

# 論文 コンクリート構造物における電気防食の電位シフト基準に関する検討

川俣孝治\*1・武若耕司\*2・守安陽一郎\*3

**要旨：** 本研究では、電気防食法をコンクリート構造物の塩害補修工法として適用する場合に防食基準として通常用いられている100mVシフト基準の妥当性について、腐食環境条件あるいは鉄筋腐食状況の異なる鉄筋コンクリート部材に対する電気防食の効果確認実験により検討を行った。その結果、環境条件や鉄筋の腐食程度によっては、100mV程度の電位シフト量では、鉄筋の防食効果が不十分となる場合のあることが確認された。このため、今回の実験結果を基にして、電気防食法をより確実な塩害補修工法として用いるための新たな電位シフト基準の提案を行った。

**キーワード：** 電気防食、コンクリート構造物、塩害、防食基準、100mVシフト

## 1. はじめに

現在、コンクリート構造物に対する電気防食の防食基準については、鉄筋の有する電位が、自然電位から100mV以上の分極量があるような通電条件であれば防食効果はある、とする考えに基づいたものが主体である。また、この基準は、通常塩害を受けたあるいは受ける可能性のあるコンクリート構造物全般に適用できるとしている。しかし、塩害により劣化した構造物への電気防食の適用を考えた場合、その適用構造物の劣化状況や設置環境は個々に異なり、場合によっては、現状の一律な防食基準では電気防食の効果を十分に期待できないことも予想される [1]。

本研究では、現在一般に用いられているこの100mVシフト防食基準の妥当性について検討し、さらに腐食環境あるいは鉄筋腐食状況の異なる供試体における鉄筋電位のシフト量と防食性の関係から、より厳しい腐食状況下のコンクリート構造物に対する電気防食基準の改善について提案を行った。

## 2. 実験の概要

実験に用いた鉄筋コンクリート供試体は、図-1に示すように、長さ1.2m、断面10×10cmの中心にD10の鉄筋を1本設置し、供試体の片端部から30cmの範囲にチタンメッシュ陽極を設置したRC梁供試体および、D10の鉄筋を縦横1段づつ各6本配置した90×90×10cmのRCスラブ供試体で、チタンメッシュ陽極を供試体作製時にコンクリート表面から2cmの位置に

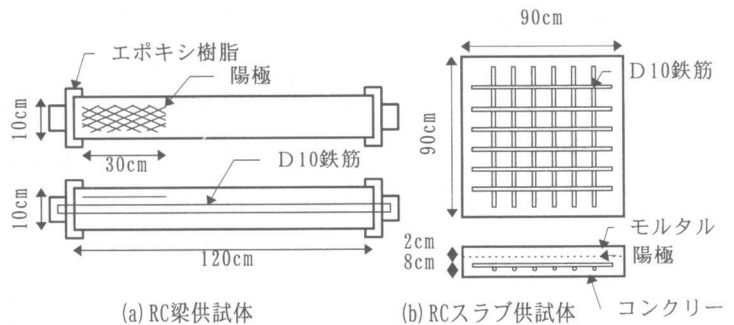


図-1 実験供試体の概

表-1 コンクリートの配合

供試体の種類	W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
			W	C	S	G(L)	G(S)	NaCl
RC梁供試体	60	49	198	283	914	578	389	11.8
RCスラブ供試体	60	48	193	322	886	584	389	0

\*1 住友大坂セメント (株) 建材事業部 工博 (正会員)

\*2 鹿児島大学助教授 海洋土木工学科 工博 (正会員)

\*3 鹿児島市 経済局農林部農政課農林土木

埋設したものの2種類である。表-1には、各供試体に使用したコンクリートの配合を示す。いずれの供試体も鉄筋腐食にとってもできるだけ厳しい環境となるように、コンクリートの水セメント比を60%とし、さらに、梁供試体においては、コンクリート重量比で0.5%のNaClをコンクリート打設時に混入した。また、RCスラブ供試体については、塩化物は添加していないが、腐食の進行を促進させるため、載荷試験により、最大幅0.3~0.4mmのひびわれを導入し、そのひびわれを拘束した状態で約3年間海水散布と乾燥を繰り返す環境に放置し、鉄筋の腐食促進を行ったものを実験に供した。これらの供試体の本実験における通電条件および暴露条件をとりまとめて表-2に示す。この中で、梁供試体の通電条件のうち-600mV設定は、

