

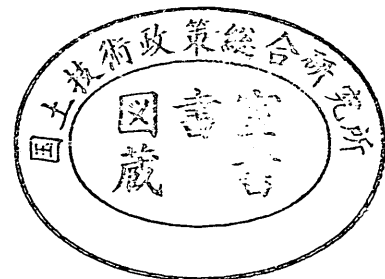
運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 33 NO. 2 JUNE. 1994

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I)

第33巻 第2号 (Vol.33, No.2), 1994年6月 (June.1994)

目次 (CONTENTS)

1. スペクトル形状による波群特性の変化
.....鈴木康正・河合弘泰・望月徳雄・松森孝弘..... 3
(Effect of Spectral Peakedness on Wave Grouping Characteristics
...Yasumasa SUZUKI, Hiroyasu KAWAI, Norio MOCHIZUKI and Takahiro MATSUMORI)
2. 衝撃碎波力に対する防波堤ケーソンの動的挙動
.....高橋重雄・下迫健一郎・上部達生 59
(Characteristics of the Dynamic Response of Composite Breakwater
against Impulsive Breaking Wave Force
.....Shigeo TAKAHASHI, Ken'ichirou SHIMOSAKO and Tatsuo UWABE)
3. 海中に設置された汚濁拡散防止膜の水理特性に関する研究
.....鶴谷広一・渡邊 弘・安岡大輔・工藤雅春 87
(Study on hydrodynamic characteristics of floating flexible barrier
.....Hiroichi TSURUYA, Hiroshi WATANABE, Daisuke YASUOKA and Massaharu KUDO)
4. 潜堤周辺の底泥の局所洗掘に関する実験的研究
.....鶴谷広一・吉永宙司・佐々木豊喜115
(Experimental Study on the Local Mud Scour near Submerged Walls
.....Hiroichi TSURUYA, Hiroshi YOSHINAGA and Toyoki SASAKI)
5. 合成版式ケーソンのフーチング部の力学特性と構造設計
.....清宮 理・山田昌郎141
(Mechanical Properties and Structural Design of Composite Footing
.....Osamu KIYOMIYA and Masao YAMADA)
6. 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
.....阿部正美・福手 勤・浜田秀則・三浦幸治181
(A Study of Current Density and Polarization Amounts by Cathodic
Protection for Macro Cell Corrosion of Steel Bars in Concrete
.....Masami ABE, Tsutomu FUKUTE, Hidenori HAMADA and Kouji MIURA)
7. 転圧コンクリートによる薄層オーバーレイ工法の開発
.....福手 勤・三浦幸治・浜田秀則・寺野宜成207
(Thin Bonded Overlay using Roller Compacted Concrete for Airport Concrete
Pavements
.....Tsutomu FUKUTE, Kouji MIURA, Hidenori HAMADA and Yoshinari TERANO)

8. 増粘剤を用いた高流動コンクリートの過密配筋部材への適用性
.....福手 勤・濱田秀則・三浦幸治231
(Applicability of super-workable concrete using viscous agent to densely reinforced
concrete members
.....Tsutomu FUKUTE, Hidenori HAMADA and Kouji MIURA)

6. 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

阿部正美*

福手 勤**

浜田秀則***

三浦幸治****

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対策法として、電気防食による方法が検討されている。

最近では、実構造物への試験的な施工も行われるようになった。しかしながら、電気防食を行うにあたり、施工や設計の面でまだ解決しなければならない事柄が多く残されている。その一つとして、コンクリート中の鉄筋へ流す適切な電流量や分極量についてはまだ十分に検討されていない。

本試験はコンクリート中の鉄筋がマクロ腐食を形成している条件下で、電気防食により通電を行った場合にアノード部、カソード部へ流入する電流量の割合や分極量等を把握する目的のために実施したものである。

試験結果より得られた主な点は以下の通りである。

- 1) A_a/A_c の差によるマクロ腐食電流の流出傾向は A_a/A_c が小さい程、大きい電流密度を示した。
- 2) 通電を行い、 A_a/A_c が非常に小さく、大きいマクロ腐食電流が発生している場合には、小さい防食電流ではマクロ腐食電流を停止させることは出来なかった。
- 3) 分極量は、アノード部に比べてカソード部で大きい傾向を示した。
- 4) 100mV以上の分極量を得るには、 A_a/A_c が $1/1 \sim 10/1$ では $10\text{mA}/\text{m}^2$ 程度、 A_a/A_c が $1/10 \sim 1/2$ の場合には $22 \sim 29\text{mA}/\text{m}^2$ 程度の電流密度が必要であった。
- 5) マクロ腐食電流の大小により、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変わってくるために、コンクリート中の鉄筋の腐食に見合った適切な防食電流を流す必要がある。

キーワード：電気防食、鉄筋コンクリート、海洋環境、マクロ腐食

*構造部 主任研究官 (防食担当)

**構造部 材料研究室長

***構造部 主任研究官 (コンクリート耐久性担当)

****構造部 材料研究室

6. A Study of Current Density and Polarization Amounts by Cathodic Protection for Macro Cell Corrosion of Steel Bars in Concrete

Masami ABE*

Tsutomu FUKUTE**

Hidenori HAMADA***

Kouji MIURA****

Synopsis

For corrosion prevention method of steel bars in concrete structures damaged by salt attack under marine environments, a cathodic protection method has been suggested.

This study was conducted to examine the current flow between anode area and cathode area, and the polarization amount of steel bars in concrete under both macro corrosion cell and cathodic protection.

The reinforced concrete specimens with cathodic protection were exposed in simulated splashing zone and various measurement were carried out.

Major findings are as follows :

- (1) As for the relation between macro corrosion current and A_a/A_c ratio (the ratio of anode area to cathode area of steel bars in concrete), the smaller was the A_a/A_c ratio, the larger was the current density.
- (2) Small current density of cathodic protection could not stop the large macro corrosion current.
- (3) Increase of polarization amount was larger at cathodic area than that at anode area.
- (4) Protective current density for satisfying the 100 mV criterion was about 10mA/m^2 ($A_a/A_c : 1/1 \sim 10/1$) and about $22 \sim 29\text{mA/m}^2$ ($A_a/A_c : 1/10 \sim 1/2$).
- (5) From test results that an adequate current density changes according to the magnitude of macro corrosion cell, it is necessary to apply suitable protective current density to the steel bars decided by the corrosion degree.

Key Words : Cathodic protection, Reinforcement Concrete, Marine Environment, Macro Cell Corrosion.

*Senior Research Engineer, Structural Engineering Division

**Chief of Materials Lab, Structural Engineering Division

***Senior Research Engineer, Structural Engineering Division

****Member of Materials Lab, Structural Engineering Division

目 次

要旨	181
1. まえがき	185
2. 試験の内容	185
2. 1 試験に使用した供試体および暴露環境	186
2. 2 測定項目	188
3. 試験結果および考察	188
3. 1 無防食時のマクロ腐食電流と電位	188
3. 1. 1 マクロ腐食電流の経時変化	188
3. 1. 2 一日の環境変化に伴うマクロ腐食電流の変化	190
3. 1. 3 単極電位および短絡電位	192
3. 2 通電試験	193
3. 2. 1 アノード部, カソード部へ流入する電流	193
3. 2. 2 アノード部, カソード部の電位の分極量	195
3. 2. 3 アノード部およびカソード部のみへの通電試験	199
3. 3 無防食供試体の腐食状況	200
4. 結論	204
5. あとがき	205
6. 参考文献	205

1. まえがき

港湾コンクリート構造物、特に、栈橋の上部工において塩害によるコンクリートの劣化が見られるようになり、コンクリートの劣化を防止する対策法がいろいろと考えられている。

塩害によるコンクリートの劣化は図-1に示すように、外部からの塩化物イオンがコンクリート中へ浸透し、ある一定量に達するとコンクリート中の鉄筋の不動態膜を破壊することから始まる。不動態膜の破壊に伴い鉄筋は錆の生成が起り、錆の生成物の膨張によりコンクリートにひびわれを発生させる。発生したひびわれの部分から塩化物イオンや酸素が容易にコンクリート中の鉄筋へ入り込み、ますますコンクリート中の鉄筋の腐食が促進されることとなる。

コンクリートの劣化を防止する対策法としては従来から物理的な断面修復、ライニング工法等様々な手法が提案されている¹⁾。しかし、一旦、塩化物イオンがコンクリート中に浸透してしまうと、図-2に示すように補修部と非補修部とでマクロセルを形成して非補修部がアノード、補修部がカソードとなるマクロ腐食電流が発生して非補修部の鉄筋の腐食が進むこととなる。したがって、このような対策法では腐食の抑制にはなるが長期間鉄筋を腐食から守ることは非常に困難であるために、より確実な防食法の開発が必要である。

最近、劣化を防止する方法として電気防食法が注目を集めている。この方法は、わが国では数年前より供試体を用いた試験や実構造物への適用試験²⁾等が実施されている。しかしながら、電気防食を行うにあたり防食施工や設計の面でまだ明かになっていない事柄が多く残されているのが現状である。その一つとして、電気防食を実施する場合に、コンクリート中の鉄筋へ流す電流量の間

題がある。コンクリート中の鉄筋の腐食はアノード部、カソード部のマクロセルを形成することにより発生する。このマクロセルを形成している部分に電気防食を行う場合に、防食効果を期待するための適正な防食電流を流す必要がある。そのためにはアノード部、カソード部へ流入する電流の割合やアノード部およびカソード部における分極量を把握し、コンクリート中の鉄筋の腐食に見合った適切な防食電流密度を明らかにしておくことが大切である。

なお、電気防食を行ううえで重要と思われる、これらの事項について検討した文献等については国内、外ほとんど見受けられないのが現状である。

以上のような理由から、本試験ではコンクリート中の鉄筋にマクロセルが形成している条件において、以下に示す4つの項目について検討することとした。

- ① コンクリート中の鉄筋のアノード部面積に対するカソード部面積の比(以下 A_a/A_c と呼ぶ)によるマクロ腐食電流の検討。
- ② 電気防食を実施した場合のアノード部、カソード部へ流入する電流量や分極量の傾向の把握。
- ③ マクロ腐食を停止させるに必要な電流密度や分極量の検討。
- ④ 無防食供試体を解体してコンクリート中の鉄筋のマクロ腐食の確認。

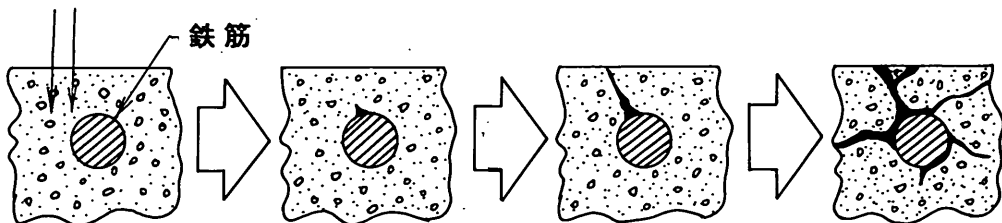
以上の4項目について検討するための試験を行った。本報告はこれらの試験結果を取りまとめたものである。

2. 試験の内容

暴露環境に設置された供試体について、まず、 A_a/A_c に対するマクロ腐食電流の流出状況を測定した。

その後、通電試験用供試体については外部電源方式による電気防食を実施し、 A_a/A_c の差によるアノード部、

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。

腐食生成物の膨張で、コンクリートにひびわれが発生する。

錆の膨張で、ひびわれ幅が大きくなり鉄筋の腐食が促進される。

図-1 コンクリート中の鉄筋の腐食過程

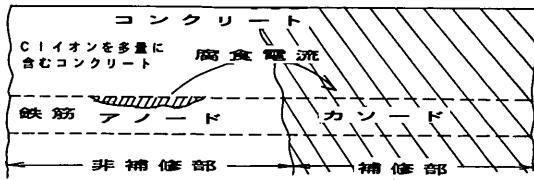


図-2 補修部，非補修部によるマクロ腐食発生の概念図

カソード部へ流れる防食電流の測定と通電されたアノード部，カソード部の電位の分極量の違いを測定した。その後，これらの試験結果より A_a/A_c に対して防食効果の期待出来ると考えられる防食電流密度や分極量を求めた。

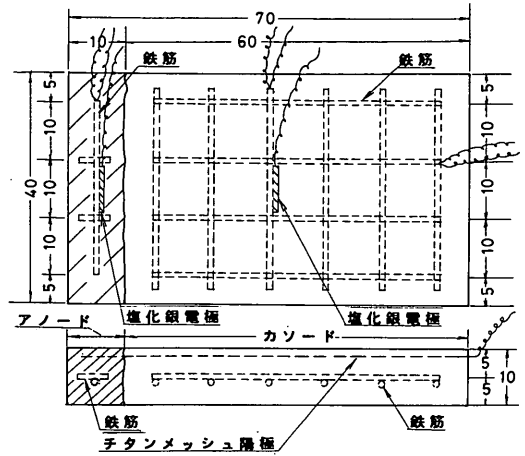
無防食供試体についてはマクロ腐食電流の測定，電位の測定を行った。また，供試体を解体してコンクリート中の鉄筋の腐食状況を観察した。

