

論 文

[1139] 水素発生領域におけるプレストレストコンクリートの電気防食

峰松敏和*1・堺 孝司*2・池田勝日輝*3・石川光男*4

1. はじめに

塩害によるコンクリート構造物中の鋼材の腐食に対して、電気防食法が抜本的な対策として着目され、我が国においてもその適用例が増加しつつある。特に、鉄筋コンクリート構造物に関しては、その適用技術はほぼ確立され、今後、さらに普及するものと考えられる。

一方、プレストレストコンクリート（以下PCと呼ぶ）への適用に関しては、電気化学上の問題、すなわち、過防食状態での電気防食時に水分が電気分解し、発生する水素がPC鋼線を脆化させる現象、いわゆる水素脆化が懸念される[1]。このため、その適用例は少なく、我が国で試験的に実施された3例およびイタリアで新設のPC橋梁に適用された約10万m²[2]のみである。

PC構造物では、防食電位を水素発生領域に至らせないことで、電気防食の適用が可能と考えられるが、そのためには、水素発生領域でのPCの電気防食の挙動を把握しておく必要がある。

すなわち、これらの挙動はプレテンションとポストテンション方式では異なること、ポストテンション方式ではシース管とシース管中のPC鋼線では防食電位が異なること、腐食欠損したシース管を有する場合の各部位における電位の挙動が不明なこと、コンクリートの乾燥状態の違いにより発生する水素量が異なり水素脆化の危険性の程度が異なるなど、解明すべき問題点が多く残されている。

本文は、上記のような問題点を明らかにするため、モデルPC供試体を用い、水素発生領域での電気防食時の電位やひずみを測定することで、PC構造物への電気防食の適用の可能性を検討したものである。

2. 実験概要

実験は、図-1に示す形状寸法の供試体を用い、防食方式はメッシュ陽極方式とした。適用したPC鋼線はφ2.9mmの2本撚り線で、シース管はφ26mmの金属性スパイラルシースである。また、供試体は表-1および図-2に示すようにストレスの導入方式やシース管の欠損の影響、通電方式や防食電位の影響、防食電位を制御する照合電極の位置等について検討することとした。供試体は、No.1をプレテンション方式で作製し、No.2~No.5をポストテンション方式とし、No.2はシース管とPC鋼線を

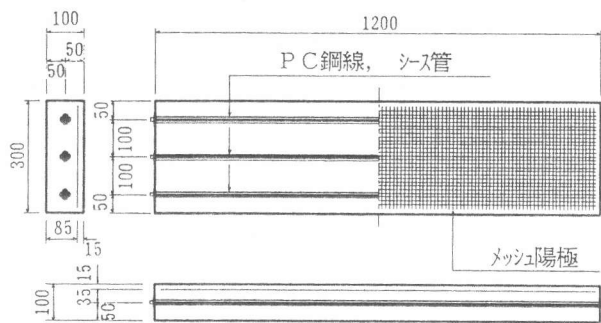


図-1 供試体の形状寸法

表-1 供試体および実験条件

No	プレストレス導入方式	シースの欠損	通電方式	通電開始時電位	照合電極	電位コントロール
1	プレテンション	-	定電流	-1.1V より卑 (Eio)	1本	PC鋼線
2	ポストテンション	なし	定電流	-1.1V より卑 (Eio)	1本	シース管
3	ポストテンション	小欠損	定電位	-0.8V (Eon) ¹⁾	3本	シース管
4	ポストテンション	30cm*1	定電位	-0.8V (Eon) ¹⁾	3本	シース管
5	ポストテンション	20cm*2	定電位	-0.8V (Eon) ¹⁾	3本	PC鋼線

1)管理基準電位を-0.8→-1.0→-1.2→-1.4→-1.6Vと変化させる定電流通電では、使用電源の関係上、20%程度の許容電流変動を有する

- * 1 住友セメント（株）中央研究所セメントコンクリート研究所商品開発室主任研究員、工博（正会員）
- * 2 北海道開発局 開発土木研究所 構造部 材料研究室 室長、工博（正会員）
- * 3 北海道開発局 開発土木研究所 構造部 材料研究室 副室長
- * 4 日本防蝕工業（株）技術研究所 課長（正会員）

