

論文 グラウト充てん不足部の亜硝酸リチウム水溶液注入補修の品質管理に関する検討

鴨谷 知繁*1・中司 和宏*2・石井 浩司*3・森川 英典*4

要旨: 本稿では, グラウト充てん不足部において塩化物により腐食した PC 鋼材を模擬した実物大試験体で亜硝酸リチウム水溶液注入実験を行った。同水溶液注入中の PC 鋼材の自然電位の経時変化から腐食抑制効果を判断する従来の品質管理手法には適用上の限界があり, その場合には減圧注入方式の継続時間による管理手法が必要となることを明らかにした。また, 拭き取り法による PC 鋼材表面錆中の塩化物調査で, 塩化物が検出された PC ケーブルの実施工においても, 同様の傾向が確認された。これらの検討を踏まえ, 水溶液注入補修における品質管理フローを提案した。

キーワード: 亜硝酸リチウム, 自然電位, 塩化物イオン, 補修, 品質管理, グラウト, 既設 PC 橋

1. はじめに

近年, 既設 PC 橋の長寿命化が求められており, 著者らは同橋のグラウト充てん不足部で塩化物イオン(以下, Cl⁻) の侵入より生じた PC 鋼材の腐食に着目し, 亜硝酸リチウム水溶液 (以下, 水溶液) を前処理として注入する補修工法 (以下, 本工法) について検討を行ってきた。従来工法であるグラウト再注入工法と比較して高い腐食抑制効果が得られることが明らか^(例えば1)となり, 実橋での補修 (以下, 実施工) にも適用されている。

本工法の腐食抑制メカニズムは, 水溶液に含まれる亜硝酸イオン (以下 NO₂⁻) が PC 鋼材表面の錆層内に浸入し, 錆層内で[Cl⁻]/[NO₂⁻] \leq 1.25^(例えば2)以下となり, PC 鋼材表面が再不動態化されることで説明される。よって, 実施工においても, 上記条件を満足するかどうか直接管理することができれば理想的であるが, 様々な制約条件のため現実的ではなく, 何らかの間接的な指標に基づいて品質管理を行う必要がある。

そこで著者らは, 水溶液注入時の PC 鋼材の自然電位を照合電極と電位差計を用いてリアルタイムで測定し, 図-1に示すような JIS 規格³⁾ に示される塩化物に対する

コンクリート用 (アノード型) 防錆剤において鋼材腐食が生じない場合の曲線形状と一致するか否かを実施工の品質管理基準 (以下, 従来基準) として採用してきた。実橋でも図-1 のような曲線形状が得られることが確認されている⁴⁾ものの, 補修実績はまだ少なく, 例えば, 図-2 のように特に著しい腐食を生じた PC 鋼材束への適用性が十分確認されたとは言い難い。

そこで本稿では, PC グラウト充てん部と充てん不足部との境界部 (以下, 境界部) 近傍で Cl⁻により著しい腐食を生じた PC 鋼線束を再現した実物大試験体で水溶液注入実験⁵⁾を行い, 従来基準の適用性を検討した。水溶液注入時の PC 鋼材束の自然電位と錆層内の[Cl⁻]/[NO₂⁻] 分析結果との比較を行った結果, 従来基準には適用上の限界があり, その場合には, 減圧注入方式⁵⁾の継続時間による管理手法が必要となることを明らかにした。また, 拭き取り法による PC 鋼材表面錆中の塩化物調査で, 塩化物が検出された PC ケーブル実施工においても, 同様の傾向が確認された。これらの検討を踏まえ, 水溶液注入補修における品質管理フローを提案した。

