

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

(株)ピーエス三菱 正会員 工修 鴨谷 知繁
 (株)ピーエス三菱 正会員 工博 青山 敏幸
 (株)ピーエス三菱 正会員 工博 石井 浩司
 神戸大学大学院 教授 森川 英典

Abstract : The prestressing steels are protected against steel-corrosion due to PC-grout in post-tensioned structures. Unfortunately, incomplete grouting, like poor procedures, poor mixtures and so on, formed the voids in the post-tensioning duct. The prestressing steels suffered corrosion damages due to chloride ions invasion into the voids in the area spraying antifreezing agent in winter season. The re-grouting using ordinary portland cement performs as a countermeasure against the voids. However, it has not been verified that the re-grouting prevents corrosion of prestressing steels. So, this paper discusses effect of re-grouting using portland cement and portland cement with LiNO_2 agent against corrosion.

Key words : Prestressing Steel, Corrosion, PC-grout, Antifreezing Agent

1. はじめに

ポストテンション方式のPC構造物において、PCグラウトの役割はPC鋼材と構造物との一体化およびPC鋼材の腐食からの保護である。しかし、シースの変形や破損とコンクリートの「のり」の侵入によるグラウト注入障害や中間排気口の未設置によるシース内の残留空気の存在などの施工トラブル、グラウトのブリーディング発生やシース内のグラウト先流れなどグラウトの性能不足によるグラウト未充てんが確認・報告されている¹⁾。さらには凍結防止剤を散布するような寒冷地においては、上縁定着または端部定着された定着部付近から塩化物イオンが侵入し、PC鋼材の腐食が報告²⁾されており、最悪の場合にはPC鋼材の破断が懸念されている。

これらグラウト未充てん部の補修対策として、セメント系ノンブリーディングタイプのグラウトを使用して再注入しているのが現状である³⁾。しかし、グラウト未充てん部またはPCグラウトに塩化物イオンが侵入したことにより腐食したPC鋼材に対して、グラウト再注入による補修を行った場合の腐食抑制効果に関する報告は少なく⁴⁾、十分に明らかになっているとは考えられない。

一方、コンクリート中の鋼材腐食を抑制する防錆剤として亜硝酸塩がある。亜硝酸塩はコンクリート中の鋼材腐食抑制に用いられる陽極型防錆剤の一種であり、コンクリートの配合において $\text{Cl}^-/\text{NO}_2^-$ が1.25以下となる亜硝酸イオン量が確保されていれば鋼材腐食の抑制効果が認められると報告⁵⁾されている。そこで本論文は、凍結防止剤が散布される環境に位置するポストテンション方式PC構造物において、グラウト未充てん部に塩化物イオンが侵入しPC鋼材が腐食した場合を模擬した試験体を製作し、グラウト再注入、亜硝酸塩として LiNO_2 を添加したグラウトによる再注入、さらには LiNO_2 溶液浸漬後の LiNO_2 添加グラウト再注入の各補修における腐食抑制効果について実験的に検討した。

2. 実験概要

2.1 試験体の製作

図 - 1 に試験体の概要図を示す。試験片はPC鋼材の代わりに 13mmみがき丸鋼を用い、5%NaCl水溶液を2回/日散布することで腐食させ、散布期間を2週間、2ヶ月と変化させることで腐食量を変化させ

た。また、著しい腐食として撤去桁から採取したD13鉄筋を参考として、同じく試験片とした。試験片の腐食状況を写真 - 1 に示す。それぞれの腐食量は3本の平均値で代表させると13.3mg/cm²、43.4mg/cm²および256.3mg/cm²で、以降、腐食程度A、B、Cと表す。試験片の両端は塩ビ管を設置して腐食から保護し、試験片の一端には電気化学的測定用のリード線を設置した。

シー스는塩ビ管を使用し、かぶりが10mmとなるように試験片をシース内に設置した。電気化学測定を行うための対極を試験体内に設置するとともに、塩ビ管に試験片の鋼材電位計測用の計測孔を設けた。シース内を充てんするPCグラウトは、早強ポルトランドセメントと高粘性グラウト混和剤を使用し、W/C=45%とした。

