

リパッシブ工法の実用化 — 鼻毛橋の施工 —

技術本部	技術部	鴨谷知繁
東京土木支店	土木工事部(東北支店駐在)	蝦名崇宏
技術本部	技術部	青山敏幸

概要: 既設 PC 橋に生じたグラウト充てん不足部の新しい補修方法として開発した「リパッシブ工法」を、仙台市内に位置する鼻毛橋の補修工事に適用した。開発時に行った上縁定着ケーブルを想定した実物大模型実験で、実用化に必要な性能を満足することを確認した施工方法により実施工を行った結果、良好な結果が得られた。

Key Words: リパッシブ工法, 実用化, PC グラウト再注入

1. はじめに

近年、高齢化した橋梁の多くで劣化が顕在化しており、合理的な維持管理により健全性を確保し長寿命化することが国家的な重要課題として認識されている。15m 以上の道路橋の内、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 橋と記す)も例外ではなく、中でも、ポストテンション方式の既設 PC 橋では図-1 に示すように材料分離によるブリーディングの発生等が原因で主ケーブルの PC グラウト充てん不足が生じ、写真-1 に示すような主ケーブルに沿ったひび割れや漏水にともなうエフロレッセンス等の変状が確認されている。特に、寒冷地に位置し凍結防止剤が多用される環境下にある既設 PC 橋では、凍結防止剤に含まれる塩化物イオン(以下、 Cl^- と記す)がグラウト充てん不足部に侵入し、PC 鋼材に写真-2 に示すような局部腐食をとともなう著しい腐食が生じている場合がある。このように腐食した PC 鋼材は、健全な PC 鋼材と比較して局部応力が増大し、応力腐食割れ試験における破断時間が短くなることが確認されており、実橋梁では安全性確保のため、早期に補修を行う必要があると考えられる。

従来、既設 PC 橋においてグラウト充てん不足が確認された場合には、一般的な対策として、グラウト充てん不足部に PC グラウトを後注入するグラウト再注入工法^{例えは②)}が用いられてきた。仮に、グラウト充てん不足部の PC 鋼材に腐食が生じていない場合には、この工法を用いた補修により耐久性や健全性を回復する

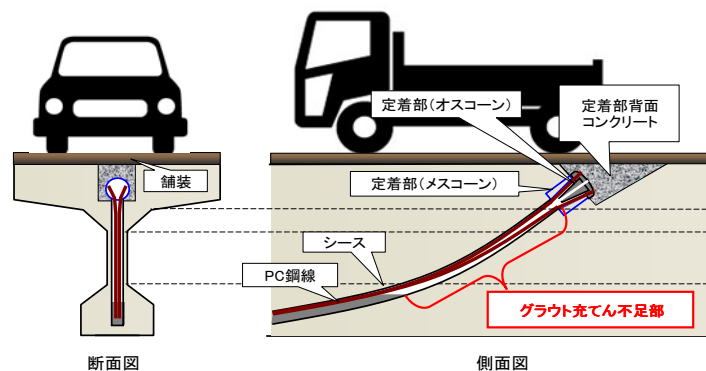


図-1 既設 PC 橋のグラウト充てん不足例



写真-1 既設 PC 橋のウェブ側面に生じた変状例
(主ケーブルに沿ったひび割れと漏水)



鴨谷知繁



蝦名崇宏



青山敏幸

ことができる。一方、上述のように腐食が生じた PC 鋼材、特に Cl^- により著しい腐食が生じている場合には、 Cl^- を除外することなくグラウトを後注入するため、十分な腐食抑制効果が得られない可能性が考えられる。

以上のような状況を鑑み、著者らは Cl^- により腐食した PC 鋼材の腐食の進行を抑制することが可能な工法として、亜硝酸リチウム(以下、 LiNO_2 と記す)水溶液を前処理として注入する新しい工法「リパッシブ工法 (以下、新工法と記す)」を神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻森川英典教授と共同開発した。

