

特殊混和材を混合したコンクリートの遮塩性能に関する実験的研究

浦野 登志雄^{1,*} 松田 学² 松本 康資²井形 友彦² 松本 優朋² 下田 誠也³

Experimental Studies on Improvement of Salt Resistance Performance of Concrete Using Special Inorganic Fine Powder

Toshio Urano^{1,*}, Manabu Matsuda², Yasushi Matsumoto², Tomohiko Igata², Yuho Matsumoto², Seiya Shimoda³

In the previous research, the authors clarified that blending using fly ash or ground granulated blast-furnace slag as an additive improves salinity permeation resistance compared to blending ordinary plain portland cement. In this report, with the aim of further improving salt resistance performance, special inorganic fine powders expected for high strength and high durability of concrete are used in combination with the preparation of the previous report, and salt penetration resistance is compared and evaluated. As a result, fixation of salt content was promoted by the use of the special inorganic fine powder, the apparent diffusion coefficient of chloride ions was lowered, and the improvement of salt resistance performance by the special inorganic fine powder was recognized.

キーワード：耐久性，塩分浸透抵抗性，プレキャストコンクリート，高炉スラグ微粉末，フライアッシュ

Keywords : Durability, Salt Resistance Performance, Precast Concrete, Blast Furnace Slag Powder, Fly-ash

1. はじめに

海岸沿いの地域や凍結防止剤を用いる山間部では構造物に耐塩害性能が求められる。それらの一般的な対策として、エポキシ塗装鉄筋の使用やかぶり厚さを大きく取ること等が挙げられるが、部材厚や加工費が増すことによるコスト増が懸念される。そのため、セメントの一部に置換するだけでコンクリートを高強度・高耐久化させる鉱物質系の特殊無機微粉末が開発された。筆者らは、塩害対策地域へのプレキャストコンクリート製品への利用を想定し既報の論文にて、養生方法、圧縮強度および各種混和材の使用を実験要因とし、フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を置換することで塩分浸透抵抗性を向上させることを明らかに

Table 1 Properties of material

Materials	Symbol	Density (g/cm ³)	F.M.
Ordinarily Portland cement	N	3.16	—
Blast furnace slag fine powder	BS	2.91	—
Fly ash II type	FA	2.28	—
Silica fume	SF	2.25	—
Special inorganic fine powder	IP	2.37	—
Sea sand	SS	2.57	2.51
Crushed stone	G	2.92	6.60
Super plasticizer	—	1.05	—

Table 2 Chemical composition of admixtures

Materials	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO
BS	27.9	11.6	0.27	39.3
FA	49.4	18.1	4.03	2.51
SF	84.4	0.51	0.52	0.18
IP	57.9	29.2	0.63	0.06

した⁽¹⁾。本研究では耐塩害性能のさらなる向上を目的とし、それらの調合に特殊無機微粉末を一部置換した調合につい

1 生産システム工学専攻
〒866-8501 熊本県八代市平山新町 2627
Faculty of Production Systems Engineering
2627 Hirayamashin-Machi, Yatsushiro Kumamoto, Japan 866-8501

2 (株)ヤマックス
〒862-0950 熊本県熊本市水前寺 3 丁目 9 番 5 号
Department of Research and Development, Yamax Corporation.
3-9-5, Suizenji, Kumamoto-shi, Kumamoto, Japan 862-0950

3 有明工業高等専門学校 創造工学科
〒836-8585 福岡県大牟田市東萩尾町 150
Department of Creative Engineering, National Institute of
Technology, Ariake College
150, 150 Higashihagio-Machi, Omuta Fukuoka, Japan 836-8585

* Corresponding author
E-mail address: urano@kumamoto-nct.ac.jp (T.Urano)

Table 3 Mix proportions

F _c (N/mm ²)	Type	W/B (%)	s/a	Unit volume (kg/m ³)							Fresh property				
				W	B					SS	G	SL·Sf (cm)	Air (%)	C.T. (°C)	Cl ⁻ (kg·m ⁻³)
					C	BS	FA	SF	IP						
30	30N	48	41.3	165	324	—	—	—	20	748	1206	9.5	1.9	29.0	0.076
	30BS	46	40.7		231	108	—	—		728		11.0	1.0	30.0	0.083
	30FA	40	38.2		297	—	100	—		657		12.5	1.8	26.0	0.065
45	45N	37	38.5	165	426	—	—	—	20	665	1206	12.5	1.1	26.0	0.080
	45BS	35	37.4		310	141	—	—		634		13.0	1.7	25.0	0.064
	45FA	32	35.2		396	—	100	—		577		14.5	1.6	25.0	0.030
80	80H	25	44.9	150	450	—	90	60	—	724	1008	65.5	1.2	30.0	0.032

