

論文 干満帯における鉄筋コンクリート部材の電気防食効果に関する実験的研究

上野 萌^{*1}・山本 悟^{*2}・石井 浩司^{*3}・関 博^{*4}

要旨：満潮時のみ海水中に没する栈橋の梁下部鉄筋の電気防食を想定し，干満帯を模擬した水槽においてマクロセルを形成させたコンクリート供試体に対して外部電源方式による通電試験を行い，その防食効果を検討した。また，栈橋下部工の鋼管杭を防食するための流電陽極が梁下部に対する防食効果へ及ぼす影響も調べた。その結果，防食供試体では防食電流による鉄筋近傍の環境改善が見られ，干満帯にある鉄筋に対して明確な防食効果が認められた。さらに，その効果は流電陽極があるとより大きくなった。

キーワード：電気防食，マクロセル，干満帯，流電陽極，防食効果，防食率

1. はじめに

塩害を受けたコンクリート構造物の補修工法として，電気防食工法が普及している。本工法は，コンクリート表面もしくは内部に陽極材を取り付け，鋼材を陰極として防食電流を鋼材表面へ流すことにより，鋼材の電位を単方向へ変化させて腐食の発生や進行を防止するものである。電気防食の対象構造物に，干満帯や飛沫帯に位置する栈橋がある。我が国における栈橋の多くは，上部工がRC構造の梁および床版で下部工が鋼管杭の構造となっており，下部工の水中部では従来から流電陽極方式の電気防食が行われている。一方，上部工では床版や梁上部は大気中，梁下部は干満帯に暴露されることが多く，両環境では電気防食の所要電流密度や電解電圧等が異なるため，回路を分けてそれぞれを制御している¹⁾。しかし，同一回路内においても乾湿の境界付近部や，ひび割れ箇所のようにコンクリートの含水率が不均一な箇所が存在する。本研究では，そのような部位における電気防食を想定し，干満帯を模擬してマクロセルを形成させ，1.5年間の外部電源方式による通電試験を行い，電気防食の効果を検討した。また，鋼管杭に取り付けた流電陽極を模擬したアルミニウム合金陽極からの電流が，満潮時にコンクリート中鋼材に流入することによる防食効果への影響も調べた。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

(1) 形状・寸法

図-1に供試体の形状・寸法を示す。コンクリート供試体は300×230×100mmとし，20mmのかぶり

で鉄筋を埋設した。

(2) 使用材料

表-1に供試体の示方配合を示す。セメントには普通ポルトランドセメントを使用し，水セメント比W/C=53%とした。また，コンクリートに対してCl⁻が10kg/m³となるようにNaClを練混ぜ水に混合した。

使用した鉄筋は16の磨き丸鋼で，端部にリード線を接続した後に柔軟性樹脂塗料を用いて防水処理を施した後に，供試面積が7.5×10⁻³m²(16×150mm)となるように両端を自己融着テープおよびビニルテープで被覆した。また，電気防食用陽極には幅20×厚さ1.3mmの貴

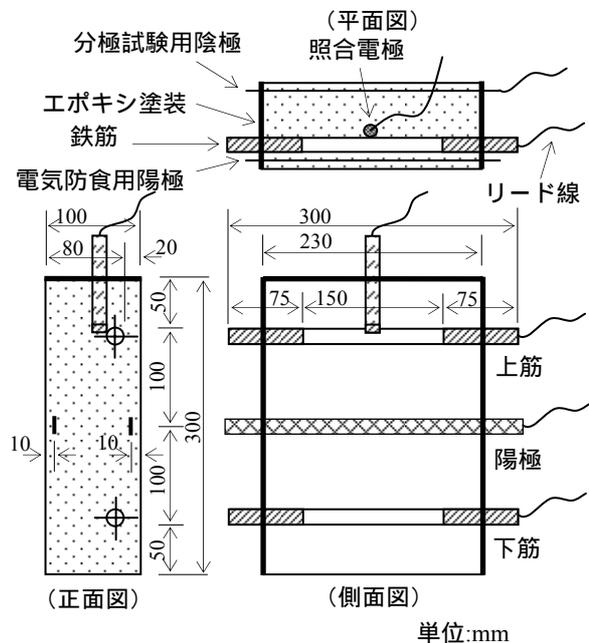


図-1 供試体の形状・寸法

*1 早稲田大学大学院 創造理工学研究科 (正会員)

