

# 港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE  
OF  
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

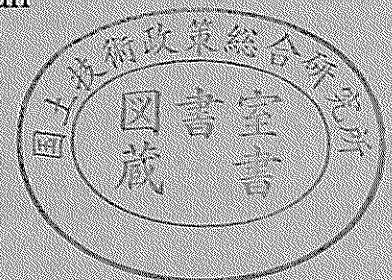
No.1008 September 2001

海洋環境下にあるプレション方式PC構造物への電気防食の適用に関する研究  
—暴露10年結果報告—

青 山	敏 幸
阿 部	正 美
濱 田	秀 則
福 手	勤
関	博
井 川	一 弘

独立行政法人 港湾空港技術研究所

Independent Administrative Institution,  
Port and Airport Research Institute, Japan



## 目 次

要 旨	3
1. まえがき	4
1.1 研究の背景・目的	4
1.2 研究の全体構成	4
2. 実験概要	5
2.1 供試体の概要	5
2.2 使用材料	5
2.3 電気防食方式および電流印加方法	7
2.4 暴露環境	9
2.5 評価項目と試験方法	9
3. 実験結果	13
3.1 PC鋼材の防食効果に関する評価	13
3.2 PC鋼材の機械的性質に関する評価	24
3.3 PCはりの力学的挙動に関する評価	26
3.4 電流印加がコンクリートに及ぼす影響	34
3.5 陽極材・参照電極の耐久性に関する評価	36
4. 結論	37
5. あとがき	38
謝辞	38
参考文献	38

**A study on Cathodic Protection for Pre-tensioned Prestressed Concrete Structure  
under Marine Environment  
– Report of exposure testing for 10 years –**

**Toshiyuki AOYAMA\***  
**Masami ABE\*\***  
**Hidenori HAMADA\*\*\***  
**Tsutomu FUKUTE\*\*\*\***  
**Hiroshi SEKI\*\*\*\*\***  
**Kazuhiro IKAWA\*\*\*\*\***

**Synopsis**

This paper discusses the effectiveness of cathodic protection for prestressed concrete structures under marine environment. Testing specimens were pre-stressed concrete beams fabricated by pre-tensioned method. All of them contained chloride ion, of 9kg-Cl- per volume. The experimental parameter is with or without cathodic protection. For protected specimens, anode material, which is titanium mesh, titanium bar, zinc sheet, or electric conductive paint, was affixed on surface of specimen. All of specimen has been exposed to splashing sea water for ten years. Then several tests were conducted so as to discuss about flexural behavior of beam specimens, corroded condition of PC strand, mechanical property of corroded strand, chloride content of concrete, and residual performance of anode materials.

The following conclusion can be drawn in this study:

- 1) The protection methods, using titanium mesh, zinc sheet, and electric conductive paint, enable to prevent corrosion. Consequently the test result based on electrochemical method during exposure term prove the effectiveness of corrosion protection. Further corrosion products was a small amount when these method was applied.
- 2) The strand was corroded in the specimen protected by titanium bar, because electrochemical test result did not satisfy the specification for corrosion free. This material, as a result, is not suitable for anode material.
- 3) When the effective protection method was applied, the material properties of the strand was satisfied its own standard value.
- 4) When the effective protection method was applied, the flexural performance showed as same as non-corroded one. However, the flexural capacity with titanium bar, and without protection was about 35 % loss of non-corroded capacity.

**Key Words:** Cathodic Protection, Prestressed Concrete, Durability, Load Bearing capacity, Long-term exposure test

---

\* Trainee of Materials Division, Geotechnical and Structural Engineering Department (P.S Corp.)

\*\* Senior Researcher , Geotechnical and Structural Engineering Department

\*\*\* Chief of Materials Division, Geotechnical and Structural Engineering Department

\*\*\*\* Coordination Department Director , National Research Institute for Land Management and Built Environment

\*\*\*\*\* Department of Civil Engineering, School of Science and Engineering, Waseda University.

\*\*\*\*\* Nakabohtec Corrosion Protecting Corp.

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-468-445061 Fax : +81-468-440255 e-mail:abe@cc.phri.go.jp

# 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 の適用に関する研究 —暴露10年結果報告—

青山 敏幸\*  
阿部 正美\*\*  
濱田 秀則\*\*\*  
福手 勤\*\*\*\*  
関 博\*\*\*\*\*  
井川 一弘\*\*\*\*\*

## 要 旨

本研究は、海洋環境下におけるPC構造物への電気防食適用性を検討するため、あらかじめコンクリートに塩化物イオンを9kg/m<sup>3</sup>混入し、海水散布環境下に10年間にわたり無防食状態、および「網状陽極」、「チタン線」、「亜鉛シート」、「導電性塗料」方式で電気防食を施したプレテンション方式PCはりについて、暴露終了後に実施した静的載荷試験、PC鋼材の腐食状況、PC鋼材引張試験、コンクリートの塩化物イオン含有量測定、陽極材の性能試験等の結果をとりまとめたものである。得られた主要な結論は以下の通りである。

