

論文 設置環境を考慮したコンクリート部材の電気防食基準に関する実験的研究

細田 喜子*1・石井 浩司*2・田代 賢吉*3・関 博*4

要旨:コンクリートの防食基準として、100mV シフト基準に加え、水中の鋼材防食基準である-850mV (vs CSE) より卑化させる基準を適用した実験を行い、干満帯・海中中部等水分を多く含む環境における防食基準の検討を行った。その結果、100mV シフト基準では、コンクリートの湿潤が起因した電位の卑化と、復極速度の低下が原因で電流調整や復極試験などが困難となったが、-850mV(vs CSE)より卑の基準は初期に大電流を必要とするものの、一度卑化すれば大気中に設置された構造物に対する通電電流密度と比較して非常に小さな電流で電位を保持でき、本実験の範囲内では100mV シフトより腐食の進行を抑制できることが明確となった。

キーワード: 電気防食, 防食基準, 干満帯

1. はじめに

電気防食工法は鉄筋の有効な防食方法であり、これまで主に飛沫帯から大気中部の構造物を対象として検討されてきた。塩害対策を必要とするコンクリート構造物の中には干満帯に位置する柱、梁、桁などの部材が存在している場合があり、特に、干満帯や常時波浪の影響を受ける栈橋のような構造物ではコンクリートが水分を多く含んだ状態にある。このような構造物に通常電気防食を適用した場合、水分を多く含む箇所で過大な防食電流が流れることや、鉄筋の自然電位が卑化することにより、分極電位が水素発生電位より卑になることが危惧されると同時に、防食電流を遮断しても復極するのに長い時間を要する。このため、大気中に位置する構造物の防食基準である100mV シフト基準¹⁾では対応できない。そこで、干満帯のような湿潤な環境に位置する部材に電気防食を適用する場合の防食基準とその効果を検討する必要がある。

水中の鋼材の防食電位として、鋼材電位が-850mV(vs.CSE)より卑という基準が NACE(National Association of Corrosion Engineers)で提案されている²⁾が、本研究では湿潤な環境における防食基準として-850mV(vs.CSE)より卑という基準に注目し、その適用性や防食効果を100mV シフト基準を適用した試験体や無防食試験体と比較・検討した。

2. 実験方法

2.1 供試体概要

(1) 形状・寸法

図-1 に試験体の形状・寸法を示す。試験体は 100

×100×230mm の角柱とし、20mm, 42mm のかぶり³⁾で鉄筋を埋設した。使用した鉄筋はφ16 の磨き丸鋼で、端部に導線を接続した後にエポキシ樹脂を用いた防水を行い、露出部分(長さ150mm)以外を自己融着テープとビニルテープで被覆した。

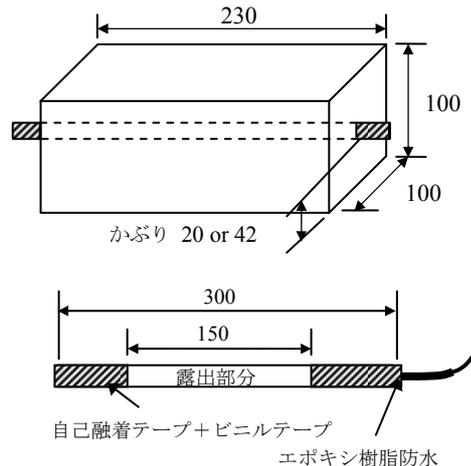


図-1 供試体製作図 (単位: mm)

(2) 使用材料

表-1 に示方配合を示す。使用したセメントは普通ポルトランドセメントであり、塩化物イオン量は10kg/m³(Cl⁻)とし、練り混ぜ水に混入し用いた。また、電気防食における陽極には線状陽極、照合電極には鉛照合電極を用いた。

表-1 示方配合

W/C (%)	Air (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					
			W	C	S	G	Ad	AE
53	4.5	48	170	321	859	959	0.663	0.612

注) Ad: AE減水剤, AE: AE助剤100倍溶液

*1 早稲田大学 大学院理工学研究科 (正会員)

*2 (株)ピーエス三菱 土木本部土木統括部メンテナンス部 工博 (正会員)

*3 日本防蝕工業 (株) 技術研究所 工修 (正会員)

*4 早稲田大学 理工学術院社会環境工学科教授 工博 (正会員)

