

## PCグラウト再注入が鋼材腐食に及ぼす影響に関する実験的検討

(株) 高速道路総合技術研究所 工修 ○宮永 憲一  
 (株) 高速道路総合技術研究所 正会員 工修 青木 圭一  
 (株) 高速道路総合技術研究所 正会員 工修 萩原 直樹  
 (一社) 日本建設機械施工協会 施工技術研究所 工博 渡邊 晋也

Abstract : When insufficient PC grouting is confirmed, regrouting is recommended to integrate PC steel and concrete member, and protect PC steel from corrosion. But if the existing grout contains high concentrations of chloride ion, regrouting may cause macrocell corrosion of the PC steel. To study the effect, we created specimens of the existing grout with various levels of salinity and evaluated the corrosion of steel caused by regrouting, applying the spontaneous polarization method and calculating the corrosion current. The study found that when the existing grout has a salinity of over  $10\text{kg/m}^3$ , there is a possibility of PC steel corroding. It was also discovered that volume ratio resistivity was high at places where grouting was insufficient, and that injecting grout with lithium nitrite will prevent corrosion of steel to some degree.

Key words : Macrocell corrosion , Chloride ion , Spontaneous polarization , PC steel

### 1. はじめに

既設ポストテンションPC橋では、建設当時のPCグラウト材料・施工技術の未熟さなどによりグラウト充填不良が確認されている。この場合、PC鋼材とコンクリート部材との一体化、PC鋼材を腐食から保護するという点からは、充填不良部にPCグラウトを再注入することが望ましい。しかしながら、凍結防止剤や飛来塩分の影響を受けたPC橋では、既設グラウト部に高濃度の塩化物イオンが含有されていることが確認されており、異なる材質のグラウトを充填不良部に再注入することによって、マクロセル腐食の発生が懸念される。

筆者らは、塩化物イオン濃度を変化させたPCグラウトに、新たなPCグラウトを注入したPC試験体を製作し、PCグラウト再注入がPC鋼材のマクロセル腐食に及ぼす影響について、自然電位法などにより評価してきた<sup>1)</sup>。

本件は、約1年が経過したPC試験体の自然電位測定、および解体時のPC鋼棒の腐食減量測定などを実施し、PCグラウト再注入が鋼材腐食に与える影響について検討したものである。

### 2. 実験概要

#### 2.1 試験体概要

試験体概要を図-1に示す。試験体は、円形筒状の亚克力管の中央にPC鋼棒φ23mmを配置し、初めに既設PCグラウト材を試験体の半分まで打設して、28日が経過したあとに、再注入PCグラウト材を打設して製作した。

#### 2.2 使用グラウト材料

##### (1) 既設PCグラウト材

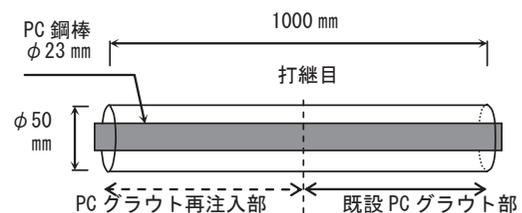


図-1 試験体概要

既設グラウト材は、普通ポルトランドセメントおよび減水剤（ポゾリス No.8）を使用して、1980年頃に使用されていた配合（水セメント比48%）を再現した。既設グラウト材の塩化物イオン量は、 $0\text{kg/m}^3$ 、腐食発生限界濃度に相当する  $3.9\text{kg/m}^3$ 、PC 鋼材が腐食すると考えられる  $10\text{kg/m}^3$ 、および  $30\text{kg/m}^3$  の4種類とした。

(2)再注入 PC グラウト材

再注入グラウト材は、NEXCO の新設 PC 橋で一般に使用されているノンブリーディング型で混和剤タイプ（以下、NB タイプという）のものと、PC グラウト再注入工法用として開発された亜硝酸リチウム入り PC グラウト材（以下、Li タイプという）の2種類とした。