2.1 試験に使用した供試体および暴露環境

試験に使用した通電試験用供試体を図-3(a)~図-3(f)に示す。コンクリート中の鉄筋をアノード部，カソード部に分けることと，アノード部とカソード部の面積比を変えてマクロ腐食の大小を作るために表-1に示すようにコンクリート中の鉄筋のアノード部，カソード部の面積比を変えて供試体を製作した。また，コンクリート中の鉄筋をアノード部，カソード部に分けるために直接接触しないようにし，アノード部，カソード部の鉄筋に接続しているリード線により供試体の外で短絡出来るようにした。使用した鉄筋は $\phi 13\text{mm}$ の丸鋼で鉄筋表面は前もってサンドブラスト処理したホワイトメタル状のものを使用した。アノード部の鉄筋はサンドブラスト処理後，鉄筋に海水を散布して鉄筋表面に薄い錆が散見される状態のものを使用した。その鉄筋の表面状況を写真-1に示す。なお，電気防食の方式は外部電源方式で，陽極材としてはチタンメッシュ陽極を用いた。各供試体には図-4に示す寸法のチタンメッシュ陽極材をコンクリート表面より下2cmの深さの所へ埋設した。

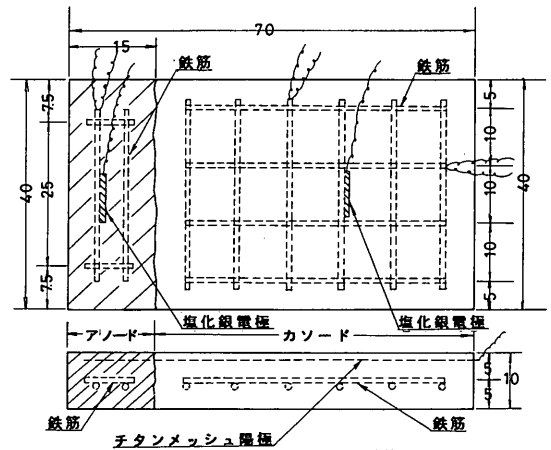
なお，供試体No. 7, No. 8については電気防食を行わず，無防食のまま暴露環境に設置し，マクロ腐食の傾向を直接調べる供試体とした。無防食供試体の A_a/A_c は $1/10$ (No. 7), $1/1$ (No. 8) である。

コンクリートの配合は表-2に示すように，水セメント比50%，スランプ12cm，呼び強度240kgf/cm²である。また，コンクリート中の鉄筋のアノード部を作るために，アノード部のコンクリートには表-1に示すように15



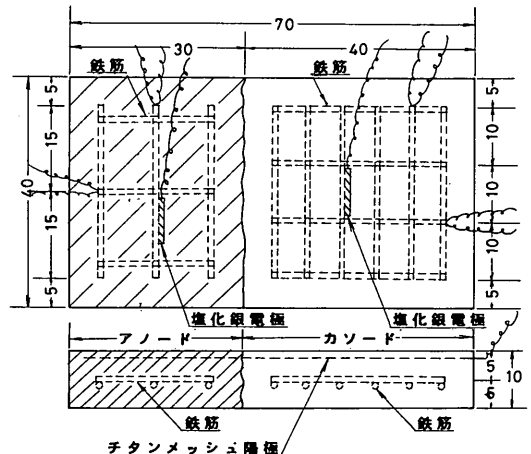
単位：cm

図-3(a) 供試体の形状寸法 (A_a/A_c : $1/10$) No.1



単位：cm

図-3(b) 供試体の形状寸法 (A_a/A_c : $1/5$) No.2



単位：cm

図-3(c) 供試体の形状寸法 (A_a/A_c : $1/2$) No.3

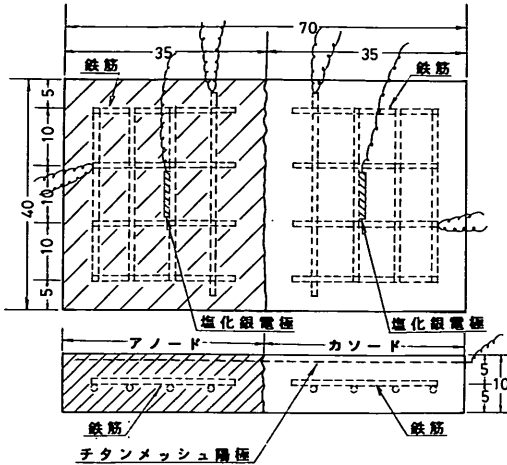


図-3(d) 供試体の形状寸法 (Aa/Ac : 1 / 1) No.4

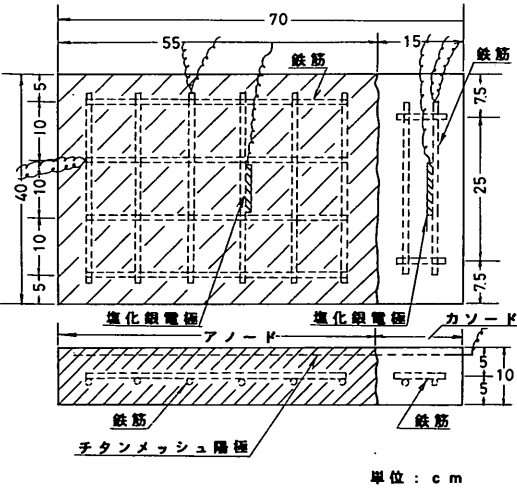


図-3(e) 供試体の形状寸法 (Aa/Ac : 5 / 1) No.5

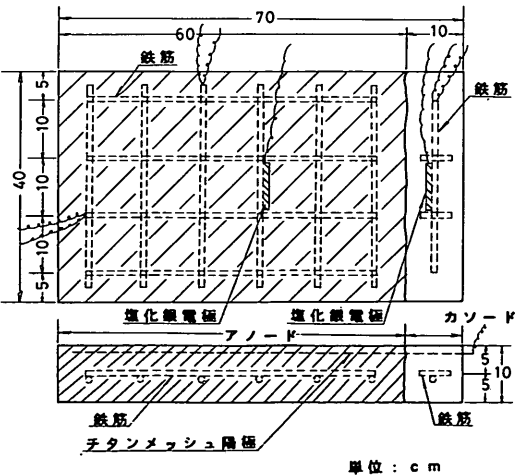


図-3(f) 供試体の形状寸法 (Aa/Ac : 10 / 1) No.6

表-1 供試体の条件

供試体No.	Aa/Ac 面積比*	コンクリートの条件	
		アノード部	カソード部
1	1/10	NaCl 15kg/m ³ 混入	NaCl 混入無し
2	1/5	NaCl 15kg/m ³ 混入	NaCl 混入無し
3	1/2	NaCl 15kg/m ³ 混入	NaCl 混入無し
4	1/1	NaCl 15kg/m ³ 混入	NaCl 混入無し
5	5/1	NaCl 15kg/m ³ 混入	NaCl 混入無し
6	10/1	NaCl 15kg/m ³ 混入	NaCl 混入無し
7	1/10	NaCl 15kg/m ³ 混入	NaCl 混入無し
8	1/1	NaCl 15kg/m ³ 混入	NaCl 混入無し

* : アノード部/カソード部の鉄筋の表面積比を示す。

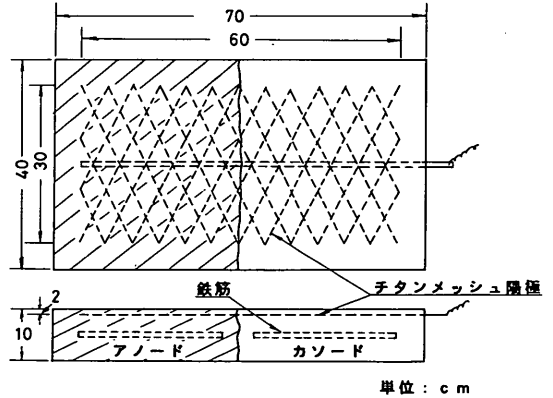


図-4 チタンメッシュ陽極の配置状況

表-2 コンクリートの示方配合

Gmax (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)
20	12	4 ± 1	50	47
単位量 (kg/m ³)				
水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和材
180	360	814	932	450

kg/m³のNaClを練り混ぜ水に混入して使用した。セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。細骨材は鬼怒川産川砂、粗骨材は岩瀬産碎石をそれぞれ使用した。

チタンメッシュ陽極を適用した電気防食法の構成を図-5に示す。なお、今回のチタンメッシュ陽極材の設置に当たっては、直接コンクリートの中へ埋設したのでオーバーレイ材は使用していない。

供試体を暴露した試験場所は港湾技術研究所内護岸沿いに設けられた野外の暴露試験場である。試験場の環境条件としては図-6に示すように海水のシャワーが供試体に一定時間かかる環境である。すなわち、野外の試験場に暴露された供試体は一日に2回（昼間の午前中1回、夜間1回）海水のシャワーを浴びるサイクルを繰り返す条件である。シャワーの時間は1回につき約3時間30分である。海水シャワーのかかっていない時間には雨天を除いて供試体の表面は乾燥状態になる。

2.2 測定項目

図-7および図-8の試験フロー図に示すように、まず、図-7に示す通電試験用供試体（No. 1～No. 6）は、電気防食による通電試験を開始する前に、アノード部、カソード部にそれぞれ取り付けてある照合電極（塩化銀電極）によって両極の単極電位を測定した。その後、アノード部、カソード部を短絡して図-9に示すようにアノード部からカソード部へ流れるマクロ腐食電流および両極の短絡電位を測定した。この無防食の短絡状態を約6ヶ月間続けた後、一度開路状態にして両極における開路電位を測定した。なお、後述するように、ここで測定された開路電位（自然電位）は通電後の分極量を求める自然電位として用いた。

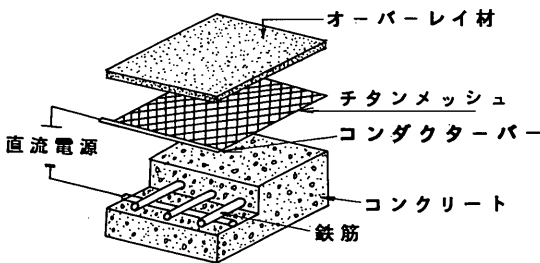


図-5 チタンメッシュ方式の構成

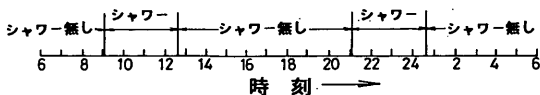


図-6 暴露環境条件

開路電位が安定した時点でアノード部およびカソード部を再び短絡してチタンメッシュ陽極を用いて通電試験を実施した。通電試験は、一定の電流密度の電流を流す定電流法により行った。流す電流量は当初、小さい電流密度で流して順次電流密度を大きくしていき、各々の電流密度に対する各供試体のアノード部およびカソード部へ流入する電流量と電位を測定した。その後、一度、通電を切り、無防食状態（約1ヶ月間）で放置した後に再度通電を行った。この通電（定電流法）はアノード部およびカソード部を別々に行い、前述したアノード部およびカソード部を短絡した状態における通電試験結果との比較検討を行った。

なお、通電時の電流密度はコンクリート中の鉄筋の表面積当たりの値とした。

図-10に通電時におけるアノード部、カソード部へ流入する電流の測定要領を示す。アノード部、カソード部へ流入する電流の測定方法はアノード部、カソード部の通電回路間に0.1Ωの固定抵抗を挿入して電圧降下法により測定した。電位の測定要領は図-9に示す方法と同じである。分極量の算出については安定したアノード部およびカソード部の開路電位と通電中のインスタントオフ電位（一時、通電を切った直後の1～2秒程度の間測定される電位）の差から求めた。また、供試体製作時にコンクリート中に温度センサーを埋設しておき温度センサーにより供試体中の温度を測定した。

無防食供試体（No. 7, No. 8）については、図-8に示すように暴露期間中、マクロ腐食電流および短絡電位を測定した。その後試験終了時に供試体を解体してコンクリート中の鉄筋の腐食状況を観察、調査した。また、コンクリートの細孔容積を求めるために、水銀圧入式ポロシメーターを用いた測定を行った。

3. 試験結果および考察

3.1 無防食時のマクロ腐食電流と電位

3.1.1 マクロ腐食電流の経時変化

図-11は各供試体におけるアノード部から流出するマクロ腐食電流の流出傾向を示す。

図-11に示すようにAa/Acに対するマクロ腐食電流の流出傾向は、Aa/Acが非常に小さい場合に大きい腐食電流が流出していることが分かる。Aa/Acが1/10の供試体No. 1では0.7～2 μA/cm²の流出が見られ、1/5の供試体No. 2では0.5～1 μA/cm²の流出、1/2の供試体No. 3では0.25～0.5 μA/cm²の流出であった。Aa/Acの面積比が逆に大きい5/1の供試体