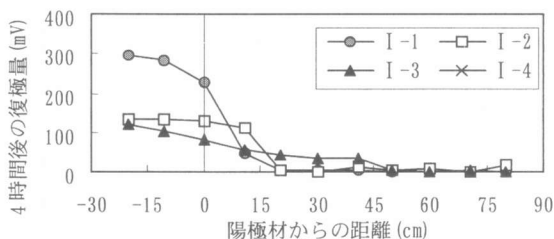
表-2 供試体の通電条件および暴露条件

供試体No.	供試体の種類	通電条件	暴露条件
I-1	RC梁供試体	-600mV設定	海水散布
I-2		200mVシフト	海水散布
I-3		200mVシフト	屋外暴露
I-4		無通電	海水散布
II-1	RCスラブ供試体	300mVシフト	屋外暴露
II-2		200mVシフト	
II-3		100, 150mVシフト	
II-4		無通電	

通電時の鉄筋電位を常時、Ag/AgCl電極で-600mVに調整したものである。また、200mVシフトについては、通電期間中定期的に通電を一時停止させ、通電停止24時間後の鉄筋電位から200mV分極させるよう、通電調整を断続的に行ったものである。また、RCスラブ供試体は、上述した腐食促進養生によって鉄筋が

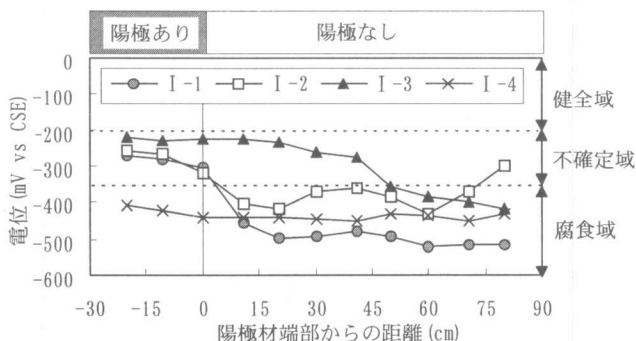
腐食状態となったことを自然電位の測定により確認した後、電気防食を施した。なお、この場合の電位シフト量は、いずれも通電停止直後の電位(Instant off電位)と通電停止4時間後電位の差、いわゆる4時間後復極量を意味し、定期的にこの値を測定することによって通電量を管理した。

暴露条件は、海水散布および屋外暴露の2種類とした。このうち海水散布は、室温を30℃に保持した腐食促進養生室で海水散布と乾燥を6時間毎に繰り返すものである。屋外暴露供試体は、鹿児島大学構内に暴露した。なお、梁供試体のうち、I-3の供試体については、約2年半にわたる上記の検討が終了した後、約1年間、無通電状態で屋外に暴露して再劣化させた後、200mVシフトの通電条件で再び通電を開始し、同様な測定項目で検討を行った。



(a) 4時間後復極量の分布

暴露期間中は、コンクリート表面からAg/AgCl電極を用いて Instant off電位、通電停止4時間後および24時間後電位の測定を約1カ月間隔で定期的に行った。なお、電位測定に使用した電極はAg/AgClであるが、以下の結果の検討では、銅硫酸銅電極基準(CSE)に換算した値で示す。



(b) 通電停止24時間後の電位分布(無通電供試体のみは自然電位)

図-2 通電113週目における鋼材電位の状況

### 3. 梁供試体における検討結果及び考察

図-2には、梁供試体において、通電を開始して113週目に測定された4時間後復極量および通電停止24時間後の鉄筋電位を陽極設置端部からの距離との関係で示した。ここで、4時間後の復極量は、通電による鉄筋電位シフト量にほぼ相当し、電気防食による防食効果の有効性を評価する指標となる。また、通電停止24時間後には、いずれの供試体においても電位が安定したため、この時の電位を鉄筋の自然電位に相当すると考え、この値をその時点で鉄筋自身が有している腐食性の指標とすることにした。なお、その際の腐食性の判断基準には、自然電位による腐食性判断基準として一般に広く用いられているASTM C 876に示されている腐食性評価指標を用いた[2]。