本稿では、開発時に行った上縁定着ケーブルを想定した実物大模型実験で、実用化に必要な性能を満足することを確認した施工方法により新工法を実橋梁に適用し、良好な結果が得られたので、その内容について報告する。

2. 新工法の概要

新工法の施工フローを図-2に示す。新工法は、PC 鋼材の位置を非破壊検査にて探査しシース内部の状況を確認する①事前調査工、真空ポンプを用いてシース漏気箇所やシース内の通気を確認する②通気確認工、排気チューブの挿入や注入治具の取付を行う③注入準備工、 LiNO_2 水溶液を注入し PC 鋼材を再不動態化する④ LiNO_2 水溶液注入工、 LiNO_2 を添加した小間隙充てん用補修材を注入し PC 鋼材の周辺を腐食抑制環境に維持する⑤ LiNO_2 添加補修材充てん工および注入治具を撤去し断面修復を行う⑥後処理工の 6 工種からなる。

新工法の特徴としては、グラウトと比較して小間隙への浸透性が高い 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、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することで PC 鋼材表面の再不動態化が期待できる。また、この再不動態化は、後述するようなモニタリングにより確認することができる。そして、 LiNO_2 添加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が経年的に低下することを防止できる等が挙げられる。

3. 新工法の施工方法

3.1 LiNO_2 水溶液の注入方法

新工法の実用化に向けて、図-1に示したような、実際の既設 PC 橋で確認されている例が多い上縁定着ケーブルのウェブから定着部間 (以下、曲げ上げ部と記す) におけるグラウト充てん不足を模擬した試験体を作製し、施工確認実験を行った。

写真-3に試験体の外観を示す。試験体は全長 1.5m であり、シースを模擬した $\phi 41\text{mm}$ の透明塩化ビニル



写真-2 PC 鋼材の著しい腐食

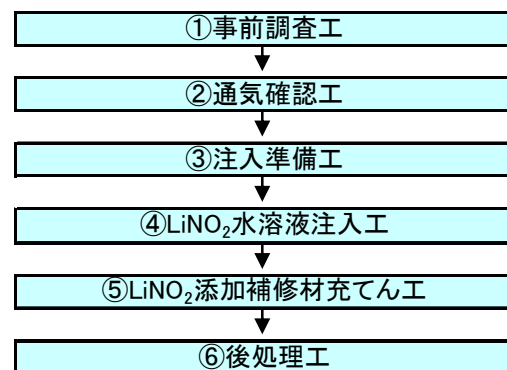


図-2 新工法の施工フロー

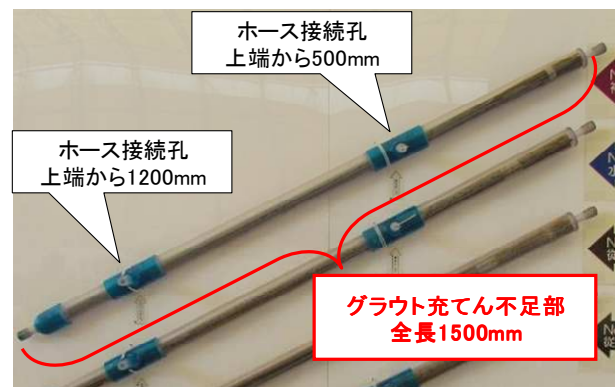


写真-3 試験体の外観

管の中に PC 鋼材 12φ7mm (7mm の素線を 12 本束ねたもの) を挿入し、25 度傾けて設置した。LiNO₂ 水溶液の注入や、補修材の充てんは主桁ウェブ側面から行わざるを得ない実施工上の条件を考慮し、シース上端から 500mm、1200mm の位置にホース接続部を設け、これを利用し施工した。またグラウト充てん不良部の上端については、僅かな通気性が有る場合と、密閉の場合を想定し、シース上端より上部に設置したバルブで通気性を調整した。

