

## PCグラウト再注入による鋼材腐食の影響検討

(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 横山 貴士  
 (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 10kg/m<sup>3</sup>, 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

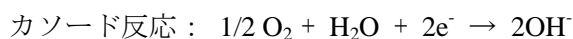
既設ポストテンションPC橋は、建設当時のPCグラウト材料・施工技術の未熟さなどによって、グラウト充填不良が確認されている。この場合、PC鋼材とコンクリート部材との一体化、およびPC鋼材を腐食から保護するという点からは、充填不良部にグラウトを再注入することが望ましいと考えられる。

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で、マクロセル腐食の発生が懸念される。

そこで、既設グラウト部の塩化物イオン濃度を变化させた試験体を製作し、PCグラウト再注入による鋼材腐食を自然電位法、腐食電流測定、および解体調査により評価した。

### 2. 鋼材の腐食反応

コンクリート中の鋼材腐食は、鉄がイオン化するアノード反応と酸素が還元するカソード反応することによって生じる。



一般に、アノード反応とカソード反応が同じ位置もしくは極めて近い位置で生じる場合の腐食がマイクロセル腐食と言われ、鋼材表面全体で腐食が均一に進行する。一方、マクロセル腐食とは、アノード反応とカソード反応が互いに離れた位置で生じ、一部で局所的に腐食が進行するものと言われている(図-1)。

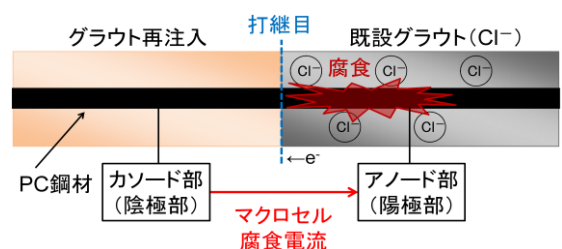


図-1 マクロセル腐食の発生機構 (模式図)

表-1 PC グラウト再注入実験 (試験ケース)

試験ケース	使用鋼材	形状寸法	既設グラウト中の塩分	評価方法
I	PC 鋼棒	φ50×1000	4 種類	自然電位
II	PC 鋼線	φ50×200	4 種類	腐食電流測定

### 3. 実験概要

本実験では、PCグラウト再注入による鋼材腐食の影響を検討するため、表-1に示す2ケースの試験を行った。ケースⅠは、PC鋼棒の腐食を自然電位法により評価する試験、ケースⅡはPC鋼線を用いたマクロセル腐食電流を測定する試験である。なお、それぞれの試験に使用したPCグラウト材は同一のものとした。

#### 3.1 使用グラウト材料

##### (1) 既設グラウト材

実験に用いた既設グラウト材の配合、基本物性を表-2に示す。既設グラウト材は、1980年頃に使用されていた配合を再現することとし、普通ポルトランドセメントおよび減水剤（ポゾリス No.8）を使用した。

塩化物イオン量は、塩化ナトリウムを混入していない  $0\text{kg/m}^3$ 、PCグラウトにおける塩化物イオン量の総量規制値（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) 再注入グラウト材

本実験に用いた再注入グラウト材は2種類とした。

一般に使用されているグラウト材には、混和剤タイプとプレミックスタイプがあり、マクロセル腐食は、体積比抵抗率が大きいほど腐食が進行しにくいとされている。そこで、事前に混和材タイプとプレミックスタイプの体積比抵抗率を測定し、水セメント比が大きく、体積比抵抗率の小さい混和剤タイプを1つ目のグラウト材として用いることとした。

もう1つのグラウト材は、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グラウト材を使用した。この工法の特徴は、亜硝酸リチウムの効果によってPC鋼材の表面に不動体被膜を形成し、防錆効果を高めることを期待するものである。

本実験で使用した再注入グラウト材の材齢28日の圧縮強度および体積比抵抗率を表-3に示す。亜硝酸リチウム入りのグラウト材は、混和剤タイプのグラウト材と比較して圧縮強度が大きく、体積比抵抗率の大きい材料であることがわかる。

