

論文 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 LiNO_2 水溶液注入補修の適用性

鴨谷 知繁*1・青山 敏幸*1・福田 圭祐*2・森川 英典*3・

要旨: 既設 PCT 橋のグラウト充てん・充てん不足境界近傍で塩化物イオンにより著しい腐食が生じた PC 鋼線束内部を対象に、 LiNO_2 水溶液注入による腐食抑制工法の適用性を明らかにすることを目的として、同部を模擬した試験体に水溶液を注入し、対象領域から採取した錆試料のイオン分析を行った。一孔式の自然流下・減圧注入併用方式の試験体では、対象領域において塩化物イオンによる腐食を抑制するのに必要とされる亜硝酸イオンが供給されているのを確認でき、本方法の適用性および妥当性が確認された。また亜硝酸イオンを十分に供給できたのは、減圧注入方式による真空脱泡作用が有効に機能したためと推察された。

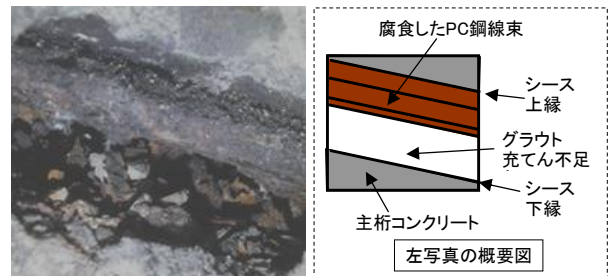
キーワード: 亜硝酸リチウム, グラウト再注入, 腐食, 補修, 真空

1. はじめに

近年、供用後数十年が経過した既設ポストテンション方式の PC 橋において、グラウトの充てん不足が確認されている。そのうち、寒冷地など凍結防止剤を使用する環境の橋梁では、グラウト充てん不足部に塩化物イオン (以下、 Cl^-) が侵入し、PC 鋼材の腐食や破断が報告されている (例えば¹⁾)。既設 PCT 桁の上縁定着ケーブルに生じた腐食の一例を写真-1 に示す。φ7mmPC 鋼線の 12 本束 (12φ7mm) の 1 本ごとの区別が付かない程の著しい腐食が確認された本例では、精製水を用いた表面錆の拭き取り調査を行ったところ、 Cl^- が検出された。従来、既設 PC 橋のグラウト充てん不足への対策としては、グラウト再注入が行われてきたが、本例のように Cl^- により著しい腐食が生じた PC 鋼材に対しては Cl^- を存置したままの補修となるために、再劣化が生じる可能性が考えられた。

そこで著者らは、図-1 にフローを示すように防錆剤の一種である亜硝酸リチウム (以下、 LiNO_2) 水溶液を前処理としてシース内に注入し、 Cl^- による腐食を抑制するのに十分な量の亜硝酸イオン (以下、 NO_2^-)、すなわち浜ら²⁾が提案している $[\text{Cl}^-] / [\text{NO}_2^-] < 1.25$ となるような NO_2^- を供給して腐食した PC 鋼材の再不動態化を行い、同水溶液の除去後、 LiNO_2 を添加したセメント系補修材 (以下、 LiNO_2 添加補修材) を充てんする補修工法 (以下、本補修方法) を提案し、種々の検討を行ってきた。

本補修工法を適用し高い補修効果を得るための要点の一つとして、 LiNO_2 水溶液を腐食した PC 鋼材の全表面へ浸入させ、確実に再不動態化することが挙げられる。これに関連して、白川ら³⁾は、既設 PCT 桁橋の上縁定着ケーブルに生じたグラウト充てん不足部を模擬した試験体において塩水乾湿サイクルによる腐食促進試験を行い、



(1) 既設PCT桁橋の主ケーブルの腐食事例



(2) 精製水による拭き取り

(3) 錆層から塩化物イオン検出

写真-1 既設 PCT 桁の主ケーブルに生じた腐食の一例



図-1 本補修工法の施工フロー

*1 (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 博(工) (正会員)

*2 神戸大学大学院工学研究科 市民工学専攻 博士前期課程 (学生会員)

*3 神戸大学大学院工学研究科 市民工学専攻 教授 博(工) (正会員)

