

論文 腐食状態の異なるコンクリート中鋼材への電気防食に関する実験的研究

青山 敏幸*1・實盛 明日香*2・山本 悟*3・関 博*4

要旨：鋼材の腐食状態が大きく異なる構造物に電気防食を適用した場合の防食効果や防食電流の分配を検討することを目的に、腐食部・非腐食部の面積比、暴露環境をパラメータとした供試体に通電試験を実施した。鋼材表面積あたりに流入する防食電流は、腐食部の鋼材面積が非腐食部の鋼材面積に対して小さくなるほど、腐食部の鋼材により多く流れる傾向を示した。通電終了後の腐食重量減の結果からも同様に、腐食部の鋼材面積が非腐食部の鋼材面積に対して小さくなるほど防食効果が見られた。

キーワード：電気防食, 防食電流密度, 暴露環境

1. はじめに

コンクリート構造物の腐食対策工法のひとつに電気防食工法がある。本工法は、コンクリート内部あるいは表面に配置した陽極材からコンクリート中の鋼材に微弱電流を印加することにより、鋼材腐食を抑制する電気化学的手法である。2001年には、土木学会から「電気化学的防食工法設計・施工指針」¹⁾ (以下, “指針”と称す) が発刊され、本工法の施工実績も増加している。

外部電源方式による電気防食工法を適用する際に重要なことは、防食期間を通して鋼材の防食に必要な電流を流すことができるように陽極材を配置することである。陽極をより経済的に配置するためには、設計の段階で構造物の状況に応じた防食電流密度を正確に設定することが望まれる。しかし、防食電流密度はコンクリート中の鋼材量、塩化物イオン濃度、環境条件等によって異なるため、指針¹⁾ではコンクリート表面積あたりで通常1~30mA/m²程度であるとの記述に留まっている。

そこで、本研究ではコンクリート中の塩化物イオン濃度が大きく異なる非腐食部と腐食部を設けた供試体に電気防食を適用し、鋼材の電位および非腐食部と腐食部の各々の鋼材に流入する防食電流密度の測定を実施した。これらの結果を基に、防食効果や防食電流の分配を確認することを目的とした。

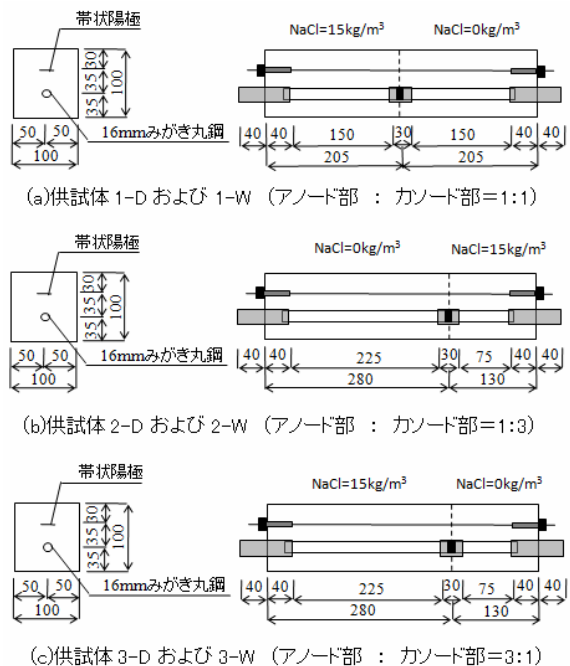
2. 実験概要

2.1 供試体概要

(1) 形状・寸法

供試体の形状および寸法を図-1に示す。供試体は100×100×410mmの形状を有し、塩化物混入部(本文では、“アノード部”と称する)と塩化物無混入部(本文では、

“カソード部”と称する)に分かれている。本文では、前者に配置した鋼材を“アノード鋼材”，後者に配置した鋼材を“カソード鋼材”と記すこととする。鋼材は直径16mmのみがき丸鋼を、陽極は幅20mm、厚さ0.5mmの線状陽極を用い、図-1に示す位置に配置した。鋼材は非腐食部と腐食部の間で切断している。鋼材、陽極材のそれぞれ両端部には塩ビパイプならびに絶縁テープにより絶縁処理を行った。供試体作製は塩化物無混入のコンクリートを先に打設し、コンクリート硬化後に目荒



