

# PC グラウト充てん不足部補修「リパッシブ工法」の腐食抑制効果

技術本部                      技術部                      鴨谷知繁  
 技術本部                      技術部                      青山敏幸

**概要：**グラウト充てん不足部への  $\text{Cl}^-$  の侵入による PC 鋼材の腐食を模擬した試験体を用いて、その補修方法を検討した。  $\text{LiNO}_2$  水溶液へ浸せきした場合の鋼材の電位変化や、9ヶ月に渡る促進腐食試験中の分極抵抗の測定結果および試験終了後の腐食減量の測定結果より、  $\text{LiNO}_2$  水溶液への浸せきと  $\text{LiNO}_2$  を添加した補修材充てんを行うリパッシブ工法の腐食抑制効果が高いと判断された。

**Key Words：**凍結防止剤，グラウト充てん不足，補修，亜硝酸リチウム

## 1. はじめに

近年、ポストテンション方式の既設 PC 橋におけるグラウト充てん不足部に、凍結防止剤に含まれる  $\text{Cl}^-$  が侵入し、構造安全性を確保する上で重要な PC 鋼材において著しい腐食(写真-1)や破断が報告されている。このようにして腐食した PC 鋼材は、表面の錆層に多量の  $\text{Cl}^-$  が含まれるため、従来のグラウト再注入工法では、十分な補修効果を得ることができない可能性がある。そこで、このような鋼材においても耐久性を確保することを目的に、亜硝酸リチウム(以下、  $\text{LiNO}_2$  と記す)水溶液の注入と  $\text{LiNO}_2$  を添加した補修材の充てんによる新しい補修工法「リパッシブ工法」を開発した。本稿では、塩水噴霧により腐食させた鋼材を対象にリパッシブ工法による腐食抑制効果を実験的に検討した結果を報告する。



写真-1 既設 PCT 桁橋の主ケーブルに生じた著しい腐食



写真-2 試験片の腐食状況

## 2. 試験概要

### 2.1 試験片概要

試験片は、PC 鋼材の代わりに直径 13mm のみがき丸鋼とし、5%の  $\text{NaCl}$  水溶液の1日2回の散布を2ヶ月間行うことにより腐食させた。試験片の腐食状況を写真-2に示す。腐食量は3本の平均値で  $43.4\text{mg}/\text{cm}^2$  であった。

### 2.1 試験概要

#### 2.1.1 シリーズ I

試験はシリーズ I とシリーズ II に分けて行った。シリーズ I は  $\text{LiNO}_2$  水溶液へ浸せきした試験片における電位の経時変化と、錆層に含まれる  $\text{Cl}^-$  量、  $\text{NO}_2^-$  量を把握することを目的とした。試験片を飽和  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  水溶液、6.5%、13.0%、40.0%の濃度の異なる  $\text{LiNO}_2$  水溶液に浸せきし、図-1に示す方法により定期的に電位を計測した。さらに、13.0%、40.0%の  $\text{LiNO}_2$  水溶液に浸せきした試験片については  $\text{LiNO}_2$  水溶液への浸せき後、腐食生成物を採取した。これを過熱乾燥させたものを分析試料とし、純水を加え溶け出した両イオ

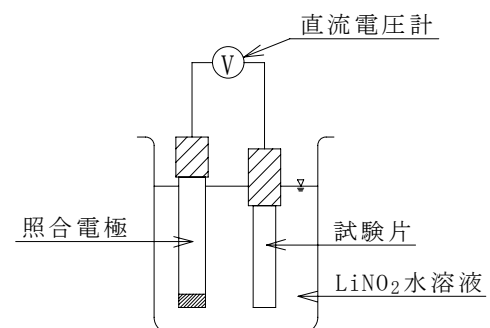


図-1 鋼材電位の測定概要図

ンをイオンクロマトグラフ法により分析した。

### 2.1.2 シリーズII

シリーズIIでは図-2に示す試験体を製作した。試験片の両端は塩化ビニル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を行うためのリード線を設置した。シースは塩化ビニル管を使用し、かぶりが10mmとなるように試験片をシース内に設置した。電気化学的測定を行うための対極を試験体内に設置するとともに、塩化ビニル管に試験片の電位を計測するための計測孔を設けた。

