

港湾技研資料

TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 851

Dec. 1996

コンクリート中に多段配筋された鉄筋の電気防食効果に関する基礎的研究

福	手		勤
阿	部	正	美
吉	岡	光	洋



運輸省港湾技術研究所

目 次

要 旨	3
1. まえがき	4
2. 鉄筋の腐食機構と電気防食の原理	5
3. 試験方法	5
3. 1 供試体の概要	5
(1) 使用材料	5
(2) 供試体の製作	6
3. 2 試験の手順および測定項目	7
4. 試験結果および考察	9
4. 1 無防食時の鉄筋電位とマクロ腐食電流	9
(1) 単極電位（未短絡時の電位）と短絡電位	9
(2) マクロ腐食電流	10
4. 2 通電試験	11
(1) 各鉄筋への通電時の電流の流入傾向	11
(2) 各電流密度での鉄筋短絡時の分極量	12
(3) 各電流密度での鉄筋未短絡時の分極量	14
5. 結 論	15
6. あとがき	15
7. 参考文献	15

Fundamental Studies on the Effect of Cathodic Protection for Multi-Layered Reinforcements in Concrete

Tsutomu FUKUTE *

Masami ABE **

Mitsuhiro YOSHIOKA ***

Synopsis

Cathodic protection methods have been given attention as one of the effective countermeasures against salt induced damage of reinforced concrete (RC) members. In this paper, a series of experiments was executed in order to examine the effects of chloride content gradient of concrete from the surface to the inside of concrete and multi-layered arrangement of reinforcing steel bars on the effects of cathodic protection.

The following results were obtained.

- (1) Macro-cell corrosion current flowed out of the steel bars in outer layer of concrete having high amount of chloride ions to those in inner part of concrete having less amount of chloride ions.
- (2) When all steel bars were short-circuited protective current from the anode attached on the surface of concrete flowed mainly into the steel bars in outer layer of concrete.
- (3) In case of relatively high chloride ion content in concrete, macro-cell current was large and protective current density of 2-4mA/m² was needed to eliminate those macro-cells.
- (4) In case of relatively high chloride ion content in concrete, protective current density of 20-40mA/m² was needed in order to polarize the steel bars inside of concretes as much as 100mV, which was 2-5times larger than for the bars in outer layer of concrete.
- (5) In case of small amount of chloride ion in concrete, protective current density less than 1mA/m² was enough to polarize all the bars in concrete up to 100mV.

Key Words : Cathodic protection, Reinforced concrete, Macro-cell corrosion, Polarization, Chloride ion content, Standard for protection

*Chief of Materials Lab, Structural Engineering Division

**Senior Research Engineer, Structural Engineering Division

***Denki Kagaku Kougyou Co.,Ltd.

コンクリート中に多段配筋された鉄筋の電気防食効果に関する基礎的研究

福手 勤*
阿部正美* 2
吉岡光洋* 3

要 旨

港湾コンクリート構造物の塩害による劣化を防止する一つの方法として、電気防食法が検討されている。

本資料では、コンクリート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させた供試体を用い、電気防食の効果について基礎的な試験を行った。本試験により以下のことが明らかとなった。

(1) 塩分量の多い上段のコンクリートに埋め込まれた鉄筋から塩分量の少ない中、下段の鉄筋へマクロ腐食電流が流出した。

(2) 上、中、下段鉄筋を短絡して通電試験を実施した場合、電流は通電量の増大とともに上段の鉄筋へ優先的に流入し、中、下段鉄筋への流入量は少なく、また、中、下段へ流入する電流量には差がなかった。

(3) 各鉄筋を短絡して通電した場合、コンクリート中の含有塩分量が多くマクロ腐食電流が大きかった供試体では、マクロ腐食電流を停止させるためには2~4mA/m²防食電流密度が必要であった。

(4) コンクリート中の含有塩分量が多くマクロ腐食電流が大きかった供試体で鉄筋を短絡させ通電試験を実施した場合、中、下段の鉄筋を100mV以上分極させるためには20~40mA/m²防食電流密度が必要であった。

(5) コンクリート中の含有塩分量が少なくマクロ腐食電流の小さかった供試体では、鉄筋を短絡した場合の通電試験の結果、1mA/m²以下の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。

キーワード：電気防食，鉄筋コンクリート，
マクロ腐食，分極量，含有塩分量，
防食基準

* 構造部 材料研究室 室長

*2構造部 主任研究官 (防食担当)

*3電気化学工業 (株) (構造部材料研究室 研修生)

1. まえがき

海水や飛来塩分の影響を受ける港湾における鉄筋コンクリート構造物は、塩分がコンクリート中へ浸透すること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なる。コンクリート中の鉄筋の腐食によるコンクリートの破壊の過程を図-1に示す。鉄筋の発錆は、その錆の膨張圧によってコンクリートのひび割れを招き、さらにそのひび割れによって鉄筋の腐食を促進させる原因となる。また、写真-1には栈橋のコンクリート上部工の鉄筋腐食による劣化状況を示す。

現在、コンクリートの劣化を防止する対策法が種々検討されているが、コンクリート中の鉄筋の腐食対策として表-1 [1] に示すものがあげられる。これらのうち電気防食法は、鉄筋の腐食が電気化学的反応に起因するものであることに着目した防食工法である。米国連邦道路局(FHWA)では、ハイウエーの塩害によ

るコンクリートの劣化を防止する対策を数十年にわたり研究した結果、「電気防食が唯一の補修方法ではないが、鉄筋腐食を停止させるには唯一の方法である」という見解を示した [2]。

電気防食に関する実験は多数実施されており、実構造物を対象とした施工も最近では行われている [3]。

しかしながら、電気防食を行う際にコンクリート中に多段配筋された複数の鉄筋の防食効果は、塩分による腐食の程度のみならず陽極からの距離等に影響されることが考えられる。しかし、これら塩分濃度およびかぶり厚さの影響を同時に試験した報告は見当たらない。そのためコンクリート中の塩分濃度差やかぶり厚の差等によるコンクリート深度方向の電流分布状況の違いなどを把握しておくことは、たとえばスターラップと複曲げ鉄筋を有するような異なる深度に複数の鉄筋で補強された構造物を対象とした電気防食法の設計を検討するための基礎的なデータとして必要なことである。

このような観点から本資料では、深さ方向にコンク

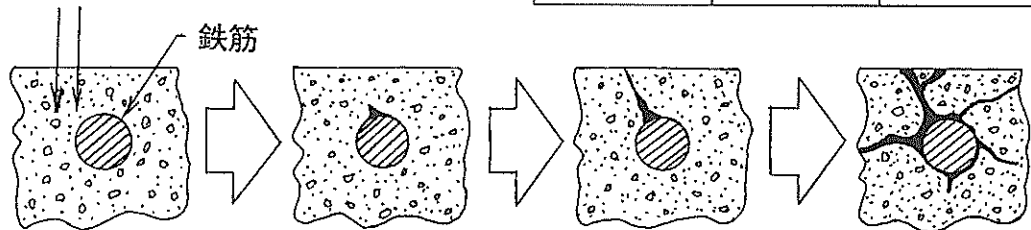


写真-1 コンクリート構造物の劣化状況

表-1 防食方法一覧

目的	項目	内容
腐食環境の除去		温・湿度制御 脱塩、脱水
コンクリート中への塩分浸透の抑制	密実性の増加	最大W/Cの制限
	ひび割れ	許容ひび割れ幅
	コンクリートの表面ライニング	合成樹脂によるライニング、塗装
	樹脂含浸コンクリート ポリアセトコンクリート	エポキシ、シリコン等による含浸
	混和材の有効利用	フライアッシュ、スラグの利用
鋼材表面の保護	樹脂塗装鋼材 メッキ鋼材	エポキシ樹脂塗装 亜鉛メッキ
電位制御	電気防食	外部電源方式 流電陽極方式
防錆剤	防錆剤	亜硝酸系