て、力学的特性、塩分浸透抵抗性および中性化抵抗性を比較評価した。また、コンクリートの密実性が各種物性に与える影響を調べるため、超高強度調合を実験水準に加えた。

2. 実験概要

2.1 使用材料および調合

Table 1~3 に使用材料の諸元、化学成分および調合表をそれぞれ示す。本実験における調合は、JASS10⁽²⁾ に準拠して調合設計した設計基準強度 (F_c) 30 および 45N/mm² の各種コンクリートの計画調合に、特殊無機微粉末をそれぞれ 20kg ずつセメントに置換した調合とした。特殊無機微粉末は 10m²/g 以上の BET 比表面積を持つ微粉末であり、ポゾラン反応性を有する。構成成分には SiO₂ および Al₂O₃ を豊富に含有する。なお、超高強度調合 (80H) は特殊無機微粉末を使用せず、フライアッシュとシリカフェームを併用した三成分系とした。設計スランブは特殊無機微粉末使用調合で 12.0±2.5cm とし、高性能減水剤を適宜添加し調整した。コンクリートの練混ぜは、容量 1.5m³ の強制 2 軸型実機プラントにより行った。ただし、超高強度調合は容量 55L の強制 2 軸ミキサーにより練混ぜを行い、設計スランブフローを 60.0±10.0cm とした。フレッシュ性状について、コンクリートは夏期に打設したため、練上がり温度が 30°C 近くとなった。

2.2 実験方法

(1) 実験項目

Table 4 に実験種類および実験方法を示す。力学的特性に用いた供試体は、圧縮強度、ヤング係数および割裂引張強度試験で φ100×200mm の円柱供試体、曲げ強度試験で 100×100×400mm の角柱供試体とした。なお、材齢は 28 日までとし、所定の材齢で試験を行った。耐久性試験は、乾燥収縮ひずみ、促進中性化および塩水浸漬試験を行った。

(2) 供試体養生方法

供試体の養生は、標準養生 (W) と蒸気養生 (S) を基本とした。ただし、超高強度調合のみ蒸気養生の代わりに恒温恒湿養生 (C) を行った。

(W) : 材齢 1 日まで現場気中養生を行い、脱型後に所定材齢まで 20±2°C の水中にて養生した。

Table 4 Test types and methods

	Test types	Test methods
Mechanical characteristics	Compressive strength	JIS A 1108
	Flexural strength	JIS A 1106
	Splitting tensile strength	JIS A 1113
	Young's modulus	JIS A 1149
Durability	Drying shrinkage strain	JIS A 1129-3
	Accelerated carbonation	JIS A 1153
	Apparent diffusion coefficient of chloride ion	JSCE-G 572

(S) : PC 部材と同一条件の蒸気養生 (前置き 2 時間、昇温速度 20°C/hr、最高温度 50°C にて 1 時間保持後、徐冷) を行った後、恒温恒湿室 (20°C, 60%RH) にて試験時まで養生した。

(C) : 打設後から所定材齢まで恒温恒湿室内にて気中養生した。

(3) 乾燥収縮試験

JIS A 1129-3 のダイヤルゲージ法に準拠し、角柱供試体にゲージプラグを埋め込んで供試体を作製した。標準養生供試体は材齢 7 日まで標準養生を行い、基長を測定後、恒温恒湿室にて 2 次養生を行い、所定の材齢でひずみを測定した。蒸気養生供試体は PC 部材同一条件の蒸気養生後、24 時間後に脱型し、以後は恒温恒湿室内にて 2 次養生を行い、材齢 7 日で基長を測定した。なお、測定は 26 週までとした。

(4) 促進中性化試験

JIS A 1153 に準拠し、二酸化炭素濃度 5% にて材齢 26 週まで促進中性化試験を行った。供試体は乾燥収縮試験に使用した供試体を再利用し、試験開始時まで恒温恒湿室にて養生した。なお、実験水準は F_c=30N/mm² の特殊無機微粉末置換および無置換調合とした。

(5) 塩分浸透性試験

塩水浸漬試験は JSCE-G 572 に準拠し、φ100×200mm の円柱供試体に加工を施し、10%NaCl 水溶液へ 2 年間の浸漬を行った。浸漬後の供試体は深さ方向に 15mm ずつ 5 層に切断し、可溶性塩分量と全塩分量を測定した。可溶性塩分量は、各層の試料を微粉碎後に 50°C の精製水に溶解させ、

