

平成13～17年度
コンクリート維持管理小委員会報告書

北海道における コンクリート構造物維持管理の手引き（案）

平成18年3月

北海道土木技術会コンクリート研究委員会
コンクリート維持管理小委員会

発刊にあたって

社会資本としてのコンクリート構造物のストックは、高度経済成長期以降年々増加する一方、2025年頃には新設投資が減少し、維持管理と更新に要する投資がこれを大きく上回ることが予想されています。社会資本ストックの高齢化に対応して、国土交通省では、重点的・効率的な維持管理を推進するため、「ライフサイクルコストが最小となる計画的な構造物補修の推進、維持管理技術の高度化の推進」を重点施策として掲げています。特に、北海道は広い面積を有することから人口に比べて多くの施設を所有し、また積雪寒冷な気象条件はコンクリート構造物の劣化を早めていると考えられます。北海道のコンクリート構造物を効率的で適切に維持管理し、長寿命化を図るためには、地域的な特性を考慮した点検、診断、補修・補強に関する技術開発を行うとともに、これらに従事する技術者の養成や技術力の向上が求められています。

このような社会状況の中、北海道土木技術会コンクリート研究委員会では平成13年度にコンクリート維持管理小委員会を設け、平成15年度には北海道におけるコンクリート構造物の維持管理の現状と課題について中間報告を行い、今年度は「北海道におけるコンクリート構造物維持管理の手引き（案）」として活動成果を取りまとめました。本書がコンクリート構造物の維持管理に携わる土木技術者に適切に活用され、北海道の維持管理技術向上の一助となれば幸いです。

最後に、手引き（案）作成に参画された委員各位、特にWG座長、幹事ならびに執筆者の方々に感謝の意を表します。

平成18年3月

北海道土木技術会コンクリート研究委員会
委員長 大沼 博志

手引き（案）の運用にあたって

本書は、コンクリート構造物を適切に維持管理する際の手引き（案）であり、道路橋示方書、土木学会コンクリート標準示方書等の技術基準を補完し、あわせて積雪寒冷な気象条件にある北海道の問題に対しても詳述したものとなっています。

本書の主な内容は次の通りです。

「1. はじめに」では、コンクリート維持管理小委員会の活動経緯、および本手引き書（案）の構成を示しています。

「2. コンクリート劣化の現状分析」では、コンクリート構造物に生じる変状の中で、劣化現象に着目し、種々の劣化メカニズムを解説しています。また、北海道の地域特性を示すとともに、点検等から得られたデータをもとに劣化の現状を示しています。

「3. コンクリート構造物の点検・試験方法」では、点検・試験の考え方、調査計画、各種調査方法を示した後、個別の劣化に対応した調査方法を詳述しています。尚、各種調査方法の詳細は、参考1に資料として掲載しています。

「4. コンクリート構造物の診断」では、診断の考え方を示した後、中性化、塩害、凍害、化学的侵食、アルカリ骨材反応、疲労の個別の劣化毎に診断の手法を解説しています。尚、変状に対する評価・判定の事例を参考2に資料として掲載しています。

「5. コンクリート構造物の補修・補強」では、要求性能と補修補強との関係、補修補強と性能照査との関係を示した後、補修工法に着目して耐久性評価の手法を解説しています。尚、補修補強工法事例を参考3に資料として掲載しています。

本書は、コンクリート構造物の維持管理技術の現状を把握する意味から、新技術を含む種々の試験方法、診断方法、および補修・補強方法を示しています。しかし、これらについてはまだ研究途上のものも多く、検討課題も残されていますので、運用にあたっては各コンクリート構造物管理者などと十分打合せして頂くよう留意願います。また、本書の内容は維持管理技術の進歩に合わせて改訂が必要となるものと考えていますので、関係各位の忌憚のないご意見を期待する次第です。

平成18年3月

北海道土木技術会コンクリート研究委員会
コンクリート維持管理小委員会
委員長 柳原 優登

北海道土木技術会コンクリート研究委員会

コンクリート維持管理小委員会 委員名簿(H13.11-H18.3)

委員長	福本 淳	H13,14	北海道開発局
	柳屋 勝彦	H15	北海道開発局
	柳原 優登	H16,17	北海道開発局
副委員長	田口 史雄	H13-17	(独)北海道開発土木研究所
	佐伯 昇	H13-16	北海道大学大学院
委員	大沼 博志	H17	北海道大学大学院
	井村 正和	H13,14	ドーピー建設工業(株)
	松井 敏二	H15-17	ドーピー建設工業(株)
	鷹巢 恵一	H13-16	日本高圧コンクリート(株)
	鈴木 洋一	H17	日本高圧コンクリート(株)
	山口 光男	H13-17	(株)ドーコン
	大山 高輝	H16,17	(株)ドーコン
	池田 隆	H13-15,17	鹿島建設(株)
	川守田 規	H16	鹿島建設(株)
	定木 紳	H13-17	清水建設(株)
	中川 泰孝	H13-16	(株)地崎工業
	上山 力	H16,17	伊藤組土建(株)
	内田誠二郎	H13,14	住友建設(株)
	柴田 登	H16,17	飛島建設(株)
	笠井 和弘	H16,17	飛島建設(株)
	山下 英俊	H13-15	(株)間組
	嵯峨 一	H16,17	(株)間組
	宮崎 健	H13,14	オリエンタル建設(株)
	高澤 昌憲	H15	オリエンタル建設(株)
	神谷 卓伸	H16,17	オリエンタル建設(株)
	米澤 良一	H15-17	オリエンタル建設(株)
	高木 隆一	H13-15	(株)ピーエス三菱
	清水 俊一	H16,17	(株)ピーエス三菱
	山田 学	H13-17	ショーボンド建設(株)
	三上 浩	H13-17	三井住友建設(株)
	永原 潔	H16	黒沢建設(株)
	梶川 裕	H16,17	新技術開発(株)
	桜庭 哲広	H16,17	中大技研(株)
	出村 博隆	H17	(株)さくら技研
	谷口 善朗	H17	(株)さくら技研
	高山 俊春	H17	(株)ビューテック
	茶家 義明	H13,14	(株)コンステック
	西川 忠	H15-17	(株)コンステック
	徳岡 文明	H17	(株)テクノブレインズ
	吉田 直人	H13,14	(株)開発工営社
	木内 順司	H15-17	(株)開発工営社
	木村 和之	H13-17	(株)構研エンジニアリング
江原 慎一	H13-17	(株)長大	
中元 英樹	H13-17	中央コンサルタンツ(株)	
佐々木博之	H13-17	日本工営(株)	
渡辺 忠朋	H13-17	北武コンサルタント(株)	
葛西 章	H13-17	(株)リテック	
朝倉 啓仁	H13-17	(株)リテック	
林 秀哉	H13-15	中大実業(株)	
宮田 裕行	H16,17	中大実業(株)	
高橋 正之	H17	オバナヤ・セメントテックス(株)	
中山 芳彦	H16,17	北海道調査測量(株)	
中谷 忠司	H15	日本データサービス(株)	
大内 義仁	H16,17	日本データサービス(株)	
安部 義文	H17	北海道キング設計(株)	
中山 眞実	H17	北海道キング設計(株)	
嶋田 久俊	H13-17	(独)北海道開発土木研究所	
小尾 稔	H16,17	(独)北海道開発土木研究所	

(次頁に続く)

遠藤 裕丈	H13-17	(独)北海道開発土木研究所
国松 博一	H15	(独)北海道開発土木研究所
三田村 浩	H15-17	(独)北海道開発土木研究所
渡辺 一悟	H16	(独)北海道開発土木研究所
後藤 幸雄	H13	北海道開発局
佐藤 薫	H14,15	北海道開発局
谷本 俊充	H16,17	北海道開発局
河上 聖典	H13,14	北海道開発局
阿部 剛	H15,16	北海道開発局
畑山 朗	H13,14,17	北海道開発局
小田嶋正之	H16,17	北海道開発局
佐野 修	H13-16	北海道建設部
京田 隆一	H17	北海道建設部
菊池 隆	H13-15	北海道建設部
堤 正伸	H16,17	北海道建設部
伊藤 仁	H13	札幌市建設局
相馬 英敏	H14	札幌市建設局
小泉 健治	H15-17	札幌市建設局
桜井 宏	H13-17	北見工業大学

WG 1 : コンクリート劣化評価 WG

座 長	嶋田 久俊	H13-17
幹 事	朝倉 啓仁	H13-17
	大内 義仁	H16,17
	小尾 稔	H16,17
	神谷 卓伸	H16,17
	木村 和之	H13-17
	桜井 宏	H13-17
	佐々木博之	H13-17
	定木 紳	H13-17
	高澤 昌憲	H15
	中谷 忠司	H15
	中山 芳彦	H16,17
	宮崎 健	H13,14
	山口 光男	H13-17

WG 2 : 点検・試験方法 WG

座 長	茶家 義明	H13,14
幹 事	西川 忠	H15-17
	葛西 章	H13-17
	井村 正和	H13,14
	江原 慎一	H13-17
	遠藤 裕丈	H13-17
	木内 順司	H15-17
	嵯峨 一	H16,17
	中川 泰孝	H13-16
	松井 敏二	H15-17
	山下 英俊	H13-15
	吉田 直人	H13,14

WG 3 : 補修・補強 WG

座 長	渡辺 忠朋	H13-17
幹 事	中元 英樹	H13-17
	池田 隆	H13-15,17
	内田誠二郎	H13,14
	大山 高輝	H16,17
	笠井 和弘	H16,17
	梶川 裕	H16,17
	上山 力	H16,17
	川守田 規	H16
	桜庭 哲弘	H16,17
	柴田 登	H16,17
	清水 俊一	H16,17
	高木 隆一	H13-15
	鷹巢 恵一	H13-16
	高橋 正之	H17
	永原 潔	H16
	畑山 朗	H13,14,17
	林 秀哉	H13-15
	三上 浩	H13-17
	三田村 浩	H15-17
	宮田 裕行	H16,17
	山田 学	H13-17
	米澤 良一	H15-17
	渡辺 一悟	H16

WG 4 : 全体調整 WG

座 長	田口 史雄	H13-17
幹 事	朝倉 啓仁	H13-17
	葛西 章	H13-17
	嶋田 久俊	H13-17
	茶家 義明	H13,14
	中元 英樹	H13-17
	西川 忠	H15-17
	山口 光男	H13-17
	渡辺 忠朋	H13-17

(敬称略)

【目次】

1. はじめに.....	1-1
1.1 コンクリート維持管理小委員会の経緯.....	1-1
1.2 活動経過.....	1-2
1.3 手引き（案）の構成.....	1-3
2. コンクリート劣化の現状分析.....	2-1
2.1 劣化因子とメカニズム.....	2-1
2.2 北海道の地域特性.....	2-29
2.3 北海道におけるコンクリート劣化の現状.....	2-44
3. コンクリート構造物の点検・試験方法.....	3-1
3.1 点検・調査の考え方.....	3-1
3.2 調査計画.....	3-2
3.3 コンクリート構造物の各種調査方法.....	3-5
3.4 凍害の調査方法.....	3-12
3.5 塩害の調査方法.....	3-24
3.6 凍害と塩害の複合劣化の調査方法.....	3-31
3.7 アルカリ骨材反応の調査方法.....	3-33
3.8 コンクリート構造物の点検調査に関する提案.....	3-37
4. コンクリート構造物の診断.....	4-1
4.1 診断の考え方.....	4-1
4.2 中性化.....	4-4
4.3 塩害.....	4-13
4.4 凍害.....	4-28
4.5 化学的侵食.....	4-34
4.6 アルカリ骨材反応.....	4-39
4.7 疲労.....	4-47
4.8 診断の際の留意点.....	4-53
5. コンクリート構造物の補修・補強.....	5-1
5.1 維持管理と補修補強.....	5-1
5.2 構造物の要求性能と補修補強.....	5-4
5.3 補修補強と性能照査.....	5-17
5.4 補修工法の耐久性評価法.....	5-18
参考資料	
参考1. コンクリート構造物の点検試験方法詳細.....	参 1-1
参考2. コンクリートの変状に対する評価・判定事例.....	参 2-1
参考3. 補修補強工法事例.....	参 3-1

1. はじめに

1.1 コンクリート維持管理小委員会の経緯

コンクリート構造物のストック量が膨大なものとなり、また剥落事故などコンクリート構造物の信頼性を損ねかねない事例が発生している。厳しい財政事情にある今日、蓄積してきたコンクリート構造物をいかに維持、更新するかが求められている。

一方、北海道のコンクリート構造物は、積雪寒冷地にあり凍結融解作用を強く受けていること、日本海岸等日本有数の塩害環境下にあることなど、温暖な地域に比べて過酷な使用環境におかれている。

このような状況を踏まえ、北海道土木技術会コンクリート研究委員会は、積雪寒冷地である北海道においてコンクリート構造物の劣化状況の把握、耐久性診断技術・補修補強技術の研究および普及を目的とし、平成 13 年 11 月コンクリート維持管理小委員会を設置した。

小委員会の研究活動は、平成 13-15 年度の 3 年間で「北海道におけるコンクリート構造物の維持管理の現状と課題」について取りまとめ、その後平成 16-17 年度の 2 年間で「コンクリート構造物維持管理の手引き（案）」として活動成果を取りまとめた。

1.2 活動経過

コンクリート維持管理小委員会の活動経過を表 1.2.1 に示す。

表 1.2.1 活動経過

	日時/会場	内容
第1回小委員会	H13/11/14 KKR 札幌	<ul style="list-style-type: none"> ・小委員会発足の趣旨説明 ・小委員会の活動内容、スケジュール等の討議 ・WG の構成 WG1;コンクリート劣化評価 WG WG2;点検・試験方法 WG WG3;補修・補強 WG WG4;全体調整 WG ・参加;27名
第2回小委員会	H14/2/28 KKR 札幌	<ul style="list-style-type: none"> ・新委員の委託について ・各WGの活動報告と今後の予定 ・参加;23名
活動報告会	H14/2/28 KKR 札幌	平成13年度小委員会活動報告会 <ul style="list-style-type: none"> ・コンクリート維持管理小委員会の活動報告と話題提供 ・コンクリート補修・補強に関する勉強会 ・参加;28名
現地見学会	H14/7/26 R228 上磯町, 茂辺 地大橋現場	「古いPC桁の耐久性試験現地見学会」 <ul style="list-style-type: none"> ・非破壊による配筋調査, 鉄筋腐食調査 ・非破壊による衝撃弾性波探査など ・参加;25名
第3回小委員会	H15/3/14 開土研講堂	<ul style="list-style-type: none"> ・新委員の委託について ・H14年度活動状況の報告と審議 ・参加;15名
コンクリート講習会	H15/3/14 開土研講堂	「コンクリート構造物の耐久性向上技術」 <ul style="list-style-type: none"> ・コンクリート維持管理小委員会の取組み紹介 ・建設後40年を経たPC橋の劣化調査 ・塩害環境下にあるPC橋のLCC検討事例 ・積丹半島の橋梁計画における耐久性設計 ・コンクリート構造物の設計と維持管理の今後 ・参加;102名
第4回小委員会	H16/6/21 開土研講堂	<ul style="list-style-type: none"> ・新委員の委託について ・H15年度活動状況の報告と審議 ・参加;28名
講習会	H16/6/21 開土研講堂	平成13-15年度の活動報告 「北海道におけるコンクリート構造物の維持管理の現状と課題(平成13~15年度コンクリート維持管理小委員会中間報告)」 <ul style="list-style-type: none"> ・参加;119名
講師協力	H17/1/19-21	・H16年度橋梁マネジメント現場支援セミナー(開発局主催) 非破壊検査の実務演習に講師4名協力
第5回小委員会	H17/4/21 開土研講堂	<ul style="list-style-type: none"> ・新委員の委託について ・H16年度活動状況の報告と審議 ・参加;28名
講師協力	H17/10/6	・H17年度橋梁マネジメント現場支援セミナー(開発局主催) 非破壊検査の実務演習に講師4名協力
講習会	H18/4/26(予定) 札幌コンベンションセンタ ー	平成13-17年度の活動報告 「北海道におけるコンクリート構造物維持管理の手引き(案)」

1.3 手引き（案）の構成

構造物の一般的な維持管理の手順を図 1.3.1 に示す。

既設構造物においては、最初の点検を初期点検とし、構造物に関する情報を収集のうえ、維持管理区分を定め、劣化機構の推定および劣化予測、評価および判定、対策、記録を合理的に組み合わせて維持管理を行う必要がある。

ここに、維持管理区分は A: 予防維持管理, B: 事後維持管理, C: 観察維持管理, D: 無点検維持管理を示す。

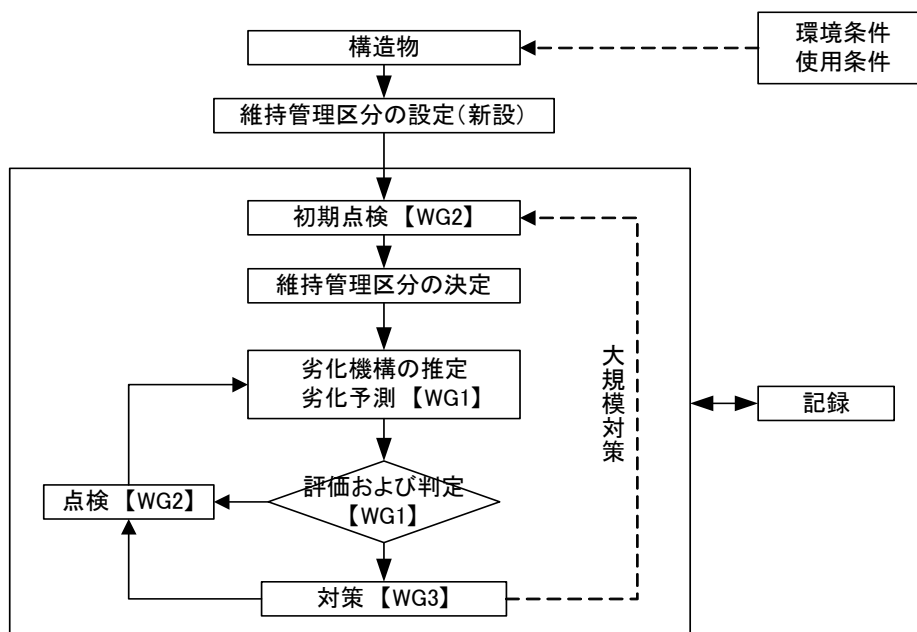


図 1.3.1 維持管理の手順

本手引き（案）は、この維持管理の手順を以下に示す4つのワーキンググループ（WG）にて分担し、執筆している。本手引き（案）の目次構成とWG分担を表 1.3.1 に示す。

- WG1：コンクリート劣化評価 WG
- WG2：点検・試験方法 WG
- WG3：補修・補強 WG
- WG4：全体調整 WG

表 1.3.1 本報告書の目次構成とWG分担

本手引き（案）の構成	執筆分担
1. はじめに	WG4:全体調整 WG
2. コンクリート劣化の現状分析	WG1;コンクリート劣化評価 WG WG2;点検・試験方法 WG
3. コンクリート構造物の点検・試験方法	WG2;点検・試験方法 WG
4. コンクリート構造物の診断	WG1;コンクリート劣化評価 WG
5. コンクリート構造物の補修・補強	WG3;補修・補強 WG
参考資料	
参考1 コンクリート構造物の点検試験方法詳細	WG2;点検・試験方法 WG
参考2 コンクリートの変状に対する評価・判定事例	WG1;コンクリート劣化評価 WG
参考3 補修補強工法事例	WG3;補修・補強 WG

2. コンクリート劣化の現状分析

2.1 劣化因子とメカニズム

2.1.1 劣化因子の種類

コンクリート標準示方書[維持管理編]では、鉄筋コンクリート造構造物の劣化として、6つの現象を扱っている。

- (1) 中性化
- (2) 塩害
- (3) 凍害
- (4) 化学的侵食
- (5) アルカリ骨材反応
- (6) 疲労

表 2.1.1 劣化機構と要因、指標、現象の関連¹⁾

劣化機構	劣化要因	劣化現象	劣化指標
中性化	二酸化炭素	二酸化炭素がセメント水和物と炭酸化反応を起こし、細孔溶液中のpHを低下させることで、鋼材の腐食が促進され、コンクリートのひび割れやはく離、鋼材の断面減少を引き起こす劣化現象。	中性化深さ 鋼材腐食量
塩害	塩化物イオン	コンクリート中の鋼材の腐食が塩化物イオンにより促進され、コンクリートのひび割れやはく離、鋼材の断面減少を引き起こす劣化現象。	塩化物イオン濃度 鋼材腐食量
凍害	凍結融解作用	コンクリート中の水分が凍結と融解を繰り返すことによって、コンクリート表面からスケーリング、微細ひび割れおよびポップアウトなどの形で劣化する現象。	凍害深さ 鋼材腐食量
化学的侵食	酸性物質 硫酸イオン	酸性物質や硫酸イオンとの接触によりコンクリート硬化体が分解したり、化合物生成時の膨張圧によってコンクリートが劣化する現象。	劣化因子の浸透深さ 中性化深さ 鋼材腐食量
アルカリ骨材反応	反応性骨材	骨材中に含まれる反応性シリカ鉱物や炭酸塩岩を有する骨材がコンクリート中のアルカリ性水溶液と反応して、コンクリートに異常膨張やひび割れを発生させる劣化現象。	膨張量 (ひび割れ)
床版の疲労	大型車通行量 (床版諸元)	道路橋の鉄筋コンクリート床版が輸荷重の繰返し作用によりひび割れや陥没を生じる現象。	ひび割れ密度 たわみ
はり部材の疲労	繰返し荷重	鉄道橋梁などにおいて、荷重の繰返しによって、引張鋼材に亀裂が生じて、それが破断に至る劣化現象。	累積損傷度 鋼材の亀裂長

しかしながら、実際の構造物は複数の劣化要因の影響をうける環境に置かれていることが少なくない。劣化に関する研究も複合劣化を対象としたものは少なく、メカニズムも明確になっていない部分も多い。しかし、複数の劣化が複合することにより、劣化速度が大きくなることは明らかになっており、そのような環境に置かれている構造物については複合劣化を意識した維持管理を行う必要がある。

複合劣化として生じる可能性の大きな組み合わせを図 2.1.1 に示す。相乗的複合劣化としては、塩害とアルカリ骨材反応、塩害と凍害、凍害とアルカリ骨材反応の関係が主である。また、因果的複合劣化としては、中性化から塩害、凍害から塩害、アルカリ骨材反応から塩害が主であり、複合劣化における劣化要因のほとんどは、塩害が他の劣化要因に大きく関与していることが明らかになっている。さらに、これらの劣化要因に水分移動が大きく関与していることも複合劣化の特徴として挙げられる。

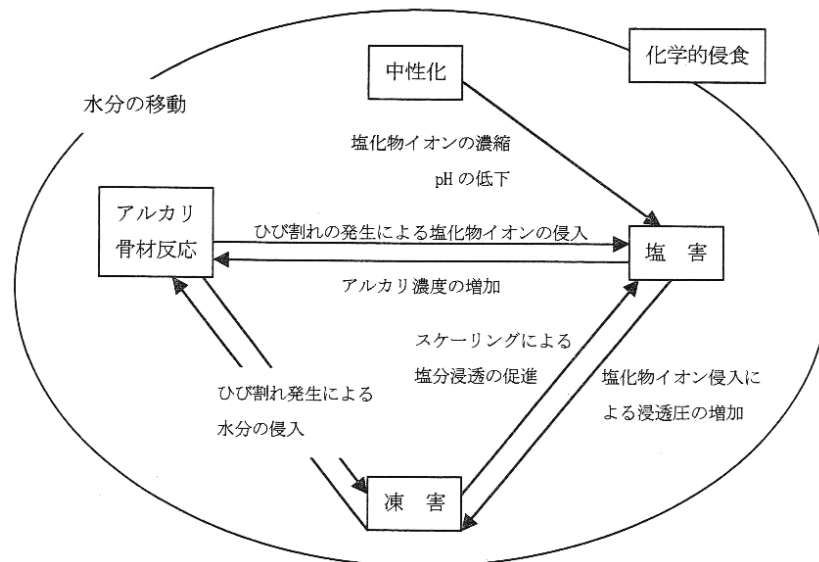


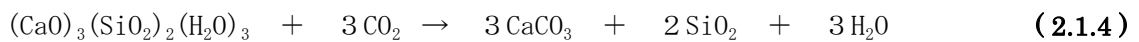
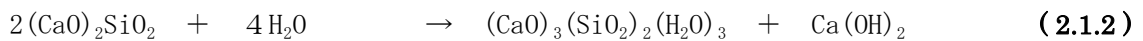
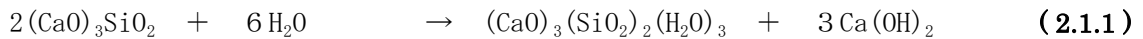
図 2.1.1 複合劣化として生じる可能性の大きい組み合わせ²⁾

2.1.2 中性化

(1) 中性化の進行のメカニズム

中性化とは、主にコンクリート中のセメント水和物が大気中の炭酸ガス(二酸化炭素(CO₂))と反応して通常、pH12~13の強アルカリの性質を示す水酸化カルシウム(Ca(OH)₂)がpH8.5~10程度の炭酸カルシウムに変化してコンクリート中のpHが低下する現象を指す。

セメント水和物と二酸化炭素の代表的な反応は、次のようになる。



まず、ポルトランドセメントの主な構成化合物であるエーライト [(CaO)₃SiO₂] とビーライト [(CaO)₂SiO₂] が、水と反応してC-S-Hゲル [(CaO)₃(SiO₂)₂(H₂O)₃] と水酸化カルシウム [Ca(OH)₂] を生成するのが、式(2.1.1)と式(2.1.2)である。この水酸化カルシウムとC-S-Hゲルは、式(2.1.3)および式(2.1.4)に示すように二酸化炭素と反応して炭酸カルシウムを生成する。

このように、二酸化炭素とセメント水和物の反応は、水酸化カルシウムが炭酸カルシウムに変わる式(2.1.3)の反応と式(2.1.4)のように水酸化カルシウム以外の鉱物も二酸化炭素と反応して炭酸カルシウムを生成する。したがって、一連の反応は炭酸化反応(carbonation)と呼ばれる。

中性化の進行によって、コンクリート内部の鋼材が腐食し、ひび割れの発生、かぶりのはく離、はく落、鋼材の断面欠損による耐荷力の低下などが引き起こされる。これは鉄がpH11以上では表面に不動体を形成し、酸素が存在していても発錆しないが、pHが11以下になると鉄筋は発錆して、鉄は2~3倍の体積膨張を起こすためである。

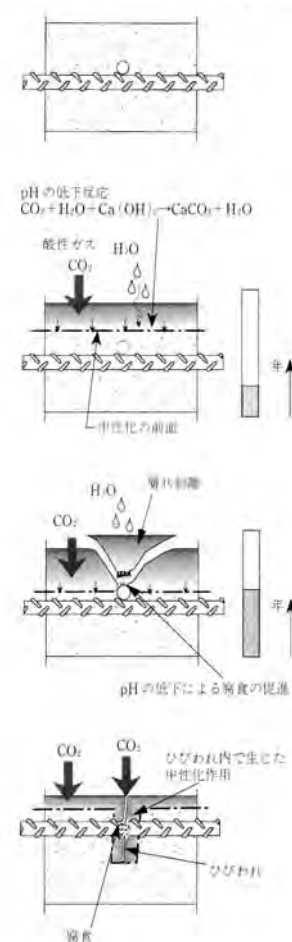


図 2.1.2 中性化による劣化のメカニズム³⁾

大気中の二酸化炭素は、コンクリートの空隙内を拡散するように侵入するので、その拡散速度はセメント硬化体の骨材の空隙量や空間構造に依存する。したがって、使用する材料や配合条件などによって大きく異なる。また、拡散速度は、気相から液相に変化すると小さくなるため、たとえば水中では炭酸化反応が緩やかに進行する。一方、炭酸化反応は炭酸イオンあるいは炭酸水素イオンとセメント水和物の反応なので、コンクリートの乾燥が進み細孔溶液量が少なくなると反応が起こり難くなり、炭酸化反応が緩やかになる。このため、中性化速度は二酸化炭素の侵入と炭酸化反応の関係から、相対湿度と中性化深さの関係は図 2.1.3 に示すように相対湿度 50~60%で極値を持つ分布となる。

また、中性化によって水和物の変質と細孔構造の変化が起こるため、塩素を含むセメント水和物であるフリーデル氏塩は、炭酸化によって分解するため、塩素イオンを解離し、これらのイオンは未炭酸化部分に移動・濃縮し、鋼材の腐食に影響を及ぼすことになる。

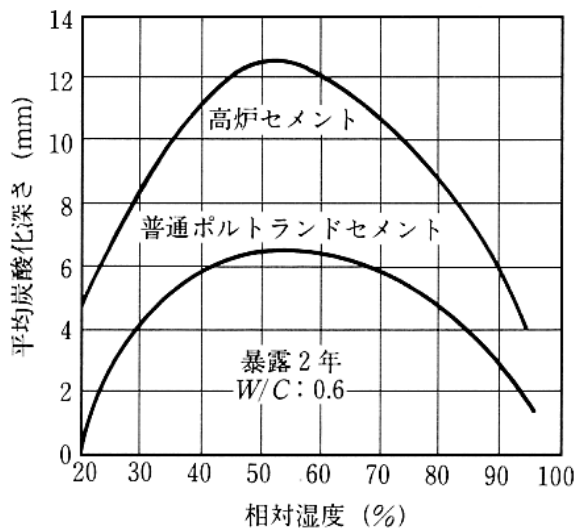
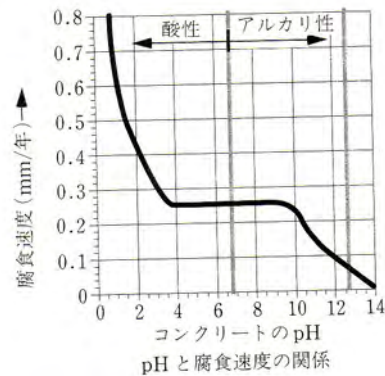


図 2.1.3 モルタルの中性化深さに及ぼす相対湿度の影響⁴⁾



写真 2.1.1 中性化による鉄筋腐食



- | | |
|---|---|
| <p>腐食の抑制要因</p> <ul style="list-style-type: none"> ・良質なコンクリート ・高い pH (アルカリ性) | <p>腐食の促進要因</p> <ul style="list-style-type: none"> ・酸素 ・水 ・迷走電流 ・化学的に不均一な濃度 ・pH (アルカリ性) の低下 |
|---|---|

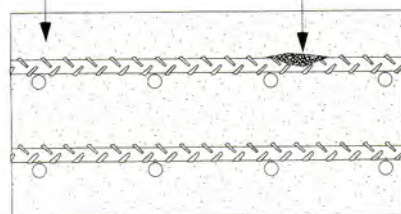


図 2.1.4 コンクリートの pH と鋼材腐食の関係³⁾

2.1.3 塩害

(1) 塩害による鋼材腐食のメカニズム

通常、高いアルカリ性環境下にあるコンクリート中の鋼材表面には、緻密な不動態被膜(厚さ 3nm 程度の酸化物層)が存在し、これにより鋼材が保護され、腐食しないとされている。

しかし、塩素イオンがある濃度以上に侵入すると、酸化被膜の酸素原子に塩素イオンが割り込み、この部分で被膜の破壊を生じる。これにより鋼材の腐食が開始され、腐食生成物の体積膨張によって、コンクリートにひび割れやはく離を引き起こしたり、鋼材の断面減少などを伴うことによって構造物の性能が低下する。この現象を塩害と呼んでいる。

塩化物イオンは鋼材の腐食を促進させるだけではなく、コンクリートの組織構造を変化させる要因にもなりうるが、その影響は小さいため、一般には鋼材腐食によって引き起こされるさまざまな問題に着目すればよい。

コンクリート構造物に供給される塩化物イオンとしては、海水や凍結防止剤などのように構造物に外部の環境から供給される場合と、コンクリート製造時に海砂に付着した塩化物イオンなど材料から供給される場合がある。いずれの場合でも、基本的な劣化過程や構造物に及ぼす影響は同様である。

塩化物イオンがコンクリート中へ浸透し、やがて鋼材表面での塩化物イオン濃度が腐食発生限界濃度以上となると鋼材は腐食を開始する。鋼材の腐食反応は図 2.1.5 に示すように、鋼材表面から鉄イオン(Fe^{2+})がコンクリートの細孔溶液中に溶け出すアノード反応と鉄イオンが鋼材中に残した電子($2e^-$)が酸素と水と反応するカソード反応が同時に起こることにより水酸化第一鉄 $[\text{Fe}(\text{OH})_2]$ を生成し、水酸化第一鉄は水と酸素の存在下で水酸化第二鉄 $[\text{Fe}(\text{OH})_3]$ へと変化する。引き続き、この化合物は水を失って水和酸化物 $\text{FeO} \cdot \text{OH}$ または Fe_2O_3 (赤錆)となり、一部は酸化不十分のまま Fe_3O_4 (黒錆)となって鉄表面に錆層を形成する。

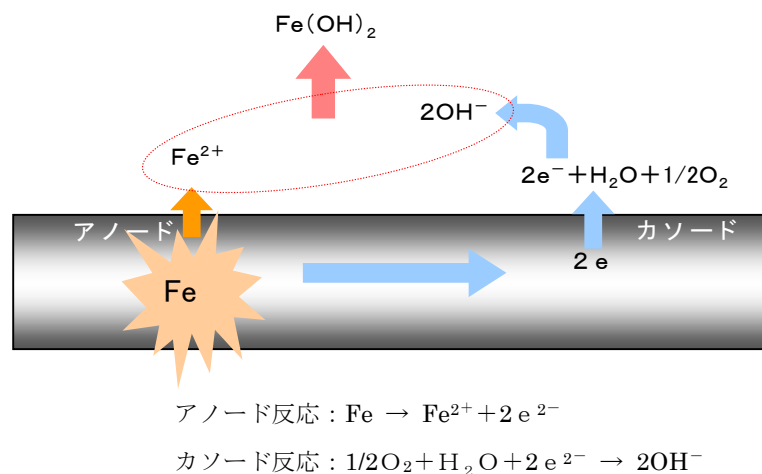
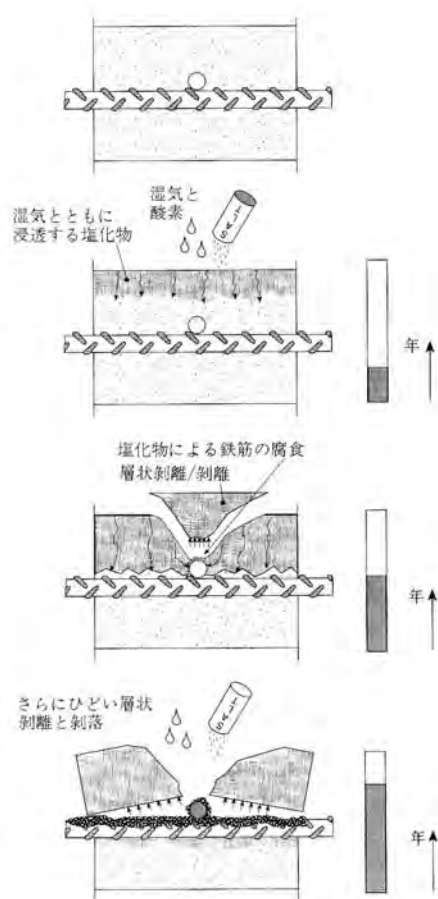


図 2.1.5 鋼材の腐食反応

鋼材が腐食し生成した腐食生成物による膨張圧がコンクリートの引張強度を超えたときにひび割れが発生する。図 2.1.6 に示すように、腐食ひび割れが生じると、ひび割れを通じて塩化物イオン、酸素、水分などの腐食因子が容易に供給されるようになり、鋼材の腐食速度が著しく増大する。腐食生成物のさらなる膨張によってひび割れ幅が増大し、やがてかぶりコンクリートのはく落へと進展していく。中性化による鉄筋腐食と比べると進行速度が速い。



海水や凍結防止用の塩分によって塩化物がコンクリート内に浸透し、湿気と酸素の存在により、鉄筋に接して腐食を引き起こす。このような腐食は次の事柄に関連する。

- ①コンクリートに浸透する塩化物の量
- ②コンクリートの浸透性
- ③湿気と酸素の量

鉄筋に錆の層が形成されると、その膨張による引張力によって、コンクリートにひびわれや層状剥離をもたらし、自重や活荷重によって剥落することもある。ひびわれと層状剥離が進むと、塩分、酸素および湿気が侵入しやすくなり、腐食は一層助長される。腐食を促す塩素濃度は pH に影響され、pH が 13.2 のとき塩素イオンが 8,000ppm を境に腐食が始まり、11.6 に低下すると僅か 71ppm で腐食が始まるとの報告がある。

図 2.1.6 塩分浸透による鉄筋腐食とコンクリートはく離のメカニズム³⁾

塩害による鋼材の腐食は、鋼材位置における塩化物イオン濃度がある程度以上になったときに開始すると考えられる。腐食発生時の塩化物イオン濃度については各種の基準値があるが、コンクリート標準示方書〔維持管理編〕では 1.2kg/m³としている。

(2) 塩害による損傷事例

塩害により鋼材の腐食が進行し、錆汁、はく離が生じた事例を写真 2.1.3、はく落に至った事例を写真 2.1.2 に示す。



写真 2.1.2 鉄筋腐食によるかぶりコンクリートのはく落



写真 2.1.3 鉄筋腐食によるかぶりコンクリートのはく離

特に日本海側では、季節風が強いため海塩飛沫による塩害と、凍結融解作用による凍害に対して厳しい環境条件にあり、複合劣化に対して注意が必要である。



写真 2.1.4 複合劣化環境

塩害による劣化は図 2.1.7 に示す通り，進展期後期からひび割れが発生し始め，加速期にはコンクリート浮きや，錆鉄筋の露出，劣化期では鉄筋やコンクリートの断面減少による耐荷力の低下に至る。

各期における劣化状況例を写真 2.1.5 に示す。

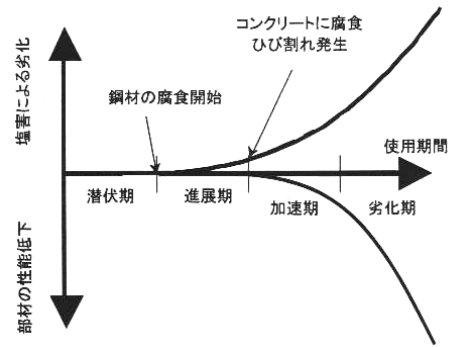


図 2.1.7 塩害による劣化進行パターン

進展期（後期）



加速期



劣化期



写真 2.1.5 塩害による損傷例

2.1.4 凍害

(1) 凍害のメカニズム

凍害とは、コンクリート内部に含まれた水分が凍結する際の膨張圧により、コンクリートにひび割れやスケーリング、ポップアウトなどを発生する現象である。

凍害によりコンクリート組織が破壊に至る機構は、現在のところ水圧説や浸透圧説で説明されており、そのメカニズムは図 2.1.8 に示す通りである。

- ①水圧説：コンクリートの細孔中の水が凍結し、その膨張分の水の移動圧によりコンクリート組織が破壊するもので、その圧力の大きさは、凍結速度、飽水度、透水性および空隙までの距離によるとしており、凍害を説明する原点とも言える。
- ②浸透圧説（膨張）：しかし、低温を持続した場合に凍害が進行することや AE コンクリートが凍結する際に観察される収縮は水圧説だけでは説明できず、その後浸透圧説で説明された。これは、毛細管中の細孔水は弱アルカリであることを指摘し、コンクリートの温度降下によりまず粗大径側の毛細管中の水が凍結するが微小な細孔にある水は凍結せず、その結果、未凍結水のアルカリ濃度は増加し、周囲の未凍結のゲル水との間に浸透圧が発生する。このため、ゲル水が毛細管の未凍結水中へ拡散し凍結が始まり、氷の成長による膨張圧でコンクリートの組織が破壊する説である。
- ③浸透圧説（収縮）：また、空気泡に拡散された水は直ちに凍結し、毛細管中の氷晶とともに周囲の水を吸収するため、空気泡中の氷晶が周囲の組織から水を吸収する場合には、空気泡が水で満たされるまで吸収する水の量だけ収縮する説である。

これらの現象は同時に作用するため、コンクリートの細孔構造の違いによりコンクリート中のひずみ量は異なると考えられる。

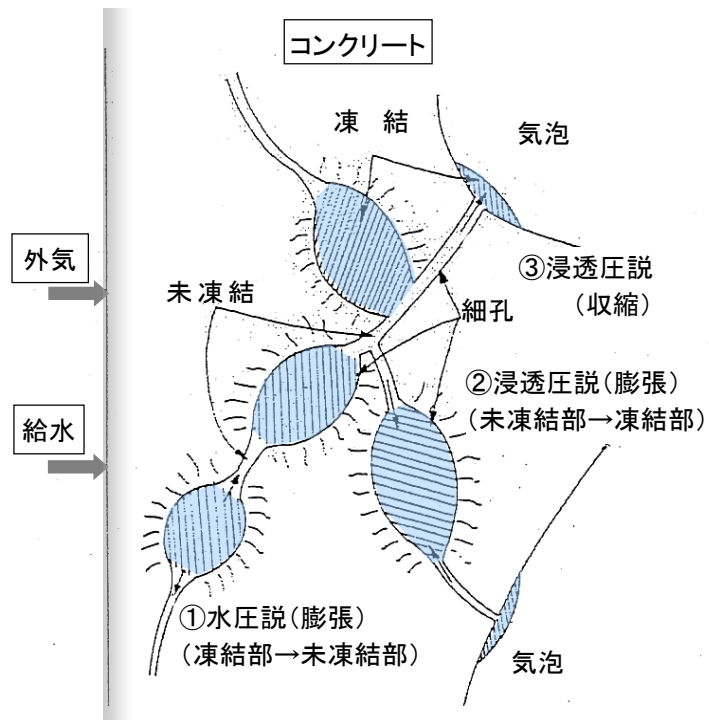


図 2.1.8 水圧説と浸透圧説

スケーリングを例に，その進行過程を示すと図 2.1.9 の通りであり，各過程では次のような現象が起こっている。

①飽水状態のコンクリートが低温環境下におかれる
水の凍結が始まると，体積が約9%膨張する。

②未凍結水の移動

凍結膨張圧により水の無い空隙に水が移動する。
水が移動できる間は膨張圧を緩和することができる。

③未凍結水の移動

さらに温度低下にしたがって，より微細な空隙にも水が移動する。径の小さい空隙ほど，内部の水が凍結する温度は低い。

④内部にひび割れが発生

空隙に水が満たされ，凍結膨張圧を緩和する空隙がなくなると，静水圧が空隙内部から作用し，ひび割れが発生する。

⑤ひび割れの進行による表層剥離

内部にひび割れが発生すると，表面からコンクリート内部に水が容易に浸透する。さらに凍結融解を繰り返すことにより，コンクリート表面が剥離する。

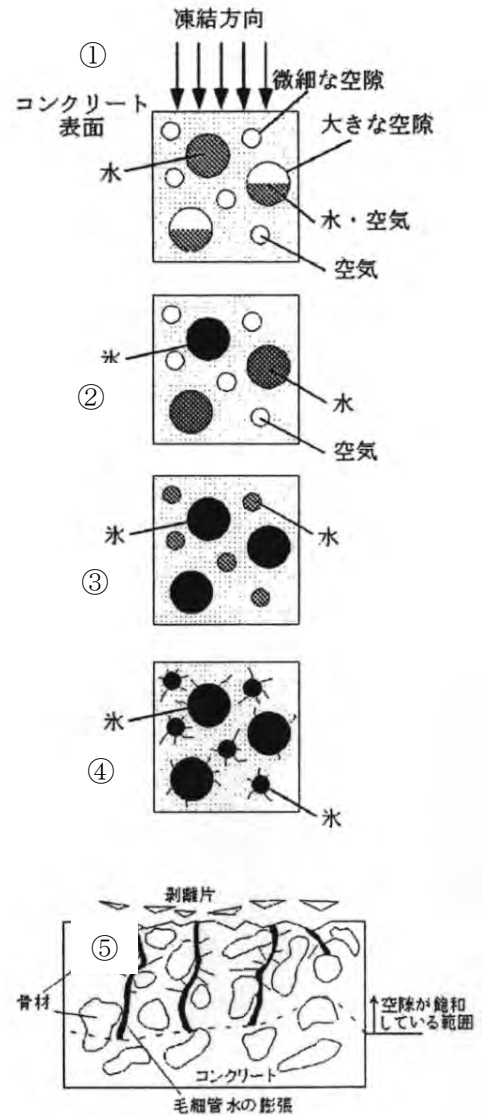


図 2.1.9 凍結融解による剥離発生機構⁹⁾

(2) 凍害による損傷事例

凍結融解によるコンクリートの損傷には、次のパターンがある。

- ①ひび割れ
- ②スケーリング
- ③ポップアウト
- ④断面欠損

このうち④断面欠損は、①や②の現象が進行した結果である。



写真 2.1.6 凍結融解によるひび割れ

張り出し部など、部材断面が小さい箇所に生じやすい

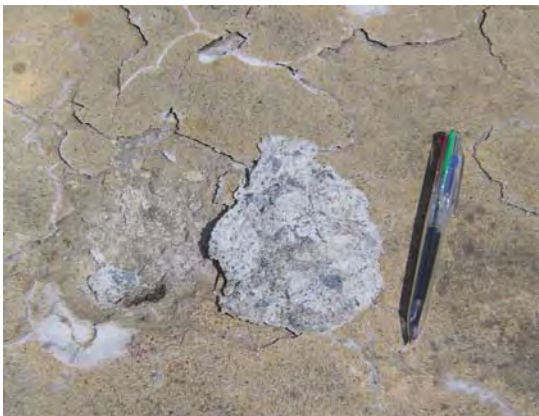


写真 2.1.7 スケーリング

上向き面で表面に脆弱層がある場合に生じやすい



写真 2.1.8 ポップアウト

粗骨材の吸水率が大きい場合に生じやすい



写真 2.1.9 断面欠損

ひび割れやスケーリングが進行した状態

(3) 凍害を中心とした複合劣化の相関

図 2.1.10 に凍害と他の劣化原因との複合劣化の相関図を示す。

コンクリート構造物の劣化現象は水分環境条件と深い関係がある。表 2.1.2 に示すように、複数の劣化原因による相乗効果を考えるとき、水分環境の共通性が高いほど、複合化の影響が大きいと考えられる。

このような視点で劣化現象どうしの関連性を見ると、表 2.1.3 に示すように、塩害－凍結融解、塩害－アルカリ骨材反応、凍結融解－アルカリ骨材反応、塩害－中性化の複合作用が大きく、凍結融解は他の劣化と複合しやすいと言える。

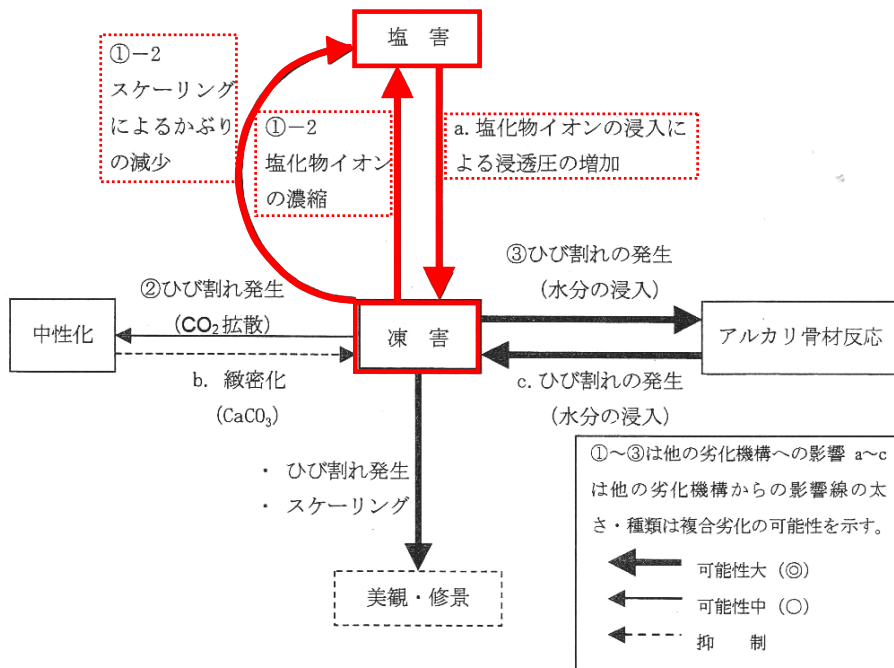


図 2.1.10 複合劣化の相関図²⁾

表 2.1.2 水分環境と劣化現象との関係²⁾

劣化現象	水分環境		対象地域	劣化速度	備考
	湿潤支配	湿潤多→乾湿繰り返し→湿潤少			
凍結融解	[湿潤多]		△	△	寒冷地・内陸多
アルカリ骨材反応	[湿潤多]		◎	○	全国・沿岸多
化学的侵食	[湿潤多]		△	◎	下水、温泉等
塩害(外来-飛沫塩分)	[湿潤多]		○	○	日本海等沿岸多
塩害(外来-凍結防止剤)	[湿潤多]		○	○	寒冷地
塩害(内在)	[湿潤多]		○	○	除塩不足海砂ほか
中性化	[湿潤多]		◎	△	

複合劣化が顕在化する可能性のある領域

対象地域: ◎-全国レベル、○-ある程度限定される、△-構造物・地域が限定される

劣化速度: ◎-比較的早く顕在化(数ヶ月~数年)、○-中程度(数年~数十年)、△-遅い(数十年オーダー)

表 2.1.3 水分環境を軸とした複合劣化の可能性判定²⁾

複合劣化の可能性	複合劣化現象の組み合わせ	対象地域の共通性	水分環境の共通性	重要性
大 ↑ ↓ 小	塩害(外来)-凍結融解	○	◎	A
	塩害(外来)-アルカリ骨材反応	○	◎	A
	凍結融解-アルカリ骨材反応	△	◎	B
	塩害(内在、外来-凍結防止剤)-中性化	○	○	B
	凍結融解-アルカリ骨材反応-塩害(外来)	△	○	C
	凍結融解-中性化	◎	△	C
	塩害(外来-飛沫塩分)-中性化	◎	△	C
	化学的侵食-中性化以外の劣化	△	△	D

対象地域の共通性: ◎-いずれかの劣化因子地域にほぼ包含される、○-ある程度限定される、△-かなり限定される

水分環境の共通性: ◎-共通した水分環境範囲がある、○-多少ある程度、△-ほとんどない

(4) 凍害と塩害の複合劣化による典型的な変状

凍害と塩害の複合劣化の場合は、塩化物の侵入によりコンクリート中の細孔溶液の塩化物イオン濃度が高くなり、浸透圧によって静水圧が高くなることからスケーリング量が増加すると言われている。

写真 2.1.10 は日本海に面する某トンネル抗口に見られた激しいスケーリングであり、複合劣化作用によるものと思われる。

写真 2.1.11 は塩水と水道水を浸透させた供試体の凍結融解試験後の状況である。300 サイクル終了時において、水道水を浸透させた供試体に損傷は見られないのに対して、同条件で塩水を浸透させた供試体ではスケーリングを生じている。



写真 2.1.10 凍害と塩害の複合劣化によるスケーリング



写真 2.1.11 塩水を浸透させた供試体の凍結融解試験 (300 サイクル)

(5) 凍害と塩害の複合劣化による各種性能の低下

凍害と塩害の複合劣化の場合、塩化物の侵入により、コンクリート中の細孔溶液のイオン濃度が高くなり、浸透圧によって静水圧が高くなることからスケーリング量が増加し、それによってかぶりが減少し、塩化物イオンの拡散も促進されやすくなる。そのため、図 2.1.11 に示すように鉄筋が腐食し始めるまでの潜伏期間は単独劣化の場合より短くなると予想される。

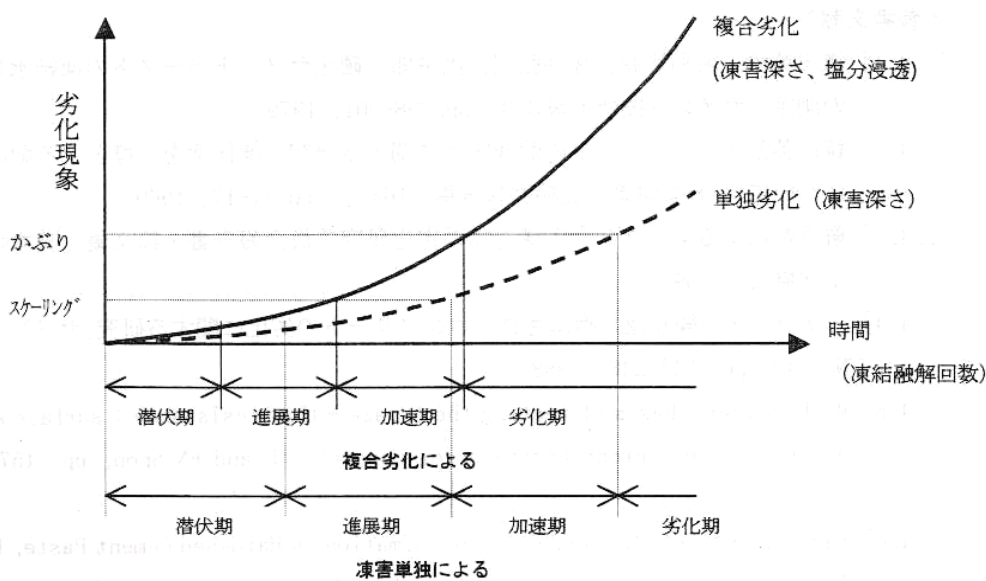


図 2.1.11 凍害と塩害の複合劣化モデル

図 2.1.12 に塩害と凍害の複合劣化による各種性能の低下概念図を示す。

塩害と凍害の複合劣化では、凍害によりコンクリート中に微細なひび割れが発生し、塩化物イオンの浸透が促進され、鉄筋の腐食が加速される。さらに鉄筋腐食だけでなく、微細なひび割れによりコンクリートそのものの材料性能も低下する。

また、塩害と凍害の複合劣化を受けた構造物では、鉄筋の腐食に起因する付着力低下と、コンクリートの微細ひび割れ起因する低下を同時に考慮する必要がある。断面性能についても同様に、鉄筋腐食によって発生するひび割れとかぶりの剥落および凍害によるコンクリートの劣化やスケーリングを考慮する必要がある。

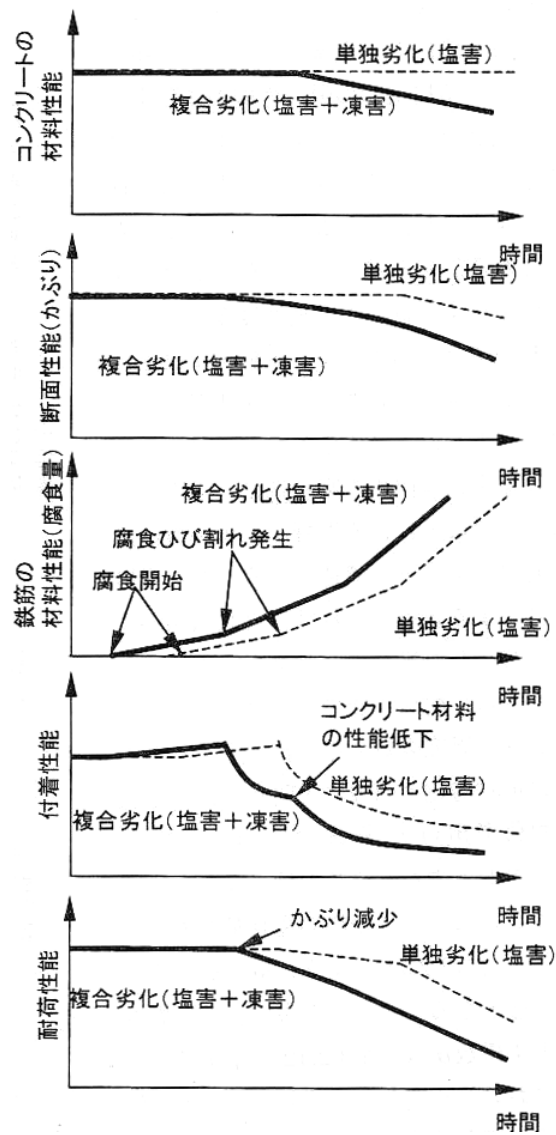


図 2.1.12 塩害と凍害の複合劣化による各種性能の低下概念図²⁾

(6) 凍害に係る複合劣化の文献

複合劣化については、まとまった指針等がなく、調査研究途上であり、その対策基準等も整備されていない。したがって現段階では、個々の設計者や調査者が判断しなければならない部分が多い。耐久設計や調査診断にあたって、参考となる文献を掲げるので参照されたい。

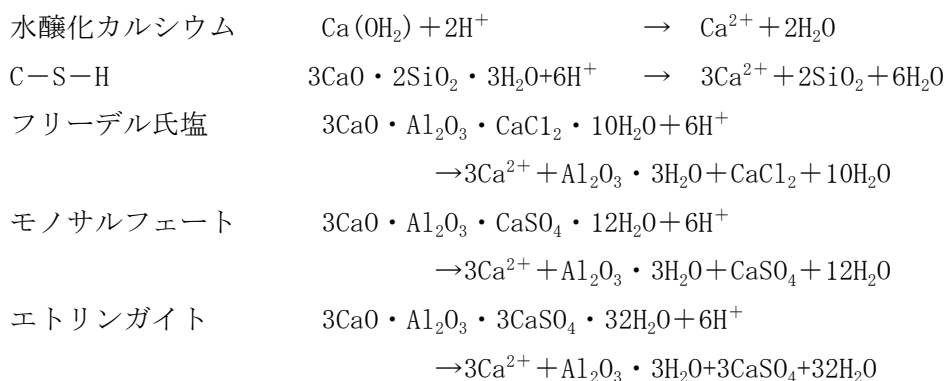
- 1 「複合劣化コンクリート構造物の評価と維持管理計画研究委員会」報告書
 - 複合劣化メカニズムと劣化現象が構造物に与える影響
 - 複合劣化を受ける構造物のメンテナンス対策の検討
 - 各種補修材料の性能評価を目的とした実環境での暴露実験
 - 複合劣化構造物の補修・補強ガイドライン(社)日本コンクリート工学協会 2001.5
- 2 「融雪剤によるコンクリート構造物の劣化研究委員会」報告書・論文集
 - 融雪剤による我が国のコンクリート構造物の劣化の現状
 - 融雪剤の影響を受けたコンクリートの凍害
 - 融雪剤の影響を受けたコンクリートのアルカリ骨材反応
 - 融雪剤による鉄筋の腐食
 - 論文報告集(16編)(社)日本コンクリート工学協会 1999.11
- 3 「なぜ、塩化物水溶液はコンクリートの凍害劣化を促進させるのか」
北海道開発土木研究所月報 No.582号 2001.11
- 4 「寒冷地海岸コンクリート構造物の塩化物イオン量調査」
北海道開発土木研究所月報 No.618号 2004.11
- 5 山下英俊外「寒冷地におけるコンクリート構造物の複合劣化に関する研究」
コンクリート工学年次論文集 Vol.16 1994
- 6 竹田宣典外「凍害と塩害の複合劣化作用がコンクリートの耐久性に及ぼす影響」
コンクリート工学年次論文集 Vol.23 2001
- 7 月永洋一外「塩分浸透と凍結融解によるコンクリートの複合劣化に関する基礎的研究」
セメント・コンクリート論文集 Vol.46 1992
- 8 月永洋一外「塩化物が作用したコンクリートの凍害劣化に関する研究」
セメント・コンクリート論文集 Vol.47 1993
- 9 庄谷征美外「凍結融解を主要因としたコンクリートの複合劣化に関する研究」
セメント・コンクリート論文集 Vol.50 1996
- 10 西沢隆宏外「コンクリートの複合劣化における凍結融解作用の影響」
土木学会年次学術講演会講演概要集第5部 Vol.49 1994 pp522-523
- 11 古江一臣外「凍害と中性化および塩害の複合劣化に関する一考察」
土木学会年次学術講演会講演概要集第5部 Vol.56 2001 pp626-627
- 12 小尾稔外「路面凍結防止剤の影響を受けるコンクリート橋の凍害、塩害調査」
平成17年度北海道開発土木研究所研究発表会論文集

2.1.5 化学的侵食

(1) 化学的侵食のメカニズム

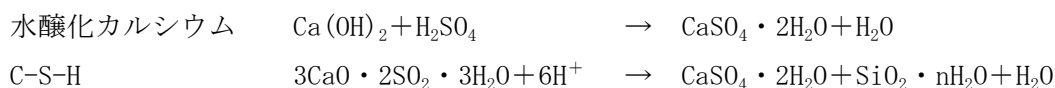
コンクリートは、骨材をセメント、水との反応生成物で結合したものである。しかし、セメントと水との反応生成物は、ある種の化学物質と反応して全く別の物質に変化する。この反応に伴ってセメント水和物が分解され、結合能力を失ったり、反応生成物の溶出によりコンクリート組織が粗になったり、反応に伴って膨張を生じたりして、コンクリート自体の耐力の低下、ひび割れの発生、溶解、はく落などの現象が生じる。このような現象を化学的侵食という。

コンクリートを構成する反応生成物(カルシウム化合物)はアルカリ環境下において化学的に安定であるが、中性、酸性領域では不安定となり分解が生じる。ポルトランドセメント系コンクリート中の結合材として役割を果たしている主なものは水酸化カルシウム、けい酸カルシウム水和物(C-S-H)であり、次いでフリーデル氏塩、モノサルフェート、エトリンサイトがある。これらのカルシウム水和物が酸(H⁺)に侵食されると以下のような反応が起こり分解する。



水に対する溶解度が大きい塩酸や硝酸のカルシウム塩は顕著な反応となりコンクリートを著しく劣化させる。また、一般的に有機酸の場合は弱酸であることが多いため、無機酸と比較すると侵食作用は緩慢となる。しかし、有機酸のなかでも酢酸、乳酸、クエン酸などのカルシウム塩は溶解度が大きいため侵食は激しくなり、これに対してしゅう酸はそのカルシウム塩が水に難溶性であるため、コンクリート表面を反応生成物で緻密化し侵食は進まない。

一方、下水道のように硫酸塩による劣化が激しい環境下においては、カルシウム水和物は以下のように反応する。



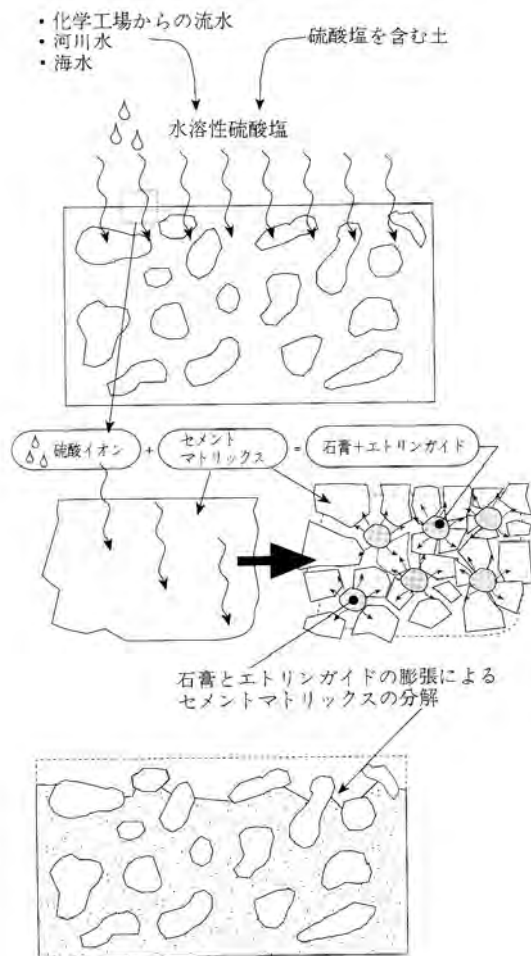


図 2.1.13 硫酸塩による侵食メカニズム³⁾

生成する $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ （石こう）は水に対する溶解度が比較的小さいため、硫酸の濃度が薄い場合にはある程度コンクリートの空孔をふさぐ作用があり、初期には分解生成物の溶出を抑えたり、酸液がコンクリート中に浸透するのを抑えたりする作用を示し、見かけ上の侵食は遅れる。しかし、逆に生成した石こうがさらにセメント中の $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ と反応し、 $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ （エトリンガイト）になると、膨張圧によってコンクリートに大きな被害を及ぼす結果となる。

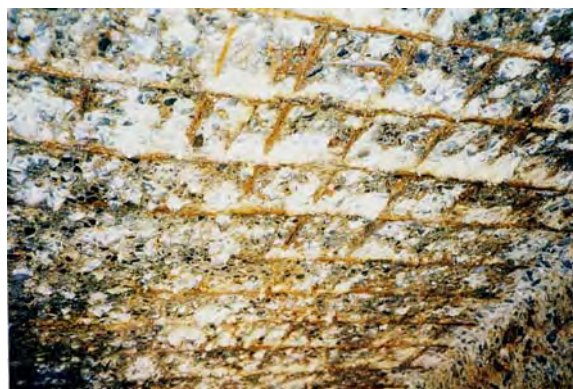


写真 2.1.12 硫酸塩によるし尿槽コンクリートの腐食

2.1.6 アルカリ骨材反応

(1) アルカリ骨材反応のメカニズム

1940年にT. E. Stantonがアルカリ骨材反応の存在を発表して以来、化学反応を起こさないと考えられていたコンクリート内の骨材が条件によっては膨張やひび割れを発生させるおそれがあることが認識されてきた。

アルカリ骨材反応は、コンクリート中の毛細管孔内の高pH水酸化アルカリと反応性骨材との化学反応であり、図2.1.14に示すように、アルカリ、反応性を有する骨材、水分の存在の3つがそろって発生する。

アルカリ骨材反応には、アルカリシリカ反応(ASR)、アルカリ炭酸塩岩反応、アルカリシリケート反応の3種類があるが、わが国で主に報告されているのはアルカリシリカ反応(ASR)である。

ASRによるコンクリートの異常現象は、セメント中のNa, Kなどのアルカリ金属が、コンクリート組織内の毛細管孔やゲル空隙にイオンとして溶出することから始まる。溶出したアルカリ金属イオンは、骨材中の可溶性シリカや SiO_2 と水分の存在下で反応する。化学反応によって生成したアルカリシリカゲルは、水分が供給されると吸水膨張するため、反応性骨材粒子にアルカリシリカゲルが生成すると、水を吸収し膨張してコンクリート中の骨材粒子や周囲の組織にひび割れを発生させる。

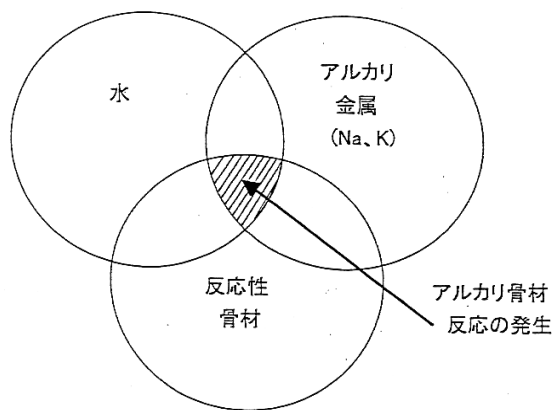


図 2.1.14 アルカリ骨材反応の3主要因

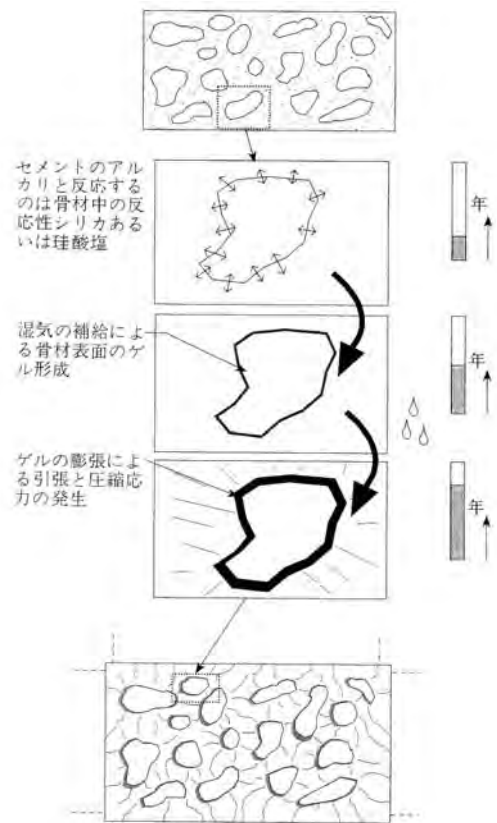


図 2.1.15 アルカリ骨材反応による骨材膨張のメカニズム³⁾

(2) アルカリ骨材反応による損傷事例

アルカリ骨材反応を生じたコンクリートの外観上の特徴を表 2.1.4 に示す。

ひび割れについては図 2.1.16 に示すように、無筋コンクリートや鉄筋量が少ない場合は、亀甲状ひび割れとなるが、鉄筋量が多い場合やプレストレスが加わっている場合には、主筋方向のひび割れが卓越する。また、ゲルの吸水が大きいほど膨張量が大きいので、同一構造物の中でも水分供給量の多い部位にひび割れが多く生じる。

但し、他の要因でも類似のひび割れを生じる場合があり、ゲルとエフロレッセンスも紛らわしいので、外観のみから断定することは危険である。

表 2.1.4 アルカリ骨材反応を生じたコンクリートの外観の変状

外観上の変状	
ひび割れ	1. 網目状のひび割れ
	2. 方向性のひび割れ
	3. 白色のゲル状物質の析出
	4. 水の供給を受ける箇所ひび割れ
変位・変形	5. ひび割れ部の段差や目地材のはみ出しなど
変色	6. コンクリート表面の変色



無筋コンクリートの亀甲状ひび割れ⁵⁾



主筋方向のひび割れ⁶⁾

写真 2.1.13 アルカリ骨材反応によるひび割れパターン(1)



白色のゲル状物質の析出



水分供給の多い箇所でのひび割れ⁵⁾

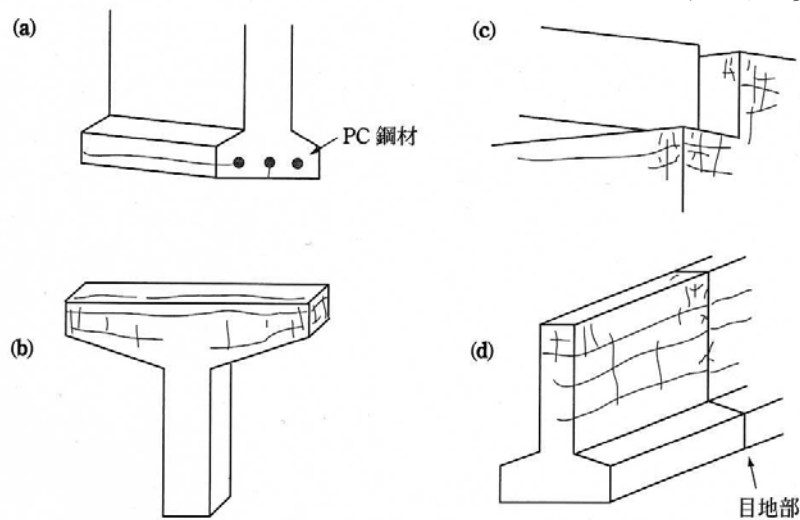


ひび割れ部の段差



コンクリートの変色⁵⁾

写真 2.1.14 アルカリ骨材反応によるひび割れパターン(2)



- (a) プレストレスト桁では、プレストレスト力と同方向に水平なひび割れが発生する。
- (b) T型橋脚では、天端付近に水平方向のひび割れが発生しやすい。また、隅各部に幅の大きなひび割れが発生することが多い。
- (c) 橋台では、雨水の流下経路となる側面に無秩序なひび割れが発生しやすい。
- (d) 擁壁では、無秩序なひび割れが発生するが、水平方向のひび割れがやや目立つ場合が多い。また、膨張したコンクリートが押し合った結果、目地部で局部的に変状が著しいことも多い。

図 2.1.16 アルカリ骨材反応によるひび割れパターン⁷⁾(3)

(3) コンクリート断面の変状

写真 2.1.15 にアルカリ骨材反応により生じた反応リム，写真 2.1.16 にアルカリシリカゲルの析出例を示す．コンクリートのはつり面や採取コアの切断面にこのような現象が現れていれば，アルカリ骨材反応を生じているといえる．

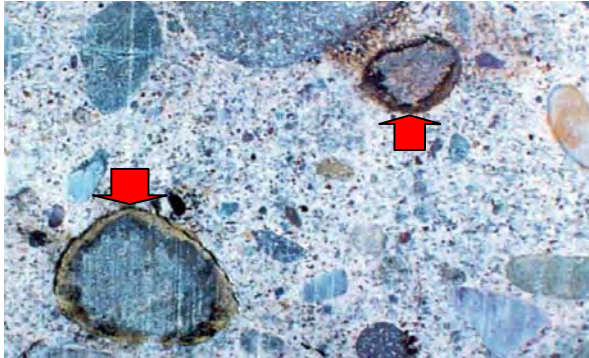


写真 2.1.15 反応リム



写真 2.1.16 アルカリシリカゲルの析出

(4) アルカリ骨材反応を中心とした複合劣化の相関

図 2.1.17 に示すように，アルカリ骨材反応により発生したひび割れは，水分，塩化物イオン，炭酸ガスの通り道になり，それらの物質のコンクリート内部への拡散・透過性を増大させる．この結果，中性化や塩害による鉄筋腐食および凍害が促進するため注意が必要である．

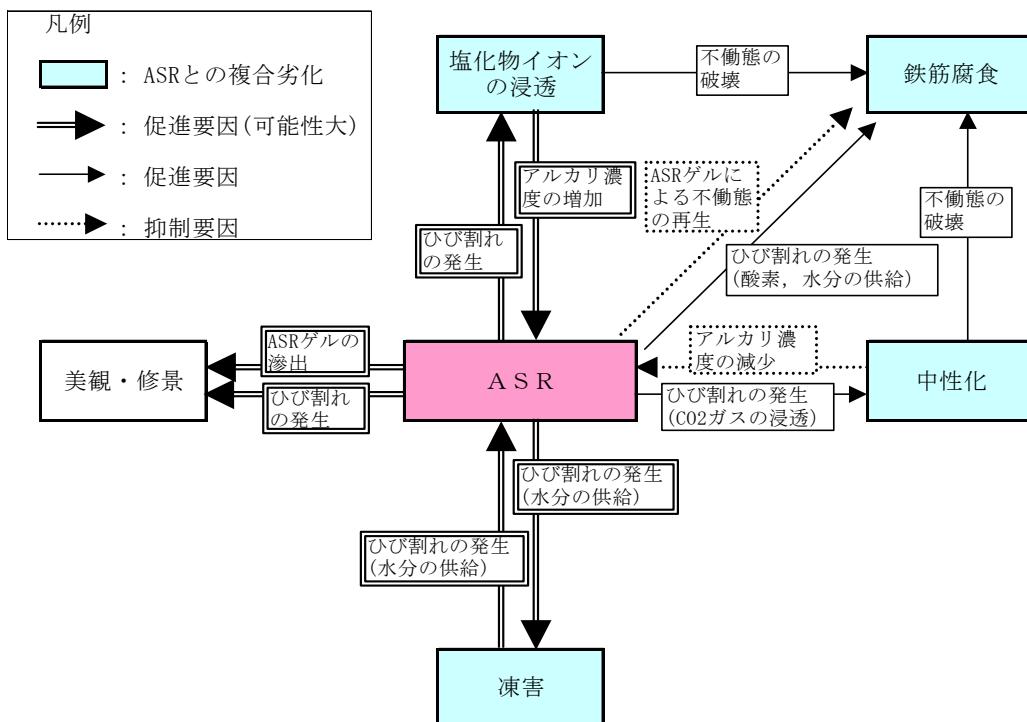


図 2.1.17 ASRに関する複合劣化現象⁸⁾

1) 海水飛沫や飛来塩分の強い地域

海水の影響を受けるコンクリートや海砂、海砂利を使用したコンクリートでASRが促進される問題が指摘されている。

道示¹⁰⁾では図 2.2.1 に示す通り北海道内を日本海側（B地域）と太平洋側（C地域）に分類し、海岸線からの距離に応じた対策区分を示しており、対策区分に妥当する地域では飛来塩分による塩害の影響があると考えられる。

2) 凍結防止剤の散布地域

北海道で使用されている凍結防止剤（融雪剤を含む）の大半は塩化ナトリウムおよび塩化カルシウムであり、道内各地で使用されている。塩化ナトリウムはアルカリの供給源となり、アルカリ骨材反応を促進することが知られており、凍結防止剤の散布路線上の構造物では注意が必要である。

道路構造物で凍結防止剤の影響を受けやすい部位を図 2.1.18 に示す。

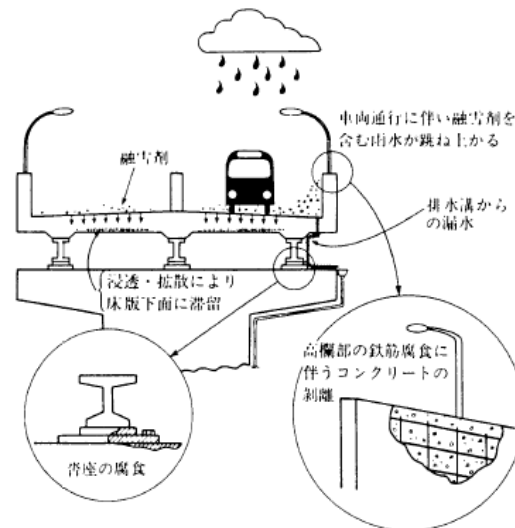


図 2.1.18 凍害防止剤の影響を受けやすい部位⁹⁾

3) 凍害の影響を受ける地域

アルカリ骨材反応と凍害は水の供給を受ける環境で劣化が進行するという共通の環境要因があり、ひび割れが発生するとひび割れからコンクリート内部に水分が供給されると共に、コンクリートの水持ちが増加する。このため、アルカリ骨材反応と凍害のどちらが先かに関係なく相互に劣化を進行させ合い、ひび割れの拡大や強度、弾性係数の低下を招くことが予想される。

北海道は全道的に凍害危険度の高い地域が多く、凍結融解による凍害を受ける可能性が高い。

4) 鉄筋腐食

アルカリ骨材反応により生じたひび割れから、塩分、炭酸ガス、酸素、水分がコンクリート内部に侵入し、鉄筋の腐食が促進される可能性がある。

また、アルカリ骨材反応の進行により細孔溶液中の OH^- イオンがアルカリ骨材反応により消費され、コンクリートのアルカリ性が低下し、塩化物イオンが存在する時には鉄筋の腐食が促進される可能性がある。その一方で、塩化物イオンが含まれていても比較的少ない場合は、高いアルカリ性を持つアルカリシリカゲルによる鉄筋の保護作用により腐食していない可能性もある。

5) 凍害とアルカリ骨材反応の複合劣化

凍害およびアルカリ性骨材反応は、いずれも膨張性のひび割れを発生するため、劣化加速の相乗効果を生じる。

a. 凍害によるアルカリ骨材反応の加速

凍害により生じたひび割れからの水分供給により、アルカリ骨材反応の加速や深部へ進行する。

b. アルカリ骨材反応による凍害の加速

アルカリ骨材反応によるひび割れから水分が侵入することにより、凍害が加速や深部へ進行する。

2.1.7 疲労

(1) 疲労のメカニズム

コンクリート部材の繰り返し荷重によって、所要の耐荷力を失うことを疲労という。

コンクリート部材の疲労は、コンクリート部材を構成するコンクリートと鋼材の両者の繰り返し作用による劣化によるものである。

異形鉄筋などの補強鋼材の疲労は、繰り返し引張応力の基で鉄筋のふしなどの局部的に応力が高くなる箇所からひび割れが発生し、それが進展して破断にいたるものである。

コンクリートの疲労については、微視的な劣化機構については、十分明らかにされていないのが現状である。粗骨材とマトリックスとの間の付着力の低下や微細ひび割れの発生と伝播により生じるとされている。コンクリートの疲労強度は、水中では大きく低下する。これは、ひび割れの開閉や細孔組織の体積変化による水の洗い出しに際して、コンクリートに損傷が入ることによる影響と考えられている。

部材としての疲労破壊形態は、部材に作用する応力状態によって異なる。

一般に疲労破壊は、以下のように区分される。

■ 曲げ疲労

この破壊は、コンクリート圧縮応力の繰り返し作用によるコンクリート疲労破壊と、鉄筋の引張応力の繰り返しによる鉄筋の疲労破壊が生じる

■ せん断疲労

せん断疲労破壊には、曲げせん断疲労破壊と、押抜きせん断疲労破壊がある。

せん断補強鋼材が配置されていない場合は、いずれも、コンクリート部材のせん断耐力の繰り返しによる低下によって疲労破壊が生じる。コンクリートが負担するせん断力の低下には、①ひび割れ面でのせん断伝達機構の劣化、②それに伴う斜め圧縮応力の方向の変化による影響がある。なお、道路橋 RC 床版においては、車両の走行により載荷位置が変化することになり、コンクリート部材のある箇所の応力状態が大きく変化することにより、定点載荷時のせん断疲労寿命よりも大きく低下することが知られている。また、前述のようにコンクリートは湿潤な状態では、気中に比べて低下することから、道路橋の RC 床版で排水などが十分ではない場合は、水の影響も受けてさらに疲労寿命が低下するとされている。

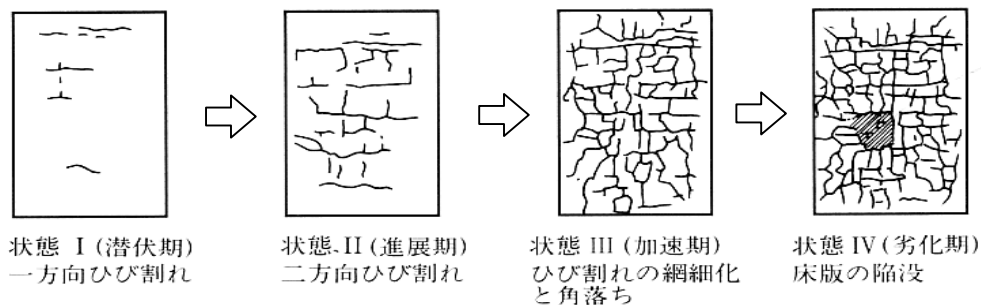


図 2.1.19 疲労によるRC床版の劣化進行^{9)・10)}

2.1.8 その他劣化を促進する変状

(1) 初期欠陥

耐久性への影響が大きい初期欠陥として、コールドジョイントとジャンカが挙げられる。コンクリート打設の不具合によりジャンカやコールドジョイントを生じると、水分やCO₂、塩化物等の劣化因子が容易に侵入できるため、内部の鋼材が腐食しやすくなり、劣化を促進させる。また、コンクリートの一体性が欠如していたり、断面が欠損することによる構造強度上の問題が発生することも考えられる。さらに、欠陥部からの漏水による使用性の低下や、エフロレッセンスによる美観低下も問題となる。

コールドジョイントの程度を調査としては、次の方法がある。

- ・コールドジョイント部を打撃し、反発音により浮きの有無を確認する。
- ・コールドジョイント部でコア採取し、断面を直接観察する。
- ・超音波法により深さを測定する（ひび割れ深さの測定と同じ方法）。

ジャンカの調査としては、次の方法がある。

- ・ジャンカ部を打撃し、骨材の脱落の有無を確認する。通常、打撃音からはジャンカの状態は判別困難である。
- ・ジャンカ部でコア採取し、充填不良部分の深さを直接確認する。
- ・超音波伝播速度を測定し、単触子間に空隙の有無を推定する。
- ・対象部のX線撮影を行い、空隙の有無を確認する。但し厚い部材や背面側にフィルムを設置できない部位には適用できない。

(2) 乾燥収縮ひび割れと温度応力ひび割れ

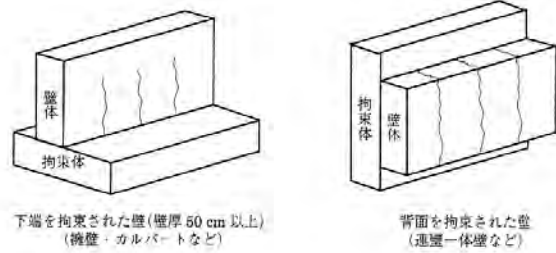
コンクリート構造物にはさまざまな原因によりひび割れが発生するが、一般にひび割れ発生原因として最も多いのは、コンクリート打設直後の水和熱に伴う温度応力によるひび割れと、打設後数年間の間に生じる乾燥収縮といえる。

これらのひび割れについては、発生パターンや発生時期から原因をほぼ推測できることが多い。温度応力によるひび割れの典型的なパターンを図 2.1.20、乾燥収縮によるひび割れの典型的なパターンを図 2.1.21 に示す。

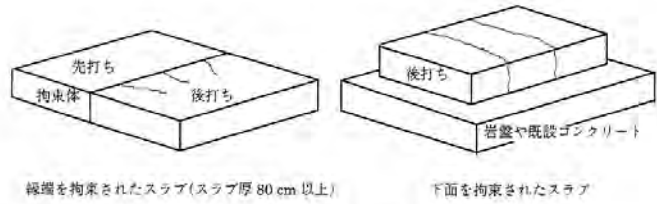
温度応力によるひび割れには、外部拘束によるものと内部拘束によるものに分けられる。外部拘束は、打設したコンクリートの温度下降過程において、収縮が既設コンクリートや岩盤などに拘束されることにより生じる。したがって、既設部分や岩盤との接続部において生じやすい。

内部拘束によるひび割れは、打設したコンクリートの温度下降過程において、内外部の温度差によって生じるものであり、コンクリートの断面が大きいほど生じやすい。

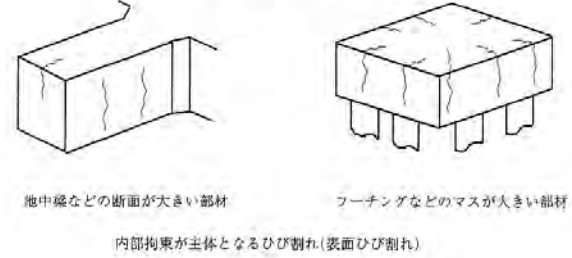
温度応力によるひび割れを防止するには、セメントの発熱を極力抑えることが肝要であり、低発熱型のセメントを使用したり、打設時のコンクリート温度を低くするなどの方法がある。



乾燥収縮によるひび割れは、コンクリート内部の余剰水が散逸するのに伴って生じる現象であり、水分が供給されない乾燥環境に置かれているほど、部材厚が薄いほど、コンクリートの単位水量が大きいほど収縮量が大きくなり、ひび割れを生じやすい。



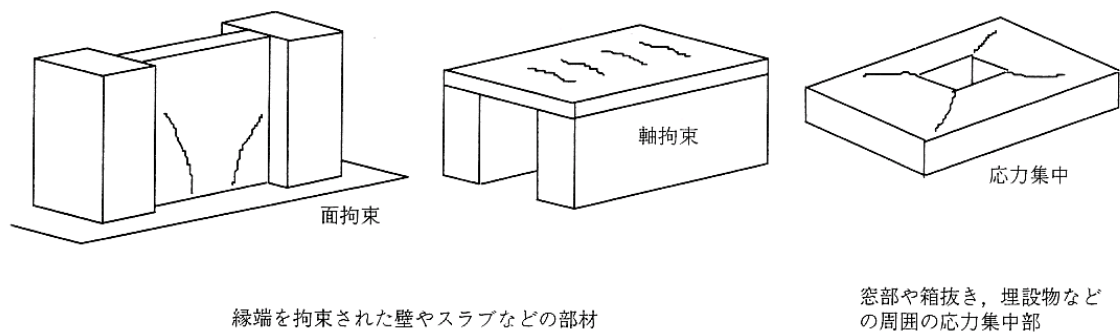
外部拘束が主体となるひび割れ(貫通ひび割れ)



内部拘束が主体となるひび割れ(表面ひび割れ)

図 2.1.20 温度応力によるひび割れパターン¹¹⁾

乾燥収縮ひび割れを防止するには、単位水量を低減することが最も重要であるが、最近のコンクリートの配合に置いては、単位水量の低減は限界に近い状態にまで行われており、さらに水量を大幅に低減することは難しいといえる。その他の方法としては、収縮低減剤を使用したり、ひび割れが生じても実害のないように誘発目地を設けるといった方法が一般的である。



縁端を拘束された壁やスラブなどの部材

窓部や箱抜き、埋設物などの周囲の応力集中部

図 2.1.21 乾燥収縮によるひび割れパターン¹¹⁾

2.2 北海道の地域特性

2.2.1 北海道における環境条件

(1) 沿岸部

道路橋示方書コンクリート橋編および下部構造編では、塩害の影響地域を表 2.2.1 のように分類している。このうち、北海道の影響地域に関しては、図 2.2.1 のように設定している。

これによると、北海道では、猿払村から松前町にかけての日本海沿岸全域が区分 B（海上部および海岸線から 300m までの部分）、これ以外の領域は区分 C（海上部および海岸線から 200m の部分）に指定されている。

表 2.2.1 塩害の影響地域¹²⁾

地域区分	地域	海岸線からの距離	塩害の影響度合いと対策区分	
			対策区分	影響度合い
B	北海道のうち、宗谷支庁の礼文町、利尻富士町・稚内市、猿払村・豊富町、留萌支庁、石狩支庁、後志支庁、渡島支庁の松前町	海上部及び海岸線から 100m まで	S	影響が激しい
		100m をこえて 300m まで	I	影響を受ける
		300m をこえて 500m まで	II	
		500m をこえて 700m まで	III	
C	上記以外の地域	海上部及び海岸線から 20m まで	S	影響が激しい
		20m をこえて 50m まで	I	影響を受ける
		50m をこえて 100m まで	II	
		100m をこえて 200m まで	III	

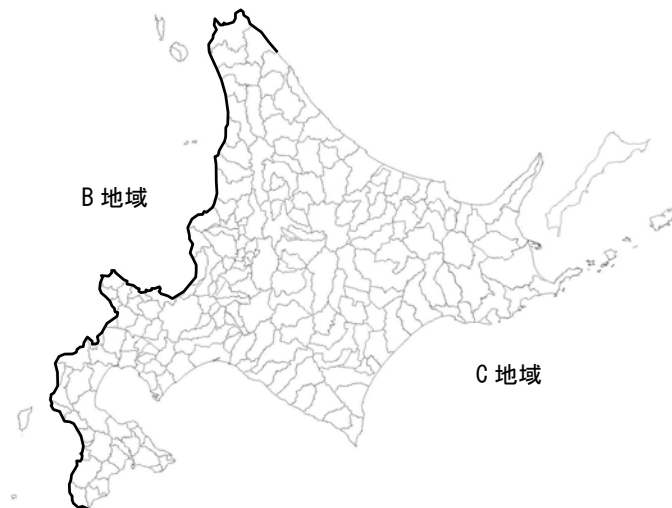


図 2.2.1 塩害の影響度合いの地域区分¹²⁾

また、北海道においては海塩粒子の海岸からの距離特性から塩分付着量マップ¹³⁾が作成されており、これを図 2.2.2 に示す。本マップは北海道電力が全道約 200 箇所にて送電鉄塔の 254mm標準懸垂碍子の付着塩分量を調査し定めた塩分付着量マップの 50%値¹⁴⁾（1 ヶ月累積汚損量の発生頻度 50%値）である。表示コンターは塩分付着量（単位：mg/下面外）であるが、橋梁構造の飛来塩分環境の指標とされる飛来塩分量mdd($\text{Cl}^- \cdot \text{mg}/\text{dcm}^2/\text{day}$)と単位は異なるものの相関があると考えられる。

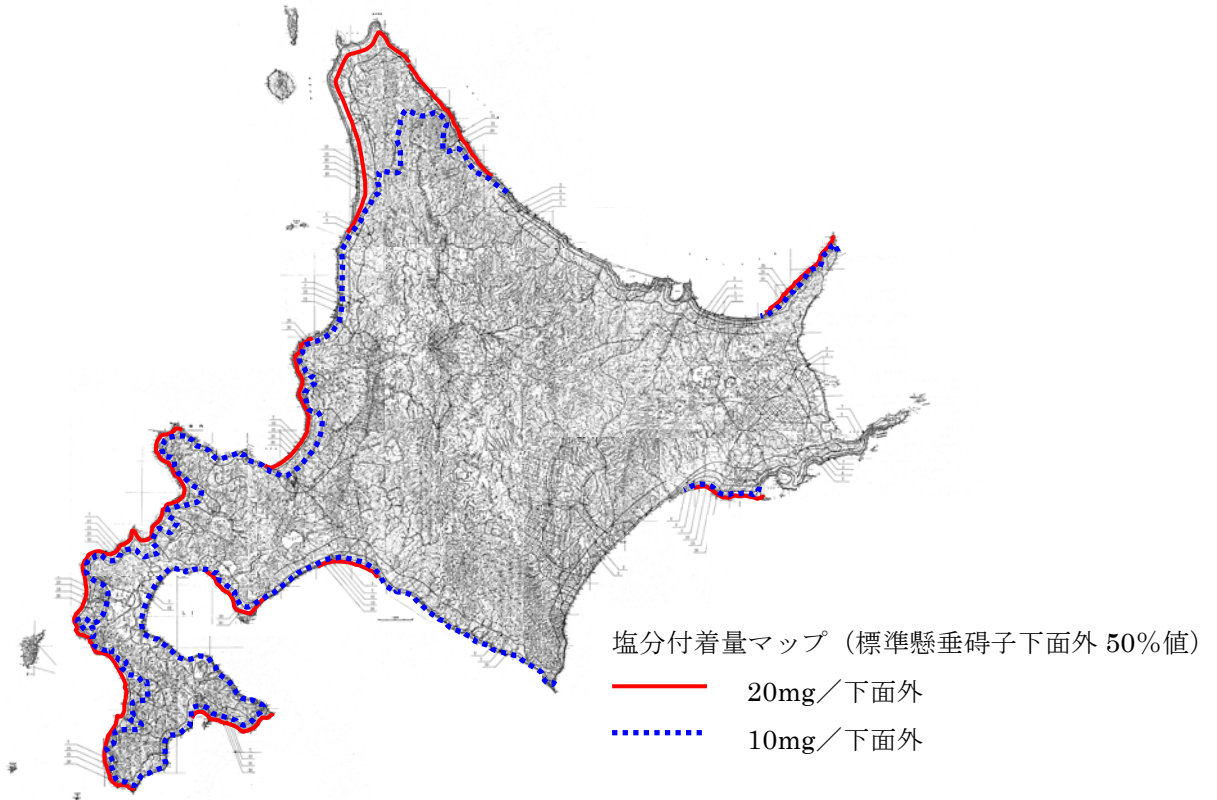


図 2.2.2 塩分付着量マップ 50%値

表 2.2.2 は、北海道内の主な港湾の凍結融解回数を調べた結果の一例である。昭和62年10月～昭和63年5月を「1冬目」とし、以降、12冬目（平成10年10月～平成11年5月）まで測定が行われている。回数は、-2℃を境にカウントされている。1冬あたりの凍結融解回数は、道南の江差港と室蘭港では平均して50回程度であるが、他の地域ではそれよりも高く、苫小牧港、十勝港、釧路港では平均100回程度、凍結融解の繰り返しを受けていることがわかる。

これらのことから、道内の沿岸一帯は、塩害と凍害の複合劣化が生ずる危険性は高く、特に、図 2.2.1 に示される太線のB地域は、複合劣化の発生が特に懸念されると言える。

表 2.2.2 道内の主な港湾における凍結融解回数¹⁵⁾

港湾名	冬目	回数	合計	港湾名	冬目	回数	合計	港湾名	冬目	回数	合計	港湾名	冬目	回数	合計
留萌港	1	63	957 平均 80	江差港	1	61	564 平均 47	浦河港	1	85	1003 平均 84	紋別港	1	69	897 平均 75
	2	84			2	42			2	84			2	80	
	3	76			3	27			3	66			3	73	
	4	80			4	36			4	81			4	75	
	5	86			5	60			5	98			5	77	
	6	92			6	50			6	99			6	85	
	7	77			7	50			7	86			7	88	
	8	78			8	45			8	84			8	70	
	9	80			9	39			9	77			9	65	
	10	96			10	48			10	86			10	76	
	11	61			11	42			11	67			11	63	
	12	84			12	64			12	90			12	76	
石狩湾 新港	1	69	937 平均 78	室蘭港	1	64	705 平均 59	釧路港	1	101	1208 平均 100	網走港	1	75	873 平均 73
	2	76			2	50			2	101			2	84	
	3	53			3	38			3	87			3	74	
	4	83			4	52			4	95			4	67	
	5	76			5	72			5	111			5	78	
	6	90			6	73			6	109			6	80	
	7	80			7	58			7	102			7	80	
	8	80			8	55			8	96			8	64	
	9	80			9	51			9	102			9	75	
	10	102			10	67			10	116			10	67	
	11	66			11	50			11	79			11	58	
	12	82			12	75			12	109			12	71	
小樽港	1	65	862 平均 72	苫小牧 港	1	106	1187 平均 99	十勝港	1	104	1208 平均 100	/			
	2	77			2	98			2	100					
	3	53			3	85			3	86					
	4	71			4	98			4	89					
	5	85			5	102			5	102					
	6	83			6	112			6	108					
	7	72			7	100			7	98					
	8	65			8	95			8	94					
	9	61			9	93			9	86					
	10	89			10	112			10	131					
	11	60			11	74			11	97					
	12	81			12	112			12	113					

(2) 内陸部

図 2.2.3 は、1982年1月の平均気温分布である。これをみると、内陸部の平均気温は沿岸部に比べると低く、特に、標高が高い大雪山地域、道北の幌加内地域において、平均気温が低い傾向が顕著に表れている。

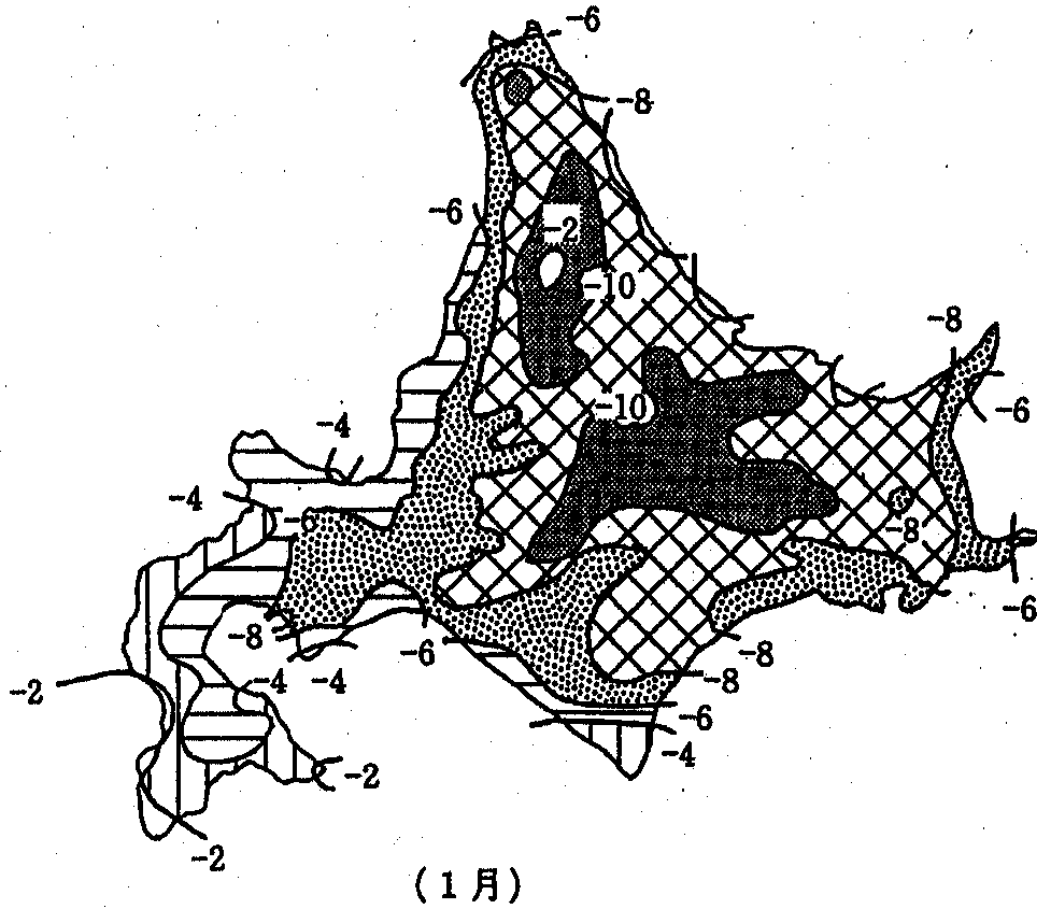
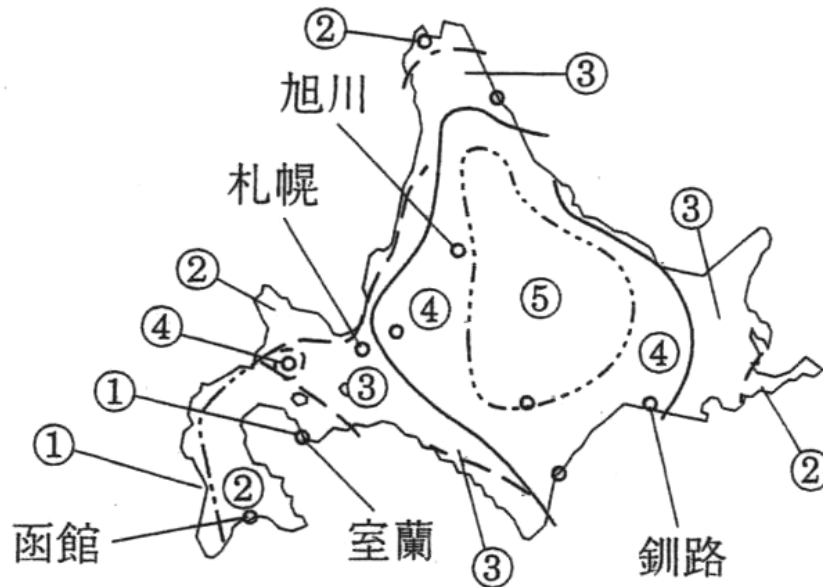


図 2.2.3 1982年1月の平均気温分布¹⁶⁾

図 2.2.4 は、長谷川による北海道内の凍害危険度分布図である。長谷川も、標高が高い大雪山地域、道北の幌加内地域を「凍害は極めて大きいと予想される地域（危険度5）」に位置づけている。



凍害危険度	凍害の予想程度	最大水セメント比(%)		骨材	AE剤
		(a)湿潤状態の 外気側コン クリート	(b)水に接し ない外気側 コンクリート		
5	凍害は極めて大きいと予想される地域	50	55	原則として I級を用いる	必要
4	凍害は大きいと予想される地域	55	60	〃	〃
3	凍害はやや大きいと予想される地域	60	65	〃	〃
2	凍害は軽微と予想される地域	60	65	II級でもよい	〃
1	凍害はごく軽微と予想される地域	65	70	〃	〃
0	凍害はないと予想される地域	制限なし (70)	70	〃	不要

図 2.2.4 長谷川による北海道内の凍害危険度分布¹⁷⁾

塩害は元来、主に沿岸地域に建設された構造物で特に問題視されてきた。

しかし、スパイクタイヤの販売及び指定地域内での使用禁止が法制化された平成3年以降、図 2.2.5 に示すように、凍結防止剤の散布量が年々増加傾向にある。このことから、内陸部においても、凍結防止剤による凍害、および凍害と塩害による複合劣化の発生が危惧される。

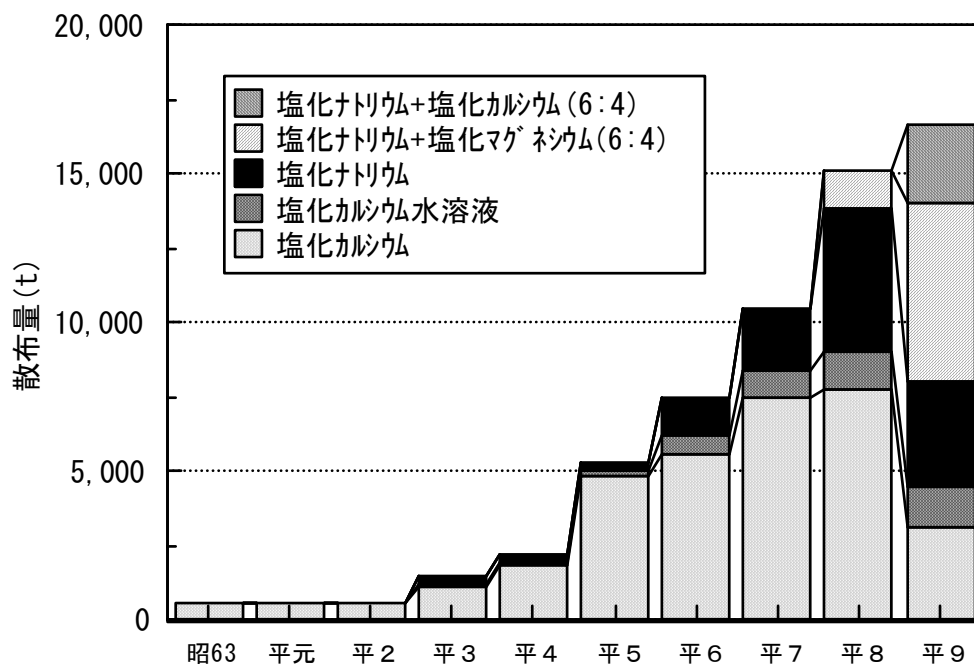


図 2.2.5 北海道開発局管内の凍結防止剤散布量 (昭和63年～平成9年)¹⁸⁾

図 2.2.6 は、平成5年度の北海道内地域別の凍結防止剤使用量、図 2.2.7 は、砂や砕石などすべり止め材の使用量を示している⁴⁾。

凍結防止剤は、車両走行路面の凍結防止を目的とした冰雪の融解、および、除雪後に生ずる残雪の融解といった面で、効果を発揮する。

これまで、管轄路線での全線散布というより、交通事故が生ずる危険性が高い上り坂や下り坂、カーブ、日陰、トンネル出入口、橋梁部、交差点などでスポット的な散布が行われてきた。一方、高速道や高規格幹線道では、極めて重大な交通事故の発生が懸念されるため、事故を未然に防止する観点から、路面を完全に露出させることが望ましく、これらの路線では全線散布が基本となる。

一般に、凍結防止剤は、地域特性の事情を考慮した上で選定がなされる。気温が低く、スポット的な散布を行っている地域では、即効性に優れ、発熱作用を有する塩化カルシウムが、一方、気温が比較的高い地域では、持続性に優れ、吸熱作用を有する塩化ナトリウムが使用される場合が多い。

一方、すべり止め材は、路面の凍結防止、ブラックアイスバーン路面の融解には適さない反面、路面の雪氷が厚い場合や、低温時もある程度の効果が期待できる特徴を有する。

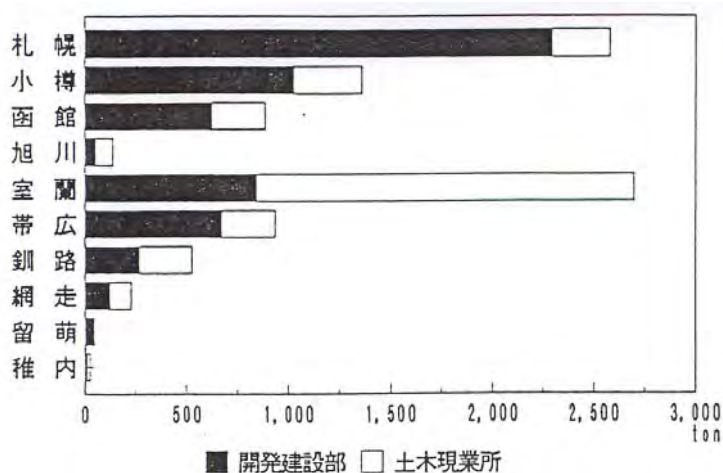


図 2.2.6 北海道内の地域別凍結防止剤散布量 (平成5年度) 18)

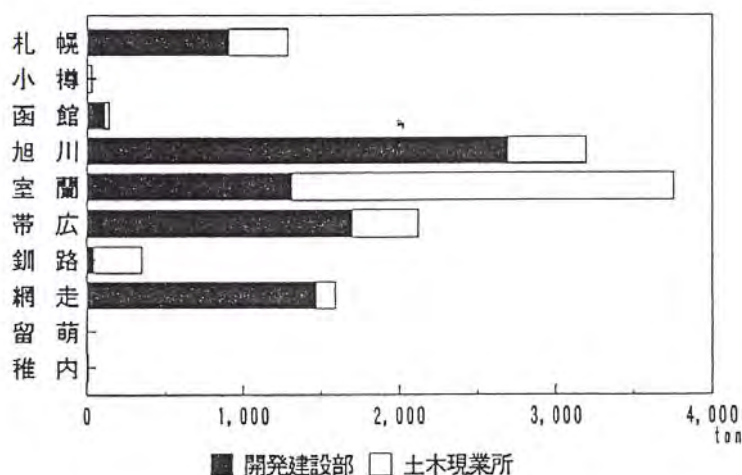


図 2.2.7 北海道内の地域別すべり止め材 (砂および砕石) 散布量 (平成5年度) 18)

図 2.2.6, 図 2.2.7 をみると、凍結防止剤と砂・砕石の双方を使用した路面管理を実施している地域は札幌、室蘭、帯広、凍結防止剤による路面管理を主としている地域は小樽、函館、砂・砕石による路面管理をメインとする地域は旭川、網走となっている。凍結防止剤は、比較的温暖な地域で多く用いられるのに対し、低温地域ではあまり用いられていない傾向が伺える。

すべり止め材は、積雪量が多く、低温な地域に適することを前述したが、地吹雪が頻発する留萌や稚内では、散布量が少なくなっており、単純に、雪が多く、気温が低い地域ですべり止め材が多く散布されているとは一概には言えない。

(3) 凍害危険度と塩害範囲の関連

北海道は全域が凍害危険地域であることと、海岸線が長く塩害範囲地域が広く、特に日本海側では塩害に対する外力が大きいこと、内陸であっても凍結防止剤による塩害を受けられる可能性がある。そのため、図 2.2.8 に示すように、北海道は国内で最も凍害と塩害の複合劣化を受けやすい地域といえる。

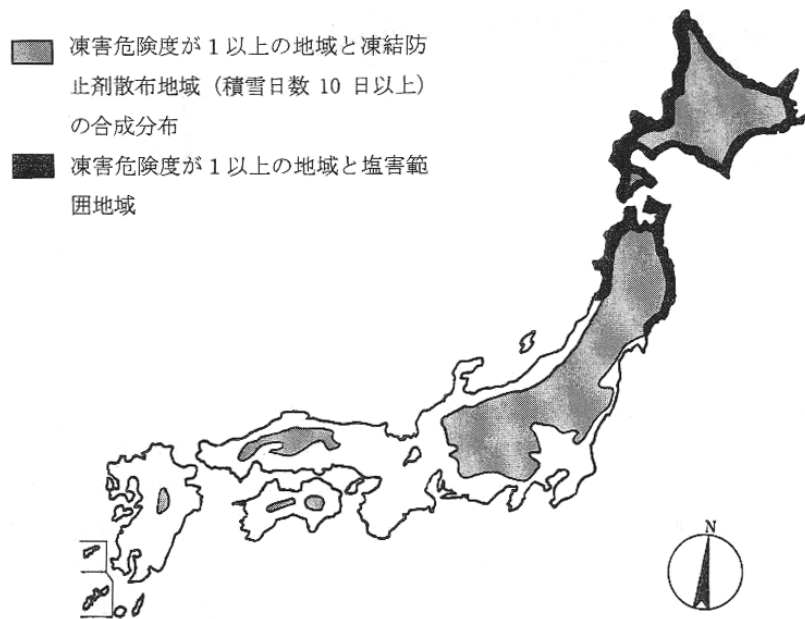


図 2.2.8 凍害と塩害の複合劣化の可能性がある地域²⁾

図 2.2.1 および図 2.2.4 に北海道内における飛来塩分による塩害範囲の地域区分と凍害危険度の分布を示したが、塩害の影響が大きいのは日本側であり、凍害危険度については、道東地域が道央・道南・道北地域に比べて厳しいが、一概にどの地域が厳しいとは言えない。

また、内陸部においても凍結防止剤としてNaClやCaCl₂を使用している地域では、複合劣化の危険性がある。図 2.2.9 に示すように、凍結防止剤の散布量が多いほど凍害劣化度と塩害劣化度の双方が大きくなる傾向があることが報告されている。

このため、北海道においては全ての沿岸地域と凍結防止剤の散布地域は塩害と凍害との複合劣化に対して注意が必要である。

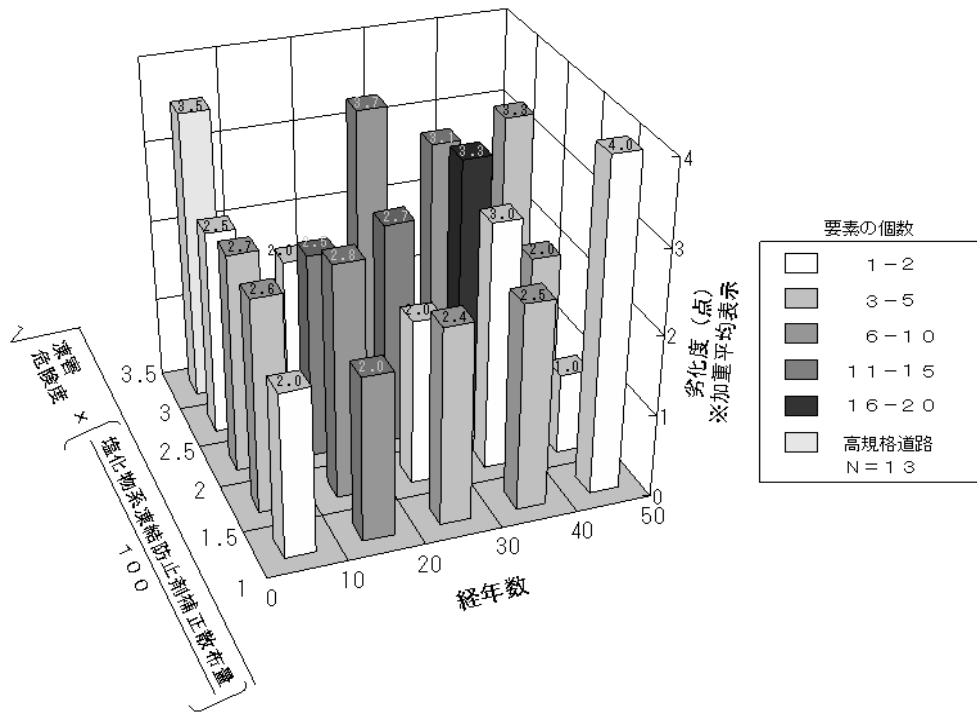


図 2.2.9 外部環境（凍害危険度，塩化物系凍結防止剤散布量）および供用年数が劣化度に与える影響傾向¹⁹⁾

2.2.2 北海道産骨材の品質特性

(1) 骨材品質の現状

北海道におけるコンクリート用骨材の品質調査の成果については、現場から試料を取り寄せ、分析を行った林の報告²⁰⁾、開発局各建設部管内の主な河川・海岸を選出し、その選定地域から試料を採取して品質試験を行った岡村の報告^{21)・22)}、札幌地区における骨材の現状について調査した今井の報告²³⁾、生コン工場が使用している骨材の現況調査を行った結果をもとに多変量解析を行い、総合評価を行った太田の報告²⁴⁾ などがある。

図 2.2.10、図 2.2.11 は太田の報告の一部である。比重（現在は「密度」）に大きな異常値はみられないが、吸水率、洗い試験で失われるもの、安定性試験損失量の値には多少のばらつきがみられ、骨材の選択にあたっては、特に吟味する必要があると言える。

一方、林の報告²⁰⁾によると、細骨材は太平洋岸の苫小牧市と幌別町間の海砂が最良で、粗骨材は十勝川、札内川、静内川、遠別川などの砂利が良質の部類に属するようである。また、地域別では日高山脈に源を発する河川産のものが概して良好で、地質学的にも妥当との報告がなされている。

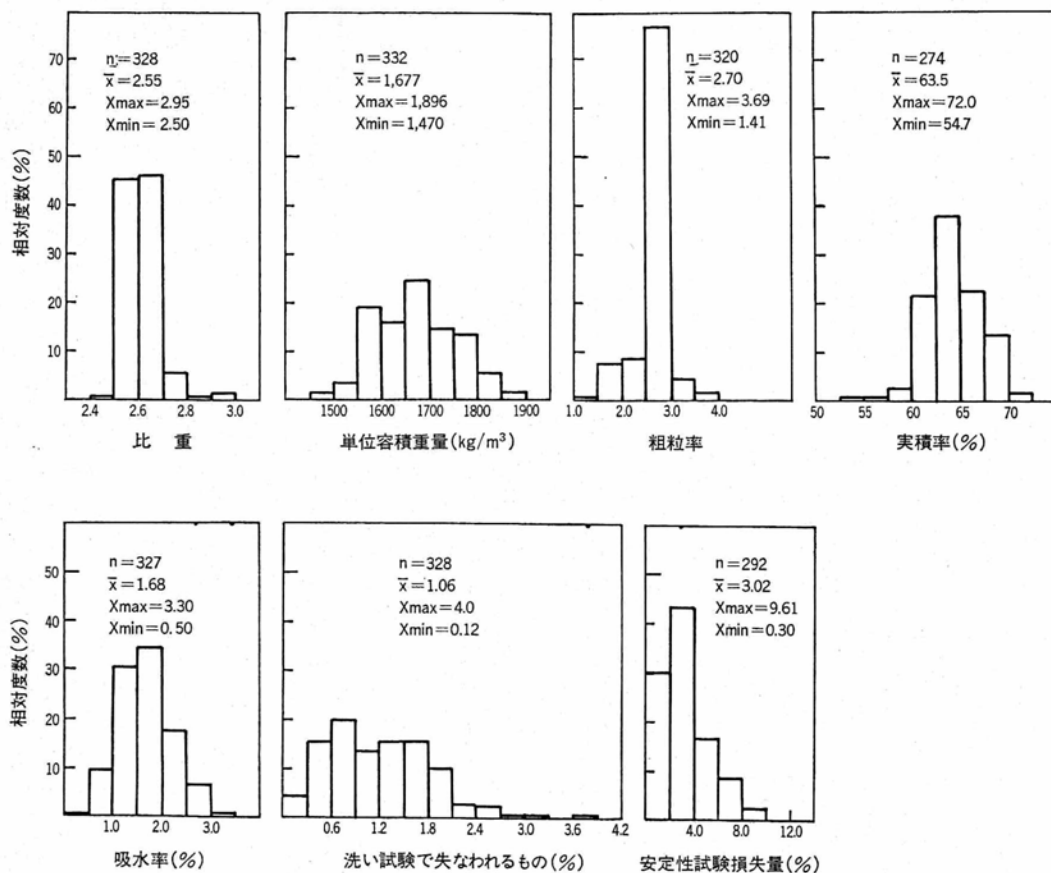


図 2.2.10 道内細骨材の物理的性質²⁴⁾

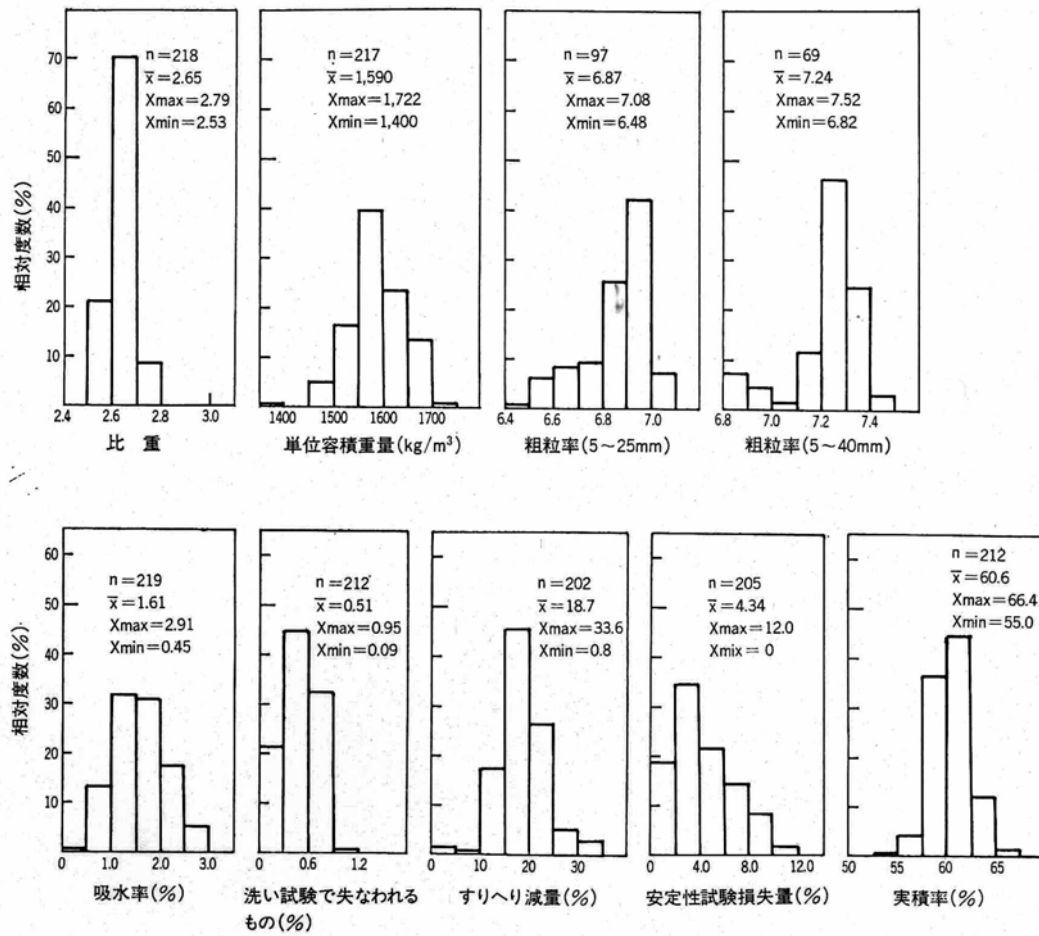


図 2.2.11 道内粗骨材の物理的性質²⁴⁾

(2) アルカリ骨材反応性骨材の道内分布

昭和58～63年度にかけて全道各地で採取した碎石（砕砂）・砂利・砂について鉍物分析・骨材のASR反応性試験（化学法・モルタルバー法）が実施され，試験結果より反応性骨材である可能性が高い地域²⁵⁾を図2.2.12の斜線部分に示す。

