

コンクリート中の鉄筋に対する電気防食工法のさび層改質効果

京都大学 学生会員 ○大谷 一貴 東洋建設株式会社 正会員 末岡 英二  
住友大阪セメント株式会社 正会員 山本 誠 株式会社ケミカル工事 正会員 若杉 三紀夫  
株式会社島津テクノリサーチ 非会員 羽村 陽平 京都大学 正会員 高谷 哲 京都大学 正会員 山本 貴士

1. はじめに

コンクリート中の鉄筋腐食は、構造物の性能低下の観点から特に重大な問題である。既往の研究により、結晶性が良く優れた耐食性を有する  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  保護性さびは、コンクリート中の鉄筋表面の水が抜けにくく酸素欠乏状態が保持された状態で形成する可能性があることが分かってきた<sup>1)</sup>。鉄筋をカソードとして通電し、酸素還元反応を伴う電気防食工法を適用すれば、既に生成しているさび層を保護性さびに改質できる可能性がある。そこで本研究では、腐食状況、防食電流密度、通電期間を実験要因とし、電気防食工法の適用によるコンクリート中铁筋のさび層改質効果について検討した。

2. 防食電流の通電

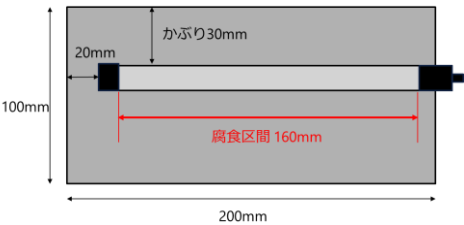


図1 試験体概要

防食電流を通電するコンクリート試験体の概要を図1に示す。コンクリート中にはSS400 磨き丸鋼 ( $\phi 16$ ) を1本埋設し、腐食区間を160mmとした。なお、すべての試験体に  $\text{NaCl}$  ( $5.0\text{kg/m}^3$ ) を練り混ぜた。

今回は、電気防食工法を適用する構造物として、腐食ひび割れが生じている場合、生じていない場合の2ケースを想定した。前者については  $\text{W/C}=65\%$  とし、腐食していない鉄筋（以下ブランク鉄筋）に対してアノード電解処理を施した。後者については  $\text{W/C}=55\%$  とし、ブランク鉄筋を打設時に配置した試験体と、事前腐食鉄筋を打設時に配置した試験体を作製した。

打設・養生後、各試験体中の鉄筋に対して防食電流

の通電をおこなった。電流密度は鉄筋表面積あたり  $1.6\text{mA/m}^2$ ,  $4.8\text{mA/m}^2$ ,  $9.6\text{mA/m}^2$  の3通り、通電期間は2週間、1カ月、3カ月の3通りの組み合わせとした。

3. 防食鉄筋の耐食性評価

防食電流の通電終了後、防食3カ月のコンクリート中铁筋を対象として、ポテンシオスタットにより分極試験をおこなった。電位の掃引速度は  $10\text{mV/s}$ 、自然電位から  $\pm 200\text{mV}$  となる範囲でアノード分極曲線、カソード分極曲線を測定した。その結果、電気防食工法適用後は、アノード電解のみの試験体と比較して分極曲線が低電流密度側にシフトし、防食による腐食速度の低下が確認された。

また、アノード側に  $10\text{mV}$  分極した時点での電流値を腐食速度とした結果を表1に示す。表2に示すCEBの評価基準<sup>2)</sup>と比較すると、防食後の腐食速度は低～中程度または中～高程度であった。今回の防食条件では、不動態状態まで腐食速度を改善することはできなかった。

表1 算出した腐食速度

|             | 防食電流密度<br>( $\text{mA/m}^2$ ) | 腐食速度<br>( $\mu\text{A/cm}^2$ ) |
|-------------|-------------------------------|--------------------------------|
| アノード電解+防食   | 1.6                           | 0.7674                         |
|             | 4.8                           | 0.6621                         |
|             | 9.6                           | 0.6021                         |
| 事前腐食鉄筋+防食   | 1.6                           | 0.4203                         |
|             | 4.8                           | 0.5158                         |
|             | 9.6                           | 0.5283                         |
| ブランク鉄筋+防食   | 1.6                           | 0.3625                         |
|             | 4.8                           | 0.4183                         |
|             | 9.6                           | 0.4530                         |
| アノード電解のみ    |                               | 1.536                          |
| ブランク鉄筋 防食なし |                               | 0.4448                         |

キーワード 電気防食工法、保護性さび、ラマン分光分析、鉄筋腐食  
連絡先 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1-458 TEL : 075-383-3176 FAX : 075-383-3177

表 2 腐食速度の判定基準<sup>2)</sup>

| 腐食速度測定値 (μA/cm <sup>2</sup> ) | 腐食速度の判定      |
|-------------------------------|--------------|
| 0.1～0.2 未満                    | 不動態状態 (腐食なし) |
| 0.2 以上 0.5 以下                 | 低～中程度の腐食速度   |
| 0.5 以上 1 以下                   | 中～高程度の腐食速度   |
| 1 より大                         | 激しい, 高い腐食速度  |