PC 鋼線間やシースと PC 鋼線間などの小間隙で腐食量が大きくなることを示した。そこで福田ら⁴⁾は Cl⁻により腐食した PC 鋼線束に対する本補修工法の適用性に関する基礎的検討として、塩水乾湿サイクルで腐食させた 7 本束の φ7mmPC 鋼線 (7φ7mm) を LiNO₂ 水溶液に浸せきし、PC 鋼材表面錆層内の NO₂ 量および Cl⁻ 量を測定した。その結果、腐食した PC 鋼線束内部にも LiNO₂ 水溶液が浸入し錆層内の Cl⁻ による腐食の進行を抑制するのに十分な量の NO₂ が供給されていることが確認され、本補修工法の適用により PC 鋼線束内部の腐食抑制効果が期待できることを示した。

一方、同実験では、PC 鋼線束内側への NO₂ 供給量が外側の PC 鋼線へのそれと比較して少ない傾向も確認されている。この傾向によれば、実橋の方が同実験より不利になる要因、例えば①実橋の方が PC 鋼線束 1 束あたりの本数が多く、束内部に NO₂ が供給されにくい可能性がある、②実橋の方が著しい腐食が生じている可能性がある、③グラウト充てん・充てん不足境界部ではシース内空隙が既設グラウトである程充てんされているため、PC 鋼線表面積あたりの LiNO₂ 水溶液注入量が少ない、などを考慮した場合、本補修工法により Cl⁻ による腐食の進行を抑制するのに十分な量の NO₂ を供給できないことが考えられた。




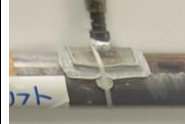




そこで本稿では、既設 PCT 桁橋のグラウト充てん・充てん不足境界近傍で Cl⁻ により著しい腐食が生じた PC 鋼線束内部 (以下、対象領域) を模擬した試験体を作製し、既報で示した施工方法⁹⁾を考慮した方法で、LiNO₂ 水溶液を注入し、対象領域から採取した錆試料のイオン分析結果に基づき、本補修工法の対象領域に対する適用性を明らかにすることを目的に検討を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体の製作

試験体の概要を表-1 に示す。既設 PCT 橋の上縁定着ケーブルのウェブ部に対象領域がある場合を想定し、長さ 900mm φ50mm の透明塩化ビニル管をシースとし、その中に長さ 850mm の φ7mm の PC 鋼線 12 本をシース上端にそろえて挿入した。対象領域ではシースの曲げ上げ配置により写真-1 の写真および概要図に示すように PC 鋼線がシース上方に偏在するのを考慮して、PC 鋼線 12 本はシース上方に束ねて固定した。シース下端にホースを取付け、シースを斜め 10 度に設置した後、既設グラウトとして高粘性普通セメントタイプのグラウトをシース高さ約半分まで充てんした。グラウトとシースの肌隙は無く、LiNO₂ 水溶液注入時もシース下端は密閉状態であった。既設グラウトを 7 日養生した後、約 30℃、R.H. 約 80% の保温容器内で 60 日間、3% の塩水の乾湿サイクル

表-1 試験体概要

試験体名		
全景		
PCグラウト充てん不足境界部拡大	シース撤去後鋼線方向	ホースジョイント設置状況
2-N-A		
		
		
2-N		
		
		

により PC 鋼線束を促進腐食させた。シース上端にエンドキャップを取り付けた後、ウェブ上端部に相当する位置にホースジョイントを取り付けた。そして次節で詳述する自然流下方式における排気口と減圧注入方式における吸引口を兼ねる φ2mm 樹脂製高弾性チューブ (以下、高弾性チューブ) をホースジョイントからシース上端近傍まで挿入し、ホースジョイントとチューブの隙間をエポキシパテで密閉処理した。また次節で詳述するようにグラウト充てん不足最下部から水溶液を注入する試験体 (2-N-A, 2-N) は、表-1 に示すように同部のシースを 25mm 角で切り取り、ホースジョイントをエポキシ接着剤で堅固に固定し注入孔とした。

2.2 LiNO₂ 水溶液の注入方法

本補修工法の施工方法について既報⁹⁾では、従来のグラウト再注入試験⁶⁾でシース上端部近傍にエア溜まりが生じやすいとの知見から、最も補修困難な領域を一旦同部と想定し、同領域に確実に LiNO₂ 水溶液を供給することを目的に施工方法を検討している。その結果、定着部背面の密閉度に応じて適切な方法が異なり、定着部以外の密閉性を確保した状態で真空ポンプを用いてシース内部を減圧し、真空ポンプ停止前後の真空度を測定するリークテストにおいて真空度の変化が大きい、すなわち密閉性が低いと判断される場合には、図-2 の 1-N に示すような透明管を用いた自然流下方式 (以下、自然流下方式)、一方、上記リークテストにおいて真空度の変化が無いもしくは微小である、すなわち密閉性が高いと判断される場合には、図-2 の 1-N-A に示すような真空ポンプに接続