また，碎石骨材（砂，砂利を含まない）で反応性のある岩石が高率で含まれている可能性のある岩体（中新世よりも新しい火山岩類）を図2.2.12のグレー部分に示す。²⁶⁾

両者は調査機関や調査対象とした骨材の種類の違いより地域分布が異なっているが，反応性骨材である可能性が高い地域を表している。

尚，このほかの地域についても全く反応性骨材がないとはいえないため注意が必要である。

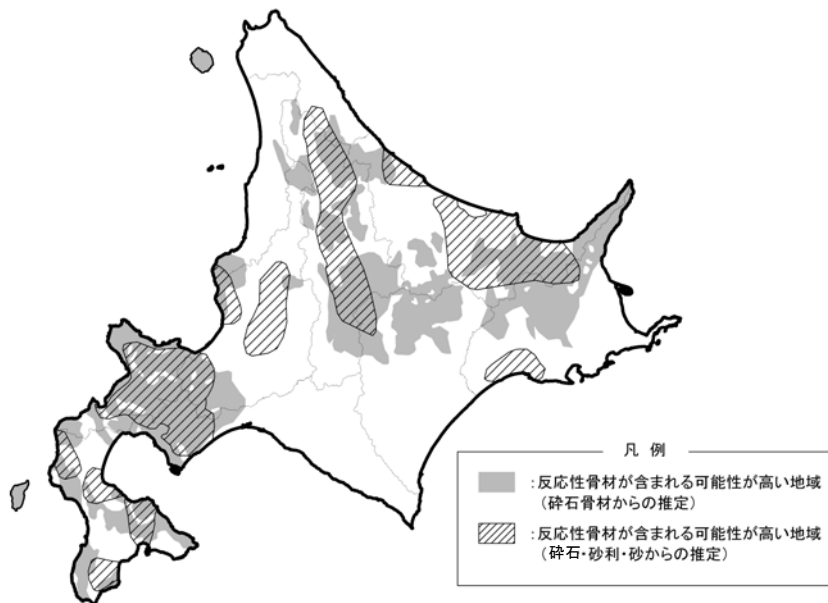


図 2.2.12 反応性骨材である可能性が高い地域^{25), 26)}

2.2.3 北海道内における腐食性地盤の分布

日本列島は環太平洋造山帯に位置し、活発な火山活動があり、また地殻運動に伴う海成層の堆積、さらに各地の地層中に鉱床が形成していることなど、コンクリートに対して厳しい土壌環境にある。このような環境に曝されたコンクリートはそれぞれの要因により劣化崩壊を生じ、長期強度の発現に問題が生じる場合がある。

劣化要因としては、

- ①火山活動に由来する熱や熱水、噴気ガスさらに温泉水による劣化環境
- ②地層中に形成された金属および非金属鉱床からの酸性水による劣化環境
- ③海成層からなる堆積岩中に含まれる黄鉄鉱が酸化されて硫酸塩地盤となる劣化環境が考えられる。

(1) 火山活動および鉱床による劣化要因

火山活動によるコンクリートの劣化環境とは、(a) 熱水および温泉水の含有成分による化学的侵食、(b) 火山および温泉の熱によるコンクリートの長期強度低下と化学的侵食の促進、コンクリート構造物における温度応力の発生、(c) 流水による化学的侵食の促進と物理的侵食等である。

鉱床におけるコンクリートの劣化環境とは、鉱床中に含まれる黄鉄鉱や鉱床を形成する地山が風化した場合、酸化作用により発生した酸性水が表流水として排出され、温泉水と同様な被害を生じることである。

したがって、火山岩分布地に相当し、噴気ガスや熱水および温泉水が地殻に存在する地域や、過去の火山活動や熱水変質等で形成された鉱床が存在する地盤はコンクリートを腐食させる土壌環境といえる。

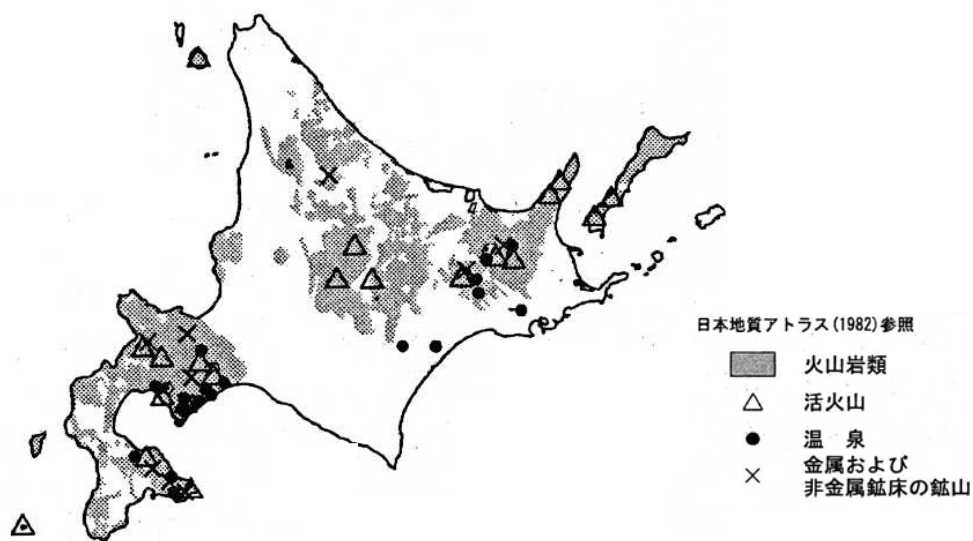


図 2.2.13 火山活動あるいは鉱床に由来するコンクリートの腐食性地盤図²⁷⁾

表 2.2.3 火山活動により硫酸性の地盤となる環境要因²⁷⁾

危険度		A : 高い ←	B : 中位 →	C : 低い
地質	時代	新生代第四紀		新生代第三紀
	岩種	火山岩	凝灰角礫岩	
噴気ガス		H ₂ S・SO ₂ 濃度が高い		H ₂ S・SO ₂ 濃度が低い
温泉水	温度	泉温が高い		泉温が低い
	pH	pHが低い		pHが高い
	溶存成分	硫酸イオン多い		硫酸イオン少ない
周辺地盤	温度	地温が高い		地温が低い
	pH	pHが低い		pHが高い
	析出物	白色または黄色結晶の付着あり		なし

表 2.2.4 鉱床により硫酸性の地盤となる環境要因²⁷⁾

危険度		A : 高い ←	B : 中位 →	C : 低い
地質	時代	新生代第三紀		中生代以前
	岩種	火山岩	深成岩	堆積岩
気温		高い	(20℃)	低い
周辺環境	鉱山の有無	数 km 以内にあり		10 km 以上離れている
	鉱山の有無	対象地にあり		数 km 以内にあり
	廃水の有無	対象地にあり・直下流側に位置		数 km 以内にあり
	表流水	多い・湧水あり		少ない・降雨時のみ

(2) 海成層による劣化要因

海成層によるコンクリートの腐食性地盤とは、沖積粘性土の分布する埋立地や低地、洪積固結粘土や新第三期泥岩の分布する台地から丘陵地の地盤で、もともと海底に堆積した泥土が圧密、脱水、固結化の過程を経て陸地になっている新しい地層に相当する地盤である。

これらの地盤は、海水起源の硫酸イオンが硫酸還元菌の働きにより生成された黄鉄鉱を数%含み、海水中で安定であった黄鉄鉱が空気と水の存在する陸上で再び水溶性硫酸イオンとして溶出し、同時に増加した水素イオン濃度により pH が 2～3 の強い酸性地盤を形成する。このように硫酸イオンが増大する酸化環境を与える地盤は、コンクリートを腐食させる土壤環境といえる。



図 2.2.14 海成層によるコンクリートの腐食性地盤²⁷⁾

表 2.2.5 海成層により硫酸性の地盤となる環境要因²⁷⁾

危険度		A : 高い ← B : 中位 → C : 低い			
地形	標高	0 ~ 5m	5 ~ 50m	50 ~ 200m	200m ~
	対応する位置	埋立地	低地	台地	丘陵地 山地
地質	地層名	沖積層	洪積層	新第三紀層	古第三紀層
	岩種	泥・粘土・泥岩		砂・砂岩	砂礫・礫岩
	堆積環境	海成層		汽水成層	淡水成層
	(識別化石)	(貝化石含む)	(貝化石と植物化石の混在)		(植物化石含む)
気温		高い	(20℃)		低い
地盤環境	含水比	高い	(25%)		低い
	地下水位	浅い・変動する			深い・変動しない
	吸水性 (透水性)	高い		(透水係数 10 ⁻⁵ cm/s)	低い 小さい
	含有物	腐植物含む・微生物多い			腐植物なし・微生物少ない
	土の pH	強酸性 (5.6 未満)	~	弱酸性	~ 中性 (7.0)
	水溶性硫酸	0.2%以上	0.2~0.02%		0.02%未満
	SO ₄ ²⁻	(2000ppm 以上	2000~200ppm		200ppm 未満)

2.3 北海道におけるコンクリート劣化の現状

2.3.1 道路橋にみる塩害劣化の地域的特徴

(1) 外観上塩害を受けたと推定される構造物の分布

コンクリート構造物が塩害を受けると、錆汁や錆汁を伴うひび割れが発生し、損傷が外観上顕在化する。このため、北海道全域の調査である橋梁点検の結果をもとに、外観上塩害を受けたと推定される構造物を地図上に配置（図 2.3.1）した。調査地点は、平成 17 年度に北海道開発局が実施した橋梁定期点検約 800 橋（●印）であり、主部材（地覆等橋面工、付属物を除く）に生じた外観上の損傷が塩害によるものと推定された橋梁を●印で示した。

この結果、①塩害を受けたと推定される構造物は日本海岸、太平洋岸の海岸線に広く分布すること、②一部内陸部においても塩害と推定される構造物があることが明らかとなった。

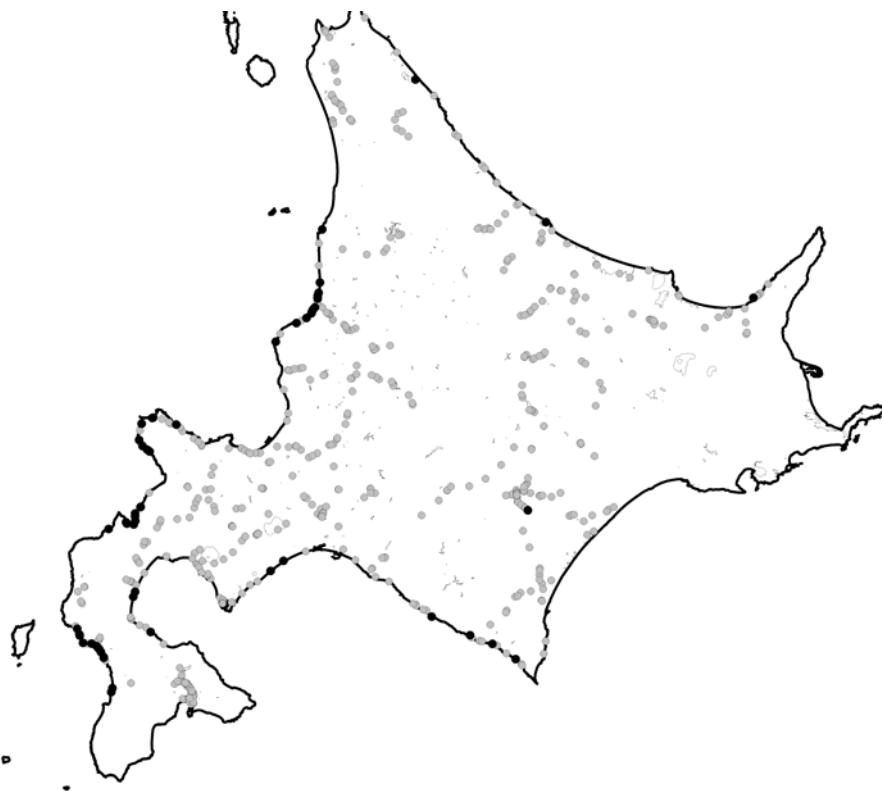


図 2.3.1 外観上塩害を受けたと推定される構造物の分布

(2) コンクリート中の塩分量の海域による特徴

海岸線に位置するコンクリート構造物は飛来塩分の影響を受けるため、コンクリート中に浸透した全塩化物イオン濃度に着目し、海岸線からの距離、供用年数をパラメーターとして海域の違いによる特徴について検討した。

コンクリート中の塩分量は過年度の各種調査結果を使用している。対象は調査数量が多く、水セメント比のばらつきが上部工に比べて小さいと想定される橋梁下部工としている。中性化試験による中性化深さが極端に小さいか大きいものについては、水セメント比が過小か過大の可能性があり、異常値としてデータから除外している。有効なデータとして採用した測定位置は表 2.3.2 の●印の通りである。

塩分量の着目深さは、コンクリート表面付近の中性化や凍害の影響を強く受けていると考えられる表面付近を除外した深い位置とすること、また測定塩分量が定量下限値とならない程度の値を有することを考慮し、50mm のかぶり位置とした。

地域区分については、冬季の季節風や海域の違いが飛来塩分に影響を与えると考えられることから、日本海、太平洋、オホーツク海の3つの地域に分類した。また、太平洋については津軽海峡エリアを太平洋Ⅱとしてた場合にも検討した。また、海岸線からの距離については、飛沫の影響が大きいと予想される海岸線から20m までの汀線付近と、飛来塩分の影響が大きくなると予想される20m から700m までの2種類とした。

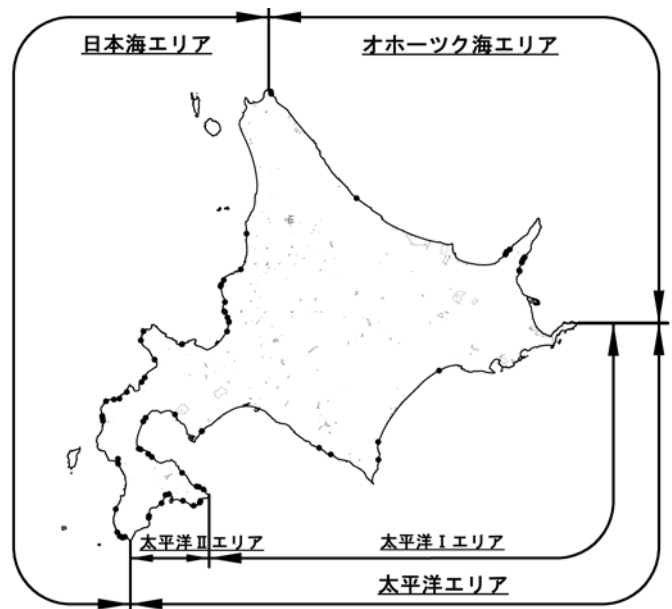


図 2.3.2 コンクリート中の塩分量を調査した橋梁の位置図

海域毎の海岸線からの距離に応じて、下部工 50mm かぶり位置の塩化物イオン濃度と経過年数の関係を図 2.3.3～図 2.3.5 に示す。この結果、以下の傾向が伺える。

- ① 汀線付近では、コンクリート中の塩化物イオン濃度 (図 2.3.3) は、日本海 > 太平洋 > オホーツクの順に減少する傾向にある。特に、日本海岸が他の海域の2倍以上高い塩分量となっており、25年経過時点で 4kg/m^3 を超過する高いレベルである。
- ② 汀線から遠い距離のコンクリート中の塩化物イオン濃度 (図 2.3.4) も汀線付近と同様に、日本海 > 太平洋 > オホーツクの順に減少する傾向にある。
- ③ 太平洋岸Ⅰ、Ⅱのコンクリート中の塩化物イオン濃度 (図 2.3.5) は、海岸線からの距離に関係なく太平洋Ⅰ > 太平洋Ⅱの関係にあり、限られたデータ数による評価ではあるが、太平洋Ⅱ地域は太平洋Ⅰ地域に比較して厳しい塩害環境とは言えない結果であった。

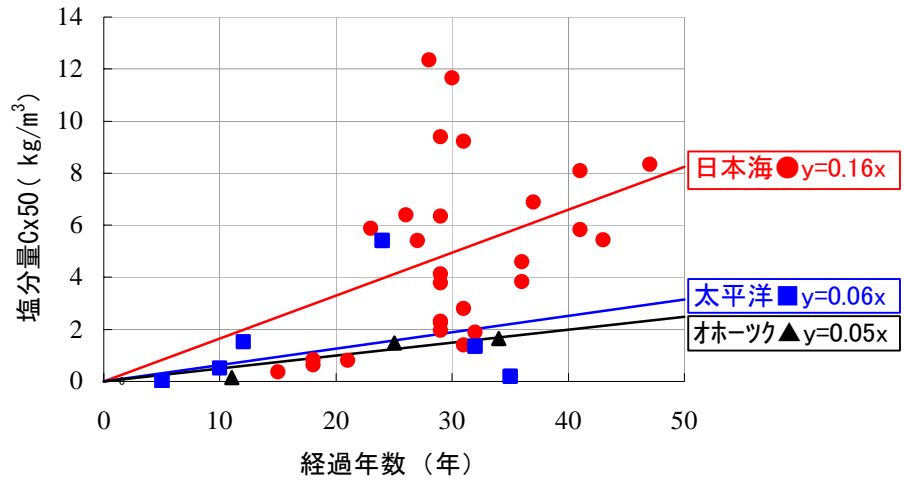


図 2.3.3 50mm 位置塩分量と経過年数との関係(汀線付近: $0 < d < 20$)

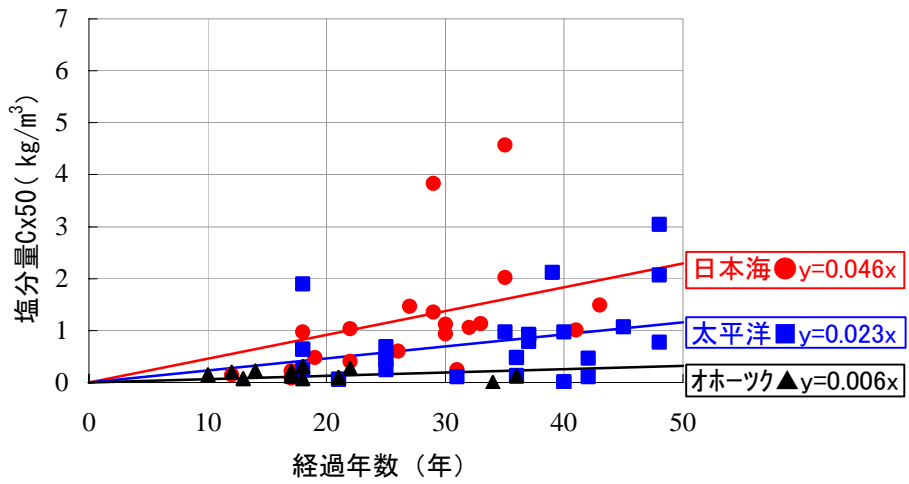


図 2.3.4 50mm 位置塩分量と経過年数(汀線付近外: $20 < d < 700\text{m}$)

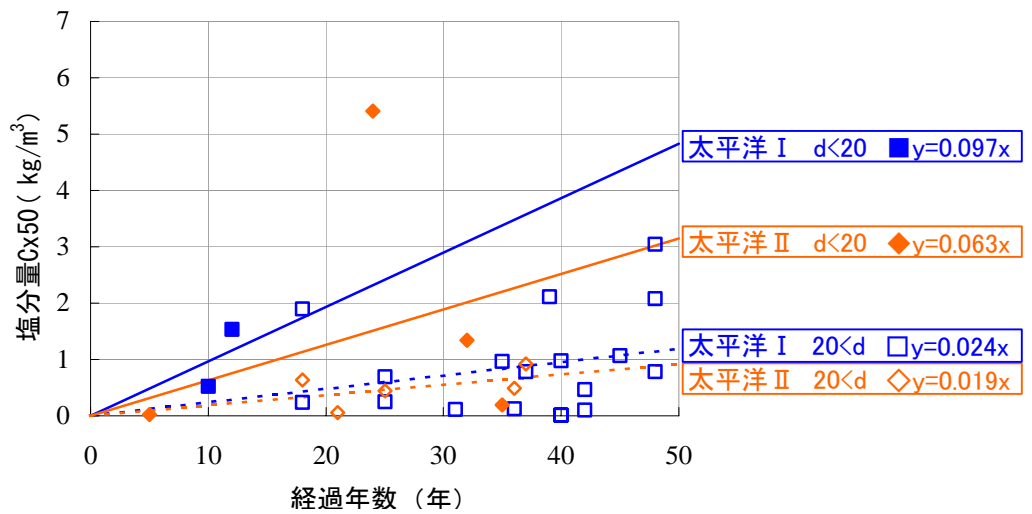


図 2.3.5 太平洋岸の塩分量と経過年数

2.3.2 道路橋にみる凍害劣化の地域的特徴

凍害はコンクリート表面にスケーリング、ひび割れ、ポップアウトなどの損傷として顕在化する。このため、北海道全域の調査である橋梁点検の結果をもとに、外観上凍害を受けたと推定される橋梁を地図上に配置（図 2.3.6）した。調査地点は、平成 17 年度に北海道開発局が実施した橋梁定期点検約 800 橋（●印）であり、主部材（地覆等橋面工、付属物を除く）に生じた外観上の損傷が凍害によるものと推定された橋梁を●印で示した。

図 2.3.6 のコンターおよび○内数字は図 2.2.4 の凍害危険度を表したものであり、凍害危険度毎の凍害発生率（=凍害を受けたと推定した橋梁数/点検橋梁数）を表 2.3.1 に示す。この結果、凍害危険度の高い地域に位置する橋梁は、凍害による損傷が顕在化している可能性が高いことが認められた。

表 2.3.1 凍害危険度と道路橋の損傷との関係

凍害危険度	凍害の予想程度	点検橋梁数 (A)	凍害を受けたと推定した橋梁数 (B)	B/A (%)
⑤	極めて大きい	100	63	63
④	大きい	139	52	37
③	やや大きい	135	42	31
②	軽微	179	66	37
①	極軽微	62	12	19

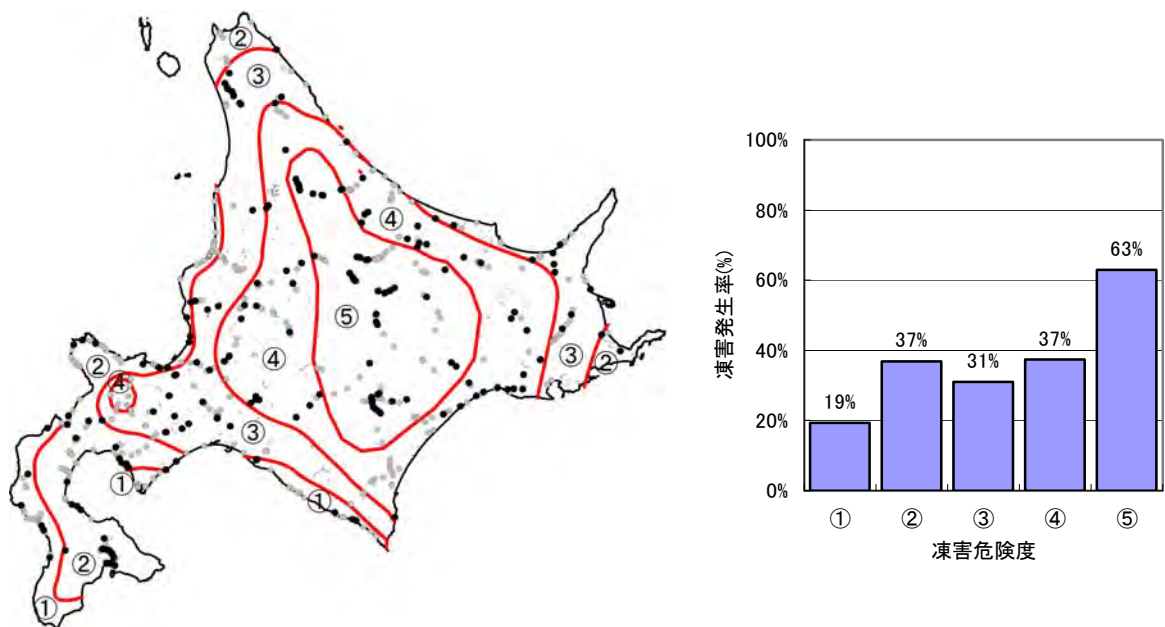


図 2.3.6 凍害危険度と凍害発生率

2.3.3 内陸部における凍結防止剤の影響による凍害、
塩害劣化の特徴

北海道のコンクリート構造物は、冬期間は厳しい凍結融解環境下にある。そこで近年、冬期路面管理のために塩化物系の凍結防止剤（以下；凍結防止剤）が散布されている。このため、内陸部における塩害、凍害の現状の把握を行った。

ここでは、北海道内陸部において凍結防止剤が散布される地域の一部のコンクリート橋（一般国道 170 橋、高規格道路 13 橋）の地覆（壁高欄部）を調査の対象とした。外観目視による塩害環境下の凍害劣化の判定は、ASTM-C672 の室内試験における目視判定法を用い、表 2.3.2 の通り判定した。また、塩害劣化の判定は、旧建設省総プロの塩害損傷度判定基準を参考とし、劣化初期の判定を細分化した表 2.3.3 の通り判定した。²⁸⁾

①凍害劣化の特徴

図 2.3.7 は、路面凍結防止剤と凍害劣化度の関係を示しているが、ばらつきが大きいものの散布量が多いほど凍害劣化度が大きくなる傾向を示している。このことは、塩化物イオンと凍結融解の複合作用による凍害劣化が促進されることも考えられることから継続的な調査が必要である。

②塩害劣化の特徴

図 2.3.8 は路面凍結防止剤と塩害劣化度の関係を示しているが、塩害は、現時点では劣化度 0, 1 が多く、外観上は大きな劣化は見られない。今後、コンクリート中に塩化物イオンが浸透し潜伏期から進展期に移行した橋梁が増加すると、塩害が発生することも考えられるので継続的な調査が必要である。

表 2.3.2 塩害環境下の凍害劣化度判定例

点	表面の劣化状況
0	剥離なし
1	粗骨材の露出なし、 深さ3mm以下の剥離
2	評価1と評価3の中間程度の剥離
3	粗骨材がいくつか露出する程度の剥離
4	評価3と評価5の中間程度の剥離
5	粗骨材が全面露出する程の激しい剥離

表 2.3.3 塩害劣化度判定例

点	外観の劣化状況
0	被害無し
1	コンクリート表面に特にかぶりの 小さい仮設材などの点錆が見られる
2	錆汁による汚れ
3	コンクリート表面の一部に 腐食ひび割れが見られる
4	コンクリート表面に多数の 腐食ひび割れが見られる
5	コンクリートの剥離、剥落

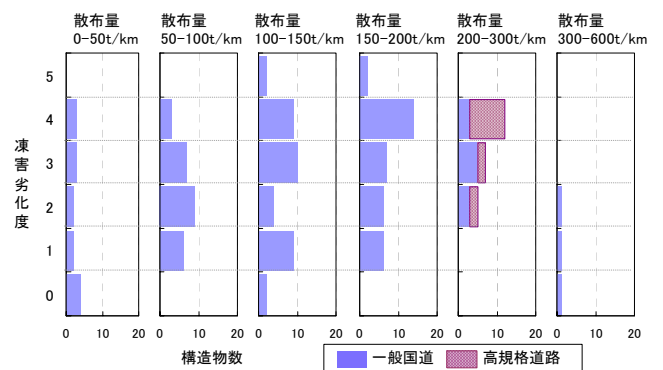


図 2.3.7 散布量と地覆車道面の凍害劣化度

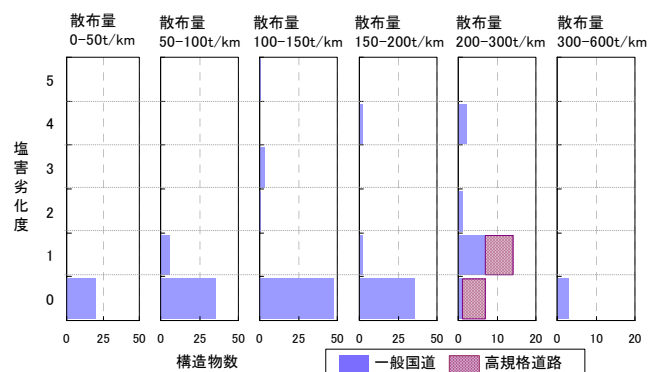


図 2.3.8 散布量と地覆車道面の塩害劣化度

図 2.3.9 は高規格道路のある橋梁において、コアによる塩分浸透量調査を実施し、その表面塩化物イオン濃度を整理したものである。路面に散布された凍結防止剤は地覆車道面①に多く付着し、橋台側面②、③は比較的付着が少ない。また、橋座部付近の④、⑤は伸縮装置から橋座部へ凍結防止剤を含んだ水が流れだした部位のため塩化物イオン濃度が多い傾向を示している。

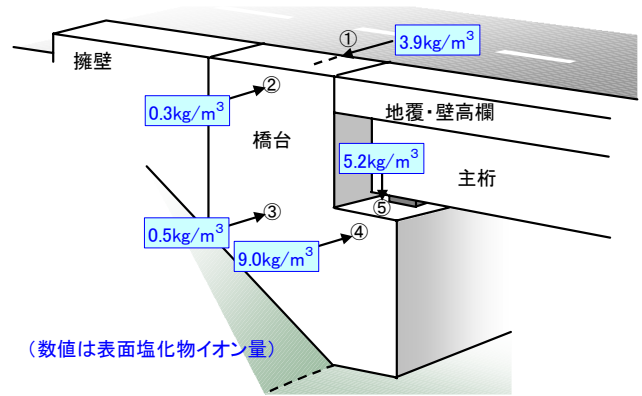


図 2.3.9 下部工の表面塩化物イオン濃度分布例

参考文献

- 1 土木学会：コンクリート標準示方書 [維持管理編]，2001. 1
- 2 日本コンクリート工学協会：複合劣化コンクリート構造物の評価と維持管理計画研究委員会報告書，2001. 5
- 3 ピーターH・エドモンズ：イラストで見るコンクリート構造物の維持と補修，鹿島出版会
- 4 日本コンクリート工学協会：コンクリート診断技術'03
- 5 日本コンクリート工学協会：アルカリ骨材反応調査研究委員会報告書，1989. 7
- 6 土木学会：コンクリートライブラリー104，2001 制定コンクリート標準示方書[維持管理編]制定資料，2001. 1
- 7 土木研究所，日本構造物診断技術協会：非破壊試験を用いた土木コンクリート構造物の健全度診断マニュアル，2004
- 8 日本コンクリート工学協会：複合劣化コンクリート構造物の評価と維持管理計画研究委員会報告，2001. 5
- 9 三浦尚：融雪剤による鉄筋コンクリート構造物の劣化，コンクリート工学 Vol. 38, No. 6, 2000. 6
- 10 北海道土木技術会鋼道路橋研究委員会：北海道における鋼道路橋の設計および施工指針，1995. 12
- 11 日本コンクリート工学協会：コンクリートのひび割れ調査，補修・補強指針-2003-，2003. 6
- 12 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅲコンクリート橋編，2002. 3
- 13 北海道土木技術会鋼道路橋研究委員会：北海道における耐候性鋼材裸使用の道路橋の設計及び施工指針，1981. 7
- 14 北海道電力技術研究所：研究報告第 284 号，電力施設の塩雪害対策に関する研究 中間報告(2) 一塩分付着量マップー，1981. 3
- 15 北海道開発局港湾部港湾建設課，寒地港湾技術研究センター：海洋環境下におけるコンクリートの耐久性向上技術検討業務報告書，2003. 3
- 16 北海道開発局建設部道路維持課監修：冬の国道防雪対策
- 17 長谷川寿夫：コンクリートの凍害危険度算出と水セメント比限界値の提案，セメント技術年報XXIX，1975
- 18 開発土木研究所交通研究室：凍結防止剤の基礎知識，1994. 11
- 19 田口史雄，小尾稔，遠藤裕丈：コンクリートの凍害および塩害による複合劣化に関する調査，第 28 回コンクリート工学年次大会，2006. 7 (投稿中)
- 20 林正道：北海道地方に産する骨材の分布と品質，セメントコンクリートNo. 129
- 21 岡村武：北海道産骨材の品質について，第 3 回北海道開発局技術研究発表会，1959
- 22 岡村武：北海道産骨材の品質について (第 2 報)，第 4 回北海道開発局技術研究発表会，1960
- 23 今井益隆：骨材問題を考える一地域別骨材事情「札幌地区」，コンクリート工学，Vol. 34, No. 7, 1996. 7
- 24 太田利隆：北海道における骨材品質の現状：セメント・コンクリートNo. 415，1981
- 25 中井俊英：北海道における A S R 反応性骨材の実態について，開発土木研究所月報，No. 425，1988. 10

-
- 26 土木研究センター：建設省総合技術開発プロジェクト，コンクリート耐久性向上技術の開発，アルカリシリカ反応性骨材分布図，1989.5（トレース復元）
- 27 日本コンクリート工学協会：自然環境とコンクリート性能評価に関するシンポジウム委員会報告書，2005.6
- 28 小尾稔，田口史雄，嶋田久俊：路面凍結防止剤の影響を受けるコンクリート橋の凍害，塩害調査，第49回（平成17年度）北海道開発局技術研究発表会，技-19，2006.2

3. コンクリート構造物の点検・試験方法

3.1 点検・調査の考え方

本章は、コンクリート構造物の点検調査を行う際に、調査計画の立案や、調査手法の選定を行う際の参考となることを目的としており、図 3.1.1 に示す初期点検と通常点検について解説する。尚、点検における外観上の損傷の特徴については「2. コンクリート劣化の現状分析」の各劣化の項を参照のこと。

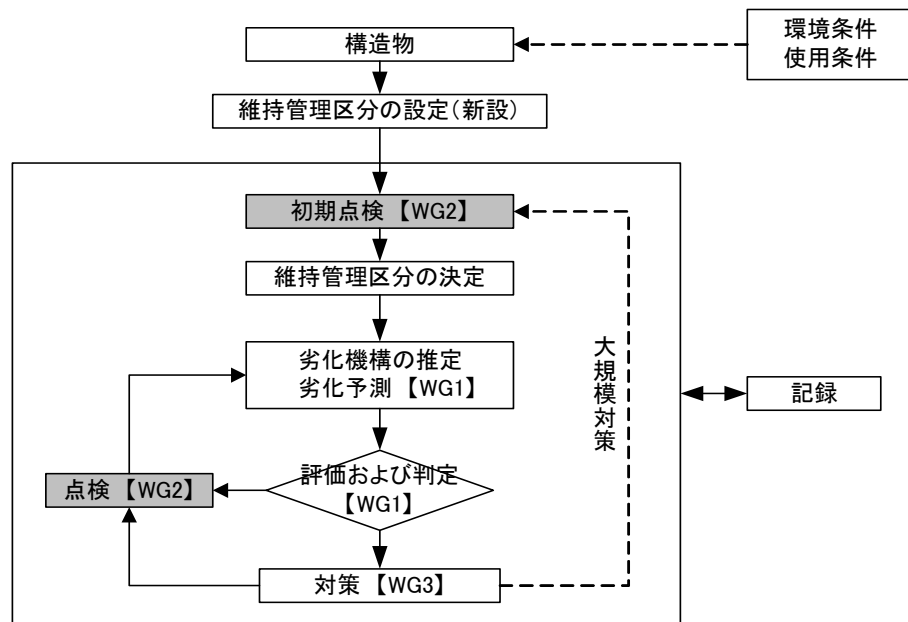


図 3.1.1 維持管理の手順

コンクリート構造物を適切に維持管理するためには、日常的な点検が不可欠である。また、劣化が認められた場合、これまでは劣化原因や状況に関わらず画一的な補修が行われていた傾向があるが、補修対策等を立案するにあたっては、劣化原因や劣化の進行程度を把握する必要があり、そのため必要に応じ詳細調査を行う必要がある。

コンクリート構造物の点検・試験方法としては、現地にて行う方法と、現地で採取した試料について試験室にて試験・分析する方法に大別される。いずれの分野においても新しい手法や調査機器の開発が行われている。特に、点検業務については、昨今のコンクリート剥落事故の影響により、最近では現地にて効率良く点検作業ができる手法の開発に力が入れられており、大手鉄道会社を中心に検査車なども開発されている。

3.2 調査計画

3.2.1 調査手順

コンクリートの点検・試験方法の基本的な流れを図 3.2.1 に示す。点検・試験を実施するに当たっては調査目的を確認し、その目的を達成するために必要な情報を整理することから始める。この情報を得るためには、事前調査、現地調査、試験体試験の中から必要な項目について実施する必要がある。本手引き（案）では、試験項目ごとに得られる情報、特徴、方法、破壊程度、普及・一般性、簡便さ・熟練度および作業効率等についても判断できるように示してある。また、試験方法ごとに詳細な試験方法や判断基準も示してあるので、後述する内容を参照してほしい。

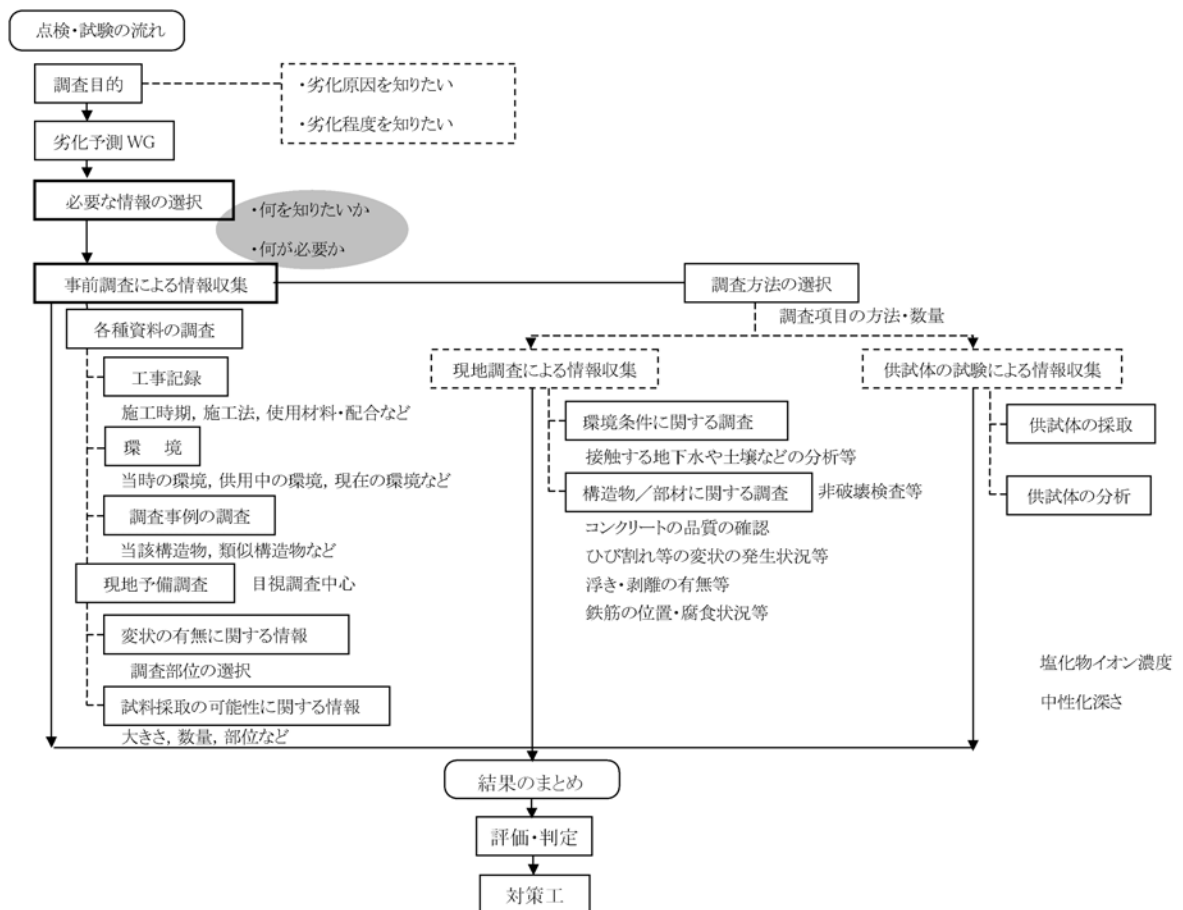


図 3.2.1 点検・試験の流れ

3.2.2 調査目的

構造物を点検・試験するに当たっては、調査目的を明確にする必要がある。たとえば、構造物の劣化原因や程度などを知りたい場合、今後の劣化予測を行いたい場合、補修、補強などの対策工を選定したい場合などがあり、目的によって調査項目、数量等が異なってくる。しかし、これらの目的はすべて関連があるため、基本的な調査方法に大きな違いはないが、より詳細なデータを必要とする劣化予測とか、広い範囲のデータを必要とする対策方法の選定など、目的によって具体的な方法が異なるのは当然である。

3.2.3 必要な情報

点検・試験の項目を選定するためには、調査目的によって必要な情報を整理する必要がある。必要な情報とは、言い換えれば目的を達成するための調査項目のことであるため、手順を追って調査項目を選定することが大切である。表 3.2.1 に調査項目の選定例を示すが、この表は、現在の状況を知るだけでよいのか、施工時の情報が必要ないかなどを検討したものである。それぞれの調査項目は、さらに詳しい項目が必要になるため、調査項目と細目の例を表 3.2.2 に示す。

表 3.2.1 調査項目の選定例

調査目的	調査項目					
	設計仕様	使用材料	施工法	環境条件	供用条件	品質
現状の把握		○		○	○	◎
劣化予測	○	○	○	◎	◎	◎
対策法の検討	◎	○		○	○	◎

*：◎：重要な項目，○：基本的な選定項目

表 3.2.2 調査項目と細目

	調査項目					
	設計	使用材料	施工法	環境条件	供用条件	品質
調査細目	コンクリートの配合 鉄筋かぶり 鉄筋量	種類 産地	打込み方法 養生方法 養生時間	気温 日射 降水量 海岸地域 寒冷地域 温泉地域	荷重条件 供用期間 接触物質 凍結防止剤	物性 表面状況 鉄筋かぶり

また、環境条件、供用条件などの外的要因から表 3.2.3 に示すようにある程度の劣化機構が推定でき、調査項目を絞り込むことができる。さらに、劣化機構が特定できれば、表 3.2.4 に示すように、その劣化機構による劣化程度の判断基準になる劣化要因や劣化指標が明確になるため、調査項目は相当絞り込むことが可能である。

表 3.2.3 外的要因によって推定される劣化機構¹⁾

外的要因		推定される劣化機構
環境条件	海岸地域	塩害
	寒冷地域	凍害、塩害
	温泉地域	化学的侵食
供用条件	乾湿繰り返し	アルカリ骨材反応、塩害、凍害
	凍結防止剤の使用	塩害、凍害、アルカリ骨材反応
	繰り返し荷重	疲労
	二酸化炭素	中性化
	酸性水	化学的侵食

表 3.2.4 劣化機構と劣化指標¹⁾

劣化機構	劣化要因	劣化指標
中性化	二酸化炭素	中性化深さ 鉄筋かぶり 鋼材腐食量
塩害	塩化物イオン濃度	塩化物イオン濃度 鉄筋かぶり 鋼材腐食量
凍害	凍結融解回数	凍害深さ 鋼材腐食量 凍結融解回数
化学的侵食	酸性物質 硫酸イオン	劣化因子の浸透深さ 中性化深さ 鋼材腐食量
アルカリ骨材反応	反応性骨材 アルカリ量	反応性骨材の有無 アルカリ量 膨張量
疲労	大型車通行量 繰り返し荷重	ひび割れ密度 ひび割れパターン たわみ

3.3 コンクリート構造物の各種調査方法

コンクリート維持管理における点検および試験を行うにあたり実施すべき事前調査には設計、工事履歴、環境、類似構造物変状例の調査を目的とする各種資料調査および変状の有無、点検調査および試験方法の選択、破壊試験における試料採取の可能性について目視調査を中心に行われる現地予備調査がある。

3.3.1 各種資料の調査

各種資料調査における調査項目および調査内容を以下に示す。

(1) 設計図書資料調査

対象コンクリート構造物の設計図書資料を収集し設計書における設計荷重、コンクリート設計基準強度の調査を行いその後の荷重変遷と対比し設計荷重増が劣化原因に成り得るかを把握する。また設計図における鉄筋被り、鉄筋配置および鉄筋加工を調査しコンクリートの耐久性に影響を及ぼすか否かを把握する。

(2) 工事履歴の調査

工事履歴の調査には対象コンクリート構造物の初期工事記録、補修工事記録等をもって履歴を調査し劣化原因および劣化進行を把握する。

a. 初期工事記録

初期工事における施工時期、施工法、コンクリート使用材料および配合等から施工がコンクリート構造物の劣化原因に成り得るかを把握する。

b. 補修工事記録

補修工事における補修箇所および補修工法から対象コンクリート構造物の劣化部位の特定および劣化原因の把握、推定を行う。

(3) 環境の調査

環境調査には対象コンクリート構造物がおかれた地理環境調査（海岸部、山間部、市街地、温泉地域）、気候環境調査（年、月、日気温変動および日照時間、日照方向性または雨量、湿度）または大気環境の調査を行うとともに、環境の経年変化をも調査し劣化機構（中性化、塩害、凍害、化学的侵食等）の外的要因となる環境条件にあるかどうかを把握する。

(4) 類似構造物変状例調査

対象コンクリート構造物の類似構造物における変状例を調査し変状要因が当該構造物に含まれているかどうかを把握する。共通の変状要因がある場合、将来変状の可能性を示唆するものとする。

3.3.2 現地予備調査

現地予備調査における調査項目および調査内容を以下に示す。

(1) 変状の有無調査

目視調査により当該コンクリート構造物の全体劣化状態および変状の有無を把握すると共に変状部位の特定から変状原因を推定し点検調査方法および試験方法を選択する。

(2) 試料採取の可能性調査

目視調査において試験方法は破壊試験が妥当と判断した場合，試料採取（大きさ，数量，部位）の可能性についても同時に調査を行う。

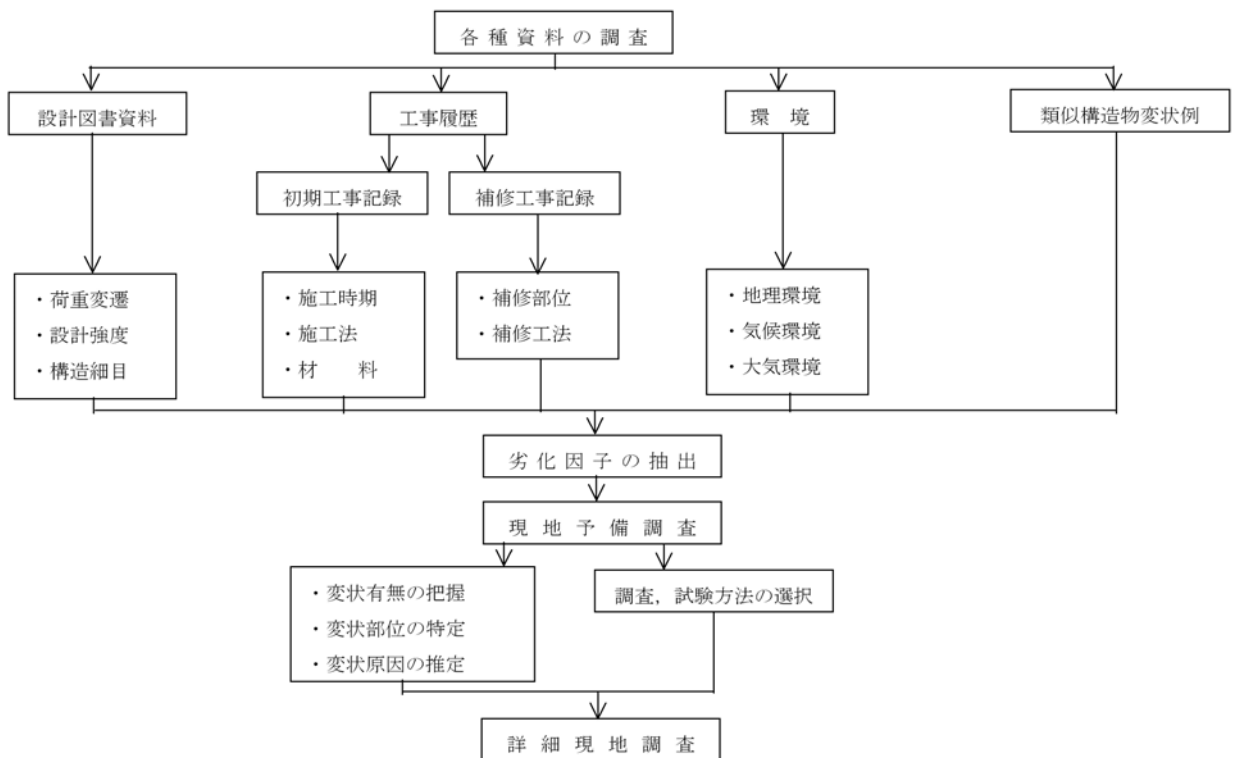


図 3.3.1 調査計画フロー

3.3.3 劣化種類と調査項目

構造物が置かれている環境と劣化現象の間には密接な関係がある。構造物の劣化状態の調査と併せて、劣化環境の調査を行う必要がある。

特に、北海道の構造物で多く見られる塩害や凍害について環境要因の影響が大きいと言える。表 3.3.1 に劣化機構と環境要因の関係を示す。既存の気象データ等により入手できる資料が多いので、調査にあたって収集することを心がけたい。

表 3.3.1 各種機構に及ぼす環境要因に関する調査項目

劣化機構	気象条件	土壌条件	供給塩化物量	環境と構造物の接触状況
中性化	1.気温 2.湿度 3.降雨頻度 4.日射量			
塩害	1.温度(気温) 2.湿度 3.降雨量 4.降雨頻度 5.日射量		1.海水接触 2.飛来塩分量 3.凍結防止剤	
凍害	1.最低気温 2.日射量 3.凍結融解回数			1.水分の供給量
化学的侵食	1.温度(気温)	1.土壌のpH 2.含有成分		1.接触溶液・ガスの種類
アルカリ骨材反応	1.温度 2.湿度 3.日射量	1.水の供給 2.アルカリの供給	1.凍結防止剤	1.雨がかりの状況 2.アルカリの供給
測定方法	1.気象庁の観測データを利用 2.現地計測	1.設計資料により確認 2.現地調査	1.現地での観察・調査が基本	1.現地での観察・調査が基本

表 3.3.2 は劣化機構と、環境条件、構造物の初期条件、劣化現象に関わる要因、劣化程度の評価項目の関係であり、診断、対策立案等を念頭に置いた上で、調査項目を選定する必要がある。

表 3.3.2 劣化機構と調査項目・評価項目

劣化の種類		中性化	塩害	凍害	化学的侵食	アルカリ骨材反応	疲労
調査項目	環境条件	気象条件(気温、湿度、降雨頻度、日射量) 雨掛かりの状況 CO ₂ 濃度	海水および飛来塩分の影響(海岸からの距離、季節風の向き) 凍結防止剤の影響 気象条件(気温、湿度、降雨頻度、日射量)	気象条件(気温、降水量、日射量) 水の供給条件 凍結融解回数 最低温度	コンクリートが接する液体の種類 温度、湿度 劣化因子を含む溶液のpH、濃度 地下水、土壌中の成分	気象条件(気温、湿度、日射量) 雨掛かりの状況 地盤中からの水分供給条件 アルカリの供給条件	荷重条件 大型車の通行量 使用条件(雨水の浸透、凍結防止剤の散布)
	初期条件	水セメント比 混和材の種類と量 かぶり厚 初期欠陥	水セメント比 セメントの種類 混和材の種類と量 初期含有塩化物イオン濃度 かぶり厚 初期欠陥	骨材の品質 水セメント比 空気量、気泡間隔係数 かぶり厚 コンクリートの飽水度(含水比) 初期欠陥	コンクリート保護層の有無と種類 水セメント比 混和材の種類と量 かぶり厚 初期欠陥	骨材の産地 セメントのアルカリ量と単位セメント量	コンクリート強度 コンクリートの品質 床版厚さ 配筋状況、かぶり厚
	劣化現象	中性化深さ ひび割れ状況(幅、深さ、密度) 鋼材の位置と腐食状況 錆汁 変色、エフロッセンス 電気化学的指標(自然電位、分極抵抗など) コンクリート強度、弾性係数 たわみ、変位	塩化物イオン濃度 中性化深さ ひび割れ状況(幅、深さ、密度) 鋼材の位置と腐食状況 錆汁 変色、エフロッセンス 電気化学的指標(自然電位、分極抵抗など) コンクリート強度、弾性係数 たわみ、変位	凍害深さ ひび割れ状況(幅、深さ、密度) スケーリング状況 ポップアウト状況 コンクリート強度、弾性係数 鋼材の位置と腐食状況 たわみ、変位	中性化深さ 劣化因子の浸透深さ ひび割れ状況(幅、深さ、密度) コンクリートの断面欠損深さ 鋼材の位置と腐食状況 錆汁 変色、エフロッセンス 電気化学的指標(自然電位、分極抵抗など) コンクリート強度、弾性係数 たわみ、変位	骨材のアルカリシリカ反応性(化学法、モルタルバー法) 残存膨脹量 ひび割れ(幅、本数、密度) 鋼材の腐食状況 鋼材の降伏および破断の有無 変色、ゲルの滲出 反応リムの有無 コンクリート強度、弾性係数 変位、変形	ひび割れ状況(パターン、深さ、幅、角欠けの有無) ひび割れの挙動、段差 不良音 下面への漏水 路面の亀裂、陥没 たわみ 異常振動の有無
評価項目	中性化の進行程度、速度 鋼材の腐食グレード、腐食量 美観 コンクリートの強度、剛性 部材の剛性、耐荷力	塩化物イオン濃度の深さ方向の分布 中性化の進行程度、速度 鋼材の腐食グレード、腐食量 美観 コンクリートの強度、剛性 部材の剛性、耐荷力	凍害進行速度 美観 骨材の品質 コンクリートの品質 コンクリート強度、剛性 鋼材の腐食グレード、腐食量 部材の剛性、耐荷力	劣化因子の浸透速度 中性化速度 鋼材の腐食グレード、腐食量 部材の剛性、耐荷力 美観	ASR進行速度 美観 鋼材の腐食グレード コンクリート強度、剛性 部材の剛性、耐荷力	疲労の進行度 コンクリートの一体性 剥落危険性の有無 鋼材の腐食グレード 剛性、耐荷力	

表 3.3.3 に各劣化現象の調査において、適用される頻度が多い調査方法を示した。実際には調査前の段階で劣化現象の種類を特定できないことも多いが、構造物が置かれている環境条件や使用条件から判断して、調査内容や方法を絞り込む。

また、表 3.3.4 に判定・評価方法、基準値を示す。なお、各試験法の詳細については、「参考 1 コンクリート構造物の点検試験方法詳細」を参照されたい。

表 3.3.3 劣化原因に応じた調査方法¹⁾ (脚注出典に加筆)

	調査方法	測定・試験方法	設計仕様 の調査*1	施工欠陥 の調査	劣化原因、程度の調査						
					全体的な 変状	中性化	塩害	凍害	化学的 侵食	アルカリ 骨材反応	疲労
全体的な 状況調査	変状把握	目視、双眼鏡、デジタルカメラ			◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
		レーザ計測			◎	○	○			○	○
	変位測定(モニタリング)	光ファイバーによる測定			◎						
力学的調査	載荷試験(静的)	載荷時のひずみ測定				○	○	○	○	○	◎
		載荷時の変位測定・剛性評価					○	○	○	○	◎
		ひび割れ発生等の確認					○	○			○
	載荷試験(動的)	固有振動数、振動モード、剛性評価				○	○			○	◎
AE法	破壊進行部の特定									○	
非破壊調査	電気化学的方法	自然電位法				◎	◎	○	○	○	
		分極抵抗法				◎	◎	○	○	○	
	超音波法	ひび割れ深さ測定		◎				○		○	○
		内部欠陥調査		◎							
		部材厚測定	◎	◎							
	衝撃弾性波法	内部欠陥調査		◎							
		部材厚測定	◎	◎							
	レーダー法	鋼材配置測定	◎	◎		◎	◎				
		空隙調査		○							
	電磁誘導法	鋼材配置測定、径の測定	◎	◎		◎	◎				
電気抵抗を利用する方法	含水率測定						○		○		
打音法	打撃音、波形解析				○	○	◎	◎	◎	○	
反発硬度法	シュミットハンマー法	○	○		○	○	◎	◎	◎	○	
赤外線法	表層浮き、内部空隙調査		◎		○	○	○	○		○	
破壊調査	はつり試験	中性化深さ測定				◎	◎		○		
		鋼材の腐食状況観察				◎	◎	○	○	○	○
		かぶり厚測定	◎	◎		◎	◎	○	○	○	○
採取試料 による測定・分析	採取した鋼材による試験	鋼材の引張り強度試験	◎	○							
		採取したコアによる試験	中性化深さ測定				◎	◎		○	
	外観調査、ひび割れ深さ測定など		◎		○	○	◎	◎	◎	◎	
	圧縮強度、引張り強度、静弾性係数測定	◎	◎				○	◎	◎		
	配合分析	◎	◎			○	○	○	○		
	塩化物含有量						◎	○		○	
	骨材の反応性分析								◎		
	膨張量測定								◎		
	気泡間隔係数測定							◎			
	細孔径分布測定					○	○	◎	○		
	空気量測定							◎			
	凍結融解試験							◎			
	透水性試験					○	○	○	○		
	コンクリートの化学組成	熱分析(TG、TDA)					◎			◎	
X線回折									◎		
元素分析(EPMA)						○	○		◎	○	
走査型電子顕微鏡(SEM)観察									○	○	

*1 設計図面がない場合などに実施

◎：構造物の状況や劣化程度に関わらず重要なデータが得られる。

○：構造物の状況や劣化程度によっては重要なデータが得られる。

表 3.3.4 各試験方法の判定・評価方法，基準

	調査方法	測定・試験方法	判定・評価方法，基準	詳細参照頁
全体的な状況調査	変状把握	目視，双眼鏡，デジタルカメラ	ひび割れ幅，ひび割れ密度，その他の異常	参1-18~22
		レーザー計測	ひび割れ幅，ひび割れ密度	参1-23
	変位測定(モニタリング)	光ファイバーによる測定	ひずみ量，変位	参1-26
力学的調査	載荷試験(静的)	載荷時のひずみ測定	設計によるひずみ，変位との比較	
		載荷時の変位測定・剛性評価	初期値または既存測定値からの変化の有無(過去に測定を行っている場合)	
		ひび割れ発生等の確認	ひび割れ発生時の荷重，応力度による判断	
	載荷試験(動的)	固有振動数，振動モード，剛性評価	設計による振動特性との比較 初期値または既存測定値からの変化の有無(過去に測定を行っている場合)	参1-25
AE法	破壊進行部の特定	ひび割れ発生位置	参1-27	
非破壊調査	電気化学的方法	自然電位法	電位差の大きさにより，腐食確率を判定(ASTM C 876) ※腐食速度の大きさを示すものであり，腐食度ではないことに注意	参1-46
		分極抵抗法	規格化された評価基準はない 二重構造リング状電極による腐食速度測定値規準として，CEB(ヨーロッパコンクリート委員会)の判定基準がある。	参1-47
	超音波法	ひび割れ深さ測定	かぶり厚との関係，貫通or非貫通の判定	参1-31
		内部欠陥調査	超音波伝播速度，周波数スペクトル	参1-35
		部材厚測定	設計厚との比較	
	衝撃弾性波法	内部欠陥調査	弾性波伝播時間の分布	参1-39
		部材厚測定	弾性波伝播時間	参1-39
	レーザー法	鋼材配置測定	鉄筋の設計間隔および設計かぶりとの比較	参1-43
		空隙調査	空隙による異常な反射波形の有無により判定	参1-40
	電磁誘導法	鋼材配置測定，径の測定	設計による鉄筋径・間隔および設計かぶりとの比較	参1-42
	電気抵抗を利用する方法	含水率測定	飽水時の含水率に対する比により評価	
	打音法	打撃音，波形解析	健全部との比較	参1-39
	反発硬度法	シュミットハンマー法	圧縮強度推定式(日本材料学会式など)と設計強度との関係 劣化部と健全部の反発硬度の比較	参1-33
	赤外線法	表層浮き，内部空隙調査	健全部と異常部の表面温度差	参1-24
破壊調査	はつり試験	中性化深さ測定	中性化残りによる腐食危険度評価，中性化速度による余寿命推定	参1-32
		鋼材の腐食状況観察	鉄筋腐食グレード	参1-45
		かぶり厚測定	設計かぶりとの比較	参1-32
採取試料による測定分析	採取した鋼材による試験	鋼材の引張り強度試験	規格強度，伸びとの比較	参1-72
	採取したコアによる試験	中性化深さ測定	中性化残りによる腐食危険度評価，中性化速度による余寿命推定	参1-64~66
		外観調査，ひび割れ深さ測定など	かぶり厚との関係，深部のひび割れ幅，貫通or非貫通の判定	参1-29
		圧縮強度，引張り強度，静弾性係数測定	設計基準強度との比較	参1-50, 51
		配合分析	W/Cの大きさ，配合設計による値との差	参1-57~60
		塩化物含有量	鉄筋発錆限界(1.2kg/m ³ とすることが多い)との比較 深さ方向の濃度分布から将来予測	参1-67~69
		骨材の反応性分析	溶解シリカ量とアルカリ濃度減少量により，有害と無害を判定	参1-74~77
		膨張量測定	阪神高速同目公団:0.1%超で有害 建設省層プロ:0.05%超で有害または潜在的有害	参1-70
		気泡間隔係数測定	200~250μm以下は耐凍害性に優れる	参1-53
		細孔径分布測定	細孔径分布状況による判断	参1-55
		空気量測定	JIS A 5308 :4.5±1.5%	参1-53
	凍結融解試験	JISA1148(A法)で，相対動弾性係数60~85%以上 相対動弾性係数の最少限界値は気象条件と構造物の露出状態により異なる		
	透水性試験		参1-61, 62	
	コンクリートの化学組成	熱分析(TG, TDA)	昇温時の重量減少により判定	参1-65
		X線回析	対象とする元素，化合物の有無，量により判定	参1-69
元素分析(EPMA)		対象とする元素量，分布により判定	参1-66	
走査型電子顕微鏡(SEM)観察		アルカリシリカゲル，エトリンガイト等の有無確認	参1-78	

比較的使用頻度の高い試験項目について、(独) 土木研究所、日本構造物診断技術協会「非破壊試験を用いた土木コンクリート構造物の健全度診断マニュアル」の評価基準を示す。

塩化物イオン量と塩害による鋼材の腐食可能性の評価

全塩化物イオン量 (kg/m ³)	塩害による鉄筋腐食の可能性
2.5以上	腐食が生じる
1.2以上、2.5未満	将来的に塩害による腐食が生じる可能性が高い
0.3を超えて、1.2未満	何らかの原因でコンクリート中の塩化物イオン濃度が高いが、腐食が生じる可能性は低い
0.3以下	現時点では、塩害による腐食が生じる恐れはない

中性化残りと中性化による鋼材の腐食可能性の評価

中性化残り (mm)	中性化による鉄筋腐食の可能性
0未満	腐食が生じる
0以上、10未満	場合によっては中性化による腐食が生じる可能性がある
10以上、30未満	将来的には中性化による腐食が生じる可能性がある
30以上	当面の間は中性化による腐食が生じるおそれはない

註) 鉄筋のかぶり厚は調査位置での測定値とする。但し不明な場合は設計図書に示された値を用いても良い

膨張量試験結果とアルカリ骨材反応の評価

試験項目	アルカリ骨材反応の評価
膨張量試験	採取コアの促進膨張試験の結果、全膨張ひずみ量が試験材齢3ヶ月の時点で0.05% (500×10 ⁻⁶)を超えた場合、試験したコンクリートにアルカリ骨材反応による膨張が生じるおそれがあると判断する。

アルカリ骨材反応関連試験と試験結果の評価

試験項目	アルカリ骨材反応の評価
岩種判定	偏光顕微鏡観察の結果、有害鉱物を含む岩種の存在が認められた場合は、アルカリ骨材反応を生じる可能性があるものと判定する。但し、有害鉱物を含む岩種の量が数%に過ぎない場合は、アルカリ骨材反応が変状の主原因であるとは断定できない。
アルカリ含有量分析	採取コアのアルカリ金属イオン含有量試験の結果、当該コンクリート中のアルカリ金属イオン量が3.0kg/m ³ 以上であれば、アルカリ骨材反応が生じる可能性があるものと判定する。
シリカゲルの確認	生成した白色物質がアルカリシリカゲルであるか否かの判定をシリカゲル判定表により行い、アルカリ骨材反応による劣化が生じているか否かの判定を行う。このとき、判定精度も記録する。

シリカゲル判定表

判定基準	試料量			
	50mg以上	10～50mg	10mg未満	数mg
SiO ₂ 30%以上	シリカゲルである			判定不可
SiO ₂ 10～30%	シリカゲルの可能性が高い	判定不可	判定不可	判定不可
SiO ₂ 10%未満	シリカゲルの可能性がある	判定不可	判定不可	判定不可
ケイ酸イオンの定性	判定不可	判定不可	判定不可	判定不可
判定精度	高い	やや低い	参考値	参考値

コンクリートコアの圧縮強度の評価

圧縮強度	評価
すべての供試体の圧縮強度が設計基準強度以上である場合	健全である
圧縮強度が設計基準強度を下回っている供試体もあるが、すべての供試体の圧縮強度が設計基準強度の80%以上である場合	構造的に問題はないと判断してよい
圧縮強度が設計基準強度の80%を下回っている供試体がある場合	構造的な検討も必要である

静弾性係数試験結果の評価

静弾性係数	評価
すべての供試体の静弾性係数が下表で示される標準値より大きい場合	健全である*
すべての供試体の静弾性係数が下表で示される標準値の範囲に含まれる場合	健全である
静弾性係数が下表で示される標準値より小さい供試体がある場合	アルカリ骨材反応あるいは凍害が生じている可能性も考えられ、場合によっては構造的な検討も必要である

* 一般的には、静弾性係数の試験結果が標準値より高い場合でも、構造物の健全度には影響ないと考えられる。しかし、圧縮強度および静弾性係数の試験方法に問題がなかったかを確認することが望ましい。

静弾性係数の標準値

コアの圧縮強度(N/mm ²)	コアの静弾性係数の標準値 (kN/mm ²)
15以上21未満	8.4～17.8
21以上27未満	13.1～21.3
27以上35未満	16.2～25.8
35以上45未満	19.7～29.8
45以上55未満	19.1～34.2

自然電位測定結果の判定

◇非破壊試験を用いた土木コンクリート構造物の健全度診断マニュアル

自然電位 E(mV:CSE)	鋼材の腐食しやすさ
-350 ≥ E	大
-250 ≥ E > -350	やや大
-150 ≥ E > -250	軽微
E > -150	なし

◇ASTM、BS

自然電位 E(mV:CSE)	腐食確率	
	ASTM	BS
-350 ≥ E	90%以上の確率で腐食あり	90%以上の確率で腐食あり
-200 ≥ E > -350	不確定	50%
E > -200	90%以上の確率で腐食なし	5%以下の確率で腐食あり

3.4 凍害の調査方法

3.4.1 凍害の調査

中性化については「中性化深さ」、塩害については「塩化物イオン濃度」といった評価指標があるが、凍害については「凍害深さ」が対応する。しかしながら、凍害深さの調査法は確立されているとは言いがたく、図 3.4.1 に示すコンクリートの初期品質、構造物の設置環境を考慮しつつ、点検を主体として劣化程度や進行性を評価せざるを得ない現状にある。

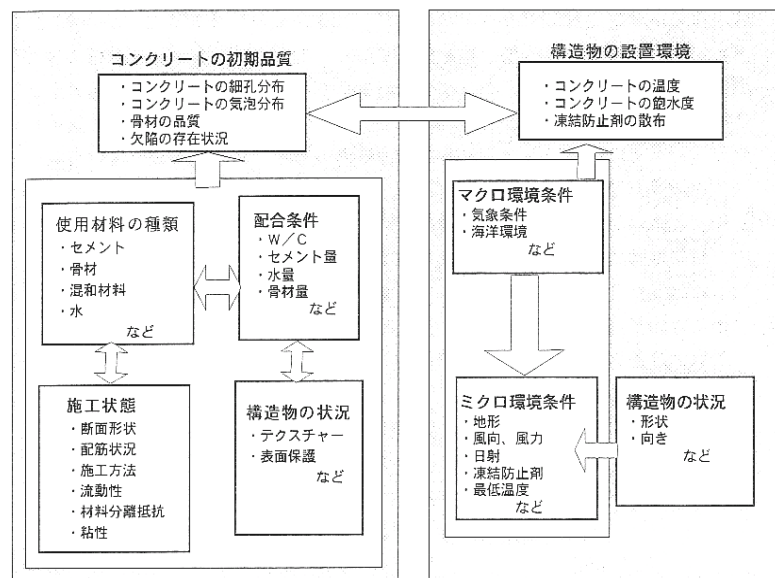


図 3.4.1 凍害環境下におけるコンクリート構造物の耐久性に影響する要因

凍害の調査は、次の3つの内容に分類できる。

- ①凍害環境の調査
- ②コンクリートの耐凍害性に関する試験・分析
- ③凍害による損傷程度の調査

凍害に関係する調査・分析項目を表 3.4.1 に挙げる。

表 3.4.1 凍害の調査方法

目的	調査・分析項目	方法
(1) 凍害環境の調査	① 気象条件に関する資料調査	気象台データ等
	② 水分供給、日射条件の調査	水掛かり、日射条件、積雪条件
	③ 含水状態の測定	高周波水分計による含水率測定 サーモカメラによる表面温度測定
(2) 凍害による損傷程度の調査	① 目視による外観調査	ひび割れ、スケーリング等の劣化を観察
	② 打診調査	テストハンマにより浮き、表面脆弱化範囲を把握
	③ コンクリート強度性状	シュミットハンマによる表面反発硬度(健全部と比較)
		採取コアによる圧縮強度測定 採取コアによる静弾性係数測定
④ 音速測定	超音波測定器によるコンクリート内の音速測定(健全部と比較)	
(3) コンクリートの耐凍害性に関する試験・分析	① 空気量測定	採取サンプル(コア等)の研磨断面にて測定
	② 気泡間隔係数測定	採取サンプル(コア等)の研磨断面にて測定
	③ 配合推定	セメント協会法等
	④ 粗骨材の吸水率測定	JIS A 1110(粗骨材の比重及び吸水率試験方法)
	⑤ 細孔径分布測定	水銀圧入法
	⑥ 凍結融解試験	JIS A 1148(コンクリートの凍結融解試験方法)

(1) 凍害環境の調査

凍害環境の強さとしては、次のような気象条件や、構造物が置かれている条件、部材形状等が影響する。

①気象条件

最低気温の極値、凍結期間、凍結融解回数、日射量

②構造物の置かれている条件

方位、水掛かりやコンクリート面への積雪の有無、日射遮蔽物の有無

③部材形状等

部材断面の大きさ、部位（一般部 or 角部・端部）

④複合劣化要因

塩害環境（飛来塩分、凍結防止剤）

①気象条件に関する資料調査

主要都市については気象台による資料があるので、容易に利用することができる。凍害環境の評価にあたって必要なデータは冬期気温の平年値であり、凍害環境の強さを評価するのにあたって、最低気温の極値や、外気温が0℃をはさんで上下する日数（凍結融解回数）、3.4.2 で示した凍結融解作用指数を使用する。

最近の研究では、最低気温の極値が及ぼす影響が大きいことが知られている。

②水分供給，日射条件の調査

現地において，コンクリート面への積雪や融雪水溜まり，水しぶきの掛かり具合などについて調査する．また，対象面の方位や遮蔽物の有無による日射の当たり方についても調査する．

③含水状態の調査

コンクリートの含水率や湿潤状況を測定する．含水率が高ければ凍害を起こすという訳ではないが，含水率が大きく飽水状態になっている方が危険性は高いといえる．

1) 高周波水分計

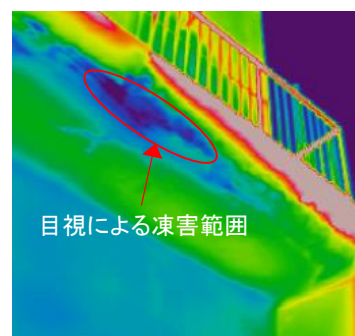
高周波水分計を使用すると，現地にて短時間で含水率を測定できる．重量法による測定に比べると測定誤差は大きい，簡便に測定できる利点は大きい．測定値は表面から数十 mm の間の平均的な値として得られるので，深部の含水率を測定することはできない．



高周波水分計 HI-520
(株kett科学研究所)

2) サーモカメラによる表面温度計測

サーモカメラにより表面温度を測定することにより，含水率が高い範囲を視覚的に把握することができる．目視により凍害損傷が確認できる範囲よりも含水率が高い範囲は広いことが多い．



(2) 凍害による損傷程度の調査

①目視による外観調査

ひび割れやスケーリング，ポップアウトなど凍害に特有な劣化現象の有無と程度を観察する．また，飽水状態になっているため，ひび割れにはエフロッセンスを伴うことも多い．

②打診調査

テストハンマーによりコンクリート表面を打診し，表面の脆弱化，浮き等の範囲を調査する．進行程度が大きい部分については，テストハンマーの鋭利な側で叩くと，層状に損傷部分が剥離する．

写真 3.4.1 凍害を生じたバルコニー先端の温度分布

③コンクリート強度性状

1) シュミットハンマーによる表面反発硬度

凍害を生じていると思われる部分と、健全部分において反発硬度を比較することにより、コンクリート組織の損傷の有無を判定する。テストハンマーによる音の違いでは判断できない差でも、反発硬度により定量化することで判断が容易になる。比較対照とする健全部については、打撃角度、部材厚さ、コンクリートの材齢、湿潤程度などがなるべく測定対象とした部分と同条件になる位置を選定する。



写真 3.4.2 シュミットハンマーによる反発硬度の測定

2) 採取コアによる圧縮強度測定

凍害が進行するとコンクリート強度が低下するので、対象部分からコンクリートコアを採取し、圧縮強度試験を行う。設計基準強度に達していれば一応問題ないと判断できるが、できれば健全部からも採取し、両者の強度を比較するのがよい。



写真 3.4.3 $\phi 100\text{mm}$ コアと小径コア

試験は、JIS A 1107「コンクリートからのコアの採取方法及び圧縮強度試験方法」による。これによると、採取コアの直径は粗骨材寸法の3倍以上が必要となるので、粗骨材寸法が20mmの場合はコア径75mmまたは100mm、粗骨材寸法が40mmの場合はコア径125mmまたは150mmが標準となる。

但し、圧縮強度試験では最終的に供試体の中央付近が破壊するため、凍害により表面側の損傷程度が大きい場合でも、その結果は試験値に反映されにくい。表面近くの状態を反映する方法として、小径コアにより圧縮強度試験を行う方法がある。小径コアによる圧縮強度策定は、直径が25mm程度で高さは直径の2倍の供試体を使用するので、表層部についての圧縮強度を測定することができ、深部までコアボーリングを行えば、同位置について表層部と深部の強度を比較することも可能である。なお、この試験方法は日本建築センター技術審査証明「小径コアによるコンクリート強度調査法『ソフトコアリング』」による。

3) 採取コアによる静弾性係数測定

凍害やアルカリ骨材反応のように、セメントペーストでマイクロクラックが成長し、組織が内部から損傷してゆくような現象に対しては、圧縮強度よりも弾性係数の方がより敏感に影響が現れる。

採取コアがあれば、b. の圧縮強度試験と同時に行うことができる。測定方法としてはコアの側面にひずみゲージを接着して加力時の圧縮ひずみを測定する方法と、コアにコンプレッションメーターを取り付けて、圧縮変位を高精度変位計（分解能 1/1000mm 程度）により測定する方法がある。

ひずみゲージを貼り付ける場合は、ゲージの有効長さは 50mm 程度とする。

④音速測定

凍害によりコンクリートの組織が損傷すると、弾性係数が低下するため、コンクリート内部を伝播する弾性波の速度が低下する。このことを利用して、超音波測定器により対象部を伝播する音速を測定することにより損傷度を評価する。

凍結融解試験では損傷度の指標として動弾性係数を用いるが、動弾性係数と音速は比例関係にあることから、同義の測定である。



写真 3.4.4 超音波測定器による音速測定状況
柱を挟み込んで測定している

固体中における縦波の速度 C_L は、理論的には次式で定義される。

$$C_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \times \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}$$

ここで、

E : 縦弾性係数

ν : ボアソン比

ρ : 密度

すなわち、凍害によりコンクリートの弾性係数が低下すると、その平方根に比例して音速も低下することになる。但し、現地における測定では、音速は複数の要因が合わさった結果として得られるので、健全部においても測定し、その値と比較する必要がある。

なお、測定にあたっては端触子を接触させる部分は平滑でなければならないため、凍害による損傷程度が大きく、表面が荒れている場合には適用できない。

(3) コンクリートの耐凍害性に関する試験・分析

①空気量, ②気泡間隔係数

コンクリート中に微細な空気を連行することにより耐凍害性が向上することは良く知られており, JIS A 5803「レディーミクストコンクリート」では, 普通コンクリートの空気量は $4.5 \pm 1.5\%$ と規定されている. 図 3.4.2 に示すように, 空気量が3%を下回ると急激に耐凍害性が低下する. 耐凍害性を評価するに当たっては, まず, この規定値に相当する空気量が確保されているかどうかを確認する必要がある.

また, 空気量が同量であっても, 径の大きな気泡がまばらに存在するよりも, 径の小さい気泡が密に存在する方が自由水の凍結による膨脹圧を緩和する効果大きい. 気泡分布の密度を表す指標が気泡間隔係数であり, 隣接する気泡と気泡間の距離の平均値を表す数値である.

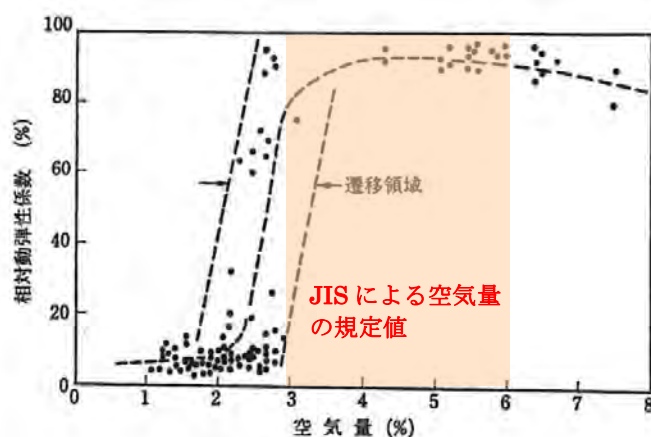


図 3.4.2 空気量と相対動弾性係数の関係²⁾

気泡間隔係数と耐凍害性の関係を図 3.4.3 に示すが, 気泡間隔が $200 \sim 250 \mu\text{m}$ 以下の場合には耐凍害性にすぐれており, $450 \mu\text{m}$ より大きいと耐凍害性が著しく低下する.

空気量と気泡間隔係数の測定方法としては, コア等の試料の研磨面について顕微鏡上で気泡間の距離を測定する方法が一般的であるが, 画像解析により算出する方法もある.

顕微鏡による方法では, コンクリート供試体を数cmにスライスし, 研磨機で平滑に仕上げた表面を水平2方向に平滑できるステージに置き, 光学顕微鏡によって気泡の分布状態を測定する. 測定はコンクリート表面を一定間隔で移動させて碁盤目状に区切った区切線の交点が気泡断面に合致する割合から気泡量を求めるポイントカウント法と, 区切線によって気泡上を横切る際の気泡断面の弦長の総和から空気量を算出するリニヤトランス法がある.

一方, 画像処理による方法では, コンクリートの試料切片における気泡内に蛍光染料を添加した充填材で染色し, その後試料面に紫外線を照射して気泡組織のみを発光させ, その際の輝度分布を一定の閾値によって二値化し画像処理によって空気量, 気泡間隔などの値を算出する.

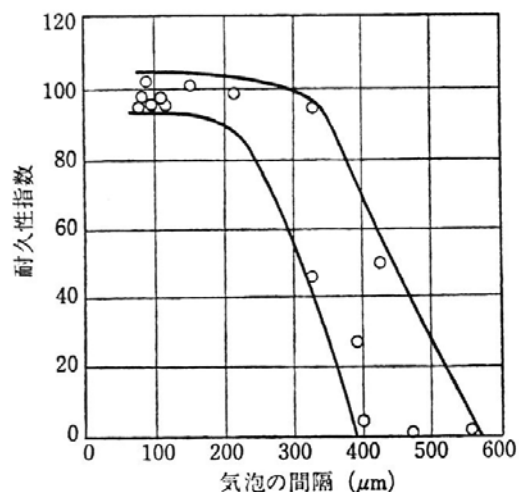


図 3.4.3 気泡間隔係数と耐久性指数の関係²⁾

③配合推定

水セメント比が大きいコンクリートは中性化の進行速度や塩化物の浸透速度が大きいことが知られているが、凍結融解に対する抵抗力も小さい。

水セメント比を変化させた凍結融試験の結果においても、図 3.4.4 に示すように、水セメント比が小さいほど、耐凍害性が向上していることが解る。

日本建築学会「建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事」では、凍結融解作用係数が 5 以上の場合は、水セメント比 50%以下、5 未満の場合でも 55%以下とするように規定されている。

水セメント比は特にスケーリングに対する影響が大きく、凍結融解作用と海水や凍結防止剤の作用を同時に受ける場合など、激しいスケーリングが予想される場合には、水セメント比の上限を小さくする必要がある。

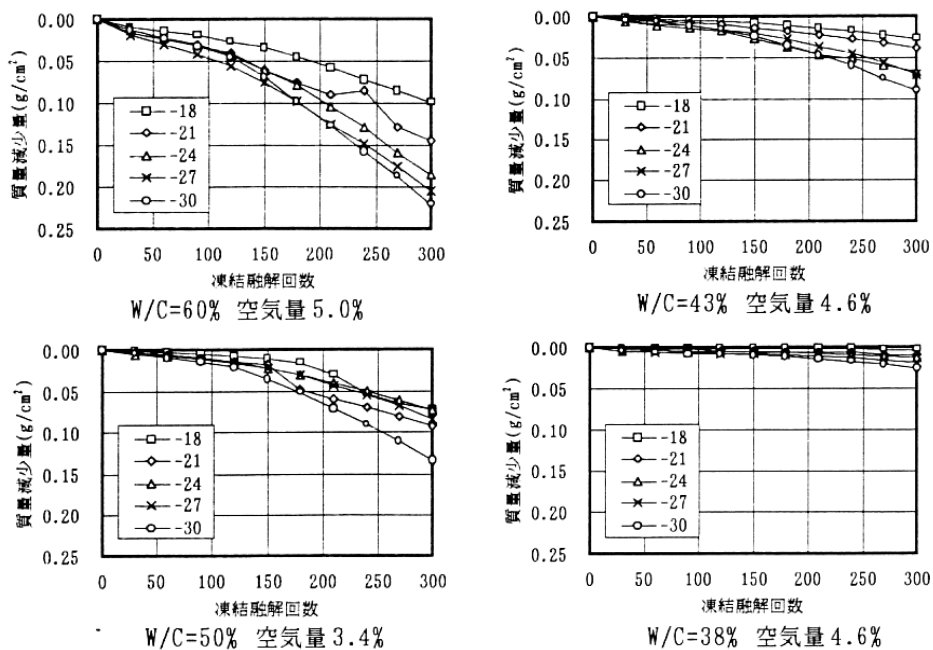


図 3.4.4 W/Cと耐凍害性の関係³⁾

④粗骨材の吸水率測定

コンクリートの耐凍害性を向上させるためには、吸水率の小さい骨材を使用する必要がある。JIS A 5308「レディーミクストコンクリート」では、粗骨材の吸水率を 3.0% 以下、細骨材の吸水率を 3.5%以下と規定している。但し、骨材全体の吸水率が基準値を満たしていても、粗骨材中に軟石が含まれていると、ポップアウトを生じやすい。

吸水率の試験は、JIS A 1110「粗骨材の比重及び吸水率試験方法」による。

⑤細孔径分布測定

セメント硬化体中の水の凍結温度は細孔径に依存することが知られている。細孔径が小さいほど凍結温度が低くなる傾向にあり、耐凍害性の向上に寄与する。

細孔径分布を測定する方法としては、水銀の表面張力を利用して測定する水銀圧入法が最も広く利用されている。

図 3.4.5 は、水セメント比および練り上がり温度と凍結融解試験による長さ変化率の関係、そのときのコンクリートの細孔径分布を示している。いずれも、細孔径が小さい方にシフトしているコンクリートの方が耐凍害性に優れていることが判る。

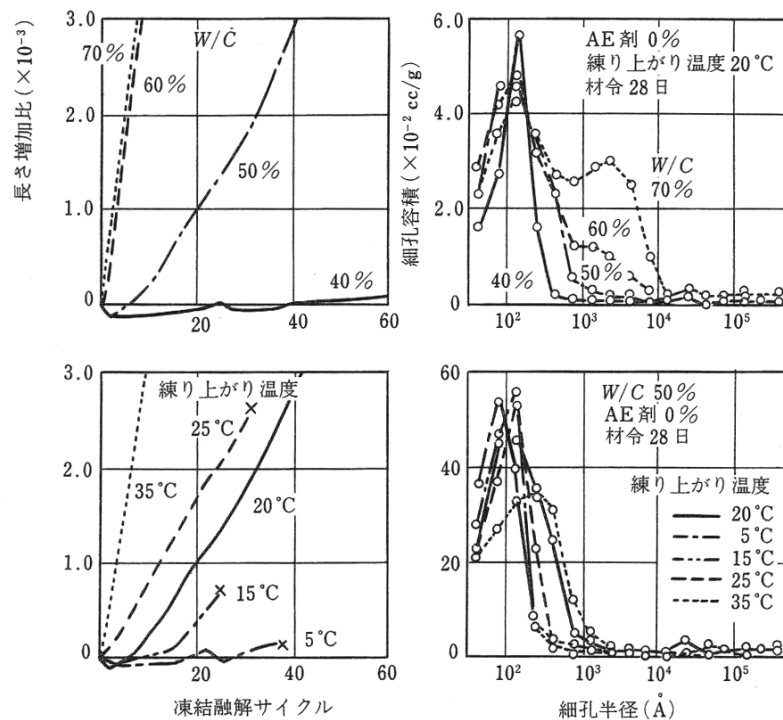


図 3.4.5 水セメント比および練り上がり温度と細孔径分布，耐凍害性の関係⁴⁾

⑥凍結融解試験

実際の構造物からコンクリートコアを採取して凍結融解試験を行うこともできる。種々の環境下で供用していることから，既に凍結融解サイクルを受けており，耐凍害性を定量的に評価することは困難であるものの，凍害を受ける可能性の有無を評価することは可能である。

試験は，JIS A 1148「コンクリートの凍結融解試験方法」のA法（水中凍結融解試験方法）に準拠する。コンクリート示方書では耐凍害性を評価するにあたって，相対動弾性係数を指標としているが，コアを試験体とする場合，たわみ振動の計測ができないので，重量減少率を指標とすることになる。但し，実構造物から採取した試料については，既に自然環境下で凍結融解履歴を受けていることを考慮した上で，試験結果を判断しなければならない。

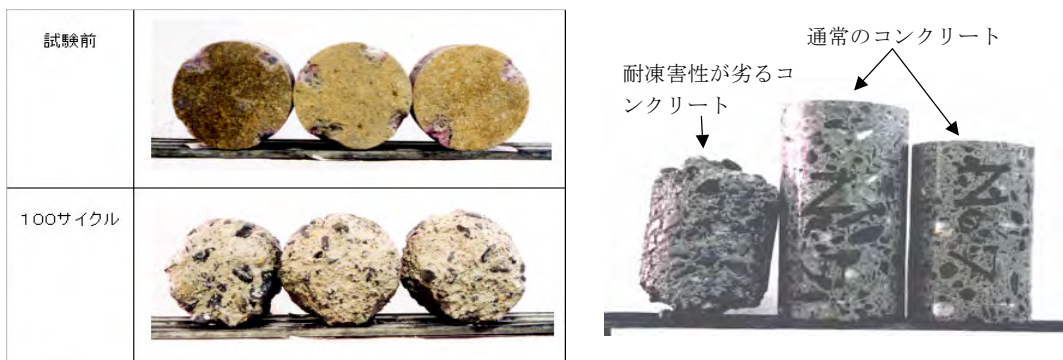


写真 3.4.5 写真採取コアの凍結融解試験の例

3.4.2 凍結融解に対して求められるコンクリートの性能

凍結融解作用をうける地域のコンクリートに必要な耐凍害性を確保するため、土木学会、日本建築学会では、次のような設計法を示している。いずれにおいても耐凍害性を評価には相対動弾性係数を指標としている。

【土木学会 コンクリート標準示方書】凍結融解作用に関する照査

- (1) 構造物の所要の性能が、凍結融解作用によって損なわれてはならない。
- (2) 凍結融解作用に関する照査は、構造物中のコンクリートが劣化を受けた場合に関して、相対動弾性係数の最小限界値 E_{min} とその設計値 E_d の比に構造物係数 γ_i を乗じた値が、1.0 以下であることを確かめることにより行ってよい。

$$\gamma_i (E_{min}/E_d) \leq 1.0$$

ここに、 γ_i ：構造物係数。一般に 1.0 としてよいが、重要構造物に対しては 1.1 とするのがよい。

E_d ：相対動弾性係数の設計値 ($= E_k / \gamma_c$)

E_k ：相対動弾性係数の特性値

γ_c ：コンクリートの材料係数。一般に 1.0 としてよい。但し、上面の部位に関しては 1.3 とするのがよい。なお、構造物中のコンクリートと標準養生供試体との間で品質に差が生じない場合は、すべての部位において 1.0 としてよい。

E_{min} ：凍害に関する性能を満足するための相対動弾性係数の最小限界値。一般に下表によってよい。

凍害に関するコンクリート構造物の性能を満足するための相対動弾性係数の最小限界値 E_{min} (%)

気象条件 断面 構造物の露出状態	気象作用が激しい場合または凍結融解がしばしば繰り返される場合		気象作用が激しくない場合、氷点下の気温になることがまれな場合	
	薄い場合 ²⁾	一般の場合	薄い場合 ²⁾	一般の場合
(1)連続してあるいはしばしば水で飽和される場合 ¹⁾	85	70	85	60
(2)普通の露出状態にあり、(1)に属さない場合	70	60	70	60

1)水路、水槽、橋台、橋脚、擁壁、トンネル覆工等で水面に近く、水で飽和される部分およびこれらの構造物のほか、桁、床版等で水面から離れてはいるが、融雪、流水、水しぶき等のため、水で飽和される部分など。

2)断面の厚さが 20cm 程度以下の部分など

- (3) 相対動弾性係数の特性値 E_k を 90 以上とする場合には、一般に (2) の照査を行わなくてよい。

【日本建築学会 建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事】

26 節 凍結融解作用を受けるコンクリート

26.3 コンクリートの性能区分とその選定

a. コンクリートの性能区分は表 26.1 による。

表 26.1 耐凍害性の性能区分に対応するコンクリートの品質

性能区分	耐凍害性およびコンクリートの品質
A	凍結融解試験(1)において 300 サイクルにおける相対動弾性係数が 60%以上であること。
B	凍結融解試験(1)において 200 サイクルにおける相対動弾性係数が 60%以上であること、または 26.4 で規定する材料・調合に適合するコンクリートであること。
C	26.4 で規定する材料・調合に適合するコンクリートであること。

[注] (1)JISA1148(コンクリートの凍結融解試験方法)の A 法による。

b. コンクリートの性能区分は、凍結融解作用の強さと建物および部位の重要度を総合的に考慮して特記する。

凍結融解作用指数の考え方

設計者は凍結融解作用の強さを、次式により得られる「凍結融解作用指数」と次表を参考として定め、さらに対象とする構造物や部材の重要度などを総合的に判断して、コンクリートの耐凍害性の性能区分を特記する。

$$(\text{凍結融解作用指数}) = - (\text{最低気温}) \times (\text{日射係数}) \times (\text{部材係数})$$

ここに、最低気温は、気象庁資料の日本気候表またはアメダス準平年値による日最低気温の平滑平年値の極値とする。

凍結融解作用に対応する性能選択区分の目安

凍結融解作用係数	性能区分
2以上5未満	C
5以上10未満	B
10以上	AまたはB

凍結融解作用に対応する性能選択区分の目安

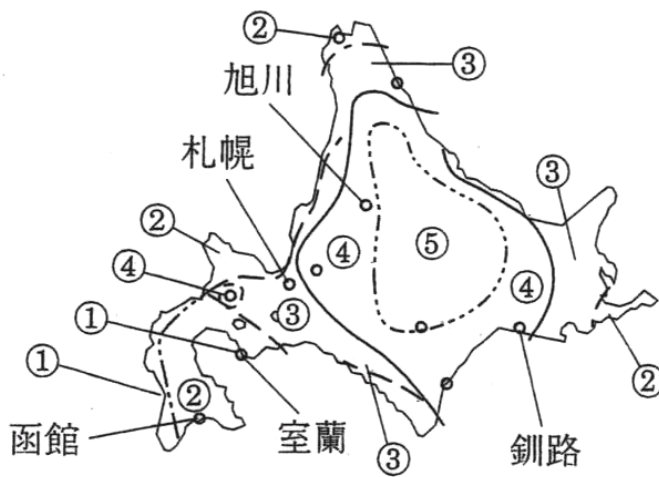
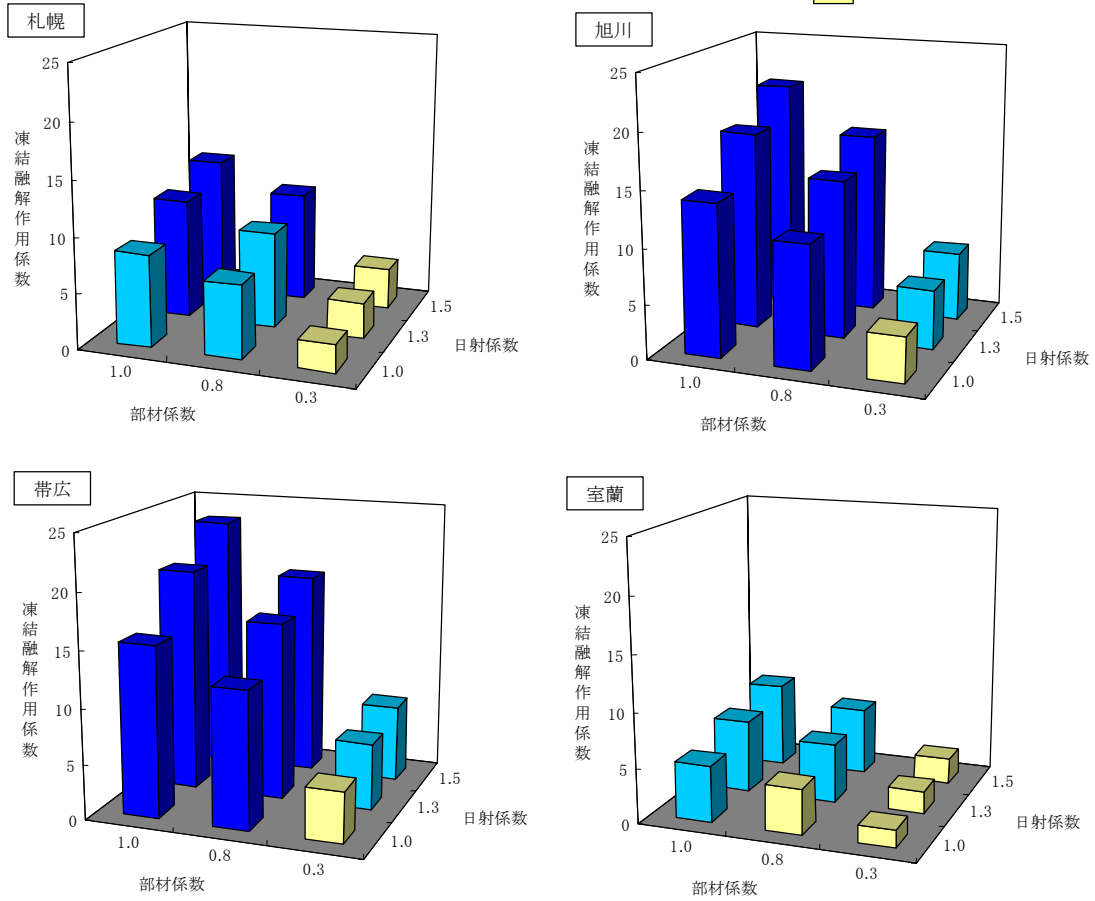
凍結融解作用係数	性能区分
2以上5未満	C
5以上10未満	B
10以上	AまたはB

部材係数の参考値

水分の供給程度による部材条件	対象となる部位、部材の例	部位係数
水と接した状態で凍結融解作用を受ける部位	軒先、ベランダ、ひさし、パラペット笠石・笠木などの突出部、屋上階段など	1.0
比較的水分供給の多い部位	一般的な水平部材(防水押さえなど)、斜め外壁、開口部まわり、排気口下部など	0.8
水がかりの少ない部位	一般的な外壁面など	0.3

道内代表的都市における凍結融解作用係数

■ 性能区分AまたはBに対応
 ■ 性能区分Bに対応
 ■ 性能区分Cに対応



1. ○内の数値は凍害危険度.

凍害危険度	凍害の予想程度
5	極めて大きい
4	大きい
3	やや大きい
2	軽微
1	ごく軽微

2. 凍害重み係数 $t(A)$: 良質骨材, または AE剤を使用したコンクリートの場合.

図 3.4.6 凍害危険度の分布図²⁾

3.5 塩害の調査方法

3.5.1 塩害環境の調査

(1) 飛来塩分濃度の測定

コンクリート内部の塩化物イオン濃度分布の予測にあたっては、コンクリートの物性によって決まる拡散係数とともに、当該立地によって決まる表面塩化物イオン濃度 C_0 が重要な値となる。

コンクリート標準示方書[施工編]においては海からの距離によって表面塩化物イオン濃度は

一義的に決められているが、実際には、太平洋側か日本海側の別、当該構造物周囲の地形、遮蔽物の有無、地上からの高さ等によってその値は異なると考えられる。

飛来塩分量の実測には、JIS Z 2832「大気環境の腐食性を評価するための環境汚染因子の測定」によるドライガーゼ法や土研法が一般的に用いられている⁵⁾。ガーゼ法は暴露したガーゼに付着した塩分量を測定



写真 3.5.1 ガーゼ法による飛来塩分の捕捉

表 3.5.1 飛来塩分量の測定方法

するのに対し、土研法はステンレス板に付着した塩分を洗い流して水溶液として回収する。いずれも捕集した塩分は硝酸銀滴定法などにより、塩化物イオン濃度を測定する。両測定法の概要を表 3.5.1 に示す。

捕集部	ガーゼ法(JIS法)	土研法
方法	百葉箱内に捕集器を置き、そこへ塩分を付着させる。	戸外に塩分捕集器を置き、捕集タンクへ塩分を導く。
捕集期間	1ヶ月	1ヶ月
特徴	データの比較がしやすい。 大量の塩分保持能力に劣る。	雨水中の塩分も含めて捕集でき、塩分の保持能力に優れている。
作業	1ヶ月経過後、捕集器よりガーゼを取り出し、密封回収後、分析を行う。	1ヶ月経過後捕集器表面に付着している塩分をイオン交換水でポリタンク内に洗い流す。ポリタンクを密封回収後、分析を行う。
分析	硝酸銀滴定法などの方法を用いて塩分量を定量分析する w (mg)	
表示	$w / (\text{day} \times 2)$	飛来塩分量 (mdd) で表示 $w / (\text{day} \times \text{ステンレス板表面積} (\text{dm}^2))$
捕集器		

3.5.2 塩害による劣化度の調査

(1) コンクリート中の塩化物イオン濃度測定

塩害調査において、コンクリート中の塩化物イオン濃度の測定は最も重要な項目である。

測定にあたっては、コンクリートの試料を採取する必要があるが、コンクリート内部の塩化物イオン濃度を非破壊で測定できる方法は現在のところない。

通常はコンクリートコアやはつり片を試料として採取し、それらを粉砕し分析する。塩化物イオンの定量は JIS A 1154「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」に基づいて行い、全塩化物イオン量を求めることを原則とする。

分析方法としては、表 3.5.2 に示すような種類があるが、この中ではモール法や電位差滴定法が比較的多く使用されている。

表 3.5.2 塩化物イオン濃度の分析方法

測定原理	測定方法の名称
重量法	塩化銀沈殿法
容積法	モール法、硝酸第二水銀法
吸光光度法	チオシアン酸第二水銀法、クロム酸銀法
電気化学的方法	電位差滴定法、イオン電極法、伝導度滴定法、重量滴定法
EPMA	定量分析、マッピング

一般に鉄筋が腐食開始する塩化物イオン濃度として、 $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ を用いることが多いが、(独)土木研究所・日本構造物診断技術協会による「非破壊試験を用いた土木コンクリート構造物の健全度診断マニュアル」⁶⁾では、表 3.5.3 のようにグレーディングされている。

表 3.5.3 塩化物イオン量と塩害による鋼材の腐食可能性の評価

全塩化物イオン量	塩害による鉄筋腐食の可能性
$2.5\text{kg}/\text{m}^3$ 以上	腐食を生じる。
$1.2\text{kg}/\text{m}^3$ 以上、かつ $2.5\text{kg}/\text{m}^3$ 未満	将来的に塩害による腐食が生じる可能性が高い。
$0.3\text{kg}/\text{m}^3$ を超えて、かつ $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ 未満	何らかの原因でコンクリート中の塩化物イオン濃度が高いが、腐食が生じる可能性は低い。
$0.3\text{kg}/\text{m}^3$ 以下	現時点では、塩害による腐食が生じるおそれはない。

また、図 3.5.1 のように EPMA により塩素の面的な分布を知ることができる。ひび割れからの塩化物イオンの侵入や、中性化縁による塩素イオンの濃縮など、特異条件の分析に適している。

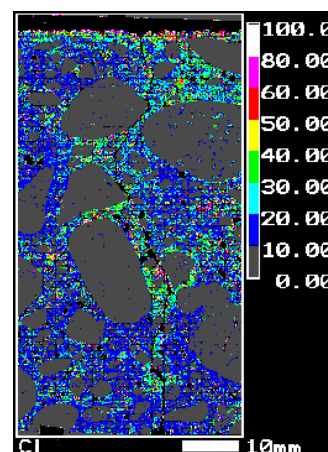


図 3.5.1 EPMA による塩素濃度の分布測定

(2) 鉄筋腐食度測定

1) 外観検査

塩害が進展期後期から加速期になると、鉄筋腐食によるひび割れが発生したり、ひび割れから錆汁が流出するなど、内部鉄筋腐食の兆候が現れる。

外観からは詳細な腐食状況は知り得ないが、以下の詳細調査を行うにあたっては、外観にこのような変状を生じている位置で行うのが良い。

2) はつりによる方法

鉄筋をはつり出し、鉄筋の腐食状況を直接目視観察する。破壊を伴うので、数多くの箇所で行うことは難しいが、最も信頼度の高い方法である。はつり出した鉄筋を切断採取し、腐食面積率を求めたり、錆落とし処理した後の重量減少率を求めることもある。

3) 非破壊検査法

非破壊による鉄筋腐食度の測定方法としては、自然電位測定が一般的である。

測定範囲内で鉄筋を1箇所はつり出し、コンクリート表面と鉄筋間の電位差を測定し、その分布状況から鉄筋腐食により生じている局部電池の活性度(=腐食の進行速度)を推定する。

但し、判定基準で不確定となる範囲が広いことや、得られる結果は腐食速度であり、腐食程度ではないことに注意する必要がある。

また、自然電位はコンクリートの含水率や中性化深さによる影響を受けることが知られている。土木学会基準「コンクリート構造物における自然電位測定方法(JSCE-E601-2000)」による補正方法を示す。

測定時の含水率 x (%) の場合

$$\text{補正值} = \text{測定値} - 25x + 180$$

中性化深さ y (mm) の場合

$$\text{補正值} = \text{測定値} + 8y$$



写真 3.5.2 自然電位測定状況

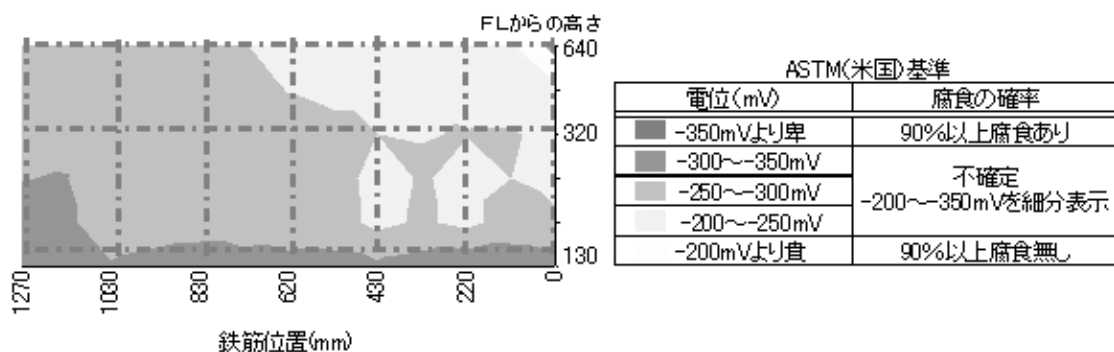
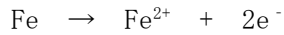


図 3.5.1 自然電位測定結果例

◇自然電位測定の方法

コンクリート中の鉄筋の腐食は、鉄原子がイオンとなってコンクリート中に溶け出し、コンクリート中の水酸化物イオンと反応して、鉄の水酸化物となり、鉄筋表面に錆となって生じる。

鉄筋が腐食を起こしている箇所はアノード域と呼ばれ、鉄原子は電子を失い鉄イオンとしてコンクリート中に溶け出していく。この反応を酸化反応（アノード反応）と呼ぶ。

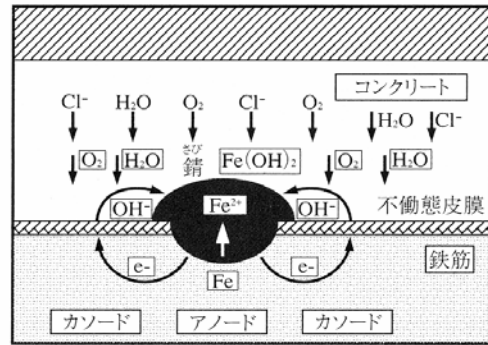


電子はカソード域と呼ばれる場所に移動し、コンクリート中の酸素や水と結合して水酸化物イオンとなる。この反応を還元反応（カソード反応）と呼ぶ。

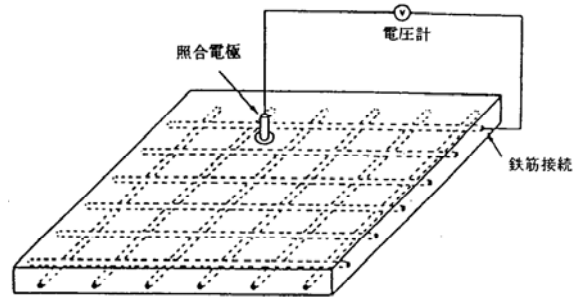


鉄筋が腐食しているときは、電子は鉄筋内を流れ、イオンはコンクリート中を移動する。これら電子やイオンの流れが腐食電流であり、腐食反応の速さを表している。鉄筋が腐食していないときは電子やイオンの移動はない。

鉄筋が腐食しているアノード域の電位は一側に変化することが多い。自然電位法はこの負の電荷を検出するもので、腐食状況に応じて変動する電位を測定することにより、鉄筋の腐食推定を行うものである。測定は、一部の鉄筋を研り出し、表面を磨いた上で片方の電極をクリップにより、接続する。片方には照合電極を接続し、その間の電位を測定する方法で行う。また、自然電位法は腐食の可能性を診断するものであり、断面欠損が生じている等の腐食の程度を測定するものではない。



参考図2 鉄筋腐食



参考図3 自然電位測定原理

(3) 塩化物イオン濃度分布の測定方法

フローを図 3.5.2 に示す。

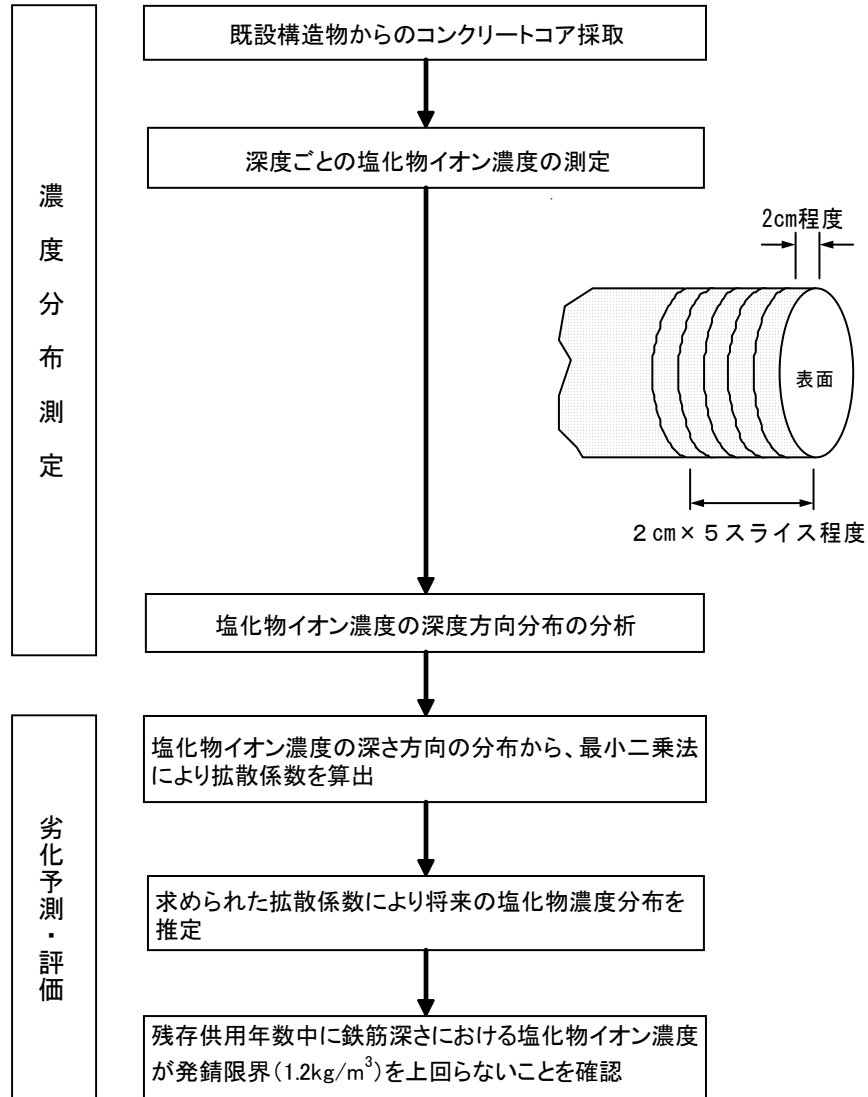
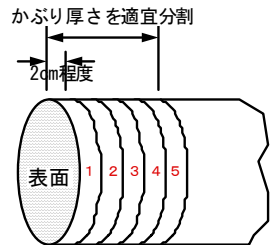
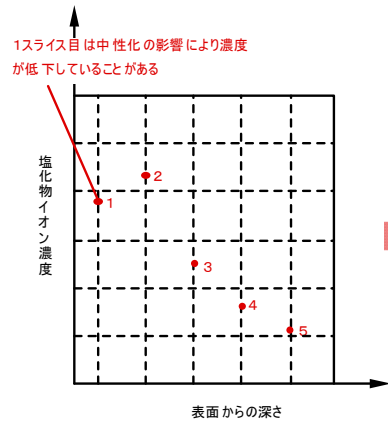


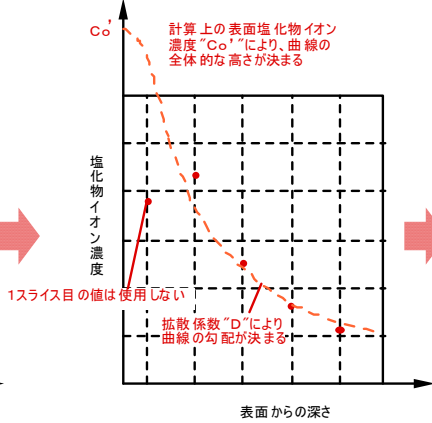
図 3.5.2 塩化物イオン濃度分布の測定方法

① 深さごとの塩化物イオン濃度分析



② 拡散係数と計算上の表面塩化物イオン濃度の計算

測定値と拡散分布曲線差が最小になるように収斂計算する。



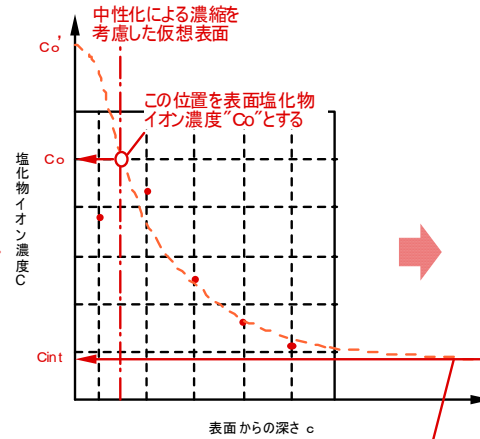
深さ“ c ”と経過年数“ t ”は既知なので、
誤差関数の変数 $\frac{0.1c}{2\sqrt{D \cdot t}}$ の中で、未知数は D のみ

拡散分布曲線 $C_o \{ 1 - \text{erf}(\frac{0.1c}{2\sqrt{D \cdot t}}) \}$

拡散係数 D は深さ方向に一定と考える。

各測定点で有効データを近似するように、拡散係数“ D ”と計算上の表面塩化物イオン濃度“ $C_{o'}$ ”を求める。

③ 中性化を考慮した表面塩化物イオン濃度と初期塩化物イオン濃度の計算



曲線を無限に延長したときの値を初期塩化物イオン“ C_{int} ”とする

④ 求められた拡散係数と表面塩化物イオン濃度からX年後の分布を予測

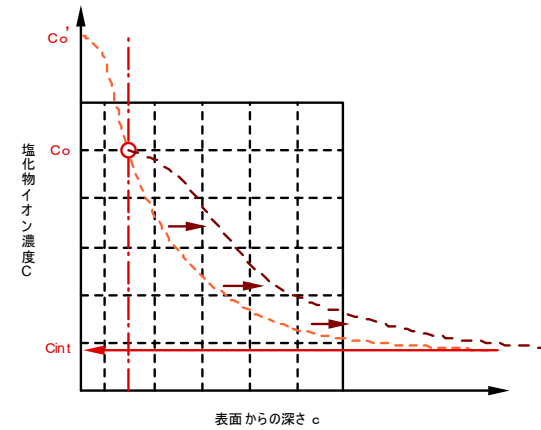
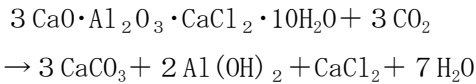


図 3.5.3 フィックの法則に基づく塩化物イオン濃度分布予測

＜参考＞中性化による塩化物イオンの濃縮

コンクリートが中性化すると、塩分を固定化していたフリーデル氏塩が、次式のように分解して、塩化物イオンを解離する。



これらのイオンは、図 3.5.4 に示すようなメカニズムで未中性化部分に移動・濃縮する。濃縮範囲に鉄筋がある場合は、鉄筋腐食に悪影響を及ぼす。

コアをスライスして塩化物濃度分布を求める際、中性化縁での濃縮のために図 3.5.3 に示すように、表面側の塩化物濃度の測定値が小さくなることがある。その場合は、表面側スライスの測定値を除外して、拡散係数を求める。

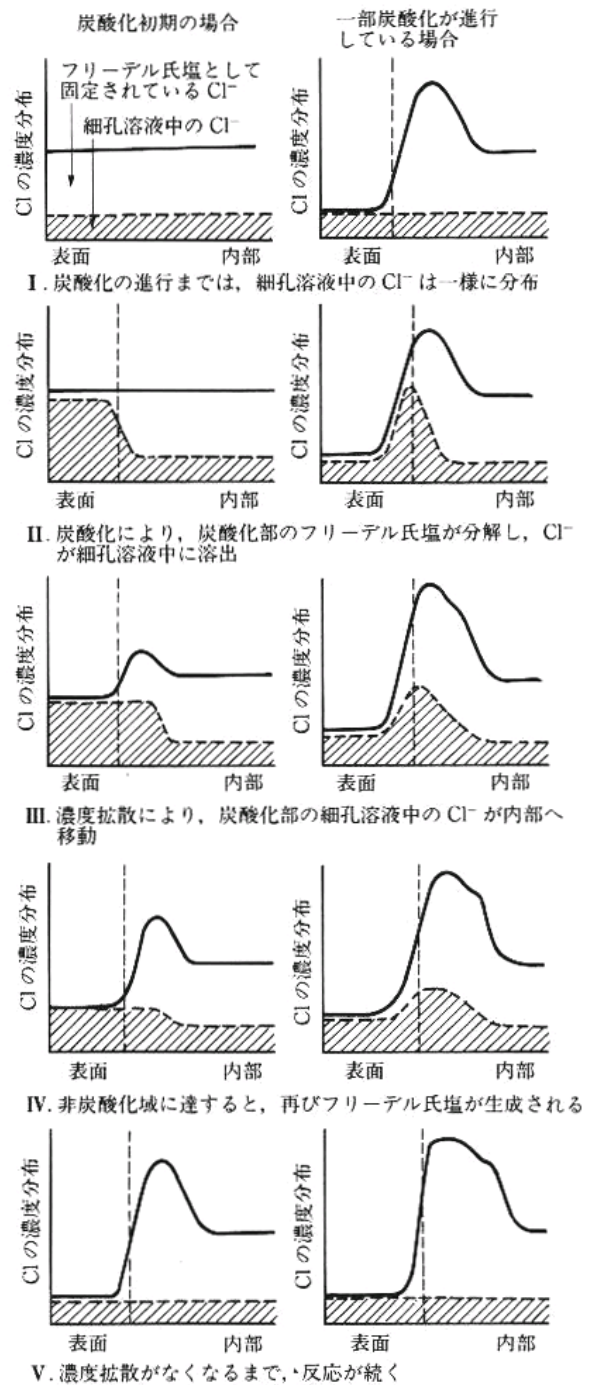


図 3.5.4 中性化による塩化物イオンの濃縮
「コンクリート診断技術'04」
日本コンクリート工学協会

3.6 凍害と塩害の複合劣化の調査方法

3.6.1 凍害と塩害の複合劣化点検方法

複合劣化については調査研究の緒についた段階であり、現段階では特に複合劣化のための特別な点検方法があるわけではない。また、単独劣化か複合劣化かを判定する方法もない。このため、現状では複合されるそれぞれの劣化現象や劣化環境に関する調査点検を行い、複合効果については環境条件や劣化状況から総合的に判断する以外に方法がない。

表 3.6.1 点検項目

	凍害を主として見る場合	塩害を主として見る場合
環境条件	水分の供給状態 気温、日射量	海岸線からの距離、卓越風の向き 凍結防止材の散布量
構造物の条件	部材断面の大きさ	対象面の向き(上、下、風上、風下)
コンクリートの物性	空気量 細孔径分布 吸水率・含水率 W/C	塩化物イオン濃度の深さ方向の分布 鋼材位置での塩化物イオン濃度 かぶり厚 W/C
外観	ひび割れ スケーリング ポップアウト	鉄筋に沿ったひび割れ、錆汁 かぶりコンクリートの浮き、剥落 鉄筋腐食度
複合作用の有無	スケーリングの程度 塩化物の影響が少ない部分との劣化状況比較	

3.6.2 凍害と塩害の複合劣化に対するコンクリートの耐久性試験

凍害と塩害の複合劣化に対するコンクリートの耐久性を評価する試験方法として、次のような方法が提案されている。

- ①灌水法 (ASTM C672)
- ②散布法
- ③毛管浸透法
- ④浸漬法

いずれも、塩水を含浸させた状態で凍結融解を行い、スケーリング量を測定する。

例として、①の灌水法と③の毛管浸透法の試験方法を図 3.6.1 に示す。

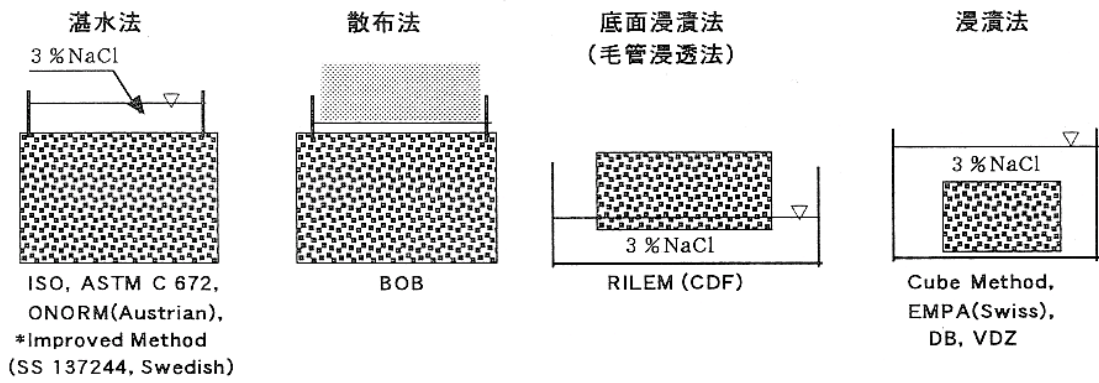
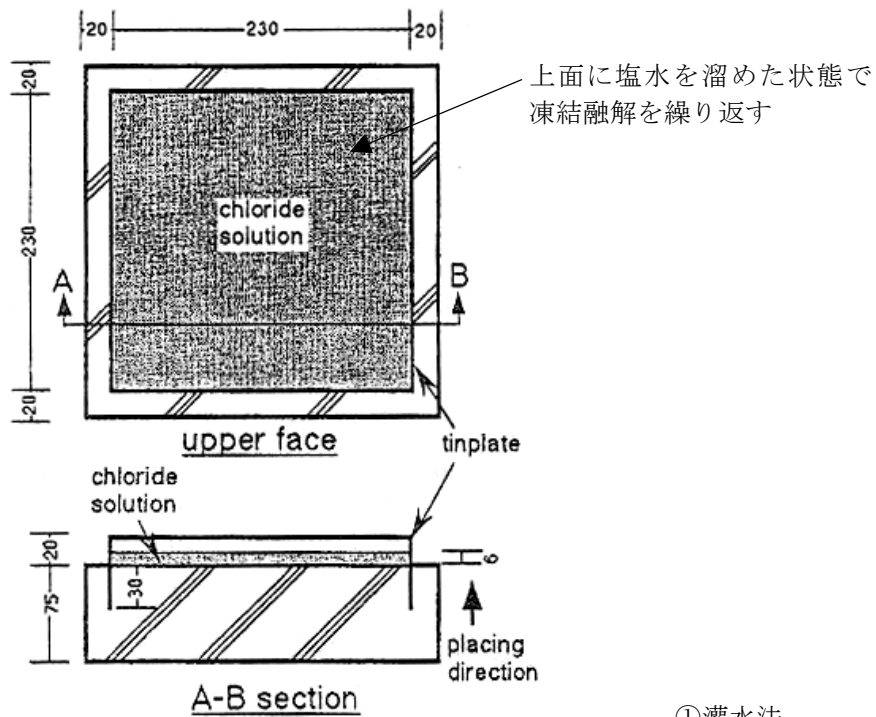


図 3.6.1 スケーリング量の測定による耐凍害性試験方法



①灌水法

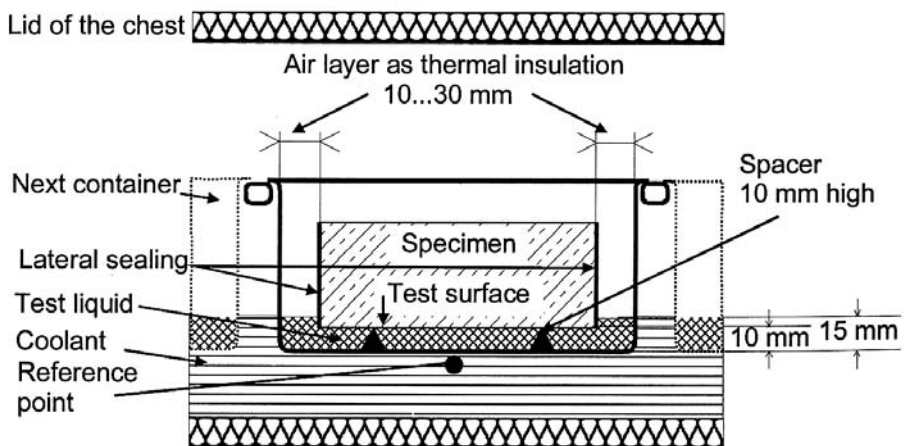


Fig. 2 Test container with specimen in the liquid cooling bath.