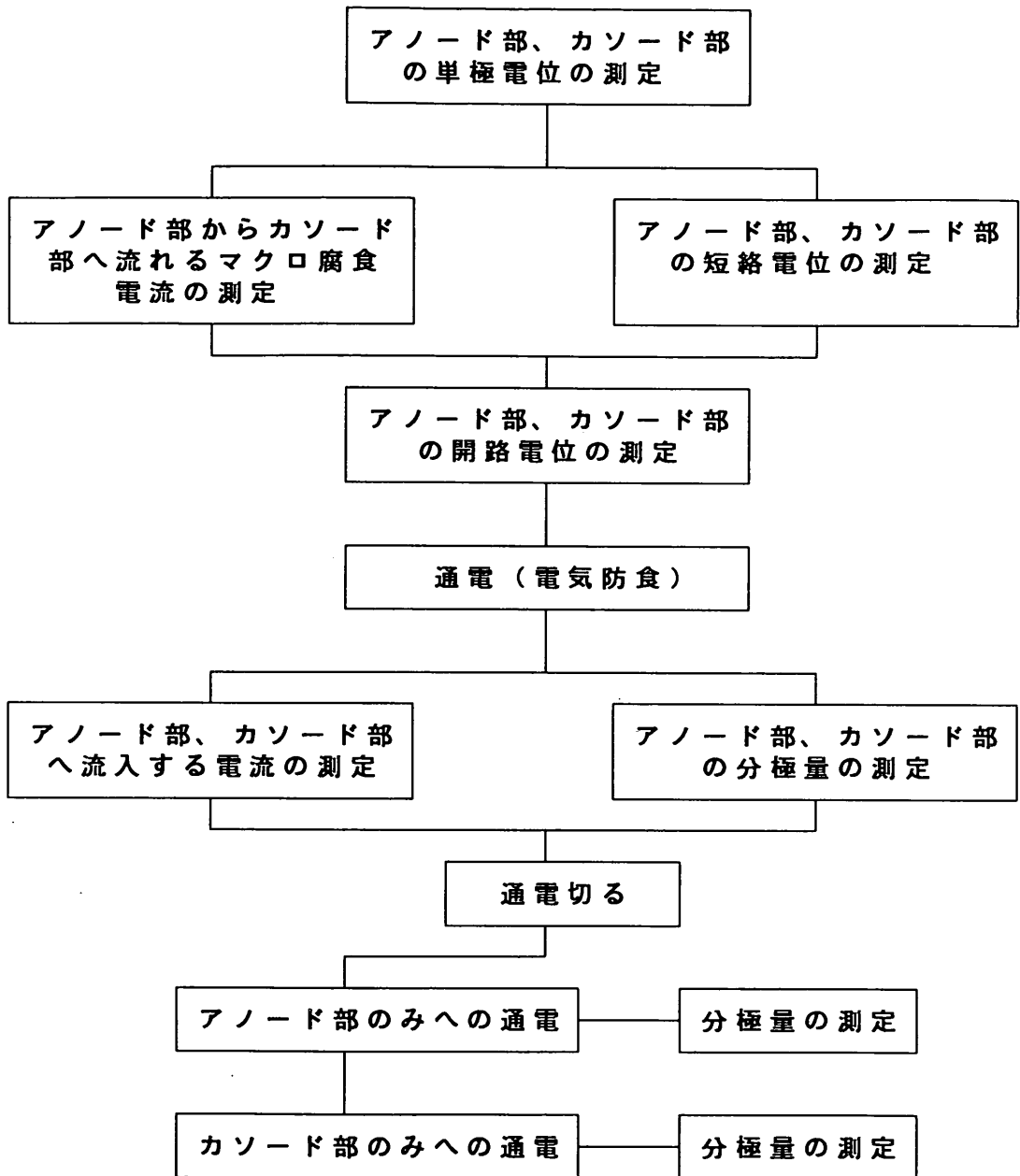


図-7 通電試験用供試体のフロー図

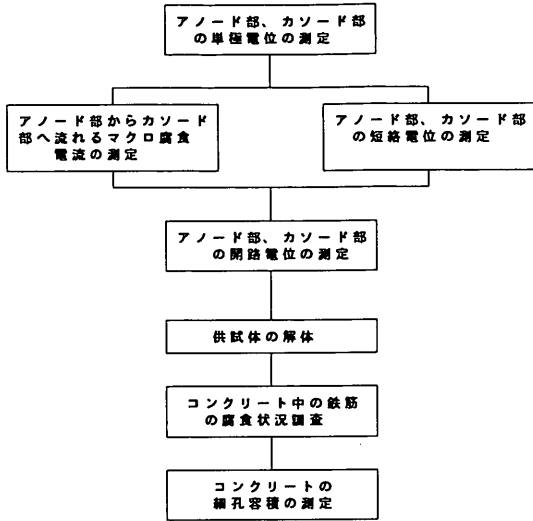


図-8 無防食供試体の試験のフロー図

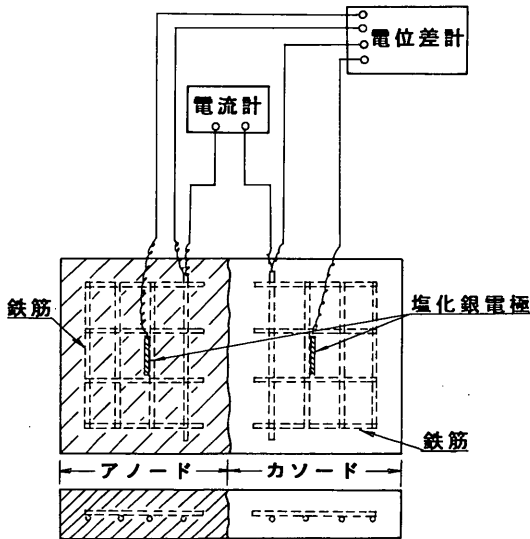


図-9 マクロ防食電流及び電位の測定要領図

No. 5や10/1の供試体No. 6では、流出する電流密度は非常に小さく $0.1\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 以下であった。

したがって、 A_a/A_c が小さい程アノード部から流出するマクロ腐食電流は大きく腐食速度が大きいこととなる。

表-3に A_a/A_c に対するマクロ腐食電流から計算したアノード部の鉄筋の腐食速度を示す。なお、腐食速度は次式³⁾により算出した。

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

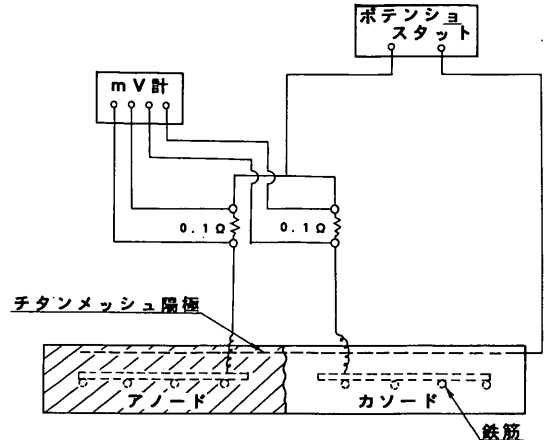


図-10 アノード部、カソード部の流出、流入電流測定要領図

$$(B) = \text{侵食量 (cm/hr)} = (A) / 7.86 \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad (2)$$

$$\text{腐食速度 (mm/yr)} = (B) \times 24 \times 365 \times 10 \quad (3)$$

腐食速度はマクロ腐食電流に比例して流出電流が大きい程、腐食速度の大きいことが認められる。例えば、 A_a/A_c が1/10の供試体No. 1と A_a/A_c が1/1のNo. 4とを比較すると、約4~7倍程度、供試体No. 1の方が大きい腐食速度を示す。そのため、コンクリート中の鉄筋に A_a/A_c の非常に小さいマクロ腐食が形成された場合には、そのアノード部に集中した腐食が発生することとなる。測定結果より、 A_a/A_c とマクロ腐食電流の関係を整理すると図-12のようになる。

3.1.2 一日の環境変化に伴うマクロ腐食電流の変化

一日の環境サイクルに伴うマクロ腐食電流の流出の傾向を整理すると図-13、図-14のようになる。

図-13は天候が晴の条件である。この場合には A_a/A_c が1/10, 1/5, 1/2, 1/1では14時~15時にかけて流出する電流量が大きくなる傾向が見られた。この時間帯は最も気温が上がる時間であり海水シャワー(8:30~12:00)がかかった後、コンクリート表面が乾燥に向かう状態である。その上、供試体の温度も15時に最も高い値を示した。それに対して、朝方や夜間における電流量は小さい傾向を示す。したがって、マクロ腐食電流の流出の増減傾向はコンクリート表面状態と温度に影響を受けるものと考えられる。14時~15時頃に大きいマクロ腐食電流が流れたのは温度の上昇とコンクリートの乾燥によるコンクリート中への酸素透過性の増加によりマクロ腐食反応が活発に行われたためと思われる。

これに対して、図-14に示す、天候が雨の条件の場合には一日を通してほぼ同じ程度のマクロ腐食電流を示し、

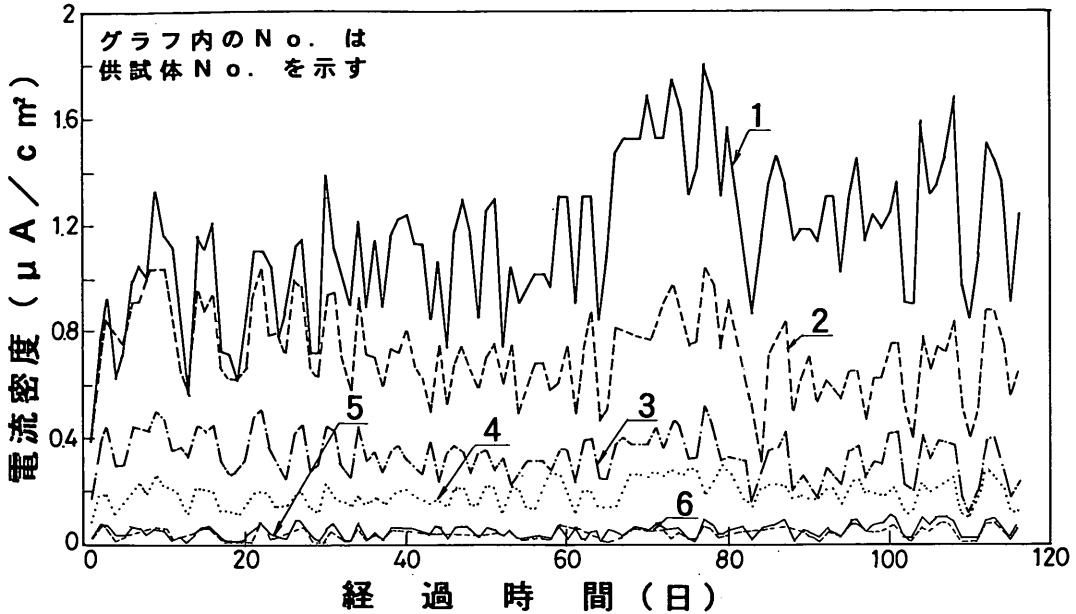


図-11 マクロ腐食電流の経時変化

表-3 マクロ腐食電流から求めたアノード部鉄筋の腐食速度

供試体No.	Aa/Ac 面積比	腐食速度 (mm/yr)
1	1/10	0.008~0.021
2	1/5	0.005~0.011
3	1/2	0.003~0.005
4	1/1	0.002~0.003
5	5/1	<0.001
6	10/1	<0.001

晴の条件のような電流の増加のピークは見られない。この理由は、コンクリート表面が雨により常に湿潤状態に保たれていることと、気温の上昇が晴の場合のように大きくなかったためと思われる。すなわち、コンクリート表面が湿潤状態であり酸素の拡散はコンクリートの細孔の封鎖によりコンクリート中への酸素透過性が晴の場合よりも少ないためにマクロ腐食の作用は晴の場合よりも活発ではなかったものと考えられる。

また、海水シャワーの無い条件での一日のマクロ腐食電流の傾向を測定してみると図-15の下図のような結果が得られた。これによると昼間の午前から午後にかけて気温の上昇とともにマクロ腐食電流は増加していき、午後の14時~15時頃にマクロ腐食電流のピークが見られた。その後、夕方からゆっくり低減する傾向を示した。したがって、マクロ腐食の活性はコンクリートの温度に大きく影響されることが分かる。

このマクロ腐食電流の一日の傾向は、図-15の上図に示す流電陽極方式による電気防食試験の防食電流の増減傾向とよく類似していたり。また、図-16に示すように、外部電源方式による電気防食でコンクリート中の鉄筋の電位を一定に保つように設定する定電位法による試験では⁵⁾、昼間の13時~15時頃が最も設定した電位を保つために必要な電流量の大きいことがうかがえる。このことは、図-15のマクロ腐食電流の流出量が、この時間帯で大きくなるためにコンクリート中の鉄筋の設定電位を維持

