

# PC グラウト再注入工法 ーリパッシブ工法ー

石井 浩司

株式会社ピーエス三菱 技術本部 技術部



PC構造物においてPCグラウトの充てんが不十分な箇所に凍結防止剤等が侵入することが原因でPC鋼材の腐食やその破断などが報告されている。これらの補修対策は新設時と同じPCグラウトを使用して再注入しているが、PC鋼材の腐食抑制効果は明らかになっていない。本論文は亜硝酸リチウム水溶液を使用したグラウト再注入工法を開発し、PC鋼材の腐食抑制効果とグラウト充てん性能を確認した結果および実構造物に適用した事例を報告するものである。

グラウト未充てん 凍結防止剤 PC 鋼材 腐食 亜硝酸リチウム

## 1. はじめに

ポストテンション方式 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「のろ」の侵入による PC グラウト注入阻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、PC グラウトのブリーディング発生やシース内の PC グラウト先流れなどグラウトの性能不足による PC グラウト充てん不良が確認・報告されている<sup>1)</sup>。さらに、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<sup>2)</sup>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。

これら既設グラウト充てん不良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PCグラウトを使用して再注入しているのが現状である<sup>3)</sup>。しかし、一旦、塩化物イオンが既設グラウト充てん不良部に侵入し PC 鋼材が腐食しているような場合、PCグラウトを再注入した時のPC鋼材の腐食抑制効果に関する報告は少なく<sup>4)</sup>、その効果が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 $Cl^-/NO_2^-$ 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<sup>5)</sup>されている。

そこで著者らは、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、既設グラウト充てん不良部に塩化物イオンが侵入し PC 鋼材が腐食した場合に注目し、亜硝酸リチウム水溶液（以下  $LiNO_2$  水溶液と呼ぶ）を用いた補修方法（以下、リパッシブ工法と呼ぶ）を開発した。

開発に際して検討した項目は、

- ①PC グラウトによる PC 鋼材腐食抑制効果
- ② $LiNO_2$  水溶液による PC 鋼材腐食抑制効果
- ③グラウト再充てん度の向上
- ④腐食抑制、 $LiNO_2$  水溶液やグラウトの充填度のモニタリング

であり、本論文は試験体を用いて検討した結果と実構造物への適用事例を報告するものである。

## 2. リパッシブ工法の概要

リパッシブ工法の概要を図-1 に示す。図-1 は主桁上縁定着ケーブルに生じたグラウト充てん不足部にリパッシブ工法を適用した事例である。

橋面から浸透した塩化物イオンを含んだ融雪水により PC 鋼材に腐食が生じる（図-1 a）。リパッシブ工法は、PC グラウトの充てん不足部に  $LiNO_2$  水溶液を注入することで PC 鋼材の表面上に生成されている錆層の中に亜硝酸イオンを浸透させ、PC 鋼材を再不動態化させる（図-1 b）。不動態化の確認後、 $LiNO_2$  水溶液を排出させ、

亜硝酸リチウムを含有するグラウトを自然流下により充てんさせる方法（図-1 c）で、

- ①LiNO<sub>2</sub>水溶液がPC鋼材間やシースとPC鋼材との間等の小さな隙間にも注入することができ、細かい所までPC鋼材の腐食を抑制することができること。
- ②自然流下により時間をかけてグラウトを充てんするために空気等を巻き込まず、確実に充てんできると。
- ③PC鋼材が再不動態化したことやLiNO<sub>2</sub>含有グラウトが所定の位置まで充てんされたことなどのモニタリングが可能であること。

などが特徴として挙げられる。

### 3. 実験概要

実験は検討項目によりシリーズⅠ、シリーズⅡ、シリーズⅢに分けて行った。シリーズⅠはPCグラウトとリパシブ工法の腐食抑制効果の検討を目的とし、シリーズⅡはグラウト充てん度の向上を、シリーズⅢはモニタリングを検討することを目的としたものである。

