

論文

[1090] 鉄筋の電気防食法に関する基礎的研究

正会員○武若耕司（鹿児島大学工学部）

同上 峰松敏和（住友セメント技術開発センター）

1. まえがき

コンクリート構造物における塩害の顕在化は、膨大な社会資本の崩壊を予測させ、コンクリートの信頼性を失わせる原因となった。そこで我が国では、1983年、諸外国に先駆けてコンクリート中の鉄筋防食方法の具体的な手法を盛り込んだ設計指針として、日本コンクリート工学協会より『海洋コンクリート構造物の防食指針（案）』がまとめられ、塩害対策についての基本的な考え方が固まった。その特徴は、コンクリート中の鉄筋の防食に対してコンクリートのみを防食材とみなすだけでなく、より積極的、より直接的な防食方法いわゆる、「第2種防食方法」の適用を検討したことである。そして、この中で、エポキシ樹脂塗装鉄筋等とともに優れた防食方法として取上げられたものに電気防食法がある。

この電気防食方法は、鋼材の腐食反応形態そのものに関与しこれを抑制する方法であるため、海洋に建設される鋼構造物には比較的古くから適用の実績があり、コンクリート構造物の塩害対策としても信頼性の高い防食方法と成り得ると予想できる。また、この方法は、新規構造物への適用のみではなく、塩害を受けた既存構造物の補修方法としても適用が可能であるという点でも注目される。しかしながら我が国の現状を見ると、エポキシ樹脂塗装鉄筋あるいはコンクリート表面被覆等に関する検討が活発に行なわれているのに比べて、電気防食の実用化に関する検討は極めて少ない状況にある。

そこで以上のことを鑑みて、本研究ではコンクリート構造物における電気防食法の実用化を目的とし、その際に必要となる基礎資料を得るための諸検討を行った。

2. 検討項目の概要

本研究で取りあげる電気防食方法は、外部電源方式のカソード防食法である。なお、この方法のコンクリート構造物への適用にあたっては、次のような点が問題となる。

- 1) コンクリートを介して鋼材に防食を施す場合、防食電位の設定値が鋼構造物の場合とは異なり、しかも、この値がコンクリートの品質に影響を受ける可能性があること、
 - 2) 防食電位が設定値以下となると腐食の危険性が生じ、また過防食となった場合には、不経済となるだけでなく、コンクリートと鉄筋の付着性低下の問題も懸念されること、
 - 3) コンクリート中は不均一な環境と考えられるため、全ての鋼材に均一に防食させるための特殊な電気伝導層の開発や、施工上の工夫が必要となること、
- 等である。今回の検討ではこれ等の点について基礎的な考察を加えるものである。

3. 防食電位の設定値に関する検討

3-1 実験の概要

電気防食法は、腐食環境で金属が有する電位を外部から与えた電流によって強制的に分極させて腐食の生じない電位に移行させ、腐食反応を停止させる防食方法である。従って、防食電位の設定にあたっては、コンクリート中における鉄筋の分極性状について詳細に把握する必要がある。そこでここでは、防食電位の設定範囲を、コンクリート中の鉄筋の分極曲線を測定することによ

って検討を行った。

図-1には、分極曲線の測定に使用した供試体の形状と測定方法の概略を示した。供試体は、高さ10cmのコンクリート円柱体の中央にφ10mmのみがき丸鋼を埋め込んだものである。このみがき丸鋼はSGD-3規格のものを旋盤仕上し、さらに#400のサンドペーパーで表面仕上げを行った後、これに、約1cmの測定区間を除いてエポキシ樹脂によるコーティングを施したものである。供試体は打設後密封養生を行い、材令3~5週間で測定に供した。表-1に、作製した供試体の主な概要を示す。

分極曲線の測定は、対極に白金線、照合電極として飽和塩化銀電極を用い、電位走査法により行った。測定にあたっては、走査速度を1mV/secとし、まず鉄筋の自然電位から卑の方向に-1.4Vまで陰分極させた後、貴の方向へ+0.9Vまで陽分極させ、再度元の自然電位まで卑変させる走査を行った。