塩化物イオン



コンクリートの表面から塩化物イオンが浸透し、鉄筋表面に到達する。

鉄筋表面の塩化物イオン量が限界値を越すと、鉄筋が腐食する。

腐食生成物の膨張圧で、コンクリートにひび割れが発生する。

錆の膨張圧で、ひび割れ幅が大きくなり鉄筋の腐食が促進される。

図-1 鉄筋の腐食によるコンクリートの破壊過程

リート中の塩分濃度を3層に変化させ、それぞれの層に鉄筋を埋設した供試体を用い、コンクリート中のマクロ腐食の状況、通電時の各鉄筋への電流の流入状況および分極状態などを検討するための基礎的な試験を実施した。

2. 鉄筋の腐食機構と電気防食の原理

鉄筋の腐食は、電気化学的反応に起因するものである。腐食の発生した鋼材では(1)式の反応が進行するアノード部と(2)式の反応が進行するカソード部が存在する。

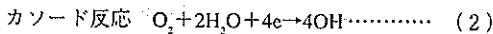
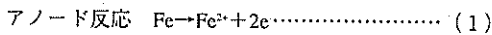


図-2に鉄筋の腐食の反応機構を示す。アノード部で生じた電子は鋼材中をカソード部へ向かって移動する。アノード部は電子の生成を行うために低い(以後"卑"と呼ぶ)電位となり、一方のカソード部は高い(以後"貴"と呼ぶ)電位となっている。この電位差が生じるために、腐食電流がカソード部からアノード部へ流れる。

電気防食の原理は、外部から電流を流すことにより上記のアノード部とカソード部の電位差をなくすことにより、腐食電流を停止させ、腐食反応を止めるものである。一般的に電気防食と呼ばれているものは、カソード部の電位をアノード部の電位まで下げるカソード防食法である。先に述べたように、鉄筋の腐食は電気化学的反応に起因するものであり、電気防食は鋼材の腐食を直接停止させる方法であるため、腐食の条件である酸素や水の遮断をする必要はなく、また塩分の存在下でも防食が可能である。さらに、その電気的な作用により鉄筋周辺の塩分を防食電流を供給する陽極側へ移動させる作用も期待できる。

電気防食において防食対象となる鉄筋へ電流を供給する方法には、外部電源方式と流電陽極方式の2つの方式がある。外部電源方式の概略図を図-3に示す。外部電源方式は、コンクリート中の鉄筋を直流電源のマイナス極に接続する。コンクリート表面には陽極と

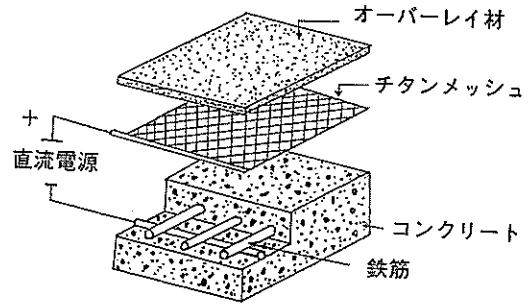


図-3 チタンメッシュ陽極方式の電気防食概略図

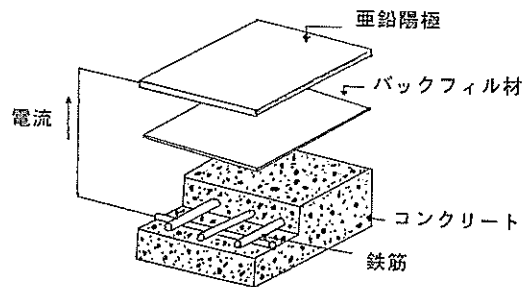


図-4 流電陽極方式概略図

なる電極を設置して直流電源のプラス極に接続し陽極から陰極となる鉄筋へ向かって適切にコントロールされた直流電流を流す方法である。流電陽極方式の概略図を図-4に示す。流電陽極方式は、コンクリート表面に亜鉛などの犠牲陽極を設置し、コンクリート中の鉄筋と接続することで犠牲陽極と鉄筋間に電位差が生じ、コンクリート表面の犠牲陽極からコンクリート中を通り鉄筋へ向かって電流が供給される方式である。本試験では、図-3に示す外部電源方式によって通電試験を行った。

3. 試験方法

3.1 供試体の概要

(1) 使用材料

供試体の製作に使用した材料を表-2に示す。コンクリートの配合はW/C=50%、目標強度24N/mm²以上とした。表-3には使用したコンクリートの配合を示す。

コンクリート中の鉄筋にはφ13mmの磨き丸鋼(JIS G3112 SR235相当)を使用した。またコンクリート中の鉄筋に電流を供給する陽極には、チタンメッシュ陽極を用いた。

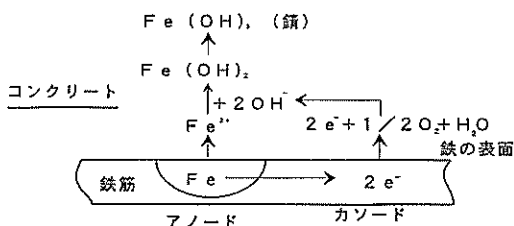


図-2 鉄筋腐食の反応機構図

表一2 使用材料一覧

材 料	規格、仕様	
コンクリート	セメント	普通ポルトランドセメント
	細骨材	新潟県姫川産の川砂
	粗骨材	新潟県姫川産の砕石
	混和剤	A E 減水剤
		空気量調節剤
NaCl	市販の食塩(NaCl99.0%)	
陽極材	チタンメッシュ陽極	
基準電極	埋設用鉛電極	
鉄筋	磨き丸鋼	
表面被覆材	エポキシ樹脂系	

表一3 コンクリート配合

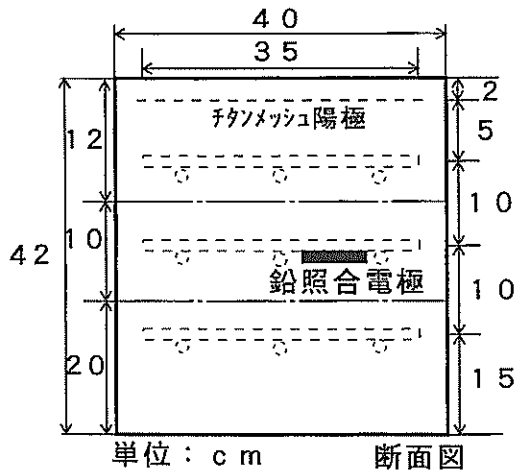
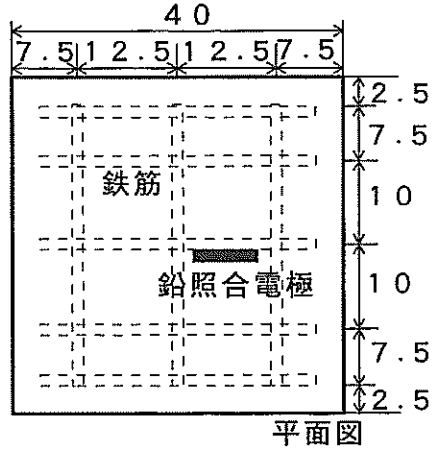
Gmax (mm)	スパン (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)		
20	12	4	50	48		
単 位 量 (kg/m ³)						
W	C	S	G	AE剤P-70	空気量調節剤	NaCl
165	330	880	978	C×0.25%	0.75×A	0~15

