

PC 鋼より線破断時の挙動に関する一実験

大島 克仁^{*1}・松原 喜之^{*2}・福田 雅人^{*3}・青木 圭一^{*4}

ポストテンション橋において PC 鋼材が腐食破断し、破断の衝撃による鋼材の突出やコンクリート躯体への悪影響を及ぼすリスクが考えられる。そのため本稿では、PC 鋼より線および被覆 PC 鋼より線（内部充てん型エポキシ樹脂被覆 PC 鋼より線）を用い、腐食破断を想定した素線破断時の挙動確認試験を実施し検証を行った。その結果、いずれの供試体においても、素線が 1 本ずつ切れた場合に、残りの素線が同時に破断することではなく、残り 1 本の素線が破断するまで定着具の飛出しや破損も認められなかった。また素線の破断とともに PC 鋼材の張力は徐々に低下することが分かった。この試験により、PC 鋼より線および被覆 PC 鋼より線の素線が破断に至った場合でも、PC 鋼材が一挙に破断する可能性が低いことが示された。

キーワード：腐食破断、PC 鋼より線、被覆 PC 鋼より線

1. はじめに

1.1 実験の背景および目的

ポストテンション橋において PC グラウトの充てん不足などの要因により PC 鋼材が腐食し、破断に至る事例が報告されている¹⁾。PC 鋼材が腐食により破断に至ると、橋梁の耐久性が損なわれるだけでなく、破断の衝撃により鋼材の突出やコンクリート躯体への悪影響など、重大な損傷やトラブルに繋がるケースも考えられる。PC 鋼より線では PC 鋼棒に比べ、このようなリスクが小さいと考えられるものの、十分に検証されていない。

そこで、PC 鋼より線および被覆 PC 鋼より線（内部充てん型エポキシ樹脂被覆 PC 鋼より線）を用い、腐食破断を想定した素線破断試験を実施することで、腐食破断時の破断挙動の検証を行った。

1.2 供試材の種類および諸特性

試験に用いた PC 鋼材の種類と主な機械的性質を表 - 1 に、外観を写真 - 1 に示す。PC 鋼より線としては、内ケーブルなどの用途で多数適用される 15.2 mm (SWPR7BL) を代表サイズとして選定した。被覆 PC 鋼より線としては、エポキシ樹脂を用いた高機能 PC 鋼材を使用するプレストレストコンクリート設計施工指針 (案)²⁾ に規定される内部充てん型エポキシ樹脂被覆 PC 鋼より線を 15.2 mm 被覆 PC 鋼より線として供試した。21.8 mm 被覆 PC 鋼より線は、近年、開発された内部充てん型エポキシ樹脂被覆 PC 鋼より線の単一ストランドで最大容量の PC 鋼材である。これら被覆 PC 鋼より線は、表面および素線間の隙間がエポキシ樹脂で充てんされた高い耐久性を有する PC 鋼材であるため、通常の使用環境において供用中に腐食が発生する可能性はきわめて低いと考えられるが、今回の実験では万が一施工時に被覆が損傷するなどにより、腐食が発生し素線が

表 - 1 試験に使用した PC 鋼材の種類

種類	径 (mm)	最大試験力 (kN)	0.2 % 永久伸びに対する試験力 (kN)	伸び (%)
PC 鋼より線 (JIS G3536 SWPRBL)	15.2	≥ 261	≥ 222	≥ 3.5
被覆 PC 鋼より線	15.2	≥ 261	≥ 222	≥ 3.5
内部充てん型エポキシ樹脂被覆 PC 鋼より線	21.8	≥ 573	≥ 495	≥ 3.5

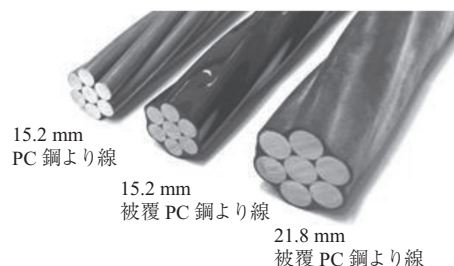


写真 - 1 試験に使用した PC 鋼材の外観

破断した場合を想定して破断挙動の検証を行うこととした。

2. 素線破断試験の方法

2.1 試験装置

素線破断試験の概要図を図 - 1 に示す。試験は、緊張用の鋼製ベンチに配置した PC 鋼材を緊張ジャッキにより初期緊張力 (0.6 Pu) を与え、伸びを一定に保った状態で、PC 鋼材中央付近を破断することにより実施した。

