

グラウト充填状況の異なるPC部材の腐食促進によるPC鋼材破断実験

(株)日本ピーエス 正会員 ○栗原 勇樹
オムロンソーシアルソリューションズ(株) 樋上 智彦
西日本高速道路エンジニアリング関西(株) 河田 直樹
西日本高速道路(株) 正会員 福田 雅人

Abstract : This paper describes that the break properties of PC tendon and the applicability of detecting it by a sensor. The specimens are imitated the post-tensioned PC member and they have various grout filling condition. The PC tendon is broken by the electric corrosion. In addition, the impact waves and frequency of them are obtained by the acoustic sensors. The results support that the impact, frequency and breaking surface depend on the difference of the PC tendon type and the filling condition of the grout. The results suggest that there exists the necessity of more consideration about where to install sensors.

Key words : Breaking property, Electric corrosion, PC tendon, Grout filling condition, Acoustic sensor

1. はじめに

ポストテンション方式のPC橋では、グラウトの充填不足に伴ってシース内部に水や塩分が侵入し、シース内のPC鋼材が腐食し、場合によって破断する可能性がある。PC鋼材の破断はPC橋の耐荷力に影響することから、コンクリート内部にあるPC鋼材の腐食や破断の状態を把握することがPC橋の維持管理において重要となる。しかし、コンクリートの外観から内部のPC鋼材の状態を把握することは困難であり、PC鋼材の破断をセンサーなどによって検知するモニタリング技術^{たとえば1)}の適用が望まれる。供用中のPC橋においてPC鋼材の破断検知技術を適用していくためには、PC鋼材の破断時の現象や破断に伴って発生する衝撃波について、グラウト充填状況やPC鋼材種類の違いによる特徴を把握しておく必要がある。

そこで、本稿では、グラウト充填状況の異なるポストテンションPC部材を模擬した梁供試体を製作し、電食による腐食促進実験を行ってPC鋼棒とPC鋼より線を破断させ、グラウト充填状況やPC鋼材種類の違いによるPC鋼材の破断時の特徴について検討した。また、音響センサー(以下、ハイドロホン)を用いてPC鋼材の破断時の衝撃波を計測し、破断検知技術の適用性について確認した。

2. 実験概要

2. 1 供試体概要

本実験に用いた供試体の種類を表-1に、供試体図を図-1に示す。供試体は、長さ5000mm、幅250mm、高さ500mmの矩形の梁部材である。供試体の下面から160mmの高さの位置にシースと2種類のPC鋼材(PC鋼棒、PC鋼より線)を配置し、3種類のグラウト充填状況(充填、一部充填不足、未充填)を模擬した6体を製作した。PC鋼材を腐食破断させることを目的としていることから、鉄筋と定着具はエポキシの塗装によって防錆処理を行った。

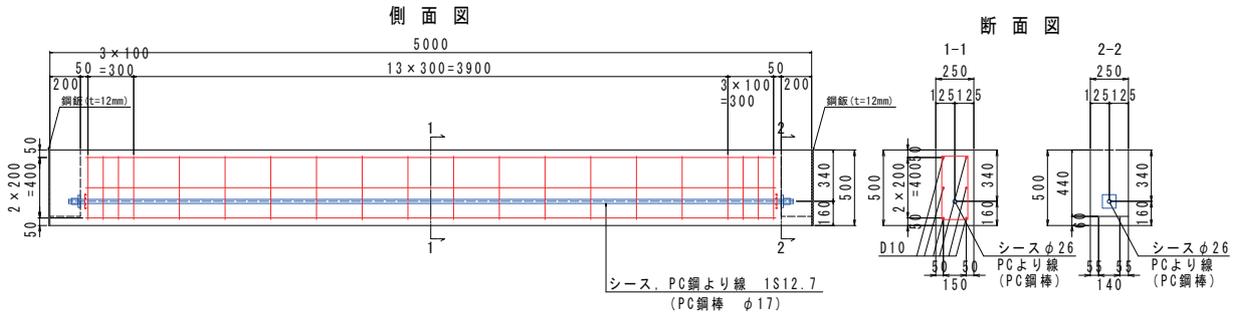
PC鋼材の緊張は、初期引張応力度を許容応力度の90%前後に設定して実施した。緊張完了後、グラウト充填供試体と一部充填不足供試体にグラウト注入を行った。グラウト混和剤は低粘性型を使用し、腐食促進のため練混ぜ水に3%のNaCl溶液を用いた。なお、一部充填不足供試体は、充填供試体に対し

