

## ポステンPC構造物への防食電流分布に関する研究

オリエンタル建設(株) 技術研究所  
同 上

○小林 俊秋  
正会員 呉 承寧

### 1. はじめに

電気防食工法は、塩化物を含む部分のコンクリートを大量にはつり取る作業が不要であり、確実に腐食の進行を防止することができるために、常に応力負荷状態である PC 構造物への適用は望ましいと考えられる。腐食を停止させるための電流は最小に抑える必要があるが、コンクリートは、不均質な材料で電気抵抗が大きいので、全ての部分に対して十分な電流密度を供給するためには、ある程度過防食とする必要がある。普通鉄筋には無関係であるが PC 鋼材のような高強度鋼への過防食は、水素脆性に対する懸念がある。

ポステン PC 構造物においてシース、PC 鋼材、主鉄筋、スターラップ鉄筋など複数の鋼材を並列接続して通電を行った場合には、鋼材の材質、寸法、表面積、陽極からの距離の違いなどにより、電流密度の分布はかなり異なると考えられる。またシース管が腐食欠損、グラウトが未充填、鉄筋かぶりが不均一などの施工不良によっても分布は異なる。さらに複雑に配筋された実構造物において隣接している金属が電気的導通のない場合には、迷走電流による電食の可能性もある。電気防食の問題では、防食対象となる鉄筋やシース表面の電流密度などの物理量が重要である。過防食あるいは電食による損害を防ぐためには、電流密度または分極量の分布を予測し、陽極の設置位置、供給電圧または電流、導通箇所などを適切に決定することが必要となる。

本研究は、鉄筋表面の電流密度分布を測定するために細片に分割した鉄筋を用いたモデル PC 試験体を製作し電気防食を施して異なる構造形式による電流密度の分布状況などを詳細に調べ、適切な防食方式について検討し、PC 構造物への電気防食の適用性を明らかにすることを目的とした。

### 2. 実験概要

#### 2.1 使用材料および配合

表-1 は、使用材料の一覧、表-2 は、コンクリートの配合、表-3 は、グラウトの配合である。水セメント比は W/C=37%とし、セメントは、早強ポルトランドセメントとした。電気防食の陽極材として、酸素過電圧および水素過電圧が大きく、液中に溶出せず、導電率が高い炭素繊維シートを使用した。グラウトおよびコンクリートには、予めセメントペーストおよびモルタル重量あたり塩素イオンを 0.5%混入したものと混入していないものを製作する。本論文は、塩素イオンを混入していない試験体だけとする。

表-1 使用材料の種類

コンクリート	セメント	早強ポルトランドセメント
	細骨材	砕砂, $\rho = 2.61$
	粗骨材	砕石, $\rho = 2.63$
	混和剤	ポリカルボン酸系
グラウト	セメント	普通ポルトランドセメント
	混和剤	ノンブリーディング・粘性型
陽極		炭素繊維シート
照合電極		飽和塩化銀電極、ミニセンサー
シース		金属製スパイラルシース
PC鋼材	SWPR7BN	12.7, 15.2mm
鉄筋	SD295A	D16, 13, 10

表-2 コンクリートの配合

水セメント比 (%)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )					
	水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤	塩化物
W/C	W	C	S	G	SP	NaCl
37	150	405	846	1050	4.00	12.5

表-3 グラウトの配合

水セメント比 (%)	(kg)			
	GF-1700の 使用量 (C×1.0%)	水	セメント	塩化物
W/C	W	C	NaCl	
45	1.0	45	100	1.2

## 2.2 供試体の製作

実験には、図-1に示す500×500×400mmのポストテンション方式のPC部材中央部下部をモデル化した供試体を用いた。シースは、4段配置とし、そのうちの1段目に並列して3本配置して、C5のシースには、長さ150mmの切り欠き部を中央部に設け、C6のシースには、上半分をグラウト未充填部とし水を満たし欠陥シースとし、計6本(C1~6)とした。陽極として炭素繊維シートを底部および側面に配置した。鋼材は、7本より線SWPR12.7mmを4本として内径φ65mmのシースに入っており、スターラップ筋は、D13で3組(st1~3)、主筋は、D16を8本(s1~8)とした。鉄筋、シースおよびPC鋼材の電位を測定するために、スターラップ脇、C1、シース側面およびシースを貫入させて埋込照合電極(飽和塩化銀)およびミニセンサー(小型化した偽参照電極)を図-1に示す位置に設置した。