LiNO₂ 水溶液の注入方法を図-3 に示す。自然流下式は、耳桁外側側面に配置した透明管からシース内へと水溶液を片押しして注入する方法である。グラウト充てん不足部上端に通気性が有る場合には、シース内の空気が上部へ排出されるため、透明管内の水溶液のヘッド圧により水溶液が順次注入された。そして、最終的にはシース上端まで水溶液が注入されグラウト充てん不足部の隅々の鋼材表面まで水溶液を行き渡らすことができた。

ただし、このような場合には、充てん不足部の上端から橋面へと水溶液が溢れ出す可能性がある。LiNO₂ 水溶液は劇毒物では無いものの、多量に漏出させると水質汚濁を生じる可能性がある材料であるため、桁外の透明管内とシース内部とで LiNO₂ 水溶液の液面高さが等しいことを利用し、透明管内の液面高さを管理することにより漏出量を最小限にする必要がある。

次に、エアリフト式はグラウト充てん不足部上端の密閉性が高い場合を想定した方法で、シース内への挿入性に優れた高弾性の内径 2mm のチューブ(以下、高弾性細径チューブと記す)を充てん不足部上端近傍まで挿入し、これに真空ポンプを接続し桁外の透明管に入れた水溶液を上方へ吸引する方法である。水溶液がシース上端近傍まで注入され、高弾性細径チューブから排出したのを確認し、その後、透明管側に設置したボールバルブの開閉を真空計の値を確認しながら断続的に行い水溶液の吸引を継続した。その結果、ボールバルブを開放した直後に水溶液が高弾性細径チューブ先端の到達位置より上方まで注入された。

以上より、上述の 2 つの方法を適切に用いることで、グラウト充てん不足部の隅々の鋼材表面まで LiNO₂ 水溶液を行き渡らすことが期待できる。

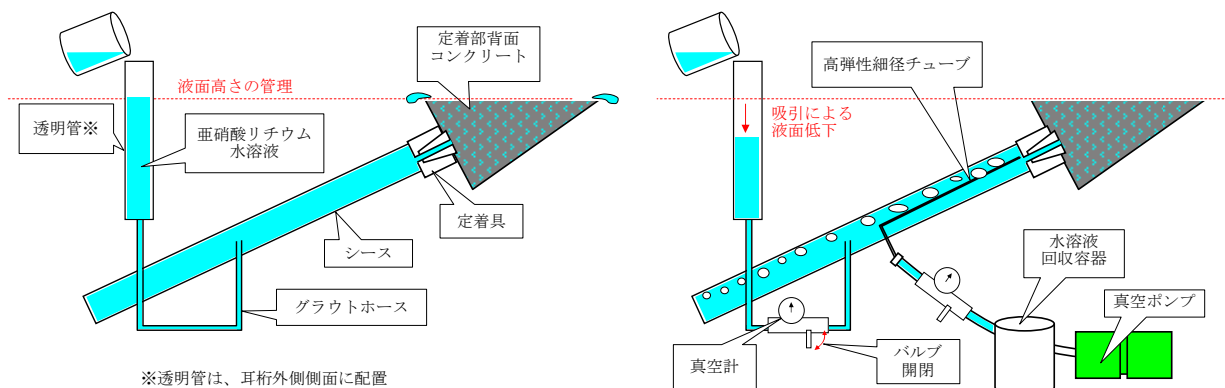


図-3 LiNO₂ 水溶液の注入方法 (左：自然流下式 右：エアリフト式)

3.2 LiNO₂ 添加補修材の充てん方法

施工方法の検討に先立ち、新工法に適した LiNO₂ 添加補修材の検討を行い、PC グラウトにおける管理基準³⁾満足するとともに、図-4 に示すように修正 JASS フロー試験のフロー値 250mm を 5~6 時間程度保持し、また写真-4 に示すように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ものを使用した。また、上述の要求性能を満足しつつ最大限の NO₂⁻ を添加することを目的に NO₂⁻ を約 50kg/m³ を添加した。