4. 防食鉄筋のさび層分析

防食鉄筋さび層のラマン分光分析をおこなった結果、電気防食工法の適用によりアノード電解鉄筋、事前腐食鉄筋いずれもさび層の主体が α-FeOOH、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> であることが確認された。

Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> ピークが確認された代表的なスペクトルを図2に示す。防食期間、防食電流密度によらず、いずれの鉄筋においても標準試料で見られる Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> の A<sub>1g</sub> モードのピーク (670cm<sup>-1</sup> 付近) と、当該ピークがシフトしたもののとの混合ピークが 700cm<sup>-1</sup> 付近に見られたことから、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> の結晶成長が始まっている段階と考えられた。しかし、さび層内には α-FeOOH が存在していたことから、鉄筋近傍が完全な酸素欠乏状態となっておらず、シフトを示さないピークに対するシフトを示すピークの相対強度が小さくなったと考えられる。

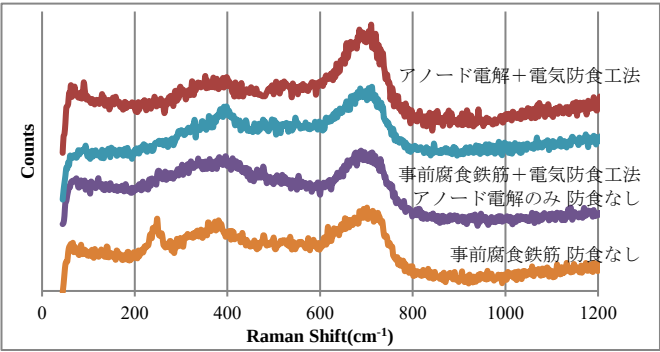


図 2 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> が確認されたさび層ラマンスペクトル

5. さび層改質効果に関する考察

アノード電解鉄筋、事前腐食鉄筋いずれにおいても、防食後は α-FeOOH および Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> がさび層の主体となり、腐食速度の低下、耐食性の向上が確認された。

防食鉄筋で確認された Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> は、結晶成長が始まっている段階と考えられたものの、鉄筋近傍が完全な酸素欠乏状態となっておらず、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 保護性さびと比較すると改質の進行途中であったと言える。酸素拡散限界電流密度で通電をおこなわない限りは、防食期間を伸

ばしたとしても腐食速度のさらなる改善や Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 保護性さびの形成にはつながらないと考えられる。

6. 最適な通電条件の設計

Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 内での結晶構造の組み換えによる緻密化を促進し、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 保護性さびの形成につなげるためには、酸素拡散限界電流密度で通電すればよいと考えられる。しかし図 3 の緑斜線部に示すように、設定電流密度が小さいと酸素消費速度よりも拡散速度が上回り、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> の緻密化が進行しにくい。反対に電流密度が大きいと、カソードでは水素発生反応が主となり、水素ガスが緻密な皮膜の形成を阻害すると考えられる。このように、電流制御では設定値からわずかに電流密度が変化しただけでさび層改質効果が大幅に低下する可能性があるため、酸素拡散限界領域を示す電位域 (図 3 の赤斜線部) での通電 (電位制御) が有効と考えられる。

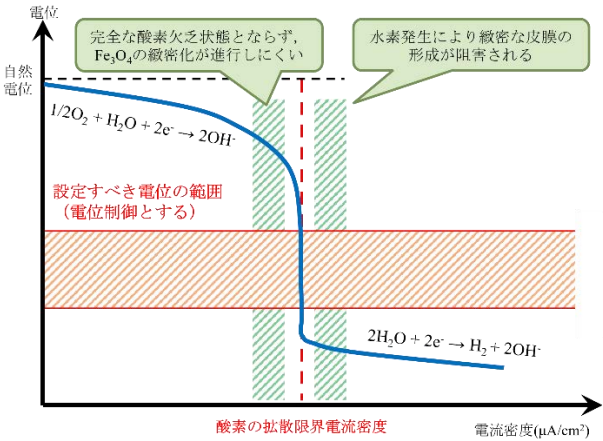


図 3 カソード分極特性を踏まえた防食電位の設定

謝辞

本研究は日本エルガード協会との共同研究であり、協会関係者の皆様より多くのご意見・ご指導をいただいた。また、ショーボンド建設より電気防食用陽極材料をご提供いただいた。ここに御礼申し上げます。

参考文献

1) 高谷哲, 羽村陽平, 土井康太郎, 左藤眞市, 野口貴文: 軍艦島 (端島) における鉄筋腐食の進展メカニズム, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.17, pp.19-24, 2017  
2) 日本コンクリート工学会: コンクリート診断技術' 15[基礎編], pp.195, 2015