③毛管浸透法

下面から塩水を浸透させた状態で凍結融解を繰り返す

図 3.6.2 複合劣化試験方法

3.7 アルカリ骨材反応の調査方法

3.7.1 コンクリート示方書による耐アルカリ骨材反応の照査

土木学会コンクリート標準示方書[施工編]では、耐アルカリ骨材反応性の照査方法を次のように示している。

(1) 耐アルカリ骨材反応性の照査は、式(6.4.9)によることを原則とする。

$$\gamma_p \frac{L_p}{L_{\max}} \leq 1.0 \quad (6.4.9)$$

ここに、

L_p : アルカリ骨材反応によるコンクリートの膨張率の予測値 (%)。一般に、コンクリートのアルカリシリカ反応性判定試験方法 JCI AAR-3 の 6 ヶ月材齢における長さ変化率から求めてよい。

L_{\max} : コンクリートが所要の耐アルカリ骨材反応性を満足するための膨張率の最大値 (%)。一般に 1.0% としてよい。

γ_p : L_p の精度に関する安全形数。一般に 1.0~1.3 としよ。 JCI AAR-3 によってコンクリートの膨張率を求める場合には、一般に 1.0 としよ。

(2) 以下に示すいずれかの条件を満たす場合には、耐アルカリ骨材反応性の照査を省略することができる。

(a) JIS A 5308 付属書 1 の区分 A の骨材のみを使用する。

(b) アルカリ金属イオンが混入する恐れのない環境で、JIS A 5308 付属書 1 の区分 B の骨材を使用するが、付属書 6 のアルカリ骨材反応抑制対策を行う

現在市場で使用されているコンクリートの多くは、上記 (2) (a) により区分 A (アルカリシリカ反応試験の結果が「無害」と判定されたもの) が使用されている。有害性の判定は化学法 (参 1-74) により判定するが、この結果「無害でない」と判定された場合は、モルタルバー法 (参 1-75) による試験を行って判定する。化学法による試験を行わない場合には、モルタルバー法による試験を行って判定してよ。

なお、(2) (b) では付属書 6 によるアルカリ骨材反応抑制対策が記載されているが、2003 年の JIS 改正により、付属書 2 に (規定) アルカリシリカ反応抑制対策の方法として、次の区分が示されている。

a)コンクリート中のアルカリ総量を規制する抑制対策

全アルカリ量が明らかなポルトランドセメントなどを使用し、式(1)によって計算されるコンクリート中のアルカリ総量(Rt)が3.0kg/m³以下となることを確認する。

$$R_t = R_c + R_a + R_s + R_m + R_p \quad (1)$$

R_t : コンクリート中のアルカリ総量 (kg/m³)

R_c : コンクリート中のセメントに含まれる全アルカリ量 (kg/m³)

R_a : コンクリート中の混和材に含まれる全アルカリ量 (kg/m³)

R_s : コンクリート中の骨材に含まれる全アルカリ量 (kg/m³)

R_m : コンクリート中の混和剤に含まれる全アルカリ量

R_p : コンクリート中の流動化剤に含まれる全アルカリ量 (kg/m³)

b)アルカリシリカ反応抑制効果のある混合セメントを使用する抑制対策

1)混合セメントを使用する場合は、JIS A 5211 に適合するB種もしくは高炉セメントC種またはJIS R 5213 に適合するフライアッシュセメントB種もしくはフライアッシュセメントC種を用いる。

2)高炉スラグ微粉末またはフライアッシュを混和材として使用する場合は、併用するポルトランドセメントとの組み合わせにおいて、アルカリシリカ反応抑制効果があると確認された単位量で用いる。

3.7.2 アルカリ骨材反応の試験方法

A S Rが疑われる構造物をより詳細に調査する試験方法を表 3.7.1 に示す。試験方法としては、①膨張量試験 ②骨材の岩種判定 ③コンクリート中のアルカリ含有量の分析 ④A S Rによって生じるシリカゲルの確認、などがある。また、コア採取による圧縮強度と静弾性係数の試験結果からA S Rが生じている可能性を推定する方法もある。

(1) 骨材の有害性に関する試験

表 3.7.1 中の①～③は骨材がアルカリ骨材反応を生じる性質を有しているか否かを判定するものであり、必ずしも採取したコンクリートがアルカリ骨材反応を生じたどうかを特定できるわけではないが、A S Rが疑われる構造物の今後の劣化進行の可能性をより明確にしたい場合には、①コンクリートコアの膨張量試験が優先される。

①～③の試験で、「反応性あり」と判定された骨材であってもアルカリや供給がなければ反応を生じないので、必ずしも反応を生じるというわけではない。反対に、①の膨張量試験では、既に膨張が収束しかかっているコンクリートでは、促進試験においてはほとんど膨張せず、「反応性あり」と判定される膨張量に達しないこともある。コンクリートコアの採取にあたっては、目的を考慮して採取位置を選定しなければならない。またコア採取時には、コア周面やコア破断面の骨材周辺に反応リムやゲルが見られるかどうか確認することを心がける。

(2) 反応の有無の判定に関する試験

調査対象のコンクリートが実際にA S Rを生じているが否かを判定するには、④のアルカリシリカゲルが生成されていることを確認するのが最も信頼性の高い方法である。

ゲルの生成を確認する試験として、粉末X線回折が多様されているものの、結晶性成分が同定されない場合にゲルの可能性があるかと判定されるにとどまり、ましてや定量は困難である。このため、化学分析や走査電子顕微鏡（SEM・EDXA）観察による方法が望ましい。

表 3.7.1 アルカリ骨材反応に関する試験^④

試験項目		試験方法等	
骨材の有害性に関する試験	①コアの膨張量試験	<p>一般にコンクリート構造物中においてアルカリ骨材反応が生じるとコンクリートに膨張が生じ、劣化が進行する。したがって、採取コアの促進膨張試験を行うことにより、今後どの程度膨張するかの判定値とすることが可能である。</p> <p>膨張試験は、採取コアにコンタクトゲージ用ポイントを接着したステンレス製バンドを巻き付け、ポイント間の距離をコンタクトゲージを用いて測定する方法により行う。</p>	
	②岩種判定	目視による観察	採取コアから取り出した骨材もしくはコアのスライス片を用いて、鉱物学識経験者が目視観察により骨材の岩種判定を行う。
		偏光顕微鏡観察	鉱物学識経験者が、コア中の粗骨材を対象に薄片試料を作成して偏光顕微鏡観察を行うことにより、アルカリ骨材反応性鉱物等の有害鉱物の有無を判定する。
		粉末X線回折	一般には採取コア中から粗骨材を取り出し、粉末X線回折法により岩種の構成鉱物の同定を行い、アルカリ骨材反応に有害な鉱物の有無を判定する。また、コア粗骨材とモルタル部分に分離し、それぞれについて粉末X線回折測定を行うことにより、アルカリ骨材反応性鉱物等、コンクリートの品質に有害影響を及ぼす物質の有無を判定する場合もある。
③アルカリ含有量分析	アルカリ骨材反応は、コンクリート中のアルカリと水が反応性骨材に作用することにより生ずる。したがって、コンクリート中のアルカリ量を測定することにより、アルカリ骨材反応の可能性の有無を把握することが出来る。		
反応の有無に関する試験	④シリカゲルの確認	<p>コンクリートの生じている析出物（白色析出物）が、エフロレッセンスであるのか、あるいはアルカリ骨材反応による生成物であるシリカゲルかどうかを確認するために行う。</p> <p>シリカゲルであるかどうかの確認は、化学分析を用いることもあるが、通常は粉末X線回折法により結晶性成分を同定（判別）する方法が多用されている。</p>	

(3) 圧縮強度および静弾性係数の測定

アルカリ骨材反応のようにコンクリート内部に微細なひび割れが生じ、組織の破壊が進行する劣化においては、圧縮強度の低下を生じるが、それ以上に静弾性係数が低下し、場合によっては $1/3 \sim 1/5$ 程度にまで低下することがある。このように極端に小さな静弾性係数が得られた場合は、ASRが生じている可能性がある。但し、凍害によっても同様の現象を生じるので注意が必要である。

3.7.3 鉄筋破断に関する調査

ASRによる劣化が生じた構造物は、これまでの調査から、外観上著しく劣化しているように見える場合でも、構造物の耐荷力への影響は少ないと考えられてきた。しかし、近年、ASRが原因で内部の鉄筋が破断していると思われる構造物もあることが明らかになっている。したがって、外観調査の結果、幅が大きいひび割れが見られる場合は鉄筋をはつりだすなどして、鉄筋の健全度を調査するものとする。



写真 3.7.1 ASRによる鉄筋破断

これまでの事例では破断は鉄筋の折り曲げ加工部に集中していることから、当該折り曲げ部の鉄筋をはつり出して状況を確認することが望ましい。

3.8 コンクリート構造物の点検調査に関する提案

3.8.1 モニタリング調査のための提案

コンクリート構造物を長期にわたって健全な状態に保持するためには、定期的な点検が不可欠である。高い点検精度を得るためには、試料採取や破壊を伴う調査が必要となることが多い。しかし、破壊調査は少なからず構造物にダメージを与えることになるため、多くの箇所数を調査することは難しく、頻度も多くはできない。

そこで構造物の新設時に、定期的なモニタリング調査を行うことを全体とした工夫を、盛り込むことを提案する。

(1) コンクリートの劣化に対して

1) 供試体を暴露しておく方法

従来から行われている方法ではあるが、特別な場合に限られている。新設時に作成した供試体を定期的に試験を行い、その結果から構造物本体の劣化進行予測を行う。

従来の円柱供試体以外にも、凍害による損傷度を評価するための角柱供試体や、平板状の供試体、鉄筋を内蔵した腐食モニタ用の供試体なども考えられる。

試験を簡便に行うことができるが、長期に渡る供試体の管理方法の問題もある。但し、凍結融解作用などに対しては、構造物本体と供試体との大きさの違いにより結果に差が生じる可能性がある。

2) 採取しやすい突起をあらかじめ作成しておく方法（ボス供試体）

構造物本体に突起状に供試体部分を同時に作成しており、適宜その部分を取り外して試験を行う。本体と同材料の供試体が得られるので、コンクリート強度や中性化、塩化物濃度測定などに適する。

「ボス供試体」がこれに相当するが、ボス供試体は現在のところ若材齢時の品質管理を目的としているが、これを長期間にわたる維持管理にも応用できれば有用である。但し、採取部分を突起状とした場合には、本体の一般部との温度履歴や水掛かり状況の違いなどの影響を受ける可能性がある。

3) コア採取をできる非構造部分をあらかじめ作成しておく方法

本体の一部に破壊しても構わない部分をあらかじめ作成しておき、その範囲でコア採取やはつり調査を行う。供試体採取に多少手間を要するが、本体とほぼ同環境にあった状態の供試体を採取できる。

(2) 鉄筋の劣化に対して

1) 自然電位測定用電極をあらかじめ埋め込んでおく方法

鉄筋腐食の非破壊検査法としては、自然電位測定が一般的であるが、電極を取り付けるために鉄筋のはつり出しが必要である。あらかじめ、鉄筋と接続した電極を構造体の表面に露出させておくことで、完全非破壊で自然電位測定ができる。

自然電位測定による腐食度評価はばらつきが大きい傾向があるが、同一箇所を繰り返し測定することで、無作為の測定に比べて精度が向上することも期待できる。

表 3.8.1 モニタリング調査のための工夫

	手 法	試験項目	利点	留意点
①	本体と同じ供試体を現地に暴露しておく テストピース 角柱供試体 など	コンクリート強度 塩化物イオン濃度 中性化	・本体からのコア採取やはつりを行わなくて良い	・極力本体と同環境になるように設置する必要がある。 ・設置場所の違いによる影響が大きい現象や、コンクリートの体積による影響が大きい現象には不向き。
②	あらかじめ本体に破壊しても良い部分を作っておき、そこでコア採取やはつりを行う。 無筋のふかしコンクリート部分 など	コンクリート強度 塩化物イオン濃度 中性化	・本体と同材質、同環境の試料を採取できる。 ・試料採取にあたって、構造的ダメージを生じない。	・試料採取の手間を必要とする。 ・設置場所の違いによる影響が大きい現象や、コンクリートの体積による影響が大きい現象には不向き。 ・試料採取箇所が限定される。
③	あらかじめ鉄筋に電極を取り付けておく。	鉄筋腐食度(自然電位法) " (分極抵抗法)	・測定にあたって、鉄筋を研り出す必要がない。	・測定箇所が限定される。
④	あらかじめモニタリング位置を決め、非破壊試験により初期状態を測定しておく。	反発硬度(強度) 凍害(相対動弾性係数)	・相対値でなければ評価できない手法も適用できる。 ・測定頻度の制約がないので、こまめに検査できる。	
⑤	プルアウト法のアタッチメントを埋め込んでおく。	コンクリート強度 (ASTM C 900)	・損傷が局所的である。 ・試験方法が規格化されている。	

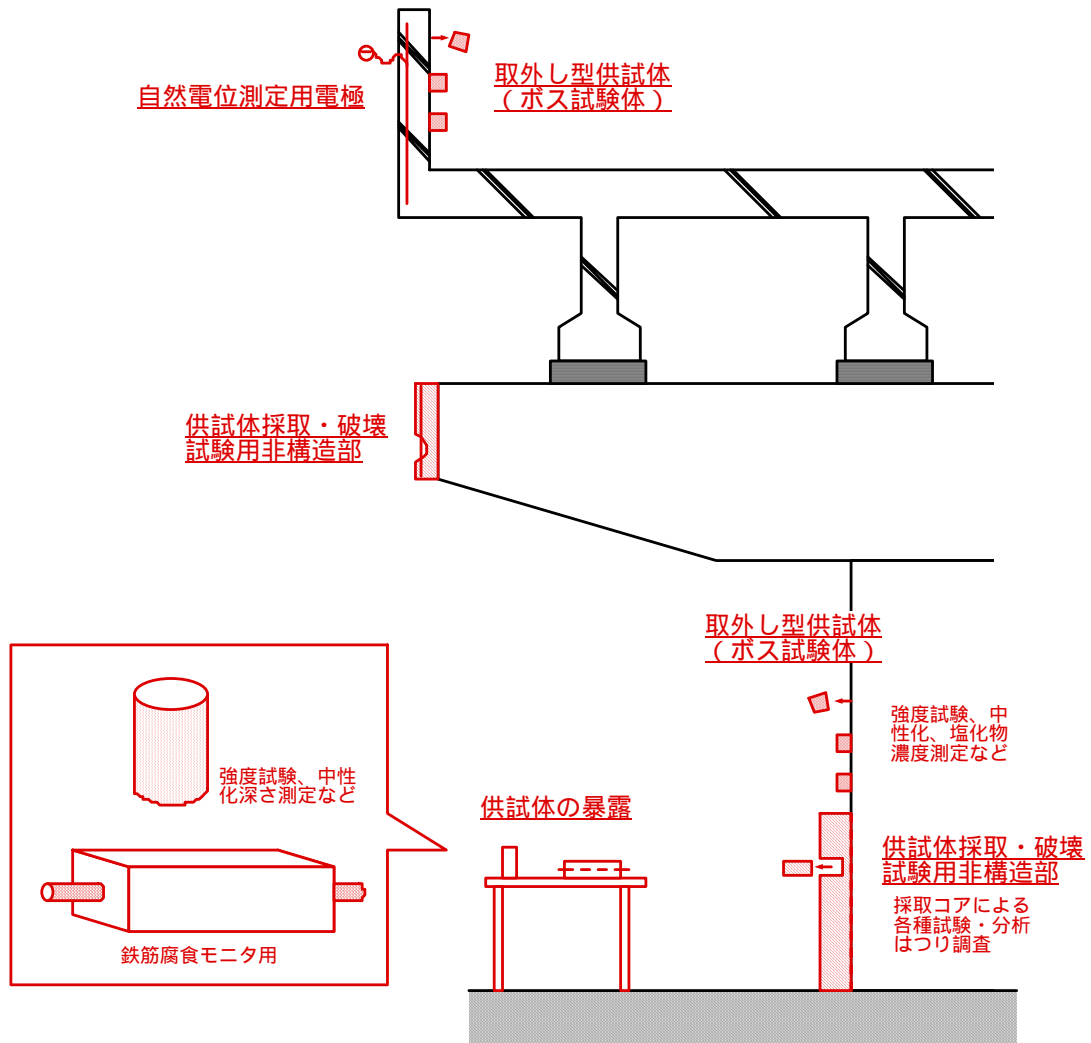


図 3.8.1 R C 構造物の劣化進行モニタリングを考慮した工夫

3.8.2 維持管理に必要な構造物の初期情報

一般的にはRC構造物の点検は、ある程度劣化が顕在化してから行われることが多い。その際、コンクリートの物性などについて各種の試験・分析が行われるが、通常はその初期状態は不明である。設計値が示されているものもあるが、コンクリート強度のように設計値と実際の値に差があるものも多い。

精度の高い点検・モニタリングのためには、構造物の初期状態を知り、そこからどの程度性能・品質が低下しているかを評価する必要があると考える。

そこで、コンクリート構造物の維持管理上、有用と考えられる初期情報について整理する。

(1) 構造物の維持管理全般のための情報

コンクリート構造物の維持管理のためには、設計および施工に関する様々な情報が必要となるが、設計施工に関する全情報は膨大である。したがって、維持管理において必要性の高い情報を抜き出して、その後の管理のために所有するのが効率的と考えられる。

そこで、構造物別に維持管理のために有用と考えられる初期情報を以下に挙げる。

a. 一般事項

分類		項目	内容
一般事項	構造物名称	名称	
		路線名	
		所在地	
	関係所轄	発注者	
		監理者	
		設計者	
		施工者	
		維持管理者	維持管理担当事務所
		施工年月日	概略工程
	型式	構造形式	
		延長	
		準拠基準	道路橋示方書、要領関係、指針、マニュアル
		設計図書	一般図、設計図、計算書、地盤資料等の有無

b.生コンクリート品質記録 ※北海道開発局におけるコンクリートの品質記録フォーマットによる

項目			打設部位			
			①	②	③..	
配合	種別					
	強度	呼び強度				
		設計基準強度	(N/mm ²)			
	粗骨材最大寸法	(mm)				
	スランブの範囲	(cm)				
	空気量の範囲	(%)				
	水セメント比 W/C	(%)				
	細骨材率 s/a	(%)				
	単体量	水 W	(kg/m ³)			
		セメント C	(kg/m ³)			
		細骨材 S	(kg/m ³)			
		粗骨材 G	5~20mm	(kg/m ³)		
			20mm~	(kg/m ³)		
		混和材	(kg/m ³)			
	混和剤	種類・商品名				
添加量		(ml/m ³)				
生コンクリート製造会社名						
JIS工場指定の有無						
材料特性	種類					
	メーカー名					
	密度	g/cm ³				
	比表面積	cm ² /g				
	凝結	水量	%			
		始発	min			
		集結	h			
	安定性	バット法				
		ルシヤテリエ法	mm			
	圧縮強さ	1day				
		3day				
		7day	(N/mm ²)			
		28day				
		91day				
	水和熱	7day	(J/g)			
28day						
成分	酸化マグネシウム	(%)				
	三酸化硫黄	(%)				
	強熱減量	(%)				
	余アルカリ	(%)				
	塩化物イオン	(%)				
	けい酸三カルシウム	(%)				
	けい酸二カルシウム	(%)				
アルミン酸三カルシウム	(%)					
骨材	材料名	粗/細の別				
		種類				
	絶乾密度	(g/cm ³)				
	吸水率	(%)				
	粘土塊量	(%)				
	微粒分量	(%)				
	洗い試験によって失われる量	(%)				
	原石名					
	塩分 NaCl	(%)				
	安定性	(%)				
	すり減り減量	(%)				
	単位容積重量	(kg/m ³)				
	実積率または粗粒率					
	混合割合	(%)				
	産地					
販売会社						

項目			打設部位			
			①	②	③..	
材料特性	混和材料	種類				
		品名、製造会社名				
		型式				
		減水率	(%)			
		ブリージング量の比	(%)			
		凝結時間の差	始発			
			終結			
		圧縮強度比	3day			
			7day			
			28day			
		長さ変化比	(%)			
		凍結融解に対する抵抗性(相対動弾性係数)	(%)			
		経時変化量	スランブ	(cm)		
			空気量	(%)		
		塩化物イオン(Cl ⁻)量	(kg/m ³)			
全アルカリ量	(kg/m ³)					

項目			打設部位			
			①	②	③..	
品質試験結果		種別				
		呼び強度				
		設計基準強度	(N/mm ²)			
		配合強度	(N/mm ²)			
		σ 28強度	最大	(N/mm ²)		
			最小			
			平均			
			試験個数			
		空気量	最大	(%)		
			最小			
			平均			
		塩分量	最大	(kg/m ³)		
			最小			
			平均			
		アルカリ骨材反応対策				
コンクリート運搬時間	(分)					
打設関係		打設期間				
		打設数量				
		コンクリート温度	最高			
			最低			
			平均			
		打設時の気温	最高			
			最低			
		打設方法				
養生方法・期間						
打設会社名						

c. トンネル

分類	名称項目	内容
形状	トンネル内空断面積	
	最大土被り厚	トンネル坑の地山最大かぶり厚さ
構造情報 (①掘削)	トンネル掘削工法	例: 全断面工法、補助ベンチ付全断面工法、上半工法、中壁分割工法等
	トンネル掘削方式	例: 発破工法、機械掘削方式
	トンネル掘削区分	施工した掘削区分を区間・延長で明示
	地質区分	例: 玄武岩、安山岩、花崗岩、泥岩、断層、破碎帯等を区間・延長で明示
構造情報 (②防水)	防水工種別	防水シートの種別・例: EVAシート、PVCシート等
	シート厚	
構造情報 (③断熱工)	断熱工種別	断熱工の種別・例: 吹付け断熱材
	断熱工厚	
構造情報 (④ロックボルト)	ロックボルト配置	ロックボルトの延長方向・周方向の打設ピッチ、施工範囲及び長さ・本数
	ロックボルト種別	ロックボルトの種別・例: ねじり棒鋼、異型棒鋼等
構造情報 (⑤吹付けコンクリート)	吹付け厚	
	吹付けコンクリート種別	吹付けコンクリート種別・例: 従来吹付けコンクリート、高強度吹付けコンクリート等
構造情報 (⑥鋼アーチ支保工)	鋼アーチ支保工配置	鋼アーチ支保工の設置間隔、施工範囲
	鋼アーチ支保工種別	鋼アーチ支保工の種別・例: HH-200(高規格)、NH-200(従来)
構造情報 (⑦覆工コンクリート)	覆工コンクリート種別	覆工コンクリートの種別・例: 設計基準強度、配合名称
	覆工コンクリート厚	
	コンクリート材料	※共通事項に記載
	コンクリート試験結果	※共通事項に記載
	鉄筋配置	鉄筋の軸方向・軸直角方向のピッチ、本数、設計かぶり
	鉄筋種別	鉄筋の種別・例: SD295 D22等
	鉄筋材料	引張強度、防錆処理有無
セトル形式	材質、ラップ長、油圧・手動等	
施工情報	補助工法種別	補助工法実施目的: 切羽安定対策、地表面沈下対策、湧水対策等
	補助工法内容	例: AGF、フォアホーリング、鏡ボルト、水抜ホーリング、仮インバート等
	計測情報	A計測: 坑内観察調査、内空変位、天端沈下等 B計測: 地中変位、ロックボルト軸力等 の計測値
	湧水情報	湧水区間、湧水量測定値
完成時 点検情報	覆工表面目視点検	ひびわれ、コールドジョイント、浮き・はく離、ジャンカ、漏水、遊離石灰、補修工跡等の変状をスパン毎に展開図にて表示
	覆工打音点検	打音点検結果での異常箇所を展開図にて表示

d. 橋梁

分類	項目	内容		
材料	コンクリート	※共通事項に記載		
	グラウト	基本配合	W/C 混和材、混和剤の種類、使用量 セメント種別、産地	
		基本物性値	強度 塩化物量	
	PC鋼材、鉄筋	基本物性値	種類、材質 被覆の有無と種類	
	表面被覆、改良材	基本物性値		
設計	設計的配慮	鋼材かぶり		
		使用材料	コンクリート材料 鋼材 シース 防水・被覆 その他付属品	
施工	実施工概要	設計変更	有無と内容	
		施工検討	残留応力	
	コンクリート	打設	打設日、順序 気象状況	
		養生	方法 期間	
	工法	定着工法		
		架設工法		
		特殊工法		
	竣工時検査	検査時期		
		検査項目	強度 そり・たわみ ひび割れ 表面状況	
		初期変状・欠陥	位置、程度	
施工時における補修		補修箇所、方法		
事後試験	コア採取	実施の有無、指定部位、圧縮強度		
環境	環境条件	使用環境	使用上の特殊事情	
		自然環境	年平均降水量	
			年平均気温	
			凍結融解、乾湿繰り返し環境 日照条件	
	隣接構造物	劣化・補修状況		
補修・補強履歴	補修	補修部位	方法・工法 事由・原因 補修効果	
		補強	補強部位	方法・工法 事由・原因 補強効果
			点検履歴	点検部位

e. 擁壁

分類		項目	内容	
材料	コンクリート	※共通事項に記載		
	鋼材	基本物性値	鉄筋種別、鉄筋量 特殊鋼材(被覆鉄筋等)の使用の有無	
設計	設計的配慮	誘発目地	有無、形状、欠損率、間隔	
		基礎構造	基礎の種類、杭の有無・種類	
	構造	断面形状	逆T型、L型、重力式、U型など	
		標準構造寸法	高さ、版厚、底版長など	
		支持地盤	種類、地耐力	
		埋め戻し土		
施工	実施工概要	設計変更	有無と内容	
		施工検討		
	コンクリート	打設	打設日、順序 気象状況	
		養生	方法 期間	
		品質管理試験結果	※共通事項に記載	
	工法	打設方法		
		特殊な材料、施工法		
	竣工時検査	検査時期		
		検査項目	強度	
			ひび割れ	
			表面状況	
		初期変状・欠陥	位置、程度	
施工時における補修		補修箇所、方法		
事後試験	コア採取	実施の有無、指定部位、圧縮強度		
環境	環境条件	使用環境	使用上の特殊事情	
		自然環境	年平均降水量	
			年平均気温	
			二酸化炭素濃度に及ぼす要因の有無	
			凍結融解、乾湿繰り返し環境、最低気温	
			海岸からの距離	
			日照条件	
		隣接構造物	劣化・補修状況	
補修・補強履歴	補修	補修部位	方法・工法 事由・原因 補修効果	
		補強	補強部位	方法・工法 事由・原因 補強効果
			点検履歴	点検日時 点検結果

(2) コンクリートの劣化度評価のための初期情報

これまで構造物の劣化調査は劣化がある程度進行してから行われることが多かったため、初期状態が不明のまま評価せざるを得なかった。初期が既知であれば各種性能について真の低下度を評価することができ、劣化度評価の精度向上が期待できる。

コンクリート構造物の劣化度評価において有用と思われる初期情報を以下に挙げる。

1) コンクリート強度

竣工時の強度は別途採取した供試体により確認されているが、供試体強度と構造物本体の強度にある程度の差が生じることは避けられない。

そのため、コンクリートの強度劣化は初期強度からの低下度合いではなく、設計基準強度に対する比で評価されることが多い。しかしその場合、実際には強度劣化を生じていても、初期強度が大きければ、劣化進行が見逃されることになる。

3.8.1 の提案したような方法により、初期における構造物本体の強度を確認しておくことにより、経年による真の強度劣化を評価することができる。

2) 反発硬度

反発硬度による点検は簡便であるが、コンクリートの状態によるばらつきが大きい欠点がある。これについても、初期に測定範囲を特定しておき、定期的に同一範囲内において測定すれば、少なくともコンクリートの状態によるばらつきは最小限に抑えられ、経年による反発硬度の変化を捉えることができる。

但し、反発硬度は経年による炭酸化や、測定時の含水状態により変化するので注意が必要である。

3) 動弾性係数

一般に凍害による損傷度評価は、初期状態に対する動弾性係数の低下割合（＝相対動弾性係数）で評価することが多い。通常は角柱供試体について凍結融解促進試験を行い、その前後の動弾性係数を測定するが、実際の構造物には適用しにくい。

超音波伝播速度と動弾性係数の間には次の関係がある。

$$E_d = \frac{\rho \cdot VL^2}{g} \cdot \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{1 - \nu}$$

ここで、

E_d : 動弾性係数 (N/mm²)

VL : 超音波伝播速度 (mm/sec)

ρ : コンクリートの密度 (kg/mm³)

g : 重力加速度 (mm/sec²)

ν : ポアソン比

したがって、決められた測定位置について、初期状態で超音波伝播速度を測定しておけば、その後同様の測定を行うことにより、相対動弾性係数による凍害損傷度の評価が可能となる。

凍害は北海道においては、大きな劣化要因であるが、他の劣化現象で使用する信頼性の高い判定指標、例えば、

「中性化」 → 中性化深さ測定値

「塩害」 → 塩化物イオン濃度

「アルカリ骨材反応」 → 促進膨脹量、反応性分析

がないため、目視や打診検査に頼ることが多かった。凍害危険度の高い部位について、超音波速度の初期データを採取することで、凍害評価の精度向上が期待できる。

4) 初期段階のひび割れ

鉄筋コンクリート構造物の劣化現象の多くは、まず「ひび割れ」として現れることが多いが、初期段階で劣化以外の要因でもひび割れは発生する。コンクリート打設直後の温度ひび割れや、竣工後3年程度の間を生じる乾燥収縮ひび割れなど、材料や施工の特性上生じるひび割れは劣化とは言えないので、他の原因により生じたひび割れと別の扱いをする必要がある。しかし、現況ではある程度年数を経過した後に1回目の点検を行うため、その時点では既に初期段階に生じたひび割れと、その後の劣化により生じたひび割れを見分けられないことが多い。

そこで、竣工後2～3年経過した時点で第1回の点検を実施することで、初期段階に生じた現象と経年による劣化を区別できると考えられる。

参考文献

- 1 土木学会：コンクリート標準示方書 [維持管理編]，2001. 1
- 2 長谷川寿夫ほか：コンクリート構造物の耐久性シリーズ 凍害，1988. 2，技報堂出版
- 3 桂修：過冷却現象を考慮したコンクリートの凍害機構に関する研究，北海道大学学位論文 1999
- 4 小林一輔ほか：コンクリートの組織構造の診断，2005. 3，森北出版
- 5 脇清士：最新のコンクリート防食と補修技術，1999. 9，山海堂
- 6 土木研究所，日本構造物診断技術協会：非破壊試験を用いた土木コンクリート構造物の健全度診断マニュアル，2004

4. コンクリート構造物の診断

4.1 診断の考え方

図 4.1.1 に示す維持管理の手順の中で、点検結果に対して行われる劣化機構の推定、劣化予測、評価および判定を、ここでは診断と称する。

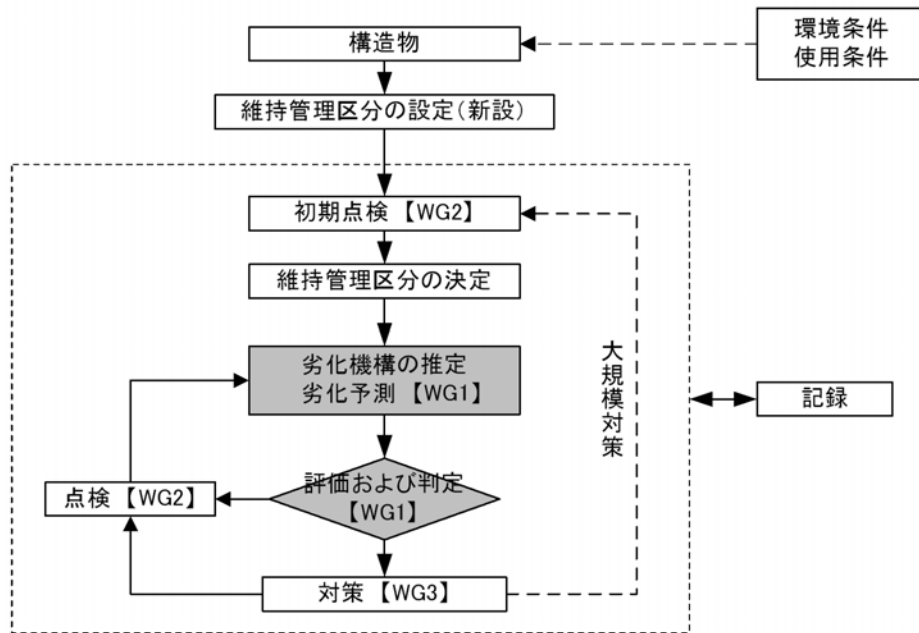


図 4.1.1 維持管理における診断

コンクリート構造物の診断においては、まず点検において把握した外観上の変状を元に、これらの原因を明確にする必要がある。ここに、変状とは初期欠陥、損傷、劣化の総称であり、**損傷**は地震や衝突等によるひび割れやはく離など短時間の内に発生し、時間の経過によって進行しないもの、**劣化**は時間の経過に伴って進行するものをいう。変状が劣化に起因すると推定される場合には、必要に応じて図書調査や詳細調査を実施し、環境条件、使用条件下をも考慮して**劣化機構の推定**をする。次に、構造物や部位・部材の劣化による性能低下を把握し、適切で計画的な維持管理を行うことを目的として、**劣化予測**を行う。**評価および判定**の評価とは、構造物の性能が要求性能を満足するか否かを評価することを言い、判定とは評価の結果を受けて点検と対策の要否を判定することを言う。

(1) 劣化機構の推定¹⁾

点検によって構造物の変状を発見した場合には、劣化機構から推定される劣化現象か否かを推定しなければならない。劣化機構の推定は、外観上の変状の特徴、環境条件・使用条件を主体とした外的な要因、劣化の進行や劣化度の劣化指標とともに推定する。

表 4.1.1 に外観上の変状の特徴から推定される劣化機構を、表 4.1.2 に環境条件、使用条件の外的要因によって推定される劣化機構を示す。外観上の変状の特徴から推定される劣化機構の詳細については、「3. コンクリート構造物の点検・試験方法」に示している。

以上の外観上の変状、および外的要因（環境条件、使用条件）から劣化機構が推定できない場合は、表 4.1.3 に示す劣化指標に着目した詳細点検（試験を含む）の結果も合わせて劣化機構を推定する。

表 4.1.1 外観上の損傷から推定される劣化機構

劣化機構	特徴的な外観上の損傷
中性化	鉄筋軸方向のひび割れ、コンクリートはく離
塩害	鉄筋軸方向のひび割れ、錆汁、コンクリートや鉄筋の断面欠損
凍害	微細ひび割れ、スケーリング、ポップアウト、変形
化学的侵食	変色、コンクリートはく離
アルカリ骨材反応	膨張ひび割れ（拘束方向、亀甲状）、ゲル、変色
疲労（道路橋床版）	格子状ひび割れ、角落ち、遊離石灰

表 4.1.2 外的要因によって推定される劣化機構

劣化機構	環境条件			使用条件				
	海岸地域	寒冷地域	温泉地域	湿乾燥り返し	凍結防止剤の使用	繰り返し荷重	二酸化炭素	酸性水
中性化							○	
塩害	○	○		○	○			
凍害		○		○	○			
化学的侵食			○					○
アルカリ骨材反応				○	○			
疲労（道路橋床版）						○		

表 4.1.3 劣化機構と劣化指標

劣化機構	劣化要因	劣化指標
中性化	二酸化炭素	中性化深さ、鋼材腐食量
塩害	塩化物イオン濃度	塩化物イオン濃度、鋼材腐食量
凍害	凍結融解回数	凍害深さ、鋼材腐食量
化学的侵食	酸性物質 硫酸イオン	劣化因子の浸透深さ、中性化深さ 鋼材腐食量
アルカリ骨材反応	反応性骨材	膨張量（ひび割れ）
疲労（床版、はり）	大型車通行量 繰返し荷重	ひび割れ密度、たわみ 累積損傷度、鋼材の亀裂長

(2) 劣化予測, 評価および判定

劣化予測は, 構造物や部位・部材の諸性能の変化を時間軸で評価することであり, 理想としては性能低下の予測手法を確立し, 定量的な性能評価を行うことが望ましい. しかしながら, 表 4.1.4 に劣化機構に対する劣化予測の現状を示すが, 中性化, 塩害では劣化予測に関するデータが集積されつつある現状であり, 凍害等その他の劣化機構では精度の差はあるものの劣化予測が難しいのが現状である.

表 4.1.4 劣化機構に対する劣化予測の現状

劣化機構	劣化予測	代表的な指標	劣化予測の現状
中性化	中性化の進行予測	鋼材の腐食の進行予測	劣化予測に関するデータが 集積されつつある.
塩害	塩化物イオンの拡散予測	鋼材の腐食の進行予測	
凍害	凍害発生の予測	凍害深さの予測	精度の高い劣化予測が 難しい.
化学的侵食	化学的侵食の進行予測	鋼材の腐食の進行予測	
アルカリ骨材反応	A S R 発生の予測	A S R の進行予測	→点検が重要
床版の疲労	ひび割れの形態を確認し進行を予測		劣化予測が難しい.
はり部材の疲労	補強鋼材の亀裂進展を予測 (線形累積損傷則)		→点検が重要 (学習効果)

このため, コンクリート標準示方書 [維持管理編] においては, 図 4.1.2 に示す通り, 劣化過程の長さの予測を半定量的なグレーディング手法を用いることにより可能としている. この劣化予測のモデルは, 劣化の進行をその程度により潜伏期, 進展期, 加速期, 劣化期の4つのグレードに区分し (これを劣化過程という), 劣化過程と主に構造物の外観上の劣化, さらに劣化過程と標準的な性能低下とを関連付ける劣化予測を行う手法であり, 点検時および予定供用期間終了時の2時点の予測を行う.

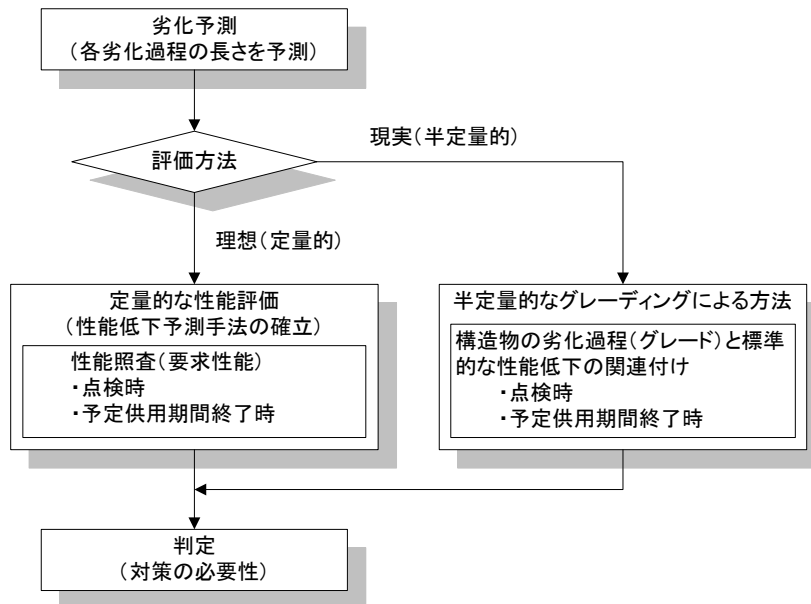


図 4.1.2 劣化予測, 評価および判定の流れ

以下に, 代表的な劣化機構として中性化, 塩害, 凍害, 化学的侵食, アルカリ骨材反応, 疲労に着目し, 劣化機構の推定, 評価および判定について詳述する. 最後に, 診断の際の留意点について述べる.

4.2 中性化

4.2.1 劣化機構の推定：中性化

中性化による劣化か否かは、表 4.2.1 の通り外観上の損傷、環境条件・使用条件の外的要因、詳細調査による劣化指標を考慮して推定する。

外観上の損傷としては、施工不良に起因するかぶりの薄い箇所、材料分離等による高水セメント比の部位、豆板やひび割れなどの部分は損傷が顕在化しやすい箇所として注意が必要である。

また、外的要因としては、二酸化炭素の供給は気中部にある部位全てに共通するが、コンクリートが乾燥している場合に、中性化の進行が早いことが知られており、降雨等による水分の供給を受けにくく、日射等によって乾燥しやすい部位は損傷を受けやすい箇所として注意が必要である。

表 4.2.1 中性化の劣化推定

	調査内容	中性化による劣化か否かの推定
(1)外観上の損傷	<ul style="list-style-type: none">鋼材に沿ったひび割れ浮き、はく離、はく落鉄筋の露出錆汁	左記変状項目のいずれかに該当する場合、有 左記変状項目の全てに該当しない場合、無
(2)外的要因	<ul style="list-style-type: none">二酸化炭素の供給乾燥しやすい部位既往調査、補修記録等の調査	推定の参考とする
(3)詳細調査	<ul style="list-style-type: none">中性化深さかぶり（局部破壊あるいは非破壊調査）鋼材の腐食状態（局部破壊あるいは非破壊調査）	推定、評価・判定の参考とする

4.2.2 劣化予測：中性化¹⁾

中性化による主な劣化現象は鋼材腐食である。このため、中性化による性能低下を、図 4.2.1 の通りモデル化し、中性化深さ、鋼材腐食、腐食ひび割れを劣化指標として評価する方法がとられている。すなわち、中性化深さが鋼材の腐食発生限界に達するまでの**潜伏期**、腐食開始から腐食ひび割れが生じるまでの**進展期**、ひび割れの存在によって腐食速度が増大する**加速期**、鋼材腐食の進行によって耐荷力等の低下が顕著な**劣化期**に区分されている。

ここで、各劣化過程とその期間を決定する要因は表 4.2.2 の通り凍害深さ、凍結融解回数、凍結水量等を指標として設定されるべきであるが、凍害深さの測定手法やその予測手法は確立されていないのが現状である。このため、現実的には構造物の外観上のグレードに対応した性能評価を行い、対策の要否を判定する方法がとられている。

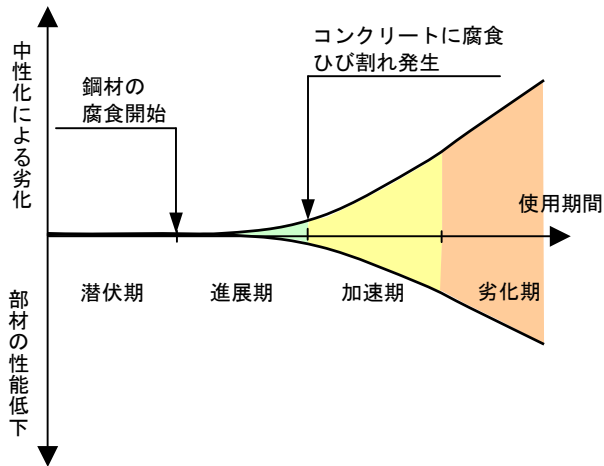


図 4.2.1 中性化：劣化過程の概念図

表 4.2.2 中性化：劣化過程の定義と期間を決定する要因

劣化過程	定義	期間を決定する要因
潜伏期	中性化深さが鋼材の腐食発生限界に到達するまでの期間	中性化進行速度
進展期	鋼材の腐食開始から腐食ひび割れ発生までの期間	鋼材の腐食速度
加速期	腐食ひび割れ発生により鋼材の腐食速度が増大する期間	ひび割れを有する場合の鋼材の腐食速度
劣化期	鋼材の腐食量の増加により耐荷力の低下が顕著な期間	

(1) 中性化の進行予測

1) 中性化の進行予測の定式化

中性化深さの予測は、鋼材の腐食が開始する潜伏期の終了時点の予測において重要であり、 \sqrt{t} 則に基づいて行う。

$$y = b \cdot \sqrt{t} \tag{4.2.1}$$

ここに、

y：中性化深さ (mm)

t：中性化期間 (年)

b：中性化速度係数 (mm/ $\sqrt{\text{年}}$)

2) 中性化深さの測定値がある場合の中性化進行予測

コンクリート標準示方書〔維持管理編〕に従い、中性化深さの測定値から中性化速度係数を求め、中性化深さの予測を行う場合について解説する。

中性化深さの予測式

$$y = \gamma_{cb} \cdot \gamma_p \cdot \gamma_c \cdot b \sqrt{t} \quad (4.2.2)$$

ここに、

- y : 中性化深さ (mm) の予測値.
- γ_{cb} : 予測式の精度に関する安全係数. 新設構造物の場合と同様に、一般に 1.15 とし
てよい.
- γ_p : 点検結果のばらつきを考慮する安全係数. 一般に 1.0 としてよい.
- γ_c : 試料数が限定されたことによる、点検結果と実際の構造物との誤差を考慮した
安全係数. 一般に 1.0 としてよい.
- b : 点検結果から求めた中性化速度係数 (mm/年). 式(4.2.1)より $b=y/\sqrt{t}$.

建設 20 年後の中性化深さの実測値が 8mm である時、建設 50 年後の将来予測は、式(4.2.2)を用いて、図 4.2.2 の通りとなる。すなわち、調査時点の経年と測定した中性化深さから中性化速度係数 $b=1.79\text{mm}/\sqrt{\text{年}}$ を計算し、建設 50 年後の中性化深さは予測式の精度に関する安全係数 $\gamma_{cb}=1.15$ を考慮して、 $y=1.15 \times 1.79 \times \sqrt{50}=14.6\text{mm}$ となる。

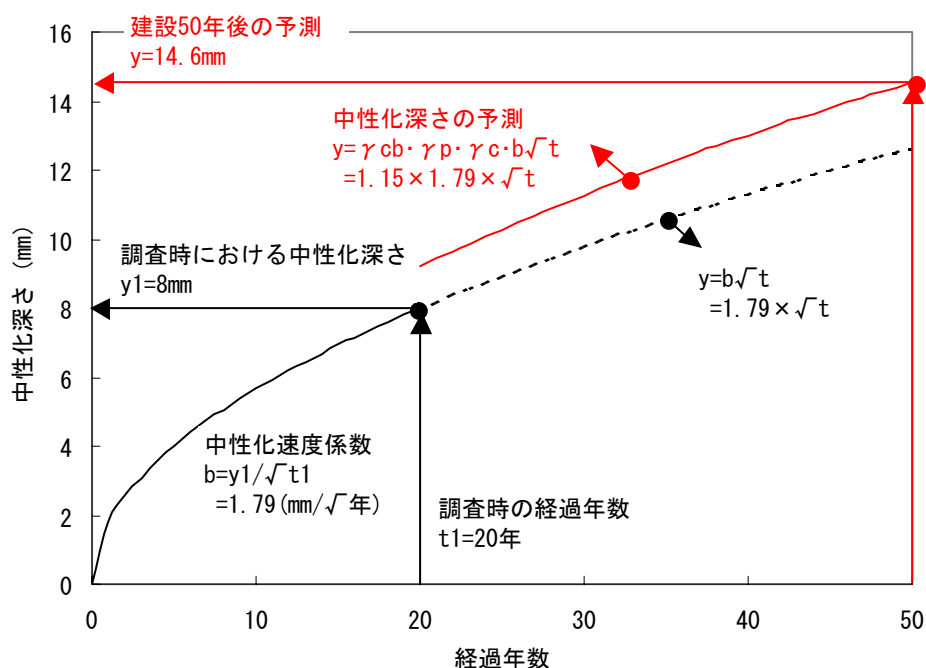


図 4.2.2 中性化深さの予測例

3) 中性化深さの測定値がない場合の中性化進行予測²⁾

コンクリート標準示方書〔維持管理編〕¹⁾に従い、中性化深さの測定値がない場合の中性化進行予測について解説する。

中性化の進行は、新設構造物の場合に準じるものとし、式(4.2.3)より中性化深さを求める。

中性化深さの予測式

$$\begin{aligned}
 y &= y_d \\
 &= \gamma_{cb} \cdot \alpha_d \cdot \sqrt{t} \\
 &= \gamma_{cb} \cdot (\alpha_k \cdot \beta_e \cdot \gamma_c) \cdot \sqrt{t} \\
 &= \gamma_{cb} \cdot (\gamma_p \cdot \alpha_p) \cdot \beta_e \cdot \gamma_c \cdot \sqrt{t} \\
 &= \gamma_{cb} \cdot \gamma_p \cdot \gamma_c \cdot \beta_e \cdot (-3.57 + 9.0W/B) \cdot \sqrt{t} \\
 &= \gamma_{cb} \cdot \gamma_p \cdot \gamma_c \cdot \beta_e \cdot (-3.57 + 9.0 / (1 + (k-1)x) \cdot W/C) \cdot \sqrt{t} \tag{4.2.3}
 \end{aligned}$$

ここに、

- y : 中性化深さ(mm)の予測値.
- y_d : 新設構造物における中性化深さの設計値(mm). 中性化深さの予測値とする.
- γ_{cb} : 中性化深さの設計値y_dのばらつきを考慮した安全係数. 新設構造物の場合と同様に1.15としてよい.
- α_d : 中性化速度係数の設計値(mm/√年). α_d = α_k · β_e · γ_c
- α_k : 中性化速度係数の特性値. α_k = γ_p · α_p
- γ_p : α_pの精度に関する安全係数. 新設構造物の場合と同様に1.1としてよい.
- β_e : 環境作用の程度を表す係数.
乾燥しやすい環境 : β_e = 1.6
乾燥しにくい環境 : β_e = 1.0
- γ_c : コンクリートの材料係数. 一般に1.0としてよい. ただし、上面の部位に関してはブリーディングによるコンクリートの品質低下を考慮して1.3とするのがよい.
- α_p : 中性化速度係数の予測値(mm/√年) α_p = a + b · W/B

ここに、

- a, b : セメント(結合材)の種類に応じて実績から求まる係数. a = -3.57 b = 9.0
- W/B : 有効水結合材比

$$W/B = W / (C_p + k \cdot A_d) = W / ((C - A_d) + k \cdot A_d) = W / (C + (k-1) \cdot A_d) = 1 / (1 + (k-1)x) \cdot W/C$$

- C_p : 単位体積当たりのポルトランドセメントの質量
- C : 単位体積当たりの混和材料を含むセメントの質量
- A_d : 単位体積当たりの混和剤の質量 A_d = x · C
- x : 混和材の置換率

高炉セメントB種の混和材の置換率はJIS規定30~60%に対して、通常40~45%程度を目安に生産³⁾されている。

- k : 混和材の種類により定まる定数
 フライアッシュの場合 : k=0
 高炉スラグ微粉末の場合 : k=0.7

式(4.2.3)をセメントの種類に応じて示す.

普通ポルトランドセメント :

$$y = \gamma_{cb} \cdot \gamma_p \cdot \gamma_c \cdot \beta_e \cdot (-3.57 + 9.0 \cdot W/C) \cdot \sqrt{t} \quad (4.2.4)$$

高炉セメント B 種 (混和材の置換率を 40%と仮定) :

$$y = \gamma_{cb} \cdot \gamma_p \cdot \gamma_c \cdot \beta_e \cdot (-3.57 + 9.0/0.88 \cdot W/C) \cdot \sqrt{t} \quad (4.2.5)$$

式(4.2.4), (4.2.5)より, 経過年数と中性化深さとの関係を, 図 4.2.3 (普通ポルトランドセメント), 図 4.2.4 (高炉セメント) に示す. この図より, 中性化深さが大きい傾向を示す要因としては, 高水セメント比 > 低水セメント比, 乾燥しやすい環境 > 乾燥しにくい環境, 高炉セメント > 普通ポルトランドセメントの関係にあることが分かる.

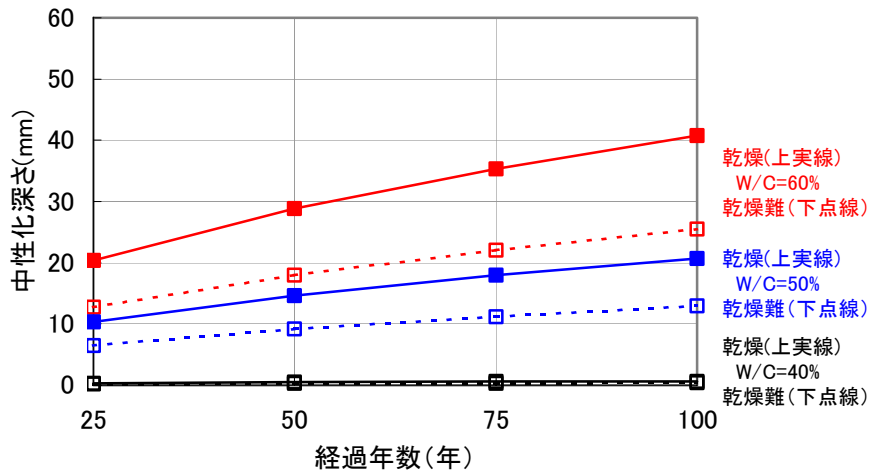


図 4.2.3 中性化深さと経過年数の関係 (普通ポルトランドセメント)

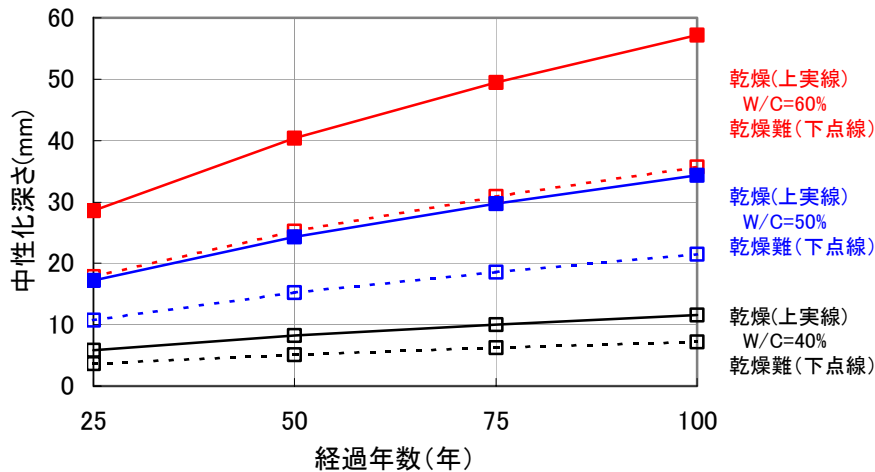


図 4.2.4 中性化深さと経過年数の関係 (高炉 B 置換率 40%)

尚、中性化深さの測定値(y)がある場合には、式(4.2.3)を水セメント比で表したを用いて、水セメント比を推定することができる。

$$W/C = [y / (\gamma_{cb} \cdot \gamma_p \cdot \gamma_c \cdot \beta_e \cdot \sqrt{t}) + 3.57] \times [1 + (k-1)x] / 9.0 \quad (4.2.6)$$

式(4.2.6)をセメントの種類に応じて示す。

普通ポルトランドセメント：

$$W/C = [y / (1.15 \cdot 1.1 \cdot 1.0 \cdot \beta_e \cdot \sqrt{t}) + 3.57] \times 1 / 9.0 \quad (4.2.7)$$

高炉セメントB種（混和材の置換率を40%と仮定）：

$$W/C = [y / (1.15 \cdot 1.1 \cdot 1.0 \cdot \beta_e \cdot \sqrt{t}) + 3.57] \times 0.88 / 9.0 \quad (4.2.8)$$

(2) 鋼材腐食の進行予測

鋼材腐食の進行予測は、研究例が多くないことから、点検結果から得られた腐食量の経時変化に基づくと必要がある。目視による腐食状況と鉄筋質量減少率の例を表4.2.3に示す。

表 4.2.3 目視による腐食状況と鉄筋質量減少率の関係 (例) ⁴⁾

腐食グレード	観察状況	鉄筋腐食減少率(%)	
		平均値	標準偏差
I	施工時の状況を保ち、以降の腐食は認められない。	0.8	0.2
II	部分的に軽微な腐食が認められる。	2.0	1.0
III	表面の体部分に腐食が認められる。	4.5	3.0
IV	部分的に断面欠損が認められる。	7.0	3.5
V	鉄筋の全周にわたり、断面欠損が認められる。	11.0	4.5

進展期の起点となる鋼材の腐食開始時期は、かぶりから中性化深さを減じた中性化残りが表4.2.4の値となる時期とする。

表 4.2.4 中性化により腐食が開始する中性化残り

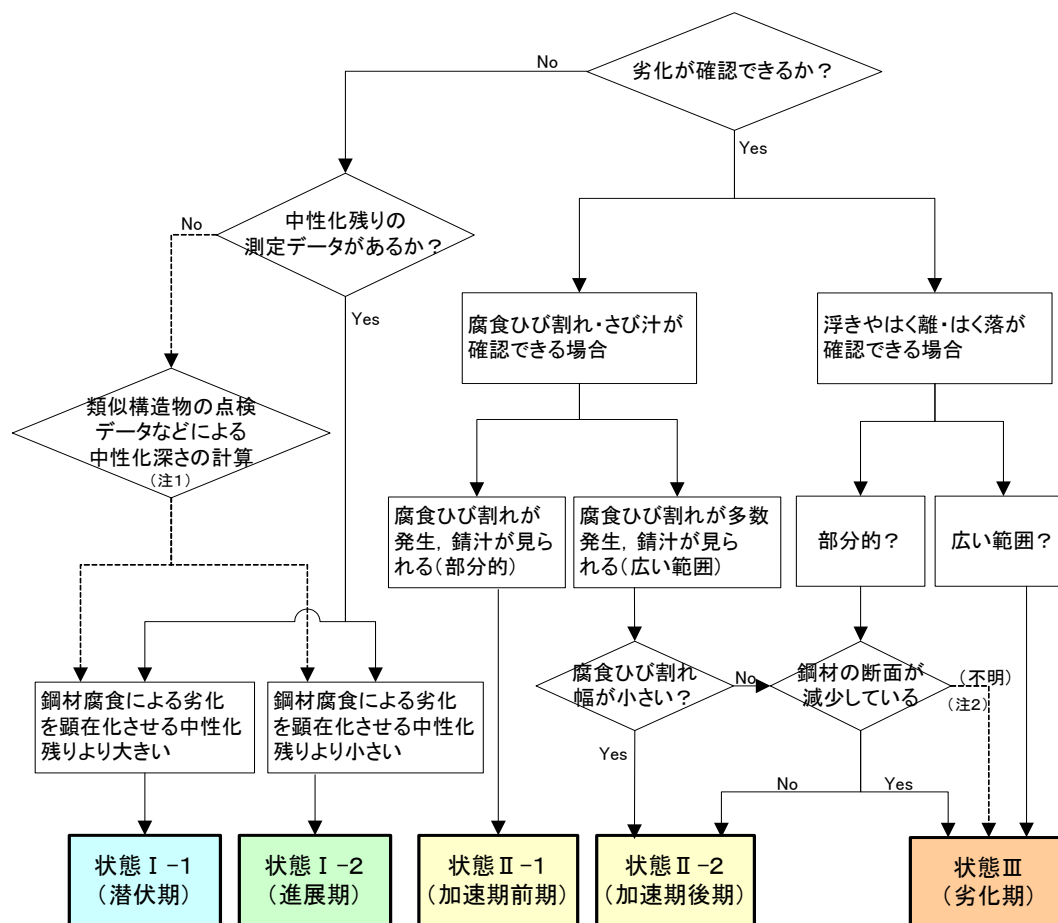
	腐食が開始する中性化残り (中性化残り = かぶり - 中性化深さ)
一般の環境	10mm
コンクリート中に塩化物イオンが含まれている場合	25mm

進展期の終点となる腐食ひび割れの生じる時期は、鋼材の腐食量と関係付けられ、既往の研究からは腐食ひび割れ発生時の鋼材腐食量は10mg/cm²とされている。

4.2.3 評価および判定：中性化

中性化劣化の評価は、図 4.2.5 に示す構造物の外観上の劣化グレード手法により、劣化グレードを示すことにより評価する。ここに、外観上の劣化グレードと劣化の状態との関係は表 4.2.5 の通りである。中性化劣化の判定は、評価された劣化グレードに対応する性能低下が表 4.2.6 の通り想定されることを参考として、対策要否を判定する。

潜伏期では、中性化の進行により鋼材腐食の可能性が生じ、また**進展期**ではかぶりを通しての酸素の供給により鋼材腐食が進行するため、鋼材を保護する性能が評価の対象となる。この性能は直接的な構造物の性能ではないが、耐久性能に影響を及ぼすので重要である。**加速期**は腐食ひび割れ発生後で腐食量の増大が顕著な期間であるので、鋼材の保護性能の他、部材の剛性やじん性など使用性能の低下、ひび割れの発生によるはく離・はく落の可能性などの第三者影響度や美観の低下について評価を行う必要がある。**劣化期**ではさらに腐食が進行しているため、加速期で着目する性能に加えて耐荷力等の安全性能に着目する必要がある。



注1：類似構造物点検結果などのデータを用いて、かぶりやコンクリートの品質を想定し、「4.2.2 劣化予測：中性化」にしたがって、中性化深さを予測する必要がある。

注2：点検を実施する必要がある。塩害と複合している可能性が考えられる場合には、鋼材が部分的に激しく腐食している可能性があるため、「状態III (劣化期)」と評価するのがよい。

図 4.2.5 中性化：外観上のグレード評価の手順 (例) 4)

表 4.2.5 中性化：外観上のグレードと劣化の状態

構造物の外観上のグレード	劣化の状態
状態Ⅰ-1（潜伏期）	外観上の変状が見られない，中性化残りが発錆限界以上
状態Ⅰ-2（進展期）	外観上の変状が見られない，中性化残りが発錆限界未満，腐食が開始
状態Ⅱ-1（加速期前後）	腐食ひび割れが発生
状態Ⅱ-2（加速後後期）	腐食ひび割れが多数発生，錆汁が見られる，部分的なはく離・はく落が見られる，腐食量の増大
状態Ⅲ（劣化期）	腐食ひび割れが多数発生，ひび割れ幅が大きい，錆汁が見られる，はく離・はく落が見られる

表 4.2.6 中性化：外観上のグレードと標準的な性能低下

構造物の外観上のグレード	安全性能	使用性能	第三者影響度 美観・景観
状態Ⅰ-1（潜伏期）	—	—	—
状態Ⅰ-2（進展期）	—	—	—
状態Ⅱ-1（加速期前後）	—	—	美観の低下
状態Ⅱ-2（加速後後期）	—	剛性低下（変形の増大・振動の発生） ・鋼材断面積の減少 ・鋼材とコンクリートの付着力の低下 ・浮き・はく離によるコンクリート断面の減少	・ひび割れ ・錆汁 ・鋼材の露出 第三者への影響 ・はく離 ・はく落
状態Ⅲ（劣化期）	耐力力・じん性の低下 ・鋼材断面積の減少 ・浮き・はく離によるコンクリート断面の減少		

4.2.4 対策の選定：中性化¹⁾

中性化による構造物の性能低下が必要と判断された場合には，要求性能を満足するような対策を選定しなければならない。性能照査に基づいた対策の選定が難しい場合には，表 4.2.7，表 4.2.8，表 4.2.9 に示す外観上のグレードを基準として対策を選定してもよい。標準的な工法は「5. コンクリート構造物の補修・補強」に詳細を示している。

表 4.2.7 中性化：構造物の外観上のグレードと対策

構造物の外観上のグレード	点検強化	補修	補強	修景	使用性回復	機能性向上	供用制限	解体・撤去
状態Ⅰ-1（潜伏期）	○	(○)						
状態Ⅰ-2（進展期）	○	○						
状態Ⅱ-1（加速期前後）	◎	◎		◎				
状態Ⅱ-2（加速後後期）	◎	◎	◎	◎	◎	○	○	
状態Ⅲ（劣化期）		○	◎	○	◎	◎	◎	◎
備考	◎：標準的な対策，○：場合によっては考えられる対策 (○)：予防的に実施される対策							

表 4.2.8 中性化：補修・補強に期待する効果と工法

期待する効果	工法例
中性化の進行を抑制	表面処理, ひび割れ注入
中性化深さを 0 にする	断面修復 (防錆処理, 被覆を含む), 再アルカリ化
鉄筋の腐食進行を抑制	表面処理, 電気防食, 断面修復, 再アルカリ化, 防錆処理
耐荷力を向上	鋼板・FRP 接着, 外ケーブル, 巻立て, 増厚

表 4.2.9 中性化：構造物の外観上のグレードと標準的な工法

構造物の外観上のグレード	標準的な工法
状態Ⅰ-1 (潜伏期)	表面処理* * : 予防的に実施される工法
状態Ⅰ-2 (進展期)	表面処理, (再アルカリ化)
状態Ⅱ-1 (加速期前後)	表面処理, (電気防食), (再アルカリ化)
状態Ⅱ-2 (加速後後期)	表面処理, 断面修復, (電気防食)
状態Ⅲ (劣化期)	鉄板・FRP 接着, 外ケーブル, 巻立て, 増厚

4.3 塩害

4.3.1 劣化機構の推定：塩害

塩害によりコンクリート中の鋼材の腐食が発生し、コンクリート表面の外観には錆汁や鋼材の腐食膨張によるひび割れ(「2.1.3(2) 塩害による損傷事例」参照)が発生する。このため、塩害劣化による変状か否かの推定は、表 4.3.1 に基づき外観調査を主体に、図書調査、詳細調査を参考として推定する。外観調査の判定項目のいずれかに該当する場合は、塩害と疑われる。

詳細調査としては、鋼材腐食状況の把握、鋼材腐食発生時期や劣化進行予測を行うことを目的として、塩化物イオン濃度や中性化深さの調査、かぶりや鋼材腐食状況の調査が行われる。

表 4.3.1 塩害劣化の推定

	調査内容	塩害による変状か否かの推定
(1)外観調査	(a)ひび割れ ・鋼材に沿ったひび割れ ・一部に錆汁が確認できる	左記変状項目のいずれかに該当する場合、有 左記変状項目の全てに該当しない場合、無
	(b)浮き・はく離・はく落(鋼材の腐食によるもの) ・浮きやはく離が見られる ・はく落が見られる	
	(c)鉄筋の露出	
	(d)錆汁	
(2)図書調査	・飛来塩分環境(海域、海岸線からの距離) ・融雪剤散布環境 ・内在塩分の影響(表 4.3.2 参照) ・既往調査、補修記録等の調査	推定の参考とする
(3)詳細調査	・塩化物イオン濃度(コアまたはドリル粉) ・中性化深さ(コアまたはドリル粉) ・かぶり(局部破壊あるいは非破壊調査) ・鋼材の腐食状態(局部破壊あるいは非破壊調査)	判定の参考とする

表 4.3.2 塩害（塩化物イオン）に関する規制等の時系列⁵⁾

	内 容
昭和 49 年 (1974)	土木学会：RC標準示方書 解説：一般の鉄筋コンクリート構造物に用いるコンクリートで、海砂に含まれる塩化物の許容限度の標準は海砂の絶乾重量に対し、NaCl に換算して 0.1% とする。
昭和 53 年 (1978)	土木学会：PC標準示方書 解説：プレテンション部材あるいはポストテンション部材の PC グラウトには、砂の絶乾重量に対し 0.03% 以下 (NaCl 換算)、その他の場合には、セメント重量の 0.1% に相当する量以下とする。
昭和 53 年 (1978)	建設省技術調査室長通達：「土木工事に係わるコンクリート細骨材としての海砂の使用について」 シース内グラウトおよびプレテン部材に対し、細骨材の絶乾重量に対して NaCl 換算で 0.03% 以下とする。
昭和 53 年 (1978)	JIS A 5308：レディーミクストコンクリート 土木用骨材に対する細骨材に含まれる塩化物の許容限度は、原則として細骨材の絶乾重量に対して NaCl に換算して 0.1% 以下とする。
昭和 61 年 (1986)	建設省技術調査室発通達：「コンクリート中の塩化物総量規制について」 コンクリート中の塩化物総量規制基準（土木構造物） (1) 鉄筋コンクリート部材、ポストテンション方式のプレストレストコンクリート部材（シース内のグラウトを除く）および用心鉄筋を有する無筋コンクリート部材における許容塩化物量は、 $0.60\text{kg}/\text{m}^3$ (Cl^- 重量) とする。 (2) プレテンション方式のプレストレストコンクリート部材、シース内のグラウトおよびオートクレープ養生を行う製品における許容塩化物量は $0.30\text{kg}/\text{m}^3$ (Cl^- 重量) とする。 (3) アルミナセメントを用いる場合、電食のおそれのある場合等は、試験結果等から適宜定めるものとし、特に資料がない場合は $0.30\text{kg}/\text{m}^3$ (Cl^- 重量) とする。
昭和 61 年 (1986)	JIS A 5308：レディーミクストコンクリート コンクリートに含まれる塩化物量は、荷下し地点で、塩素イオンとして $0.3\text{kg}/\text{m}^3$ 以下でなければならない。ただし、購入者の承認を受けた場合には、 $0.60\text{kg}/\text{m}^3$ 以下とすることができる。
昭和 61 年 (1986)	土木学会：コンクリート標準示方書、施工編 コンクリート中の塩化物含有量が規定される。 建設省通達、JIS A 5308 と同様の内容が記述される。
昭和 62 年 (1987)	JIS A 6204：コンクリート用化学混和剤 塩化物イオン濃度の規定が設けられる。
平成 3 年 (1991)	土木学会：コンクリート標準示方書、施工編 条文中：練りませ時におけるコンクリート中の全塩化物イオン濃度は、原則として、 $0.30\text{kg}/\text{m}^3$ 以下とする。 解説：場合によっては、その値を $0.60\text{kg}/\text{m}^3$ としてよい。
平成 8 年 (1996)	JIS A 5308：レディーミクストコンクリート 「塩素イオン」の用語が「塩化物イオン」と改訂される。

4.3.2 劣化予測：塩害¹⁾

塩害による構造物の性能低下は図 4.3.1 に示すように、鋼材の腐食が開始するまでの**潜伏期**、腐食開始から腐食ひび割れ発生までの**進展期**、腐食ひび割れの影響で腐食速度が大幅に増加する**加速期**および鋼材の大幅な断面減少などによる性能低下の**劣化期**に区分されている。

ここで、各劣化過程とその期間を決定する要因は表 4.3.3 の通り、塩化物イオンの拡散、初期含有塩化物イオン濃度、鋼材の腐食速度等を指標として設定されることになる。

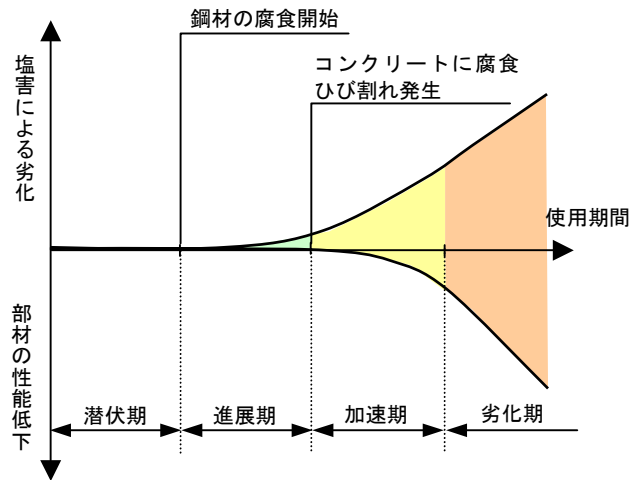


図 4.3.1 塩害：劣化過程の概念図

表 4.3.3 塩害：劣化過程の定義と期間を決定する要因

劣化過程	定義	期間を決定する要因
潜伏期	鋼材のかぶり位置における塩化物イオン濃度が腐食発生限界濃度に達するまでの期間	塩化物イオンの拡散 初期含有塩化物イオン濃度
進展期	鋼材の腐食開始から腐食ひび割れ発生までの期間	鋼材の腐食速度
加速期	腐食ひび割れ発生により腐食速度が増大する期間	ひび割れを有する場合の鋼材の腐食速度
劣化期	腐食量の増加により耐荷力の低下が顕著な期間	

(1) 塩化物イオンの拡散予測モデル

塩化物イオンの拡散予測は、鋼材の腐食が開始する潜伏期の終了時点の予測において重量である。コンクリート中の塩化物イオンの移動は、コンクリートの組織構造、湿乾燥り返し、水セメント比や養生によるコンクリートの組織の緻密さ、混和材の種類、中性化フロントにおける塩化物イオンの濃縮などが関与していると言われており、塩化物イオンの拡散予測はコンクリートの品質および環境条件などの影響を適切に考慮する必要がある。

ここでは、塩化物イオンの拡散予測として一般に利用されている拡散方程式による方法を説明する。これは、コンクリート中の塩化物イオンが濃度勾配により移動するとみなし、拡散方程式（フィックの第2法則、式(4.3.1)）をある境界条件の下に解く方法である。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (4.3.1)$$

ここに、

- C：全塩化物イオン濃度 (Cl⁻・kg/m³)
- t：経過時間 (年)
- D：見掛けの拡散係数 (cm²/年)
- x：コンクリート表面からの距離 (cm)

1) 拡散方程式の理論解

式(4.3.1)の最も一般的な理論解は式(4.3.2)で表される。これは、見掛けの拡散係数 (D) が時間および位置に対して一定で、かつ表面塩化物イオン濃度(C_0)が時間に対して一定、さらに拡散の媒体であるコンクリートが半無限体である場合の理論解であり、コンクリート表面に一定の飛来塩分が供給される場合に用いられる。

$$C(x, t) = C_0 [1 - \text{erf} [x / (2\sqrt{D \cdot t})]] + C_i \quad (4.3.2)$$

ここに、

$C(x, t)$: 深さ x (cm), 時刻 t (年)における塩化物イオン濃度 (kg/m^3)

C_0 : 表面塩化物イオン濃度 ($\text{Cl}^- \cdot \text{kg}/\text{m}^3$)

C_i : 初期含有塩化物イオン濃度 ($\text{Cl}^- \cdot \text{kg}/\text{m}^3$)

D : 塩化物イオンの見掛けの拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$)

$\text{erf}(s)$: 誤差関数^{2), 6)}

$$= 2/\sqrt{\pi} \times \int_0^s e^{-t^2} dt$$

$$\approx 1 - 1/(1 + 0.278393s + 0.230389s^2 + 0.000972s^3 + 0.078108s^4)^4$$

式(4.3.2)を用いた拡散予測の例を図 4.3.2 に示す。計算条件は以下の通りである。

- 表面塩化物イオン濃度 $C_0 = 11.52 \text{kg}/\text{m}^3$ (一定)
- 見掛けの拡散係数 $D = 0.33 \text{cm}^2/\text{年}$
- 初期含有塩化物イオン濃度 $C_i = 0.15 \text{kg}/\text{m}^3$
- 現在の経年：建設 17 年後 将来予測：建設 100 年後

図 4.3.2 より、表面の塩化物イオン濃度 ($C_0 + C_i$) が時間によらず一定であること、時間の経過に応じて内部の濃度が増加する様子が分かる。(参考 2.1.1 参照)

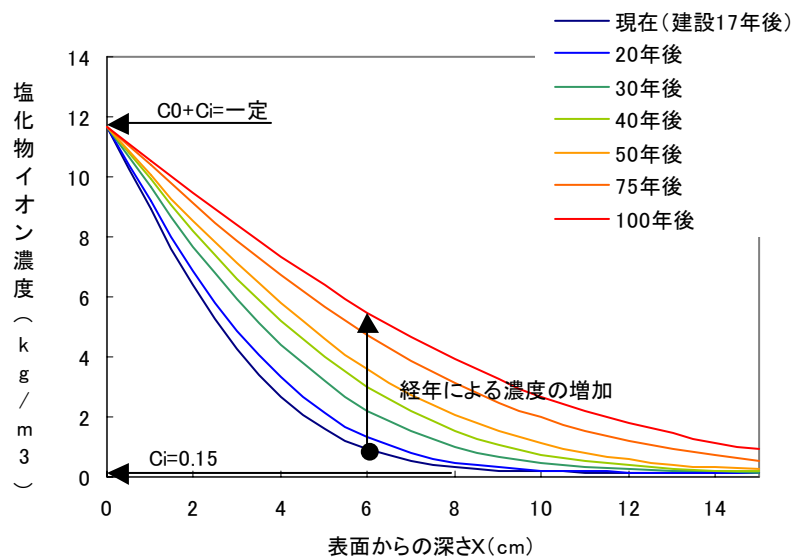


図 4.3.2 表面塩化物イオン濃度が一定の場合の拡散予測

2) 拡散方程式の差分法による数値解

コンクリート表面に表面保護工等の補修を施した場合、理論解の算出に用いた境界条件と異なるため式(4.3.2)の理論解は適用できない。さらに、補修を考慮した種々の境界条件の下に式(4.3.1)の理論解を得ることは困難な場合が多い。このような場合には、式(4.3.1)を差分表示した式(4.3.3)に境界条件を考慮し、数値解析により解を得ることができる。⁷⁾

$$c_{m,n+1} = D \cdot r (c_{m+1,n} + c_{m-1,n}) + (1 - 2D \cdot r) c_{m,n} \quad (4.3.3)$$

ここに、

浸透深さ x 、時間 t をきざみ幅を Δx 、 Δt を用いて、 $x_m = m \Delta x$ 、 $t_n = n \Delta t$ ($m=0, 1, 2, \dots$ 、 $n=0, 1, 2, \dots$)とし、任意の要素を $c(x_m, t_n) \equiv c_{m,n}$ で表す。

$$r = \Delta t / \Delta x^2 \leq 0.5$$

式(4.3.3)を用いた拡散予測の例を図4.3.3に示す。計算条件は以下の通りである。

- ・ 建設17年後の現在まで表面塩化物イオン濃度 $C_0=11.52\text{kg/m}^3$ (一定)
- ・ 現在以降、表面からの塩化物イオンの供給がない、完全遮塩の条件を仮定
- ・ 見掛けの拡散係数 $D = 0.33\text{cm}^2/\text{年}$
- ・ 初期含有塩化物イオン濃度 $C_i=0.15\text{kg/m}^3$
- ・ 現在の経年：建設17年後 将来予測：建設100年後

図4.3.3より、建設17年後の現在までの間、コンクリート内部に塩化物イオンが拡散した状態を初期値として、以降表面からの塩化物イオンの供給がないとした場合には、内部に向かいその濃度を均一化するように拡散する。すなわち、表面の塩化物イオン濃度(C_0+C_i)は時間の経過に応じて低下し、また内部の濃度は表面付近では低下、深部では増加する傾向が伺える。(参考2 2.1.1参照)

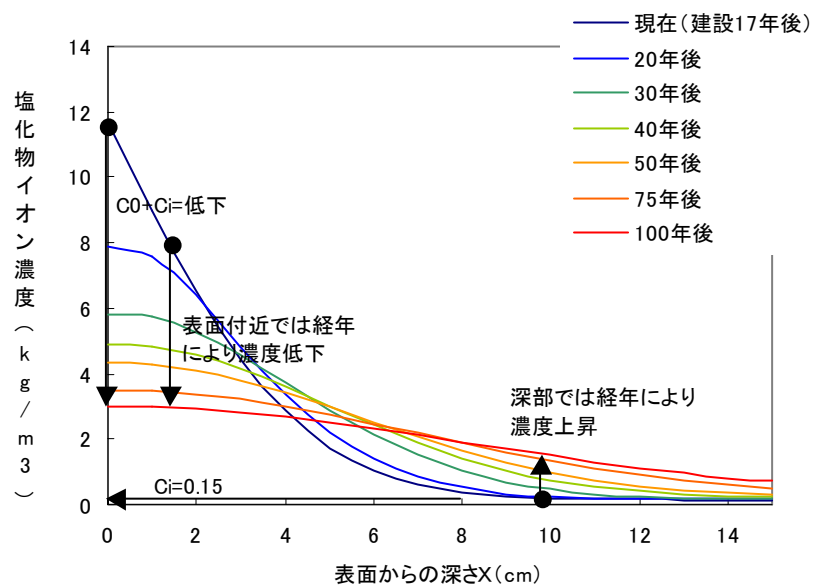


図 4.3.3 表面から塩化物イオンの供給がない場合の拡散予測

(2) 実測した塩化物イオン濃度分布を用いた拡散予測

コンクリート表面に供給された塩化物イオンが建設以降現在まで一定と考えられる場合、コア採取等により得た塩化物イオン濃度のかぶり深さ方向の分布を用いて拡散予測を行うことができる。

最初に、経過年数と塩化物イオン濃度、すなわち $C(x, t)$ から式(4.3.2)の3つの係数(C_0 , D , C_i)、あるいは C_i を既知とする場合は2つの係数(C_0 , D)を最小二乗法を用いた回帰計算により算出する。

この演算処理を行う場合には、土木学会から提案されている見かけの拡散係数・表面塩化物イオン濃度の算出プログラムのフォートランリスト⁸⁾が参考となる。また、土木研究所からは表計算ソフトによる「コンクリート中の塩化物イオン濃度分布簡易分析シート」⁹⁾が提供されているが、使用者が測定値と回帰曲線との誤差が最小となるように係数(C_0 , D , C_i)を修正して入力する必要がある。簡易分析シートの付録には初期塩化物イオン濃度の扱い方、表面付近の濃度が低下している場合の扱い方など、フィティングの方法が解説されており、参考2 2.1.8に一部を抜粋して示している。

次に、回帰計算により求めた C_0 , D , C_i および将来予測を行う時間 t を式(4.3.2)あるいは式(4.3.3)に与えることにより、将来の塩化物イオン濃度を求めることができる。

ここでは、20mmピッチで5深度について実測した塩化物イオン濃度分布(図4.3.4の●印の数値)を用いた回帰計算例を示す。計算条件は以下の通りである。

- ・ 建設後の経過年数 $t=17$ 年、この間表面塩化物イオン濃度は一定と仮定する。
 - ・ コンクリート中への塩化物イオンの拡散は拡散方程式に従うものとする。
 - ・ 初期含有塩化物イオン濃度は70, 90mmの濃度が一定であることから、 0.15kg/m^3 とする。
- 計算の結果、 $C_0=11.52\text{kg/m}^3$, $D=0.33\text{cm}^2/\text{年}$ となる。

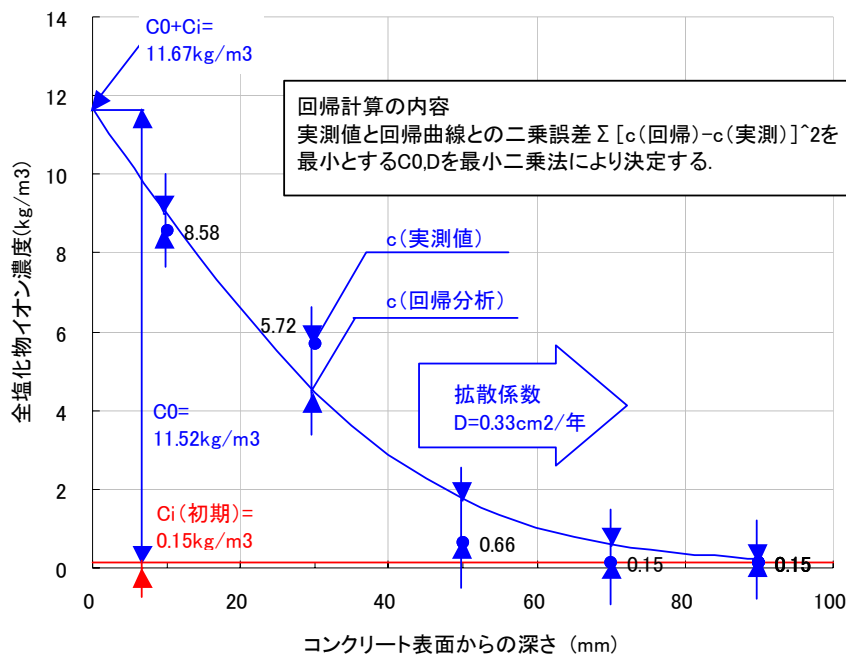


図 4.3.4 回帰計算による C_0, D の計算例

(3) 実測した塩化物イオン濃度分布等がない場合の拡散予測（コンクリート標準示方書）

既存構造物の塩化物イオンの拡散予測に際し、実測した塩化物イオン濃度分布等がない場合には、新設構造物の塩害に対する耐久性設計に準じて塩化物イオンの拡散を予測することが出来る。ここでは、コンクリート標準示方書〔施工編〕による方法を示す。

1) 塩素イオンに対する拡散係数の照査式³⁾ から求まる拡散係数の特性値

$$\gamma_p \cdot D_p / D_k \leq 1.0 \quad \therefore D_k = \gamma_p \cdot D_p$$

ここに、

D_k : コンクリートの拡散係数の特性値 (cm²/年)

D_p : コンクリートの拡散係数の予測値 (cm²/年)

$$\log D_p = a(W/C)^2 + b(W/C) + c$$

普通ポルトランドセメント $\log D_p = -3.9(W/C)^2 + 7.2(W/C) - 2.5$

混合セメント

高炉セメント・シリカヒューム $\log D_p = -3.0(W/C)^2 + 5.4(W/C) - 2.2$

W/C : 水セメント（結合材）比

γ_p : D_p の精度に関する安全係数。一般に、1.0～1.3としてよい。

上記回帰式を用いる場合には、安全係数を1.2とするのがよい。

2) 塩化物イオンの侵入に伴う鋼材腐食に関する照査式²⁾ から求まる塩化物イオン濃度の設計値

$$\gamma_i \cdot C_d / C_{lim} \leq 1.0 \quad \therefore \gamma_i \cdot C_d \leq C_{lim}$$

ここに、

γ_i : 構造物係数。一般に1.0としてよいが、重要構造物に対しては1.1とするのがよい。

C_{lim} : 鋼材腐食発生限界濃度。一般に、1.2kg/m³としてよい。但し、凍結融解作用を受ける場合には、1.2kg/m³より小さな値とするのがよい。

C_d : 鋼材位置における塩化物イオン濃度の設計値。

$$C_d = \gamma_{c1} \cdot C_0 [1 - \text{erf} [0.1 \cdot c / (2\sqrt{D_d \cdot t})]]$$

ここに、

C_0 : コンクリート表面における想定塩化物イオン濃度 (kg/m³)

表 4.3.4 コンクリート表面における想定塩化物イオン濃度(kg/m³)

飛沫帯	海岸線からの距離				
	汀線付近	0.1	0.25	0.5	1.0
13.0	9.0	4.5	3.0	2.0	1.5

c : かぶりの設計値(mm)。一般に、設計かぶりとしてよい。

t : 塩化物イオンの侵入に対する耐用年数(年)。一般に、耐用年数100年を上限とする。

γ_{cl} : 鋼材位置における塩化物イオン濃度の設計値 C_d のばらつきを考慮した安全係数. 一般に 1.3 としてよい. 但し, 高流動コンクリートを用いる場合には, 1.1 としてよい.

D_d : 塩化物イオンに対する設計拡散係数($\text{cm}^2/\text{年}$). $D_d = \gamma_c \cdot D_k + (w/l) \cdot (w/w_a)^2 \cdot D_0$

ここに,

γ_c : コンクリートの材料係数. 一般に 1.0 としてよい. ただし, 上面の部位ではブリーディングによるコンクリートの品質低下を考慮して 1.3 とするのがよい.

D_k : コンクリートの拡散係数の特性値 ($\text{cm}^2/\text{年}$). 塩化物イオンに対する拡散係数の照査を満足する必要がある.

D_0 : コンクリート中の塩化物イオンの移動に及ぼすひび割れの影響を表す定数($\text{cm}^2/\text{年}$). 一般に $200\text{cm}^2/\text{年}$ としてよい.

w : ひび割れ幅(mm) $w = 1.1k_1k_2k_3 \{4c + 0.7(c_s - \phi)\} [\sigma_{se}/E_s \text{ (または } \sigma_{pe}/E_p) + \varepsilon'_{csd}]$

w_a : 許容ひび割れ幅

表 4.3.5 許容ひび割れ幅 w_a (mm)

鋼材の種類	鋼材の腐食に対する環境条件 (表 4.3.6 参照)		
	一般の環境	腐食性環境	特に厳しい腐食性環境
異形鉄筋・普通丸鋼	0.005c	0.004c	0.0035c
P C 鋼材	0.004c	---	---

表 4.3.6 鋼材の腐食に対する環境条件の区分

環境区分	解説
一般の環境	塩化物イオンが飛来しない通常の屋外の場合, 土中の場合等
腐食性環境	1. 一般の環境に比較し, 乾湿の繰り返しが多い場合および特に有害な物質を含む地下水位以下の土中の場合等鋼材の腐食に有害な影響を与える場合等 2. 海洋コンクリート構造物で海水中や特に厳しくない海洋環境にある場合等
特に厳しい腐食性環境	1. 鋼材の腐食に著しく有害な影響を与える場合等 2. 海洋コンクリート構造物で干満帯や飛沫帯にある場合および激しい潮風を受ける場合等

w/l : ひび割れ幅とひび割れ間隔の比

ここに,

k_1 : 鋼材の表面形状がひび割れ幅に及ぼす影響を表す係数で, 一般に, 異形鉄筋の場合に 1.0, 普通丸鋼および P C 鋼材の場合に 1.3 としてよい.

k_2 : コンクリートの品質がひび割れ幅に及ぼす影響を表す係数. $k_2 = 15/(f'_c + 20) + 0.7$

f'_c : コンクリートの圧縮強度 (N/mm^2). 一般に, 設計圧縮強度 f'_{cd} を用いてよい.

k_3 : 引張鋼材の段数の影響を表す係数. $k_3 = 5(n+2)/(7n+8)$

n : 引張鋼材の段数

c : かぶり (mm), 表 4.3.5 に適用できるかぶり c は, 100mm 以下を標準とする.

c_s : 鋼材の中心間隔 (mm)

ϕ : 鋼材径 (mm)

- ε'_{csd} : コンクリートの収縮およびクリープ等によるひび割れ幅の増加を考慮するための数値
- σ_{se} : 鋼材位置のコンクリートの応力が 0 の状態から鉄筋応力度の増加量 (N/mm²)
- σ_{pe} : 鋼材位置のコンクリートの応力が 0 の状態から PC 鋼材応力度の増加量 (N/mm²)

(4) 実測した塩化物イオン濃度分布等がない場合の拡散予測 (土木研究所の手法)

既存構造物の塩化物イオンの拡散予測に際し、実測した塩化物イオン濃度分布等がない場合には、新設構造物の塩害に対する耐久性設計に準じて塩化物イオンの拡散を予測することが出来る。ここでは、道路橋示方書の根拠となっている土木研究所の手法⁶⁾を示す。

1) 見掛けの拡散係数

土木研究所の手法による見掛けの拡散係数 (以下、土研式という) は、沿岸部における屋外暴露試験から普通ポルトランドセメントに対して水セメント比の逆数の関数として設定している。尚、この土研式による見掛けの拡散係数を元に H14 道示の最小かぶり設定されている。

土研式による塩化物イオンの見掛けの拡散係数

セメントの種類 : 普通ポルトランドセメント

$$D_c = (5 \times 10^{-7}) \cdot \exp(-1.6 \cdot (C/W)) \quad (\text{cm}^2/\text{sec})$$

$$= (5 \times 10^{-7}) \cdot \exp(-1.6 \cdot (C/W)) \cdot 3.15 \times 10^7 \quad (\text{cm}^2/\text{年})$$

ここに、

D_c : 見掛けの拡散係数 (cm²/sec, cm²/年)

C/W : 水セメント比 W/C の逆数

この土研式による塩化物イオンの見掛けの拡散係数 (D_c) を、コンクリート標準示方書の拡散係数 (予測値 D_p , 予測値の精度に関する安全係数 $\gamma_p = 1.2$ を乗じていない) と合わせて示せば表 4.3.7, 図 4.3.5 の通りとなる。土研式は普通ポルトランドセメントのみに対応しているが、コンクリート標準示方書に比べ小さい拡散係数が設定されており、水セメント比の小さい領域ではその傾向が大きい。

表 4.3.7 見かけの拡散係数の推定値

	セメントの種類	単位	W/C (-)					
			0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55
土研式D _c	N	cm ² /年	0.076	0.16	0.29	0.45	0.64	0.86
コンクリート標準示方書D _p	N	cm ² /年	0.20	0.35	0.57	0.89	1.33	1.91
	BB	cm ² /年	0.14	0.21	0.30	0.42	0.56	0.73

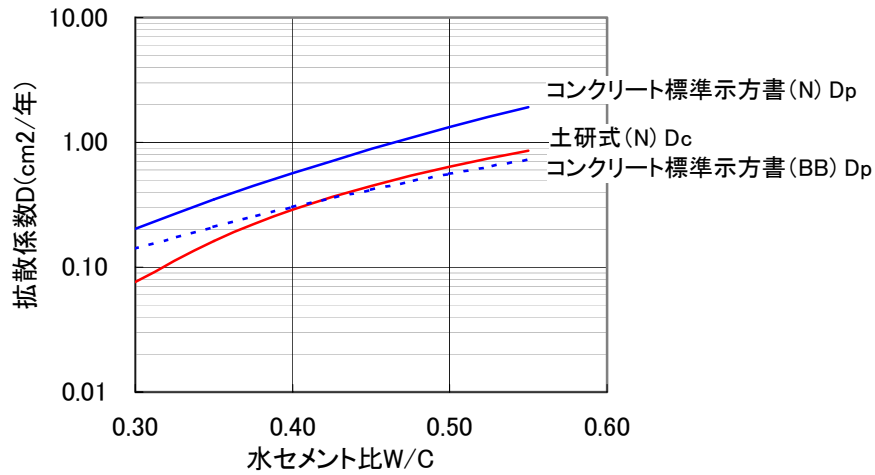


図 4.3.5 拡散係数と水セメント比との関係

2) 表面塩化物イオン濃度

土木研究所の手法によるコンクリート表面の塩化物イオン濃度（以下、土研式という）は、H14 道示に示す地域区分に応じて、飛来塩分量に距離減衰を考慮して設定している。尚、この土研式による表面塩化物イオン濃度を元に塩害対策区分に対応した最小かぶりが設定されている。

土研式による表面塩化物イオン濃度

$$C_0 (\text{kg/m}^3) = 1.5 \times C_{\text{air}}^{0.4}$$

ここに、

C_{air} : 架橋地点における飛来塩分量 ($\text{mdd} \cdot \text{Cl}^-$), $C_{\text{air}} = C_1 \times d^{-0.6}$

C_1 : 1km換算飛来塩分量 ($\text{mdd} \cdot \text{Cl}^-$)

地域区分	地域	$C_1 (\text{mdd} \cdot \text{Cl}^-)$
飛沫帯	---	別途設定 注1)
A	沖縄県	0.6
B	日本海北部	0.6
C	上記以外の地域	0.2
注 釈	1) コンクリート標準示方書では飛沫帯の表面塩化物イオン濃度を 13kg/m^3 としている。	

d : 海岸からの距離 (km)

この土研式による表面塩化物イオン濃度を，コンクリート標準示方書の値と合わせて示せば，表 4.3.8，図 4.3.6 の通りとなる．土研式では地域区分に応じた飛来塩分の調査結果からコンクリート標準示方書の値より小さい表面塩化物イオン濃度を設定していることが分かる．

表 4.3.8 土研式による表面塩化物イオン濃度 $C_0(\text{kg/m}^3 \cdot \text{Cl}^-)$

地域区分	海岸線からの距離 x (km)	C_1 ($\text{mdd} \cdot \text{Cl}^-$)	$C_{\text{air}} = C_1 \cdot x^{-0.6}$ ($\text{mdd} \cdot \text{Cl}^-$)	$C_0 = 1.5 \cdot C_{\text{air}}^{0.4}$ ($\text{kg/m}^3 \cdot \text{Cl}^-$)
地域区分 B	波しぶきが直接かかる可能性がある箇所	---	---	13.0
	海上や海岸線で 0km の場合	0.001	0.6	37.9
	海上部および海岸線から 100m まで	0.1		2.4
	同 100m を超えて 300m まで	0.3		1.2
	同 300m を超えて 500m まで	0.5		0.9
	同 500m を超えて 700m まで	0.7		0.7
	---	1.0		0.6
---	1.0	0.6		
地域区分 C	波しぶきが直接かかる可能性がある箇所	---	---	13.0
	海上や海岸線で 0km の場合	0.001	0.2	12.6
	海上部および海岸線から 20m まで	0.02		2.1
	同 20m を超えて 50m まで	0.05		1.2
	同 50m を超えて 100m まで	0.1		0.8
	同 100m を超えて 200m まで	0.2		0.5
	---	0.5		0.3
	---	0.7		0.2
	---	1.0		0.2
	---	1.0		0.2
---	1.0	0.2		

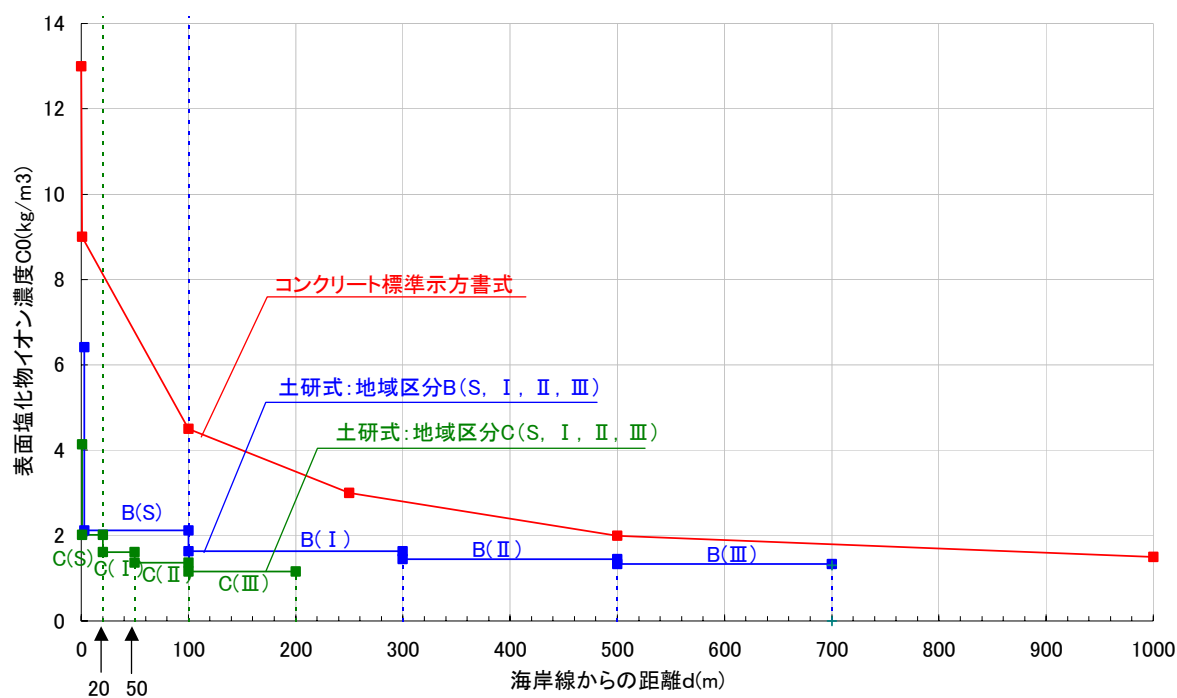


図 4.3.6 表面塩化物イオン濃度 (C_0) と海岸線からの距離 (d) の関係

4.3.3 評価および判定：塩害

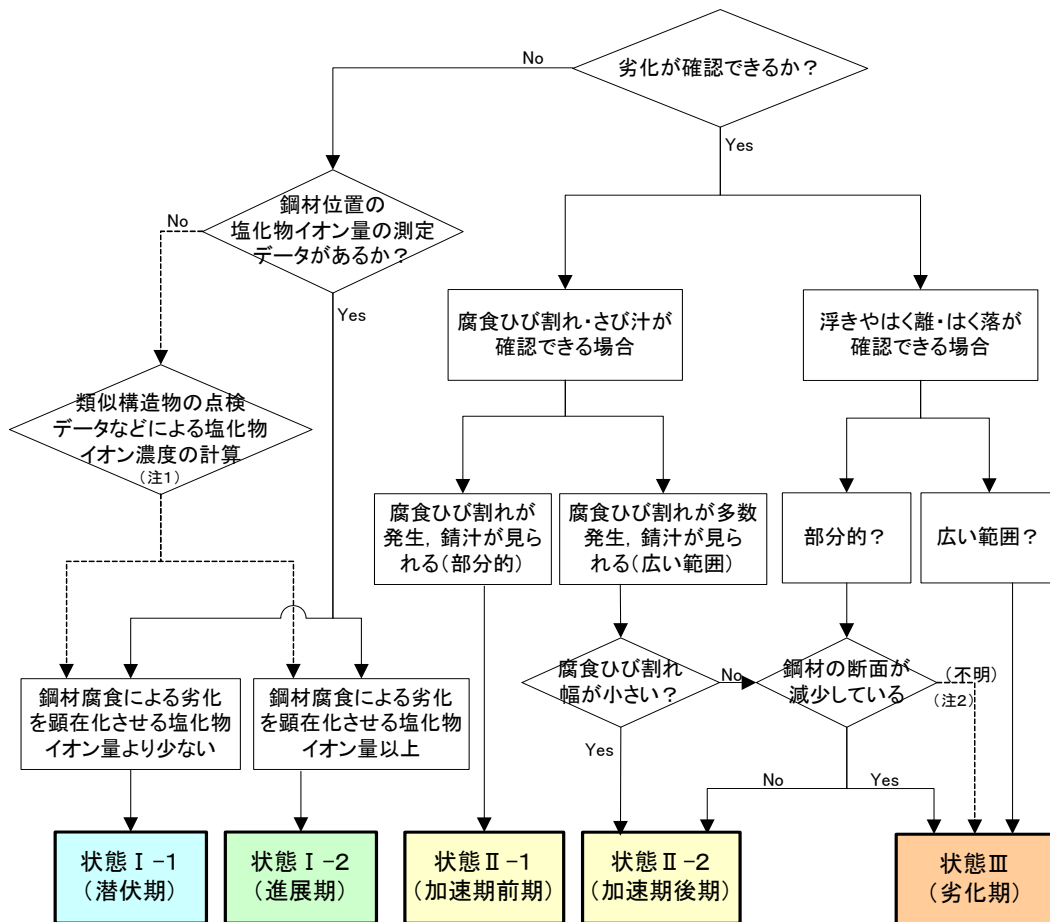
点検時における塩害劣化の評価は、図 4.3.7 に示す構造物の外観上の劣化グレード手法により、劣化グレードを示すことにより評価とする。ここに、外観上の劣化グレードと劣化の状態との関係は表 4.3.9 の通りである。塩害劣化の判定は、評価された劣化グレードに対応する性能低下が表 4.3.10 の通り想定されることを参考として、対策要否を判定する。

(1) 鋼材の腐食発生限界塩化物イオン濃度

鋼材の腐食開始時期は、かぶりにおける塩化物イオン濃度で判定する。鋼材の腐食状態と鋼材位置における塩化物イオン濃度から腐食発生限界塩化物イオン濃度を求める。個々の構造物の環境条件、使用条件によりこれを定めることは困難な場合が多く、コンクリート標準示方書〔維持管理編〕ではこれが出来ない場合は、腐食発生限界塩化物イオン濃度 $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ を用いてもよいとしている。

(2) 補修の要否を検討する際の塩化物イオン濃度

補修の要否を判定する際のかぶりにおける塩化物イオン濃度は、腐食発生限界塩化物イオン濃度に達した後、腐食が進行し寿命に至るため、 $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ での管理では厳しいとの意見もある。実際に、 $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ 以下の場合には補修不要を目安とする考え方もあり、対策工の要否の判定においては、表 4.3.11 等を参考としてかぶりにおける塩化物イオン濃度を設定する必要がある。尚、塩害に対する予防保全対策として新設構造物を計画する際や表面保護工等の補修材料を計画する際には、かぶりにおける塩化物イオン濃度を腐食発生限界塩化物イオン濃度 $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ 以下に抑える手法が一般に用いられている。



注1：類似構造物点検結果などのデータを用いて、かぶり、コンクリートの品質、表面塩化物イオン濃度を想定し、「4.3.2 劣化予測：塩害」にしたがって、鋼材位置の塩化物イオン濃度を予測する必要がある。
 注2：点検を実施する必要がある。塩害の場合には、部分的に激しく腐食する可能性が高いため、「不明」の場合には「状態Ⅲ（劣化期）」と評価するのがよい。

図 4.3.7 塩害：外観上のグレード評価の手順（例）⁴⁾

表 4.3.9 塩害：構造物の外観上のグレードと劣化の状態¹⁾

構造物の外観上のグレード	劣化の状態
状態Ⅰ-1（潜伏期）	外観上の変状が見られない，腐食発生限界塩化物イオン濃度以下
状態Ⅰ-2（進展期）	外観上の変状が見られない，腐食発生限界塩化物イオン濃度以上，腐食が開始
状態Ⅱ-1（加速期前期）	腐食ひび割れが発生，錆汁が見られる
状態Ⅱ-2（加速期後期）	腐食ひび割れが多数発生，錆汁が見られる，部分的なはく離・はく落が見られる，腐食量の増大
状態Ⅲ（劣化期）	腐食ひび割れが多数発生，ひび割れ幅が大きい，錆汁が見られる，はく離・はく落がみられる，変位・たわみが大きい

表 4.3.10 塩害：外観上のグレードと標準的な性能低下

構造物の外観上のグレード	安全性能	使用性能	第三者影響度 美観・景観
状態Ⅰ（潜伏期）	—	—	—
状態Ⅱ（進展期）	—	—	—
状態Ⅲ（加速期前期）	—	—	美観の低下
状態Ⅲ（加速期後期）	耐荷力の低下・じん性の低下 ・鋼材断面積の減少・破断 ・浮き・はく離によるコンクリート断面の減少	剛性低下（変形の増大・振動の発生） ・鋼材断面積の減少 ・鋼材とコンクリートの付着力の低下 ・浮き・はく離によるコンクリート断面の減少	・スケーリング・ポップアウト ・ひび割れ 第三者への影響 ・はく離 ・はく落
状態Ⅳ（劣化期）			

表 4.3.11 塩害の評価および判定の管理限界値の例¹⁰⁾

維持管理者及び学会等	塩化物イオン濃度（全塩分表示）
国土交通省 直轄・地方自治体	補修の要否の判断 2.5kg/m³ 解説：損傷度Ⅲ（損傷状況としてひび割れ、錆汁、あるいははく離が部分的に認められる場合）における補修の要否について、鋼材位置の含有全塩化物イオン濃度が2.5kg/m ³ 程度以上であれば補修を行うのが望ましい。 出典：塩害を受けた土木構造物の補修指針（案）：建設省総合技術開発プロジェクト、コンクリートの耐久性向上技術の開発，p66，1989.5
沖縄総合事務局	1.2kg/m³ 出典：コンクリート橋塩害調査・塩害補修設計マニュアル（案），1996.4
日本道路公団	補修の要否の判断 1.0kg/m³ 出典：コンクリート片はく落防止対策マニュアル，2000.11
東京港埠頭公社	1.88 kg/m³ 出典：大井埠頭棧橋劣化調査・補修マニュアル（案）一，1994.3
土木学会	腐食発生限界塩化物イオン濃度 1.2kg/m³ 解説：鋼材の腐食開始時期はかぶりにおける塩化物イオン濃度で判定する。鋼材の腐食状態と鋼材位置における塩化物イオン濃度から腐食発生限界塩化物イオン濃度を求める。これが出来ない場合は、腐食発生限界塩化物イオン濃度1.2kg/m ³ を用いてもよい。 出典：コンクリート標準示方書 [維持管理編]，p103，2001.1
日本コンクリート工学協会	1.2kg/m³ 出典：コンクリート構造物の電気防食工法研究委員会報告書1994.10
土木研究所	2.5kg/m³以上（劣化度B） 想定される状況：腐食による鋼材の軽微な断面欠損が見られるなど、構造物の劣化が進行していると考えられる段階。 補修要否：補修を実施することが望ましい。 1.2kg/m³以上，2.5kg/m³未満（劣化度C） 想定される状況：鋼材の腐食はごくわずかか、認められない状態であり、構造物が劣化しているとは判断しづらいが、今後、鋼材が腐食しやすい状態へと移行する兆候が認められる段階。 補修要否：すぐに補修が必要であるとは限らない。 0.3kg/m³を越えて，1.2kg/m³未満（劣化度D1） 想定される状況：構造物は劣化していないと考えられる段階。 補修要否：現状では補修は必要ない。 0.3kg/m³以下（劣化度D2） 想定される状況：構造物は劣化しておらず、劣化の兆候も認められない段階。 補修要否：当面は補修を必要としない。 出典：土木研究所，日本構造物診断技術協会：非破壊試験を用いた土木コンクリート構造物の健全度診断マニュアル，p124,127,130，2003.10，技法堂出版

4.3.4 対策の選定：塩害¹⁾

塩害による構造物の性能低下が必要と判断された場合には、要求性能を満足するような対策を選定しなければならない。性能照査に基づいた対策の選定が難しい場合には、表 4.3.12、表 4.3.13、表 4.3.14 に示す外観上のグレードを基準として対策を選定してもよい。標準的な工法については「5. コンクリート構造物の補修・補強」に解説を示している。

表 4.3.12 塩害：構造物の外観上のグレードと対策

構造物の外観上のグレード	点検強化	補修	補強	修景	使用性回復	機能性向上	供用制限	解体・撤去
状態Ⅰ-1（潜伏期）	○	(○)						
状態Ⅰ-2（進展期）	○	○						
状態Ⅱ-1（加速期前後）	◎	◎		◎				
状態Ⅱ-2（加速後後期）	◎	◎	◎	◎	◎	○	○	
状態Ⅲ（劣化期）		○	◎	○	◎	◎	◎	◎
備考	◎：標準的な対策，○：場合によっては考えられる対策 (○)：予防的に実施される対策							

表 4.3.13 塩害：補修・補強に期待する効果と工法

期待する効果	工法例
鋼材の腐食因子の供給量を低減	表面処理
鋼材の腐食因子の除去	断面修復，電気化学的脱塩
鋼材の腐食進行を抑制	表面処理，電気防食，断面修復，防錆処理
耐荷力を向上	FRP 接着，断面修復，外ケーブル，巻立て，増厚

表 4.3.14 塩害：構造物の外観上のグレードと標準的な工法

構造物の外観上のグレード	標準的な工法
状態Ⅰ-1（潜伏期）	表面処理* *：予防的に実施される工法
状態Ⅰ-2（進展期）	表面処理，電気防食，電気化学的脱塩
状態Ⅱ-1（加速期前後）	表面処理，断面修復，電気防食，電気化学的脱塩
状態Ⅱ-2（加速後後期）	断面修復
状態Ⅲ（劣化期）	FRP 接着，断面修復，外ケーブル，巻立て，増厚

4.4 凍害

4.4.1 劣化機構の推定：凍害

凍害劣化による変状か否かの推定は、外観調査、図書調査および詳細調査の各々の段階において表 4.4.1、表 4.4.2 の通り行う。

凍害劣化によるコンクリート表面の変状は、スケーリング、ひび割れ、ポップアウトなどその外観に特徴（「2.1.4(2) 凍害による損傷事例」参照）があり、劣化機構の推定は外観調査を主体として行う。推定の際には、主に材料の耐凍害性を評価する図書調査や、凍害深さ等の凍害劣化程度の把握、材料の耐凍害性の把握、複合している他の劣化因子の把握等を目的として実施される詳細調査の結果を参考とする。

表 4.4.1 凍害劣化の推定（その 1）

	凍害による劣化か否かの判定			備考
	組合せ 1	組合せ 2	組合せ 3	
外観調査による判定	可能性有	可能性有	可能性無	表 4.4.2(1)
図書調査による判定	可能性有・無	可能性有・無	図書調査不要	表 4.4.2(2)
詳細調査による判定	可能性有	可能性無	詳細調査不要	表 4.4.1(3)
総合判定	凍害である	凍害でない	凍害でない	