- 1) 暴露期間中の電気化学的測定により防食効果があると判断された「網状陽極」、「亜鉛シート」、「導電性塗料」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。
- 2) 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。
- 3) 電気防食による防食効果が得られた供試体は、PC鋼材の機械的性質も規格値以上を満足していた。
- 4) 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を得ることができなかった「チタン線」方式、無防食供試体は、隅角部2本の鋼材の破断により、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。

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

---

\* 地盤・構造部材料研究室研修生 ((株)ピー・エス)  
\*\* 地盤・構造部主任研究官  
\*\*\* 地盤・構造部材料研究室長  
\*\*\*\* 国土技術政策総合研究所 管理調整部長  
\*\*\*\*\* 早稲田大学理工学部土木工学科  
\*\*\*\*\* (株)ナカポーテック  
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人港湾空港技術研究所  
電話：0468-44-5061 Fax：0468-44-0255 e-mail:abc@cc.phri.go.jp

# 1. まえがき

## 1.1 研究の背景・目的

港湾コンクリート構造物の塩害による早期劣化がこれまでに報告されている。ひび割れの制御，自重軽減によるスパンの増大，プレキャスト製品による高品質な部材の製作と工期短縮を可能にするプレストレストコンクリート構造物(以下PC構造物)は，構造・耐久性能に優れた構造物であり，栈橋上部工をはじめとした港湾コンクリート構造物にも使用されている。しかし，PC構造物にも塩分浸透による鋼材の腐食が一部報告され，今後増加する可能性が危惧される。

塩害対策の有効な方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。RC構造物は，これまでの研究成果からその効果が確認されているが，PC構造物に電気防食を適用する場合には，構造形式の違いから検討すべき課題が残されている。

PC構造物がその機能を十分に発揮するためには，供用期間中のPC鋼材が健全な状態であること，確実に定着されていることが絶対条件である。しかし，PC構造物に電気防食を適用した場合には，過大電流印加時に発生する水素による遅れ破壊（水素脆化）現象，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る。特に，プレテンション方式PC構造物は，PC鋼材とコンクリートとの付着力によりPC鋼材を定着する構造であるがゆえ，これらの現象については十分に検討しなければならない。

このような背景から，本研究はプレテンション方式PC

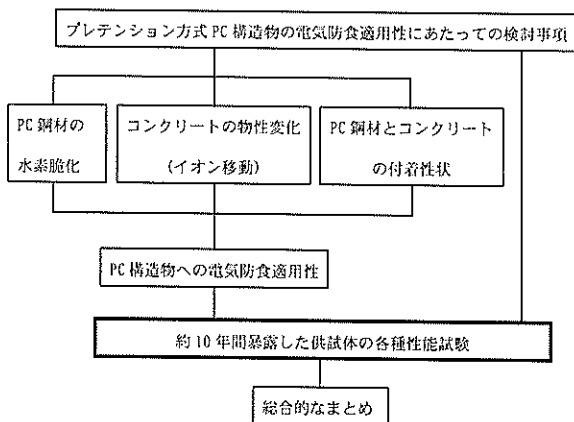


図-1 PC 構造物の電気防食適用にあたっての検討事項

構造物の電気防食適用性を検討するため，図-1に示す研究フローに基づき，これまでにPC鋼材の水素脆化に関する検討，電流印加に伴うコンクリート中のイオン移動に関する検討，鋼材近傍のアルカリイオンの集積によるPC鋼材とコンクリートの付着性状に関する検討を行った。個々の現象，影響要因については，石井の報告を参照されたい。

本資料は，そのうち約10年間電気防食を施した小型はり供試体，大型はり供試体，円柱供試体について，暴露終了後に各種性能試験を行い，PC構造物の電気防食の適用性について総合的に検討することを目的とする。

## 1.2 研究の全体構成

本研究のフローを図-2に示す。本研究は，約10年間にわたり電気防食を施した供試体の，

- ①PC鋼材の防食効果に関する評価
- ②PC鋼材の機械的性質に関する評価
- ③PCはりの力学的挙動に関する評価
- ④電流印加がコンクリートに及ぼす影響
- ⑤陽極材・参照電極の耐久性に関する評価