て半分の量のグラウトを注入し、シース断面上方に連続した空隙が生じるように供試体を製作した。

緊張定着切欠き部のあと埋めには無収縮モルタルを用いた。なお、腐食促進実験中は計測のための電源設備が必要となり、雨掛かりのない建屋（プレファブ小屋）内で実施することから、PC鋼材破断時の突出による建屋の倒壊を防止するため、供試体端部に厚さ12mmの鉄板を設置して補強した。

表－１ 供試体の種類

供試体名	コンクリート	PC 鋼材		シース	グラウト
	強度(N/mm ²)	鋼材種類	鋼材径	シース径	充填状況
B-1	50	PC 鋼棒	φ 17	φ 26	充填
B-2					一部充填不足
B-3					未充填
S-1		PC 鋼より線	1S12.7	φ 26	充填
S-2					一部充填不足
S-3					未充填



図－１ 供試体図

2. 2 予備実験

腐食促進実験では、PC鋼棒、PC鋼より線いずれも電食によって破断するまでの期間を1か月以内として目標設定した。しかし、目標期間内にPC鋼材を破断させるための電食方法や通電量などが不明であったことから、事前に予備実験を行って電食期間と腐食量を確認することとした。

電食方法は、既往の文献²⁾を参考に、図－2に示すように、直流安定化電源を使用して、PC鋼材に陽極を、供試体下面に設置した5%NaCl溶液の入った水槽内の銅板に陰極をそれぞれ接続し、吸水スポンジによって供試体下面からの吸水範囲に電流が流れるようにした。また、シース内のグラウト未充填部には3%NaCl溶液を満たした。電流量の仮定値は、既往の文献^{3),4)}を参考に、PC鋼材の質量減少率が10%で引張強度が30%減少するものと仮定して、吸水スポンジの幅(10cm)あたりの質量減少率が10%相当となる腐食量から積算電流量を算出し、腐食期間(28日(672時間))で除した値とした。その結果、PC鋼棒で0.03A、PC鋼より線で0.02Aとなった。予備実験開始時においては、直流安定化電源の最大電圧(16V)に対して0.09A程度の電流を確認し、定電流0.02~0.03Aで通電を開始した。予備実験の状況を写真－1に示す。

予備実験供試体は腐食促進実験と同じ配合のコンクリートとグラウトを使用し、PC鋼材の緊張を行わず、通電開始から1週間後に未充填供試体のPC鋼材を取り出して腐食状態を確認した。この結果、まったく腐食が進んでおらず、最大電圧で再度10日間通電を実施したが、表面錆がみられる程度で断面減少を伴う腐食はみられなかった。また、側面からの吸水も加えて吸水範囲を拡大して通電を実施したが、電流の値は変わらなかった。本実験では通常のポストテンション橋を想定して破断検知を検討するために、供試体のシースまでのかぶり厚を100~140mm程度としたことから、吸水面からコンクリ

ート内部に浸透するNaCl溶液の量が想定よりも少なかったことが考えられる。したがって、この方法では電流量が小さく、短い期間でのPC鋼材の腐食促進が実現できないと推測された。

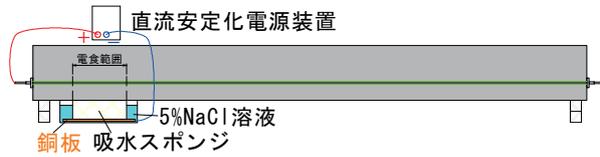


図-2 電食方法の概要

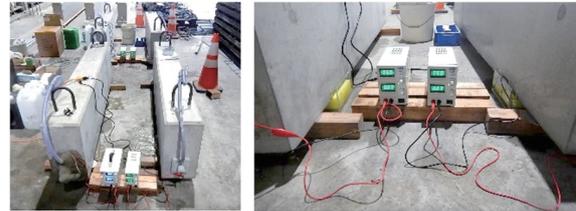


写真-1 予備実験の状況

そこで、今回の腐食促進実験では、図-3に示すように、供試体上面からシース上面までを超音波ドリルを使用してφ30mmで削孔し、この削孔部に5%のNaCl溶液を満たしてアース棒を挿入し、これに直流安定化電源の陰極を接続する電食方法に変更した。この結果、最大電圧(16V)で0.2A程度電流が流れ、未充填供試体ではシースが消失したのち、1A以上の電流が流れることを確認した。