表-2 既設グラウト材の配合、基本物性

項目	塩化物イオン量 ( $\text{kg/m}^3$ )	セメント質量比 ( $C \times \text{mass}\%$ ※1)	水セメント 比 (%)	単位セメント 量 ( $\text{kg/m}^3$ )	圧縮強度 材齢 28 日 ( $\text{N/mm}^2$ )	体積比抵抗率※2 材齢 28 日 ( $\Omega \cdot \text{m}$ )
既設グラウト材	0	0.00	48	1300	40.0	16.37
	3.9	0.30			38.0	16.44
	10	0.77			33.0	15.52
	30	2.31			22.3	16.71

※1：単位セメント量に対する質量比

※2：JSCE-K 562「四電極法による断面修復材の体積比抵抗率の測定方法（案）」に準じて比抵抗値を測定

表-3 再注入グラウト材の基本物性

項目	使用材料	水セメント 比 (%)	圧縮強度 材齢 28 日 ( $\text{N/mm}^2$ )	体積比抵抗率※3 材齢 28 日 ( $\Omega \cdot \text{m}$ )	備考
再注入グラウト材	ノンブリーディング型、混和材タイプ	45	54.9	15.61	市販品
	亜硝酸リチウム入り、プレミックスタイプ	— (不明)	79.0	88.28	市販品

※3：JSCE-K 562「四電極法による断面修復材の体積比抵抗率の測定方法（案）」に準じて比抵抗値を測定

### 3.2 自然電位法による鋼材腐食 (試験ケース I)

#### (1) 試験体形状

試験体の形状は、図-2 に示すような円形筒状の形状で、PC 鋼棒 φ23 mmを中央部に配置した。

#### (2) 試験条件

試験ケース I の試験条件は、表-4 に示すとおりであるが、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) を製作した。

#### (3) 試験体製作

グラウト再注入を行う試験体は、試験体の半分の位置まで既設グラウト部を打設し、28 日経過後、再注入グラウト部を打設する手順で製作した。

#### (4) 曝露環境

試験体は、温度平均約 24℃、湿度平均約 64%の恒温室に曝露した。

#### (5) 自然電位の測定

自然電位法とは、鋼材が腐食することによって変化する鋼材表面の電位から、鋼材腐食を診断しようとする電気化学的方法である。本試験における測定点間隔は 50 mmとし、参照電極は銀-塩化銀電極を用いた。

#### (6) 鋼材腐食の評価

PC 鋼材の腐食は、表-5 に示す ASTM C 876 の判定基準により評価した。

#### (7) 解体調査

塩化物イオン量 30kg/m<sup>3</sup> の試験体 (試験条件毎に各 1 体) を解体して腐食状況を目視で観察した。

### 3.3 分割 PC 鋼材による腐食電流測定 (試験ケース II)

#### (1) 試験体形状

試験体の形状は、図-3 に示すような円形筒状の形状で、PC 鋼線 φ7 mmを分割し、それぞれの PC 鋼線を結線した後、エポキシ樹脂接着剤を用いて一体化させ、グラウト中央部に配置した。分割 PC 鋼線の製作状況と、分割 PC 鋼線に設定した番号を図-4 に示す。

#### (2) 試験条件

試験ケース II の試験条件は、表-6 に示すとおりである。

#### (3) 試験体製作

グラウト再注入を行う場合の試験体は、試験体の半分の位置まで既設グラウト部を打設し、28 日経過後、再注入グラウト部を打設する手順で製作した。

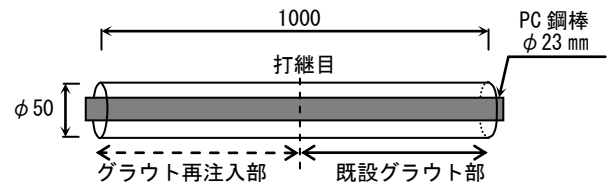


図-2 試験体の形状 (試験ケース I)

表-4 試験条件 (試験ケース I)