2.2 実験概要

電食によりあらかじめ腐食させた後、乾湿繰返し条件下では、100mVシフト基準および-850mV(vs.CSE)より卑の基準、水中条件下では-850mV(vs.CSE)より卑の基準を適用し電流を調整した。

表-2 に実験要因と試験体数を示す。

(1) 電食

アノードにおける腐食生成物がかぶりコンクリートにひび割れを生じさせる通電電流量 Q_c を 20mAh/cm^2 と推定し³⁾、 0.11mA/cm^2 の電流密度で8日間通電し、鉄筋を腐食させた。また、電食確認試験体を用いて、電食終了直後の腐食面積率と腐食重量を測定し、試験開始時の腐食量の基準値とした。

(2) 試験期間

電食を終えた試験体に、電気防食による通電を開始した。試験期間は0.5年、1年である。鋼材電位の卑化のため通電を停止し電位の貴化を待った期間があり、通電期間は5ヶ月、10ヶ月である。試験期間の詳細を図-2に示す。この通電停止期間に、乾湿繰返し条件の試験体は乾湿繰返しを停止し乾燥させた。水中条件の試験体は乾燥させず水中のままとした。

(3) 通電条件

試験体の暴露環境は乾湿繰返しと水中の二種類であり、乾湿繰返しは図-3に示すように乾燥5日間(LWL)、湿潤2日間(HWL)を1サイクルとし水位を変化させた。一方、水中は常に水位がHWLにあるようにした。

なお、実験はすべて温度 20°C 、湿度 $20\sim 60\%$ の(冬場～夏場)の実験室内で行った。

通電は条件ごとに直列に接続し、定電流方式で行った。試験状況を図-3に示す。鉄筋電位は可搬式の照合電極を湿布にあて、電位差計で読み取った。また、電流調整時の電流保持時間は、乾湿繰返し・水中試験体ともに5分間とした。

試験期間中の測定項目は、自然電位(無防食試験体)とインスタントオフ電位と通電電流密度(防食試験体、鋼材表面積あたり)とした。

各基準に適合するよう通電電流量の定期調整は1週間に2回を基本とした。また、PCで観測されるような過防食の影響⁴⁾を危惧し、本実験では水素発生電位より卑化させないこととした。

100mVシフト基準に関しては、月1回の復極試験を行い、24時間後のオフ電位を測定し、定期調整ではこの値から100mVシフトするように調整した。

(4) 通電終了後

通電終了後は、分極抵抗、外観調査、pH、腐食重量減および塩化物イオン量等の腐食に関する調査を行った。

表-2 実験要因

Cl^- (kg/m^3)	かぶり (mm)	環境	防食基準	曝露期間 (年)	試験体数
0	20	乾湿	100mVシフト	0.5, 1	2
			-850mVより卑	0.5, 1	2
			無防食	0.5, 1	2
		水中	-850mVより卑	1	1
			無防食	1	1
			電食確認試験体		3
10	20	乾湿	100mVシフト	0.5, 1	4
			-850mVより卑	0.5, 1	2
			無防食	0.5, 1	4
		水中	-850mVより卑	1	1
			無防食	1	1
			電食確認試験体		6
42	20	乾湿	100mVシフト	0.5, 1	2
			-850mVより卑	0.5, 1	2
			無防食	0.5, 1	2
		水中	-850mVより卑	1	1
			無防食	1	1
			電食確認試験体		6



