

初期塩化物量がグラウト中の鋼材の腐食性に及ぼす影響に関する実験的研究

オリエンタル建設(株) 正会員 ○小林 俊秋  
 京都大学 大学院工学研究科 正会員 工博 宮川 豊章  
 日本道路公団 試験研究所 正会員 野島 昭二  
 オリエンタル建設(株) 正会員 工修 二井谷 教治

1. はじめに

PCグラウトの要求性能は、緊張材の保護と部材コンクリートとの一体化である。この性能を保証する基本的な性質の1つに、グラウト中の初期塩化物イオン総量が挙げられる。コンクリート標準示方書では、グラウト中の塩化物イオン総量をコンクリート中と同じ 0.3kg/m<sup>3</sup> 以下と規定している。W/C=50%, C=328kg/m<sup>3</sup> をコンクリート、W/C=45%, C=1305kg/m<sup>3</sup> をグラウトの標準的な配合とし規定値をセメント重量比で計算すると、コンクリートでは約 0.1%、グラウトでは 0.02%以下となる。また、英国コンクリート学会技術報告書第 47 号 (TR47) <sup>1)</sup>でのグラウトの規定値は、セメント重量比で 0.1%以下である。TR47 のグラウトの規定値が国内のコンクリートの規定値とほぼ同じであることを考慮すると、国内のグラウトの規定値は、かなり小さい値である。一方、コンクリート中での塩化物イオンの鋼材腐食発生限界濃度 1.2kg/m<sup>3</sup> をセメント重量比で計算すると約 0.4%である。仮に、グラウト中での限界値がコンクリートと同程度であれば、国内のグラウトの規定値を検討する必要があると考えられる。しかし、グラウトの鋼材腐食発生限界濃度に関しては、現在まであまり研究が行われていないのが現状である。本実験では、グラウト内に埋設されたPC鋼材の耐食性を分極試験によって電気化学的に評価し、PC鋼材と塩化物イオンの腐食発生限界濃度の関係を明らかにすることを目的とした。

2. 実験概要

2. 1 要因と水準

グラウト中の初期塩化物イオン量の影響を、主にPC鋼材の自然電位、分極抵抗から検討を行う。実験の要因と水準および試験項目を表-1, 2に示す。初期塩化物イオン量は、土木学会の規定値0.02 (0.3kg/m<sup>3</sup>), セメントの規定値0.035, TR47の規定値0.10, 腐食発生限界量近傍の0.3, 0.6さらに1.2, 1.8, 2.4 (C×wt%) までの8水準とする。特性を平均化するため銘柄3種類を混合した普通ポルトランドセメント、練混ぜ水は、水道水、混和剤は、ノンブリーディング・高粘性型グラウト用混和剤、鋼材は、PC鋼棒 (SBPR φ23mm) を使用する。グラウトの塩分量の調整は、塩分の不足分を、練混ぜ水の一部に調整した塩分溶液を加えることによる。

表-1 要因と水準

| 要因         | 水準         |  |  |
|------------|------------|--|--|
|            | (セメント重量×%) | グラウト1m <sup>3</sup> 当りの塩化物イオン量(kg) <sup>※1</sup> | コンクリート1m <sup>3</sup> 当りの塩化物イオン量(kg) <sup>※2</sup> |
|            | ①          | ((①/100)×1305)                                   | ((①/100)×328)                                      |
| グラウトの塩分含有量 | 0.02       | 0.3  | 0.07   |
|            | 0.035      | 0.5  | 0.1  |
|            | 0.1        | 1.3  | 0.3  |
|            | 0.3        | 4  | 1  |
|            | 0.6        | 8  | 2  |
|            | 1.2        | 16   | 4  |
|            | 1.8        | 23   | 6  |
|            | 2.4        | 31   | 8  |

表-2 試験項目

| 試験対象    | 試験項目                  |
|---------|-----------------------|
| 鋼材の発錆   | 発錆状態の観察、発錆量、自然電位、分極抵抗 |
| グラウトの物性 | 圧縮強度、塩分量、pH           |