2.2 素線破断方法

素線の破断は、隣接する素線が損傷しないよう試験状況に応じて、写真 - 2 に示すマイクログラインダーおよびハンドグラインダーの切断工具を用い、素線に切り込みを与えることにより行った。素線破断の順序およびひずみゲージを貼り付けた素線を表 - 2 に示す。PC 鋼より線を用いた破断試験では、破断順序による影響の検証のため、2

^{*1} Katsuhito OSHIMA : 住友電工スチールワイヤー (株) PC 技術部

^{*2} Yoshiyuki MATSUBARA : 住友電工スチールワイヤー (株) PC 技術部

^{*3} Masato FUKUDA : 西日本高速道路 (株) 技術環境部 構造技術課

^{*4} Keiichi AOKI : 中日本高速道路 (株) 名古屋工事事務所 所長

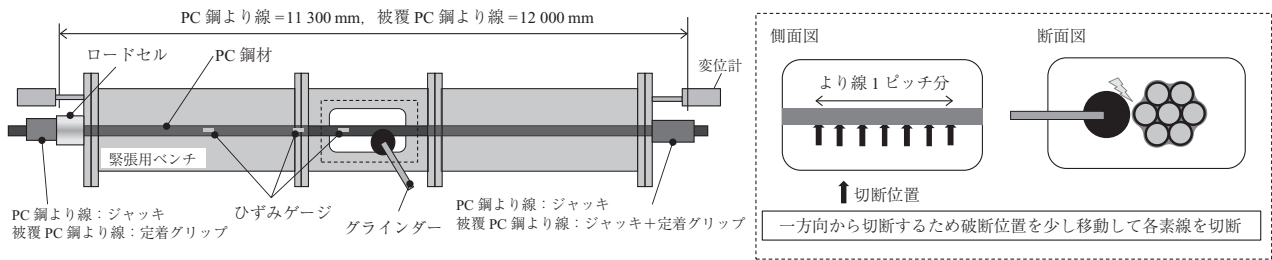


図 - 1 試験装置の概要

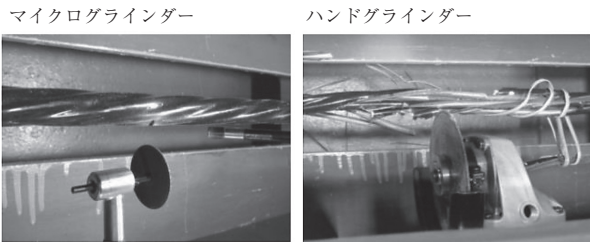


写真 - 2 切断工具

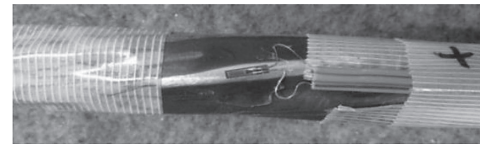


写真 - 3 ひずみゲージ貼付け例

表 - 2 素線破断順序

PC 鋼より線 (15.2 mm)		被覆 PC 鋼より線 (15.2, 21.8 mm)
条件①	条件②	
同一方向から破断	中心線に対称に破断	

素線に記載した番号は破断順序を示す
 ■ ひずみゲージ

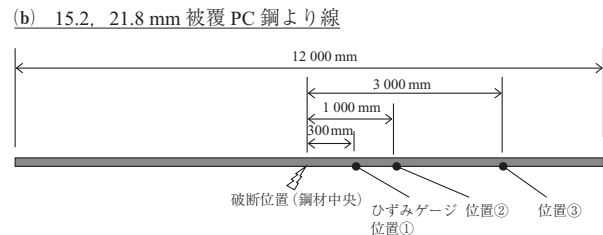
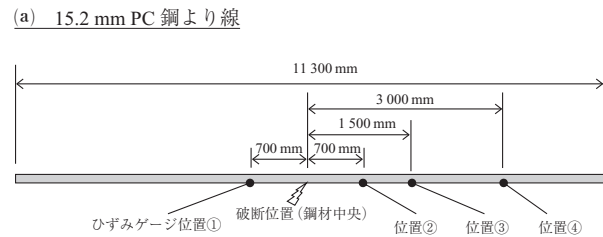