#### (1) シリーズⅠ

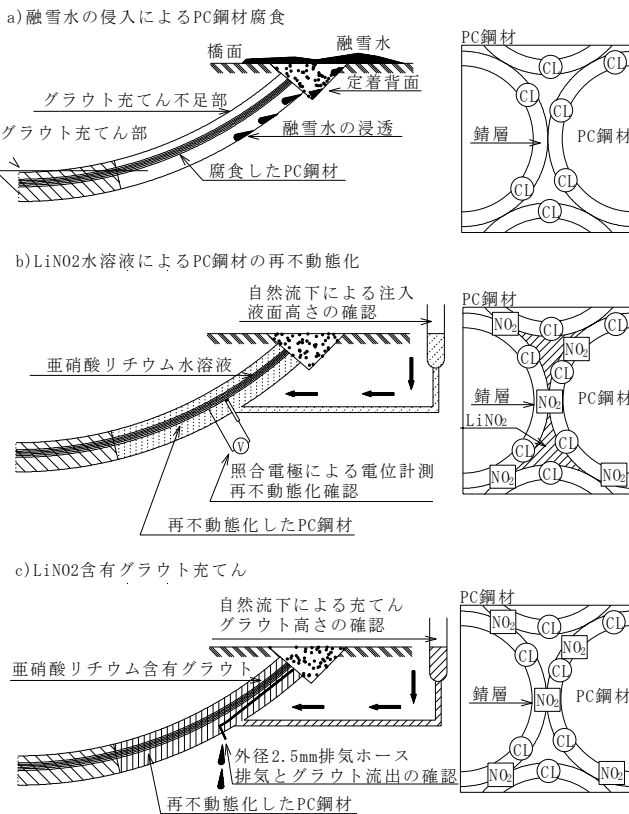


図-1 リパシブ工法の概要

シリーズⅠにおいてPC鋼材の代わりにφ13mmのみが丸鋼を用いて試験片とした。試験片は、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。それぞれの腐食量は3本の平均値で代表させると13.3mg/m<sup>2</sup>、43.4mg/m<sup>2</sup>であった（以下、腐食小、腐食大と表す）。製作した試験体を図-2に示す。シースとして塩ビ管を使用し、電気化学的測定が行えるように対極を試験体内に設置するとともに、試験片の鋼材電位が計測出来るように塩ビ管に計測孔を設けた。試験要因は表-1に示すように試験片の腐食程度、亜硝酸リチウム水溶液への浸漬の有無、PCグラウトへの亜硝酸リチウム含有量とした。

製作した試験体は、腐食環境の著しい温度30℃、相対湿度90%の養生槽に設置し、定期的に電気化学測定を実施した。

#### (2) シリーズⅡ

シリーズⅡは図-1に示す上縁定着付近を模擬した試験体を製作した。対象となるPC鋼材（12φ7）の代わ

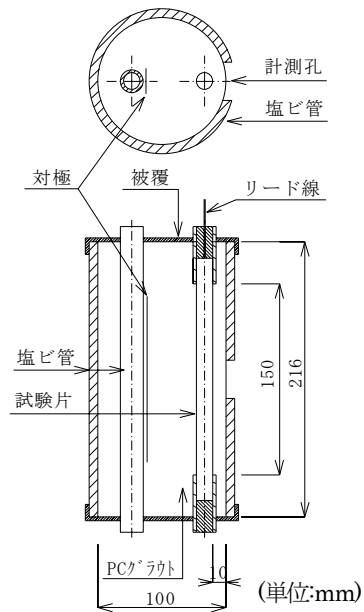


図-2 シリーズⅠの試験体概要

表-1 シリーズⅠの試験要因

腐食程度	LiNO <sub>2</sub> 水溶液注入 NO <sub>2</sub> 濃度一時間	PCグラウト NO <sub>2</sub> 添加量
無	無	0kg/m <sup>3</sup>
小		0, 6, 9kg/m <sup>3</sup>
大	6.5%—4日	0, 6, 9, 15kg/m <sup>3</sup>
		9kg/m <sup>3</sup>

