

PC グラウト再注入工法

— PC 鋼線の腐食・破断特性とその補修方法 —

森川 英典*1・美濃 智広*2・鴨谷 知繁*3

近年、グラウト充填不足部における PC 鋼材の腐食・破断が多数報告され、深刻な問題となっている。とくに、1993 年以前に建設された上縁定着ケーブルを有するポストテンション道路橋で凍結防止剤使用環境下において顕著となっている。本稿では、このような橋梁における主ケーブルで用いられていた PC 鋼線束ケーブル（12φ7 mm、12φ5 mm）の腐食・破断特性について触れたのち、その補修工法について紹介する。層状パーライト組織を有する PC 鋼線の破断について、活性溶解型応力腐食割れ、水素脆化割れの 2 種類の破断特性の相違、および、マルテンサイト組織を有する PC 鋼棒の遅れ破壊との相違について概観したうえで、PC 鋼線については活性溶解型応力腐食割れが生じている可能性が高いことを示す。補修工法については、従来の PC グラウト再注入工法（従来工法）を概観し、その問題点として、PC 鋼線束隙間の防錆の困難性、新旧グラウト界面でのマクロセル腐食発生を指摘したのち、それらに対応することを目的とした PC 鋼線の腐食抑制補修に関する研究開発事例を紹介する。最後に、筆者らが開発した亜硝酸リチウム（LiNO₂）水溶液を用いる補修工法について、その開発研究経緯を含めて、補修効果と施工手法を詳細に解説する。

キーワード：PC グラウト再注入、PC 鋼線、腐食、破断、補修、亜硝酸リチウム

1. はじめに

近年、グラウト充填不足部における PC 鋼材の腐食・破断が多数報告され、深刻な問題となっている。とくに、1993 年以前に建設された上縁定着ケーブルを有するポストテンション方式 PCT 桁道路橋で凍結防止剤使用環境下において顕著となっている。本稿では、このような橋梁における主ケーブルで用いられていた鋼線束の PC ケーブル（12φ7 mm、12φ5 mm）の腐食・破断特性について触れたのち、その補修工法について紹介する。補修工法については、従来の PC グラウト再注入工法（以下、従来工法）を概観したのち、PC 鋼線の腐食抑制補修に関する研究開発事例を紹介する。最後に、筆者らが開発した亜硝酸リチウム（以下、LiNO₂）水溶液を用いる補修工法について、その開発研究経緯を含めて詳細に解説する。

2. PC 鋼線の腐食・破断特性

実橋梁における PC 鋼線の破断事例は多数^{1)~3)}報告さ

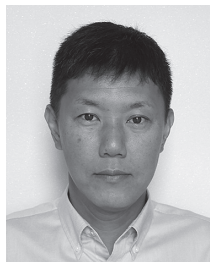
れているが、写真 - 1 に示すように層状パーライト組織を有する PC 鋼線の破断面はすべて軸方向に滑るような特徴を有しており、写真 - 2 に示したマルテンサイト組織を有する横締め PC 鋼棒の破断面とは明らかに異なっている。

そこで、著者ら^{4)~9)}は、PC 鋼線の遅れ破壊試験として、活性溶解型応力腐食割れ試験と水素脆化割れ試験の 2 種類を実施した。その結果、写真 - 3 に示すように、活性溶解型応力腐食割れによる破断面は写真 - 1 に示す実橋梁における PC 鋼線の破断面と同様に、軸方向に滑るような破断面であるのに対して、水素脆化割れによる破断面は、写真 - 4 に示すように、それらとはまったく異なる特徴を有している。また図 - 1 に示すように、活性溶解型応力腐食割れ試験における破断時間は腐食量（局部腐食の深さ）が約 1 mm を超えると非常に短くなる。局部腐食の大きさが破断の感受性に関与していることが分かる。以上のことから、塩化物イオン（以下、Cl⁻）が介在して PC 鋼線の腐食が生じた場合、質量減少率がそれほど小さくなくても、局部腐食の程度が大きくなった場合には、破断の可