(単位:mm)

図-1 供試体の形状および寸法

*1 (株)ピーエス三菱 技術本部 技術部 開発メンテナンスグループ 修士(工学) (正会員)

*2 早稲田大学大学院創造理工学研究科

*3 (株)日本防蝕工業 技術研究部

*4 早稲田大学理工学術院社会環境工学科 工博 (正会員)

らしを行い、その後、塩化物を混入したコンクリートを打設した。

(2) 実験の要因と水準

供試体番号と実験の要因と水準を表-1に示す。

実験のパラメータは、アノード鋼材とカソード鋼材の面積比、供試体の暴露環境とした。

アノード鋼材とカソード鋼材の面積比は、1:1, 1:3, 3:1の3種類とした。暴露環境は、乾燥環境(D)と湿潤環境(W)の2種類とした。

各供試体への通電電流密度は、通電開始時に実施したE-logi試験により、アノード鋼材が100mV以上の分極量が得られる電流密度(鋼材表面積に対して30mA/m²)とし、通電期間中は同一電流密度で通電した。

(3) 使用材料

コンクリートの配合を表-2に示す。

供試体は、普通ポルトランドセメントを使用し、水セメント比は53%、スランプ値は12±2cmとした。混和剤は、AE減水剤(主成分:リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体)とAE助剤(主成分:変性アルキルカルボン酸化合物系陰イオン界面活性剤)を使用した。アノード部のコンクリート中の塩化物は、表-1に示す所定の塩化物量になるように、練混ぜ水にNaClを混入することにより調整した。また、陽極には酸化被膜を施したチタン系陽極材料を使用し、鋼材には直径16mmのみがき丸鋼を使用した。

2.2 実験方法

(1) 腐食促進方法

供試体のアノード鋼材は、電食により強制的に腐食させた。腐食の程度は、かぶりコンクリートにひび割れが生じない範囲で腐食させるため、既往の研究²⁾を参考に積算電流量を10.2mA・h/cm²に設定し、4mA(鋼材表面積に対しての電流密度を0.053mA/cm²)で8日間の通電を行った。

(2) 暴露方法

供試体の暴露方法を図-2に示す。乾燥環境、湿潤環境とも20℃の実験室内環境とし、乾燥環境は相対湿度約60%、湿潤環境は水を浸した容器の上に供試体を水面に接さない高さに置き、密閉することにより、相対湿度90%以上を保持する環境とした。

(3) 通電方法

供試体の通電方法の概略を図-3に示す。アノード鋼材とカソード鋼材の面積比が同一の供試体2体を直列に接続して通電した。

(4) 通電期間中の測定項目

測定項目は、インスタントオフ電位、電流分配量、マクロセル電流量、コンクリート比抵抗および実験終了後

表-1 供試体番号と実験の要因と水準

供試体名	アノード部 NaCl (kg/m ³)	面積比		暴露環境
		アノード鋼材 : カソード鋼材 A : C		
1-D	15	A : C = 1 : 1		乾燥(D)
1-W				湿潤(W)
2-D		A : C = 1 : 3		乾燥(D)
2-W				湿潤(W)
3-D		A : C = 3 : 1		乾燥(D)
3-W				湿潤(W)

表-2 コンクリートの配合

W/C (%)	Air (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
			W	C	S	G	Ad
53	4.5	48	170	321	859	941	1.78