以上のような LiNO₂ 添加補修材の特徴を活かし、充てん性を向上させるための施工方法として図-5 に示す透明管を用いた自然流下方式を開発した。本方式の特徴として、以下が挙げられる。

- ①透明管を用いた自然流下により容易に低速充てんが可能となり、鋼線間などの小間隙の充てん性が向上する。
- ②排気用の高弾性細径チューブを定着部近傍まで挿入することにより、グラウト充てん不足部端部近傍まで

確実に充てんできる。

③グラウト充てん不足部上端より高い位置にある透明管内の LiNO_2 添加補修材によりシース内に継続的なヘッド圧が付与されるので、定着部背面の通気性に応じて充てん性が向上する。

グラウト充てん不足部上端は、 LiNO_2 水溶液注入実験と同様に、僅かな通気性が有る場合と、密閉の場合を想定した。いずれの場合も透明管内のヘッド圧により LiNO_2 添加補修材が充てんされ、鉛直管内と試験体シース内の LiNO_2 添加補修材の高さは速やかにほぼ同じになった。その後、密閉の場合には、排気用の高弾性細径チューブの先端まで LiNO_2 添加補修材が充てんされた。またその後、高弾性細径チューブから LiNO_2 添加補修材が排出されたことから、高弾性細径チューブからの排出を目視することで充てん確認が可能であると考えられる。

一方、僅かな通気性が有る場合には、上述の密閉の場合と比較して、さらに上部まで LiNO_2 添加補修材が充てんされ、上述の排気調整用のバルブ内の隙間が閉塞し試験が終了した。以上より、自然流下方式を採用することで、 LiNO_2 添加補修材の良好な充てん性を期待できる。

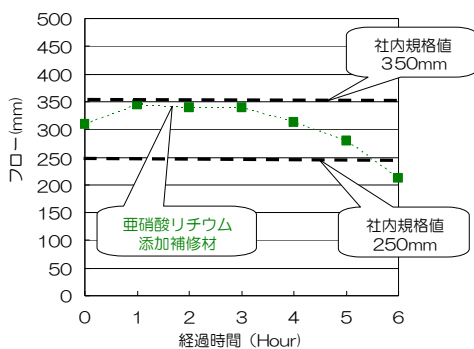


図-4 LiNO_2 添加補修材のフロー経時変化 写真-4 LiNO_2 添加補修材の静水中の不分離性

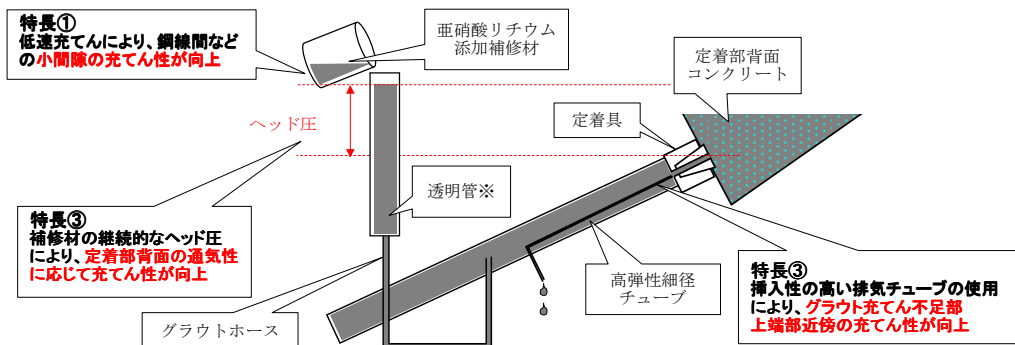


図-5 LiNO_2 添加補修材の充てん方法

4. 鼻毛橋の概要と事前調査結果

鼻毛橋 (以下、本橋を記す) は表-1 に示すように、仙台市内にある 3 径間のポストテンション方式の単純 PCT 桁橋であり、補修時点の橋齢は 33 年である。中央径間の耳桁である G1 桁において橋軸方向のひび割れとエフロッセンスが生じており、グラウト充てん不足が懸念されていた。主ケーブルの配置と変状の概要図を図-6 に示す。本橋には、1 桁あたり 10 本の主ケーブル (12φ7mm) が配置されており、側