*1 Hidenori MORIKAWA

神戸大学大学院
工学研究科 教授



*2 Tomohiro MINO

神戸大学大学院
工学研究科 研究員



*3 Tomoshige KAMOTANI

(株)ピーエス三菱
大阪支店 開発営業部



写真 - 1 PC 鋼線の破断事例 1)



写真 - 2 横締め PC 鋼棒の破断事例 (筆者撮影)



写真 - 3 PC 鋼線の活性溶解型応力腐食割れ試験結果 7)



写真 - 4 PC 鋼線の水素脆化割れ試験結果 6)

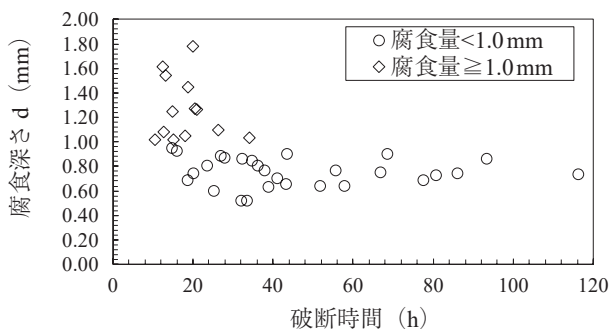


図 - 1 腐食量と破断時間との関係 7)

能性が大きくなるものといえ、早い段階での腐食抑制補修がきわめて重要である。

また著者ら¹⁰⁾は、図 - 2 に示すようなグラウト充填不足を模擬した 12φ7mm ケーブル供試体を用いた塩水供給による促進腐食試験を行った結果、図 - 3 に示すように、

鋼線と鋼線の隙間や鋼線とシースの隙間において大きな腐食が発生することを確認した。つまり、PC 鋼線の破断を防止する腐食抑制対策については、このような狭隘な隙間における腐食に対して講じる必要があり、補修の難易度は非常に高いといえる。

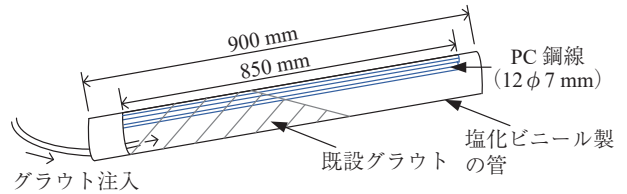
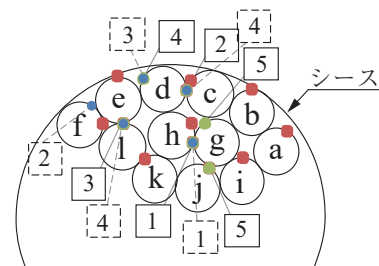


図 - 2 鋼線束の促進腐食試験供試体 5)



(c) N-0-130

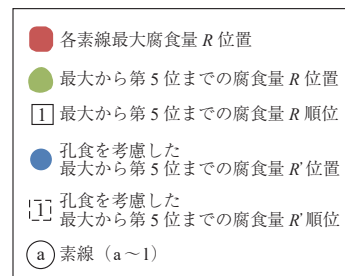


図 - 3 鋼線束における腐食発生状況 10)

3. グラウト再注入補修の現状

3.1 従来工法における問題点

ブリーディングなどによるグラウト充填不足に対応するため、従来工法^{11, 12)}として、排気ホースを設置する方法と真空ポンプを用いた方法が研究開発され、適用されてきている。

ここで、凍結防止剤由来の Cl⁻ による影響を受けた PC 鋼線束 (12φ7mm, 12φ5mm) における従来工法適用の際の問題点は、以下の 2 点があげられる。

- ① 腐食した鋼線束の内部空隙 (鋼線と鋼線の隙間) や鋼線とシースの隙間へのグラウト注入が困難である。
- ② 塩化物が侵入した旧グラウトと再注入グラウトの境界部におけるマクロセル腐食が発生する可能性がある。