2.2 試験概要

試験はシリーズ Ⅰ、シリーズ Ⅱ に分けて行った。まず、シリーズ Ⅰ では腐食程度Bの試験片を6.5%、13.0%および40.0%のLiNO₂水溶液に浸漬し、LiNO₂水溶液へ浸漬した腐食PC鋼材の挙動把握を目的に鋼材電位の経時変化を電気化学的に測定した。一方、シリーズ Ⅱ では試験要因を表 - 1 のように腐食程度、補修の方法(LiNO₂水溶液への浸漬とLiNO₂添加の有無を考慮したPCグラウト再注入)とし、各補修の腐食抑制効果の把握を目的に、試験体製作約60日後から約30 相対湿度80%の養生槽において腐食促進(暴露)試験を行った。測定項目は、試験片の鋼材電位と分極抵抗とし定期的に測定を実施した。分極抵抗は掃引速度を5mV ~ 10mV/minとし直流分極抵抗法により計測した。

3 . 実験結果と考察

3.1 LiNO₂水溶液中の腐食試験片の挙動

シリーズ Ⅰ および比較のための飽和Ca(OH)₂水溶液に浸漬した場合の測定結果を図 - 2 に示す。飽和Ca(OH)₂水溶液に浸漬した場合には、鋼材電位は-400mV(SCE)から徐々に卑に移行し-600mV(SCE)に達した。一方、LiNO₂水溶液に浸漬した場合には、時間の経過と共に鋼材電位は貴に移行し、-100 ~ -250mV(SCE)に達した。鉄の電位 - pH図⁶⁾から前者の鋼材は腐食もしくは不完全な不動態、後者の鋼材は不動態化していると判断される。また、後者において貴に変化する速度はLiNO₂水溶液濃度に依存しており、濃度が高い程、早く変化する傾向にあった。炭素鋼の錆層はミクロ的に欠陥を多く含む緻密性の低い組織であるとの報告⁷⁾を考慮すると、試験片をLiNO₂水溶液に浸漬した場合には、NO₂⁻イオンが錆層に侵入し鋼材表面に到達すると考えられる。錆層に存在するCl⁻イオンとNO₂⁻イオンとの比率が一定値以下⁵⁾となったために鋼材が不動態化したと推定される。LiNO₂水溶液濃度が

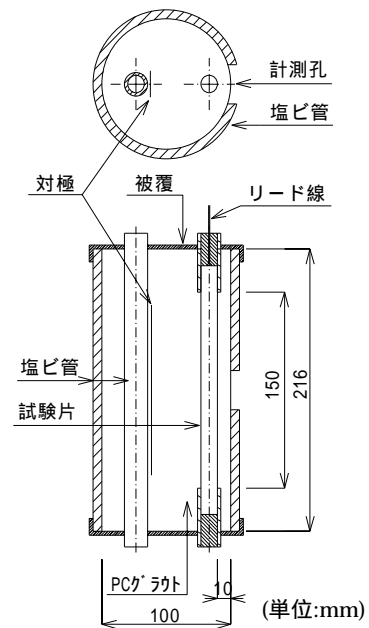


図 - 1 試験体の概要図

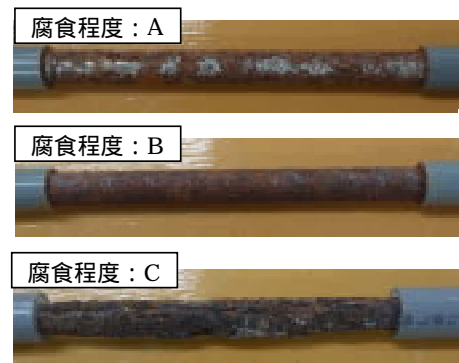


写真 - 1 試験片の腐食状況

表 - 1 試験要因(シリーズ Ⅱ)

腐食程度	Cl ⁻ 濃度	補修の方法	
		LiNO ₂ 水溶液浸漬 NO ₂ 濃度 - 時間	PCグラウト NO ₂ 添加量
A	0kg/m ³	無	0kg/m ³
			6kg/m ³
			9kg/m ³
B		6.5% - 4日	0kg/m ³
			6kg/m ³
			9kg/m ³
C	13.0% - 4日	無	0kg/m ³
			6kg/m ³
			15kg/m ³

補修は の順で行った

高い程，錆層に侵入するNO₂⁻イオンは早期に多くなり鋼材電位が早期に貴化と推定される。

3.2 LiNO₂無添加PCグラウトの腐食抑制効果

図 - 3 にLiNO₂無添加PCグラウトを充てんした試験片の分極抵抗の経時変化を示す。腐食程度A, B, Cの試験片の分極抵抗は，それぞれ140～250kΩcm²，40～80kΩcm²，3kΩcm²となっており，表 - 2 に示すCEBの腐食速度判定基準⁸⁾を参照すると腐食程度Aについては不動態化していると考えられるものの，腐食程度B,Cについては十分な腐食抑制効果が得られていない。試験片の腐食過程でNaCl水溶液を散布しており，錆層にもCl⁻イオンを含んでいると推定される⁷⁾ため，腐食がある程度以上になると，通常のLiNO₂無添加PCグラウト再注入による腐食抑制効果が期待できない可能性が考えられる。

