

# 論文 干満帯環境下における鉄筋コンクリートの電位制御および防食管理に関する基礎的検討

岡本 理沙<sup>\*1</sup>・山本 誠<sup>\*2</sup>・本田 和也<sup>\*3</sup>・福手 勤<sup>\*4</sup>

**要旨:** 海洋構造物の塩害対策として、電気防食工法の適用が進んでいるが、干満帯環境下にあるコンクリート構造物の含水状態は非常に高く、通常の防食管理基準に代わる基準が望まれる。そこで本研究では、干満帯環境下における電気防食工法の管理手法の確立を目的として、含水状況の異なる気中、水中、模擬干満帯環境下での鋼材電位、分極・復極性状を確認した。その結果から「100mV シフト基準」に準拠して、新たな防食管理手法を模索するため、鋼材防食で適用されている電位管理基準を模擬干満帯に長期に曝露することで検証した。本論文では、高含水状態での復極性状、電位管理での通電初期の防食特性について報告する。

**キーワード:** 干満帯、電気防食、防食管理、分極、復極

## 1. はじめに

現在、塩害により劣化した鉄筋コンクリートに対する補修工法として、電気防食工法が適用されている。飛沫帯などの気中環境にある構造物への電気防食工法の適用例は多数あり、その防食効果も報告されている<sup>1)</sup>。しかし、高含水状態である水中部あるいは干満帯部の構造物部材では、現行の防食管理基準である「100mV シフト基準」での防食管理や防食回路の設計が困難であり、高い防食効果は期待されるものの干満帯環境下への積極的な適用事例が少ない。また、近年では干満帯を模擬した通電特性の検証も報告<sup>2)</sup>されているが、未だその件数が少ない。今後は、わが国の限りある社会資本設備を維持するために干満帯環境に位置するコンクリート構造物への電気防食工法の適用は重要であるものとする。コンクリートの含水状態の高い水中あるいは干満帯部での分極性状及び通電性状を確認することがその一助となるものとする。

そこで、本研究では、ケース1として気中・水中・干満帯環境における含水状態の違いが鋼材電位や復極性状に与える影響を長期通電により検証し、ケース2では模擬干満帯環境下で防食管理手法の異なる供試体を長期間管理することで、防食管理方法の違いが鋼材電位・復極性状・防食状況に与える影響について検討を行った。本論文では、これら実験における通電初期に確認された結果を報告するものである。

## 2. 実験概要

### 2.1 ケース1 実験概要

ケース1では、鉄筋コンクリート供試体の曝露条件

が復極性状に与える影響の確認を行った。なお、通電期間は5ヶ月間である。

#### (1) 供試体

図-1にケース1の供試体の形状と寸法を示す。供試体の寸法は150×200×75mmとし、陽極から深さ30mmの位置にφ9×250mmの磨き丸鋼を設置した。陽極はコンクリート表面にチタンメッシュを設置し、オーバーレイ材を上塗りし設置した。なお、磨き丸鋼は、供試体端部から8mmまでエポキシ樹脂で被覆した。また、鉄筋近傍に鉛照合電極を埋設し、電位の測定を行った。また、供試体側面4面は、エポキシ樹脂で被覆した。表-1にコンクリート配合を示す。

コンクリートは、普通ポルトランドセメントを用いて、W/C60%、s/a45.9%、最大骨材寸法20mmとした。なお練混ぜ水には、塩化物イオン量がコンクリート体積当たり10kg/m<sup>3</sup>となるようにNaClを混入した。

表-1 コンクリート配合

| s/a (%) | 単位量(kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |     |       |
|---------|-------------------------|-----|-----|-----|-------|
|         | W*                      | C   | S   | G   | NaCl  |
| 45.9    | 200                     | 318 | 800 | 994 | 16.48 |