試験要因は表-1のように従来のグラウト再注入工法（以下、Nor-G補修）、 $\text{LiNO}_2$ を添加した補修材による補修（以下、LN-G補修）および $\text{LiNO}_2$ 水溶液への浸せきと $\text{LiNO}_2$ を添加した補修材による補修（以下、リパッシブ工法補修）とし、LN-G補修については補修材への $\text{NO}_2^-$ 添加量を $6\sim 15\text{kg/m}^3$ の3水準とした。なお、比較検討用に $\text{LiNO}_2$ 水溶液への浸せきと従来のグラウトによる補修を試験項目に加えることも考えられたが、後に詳述するように錆層内に侵入した $\text{NO}_2^-$ がグラウトへと拡散することで長期的な補修効果が低下することが想定されたため、本試験ではそのような試験体は製作しなかった。

シース内を充てんする補修材は、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たグラウト材とし、水セメント比は45%とした。

各補修方法の腐食抑制効果を確認することを目的に、試験体製作後約60日から約 $30^\circ\text{C}$ 相対湿度80%の養生槽において9ヶ月の腐食促進試験を行い、試験片の分極抵抗を定期的に測定した。分極抵抗は掃引速度を $5\sim 10\text{mV/min}$ とした直流分極抵抗法により計測した。そして腐食促進試験終了後、試験体を解体し、試験片の除錆を行い腐食減量の測定を行った。

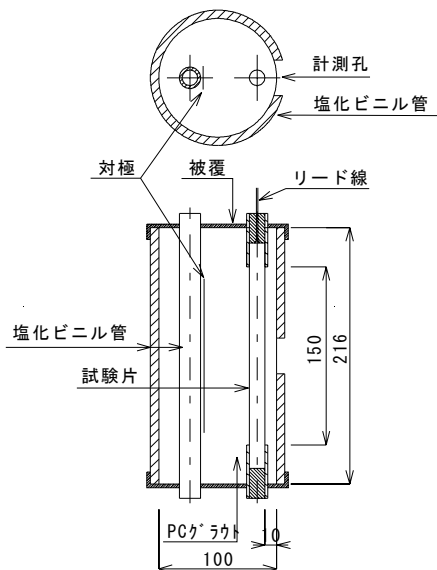


図-2 シリーズII試験体の概要図

表-1 シリーズII試験要因

| No.  | 補修の方法 ※)   |                             | 備考        |
|------|--|-----------------------------|-----------|
|      | ① $\text{LiNO}_2$ 水溶液浸せき<br>( $\text{NO}_2^-$ 濃度-時間) | ②補修材<br>$\text{NO}_2^-$ 添加量 |           |
| sp-1 | 無  | $0\text{kg/m}^3$            | Nor-G補修   |
| sp-2 | 無  | $6\text{kg/m}^3$            | LN-G補修    |
| sp-3 | 無  | $9\text{kg/m}^3$            | LN-G補修    |
| sp-4 | 無  | $15\text{kg/m}^3$           | LN-G補修    |
| sp-5 | 6.5%-4日  | $9\text{kg/m}^3$            | リパッシブ工法補修 |

※) 補修は①→②の順で行った

## 3. 実験結果と考察

### 3.1 $\text{LiNO}_2$ 水溶液中における試験片の電位変化

各水溶液中における試験片の電位の経時変化を図-2に示す。飽和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 水溶液に浸せきした場合には、電位は $-400\text{mV}(\text{SCE})$ から徐々に卑に移行し $-600\text{mV}(\text{SCE})$ に達した。一方、 $\text{LiNO}_2$ 水溶液に浸せきした場合には、電位は経時的に貴に移行し、 $-100\sim -250\text{mV}(\text{SCE})$ 程度となった。この貴に移行する速度は $\text{LiNO}_2$ 水溶液濃度に依存しており、濃度が高い程早く移行する傾向にあった。



鴨谷知繁



青山敏幸

次に、試験片の錆層に含まれる  $\text{Cl}^-$  量、 $\text{NO}_2^-$  量を分析した結果を表-2 に示す。なお、水溶液に浸せきした期間は試験体製作時と同様に 4 日である。LiNO<sub>2</sub> 水溶液に浸せきすることで  $\text{NO}_2^-$  は錆層内に浸透し、その浸透量は浸せきする水溶液の濃度が高い方が大きい傾向にあった。一方、錆層内に存在した  $\text{Cl}^-$  は逆に水溶液中へ放出される傾向にあった。

