

グラウト充てん不足を有する 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 —

鴨谷 知繁*1・岡林 秀勝*2・飯塚 崇史*3・飯田 明弘*4

現在、高度成長期に整備されたインフラの急速な老朽化に対し、戦略的な維持管理・更新を実施するための取組の一つとして、スピード感をもって新技術の活用を促進することが提言されている。既設 PC 橋についても、長寿命化を実現する合理的な維持管理手法の確立にむけてさまざまな取組がなされているが、雨水や凍結防止剤を含んだ融雪水等がグラウト充てん不足部に侵入し、PC 鋼材に腐食が生じた場合の対策はいまだ十分に確立されているとはいえない。

このような背景の下、著者らはシース内に塩化物イオンが残留し、従来の対策では補修後の再劣化の可能性が懸念される場合でも、亜硝酸リチウム水溶液の注入により PC 鋼材の腐食の進行を抑制し、長期的な耐久性を確保することを可能にする新技術「リパッシブ工法」を開発した。本稿は、グラウト充てん不足が確認された橋齢 42 年の既設 PC 橋の長寿命化工事において、本新技術が適用された事例について報告するものである。

キーワード：グラウト充てん不足、グラウト再注入、亜硝酸リチウム水溶液、新技術

1. はじめに

現在、高度成長期に整備されたインフラの急速な老朽化に対し、戦略的な維持管理・更新を実施することが社会的命題となっている。国土交通省¹⁾では平成 25 年 1 月に国土交通大臣を議長とする「社会資本の老朽化対策会議」が設置され、同年を「社会資本のメンテナンス元年」とし、老朽化対策に重点的に取り組むことが明示された。そして、その取組の一つとして、公共事業における新技術の活用をスピード感をもって促進することが提言されている²⁾。

重要な社会資本の一つとして道路橋があり、15 m 以上の道路橋のうち、約 4 割を占めるプレストレストコンクリート橋（以下、既設 PC 橋）についても例外なく老朽化が進行している。現在、長寿命化修繕計画の策定や見直しなどが行われ、予防保全型にシフトした合理的な維持管理により長寿命化を実現するためのさまざまな取組が実施されているところである。

既設 PC 橋に関する重要な課題の一つとしてあげられているのが、ポストテンション方式の既設 PC 橋におけるグラウト充てん不足³⁾である。これらは建設当時の使用材料や施工方法の未熟により生じたと考えられ、そこに雨水や凍結防止剤を含んだ融雪水等が侵入した場合には、PC 鋼材に腐食や破断⁴⁾が生じ、橋梁の健全性や信頼性の低下を引き起こすことが知られている。

このような背景の下、著者らは PC 鋼材に腐食が生じ、その内部に塩化物イオンが残留している場合でも、PC 鋼材の腐食の進行を抑制し長期的な耐久性を確保することを可能にする新技術「リパッシブ工法⁵⁾」（以下、新技術と

記す）を開発した。本稿は、グラウト充てん不足が確認された橋齢 42 年の既設 PC 橋の長寿命化工事において新技術が適用された事例について報告するものである。

2. 対象橋梁の概要

対象橋梁は、橋齢 42 年のポストテンション方式単純 PCT 桁橋の宍原橋（以下、本橋）である。図 - 1 に示すように桁長 20.6 m、幅員 10.3 m、主桁本数 6 本、桁高 1.1 m の橋梁であり、主ケーブルとして 1 主桁あたり 6 本の 12φ7 mm が配置され、このうち 3 本は上床版に定着部を配置した上縁定着ケーブルとなっている。