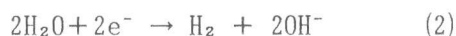
接触させ、他は接触しないように配置した。また、No. 4およびNo. 5は、シース管を表1の長さで、管の半分を切り取り、シース管欠損部を設けた。この欠損部はコンクリート打設時にはシース管内にパイプを挿入し、コンクリートが回り込まないように処理し、ストレス導入後にグラウト用の混和剤を添加したセメントミルクでグラウトを行った。供試体に設置した照合電極は鉛照合電極で中央部の電極はコンクリート打設前に設置し、他は供試体作製後、コンクリートおよびシース管を削孔し設置した。このため、PC鋼線をモニタリングする電極部のシース管には小さな欠損部が存在する。用いたコンクリートは、水セメント比が38.5%で、塩化物を添加しないものとした。

通電は、供試体No. 1、No. 2を通電開始時から水素発生電位に保持し、供試体No. 3~5は、一定期間（約3か月）ごとに防食電位を昇方向に変化させることとした。なお、実験は北海道開発局開発土木研究所内で行っており、室内環境であるが、外気温に近い状態にある。また、供試体の湿潤状態は水素脆化に影響を及ぼすと考えられるため、先ず、水分の供給がない状態での実験を行い、その後、PC鋼線に破断が認められない場合は、水分が供給される状態で試験を繰り返す計画とした。なお、測定項目は、通電時電位（E_{on}電位）、通電停止直後の電位（E_{io}電位）、防食電流、電解電圧（電源電圧）並びにコンクリートひずみとし、コンクリートのひずみは、水素脆化によるPC鋼線の伸びや破断の検出を目的としたものである。

3. 水素発生と水素脆化のメカニズム

水素脆化は、金属材料の強度や靱性が水素の侵入によって低下する現象を言う。水素脆化は、劣化形態でいくつかに分類されるが、脆化現象そのものは、水素の侵入、拡散や移動による水素の集積、集積箇所での金属クラックの発生と伝播である。いずれにしても、脆化の根本的原因は水素の生成である。

通常、アルカリ電解溶液中での陰極反応は主に酸素と水が関与し、次の反応式で示される。



すなわち、コンクリート中における鋼材の陰分極特性は、(1)、(2)の反応を合成したもので、この反応のうち、(1)の酸素還元反応は鋼材表面への酸素の供給に依存される。一般的には乾燥したコンクリートでは酸素が多量に供給され、湿潤コンクリートではその供給が少なくなり、コンクリートの乾燥程度は水素の発生反応に影響することとなる。