2.3 試験条件

試験条件は、表-1 に示すとおりとし、比較用として既設グラウト部と同じ材料を用いた均一試験体（打継目なし）と、再注入を実施しない試験体（以下、Air という）を製作した。

2.4 曝露環境

試験体は、温度平均約  $24^{\circ}\text{C}$ 、湿度平均約 64% の恒温室に曝露した。

2.5 自然電位

自然電位の測定間隔は 50 mm とし、参照電極には銀-塩化銀電極を用いた。PC 鋼材の腐食は、表-2 に示す ASTM C 876 の判定基準により評価した。

2.6 解体調査

解体調査は、PC グラウト材を除去したあとの PC 鋼棒の外観目視観察、および腐食減量測定とした。PC 鋼棒の腐食減量は、除錆前後の質量測定、および錆を除去したあとの打継目付近における最小直径測定（ノギス）することで評価した。なお、錆は、10%クエン酸水素二アンモニウム水溶液に PC 鋼棒を浸漬（ $60^{\circ}\text{C}$ 、24 時間）して除去した。

3. 実験結果

3.1 自然電位

各試験条件における自然電位の計測結果を図-2 に示す。既設グラウト部の塩化物イオン量が  $0\text{kg/m}^3$  NB タイプの PC グラウト材を再注入したもの（NB-0）の自然電位は、概ね  $-150\sim-250\text{mV}$  であった。Li-0 の自然電位は、概ね  $-150\sim-250\text{mV}$  であるが、NB-0 と比較して全体的に高い値を示した。

NB-3.9 の自然電位は、概ね  $-200\sim-300\text{mV}$  であった。Li-3.9 の自然電位は、PC グラウト再注入部が概ね  $-100\sim-200\text{mV}$ 、既設グラウト部が概ね  $-150\sim-250\text{mV}$  であり、NB-0 と比較して、PC グラウト再注入部の自然電位が高い傾向を示した。

NB-10 では、再注入用 PC グラウト材を打設してから 7 日後の自然電位が概ね  $-300\sim-450\text{mV}$  であるのに対して、98 日、239 日、365 日の各測点の自然電位が概ね  $-200\text{mV}$  程度となり、時間の経過とともに

表-1 試験条件

試験 No.	再注入 PC グラウト材	既設 PC グラウト材 塩化物イオン量
NB-0	ノンブリーディング型、混和材タイプ (NB)	$0\text{kg/m}^3$
NB-3.9		$3.9\text{kg/m}^3$
NB-10		$10\text{kg/m}^3$
NB-30		$30\text{kg/m}^3$
Li-0	亜硝酸リチウム入り、プレミックスタイプ (Li)	$0\text{kg/m}^3$
Li-3.9		$3.9\text{kg/m}^3$
Li-10		$10\text{kg/m}^3$
Li-30		$30\text{kg/m}^3$
Air-0	再注入なし (Air)	$0\text{kg/m}^3$
Air-3.9		$3.9\text{kg/m}^3$
Air-10		$10\text{kg/m}^3$
Air-30		$30\text{kg/m}^3$
均 0	均一試験体、塩化物イオン量 $0\text{kg/m}^3$	
均 3.9	均一試験体、塩化物イオン量 $3.9\text{kg/m}^3$	
均 10	均一試験体、塩化物イオン量 $10\text{kg/m}^3$	
均 30	均一試験体、塩化物イオン量 $30\text{kg/m}^3$	

表-2 鋼材腐食判定基準 (ASTM C 876)

自然電位 E (mV:C.S.E)	腐食確率
$-200 < E$	90%以上の確率で腐食なし
$-350 < E \leq -200$	不確定
$E \leq -350$	90%以上の確率で腐食あり