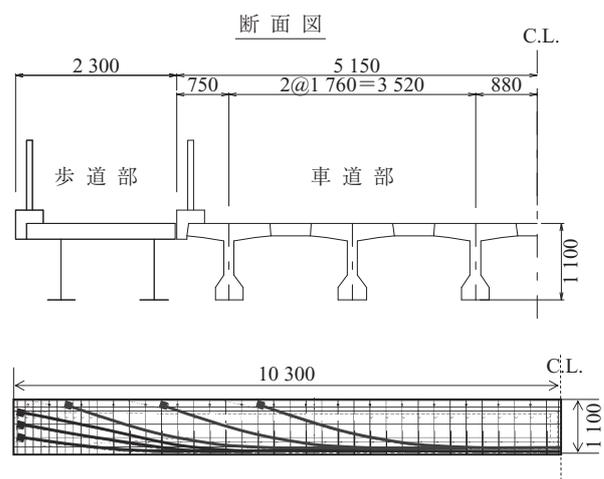


図 - 1 対象橋梁の概要図
(上：断面図 下：主ケーブル配置図)

*1 Tomoshige KAMOTANI：(株)ピーエス三菱 技術本部 技術部 開発メンテナンスグループ

*2 Hidekatsu OKABAYASHI：(株)ピーエス三菱 名古屋支店 土木工事部

*3 Takafumi IIZUKA：五光建設(株) 土木事業部

*4 Akihiro IIDA：国土交通省 中部地方整備局 静岡国道事務所 管理第二課 専門官

過年度の点検で、写真 - 1 に示すようにウェブ側面の主ケーブルに沿ったひび割れや、下フランジ側面のひび割れ、エフロレッセンスおよび錆汁が確認され、その後の調査で主ケーブルの一部にグラウト充てん不足と PC 鋼材の腐食が確認された。そのため補修には腐食した PC 鋼材に対する腐食抑制効果の高い新技術が適用された。以下、新技術の概要と本橋における施工内容について記述する。

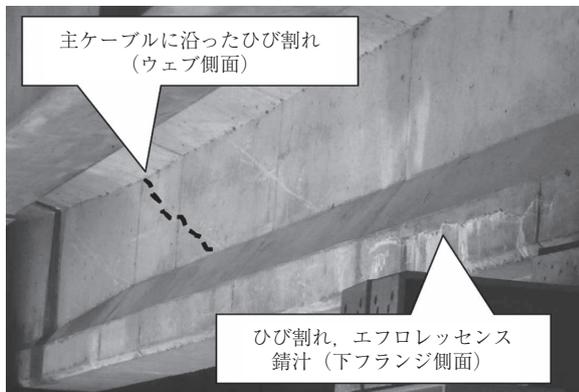


写真 - 1 本橋の変状

3. 新技術の概要

3.1 新技術の施工フロー

新技術の施工フローを図 - 2 に示す。新技術は、次節で詳述するように、① 事前調査工、② 通気確認工、③ 注入準備工、④ 亜硝酸リチウム（以下、 LiNO_2 ）注入工、⑤ LiNO_2 添加補修材充てん工、⑥ あと処理工の 6 工種からなる。

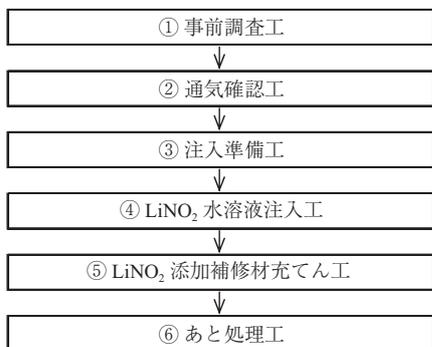


図 - 2 新技術の施工フロー

3.2 新技術の特長

新技術の特長として以下があげられる。

- ① 後述する自然流下方式とエアリフト方式の併用により注入した防錆剤の一種である LiNO_2 水溶液が、グラウトが充てんされないような錆層内、PC 鋼線間の小間隙およびブリーディングにより生じた PC 鋼材とグラウトとの隙間などに浸入し、PC 鋼材の表面錆層内部に塩化物イオンが含まれている場合でも PC 鋼材を再不動態化し、腐食の進行を抑制することができる。
- ② 再不動態化は、施工時のモニタリングにより確認でき