*2 日本防蝕工業(株) 技術研究所 (正会員)

*3 (株)ピーエス三菱 土木本部土木総括部メンテナンス部 工博 (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)

金属酸化物被覆チタン陽極を，照合電極には鉛照合電極を用いた。なお，供試体 No.22 には，満潮時のみ水中に没する位置で流電陽極（アルミニウム合金陽極，供試面積 $15 \times 100\text{mm} = 4.7 \times 10^{-3}\text{m}^2$ ）を図 - 2 に示すように取り付け電氣的に接続した。

(3) 供試体の実験条件

表 - 2 に供試体の実験条件を示す。防食を行わない供試体を「無防食」，外部電源のみで防食を行う供試体を「防食」，流電陽極有りの供試体を「防食・Al 有」と称する。また，上筋と下筋を電氣的に接続しない供試体を「単独」，リード線で短絡させた供試体を「マクロセル」とする。

2.2 実験方法

(1) 鉄筋のアノード溶解処理

補修が必要な実構造物では鉄筋はすでに腐食し，表面にさび層を有しているので，これに合わせるために供試体中の鉄筋をアノード溶解処理してさびさせた。アノード溶解処理は供試体を 3%食塩水中に浸漬して上筋および下筋をそれぞれアノード（プラス極）とし，目標電流量が 168Ah/m^2 となるように 1A/m^2 の電流密度で 7 日間通電した。鉄筋の電気化学当量を 1.042g/Ah として，鉄筋の理論溶解量は式(1)に示すように 175.1g/m^2 とした。

$$1.042 (\text{g/Ah}) \times 168 (\text{Ah/m}^2) = 175.1 (\text{g/m}^2) \quad (1)$$

(2) 実験期間と供試体の暴露環境

表 - 3 に実験の工程を示す。供試体はアノード溶解処理後，樹脂製容器に入れて供試体下端から 30mm の水位で 3%食塩水に 23 日間常時浸漬させた後に通電を開始した。その後 No.21, 22 は 5 日目に，No.24 は 23 日目に供試体を図 - 2 に示すような水槽に移し，3%食塩水を用いて干満を開始した。No.9 のみ別容器に入れて，下端から 80mm の水位で 3%食塩水に常時浸漬した。干満は電動ポンプ，電動バルブおよびタイマーを使用して，満潮時は

下筋が水没し，干潮時は供試体に水が触れないように給排水した。満潮時の水位は初め供試体下端から 30mm としたが，下筋の環境をより湿潤にするために，通電開始 61 日後に 80mm に変更した。干満サイクルは 1 日 2 回とし，ポンプから水槽に食塩水が流入してから約 3~5 分で満潮状態となるようにした。満潮時間（食塩水の給水開始から排水開始まで）は，通電開始 478 日目までは東京港を模擬して 1 日間の約 5%（=36 分間 \times 2 回=72 分間）と

表 - 1 供試体の示方配合

W/C (%)	Slump (cm)	Air (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
				W	C	S	G	AR	AF
53	12.2	4.9	48	170	321	863	969	1.70	0.01

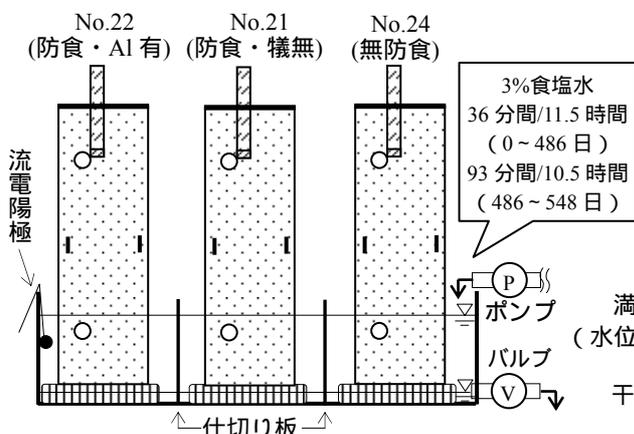
注) G_{max} : 20mm, AR : AE 減水剤, AF : 消泡剤

