

## 各種陽極材を用いて電気防食を施したプレテンション方式 PC はりの耐久性

(株) ピー・エス 開発技術第一部 正会員 ○青山 敏幸  
 早稲田大学理工学部土木工学科 関 博  
 独立行政法人港湾空港技術研究所 阿部 正美  
 (株) ナカポータック RC 事業部 井川 一弘

### 1. はじめに

PC 構造物は、耐久性に優れた構造物であり、その特徴を生かして海洋環境下等の厳しい環境にも適用されている。しかし、PC 構造物にも鋼材の腐食に伴う劣化が一部報告され、今後増加する可能性が危惧される。

塩害対策の有効な手法のひとつとして電気防食工法が注目を集めている。電気防食工法は、陽極材からコンクリート中の鋼材に微弱電流を印加することにより、鋼材腐食を根本的に抑制する電気化学的手法である。

PC 構造物に電気防食を適用する場合には、過大電流印加時に発生する水素による PC 鋼材の遅れ破壊、コンクリート細孔溶液中のアルカリイオンが、PC 鋼材近傍に集積することによる PC 鋼材とコンクリートの付着性状の低下が懸念されている。

本研究は、あらかじめ塩化物イオンをコンクリート中に混入し、海水散布環境下に約 10 年間にわたり各種陽極材を用いて電気防食を施した I 型断面のプレテンション方式 PC はりについて、暴露期間中に測定した電気化学的測定、暴露終了後に実施した PC はりの静的載荷試験、静的載荷試験終了後に実施した材料試験の結果から、プレテンション方式 PC 構造物の電気防食適用性について検討することを目的とする。

### 2. 実験概要

#### 2.1 供試体の概要

供試体の形状を図-1 に示す。供試体は、高さ 32.5cm、全長 4m の I 型断面のプレテンション方式 PC はりである。鋼材は、PC 鋼より線 (SWPR7A T9.3) を下フランジに 5 本、上フランジに 2 本の合計 7 本を使用した。プレストレス導入時の PC 鋼材応力は、 $1170\text{N/mm}^2$  である。スターラップは、 $\phi 6\text{mm}$  の丸鋼を使用した。コンクリートは、設計基準強度  $49\text{N/mm}^2$  を満足する配合とした。また、コンクリート練り混ぜ時に、 $\text{NaCl}$  を用いて塩化物イオン含有量を  $9\text{kg/m}^3$  になるよう調整し、腐食環境を促進した。

#### 2.2 供試体種類

供試体は、無防食供試体 1 体、各種陽極材を配置した電気防食供試体 3 体の計 4 体を暴露した。

各電気防食方式の陽極材の配置図を図-2 に示す。電気防食方式は、網状陽極方式、チタン線方式、垂鉛シート方式の 3 種類である。

網状陽極方式は、酸化被膜で覆った高純度チタンをエキスパンダ状に加工した網状陽極をコンクリート表面に固定し、セメント系材料にて被覆することにより構成される。チタン線方式

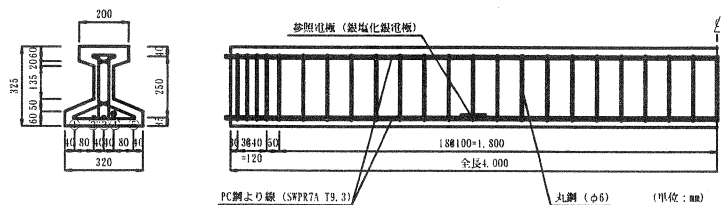


図-1 供試体の形状・寸法

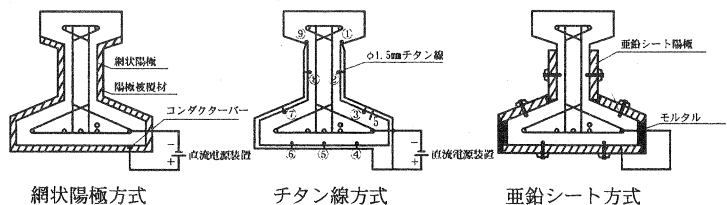


図-2 陽極材の配置図

は、供試体の断面寸法を変えずに電流分布をより均一にするため、白金メッキチタン線をコンクリート表面から 5mm 内部に 9 本配置した方法である。網状陽極方式、チタン線方式は、外部電源装置の (+) 側に陽極材を、(-) 側に PC 鋼材を取り付けることにより電流を印加した。通電電流は、定電流方式で  $10\text{mA/m}^2$  (vs.コンクリート表面積) とした。網状陽極方式は、過防食の傾向が見られたため、暴露 2 年目から  $5\text{mA/m}^2$  に変更した。

