

論文 塩化物濃度分布のあるコンクリート床版への電気防食の適用性に関する研究

菊池 順*1・青山 敏幸*2・関 博*3

要旨：塩化物濃度分布のあるコンクリート床版に電気防食を適用し、各配筋のインスタントオフ電位および各配筋に電出入する電流分配のモニタリングを行い、防食効果を確認した。また、有限要素法を用いた解析を行い、電流分配の実験値と解析値を評価し、解析の有用性についても検討した。その結果、塩化物濃度分布のあるコンクリート床版の上下段の配筋に対して防食可能であること、またコンクリート供試体の形状や鉄筋、陽極材の配置に加え、暴露環境に応じた鋼材のカソード分極特性を設定することで、電気防食によって鉄筋に流入する電流分布を予測できる可能性があることが分かった。

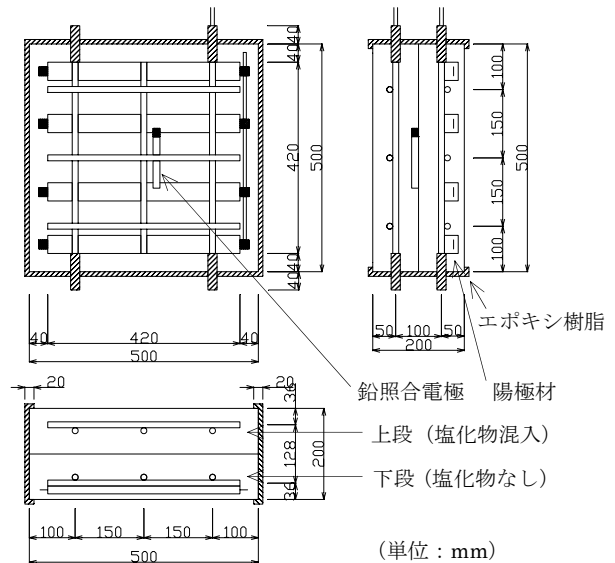
キーワード：電気防食，塩化物，自然電位，腐食，FEM 解析

1. はじめに

電気防食は塩化物イオンの浸透方向から電流を通电し、塩化物イオン含有量の多い部分の鋼材へ防食電流を通电させるのが一般的であるが、融雪剤の散布される道路橋床版などの場合には、塩化物濃度の低い床版下面から塩化物濃度の高い内部に電流を通电すれば施工性や経済性が優れている。しかし、このような通电方法に関する研究結果や施工事例は稀と思われ、防食効果や防食電流の分配など不明確な点が多い。

そこで、本研究では塩化物濃度分布のあるコンクリート床版に電気防食を適用し、各配筋のインスタントオフ電位および各配筋に流出入する電流分配のモニタリングを行い、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ものである。また、電気化学測定結果を基に有限要素法により解析を行い、電流分配の実験値と比較検討した。

融雪剤を散布され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、塩化物濃度が異なる二段配筋の試験体である。



図－1 供試体形状・寸法図

表－1 実験条件と供試体番号

試験体	塩化物量(kg/m ³)			散水
No.	0.0	2.5	5.0	
I-1	○			○
I-2		○		○
I-3			○	○
I-4			○	

2. 実験概要

2.1 供試体概要

図－1 に供試体形状・寸法を示す。供試体は、

*1 早稲田大学大学院 建設工学専攻 (正会員)

*2 株式会社ピーエス三菱 技術本部 開発技術部 (正会員)

*3 早稲田大学 理工学部社会環境工学科教授 工博 (正会員)

表-2 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	Air (%)	単 位 量 (kg/m ³)				
			W	C	S	G	SP
60	50	2	175	292	951	980	0.729

実験条件と供試体番号を表-1に示す。実験条件は、コンクリート練混ぜ時の塩化物量、散水の有無である。ここに示す塩化物量は上段のコンクリート中に含まれるもので、下段には塩化物は混入していない。