Table 5 Results of various strength tests($F_c=30N/mm^2$)

Type		Various strength			Strength increase rate by IP (%)		
		Material age (days)					
		1	14	28	1	14	28
30N -W	f_c	—	53.4	61.1	—	33.6	38.2
	f_b	—	6.00	7.17	—	10.6	11.6
	f_{st}	—	3.73	4.69	—	6.7	35.3
	E_c	—	39.9	44.4	—	12.8	21.6
30N -S	f_c	24.7	49.1	55.2	40.2	43.1	53.2
	f_b	—	5.47	4.96	—	55.4	4.8
	f_{st}	—	3.86	3.73	—	44.0	11.3
	E_c	—	38.0	41.4	—	23.1	26.6
30BS -W	f_c	—	62.4	70.6	—	33.3	35.0
	f_b	—	7.27	8.17	—	22.3	34.8
	f_{st}	—	4.16	5.00	—	15.2	28.1
	E_c	—	42.5	44.3	—	18.1	16.1
30BS -S	f_c	25.2	57.1	60.7	55.8	58.3	61.5
	f_b	—	4.53	5.33	—	22.7	24.8
	f_{st}	—	3.70	4.10	—	37.4	42.0
	E_c	—	42.1	38.2	—	34.8	19.6
30FA -W	f_c	—	58.1	66.1	—	32.1	33.3
	f_b	—	6.51	7.11	—	14.9	25.3
	f_{st}	—	4.25	4.79	—	46.2	48.7
	E_c	—	41.9	45.8	—	9.3	18.3
30FA -S	f_c	27.1	52.5	55.9	33.0	38.8	39.3
	f_b	—	4.45	4.68	—	7.6	9.5
	f_{st}	—	3.45	4.03	—	23.3	41.8
	E_c	—	36.5	36.7	—	10.5	7.6
80H-W	f_c	—	95.6	116	—	—	—
	E_c	—	47.7	49.5	—	—	—

Table 6 Results of various strength tests($F_c=45N/mm^2$)

Type		Various strength			Strength increase rate by IP (%)		
		Material age (days)					
		1	14	28	1	14	28
45N -W	f_c	—	70.5	77.5	—	33.1	34.5
	f_b	—	7.03	8.35	—	16.4	22.6
	f_{st}	—	4.29	4.80	—	17.4	20.1
	E_c	—	43.6	45.1	—	7.4	6.6
45N -S	f_c	34.9	62.4	69.4	40.0	43.2	40.7
	f_b	—	5.03	5.20	—	13.0	9.6
	f_{st}	—	4.08	4.28	—	29.4	31.0
	E_c	—	42.1	42.3	—	17.7	6.1
45BS -W	f_c	—	78.1	83.5	—	18.7	20.2
	f_b	—	8.93	9.69	—	22.9	23.2
	f_{st}	—	4.90	5.61	—	12.5	12.7
	E_c	—	44.1	45.7	—	3.2	2.4
45BS -S	f_c	34.6	71.4	75.5	28.1	35.5	31.2
	f_b	—	5.26	4.96	—	15.3	-7.1
	f_{st}	—	4.28	4.45	—	18.5	18.8
	E_c	—	41.2	41.4	—	12.3	5.6
45FA -W	f_c	—	68.9	76.8	—	22.5	19.2
	f_b	—	7.17	8.67	—	39.4	21.3
	f_{st}	—	4.68	4.91	—	28.8	23.7
	E_c	—	45.2	44.7	—	20.0	8.2
45FA -S	f_c	36.1	60.2	66.1	40.6	26.7	28.3
	f_b	—	4.33	4.50	—	-0.7	-9.6
	f_{st}	—	3.78	4.39	—	19.2	18.1
	E_c	—	43.4	39.8	—	20.8	7.9
80H-C	f_c	31.1	101	105	—	—	—
	E_c	—	46.2	48.4	—	—	—

* f_c : compressive strength (N/mm^2), f_b : flexural strength (N/mm^2), f_{st} : splitting tensile strength (N/mm^2),
 E_c : Young's modulus (kN/mm^2)