※Wには塩化物イオンの質量(10kg)を含む

#### (2) 曝露条件

表-2に各養生条件の試体数を示す。ケース1では、養生条件を気中・水中・模擬干満帯環境とした。水中環境および模擬干満帯環境では、塩化物イオン濃度が3%となるように調整した模擬海水を用いて各水槽中に供試体を養生した。

\*1 東洋大学 大学院 工学研究科 環境・デザイン専攻 (学生会員)

\*2 住友大阪セメント(株) 建材事業部 (正会員)

\*3 住友大阪セメント(株) 建材事業部 (正会員)

\*4 東洋大学 理工学部都市環境デザイン学科教授 工博 (正会員)

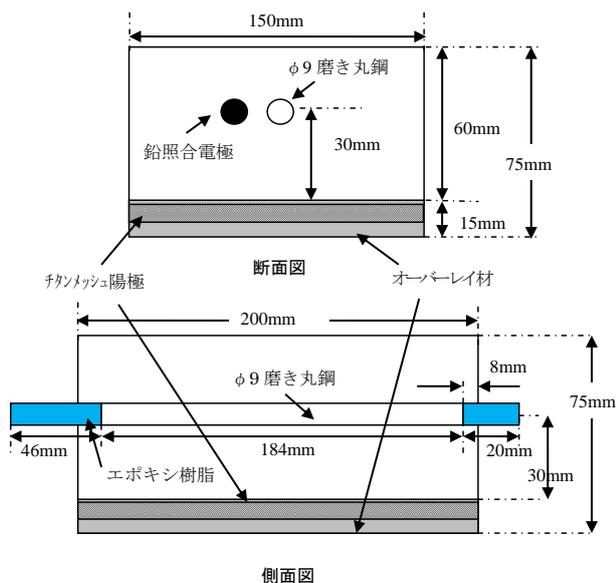


図-1 ケース 1 供試体概要

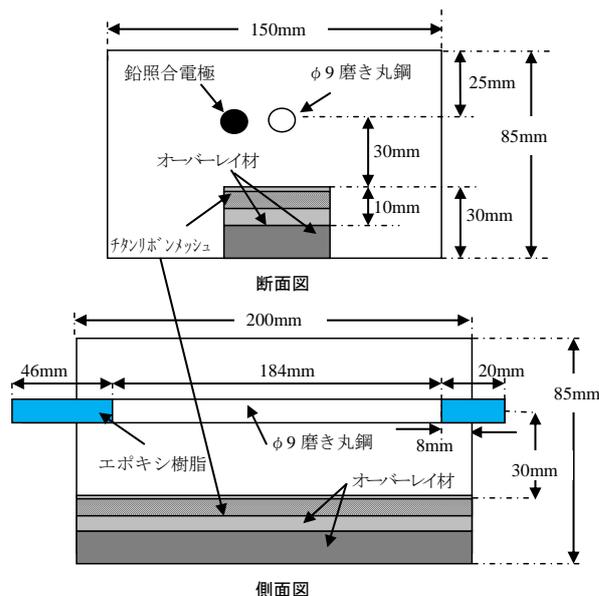


図-2 ケース 2 供試体概要

干満養生は、気中環境 11 時間、水中環境 1 時間を 1 サイクルとし、これを 1 日 2 サイクル実施することで模擬した。なお、各養生条件への供試体割り振りは、通電開始直前に実施した気中環境での分極試験結果から同一腐食状態である供試体を選別することで決定した。

表-2 防食管理水準と各曝露環境の供試体数

| 防食管理水準                | 曝露環境 (供試体数) |
|-----------------------|-------------|
| 定電流制御<br>復極量 100mV 管理 | 気中 (3 体)    |
|                       | 水中 (2 体)    |
|                       | 干満 (3 体)    |

### (3) 防食管理方法と通電方法

ケース 1 では、全ての養生条件において 24 時間後復極量が 100mV 以上となるように通電電流量を調整し防食管理を行った。また、定電流方式により同一養生条件の供試体に同一電流量を通電した。なお、電流密度は全てコンクリート面積当たりの値とした。