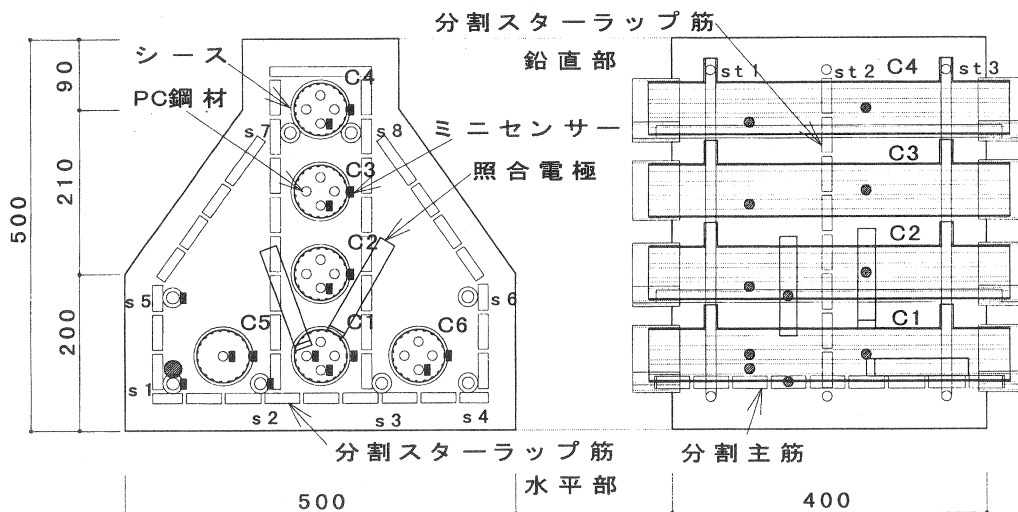


図-1 ポステンPC部材形状・寸法

外部電源を用いカソード防食によるシース、PC鋼材、主筋、スターラップ各々に流れる、電流量を測定するために各々電氣的に独立させリード線を接続した。また鉄筋に流入する防食電流分布を測定するために図-2に示すように、D16×45mmの試料を切り出し、導線を取付た後、両端にエポキシ樹脂で電氣的に独立させ連結した。このように、小さな試料を多数個絶縁体を介して並べ、細かく分割した形を作ることにより電流密度分布を測定することができる。主鉄筋のs3、s4、s8を各々9、スターラップ組立筋の記号st2を40、シース管C5内のPC鋼材を9の要素に分割した。図-3、4、5に分割主鉄筋図、腐食欠損部をモデル化したC5のシース図、分割スターラップ組立筋図を示す。

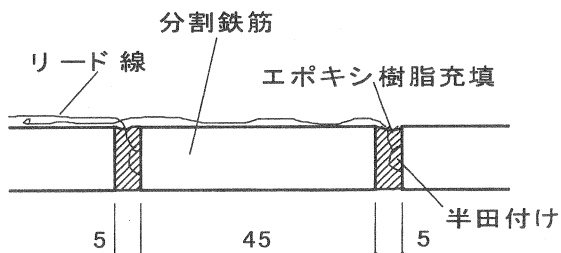


図-2 分割鉄筋詳細図



図-3 分割主鉄筋図

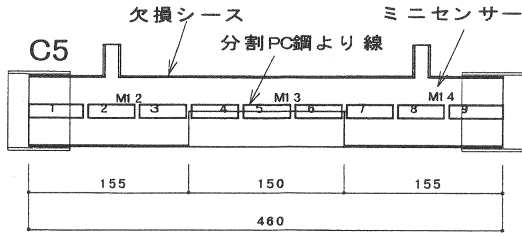


図-4 腐食欠損部をモデル化した C5 のシース図

コンクリート打設後は、温度 20℃、湿度 60% の恒温恒湿室に約 1 ヶ月設置後に、供試体の底面および側面に陽極を設置した。陽極設置面の下地処理を行い導電性プライマーを塗布しコンクリートと接着剤の付着を良くする。プライマーの硬化後、供試体に炭素繊維シートを導電性接着剤で含浸接着させて 1 方向に設置した。各陽極には、電流分配板（銅板）を繊維と直角方向に設置しリード線を取り付けた後、電氣的に独立するようセルロイド板で絶縁する。シースと PC 鋼材の間には、グラウトを注入した。

