

グラウト充填不足部におけるP C鋼材の腐食メカニズム

川田建設(株) 正会員 ○塩井 健太
 川田建設(株) 正会員 北野 勇一

キーワード：グラウト，充填不足，P C鋼材，腐食

1. はじめに

1990年代以前に建設されたポストテンション方式P C橋では、上縁定着を有するP C鋼材の曲上げ部にブリーディングが発生してグラウト充填不足が生じるケースが多いといわれている¹⁾。供用40年を超え撤去されたP C橋の調査結果²⁾によると、過酷な塩害を受ける状況ではグラウト充填不足部でP C鋼材の著しい腐食と素線破断が確認されたとする一方、水が侵入しない状況ではP C鋼材の腐食は認められないとも報告されている。今後、建設時の初期不良としてグラウト充填不足を有するP C構造物をより長く使い続けるためには、供用中の環境とP C鋼材の腐食メカニズムの関係を明らかにすることは有用と考える。そこで本稿では、グラウト充填不足の箇所に水や塩が侵入する環境(図-1に示す環境B)を想定し、グラウトの有無と環境条件を変えたP C鋼材の腐食実験を行った結果について報告する。

2. 環境条件がP C鋼材の腐食に与える影響(グラウト無)

2.1 実験概要

図-2に実験装置を示す。P C鋼材はφ7mmを長さ100mmに切断し、酸化皮膜がある状態で蓋付きの容器(密封)と蓋なしの容器(開放)に入れ、塩分(塩化ナトリウム)とpH調整試薬(水酸化カルシウム)を所定量溶解させた水溶液をP C鋼材がすべて浸かるまで注いだもの(全浸漬)と半分が浸かるまで注いだもの(半浸漬)を用意した。ここで、塩分濃度0.6%(グラウト単位容積質量1900kg/m³とした場合の塩化物イオン量6.9kg/m³相当)は、P C鋼材の破断が確認されたP C橋の調査結果³⁾よりグラウト中の塩化物イオン量が2.71kg/m³であったことから、それよりも腐食しやすい環境下を考慮して実験を行っている。そのため、塩分濃度0.6%という値は安全側に推定される値である。また、pHは橋面から上縁定着部を通じて水が侵入する際にアルカリ性を帯びることを考慮したものである。

これらの装置は温度20℃相対湿度60%の室内にて3ヶ月間静置した。実験終了後、P C鋼材を取り出し10%クエン酸二アンモニウム水溶液に浸した状態で温度60℃の乾燥炉にて12時間保管して錆を除去し

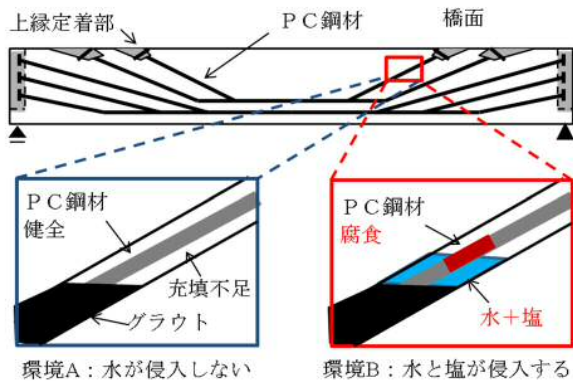


図-1 グラウト充填不足箇所で想定される環境

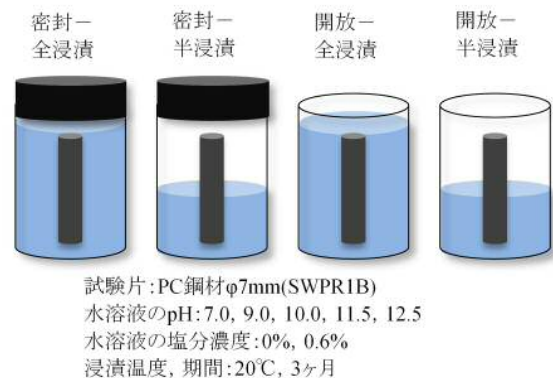


図-2 実験装置(グラウト無)

た。除錆後のP C鋼材に対し、電子ノギスを用いて最小直径を0.01mm単位まで測定するとともに、最小単位1mgの電子天秤を用いて質量を測定した。P C鋼材の減肉量と質量減少率をそれぞれ式(1)および式(2)により求めた。ここで、健全PC鋼材のD₀とWL₀は、浸漬を行わないPC鋼材を除錆したのちに測定した値である。

$$DL = (Db - D_0) \quad (1)$$

DL : P C鋼材の減肉量(mm)

Db : 除錆後のP C鋼材の最小直径(mm)