表 - 2 供試体の実験条件

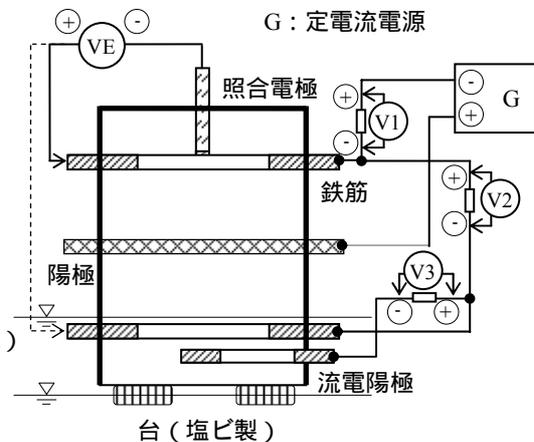
供試体 No.	鉄筋 No.	暴露環境	鉄筋回路	電気防食	犠牲陽極
24 (無防食)	24 上	大気中	マクロセル	無	無
	24 下	干満帯			
21 (防食)	21 上	大気中	マクロセル	有	無
	21 下	干満帯			
22 (防食・Al 有)	22 上	大気中	マクロセル	有	有
	22 下	干満帯			
9 (無防食・単独)	9 上	大気中	単独	無	無
	9 下	水中			

表 - 3 実験工程表

年度	1年目												2年目											
	月	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
供試体打設	●																							
打型, 処理	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
アノード溶解処理	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
通電準備	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
干満開始																								
電気防食																								



a) 供試体の配置



b) No.22 (防食・流電陽極有) の防食回路

図 - 2 供試体の配置および供試体の回路例

し、その後通電終了までは広島港を模擬して1日間の約13% (93分間×2回=186分間)とした。また、満潮時にNo.22に設置した流電陽極から食塩水を介してその他の供試体に電流が影響したと考えられたため、通電開始301日後に供試体の間に塩化ビニル製の水切り弁付き仕切り板を設置した。さらに冬季の乾燥を防ぐために通電開始306日後に供試体の周囲を透明ビニルシートで覆った。試験温度は20とし、相対湿度は40~60%であった。

(3) 通電方法および測定項目

供試体回路の例としてNo.22(防食・Al有)の回路を図-2に示す。No.21(防食)の回路は図-2の流電陽極が無いものである。No.24(無防食)の回路は定電流電源および流電陽極が無いもので、No.9(無防食・単独)はさらに上下鉄筋をつなぐリード線が無いものである。上下の鉄筋に流入する電流(防食電流分配量)は10の固定抵抗器に生じる電圧降下 IR からそれぞれ算出した。

試験期間中の測定項目は、(1)自然電位 E_{cor} (No.24, 9)(2)マクロセル電流密度(No.24)(3)オン電位 E_{on} (4)インスタントオフ電位 E_{ins} (5)オフ電位 E_{off} および(6)防食電流分配量(No.21, 22)とした。測定項目(1),(2),(3),(6)に関しては潮位変動による影響を観測するため、データロガーを用いて、通電開始後13~48日は5分間隔で、それ以降は10分間隔で連続的に測定した。また、マクロセル電流密度と通電時間から、上下鉄筋間に流れたマクロセル電流の積算電気量(Ah)を算出した。測定項目(4),(5)に関しては、デジタルマルチメーターを用いて通電開始後236日までは1週間ごとに、それ以降は2週間ごとにいずれも干潮時に測定した。インスタントオフ電位 E_{ins} は通電電流を遮断した直後に、オフ電位 E_{off} は電流を遮断してから4時間後に測定した。なお、電流値の極性は鉄筋および流電陽極から流出(腐食)する場合はプラス(+),流入(防食)する場合はマイナス(-)とし、鋼材表面積に対する電流密度として表した。電位は埋め込んだ鉛照合電極(-800mV vs.CSE)を基準として測定し、測定値は飽和硫酸銅電極基準CSEに換算した。なお、マクロセル供試体は上筋の電位を測定した。

通電電流値は通電開始前の他の供試体における分極試験結果より求めた分極量 E_p が100mV以上になる電流密度に、その後はインスタントオフ電位 E_{ins} とオフ電位 E_{off} の差から求めた復極量 E が100mV以上になるように電流密度を設定し、No.21, 22にはそれと同じ電流密度で通電した。