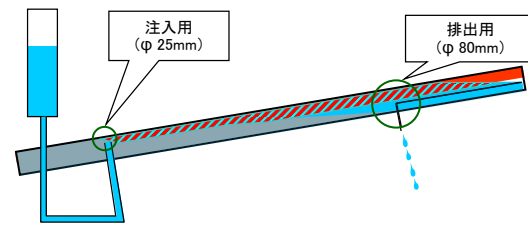
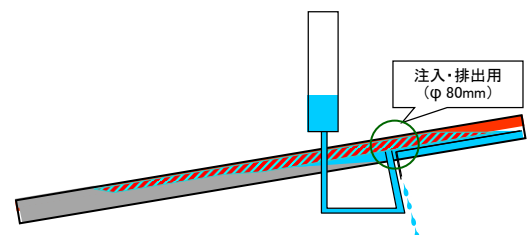
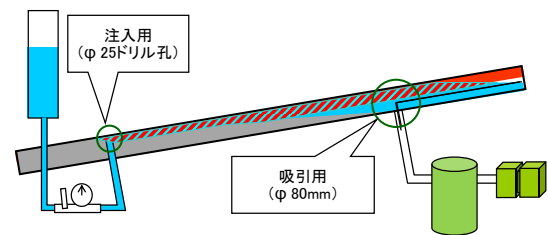
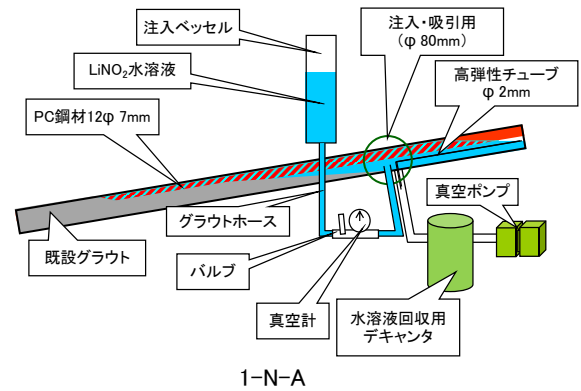
した高弾性チューブからシース内を減圧した状態で、 LiNO_2 水溶液入りの注入ベッセルに接続したバルブの開閉を繰り返しながら注入する方式（以下、減圧注入方式）により、同部へ LiNO_2 水溶液を供給できることを報告し、実用化に至った。

一方、上記検討後に行った既設 PCT 桁橋の補修^{例え}では、現場の諸要因により必ずしも実験のように精度良く定着部背面の密閉度の判断を行えない場合があった。そこで、実施工においては自然流下方式に引き続き減圧注入方式を行う自然流下・減圧注入併用方式（以下、併用方式）を標準としているのが現状である。以上より、本実験では、標準方法である併用方式を基準とし、比較のため減圧注入方式を行わなかった場合についても考慮することにした。

また、実施工では PC 桁の損傷を最小限にすることが望ましいため、**図-2** の 1-N-A に示すように既報⁸⁾に準じた $\phi 80\text{mm}$ のコア孔を、ブリーディングによる PC グラウト充てん不足が生じやすいと考えられるウェブ上端近傍の 1 箇所のみ削孔し、ここに水溶液注入用グラウトホースと、自然流下方式における排気口と減圧注入方式における吸引口を兼ねる高弾性チューブの両方を設置し施工する方法（以下、一孔式）を標準としている。一方、同コア孔から検束尺としてピアノ線や高弾性チューブを下方向に挿入し、グラウト充てん・充てん不足境界の概略位置を推定後、同位置への追加削孔を行い水溶液の注入口とする施工方法（以下、二孔式）が適用できる場合もある。そこで本実験では、一孔式を基準とし比較のため二孔式も考慮した。

以上の試験要因をまとめると**表-2**となり、 LiNO_2 水溶液の注入方法の概要はそれぞれ**図-2** に示す通りとなる。なお、試験体名は「削孔数（1 または 2）-自然流下方式（N）-減圧注入方式の有無（A または 無）」とした。