※1A: C×0.002%

さらに、鉄筋の電位測定には、鉛照合電極を用いた。

(2) 供試体の製作

試験に使用した供試体は図一5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。供試体は、深さ方向(3層)に、塩分濃度が分かれており、1層目(下段:20cm)を打設したのち24時間後に2層目(中段:10cm)を打設、さらに24時間後に3層目(上段:12cm)を打設した。各供試体の1~3層の塩分濃度の組み合わせは表一4に示すとおりである。供試体は3体(No.1~No.3)製作した。コンクリートへの塩分の導入は、コンクリートの打込み時に所定の濃度のNaClを溶解させた練混ぜ水を使用することによって行った。コンクリート中にあらかじめ含有させた塩分量は、海洋環境に暴露されたコンクリート中の含有塩分量としてこれまで報告されている数値をもとに設定した[4]。表一4に示す最も塩分量の多い組み合わせのNo.1の上段は、実際のコンクリート構造物の塩分浸透量に照らし合わせてコンクリートの材齢を推定すると、常に海水飛沫を受けるスプラッシュゾーンにおいて20年程度経過したものに相当する。文献[4]を参考に、実際の構造物の塩分浸透量からみた、各供試体の上段部分の予想材齢



図一5 供試体の形状寸法図

表一4 供試体含有塩分量

鉄筋位置	含有塩分量(NaCl)(kg/m ³)		
	No. 1	No. 2	No. 3
上段	15 (9.1)	8 (4.9)	4 (2.4)
中段	8 (4.9)	4 (2.4)	2 (1.2)
下段	4 (2.4)	2 (1.2)	0

()はCl⁻kg/m³

を表一5に示す。なお引用したデータは、測定された塩分量の最大値のデータを使用しており、コンクリートの種類によっても塩分浸透量は異なることから、実際とは異なる場合もある。

鉄筋は縦3本、横5本をそれぞれプラスチック製結束線により組み合わせて使用した(写真一2参照)。この鉄筋組を塩分量の異なるそれぞれのコンクリート層にコンクリート打込みと同時に埋設した。各段の鉄筋

表-5 含有塩分量から見たコンクリートの予想在齢表（スプラッシュゾーン）

鉄筋位置	供 試 体 No.		
	No. 1	No. 2	No. 3
上段（かぶり5cm）	～18年	5～年	1～2年

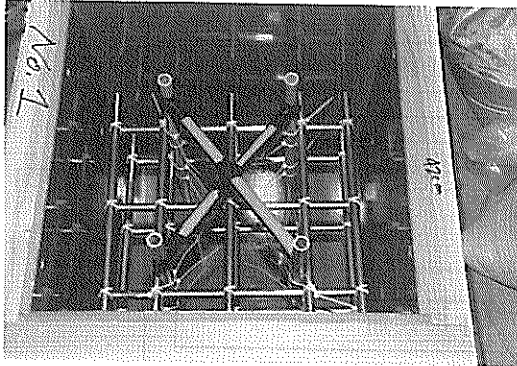


写真-2 コンクリート中の配筋写真

どうしは直接接触しないようにし、各鉄筋に接続したリード線によって外部において鉄筋同士の短絡および通電が行えるようにした。各供試体の中段の中心部には鉄筋の電位測定のための鉛照合電極を設置した。

チタンメッシュ陽極は、コンクリートの表面より2cmの深さの所に3層目のコンクリートの打込みと同時に埋設した。チタンメッシュ陽極から鉄筋までの距離は、上段、中段、下段それぞれ5cm、15cm、25cmである。

各供試体は28日間の湿空養生の後、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エポキシ系樹脂塗料を用いて塗布被覆した。写真-3にこの供試体の外観を示す。塗布被覆した理由は、コンクリート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、港湾技

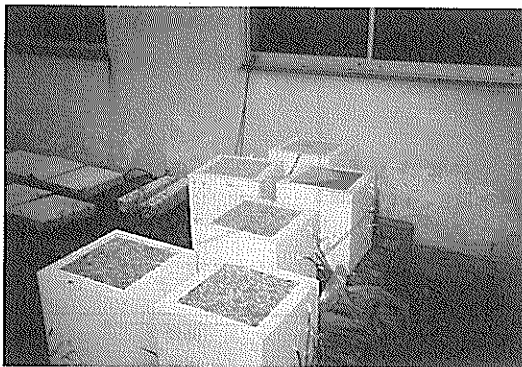


写真-3 供試体の外観写真

術研究所内の久里浜湾に面した、海に近い潮風の当たる屋外に暴露して測定に供した。

3. 2 試験の手順および測定項目

試験の手順を示したフロー図を図-6に示す。暴露4ヶ月後から各種試験を実施し、通電試験終了後に鉄筋を短絡した状態で8ヶ月間放置し、再度マクロ腐食電流の測定を行った。

暴露4ヶ月後に、まず無防食時すなわち無通電時における上、中、下段に埋め込まれている各段鉄筋の単独の電位である単極電位を測定した。図-7に中段鉄

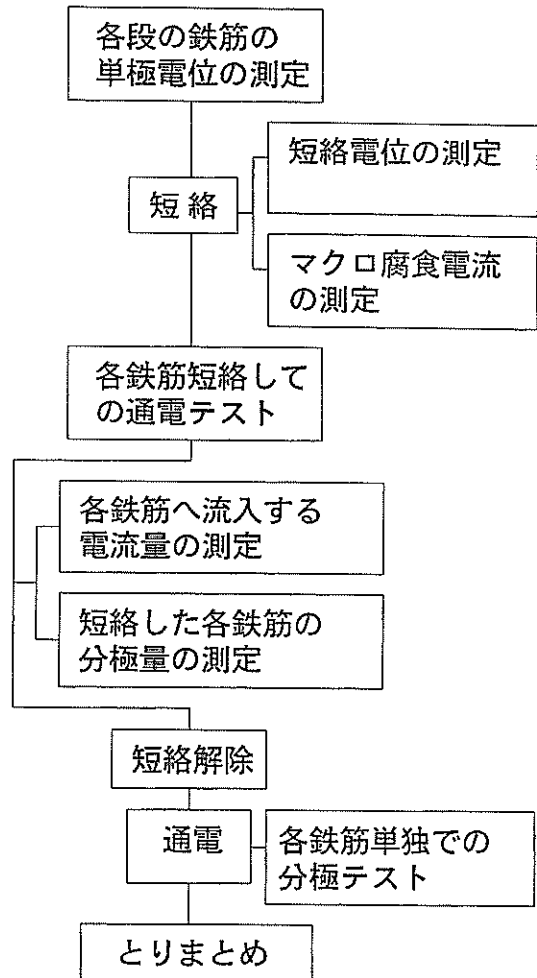


図-6 試験手順フロー図

筋の単極電位の測定要領図を示す。上段および下段の鉄筋を測定する場合は図中の電位差計Vの接続端子を切り替え、それぞれ中段鉄筋と同様に測定した。

次に、供試体中の上、中、下段の鉄筋から取り出しているリード線を短絡して、各供試体の鉄筋の短絡時の電位（以後短絡電位と呼ぶ）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。短絡した後のマクロ腐食電流の電流量，中段の短絡電位の測定要領図を図-8に示した。図中のスイッチ（S W）はオフのまま測定した。図中のAは無抵抗電流計，Vは電位差計を示す。