りにφ7mmの丸木材を、定着具としてモルタル定着具を複製したものを使用し図-3に示す試験体を製作した。

ここで、PC鋼材の腐食やその破断の原因のひとつとして、背面コンクリートの経年劣化・損傷が原因で橋面からの融雪水がシース内に侵入している可能性が高いと推定される。よって、グラウトの充てんは特にこの箇所適切に行う必要があると考えられることから、試験要因は背面コンクリートの締固めの有無とした。

充てん度は、試験体にグラウトを自然流下により充てんした後、背面コンクリートを切断し目視観察すること

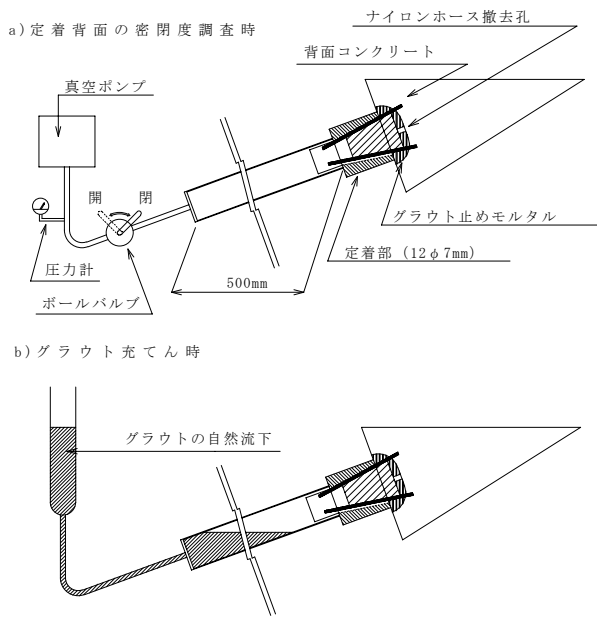


図-3 シリーズIIの試験体概要

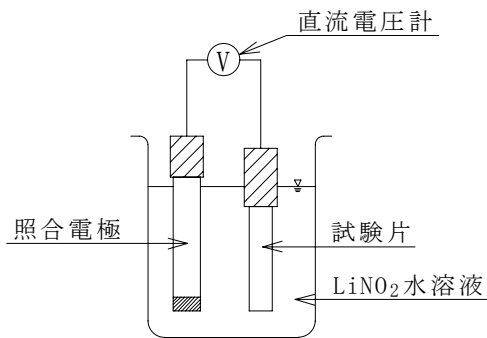


図-4 シリーズIIIの試験方法

表-2 CEBによる腐食速度判定基準

腐食速度の判定	分極抵抗 ( $k\Omega cm^2$ )
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

で確認した。

### (3) シリーズIII

シリーズIIIはシリーズIで使用した腐食大の試験片を図-4に示す容器に設置し、照合電極を用いて試験片の電位を計測し、不動態化したことを確認した。試験要因は容器内の水溶液濃度とした。

## 4. 実験結果と考察

### (1) PCグラウト、 $LiNO_2$ 水溶液の腐食抑制効果

腐食抑制効果の検討は、各試験体において定期的に計測した直流法による分極抵抗値とした。分極抵抗は

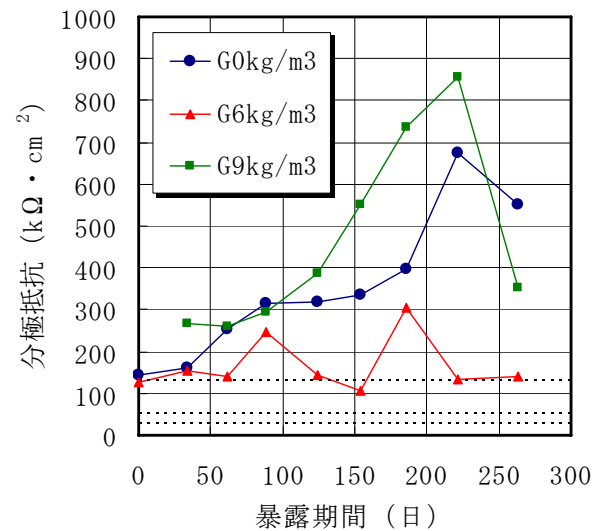


図-5 分極抵抗の経時変化(試験片;腐食小)

