論文 塩化物濃度の異なるコンクリート部材における陽極材配置が防食電流の分配に及ぼす影響に関する実験的研究

石井 浩司*1·實盛 明日香*2·半司 淳弥*3·山本 悟*4

要旨:コンクリート中の塩化物濃度が大きく異なる構造物に電気防食を適用した場合を想定し,防食効果や防食電流分配を検討することを目的に通電試験を実施した。鋼材を供試体中の塩化物濃度の異なる位置にそれぞれ配筋し,陽極材を2箇所に配置した。塩化物混入部に配置した鋼材に近い位置に陽極材を設置した場合,防食電流密度が変化しても陽極材に近い鋼材に大きな割合で防食電流量が流入した。一方,塩化物無混入部に配置した鋼材に近い位置に陽極材を設置した場合,塩化物濃度の異なる位置に配置したそれぞれの鋼材に流入する防食電流量の割合は,防食電流密度によって大きく変化した。

キーワード:電気防食,防食電流密度,陽極位置

1. はじめに

コンクリート構造物の劣化が報告されてから久しいが、劣化の主な原因の一つは内部に配置されている鉄筋の腐食である。鉄筋を腐食させる要因として塩害、中性化などが挙げられているが、鉄筋の腐食を防止ないし抑制する有力な対策として"電気防食工法"が検討ないし適用されてきた。すでに、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(案)」1)(以下、"指針"と称する)が発刊され、本工法の実績も増加している

電気防食工法には,外部電極方式および流電陽極方式があるが,現状で多用されているのは印加電流や印加電圧の制御の容易な前者である。外部電極方式により内部鋼材を防食するためには,防食電流の量,陽極材の配置,などを適切に定める必要があるが,一方では,コンクリート中の鋼材量,鋼材の配置位置,コンクリートの品質,コンクリート中の腐食因子(たとえば,塩化物量),構造物の設置されている環境の条件などによってもその効果は相違すると考えられる。しかし,すべての要因を含んで定量的に電気防食工法を提示するには至っていない。たとえば,防食電流密度を取り上げても,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。

潮風や波しぶきに曝される海岸や港湾の構造物では, 塩害による鉄筋腐食がたびたび報告され,電気防食による対策もなされている。これらの施設では,塩化物はコンクリート部材表面から浸透するため,塩化物濃度はコンクリート表層から内部にいくにしたがって減少する ことになる。鉄筋は部材表面に近い箇所での腐食が憂慮 され,電気防食を適用するときの陽極材はコンクリート 部材表面に設置することになる。

一方,塩害による鉄筋腐食としては環境条件によって は"融雪剤"(ないし"凍結防止剤")も原因となること も多い。特に,寒冷地などでは路面上での結氷防止や融 雪のために冬季に多量の塩化ナトリウムや塩化カルシ ウムが散布されている。既設の建設時期の古い道路橋床 版などでは必ずしも上面アスファルト舗装と下層のコ ンクリート床版に防水工が設置されていないものもあ り,上面に"融雪剤"が散布されるとアスファルト舗 装に接したコンクリート上層部分の塩化物量は大気に 接した下層部分の塩化物量よりも大きな蓄積量となる。 このような構造物でも,電気防食を適用するために経済 性や施工性からは,陽極材を塩化物濃度の低いコンクリ ート床版下面に設置するのが望ましいと考えられる。塩 化物濃度の分布に対して陽極材を低い濃度の部分に配 置せざるを得ない構造物などでは通電方法に関する研 究例は少なく,防食効果などについては不明の点が多い。

そこで、本研究ではコンクリートの塩化物濃度が大きく異なる部分で構成される供試体に電気防食を適用することを試みた。それぞれの塩化物を有する部分に鋼材を配置し、陽極材を塩化物濃度の高い部分あるいは低い部分に配置して、各鋼材電位および各鋼材に流入する防食電流量のモニタリングを行った。その結果を基に、防食効果や防食電流の分配を検討することとした。また、電気化学測定結果を使って有限要素法により解析を行い、電流分配の実験値との比較を行った。

