

海洋環境下にあるプレテンション方式 PC 構造物への電気防食適用に関する研究

青山 敏幸*1 関 博*2 阿部 正美*3 井川 一弘*4

1. はじめに

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浴びている。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中の鋼材に直流の微弱電流を印加することにより、鋼材腐食を電気化学的手法により抑制する方法である。

本研究は、腐食環境として極めて過酷な海洋環境下に位置するプレテンション方式 PC 構造物に電気防食を適用した場合に、その力学的性状、および電気防食方式の種類の違いによる防食効果を検討するために、約 10 年間にわたり海水散布環境下にあらかじめ塩化物イオンを 9 kg/m^3 混入した PC 梁を暴露し、暴露終了後に各種試験を実施した結果をとりまとめたものである。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

供試体の形状を図 - 1 に示す。供試体は、I 型断面の高さ 325 mm、全長 4 m のプレテンション方式 PC 梁である。PC 鋼材は、 $\phi 9.3 \text{ mm}$ の PC 鋼より線 (SWPR 7 A T 9.3) を下フランジ 5 本、上フランジ 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 49 N/mm^2 を満足すべく、表 - 1 に示す配合を使用した。コンクリートは、練り混ぜ水に NaCl を用いて塩化物イオン含有量を 9 kg/m^3 に調整した。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

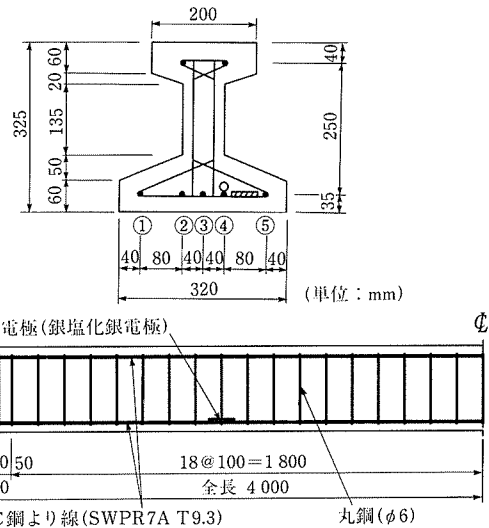


図 - 1 供試体の形状・寸法

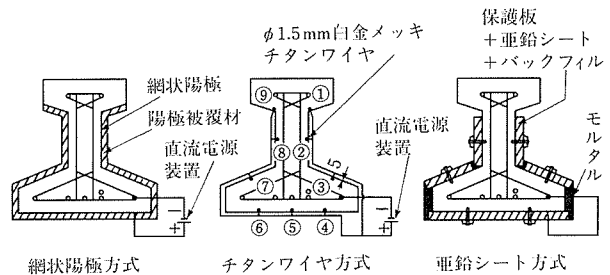


図 - 2 電気防食方式

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
8 ± 2.5	37	2 ± 1	41	160	430	737	1076	5.16

表 - 2 供試体の種類

供試体名	備考	
基準	供試体製作時に静的曲げ荷重試験実施	
無防食	-	
網状陽極方式	外部電源方式	定電流 (10 mA/m ² → 5 mA/m ²)
チタンワイヤ方式		定電流 (10 mA/m ²)
亜鉛シート方式	流電陽極方式	-

うに供試体の端部から 1 m の位置に埋込み式の参照電極 (銀塩化銀電極) を 2 本埋設した。

供試体の種類は、表 - 2 に示すように、実験開始当時の電気防食方式として有効であると考えられた、網状陽極方式、チタンワイヤ方式、亜鉛シート方式の 3 種類の電気防食供試体と基準供試体、無防食供試体である。網状陽極方式、チタンワイヤ方式は、外部電源装置から電流を印加する外部電源方式である。亜鉛シート方式は、鋼材よりイオン化傾向の大きい亜鉛を犠牲陽極とする方法であり、外部電源装置を必要としないことを特徴とする流電陽極方式である。各種電気防食工法の陽極材の配置、ならびに通電方式を図 - 2 に示す。

