

論文 多段配筋された鉄筋コンクリート部材における電気防食効果

吉岡光洋*¹・福手勤*²・阿部正美*³・濱田秀則*⁴

要旨：コンクリート中の塩分濃度を深さ方向に3段階変化させ、それぞれの層に独立して鉄筋を埋設したコンクリート供試体を用い、電気防食の効果について検討した。コンクリート中の鉄筋を短絡させることによってマクロセルが形成され、通電時には、上、中、下段のそれぞれの鉄筋への電流の流入に差が見られた。防食電流の供給による鉄筋の分極状態は各段の鉄筋で異なり、最も塩分量の多い供試体においては、防食基準とされる100mVシフトを達成するのに下段は上段のおよそ4倍の電流を必要とした。

キーワード：電気防食、鉄筋コンクリート、分極量、マクロ腐食

1. はじめに

海水や飛来塩分の影響を受ける港湾コンクリート構造物は、その塩分によってコンクリート中の鉄筋が発錆し、構造物の劣化が進行しやすい状態にある。このような劣化を防止する対策の一つとして電気防食法が着目され、種々の研究がなされており、かなりの件数の研究が報告されている。しかし、これらの報告の中で、コンクリート中の塩分濃度が異なる構造物中における複数の鉄筋に対して電気防食を行った報告例は少ない〔1, 2, 3〕。

電気防食を行う際にコンクリート中に存在する複数の鉄筋への防食効果は、塩分による腐食の程度や陽極からの距離等に影響されることが考えられる。そのため、コンクリート性状の差およびかぶり厚の差等による深度方向の電流の分布状況の違いなどを把握しておくことは電気防食法の設計、施工を検討するために必要なことである。

本研究は、外部から塩分が浸透したコンクリート構造物を模して、深さ方向にコンクリート中の塩分濃度を3層に変化させ、それぞれの層に独立した鉄筋を埋設した多段配筋コンクリート供試体を用い、コンクリート中のマクロ腐食の状況及び通電時の各鉄筋への電流の流出入状況、および分極状態などを検討した。本報告は、それらをとりまとめたものである。

2. 試験概要

2. 1 供試体の概要

試験に使用した供試体は図-1に示すように縦40cm×横40cm×高さ42cmのほぼ立方体の形状寸法を有している。コンクリートは、あらかじめNaClを溶解混入させたものを混練水として使用しており、上、中、下段の各層に塩分濃度の異なるコンクリートを層状となるように打設した。塩分濃度の組み合わせは表-1に示すとおりであり、供試体は各1体(No.1~3)ずつ製作した。コンクリート中の鉄筋にはφ13mmの磨き丸鋼(SR24)を用い、縦3本、横5本をそれぞれ組み合わせ

*1 電気化学工業株式会社 青海工場セメント・特混研究所(正会員)

*2 運輸省港湾技術研究所 構造部材料研究室長、工博(正会員)

*3 運輸省港湾技術研究所 構造部主任研究官(正会員)

*4 運輸省港湾技術研究所 構造部主任研究官、工修(正会員)