2.2 使用材料

使用したセメントは普通ポルトランドで、表-2にコンクリートの示方配合を示すようにW/Cを60%とした。塩化物は、練混ぜ水に混入させ練混ぜた。使用した鉄筋はφ13mmの磨き丸鋼（SR235）で、各段の配筋には電線を接続しており無通電時の上下の配筋間に流れる腐食電流や通電時の上下段配筋の防食電流分配を測定できるようにした。

陽極材は供試体製作の簡便性から線状陽極をモルタルで被覆して用いた。なお、照合電極として鉛照合電極を用いた。

2.3 暴露条件と通電

暴露場所は、早稲田大学理工学部校内で降雨の影響を受けない屋外とし、表-1に示すように供試体に散水した。散水は、供試体の上面に養生シートを設置し、養生シートおよび供試体表面が湿る程度に1回/日で7日間散水、養生シートを取り外し7日間乾燥の2週間/サイクルとした。

本実験では散水時を湿潤状態、乾燥時を乾燥状態とした。

供試体は平成16年6月に作製し、平成18年10月から80日間防食電流を通電した。

2.4 実験項目

実験項目は、無通電時に（1）上下配筋間に流れるマクロセル電流と（2）自然電位、通電時には（3）通電調整試験（E-logI試験）、（4）防食電流量、（5）上下配筋間に流入する分配防食電流量、（6）分極電位および（7）復極量試験とした。なお、マクロセル電流と分配防食電流量の測定には無抵抗電流計を用い、自然電位と分極

電位はコンクリート表面から可搬式照合電極を用いて測定した。

2.5 数値解析

本実験では、供試体の上半分と下半分で鉄筋のカソード分極特性、コンクリート比抵抗が異なる環境を設定しているが、このような環境でもコンクリート中の電流分布の予測ができれば、より信頼性の高い電気防食回路の設計が可能になるものと考えられる。そこで上段配筋と下段配筋に流入する電流分布の解析を実施し、その妥当性について検討することを目的とした。

解析は3次元の有限要素法とし、コンクリートをソリッド要素、鉄筋表面と陽極材表面をプレート要素として、図-1に示す供試体をモデル化した。コンクリートの比抵抗は、供試体の上段、下段でそれぞれ均一とした。境界条件として、陽極材表面、鉄筋表面の電位は、電流密度に応じて変化することを考慮して、陽極材のアノード分極曲線、鉄筋のカソード分極曲線を設定するとともに、絶縁壁（コンクリート表面）では電流が流れないものとした。

なおコンクリートの比抵抗は、交流インピーダンス法により測定し、鉄筋のカソード分極曲線は、上側配筋と下側配筋の導通を一時的に切断した状態でそれぞれ測定した。下段配筋の分極曲線はコンクリート供試体に埋設された陽極材を使用し、上段配筋のそれは埋設された陽極材と同一な配置形状のものを仮設陽極材として用いて実施した。

3. 実験結果および考察

3.1 マクロセル電流の経時変化

図-2に各試験体の上下段配筋間に流れるマクロセル電流の経時変化を示す。すべての供試体において上段配筋から下段配筋へ電流が流れていた。つまり上側配筋がアノード、下側配筋がカ

ソードとなりマクロセル電流が流れ、マクロセル腐食の形成が認められた¹⁾。

マクロセル電流は上下コンクリート中の塩化物量の差が大きいほど、また、散水した方が大きく、特に I-3 供試体のマクロセル電流量は最も大きい値となった。散水によりコンクリート中に水分が供給され鉄筋の腐食の進行が大きくなったことによると考えられる。さらに、各配筋に流入するマクロセル電流は暴露期間と共に減少する傾向を示していた。これは環境温度の低下に伴い腐食反応速度が小さくなることに起因していると考えられる²⁾。

3.2 自然電位の経時変化

図-3 に埋め込み照合電極を用いて測定した各試験体の自然電位の経時変化を示す。塩化物量が多い試験体中の配筋ほど自然電位は卑となり、特に I-3 (塩化物量 5.0kg/m^3 、散水あり) 供試体の自然電位は $-275\text{mV}(\text{vs SCE})$ より卑な値を示している。このことから I-3 供試体の配筋は腐食が開始している可能性があるとして推定さ