図 - 2 ひずみゲージ貼付け位置

種類の破断順序の条件で試験した。

2.3 計測および確認項目

計測項目を表 - 3 に、ひずみゲージの貼付け箇所を図 - 2 に示す。本試験では各素線を破断させた際の荷重およびひずみを記録した。ひずみを正確に計測するため、ひずみゲージをより方向に合せて各素線に貼り付けた。被覆 PC 鋼より線では、写真 - 3 に示すように計測箇所のエポキシ樹脂をサンドペーパーで除去したのち、ひずみゲージの貼付けを行った。15.2 mm PC 鋼より線に対して各条件を 3 体、15.2 および 21.8 mm 被覆 PC 鋼より線に対して各 2 体の試験を実施した。

表 - 3 計測および確認項目

項目	計測方法	計測箇所	
		PC 鋼より線	被覆 PC 鋼より線
荷重	ロードセル	図 - 1 参照	
ひずみ	ひずみゲージ	外層線 6 本の内 4 本に 4 箇所 (破断位置から両側 700 mm, 1 500, 3 000 mm) ずつ貼付け	各外層線に 3 箇所 (破断位置から 300, 1 000, 3 000 mm) ずつ貼付け
外観観察	目視	PC 鋼材全長の損傷状況	PC 鋼材全長の損傷状況 定着グリップの破損状況
緊張用ベンチの変形	変位計	ベンチ両端側、緊張方向の変形を計測 図 - 1 参照	

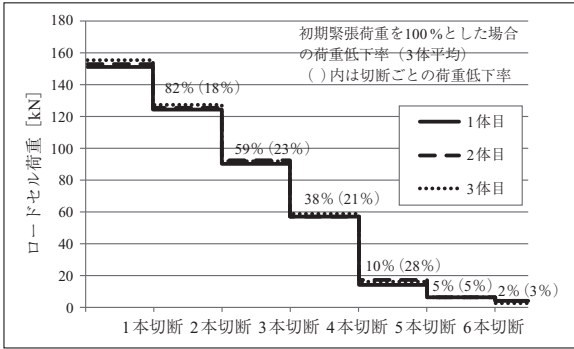
3. 試験結果

3.1 15.2 mm PC 鋼より線

15.2 mm PC 鋼より線を 0.6 Pu (= 157 kN) の荷重で緊張したのち、荷重が安定してから素線への切込みを開始した。素線を 1 本切断し、約 10 秒間データを計測した 2 分後に次の素線を破断させる工程を、全素線が破断に至るまで繰り返した。素線破断ごとの荷重低下の推移を図 - 3 に、ひずみ計測結果を図 - 4 に示す。

すべての条件の試験において、15.2 mm PC 鋼より線の各素線を破断させた際に、残りの素線が進行して破断することはなく、2 分間保持後も他の素線に変化は認められなかった。緊張用ベンチの変位量は、最大 0.35 mm (張力換算 0.9 kN) と無視できるレベルであり、ほぼ変位一定の条件で本試験を実施できたものと考えている。ジャッキウェッジ近傍において、最終の素線が破断するまで、素線の拔出しや鋼材の滑りはなく、定着部を原因とする荷重の低下は認められなかった。