について検討することを目的とする。

これらの事項について検討すべく，図-2に示すフローに従い試験を行い，電気防食の適用性について検討した。

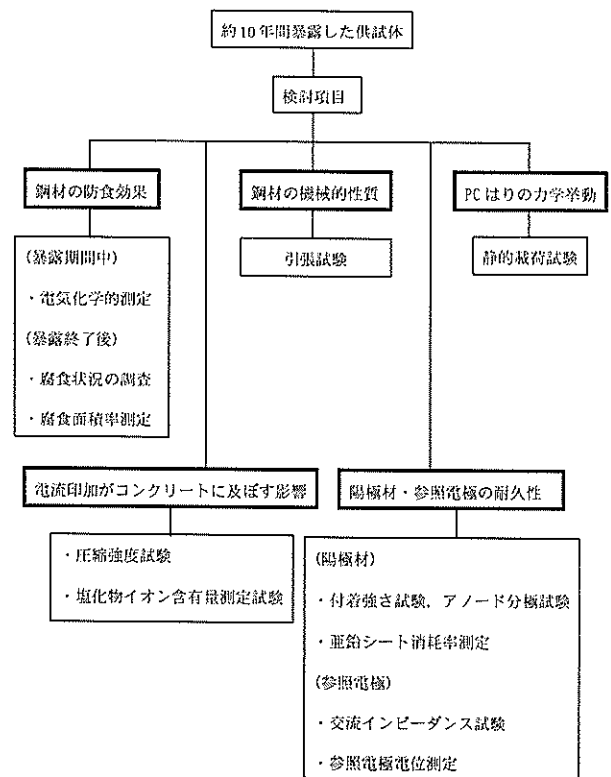


図-2 研究のフロー図

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体の概要

#### (1) 供試体の種類および形状

供試体の種類を表-1に示す。供試体の種類は、小型はり供試体、大型はり供試体、円柱供試体の3種類である。

##### a) 小型はり供試体

小型はり供試体の形状を図-3に示す。供試体は、60×120×2200mmのプレテンション方式PCはりである。主筋には、φ9.3mmのPC鋼より線(SWPR7A T9.3)を1本使用した。プレストレス導入時のPC鋼材応力は、1170N/mm<sup>2</sup>である。応力管理は、供試体製作時にアバット端部に取り付けたロードセルを用いた。本供試体は、PC鋼材に着目すべく、圧縮側鉄筋にはエポキシ樹脂塗装鉄筋を、スターラップにFRP筋を使用した。

実験要因は、電気防食の有無、コンクリート練り混ぜ時の塩化物イオンの有無、暴露環境である。

無防食供試体は、コンクリート製作時に塩化物イオンを混入せず屋外環境に暴露した「無防食-屋外」、塩化物イオンを混入し、海水散布環境に暴露した「無防食-海水」の2種類、計4体である。電気防食供試体は、塩化物イオンを混入し、海水散布環境に暴露開始1年半以降電気防食を開始した「電気防食-海水」、塩化物イオンを混入し、室内環境で電気防食を施した「電気防食-室内」の2種類、計4体である。電気防食供試体の通電電流密度は、鋼材表面

積に対して定電流方式で20mA/m<sup>2</sup>とした。

##### b) 大型はり供試体

大型はり供試体の形状を図-4に示す。供試体は、I型断面の高さ325mm、全長4mのプレテンション方式PCはりである。主筋には、小型はり供試体と同様にφ9.3mmのPC鋼より線を下フランジ5本、上フランジ2本の合計7本使用した。プレストレス導入時のPC鋼材応力は、1170N/mm<sup>2</sup>である。スターラップには、φ6mm丸鋼を使用した。

実験要因は、電気防食の有無、電気防食方式である。

電気防食方式は、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、チタン線方式、亜鉛シート方式の3種類である。網状陽極方式、チタン線方式の通電電流密度は、コンクリート表面積に対して定電流方式で、表-1に示す値を印加した。

##### c) 円柱供試体

長期間にわたる電流印加が、コンクリートの強度特性に及ぼす影響を確認するため、φ100×200mmの円柱供試体に電流印加を行った。供試体は、コンクリート練り混ぜ時に塩化物イオンを混入したものを室内環境に暴露した。

## 2.2 使用材料

### (1) コンクリート

コンクリートは、設計基準強度49N/mm<sup>2</sup>を満足すべく、

表-1 供試体の種類

供試体種類	供試体名	電気防食工法の種類		通電電流密度 <sup>注1)</sup> (mA/m <sup>2</sup> )	Cl <sup>-</sup> 含有量 (kg/m <sup>3</sup> )	暴露環境	暴露期間 (年)	供試体数	
小型はり	基準	-		0 (無し)	-	-	0	1	
	無防食-屋外	-			0	屋外	10	2	
	無防食-海水	-		9 <sup>注4)</sup>	海水	2			
	電気防食-海水	外部電源	導電性塗料		0→20 <sup>注2)</sup>	屋内		2	
	電気防食-屋内			20	2				
大型はり	基準	-		0 (無し)	9 <sup>注4)</sup>	-	0	1	
	無防食	-				10→5	海水	10	1
	網状陽極	外部電源	網状陽極	10 <sup>注3)</sup>				8.5	1
	チタン線		チタン線	時期により変動				10	1
	亜鉛シート	流電陽極	亜鉛シート	時期により変動		10	1		
円柱	基準	-		0 (無し)	9 <sup>注4)</sup>	-	0	3	
	電流無	-				屋内	10	6	
	電流有	外部電源		20		6			