その後、コンクリート中に埋設してあるチタンメッシュ陽極を用いて、鉄筋を短絡させたまま通電試験を実施した。図-8には通電時の回路図もあわせて示す。通電時には図-8中のスイッチをオンにしてポテンシヨスタット（直流電源装置）からチタンメッシュ陽極を通して各段の鉄筋へ電流を供給し、通電試験を行った。測定項目は、鉄筋への流入電流量，通電時の鉄筋電位であるオン電位および通電を切った直後の鉄筋電位であるオフ電位である。測定要領は短絡時の電位，電流の測定の場合と同様である。通電は、常に鉄筋へ供給する電流量が一定となる定電流方式で行った。電流の供給は、小さい電流密度から徐々に大きくしていった。また、各電流密度におけるオフ電位と無通電時における鉄筋の安定した短絡電位とから復極量（分極量）を求めた。図-9に、この概念図を示した。

電気防食の防食効果を判定する基準の一つに100mV復極基準がある [5]。この100mV復極基準について図-9を用いて説明する。100mV復極基準とは、通電時の鉄筋電位をオン電位、通電停止直後の鉄筋電位をオフ電位とし、このオフ電位と通電停止4時間後の鉄筋電位との差が100mV以上あれば防食効果があると判断するもので、防食基準の一つにあげられている。しかしながら、この100mV復極基準については、本来、土中に埋設されるパイプラインの電気防食の防食基準をそのまま適用しているものであり、この基準については港湾環境に位置するコンクリート中の鉄筋にそのまま適用できるかは検討課題として残っている。そこで、本試験では通電前の各鉄筋の安定した短絡電位と、各電流密度で通電したときのインスタントオフ電位から分極量を求め、その値が100mVを満足していれば防食が達成されると仮定して試験を実施した。

さらに通電試験終了後、上記試験に引き続き、いったん鉄筋の短絡を解除し、各々の供試体の鉄筋個々で通電試験を実施した。ここでの通電試験による分極量の算出は、各電流密度におけるインスタントオフ電位

供試体

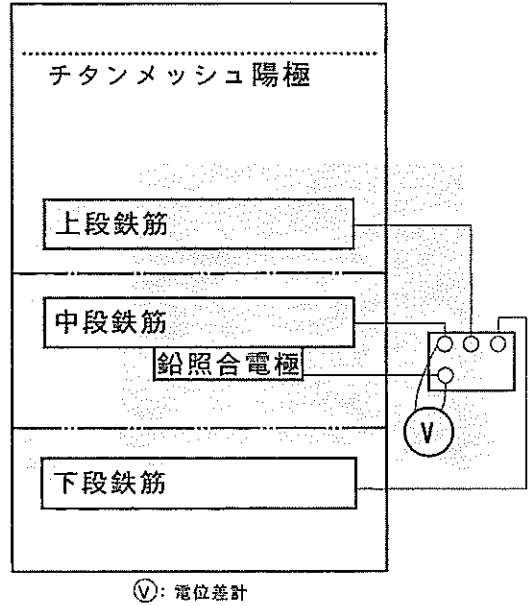


図-7 単極電位の測定要領図

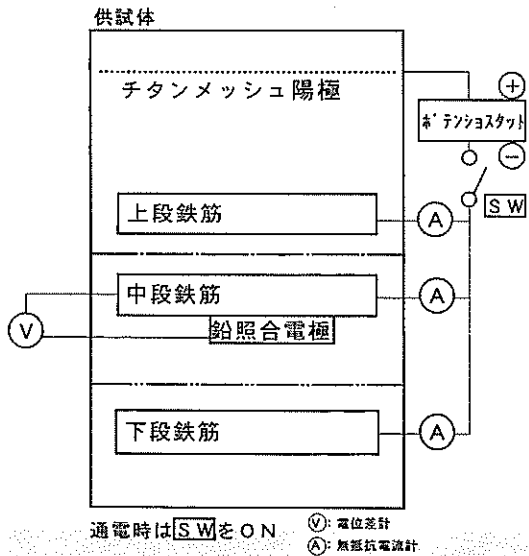


図-8 短絡回路および通電時の測定要領図

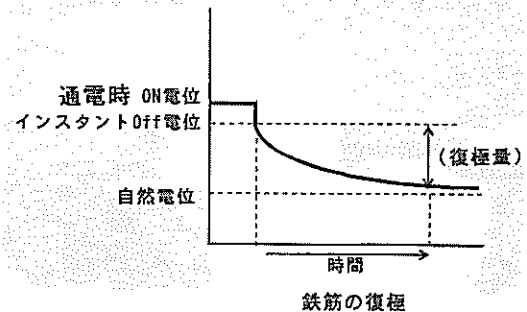


図-9 100mV復極基準概念図

と各鉄筋の通電前の安定した単極電位から求め、この試験においてもこの分極量が100mVを満足していれば防食が達成されていると仮定した。

鉄筋個々の単極での通電試験終了後、鉄筋を短絡したまま8ヶ月間放置し再びマクロ腐食電流の測定を行った。

なお、鉄筋電位の測定には鉛照合電極を用いた。本資料においては、測定した電位を銅/飽和硫酸銅照合電極(CSE)値に換算して示した。換算式を下記に示す。

(銅/飽和硫酸銅照合電極の値) =

$$(\text{鉛照合電極の値}) - 800\text{mV}$$

電流密度の計算には、鉄筋短絡時の通電試験においてはコンクリート中のすべての段の鉄筋表面積に対する値を用い、各鉄筋単極での通電試験時においては一段分の鉄筋の表面積に対する値とした。

試験項目を表-6に、また測定に使用した機器を表-7に示した。

表-6 試験項目一覧

試験項目	無通電時	通電時
供試体温度	○	○
鉄筋電位	○	○
流出入電流量	○	○
極間抵抗	○	×
分極量	×	○

表-7 使用測定機器一覧

測定項目	測定機器
供試体温度	熱電対
極間抵抗	LCRメーター
鉄筋電位	鉛電極 電位差計
電流	無抵抗電流計
通電装置	ボテンコスケット

4. 試験結果および考察

4.1 無防食時の鉄筋電位とマクロ腐食電流

ここでは暴露4ヶ月経過時の、無防食時すなわち供試体へ通電しないときの各鉄筋の単極電位および鉄筋を短絡することにより得られる短絡電位とマクロ腐食電流の測定結果について示す。

(1) 単極電位 (未短絡時の電位) と短絡電位

暴露開始後4ヶ月経過時の、通電前における各供試体の各鉄筋の単極電位と短絡後の電位を図-10に示す。縦軸に鉄筋の電位を、横軸にコンクリート中の鉄筋位置を示す。また図の右側には腐食の判断基準の一つであるASTM C876 [6] を添付した。