*1 Toshiyuki AOYAMA : (株)ビー・エス 開発技術第一部

*2 Hiroshi SEKI : 早稲田大学 理工学部 土木工学科

*3 Masami ABE : 独立行政法人 港湾空港技術研究所

*4 Kazuhiro IKAWA : (株)ナカボータック RC 事業部

(1) 基準供試体

暴露前と暴露終了後の PC 梁の力学的性状を比較することを目的に、供試体製作後に静的曲げ載荷試験を実施した供試体である。

(2) 無防食供試体

電気防食供試体と比較することを目的に、電気防食供試体と同一環境下に暴露した。

(3) 網状陽極方式

本方式は、目開き 76 mm×34 mm の網状の陽極をコンクリート表面に固定し、セメント系材料により被覆することにより構成される。通電電流量は、定電流方式でコンクリート表面積に対して 10 mA/m² の電流を印加したが、過防食の傾向が見られたため、暴露 2 年目から 5 mA/m² に変更した。

(4) チタンワイヤ方式

本方式は、供試体の断面寸法を変えずに電流を印加することを目的に、φ1.5 mm の白金メッキチタンワイヤをコンクリート表面から 5 mm 内部に 9 本配置した方法である。陽極材の単位長さあたりの面積は、0.005 m²/m であり非常に小さい。なお、通電電流量は、定電流方式でコンクリート表面積に対して 10 mA/m² の電流を印加した。

(5) 亜鉛シート方式

本方式は、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 枚取り付け付けた。

2.2 暴露環境

供試体の暴露状況を写真 - 1 に示す。供試体は、神奈川県横須賀市久里浜の独立行政法人港湾空港技術研究所内の屋外暴露場に暴露された。本環境は、1 日 2 回（昼間 1 回、夜間 1 回）それぞれ約 3 時間ずつ久里浜湾の自然海水を散布する環境である。

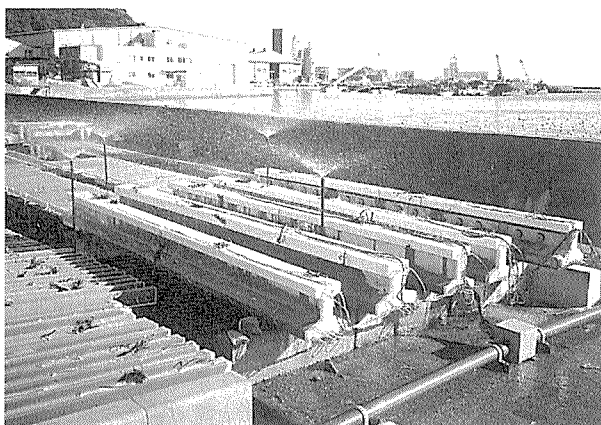


写真 - 1 供試体の暴露状況

2.3 実験項目

実験は、表 - 3 に示す実験項目に準拠して行った。

(1) 電気化学的測定試験

電気防食工法による防食効果の判定基準は、一般に電位シフトによる基準²⁾が採用されている。本基準は、通電時

表 - 3 実験項目

実験項目	測定項目
電気化学的測定	インスタントオフ電位、 電流遮断 24 時間後電位
外観目視調査	ひび割れ、浮き・剥離、 錆汁発生状況
静的曲げ載荷試験	荷重、スパン中央のたわみ、 上縁コンクリートひずみ
腐食状況目視調査	鋼材の腐食位置、腐食面積率
PC 鋼材引張試験	引張荷重、降伏荷重、伸び
塩化物イオン含有量測定	かぶり位置塩化物イオン含有量
曲げ載荷試験の解析	非線形 FEM による解析

の電位（以下 E_{on} と呼ぶ）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_{io} と呼ぶ）と、電流遮断所定時間後の電位 E_{or} の差（復極量）が 100 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。

今回は E_{io}、電流遮断 24 時間後の電位（以下 E_{or} と呼ぶ）を測定し、その差を復極量とした。暴露期間中の測定は、基本的に年 2 回（6 月、12 月）の頻度で、コンクリート内部に埋め込んだ銀塩化銀電極により電位を測定した。

(2) 外観目視調査

10 年間にわたる暴露終了後、梁の劣化状況を確認するために外観目視調査を行った。調査項目は、コンクリートのひび割れ、浮き・剥離、錆汁発生状況である。

(3) 静的曲げ載荷試験

外観目視調査終了後、スパン 3 200 mm、等曲げ区間 400 mm の 2 等分点による静的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出し、亜鉛シート方式は、亜鉛シートを取りはずした。