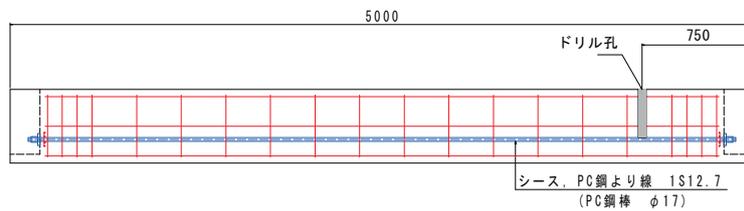


図-3 本実験における電食方法の概要

2.3 実験方法

腐食促進実験では、予備実験の結果を参考に、各供試体の上面からシース上面までを超音波ドリルを用いて削孔し、5%のNaCl溶液を注入したのちに設置したアース棒に陰極を接続し、PC鋼材に陽極を接続した。当初の電流量は最大電圧(16V)相当の電流量(約0.2~0.3A)として実験を開始した。また、図-4に示すように、ハイドロホン(写真-2)を供試体の削孔部から1.0mと3.5mの位置に設置し、データロガーに接続して一定の衝撃が発生した時点で衝撃波を記録するように設定した。データロガーに収録された衝撃波を変換して得られた出力レベルと周波数特性を分析し、PC鋼材の破断検知技術の適用性について検討した。なお、実験中にはネットワークカメラを用いて供試体を常時撮影し、破断時の状況を録画した。腐食促進実験の状況を写真-3に示す。

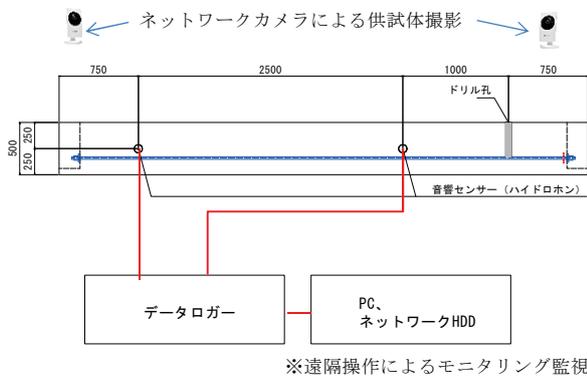


図-4 計測の概要



写真-2 ハイドロホン



写真-3 腐食実験の状況

3. 実験結果

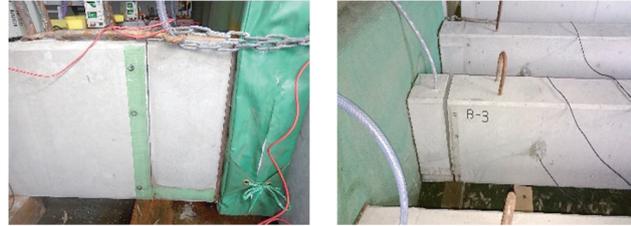
3. 1 破断時の状況

PC鋼棒供試体では、実験開始から約10日後に削孔部では腐食生成物がみられた(写真-4)。また、1A以上の電流が流れたことから、0.8~1A程度の電流が流れるように電圧を調整して通電を継続した。

その後、シースの腐食に伴う消失や、PC鋼棒の腐食の進行とともに電圧の値が下がり、これに伴い約2Aの電流が流れ、実験開始から15日目に一部充填不足供試体(B-2)のPC鋼棒が破断した。PC鋼棒の破断時の突出エネルギーに伴い、あと埋め部の剥離がみられた(写真-5(a))。また、数日後に未充填供試体(B-3)のPC鋼棒が破断した。グラウトによる付着がないことから、B-2供試体よりも破断時の衝撃が大きく、ネットワークカメラの映像から緊張防護板が揺れるほどの衝撃がみられ、あと埋め部が剥離した(写真-5(b))。グラウト充填供試体(B-1)においては、あと埋め部の剥離などの外観変状がみられなかったことから、削孔部を利用してファイバースコープを用いてシーソ内部を確認したところ、グラウトの破砕とPC鋼棒の破断を確認した。ほかの供試体と異なる外観変状となった理由として、グラウト材とPC鋼棒との付着によってPC鋼棒破断時においてもプレストレスが再分配されて突出に至らなかったものと考えられる。



写真-4 腐食生成物の確認



(a) 一部充填不足供試体(B-2) (b) 未充填供試体(B-3)
写真-5 破断時のあと埋め部の剥離状況

PC鋼より線供試体においても、PC鋼棒供試体と同様に腐食生成物がみられ、シーソの腐食に伴う消失や、PC鋼より線の腐食の進行とともに電圧の値が下がり、これに伴い約2Aの電流が流れ、実験開始から9日目以降に各供試体のPC鋼より線の素線の一部が順次破断した。