桑原ら¹³⁾は、種々の腐食状態の PC 鋼材にグラウトを充填した供試体における腐食進行状態の測定を行い、著しい錆を有する鋼材の場合には、グラウト充填後においても腐食が進行する状態にあることを明らかにしている。また近藤¹⁴⁾は、塩水散布により促進腐食を行った φ7mm PC 鋼線を用いて、グラウト再注入後の腐食進行について検討

を行った結果、再注入による腐食抑制は認められるが、鋼材表面に凹凸が確認できるほど腐食が進行した場合、腐食を完全には抑制できない可能性があることを指摘している。これらの実験は、PC 鋼材 1 本を用いた実験であるが、鋼線束 (12φ7 mm) の場合には、上記 ① の問題により、グラウト再注入による腐食抑制効果が低くなることが考えられる。

また、上記 ② の問題に関して、宮永ら¹⁵⁾は、新旧グラウト界面付近におけるマクロセル腐食に関する実験を行い、旧グラウトの Cl⁻濃度が 10 kg/m³ 以上の場合には、グラウト再注入後に新旧グラウト界面における PC 鋼材が腐食する可能性を指摘している。

このような状況を踏まえ、プレストレストコンクリート工学会「既設ポストテンション橋の PC 鋼材調査および補修・補強指針」¹⁶⁾では、既設グラウト部に高濃度な Cl⁻の含有が確認された場合、とくに、再劣化に注意のうえ、適切な材料を選定しなければならないとしている。

3.2 PC 鋼材の腐食抑制を考慮したグラウト再注入工法

以上のような問題点を踏まえた上で、PC 鋼材の腐食抑制を考慮したグラウト再注入工法が種々、検討されている。

まず、著者らは、LiNO₂ 水溶液を用いた補修工法を開発し、基礎実験によりその補修効果を確認したうえで、実橋梁に対する適用を行い、補修後の自然電位モニタリングにより補修効果の検証を行っている。この手法については、次章において詳細に解説する。

そのほかの手法として、井牟ら^{17, 18)}は、Cl⁻固定化剤 (CA₂) を混入させた PC グラウトを用いた再注入補修工法について検討を行い、分割鋼板試験体において適用した結果、既設グラウトの Cl⁻濃度が 30 kg/m³ のケースにおいて、マクロセル腐食を抑制できることを確認している。PC 鋼線束における腐食抑制効果の検討については、今後の課題となっている。

真田ら^{19~21)}は、イオン交換樹脂を混和した PC グラウトを用いた再注入補修材料について検討を行い、塩化物拡散効果を有する再注入グラウト材料としての基本物性について示している。PC 鋼材の腐食抑制効果やマクロセル抑制効果の検証については、今後の課題となっている。

塩井ら²²⁾は、気化防錆剤を混入した PC グラウトを用いた補修工法について検討を行っている。この手法は、グラウト再注入が完全でない場合に、気中においても防錆効果を付与することを目的としている。PC 鋼線束における補修効果の検証は今後の課題となっている。

以上のように、PC 鋼材の腐食抑制を考慮したグラウト再注入工法については、種々、検討されているが、PC 鋼線束における効果の検証は、現状ではなされておらず、唯一、著者らの補修工法のみが実用化段階に到っている。そこで、次章においては、著者らの補修工法 (以下、本工法) について、その開発経緯を概観しながら解説する。

4. LiNO₂ 水溶液を用いた PC 鋼線束の補修

4.1 本工法の概要

本工法のフローを示す。前処理としてシース内に 40%

LiNO₂ 水溶液を注入することが最大の特徴である。この過程で、水溶液中の亜硝酸イオン (以下、NO₂⁻) が PC 鋼線束表面の錆層内部に浸入すると同時に、同錆層内部の Cl⁻ が水溶液中へと溶出することにより亜硝酸イオン (以下、NO₂⁻) による腐食抑制効果が発揮される。同水溶液を除去したのち、本工法専用開発された、① 小間隙充填性^{23, 24)}、② 長時間可使用性^{23, 24)}、③ 静水中の不分離性^{23, 24)}、④ 高い防凍性能²⁵⁾を有する専用の LiNO₂ 添加補修材をシース内部の隅々まで充填することで、定着部背面などからの劣化因子の侵入を防止するとともに、NO₂⁻の錆層内部から補修材への逆拡散を抑制し、耐久性を確保する。