(4) 腐食状況目視調査

PC 鋼材の腐食箇所と腐食状況の把握、また腐食している面積を定量化することを目的に、静的曲げ載荷試験終了後に供試体から PC 鋼材をはつり出し、鋼材の腐食状況の目視調査と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。

(5) PC 鋼材引張試験

PC 鋼材の機械的性質について評価することを目的に、PC 鋼材の腐食面積率測定後、PC 鋼材から 1.5 m の PC 鋼材を取り出し鋼材引張試験を行った。試験は、金属材料引張試験方法（JIS Z 2241-1998）²⁾ に準拠して行った。測定項目は、引張荷重、降伏荷重、伸びとした。ただし、腐食の程度が大きいものは、測定器の制約から降伏荷重の測定は実施しなかった。

(6) 塩化物イオン含有量測定試験

電気防食工法の 2 次的効果として、鋼材周辺の塩化物イオン移動による腐食環境の改善が期待できる。静的曲げ載荷試験終了後、PC 鋼材と同一かぶり位置（図 - 1 の斜線部）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。試験は、「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法」³⁾ に従い、電位差滴定方法により全塩化物イオン含有量（以下塩化物イオン含有量と呼ぶ）を測定した。

(7) 静的曲げ載荷試験結果の解析

静的曲げ載荷試験と同様な載荷条件で非線形 FEM 解析を実施し、実験値と比較を行った。

3. 実験結果

3.1 電気化学的測定試験

暴露期間と復極量の関係を図-3に示す。

網状陽極方式は、常に 100~300 mV の復極量があり、防食判定基準から判断すると防食効果があったものと推定される。

チタンワイヤ方式は、防食基準である 100 mV 以上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。

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 100 mV 以上の復極量を満足していることがわかる。100 mV 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、鋼材の電位が亜鉛の自然電位に近かったことを考えると、本方式は防食効果があったものと考えられる。

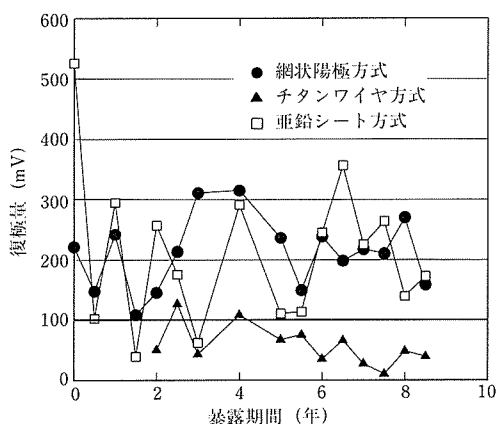


図-3 暴露期間と復極量の関係

3.2 外観目視調査

暴露試験終了後、各供試体の外観目視調査を行った。

写真-2に示す無防食供試体は、腐食によるひび割れが供試体底面、下フランジ隅角部の側面で認められた。ひび割れ幅に関しては、1 mm 以上のものが多く存在し、一部は約 5 mm 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。

写真-3に示すチタンワイヤ方式も、陽極材近傍コンクリートの劣化と腐食によるひび割れが確認された。このことから、防食効果がなかったことが推定される。

NACE (National Association of Corrosion Engineers) の電気防食要綱によれば、通電量の最大値は、陽極材表面積に対して約 100 mA/m² としている。これは、塩分を含むコンクリート中の陽極材に過大な電流が印加されると、(1)式の反応により塩素ガスが陽極材周辺に発生し、陽極材、コンクリートの劣化が生じるためと述べている⁹⁾。



写真-2 無防食供試体の外観目視調査

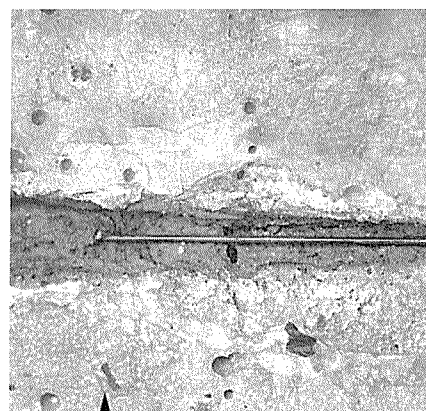
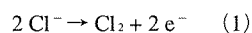