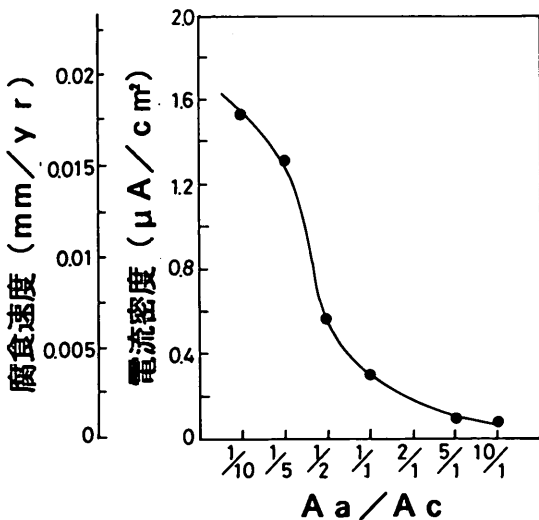


図-12 Aa/Acとマクロ腐食電流の関係

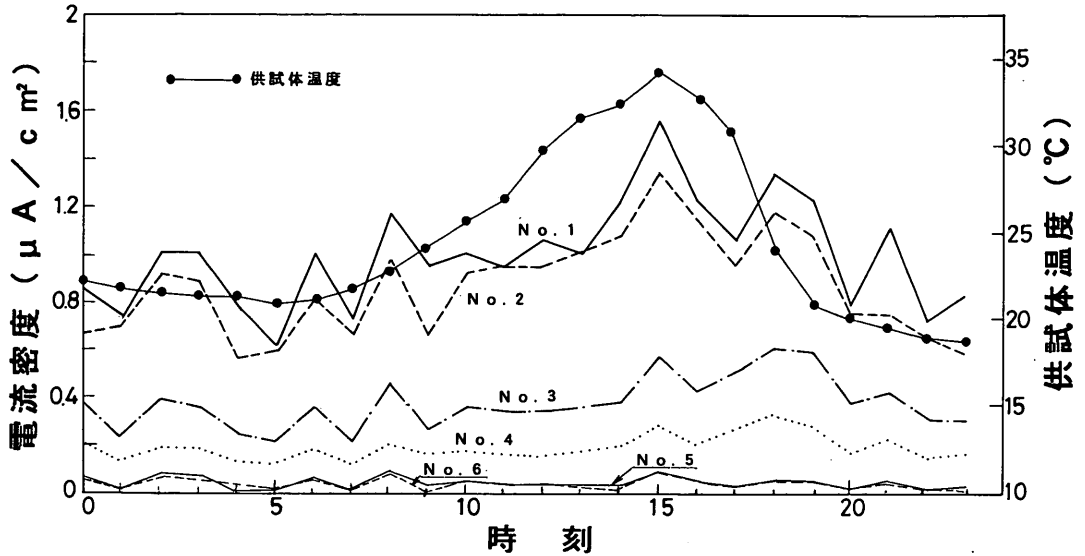


図-13 各供試体のマクロ腐食電流の一日の変化 (天候：晴)

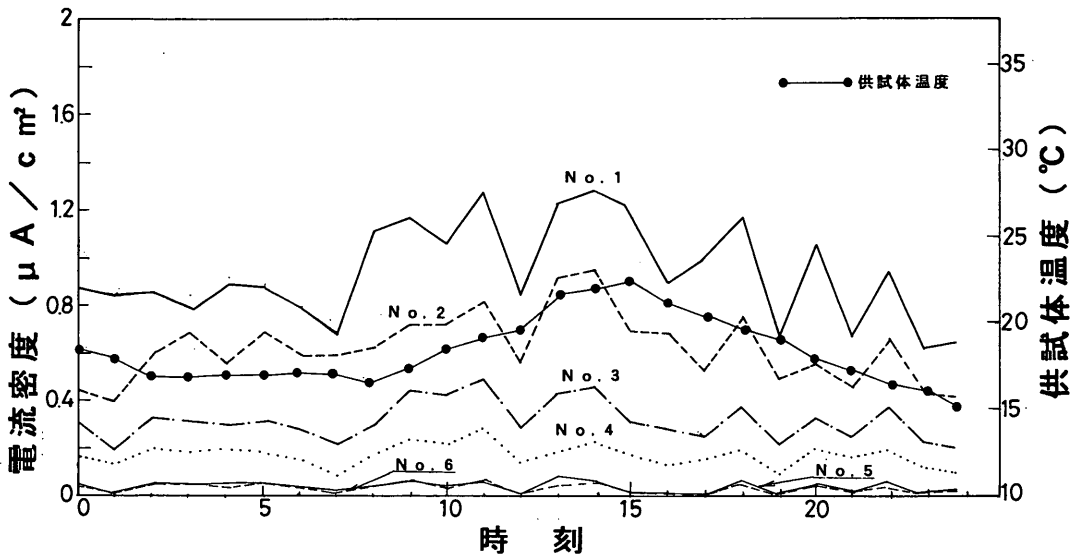


図-14 各供試体のマクロ腐食電流の一日の変化 (天候：雨)

するためには大きい電流が必要であったことを意味する。このように、流電陽極方式や外部電源方式(定電位法)による電流の増加が認められたために、この時間帯が最も腐食に対して活性であることとなる。つまり、大きい腐食を防止するには大きい電流が必要であることを示唆している。

3.1.3 単極電位および短絡電位

図-17～図-22に通電用の各供試体(No. 1～No. 6)のアノード部、カソード部におけるコンクリート中の鉄筋

の単極電位(各図中の開路電位を示す)およびアノード部、カソード部を短絡した後の短絡電位の経時変化を示す。

まず、アノード部、カソード部での単極電位は供試体によって多少その値は異なるが、アノード部では $-300\text{ mV} \sim -400\text{ mV}$ 程度の値を示し、カソード部では $-140\text{ mV} \sim -300\text{ mV}$ 程度の値を示した。アノード部のコンクリートには前述したように 15 kg/m^3 のNaClを混入したこと、コンクリート中の鉄筋の表面に錆を発生させるよ

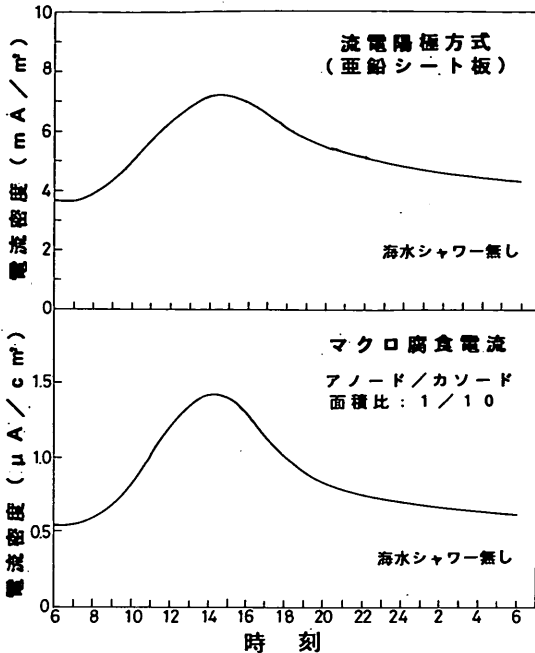


図-15 マクロ腐食電流と防食電流(流電陽極方式)の一日の変化

うにしたために、このような値を示したものと思われる。電位測定結果より、コンクリート中にNaClを混入することによってコンクリート中の鉄筋の電位が混入しないものに比べて卑になる傾向のあることが分かる。このことは、暴露試験場へ供試体を暴露して、コンクリートの表面状態を観察した結果(暴露後、約7～8ヶ月)、写真-2に示すようにNaClを15kg/m³混入したアノード部のコンクリートにはひびわれの発生が多く認められた。その結果、酸素拡散や透水性が良くなったために電位が卑な値を示したものと思われる。また、NaClがコンクリートの練り混ぜ時に混入されると、まず塩化物イオンとナトリウムイオンに解離するが、このうちセメント重量の約0.4%に相当する量の塩化物イオンがFriedel氏塩として固定化されると言われる⁶⁾。しかし、これを越える量の塩化物イオンは細孔溶液中に存在し、鉄筋の不動態皮膜を破壊して鉄筋を腐食に対して無防備状態にするとされている⁷⁾。これらの理由により、アノード部の鉄筋の電位は腐食を生じる程度の卑な電位を示したものと思われる。なお、NaClを混入していないカソード部のコンクリートにはアノード部のコンクリートに見られるようなひびわれは見られなかった。

アノード部、カソード部を短絡することによりアノード部の電位はやや貴の方向へ移行し、カソード部の電位

はやや卑の方向に移行して両極はバランスを保っている。マクロ腐食の発生しているコンクリート中の鉄筋の電位はおおむねこのような短絡電位を示していることとなる。しかし、図-21および図-22の供試体No. 5やNo. 6においてはアノード部、カソード部を短絡した場合にカソード部がアノード部へ極端に移行する傾向が見られた。この理由としては、供試体No. 5, No. 6はAa/Acが5/1, 10/1と非常に大きいためにアノード部の支配を強く受けたためと思われる。

また、短絡時におけるアノード部、カソード部の電位差の傾向は供試体No. 1～No. 3で大きく、その値は70mV～150mV程度であった。しかし、供試体No. 4～No. 6では、その値は20mV～40mV程度と小さかった。供試体No. 1～No. 3の大きい電位差はアノード部から流出するマクロ腐食電流の大小と関係していることが考えられる。すなわち、アノード部とカソード部とで大きい電位差が生じることにより大きいマクロ腐食電流がアノード部から流出するためと思われる。

マクロ腐食電流の測定後、アノード部、カソード部の短絡を切りアノード部、カソード部の鉄筋の電位の復極状況を測定した。その一例を図-23(供試体No. 1)に示す。アノード部、カソード部の電位はいずれの供試体も開路後100～200分程度で安定した値を示し復極速度は速かった。

3.2 通電試験

3.2.1 アノード部、カソード部へ流入する電流

図-24は通電試験を実施し、各電流密度におけるコンクリート中の鉄筋のアノード部、カソード部へ流れる電流量を整理したものである。測定は条件を一定にするために、午前中の海水シャワー開始30分後に行った。図-24の供試体No. 1やNo. 2のようにAa/Acが1/10または1/5と非常に小さく、流す電流量が少ない場合には、防食電流は優先的にカソード部へ流入し、アノード部への流入は見られなかった。すなわち、アノード部からカソード部へ腐食電流が流出する傾向を示した。つまり、電気防食を行っている場合でもコンクリート中の鉄筋のマクロ腐食の度合いが大きい場合には、流す電流量が小さいとマクロ腐食電流がアノード部からカソード部へ流れて電気防食が十分に行われていないこととなる。その結果、防食効果が期待出来ないことが考えられる。

すなわち、図-25に示すように電気防食を実施していない場合にはマクロ腐食電流 i_{corr} がアノード部からカソード部へ流れている。この状態で外部から電流を流した場合(電気防食)に、 E_c が E_a の位置まで到達出来るだけ

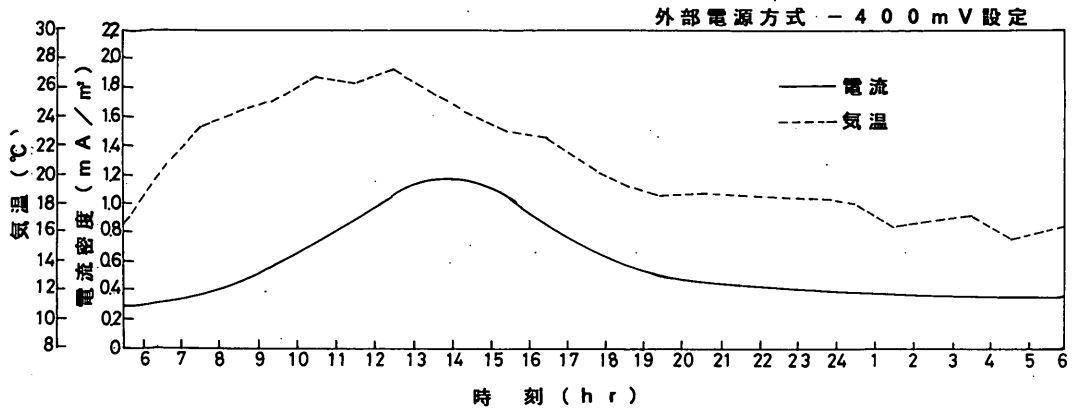


図-16 外部電源方式による防食電流の一日の変化 (定電位法, 設定電位: -400mV)

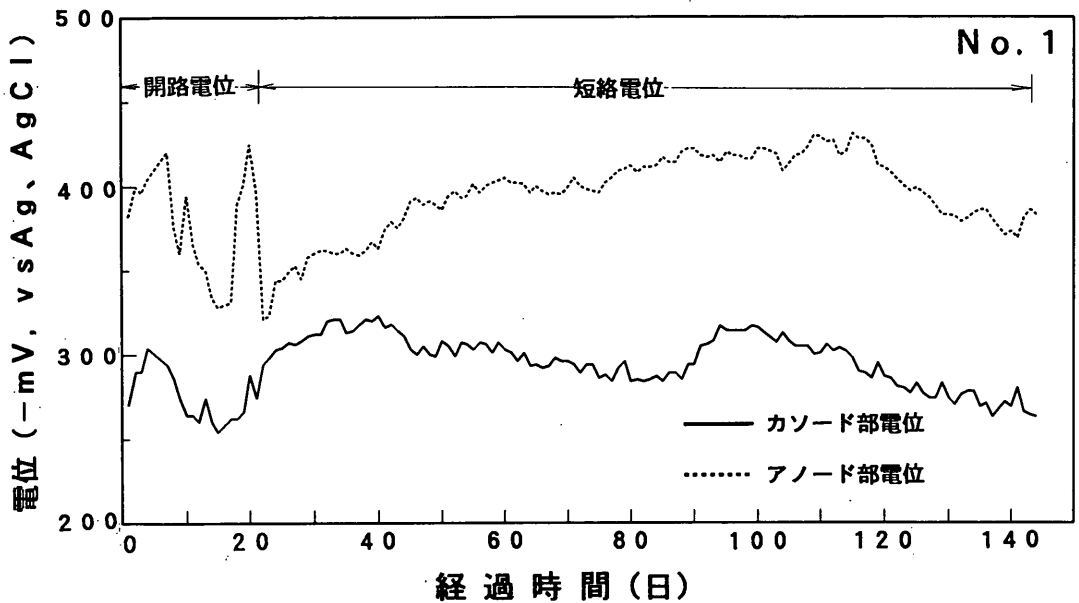


図-17 電位の経時変化 (供試体No.1)