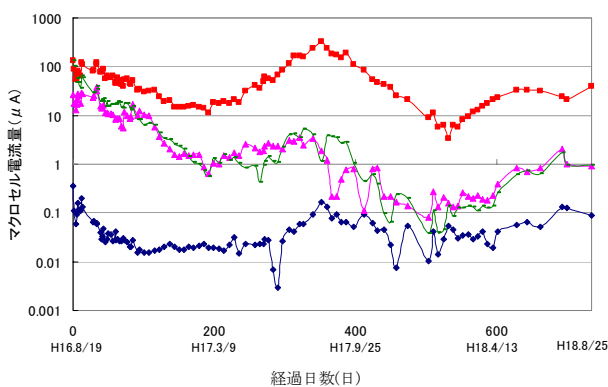


図-2 マクロセル電流量の経時変化

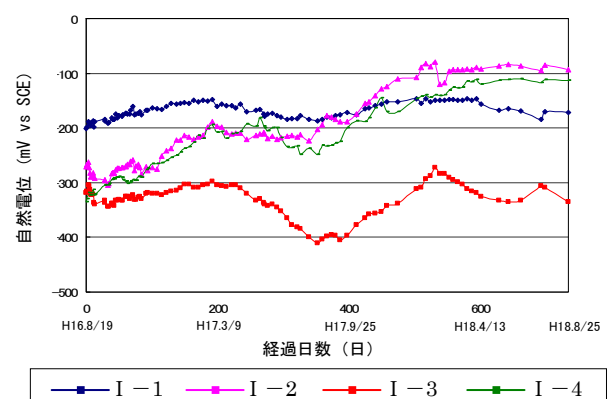


図-3 自然電位の経時変化

れた³⁾。

3.3 防食電流量

E-logI 試験では、陽極材から上段配筋および下段配筋に様々な大きさの電流を通电し、通电開始から 5 分後の各配筋の電位をそれぞれ測定し、各供試体の上段配筋および下段配筋の電位がともに自然電位から 100mV 以上シフトしたときの電流密度を防食電流密度と決定した。図-4 に各配筋の E-logI 試験結果を示す。これらの結果から各供試体の防食電流密度を決定し、表-3 に示す。防食電流密度はコンクリート表面積あたりの電流密度である。塩化物量差が多く、水分が供給されている (マクロセル腐食環境の厳しい) 供試体には大きな防食電流が必要となる傾向にあった。

