

犠牲陽極方式による鋼材防食の低電流下での効果

維持管理工学研究室 米窪 祥平

1 はじめに

鉄筋コンクリート中の鋼材の防食工法として電気防食工法があり、電気防食工法は外部電源方式と犠牲陽極方式の2種類に大別される。

近年では施工後の特別な維持管理が不要なことから、犠牲陽極方式の採用が増えてきているが、犠牲陽極方式は電流量の管理ができないため、高比抵抗を有するコンクリート構造物に適用した場合、通電電流密度が小さくなり、一般的な防食基準である100mV以上の復極量が確保できないことが想定される。復極量が100mV未満であっても、腐食をある程度抑制できることは明らかになっているが、復極量100mV未満における腐食抑制効果の詳細な研究は行われていない。

そこで、本研究では塩分を含有するコンクリートを対象に、外部電源方式と犠牲陽極方式を1.0mA/m²付近の低電流下で運用し、両方式を比較することで、通電量と復極量の関係および、復極量100mV以下での詳細な防食効果を確認することを目的とした。また、気温の変化が復極量に与える影響を確認するために、犠牲陽極方式のみ屋外での暴露試験も実施した。

2 実験概要

本研究で使用した供試体は室内試験、暴露試験ともに、W/C60%であり、塩化物イオン濃度(Cl⁻)は0.8, 1.5, 2.0% (対セメント比)の3種類である。

2.1 室内試験供試体概要

使用した供試体は、無防食(PLAIN)、外部電源方式、犠牲陽極方式の3種類である。(図1~図3)。鋼材は防食面積を増やすためにSS400相当の酸洗い鋼板(60×400×3mm)を埋設した。

犠牲陽極材(市販品)は5種類(名称:XPT, XP2, XP4, DAS, FUSION)を用いた。犠牲陽極方式においては、試験当初、鋼板の表面積に対して陽極材の防食能力高すぎたことが原因で、本研究の目的よりも過大な電流が供給されていたため、対策として試験途中から犠牲陽極材に電気抵抗を取り付けた(図2)。犠牲陽極材は鋼板端部に結束バンドで固定してある。外部電源方式の供試体には、鋼板上方の10~20mmの位置に陽極としてチタンメッシュを埋め込んだ(図3)。外部電源によって鋼材に流す電流量は4.0, 2.0, 1.0, 0.2mA/m²の4種類である。

各Cl⁻濃度に対して同一の供試体を4本もしくは3本ずつ、計99本作製した。

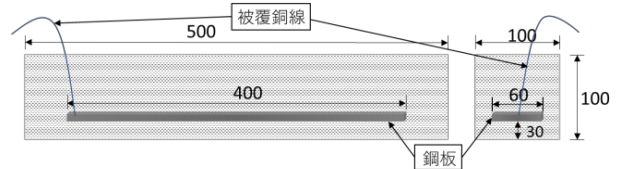


図1 PLAIN 供試体 (単位:mm)

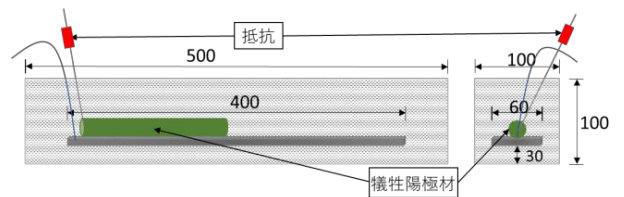


図2 犠牲陽極方式供試体 (単位:mm)

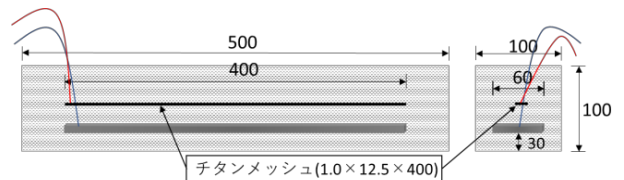


図3 外部電源方式供試体 (単位:mm)

2.2 暴露試験供試体概要

使用した供試体は、無防食 (PLAIN), 犠牲陽極方式の 2 種類である. 図 1, 2 とほぼ同一であるが, 寸法は $100 \times 100 \times 250 \text{mm}$ であり, 埋設した鋼材の寸法は $60 \times 150 \times 3 \text{mm}$ である. 使用した鋼材と犠牲陽極材の種類は室内試験供試体と同一である. なお, 犠牲陽極方式供試体に電気抵抗は取り付けていない.

各 Cl^- 濃度に対して同一の供試体を 3 本ずつ, 計 54 本作製した.