写真-3 チタンワイヤ方式の外観目視調査



本方式は、φ1.5 mm のチタンワイヤを9本、図-2に示すように配置した方法であり、所定の復極量を満足させるためにコンクリート表面積に対して 10 mA/m² の電流を印加させていたが、陽極材の単位長さあたりの表面積が非常に小さいため、陽極材表面積に対して 100 mA/m² 以上の電流が印加された。その結果、(1)式に示すような反応により塩素ガスが発生し、陽極材近傍のコンクリートの pH が低下した。それに伴い、写真-3に示すように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ため、所定の復極量を満足することができなかったものと考えられる。

網状陽極方式は、一部陽極材のコーナー部にひび割れと浮きが生じている箇所が確認されたが、供試体そのものの劣化は生じていなかった。

表 - 4 静的曲げ載荷試験の結果

	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
網状陽極方式	98.1	1.25	210.8	1.03	コンクリート圧壊
チタンワイヤ方式	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
亜鉛シート方式	93.2	1.19	205.9	1.00	コンクリート圧壊

3.3 静的曲げ載荷試験

(1) ひび割れ荷重・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 - 4 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，チタンワイヤ方式，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。無防食供試体を除く各供試体のひび割れ発生荷重は，基準供試体の値以上であり，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，コンクリートの圧縮破壊と同時に下フランジ中央の PC 鋼材 (図 - 1 の③) の破断により最終的な破壊に至り，基準供試体に比べ終局荷重が約 35 % 低下した。チタンワイヤ方式は，下フランジ隅角部の PC 鋼材 (図 - 1 の①，⑤) の破断後のコンクリート圧縮破壊により，基準供試体に比べ終局荷重が約 35 % 低下した。

(2) ひび割れ幅・ひび割れ分散性

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曲げ載荷試験時に発生したひび割れの分散性状を図 - 4 に，荷重と等曲げ区間に発生した主要なひび割れ幅 (図 - 4 の太線部) の関係を図 - 5 にそれぞれ示す。

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，長期間にわたる 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。

一方，無防食供試体，チタンワイヤ方式は，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鋼材比の低下，PC 鋼材の腐食により発生した軸方向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考えられる。

3.4 PC 鋼材腐食調査

各供試体から取り出した下フランジの PC 鋼材腐食状況を図 - 6，その一部を写真 - 4 にそれぞれ示す。

鋼材腐食状況は，下フランジの 5 本について，鉄筋腐食度の評価基準⁹⁾を参考に，「断面欠損のない腐食状態」，「断面欠損の認められる腐食状態」，「断面欠損が 1/2 以上の腐食状態」の三つにわけて表記した。鋼材の腐食状況確認後，各鋼材の腐食面積率を測定した。その結果を図 - 7 に示す。