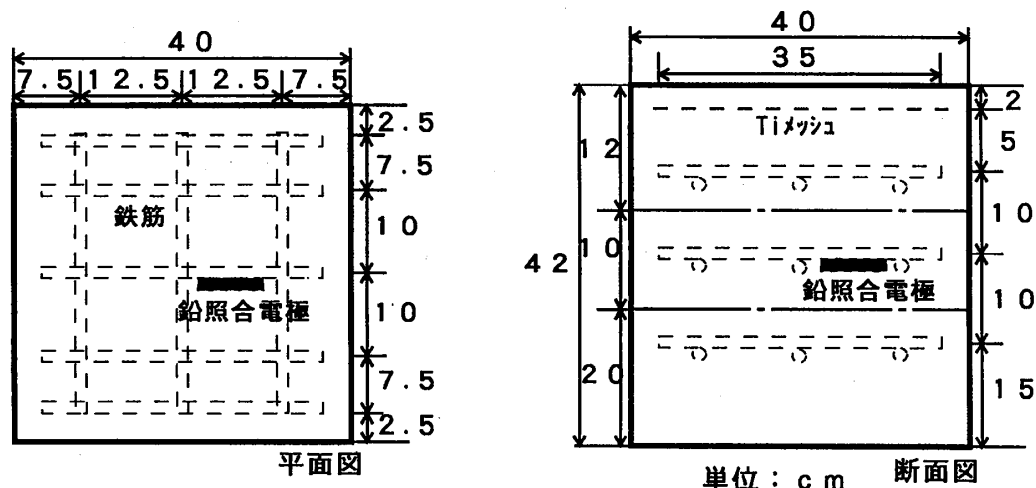


図-1 供試体の形状寸法

たものを3段に埋設した。各段の鉄筋同士は直接接触しないようにコンクリートを打設し、各鉄筋に接続したリード線によって短絡および通電が行えるようにした。中段の鉄筋には鉄筋の電位測定のための基準電極（鉛電極）を取り付けた。陽極材にはチタンメッシュを用い、コンクリートの表面より2cmの深さにコンクリートの打設と同時に埋設した。陽極から鉄筋までの距離は上段からそれぞれ5、15、25cmである。屋内での28日間の養生の後、供試体の表面（底面、側面の全面）および上面の端部から5cm幅の部分については絶縁性のエポキシ系樹脂塗料を用いて塗布被覆した。塗布被覆した理由は、塩分及び水分の周囲からの浸透を防ぎ、またコンクリートの表面の濡れによる通電時の側面からの電流の流出を避けるためである。被覆後の供試体は、海に近い潮風の当たる屋外に置き、測定に供した。なおコンクリートの配合はW/C=50%、呼び強度24N/mm²以上とした。表-2に使用したコンクリートの配合を示す。

表-1 供試体含有塩分量

供試体 No.	含有塩分量(NaCl)(kg/m ³)		
	上段	中段	下段
1	15	8	4
2	8	4	2
3	4	2	0

表-2 コンクリート配合

Gmax (mm)	スランプ (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)						
					W	C	S	G	混和剤P-70	混和剤303A	NaCl
20	12	4	50	48	165	330	880	978	C×0.25%	※ 0.75 A	0~15

※1A : C×0.002%

2. 2 測定項目

まず上、中、下段に埋め込まれている各鉄筋の自然電位の変化を測定した。次に各段の鉄筋を短絡して、それらの短絡電位を測定するとともに、各鉄筋間に電流計を挿入してマクロ腐食電流の流入、流出量を測定した。その後、コンクリート中に埋設してある陽極材を用いて通電試験を実施した。防食電流の供給は、小さい電流密度から徐々に大きくしていき、各々の電流密度にお

ける各段の鉄筋へ流入した電流とON, OFF電位を測定した。また、各電流密度におけるOFF電位と短絡した自然電位とから分極量を求めた。なお、電流密度の計算にはコンクリート中のすべての鉄筋の表面積に対する値を用いた。

3. 試験結果および考察

3. 1 単極電位およびマクロ腐食電流

通電前の各供試体の各鉄筋の単極電位および短絡電位を図-2に示す。

まず、各鉄筋の自然電位について見てみると、ASTM C 876に従って、「 $E \geq -200\text{mV}$ は腐食無し」、 $-200\text{mV} > E \geq -350\text{mV}$ は不確定」、「 $-350\text{mV} > E$ は腐食あり」と判断すると、No. 1、2では上段が腐食している領域で、中、下段は不確定、No. 3では上、中、下段全て腐食無しの領域にあった。これは、それぞれの鉄筋が位置するコンクリート中の塩分量と相関があり、最も塩分量の多い層に配筋された鉄筋が最も卑となり、腐食の進行の可能性が大きいものと判断された。短絡後の電位を見ると、3つのそれぞれの供試体で、上、中、下段の電位差が小さくなっている。No. 1、2では、上段の鉄筋はわずかに貴となり、短絡前の電位よりも中段、下段では大きく卑となっている。No. 3は上、中段は貴になり、下段

はわずかに卑となった。前述のASTMの基準に照らし合わせるとNo. 1では短絡後に全ての鉄筋の電位が腐食ありの領域に入り、No. 2は腐食ありと不確定の境目となった。No. 3においては、全ての段の鉄筋が腐食無しの領域に入った。