また、これらの反応における平衡電位はpHに影響され、飽和硫酸銅電極換算で以下となる。

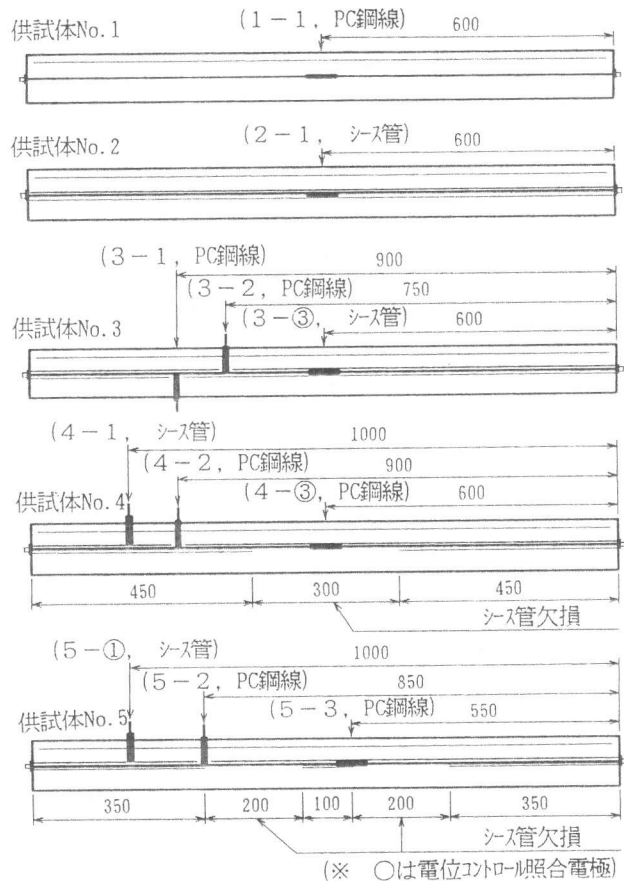


図-2 照合電極設置位置

$$E_{O_2} = 0.914 - 0.059 \text{ pH}$$

$$E_{H_2} = -0.316 - 0.059 \text{ pH}$$

この式に基づきコンクリート中(pH=12.5と仮定)での水素の発生電位を求めると以下となる。

$$E_{H_2} = -0.316 - 0.059 \times 12.5 = -1.054 \text{ (V)}$$

また、(1)、(2)の反応式からも明らかなように、陰極反応に伴いOH⁻が生成するため、鋼材表面ではpHが上昇する。これを考慮し、鋼材表面のpHを13.5とすると平衡電位は次となる。

$$E_{H_2} = -0.316 - 0.059 \times 13.5 = -1.113 \text{ (V)}$$

これに対し、コンクリートが中性化した場合、例えば鋼材近傍のpHが10では、

$$E_{H_2} = -0.316 - 0.059 \times 10 = -0.906 \text{ (V)}$$

と水素発生電位が貴となる。しかしながら、実際の電気防食においては前述のように酸素還元反応によりpHが上昇しているため、通常言われているように水素脆化危険電位を約-1100mVとすることは妥当と考えられ、本実験においてもこの値を適用した。

また、鋼材が分極するためには電流が流入する必要があるが、シース管が健全な場合、防食電流は、直流電源(+)→陽極→コンクリート→シース管(→P C線)→直流電源(-)と流れる。電気化学反応は電解質と金属界面での電流の授受がある場合に生じ、この場合、シース外面での電気化学反応は生じるが、P C鋼線表面では電気化学反応は生じない。したがって、シース外面が水素発生領域に置かれてもP C鋼線の水素脆化は生じないと判断される。しかしながら、シース管が破損した場合には、防食電流は、コンクリート→シース管およびコンクリート→P C鋼線の2通りになり、P C鋼線も電気化学反応の対象となる。シース管またはP C鋼線に流入する電流は陽極からシース管またはP C鋼線までの距離に大きく影響され、一般的には、陽極から遠いものほど、また、シース管の破損程度が小さいものほど、さらに、対象鋼材が細いものほど電流が供給され難くなる。

これらの諸条件をボステン方式のP C構造物にあてはめた場合、P C鋼線はシース管の内側に存在し、さらに細いため、シース管に比して電流が流入しにくくなる。すなわち、P C鋼線は、シースに比べ防食電位が卑化しづらく、シース管外面が水素発生領域に置かれても、P C鋼線の電位はシース管よりは安全側になると予想され、本実験においてこれらを確認することとした。

4. 実験結果および考察

(1) プレテンション方式(P C鋼線の挙動)

プレテンション方式のP C鋼線に直接、水素発生領域の電位となる防食電流を通電開始当初から供給し、P C鋼線の電位、電解電圧および防食電流の経時変化を図-3に示す。本結果によると、E_{on}電位は試験開始時で-1400mV程度、通電後約200日で-1500mV程度となったが、E_{io}電