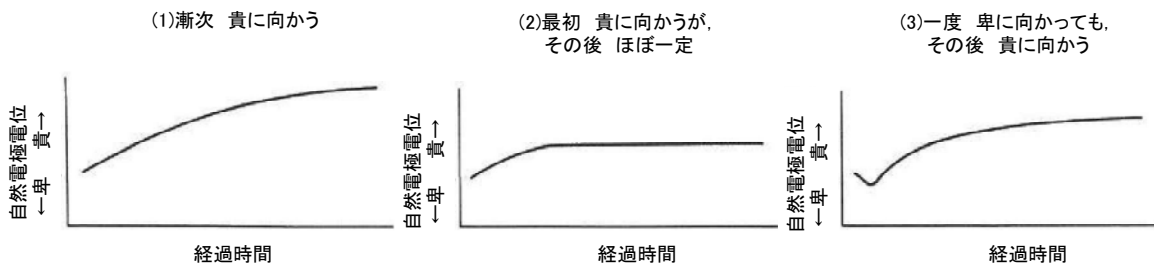


図-1 JIS A 6205(1993)に示される判定手法

*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 (株)ピーエス三菱 大阪支店土木工事部

*3 (株)ピーエス三菱 技術本部技術部 博(工) (正会員)

*4 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)

2. 実物大試験における従来基準の適用性の検討

2.1 試験方法

試験体は図-3 に示すように既設 PCT 橋の上縁定着ケーブルのウェブ部に境界部がある場合を想定し製作したものである⁵⁾。製作方法は以下の通りで、まず長さ 900mm 直径 50mm 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。シースの曲げ上げ配置により 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、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 3% の塩水への浸せき 1 時間と 23 時