試験条件	再注入グラウト材	既設グラウト材
I-1	ノンフリーディング型、 混和材タイプ (以下、NB系という)	塩化物イオン量 0, 3.9, 10, 30kg/m <sup>3</sup>
I-2	亜硝酸リチウム入り、 ブレミックタイプ (以下、Li系という)	塩化物イオン量 0, 3.9, 10, 30kg/m <sup>3</sup>
I-3	既設グラウト材を用いた打継目を設けない均一試験体、塩化物イオン量 0, 3.9, 10, 30kg/m <sup>3</sup> (以下、均一試験体という)	

表-5 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 ≤ -200	不確定
E ≤ -350	90%以上の確率で腐食あり

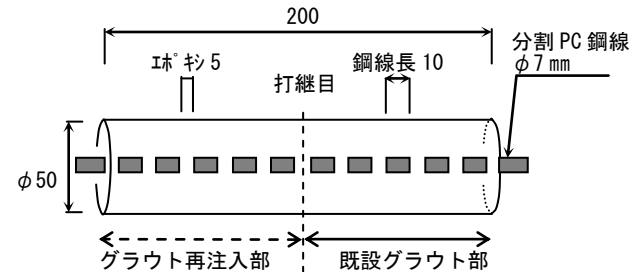


図-3 試験体の形状 (試験ケース II)

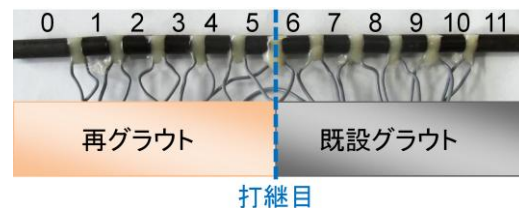


図-4 分割 PC 鋼線番号

表-6 試験条件 (試験ケース II)

試験条件	再注入グラウト材	既設グラウト材
II-1	ノンフリーディング型、 混和材タイプ (以下、NB型という)	塩化物イオン量 0, 3.9, 10, 30kg/m <sup>3</sup>
II-2	亜硝酸リチウム入り、 ブレミックタイプ (以下、Li型という)	塩化物イオン量 0, 3.9, 10, 30kg/m <sup>3</sup>

(4) 曝露環境

試験体は、温度平均約 40℃、湿度平均約 67%の恒温槽に曝露した。

(5) 腐食電流測定

腐食電流は、既往の研究<sup>1)</sup>を参考に、鋼材内部を流れる腐食電流を定量的に測定した。鋼材要素のマクロセル電流密度は、対象とする分割鋼材要素の両端から流入する電流を合計し、この電流を、分割鋼材要素の表面積で除することにより算出した。既往の研究<sup>1)</sup>では、分割鋼材の要素長さを 15mm 以下にすることでマクロセル電流を測定することが可能とされている。本実験では、分割 PC 鋼材の要素長さを 10mm とし、各分割 PC 鋼材の腐食電流密度を 1 時間間隔で計測した。

(6) 鋼材腐食の評価

鋼材腐食は、腐食電流密度の大きさに着目して評価することとした。

4. 実験結果

4.1 自然電位法による鋼材腐食 (試験ケース I)

(1) 既設グラウト部の塩分量と鋼材腐食

ノンブリーディング型で混和材タイプ (以下, NB 系という) グラウト材を再注入してから, 28 日経過後の自然電位を図-5 に示す。

既設グラウト部の塩分量が 0, 3.9kg/m<sup>3</sup> の場合の自然電位は, -200~-300mV となり, 腐食判定は「不確定」であった。

それに対して, 既設グラウト部の塩分量が 10kg/m<sup>3</sup> の場合は, -350mV より卑な値を打継目付近で示すものがあり「90%以上の確率で腐食あり」と判定された。

既設グラウト部の塩分量が 30kg/m<sup>3</sup> の場合は, 概ねすべての計測位置で自然電位は-350mV より卑となり, 10kg/m<sup>3</sup> と比較して自然電位が小さくなった。