### 2.3 通電方法

通電方法は、供試体表面に接着した炭素繊維シートを陽極とし、鉄筋、シースまたは PC 鋼材を陰極とし、定電流方式で通電特性を詳細に検討する。定電流方式とは、定電流電解装置（ガルバノスタット）により陽極表面積あたりの通電電流密度を一定に保つ通電方式である。通電期間は 3 日とした。図-6 に陽極設置位置図を示す。各分割鉄筋、シースおよび PC 鋼より線を電氣的に接続した後に、設定電流密度（陽極設置面積に対し）10、20、40mA/m<sup>2</sup>、陽極面を①、①+②、①+②+③で通電した。通電条件一覧を表-4 に示す。

### 2.4 測定方法

電位分布の測定は、埋込型照合電極、埋込型ミニセンサーまたは供試体表面の測定点に外部用照合電極を当て、エレクトロメーター（入力抵抗：1×10<sup>11</sup>Ω）を用いてシース、鉄筋および PC 鋼材の自然電位（E<sub>of</sub>）、通電 72 時間後の電位（E<sub>on</sub>）、通電停止直後の電位（E<sub>io</sub>）および通電停止 24 時間後の電位（E<sub>of</sub>）を測定し E<sub>io</sub> と E<sub>of</sub> とから分極量を求めた。測定値は、飽和硫酸銅電極基準（CSE）に換算した。通電時に各分割鋼材へ流入する防食電流量は、分割鉄筋と外部電源から外部電気回路を形成する導線との間に無抵抗電流計（測定範囲±1nA～±1A）を接続して測定した。また、測定値は各鋼材の表面積で除して電流密度（mA/m<sup>2</sup>）に換算した。

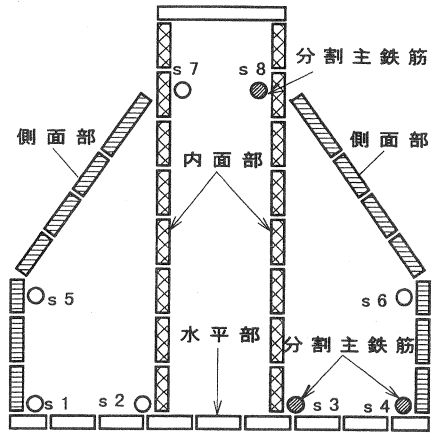


図-5 分割スターラップ筋図

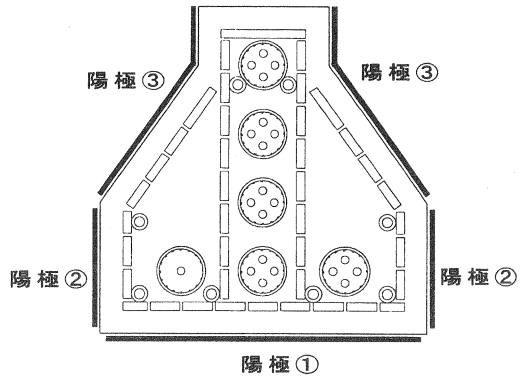


図-6 陽極設置位置図

表-4 供試体の通電条件一覧

陽極設置位置			電流密度 mA/m <sup>2</sup>			通電 期間 日
①	①+②	①+②+③	10	20	40	
○				○		3
	○			○		3
					○	3
		○	○			3