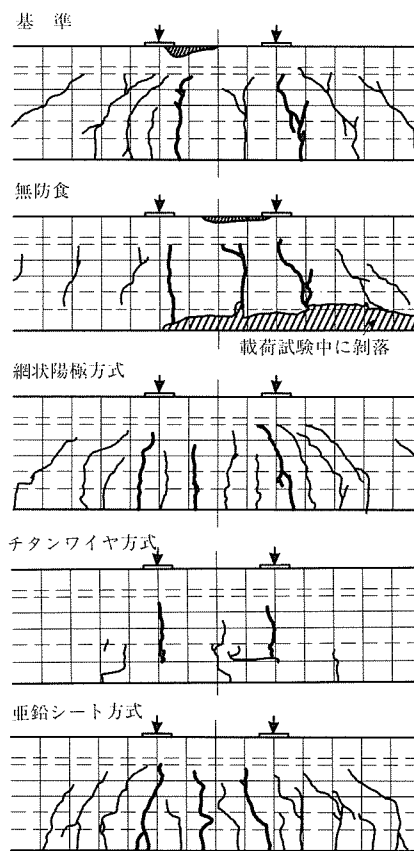


図 - 4 ひび割れ分散性

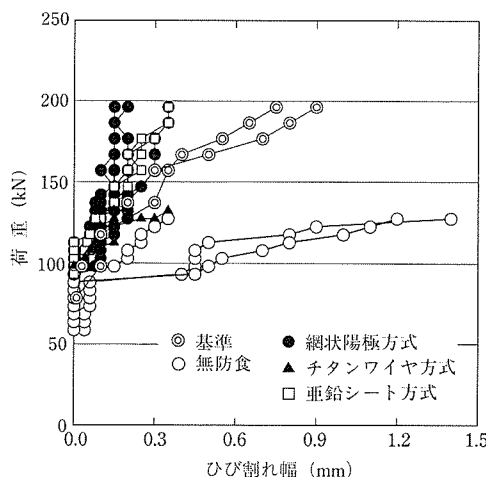
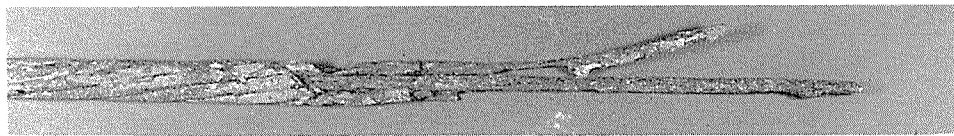
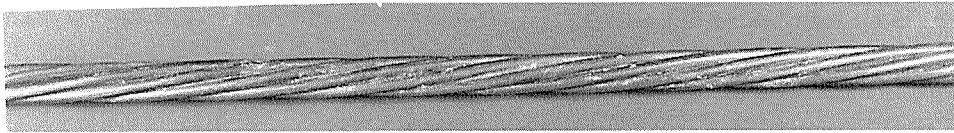


図 - 5 荷重とひび割れ幅の関係

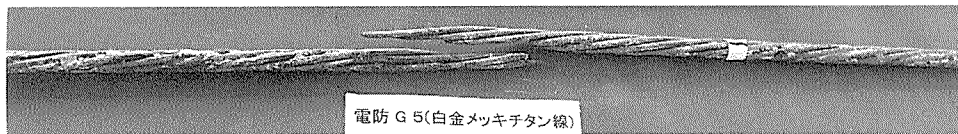
なお，図 - 6，7 に示す ①～⑤ は，図 - 1 に示す ①～⑤ の PC 鋼材を示す。



