

## 論文

## [1096] コンクリート構造物の塩害対策における電気防食の適用性に関する検討

正会員○武若耕司（鹿児島大学海洋土木開発工学科）  
馬庭秀士（コーアツ工業技術部）

## 1. まえがき

コンクリート構造物における鉄筋防食の基本的な考え方は、かぶりを十分にとり、密実なコンクリートを施工することによって、鉄筋腐食要因のコンクリート中への侵入を抑制することである。しかし実際には、施工の能率化によるコンクリートの品質低下、河川産骨材の不足に伴う海砂の使用および、海洋環境への土木構造物の進出などコンクリートのみで鉄筋を防食するには極めて困難な状況も生じており、今日までに数多くの構造物において鉄筋腐食問題が顕在化するに至っている。このような状況に鑑み、最近、コンクリート構造物に対する積極的な鉄筋防食法の開発、研究が急速に進められている。中でも電気防食法は、新設の構造物のみでなく、従来抜本的な対策がないと言われてきた既設塩害構造物の補修工法としても有効であると予想されることから、その実用化が大いに期待されている防食対策の1つである。

そこで著者らはこれまで、この電気防食法をコンクリート構造物に対して適切に活用するために必要となる基本的な事項について検討を行っているが〔1〕〔2〕、本論文ではこれらのうち、防食基準ならびに防食効果に関する新たな検討結果について示すとともに、通電によってコンクリート構造物の構造特性上への影響が懸念される問題として鉄筋付着性およびプレストレストコンクリート構造（以下、PC構造と称す）における問題を取り上げて検討を加えた。

## 2. 防食基準に関する検討

## 2.1 検討の概要

現在、コンクリート中の鉄筋の電気防食基準については、鋼構造物やパイプライン等における基準を参考にして幾つか検討されているが、これらを一覧すると、①防食電位を設定する方法と、②鉄筋電位を一定幅シフトさせる方法の2つとなる。これらのうち①のタイプの基準について著者らは既に、コンクリート中の鋼材の分極曲線を測定することによって、防食電位として孔食停止電位が最も妥当であることを明確にし、また、コンクリート中の鋼材におけるその基準の具体的な値についても提案を行った。しかし、②のタイプの基準については、その根拠自体が未だに不明なままである。そこで本検討では、まず、この基準の根拠を明らかにさせるためにコンクリート中の鋼材のカソード分極性状についてより詳細な検討を試みた。

一方、この②のタイプの基準を用いる場合には、通常、電流の供給を一時停止させ、通電停止直後の鉄筋電位と停止4時間後の電位の差（以下、4時間後復極量と称す）をシフト量と考えて、その値から防食性を判断する方法が実用的であるといわれている。そこで次に、このようにして求められる鉄筋電位のシフト量と防食性の関係を実験的に明らかにすることにより、②のタイプの防食基準の具体的な設定値についての提案を行った。

## 2.2 コンクリート中の鋼材のカソード分極性状について

図-1には、種々のコンクリート中のみがき丸鋼のカソード分極曲線を電位走査法により測定した結果について取りまとめて示した。なお、電位走査は、鋼材の自然電位から-1400mVまで卑

変させた後、アノード分極曲線が得られるまで貴変させる方法により行った。この結果によると、コンクリート中の鋼材のカソード分極曲線の形状は、カソード反応が可逆的な場合と不可逆的な場合の2ケースに大別されるようであった。この様な相違が何故生じるかについては現時点では明確ではないが、①水セメント比が小さくなるほど、②かぶり厚くなるほど、③コンクリート中の塩分量が多くなるほど、カソード反応は可逆的なものとなる傾向が見受けられることから、この反応形態の相違は、カソード反応に必要な諸因子のコンクリート中における存在状況やその拡散性が原因となっているものと予想される。

なお、ここで注目される点は、電位走査の貴変過程においてカソード分極からアノード分極へ移行する時の鋼材電位が、反応形態の相違によって大きく異なってくることである。特に、反応が可逆的なほど、鋼材の当初の自然電位により近い電位からアノード分極が生じることになる。鋼材にアノード反応が生じなければ腐食は発生しないことから、カソード反応が可逆的に生じるケースでは、鋼材の電位を自然電位からわずかな幅だけシフトさせれば鋼材は防食されることになる。