一方、亜鉛シート方式は、コンクリートと亜鉛シート間の密着性と保水性を保持するべく、保護カバー、亜鉛シート、バックフィル材から構成される電気防食板を軸方向に 6ヶ所、計 30 枚取り付け、亜鉛シートと PC 鋼材の導通をとることにより防食電流を印加した。

また、暴露期間中と暴露終了後の PC はりの力学的挙動を比較するため、暴露 0 年目に基準供試体として 1 体、静的載荷試験を実施した。

### 2.3 暴露環境

供試体は、独立行政法人港湾空港技術研究所内護岸沿いに設けられた屋外の暴露試験場に暴露した。本環境は、1日2回(昼間1回、夜間1回)海水シャワーを繰り返し浴びる環境である。海水散布時間は、1回につき約3時間である。

### 2.4 実験方法

#### a)電気化学的測定試験

コンクリート構造物の電気防食による防食判定基準は、電位シフト基準<sup>1)</sup>が用いられている。本基準は、通電時の電位  $E_{on}$  からコンクリートの抵抗を取り除いたインスタントオフ電位 (以下  $E_{ins}$  と呼ぶ) と、電流遮断所定時間後の電位の差 (復極量) が  $100\text{mV}$  以上あれば防食効果があるといわれる防食判定基準である。

電気防食供試体は、 $E_{ins}$  と  $E_{24}$  ならびに通電電流を測定した。 $E_{ins}$ 、 $E_{24}$  は、コンクリート製作時にあらかじめ内部に埋め込んだ Ag/AgCl 電極により、図-3 に示す方法で測定した。網状陽極方式、チタン線方式の通電電流は、直流電源装置の読み値を確認した。一方、亜鉛シート方式は、通電電流の調整ができないため、スイッチボックスと無抵抗電流計を導通させることにより電流計の読みを測定した。

#### b)静的載荷試験

静的載荷試験は、スパン  $3200\text{mm}$ 、等曲げ区間  $400\text{mm}$  の 2 等分点による曲げ載荷試験を行った。載荷試験に先立ち、網状陽極方式は、陽極被覆材をはつりだし、亜鉛シート方式は、亜鉛シートを取りはずした。

#### c)PC 鋼材腐食面積率測定試験

PC 鋼材の腐食面積を確認することを目的に、静的載荷試験終了後に供試体から PC 鋼材をはつり出し、下フランジ 5 本の PC 鋼材の腐食面積率を測定した。腐食面積率は、PC 鋼材表面積における腐食面積の割合 (= 腐食面積 / PC 鋼材表面積) と定義した。腐食面積は、PC 鋼材のまわりに透明なセロハンを巻き付け、腐食部分を黒マジックで塗りつぶし、それをスキャナーで取り込み、色で面積を測定するパソコンソフト (Dot Count) により測定した。

#### d)塩化物イオン含有量測定試験

電気防食工法の副次的作用として、PC 鋼材近傍の塩化物イオンの移動に伴う腐食環境の改善が期待できる。静的載荷試験終了後、PC 鋼材のかぶり位置から分析用コンクリート試料を採取し、塩化物イオン含有量を測定した。試料採取位置は、図-4 の黒色で塗りつぶした

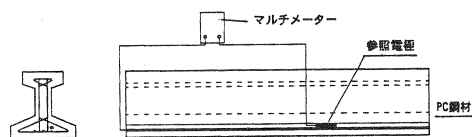


図-3 PC 鋼材の電位測定方法

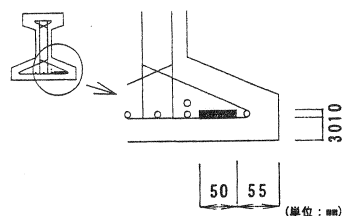


図-4 塩化物イオン含有量測定箇所

位置とした。試験は、「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法」<sup>2)</sup>に従い、電位差滴定方法により測定した。