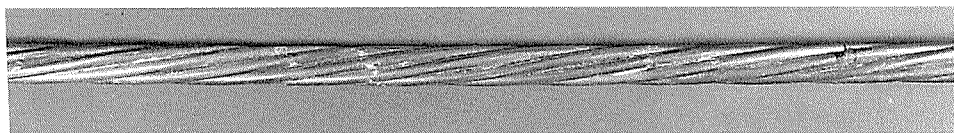
(a) 無防食供試体



(b) 網状陽極方式



(c) チタンワイヤ方式



(d) 亜鉛シート方式

写真 - 4 PC 鋼材の腐食状況

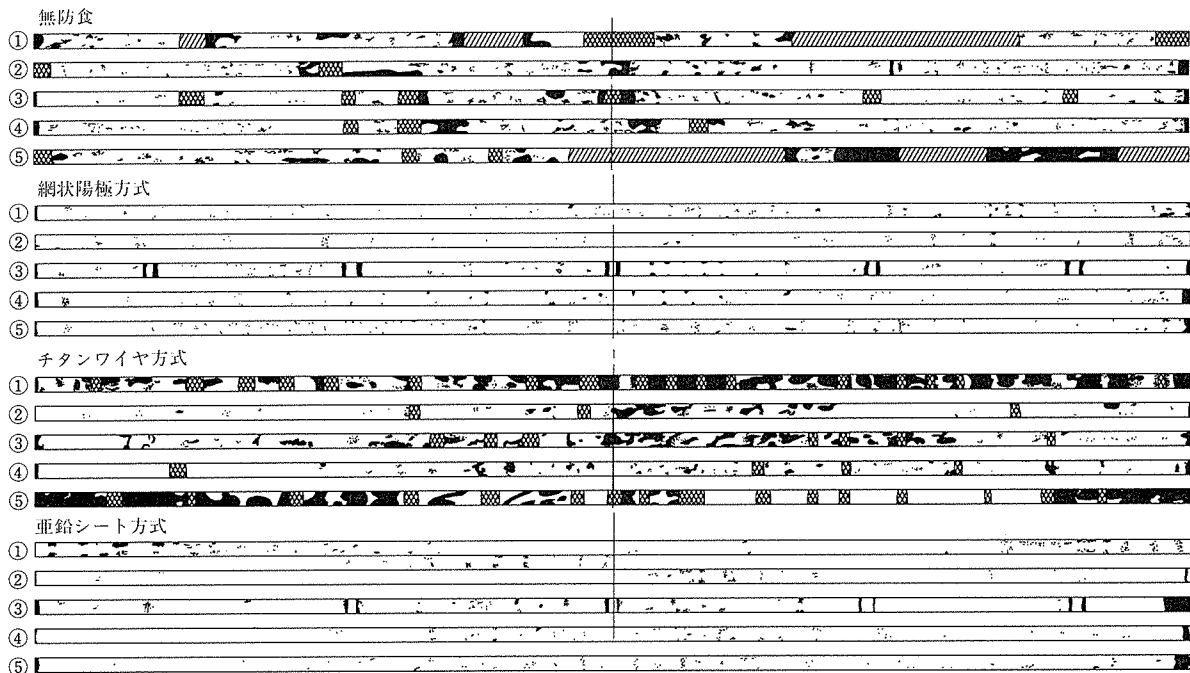
無防食供試体は、下フランジ隅角部の鋼材（図 - 6 の①、⑤）に断面欠損を伴う鋼材腐食が多く認められた。その箇所は、外観目視調査により腐食ひび割れが生じていた箇所、特に錆汁が発生していた箇所と一致していた。隅角部の鋼材は、一部完全に断面が消失していた箇所も確認された。

網状陽極方式は、図 - 6 に示すように鋼材の一部に点錆が生じているだけであり、電気防食による PC 鋼材の防食

効果が確認できた。

チタンワイヤ方式は、無防食供試体と同様に下フランジ隅角部の鋼材（図 - 6 の①、⑤）に断面欠損を伴う腐食が認められた。図 - 7 に示す結果から、隅角部の PC 鋼材の腐食面積率が大きいことがわかる。

亜鉛シート方式は、網状陽極方式と同様、鋼材の一部に点錆が生じているだけであり、電気防食による防食効果が



■ 腐食箇所
 XXXXXX 断面欠損を伴う腐食箇所
 ZZZZZZ 断面欠損が鋼材断面積の50%以上の腐食箇所

図 - 6 PC 鋼材の腐食状況

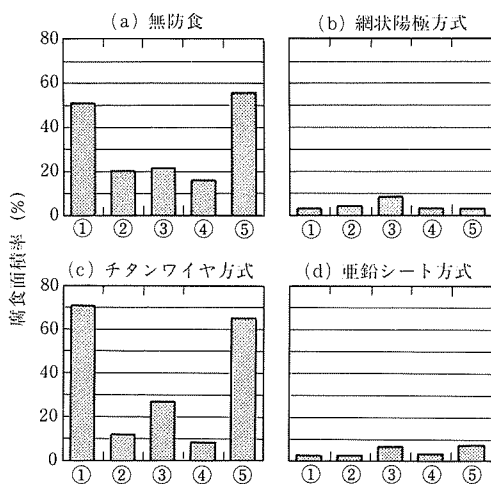


図 - 7 PC 鋼材の腐食面積率

確認できた。

3.5 PC 鋼材引張試験

各供試体の PC 鋼材の引張荷重, 伸びの結果を表 - 5 に示す。ここで, 引張荷重, 伸びは, 規格値⁶⁾に対する比率である。

引張荷重の結果から, 網状陽極方式, 亜鉛シート方式は, 規格値以上の荷重を有しており, 電流印加が PC 鋼材の引張荷重に悪影響を及ぼさないことを確認した。一方, 無防食供試体は, 腐食部あるいは腐食により断面欠損が生じた箇所では鋼材が破断した。断面欠損部の引張荷重は, 規格値の 3 割程度と著しく低下した。チタンワイヤ方式も, 無防食供試体と同様, 断面欠損部の引張荷重は, 規格値の 3 割程度の荷重しか有さず, 防食効果がないことを裏づける結果となった。