図 - 4 本工法のフロー

4.2 腐食抑制効果に関する実験的検討

本工法の腐食抑制効果に関する基礎試験として、塩水噴霧により促進腐食させた鋼材と新設構造物で使用される汎用グラウト材を用い、従来工法、LiNO₂ 添加グラウト充填、および本工法による補修を模擬し、補修部の分極抵抗^{26~29)}および既設グラウト部と補修部との間に生じるマクロセル腐食電流量^{28, 29)}について検討した。その結果、図 - 5 に一例として補修部の分極抵抗を示すように本工法の腐食抑制効果ももっとも優れ、一方、LiNO₂ 添加グラウト充填および従来工法では十分な腐食抑制効果は期待できず、とくに、LiNO₂ 添加グラウト充填は従来工法と比較して必ずしも良好な結果が得られない^{26, 27)}ことが明らかとなった。また、LiNO₂ 水溶液の注入により、錆層内の [Cl⁻]/[NO₂⁻] < 1.25 となることで、NO₂⁻の防錆効果が発揮される^{27, 29)}ことが本工法の腐食抑制メカニズムであることを確認した。

次に、本工法のマクロセル腐食抑制メカニズムについて検討を行った。マクロセル腐食電流量は、一般に相対的に貴な電位を示す補修部鋼材のカソード分極特性およびグラウト材の体積抵抗率に影響を受けることが知られている。そこで塩水噴霧により腐食された PC 鋼線に対し、本工法専用材料による補修を行い、補修部鋼材のカソード分極特性について検討³⁰⁾を行った。図 - 6 に示すように LiNO₂ 水溶液の注入が補修部のカソード分極特性を大幅に向上させるため、本工法ではマクロセル腐食が抑制されることを確認した。また本工法の補修材は、新設構造物に使用される汎用グラウトと比較して体積比抵抗率が高い¹⁵⁾こともマクロセル腐食の抑制に効果的な要因となっている。

さらに、本工法は緊張力が付与された状態の PC 鋼材に

適用するため、JSCE S 1201 に準拠し応力腐食割れ試験³¹⁾を実施した。切欠きを設けたPC鋼線を試験片を40% LiNO₂水溶液に200時間浸漬しても腐食反応および破断は生じず、遅れ破壊の要因となる拡散性水素は0.01 ppm以下、機械的性質の低下も認められず、LiNO₂水溶液はPC鋼線の応力腐食割れや水素脆化割れに影響を与えないことを確認した。

