

グラウトを充填した PC 鋼材の不動態化に関する実験的研究

オリエンタル建設 (株) 技術研究所 正会員 ○小林 俊秋
同 上 正会員 工博 呉 承寧

1. はじめに

PC グラウトは PC 構造物の耐久性を確保するために重要なものである。グラウト充填後の PC 鋼材は、 $\text{pH}=12\sim 13$ 、溶存酸素濃度 5ppm 程度の環境となり容易に不動態化する。不動態化とは、鋼材表面に酸化物皮膜が形成され、腐食速度が著しく低下することである。しかし気温の高い時期グラウト施工前にシース内に水分が存在した場合、PC 鋼材表面には、容易に錆が付着している。表面に錆が付着した PC 鋼材をそのまま使用した場合、グラウト充填後に不動態化するののかについて明らかにはなっていない。そこで本実験では、錆の付着した PC 鋼材を用いてグラウト充填後の電気化学的性質の経時変化を測定してその不動態について検討した。

2. 実験概要

2.1 試験体製作

実験は、錆の付着した PC 鋼材と錆の付着していない PC 鋼材との比較を行う。グラウトは、ノンブリーディングタイプ、PC 鋼材は、7本より線 $\phi 15.2\text{mm}$ (SWPR7BN) を使用した。試験体は、図-1 に示すように透明 PVC (ポリ塩化ビニル) 管 (内径 28mm) と短い PC 鋼材から成る¹⁾。鋼材と PVC 管が同心円に位置するようにプラスチック製のスペーサーで鋼材を PVC 管に固定し、底部は、エポキシ樹脂で充填した。錆なし PC 鋼材は、アセトンで表面の汚れを取り除いた。錆の付着した PC 鋼材は、温度 40°C 、相対湿度 95% で促進養生を行い発錆させた。注入管と排出管を設置して、注入管よりグラウトを全体の $1/3$ づつ空気泡が十分に抜ける程度にゆっくりと充填する。試験体は、温度 20°C 、湿度 60% の恒温恒湿室に8日間養生して、その後、回転式ワイヤブラシを用いて、グラウトに損傷を与えないように測定部分の PVC 管 ($h=90\text{mm}$) を取り除きグラウトを露出させる。最初に半径方向に PVC 管を2ヶ所切断して、それから縦方向に2ヶ所切断した。ひび割れが発生しないように早急に試験体を濡れたタオルで包みこむ。その後封かん養生する。試験体本数は、グラウト試験体2種類(錆あり、なし) $\times 3$ 、合計6体とした。試験に用いた錆の付着した PC 鋼材を写真-1、グラウト試験体を写真-2に示す。

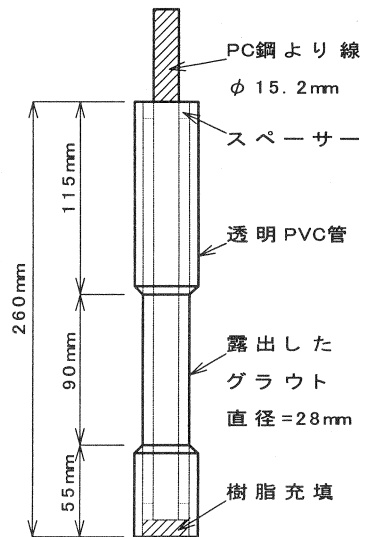


図-1 試験体の形状



写真-1 表面上に錆の付着した PC 鋼材

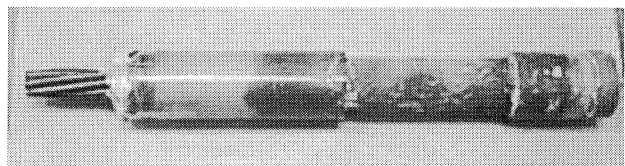


写真-2 グラウト試験体

2.2測定方法

鋼材の自然電位は、鋼材 (WE) と照合電極 (RE) 間の電位差から測定する。入力抵抗が100MΩ以上の電圧計を使用する。腐食電流は、外部直流電源装置と対極 (CE) 間の金属導線間に挿入した無抵抗電流計から測定できる。アノード分極曲線は、動電位法によって求める。動電位法では、鋼材電位を自然電位から一定速度 (1mV/s) で直線的に変化させられる電流を測定する。ポテンション・ガルバノスタット (PGS, ±50V, ±10A) を用いることにより、電位規制で電流-電位曲線の測定を行うことができる。分極抵抗は、交流インピーダンス法によって測定する。交流インピーダンス法は、±10mVの交流電圧を鋼材に負荷したときの抵抗を測定する。交流の周波数は、10Hz, 20mHz, とする。