LiNO_2 水溶液は、実施工で使用しているものと同じ 40% 濃度品を使用し、**写真-2**のように試験体および機材を配置し注入した。また減圧注入方式で使用する真空ポンプは、本補修工法の実施工で使用している**写真-2**右下隅に示すものを使用した。最大真空度は真空ポンプを用いたグラウト再注入に関する文献⁹⁾で必要とされる真空度（ -0.070MPa ）を満足している。 LiNO_2 水溶液の注入時間は、 LiNO_2 添加補修材の充てんを同水溶液注入作業の翌日に行う工程を想定し 20 ± 1 時間とし、1-N-A および 2-N-A については、10 分間の自然流下方式の後、既報⁷⁾



()は実施工で必要となる削孔径の例を示す。
高弾性チューブを挿入位置では挿入作業のため、 $\phi 80\text{mm}$ が必要となる。

図-2 LiNO_2 水溶液の注入方法概要図



写真-2 LiNO_2 水溶液注入状況

表-2 試験要因

試験体名	LiNO_2 水溶液注入方法
1-N-A	一孔式 自然流下・減圧注入併用方式
2-N-A	二孔式 自然流下・減圧注入併用方式
1-N	一孔式 自然流下方式
2-N	二孔式 自然流下方式

で不動態化に要した時間を参考に、既報⁷⁾の対象ケーブルの腐食程度と本試験におけるそれとの相違を考慮して、3倍となる30分間減圧注入方式を行い、その後は再び自然流下方式とした。LiNO₂水溶液の除去後、自然流下方式により通常のPCグラウトと比較して高い小間隙充てん性を有する⁷⁾LiNO₂添加補修材を充てんした。2-N-Aと2-NはLiNO₂水溶液同様のシース下端側の注入孔から充てんしたが、シース鋼線間および鋼線間を充たした錆層により閉塞しシース上端まで充てんされなかったため、シース上端側に注入孔を設け、そこから充てんした。

2.3 錆試料の採取

表-3に錆試料採取箇所を示す。試験体はLiNO₂補修材充てん後14日で解体し、表-3の断面図において緑着色したように、周辺をPC鋼材で囲まれているため最もLiNO₂水溶液の浸入が困難と考えられるPC鋼線束内部に生じた錆を対象に、A点、B点の2点から試料を採取した。表-3の側面写真に示すように、A点はPC鋼線束以外のシース内空隙が既設グラウトで充てんされた区間とし、表-3の平面写真に示すように最外縁のPC鋼線を取り外した状態で、Cl⁻による著しい腐食により、上述のLiNO₂添加

表-3 錆試料採取箇所

試験体名	錆試料採取箇所		断面図 (PC鋼線配置図)	錆試料採取箇所詳細(平面図)	
	側面写真 (赤:A点, 青:B点)	平面写真 (赤:A点, 青:B点)		1-N-A	
1-N-A					
2-N-A					
1-N					
2-N					
備考	0 100 200 300 400 500 600 700 800 900		錆試料はPC鋼材束内部の緑着色部から採取した。		

錆試料採取箇所詳細(平面図)		
<p>2-N-A</p> <p>()で挟まれた領域は、PC鋼線間が錆で充たされた領域</p>	<p>1-N</p> <p>()で挟まれた領域は、PC鋼線間が錆で充たされた領域</p>	<p>2-N</p> <p>()で挟まれた領域は、PC鋼線間が錆で充たされた領域</p>

補修材が通過できない程度までPC鋼線間が錆で充たされた箇所を目視で判断し決定した。また、B点は既設グラウトの充てん不足境界部近傍とし、A点同様の判断により決定した。後述のイオン分析において、0.2g以上の試料を採取する必要があったため、試料採取区間は、A点、B点ともに表-3の平面写真（詳細）に示すように長さ50mmとした。

3. 試験結果

3.1 分析方法と判定基準

2.3節で示した方法により採取した錆試料を過熱乾燥させて、純水を加え溶け出したCl⁻とNO₂⁻をイオンクロマトグラフ法により分析した。図-3に分析結果、すなわち各試験体の錆中のイオン濃度を示す。次に、本試験の目的である対象領域における本補修工法の適用性の判定は、図-3のデータを図-4に示すように各試験体の錆層内の [Cl⁻] / [NO₂⁻] で整理し、1章で述べたように、Cl⁻に対してNO₂⁻による腐食抑制効果が発揮されるとされる [Cl⁻] / [NO₂⁻] < 1.25を指標に行った。