### 3. 実験結果

#### 3.1 電気化学的測定

図-5に網状陽極方式、チタン線方式、亜鉛シート方式の暴露期間と復極量の関係を示す。

網状陽極方式は、常に100~300mVの復極量があり、防食効果があったものと推定される。

一方、チタン線方式は、防食判定基準の100mVの復極量を満足しておらず、十分な防食効果が期待されていないものと推定される。本方式は、φ1.5mmの白金メッキチタン線を9本、図-2に示すように配置した方法であるが、時間の経過と共に各チタン線に流れる電流分布が不均一になったことが原因と考えられる。電流分布が不均一になった理由は、陽極材の面積がφ1.5mmと小さく、過大な電流が印加された箇所では、界面反応の変化により塩素ガスの発生と同時に陽極材近傍コンクリートのpHの低下に伴いコンクリートが劣化し、その箇所からPC鋼材へ電流が流れなくなったことが要因と考えられる。

亜鉛シート方式は、気温・降雨等の影響により復極量が変動しているが、一部を除き100mV以上の復極量を満足していることがわかる。100mVの復極量に達していない時期については、コンクリートが湿潤状態にあり復極速度が遅かったこと、その時期の電流遮断直後の電位は-1000mV(vs.SCE)と亜鉛の電位に近いことを考えると、十分に防食されていたものと考えられる。

#### 3.2 材料試験

##### a) PC鋼材の腐食面積率

図-6に各供試体の下フランジに配置した5本のPC鋼材の腐食面積率測定結果を示す。ここで、グラフ中の①~⑤は、図-1の鋼材位置①~⑤である。

図-5に示す電気化学的測定から防食効果があったと判断された網状陽極方式、亜鉛シート方式は、PC鋼材の腐食面積率は非常に小さく、電気防食による防食効果が確認できた。

一方、電気化学的測定から十分な防食効果が得られなかったと判断されたチタン線方式は、隅角部の腐食面積率が大きく、所々にPC鋼材の断面欠損を伴う腐食が生じており、電気防食による防食効果がなかった。

無防食供試体も同様に、隅角部の腐食面積率が大きかった。特に外観目視調査により、1mm以上の腐食ひび割れと錆汁が発生していた箇所のPC鋼材の断面欠損が大きく、場所によっては、PC鋼材の断面が完全に欠損している箇所も認められた。

##### b) 塩化物イオン含有量

各供試体の鋼材かぶり位置(図-4の塗りつぶし部分)の塩化物イオン含有量の測定結果を図-7に示す。

図-7に示す各供試体の塩化物イオン含有量の測定から、適切な電気防食を施した網状陽極方式、亜鉛シート方式は、PC鋼材かぶり位置の塩化物イオンが無防食供試体に比べて小さいことがわかる。網状

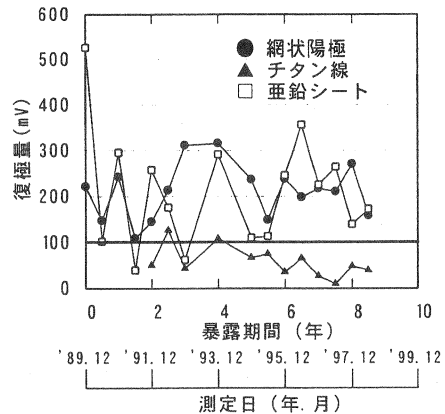


図-5 暴露期間と復極量の関係

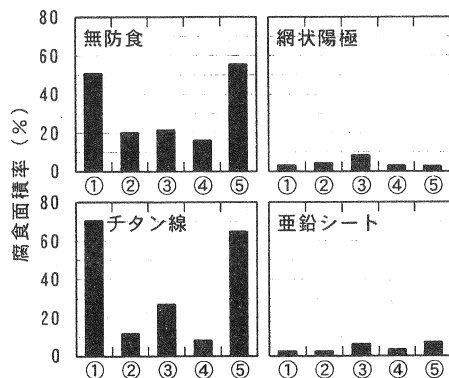


図-6 各PC鋼材の腐食面積率測定

陽極方式、亜鉛シート方式で塩化物イオン含有量に差が生じた理由は、積算電流密度が異なること、亜鉛シート方式は、亜鉛シート板とモルタル界面等から塩化物イオンが浸透しやすい環境にあったことが考えられる。