^{*1 (}株)ピーエス三菱 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} 早稲田大学創造理工学部社会環境工学科

^{*4 (}株)日本防蝕工業 技術研究所

2. 実験概要

2.1 供試体概要

(1) 形状・寸法

供試体の形状・寸法を図 - 1 に示す。供試体は,融雪剤を散布したコンクリート床版を想定し,試験体上半分(打上がり面)に塩化物を混入し下半分(底面)には塩化物を混入しない,塩化物濃度分布のある二段配筋の試験体とした。

鋼材には直径 16mm のみがき丸鋼を使用し,陽極材には幅 20mm,厚さ 0.5mm の線状陽極を用い図 - 1 に示すように上段および下段に配置した。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。供試体作製に当たっては,塩化物無混入部分のコンクリートを先に打設し,コンクリート硬化後に端面に目荒らしを行い,塩化物を混入したコンクリートを打設した。

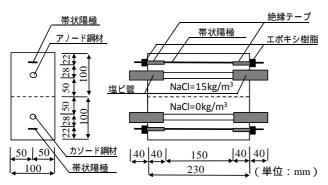


図 - 1 供試体の形状・寸法

(2) 種類

供試体の種類を表 - 1 に示す。供試体のパラメータは通電方法であり,通電方法の概略を図 - 2 に示す。通電方法 は塩化物無混入部(本文では"カソード部"と称する)から塩化物混入部(本文では"アノード部"と称する)に電流を通電させる方法(陽極を使用)であり,通電方法 は塩化物混入部(アノード部)から塩化物無混入部(カソード部)に電流を通電させる方法(陽極を使用)である。また,本文ではアノード部に配置された鋼材を"アノード鋼材"、カソード部に配置された鋼材を"カソード鋼材"と称することとした。

表 - 1 供試体の種類

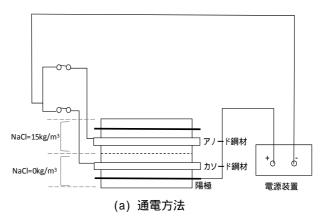
供試体名	NaCl (通電方法			
供訊体台	アノード部	カソード部	迪电 万広		
-1		0			
-2					
-3	15				
-1					
-2					

(3) 使用材料

コンクリートの配合を表 - 2 に示す。普通ポルトランドセメントを使用し、コンクリートの W/C は 53%であり、スランプは 12±2 c mとした。細骨材には甲州産砕砂(密度 2.62g/cm³,吸水率 2.75%)を、粗骨材には鹿沼産砕石(密度 2.65g/cm³,吸水率 0.51%,最大寸法 20mm)を使用した。また、混和剤は AE 減水剤と、AE 助剤を使用した。コンクリート中の塩化物イオンは、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。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。

(4) 製作から通電開始まで

供試体を打設し,6 日後に脱型した。その後は気温約20 ,相対湿度 60%の環境にて静置し,ほぼ 11 ヵ月後に通電を開始した。



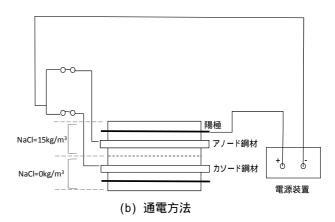


図 - 2 通電方法

表 - 2 コンクリートの配合

W/C	Air	s/a	単位量 (kg/m³)						
(%)	(%)	(%)	W	C	S	G	Ad		
53	4.5	48	170	321	859	941	1.78		

2.2 実験方法

(1) 暴露方法

実験室内で 20 相対湿度約 60%を保持する環境で供 試体を暴露した。

(2) 通電方法

供試体の通電方法の概略を図 - 2 に示す。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(塩化物混入部分の鋼材)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 3mA/m²)とし,通電期間中は同一電流密度で通電した。通電期間は3ヶ月である。

(3) 通電期間中の測定項目

通電期間中は,2週間に1度の頻度でインスタントオフ電位および防食電流分配量を測定し,1ヶ月に1度の頻度で復極試験(24時間),E-logi試験,マクロセル電流量およびコンクリートの比抵抗の測定を行った。