まず、図-10の各鉄筋の単極電位 (短絡前) について見てみると、鉄筋の腐食状態を自然電位から判断するASTM C 876に従って、「E (電位) \geq -200mV (CSE) は90%以上の確率で腐食無し」、 $[-200\text{mV} > E \geq -350\text{mV}]$ は不確定」、「 $[-350\text{mV} > E]$ は90%以上の確率で腐食あり」と判断すると、No.1, 2では上段が腐

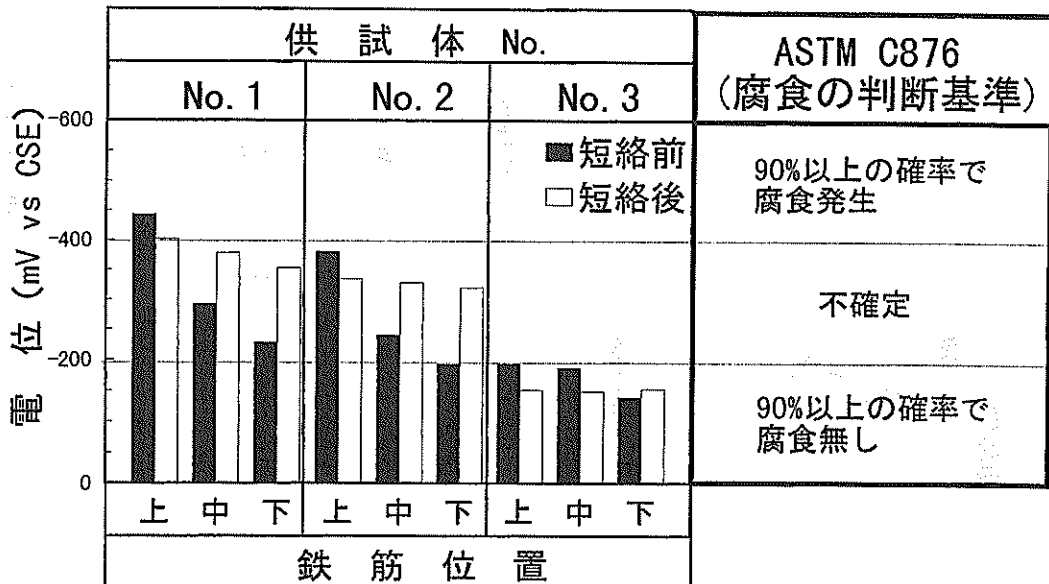


図-10 各供試体の単極および短絡電位

食している領域で、中、下段は不確定、No.3では上、中、下段全て腐食無し領域にあると判定された。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。

各段の鉄筋をリード線によって短絡した後の短絡電位を見ると、3つの供試体はいずれにおいても、上、中、下段の電位差は、単極の場合よりそれぞれ小さくなっている。No.1では短絡後の上段と下段の電位差が50mV程度、No.2では20mV程度でNo.3ではほとんど差がなかった。また、No.1, 2では、短絡前の単極電位よりも上段の鉄筋電位はわずかに貴となり、中段、下段では大きく卑となった。No.3は上、中段は貴となり、下段はわずかに卑となった。

(2) マクロ腐食電流

図-11は、各段の鉄筋を短絡した際のマクロ腐食電流の流出入結果の一例を示したものである。

マクロ腐食電流は、上段鉄筋から中、下段鉄筋へ流出した。中段鉄筋および下段鉄筋へ流入する電流量を比較すると、下段鉄筋へ多く流入し、中段鉄筋へ流入する電流量は少なかった。この結果は、各鉄筋を短絡することによって中、下段鉄筋の電位が図-10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。組み合わせた塩分濃度が最も大きいNo.1が、最もマクロ腐食電流の流出入量が大きかった。塩分量の少ないNo.3では、電流の流出入は確認されたものの、その電流量はごくわずかであった。

図-12(a), (b), (c)は、各供試体の1日のマクロ腐食電流の経時変化を示したものである。暴露開始後、一年経過した夏の測定データである。この間供試体は、通電試験以外の時は常に短絡状態（無防食）で暴露さ

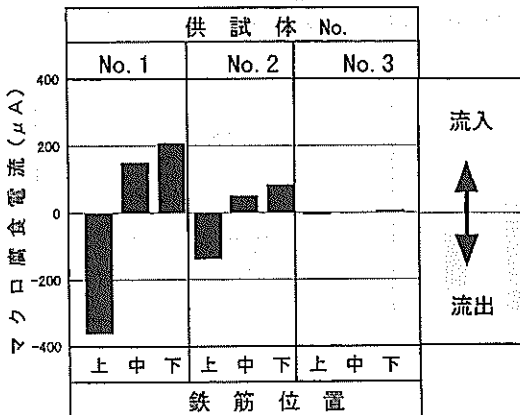


図-11 各供試体のマクロ腐食電流

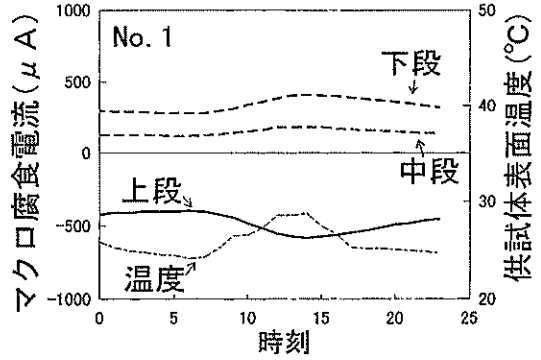


図-12(a) 各供試体のマクロ腐食電流の1日の変化 (No.1)

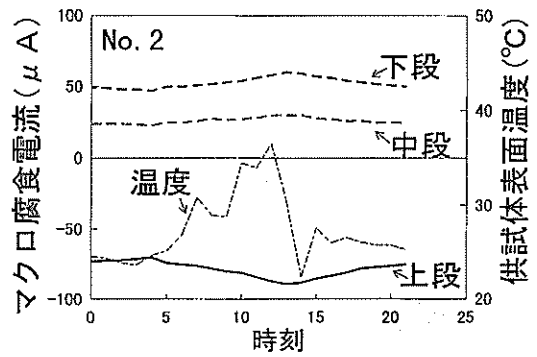


図-12(b) 各供試体のマクロ腐食電流の1日の変化 (No.2)

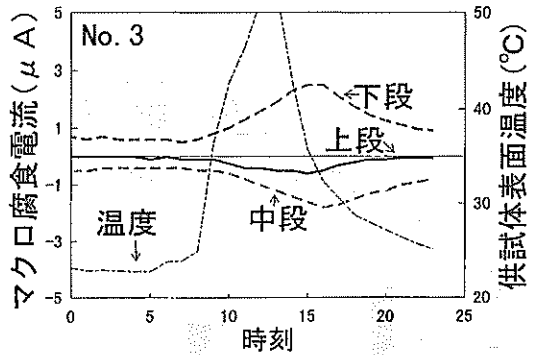


図-12(c) 各供試体のマクロ腐食電流の1日の変化 (No.3)

せてあった。この図から分かるように、流出側である上段鉄筋のアノード電流は、供試体温度の上昇とともに増加している。また、供試体温度が最も低くなる午前4～5時頃が最小となった。これにともない、中、下段鉄筋へ流入する電流量も変化した。図-11に示す4ヶ月時のマクロ腐食電流量と比較すると、最も塩分