る。

- ③ LiNO_2 を添加した補修材を充てんすることで、錆層内に浸入した LiNO_2 のグラウト中への逆拡散を防止し、腐食抑制効果を長期間維持することができる。
- ④ 補修材の充てん度を施工時にモニタリングでき、良好な充てん度を確保できる。

4. 新技術の施工内容

4.1 事前調査工

事前調査工では、RC レーダーを用いて主ケーブルの位置出しとかぶりの測定を行った。続いて行う予備削孔（ $\phi 25 \text{ mm}$ ）は削孔作業中の PC 鋼材の損傷を防ぐため、ドリル先端が鋼製シースに接触すると短絡して動作が停止する機能を有するドラムコードとハンマドリルを用いて行った。シースを破った後、CCD カメラでシース内部を撮影し、グラウト充てん不足が確認された箇所については、予備削孔にスケールを挿入して直接かぶりを確認したうえで、PC 鋼材に損傷を与えないように $\phi 80 \text{ mm}$ のコア孔を設け、PC 鋼材を露出させた。コア孔からシース内部を目視したところ、一部の PC 鋼材に発錆が確認された。

既設 PC 橋においては、PC 鋼材が構造安全性を確保するための重要な部材であり、また一度グラウト再注入を行うとその後の再補修は非常に困難となる。そのため長寿命化を目指した補修を行う場合、確実に劣化の進行を抑制し、補修後の再劣化を生じさせないことが重要である。そこで、本橋における PC 鋼材の腐食の原因が塩化物イオンかどうか判断するため、精製水を染みこませた綿棒で露出した PC 鋼材の表面錆を数度拭き取り、これを少量の水に溶出させたものを検水として、市販の簡易水質検査キット（低濃度品）を用いて調査を行った。本キットの検査チューブは、塩化物イオンが検出されない場合には黄色、検出された場合には、塩化物イオン濃度が高くなるほど、橙色や赤色に呈色する。本橋の場合、写真 - 2 に示すように橙～赤色に呈色しており、PC 鋼材の腐食の原因は塩化物イオンと判断されると同時に、発生した錆層内部にも塩化物イオンが存在していることが容易に想定された。

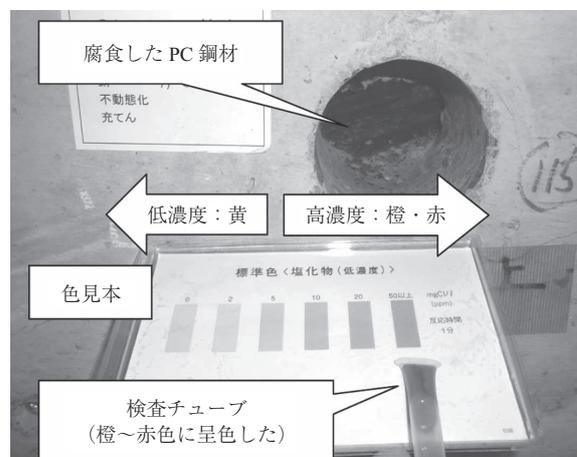


写真 - 2 PC 鋼材表面錆層の塩化物イオン調査

塩化物イオンの拭き取り調査はコア削孔位置のみでグラウト充てん不足部全長に渡り実施したのではなく、塩化物イオンがさらに高濃度に侵入している可能性が考えられた。そこで本橋においては、十分な LiNO_2 を供給し確実に腐食の進行を抑制するため、後述の LiNO_2 水溶液注入工では、 LiNO_2 添加補修材に添加したのと同じ専用の40%濃度品を使用した。

4.2 通気確認工

通気確認工は、 LiNO_2 水溶液が注入施工中にひび割れから外部に漏出するのを避けることを第一の目的として行う工種である。 LiNO_2 水溶液は、劇毒物に指定されていないものの河川等に大量に漏出すると水質汚濁⁶⁾の可能性がある化学薬品であり、本橋のようにシースに沿ったひび割れの発生が推定される既設PC橋の場合では非常に重要な工種となる。