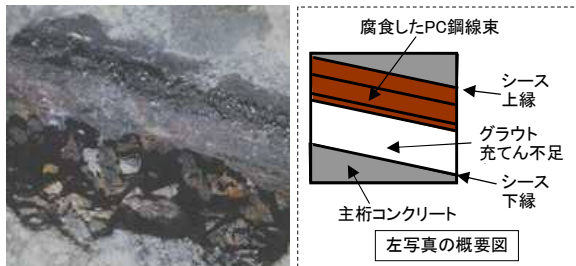


図-2 実橋で確認された PC 鋼材の著しい腐食

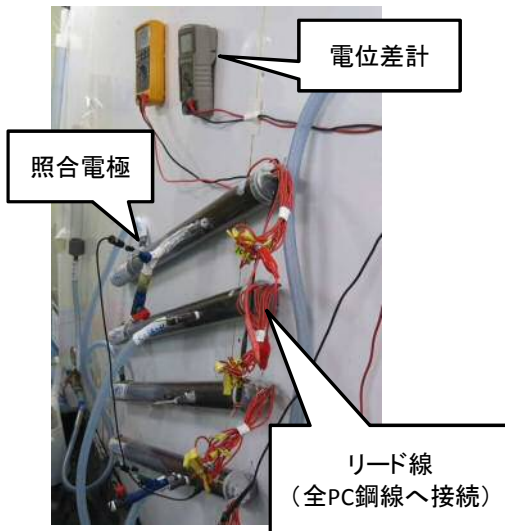


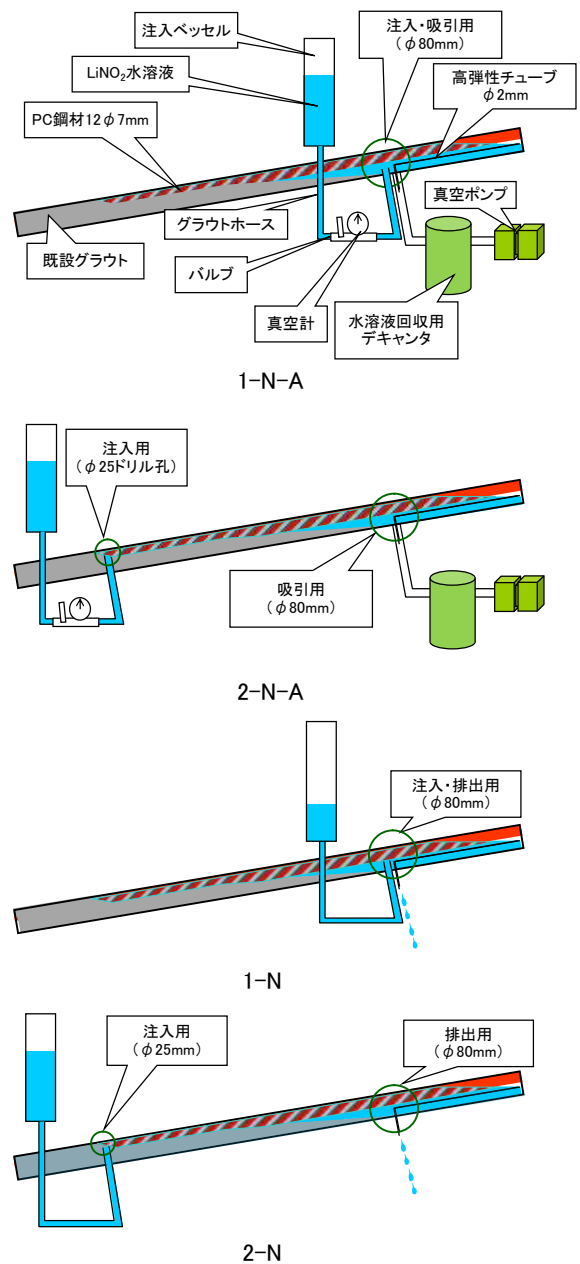
図-3 試験体の外観および水溶液注入時の測定状況

表-1 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

間の気中暴露 5 日間、24 時間の気中暴露 2 日間を 1 サイクルとした乾湿サイクルを 60 日間行うことで PC 鋼線束を促進腐食させた。全 PC 鋼線の上端にリード線を接続した後、シース上端を密閉処理し、ウェブ上部部に相当する位置にドリル孔を設けた。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をドリル孔からシース上端近傍まで挿入し、ドリル孔とチューブの隙間をエポキシパテで密閉処理した。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、同部に注入用ホースを堅固に取り付けた。

水溶液の注入方法は、表-1 と図-4 に示す 4 種類とし、試験体名は「削孔数 (1 または 2) -自然流下方式(N)-減



()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、φ80mmが必要となる。

図-4 水溶液の注入方法概要図

圧注入方式の有無（A または無）」とした。自然流下方式は注入ベッセル内にある水溶液のヘッド圧だけを利用して注入する方法であり、一方、減圧注入方式は、真空ポンプに接続した高弾性チューブを通じてシース内を減圧した状態で、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である。

水溶液は、実施工で使用しているものと同じ 40%濃度品を使用した。その注入時間は、亜硝酸リチウム添加補修材の充てんを水溶液注入作業の翌日に行う工程を想定し 20±1 時間とした。減圧注入方式を併用する 1-N-A および 2-N-A では、自然流下方式を 10 分間行った後、減圧注入方式を 30 分間行い、その後自然流下方式とした。減圧注入方式の継続時間は、実施工⁴⁾において、PC 鋼材の自然電位が安定するのに要した時間に対し、実施工と本試験との腐食程度の相違を考慮して決定した。

2.2 測定項目

測定項目は、PC 鋼材束内部から採取した錆試料おけ $[Cl^-]/[NO_2^-]$ と、水溶液注入時の PC 鋼材の自然電位とした。前者は、最も補修が困難と考えられる PC 鋼材束内部の内、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(A 点)と、既設グラウトの充てん不足境界部近傍(B 点)の PC 鋼線表面から採取し、イオンクロマトグラフ法により求めた。また後者は、図-3 に示すように全 PC 鋼線と導通のある状態で、飽和カロメル照合電極と電位差計を用いて測定した。

2.3 試験結果と考察

$[Cl^-]/[NO_2^-]$ の測定結果を図-5 に示す。自然流下方式だけの 1-N、2-N は、削孔数により相違がある個所があるものの $[Cl^-]/[NO_2^-] > 1.25$ となり腐食抑制効果が不十分な箇所がある一方、減圧注入方式を適用した 1-N-A、2-N-A は、 $[Cl^-]/[NO_2^-] < 1.25$ 以下となり、腐食抑制効果が得られる結果となった。この理由は、減圧注入方式では真空脱泡効果が発揮され、自然流下方式では浸入できない錆層の小間隙まで水溶液が浸入できる⁵⁾ためと考えられる。

次に、PC 鋼材の自然電位を図-6 に示す。いずれも注入開始直後の -40~-180 (mV,SCE) から最終測定時の -170~-250 (mV,SCE) まで単調に卑化しており、著者らが採用してきた従来基準では、すべての試験体で腐食抑制効果が得られていないと判定された。