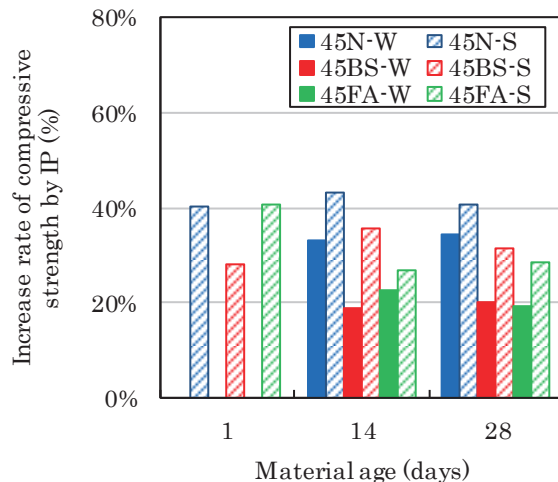
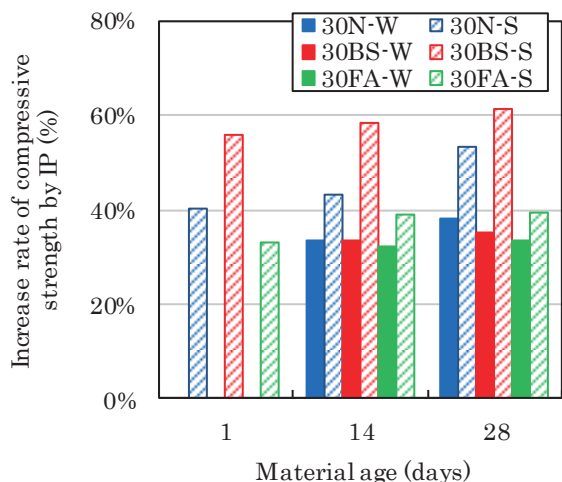


Fig. 1 Increase rate of compressive strength by IP

電極電流測定法 (ソルターC-6 型、(株) レグラス) によって測定した。全塩分量は同様の試料を JCI-SC4 「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法」の硝酸銀滴定法により測定した。試験結果は Fick の拡散方程式の解により帰して見掛けの拡散係数を算出した。

3. 実験結果

3.1 強度試験結果

Table 5, 6 に各強度試験結果と特殊無機微粉末無置換に比較した強度増加率を、Fig. 1 に特殊無機微粉末の置換による圧縮強度増加率を示す。特殊無機微粉末を用いることで、蒸気養生で平均 40% (32~55%)、標準養生で平均 29% (19~36%) 圧縮強度が増加した。これは特殊無機微粉末に SiO_2 や Al_2O_3 が豊富に含まれており、蒸気養生では材齢初期にエトリングタイトの生成やポゾラン反応が促進されたと考えられる。また、圧縮強度増加率に材齢による差は小さい。これより、特殊無機微粉末の反応は材齢初期に集中するこ

とが推察される。曲げ強度、割裂引張強度、ヤング係数について、ばらつきはあるが特殊無機微粉末の置換により向上傾向にある。これらは、特殊無機微粉末が粉末度 $10\text{m}^2/\text{g}$ を超える材料であり、マイクロファイバー効果によりコンクリート構造が緻密化したことも考えられる。

3.2 乾燥収縮ひずみの測定結果

Fig. 2 に特殊無機微粉末の置換および無置換調合における乾燥収縮ひずみの測定結果を示す。図中の測点はそれぞれ材齢 26 週までの測定結果をプロットした。試験結果から、特殊無機微粉末の置換により標準養生で平均 17% (-7~40%)、蒸気養生で平均 34% (20~56%) 乾燥収縮が低減した。これは圧縮強度と同様の傾向にある。設計基準強度と比較すると、 $F_c=45\text{ N/mm}^2$ より $F_c=30\text{ N/mm}^2$ の方が特殊無機微粉末による効果大きい。これは特殊無機微粉末の置換量を各調合 20kg/m^3 で統一しており、 $F_c=30\text{ N/mm}^2$ の方がセメントに対する特殊無機微粉末の置換率が大きいいため効果も高くなったと考えられる。混和材種類別に比較す