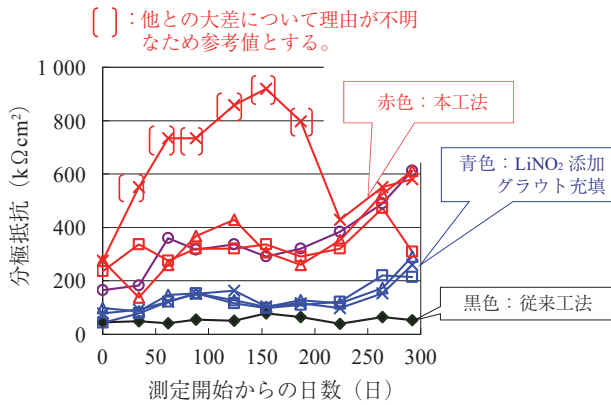


図 - 5 補修部の分極抵抗

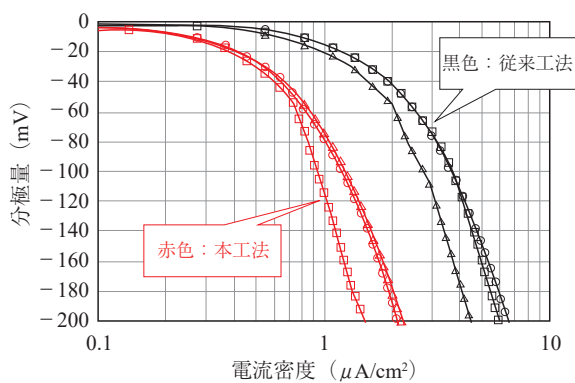


図 - 6 カソード分極曲線

4.3 施工方法に関する検討

実橋のPCケーブル曲上げ部～定着間を模擬した実物大試験体を用い、① LiNO₂水溶液の注入方法については、PC鋼線東内部やグラウト充填不足部端部まで確実に水溶液を供給できること、② LiNO₂添加補修材の充填方法については、グラウト充填不足部端部までの充填および充填確認が可能であること、③ 上記2点が現場作業において容易かつ確実に実施可能であることを要求性能として施工方法の開発^{32~35)}を行った。図-7に示すようにLiNO₂水溶液の注入は、注入ベッセルを用いた自然流下方式と真空ポンプを用いた減圧注入方式の併用とした。自然流下方式は低圧注入やシース内水溶液高さの把握が容易なのが特徴であり、ひび割れや定着部背面から路面への水溶液の漏出低減に効果的な方法である。また、減圧注入方式は真空ポンプによりシース内部を減圧しながら水溶液を注入することで真空脱泡作用が生じ、自然流下方式では水溶液を供給できないPC鋼線東内部まで水溶液を供給できるとともに、急激に大気圧に戻すと同時に勢い良くシース内部に注

入されることで、水溶液に乱流が生じ、エア溜まりが生じやすいグラウト充填不足部上端まで水溶液を供給可能であり、またシース内のグラウト片や浮錆などをシース外へ除去できる²⁴⁾効果も確認されている。

図-8に示すように補修材の充填は内径2mmの高弾性チューブと注入ベッセルを用いた自然流下方式とした。本方式は、①容易に低速充填が可能となり、鋼線間などの小間隙の充填性が向上する、②高弾性チューブを定着部近傍まで挿入することにより、グラウト充填不足部端部近傍まで確実に充填でき、同チューブからの排出により充填確認が可能である、③シース内に継続的なヘッド圧が付与され、定着部背面の通気性に依りて充填性が向上する、などの特徴がある。