表 4.4.2 凍害劣化の推定（その 2）

	凍害の判定	解 説
(1) 外観調査	可能性有	スケーリング、ひび割れ、ポップアウト、はく離、断面欠損や鉄筋露出のいずれかの変状が認められる場合、凍害の可能性有と判断する。この際、変状部位の水分の供給、日射条件も参考とする。 また、その他凍結膨張による変状がある場合も凍害の可能性有と判断する。
	可能性無	上記のいずれの変状も見られないか、または変状の原因が塩害、中性化、アルカリ骨材反応等の他の劣化や外力の作用の可能性によるものと特定できる場合は可能性無と判断する。但し、劣化については凍結融解作用と複合している可能性があり注意が必要である。
(2) 図書調査	可能性有	工事記録により骨材の品質の低下（吸水率 3%以上等）、低空気量（3%未満）、高水セメント比（55%超過）等が確認される場合、図書調査による凍害の可能性有と判断する。 また、工事記録等の確認ができない場合も凍害の可能性有と判断する。
	可能性無	上記のいずれの可能性もない場合、図書調査による凍害の可能性無と判断する。
(3) 詳細調査	可能性有	凍害に特徴的なひび割れが認められる場合で、詳細調査によりアルカリ骨材反応の可能性がない場合には、凍害の可能性有と判断する。 アルカリ骨材反応を含め凍害以外の劣化との複合が考えられる場合には、凍害の可能性有と判断する。
	可能性無	凍害以外の劣化原因が特定され、凍害との複合劣化が考えられない場合には、凍害の可能性無と判断する。

4.4.2 劣化予測：凍害¹⁾

凍害劣化は、①凍結融解作用によるコンクリート組織の緩み、あるいはコンクリート表面部におけるひび割れの発生、②凍結融解作用や塩化物との複合作用によるスケーリングに代表されるコンクリート断面厚さの減少の2つの劣化現象を総称している。これら凍害劣化の程度によって鋼材腐食の発生が懸念される。このため、凍害によるコンクリートの性能低下を、図 4.2.1 の通りモデル化し、凍害深さを指標として評価する方法がとられている。すなわち、凍害によるスケーリング等が発生するまでの**潜伏期**、凍害は進行するが鋼材腐食にまで至らない**進展期**、凍害深さが鋼材位置に達して鋼材腐食が進む**加速期**、凍害深さが鋼材位置より大きくなり耐荷力に影響を及ぼす**劣化期**に区分されている。

ここで、各劣化過程とその期間を決定する要因は表 4.2.2 の通り凍害深さ、凍結融解回数、凍結水量等を指標として設定されるべきであるが、凍害深さの測定手法やその予測手法は確立されていないのが現状である。このため、現実的には構造物の外観上のグレードに対応した性能評価を行い、対策の可否を判定する方法がとられている。

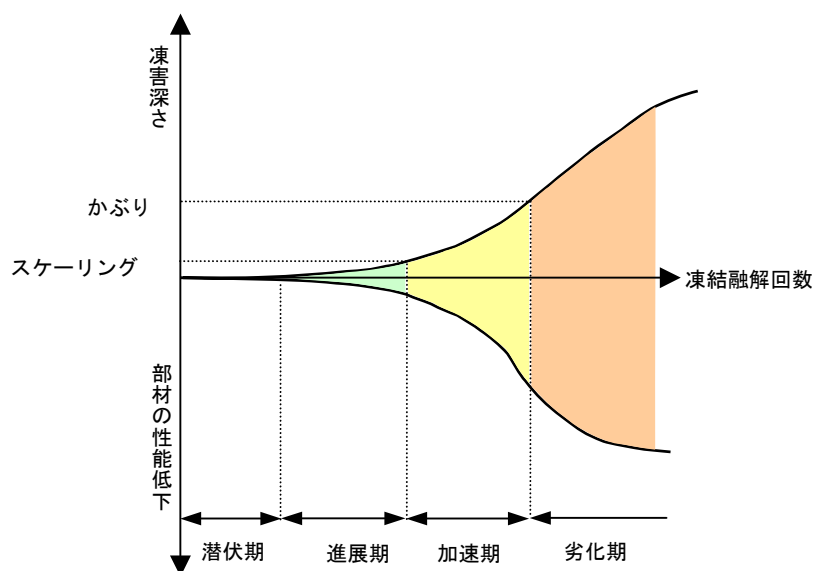


図 4.4.1 凍害：劣化過程の概念図

表 4.4.3 凍害：劣化過程の定義と期間を決定する要因

劣化過程	定義	期間を決定する要因
潜伏期	凍結融解作用は受けるが劣化が顕在化しない期間	凍害発生の可能性の有無，凍結融解回数
進展期	コンクリート表面の劣化は進行するが，鋼材腐食がない期間	凍害深さ（凍結融解回数，凍結水量）
加速期	コンクリートの劣化が大きくなり，鋼材腐食が増大する期間	凍害深さ，鋼材の腐食速度
劣化期	コンクリートの劣化がかぶり異常になり，耐荷力の低下が顕著になる期間	鋼材の腐食速度

(1) 凍害発生の予測

コンクリートは骨材とペーストとの複合体であることから、骨材の吸水率や安定性試験、対象とするコンクリートを再現したコンクリートの凍結融解試験を行うことにより、凍害発生の予測を行い、潜伏期の長さを予測することができる。しかし、構造物の供用環境が異なることから定量的な予測は現在のところ困難であり、耐凍害性の有無を評価することとなる。

凍害を受ける可能性の有無、すなわち耐凍害性評価の制限値を表 4.4.4 に示す。

表 4.4.4 耐凍害性の評価

	試験方法	制限値
骨材の耐凍害性	吸水率試験	3%以下
	骨材安定性試験	損失重量 12%以下
コンクリートの耐凍害性	JIS A 1148 A 法 コンクリートの凍結融解試験方法 (水中凍結融解試験方法)	健全 : 耐凍害性に優れる 要注意 : 場合によっては使用可能 要注意(2)(3) : 耐凍害性に劣っており、寒冷地では使用不可 表 4.4.5, 図 4.4.2 参照

表 4.4.5 凍結融解試験結果の評価¹⁾

	相対動弾性係数 (%)	長さ変化率 (μ)
健全	300 サイクル終了後 80%以上	300 サイクル終了後 200 μ 以下
要注意(1)	300 サイクル終了後 60~80%	300 サイクル終了後 200~1000 μ
要注意(2)	300 サイクル終了後 ~60%	300 サイクル終了後 1000 μ ~
要注意(3)	300 サイクル終了困難	300 サイクル終了困難
備考	長さ変化率は JIS 原案「コンクリートの凍結融解試験方法 (案)」および現行 JIS A 1148 において付属書 (参考)「長さ増加比試験方法」として示されているが、現行の JIS 規定の一部とはされていない。	

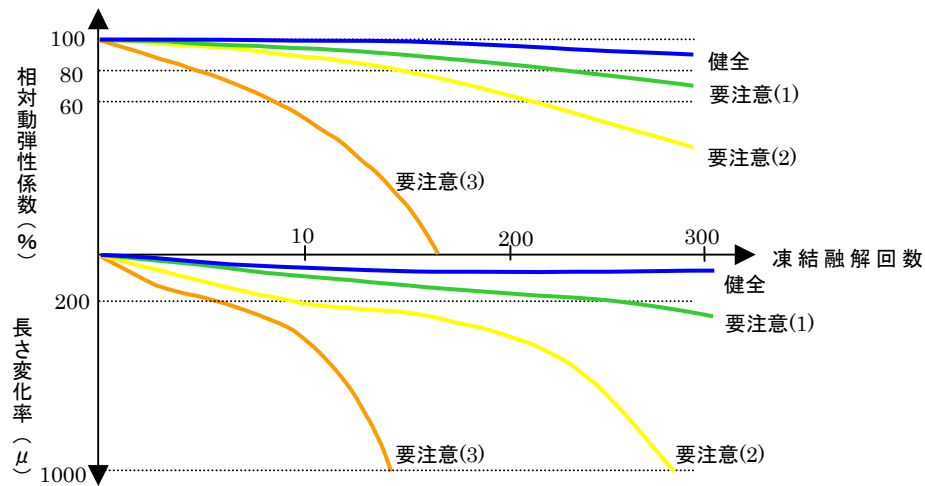


図 4.4.2 凍結融解試験結果の概念図

(2) 凍害深さの予測

詳細調査により得られた凍害深さとその進行速度をもとに、凍害深さの予測を行う。しかしながら、凍害深さの測定はコンクリート表面から深さ毎の超音波伝播速度の分布や細孔径分布の径別の割合から求める方法が検討されている段階であり、未だ研究段階にある。

(3) 凍害に対する劣化モデルの概念

中性化や塩害と同様に劣化推定を行うためには、凍害に対する劣化モデルが必要となる。現在研究開発が求められている分野であり、その概念を以下に示す。

凍害に対する劣化モデル (図 4.4.3 参照)

$$\text{劣化度}(R) = \alpha(z) \cdot f(r, s, W/C, e, b) \cdot N^{(a \cdot n)} \quad (4.4.1)$$

ここに、

R : 劣化度を表わす指数で、表 4.4.6 に示す外観と劣化深さから基準化した健全度を評価する指数

表 4.4.6 健全度評価指数のイメージ

健全度	外観と劣化深さ	劣化度(R)
I	表面に肌荒れと微細なひび割れが見られる。劣化深さはコンクリート表面から数 mm 程度	xx~yy
II	表面のスケーリングと骨材のポップアウトが見られ、劣化深さがコンクリート表面から 10mm 程度	yy~zz
III	表面のコンクリートの一部が脆弱化して崩壊しており、劣化深さはコンクリート表面から 20~30mm 以上となっている	zz 以上

$f(r, s, W/C, e, b)$: 地区、構造、水セメント比、空気量、塩化物の影響を関数とした凍害劣化度係数

r : 最低気温に関する係数

s : 構造物係数 (しばしば水の影響を受ける構造部材・部位と水の影響はあまり受けない構造物部材・部位に関する係数)

W/C : 水セメント (結合材) 比に関する係数

e : 空気量に関する係数

b : 塩化物の影響の有無 (凍結防止剤, 海水等) に関する係数

$N^{(a \cdot n)}$: 凍結融解の回数の関数

a : 構造物の設置方向が日照に照らされるか、ほとんど日照を受けないかに関する係数

n : 構造物の置かれている地区の凍結融解の回数

$\alpha(z)$: 表面被覆材による補正係数

上記の、各パラメータの影響度が明確になれば、凍害劣化による材料劣化や構造性能の変化を推定することが可能となる。これらの検討が急務であると考ええる。

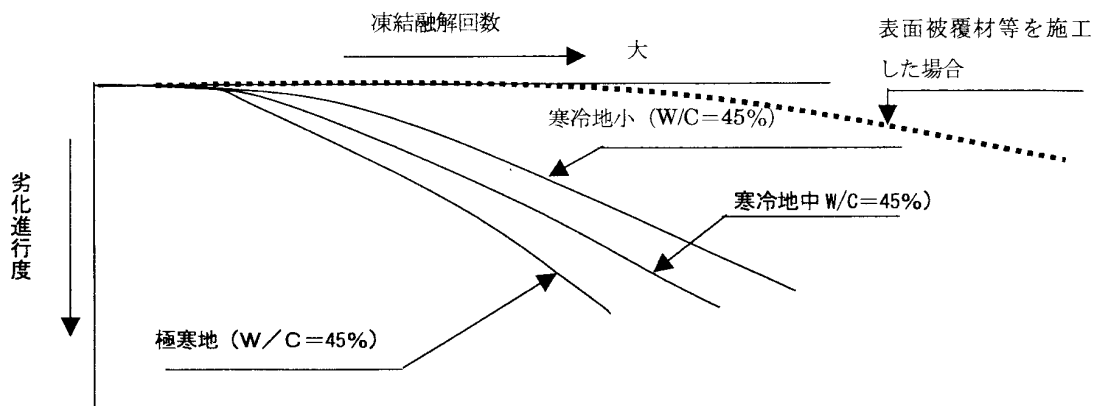


図 4.4.3 凍害劣化モデル概念図

4.4.3 評価および判定：凍害¹⁾

点検時における凍害劣化の評価は、表 4.2.5 に示す構造物の外観上の劣化グレード手法により、劣化グレードを示すことにより評価とする。凍害劣化の判定は、評価された劣化グレードに対応する性能低下が表 4.2.6 の通り想定されることを参考として、対策要否を判定する。

潜伏期では、基本的に劣化が顕在化していないので性能の低下はないが、**進展期**に入り表面の劣化が発生すると美観の低下が考えられる。**加速期**に入ると凍害深さが大きくなり、コンクリートの断面減少が顕著になるため、鋼材腐食が発生する段階には入り、コンクリートのはく落等による第三者影響度が心配される。**劣化期**に入ると凍害によるコンクリートの劣化がかぶり以上になるため、変形による使用性能の低下や耐荷力の低下による安全性能の低下が懸念される。尚、鋼材に腐食が生じていて動的荷重により疲労を受けている場合には、進展期などの比較的早い段階からコンクリートのはく落に代表される第三者影響度が問題となることがあるため注意が必要である。

また、予定供用期間終了時は、詳細調査等で求まる供用期間と凍害深さの関係から評価および判定を、点検時と同様に行う。

表 4.4.7 凍害：外観上のグレードと劣化の状態

構造物の外観上のグレード	凍害劣化の状態
状態Ⅰ（潜伏期）	凍結融解作用を受けるが、性能低下がなく初期の健全性を保持している段階
状態Ⅱ（進展期）	凍害深さが小さく剛性にほとんど変化はなく鋼材腐食もないが、美観等に影響を及ぼす段階
状態Ⅲ（加速期）	凍害深さが大きくなり、剥落等の第三者への影響が起こり鋼材腐食が発生する段階
状態Ⅳ（劣化期）	凍害深さが鋼材以上になり、鋼材腐食が著しくなり、仕様性能や安全性能へ影響を及ぼす段階

表 4.4.8 凍害：外観上のグレードと標準的な性能低下

構造物の外観上のグレード	安全性能	使用性能	第三者影響度 美観・景観
状態Ⅰ（潜伏期）	－	－	－
状態Ⅱ（進展期）	－	－	美観の低下 ・スケーリング・ポップアウト ・ひび割れ 第三者への影響 ・はく離 ・はく落
状態Ⅲ（加速期）	－	－	
状態Ⅳ（劣化期）	耐荷力の低下 ・コンクリート断面の減少 ・鋼材腐食	変位・変形 ・コンクリート断面の減少 ・鋼材腐食	

4.4.4 対策の選定：凍害¹⁾

塩害による構造物の性能低下が必要と判断された場合には、要求性能を満足するような対策を選定しなければならない。性能照査に基づいた対策の選定が難しい場合には、表 4.4.9, 表 4.4.10, 表 4.4.11 に示す外観上のグレードを基準として対策を選定してもよい。標準的な工法については「5. コンクリート構造物の補修・補強」に解説を示している。

表 4.4.9 凍害：構造物の外観上のグレードと対策

構造物の外観上のグレード	点検強化	補修	補強	修景	使用性回復	機能性向上	供用制限	解体・撤去
I（潜伏期）		(○)						
II（進展期）	○	○		◎				
III（加速期）	○	◎	○	◎	○		○	
IV（劣化期）	○	◎	◎	○	○	○	○	◎
備考	◎：標準的な対策，○：場合によっては考えられる対策 (○)：予防的に実施される対策							

表 4.4.10 凍害：補修・補強に期待する効果と工法

期待する効果	工法例
水の供給を抑制	表面処理，ひび割れ注入
劣化部を取り除く	断面修復，ひび割れ注入
耐荷力の向上	増厚，打換え，巻立て

表 4.4.11 凍害：構造物の外観上のグレードと標準的な工法

構造物の外観上のグレード	標準的な工法
I（潜伏期）	表面処理* *：予防的に実施される工法
II（進展期）	表面処理
III（加速期）	表面処理，ひび割れ注入，断面修復
IV（劣化期）	ひび割れ注入，増厚，打換え，巻立て

4.5 化学的侵食

4.5.1 劣化機構の推定：化学的侵食

本節では化学的侵食として、主に下水道関連施設、温泉地、土壌における酸性劣化ならびに硫酸塩劣化を対象とする。化学的侵食による劣化か否かは、表 4.5.1 の通り外観上の損傷、環境条件・使用条件の外的要因、詳細調査による劣化指標を考慮して推定する。

表 4.5.1 化学的侵食：劣化推定

	調査内容	化学的侵食による劣化か否かの推定
(1) 外観上の損傷	・変色 ・コンクリートはく離 ・コンクリート硬化体の分解 ・化合物生成時の膨張圧による劣化	左記変状項目のいずれかに該当する場合、有 左記変状項目の全てに該当しない場合、無
(2) 外的要因	・温泉地域 ・酸性水	
(3) 詳細調査	・劣化因子の浸透深さ ・鋼材腐食量 ・中性化深さ	推定、評価・判定の参考とする

4.5.2 劣化予測：化学的侵食¹⁾

化学的侵食による主な劣化現象はコンクリート保護層およびコンクリートの劣化の進行、ならびに鋼材腐食の進行である。このため、化学的侵食による性能低下を図 4.5.1 の通りモデル化し、各劣化過程とその期間を決定する要因を表 4.5.2 の通りとして評価する方法がとられている。すなわち、コンクリート保護層の変質（脆弱化、変色）を経てコンクリートの変質が生じるまでの**潜伏期**、コンクリートの変質が鋼材位置に達するまでの**進展期**、鋼材の腐食が進行する**加速期**、コンクリートの断面欠損や鋼材の断面減少などによって構造物の性能低下が顕著となる**劣化期**に区分される。

ここで、各劣化過程とその期間を決定する要因は表 4.5.2 の通り保護層あるいはコンクリート中への劣化因子の浸透速度、腐食速度を指標として設定されるべきであるが、現時点での技術レベルでは直接的に性能低下の予測を行うことは困難である。このため、現実的には構造物の外観上のグレードに対応した性能評価を行い、対策の要否を判定する方法がとられている。

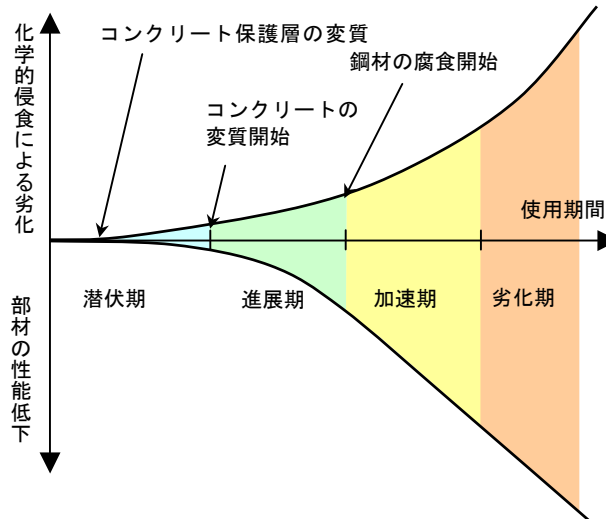


図 4.5.1 化学的侵食：劣化過程の概念図

表 4.5.2 化学的侵食：劣化過程の定義と期間を決定する要因

劣化過程	定義	期間を決定する要因
潜伏期	コンクリートの変質が生じるまでの期間	コンクリート保護層中への劣化因子の浸透速度
進展期	コンクリートの変質が鋼材位置に達するまでの期間	コンクリート中への劣化因子の浸透速度
加速期	鋼材腐食が進行する期間	鋼材の腐食速度
劣化期	コンクリートの断面欠損・鋼材の断面減少などにより耐荷力の低下が顕著な期間	鋼材の腐食速度

(1) 化学的侵食の進行予測

酸性劣化では、pH が低い場合 (pH=1~3) には、劣化因子の浸透深さは時間の \sqrt{t} 則に従う場合が多い。

$$y = b \cdot \sqrt{t} \tag{4.5.1}$$

ここに、

y : 劣化因子の浸透深さ (mm)

t : 化学的侵食をもたらす物質に曝される期間 (年)

b : 劣化因子の浸透速度係数 (mm/ $\sqrt{\text{年}}$)

(2) 鋼材腐食の進行予測

鋼材の腐食開始時期は、化学的侵食に着目した研究例が多くないことから、点検結果から得られた中性化深さを利用して、中性化残りで判定する。この際、中性化残りとの関係は、シミュレーション試験によって明らかにしておく必要がある。

鋼材の腐食進行予測は、点検結果で得られた腐食量に基づく方法、あるいはシミュレーション試験の利用により行う。

4.5.3 評価および判定：化学的侵食¹⁾

化学的侵食の評価は、表 4.5.3 に示す構造物の外観上の劣化グレード手法により、劣化グレードを示すことにより評価とする。化学的侵食の判定は、評価された劣化グレードに対応する性能低下が表 4.5.4 の通り想定されることを参考として、対策要否を判定する。

潜伏期では、コンクリート保護層の化学的侵食の進行によりコンクリートの化学的侵食の可能性が生じ、また**進展期**ではコンクリートの化学的侵食の進行により鋼材腐食の可能性が生じるため、鋼材の保護性能が評価の対象となる。鋼材保護性能は直接的な構造物の性能ではないが、耐久性能に影響を及ぼすので重要である。

また、**潜伏期**ではコンクリート保護層のはく離やはく落、**進展期**ではコンクリートのはく離やはく落、さらに**加速期以降**ではコンクリートの断面が減少し、鋼材の腐食量が増大するため、部材の剛性やじん性など使用性能の低下、耐荷力等の安全性能にも着目する必要がある。

表 4.5.3 化学的侵食：構造物の外観上のグレードと劣化の状態の関係

構造物の 外観上のグレード	劣化の状態
状態Ⅰ（潜伏期前期）	外観上の返上が見られない
状態Ⅱ-1（潜伏期後期）	コンクリート保護層に変状が見られる
状態Ⅱ-2（進展期）	コンクリートに変状が見られる，劣化因子の浸透深さが鋼材位置まで達していない
状態Ⅲ-1（加速期前期）	コンクリートの断面欠損が著しい，劣化因子の浸透深さが鋼材位置に達している，鋼材の腐食が見られる
状態Ⅲ-2（加速期後期）	コンクリートの断面欠損が著しい，鋼材の腐食量の増大
状態Ⅳ（劣化期）	鋼材の腐食が著しい，変位・たわみが大きい

表 4.5.4 化学的侵食：外観上のグレードと標準的な性能低下

構造物の 外観上のグレード	安全性能	使用性能	第三者影響度 美観・景観
状態Ⅰ（潜伏期前期）	—	—	—
状態Ⅱ-1（潜伏期後期）	—	—	美観の低下 ・コンクリート保護層のはく離・はく落
状態Ⅱ-2（進展期）	耐力の低下 ・コンクリート断面の減少	剛性の低下（変形の増大・振動の発生） ・鋼材とコンクリートの付着力の低下	美観の低下 ・コンクリートの変質・ひび割れ 第三者への影響 ・はく離 ・はく落
状態Ⅲ-1（加速期前期）		剛性の低下（変形の増大・振動の発生）	美観の低下
状態Ⅲ-2（加速期後期）	耐力・じん性の低下	・コンクリート断面の減少	・コンクリートの変質・ひび割れ
状態Ⅳ（劣化期）	・鋼材断面積の減少	・鋼材断面積の減少	・鋼材の露出 ・錆汁

4.5.4 対策の選定：化学的侵食¹⁾

化学的侵食による構造物の性能低下が必要と判断された場合には、要求性能を満足するような対策を選定しなければならない。性能照査に基づいた対策の選定が難しい場合には、表 4.2.7、表 4.2.8、表 4.2.9 に示す外観上のグレードを基準として対策を選定してもよい。標準的な工法については「5. コンクリート構造物の補修・補強」に解説を示している。

表 4.5.5 化学的侵食：構造物の外観上のグレードと対策

構造物の外観上のグレード	点検強化	補修	補強	修景	使用性回復	機能性向上	供用制限	解体・撤去
I (潜伏期前期)	○	(○)						
II-1 (潜伏期後期)	○	◎		◎				
II-2 (進展期)	◎	◎	○	◎	○	○		
III-1 (加速期前期)	◎	◎	◎	◎	◎	○		
III-2 (加速期後期)	◎	◎	◎	◎	◎	◎	○	
IV (劣化期)		○	◎	○	◎	◎	◎	◎
備考	◎：標準的な対策，○：場合によっては考えられる対策 (○)：予防的に実施される対策							

表 4.5.6 化学的侵食：補修・補強に期待する効果と工法

期待する効果	工法例
化学的侵食の進行を抑制	表面処理（樹脂ライニング，シートライニング），FRP 接着
鉄筋の腐食進行を抑制	表面処理，断面修復，防錆処理
耐荷力を向上	FRP 接着，増厚，巻立て

表 4.5.7 化学的侵食：構造物の外観上のグレードと標準的な工法

構造物の外観上のグレード	標準的な工法
I (潜伏期前期)	表面処理* *：予防的に実施される工法
II-1 (潜伏期後期)	表面処理
II-2 (進展期)	含浸，断面修復，表面処理
III-1 (加速期前期)	断面修復，表面処理
III-2 (加速期後期)	断面修復，表面処理，増厚
IV (劣化期)	FRP 接着，断面修復，表面処理，増厚，巻立て

4.6 アルカリ骨材反応

4.6.1 劣化機構の推定：ASR

アルカリ骨材反応（以下、ASRと称す）による劣化の可能性があるか否かの推定は、外観調査を基本として表 4.6.1、表 4.6.2 の通り行う。ASR劣化を生じた構造物には、亀甲状あるいは部材軸方向のひび割れ、白色のゲル状物質の滲出、ひび割れの段差、変色等の外観上の特徴（「2.1.6 アルカリ骨材反応による損傷事例」参照）が見られる場合が多い。この場合には、ASR劣化の疑いがあるものと推定する。図書調査は主に、使用材料のアルカリ骨材反応性の有無を評価するものであり推定の際の参考とする。

表 4.6.1 ASR劣化の推定（その1）

	外観調査・図書調査結果の組合せ			備考
	①	②	③	
外観調査による判定	有	有	無	表 4.6.2(1)参照
図書調査による判定	有 (調査結果が不明 の場合を含む)	無	図書調査不要	表 4.6.2(2)参照
外観調査・図書調査 による総合判定	有	有	無	

表 4.6.2 ASR劣化の推定（その2）

着目する変状項目		ASRの可能性の判定
(1)外観調査	ひび割れ ・網目状のひび割れ ・方向性のひび割れ ・白色のゲル状物質の析出 ・水の供給を受ける箇所ひび割れ	左記変状項目のいずれかに該当する場合、有 左記変状項目の全てに該当しない場合、無
	変位・変形、変色 ・ひび割れ部の段差や目地材のはみ出し ・コンクリート表面の変色	
(2)図書調査	使用材料（表 4.6.3 参照） ・無害骨材の使用 ・低アルカリセメントの使用 ・混合セメントの使用 ・総アルカリ量が 3.0kg/m ³ 以下	左記対策項目のいずれかに該当する場合、無 左記対策項目の全てに該当しない場合（すなわち抑制対策を講じていない）または調査結果が不明の場合、有

ASR劣化の可能性があるかと推定された場合や、凍害劣化等他の劣化との複合が想定される場合には、ASR劣化の特定あるいは劣化状態の評価、対策要否の判定を行うことを目的として、ASRに関する試験を行うものとし、試験項目とその評価は表 4.6.4 の通りとする。尚、ASR劣化の可能性無と推定された場合においても、今後次第に変状が顕在化してくる可能性が考えられ、定期点検等による継続的な維持管理が必要である。一般的には、ASR劣化によるひび割れは竣工後 2～3 年以上経過した後に発生し、5～6 年以上の後に目立つようになることが多い¹¹⁾ と言われているが、これに使用条件・環境条件が加わり変状が顕在化する時期は竣工後の経過年数からは一概に判断できない。

表 4.6.3 ASRに関する規制等の時系列

	内 容
昭和 61(1986)年以前の取組み	アルカリ骨材反応は1940年にアメリカのStantonにより最初の報告がされているが、我が国では昭和25年に米国の文献が紹介され、昭和26年に山形県の調査で2つの構造物がアルカリ骨材反応の疑いが高いとして報告されている。昭和30年頃には鳥取県で被害例が1例報告されている。昭和57年頃阪神地区での損傷事例の発見の後、多くの研究機関等で、損傷の原因から骨材の実態、劣化メカニズム、劣化予防方法など広範な研究が行われ、アルカリ骨材反応に関する規制に到った。 ⁵⁾
昭和61年6月(1986)	建設省通達「アルカリ骨材反応暫定対策について」¹²⁾ 「骨材の選定」「低アルカリ型セメントの使用」「抑制効果のある混合セメントの使用」「コンクリート中のアルカリ総量の抑制」の4つの対策が示された。同時に、骨材のアルカリシリカ反応性試験の試験法として、化学法とモルタルバー法の建設省暫定案が示された。
昭和61年10月(1986)	JIS A 5308「レディーミクストコンクリート」 アルカリ骨材反応対策が盛り込まれ、アルカリ骨材反応の抑制方法を購入者に報告することが義務づけられた。すなわち、使用骨材は化学法がモルタルバー法で試験し無害と判定された骨材でなければならないとした。ただし、「低アルカリ形セメント」「混合セメント」「コンクリートのアルカリ総量の規制」による抑制対策を講じた場合は、無害と判定されない骨材も使用可能であるとした。 以下に、関連するJIS A 5308の付属書を示す。 付属書1(規定)レディーミクストコンクリート用骨材 付属書6(規定)セメントの選定等によるアルカリ骨材反応の抑制対策の方法 付属書7(規定)骨材のアルカリシリカ反応性試験方法(化学法) 付属書8(規定)骨材のアルカリシリカ反応性試験方法(モルタルバー法)
平成元年5月(1989)	総プロ「コンクリートの耐久性向上技術の開発」¹³⁾ 建設省総合技術開発プロジェクトの一環として昭和60年度に研究に着手し、昭和62年度に終了した「コンクリートの耐久性向上技術の開発」の内、土木構造物に関する研究成果がとりまとめられ、アルカリ骨材反応に関する骨材の試験方法と判定基準、アルカリ骨材反応抑制対策の方法が規定された。この内容が次項の建設省通達である。
平成元年7月(1989)	建設省通達「アルカリ骨材反応抑制対策について」¹⁴⁾ 昭和61年の建設省通達「アルカリ骨材反応暫定対策について」の内、抑制効果のある混合セメント等の記述と、化学法およびモルタルバー法の試験方法が小改定された。アルカリ骨材反応抑制対策として、「安全と認められる骨材の使用」「低アルカリ形セメントの使用」「抑制効果のある混合セメント等の使用」「コンクリートのアルカリ総量の抑制」の4つの対策の中のいずれか1つをとらなければならないとされた。
平成元年12月(1989)	JIS A 5308「レディーミクストコンクリート」 アルカリ骨材反応対策関係の記述が修正され、骨材をアルカリシリカ反応性の有無によって、種類A(無害)と種類B(無害でないもの)に分類分けし、反応抑制対策を施すことによって種類Bの骨材の取り扱いを種類Aと同等のものとした。
平成4年3月(1992)	JIS A 1804「コンクリートの生産工程管理用試験方法—骨材のアルカリシリカ反応性試験方法(迅速法)」 骨材のアルカリシリカ反応性試験として迅速法が制定される。
平成14年8月(2002)	国交省「アルカリ骨材反応抑制対策」¹⁵⁾ 平成元年7月の建設省通達を改正し、アルカリ骨材反応抑制対策として、「コンクリート中のアルカリ総量の抑制」「抑制効果のある混合セメント等の使用」「安全と認められる骨材の使用」の3つ対策の中から1つの対策をとることを求めている。
平成15年3月(2003)	国交省「アルカリ骨材反応が生じた橋梁に対する対応について」¹⁶⁾ 従来、アルカリ骨材反応に起因する橋梁の損傷は、主にコンクリートの膨張によるひび割れが問題とされ、コンクリート内部への水分の供給を防ぎアルカリ骨材反応の進行を抑制する対策を実施してきました。しかし、最近になって近畿地方整備局等の管理する橋梁の下部構造において鉄筋の破断が報告され、実際に橋梁を維持管理するうえでの対応要領が必要とされた。 このため、近畿地方整備局に設置した「アルカリ骨材反応橋脚等に関する対策検討委員会」において検討を行い、国土交通省として道路橋のアルカリ骨材反応に対する対応要領を取りまとめ、これに基づく調査、補修等の実施を求めている。

表 4.6.4 既存構造物のASR劣化に関する試験項目とその評価例

試験項目	ASRの評価				
①膨張量試験	採取コア（標準φ100mm×250mm）の促進膨張試験の結果，全膨張ひずみ量が試験材齢3ヶ月の時点で0.05% (500×10^{-6}) を越えた場合，試験したコンクリートコにアルカリ骨材反応による膨張が生じるおそれがあると判断する。				
②岩種判定	表 4.6.5 に示す有害鉱物を含む岩種の存在が認められた場合は，アルカリ骨材反応を生じる可能性があるものと判断する。ただし，有害鉱物を含む岩種の量が数%にすぎない場合は，アルカリ骨材反応が変状の主原因であるとは断定できない。				
③アルカリ含有量分析	採取コアのアルカリ金属イオン含有量試験の結果，当該コンクリート中のアルカリ金属イオン量が 3.0kg/m^3 以上であれば，アルカリ骨材反応が生じる可能性があるものと判断する。				
④シリカゲルの確認	生成した白色物質がアルカリシリカゲルであるが否かの判定をシリカゲル判定表により行い，アルカリ骨材反応による劣化が生じているか否かの判定を行う。この時，判定精度も記録する。				
	シリカゲル判定表				
	判定基準	試料量			
		50mg 以上	50～10mg	10mg 未満	数 mg
	SiO ₂ 30%以上	シリカゲルである			判定不可
	SiO ₂ 10～30%	シリカゲルの可能性が大きい		判定不可	判定不可
SiO ₂ 10%未満	シリカゲルの可能性がある	判定不可	判定不可	判定不可	
ケイ酸イオンの定性	判定不可	判定不可	判定不可	青色判定	
判定精度	高い	やや低い	参考値	参考値	
備考	以下文献に一部加筆して作成。 (独) 土木研究所，日本構造物診断技術協会：非破壊試験を用いた土木コンクリート構造物の健全度診断マニュアル，p121-122，技報堂出版，2003. 10				

表 4.6.5 日本において構造物で反応性が認められているASR有害鉱物

岩石の成因		有害鉱物を含む可能性のある骨材用岩石	日本の構造物においてASR反応性が認められている有害鉱物（鉱物記号）			
			火山ガラス (G)	クリストバライト (Cr)	トリジマイト (Tr)	微小石英 (MQ)
火成岩	火山岩	安山岩	○	○	○	
		流紋岩	○	○	○	○
変成岩	——	粘板岩				○
堆積岩	固結堆積岩	砂岩				○
		頁岩				○
	火山性堆積岩	凝灰岩	○	○	○	○
	化学的堆積岩	チャート				○
備考	以下文献をもとに筆者が作成。尚，粘板岩は文献により堆積岩に含める場合もある。 ・脇坂安彦：世界各国におけるアルカリシリカ反応性岩石（その2），応用地質 31 巻，3 号，1990 ・丸章夫：骨材品質にかかわる耐久性の診断手法—岩石・鉱物学的手法—，コンクリート工学，Vol.26，No.7，pp41-48，1988 ・小林一輔編集：コンクリート構造物の耐久性診断シリーズ 2，アルカリ骨材反応の診断，p80，森北出版					

4.6.2 劣化予測：ASR¹⁾

アルカリ骨材反応（以下ASRという）による構造物の性能低下は図 4.6.1 に示すように、ASRそのものは進行するものの膨張がまだ表れない**潜伏期**、水分とアルカリの供給下において膨張が継続的に進行し、ひび割れが発生する**進展期**、ASRによる膨張が顕著に表れ、膨張速度が最大を示す段階で、ひび割れが進展する**加速期**、ひび割れ密度が増大し、鋼材腐食が進行するとともに、コンクリートの強度低下および鋼材の損傷により部材としての耐荷力に影響を及ぼす**劣化期**に区分されている。

ここで、各劣化過程とその時期を決定する要因は表 4.6.6 の通りであり、その時期はASRゲルの生成速度、吸水膨張速度、鋼材の腐食速度等を指標として設定されるべきであるが、構造物の性能の変化を予測することは困難な現状にある。

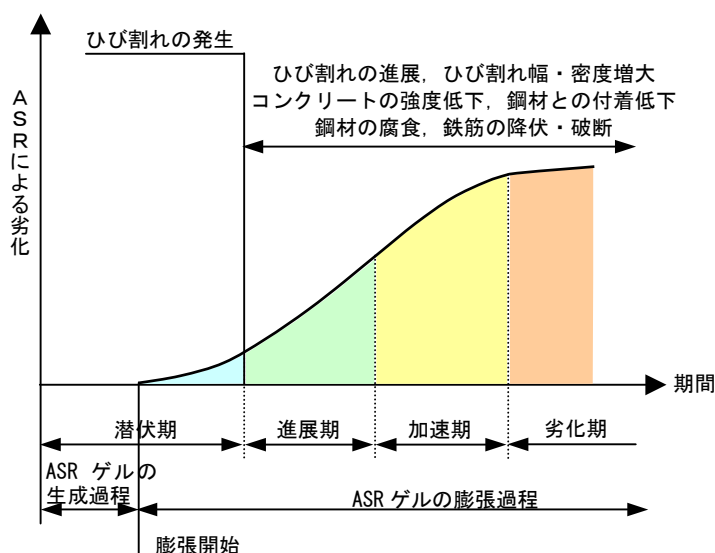


図 4.6.1 ASR劣化過程の概念図¹⁷⁾

表 4.6.6 ASRによる劣化過程の定義と期間を決定する要因

劣化過程	定義	期間を決定する要因
潜伏期	ASRそのものは進行するものの膨張およびそれに伴うひび割れがまだ発生していない。	ASRゲルの生成速度 (反応性鉱物の種類とその量, アルカリ量)
進展期	水分とアルカリの供給下において膨張が継続的に進行し、ひび割れが発生する。	ASRゲルの吸水膨張速度 (水分とアルカリの供給)
加速期	ASRによる膨張が顕著に表れ、膨張速度が最大を示す段階で、ひび割れが進展する。	
劣化期	ひび割れ幅および密度が増大し、鋼材腐食が進行するとともに、過大な膨張が発生した時には、鋼材の降伏や破断が発生し、部材としての耐荷力に影響を及ぼす。	ASRゲルの吸水膨張速度 (水分とアルカリの供給) 鋼材の腐食速度 鋼材の引張応力度増加率

(1) A S R の進行予測

A S R の進行はアルカリシリカゲルの生成（化学反応過程）とアルカリシリカゲルが吸水することによる膨張過程（物理的過程）からなる。A S R によるコンクリートの膨張は、図 4.6.2 に示す通り 4 段階にモデル化され、膨張状態の区分と特徴は表 4.6.7 の通りである。

A S R の進行は、主に骨材の反応性（反応性珪物の種類とその含有量）、コンクリートの配合（コンクリート中のアルカリ量）、環境条件（水分およびアルカリの供給条件）に支配され、これらを適切に評価する必要があるが、現状ではこれらを定量的に評価できる段階ではない。

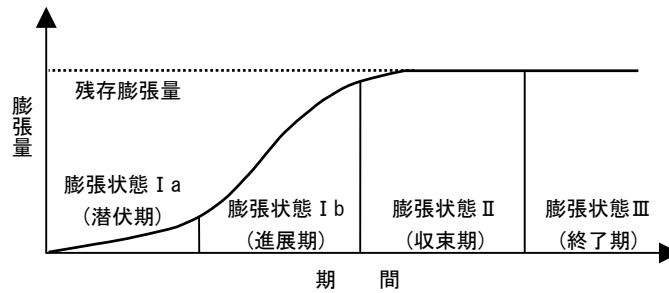


図 4.6.2 A S R によるコンクリートの膨張過程の概念図

表 4.6.7 A S R によるコンクリートの膨張過程

膨張の区分		解説
膨張状態 I a	潜伏期	A S R そのものは進行するものの、膨張がまだ顕著に表れない時期。コンクリートが持っている潜在的な膨張能力は最も大きい時期であり、残存膨張量は最大を示す。なお、場合によっては、I a を経ずに最初から I b の状態になることがある。
膨張状態 I b	進展期	A S R による膨張が顕著に表れ、膨張速度は最大を示す時期であって、残存膨張量はまだ大きい。
膨張状態 II	収束期	A S R そのものはほぼ収束し、A S R による膨張の速度が低下し、収束に向かう時期であって、残存膨張量は小さい。
膨張状態 III	終了期	A S R による膨張もほぼ収束し、残存膨張量がほぼ 0 となる時期。

(2) A S R による構造物の劣化予測

A S R の進行に伴う構造物の劣化は、コンクリート内部におけるアルカリシリカゲルの吸水膨張によって発生するが、環境条件やコンクリートの拘束条件（鋼材量や外部拘束の有無）により、ひび割れの発生状況は大きく相違する。このため、コアの促進膨張試験、または構造物のひび割れ進展の点検などにより、点検時の劣化グレードを設定している現状である。

4.6.3 評価および判定：A S R¹⁾

A S R 劣化の点検時および予定供用期間終了時の評価は、表 4.6.8 に示す構造物の外観上の劣化グレード手法により、劣化グレードを示すことにより評価とする。この際、外観調査、ひび割れの経時的進展、コアの促進膨張試験などの結果を参考とする。A S R 劣化

の判定は、評価された潜伏期等の劣化グレードに対応する性能低下が表 4.6.9 の通り想定されることを参考として、対策要否を判定する。

表 4.6.8 A S R : 構造物の外観上のグレードと劣化の状態

構造物の外観上のグレード	A S R劣化の状態
状態Ⅰ（潜伏期）	A S Rは発生しているが、外観上の変状は見られない。
状態Ⅱ（進展期）	A S Rによる膨張によってひび割れが発生し、変色、ゲルの滲出が見られる。
状態Ⅲ（加速期）	A S Rによるひび割れが進展し、ひび割れの本数、幅および密度が増大する。
状態Ⅳ（劣化期）	A S Rによるひび割れが多数発生し、構造物に段差、ずれなどが見られる。かぶりの部分的なはく離・はく落が発生する。鋼材腐食が進行し、錆汁が見られる。変位・変形が大きい。

表 4.6.9 A S R : 構造物の外観上のグレードと標準的な性能低下

構造物の外観上のグレード	安全性能	使用性能	第三者影響度 美観・景観
状態Ⅰ（潜伏期）	---	---	---
状態Ⅱ（進展期）	---	水密性などの低下	美観の低下
状態Ⅲ（加速期）	じん性の低下	・ひび割れ	・ひび割れ
状態Ⅳ（劣化期）	・鋼材の腐食 耐荷力の低下 ・本来の照査：耐荷力 ・簡易な照査：コンクリートの強度低下、鋼材の付着力低下、鋼材の降伏および破断	鋼材の腐食発生 ・ひび割れ 構造物の変位・変形 ・たわみ ・ずれ ・段差	・変色 ・ゲルの滲出 第三者への影響 ・はく離 ・はく落

(1) A S Rによる構造物の性能低下

A S Rにより発生したコンクリートのひび割れは、表面のかぶり部分までで、鋼材内部へのひび割れの進展は少なく、コンクリート中に鋼材が適切に配置されている場合には、A S Rがコンクリート構造物の耐荷力に与える影響は小さいとされている。このため、コンクリートのひび割れがかぶり部分に限られる場合には、ひび割れによる鋼材腐食の発生、ひび割れや変色など、使用性能および第三者影響度に関する性能、美観・景観の低下が問題となることが多い。

A S Rによる過大な膨張が発生した構造物では、ひび割れ、ゲルの滲出などのコンクリート上面の変状だけでなく、状況によってはコンクリートの強度低下や鋼材の損傷により構造物の耐荷力が低下していることがあるので、載荷試験などにより構造物あるいは構成部材の耐荷力および剛性を確認する必要がある。

また、段差またはずれが発生している箇所では、かぶりの一部をはつり取り、鋼材の腐食状況および鋼材の破断の有無を調査する必要がある。

特に、常に水の供給を受ける橋脚の梁端部や土と接する基礎構造物、橋台、擁壁、トンネル坑口などでは長期にわたるA S Rの進行によって過大な膨張が発生する可能性がある。

(2) 補修の検討を行う必要性の判断¹¹⁾

補修を行うための検討を始めるかどうかは、構造物の種類や重要性、周辺環境、ひび割

れの程度、これまでの調査記録等を総合的に勘案して判断するものとする。ASRによるひび割れが生じていても、ひび割れ幅が小さく、反応ゲルや炭酸カルシウムなどで充填されている場合には、次のような理由から、すぐに補修のための検討を行わず、経過観察を行うものとしてもよい。この場合でも、上部構造からの漏水が著しく、ASRによる変状が生じている部位に水分が供給されている場合には、水分の供給を防ぐための対策を行う

- ・ ひび割れ幅が小さい場合には、ひび割れが反応ゲルや炭酸カルシウム（遊離石灰）などで充填されるため水や空気の鉄筋近傍への侵入が抑制され、コンクリート中の鉄筋は健全であることが多い。
- ・ ひび割れ幅が小さく、ひび割れが反応ゲル等で充填されている場合には、ひび割れへの補修材料の注入が困難である。
- ・ 補修（特に、表面保護工）を行うことで、外観からの経過観察が困難になる場合がある。

(3) 補強の検討を行う必要性の判断¹¹⁾

1) 鉄筋の腐食・破断に対する判断

既往の研究では、ASRにより著しいひび割れが発生しているなど外見上かなりの変状が見られる場合でも、ひび割れの深さが鉄筋のかぶり程度までにとどまっていることが多く、内部の鉄筋が健全であれば、耐荷力の低下はほとんどないと考えられている。

しかし、最近になって、ASRによるコンクリートの膨張が著しい構造物の一部では、内部の鉄筋が破断している事例もあることがわかってきた。このような構造物中の鉄筋の損傷が進展すれば、構造物の耐荷性能が損なわれる可能性もあるので、早期に補強することも念頭に置いて詳細調査を行うものとする。

2) コンクリート強度等に対する判断

著しい強度低下や静弾性係数の低下がある場合は、ASRもしくは凍害との複合劣化によるひび割れの進展により、耐荷力が低下している事例もあり、補強することも念頭に置いて詳細調査を行うものとする。

(4) 補修の必要性の判断¹¹⁾

ASRが原因と考えられる変状を補修するかどうか、どのような補修を行うか判断する際には、構造物の種類や重要性、周辺環境、損傷の程度、これまでの記録、詳細調査で得られた各種試験の結果、補修の有効性等を総合的に勘案しなければならない。そこで、必要な場合には、専門家の意見を交えて検討し、これらの判断を行うものとする。

(5) 補強の必要性の判断¹¹⁾

1) 鉄筋が破断している場合

詳細調査で鉄筋の破断が生じている場合には、構造物の耐荷力に影響を及ぼすおそれもあるので、専門家を交えて補強の必要性について検討し、必要に応じて補強方法の検討に入らなければならない。

2) 内部の鉄筋が健全な場合

ASRにより著しいひび割れが発生しているなど外見上かなりの変状が見られる場合でも、ひび割れの深さが鉄筋のかぶり程度までにとどまっており、内部の鉄筋が健全であれば、耐荷力の低下はほとんどないと考えられる。

3) ひび割れなどの変状が耐荷力に影響を及ぼしている場合

著しい強度低下や静弾性係数の低下がある場合は、ASRもしくは凍害との複合劣化によるひび割れの進展により、内部の鉄筋が健全な場合でも耐荷力が低下している事例もあり、前項 2) により難いと判断される場合は専門家の意見も聞き、載荷試験等を実施し、耐荷力に関する検討を行うことが望ましい。積雪寒冷地にある北海道においては特に注意が必要である。

4.6.4 対策の選定：ASR¹⁾

ASRによる構造物の性能低下が必要と判断された場合には、要求性能を満足するような対策を選定しなければならない。性能照査に基づいた対策の選定が難しい場合には、表 4.6.10、表 4.6.11、表 4.6.12 に示す外観上のグレードを基準として対策を選定してもよい。標準的な工法については「5. コンクリート構造物の補修・補強」に解説を示している。

表 4.6.10 ASR：構造物の外観上のグレードと対策

構造物の外観上のグレード	点検強化	補修	補強	修景	使用性回復	機能性向上	供用制限	解体・撤去
I (潜伏期)	○	(○)						
II (進展期)	○	◎		◎	○	○		
III (加速期)	◎	◎	○	◎	○	○	○	
IV (劣化期)	◎	○	◎	○	◎	◎	◎	◎
備考	◎：標準的な対策，○：場合によっては考えられる対策 (○)：予防的に実施される対策							

表 4.6.11 ASR：補修・補強に期待する効果と工法

期待する効果	工法例
ASRの進行を抑制	表面処理（被覆，含浸），ひび割れ注入
ASRの膨張を拘束	プレストレスの導入，鋼板・PC・FRP 巻立て
劣化部を取り除く	断面修復
耐荷力を向上	鋼板・FRP 接着，プレストレスの導入，増厚，鋼板・PC・FRP 巻立て 外ケーブル

表 4.6.12 ASR：構造物の外観上のグレードと標準的な工法

構造物の外観上のグレード	標準的な工法
I (潜伏期)	表面処理* *：予防的に実施される工法
II (進展期)	表面処理
III (加速期)	表面処理，断面修復，プレストレスの導入
IV (劣化期)	断面修復，プレストレスの導入，鋼板・FRP 接着，鋼板・PC・FRP 巻立て 外ケーブル

4.7 疲労

4.7.1 劣化機構の推定：床版疲労¹⁾

R C床版の外観の損傷過程は、一般に以下のように分類され、また損傷の外観状態を図4.7.1に示す。

- ① R C床版は鋼桁に支持された構造のため、合成桁はずれ止めにより、非合成桁もスラブ止めにより、鋼桁に支持され、床版コンクリートの乾燥収縮などによって、床版には主として橋軸方向に引張力が生じる。この状態で輪荷重が載ると橋軸方向、直角方向の双方に曲げモーメントが生じるが、ひび割れは主に橋軸直角方向に先に生じる。(段階Ⅰ)
- ② 橋軸直角方向にひび割れが入ると、配筋方向の曲げ剛性が主筋方向に比べて小さくなり、床版は等方向性から異方向性に変化するため、板としての構造が梁としての挙動に近くなる。この変化によって主筋方向への曲げモーメント負担が増加し、配筋方向のひび割れが生じる。これにより、ひび割れは2方向に発生していくこととなる。(段階Ⅱ)
- ③ 2方向にひび割れた床版は、版全体としてのせん断剛性、ねじり剛性が低下し、ひび割れ幅を大きくしたり、ひび割れの数を増やすことになり、損傷はさらに進行し、亀甲状のひび割れが生じる。(段階Ⅱ～Ⅲ)
- ④ この損傷の進行によりひび割れの中には床版を貫通するものも生じて、床版表面からの水の浸透・流水が始まり、コンクリートのひび割れを通過する際に水中に溶け込んだ Ca^{++} が床版下面に漂い、空中の炭酸ガスと結合して白色の生成物である遊離石灰が発生する。
- ⑤ 貫通ひび割れを有する床版上を輪荷重が通過することにより、ひび割れの開閉、ひび割れのこすり合わせ挙動による磨耗が生じ、ひび割れ交点での角落ちなど、床版の損傷は急速に進むことになる。(段階Ⅲ)
- ⑥ この状態が進行すると、ひび割れが大きくなり、剥離や陥没が進行する。この段階では床版の表面には放射状あるいは亀甲状のひび割れが生じ、陥没が起こったところでは、鉄筋が残った状態でコンクリート片だけが落下する状態となる。(段階Ⅳ)

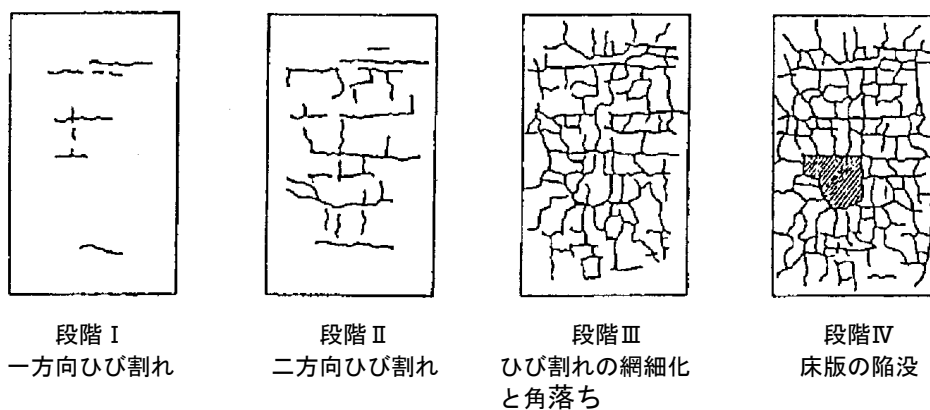


図 4.7.1 道路橋R C床版のひび割れ損傷過程

これらに対応した、RC床版の疲労による劣化進行過程と、その定義を図 4.7.2 および表 4.7.1 に示す。これにより、外観状況によって、RC床版の劣化状態と将来の進行過程を推定することが可能となる。

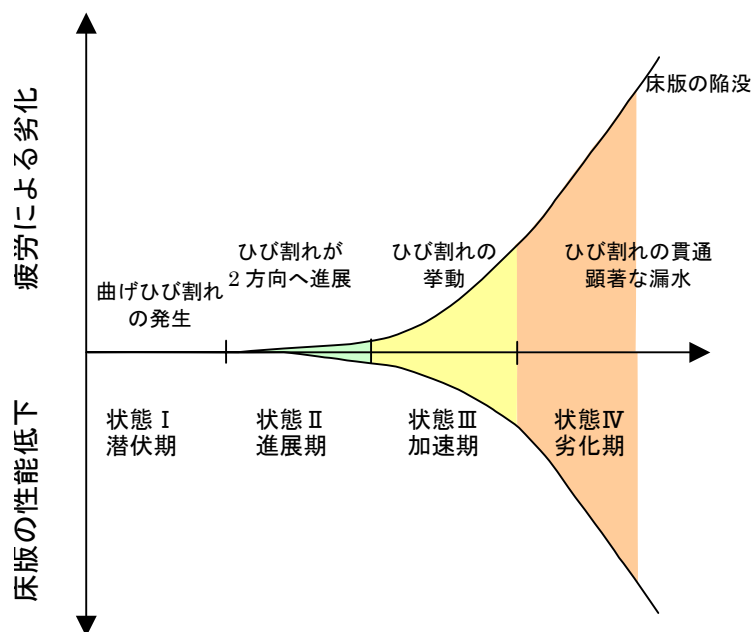


図 4.7.2 鉄筋コンクリート床版の疲労による劣化進行過程

表 4.7.1 鉄筋コンクリート床版の劣化過程の定義

劣化過程	定義	劣化進行に影響する要因
潜伏期 (状態Ⅰ)	乾燥収縮もしくは荷重による、主筋に沿った一方的ひび割れが数本程度できる段階。主桁の拘束条件によっては乾燥収縮や主桁温度変化による橋軸方向のひび割れが進行することもある。	適用した設計基準 床版厚、配筋鉄筋量 床版支間長 施工
進展期 (状態Ⅱ)	主筋に沿った曲げひび割れが進展するとともに、配筋筋に沿う方向のひび割れも進展し始め、格子状のひび割れ網が形成される段階。外観上ひび割れの密度進行は著しいが、鉄筋コンクリート床版の連続性は失われていない。	乾燥収縮 使用条件 交通量、車両重量 走行位置
加速期 (状態Ⅲ)	ひび割れの網細化が進み、ひび割れ幅の開閉やひび割れ面のこすり合わせが始まる段階。ひび割れのスリット化や角落ちが生じるとコンクリート断面の抵抗は期待できないので、鉄筋コンクリート床版の耐力は急激に低下し始める。	上記条件に加えて 環境条件 浸透水の影響 排水、溜水の影響
劣化期 (状態Ⅳ)	床版断面内にひび割れが貫通すると床版の連続性は失われ、貫通ひび割れで区切られたはり状部材として輪荷重に抵抗することになる段階。貫通ひび割れの間隔やコンクリート強度、配筋量などが部材として終局耐力に影響するだけでなく、雨水の浸透や鉄筋腐食などにも配慮する必要がある。	凍結防止剤の影響 凍結融解作用の影響 実施してきた対策 床版防水工の有無 補修・補強の有無

4.7.2 劣化予測：床版疲労

(1) 外観による劣化予測

R C床版を外観調査結果に基づいて劣化予測を行う場合は、図 4.7.1 により判定してよい。

尚、参考として既往の実験による外観劣化進行過程と輪荷重走行試験における繰り返し回数の関係を図 4.7.3 示す。外観によって劣化予測を行う場合には、図 4.7.3 などを参考に、外観劣化状態の区分との走行回数との関係は、一定間隔ではないことに留意する必要がある。すなわち、比較的早期に状態Ⅰ～Ⅱに至り、状態Ⅲ～Ⅳの期間が長期間を占める。ただし、状態Ⅲの期間が比較的長期間に渡るため調査時の状態Ⅲが、状態Ⅱまたは状態Ⅳのいずれに近い状態であるか、慎重に判断する必要がある。

ここに、図 4.7.3 の外観劣化状態と時間軸の関係は、床版上面などが劣化していない状態のものである。北海道においては、床版は、路面の排水状態によっては床版上面が凍害の影響を受けるため、地覆などの周辺部位などが凍害の影響を受けている場合は、床版上面の外観調査を行い、凍害によるコンクリート劣化が観察された場合は、図 4.7.3 に示す床版下面の外観劣化状態と時間軸の関係は、必ずしも成立しないことに留意する必要がある。

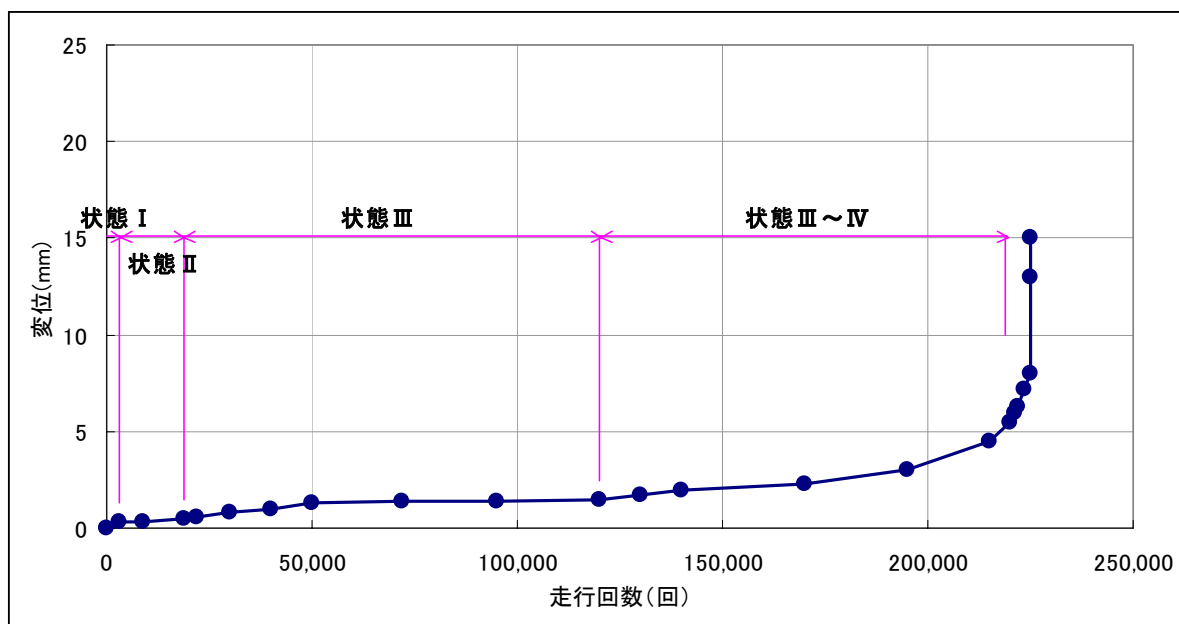


図 4.7.3 床版下面の外観劣化状態の区分と走行回数との関係の例

(2) 耐用年数の予測

既設RC床版の耐用年数算定の流れを図4.7.4に示す。この流れに従って既設RC床版の耐用年数を推定するためには、床版の照査時点までの車両繰返し回数および将来の車両の繰返し回数が必要となる。表4.7.2などを参考に、繰返し回数算定の基本となる交通特性の調査を行う必要がある。

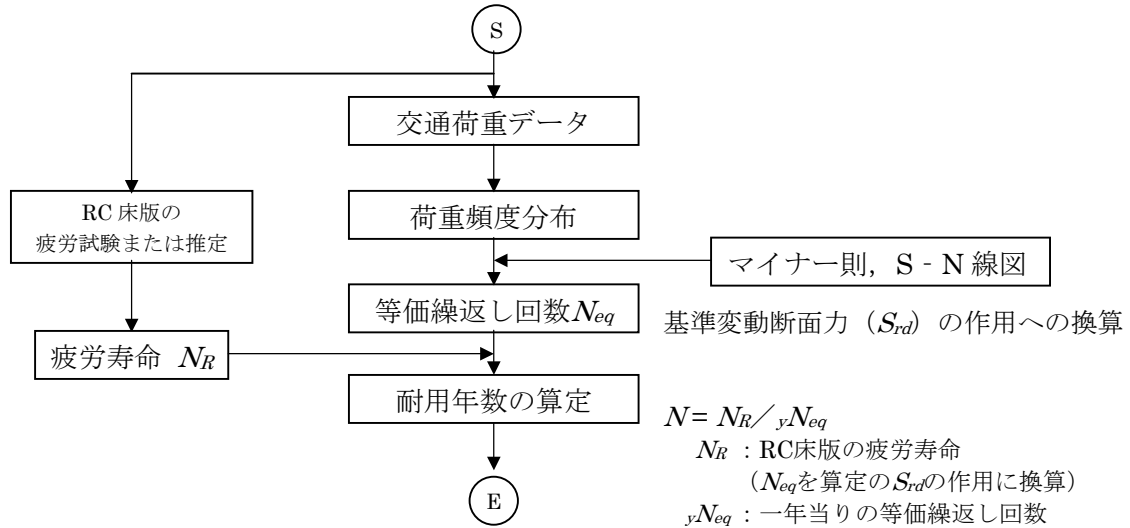


図 4.7.4 既設RC床版の耐用年数算定の流れ

表 4.7.2 交通特性モニタリング項目と方法の例

交通特性のモニタリング項目	方法
交通量調査 交通量, 大型車混入率 車線分担率, 車種調査など	交通量調査, 交通流監視装置による記録など
走行車両の荷重調査	軸重計測, たわみ計測結果からの逆解析など

(3) 床版の疲労寿命

既設RC床版の疲労寿命の算定手法は、確立していないのが現状である。したがって、対象とするRC床版を模擬して輪荷重走行試験等で実験的に算定することが原則であるが、既往の実験結果などを参考に、設定することも可能である。

ただし、北海道においては、荷重作用以外の疲労寿命の低下要因として、点検調査結果に基づき以下の影響を考慮する必要がある。

- ・凍害によるコンクリート抵抗断面の減少
- ・塩害による鋼材腐食
- ・水分の影響

4.7.3 評価および判定：床版疲労¹⁾

鉄筋コンクリート床版の劣化の点検時および予定供用期間終了時の評価は、表 4.7.1 を用いて外観上の状態（グレード）と関連付けた劣化グレード手法により、劣化グレードを示すことにより評価とする。

次に、判定は評価された劣化グレードに対応する性能低下が表 4.7.3 の通り想定されることを参考として、対策要否を判定する。

表 4.7.3 構造物の外観上のグレードと標準的な性能低下

構造物の外観上のグレード	安全性能	使用性能	第三者影響度 美観・景観
状態Ⅰ（潜伏期）	—	—	—
状態Ⅱ（進展期）	—	—	—
状態Ⅲ（加速期）	せん断剛性の低下 ・ひび割れのスリット化、 角落ち	—	美観の低下 ・ひび割れ ・遊離石灰 ・コンクリート表面の陥没
状態Ⅳ（劣化期）	耐荷力の低下 ・ひび割れの貫通 ・雨水の浸透 ・鋼材腐食	疲労進行による路面の損傷 ・路面の亀裂・陥没	第三者への影響 ・はく離 ・はく落

4.7.4 対策の選定：床版疲労¹⁾

床版の疲労による構造物の性能低下が必要と判断された場合には、要求性能を満足するような対策を選定しなければならない。性能照査に基づいた対策の選定が難しい場合には、表 4.7.4、表 4.7.5、表 4.7.6 に示す外観上のグレードを基準として対策を選定してもよい。標準的な工法については「5. コンクリート構造物の補修・補強」に解説を示している。

表 4.7.4 構造物の外観上のグレードと対策

構造物の外観上のグレード	点検強化	補修	補強	修景	使用性回復	機能性向上	供用制限	打替え・取替
Ⅰ（潜伏期）	○	(○)				(○)		
Ⅱ（進展期）	◎	◎	(○)			(○)		
Ⅲ（加速期）	◎	○	◎	○		(○)		
Ⅳ（劣化期）	○	○	◎	○	○	○	○	○
備考	◎：標準的な対策，○：場合によっては考えられる対策 (○)：予防的に実施される対策							

表 4.7.5 補修・補強に期待する効果と工法

期待する効果	工法例
第三者の影響度，美観・景観の改善	表面処理（被覆）
水の影響を除くことによる疲労耐久性の向上	床版防水の設置
ひび割れ開口の抑制による疲労耐久性の向上	FRP 接着，プレストレスの導入
引張縁への部材設置による断面剛性の回復	床版下面への鋼板等の接着，R C 断面の増厚，増設桁の設置
圧縮側断面のせん断剛性の向上による疲労耐久性の向上	床版上面増厚

表 4.7.6 構造物の外観上のグレードと標準的な工法

構造物の外観上のグレード	標準的な工法
I（潜伏期）	床版防水
II（進展期）	床版防水，鋼板・FRP 接着，上面増厚，下面増厚，増設桁
III（加速期で浸透水の影響有り）	床版防水，鋼板接着，上面増厚，増設桁
III（加速期で浸透水の影響なし）	床版防水，鋼板接着，上面増厚，下面増厚，増設桁
IV（劣化期）	供用制限，打換え

4.8 診断の際の留意点

4.8.1 劣化機構の推定における留意点

北海道のような寒冷地においては、凍害以外の塩害やアルカリ骨材反応等の劣化と凍害劣化とが複合的に作用する複合劣化についても留意する必要がある。特に近年は、凍結防止材の散布により、海岸部のみならず山間部においても塩化物イオンの供給があることから、凍害と塩害との複合劣化を受ける可能性が考えられる。

複合劣化の場合、その劣化を引き起こす原因とその劣化が進行する原因が異なる場合がある。例えばアルカリ骨材反応によって微細なひびわれが生じ、アルカリ骨材反応自体は主たる劣化に至る前に収束したとしても、そのひびわれに水が入り凍結融解の繰り返しにより劣化が進行する等である。このように複合劣化の可能性がある場合、その劣化因子の特定は慎重に行う必要がある。

4.8.2 劣化グレードの評価における留意点

複合劣化については、研究が始まってから間もないため、具体的な評価手法、対策手法が明らかとなっていない。塩害や中性化の劣化進行予測のように、比較的劣化予測手法が確立されている場合であっても、単独の劣化機構についての予測であり、凍害との複合劣化は考慮されていないことに留意し、劣化予測結果を取り扱う必要がある。

しかしながら、凍害との複合劣化の進行予測を定式化できない現状においては、採取した試料が何らかの凍結融解作用を受けているものとして、実測値から単独劣化の進行予測に準じた予測を行うのが現実的手法となる。例えば、測定した中性化深さや塩化物イオン濃度に凍害の影響が加味されていると考えれば、これから算出される中性化速度係数や塩化物イオンの見掛けの拡散係数にも凍害の影響が加味されていると考えることが出来る。

定量的な劣化予測手法が確立されている場合においても、その前提条件を理解する必要がある。例えば塩化物イオンの拡散予測では、拡散係数はコンクリート内で一様であり、表面塩化物イオン濃度の経年変化はないが、実際には凍害による表面劣化や水分量は拡散係数に影響を及ぼすと考えられ、また、含有塩分濃度から推定される表面塩化物イオン濃度に経年変化が生じている。劣化の評価精度を高めるためにも、できるだけ経年変化のデータの取得が望ましい。

4.8.3 対策要否の判定における留意点

鉄筋コンクリート構造物に発生するひびわれの補修の要否は、ひびわれ幅の判定基準によって判定されているのが一般的であるが、北海道においては、長期耐久性を確保するために、判定基準によれば補修を必要としないひびわれ幅であっても補修することがある。ひびわれを補修し、できる限り水分、塩分、二酸化炭素等がコンクリート内部に浸透する

ことを防ぐことは望ましいが、ひびわれが生じた場合に全てを補修する必要はなく、コンクリート構造物の環境条件、使用材料、配合条件等を総合的に判断して補修規模を決める必要がある。

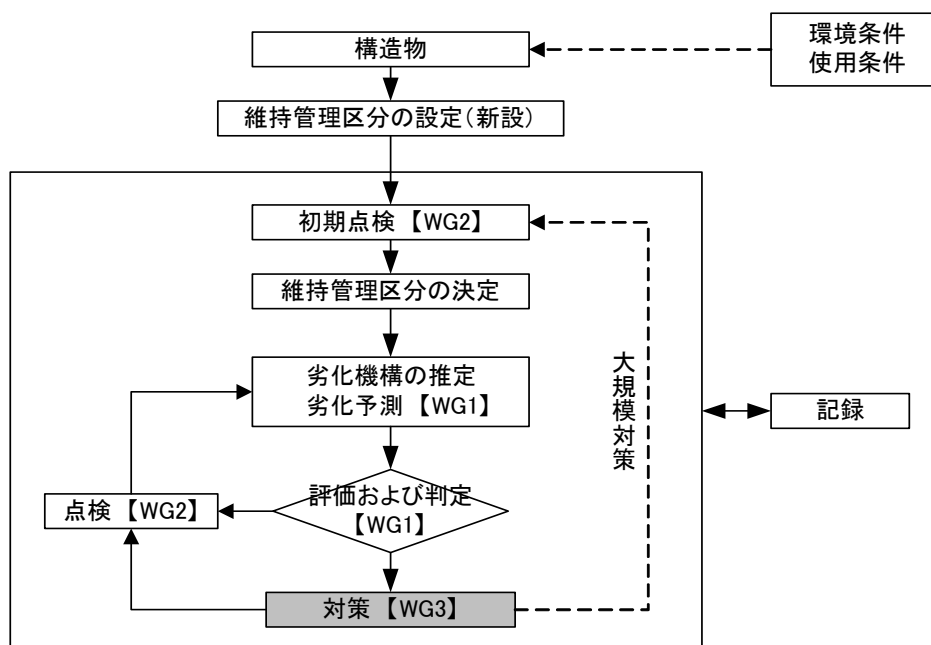
参考文献

- 1 土木学会：2001年制定コンクリート標準示方書 [維持管理編]，2001.1
- 2 土木学会：2002年制定コンクリート標準示方書 [施工編]，2002.3
- 3 十河茂幸他：現場で役立つコンクリート名人養成講座，2000.10，日経BP社
- 4 土木学会：コンクリート技術シリーズ57，コンクリート標準示方書[維持管理編]に準拠した維持管理マニュアル（その1）及び関連資料，2003.11
- 5 日本コンクリート工学協会：コンクリート診断技術'02 [応用編]，2002.1
- 6 土木研究所：ミニマムメンテナンスPC橋の開発に関する共同研究報告書(Ⅲ)－PC橋の塩害対策に関する検討－，2001.3
- 7 朝倉，田口：差分法による数値解析を用いたコンクリート部材の塩分浸透解析，平成16年度土木学会北海道支部論文報告集第61号，2005.2
- 8 土木学会：コンクリート技術シリーズ40，鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の動向（その2）－コンクリート委員会腐食防食小委員会（2期目）報告－，2000.12
- 9 土木研究所：コンクリート中の塩化物イオン濃度分布簡易分析シートおよび付録
http://www.pwri.go.jp/jpn/tech_inf/download.htm
- 10 土木学会：コンクリートライブラリー107，電気化学的防食工法設計施工指針(案)，解説表3.2.2，2001.1（筆者加筆）
- 11 国土交通省：道路橋のアルカリ骨材反応に対する維持管理要領(案)，2003.3
- 12 空建第92号：コンクリート中の塩化物総量規制及びアルカリ骨材反応暫定対策について，1986.7.14
港技第129号：コンクリート中の塩化物総量規制及びアルカリ骨材反応暫定対策について，1986.10.8
- 13 建設省総合技術開発プロジェクト，コンクリート耐久性向上技術の開発，コンクリートのアルカリ骨材反応抑制対策(案)，1989.5
- 14 建設省技調発第370号：アルカリ骨材反応抑制対策について，1989.7.17
- 15 国土交通省報道発表資料(国交省HP)：アルカリ骨材反応抑制対策について，2002.8.1
（別紙1）アルカリ骨材反応抑制対策（土木・建築共通），アルカリ骨材反応抑制対策（土木構造物）実施要領
- 16 国土交通省報道発表資料(国交省HP)：アルカリ骨材反応が生じた橋梁に対する対応について，2003.3.18
- 17 土木学会：コンクリートライブラリー109，コンクリートの耐久性に関する研究の現状とデータベース構築のためのフォーマットの提案，2002.12（筆者が一部加筆修正）

5. コンクリート構造物の補修・補強

5.1 維持管理と補修補強

維持管理においては設計耐用期間内の構造物の性能低下が問題となる可能性があるとして評価および判定された場合に、なんらかの対策が必要となる（図 5.1.1）。対策は、構造物の供用期間と耐用期間の関係を考慮して実施されることが重要である。ここで言う供用期間は、構造物の所有者が決めるもので、将来の構造物の要求性能の種類や水準の変更などの社会的要因や経済的な要因に基づいて決定される。耐用期間は、劣化の種類や程度に影響を受けるものである。耐用期間と供用期間の関係を図 5.1.2 に示す。



維持管理の手順

図 5.1.1 維持管理の手順

一般の場合は、図 5.1.2 に示すように、設計耐用期間が予定供用期間より長く設定される。しかし、設計耐用期間を予定供用期間よりも短くとり、補修・補強等の対策によって維持管理を図ることも可能である。これらの、選択に関しては、近年は LCC などを指標として選定する方向性にある。

構造物の性能低下が問題となる可能性があるとして診断された場合には、なんらかの対策を講じることになる。

構造物の性能低下の判断としては、以下の 3 つがある。

- ① 構造物が保有する性能のひとつまたは複数、許容する限界を超えていると判断された場合
- ② 現時点では問題がなくても、劣化予測により、残存供用期間中に構造物の性能低下が問題となると判断された場合
- ③ 当初の劣化予測と異なり、劣化速度が速く、性能低下が早期に問題となると判断された場合

これらの対策としては、点検強化、補修・補強、修景、使用性回復、供用制限、解体・撤去等があり、補修・補強は、対策のひとつの方法である。補修・補強等の対策を行なう場合には、構造物の性能の回復度合いは、一般に、図 5.1.3 のように 3 つに分類される。

- ① 建設時と現状の中間の性能を回復しようとする場合
- ② 建設時の性能を回復しようとする場合
- ③ 建設時以上の性能に向上させようとする場合

補修・補強の選定に当たっては、目標とする水準を明確することが重要であり、目標水準の設定を含めて LCC で評価する研究も近年実施されており、効率的な社会資本投資の観点からの検討も重要な事項であると考えられる。

なお、本 WG では、補強・補修の分類は次の通り定義した。

補強：部材、構造物の耐荷性や剛性等の力学的性能を回復、もしくは向上させることを目的とした維持管理対策

補修：性能の経時劣化に対する抵抗性を回復、もしくは向上させること、第三者影響度を改善することを目的とした維持管理対策

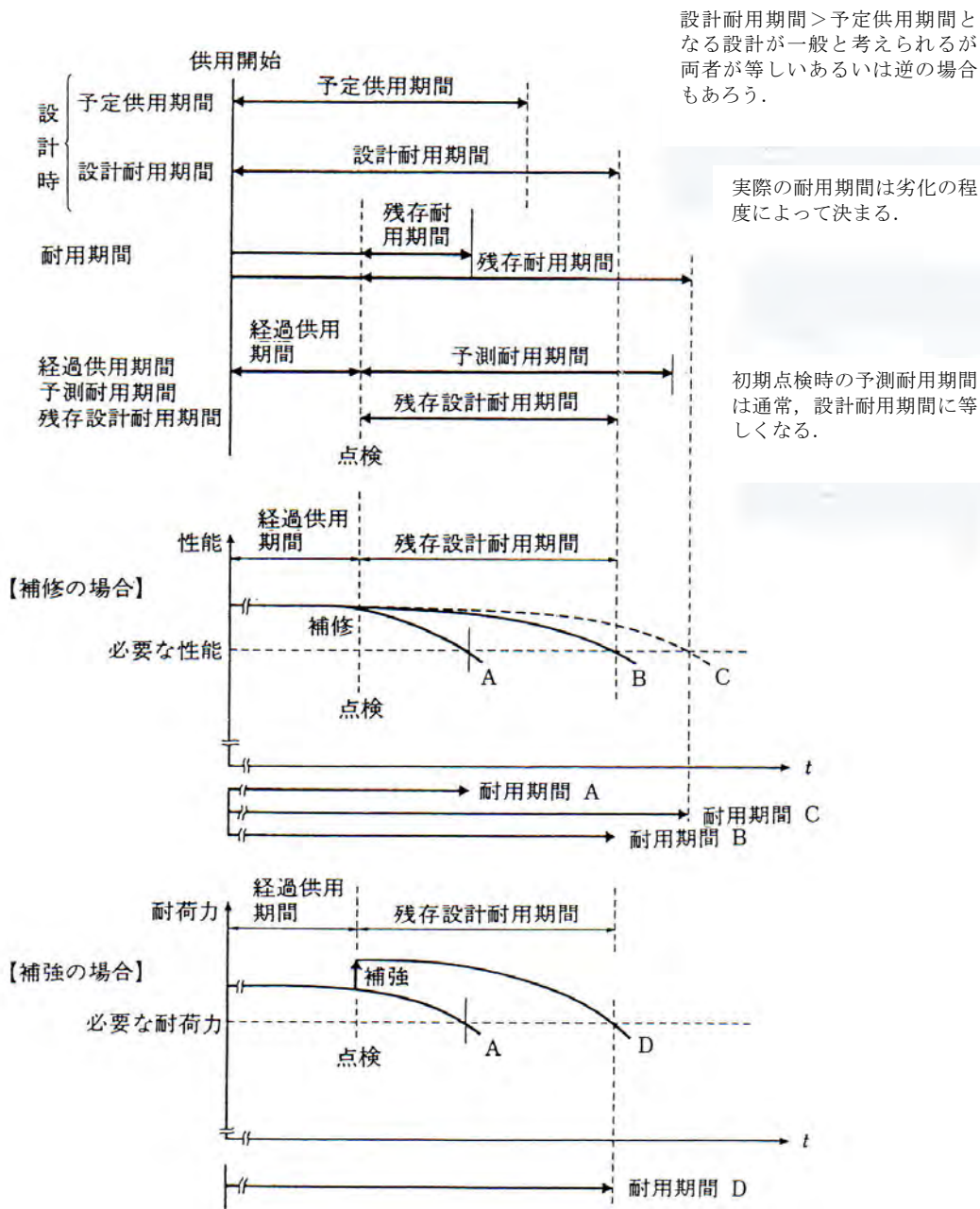
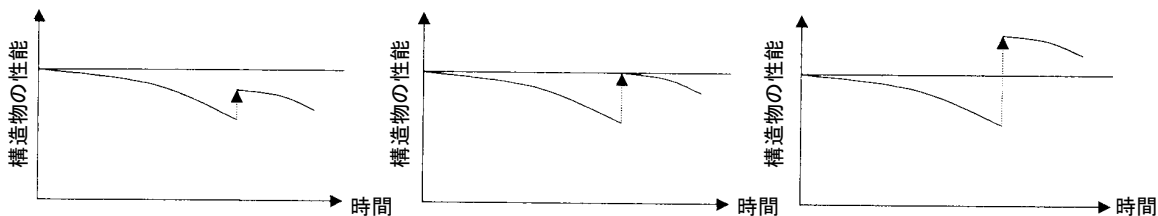


図 5.1.2 耐用期間と供用期間¹⁾



①建設時と現状の中間水準の性能の回復 ②建設時の性能の回復 ③性能時の性能より向上

図 5.1.3 対策の水準¹⁾

5.2 構造物の要求性能と補修補強

5.2.1 構造物の要求性能

構造物の要求性能は、土木学会^{2)・3)}、国土交通省⁴⁾、各事業者^{5)・6)}で検討が行なわれており、現時点では、概ね以下のように集約されると考えられる。

- 安 全 性**：安全性は、想定されるすべての作用のもとで、構造物が使用者や周辺の人々の生命を脅かさないための性能とする。安全性には、構造物の構造体としての安全性と機能上の安全性があり、これらの両者の要求性能を設定しなければならない。
- 使 用 性**：使用性は、想定される作用のもとで、構造物の使用者や周辺の人が快適に構造物を使用するための性能、および構造物に要求される諸機能に対する性能とする。
- 復 旧 性**：復旧性は、稀に作用する変動作用や地震の影響などの偶発作用等による損傷に対する修復や機能回復の難易度に対する性能とする。一般に、修復や機能回復に対する難易度等を考慮して設定するのがよい。

この他に、力学性能に起因しない要求性能として社会環境性、施工性、維持管理性、解体・再利用性などがある。これらの性能は、現時点では照査手法が明確でないが、性能照査時になんらかの形で配慮すべき事項である。

要求性能と、現状での性能項目と照査指標の関係を表 5.2.1 に示す。なお性能項目とは要求性能を細分化したものであり、照査指標とは、性能項目を定量評価が可能な物理量に置き換えたものである。

補修補強を行なう場合には、これらのうち、いかなる要求性能の維持や向上を目的としたものであるかを、明確にする必要がある。言い換えれば、補修補強の目的を明確にして、目的以外の効果を補修補強工法に求めないことが重要である。

なお、上記の要求性能においては、耐久性を要求性能として定義していない。本委員会では、耐久性を「時間の経過に伴い環境作用により生じる材料特性の変化に起因した構造物や部材の性能の変化」と定義した。すなわち、耐久性は、構造物の要求性能としてではなく、設計供用期間内のそれぞれの要求性能を照査するうえで考慮すべき因子として扱われることになる。

とくに維持管理を合理的に行なう場合、構造物の調査結果を基に、設計供用期間において作用による構造物中の材料特性の変化、損傷の累積などによる構造物の保有する性能の経時変化を推定し、構造物の将来の挙動を診断することが求められるため、耐久性を上記の様に定義することがより維持管理の実態を反映させられると考えられる。本WGにおける補修補強と構造物の要求性能の関係を表 5.2.1 に示す。補強は、主として構造物の力学的な要求性能を満足させることを目的とした行為である。それに対して補修は、構造物の力

学的な要求性能を満たすための前提条件となる材料の劣化抵抗性を確保することを主目的とした行為となる。

ただし、補修補強とともに、主目的の要求性能を満たすことにより、従属的に満たされる要求性能もある。

表 5.2.1 要求性能と照査指標一覧表

要求性能	性能項目	限界状態	照査指標	補修	補強
安全性	構造物または部材の破壊・崩壊	断面破壊	力・変位・変形		○
		疲労破壊	材料応力度・力		○
		構造物の崩壊	変位・変形		○
		剛体の安定	基礎構造の変位		○
	機能上の安全性	走行性	加速度・振動 変位・変形		○
		第3者影響度	かぶりのはく落	△*	
使用性	使用上の快適性	走行性・歩行性	加速度・振動 変位・変形		△
		外観 視覚的安全性	ひび割れ幅, 材料応力度	△*	△
		騒音・振動	騒音・振動レベル		△
	機能性	水密性	構造体の透水係数 ひび割れ幅	△*	△
		気密性	構造体の透気係数 ひび割れ幅	△*	△
		遮蔽性	物質・エネルギーの漏洩量	△*	△
		透過性	構造体の透水係数 ひび割れ幅	△*	△
復旧性	機能の回復	損傷	応答変位・ひずみ	△	○
材料劣化抵抗性				○	○

注) ○ : 主目的とした要求性能

△ : 主目的とした要求性能を満たす結果として、従属的に満たされる要求性能

* : 必要に応じて主目的とした要求性能となる場合もある。

5.2.2 要求性能と補修工法

補修工法は、一般に以下のように分類される。

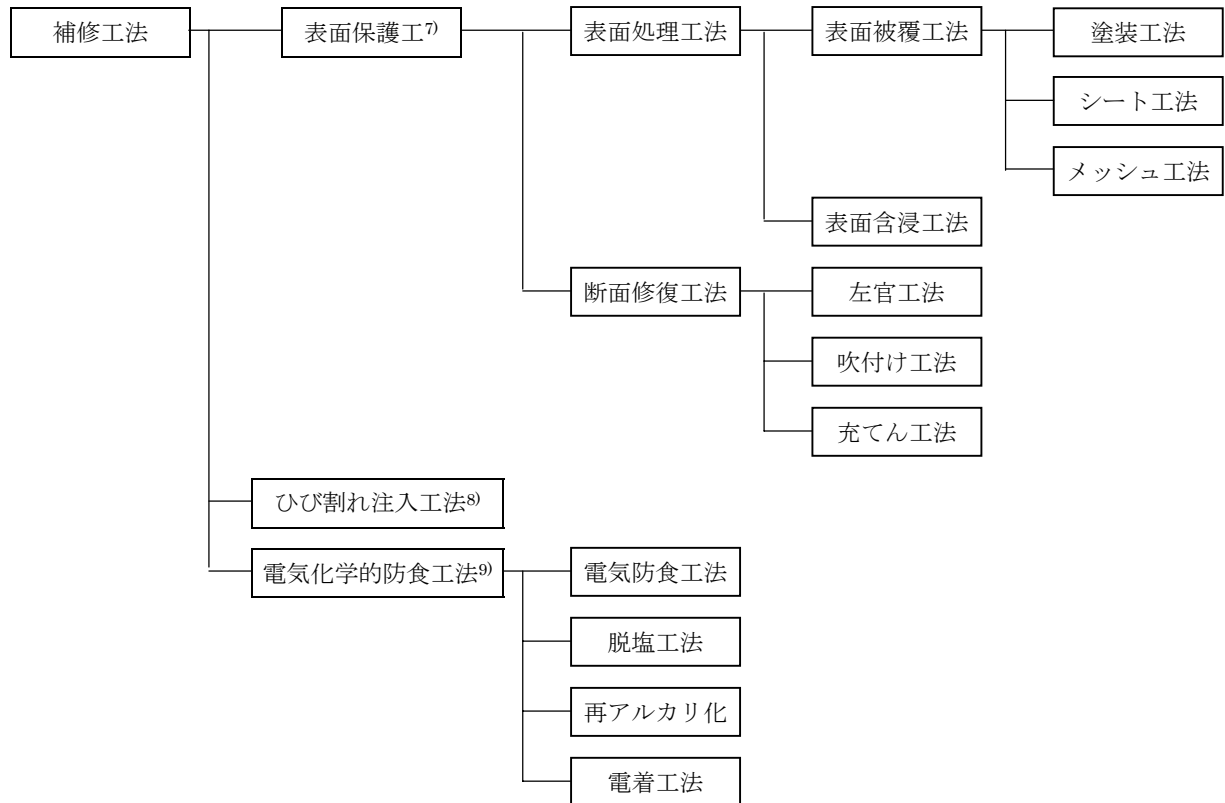


図 5.2.1 補修工法の分類

各工法の概要を以下に示す。なお、具体的事例は、**参考3**に示す。

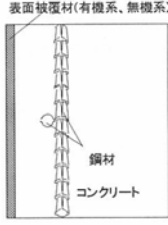
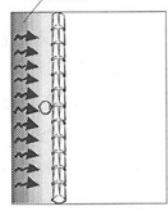
■ 表面処理

表面処理とは、コンクリート構造物の表面または断面の修復を終えたコンクリート構造物の表面に保護措置を施す工法であり、表面被覆工法と表面含浸工法に分けられる。

表面処理を表面被覆工法（有機系，無機系），表面含浸工法（シラン系，けい酸塩系）に分けて，その工法の概要を表 5.2.2 に示す。

なお，表面被覆工法のうち，特に被覆の構成要素の一つとしてシートを設置する工法をシート工法といい，塗装接着シート工法と貼り付け接着シート工法がある。ここでいうシート工法は，劣化因子の侵入抑制の効果もあるが，主としてコンクリートの剥落防止を目的として適用される工法をいう。耐力力の向上などを目的とした補強工法とは，目的が異なることに留意する必要がある。

表 5.2.2 表面処理工法の特徴

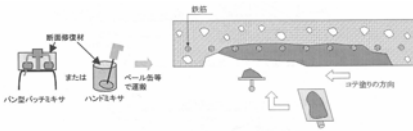

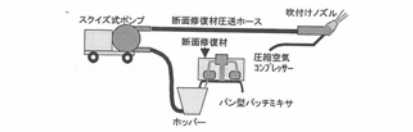
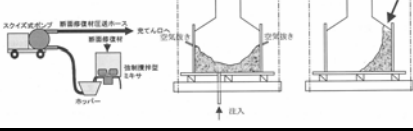
表面処理工	概念図	特 徴
表面被覆工法	 <p>表面被覆材(有機系、無機系)</p> <p>鋼材</p> <p>コンクリート</p>	劣化因子の侵入やコンクリートのはく落を抑制または防止する効果を有する被覆をコンクリート構造物の表面に形成させる工法。有機または無機の被覆材がもちいられる。
有機系		表面被覆工において被覆を形成させるために用いられる材料の内，有機系樹脂を主成分とするもの。有機系被覆材による被覆には，ひび割れ追随性，耐候性，美観付与などの性能または機能が要求されることが多い。
無機系		表面被覆工において被覆を形成させるために用いられる材料の内，無機系の材料を主成分とするもの。被覆の主材としてはポリマーセメント系材料とその他の無機系材料がある。
表面含浸工法	 <p>表面含浸材</p>	表面含浸工法において，コンクリート表面から内部に含浸させる材料。コンクリートに対する含浸性に加え，コンクリート表層部を改質して，その部分には水性やアルカリ性を付与したり，その他の特殊な機能を付与したりする性能が要求される。一般にはシラン系あるいはけい酸塩系の表面含浸材が用いられている。
シラン系		浸透系吸水防止材と称される材料であり，コンクリート表層部に吸水防止層を形成して，水分や因子の侵入を抑制する。
けい酸塩系		コンクリートへのアルカリ付与や表層部，脆弱部などの強化・緻密化を主目的としたけい酸リチウム系の材料，防水性の向上や劣化因子の侵入抑制を主目的としたけい酸ナトリウム系の材料がある。

■ 断面修復

断面修復とは，コンクリートの劣化，鋼材の腐食，その他の原因によって欠損したコンクリート断面または許容限度以上の劣化因子を含むコンクリート部分を除去した後の断面を，その当初の性能および形状寸法に戻すために用いられる工法である。

断面修復は施工法により左官工法，吹き付け工法（湿式，乾式），充てん工法に分かれ，その工法の概要を表 5.2.3 に示す。

表 5.2.3 断面修復工の概要

特徴 施工法	模式図	工法概要
左官工法		<p>型枠を設置せず、金ゴテや木ゴテ等を用いて人力によって、断面修復材を塗りつける施工方法であり、断面修復部が小さい場合や、点在している場合に適用する。</p>
吹付け工法 (湿式，乾式)	<p>乾式吹付け工法</p>  <p>湿式吹付け工法</p> 	<p>型枠を設置せず、圧縮空気や遠心力などを用いて断面修復材を吹き付ける施工方法であり、断面修復部が比較的大きい床版や梁下面等の上向き施工および梁や柱側面等の横向き施工に適用する。</p> <p>乾式：断面修復材を圧縮空気により圧送して、吹付けノズル部に所定の水量，および急結剤や硬化促進剤を添加して吹き付ける施工法。</p> <p>湿式：所定の水量，流動性に練り混ぜられた断面修復材を，ポンプにより圧送し，圧縮空気や遠心力を用いて吹き付ける工法。吹付けノズル部に急結剤や硬化促進剤を混入する場合もある。</p>
充てん工法		<p>型枠を設置して流動性を有する断面修復材を打ち込む施工方法であり、断面修復部が比較的大きい場合に適用する。</p> <p>モルタル注入工法（左図中央），打ち継ぎコンクリート工法（左図右）等の工法がある。</p>

■ 電気化学的防食工法

電気化学的防食工法は、構造物表面に設置した陽極からコンクリート中の鋼材へ直流電流を流し、電気化学的反応を利用して、鋼材腐食による劣化を抑制する防食工法である。現在実用化されている電気化学的防食工法の概要を表 5.2.4 に示すが、通電期間や通電量、効果の確認方法などにそれぞれ特徴を有している。

表 5.2.4 電気化学的防食工法の概要

	電気防食工法	脱塩工法	再アルカリ化工法	電着工法
工法概要	電気防食工法は、継続的な通電を行うことによって、コンクリート中の鋼材の腐食反応を電気化学的に抑制し、鋼材腐食による劣化の進行を抑制する工法である。	脱塩工法は、仮設陽極を設置して通電を行うことによって、コンクリート中に存在する塩化物イオンを電気化学的に除去もしくは低減し、塩害による鋼材腐食の劣化進行を抑制する工法である。	再アルカリ化工法は、中性化したコンクリートに仮設陽極を設置し通電を行うことによって、電気化学的にアルカリ性を再付与し、中性化による鋼材腐食の劣化進行を抑制する工法である。	電着工法は、仮設陽極を設置し通電を行うことによって、コンクリートに発生したひび割れやコンクリート表面に無機系物質の電着物を電気化学的に析出させ、ひび割れの閉塞やコンクリートの緻密化を図る工法である。
システムの概要	<p>(外部電源方式の場合の例)</p>			
防食対策の目的	腐食反応の抑制	鋼材の腐食環境の改善	鋼材の腐食環境の改善	腐食因子の供給低減
期待される主な効果	腐食電池の抑制	塩化物イオン濃度の低減	アルカリ性の回復	ひび割れの閉塞とち密化
通電期間	防食期間中継続	約 8 週間	約 1~2 週間	約 6 ヶ月
電流密度	0.001~0.03A/m ²	1A/m ²	1A/m ²	0.5~1A/m ²
通電電圧	1~5V	5~50V	5~50V	10~30V
電解液	---	Ca(OH) ₂ 水溶液等	Na ₂ CO ₃ 水溶液等	海水
効果の確認方法	電位または電位変化量の測定	コンクリートの塩化物イオン量の測定	コンクリートの中性化深さの測定	コンクリートの透水係数の測定
効果確認の頻度	初年度 1~2 回/年以降、1 回/ (1~5 年)	通電終了後	通電終了後	通電終了後

表 5.2.5 に、補修工法の構造物の要求性能との関係を示す。

補修工法は、コンクリートや鉄筋等の環境作用による材料劣化抵抗性を確保することが、主目的であり、構造物が要求性能を耐用期間中に満足することの前提条件を確保することが目的と位置付けられる。

ただし、補修工法は、かぶりの剥落に伴う第三者に対する公衆災害（安全性）や、ひび割れの増大に伴う外観（使用性）等、構造物の諸機能に対する要求性能も満たすこと出来る。言い換えれば、補修工法は、直接、力学的性能の維持や向上を目的としていないことを留意しなければならない。

補修工法は、多くの場合、材料の劣化因子の侵入の抑制、防止、および除去などの硬化を期待するものであり、図 5.2.2 に示すように、種々の劣化因子を対象に求める効果によって種々の工法がある。

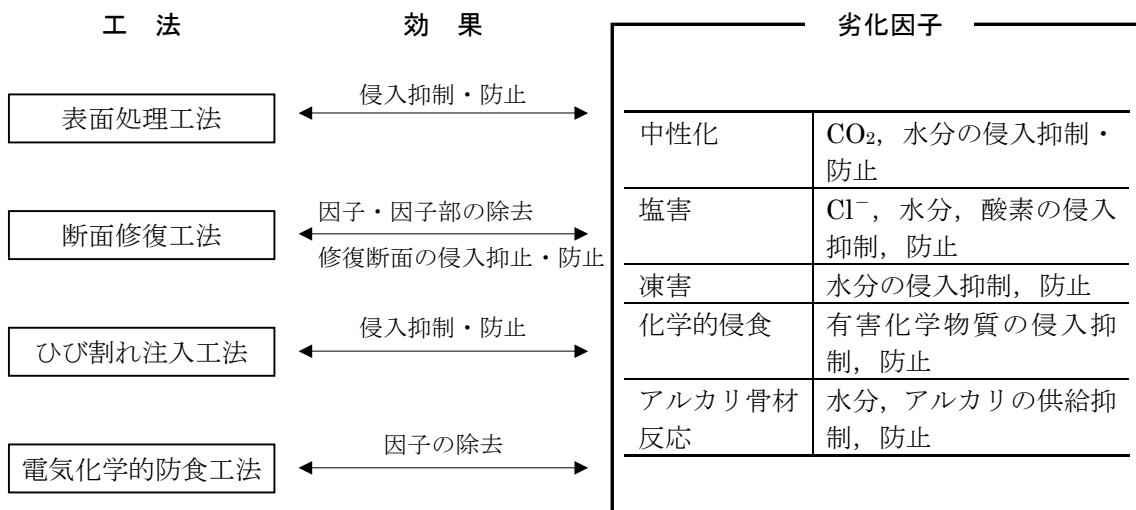


図 5.2.2 補修工法の効果

したがって、補修対象部材の劣化因子や劣化状態に応じて適切な補修工法を選定する必要がある。劣化因子に対する補修工法の適用範囲を表 5.2.6～表 5.2.8 に示す。また、各工法の中にも使用材料などが異なるため、期待される効果と適用範囲に留意する必要がある。種々の工法における期待される性能と適用効果を

表 5.2.9～表 5.2.12 に示す。

表 5.2.5 構造物の要求性能に対する補修工法の適用範囲

補修工法		表面処理工					電気化学的防食工法						
		表面被覆工法		表面含 侵工法	メッシュ 工法	シート 工法	断面修復 工法	ひび割れ 注入工法	電気化学的防食工法				
		有機系	無機系						電気防食	脱塩	再アルカリ	電着	
要求性能に関連する項目		新設・ 既設	新設・ 既設	新設・ 既設	新設・ 既設	新設・ 既設	既設	既設	新設・ 既設	既設	既設	既設	
適用構造物		新設・ 既設	新設・ 既設	新設・ 既設	新設・ 既設	新設・ 既設	既設	既設	新設・ 既設	既設	既設	既設	
劣化に対する 抵抗性	中性化	○	○	○	*1	○	○	*2	○		○	*2	
	塩害	○	○	○	*1	○	○	*2	○	○		*2	
	凍害	○	○	△	*1	*1	○	*2				*2	
	化学的侵食	○	△	—	*1	○	○						
	アルカリ骨材反応	△	△	△	*1	*1	○	*2				*2	
	乾湿繰返し	○	○	○	*1	*1	○	*2				*2	
	摩耗(キャビテーション抑制など)	○	○	△	*1	*1	○						
	疲労によるひび割れ	—	—	—	△	△	—						
	構造物中の劣化部分の除去	—	—	—	—	—	○						
構造物の 要求性能	第三者影響度	はく落抵抗性	—	—	△	○	○	—					
		美観・景観	落書き防止	○	△	△	*1	—	—				
	排ガス付着防止		○	△	△	*1	—	—					
	防藻・防かび		○	△	△	*1	—	—					
	意匠性向上		○	○	—	*1	—	—					
	外観維持		—	—	○	—	—	—					
	機能性	水密性（防水対策）	○	○	○	*1	○	○	○				
		耐火性向上（爆裂防止）	△	○	—	*1	—	○					
		収縮によるひび割れ抑制	○	○	—	*1	—	○	○				
		保温性向上	△	○	—	*1	—	—					
		海洋生物付着防止	△	—	—	*1	—	—					
		融雪溝の雪溜り向上	△	—	—	*1	—	—					
		車両走行安全性向上，視認性向上	△	—	—	*1	—	—					
	ぜい弱部の強度回復（固化）	—	—	○	—	—	—						

○は適用の対象，△は適用する場合に検討が必要（他の工種，工法との併用など），—は適用の対象外を示す。

*1：本表では，メッシュ工法，あるいはシート工法によって付加される効果のみを示す。メッシュ工法，シート工法は，表面被覆工法（有機系，無機系）と併用して使用するために，その適用範囲は，使用する表面被覆工の適用範囲に準ずる。

*2：発生したひび割れ部分の鋼材腐食の抑制・防止効果として記載。

表 5.2.6 中性化における補修工法の適用範囲

適用対象		工法	表面処理			断面修復	断面修復と表面処理の併用	ひび割れ注入	電気化学的防食		
			表面被覆		表面含浸				電気防食	再アルカリ化	電着
			有機系	無機系							
環境	陸上部・内陸部		○	○	△	○	○	*	○	○	△
	海洋環境(海上大気中部)		○	○	△	○	○	*	○	△	△
既設 構造物	劣化度	潜伏期	○	○	△	—	—	*	○	○	○
		進展期	○	○	△	○	○	*	○	○	○
		加速期	—	—	—	○	○	*	○	○	○
		劣化期	—	—	—	○	○	*	△	△	△
新設構造物			○	○	△	—	—	*	○	—	○

注) ○：適用の対象 △：適用する場合には検討が必要 —：適用の対象外
*：ひび割れへの劣化因子の侵入防止の目的で各工法と併用する。

表 5.2.7 塩害対策における補修工法の適用範囲

適用対象		工法	表面処理			断面修復	断面修復と表面処理の併用	ひび割れ注入	電気化学的防食		
			表面被覆		表面含浸				電気防食	脱塩	電着
			有機系	無機系							
環境	海洋環境	陸上部・内陸部	○	○	○	○	○	*	○	○	△
		海上大気中部	○	○	○	○	○	*	○	○	△
		飛沫帯部	△	△	△	△	△* ¹	*	○	○	△
		干満帯部	△	△	△	△	△* ¹	*	△	△	△
		海中部	△	—	—	△	—	*	△	—	○
既設 構造物	劣化度	潜伏期	○	○	○	—	—	*	○	○	○
		進展期	○	○	○	○	○	*	○	○	○
		加速期	—	—	—	○	○	*	○	○	○
		劣化期	—	—	—	○	○	*	△	△	△
新設構造物			○	○	○	—	—	*	○	—	○

注) ○：適用の対象 △：適用する場合には検討が必要 —：適用の対象外
*：ひび割れへの劣化因子の侵入防止の目的で各工法と併用する。
*1：下地乾燥が困難なため、有機系表面被覆材を使用する場合は材料選定などの検討が必要

表 5.2.8 凍害対策における補修工法の適用範囲

適用対象		工法	表面処理			断面修復	断面修復と表面処理の併用	ひび割れ注入
			表面被覆		表面含浸			
			有機系	無機系				
環境	寒冷地	陸上部・内陸部	○	○	○	○	○	*
		海上大気中部	○	○	○	○	○	*
既設 構造物	劣化度	潜伏期	○	○	○	—	—	*
		進展期	○	○	△	○	○	*
		加速期	△	△	—	○	○	*
		劣化期	—	—	—	○	○	*
新設構造物			○	○	△	—	—	*

注) ○：適用の対象 △：適用する場合には検討が必要 —：適用の対象外
*：ひび割れへの劣化因子の侵入防止の目的で各工法と併用する。

表 5.2.9 有機系被覆工法に期待される性能と適用効果

	塗装工法				シート工法 ²					
	中塗り材の種類				塗布接着形シート工法 (クロスシート, メッシュシート, 等)					張付け接着 形シート工法
	標準形	厚膜形	柔軟形	柔軟 厚膜形						
樹脂およびシートの種類 ¹	エポキシ	エポキシ, アクリル, ビニルエステル, ホリエステル, アクリロイル	エポキシ, ホリウレタン, ふっ素	エポキシ, ホリウレタン, アクリルコーム, クロプロレンコーム, ホリフタジエン, ホリウレア	ガラス繊維シート 1層/2層/エポキシ	ビニロン繊維シート/エポキシ, アクリル, クロプロレンコーム	アラミド繊維シート/エポキシ	カーボン繊維シート/エポキシ, アクリル	ガラスマット 1層/2層/エポキシ/ビニルエステル/ホリエステル	ラミネートシート/エポキシ
膜厚(μm)	100未満	100以上	100未満	100以上	500/1000	500	700	積層数により変化	1000 - 2000	1000
中性化抑制	○	○	○	○	*	*	*	*	*	*
塩化物イオンの侵入抑制	○	○	○	○	*	*	*	*	*	*
凍結融解抵抗性	△	△	△	○	*	*	*	*	*	*
化学的侵食抑制	△	○	△	○	○	—	*	○	○	*
アルカリ骨材反応抑制	△	△	△	△	*	*	*	*	*	*
ひび割れ追従性	△	△	○	○	*	*	*	*	*	*
美観・景観に関する性能	○	○	○	○	*	*	*	*	*	*
はく落抵抗性	—	—	—	—	○	○	○	○	*	○

注) 期待される効果は主要なもののみ示した。表中の○は適用対象, △は適用する場合に検討が必要(他の工法との併用など), —は適用対象外を示す。

1 樹脂系に記載のものは全てではなく, 市販の代表的な有機系被覆材を載せた。

2 はく落防止を主目的とする。それ以外の用途として下水道構造物の劣化防止に使用されることもある。*印は, 同様の樹脂系のものを用い, かつ膜厚が同じ場合は, 塗装工法と同様の適用効果を期待できることを示す。膜厚は目安を示した。

表 5.2.10 無機系被覆工法に期待される性能と適用効果

期待される性能	単層による塗装工法		複層による塗装工法		メッシュ工法 ⁴
	柔軟形	標準形	柔軟形	標準形	
中性化抑制	○	○	○	○	*
塩化物イオンの侵入抑制	○	○	○	○	*
凍結融解抵抗性	○	○	○	○	*
化学的侵食抑制	△	—	△	△	*
アルカリ骨材反応抑制 ²	△	—	△	△	*
ひび割れ追従性	○	△	○	△	*
美観・景観に関する性能	△	△	○	○	*
はく落抵抗性 ³	—	—	—	—	○

1 表中の○は適用対象, △は適用する場合に検討が必要(他の工法との併用など), —は適用対象外を示す。

2 アルカリ骨材反応抑制は, 標準的な遮水性により判定した。

3 はく落抵抗性は付着性を基本に判定した。

4 メッシュ工法の「*」については, 単層および複層による塗布工法と併用して使用するために, その適用範囲は, 使用する無機系被覆の各工法の適用範囲に準ずることを示す。

表 5.2.11 表面含侵工法に期待される性能と適用効果

期待される性能	シラン系	けい酸塩系	
		けい酸リチウム系	けい酸ナトリウム系
中性化抑制	△	△	○
塩化物イオンの侵入抑制	○	—	○
凍結融解抵抗性	○	—	○
化学的侵食抑制	—	—	—
アルカリ骨材反応抑制 ²⁾	○	○	△
美観・景観に関する性能 ³⁾	○	○	○
はく落抵抗性 ⁴⁾	—	△	△

- 1) 表中の○は適用対象，△は適用する場合に検討が必要（他の工法との併用など），—は適用対象外を示す。
- 2) アルカリ骨材反応抑制は，標準的な遮水性により判定した。
- 3) 美観・景観に関する性能は外観維持を基本に判定した。
- 4) はく落抵抗性は付着性を基本に判定した。

表 5.2.12 断面修復工法に期待される性能と適用効果

期待される性能	断面修復材の種類		
	セメント モルタル	ポリマーセメント モルタル	ポリマー モルタル
力学的性能	○	○	○
ひび割れ抵抗性	△	○	△
中性化抑制	○	○	○
塩化物イオンの侵入抑制	△	△	○
凍結融解抵抗性	○	○	○
化学的侵食抑制	△	△	○
アルカリ骨材反応抑制 ¹⁾	△	△	○
美観・景観に関する性能	△	△	○
はく落抵抗性 ²⁾	○	○	○

注) 表中の○は適用効果あり，△は適用効果を期待する場合検討が必要（他の工法との併用など），を
示す。

- 1) アルカリ骨材反応抑制は，標準的な遮水性に判定。
- 2) 付着性状による判定。

5.2.3 要求性能と補強工法

補強工法は、一般に以下のように分類される。なお、具体的事例は、**参考資料3**に示す。

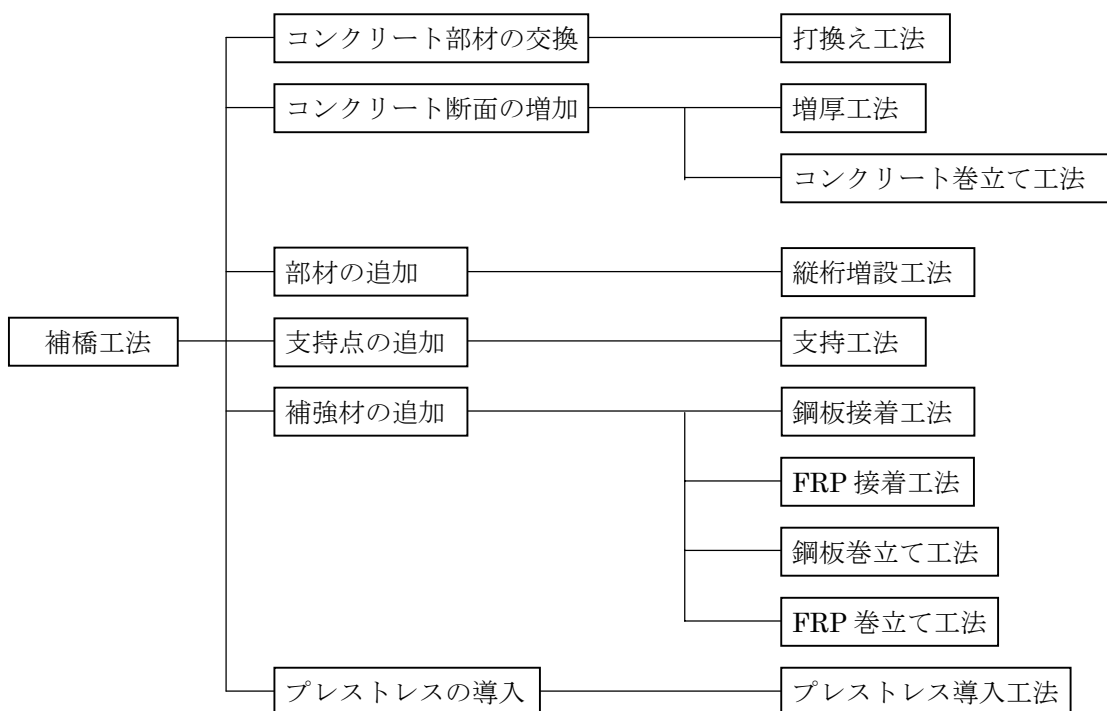


図 5.2.3 補強工法の例

補強工法と要求性能の関係を表 5.2.1 に示す。各補修補強工法で、複数の要求性能に対する改善や回復が図られると考えられる工法は、複数の要求性に寄与するものとして整理した。ただし、複数の要求性能に寄与する程度は、異なると考えられるが、現時点では、寄与度を定量的に評価できないことから、複数の要求性能の寄与度は、今後の課題と考える。

表 5.2.13 に主な工法と適用部材の例を示す。なお、補強工法は、補強対象部材によって、要求される力学性能が異なることに留意する必要がある。表 5.2.14 に示すように、補強工法は、補強対象部材に要求される力学性能を満たすことが保証されていなければならない。

表 5.2.13 主な工法と適用部材

補強・使用性回復の目的	対策の概要	主な工法の例 ^{※1}	適用部材					
			全般	はり	柱	スラブ ⁺	壁 ^{※2}	支承
コンクリート部材	接着	接着工法		◎	○	◎	○	
	巻立て	巻立て工法			◎		○	
	プレストレスの導入	外ケーブル工法		◎	○	○		
	断面の増厚	増厚工法		○		◎		
	部材の交換	打換え工法		○	○	◎	◎	
構造体	はり(桁)の増設	増設工法		◎		◎		
	壁の増設	増設工法					◎	
	支持点の増設	増設工法		◎		◎		
	免震化	免震工法	◎					◎

※1 : 接着工法 : 鋼板接着工法, FRP接着工法(連続繊維シート接着工法, 連続繊維板接着工法)
 巻立て工法 : 鋼板巻立て工法, FRP巻立て工法(連続繊維シート巻立て工法, 連続繊維板巻立て工),
 RC巻立て工法, モルタル吹付け工法, プレキャストパネル巻立て工法
 プレストレス導入 : 外ケーブル工法, 内ケーブル工法
 増厚工法 : 上面増厚工法, 下面増厚工法, 下面吹付け工法
 増設工法 : はり(桁)増設工法, 耐震壁増設工法, 支持点増設工法

※2 : 壁式橋脚を含む
 ◎ : 実績が比較的多いもの
 ○ : 適用が可能と考えられるもの

表 5.2.14 補強対象部材と要求される力学的要求性能

対象部材	安全性		復旧性	使用性
	最大荷重	疲労荷重	地震作用	変動作用
桁・床版	○	○	—	○
橋脚	○	△	○	—

注) ○ : 主たる要求性能 △ : 必要により要求される性能または満たされる性能

なお、補強工法でも、補修工法に対する劣化因子の関係と同様に、補強工法に期待する力学的作用によって選定される補強工法は異なることになるため、補強工法の力学的効果を明確にして選定する必要がある。

RC床版を例に、期待する効果と補強工法の関係を表 5.2.15 に示す。

表 5.2.15 補修・補強に期待する効果と工法

期待する効果	工法例
第三者の影響度、美観・景観の改善	表面処理(被覆)
水の影響を除くことによる疲労耐久性の向上	床版防水の設置
ひび割れ開口の抑制による疲労耐久性の向上	FRP接着, プレストレスの導入
引張縁への部材設置による断面剛性の回復	床版下面への鋼板等の接着, RC断面の増厚, 増設桁の設置
圧縮側断面のせん断剛性の向上による疲労耐久性の向上	床版上面増厚

5.3 補修補強と性能照査

構造物の設計は、構造物に要求される性能（以下、要求性能）を明確にし、この要求性能を満足度を照査する性能照査型の体系への移行が進められており、土木学会等においても基準化され実務設計に適用され始めている。

この体系は、新設構造物のみならず既設構造物に適用できる概念であり、維持管理における補修・補強等の対策の目的を明確にできるという観点からも、合理的であると考えられる。

維持管理における性能照査の基本的な手順を図 5.3.1 に示す。点検結果を基に、点検時と予定供用期間終了時において、要求性能との比較により照査することになる。

このように、補修補強工法の要求性能に対する照査では、構造物の実際に挙動を、より正確に反映させることが、合理的な維持管理の必須条件となる。

これを実現させるためには、構造物の実際の挙動を反映させた照査方法を適用することが望ましい。現在の照査方法としては、道路構造物では、許容応力度法を適用しているのが実態であるが、維持管理においては、限界状態設計法などの実構造物の挙動をより正確に反映した照査方法の導入が必要であり、コンクリート構造物に対しては、土木学会コンクリート標準示方書等を適用することも考えられる。

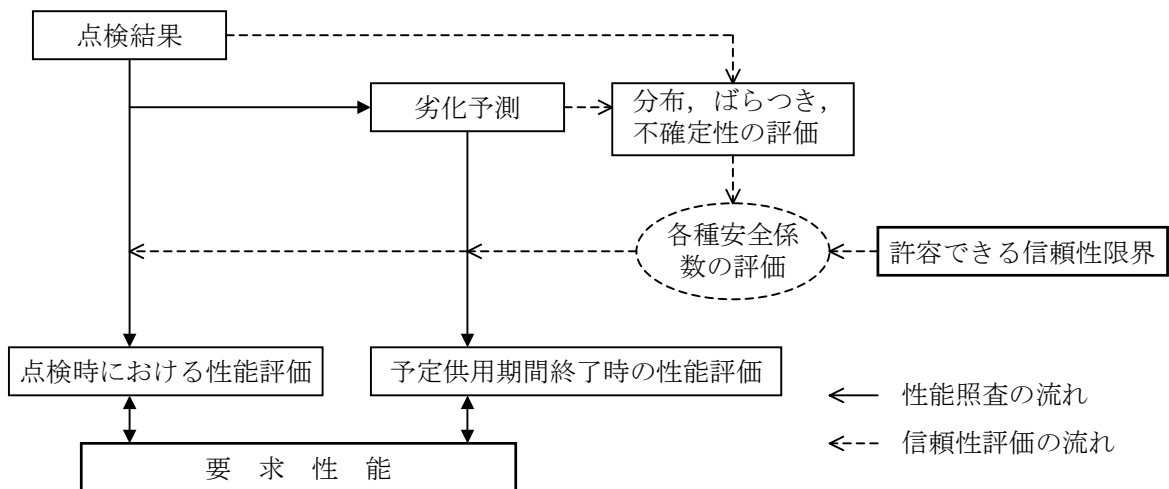


図 5.3.1 維持管理における性能照査のイメージ

5.4 補修工法の耐久性評価法

5.4.1 耐久性評価方法の現状

補修補強工法の性能の経時変化は、図 5.4.1 に示すように、使用する材料と補修補強後の性能が、経時変化により環境作用や荷重作用で変化することを考慮することである。

昨今の維持管理は、コストを極力縮減し効率的に行うことが重要であり、そのためにライフサイクルコスト等の指標の導入が進められている。このライフサイクルコストを指標として補修補強工法の選択などを実施するためには、補修補強工法の経時変化の影響を考慮することが必須である。

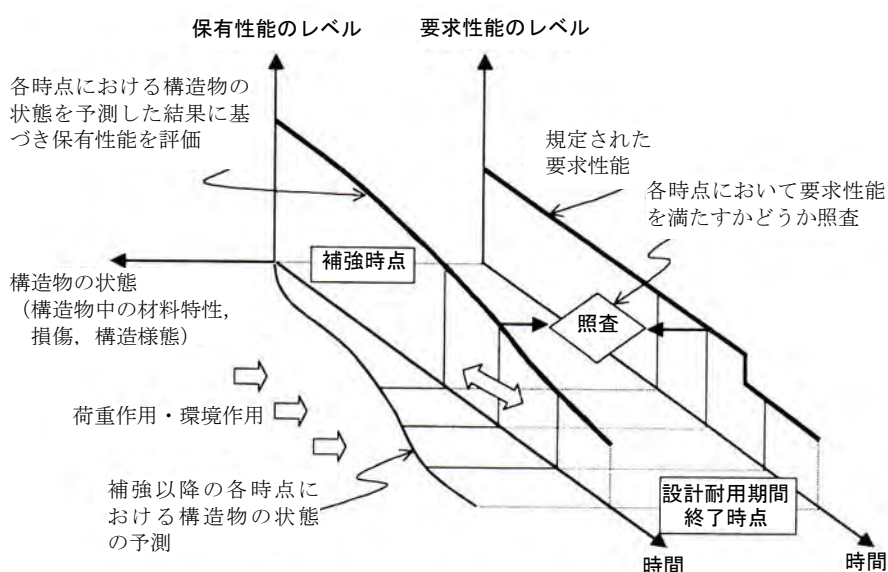


図 5.4.1 補修・補強と性能の経時変化

現状の新設構造物の耐久性の確保は、材料の耐久性（材料の経時変化の影響に対する抵抗性、以下、材料劣化抵抗性）を無視できるように制約条件を設けることで、構造性能のみを照査していることで担保している。

既設構造物の場合は、構造物が一定の材料劣化を受けた状態を考慮して補修・補強等の修復を行なうことになるため、必ずしも新設構造物と同様の考え方をを用いることが適切ではないと考えられる。

一般に、補修補強工法の供用期間を推定する方法は、以下の二つに分類される（図 5.4.2 参照）。

- ① 補修補強材料に対して建設初期のコンクリート構造物と同程度以上の材料耐久性を確保する方法
- ② 補修補強材料の材料劣化の影響を、各要求性能の照査に考慮する方法

本来は、②で示す材料劣化の影響を考慮して各要求性能に対する照査を行うのが望まし

いが、現時点では、技術的に困難な部分もあるため、多くの場合は、新設構造物と同様に①に示す方法で構造物本体の供用期間中の要求性能を確保している。すなわち、材料としての耐久性を、対象コンクリート構造物のコンクリートの材料劣化抵抗性以上となることを保証して、補修補強後の部材の材料劣化抵抗性を一定期間無視していることになる。

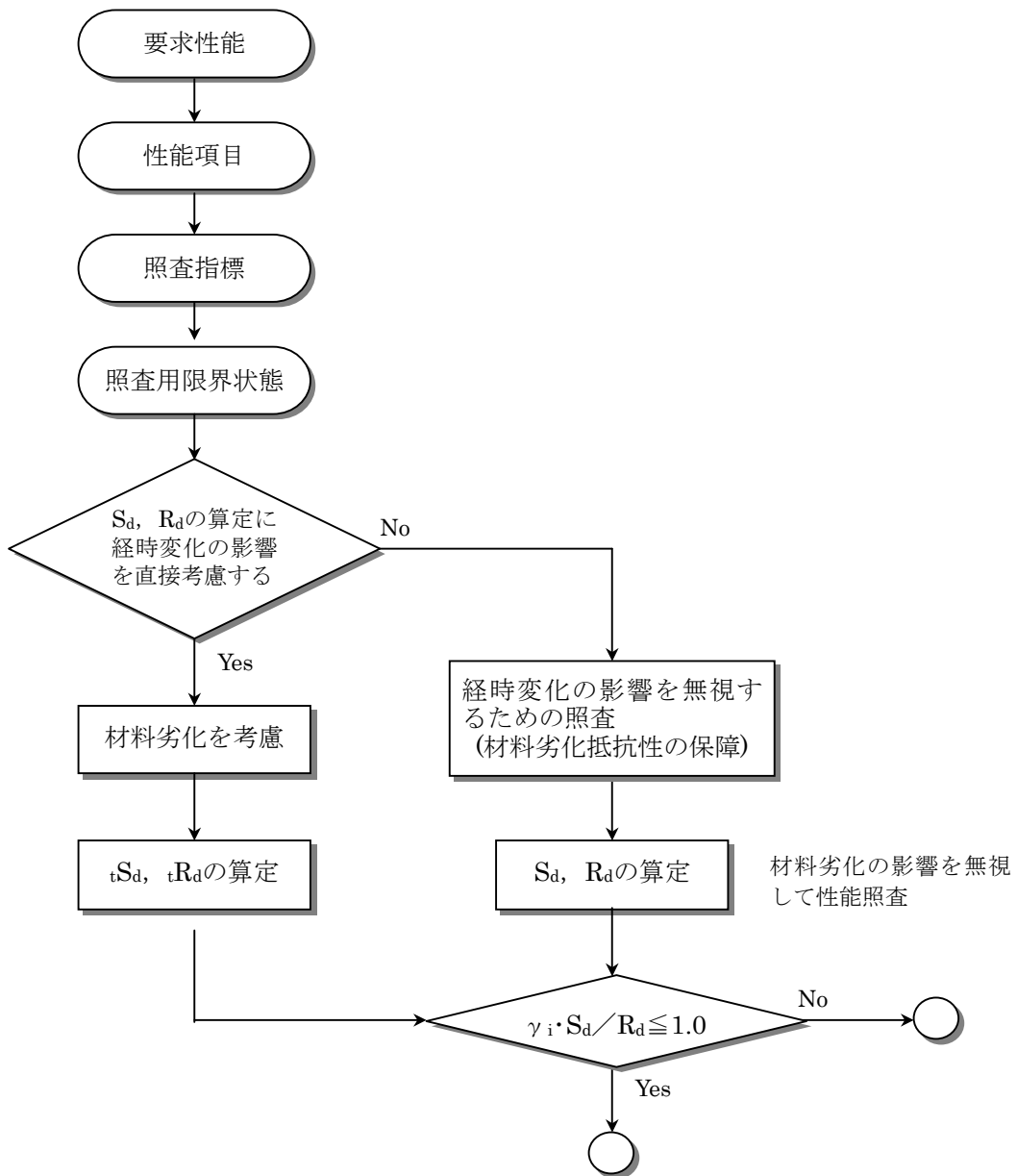


図 5.4.2 経時変化の影響の取扱い

一般に、材料劣化抵抗性に関しては、以下の環境作用に対する検討が必要となり、環境条件に応じて環境作用の因子に着目して材料抵抗性を保証することとなる。

- 中性化
- 塩害
- 凍害
- アル骨
- 化学的抵抗性

しかし、補修補強工法は、材料劣化抵抗性の他に、力学性能も要求される。力学性能は、荷重作用によって、必要とされる特性が異なることになり、一般に、以下に示す作用に対して安全性、使用性および復旧性を満足することが必要となる。

補修工法は、力学性能を要求されることはないが、補修工法を適用する部位によっては、以下に示す作用が生じた場合には、剥離・剥落などの使用性や第3者に対する公衆災害が発生しないことを保証することが必要となる。

- 最大荷重作用
- 繰返し荷重作用
- 地震作用

以下に、補修補強工法ごとに、①を満たすと考えられる規定を示す。これらの規定を満足する場合は、補修補強工法が対象構造物と同等以上である一定期間が保障されると考えてよい。

5.4.2 材料劣化抵抗性に対する要求

(1) 補修工法

表面保護工に着目して、材料劣化抵抗性に関する要求事項を示す。

表面保護工を用いる場合は、対象とする劣化要因に材料劣化抵抗性を有するものでなければならない。材料劣化要因に対して満足すべき抵抗要因を表 5.4.1 に示す。

表 5.4.1 表面保護（表面処理，断面修復）に求められる性能

性能		劣化機構				
		中性化	塩害	凍害	化学的浸食	アルカリ骨材反応
材料劣化抵抗性	二酸化炭素遮断性(中性化阻止性)	◎				
	塩化物イオン遮断性	○	◎	○		○
	酸素遮断性	○	○			
	凍結融解抵抗性			◎		
	耐酸性，耐硫酸性				◎	
	耐アルカリ性				◎	
構造適用性	防水性（遮水性）		○	◎	○	◎
	水蒸気透過性（透湿性）					◎
	ひび割れ追従性（柔軟性）	△	△	△	△	△
	はく落抵抗性	△	△	△	△	△

注) ◎：主として必要な要求性能 ○：副次的に必要な要求性能 △：場合により必要な要求性能

表面保護工は、前述のとおり補修後の部材の材料劣化抵抗性を一定期間保証できるものでなければならない。そのためには、所定の材料劣化抵抗性や構造適用性を満足していることを評価しなければならない。表 5.4.2～表 5.4.7 に表面保護工の材料劣化抵抗性を一定期間保証するための評価基準の例を示す。これらの評価基準を満足することが、表面保護工が工法としての材料劣化抵抗性を有する前提条件となる。

表 5.4.2 表面被覆工法（有機系）

評価項目	試験方法	評価基準値	
材料劣化抵抗性	耐候性	JSCE-K511-2005* 標準（フッ素樹脂カーボンアーク灯/キセノンランプ） 1000 時間/1500 時間 高耐久（フッ素樹脂カーボンアーク灯/キセノンランプ） 2000 時間/3000 時間 白亜化がなく、われ・はがれのないこと 光沢保持率：80%以上 色差 ΔE^* ：3.00 以下	
	耐アルカリ性	JIS A 6909-2000	
	耐酸性	日本下水道事業団	
	耐薬品性	JIS K 5600-6-1	
	一体性 (付着強さ)	JSCE-K531-1999 日本下水道事業団	
	二酸化炭素透過 阻止性	JIS A 1171	
	透水阻止性	JSCE-K523-2005*	
	水蒸気透過性	JSCE-K522-2005*	
	水蒸気透過阻止性		
	酸素透過阻止性	JSCE-K521-1999 (A 法)	
	塩化物イオン透過 阻止性	拡散セル方式 JSCE-K524-2005*	
	硫黄の浸透阻止性	日本下水道事業団	
	凍結融解抵抗性	JIS A 6909-2000	
	構造適用性	ひび割れ追従性	JSCE-K523-1999
		防汚性	土木研究所
はく落防止性 (押し抜き荷重)		首都高速道路公団	
備考	*：出典文献に示される試験方法を最新の 2005 年版に修正		

表 5.4.3 表面被服工法（無機系）

評価項目		試験方法	標準値
材料劣化抵抗性	耐候性	JSCE-K511-1999	ランク 1 : 3000 時間に合格 ランク 2 : 1000 時間に合格 ランク 3 : 300 時間に合格
	酸素遮断性	JSCE-K521-1999	$20 \times 10^{-12} \text{mol} / (\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ 以下
	二酸化炭素遮断性	中性化促進試験 (28 日間) ¹	ランク 1 : 0mm ランク 2 : 1mm 以下 ランク 3 : 2mm 以下
	水蒸気透過性	JSCE-K522-1999	高透湿 : $30 \text{g} / (\text{m}^2 \cdot \text{日})$ 以上 中透湿 : $15 \text{g} / (\text{m}^2 \cdot \text{日})$ 以上 低透湿 : $5 \text{g} / (\text{m}^2 \cdot \text{日})$ 以上
	防水性	JSCE-K523-1999	ランク 1 : 0.2g 以下 ランク 2 : 1.0g 以下 ランク 3 : 5.0g 以下
	塩化物イオン遮断性	JSCE-K524-1999	標準 : 0mm (Cl ⁻ 浸透深さ)
拡散セル法 ²		ランク 1 : $10^{-4} \text{mg} / (\text{cm}^2 \cdot \text{日})$ 以下 ランク 2 : $10^{-3} \text{mg} / (\text{cm}^2 \cdot \text{日})$ 以下 ランク 3 : $10^{-2} \text{mg} / (\text{cm}^2 \cdot \text{日})$ 以下	
構造適用性	付着性	JSCE-K531-1999	標準形 : $1.0 \text{N} / \text{mm}^2$ 以上 柔軟形 : $0.7 \text{N} / \text{mm}^2$ 以上
	ひび割れ追従性	JSCE-K532-1999	高追従 : 1.0mm 以上 中追従 : 0.4mm 以上 低追従 : 0.1mm 以上
備考		1 日本工業規格 JIS A 1153 「コンクリートの促進中性化試験方法」 2 日本道路公団規格 JHS 417 「コンクリート塗装材の品質規格試験方法」	

表 5.4.4 表面含浸工

要求性能	評価項目	試験方法	評価基準			
			シラン系	けい酸塩系		その他の系
				けい酸リチウム系	けい酸ナトリウム系	
材料劣化抵抗性	中性化深さ	JSCE-K571-2004	C	B	B	—
	塩化物イオン浸透抵抗性	JSCE-K571-2004	A	C	C	—
	透水性	JSCE-K571-2004	A	C	C	—
	吸水性	JSCE-K571-2004	A	C	C	—
	酸素遮断性	JSCE-K521-1999 等	*1	*1	*1	—
	水蒸気透過性	JSCE-K571-2004	B	B	B	—
	アルカリ性の付与	未定	—	*2	*2	—
構造適用性	耐摩耗性	JIS A 1453 等	—	*3	*3	—
	外観変化	JSCE-K571-2004	NC, SC, CC のいずれか			
備考	含浸性	JSCE-K571-2004	IS	IL	IN	IO
	*1 : JSCE-K521-1999 (表面被覆材の酸素透過性試験方法) 等の試験を適用して, 表面含浸材を含浸したモルタルまたはコンクリート試験体の酸素透過性試験を行い, 表面含浸材の含有によって酸素遮断性が付与されるかどうかを確認する. *2 : 中性化したモルタルまたはコンクリート試験体に表面含浸材を含浸して, 含浸部分のアルカリ性が回復することを確認する. *3 : JIS A 1453 (建築材料および建築構成部分の磨耗試験方法—研磨紙法) 等の試験を適用して, 表面含浸材を含浸したモルタルまたはコンクリート試験体の磨耗試験を行い, 表面含浸材を含浸しない試験体に比べて, 耐摩耗性が改善されることを確認する.					