### (4) 測定項目

測定項目は、鋼材の自然電位、通電期間中のインスタントオフ電位、通電停止 24 時間後電位及び供試体の質量変化率とした。鋼材電位の測定は、供試体中の鉛照合電極を用いて測定した。また、復極試験と質量変化率は 1 ヶ月に 1 回測定し計 6 回行った。

供試体の質量変化率  $W_r$  は式(1)を用いて算出した。

$$W_r = W_{kw} / W_o \times 100 \quad \text{式(1)}$$

ここに、 $W_{kw}$  : 測定時の供試体質量、 $W_o$  : 通電前の供試体質量とする。

## 2.2 ケース 2 実験概要

ケース 2 では、干満帯環境中の鉄筋コンクリート供試体への防食管理手段が復極性状・鋼材電位・分極性状・腐食量に与える影響の確認を行った。なお、通電期間は 5 ヶ月間である。

### (1) 供試体

図-2 にケース 2 の供試体の形状と寸法を示す。供試体の寸法は 150×200×85mm とし、陽極から 30mm 深さの位置に φ9×250mm の磨き丸鋼を設置した。

陽極はコンクリート表面に設けた溝にチタンリボンメッシュを設置し、オーバーレイ材にて埋め戻した。なお、丸鋼と供試体側面の被服処理・照合電極の設置はケース 1 と同様とした。

### (2) 曝露条件

全ての供試体の養生条件を模擬干満環境とした。干満環境は塩化物イオン濃度 3% 程度の模擬海水を用い、10 時間気中環境後、2 時間水中環境を 1 サイクルとし 1 日 2 サイクル行うことで模擬した。

### (3) 防食管理方法

表-3 にケース 2 の防食管理方法を示す。ケース 2 における防食管理方法は、復極量管理として復極量 50mV、100mV の 2 水準、さらに、通電期間中のインスタントオフ電位が飽和硫酸銅電極換算で -650mV と -850mV の 2 水準とした。本試験の管理水準は、一般的に防食管理基準として用いられる通電停止 24 時間後の復極量 100mV を満足しなかった場合の防食効果を検証するために復極量 50mV を設定した。また、電位管理供試体では鋼構造物の防食基準である -850mV の他にコンクリート中の鋼材への防食であることから貴側の電位 -650mV を防食管理水準とした。

復極量管理では、復極試験時の24時間後復極量が所定の値を満足するように初期分極試験結果から防食電流量を段階的に上昇させた。これは、目標の復極量を大幅に超過することを防ぐためである。また、電位管理では通電期間中のインスタントオフ電位が所定の電位になるように通電電流量を調整した。なお、各防食管理方法への供試体の割り振りは、気中環境下で行った分極試験の結果から同程度の自然電位と分極性状の供試体群を同一防食管理方法とした。また、各防食管理方法の全ての供試体に同一量の電流を通電し、電流密度は全てコンクリート面積当たりの値とした。

表-3 ケース2で採用した防食管理水準

| 防食管理 | 復極量管理<br>(供試体数) |               | INS 電位管理 (vs.CSE)<br>(供試体数) |                |
|------|-----------------|---------------|-----------------------------|----------------|
|      | 50mV<br>(2体)    | 100mV<br>(2体) | -650mV<br>(2体)              | -850mV<br>(2体) |

#### (4) 測定項目

測定項目は、鋼材の自然電位、通電期間中のインスタントオフ電位、通電停止24時間後電位および、鋼材腐食量とした。

鋼材の電位の測定は供試体中の鉛照合電極を用いて測定した。また、復極試験は1ヶ月に1回測定し計6回行った。鋼材腐食減量は、鋼材の腐食生成物を除去した鋼材重量を通電前・通電5ヶ月後に「JCI-SC1 コンクリート中の鋼材腐食の腐食評価方法」に準拠して測定を行い、腐食減量率として式(2)を用いて算出した。試験では、作製した全ての供試体の内部鋼材の重量を事前に測定し、打設前鋼材質量としている。