(a) 条件① 同一方向から破断



(b) 条件② 中心線を対称に破断

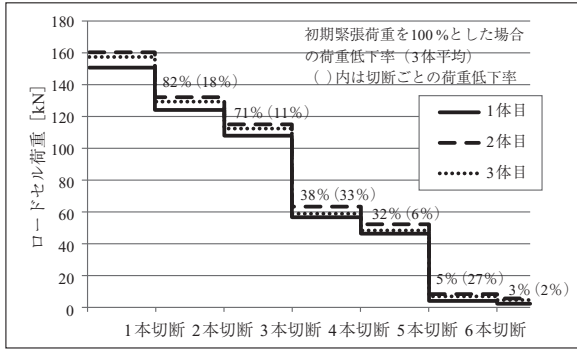
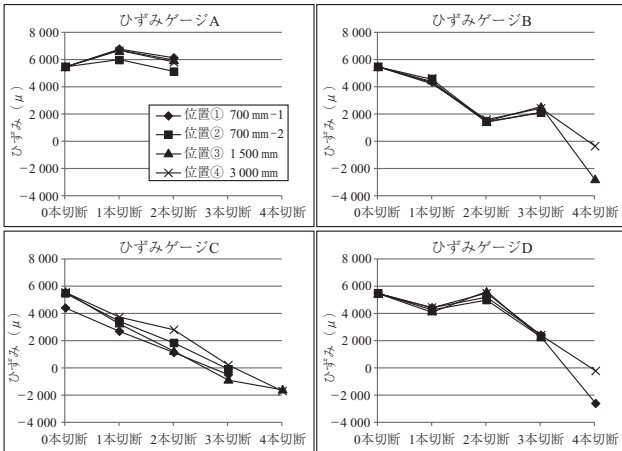


図 - 3 素線破断ごとの荷重低下推移 (15.2 mm PC 鋼より線)

(a) 条件① 同一方向から破断



(b) 条件② 中心線を対称に破断

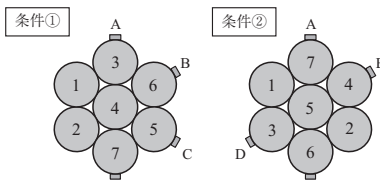
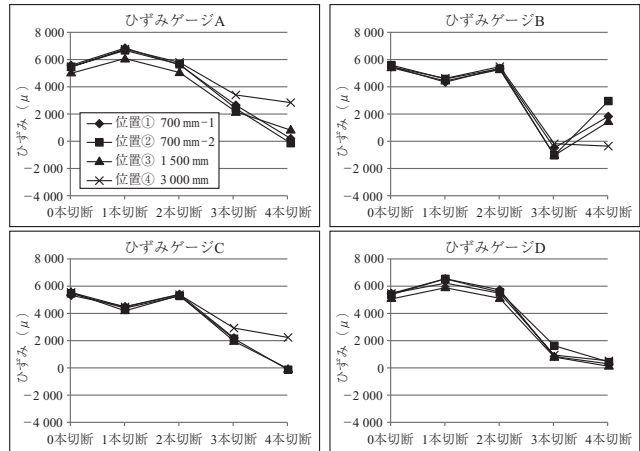


図 - 4 ひずみ計測結果 (15.2 mm PC 鋼より線)

図 - 3 および図 - 4 の結果より、切断順序によって荷重およびひずみの挙動が異なっており、2 本目切断時点での残存荷重が条件①に比べ条件②の方が大きくなっていることが分かる。図 - 5 にひずみ計測結果から推定される各素線の張力を示す。素線 1 ~ 2 本目破断時の挙動は、側線が破断した際、中心線を対称に反対側の素線のひずみが小さくなり、荷重が小さくなった。また、破断した素線の負荷は近接する素線に移り、荷重が増加する挙動を示した。これらの挙動により、中心線に対称に各素線を破断する条件②の方が切断時の荷重の低下率が小さく、条件①の荷重低下が早く生じたものと推察される。

3 本目以降の破断においては、破断した素線の隙間に残りの側線および中心線が入り込み、元のより線から崩れた形状を形成した (図 - 6)。5 本目破断後の残存荷重は 5.0 ~ 8.1 kN であり、これは形状が崩れ、残りの素線が伸びたことによるものと考えられる。