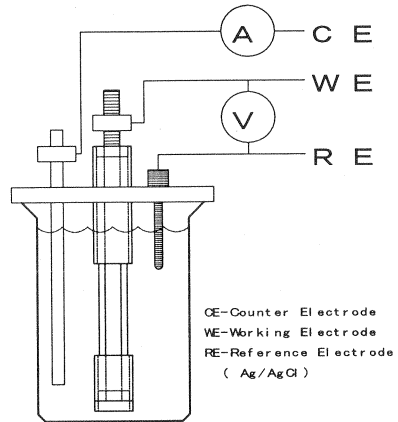


図-2 電解装置

3. 実験結果

3.1自然電位

鋼材表面に生成した不動態被膜の安定性を評価するために、飽和カルシウム溶液中での自然電位の測定を行った。測定には電気化学測定装置 (北斗電工社製, HE-104) を使用した。対極にはTiを、参照電極にはAg/AgCl (飽和KCl) 電極を用いた。本項文中の電位はCu/飽和CuSO₄電極を基準として表示した。試験溶液は、20℃とした。表-1は、ASTM C 876規格による電位と鉄筋の腐食状態を規定したものである。PC鋼材の電位/時間のグラフを図-3に示す。表-1の判定基準より、グラウト中の錆なしPC鋼材では、初期の自然電位が-295mV(CSE)程度と最も低く、腐食電位近くであるが、その後プラス方向へ大幅に変化し、-210mV(CSE)程度の定常値に落ち着いた。鋼材腐食 (溶解) に伴う自然電位の低下が抑制されており、高い耐食性を示している。錆の付着したPC鋼材の電位は、錆なしPC鋼材と同様の時間特性を示す。錆なしPC鋼材と比較すると少し自然電位が低く不動態が不安定なようである。

試験体種類

グラウト中のPC鋼材 (錆なし)
 グラウト中のPC鋼材 (錆あり)

腐食状態の変化 (17日→377日)

不確定 (腐食電位に近い) →不確定 (不動態電位に近い)
 不確定 (腐食電位に近い) →不確定 (不動態電位に近い)

表-1 電位と鋼材の腐食性の関係²⁾

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

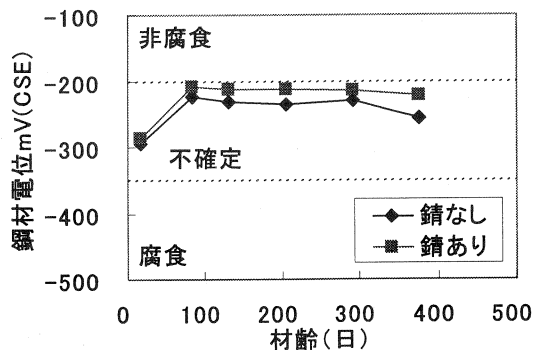


図-3 電位/時間

3.2分極抵抗

実験装置は、周波数応答解析器 (FRA), 電位制御装置, PGS, パーソナルコンピュータで構成した。対極にはTiを、参照電極にはAg/AgCl(飽和KCl)電極を用いた。腐食評価基準を表-2, PC鋼材の分極抵抗/時間のグラフを図-4に示す。グラウト中の錆なしPC鋼材では、初期の分極抵抗が238 kΩ・cm²と最も低く、不動態-腐食境界領域であるが、その後プラス方向へ大幅に変化し、500kΩ・cm²程度の定常値に落ち着いた。3ヶ月目以降は分極抵抗が高く、自然電位の測定結果と同様に高い耐食性を示していることが分かる。錆の付着したPC鋼材の分極抵抗は、錆なしPC鋼材と比較すると少し分極抵抗が低く自然電位の測定結果と同様に不動態が不安定なようである。3ヶ月目以降は不動態が安定化して高い耐食性を示していることが分かる。

試験体種類

グラウト中のPC鋼材 (錆なし)
 グラウト中のPC鋼材 (錆あり)

腐食速度の変化 (17日→377日)

低から中程度の腐食速度→不動態状態
 低から中程度の腐食速度→不動態状態

表-2 腐食速度の判定基準³⁾

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

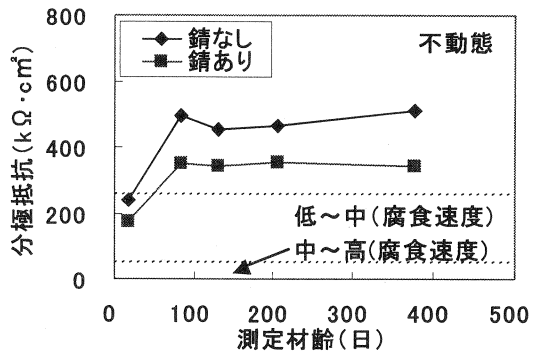


図-4 分極抵抗/時間

3.3アノード分極曲線

飽和Ca(OH)₂水溶液中での測定は、試験体浸漬後数分後の自然電極電位を分極開始電位として、電位をアノード方向に1.00V程度まで電位掃引を行った。この電位間において安定した不動態での反応は、不動態内の電子伝導に伴う酸素発生、化学溶解する不動態皮膜の補修等の電極反応である。不安定な不動態での反応は、金属溶解と酸素発生で両者の競争となる。金属溶解で流れる電流は、酸素発生で流れる電流に比較して極めて大きい。従って流れる電流量を測定することにより発生反応を特定することができて、不動態の安定性を評価できる。本項文中の電位はAg/AgCl(飽和KCl)電極を基準として表示した。