この結果より、先ず、海水散布を繰り返した無通電供試体(I-4)の電位は、 $-400\text{mV}$ 程度と一様に腐食域にあり、腐食が進行していることがわかる。一方、電気防食供試体についてみると、陽極を設置した範囲の鉄筋は、通電条件の如何にかかわらずいずれも通電により $100\text{mV}$ 以上の復極量が確保される状況にあるが、陽極から離れると分極量は急激に減少する傾向がみられる。特に海水散布と乾燥を繰り返すを受ける供試体(I-1、I-2)においては、実質的には陽極直下の鉄筋にしか防食電流の供給がなく、その結果、通電停止24時間後の電位から、陽極直下では防食が確保されていると考えられるにもかかわらず、陽極材直下以外の鉄筋は、高い腐食状態にあることが確認できる。これに対して、比較的腐食性の低い屋外暴露供試体(I-3)では、防食電流が陽極端部から $40\text{cm}$ 程度までの範囲まで供給されているようであり、この範囲の鉄筋には防食効果が認められるが、さらに遠方では電流は供給されず、腐食性も改善されていない。

図-3は、図-2に示した各供試体の各測定ポイントにおける4時間後の復極量と通電停止24時間後の電位の関係を供試体ごとに示したものである。なお、データは、113週目のデータの他に、10、20、76週の測定結果についても併せて示した。

この結果より、4時間後復極量の大きいものは、通電停止24時間後の電位も貴化する傾向が認められ、シフト量の増加により鉄筋の防食性は高まることがわかる。特に、暴露環境のそれほど厳しくない屋外暴露供試体(I-3)については、4時間後の復極量が少なくとも $50\text{mV}$ 以上あれば十分に防食されるようであり、いわゆる $100\text{mV}$ シフト基準は妥当であると評価された。また、通電材齢の長期化により、同一の復極量における通電停止24時間後電位は貴化する傾向も

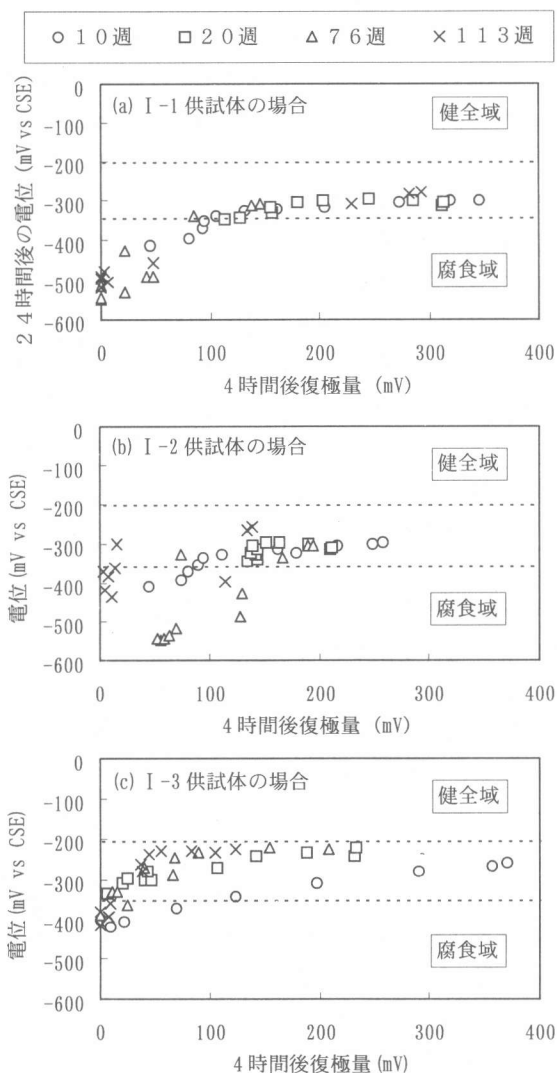


図-3 4時間後復極量と通電停止24時間後電位の関係

確認され、鉄筋の腐食性が通電の継続により改善されていることもわかる。一方、腐食性のより高い海水散布と乾燥の繰り返し環境に暴露された供試体においても、通電条件あるいは試験期間のいかんにかかわらず、4時間後の復極量が100mV以上あれば、防食性は改善される状況にあることが確認された。しかし、一方では、一部に100mV程度の復極量ではその防食性が不足するデータも得られており、このような腐食性の高い環境において電気防食による安全な防食性を期待するならば、少なくとも150mV程度の復極量は必要となるようであった。