PC鋼より線供試体では、素線の破断に伴うあと埋め部の剥離はみられず、未充填供試体であと埋め部の継ぎ目に水シミがみられる程度であった(写真-6)。充填供試体においては、PC鋼棒供試体と同様に、グラウト材とPC鋼より線との付着によって、素線の破断時もプレストレスが再分配されて突出に至らなかったものと推察される。また、一部充填不足供試体、未充填供試体においては、素線の一部の破断による突出エネルギーが小さく、素線の破断によってプレストレス力も低下したことが影響しているものと考えられる。

このように、PC鋼材の種類やグラウト充填状況の違いによって、PC鋼材が破断に至るまでの過程や破断時の衝撃など特徴が異なることを確認した。



写真-6 破断時のあと埋め部の状況

3. 2 破断検知の検証

腐食促進実験において、ハイドロホンを用いて計測したPC鋼材破断に伴う衝撃波形を図-5に示す。なお、今回の実験では、データロガーの不具合によってPC鋼棒供試体では一部充填不足供試体(B-2)の波形のみのデータ収録となった。一部充填不足供試体のPC鋼棒とPC鋼より線の波形を一例として示す。

PC鋼棒では破断時の最大出力が10V程度発生しているのに対し、PC鋼より線では2V程度であった。映像や目視によって確認されたPC鋼材種類の違いによる破断時の衝撃を、ハイドロホンを用いることで出力の大きさの違いとして捉えられることを確認できた。また、いずれの供試体もセンサーの設置位

置が破断位置から離れると出力が減衰し、とくにPC鋼より線では素線の段階的な破断となり破断時の出力が小さいことから、破断の検知が困難となる可能性がみられた。

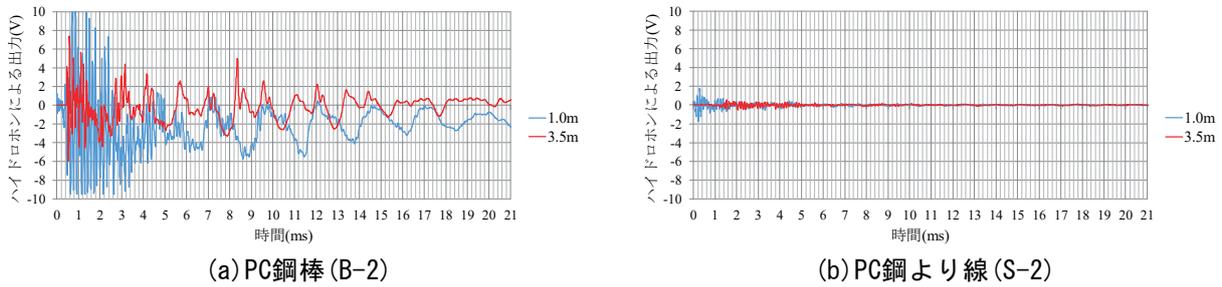


図-5 ハイドロホンによるPC鋼材破断時の出力波形 (一部充填不足供試体)

PC鋼材破断時にハイドロホンで計測された衝撃波の周波数帯域の中でピーク値が発生したときの周波数と高速フーリエ変換によるフーリエスペクトルの関係を図-6に示す。

PC鋼より線に着目すると、破断開始から20.48msecの間の波形データを分析した結果から、未充填供試体(S-3)の周波数帯域が高く出る結果となった。未充填では、グラウトによるPC鋼より線の拘束がないことから、破断時の自由振動周波数が高く、さらに、充填供試体(S-1)、一部充填供試体(S-2)と比較して長時間振動が続いたものと考えられる。また、一部充填不足供試体(S-2, B-2)に着目すると、PC鋼材種類によるフーリエスペクトルは異なるが、衝撃によって発生した周波数はいずれも400~1200Hzの間の高調波としてみられた。

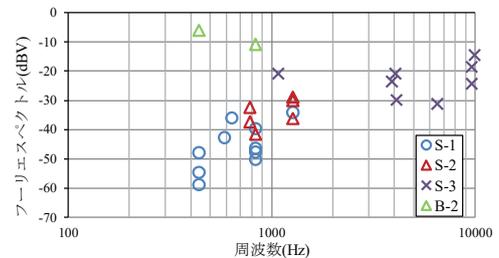


図-6 周波数とフーリエスペクトル

3.3 破断面の状況

腐食促進実験終了後、未充填供試体(B-3, S-3)とあと埋め部が剥離したPC鋼棒の一部充填不足供試体(B-2)について、あと埋め部を解体してPC鋼材を取り出し、破断面の確認を行った。そのほかの供試体はファイバースコープを用いてシース内部のPC鋼材の状況を確認した。