3. 実験結果および考察

3.1 スターラップ鉄筋の電流密度および分極量の分布

電流密度を10, 20mA/m<sup>2</sup>, 陽極設置位置を①, ①+②, ①+②+③と変えた場合の、側面部スターラップ鉄筋の電流密度および分極量分布の測定結果を図-7に示す。20mA/m<sup>2</sup>, 陽極①の場合, 電流密度は陽極鉄筋間距離の増加に伴い減少する。分極量は、電流密度と同様の傾向を示す。分極量は、陽極鉄筋間距離が350mm以内で100mV以上となり防食効果が期待できる。100mVの分極量を得るための最小電流密度は鉄筋単位面積当たり0.14μA/cm<sup>2</sup>であった。鉄筋が腐食していないため米国等で実績のある防食電流密度5μA/cm<sup>2</sup>と比較すると小さい値である。20mA/m<sup>2</sup>, 陽極①+②の場合, 陽極②直下の電流密度は、鉄筋との距離が35mmと小さく、また二方向から電流が供給されるため約4μA/cm<sup>2</sup>と高い値となる。分極量は、800mV以上である。特に陽極鉄筋間距離が100mm以内の隅角部では、分極電位は最大-953(mV vs CSE)で水素発生電位近くまで分極している。10mA/m<sup>2</sup>, 陽極①+②+③の場合, 電流密度は、陽極②で最大0.9μA/cm<sup>2</sup>, 陽極③で最大2.5μA/cm<sup>2</sup>であった。陽極③は、下フランジからウェブへ向かうハンチ部で断面が減少する部分に位置している所以对称面の陽極③との距離が小さくなる。そのために陽極②に比較して電流密度が大きくなると考えられる。分極量は最大約680mVで、分極電位は最大-870(mV vs CSE)である。下フランジからウェブまで電気防食を行う場合の電流密度は、ウェブに電流が集中するためにフランジ部より小さくする必要がある。水平部スターラップ鉄筋上の電流密度および分極量分布の測定結果を図-8に示す。20mA/m<sup>2</sup>, 陽極①とした場合, 電流密度は、最大2.35μA/cm<sup>2</sup>であった。分極量は400mV以上となる。陽極①+②とした場合, 電流密度は、隅角部で最大4.32μA/cm<sup>2</sup>, 分極量は、900V以上で側面部と同様である。分極電位は最大-1120(mV vs CSE)で水素発生電位まで分極している。

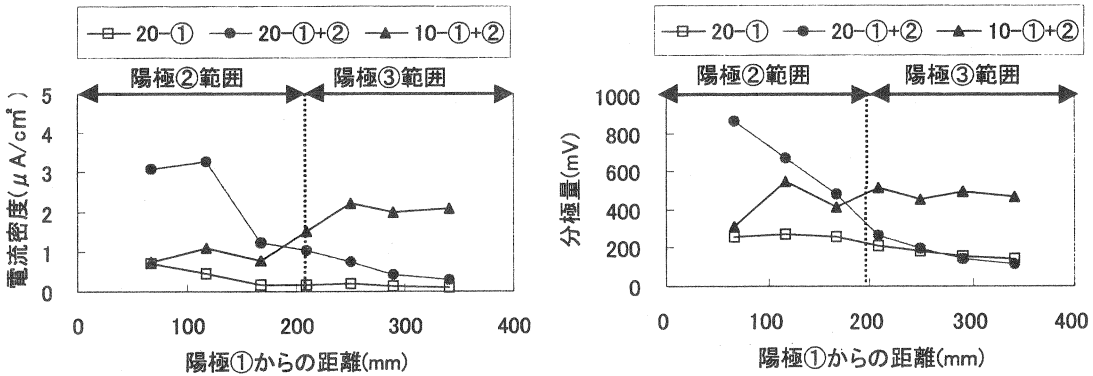


図-7 側面部スターラップ鉄筋の電流密度, 分極量分布(陽極①, ①+②, ①+②+③)

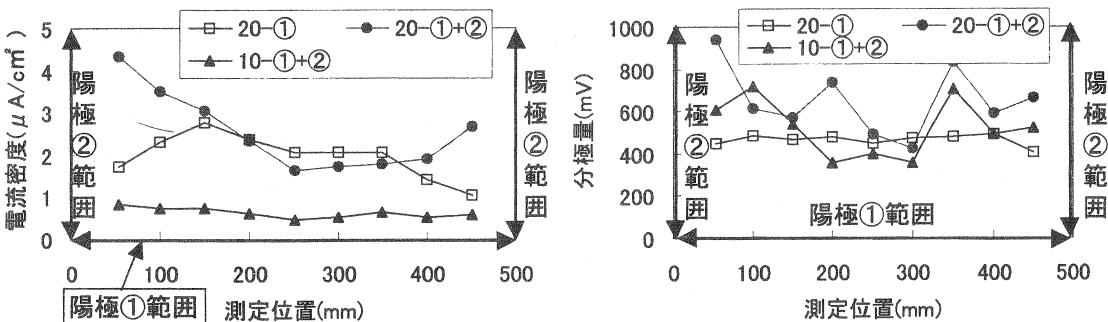


図-8 水平部スターラップ鉄筋の電流密度および分極量分布(陽極①, ①+②)