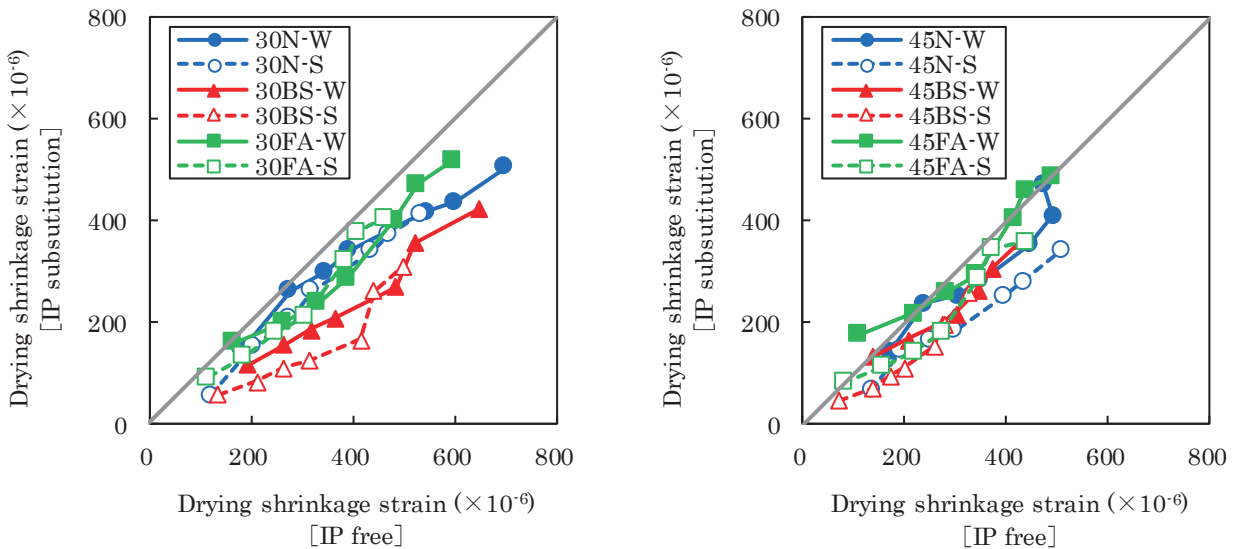


Fig. 2 IP effect on drying shrinkage strain

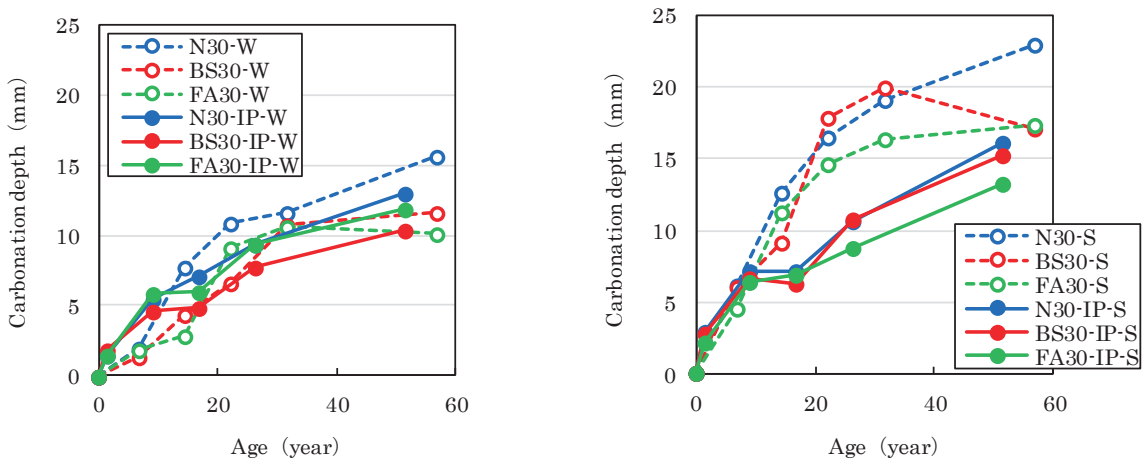


Fig. 3 Carbonation depth

ると、フライアッシュ使用割合は特殊無機微粉末の効果が小さい。この理由として、フライアッシュと特殊無機微粉末の成分構成が近いためと考えられる。

3.3 促進中性化試験結果

Fig. 3 に促進中性化試験による中性化深さを、Fig. 4 に中性化速度係数を示す。Fig. 3 の材齢について、促進中性化試験における二酸化炭素濃度 5%は、一般大気中における二酸化炭素濃度 0.05%の 100 倍の期間に相当するため⁽³⁾、換算値で表記した。

試験結果より、特殊無機微粉末を置換したいずれの割合においても中性化速度係数は低下した。特殊無機微粉末は、ポゾラン反応により水酸化カルシウムを消費し中性化を進行させる効果と、ポゾラン反応およびマイクロファイラー効果によりコンクリートを緻密化し中性化を抑制させる効果の相反性を有する。本実験の範囲内では、特殊無機微粉末は中性化の抑制に有効である結果となった。また、フライアッシュや高炉スラグ微粉末等の混和材使用割合は一般的に中性化し易いとされているが⁽⁴⁾、同一の設計基準強度で比較すると普通セメント割合と同等以上の中性化抵抗性を有することが認められた。養生別と比較すると、標準養生の中性化速度係数が小さい。蒸気養生に比べて標準養生は水