量の多い供試体No.1では、電流量は増加しており、それ以外ではあまり変化は見られなかった。これは、供試体No.1では多くのマクロ腐食電流が発生したために腐食が進行したと考えられる。各供試体の流出側である上段鉄筋のアノード電流について見ると（No.3のみ中段鉄筋）、No.1では390～580 μ A、No.2では70～90 μ A、No.3では0.4～1.8 μ Aであり、No.1からNo.3へ塩分量が少なくなるにつれ腐食電流量が1オーダーずつ小さくなっている。塩分量の多いNo.1、No.2は、常に上段鉄筋がアノードであり中、下段鉄筋はカソードであった。しかし、No.3においては中段鉄筋が常にアノード側であり、上段鉄筋は場合によりアノード側となり電流を流出したり、あるいは流入電流がゼロを示した。これは、図-10の鉄筋電位の測定結果からも分かる通り、供試体No.3はコンクリート中の塩分量が少なく上、中、下段鉄筋で腐食量に差があまりなかったためと考えられる。

電流が流出するアノード側上段鉄筋（No.3のみ中段鉄筋）のマクロ腐食電流から算出した鉄筋の腐食速度を表-8に示す。腐食速度は、以下の式〔7〕を用いて算出した。

$$(A) = \text{腐食量}(\text{g}/\text{cm}^2/\text{hr}) = 1 \text{ 化学等量} \times \text{腐食電流}(\text{A}/\text{cm}^2) / 26.8(\text{A} \cdot \text{hr}) \quad (3)$$

$$(B) = \text{侵食量}(\text{cm}/\text{hr}) = (A) / \text{鋼の密度}(\text{g}/\text{cm}^3) \quad (4)$$

$$\text{腐食速度}(\text{mm}/\text{yr}) = (B) \times 24(\text{hr}) \times 365(\text{day}) \times 10(\text{mm}) \quad (5)$$

（ここで、Feの1化学等量は55.84/2=27.92(g)、鋼の密度は7.86)

最も腐食電流の大きいNo.1の腐食速度は、おおよそ0.003mm/yrとなった。阿部らの試験〔8〕によると、アノード部の塩分含有量が本試験と同量の15kg/m³、カソード部が0kg/m³で、アノード/カソードの面積比が1/2のとき、3ヶ月経過時までのマクロ腐食電流は0.2～0.45 μ A/cm²であり、前述の式から算出した腐食速度は0.003～0.005mm/yrとなることが報告されている。今回の試験結果はマクロ腐食電流から見ると0.33 μ A/cm²程度であり、上段鉄筋がアノードで中、下段鉄筋がカソードとなっており、鉄筋の面積比で見るとアノード/カソードが1/2となる。カソード部の塩

分量は異なるものの、マクロ腐食電流量はほぼ同程度であったため、阿部らの試験とほぼ同様の腐食速度が認められた。なお表-8のマクロ腐食電流量は図-11の値を用いた。

4.2 通電試験

4.1の試験終了後、通電試験を行った。ここではチタンメッシュ陽極から鉄筋へ通電した場合の各鉄筋の電位、電流の流出入量および鉄筋の分極量について測定した結果について考察した。

(1) 各鉄筋への通電時の電流の流入出傾向

図-13(a), (b), (c)にチタンメッシュ陽極から通電した時の、各供試体の鉄筋へ流入する電流量の測定結果を示す。横軸に全ての段の鉄筋に対する設定電流密度を、縦軸に各鉄筋の流入出電流量をプロットした。

図-13(a)よりNo.1の上段の鉄筋には、2mA/m²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、マクロ腐食電流の流出を続けた。電流密度が4mA/m²程度になるとマクロ腐食電流は停止し、上段の鉄筋へ中、下段と同量の電流の流入が認められた。さらに電流密度を大きくしていくと、その後は陽極に近い上段へ優先的に流入し、中、下段の鉄筋では流入量は徐々に増加していった。

図-13(b)のNo.2では、電流の流入出についてはNo.1とほぼ同様な結果を示した。ただし、電流密度が2mA/m²程度になるとマクロ腐食電流は停止し、上段の鉄筋への電流の流入が認められた。これは、No.1よりも供試体中の塩分量が少ないために鉄筋の発錆が少なく、マクロ腐食の程度が小さかったためと考えられる。

図-13(c)よりNo.3では、マクロ腐食電流の影響は見られず、小さな電流密度の段階から上段鉄筋へ最も多く流入した。中段、下段への流入量は、No.1,2の供試体と同様でほとんど差が認められなかった。

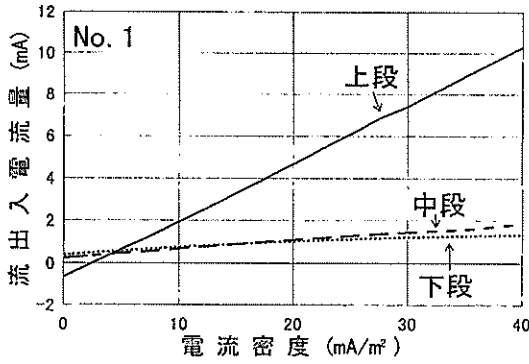
先にも述べたが、電流量の大きい設定時については、上段の鉄筋へ、その大部分の電流が流入しており、中、下段鉄筋では流入量にあまり差がなかった。各供試体間でも差は見られず、例えば防食電流密度が20mA/m²設定の時、流入割合は、上段が74%、中段が14%、下段が12%程度であった。各供試体で各鉄筋への流入電流の割合に差が見られなかったのは、各供試体中の塩分量の差が、コンクリートの抵抗を変化させるほどの影響を与えなかったためと考えられる。

(2) 各電流密度での鉄筋短絡時の分極量

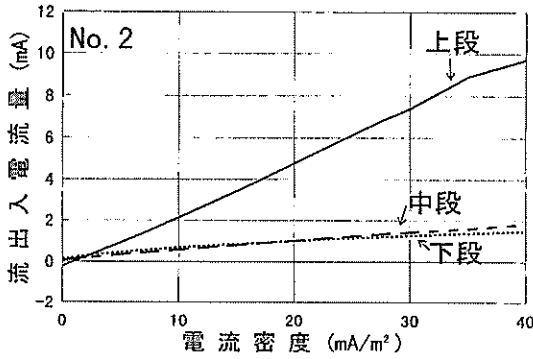
電気防食の防食効果を図-9に示した100mV復極基準で検討した。本試験では通電前の各鉄筋の安定した

表-8 マクロ腐食電流から求めた腐食速度

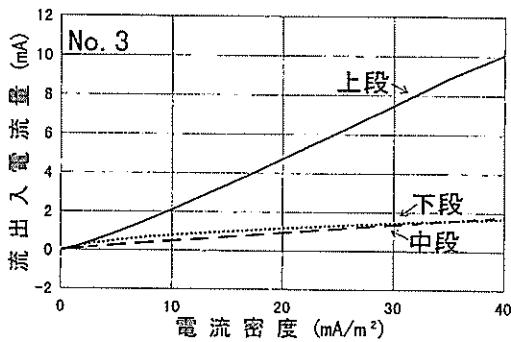
供試体No.	マクロ腐食電流量 (μ A)	腐食速度 (mm/yr)
No. 1	-362	0.0037
No. 2	-138	0.0014
No. 3	-6	0.0006