3.4 分極電位

図-5 に各配筋のインスタントオフ電位の経

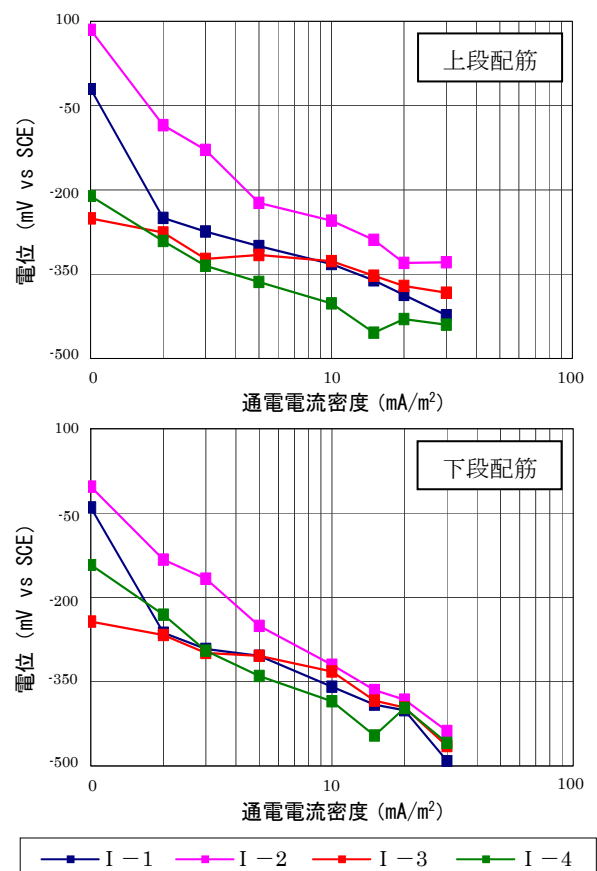


図-4 上段および下段配筋の E-logI 試験結果

表-3 各供試体の防食電流密度

試験体No.	I-1	I-2	I-3	I-4
防食電流密度 (mA/m^2)	2	2	40	3

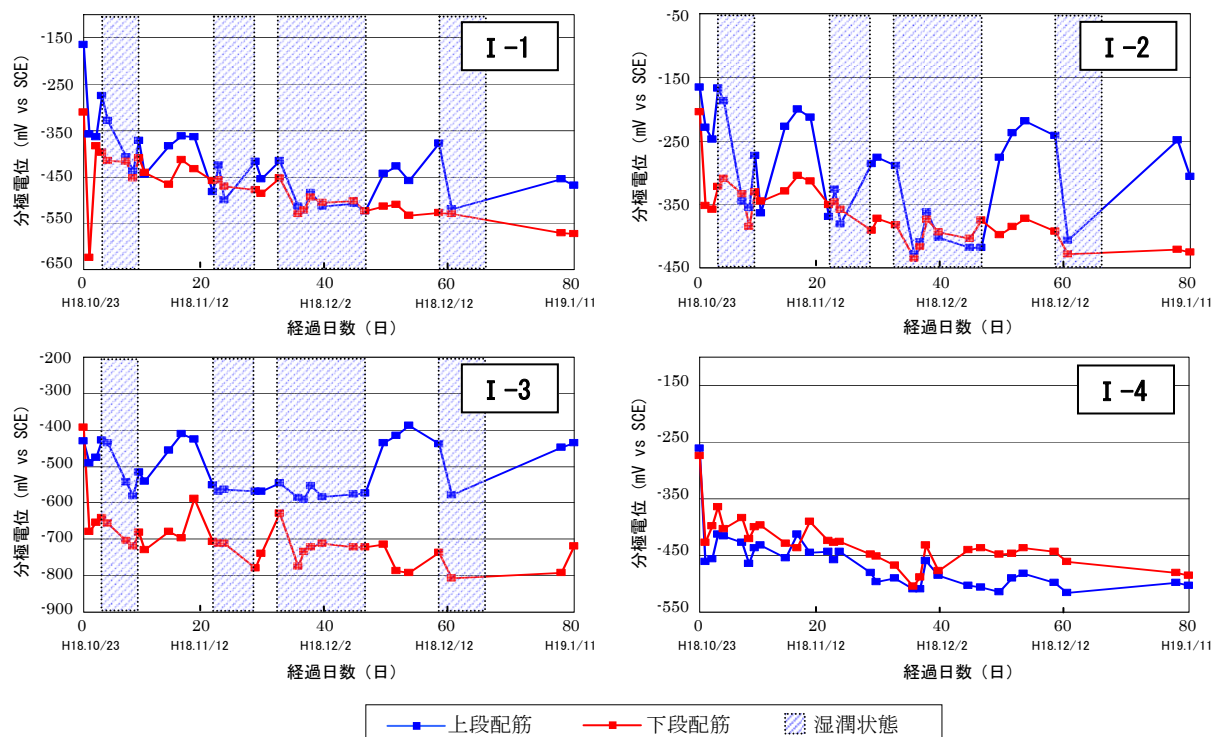


図-5 各配筋の分極電位の経時変化

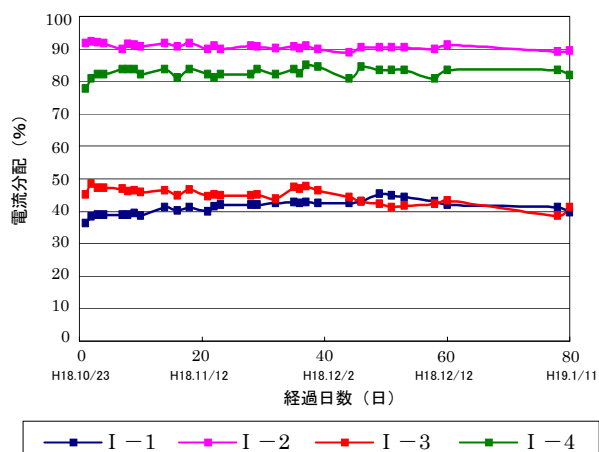


図-6 上段配筋に流入する電流量の割合

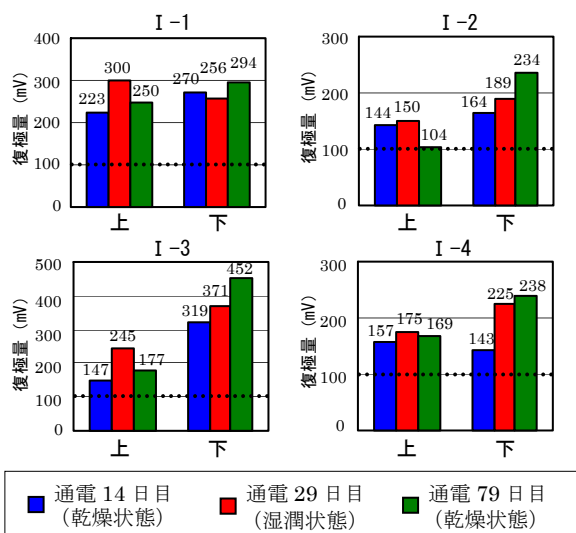


図-7 復極試験結果

時変化を示す。測定値は、可搬式照合電極を用いてコンクリート表面から測定した値である。乾燥状態時ではインスタントオフ電位は貴になり、湿潤状態時では卑に移行する傾向を示していた。特に、上段配筋は顕著であった。乾湿による鋼材の分極特性の変化などが原因と考えられる。

3.5 電流分配

図-6 に上段配筋に流入する防食電流量を示す。I-1 および I-3 供試体については上下段の配筋に防食電流が同じ割合で分配されているのに対して、I-2 および I-4 供試体については上段の配筋に全体の 8 割以上の電流が分配されている傾向を示していた。また、コンクリートの乾湿状態によって分配比率に大きな変化は認められなかった。

3.6 復極試験

図-7 に各配筋の復極試験結果を示す。いずれの供試体、配筋においてもコンクリートの乾湿の状態に関わらず防食基準である 100mV 以上の復極を満足しており、良好な防食状態にあることが推定された³⁾。