屋外暴露したI-3の供試体は、上記検討を行った後、通電を約1年間停止し、屋外に暴露した。図-4には、この供試体に再通電を行なう直前の自然電位測定結果を示す。この結果、自然電位は  $-350 \sim -400\text{mV}$  (CSE) の範囲にあり、かなりの腐食の進行が予想され、また、実際に供試体には鉄筋腐食の進行に起因したと考えられるひびわれの発生も確認された。この屋外暴露環境下において再度腐食が進行した供試体に対して、あらたに通電を開始した。通電条件は、陽極直下の鉄筋電位の目標シフト量を200mVとする条件である。なお、通電後の環境もまた屋外暴露である。図-4には、通電再開後約3カ月後の測定結果も併せて示してある。この結果より、再通電開始前に測定した自然電位が供試体全域にわたり非常に卑な電位を示していたのに対し、通電3カ月後には、陽極周辺の鉄筋の腐食性は大幅に改善され、特に、200mV以上の復極量が確保された陽極直下では、通電停止24時間後の電位（自然電位に相当）は $-200\text{mV}$ より貴な値となり、良好な防食状態にあった。しかし、この復極量は陽極から離れるに従い減少するため、通電停止24時間後電位も陽極から離れるに従って卑化し、防食性が低下する。

図-5は、陽極からの距離を、陽極直下、陽極から0~30cm、30~60cm、60~80cmに分類し、その範囲での4時間後復極量および通電停止24時間後電位の平均値を各通電材齢毎に求めたものである。この結果より、4時間後の復極量は、概ね200mV、100mV、50mV前後の範囲に分類される。4時間後復極量は、通電時の電位シフト量

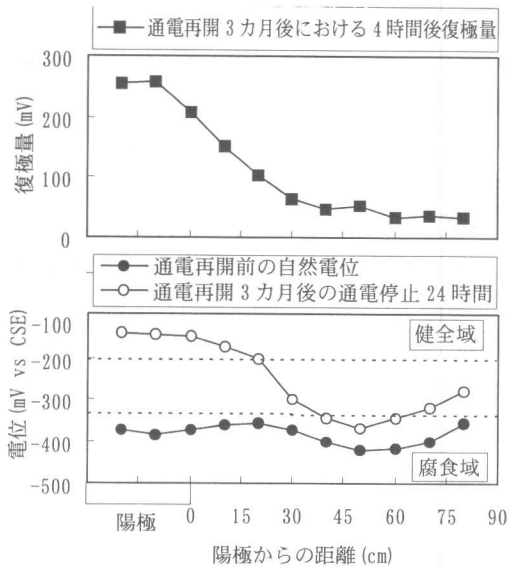
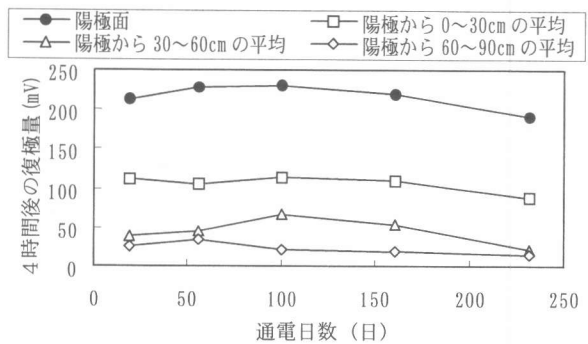
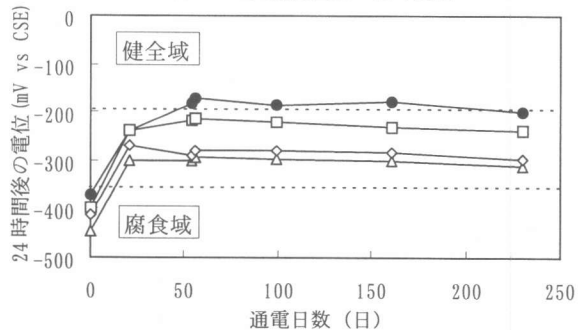