図一13(a) 各電流密度における電流の流入傾向 (No.1)



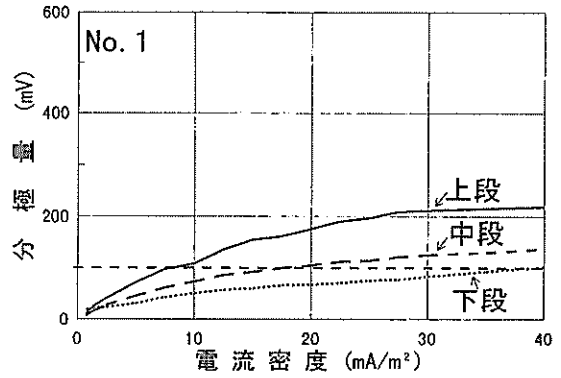
図一13(b) 各電流密度における電流の流入傾向 (No.2)



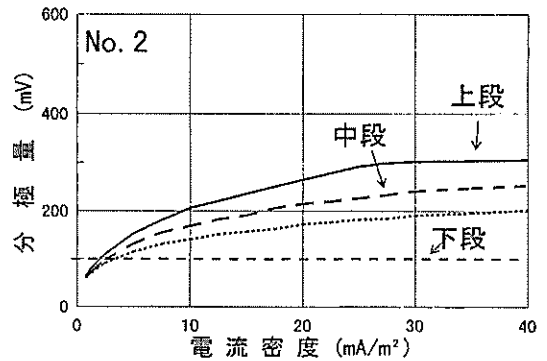
図一13(c) 各電流密度における電流の流入傾向 (No.3)

短絡電位と、各電流密度で通電したときのインスタントオフ電位から分極量を求め、その値が100mVを満足していれば防食が達成されると仮定し、試験を実施した。

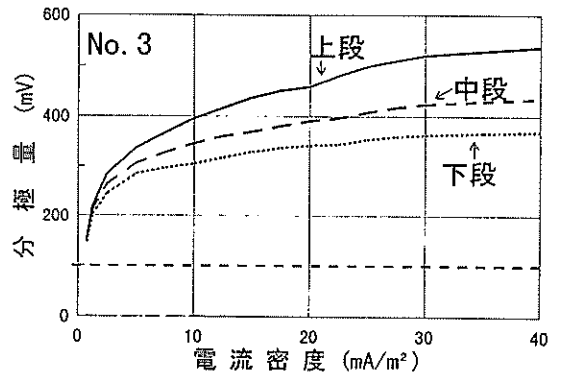
図一14(a), (b), (c)に各段の鉄筋を短絡させ通電を行った場合の、供試体の各電流密度における分極量の変化を示す。横軸は、供試体中の全ての鉄筋に対する設定電流密度、縦軸には各鉄筋の分極量を示す。また、表一9には、各供試体の100mV復極基準を達成するの



図一14(a) 鉄筋短絡時の各電流密度における分極量 (No.1)



図一14(b) 鉄筋短絡時の各電流密度における分極量 (No.2)



図一14(c) 鉄筋短絡時の各電流密度における分極量 (No.3)

表一9 短絡時の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

に必要な電流密度の値を示す。

図一14(a)より、No.1では、上、中、下段すべての鉄筋が100mV復極基準を満足する分極量を得るためにかなり大きな電流密度が必要となった。上段鉄筋のみ分極させるためには7.9mA/m²、中段鉄筋まで分極させるためには17.0mA/m²、さらに下段鉄筋まで分極させるためには40.0mA/m²を必要とした。3. 2. 1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し、下段鉄筋にはわずかな電流しか到達できなかった。その結果、腐食した下段鉄筋の100mV分極を得るために大きな設定電流密度が必要になったと考えられる。

図一14(b)より、No.2では、100mVの分極量を得るために上段鉄筋のみで2.0mA/m²、中段鉄筋まで分極させるには2.7mA/m²、さらに下段鉄筋まで分極させるには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分極を達成できた。これは、No.1の供試体と比較して、コンクリート中の含有塩分量が少なく、鉄筋の腐食があまり進行していないためと考えられる。

図一14(c)よりNo.3では、上、中、下段鉄筋全て1.0mA/m²以下のごくわずかな電流で100mV分極を満足した。No.2やNo.3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分極を達成できることがわかった。

本試験で使用した供試体では上段鉄筋がアノード、中、下段がカソードとなっている（ただしNo.3では上、中段がアノード）。電気防食の原理から考えると、外部電流は選択的にカソードへ流れやすい。本来なら、この供試体においてもカソードである中、下段（No.3では下段のみ）鉄筋へ多く流入するはずであるが、4. 2. (1)で示したように上段の鉄筋が最も陽極に近いためアノードにもかかわらず電流が多く流入し、大きい分極を示したものと思われる。

今回の試験では、図一10からわかるとおり、短絡後の上段と下段の鉄筋電位差が最も大きいもので50mV程度しかなかった。また鉄筋短絡時の外部電源による通電時の電流の流入を見ても、No.1では図一13(a)に示したように、最上段の鉄筋からのアノード電流（流出側）が2～3mA/m²の通電電流密度で停止した。つまり、この時点で供試体中では鉄筋の腐食は停止したと考えられる。このマクロ腐食が停止したと考えられる2～3mA/m²通電時の各段の鉄筋の分極量は、図一14(a)から上段が40mV、中段が30mV、下段が25mV程度である。つまり、鉄筋電位が100mVシフトを満たさ

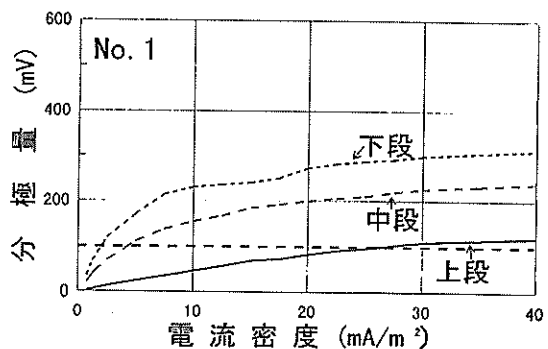
なくても流入電流から見ると防食が達成できていると考えられる。すなわち深さ方向でマクロ腐食を形成し短絡電位差が小さい場合、中、下段まで100mVシフトを達成しようとする上段鉄筋の分極量は200mV程度となる。今回の実験では、鉄筋間のマクロ腐食電流はあまり大きくなく、短絡後の電位差もそれほど大きくなかった。本試験のような場合の深度方向の防食基準の考え方については、電気防食は長期間実施されるものであり、経済性や陽極材の耐久性を考えるとできるだけ供給電流量は少ない方がよいと、今後の検討課題と考えられる。

同じかぶり厚さ位置の鉄筋同士で比較した場合は、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。図一13に示したように流出入電流量の値はそれぞれの供試体で差がなかったことにより、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結果となった。これは、次節で述べる、各段の鉄筋をリード線により短絡させない開路状態で一段ずつ通電試験を行った場合と同様の結果であった。

