

論文 10年間電気防食を施したプレテンション方式 PC 部材の材料及び力学特性

青山 敏幸*1・関 博*2・阿部 正美*3・井川 一弘*4

要旨: 本研究は、プレストレストコンクリート構造物への電気防食の適用性を検討することを目的に、あらかじめ塩分を混入した PC 部材に電気防食を施し、海水散布環境下に約 10 年間暴露し、電気防食による防食効果、電気防食が与える PC 鋼材の機械的性質や PC 部材の力学的挙動への影響を検討した。その結果、電気防食は、PC 鋼材の機械的性質や部材の力学的挙動には影響を与えなかった。

キーワード: 電気防食, プレストレストコンクリート, 耐荷性状, 長期暴露試験, 10 年

1. はじめに

電気防食は、コンクリート表面に取り付けた陽極材からコンクリートを介して鋼材に強制的に電流を流すことにより、鋼材の腐食を根本的に防止する電気化学的手法である。コンクリート内部の鋼材に電流を印加した場合には、鋼材周辺のコンクリート中アルカリイオンの集積によるコンクリートの軟化¹⁾、それに伴うコンクリートと鋼材の付着力の低下^{1), 2)}、PC 鋼材の水素脆化現象^{1), 2)}などが懸念されている。

これらの研究成果を踏まえ、本研究は、プレテンション方式 PC 部材への電気防食適用性を検討することを目的に、約 10 年間暴露した PC 部材の外観目視調査、静的載荷試験、載荷試験終了後に取り出した PC 鋼材の腐食状況、引張強度試験を行った結果を示すものである。

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 N/mm^2 である。スターラップには、 $\phi 6 \text{ mm}$ 丸鋼を使用した。コンクリートは、設計基準強度が 50 N/mm^2 となるよう、表-1 に示す配合を使用した。コンクリートには、厳しい腐食環境を想定し、練混ぜ時に NaCl を 15 kg/m^3 混入して腐食を促進させることにした。また、暴露期間中の PC 鋼材電位を測定するために、図-1 に示すように試験体の端部から 1m の位置に埋め込み式参照電極（銀塩化

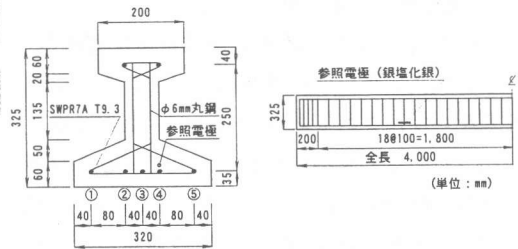


図-1 試験体の形状・寸法

表-1 コンクリートの配合

スランブ (cm)	W/C (%)	Air (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
				W	C	S	G	Ad	NaCl
8±2.5	37	2±1	41	160	430	737	1076	5.2	15

2. 実験概要

2.1 試験体概要

試験体の形状を図-1 に示す。試験体は、桁高 325mm、全長 4m のプレテンション方式 PC 部材である。下フランジには、 $\phi 9.3 \text{ mm}$ 7 本より PC 鋼より線 (SWPR7A T9.3) を 5 本、上フラン

*1 独立行政法人港湾空港技術研究所地盤・構造部材料研究室研修生((株)ピー・エス) 工修(正会員)

*2 早稲田大学教授 理工学部土木工学科 工博(正会員)

*3 独立行政法人港湾空港技術研究所地盤・構造部材料研究室主任研究官 工博(正会員)

*4 (株)ナカポーテック RC 事業部課長(正会員)

銀電極)を2本埋設した。

2.2 試験体種類

試験体の種類を表-2に示す。試験要因は電気防食方式とした。各電気防食方式の陽極材の配置を図-2に示す。網状陽極試験体は、網状陽極、陽極被覆材により構成される陽極材を図の斜線部に配置した。チタン線試験体は、コンクリート表面から5mmの位置にφ1.5mmの白金メッキチタン線9本を、図の①～⑨の位置に埋設した。亜鉛シート試験体は、保護板、亜鉛シート、バックフィル材により構成される陽極材を図の斜線部に配置した。網状陽極試験体、チタン線試験体の通電電流は、10mA/m²(vs.コンクリート表面積)で一定とした。網状陽極試験体は、過防食の傾向が見られたため、暴露2年目から5mA/m²に変更した。