自然電位+0.20V<E<0.64V(Ag/AgCl)の電位範囲で流れる電流から不動態の状態を分類した指標を表-3に示す⁴⁾。分極曲線の経時変化を図-5, 6に示す。図-5より、上記電位間で、グラウト中の錆なしPC鋼材は、初期の最大電流が10.6 μA/cm²程度と最も高く、不完全な不動態領域である。しかし不安定な不動態では、アノード電流は、約0.2~20A/cm²程度の大きな値となる。鋼材腐食(溶解)に伴うアノード電流の増加が抑制されており、耐食性を示している。その後最大電流は、大幅に減少して2.2 μA/cm²程度の定常値に落ち着いた。自然電位や分極抵抗の測定結果と同様にアノード分極曲線の最大電流からも不動態が安定化したことがわかる。錆の付着したPC鋼材の最大電流を比較すると自然電位、分極抵抗と同様少し最大電流が大きく不動態が不安定なようである。3ヶ月目以降は不動態が安定化して高い耐食性を示している。最大電流/時間のグラフを図-7に示す。

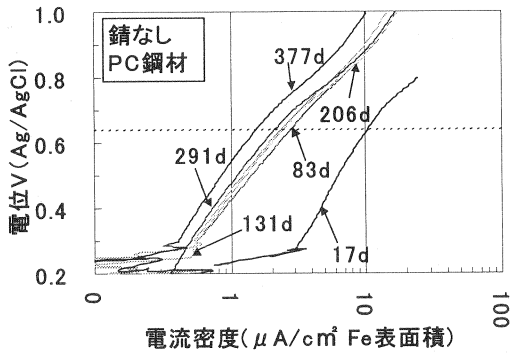


図-5 アノード分極曲線(錆なし)

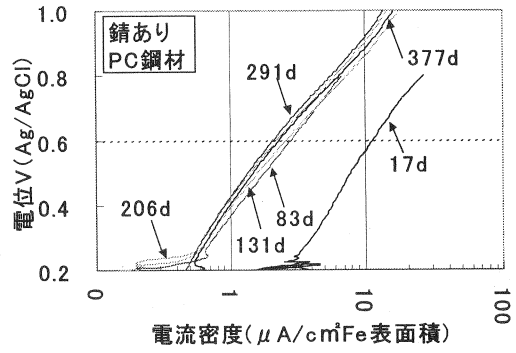


図-6 アノード分極曲線(錆あり)

試験体種類

- グラウト中のPC鋼材 (錆なし)
- グラウト中のPC鋼材 (錆あり)

不動態グレードの変化 (17日→377日)

- グレード2→グレード4
- グレード2→グレード4

表-3 アノード分極曲線の評価基準

グレード	評価基準
0	電流密度が1度でも100 μA/cm ² を越えるもの (全く不動態がない)
1	電流密度が10~100 μA/cm ² にあるもの (不完全ではあるが、若干は不動態があるもの)
2	電流密度が1度でも、10 μA/cm ² を越え、且つグレード1またはグレード3に含まれないもの
3	電流密度が1~10 μA/cm ² にあるもの
4	電流密度が1度でも、1 μA/cm ² を越え、且つグレード0, 1, 2又は3に含まれないもの
5	電流密度が1 μA/cm ² を越えないもの (非常に良好な不動態があるもの)

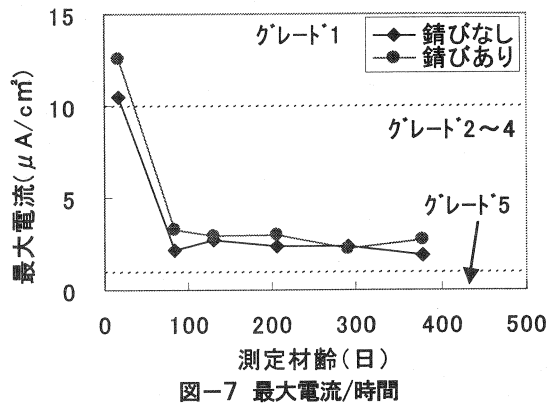


図-7 最大電流/時間

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)電気化学的測定よりグラウト内の錆があるPC鋼材は、錆がないPC鋼材と同様に不動態化する。
- (2)グラウト内の錆があるPC鋼材は、錆がないPC鋼材に比較して少し不動態が不安定である。
- (3)グラウト内での錆があるPC鋼材と錆がないPC鋼材の不動態は、時間の経過に伴い安定化する。

参考文献

- 1) Specification for Grouting of Post-Tensioned Structures, PTI Committee on Grouting Specifications, 2, 2001, pp58-60
- 2) ASTM C876-80 : Half Cell Potentials of Reinforcing Steel in Concrete
- 3) CEB Working Party V/4.1: Strategies for Testing and Assessment of Concrete Structures Affected by Reinforcement Corrosion (draft), BBRI-CSTC- WTCB, Dec. 1997
- 4) 大即信明, 池上明夫, 福手勤, 高木兼士: 種々の材料の鉄筋防食性能についての電気化学的評価, コンクリート工学論文集, 第1巻, 2号, pp.1-13,