注1) 小型はり供試体は、鋼材表面積に対して、大型はり、円柱供試体については、コンクリート表面積に対する通電電流密度とする。

注2) 暴露開始1年半は無防食、それ以降について電気防食を施した。

注3) 1年半遅れて暴露開始。

注4) 既往の構造物の調査で激しい塩害環境下でのかぶり位置で測定された塩化物イオン含有量を想定した。

初期塩化物イオン含有量は、NaClを用いて調整した。

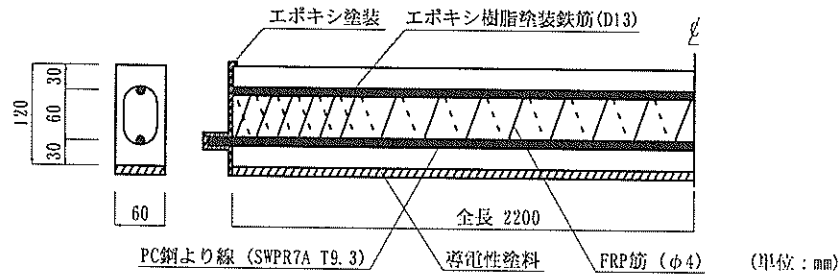


図-3 小型供試体の断面形状

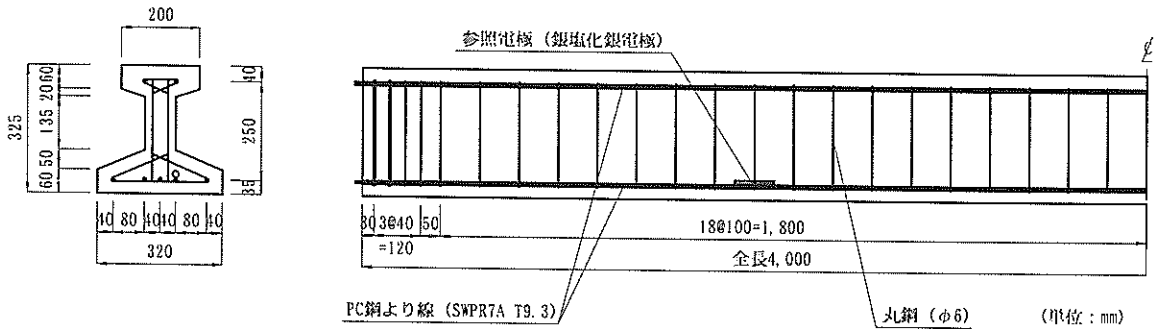


図-4 大型供試体の断面形状

表-2 コンクリートの配合

スランブ (cm)	W/C (%)	Air (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
				W	C	S	G	Ad
8±2.5	37	2±1	41	160	430	737	1076	5.16

表-3 PC鋼材の機械的性質 (規格値)<sup>4)</sup>

引張荷重 (kN)	降伏荷重 (kN)	伸び (%)
88.8以上	75.5以上	3.5以上

表-4 PC鋼材の化学組成 (WT%)

C	Si	Mn	P	S	Cu
0.76	0.24	0.83	0.011	0.002	0.006

表-5 FRP筋の成分と機械的性質

成分			機械的性質	
繊維	結合材	ガラス含有率 (%)	引張強さ (N)	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )
ガラス 繊維	ビニル エステル	58.0	10610	33340

表-6 エポキシ樹脂塗装鉄筋の品質

膜厚 (μm)	ピンホール (個/m)
192	2.1

表-2に示す配合を使用した。セメントは、早強ポルトランドセメントを使用した。細骨材は、神奈川県酒匂川水系産の川砂（表乾比重：2.63，吸水率：1.64%，実績率：63.5%，粗粒率：2.93%），粗骨材は、山梨県大月市初狩町産の川砂利（表乾比重：2.67，吸水率：1.12%，実績率：60.2%，粗粒率：6.63%）を使用した。コンクリート練り混ぜ時に塩化物イオンを混入した供試体は、厳しい環境下のコンクリート内部に蓄積していた塩化物イオン含有量のデータ<sup>2),3)</sup>を参考に、練り混ぜ水にNaClを用いて塩化物イオン含有量を9kg/m<sup>3</sup>に調整した。

#### (2) PC鋼材

小型はり，大型はり供試体に使用したφ9.3mmの7本よりPC鋼より線(SWPR7A T9.3)の機械的性質の規格値<sup>4)</sup>を表-3に，化学組成を表-4にそれぞれ示す。