3-2 分極曲線の測定結果

図-2には、今回の測定によって得られた分極曲線の代表的な3つの形状を示した。また、図中には、それぞれの分極過程において予想される電気化学反応についても示した。

この内、(1)の曲線の特徴は、特にアノード分極曲線において、一般のコンクリート中の鉄筋が示すと予想される活性化領域、不動態化領域および過不動態化領域を明確に確認できることであり、これは、活性化電位(図中のIIの点、pH=12.5の溶液中での理論値 = -0.984V [vs. Ag/AgCl 以下同じ])、不動態化電位(III、理論値 = -0.667V)および酸素発生電位(V、理論値 = +0.296V)が、今回の測定結果と理論値ではほぼ一致することから明らかである。

(2)の曲線においては、電位の貴変に際して明確な活性化領域を示さず、アノード電流が-0.4V付近で生じた後、分極曲線は直ちに不動態化の状況を呈した。なお、コンクリートの水セメント比の減少に伴ってまた、かぶりの増加に伴って鉄筋の分極曲線は(1)から(2)へ変化する傾向が見られた。これは、コンクリートの品質やかぶりの違いによって、カソード分極時の不動態被膜の還元状況に差が生じたことによるものと思われる。

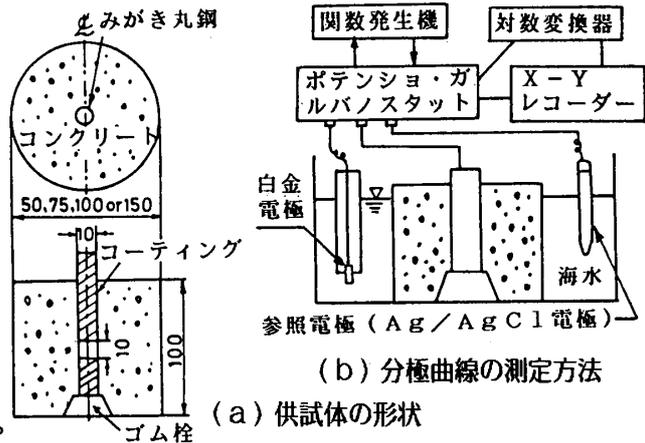


図-1 分極曲線測定実験の概略

表-1 分極曲線測定実験の要因と水準

要因	水準
水セメント比 (%)	40、50、60、70
かぶり (cm) (供試体直径)	2、3、25、4.5、7 (5) (7.5) (10) (15)
塩分含有量 (1)カ/ト重量比%)	0、0.05、0.1、 0.3、0.5
ひびわれの有無	有(幅0.1mm程度)、無

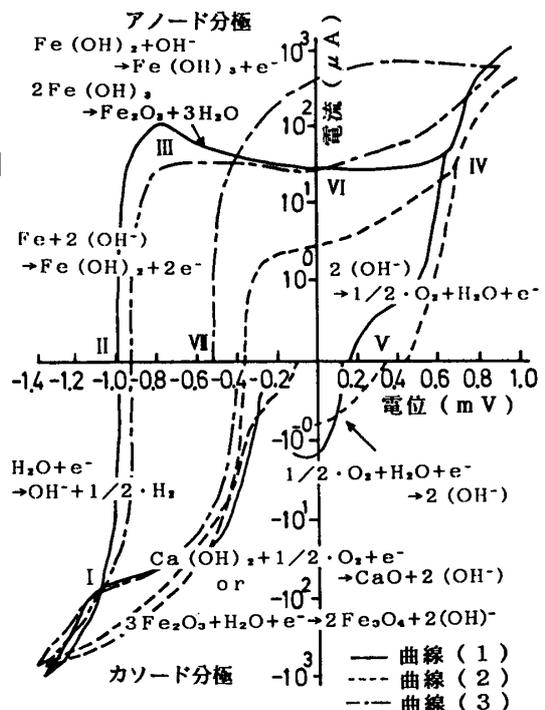


図-2 コンクリート中の鉄筋において測定される分極曲線の代表的な例

(3)の曲線は、コンクリートにひびわれを有する供試体において測定されたものである。この曲線を(1)と比較すると、不動態化領域の途中でアノード電流の急増する点(図中のⅥの点)が存在し、孔食の発生を示唆できる。孔食が発生すると、その後電位を卑変させても分極曲線は不動態化の形状を示さないが、さらに卑変させると-0.5V付近でアノード電流が0となる点が現れた(図中のⅦ)。この点の電位は図-3に示すように、孔食の発生状況のいかに拘らずほぼ同じ値となり、いわゆる不動態保護電位であると予想できた。