和が促進され、特に表層部のコンクリートが緻密化したと考えられる。

3.4 塩分浸透性試験結果

Fig. 5 に塩分浸透量の測定結果を、Fig. 6 に見掛けの拡散係数と塩分固定化率との関係を示す。なお、Fig. 5 の凡例末尾 A は電極電流法の試験結果を、凡例末尾 B は硝酸銀滴定

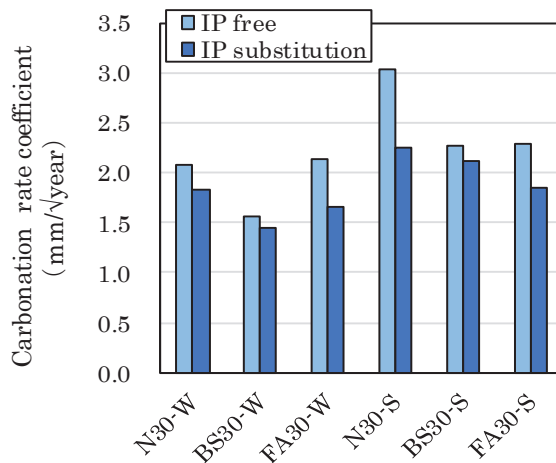


Fig. 4 Carbonation rate coefficient

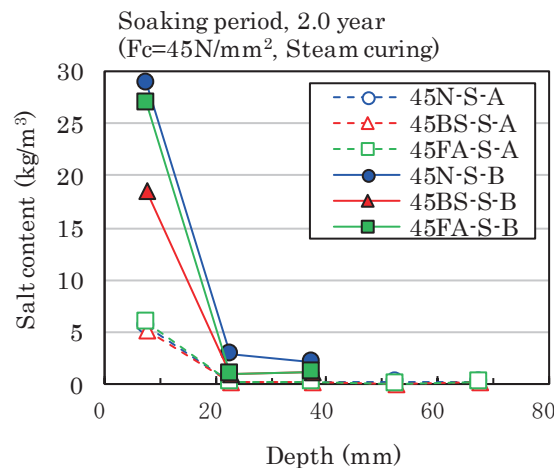
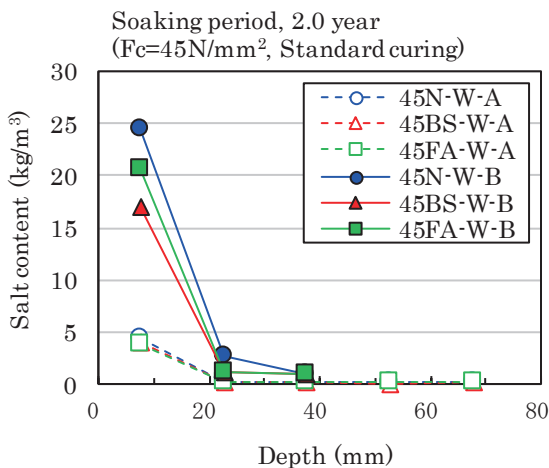
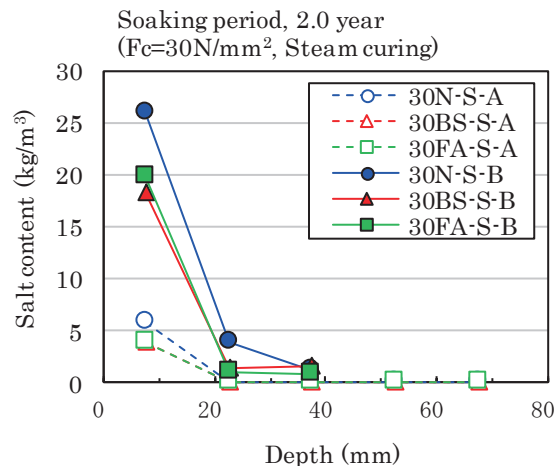
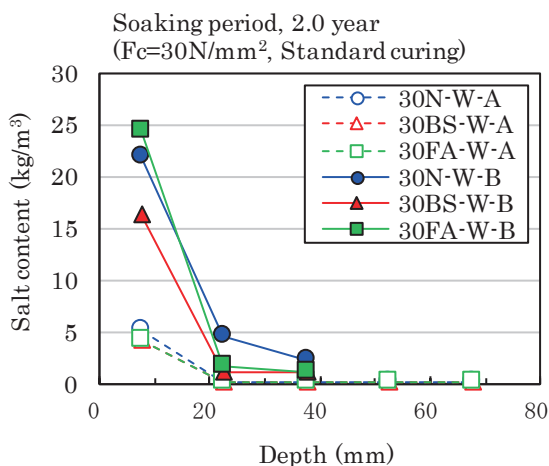