※1 単位セメント量=1305kgと仮定して計算

※2 単位セメント量=328kgと仮定して計算

## 2. 2 供試体の製作

水準の多い実験を簡易に行なうために、応力腐食の影響を考慮しない供試体とする。供試体は、PTI<sup>2)</sup>を参考にして、図-1に示すように透明PVC管とし、PC鋼材を絶縁製スペーサーで管の中心に配置する。PC鋼材は、前処理として、10%クエン酸ニアンモニウム溶液での化学研磨を行った後、デシケータ中で所定日数保存する。所定の方法で練混ぜたグラウトを、空気泡が十分に抜けるようにゆっくりと充填する。成形後、供試体は、14日間湿潤養生して、その後、グラウトに損傷を与えないように測定部分のPVC管を取り除きグラウトを露出させる。養生は、最も厳しい条件を想定して、温度20℃、湿度95%の簡易湿気箱に設置する湿布養生とする。表-3にグラウトの配合表を示す。グラウト流動性試験は、塩化物イオン量(セメント重量%) 0.02%、0.3%および2.4%の3水準について行い、

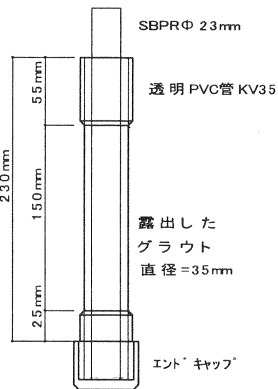


図-1 供試体の形状

表-3 PCグラウトの配合

| 水セメント比 (%) | グラウト用混和剤(kg) | 水(kg) | セメント(kg) |
|------------|--------------|-------|----------|
| 45         | 1.0          | 45.0  | 100.0    |

## 2. 3 測定方法

測定では、図-2に示す電解槽を用いる。試験水溶液は水酸化カルシウム飽和水溶液、試料極はグラウト供試体、対極はチタン製丸棒φ12.7mm、照合電極は銀塩化銀電極、電源は定電流電解装置を用いる。アルカリ性液中の鋼材腐食は溶存酸素濃度に依存するので、養魚用ポンプで試験水溶液に空気を吹き込んで腐食反応を律速した。試験水溶液の温度は20℃とし、一定に保持した。PC鋼材の腐食部位では、鉄の溶解と酸素の還元反応が同時に生じて腐食電流が流れる。腐食電流は、腐食速度を表す。PC鋼材の電位変化量Eと腐食電流I<sub>corr</sub>には、腐食電位近傍の範囲で式(1)の直線関係が成立する。

$$E = I_{\text{corr}} \times R_p \tag{1}$$

このR<sub>p</sub>を分極抵抗と呼ぶ。分極測定とは、評価する試料表面の電位を種々に変化させ、その電位における反応の量を電流(電気量)という形で定量する電気化学的測定法である。直流分極抵抗法を図-3に示す測定結果の例から説明する。縦軸の電位変化量Eに対する横軸の腐食電流I<sub>corr</sub>関係について直線を引き直線の傾きから分極抵抗R<sub>p</sub>を求める。交流インピーダンス法を図-4に示す腐食反応をモデル化した等価電気回路から説明する。図のコンクリート側から鉄筋に交流電圧を流すと周波数により電流経路が異なる。下記に示す方法により分極抵抗が求まる。

- ・低周波数の電流(充電される→Cdl≠∞)→(R<sub>s</sub>+R<sub>p</sub>)が測定
- ・高周波数の電流(充電されない→Cdl≅0)→R<sub>s</sub>が測定→(R<sub>s</sub>+R<sub>p</sub>)-R<sub>s</sub>=R<sub>p</sub>が求まる