鋼材電位は,図-3に示すように供試体側面を測定面とし,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,マルチメーターにより測定した。

電流量は,図-4に示すように通電回路内にマルチメーターを取り付け測定した。また,通電終了後に供試体を破壊し鋼材を取り出して,鋼材の腐食重量などを測定した。

コンクリート比抵抗は鋼材の電位測定方法と同様に,供試体側面を測定面とし,防食電流を遮断して交流インピーダンス法により測定した。

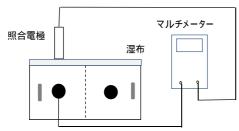


図 - 3 鋼材電位の測定方法

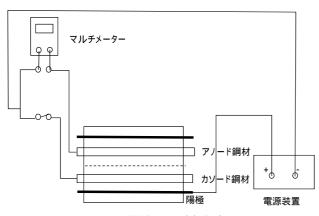


図 - 4 電流量の測定方法

3. 実験結果と考察

3.1 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 - 5 に示す。

すべての供試体において,マクロセル電流量は非常に 小さく,通電日数が経過しても大きな変化は見られなかった。ここから,上下の鋼材間でマクロセル腐食の影響 は小さいと考えられる。

3.2 防食電流分配率の経時変化

各鋼材に流入する防食電流の分配率の経時変化を図 - 6 に示す。

通電方法 の供試体では、陽極に近いアノード鋼材に 90%以上の防食電流が流入し、陽極から遠いカソード鋼材に流入する電流量は 10%以下となった。これは、鋼材が多段配筋された構造物に電気防食を適用した場合、陽極に近い鋼材に多くの防食電流が流入し、陽極から遠い鋼材に流入する防食電流量は小さくなるという既往の研究 2)と一致する結果となった。一方、通電方法 の供試体では、通電方法 の供試体の結果と異なりアノード鋼材とカソード鋼材にほぼ同程度の割合で防食電流が流入した。通電方法 と の結果から、防食電流分配率は陽極と鋼材間の距離だけではなく、鋼材の腐食程度にも関係していることが考えられる。

3.3 復極量の経時変化

復極量の経時変化を図 - 7 に示す。

全ての鋼材で 100mV 以上の復極量を満たしており, 通電日数の経過と共に復極量が増加する傾向が見られた。通電方法の相違についてみると,通電方法 ではア ノード鋼材よりもカソード鋼材の復極量が大きくなった。一方,通電方法 ではその逆の傾向が見られ,陽極 に近い鋼材の復極量が大きくなっていることが分かる。

この結果は電流分配率が影響していると考えられる。 図 - 6 を見ると,まず通電方法 では両鋼材に同程度の 防食電流が流入しているが,アノード鋼材は分極しにく いためにカソード鋼材に比してアノード鋼材の復極量 が小さくなったと考えられる。一方,通電方法 ではア ノード鋼材に90%以上の防食電流が流入したため,アノ ード鋼材の復極量が大きくなったと考えられる。

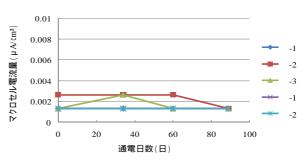
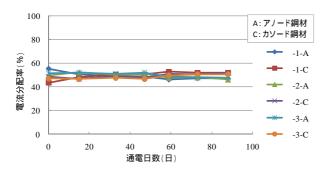
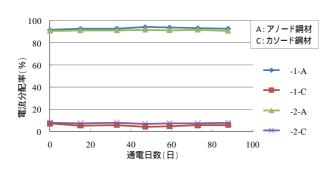