表 5.4.5 表面含浸工の外観変化および含浸深さのグレード

評価項目	グレード	内 容
外観変化	NC	外観変化なし
	SC	わずかに変化（濡れ色を呈する程度の変化）
	CC	著しい変化
含浸深さ	IS	シラン系
	IL	けい酸リチウム系
	IN	けい酸ナトリウム系
	IO	その他の系

表 5.4.6 表面含浸工の劣化要因に対する性能のグレード

評価項目		グレード		
性 能	評価値 (%)	A	B	C
透水に対する抵抗性	透水抑制率	80 以上	80～60	60 以下
吸水性に対する抵抗性	吸水抑制率	80 以上	80～60	60 以下
透湿性	透湿比	80 以上	80～60	60 以下
中性化に対する抵抗性	中性化抑制率	80 以上	80～60	60 以下
塩化物イオン浸透抵抗性	塩化物イオン浸透抑制率	80 以上	80～60	60 以下

表 5.4.7 断面修復工法

		試験方法例	評価基準値例
材料耐久性	中性化	JIS A 1171-2000 の 7.7	中性化速度係数が既設コンクリートのそれ以上.
	塩化物イオンの侵入	JSCE-G 571-2003 JSCE-G 572-2003	塩化物イオンの拡散係数試験方法により測定した塩化物イオンの拡散係数が、既設コンクリートと同等以上.
	凍結融解	JIS A 1148-2003	JIS A 1148-2001「コンクリートの凍結融解試験方法」による相対動弾性係数が設定値以上.
	はく落抵抗性		はつり深さが鋼材背面までの場合には、はく落抵抗性の照査を付着強度により照査できる。 はつり深さがコンクリートかぶり深さ以内の場合には、付着強度のみでは充分と言え難く、第三者影響への対策としてははく落防止が要求される場合などでは、繊維補強や繊維シートを用いることやアンカーなどを適切に配置するなどの配慮が必要である.
	美観・景観	外観目視，色差測定等	美観・景観に特に配慮が必要な場合には、評価項目や許容範囲を適切に設定して性能照査する.
構造適用性	圧縮強度	JSCE-G 563-2005	試験による実測値をその精度に関する安全係数（一般に 1.0～1.3）で除した値が設定値（一般に補修される母材コンクリートの設計基準強度）以上.
	付着強度	JIS A 1171-2000 の 7.9 JSCE-K 561-2003	圧縮強度と同様に試験による実測値をその精度に関する安全係数（一般に 1.0～1.3）で除した値が設定値（1.0N/mm ² ）以上.
	ひび割れ抵抗性	JIS A 1129-2001 JIS A 1151-2002 JIS A 1171-2000 JIS A 6202-2000 JSCE-K 561-2003 の 5.10	JSCE-K561 に規定する寸法安定性試験により求められた長さ変化率が、設定値を満足すること.
施工			ワーカビリティ，運搬方法，凝結特性および単位容積質量などを適切に設定し，照査する.

(2) 補強工法

補強工法に関しても、補修工法と同様に材料劣化抵抗性が求められる。

個々の補強工法で使用されている材料の環境作用に対する材料抵抗性を、補強工法の材料劣化抵抗性とと考えてよい。

使用材料の材料劣化抵抗性は、補修工法の材料劣化抵抗性の評価基準等を参考とするのがよい。なお、補強工法で、材料劣化抵抗性が十分に得られない場合は、補強工法の環境作用に対する補修を前提としなければならない。

耐震補強工法を例に材料劣化抵抗性に対する考え方を示す。

耐震補強工法は、構造物の供用期間中に発生する地震動に対して、所要の性能を発揮できなければならない。

耐震補強工法の力学的性能は、通常の場合、実験的検討を基に定められた照査手法を用いることに保証されている。

しかし、この力学的性能が、地震時に十分に発揮されるためには、耐震補強工法が、構造物の供用期間中の環境作用に対して使用材料等の耐久性が保証されていることが前提となる。

表 5.4.8 に、耐震補強工法ごとに、使用材料等の耐久性を確保するための用件の例を示した。

これらの用件を、構造物の供用期間中に渡り満足することが、耐震補強工法の力学的性能を保証することとなる。

表 5.4.8 耐震補強工法と材料耐久性の関係の例

	劣化因子（中性化、塩害、凍害、紫外線等）
RC 巻き補強	通常の RC 部材として、材料耐久性を確保
連続繊維シート巻き補強	表面部のエポキシ樹脂に対して、材料耐久性を確保するか、防護処理を施す。 防護処理を施した場合、防護処理の材料耐久性を確保
鋼板巻き補強	表面の鋼材は、防錆処理等の材料の耐久性を確保 鋼材と既設コンクリート間の充填材は、使用材料ごとに材料耐久性を確保

5.4.3 力学性能に対する要求

補修補強工法において、力学性能を要求する場合には、適用部位部材の荷重作用に対して安全性、使用性、復旧性を満足することを照査しなければならない。対象部材部位ごとに、考慮すべき荷重作用に対する力学的な構造物の要求性能の関係は、表 5.2.14 に示すとおりである。なお、表面保護工等の補修工法等において、力学性能を要求しない場合でも、適用部位によっては、荷重作用に対して剥離、剥落による第三者に対する公衆災害等の構造物の安全性、諸機能に対する使用性を満足することを確認する必要がある。

補強工法の力学的な要求と耐用年数の関係は、補強工法が保有すべき荷重作用の規模に関係する。荷重作用ごとに、その考え方の例を示す。

①破壊に対する安全性

設計供用期間中に予測される最大荷重作用に対して、所要の安全性を有すること。

②疲労破壊

設計供用期間中に予測されるすべての荷重作用に対して、所要の安全性を有すること。
すなわち、走行車両の交通量を推定することが必要となる。

③地震作用に対する安全性、復旧性

設計供用期間中に発生する最大規模の地震動に対して、所要の安全性または復旧性を有すること。

5.4.4 材料劣化予測の考え方と事例

前節では、補修補強部材に対してコンクリート構造体と同程度の材料劣化抵抗性を確保する方法を用いる場合の、補修補強材の材料劣化抵抗性に対する要求事項と評価方法を示した。

前節で示した方法は、補修補強工法の耐用期間は、対象構造物のコンクリート劣化に対する耐用期間と同等以上であることを一定期間保証するもので、補修補強部材自体の耐用期間を推定することは出来ない。

本節では、現時点で補修補強部材の耐用期間を推定する手法に関して、検討を行なった。以下に、その考え方および事例を示す。

(1) 表面処理工法における耐用年数予測

表面処理工法を例に、環境作用に対する耐用年数の推定例を以下に示す。

表面処理工法の環境作用に対する材料抵抗性の耐用年数を予測するためには、塩害環境、凍害環境、中性化環境等の環境下での時間と劣化因子の浸透性の関係が必要となる。

以下に、コンクリート標準示方書に準じた方法の例として塩害環境下の耐用年数予測例を示す。

1) 塩害劣化の予測モデル

表面処理を施した後の塩害劣化の予測モデルは、

表 5.4.9 に示す通り種々の提案がなされている。方法①の補修効果の期待できる耐用年数を設定する方法は、被覆材のしゃ塩性、被覆材自体の耐久性を含めた耐用年数を定め、耐用年数に達した時点で同じ方法で再補修を施すというシナリオを考えると、比較的容易に LCC を算定できる手法である。方法②の等価かぶりに換算する方法等は遮塩性能に着目した予測が可能となる手法である。

表 5.4.9 表面処理実施後の補修効果の考え方

	概要	模式図
<p>方法① 補修効果の期待できる耐用年数を設定</p>	<p>表面被覆材の耐用年数までは劣化因子の侵入を遮断するが、耐用年数に達すると遮断効果がなくなる、すなわち再補修する考え方である。 表面被覆の耐用年数は仕様の違いにより様々であるが、補修実績調査では5～30年、文献調査では15年とされたものが多いとされている。</p>	
<p>方法② 補修効果を等価かぶりに換算</p>	<p>表面被覆による劣化因子の侵入遮断効果をコンクリートかぶり厚さの増加とみなす考え方である。 等価かぶりは被覆材の性能（見掛けの拡散係数）・膜厚など仕様の違い等により様々であり、適切な値を設定する必要がある。</p>	
<p>方法③ 表面被覆材の見掛けの拡散係数を設定</p>	<p>表面被覆材とコンクリートの見掛けの拡散係数をそれぞれ別途に設定した2層系材料とする考え方である。 見掛けの拡散係数は被覆材の性能・膜厚など仕様の違い等により様々であり、経時的に見掛けの拡散係数が低下するなどの適切な値を設定する必要がある。</p>	
<p>方法④ 性能低下曲線を設定</p>	<p>補修直後の遮断性能を100%、耐用年数時点での遮断性能は20%までに低下すると仮定した性能低下曲線を用いて表面被覆の効果を評価する考え方である。</p>	

ここでは、表面処理工法の遮塩性能に着目し、比較的容易に塩化物イオンの拡散を予測することのできる補修効果を等価かぶりに換算する予測モデルを示す。

i) 等価かぶりによる塩化物イオン侵入モデル：新設構造物

新設構造物に表面被覆材を施す場合、コンクリート表面からの距離 x に於ける塩化物イオン濃度 $C(x, t)$ は、下式による。表面処理厚、見掛けの拡散係数と等価かぶりとの関係は図 5.4.3 の通りである。

$$C(x,t) = C_0 [1 - \text{erf} \{0.1/(2\sqrt{t}) \cdot (x/\sqrt{D_c} + th/\sqrt{D_h})\}] + C(x,0) \\ = C_0 [1 - \text{erf} \{0.1/(2\sqrt{t}) \cdot (x + th_c) / \sqrt{D_c}\}] + C(x,0) \quad (5.4.1)$$

ここに、

$C(x,0)$: 初期塩化物イオン含有量(kg/m³)

C_0 : コンクリート表面における想定塩化物イオン濃度 (kg/m³)

t : 新設から照査時までの経過年数(年)

x : コンクリート表面からの距離(mm)
 th : 表面処理厚(mm), 表面被覆材では塗膜厚, 表面含浸では含浸厚(mm)
 D_c : 塩化物イオンに対するコンクリートの見かけの拡散係数($cm^2/年$)
 D_h : 塩化物イオンに対する表面処理材の見かけの拡散係数($cm^2/年$)
 表面被覆材では塗膜, 表面含浸材では含浸厚とする.
 th_c : 等価かぶり $th_c = th \times \sqrt{D_c/D_h}$

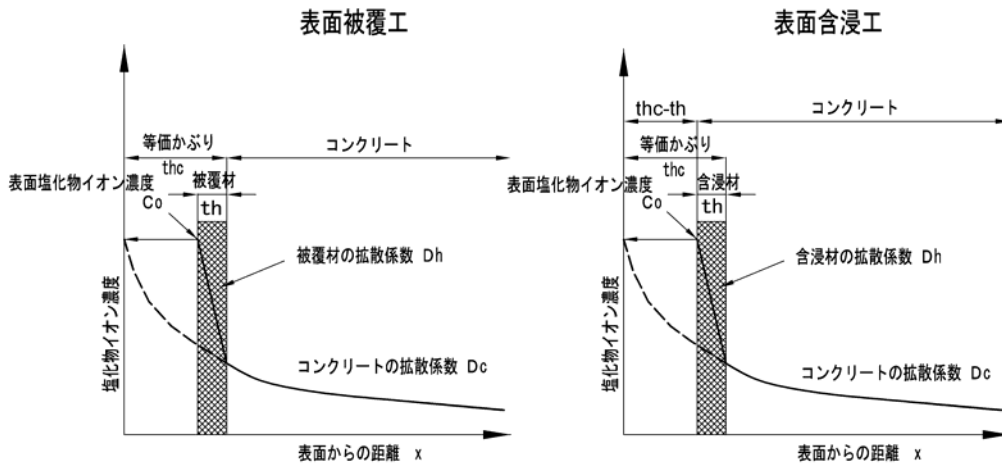


図 5.4.3 等価かぶりに基づく塩分侵入モデルの概念図

ii) 等価かぶりによる塩素イオン侵入モデル：既設構造物

既にコンクリート表面から塩化物イオンの侵入を受けている場合には、フィックの拡散方程式の理論解を適用できない。このため、式(4.3.3)に示すフィックの拡散方程式の数値解析手法である一次元差分法を用いて、塩化物イオンの侵入予測を行うことができる。

2) 耐久性の予測事例

橋脚く体のかぶり部分を断面修復した後に、表面処理を施した場合を例として、塩害による鋼材腐食に至る予測例を示す。

断面修復工法、表面処理工法条件を以下の通り仮定する。

海岸線からの距離	100m
表面塩化物イオン濃度	$4.5kg/m^3$
かぶり	70mm
かぶり以深の塩化物イオンの再拡散の影響	無視できるほど小さい
断面修復工法	
水セメント比	W/C=40%
塩化物イオンの見掛けの拡散係数の特性値	$D_p=0.570cm^2/年$
安全係数	$\gamma_p=1.2$
塩化物イオンの見掛けの拡散係数の特性値	$D_k=0.684 cm^2/年$
初期含有塩化物イオン濃度	$C_i=0.0 kg/m^3$

表面処理：有機系表面被覆の場合

膜厚

$t_h=500 \mu m=0.5mm$ (仮定)

塩化物イオンの見掛けの拡散係数

$D_h=0.001cm^2/年$ (仮定)

等価かぶり

$t_c=t_h \times \sqrt{D_c/D_h}=13.1mm$

表面処理：シラン系表面含浸の場合

含浸厚

$t_h=0.5mm$ (仮定)

塩化物イオンの見掛けの拡散係数

$D_h=0.057cm^2/年$

(無処理の 1/10 を仮定)

等価かぶり

$t_c=t_h \times \sqrt{D_c/D_h}=1.6mm$

コンクリート表面からの増加かぶり

$t_c-t_h=1.1mm$

コンクリート標準示方書²⁾に基づき式(5.4.7)を満足しなくなる時点をも、鋼材腐食が開始する時点として定義し、無処理の場合および表面被覆、表面含浸処置を施した場合の時間と塩化物イオン濃度が制限値となるかぶり厚との関係を図 5.4.4 に示す。これより、表面被覆は 32 年、表面含浸は 23 年で鋼材腐食発生限界塩分濃度 $1.2kg/m^3$ に至ることが分かる。

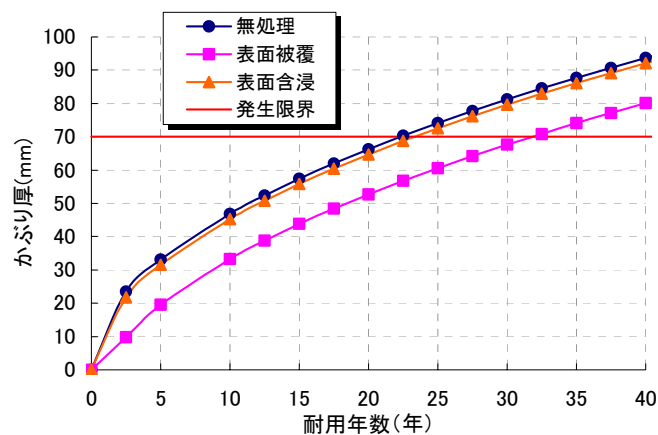


図 5.4.4 耐用期間と塩化物イオン濃度が制限値となるかぶり厚との関係

(2) 断面修復工法における耐用年数予測

断面修復工法を例に、環境作用に対する耐用年数の推定例を以下に示す。

断面修復工法の環境作用に材料抵抗性の耐用年数を予測するためには、以下に示す各環境作用下での時間と主要因子の浸透性の関係が必要となる。

塩害環境

凍害環境

中性化環境

以下に、コンクリート標準示方書に準じた方法の例を示す。この方法は、断面修復材をコンクリートと同様に取り扱ったものである。

1) 塩害劣化の予測モデル

塩害に対する劣化モデルを、以下に示す。

$$C_d = \gamma_{cl1} C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1c}{2\sqrt{D_d \cdot t_s}} \right) \right) \quad (5.4.2)$$

ここに、

C_d : 鋼材位置における塩化イオン濃度

γ_{cl1} : C_d のばらつきを考慮した安全係数。一般に 1.3

C_0 : コンクリート表面における塩化イオン濃度。一般に海岸からの距離から設定。

c : かぶり (mm)

D_d : 使用材料の塩化イオンの設計拡散係数

t_s : 供用年数

2) 中性化に対する劣化予測モデル

中性化深さの推定値 y_g は、式(5.4.3)により求めた。

$$y_g = \gamma_{cb} \cdot \alpha_d \cdot \sqrt{t} \quad (5.4.3)$$

ここに、

γ_{cb} : y_g のばらつきを考慮した係数。

一般的な値として、本検討では 1.15 とした。(表 5.4.10 参照)

t : 設計耐用年数(年)。本検討では 100 年とした。

α_d : 中性化速度係数の推定値(mm/ $\sqrt{\text{年}}$)

$$= \alpha_k \cdot \beta_e \cdot \gamma_c \quad (5.4.4)$$

β_e : 環境の影響の程度を表す係数。(表 5.4.10, 表 5.4.11 参照)

γ_c : コンクリートの材料係数。(表 5.4.10, 表 5.4.11 参照)

α_k : 使用材料の中性化速度係数の特性値(mm/ $\sqrt{\text{年}}$)で、式(5.4.5)で求める。

$$\alpha_k = k \cdot \gamma_p \cdot \alpha_p \quad (5.4.5)$$

k : 補正係数 1.0

γ_p : α_p の精度に関する係数。一般的な値として、本検討では 1.1 とした。

α_p : 中性化速度係数の予測値 (mm/ $\sqrt{\text{年}}$) で、式(5.4.6)で求めた.

$$\alpha_p = -3.57 + 9.0 \cdot WB \quad (5.4.6)$$

WB : 有効水結合材比. 本検討では, $WB = WC$

W : 単位水量

C : 単位セメント量

表 5.4.10 各係数の値

係数		数値	記事
γ_{cb}	中性化深さの設計値のばらつきを考慮した係数	1.15	一般の場合
β_e	環境の影響の程度を表す係数	1.6	一般の場合
		1.0	土中および水中の部材等, 湿潤状態が保たれやすい部材
γ_c	コンクリートの材料係数	1.0	一般の場合
		1.3	部材の上部の部分等ブリーディングによるコンクリートの品質低下がある部位

表 5.4.11 係数の組合せと構造物の例

構造物の種類	部材	β_e	γ_c
桁, ラーメン	スラブ, 梁	1.6	1.0
	柱	1.6	1.3
橋脚, 橋台, 擁壁	—	1.3	1.3
高欄	—	1.0	1.3

以上のことから, 表面被覆工法に関して各劣化因子対して, 以下の諸性能が得られれば補修対象部材の鉄筋腐食に至る時間を推定することが出来る.

中性化 : 中性化速度係数

塩害 : 塩分浸透拡散係数

3) 耐久性の予測事例

橋脚く体のかぶり部分を, はつり落とし断面修復した場合を例として, 中性化および塩害に対しての, 鋼材腐食に至る予測例を示す.

① 塩害劣化

検討条件を以下に示す.

海岸からの距離 100 m

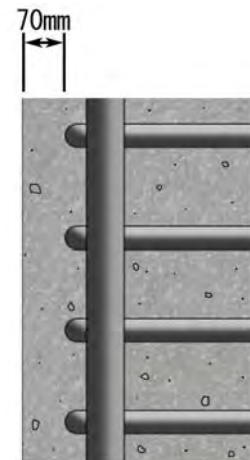
塩化物イオン濃度 4.5 kg/m³

かぶり 70 mm

塩分拡散係数

塩分拡散係数は, 断面修復材の水セメント比の関数として表されることから, 以下のように仮定した.

既往の部材 $WC = 55\%$



断面修復工法 A $WC = 40\%$

断面修復工法 B $WC = 30\%$

式(5.4.7)により、時間と塩分浸透深さの関係を図 5.4.5 に示す。

コンクリート標準示方書に基づき次式を満足しなくなる時点をも、鋼材腐食が開始される時点として定義する。

$$C_g \leq C_{lim} \quad (5.4.7)$$

ここに、

C_{lim} : 塩化物イオン濃度の制限値。本検討では、 1.2kg/m^3 とした。

C_g : 鋼材位置における塩化物イオン濃度の推定値

これより、断面修復工法 A は 22 年、断面修復工法 B は 62 年で鋼材腐食に対する限界値に至ることが分かる。

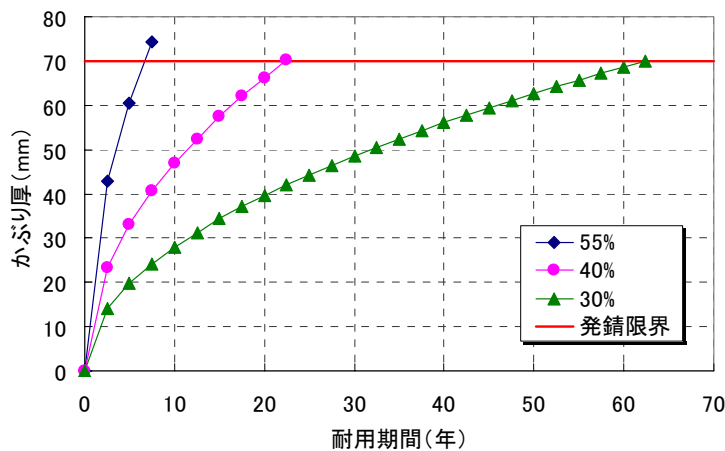


図 5.4.5 耐用期間と塩化物イオン濃度の関係

② 中性化

検討条件を以下に示す。

かぶり 30 mm

中性速度

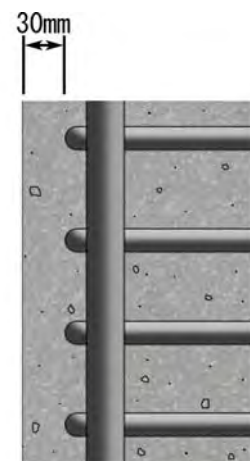
中性化速度は、断面修復材の水セメント比で表されることから、以下のように仮定した。

既往の部材 $WC = 60\%$

断面修復工法 A $WC = 55\%$

断面修復工法 B $WC = 50\%$

断面修復工法 C $WC = 45\%$



式(5.4.8)により、時間と中性深さの関係を図 5.4.6 に示す。

コンクリート標準示方書に基づき次式を満足しなくなる時点をも、鋼材腐食が開始される時点として定義する。

$$y_g \leq y_{lim} \quad (5.4.8)$$

$$y_{lim} = c - ck$$

y_g : 中性化深さ

c : かぶり

c_k : 中性化残り, 10mmとする.

これより, 断面修復工法 A は 30 年, 断面修復工法 B は 70 年, 断面修復工法 C は 100 年以上で鋼材腐食に対する限界値に至ることが分かる.

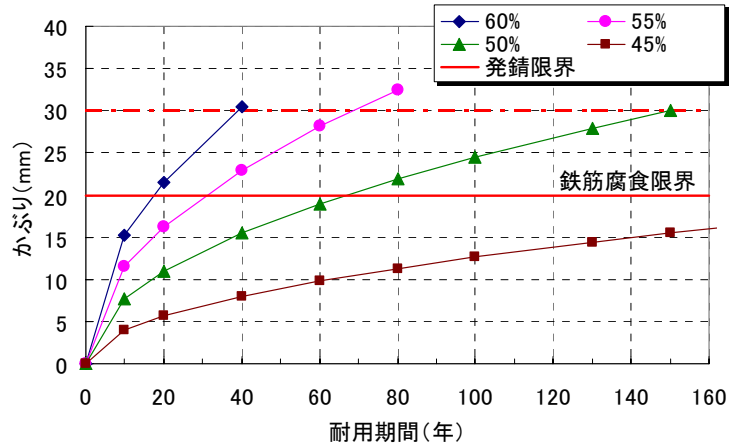


図 5.4.6 耐用期間と中性化進行状況の関係

5.4.5 床版補強工法における疲労寿命予測手法

床版補強工法の疲労寿命算定事例を示す. なお, 環境作用に対する耐久性は, 別途照査または満足するものとする.

(1) 疲労寿命算定の考え方

疲労寿命の予測をするためには, 応答値と繰返し回数に依存した部材の疲労耐力算定手法が必要となる. 補強 RC 床版の耐用年数算定の流れを図 5.4.7 に示す.

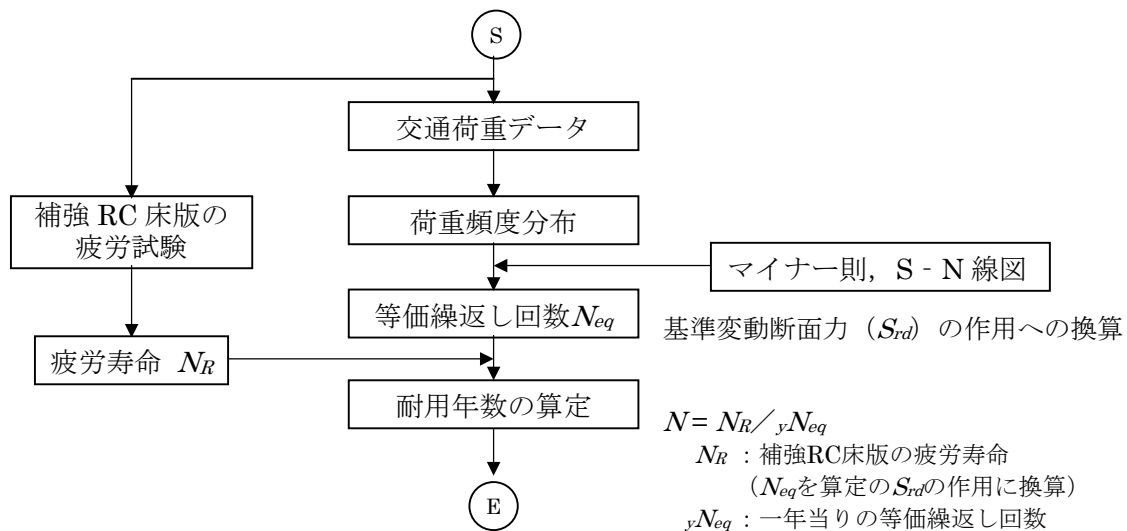


図 5.4.7 補強 RC 床版の耐用年数算定の流れ

(2) 疲労寿命算定例

RC 床版に連続繊維シート補強をした場合を例として、疲労寿命推定の例を示す。

RC 床版の疲労寿命は、寿命予測手法自体が確立されていないために、実験的検討結果に基づいて行なう方法を示す。

RC 床版の疲労寿命を推定するためには、前項に示したように以下の事項が必要となる。

- ・ 補強前床版の車両繰り返し回数
- ・ 補強後供試体の疲労破壊時の繰り返し回数
- ・ 対象橋梁の車両の繰り返し回数

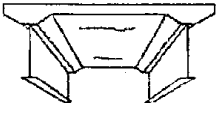
1) 補強前床版の車両繰り返し回数の推定

補強前床版の車両繰り返し回数は、通常得られる情報は、ひび割れ発生状況等の外観であるため、外観から繰り返し回数を推定する必要がある。

これまで実施された昭和 39 年道路橋示方書により設計された RC 床版の輪荷重走行試験におけるひび割れ状況と、通常の RC 床版における健全度調査における区分との関係の例を表 5.4.12 に示す。このような関係と、対象橋梁の供用期間により、概ね対象 RC 床版の荷重履歴を推定することができる。

なお、この関係の例は、ひび割れは荷重作用の影響のみで発生や伸展するとした場合のものである。環境作用の影響は、別途考慮する必要がある。

表 5.4.12 外観損傷と繰返し回数の関係の例

区分	ひび割れ幅に着目した程度	ひび割れ間隔に着目した程度	繰返し回数の目安*
a	[ひび割れ間隔と性状] ひび割れは主として1方向のみで、最小ひび割れ間隔が概ね1.0m以上 [ひび割れ幅] 最大ひび割れ幅が0.05mm以下(ヘアークラック程度)		—
b	[ひび割れ間隔と性状] 1.0m~0.5m, 1方向が主で直交方向は従、かつ格子状でない [ひび割れ幅] 0.1mm以下が主であるが、一部に0.1mm以上も存在する		—
c	[ひび割れ間隔と性状] (c) 5m程度, 格子状直前のもの [ひび割れ幅] 0.2mm以下が主であるが、一部に0.2mm以上も存在する		~ 25,000
d	[ひび割れ間隔と性状] (c) 5m~0.2m, 格子状に発生 [ひび割れ幅] (c) 2mm以上が目立ち部分的な角落ちもみられる		~125,000
e	[ひび割れ間隔と性状] (c) 2m以下, 格子状に発生 [ひび割れ幅] 0.2mm以上がかなり目立ち連続的な角落ちが生じている		~200,000

*載荷荷重 150kN を用いた輪荷重走行試験の値

2) 補強後供試体の疲労寿命

補強供試体の疲労寿命は、補強前供試体の損傷履歴や補強工法や補強量により異なり、これらの疲労寿命推定手法が確立されていないため、実物供試体を用いた輪荷重走行試験等により実験に基づいて設定する必要がある。

3) 対象橋梁の車両の繰り返し回数

対象橋梁の車両の繰り返し回数は、実測データに基づき設定することが出来る。

実測データを用いる方法としては、以下のような方法がある。

- ・交通センサス情報を用いる方法

対象橋梁を含む近傍路線の情報等から推定して用いる。

- ・橋梁測定結果を用いる方法

WIM法などにより、対象橋梁の実応力測定結果に基づき推定する方法

なお、これらの情報は、輪荷重と頻度が得られる。そのため、輪荷重走行試験結果等の一定輪荷重の効果に換算することにより、容易に寿命を推定することが可能となる。

種々の輪荷重の影響を一定の輪荷重の影響に換算した回数を、等価繰り返し回数といい、一般に軸重と断面力を等価として、次式で算定することができる。

$$N_{eq} = \sum \left(\frac{P_i}{P} \right)^m \cdot n_i \quad (5.4.9)$$

ここに、

N_{eq} : 等価繰り返し回数 (回)

P_i : 輪荷重

4) P : 基準輪荷重

m : S - N 線図の傾きの逆数 (一般に 12.76)

n_i : 輪荷重 P_i の回数

上記の考え方に基づき、以下の検討条件によって RC 床版補強工法の疲労寿命推定の事例を示す。

検討条件

供用期間 20 年

外観情報 健全度 C~D 判定

地覆などは、凍害劣化の影響が顕著ではない。

交通量 対象橋梁を含む近傍路線の交通センサス情報

日交通量 大型車混入率 5%

補強工法 種類 連続繊維シート補強

試験概要

供試体 健全度 C~D 相当の初期損傷後に補強

疲労寿命 80 万回 (100kN 載荷)

① 補強前床版の車両繰り返し回数の推定

交通センサス情報を用いて、100kN に対する等価繰り返し回数を算定する。

交通量調査から、1日1車線あたりの大型車台数を580台とした。軸重占有率と車種ごとの軸数から、1日1車線あたりの軸数1415軸が求められる(表5.4.13)。

軸数1415(1車線/日)と表5.4.14の軸重頻度分布の軸重ごとの割合から1年間の荷重 P_i の輪数が式(5.4.10)により求められる。

$$n_i = 1415 \cdot 365 = 516,475 \quad (5.4.10)$$

一定荷重(100kN)に換算した1年間1車線あたりの等価繰返し輪数を表5.4.14に算定した。これらより、1年間1車線あたりの換算等価繰返し輪数を約2.40万台と算定した。

表 5.4.13 軸重頻度分布

車種 (軸数)	占有率 (%)	台数 (台)	軸数 (軸)
2	80	400	800
3	10	120	360
4	5	50	200
5	3	5	25
6	2	5	30
	100	580	1415

表 5.4.14 100kN換算の大型車輪数 (1車線/年)

軸重 (kN)	輪荷重 P_i (kN)	割合 i (%)	輪数 n_i (輪)	100kN換算 (輪)
164未満	56.3	95	490651.3	322
164~168	83	4	20659.0	1917
168~172	85	0.3	1549.4	195
172~176	87	0.15	774.7	131
176~180	89	0.15	774.7	175
180~184	91	0.1	516.5	155
188~192	95	0.1	516.5	268
220~224	111	0.1	516.5	1956
248~252	125	0.05	258.2	4452
272~276	137	0.05	258.2	14341
総計	—	100	516475	23912

②補強後供試体の疲労寿命

損傷レベルC~D相当の損傷が生じた補強供試体の100kNの繰返し載荷疲労寿命は80万回であるため、補強後の疲労寿命は、80万回とする。

③補強RC床版の寿命の推定

補強RC床版の寿命は、次式で求めることができる。

$$y_r = N_r / N_o \quad (5.4.11)$$

ここに、

y_r : 補強RC床版の耐用年数

N_r : 補強RC床版の疲労寿命, 80万回

N_o : 1年当りの等価繰返し回数, 2.40万回

これより、約33年となる。

5.4.6 北海道における補修補強工法の耐久性評価の問題点

環境作用として、中性化、塩害、荷重作用として疲労荷重に着目して、耐用年数の算定の考え方と事例を示した。

北海道の積雪寒冷地という地域特性を考慮した場合、凍害作用、低温による材料劣化および材料特性の変化などを考慮して補修補強した構造物の性能の経時変化を推定する必要がある。

しかし、多くの補修補強工法の場合、これらの要因は検証されていないのが実態である。今後は、補修補強工法においては、工法の選定時に以下に示す事項の情報の収集整理を義務付けるなどして、工法選定および耐用年数評価に反映させていくことが重要と考えられる。

- ・ 使用材料の凍結融解抵抗性、温度依存性、低温劣化抵抗性

参考文献

- 1 土木学会：2001年制定コンクリート標準示方書[維持管理編]，2001.1
- 2 土木学会：2002年制定コンクリート標準示方書[構造性能照査編]，2002.3
- 3 土木学会：複合構造物の性能照査指針（案），2002.10
- 4 国土交通省：土木・建築にかかる設計の基本，2002.10
- 5 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，I 共通編，2002.3
- 6 丸善：鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物），2004.4
- 7 土木学会：コンクリートライブラリー119，表面保護工法設計施工指針（案），2005.4
- 8 日本コンクリート工学協会：コンクリートのひび割れ調査，補修・補強指針－2003－，2003.6
- 9 土木学会：コンクリートライブラリー107，電氣的防食工法設計指針(案)，2001.11

参 考 資 料

【目 次】

参考1. コンクリート構造物の点検試験方法詳細.....	参 1-1
1.1 各種試験点検方法の総括表	参 1-1
1.2 現地における調査.....	参 1-16
1.3 試験室における試験・分析	参 1-49
参考2. コンクリートの変状に対する評価・判定事例.....	参 2-1
2.1 塩害劣化構造物の事例.....	参 2-1
2.2 凍害劣化構造物の事例.....	参 2-17
2.3 アルカリ骨材反応劣化構造物の事例	参 2-21
2.4 その他の事例.....	参 2-23
参考3 補修補強工法事例.....	参 3-1
3.1 補修対策の目的と工法の分類.....	参 3-1
3.2 補修工法事例.....	参 3-2
3.3 補強対策の目的と工法の分類.....	参 3-21
3.4 補強工法事例.....	参 3-22

参考1.コンクリート構造物の点検試験方法詳細

1.1 各種試験点検方法の総括表

【現地調査】

構造物の全体的な変状や環境条件の調査(1/2)

調査対象	調査目的	方法	概要	破壊程度	普及度 一般性	簡便さ・熟 練度	作業効率	費用	測定精度	準拠規準・マニュアル等	機器種類	
全体	外観の変状	変状分布、程度 の全体把握	目視	調査者が近接して変状を観察する。対象面に近接するために、各種の足場・機器を必要とする場合がある。	なし				安価	近接程度により差がある	特になし	
			デジタルカメラ	高解像度デジタルカメラにより対象面を撮影し、ひび割れ等の変状を抽出する。	なし				やや高価	距離とヶ総数によるが、ひび割れ幅0.5mm程度	特になし	
			レーザー	レーザーを照射し、その反射強度を測定することにより、ひび割れを抽出する	なし	トンネル で			やや高価	ひび割れ幅1mm程度	特になし	
			赤外線	サーモカメラで撮影した表面温度分布から、内部空隙等を検出する	なし			人工加熱 は	やや高価	表面から5～10cmまで	1)熱赤外線法によるモルタル吹き付け法面の診断マニュアル	1)NEC三栄より数機種 2)日本アビオニクスより数機種 3)ほか、外国製品は多種類
			パノラマカメラ	トンネル壁面を写真撮影し、画像データのコンピュータ処理により連続壁面展開図を作成する	なし				やや高価	ひび割れ幅0.2～0.3mm		
			ラインセンサカメラ	連続撮影したトンネル覆工面の画像を電子データとして記録、合成し展開画像を作成する	なし				やや高価	ひび割れ幅1mm		
			スリットカメラ	連続撮影した画像を合成し、覆工面の展開画像を作成する。	なし				やや高価	ひび割れ幅1mm		

構造物の全体的な変状や環境条件の調査(2/2)

調査対象		調査目的	方法	概要	破壊程度	普及度 一般性	簡便さ・熟 練度	作業効率	費用	測定精度	準拠規準・マニュアル等	機器種類
全体	構造性能	構造耐力の低下	載荷・振動測定	加振時の応答レベルや固有周期、載荷時のたわみ量から、剛性や強度低下を評価する	なし				高価			
			光ファイバー(BOTDR)	部埋散乱光の周波数特性変化からひずみを、もどり時間から位置を計測する	なし				高価	ひずみ分解能 $\pm 30 \mu$ 距離分解能 1m		1)東横エルメス(株)
			光ファイバー(FBG)	ブランク光の周波数特性変化からひずみを計測する	なし				高価	ひずみ分解能 $\pm 4 \mu$		1)東京測振(株)
			光ファイバー(OSMOS)	マイクロベンディングによる漏洩光量変化から変位を計測する	なし				高価	変位分解能 $\pm 20 \mu$		1)(株)ハザマ
			光ファイバー(SOFO)	伸縮による光のパス変化から変位を計測する	なし				高価	変位分解能 $\pm 2 \mu$		1)石川島検査計測(株)

コンクリートの物性や劣化程度に関する調査(1/4)

調査対象		調査目的	方法	概要	破壊程度	普及度・一般性	簡便さ・熟練度	作業効率	費用	測定精度	準拠規準・マニュアル等	機器種類
コンクリート	コンクリート強度	圧縮強度の推定	反発硬度法(テストハンマー法)	コンクリートの表面をテストハンマーによって打撃し、その反発硬度から圧縮強度を求める。	小		特別な技術を必要としない		安価	測定可能なコンクリート強度の範囲は測定機器によって異なるが、10～60N/mm ² が適用可能。	規1)コンクリート標準示方書(規準編)(2002年制定) JSC-E-G 504-1999 参1)コンクリート診断技術'02 p94	1)シュミットハンマー(富士物産) 2)シュミットハンマー(シュミット社)
			表面硬度法(落下式ハンマー法、ばね式ハンマー法、回転式ハンマー法、ピストル鋼球打撃法等)	コンクリートの表面を打撃し、くぼみの深さ、直径、面積等を測定する。	小		ほとんど使用されていない。		安価		1) 2) 3)	1) 2) 3)
			貫入法(局部破壊法)(ウィンザー法、C.P.T.ピンテスト)	コンクリート表面にピンを貫入してその深さを測定する。	小		我国での使用例はない。若材齢コンクリートの試験に適する。		安価		1) 2) 3)	1) 2) 3)
			局部破壊試験(プルオフ法、ブルアウト法、ブレイクオフ法)	コンクリートの表層部を局部的に破壊し、破壊時の抵抗力を指標として圧縮強度を推定する。	小 (試験によって生じる局所的な損傷は、コンクリート構造体に影響を与えないが、損傷部を補修する必要がある。)			やや高価	局部破壊法の変動係数は約10%以下、圧縮強度推定の信頼限界は±20%以下。	参1)コンクリート診断技術'02 p97		
			コア強度	コアによる強度試験はコンクリート構造物の強度を推定する方法の中で最も信頼できる方法であるが、強度はコアの採取方法、コアの寸法、養生方法等に影響を受け、これらの点を十分に理解して試験を実施する必要がある。	中 (試験によって生じる損傷は、コンクリート構造体に影響を与えないが、損傷部を補修する必要がある。)			やや高価		規1)コンクリート標準示方書(規準編)(2002年制定) JIS A 1107-1993、 JIS A 1108-1999 参1)コンクリート診断技術 02 p90	1)コンクリートコア採取機(丸東製作所) 2)コンクリートコア切断機(丸東製作所) 3)コンクリート圧縮試験機(島津製作所)	

コンクリートの物性や劣化程度に関する調査(2/4)

調査対象	調査目的	方法	概要	破壊程度	普及度・一般性	簡便さ・熟練度	作業効率	費用	測定精度	準拠規準・マニュアル等	機器種類
		超音波法(パ ンジェット 法,ソニック ピュア法,ウ ルトラソニック テスト法等)	超音波パルス(縦波,横波) の伝播速度および波形を測 定する。	無				やや高価	強度の推定精 度は余り良くな い。	マ1)コンクリートの試験・分析 マニュアル JCI 2000.5 p155 参1)コンクリート診断技術 02 p105	
		複合法(シュ ミットハンマ 反発硬度 法,超音波 法)	シュミットハンマ反発硬度法 と超音波法を測定する。	無				やや高価	強度判定式が 確立されていな い。単独で試験 するより精度が 良い。		

コンクリートの物性や劣化程度に関する調査(3/4)

調査対象	調査目的	方法	概要	破壊程度	普及度・一般性	簡便さ・熟練度	作業効率	費用	測定精度	準拠規準・マニュアル等	機器種類
コンクリート	ひび割れ深さ 劣化因子の侵入強度 漏水の危険度	コア採取	ひび割れ位置においてコアを採取し、コア側面またはコア採取孔におけるひび割れ幅を実測する。	大				やや高価	良い。但し調査箇所数が限定される場合が多い。	特になし	
		はつり	ひび割れ部でコンクリートをはつり、はつり面におけるひび割れの状況を観察・測定する。	大				やや高価	はつり粉により、微細なひび割れは観察しにくい	特になし	
		超音波法	超音波がひび割れ先端を迂回する際の位相の変化または、伝播時間の遅れからひび割れ深さを推定する。	なし 接触材(그리스)により汚れる			ひび割れ幅、配筋密度により検知精度に差が生じる	安価	ひび割れ幅、配筋密度により検知精度に差が生じる。ヘアクラック程度の微細なひび割れは検知困難。	参1)コンクリート診断技術'01 p103~106	1)エルソニック(東横エルメス) 2)ソニックサーチャー(三協エンジニアリング) 3)ウルコン(日本クラウトクレマー) 4)バンジット(CNS.Electronics)
中性化深さ	鉄筋発錆危険度の評価	フェノールフタレイン法(コア)	採取したコアの割裂面にフェノールフタレイン溶液を噴霧し、非発色部の深さを測定する。圧縮強度試験後のコアも流用可	大~中				やや高価	良い。	基1)JISS A 1152 コンクリートの中性化深さの測定方法	
		フェノールフタレイン法(はつり)	はつり面にフェノールフタレイン溶液を噴霧し、非発色部の深さを測定する。	大~小				やや高価	良い。はつり面を十分に清掃する必要がある。	基1)JISS A 1152 コンクリートの中性化深さの測定方法	
		ドリル法	ドリル粉をフェノールフタレイン溶液を含浸させた濾紙で受け、変色時の穿孔深さを測定する。	小				安価	やや深めに評価される	基1)NDIS3419「ドリル削孔粉を用いたコンクリート構造物の中性化試験方法」	1)携帯式振動式ドリル(JIS C 9605)
透気性	透気性	透気試験		小 現場で可能な微破壊試験。				やや高価	マ-1)コンクリートの試験・分析マニュアル JCI 2000.5 p140	1)トレント(富士物産(株)) 2)	
含水率	含水率	乾燥度試験紙法(塩化コバルト法)	乾燥度試験紙をコンクリート表面に貼り付け色の変化から水分蒸発速度を求める。	無				安価	水分蒸発速度はかなり正確に測定できる。表面含水率の推定も可能。内部の含水率を測定できない。	マ-1)コンクリートの試験・分析マニュアル JCI 2000.5 p18	1)水分計(株)ケツ科学研究所) 2)
吸水率	吸水率	簡易吸水速度法	コンクリートに開けたドリルの削孔に栓をし注水させ、一定量吸水するまでの時間を測定し、簡易吸水速度を求める。	小 現場で可能な微破壊試験。				やや高価	あらかじめ求めた簡易吸水速度と塩分浸透量の結果に対応させ耐久性を評価する	マ-1)コンクリートの試験・分析マニュアル JCI 2000.5 p19	

コンクリートの物性や劣化程度に関する調査(4/4)

調査対象		調査目的	方法	概要	破壊程度	普及度・一般性	簡便さ・熟練度	作業効率	費用	測定精度	準拠規準・マニュアル等	機器種類
コンクリート	ひび割れ、剥離、空洞	内部欠陥の有無、位置の検出	サーモグラフィ法	サーモカメラを用いて対象構造物の表面温度分布を測定し、熱画像上の異常な温度分布から、内部欠陥の存在を推定する。	無				やや高価	1)測定精度や適用限界が気象条件や、対象面の汚れなどに影響を受ける。	参1)コンクリート診断技術'02 p102	1)ネオサーモ(日本アビオニクス) 2)サーモトレーサー(NEC三栄) 3)その他外国製品は他種類あり
			超音波法	超音波が発振端子から受信端子へ伝達される際の、伝達時間やひび割れ先端を迂回する際の位相変化、空隙等での反射時間から内部状況を推定する	無 グリスによる汚れあり				やや高価	1)反射波の読み取りにあたっては、判読のための経験が必要。	参1)コンクリート診断技術'02 p102	1)エルソニック(東横エルメス) 2)ソニックサーチャー(三協エンジニアリング) 3)ウルコン(日本クラウトクレーマー) 4)パンジット(CNS.Electronics)
			衝撃弾性波法	インパクトハンマー等でコンクリート表面を打撃して弾性波を発生させ、反射波を受信端子で測定し、内部欠陥や部材厚を推定する。超音波よりも低い周波数成分を使用する。	無				やや高価	1)反射波の読み取りにあたっては、判読のための経験が必要。	参1)コンクリート診断技術'02 p102	1)PIT(パイルダイナミック社)
			打音法	鉄球等でコンクリート表面を打撃したときの打撃音をマイクロフォンで測定し、音圧レベルや周波数特性から内部状況を推定する。	無				やや高価	1)打撃音の解析にあたっては経験が必要	参1)コンクリート診断技術'02 p102	1)I-tec3(伊藤建設)
			A E法	コンクリートのひび割れ発生時に生じる弾性波を検出し、ひび割れ発生位置を特定する。	無				高価	1)センサの取付位置と数、測定対象物の大きさにより異なる	参1)コンクリート診断技術'02 p102	1)DSP-32/16(日本フィジカルアコースティック)
			電磁波レーダー法	コンクリート内部にインパルス状の電磁波を放射し、物性の異なる境界面での反射波を受信し、異物や空隙までの距離を求める	無				安価	1)使用する周波数により、検知深さや分解能が異なる	参1)コンクリート診断技術'02 p102	1)ハンディーサーチ(日本無線) 2)アイアンシーカー(コマツエンジニアリング)
			X線法	対象面にX線を放射し、反対面でフィルムまたはイメージングプレートでの感光強度から、内部の埋設物や空隙の位置、形状を検出する。	無				高価	1)測定可能な部材厚は400mm程度まで	参1)コンクリート診断技術'02 p102	1)低エネルギーX線装置(理学電機) 2)Model PC-101H(ポニー工業) 3)Model PI-104(ポニー工業)

配筋状況、鉄筋の劣化程度に関する調査

調査対象	調査目的	方法	概要	破壊程度	普及度・一般性	簡便さ・熟練度	作業効率	費用	測定精度	準拠規準・マニュアル等	機器種類	
鉄筋	腐食程度	残存耐力の推定 腐食の進行予測	はつり法	鉄筋探査機で鉄筋位置を確認した後、電動ピック等によりかぶりコンクリートをはつり、鉄筋を直接目視し、腐食度のグレーディングや残存断面積の測定を行う。	大			安価	良い。但し調査箇所数が限定される場合が多い。	参1)コンクリート診断技術'02 p150		
		自然電位法	コンクリート表面に外部電極を当てて、鋼材の腐食状況を調べる方法。鋼材の腐食した個所と腐食していない個所とでは、電位が異なることを利用する。	小 (電極の取付箇所で鉄筋をはつり出す)		×	×	やや高価	含水率による影響が大きい。判断指標にあいまいな区間が大きい。	参1)コンクリート診断技術'02 p160 参2)コンクリート構造物の非破壊検査p25	1)ポテンシャルホール(富士物産) 2)鉄筋腐食電位差計(東亜電波工業)	
		分極抵抗法	コンクリート表面に当てた外部電極とコンクリート内部の鋼材との間に微弱な電流を加えて、鋼材の抵抗値から鋼材の腐食する速度を推定する方法。	小 (電極の取付箇所で鉄筋をはつり出す)				やや高価	含水率による影響が大きい。評価については、試案や民間レベルの評価基準が提案されている段階。	参1)コンクリート診断技術'02 p164		
		電気抵抗法	コンクリートのかぶり部分の電気抵抗を測定することで、鋼材の腐食のしやすさを調べる方法。電気抵抗がコンクリートの組成やコンクリート中の塩化物イオン量、含水量などによってかわることを利用する。	なし				やや高価	表面の湿潤状態の影響が大きい。ごく表層の電気抵抗を測定しているに過ぎない。	参1)コンクリート診断技術'02 p167 参2)コンクリート構造物の非破壊検査p25		
	位置	位置、かぶり厚さ	電磁誘導法	コイルをもつセンサーから磁場を発生され、鋼材などの磁性体によって生じる磁場の変化を感知して、鋼材の位置などを調べる方法。	なし				安価	配筋ピッチが密な場合、周囲の鉄筋の影響を受け、正確な測定が困難になる。	参1)コンクリート診断技術'02 p121	1)プロフォーメーター(富士物産) 2)鉄筋探知器SS-30 (サノコ電子研究所)
			電磁波レーダ法	コンクリート表面からマイクロ波を放射して、反射してきた時間を測定。画像処理することによって剥離や空洞、コンクリート内部の鋼材の位置を調べる方法。	なし				安価	反射波を測定する装置のため、測定精度は最も計測面側に位置する鉄筋に対して有効。	参1)コンクリート診断技術'02 p124 参2)コンクリート構造物の非破壊検査p25	1)RCレーダ(日本無線) 2)センシオプロ1(コス)
			X線法	コンクリート表面からX線を照射し、対面する裏面にフィルムを配置することによって透過像を撮影し、鉄筋や配管等の埋設物および空洞やひび割れ等の変状を検出する。	なし			×	高価	信頼性が高い。部材が厚いほど照射時間が増大するため普通コンクリートで約350mm厚が適用限界。	参1)コンクリート診断技術'02 p127 参2)コンクリート構造物の非破壊検査 p25,p82	

【試験室における試験・分析】

コンクリートの組成、品質に関する試験・分析(1/2)

調査対象	調査目的	方法	概要	普及度・一般性	簡便さ・熟練度	作業効率	費用	測定精度	準拠規準・マニュアル等	機器種類	
コンクリート	強度・弾性係数	圧縮強度 弾性係数	圧縮強度	採取したコンクリートのコアから圧縮強度および弾性係数を調べる。				やや高価	良い。ただし、コアの寸法、養生方法等に影響を受ける。	参1-コンクリート診断技術'02 p90 規1-JIS A 1108 1999「コンクリートの圧縮強度試験方法」 規2-JIS A 1149 2001「コンクリートの静弾性係数試験方法」	1)圧縮強度試験機
	静弾性係数 ポアソン比	ストレイン ゲージ		圧縮強度試験時の縦ひずみと応力の関係から、静弾性係数を縦ひずみと横ひずみの関係からポアソン比を求める				やや高価	ゲージの貼布位置により出力値が異なる	マ1-コンクリートの試験・分析マニュアルP152	1)ひずみ
		コンプレッソ メータ		圧縮強度試験時の縦ひずみと応力の関係から、静弾性係数を縦ひずみと横ひずみの関係からポアソン比を求める				安価	ゲージの貼布位置により出力値が異なる	マ1-コンクリートの試験・分析マニュアルP152	1)コンプレッソメータ
	圧縮強度	小径コアによる方法		直径20mm程度の小径コアをコア採取装置により採取した後、圧縮強度試験を行い、その試験結果をもとに、あらかじめ定めた実験式を用いて補正することにより、構造体コンクリート強度を推定する調査方法である。				安価	良い。	参1-寺田,谷川,中込,佐原:小径コアによる構造体コンクリート強度の推定法,コンクリート工学,Vol.39,No.4,2001.4	1)圧縮強度試験機
空気量・細孔分布	気泡間隔係数	顕微鏡法		コンクリート試料を数cmにスライスし、研磨機で平滑に仕上げた試験体表面を気泡間隔測定装置で空気量等を測定する。	×	熟練を要する	×	高価		マ1-コンクリートの試験・分析マニュアルP47	1)気泡間隔測定装置
	空気量	高水圧法		加圧装置にて供試体に水を圧入して空気量を測定する。	×	× 顕微鏡法より簡便	×	やや高価	測定精度に課題あり	マ1-コンクリートの試験・分析マニュアルP48	1)耐圧試験機を介した加圧装置
	細孔径分布	水銀圧入法		水銀の表面張力が大きいことを利用して粉体の細孔に水銀を侵入させるために圧力を加え、圧力と圧入された水銀量から比表面積や細孔分布を求める。	×	×		やや高価	良い。	マ1-コンクリートの試験・分析マニュアルP127	1)ポロシメータ(島津製作所)
		気体(窒素)吸着法		窒素吸着によるセメント硬化体の細孔径分布および比表面積を測定する。	×	×		やや高価	使用する気体により測定値が異なる場合がある。	マ1-コンクリートの試験・分析マニュアルP127	1)細孔分布測定装置(日本ベル) 2)ガス吸着装置(エアサイオンクス)

コンクリートの組成、品質に関する試験・分析(2/2)

調査対象		調査目的	方法	概要	普及度・一般性	簡便さ・熟練度	作業効率	費用	測定精度	準拠規準・マニュアル等	機器種類	
コンクリート	配合	配合推定試験	セメント協会法	打設されたコンクリートの材料構成がどのようなものか、配(調)合どおりのものであるか否かを把握する。		×	×	高価	単位水量には相当大きな誤差が含まれるおそれがある。	参1-コンクリート診断技術'02 p134 マ1-コンクリートの試験・分析マニュアルP39		
			フッ酸法	石灰石を骨材として用いている場合にも適用可能な硬化コンクリートの単位セメント量を推定する方法	×	×	×	高価		参1-コンクリート診断技術'02 p134 マ1-コンクリートの試験・分析マニュアルP42	1)偏光顕微鏡(ニコン)	
			ギ酸法	セメント協会法の欠点である「セメント水和物中のカルシウムと骨材中のカルシウムを区分できないこと」の解消を図った方法である。	×	×	×	高価		参1-コンクリート診断技術'02 p134 マ1-コンクリートの試験・分析マニュアルP43	1)ICP発光分光分析装置(島津製作所・パーキンエルマー・ジャパン)	
			グルコン酸法	セメント協会法の欠点である「セメント水和物中のカルシウムと骨材中のカルシウムを区分できないこと」の解消を図った方法である。	×	×	×	やや高価		参1-コンクリート診断技術'02 p134 マ1-コンクリートの試験・分析マニュアルP44		
	遮蔽性	透水係数	インプット法	一定の圧力の水を作用させ、一定時間内に圧入した首量または浸透深さによってコンクリートの水密性を評価する。	×				やや高価		マ1-コンクリートの試験・分析マニュアルP137	
			アウトプット法	一定の圧力で直接供試体に水を作用させ、単位時間に単位断面を流して流出した水量を計り、圧力と流出量との関係から透水性を求める方法	×				やや高価		マ1-コンクリートの試験・分析マニュアルP138	1)透水試験装置
		透気係数	透気試験	一定の圧力の空気を試験体に作用させ、空気の流れが定常になった後、流量を測定し、ダルシー則より透気係数を求める。	×				やや高価		マ1-コンクリートの試験・分析マニュアルP140	1)透気試験装置

コンクリートの損傷度に関する試験・分析(1/3)

調査対象		調査目的	方法	概要	普及度・一般性	簡便さ・熟練度	作業効率	費用	測定精度	準拠規準・マニュアル等	機器種類
コンクリートの損傷度	中性化深さ	中性化範囲の測定 鉄筋腐食の予測	フェノールフタレイン法	コア試験体を割製し、割裂面にフェノールフタレインアルコール1%溶液を噴霧する。一般にPH8.6以上で赤色に着色する。この未着色部分が中性化深さである。				安価	pH8.6以上で着色する。	マ1)JCI炭酸化研究委員会報告書:コンクリートの炭酸化に関する研究の現状、1993	フェノールフタレイン1%アルコール溶液
			示差熱重量分析	コア試験体を深さ毎にスライスしそれぞれ微粉末試料を作成する。この試料を常温から1000程度まで定速で昇温することにより、水酸カルシウムおよび炭酸カルシウム量を把握するものである。	×	×	×	やや高価	水酸化カルシウムと炭酸カルシウムの量から判断するので、精度は高い。	参1)福島敏夫ほか:コンクリートの中性化深さの物理化学的意味に判断するので、精度は高い。セメント・コンクリート論文集、No43,pp.424-429,1989	示差熱重量分析装置
			EPMA	試験体の炭素の分布を調べるもので、その結果から炭酸化した範囲を測定する。	×	×	×	高価	炭素の分布から中性化深さを求めるので精度は高い。	参1)小林一輔:コンクリートの炭酸化に関する研究()、生産研究、Vol.40, No.11, pp.570-572,1988	X線マイクロアナライザ
	塩化物イオン濃度	塩化物イオン濃度の測定 鉄筋腐食の予測	重量法	硫酸酸性溶液中で、塩化物イオンが銀イオンと反応して生じる塩化銀(沈殿物)の重量を測定することにより、塩化物イオン量を算出する。 Cl ⁻ +Ag ⁺ AgCl(白色沈殿物)				やや高価	他の方法とさほど差はない	規1)JCI-SC4「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法」、コンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法ならびに規準(案)、日本コンクリート工学協会、1987.4	
			容積法	指示薬としてクロム酸カリウムを用い、硝酸銀溶液で塩化物イオンを滴定する方法である。クロム酸イオンの存在下で塩化物イオンを含有した溶液に硝酸銀溶液を滴下していくと、塩化銀の方がクロム酸銀よりも溶解度が小さいために先に沈殿が生じる。塩化物イオンが塩化銀として完全に沈殿した後、続けて滴下される余剰の硝酸銀とクロム酸が反応し、赤褐色のクロム酸銀が生じる。この呈色をもって終点とする方法である。				やや高価	他の方法とさほど差はない	規1)JCI-SC4「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法」、コンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法ならびに規準(案)、日本コンクリート工学協会、1987.4	
			吸光度法	塩化物イオンを含む溶液中にクロム酸銀を加えると、塩化物イオンが塩化銀となり、クロム酸イオンが遊離生成する。このクロム酸イオンの特性吸収波長領域における吸光度法を測定することにより、塩化物イオン量を求める方				やや高価	他の方法とさほど差はない	規1)JCI-SC4「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法」、コンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法ならびに規準(案)、日本コンクリート工学協会、1987.4	

コンクリートの損傷度に関する試験・分析(2/3)

調査対象	調査目的	方法	概要	普及度・一般性	簡便さ・熟練度	作業効率	費用	測定精度	準拠規準・マニュアル等	機器種類
コンクリートの損傷度	塩化物イオン濃度 鉄筋腐食の予測	電気化学的方法	反応そのものは重量法と同様、硝酸銀溶液を用いた塩化物イオンの沈殿滴定法である。反応の当量点近傍で被測定液の特性に大きな変化が生じるのを電極電位の測定から把握する方法である。指示薬のように呈色の変化を見るのではなく、電気化学的な変化を捉えるので微量分析にも適用しうる。指示電極として塩化物イオン量選択性電極を使用する。 コンクリート試料を対象として試験を行った場合、試験結果は全塩分量および可溶性塩分量として示される。				やや高価	他の方法とさほど差はない	規1)JCI-SC4「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法」、コンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法ならびに規準(案)、日本コンクリート工学協会、1987.4	AUT-501自動滴定装置;東亜電波工業 など
	凍害 凍害発する可能性	骨材の品質	使用した骨材の物性他が吸水率3%以下、安定性損失重量12%以下であると耐凍害性に得する。またコンクリートの場合は、凍結融解試験の結果が一般に60%以下だと耐凍害性に得する				高価 凍結融解試験36万円/3本	精度は高い	規1)コンクリートの凍結融解試験方法(JIS1148-2001)	
	凍害深さ	超音波伝播速度 細孔径分布	コンクリート表面から深さ毎に超音波伝播速度や細孔径分布を測定する。	×	×	×	高価 超音波伝播速度:10万円/箇所、細孔径分布:5万円/試料	精度はやや高い	参1)山下英俊ほか:超音波伝播速度を用いた凍害深さの推定、コンクリート工学論文集、第7巻第2号、pp.179-186,1996	エルソニック;東横エルメス など

コンクリートの損傷度に関する試験・分析(3/3)

調査対象	調査目的	方法	概要	普及度・一般性	簡便さ・熟練度	作業効率	費用	測定精度	準拠規準・マニュアル等	機器種類
アルカリ骨材反応	アルカリ骨材反応 今後の進行予測	JCI-DD2法	<p>・促進条件 温度40℃、湿度100%の条件下にて養生</p> <p>・判定基準 阪神高速公団 全膨張量が0.1%を超える場合、有害と判定する。 建設省 建設省総合プロジェクト「コンクリートの耐久性向上技術の開発」では40℃、100%R.H.の条件下に13週間養生し、0.05%以上の膨張量を示すものを有害または潜在的有害と判定する。</p>				やや高価		規1)コンクリートのアルカリシリカ反応性判定試験方法(案)(JCI-AAR-3-1987) 参1)コンクリート診断技術 02[基礎編]、日本コンクリート工学協会、pp.172	
		デンマーク法	<p>・促進条件 温度50℃の飽和NaCl溶液中に浸漬</p> <p>・判定基準 試験材齢3ヶ月での膨張量で以下のように判定する。 0.4%以上:膨張性あり 0.1~0.4%:不明確 0.1%未満:膨張性なし</p>				やや高価		参1)コンクリート診断技術 02[基礎編]、日本コンクリート工学協会、pp.172	
		カナダ法 (NBRI法)	<p>・促進条件 温度80℃の1NのNaOH溶液中に浸漬</p> <p>・判定基準 ASTM C 1260-94の判定基準: 試験開始後14日間での膨張量で以下のように判定する。 0.1%以下の場合:無害 0.10~0.20の場合:無害 (この場合、14日以降も更に試験を継続する。) 0.20%以上の場合:潜在的に有害な膨張率</p>				高価		参1)コンクリート診断技術 02[基礎編]、日本コンクリート工学協会、pp.172	
化学的侵食	侵食深さを予測する	劣化診断等による測定	中性化深さと同じようにコア試験体を割裂し割裂面に特殊な診断薬をスプレーする。硫酸が浸透していない健全な部分だけが赤褐色に発色し硫酸劣化している部分は発色しない。発色しない部分までが劣化深さである。				安価			

鉄筋の物性、劣化程度に関する試験・分析

調査対象		調査目的	方法	概要	普及度・一般性	簡便さ・熟練度	作業効率	費用	測定精度	準拠規準・マニュアル等	機器種類
鉄筋	腐食、防食	コンクリート中の鋼材の腐食評価 残存耐力の推定	腐食面積率	コンクリート構造物から取り出した鉄筋に対して、腐食状況を正確に写し取り展開図を作成する。更に腐食部分の面積をプラニメータや画像処理等により測定する。				やや高価	良い。但し調査箇所数が限定される場合が多い。	参-1「コンクリート診断技術'01」 p155 規-1「コンクリート中の鋼材の腐食評価方法」(JCI-SC1)	プラニメータ
			重量減少率	コンクリート構造物から取り出した鉄筋の表面に付着したモルタルを除去し、鉄筋重量を測定し錆を除去した後、再度鉄筋重量を測定する。				やや高価	良い。腐食前の鉄筋重量は通常未知なので計算上の値を使う。	参-1「コンクリート診断技術'01」 p155 規-1「コンクリート中の鋼材の腐食評価方法」(JCI-SC1)	
	曲げ強度	残存耐力の推定	曲げ試験	押曲げ法、巻付け法 Vブロック法 試験片を曲げ装置から取り外した後、わん局部外側の裂け傷その他の欠点の有無を肉眼で観察する。				やや高価	良い。	規-1「金属材料曲げ試験方法」(JIS Z 2248-1996)	
	引張強度	残存耐力の推定		オフセット法、永久伸び法 全伸び法				やや高価	良い	規-1「金属材料引張試験方法」(JIS Z 2241-1998)	

骨材の物性に関する試験・分析

調査対象	調査目的	方法	概要	普及度・一般性	簡便さ・熟練度	作業効率	費用	測定精度	準拠規準・マニュアル等	機器種類	
骨材	反応性 アルカリ骨材反応に対する有害、無害判定	偏光顕微鏡法 走査型電子顕微鏡法 粉末X線回折法	使用骨材の岩種や骨材に含まれる反応性鉱物の種類を調べることにより、骨材のアルカリ骨材反応性を間接的に推定する。	小 実施できる機 関は限られる	×	×	高価	推測程度 骨材のアルカリシリカ反応性は骨材の粒径やその混合比率により相違するので、正確に判定することは困難である。	参-1「コンクリート診断技術'01」 p169 参-2「アルカリ骨材反応の診断」小林一輔編集	偏光顕微鏡、偏光投影機 メーカー：(株)ニコン、オリンパス等 価格：50万～150万程度 X線回折装置 メーカー：(株)リガク、(株)島津製作所等 価格：700万～2000万程度 走査電子顕微鏡 メーカー：日本電子(株)、(株)日立製作所等 価格：小型500万程度、大型1000万～2000	
		アルカリ骨材反応に対する有害、無害判定	化学法	粒度0.15～0.3mmに調整した骨材試料25gと1NのNaOH由応益を80の温度条件で24時間保持したときに得られたアルカリ濃度減少量と溶解シリカ量で判断する。				高価	やや良 判定できない骨材もあることに留意する。	参-1「コンクリート診断技術'01」 p1 規-1「骨材のアルカリシリカ反応性試験方法」(化学法) (JIS A 1145-2001)	恒温水槽、電気炉等
		化学法に同様	改良化学法	化学法のアルカリ濃度減少量(Rc)と溶解シリカ量(Sc)の経時変化を求め、これらから得られる指標Rc0とSc24を用いて、コンクリートとして有害な膨張量を生じない原価のアルカリ量を化学的に推定する。(JSCE-C 511-2001)				高価	やや良 判定できない骨材もあることに留意する。	規-1「コンクリート用骨材のアルカリシリカ反応性評価試験方法」(改良化学法) (JSCE-C 511-2001)	恒温水槽、電気炉等
	吸水性	骨材の吸水特性	吸水率試験	吸水率試験用試料を0.1gまで計った後、105±5で一定質量となるまで乾燥し、デジケータ内で室温まで冷やし、その質量を計測する。				安価	良	規-1「粗骨材の密度及び吸水率の試験方法」(JIS-A-1109-1999) 規-2「細骨材の密度及び吸水率の試験方法」(JIS-A-1110-1999)	ピクノメーター、乾燥機等
	モルタルの膨張反応性	アルカリ骨材反応に対する有害、無害判定	モルタルバー法	セメントの等価アルカリ量(Na eq.)が1.2%になるように、水酸化ナトリウムを添加したモルタル供試体を湿気箱(温度40、相対湿度100%)に保存し、所定間隔でのモルタル膨張量を測定する。			×	高価	やや良 膨張の進行によっては適切に判定できないものがある。	参-1「コンクリート診断技術'01」 p1 規-1「骨材のアルカリシリカ反応性試験方法」(モルタルバー法) (JIS A 1146-2001)	恒温貯蔵容器、モルタル製作機器 製砂器(ロッドミル等)
			促進モルタルバー法	温度80の1NのNaOH溶液中に浸漬したモルタル供試体の14日間の膨張量を測定する。(ASTM C 1260)				高価	やや良 膨張の進行によっては適切に判定できないものがある。	参-1「コンクリート診断技術'01」 p1 規-1「骨材のアルカリシリカ反応性試験方法」(促進モルタルバー法) (ASTM C 1260)	恒温貯蔵容器、モルタル製作機器 製砂器(ロッドミル等)
	コンクリートの膨張反応性	アルカリ骨材反応に対する有害、無害判定	コンクリートプリズム法	コンクリート用骨材のアルカリシリカ反応性を、実際のコンクリート供試体で次試験する。	小			高価		参-1「コンクリート診断技術'01」 p169 規-1「骨材のアルカリシリカ反応性試験方法」(コンクリートプリズム法) (ASTM C 1293)	

骨材用試験方法

基準	年度	試験方法	適用範囲	備考
JIS A 1102	1999	骨材のふるい分け試験方法	コンクリートに用いる骨材のふるい分け試験	
JIS A 1103	1997	骨材の微粒分量試験方法	骨材に含まれる粒子のうち、網ふるい175 μmを通過するものの量を定める試験	
JIS A 1104	1999	骨材の単位容積質量及び実積率試験方法	コンクリートに用いる骨材の単位容積質量及び実積率の試験	
JIS A 1105	1993	細骨材の有機不純物試験方法	モルタル及びコンクリートに用いる細骨材の中に含まれる有機不純物の有害の概略を調べる試験	
JIS A 1109	1999	細骨材の密度及び吸水率試験方法	細骨材の密度及び吸水率試験	
JIS A 1110	1999	粗骨材の密度及び吸水率試験方法	粗骨材の密度及び吸水率試験	
JIS A 1111	2001	細骨材の表面水率試験方法	細骨材の表面水率の試験	
JIS A 1121	2001	ロサンゼルス試験機による骨材のすりへり試験方法	ロサンゼルス試験機による粗骨材のすりへり試験	
JIS A 1122	1998	硫酸ナトリウムによる骨材の安定性試験方法	硫酸ナトリウムの結晶圧による破壊作用に対する抵抗性を基準とする骨材の安定性試験	
JIS A 1125	2001	骨材の含水率試験及び含水率に基づく表面水率の試験方法	骨材の含水率を乾燥前後の質量差によって求める試験及び表面水率を含水率によって求める試験	
JIS A 1126	2001	ひっかき硬さによる粗骨材中の軟石量試験方法	ひっかき硬さによる粗骨材中の軟石量試験方法	
JIS A 1134	1999	構造用軽量細骨材の密度及び吸水率試験方法	構造用軽量細骨材の密度及び吸水率試験方法	
JIS A 1135	1999	構造用軽量粗骨材の密度及び吸水率試験方法	構造用軽量粗骨材の密度及び吸水率試験方法	
JIS A 1137	1998	骨材中に含まれる粘土塊量の試験方法	骨材中に含まれる粘土塊量の試験	
JIS A 1141	2001	骨材中の密度1.95g/cm ³ の液体に浮く粒子の試験方法	骨材中の密度1.95g/cm ³ より軽い粒子を近似的に測定する試験	
JIS A 1142	2001	有機不純物を含む細骨材モルタルの圧縮強度による試験方法	JIS A 1105において試験溶液の色が標準色より濃くなった細骨材の有機不純物の影響をモルタル圧縮強度により試験する方法	
JIS A 1143	2001	軽量粗骨材の浮率率の試験方法	構造用軽量粗骨材の浮率率の試験	
JIS A 1145	2001	骨材のアルカリシリカ反応性試験方法(化学法)	コンクリート用骨材のアルカリシリカ反応性を、化学的な方法によって比較的迅速に判断する試験 粒度0.15～0.3mmに調整した骨材試料25gと1NのNaOH溶液25mlを80℃の温度条件で24時間保持した時に得られたアルカリ濃度減少量(Rc)と溶解シリカ量(Sc)よりアルカリ骨材反応に対する反応性を判断する試験	モルタルバー法を実施する際には高いアルカリシリカ反応性と顕著なベシマム現象を留意する必要がある。
JIS A 1146	2001	骨材のアルカリシリカ反応性試験方法(モルタルバー法)	モルタルバーの長さ変化を測定することによって、骨材のアルカリシリカ反応性を判定する方法 セメントの等価アルカリ量(Na ₂ O eq.)が1.2%となるように、水酸化ナトリウムを添加したモルタル供試体を湿気箱(温度40℃、相対湿度100%)に保存し所定の間隔でモルタルの膨張量を測定してアルカリシリカ反応に対する反応性を判断する試験	判定には長時間を必要とするとともに、測定期間中に供試体内部より比較的多量の水酸化物イオンが漏出することが問題である。
JIS A 5011-1	1997	付属書1 高炉スラグ骨材の化学成分分析		
JIS A 5011-1	1997	付属書2 高炉スラグ骨材の貯蔵の安定性の試験		
JIS A 5011-2	1997	付属書 フェロニッケルスラグ骨材の化学成分分析方法		
JIS A 5011-3	1997	付属書 鋼スラグ骨材の化学成分方法		
ASTM基準				
ASTM C 289		化学法	JIS A 1145	
ASTM C 1260		促進モルタルバー法	コンクリート用骨材のアルカリシリカ反応性を、温度80℃の1NのNaOH溶液中に浸漬したモルタル供試体の膨張量を測定する試験	
ACTM C 1293		コンクリートプリズム法	コンクリート用骨材のアルカリシリカ反応性を、実際のコンクリート供試体で膨張量を測定する試験	
土木学会基準				
JSCE-C 502	1999	海砂の塩化物イオン含有率試験方法(滴定法)	海砂の塩化物イオン含有率を滴定法によって測定する試験	
JSCE-C 503	1999	海砂の塩化物イオン含有率試験方法(簡易測定器法)	海砂の塩化物イオン含有率を簡易な塩化物イオン含有率測定器によって測定する試験	
JSCE-C 511	2001	コンクリート用骨材のアルカリシリカ反応性評価試験方法(改良化学法)(案)	JIS A 1145のアルカリ濃度減少量(Rc)と溶解シリカ量(Sc)の経時変化を求め、これから得られる指標、Rc0とSc24を用いて、コンクリートとして有害な膨張を生じさせない限界のアルカリ量を化学的に推定する試験	
その他				
		岩石学的試験 (偏光顕微鏡観察、粉末X線回折、SEM-EDXA、赤外線吸収スペクトル分析)		

鋼材用試験方法

基準	年度	試験方法	適用範囲	備考
JIS Z 2241	1998	金属材料引張試験方法	金属材料の引張試験	
JIS Z 2248	1996	金属材料曲げ試験方法	金属材料の曲げ試験	
JCI-SC1	1987	コンクリート中の鋼材の腐食評価方法	鉄筋の腐食面積率および腐食による減少重量試験	プラニメータおよび画像処理


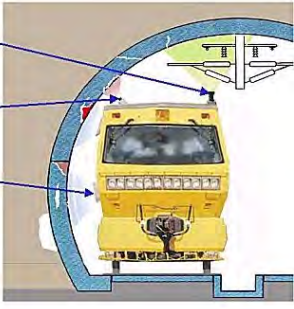
1.2【現地における調査】

大分類	小分類	手法	頁	
a. 構造物全体	全体的な劣化の把握 (外観、表層の変状)	目視	参1-17	
		デジタルカメラ、高解像度CCDカメラによる撮影	参1-18	
		連続写真(パノラマカメラ)	参1-19	
		連続走査画像	参1-20	
		スリットカメラ	参1-21	
		レーザー	参1-22	
		赤外線法	参1-23	
	全体的な劣化の把握 (構造的変状)	振動測定による方法	参1-24	
		光ファイバーによるひずみ計測	参1-25	
		アコースティック・エミッション法	参1-26	
b. コンクリート	ひび割れ深さの測定	はつりによる方法	参1-27	
		コア採取による方法	参1-28	
		超音波法(直角回折法)	参1-29	
		超音波法(T-Tc法)		
		ガス検知法	参1-30	
	中性化深さの測定	はつり法	参1-31	
		ドリル法	参1-32	
	強度推定	反発硬度法	参1-33	
		局部破壊試験法(プルオフ法、プルアウト法、ブレイクオフ法)	参1-34	
		超音波法(超音波伝播速度)	参1-35	
		複合法	参1-36	
	乾燥度・吸水性	乾燥度試験紙法	参1-37	
		高周波水分計による測定		
		簡易吸水速度法	参1-38	
	内部空隙、版厚	超音波法		
		弾性波法(衝撃弾性波法、打音法)	参1-39	
		電磁波レーダー法	参1-40	
		X線法	参1-41	
	c. 鉄筋	鉄筋位置の測定	電磁誘導法	参1-42
			電磁波レーダー法	参1-43
X線法			参1-44	
鉄筋腐食状況		はつり法	参1-45	
		自然電位法	参1-46	
		分極抵抗法	参1-47	
		電気抵抗法	参1-48	

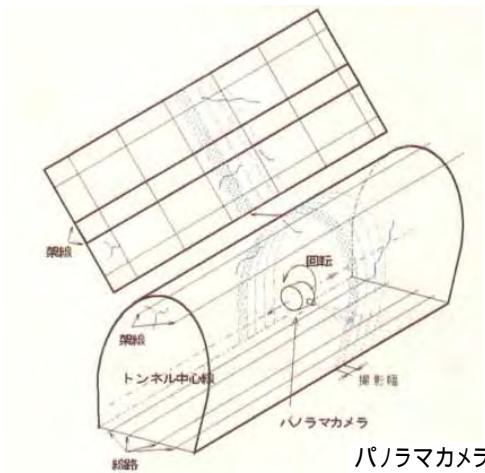
a. 構造物全体(外観の変状)

項目	目視
概要	調査員が近接して目視、または双眼鏡等を使用して観察する。 必要に応じて、打音により浮きの有無を調査する。
適用対象・範囲	コンクリート構造物全般
機器・装置	・双眼鏡 ・必要に応じて高所作業車等の仮設足場 ・カメラ
調査方法	調査範囲の特定 対象面の観察、記録 必要に応じて打音調査を行う 変状を図面上に記録する 高所や危険箇所については調査方法自体よりも、近接方法が問題となる。 ・仮設足場、高所作業車 ・橋梁点検車、トンネル点検車 ・ラジコンヘリ搭載CCDカメラ
判断基準	・各種点検マニュアル、劣化度判定基準による。
特徴	・最も簡易であり、全ての調査において基本となる調査である。
留意点	・現場での手間を要する。 ・調査員による個人差が生じる。 ・近接するための足場が必要となることがある。

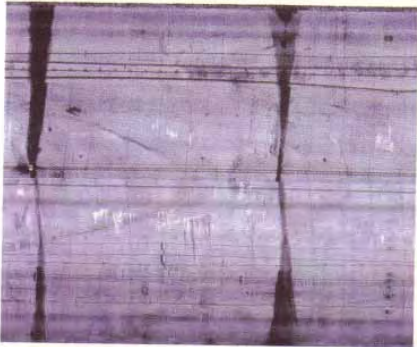
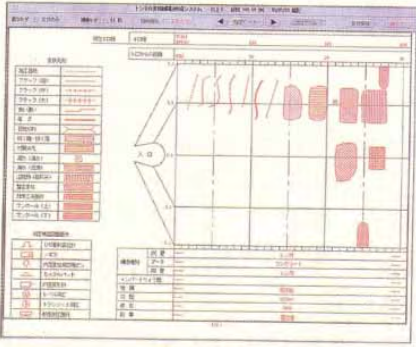
a. 構造物全体 (外観の変状)

項目	デジタルカメラ、高解像度CCDカメラによる撮影
概要	高解像度のデジタルカメラまたは高解像度CCDカメラにより、可視情報としての変状を記録する。パソコン処理により、展開図の作成や、ひび割れの抽出ができる。
適用対象・範囲	対象はコンクリート構造物全般であるが、トンネルや橋梁の床版における適用が進んでいる
機器・装置	<p>・デジタルカメラ、高解像度CCDカメラ</p> <p>トンネルの調査は、電源、照明、撮影・記録設備を備えた専用車で行うことが多い。</p> <p style="text-align: center;">営団地下鉄の例 赤外線+CCDカメラ搭載診断車</p> 
調査方法	<p>撮影範囲の設定</p> <p>撮影・記録</p> <p>画像から変状の抽出</p> <p>現段階では、パソコンによる自動抽出は困難。オペレータが画像上で抽出する。</p> <p>画像のデジタル処理(幾何補正、貼り合わせ等)</p> <p>変状抽出図の作成、数量積算</p> <div style="display: flex; align-items: center;">  <div style="margin-left: 20px;">   </div> </div> <p style="text-align: center;">ひび割れの抽出例</p> <p style="text-align: center;">CCDカメラとサーモカメラを搭載した測定車の例</p>
判断基準	<p>・各種点検マニュアル、劣化度判定基準による。</p> <p>・過去の撮影データがある場合には、経年による変化を把握しやすい。</p>
特徴	<p>・個人差のない客観的なデータとして保存することができる。</p> <p>・パソコン処理により、幾何補正や貼り合わせ処理、展開図の作成ができる。</p> <p>・現段階ではひび割れ幅の抽出限界は0.2mm程度。</p> <p>・今後、デジタルカメラとパソコンの性能向上により、精度と能率の向上が期待できる。</p>
留意点	<p>・画素数と撮影範囲の関係により、画像上で認識できるひび割れ幅が決まるので、必要な分解精度に合わせて、撮影距離やズームを設定する。</p> <p>・対象面が汚れていたり、暗いとひび割れを認識しづらくなる。</p>

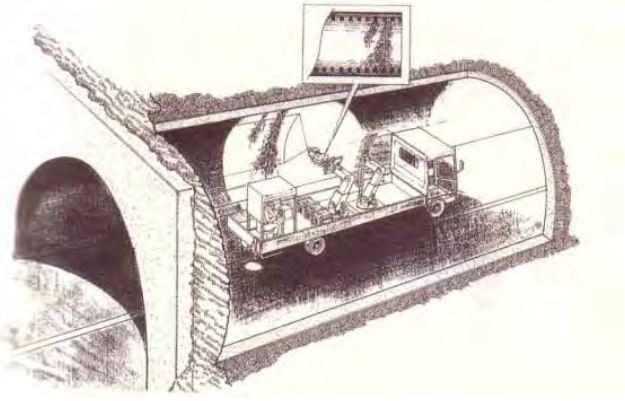
a. 構造物全体 (外観の変状)

項目	連続写真(パノラマカメラ)
概要	パノラマカメラによりトンネル壁面を写真撮影し、画像データをコンピュータ処理することにより、従来の人手によるトンネルの検査・管理の合理化を図る。また、連続壁面展開図を用いて、トンネルの変状を客観的かつ正確に記録することができる。
適用対象・範囲	トンネル覆工
機器・装置	
調査方法	<p>パノラマカメラをトンネル中心軸に据え付けて、カメラを回転させながら輪切り方向に壁面の画像を撮影する。これをパソコンに取り込んで画像処理によりつなぎ合わせ、連続壁面展開図を作成する。</p>  <p style="text-align: right;">パノラマカメラによる撮影方法</p>
判断基準	・幅0.2～0.3mmのひび割れも検出可能
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・現場作業の効率化を図ることができる。 ・調査者の主観によらない視覚化ができる。
留意点	・撮影速度は一晩で1km

a. 構造物全体 (外観の変状)

項目	連続走査画像
概要	高解像度電子カメラであるラインセンサカメラを用い、トンネル覆工面の画像を連続的に撮影し、電子データとして記録することにより、トンネル覆工の検査業務の合理化を図る。撮影されたデジタル画像を合成することにより、覆工面の展開画像を作成できる。
適用対象・範囲	トンネル覆工
機器・装置	
調査方法	トンネル断面方向と走査方向が一致するようにラインセンサカメラを点検車両に取り付け、走行しながらトンネル覆工の連続走査画像を撮影する。その後、撮影したデジタル画像をコンピュータを用いて合成する。この画像からオペレータが覆工の変状展開図を作成する。 <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">   </div> <p style="text-align: center;">高解像度の壁面画像 変状展開図</p>
判断基準	・幅1mmのひび割れまで検出可能
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・現場作業の効率化を図ることができる。 ・撮影時の走行速度は30km / h ・調査者の主観によらない視覚化ができる。 ・デジタルデータなので画像の加工が自由にできる。
留意点	


a. 構造物全体 (外観の変状)

項目	スリットカメラ
概要	スリットカメラを用いて対象面を連続撮影する。トンネルの場合は横断方向を数面に区分して撮影する。画像処理によって合成し、覆工面の展開画像を作成する。ひび割れのほか、漏水や溶脱物などをカラー情報として把握できる。
適用対象・範囲	トンネル覆工、側壁、高欄、路面等
機器・装置	
調査方法	<p>スリットカメラはシャッターの代わりに幅の狭いスリット開口部がある。スリットカメラのフィルム送り速度を走行速度(被写体の移動速度)に同期させることにより、走行しながら被写体の連続画像を得ることができる。</p> 
判断基準	・幅1mmまでのひび割れを検出可能。
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・撮影時の走行速度は30～50km/h。 ・現場作業の効率化を図ることができる。 ・調査者の主観によらない視覚化ができる。
留意点	

a. 構造物全体 (外観の変状)

項目	レーザー
概要	<p>コンクリート構造物の表面をレーザーでスキャンし、画像処理することによって、ひび割れ展開図を作成することができる。</p>
適用対象・範囲	トンネル覆工、側壁、高欄、路面等
機器・装置	
調査方法	<p>レーザー光線を細かいビームスポットにしてコンクリート壁面を走査し、反射光量の強弱を順次計測することにより、壁面のひび割れを収録する。</p> <div data-bbox="579 891 1129 1350" data-label="Image"> <p>レーザーキャッチャーでレーザー光線をトンネル壁面に照射し、壁面で反射した光線の強弱を光センサーにより読み取り、2次元図面にデジタル化し、画面上で表示することが出来ます。このレーザー光線の照射角度が一定を維持することで、壁面に沿って移動することが出来ます。</p> <p>レーザーによるトンネル測定車</p> </div>
判断基準	<ul style="list-style-type: none"> 幅0.5mmのひび割れを検出できる。
特徴	<ul style="list-style-type: none"> 測定時の走行速度は4～7km/h以下。 暗所でも照明なしで使用できる。
留意点	

a. 構造物全体

項目	赤外線法
概要	サーモカメラにより表面温度分布を画像化し、表層コンクリートの剥離や漏水状況を面的に把握することができる。
適用対象・範囲	対象はコンクリート構造物全般であるが、トンネル等の温度変化の小さい構造物では人工的に加熱する必要がある。
機器・装置	<ul style="list-style-type: none"> ・サーモカメラ ・デジタルカメラ(確認用) ・加熱装置(必要に応じて)  <p>最新型サーモカメラの</p>
調査方法	<p>撮影対象面と最適撮影時刻の設定</p> <p>日射を熱源とする場合には、対象面に当たる日射量のピーク時、日射が当たらない面については外気温のピーク時が最適撮影時刻となる。</p> <p>赤外線画像の撮影</p> <p>変状や汚れの確認のために、可視画像も必ず撮影する。浮き部判定の精度を上げるため、必要に応じて夜間にも撮影する。</p> <p>浮き部の抽出</p> <p>赤外線画像の温度分布から浮き部を抽出する。現段階で、浮き部の自動抽出は困難。</p> <p>画像のデジタル処理</p> <p>必要に応じて赤外線画像の幾何補正や貼り合わせ処理を行う。</p> <p>浮き部抽出図の作成、数量算出</p> <p>鉄道トンネルでは、人工加熱装置と一体となった測定車が実用化されている。</p>  <p>橋梁の赤外線画像の例</p>
判断基準	<ul style="list-style-type: none"> ・浮き部と認識するのに、周辺健全部との温度差が日射が当たる面では1℃、日射が当たらない面または夜間では0.5℃以上が必要。但し汚れ程度が大きい場合には、より大きな温度差が必要となる。
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・非接触で大面積の情報を短時間で取り込むことができる。 ・検知できる浮き部の深さは、実用上は50mm程度まで。日射が当たらない面では、30mm程度まで。
留意点	<ul style="list-style-type: none"> ・通常は日射または外気温変動が熱源となるので、赤外線画像の撮影は晴天日に行う。 ・汚れや補修跡など、浮き以外にも温度差を生じる要因があるので、可視画像や昼夜の赤外線画像を対比して、浮き部抽出時にはそれらの要因を排除する。

a. 構造物全体 (構造的な変状)

項目	振動測定による方法
概要	<p>車輛通行時、または加振装置を用いて、固有周期や応答レベルを測定する。 設計値と比較して、剛性低下の有無を評価する。</p>
適用対象・範囲	<p>主に橋梁</p>
機器・装置	<p>・振動測定器(加速度センサ、レコーダー、周波数解析装置) ・加振装置</p>
調査方法	<p>加速度センサの取り付け 通常状態での振動測定</p> <p>必要に応じて、通行規制し、起振機による加振または重量物を落下させた場合の振動を測定する。</p> <p>振動レベルおよび固有周期、振動モードを求め、設計値と比較する。 剛性低下の評価</p> <div data-bbox="635 1064 1273 1344" style="text-align: center;"> <p>加速度波形の例</p> </div>
判断基準	<p>・設計による剛性に対する低下率で評価</p>
特徴	<p>・全体的な剛性評価を大かりな装置を使用せずに行える。 ・再現性が良いので、経時変化を把握するのに適している。</p>
留意点	<p>・局部的な損傷や、初期段階の劣化は剛性低下として現れにくい。 ・初期剛性の影響が大きいため、この結果から設計荷重時の状態を直接評価することはできない。</p>


a. 構造物全体 (構造的な変状)

項目	光ファイバーによるひずみ計測																																													
概要	<p>支点間に取り付けた光ファイバーのひずみを計測する。</p> <p>一時の測定ではなく、長期のモニタリングに適する。</p>																																													
適用対象・範囲	橋梁、トンネル、岩盤など																																													
機器・装置	<p>光ファイバー計測方法の種類</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ファイバークレーティング (FBG) 応力センサ (ひずみ・温度・変位・圧力) ・ブリルアン散乱光応用センサ (ひずみ分布・温度分布) ・ラマン散乱光応用センサ (ひずみ分布・温度分布) ・レイリー散乱光応用センサ (光損失分布・ひがみ・変位) ・光学ストランド (赤外線センサ) OSMOS (ひずみ・変位・圧力) <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  <p>AFRP被覆 光ファイバ 0.25mm 樹脂被覆(凸凹加工) コンクリート構造物用センサケーブル</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>光計測システム概念図</p> <p>光センサ類(ひずみ計、傾斜計、etc.) 光ファイバセンサ(ひずみ、温度)</p> <p>接続BOX 接続BOX 多心光ケーブル (0~20km) 光スイッチ FBG-IS B-OTDR (測定器) 監視用パソコン LAN、携帯電話、公衆回線</p> </div> </div>																																													
調査方法	<p>モニタリング位置の選定</p> <p>光ストランドの取り付け</p> <p>常時計測</p>																																													
判断基準	・対象構造物、岩盤等の特性による																																													
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・電氣的ノイズの影響を受けない。 ・長距離の信号伝送が可能 ・腐食性雰囲気での耐性に優れる。 ・岩盤やトンネルの崩落予測に適する ・センサごとの配線が不要 (直列配置できる) 																																													
留意点	<p style="text-align: center;">コンクリート構造物に使用実績のある光ファイバひずみセンサの種類と主な特性</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>項目</th> <th>BOTDR</th> <th>FBG</th> <th>OSMOS</th> <th>SOFO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>測定原理</td> <td>ブリルアン散乱光の周波数特性変化からひずみを、戻り時間から位置を計測</td> <td>ブラッグ光の波長特性変化からひずみを計測</td> <td>マイクロベンディングによる漏洩光量変化から変位を計測</td> <td>伸縮による光のパスの変化から変位を計測</td> </tr> <tr> <td>計測領域</td> <td>分散型 最長で数km 5~10cm間隔で収録可能</td> <td>多点型 1点は1~10cm程度 10点程度の多重化可能</td> <td>広域型 1~10m</td> <td>広域型 20cm~50m</td> </tr> <tr> <td>センサの構造</td> <td>通常の光ファイバを利用(被覆加工する場合あり)</td> <td>光ファイバにブラッグ格子を加工する</td> <td>光ファイバより線</td> <td>端部に反射面を設けた2本の光ファイバ</td> </tr> <tr> <td>分解性</td> <td>ひずみ分解能: ±30μ 距離分解能: 1m</td> <td>ひずみ分解能: ±4μ</td> <td>変位分解能: ±20μm (スモールレンジ)</td> <td>変位分解能: ±2μm</td> </tr> <tr> <td>容量</td> <td>30000μ (3%)</td> <td>10000μ (1%)</td> <td>計測長の0.5%</td> <td>伸び1%、縮み0.5%</td> </tr> <tr> <td>計測時間</td> <td>5~20分(静的計測のみ)</td> <td>0.02秒(動的計測可能)</td> <td>0.05秒(動的計測可能)</td> <td>数秒</td> </tr> <tr> <td>温度影響</td> <td>20μ / 程度</td> <td>10μ / 程度</td> <td>ほとんどなし</td> <td>影響なし</td> </tr> <tr> <td>国内実績</td> <td>建物基礎、トンネルなど数件の実績あり</td> <td>トンネルなど実績あり</td> <td>建物基礎、トンネルなど数件の実績あり</td> <td>橋梁、トンネルなど数件の実績あり</td> </tr> </tbody> </table>	項目	BOTDR	FBG	OSMOS	SOFO	測定原理	ブリルアン散乱光の周波数特性変化からひずみを、戻り時間から位置を計測	ブラッグ光の波長特性変化からひずみを計測	マイクロベンディングによる漏洩光量変化から変位を計測	伸縮による光のパスの変化から変位を計測	計測領域	分散型 最長で数km 5~10cm間隔で収録可能	多点型 1点は1~10cm程度 10点程度の多重化可能	広域型 1~10m	広域型 20cm~50m	センサの構造	通常の光ファイバを利用(被覆加工する場合あり)	光ファイバにブラッグ格子を加工する	光ファイバより線	端部に反射面を設けた2本の光ファイバ	分解性	ひずみ分解能: ±30μ 距離分解能: 1m	ひずみ分解能: ±4μ	変位分解能: ±20μm (スモールレンジ)	変位分解能: ±2μm	容量	30000μ (3%)	10000μ (1%)	計測長の0.5%	伸び1%、縮み0.5%	計測時間	5~20分(静的計測のみ)	0.02秒(動的計測可能)	0.05秒(動的計測可能)	数秒	温度影響	20μ / 程度	10μ / 程度	ほとんどなし	影響なし	国内実績	建物基礎、トンネルなど数件の実績あり	トンネルなど実績あり	建物基礎、トンネルなど数件の実績あり	橋梁、トンネルなど数件の実績あり
項目	BOTDR	FBG	OSMOS	SOFO																																										
測定原理	ブリルアン散乱光の周波数特性変化からひずみを、戻り時間から位置を計測	ブラッグ光の波長特性変化からひずみを計測	マイクロベンディングによる漏洩光量変化から変位を計測	伸縮による光のパスの変化から変位を計測																																										
計測領域	分散型 最長で数km 5~10cm間隔で収録可能	多点型 1点は1~10cm程度 10点程度の多重化可能	広域型 1~10m	広域型 20cm~50m																																										
センサの構造	通常の光ファイバを利用(被覆加工する場合あり)	光ファイバにブラッグ格子を加工する	光ファイバより線	端部に反射面を設けた2本の光ファイバ																																										
分解性	ひずみ分解能: ±30μ 距離分解能: 1m	ひずみ分解能: ±4μ	変位分解能: ±20μm (スモールレンジ)	変位分解能: ±2μm																																										
容量	30000μ (3%)	10000μ (1%)	計測長の0.5%	伸び1%、縮み0.5%																																										
計測時間	5~20分(静的計測のみ)	0.02秒(動的計測可能)	0.05秒(動的計測可能)	数秒																																										
温度影響	20μ / 程度	10μ / 程度	ほとんどなし	影響なし																																										
国内実績	建物基礎、トンネルなど数件の実績あり	トンネルなど実績あり	建物基礎、トンネルなど数件の実績あり	橋梁、トンネルなど数件の実績あり																																										

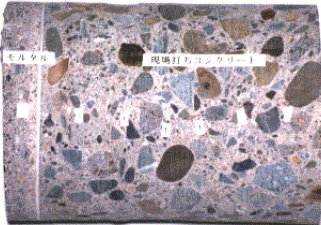
a. 構造物全体 (構造的な変状)

項目	コンクリートの損傷状況、欠陥の測定
手法名	アコースティック・エミッション法(AE法)
概要	<p>コンクリートのひび割れ発生にともなって発生し伝播する弾性波を検出する。</p> <p>供用中の過剰な交通荷重や地震などの異常な荷重などや鉄筋の腐食によりコンクリートに内部ひび割れが発生すれば弾性波として検出できる。</p> <p>コンクリート表面部にAEセンサを設置して計測すれば、ひび割れの常時監視に適用できる。</p>
適用対象・範囲	
機器・装置	<p>AE測定に必要な計測システムは変換子、増幅器、フィルターが必要である。</p> <p>検出されたAE信号は電子的に調整され、AE源の位置標定に必要な情報およびAE源の特性づけと、評価に必要な分析パラメータとして処理される。</p>
調査方法	<p>コンクリート表面にAE変換子を取り付け、最大変換子間隔を幾つかに等分した間隔ごとに、擬似AE源から一定振幅の擬似AE波を入力して、これをAE計測システムでAE尖頭値を測定する。</p> <p>AE計測システムの周波数帯域は、測定中に発生する外部雑音によっても支配される。そのため、AE変換子を設置した状態で測定した周波数帯域を考慮した上で選定する。</p>
判断基準	計測機器の分解能に依存するが、市販されている機器を用いた場合にはコンクリート材料で数mmの位置誤差を生じる。
特徴	連続監視への適用性が高いため、現在問題が指摘されている各種コンクリート構造物のひび割れ診断への展開が期待されている。
留意点	


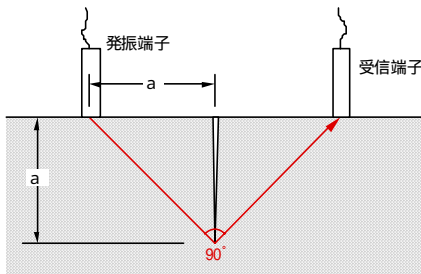
b. コンクリート

項目	ひび割れ深さの測定
手法名	はつりによる方法
概要	ひび割れ位置を、電動ピック等ではつり、ひび割れの深さや幅を測定する。
適用対象・範囲	・比較的浅いひび割れの場合 ・ひび割れが仕上げモルタルのみに生じたものか、躯体コンクリートに達しているかを判断する場合
機器・装置	・電動ピック ・たがね、ハンマー(小規模な場合)
調査方法	<p>調査対象とするひび割れの選定 幅の大きいひび割れ、漏水や構造耐力に対して影響度の大きいひび割れを選定する。 鉄筋探査器による鉄筋位置の測定 少しずつコンクリートをはつる。 なるべく鉄筋まではつり、鉄筋の腐食状態や中性化状況を把握する。</p>  <p>はつりによるひび割れ深さの測定</p>
判断基準	・ひび割れ先端の深さ(かぶり厚との関係) ・ひび割れ幅(鉄筋腐食や漏水に対する危険度の評価) ・ひび割れ部近傍における中性化の状況
特徴	・ひび割れ先端の深さと、任意の深さにおけるひび割れ幅を直接測定できる。 ・中性化試験を行うことにより、ひび割れの影響を知ることができる。
留意点	・破壊を伴うので、調査箇所数に制約を受けることが多い。 ・はつり粉がひび割れに入り込むため、微細なひび割れの測定はできない。 ・はつり箇所は速やかに無収縮モルタルで補修する。

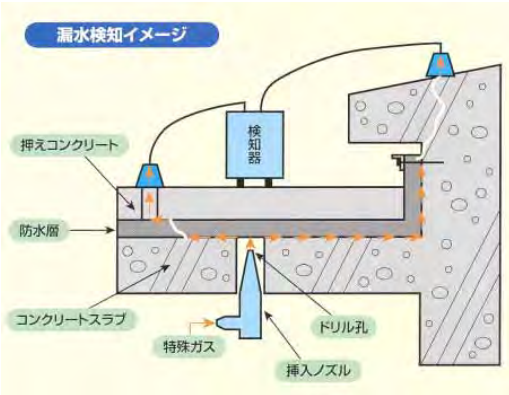
b. コンクリート

項目	ひび割れ深さの測定
手法名	コア採取による方法
概要	ひび割れ位置でコアを採取し、コア側面またはコアの採取孔にてひび割れ幅をクラックスケールやルーペで直接測定する。
適用対象・範囲	<ul style="list-style-type: none"> ・ひび割れが表面に現れている場合 ・コア採取程度の破壊が許容される場合
機器・装置	<ul style="list-style-type: none"> ・コアボーリングマシン 採取コアの径 ひび割れが深いと予想される場合～ 100mm程度 ひび割れが浅いと予想される場合～ 50mm程度
調査方法	調査対象とするひび割れの選定 幅の大きいひび割れ、漏水や構造耐力に対して影響度の大きいひび割れを選定する。 鉄筋探査器による鉄筋位置の測定 鉄筋を切断しない位置でコアボーリング 部材厚が大きい場合や、貫通採取できない場合には、適当な深さでコアを折って取り出す。 コアまたは採取孔を清水で洗浄した後、ひび割れ幅をクラックスケールやルーペで測定する。ひび割れによりコアの一体性が損なわれている場合には、採取孔で測定する。
	 <p>100mmコアによるひび割れ深さの測</p>
判断基準	<ul style="list-style-type: none"> ・ひび割れ先端の深さ(かぶり厚との関係) ・ひび割れ幅(鉄筋腐食や漏水に対する危険度の評価) ・表層と深部でのひび割れ幅の差 ひび割れの原因特定の資料となる。 ・ひび割れ部近傍における中性化の状況
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・ひび割れ先端の深さと、任意の深さにおけるひび割れ幅を直接測定できる。 ・中性化試験を行うことにより、ひび割れの影響を知ることができる。
留意点	<ul style="list-style-type: none"> ・破壊を伴うので、調査箇所数に制約を受けることが多い。 ・構造上必要な鉄筋を切断しない位置から採取する。 ・採取孔は速やかに、無収縮モルタルで補修する。

b. コンクリート

項目	ひび割れ深さの測定
手法名	超音波法(直角回折法)
概要	ひび割れを挟んで、発振端子と受振端子を当て、ひび割れの先端を超音波が直角に回折するときの位相の変化により、深さを求める。
適用対象・範囲	・表面にモルタル等の仕上げ層がないコンクリート面 ・ひび割れが表面に現れている場合
機器・装置	・超音波測定器 ・スケール 
調査方法	<p>コンクリート表面が風化していたり、厚みのある塗装がある場合には、ケレンし健全なコンクリート面を露出させる。</p> <p>鉄筋が密に配筋されている場合には、鉄筋探査器により鉄筋位置を測定する。</p> <p>ひび割れを挟んで、発信端子と受振端子を当て、両端子とひび割れとの距離が常に等しくなるように、徐々に端子間の距離を広げてゆく。</p> <p>ひび割れ先端での回折波を測定器が検知した時点で、ひび割れと端子間の距離を測定する。その距離が推定ひび割れ深さとなる。</p> <p>回折波の検出が明確でない場合には、端子を当てる位置や、ひび割れに対する角度を変えて数回測定する。</p>  <p style="text-align: center;">直角回折法</p>
判断基準	・ひび割れ深さとかぶり厚さの関係 ・貫通か非貫通か
特徴	・非破壊によりひび割れ深さを推定できる。 ・ひび割れ深さの推定にあたって、計算式を必要としない。
留意点	・端子を接触させる面が平滑であること ・端子の先端に接触剤としてグリスを付けるので、測定面が汚れる。 ・ひび割れ幅が小さい場合や、鉄筋が密に配置されている場合には、測定値がばらつくことがある。

b. コンクリート

項目	ひび割れ深さの測定
手法名	ガス検知法
概要	ひび割れが貫通しているか否かを調査する目的で使用する。 片面からガスを(CO2など)圧入し、反対面においてガス検知センサによるひび割れからのガスの漏洩の有無を調べる。
適用対象・範囲	両面が解放されている壁面やスラブ面
機器・装置	・ガス検知装置 ・圧入ガス ・シール材
調査方法	調査対象ひび割れの決定 ガス注入孔の穿孔と注入側ひび割れのシール 一方のひび割れからガス圧入、または中間部から圧入 出口と予想されるひび割れにガス検知器を設置 
判断基準	・貫通の有無 ・漏水源となっているひび割れを特定できる
特徴	・非破壊で貫通ひび割れを判定できる。 ・漏水経路のわからない場合に、漏水源となっているひび割れを特定するのに有効。
留意点	・ある程度ひび割れの入り口側と出口側を想定する必要がある。 ・ひび割れが内部で網目状に生じている場合には、入り口と出口の特定はできない。

b. コンクリート

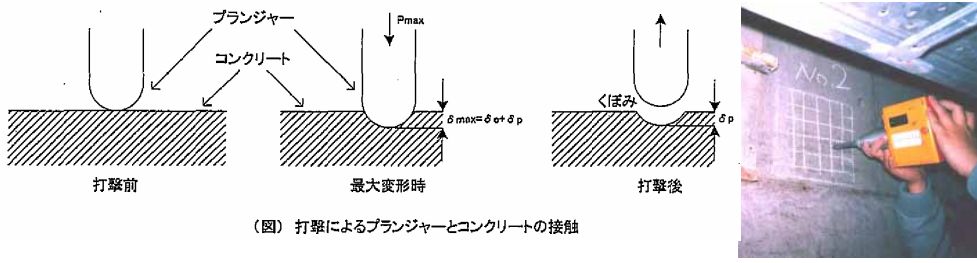
項目	中性化深さの測定
手法名	はつり法
概要	JIS A 1152「コンクリートの中性化深さの測定方法」フェノールフタレイン法 はつり面による測定
適用対象・範囲	鉄筋コンクリート構造物全般
機器・装置	・フェノールフタレイン試薬 ・電動ピック等
調査方法	<p>JIS A 1152「コンクリートの中性化深さの測定方法」フェノールフタレイン法</p> <p>指示薬とするフェノールフタレイン溶液は、95%エタノール90mlにフェノールフタレインの粉末1gを溶かし、水を加えて100mmとしたものである。供試体が乾燥している場合には、95%エタノールの量を70ml程度にするなどして、加える水の量を多くすることができる。</p> <p>調査対象位置を選定する。</p> <p>環境条件や使用条件、仕上げの有無などを考慮する。</p> <p>鉄筋探査機により鉄筋位置を測定する。</p> <p>鉄筋位置において電動ピック等によりコンクリートをはつる。</p> <p>はつり粉をブローア等により除去する。</p> <p>フェノールフタレイン試薬を噴霧し、赤変した位置の深さをスケールで測定する。</p> <p>測定箇所ははつり面の上下左右の4箇所程度とする。</p> <p>構造体に与える損傷を小さくしたい場合には、25mm程度の小径コアを採取し、その側面にフェノールフタレイン試薬を噴霧する方法もある。</p>
判断基準	・フェノールフタレイン試薬はpH10以下で変色しなくなる。
特徴	・その場で簡便に測定値が得られる。 ・鉄筋のかぶり厚や腐食度と合わせて調査することができる。
留意点	・はつり粉を十分に清掃する。 ・時間経過とともに発色範囲が広がる場合があるが、試薬を噴霧した直後の時点で測定する。



b. コンクリート

項目	中性化深さの測定
手法名	ドリル法
概要	日本非破壊検査協会 NDIS3149「ドリル切削粉を用いたコンクリート構造物の中性化試験方法」 振動ドリルにより穿孔した際の切削粉について、穿孔深さとフェノールフタレイン試薬による発色の有無により中性化深さを求める
適用対象・範囲	鉄筋コンクリート構造物全般
機器・装置	・振動ドリル ・フェノールフタレイン1%エタノール溶液を含浸させた濾紙
調査方法	<p>調査対象位置を選定する。</p> <p>環境条件や使用条件、仕上げの有無などを考慮する。</p> <p>10mmの振動ドリルによりコンクリートを穿孔し、フェノールフタレイン溶液を染みこませた濾紙に切削粉を落下させる。</p> <p>濾紙をゆっくり回転させ、落下粉が赤紫いろに変色した時点で切削を停止する。</p> <p>ドリル刃を引き抜き、孔の深さをノギスで測定す</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> <p>削孔による中性化深さ (mm)</p> <p>コアによる中性化深さ (mm)</p> <p>$y = 1.05x + 0.73$ (相関係数0.96)</p> </div> </div>
判断基準	・フェノールフタレイン試薬はpH10以下で変色しなくなる。 ・割裂面による測定値よりやや大きめの値を示す傾向がある。
特徴	・測定位置の損傷を最小限にとどめることができ、補修も容易である。 ・微破壊のため、測定点数を多くすることが容易。
留意点	

b. コンクリート

項目	コンクリート強度の測定
手法名	反発硬度法
概要	コンクリートの表面をテストハンマーで打撃し、その反発硬度から圧縮強度を求める。
適用対象・範囲	測定可能なコンクリート強度の範囲は使用する測定機器によって異なるが、およそ10～60N/mm ² が適用可能な範囲とされている。
機器・装置	対象とするコンクリートの種類や状態によって数種類のシュミットハンマーが製造されている。 普通コンクリート用のN(R)型。軽量コンクリート用のL型。低強度コンクリート用のP型。 マスコンクリート用のM型。
調査方法	調査箇所の選定にあたっては、表面が平坦で縁部から離れた位置を選定する。 部材厚さが10cm以下となる所や、部材幅が15cm以下となるような小寸法の箇所は、打撃エネルギーが逸散して測定結果に影響を及ぼすので選定しない。 浮や剥離、ひび割れ、気泡等によって反発の程度に影響を及ぼす可能性のある箇所は避ける。  (図) 打撃によるプランジャーとコンクリートの接触
判断基準	測定箇所1箇所につき20回打撃を行う。 同一点は打撃しない。 各打撃点は他の打撃による影響がないように3cm以上距離をおく。 各測定箇所の反発度は20回の平均反発度で求める。 明らかに局所的な要因で他の値と異なる特異値は計算から除外する。
特徴	コア採取によるコンクリート強度測定と比較して試験方法が簡便なこと。 構造物を破壊することなく測定できること。
留意点	打撃時の反発の程度で強度推定を行うために、打撃力が逸散するような箇所や状態では測定が困難である。 表面の摩耗状態や含水状態による影響を受ける。

b. コンクリート

項目	コンクリート強度の測定
手法名	局部破壊法(プルオフ法、プリアウト法、ブレイクオフ法)
概要	局部破壊法は、コンクリートの表層部を局部的に破壊し、破壊時の抵抗力を指標として圧縮強度を推定する試験方法
適用対象・範囲	試験精度は、各試験とも試験値の変動係数約10%以下、圧縮強度推定の信頼限界は±20%以下。
機器・装置	<p>プルオフ法：鋼製ディスク、載荷装置および荷重計測装置からなる。ディスクの直径は50mmおよび75mmを標準とするが、骨材最大寸法の3倍以上とすることにより試験値のばらつきを低減できる。</p> <p>プリアウト法：加力プレートと引き抜きボルトからなる埋め込み具、載荷装置および荷重計測装置からなる。加力プレートの直径の標準値は25mmで、骨材最大寸法20mmまでのコンクリートに適用。</p> <p>ブレイクオフ法：ロードセル、油圧計およびハンドポンプからなる。骨材最大寸法が大きくなると試験精度が低下するため、最大寸法25mmまでのコンクリートに適用。</p>
調査方法	<p>プルオフ法：鋼製ディスクに載荷装置と荷重計測装置を連結させて、載荷速度を$0.05 \pm 0.03 \text{ N/mm}^2$とし、鋼片に接着されたコンクリートを引っ張り破断させる。</p> <p>プリアウト法：埋め込む具に載荷装置と荷重計測装置を連結させ、載荷速度は最大荷重までの時間が$1.5 \text{ min} \pm 0.5 \text{ min}$になるように一定とする。引き抜き荷重の最大値を引き抜き耐力とする。</p> <p>ブレイクオフ法：ロードセルをコア頂部にセットし、ハンドポンプによりコア軸に対して垂直に載荷する。載荷速度は$0.1 \pm 0.05 \text{ kN/sec}$とし、連続的に載荷する。</p> <div style="text-align: center;"> <p>(a) プルオフ法 (直接接着する方法)</p> <p>(b) プルオフ法 (コア部を設けて接着する方法)</p> <p>(c) 改良プルオフ法 (コア部の深さと同じ深さのパイプ部を持つディスクを接着する方法)</p> <p>エポキシ樹脂</p> <p>破壊面</p> <p>(図) プルオフ法及び改良プルオフ法の概要</p> </div>
判断基準	局部破壊法の各試験とも試験値の変動係数は約10%以下、圧縮強度推定の信頼限度は±20%以下と比較的良好である。
特徴	コンクリートの強度と直接関係する破壊時の抵抗力を指標とするため、強度の推定精度は比較的良好である。
留意点	試験によって生じる局所的な損傷は、コンクリート構造体に影響を与えない無視できるものであるが、損傷部分を補修する必要がある。