#### (3) 補強材

小型はりに使用したφ4mmのFRP筋の成分および機械的性質を表-5に，エポキシ樹脂塗装鉄筋(D13)の出荷時の品質試験の結果を表-6にそれぞれ示す。

#### (4) 陽極材

各電気防食方式により陽極材の構成は異なる。各電気防食方式に使用した構成材料の特性を以下に示す。

##### a) 導電性塗料方式

本方式は，白金メッキチタン線，導電性パテ，導電性塗料，耐候性塗料から構成される。導電性パテ，導電性塗料，耐候性塗料の成分を表-7～表-9にそれぞれ示す。

表-7 導電性パテの成分

成分	カーボン	水	アン モニア	アクリル エマルジョン	分散剤 その他
含有量 (%)	60.0	27.0	<1.0	12.0	<1.0

表-8 導電性塗料の成分

成分	カーボン	水	アン モニア	アクリル エマルジョン	分散剤 その他	エステル アルコール
含有量 (%)	66.0	12.0	<1.0	21.0	<1.0	<1.0

表-9 耐候性塗料の成分

成分	アクリル エマルジョン	水	分散剤	酸化チタン
含有量 (%)	20.0	29.0	<1.0	50.0

表-10 網状陽極の品質

コンクリート構造物での最大電流密度		45mA/m <sup>2</sup>
触媒	組成	貴金属酸化物
	アノード界面での最大電流密度	215mA/m <sup>2</sup>
メッシュ	組成	チタン
	目開き	76mm×34mm
シユ	縦方向の抵抗	0.046Ω/m
	横方向の抵抗	0.016Ω/m

表-11 コンダクターバーの品質

組成	高純度チタン
形状	幅：12mm，厚さ：1mm

表-12 陽極被覆材の品質

標準使用量 (kg/m <sup>3</sup> )		標準吹付量 (mm)
セメント系 補修材料	水	
1950	335	10-40

表-13 電気防食用亜鉛JIS原案1種

成分元素	Cu	Pb	Fe	Cd	Al	Zn
規格値 wt%	<0.001	<0.003	<0.0014	<0.002	-	<99.995

表-14 バックフィル材の組成

成分	ベント ナイト	生石膏	硫酸 マグネシウム	塩化 マグネシウム
重量比	7	2	1	3~5

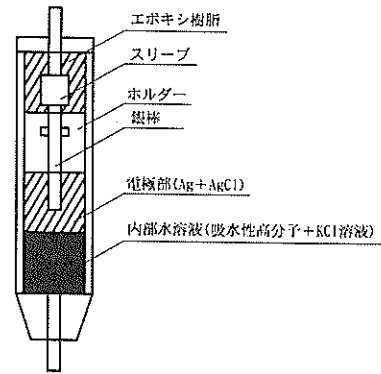


図-5 埋め込み参照電極

b) 網状陽極方式

本方式は、酸化被膜で覆った高純度チタンをエキスバンド状に加工した網状陽極、網状陽極間の電気的な接続に用いるコンダクターバー、陽極固定材、陽極被覆材で構成される。網状陽極、コンダクターバー、陽極被覆材の品質を表-10～表-12にそれぞれ示す。

c) チタン線方式

本方式は、φ1.5mm、メッキ厚1μmの白金メッキチタン線のみで構成される。

d) 亜鉛シート方式

本方式は、電気防食板として亜鉛シート、バックフィル材、保護板、固定材としてアンカーボルト、ボルトキャップから構成される。亜鉛シート、バックフィル材の品質を表-13、表-14にそれぞれ示す。

(5) 参照電極

大型はり供試体は、暴露期間中の鋼材電位をモニタリングするために、供試体内部に銀塩化銀(以下Ag/AgClと呼ぶ)製の埋め込み式参照電極を設置した。参照電極の構成を図-5に示す。

2.3 電気防食方式および電流印加方法

電気防食方式は、コンクリートの表面に陽極材を設置し、外部の電源装置からコンクリートを介して内部の鋼材に強制的に電流を印加する外部電源方式と、イオン化傾向の大きい金属を陽極材とし、内部の鋼材と導通をとり、電位差を利用して電流を流す流電陽極方式に大別される。

現在、一般的に採用されている電気防食方式の特徴を表-15<sup>5),6)</sup>に示す。ここでは、10年前に有効であると考えられた電気防食方式である導電性塗料方式、網状陽極方式、亜鉛シート方式、チタン線方式の陽極配置方法、電流印加方法について述べる。



(1) 小型はり供試体

a) 導電性塗料方式

小型はり供試体に用いた導電性塗料方式の陽極材の配置ならびに電流印加方法を図-6に示す。本方式は、コンクリート製作時にあらかじめ供試体の底面に約2×2mmの溝を設け、素地調整を行った後に白金メッキチタン線を挿入し、導電性パテを用いて溝を埋めた。導電性パテが乾燥した後に導電性塗料を吹き付け、導電性塗料が乾燥した後に耐候性塗料を吹き付けた。電流は、導電性塗料中の白金メッキチタン線を直流電源装置の(+)側、供試体中のPC鋼より線を外部電源装置の(-)側に接続することにより印加した。