このことが電気防食において電位を一定幅シフトさせる基準の根拠となると考えられる。

図-2は、一定期間電気防食を行った後のコンクリート中の鋼材のカソード分極曲線を測定し、この結果を自然電位からの分極量と電流量の関係で示したものである。この図に

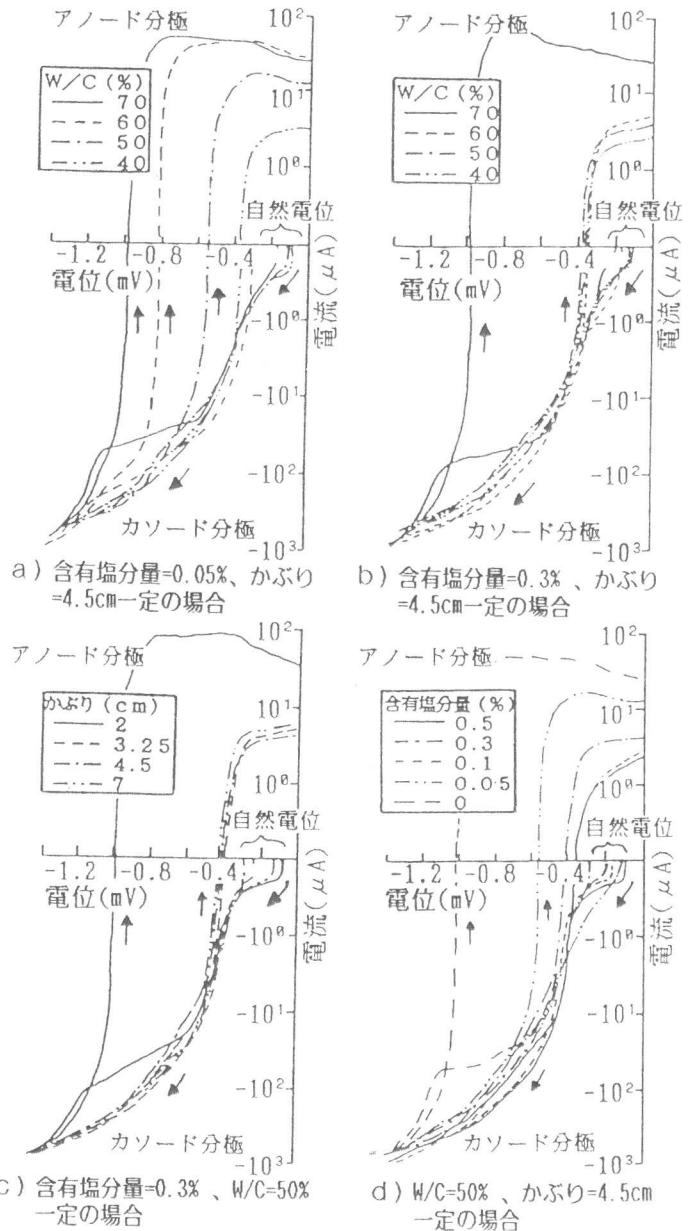


図-1 コンクリート中のみがき丸鋼の分極曲線 (走査速度1mV/sec、塩分量はコンクリート重量%)

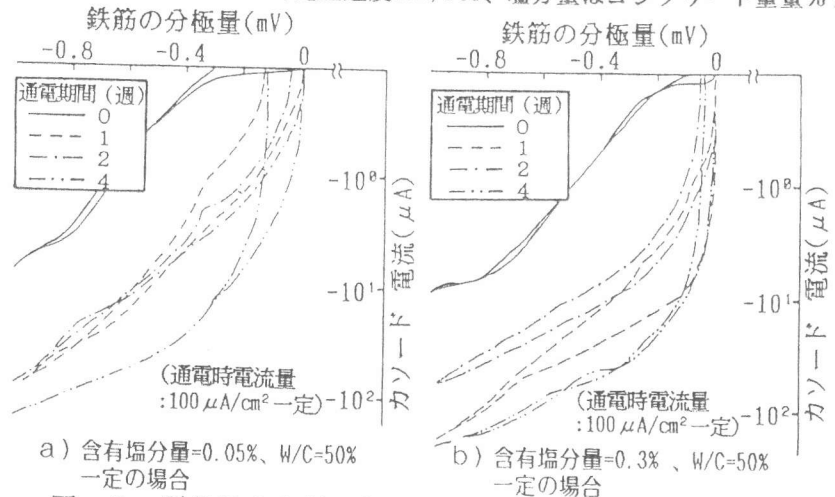


図-2 電気防食を行った鋼材におけるカソード分極曲線 (走査速度1mV/min、塩分量はコンクリート重量%)