(4) 通電終了後の解体試験

通電終了後、鉄筋表面のpH、鉄筋近傍(約10mm)のコンクリートの塩化物イオン濃度および質量減を測定した。鉄筋の通電試験前の質量減は、防食試験開始直前に

他の供試体を解体して求めた上筋2本および下筋2本の平均値とし、これらを上筋および下筋の通電開始までの質量減 W_s (アノード溶解処理による質量減を含む)とした。また、鉄筋の除錆処理は、通電開始前の処理はサンドブラストにより行い、解体時の処理はJIS Z 2371に準じて行った。補正のため、除錆処理に伴う質量減の平均値を求めてそれぞれ W_{t1} および W_{t2} とし、式(2)により供試期間における質量減 W を求めた。また質量減から式(3)および(4)を用いてそれぞれ鉄筋の腐食電流密度 i_{cor} (mA/m²)および防食率 P (%)を求めた。

$$W = W_e - W_s = (W_e' - W_{t2}) - (W_s' - W_{t1}) \quad (2)$$

$$i_{cor} = \frac{W}{K \times t} \quad (3)$$

$$P = \frac{i_{cor-N} - i_{cor-P}}{i_{cor-N}} \times 100 \quad (4)$$

ここで、 W は鉄筋の質量減(g/m²)、 W_e' は除錆処理に伴う質量減を含んだ解体時の質量減(g/m²)、 W_s' は除錆処理に伴う質量減を含んだ通電開始までの質量減(g/m²)、 K は鉄Feの電気化学当量(=1.042×10⁻³(g/mAh))、 t は供試時間(=548日=13152h)、 i_{cor-N} および i_{cor-P} はそれぞれ無防食供試体および防食供試体の腐食電流密度(mA/m²)とした。

3. 実験結果および考察

3.1 電位および電流の経時変化

(1) 無防食供試体(No.24, 9)

図-3にNo.24(無防食)およびNo.9(無防食・単独)の全試験期間における自然電位 E_{cor} の経時変化を示す。なお、No.9(無防食・単独)のデータは1週間ないしは2週間ごとにデジタルマルチメーターにより手動測定したものである。No.9(無防食・単独)の上筋の自然電位は130日以降-300mV vs.CSEよりも貴な値を示した。これは上筋周辺のコンクリートの抵抗率上昇に伴う電位の貴化と考えられる。一方、下筋の自然電位は30日目から-450mV vs.CSE前後で推移したが、260日以降-550mV vs.CSEまで卑化し、試験終了まで-500mV vs.CSEよりも卑な値を維持した。これは下筋周辺のコンクリートの抵抗率が上筋周辺のコンクリートよりも低くなったためと考えられる。No.24(無防食)の自然電位は時間とともに最高-340mV vs.CSEまで貴化したが、ビニルシート設置後に顕著に100mV程度卑化して、約-440mV vs.CSEとなり、その後はほぼ一定の値を示した。経過日数478日後に満潮時間を変更してから約20日経過した500日付近でさらに50mV程度卑化した。これはビニルシートの設置で上筋周辺のコンクリートの含水率が増加し、さらに満潮時間を長くすることで干潮時の下筋周辺のコンクリートの湿潤時間が長くなったために下筋の電位が卑化した

ことによると考えられる。また, No.24 (無防食) の自然電位は 100 日目から試験終了まで, No.9 (無防食・単独) の上筋および下筋の間の値を示した。このことから, No.24 (無防食) は大気中にある上筋がカソード, 干満帯にある下筋がアノードのマクロセルを形成していたと考えられる。

図 - 4 は満潮時間変更前後(462 日目および 509 日目)における No.24(無防食) の自然電位の経時変化(1 日間)を示したものである。この図から自然電位が貴化と卑化を繰り返す現象が認められた。このような自然電位の変動は堀口らの文献^{2),3)}でも確認されており, 不動態の破壊と再生が繰り返されるために生じたものと考えられる。