3 実験概要

3.1 室内試験

室温約 20°C の部屋にて, プラスチック製のトレーに供試体を静置し, 供試体の乾燥を防ぐために, 定期的にトレーに水を注入し試験を実施した. 2 週間を 1 サイクルとし, 12 日間の通電, 2 日間の通電停止を繰り返した. 測定項目は通電電流量 (犠牲陽極方式のみ), 鋼板電位である. また, 約 3 ヶ月毎に 3 電極法による分極試験を実施し, 腐食電流密度の推定を行った.

3.2 暴露試験

岐阜大学工学部 A 棟屋上に供試体を暴露し, 約 3 ヶ月間の通電と 2 日間の通電停止を繰り返した. 測定項目は通電電流量と鋼板電位である.

4 実験結果

4.1 室内試験

犠牲陽極方式の結果に挿入されている数字はそれぞれ, ①電気抵抗なし (0~160 日), ②一律 $4.3 \text{k}\Omega$ の抵抗を設置 (161~226 日), ③XP 系のみ抵抗値を $20 \text{k}\Omega$ に変更 (227 日~) の期間を表している.

4.1.1 犠牲陽極方式の通電電流密度

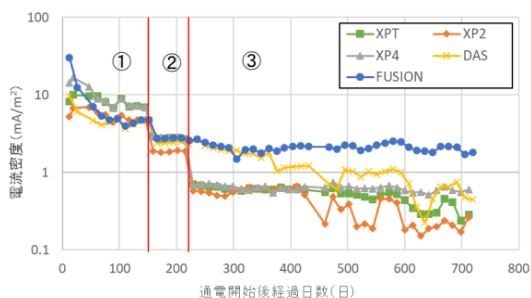


図 4 通電電流密度の経時変化 (Cl^- 2.0%)

犠牲陽極方式の通電量は期間③で全供試体が概ね目標の通電量となったので, 犠牲陽極方式は期間③のみで評価する. 図 4 に示すように, Cl^- 濃度に関わらず, 同一種類の陽極材を用いた供試体はほぼ同程度の通電量となった. このことから, 犠牲陽極材により供給される防食電流量は, 犠牲陽極材の能力・容量の範囲内であれば, Cl^- 濃度に依存しないと考えられる.

4.1.2 犠牲陽極方式供試体の復極量

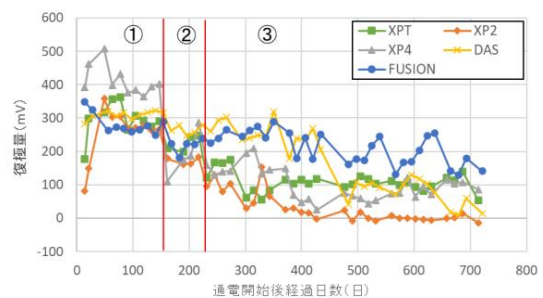


図 5 復極量の経時変化 (Cl^- 2.0%)

Cl^- 0.8% では, すべての供試体の復極量が 100mV 以上で推移したが, 図 5 に示すように, Cl^- 2.0% では, XPT, XP4 が 100mV 付近の復極量で推移した. 塩化物イオン 0.8% では XP2 が最も通電量が小さく, 平均約 0.5mA/m^2 であった. また, Cl^- 2.0% の XPT の通電量は平均約 0.5mA/m^2 , XP4 は平均約 0.6mA/m^2 であった. 以上より, Cl^- 0.8% 以下の場合には 0.5mA/m^2 程度の通電量でも安定して 100mV 以上の復極量を確保できるが, Cl^- 1.5% 以上の場合, 安定して 100mV 以上の復極量を確保するには, 0.6mA/m^2 より大きな通電量が必要であると言える.

4.1.3 外部電源方式供試体の復極量

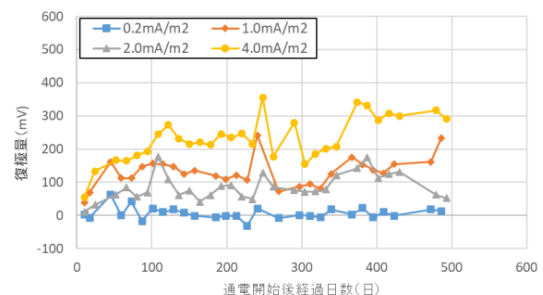


図 6 復極量の経時変化 (Cl^- 2.0%)

Cl⁻ 0.8%では通電量 0.2mA/m²の供試体でも、復極量が 100mV 付近で推移したのに対し、図 6 に示すように、Cl⁻ 2.0%では、通電量 1.0mA/m²以上の供試体のみ、復極量が 100mV 以上で推移した。この結果は Cl⁻ 1.5%でも同様であった。