3.2 自然流下方式のみの適用性

一孔式の自然流下方式のみで注入した1-Nは、A点もB点も [Cl⁻] / [NO₂⁻] > 1.25となっており、Cl⁻による腐食の進行を抑制するのに十分な量のNO₂⁻が供給されない結果となった。これは対象領域では表-3の平面写真詳細に示すように著しい腐食によりPC鋼線間が錆で充たされ極めて小間隙化された状態となっており、このような環境では粘性の低いLiNO₂水溶液であっても表面張力が卓越し、錆層内に残留する空気との置換が妨げられたためと考えられる。また一孔式の場合、対象領域では、LiNO₂水溶液の供給方向と空気の移動方向が逆になることも悪影響を及ぼしたと考えられる。この結果から一孔式の自然流下方式による注入だけでは、対象領域において十分

な補修効果が得られない可能性があると考えられる。

一方、同じ自然流下方式のみでも二孔式により注入した2-Nは [Cl⁻] / [NO₂⁻] < 1.25となっており、先ほどの1-Nに対してA点での補修効果に改善が見られた。これは二孔式の注入により、水溶液の供給と空気の移動が同方向となるため、両者の置換がスムーズになったことが一要因として推察される。ただし、表-3のPC鋼線配置断面図において、2-Nで対象としたPC鋼線は、その上部に比較的大きな間隙があり、表-3の平面写真詳細でもLiNO₂添加補修材の充てんが確認できることから、LiNO₂水溶液が比較的通過しやすい箇所であったことが要因と考えられる。実際、一方のB点では [Cl⁻] / [NO₂⁻] > 1.25となっており十分なNO₂⁻が供給されていない。その要因として、B点は表-3の平面写真詳細でLiNO₂添加補修材の閉塞が確認できるようにA点と比較してPC鋼線間がさらに小間隙化されていること、またB点はA点には無いような既設グラウトの充てん不足が生じておりPC鋼線束の外側に比較的水溶液が通過しやすい間隙があることなどにより、LiNO₂水溶液が対象領域以外を優先的に通過したことが考えられる。以上より、二孔式による改善は対象領域におけるLiNO₂水溶液の通過しやすさに影響を受けると考えられ、改善範囲は限定的なものと判断される。

以上、自然流下方式のみ試験体である1-Nと2-Nの考察から、グラウト等に比べて浸透性の高いLiNO₂水溶液を用いた場合でも、対象領域で良好な補修効果が得られない可能性があるものと推察された。

3.3 併用方式の適用性

次に、実施工で標準としている一孔式の併用方式で注入した1-N-Aは、A点、B点ともに [Cl⁻] / [NO₂⁻] < 1.25となっており、Cl⁻による腐食の進行を抑制するのに十分なNO₂⁻の供給が可能で、対象領域に対する適用性があることが確認された。

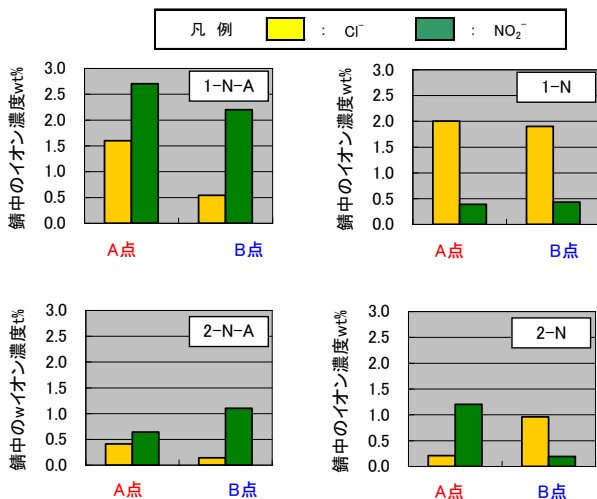


図-3 各試験体の錆層のイオン濃度

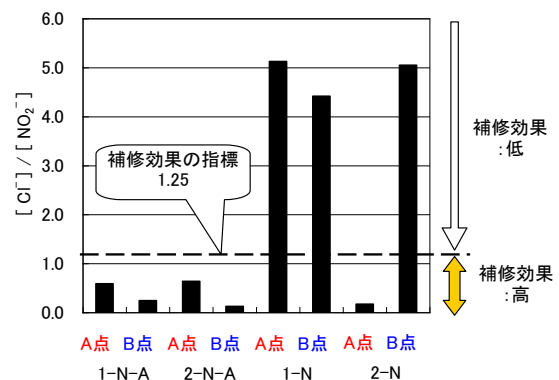


図-4 各試験体の錆層の [Cl⁻] / [NO₂⁻]