図-2 試験期間

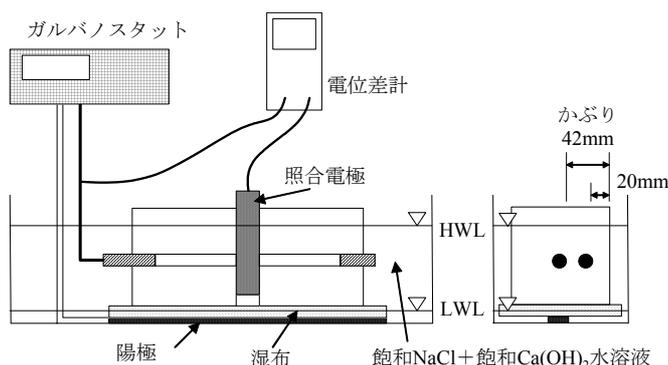


図-3 試験状況

3. 実験結果と考察

3.1 無防食試験体

(1) 乾湿繰返し

図-4 に無防食試験体の自然電位の経時変化を示す。

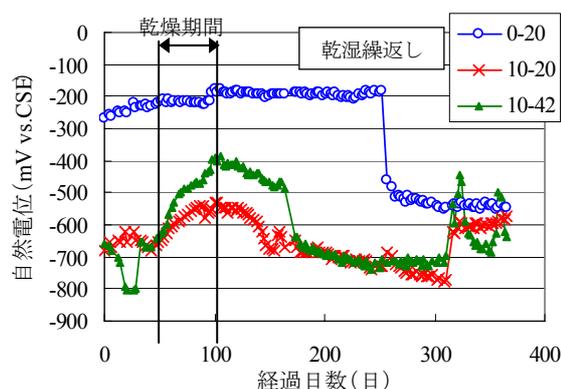


図-4 自然電位の変化(無防食)

図中の「0-20」は「塩化物イオン量-かぶり」を表しており、初期添加塩化物イオン量 0kg/m^3 でかぶり 20mm の試験体を意味する。また、以下の鋼材電位は飽和硫酸銅電極に対する電位を示す。

0-20 試験体は、経過日数 250 日まで -200mV 程度で安定していたが、急激に卑化する傾向が見られ、 -550mV で安定した。

一方、10-20 試験体および 10-42 試験体は、 -700mV と通電初期から著しく卑な電位を示し、腐食状態にあることが推測される。通電 40 日～100 日は乾湿繰返しの停止により貴化しているが、再び乾湿繰返しを始めると徐々に卑化する傾向にあった。その後、 $-700\sim-800\text{mV}$ で安定していたが、320 日付近で再び貴化した。これは、冬季になり湿度が低下したためと考えられる。

10-20 試験体と 10-42 試験体間で比較をすると、傾向は同じであるが、かぶりが厚い方が全体的に若干貴な電位を示していた。

(2) 水中

図-5 に無防食試験体の自然電位の経時変化を示す。

全試験体において、試験開始時から卑化していく傾向にあり、最終的には -900mV 程度で安定した。

10-20 試験体と 10-42 試験体間で比較をすると、乾湿繰返しの場合と逆に、かぶりが薄い方が全体的に若干貴な電位を示していた。

3.2 電気防食試験体

(1) 100mV シフト

100mV シフト基準を用いた試験体（乾湿繰返しのみ）のインスタントオフ電位の変化を図-6 に、通電電流密度の変化を図-7 に、各月に行った復極試験の結果を図-8 に示す。

図-6 に示すように、10-20 試験体と 10-42 試験体のインスタントオフ電位は卑化していく傾向⁵⁾にあった。

図-7 より、通電電流密度は通電初期において $30\sim 50\text{mA/m}^2$ であるが、時間の経過とともに小さくなる傾向にあった。これは時間の経過とともにコンクリートが湿潤となり、鉄筋電位が卑化したため分極に要する電流が小さくなったためと考えられる。電流密度が一時的に増加しているのは、次に述べる復極量の変化に対応したものである。

図-8 より、月 1 回行われる復極試験では、復極速度が遅くなった影響で、24 時間後のオフ電位が 100mV シフト基準を満足しなくなった。定期調整では、このような復極試験で得られた「戻らない」オフ電位を基準として 100mV シフトするように電流を増加させた後、再び電位の卑化により所要電流が減少するということが繰返された。この結果、図-7 に示すように通電電流密度が一時的に増加する現象が生じることとなった。