D₀ : 健全P C鋼材の最小直径(=6.91mm)

$$WL = (Wb - Wa) / Wb \times 100 - WL_0 \quad (2)$$

WL : P C鋼材の質量減少率(%)

Wb : P C鋼材の初期質量(g)

Wa : 除錆後のP C鋼材の質量(g)

WL₀ : 健全P C鋼材の質量減少率(=1.31%)

2.2 実験結果および考察

図-3に浸漬3ヶ月の装置内状況を示す。各装置は、溶液中に錯体（金属イオンが水和結合したもの）が認められるものと認められないものがあった。錯体

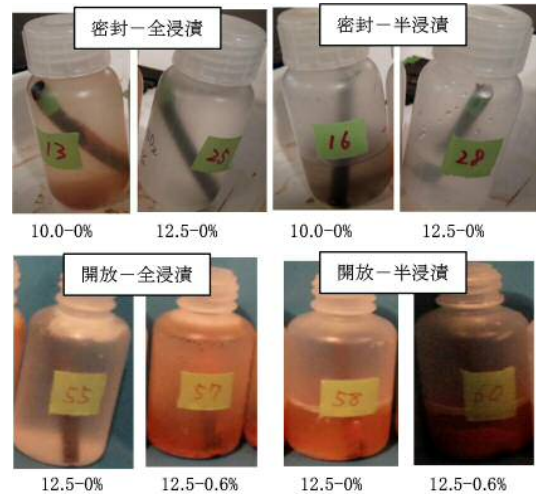
有の装置のうち開放のものはすべて赤褐色を呈していたが、密封のものは淡い褐色や淡い黒色を呈するものが多かった。なお、半浸漬の水に浸かっていない部分のP C鋼材の表面は、酸化皮膜のままであった。

図-4にP C鋼材の減肉量（グラウト無）を示す。いずれのP C鋼材にも減肉が認められ、密閉より開放、全浸漬より半浸漬の方が減肉量が増す傾向にあった。これは、密閉より開放の方が酸素供給量が多く、全浸漬はP C鋼材が全面腐食となるのに対し、半浸漬ではマクロセルを形成するためと考える。ただし、マ

クロセル形成による局部腐食を目視確認できたのは開放-半浸漬でpH12.5かつ塩分濃度0.6%の装置のみであった（図-5）。また、pHおよび塩分濃度の差異がもっとも現れたのは開放-半浸漬の装置で、pHが10以下で塩分濃度が高い条件で減肉量が増した。

図-6にP C鋼材の質量減少率を示す。溶液のpHが12.5でかつ錯体無のものは0.3%以下、これ以外では0.3%を超える質量減少率が確認された。ただし、試験条件の違いは明確でなかった。

以上より、グラウト無の場合、P C鋼材は水があると腐食し、侵水範囲、酸素供給量、pHおよび塩分濃度等の環境によっては局部的に腐食が進行することがわかった。



注) 各装置の下の表記は、「pH-塩分濃度」である。

図-3 装置内状況の一例（浸漬3ヶ月）

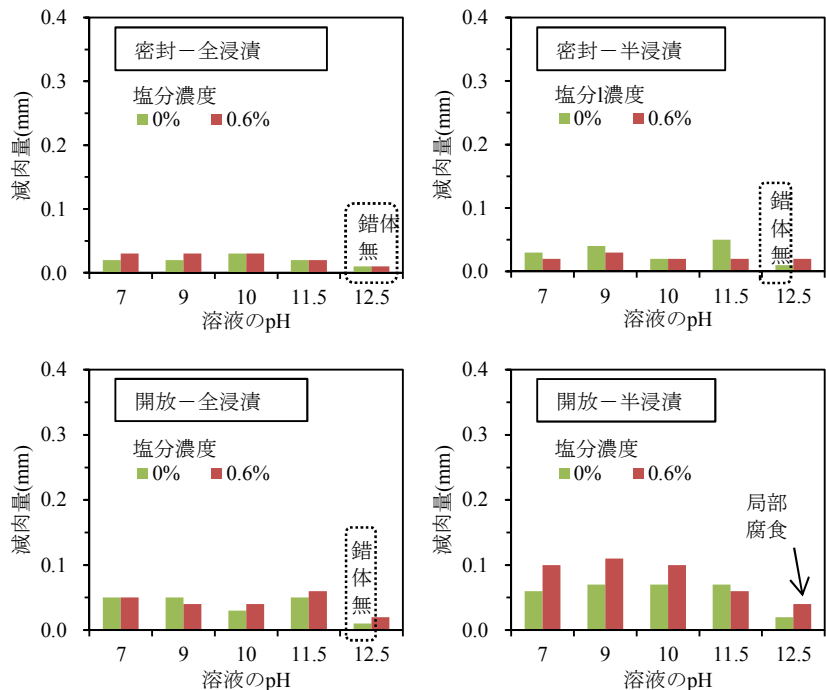


図-4 P C鋼材減肉量（グラウト無）

3. グラウトがP C鋼材の腐食に与える影響 (グラウト有)