今回は、PC 鋼材のかぶり位置の塩化物イオン含有量を測定したが、PC 鋼材近傍の塩化物イオン含有量はさらに小さく、鋼材近傍位置の腐食環境は改善されているものと推定される。

### 3.3 静的載荷試験

#### b)ひび割れ発生荷重・終局荷重

各供試体のひび割れ発生荷重、終局荷重の結果、

および基準供試体の結果に対する各供試体のひび割れ発生荷重比、終局荷重比を表-1に示す。

表-1に示すひび割れ発生荷重比の結果から、電気防食を施した網状陽極方式、チタン線方式、亜鉛シート方式は、電流印加に伴うプレストレスの減少は認められなかった。一方、無防食供試体は、基準供試体に比べひび割れ発生荷重が約25%低下した。この理由は、3.2a)のPC鋼材の腐食面積率の測定で述べたように、フランジ隅角部の鋼材(図-1の①、⑤)の断面欠損が非常に大きく、載荷試験前、あるいは載荷試験開始直後にPC鋼材が破断したことに起因しているものと考えられる。無防食供試体を除く各供試体のひび割れ発生荷重は、暴露0年目に実施した基準供試体のひび割れ発生荷重以上であり、電流印加がコンクリートとPC鋼材の付着力の低下を招かない結果となった。

終局荷重比の結果から、網状陽極方式、亜鉛シート方式は、ひび割れ発生荷重同様、荷重の低下が認められず、電気防食は部材の耐荷性能に悪影響を与えないことを確認した。一方、無防食供試体は、基準供試体に比べ終局荷重が約35%低下した。この理由は、ひび割れ発生荷重の低下原因と同様、フランジ隅角部のPC鋼材の破断により、残り3本のPC鋼材(図-1の②、③、④)しか寄与しなかったためと考えられる。十分な電気防食が施されなかったチタン線方式は、無防食供試体と同様に終局荷重が約35%低下した。チタン線方式についても、フランジ隅角部のPC鋼材(図-1の①、⑤)が等曲げ区間内で破断したことが耐力低下を引き起こしたものと推定される。

#### b)変形性能

各供試体の荷重-変位の実験値と解析値を図-8に示す。解析は、コンクリート構造解析専用の二次元有限要素解析コードのSBETAを用いた。コンクリート上縁のひずみの実験値、解析値も合わせて示す。

引張側コンクリートは、ひび割れ発生までは弾性体として取り扱い、ひび割れ発生以降の引張剛性は考慮しないものとした。圧縮側コンクリートは、コンクリート応力が最大値に到達するまではCEB-FIP model code 90を使用し、最大値以降は応力の増減はないものとした。コンクリートの力学的性質は、表-2に示す供試体製作時に実施した試験の結果を使用した。

PC鋼材は、コンクリート標準示方書に準拠したモデル<sup>3)</sup>を使用し、降伏強度、引張強度、弾性係数は、

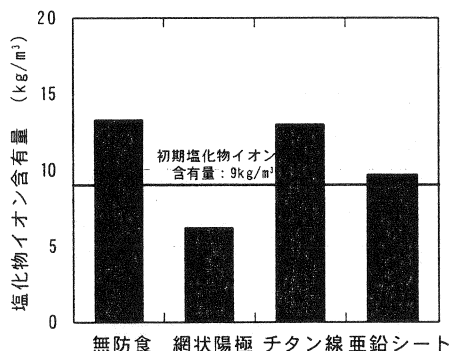


図-7 塩化物イオン含有量測定

表-1 ひび割れ発生荷重・終局荷重

	ひび割れ発生荷重 (kN)	比率	終局荷重 (kN)	比率	破壊モード
基準	78.5	1.00	205.0	1.00	コンクリート圧壊
無防食	58.8	0.75	132.4	0.65	コンクリート圧壊と同時に③鋼材の破断
網状陽極	98.1	1.25	210.8	1.03	コンクリート圧壊
チタン線	98.1	1.25	135.3	0.66	隅角部鋼材2本破断後のコンクリート圧壊
亜鉛シート	93.2	1.19	205.9	1.00	コンクリート圧壊