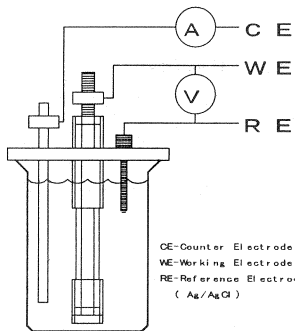


図-2 電解セル

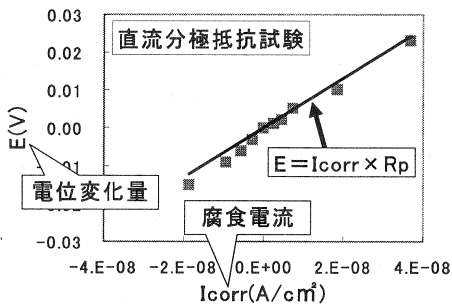


図-3 直流分極抵抗法による測定結果

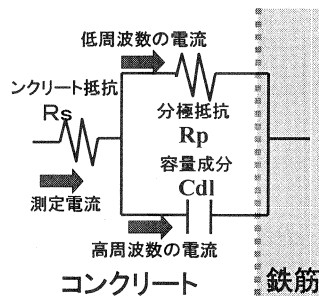


図-4 等価電気回路

### 3. 実験結果

#### 3. 1 PCグラウト供試体

PCグラウト供試体の製作過程において、PVC測定部除去の際、塩化物イオン量が1.8, 2.4 (C×wt%) の全部 (4体) および1.2 (C×wt%) の4本中3体の供試体にひび割れが発生していることが確認された。ひび割れ幅はほとんどが0.3mm以下である。塩化物イオン量とひび割れ状況の関係にはやや強い相関が認められ、塩化物イオン量が大きくなるに従い、ひび割れが激しくなった。このことから、塩化物イオン量の増加に伴う乾燥収縮の増大、連行空気量の増大等が、ひび割れの原因と考えられる。試験結果へのひび割れの影響については明確ではない。しかし1.2 (C×wt%) でひび割れが発生していない供試体とひび割れが発生した供試体の試験値には、大幅な違いはなく試験結果へのひび割れの影響は少ないようである。

#### 3. 2 自然電位

PC鋼材の電位と塩化物イオン量のグラフを図-5に示す。本項文中の電位はCu/飽和CuSO<sub>4</sub>電極を基準として表示した。表-4は、電位と鋼材の腐食性の一般的な関係である。グラウト中のPC鋼材では、塩化物イオン量が0.02~0.6 (C×wt%) の範囲では、自然電位は、塩化物イオン濃度依存性が小さく、ほとんどのものが-350mV (vs. CSE) を上回り、マイナス方向の経時変化もみられない。鋼材腐食に伴う電位低下が抑制されており、耐食性を示している。しかし、塩化物イオン量が1.2 (C×wt%) 以上のPC鋼材では、全体的に-350mV (vs. CSE) を下回り、表-4の判定基準より、腐食性がみられる領域まで低下している。塩化物イオン濃度依存性が見られ、塩化物イオン濃度が濃くなるにつれマイナス方向になる傾向が見られた。

表-4 電位と鋼材の腐食性の関係<sup>3)</sup>

| 電位nV(CSE)       | 評価                |
|-----------------|-------------------|
| -200nV<E        | 90%以上の確率で非腐食の状態   |
| -350nV<E≤-200nV | 腐食状態は不確定          |
| -500nV<E<-350nV | 90%以上の確率で腐食している状態 |
| E<-500nV        | ひどい腐食状態           |

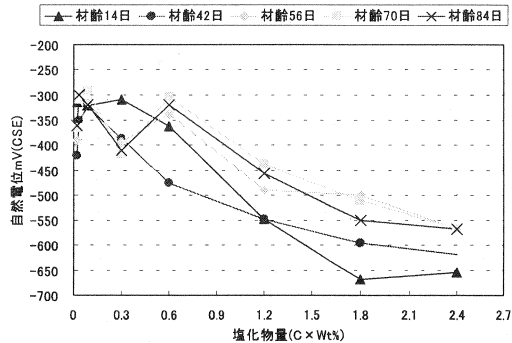


図-5 電位と塩化物イオン量の関係

#### 3. 3 分極抵抗

分極抵抗と塩化物イオン量の関係について直流法を図-6、交流法を図-7に示す。直流法は、0.02 (C×wt%) ではおよそ2000kΩ・cm<sup>2</sup>、1.2 (C×wt%) ではおよそ500kΩ・cm<sup>2</sup>であり、交流法の場合と比較すると0.02%では6倍程度、1.2%では3倍程度大きな値を示している。直流法の場合、電気抵抗の大きいグラウト中では、イオン伝導媒体が鋼材表面に到達する時間を考慮して、5分間通電電流を保持した後分極測定を行なった。その間に、分極反応の増加により計測される測定値が実際より大きくなる可能性はある。一方、交流法は、極性が瞬時に変化するので分極の問題はない。従って直流法の分極抵抗は、過大に計測されていると考えられる。そこで直流法の分極抵抗は、相対評価とし、交流法は、絶対評価で検討を進める。図-6より0.02~0.6 (C×wt%) の範囲では、分極抵抗は、塩化物イオン量との依存性は小さく、ほとんどのものが初期材齢から急激に増加し、その後も、不動態の成長に伴うと思われる分極抵抗の経時的な増加傾向が確認された。改正前のセメントの規制値である0.02 (C×wt%) を十分な耐食性を有すると仮定した場合、全体として、不動態が健全な状態であると言える。一方、1.2~2.4 (C×wt%) の範囲では、分極抵抗は、塩化物イオン量の増加とともに徐々に減少し、経時的な増加量でも、0.02~0.6 (C×wt%) の範