通気確認工の実施状況を写真-3に示す。コア孔部に取り外しが可能な専用の通気確認用密閉キャップを設置し、これに真空計、粉塵回収容器、真空ポンプをグラウトホースを介して接続し、バルブ開閉前後の真空度を計測した。真空ポンプによる減圧を行っても所定の真空度が得られない場合は、シースに沿ったひび割れ等から漏気が生じていることが考えられ、その漏気音を検知して水溶液が漏出する可能性のある箇所を特定し、写真-4に示すように強力布テープによる漏水防止処理を行った。

さらに本橋では、定着部から背面の保護コンクリートに向けた通気の有無を確認するため、ウェブや下フランジの漏水防止処理を行った後、再度真空度の確認を行った。こ

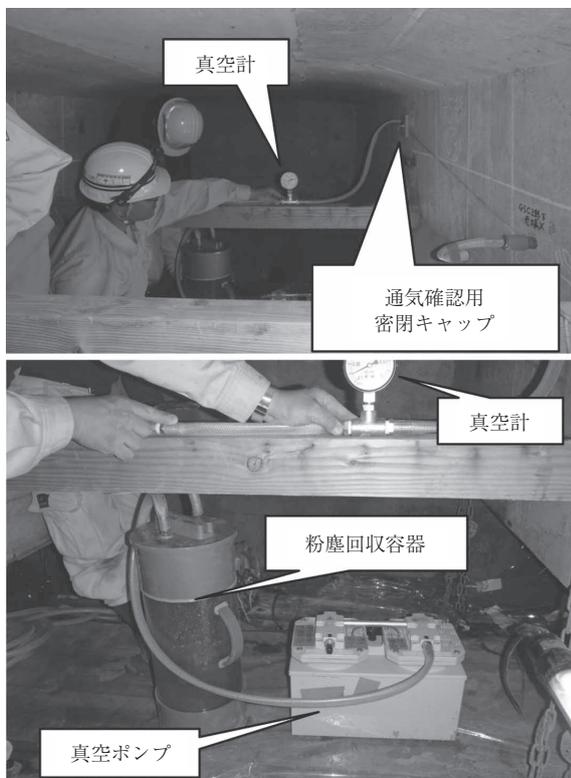


写真 - 3 通気確認工実施状況



写真 - 4 漏水防止処理実施状況

の通気の有無はグラウト充てん不足部上端部における LiNO_2 添加補修材の充てん度に影響を与える⁷⁾ことが知られている。漏水防止処理後も所定の真空度には至らなかったことから、わずかに定着部背面の通気が存在することが推察されるとともに、本橋のグラウト充てん不足部は外環境からシース内部へ塩化物イオンが侵入しやすい状態にあったものと考えられた。

4.3 注入準備工

注入準備工では、 LiNO_2 水溶液が足場外部に漏出することを確実に防止するため、写真-5に示すように足場全面への透明シート敷設に加え、下フランジ直下へのロール状高分子ポリマー吸水シートの敷設と、バケツやプラ舟の準備による漏水防止養生を実施した。

次に、コア孔からグラウト充てん不足部端部にむけて、排気や充てん確認に使用する内径2.0mmの高弾性チューブを挿入した。写真-6に示すように既往の施工⁸⁾と同



写真 - 5 漏水防止養生

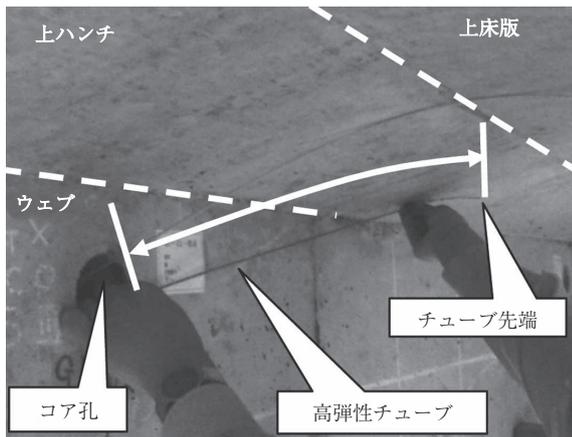


写真 - 6 高弾性チューブ挿入長確認状況

様に、先端は主ケーブルの定着部近傍まで挿入されたことを確認した。また高弾性チューブの挿入長を全注入箇所測定し、その結果を基に LiNO_2 水溶液と LiNO_2 添加補修材の必要数量を算出した。その後、取り外しが可能で真空圧や注入圧に対する気密性と水密性を容易に確保できる専用の注入キャップを用いてコア孔部を覆い、高弾性チューブの片端を外部に露出させた状態とした。