(2) 再注入グラウト材

NB 系グラウトと, 亜硝酸リチウム入りプレミックスタイプ (以下, Li 系という) グラウト材を, それぞれ再注入した試験体の自然電位を図-6 に示す。

既設グラウト部の塩化物イオン量が 10 kg/m<sup>3</sup> の場合は, NB 系グラウトの自然電位が-350mV より卑な値を示すのに対して, Li 系のものは-350mV よりも貴な値を示し, 鋼材腐食の抑制する可能性があることを示した (図-6(a))。

既設グラウト部の塩化物イオン量が 30kg/m<sup>3</sup> の場合においても, Li 系では, ある程度鋼材腐食を抑制する可能性がある (図-6(b))。

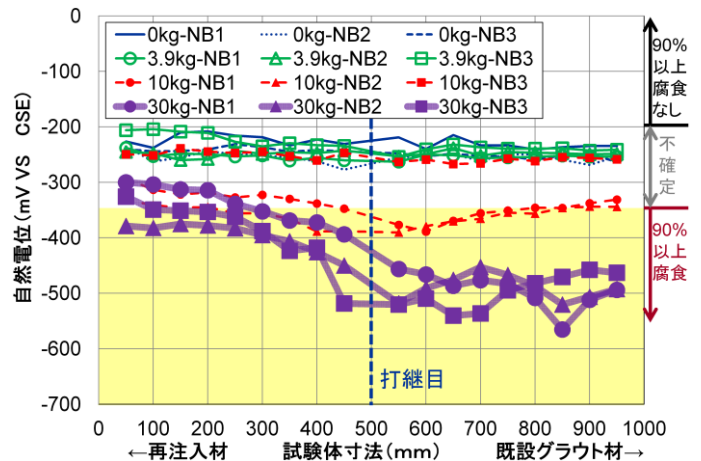
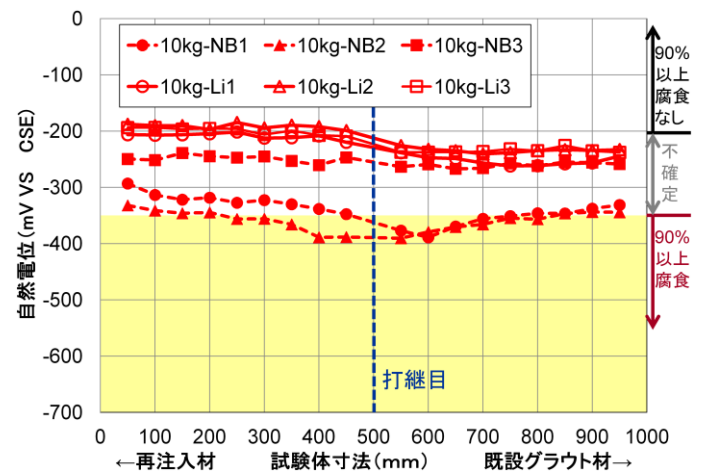
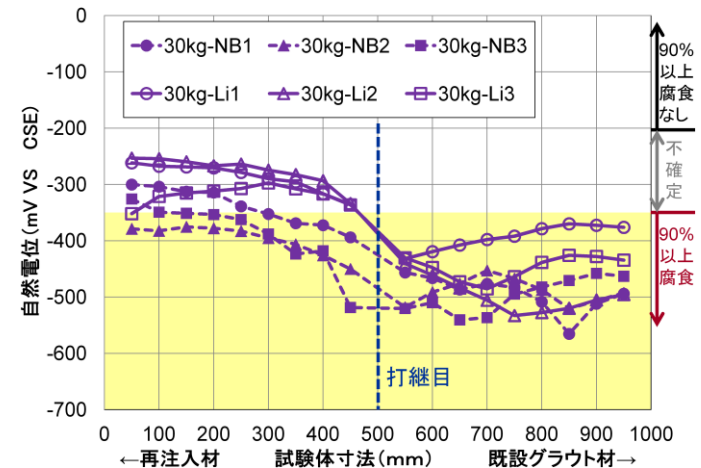