図 - 5 マクロセル電流量の経時変化

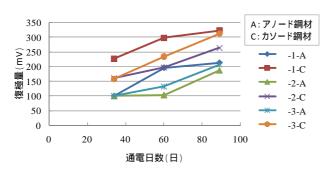


(a) 通電方法

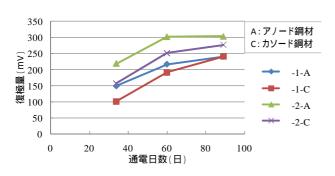


(b) 通電方法

図 - 6 電流分配率の経時変化



(a) 通電方法



(b) 通電方法

図 - 7 復極量の経時変化

3.4 通電電流密度の大きさと電流分配率の関係

E-logi 試験において 0.1mA/m^2 , 0.2mA/m^2 , 0.5mA/m^2 , 1mA/m^2 , 2mA/m^2 , 3mA/m^2 , 5mA/m^2 , 10mA/m^2 , 20mA/m^2 の各電流密度に対するインスタントオフ電位と共に , 各鋼材に流入する電流分配量も測定した。通電方法 の供試体 3 体と通電方法 の供試体 2 体はそれぞれ同様の傾向を示し , 通電日数の経過に伴う大きな変化も見られなかった。 -2 と -2 の通電 3 ヶ月後の結果を図 -8 に示す。

通電方法 における電流分配率は,通電電流密度の大きさによって大きく変化した。通電電流密度の小さい時には陽極から遠いアノード鋼材に多く流入するが,通電電流密度が大きくなると,陽極から近いカソード鋼材に多く流入した。本試験の通電電流密度である 3mA/m²では,アノード鋼材もカソード鋼材も共に約50%の値となった。これは前節の電流分配率の結果とも一致した。一方,通電方法 における電流分配率は通電電流密度の大きさによらず,陽極から近いアノード鋼材に90%以上の割合で流入した。これも前節の電流分配率の結果と一致した。

このような結果が得られた理由は,陽極材から鋼材までの距離,鋼材の腐食程度,コンクリート中の塩化物量などの多くの要因が電流分配率に影響すると考えられ,今回の課題と思われる。

3.5 電流分配率の実験値と解析値の比較

E-logi 試験の測定で得られたカソード分極曲線,コンクリート比抵抗の測定結果を使用して,文献 3) にしたがって各鋼材に流入する電流分配率の解析を実施した。解析は図-9に示す3次元モデルで行い,電流・電位分布を導体の定常電流場の問題として解く市販の有限要素プログラムを用いた。アノード鋼材およびカソード鋼材の通電終了後の分極曲線は通電方法 および に分けて図-10に示す。それぞれの値を直線(片対数)近似して次式を使用した。

(a) 通電方法

アノード鋼材
$$E = -0.3832\log I - 1.3401$$
 (1)

(b) 通電方法

但し, E:鋼材電位(V vs Ag/AgCl)

1:通電電流密度(A/m²)

なお,コンクリートの比抵抗は以下の通電終了後に得られた値の平均値を用いた。

カソード部:70.2 k ・cm

アノード部:41.6 k ・cm

実験値と解析値の比較を図 - 11 に示す。

通電電流密度の大きさによる電流分配率の変化は,実験と解析とでほぼ同様の傾向を示した。

3.6 通電終了後の腐食重量減

通電終了後の腐食重量減を図 - 12 に示す。

アノード鋼材とカソード鋼材を比較すると,アノード 鋼材の腐食重量減が大きな値となっている。

通電方法の相違によるカソード鋼材の腐食重量減に 大きな違いは見られないが,アノード鋼材の腐食重量減についてみると,通電方法 よりも通電方法 の方が小さな値となった。これは,アノード鋼材への防食電流分配率の大小関係と防食効果が一致する結果となった。

また,カソード鋼材にも通電方法によらないほぼ同等の腐食重量減が見られた。電気防食する以前にすでに腐食していた例もあることから,このような腐食が生じた理由として,供試体を製作してから通電開始までに長い時間が経過していたことが考えられる。

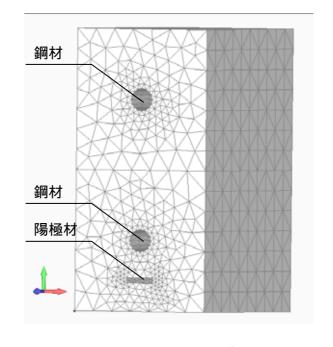
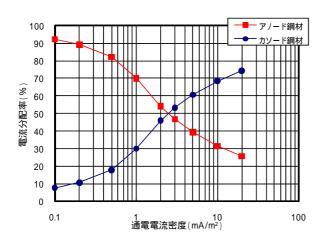