3.1 実験概要

図-7にグラウト充填不足を模擬した実験装置を示す。実験装置は1990年代以前に使用されていたP C鋼材とシースの組合せを想定し直径50mmの容器に前章と同じP C鋼材を設置し、



図-5 局部腐食

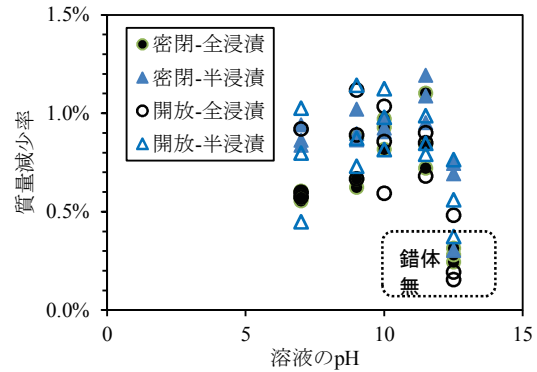
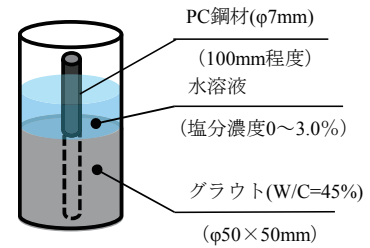


図-6 P C鋼材質量減少率 (グラウト無)

水セメント比45%のグラウトを高さ約50mmまで充填し、封緘養生を7日間行い、所定量の塩分を溶解させた水溶液を深さ約25mm注ぎ、上部25mmは気中とする「密封-半浸漬」のものとした。これは、予防保全の観点からP C構造物を維持管理するためには、外観に変状が出ない（開放はひび割れや水しみとして変状が確認でき、全浸漬は腐食進行が遅い⁴⁾）時点でのP C鋼材の劣化メカニズムを知ることが重要であると考えたためである。また、塩分濃度は、一般に腐食速度が最大になるといわれる3.0%以下の範囲で変化させた。



*上面はラップで覆い密封した
図-7 実験装置 (グラウト有)

実験は前章同様に温度20°C期間3ヶ月とし、浸漬中に溶液pH (pH試験紙による) と自然電位 (電位差計の陽極をP C鋼材に接続し、陰極である飽和硫酸銅電極を溶液に浸すことによる) を測定した。実験終了後、除錆したP C鋼材の最小直径 (電子ノギスは局部腐食部での正確な読みが難しいため0.05mm単位ノギスを読み値とした) を測定した。

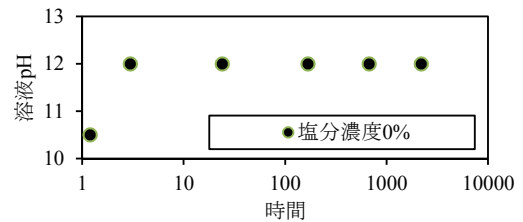


図-8 溶液 pH の推移

3.2 実験結果および考察

図-8に溶液pHの推移を示す。溶液pHの初期値は7.0であり、浸漬1時間後に10.5、3時間後に12.0となり、以後12.0で推移した。溶液pHが中性からアルカリ性に変化したのはグラウトから水酸化カルシウムなどの成分が溶出したためと考えられる。なお、例示以外の装置も溶液pHは概ね同様の推移であった。

図-9に自然電位の測定結果を示す。自然電位は塩分濃度0%のもので-350mVより貴、塩分濃度0.3~3.0%のものはいずれも-350mVより卑であった。この-350mVという電位は腐食判定の閾値になるといわれており、実際に塩分濃度0%のものは溶液中に鉄イオン溶出による錯体などの不純物が認められなかった。