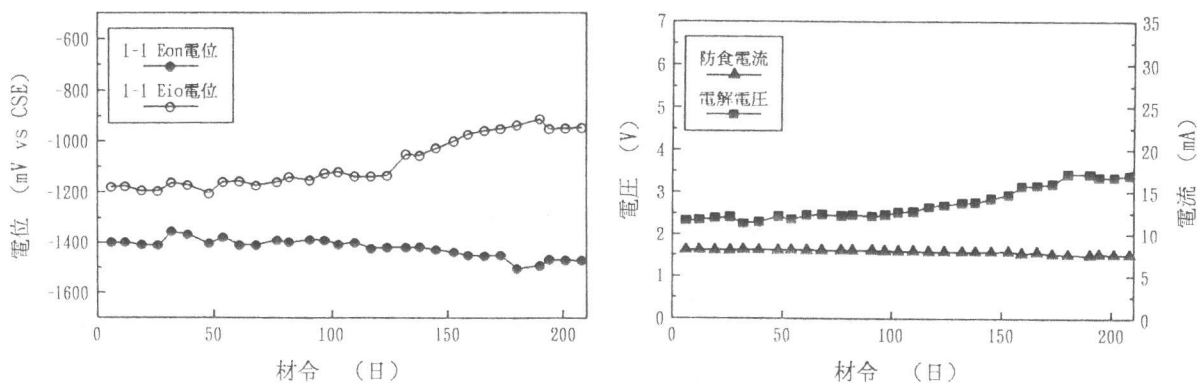


図-3 供試体No. 1における電位、防食電流および電圧の経時変化

位は、130日程度までが約 -1200mV で、水素発生領域にあり、その後徐々に貴化し、約 200日で -950mV 程度となり、Eon 電位と Eio 電位の差、すなわち、IR ドロップの増加が認められた。また、この時の電解電圧の経時変化は 2.3V から 3.4V に増加しており、これらの電位や電圧の変化はコンクリートの乾燥等によるコンクリートの抵抗率の増加が原因と考えられる。

本供試体の場合、通電開始から 130日程度までの Eio 電位は約 -1200mV で水素発生領域にあるが、後述するひずみの測定結果（図-8）では、コンクリートの収縮ひずみが測定されており、PC 鋼線の水素脆化や破断に伴うひずみの増加は認められない。すなわち、プレテンション方式で、直接 PC 鋼線が水素発生領域に置かれた場合でも、この程度の期間および環境であればほとんど問題とならないと考えることもできる。

(2) シース管が健全なポストテンション方式（シース管の挙動）

ポストテンション方式のシース管に水素発生領域となる防食電流を供給し、過防食域でのシース管の防食特性を求めた。電位の挙動、電解電圧および防食電流の経時変化を図-4に示す。

本実験では、通電開始時のシース外面の Eon 電位を -1400mV 程度に設定したが、その後徐々に貴化し 200日程度で -1200mV になった。また、Eio 電位は -1300mV 程度から -1000mV 程度に変化し、双方の電位差、すなわち、IR ドロップが拡大しており、電位変化の形態は若干異なるが、プレテンション方式での PC 鋼線の挙動と同様な傾向を示している。また、この時の電解電圧は 3V 程度から徐々に増加し、100日以降で急激に増大し、200日で約 7V となっており、絶対値に違いはあるもののプレテンション方式の場合と同様な傾向であった。