囲に比べて低い値である。不動態が不健全な状態であると言える。本実験で用いたグラウト中のPC鋼材では、腐食発生限界塩化物イオン濃度は、0.6~1.2 (C×wt%) の範囲内であると確認できる。表-5は、腐食速度の判定基準である。図-7より、0.02, 0.3 (C×wt%) の範囲では、分極抵抗は、300kΩ・cm<sup>2</sup>を上回り、不動態領域に存在して高い耐食性を示していることが分かる。しかし塩化物イオン量1.2 (C×wt%) の分極抵抗は、150kΩ・cm<sup>2</sup>前後であった。表-5の判定基準より、不動態-腐食境界領域であるが、その後プラス方向に変化し、180kΩ・cm<sup>2</sup>程度に落ち着いた。塩化物イオン量0.02, 0.3 (C×wt%) と比較すると分極抵抗が低く不動態が不安定のようなのである。

表-5 腐食速度の判定基準<sup>4)</sup>

| 分極抵抗(kΩ・cm <sup>2</sup> ) | 腐食速度の判定     |
|---------------------------|-------------|
| 130-260より大                | 不動態状態       |
| 52以上130以下                 | 低から中程度の腐食速度 |
| 26以上52以下                  | 中から高程度の腐食速度 |
| 26未満                      | 激しい、高い腐食速度  |

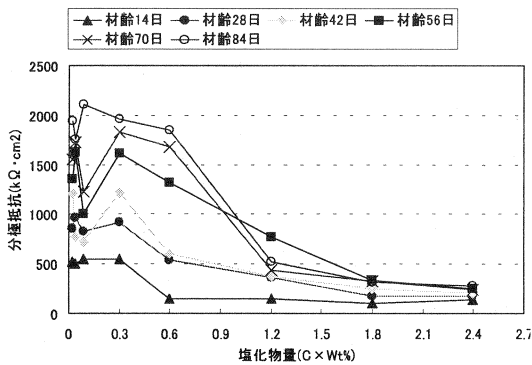


図-6 分極抵抗 (直流法)

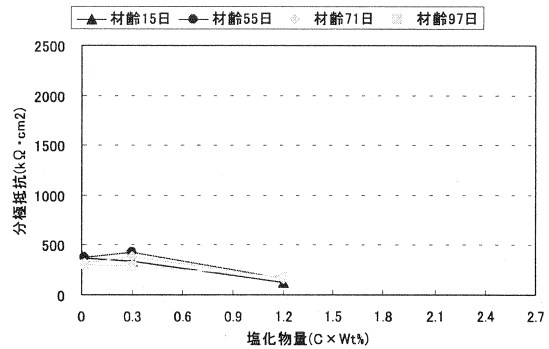


図-7 分極抵抗 (交流インピーダンス法)

4. 結論

本試験の範囲内において、以下の結論が得られた。

- (1) グラウト中のPC鋼材では、腐食発生限界塩化物イオン濃度は、0.6~1.2 (C×wt%) の範囲内にあると思われる。しかし、本結果は短期間の湿潤養生に基づいた結論なので継続的な実験の遂行が必要である。
- (2) グラウト中においてPC鋼材の不動態が健全な場合、電気化学的特性には塩化物イオン濃度依存性は見られない。しかしPC鋼材の不動態が不健全な場合、電気化学的特性に塩化物イオン濃度依存性が見られ、塩化物イオン濃度が濃くなるにつれ腐食性が増加する傾向が見られた。

本検討は、(社)プレストレスト・コンクリート技術協会の「PCグラウト規準作成委員会 実験検討WG」の一環として行なわれたものである。本実験を実施するにあたり、(株)太平洋コンサルタントに協力を頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) UK Concrete Society: Durable post-tensioned concrete bridges, Concrete Society Technical Report No. 47 Second Edition, 2002
- 2) Specification for Grouting of Post-Tensioned Structures, PTI Committee on Grouting Specifications, 2, 2001, pp58-60
- 3) ASTM C876-80: Half Cell Potentials of Reinforcing Steel in Concrete
- 4) CEB Working Party V/4.1: Strategies for Testing and Assessment of Concrete Structures Affected by Reinforcement Corrosion (draft), BBRI-CSTC- WTCB, Dec. 1997