イオン分析で腐食抑制効果が確認された試験体で、PC 鋼材の自然電位が卑化した理由として以下が考えられる。気中暴露状態にある腐食した PC 鋼線を水溶液に浸せきすると、表面の湿潤化による酸素の供給速度の低下が生じカソード反応が抑制される。これが主要因となり自然電位が卑化する、すなわち図-1(3)の「一度卑に向かう」傾向⁶⁾がある。本試験は、酸素の供給速度が大きい気中暴露状態の PC 鋼材に水溶液を注入したこと、また PC 鋼

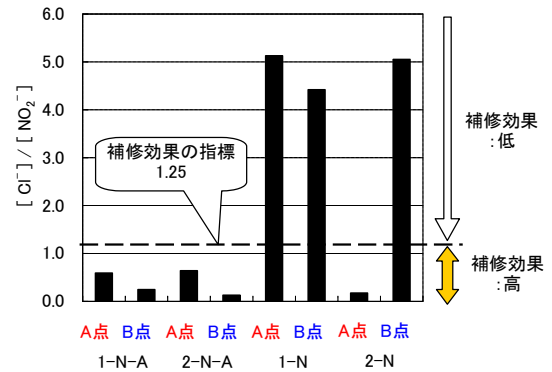


図-5 各試験体の錆層の $[Cl^-]/[NO_2^-]$

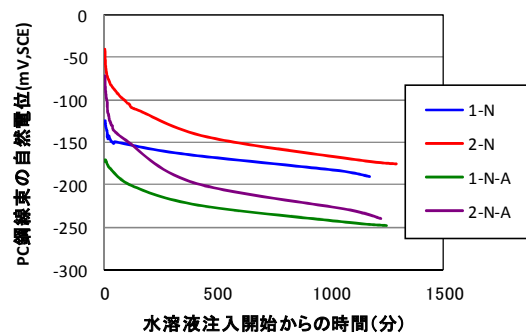


図-6 水溶液注入時の PC 鋼材の自然電位

材束であるため、水溶液注入による湿潤化の開始時間や進行速度が PC 鋼材束内外でばらついたことにより、卑化傾向が支配的となり、 NO_2^- による腐食抑制効果を示す貴化が表面化しなかったためと推察される。

また、従来基準による判定で、イオン分析で確認された腐食抑制効果の差を検出できない理由として、前述の要因に加え、イオン分析結果は PC 鋼材束内部の最も補修が困難とされる部分の測定結果であるのに対し、水溶液注入時の自然電位として測定されるのは、水溶液が浸入しやすい束外側から浸入しにくい束内側まで導通のある PC 鋼材の混成電位であり、湿潤化による卑化傾向が大きくなったためと推察される。

以上より、従来基準は、実施工における品質管理に対する適用上の限界があり、特に Cl^- により PC 鋼線束に著しい腐食が生じている場合には、最も補修が困難と推定される境界部近傍の PC 鋼線束内部においても $[Cl^-]/[NO_2^-] < 1.25$ を確保できた主要因である減圧注入方式を、実験的に効果が確認された継続時間である 30 分で管理する手法が必要であると判断された。

3. 実施工における塩化物調査と自然電位測定結果に関する考察

3.1 補修対象橋の概要

補修対象は図-7 に示す兵庫県内の山間部にある既設 PC 橋の M 橋で、形式は単純ポストテンション方式 PCT 桁(6 主桁)である。目視点検で主ケーブルに沿ったひび割



図-7 M橋の概要

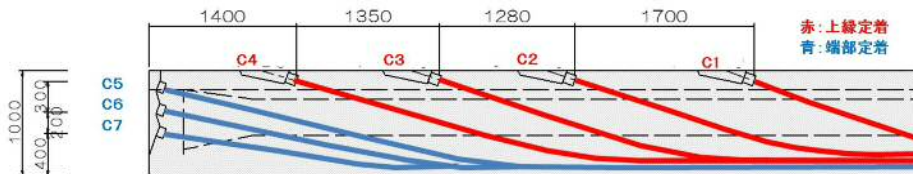


図-8 M橋のケーブル配置

れやエフロッセンスが確認され、平成 22 年度に詳細調査が実施された。G6 桁を対象としたグラウト充てん状況調査において、グラウト充てん不足や、Cl⁻による PC 鋼材の腐食が確認され、平成 26 年に本工法を用いた補修が実施された。主ケーブルは、図-8 に示すように 1 主桁あたり 7 本の 12φ7mm が配置されており、内 4 本が上縁定着ケーブルである。