腐食減量率(%) =

$$\frac{\text{打設前鋼材質量} - \text{解体時鋼材質量}}{\text{打設前鋼材質量}} \times 100 \quad \text{式(2)}$$

### 3. 実験結果

#### 3.1 ケース1の結果

図-3 から図-5 に気中・干満・水中養生における鋼材の通電停止24時間後復極量と通電電流密度の経時変化を示す。

気中養生の供試体に関しては、徐々に復極量100mVを満足するように通電電流密度を調整し、通電3ヶ月で全ての供試体が100mV以上の復極量となった。また、通電4ヶ月後では、100mVの復極量を満足するための通電電流密度が減少し、腐食環境が改善されたことが確認できる。

模擬干満養生の供試体においても、気中養生と同様に徐々に復極量100mVを満足するように通電電流密

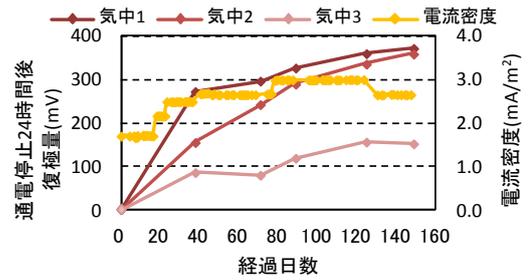


図-3 気中養生の復極量と電流密度の経時変化

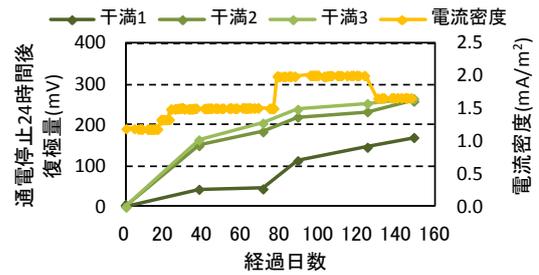


図-4 干満養生の復極量と電流密度の経時変化

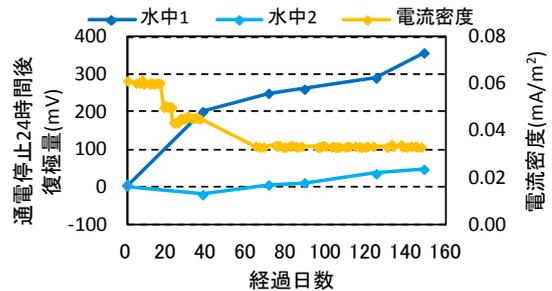


図-5 水中養生の復極量と電流密度の経時変化

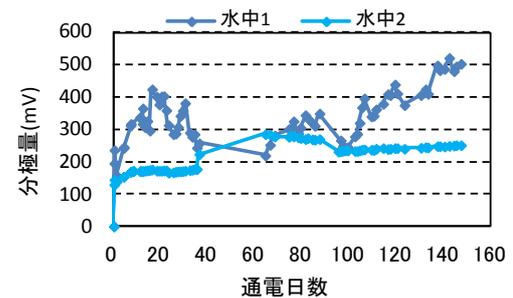


図-6 水中養生の分極量の経時変化

度を調整し、通電3ヶ月で全ての供試体が100mV以上の復極量となった。また、通電4ヶ月後では、気中養生と同様に100mVの復極量を満足するための通電電流密度が減少した。気中養生および模擬干満養生の供試体の復極量で供試体間のばらつきが確認されるが、この原因は明らかでない。ただし、目標とする復極量100mVは満足しているため、今後の継続試験により検討する予定である。

水中養生の供試体では通電後1ヶ月後の復極試験において、供試体1は100mV以上復極したが供試体2では通電初期に24時間後復極量がマイナスの値となった。その後、20日間復極試験を追加継続したが鋼材の電位に大きな変化は確認されなかった。