図-4 通電再開前自然電位および通電3カ月後の各電位

図-4 通電再開前自然電位および通電3カ月後の各電位



(a) 4時間後復極量の経時変化



(b) 通電停止24時間後の電位の経時変化

図-5 4時間後復極量および通電停止24時間後

にほぼ等しいとみなせるため、これらの電位シフト量における防食性を通電停止24時間後電位で評価すると、このような屋外暴露環境では今回の場合のように腐食がかなり進行した状況においても、50mV程度の電位シフト量である程度の防食性は確保されるようであった。また、100mV以上のシフト量が確保されると、防食効果の確実性は大幅に高まることも確認できる。したがって、この結果は、構造物の環境が飛来塩化物等の影響をあまり受けない比較的マイルドな環境である場合には、コンクリート構造物中の鉄筋腐食がある程度進行した状況であっても、100mVシフト基準は電気防食基準として十分に妥当であることを示している。

#### 4. スラブ部材における検討結果及び考察

腐食促進養生により鉄筋にマクロセル腐食を形成させたスラブ供試体において、表-2の通電条件により通電を行なった。

図-6に4時間後復極量の経時変化を示す。なお、この結果は、スラブ表面の縦、横のそれぞれ8カ所において測定した結果の平均値である。これより、通電による鉄筋の分極量はII-2の供試体で150~200mV、II-3の供試体で100mV前後、II-1では300mV以上の値を得ており、表-2の通電条件をほぼ満足していることがわかる。なお、II-3の供試体において通電開始600日経過後から分極量が上昇しているのは、目標分極量を150mVに変更したためである。

図-7は、同様に縦横それぞれ8カ所の通電停止24時間後電位の平均値の経時変化を示したものである。この結果を基に、図-6に示したシフト量とその防食効果を検討すると、まず、通電前の自然電位の測定結果(最卑値-274mV)から腐食の進行が比較的軽微であると予想されたII-2の供試体への150~200mVシフトによる通電については、

通電停止24時間後電位が-200mVより貴な値を示していることから、十分な防食効果が得られているものと考えられる。これに対し、腐食がかなり進行していると予想されるII-3の供試体(通電時の自然電位の最卑値約-475mV)については、当初、100mVのシフト量で通電を行ったが、この間の通電停止24時間後電位は、無通電供試体の自然電位と差異が認められなかった。このことは、腐食がかなり進行した場合における100mVシフト基準による通電は、防食効果がほとんど期待できないことを示している。ただし、このII-3供試体に対して、目標分極量を150mVに変更した通電材齢600日以降についてみると、通電停止24時間後電位は貴化する傾向にあり、防食性の改善が認められる。一方、同様にかんがりの腐食進行が予想されるII-1の供試体(暴露時の自然電位の最卑値-407mV)へ300mVのシフト量を適用した場合には、通電初期より良好な防食状態が確保できているようである。

図-8には、通電開始前の鉄筋の自然電位および通電1年あるいは2年後に測定した通電停止24時間後の電位を度数分布として表し、通電により鉄筋の自然電位分布が変化する様子を検討したものである。これより、無通電の供試体であるII-4においては、1年後の自然電位も腐食域にあり、その腐食性に変化が認められない。これに対して、電気防食を施したII-1~II-3の供試体では、通電

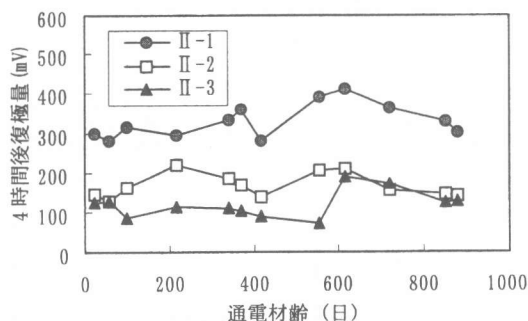


図-6 4時間後復極量の経時変化

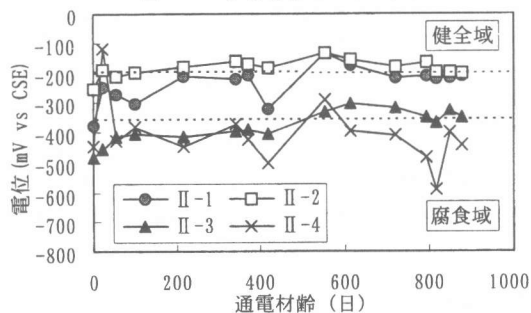


図-7 通電停止24時間後電位の経時変化 (無通電供試体II-4については自然電位)