3.2 PC 鋼線束表面錆層の Cl⁻ 調査（拭き取り法）

グラウト充てん不足部における PC 鋼材の腐食は定着部から侵入した雨水に起因して生じたと考えられたため、同雨水が通常の雨水なのか、あるいは凍結防止剤を含む雨水なのか判別することを目的に、水溶液注入に先立ち PC 鋼線束表面錆層の Cl⁻ を調査した。調査は、図-9 に示すように、精製水を浸み込ませた綿棒による拭き取りと、精製水への Cl⁻ の溶出を数度繰り返して検水を作成し、それに含まれる Cl⁻ 濃度を、市販の検知管等を用いて測定する簡易的な方法である拭き取り法により行った。錆層の Cl⁻ を定量的に評価するほどの精度は期待できないため、上述の雨水に含まれる Cl⁻ 濃度(10ppm 程度)を閾値として表-2 に示す 3 グレードにより測定結果を分類した。

表-3 に全主桁の上縁定着ケーブル (C1~C4) と最も上部に定着された端部定着ケーブル (C5)、計 60 箇所分の調査結果を示す。上縁定着ケーブルの多くで Cl⁻ が検出された一方、端部定着ケーブルは 1 本を除いて、Cl⁻ は検出されなかった。M 橋は、本工法による補修の直後まで橋面防水が施工されていない状態であったため、上縁定着ケーブルの方が、定着部背面からグラウト充てん不足部へ Cl⁻ が侵入しやすかったと考えられる。

3.3 水溶液注入時の自然電位（塩化物有の場合）

拭き取り調査で塩化物有と分類されたケーブルの水

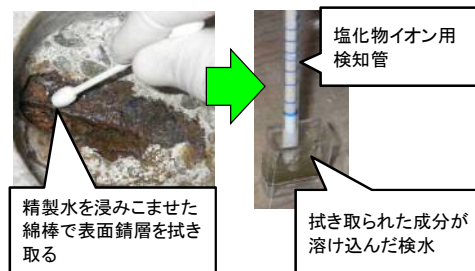


図-9 PC 鋼線束表面の Cl⁻ 調査（拭き取り法）

表-2 拭き取り法におけるグレード分類

塩化物のグレード	検水の [Cl ⁻] (ppm)
有	10以上
微少	1~10
無	1未満

表-3 拭き取り法による調査結果 (M 橋)

起点/終点	終点側					起点側				
	C5	C4	C3	C2	C1	C2	C3	C4	C5	
桁 No.	G6	有	有	有	有	有	有	有	有	無
	G5	無	有	微少	有	有	微少	微少	無	無
	G4	無	微少	有	無	有	有	有	微少	無
	G3	無	無	無	無	有	有	微少	有	無
	G2	無	無	有	有	無	有	有	有	無
	G1	無	有	有	有	有	有	有	無	有
定着位置	端部		上縁			上縁			端部	

溶液注入時の自然電位の抜粋を図-10 に示す。概ね 15 分経過すると経時変化が収束し安定したが、図-1 に示したタイプ(1)~(3)のように貴化するものと、卑化するものが混在した結果となり、2 章に示した実物大試験と同様、