に鋼材腐食反応が収束しているものと推察された。一方、Li-10 では、NB-10 と比較して、高い自然電位となり、鋼材腐食を抑制しているものと考えられた。

NB-30 の自然電位は、PC グラウト再注入部が概ね-350~-500mV、既設グラウト部が概ね-450~-550 mV であり、365 日経過後においても NB-10 で見られたような腐食反応が収束する傾向は確認できなかった。一方、Li-30 では、PC グラウト再注入部が概ね-200~-400mV、既設グラウト部が概ね-400~-550mV であり、NB-30 と比較して PC グラウト再注入部の自然電位は高い値となった。

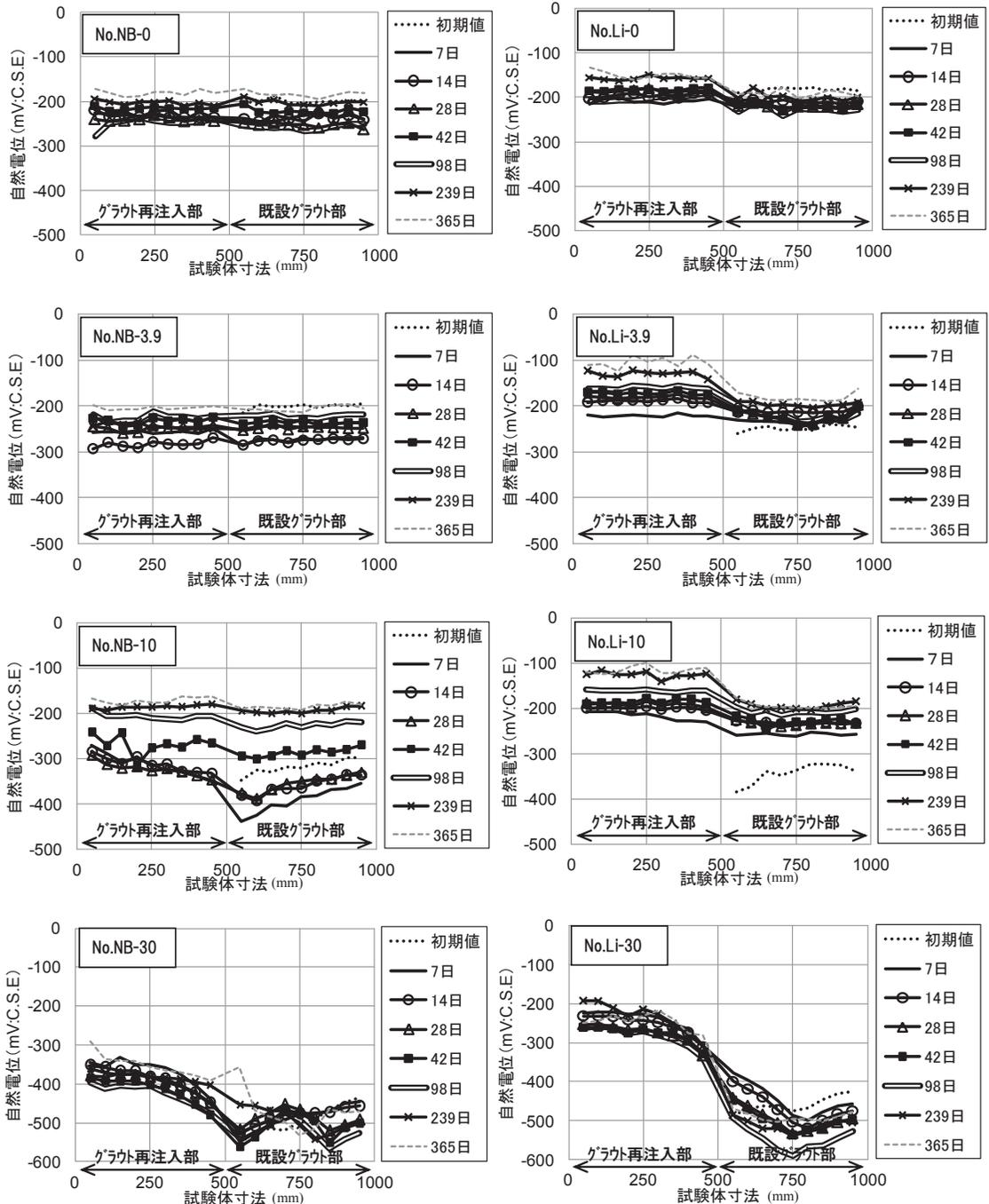


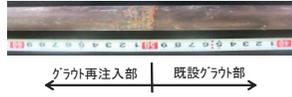
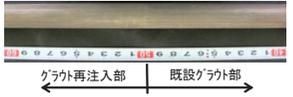
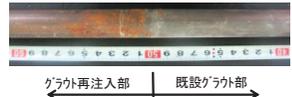
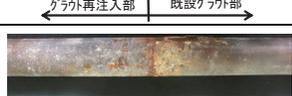
図-2 各試験条件ごとの自然電位の経時変化

### 3.2 解体調査

#### (1) 外観目視観察

PC鋼棒の外観目視観察結果を表-3に示す。

表-3 外観目視観察結果

試験No.	除錆前	除錆後	打継目付近の発錆状況
NB-0	 グラウト再注入部   既設グラウト部	 グラウト再注入部   既設グラウト部	除錆前: PC鋼棒表面の赤錆がある 除錆後: 腐食跡(孔食など)は確認されない
Li-0	 グラウト再注入部   既設グラウト部	 グラウト再注入部   既設グラウト部	除錆前: PC鋼棒表面の赤錆がある 除錆後: 腐食跡(孔食など)は確認されない
Air-0	 グラウト再注入部   既設グラウト部	 グラウト再注入部   既設グラウト部	除錆前: PC鋼棒表面の赤錆がある 除錆後: 腐食跡(孔食など)は確認されない