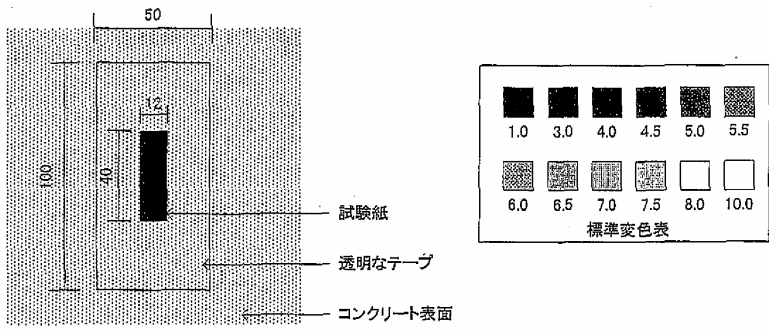
b. コンクリート

項目	コンクリート強度の測定、品質評価
手法名	超音波法(超音波伝播速度)
概要	使用周波数が20kHz以上の超音波域と呼ばれる周波数帯を主に使用し、発信子からシリコングリッドなどの接触剤を介してコンクリート中に発射された弾性波を受信子で測定する手法。
適用対象・範囲	ひび割れ、剥離、空洞(コンクリート内部および背面)を有するコンクリート構造物を対象とする。どのようなコンクリート構造物に対しても適用可能であるが、利用する周波数単位の高いものはコンクリート中での減衰が大きいので、50kHz程度以上の高周波数を利用する場合は、部材寸法や欠陥深さが2～3m程度の範囲が限度となる。
機器・装置	弾性波発生装置...圧電素子を用いた振動子が通常用いられる。 弾性波受信装置...圧電素子を用いた振動子が通常用いられる。 波形表示・処理装置...パルス発振回路、受信信号増幅回路とともに波形の表示や入力信号発射から受信信号の初動開始までの時間表示を行うものもあれば、汎用のオシロスコープやFFTアナライザを用いる場合もある。
調査方法	<p>下図に示すような測定装置により、圧電素子を用いた発信子、受信子をコンクリートに当て、発信子より発振した超音波を受振子で受振し、伝播速度などの受振振動をもとにコンクリートの強度や品質を検査する。</p> <div style="text-align: center;"> <p>(図) 測定装置の機器構成</p> </div>
判断基準	<p>測定した伝播時間から伝播速度を算出し、その値により圧縮強度や水セメント比を推定する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・圧縮強度 ...伝播速度から圧縮強度を推定しようとする試みは多く行われており、多くの関係式が提案されている。 ・水セメント比...伝播速度は骨材の影響を大きく受けるため骨材の影響を取り除いた修正伝播速度により評価する。評価は、トモグラフィー等による断面の評価が有効である。
特徴	超音波法は測定が簡易なため幅広く用いられている。
留意点	超音波伝播速度は、試験体表面の凹凸、コンクリートの含水比、温度および骨材の影響を受けるため、それらの影響度を適切に評価しなければならない。

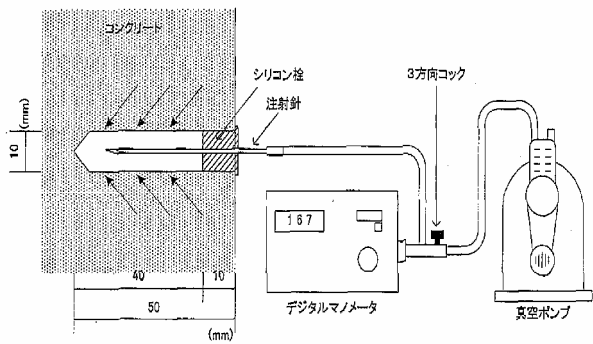
b. コンクリート

項目	コンクリート強度の測定
手法名	複合法
概要	シュミットハンマ反発硬度法と超音波法を測定する。 反発硬度法、超音波法 概要 を参照のこと。
適用対象・範囲	反発硬度法、超音波法 適用範囲 を参照のこと
機器・装置	反発硬度法、超音波法 機器・装置 を参照のこと
調査方法	反発硬度法、超音波法 調査方法 を参照のこと 強度推定公式 $\left. \begin{array}{l} F_c = k_1 R + k_2 V_p + C \\ \log F_c = k_1 R + k_2 V_p + C \end{array} \right\} \text{どちらか}$ <p>F_c: 圧縮強度 R : 反発度 V_p: 音速 k₁, k₂, C: 実験定数</p> <p>日本建築学会「コンクリート強度推定のための非破壊試験方法マニュアル」を参照のこと</p>
判断基準	反発硬度法、超音波法 判断基準 を参照のこと。
特徴	測定が簡便 被測定物の形状・寸法に関係なく適用できる。
留意点	強度判定式が確立されていない。 実験により強度推定式の定数を求める必要がある。

b. コンクリート

項目	含水率
手法名	乾燥度試験紙法(塩化コバルト法)
概要	任意にその時々コンクリートから単位時間当たり蒸発する水分量をコンクリートに貼り付けた乾燥度試験紙の色変化により求める。
適用対象・範囲	コンクリートの水分蒸発速度を求める。
機器・装置	乾燥度試験紙 透明なテープ
調査方法	<p>乾燥度試験紙を透明なテープとともに、コンクリート表面に貼る。 貼り付け後、10分経過したときの乾燥度試験紙の色を評価する。</p>  <p style="text-align: center;">(図) 透気試験(定圧方法)概略図</p>
判断基準	色の評価値を、あらかじめ求めておいた色の評価値とコンクリートの水分蒸発速度(含水率)との関係に対応させ、水分蒸発速度(含水率)を求める。
特徴	<p>調合が同じコンクリートであらかじめ対応を測定してあれば、色の評価値からコンクリート表層部の含水率をおおよそ推定することもできる。</p> <p>無破壊試験、試験費用は安価、測定精度は良い。</p> <p>普及性・一般性</p> <p>簡便さ・熟練度</p> <p>作業効率 である。</p>
留意点	内部の含水率を測定できない。

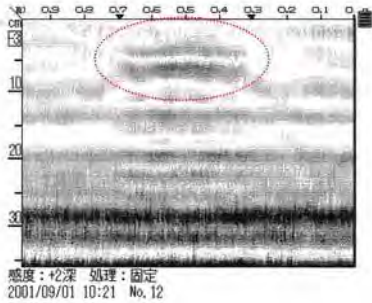
b. コンクリート

項目	含水率
手法名	簡易吸水速度法
概要	ドリルの削孔に栓をし、注水させ、一定量吸水するまでの速度により吸水性を評価する。
適用対象・範囲	構造体コンクリートの吸水性を現場で測定する。
機器・装置	簡易透気試験装置
調査方法	<p>ドリル(10mm)でコンクリートを削孔する。</p> <p>栓をし、注射器で水を注入する。</p> <p>別に設けた管からオーバーフローしたとき、注水をやめ、メスピペット上で水が一定量吸水されるまでの時間を測定する。</p> <p>簡易吸水速度を求める。</p>  <p>(図) 簡易透気試験装置</p>
判断基準	測定した簡易吸水速度をあらかじめ求めた簡易吸水速度と塩分浸透量の結果に対応させ耐久性を評価する。また、相互比較などにより品質を評価する。
特徴	<p>現場で試験が可能である。</p> <p>普及性・一般性</p> <p>簡便さ・熟練度</p> <p>作業効率 である。</p>
留意点	試験費用が、やや高価である。


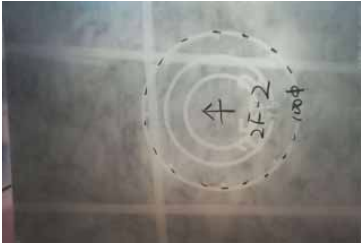
b. コンクリート

項目	コンクリートの損傷状況、欠陥の測定
手法名	弾性波法(衝撃弾性波法・打音法)
概要	ハンマーなどによりコンクリート表面を打撃して弾性波を発生させ、これを受振子等で測定する。 衝撃弾性波法では、一般的に20kHz以下の超音波域よりも低い周波数成分の多い波を使用する。 打音法では、可聴域と呼ばれている20Hzから20kHzの周波数域の音(弾性波)を使用する。
適用対象・範囲	
機器・装置	一般的なハンマーも用いられているが、衝撃入力タイミングが分かること、入力する衝撃そのものの周波数特性が、分かることから圧電素子や加速度計をヘッド部に内蔵したインパルスハンマーを用いることもある。 小型ハンマー(ヘッド重量200g程度)であっても超音波発振子に比べてエネルギーは相当大きい。 弾性波を検出する装置としては、衝撃弾性波法では圧電素子を利用した振動子が、打音法ではマイクロフォンが用いられる。
調査方法	コンクリート表面から打撃等により弾性波を生じさせると、コンクリート部材の厚さ方向に半波長の整数倍の共振が生じる。これを利用してコンクリート内部欠陥までの距離や剥離深さを測定する。
判断基準	共振周波数測定では、理論的には測定機器の周波数分解能に影響される。通常のFFT処理であれば、分解能は読み取り周波数範囲の1/400～1/1600程度の分解能となる。 打音法では、測定周波数範囲が20kHzに限定されており、20kHzの波の半波長はおおよそ10cmであり、これ以上短い共振の場合は通常のマイクロフォンでは測定不可能である。
特徴	
留意点	数kHz以下の低周波数を用いる工法では、伝播速度を10m以上とすることが出来るが、測定速度は低下し、検出可能な欠陥の寸法は大きくなる。

b. コンクリート

項目	コンクリートの損傷状況、欠陥の測定
手法名	電磁波レーダ法
概要	電磁波レーダ法は、インパルス状の電磁波をコンクリート内へ送信アンテナから放射すると、その電磁波がコンクリートと電気的性質(比誘電率・導電率)の異なる物体との境界面で反射する。それを受信アンテナで受信し、それにかかる往復の伝播時間から反射物体までの距離を計算してその位置を求める。
適用対象・範囲	主として無筋構造物 鉄筋が位置値されていると、鉄筋位置での反射波により、それより奥の判読が困難になる。
機器・装置	
調査方法	電磁波レーダは、探査対象との電気的性質の違いから発生する反射波の移り変わりを見る。計測されたデータからその形状や材質を判定することは出来ない。 
判断基準	平面的位置の測定精度は、コンクリート性状調査において影響が少ない。 深さ方向の位置精度は、電磁波の伝播速度に依存する。電磁波の伝播速度は比誘電率によって決定される。 探査対象であるコンクリートが均一でないため、定量化できるデータが少ない。そのため現在利用されている用途の多くが位置情報のみに限られている。
特徴	取り扱いが簡単で、かつ短時間で広範囲の調査が可能で、特別な資格・免許等を必要としない。
留意点	現在使用されている用途においても解析技術者の技量により測定精度にバラツキがある。 計測されたデータからその形状や材質を判定することが出来ない。

b. コンクリート

項目	コンクリートの損傷状況、欠陥の測定
手法名	放射線法(X線法)
概要	<p>X線透過撮影法は内部の様子をほぼ実態に近い状態で確認できる唯一の非破壊試験方法である。</p> <p>コンクリート構造物を対象とした場合、鉄筋や配管等の埋設物および空洞やひび割れ等のコンクリートの変状を検出することが出来る。</p>
適用対象・範囲	<p>一方からX線を照射し、対向する裏面に配置したフィルムより透過像を撮影する。</p> <p>放射線防護のための安全管理上の制限があり、実際の現場作業においては低エネルギーのX線装置の使用に限定される。</p>
機器・装置	
調査方法	<p>コンクリート構造物は、撮影の位置および照射方向によって鉄筋同士が重なったり、予想以外のものが存在して目的の鉄筋等が明瞭に撮影できなったりすることもあり、現像処理は現場で行う。</p> <p>安全管理上、コンクリート壁などの仕切りがない場合は、一般的に立体半径で5m以内を立ち入り禁止区域とする。</p> 
判断基準	<p>躯体の厚さが厚くなるにしたがって測定値の誤差が大きくなる主な要因は、透過写真の鮮鋭度の低下による読み取り誤差の増大によるものと考えられる。</p> <p>これらの測定誤差を考慮するとX線フィルムを使用した一般的なシステムの適用厚さの限界は、普通強度のコンクリートで約350mmとみることができる。</p>
特徴	<p>透過画像が得られるので、精度が高い。</p> <p>埋設管など鉄筋以外の物体も検出できる。</p>
留意点	<p>普通コンクリートを対象とした適用限界厚さは、経済的な作業効率も考慮すると400mm程度である。</p> <p>X線透過撮影は、信頼性のある情報を提供するが、時間および費用の面で他の調査方法に比べて効率的ではない。</p>

c. 鉄筋

項目	鉄筋位置の測定
手法名	電磁誘導法
概要	コイルに交流電流を流すことによりコイル周辺に交番磁界を発生させ、それによりコンクリート中に渦電流を誘起する。この渦電流は鉄筋のような磁性体が存在すると乱されるという性質を有しており、この変化をコイルにインピーダンスの変化として検知する。
適用対象・範囲	コンクリート中の鉄筋探査 鉄筋以外の埋設金属の探査
機器・装置	
調査方法	試験プローブを用いて鉄筋に直行する方向にコンクリート表面を走査することにより鉄筋を検出する。プローブが鉄筋に近づくと、かぶり厚さの表示値が小さくなり鉄筋真上でブザーが鳴る。
判断基準	径の大きな鉄筋ほど深い位置まで探査可能であり、またかぶり厚さは薄いほど測定精度は高い。
特徴	非磁性体であるかぎり、仕上げ材の影響を受けない。 コンクリート中に空洞、ジャンカ等の欠陥がある場合でも鉄筋探査が可能。 鉄筋からの距離と磁束の変化の関係から鉄筋径とかぶり厚さの同時測定が可能。
留意点	指向性が乏しいため、配筋ピッチが密な場合、周囲の鉄筋の影響を受け、正確な測定が困難になる。 かぶり厚さより配筋ピッチが密な場合は、測定が困難。 空洞、ジャンカ、剥離等の探査には使用できない。 塩ビ管のような非磁性体の探査には使用できない。 ダブル配筋の場合、表面側の鉄筋しか検出できない。

c. 鉄筋

項目	鉄筋位置の測定
手法名	電磁波レーダー法
概要	コンクリート用電磁波レーダは、インパルス状の電磁波をコンクリート内へ送信アンテナから放射すると、その電磁波がコンクリートと電気的性質の異なる物体（例えば、鉄筋、埋設管、空洞等）との境界面で反射する。それを受信アンテナで受信し、それにかかる往復の伝搬時間から反射物体までの距離を計算することで位置を求める。
適用対象・範囲	埋設物の平面的位置および深さ方向の位置（かぶり厚さ）の測定が可能。 埋設物の大きさに関しては、一部を除いて困難。
機器・装置	
調査方法	コンクリート用電磁波レーダで最も多く使用されている平行アンテナでは、縦方向の操作で横方向の埋設物の位置を計測し、上下それぞれのデータから得られた埋設位置を結ぶ。 ・使用周波数(800MHZから2GHZ)
判断基準	平面的位置の測定精度はアンテナの水平分解能(配筋ピッチの分解能力)によって決定する。 平面的位置精度の誤差(±10mmまたは±1.0%以内) かぶり厚さの誤差±(5mm+実かぶり厚さ0.1%)以内または±5.0%以内のいずれか精度の低い方 電磁波レーダは電磁波の反射波を測定する装置のため、測定精度は最も計測面側に位置する埋設物に対して有効
特徴	取り扱いが簡単、かつ短期間で広範囲の調査が可能であり、特別な資格・免許等を必要とせず、すぐに結果が得られる手法である。 しかし、簡便な手法ゆえに作業者の技量や経験に依存するところの多い手法でもある。
留意点	電磁波レーダ装置によって採取されたデータには、鉄筋等の埋設物そのものに関する情報ばかりでなく、鉄筋周りの小空隙、コンクリートの性状に関する情報も含まれるが、その解析方法が確立していないため、採取されたデータが十分に活用されているとは言えない。また、埋設物探査においても解析技術者の技量によるところは多い。

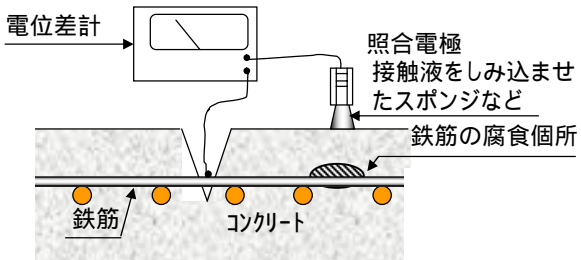
c. 鉄筋

項目	鉄筋位置の測定
手法名	X線法
概要	X線(放射線)は、 $10^{-12} \sim 10^{-6}$ cmの波長をもった電磁波であり、物体を透過する能力をもち写真を感光させたりする性質をもっている。X線が物体を透過する際にその物体に吸収される割合は透過する物質によって異なり、コンクリート中の鉄筋を通過した放射線の強さとコンクリートそのものだけを通じた放射線の強さに差ができることになる。この差がフィルム上では濃度の差として現れるため、内部の様子を画像として観察することができる。
適用対象・範囲	透過撮影は一方からX線を照射し、対向する裏面にフィルムを配置することによって透過像を撮影するため、少なくとも試験部の両面に装置とフィルムを配置するための空間が必要となる。また放射線防護のため安全管理上の制限があり、実際の現場作業においては低エネルギーのX線装置(可搬式)の使用に限定される。
機器・装置	<p>透過写真は、二次元であり、また実体の拡大像であるため、単に撮影された透過写真を観察するだけでは、版厚を測定することはできず、また配筋状況の概要は把握できても対象物の相互間距離、深さおよび大きさを求めることはできない。したがって、更に写真解析が必要。</p>
調査方法	コンクリート構造物は、撮影の位置および照射方向によって鉄筋同士が重なったり、予想以外のものが存在して目的の鉄筋が明瞭に撮影できなかつたりすることがあるため、本撮影に先立ち、撮影条件の決定および墨出し位置修正のための試し撮りを調査箇所ごとに行う。またその結果を踏まえ撮り直しの可能性もあることから現像処理は現場で行う。さらに、撮影中は安全上の管理区域を確保しなければならない。コンクリート壁などの仕切がない場合は、一般には立体半径で5m以内を立入禁止区域とする
判断基準	<p>高エネルギーのX線を使用すれば1mを越す躯体を撮影することも可能であるが、放射線防護のための安全管理上の制約があり、実際の現場作業においては低エネルギーのX線装置に使用が限定されている。また、厚さが厚くなるに従って透過写真の鮮鋭度の低下による読取り誤差も増大する。</p> <p>これらを考慮すると、一般的なシステムの適用厚さの限界は、普通強度のコンクリートで約350mmとみることができる。</p>
特徴	信頼性のある情報を提供するが、時間および費用の面で他の調査方法に比べて効率的ではなく、部分的な調査とならざるを得ない。したがって、効率よく有用なデータを得るには、調査の目的を明確にし、適切な調査箇所を選定し、そして目的に応じた適切な方法で撮影することが必要となる
留意点	X線法はほかの試験法と異なり、人的または物的な障害に対する安全管理が特別に必要となる。したがって、調査にあたっては試験そのもののほかに放射線障害についても配慮しなければならない。また、撮影は電離放射線障害防止規則で規定されるX線作業主任者の有資格者の管理のもとに行わなければならない。

c. 鉄筋

項目	腐食度の測定										
手法名	はつり法										
概要	直接鉄筋をコンクリート中から取り出し、鉄筋の腐食状態を調べる。調査項目としては、「鉄筋の腐食面積率」や「鉄筋重量減少量」が挙げられる。										
適用対象・範囲	すべての鉄筋コンクリート構造物で可能 ただし、鉄筋を取り出す位置については、考慮する必要がある。										
機器・装置	はつり方法 手ばつり 効率が悪いため補助的な手段 電動ピック 破壊力はエアークリックより劣るものの、作業性はよい エアークリック 破壊力が強いので、面積が大規模な場合や対象コンクリートが高強度である場合に採用										
調査方法	「腐食面積率の算出」 腐食状況を正確に写し取り展開図を作成する。更に腐食部分の面積をプランメーターや画像処理装置により測定し、鉄筋の表面積で除して腐食面積率を求める。 腐食面積率 = (腐食鉄筋表面積 / 鉄筋表面積) × 100 「重量減少率の算出」 鉄筋の表面に付着したモルタルを除去し、鉄筋重量を測定する。その後錆びを除去し、再度鉄筋の重量(徐錆後鉄筋重量)を測定する。 除去後の重量と腐食前の重量を基に、鉄筋重量減少率を算出する。 鉄筋重量減少率 = (腐食前鉄筋重量 - 除錆後鉄筋重量) / 腐食前鉄筋重量										
判断基準	<p style="text-align: center;">損傷度の評価</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 50%;">鉄筋腐食度</th> <th style="width: 50%;">損傷度の評価基準</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>欠損が著しい腐食</td> <td>構造物の耐久性能が著しく低下していて、耐荷性能の低下が心配される段階</td> </tr> <tr> <td>浅い孔食など断面欠損の軽微な腐食</td> <td>構造物の耐久性能が低下していると考えられる段階</td> </tr> <tr> <td>ごく表面的な腐食</td> <td>構造物の耐久性能が低下しているとは判断しづらいが、その徴候は認められる段階</td> </tr> <tr> <td>腐食なし</td> <td>構造物に損傷ないと考えられる段階</td> </tr> </tbody> </table>	鉄筋腐食度	損傷度の評価基準	欠損が著しい腐食	構造物の耐久性能が著しく低下していて、耐荷性能の低下が心配される段階	浅い孔食など断面欠損の軽微な腐食	構造物の耐久性能が低下していると考えられる段階	ごく表面的な腐食	構造物の耐久性能が低下しているとは判断しづらいが、その徴候は認められる段階	腐食なし	構造物に損傷ないと考えられる段階
鉄筋腐食度	損傷度の評価基準										
欠損が著しい腐食	構造物の耐久性能が著しく低下していて、耐荷性能の低下が心配される段階										
浅い孔食など断面欠損の軽微な腐食	構造物の耐久性能が低下していると考えられる段階										
ごく表面的な腐食	構造物の耐久性能が低下しているとは判断しづらいが、その徴候は認められる段階										
腐食なし	構造物に損傷ないと考えられる段階										
特徴	腐食状態を目視により確認することができる。										
留意点	対象ヶ所・部位・路下条件・周囲の環境等によりはつり方法を適宜選択したうえで、粉塵の飛散防止策を検討する必要がある。 鉄筋を取り出す位置の選定にあたっては、耐荷性能に影響すると考えられる箇所は基本的にはさける必要がある。 非破壊検査と異なり、構造物を傷める。										

c. 鉄筋

項目	腐食度の測定								
手法名	自然電位法								
概要	鉄筋が腐食しているときは、電子は鉄筋内を流れ、イオンはコンクリート中を移動する。これらの電子やイオンの流れが腐食電流であり、腐食反応の速さ(腐食速度)をあらわしている。この、鉄筋が腐食することによって変化する鉄筋表面の電位から、鋼材腐食を診断しようとする電気化学的方法である。								
適用対象・範囲	調査時点での腐食の可能性について診断するものであり、構造物内で腐食の可能性が高い個所を見つけ出すために用いられる。構造物が供用開始してからの内部鉄筋が腐食し、腐食によりかぶりコンクリートにひび割れが発生するまでの、初期の段階での診断に有効。								
機器・装置									
調査方法	<p>コンクリート中の鋼材を1ヶ所はつり出し、電位差計とコードで結び、もう一方のコードは照合電極と結んで電位値を測り、得られた自然電位値から鋼材の腐食状況を判断する。</p> <p>入力抵抗が100M 以上、分解能が1mV以下の直流電圧計を使用する。</p>								
判断基準	<p>ASTM(米国材料試験学会) C 876による鉄筋腐食性評価</p> <table border="1" data-bbox="430 1198 1316 1422"> <thead> <tr> <th>自然電位 (E) (V_{sCSE})</th> <th>鉄筋腐食の可能性</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>$-0.20 < E$</td> <td>90%以上の確率で腐食なし</td> </tr> <tr> <td>$-0.35 < E \leq -0.20$</td> <td>不確定</td> </tr> <tr> <td>$E \leq -0.35$</td> <td>90%以上の確率で腐食あり</td> </tr> </tbody> </table>	自然電位 (E) (V_{sCSE})	鉄筋腐食の可能性	$-0.20 < E$	90%以上の確率で腐食なし	$-0.35 < E \leq -0.20$	不確定	$E \leq -0.35$	90%以上の確率で腐食あり
自然電位 (E) (V_{sCSE})	鉄筋腐食の可能性								
$-0.20 < E$	90%以上の確率で腐食なし								
$-0.35 < E \leq -0.20$	不確定								
$E \leq -0.35$	90%以上の確率で腐食あり								
特徴	原理が単純で特殊な機器を必要とせず測定も簡単なことから広く用いられている。しかし、かぶりコンクリートの性状によって測定値が大きく影響を受ける。調査時点で腐食の可能性について診断するものであり、鉄筋の腐食速度を測定するものではない。コンクリートが十分に湿っている場合にのみ確かな電位の読み値が得られる。								
留意点	<p>以下の条件下では、適用できない。</p> <ul style="list-style-type: none"> 表面が非常に乾燥し電氣的に絶縁体に近い場合 コンクリート表面に塗装等の絶縁材料が被覆されているような場合 コンクリート表面が常に水で覆われているような場合 表面がコーティングされている鉄筋 								

c. 鉄筋

項目	腐食度の測定																				
手法名	分極抵抗法																				
概要	コンクリート表面に当てた外部電極から内部鉄筋に微弱な電流または電位差を負荷したときに生じる電位変化量または電流変化量から、腐食速度（腐食電流密度）と反比例の関係にある分極抵抗を求め、内部鉄筋の腐食速度を推定しようとする電気化学的方法。																				
適用対象・範囲	鉄筋の腐食速度に関する情報を得ることができる。連続測定を行うことで、その時間積分値として腐食量を推定できる可能性を有している。コンクリート構造物が腐食劣化する初期の段階での診断に有効。																				
機器・装置																					
調査方法	コンクリート中の鋼材を1ヶ所はつり出し、鉄筋にリード線をつないで試料極(WE)とし、照合電極(RE)および電気を流すための対極(CE)を測りたい鉄筋のすぐ上のコンクリート表面に設置する。そして微弱な交流電流を流し、その時のインピーダンス値から腐食速度と反比例の関係にある分極抵抗を求め、コンクリート構造物の鉄筋の腐食範囲や腐食速度を評価する。																				
判断基準	<p>結果は、測定された見かけの分極抵抗（ ）や鉄筋の単位面積あたりの分極抵抗（ cm^2）を腐食速度の指標として、そのまま用いても良いが、腐食電流密度（ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$）や腐食度（ mdd）、侵食度（ $\text{mm}/\text{年}$）で整理される場合が多い。</p> <p>CEB（ヨーロッパコンクリート委員会）による判定基準</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>腐食速度測定値 i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)</th> <th>腐食速度の判定</th> <th>分極抵抗 R_{ct} ($\text{k}\Omega\cdot\text{cm}^2$)</th> <th>腐食度 PDY ($\text{mm}/\text{年}$)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.1～0.2未満</td> <td>不動態皮膜（腐食なし）</td> <td>130～260より大</td> <td>0.0011～0.0023未満</td> </tr> <tr> <td>0.2以上0.5以下</td> <td>低～中程度の腐食速度</td> <td>52以上 130以下</td> <td>0.0023以上 0.0058以下</td> </tr> <tr> <td>0.5以上1以下</td> <td>中～高程度の腐食速度</td> <td>26以上 52以下</td> <td>0.0058以上 0.0116以下</td> </tr> <tr> <td>1より大</td> <td>激しい、高い腐食速度</td> <td>26未満</td> <td>0.0116より大</td> </tr> </tbody> </table>	腐食速度測定値 i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	腐食速度の判定	分極抵抗 R_{ct} ($\text{k}\Omega\cdot\text{cm}^2$)	腐食度 PDY ($\text{mm}/\text{年}$)	0.1～0.2未満	不動態皮膜（腐食なし）	130～260より大	0.0011～0.0023未満	0.2以上0.5以下	低～中程度の腐食速度	52以上 130以下	0.0023以上 0.0058以下	0.5以上1以下	中～高程度の腐食速度	26以上 52以下	0.0058以上 0.0116以下	1より大	激しい、高い腐食速度	26未満	0.0116より大
腐食速度測定値 i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	腐食速度の判定	分極抵抗 R_{ct} ($\text{k}\Omega\cdot\text{cm}^2$)	腐食度 PDY ($\text{mm}/\text{年}$)																		
0.1～0.2未満	不動態皮膜（腐食なし）	130～260より大	0.0011～0.0023未満																		
0.2以上0.5以下	低～中程度の腐食速度	52以上 130以下	0.0023以上 0.0058以下																		
0.5以上1以下	中～高程度の腐食速度	26以上 52以下	0.0058以上 0.0116以下																		
1より大	激しい、高い腐食速度	26未満	0.0116より大																		
特徴	<p>測定結果はその時点での腐食状況や腐食速度を評価する目安になるものなので、信頼性を向上するためには、年間を通じて異なる時期に測定を繰り返したり、1年以上長期間にわたって複数回の測定を行うことが望ましい。</p> <p>かぶりコンクリートの含水率に計測結果が左右される。</p> <p>コンクリート表面を湿らせた状態で計測を行うのがよい。</p>																				
留意点	<p>絶縁体に近い場合、被覆されている場合は適用できない。</p> <p>ひび割れや凹凸がなく滑らかでなければならない。</p> <p>鉄筋とコンクリートは接触していなければならない。</p> <p>水で覆われている場合は適用できない。</p> <p>迷走電流が存在しているところや、強い磁場が作用しているところであってはならない。</p>																				

c. 鉄筋

項目	腐食度の測定																																
手法名	電気抵抗法																																
概要	電気抵抗法とは、かぶりコンクリートの電気抵抗を測定することによって、その腐食性および鉄筋の腐食進行のしやすさについて評価する電気的方法。																																
適用対象・範囲	大気中にあるコンクリート構造物を対象に、鉄筋などの鋼材を取り巻くコンクリートの腐食環境因子の状況について診断する。電気抵抗は主にコンクリートの含水量や塩化物含有量などの影響を包括したような特性値である。																																
機器・装置																																	
調査方法	等間隔 a に一列に並べた4本の電極のうち、両端の電極 A、B 間に直流あるいは周波数 10 ~ 100Hz 程度の交流を流して、その電流量 I と内側の2本の電極 C、D 間で測定される電位差から比抵抗を求める。																																
判断基準	<p>測定結果は cm の単位をもつ比抵抗（抵抗率）で整理される。この比抵抗と鉄筋の腐食性の関係について検討された例を以下に示す。</p> <p style="text-align: center;">コンクリートの比抵抗による鋼材腐食性評価の例</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th colspan="2">Gavalier and Vassie</th> <th colspan="2">Taylor Woodrow Res.Lab</th> <th colspan="2">武若および小林</th> </tr> <tr> <th>比抵抗の範囲</th> <th>腐食性</th> <th>比抵抗の範囲</th> <th>腐食性</th> <th>比抵抗の範囲</th> <th>腐食性</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>> 12,000</td> <td>微候なし</td> <td>> 20,000</td> <td>なし</td> <td>> 10,000</td> <td>小さい</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">5000 ~ 12,000</td> <td rowspan="2">危険性あり</td> <td>10000 ~ 20,000</td> <td>小さい</td> <td rowspan="2">5000 ~ 10,000</td> <td rowspan="2">不確実</td> </tr> <tr> <td>5000 ~ 10,000</td> <td>大きい</td> </tr> <tr> <td>< 5,000</td> <td>確実</td> <td>< 5,000</td> <td>非常に大</td> <td>< 5,000</td> <td>大きい</td> </tr> </tbody> </table>	Gavalier and Vassie		Taylor Woodrow Res.Lab		武若および小林		比抵抗の範囲	腐食性	比抵抗の範囲	腐食性	比抵抗の範囲	腐食性	> 12,000	微候なし	> 20,000	なし	> 10,000	小さい	5000 ~ 12,000	危険性あり	10000 ~ 20,000	小さい	5000 ~ 10,000	不確実	5000 ~ 10,000	大きい	< 5,000	確実	< 5,000	非常に大	< 5,000	大きい
Gavalier and Vassie		Taylor Woodrow Res.Lab		武若および小林																													
比抵抗の範囲	腐食性	比抵抗の範囲	腐食性	比抵抗の範囲	腐食性																												
> 12,000	微候なし	> 20,000	なし	> 10,000	小さい																												
5000 ~ 12,000	危険性あり	10000 ~ 20,000	小さい	5000 ~ 10,000	不確実																												
		5000 ~ 10,000	大きい																														
< 5,000	確実	< 5,000	非常に大	< 5,000	大きい																												
特徴	<p>電極の間隔や電極先端の湿潤状態の広がり具合などによっては、どのような回路の電気抵抗を測定しているのか保証がなく、どちらかというごく表層の電気抵抗を測定しているに過ぎない。</p> <p>電気抵抗は鉄筋そのものの腐食状態を直接表すものではない。</p>																																
留意点	<p>コンクリート表面に各電極間をつなぐような浮き水があってはならない。</p> <p>コンクリート表面の湿潤状態の影響が出やすい。</p>																																

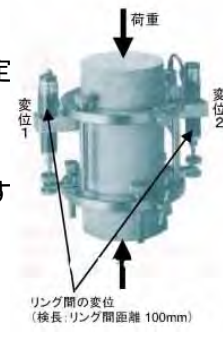
1.3【試験室における試験・分析】

大分類	小分類	手法	頁
a. コンクリートの品質	強度・弾性	採取コアによる圧縮強度試験	参1-50
		採取コアによる静弾性係数測定	参1-51
		小径コアによる測定	参1-52
	空気量、気泡分布	気泡間隔係数測定(顕微鏡法)	参1-53
		空気量(高圧水法)	参1-54
		細孔径分布測定(水銀圧入法)	参1-55
		細孔径分布測定(窒素橋着法)	参1-56
	配合推定	セメント協会法	参1-57
		フッ酸法	参1-58
		ギ酸法	参1-59
		グルコン酸法	参1-60
	透水性・透気性	透水係数測定(インプット法)	参1-61
透水係数測定(アウトプット法)		参1-62	
透気係数測定		参1-63	
b. コンクリートの劣化度	中性化	フェノールフタレイン法	参1-64
		熱分析法	参1-65
		E P M Aによる面分析	参1-66
	塩化物の浸透	全塩分分析	参1-67
		可溶性塩分分析	参1-68
		蛍光X線分析	参1-69
	アルカリ骨材反応	促進膨張試験	参1-70
c. 鉄筋	腐食度	抜き取った鉄筋の腐食度測定	参1-71
	強度	金属材料引張り試験	参1-72
		金属材料曲げ試験	参1-73
d. 骨材	アルカリに対する反応性	化学法	参1-74
		モルタルバー法	参1-75
		偏光顕微鏡観察	参1-76
		粉末X線回折試験	参1-77
		走査型電子顕微鏡観察・SEM試験	参1-78



a. コンクリートの品質

項目	圧縮強度、静弾性係数
手法名	採取コアによる方法
概要	採取したコンクリートのコアから圧縮強度試験機を用いコンクリートの圧縮強度を測定する。実験値の圧縮強度と設計基準強度(構造計算の設計値)を比較しコンクリートの品質を判断する。
適用対象・範囲	<p>構造体強度の把握が第1の目的であり、他の試験方法に比べて、正確に構造体の強度を評価できる方法である。結果としてアルカリ骨材反応により劣化した構造物の強度や劣化の度合いの評価にも適用できる。</p> <p>構造体の強度を推定する試験方法としては、他の方法より正確ではあるが、部材の種類、部材の厚さ、部材中の部位、欠陥部(ひび割れ、コールドジョイント等)等に影響を受けるので、これらの要因を考慮して、構造体の強度を評価する必要がある。</p>
機器・装置	<p>鉄筋探査計(鉄筋の位置、間隔、かぶり厚の測定が可能なもの)</p> <p>コンクリート用コアドリル</p> <p>コンクリートカッター</p> <p>キャッピング用器具または端面研磨器具</p> <p>圧縮試験機</p>
調査方法	<p>コア径およびコア採取箇所の選定</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ JIS A 1107- 1993「コンクリートからコア及びはりの切り取り方法並びに強度試験方法」 ・ JCI-DD1「コンクリート構造物からのコア採取方法(案)」 <p>鉄筋探査計による鉄筋位置、間隔、かぶり厚の推定</p> <p>コア採取位置の決定</p> <p>圧縮強度試験</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ JIS A 1108 1999「コンクリートの圧縮強度試験方法」 ・ JIS A 1149 2001「コンクリートの静弾性係数試験方法」 <p>試験結果の整理</p>
判断基準	<p>圧縮強度と圧縮弾性係数の測定値を用いて判定す</p> <p>採取したコアによって得られた E_c/c との関係は健全なコンクリート曲線から下方にプロットされると骨材反応によるコンクリートの劣化が進行している。</p> 
特徴	多くの試験施設などで実施可能な汎用的方法である。
留意点	<p>粗骨材の大きさにより供試体の大きさが限定される。</p> <p>強度はコアの採取方法、コアの寸法、養生方法等に影響を受ける。</p> <p>コアを採取する場合は、コアを完全に抜き切るか、途中でねじり切るかの判断が必要である。</p> <p>橋脚や橋台などでは、鉄筋のかぶりも大きいので、通常の鉄筋探査径では配筋を調べることは困難である。このような場合には、高性能の鉄筋探査計を使用するか、または配筋図によるチェックが必要不可欠である。</p>


a. コンクリートの品質

項目	静弾性係数測定
手法名	ストレインゲージ、コンプレッソメータ
概要	圧縮強度試験時の縦ひずみと応力の関係から、静弾性係数を縦ひずみと横ひずみの関係からポアソン比を求める。それぞれのひずみはストレインゲージまたはコンプレッソメータで測定する。
適用対象・範囲	鉄筋コンクリート構造物で可能
機器・装置	圧縮試験器 ひずみ測定器
調査方法	<p>JIS A 1149 2001「コンクリートの静弾性係数試験方法」</p> <p>(1) 試験の準備</p> <ul style="list-style-type: none"> 成形した供試体あるいはコア供試体を圧縮試験を行う時と同様な方法で準備する。 供試体の長さおよび直径を0.2mmまで測定する。 <p>ワイヤーストレインゲージを用いた場合</p> <ul style="list-style-type: none"> 供試体表面の相対する位置に2枚ずつ、計4枚のゲージを接着剤を用いて張り付ける。 接着剤が完全に硬化した後、ゲージのリード線を静ひずみ測定器に取り付け、試験準備をする。 <p>コンプレッソメータを用いる場合</p> <ul style="list-style-type: none"> コンプレッソメータを供試体に取り付ける。 装置を正しく調整し、供試体に生じた変形を正確に測定できるように準備する。 <p>(2) 载荷ならびに変形測定試験</p> <ul style="list-style-type: none"> 供試体を载荷し、その都度縦ひずみ、横ひずみを測定す 求めた結果から静弾性係数、ポアソン比を計算する。 <div style="text-align: right;">  </div>
判断基準	構造物コンクリートの配合推定の評価に用いる。
特徴	コンプレッソメータは簡易に測定することができる。
留意点	<p>ストレインゲージを貼るのに手間がかかる。</p> <p>ストレインゲージの場合は貼る場所によって骨材の影響を受ける場合があるので、極力骨材のないところを選んで貼るとよい。</p> <p>コンプレッソメータは正しく調整して取り付ける必要がある。</p> <p>偏圧がかかると相対ひずみ量が異なることがあるので、基本的には平均値を用</p>

a. コンクリートの品質

項目	圧縮強度
手法名	小径コアによる試験
概要	直径20mm程度の小径コアをコア採取装置により採取した後、圧縮強度試験を行い、その試験結果をもとに、あらかじめ定めた実験式を用いて補正することにより、構造体コンクリート強度を推定する調査方法である。
適用対象・範囲	<ul style="list-style-type: none"> ・強度推定法の適用範囲は、10～60N/mm²である。(実験により確認) ・粗骨材の最大寸法20mmの碎石、25mm程度の川砂利および軽量粗骨材を用いたコンクリート
機器・装置	<p>市販の小型ダイヤモンドコアドリル 圧縮試験機</p>  <p>100コア(左)と小径コア(中、右)</p>
調査方法	<p>コアの採取 供試体の成型 圧縮強度試験</p> <p>・JIS A 1108 1999「コンクリートの圧縮強度試験方法」 試験結果の整理</p>  <p>小径コア供試体の圧縮試験状況 (現場での試験も可能)</p>
判断基準	<p>小径コアの直径、コンクリートの強度レベルならびに圧縮試験方法ごとに下式のように表す。</p> $f_c = f_{c-a} + b \times h/d$ <p>ここに、</p> <p>f_c : 構造体コンクリート強度(N/mm²) f_c : 小径コア供試体の強度(N/mm²) h/d : 小径コア供試体の高さhと直径dの比 a, b : 基礎実験により定められた定数</p> <p>なお、定数aおよびbは、室内試験の結果から定められたものであり、小径コアの直径、コンクリートの強度レベルおよび圧縮試験方法によって異なる。</p>
特徴	<p>コアの直径が小さいので、構造体の耐力を損なうことなく、柱、はりなどの主要構造部材からもコアを採取できる。</p> <p>コアの直径が一般の鉄筋ピッチより小さいので、鉄筋切断の可能性が少ない。簡易なドリルを用いて容易にコアを採取することができ、採取跡の補修も容易である。</p> <p>圧縮試験器の容量が小さくて済むので、簡易な試験器を用いて、現場において容易にコンクリート強度を推定できる。</p>
留意点	


a. コンクリートの品質

項目	空気量・気泡間隔係数・細孔構造
手法名	顕微鏡法
概要	コンクリート試料を数cmにスライスし、研磨機で平滑に仕上げた試験体表面を気泡間隔測定装置で空気量等を測定する。
適用対象・範囲	鉄筋コンクリート構造物で可能
機器・装置	<p>コンクリート表面を水平の直角2方向に平滑に移動できるステージをもつ気泡間隔測定装置によって測定する。</p> <div style="text-align: center;">  <p>画像処理による 気泡間隔測定装</p> </div>
調査方法	<p>試料採取</p> <ul style="list-style-type: none"> ・コンクリート供試体を数cmにスライスし、研磨機で平滑に仕上げた供試体を作成する。 ・骨材寸法にもよるが、一般には 10×5cm程度を確保する。 <p>方法</p> <p>コンクリート表面を一定間隔に区切った区切線上の気泡を測定する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ポイントカウント法：基盤上の区切った区切線の交点が気泡断面に合致する割合から空気量を求める。 ・リニアトラバース法：区切線によって気泡上をよぎる際の気泡断面の弦長の総和から空気量を求める。 ・画像処理法：コンクリート試料切片の気泡内に蛍光塗料を添加し、紫外線を照射して気泡を発行させ、顕微鏡により倍率を上げたCCDカメラで発光状態を撮影し、画像処理について空気量を求める。
判断基準	一般に凍結融解の繰り返し作用を受ける恐れがある場合には、気泡間隔係数を200 μm以下となることが必要である。
特徴	<p>ポイントカウント法、リニアトラバース法による測定には一試料2～3時間必要である。</p> <p>ポイントカウント法、リニアトラバース法による測定結果にはほとんど差は生じない。</p>
留意点	<p>コンクリートの研磨作業や測定に熟練を要する。</p> <p>画像処理法は、測定を手軽に短時間でできるようになったが、骨材とペーストの界面などの本来気泡でない部分もカウントすることがあり、気泡間隔係数は少なめに評価されることがある。</p>

a. コンクリートの品質

項目	空気量・気泡間隔係数・細孔構造
手法名	高水圧法
概要	加圧装置にて供試体に水を圧入して空気量を測定する。
適用対象・範囲	鉄筋コンクリート構造物で可能
機器・装置	供試体の周囲に水をめぐらした密閉室に、耐圧試験機を介した加圧装置によって水を圧入する装置
調査方法	<p>試料採取</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 10×20cm程度を確保する。 <p>方法</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ コンクリート試料に300kgf/cm²程度の高水圧をかけ、コンクリートに浸透圧入される水量から空気量を求め
	
判断基準	空気量の目標値は粗骨材の最大寸法が20～40mmの一般的な普通コンクリートでは4～7%を標準
特徴	顕微鏡法に比べて簡便に行える。
留意点	測定値のキャリブレーションの方法、測定精度に課題あり。

a. コンクリートの品質

項目	空気量・気泡間隔係数・細孔構造
手法名	水銀圧入法
概要	水銀の表面張力が大きいことを利用して粉体の細孔に水銀を侵入させるために圧力を加え、圧力と圧入された水銀量から比表面積や細孔分布を求める。
適用対象・範囲	鉄筋コンクリート構造物で可能
機器・装置	 <p>ポロシメータ</p>
調査方法	<p>コア(100mm、 30～50mmでも可)を抜き取る。</p> <p>所定の部分にコンクリートカッターで切断した後、2.5～5mmに粉碎する。</p> <p>アセトンおよびD-dry乾燥によって水和を停止させた試料とする。</p> <p>試料の細孔構造を水銀圧入法により測定する。</p> <p>塩酸もしくはグルコン酸ナトリウム溶液を用いて、試料中の骨材量を測定する。</p> <p>有効細孔量として整理する。</p>
判断基準	
特徴	細孔径分布、総有効細孔量、メジアン半径などの細孔構造の指標を再現性良く測定できる。
留意点	

a. コンクリートの品質

項目	空気量・気泡間隔係数・細孔構造
手法名	気体(窒素)吸着法
概要	窒素吸着によるセメント硬化体の細孔径分布および比表面積を測定する。
適用対象・範囲	鉄筋コンクリート構造物で可能
機器・装置	細孔分布測定装置
調査方法	<p>(1) コンクリートのモルタル部分を試料容器に入る大きさに切断機を用いて切断するか、鉄乳鉢を用いて粗砕し測定試料とする。</p> <p>(2) 測定試料をD-乾燥して水和を停止する。</p> <p>(3) D-乾燥した測定試料を量り採り、窒素を吸着する。</p> <p>細孔径分布測定の場合</p> <p>平衡圧PがP/P_0(P_0は飽和蒸気圧が0.95となるまで平衡圧と吸着量を測定する。</p> <p>B.E.T.法による比表面積の測定の場合</p> <p>多点法で測定する場合は平衡圧PがP/P_0(P_0は飽和蒸気圧)で0.05～0.35の範囲内で数点(4～6点)、平衡圧と吸着量を測定する。1点法で測定する場合は平衡圧がP/P_0が0.3～0.35となる窒素を吸着させ、その時の平衡圧と吸着量を測定する。また、吸着量の測定は熱伝導度検出器(TCD)を用いて吸着量の測定を行う流動法で測定してもよい。</p> <p>(4) 平衡圧と吸着量の関係から細孔径分布の計算または比表面積の計算を行う。</p> <p>細孔径分布の計算</p> <p>計算方法はいくつかの方法があるので目的、計算ができる細孔径の範囲に応じて計算方法を選択する。計算結果は単位試料質量当りかまたは単位試料体積当りで示し、計算方法を明記する。</p> <p>B.E.T.法による比表面積の場合</p> <p>B.E.T.式によって比表面積(単位試料質量当りの表面積)を算出する。</p>
判断基準	
特徴	B.E.T.法による表面積の測定は一般的な方法である。
留意点	<p>細孔径分布の測定はP/P_0が0.95となるまで測定する必要があり、測定時間が長い。</p> <p>気体吸着は使用する気体により吸着性状が異なるため、試料によっては比表面積等の測定値が異なる場合がある。</p>


a. コンクリートの品質

項目	配合推定
手法名	セメント協会法
概要	打設されたコンクリートの材料構成がどのようなものか、配(調)合どおりのものであるか否かを把握する。
適用対象・範囲	普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートに適用する。
機器・装置	通常の化学分析を行えるレベルの機器・試薬で行うことができる。
調査方法	<p>コンクリートの単位容積質量を測定後、微粉碎して希塩酸に溶解し、不溶残分と酸化カルシウム量を測定する。</p> <p>別に強熱減量を求める。</p> <p>単位容積質量、吸水率、付着水、不溶残分、酸化カルシウムより、配(調)合を算出する。</p>
判断基準	構造物コンクリートの配合推定の評価に用いる。
特徴	<p>試験が比較的簡便であり、特殊な技能、分析装置を必要としない。</p> <p>比較的短時間で試験結果が得られる。</p>
留意点	<p>使用材料の入手、分析を行って補正する必要があり、また骨材比率が既知でないと、細、粗骨材の推定が困難である。</p> <p>貝殻を含んだ石灰石系骨材を使用した場合には、ほぼ推定が困難である。</p> <p>単位水量は、フレッシュの状態では封緘された以外、誤差が多く、ほぼ推定不可能である。</p> <p>近年の多様な混和材、剤が使用されている場合、滴定法による酸化カルシウムの定量ができない場合がある。</p>

a. コンクリートの品質

項目	配合推定
手法名	フッ酸法
概要	石灰岩を骨材として用いている場合にも適用可能な硬化コンクリートの単位セメント量を推定する方法。
適用対象・範囲	コンクリートに使用した材料が入手できなくても推定が可能であり、骨材が石灰岩系でも配(調)合推定は可能である。 単位水量はセメント量、細・粗骨材量を求めた残量としているため推定精度は高められない。 なお本試験方法では、コンクリートが中性化していても推定精度は未中性化の場合と同程度と考えられる。
機器・装置	偏光顕微鏡
調査方法	モルタル部を切り出し、薄片を作製後、偏光顕微鏡を用いて測線上の細骨材の長さ、岩石種、鉱物種を記録する。 コンクリート断面に見られる粗骨材をトレースし粗骨材容積占有率を推定後、粗骨材を取り出し比重・吸水率・酸化カルシウム量を測定する。 コンクリート試料を微粉碎後、フッ化水素酸で分解し酸化カルシウムをEDTA滴定法で定量する。
判断基準	構造物コンクリートの配合推定の評価に用いる。
特徴	石灰岩系骨材使用の場合でも、単位セメント量、単位細・粗骨材量を推定できる。 不溶残分を定量しないため、溶解性の大きい骨材を使用していても誤差はない。 中性化に伴うセメント水和物分解によるシリカゲルの生成は誤差にならない。
留意点	細骨材を偏光顕微鏡で観察するため、時間と専門的知識を要する。 粗骨材のトレース、薄片の作製、酸化カルシウムの定量の順で行い、同時平行では行えないため、時間を要する。または複数の試験体を必要とする。

a. コンクリートの品質

項目	配合推定
手法名	ギ酸法
概要	セメント協会法の欠点である「セメント水和物中のカルシウムと骨材中のカルシウムを区分できないこと」の解消を図った方法である。
適用対象・範囲	鉄筋コンクリート構造物で可能
機器・装置	ICP発光分光分析装置 
調査方法	真空吸水 - 真空乾燥によって単位容積質量を求める。コンクリート粉末をDTA-TGにより強熱減量を求め、一方0.5%ギ酸で分解し、シリカ量を求める。 計算により、単位水量、単位セメント量、単位骨材量を求める。
判断基準	構造物コンクリートの配合推定の評価に用いる。
特徴	試験が比較的簡便であり、特殊な技能を必要としない。機器はICPを用いるが、吸光光度法でも代用できる。 石灰岩質骨材を使用していても推定可能である。 比較的短期間で試験結果が得られる。 骨材のシリカをわずかしか溶解しないため精度よくセメント量が推定できる。
留意点	中性化したコンクリート、アルカリシリカ反応性を生じているコンクリートについては推定不能である。


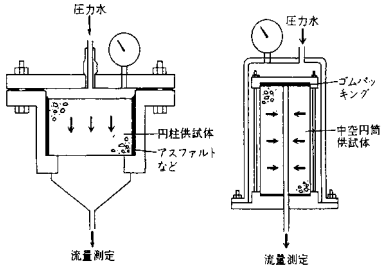
a. コンクリートの品質

項目	配合推定
手法名	グルコン酸法
概要	セメント協会法の欠点である「セメント水和物中のカルシウムと骨材中のカルシウムを区分できないこと」の解消を図った方法である。
適用対象・範囲	ポルトランドセメントで普通、石灰岩、貝殻を含む骨材を使用した硬化コンクリートの配(調)合推定が可能である。 混合セメントについては単位セメント量が小さくなる。また中性化したコンクリートには適用できない。
機器・装置	通常の化学分析を行えるレベルの機器・試薬で行うことができる。
調査方法	コンクリートコア供試体(100mm、 30～50mmでも可)を抜き取る。 全量を粉砕する。 所定の温度で、コンクリート粉末をグルコン酸ナトリウムで溶解する。 不溶残分から単位セメント量を計算する。
判断基準	構造物コンクリートの配合推定の評価に用いる。
特徴	単位セメント量を±10%で推定できる。
留意点	石灰石骨材などを含んでいても分析が可能であるが、中性化が進行したコンクリートには適用できない。

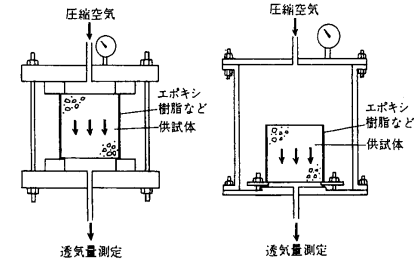
a. コンクリートの品質

項目	透水性																										
手法名	インプット法(浸透深さによる方法)																										
概要	インプット法(浸透深さによる方法)によって拡散係数を求めて透水係数を算定する。その結果、コンクリートの水密性を評価する。																										
適用対象・範囲	鉄筋コンクリート構造物で可能																										
機器・装置																											
調査方法	<p>直径と高さがほぼ等しい円柱供試体を所定の養生を行った後、7日間20～25の室内で乾燥させる。</p> <p>1～2N/mm²の水圧を48時間加える。</p> <p>供試体を割裂し、水の平均浸透深さを測定する。</p> <p>次式により、拡散係数を測定する。</p> $i^2 = \alpha \cdot D m^2 / 4t$ <p>ここに、i^2 : 拡散係数 (cm/sec²) , $D m$: 平均浸透深さ (cm) , t : 水圧を加えた時間 (sec)</p> <p>α は係数で下記の表による</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <caption>表 水圧を加えた時間 t による α の値</caption> <thead> <tr> <th>t (sec)</th> <th>1</th> <th>24×60²</th> <th>48×60²</th> <th>72×60²</th> <th>120×60²</th> <th>312×60²</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>α</td> <td>1</td> <td>130.5</td> <td>175.7</td> <td>209.0</td> <td>259.6</td> <td>391.8</td> </tr> </tbody> </table> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <caption>表 水圧 1 kg/cm² とした場合の ξ の値</caption> <thead> <tr> <th>P_0 (kg/cm²)</th> <th>2.5</th> <th>5</th> <th>10</th> <th>15</th> <th>20</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ξ</td> <td>0.594</td> <td>0.905</td> <td>1.163</td> <td>1.301</td> <td>1.386</td> </tr> </tbody> </table>	t (sec)	1	24×60 ²	48×60 ²	72×60 ²	120×60 ²	312×60 ²	α	1	130.5	175.7	209.0	259.6	391.8	P_0 (kg/cm ²)	2.5	5	10	15	20	ξ	0.594	0.905	1.163	1.301	1.386
t (sec)	1	24×60 ²	48×60 ²	72×60 ²	120×60 ²	312×60 ²																					
α	1	130.5	175.7	209.0	259.6	391.8																					
P_0 (kg/cm ²)	2.5	5	10	15	20																						
ξ	0.594	0.905	1.163	1.301	1.386																						
判断基準	コンクリートの水密性を判断する。																										
特徴																											
留意点																											

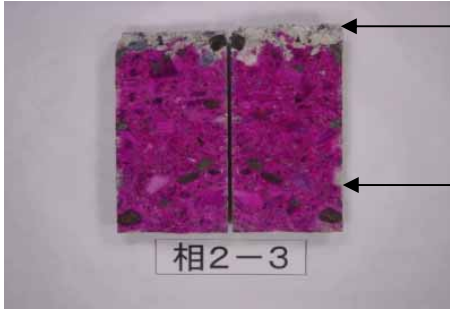
a. コンクリートの品質

項目	透水性
手法名	アウトプット法
概要	一定の圧力で直接供試体に水を作用させ、単位時間に単位断面を通過して流出した水量を計り、圧力と流出量との関係から透水性を求める方法。
適用対象・範囲	鉄筋コンクリート構造物で可能
機器・装置	透水試験装置  加圧式透水試験機
調査方法	<p>透水試験装置に供試体を加熱したアスファルトまたはパラフィンとロジンの質量比1:1の混合物等で固定する。</p> <p>透水試験を恒温室内で実施する。透水係数は、流入量と流出量がほぼ等しくなった時点の透水量により次式により求める。</p> $K = \frac{Q}{A} \times \left(\frac{L}{P} \right) \times \left(\frac{Q}{A} \right)$ <p>ここに、K：透水係数 (cm/sec) ρ：水の密度 (0.001kgf/cm³) L：試験体厚さ (cm) P：水圧 (kgf/cm²) Q：透水量 (cm³/sec) A：試験体の断面積 (cm²)</p>  <p>図 透水試験（アウトプット）概略図</p>
判断基準	コンクリートの水密性を判断する。
特徴	
留意点	

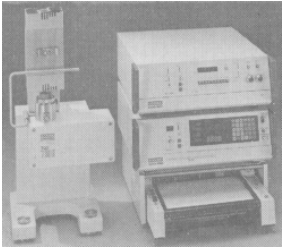
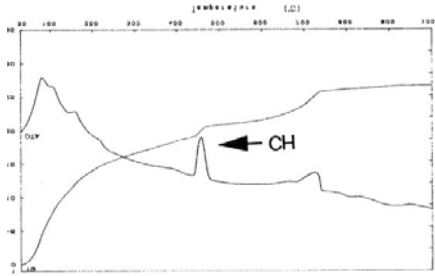
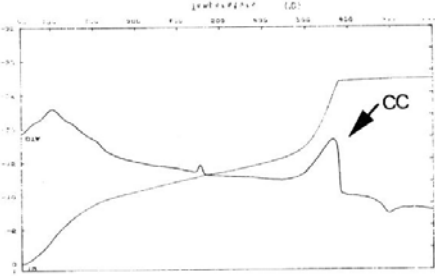
a. コンクリートの品質

項目	透気性
手法名	透気試験
概要	一定の圧力の空気を試験体に作用させ、空気の流れが定常になった後、流量を測定し、ダルシー則より透気係数を求める。
適用対象・範囲	鉄筋コンクリート構造物で可能
機器・装置	透気試験装置
調査方法	<p>透気試験装置に供試体を加熱したアスファルトまたはパラフィンとロジンの質量比1:1の混合物等で固定する。</p> <p>透気試験を恒温室内で実施する。透気係数は、流入量と流出量がほぼ等しくなった時点の透気量により次式により求める。</p> $K = \frac{2 L P_2}{P_1^2 - P_2^2} \times \frac{Q}{A}$ <p>ここに、K：透気係数(cm/sec) L：試験体厚さ(cm) P₁：載荷圧力 + 大気圧(kgf/cm²) P₂：大気圧(1.0)(kgf/cm²) A：透気面積(78.5cm²) A：空気の単位容積重量(1.205×10⁻⁶kgf/cm³) Q：透気量(cc/sec)</p>  <p style="text-align: center;">図 透気試験(定圧方法)概略図</p>
判断基準	コンクリートの水密性を判断する。
特徴	
留意点	

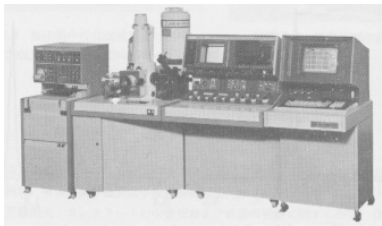
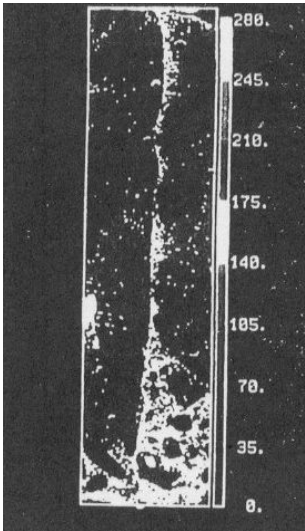
b. コンクリートの損傷度

項目	中性化・炭酸化
手法名	フェノールフタレン噴霧法によるコンクリートの中性化深さの測定
概要	構造物からコアを採取したりして、大気中の炭酸ガスなどの作用によって、コンクリートのアルカリ性が失われた範囲を測定する。
適用対象・範囲	すべての鉄筋コンクリート構造物で可能。基本的には構造物からコア試験体を採取し、その試験体で測定する。
機器・装置	フェノールフタレン1%アルコール溶液をコア試験体の割裂面に噴霧する。
調査方法	<ol style="list-style-type: none"> 1. 構造物からコア試験体を採取する。(原則粗骨材径の3倍以上のコアを採取する。) 2. コア試験体が外気に接しないようにサランラップ等で養生して試験室に持ち運ぶ。 3. アムスラー等でコア試験体を割裂する。 4. 割裂面にフェノールフタレン1%アルコール溶液を噴霧する。 5. コンクリート表面から赤紫色に着色したところまでの距離を測定する。その距離が中性化深さである。
判断基準	<p>中性化深さの測定例を写真に示す。</p>  <p>上面(コンクリート表面)から赤紫色着色面までの距離を測定する。これが中性化深さである。</p>
特徴	簡易に中性化範囲を測定できる
留意点	<p>(1) コアの採取やはつりなど、ある程度の破壊を伴う。</p> <p>(2) フェノールフタレンが赤紫色に変色するPHは8.6以上であり、鉄筋が腐食する雰囲気にあるかどうかの判定には役立つが、中性化の原因についての情報は得られない。</p>

b. コンクリートの損傷度

項目	中性化・炭酸化
手法名	熱分析法による炭酸化範囲の測定
概要	熱分析法によって、水和組織中のCaCO ₃ の含有割合の分布を測定し炭酸化の範囲を推する。炭酸化の範囲は、健全部との比較によって判定する。
適用対象・範囲	すべての鉄筋コンクリート構造物で可能。構造物からコア試験体を採取し、その試験体を分析する。
機器・装置	図に示す示差熱重量分析装置で試験を行う。 <div style="text-align: center;">  示差熱重量分析装置 </div>
調査方法	<p>(1) 重液分離によって分別された試料(番号:D-14参照)をメノウ乳鉢によって固結部分を軽くほぐす程度にすりつぶす。その際、炭酸化を受けないように注意する。</p> <p>(2) 熱分析装置(TG - DTA)を用い、試料20~30mgについて、10 / minの昇温速度の条件下で室温から1000 までの重量変化を測定する。(番号:D-16参照)</p> <p>(3) 次式からCa(OH)₂量とCaCO₃量を算出する。</p> <p>Ca(OH)₂量: (Ca(OH)₂による減量 / 試料の質量) × (1 / 0.24) × 100%</p> <p>CaCO₃量: (CaCO₃による減量 / 試料の質量) × (1 / 0.44) × 100%</p>
判断基準	<p>(1) 促進中性化試験を行った試験体における炭酸化範囲の調査例</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  健全部の例 </div> <div style="text-align: center;">  中性化部の例 </div> </div>
特徴	
留意点	<p>(1) 炭酸化によるCa(OH)₂含有量の減少程度はわかるが、C - S - Hの変質程度までは判定できない。</p> <p>(2) 石灰接骨剤や混和剤として石灰石微粉末が使われている場合は、中性化で生成したCaCO₃量の算出は困難である。</p>

b. コンクリートの損傷度

項目	中性化・炭酸化
手法名	EPMAによる炭酸化範囲の推定
概要	最大で10cmまでの試験片を対象として、中性化範囲ではなく、炭素の分布を調査した結果から炭酸化した範囲を推定する。
適用対象・範囲	すべての鉄筋コンクリート構造物で可能。構造物からコア試験体を採取し、その試験体で分析を行う。
機器・装置	図に示すX線マイクロアナライザーで試験を行う。  <p style="text-align: right;">X線マイクロアナライザー</p>
調査方法	炭酸化の範囲を調査したい試験片の表面を研磨した後、金を蒸着して、EPMA装置によって炭素の濃度分布を測定する。 (測定条件の例) 加圧電圧:15kV 試料電圧: 5×10^{-7} A、プローブ径100 μ m ピクセル数:200 \times 780、ピクセルサイズ:100 μ m
判断基準	(1) 促進中性化試験を行った打ち継ぎ面付近の炭素の分布の例  <p style="text-align: right;">炭素の量が多い部分が白く表現されているため、打ち継ぎ部が中性化していることが分かる。</p> <p style="text-align: right;">E P M A 測定結果の例</p>
特徴	
留意点	(1) 通常は5cm程度(最大でも10cmまで)の大きさの試験片にしか適用できない。 (2) 研磨の際、試験体に樹脂を含浸させた場合は、樹脂中の炭素も測定されるので注意が必要である。

b. コンクリートの損傷度

項目	塩化物濃度
手法名	全塩分
概要	硬化コンクリート中に含まれる塩分の全量を分析する方法について示す。
適用対象・範囲	すべての鉄筋コンクリート構造物で可能。構造物から試料を採取し、その試験体を分析する。
機器・装置	自動滴定装置等を用いる。
調査方法	<p>(1) 試料調整</p> <p>構造物から採取したコンクリートコアやその他のコンクリート塊を、塩分の溶出を防ぐため水冷式のカッターなどを使用しないで、タガネなどを用いて割裂する。次いでジョークラッシャーや鉄乳鉢(ステンレス乳鉢)を用いて、約5mm以下に粗粉碎して風乾する。振動ミルや鉄乳鉢(ステンレス乳鉢)を用いて149μmのふるいを全通するように粉碎する。一昼夜風乾したものを試料とする。</p> <p>(2) 塩化物イオンの抽出</p> <p>骨材の結晶内で置換固溶している微量の、鉄筋の腐食に無関係な固定化された塩分を溶出させずに、施工およびその後に混入してくる塩分のみを完全に溶解する。試料に硝酸溶液(2N)を加えてpH値を3以下とし、加熱煮沸して全塩分を溶解する。</p> <p>(3) 塩化物量の測定</p> <p>a) 塩化物イオン選択性電極を用いた電位差滴定法</p> <p>試料を硫酸で溶解した溶液を、ろ過洗浄する。ろ過を分取し塩化物イオン選択性電極を備えた電位差滴定装置を用いてN/200硝酸銀溶液で電位差滴定する。滴定量から塩分量を算出する。</p> <p>b) クロム酸銀 - 吸光光度法</p> <p>試料を硫酸で溶解した溶液に炭酸カルシウムを少量ずつ加えて再び煮沸して冷却した後、吸引ろ過洗浄する。ろ液を分取しクロム酸銀(粉末)を加えて呈色させる。上澄み液を加圧してろ過して吸光度を測定する。吸光度から塩分量を算出する。</p> <p>c) 硝酸銀滴定法</p> <p>試料を硝酸で溶解した溶液に炭酸カルシウムを少量ずつ加えて再び煮沸して冷却した後、吸引ろ過洗浄する。ろ液を分取しクロム酸カリウムを指示薬としてN/10硝酸銀標準溶液で滴定する。滴定量から塩分を算出する。</p> <p>(4) 注意事項</p> <p>無色透明あるいは淡黄色の液体である硝酸は赤褐色の特有の臭気を持つガスを発生する。皮膚に触れると直ちに皮膚が腐食され、目に入れば失明するおそれがあるので、取り扱いには十分慎重に行うこと。</p>
判断基準	コンクリート構造物への塩化物イオンの浸入量、浸入深さの調査 塩化物イオンの硬化コンクリート中の移動に関する検討
特徴	
留意点	塩化物イオンの定量は所有する装置や経験などにより選択する余地がある。 塩化物イオンの形態により抽出の挙動が異なるので抽出条件を明示する必要がある。 操作が比較的煩雑である。(このため簡易な方法も検討されている。[2])

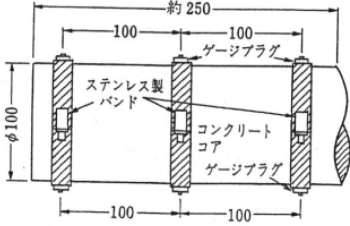
b. コンクリートの損傷度

項目	塩化物濃度
手法名	可溶性塩分
概要	硬化コンクリート中に含まれる50 の温水に可溶性塩分量を分析する方法について示す。
適用対象・範囲	すべての鉄筋コンクリート構造物で可能。構造物から試料を採取し、その試料を分析する。
機器・装置	自動滴定装置等
調査方法	<p>(1) 試料調整 全塩分に示す試料調整法と同一である。</p> <p>(2) 塩化物イオンの抽出 一般に水または温水により容易に抽出される塩分はイオン化した状態にあるものが多く、鋼材の腐食に直接関与すると考えられている。</p> <p>(3) 塩化物量の測定 a) 塩化物イオン選択性電極を用いた電位差滴定法 試料から温水を用いて塩分を抽出した溶液を吸引ろ過する。ろ液を分取し硝酸溶液(2 N)を加えて酸性にした後、塩化物イオン選択性電極を備えた電位差滴定装置を用いてN / 200硝酸銀溶液で電位差滴定する。滴定量から塩分量を算出する。 b) クロム酸銀 - 吸光光度法 試料から温水を用いて塩分を抽出した溶液を吸引ろ過する。ろ液を分取し硝酸溶液(2 N)を加えて酸性にする。炭酸カルシウムを加えて静かに沸騰させた後、常温まで冷却しろ過洗浄する。ろ液を分取しクロム酸銀(粉末)を加えて呈色させ、加圧ろ過して400mm付近で吸光度を測定する。吸光度から塩分量を算出する c) 硝酸銀滴定法 試料から温水を用いて塩分を抽出した溶液を吸引ろ過する。ろ液を分取し硝酸溶液(2 N)を加えて酸性にする。炭酸カルシウムを加えて静かに沸騰させた後、常温まで冷却しろ過洗浄する。ろ液を分取しクロム酸カリウムを指示薬としてN / 10硝酸銀標準溶液で滴定する。滴定量から塩分を算出する。</p> <p>(4) 注意事項 50 で抽出中の温度の変化に留意する。室温などを50 に設定できないときは保温容器[2]などを利用する必要がある</p>
判断基準	コンクリート構造物への塩化物イオンの浸入量、浸入深さの調査 塩化物イオンの硬化コンクリート中の移動に関する検討
特徴	
留意点	全塩分に示す全塩分の分析の場合と同様である。 ただし可溶性塩分については文献[1]のなかで簡易法は開発されていない。


b. コンクリートの損傷度

項目	塩化物濃度
手法名	蛍光X線分析による塩化物の分析
概要	(目的、特徴、適用限界、定量の範囲、精度など) 硬化体(ペースト、モルタル、コンクリート)中の塩素の全量分析
適用対象・範囲	すべての鉄筋コンクリート構造物で可能。構造物から試料を採取し、その試料を分析する。
機器・装置	自動滴定装置等
調査方法	<p>操作</p> <p>セメント硬化体中の塩素の蛍光X線分析に関しては公定法はないので「含塩素スラグ中の定量」[2]で報告されている方法をモルタルに適用したところ、比較的再現性良く測定することが可能であることがわかった。したがって本項ではこの方法について示す。</p> <p>塩化物含有量が異なる試料を湿式分析により塩素量を定量する。湿式分析方法はJCI - SC 4硬化コンクリート中に含まれる塩素の分析方法に準拠して行う。</p> <p>によって塩化物含有量が既知となった試料と融剤、剥離促進剤を容器に測りとり、ガラスビード作成装置にてビードを作成する。ビード作成温度や作成方法については文献[2]を参考とする。</p> <p>蛍光X線装置にて で作成したビードのX線強度を測定し、湿式分析値とエックス線強度値から検量線を作成する。塩素の蛍光X線の測定方法はJIS等に規定されていないので文献[2]の方法を参考にして分光結晶や検出器を選定する。</p> <p>測定試料に関しても 法でガラスビードを作製し、蛍光X線装置X線強度を測定し、得られた検量線から含有量を定量する</p>
判断基準	鉄筋コンクリート中の塩分濃度の測定 他。
特徴	迅速分析が可能である。
留意点	<p>試料調整温度により塩素の揮散量が異なるため、厳密な温度管理が必要である。</p> <p>検量線作成のため濃度既知試料が必要であり、湿式分析技術も必要である。</p> <p>測定条件設定に習熟が必要である。</p> <p>装置が高価であり、試験機関に限られる。</p>


b. コンクリートの損傷度

項目	アルカリ骨材反応													
手法名	コア試料による膨張率の測定方法													
概要	アルカリ骨材反応を生じた構造物から試料を採取し、コアの膨張率について測定する方法である。													
適用対象・範囲	アルカリ骨材反応が生じた、あるいは疑われる構造物													
機器・装置	恒温恒湿槽													
調査方法	<p>1. 構造物からコア試験体を採取し、図に示すゲージを取り付ける。</p> <p>2. 取り付けた時点の基長をコンタクトゲージ等で測定する。</p> <p>3. 湿潤状態で養生し、試験室(20 一定)に保管するし、膨張が収束するまで定期的に測定を行う。</p> <p>4. 4.0 一定の環境に湿潤状態(湿度95%以上)を保ったまま保管し、定期的に6ヶ月測定を続ける。(この方法がJCI法である。類似な方法として5.0 のNaCl溶液で3ヶ月間保管するのがデンマーク法、8.0 NaOH溶液に2週間保管するのがカナダ法である。)</p>													
	 <p>図 2-3 ゲージプラグの取付けの例</p>													
判断基準	<p>各機関によって異なるが、たとえば以下のような例がある。</p> <table border="1" data-bbox="400 1211 1353 1653"> <thead> <tr> <th></th> <th>促進養生の条件</th> <th>判定基準</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">JCI-DD2法</td> <td rowspan="2">温度 40℃、湿度 100%の条件下にて養生</td> <td>阪神高速道路公団 全膨張量が 0.1%を超える場合、有害と判定する。</td> </tr> <tr> <td>建設省 建設省総合プロジェクト「コンクリートの耐久性康応技術の開発」では 40 度、100%RH.の条件下に 13 週間養生し、0.05%以上の膨張量を示すものを有害または潜在的有害と判定する。</td> </tr> <tr> <td>デンマーク法</td> <td>温度 50℃ の飽和 NaCl 溶液中に浸漬</td> <td>試験材齢 3ヶ月での膨張量で以下のように判定する。 0.4%以上:膨張性あり 0.1~0.4%:不明確 0.1%未満:膨張性なし</td> </tr> <tr> <td>カナダ法(NBRI法)</td> <td>温度 80℃ の 1N の NaOH 溶液中に浸漬</td> <td>ASTM S 1260-94 の判定基準:試験開始後 14 日間での膨張量で以下のように判定する。 0.1%以下の場合:無害 0.10~0.20%の場合:有害と無害な骨材が含まれる (この場合、14 日以降もさらに試験を継続する) 0.20%以上の場合:潜在的に有害な膨張率</td> </tr> </tbody> </table>		促進養生の条件	判定基準	JCI-DD2法	温度 40℃、湿度 100%の条件下にて養生	阪神高速道路公団 全膨張量が 0.1%を超える場合、有害と判定する。	建設省 建設省総合プロジェクト「コンクリートの耐久性康応技術の開発」では 40 度、100%RH.の条件下に 13 週間養生し、0.05%以上の膨張量を示すものを有害または潜在的有害と判定する。	デンマーク法	温度 50℃ の飽和 NaCl 溶液中に浸漬	試験材齢 3ヶ月での膨張量で以下のように判定する。 0.4%以上:膨張性あり 0.1~0.4%:不明確 0.1%未満:膨張性なし	カナダ法(NBRI法)	温度 80℃ の 1N の NaOH 溶液中に浸漬	ASTM S 1260-94 の判定基準:試験開始後 14 日間での膨張量で以下のように判定する。 0.1%以下の場合:無害 0.10~0.20%の場合:有害と無害な骨材が含まれる (この場合、14 日以降もさらに試験を継続する) 0.20%以上の場合:潜在的に有害な膨張率
	促進養生の条件	判定基準												
JCI-DD2法	温度 40℃、湿度 100%の条件下にて養生	阪神高速道路公団 全膨張量が 0.1%を超える場合、有害と判定する。												
		建設省 建設省総合プロジェクト「コンクリートの耐久性康応技術の開発」では 40 度、100%RH.の条件下に 13 週間養生し、0.05%以上の膨張量を示すものを有害または潜在的有害と判定する。												
デンマーク法	温度 50℃ の飽和 NaCl 溶液中に浸漬	試験材齢 3ヶ月での膨張量で以下のように判定する。 0.4%以上:膨張性あり 0.1~0.4%:不明確 0.1%未満:膨張性なし												
カナダ法(NBRI法)	温度 80℃ の 1N の NaOH 溶液中に浸漬	ASTM S 1260-94 の判定基準:試験開始後 14 日間での膨張量で以下のように判定する。 0.1%以下の場合:無害 0.10~0.20%の場合:有害と無害な骨材が含まれる (この場合、14 日以降もさらに試験を継続する) 0.20%以上の場合:潜在的に有害な膨張率												
特徴	カナダ法は、短期間で測定できる。													
留意点	<p>1. 各方法の保管する溶液の種類による影響を十分に考慮する必要がある。</p> <p>2. JCI 法以外は、あまり一般化されていないので、対応できる研究施設は少ない。</p>													

c. 鉄筋の損傷度

項目	鉄筋腐食度																																																																																														
手法名	コンクリート中の鋼材の腐食評価																																																																																														
概要	<p>コンクリート構造物から取り出した鉄筋に対して、腐食状況を確認する。</p> <p>1) 腐食面積率 2) 鋼材断面減少 3) 重量減少率</p>																																																																																														
適用対象・範囲	全ての鋼材に適用可能																																																																																														
機器・装置	<p>プラニメータ 画像処理装置 ポイントマイクロメータ</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">  </div> <p style="display: flex; justify-content: space-around;"> プラニメータ 画像処理装 </p>																																																																																														
調査方法	<p>1) 腐食面積率</p> <p>コンクリート構造物から取り出した鉄筋に対して、腐食状況を正確に写し取り展開図を作成する。更に腐食部分の面積をプラニメータや画像処理等により測定する。</p> <p>2) 鋼材断面減少</p> <p>酸類等により腐食生成物を除去した後、鋼材が最も細くなっている部分の直径を、ポイントマイクロメータ、400倍程度の顕微鏡の焦点距離を利用して計測する</p> <p>3) 重量減少率</p> <p>腐食生成物を除去した後の鋼材重量と当初の重量との差から、腐食によって損失した鋼材重量を計測する。</p>																																																																																														
判断基準	<p>鉄筋腐食量が大きい場合は構造的な欠陥につながる。また、腐食面積率が高いものは、環境状況やかぶり厚との関連を合わせて考えると、耐久性能が低下していると考えられるものもある。一方、腐食減量が集中しているものは外観状ひび割れ発生位置と関連しているものが多いと考えられる。</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <caption>表 4.8 鋼材腐食状況評価の目安^{19)~17)}</caption> <thead> <tr> <th rowspan="2">腐食状況評価の目安</th> <th colspan="2">著しい腐食とは認められない</th> <th colspan="2">著しく腐食している</th> </tr> <tr> <th colspan="2">現状で十分使用可</th> <th colspan="2">注意が必要 交換・補修等が必要</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>腐食の形態評価</td> <td colspan="2">G 腐食</td> <td colspan="2">D 腐食</td> </tr> <tr> <td rowspan="5">腐食調査基本項目</td> <td>腐食グレード</td> <td>I</td> <td>II</td> <td>III</td> <td>IV</td> </tr> <tr> <td>腐食による鋼材断面の減少</td> <td colspan="2">ほとんど断面減少は見られない</td> <td colspan="2">明らかに断面の減少が見られる。IVの場合は1mm以上欠損していることが多い</td> </tr> <tr> <td>重量変化率</td> <td colspan="2">5%以下</td> <td>~8%</td> <td>左以上</td> </tr> <tr> <td>腐食度</td> <td colspan="2">3~7 mdd以下</td> <td colspan="2">10 mdd 以上</td> </tr> <tr> <td>侵食度</td> <td colspan="2">0.15 mm/年以下</td> <td colspan="2">0.15 mm/年以上</td> </tr> <tr> <td>腐食電位</td> <td colspan="2">-0.20 V<E</td> <td colspan="2">E<-0.35 V</td> </tr> <tr> <td rowspan="5">構造物としての検討項目</td> <td>コンクリートのひびわれの有無</td> <td colspan="2">なし</td> <td>ひびわれ発生開始</td> <td>ひびわれが発生しているら必ずIV。逆にIVであれば、おおむねひびわれ発生</td> </tr> <tr> <td>コンクリートのまび散散</td> <td colspan="2">まびは鉄筋とコンクリートの界面にとどまる</td> <td>コンクリート内部へ拡散開始</td> <td>ひびわれに陥って拡散、コンクリート表面にしみ出る</td> </tr> <tr> <td rowspan="3">付着強度</td> <td>異形</td> <td colspan="4">ほとんど変化せず</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">丸鋼</td> <td colspan="4">腐食度が大きくなるに従い、むしろ増大する</td> </tr> <tr> <td colspan="4">付着強度比(1を100とする)</td> </tr> <tr> <td>降伏点</td> <td>100</td> <td>134</td> <td>166</td> <td>139</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">引張強さ</td> <td colspan="2">ほとんど変化せず</td> <td colspan="2">腐食減量に比例して低下</td> </tr> <tr> <td colspan="2">ほとんど変化せず</td> <td colspan="2">降伏点が現れにくくなる</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">引張強さ</td> <td colspan="2">ほとんど変化せず</td> <td colspan="2">断面欠損がなければ強さの低下は無視しうる</td> </tr> <tr> <td colspan="2">ほとんど変化せず</td> <td colspan="2">かなり低下する</td> </tr> </tbody> </table>	腐食状況評価の目安	著しい腐食とは認められない		著しく腐食している		現状で十分使用可		注意が必要 交換・補修等が必要		腐食の形態評価	G 腐食		D 腐食		腐食調査基本項目	腐食グレード	I	II	III	IV	腐食による鋼材断面の減少	ほとんど断面減少は見られない		明らかに断面の減少が見られる。IVの場合は1mm以上欠損していることが多い		重量変化率	5%以下		~8%	左以上	腐食度	3~7 mdd以下		10 mdd 以上		侵食度	0.15 mm/年以下		0.15 mm/年以上		腐食電位	-0.20 V<E		E<-0.35 V		構造物としての検討項目	コンクリートのひびわれの有無	なし		ひびわれ発生開始	ひびわれが発生しているら必ずIV。逆にIVであれば、おおむねひびわれ発生	コンクリートのまび散散	まびは鉄筋とコンクリートの界面にとどまる		コンクリート内部へ拡散開始	ひびわれに陥って拡散、コンクリート表面にしみ出る	付着強度	異形	ほとんど変化せず				丸鋼	腐食度が大きくなるに従い、むしろ増大する				付着強度比(1を100とする)				降伏点	100	134	166	139	引張強さ	ほとんど変化せず		腐食減量に比例して低下		ほとんど変化せず		降伏点が現れにくくなる		引張強さ	ほとんど変化せず		断面欠損がなければ強さの低下は無視しうる		ほとんど変化せず		かなり低下する	
腐食状況評価の目安	著しい腐食とは認められない		著しく腐食している																																																																																												
	現状で十分使用可		注意が必要 交換・補修等が必要																																																																																												
腐食の形態評価	G 腐食		D 腐食																																																																																												
腐食調査基本項目	腐食グレード	I	II	III	IV																																																																																										
	腐食による鋼材断面の減少	ほとんど断面減少は見られない		明らかに断面の減少が見られる。IVの場合は1mm以上欠損していることが多い																																																																																											
	重量変化率	5%以下		~8%	左以上																																																																																										
	腐食度	3~7 mdd以下		10 mdd 以上																																																																																											
	侵食度	0.15 mm/年以下		0.15 mm/年以上																																																																																											
腐食電位	-0.20 V<E		E<-0.35 V																																																																																												
構造物としての検討項目	コンクリートのひびわれの有無	なし		ひびわれ発生開始	ひびわれが発生しているら必ずIV。逆にIVであれば、おおむねひびわれ発生																																																																																										
	コンクリートのまび散散	まびは鉄筋とコンクリートの界面にとどまる		コンクリート内部へ拡散開始	ひびわれに陥って拡散、コンクリート表面にしみ出る																																																																																										
	付着強度	異形	ほとんど変化せず																																																																																												
		丸鋼	腐食度が大きくなるに従い、むしろ増大する																																																																																												
			付着強度比(1を100とする)																																																																																												
降伏点	100	134	166	139																																																																																											
引張強さ	ほとんど変化せず		腐食減量に比例して低下																																																																																												
	ほとんど変化せず		降伏点が現れにくくなる																																																																																												
引張強さ	ほとんど変化せず		断面欠損がなければ強さの低下は無視しうる																																																																																												
	ほとんど変化せず		かなり低下する																																																																																												
特徴	コンクリートのはつりが必要となる。																																																																																														
留意点	鉄筋を取り出す位置の選定にあたっては、耐荷性能に影響すると考えられる箇所は基本的に裂けるべきである。ただし、影響すると考えられる箇所を切り出す場合は、構造的な安全性を照査し、必要に応じて補強を考えなければならない。																																																																																														

c. 鉄筋の損傷度

項目	鋼材の強度
手法名	金属材料引張試験
概要	コンクリート構造物から取り出した鉄筋に対して、残存耐荷力を確認する。
適用対象・範囲	全ての鋼材に適用可能
機器・装置	引張試験機(JIS B 7721) 
調査方法	オフセット法、永久伸び法、全伸び法(JIS Z 2241)
判断基準	試験結果による
特徴	コンクリートのはつりが必要
留意点	

c. 鉄筋の損傷度

項目	鋼材の強度
手法名	金属材料曲げ試験
概要	コンクリート構造物から取り出した鉄筋に対して、残存曲げ耐力を確認する。
適用対象・範囲	全ての鋼材に適用可能
機器・装置	曲げ試験機  鉄筋曲げ試験機
調査方法	押曲げ法、巻付け法、Vブロック法
判断基準	試験結果による
特徴	コンクリートのはつりが必要
留意点	

d. 骨材

項目	アルカリ骨材反応
手法名	化学法
概要	<p>コンクリートからはつりとられたコンクリート塊から骨材を取り出し5%程度の希塩酸に浸漬し、骨材に付着したセメントペースト分を完全に溶解させ、骨材のみを取り出して反応性を確認する。この方法は、試験値を判定図 (ASTM C 289) にプロットして、反応性を判断するが、アルカリ骨材反応は種々の条件が重なって起こるので、この試験での「有害」、「無害」の判定は、その可能性が強いという意味に解釈すべきである。『ASTM C 289』、『JIS A 1145-2001』</p>
適用対象・範囲	コンクリート用骨材のアルカリシリカ反応性を、化学的な方法で迅速に判断できる
機器・装置	<p>資料調整用装置</p> <p>破砕機 (ジョークラッシャー)、微粉碎装置</p> <p>恒温水槽、原子吸光光度計、光電光度計</p> <p>電気炉等</p>
調査方法	<p>試料を粉砕機で粉砕し、粒度0.3～0.15mmに調整した後、水洗し、温度105 ± 5 の乾燥器内で20時間乾燥させる。試料25gと1規定 (40g/l) の水酸化ナトリウム水溶液25mlをステンレスチール製反応容器に入れ80 ± 1 の恒温浴槽中温度で24時間保持後、試料原液を吸引濾過する。</p> <p>原料原液を希釈し、分光光度計や原子吸光光度計を用い、あるいは重量法分析によって溶解シリカ量 (Sc) を測定し、アルカリ濃度減少量 (Rc) は希塩酸で滴定して測定する。この値を判定図にプロットして判断する。試験値を大きく左右する要因の一つに骨材試料の粉砕方法にある。</p> <p>粗骨材に付着するセメント硬化体をハンドグラインダーで研磨除去する方法</p> <p>コンクリートをハンマーで粗破砕し、さらに粗骨材に付着するモルタルを小型ダイヤモンドハンマーでできるだけ除く。その後、小型ダイヤモンドハンドグラインダーで付着物をさらに研磨除去し付着物の有無は、時々ルペーあるいは実態顕微鏡で確認する。</p> <p>粗骨材に付着したセメント硬化体を塩酸で溶解除去する方法</p> <p>ハンマーを用いてできるだけ粗骨材とモルタル部を分離し、粗骨材に付着する付着物はさらに鋭利なハンマーを使って除く。その後1+1の塩酸に1時間程度浸漬した後水洗いする。</p>
判断基準	<p>骨材のアルカリシリカ反応性の判断は、測定項目における定量値の平均値を用いて判断する。</p> <p>溶解シリカ量 10mmol/lかつアルカリ濃度減少量 < 700mmol/lで溶解シリカ量 (Sc)/アルカリ濃度減少量 (Rc) 2 で「無害と判断する」。</p>
	<p>図 6.12 骨材の有害度の判定図 (JIS A 5308 附属書 7)</p>
特徴	<p>短期間に結果が得られる。化学法によるアルカリシリカ反応性試験用試料は、0.3～0.15mmと きわめて狭い粒度範囲のものを用いるので、元の骨材試料から0.3～0.15の試料をどれだけ調整できたか、つまり0.3～0.15mmの試料の歩留りが問題となる。現在一般的に行われている粉砕方法では、0.3～0.15mm試料の歩留りは平均37%前後であり、骨材によっては0.3～0.15mmの範囲に砕けやすい部分だけを試験することになるので、できるだけ歩留りをあげる必要がある。</p>
留意点	<p>全ての骨材のアルカリシリカ反応性の判定に適しているわけではなく、判定することができない種類の骨材もあることに留意する。骨材中に粘土鉱物など微少鉱物が含まれていると、鉱物中の塩酸と反応しやすいアルミナや鉄が塩酸と反応して溶出し、シリカは溶出せずに留まる。このような骨材についてはアルカリシリカ反応性試験 (化学法) を行うと「溶解シリカ量」の値が大きくなるので、骨材の構成鉱物をよく調べてから実施する必要がある。</p>

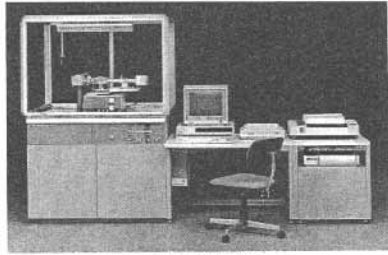
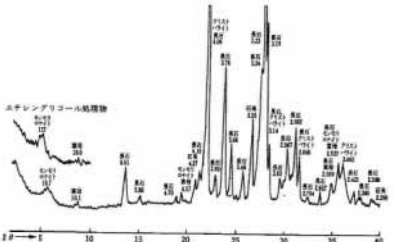
d. 骨材

項目	アルカリ骨材反応																						
手法名	モルタルバー法																						
概要	モルタル供試体を作製して骨材のアルカリ骨材反応性を調べる方法である。『ASTM C 227』、『JIS A 1146-2001』に準拠する。																						
適用対象・範囲	モルタルバーの長さ変化を測定することによって、骨材のアルカリシリカ反応性を判定する。																						
機器・装置	粗骨材から細骨材を製造する製砂機(ロッドミル、ジョークラッシャー、ディスク型製砂機、ロール型製砂機)、ふるい『JIS Z 8801-1』4.75mm、2.36mm、1.18mm、600 μ m、300 μ mおよび150 μ m、モルタルの機械練り用練混機『JIS R 5201 8.1(2)』、型枠『JIS R 5201 10.1(2)』、ダイヤルゲージ『JIS A 1129-3』、および温度40 \pm 2、相対湿度は95%に保持できる貯蔵容器																						
調査方法	<p>試験用試料は表に示す粒度となるように調製する。型枠は40\times40\times160mmの型枠で、両端に長さ変化測定用ゲージプラグを埋め込めるよう、加工してあるものを用いる。使用セメントは、アルカリ量0.65\pm0.05%、Na₂O(%):K₂O(%)=1.2\pm0.5の範囲にあるアルカリ量が明らかなポルトランドセメントを用い、水酸化ナトリウムを添加し、アルカリ量を等価Na₂O=1.2%\pm0.5%に調製して試験を行う。モルタルの配合は、質量比でセメントに対して骨材2.25、水0.5とする。供試体は24\pm2時間後に型枠から外し、最初の長さ測定を行うが、測定には0.001mm精度のダイヤルゲージを使用する。供試体は容器中に密閉し、12日間温度40\pm2で保つ。12日後、温度20\pm3に少なくとも16時間保った後、供</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">ふるい呼び寸法</th> <th rowspan="2">重量百分率 (%)</th> </tr> <tr> <th>通過</th> <th>残留</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4.75mm</td> <td>2.36mm</td> <td>10%</td> </tr> <tr> <td>2.36mm</td> <td>1.18mm</td> <td>25%</td> </tr> <tr> <td>1.18mm</td> <td>600μm</td> <td>25%</td> </tr> <tr> <td>600μm</td> <td>300μm</td> <td>25%</td> </tr> <tr> <td>300μm</td> <td>150μm</td> <td>15%</td> </tr> </tbody> </table>		ふるい呼び寸法		重量百分率 (%)	通過	残留	4.75mm	2.36mm	10%	2.36mm	1.18mm	25%	1.18mm	600 μ m	25%	600 μ m	300 μ m	25%	300 μ m	150 μ m	15%
ふるい呼び寸法		重量百分率 (%)																					
通過	残留																						
4.75mm	2.36mm	10%																					
2.36mm	1.18mm	25%																					
1.18mm	600 μ m	25%																					
600 μ m	300 μ m	25%																					
300 μ m	150 μ m	15%																					
判断基準	供試体の長さ変化の測定は、材令2週、4週、8週、3ヶ月および6ヶ月とする。6ヶ月後の供試体の長さ変化の測定結果、供試体3本の平均値が材令6ヶ月に膨張率 0.100%(もしくは3ヶ月後の膨張率 0.05%)の場合に「有害である」と判断する。																						
特徴	判定までに長期間を必要とするとともに、測定中に供試体内部より比較的多量の水酸化イオンが漏出することが問題となる。微細な結晶粒や歪んだ結晶格子をもつ石英が反応性鉱物である、チャートなどの骨材では、膨張が非常にゆっくりと進行するため原稿の判定基準によっては適切に評価できない。																						
留意点	化学法により「潜在的有害」と判断されたばあいは、高いアルカリシリカ反応性と顕著なペシマム現象に留意する必要がある。化学法同様、骨材の粒度調製あたっての粉碎方法(特に調製歩留り)は、試験値に影響を与えらるるので十分注意する。また相当量の骨材試料を必要とし、コンクリート中の粗骨材の反応性を調べる方法としては、骨材の取り出し作業に人手と時間を要するので、実際的とはいえない。むしろ化学法で判断した方が良い場合もある。																						


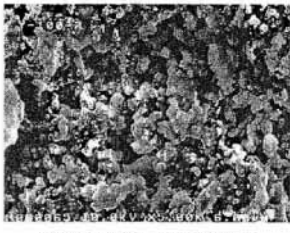
d. 骨材

項目	アルカリ骨材反応
手法名	偏向顕微鏡観察 (岩石学的試験)
概要	<p>偏向顕微鏡は、微細な物質を拡大して観察するばかりではなく、物質の光学的性質を調べるために特殊なプリズムを備えた顕微鏡を用い骨材中の有害鉱物を判定する方法である。物質の光学的特徴は、それぞれの物質に固有のものであるから、その物質の種類が何であるかを知るための有効な手段である。</p>
適用対象・範囲	骨材に含まれる有害鉱物の判別(同定)、定量
機器・装置	<p>眼に接する対眼鏡、観察試料に接する対物橋の他にアナライザー、ポラライザーの2つの組合せがある。この組合せには光の振動方向を特定するための系で、ポラライザーを通過する偏光の振動方向は顕微鏡に向かって前後方向に、またアナライザーを通過したものは左右方向になるようにしてある。以上の4つレンズ系を用いて観察する方法をオルソスコブ観察という。写真「アルカリ骨材反応の診断」(小林一輔編集)より抜粋</p> <div style="display: flex; align-items: center;">  <div style="margin-left: 20px;">  <p>図 2.11 偏向顕微鏡光学系</p> </div> </div> <p style="text-align: center;">写真 2.4 偏向顕微鏡</p>
調査方法	<p>偏向顕微鏡下で観察できるのは、使用された骨材(岩石・鉱物の種類と量)とセメント硬化体の様子、反応生成物、気泡の様子などである。</p> <p>偏向顕微鏡とは、偏光を用いて物質を観察顕微鏡であり、偏光はニコル・プリズムによって得る。この方法はその対象鉱物により単ニコル・プリズム法(偏光板が1枚)と直交ニコル・プリズム法(縦波の光を透す偏光板と横波を透す偏光板を用いる)から選定し、鉱物の光学的特徴から判定(鑑定)する。</p> <p>観察資料は、岩種により偏りの無いようにコンクリート中から粗骨材をできるだけ多く(30個以上)取り出し、試料全てを5mm以下に砕いてから縮分し、合成樹脂で固めて薄片試料を作製する。薄片試料は2~3枚作製する。</p>
判断基準	<p>偏向顕微鏡下における骨材の観察と、含まれる有害鉱物の定量方法は、JCI-DD3「骨材に含まれる有害鉱物の判定(同定)方法(案)」とJCI-DD4「有害鉱物の定量方法(案)」に従うと良い。</p> <div style="display: flex; justify-content: center; align-items: center;">   </div> <p style="text-align: center;">写真 2.6 安岩山および石英質骨材の偏光顕微鏡写真²⁾ 左: ガラス質安岩 (PC: 斜長石, A: 普通輝石, 茶色部は火山ガラス) 右: 石英 (PC: 斜長石, O: 正長石, Q: 石英, B: 黒雲母)</p> <p style="text-align: center;">「コンクリートの組織構造の診断」(小林一輔編集)より抜粋</p>
特徴	各種分析機器の取り扱いや岩種および反応性鉱物の同定にかなりの熟練度が要求される。
留意点	反応性鉱物の種類とその量が調べられた場合でも、骨材のアルカリシリカ反応性は骨材の粒径やその混合比率(ペシマム混合率が存在する)により相違するので、骨材のアルカリシリカ反応性を正確に判定することは困難である。

d. 骨材

項目	アルカリ骨材反応																																																																																																																																																																																																																	
手法名	粉末X回折試験(岩石学的試験)																																																																																																																																																																																																																	
概要	<p>X線回折試験は、X線が結晶によって回折されることを利用して、物質を構成している化合物や固体化学反応の状態分析などの有力な手段として用いられている。結晶体に単色(波長を λ とする)のX線を当てると、結晶の面間隔dに対し、ブラッグの式 $n\lambda = 2d\sin\theta$ を満足するとき、X線はその結晶の格子面によって回折される。したがって、回折が起こるX線の入射角を測定すれば、計算により試料の格子面間隔dが求められ、あらかじめ測定された種々の結晶の格子面間隔dと対比することによって、物質の同定が可能となる。なお、試料は通常粉末で試験することから、粉末X線回折法と呼ばれている。</p>																																																																																																																																																																																																																	
適用対象・範囲	骨材に含まれる有害鉱物の判別(同定)、定量																																																																																																																																																																																																																	
機器・装置	<p>X線管球は、その発生X線が特定波長を持つように、それに対応した金属を用いてつくられる。試料は一般的に微粉碎したものを、測定用ホルダーに圧縮して平板状につめる。回折記録にあたっては、データの処理、検討の目的により、走査速度、発生X線の強さ、回折角度範囲その他の条件をそのつど設定する。特に回折角度の精密測定をはじめ、回折パターンの重なりなどは分解能を向上させるために設定が必要である。写真「アルカリ骨材反応の診断」(小林一輔編集)</p>	 <p style="text-align: center;">写真 2-3 X線回折装置</p>																																																																																																																																																																																																																
調査方法	<p>水和物、骨材などを問わず、その含有鉱物の定量を簡単に行う一般的な方法として最も普及した測定方法である。未知試料のASTMカードなどを用いた同体法や、結晶への他成分の個溶などによる格子の大きさの変化や歪みの状態の定量的扱いなど応用範囲は広い。さらに結晶構造への解析のように、単結晶についての検討から始まる高度な解析に至る手</p>	 <p style="text-align: center;">図 6-7 ガラス質火山岩の粉末 X線回折図 脱ガラス化作用によってクリストバライトが生成している。</p>																																																																																																																																																																																																																
判断基準	<p>試験試料から得られた回折パターンの回折角度から格子面間隔を求めるが、これはX線波長に対応する $2\theta - d$ 表がつくられており、それから簡単に読みとることができる。これを回折角度のある範囲内において各パターンについて求め、同時にそれらの回折強度を定性または定量的に算出してその間の表をつくる。この得られたデータを基準にASTMカードと比較することによりその試料の構成化合物の同定をする。</p>	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="12">5-0490 MINOR CORRECTION</th> </tr> <tr> <th>d</th> <th>3.34</th> <th>4.26</th> <th>1.82</th> <th>4.26</th> <th>SiO₂</th> <th colspan="6"></th> </tr> <tr> <th>hkl</th> <th>100</th> <th>35</th> <th>17</th> <th>35</th> <th>SILICON IV OXIDE</th> <th colspan="6"></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Rad. CuKα, λ 1.5405</td> <td>Filter Ni</td> <td>Coll.</td> <td colspan="3"></td> <td>dA</td> <td>1/1₁</td> <td>hkl</td> <td>dA</td> <td>1/1₁</td> <td>hkl</td> </tr> <tr> <td>Dis. G. C. DIFFRACTOMETER</td> <td>deorr. abs.?</td> <td>4.26</td> <td>35</td> <td>100</td> <td>1.228</td> <td>2</td> <td>220</td> <td>3.343</td> <td>100</td> <td>101</td> <td>1.197</td> <td>5</td> <td>213</td> </tr> <tr> <td>Ref. SWANSON AND FUYAT, NBS CIRCUL-AR 539, VOL. III (1953)</td> <td></td> <td>2.458</td> <td>12</td> <td>110</td> <td>1.1973</td> <td>2</td> <td>221</td> <td>2.282</td> <td>12</td> <td>102</td> <td>1.1838</td> <td>4</td> <td>114</td> </tr> <tr> <td>Sys. HWXAGONAL</td> <td>S. G. D₆-P3, 21</td> <td>2.237</td> <td>6</td> <td>111</td> <td>1.1802</td> <td>4</td> <td>310</td> <td>2.128</td> <td>9</td> <td>200</td> <td>1.1530</td> <td>2</td> <td>311</td> </tr> <tr> <td>a₀ 4.913 b₀ c₀ 5.405</td> <td>A C₁ 10</td> <td>1.360</td> <td>6</td> <td>201</td> <td>1.1408</td> <td><1</td> <td>204</td> <td>1.817</td> <td>17</td> <td>112</td> <td>1.1144</td> <td><1</td> <td>303</td> </tr> <tr> <td>Ref. ISID.</td> <td></td> <td>1.601</td> <td><1</td> <td>003</td> <td>1.0816</td> <td>4</td> <td>312</td> <td>1.672</td> <td>7</td> <td>202</td> <td>1.0536</td> <td>1</td> <td>400</td> </tr> <tr> <td>is neg 1.554ey</td> <td>1.553 Sign +</td> <td>1.659</td> <td>3</td> <td>103</td> <td>1.0477</td> <td>2</td> <td>165</td> <td>1.608</td> <td><1</td> <td>210</td> <td>1.0437</td> <td>2</td> <td>401</td> </tr> <tr> <td>2 V D₂ 547mp</td> <td>color</td> <td>1.541</td> <td>15</td> <td>211</td> <td>1.0346</td> <td>2</td> <td>214</td> <td>1.453</td> <td>3</td> <td>113</td> <td>1.0149</td> <td>2</td> <td>223</td> </tr> <tr> <td>Ref. ISID.</td> <td></td> <td>1.418</td> <td><1</td> <td>300</td> <td>0.9896</td> <td>2</td> <td>402, 115</td> <td>1.382</td> <td>7</td> <td>212</td> <td>.9872</td> <td>2</td> <td>313</td> </tr> <tr> <td>MINERAL FROM LAKE TOXAWAY, N. C.</td> <td></td> <td>1.375</td> <td>11</td> <td>203</td> <td>.9781</td> <td><1</td> <td>304</td> <td>X-RAY RATTERAN AT 25°C</td> <td></td> <td>1.372</td> <td>9</td> <td>301</td> <td>.9762</td> <td>1</td> <td>320</td> </tr> <tr> <td>SPECT. ANAL. 1 <0.01%AL; <0.001%CA, CU,</td> <td></td> <td>1.288</td> <td>3</td> <td>104</td> <td>.9507</td> <td>2</td> <td>321</td> <td>PEPLACES 1-0649, 2-0458, 2-0458, 2-0471, 3-</td> <td></td> <td>1.256</td> <td>4</td> <td>302</td> <td>.9285</td> <td><1</td> <td>410</td> </tr> <tr> <td>FE, MG,</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: right;">'915 「アルカリ骨材反応の診断」(小林一輔編集)より</p>	5-0490 MINOR CORRECTION												d	3.34	4.26	1.82	4.26	SiO ₂							hkl	100	35	17	35	SILICON IV OXIDE							Rad. CuK α , λ 1.5405	Filter Ni	Coll.				dA	1/1 ₁	hkl	dA	1/1 ₁	hkl	Dis. G. C. DIFFRACTOMETER	deorr. abs.?	4.26	35	100	1.228	2	220	3.343	100	101	1.197	5	213	Ref. SWANSON AND FUYAT, NBS CIRCUL-AR 539, VOL. III (1953)		2.458	12	110	1.1973	2	221	2.282	12	102	1.1838	4	114	Sys. HWXAGONAL	S. G. D ₆ -P3, 21	2.237	6	111	1.1802	4	310	2.128	9	200	1.1530	2	311	a ₀ 4.913 b ₀ c ₀ 5.405	A C ₁ 10	1.360	6	201	1.1408	<1	204	1.817	17	112	1.1144	<1	303	Ref. ISID.		1.601	<1	003	1.0816	4	312	1.672	7	202	1.0536	1	400	is neg 1.554ey	1.553 Sign +	1.659	3	103	1.0477	2	165	1.608	<1	210	1.0437	2	401	2 V D ₂ 547mp	color	1.541	15	211	1.0346	2	214	1.453	3	113	1.0149	2	223	Ref. ISID.		1.418	<1	300	0.9896	2	402, 115	1.382	7	212	.9872	2	313	MINERAL FROM LAKE TOXAWAY, N. C.		1.375	11	203	.9781	<1	304	X-RAY RATTERAN AT 25°C		1.372	9	301	.9762	1	320	SPECT. ANAL. 1 <0.01%AL; <0.001%CA, CU,		1.288	3	104	.9507	2	321	PEPLACES 1-0649, 2-0458, 2-0458, 2-0471, 3-		1.256	4	302	.9285	<1	410	FE, MG,															
5-0490 MINOR CORRECTION																																																																																																																																																																																																																		
d	3.34	4.26	1.82	4.26	SiO ₂																																																																																																																																																																																																													
hkl	100	35	17	35	SILICON IV OXIDE																																																																																																																																																																																																													
Rad. CuK α , λ 1.5405	Filter Ni	Coll.				dA	1/1 ₁	hkl	dA	1/1 ₁	hkl																																																																																																																																																																																																							
Dis. G. C. DIFFRACTOMETER	deorr. abs.?	4.26	35	100	1.228	2	220	3.343	100	101	1.197	5	213																																																																																																																																																																																																					
Ref. SWANSON AND FUYAT, NBS CIRCUL-AR 539, VOL. III (1953)		2.458	12	110	1.1973	2	221	2.282	12	102	1.1838	4	114																																																																																																																																																																																																					
Sys. HWXAGONAL	S. G. D ₆ -P3, 21	2.237	6	111	1.1802	4	310	2.128	9	200	1.1530	2	311																																																																																																																																																																																																					
a ₀ 4.913 b ₀ c ₀ 5.405	A C ₁ 10	1.360	6	201	1.1408	<1	204	1.817	17	112	1.1144	<1	303																																																																																																																																																																																																					
Ref. ISID.		1.601	<1	003	1.0816	4	312	1.672	7	202	1.0536	1	400																																																																																																																																																																																																					
is neg 1.554ey	1.553 Sign +	1.659	3	103	1.0477	2	165	1.608	<1	210	1.0437	2	401																																																																																																																																																																																																					
2 V D ₂ 547mp	color	1.541	15	211	1.0346	2	214	1.453	3	113	1.0149	2	223																																																																																																																																																																																																					
Ref. ISID.		1.418	<1	300	0.9896	2	402, 115	1.382	7	212	.9872	2	313																																																																																																																																																																																																					
MINERAL FROM LAKE TOXAWAY, N. C.		1.375	11	203	.9781	<1	304	X-RAY RATTERAN AT 25°C		1.372	9	301	.9762	1	320																																																																																																																																																																																																			
SPECT. ANAL. 1 <0.01%AL; <0.001%CA, CU,		1.288	3	104	.9507	2	321	PEPLACES 1-0649, 2-0458, 2-0458, 2-0471, 3-		1.256	4	302	.9285	<1	410																																																																																																																																																																																																			
FE, MG,																																																																																																																																																																																																																		
特徴	<p>粉末X線回折試験によって診断の可能なものは、コンクリート中の粗骨材とセメント硬化体を構成する鉱物である。粗骨材の試験では、アルカリ反応性鉱物のクリストバライトとトリジマイトの同定に適するとともに、他種の鉱物の偏光顕微鏡観察の補助となる。</p>																																																																																																																																																																																																																	
留意点	<p>骨材の検討には、その含有岩石やそれを構成する鉱物について、定性、定量的に広く測定分析することができ、その品質判定には、偏光顕微鏡観察とともに重要かつ手軽な手法と考えてよい。ただし全般的に非結晶または低結晶性物質の混合量の判定には難点があるので、他の方法により検討する必要がある。</p>																																																																																																																																																																																																																	

d. 骨材

項目	アルカリ骨材反応	
手法名	走査型電子顕微鏡観察・SEM試験(岩石学的試験)	
概要	走査型電子顕微鏡(SEM)は、きわめて細かく絞られた電子線(電子プローブ)で試料表面を二次元的に走査し、試料の表面近くで発生する二次電子を収集して、テレビジョンで使用されるものと同様の技術で映像化する装置である。SEMIは、光学顕微鏡と比較して格段の焦点深度が深く分解能も良いため、凹凸のある表面の形態観察に最適で、高分解能の実体顕微鏡と考えることができる。アルカリ骨材反応を生じたコンクリート中の骨材やゲルを観察することが可能で骨材の浸食やゲルの浸出状態の他、ゲルそのものの形態の特徴も観察できる。	
適用対象・範囲	骨材の浸食およびゲルの浸出状況観察、およびアルカリ骨材反応の判定	
機器・装置	電子線を放射する電子銃、何段階かの収束レンズにより構成された照射系、資料室、対物レンズ、中間レンズ、投影レンズを組合せた結像系とからなる。結像部は試料表面からでる二次電子を検出器と増幅器、走査コイルと同期させて像を画面に再現するCRTの各部分からできている。SEMの分解能は電子ビームをどれだけ細かく絞り、また高い輝度で試料に照射できるかによって決まる。写真「アルカリ骨材反応の診断」(小林一輔編集)より抜粋	
調査方法	まず、硬化コンクリートから分析用サンプルを採取する。走査電子顕微鏡は、表面の拡大観察を行う機器であり、観察対象物質が表面に現れていることが前提条件である。また、組織構造や結晶構造を観察するのが主たる目的であるので、破面のままでよい。サンプルに水や揮発物質が含まれている場合には、デシケータ等で乾燥しておく。次に、金属蒸着装置を用いて観察面に金属を蒸着する。金属蒸着の目的は試料台と通電させて電気を逃がすためである。金属蒸着が終了したサンプルは、試料台に分析面が上になるように両面テープあるいは瞬間接着剤で固定し、試料台と蒸着金属を導電テープ等で通電させ、走査電子顕微鏡内部に装填する。CRTで観察の終了した画像は、通常、試料の分析条件を画像内に表示して、備え付けのポラロイドカメラで投影する。	
判断基準	写真は、空隙中のアルカリシリカゲルの生成状態を撮影したものである(×40)。分析時の脱気により乾燥して、ひびわれが入っている。写真4.6.2-4は 部を拡大し拡大して分析したものである(×5000)。粒状で非結晶のアルカリシリカゲルが存在しており、X線による組成分析から、アルカリシリカゲルであることが確認された。	
		
	写真4.6.2-3 空隙内のアルカリシリカゲル	写真4.6.2-4 写真4.6.2-3の□部分の拡大像
特徴	走査電子顕微鏡では、無機物、有機物を問わず、ほとんどの観察が可能である。硬化コンクリートに関して適用する場合、倍率を選定することによって様々な解析ができる。低倍率では空隙の形態・分布状況やアルカリシリカゲルの存在状態など、高倍率では骨材とセメントペーストの界面の状態やセメント硬化体の結晶の生成状態などと利用範囲が広い。	
留意点	水を含んでいるサンプルを分析する場合、その程度にも夜が、装置に悪影響を与えると同時に、脱気に時間を要し、サンプルの形態も変化する。このような場合には、低真空型のSEMを用いたり、試料を凍結させて分析することになる。分析時には、高電圧の電子線が試料に照射されるため、試料にダメージを受ける。その結果、形態が変化するため、低倍率から分析を行う。有機物質を分析する場合は、1回の分析で照射部分が焦げ付くなどの現象が確認されている。また、高倍率で結晶状態を見ることになるので、物質の特定については専門技術者の判断を仰ぎ、解析を誤らないようにするのが望ましい。	

参考 2. コンクリートの変状に対する評価・判定事例

2.1 塩害劣化構造物の事例

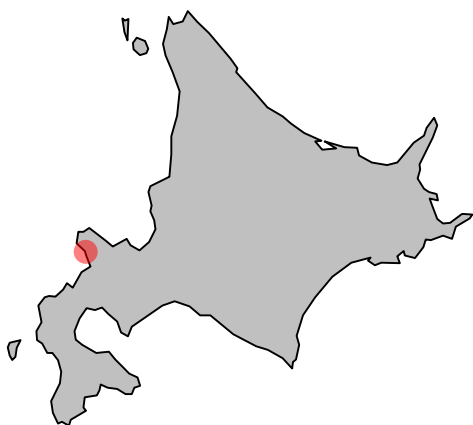
2.1.1 日本海岸の飛来塩分の多い地域で17年経過したP C I 合成桁橋

(1) 対象構造物

対象構造物は日本海岸の汀線付近に位置する橋長 429m のコンクリート橋であり、橋長の中央付近に位置する 2 径間連続 P C I 合成桁橋の主桁に着目し、竣工後 17 年目に調査を行った。構造物の諸元を参表 2.1.1 に、位置図、コア調査箇所を参図 2.1.1、参図 2.1.2 に示す。