また、通電開始から防食電流量を一定として

いたために復極量は大きくなる傾向を示した。

4. 解析結果および考察

4.1 コンクリート比抵抗とカソード分極曲線

コンクリートの比抵抗は、交流インピーダンス法を用いて測定し、その結果を表-4に示す。配筋のカソード分極曲線は、コンクリートが湿潤状態時と、乾燥状態時に実施した値を使用した。図-8に湿潤状態における各供試体の上段配筋と下段配筋のカソード分極試験の結果を示す。

鋼材の分極が大きい場合は、ターフェル式（電流の対数と電位の直線関係式）に従う傾向にあるため、全てのカソード分極曲線についてターフェル式に従い実験値を外挿した。その結果、塩化物イオンを混入していないI-1供試体の上段配筋ならびにI-1～I-4供試体の下段配筋では、ターフェル式による近似が可能であったが、塩化物を混入した箇所に埋設されたI-2～I-4供試体の上段配筋は、低電流密度ではカソード分極しにくい傾向にあり、低電流密度から高電流密度の範囲においてターフェル式による近似が成立しなかった。そこで、I-2～I-4供試体の上段配筋は、直線近似式を用いるものとした。

以上の方法に基づき設定したカソード分極曲線を表-5に示す。

4.2 分配防食電流量の推定

図-9に湿潤状態、図-10に乾燥状態における上段配筋に流入する電流量の割合の解析結果ならびに実験結果を示す。コンクリートの比抵抗は表-4の値を、配筋のカソード分極曲線は表-5の値を用いた。また上段配筋に流入する電流量の割合は、上段配筋に流入する電流量を総電流量で除して算出した。