表-1 鼻毛橋の概要

項目	内容
種別	プレストレストコンクリート道路橋
形式	ポストテンション単純T桁橋
荷重	TL-20+100kg/m ² (雪)
橋長	84.290m
桁長	3@28.030m
支間	3@27.330m
全幅員	10.500m
補修対象桁	中央径間 G1桁

面図に示すように内 5 本が床版に定着された上縁定着ケーブルであった。足場を架設した後に行った近接目視と主ケーブル位置の探査結果より、上述のひび割れとエフロレッセンスは、ウェブ側面については No.2 に沿って、下フランジ下面については No.4 に沿って生じていることが確認された。

上縁定着ケーブル 5 本について、床版付け根部において X 線透過試験を行ったところ、起点側は No.2、終点側は No.2 および No.3 でグラウト充てん不足が生じていた。当該箇所においてウェブ側面から削孔を行い、シース内部の状況を目視および CCD カメラにて観察した結果を写真-5 に示す。終点側 No.2 は、PC 鋼材の腐食が確認されなかったのに対し、起点側 No.2 および終点側 No.3 は、PC 鋼材全体に腐食が生じており、素線間が錆で埋まったような状況であった。そこで、シース内のグラウト片を採取し、JISA1154:2003⁴⁾に基づいてグラウトの Cl⁻濃度を測定した。表-2 に示すように、腐食が生じていた主ケーブルでは、腐食が確認されなかった主ケーブルの 10 倍の Cl⁻濃度となっていた。本橋は寒冷地に位置することから、主ケーブルの腐食は、凍結防止剤を含む水分がシース内に侵入によるものと考えられる。