図-3に各段の鉄筋を短絡した際のマクロ腐食電流の傾向を示す。その結果、各供試体において、マクロ腐食電流が確認された。このマクロ腐食電流は全ての供試体で、上段から中、下段へ流出した。中段および下段へ流入する電流量は下段への方が大きい傾向が見られた。この結果は、鉄筋を短絡することによって中、下段の鉄筋の電位が図-2に示すように卑な方向へ変化していることと一致している。中、下段の鉄筋は上段から流入するマクロ腐食電流によって分極された形になっていると考えられる。塩分濃度が大きいNo. 1が最も電流の流出入が大きい。最も流出量の大きいNo. 1の上段鉄筋の腐

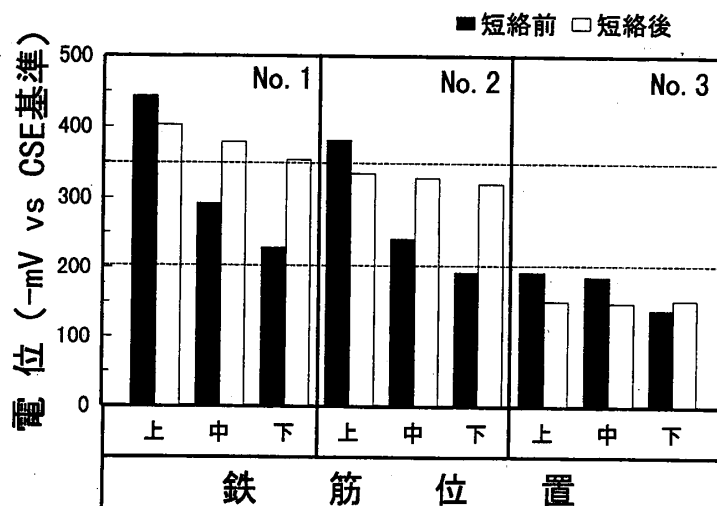


図-2 各供試体の単極および短絡電位

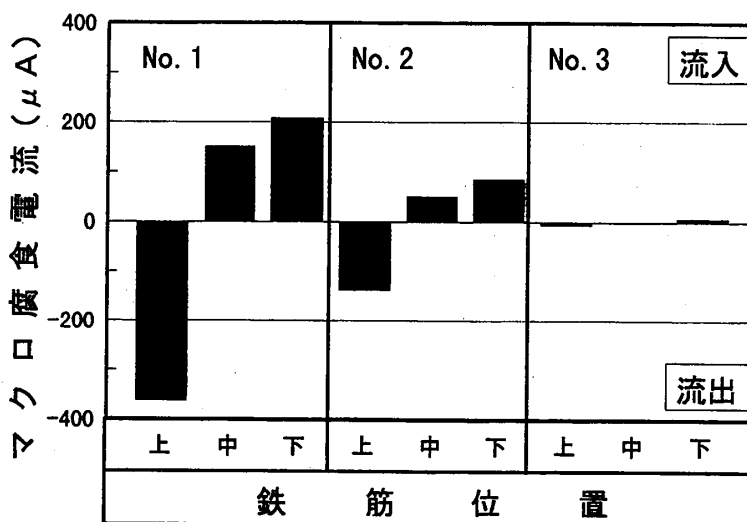


図-3 各供試体のマクロ腐食電流

食速度を計算〔4〕するとおよそ0.003mm/yrの値となる。

3. 2 通電時の電流の流入状況

図-4に通電時の各供試体の鉄筋に流入する電流の傾向を示す。No. 1の上段の鉄筋は $2\text{mA}/\text{m}^2$ 程度までの小さい電流密度では、マクロ腐食電流の影響が大きく、電流は流入せず、流出を続けた。電流密度が $5\text{mA}/\text{m}^2$ 程度になるとマクロ腐食電流は消失し、上段の鉄筋へ流入が認められた。中、下段の鉄筋では流入量に大きな差は見られなかった。

No. 2について見てみると、電流の流出入はNo. 1と同様な傾向を示した。ただし、電流密度が $2\text{mA}/\text{m}^2$ 程度になるとマクロ腐食電流は消失し、上段の鉄筋へ流入が認められた。これは、No. 1よりも供試体中の塩分量が少ないために、マクロ腐食の程度が小さかったためと考えられる。