Fig. 5 Salt content

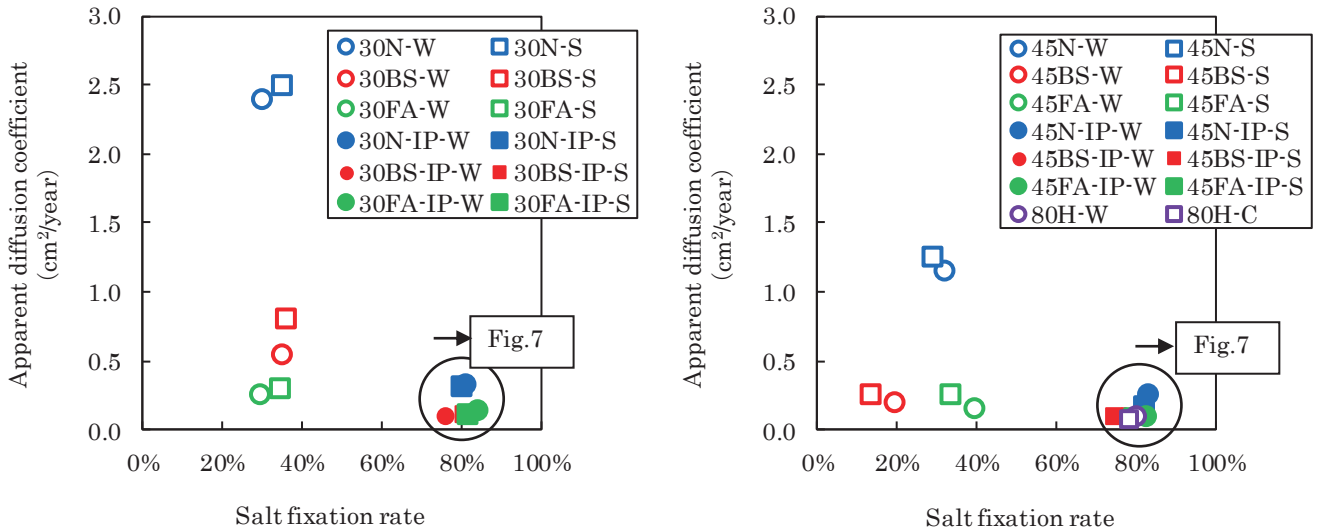


Fig. 6 Relationship between apparent diffusion coefficient and salt fixation rate

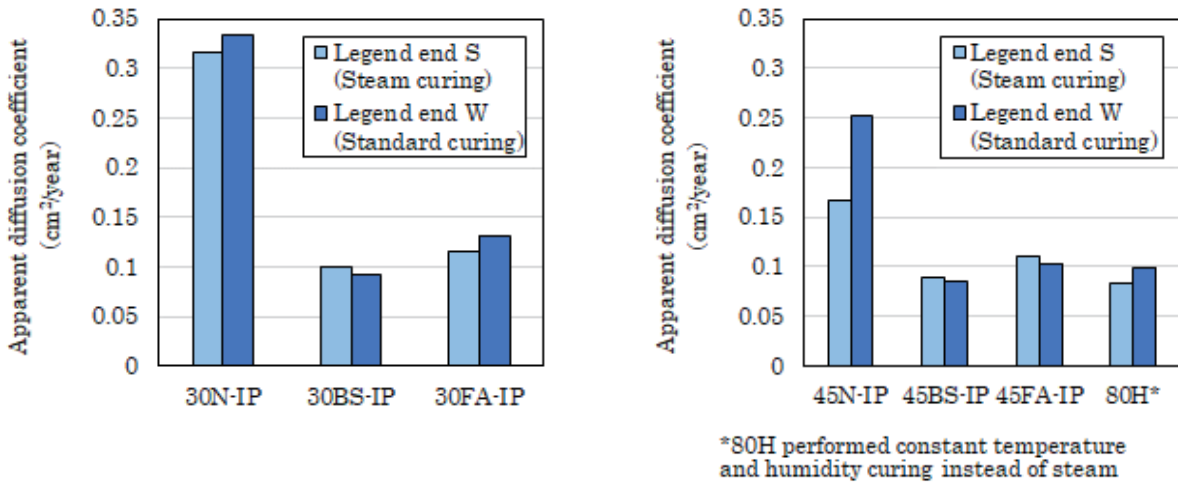


Fig. 7 Apparent diffusion coefficient of IP formulation

法の試験結果を示す。硝酸銀滴定法は、塩分の浸透が顕著であった3層目まで(～45mm)を測定した。塩分固定化率について、式(1)に算出方法を示す。本研究では3層目までの測定値を累計した全塩分量(硝酸銀滴定法)から可溶性塩分量(電極電流法)を差し引いた値を固定化塩分量とし、全塩分量に対する比として求めた。

$$\alpha_{\text{fixed}} = \{ (C_{\text{tot}} - C_{\text{sol}}) / C_{\text{tot}} \} \times 100 \quad \dots (1)$$