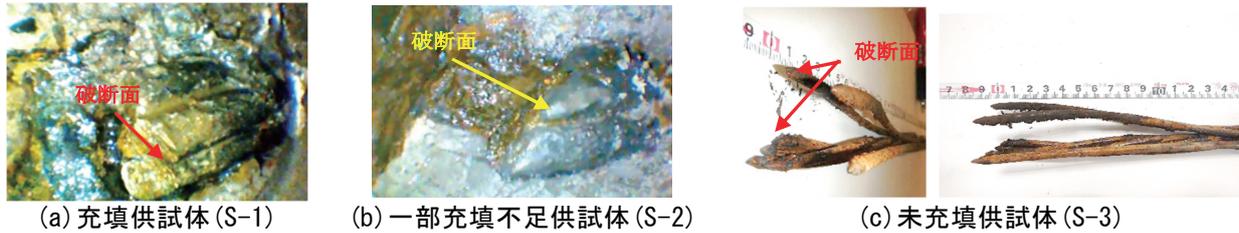
PC鋼棒の破断面の状況を写真-7に示す。PC鋼棒の破断面は、腐食に伴う局所的な断面欠損がみられた。取り出したPC鋼棒では、未充填供試体(B-3)で約35%、一部充填不足供試体(B-2)で約50%の断面欠損がみられた。また、PC鋼棒の破断方向は断面方向となり、充填供試体においてもシース内部のPC鋼棒の状況から同様の傾向がみられ、脆性的な破断であったと推察される。



写真-7 PC鋼棒の破断面の状況

PC鋼より線の破断面の状況を写真-8に示す。取り出したPC鋼より線の破断面は、未充填供試体では鎗型(円錐)、それ以外の供試体では刃型(せん断)となり、PC鋼棒とは対照的に延性的な破断であったと推察される。これは、PC鋼より線の腐食による各素線の断面減少に伴って破断する過程で、残存する素線が負担する引張力の増大によって順次破断に至ったものと考えられる。また、未充填供試体では素線の破断時によりが戻る方向に広がっていることを確認した。一方で、充填供試体および

一部充填不足供試体ではグラウトの拘束によるものと考えられる影響から、そのような現象はみられなかった。



写真－8 PC鋼より線の破断面の状況

4. まとめ

本検討では、電食による腐食促進実験を行ってPC鋼棒とPC鋼より線を破断させ、グラウト充填状況やPC鋼材種類の違いによるPC鋼材の破断時の特徴とハイドロホンを用いた破断検知の適用性について検討した。得られた知見を以下に示す。

- 1) PC鋼棒とPC鋼より線では、破断に至る過程や破断時の衝撃、破断面の状況など特徴が異なることを、映像や破断後の目視観察、衝撃波形によって確認できた。
- 2) PC鋼棒供試体では、グラウト充填状況の違いによって破断時の衝撃の違いを、映像や破断後の目視観察によって確認できた。また、PC鋼より線供試体では、破断時の衝撃によって発生した周波数に違いがみられた。
- 3) ハイドロホンの設置位置が破断位置から離れると出力が減衰し、とくにPC鋼より線では素線の段階的な破断となり出力が小さいことから、破断の検知が困難となる可能性がみられた。

ハイドロホンを用いたPC鋼材破断検知技術を実橋のモニタリングに活用していくうえで、破断位置の特定が課題となり、さらなる検証が必要であると思われる。したがって、既存の非破壊調査技術と併用しながら、グラウトの充填不足と内部のPC鋼材の腐食が確認された箇所など、PC鋼材の破断が生じる可能性が考えられる箇所での適用を考えていく必要があると思われる。

謝辞

本稿は、西日本高速道路(株)、西日本高速道路エンジニアリング関西(株)、オムロンソーシア ルソリューションズ(株)、東京工業大学、福井大学、(株)日本ピーエスで実施した「橋梁のモニタリングによる異常検知技術の検討」における成果の一部について取り纏めたものである。ご尽力いただいた関係各位、ならびに電食に関してご助言頂いた長岡技術科学大学山口貴幸氏、(株)大林組早川智浩氏に深謝の意を表す。

参考文献

- 1) 稲葉将吾ほか：PC鋼材破断検出に向けた音響モニタリングシステムの開発，土木学会第67回年次学術講演会論文集，V-064，pp.127-128，2012.9
- 2) 陸賢ほか：鋼材が腐食したプレテンションPC梁の荷重実験，第20回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.39-44，2011.10
- 3) プレストレスト・コンクリート建設業協会：プレストレストコンクリート構造物の補修の手引き(案)[断面修復工法]，平成21年9月
- 4) 田森清美ほか：鉄筋の発錆によるコンクリートのひびわれ性状に関する基礎研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.10，No.2，pp.505-510，1988