No. 3では、マクロ腐食電流の流出入は見られず、小さい電流の密度の段階から上段鉄筋へ最も多く流入した。下段および中段への流入量は、他の供試体と同様ほとんど差が認められなかった。

全ての供試体において電流密度と流入電流量の傾きについて見ると、上段の鉄筋が最も大きく下段が最も小さい。これは、各段の鉄筋への流入のしやすさを表していると考えられる。

3. 3 分極量の傾向

図-5(a), (b), (c)に各供試体の各電流密度における分極量の変化を示す。また、表-3には現在一般的な防食基準と見なされている100mV分極基準〔5〕に必要な、所要防食電流密度の値を示す。

図-5(a)より、No. 1では、上、中、下段それぞれで100mVシフト基準を満足する分極量を得るため

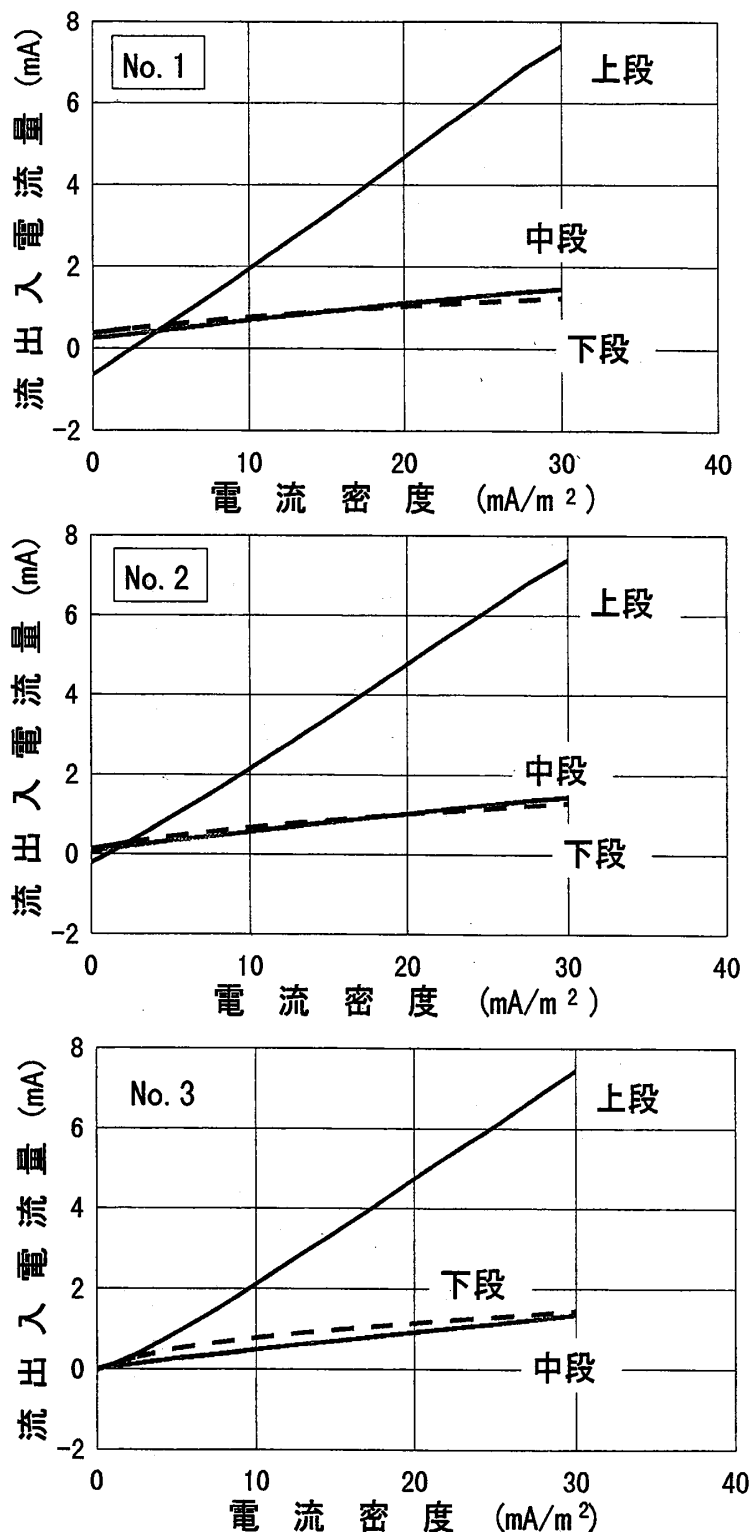


図-4 電流の流入傾向

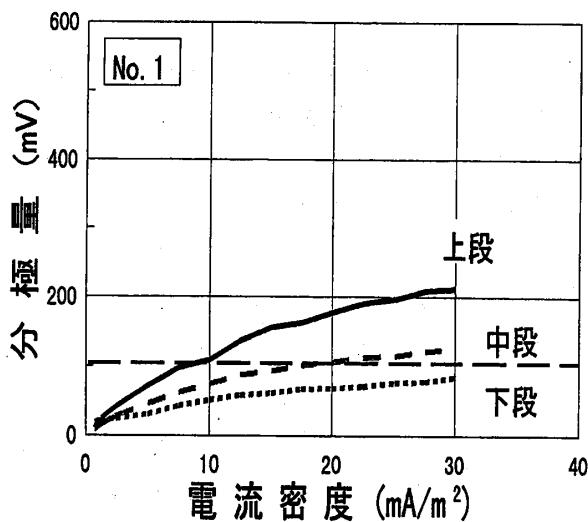


図-5(a) 分極量の傾向(No. 1)

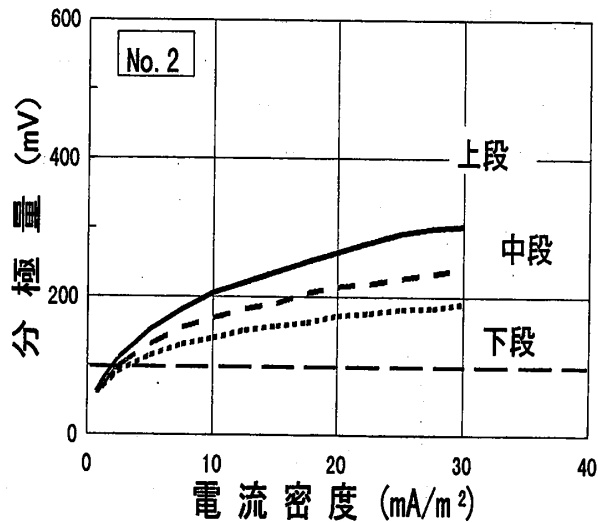


図-5(b) 分極量の傾向(No. 2)

の所要電流密度は異なっている。表-3からわかるように、下段では上段の約5倍の電流が必要であった。3.2で示したように、陽極から供給される電流の多くが上段鉄筋へ流入するため、最も陽極から離れている下段の鉄筋には100mVシフトを得るためには、さらに大きい電流の設定が必要となる。図-5(b)に示すNo.2では、100mVシフトの分極量を得るために、上、中、下段それぞれが2.0mA/m²、2.7mA/m²、3.3mA/m²を必要とした。No.1と比較すると、上、中、下段ともかなり小さい電流値で100mVシフトを達成できた。図-5(c)のNo.3では、上、中、下段による差はほとんど認められず、上、中、下段全て1.0mA/m²以下のごくわずかな電流で100mVシフトを満足した。この供試体のように、含有塩分量が少なく供試体中の鉄筋が比較的健全であると思われるものについては、ごく小さな電流で100mVシフトを達成できることがわかる。

同じかぶり厚さの位置で比較した場合は、上、中、下段どの位置の鉄筋においても、塩分量の多いNo.1が最も分極しにくく、塩分量の少ないNo.3が最も分極しやすかった。このことから、塩分を多量に含んだコンクリート中の鉄筋ほど分極しにくいことが明らかになった。