参表 2.1.1 調査箇所の構造物諸元等

項目	諸元等
竣工	1984 年 (S59)
構造形式	2 径間連続 P C I 合成桁
橋長/支間	橋長 429.0m / 調査箇所の支間 2@44.6m
幅員	8.2m
設計荷重	TL-20
材料規格	コンクリート $\sigma_{ck}=400\text{kgf/cm}^2$ 鉄筋 SD35 エポキシ樹脂塗装鉄筋 PC 鋼より線 12-T12.4
補修履歴	2000 年 (H12) コンクリート塗装
設計準拠規格	道路橋示方書コンクリート橋編 昭和 53 年 道路橋の塩害対策指針 (案)・同解説 昭和 59 年 2 月
周辺環境	海岸線からの距離：汀線付近 冬季の季節風による飛沫、飛来塩分の影響が大きく、日本でも有数の厳しい塩害環境である。



参図 2.1.1 対象構造物位置図



参図 2.1.2 コア調査箇所

(2) 調査項目、方法および結果

対象橋梁は日常点検、定期点検により維持管理されており、本調査の前年に塩害対策として表面被覆塗装が実施された。塩害による鋼材の腐食の可能性を判定することを目的として、コンクリート試験を実施しており、調査項目およびその結果を参表 2.1.2 に示す。

参表 2.1.2 詳細点検の項目，方法および結果

項目	方法	結果
調査時期	---	2001年 (H13) 建設後 17年
水セメント比	工事記録の調査	37%(1.00)
	配合推定(セメント協会法F-18)	41%(1.11)
セメントの種類	工事記録の調査	早強セメント
コアの外観観察	目視観察の調査	粗骨材：碎石
塩化物イオン濃度の分布	コア採取，JCI-SC4 全塩分，吸光度法	参図 2.1.3 参照
かぶり	設計図	純かぶり 50mm
鋼材の腐食状況	はつり，目視	未実施
中性化深さ	フェノールフタレイン法	平均 0mm

(3) 塩害劣化予測と評価および判定

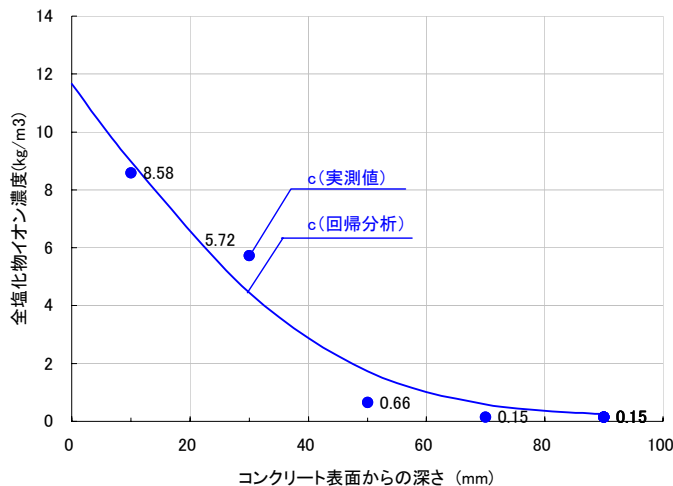
まず，測定した塩分量に対して拡散方程式（フィックの第2法則）の解析解を用いた回帰分析を行い，塩分浸透予測に必要となる定数（表面塩化物イオン濃度： C_0 見かけの拡散係数： D_c ）を設定する．この定数と任意の時間から，かぶり深さ方向の塩化物イオン濃度を計算し，鋼材位置での塩化物イオン濃度と鋼材腐食発生塩分量との大小関係から劣化グレードの評価および対策要否の判定を行う．

1) 表面塩化物イオン濃度，見かけの拡散係数の設定

式 (4.3.2) による回帰計算の条件と計算結果を参表 2.1.3，参図 2.1.3 に示す．

参表 2.1.3 表面塩化物イオン濃度と見かけの拡散係数の回帰計算

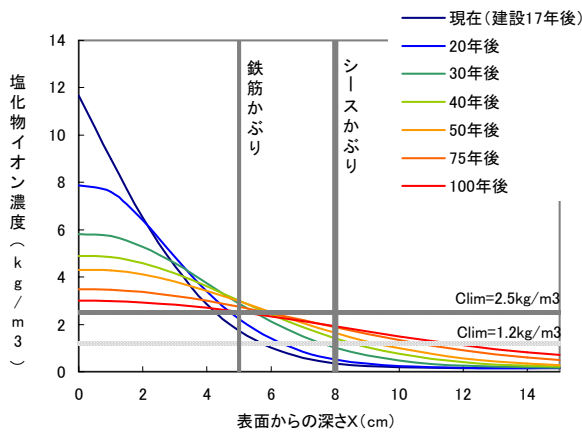
		条件と結果
回帰計算条件	塩化物イオン濃度分布	参図 2.1.3 参照
	建設後の経過年数	t=17年 (無塗装 14年+表面被覆 3年を経過しているが，17年間表面塩化物イオン濃度が一定であると仮定)
	回帰計算	Fick の一次拡散方程式の解
	初期塩化物イオン濃度	$C_1=0.15\text{kg/m}^3$ (測定濃度が 70, 90mm 位置で一定であることからこの値を初期含有量と仮定)
回帰計算結果	C_0	1.52kg/m^3
	D_c	$0.33\text{cm}^2/\text{年}$



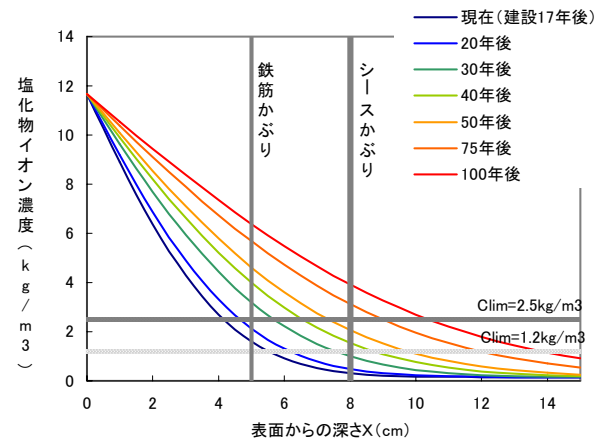
参図 2.1.3 塩化物イオン濃度の分布

2) 塩化物イオン濃度の将来予測

調査時点以降の拡散予測は、表面被覆により外部からの塩化物イオンの供給はないこと、調査時点において浸透していた塩化物イオンのみが再拡散することを仮定して、式(4.3.3)を用いて数値解析した結果を、参図 2.1.4 に示す。また、表面被覆を実施しなかったと仮定し、式(4.3.2)を用いた将来予測を参図 2.1.5 に示す。この結果、鉄筋かぶりおよびシースかぶり位置の塩化物イオン濃度は、表面被覆により、内部に浸透する塩化物イオン濃度を低減できることが分かる。

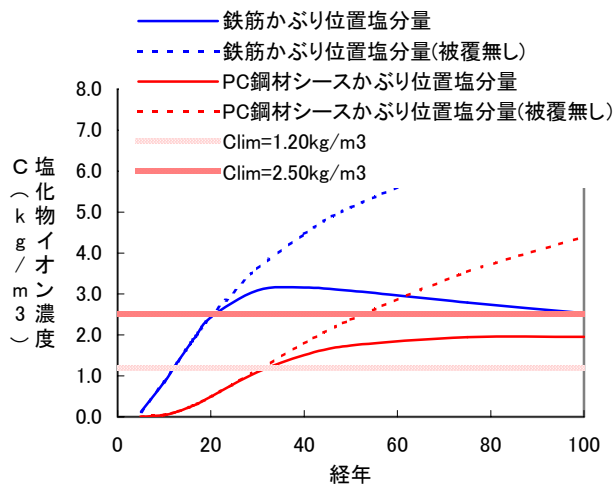


参図 2.1.4 表面被覆後の塩化物イオン濃度の分布



参図 2.1.5 表面被覆をしなかったと仮定した場合の塩化物イオン濃度の分布

また、鉄筋および PC 鋼材シース位置に着目した塩化物イオン濃度の経時変化を参図 2.1.6 に示す。実線が表面被覆、破線が表面被覆無しの将来予測であり、表面被覆により完全に表面からの塩分の供給を遮断できるとした場合には、将来の鋼材位置の塩分量は収束する傾向にあることが分かる。



参図 2.1.6 鋼材位置の塩化物イオン濃度の推移

3) 塩害劣化過程（グレード）の検討

参図 2.1.6 に示す鉄筋位置における塩化物イオン濃度の推移（青実線）から、表面被覆により塩化物イオンの浸透は抑えられるものの、鋼材腐食発生限界塩分量($C_{lim}=1.2\text{kg/m}^3$)をある時期から超過し、鋼材の腐食が始まる。しかしながら、本橋はエポキシ樹脂塗装鉄筋を使用しており現在・将来とも腐食による劣化を生じない潜伏期と考えられる。

PC鋼材シースかぶり位置は現在 0.3kg/m^3 と少なく潜伏期と考えられるが、建設後約 32 年後に $C_{lim}=1.2\text{kg/m}^3$ に達し腐食が開始する進展期へと移行する。予定供用期間を建設後 100 年とすると将来は約 $C_{lim}=2.5\text{kg/m}^3$ まで到達することではなく、進展期あるいは腐食ひび割れ発生の加速期にあると考えられる。

4) 評価および判定

PC 鋼材（シース）のかぶり位置に着目し表 4.3.11 の土木研究所の評価を行うと、参表 2.1.4 の通り、すぐに補修の要否が必要であるとは限らない段階と考えられる。劣化予測による劣化グレードの評価と判定を参表 2.1.5 に示す。

参表 2.1.4 PC 鋼材に着目した塩化物イオン濃度による評価判定例

現在および将来	全塩化物イオン濃度	評価・判定例
	2.5kg/m^3 以上	劣化度 B 想定される状況：腐食による鋼材の軽微な断面欠損が見られるなど、構造物の劣化が進行していると考えられる段階。 補修要否：補修を実施することが望ましい。
建設 100 年後	1.2kg/m^3 以上、かつ 2.5kg/m^3 未満	劣化度 C 想定される状況：鋼材の腐食はごくわずかか、認められない状態であり、構造物が劣化しているとは判断しづらいが、今後、鋼材が腐食しやすい状態へと移行する兆候が認められる段階。 補修要否：すぐに補修が必要であるとは限らない。
	0.3kg/m^3 を越えて、かつ 1.2kg/m^3 未満	劣化度 D1 想定される状況：構造物は劣化していないと考えられる段階。 補修要否：現状では補修は必要ない。
現在	0.3kg/m^3 以下	劣化度 D2 想定される状況：構造物は劣化しておらず、劣化の兆候も認められない段階。 補修要否：当面は補修を必要としない。

参表 2.1.5 詳細点検における評価および判定

評価・判定時期	評価	判定
現状 (建設後 17 年)	鉄筋はエポキシ樹脂塗装鉄筋を使用しており潜伏期にある。 PC 鋼材かぶり位置の塩化物イオン濃度が小さく、潜伏期にある。	要求性能を満足しており、応急処置の必要なし。 日常点検および定期点検を実施する。
予定供用期間 終了時 (建設後 100 年)	鉄筋は将来とも潜伏期にある。 PC鋼材かぶり位置の塩化物イオン濃度は将来 1.2kg/m^3 以上、 2.5kg/m^3 未満であり進展期～加速期にある。	塩害劣化に対しては、すぐに補修が必要であるとは限らないが、劣化過程の早い段階に対策をとることで LCC の低減が可能な場合があり、最適な補修工法を選定し維持管理する必要がある。

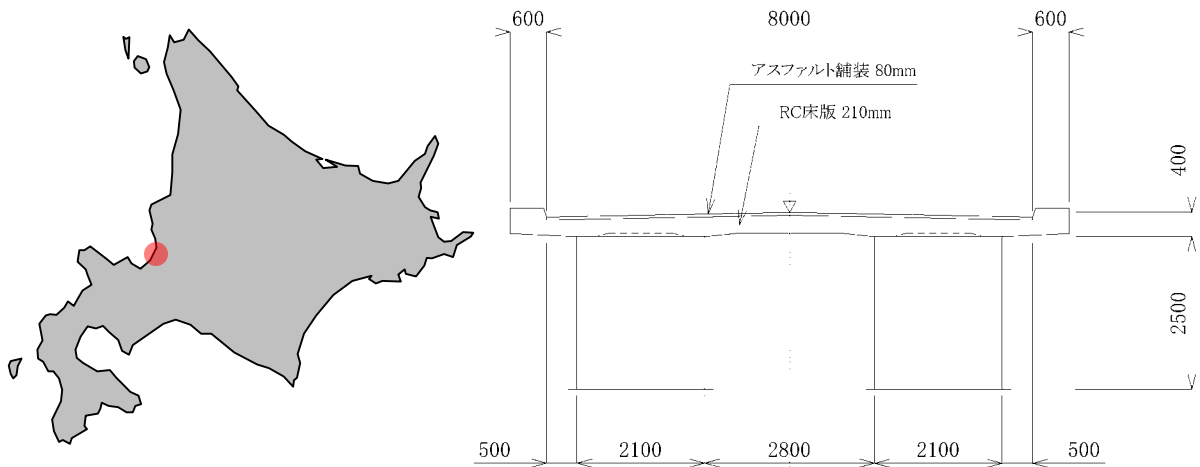
2.1.2 日本海岸の飛来塩分の多い地域で23年経過した鋼橋RC床版

(1) 対象構造物

調査・点検の対象構造物は、単純鋼箱桁のRC床版である。構造物の諸元を参表 2.1.6 に、位置図と断面図を参図 2.1.7 に示す。

参表 2.1.6 構造物の諸元等

項目	諸元等
竣工	1980年(S55)
構造形式	単純鋼箱桁のRC床版
橋長	60.3m
支間	29.3m
幅員	8.0m
設計荷重	TL-20
材料規格	コンクリート 推定 $\sigma_{ck}=240\text{kgf/cm}^2$ 鉄筋 推定SD35
補修履歴	無し
設計準拠規格	道路橋示方書鋼橋編 昭和48年
周辺環境	海岸線からの距離：汀線付近 日本海側の港に面し冬季の季節風による飛沫、飛来塩分の影響が大きい。



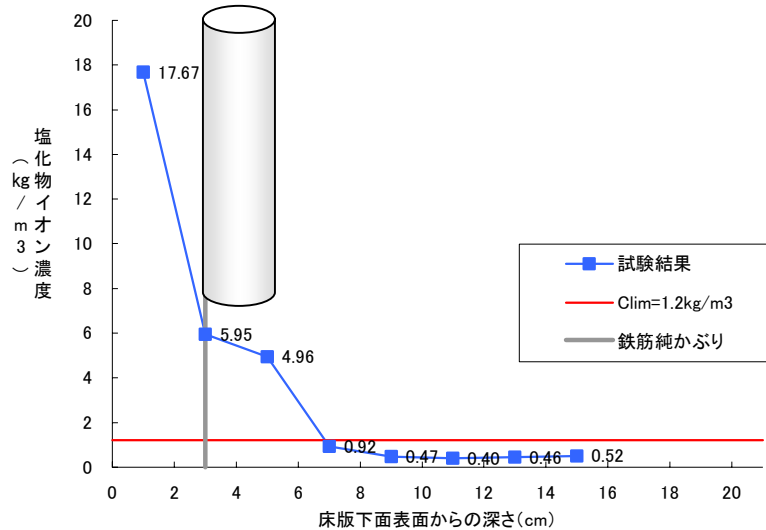
参図 2.1.7 対象構造物の位置図，断面図

(2) 調査項目，方法および結果

対象橋梁の活荷重照査を目的として外観目視点検を実施したところ、床版下面に浮き音を確認され、劣化要因の検討のため詳細点検を行った。点検の結果より中性化、塩害、凍害による劣化の進行が考えられる。

参表 2.1.7 詳細点検の項目、方法および結果

項目	方法	結果
調査時期	---	建設後 23 年 2003 年 (H15)
外観目視点検	近接目視, たたき検査	床版下面コンクリート表面のスケーリング たたき検査による濁音より広範囲にわたる浮き 腐食ひび割れは確認できない。 
水セメント比	工事記録の調査	工事記録無し
	配合推定(セメント協会法 F-18)	未実施
セメントの種類	工事記録の調査	工事記録無し 推定 普通ポルトランドセメント
コアの外観観察	目視観察の調査	粗骨材：砂利
塩化物イオン濃度の分布	コア採取, JCI-SC4, 全塩分, 塩化物イオン選択性電極を用いた電位差滴定法	参図 2.1.8 参照。 塩害による鉄筋腐食の可能性はある。
かぶり	コアボーリングによる削孔	純かぶり 30mm
鋼材の腐食状況	コアボーリングによる削孔, 目視	やや厚みのある膨張性の錆が生じているが, 鉄筋の節が確認出来, 断面減少は比較的少ない状態。 
中性化深さ	フェノールフタレイン法	20~25mm 中性化による鉄筋の腐食の可能性はある。
強度試験	JIS A 1108	設計基準強度に同等
静弾性係数試験	JIS A 1149	設計基準強度相当の静弾性係数から低下しているが, 外観上たわみの増加等の変状は認められない。



参図 2.1.8 塩化物イオン濃度の分布

(3) 塩害に対する評価および判定

はつり後の目視調査の結果から鉄筋に浮き錆が確認され、また耐力低下を伴うような鋼材断面の減少は確認されなかった。また、床版下面の鉄筋かぶり位置の塩化物イオン濃度は現在（建設後 23 目の調査時点） $6\text{kg}/\text{m}^3$ と鋼材発生限界塩分量（ $\text{Cl}_{\text{lim}}=1.2\text{kg}/\text{m}^3$ ）を大きく超えている。一般的に鉄筋腐食によるひび割れの発生はコンクリート表面に確認されるが、本床版の場合は打音検査の結果から、床版下面鉄筋位置の水平方向にひびわれが発達し、かぶりコンクリート全体が浮きを生じていると考えられる。

以上より、塩害の劣化過程（グレード）は腐食ひび割れ発生以降の加速期であり、また、鉄筋に耐力低下を伴うような鋼材断面の減少は見られないことから劣化期には至っていないと考えられる。

予定供用期間を建設後 100 年と仮定すると、腐食ひび割れの進行、鋼材断面の減少による耐力低下が想定され、予定供用期間終了時は劣化期と考えられる。

詳細点検における塩害劣化グレードの評価と判定を参表 2.1.8 に示す。

参表 2.1.8 詳細点検における評価および判定

評価・判定時期	評価	判定
現状 (建設後 23 年)	加速期にある。	多量の塩化物イオンが鉄筋位置に内在しており、劣化の進行を早め耐力の低下を招くことから早急に補修対策の検討が必要である。
予定供用期間終了時 (建設後 100 年)	劣化期にある。	上記、補修対策後の初期点検と定期点検が必要である。

2.1.3 日本海岸で14～20年供用しているコンクリート覆道

(1) 対象構造物

対象構造物は、日本海岸で13～20年供用しているコンクリート覆道の柱である。構造物の諸元を参表 2.1.9 に、位置図を参図 2.1.9 示す。

参表 2.1.9 構造物の諸元等

	項目	諸元等
覆道 A	竣工	1981年(S56)
	構造形式	コンクリート覆道
	調査	1999年(H11) 建設後18年経過
覆道 B	竣工	1980年(S55)
	構造形式	コンクリート覆道
	調査	2000年(H12) 建設後20年経過
覆道 C	竣工	1987年(S62)
	構造形式	コンクリート覆道
	調査	2000年(H12) 建設後13年経過



参図 2.1.9 対象構造物の位置図

(2) 塩害劣化グレードの設定

調査箇所の外観写真とコア採取により測定した全塩分($\text{Cl}^-/\text{kg}/\text{m}^3$)と電磁誘導法により非破壊で測定した鉄筋かぶりとを参表 2.1.10 に示す。


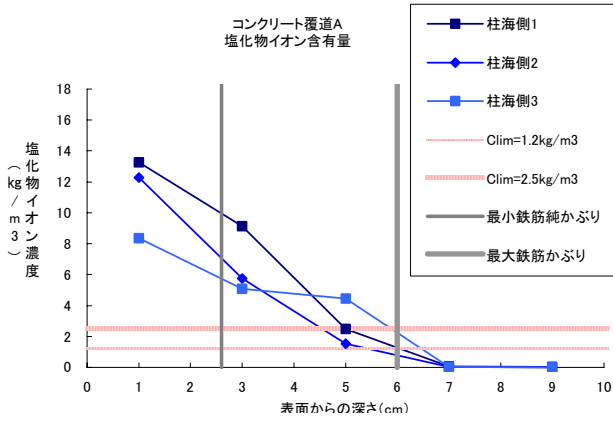
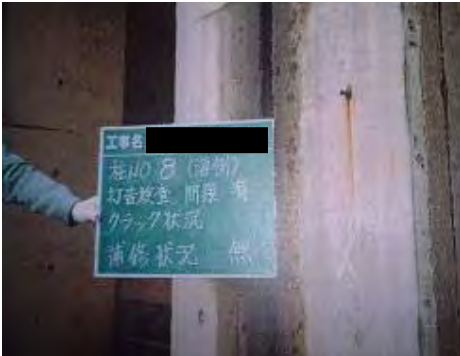
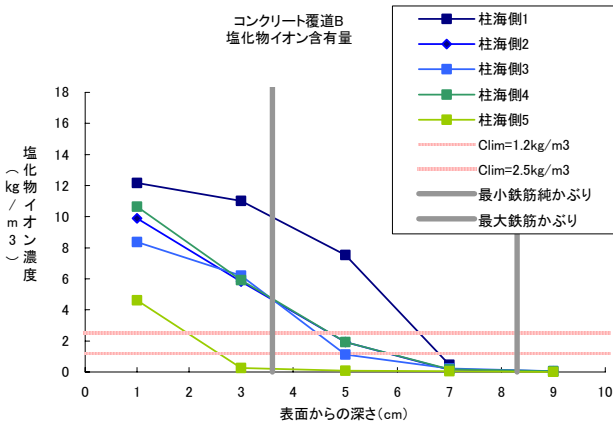
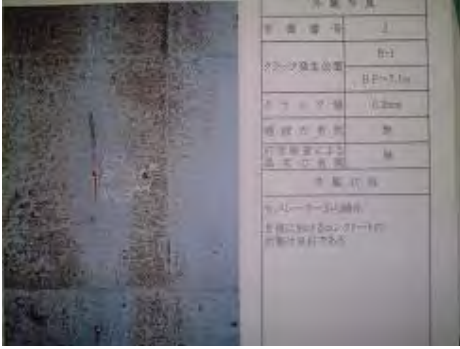
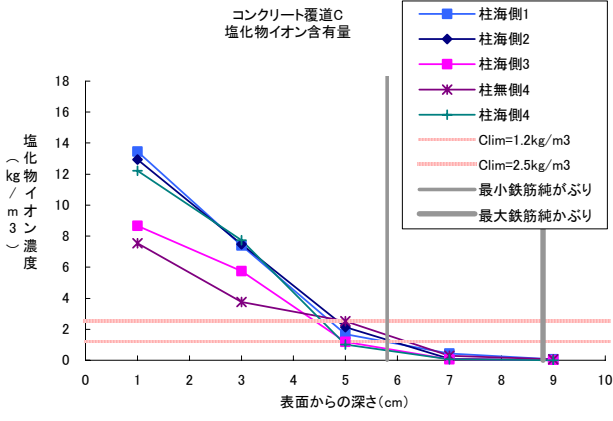
外観観察、打音検査、塩化物イオン濃度試験の結果から、塩害による劣化過程(劣化グレード)を以下の通り設定した。

覆道 A は施工時のかぶりが少ない箇所から鉄筋が腐食を開始し、はく離に至っており加速期にあると判断できる。

覆道 B は若干かぶりが大きく外観上はスペーサーの錆汁のみの変状に見えるが、打音検査では浮きが認められ、鉄筋腐食の膨張によりかぶりコンクリート全体が浮きを生じており、覆道 A と同様加速期にあると判断できる。

覆道 C は最も経過年数が少なく塩化物イオン濃度も小さいこと、最小鉄筋かぶりが 6cm 程度確保されており、調査時点で鋼材腐食発生限界塩分量に達していることから、鉄筋の腐食が開始した時点であり潜伏期から進展期に移行した時点にあると判断できる。このため、鉄筋の腐食膨張によるひび割れが生じておらず、外観上の変状も認められない。

参表 2.1.10 覆道柱の塩害劣化事例

柱表面の状況	試験結果
<p>覆道 A : 加速期の例 外観 : はく離, 鉄筋腐食</p> 	<p>コンクリート覆道A 塩化物イオン含有量</p> 
<p>覆道 B : 加速期の例 外観 : 損傷なし 打音検査 : 広範囲に渡る浮き</p> 	<p>コンクリート覆道B 塩化物イオン含有量</p> 
<p>覆道 C : 進展期の例 外観 : 損傷なし</p> 	<p>コンクリート覆道C 塩化物イオン含有量</p> 

2.1.4 津軽海峡沿岸で13年供用しているPC橋

(1) 対象構造物

竣工：1988年（調査時供用13年）

構造形式：3径間連結PC合成桁

材料規格： $\sigma_{ck}=40\text{N}/\text{mm}^2$

周辺環境：飛沫帯

セメントの種類：普通ポルトランドセメント

水セメント比：51%（配合分析の結果）

鋼材のかぶり：50mm（設計図による）



参写真 2.1.1 PC橋の側面全景

(2) 塩害劣化予測および劣化グレードの評価の方法

2001年制定コンクリート標準示方書〔維持管理編〕に準拠し、塩害劣化予測及び劣化グレードの評価を行う。劣化予測は測定した塩化物イオン濃度から表面塩化物イオン濃度と見掛けの拡散係数を求め、予定供用期間終了時までの塩化物イオンの浸透状況を算定した。評価及び判定は予定供用期間100年において、安全性能、使用機能を満足している事とし、これら要求性能を満足するためのグレードを「状態Ⅰ-2（進展期）」以下、すなわち潜伏期または進展期にあることとする。

参表 2.1.11 構造物の外観上のグレードと劣化の状態

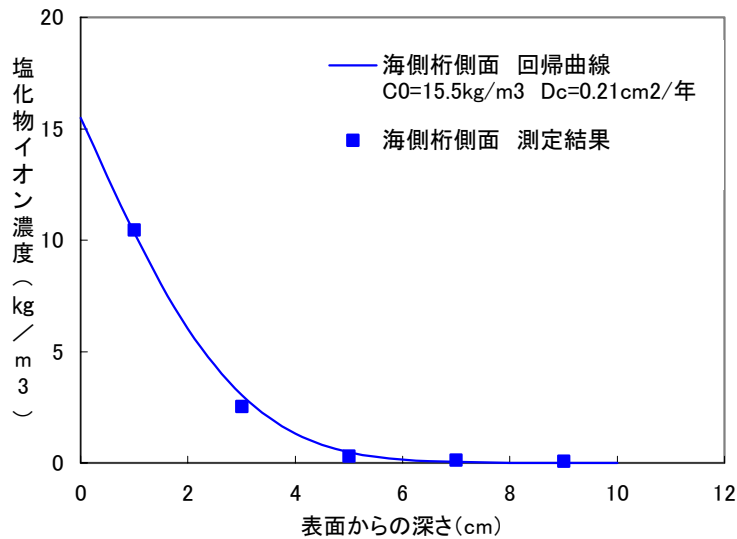
構造物の外観上のグレード	劣化の状態
状態Ⅰ-1（潜伏期）	外観上の変状が見られない，腐食発生限界塩化物イオン濃度以下
状態Ⅰ-2（進展期）	外観上の変状が見られない，腐食発生限界塩化物イオン濃度以上，腐食が開始
状態Ⅱ-1（加速期前期）	腐食ひび割れが発生，錆汁が見られる
状態Ⅱ-2（加速期後期）	腐食ひび割れが多数発生，錆汁が見られる，部分的なはく離・はく落が見られる，腐食量の増大
状態Ⅲ（劣化期）	腐食ひび割れが多数発生，ひび割れ幅が大きい，錆汁が見られる，はく離・はく落が見られる，変位・たわみが大きい

(3) 塩害劣化予測および劣化グレードの評価

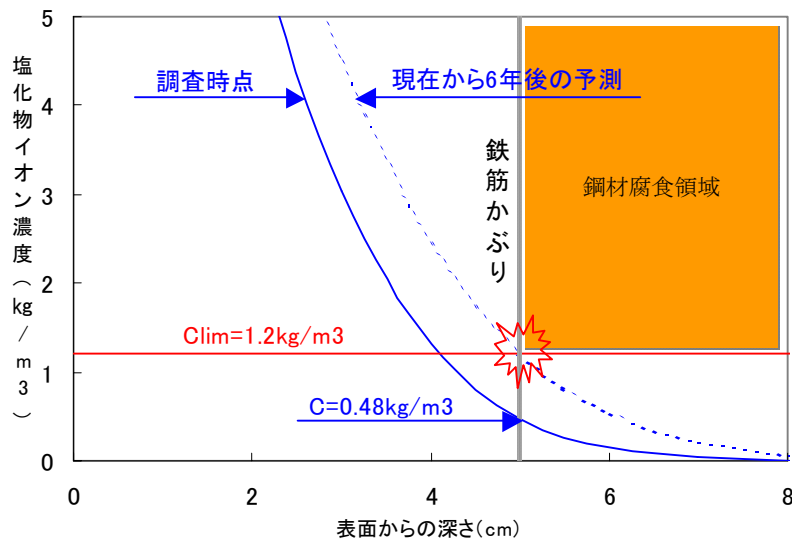
式（4.3.2）による回帰計算の条件と計算結果を参表 2.1.12 に示す。

参表 2.1.12 表面塩化物イオン濃度と見かけの拡散係数の回帰計算

		条件と結果
回帰計算 条件	塩化物イオン濃度分布	参図 2.1.10 参照
	建設後の経過年数	t=13年 表面無処理
	回帰計算	Fick の一次拡散方程式の解
	初期塩化物イオン濃度	$C_1=0.0\text{kg}/\text{m}^3$
回帰計算 結果	C_0	$15.5\text{kg}/\text{m}^3$
	D_c	$0.21\text{cm}^2/\text{年}$



参図 2.1.10 塩化物イオン濃度の測定結果と回帰分析結果



参図 2.1.11 塩害劣化の進行予測

調査時点のかぶり位置の塩化物イオン濃度は $C=0.48\text{kg/m}^3$ と $C_{lim}=1.2\text{kg/m}^3$ 以下であり状態Ⅰ-1（潜伏期）である。すなわち現時点では外観上の変状，塩化物イオン濃度から鋼材の腐食はごく軽微と考えられる。しかし，6年後には最小かぶり位置で C_{lim} に達し状態Ⅰ-2（進展期）に移り腐食が開始する。その後，コンクリートに腐食ひび割れが発生する状態Ⅱ-1（加速期前期）へと移行し，予定供用期間終了時には，腐食ひび割れの影響により拡散速度および腐食速度が増加する状態Ⅱ-2（加速期後期）あるいは状態Ⅲ（劣化期）へと進展すると想定される。

(4) まとめ

架設供用後 13 年経過した PC 桁の塩分含有量調査の結果，今後約 6 年（建設後 19 年）で鉄筋腐食が発生すると推定された。塩害劣化に対する補修・補強工法は種々提案されているが，対策を実施する時期により最も経済的になる工法が異なるため，ライフサイクルコスト（LCC）を検討し，維持管理方法を決定する必要がある。

2.1.5 関東の太平洋岸で約30年供用しているPC橋

(1) 対象構造物

参表 2.1.13 構造物の諸元等

項目	諸元等
構造物の種類	橋梁（高架橋）
構造形式	PC ポステンT桁
竣工年月	1972年
所在地	関東地方
立地条件	海岸線より約50m

(2) 劣化状況

劣化要因：塩害

状況：鉄筋の腐食によるかぶりコンクリートの剥落が多く見受けられた。コンクリートの表面は被覆がなされているが、被覆前にすでに塩分がコンクリート内部に浸透していたためか、鉄筋の腐食が進行した状態であった。一部の径間ではすでに脱塩工法による対策がなされていた。



参写真 2.1.2 桁下面の塩害損傷状況（はく離・鉄筋露出）

(3) 点検・調査項目の例

非破壊試験の再現性と各非破壊試験結果間における相関の把握を目的として、自然電位法（NK）・熱赤外線映像法・打音法・透気法などのほか、光ファイバや加速度計を利用したモニタリングを検討するための走行試験を実施した。ここでは、試験項目の紹介までとした。

2.1.6 中国地方の日本海岸で約 50 年供用している鋼橋 RC 床版

(1) 対象構造物

参表 2.1.14 構造物の諸元等

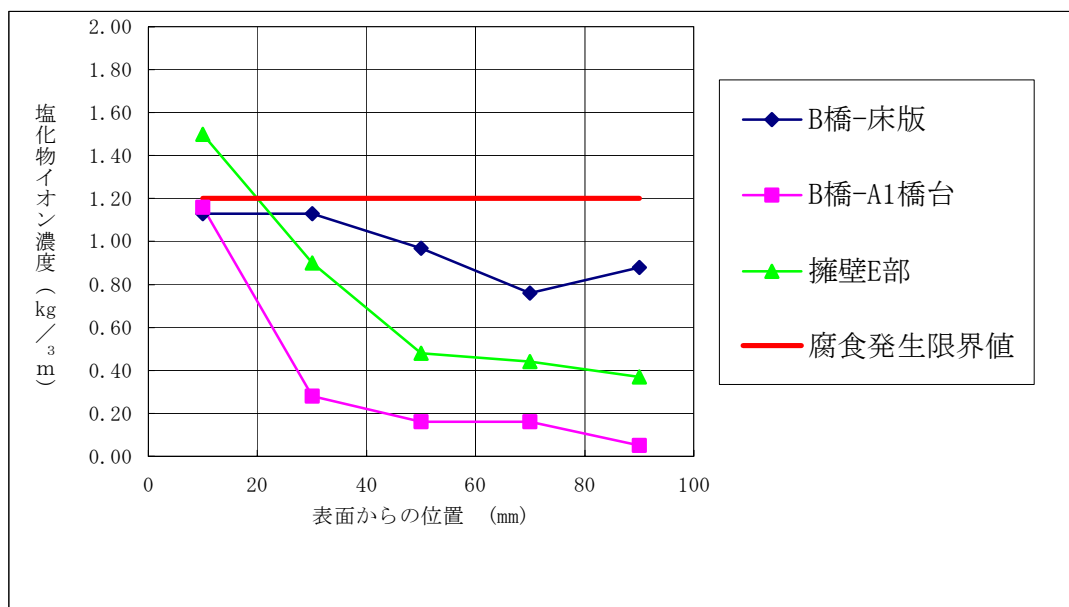
項目	諸元等
構造物の種類	橋 梁
構造形式	単純H鋼桁橋
竣工年月	1949 年(昭和 24 年)
所在地	中国地方
立地条件	海岸線より約 200m, 河川橋梁取付部

(2) 1-6-2 点検・調査結果

橋梁劣化状況を確認するための試験として、①圧縮強度試験、②中性化試験、③塩化物イオン濃度試験を実施した。

参表 2.1.15 コンクリート試験結果

調査項目	結果
圧縮強度試験	コンクリート標準示方書(昭和 24 年)を参考とした設計基準強度と対比し、強度低下は生じていない。
中性化試験	かぶり深さに対して中性化領域は小さく、 \sqrt{t} 則による劣化予測値も今後 100 年では鉄筋の腐食に与える影響は小さいものとなった。
塩化物イオン濃度試験	B 橋床版では、鉄筋位置 (20mm) で腐食発錆限界値 (1.2 kg/m ³) 付近の値となっており、対策が必要であると判断する。 (下図グラフ参照)



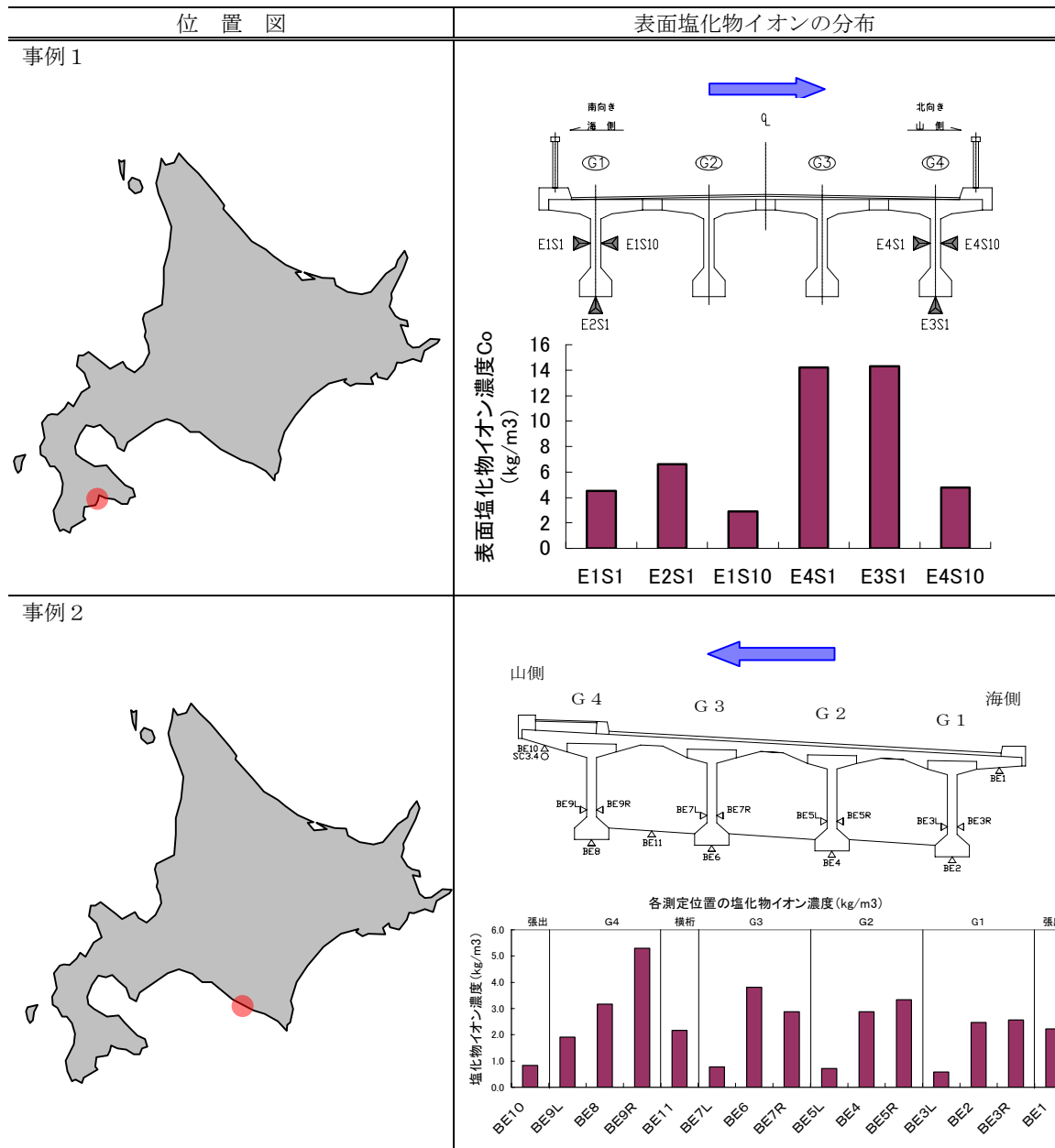
参図 2.1.12 塩化物イオン濃度試験結果図

2.1.7 桁横断方向の表面塩化物イオン濃度の測定事例

コンクリート桁橋について表面塩化物イオン濃度の桁横断方向の調査事例を参表 2.1.16 に示す。ここに、表面塩化物イオン濃度 (C_0) は測定した塩化物イオン濃度に対して拡散方程式(フィックの第2法則)の解析解を用いた回帰分析により計算した値である。

両事例とも河口に近い河川橋であり桁下を潮風が吹き抜ける地形条件であり、風下側の桁下面および風を受ける桁側面が相対的に高い表面塩化物イオン濃度となっている。両耳桁の外側は相対的に低い表面塩化物イオン濃度であり、雨掛かりにより洗われる部位であることが要因の一つと考えられる。

参表 2.1.16 桁横断方向の表面塩化物イオンの分布事例



2.1.8 コンクリート中の塩化物イオン濃度分布簡易分析シート，付録2 抜粋

本項は以下の文献から抜粋して示している。

土木研究所：コンクリート中の塩化物イオン濃度分布簡易分析シートおよび付録
http://www.pwri.go.jp/jpn/tech_inf/download.htm

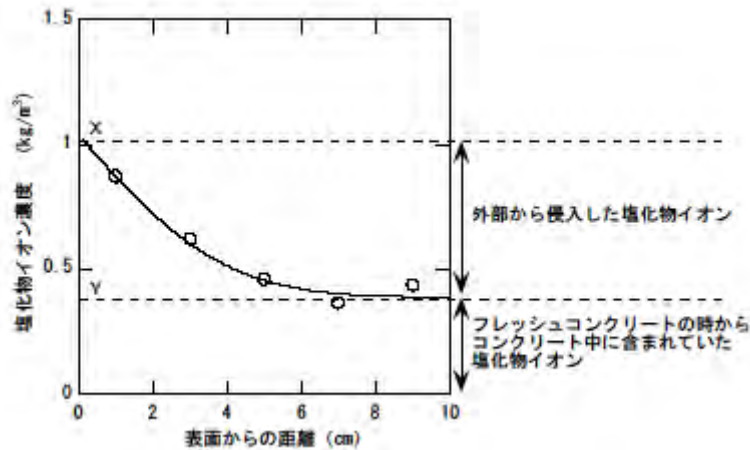
Q2 分析の際に入力する表面塩化物イオン濃度，見掛けの拡散係数，初期塩化物イオン濃度の値と塩分分布の計算結果の関係について教えてください。

A2 分析（推定）する三つのパラメータは，それぞれ以下のような意味を持ち，計算値の大きさや曲線の傾きに影響を与えます。

表面塩化物イオン濃度：構造物のごく表面部に位置するコンクリートに含まれている塩化物イオンの濃度を表す係数，付図-2.1のXの値からYの値を減じた値に対応

見掛けの拡散係数：塩化物イオンが，拡散現象によりコンクリート表面から内部に移動する際の，拡散の速度を表す係数，推定曲線の形状（傾きの大きさ）に影響

初期塩化物イオン濃度：コンクリート中に当初から（フレッシュコンクリートの時から）含まれていたと考えられる塩化物イオン濃度を表す係数，付図-2.1のYの値に対応



付図-2.1 各パラメータの意味（グラフは一例）

Q7 表面塩化物イオン濃度，見掛けの拡散係数，初期塩化物イオン濃度を推定して入力する際，何桁まで検討するとよいでしょうか。

A7 表面塩化物イオン濃度と初期塩化物イオン濃度の推定では，塩化物イオンの試験結果に合わせて小数点以下2桁まで推定するのが良いでしょう。見掛けの拡散係数は，有効桁数2桁で推定すると良いでしょう。

Q8 分析の開始時に初期塩化物イオン濃度を推定する方法を教えてください。
初期塩化物イオン濃度の推定で、注意すべき点はありますか。

A8 初期塩化物イオン濃度は、フレッシュコンクリートの時から既にコンクリート中にあると考えられる塩分の量です (Q2, 付図-2.1 参照)。分析の開始時に入力する値は、以下を参考にして初期値を設定するとよいでしょう。

- 1) 構造物の最も内部から採取した試料で測定した塩化物イオン濃度が $0\text{kg}/\text{m}^3$ の場合、初期塩化物イオン濃度も $0\text{kg}/\text{m}^3$ と推定する。
- 2) コンクリート内部のデータが数点連続して同程度の値を示す場合 (例えば、付図-2.1), その平均的な値を初期塩化物イオン濃度と推定する。
- 3) 1)2)に該当しない場合には、 $0\text{kg}/\text{m}^3$ と仮定する。

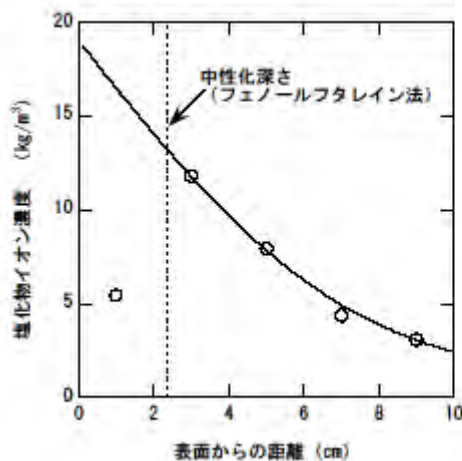
※塩化物イオン濃度の実測値として約 $0.05\text{kg}/\text{m}^3$ 以下の値が記入されている場合には、注意が必要です。塩化物イオン濃度が著しく小さいデータには、実際に塩化物イオンを分析した結果としてその値が得られた場合と、塩化物イオン濃度が小さすぎて分析できず、測定装置等の分解能が記入されている場合の二通りがあります。したがって、このような場合は、前者であることが明らかな場合を除き、この部分の塩化物イオン濃度は $0\text{kg}/\text{m}^3$ であると考えるのが良いでしょう。

※初期塩分の由来としては、骨材表面に付着していたものや混和剤中に含まれていたものなどが考えられます。初期塩分に起因するコンクリート構造物の塩害を避けるため、レディーミクストコンクリートの受け入れ時には塩化物イオンの試験を行うことが定められており、初期塩分量は、通常 $0.3\text{kg}/\text{m}^3$ 以下とされています。ただし、このような規準類が整備されていなかった 1986 年以前の構造物では、コンクリート中に建設当初から多量の塩分が含まれている場合があります。

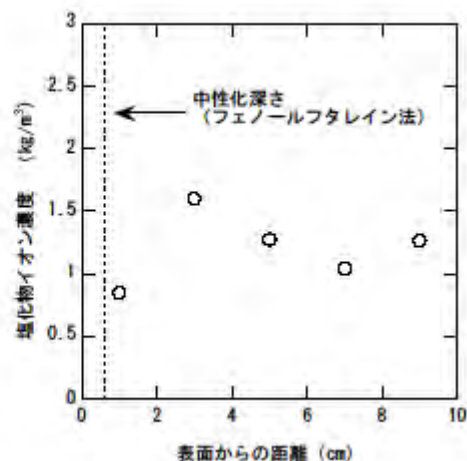
Q9 コンクリート表面に近い箇所の塩化物イオン量の実測値がコンクリート内部よりも小さい場合があるのですが、どのように分析したらよいのでしょうか。

A9 コンクリートが構造物表面から中性化 (炭酸化) した場合、中性化した領域に含まれていた塩分が、構造物内部の未中性化領域へと移動すると考えられています。したがって、中性化の影響を受けていると推測されるデータについては、表面塩化物イオン濃度、見掛けの拡散係数、初期塩化物イオン濃度の推定時には、無視してください (付図-2.2)。

コンクリートが中性化していないにもかかわらずコンクリート表面付近の塩化物イオン濃度が小さい場合や、(中性化の有無に関わらず) 塩化物イオンの実測値が不規則に並んでいる場合には、塩化物イオンの拡散法則によって (つまり、分析シートで) 塩化物イオン濃度の分布を説明したり、将来予測を行うことはできません (付図-2.3)。



付図-2.2 塩化物イオンの濃度分布が中性化の影響を受けている事例



付図-2.3 拡散法則で塩化物イオン濃度分布を推定するのが不適当な事例

2.2 凍害劣化構造物の事例

2.2.1 北海道の太平洋岸で建設 37 年を経過する防波堤

(1) 対象構造物と劣化状況

対象構造物の諸元を参表 2.2.1 に、外観写真を参写真 2.2.1 に示す。目視可能範囲は、躯体天端にあたる海上部に限られたが、その劣化・損傷度はきわめて大きい。港内側となる面の欠損状況は著しく、一部に鉄筋の露出も確認される。港外側にも一部鉄筋露出を伴う欠損部が確認されるが港内側と比較してその損傷度は比較的小さい。横断面においては、著しいコンクリート表面のスケーリングが認められるが、直接海水に晒されていた港内外面と比較して当初の断面が失われるほどの欠損は認められない。

参表 2.2.1 構造物の緒元等

項目	諸元等
構造物の種類	港湾構造物
対象部位	防波堤
竣工年度	1965 年
所在地	北海道（海岸部）
調査実施日	2002 年



参写真 2.2.1 コンクリート表面の劣化状況

(2) 点検・調査・診断結果

コンクリートの劣化要因を把握する目的から①外観目視調査，②圧縮強度試験，③静弾性試験，④中性化試験，⑤塩化物イオン濃度試験，⑥物理化学試験（X線回折分析，熱分析，細孔径分布試験，気泡分布試験）の調査を実施した。外観から凍害による著しいスケーリングが認められており，ここでは凍結融解抵抗性に関する試験結果を示す。

細孔構造分析結果：凍結融解抵抗性に有害な空隙は直径 100nm～1 μ m の細孔とされており，この空隙に含まれる水が凍結膨張すると硬化体組織の破壊に繋がる。深度 0-20 において 100nm～1 μ m の細孔は深度 40-60 と比較して 1.5 倍もの容積を有しており，すなわち内部と比較して凍結融解に対する抵抗性が低下しているものと解釈される。

気泡組織分析結果：気泡間隔係数はコンクリートの凍結融解に対する耐久性を示す最も重要な指標とされており，0.1～0.2mm の範囲にあるコンクリートは凍結融解抵抗性を有するものとして判断される。当該施設コンクリートにおいては 0.366mm と上記範囲より大きな値となり，気泡間の距離が長く「凍結融解抵抗性を大きく期待できないコンクリート」と評価されることとなる。また，凍結融解の抵抗性に寄与する空気量も A E コンクリートとしては 1.95%と少ない。

以上を考慮すると，当該施設コンクリート自体に凍結融解に対する抵抗性は期待出来ない。

(3) 対策

当該施設の再利用性に影響を及ぼす恐れのある要因，およびこれに起因する劣化現象は参表 2.2.2 の通りであり，予想される劣化に対する対策と期待される効果を参表 2.2.3 にまとめる．単一工法によって全ての効果を期待できる対策は難しく，併用工法で対応する必要がある．対策の併用により全ての効果が得られる対策の組み合わせは参表 2.2.4 の通りであり，何れかの対策が必要となる．この場合，性能，施工性，実績及び経済性等を考慮の上工法を選択することとなる．断面欠損部の修復後に海中使用し，耐荷力の回復と予想される劣化挙動を抑制する対策が最も簡易的かつ効果的であると考える．

参表 2.2.2 損傷と劣化現象

損傷と劣化現象	
再利用性に影響を及ぼす恐れのある要因	①鉄筋露出を伴うコンクリート断面の欠損と断面を貫通する割れの発生 ②鉄筋位置に於ける腐食限界値を超越した塩分含有量 ③水酸化カルシウムの溶脱に起因するコンクリート組織のポーラス化 ④凍結融解抵抗性に劣るコンクリートと炭酸化に伴う抵抗性の更なる低下
これらの要因に起因する劣化現象	A. 耐荷力の低下及び鉄筋腐食 B. 酸素の浸透・拡散による鉄筋腐食 C. 二酸化炭素の浸透・拡散による中性化 D. 凍結融解作用による凍害劣化 尚，上記 B. ～D. に関しては大気中暴露が条件となる劣化現象である． 海水中使用に際しては，二酸化炭素，酸素の浸透拡散及び凍結融解は発生せず，これらの劣化挙動は示さないものと推察される．

参表 2.2.3 対策工法とその効果

使用環境	対 策	期待される効果			
		耐荷力回復	中性化抑制	鉄筋腐食抑制	凍害劣化抑制
海上使用	対策なし	×	×	×	×
	表面被覆	×	○	×	○
	欠損断面の修復 ^{※1}	○	×	×	×
	電気化学的脱塩	×	×	○	×
	電気防食	×	×	○	×
	劣化部除去及び新規打設 ^{※2}	×	○	○	○
海中使用	対策なし	×	○	○	○
備 考	○：効果が期待できる ×：効果が期待できない ※1：当初断面への回復，欠損部及び割れの修復を指す． ※2：再利用後に海上部となる高さ分のコンクリート除去及び新規コンクリートの打設を指す．				

参表 2.2.4 対策工法の併用とその効果

使用環境	対 策	期待される効果			
		耐荷力回復	中性化抑制	鉄筋腐食抑制	凍害劣化抑制
海上使用	欠損断面の修復+表面被覆+電気化学的脱塩	○	○	○	○
	欠損断面の修復+表面被覆+電気防食	○	○	○	○
	劣化部除去及び新規打設	○	○	○	○
海中使用	欠損断面の修復	○	○	○	○
備 考	○：効果が期待できる， ×：効果が期待できない				

2.2.2 北海道の太平洋岸で建設 38 年を経過する防波堤

(1) 対象構造物と劣化状況

対象構造物の諸元を参表 2.2.5 に、外観写真を参写真 2.2.2 に示す。

外壁に関してはコンクリート表面のスケーリングが外面及び天端面の一部に認められる。他は、際だった経年劣化は認められない。一方で、断面を大きく失った破損部が随所に認められ、一部は鉄筋露出を伴い、著しい腐食の進行も認められる。損傷形態や鉄筋の腐食状況から判断してこれらの欠損はさほど古いものでないと思われるが、湾曲した鉄筋も見受けられることから何らかの外力が作用したことによるものと考えられる。また、0.2mm を超える大きな亀裂（割れ）の発生も認められ、特に隅角部近傍に於いては高い頻度で確認される。

参表 2.2.5 構造物の緒元等

項目	諸元等
構造物の種類	港湾構造物
対象部位	防波堤
竣工年度	1965 年
所在地	北海道（海岸部）
調査実施日	2003 年



参写真 2.2.2 コンクリートの劣化状況

(2) 点検・調査・診断結果

コンクリートの劣化要因を把握する目的から①外観目視調査、②鉄筋電位測定③圧縮強度試験、④静弾性試験、⑤中性化試験、⑥塩化物イオン濃度試験、⑦物理化学試験（X線回折分析、熱分析、細孔径分布試験、気泡分布試験）の調査を実施した。外観から凍害による著しいスケーリングが認められており、ここでは凍結融解抵抗性に関する試験結果を示す。

細孔構造分析結果：深度 10mm に於ける $0.1\sim 1\mu\text{m}$ の細孔容積は 0.00773 ml/g となり、内部と比較して 50%以上もの減少傾向を示す。また、細孔構成率に着目すると 11.6%であり、内部のそれと比較して 7%程度の減少傾向を示す。凍結融解抵抗性に有害な空隙は直径 $0.1\sim 1\mu\text{m}$ の細孔とされており、この空隙に含まれる水が凍結膨張すると硬化体組織の破壊に繋がる。深度 10mm に於ける $0.1\sim 1\mu\text{m}$ の細孔は、深度 50mm と比較して容積を減じており、内部と比較して凍結融解に対する抵抗性を有している。

気泡組織分析結果：気泡間隔係数はコンクリートの凍結融解に対する耐久性を示す最も重要な指標とされており、 $0.2\sim 0.25\text{mm}$ の範囲にあるコンクリートが凍結融解抵抗性を有するものとして判断される。当該施設の気泡間隔係数は 0.279mm と分析され、概ね凍結融解抵抗性を有するコンクリートである。

(3) 対策

当該施設の再利用性に影響を及ぼす恐れのある要因，およびこれに起因する劣化現象は参表 2.2.6 の通りであり，予想される劣化に対する対策と期待される効果を参表 2.2.7 にまとめる．全ての効果を期待できる対策は，劣化部除去後に新規コンクリートを打ち直す工法のみである．しかし，再利用の観点からは現状の断面を最大限に利用しつつ，目標とする耐用年数を付加する対策の選定が賢明に思われる．対策の併用により全ての効果が期待できる組み合わせは参表 2.2.8 の通りである．

参表 2.2.6 損傷と劣化現象

損傷と劣化現象	
再利用性に影響を及ぼす恐れのある要因	①鉄筋露出を伴うコンクリート断面の欠損と断面を貫通する割れの発生 ②塩分含有量のさらなる増加 ③水酸化カルシウムの溶脱に起因するコンクリート組織のポーラス化
これらの要因に起因する劣化現象	A. 耐荷力の低下 B. 酸素の浸透・拡散による鉄筋腐食 C. 二酸化炭素の浸透・拡散による中性化 尚，上記 B. C. に関しては大気中暴露が条件となる劣化現象である． 海水中使用に際しては，二酸化炭素，酸素の浸透拡散及び凍結融解は発生せず，これらの劣化挙動は示さないものと推察される．

参表 2.2.7 対策工法とその効果

使用環境	対 策	期待される効果		
		耐荷力回復	中性化抑制	鉄筋腐食抑制
海上使用	対策なし	×	×	×
	表面被覆	×	○	△
	欠損断面の修復 ^{※1}	○	×	×
	電気化学的脱塩	×	×	○
	電気防食	×	×	○
	劣化部除去及び新規打設 ^{※2}	○	○	○
海中使用	対策なし	×	○	○
備 考	○：効果が期待できる，△：間接的な効果が期待できる，×：効果が期待できない ※1：当初断面への回復，欠損部及び割れの修復を指す． ※2：再利用後に海上部となる高さ分のコンクリート除去及び新規コンクリートの打設を指す．			

参表 2.2.8 対策工法の併用とその効果

使用環境	対 策	期待される効果		
		耐荷力回復	中性化抑制	鉄筋腐食抑制
海上使用	欠損断面の修復+表面被覆	○	○	△
	欠損断面の修復+表面被覆+電気化学的脱塩	○	○	○
	欠損断面の修復+表面被覆+電気防食	○	○	○
海中使用	欠損断面の修復	○	○	○
備 考	○：効果が期待できる，△：間接的な効果が期待できる			

2.3 アルカリ骨材反応劣化構造物の事例

2.3.1 建設後約40年経過したPCプレテンI桁橋

(1) 対象構造物

参表 2.3.1 構造物の諸元等

項目	諸元等
構造物の種類	橋梁（跨道橋）
構造形式	PCプレテンI桁橋（歩道部）
竣工年月	1961
所在地	北陸地方
立地条件	海岸線より約3km

(2) 劣化状況

主桁下面には橋軸方向のひび割れが見られた。ひび割れは桁端部に多く分布していた。ほとんどのひび割れには、濡れ色及び白色の析出物が認められた。ひび割れ幅は0.1mm未満で、最大0.04mmのひび割れが確認された。



参写真 2.3.1 PCプレキャスト桁下面のひび割れ

(3) 点検・調査結果

A S Rと凍害の複合劣化を把握する目的で①近接目視調査，②はつり調査，③反発度測定，④コア採取（アルカリ度測定，気泡間隔係数測定）の詳細調査を行った。

推定強度は 59N/mm^2 ，コンクリート中の総アルカリ度は 3kg/m^3 であった。コア破断面の骨材と空隙にアルカリシリカゲルが見られた。また，気泡間隔係数からは耐凍害性が確認されたことより，劣化の主要因はA S Rであると判断した。一方，はつり調査では鉄筋の軽微な腐食が見られた。

2.3.2 建設後約30年経過したポンプ場RC構造

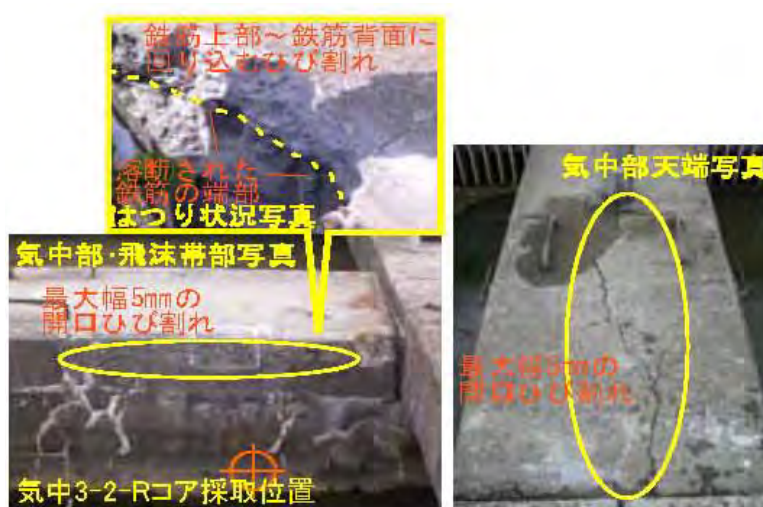
(1) 対象構造物

参表 2.3.2 構造物の諸元等

項目	諸元等
構造物の種類	ポンプ場（排水機場）
構造形式	RC（ピア状、ボックス状）
竣工年月	1970
所在地	北陸地方
立地条件	河口部に位置する構造物

(2) 劣化状況

屋外ピア状構造物では亀甲状の開口ひび割れがみられ、とくにピア天端部では幅5mmに達するものもあった。白色析出物は気中部飛沫帯付近で顕著であった。室内ボックス状構造物では変状はほとんどみられなかった。



参写真 2.3.2 屋外ピア状構造部の天端変状状況

(3) 点検・調査結果

上記変状発生状況と、河口に立地する環境から、ASRと塩害の調査を実施した。調査項目はつぎの6項目であり、供用環境毎、部材深度毎に試料を採取した。

①残存膨張量試験（デンマーク法）②SEM分析③目視観察④強度・静弾性係数試験⑤はつり・鉄筋腐食破断確認⑥塩化物イオン濃度試験

試験の結果、塩害は発生していないが、ASR生成物や静弾性係数の低下などが確認され、ASR劣化が明らかとなった。

対策としては、部材表面付近の劣化部を除去・断面修復する工法を提案した。

2.4 その他の事例

2.4.1 化学的腐食による劣化を生じた汚水処理場コンクリート

(1) 対象構造物

参表 2.4.1 構造物の緒元等

項 目	諸 元 等
構造物の種類	汚水処理場
対象部位	消化タンク
竣工年度	1973年
所在地	北海道（内陸部）
調査実施日	2003年

(2) 劣化状況

当該消化タンクは、約30年前に竣工し、途中、内部被覆材の改修を行っているが、気相中のコンクリート部分（上床版下面）は、硫化水素により著しいコンクリートの脆弱化が予想され、また、液相中に於いても化学的侵食環境によるコンクリート耐久性の低下が懸念される状況にある。



参写真 2.4.1 コンクリートの劣化状況

(3) 点検・調査・診断結果

コンクリートの劣化要因を把握する目的から①外観目視調査、②圧縮強度試験、③配筋調査（電磁波反射法）、④中性化試験、⑤鉄筋腐植度、⑥汚泥水質分析次の調査を実施した。

側壁では、ウレタン系保護層が残っているものの脆弱化が進行しており、下床版では、エポキシ塗装が2層剥がれている面積が多かった。中性化試験の結果、上床版の屋外に関して平均中性化深さが0～105mmと設計被り厚さ40mmを超えている。しかし、採取した鉄筋は腐食が見られずすべて健全であったことから、コンクリート内部にひび割れがあり、局所的に中性化が進んだものと推察される。

汚泥水質分析を行った結果、pH、アンモニウム塩に対して、対策が必要と判定された。

コンクリート躯体は、防食被覆層の老朽化、上床版の貫通亀裂、中性化の進行、被り厚さの不足、防水層の機能低下などの劣化症状が見られるが、床版の内部鉄筋は腐食しておらず健全であった。

以上より、コンクリート躯体は改修可能な劣化程度であり、劣化症状に対して改修対策を講じることにより、物理的な耐用年数を確保することが可能と判断された。

2.4.2 高温環境下でひび割れ等の損傷を生じた電気炉基礎コンクリート

(1) 対象構造物

参表 2.4.2 構造物の緒元等

項 目	諸 元 等
構造物の種類	電気炉基礎
対象部位	基礎コンクリート
竣工年度	1975年
所在地	北海道（内陸部）
調査実施日	2002年

(2) 劣化状況

当該構造物は、竣工後 27 年間高温環境に晒されてきており、煉瓦、鋼板などの耐火層を有しているものの、ひび割れ、変形・脱落などその変状は著しく、コンクリート躯体への影響も懸念されるところである。



参写真 2.4.2 コンクリートの劣化状況

(3) 点検・調査・診断結果

コンクリートの劣化要因を把握する目的から①圧縮強度試験、②静弾性試験、③深さ方向の劣化推定（超音波伝搬速度法）、④温度特性調査（熱伝対）、⑤ひび割れ調査、⑥中性化試験の調査を実施した。

試験の結果、圧縮強度は基準強度を確保しているがコンクリート表面部は中心部の 60% と低い値であった。静弾性試験は、土木学会標準値と比べて 50% 程度低下しており、圧縮強度との相関が見られ熱の影響を受けていると推察される。

また、中性化試験においても熱的な劣化を受けている部位の中性化は他の部位に比べて進行している。

温度特性調査では、コンクリート表面部および深さ 10cm の箇所では最高 50℃ と比較的高い値を示しており、このような温度変化によってコンクリートの温度応力が発生し、その繰り返しによって微細なひび割れが生じてコンクリートが劣化していると考えられる。

尚、本業務では対策工の検討、提案は実施していない。

2.4.3 ダム水叩き部に洗掘を生じた重力式ダム

(1) 対象構造物

参表 2.4.3 構造物の諸元等

項目	諸元等
構造物の種類	ダム
構造形式	重力式ダム
竣工年月	1957年(昭和32年)
所在地	関東地方
立地条件	山岳部

(2) 劣化状況

当ダムは、発電用、洪水調節用ダムで、出水時に砂礫を混入した水が越流するため、堤体および水叩き部の洗掘が著しい。

- ・ダム越流部の洗掘 洗掘最大深さ 1.2m (下端部)
- ・水叩き部の洗掘 洗掘最大深さ 2m (つま先部)



参写真 2.4.3 右岸から越流部下端を撮影

(3) 点検・調査・診断結果

調査では現状把握を目的とした①外観目視調査, ②洗掘量調査 (ロッククライミング調査), ③反発強度調査を行い, 調査結果に基づいたダムの安定検討, 対策工設計を実施した。

コンクリートの推定強度は $40\text{N}/\text{mm}^2$ 程度。洗掘深さは上記のとおり。

洗掘は、現状ではダムの安定を損なうものではないが、放置すれば安定性が損なわれるため対策することとした。

対策は以下の4案で比較し原形復旧を採用。

- ・高強度コンクリートによる原形復旧
- ・鋼板による表面ライニング
- ・高強度コンクリート増し厚
- ・排砂トンネルの新設

2.4.4 支承付近にひび割れを生じたダムクレストゲート柱

(1) 対象構造物

参表 2.4.4 構造物の諸元等

項目	諸元等
構造物の種類	ダムクレストゲート柱
構造形式	RC 構造
竣工年月	昭和 39 年
所在地	中部地方
立地条件	山岳部

(2) 劣化状況

対象ひび割れは、ダムのクレストゲート左岸側堰柱・巻上げ装置上流側支承直下に確認される。ひび割れは、最大幅 15mm、段差 5mm を有しており、支承台部を取り囲んでいる。このひび割れは、以前、樹脂系充填剤で補修がされているが、その後さらに開口した形跡がある。



参写真 2.4.4 堰注全景とひび割れ部の拡大

(3) 点検・調査・診断結果

現在、当該箇所については、コンクリートの付着力はほとんど期待できない状態にあり、内部鉄筋だけで保持されているものと判断され、ゲートの安定した操作に支障をきたす恐れがある。このため、応急的・長期的な対策を講じることが望ましい。

クレストゲート堰柱支承部のひび割れの長期的な対策としては、巻上げ装置をジャッキアップにより仮受けし、ひび割れ部を除去した後、配筋を行い、コンクリートを打設する必要がある。

しかし、現時点でクレストゲートの運転ができていることを考慮すると、応急的な対策を実施することも考えられる。この場合の対策工としては、鋼板を巻き立ててせん断力に対抗することが考えられる。

2.4.5 竣工後まもなくひび割れを生じた揚水機場コンクリート

(1) 構造物

参表 2.4.5 構造物の緒元等

項 目	諸 元 等
構造物の種類	揚水機場
対象部位	合流工
竣工年度	1999年
所在地	北海道（内陸部）
調査実施日	2003年

(2) 劣化状況

竣工後5年を数える当該構造物には、漏水を伴ったひび割れをはじめとするコンクリート部材の変状が多数認められ、構造物の美観が損なわれるにとどまらず構造耐力への影響も懸念されるところである。

合流工としてこれから長期間使用するためには、現状の把握及びこれら変状の発生原因を解明することが必要である。



参写真 2.4.5 コンクリートの劣化状況

(3) 点検・調査・診断結果

コンクリートの劣化要因を把握する目的から①外観目視調査、②圧縮強度試験、③配合推定、④配筋調査（電磁波反射法）の調査を実施した。

上記試験の結果、圧縮強度はすべての供試体で設計基準強度を満足するが、コアの外観から多数の空隙が認められ、エントラップドエアの抜けが十分行われなかったものと考えられるた。

配合推定から、単位セメント量 $303\text{kg}/\text{m}^3$ 、単位水量 $206\text{kg}/\text{m}^3$ および $W/C=68.1\%$ との分析結果を得た。当該構造物の設計水セメント比は 55% であり、本調査において W/C が大きく算出された理由として、①骨材の吸水率を 1% としたこと（北海道の平均値は 1.6% 程度）、②締固めが不十分な場合にはエントラップドエア量が多くなること、③コアの採取が構造物上部であったためコンクリートの打設後ブリージングにより材料分離が起こったことなどの影響が考えられる。尚、配合推定試験は使用材料の品質が既知の場合には比較的精度の高い推定値が得られるが、未知の場合には仮定値が多く誤差が大きくなる傾向を有する。

尚、本業務では対策工の検討、提案は実施していない。

2.4.6 施工不良による空洞を有する橋梁床版コンクリート

(1) 対象構造物

参表 2.4.6 構造物の緒元等

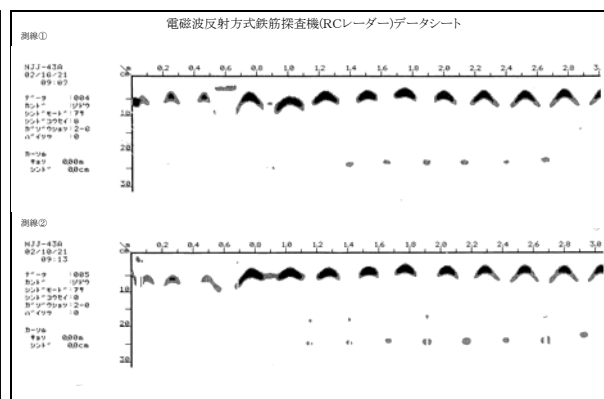
項 目	諸 元 等
構造物の種類	橋梁
対象部位	床版コンクリート(かぶり部)
竣工年度	不明
所在地	北海道 (内陸部)
調査実施日	2002 年

(2) 劣化状況

当該構造物において、改修工事を行う際にかぶりコンクリートの大規模な浮きが確認された。本調査は、当該構造物に於けるかぶりコンクリートの浮き範囲を確認するため実施した。



参写真 2.4.6 配筋，空洞調査状況



参図 2.4.1 電磁波測定結果

(3) 点検・調査・診断結果

コンクリートの排気状況ならびにかぶり部の空洞を把握する目的から①配筋調査（電磁波測定法）、②コンクリート内部空洞調査（電磁波測定法，超音波伝播速度法）の調査を実施した。超音波伝播速度測定機を用いた，コンクリート内空洞の判定方法を以下に示す。

判定 1) 健全部伝播時間 \geq 測定位置伝播時間 $\cdots\cdots$ 健全とする

判定 2) 測定位置の内，2 倍以上の伝播時間を示す位置を浮きとする。

健全部と測定部の比較を行うと，判定 2 の範囲に含まれる測定部の伝播速度は見られないことから，大規模な浮きの発生は無いものと思われる。健全部に比べ伝播時間の大きい測定部も認められたが，これは，コンクリート内部に於ける空洞の存在や，超音波経路内に存在する骨材種に起因する測定値の差であると思われる。

また，電磁波反射方式鉄筋探査機を用いてコンクリート内部の空洞調査を行った結果，空洞の確認は出来なかった。

尚，本業務では対策工の検討，提案は実施していない。

2.4.7 建設後 34 年を経過する床版橋の疲労照査

(1) 対象構造物

調査・点検の対象構造物は、内陸部で 34 年経過した 3 径間連続 RC 中空床版橋である。構造物の諸元を参表 2.4.7 に、外観写真を参図 2.4.2 に示す。

参表 2.4.7 構造物の諸元等

項目	諸元等
竣工	1968 年 (S43)
構造形式	3 径間連続 RC 中空床版橋
橋長	46.01m
支間	14.60+16.06+14.06
幅員	16.7m
設計荷重	TL-20
材料規格	コンクリート $\sigma_{ck}=280\text{kgf/cm}^2$ 鉄筋 SD35
補修履歴	1973 年 (S48) ロードヒーティング補修 1985 年 (S60) 高欄塗装塗替 1999 年 (H11) 高欄取替
設計準拠規格	鉄筋コンクリート標準示方書 昭和 31 年 鉄筋コンクリート橋設計示方書改定案 昭和 39 年
周辺環境	内陸部, 積雪寒冷地



参図 2.4.2 対象構造物の位置図, 外観写真


(2) 調査項目, 方法および結果

対象橋梁は日常点検, 定期点検により維持管理されており, また過年度に床版橋下面のひび割れ調査も実施されている。本調査は床版橋のひび割れ進行の有無を確認すると共に補修・補強の可否を判定するための詳細点検である。調査結果を参表 2.4.8 に示す。

(3) 床版橋の疲労照査による評価および判定

土木学会コンクリート標準示方書 [維持管理編] [構造性能照査編] に準じた疲労照査として繰返し荷重作用による累積疲労損傷度 (M) を計算した結果, 現在 $M=0.04$, 供用 100 年後 $M=0.12$ となり, いずれも潜伏期の閾値となる「0.2」以下の値であった。このため, 応力振幅に対する異形鉄筋の疲労損傷度は現在・将来とも小さく潜伏期にあり, 要求性能を満足している結果であった。尚, 荷重作用による曲げひび割れに対しては別途検討を要する。

参表 2.4.8 詳細点検の項目、方法および結果

項目	方法	結果
調査時期	---	建設後 23 年 2003 年 (H15)
外観目視点検	近接目視, 打音検査 ひび割れ密度測定	床版橋下面に橋軸直角方向を主とする網目状のひび割れが発生し, 過年度調査時点より進行している。 歩車道境界の下方には通水によるエフロレッセンスが発生している。 打音検査では浮きは確認されなかった。 
水セメント比	工事記録の調査 配合推定(セメント協会法 F-18)	工事記録無し W/C=47%
セメントの種類	工事記録の調査	工事記録無し 推定 普通ポルトランドセメント
コアの外観観察	目視観察の調査	粗骨材: 砂利
かぶり	コアボーリングによる削孔	純かぶり 40mm
鋼材の腐食状況	コアボーリングによる削孔, 目視	腐食なし
中性化深さ	フェノールフタレイン法	20~25mm
強度試験	JIS A 1108	設計基準強度の 1.3 倍より健全

参表 2.4.9 梁の疲労の劣化過程

構造物の外観上のグレード	疲労損傷度	外観による区分	安全性能	使用性能	第三者影響度 美観・景観
状態Ⅰ-1 (潜伏期)	$M < 0.2$	ひび割れは生じていないが, 外観上の変状はみられない。	—	—	—
状態Ⅰ-2 (潜伏期)	$0.2 < M < 0.5$	ひび割れの進展がみられる。	—	—	—
状態Ⅰ-3 (潜伏期)	$0.5 < M < 0.8$	ひび割れの進展がみられる。	—	—	—
状態Ⅱ (進展期)	$0.8 < M < 1.0$	ひび割れの進展がみられる。	—	—	—
状態Ⅲ (加速期)	$1.0 < M$	ひび割れの進展がみられる。	耐力の低下 ・補強鋼材に生じている疲労亀裂による断面減少	剛性の低下 ・ひび割れの進展	美観の低下 ・ひび割れの進展
状態Ⅳ (劣化期)		ひび割れの進展・拡大がみられる。	耐力の低下 ・はり部材内の一部の補強鋼材が疲労破断	剛性の低下 ・補強鋼材の破断	第三者への影響 ・補強鋼材の破断付近のコンクリートのはく離, はく落

参考3 補修補強工法事例

3.1 補修対策の目的と工法の分類

対策工法の分類	対策の目的	工法名称							
A. 表面保護工	腐食因子侵入制御 耐久性向上 剥落防止 断面性能回復	A1	表面処理工法	A1-1	塗膜被覆工法, EFL被覆工法				
				A1-2	リソット工法(被覆工法)				
				A1-3	コンクリート改質剤被覆工法				
				A1-4	コンクリート被覆工法(シート)				
				A1-5	含浸材塗布工法				
				A1-6	〃				
	・対策が有効な主劣化要因 塩害、中性化、凍害、 ASR、化学的腐食	A2	断面修復工法	A2-1	断面修復工法				
A2-2				SSI工法(断面修復)					
A2-3				断面はつり工法					
B. ひび割れ注入工法	耐久性向上	B1	ひび割れ注入工法	B1-1	ひび割れ注入工法				
				B1-2	〃				
				B1-3	〃				
				B1-4	充填工法				
C. 電気化学的防食工	耐久性向上 腐食因子除去・制御 ・対策が有効な主劣化要因	C1	電気防食	C1-1	内部電極方式(電気防食)				
				C1-2	外部電源方式(電気防食)				
				C1-3	ガルバニウム X P (電気防食)				
	塩害、中性化	C2	脱塩工法	C2-1	デザリネーション(脱塩工法)				
				C3	再アルカリ化工法	C3-1	再添加化工法		
						C4	電着工法	C4-1	電着工法

3.2 補修工法事例

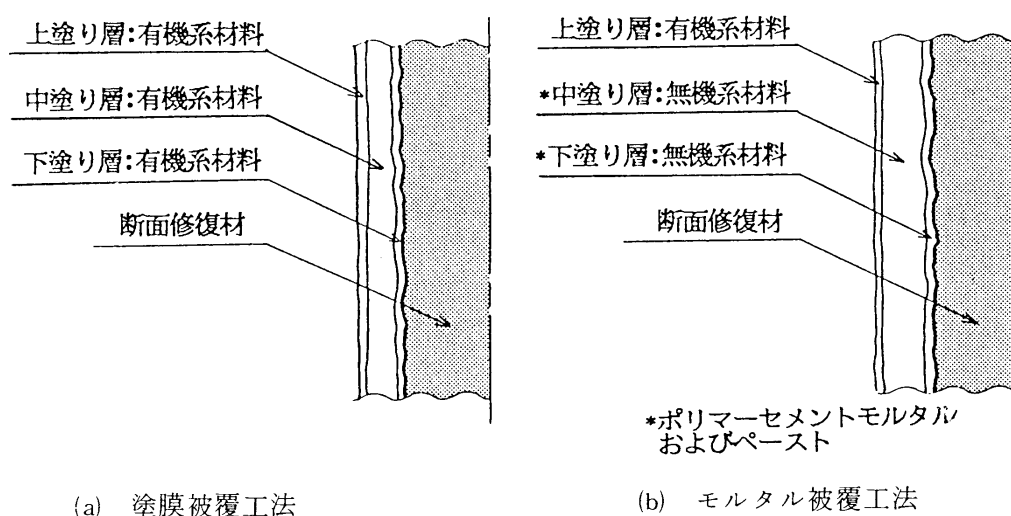
補修工法

対策工法の分類	A	表面保護工
工法番号,工法名称	A1	表面処理工法
調査件名	A1-1	塗膜被覆工法,モルタル被覆工法

補強・補修工法諸元

道路・鉄道・その他	コンクリート構造物
対象部材・部位	床版・桁・梁・柱他
補修・補強目的	コンクリート構造物の劣化因子の表面からの侵入を抑止し,劣化の進行を抑制する。
工法概要・特徴	<p>コンクリート構造物の欠損断面を,断面修復材料により復旧し,ひびわれ注入(充填)を行うとともに,コンクリート表面被覆(塗装)を行い,劣化の進行を抑制する。</p> <p>表面塗装工法の採用。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・アルカリ骨材反応の場合,ひびわれの進行度区分により,ひびわれが進行している場合は,柔軟型のひびわれ注入材,シーランドおよび柔軟型厚膜被覆,ひびわれ注入材,ポリマーセメントおよび硬質被覆等が用いられる。 ・塩害の場合,点検によって得られた構造物の損傷度により,コンクリート表面被覆材料の品質が決定される。 ・表面からのコンクリート劣化因子(塩分,水,酸素,炭酸ガスなど)の侵入抑止の目的には,表面被覆(塗装)が一般的に用いられる。
概算工費(参考)	C=3~5千円/m ²
適用基準類	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリートの耐久性向上技術の開発:(財)土木研究センター,平成元年5月 ・道路橋の煙害対策指針(案)・同解説:(社)日本道路協会,昭和59年2月
本工法事例の出典 及び参考文献	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリートの耐久性向上技術の開発:(財)土木研究センター,平成元年5月 ・コンクリート構造物の補修事例集:(社)日本コンクリート工学協会,1994年10月

工法概要図



補修工法

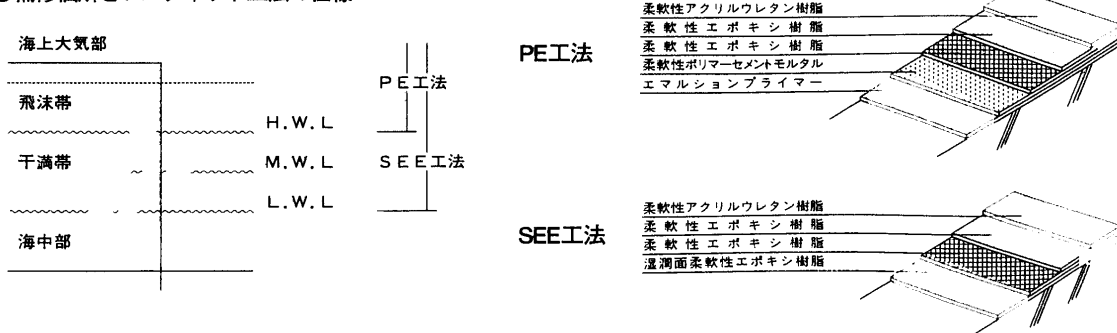
対策工法の分類	A	表面保護工法
工法番号,工法名称	A1	表面処理工法
	A1 - 2	ソルシャット工法(被覆工法)

補強・補修工法諸元

道路・鉄道・その他	道路,鉄道
対象部材・部位	床版・桁・梁・柱他
補修・補強目的	鉄筋コンクリート構造物の表面をエポキシ樹脂などで被覆し,塩害による劣化を防止する。(ソルシャット工法)
工法概要・特徴	ソルシャットPE工法とソルシャットSEE工法の2種類がある。 PE工法は,構造物の陸上部や波の飛沫がかかる部分に使用する。下層に柔軟性ポリマーセメントモルタルを用いて,コンクリートのひび割れに対する追従性を高めた。 一方,SEE工法は,潮の干満の影響を受ける部分に用いる。下層にコンクリートの湿潤面への付着性に優れる湿潤用柔軟性エポキシ樹脂を採用した。 両工法とも,中層に柔軟性エポキシ樹脂を入れて,塩害の要因となる塩分,酸素,水分の浸透を防ぐ。
概算工費(参考)	
適用基準類	
本工法事例の出典 及び参考文献	日経コンストラクション 最新土木工法年鑑96

工法概要図

●補修箇所とソルシャット工法の仕様



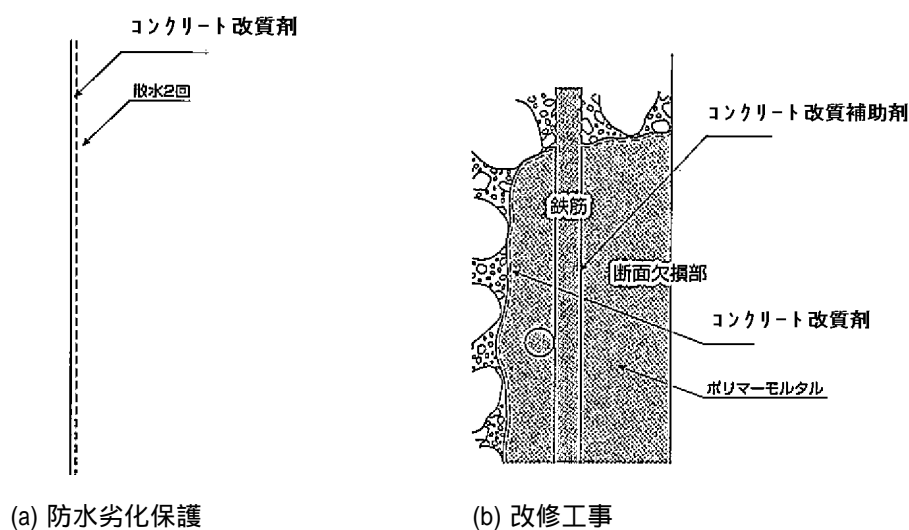
補修工法

対策工法の分類	A	表面保護工
工法番号,工法名称	A1	表面処理工法
	A1-3	コンクリート改質剤被覆工法

補強・補修工法諸元

道路・鉄道・その他	コンクリート構造物
対象部材・部位	床版・桁・梁・柱他
補修・補強目的	コンクリート改質剤により、コンクリートを緻密かつ強固とする事で、劣化保護と躯体への止水を行う。
工法概要・特徴	硬化したコンクリート表面にコンクリート改質剤を散布(または塗布)を行う。 その後、散水養生を行うことで未水和のセメントや水和生成物を安定した結晶へと変化させ緻密で強固なコンクリートへと変化させる。 反応は、表層部にとどまらずコンクリートの深部まで及ぶ。 塩害、凍害、中性化、対薬品等の劣化要因にたいする耐久性が増す。 大きな空隙には、充填または注入の処理が必要。
概算工費(参考)	算出例 直工 (a) 防水劣化保護: 改質剤散布2回、散水3回 C=4千円/m ²
適用基準類	
本工法事例の出典 及び参考文献	・無機系改質剤によるコンクリートのひびわれ補修に関する基礎的性能評価 (社)日本材料学会 コンクリート構造物の補修・補強アップグレードシンポジウム 2002,10

工法概要図



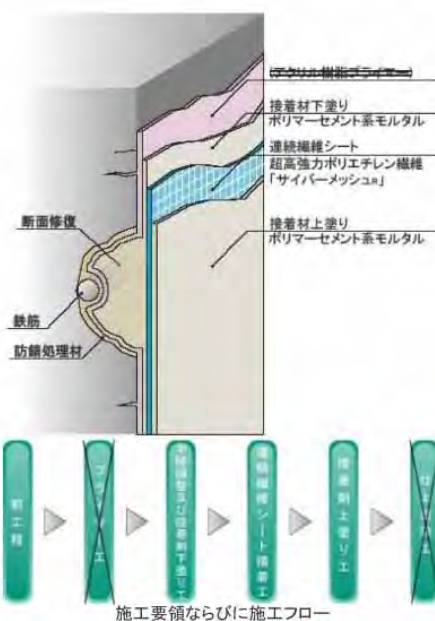
補修工法

対策工法の分類	A	表面保護工
工法番号,工法名称	A1	表面処理工法
	A1-4	コンクリート被覆工法(シート)

補強・補修工法諸元

道路・鉄道・その他	コンクリート構造物
対象部材・部位	床版・桁・梁・柱など剥落損傷箇所
補修・補強目的	繊維シートにより、コンクリートの剥落を防止する。
工法概要・特徴	シート材料に超高強度ポリエチレン繊維をメッシュ状に配列した材料を使用し、施性を改善させた工法である。 接着材には超高強度ポリエチレン短繊維とピニロン短繊維を混入したポリマーセメント系モルタルを使用している。
概算工費(参考)	算出例 直工 (a)連続施工面積100m ² 以上 下地処理、断面修復、足場工含まず。 C=8.7千円/m ²
適用基準類	日本道路公団「コンクリート片はく落防止対策マニュアル」
本工法事例の出典 及び参考文献	日本道路公団「コンクリート片はく落防止対策マニュアル」 コンクリート工学年次論文報告集VOL26 1

工法概要図



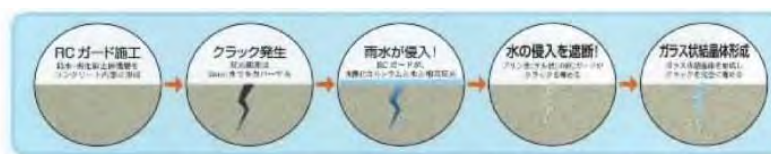
補修工法

対策工法の分類	A	表面保護工
工法番号,工法名称	A1	表面処理工法
	A1-5	含浸材塗布工法

補強・補修工法諸元

道路・鉄道・その他	コンクリート構造物
対象部材・部位	RC構造物
補修・補強目的	コンクリート表面の防水、改質によりコンクリート劣化を防止。
工法概要・特徴	ナトリウム、カリウムなどを主成分としたコンクリート改質材、及びセラミックコーティング材によりコンクリート表面を改質する。 施工面では工程が少なく作業が容易であり、使用する材料は環境にやさしいものがある。
概算工費(参考)	算出例 直工 C=5 ~ 6千円/m ²
適用基準類	-
本工法事例の出典 及び参考文献	土木学会第58回年次学術講演会公演概要集 2003.9

工法概要図



RCライフコントロールシステム概要(RCガード)



補修工法

対策工法の分類	A	表面保護工
工法番号,工法名称	A1	表面処理工法
	A1-6	含浸材塗布工法

補強・補修工法諸元

道路・鉄道・その他	コンクリート構造物(金属、樹脂以外に適応)
対象部材・部位	RC構造物
補修・補強目的	コンクリート表面の防水、改質によりコンクリート劣化を防止。
工法概要・特徴	従来強度が出なかった経年変化で強度が不足してきたものの強度を復元させる。建物の景観を害さずに恒久的な撥水力を保持し、劣化防止の働きもある。
概算工費(参考)	算出例 直工 使用量0.2C=2.5千円/m ² 使用量0.3C=3.8千円/m ²
適用基準類	-
本工法事例の出典 及び参考文献	-

工法概要図

省略

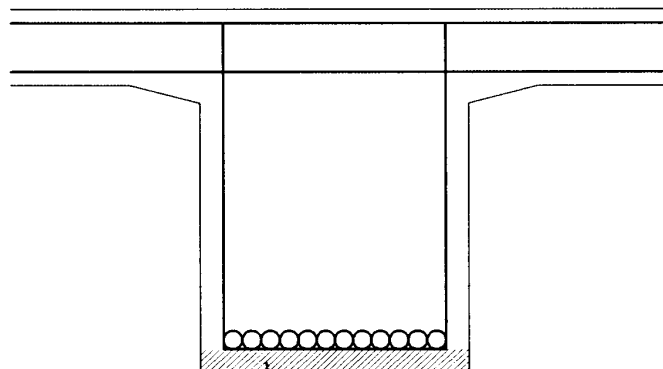
補修工法

対策工法の分類	A	表面保護工
工法番号,工法名称	A2	断面修復工法
	A2-1	断面修復工法

補強・補修工法諸元

道路・鉄道・その他	道路・鉄道・その他
対象部材・部位	すべての部位
補修・補強目的	凍害,塩害,その他により断面欠損している所,もしくは損傷している所をはつり取り,断面修復を行う。
工法概要・特徴	断面欠損部もしくは損傷している所をはつり取り,再びエポキシ樹脂またはポリマーセメントモルタルで断面修復をし,既設構造物の断面確保を行う(計算上必要な断面)。 ・断面修復が著しく大きいと,重要構造物では,耐久性,耐荷力に問題が生じる場合がある。
概算工費(参考)	直工 C=20千円 / m ²
適用基準類	
本工法事例の出典 及び参考文献	・コンクリート耐久性向上技術の開発 (財)土木研究センター

工法概要図



断面欠損もしくは損傷部をはつり取り、その後エポキシ樹脂または、ポリマーセメントモルタルで断面修復

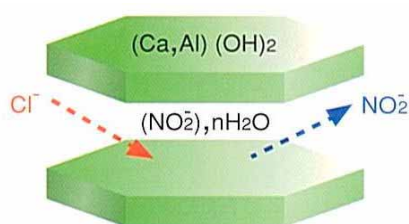
補修工法

対策工法の分類	A	表面保護工
工法番号,工法名称	A 2	断面修復工法
	A 2 - 2	SSI工法(断面修復)

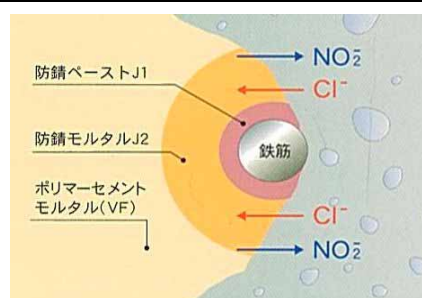
補強・補修工法諸元

道路・鉄道・その他	道路橋
対象部材・部位	鉄筋コンクリート全般
補修・補強目的	・塩害による鉄筋腐食抑制補修工法(断面修復)
工法概要・特徴	<p>SSI工法は、鉄筋周辺の塩分(塩化物イオン)を吸着して亜硝酸イオンを放出することにより、鉄筋に対して優れた塩害抑止効果を発揮する補修工法である。</p> <p>・塩分吸着剤は層状構造を有するカルシウム・アルミニウム複合水酸化物で、層間に鉄筋腐食抑制効果のある亜硝酸イオンを保持しており、過剰な塩化物イオンを吸着すると共に、亜硝酸イオンを放出し鉄筋の腐食を抑制する。</p> <p>・残留塩分が内在する本補修ではマクロセル腐食による鉄筋小の再劣化(腐食)を防止できる。</p> <p>・使用材料は塩分吸着剤を混入したJ1防錆ペーストとJ2防錆モルタルか</p>
概算工費(参考)	
適用基準類	・オパナヤセメンテックス:SSI工法技術資料
本工法事例の出典及び参考文献	・オパナヤセメンテックス:SSI工法技術資料 本工法は日本道路公団試験研究所と鉄道総合技術研究所との共同開発

工法概要図



[塩分吸着剤の構造模式図]



[J1ペースト施工]



[J2モルタル施工]

補修工法

対策工法の分類	A	表面保護工法
工法番号,工法名称	A2	断面修復工法
	A2-3	断面はつり工法

補強・補修工法諸元

道路・鉄道・その他	道路,鉄道
対象部材・部位	床版・桁・梁・柱他
補修・補強目的	劣化したコンクリート表面を修復するため、コンクリート表面をはつることを目的としている工法。
工法概要・特徴	ブレードをウォータージェットに変えることにより、健全なコンクリートや鉄筋を損傷させず、断面修復を可能とする工法である。 振動、粉塵が発生しなくなり、作業員への負担が少なく、周辺環境への影響を抑制できる。 ウォータージェットを二つのノズルから噴射、衝突させることにより、はつり深さを抑制でき、鉄筋のうらについたコンクリートの錆をおとすことができ、品質を向上させることができる。
概算工費(参考)	直接工費 C = 500千円/m ³
適用基準類	<ul style="list-style-type: none"> ・「ウォータージェットはつりによるはつり処理性能試験」(日本建設機械化協会) ・「ウォータージェット工法計画・施工の手引き」(日本ウォータージェット施工協会) ・「ウォータージェット工法安全の手引き(案)」(日本ウォータージェット施工協会)
本工法事例の出典 及び参考文献	<ul style="list-style-type: none"> ・「ウォータージェットによるはつり処理性能の試験実施要領」 (平成13年2月建設機械化研究所) ・「ウォータージェット技術を利用した新旧コンクリート構造物の一体化処理」 (2003年8月コンクリート工学)

工法概要図



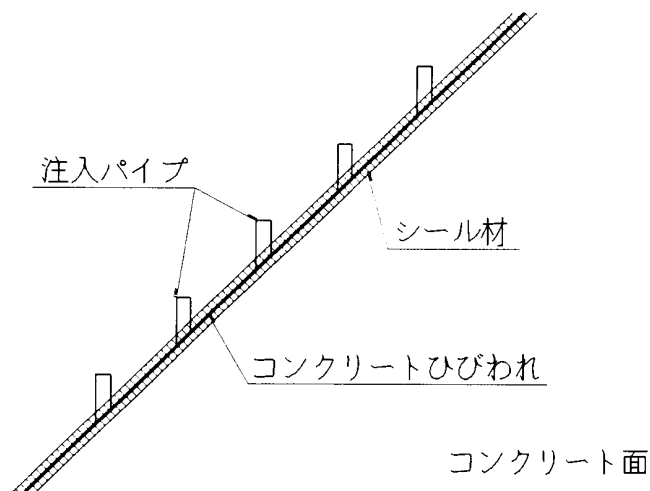
補修工法

対策工法の分類	B	耐久性向上
工法番号,工法名称	B1	ひび割れ注入工法
	B1-1	ひび割れ注入工法

補強・補修工法諸元

道路・鉄道・その他	道路・鉄道・その他
対象部材・部位	すべての部位
補修・補強目的	ひびわれ断面を1体化する。
工法概要・特徴	ひびわれ線に沿って,シールを行い,中間に注入パイプを25cm~30cmピッチで配し,注入パイプよりセメント系,樹脂系材を注入する。 注入後,パイプをカットして完了する。 0.1mm以下のひびわれ幅と遊離石灰を伴うと,注入は難しい。
概算工費(参考)	直工 C=5千円/m
適用基準類	
本工法事例の出典 及び参考文献	

工法概要図



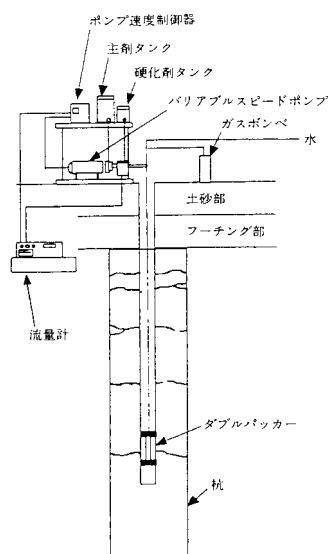
補修工法

対策工法の分類	B	耐久性向上
工法番号,工法名称	B1	ひび割れ注入工法
	B1-2	ひび割れ注入工法

補強・補修工法諸元

道路・鉄道・その他	道路橋
対象部材・部位	杭基礎
補修・補強目的	損傷したクラックを通して海水等により鉄筋が腐食するのを防ぐ
工法概要・特徴	ひびわれ線に沿って,シールを行い,中間に注入パイプを25cm~30cmピッチ工法。 杭の損傷度小さく,新しい耐震基準による地震力に対しても十分耐荷力を持つが,クラックを通して海水等により鉄筋が腐食する恐れがある場合に適用する。
概算工費(参考)	
適用基準類	
本工法事例の出典 及び参考文献	・阪神・淡路大震災調査報告編集委員会:阪神・淡路大震災調査報告 土木構造物の応急復旧,補修,補強,1998.6

工法概要図



補修工法

対策工法の分類	B	耐久性向上
工法番号,工法名称	B1	ひび割れ注入工法
	B1-3	ひび割れ注入工法

補強・補修工法諸元

道路・鉄道・その他	道路橋
対象部材・部位	コンクリート構造物
補修・補強目的	コンクリート構造物ひび割れを省力化により補修を行なう。
工法概要・特徴	<p>特殊エポキシ樹脂注入材で膨らんだゴムチューブが縮む力により、時間をかけてひび割れの奥深くまで注入させる工法。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・注入材で膨らんだゴムチューブの圧力により、長時間に渡り、注入が続行されるのでひび割れの深奥部や鉄筋の付着切れによる空隙にも完璧に注入できる。 ・インジェクターを膨らますだけの短時間作業で、熟練した技術は不要。 ・ゴム収縮による均一な圧力が注入を続け、ゴムチューブに残った注入材を点検だけで硬化確認ができ、施工管理が容易に行なえる。 ・ひび割れが湿潤している場合、エポキシ樹脂の接着性が低下するおそれがあり、ひびわれ内を乾燥して対処する。 ・気温が5°以下の場合、エポキシ樹脂を加温するなどの対策が必要。
概算工費(参考)	<p>直接工費</p> <p>C = 7千円/m</p>
適用基準類	
本工法事例の出典 及び参考文献	<ul style="list-style-type: none"> ・日経アーキテクチャー編 地震に強い建築・阪神大震災の教訓[復興編] ・森濱、小林、高橋; ひび割れ注入およびその効果、第15回日本道路会議論文集

工法概要図



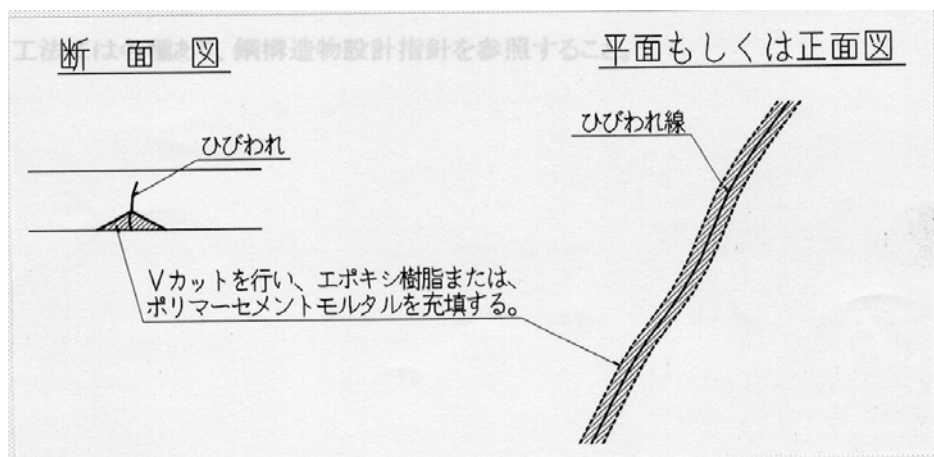
補修工法

対策工法の分類	B	ひび割れ注入工法
工法番号,工法名称	B1	ひび割れ注入工法
	B1-4	充填工法

補強・補修工法諸元

道路・鉄道・その他	道路・鉄道・その他
対象部材・部位	すべての部位
補修・補強目的	ひびわれ注入が不可能の場合,Vカットはつりを行った後,充填する。
工法概要・特徴	ひびわれ部に沿って,Vカットを行い,その後エポキシ樹脂または,ポリマーセメントモルタルを充填し,ひびわれによる断面を小さくする。
概算工費(参考)	C=5~7千円/m
適用基準類	
本工法事例の出典 及び参考文献	

工法概要図



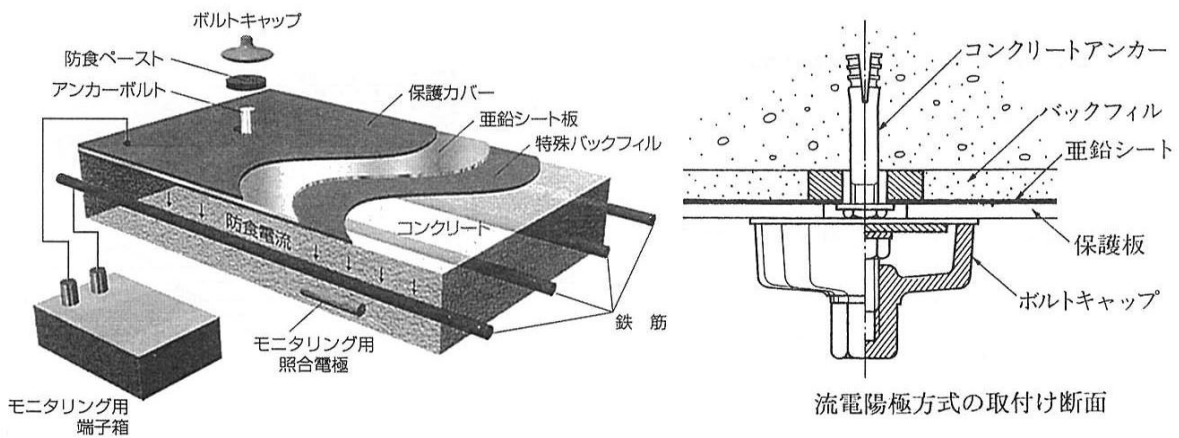
補修工法

対策工法の分類	C	電気化学的防食工
工法番号,工法名称	C1	電気防食工法
	C1-1	内部電極方式(電気防食)

補強・補修工法諸元

道路・鉄道・その他	主に栈橋構造物
対象部材・部位	床版,梁部
補修・補強目的	塩害,中性化等によってコンクリート中の鋼材が腐食している。 あるいは,今後腐食が予想される鋼材に対して電流を流入させることによって腐食を抑制させることが目的
工法概要・特徴	亜鉛シート方式は,亜鉛シート・特殊バックフィル・保護カバーからなる。 亜鉛防食板をアンカーボルトで固定し,亜鉛シートと鋼材(鉄筋)の金属的性質の違いによって防食電流を供給する。 ・電源設備が不要。 ・管理が容易。 ・過防食の心配がない(特にPC部材)。 ・コンクリート中に塩分が存在していても防食が可能である。 ・コンクリート中にモニタリング装置(照合電極)を設置して防食効果を確認できる。
概算工費(参考)	直工 C=50千円 / m ² (初期コスト)
適用基準類	・コンクリート構造物の電気防食法 研究委員会報告書 :日本コンクリート工学協会 1994.10 ・コンクリート構造物の電気化学的補修工法 設計・施工マニュアル :コンクリート構造物の電気化学的補修工法研究会 1998.1
本工法事例の出典 及び参考文献	・コンクリート構造物の電気防食法 研究委員会報告書 :日本コンクリート工学協会 1994.10 ・コンクリート構造物の電気化学的補修工法 設計・施工マニュアル :コンクリート構造物の電気化学的補修工法研究会 1998.1

工法概要図



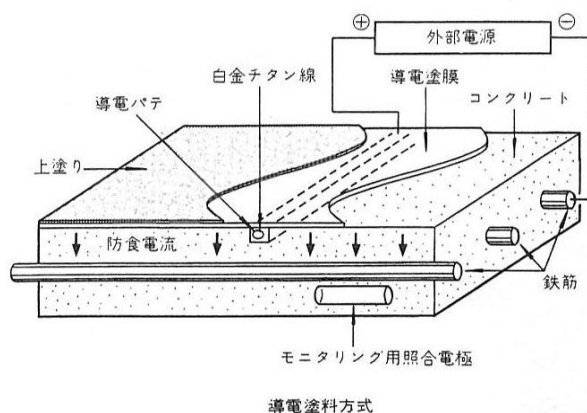
補修工法

対策工法の分類	C	電気化学的防食工
工法番号,工法名称	C1	電気防食工法
	C1 - 2	外部電源方式(電気防食)

補強・補修工法諸元

道路・鉄道・その他	道路橋梁、鉄道橋、トンネル、タンク 他
対象部材・部位	下部工フランジ部、壁側面、スラブ 他
補修・補強目的	塩害、中性化等によってコンクリート中の鋼材が腐食している。 あるいは、今後腐食が予想される鋼材に対して電流を流入させることによって腐食を抑制させることが目的
工法概要・特徴	金属のチタンをコンクリート表面に溶射被覆し、これを電気防食用の電極とする。 電極特性を高める為、触媒液を加えたチタン溶射電極を直流電源装置の(+)側に鋼材を(-)側につなぎ所定の電流を鋼材 (鉄筋)へ供給させる。 ・作業良好で複雑な構造物にも適用可能 ・初期コストが安価で美観性に優れる
概算工費(参考)	
適用基準類	・コンクリート構造物の電気防食法 研究委員会報告書 ：日本コンクリート工学協会 1994.10 ・コンクリート構造物の電気化学的補修工法 設計・施工マニュアル ：コンクリート構造物の電気化学的補修工法研究会 1998.1
本工法事例の出典 及び参考文献	・コンクリート構造物の電気防食法 研究委員会報告書 ：日本コンクリート工学協会 1994.10 ・コンクリート構造物の電気化学的補修工法 設計・施工マニュアル ：コンクリート構造物の電気化学的補修工法研究会 1998.1

工法概要図



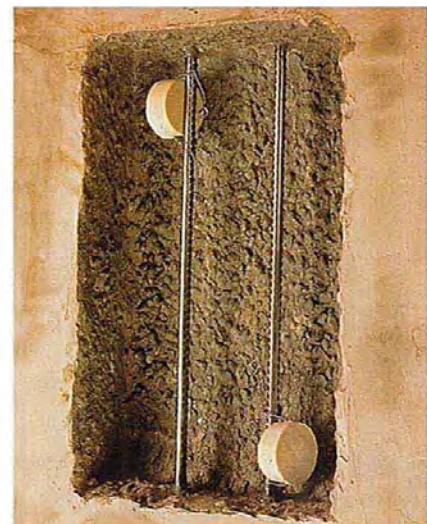
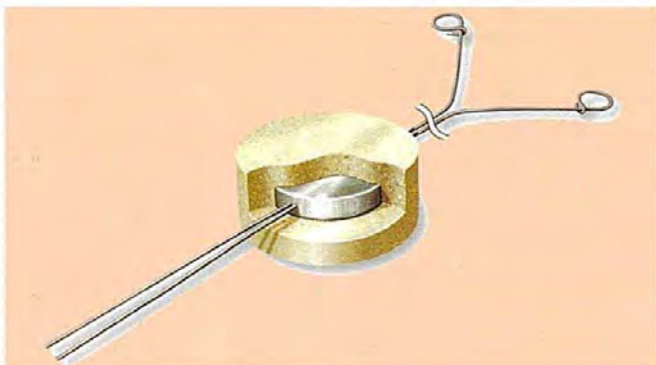
補修工法

対策工法の分類	C	電気化学的防食工
工法番号,工法名称	C1	電気防食工法
	C1-3	ガルバシールドXP(電気防食)

補強・補修工法諸元

道路・鉄道・その他	道路橋
対象部材・部位	RC壁高欄(剛性防護柵)
補修・補強目的	・塩害による鉄筋腐食に対する防錆
工法概要・特徴	<p>本工法は鉄筋コンクリート用犠牲電極型防錆システムであり、塩害を受けたRC構造物に対し、鉄筋をむき出し(コンクリートをはつり取る)にし、ガルバシールドXPをセットするだけで塩分残量があっても鉄筋の発錆を防止する効果がある。</p> <p>本製品は、特殊なモルタルで成型した金属亜鉛犠牲陽極であり、金属亜鉛と鉄筋の間で化学電池を形成することにより、鉄筋に電位を形成し、塩分が残留していても錆が発生しない状況を金属亜鉛が消費されなくなるまで維持する。(約10~20年)</p> <p>・施工性:容易 ・耐久性:15年以上(カタログ値)</p>
概算工費(参考)	直工
適用基準類	C=30千円/m ² 特になし
本工法事例の出典 及び参考文献	・フォスロック・ジャパン・リミテッド社製品

工法概要図



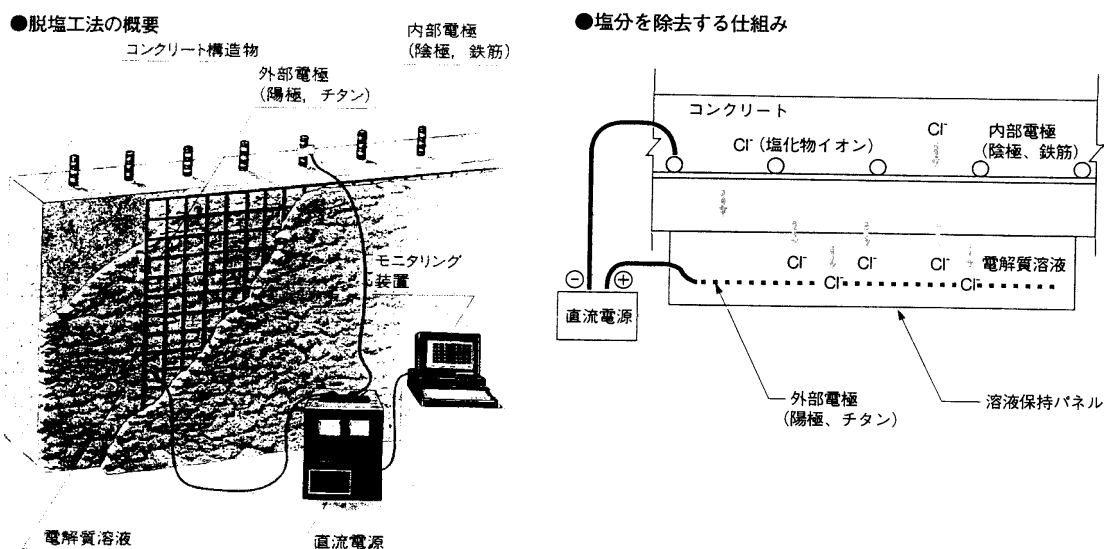
補修工法

対策工法の分類	C	電気化学的防食工
工法番号,工法名称	C2	電気防食工法
	C2-1	デサリネーション(脱塩工法)

補強・補修工法諸元

道路・鉄道・その他	道路,鉄道
対象部材・部位	床版下面,桁側面下面
補修・補強目的	・コンクリートに浸透した塩分を除去し,鉄筋の腐食を止める。
工法概要・特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリート内部と外部にそれぞれ電極を設け,両極間に電気を流すことで鉄筋付近の塩化物イオンを取り除く工法。 ・内部電極(陰極)として床版内の鉄筋,外部電極(陽極)としてチタンの金網を溶液保持パネルに取り付け,パネルには電解質溶液(ほう酸リチウム溶液)を満たす。この溶液内に塩化物イオンを取り込む。 ・パネルなどの資材を転用できるので,工事費は電気防食方法に比べて3割程度安い。
概算工費(参考)	
適用基準類	
本工法事例の出典 及び参考文献	・日経コンストラクション 最新土木工法年鑑96

工法概要図



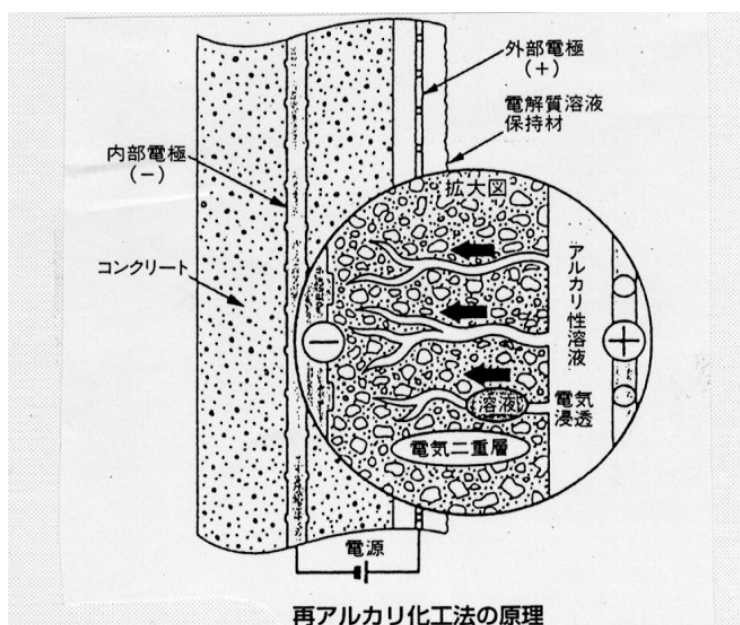
補修工法

対策工法の分類	C	電気化学的防食工
工法番号,工法名称	C3	電気防食工法
	C3 - 1	再アルカリ化工法

補強・補修工法諸元

道路・鉄道・その他	コンクリート構造物
対象部材・部位	
補修・補強目的	・低下したコンクリートのPHを上昇させ,,コンクリートが本来持っている防錆機能を回復させる。
工法概要・特徴	・再アルカリ化工法は,電気浸透原理により,コンクリート表面から中性化した,コンクリート部分へ,アルカリ性溶液を強制的に浸透させる。
概算工費(参考)	
適用基準類	・建築分野を主としている。・鉄筋コンクリート造建築物の耐久性調査・診断および補修指針(案)・同解説:日本建築学会 ・コンクリート構造物の電気化学的補修工法設計・施工マニュアル :コンクリート構造物の電気化学的補修工法研究会,平成10年1月
本工法事例の出典 及び参考文献	・鉄筋コンクリート造建築物の耐久性調査・診断および補修指針(案)・同解説:日本建築学会 ・コンクリート構造物の電気化学的補修工法設計・施工マニュアル :コンクリート構造物の電気化学的補修工法研究会,平成10年1月

工法概要図



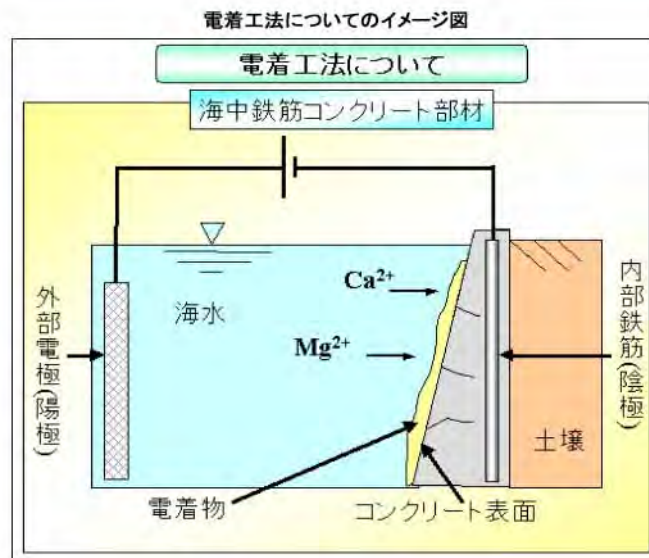
補修工法

対策工法の分類	C	電気化学的防食工
工法番号,工法名称	C4	電気防食工法
	C4 - 1	電着工法

補強・補修工法諸元

道路・鉄道・その他	コンクリート構造物
対象部材・部位	
補修・補強目的	・コンクリート構造物のひび割れを補修しコンクリート内部鉄筋等の腐食を防ぐ。
工法概要・特徴	・鉄筋コンクリート構造物のひび割れ近傍をCa ²⁺ やMg ²⁺ などの陽イオンを含んだ水溶液で満たし、通電することにより発生する電着物によりひび割れの閉塞や、表層部の改質をはかる。
概算工費(参考)	
適用基準類	・コンクリートライブラリー107電気化学的防食工法 設計施工指針(案)
本工法事例の出典 及び参考文献	・コンクリートライブラリー107電気化学的防食工法 設計施工指針(案)

工法概要図



3.3 補強対策の目的と工法の分類

対策工法の分類	対策の目的	工法名称			
D. コンクリート部材の交換	部材の補強	D1	打ち替え工法	D1-1	PCプレキャスト床版
				D1-2	打換え工法
				D1-3	打換え工法
E. コンクリート断面増加	部材の補強	E1	増厚工法	E1-1	上面増厚工法, 鉄筋補強増厚工法
				E1-2	下面吹付け工法
				E1-3	E/F吹付け工法
				E1-4	S/F 鉄筋巻立て補強
				E1-5	E/F吹付け工法
				E1-6	スーパースト工法
				E1-7	FRP吹付け補強
		E2	コンクリート巻立て工法	E2-1	RC巻立て工法
				E2-2	RC巻立て(柱)+RC増厚(梁)工法
				E2-3	コンクリート増厚補強
				E2-4	S/F 鉄筋巻き立て補強
				E2-5	PCプレキャスト型枠補強
				E2-6	RC巻き立て(アラミドロッド)
				E2-7	PC巻き立て(OSR工法)
F. 部材の追加	構造体の補強	F1	縦桁増設工法	F1-1	はり増設工法
				F1-2	〃
		F2	壁増設工法	F2-1	耐震壁増設
G. 支持点の追加	構造体の補強	G1	支持工法	G1-1	支持点増設工法
H. 補強材の追加	部材の補強	H1	鋼板接着工法	H1-1	鋼板接着工法
				H1-2	〃
				H1-3	サトイッチ床版
		H2	FRP接着工法	H2-1	アラミド 繊維板接着工法
				H2-2	炭素繊維板固定・定着工法
				H2-3	連続繊維シート接着工法
				H2-4	〃
				H2-5	タフガードガラス工法
				H2-6	ガラスクロスインゾグシステム
				H2-7	繊維シート接着(2方向シート)
				H2-8	繊維シート接着(水分除去)
		H3	鋼板巻立て工法	H3-1	鋼板巻立て工法
				H3-2	〃
				H3-3	〃
				H3-4	〃
				H3-5	〃
				H3-6	〃(かみ合わせ)
		H4	FRP巻立て工法	H4-1	連続繊維シート巻立て工法
				H4-2	炭素繊維シート巻立て工法
				H4-3	アラミド 繊維シート巻き立て補強
H4-4	FRP補強(スチール材)				
H4-5	連続繊維(プレキャスト)				
I. プレストレスの導入	部材の補強	I1	プレストレス導入工法	I1-1	外ケーブル工法
				I1-2	外ケーブル工法(アラミド)
				I1-3	内ケーブル工法