よると、電気防食が施されている期間中もコンクリート中の鋼材におけるカソード反応の可逆性は保持され続け、また、いずれの通電期間においても、アノード反応発生電位は自然電位から $-100\sim-150\text{mV}$ 程度卑な電位の範囲内に存在するようであった。従ってこのことは、ある範囲よりも常に卑な電位に鋼材電位を設定すれば、電気防食期間中ほぼ完全に防食が行えることを示している。

### 2.3 モデル供試体を用いた防食性の検討

分極曲線の測定では測定結果が走査速度等によって影響を受けるため、電気防食に必要な電位シフト量の厳密な値を得ることは困難である。そこでここでは、図-3に示すような供試体を使用し、種々の電流供給条件下において鉄筋の防食実験を実施し、その際の鉄筋電位のシフト量と防食性の関係について検討を行った。なお、実験にあたっては鉄筋の腐食性を高めるために、コンクリート重量比で0.5%の塩分をコンクリート中に予め混入し、また、供試体は材令20日まで密封養生を行った後、温度 $40^\circ\text{C}$ 、湿度95%以上の高温高湿の環境および室内環境で2日ごとに養生を繰返す、乾湿繰返し試験に供した。

図-4は、8カ月間の乾湿繰返し試験の後に測定した鉄筋腐食量を鉄筋への供給電流密度との関係で示したものである。この結果によると、今回の検討では、①鉄筋への供給電流量が $30\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 以上において初めて十分な防食効果が得られることおよび、②供給電流量が不十分な場合にはかえって鉄筋腐食が促進されるケースもあること、等を確認できる。一方、図-5は各供給電流条件下における鉄筋の分極量を4時間後復極量によって示したものである。この図では、供給電流密度が一定であってもコンクリートの乾燥時と湿潤時で鉄筋の復極量は異なり、乾燥時には鉄筋の分極量がかなり小さくなる傾向が見られる。特に、この差は電流密度が小さな場合において顕著となるようである。このことは、図-4において十分な防食効果の得られてないケースが、乾燥時における鉄筋の分極性に問題が生じたために起こった可能性のあることを示している。図-6には、以上のことを考慮して、試験期間中の乾燥養生時に測定された分極量（4時間後復極量）を平均し、こ