表-2 に示す静的載荷試験終了後に取り出した PC 鋼材の引張試験の最大値を使用した。

また、各供試体に配置される下フランジ 5 本の PC 鋼材は、腐食の程度に応じて表-3 に示す状態を仮定して解析した。

電流印加に伴う PC はりの力学的挙動に変化が見られなかった網状陽極方式、亜鉛シート方式は、表-3 に示すように全ての PC 鋼材が健全な状態であるものと仮定した。

終局荷重の低下が認められたチタン線方式は、隅角部の鋼材 (図-1 の①,⑤) の伸び能力の低下に起因した PC 鋼材の破断が耐力低下の原因と考えられたため、チタン線方式の供試体内部から取り出した PC 鋼材の引張試験の結果を参考に、表-3 に示すように隅角部の PC 鋼材 2 本について伸びが 0.7% で破断するよう仮定した。

ひび割れ発生荷重、終局荷重の低下が認められた無防食供試体は、前述した理由から、下フランジの鋼材 2 本が存在しないものと仮定した。すなわち、下フランジの PC 鋼材断面積を健全時の 60%、プレストレス

は、7 本中 5 本の鋼材により導入されているとして健全時の 75% と仮定した。

また、無防食供試体は、鋼材の腐食、腐食ひび割れによりコンクリートと鋼材の付着性状に変化が生じている可能性が考えられるが、今回はコンクリートと PC 鋼材は完全付着と仮定した。

図-8 から、各供試体とも解析値は実験結果と大筋では一致していることがわかる。適切な方法で電気防食を施した供試体は、PC はりの力学的挙動の変化は生じていないことを示す結果となった。

c) ひび割れ幅・ひび割れ分散性状

基準供試体、および暴露 10 年目に実施した各供試体の静的載荷試験時に発生したひび割れの分散性状を図-9 に、荷重と等曲げ区間内に発生した主要なひび割れ幅 (図-9 の太線部) の関係を図-10 に示す。

網状陽極方式、亜鉛シート方式は、基準供試体に比べ、ひび割れの本数が増加し、ひび割れ分散性が良好である。すなわち、PC 鋼材の電流印加に起因した付着性状の低下はないものと考えられる。

表-2 計算に用いた材料の力学的性質

コンクリート			PC 鋼材		
圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )
65.3	4.4	28050	1856	1967	192000

表-3 PC 鋼材に用いた入力値

	①	②	③	④	⑤
無防食	—	健全	健全	健全	—
網状陽極	健全	健全	健全	健全	健全
チタン線	0.7% (注)	健全	健全	健全	0.7% (注)
亜鉛シート	健全	健全	健全	健全	健全