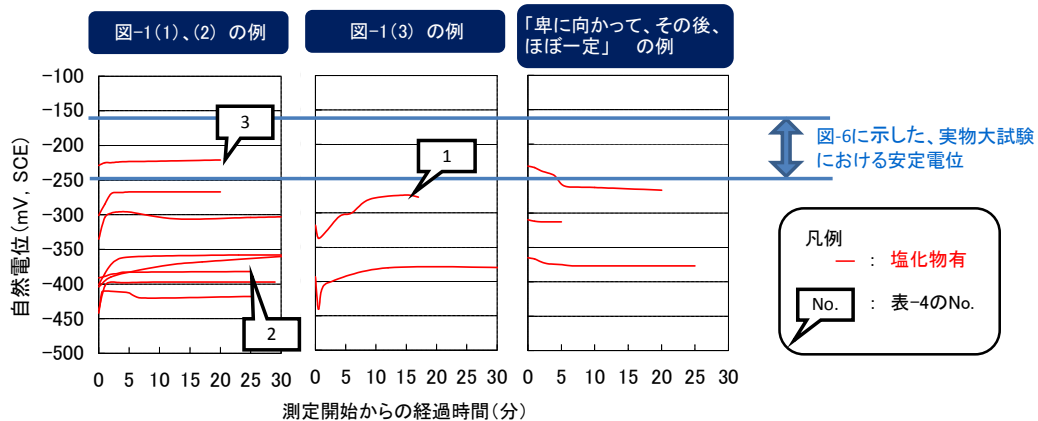


図-10 水溶液注入時の自然電位（塩化物有の場合）

従来基準の適用上の限界があり、その場合には減圧注入方式の継続時間による管理手法が必要となることが明らかとなった。

ただし本橋においては、安定電位が実物大注入実験の結果より 20mV～170mV 程度卑な値を示し、これは実物大試験より腐食量や塩化物侵入量が多いことが推察された。そこで安全側を考慮して、自然電位の変化方向に関わらず、減圧注入方式を 2 章で示した実物大実験で効果が継続時間である 30 分間行った。

3.4 PC 鋼材表面錆層のイオン分析結果

水溶液注入補修の効果を確認するため、水溶液注入補修終了後、PC 鋼線束表面から錆を採取し、2.2 節と同様の方法で錆層内の $[Cl^-] / [NO_2^-]$ を調査した。試料は PC 鋼線束外部から採取したものであるため、最も補修が困難と考えられる境界部近傍の PC 鋼線束内部における補修効果を直接評価できるものではないものの、表-4 に示すように著しい腐食が PC 鋼材において $[Cl^-] / [NO_2^-] < 1.25$ 以下となっており、本工法の補修による腐食抑制効果が推察される結果となった。

3.5 水溶液注入時の自然電位（塩化物無、微少の場合）

また本橋では、拭き取り調査で塩化物無または微少と分類され、腐食抑制効果の判定において図-1 に示す JIS 規格³⁾ が適用範囲外と考えられるケーブルについても、参考のため水溶液注入時の自然電位の測定を行った。図-11 に示すように無、微少いずれも貴化と卑化が混在した結果となったが、塩化物有と比較して短時間（約 3 分程度）で電位変化が収束した。またその安定電位は、図-12 に示す全 60 ケーブルの水溶液安定電位のように、塩化物有と比較して明確に貴な傾向が得られた。塩化物無または微少の場合の水溶液注入は目視観察が不可能な部分などに対する安全側の対策としての意味合いであり、 NO_2^- による不動態化が速やかに行われると考えられるため、簡易的な品質管理手法として水溶液注入時間を 3 分とする方法が妥当と考えられる。

表-4 水溶液注入後に行った錆層の $[Cl^-] / [NO_2^-]$ 調査結果

No.	PC 鋼材の腐食状況 (側面)	$[Cl^-] / [NO_2^-]$
1		0.24
2		0.24
3		0.07

4. 水溶液注入補修における品質管理フローの提案

上述した各検討を踏まえ、本章では図-13 に示すような本工法の水溶液注入時の品質管理フローを提案する。まず、3.3 節で述べたように、拭き取り法による PC 鋼線束表面錆層の Cl 調査を実施し、補修対象となるケーブルを塩化物有、微少、無の 3 つのグレードに分類する。次に、塩化物無、微少の場合には、自然流下方式を 3 分間行った後、グラウト充てん不足部上端の密閉性が高い場合においても、高弾性チューブの先端より上方へ確実に水溶液を供給することを主目的⁷⁾として減圧注入方式を 3 分間実施することで、腐食抑制効果が得られたものと判断する。