そこで、図-6に水中養生の供試体について、通電直前の鋼材自然電位からの分極量の経時変化を示す。ここで、分極量とは、通電前自然電位と通電開始後に測定したインスタントオフ電位の差を示す。この結果から、復極量100mV達成しなかった供試体2も含め、いずれの供試体も通電前の自然電位から100mV以上分極していることが確認できる。このことから、復極量が小さい供試体2についても、防食基準とされているマイナス方向への100mV以上の電位変化量<sup>3</sup>があり、十分に防食されていると評価できる。

以上より、本実験の管理基準である復極量100mVは、水中養生供試体では、復極量100mVを満足していないが分極量として100mV以上の電位シフト量があることを確認した。

図-7から図-9に気中・干満・水中養生の供試体の通電前自然電位と通電停止24時間後電位の経時変化を示す。気中養生においては、いずれの供試体も通電停止24時間後電位が通電前の自然電位程度まで復極していることが確認できる。模擬干満養生においても、気中環境と同様にいずれの供試体も通電停止24時間後電位が通電前の自然電位程度まで復極していることが確認できる。一方、水中養生の供試体に関しては、供試体1,2ともに自然電位まで復極しておらず、供試体1に関しては、経時的に卑側へ移行していることが確認される。

この原因を検討するため、図-10に気中・水中・模擬干満養生の供試体の質量変化率の経時変化を示す。気中養生の供試体は、いずれも通電の経過に伴い質量変化率が負の値となり、コンクリートが乾燥している状況が確認される。模擬干満養生の供試体では、他の養生条件と比較し質量変化率は若干増加しているものの、大きな変化は確認されず、通電5ヶ月までは通電初期の含水状況がほぼ一定に保たれていると考えられる。水中環境の供試体はいずれも質量変化率が大きくなり、コンクリートの含水状況が高くなっていることが確認できる。したがって、水中養生供試体の復極が遅い原因として、水中養生ではコンクリートの含水状態が上昇し、酸素の拡散速度が低下することで、鋼材の復極に必要とされる酸素量が継続した通電により鋼材周辺から低下したことが考えられる。