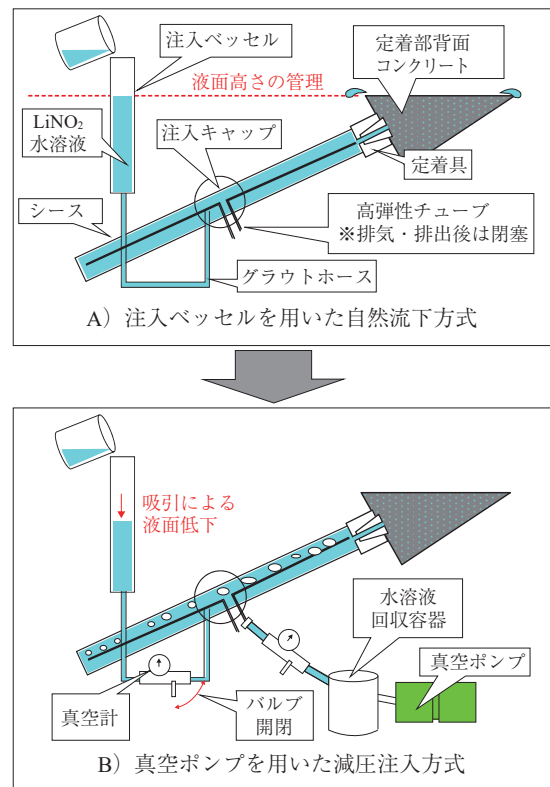


図 - 7 LiNO₂水溶液の注入方法

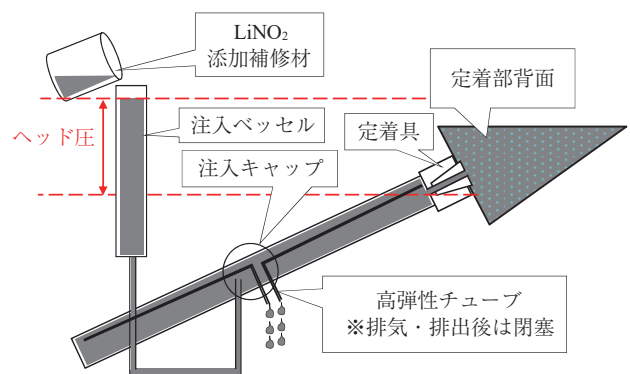


図 - 8 LiNO₂添加補修材の充填方法

4.4 実橋における補修効果のモニタリング

本工法は、平成 30 年 3 月現在 62 件のグラウト再注入工事で採用^{たとえば 24, 25)}されており、図 - 9 に示す施工状況のように、開発した施工方法により良好な現場施工が実施されている。また、その内 7 橋では図 - 10 に示すように注入孔の PC 鋼材近傍にモニタリングセンサを設置し、電気化学的測定により補修後の耐久性モニタリング³⁶⁾を実施している。本工法の初施工となった東北地方の PCT 桁橋の例を示す。図 - 11 に示すケーブルに対し本工法施工後に測定した自然電位を図 - 12 に示す。自然電位が補修直後から 5 年間、ASTM 基準で「90% 以上の確率で腐食なし」を示す値で推移しており、本工法の実構造物における補修効果は、良好な状態で確保されている。

5. おわりに

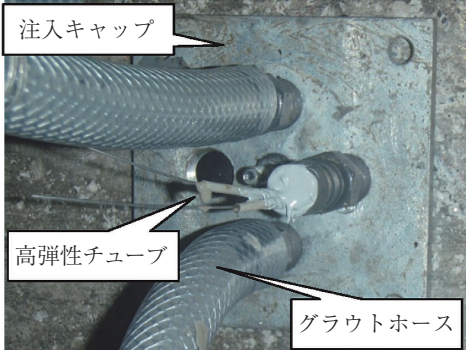
以上、本稿では、PC 鋼線の腐食・破断特性について触れたのち、その種々の補修工法について紹介した。



(上：亜硝酸リチウム水溶液の注入状況)



注入ベッセル



(下：亜硝酸リチウム添加補修材の充填・充填確認状況)

図 - 9 施工状況

層状パーライト組織を有する PC 鋼線における軸方向すべりを伴った破断としては、活性溶解型応力腐食割れが生じている可能性が高いことを示した。また従来の PC グラウト再注入工法における問題に対応する補修方法として実用化された亜硝酸リチウム（以下、 LiNO_2 ）水溶液を用いる補修方法について、その補修効果と施工方法について詳細に紹介した。

PC 鋼線の破断に対応するため、早期診断手法の確立とともに、できるだけ早期の腐食抑制対策を実施するとともに、橋梁のモニタリングなどの手法と併せて、PC 橋の信頼性向上を図ることが望まれる。

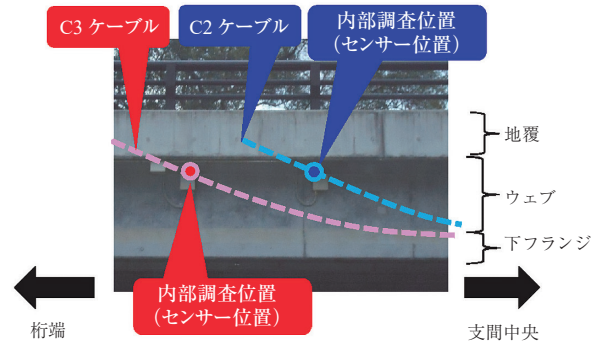


図 - 10 モニタリングセンサー設置位置

橋梁	ケーブル	補修前の状況	塩化物イオンの侵入
H 橋	G1 桁 C2ケーブル (終点側)	腐食軽微	無しまた微少 〔既設グラウト中の塩化物イオン量 0.19 kg/m ³ 〕
	G1 桁 C3ケーブル (終点側)	著しい腐食	有り 〔既設グラウト中の塩化物イオン量 1.90 kg/m ³ 〕