の電流 (i_p) を流せばアノード部からカソード部へ流れるマクロ腐食電流は停止して防食は期待出来る。しかし、流す電流量が i_p より少ない場合 (例えば i_{corr} 量) には、ある部分では防食出来ているがある部分では不完全な防食となっている箇所が認められることとなる。そのため、外部から十分な電流を流さないとマクロ腐食電流がアノード部から流出することとなる。

したがって、 A_a/A_c が非常に小さく、アノード部から大きいマクロ腐食電流を流出している状態では少ない電流を流して電気防食を行ってもアノード部への電流の流入が見られない。そのため、アノード部へ流入を行うにはマクロ腐食の大きさによって、そのマクロ腐食電流を

停止させるだけの量の電流を流す必要がある。本試験よりマクロ腐食電流を停止させるに必要な電流密度は図-24より、マクロ腐食電流 (流出: $-$) が 0 となる $8\text{mA}/\text{m}^2$ 程度以上であるものとする。

また、通電試験において供試体No. 4~No. 6では、供試体No. 1やNo. 2のようにアノード部からカソード部へマクロ腐食電流が流出する傾向を示さなかったが、これはマクロ腐食がNo. 1やNo. 2ほど大きくなかったためと思われる。すなわち、無防食状態において流出するマクロ腐食の電流量が供試体No. 1やNo. 2に比べて小さかったためと考えられる (図-11参照)。したがって、電気防食を行いカソード部の電位がアノード部の電位に

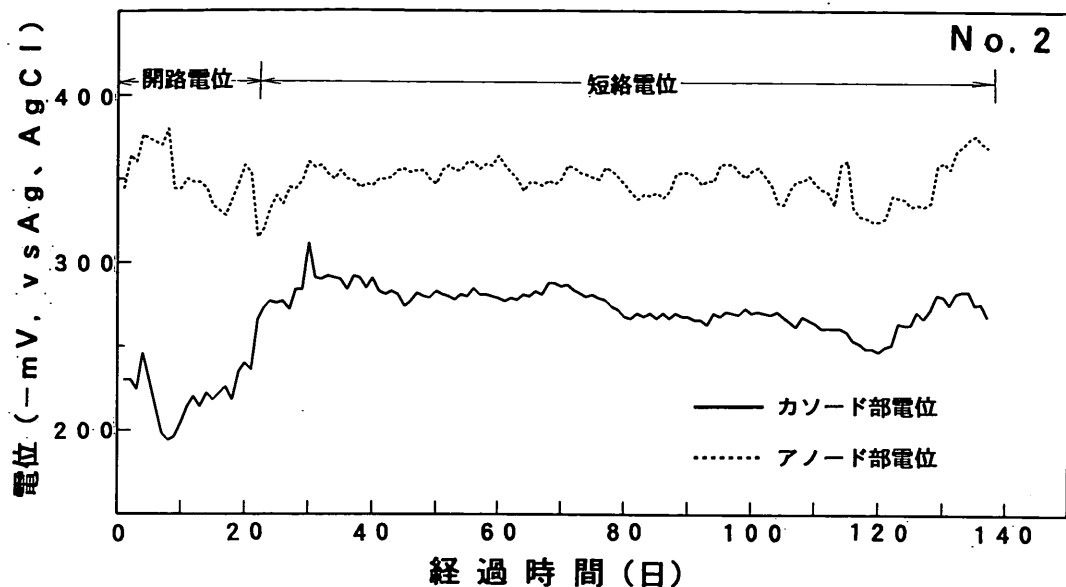


図-18 電位の経時変化 (供試体No.2)

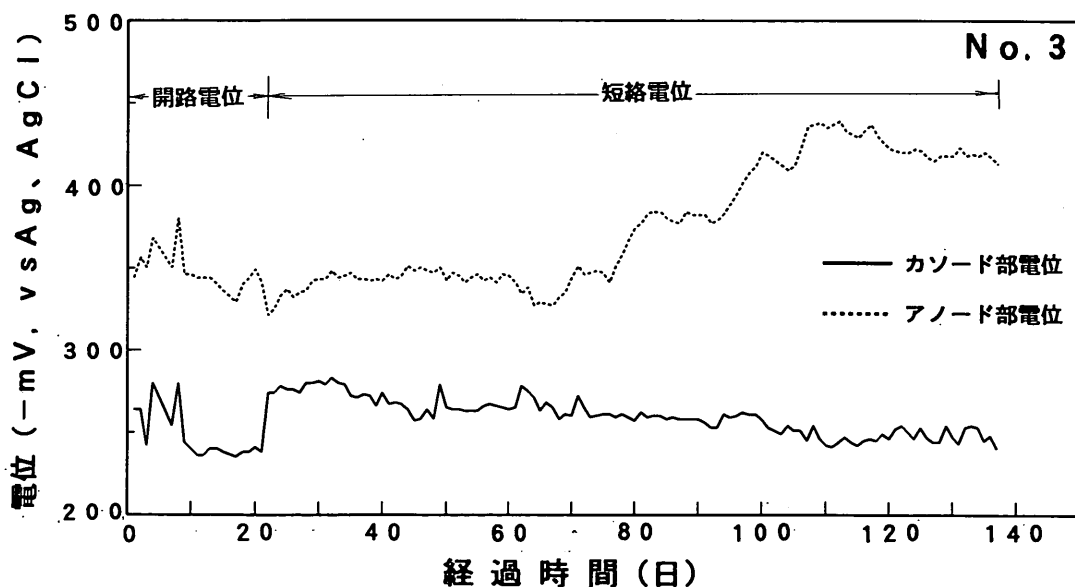


図-19 電位の経時変化 (供試体No.3)

なるまで分極出来る程度か、それ以上の電流を流さないとアノード部への電流の流入は見られないようである。このことはアノード部から流出するマクロ腐食電流の停止を意味し、電気防食が正常に作動することとなる。すなわち、電気防食による適切な所要防食電流密度はコンクリート中の鉄筋の腐食状態によって変化することが言える。

3.2.2 アノード部、カソード部の電位の分極量

図-26は図-24に伴う電気防食を行ってからのコンクリート中の鉄筋の各電流密度に対するアノード部、カソード部の分極量を示した図である。前述したように、ここでの分極量は2.2に述べた通電前の安定した自然電位(アノード部およびカソード部)と、通電を一時OFFにした直後の電位(インスタントオフ電位と呼ばれる)の差か

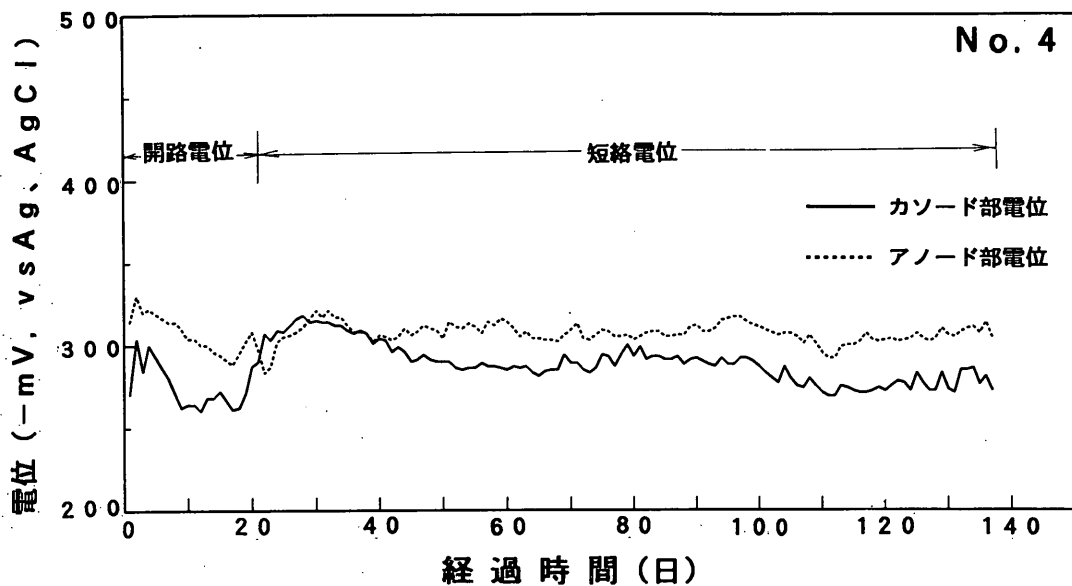


図-20 電位の経時変化 (供試体No.4)

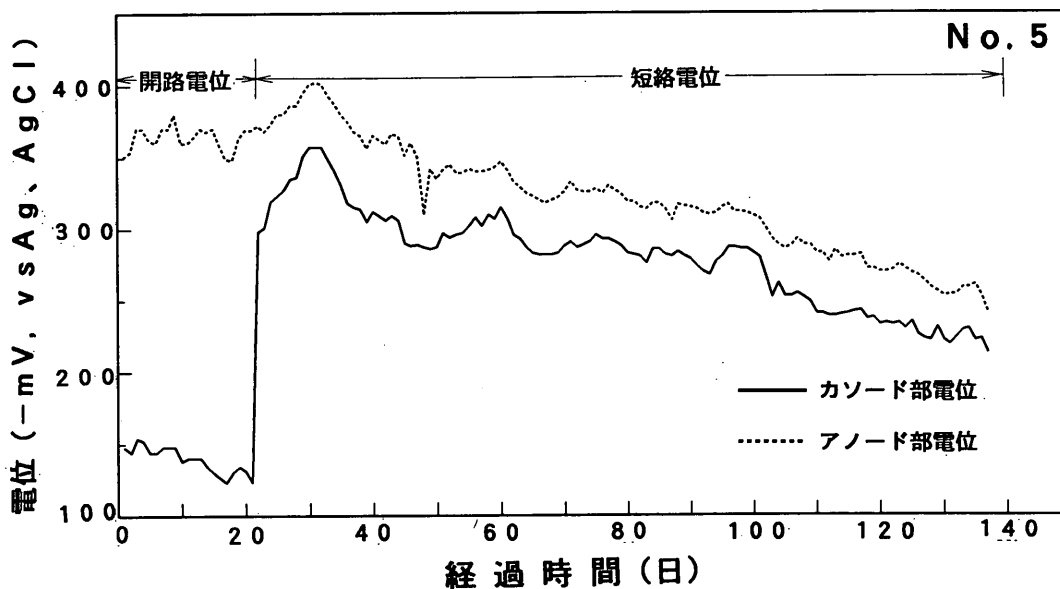


図-21 電位の経時変化 (供試体No.5)

ら求めている。この分極量の判定に当たってコンクリート中の鉄筋の防食効果を評価する一つの方法として100mV復極基準の方法⁹⁾がある。この方法の概念を図-27に示す。つまり防食時の電位から通電を切った直後のインスタントオフ電位を求め、その後4時間経過後の電位とインスタントオフ電位の差が100mV以上あれば防食効果があると評価される方法である。

しかし、港湾環境に位置するコンクリート構造物、特に上部工の下部におけるコンクリートは海水の飛沫を浴びるなど、常に湿潤状態にある。このような環境においてはコンクリート中への酸素拡散速度は遅くなるため通常の陸上の自然環境と異なって復極速度は非常に遅く、20~24時間程度経過しないとその100mVのシフトを満足しない場合がある⁹⁾。このような状況下で、各電流密度

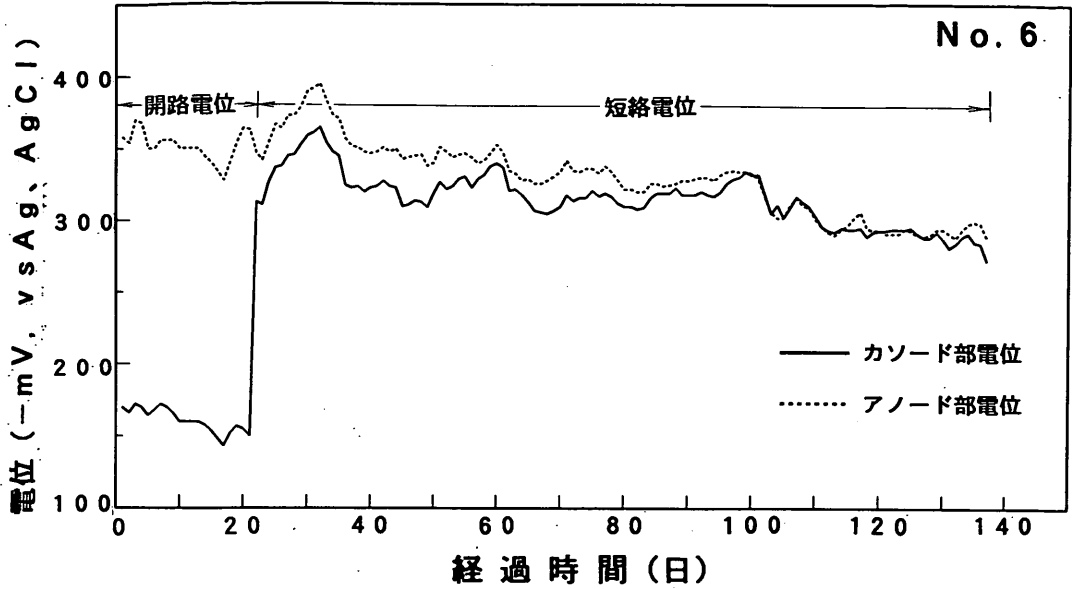


図-22 電位の経時変化 (供試体No.6)