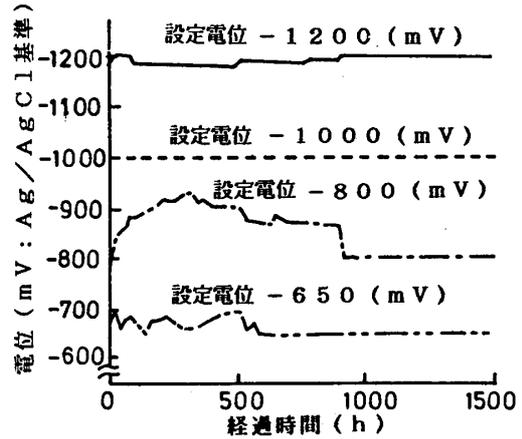


図-3 ひびわれのある供試体における分極曲線の測定結果の例

3-3 防食電位の設定に関する一考察

上記の分極特性は、鉄筋周辺のコンクリートの高アルカリ性が確保されている場合の防食電位の設定に関して次のような情報を与える。

- 1) コンクリート中の鉄筋をおよそ-1V (活性化電位) よりも卑な電位に設定すれば腐食は起こらない。ただしこの場合には、鉄筋表面に水素が発生する危険性がある。
- 2) およそ-1~-0.7V の範囲にある活性化の領域で生じるアノード電流量はわずかで鉄筋腐食量としては無視できる。
- 3) およそ-0.7V よりも貴な電位とすると鉄筋は不動態化するが、およそ-0.55V (不動態保持電位) よりも貴な電位とするとコンクリート中に塩分が存在する場合には孔食発生の危険性が生じる。

従って例えば、塩害環境下で新規に建設されるコンクリート構造物の場合には、防食電位を-0.55Vよりも卑な電位に設定することによって十分に耐久的な構造物となり得ると思われる。

しかし、コンクリートの中性化が進行している場合、大きなひびわれがある場合またはすでにかかなりの腐食が鋼材に発生している場合等のように、鉄筋の周辺が中性に近い状態となっていると上記の結果をそのまま利用できない。これは、図-4に示すように、これらの状況に比較的近いpHの環境(約pH=9.5)においては、鋼材の活性化電位(図中のⅦの点、理論値=-0.8V)が図-1の場合よりかなり貴な値となり、しかも不動態領域は認められずにその

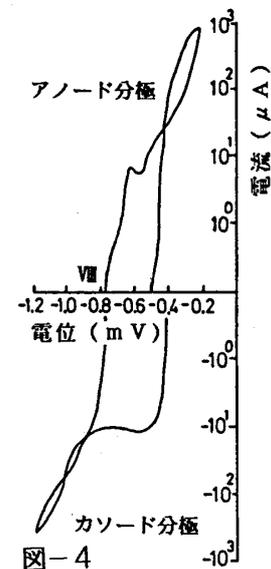


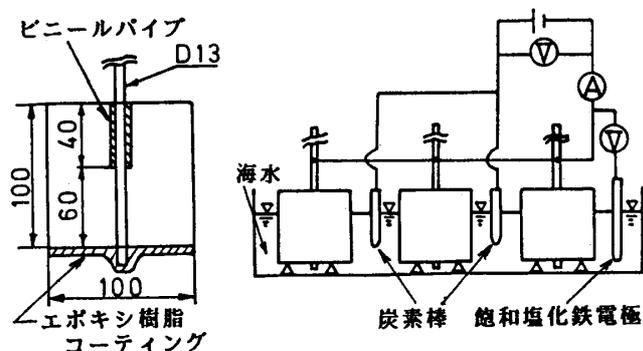
図-4 pH9.36の3%NaCl水溶液中の鉄筋の分極曲線

まま活性化が進行するためである。従って、例えば電気防食法の塩害補修工法として利用を考える場合などでは、その防食電位を-0.8V程度よりも卑に設定する必要もあると思われる。