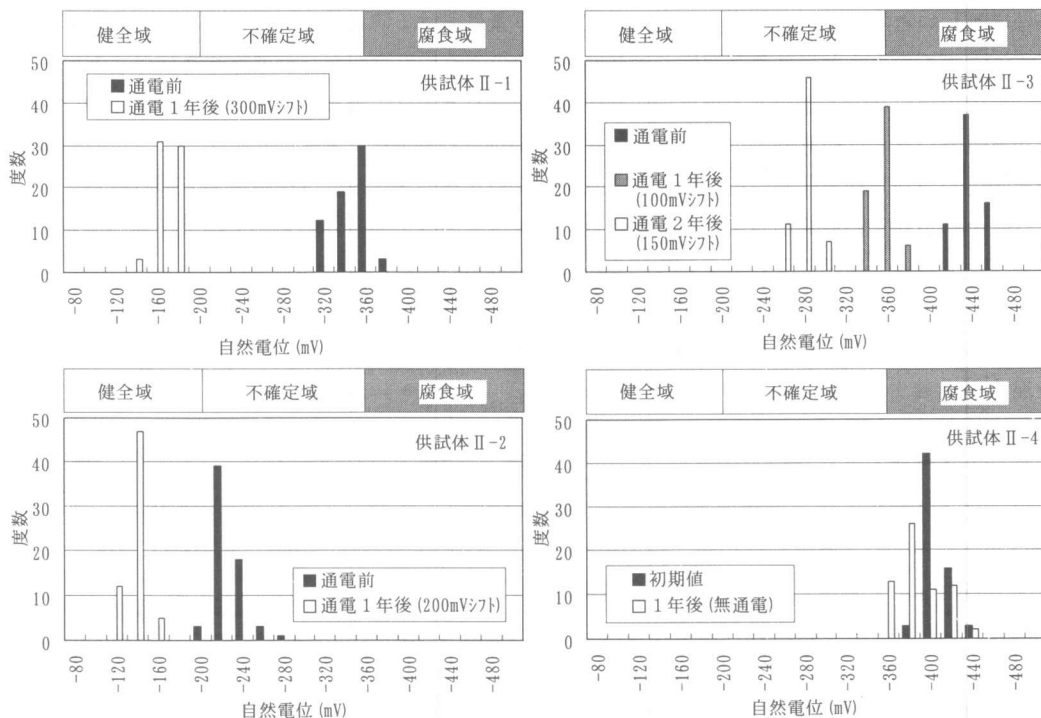


図-8 RCスラブ供試体における自然電位発生度数分布の変化

の継続が鉄筋の腐食性を改善している状況をとらえられることができ、あわせて、その防食性が通電開始前の腐食程度と電位シフト量により大きく異なることも明らかである。

## 5. まとめ

外部環境条件および鉄筋腐食状況の異なる鉄筋コンクリート部材に電気防食を適用し、その効果について検討を行った。その結果を基にして、塩害劣化構造物の補修工法として電気防食を用いる場合の防食基準について以下のことを提案する。

### ①環境の腐食性が穏やかな場合

鉄筋の腐食の進行程度に関わらず、従来の100mVシフト基準で十分な防食が可能。

### ②環境の腐食性が厳しい場合

コンクリート中の鋼材の腐食があまり進行していない場合には、100mVシフト基準を適用。ただし、鉄筋腐食進行程度が大きい場合には、150mV以上の電位シフト量を確保。

### ③環境の腐食性が非常に厳しい場合

鋼材腐食の程度に関わらず、200mV以上のシフト量を確保。

なお、鋼材の防食性は外部環境だけではなく、コンクリートの内部環境、例えばコンクリートの品質や含水量などにも支配される。上記の提案は、今回の実験条件も考慮して、とりあえずコンクリートの内部環境がかなり厳しい状態を想定したものである。今後は、この点に関するより詳細な検討も必要と考えられる。

## 参考文献

- [1] 日本コンクリート工学協会編:コンクリート構造物の電気防食法研究委員会報告書1994. 1
- [2] ASTM C 876-77:Half Cell Potentials of Reinforcing Steel in Concrete