以上の結果から、水中環境の構造物のようにコンクリート中の含水状態が高い状態での防食管理では、復極

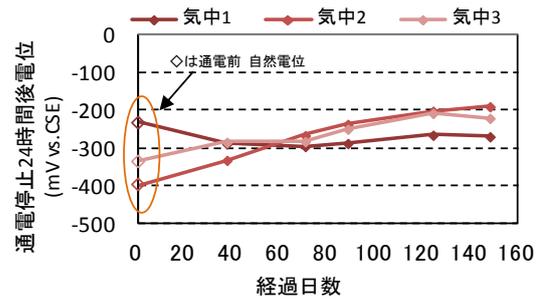


図-7 気中養生の通電停止24時間後電位の経時変化

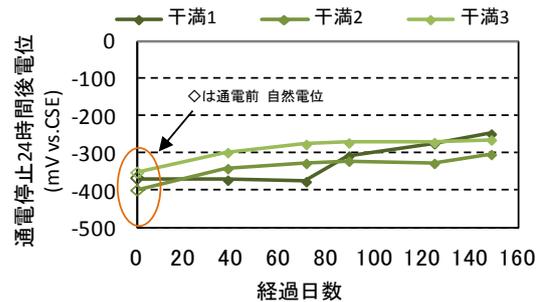


図-8 干満養生の通電停止24時間後電位の経時変化

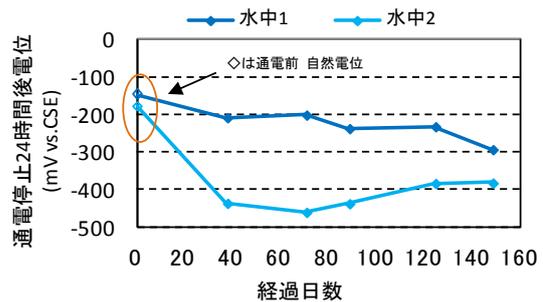


図-9 水中養生の通電停止24時間後電位の経時変化

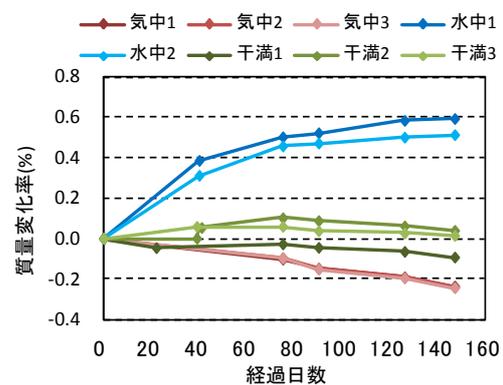


図-10 質量変化率経時変化

量のみで鋼材の防食状態を判断することは適切でないものとする。

### 3.2 ケース2の結果

#### (1) 防食管理結果

図-11, 12に50mV, 100mV復極量管理供試体の通

電停止 24 時間後復極量と通電電流密度の経時変化を示す。50mV, 100mV いずれの復極量管理においても徐々に通電電流密度を増加することで所定の復極量を満足するように調整した。その結果, 通電 5 ヶ月後を経過した時点では, いずれも目標の防食管理状態に維持できていることが確認できた。

図-13,14 に-650mV, -850mV 電位管理供試体のインスタントオフ電位と通電電流密度の経時変化を示す。-650mV 電位管理供試体では, 徐々に所定の電位になるように通電電流密度を調整し, 所定の電位を満足する管理状態となったが, 通電の経過とともに管理に必要な電流密度は減少している傾向が確認できる。

また, -850mV 電位管理供試体では, 他と比較して所定の電位にシフトさせるための電流密度が大きく, 所定の電位に達した通電 1 ヶ月後では, 100mV 復極量管理供試体の約 10 倍の電流密度が必要であることが確認できる。

しかし, 通電 5 ヶ月後では, 所定の電位を維持するための通電電流密度が減少していることが確認できる。

以上の結果から, 復極量管理・電位管理ともに所定の防食管理に必要な電流密度は, 経時的に小さくすることが可能であると考えられる。

### (2) 自然電位の経時変化

図-15 から図-17 に無通電供試体・復極量管理供試体・電位管理供試体の自然電位の経時変化を示す。なお, 自然電位は通電遮断後 72 時間以上通電を停止することで評価した。

ASTM 基準の腐食性で判断した場合, 無通電供試体の曝露前自然電位は,  $-350\text{mV vs.CSE} < \text{自然電位} \leq -250\text{mV vs.CSE}$  の「不確定」範囲であったが, 曝露から 5 ヶ月後の自然電位は,  $-350\text{mV vs.CSE}$  より卑側「90%以上の確率で腐食あり」の領域へ電位が移行しており, 干満帯環境に曝露されることにより, 腐食が進行したためと推察される。

復極量管理供試体は, いずれも通電前の自然電位より貴側へ変化していることが確認され, また 100mV 復極量管理の供試体は, 50mV 復極量管理の供試体に比べ, より貴側へ変化していることが確認された。

電位管理供試体は, 復極量管理供試体と同様に, いずれも通電前の自然電位より電位が貴側へ変化していることが確認できる。また, -850mV 電位管理供試体の通電前自然電位は,  $-350\text{mV vs.CSE} < \text{自然電位} \leq -250\text{mV vs.CSE}$  の「不確定」範囲であったが, 通電開始から 5 ヶ月後の自然電位は,  $-200\text{mV vs.CSE}$  より貴側「90%以上の確率で腐食なし」の領域へ電位が移行しており, 鋼材周辺の腐食環境の改善がなされたものと推測できる。