(3) 各電流密度における鉄筋未短絡時の分極量

コンクリート中の鉄筋を短絡させず開路状態のまま、上、中、下段それぞれ一段ずつ通電し、各鉄筋の分極量を測定した結果を図一15(a)、(b)、(c)に示す。横軸は鉄筋一段分に対する設定電流密度を、縦軸には各鉄筋の各電流密度における分極量を示す。また、表一10には100mVの分極を達成するのに必要な電流密度をまとめた。ここでは、通電前の各鉄筋の安定した自然電位（単極電位）とインスタントオフ電位から分極量を求め、この値が100mVを満足していれば防食が達成できると仮定して試験を実施した。

図一15(a)からわかるとおりNo.1の供試体では、供給電流密度を増加させるに伴い下段、中段、上段の順で



図一15(a) 鉄筋未短絡時の各電流密度における分極量 (No.1)

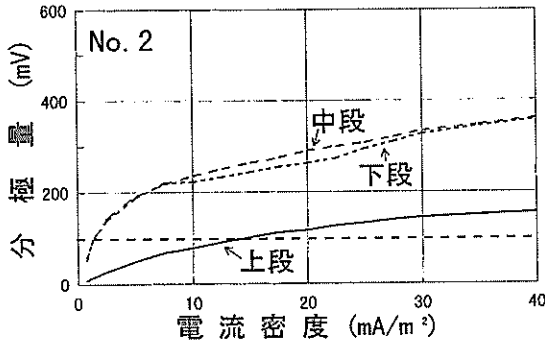


図-15(b) 鉄筋未短絡時の各電流密度における分極量(No.2)

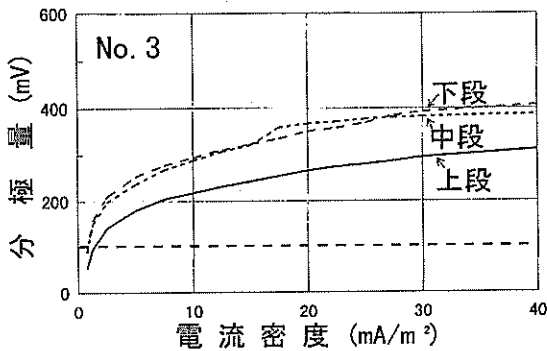


図-15(c) 鉄筋未短絡時の各電流密度における分極量(No.3)

表-10 未短絡時の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	25.8	14.4	1.3
中段	4.4	1.3	0.8
下段	2.1	1.3	0.8

100mVの分極を達成した。上段鉄筋は最も陽極に近い(かぶり薄い)にも関わらず、中、下段の鉄筋に比べ同じ電流密度における分極量が小さかった。この分極量は、鉄筋の埋設してあるコンクリート中の塩分量の違いによる鉄筋の腐食状態と関係があり、塩分量の多いコンクリート中の鉄筋つまり腐食が進行している可能性の高い鉄筋ほど分極しにくい結果となった。

図-15(b), (c)より、No.2,3では、中、下段はほぼ等しい分極曲線が得られ、上段鉄筋に比べ100mV分極を早く達成し、上段が最も分極しにくかった。図-15(a), (b), (c)は、コンクリート中の塩分量が多く腐食の進行が大きいと予想される鉄筋ほど分極しにくい傾向を示した。これらの結果は、これまで報告されている結

果と同様であった[9]。

5. 結論

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、その塩分濃度の組み合わせが異なる3種類の多段配筋した供試体を用い各試験を行った。含有塩分量の組み合わせは、供試体No.1で上段部に15kg/m³、中段部に8kg/m³、下段部に4kg/m³。No.2では、上段部に8kg/m³、中段部に4kg/m³、下段部に2kg/m³である。また、No.3では、上段部に4kg/m³、中段部に2kg/m³、下段部に0kg/m³である。これらの供試体を使用し、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、各鉄筋の分極量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単なる値を示し、最も単なる電位の値は、NaClを15kg/m³含有した条件の-300~-450mV (VS CSE)であった。
- (2) 各供試体において各段の鉄筋を短絡した場合、上、下段の電位差がそれぞれNo.1で50mV、No.2で20mV程度となり、No.3でほとんど電位差がなくなった。
- (3) 各段の鉄筋を短絡した場合、塩分量の多い上段の鉄筋から塩分量の少ない中、下段の鉄筋へマクロ腐食電流が流出した。
- (4) 各段の鉄筋を短絡して通電した場合、マクロ腐食電流の大きかった供試体No.1では、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、2mA/m²~4mA/m²であった。
- (5) 電気防食を実施した場合、電流密度を大きくした時の各鉄筋への流入電流量を比較すると、供試体中の塩分量にかかわらず、大部分の電流は上段鉄筋へ流入し、中、下段鉄筋への流入量は少なかった。
- (6) マクロ腐食電流の大きかった供試体No.1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、特に下段の鉄筋を100mV以上分極させるためには40mA/m²程度の電流密度が必要であった。
- (7) コンクリート中の含有塩分量の少ない、マクロ腐食電流の小さい供試体No.3では、1mA/m²以下の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。
- (8) 短絡状態での通電試験時において、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。

(9) 未短絡状態で各鉄筋の通電試験を行った結果、全ての供試体で塩分量の多い上段の鉄筋が最も分極しにくかった。

6. あとがき

本資料は、1年半の間に測定した成果をとりまとめたものである。電気防食は、実際には分極量を設定した後、数年あるいは数十年の単位で通電を実施するものであるため、電気防食の効果について考えると充分満足なデータを得るには至らなかった。しかし、コンクリートの深さ方向におけるマクロ腐食電流の流出入傾向および電気防食時の電流流出入傾向、陽極からの距離が異なる鉄筋の分極量の傾向についてはある程度把握することができたものと思われる。

今後の予定として、4. 1. (2) に示したようにマクロ腐食電流に温度条件の及ぼす影響が大きいことが分かったため、気候の異なる地域で同一の供試体を用いたマクロ腐食の測定および通電試験を実施し、気象条件が各種の特性に与える影響を試験する予定である。さらに長期間にわたり電気防食を実施し、最終的には供試体を破壊しコンクリート中の鉄筋の腐食状況やコンクリート中の塩分の分布状況などを観察し、それらの基礎的なデータをとりまとめ、試験成果を電気防食の設計法に反映させたいと考えている。

(1996年9月30日受付)

7. 参考文献

- 1) 社団法人 日本材料学会：鉄筋防錆に関する研究，1990.
- 2) Federal Highway Administration :Bridge Deck Rehabilitation-A1981 Perspective, prepared by the Office of Research, 1981.
- 3) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の電気防食法研究委員会報告書，1994.
- 4) 浜田秀則，R.N.Swamy：種々の海洋環境下におけるコンクリート中への塩化物イオンの浸透に関する一考察，港湾技術研究所資料，No.810，1995.
- 5) NACE:Standard Recommended Practice Cathodic Protection of Reinforcing Steel in Atmospherically Exposed Concrete Structures, NACE Standard PR 0290-90, 1990.
- 6) ASTM.C876：Half Potentials of Reinforcing Steel in concrete.
- 7) 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.
- 8) 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.2，1994.
- 9) 例えば，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.

港湾技研資料 No. 851

1996. 12

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 株式会社 昭和工業写真印刷所

Published by the Port and Harbour Research Institute
Nagase, Yokosuka, Japan

Copyright © (1996) by P.H.R.I

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.H.R.I

この資料は、港湾技術研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本資料の全部又は一部の転載、複写は、港湾技術研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。