図-5 打設後 28 日の自然電位 (NB 系グラウト)



(a) 既設グラウト部の塩分量 (10kg/m<sup>3</sup>)



(b) 既設グラウト部の塩分量 (30kg/m<sup>3</sup>)

図-6 打設後 28 日の自然電位 (NB と Li 比較)

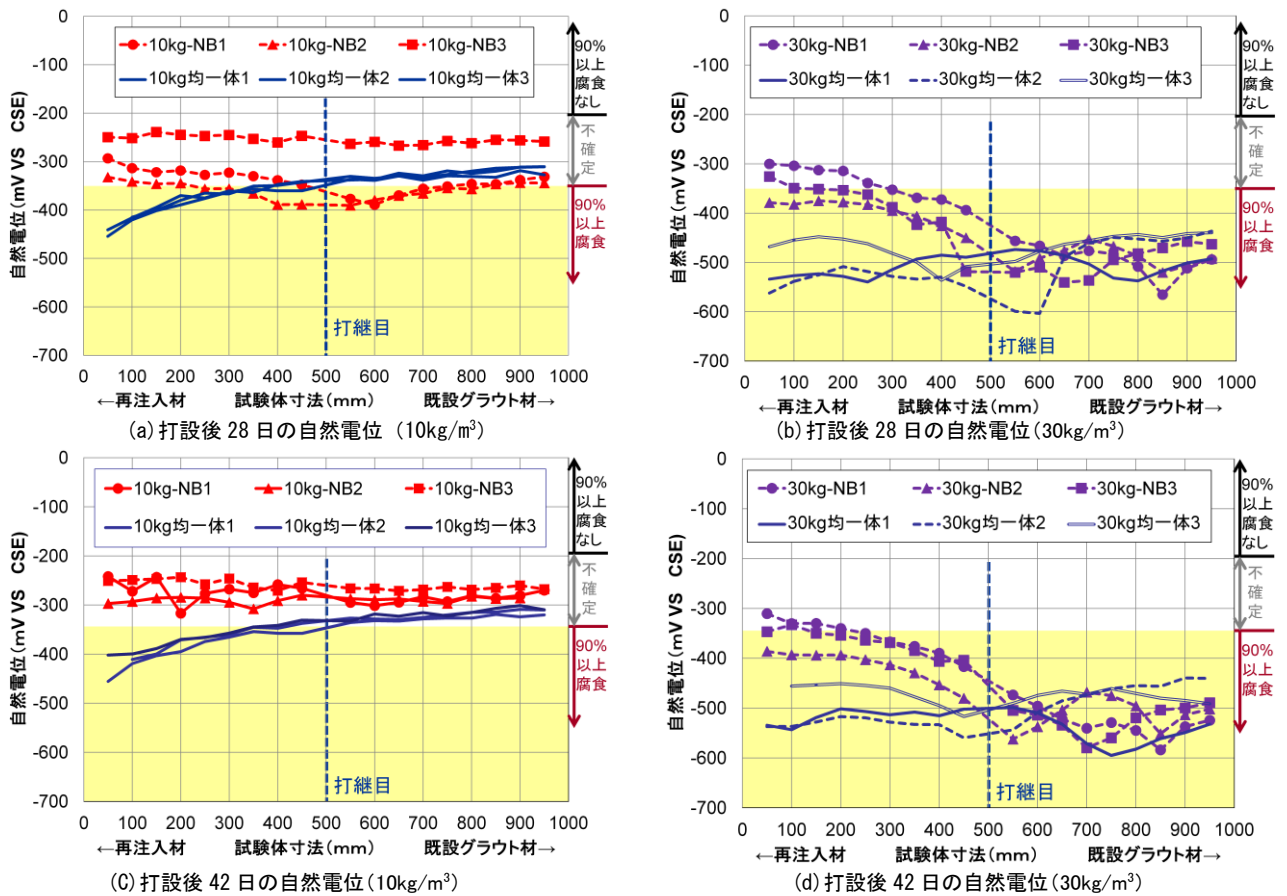


図-7 自然電位 (NB と均一試験体)