### 3.2 シース管の電流密度および分極量の分布

電流密度を10, 20mA/m<sup>2</sup>, 陽極設置位置を①, ①+②, ①+②+③と変えた場合の、シース管上における電流密度および分極量分布の測定結果を図-9に示す。電流密度, 分極量は鉄筋と同じく陽極シース管間距離の増加に伴い減少している。同位置, 同条件のスターラップ鉄筋に比較してシース管に流入する電流密度, 分極量が小さい。シース管は多段配置で下のシース管が電流を遮断して回り込む電流が少ないためと考えられる。20mA/m<sup>2</sup>, 陽極①と①+②では測定結果に顕著な差はない。陽極②とシース管(C1)との距離は250mmと大きいので影響が小さい。10 mA/m<sup>2</sup>と, 陽極①+②+③の場合、全てのシース管は, 100mVの分極量を得ることができた。

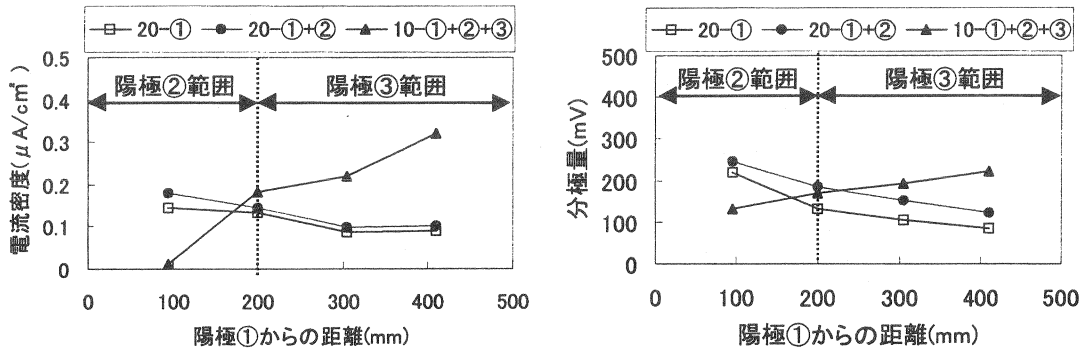


図-9 シース管の電流密度および分極量分布 (10, 20, mA/m<sup>2</sup>-陽極①, ①+②, ①+②+③)

### 3.3 PC鋼材の電流密度および分極量分布

各条件で通電した場合、PC鋼材の電流密度および分極量の分布を図-10に示す。電流密度は、最大で0.2 μA/cm<sup>2</sup>程度、分極量は、60mV以下で防食効果は期待できない。シース管が健全であるならば、シース管内のPC鋼材には、電気防食を実施することはできない。図-5に示した腐食欠損部をモデル化した長さ150mmの切り欠き部を中央部に設けたシース内の分割PC鋼より線の電流密度および分極量分布を図-11に示す。20mA/m<sup>2</sup>で通電した場合、切り欠きの中心部でPC鋼材には、最大7.7 μA/cm<sup>2</sup>と陽極直下の鉄筋より大きな電流が流れている。分極量は最大275mV, 分極電位は-600 (mV vs CSE) と電流密度に比較して小さな値であった。全てのシース管で100mVの分極量が得られた陽極①+②+③, 10mA/m<sup>2</sup>の場合、切り欠きの中心部で分極量は156mV, 分極電位は-500 (mV vs CSE) であった。電流の流入範囲は、シース欠損部から±50mm以内の範囲に限定されている。