図 - 5 に No.24 (無防食) の鉄筋間に流れるマクロセル電流密度を示す。なお, マクロセル電流密度に相対湿度が影響していると考えられたため, 通電開始 201 日目から本実験と同様な暴露条件における相対湿度を測定したので, その経時変化を図 - 5 に併せて示す。マクロセル電流密度は 150 日目からビニルシート設置までは約 2mA/m^2 と比較的低い値を示したが, ビニルシート設置後 50 日程度でそれまで約 40%であった湿度が 55%程度まで上昇し, それに伴いマクロセル電流密度も約 5mA/m^2 まで徐々に増加した。その後, 満潮時間変更後には再び減少し, 試験終了まで $2.5 \sim 4.0\text{mA/m}^2$ の間で増減を繰り返した。これを図 - 6 に示すマクロセルにおける分極の概念図を用いて考察する。ここで, E_c^0 および E_a^0 はそれぞれ上筋および下筋の自然電位とする。上筋と下筋は電気的に接続されているため, 両者の電位は $E_c^0 A$, $E_a^0 A$ のように分極するが, コンクリート抵抗によって生じる電圧降下 IR により, 分極曲線の交点 A よりも少ない電流でつり合う。ビニルシート設置前のコンクリートは比較的乾燥していて, コンクリートの抵抗が高いため少ない電流密度 i_1 でつり合ったが, ビニルシート設置によってコンクリートの抵抗が低下したことで電流密度が i_2 まで増加したものと考えられる。その後, 満潮時間が長くなることで上筋周辺のコンクリートの含水率が増加し, コンクリートの抵抗率が低下すると, 上筋の同一鉄筋内に流れるマクロセル電流が増加し, 上筋の自然電位が E_c^0 から E_c' まで卑化する。その結果, 上筋のカソード分極特性が $E_c' B$ のように変化し, 同じ電圧降下 E' を得るために必要な電流密度が i_2 から i_3 まで減少したものと考えられる。

(2) 防食供試体 (No.21, No.22)

図 - 7 に No.21 (防食) および No.22 (防食・Al 有) のオン電位 E_{on} の経時変化を, 図 - 8 に外部電源から No.21 (防食) および No.22 (防食・Al 有) の上下鉄筋に流入する防食電流分配量の 462 日目における経時変化(1 日間)を, 図 - 9 に No.21 (防食) および No.22 (防食・Al

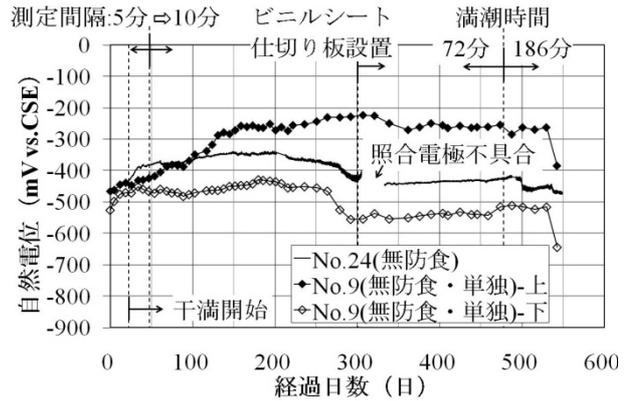


図 - 3 No.24 (無防食) および No.9 (無防食) の自然電位 E_{cor} (全試験期間)

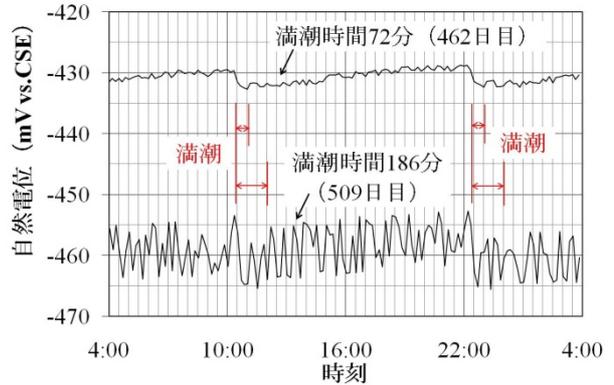


図 - 4 No.24 (無防食) の自然電位(462 および 509 日目)