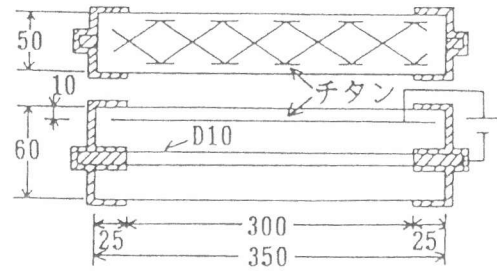


図-3 モデル供試体の形状

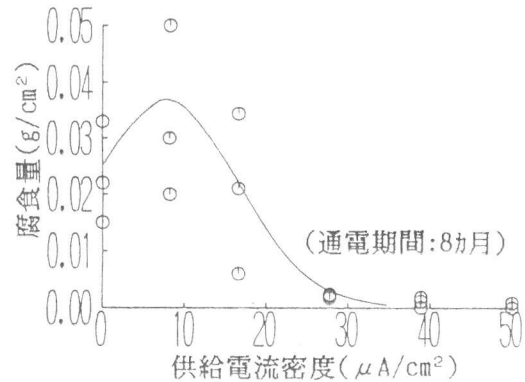


図-4 供給電流密度と鉄筋腐食量の関係

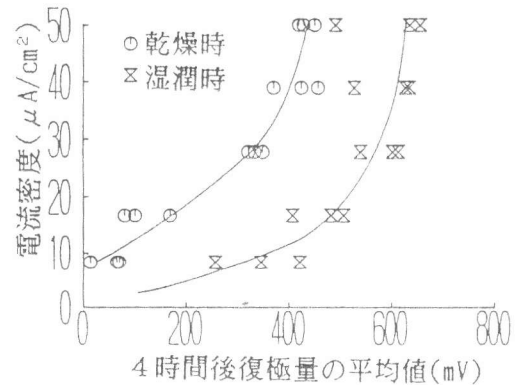


図-5 供給電流密度と4時間後復極量の関係

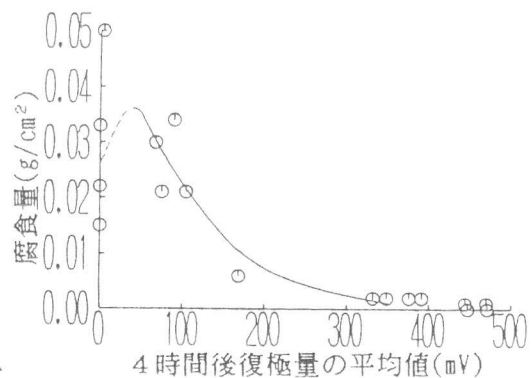


図-6 乾燥時の4時間後復極量と鉄筋腐食量の関係

れを鉄筋腐食量との関係で示した。この結果は、電気防食によって鉄筋の防食性を確保するために最低必要となる鉄筋電位のシフト量を表しているものと考えられ、このシフト量は4時間後復極量において少なくとも150~200mV程度が得られるものでなければならないことを表している。なお、図-5と6の結果を比較すると、コンクリートが湿潤状態にある場合には、5~10 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ の電流の供給によって十分に防食効果があるという結果を得るが、この電流密度は欧米等においてコンクリート橋床板などの電気防食によく適用されている値と一致する。

また、図-7は、一部の供試体において鉄筋および陽極周辺のコンクリートの塩分量をそれぞれ測定し、これを供給電流密度との関係で示したものである。この結果、電気防食においては、通電によって鉄筋周辺の塩分量を減少させる2次的防食効果も期待できることが確認された。

### 3. 構造特性に及ぼす電気防食の影響に関する検討

#### 3.1 鉄筋の付着性に及ぼす影響について

電気防食によってコンクリート構造物の構造特性上最も問題になると予想される点は、鉄筋周辺にコンクリート中の陽イオンが集積し、この部分のコンクリートが脆弱化すること、あるいは、過防食の場合に鉄筋周辺で水素が発生すること、等によって鉄筋の付着性が損なわれる状況である。ここでは、表-1に示すような5種類の電流量と通電期間の組み合わせを設定し、それぞれの条件に供された鉄筋の引き抜き特性を同じ期間通電を行わずに養生した場合と比較検討することにした。供試体はJCI案の引き抜き試験方法に準じたもので、材令40~60日まで水中養生後、通電に供した。なお、表-1の通電条件の設定にあたっては、鉄筋の付着性が供給電流量だけではなく防食期間中の積算電流量にも影響を受けると予想されることから、ここでは、積算電流量一定の条件を設定し、米国等で実績のある鉄筋単位面積当り5 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ の電流量が10年間供給される場合の積算電流量を基準としてそれぞれの値を定めた。

図-8には、通電後の引き抜き試験によって得られた鉄筋の付着応力度-すべり量関係について、その代表的な状況をとりまとめて示した。また、図-9には、通電なしの場合に対する通電供試体の付着強度比を供

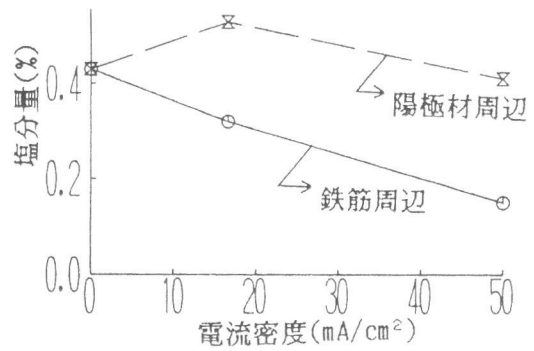


図-7 鉄筋および陽極材周辺の塩分量

表-1 付着供試体への供給電流量と通電期間

実験 No.	電流量 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	期間(日)
1	1825	10
2	608	30
3	203	90
4	122	150
5	61	300

(積算電流量:438mA\*h/cm<sup>2</sup>一定)