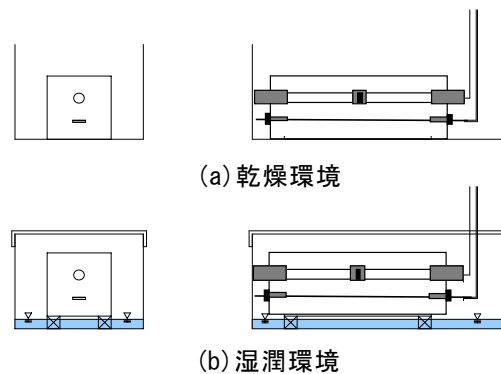


図-2 暴露方法

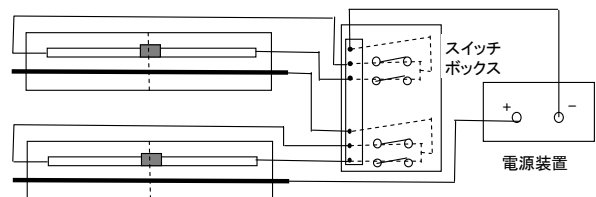


図-3 通電方法の概略

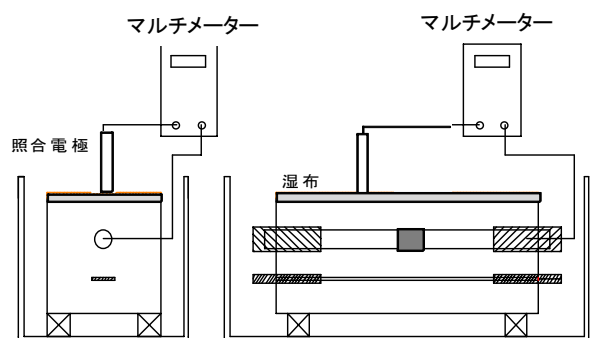


図-4 鋼材電位の測定方法

に取り出した鋼材についての鋼材腐食量とした。鋼材電位は、図-4 に示すように電位測定前に測定面を湿布した後に照合電極(銀塩化銀電極)を湿布にあて、マルチメーターにて測定した。電流量は、図-5 に示すようにスイッチボックスの端子両端部にマルチメーターを取り付け測定を行った。

コンクリートの比抵抗は、防食電流を遮断して 24 時間経過後に、交流インピーダンス法により測定した。マクロセル電流も、防食電流を遮断して 24 時間経過後に、無抵抗電流計を用いてアノード鋼材とカソード鋼材の間に流れる電流を測定した。

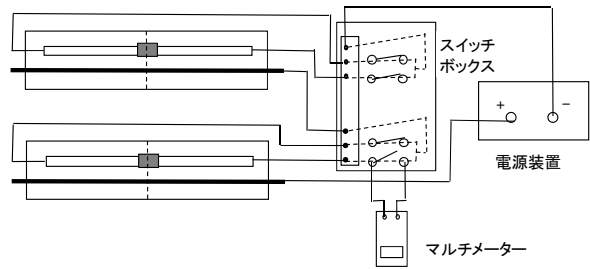


図-5 電流量の測定方法

3. 実験結果と考察

3.1 インスタントオフ電位の経時変化

インスタントオフ電位の経時変化を図-6 に示す。

乾燥環境では通電期間を通して大きな変化はないが、湿潤環境では、通電 150 日以降の 2-W-A の鋼材において電位が大きく卑に変化した。水素発生のおそれがあるために、湿潤環境の供試体の通電を一時停止し、2-W-A の鋼材の自然電位が -600 mV vs. Ag/AgCl まで貴になった後に、通電を再開した。しかし、再び 2-W-A の鋼材のインスタントオフ電位が大きく卑に変化してしまった。これは、2-W の供試体容器中の水位が高くなりすぎており、供試体と水面が接することで 2-W の供試体だけが、激しい湿潤環境におかれていたためと考えられる。通電 393 日目に 2-W の供試体の水位を供試体と水面が接さないように調整した。通電 400 日頃から 2-W-A の鋼材のインスタントオフ電位が徐々に貴に変化したのは、この調整を行ったためであると考えられる。