(2) 大型はり供試体

a) 網状陽極方式

網状陽極方式の陽極材の配置ならびに電流印加方法を図-7に示す。本方式は、網状の陽極をコンクリート表面に固定し、セメント系材料にて被覆することにより構成される。電流は、導電性塗料方式と同様に外部電源装置の(+)側に陽極材を、(-)側にPC鋼材を取り付けることにより印加した。

b) チタン線方式

チタン線方式の陽極材の配置ならびに電流印加方法を図-8に示す。本方式は、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。陽極材は、PC鋼材の緊張、スターラップの組立後、型枠端面の所定の位置に約2mmの穴をあけ、白金メッキチタン線を通して片側を固定した。その後、チタン線を

216N/mm<sup>2</sup>(降伏強度の約80%)で緊張後、樹脂製のスペーサーでコンクリート打設によるズレを防止した。電流は、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印加した。

表-15 各電気防食工法の特徴<sup>5),6)</sup>

電気防食方式	電源方式	長所	短所
導電性塗料		外観、美観に優れる 再補修が容易 比較的低コスト	電源が必要 損傷を受けやすい 床版上面は適さない
網状陽極 (チタンメッシュ)	外部	塩素ガスが発生しない 適用範囲が広い 陽極材の耐久性が大きい	電源が必要 オーバーレイ材の 施工に留意 死荷重が増加
チタン グリッド	電源	塩素ガスが発生しない 適用範囲が広い 陽極材の耐久性が大きい 死荷重の増加がない	電源が必要 切削溝が必要
内部挿入 陽極		コンクリートの表面処理 が不要 死荷重の増加がない	電源が必要 美観に難あり
亜鉛シート	直流電	電源設備が不要 管理作業(電流調整等) 低減 過防食無し ランニングコスト不要	適用箇所が制限される 電流調整ができない 耐久性に限界がある バックフィル材の 長期安定性
亜鉛溶射	陽極	電源設備が不要 管理作業(電流調整等) 低減 過防食無し ランニングコスト不要	適用箇所が制限される 電流調整ができない 作業環境の整備が必要 溶射表面の腐食生成物の ふくれ・剥離

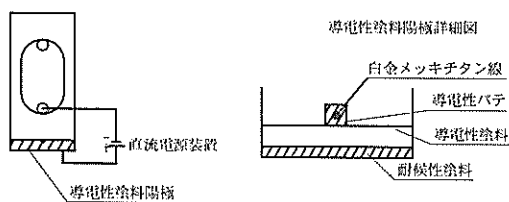


図-6 小型はり供試体の陽極配置図

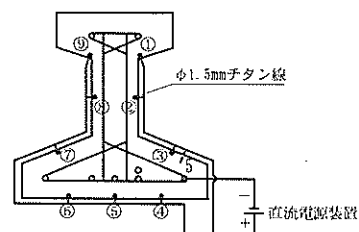


図-8 チタン線方式の陽極配置図

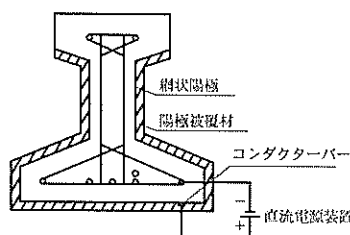


図-7 網状陽極方式の陽極配置図

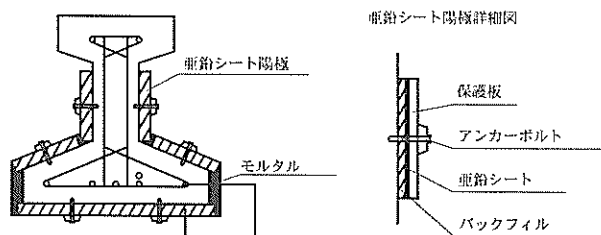


図-9 亜鉛シート方式の陽極配置図

c) 亜鉛シート方式

亜鉛シート方式の陽極材の配置ならびに電流印加方法を図-9に示す。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。ウェブ、ハンチは、12×60cmの電気防食板を、底面は34×60cmの電気防食板を取り付けた。電流は、亜鉛シートとPC鋼材の導通をとることにより印加した。

(3) 円柱供試体

円柱供試体の陽極材の配置ならびに電流印加方法を図-10に示す。電流は、保水性紙、白金メッキチタン線、樹脂製板をアノードとして外部電源装置の(+)側に、保水性紙、ステンレス板、樹脂製板をカソードとして(-)側に導通させることにより印加した。試験期間中は、保水性紙の乾燥による電圧の増加を防ぐため、定期的に飽和水酸化カルシウム溶液を用いて保水性紙を湿潤状態に維持した。

2.4 暴露環境

(1) 海水散布環境

本環境は、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である。供試体の暴露状況を写真-1に示す。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) 屋外暴露環境

本環境は、海水散布環境と同様に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で、海沿いに位置しているために潮風が吹く陸上環境である。