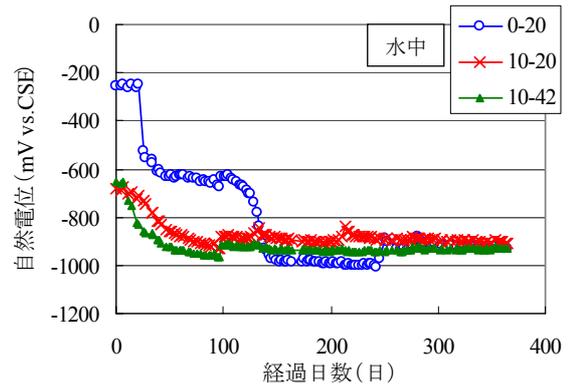


図-5 自然電位の変化（無防食）

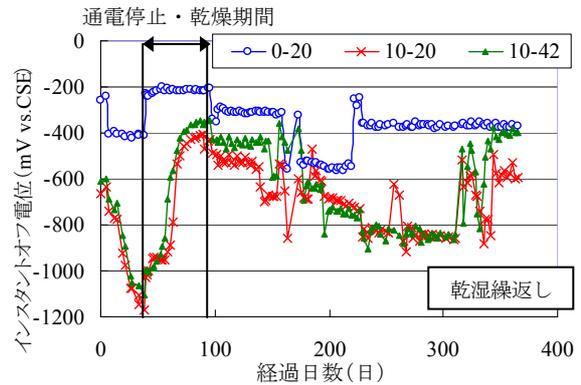
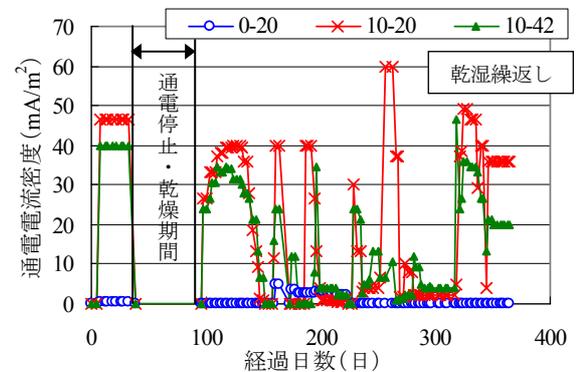


図-6 インスタントオフ電位の変化（100mV シフト）



注) コンクリート表面積あたりで換算すると縦軸の値は 1/3 程度となる

図-7 通電電流量の変化（100mV シフト）

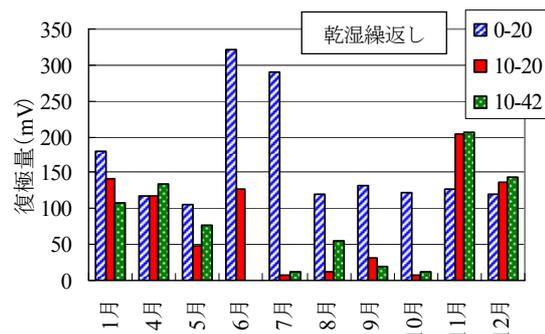


図-8 復極量の変化（100mV シフト）

また、11月、12月に入ると、再び電位が貴化し、これに伴い復極量も満足するようになった。これは、この期間の湿度が低下し試験体が乾燥することにより電位の貴化と復極速度の増加が影響したものと考えられる。

本実験では電位がコンクリートの湿潤程度に依存して大きく変動したため、「復極試験 24 時間後のオフ電位から 100mV シフトさせる」という電流の調整方法は難しかった。さらに、100mV の分極を得るために電位を卑化させていくと水素発生電位に達する可能性がある。

(2)-850mV(vs.CSE)より卑

-850mV より卑の基準を適用した乾湿繰返し試験体のインスタントオフ電位の変化を図-9 に、通電電流密度の変化を図-10 に示す。

図-9、図-10 より、-850mV より卑の基準を満足させるために、通電初期に 100mA/m² 程度の大電流が必要であった。また、基準を満足させるのに必要な通電電流密度は経過日数 140 日付近から減少し、200 日以降は 2 mA/m² 以下で基準を満足していた。ただし原因は明確になっていないが急激に電位が貴化する場合があります、注意が必要である。急激に戻った際には、再び大電流を印加し、そうするとすぐに電位が下がるので、また微弱電流に戻すという作業を行った。図-10 に見られる電流密度の一時的な増加はこの作業により生じたものである。

また、同様の基準を適用した水中試験体のインスタントオフ電位の変化を図-11 に示した。

乾湿繰返しの場合と同じ 5 分間の保持時間で電流調整試験を行ったことが原因で、インスタントオフ電位が通電初期に大きく変化した。水中の場合は、電流変化に伴う電位変化の速度が非常に遅いため、通電電流設定には十分な分極時間が必要と考えられる。

0-20 試験体は、通電初期に電位の変動が認められたが、それ以降安定し約 2mA/m² で-850mV の基準を満足していた。10-20 試験体および 10-42 試験体に関しては、自然電位が著しく卑であり、通電しなくても-850mV の基準を満足していたため、非常に微弱な 0.05 mA/m² 程度の電流密度を流した。