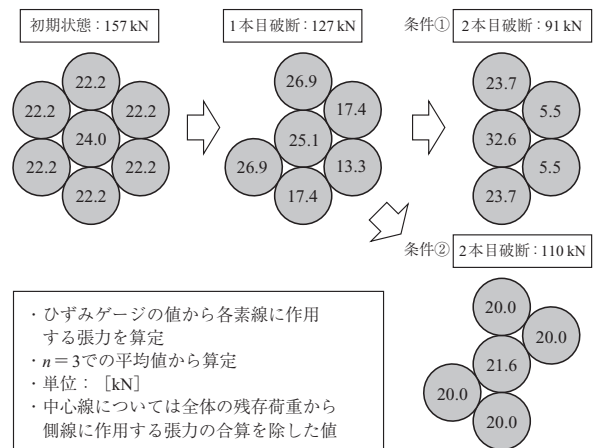


図 - 5 ひずみから想定される各素線に作用する張力

	破断状況写真	断面
破断前		
1本破断		
2本破断		
3本破断		
4本破断		
5本破断		

図 - 6 破断状況 (15.2 mm PC 鋼より線)

3.2 15.2 mm 被覆 PC 鋼より線

15.2 mm 被覆 PC 鋼より線の試験は、前述の 15.2 mm PC 鋼より線と同様に 0.6 Pu (= 157 kN) の荷重で緊張したのち、荷重が安定してから素線への切込みを実施した。素線の切断は、素線ごとに行い、荷重およびひずみが安定する

まで保持したのちに、次の素線を切断する工程を全素線が破断に至るまで繰返し行った。素線破断ごとの荷重低下の推移を図 - 7 に、ひずみの計測結果を図 - 8 に示す。

2 体の試験を行った結果、7 本の素線すべてが破断するまで、残りの素線すべてが同時に破断しない結果であった。破断時の挙動は、1～3 本目までの荷重低下量は小さく、4 本目以降の破断で大きな荷重低下を示した。また、素線 1～6 本目の破断まで定着グリップの飛び出しおよび破損は認められなかった。6 本目破断後の残存荷重は 1 体目は 20.3 kN、2 体目は 20.5 kN であった。なお、緊張用ベンチの変位量は最大 0.75 mm (張力換算 1.7 kN) と十分に小さく、計測への影響は小さいものとする。

1 体目の試験では、7 本の各素線が順次破断する挙動を示したが、2 体目の試験では、4 本目切断時に 6 本目切断予定の鋼材が同時に破断した。これは 6 本目切断予定の素線破断部の近傍にグラインダーによる損傷があったことから、1 本目ないしは 3 本目の切断時に 6 本目切断予定の素線が損傷してしまったことが要因と考えられる。

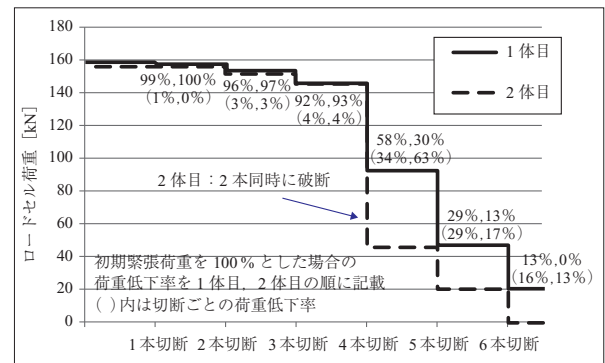


図 - 7 素線破断ごとの荷重低下推移 (15.2 mm 被覆 PC 鋼より線)