(3) 打継目付近の自然電位

NB系グラウトを再注入した試験体と、既設グラウト材による打継目のない均一試験体の自然電位 (28日, 42日) を図-7に示す。

NB系グラウト材を再注入した試験体では、打継目付近の自然電位が低下するものが図-7(a), (d)の一部で確認されたが、均一試験体ではそのような傾向は見られない。このことは、マクロセル腐食の発生を示しているものと考えられる。

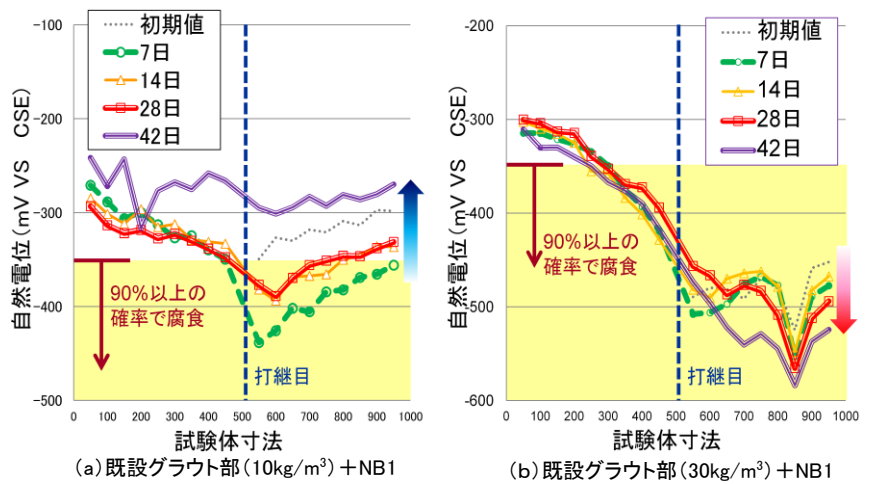


図-8 自然電位の経時変化 (NB)

(4) 自然電位の経時変化

NB系グラウトを再注入した試験体の自然電位の経時変化を図-8に示す。

既設グラウト (10kg/m³) の自然電位は、時間の経過とともに、卑から貴な値に移行する傾向が見られた。一方、既設グラウト (30kg/m³) の自然電位は、時間の経過とともに、徐々に低下する傾向が見られた。このことは、既設グラウト (10kg/m³) の腐食反応は収束傾向を示し、一方の既設グラウト (30kg/m³) の腐食反応は進行中であることを示していると考えられる。

(5) 解体調査結果

試験体を製作してから約4ヵ月後、試験体を解体し、鋼材腐食状況を目視観察した (写真-1)。

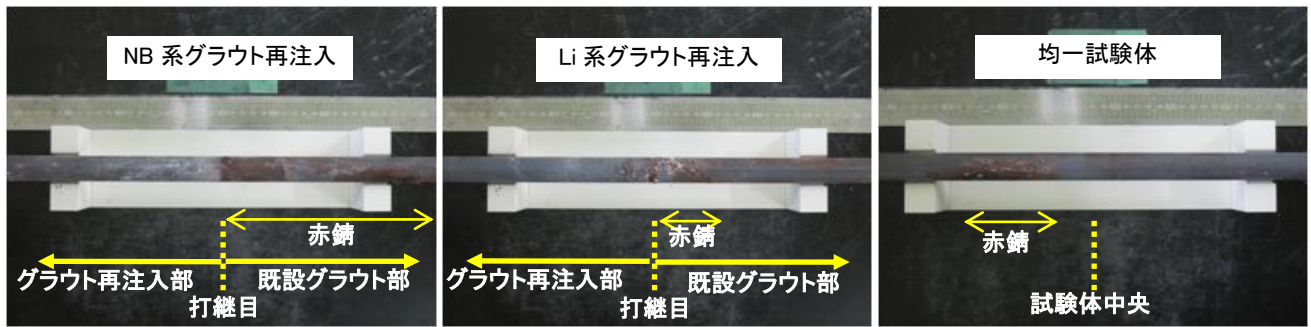


写真-1 鋼材腐食状況 (塩化物イオン量 30kg/m³)