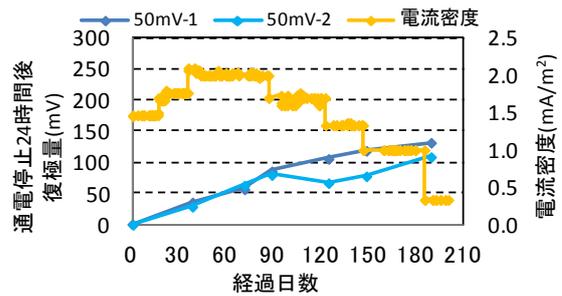


図-11 復極量管理 50mV の復極量と電流密度の変化

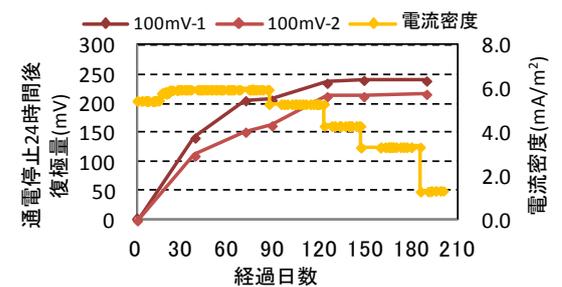


図-12 復極量管理 100mV の復極量と電流密度の変化

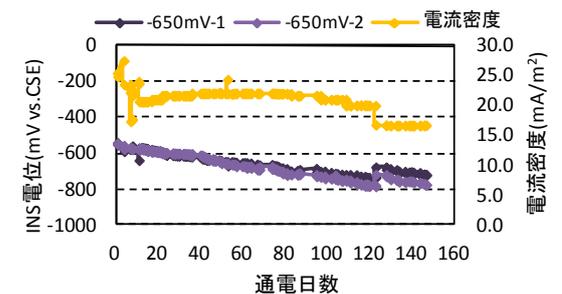


図-13 電位管理-650mV の電位と電流密度の変化

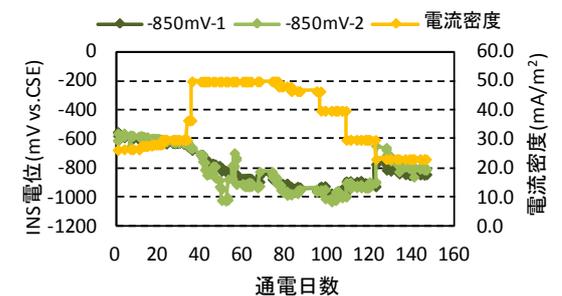


図-14 電位管理-850mV の電位と電流密度の変化

これら自然電位の結果から電気防食による通電によって, その管理方法が復極量管理あるいは電位管理供試体であったとしても腐食の進行が緩和されているものと評価できる。

### (3) 鋼材腐食減量測定結果

図-18 には, 通電開始直前および通電 5 ヶ月後に各供試体を解体して得られた内部鋼材の腐食減量率を示

す。なお、通電前の鋼材の腐食減量率は、同一条件で作製した供試体の1体を打設7ヶ月後に測定したものである。この結果から、通電直前の内部鋼材の腐食減量率は0.6%であり、供試体に混入した塩化物イオンにより腐食が進行していることが確認された。曝露開始から5ヶ月経過した無通電供試体の腐食減量率は、0.9%程度と曝露直前と比較して鋼材の腐食が進行していることが確認された。また、復極量管理 50mV、電位管理-650mV 供試体の腐食減量率は、それぞれ0.75%、0.7%程度であり通電直前と比較して若干増加している。一方で復極量管理 100mV、電位管理-850mV 供試体の腐食減量率は、それぞれ0.5%、0.4%程度であり通電直前と比較して減少している。これらは、各供試体間の通電直前の腐食状況のばらつきも含まれていると考えられるが、少なくとも電気防食による通電によって、その腐食の進行が抑制されているものと考えられる。腐食減量率に関しては、今後継続した通電後の解体試験により、引き続き検討する予定である。