また、同一供試体中のアノード鋼材とカソード鋼材のインスタントオフ電位についてみると、2-W を除いて、アノード鋼材よりもカソード鋼材のインスタントオフ電位の方が卑になった。また、通電中の鋼材電位（オン電位）もアノード鋼材よりも卑な電位であった。これは、各鋼材の E-logi 試験において、アノード鋼材よりもカソード鋼材の方が小さな電流量で分極しやすい傾向を示したことと関係すると考えられる。

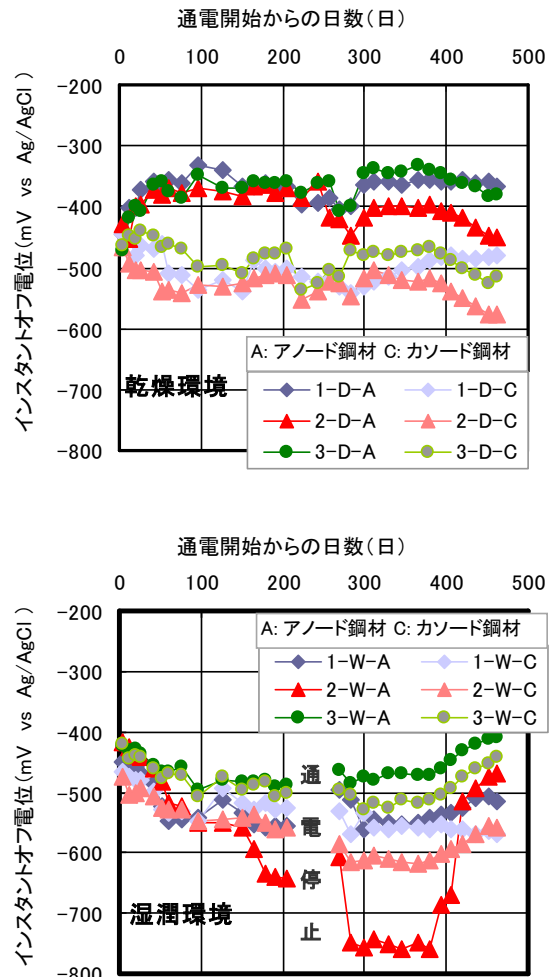


図-6 インスタントオフ電位の経時変化

3.2 マクロセル電流量の経時変化

マクロセル電流量の経時変化を図-7 に、コンクリート比抵抗の経時変化を図-8 に示す。図-7 のマクロセル電流量を各供試体のアノード鋼材面積当たりの電流密度に換算すると、マクロセル電流量 $1\mu\text{A}$ に対して 1-D および 1-W は $0.13\text{mA}/\text{m}^2$ 、2-D および 2-W は $0.27\text{mA}/\text{m}^2$ 、3-D および 3-W は $0.09\text{mA}/\text{m}^2$ である。

乾燥環境では、通電開始と共にすぐにマクロセル電流量が減少し、ほぼ 0 に近い値となった。これは、アノー

ド部のコンクリート比抵抗が大きく、マクロセル電流が流れにくい環境下にあったためと考えられる。また、アノード鋼材とカソード鋼材の面積比の相違によるマクロセル電流量の相違は見られなかった。

湿潤環境では、2-W の供試体の通電停止前の期間を除けば、通電期間の経過と共に徐々にではあるがマクロセル電流量が減少する傾向が見られた。アノード鋼材とカソード鋼材の面積比の相違についてみると、アノード部面積がカソード部面積に対して小さくなるほどマクロセル電流量は大きくなる傾向を示した。なお、2-W の供