3.3 LiNO₂添加PCグラウトの腐食抑制効果

図 - 4 にLiNO₂添加PCグラウトに埋設した試験片の分極抵抗の経時変化を示す。腐食程度Aおよび腐食程度CにおいてLiNO₂添加グラウトを充てんした試験体の方が，無添加グラウト充てん試験体に対して大きな分極抵抗が得られているケースがある。これはLiNO₂添加PCグラウトの硬化前後において，グラウト中に含まれる自由水中のNO₂⁻イオンが錆層中に一定量以上に浸透することによると推察される。ただし，暴露期間62日の現段階では，腐食抑制効果においてLiNO₂添加の有無による差が明確に生じているとは言い難い。腐食程度B, CにおいてはLiNO₂を15kg/m³を添加した試験体でも腐食鋼材を不動態化させるには至っていない。これは，腐食量が多い場合には錆層が厚く錆層内のCl⁻イオン量が増大しており，腐食抑制効果を得るのに十分な量のNO₂⁻イオンが錆中に浸透されなかったためと考えられる。以上より，LiNO₂添加PCグラウトによる腐食抑制効果が発揮されるのは，鋼材腐食が軽微な場合や，グラウト中のNO₂⁻イオンが拡散するのに十分な時間が経過した場合などに限られるものと推察されるが，その検証については今後の課題であり，測定を継続することにより確認する予定である。

3.4 LiNO₂水溶液浸漬とLiNO₂添加PCグラウトの腐食抑制効果

図 - 5 に LiNO₂水溶液に浸漬後，LiNO₂添加 PC グラウトを充てんした試験片の分極抵抗の経時変化を示す。腐食程度 B の試験片においては，PC グラウトを充てん前の 6.5%の LiNO₂ 水溶液への浸漬の有無により分極抵抗に有意な差が生じ，CEB の腐食速度判定基準⁸⁾に基づいて考察すると，LiNO₂ 水溶液へ浸漬した試験片のみ不動態と判定されることから，LiNO₂ 水溶液浸漬による腐食抑制効果は期待できると考えられる。しかし，腐食程度 C においては 13.0%の LiNO₂ 水溶液に浸漬しても，その効果は認められなかったことから，鋼材に著しい腐食が生じている場合には，例えば，図 - 2 の結果を参考に腐食鋼材を高濃度の LiNO₂ 水溶液に長期間浸漬させ，錆層内に十分な量の NO₂⁻イオンを浸透

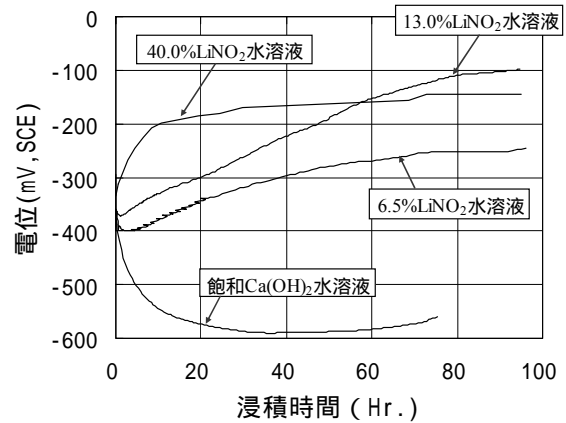


図 - 2 LiNO₂ 水溶液中の鋼材電位の経時変化 (シリーズ)

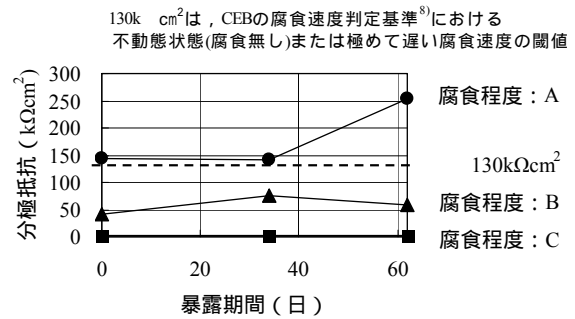


図 - 3 LiNO₂ 無添加 PC グラウトの腐食抑制効果

表 - 2 CEB の腐食速度判定基準⁸⁾

腐食速度の判定	分極抵抗 (kΩcm ²)
不動態状態	130～260より大
低～中程度の腐食速度	52以上130以下
中～高程度の腐食速度	26以上52以下
激しい、高い腐食速度	26未満