2.3 暴露環境

暴露する環境は、神奈川県横須賀市の久里浜の屋外暴露場とした。本暴露環境は、1日に2回(昼間、夜間に1回ずつ)それぞれ約3時間にわたり海水散布を行う環境である。

2.4 実験項目

(1)電気化学測定試験

計測項目は、通電電流および鋼材電位である。一般に防食効果の判定基準は、電位シフトによる基準が採用されており、100mV以上の復極量があれば防食効果があるといわれている。今回は、試験体内部に埋め込んだ参照電極によりPC鋼材の電流遮断直後の電位と電流遮断24時間後の電位を測定し、その差を復極量とした。測定は、基本的に年2回(6月、12月)の頻度で行った。

(2)外観目視・鋼材腐食状況の調査

暴露10年終了後、各試験体の外観目視調査を行った。外観目視調査に関しては、ひび割れ、コンクリートの浮き、剥離、錆汁発生状況を調査した。载荷試験終了後、試験体からPC鋼材を取り出し、鋼材腐食状況を調査した。調査対象は、下フランジのPC鋼材5本(図-1の①～⑤)とした。

表-2 試験体の種類

試験体名	備考
基準	暴露前に载荷試験実施
無防食	—
網状陽極	外部電源
チタン線	
亜鉛シート	定電流 (10mA/m ²)
亜鉛シート	流電陽極
	—

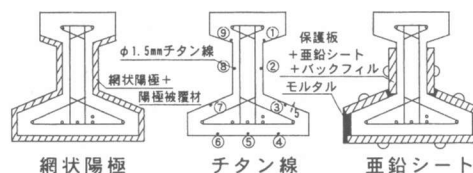


図-2 陽極材の配置図

(3)静的载荷試験

外観目視調査終了後、スパン3200mm、等曲げ区間400mmの2等分点による曲げ载荷試験を行った。また、実験値との比較検討を行うため、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SBETAにより解析を行った。

(4)腐食面積率測定試験

鋼材腐食状況の調査後、鋼材の腐食面積率を測定した。ここで腐食面積率は、PC鋼材表面積に対する腐食面積の割合(=腐食面積 / PC鋼材表面積)と定義した。測定は、下フランジのPC鋼材5本(図-1の①～⑤)とした。

(5)鋼材引張試験

腐食面積率測定後、金属材料引張試験方法(JIS Z 2241-1998)に準拠してPC鋼材の引張試験を行った。引張試験片は、試験体の解体時に損傷を与えていないものとした。測定項目は、引張強度、伸びである。

3. 実験結果

3.1 電気化学測定試験の結果

図-3に網状陽極、チタン線、亜鉛シート試験体の暴露期間と復極量の関係を示す。

網状陽極試験体は、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。

チタン線試験体は、防食基準の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。この理由は、一部の鋼材に防食電流が集中したこと、それに伴い陽極材周辺のコンクリートが劣化したことによるものと考えられる。

亜鉛シート試験体は、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ためであると考えられる。その時期の電流遮断直後の電位は-1000 mV(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 外観目視・鋼材腐食状況の調査結果

外観目視調査の結果、劣化が認められた無防食試験体、チタン線試験体の外観目視調査、鋼

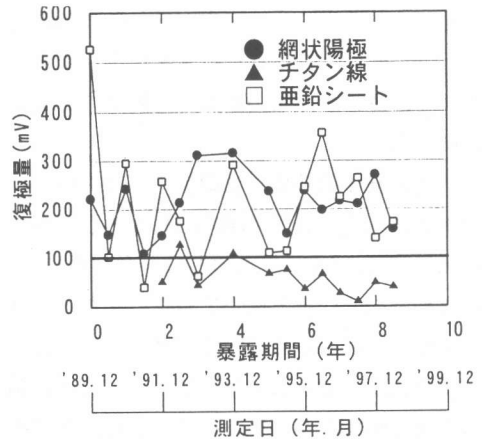


図-3 暴露期間と復極量の関係

材腐食状況の調査結果を図-4に示す。鋼材腐食状況の調査については、鋼材腐食度の判定基準³⁾に準じて、腐食度Vの「鉄筋全体にわたって著しい膨張性の錆が生じており、断面欠損が