4.1.4 電気防食供試体の分極曲線

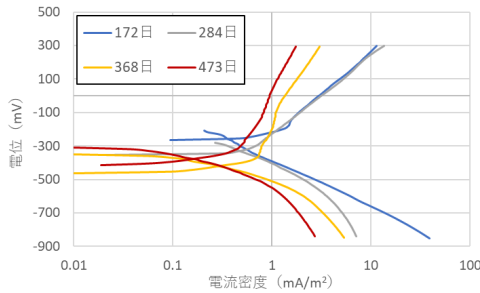


図 7 分極曲線の経時変化
(4.0mA/m²-Cl⁻ 0.8%-1)

電気防食供試体では、図 7 に例として示した、Cl⁻ 0.8%通電量 4.0mA/m²の外部電源方式供試体のみ、時間の経過に伴う分極曲線の傾きの増大が確認された。以上の結果から、犠牲陽極方式においても、Cl⁻ 0.8%以下の場合、4.0mA/m²以上の通電量で鋼材の分極抵抗が増大する可能性がある。一方、Cl⁻ 1.5%以上の場合、少なくとも 4.0mA/m²より大きな電流量を通电しないと分極抵抗は増大しないと考えられる。

4.1.5 鋼材の腐食状況

PLAIN および外部電源方式供試体は試験開始約 500 日目、犠牲陽極方式供試体は試験開始約 730 日目（期間③に入ってから約 500 日目）に供試体を割裂し、内部の鋼板を取り出した。

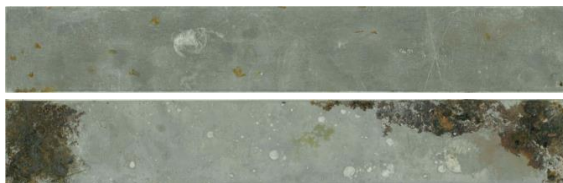


写真 1 PLAIN-Cl⁻ 2.0%-1
(上：打設面側，下：かぶり側)

写真 1 に例として示した Cl⁻ 2.0%の PLAIN と同様に、腐食が確認された供試体はすべて、Cl⁻濃度、電気防食の有無および防食方法の違いによらず、

かぶり側の方が激しく腐食していた。ブリーディングによって、鋼板のかぶり側面とコンクリートとの界面に欠陥が形成されたことで、打設面側と比較してかぶり側の面の方が、より腐食しやすい環境になったと思われる。

4.1.6 復極量と腐食抑制効果の関係

鋼板の腐食面積率および質量減少率を算出し、PLAIN の結果と比較することで、電気防食供試体における、腐食面積および腐食減量に対する抑制率を算出した。試験期間を通した平均の復極量と腐食面積および腐食減量それぞれの抑制率との関係を図 7、図 8 に示す。なお、犠牲陽極方式は期間③のみで復極量の平均値を算出した。

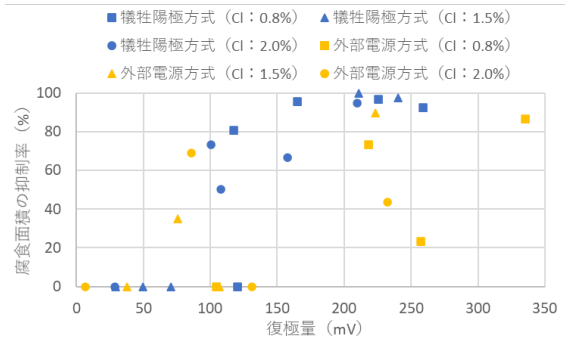


図 7 復極量と腐食面積の抑制率の関係

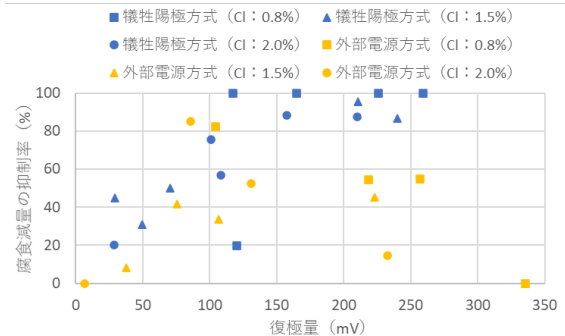


図 8 復極量と腐食減量の抑制率の関係

犠牲陽極方式は Cl⁻ 0.8%の場合、復極量が 100mV 以上(平均通電量 0.5~2.0mA/m²)となり、腐食面積、腐食減量ともに概ね 80%以上の高い抑制率となった。一方、Cl⁻ 1.5%以上では、復極量が 100mV 未満(平均通電量 0.3~0.5mA/m²)の場合、腐食面積の抑制率は 0%、腐食減量の抑制率は 20~50%程度、復極量が 100~160mV (平均通電量 0.6~1.2mA/m²) の場合、腐食面積の抑制率は 50~