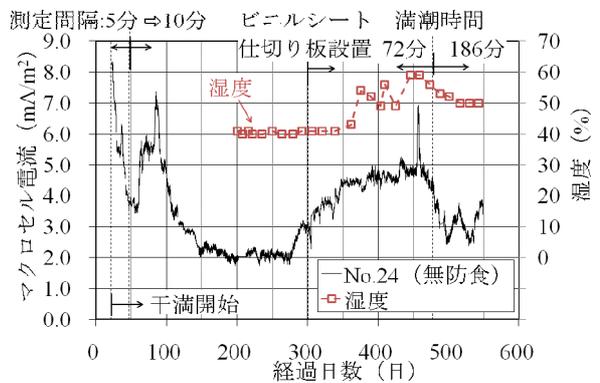


図 - 5 マクロセル電流密度(全試験期間)および相対湿度

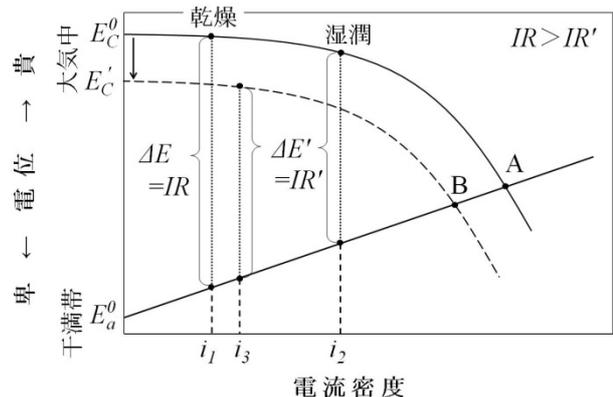


図 - 6 マクロセルにおける分極の概念図

有)のインスタントオフ電位 E_{ins} および No.24(無防食)の自然電位 E_{cor} の経時変化を示す。外部電源からの防食電流は、干潮時は No.21(防食), No.22(防食・Al有)とも下筋へ多く流入した。満潮時は No.21(防食)には変化は見られなかったが、No.22(防食・Al有)では流電陽極の電流が主に下筋へ流入し、外部電源からの電流の全てが上筋へ流入した。通電終了6日前に、LCRメーターを用いて 1kHz で No.21(防食) および No.22(防食・Al有)の各鉄筋と陽極との間の抵抗を測定した結果、上筋-陽極間の抵抗は No.21 が 6.0k Ω , No.22 が 6.8k Ω であったのに対し、下筋-陽極間の抵抗はそれぞれ 2.9k Ω および 3.4k Ω と低くなった。また、満潮時の No.22 の上筋-流電陽極間の抵抗は 4.7k Ω , 下筋-流電陽極間の抵抗は 0.7k Ω であった。このように防食電流は抵抗にほぼ反比例して流れたことから、防食電流は陽極からの抵抗に大きく依存することが分かった。なお、本実験では厳しい腐食環境を模擬するために鉄筋かぶりを 20mm としたが、栈橋上部工の一般的なかぶりにおいても同様な傾向を示すと考えられる。

No.22(防食・Al有)上筋のオン電位は、図-7に示すとおり干潮時には -400~-500mV vs.CSE 程度であったが、満潮時には流電陽極から下筋へ大量の電流が流入することにより、-600mV vs.CSE 程度まで卑になった。

また、No.22(防食・Al有)では、通電開始後 146~172日の約30日間は外部電源からの通電を停止し、流電陽極のみによる通電を行った。その結果、上筋の電位は、満潮時に -580mV vs.CSE 程度まで卑になり、外部電源による通電期間と同様な値を示したが、干潮時には -230mV vs.CSE まで貴な値を示した。この値は図-9に示す No.24(無防食)の自然電位 -330mV vs.CSE よりも貴であった。また、通電終了6日前において防食電流を遮断して5時間後に、マクロセル供試体の鉄筋同士を開放し、独立させた前後の電位と解体後に測定した各鉄筋近傍のコンクリートの塩化物イオン濃度の結果を表-4に示す。No.24(無防食)の鉄筋の電位は開放前後で上筋は 20mV 程度貴化、下筋は 170mV 程度卑化したのに対し、No.21(防食)および No.22(防食・Al有)では開放前後の電位は上下鉄筋ともほぼ同様に貴であった。供試体の解体直後に鉄筋表面の pH を測定した結果、これらの鉄筋の腐食生成物が認められる箇所における最も低い pH は、No.24(無防食)で pH6, No.21(防食)で pH9 および No.22(防食・Al有)で pH10 であり、防食した鉄筋の pH は無防食のものよりも高くなっていた。また、防食供試体の下筋近傍コンクリートの塩化物イオン濃度は、無防食供試体よりも 1.5kg/m³ 以上低い値となった。これらのことから防食電流によって鉄筋近傍の環境改善が行われた結果、鉄筋が再不動態化したものと考えられ、電気防食