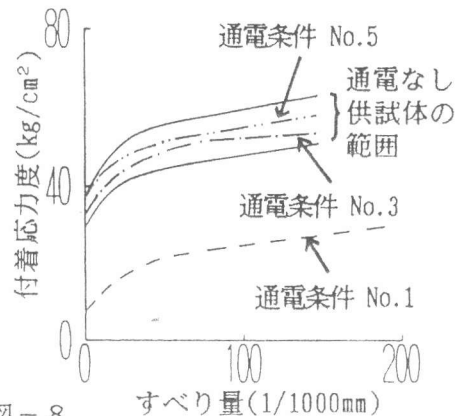


図-8 付着応力度-すべり量関係の一例

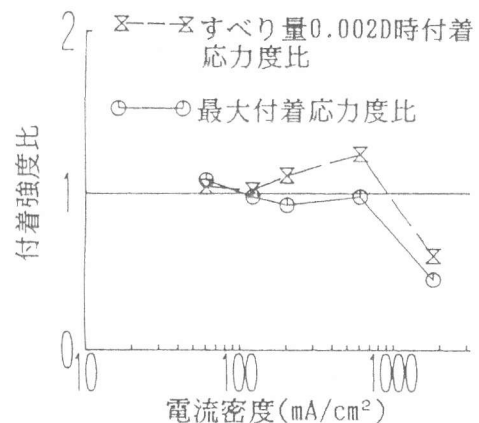


図-9 通電なしの場合に対する通電供試体の付着強度比

給電流密度との関係で示した。これらの結果によると、電流密度の最も大きな条件である  $1825 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  の場合において鉄筋付着性の大きな低下は見られるものの、 $600 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  以下の電流密度においては通電が付着性低下に繋がる状況は明確には認められず、さらに、 $100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  以下の条件では通電なしの場合と全く遜色ない鉄筋の付着性を示した。一方、この電流密度  $100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  の条件でさえ通常の電気防食における供給電流密度の数倍～数十倍のオーダーであることを考慮すると、今回の結果は、実際に活用される電気防食の通電範囲において鉄筋の付着性低下が問題となることはほとんどないことを示すものであると思われる。

### 3.2 PC構造物への適用性に関する検討

PC構造物において電気防食法を適用する場合の課題の1つとして、PC鋼材が高応力下で使用される場合には外的要因に対する感受性が極めて高いと予想されることから、通電によって鋼材の材質変化の生じる可能性が否定できないことが挙げられる。そこでこの点について検討を行うために、図-10に示すようなプレテンションPC供試体に対して表-2に示す5種類の条件でそれぞれ通電を行い、この場合の部材の破壊耐力およびPC鋼材の引張強さを通電なしの場合と比較することにした。通電条件の設定は、上述の付着試験の場合と同様、いずれの条件においても鋼材単位面積あたり  $5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  の電流が10年間供給される場合の積算電流密度を一定とするものである。また、これらの検討は、PC鋼材の目標緊張力が降伏強度の60% (タイプI供試体) および85% (タイプII供試体) の場合についてそれぞれ行うものとした。供試体の主な仕様を表-3に示す。なお、試験は供試体の材令4~6カ月より開始し、試験期間中は通電の有無にかかわらずいずれの供試体とも、海水散布6時間と乾燥18時間を1サイクルとして繰り返す温度  $30^\circ\text{C}$  の養生槽内に放置した。

図-11は、通常の電気防食条件に最も近い電流密度  $5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  の場合における通電時のPC鋼材の電位を示したものである。この図から、PC構造物に対する電気防食では、供給電流量が同じであっても、PC鋼材の緊張力が異なると鋼材電位の分極量も異なる可能性が高いことを確認できる。この結果は、PC構造物への電気防食の適用にあたって、RC構造物以上に供給電流量と鋼材分極量の関係に注意を払う必要があることを示唆する

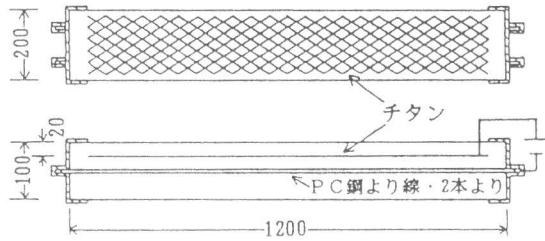


図-10 プレテンションPC供試体の形状

表-2 PC供試体への供給電流量と通電期間

実験 No.	電流量 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	期間(日)
1	228	80
2	114	160
3	76	240
4	38	480
5	5	3650

(積算電流量:  $438\text{mA}\cdot\text{h}/\text{cm}^2$ 一定)

表-3 PC供試体の主な仕様

項目	仕様
区分	プレテンション方式
コンクリート強度の目標値	$\sigma_{28} = 50.0 \text{ Kg}/\text{cm}^2$
塩分量	0、 $5 \text{ kg}/\text{m}^3 (\text{NaCl})$
PC鋼材	PC鋼より線・2本より
緊張力の目標値	降伏強度の60% (54%)
( )内は実測値	降伏強度の85% (83%)