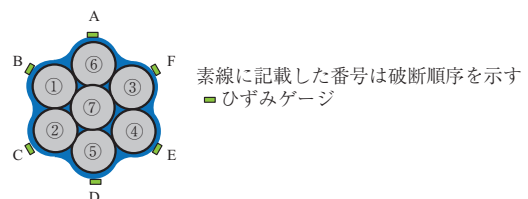
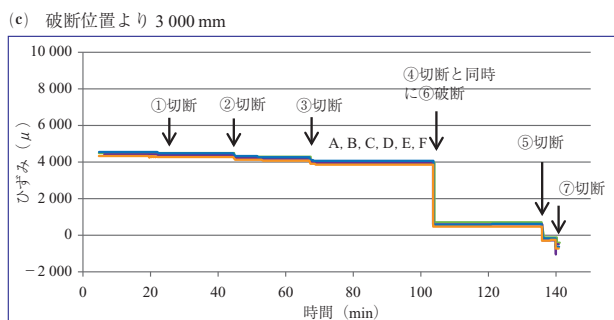
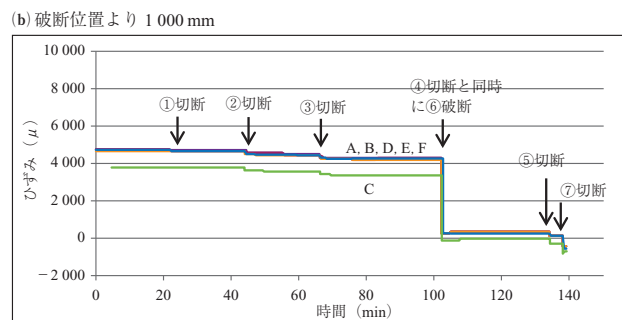
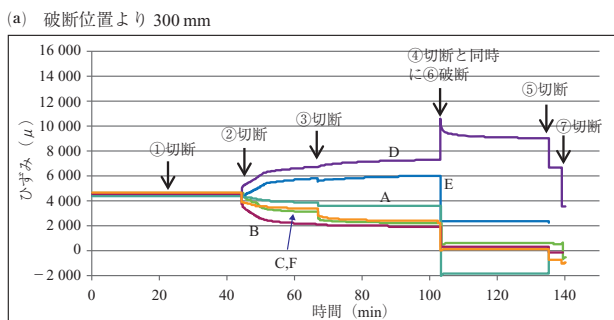


図 - 8 ひずみ計測結果 (15.2 mm 被覆 PC 鋼より線 2 体目の試験結果例)

○ 研究報告 ○

各素線のひずみ計測結果から、2本目破断以降に破断位置近傍(300 mm)の一部の素線において、ひずみ増加が認められた。その値は4本目もしくは5本目切断時点で最大となり、約10 000 μであった。一方で破断位置から1 000 mm以上離れた位置のひずみは、全素線が同様の挙動を示し、PC鋼材全体の荷重低下と同じ傾向を示した。

これらの挙動としては、1～3本目破断時の破断位置近傍において、破断した素線に作用していた応力を、残りの素線が負担することで局所的な伸びが大きくなった結果、PC鋼材全体としては張力が若干量低下したものと推察される。4～6本目破断時には、各素線のひずみの値は小さく応力が低いため、いずれかの素線1本が破断した場合でも残りの素線が同時に破断せず、素線破断ごとに荷

重が低下する挙動を示したものと考えられる。

3.3 21.8 mm 被覆 PC 鋼より線

21.8 mm 被覆 PC 鋼より線の試験は、前述の 15.2 mm PC 鋼より線と同様に 0.6 Pu (= 344 kN) の荷重で緊張したのち、荷重が安定してから素線破断試験を実施した。素線破断ごとの荷重低下の推移を図 - 9 に、ひずみの計測結果を図 - 10 に、破断状況を写真 - 5 に示す。

2体の試験を行った結果、7本の素線すべてが破断するまで、残りの素線すべてが同時に破断しない結果であった。破断時の挙動は、15.2 mm PC 鋼より線と同様に1～3本目までの荷重低下量は小さく、4本目以降の破断で大きい荷重低下を示した。また、素線1～6本目の破断まで定着グリップの飛出しおよび破損は認められなかった。6本目破断後の残存荷重は1体目は65.3 kN、2体目は66.7 kNであった。なお、緊張用ベンチの変位量は最大1.96 mm(張力換算8.9 kN)と十分に小さい値であった。