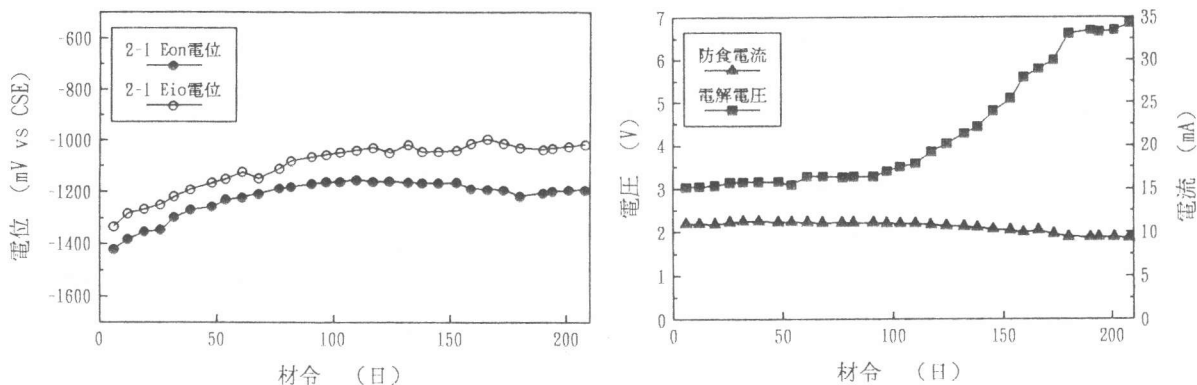


図-4 供試体No. 2における電位、防食電流および電圧の経時変化

(3) シース管に小さな欠損があるポストテンション方式（シース管外面電位管理）

本供試体には、PC 鋼線の電位を測定するための照合電極を取り付けたため、シース管には小さな欠損部が存在している。

本実験は、シース外面の電位を Eon 電位で管理し、4か月程度まで -800mV 、その後 -1000mV に変更し、さらに順次、電位を卑化させることで、通常の防食電位領域から過防食領域に至るまでの防食特性を求めることにしている。

本実験におけるこれまでの電位、防食電流および電圧の経時変化を図-5に示す。防食電位の制御は、シース外面の Eon 電位で管理しており、この位置の Eio 電位は、 -780mV 程度および -950mV 程度で比較的安定した挙動を示している。一方、シース管内の PC 鋼線の Eio 電位は陽極に面した側と裏側の場合でも異なっており、陽極側で -670mV および -780mV 程度、裏側で -630mV および -700mV 程度で、いずれもシース外面より 100mV 以上貴となっており、防食電流が流入しづらいと判断される裏側でより貴となっている。すなわち、防食電流が流入しにくいシース管内部の PC 鋼線は分極量が小さく、さらに、電流が流入しにくい裏側の PC 鋼線は、さらに小

さくなり、シース管よりも分極し難いことが確認された。なお、この時の電解電圧の挙動は管理電位を変えると電圧も変化し、 -800mV では 1.3V 程度、 -1000mV では 1.9V 程度とほぼ一定であった。一方、防食電流はそれぞれの管理電位での通電開始時に大きく、その後減少する傾向にあり、管理電位 -800mV では 6mA から 2mA へ、 -1000mV では 18mA から 8mA に減少した。

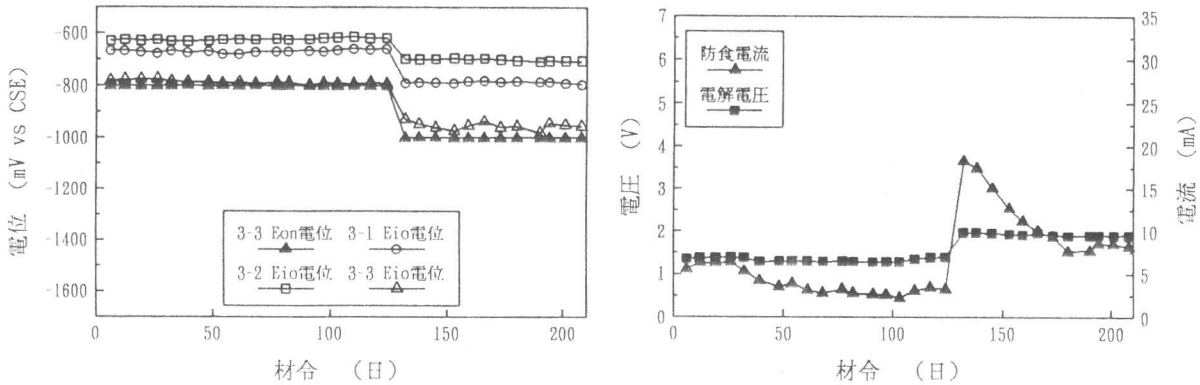


図-5 供試体No. 3における電位、防食電流および電圧の経時変化

(4) シース管が欠損(30cm, 1か所)したポストテンション方式(欠損部P C鋼線電位管理)