70%程度、質量腐食減量の抑制率は60~90%程度、復極量が200mV以上(平均通電量1.4~2.1mA/m²)の場合、腐食面積、腐食減量ともに概ね90%以上の抑制率となった。

4.2 暴露試験

4.2.1 犠牲陽極方式の通電電流密度

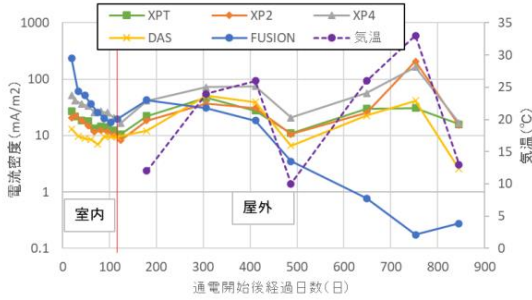


図9 通電電流密度の経時変化 (Cl⁻ 2.0%)

図9に示すように、Cl⁻ 1.5%のDAS、Cl⁻ 1.5%および2.0%のFUSION以外の供試体は、経時的に通電量が減少していったが、上記以外の供試体は、気温の上昇、低下に合わせて通電量も増加、減少した。気温が高くなるほど陽極がイオンになる反応が活発化し、それに伴ってより多くの電子が陰極に流れ込むためあると考えられる。FUSIONにおける通電量の低下は、供試体に発生したひび割れによる導通不良もしくは、亜鉛と乾電池をつなぐダイオードの接続不良が原因と考えられる。DASにおける通電量の低下は、陽極切断面からの水酸化リチウムの流出によって、亜鉛周囲に徐々に酸化被膜が形成されたことによる、亜鉛のイオン化反応の減少が原因と考えられる。

4.2.2 犠牲陽極方式の復極量

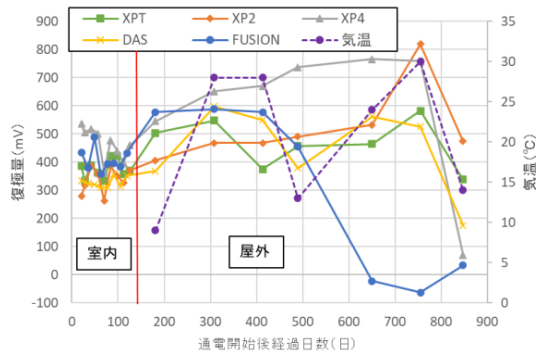


図10 通電電流密度の経時変化 (Cl⁻ 2.0%)

図10に示すように、正常に通電を行うことができていた供試体は、どのCl⁻濃度においても気温の変化に関係なく復極量が高い値で推移した。復極量が300mV以上であると明らかな過防食と判断できる。本研究において正常に通電が行えていた供試体は、暴露試験期間中、復極量が概ね300mV以上で推移しており過防食状態であったため、気温の影響を受けることなく復極量が推移したと考えられる。

4.2.3 鋼板の腐食状況

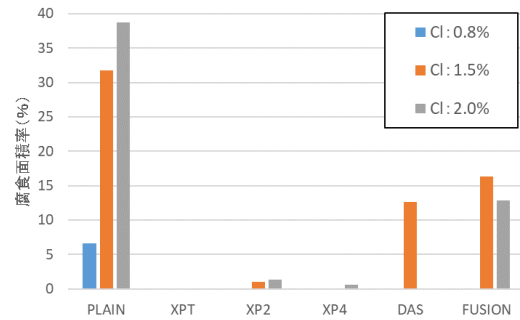


図11 腐食面積率

図11に示すように通電量が経時的に減少していったDASとFUSIONはPLAINと比較すると腐食面積率が低いことから、犠牲陽極材による防食効果はある程度発揮されていたと考えられる。FUSIONにおいてCl⁻ 1.5%よりもCl⁻ 2.0%の方がより腐食面積率が高いのは、Cl⁻ 1.5%の供試体の方が、早い段階で通電量が低下していったためだと考えられる。

5 結論

犠牲陽極方式では、Cl⁻ 0.8%以下の場合、完全に防食が可能な電流量と復極量は0.5mA/m²、100mVである。一方、Cl⁻ 1.5%以上の場合、完全に防食が可能な電流量と復極量は1.4mA/m²、200mV、十分に有効な防食ができる電流量と復極量は0.6mA/m²、100mVである。

暴露試験からは、過防食状態であると、復極量は気温の影響を受けることなく推移することが明らかになった。