1体目の試験では、4本目切断時に6本目切断予定の鋼材が同時に破断した。これは6本目切断予定の素線破断部

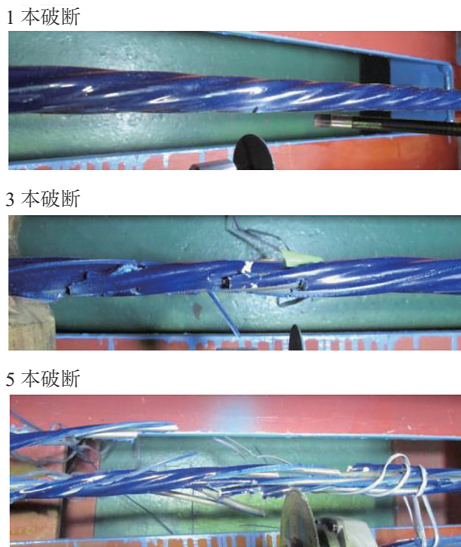


写真 - 4 破断状況 (15.2 mm 被覆 PC 鋼より線)

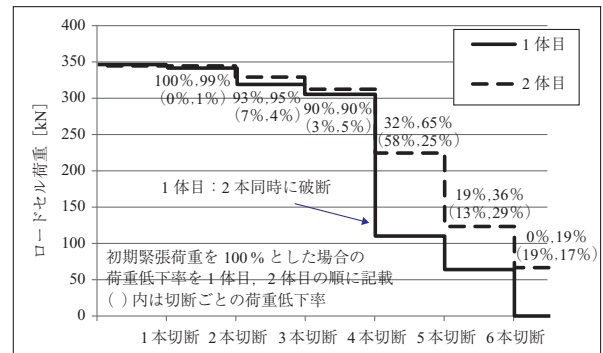


図 - 9 素線破断ごとの荷重低下推移 (21.8 mm 被覆 PC 鋼より線)

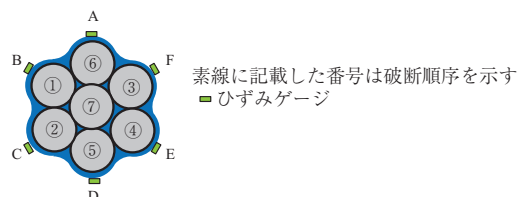
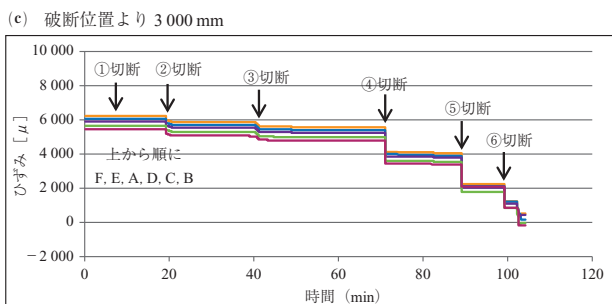
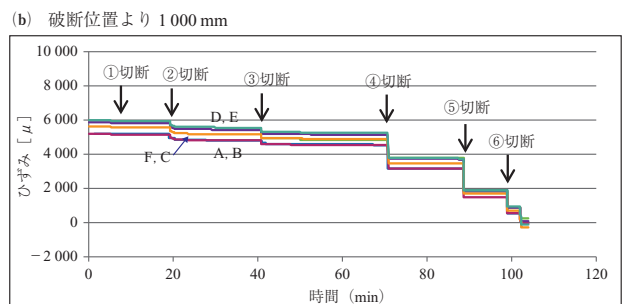
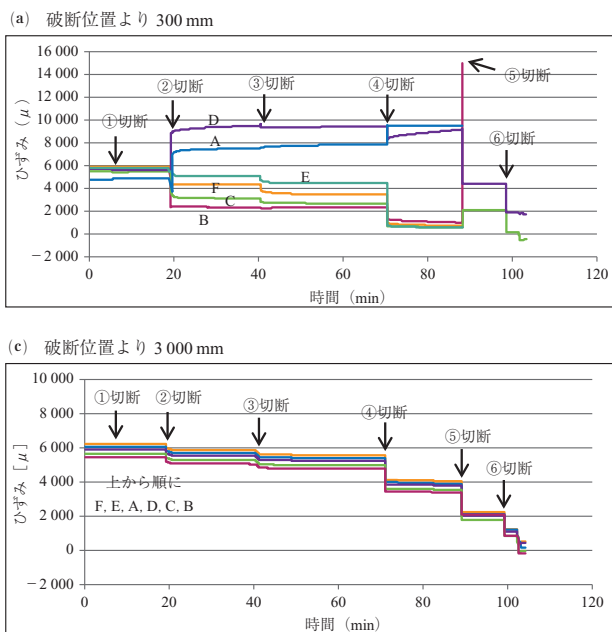
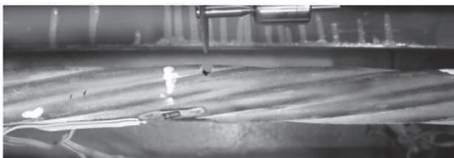