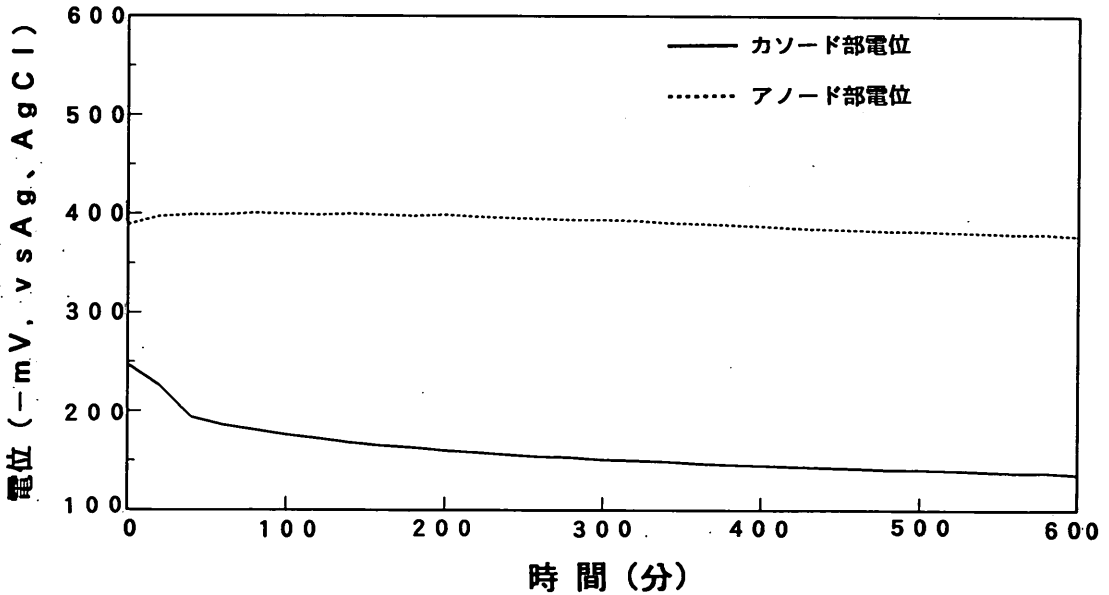


図-23 開路電位変化

における分極量を求めるには長時間を要するために、ここでは、分極量を求める自然電位を3.1.3で求めた自然電位（アノード部およびカソード部の単極電位）を用いることとした。

図-26より分極量はいずれの供試体においてもカソード部がアノード部に比べて大きい傾向を示した。アノード部へはNaClを混入しているので、NaClを混入するこ

とにより分極量が小さい傾向を示したものと考えられる。このことは、M. Funahashi等の試験¹⁰⁾においても説明されており、コンクリート中の塩化物イオン量が多くなるほど分極量が少なくなると説明している。

供試体No. 1～No. 3において、少ない電流密度においてアノード部の分極量がマイナスを示している理由は、図-28に示すようにアノード部およびカソード部のそれ

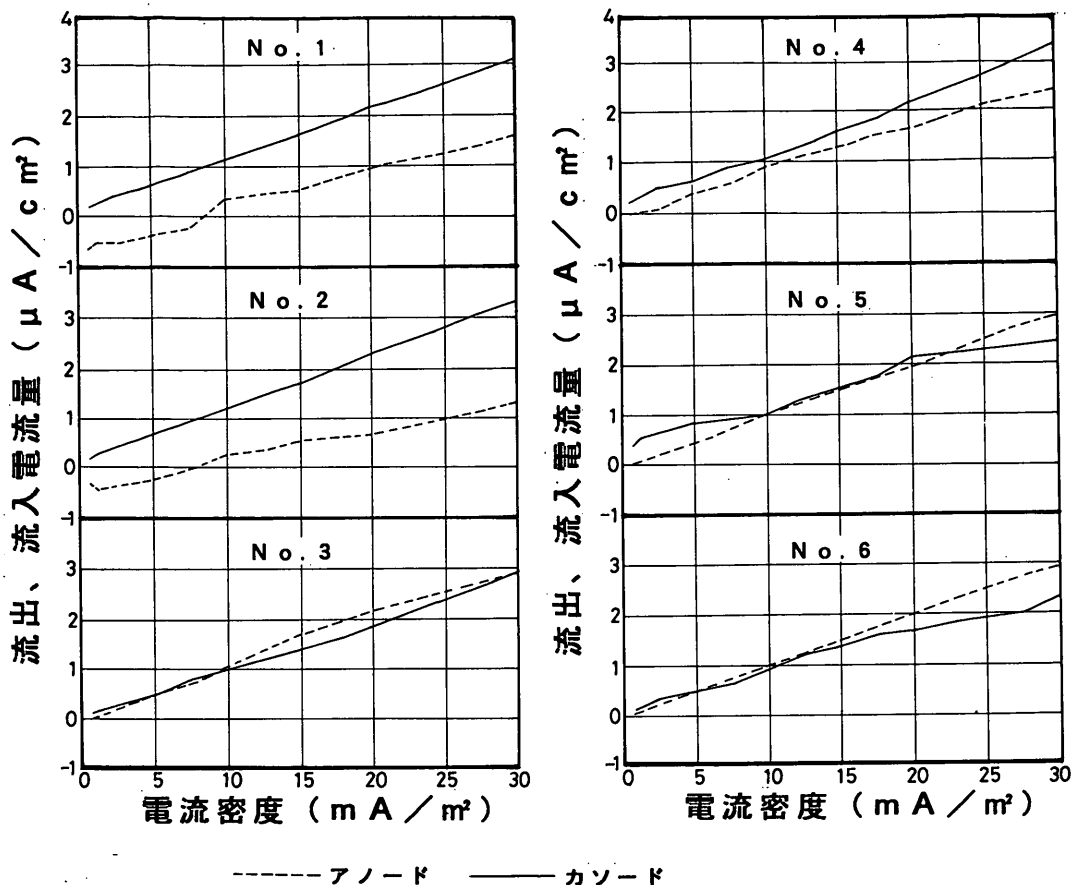


図-24 各電流密度における流出，流入電流量（流入：+，流出：-）

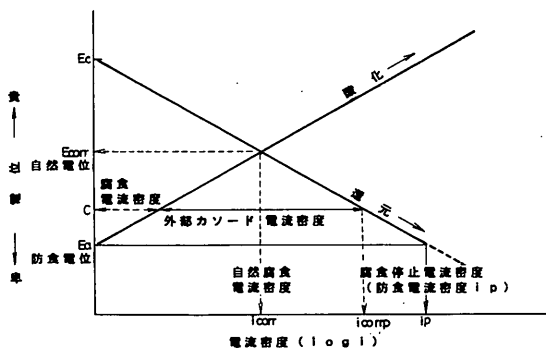


図-25 電気防食の概念図

それぞれの開路電位（単極電位）が、アノード部とカソード部を短絡することによって、アノード部の電位は開路電位の値よりもやや貴に、また、カソード部はやや卑な電位を示したためと考えられる。前述したように、安定した開路電位と、電気防食を行ってからのインスタントオフ電位の差を分極量としたために、図-26に示すような少

ない電流密度では、アノード部への電流の流入が見られない（分極されていない）ので、分極量としてはマイナスの値となったのである。特に、この傾向は供試体No. 1, No. 2 (Aa/Ac: 1/10, 1/5) で顕著であった。しかも、No. 1 は他の供試体に比べて分極量の増加の程度が遅い傾向を示した。

前述した電気防食の防食効果を評価する方法として100mV復極基準がある。この100mV復極基準について本試験の試験結果を検討してみると、図-26よりカソード部においてはいずれの供試体も1~4mA/m²程度の電流密度を流すことにより100mV以上の分極量を達成していた。しかし、アノード部においては供試体No. 1のようにAa/Acが1/10と非常に小さい場合には、分極量の増加は非常に遅く、30mA/m²程度の電流を流さないとアノード部の分極量が100mV以上のシフトを満足することが出来なかった。また、Aa/Acが小さい程100mVシフトの達成は遅いという傾向が見られた。それ故、分極量がカソード部で100mV以上のシフトをしている場合

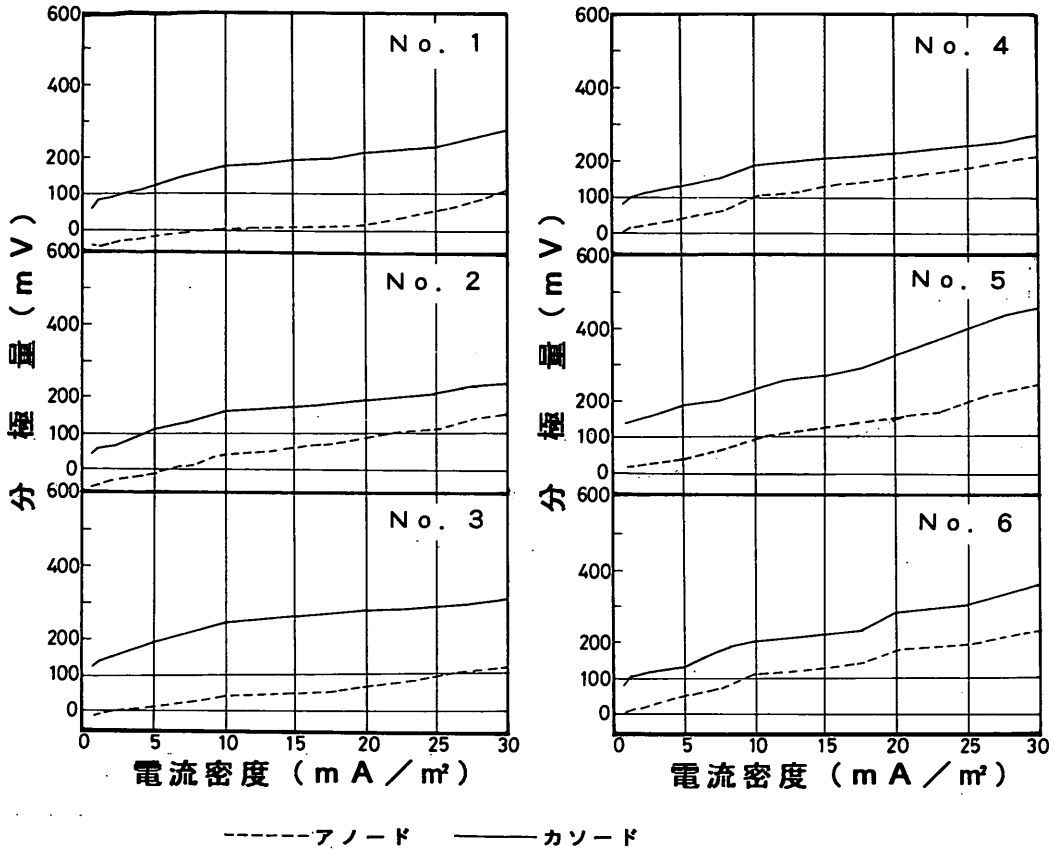


図-26 各電流密度における分極量

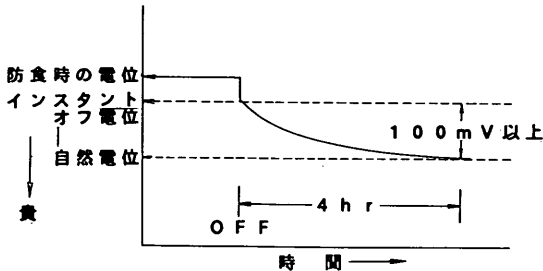


図-27 100mV複極基準の概念図

でも、アノード部のマクロ腐食の度合いによっては、アノード部における分極量は100mV以下である場合が認められた。したがって、アノード部およびカソード部の両極を100mV以上のシフトにすることが完全な防食効果を得ることとするならば、両極において100mV以上のシフトを得るには、それ相当の大きい電流密度が必要である。図-26より供試体No. 1～No. 3においてアノード部、カソード部の両極が100mV以上の分極量を得るに必要な電流密度は22～29mA/m²程度であり、供試体No. 4～No. 6では9～12mA/m²程度であった。

3.2.3 アノード部およびカソード部のみへの通電試験

図-29～図-30にアノード部、カソード部を開路状態にしてアノード部、カソード部単独の通電試験を定電流法で行った試験結果を示す。

図-29に示すようにカソード部においては小さい電流密度において大きい分極が進み、電流密度が1mA/m²程度で供試体No. 1およびNo. 2を除いて100mV以上の分極量が認められた。また、供試体No. 1およびNo. 2においても2mA/m²程度の電流密度で100mV以上の分極量を示した。

しかし、図-30のアノード部においては図-29のカソード部に比べていずれの供試体も分極量は小さく、100mV以上の分極量を示すには供試体No. 4～No. 6 (Aa/Ac: 1/1, 5/1, 10/1) では9～11mA/m²程度の電流密度が必要であった。また、Aa/Acが小さい供試体No. 1～No. 3 (Aa/Ac: 1/10, 1/5, 1/2) においては100mV以上の分極量を得るには18～24mA/m²程度必要であった。