各 PC 鋼材の伸びの結果から, 網状陽極方式および亜鉛シート方式は, 規格値以上の性能を有していた。一方, 無防食供試体, 防食効果のなかったチタンワイヤ方式は, 規格値の 2 割から 3 割程度と著しく伸び性能が低下する結果となった。

以上, 電気防食による PC 鋼材の防食効果が認められた網状陽極方式, 亜鉛シート方式は, 鋼材の機械的性質についても問題がないことが確認された。一方, 電気防食による防食効果がなかったチタンワイヤ方式, および無防食供試体の腐食による断面欠損部は, PC 鋼材の機械的性質が著

表 - 5 PC 鋼材引張試験の結果

	引張荷重 (N/mm ²)	比率	伸び (%)	比率	破断位置
規格値 ⁶⁾	1721	1.00	3.5	1.00	—
無防食	① 1738	1.01	2.9	0.83	腐食部
	② 601	0.35	0.7	0.20	断面欠損部
網状陽極方式	① 1847	1.07	6.1	1.74	正常破断
	② 1854	1.08	5.8	1.66	正常破断
チタンワイヤ方式	① 1781	1.03	5.0	1.43	腐食部
	② 581	0.34	0.7	0.20	断面欠損部
亜鉛シート方式	① 1976	1.15	5.8	1.66	正常破断
	② 1860	1.08	5.5	1.57	正常破断

しく低下することが認められた。

3.6 塩化物イオン含有量測定

各供試体の PC 鋼材と同一かぶり位置 (図 - 1 の斜線部) の塩化物イオン含有量の測定結果を図 - 8 に示す。電気防食の適用は, 鋼材周辺の塩化物イオンが移動するという二次的効果が期待でき, 今回電気防食を施した網状陽極方式, 亜鉛シート方式は, 鋼材近傍の塩化物イオンが減少している。網状陽極方式, 亜鉛シート方式で塩化物イオン含有量に差が生じている理由は, 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。一方チタンワイヤ方式は, 無防食供試体と同等の値を示していることから, 鋼材近傍には電流が印加されていないものと推定される。

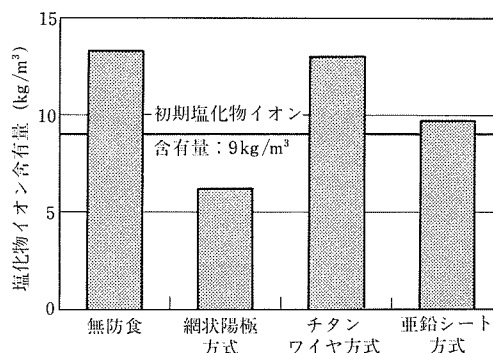


図 - 8 塩化物イオン含有量の結果

3.7 曲げ載荷試験の解析

荷重-変位の解析値と実験値の結果を図 - 9 に示す。

コンクリートの材料値は, 表 - 6 に示す材齢 28 日で実施した圧縮強度試験の結果を使用した。PC 鋼材は, PC 鋼材の腐食調査の結果から各供試体で腐食の程度が異なったこと, 腐食の程度に応じて PC 鋼材の機械的性質も異なったことから, 各供試体に応じて以下の仮定を用いて解析した。

網状陽極方式, 亜鉛シート方式は, 電流印加による PC 鋼材の機械的性質に変化が見られなかったと推定されるため, すべての PC 鋼材は表 - 6 に示す PC 鋼材引張試験結果の最大値を使用した。

チタンワイヤ方式は, 静的曲げ載荷試験の結果から, 等曲げ区間内での隅角部の PC 鋼材 (図 - 6 の①, ⑤) の破断により破壊したことから, PC 鋼材引張試験の結果を参考に, 隅角部の PC 鋼材 2 本が 0.7 % の伸びで破断するものと仮定した。その他の PC 鋼材は, 表 - 6 に示す値を使用した。

無防食供試体は, 鋼材の腐食調査の結果から, 隅角部の PC 鋼材 (図 - 6 の①, ⑤) が, 一部完全に断面が消失していた箇所も確認されたので, 下フランジの鋼材 2 本が存在しないものと仮定した。その他の鋼材は, 表 - 6 に示す値を使用した。すなわち, 下フランジの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。