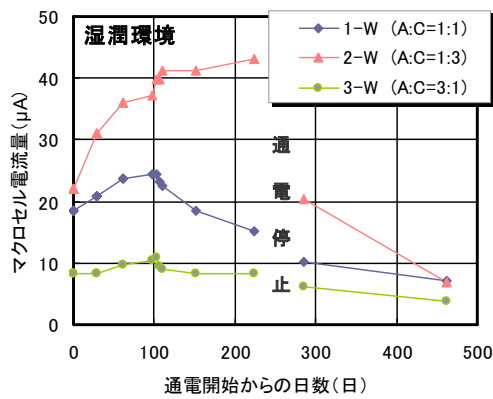
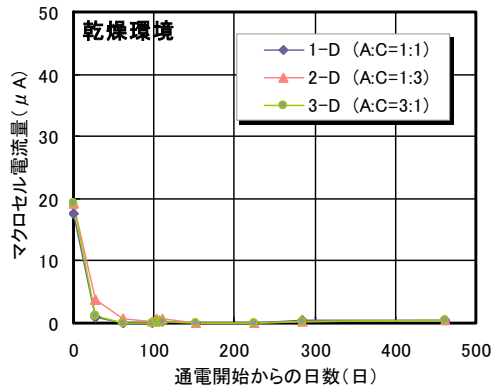


図-7 マクロセル電流量の経時変化

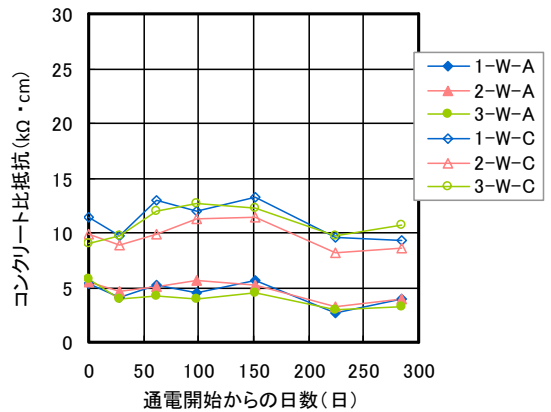
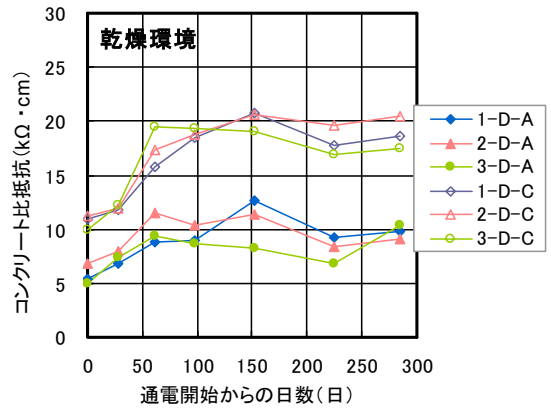


図-8 コンクリート比抵抗の経時変化

試体は前述したように高い湿潤の環境にさらされていたため、コンクリート比抵抗が部分的に減少し、マクロセル電流が流れやすい環境下であったと考えられる。

また、図-8 に示すようにコンクリート比抵抗は、カソード部よりもアノード部の方が小さな値となった。これは、アノード部では塩化物が混入されていることによると見られる。

3.3 アノード鋼材への防食電流分配の経時変化

アノード鋼材への防食電流の流入率と鋼材面積当たりの流入電流密度の経時変化をそれぞれ図-9、図-10 に示す。

図-9 より、乾燥環境および湿潤環境の両環境でアノード鋼材への防食電流の流入率は、アノード部の面積が大きいほど大きくなる傾向を示した。

鋼材面積当たりの流入電流密度の経時変化については図-10 に示した。本図によると、乾燥環境では時間の経過と共にアノード鋼材への防食電流流入密度が減少し、通電開始から 300 日頃になるとほぼ一定となった。また、アノード鋼材とカソード鋼材の面積比の相違について見ると、アノード鋼材面積がカソード鋼材面積に対して小さくなるほどアノード鋼材への防食電流密度が大きくなる傾向を示した。一方、湿潤環境では、2-W の