そして、腐食した PC 鋼材の再不動態化の確認に必要なリード線を PC 鋼材との導通を確認した鉄筋に接続するとともに、後述の LiNO_2 水溶液注入工や LiNO_2 添加補修材充てん工に必要な各資機材を配置した。

4.4 LiNO_2 水溶液注入工

LiNO_2 水溶液の注入はまず、図 - 3 (a) に示すような注入ベッセルを用いた自然流下方式で行った。通気確認工で、定着部背面にわずかに通気があることが推察されたため、シース内に注入した水溶液が定着部背面から多量に漏れ出すことが無いように、注入ベッセルを、その中央部が定着部の高さと同程度となるように外桁側面に設置し、内部の液面高さを管理しながら、少量ずつ水溶液を注入した。

この間に写真 - 7 に示すように、シース内部の PC 鋼材の自然電位を照合電極とデジタルマルチメータを用いて測定した。測定結果例を図 - 4 に示すように、自然電位は貴に移行した後安定した数値を示し、JIS 規格⁹⁾ から判断して、PC 鋼材の再不動態化を確認した。

その後、高弾性チューブからの排出により定着部近傍まで LiNO_2 水溶液が注入されたことを確認した。高弾性チューブを閉塞した後も、注入ベッセルに少量ずつ LiNO_2 水溶液を注入し、注入ベッセル内の液面高さを上昇させたので、この水頭圧によって高弾性チューブ先端よりさらに上方に向かって水溶液が注入されたと推察される。

次に、図 - 3 (b) に示すような真空ポンプを用いたエアリフト方式による水溶液の注入を、上述の再不動態化に必要とした時間以上継続した。本方式を用いることで、シース内の水溶液が断続的に勢よく定着部方向へ動くため、高弾性チューブ先端より上方にある定着部近傍の PC 鋼材へより確実に水溶液を供給することが期待できる。

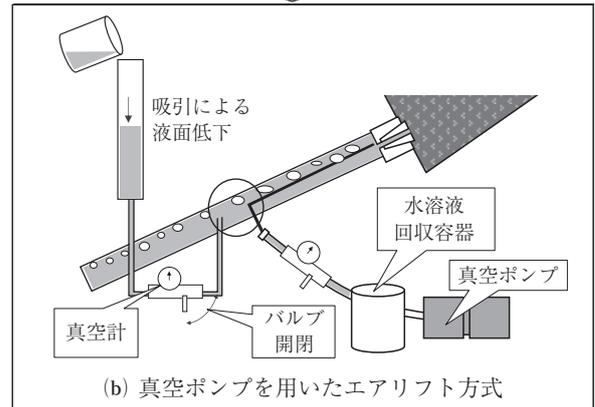
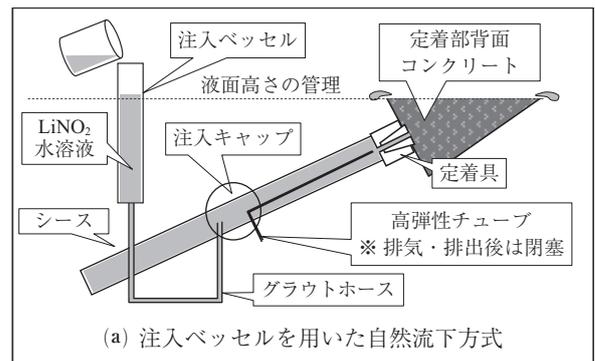