3.3 通電終了後測定項目

(1)分極抵抗

通電終了一日後の分極抵抗を交流法により測定した結果、防食基準による違いはほとんど見られなかった。塩化物やかぶりの影響が大きく、各条件の平均値を求め比較すると、乾湿繰返し試験体では 0-20 試験体 (74kΩcm²)、10-42 試験体 (1.6kΩcm²)、10-20 試験体 (0.83kΩcm²) の順で大きい傾向を示した。これより、腐食速度は 10-20 が一番大きく、また、0-20 が圧倒的に小さいと推測できる。同様に水中試験体の分極抵抗の平均値を比較すると 0-20 試験体 (16kΩcm²)、10-42

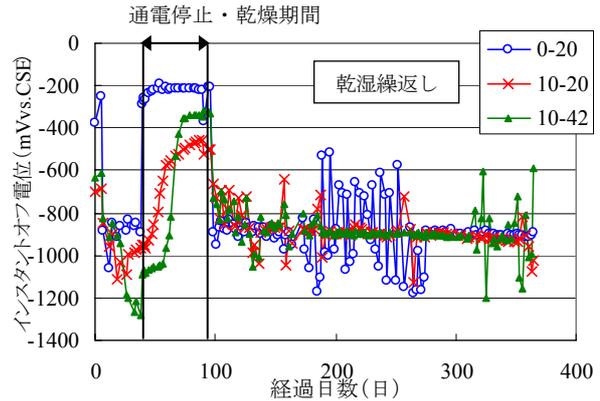
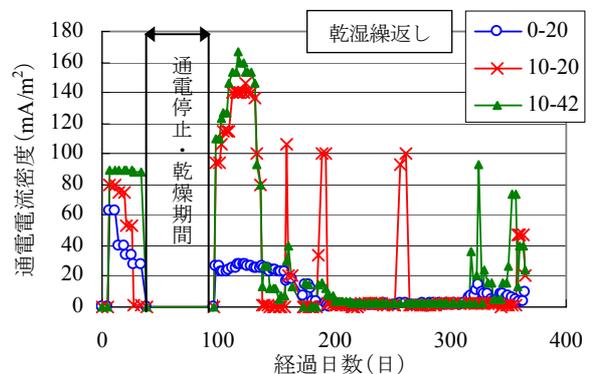


図-9 インスタントオフ電位の変化 (-850mV 卑)



注) コンクリート表面積あたりで換算すると縦軸の値は 1/3 程度となる

図-10 通電電流量の変化 (-850mV 卑)

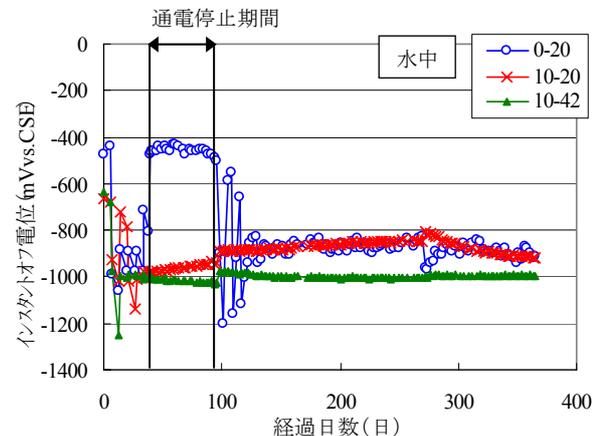


図-11 インスタントオフ電位の変化 (-850mV 卑)

試験体 (1.05kΩcm²)、10-20 試験体 (0.65kΩcm²) の順で大きく、全体的に低い値であるが乾湿繰返しと同様の傾向を示した。

(2)外観調査・pH 測定

a)外観調査

割裂前のコンクリート表面を外観調査した結果、鉄筋軸方向のひびわれは認められなかった。ただし、100mV シフト基準 (乾湿) を適用した 10-20 試験体と無防食

試験体においては表面に錆汁が確認された。

b) 腐食傾向・錆色

0-20 試験体の鉄筋はほぼ健全な状態にあった。しかしいくつかの試験体で鉄筋周りのビニルテープとコンクリートの間に水道ができ、端部がわずかに黒く腐食しているのが確認された。