(3) 屋内暴露環境

本環境は、港湾空港技術研究所屋内の気温20℃、湿度

60%の恒温恒湿槽内に暴露した環境である。

2.5 評価項目と試験方法

各種性能を評価するため、各供試体について表-16の○印に示す項目の試験を行った。

(1) PC鋼材の防食効果に関する評価

a) 電気化学的測定試験

適切な電流が印加されたかどうかを判定する規準には、表-17<sup>7)</sup>に示すものがある。電位シフト基準は、図-11に示すように通電時の電位 $E_{on}$ 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 $E_{ms}$ と呼ぶ)と、電流遮断所定時間後の電位の差(復極量)が100mV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。

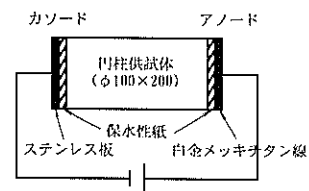


図-10 円柱供試体の陽極配置図

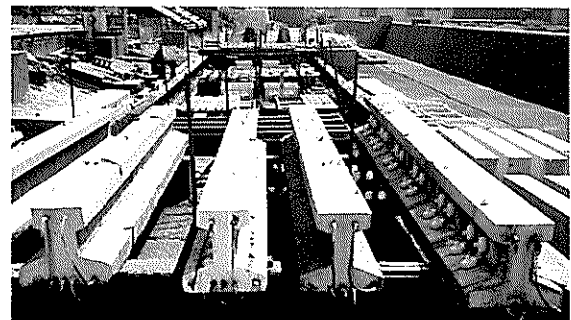


写真-1 海水散布状況

表-16 評価項目と実施試験

評価項目	鋼材の防食効果			鋼材の機械的性質	PCはりの力学的挙動	コンクリートに及ぼす影響	陽極材・参照電極の耐久性					
	電気化学的測定	外観目視調査	腐食状況腐食面積率				陽極材			参照電極		
試験項目				引張試験	静的載荷試験	圧縮強度	塩化物イオン含有量測定	付着強さ	アノード分極	亜鉛シート消耗率	電極電位測定	交流インピーダンス
小型はり	無防食-屋外			×			×					
	無防食-海水			○			○					
	電気防食-海水	○	○	○		×	○	×	×	×	×	×
	電気防食-屋内				×		×					
大型はり	無防食			○				×	×	×	○	×
	網状陽極			(下フランジ5本中)	○	×	○	○	○	×	×	○
	チタン線	○	○					×	×	×	○	×
	亜鉛シート			4本実施)				×	×	○	○	×
円柱供試体	×	×	×	×	×	○	×	×	×	×	×	

各供試体○印の項目について試験を実施した。

今回は  $E_{ins}$ 、電流遮断 24 時間後の電位 (以下  $E_{24}$  と呼ぶ) を暴露期間中に測定して復極量を確認した。小型はり供試体は、暴露環境、コンクリートの塩化物イオン含有量が異なるため、コンクリート比抵抗、分極抵抗も測定した。測定は、基本的に年 2 回 (6 月, 12 月) の頻度で行った。

① 小型はり供試体

小型はり供試体の電気化学的測定の位置を図-12に示す。電位は、はり軸方向に20cmピッチで計11箇所、分極抵抗、コンクリート比抵抗は、はり中央部、中央部から60cm離れた2箇所の計3箇所測定した。

電位の測定方法を図-13a)に、コンクリート比抵抗、分極抵抗の測定方法を図-13b)にそれぞれ示す。

電位の測定は、PC鋼より線に取り付けたリード線と参照電極のリード線をそれぞれ電圧計の-側端子と+側端子に接続し、ASTM<sup>®</sup>に準拠して測定した。

無防食供試体は、PC鋼より線の自然電位 (以下  $E_{corr}$  と呼ぶ) を測定した。電気防食供試体は、 $E_{ins}$  と  $E_{24}$  を測定した。ここで  $E_{ins}$  は、電流遮断約1秒後の電位の読みとした。通電電流は、直流電源装置の読み値を確認した。

分極抵抗、コンクリートの比抵抗の測定は、測定の約30分前に供試体の上表面を水で十分に湿らせた後、モニタリングプローブ (株) ナカポーテック製) をコンクリート表面に押し当て、コロージョンモニター (東方技研 (株) : コロージョンモニター7635) を用いて行った。測定に用いた電流は、電流によるPC鋼より線に分極量が20mVを越えない電流値の範囲の重畳式の二重パルスで、周波数は分極抵抗の測定の場合には0.01Hz、コンクリートの比抵抗の場合には0.25Hzとした。

② 大型はり供試体

大型はり供試体の電位測定方法を図-14に示す。電位は、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電極により測定した。小型はり供試体同様、無防食供試体は  $E_{corr}$  を、電気防食供試体は、 $E_{ins}$  と  $E_{24}$  を測定した。網状陽極方式、チタン線方式の通電電流は、小型はり供試体と同様に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) 外観目視調査