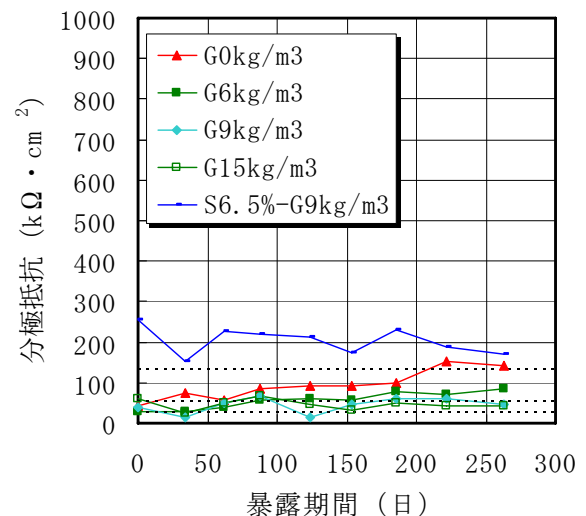


図-6 分極抵抗の経時変化(試験片;腐食大)

腐食速度の逆数に比例しており、表-2にCEBによる腐食速度の判定基準<sup>6)</sup>を示す。また、計測結果を図-5、図-6に示す。図内のGはグラウトをSは水溶液を表し、数値はLiNO<sub>2</sub>添加量を表す。また、図中の点線は表-2の判定基準を表している。

従来のPCグラウト (G0kg/m<sup>3</sup>)の腐食抑制効果は、図-5に示すように腐食が小さい場合では認められるが、図-6に示すように腐食が大きくなった場合には、認められない。

炭素鋼の鍍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する報告<sup>7)</sup>から推定すると図-1にも示したように塩化物イオンが原因で腐食した場合、発生した鍍層内には多量の塩化物イオンが侵入しているものと推定され、高アルカリ性環境であるPCグラウトを充てんしたとしても腐食を抑制出来なかったものと考えられる。

次に、PCグラウトにLiNO<sub>2</sub>水溶液を添加したグラウトの腐食抑制効果は、PCグラウトと同様に腐食が小さい場合には認められるが、大きい場合には認められない。

一方、グラウトする前にLiNO<sub>2</sub>水溶液に浸漬させた試験体は、暴露期間の早期から不動態化している傾向にある。これは鍍層へのNO<sub>2</sub>イオンの浸透は、PCグラウトよりも水溶液の方が効率的であり、Cl<sup>-</sup>/NO<sub>2</sub><sup>-</sup> ≤ 1.25の

条件が早期に満足した結果と考えられた。

## (2) PCグラウト充てん度向上の確認

まず、PCグラウトの充てん前に、真空ポンプを用いて試験体の密閉性を調査した。図-3の鉛直管の代わりに真空ポンプとボールバルブを設置し、ボールバルブを閉じた状態で真空ポンプを作動させた時の真空度とボールバルブを開いた状態での真空度の差から密閉性を調査した。調査結果を表-3に示す。

表-3から背面コンクリートの打設時に締固めを行った試験体はボールバルブの開閉に係わらず真空度に変化が認められず密閉と判定した。一方、締固めを行っていない試験体では0.005MPaの変化が認められ密閉でないとして判定した。