4. 電気防食が鉄筋の付着性に及ぼす影響に関する検討

4-1 実験の概要

カソード防食では、コンクリート中の陽イオンが鉄筋表面に移動蓄積する可能



(a) 付着試験供試体

(b) 通电状況

図-5 付着試験供試体とその通电状況の概要

性があり、また、防食電位が-1V よりも卑となると鉄筋表面に水素発生の可能性も出てくるため、これ等の影響によって鉄筋とコンクリートの付着性低下が懸念される。そこで、

表-2 鉄筋付着実験の主な要因と水準

要因	水準	
設定電位 (mV)	-650、-800、-1000、-1200	
水セメント比 (%)	50	70
通電期間 (日)	30	60

図-5に示す方法で鉄筋に所定の期間電気防食を施した供試体について鉄筋の引抜き試験を実施し鉄筋の付着性に及ぼす電気防食の影響を検討した。実験の主な要因と水準を表-2に示す。また、実験期間中の鉄筋の電位および供給電流密度の経時変化を図-6に示す。引抜き試験はJIS案に準じて実施した。

4-2 実験結果と考察

図-7は、電気防食を施した場合の鉄筋とコンクリートの付着性を防食を施さない場合と比較して、設定電位毎に示したものである。また図-8には、付着応力度-すべり量曲線の一例を示した。これらの結果を見るかぎり、今回の設定電位の範囲では電気防食による鉄筋付着性の低下は認められず、鉄筋の付着性能は十分に確保できているものと予想できる。

ところで、黒井[1]は、コンクリート中の鉄筋がカソードとなる場合の鉄筋の付着性低下が鉄筋に供給される積算電流量と相関があるとしており、彼の結果から、鉄筋の付着強度が20%程度低下する場合の積算電流密度を推定すると、およそ0.3~0.4Ah/cm²となる。一方、図-6より、電気防食を行うために鉄筋に供給される電流密度は長期的には10μA程度であると予想されることから、これらのデータをもとに、電気防食によって鉄筋の付着劣化が問題となる時期を推定すると、早ければ防食開始後5年程度で問題の生じる可能性のあることが推測された。黒井の実験では供給電流密度が非常に大きいため、その結果をそのまま電気防食の場合に適用することには問題もあるが、今後、電気防食と鉄筋付着性の関係についてはさらに長期にわたる検討も必要であると思われる。

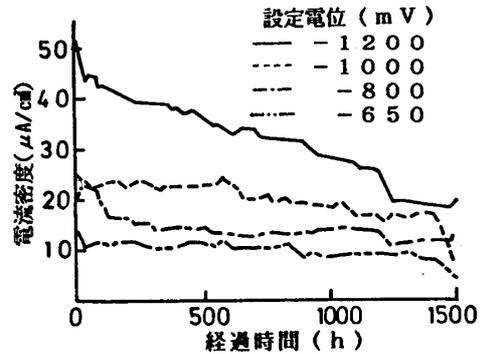
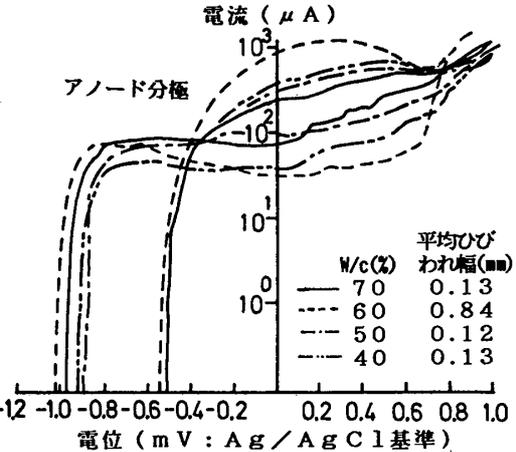