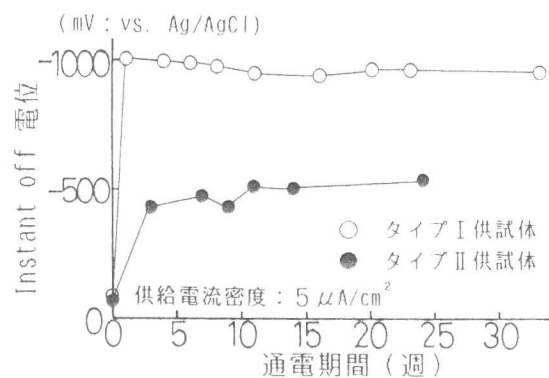


図-11 供給電流密度  $5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  の場合のPC鋼材の電位

ものである。

図-12は、通電期間160日までの条件で通電を行ったPC供試体について、通電後の曲げ載荷試験結果および内部のPC鋼材の引張強さ試験結果をそれぞれ無通電・無塩分供試体の結果との比で示した。今回報告の結果はいずれも供給電流密度の極めて高い条件でのものであるが、このような高電流量条件においても、PC部材およびPC鋼材

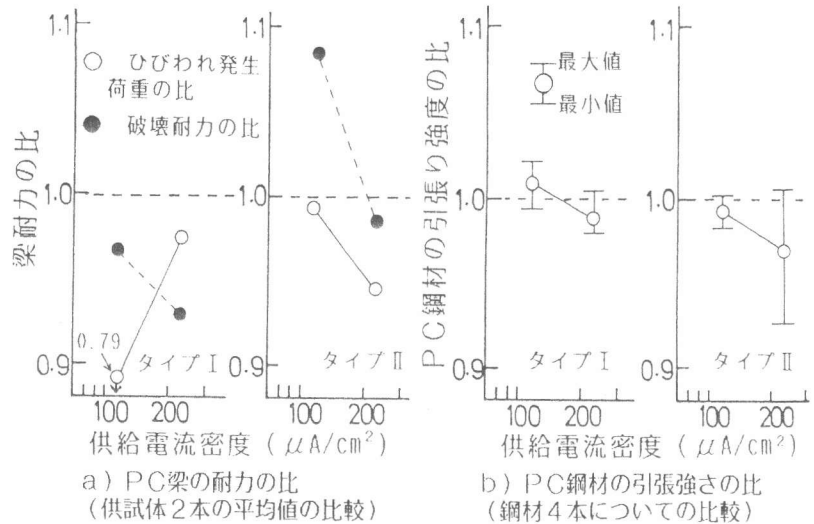


図-12 通電なしの場合に対する通電供試体の強度の比率

自身の耐力低下は数%程度の範囲にとどまっていた。このことから、実際の電気防食の場合には、少なくとも通電が直接的にPC構造物の強度特性に影響を及ぼす可能性は小さいと予想された。しかし一方、今回の実験から、①導入緊張力が大きくなると通電によるPC鋼材強度の低下割合が大きくなること、②タイプI供試体においてPC鋼材に沿ったコンクリートのひびわれが確認され、その結果、部材耐力の低下割合が大きかったこと、等の状況も確認された。特に後者のひびわれについては、高電流条件下において鋼材周辺に多量に発生した水素ガスの膨張圧に起因するものと予想されるものの、先に示した鉄筋付着強度用供試体などにおいては、同様の高電流条件においてこの様なひびわれは全く確認されなかったことから、その発生についてPC構造物独自の原因も予想され、今後ともより詳細な検討が必要である。

#### 4. まとめ

電気防食をコンクリート構造物に適用する場合に予め検討を要する諸事項のうち、本論文では、まず、この電気防食基準として最も汎用性が高いと期待される『電位シフト基準』について、その基準の根拠を明らかにした。また、そのシフト幅については、4時間後復極量において少なくとも150mV以上とすることが防食の安全上妥当であることを確認した。

さらに、電気防食の適用によってコンクリート構造物の構造上の問題が懸念される点についても検討も行い、通常の電気防食が行われる限りにおいては通電による鉄筋の付着性低下の問題は無視できること、および、PC構造物に対しては、今後の検討課題はいくつか残されたものの、基本的には構造上の問題がなく電気防食が適用可能であることを確認した。

なお最後に、本研究の遂行にあたり種々の御協力を頂いた住友セメント(株)セメント・コンクリート技術開発センター並びに、コーアツ工業(株)川内工場の関係各位に謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 武若耕司他：外部電源法によるコンクリート中の鉄筋の電気防食に関する研究、日本コンクリート工学協会、JCI-C15, pp.95-102, 1989.1
- 2) 馬庭秀土他：コンクリート構造物の塩害対策における電気防食の適用性と問題点の検討、土木学会第45回年次学術講演会、pp.560-561, 1990.9