させる必要があると考えられる。

4. まとめ

グラウト未充てん部へのCl⁻イオン浸透により腐食したPC鋼材を模擬した試験体を用いて、その補修方法を検討した。本実験の範囲内で以下に示すことが明らかとなった。

- (1) 錆層にCl⁻イオンを含んだ腐食鋼材は、腐食が軽微(腐食程度A)であれば、通常のLiNO₂無添加PCグラウト充てんにより腐食抑制効果があるが、腐食程度Bでは腐食抑制効果が期待できない。
- (2) PCグラウトにLiNO₂を添加することによる腐食抑制効果は、腐食程度が小さな場合や十分時間が経過した場合に発揮されると推察されるが、その検証は今後の課題である。
- (3) LiNO₂添加PCグラウトを充てんする前にLiNO₂水溶液に浸漬すると、少なくとも腐食程度Bのような腐食が生じた鋼材においても腐食抑制効果を期待することができる。

謝辞 本実験を遂行するにあたり日鐵高炉セメント(株)堀氏に多大なる協力を頂いた。記して、ここに深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 上東 泰：PC橋の維持管理，プレストレストコンクリート，Vo.45，No.1，pp64-71，2003．
- 2) 近藤拓也ほか：腐食したPC鋼材へのグラウト補修工に関する基礎的研究，第19回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp205-208，2010．
- 3) たとえば(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会：PC橋の耐久性能の向上技術に関する研究 共同研究報告書，2003．
- 4) 桑原大亮ほか：グラウト中に埋設された錆びたPC鋼材の腐食特性試験，土木学会第57回年次学術講演会，pp1131-1132，2002．
- 5) 浜 幸雄ほか：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，pp55-60，2000．
- 6) Pourbaix M.:Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions, NACE, p.307-p.321,1997．
- 7) 木村正雄ほか：耐候性鋼の保護性さび形成機構のナノスケール解析，新日鉄技報，第381号，pp77-81，2004．
- 8) コンクリート工学協会：コンクリート診断技術「基礎編」，p163，2001．

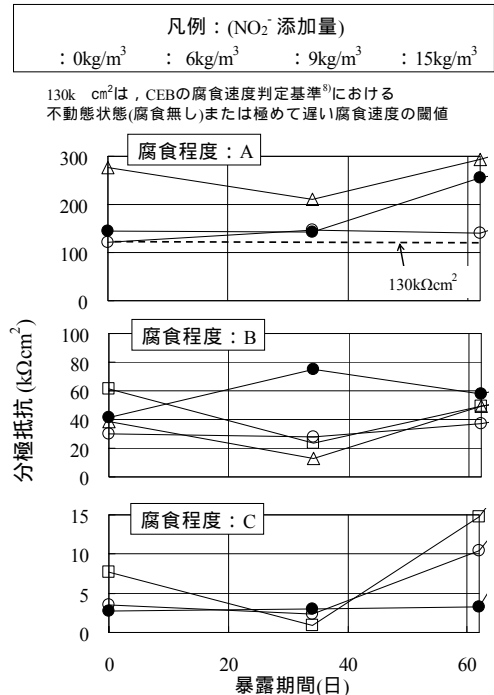


図 - 4 LiNO₂添加 PC グラウトの腐食抑制効果

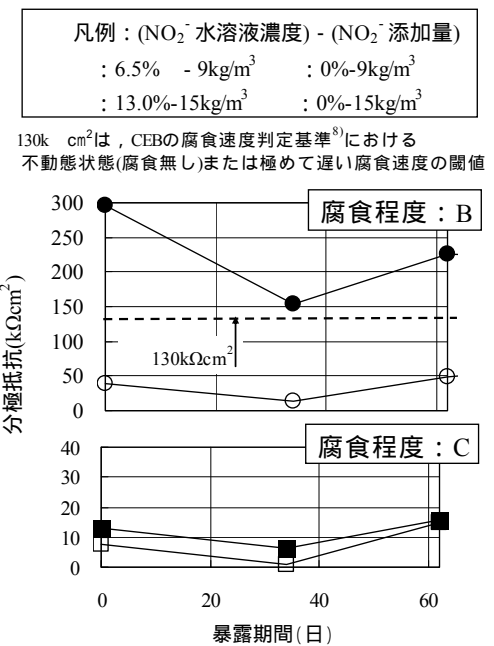


図 - 5 LiNO₂水溶液浸漬と LiNO₂添加 PC グラウトの腐食抑制効果