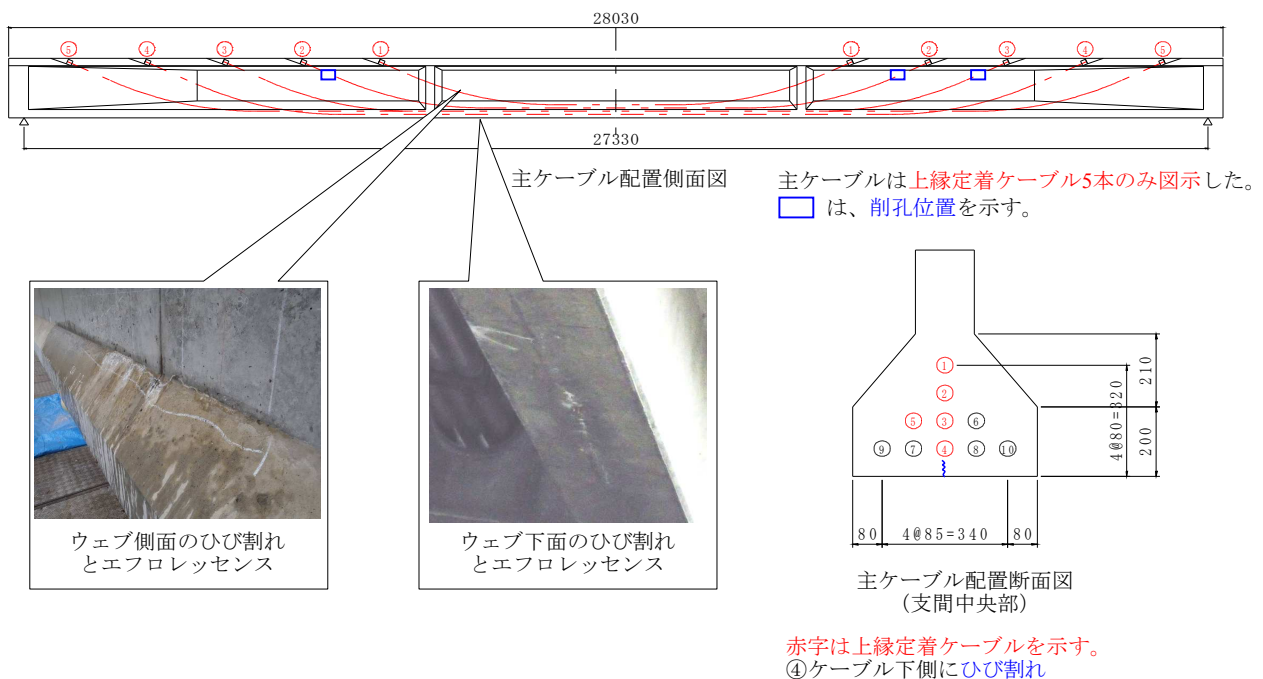


図-6 本橋の主ケーブルの配置と変状の概要図



写真-5 グラウト充てん不足部の PC 鋼材の腐食状況 左：終点側 No.2 右：終点側 No.3

表-2 グラウト内 Cl⁻濃度測定結果

試料採取場所	鋼材の腐食状況	グラウト中の Cl ⁻ 濃度 (%)	
		(%)	(kg/m ³) ※
終点側 No.2	腐食なし	0.01	0.19
終点側 No.3	腐食あり	0.10	1.90

※グラウトの単位重量を 1.9t/m³ と仮定して求めた

5. リパッシブ工法の施工

LiNO₂水溶液の注入および LiNO₂添加補修材の充てんに使用する高弾性細径チューブの挿入状況を写真-6に示す。高弾性率のため挿入時の折れが回避でき、また外径2.5mm(内径2.0mm)の細径のため挿入性がよく、定着部がある床版部分まで容易に挿入された。

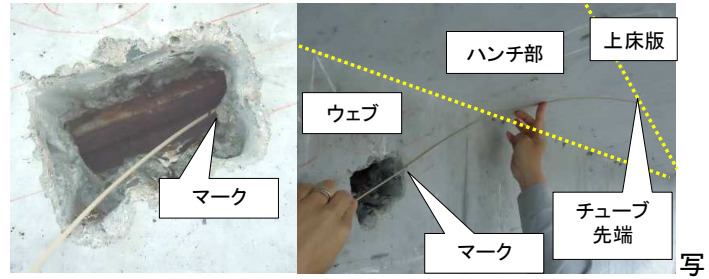


写真-6 高弾性排気チューブの挿入状況

次に、通気確認工として対象ケーブル全数で、真空ポンプと真空計を用いたリークテスト⁵⁾を行った。いずれも定着部端部の通気性は低いと判断されたが、腐食が確認された箇所については、凍結防止剤を含む水分がシース内に侵入したと推察されることから、わずかな通気性があるものと考えた。そこで、LiNO₂水溶液の注入は、まず自然流下法で水溶液を注入してPC鋼材の不動態化を確認した後、不動態化に要した時間と同じ期間、エアリフト法による注入を継続することにした。

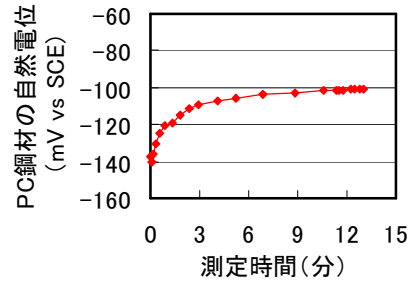


図-7 LiNO₂水溶液注入時のPC鋼材の自然電位

図-7に終点側 No.3 ケーブルにおける水溶液浸せき時のPC鋼材の電位変化を示す。本橋は河川上の橋梁であり、管理上浸せき時間を短縮して水溶液の漏水を少なくする必要があったこと、また、水溶液の濃度が濃いほうが錆層により多くの亜硝酸イオンを浸透させることができ、補修効果を持続する上で望ましいとの判断から、ほぼ飽和濃度に近い40%LiNO₂水溶液を選択した。PC鋼材の電位は約10分で貴に移行し安定した。この電位変化はJIS⁶⁾で再動態化を示しており、この結果から、実橋梁においてもLiNO₂水溶液の注入による再動態化を確認できた。