図 - 11 補修前のモニタリング対象ケーブルの状況

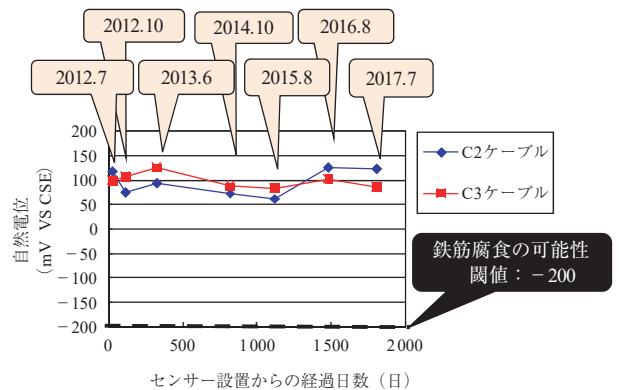


図 - 12 モニタリング結果

参考文献

- 1) 土木学会：PC 構造物の現状の問題点とその対策，pp.92-115, 2003
- 2) 玉越，平賀，木村：PC 鋼材の腐食損傷への対応事例－妙高大橋のグラウト未充填と鋼材腐食の調査－，土木技術資料，No.54-5, pp.50-51, 2012.5
- 3) 日経コンストラクション，2011.12.12号
- 4) 白川・森川・福田・河村：局部腐食を考慮したPC 鋼線における応力腐食割れによる破断性状に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.34, No.1, pp.1054-1059, 2012.7
- 5) 福田・戸田・森川・川村：グラウト充填不良部の局部腐食を考慮したPC 鋼線における応力腐食割れ破断性状に関する実験的検討，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第13巻，pp.501-508, 2013.11
- 6) 美濃・戸田・森川・河村：局部腐食を考慮したPC 鋼線における遅れ破壊による破断性状に関する実験的検討，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第14巻，pp.687-694, 2014.10
- 7) 美濃・古川・森川・河村：局部腐食を有するPC 鋼線の破断性状及び力学的特性に関する実験的検討，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第15巻，pp.1189-194, 2015.10
- 8) 黒野，美濃，森川，河村：塩化物イオン水溶液環境下での応力腐食割れ試験を用いたPC 鋼線の破断特性の検討，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol.17, pp.7-12, 2017.10
- 9) Mino and Morikawa, Chloride-induced delayed fracture of prestressing wires and Structural reliability of PC bridges, Proceedings of fib symposium 2015 Copenhagen, 2015.5
- 10) 白川，森川，鴨谷：PCT 橋のグラウト充填不良部における鋼線腐食メカニズムに関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.33, No.2, pp.493-498, 2011.7
- 11) (公財) 鉄道総合技術研究所：PC グラウトの再注入等マニュアル(案)，2002
- 12) 日本道路公団試験研究所・(社) PC 建協：PC 橋の耐久性能の向上技術に関する研究 共同研究報告書，2003
- 13) 桑原，石井，関，青木：グラウト中に埋設された錆びたPC 鋼材の腐食特性実験，土木学会第57回年次学術講演会講演概要集，V-566, pp.1131-1132, 2002.9
- 14) 近藤：ポストテンション方式PC 鉄道構造物の腐食に着目した維持管理方法に関する研究，京都大学学位論文，2012
- 15) 宮永，青木，横山，渡邊：PC グラウト再注入による鋼材腐食の影響検討，PC 工学会 第23回シンポジウム論文集，pp.451-456, 2014.10
- 16) (公社) プレストレストコンクリート工学会：既設ポストテンション橋のPC 鋼材調査および補修・補強指針，2016
- 17) 井隼，堀越，熊谷，宮口：既設ポストテンションPC 桁のグラウト充填不足に対する補修方法の研究，PC 工学会 第25回シンポジウム論文集，pp.105-110, 2016.10
- 18) 堀越，井隼，熊谷，藤田：再注入用グラウトに混和した塩化物イオン固定化材の基礎的性能，コンクリート工学年次論文集，Vol.39, No.1, pp.1027-1032, 2017.7
- 19) 真田，睦好，Luan Yao：イオン交換樹脂を混和したグラウトの塩化物拡散に関する実験的研究，PC 工学会 第23回シンポジウム論文集，pp.72-76, 2014.10
- 20) 真田，睦好，Luan Yao：イオン交換樹脂を混和したPC グラウトの分離性・流動性・塩化物拡散特性，PC 工学会 第24回シンポジウム論文集，pp.385-390, 2015.10
- 21) 真田，睦好，Luan Yao：イオン交換樹脂を混和したPC グラウトの実用的な配合について，PC 工学会 第25回シンポジウム論文集，pp.119-124, 2016.10