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<sup>2)</sup>、 $\text{Cl}^-$  と  $\text{NO}_2^-$  との比率が 1.25 以下で鋼材の腐食が抑制されるとの報告<sup>3)</sup>から考えると、腐食した鋼材を LiNO<sub>2</sub> 水溶液に浸せきすると、その濃度に応じた  $\text{NO}_2^-$  が錆層に侵入するだけでなく、錆層内に存在していた  $\text{Cl}^-$  が水溶液中に放出されることで早期に電位が貴に移行し腐食抑制効果が発揮されるものと考えられる。そして  $\text{NO}_2^-$  が錆層から鋼材表面に到達し、錆層に存在する  $\text{Cl}^-$  と  $\text{NO}_2^-$  との比率が上述の 1.25 以下となったために鋼材が不動態化したと推定される。

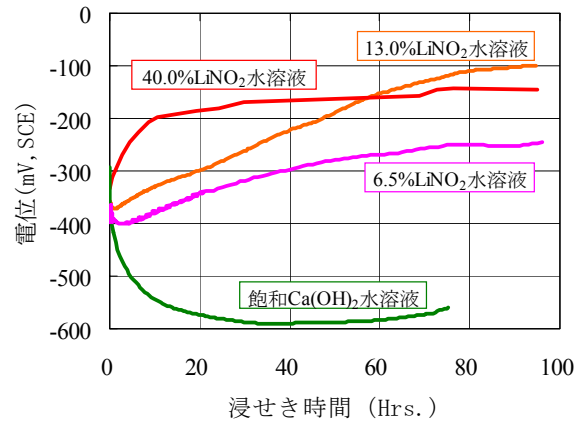


図-2 各水溶液中における試験片の電位の経時変化

表-2 試験片の錆層に含まれる  $\text{Cl}^-$  量、 $\text{NO}_2^-$  量を分析した結果

| 試料No. | 鉄筋種類                                  | (錆中の wt%)     |                 | $\text{Cl}^- / \text{NO}_2^-$ |
|-------|---------------------------------------|---------------|-----------------|-------------------------------|
|       |                                       | $\text{Cl}^-$ | $\text{NO}_2^-$ |                               |
| ①     | 塩水噴霧鉄筋                                | 4.1           | —               | —                             |
| ②     | 塩水噴霧 + 13%LiNO <sub>2</sub> 水溶液 浸せき鉄筋 | 0.23          | 3.2             | 0.072                         |
| ③     | 塩水噴霧 + 40%LiNO <sub>2</sub> 水溶液 浸せき鉄筋 | 0.53          | 5.1             | 0.104                         |

### 3.2 各試験体の分極抵抗

図-3 に各試験体の分極抵抗の経時変化を示す。Nor-G 補修の sp-1 は、分極抵抗が増加傾向にあり 180 日以降では CEB(Comité Euro-International du Béton)で示される腐食速度の判定基準<sup>4)</sup>において不動態状態と判定される 130kΩcm<sup>2</sup> 上回っているものの、それ以前は上述の判定基準を常時下回っており腐食状態と推察された。表-2 に示すように試験片の錆層内には  $\text{Cl}^-$  が含まれており、この  $\text{Cl}^-$  量がある値以上の場合には、Nor-G 補修による腐食抑制効果が期待できない可能性がある。

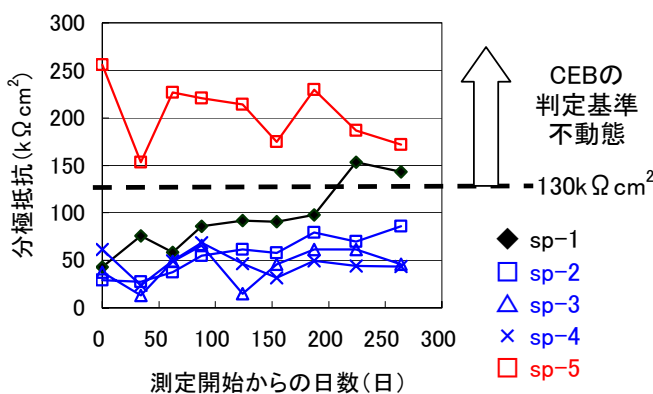


図-3 分極抵抗測定結果

表-3 CEB による腐食速度の判定基準<sup>4)</sup>

| 腐食速度の判定    | 分極抵抗 (kΩcm <sup>2</sup> ) |
|------------|---------------------------|
| 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                      |