10-20 試験体と 10-42 試験体の鉄筋は全体的に腐食しており、観測された錆色を表-3 にまとめた。10-20 試験体は全体的に腐食していたものの、かぶりが薄い側と厚い側で腐食が偏っていた。

乾湿繰返し試験体において、100mV シフトと無防食試験体で観測された錆色は黒・赤茶・緑であった。しかし、-850mV より卑の基準を適用した試験体では、黒・赤茶と緑さびが見られなかった。緑さびは二価鉄イオンと三価鉄イオンからなる反応中間体であり、この部分は鉄イオンの生成が活発であると考えられる。このことから、緑さびのなかった-850mV より卑の基準を適用した試験体の腐食は活性状態にないと推測できる。

また、水中試験体の鉄筋の錆は全体的に黒く、乾湿繰返して観察された赤茶の錆が認められなかった。これは、赤錆の生成に必要な酸素が少なかったためと考えられる。

c) pH

試験体のコンクリートを除去した直後の鉄筋に、腐食度合いの違う部分、数箇所純水を垂らし pH 試験紙を押し当て、おおよその pH を測定した。

各試験体に大きな相違は認められず、全般的な傾向としては、全体腐食部は pH8~9 程度の中性、健全部は pH10~11 程度のアルカリ性を示していた。

また、塩化物が浸透または内在する場合、孔食に近い激しい腐食が観測された。この部分の pH を測定したところ 4~6 程度の酸性を示していた。これは、内部で陽イオン Fe^{2+} が溶け出し、電気的中性を保とうとして陰イオン Cl^- が集まって濃縮・蓄積したり、腐食生成物である $FeCl_2$ が水との加水分解によって水素イオン H^+ を生成することなどにより pH の低下が起こったと考えられる。

(3) 腐食重量減

サンドブラストで錆落しを行い、腐食重量減を求めた。試験開始時の腐食重量減の基準値からの変化量を、腐食重量減変化量として図-12 に示す。ただし、防食試験体の通電停止期間における腐食量増加の影響を除去するために、同一条件下の無防食試験体の腐食量を試験期間で除し、通電停止期間を乗じ補正值として防食試験体の腐食量から差し引いた。

a) 乾湿繰返し

腐食重量減変化量が大きかったのは、塩化物混入した試験体であった。特に、錆汁が確認された 100mV シフト

表-3 錆色

	乾湿繰返し	水中
100シフト	黒・赤茶・緑	—
-850より卑	黒・赤茶	黒・緑
無防食	黒・赤茶・緑	黒・緑

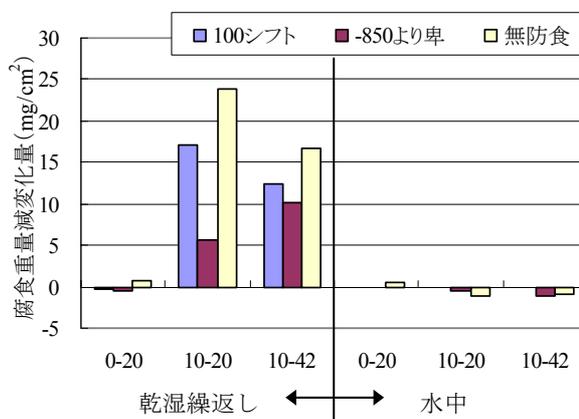


図-12 腐食重量減変化量

基準を適用した 10-20 試験体と無防食試験体のそれは大きかった。

0-20 試験体の腐食重量減変化量は非常に小さく、適用した防食基準に関係なかった。

10-20 試験体、10-42 試験体において、電気防食を適用した供試体の腐食減量が無防食供試体に対して期待したほど小さくなかった。これは、腐食を促進させるような非常に過酷な環境下にあったこと、電位の卑化等実験条件の制約により腐食停止に必要な電流よりも実験中の通電電流が小さく抑えられたことなどが原因であると考えられる。

また、図-8 に示すように「100mV シフト」供試体では 5 月~10 月にかけて 100mV シフトの条件を満足していないため、無防食供試体との腐食重量減変化量の差が小さくなったと思われる。