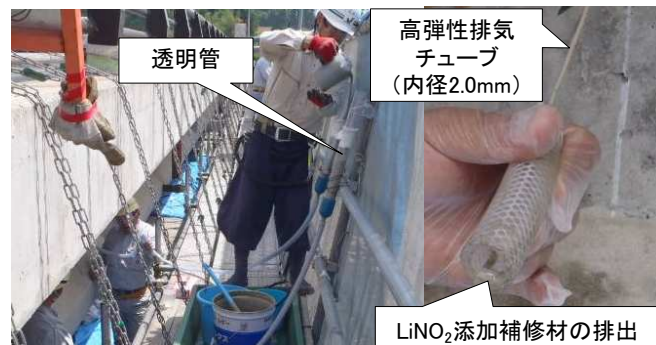


写真-7 LiNO₂を添加補修材の充てん
・充てん確認状況

LiNO₂添加補修材の充てん状況、充てん確認状況を写真-7に示す。透明管に注入されたLiNO₂添加補修材は順次シース内に充てんされ、その後高弾性細径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。同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ため、定着部のわずかな通気性によりさらに定着部上縁に向かって充てんされたものと推察される。

最後に、図-6に示す下フランジ下面に生じたひび割れについて補足する。上述のようにNo.4ケーブルに沿って生じていたが、当該ケーブルのひび割れ直上部を削孔し、内部を確認したところグラウトが完全に充てんされていた。一方、起点側No.2にLiNO₂添加補修材を充てんした際に、事前に注入したLiNO₂水溶液のうち除去しきれなかったものの一部が下フランジ下面のひび割れから漏出していることが確認された。以上より、本橋に生じた外観変状はいずれもNo.2ケーブルのグラウト充てん不足により生じたものと推察され、新工法の施工を通じて下フランジ下面に生じたひび割れが必ずしもそれに最も近接したケーブルの劣化に起因するわけではないという新たな知見も得られている。

6. まとめ

本稿では、既設 PC 橋に生じたグラウト充てん不足部の新しい補修方法として開発した新工法「リパッシブ工法」を仙台市内に位置する鼻毛橋の補修工事へ適用した事例について報告した。本報告の内容を以下にまとめる。

- 1) 上縁定着ケーブルを想定した実物大模型実験を通じて、グラウト充てん不足部上端まで水溶液を行き渡らすことが期待できる LiNO_2 水溶液の注入方法と、定着部近傍の充てんが期待できる LiNO_2 添加補修材の充てん方法を開発した。
- 2) 実施工では、塩化物イオンにより腐食したと考えられるケーブルに対して、40% LiNO_2 水溶液を開発した方法で注入し結果、注入後約 10 分で再不動態化を確認できた。
- 3) 実施工では、 LiNO_2 添加補修材を開発した方法により充てんした結果、定着部近傍まで挿入した高弾性細径チューブからの排出を目視確認でき、良好な充てん度を確認することができた。
- 4) 上述の結果より、リパッシブ工法の実用化が可能であることを確認した。

本稿が、グラウト充てん不足を有する既設 PC 橋の健全性確保と長寿命化に寄与すれば幸いである。

参考文献

- 1) 白川祐太, 森川英典, 福田圭祐, 河村睦: 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
- 2) 鉄道総合技術研究所: PC グラウトの再注入等補修マニュアル(案), 2002
- 3) 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.35-61, 2006
- 4) 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(15)
- 5) 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
- 6) 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