NB-3.9	 グラウト再注入部   既設グラウト部	 グラウト再注入部   既設グラウト部	除錆前: PC鋼棒表面の赤錆がある 除錆後: 腐食跡(孔食など)はほぼ確認されない
Li-3.9	 グラウト再注入部   既設グラウト部	 グラウト再注入部   既設グラウト部	除錆前: PC鋼棒表面の赤錆がある 除錆後: 腐食跡(孔食など)はほぼ確認されない
Air-3.9	 グラウト再注入部   既設グラウト部	 グラウト再注入部   既設グラウト部	除錆前: PC鋼棒表面の赤錆がある 除錆後: 腐食跡(孔食など)はほぼ確認されない
NB-10	 グラウト再注入部   既設グラウト部	 グラウト再注入部   既設グラウト部	除錆前: PC鋼棒表面の赤錆がある 除錆後: 腐食跡(孔食など)が打継目で確認される
Li-10	 グラウト再注入部   既設グラウト部	 グラウト再注入部   既設グラウト部	除錆前: PC鋼棒表面の赤錆がある 除錆後: 腐食跡(孔食など)が打継目で確認される
Air-10	 グラウト再注入部   既設グラウト部	 グラウト再注入部   既設グラウト部	除錆前: PC鋼棒表面の赤錆がある 除錆後: 腐食跡(孔食など)が打継目で確認される
NB-30	 グラウト再注入部   既設グラウト部	 グラウト再注入部   既設グラウト部	除錆前: PC鋼棒表面の赤錆がある 除錆後: 腐食跡(孔食など)が打継目付近の比較的大い範囲で確認される
Li-30	 グラウト再注入部   既設グラウト部	 グラウト再注入部   既設グラウト部	除錆前: PC鋼棒表面の赤錆がある 除錆後: 腐食跡(孔食など)が打継目で確認される
Air-30	 グラウト再注入部   既設グラウト部	 グラウト再注入部   既設グラウト部	除錆前: PC鋼棒表面の赤錆がある 除錆後: 腐食跡(孔食など)が打継目付近の比較的大い範囲で確認される