I-1、I-3供試体では、上段配筋に流入する電流量は、実験値、解析値ともに40～50%程度であるのに対して、I-2、I-4供試体では、実験値で80～90%、解析値では90～95%程度であった。解析値は各供試体の分配電流量の実験値とほぼ同じ値であった。

表-4 コンクリート比抵抗 ($k\Omega \cdot cm$)

	I-1		I-2		I-3		I-4	
	上	下	上	下	上	下	上	下
乾燥状態	15.71	14.31	5.86	17.04	5.76	13.06	8.21	18.7
湿潤状態	7.63	8.96	4.92	8.73	4.3	7.26		

表-5 カソード分極曲線の値

		上段配筋のカソード分極曲線	下段配筋のカソード分極曲線
湿潤環境	I-1	$E = -0.240 \log i - 1.140$	$E = -0.231 \log i - 1.114$
	I-2	$E = -27.44 \cdot i - 0.132$	$E = -0.173 \log i - 0.934$
	I-3	$E = -4.54 \cdot i - 0.261$	$E = -0.183 \log i - 0.916$
	I-4		
乾燥環境	I-1	$E = -0.255 \log i - 1.218$	$E = -0.265 \log i - 1.237$
	I-2	$E = -23.23 \cdot i - 0.092$	$E = -0.184 \log i - 0.934$
	I-3	$E = -4.51 \cdot i - 0.252$	$E = -0.188 \log i - 0.935$
	I-4	$E = -28.10 \cdot i - 0.114$	$E = -0.220 \log i - 1.076$

E:電位(V), i:電流密度(A/m²)