シース管が腐食し、一部が損傷した場合を想定した供試体の電位、防食電流および電圧の測定結果を図-6に示す。この供試体においては、シース管欠損部に位置する露出P C鋼線部のEon電位を管理電位とし、通電開始～約4か月を -800mV 、その後を -1000mV とした。

この図において、P C鋼線を対象とした管理位置でのEio電位は、管理電位 -800mV で -720mV 程度、 -1000mV に対し -920mV 程度である。また、この時のシース外面(陽極側)のEio電位はそれぞれ -850mV 、 -1020mV 程度であり、欠損部のP C鋼線のEio電位よりも卑な値となっている。一方、小さな欠損のある部分のシース管内のP C鋼線のEio電位は、 -650mV および -700mV 程度でシース外面よりも 200mV 以上貴な値で、卑な方から、シース外面、シース欠損部にあるP C鋼線、シース健全部のP C鋼線となることが確認できた。また、その際の電解電圧および防食電流の経時変化は、供試体No. 3とほぼ同様な傾向にあり、電圧は、管理電位 -800mV の場合 1.3V 程度、 -1000mV の場合 2.2V 程度で比較的安定しており、電流は管理電位が -800mV の場合 $7\sim 10\text{mA}$ で変動し、 -1000mV に変更時に急激に増加し約 19mA になったが、その後、急速に減少し約 10mA で安定した。

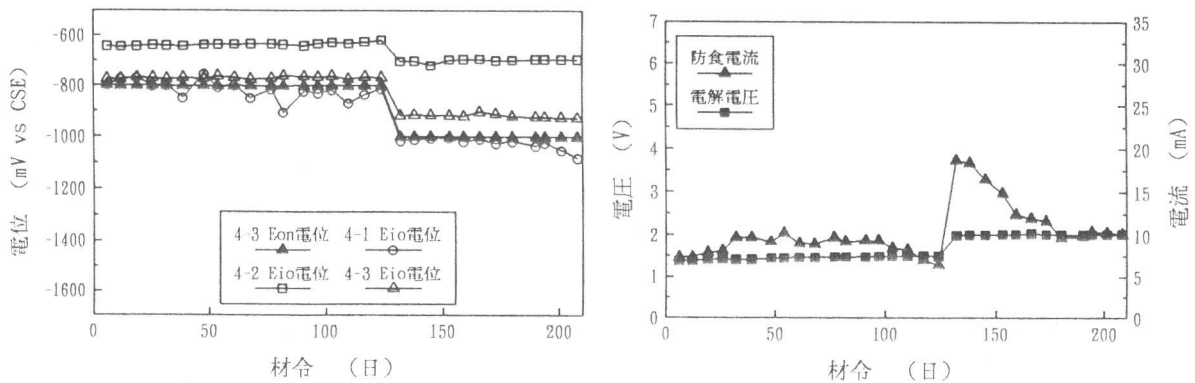


図-6 供試体No. 4における電位、防食電流および電圧の経時変化

(5) シース管が欠損(20cm, 2か所)したポストテンション方式(シース管外面電位管理)

本供試体は、供試体No. 4と同様にシースの損傷を想定し、欠損部(20cm)を2か所設置した。また、防食電位の管理基準電極は、シース外面を対象として設置した鉛照合電極で、管理電位は、

先と同様にEon 電位で-800mVおよび -1000mVとした。

電位、防食電流および電圧の経時変化を図-7に示す。この図において、シース管を対象とした管理位置でのEio 電位は、管理電位-800mVで-750mV程度、-1000mVで-880mV前後であった。この時のシース管欠損部に存在するP C鋼線のEio 電位は、管理電位-800mVで-700~-750mV、-1000mVで-800~-850mVであり、シース管に小さな欠損を有する部分のP C鋼線のEio 電位は、管理電位-800mVで-690~-720mV、-1000mVで-770~-840mV程度であり、これらの貴化傾向は供試体No. 4と同様であった。しかしながら、シース管とP C鋼線のEio 電位の差は、供試体No. 4よりは小さく、シース管の欠損量が大きいものほど防食電流の流入が容易になり、P C鋼線の水素脆化の可能性が増大することが推察される。また、この際の防食電流および電圧の挙動は、供試体No. 3およびNo. 4と値は若干異なるがほぼ同様な傾向にある。