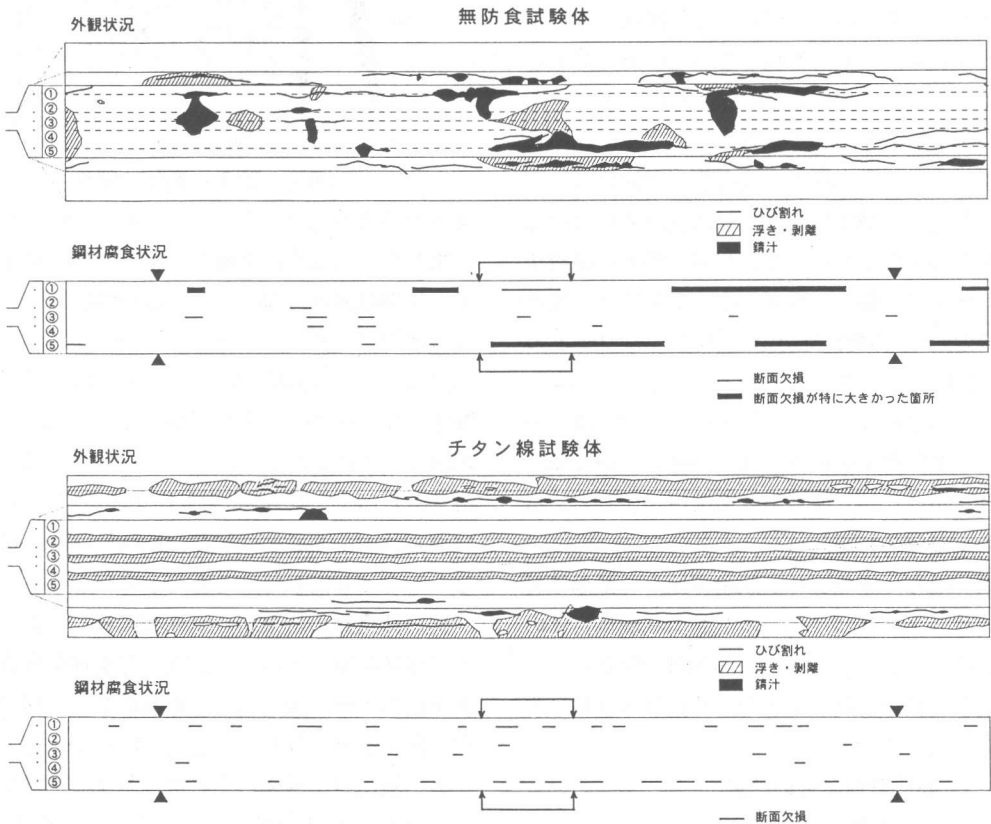


図-4 外観目視・鋼材腐食状況の調査結果

る状態」と判断される箇所を記録した。無防食試験体は、断面欠損が著しく大きい箇所が見られたので、特に断面欠損が大きい箇所を分類して記載した。

無防食試験体の外観目視調査の結果、ひび割れが試験体底面、側面で認められた。ひび割れ幅に関しては、1mm 以上のものが多く存在し、一部は約 5mm にまで達していた。また、ひび割れ箇所からは、多くの錆汁が発生していた。

鋼材腐食状況の調査の結果、錆汁発生箇所の鋼材断面欠損が大きかった。その傾向は、下フランジ隅角部の鋼材(図-4 の①, ⑤)に多く見られた。

チタン線試験体も、ひび割れが生じていることが確認された。このことから、防食効果がなかったことが推測される。また、図に示すように、チタン線埋込部に沿ってコンクリートの浮きが生じていることがわかる。場所によっては、コンクリートが変色していた箇所も認められた。本工法は、図-2 に示すように 9 本のチタン線から電流を印加する方法であるが、先述したように各チタン線から流出する電流のバランスが悪化し、鋼材に不均一な電流が流れたためであると考えられる。その結果、過大な電流が流れたチタン線は、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 が低下したことによりコンクリートが劣化したものと考えられる。鋼材腐食状況の調査の結果、無防食試験体ほど著しい断面欠損は認められなかったが、所々で断面欠損が生じていることが確認された。

網状陽極、亜鉛シート試験体は、一部陽極材の浮き、ひび割れが見られたが、試験体自体の損傷は見られなかった。内部鋼材の腐食位置を観察した結果、断面欠損を伴う鋼材の腐食は生じていなかった。