LN-G 補修の sp-2~sp-4 はいずれも全期間に渡り、上述の不動態状態と判定される基準  $130\text{k}\Omega\text{cm}^2$  を下回っており、試験片を再不動態化させるには至っていない。これは、補修材に添加された  $\text{NO}_2^-$  は錆層に侵入しにくく、腐食抑制効果を得るのに十分な量の  $\text{NO}_2^-$  が錆中に侵入しなかったためと考えられる。LN-G 補修の各試験体の分極抵抗が Nor-G 補修の sp-1 と比較して低下した理由については今後の課題であるが、この結果は LN-G 補修のように補修材への  $\text{NO}_2^-$  の添加だけでは逆効果になる可能性を示すものであり、注意を要する。

一方、リパッシブ工法補修の sp-5 は試験開始直後から常時  $130\text{k}\Omega\text{cm}^2$  を上回っており良好な不動態状態と判断され、リパッシブ工法による補修は、既往の Nor-G 補修と比較して腐食抑制効果が高いものと考えられる。また、上述のように sp-2~sp-4 の腐食抑制効果が sp-1 を下回ったことを考慮すると、腐食した PC 鋼材において良好な腐食抑制効果を得るためには  $\text{LiNO}_2$  水溶液への浸せきの手順が必要と考えられる。

### 3.3 各試験体の腐食量

図-4 に各試験体を解体した後に測定した試験片の腐食減量を示す。腐食減量は試験体作成から解体までの期間に生じた分のみとした。リパッシブ工法補修の sp-5 は Nor-G 補修の sp-1 より腐食減量が小さい一方、LN-G 補修の sp-2~sp-4 の腐食減量は sp-1 より大きくなった。この結果は、以下の式(1)に示すように分極抵抗より算出した腐食減量の推定値とも、sp-4 を除き、おおむね一致した。

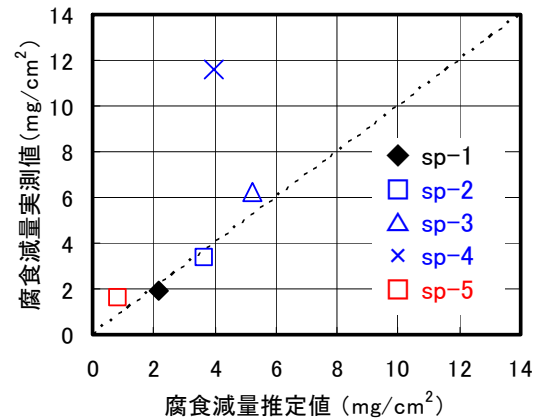


図-4 腐食減量の測定結果

$$G_h = \frac{MK_v}{2F_a} \sum \left( \frac{\Delta t}{R_p} \right) \dots\dots\dots (1)$$

- ここに、  $G_h$  : 補修部の腐食減量推定値( $\text{g}/\text{cm}^2$ )  
 $K_v$  : 換算係数(0.026V)  
 $R_p$  : 分極抵抗( $\Omega\text{cm}^2$ )  
 $M$  : 鉄の原子量(55.8g)  
 $F_a$  : ファラデー定数(96500クーロン)  
 $\Delta t$  : 経過時間(sec)

このように試験片の腐食減量を測定した結果からもリパッシブ工法による補修の高い腐食抑制効果が確認された。

## 4. まとめ

グラウト充てん不足部への  $\text{Cl}^-$  の侵入による PC 鋼材の腐食を模擬した試験体を用いて、その補修方法を検討した。  $\text{LiNO}_2$  水溶液へ浸せきした場合の鋼材の電位変化や、9 ヶ月に渡る促進腐食試験中の分極抵抗の測定結果および試験終了後の腐食減量の測定結果により、  $\text{LiNO}_2$  水溶液への浸せきと  $\text{LiNO}_2$  を添加した補修材充てんを行うリパッシブ工法の腐食抑制効果が高いと判断された。

## 謝辞

リパッシブ工法の開発においては共同研究者である神戸大学大学院森川英典教授にご指導頂いた。また新日鐵高炉セメント(株)の堀健治氏には  $\text{LiNO}_2$  を添加した補修材に関してご教示頂いた。心よりお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.