3.4 補強工法事例

補強工法

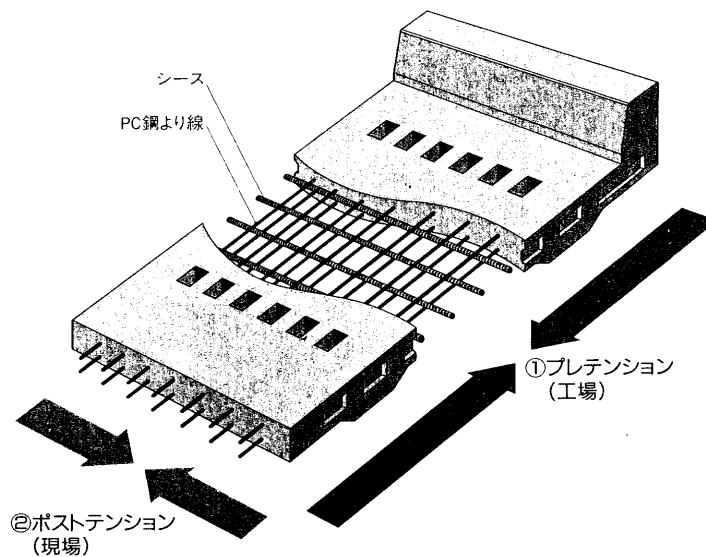
対策工法の分類	D	コンクリート部材の交換
工法番号,工法名称	D1	打換え工法
	D1-1	PCプレキャスト床版

補強・補修工法諸元

道路・鉄道・その他	道路橋
対象部材・部位	鋼橋床版
補修・補強目的	損傷した鋼橋床版の打換え
工法概要・特徴	<p>工場作製したプレキャスト床版を、橋梁桁上に架設したのち、橋軸方向にプレストレスを導入し、連続化を図る。連続化した後、桁との結合を行い、床版打換えを完了する。</p> <p>特徴：現場工期の短縮、品質の安定、省力化。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ひびわれ幅、密度によって美観を損ねる。 ・振動下における継手の指標なし。打換え工法の時、片側通行の場合は、必ず振動下の継手の影響は、評価として必要。 ・日常点検として、床版コンクリートのひびわれ幅、密度。
概算工費(参考)	
適用基準類	<ul style="list-style-type: none"> ・鋼構造物シリーズ B:土木学会 鋼構造物設計指針 PART B 合成構造物 平成9年度版
本工法事例の出典及び参考文献	<ul style="list-style-type: none"> ・軸方向プレストレスを導入したPCプレキャスト床版の疲労耐久性。 ・金田,松井,栗原,金崎,土木学会第50回年次学術講演会

工法概要図

■地覆一体型プレキャストコンクリート床版



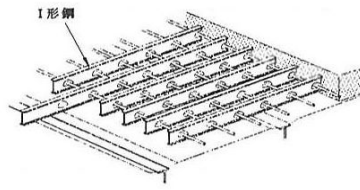
補強工法

対策工法の分類	D	コンクリート部材の交換
工法番号,工法名称	D1	打換え工法
	D1-2	打換え工法

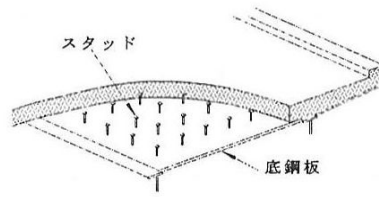
補強・補修工法諸元

道路・鉄道・その他	道路
対象部材・部位	鋼橋床版
補修・補強目的	損傷した鋼橋床版の打換え
工法概要・特徴	<p>上下もしくは,下面に鋼板があって,これにジベルが付いてコンクリートと1体化合成したものを現場に持ち込み,架設を行った後,継手処理と桁結合を行うものである。</p> <p>特徴:床版の剛性が大,現場工期の短縮,品質の安定,省力化。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・振動下における継手の指標なし。打換え工法るとき,片側通行の場合は,必ず振動下の継手の影響は,評価として必要。 ・日常点検の簡便性は舗装面および鋼板の錆。
概算工費(参考)	
適用基準類	<ul style="list-style-type: none"> ・鋼構造物シリーズ B:土木学会 鋼構造物設計指針 PART B 合成構造物 平成9年度版
本工法事例の出典 及び参考文献	<ul style="list-style-type: none"> ・松井 繁之著,論文,報告,多数あり。

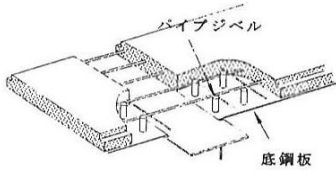
工法概要図



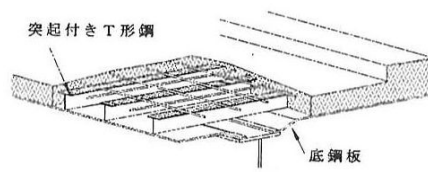
(a) I形鋼格子床版



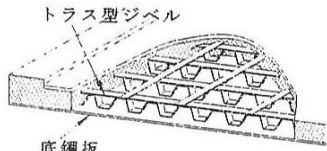
(b) ロビンソン型合成床版
(鋼板・コンクリート合成床版)



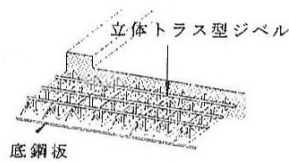
(c) パイプジベル合成床版



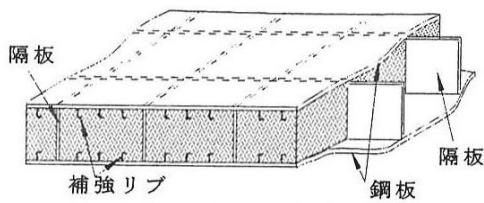
(d) 突起付きT形鋼ジベル合成床版



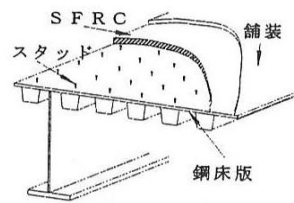
(e) トラス型ジベル合成床版



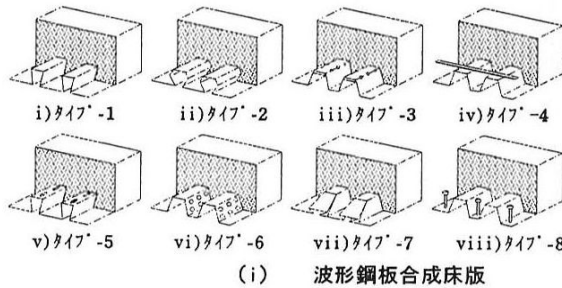
(f) 立体トラス型ジベル合成床版



(g) サンドイッチ構造合成床版
(神戸港の沈埋トンネル)



(h) SFRC合成鋼床版



(i) 波形鋼板合成床版

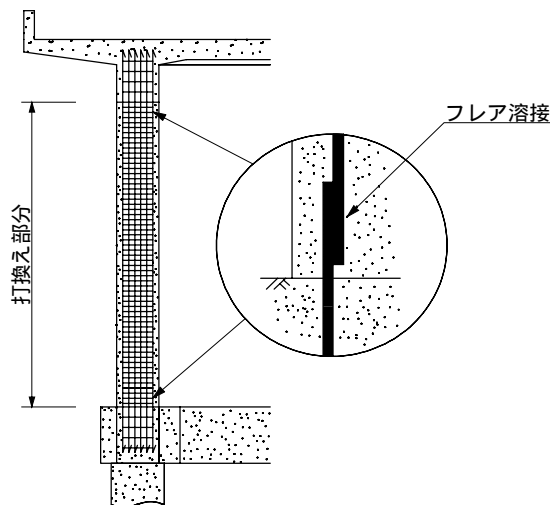
補強工法

対策工法の分類	D	コンクリート部材の交換
工法番号,工法名称	D1	打換え工法
	D1-3	打換え工法

補強・補修工法諸元

道路・鉄道・その他	鉄道
対象部材・部位	柱
補修・補強目的	部材のせん断耐力および変形性能の向上を目的とする。
工法概要・特徴	地震により損傷を受けた柱を、せん断耐力および変形性能を向上させるために、柱の上・下端で軸方向鉄筋を切断し、柱を新たに構築する工法。 軸方向鉄筋との接続はフレア溶接で行うが、溶接の品質に対する注意が必要である。
概算工費(参考)	
適用基準類	建造物保守管理標準 (財)鉄道総合技術研究所 昭和62年 国鉄建造物設計標準(鉄筋コンクリート構造物)昭和58年 鉄道構造物等設計標準(コンクリート構造物編)平成4年
本工法事例の出典 及び参考文献	建造物保守管理標準 (財)鉄道総合技術研究所 昭和62年

工法概要図



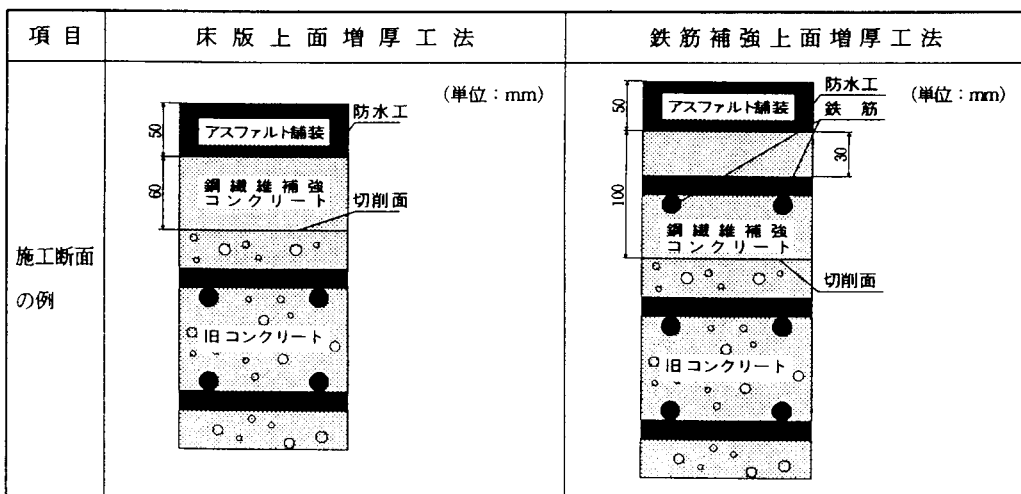
補強工法

対策工法の分類	E	コンクリート断面増加
工法番号,工法名称	E1	増厚工法
	E1-1	上面増厚工法,鉄筋補強上面増厚工法

補強・補修工法諸元

道路・鉄道・その他	道路
対象部材・部位	鋼橋,RC橋,PC橋の床版,連続橋の中間支点部の主桁・主版,張出し床版
補修・補強目的	押抜きせん断破壊に対する補強(床面上面増厚工法) 橋梁本体補強(鉄筋補強上面増厚工法)
工法概要・特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・床面上面増厚工法 薄いRC床版の曲げ耐力と押抜きせん断耐力の向上に有効であり,特に床版の最終破壊形態である押抜きせん断破壊に対する補強効果が優れている。増厚により死荷重が増加するが,主桁に及ぼす影響は少ない。 ・鉄筋補強上面増厚工法 主に連続橋の中間支点部の負の曲げ耐力の向上に有効であり,新旧コンクリートの付着により応力を伝達し,全体を一体断面としての補強効果がある。また,床版の押抜きせん断に対する補強効果も兼備しているとともに,主桁等の支間部の正の曲げモーメントに対しても有効高が増加するため効果がある。 ・交通規制を必要とし,新旧コンクリートの一体化が必要条件となる。 ・施工は高度な技術が必要。
概算工費(参考)	
適用基準類	コンクリート標準示方書:土木学会 1996 鋼繊維補強コンクリート設計施工指針(案) コンクリートライブラリー第50号 土木学会 上面増厚工法 設計施工マニュアル :財団法人 高速道路調査会 1995
本工法事例の出典 及び参考文献	上面増厚工法 設計施工マニュアル :財団法人 高速道路調査会 1995

工法概要図



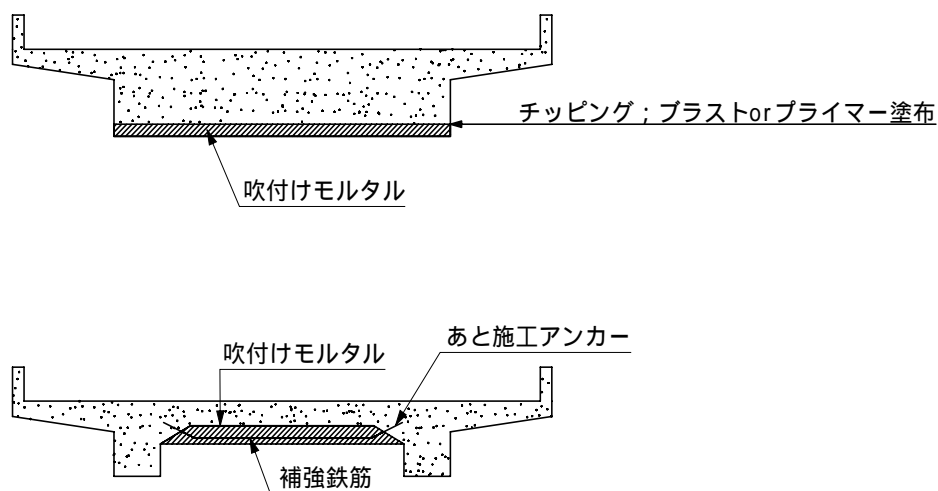
補強工法

対策工法の分類	E	コンクリート断面増加
工法番号,工法名称	E1	増厚工法
	E1-2	下面吹付け工法

補強・補修工法諸元

道路・鉄道・その他	鉄道
対象部材・部位	高架橋の床版下面
補修・補強目的	床版の終局耐力および疲労耐力の向上
工法概要・特徴	劣化床版の下面に、モルタルを吹き付けて床版の耐力等を向上させる工法 補強材としては、鋼繊維、ガラス繊維および鉄筋等が使用される。 吹き付け方法としては、乾式が用いられている。 なお、補強対象部材の界面は、吹き付けモルタルと一体化させるためブラスト、 チップングおよびプライマー塗布等が必要である。
概算工費(参考)	
適用基準類	建造物保守管理標準 (財)鉄道総合技術研究所 昭和62年
本工法事例の出典 及び参考文献	建造物保守管理標準 (財)鉄道総合技術研究所 昭和62年 吉野,石橋,渡辺,峰松;添え筋と吹き付けモルタルによるRC床版補強工法に関 実験的研究,コンクリート工学年次論文報告集 第9巻第1号,19987

工法概要図



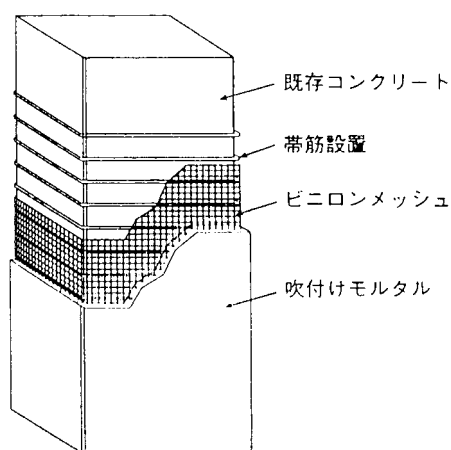
補強工法

対策工法の分類	E	コンクリート断面増加
工法番号,工法名称	E 1	増厚工法
	E 1-3	モルタル吹付け工法

補強・補修工法諸元

道路・鉄道・その他	道路橋
対象部材・部位	橋脚 柱
補修・補強目的	・橋脚のじん性の向上
工法概要・特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・橋脚躯体を帯鉄筋により補強し,吹付けモルタルにより一体化させる工法 ・帯鉄筋に高張力(S D 490)を用い,継手については機械継手やフレアー溶接を用いる ・重機が進入できない場所でも施工可能 ・熟練工を必要としない ・メンテナンスフリー
概算工費(参考)	
適用基準類	・既設道路橋の耐震設計に関する参考資料:日本道路協会 1997.8
本工法事例の出典 及び参考文献	<ul style="list-style-type: none"> ・既設道路橋の耐震設計に関する参考資料:日本道路協会 1997.8 ・吹付けモルタルによる高架橋柱の耐震補強設計:ハザマ

工法概要図



橋脚補強概念図

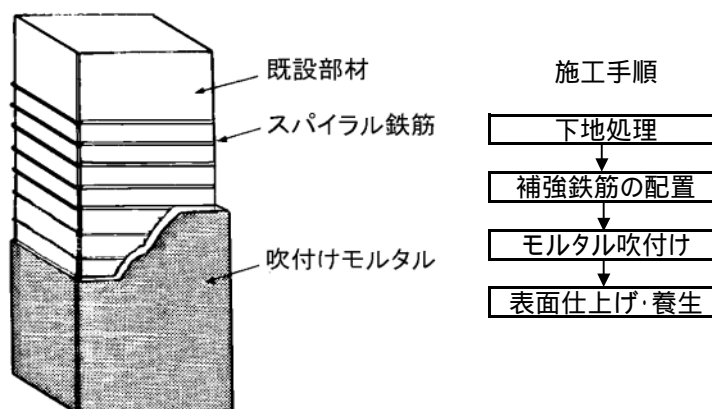
補強工法

対策工法の分類	E	コンクリート断面増加
工法番号,工法名称	E 1	増厚工法
	E 1-4	スパイラル鉄筋巻き立て補強

補強・補修工法諸元

道路・鉄道・その他	鉄道
対象部材・部位	柱, 橋脚躯体
補修・補強目的	部材のせん断耐力や塑性変形性能の向上を目的とする。 曲げ耐力の向上を目的とする場合は, 巻き立て部の軸方向鉄筋をフーチング等へ定着する必要がある。
工法概要・特徴	補強用のらせん鉄筋を柱および橋脚躯体に取り付け吹き付けモルタルで被覆する。 ・連続したらせん鉄筋を用いているので継手が不要である。 ・RC巻き立てと同程度以上の性能を有する。 ・吹き付けモルタルにより補強による荷重(自重)増で基礎の重量負担が増加する。
概算工費(参考)	
適用基準類	既存鉄道コンクリート高架橋柱等の耐震補強設計施工指針 (スパイラル鉄筋巻き立て補強編)平成8年12月 鉄道構造物等設計標準(コンクリート構造物編)平成4年
本工法事例の出典 及び参考文献	松本, 佐藤: 鉄道RC高架橋の新しい耐震補強法, コンクリート工学, vol.35, 10, 1997, 10 渡辺, 松本: RCラーメン高架橋の耐震診断技術と補強技術, コンクリート工学, vol.34, 11, 1996, 11

工法概要図



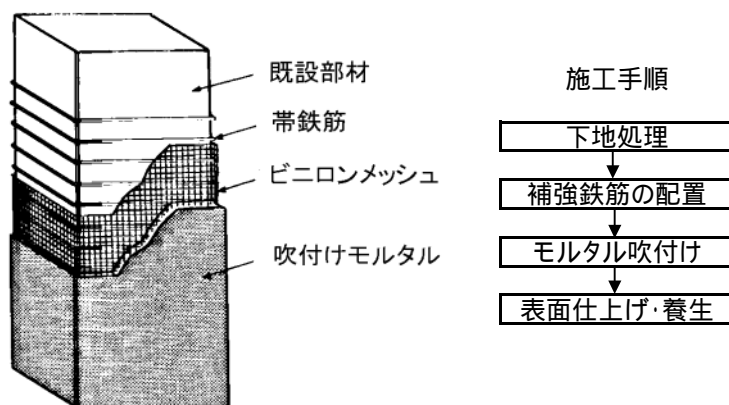
補強工法

対策工法の分類	E	コンクリート断面増加
工法番号,工法名称	E 1	増厚工法
	E 1-5	モルタル吹付け工法

補強・補修工法諸元

道路・鉄道・その他	鉄道
対象部材・部位	柱, 橋脚躯体
補修・補強目的	部材のせん断耐力や塑性変形性能の向上を目的とする。 曲げ耐力の向上を目的とする場合は, 巻き立て部の軸方向鉄筋をフーチング等へ定着する必要がある。
工法概要・特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・補強用の帯鉄筋を柱および橋脚躯体に取り付け吹き付けモルタルで被覆する。 ・補強目的に応じて補強帯鉄筋量の増減が可能。 ・RC巻き立てと同程度以上の性能を有する。 ・吹き付けモルタルにより補強による荷重(自重)増で基礎の重量負担が増加する。 ・適切な継手が必要。
概算工費(参考)	
適用基準類	既存鉄道コンクリート高架橋柱等の耐震補強設計施工指針 (吹き付けモルタル補強編)平成8年10月 鉄道構造物等設計標準(コンクリート構造物編)平成4年
本工法事例の出典 及び参考文献	松本, 佐藤: 鉄道RC高架橋の新しい耐震補強法, コンクリート工学, vol.35, 10, 1997, 10 渡辺, 松本: RCラーメン高架橋の耐震診断技術と補強技術, コンクリート工学, vol.34, 11, 1996, 11

工法概要図



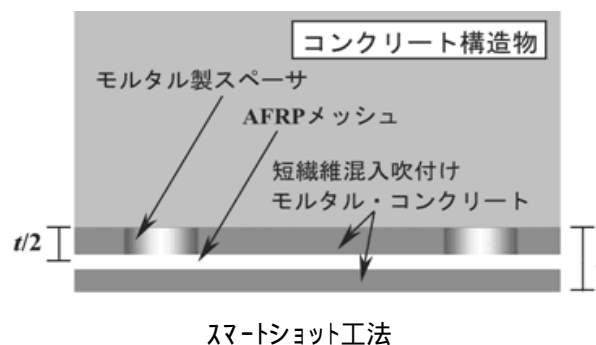
補強工法

対策工法の分類	E	コンクリート断面増加
工法番号,工法名称	E 1	増厚工法
	E 1-6	スマートショット工法

補強・補修工法諸元

道路・鉄道・その他	鉄道
対象部材・部位	柱, 橋脚躯体
補修・補強目的	高靱性吹付けモルタルとAFRPメッシュの併用により、高い補強効果と靱性能の向上が目的
工法概要・特徴	<p>AFRP(アラミ繊維)を外周に設置し、ビロン繊維を混入したスマートモルタルを吹付ける工法</p> <ul style="list-style-type: none"> ・繊維の架橋効果により、ひび割れの細密化、劣化しても剥落が防止される。 ・他の補強工法に比べ、工期短縮が可能。 ・補強対象のコンクリートとの強度バランスとコスト減を目的とした配合設計が今後の課題
概算工費(参考)	直工 ビロン繊維混入率1%, 吹付け厚さ $t=30\text{mm}$ $C=21\text{千円} / \text{m}^2$
適用基準類	
本工法事例の出典 及び参考文献	田口, 吉田, 岸, 三上: 高靱性吹付けモルタルとAFRPメッシュを併用した補修工法の開発, 2003年度セメント・コンクリート論文集 No57

工法概要図



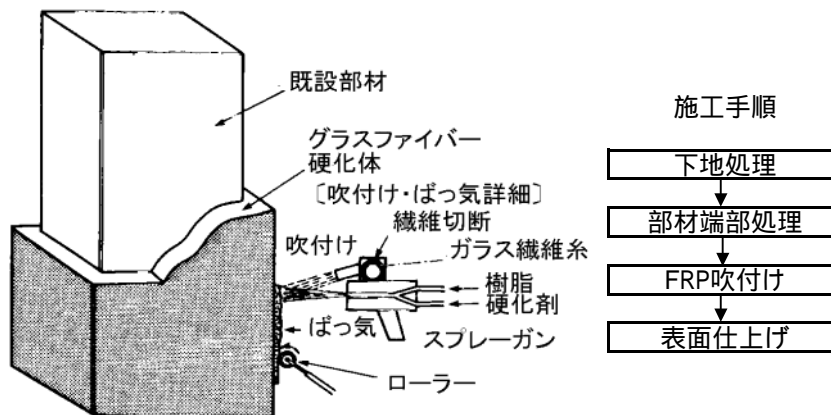
補強工法

対策工法の分類	E	コンクリート断面増加
工法番号,工法名称	E1	増厚工法
	E1-7	FRP吹付け補強

補強・補修工法諸元

道路・鉄道・その他	鉄道
対象部材・部位	柱, 橋脚躯体
補修・補強目的	部材のせん断耐力や塑性変形性能の向上を目的とする.
工法概要・特徴	<p>下地処理した柱に合成樹脂にガラスローピングを均等に混入して吹き付けてコンクリート表面にFRP硬化体を形成する.</p> <ul style="list-style-type: none"> ・使用材料は人力で運搬可能である. ・人力作業で施工可能なスペースがあればよい. ・施工速度が速い. ・補強後の断面増加は無視できるほどの量である. ・1層の吹き付け厚さは2mm以上5mm以下とし, 3mmを標準とする. ・施工時の温度が低いと樹脂の硬化が遅れる. ・水分があると樹脂の硬化に悪影響を及ぼす.
概算工費(参考)	
適用基準類	既存鉄道コンクリート高架橋柱等の耐震補強設計施工指針 (FRP吹き付け補強編)平成8年11月 鉄道構造物等設計標準(コンクリート構造物編)平成4年
本工法事例の出典 及び参考文献	松本, 佐藤: 鉄道RC高架橋の新しい耐震補強法, コンクリート工学, vol.35, 10, 1997, 10 渡辺, 松本: RCラーメン高架橋の耐震診断技術と補強技術, コンクリート工学, vol.34, 11, 1996, 11

工法概要図



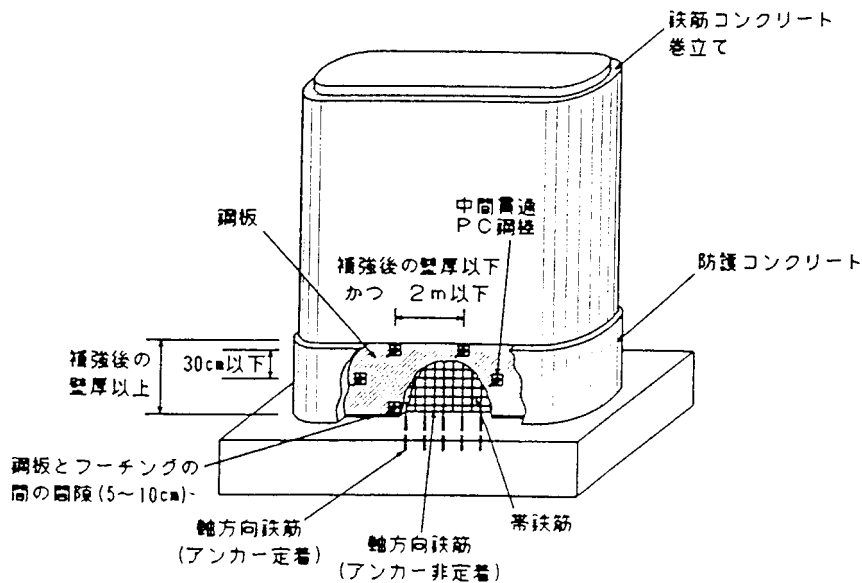
補強工法

対策工法の分類	E	コンクリート断面増加
工法番号,工法名称	E2	コンクリート巻立て工法
	E2-1	RC巻立て工法

補強・補修工法諸元

道路・鉄道・その他	道路橋
対象部材・部位	橋脚 柱
補修・補強目的	<ul style="list-style-type: none"> ・鉄筋段落とし部の補強 ・橋脚の曲げ耐力とじん性の両者の向上
工法概要・特徴	<p>橋脚躯体を鉄筋コンクリートで巻き立てるとともに,柱基部において長辺側(橋軸直角方向)の両サイドの壁面を鋼板ではさみ込み,これらを断面貫通型のPC鋼棒で一体化させた工法</p> <ul style="list-style-type: none"> ・巻き立てコンクリート部の軸方向鉄筋をフーチングに一本おきに定着 ・鋼板と両端をボルトで締着させた中間貫通PC鋼棒の併用によりコンクリート断面を拘束している ・鋼板下端とフーチング上面の間に5~10cmの間隙を設けている ・鋼板の設置範囲は,断面基部から補強後の橋軸方向幅に相当する高さまでの範囲とすることを標準とする。 ・現地調査の容易性から最低限の維持・管理性あり
概算工費(参考)	<p>直工 ~ 中間貫通鋼棒配置部</p> <p>RC巻き立て $t=250\text{mm}$ 中間貫通鋼棒($\phi=17\text{mm}$, $L=2.0\text{m}$, 2本/m^2)</p> <p>$C=55\text{千円}/\text{m}^2$ (RC巻き立てのみ $C=15\text{千円}/\text{m}^2$)</p>
適用基準類	<ul style="list-style-type: none"> ・既設道路橋の耐震設計に関する参考資料:日本道路協会 1997.8
本工法事例の出典及び参考文献	<ul style="list-style-type: none"> ・既設道路橋の耐震設計に関する参考資料:日本道路協会 1997.8

工法概要図



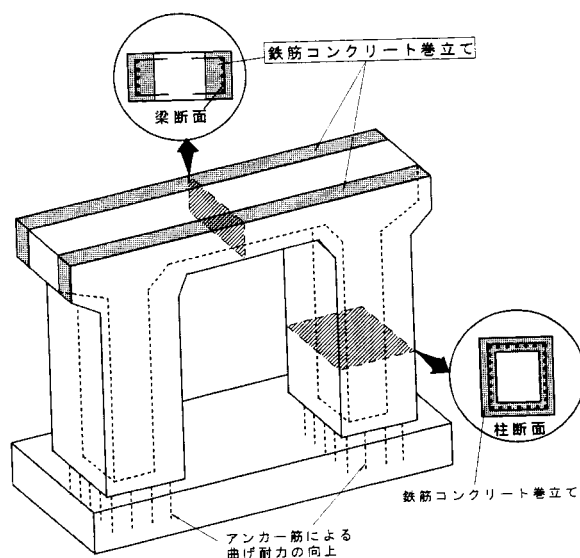
補強工法

対策工法の分類	E	コンクリート断面増加
工法番号,工法名称	E2	コンクリート巻立て工法
	E2-2	RC巻立て(柱)+RC増厚(梁)工法

補強・補修工法諸元

道路・鉄道・その他	道路橋
対象部材・部位	ラーメン橋脚 柱,はり
補修・補強目的	<ul style="list-style-type: none"> ・鉄筋段落とし部の補強 ・橋脚の曲げ耐力とじん性の両者の向上
工法概要・特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・鉄筋コンクリートラーメン橋脚の柱部材を面外方向および面内方向ともに鉄筋コンクリートで巻立て,はり部材については,橋軸方向に鉄筋コンクリートにより増厚し,せん断耐力および曲げ耐力の向上を図る ・巻き立てコンクリート部の軸方向鉄筋をフーチングに一本おきに定着 ・柱上端において巻立てた柱の軸方向鉄筋ははりにアンカーできないので,柱上端での曲げ耐力の向上は期待できない ・現地調査の容易性から最低限の維持・管理性あり
概算工費(参考)	E2-1参照
適用基準類	・既設道路橋の耐震設計に関する参考資料:日本道路協会 1997.8
本工法事例の出典 及び参考文献	・既設道路橋の耐震設計に関する参考資料:日本道路協会 1997.8

工法概要図



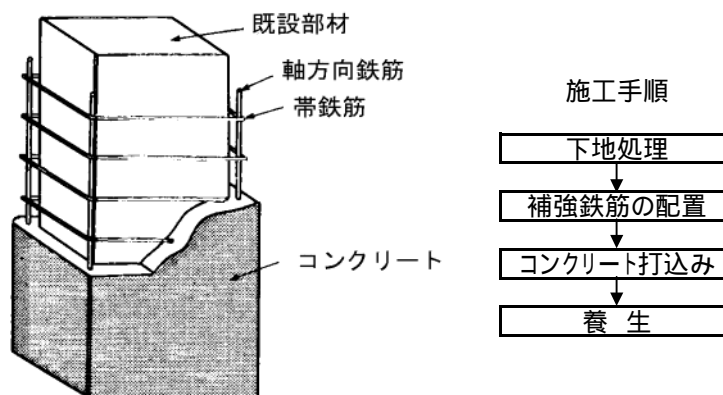
補強工法

対策工法の分類	E	コンクリート断面増加
工法番号,工法名称	E2	コンクリート巻き立て工法
	E2-3	コンクリート増厚補強

補強・補修工法諸元

道路・鉄道・その他	鉄道
対象部材・部位	柱, 橋脚躯体
補修・補強目的	部材のせん断耐力や塑性変形性能の向上を目的とする。 曲げ耐力の向上を目的とする場合は, 巻き立て部の軸方向鉄筋をフーチング等へ定着する必要がある。
工法概要・特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・ チッピングを施した柱や橋脚躯体に鉄筋コンクリートで増厚補強する工法 ・ 一般工法であり, 使用材料, 工法共に未知の要素がない。ただし, 剛性や断面が大きくなり, 景観の変化に影響を与える。 ・ チッピング時に, 騒音が発生する。 ・ 生コン車, ポンプ車等の作業スペースが必要である。 ・ 補強による荷重(自重)増で基礎の重量負担が増加する。
概算工費(参考)	E2-1参照
適用基準類	既存鉄道コンクリート高架橋柱等の耐震補強設計施工指針(RC巻き立て補強編)平成8年12月 鉄道構造物等設計標準(コンクリート構造物編)平成4年
本工法事例の出典 及び参考文献	松本, 佐藤: 鉄道RC高架橋の新しい耐震補強法, コンクリート工学, vol.35, 10, 1997, 10 渡辺, 松本: RCラーメン高架橋の耐震診断技術と補強技術, コンクリート工学, vol.34, 11, 1996, 11

工法概要図



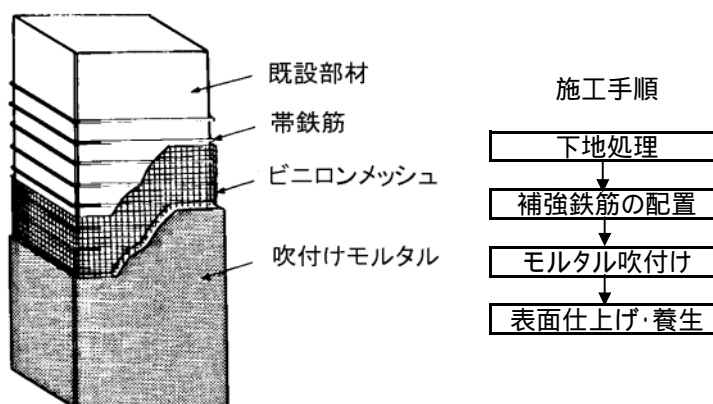
補強工法

対策工法の分類	E	コンクリート断面増加
工法番号,工法名称	E 2	コンクリート巻立て工法
調査件名	E 2 - 4	スパイラル鉄筋巻き立て補強

補強・補修工法諸元

道路・鉄道・その他	鉄道
対象部材・部位	柱, 橋脚躯体
補修・補強目的	部材のせん断耐力や塑性変形性能の向上を目的とする. 曲げ耐力の向上を目的とする場合は, 巻き立て部の軸方向鉄筋をフーチング等へ定着する必要がある.
工法概要・特徴	補強用のらせん鉄筋を柱および橋脚躯体に取り付け吹き付けモルタルで被覆する. ・連続したらせん鉄筋を用いているので継手が不要である. ・RC巻立てと同程度以上の性能を有する. ・吹き付けモルタルにより補強による荷重(自重)増で基礎の重量負担が増加する.
概算工費(参考)	
適用基準類	既存鉄道コンクリート高架橋柱等の耐震補強設計施工指針 (スパイラル鉄筋巻き立て補強編)平成8年12月 鉄道構造物等設計標準(コンクリート構造物編)平成4年
本工法事例の出典 及び参考文献	松本, 佐藤: 鉄道RC高架橋の新しい耐震補強法, コンクリート工学, vol.35, 10, 1997, 10 渡辺, 松本: RCラーメン高架橋の耐震診断技術と補強技術, コンクリート工学, vol.34, 11, 1996, 11

工法概要図



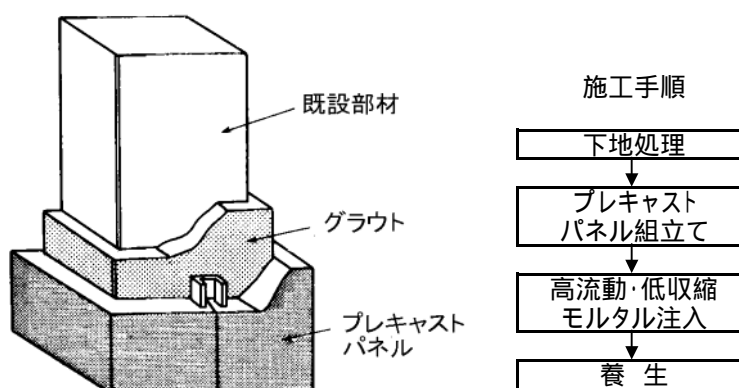
補強工法

対策工法の分類	E	コンクリート断面増加
工法番号,工法名称	E 2	コンクリート巻立て工法
	E 2-5	RCプレキャスト型枠補強

補強・補修工法諸元

道路・鉄道・その他	鉄道
対象部材・部位	柱, 橋脚躯体
補修・補強目的	部材のせん断耐力や塑性変形性能の向上を目的とする.
工法概要・特徴	<p>補強用の帯鉄筋を内蔵したプレキャスト型枠で柱の外周を取り囲む補強工法</p> <ul style="list-style-type: none"> ・プレキャスト化しているため,表面の仕上がりが良い. ・RC巻立てと同程度以上の性能を有する. ・吹付けモルタルにより補強による荷重(自重)増で基礎の重量負担が増加する. ・適切な継手が必要.
概算工費(参考)	
適用基準類	<p>既存鉄道コンクリート高架橋柱等の耐震補強設計施工指針 (プレキャスト型枠補強編)平成8年12月 鉄道構造物等設計標準(コンクリート構造物編)平成4年</p>
本工法事例の出典 及び参考文献	<p>松本, 佐藤: 鉄道RC高架橋の新しい耐震補強法, コンクリート工学, vol.35, 10,1997,10 渡辺, 松本: RCラーメン高架橋の耐震診断技術と補強技術, コンクリート工学, vol.34, 11,1996.11</p>

工法概要図



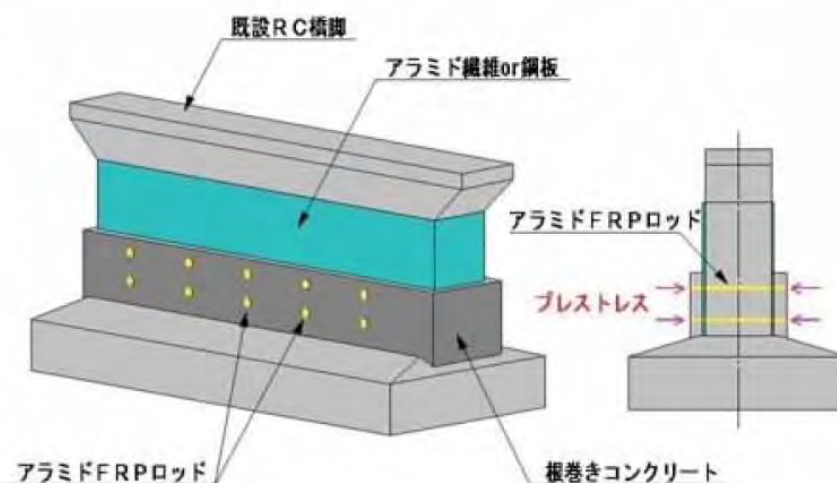
補強工法

対策工法の分類	E	コンクリート断面増加
工法番号,工法名称	E2	コンクリート巻立て工法
	E2-6	RC巻き立て(アラミロッド)

補強・補修工法諸元

道路・鉄道・その他	道路
対象部材・部位	柱, 橋脚躯体
補修・補強目的	部材のせん断耐力や塑性変形性能の向上を目的とする。
工法概要・特徴	<p>中間貫通材に緊張したアラミドFRPロッドを使用した補強工法</p> <ul style="list-style-type: none"> ・中間貫通材の配置本数が減少し、既設橋に与えるダメージが小さく、経済的である ・耐腐食性の高いアラミドFRPロッドを使用することにより耐久性、品質が向上する ・異形AFRPロッドを使用することにより、プレテンション方式でプレストレス導入が可能となり、橋脚表面の定着具が不要となるので、補強後の橋脚形状変化が生じず防理も不要となる。
概算工費(参考)	
適用基準類	プレストレスを導入した壁式橋脚耐震補強工法の設計・施工要領(案) 日本道路公団東京第一建設局 平成10年3月
本工法事例の出典 及び参考文献	<ul style="list-style-type: none"> ・壁式RC橋脚の耐震補強に関する実験的研究(1996.9)玉置一清ほか土木学会第51回学術講演会公演概要集第5部 -533 ・壁式RC橋脚の耐震補強に関する実験的研究(1996.10)和田宣史ほかPC技術協会 第6回シンポジウム論文集 ・壁式RC橋脚の耐震補強工法(AWS工法)の開発と実用化(1997.9)藤原保久ほか土木学会補修技術診断技術に関するシンポジウム ・東名高速道路相模川橋耐震補強工事の設計と施工(1999.10)藤原保久ほかPC技術協会 第9回シンポジウム

工法概要図



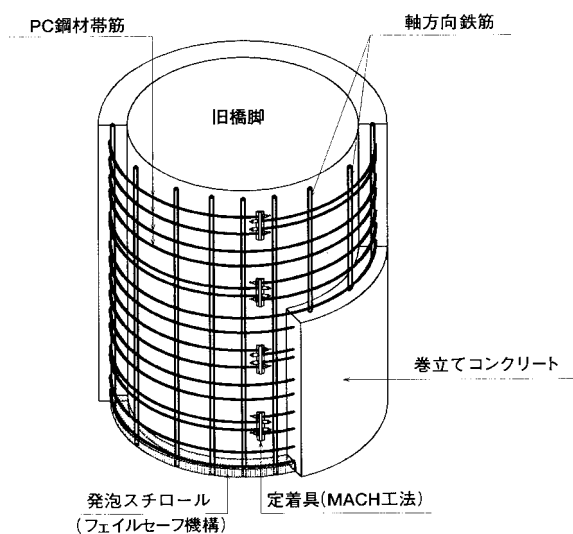
補強工法

対策工法の分類	E	コンクリート断面増加
工法番号,工法名称	E2	コンクリート巻立て工法
	E2-7	PC巻立て(OSR工法)

補強・補修工法諸元

道路・鉄道・その他	道路橋
対象部材・部位	橋脚 柱
補修・補強目的	・橋脚のじん性の向上
工法概要・特徴	<p>橋脚躯体の巻立てコンクリートにプレストレスを導入することにより新旧コンクリートを一体化</p> <p>・橋脚基部にスリットを設け,軸方向筋の一部をボンドコントロールし,コンクリートとの付着をなくすことによって,基部に塑性ヒンジが発生</p> <p>・鋼板巻立て工法と同等の耐力・性能を有する設計を行った場合,鋼板巻立て工法の約6割程度の工費</p>
概算工費(参考)	
適用基準類	・既設道路橋の耐震設計に関する参考資料:日本道路協会 1997.8
本工法事例の出典 及び参考文献	<p>・既設道路橋の耐震設計に関する参考資料:日本道路協会 1997.8</p> <p>・PC鋼材を用いたOSR工法:オリエンタル建設(株)</p>

工法概要図



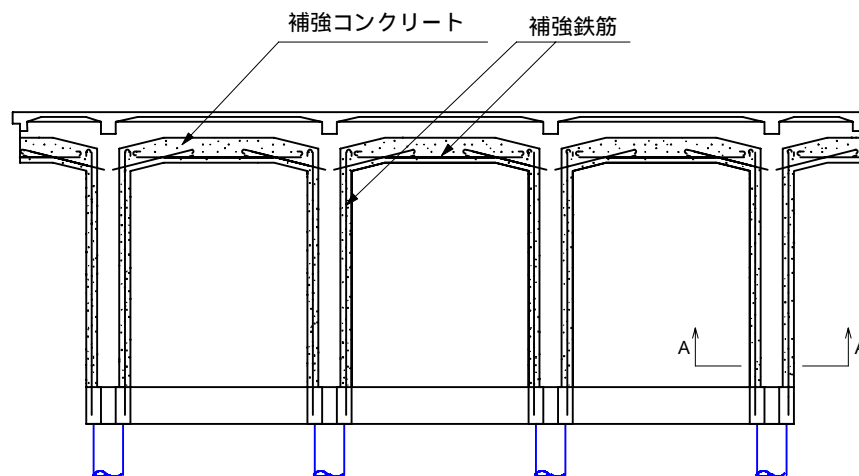
補強工法

対策工法の分類	F	部材の追加
工法番号,工法名称	F1	縦桁増設工法
	F1-1	はり増設工法

補強・補修工法諸元

道路・鉄道・その他	鉄道
対象部材・部位	ラーメン高架橋
補修・補強目的	部材の終局耐力や疲労耐力の向上を目的とする。
工法概要・特徴	地震により損傷を受けた梁を、耐力を確保させるために、既設の梁の下に新たに梁を増設させる工法。 梁の軸方向鉄筋の定着等に注意しなければならない。
概算工費(参考)	
適用基準類	建造物保守管理標準 (財)鉄道総合技術研究所 昭和62年 国鉄建造物設計標準(鉄筋コンクリート構造物)昭和58年 鉄道構造物等設計標準(コンクリート構造物編)平成4年
本工法事例の出典 及び参考文献	建造物保守管理標準 (財)鉄道総合技術研究所 昭和62年

工法概要図



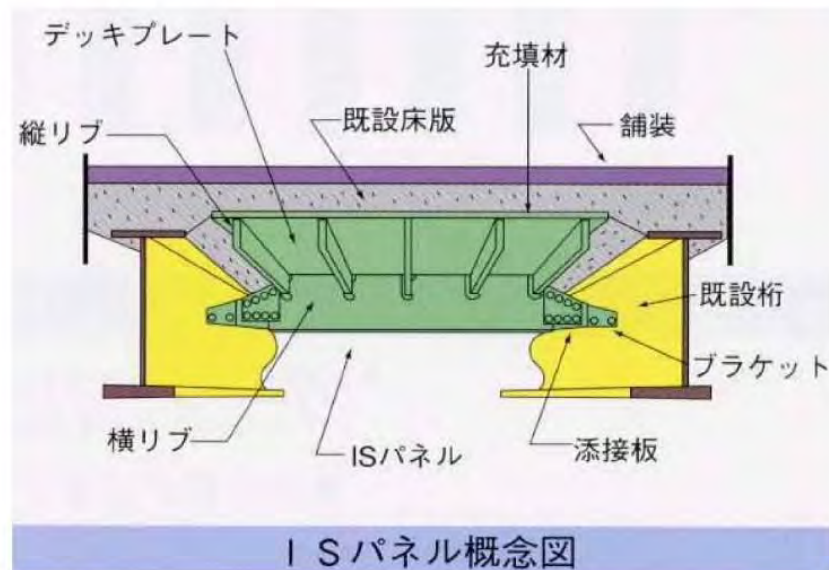
補強工法

対策工法の分類	F	部材の追加
工法番号,工法名称	F1	縦桁増設工法
	F1-2	はり増設工法

補強・補修工法諸元

道路・鉄道・その他	道路
対象部材・部位	鋼橋鉄筋コンクリート床版下面
補修・補強目的	損傷した鉄筋コンクリート床版の曲げ耐力、せん断耐力の増大を目的とする。
工法概要・特徴	<p>損傷を受けた床版の耐力を確保させるために、既設の床版の下に新たにISパネルを設置する工法。</p> <p>車両荷重を直接桁に伝達する工法であり、床版の曲げ補強と合わせ、せん断補強が可能である。</p> <p>交通規制の必要がなく、道路交通に支障なく施工できる。</p>
概算工費(参考)	<p>直接工費</p> <p>C = 100千円/m²</p>
適用基準類	-
本工法事例の出典 及び参考文献	-

工法概要図



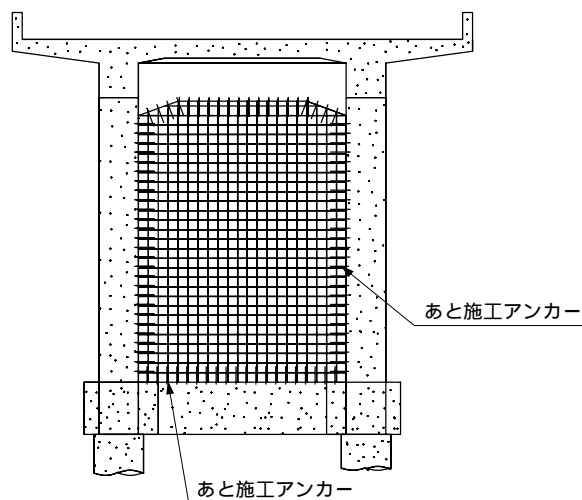
補強工法

対策工法の分類	F	部材の追加
工法番号,工法名称	F2	壁増設工法
	F2 - 1	耐震壁増設

補強・補修工法諸元

道路・鉄道・その他	鉄道
対象部材・部位	ラーメン高架橋, ラーメン橋台
補修・補強目的	構造体の水平耐力の向上を目的とする.
工法概要・特徴	既設ラーメン構造の柱間に耐震壁を増設する. 耐震壁に配置する鉄筋は, 既設柱にあと施工アンカーで定着させる. なお, 本工法は, 水平耐力が増加するため, 基礎構造への負担が増加することに注意する必要がある.
概算工費(参考)	
適用基準類	建造物保守管理標準 (財)鉄道総合技術研究所 昭和62年 国鉄建造物設計標準(鉄筋コンクリート構造物)昭和58年 鉄道構造物等設計標準(コンクリート構造物編)平成4年
本工法事例の出典 及び参考文献	千葉県東方沖地震による水深高架橋被害調査報告書 昭和63年9月

工法概要図



補強工法

対策工法の分類	G	支持点の追加
工法番号,工法名称	G1	支持工法
	G1 - 1	支持点増設工法

補強・補修工法諸元

道路・鉄道・その他	道路橋
対象部材・部位	プレストレストコンクリート道路橋,鉄筋コンクリート橋
補修・補強目的	単純桁橋の主桁を下から直接支持して補強する工法
工法概要・特徴	<p>中間支持の設置により主桁にかかる断面力(死荷重 + 活荷重)を低減させる工法。</p> <p>主桁を直接支持するため最も確実であり,主桁の断面修復作業を行わなければならない場合は非常に有利な方法といえる。</p> <p>但し,桁下は支柱が組めることが前提条件となる。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・緊急措置として有効 ・被災橋梁の補修の足場としても利用できる ・劣化の激しいコンクリート橋の防護ガードの設置も可能 ・支柱基礎についての最低限の維持管理性が必要 ・損傷部の接近・目視点検が容易
概算工費(参考)	
適用基準類	
本工法事例の出典 及び参考文献	・橋梁と基礎 1993. 12 ; 暮坪陸橋の塩害による損傷と対策

工法概要図

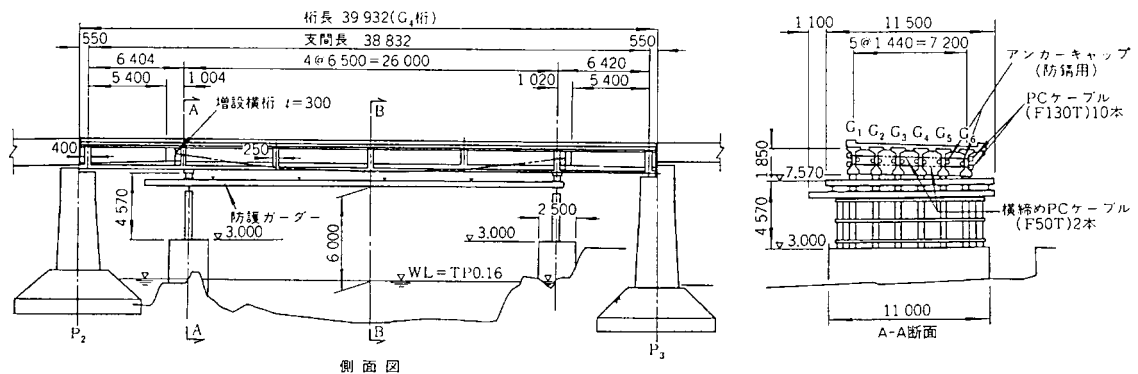


図-4 中間支柱と外ケーブルによる補強

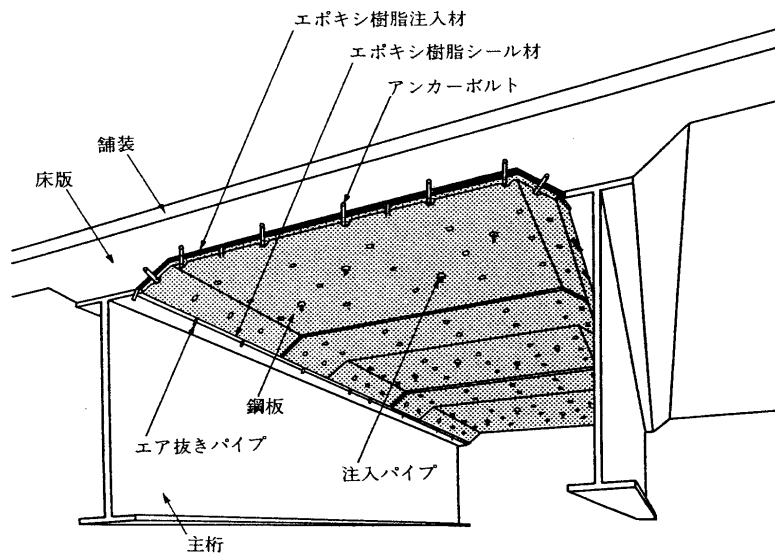
補強工法

対策工法の分類	H	補強材の追加
工法番号,工法名称	H1	鋼板接着工法
	H1-1	鋼板接着工法

補強・補修工法諸元

道路・鉄道・その他	道路橋
対象部材・部位	床版・桁
補修・補強目的	曲げ耐力,せん断耐力向上。
工法概要・特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・既設コンクリート部材の下面もしくは,側面に,エポキシ樹脂を用いて,鋼板を接着する補強工法であり,鋼板が既設部材に対して,鉄筋量を増加させたのと,同様の効果を与える。主として,床版や桁の曲げ補強に採用されるが,せん断補強にも適用できる。下面補強のため,交通を阻害することなく,施工できる利点があり,施工も簡便であるため広く用いられる。 ・施工上作業空間が狭く,高所作業であることに対する安全管理が必要である。 ・維持管理において補強後には,コンクリート表面のひびわれなどの,劣化進行を直接目視できない。
概算工費(参考)	直工 鋼板 $t=6\text{mm}$ エポキシ樹脂 $t=5\text{mm}$ $C=120\text{千円}/\text{m}^2$
適用基準類	<ul style="list-style-type: none"> ・道路構造物の補修要領: 阪神高速道路公団(1990)
本工法事例の出典 及び参考文献	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリート構造物の補修事例集: 日本コンクリート工学協会(1994年10月) ・コンクリート構造物の維持補修取壊し: 小村 敏・太田 実 技報堂出版(1983年11月)

工法概要図



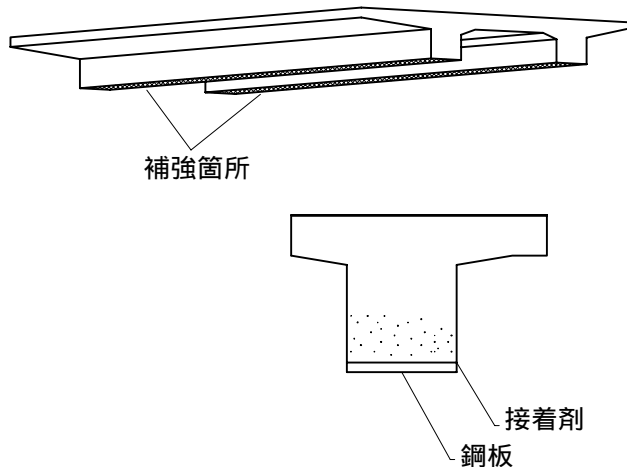
補強工法

対策工法の分類	H	補強材の追加
工法番号,工法名称	H1	鋼板接着工法
	H1 - 2	鋼板接着工法

補強・補修工法諸元

道路・鉄道・その他	鉄道
対象部材・部位	桁,床版
補修・補強目的	部材の終局耐力や疲労耐力の向上を目的とする。 部材剛性が向上する為、間接的にたわみの改善効果もある。 外面を鋼板で覆う為、ひび割れ等の耐久性上の性能も改善されるが、鋼板の腐食によって耐久性能が定まる。
工法概要・特徴	コンクリート構造物の引張側外面に鋼板を接着することにより、既設部材との一体化させ、耐力の向上を図る工法である。 鉄筋コンクリート構造は、鉄筋とコンクリートとの付着によるせん断力の伝達によって一体化が成り立っている。鋼板接着工法の原理もこれと同様の考え方で、貼り付けた鋼板は引張鉄筋の一部として作用することになる。鋼板は4.5～6mm厚のものが使用され接着剤としてはエポキシ樹脂が用いられている。 この工法には、接着方法の違いにより注入法と圧着法がある。
概算工費(参考)	H1 - 1 参照
適用基準類	建造物保守管理標準 (財)鉄道総合技術研究所 昭和62年 国鉄建造物設計標準(鉄筋コンクリート構造物)昭和58年 鉄道構造物等設計標準(コンクリート構造物編)平成4年
本工法事例の出典 及び参考文献	建造物保守管理標準 (財)鉄道総合技術研究所 昭和62年

工法概要図



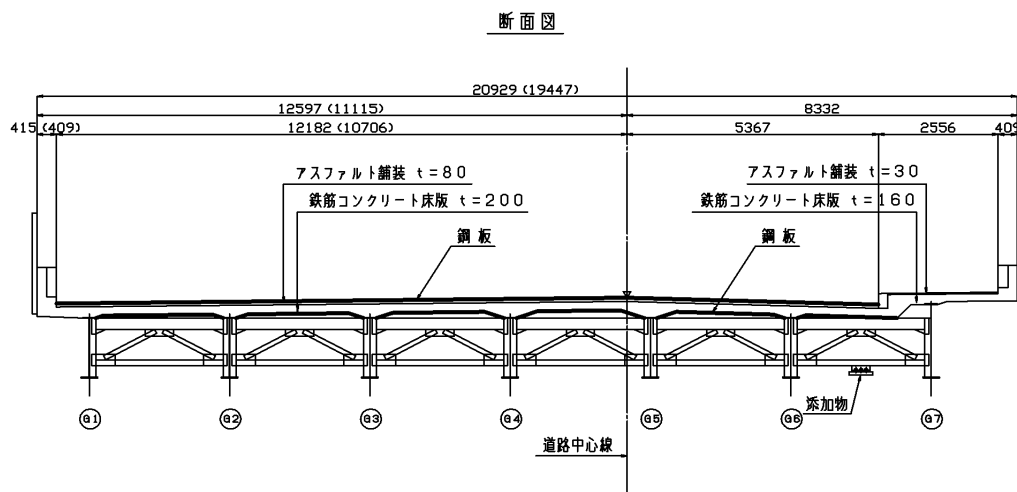
補強工法

対策工法の分類	H	補強材の追加
工法番号,工法名称	H1	鋼板接着工法
	H1-3	サンドイッチ床版

補強・補修工法諸元

道路・鉄道・その他	道路橋(跨線橋)
対象部材・部位	床版
補修・補強目的	・既設床版の曲げ・せん断補強
工法概要・特徴	<p>損傷したRC床版の上、下面に鋼板を接着させて、床版の曲げ耐力向上を図るものである。一般には、4.5mmの鋼板を床版と5mm程度の隙間を確保して上下の鋼板をアンカーで固定し、鋼板周辺をシールした後にエポキシ樹脂を注入することにより、既設床版との一体化を図る。鋼板はエポキシ樹脂の接着力およびボルトで既設床版と一体化し、RC床版との合成部材として活荷重に抵抗する。</p> <p>・鋼材の増加による曲げ剛性の増加のほか、せん断耐力も向上する・接着用のエポキシ樹脂は流動性に富んでおり、施工時に圧力をかけて注入するため、ひび割</p>
概算工費(参考)	直工
	C=130千円 / m ²
適用基準類	・北海道開発局道路設計要領第3集橋梁
本工法事例の出典 及び参考文献	・北海道開発局道路設計要領第3集橋梁

工法概要図



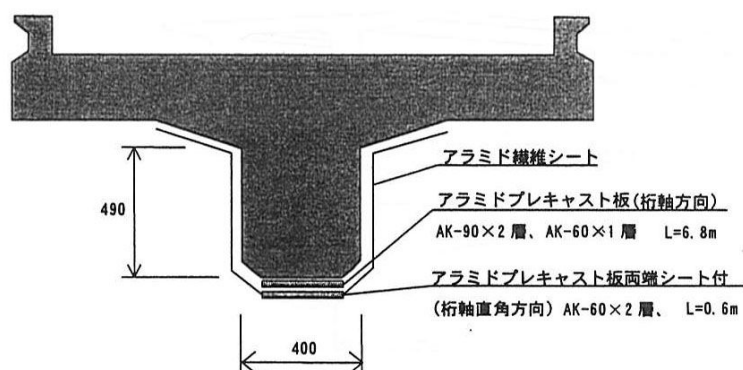
補強工法

対策工法の分類	H	補強材の追加
工法番号,工法名称	H2	FRP接着工法
	H2 - 1	アラミド繊維板接着工法

補強・補修工法諸元

道路・鉄道・その他	道路
対象部材・部位	プレレストコンクリート覆道
補修・補強目的	・落石荷重に対するプレレストコンクリート覆道の曲げ耐力とじん性の向上
工法概要・特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・逆L型2ピンラメン構造のPC梁の下面をチップングし,あらかじめ工場で制作したアラミドプレキャスト版を樹脂で接着させる。 ・コンクリートとアラミドプレキャスト版の間の付着力を確保し,耐力向上を目的として軸直角方向にアラミドシートを貼る工法。 ・施工精度の向上 ・工期短縮 ・連続繊維版はコンクリートと完全に一体化することによりその効果が100%発揮できるため,不陸修正,面取り等の前処理が必要。 ・維持管理において,目視による劣化判断が困難。
概算工費(参考)	
適用基準類	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリートライブラリー 88 連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針(案) 土木学会
本工法事例の出典 及び参考文献	<ul style="list-style-type: none"> ・アラミド繊維シートによる鉄筋コンクリート橋脚の補強工法 設計・施工要領(案) 平成10年1月 アラミド補強研究会

工法概要図



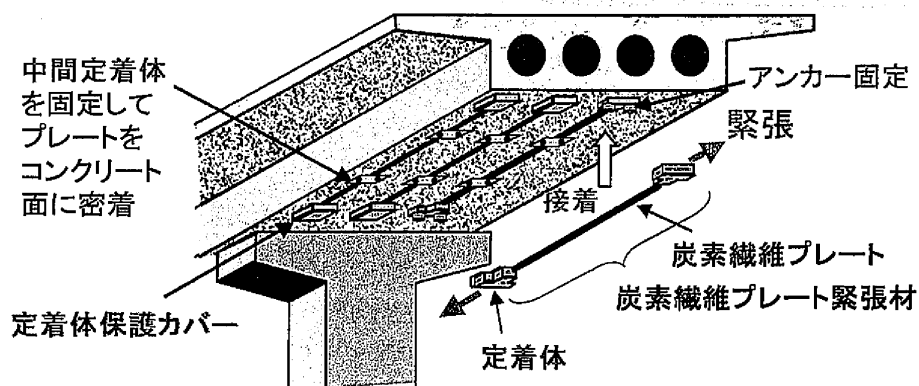
補強工法

対策工法の分類	H	補強材の追加
工法番号,工法名称	H2	FRP接着工法
	H2 - 2	炭素繊維板固定・定着工法

補強・補修工法諸元

道路・鉄道・その他	道路
対象部材・部位	桁,床版
補修・補強目的	<ul style="list-style-type: none"> 炭素繊維プレートを緊張・定着する事による曲げ補強効果。 プレストレスにより既存ひび割れを閉じ、ひび割れ発生荷重を向上させる効果もある
工法概要・特徴	<ul style="list-style-type: none"> 定着部の削孔とはつりを行ない、定着用固定プレートを取付け、固定プレート間に炭素繊維プレートをセットする。 炭素繊維プレートの緊張と接着により既設コンクリートにプレストレスを導入する工法。 従来の繊維シート定着工法に比べ、少ない補強材料で補強効果が得られる。 十分な防錆措置を行うことで、維持管理費の低減。 補強後形状に断面変化がほとんど無く、施工に有利。
概算工費(参考)	算出例 直工 ホロースラブ橋(幅員10m, 支間15m, スラブ下面幅6m) 施工単価70~80千円/㎡(足場含まず)
適用基準類	<ul style="list-style-type: none"> コンクリートライブラリー 95 連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針(案) 土木学会
本工法事例の出典 及び参考文献	<ul style="list-style-type: none"> 外ケーブル方式によるコンクリート橋の補強マニュアル(案) 平成10年 (社)プレレスト・コンクリート建設業協会 緊張した炭素繊維プレートによる既設コンクリート部材の補強に関する研究 土木学会論文集No.711 V-56,27-44,2002.8

工法概要図



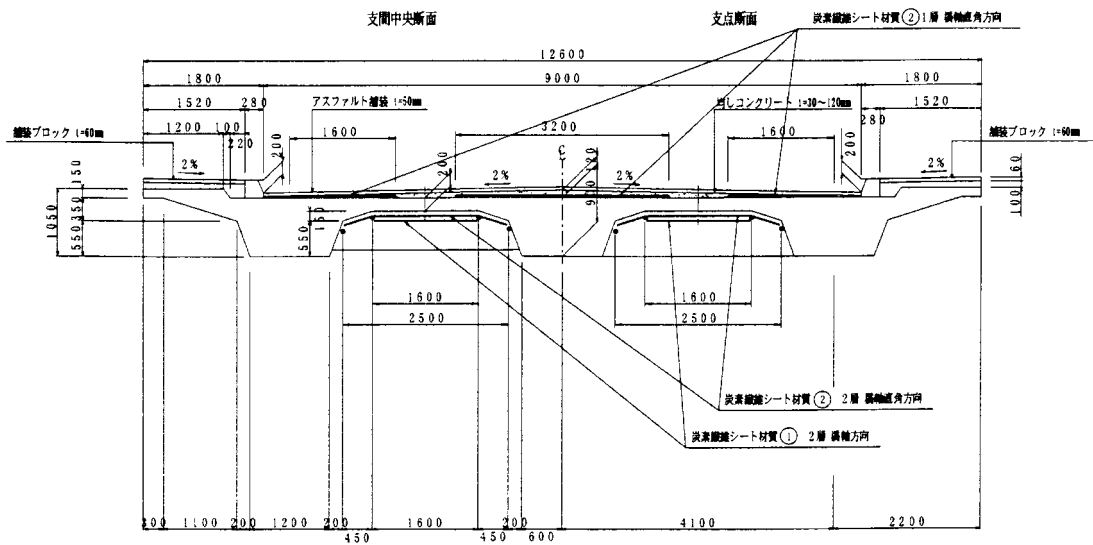
補強工法

対策工法の分類	H 補強材の追加
工法番号,工法名称	H2 FRP接着工法
	H2 - 3 連続繊維シート接着工法

補強・補修工法諸元

道路・鉄道・その他 対象部材・部位 補修・補強目的	道路 RC床版, RC梁 ・床版及び梁の曲げ及びせん断補強及びじん性補強
工法概要・特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・連続繊維シートをRC床版及びRC梁の表面に含浸接着樹脂で貼付けることにより曲げ及びせん断及びじん性の向上を計る。 ・連続繊維シートとしては現在炭素繊維, アラミド繊維, ガラス繊維が主に用いられる。 ・維持管理性, 目視による劣化判断が困難。
概算工費(参考)	直工 炭素シート2層(目付量300g/m ²) C=45千円/m ² ~
適用基準類	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリートライブラリー 88 ・連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針(案) 土木学会
本工法事例の出典 及び参考文献	<ul style="list-style-type: none"> ・トウシート工法技術資料 東燃株式会社 ・アラミド繊維シートによる鉄筋コンクリート橋脚の補強工法 設計・施工要領(案) 平成10年1月 アラミド補強研究会

工法概要図



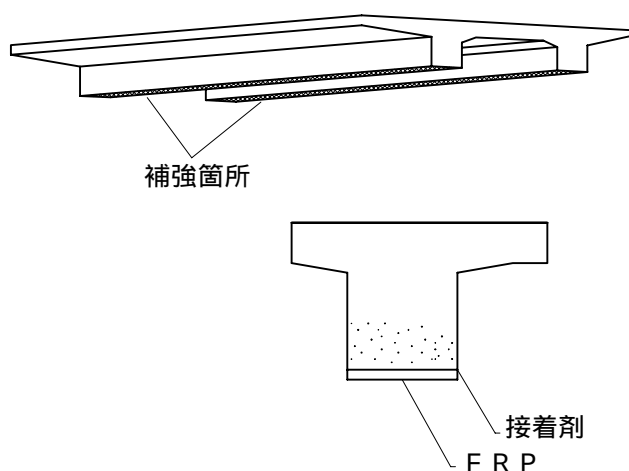
補強工法

対策工法の分類	H	補強材の追加
工法番号,工法名称	H2	FRP接着工法
	H2 - 4	連続繊維シート接着工法

補強・補修工法諸元

道路・鉄道・その他	鉄道
対象部材・部位	桁,床版
補修・補強目的	部材の終局耐力や疲労耐力の向上を目的とする。 部材剛性が向上する為、間接的にたわみの改善効果もある。 外面を連続繊維シートで覆う為、ひび割れ等の耐久性上の性能も改善されるが、連続繊維シートの耐久性で本工法の耐久性能が定まる。
工法概要・特徴	コンクリート構造物の引張側外面に連続繊維シートを接着することにより、既設部材との一体化させ耐力の向上を図る工法である。 鉄筋コンクリート構造は、鉄筋とコンクリートとの付着によるせん断力の伝達によって一体化が成り立っている。連続繊維シート接着工法の原理もこれと同様の考え方で、貼り付けた連続繊維シートが張鉄筋の一部として作用することになる。 接着剤としてはエポキシ樹脂が用いられている。 連続繊維シートの定着は、ボルト等が用いられる場合が多い。
概算工費(参考)	H2-3参照
適用基準類	建造物保守管理標準 (財)鉄道総合技術研究所 昭和62年 国鉄建造物設計標準(鉄筋コンクリート構造物)昭和58年 鉄道構造物等設計標準(コンクリート構造物編)平成4年
本工法事例の出典 及び参考文献	建造物保守管理標準 (財)鉄道総合技術研究所 昭和62年

工法概要図



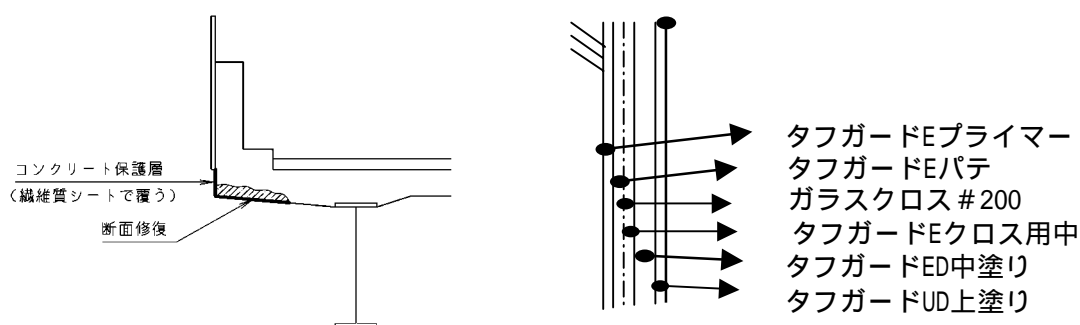
補強工法

対策工法の分類	H	補強材の追加
工法番号,工法名称	H2	FRP接着工法
	H2 - 5	タフガードガラスクロス工法

補強・補修工法諸元

道路・鉄道・その他	道路橋(跨線橋)
対象部材・部位	床版
補修・補強目的	・床版の補修(主に断面修復)後、補修箇所の剥落防止 本工法は、JR東日本の土木工事標準仕様書中の剥落防止工に掲載されている
工法概要・特徴	本工法は、コンクリート劣化部分をはつり、断面修復を行った箇所に対し、補修箇所周辺の素地調整、プライマー塗布、パテ補修、ガラスクロス貼付、塗装を行うものである。 【目付け量と施工方法】 タフガードEプライマー、0.1kg/m ² 、はけ又はローラー タフガードEパテN-2、0.5kg/m ² 、はけ又はローラー ガラスクロス 200、1.0m/m ² タフガードEクロス用中塗、ヘラ タフガードED中塗、0.26kg/m ² 、はけ又はローラー タフガードUD上塗、0.12kg/m ² 、はけ又はローラー
概算工費(参考)	直工(100m ² 以上の施工面積に対して) 材料費:270,000円/100m ² 、施工費:1,100,000円/100m ² C=1,370,000/100m ²
適用基準類	「土木工事標準仕様書 東日本旅客鉄道株式会社編」 2003年3月、社団法人鉄道施設協会
本工法事例の出典 及び参考文献	・日本ペイント社製品

工法概要図



補強工法

対策工法の分類	H	補強材の追加
工法番号,工法名称	H2	FRP接着工法
	H2 - 6	ガラスクロスライニングシステム

補強・補修工法諸元

道路・鉄道・その他	道路橋
対象部材・部位	RC壁高欄(剛性防護柵)・地覆の側面
補修・補強目的	・塩害によるコンクリートの補修後、補修箇所の剥落防止
工法概要・特徴	本工法は、塩害による損傷を受けたコンクリート劣化部分をはつり、断面修復を行った箇所に対し、補修箇所周辺の素地調整、プライマー塗布、パテ補修、ガラスクロス貼付、塗装を行うものである。塩害を受けた箇所においては、はく落防止工の品質規格と共に「塩害を受けた土木構造物の補修指針(案)」の「1種」相当以上の品質の材料を用いる。これにより、剥落防止と塩害対策を兼用することが出来る。
概算工費(参考)	直工 C=11千円 / m ²
適用基準類	・「コンクリート片はく落防止対策マニュアル」2000.11、日本道路公団
本工法事例の出典 及び参考文献	・コンクリート保護工法カタログ,仕様No.6FVガラスクロスライニングシステム[560] ショーボンド建設

工法概要図



注) 断面欠損・剥離・剥落等がある場合は、表面被覆を行う前に部分断面修復を行う。またこの時鉄筋腐食が認められる場合は、鉄筋の裏側までのはつり、防錆処理を行う。

補強工法

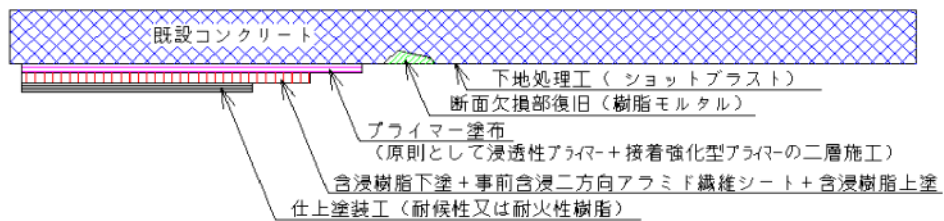
対策工法の分類	H	補強材の追加
工法番号,工法名称	H2	FRP接着工法
	H2-7	繊維シート接着(2方向シート)

補強・補修工法諸元

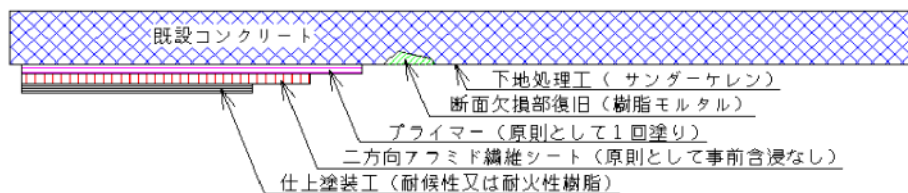
道路・鉄道・その他	道路橋
対象部材・部位	RC構造物全般
補修・補強目的	ひびわれ等の損傷が発生している既設構造物の耐力向上、疲労による劣化を抑帯構造物を延命させる。
工法概要・特徴	本工法は、2方向に織ったアラミドシートで貼り付け作業が出来る等の点から炭素繊維シート床版補強工法と比べかなりのコスト縮減ができる。アラミド繊維シートは貼り付け後の既設構造物性状を観察できるできるように、メッシュ状にしたり交差角45°の2方向織物にするなどニーズに合わせた織り方ができる。炭素繊維は硬度が高く、構造物の面取りがR30mm以上に対し、この工法はR=10mmの面取りですむ。
概算工費(参考)	直工 C = 40千円/m ²
適用基準類	-
本工法事例の出典 及び参考文献	2方向ケブラー繊維シートで下面補強した損傷床傷の疲労耐久性； 第2回道路橋床版のシンポジウム 2000年10月 2方向アラミド繊維シートの補強効果に与える貼付方法の影響； 第55回土木学会年次学術講演会2000年9月 その他多数

工法概要図

二方向アラミド繊維シートによるコンクリート構造物補強工法標準断面



二方向アラミド繊維シートによるコンクリート構造物補修工法標準断面



補強工法

対策工法の分類	H	補強材の追加
工法番号,工法名称	H2	FRP接着工法
	H2 - 8	繊維シート接着(水分除去)

補強・補修工法諸元

道路・鉄道・その他	道路橋
対象部材・部位	繊維シート補強箇所の背面の水分・浸透水・水蒸気による膨れや剥離が危惧される箇所。
補修・補強目的	・繊維シートを貼り付けたコンクリート中の不必要な水分を脱し、加えてコンクリートの補強としてアンカー効果を兼ね備えた補助・補強工法である。
工法概要・特徴	本工法は、ドライロックピンの有孔部より水蒸気が抜け、コンクリート内部をドライにし、ドライロックピンによって繊維シートをコンクリートに物理的に固定し、アンカー効果を発揮する。繊維シートの膨れや剥離現象を防止する。
概算工費(参考)	直工 C = 7.7千円/m ²
適用基準類	-
本工法事例の出典 及び参考文献	-

工法概要図



床版への適用例



脱水効果

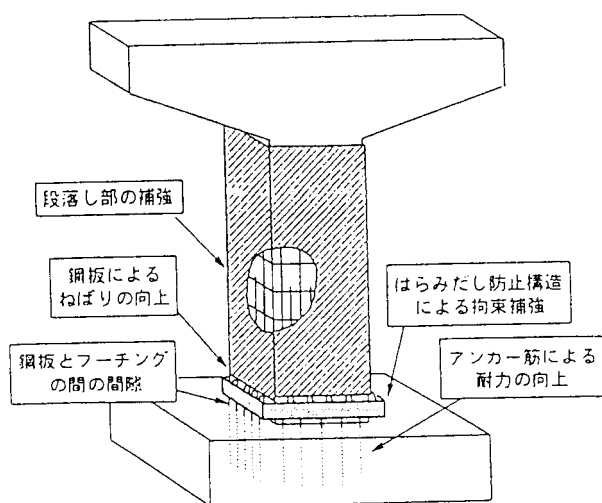
補強工法

対策工法の分類	H	補強材の追加
工法番号,工法名称	H3	鋼板巻立て工法
	H3 - 1	鋼板巻立て工法

補強・補修工法諸元

道路・鉄道・その他	道路橋
対象部材・部位	橋脚 柱
補修・補強目的	<ul style="list-style-type: none"> ・鉄筋段落とし部の補強 ・橋脚の曲げ耐力とじん性の両者の向上
工法概要・特徴	<p>鉄筋コンクリート橋脚躯体を鋼板で巻立て,その間隙を充填材により密実させるとともに,曲げ耐力を制御するアンカー筋を通じて鋼板をフーチングに定着させる構造。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・アンカー筋によるフーチングへの鋼板の定着 ・鋼板下端とフーチング上面の間に5～10cmの間隙を設け,柱下端に塑性ヒンジを形成 ・矩形断面の場合,鋼板下端を形鋼で補強することにより,コンクリートの拘束効果を向上 ・現地調査の容易性から最低限の維持・管理性あり
概算工費(参考)	<p>直工 鋼板t=6mm 無収縮モルタルt=30mm C=110千円 / m²</p>
適用基準類	<ul style="list-style-type: none"> ・既設道路橋の耐震設計に関する参考資料:日本道路協会 1997.8
本工法事例の出典 及び参考文献	<ul style="list-style-type: none"> ・既設道路橋の耐震設計に関する参考資料:日本道路協会 1997.8

工法概要図



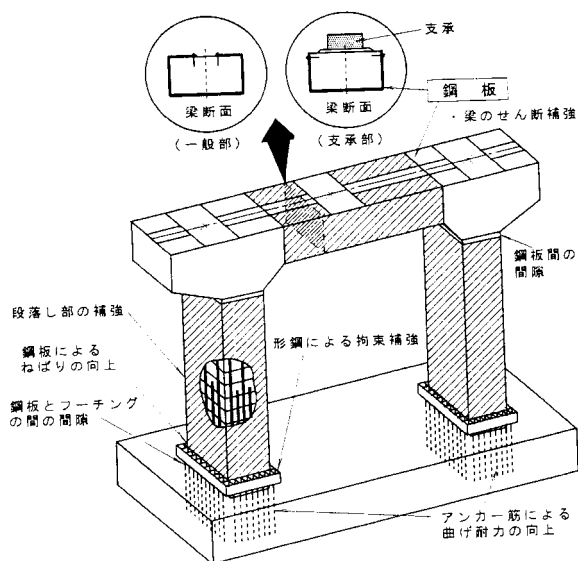
補強工法

対策工法の分類	H	補強材の追加
工法番号,工法名称	H3	鋼板巻立て工法
	H3 - 2	鋼板巻立て工法

補強・補修工法諸元

道路・鉄道・その他	道路橋
対象部材・部位	ラーメン橋脚 柱,はり
補修・補強目的	<ul style="list-style-type: none"> ・柱の曲げ耐力およびせん断耐力の向上 ・はりのせん断耐力の向上
工法概要・特徴	<p>鉄筋コンクリート橋脚躯体を鋼板で巻立て,その間隙を充填材により密実させるとともに,曲げ耐力を制御するアンカー筋を通じて鋼板をフーチングに定着させる構造。はり部材に対しては鋼板を巻立てることによりせん断補強</p> <ul style="list-style-type: none"> ・アンカー筋によるフーチングへの鋼板の定着 ・鋼板下端とフーチング上面の間に5～10cmの間隙を設け,柱下端に塑性ヒンジを形成 ・矩形断面の場合,鋼板下端を形鋼で補強することにより,コンクリートの拘束効果を向上 ・はりに鋼板を巻くことによってせん断耐力を向上 ・現地調査の容易性から最低限の維持・管理性あり
概算工費(参考)	H3-1参照
適用基準類	・既設道路橋の耐震設計に関する参考資料:日本道路協会 1997.8
本工法事例の出典及び参考文献	・既設道路橋の耐震設計に関する参考資料:日本道路協会 1997.8

工法概要図



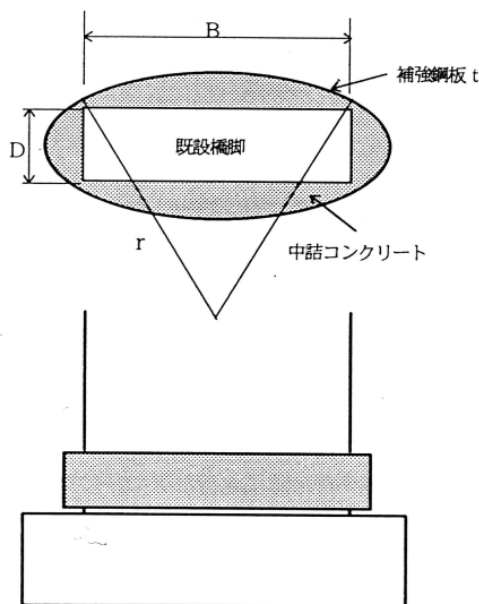
補強工法

対策工法の分類	H	補強材の追加
工法番号,工法名称	H3	鋼板巻立て工法
	H3 - 3	鋼板巻立て工法

補強・補修工法諸元

道路・鉄道・その他	道路橋
対象部材・部位	橋脚 柱
補修・補強目的	・壁式橋脚のじん性の向上
工法概要・特徴	<p>矩形断面の橋脚躯体について、鋼板を楕円形状に巻立て、橋脚躯体と鋼板の間にコンクリートを充填する工法</p> <p>・中間貫通鋼材等を使用しなくとも、拘束効果を高めることができる</p>
概算工費(参考)	<p>直工</p> <p>鋼板$t=6\text{mm}$ RC充填</p> <p>$C=100\text{千円}/\text{m}^2$</p>
適用基準類	<p>・既設道路橋の耐震設計に関する参考資料:日本道路協会 1997.8</p> <p>・設計要領 第二集 橋梁保全編:日本道路公団 1997.11</p>
本工法事例の出典 及び参考文献	<p>・既設道路橋の耐震設計に関する参考資料:日本道路協会 1997.8</p> <p>・設計要領 第二集 橋梁保全編:日本道路公団 1997.11</p>

工法概要図



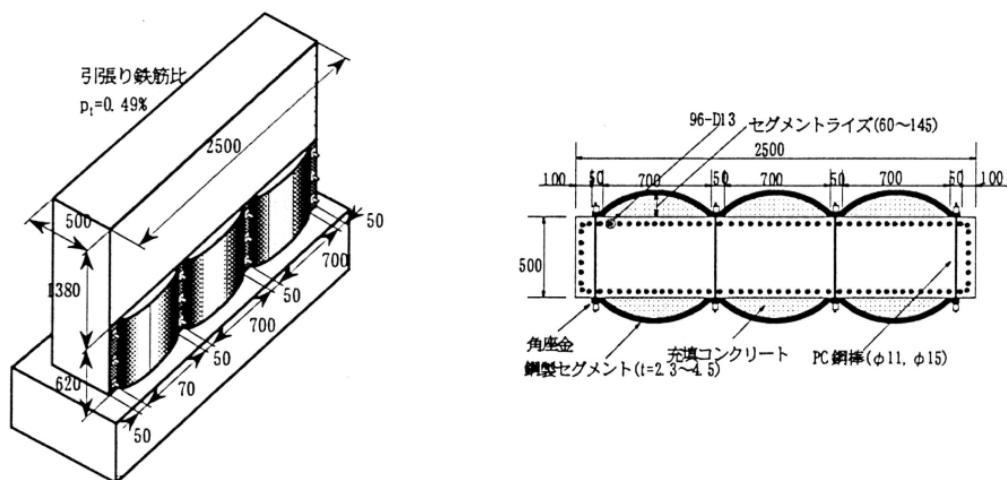
補強工法

対策工法の分類	H	補強材の追加
工法番号,工法名称	H3	鋼板巻立て工法
	H3-4	鋼板巻立て工法

補強・補修工法諸元

道路・鉄道・その他	道路橋
対象部材・部位	橋脚 柱
補修・補強目的	<ul style="list-style-type: none"> ・鉄筋段落とし部の補強 ・橋脚の曲げ耐力とじん性の両者の向上
工法概要・特徴	<p>曲面状の鋼板(鋼製セグメント)をPC鋼棒によって壁式橋脚に縫いつけ,さらに鋼製セグメント内にコンクリートを打設する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・拘束力が鋼製セグメントの円周方向軸力を介して新設コンクリートに導入されるため橋脚幅全体に拘束力が伝達され,効果的に中間貫通材の水平方向間隔を大きくすることができる ・中間貫通材のための削孔を減らすことが可能,また型枠が不要,溶接も不要
概算工費(参考)	
適用基準類	・既設道路橋の耐震設計に関する参考資料:日本道路協会 1997.8
本工法事例の出典 及び参考文献	<ul style="list-style-type: none"> ・既設道路橋の耐震設計に関する参考資料:日本道路協会 1997.8 ・曲面状鋼製セグメントによる壁式橋脚の耐震補強設計 第1回地震時保有耐力法にもとづく橋梁の耐震設計に関する シンポジウム講演論文集 1998.1

工法概要図



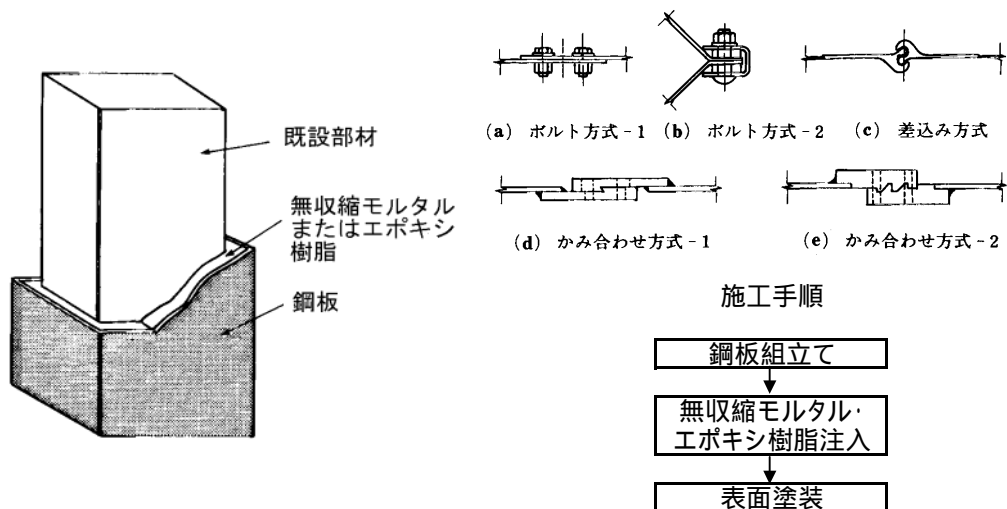
補強工法

対策工法の分類	H	補強材の追加
工法番号,工法名称	H3	鋼板巻立て工法
	H3 - 5	鋼板巻立て工法

補強・補修工法諸元

道路・鉄道・その他	鉄道
対象部材・部位	柱, 橋脚躯体
補修・補強目的	部材のせん断耐力や塑性変形性能の向上を目的とする. 曲げ耐力の向上を目的とする場合は, 部材端部に鋼板の引張力を部材の定着部に伝達できるような装置が必要となる.
工法概要・特徴	柱や橋脚躯体の周囲に鋼板を巻き鋼板同士は溶接または機械的に接続し, さらに鋼板と柱との隙間には充填材を注入する. 充填材には無収縮モルタルが使用される. ・工場加工の製品を用いるので, 品質の信頼性が高い. ・材料の搬入に機械が必要でそのための作業スペースを要する. ・現場溶接を必要とする. ・原寸加工が必要で, 加工に手間取る. ・補強後の断面増加はわずかであるが, 全体を巻立てない場合は段差が生じる.
概算工費(参考)	H3-1参照
適用基準類	建造物保守管理標準 (財)鉄道総合技術研究所 昭和62年 鉄道構造物等設計標準(コンクリート構造物編)平成4年 既存鉄道コンクリート高架橋柱等の耐震補強設計・施工指針 - 鋼板巻き補強工法編 - 平成8年
本工法事例の出典 及び参考文献	松本, 佐藤: 鉄道RC高架橋の新しい耐震補強法, コンクリート工学, vol.35, 10, 1997, 10 渡辺, 松本: RCラーメン高架橋の耐震診断技術と補強技術, コンクリート工学, vol.34, 11, 1996, 11

工法概要図



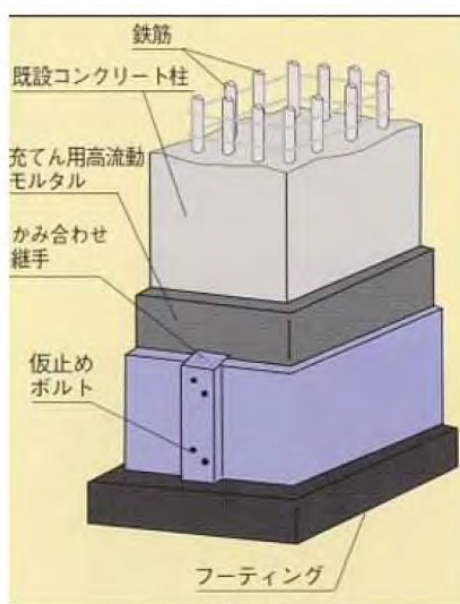
補強工法

対策工法の分類	H	補強材の追加
工法番号,工法名称	H3	鋼板巻立て工法
	H3 - 6	鋼板巻立て工法(かみあわせ)

補強・補修工法諸元

道路・鉄道・その他	道路
対象部材・部位	柱, 橋脚躯体
補修・補強目的	部材のせん断耐力や塑性変形性能の向上を目的とする.
工法概要・特徴	<p>柱や橋脚躯体の周囲に鋼板を巻き鋼板同士はかみ合わせ継ぎ手で接続し, さらに鋼板と柱との隙間には充填材を注入する.</p> <p>充填材には無収縮モルタルが使用される.</p> <ul style="list-style-type: none"> ・継ぎ手部分は工場製作のため天候や施工者の技能に左右されない. ・現場溶接がないため, 品質管理が容易. ・仮設足場等の設備はほとんど不要である. ・水中接合が可能のため, 仮締切不要で補強可能
概算工費(参考)	<p>機械式継ぎ手部材料費: 6, 9mm 156千円/t 12, 14mm 166千円/t</p> <p>施工単価: 断面寸法800mm × 800mm高さ6000mm程度の場合</p> <p style="text-align: center;">鋼板製作費460千円/本、鋼板設置費220千円/本</p>
適用基準類	-
本工法事例の出典 及び参考文献	小原:「機械式継ぎ手及び新開発モルタルを使用したRC柱の耐震補強工事」 日本鉄道施設協会誌 1996.11

工法概要図



工法の概要

補強工法

対策工法の分類	H	補強材の追加
工法番号,工法名称	H4	FRP巻立て工法
	H4-1	連続繊維シート巻立て工法

補強・補修工法諸元

道路・鉄道・その他	道路橋
対象部材・部位	橋脚 柱
補修・補強目的	<ul style="list-style-type: none"> ・橋脚の破壊形態を躯体下端の曲げ破壊へ移行させる ・橋脚全体のじん性を向上させる
工法概要・特徴	<p>橋脚躯体を炭素繊維やアラミド繊維など、多本数の連続繊維を樹脂などの結合材で集束したものにより、巻き立てることで耐震補強する</p> <ul style="list-style-type: none"> ・躯体表面の軸方向に炭素繊維シートを貼り付けることにより、引張鉄筋を増設することと同様の効果を期待して段落し部の曲げ耐力の増加を図る ・躯体表面の帯鉄筋方向に炭素繊維シートを貼り付けることにより、帯鉄筋を増設することと同様の効果を期待してせん断耐力の向上を図り橋脚全体のじん性を向上させる ・軽量の材料なので施工は手作業によることが可能、また狭小な個所での作業が比較的容易であるうえ、橋脚位置までの材料搬入路の特別な整備不必要 ・チップング処理などの施工が無く、騒音などの環境問題が発生しない ・軽量なので補強による躯体重量や断面の増加がないため基礎への影響が少ない
概算工費(参考)	<p>直工 炭素繊維シート(縦1層、横1層、目付量300g/m²) C=45千円/m²~</p>
適用基準類	<ul style="list-style-type: none"> ・既設道路橋の耐震設計に関する参考資料:日本道路協会 1997.8 ・設計要領 第二集 橋梁保全編:日本道路公団 1997.11
本工法事例の出典及び参考文献	<ul style="list-style-type: none"> ・設計要領 第二集 橋梁保全編:日本道路公団 1997.11 ・炭素繊維による段落し部を有する既存RC橋脚の耐震補強に関する研究 :CRS研究会 1996.6

工法概要図

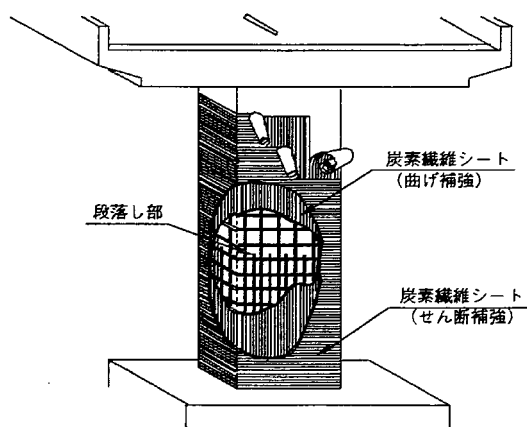


図-2 炭素繊維耐震補強構法概念図

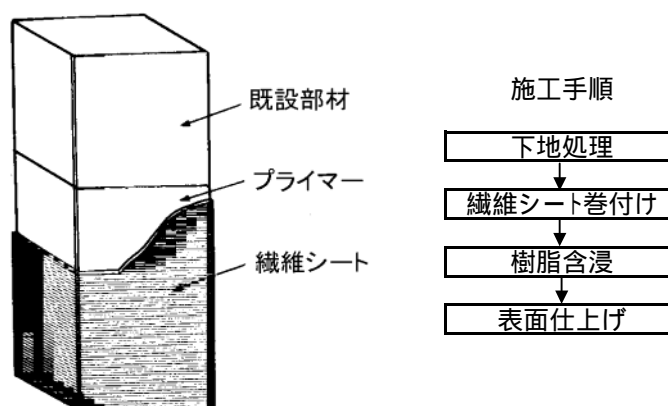
補強工法

対策工法の分類	H	補強材の追加
工法番号,工法名称	H4	FRP巻立て工法
	H4-2	炭素繊維シート巻き立て補強

補強・補修工法諸元

道路・鉄道・その他	鉄道
対象部材・部位	柱, 橋脚躯体
補修・補強目的	部材のせん断耐力や塑性変形性能の向上を目的とする. 曲げ耐力の向上を目的とする場合は, 部材端部にシートの引張力を部材の定着部に伝達できるような装置が必要となる.
工法概要・特徴	下地処理を施した柱に炭素繊維シートを巻きつける工法. せん断耐力や塑性変形性能補強としては, 帯鉄筋方向に巻き付け, 曲げ補強材としては軸方向鉄筋方向に貼り付ける. ・使用材料は人力で運搬可能である. ・人力作業で施工可能なスペースがあればよい. ・施工速度が速い. ・補強後の断面増加は無視できるほどの量である. ・施工の温度が低いと樹脂の硬化が遅れる. ・水分があると樹脂の硬化に悪影響を及ぼす. ・隅角部には面取りを必要とする.
概算工費(参考)	H4-1参照
適用基準類	炭素繊維シートによる鉄道高架橋柱の耐震補強設計施工指針 平成8年7月 炭素繊維シートによる地下鉄RC柱の耐震補強設計施工指針 平成8年12月 鉄道構造物等設計標準(コンクリート構造物編)平成4年
本工法事例の出典 及び参考文献	松本, 佐藤: 鉄道RC高架橋の新しい耐震補強法, コンクリート工学, vol.35, 10, 1997, 10 渡辺, 松本: RCラーメン高架橋の耐震診断技術と補強技術, コンクリート工学, vol.34, 11, 1996, 11

工法概要図



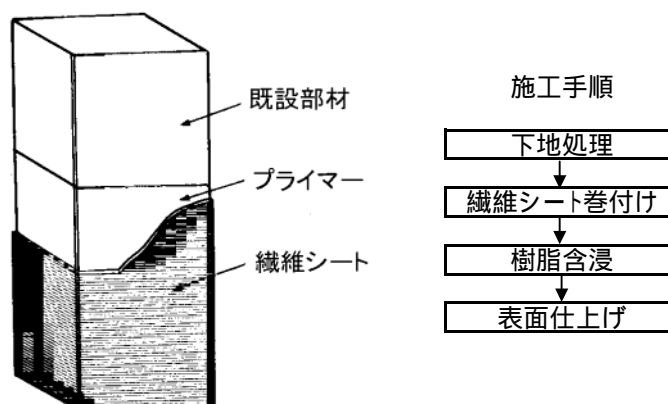
補強工法

対策工法の分類	H	補強材の追加
工法番号,工法名称	H4	FRP巻立て工法
	H4-3	アラミド繊維シート巻き立て補強

補強・補修工法諸元

道路・鉄道・その他	鉄道
対象部材・部位	柱, 橋脚躯体
補修・補強目的	部材のせん断耐力や塑性変形性能の向上を目的とする。 曲げ耐力の向上を目的とする場合は, 部材端部にシートの引張力を部材の定着部に伝達できるような装置が必要となる。
工法概要・特徴	下地処理を施した柱にアラミド繊維シートを巻きつける工法。 せん断耐力や塑性変形性能補強としては, 帯鉄筋方向に巻き付け, 曲げ補強材としては軸方向鉄筋方向に貼り付ける。 ・使用材料は人力で運搬可能である。 ・人力作業で施工可能なスペースがあればよい。 ・施工速度が速い。 ・補強後の断面増加は無視できるほどの量である。 ・施工の温度が低いと樹脂の硬化が遅れる。 ・水分があると樹脂の硬化に悪影響を及ぼす。 ・隅角部には面取が必要。ただし, 135°の場合は不要。
概算工費(参考)	直工 アラミド繊維シート(縦1層, 横1層, 目付量280g/m ²) C=40千円 / m ² ~
適用基準類	アラミド繊維シートによる鉄道高架橋柱の耐震補強設計施工指針 平成8年11月 鉄道構造物等設計標準(コンクリート構造物編)平成4年
本工法事例の出典 及び参考文献	松本, 佐藤: 鉄道RC高架橋の新しい耐震補強法, コンクリート工学, vol.35, 10, 1997, 10 渡辺, 松本: RCラーメン高架橋の耐震診断技術と補強技術, コンクリート工学, vol.34, 11, 1996, 11

工法概要図



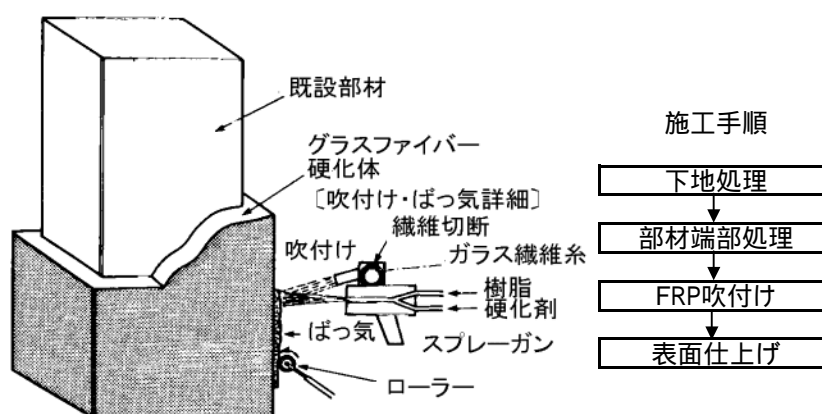
補強工法

対策工法の分類	H	補強材の追加
工法番号,工法名称	H4	FRP巻立て工法
	H4 - 4	FRP補強(スチールクロス材)

補強・補修工法諸元

道路・鉄道・その他	鉄道
対象部材・部位	柱, 橋脚躯体
補修・補強目的	部材のせん断耐力や塑性変形性能の向上を目的とする.
工法概要・特徴	<p>下地処理した柱にスチールクロス材を巻きつけて, 樹脂を吹き付けてスチールクロス材と樹脂とのFRP補強材を形成する.</p> <ul style="list-style-type: none"> ・使用材料は人力で運搬可能である. ・人力作業で施工可能なスペースがあればよい. ・施工速度が速い. ・補強後の断面増加は無視できるほどの量である. ・1層の吹き付け厚さは2mm以上5mm以下とし, 3mmを標準とする. ・施工時の温度が低いと樹脂の硬化が遅れる. ・水分があると樹脂の硬化に悪影響を及ぼす.
概算工費(参考)	
適用基準類	既存鉄道コンクリート高架橋柱等の耐震補強設計施工指針 (FRP吹き付け補強編)平成8年11月 鉄道構造物等設計標準(コンクリート構造物編)平成4年
本工法事例の出典 及び参考文献	松本, 佐藤: 鉄道RC高架橋の新しい耐震補強法, コンクリート工学, vol.35, 10, 1997, 10 渡辺, 松本: RCラーメン高架橋の耐震診断技術と補強技術, コンクリート工学, vol.34, 11, 1996, 11

工法概要図



補強工法

対策工法の分類	H	補強材の追加
工法番号,工法名称	H4	FRP巻立て工法
	H4-5	連続繊維(プレキャスト)

補強・補修工法諸元

道路・鉄道・その他	道路・鉄道
対象部材・部位	柱, 橋脚躯体
補修・補強目的	部材のせん断耐力や塑性変形性能の向上を目的とする。
工法概要・特徴	<p>高架橋下などで、クリアランスがほとんどない場合においても施工可能な工法であらかじめ工場で三面のプレキャスト版を製造し、橋脚などの構造物に隙間をあけ設置し、残り一面を現場で貼り付けた後に隙間に充填材を注入して構造物と一体化する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・従来の鋼板と比べて1/10の重量となり運搬、組立てが容易である。 ・狭い場所での施工が可能。 ・プレキャスト版は工場製作のため品質に優れ、腐食しない。 ・施工時の温度が低いと樹脂の硬化が遅れる。 ・施工工程が少ない。 ・アラミド繊維の最低幅150mmとする。 ・コラムクランプにて充填材注入時のはらみ防止をおこなう
概算工費(参考)	<p>直接工費</p> <p>C = 120 ~ 135千円/m² (SM400 t = 6mm)</p> <p>C = 135 ~ 150千円/m² (SM400 t = 9mm)</p>
適用基準類	-
本工法事例の出典 及び参考文献	<ul style="list-style-type: none"> ・連続繊維補強コンクリートに関するシンポジウム論文集；日本コンクリート工学協会JCI-43平成10年5月 ・コンクリート工学VOL37 10、基礎工VOL27 4他に掲載

工法概要図

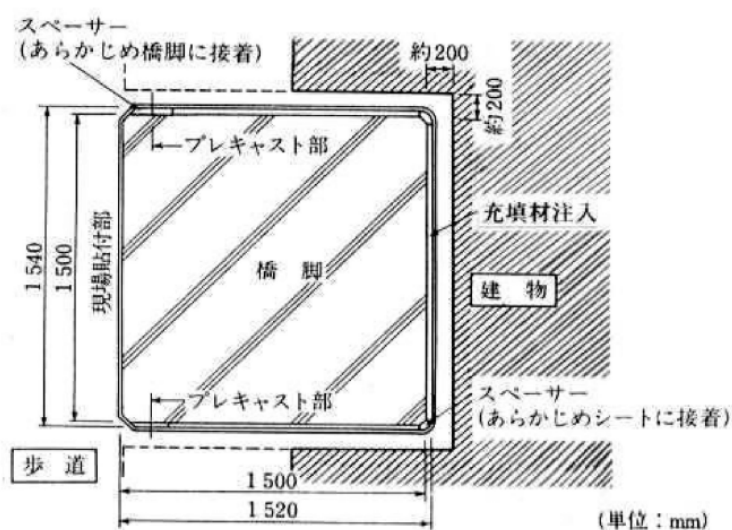


図-1 概要図

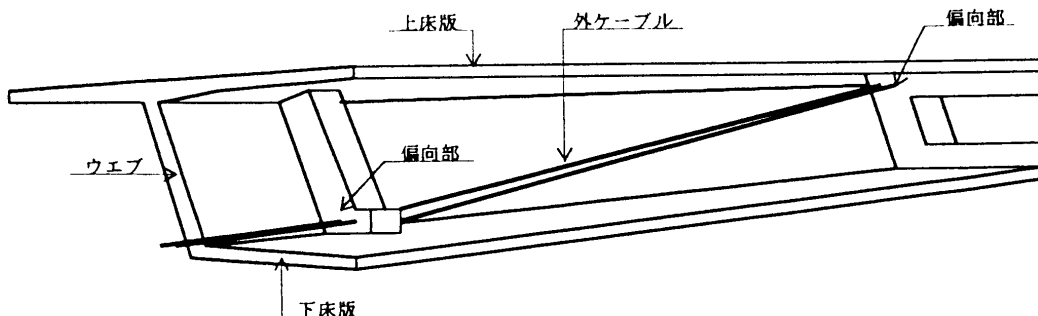
補強工法

対策工法の分類	I プレストレスの導入
工法番号,工法名称	I1 プレストレス導入工法
	I1 - 1 外ケーブル工法

補強・補修工法諸元

道路・鉄道・その他	道路橋
対象部材・部位	プレストレストコンクリート道路橋,鉄筋コンクリート橋
補修・補強目的	プレストレス導入による主桁断面の補強
工法概要・特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・恒久的な防錆処理を施した緊張材をコンクリート部材の外側に配置し,定着部あるいは偏向部を介して部材に永続的なプレストレスを与える方式。外ケーブル工法は緊張材定着具の位置を保持するための偏向部や緊張材の保護等を使用する保護管や充填材の材料などにより構成される。 ・ケーブルの取替えやケーブルの追加による補強が容易にできる。 ・内ケーブルに比べて維持管理,補修が容易である。
概算工費(参考)	
適用基準類	
本工法事例の出典 及び参考文献	<ul style="list-style-type: none"> ・外ケーブルを用いたPC橋梁の設計マニュアル : (財)高速道路技術センター 1996 ・外ケーブル方式によるコンクリート橋の補強マニュアル(案) : プレストレストコンクリート建設業協会

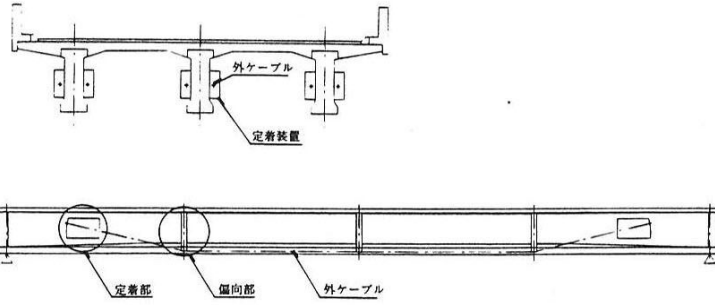
工法概要図(1)



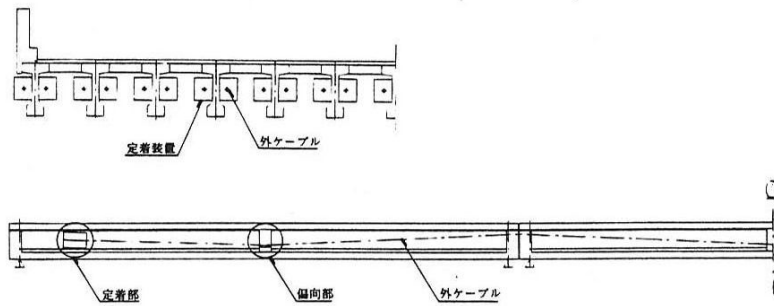
外ケーブル構造の例

工法概要図(2)

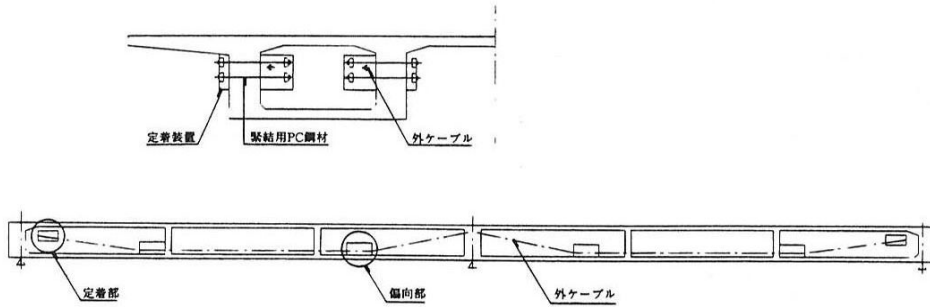
a) PC単純桁



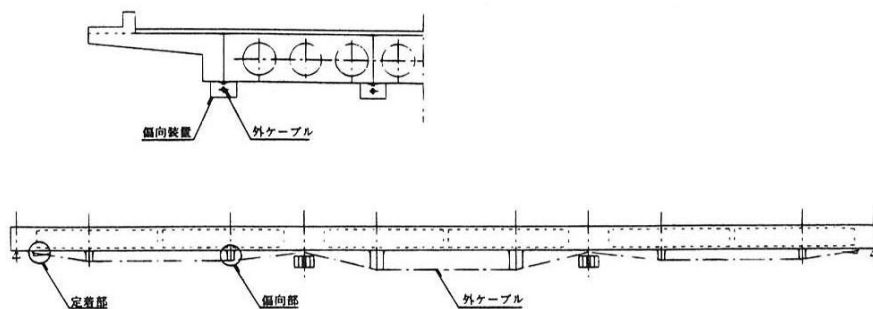
b) PC単純桁(連結化)



c) PC連続箱桁橋



d) RC連続中空床版橋



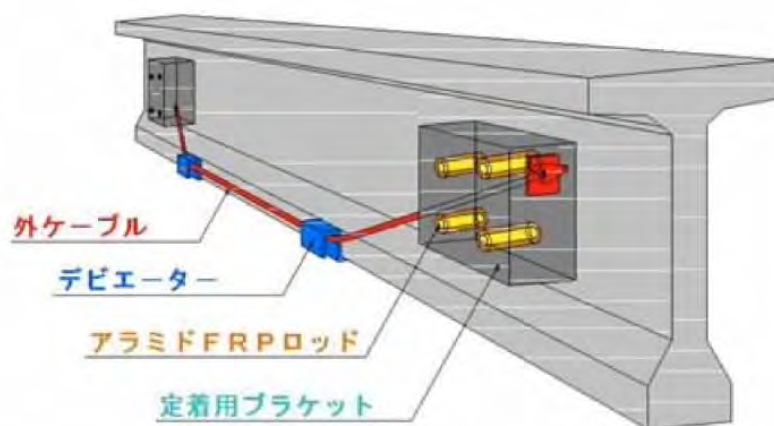
補強工法

対策工法の分類	I プレストレスの導入
工法番号,工法名称	I1 プレストレス導入工法
	I1 - 2 外ケーブル工法(アラミド)

補強・補修工法諸元

道路・鉄道・その他	道路橋
対象部材・部位	プレストレストコンクリート道路橋,鉄筋コンクリート橋
補修・補強目的	プレストレス導入による主桁断面の補強
工法概要・特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・外ケーブル定着用コンクリートブラケットを主桁に固定するため、従来のPC鋼棒の代わりにAFRPロッドを緊張材として用い、緊張接合する技術である。 ・ブラケット定着用緊張材として低弾性、高強度のAFRPロッドを使用しているため、伸び量が大きく、コンクリートのクリープ乾燥収縮によるプレストレスのロスがすくない。 ・既設桁、床版の拘束などによるプレストレスロスの影響はない。 ・全体を一度に緊張するので、緊張管理が容易である。 ・弾性係数が小さいので、クリープ等によるプレストレスロスの影響は小さい。 ・緊張材、定着具など露出する金属材料がないので、耐久性が向上する。 ・狭い施工環境においても施工可能である(プレテン桁など)
概算工費(参考)	15m幅員10主桁のポステン桁で1箇所1に6本の横締めを配置した場合 C = 2700千円
適用基準類	
本工法事例の出典 及び参考文献	<ul style="list-style-type: none"> ・第10回PCの発展に関するシンポジウム論文集H12.10 <p style="text-align: right;">その他多数</p>

工法概要図(1)



アラミドブラケット工法概要図

補強工法

対策工法の分類	I	プレストレスの導入
工法番号,工法名称	I1	プレストレス導入工法(内ケーブル)
	I1 - 3	プレストレス導入工法(内ケーブル)

補強・補修工法諸元

道路・鉄道・その他	道路橋
対象部材・部位	フーチング, 豎壁他
補修・補強目的	・新旧部材の一体性確保
工法概要・特徴	<p>基礎の支持力不足, 土圧の増加などにより, 基礎が沈下, 水平移動, 傾斜などの変状を生じた場合, それ以上の変状を防止するために, 増し杭などのアンダーピーニングを行うことが多い。このような場合, 新旧フーチングの一体性を確保するために, さし筋や接着材を用いるとともに, PC鋼棒で新旧フーチングを締付けて接合する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・旧躯体を削孔し, シースを入れてから, 空げきをグラウトして旧コンクリートとシースを固定する。 ・新フーチングのコンクリートを打込み, コンクリートが硬化し, 所定の強度に達したらPC鋼棒に緊張力を加えて, 新旧フーチングを締付ける。 ・新フーチングと既設橋台との接着面には, チッピング, 接着剤の塗布, 差筋も行う。
概算工費(参考)	
適用基準類	
本工法事例の出典 及び参考文献	・道路橋補修便覧: 日本道路協会 1979.2

工法概要図

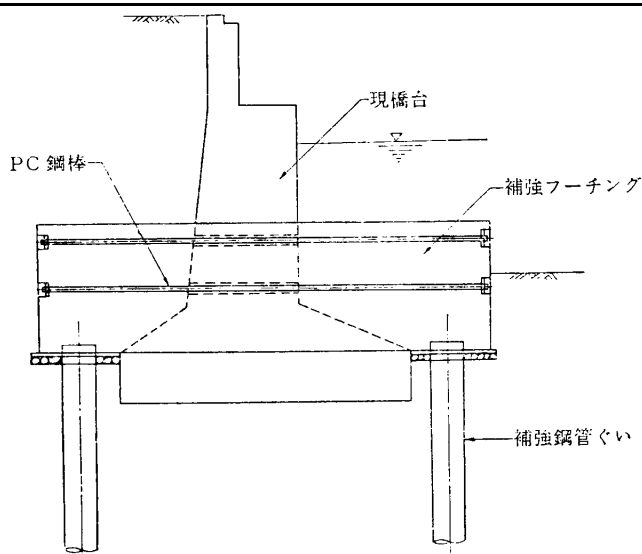


図-7.15 新旧フーチングを一体化した補修例

北海道土木技術会コンクリート研究委員会資料 第 155 号
平成 13～17 年度 コンクリート維持管理小委員会報告書

北海道におけるコンクリート構造物維持管理の手引き（案）

定価 2,500 円（消費税を含む）

発行日：平成 18 年 3 月

編 著：北海道土木技術会コンクリート研究委員会 コンクリート維持管理小委員会

発 行：北海道土木技術会コンクリート研究委員会

事務所：(株)ドーコン 構造部内

札幌市厚別区厚別中央 1 条 5 丁目 4-1 TEL(011)801-1540 FAX(011)801-1541

印 刷：(株)北武研究所

ご注意：当該出版物の内容を複写したり，他の出版物へ転載する場合には，
必ず北海道土木技術会コンクリート研究委員会の許可を得てください。

**北海道における
コンクリート構造物維持管理の手引き（案）**

平成 18 年 3 月

北海道土木技術会コンクリート研究委員会

<http://conc-sg.eng.hokudai.ac.jp/hce/>