ここに、 α_{fixed} : 塩分固定化率 (%)

C_{tot} : 全塩分量 (kg/m³)

C_{sol} : 可溶性塩分量 (kg/m³)

試験結果より、塩分固定化率は特殊無機微粉末無置換の調合で20～40%程度であるのに対し、置換調合は80%程度となり2倍以上に増加した。これは特殊無機微粉末中の未

水和 Al₂O₃ によるフリーデル氏塩生成およびマイクロファイラー効果により緻密化した細孔構造への吸着が原因として考えられる。しかし、置換調合について、材齢初期に未水和 C₃A の反応が進んだと仮定した場合、フリーデル氏塩の生成が無置換調合のそれより多いかは本研究から判断できず、今後の検討課題である。また、超高強度調合も塩分固定化率は80%程度となっているが、シリカフェームには Al₂O₃ がほとんど含まれていないため、フリーデル氏塩の生成量は小さく、細孔構造への吸着が大部分を占めると考えられる。

Fig. 7 に特殊無機微粉末を置換した調合の見掛けの拡散係数を示す。試験結果より、見掛けの拡散係数は特殊無機微粉末の置換により全ての水準において低下し、特殊無機微粉末の有用性が示された。特殊無機微粉末による見掛けの拡散係数の低減効果は、普通セメント調合で最も顕著であった。しかし、特殊無機微粉末を置換したフライアッシュ

ユおよび高炉スラグ微粉末置換調合は、普通セメント調合に比べて見掛けの拡散係数は半分程度となり、混和材置換調合の場合においても特殊無機微粉末は有意であることが明らかとなった。

4. まとめ

本研究では、特殊無機微粉末が耐塩害性能および各種物性に与える影響を実験的に検討した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 特殊無機微粉末のセメントへの一部置換により、塩分の固定化が促進され、塩化物イオンの見掛けの拡散係数が低下し、特殊無機微粉末による耐塩害性能の向上が認められる。
- 2) 特殊無機微粉末による塩化物イオン見掛けの拡散係数の改善効果は、普通セメント調合、高炉スラグ微粉末使用調合、フライアッシュ使用調合の順であった。しかし、数値としては普通セメント調合に比べて高炉スラグ微粉末およびフライアッシュ使用調合が優れる。
- 3) 圧縮強度および乾燥収縮ひずみの測定結果より、特殊無機微粉末の反応は養生初期に集中するため、蒸気養生を行って反応を促進させた方が特殊無機微粉末による改善効果は大きくなる。

塩分浸透抵抗性について、見掛けの拡散係数は浸漬期間を長くするほど低下するとされており、今後も継続して試験を実施する予定である。

謝辞

本実験における促進中性化試験を実施するにあたり、大分大学工学部の大谷俊浩教授、秋吉義忠助教に多大なご協力をいただきました。また、塩分量測定にあたり、生物化学システム工学技術専門職員の前田有希、吉原学志両氏に多大な協力を賜りました。なお、九電産業（株）よりフライアッシュの提供をいただきました。ここに記して感謝申し上げます。

(令和2年9月25日受付)

(令和2年12月7日受理)

参考文献

- (1) 浦野登志雄, 松田学, 松本康資, 久野俊文:「フライアッシュまたは高炉スラグ微粉末を混和材に用いたプレキャスト部材用コンクリートの強度特性および塩分浸透性について」, セメント・コンクリート論文集, Vol.69, pp311-318, 2015
- (2) 日本建築学会編:「プレキャストコンクリート工事標準仕様書・同解説 (JASS)」, 6節 部材に用いるコンクリートの調合, pp.101-122, 2003
- (3) 日本建築学会:「鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針・同解説」, 第2版, pp.116-117, 2016
- (4) 中村英佑, 石井豪, 渡辺博志:「暴露試験と促進試験に基づく混和材を用いたコンクリートの中性化抵抗性に関する実験的研究」, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp97-102, 2014