図 - 9 3 次元解析モデル



(a) 通電方法 (-2)

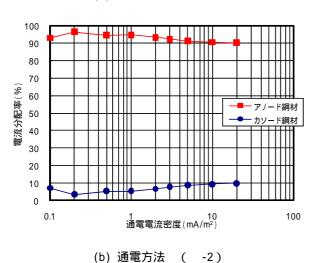
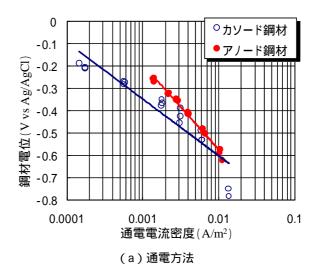
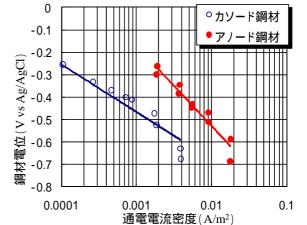


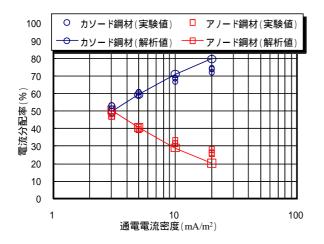
図 - 8 通電電流密度の大きさと電流分配率の関係



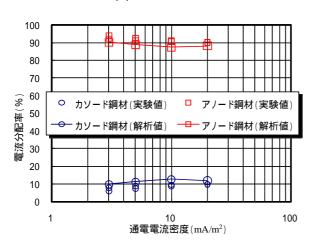


(b) 通電方法

図 - 10 通電終了後のカソード分極曲線



(a) 通電方法



(b) 通電方法

図 - 11 電流分配率の実験値と解析値の比較

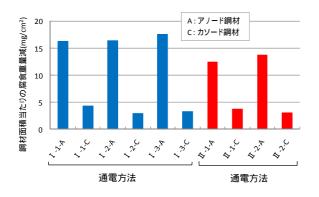


図 - 12 通電終了後の腐食重量減

4. まとめ

コンクリート中の塩化物濃度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分配を確認することを目的に,陽極材の位置が異なる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) アノード鋼材に近い位置に陽極を設置した場合,各鋼材に流入する防食電流量の割合は,アノード鋼材に90%以上,カソード鋼材に10%以下であった。また,防食電流密度が変化しても各鋼材に流入する防食電流量の割合に大きな変化は見られなかった。
- (2) カソード鋼材に近い位置に陽極を設置した場合,各鋼材に流入する防食電流量の割合は,防食電流密度によって大きく変化した。低電流密度では防食電流がアノード鋼材に多く流れ,高電流密度では防食電流がカソード鋼材に多く流れる傾向を示した。
- (3) 解析による各鋼材に流入する電流量の割合は,実験とほぼ同様の傾向を示した。
- (4) アノード鋼材の腐食重量減は、陽極をカソード鋼材 に近い位置に設置した場合と比べ、陽極をアノード 鋼材に近い位置に設置した場合の方が小さな値と なった。これは、アノード鋼材への防食電流分配率 の大小関係と防食効果が一致する結果となった。

謝辞:解析では青山敏幸氏の労を煩わした。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) 田中健一郎,望月紀保,井川一弘:コンクリート構造物に内部挿入型電極方式を適用した場合の電極配置,コンクリート工学年次論文報告集 Vol.17, No.1,pp.9139 18,1995
- 3) 青山敏幸,関博,福手勤: PC 桁への電気防食の適用に伴う PC 鋼材および陽極材の特性変化に関する実験的研究,土木学会論文集 E, Vol.65, No.4, pp.589-606, 2009.12