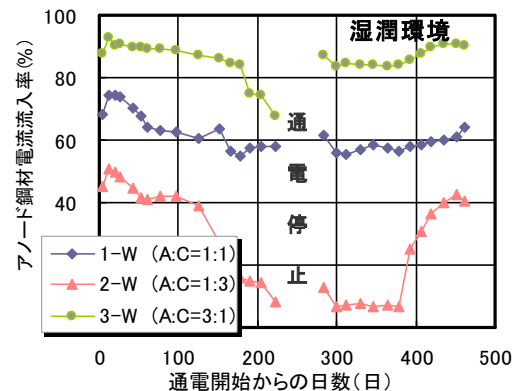
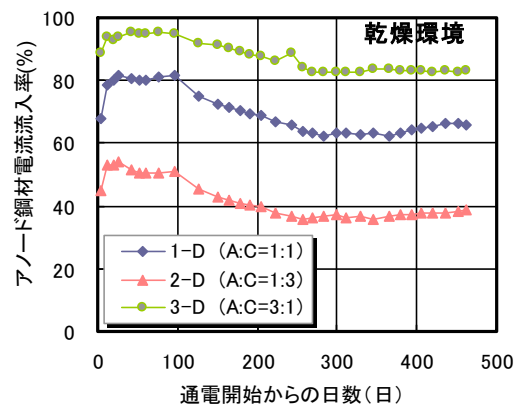


図-9 アノード鋼材への防食電流流入率の経時変化

供試体が通電開始 300 日頃まで大きく減少し、水位調整日（通電開始から 393 日）以降では、大きく増加した。水位調整後の時期において、アノード鋼材とカソード鋼材の面積比の相違について見ると、乾燥環境と同様に、アノード鋼材面積がカソード鋼材面積に対して小さくなるほどアノード鋼材により多くの電流量が流れる傾向を示した。

3.4 通電終了後の腐食面積率と腐食重量減

防食効果について検討するために、通電終了後の腐食面積率と腐食重量減をそれぞれ図-11、図-12 に示す。

図-11 よりアノード鋼材とカソード鋼材の面積比の相違に依らず、乾燥環境よりも湿潤環境の供試体の方が、腐食面積率が高くなった。また、腐食重量減は図-12 より、アノード鋼材とカソード鋼材の面積比の同じ供試体において、乾燥環境よりも湿潤環境の供試体の方が大きくなった。一方、アノード鋼材とカソード鋼材面積比の異なる供試体においては、2-W の供試体を除いて、アノード鋼材面積がカソード鋼材面積に対して大きくなるほど、腐食減量も大きくなる傾向が見られた。これは、前節のアノード鋼材への防食電流流入密度の大小関係と防食効果が一致する結果となった。ただし、2-W の供試体は、通電初期において鋼材表面積あたりに流入する防食電流は大きかったが、マクロセル電流量も他の供試体に比べて大きく、アノード鋼材の腐食が生じやすい環境であったこと、前述したようにアノード鋼材に流入する防食電流が一時大きく減少したこと等の理由から、2-W の腐食重量減が 1-W に対して若干大きくなったものと考えられる。

これから、湿潤環境よりも乾燥環境の方が防食効果が高く、アノード部の鋼材面積がカソード部の鋼材面積に対して小さくなるマクロセル腐食環境下においても防食効果があるものと考えられる。

4. まとめ

鋼材の腐食状態が大きく異なる構造物に電気防食を適用した場合の防食効果や防食電流の分配を検討することを目的に、腐食部・非腐食部の面積比、暴露環境をパラメータとした供試体に通電試験を実施した。

以下に、本研究の範囲内で得られた結論を示す。

- (1) 同一供試体中のアノード鋼材とカソード鋼材のインスタントオフ電位は、アノード鋼材よりもカソード鋼材の方が卑になった。
- (2) 乾燥環境よりも湿潤環境の方が、マクロセル電流量が大きく、湿潤環境ではアノード鋼材面積がカソード鋼材面積に対して小さくなるほどマクロセル電流量は大きくなる傾向を示した。