一方、塩化物有の場合には、水溶液注入時の自然電位を測定し、貴化した場合には従来基準に準じ、自然流下方式および減圧注入方式注入を電位安定が得られるのに要した時間行う。一方、卑化した場合には、自然流下方式を電位安定が得られるのに要した時間継続した後、減圧注入方式を 30 分間行うことで腐食抑制効果が得られたと判断する。

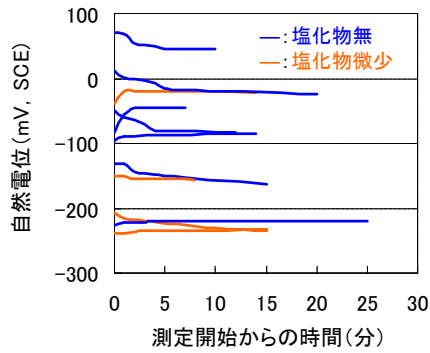


図-11 水溶液注入時の自然電位（塩化物無、微少の場合）

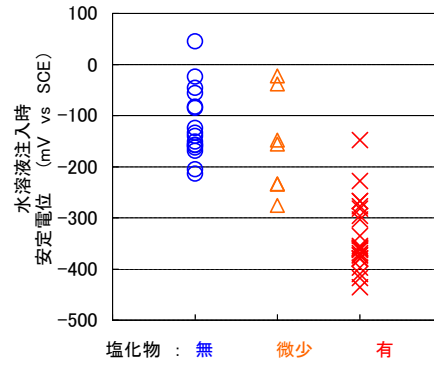


図-12 塩化物による分類と安定電位との関係

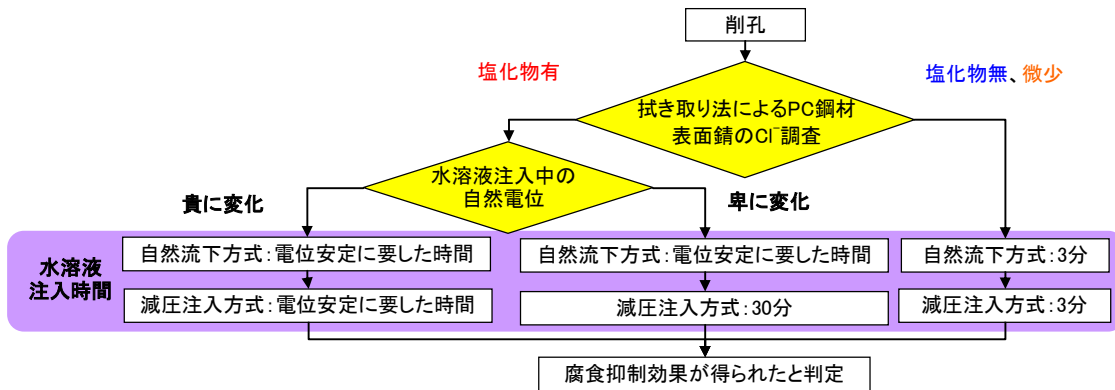


図-13 品質管理フロー

5. まとめ

本稿では、実物大試験と実施工を通じて、水溶液注入補修における品質管理手法について検討を行った。以下に得られた知見をまとめる。

- 1) 実橋のグラウト充てん不足部に水溶液注入補修を行った場合、自然電位が貴化した場合に腐食抑制効果があるとした従来の管理基準では、腐食抑制効果が発揮されたか判断できない場合があり、その場合には減圧注入方式の継続時間による管理手法が必要となる。
- 2) PC 鋼材表面錆層の Cl⁻を調査する手法として、塩化物無、微少、有の3グレードに分類可能な拭き取り法を提案し、実施工での適用性を確認した。
- 3) 実施工における水溶液注入補修の品質管理手法として、拭き取り法による PC 鋼材表面錆層の Cl⁻調査結果と、水溶液注入時の自然電位の変化方向に着目した品質管理フローを提案した。

謝辞

実施工では、兵庫県県土整備部および兵庫県西播磨県民局光都土木事務所にご指導いただいた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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良部の 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
- 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) 日本工業規格：JIS A 6205(1993)
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 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