解体調査は、再注入PCグラウト材を打設してから約1年後に実施した。

錆を除去する前の赤錆は、全体的な傾向として、既設グラウト部の塩化物イオン量が多いほど、腐食の進行が見られた。また、再注入グラウト部の材料 (NB, Li) や未注入 (Air) ごとに、既設グラウト部それぞれの塩化物イオン量 (0, 3.9, 10, 30kg/m<sup>3</sup>) で比較すると、Airが最も腐食している。

錆を除去した後の腐食跡 (孔食など) は、全体的な傾向として、既設グラウト部の塩化物イオン量が多いほど、腐食の進行が見られる。既設グラウト部の塩分量が0kg/m<sup>3</sup>では腐食跡は確認されず、既設グラウト部の塩分量が3.9kg/m<sup>3</sup>ではごくわずかな腐食跡が、既設グラウト部の塩分量が10kg/m<sup>3</sup>では打継目付近に腐食跡が確認された。塩分量が30kg/m<sup>3</sup>では、比較的広い範囲で腐食跡が確認され、この中ではLiをPCグラウト再注入材に使用したPC鋼棒の腐食が小さかった。

## (2) PC鋼棒の腐食質量

PC鋼棒の除錆前後の質量差を図-3に示す。PC鋼棒の質量差は、既設グラウト部と再注入グラウト部を分離することができないことから全体重量で評価した。

既設グラウトの塩分量が10kg/m<sup>3</sup>までは、再注入グラウト材の種類に関わらず、5g程度の同様の腐食減量となった。

一方、既設グラウトの塩分量が30kg/m<sup>3</sup>では、未充填 (Air) の腐食量が最も大きかった。再注入グラウト材にNBを使用した場合は、Airと比較して約50%の腐食減量となった。再注入グラウト材にLiを使用した場合は、NBと比較して約50%の腐食減量となった。これより、既設グラウト部の塩分量が30kg/m<sup>3</sup>の場合は、再注入グラウト材にLiを用いることで最も腐食を抑制できることがわかった。

## (3) PC鋼棒の最小直径

PC鋼棒除錆後の打継目付近の最小直径を図-4に示す。使用したPC鋼棒の健全部の直径は22.5mmである。

既設グラウトの塩分量が3.9kg/m<sup>3</sup>までは直径が0.1mm以下程度の減少となった。既設グラウトの塩分量が10kg/m<sup>3</sup>では、Airの直径減少量は約0.4mmであった。既設グラウトの塩分量が30kg/m<sup>3</sup>における直径減少量は、Air0.9mm, NB0.7mm, Li0.1mmとなり、再注入グラウト材にLiを用いることで腐食を抑制できることがわかった。