3.3 静的載荷試験の結果

(1) ひび割れ発生・終局荷重

図-5 に基準試験体の結果(ひび割れ発生荷重: 78.5kN, 終局荷重: 205.0kN) に対する各試

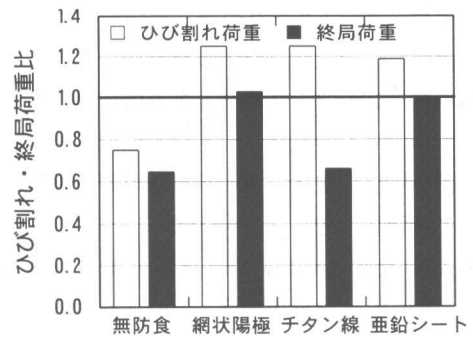


図-5 各試験体のひび割れ・終局荷重比

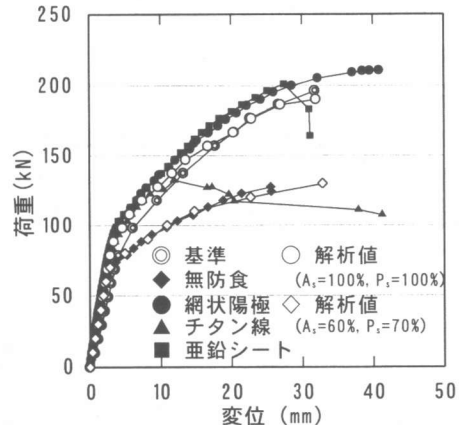


図-6 荷重-変位の関係

験体の結果の比を示す。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試験体、チタン線試験体、亜鉛シート試験体については、電流印加によるプレストレスの減少が認められなかった。一方無防食試験体のそれは、基準試験体に比べ約 75%の荷重に低下していた。この理由は、先述したように、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破断したことに起因しているものと考えられる。

終局荷重比の結果から、網状陽極、亜鉛シート試験体に関しては、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影響を与えないことが明らかとなった。一方、無防食試験体のそれは、基準試験体に比べ約 65%の荷重に低下していた。この理由は、ひび割れ発生荷重の低下原因と同様、フランジ隅角部の鋼材の破断により、下フランジの残り

3本の鋼材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試験体は、無防食と同様に終局荷重の比が約65%に低下していた。チタン線試験体についても、フランジ隅角部における等曲げ区間内の鋼材が破断したため耐力低下を引き起こした。

(2) 荷重-変位

図-6に各試験体の荷重-変位の関係を示す。ここでは、解析値との比較も試みた。電流印加による性能低下が見られなかった網状陽極試験体、亜鉛シート試験体については、コンクリート、鋼材とも健全であると仮定した。材料定数として、コンクリートに関しては、暴露前の強度試験の結果を、PC鋼材に関しては、暴露後にを行った鋼材引張試験結果の最大値を使用した。一方、耐力低下の認められた無防食試験体については、先述した理由から、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70%と仮定して解析を行った。コンクリートと鋼材の付着については、完全付着と仮定し、鋼材の腐食、腐食ひび割れによる鋼材とコンクリートの付着性状の変化は考慮していない。図から、解析値は実験結果とほぼ一致しており、今回用いた仮定が大略的には適切であることが示唆された。

(3) ひび割れ分散性状

図-7に各試験体のひび割れ分散性状を示す。主なひび割れ(図中、太線のひび割れ)幅と荷重の関係を図-8に示す。網状陽極、亜鉛シート試験体は、基準試験体に比べ、ひび割れの本数が増加し分散性状が良好であり、付着性状は変化がないと考えられる。

一方、無防食試験体とチタン線試験体の場合、ひび割れの分散性状が低下しており、ひび割れ幅も他の試験体に比べ増加している。この原因としては、鋼材断面減少による鉄筋比の低下、腐食、腐食ひび割れに伴うコンクリートと鋼材との付着性状の低下等が寄与しているものと