写真-1に充てん終了後に背面コンクリートを切断し、充てん度を確認した結果を示す。充てんは自然流下方式により行った。密閉でなく締固めを行わなかった試験体は、グラウト止めモルタルに存在するナイロンホース撤去孔、背面コンクリートに存在する大きな空隙にグラウトが充てんされていたことが確認できた。しかし、密閉と判断された締固めを試験体ではビニルホース撤去孔に空隙が認められ密閉度の相違が充てん度に影響を与えていることが確認できた。わずかでも密閉性が無いようであれば、自然流下方式により確実にグラウトが充填できる可能性があることを示している。

表-3 試験体の密閉性調査結果

背面コンクリート締固め	ボールバルブ閉時真空度 (Mpa)	ボールバルブ開時真空度 (Mpa)	変化量 (Mpa)	密閉性の判定
有り	-0.078	-0.078	0	密閉性
無し	-0.078	-0.073	0.005	密閉でない



写真-1 PCグラウトの充てん度確認結果

## (3) 再不動態化のモニタリング

図-7に試験片の自然電位を計測した結果を示す。防錆剤の防錆効果確認方法、すなわち鋼材の再不動態化の確認方法は自然電位の経時変化を計測し、電位が貴に変化するようであれば効果ありと判定している<sup>8)</sup>。

グラウトの模擬水溶液である飽和Ca(OH)<sub>2</sub>水溶液中

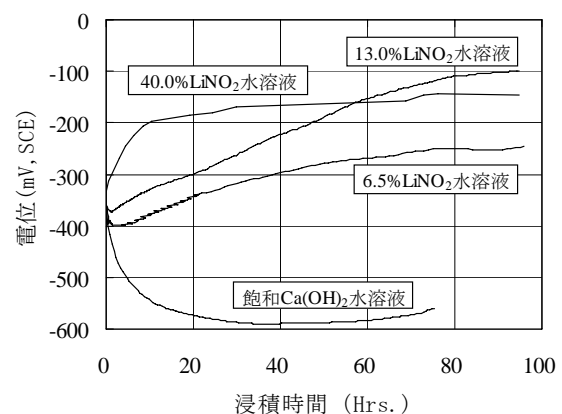


図-7 試験片の自然電位経時変化

では自然電位は卑に変化し、再不動態化の傾向は認められない。すなわち鋼材腐食が抑制されていないことを意味しておりシリーズ I の実験結果と同様である。

一方、LiNO<sub>2</sub>水溶液に浸漬させた試験片は時間とともに自然電位が貴に変化し再不動態化の傾向が認められる。また、水溶液濃度が高くなるに従い、再不動態化するのに必要な時間が短くなる傾向にあった。これは水溶液濃度が高くなるに従い鋼材錆層中に NO<sub>2</sub> イオンが早期に浸透し NO<sub>2</sub> イオン濃度が高くなる時間が早いと推定される。

試験終了後、錆層内のイオン分析をイオンクロマトグラフを用いて行った。その結果を表-4 に示す。LiNO<sub>2</sub>水溶液に浸漬することにより錆層内の塩化物イオンは減少し、NO<sub>2</sub>イオンが増加する傾向にある。さらに、濃度の高い水溶液に浸漬した場合、錆層内の NO<sub>2</sub>イオンが高い傾向にある。いずれも Cl<sup>-</sup>/NO<sub>2</sub><sup>-</sup>比が 0.072, 0.104 と 1.25 以下となっており図-7 に示す自然電位の経時変化から不動態化を推定した結果と一致している。

## 5. 実構造物への適用

冬期に融雪剤を散布する東北地方に建設された写真-2 に示すポストテンション方式T桁橋にリパッシブ工法を適用した。

施工フローを図-8 に示す。本橋の PC 鋼材は写真-3

表-4 錆層内のイオン分析結果

	Cl <sup>-</sup> イオン	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> イオン	Cl <sup>-</sup> /NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>
浸漬せず	4.1	—	—
13% LiNO <sub>2</sub> 水溶液浸漬	0.23	3.2	0.072
40% LiNO <sub>2</sub> 水溶液浸漬	0.53	5.1	0.104