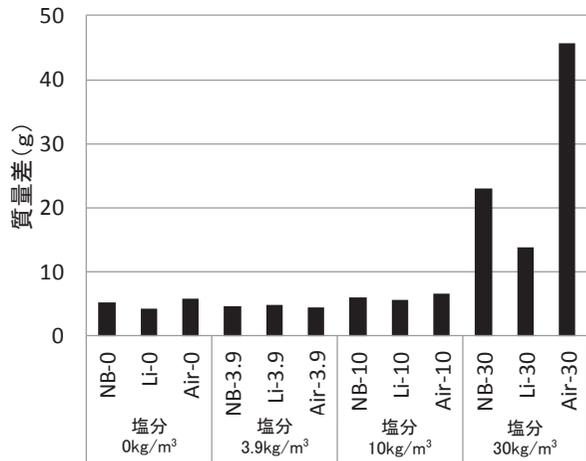


図-3 PC鋼棒の除錆前後の質量差

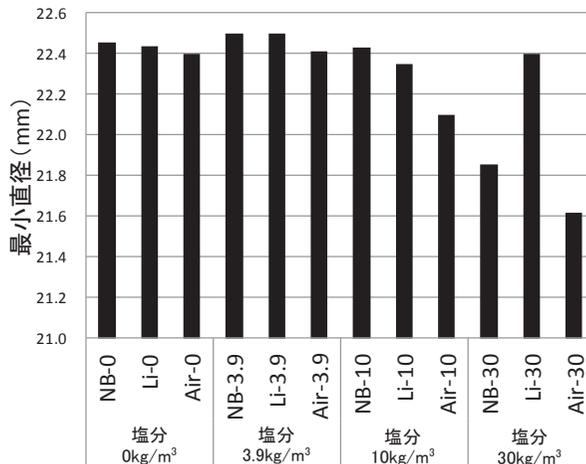


図-4 PC鋼棒の打継目付近の最小直径

(4) 自然電位との相関性

3.1に示したPCグラウト再注入後の自然電位、  
 図-5に示したPCグラウト再注入なし場合の自然電位、  
 および3.2 (1) ~ (3) に示した解体後の腐食状況を比較すると高い相関性が確認された。

具体的には、自然電位の全体的な傾向は、既設グラウト部の塩化物イオン量が多いほど卑な値を示し、Liと比較してNBにより再注入した場合の方が卑な値となった。また、Li-30とAir-30の自然電位を比較すると、打継ぎ目付近の自然電位は、Li-30の方が卑な値を示した。これらの自然電位の測定結果は、PC鋼材の解体調査で確認した腐食状況と相関性があるものであった。

よって、PCグラウト再注入後の自然電位を定期的にモニタリングすることにより、PC鋼材の腐食進行状況を把握できると考えられる。

4. 結論

約1年が経過したPC試験体の自然電位測定、および解体時のPC鋼棒の腐食減量測定を実施した。その結果、本実験の範囲内で、以下のことが明らかとなった。

- (1) 既設グラウト部の塩化物イオン量が $3.9\text{kg/m}^3$ までは、PCグラウト再注入に使用するPCグラウト材料の種類に関わらず、PC鋼棒の腐食はほぼ発生しない。
- (2) 既設グラウト部の塩化物イオン量が $10\text{kg/m}^3$ では、PCグラウト再注入に使用するPCグラウト材料の種類に関わらず、PCグラウト再注入時の打継目付近に腐食（孔食など）が発生する。腐食の程度は、 $30\text{kg/m}^3$ と比較すると小さい。
- (3) 既設グラウト部の塩化物イオン量が $30\text{kg/m}^3$ では、PCグラウト再注入に使用するPCグラウト材料の種類に関わらず、PCグラウト再注入時の打継目付近に腐食（孔食など）が発生し、その腐食の程度は、塩化物イオン量が $10\text{kg/m}^3$ までと比較して大きい。

再注入PCグラウト材料には、NBよりも亜硝酸リチウムを配合したグラウト（Li）の方が防錆効果は高く、未充填（Air）の場合の腐食が最も大きい。

- (4) PC鋼棒の自然電位と腐食状態には、相関性が見られる。よって、自然電位法はPCグラウト再注入後のモニタリング技術として活用できる。

参考文献 1) 宮永憲一・青木圭一・横山貴士・渡邊晋也：PCグラウト再注入による鋼材腐食の影響検討、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、VOL.23rd, PEGE451-456, 2014

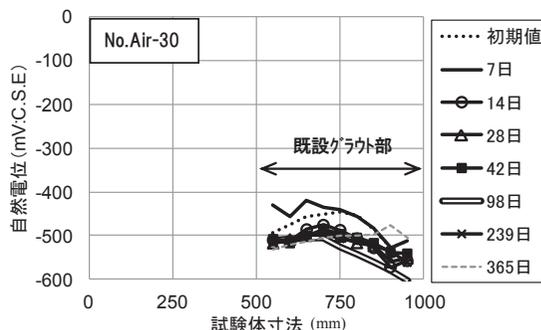


図-5 再注入なしの場合の自然電位