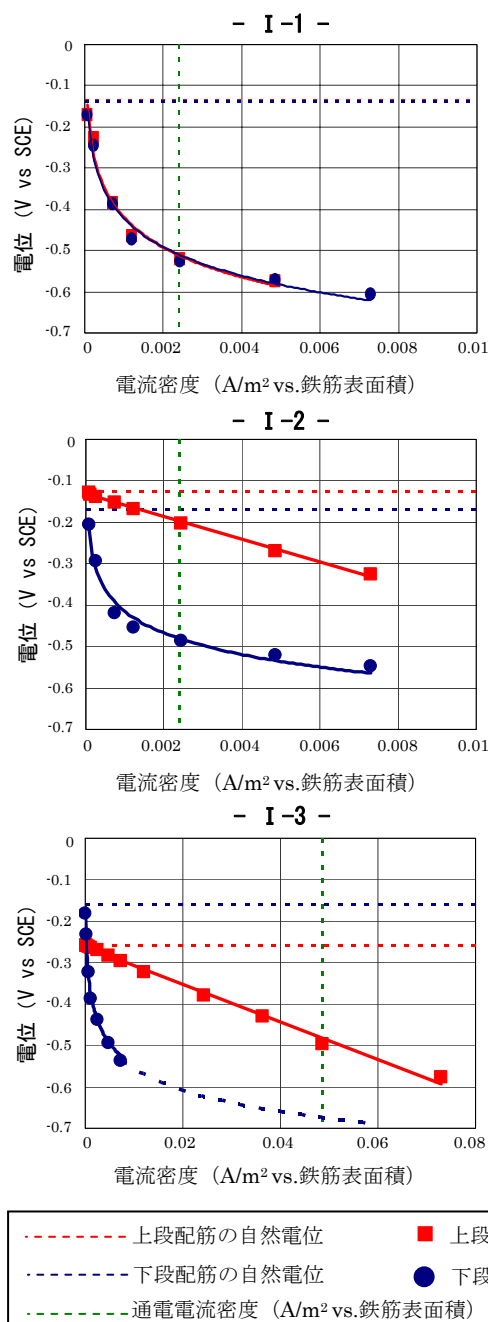


図-8 湿潤状態におけるカソード分極試験結果

解析結果を基に、各供試体の分配比率の相違の原因について推定すると、I-2 供試体は鉄筋表面積に対して約 $2.5\text{mA}/\text{m}^2$ 、I-4 供試体は約 $3.8\text{mA}/\text{m}^2$ の電流量を通电しているが、図-8 のカソード分極曲線の結果から分かるように、上段配筋と下段配筋の導通を切断した場合には、通电電流密度の付近で約 300mV の電位差が生じている。この状態で電気防食を行った場合は、上段配筋の電位が下段配筋の電位に近づく方向にシフトするため、結果として上段配筋に多くの電流が流入したものと考えられる。一方、I-1 供試体は鉄筋表面積に対して約 $2.5\text{mA}/\text{m}^2$ 、I-3 供試体は約 $50\text{mA}/\text{m}^2$ の電流量を通电しているが、この範囲では I-2、I-4 供試体に比べて上段配筋と下段配筋の電位差が小さいため、上段配筋に流入する電流量は 40～50%程度に推移していたものと考えられる。以上の結果より、電気防食により鉄筋に流入する電流分布を予測する場合は、コンクリート供試体の形状や鉄筋、陽極材の配置に加え、暴露環境に応じた鋼材のカソード分極特性を設定することにより、おおよそ予測できるものと考えられる。しかし、鉄筋に流入する電流量の割合は、鋼材の分極特性、通电電流量に応じて変化する可能性が高く、より多くのデータを蓄積、解析することにより実構造物に適用できるものと考えられる。

5. まとめ

本実験の範囲では以下の事項が明らかになった。

- (1) 塩化物濃度の低い供試体下面から塩化物濃度の高い内部に電流を通电した場合、塩化物量差が多く、水分が供給されている（マクロセル腐食環境の厳しい）供試体にはより大きな防食電流が必要となる傾向を示していた。
- (2) 塩化物量差の大小、コンクリートの乾湿状態に関わらず、電気防食によって良好な防食状態にあることが推定された。
- (3) 塩化物量の少ない供試体下段から塩化物

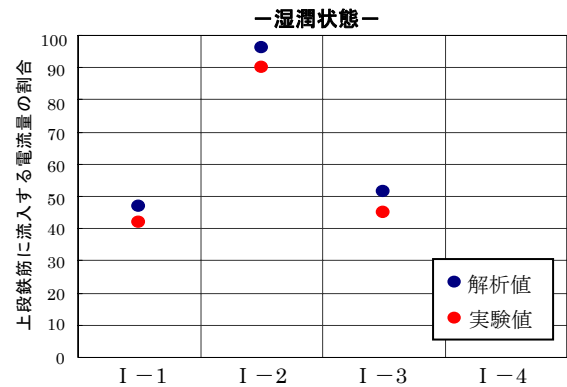


図-9 上段配筋に流入する電流量の割合（湿潤状態）

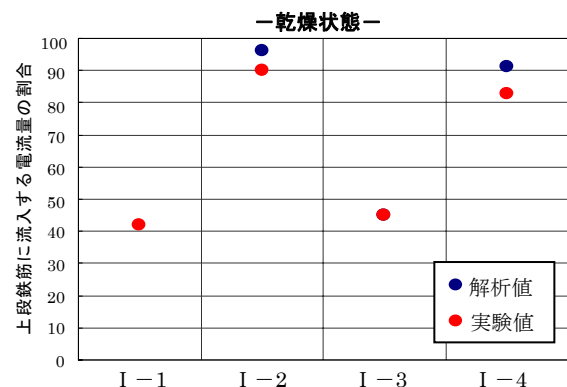


図-10 上段配筋に流入する電流量の割合（乾燥状態）

量の多い上段に電流を通电した場合、上段鉄筋に多く防食電流が流入する場合がある。

- (4) 電気防食により鉄筋に流入する電流分布を予測する場合は、コンクリート供試体の形状や鉄筋、陽極材の配置に加え、暴露環境に応じた鋼材のカソード分極特性を設定することにより、おおよそ予測できると考えられた。

参考文献

- 1) 菊池順，石井浩司，関博：塩化物イオンに濃度分布のあるコンクリート部材への電気防食の適用性に関する研究，土木学会関東支部，2005
- 2) 土木学会：コンクリート技術シリーズ 26 鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の課題，1997
- 3) 土木学会：コンクリートライブラリー107 電気化学的防食工法 設計施工指針(案)，2001