図-6 付着試験供試体中の鉄筋の設定電位と電流密度の経時変化

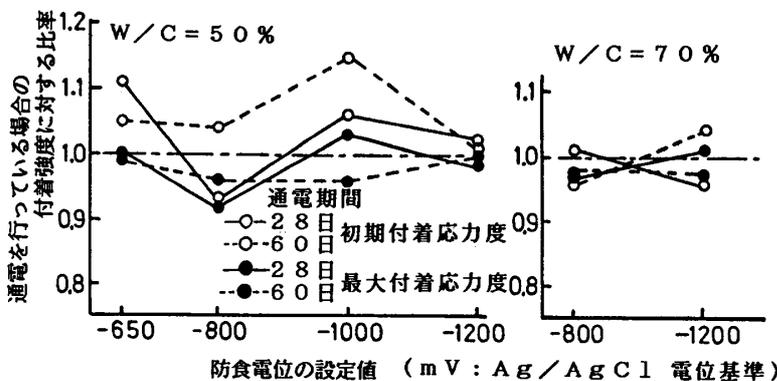


図-7 電気防食を行った場合と防食なしの場合の鉄筋付着強度比

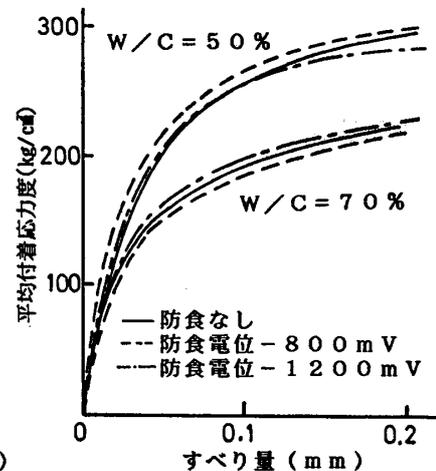


図-8 付着応力度-すべり量曲線の一例

5. 電気防食の均一性に関する検討

5-1 実験の概要

コンクリート中は不均一で電気抵抗も高いため、広範囲の鉄筋全てを所定の防食電位に設定し、この電位を保持するためには、鉄筋全てに均一に電流が供給できるシステムを開発する必要がある。これについて、現在米国などで検討されているものとしては、例えば、電気伝導性のモルタルあるいは塗料でコンクリート表面を覆いその中に対極を埋め込む方法、非腐食性の金属メッシュを埋め込んでこれを対極として使用する方法等がある。

本研究では、このうち金属メッシュを利用する方法を用いて、コンクリート部材における防食電位の均一化の問題に関する若干の検討を行うことにし、このために、図-9に示すRCスラブ供試体を2体作製して使用した。

この供試体は、図のように鉄筋と約2cmの間隔を取って供試体引張側全面に目開き3.5*7cmのチタンメッシュを敷き、その上部に厚さ約2cmのモルタル保護層を施工したものである。また、電気防食を施すにあたっては、予め鉄筋位置に埋め込んだ飽和塩化銀電極によって鉄筋の電位をモニターし、この値が2つの供試体でそれぞれ、-800mVおよび-1000mVと常時なるように電流量を調節しながら通電を行った。この間、防食電位の均一性に関する検討を行うために、定期的にコンクリート引張側表面の10cm間隔64箇所の点で鉄筋の電位を測定し、電位の分布状況を調べた。

5-2 実験結果と考察

図-10は、コンクリート表面において測定された鉄筋電位の内から、その代表的な値の経時変化を示したものである。さらに、図-11には、代表的な電位分布の一例を示した。なお、図中に示した乾燥期間とは供試体をそのまま室内放置した期間をいい、湿潤期間とは供試体表面にむしろを被せ、水を散布しながら放置した期間をさす。これらの結果によると、コンクリート表面が常に湿潤状態となっている期間中の防食電位の分布は、最大電位差が200~250mV、平均値からの最大偏差が約100mVであるが、等電位線図の形状を見るかぎりかなり均一に防食が施されている状況を確認できる。

しかし、コンクリートの乾燥状態が続くと、時間の経過とともに電位の均一性は失われて電位の差は大きくなり、等電位線図も密に入組んでくる。この傾向は、特に防食電位をより卑に