図 - 10 ひずみ計測結果 (21.8 mm 被覆 PC 鋼より線 2体目の試験結果例)

にグラインダーによる損傷があったことから、1本目ないしは3本目の切断時に6本目切断予定の素線を損傷してしまったことが要因と考えられる。2本目の試験では、7本の素線各々が順次破断する挙動を示した。

各素線のひずみ計測結果は、前述の15.2 mm PC鋼より線と同様のひずみの傾向を示し、4本目もしくは5本目破断時点でひずみが最大となり、約15 000 μ であった。

1本破断



3本破断



5本破断



写真 - 5 破断状況 (21.8 mm 被覆 PC 鋼より線)

4. ま と め

15.2 mm PC鋼より線および15.2, 21.8 mm 被覆 PC鋼より線 (内部充てん型エポキシ樹脂被覆 PC鋼より線) を用い、腐食破断を想定した素線破断時の挙動確認試験を実施した。結果をまとめると以下のとおりである。

- ・いずれの供試材においても、素線に1本ずつ切込みを入れ破断させた場合に、残りの素線すべてが同時に破断することはなく、残り1本の素線が破断するまで定着具の飛出しや破損は認められなかった。
- ・本試験では合計10体の試験を行ったが、素線1本が破断したケースおよびグラインダーでの損傷により素線2本が破断したケースでも、全素線が一挙に破断するような事象は発生しなかった。

・PC鋼より線の素線破断時の挙動は、素線の破断ごとに段階的に荷重が低下する傾向を示した。

・被覆PC鋼より線の素線破断時の挙動は、1～3本目の素線破断まではほとんど荷重低下せず、4本目ないしは5本目で大きな荷重低下が認められた。以降の素線破断時において、いずれかの素線1本が破断した場合でも、残りの素線が同時に破断しない結果であった。

以上の結果から、下記のように考察を行った。

PC鋼より線において、素線破断ごとに均等に荷重が低下するものと予想していたが、本試験により段階的に荷重は低下するものの、より線形状の崩れなどによって均等に荷重が低下しないことが分かった。実際の構造物で腐食などにより破断が確認された場合は、素線がどのように破断しているかを確認し、本試験で得られた荷重低下の結果を考慮することで、残存しているプレストレス力について定量的に評価することが可能であると考えられる。

また、被覆PC鋼より線において、たとえばエポキシ被覆が損傷し、それが見逃されて補修されることなく腐食し素線の破断に至った場合でも、構造系全体が大変形を起こすケースを除き、被覆PC鋼より線が一挙に破断する可能性は低いものと考えられる。

一方で、本試験は供試材の中央をグラインダー切断することによる模擬試験であるが、実際の構造物で腐食破断に至るケースでは、本試験のように局所的に切込みが入る状況ではなく、PC鋼材のいたる所で腐食が進行することが予想される。しかし、被覆PC鋼より線の本試験において、2本の素線が同時に破断した場合でも残りの素線が破断しない結果であることから、実際の構造物においても、PC鋼材が一挙に破断する可能性は低いものと考えられる。

最後に、本稿はPC鋼より線および被覆PC鋼より線の腐食破断によるPC鋼材の破断挙動を実験的に調査したものであり、今後も必要に応じて調査を進めていく所存である。

参考文献

- 1) プレストレストコンクリート工学会：PC構造物の戦略的メンテナンスに向けて－第43回PC技術講習会－，2015
- 2) 土木学会：エポキシ樹脂を用いた高機能PC鋼材を使用するプレレストレストコンクリート設計施工指針 (案)，2010

【2016年7月26日受付】