#### 4. 結論

以下には、本実験の範囲内で得られた結果を示す。

- (1) 電気防食の通電を継続的に行うことにより、所定の復極量を満足するための通電電流密度を減少することができる。
- (2) コンクリート中の含水状態が高くなる環境下では、通電停止後の鋼材の復極性状が乾燥状態のコンクリートと異なり、防食状態を必ずしも通電停止後24時間後復極量のみで判断することは適切ではない。
- (3) 所定の電位管理を行うための防食電流量は、復極量管理と同様に通電の継続に伴って減少する傾向がある。
- (4) 電位管理では、その管理電位が卑な電位になるに従い、初期に必要な電流密度が大きくなる。
- (5) 模擬干満帯環境下では、自然電位・分極試験・腐食測定の結果から100mV復極量管理、電位管理において無通電供試体に比べ防食効果があることが確認された。

本論文では、通電開始から5ヶ月程度と電気防食通電期間としては短い期間での評価であり、今後は通電を継続することにより長期的な効果を確認する予定である。

謝辞

最後に、本試験に対してご協力頂いた日本エルガード協会の方々に感謝致します。

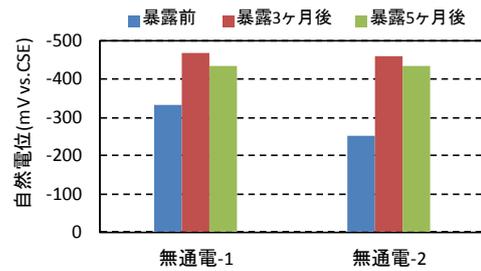


図-15 無通電の自然電位の経時変化

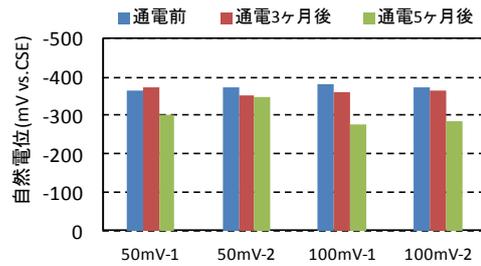


図-16 シフト管理の自然電位の経時変化

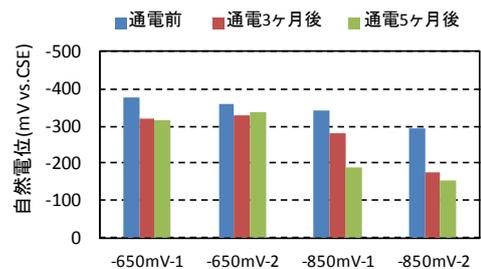


図-17 電位管理の自然電位の経時変化

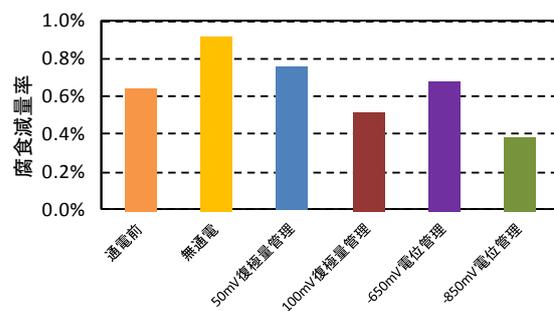


図-18 腐食減量率の測定結果

#### 参考文献

- 1) 川俣孝治ほか: コンクリート構造物干満帯部への電気防食法の適用に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.1, pp.831-836, 1996.6
- 2) 山本悟ほか: 湿潤環境にあるコンクリート中の鋼材の電気防食基準に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.3, pp.1-11, 2011.9
- 3) 社) 土木学会: 電気化学的防食工法設計施工指(案), pp.67-68, 2001