図 - 3 LiNO_2 水溶液の注入方法概要図

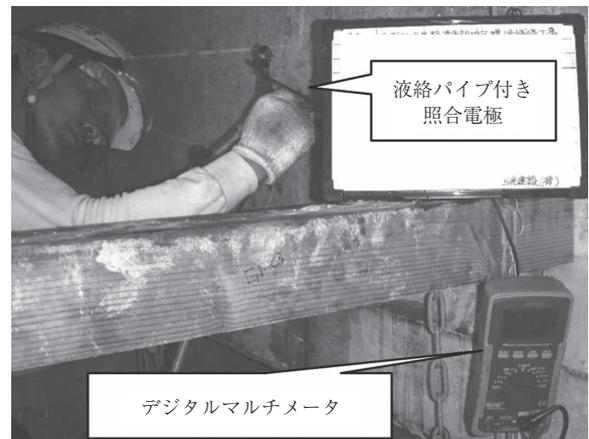


写真 - 7 再不動態化モニタリング状況

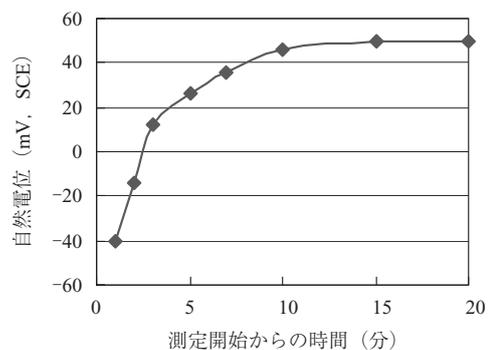


図 - 4 自然電位の測定結果例

自然流下方式およびエアリフト式による水溶液の注入終了後、注入キャップを取り外し、写真 - 8 に示すように水溶液注入前後の PC 鋼材の状況を比較したところ、完全ではないものの PC 鋼材の錆層の多くが除去されていた。また、真空ポンプを用いてシース内部の水溶液を粉塵回収容器内に回収したところ、除去された錆は水溶液ともに回収され、容器底部に沈下していた。以上より、本新技術は、腐食抑制効果に優れるだけでなく、副次的に PC 鋼材の錆層等の洗浄効果を有することが確認された。この洗浄効果は主にエアリフト方式によるものと考えられる。

また、本工事では多重の漏水防止対策を実施することで、 LiNO_2 水溶液が河川等へ漏出することなく、本工種の施工を完了することができた。

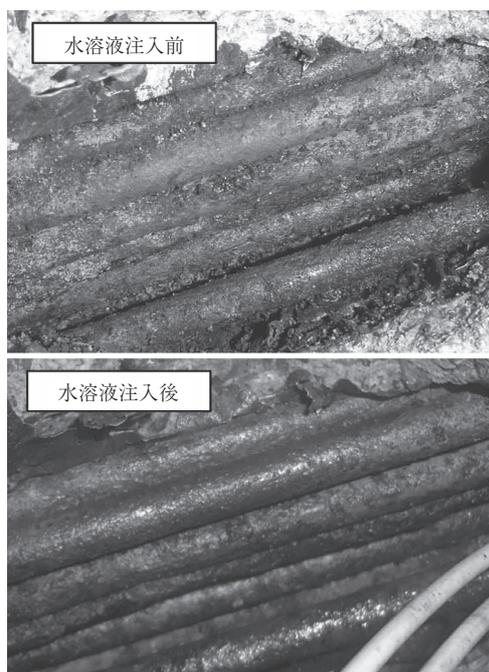


写真 - 8 LiNO_2 水溶液注入による洗浄効果

4.5 LiNO_2 添加補修材充てん工

LiNO_2 添加補修材充てん工の留意点として、グラウトの付着や、PC 鋼材の腐食等によりシース内の間隙が小さく補修材により閉塞しやすいことや、シース下部に除去しきれなかった水溶液が残留した状態で、補修材を充てんする可能性があることがあげられる。そこで新技術では、これらの課題を解決した写真 - 9 に示す専用の材料を用いている。それらは、PC グラウトにおける管理基準¹⁰⁾を満足するとともに、写真 - 10 に示す修正 JASS フロー試験のフロー値が図 - 5 に示すように新技術の規格値である 250 ~ 350 mm を 5 ~ 6 時間程度保持し、また写真 - 11 に示す傾斜管の下部に水を入れた状態で充てんしても材料分離が生じない材料である。本補修材には実配合では約 42 kg/m^3 の NO_2^- が添加されている。