表-3のPC鋼線配置断面図において、1-N-Aは自然流下方式のみで注入した1-Nと2-Nと比較してPC鋼線が密集した状態で束となっており、対象領域へのLiNO₂水溶液の供給難易度が1-Nと2-Nと比較して著しく低い状況であったとは考えられず、また表-3の平面写真詳細で示した腐食程度も同程度と考えられることから、対象領域へのNO₂の供給においては、併用した減圧注入方式が有効に機能したと推察される。減圧注入方式は、対象領域に対して真空ポンプによる減圧を断続的に付与した状態でLiNO₂水溶液を注入する方法であるため、一般的に知られる真空脱泡作用が生じ、対象領域に残留していた空気が、気泡径増大にともなう浮力の増大により速やかに上方へ移動し、結果として、LiNO₂水溶液と空気の置換がスムーズに行われ、効果的にNO₂を供給できたものと推察される。

1-N-Aと同じく減圧注入式を併用した2-N-Aも、A点、B点ともに $[Cl^-] / [NO_2^-] < 1.25$ となっており、Cl⁻による腐食の進行を抑制するのに十分なNO₂の供給が可能で、対象領域に対する適用性が確認された。ただし、PC桁への削孔はPC桁の損傷や施工性の観点から必要最小限にすることが望ましい一方、図-4に示す $[Cl^-] / [NO_2^-]$ において、1-N-Aと2-N-Aの間で有意な差が生じていないことから考えると、これまでの実施工同様、一孔式の自然流下・減圧注入併用方式を標準的な施工方法として位置づけることが妥当であると考えられる。

4. まとめ

本稿では、LiNO₂水溶液を前処理としてシーす内に注入し、Cl⁻より腐食したPC鋼材の腐食の進行を抑制し、同水溶液の除去後、LiNO₂添加補修材を充てんするグラウト充てん不足部の補修工法において、グラウト充てん・充てん不足境界近傍でCl⁻により著しい腐食が生じたPC鋼線束内部を対象領域として、これに対する適用性を明らかにすることを目的に、同部を模擬した試験体を作製し、LiNO₂水溶液の注入方法をパラメータとした注入実験を行った。本稿で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 自然流下方式のみを用いて LiNO₂ 水溶液を注入した場合には上述の対象領域の Cl⁻による腐食の進行を抑制するのに十分な量の NO₂を供給できない可能性がある。その要因として発錆により PC 鋼線間が小間隙化され、同水溶液の表面張力が卓越し同水溶液と空気の置換が妨げられることが考えられた。
- 2) 自然流下方式に加えて、真空ポンプを用いた減圧注入方式を併用してLiNO₂水溶液を注入した場合には、自然流下方式のみの場合と比較して、対象領域のNO₂の供給量が多くなり、Cl⁻による腐食の進行を抑制するのに十分な量のNO₂を供給できた。これより本方法の対象領域

に対する適用性が確認できた。

3) 減圧注入方式は、真空ポンプによる減圧を断続的に付与した状態でLiNO₂水溶液を注入できるため、一般的に知られる真空脱泡作用が生じ、鏽層内に残留していた空気が、気泡径増大にともなう浮力の増大により速やかに上方へ移動し、結果として、LiNO₂水溶液と空気の置換がスムーズに行われ、効果的にNO₂を供給できたものと推察される。

4) PC桁へ削孔はPC桁の損傷や施工性の観点から必要最小限にすることが望ましい一方、自然流下・減圧注入併用方式においては一孔式と二孔式に有意な差が生じていないことから、これまでの実施工同様、一孔式による自然流下・減圧注入併用方式を標準的な施工方法として位置づけることが妥当であると考えられる。

参考文献

- 1) 小林, 大平, 登石, 羽田: 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
- 2) 浜, 千歩, 秋田: コンクリート中の鋼材腐食に及ぼす亜硝酸イオンおよび塩化物イオン濃度の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, pp.55-60, 2000.
- 3) 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
- 4) 福田, 森川, 鴨谷: 亜硝酸リチウムを用いた PC グラウト未充てん部の補修方法の効果に関する検討, 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 12 巻, pp.257-264, 2012
- 5) 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
- 6) 日本道路公団試験研究所, プレストレストコンクリート建設業協会: PC 橋の耐久性能向上技術に関する研究, 共同研究報告書, 2003
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 日本道路公団試験研究所, プレストレストコンクリート建設業協会: PC 橋の耐久性能向上技術に関する研究, 共同研究報告書, 2003