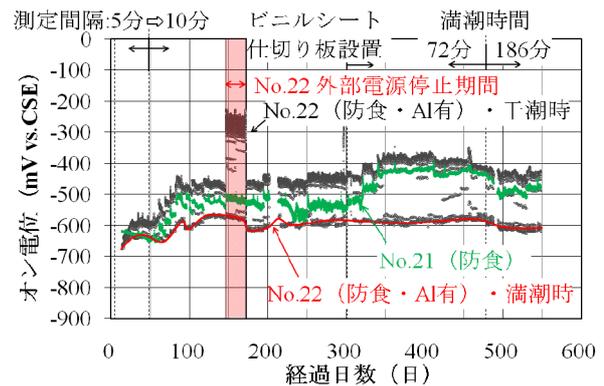


図-7 No.21(防食)およびNo.22(防食・Al有)のオン電位 E_{on} (全試験期間)

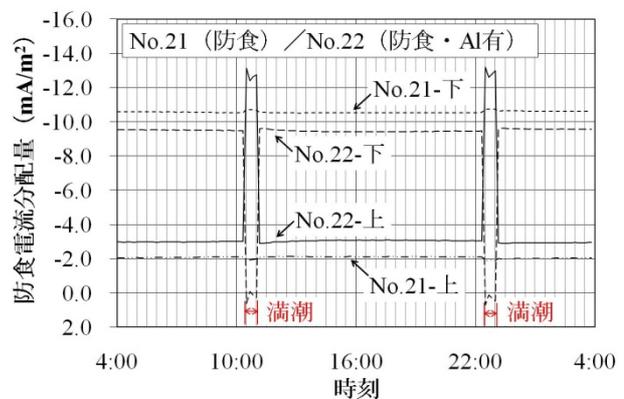


図-8 No.21(防食)およびNo.22(防食・Al有)の上下鉄筋に流入する防食電流分配量(462日目)

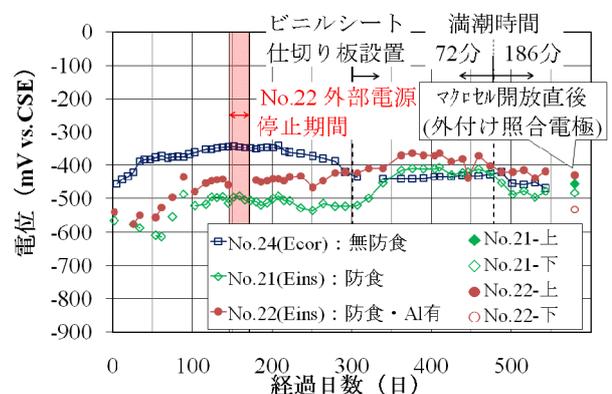


図-9 No.21(防食)およびNo.22(防食・Al有)のインスタントオフ電位 E_{ins} および No.24(無防食)の自然電位 E_{cor}

表-4 マクロセル開放前後の電位および鉄筋近傍コンクリートの塩化物イオン濃度

供試体 No.	鉄筋 No.	電位 (mV vs.CSE)		鉄筋近傍の Cl 濃度 (kg/m ³)
		開放直前	開放直後	
24 (無防食)	24 上	-468	-447	7.6
	24 下	-468	-636	9.2
21 (防食)	21 上	-283	-285	7.1
	21 下	-283	-264	7.6
22 (防食・Al有)	22 上	-229	-230	6.9
	22 下	-229	-223	7.4

によって No.21 (防食) および No.22 (防食・AI 有) の上下鉄筋の電位が貴化した要因であると考えられる。

なお、図 - 9 に示す No.21 (防食) および No.22 (防食・AI 有) のインスタントオフ電位は上筋近傍に埋設した照合電極で測定したものである。しかし、埋設した照合電極ではマクロセル電流の影響により下筋のインスタントオフ電位は正確に測定できないため、通電試験終了直前に別の照合電極を用いてマクロセル開放直後の上下鉄筋の電位を外部から測定したので、その結果を図 - 9 に併せて示す。マクロセル開放直後の電位は No.21 (防食) の下筋で-483 mV、No.22 (防食・AI 有) の下筋で-532mV vs.CSE となり、上筋のインスタントオフ電位と比べて No.21 はほぼ同様、No.22 は 110mV 程度卑な値となった。