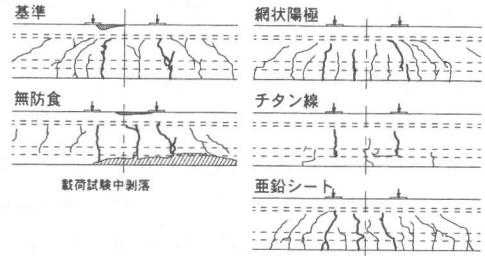


図-7 ひび割れ分散性状

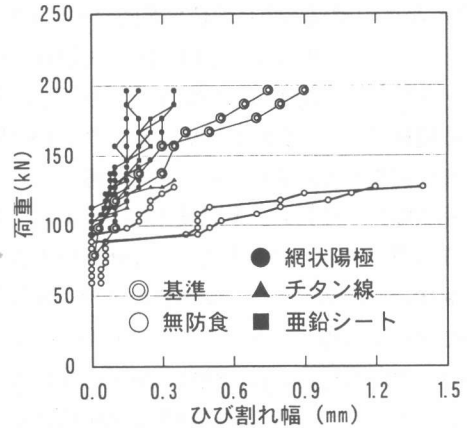


図-8 荷重-ひび割れ幅の関係

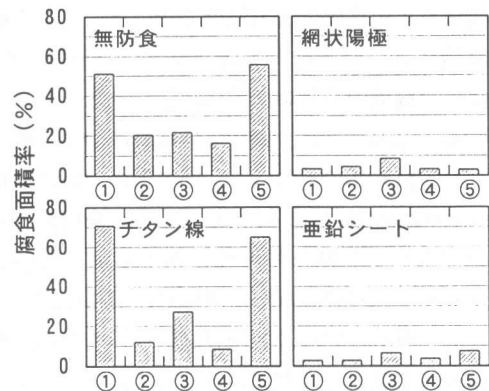


図-9 腐食面積率測定結果

えられる。

3.4 鋼材腐食面積率測定試験の結果

各試験体における下フランジのPC鋼材の腐食面積率測定結果を図-9に示す。ここで、グラフ中の①~⑤は、図-1の鋼材位置①~⑤である。図-9の結果から、復極量の測定から防食効果があったと判断される網状陽極、亜鉛シート試験体は、いずれのPC鋼材も腐食が認められず、電気防食による防食効果は明らかである。一方、

無防食試験体、チタン線試験体は、フランジ隅角部の腐食が著しい傾向にあった。この原因は、図-4 に示すようにフランジ隅角部に生じたひび割れから、腐食に影響を及ぼす物質が浸透しやすかったためであると考えられる。チタン線試験体は、腐食の程度が大きく、防食効果が期待できなかったことを裏付ける結果となった。

3.5 鋼材引張試験の結果

各試験体の鋼材引張試験結果を図-10 に示す。ここで、グラフ中の①～⑤は、図-1 の鋼材位置①～⑤である。結果は、コンクリート標準示方書の規格値⁴⁾(引張荷重: 88.8kN, 伸び: 3.5%以上)に対する各試験結果の比率で整理した。

網状陽極、亜鉛シート試験体に関しては、鋼材を取り出すときに傷が生じた鋼材(網状陽極試験体の④、亜鉛シート試験体の③)を除けば、規格値以上の強度を有していることから、電気防食は PC 鋼材の機械的性質に影響を与えないものと考えられる。一方、無防食試験体はすべて腐食による断面欠損部にて破断しており、引張荷重も規格値の3割程度であった。チタン線試験体については、無防食試験体と同様、PC 鋼材の機械的性質の低下が激しかった。

伸びに関しては、網状陽極試験体および亜鉛シート試験体のそれは、一部の傷のついた鋼材(網状陽極試験体の④、亜鉛シート試験体の③)、ひずみゲージ貼り付け部に腐食が生じた鋼材(亜鉛シート試験体の⑤)を除き、規格値以上の性能を有していた。無防食試験体のそれは、規格値の2割から3割程度と著しく低下する結果となった。

4. 結論

プレストレスコンクリート構造物への電気防食の適用性を検討することを目的に、約10年間電気防食を施した試験体について各種試験を行った結果、得られた知見を以下に示す。

(1) 静的載荷試験の結果、電気防食を施した網状陽極試験体、亜鉛シート試験体の耐荷性状は、暴露前と同等の性能を有していた。一方、無防

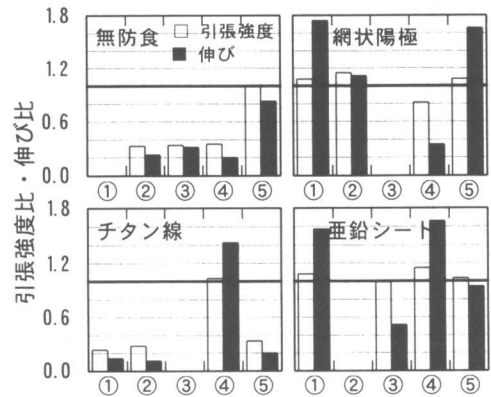


図-10 鋼材引張試験結果

食試験体は、プレストレスの減少と耐力低下が認められた。

(2) 電気防食を施した網状陽極試験体、亜鉛シート試験体の鋼材は、腐食しておらず、機械的性質に関しても規格値以上を満足していた。

謝辞:長期間にわたる研究の遂行に尽力された、国土交通省国土技術政策総合研究所福手勤氏、独立行政法人港湾空港技術研究所濱田秀則氏、(株)ピー・エス石井浩司氏、10年暴露後の実験を遂行された早稲田大学佐古武彦氏、(株)ナカポーテック技術開発研究所、(株)ピー・エス桐川潔氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 石井浩司：プレテンション方式プレストレスコンクリート部材への電気防食適用に関する研究，早稲田大学学位論文，1996.10
- 2) 上田隆雄：塩害により劣化したコンクリート構造物へのデザリネーションの適用に関する研究，京都大学学位論文，1999.6
- 3) 土木学会：鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の動向（その2），pp227，2000.12
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書[規準編] pp292,平成11年制定