- 22) 塩井，北野：気化防錆剤をもちいたグラウト再注入補修に関する基礎実験，PC 工学会 第26回シンポジウム論文集，pp.323-326, 2017.10
- 23) 鴨谷，蝦名，青山，森川：亜硝酸リチウムを用いたPC グラウト充てん不足部の新しい補修方法の腐食抑制効果と実橋への適用事例，コンクリート工学，Vol.50, No.12, pp.1084-1091, 2012.12
- 24) 鴨谷，岡林，飯塚，飯田：グラウト充填不足を有するPC 橋の長寿命化－亜硝酸リチウム水溶液を用いた新技術の適用－，プレストレストコンクリート，Vol.56, No.1, pp.17-22, 2014.10
- 25) 鴨谷，深川，石井，森川：亜硝酸リチウム添加補修材の防凍性能と強度発現性に関する実験的検討，PC 工学会 第25回シンポジウム論文集，pp.115-118, 2016.10
- 26) 鴨谷，青山，石井浩司，森川：グラウト未充てん部における腐食PC 鋼材の補修方法に関する実験的検討，PC 技術協会 第20回シンポジウム論文集，pp.17-20, 2011.10
- 27) Kamotani, Aoyama and Morikawa：Repair performance of re-injecting Lithium-Nitrite-containing solution and grout on corroded PC tendons due to anti-freeze agents, Proceedings of 3rd International Conference on Sustainable Construction and Technologies-SCMT3, e119, 2013
- 28) 鴨谷，青山，石井，堀，森川：凍結防止剤により腐食したPC 鋼材のグラウト再注入補修方法の検討，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第11巻，pp.521-528, 2011.10
- 29) 鴨谷，青山，石井，森川：凍結防止剤が侵入したグラウト充てん不足部のPC 鋼材腐食に対する亜硝酸リチウムを用いた補修の性能評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.34, No.1, pp.1006-1011, 2012.7
- 30) 福田，森川，鴨谷：亜硝酸リチウム水溶液を用いたグラウト充てん不足部のPC 鋼線への補修におけるカソード分極特性の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.35, No.1, pp.1069-1074, 2013.7
- 31) 石井，鴨谷，森川：亜硝酸リチウム水溶液がPC 鋼線の応力腐食割れに与える影響，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第16巻，pp.627-632, 2016.10
- 32) 鴨谷，青山，石井，森川：グラウト未充てん部の密閉度とグラウト再充てん方法に関する一報告，プレストレストコンクリート工学会 第21回シンポジウム論文集，pp.409-412, 2012.10
- 33) 鴨谷，青山，石井，森川：LiNO₂を用いたPC グラウト再充てんの施工方法に関する提案－実施工を目指して－，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第12巻，pp.249-256, 2012.10
- 34) 鴨谷，青山，福田，森川：PC グラウト充てん・充てん不足境界近傍で著しく腐食したPC 鋼材束内部におけるLiNO₂水溶液注入補修の適用性，コンクリート工学年次論文集，Vol.36, No.1, pp.1128-1133, 2014.7
- 35) Kamotani, Ishii and Morikawa, Development of repair method for corroded PC tendons incomplete grouting areas using LiNO₂-containing solution and grout and application to existing PC bridges, Proc. of fib symposium 2015 Copenhagen, 2015
- 36) 鴨谷，石井，森川：亜硝酸リチウムを用いたグラウト再注入を行ったPC 橋の鋼材腐食抑制効果，PC 工学会 第26回シンポジウム論文集，pp.317-322, 2017.10

【2018年9月14日受付】