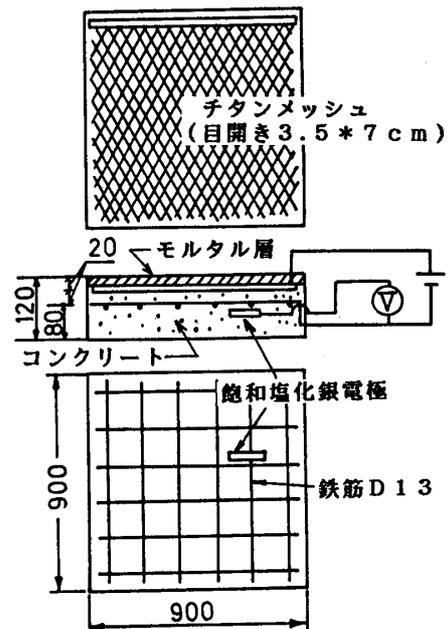


図-9 スラブ供試体における電気防食方法の概略

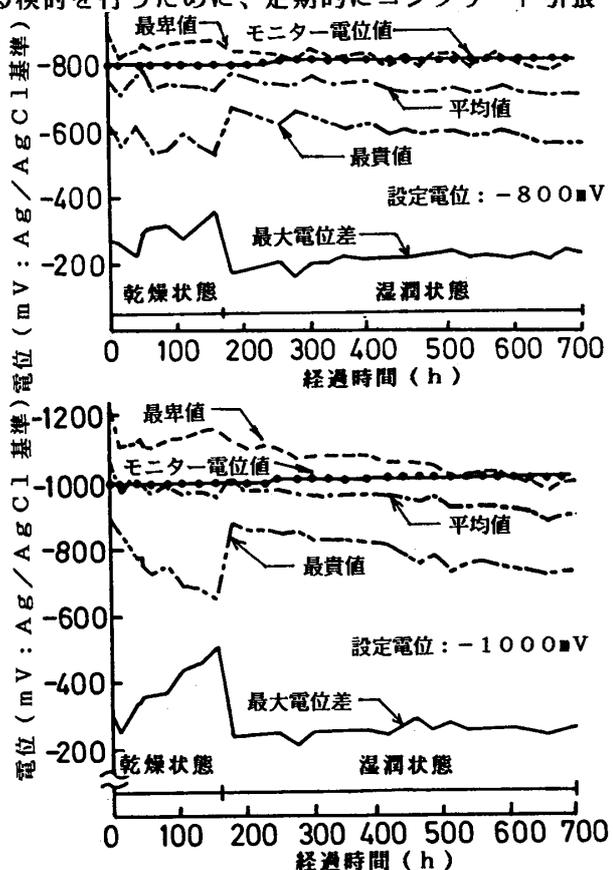
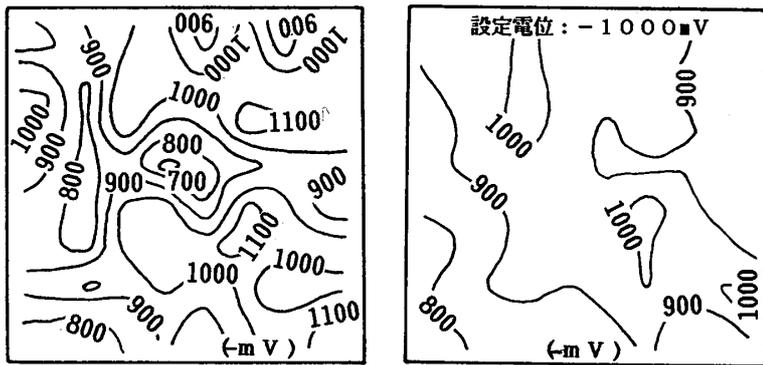


図-10 コンクリート表面において測定された電位の経時変化

設定した場合に大きく現れて、
-1000mV に設定した供試体では、
1週間の気中放置によって最大
電位差は500mV にも達した。こ
のことは、長期にわたって乾燥
状態となるコンクリート部材で
は、電気防食によって十分な防
食性を保持することができない
可能性のあることを示している。