適用した防食基準による影響を見ると-850mV より卑の基準を適用した試験体のそれが最も小さく、腐食の増大を抑えていると推定された。-850mV より卑の基準の試験体では通電初期に比較的大きな電流を流したため「100mV シフト」供試体より防食効果があったと思われる。

b) 水中

水中条件のそれは非常に小さく、適用した防食基準による差異は見られなかった。水中条件の試験体の電位はかなり卑化していたが、酸素量が少ないため実際の腐食重量減変化量は小さかった。

(4) 塩化物イオン量

鉄筋近傍のコンクリートを切り出し、硬化コンクリー

ト中に含まれる全塩分の簡易分析法 (JCI-SC5) を用い、単位体積あたりの塩化物イオン量 (CF) を算出した。この結果を図-13 に示す。

飽和 NaCl 溶液を使用しているため、全体的に塩化物イオン量は大きかった。0-20 試験体は初期塩 0 から約 3~5 (kg/m³) に増えていた。これはかぶりが薄いため水溶液中の塩化物イオンが内部に浸透した結果と考えられる。10-20 試験体も同様に、初期混入値 (10kg/m³) から乾湿繰返しで約 2.5 倍、水中で 1.5~2 倍に増加した。10-42 試験体はかぶりが厚いため、乾湿繰返し、水中ともに初期混入値 (10kg/m³) 前後の値を示していた。

図-13 の塩化物イオン量と図-12 の腐食重量減を比較すると、乾湿繰返しの場合、塩化物イオン量が多い試験体ほど腐食重量減が大きい傾向が認められた。水中試験体の場合、腐食重量減が小さく、両者の明確な関係性は得られなかった。

4. まとめ

乾湿繰返しおよび水中条件下に設置した厳しい腐食環境にある鉄筋コンクリート試験体に電気防食を施し、通常の 100mV シフト基準に加え、海水中の鋼材防食基準である-850mV (vs CSE) より卑化させる基準を適用した実験を行い、防食基準に関する検討を行った。その結果、本実験の範囲内において以下のことが明らかとなった。

- (1) 多くの水分を含む乾湿繰返し環境における 100mV シフト基準、-850mV より卑化させる基準の腐食抑制効果は、後者の方が大きい傾向にあった。しかし、抑制効果は認められたものの、腐食の完全停止までは至らなかった。これは電位の卑化に伴い通電電流量を低く抑えたことが原因と考えられる。
- (2) 100mV シフト基準を用いた場合は、多くの水分を含むような乾湿繰返し環境において、電位が湿潤程度によって卑に移行する、復極速度が遅くなるなどの影響で、試験期間の半分で 100mV シフトを満足しなくなったため防食効果が小さかった。また、100mV シフトを満足させるため (分極) 電位を卑化させ続けると水素発生電位に到達する可能性がある。

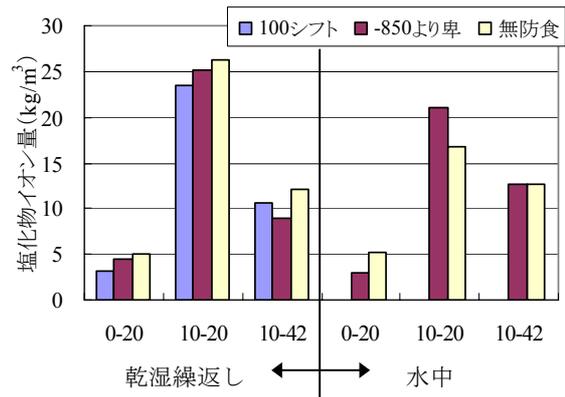


図-13 塩化物イオン量

- (3) -850mV より卑化させるという基準を用いた場合は、乾湿繰返し環境において、初期に大電流が必要であるが、一度電位が卑化すると、非常に小さな電流でも保持が可能であり、ある程度腐食の進行を抑制することができた。

参考文献

- 1) コンクリートライブラリー107 電気防食工法設計施工指針 (案), 2001
- 2) NACE Standard Rp-01-69, Recommended Practice: Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping Systems, 1969
- 3) 関 博, 伊東 昇: 鉄筋の腐食による軸方向ひびわれの発生機構について, セメント技術年報, No.36, pp.428-431, 1982.12
- 4) 武若耕司: コンクリート構造物における電気防食法の現状, コンクリート工学, Vol.30, No.8, pp.16-27, 1992.8
- 5) 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