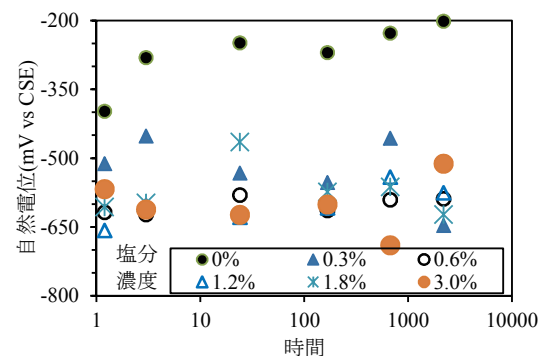


図-9 自然電位測定結果

一方、塩分濃度0.3~3.0%のものはP C鋼材の水中と気中の境界付近にこげ茶色のコブ状付着物とグラウト上面に赤褐色の沈殿物が確認された (図-10)。なお、実験終了後にグラウト充填部の自然電位を測定したところ、いずれも-350mVより貴であった。

図-11にP C鋼材の減肉量 (グラウト有) を示す。塩分濃度0%のものは減肉が認められず、それ以

外のは減肉が確認され、確認されたいずれも水中と気中の境界部に減肉が集中していた(図-12)。塩分濃度0.6%の減肉量は0.20mmであり、グラウト無で同条件の場合(前出図-4)と比べ5倍以上となることがわかった。また、塩分濃度がさらに高くなると減肉量がさらに増した(塩分濃度0.6%の1.5倍)。

以上より、グラウト有の場合、PC鋼材は水のみ3ヶ月間半浸漬する条件では腐食は確認できなかったものの、塩分濃度0.3%を超える水と塩があると腐食し、かつ、グラウト無の場合よりも腐食進行が局部的に加速されることがわかった。塩分濃度0%のグラウト有装置の場合は水がグラウトに接触しアルカリ性となりPC鋼材の腐食が抑制され、塩分濃度0.3%以上のグラウト有装置の場合はPC鋼材の長手方向においてグラウト充填部の貴な電位とグラウト充填不足でかつ水中となった部位の卑な電位との電位差が極めて大きくなることでマクロセルが強く形成されたと考えられる。

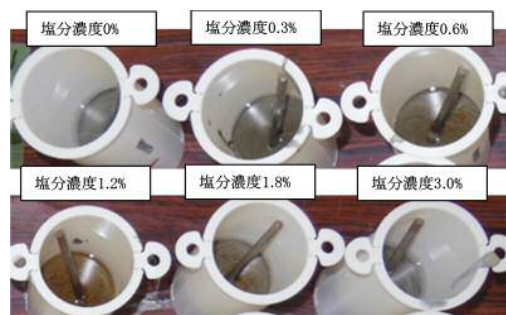


図-10 装置内状況(グラウト有)

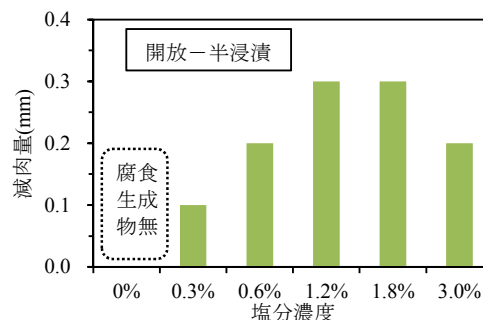


図-11 PC鋼材減肉量(グラウト有)

4. まとめ

グラウト充填不足の箇所に水や塩が侵入する環境を想定し、グラウトの有無や環境条件がPC鋼材の腐食に与える影響について実験的に確認し、今回の検討範囲において以下の結果を得た。

- (1) グラウト無の場合、PC鋼材は水があると腐食し、侵水範囲、酸素供給量、pHおよび塩分濃度等の環境によっては局部的に腐食が進行する。
- (2) グラウト有の場合、PC鋼材は水があるだけでは腐食しないものの、塩分濃度0.3%を超える水と塩があると腐食し、かつ、グラウト無の場合よりも腐食の進行が局部的に加速される。

なお、実際のPC構造物におけるPC鋼材は長いことや、水と塩の出入りがある場合など、今回の実験装置が実環境を必ずしも反映できていない部分があることについては今後の課題とする。



図-12 局部腐食状況の一例

参考文献

- 1) プレストレスト・コンクリート建設業協会：PC構造物の維持保全[2015年版]—PC橋の更なる予防保全に向けて—, 2015.3
- 2) 小林崇, 北野勇一, 花井拓, 木村嘉富：既設PC橋のグラウト充填状況がPC鋼材の腐食に与える影響, プレストレストコンクリート工学会第21回シンポジウム論文集, pp.443-446, 2012.10
- 3) 小林憲一, 大平英生, 登石清隆, 羽田伸介：妙高大橋のPCケーブル破断調査と対策, 橋梁と基礎, pp.32-38, 2011.9
- 4) 佐々木真一, 堺孝司：グラウト不良により劣化したPC橋の調査と補修, コンクリート工学年次論文集Vol.18, No.1, pp.1089-1094, 1996