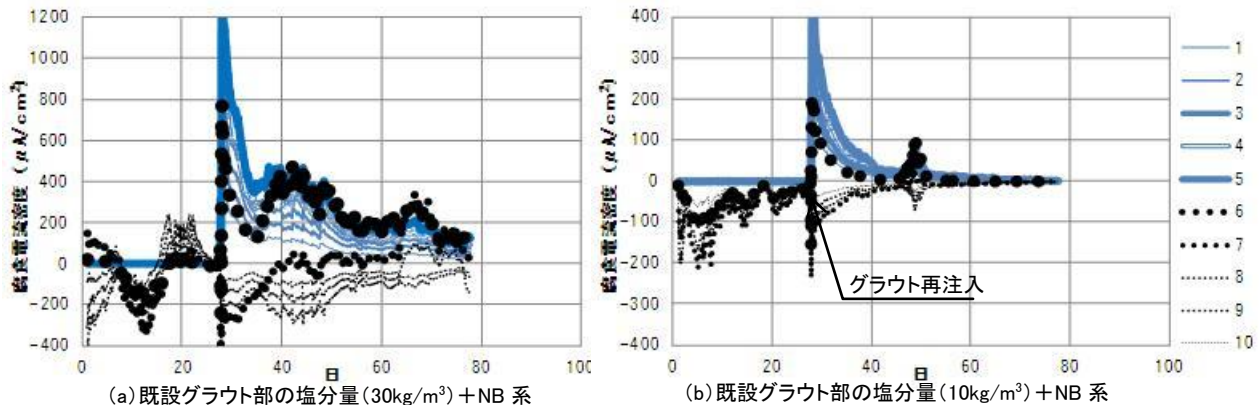


図-9 腐食電流測定 (塩分量 30, 10 kg/m³)

NB系グラウト材およびLi系グラウト材を再注入した試験体は、打継目付近で鋼材腐食が見られる。また、NB系グラウト材を再注入した試験体は、Li系グラウト材と比較して、既設グラウト部打継目付近で腐食がより進行していると考えられる。

#### 4.2 分割PC鋼材による腐食電流測定 (試験ケースⅡ)

腐食電流密度の結果を図-9に示す。再注入グラウト材を注入した直後に、急激に大きな腐食電流が発生した。また、打継目に近い分割PC鋼線 (番号4, 5, 6, 7) に大きな腐食電流が流れ、腐食電流は既設グラウト材の塩化物イオン量が多いほど大きくなる結果となった。

### 5. 結論

本実験の範囲内で、次のことが明らかとなった。

- (1) 既設グラウト材の塩化物イオン量が  $10\text{kg/m}^3$  以上含有された状態で、ノンブリーディング型 (混和材タイプ) のPCグラウト材を再注入した場合、打継目付近にマクロセル腐食電流が発生し、PC鋼材腐食が促進する可能性がある。
- (2) 既設グラウト材の塩化物イオン量が  $10\text{kg/m}^3$  以上含有された状態で、亜硝酸リチウムを配合した体積比抵抗率が大きなPCグラウト材を再注入した場合、打継目付近のマクロセル腐食電流が小さくなり、PC鋼材腐食を抑制する可能性がある。

### 6. 今後の予定

本実験の継続調査、および解体調査を行って、PC鋼材の腐食状況等を確認する予定である。

最後に、分割PC鋼材試験体の製作にあたり、金沢工業大学 宮里心一教授には、多くのご指導を賜りました。ここに記して謝意を表します。

参考文献 1) 宮里心一・大即信明・小長井彰祐：分割鉄筋を用いたマクロセル電流測定方法の実験的・理論的検討,コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, 2001