3.2 防食効果

図 - 10 に各鉄筋の腐食電流密度を示す。No.24 (無防食) の腐食電流密度は上筋で 11.4 mA/m² と比較的低い値を示し、下筋で 42.0 mA/m² と高い値を示した。この干満帯に暴露した No.24 (無防食) 下筋の腐食電流密度は、水中に常時浸漬した No.9 (無防食・単独) 下筋の腐食電流密度の 2 倍近い値で、さらにマクロセル電流の積算電気量 0.322Ah から求めた腐食電流密度 3.6mA/m² の約 12 倍も高かった。これは、3.1(1)でも述べたように上側コンクリートの乾燥により上下鉄筋間のマクロセル電流が流れにくくなったこと、および干満帯のために下筋周辺の通気性が良好であったことから、下筋の同一鉄筋内のマクロセル腐食が進行し、上下鉄筋間のマクロセル腐食を卓越したためと考えられる。

次に式(4)から算出した No.21 (防食) および No.22 (防食・AI 有) における防食率は上筋でそれぞれ 47.4 および 36.8%と低かった。これは上述のとおり、No.24 (無防食) における腐食電流密度が低く、式(4)の分母が小さいためであり、腐食はほぼ停止したと考えられる。一方、下筋の防食率は No.21 (防食) で 85.2%、No.22 (防食・AI 有) で 99.8%と高い防食効果を示した。このことからマクロセル腐食に対して、上筋の復極量 E が 100mV 以上になるように管理することで十分な電気防食が達成でき、その効果は流電陽極有りの供試体がより大きいことも明らかになった。

4. まとめ

干満帯の乾湿の境界付近部を模擬したコンクリート供試体に対して 1.5 年間の外部電源方式による電気防食試験を行い、防食効果の検討を行った。また、棧橋下部工の鋼管杭防食のために設置した流電陽極の防食効果への影響も調べた。その結果、本研究の範囲内において以下のことが明らかとなった。

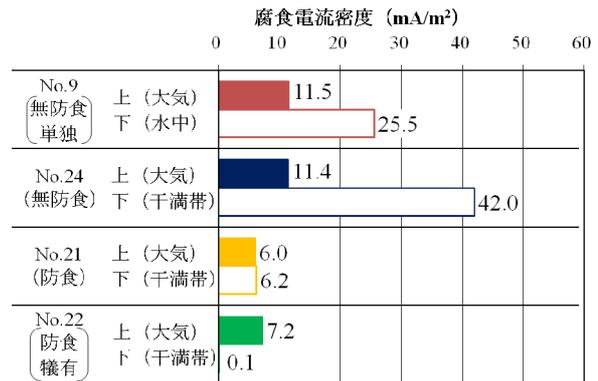


図 - 10 鉄筋の腐食電流密度 i_{cor}

- (1) 防食供試体の上筋の防食率は低かったが、これは無防食供試体の上筋の腐食電流密度が低かったためであり、腐食はほぼ停止したと考えられる。また、防食供試体の下筋に対して明確な防食効果が認められ、その効果は流電陽極有りの供試体がより大きくなった。
- (2) マクロセル無防食供試体では干満帯にある下筋の腐食電流密度は、42.0mA/m² と高かった。
- (3) 防食電流は大気中にある上筋よりも、干満帯にある下筋に多く流入し、コンクリートの含水状態 (抵抗率) に大きく依存することが分かった。
- (4) あらかじめ鉄筋を腐食させた供試体の、解体後に測定した鉄筋腐食部の pH は、防食した鉄筋では無防食の鉄筋に比べ高くなっていった。また、下筋近傍コンクリートの塩化物イオン濃度は防食供試体の方が無防食供試体よりも 1.5kg/m³ 以上低くなった。このことから防食電流によって鉄筋近傍の環境が改善され、鉄筋が再不動態化されたと考えられる。

謝辞：本研究実施にあたり、早稲田大学社会環境工学科の久村氏、猪俣氏、瀬戸口氏、日本防蝕工業 (株) の竹子氏に多大なるご協力を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 山本 悟, 川岡岳晴, 田代賢吉: 電気防食新工法のコンクリート実構造物への適用, 材料, Vol.55, No.11, pp.1016-1020, 2006.11
- 2) 堀口賢一, 丸屋 剛, 武若耕司: 自然電位連続モニタリングによる発錆時期推定手法の検討と腐食発生限界塩化物イオン濃度の測定, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1007-1012, 2006.7
- 3) 三浦 誠: モルタル中の鉄筋腐食における自然電位振動の基礎的検討, 教育実践ジャーナル, Vol.25, No.3, pp84-87, 2010.9