図 - 9 に示す結果から, 解析結果は, 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梁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。

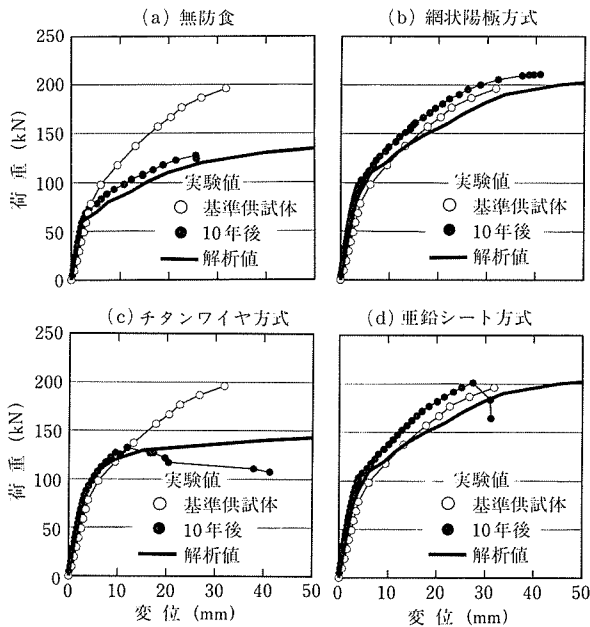


図-9 荷重-変位の関係(実験値, 解析値)

表-6 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 ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)
65.3	4.4	28 050	1 856	1 976	192 000

4. 結 論

本研究は、あらかじめコンクリートに塩化物イオンを 9 kg/m³ 混入し、海水散布環境下に 10 年間暴露したプレテンション方式 PC 梁について、PC 鋼材の防食効果、機械的性質、PC 梁の力学的性状について検討した。その結果、以下の結論を得た。

- ① 網状陽極方式、亜鉛シート方式は、内部鋼材の腐食の程度が非常に軽微であること、鋼材の機械的性質も規格値以上を満足していることを確認した。
- ② チタンワイヤ方式は、陽極材面積が非常に小さく、陽極材の表面積に対して 100 mA/m² 以上の過大な電流

が印加されたため、陽極材近傍のコンクリートの劣化に伴い、鋼材に電流が流れなくなったため防食効果がなかったものと考えられる。

- ③ 網状陽極方式、亜鉛シート方式は、ひび割れ発生荷重、終局荷重、ひび割れ分散性状に変化は認められず、電流印加がはりの力学的挙動に悪影響を及ぼさないことが確認された。一方、チタンワイヤ方式、無防食状態の供試体は、隅角部の PC 鋼材の破断により、終局荷重が暴露初期の供試体に比べ約 35% 低下した。
- ④ 暴露 10 年にわたる本研究成果から、適切な陽極材の使用と管理のもとで電気防食を行えば、海洋環境下における PC 構造物への電気防食は、塩害対策として有効な手法であることを確認した。

謝 辞

本研究は、運輸省港湾技術研究所(現・独立行政法人 港湾空港技術研究所)、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 福手勤博士(現・国土交通省国土技術政策総合研究所)、濱田秀則博士(現・独立行政法人 港湾空港技術研究所)、(株)ナカボーテック 千葉丈夫氏、(株)ピー・エス 石井浩司博士、また 10 年暴露終了後の各種試験の実施にあたり早稲田大学生 佐古武彦氏(現 JR 九州)、(株)ピー・エス 桐川潔氏、(株)ナカボーテック 技術開発研究所の方々にお世話になりました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリートライブラリー 107 電気化学的防食工法 設計施工指針(案)，pp.67~70，2001.11
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書[規準編]，金属材料引張試験方法 (JIS Z 2241-1998)，1999 年，pp.311-318.
- 3) 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)，1991 年，pp.17.
- 4) 武若耕司：コンクリート構造物における電気防食法における現状，コンクリート工学，Vol.37，No.12，1992 年，pp.24.
- 5) 土木学会：コンクリート技術シリーズ，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)，2000 年，pp.227.
- 6) 土木学会：コンクリート標準示方書[規準編]，PC 鋼線及び PC 鋼より線 (JIS G 3536-1994)，1999 年，pp. 293.

【2002 年 4 月 11 日受付】