注) PC 鋼材の伸びが 0.7% に達した時に破断することを意味する

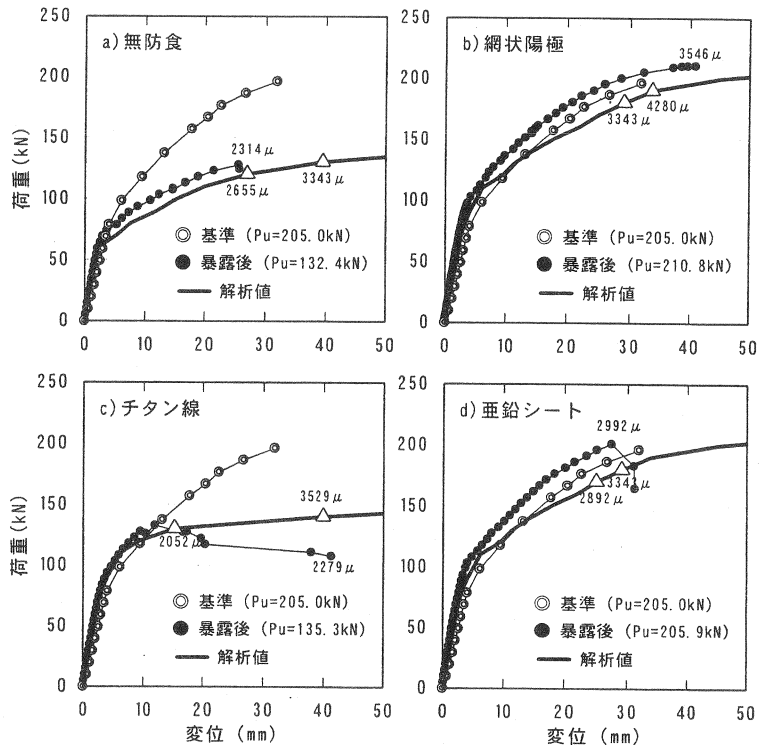


図-8 荷重-変位の関係

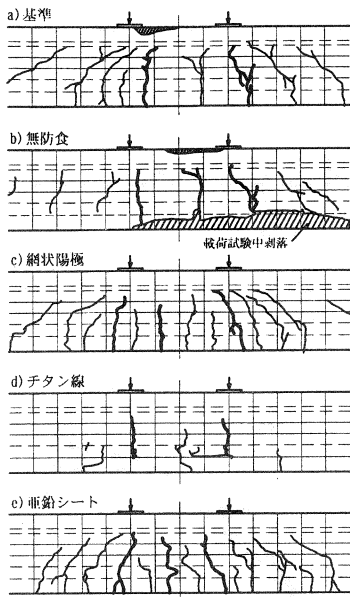


図-9 ひび割れ分散性状

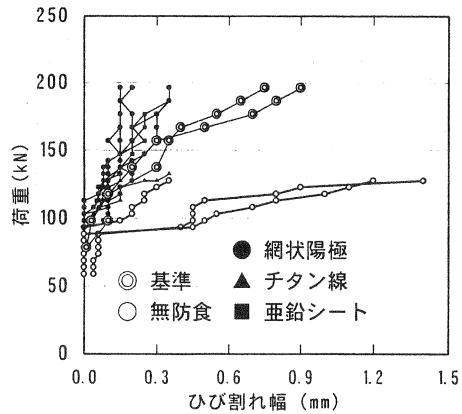


図-10 荷重-ひび割れ幅の関係

一方、無防食供試体、チタン線方式は、ひび割れの分散性状が低下し、ひび割れ幅も他の供試体に比べ増加している。この原因は、鋼材断面の減少による鉄筋比の低下、腐食、腐食によるひび割れに伴うコンクリートと鋼材の付着性状の低下等が寄与しているものと考えられる。

#### 4. まとめ

本研究は、各種陽極材を用いて10年間にわたり電気防食を施したプレテンション方式PCはりの材料試験と静的載荷試験の結果をまとめたものである。その結果、以下の知見が得られた。

- ① 暴露期間中の電気化学測定により防食効果があると判断された網状陽極方式、亜鉛シート方式は、腐食の程度が非常に軽微であり、電気防食による防食効果を確認した。一方、電気化学的測定により防食効果なしと判定されたチタン線方式、および無防食供試体は、PC鋼材の腐食が認められた。
- ② 電気防食による防食効果が得られた供試体は、PCはりの力学的挙動も暴露前と同等の性能を有していた。一方、電気防食による防食効果がなかったチタン線方式、無防食供試体は、隅角部2本のPC鋼材の破断により、暴露前に実施した供試体に比べ終局荷重が約35%低下した。

謝辞:本研究は、運輸省港湾技術研究所、早稲田大学関研究室、(株)ナカボーテック、(株)ピー・エスにて共同研究を行ってきた研究成果の一部をとりまとめたものである。長期間にわたる研究の遂行に尽力された、運輸省港湾技術研究所福手勤氏(現国土交通省 国土技術政策総合研究所)、濱田秀則氏(現独立行政法人港湾空港技術研究所)、(株)ピー・エス石井浩司氏、また10年暴露時の実験を遂行された早稲田大学佐古武彦氏、(株)ピー・エス桐川潔氏に感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 社団法人日本コンクリート工学協会:コンクリート構造物の電気防食法研究委員会報告書,pp.54,1994
- 2) 社団法人日本コンクリート工学協会:コンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法ならびに規準(案),pp.17,1991年
- 3) 土木学会:コンクリート標準示方書[設計編],pp.36-37,1996年