図-26に示すようにアノード部、カソード部を短絡した

場合における各供試体の電流密度と分極量に示すように、短絡している場合も分極量の増加傾向はカソード部では大きいアノード部では小さかった。本項に示すアノード部、カソード部を別々に分極した場合においても同様な傾向を示した。このことより、分極量の大小はコンクリート中の鉄筋の表面状態や環境により左右されることが分かる。すなわち、コンクリートにNaClを混入したアノード部では分極量は小さく、コンクリートにNaClを混入しなかったカソード部では分極量は大きかった。また、電気防食を実施する前は約6ヶ月間、マクロ腐食電流が

アノード部からカソード部へ流れていた。そのため、アノード部の鉄筋は活性化しており腐食が発生している。アノード部の腐食が発生している鉄筋表面を電気防食により還元するには、カソード部よりも多くの電流が必要となったことも原因の一つと思われる。

この試験でアノード部およびカソード部を単独に通電することにより、マクロセルが形成されているコンクリート中の鉄筋へ流れる電流量や分極量が、アノード部やカソード部で異なることを確認することが出来た。すなわち、アノード部はカソード部よりも多くの電流を流さないとカソード部と同じような分極量まで到達出来ないことが認められた。特に、この傾向は A_a/A_c が小さい程、顕著に現れているものと思われる。

以上、 A_a/A_c に対するマクロ腐食電流および電位の関係と防食電流の変化に伴うアノード部、カソード部へ流入する電流密度や分極量を整理すると表-4のようになる。また、アノード部およびカソード部のみへの通電試験の結果を整理すると表-5のようになる。表-4および表-5の傾向はよく類似している。表-4におけるアノード部の100mV以上シフトさせるに必要な電流密度は表-5によって再確認出来た。

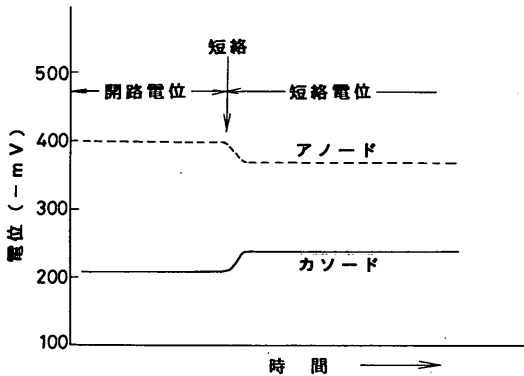


図-28 アノード部、カソード部の開路電位と短絡電位の傾向

3.3 無防食供試体の腐食状況

図-31に無防食供試体のマクロ腐食電流の経時変化を

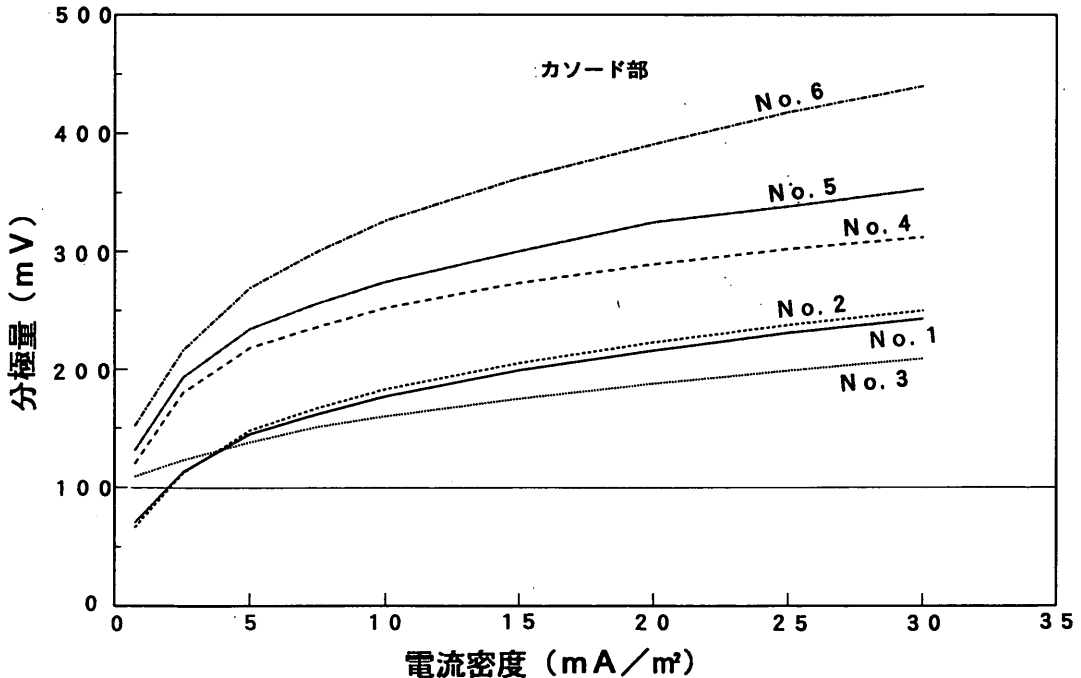


図-29 カソード部のみを通電試験結果

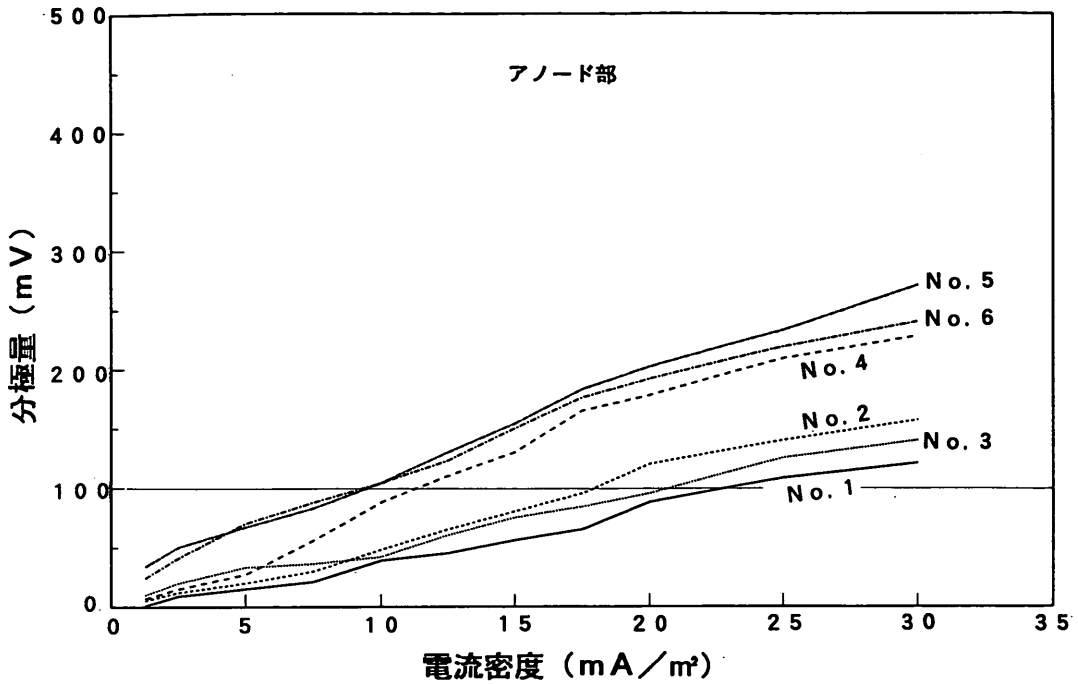


図-30 アノード部のみの通電試験結果

表-4 マクロ腐食電流と腐食停止電流密度およびアノード部、カソード部を100mV以上シフトさせるに必要な電流密度(1)

供試体 No.	Aa/Ac 面積比	マクロ腐食電流 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	腐食停止電流密度 (mA/m^2)	アノード部、カソード部を100 mV以上シフトさせるに必要な電流密度 (mA/m^2)	
				カソード部	アノード部
1	1/10	0.7~1.8	8.8	2.9	29
2	1/5	0.4~1.0	7.9	4.1	22
3	1/2	0.25~0.4	1.2	0.8	26.4
4	1/1	0.17~0.25	0.8	1.1	10
5	5/1	<0.1	0.8	0.8	10.5
6	10/1	<0.1	0.8	0.8	9.1

表-5 アノード部およびカソード部を100mV以上シフトさせるに必要な電流密度(2)

供試体 No.	Aa/Ac 面積比	電流密度 (mA/m^2)	
		カソード部	アノード部
1	1/10	2	24
2	1/5	2	19
3	1/2	0.8	21
4	1/1	0.8	12
5	5/1	0.8	10
6	10/1	0.8	10

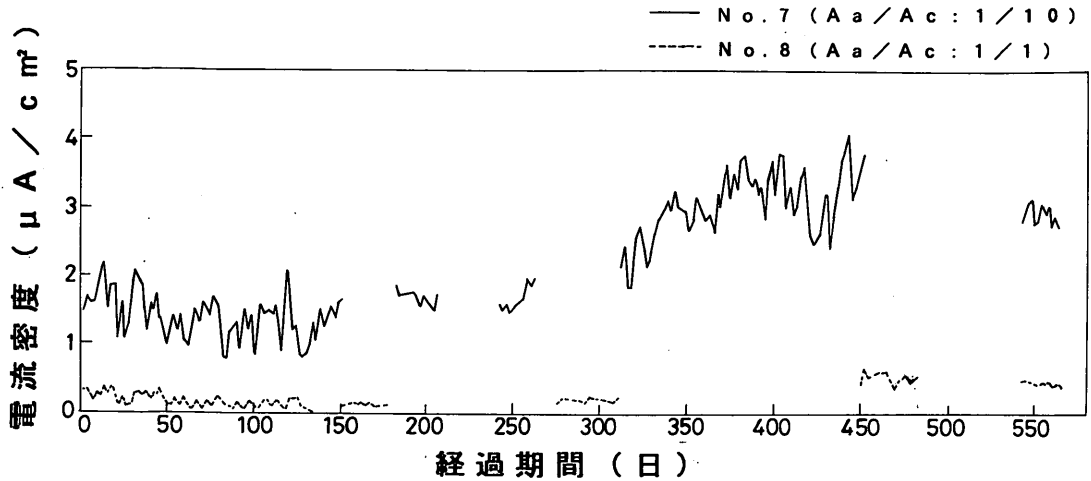


図-31 無防食供試体のマクロ腐食電流の経時変化

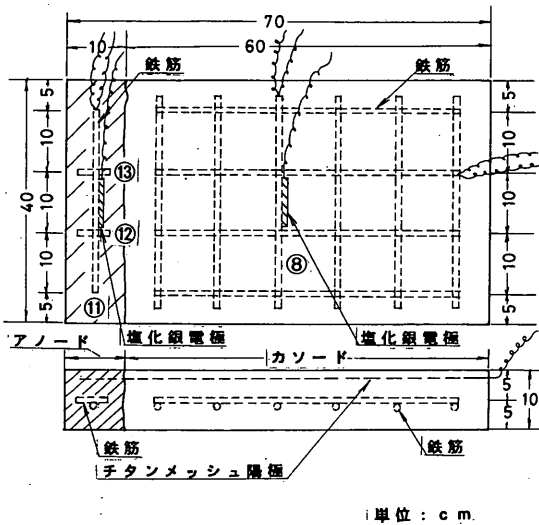


図-32 腐食量測定鉄筋の配置No. (供試体No.7)

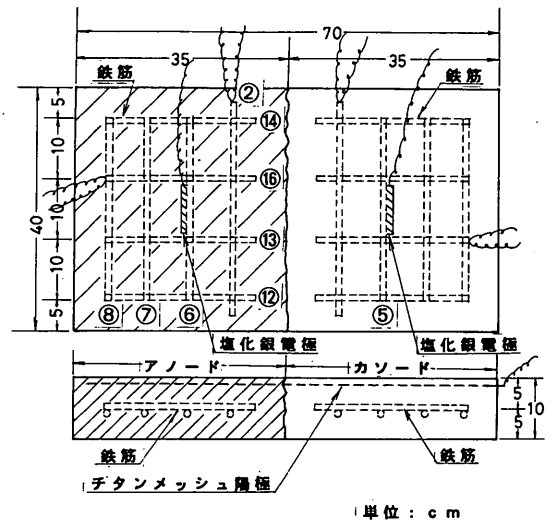


図-33 腐食量測定鉄筋の配置No. (供試体No.8)

示す。供試体No. 7 およびNo. 8 は通電用供試体 (No. 1 ~ No. 6) の無防食状態で暴露されていた (図-11に示すように) のと同様なマクロ腐食電流の傾向を示した。供試体No. 7 ($Aa/Ac: 1/10$) ではマクロ腐食電流は非常に大きく、供試体No. 8 ($Aa/Ac: 1/1$) に比べて約3~10倍の値を示した。

供試体を解体して、コンクリート中の鉄筋の腐食状況を観察した。その腐食状況を写真-3~写真-6に示す。供試体No. 7, No. 8ともアノード部において鉄筋に腐食が見られたのに対して、カソード部においては電位測定のために取り付けた塩化銀電極が接触する鉄筋表面にわずかに錆が認められたのみである。供試体No. 7では図-

32の⑧、供試体No. 8では図-33の⑤の各鉄筋である。これらの腐食は異種接触腐食で鉄筋表面が塩化銀電極と接触している部分がアノードを形成して腐食したものである。しかし、腐食の程度は大きいものではなかった。

回収したコンクリート中の鉄筋をクエン酸二アンモニウムの10%溶液に浸漬して脱錆処理を行い、重量測定から鉄筋の腐食速度を求めた。その結果を表-6に示す。なお、表-6中の鉄筋の配置No.は図-32および図-33(図中の丸数字)に示す。