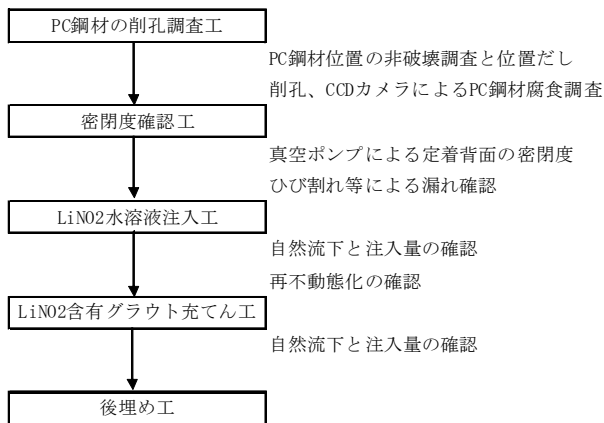


図-8 リパッシブ工法の施工フロー

に示すように融雪水により著しく腐食していた。密閉度確認後、LiNO<sub>2</sub>水溶液を注入し再不動態化させた。施工時間の短縮も目的の一部とし 40%LiNO<sub>2</sub>水溶液を使用した。図-9 に PC 鋼材の自然電位の経時変化を示すように 10 分程度で再不動態化を確認した。その後、自然流下により 50kg/m<sup>3</sup> の LiNO<sub>2</sub> 含有グラウトを充填し、施工は問題なく完了した。

ここで、実験室レベルではリパッシブ工法の腐食抑制効果は確認されているが、実構造物での確認はされていない。そこで、本橋には分極抵抗を測定できるセンサーを埋設し、定期的に計測することで腐食抑制効果を検証することとした。

## 6. まとめ

グラウト充てん不足部に塩化物イオンを含んだ融雪水



写真-2 リパッシブ工法を適用した橋梁



写真-3 PC 鋼材の腐食状況

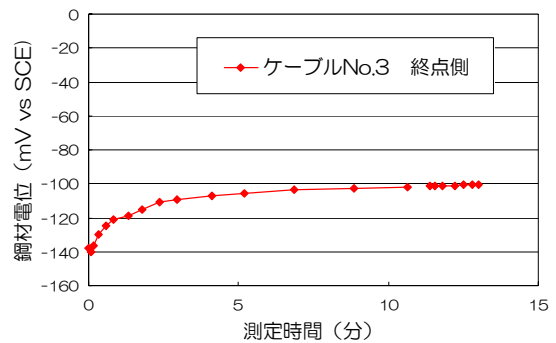


図-9 PC 鋼材の自然電位の経時変化

等が侵入した結果、PC鋼材が腐食した場合の補修方法、リパッシブ工法を開発した。

従来のPCグラウトでは一旦腐食したPC鋼材の腐食を抑制することが困難なためにリパッシブ工法ではLiNO<sub>2</sub>水溶液とLiNO<sub>2</sub>含有グラウト材を使用している。LiNO<sub>2</sub>水溶液を用いることで早期にPC鋼材が再不動態化することが実験で確認され、モニタリングすることも可能となった。また、グラウトの充てんは自然流下方式を採用しているために充填に時間を要するが確実に充てんできることが確認され、実構造物へは問題なく施工することができた。

今後は、長期間の腐食抑制効果を確認するためにセンサーを埋設し定期的な計測により確認する予定である。

**謝辞:**リパッシブ工法は、神戸大学大学院工学研究科 市民工学専攻 森川教授との共同研究・開発の成果である。本論文は今までの研究成果の一部をとりまとめたもので、神戸大学 森川教授、(株)ピーエス三菱 青山敏幸氏、鴨谷知繁氏のご指導、ご協力に感謝の意を表します。

#### 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, Vol.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) 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.
- 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) 柘田佳寛 : 防せい剤, コンクリート工学, Vol.26, No.3, pp80-84, 1988.