(a) 乾燥7日目の状態 (b) 湿潤8日目の状態

図-11 コンクリート表面における電位分布の一例

ただし、図-12に一例を示す
ように、乾燥と湿潤を繰り返すような環境では、乾燥の影響
は実用上ほとんど問題ないと思われる。

図-13には、鉄筋の供給電流密度および消費電力量の
経時変化を示した。この結果、一定の電位を維持するため
に供給される電流密度は、コンクリートが湿潤状態にある
場合には時間の経過とともに小さくなり、例えば、3章で
検討を行った防食電位の設定範囲を維持するために鉄筋に
供給される電流密度は、最終的には約10 μ A/cm程度に収束
するようであった。また、消費電力量も、コンクリート1m²
あたり約0.05W/h とわずかであり、湿潤状態が維持される
限り電気防食は十分に経済的な防食方法となり得るものと
考えられる。

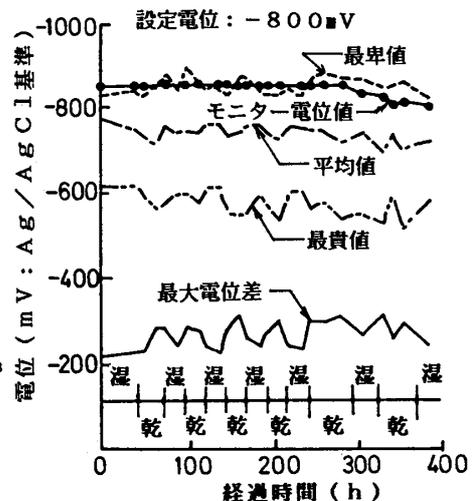


図-12 電位分布に及ぼす乾湿繰返しの影響

6. まとめ

コンクリート構造物の塩害対策の1つと
して電気防食の実用化を検討し、次のよう
な結果が得られた。

1) カソード防食を行う場合の鉄筋の設定
電位は、新規構造物に対して約-550mVより
卑にまた、補修用について-800mVより卑と
する必要がある。一方、卑変の下限値は鉄
筋付着性や経済性で決まるが、少なくとも
今回の検討範囲では、-1200mV 程度までは
大きな問題は生じないと予想された。

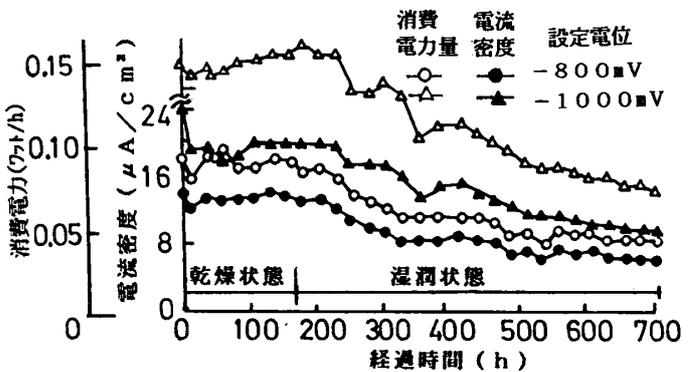


図-13 スラブ供試体に電気防食を施す場合の
供給電流量と消費電力量

- 2) 防食性を電流量で判断する場合には、鉄筋電流密度10 μ A が1つの判断基準となる。
- 3) 上記の設定電位の範囲では、通電によって生じる鉄筋とコンクリートの付着性低下は、構造上の問題とはほとんどならない。
- 4) 対極に非腐食性金属メッシュを使用することによって、防食電位の均一化をはかれる。
- 5) 海洋飛沫帯あるいは海上大気中のコンクリート構造物に電気防食は十分に適用可能である。

<参考文献> [1] 黒井登起雄：電解による鉄筋周辺のセメントペーストの軟化と付着性状について、土木学会第39回年次学術講演会講演概要集、1984、pp.25-26

[2] 武若耕司、寺原和人：鉄筋の電気防食に関する基礎的研究、土木学会西部支部研究発表会、1987、pp.552-553