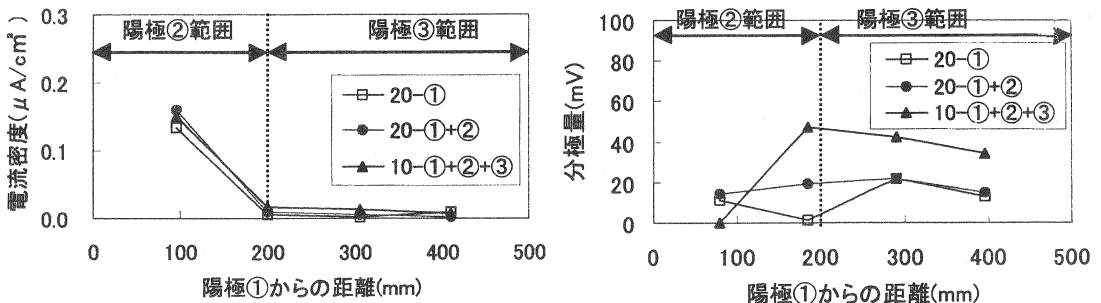


図-10 PC鋼材の電流密度および分極量分布

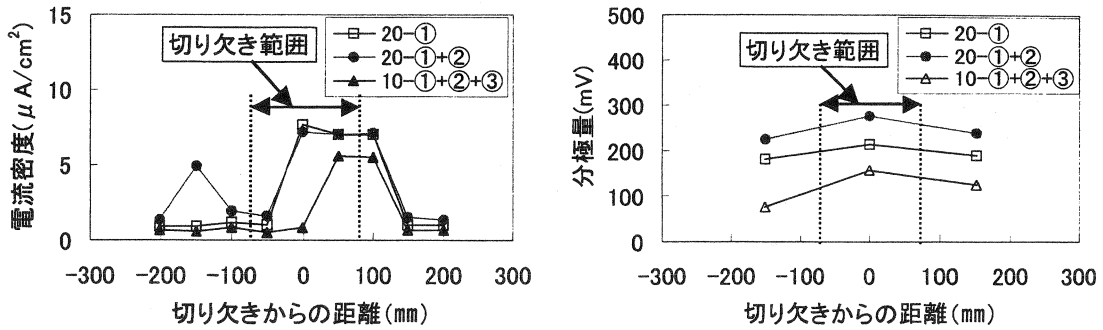


図-11 欠損シース内のPC鋼材の電流密度および分極量分布

電気防食の管理は、シースまたは、鉄筋の電位管理によって行われる。そこでシース、鉄筋およびPC鋼材上での電流密度と分極量との関係を図-12に示す。この結果から、100mVの分極量で防食するための最小電流密度は単位面積当たりシース、鉄筋、PC鋼材は、0.04, 0.14, 0.3  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ であった。電流密度は、シースが最も小さく次に鉄筋で、最後にPC鋼材が最も大きいことがわかる。

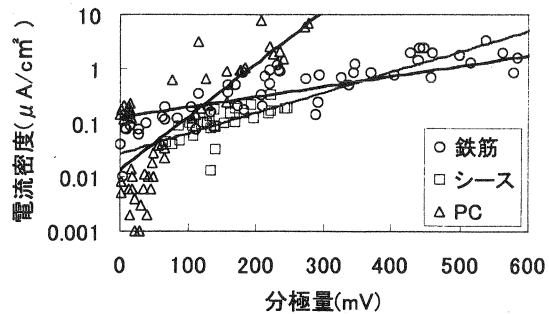


図-12 電流密度と分極量との関係

#### 4. おわりに

本試験の範囲内において、以下の結論が得られた。

- ① 防食電流は、陽極直下の鉄筋にほぼ均一に供給されるが、陽極から直下方向へ離れるに従い防食電流の供給少なくなる。
- ② スターラップ筋は、かぶりが100mm以内であるので、スターラップ筋に隣接するように陽極を設置することによりスターラップ筋全体を防食することができる。ただし隅角部あるいはウェブに防食電流が集中する可能性があるので注意を要する。
- ③ ウェブ部の方が下フランジ部に比較して防食しやすいので通電電流密度をウェブ部の方を下フランジ部より小さくする方が効率よく防食できる。
- ④ シース管は、スターラップ筋よりかぶりコンクリートが大きいいためシース管で100mVの分極量を得るための電流密度でスターラップ鉄筋は600mV以上の分極量となる。鉄筋は、水素脆化の問題はないが水素発生電位に至らないよう陽極設置位置、供給電流を適切にする必要がある。
- ⑤ シース管が健全である場合、シース管内のPC鋼材に直接防食電流を供給することはできない。シースに電気防食を施すことによって、間接的に耐久性を確保する必要がある。
- ⑥ シース管が腐食欠損している場合、PC鋼材に部分的に電流が集中する。しかしPC鋼材の分極抵抗が小さいのでシース管において通常の管理基準 (100~200mVの分極量) で防食されている状況では、分極電位は最大-500 (mV vs CSE) となり、水素発生電位には至らない。

#### 参考文献

- 1)大即信明、宮里心一、鈴木裕隆、木村勇人：曲げひび割れ近傍に生じる主鉄筋とスターラップの塩化物腐食形成機構、土木学会論文集 No627、V-44、pp.167-177、1999.8.