アノード部における鉄筋の腐食の程度は、供試体No. 8の鉄筋の腐食減量からみると、カソード部に近いアノード部の鉄筋に腐食が集中していることが認められた。

これは、コンクリートの電気抵抗の関係でマクロ腐食が発生している場合には、カソード部により近いアノード部に腐食が集中するためと思われる。また、表-6より腐食速度は供試体No. 7が供試体No. 8の約3倍と大きかった。このことは、 A_a/A_c の差によるものであり、 A_a/A_c が小さい程腐食が大きい傾向を示すことを示唆している。

重量減量より求めた腐食速度とマクロ腐食電流より求めた腐食速度(表-3)とを比較すると、同じ A_a/A_c (供

試体No. 1 : 1/10, 供試体No. 4 : 1/1)ではあるが、マクロ腐食電流より求めた腐食速度の方が小さくなっていた。この理由は、供試体が異なることも考えられるが、マクロ腐食電流はある一定の時間(午前9時~9時半の間に測定)に測定した値を算出したために小さく求められたと思われる。重量減量から求めた腐食速度はトータルな値として算出されたものである。

3.1.3で述べたようにNaClを混入したアノード部のコンクリートには多くの細かいひびわれが発生したことから、アノード部およびカソード部よりコンクリートの細孔半径分布を測定するために試料を採取し、測定をおこなった。その結果を図-34, 図-35に示す。図-34および図-35によると、細孔径分布はアノード部のコンクリートとカソード部のコンクリートでは、いずれも細孔容積のピークが 10^{-3} ~ 10^{-2} μm付近に集まっている。すなわち、細孔径の分布はNaClを15kg/m³混入したコンクリートとNaClの混入無しのもと大差ないことから、NaClを混入しても細孔径については大きい変化は無いと思われる。宇野等⁹⁾の試験でもセメント中への水酸化ナトリウムの添加は添加量の増加に伴い細孔径が粗大な方へ移行するがNaClの場合には細孔径分布には変化がないと述べている。そのため、アノード部におけるコンクリートのひびわれの原因はこの細孔径分布の測定結果からは判断出来なかった。

したがって、コンクリート中の鉄筋にアノード部、カソード部が形成されてマクロ腐食が発生している場合に

表-6 重量減量から求めたアノード部鉄筋の腐食速度

No. 7 供試体 (A_a/A_c : 1/10)		
鉄筋No.	重量減量 (g)	腐食速度 (mm/yr)
7-⑪	15.25	0.093
7-⑫	0.61	
7-⑬	0.11	
7-⑱*	1.52	
No. 8 供試体 (A_a/A_c : 1/1)		
鉄筋No.	重量減量 (g)	腐食速度 (mm/yr)
8-②	20.05	0.038
8-⑥	14.86	
8-⑦	0.92	
8-⑧	0.84	
8-⑫	1.86	
8-⑬	1.36	
8-⑭	1.46	
8-⑯	1.28	
8-⑳*	0.24	

* : カソード側の腐食を示す。

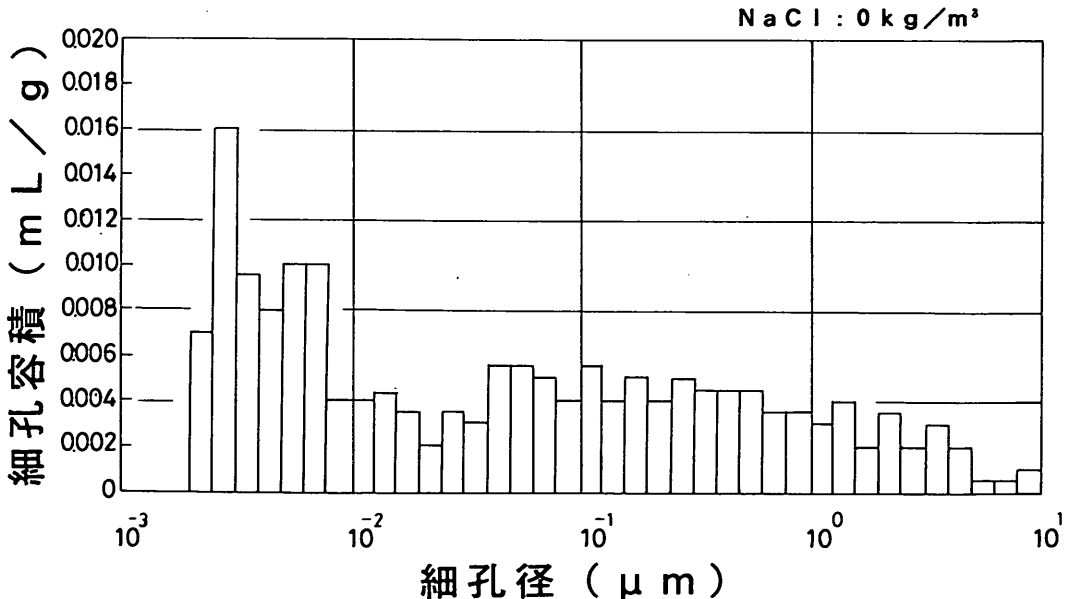


図-34 試験に使用したコンクリートの細孔径分布図(1), NaCl 0kg/m³

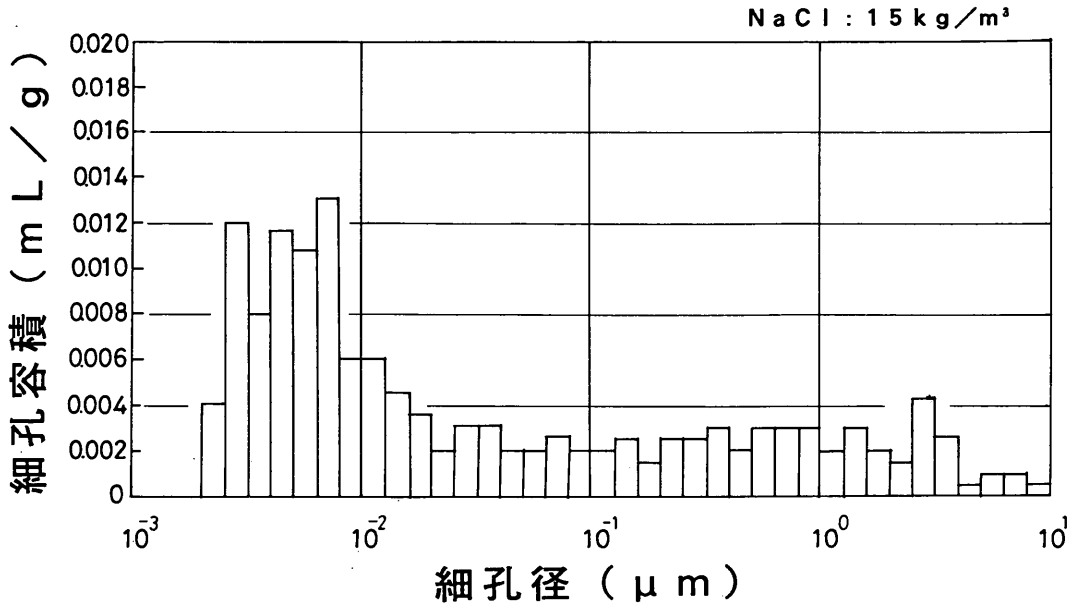


図-35 試験に使用したコンクリートの細孔径分布図(2), NaCl 15kg/m³

は、そのアノード部で腐食が進み、腐食速度はマクロ腐食電流の大小やAa/Acにより変化する。また、供試体を解体し、アノード部の腐食状況や重量減量を測定した結果、大きい腐食はカソード部に最も近いアノード部の鉄筋に発生することを確認することが出来た。

4. 結論

Aa/Acに対するマクロ腐食電流および電位の関係、電気防食（外部電源方式）における防食電流の変化に伴うアノード部、カソード部へ流入する電流密度や分極量および無防食供試体の腐食傾向について以下の事項が明らかとなった。

- (1) 電気防食前のアノード部、カソード部を短絡した場合におけるアノード部からカソード部へ流れるマクロ腐食電流は、Aa/Acが非常に小さい場合には大きいマクロ腐食電流が流れ、逆にAa/Acが大きい場合には小さいものであった。したがって、コンクリート中の鉄筋にアノード部およびカソード部が形成されてマクロ腐食電流が流れる条件であると、Aa/Acがより小さい場合にはアノード部が大きい腐食を生じることが明かとなった。
- (2) アノード部からカソード部へ流れるマクロ腐食電流はコンクリートの表面状態や気温、天候により影響を受けた。気温が高くコンクリート表面が乾燥状態であるとマクロ腐食電流は増大し、雨天でコンクリ

ート表面が湿潤状態では低減した。

- (3) マクロ腐食電流の一日の流出傾向は気温が最も高くなる14時～15時頃が最も大きく、朝方と夜間では小さかった。
- (4) マクロ腐食が形成されているコンクリート中の鉄筋へ電気防食を行った場合、その電流はカソード部へ優先的に流入した。また、流す電流量がマクロ腐食電流よりも小さい場合には電気防食を行っていてもアノード部からカソード部へマクロ腐食電流が流れて電気防食の効果は期待出来ないことが分かった。このマクロ腐食電流を停止させるに必要な電気防食の電流密度は8mA/m²(Aa/Ac : 1/10, 1/5)程度であった。
- (5) NaClを混入させたコンクリート中の鉄筋の分極量の増加傾向は、NaClを混入しないものよりも少ない傾向を示した。
- (6) 分極量はAa/Acが小さい程アノード部の分極量は小さく、カソード部に100mV以上のシフトがあってもアノード部では100mV以下である場合が認められた。それ故、コンクリート中の鉄筋の腐食が大きい場合にはアノード部に100mV以上のシフトにするにはAa/Acが1/10～1/2では22～29mA/m²程度の電流密度が必要であった。
- (7) コンクリート中の鉄筋に大きいマクロセルが形成されている場合には、電気防食を実施してカソード部の電位がアノード部の電位に到達するように、ある

程度の大きい電流を流し分極しないとアノード部への電流の流入は認められなかった。

- (8) コンクリート中の鉄筋のアノード部に大きい腐食が発生している場合には、カソード部において100mV以上の分極量があってもアノード部において100mV以上の分極量が達成されていない場合があるので、十分な防食効果を考慮してアノード部においても100mV以上の分極量を得る必要がある。そのためには、カソード部の分極量を200mV～300mV程度にする必要がある。
- (9) したがって、マクロ腐食の形成下において、分極量を基準として防食効果を判定する場合には、厳密には一律に100mV以上のシフトが適用出来るわけではなく、マクロ腐食の大小、 A_a/A_c の大きさ等の影響を受けることを十分考慮して、適切な判定基準となる分極量を決定すべきである。
- (10) 無防食供試体によるマクロ腐食の重量減量より求めた腐食速度は A_a/A_c が $1/10$ では $0.093\text{mm}/\text{yr}$ 、 A_a/A_c が $1/1$ では $0.038\text{mm}/\text{yr}$ 程度であった。また、アノード部のコンクリート中の鉄筋の腐食はカソード部に近い部分で大きいことが分かった。

5. あとがき

本報告においては、コンクリート中の鉄筋のマクロ腐食の形成によりアノード部からカソード部へ流れるマクロ腐食電流の傾向、また、このような条件において電気防食を実施した場合にアノード部およびカソード部へ流入する電流量の割合や電位の分極量の傾向について検討した。今後はコンクリート中の鉄筋の腐食の程度に見合った適切な電流密度の検討や実構造物へ電気防食を適用する場合の施工法の検討および施工材料の耐久性についての調査を実施したいと考えている。

最後に、コンクリートの細孔径分布の測定については電気化学工業(株)の真下昌章氏にお願いした。ここに感謝申し上げます。

6. 参考文献

- 1) (社)日本コンクリート工学会：鉄筋腐食による損傷を受けたコンクリート構造物の補修技術，1989.
- 2) たとえば，中村 豊，池田辰男，長田雅人，善 一章，千葉丈夫：港湾コンクリート構造物への電気防食の本格的適用，コンクリート工学，vol.22，No. 2，1991.
- 3) 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.
- 4) 阿部正美，福手 勤，濱田秀則，三浦幸治：港湾における鉄筋コンクリート構造物への流電陽極方式による電気防食法の適用に関する基礎的試験，港湾技研資料，No.740，1992.
- 5) 阿部正美，福手 勤，濱田秀則，山本邦夫：海水飛沫を受ける鉄筋コンクリート構造物への電気防食工法の適用に関する基礎的研究，港湾技研資料，No.695，1991.
- 6) Ridhartz, W.: "Die bindung von Chlorid bei der Zementerhärtung", Zement - Kalk - Gips, Nr.10, S.447-456, 1969.
- 7) 宇野祐一，小林一輔：塩化ナトリウムの混入がモルタルの諸性状に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文報告集，12-1，1990.
- 8) NACE: Standard Recommended Practice Cathodic Protection of Reinforcing Steel in Atmospherically Exposed Concrete Structures, NACE Standard PR 0290-90, 1990.
- 9) 井川一弘：鉄筋コンクリート構造物の防食方法，NAKABOH REPORT vol, 40, 1991.
- 10) M.Funahashi, J.B.Bushman: Technical Review of 100mV Polarization Shift Criterion for Reinforcing Steel in Concrete, Corrosion, vol.47, No. 5, 1991.