また施工においては、小間隙やグラウト充てん不足部上端の充てん度を向上させるため、図 - 6 に示す注入ベッセルを用いた自然流下方式により充てんを行った。本方式

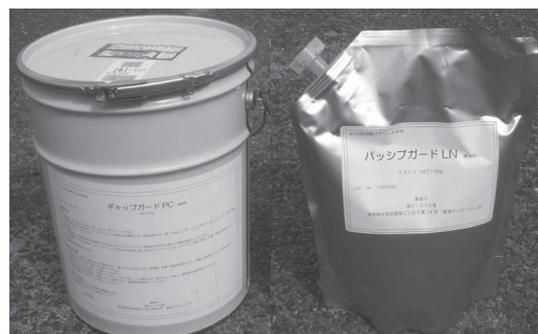


写真 - 9 使用材料

セメント系小間隙充てん用補修材 (左) $40\% \text{ LiNO}_2$ 水溶液 (右)

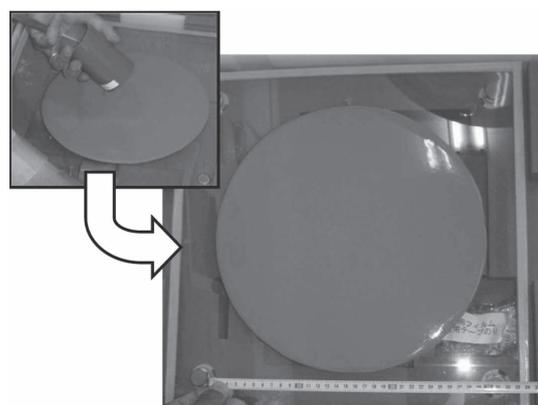


写真 - 10 修正 JASS フロー試験

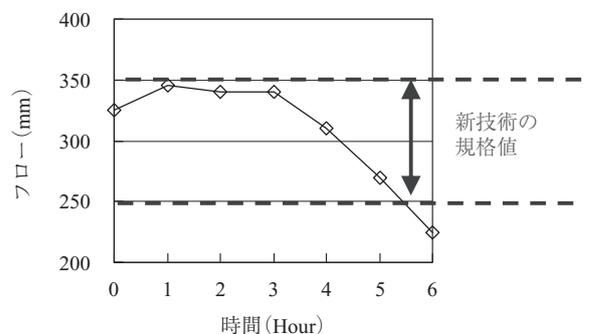


図 - 5 修正 JASS フロー試験結果例

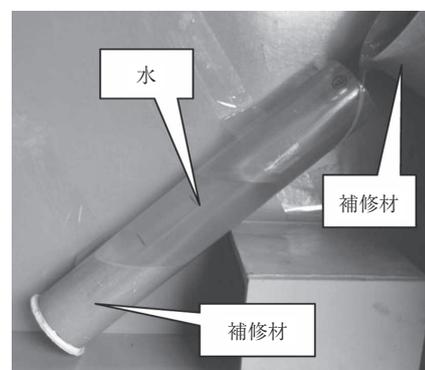


写真 - 11 LiNO_2 添加補修材の静水中の不分離性確認試験状況

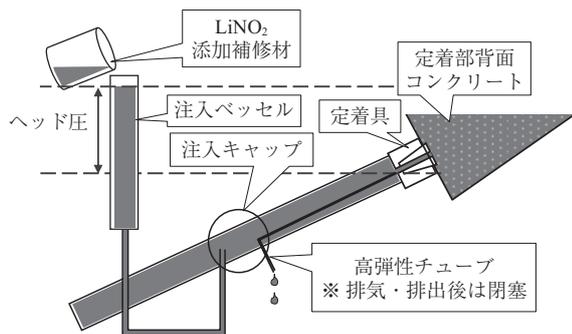


図 - 6 LiNO₂ 添加補修材の充てん方法概要図

の特長は、以下の3点があげられる。

- ① 容易に0.1リットル/min程度の低速充てんが可能となり、PC鋼線間などの小間隙において残留空気とLiNO₂添加補修材が置換されやすくなり充てん性の向上が期待できる。
- ② 内径2mmの高弾性チューブを定着部近傍まで挿入し、これを排気孔として使用することにより、グラウト充てん不足部端部近傍まで確実に充てんでき、同チューブからの排出により充てん度をモニタリングできる。
- ③ グラウト充てん不足部上端より高い位置にある注入ベッセル内の補修材によりシース内に継続的なヘッド圧が負荷されるので、定着部背面の通気性に応じて高弾性チューブ先端より上部の充てん性が向上する。

LiNO₂ 添加補修材の充てん状況と充てん確認状況を写真-12に示す。注入ベッセルに注入されたLiNO₂ 添加補修材は順次シース内に充てんされ、その後、高弾性チューブからの排出により定着部近傍まで充てんされたことを確認した。高弾性チューブを閉塞した後も、同補修材が硬化するまで継続してヘッド圧を加えたので、注入ベッセル内の補修材は、4.2節で確認した定着部背面の通気により、高弾性チューブ先端よりさらに上方にに向かって補修材が充てんされたと推察される。

4.6 後処理工

LiNO₂ 添加補修材の硬化後、専用の注入キャップを取り外し、排気チューブを切断してポリマーセメントモルタルで断面修復を行った。