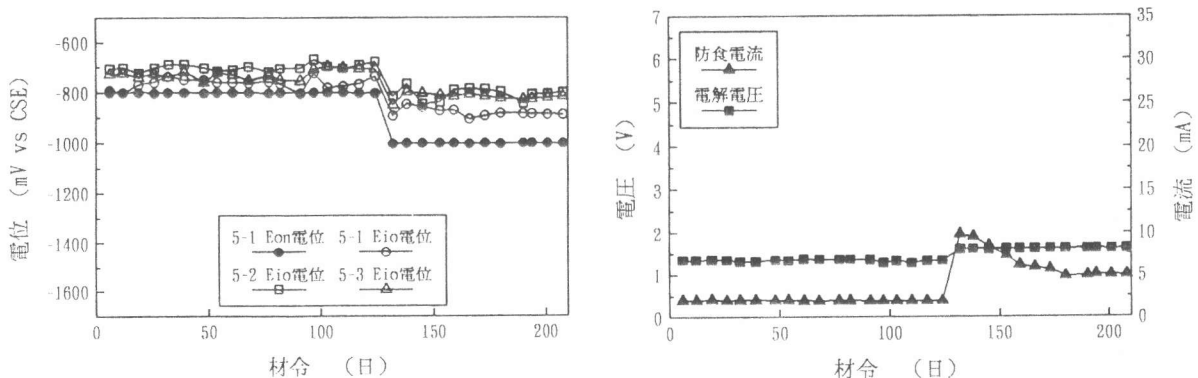


図-7 供試体No. 5における電位、防食電流および電圧の経時変化

(6) コンクリートのひずみ

コンクリートひずみの測定結果を図-8に示す。この試験結果に基づくと、いずれの供試体においても、現在までのところ急激なひずみの変化は認められず、ひずみは収縮側に徐々に増加する傾向となっている。このひずみの変化は、乾燥収縮に起因するものと考えられ、現在までのところ、水素脆化を確認することはできていない。

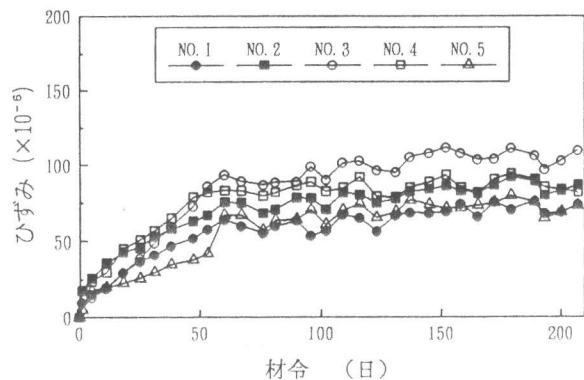


図-8 コンクリートひずみの経時変化

5. まとめ

これまでに実施した試験結果に基づくと、シース外面の防食電位が水素発生電位近傍となった場合でも、シース管内に存在するP C鋼線は、これよりも貴となり、水素脆化の危険が小さくなることが明らかとなった。したがって、シース管が健全な状態のP C構造物への電気防食の適用の可能性はかなり大きいと考えられる。本実験は、比較的乾燥状態（酸素供給が良い）にある条件で実施したが、今後、さらに卑な電位での実験を実施するとともに、湿潤状態として酸素の供給が少ない条件での実験も実施する予定である。

参考文献

- 1) 例えば、武若耕司：コンクリート構造物における電気防食法の現状、コンクリート工学、Vol. 30, No. 8, pp. 16-17, 1992. 8
- 2) ELGARD Cop.: ELGARD ANODE MESH INSTALLATION LIST-REV, 1992. 8