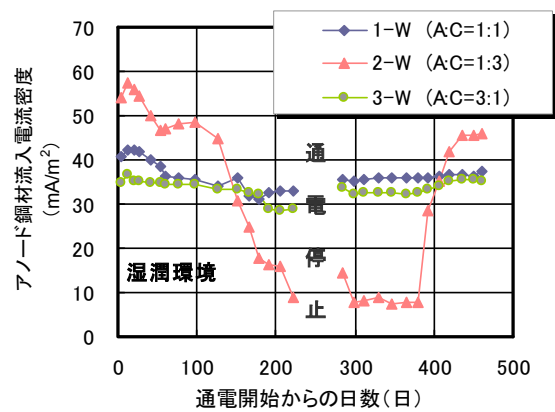
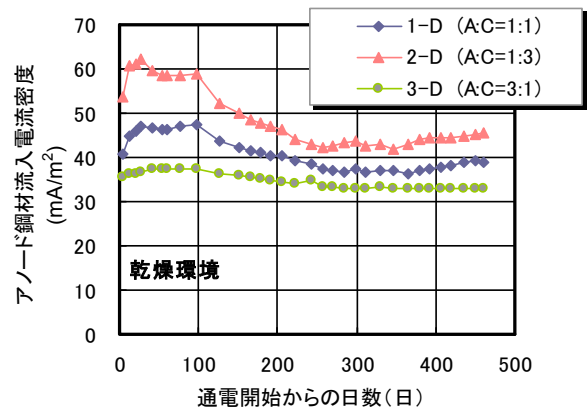


図-10 アノード鋼材への防食電流密度の経時変化

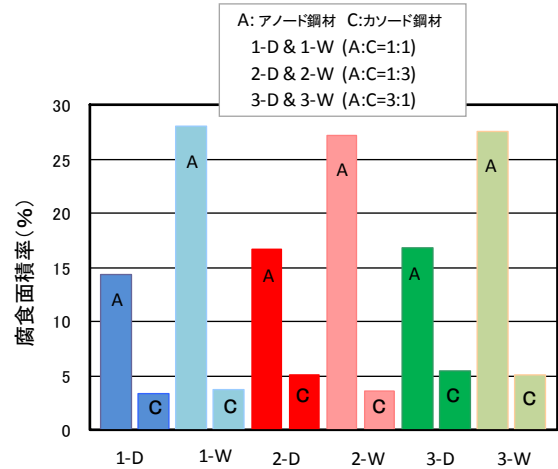


図-11 通電終了後の腐食面積率

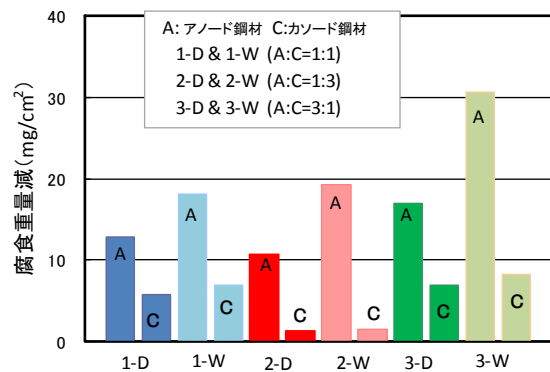


図-12 通電終了後の腐食重量減

- (3) 防食電流は、アノード鋼材面積がカソード鋼材面積に対して小さくなるほどアノード鋼材により多く流れる傾向を示した。
- (4) 通電終了後の腐食重量減は、アノード鋼材面積がカソード鋼材面積に対して小さくなるほど、小さくなる傾向が見られた。これは、アノード鋼材への防食電流流入密度の大小関係と防食効果が一致する結果となった。

5. あとがき

湿潤状態が大きく変化する暴露環境では、各鋼材に流入する防食電流の割合も大きく変化した。湿潤程度の変化する環境下での電気防食は電位が変動しやすく、今後の研究が必要とされる。

謝辞：本実験の遂行にあたり、石井浩司氏（(株)ピーエス三菱）には多大の御助力を頂いた。また、測定機器などに関して横田優氏にアドバイスいただいた。ここに記して感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 土木学会 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），2001.11
- 2) 細田喜子，石井浩司，田代賢吉，関 博：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，コンクリート工学年次論文報告集 Vol.30, No.1, pp.1155-918, 2008.7