5. おわりに

本橋はグラウト充てん不足が確認された橋齢42年の既設PC橋であり、外環境から侵入した塩化物イオンによってPC鋼材が腐食していることが確認され、錆層内にも塩化物イオンが存在している可能性が考えられた。そこで、従来技術による補修では、補修後の再劣化の可能性が懸念されたため、塩化物イオンの存在下でもPC鋼材の腐食の進行を抑制することが可能な新技術を適用するに至った。工事は無事に終了しており、本事例が他の既設PC橋の長寿命化において参考となれば幸いである。

新技術リパッシブ工法の開発においては、神戸大学大学院森川英典教授に多大なる御指導と御協力をいただいた。ここに改めて感謝の意を表する次第である。



写真 - 12 LiNO₂ 添加補修材の充てん状況 (上) と充てん確認状況 (下)

参考文献

- 1) 国土交通省：平成24年度国土交通白書，第2部，pp-113, 2013.
- 2) 菊川 滋：老朽化対策における新技術活用の取組み，NETISプラス，Vol.5, pp.3, 2013.
- 3) 土木学会：PC構造物の現状の問題点とその対策，2003
- 4) 小林憲一，大平英生，登石清隆，羽田伸介：妙高大橋のPCケーブル破断調査と対策，橋梁と基礎，Vol.45, No.9, pp.32-38, 2011.
- 5) 新技術情報提供システムホームページ：リパッシブ工法，http://www.netis.mlit.go.jp/NetisRev/Search/NtDetail1.asp?REG_NO=KT-120108&TabType=&nt=nt
- 6) 環境省ホームページ：水質汚濁に関する環境基準，別表1，<http://www.env.go.jp/kijun/wt1.html>
- 7) 鴨谷知繁，青山敏幸，石井浩司，森川英典：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.
- 8) 鴨谷知繁，蝦名崇宏，青山敏幸，森川英典：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.
- 9) 土木学会，日本規格協会：コンクリート標準示方書〔基準編〕JIS規格集，pp.472-481, 2007.
- 10) プレストレスト・コンクリート建設業協会：PCグラウト&プレグラウトPC鋼材施工マニュアル（改訂版），pp.45-75, 2013

【2013年11月7日受付】