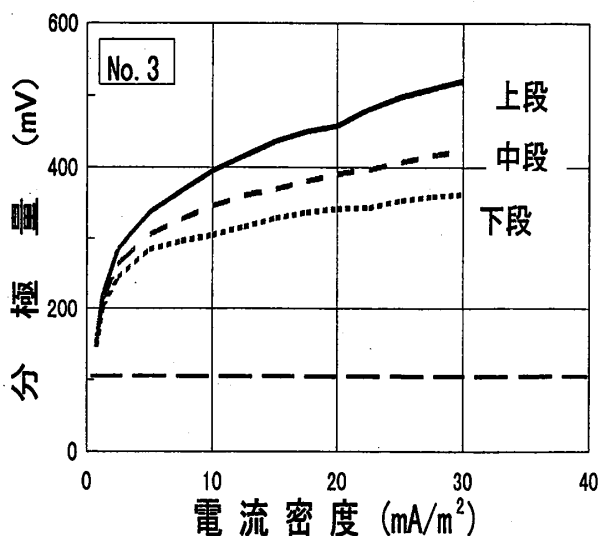


図-5(c) 分極量の傾向(No. 3)

表-3 100mVシフトに要する電流密度

鉄筋位置	電 流 密 度 (mA/m ²)		
	No. 1	No. 2	No. 3
上段	7.9	2.0	1.0
中段	17.0	2.7	1.0
下段	40.0	3.3	1.0

4. まとめ

コンクリート中の塩分濃度を深さ方向に3段階に変化させた、その塩分濃度の組み合わせが異なる3種類の多段配筋供試体を用い、コンクリート中のマクロ腐食の状況及び通電時の各鉄筋への電流の流出入状況、各鉄筋の分極状態等の測定を行った結果、以下のことが明らかになった。

- (1) NaClの混入量の増加にともない鉄筋の電位は卑な値を示し、最も卑な電位の値は、 $-300 \sim -450\text{mV}$ (CSE基準) 程度を示した。
- (2) 塩分量の多い上段に埋め込まれた鉄筋から塩分量の少ない中、下段に埋め込まれた鉄筋へマクロ腐食電流が流出し、コンクリート中の塩分量の多い組み合わせのものほど、マクロ腐食電流の流出入が大きかった。
- (3) マクロ腐食電流の大きかった供試体では、小さい防食電流密度ではマクロ腐食電流を停止することはできなかった。マクロ腐食電流を停止させるのに必要な防食電流密度は、 $5\text{mA}/\text{m}^2 \sim 2\text{mA}/\text{m}^2$ 程度であった。
- (4) マクロ腐食電流の大きかった供試体では、小さな防食電流密度では全ての段の鉄筋を 100mV 以上分極させることはできず、中、下段の鉄筋を 100mV 以上分極させるためには上段の2～5倍の電流密度が必要であった。このことから、塩分が多く浸透していると考えられるコンクリートに電気防食を施す場合、防食電流密度の設定には鉄筋の深さ方向の考慮が必要である。
- (5) マクロ腐食電流の小さい供試体では、わずかな防食電流密度で全ての段の鉄筋を 100mV 以上分極させることができた。したがって塩分量が少なく、マクロ腐食電流の流出入がきわめて小さい条件では、防食電流密度を設定する際に、鉄筋の深さ方向の考慮はあまり必要ではないものと思われる。
- (6) 同一深さ位置の鉄筋を比較した場合、塩分量の多いものほど分極しにくい結果となり、これまでに報告されているものと同様の結果を得た。

参考文献

- [1] 阿部正美・福手勤・濱田秀則：鉄筋コンクリート構造物の電気防食における鉄筋かぶりが電流分布に及ぼす影響、第41回腐食防食討論会講演集、B-310、1994。
- [2] 阿部正美・福手勤・濱田秀則・三浦幸治：コンクリート中の鉄筋のマクロ腐食と電気防食によるアノード、カソードへ流入する電流および分極量、港湾技術研究所報告、Vol. 33、No. 2、pp181-183、185-205、1994。
- [3] 井川一弘・篠田吉央・加納伸人・田中健一郎：コンクリート構造物の電気防食試験、コンクリート構造物の補修工法と電気防食に関するシンポジウム論文報告集、pp159-164、1994。
- [4] H. H. ユーリック・R. W. レヴィー：腐食反応とその制御（第3版）、産業図書（株）、1989。
- [5] NACE: Standard Recommended Practice Cathodic Protection of Reinforcing Steel in Atmospherically Exposed Concrete Structures, NACE Standard PR 0290-90, 1990。