10年間にわたる暴露終了後、はりの劣化状況を確認するため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、錆汁発生状況とした。

c) 鋼材腐食状況の調査・腐食面積率測定

PC鋼材の腐食箇所と腐食状況の把握、腐食している面

表-17 国内機関における防食効果の判定基準<sup>7)</sup>

指針等の名称	対象構造物	防食効果の判定基準
劣化防止・補修マニュアル (沿岸開発技術研究センター)	海岸大気中にあり潮風や海水飛沫を受ける港湾コンクリート構造物	①電位シフト基準 ・電流遮断後のインスタントオフ電位からの復極が0.1V以上 ・電位シフト量は、遮断4時間後の測定値 ②電位基準 ・通電時の電位が-1.10V (vs. CSE) より貴
コンクリート構造物中の鋼材の電気防食要領 (案) (土木研究センター)	大気中にある橋梁 (橋脚・床版) などのコンクリート構造物	①電位シフト基準 ・電流遮断後のインスタントオフ電位からの復極が0.1V以上 ・電位シフト量は、遮断4時間後の測定値 ②電位基準 ・通電時の電位が-1.10V (vs. SCE) より貴
電気防食法研究委員会報告 (日本コンクリート工学会)	港湾環境の棧橋床版、内陸部の道路高架橋床版、海上部の高架橋橋脚、内陸部の橋梁、橋脚など	①電位シフト基準 ・電流遮断後のインスタントオフ電位からの復極が0.1V以上 (乾燥の繰り返しの厳しい条件下ではさらに大きなシフト量) ・電位シフト量は、遮断24時間後の測定値

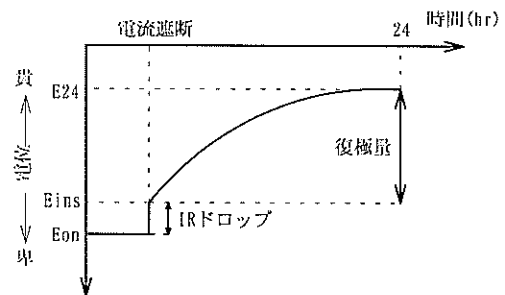


図-11 電流印加を施した鋼材の復極特性

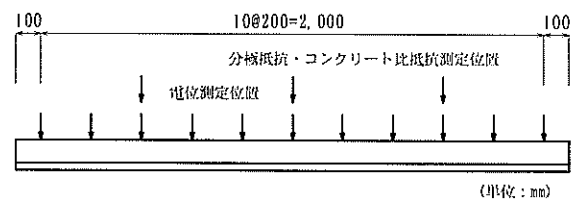


図-12 小型はり供試体の電気化学的測定の位置

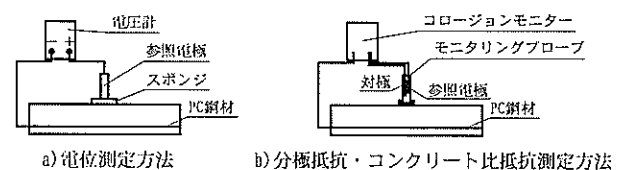


図-13 小型はり供試体の電気化学的測定の方法

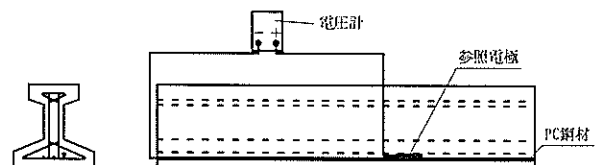


図-14 大型はり供試体の電気化学的測定の方法

積を定量化することを目的に、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。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。

小型はり供試体は、それぞれの供試体についてPC鋼材の鋼材腐食状況の調査と腐食面積率の測定を行った。大型はり供試体は、各供試体の下フランジに配置したPC鋼材5本を対象とした。

#### d) エポキシ樹脂塗装鉄筋の分析試験

海水散布環境下に暴露した小型はり供試体は、圧縮側のエポキシ樹脂塗装鉄筋近傍に腐食によるひび割れが確認された。鉄筋の腐食状況、腐食が生じた理由を検討するため、腐食ひび割れ発生状況、腐食状況と腐食面積率測定試験、各種分析試験を実施した。

分析試験は、断面を切り出した鉄筋をPt蒸着し、被覆材近傍の走査型電子顕微鏡(SEM)による観察、X線マイクロアナライザー(XMA)による元素同定を行った。また、被覆樹脂の示差走査熱分析(DSC)によるガラス転移温度( $T_g$ )、実体顕微鏡写真によりエポキシ樹脂塗膜厚を測定した。SEMによる観察は、日本電子製JSM-6330F電界放射走査型電子顕微鏡(加速電圧15kV,反射電子検出器)、XMAによる元素同定は、オックスフォード製ISIS300エネルギー分散型X線マイクロアナライザー、DSCによるガラス転移温度は、セイコーインスツルメンツ製RDC220示差走査熱分析装置を使用した。

#### (2) PC鋼材の機械的性質に関する評価

##### a) 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、試験片1.5mを取り出しPC鋼材の引張試験を行った。試験は、JIS Z 2241-1998<sup>9)</sup>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。引張荷重は、試験中の最大荷重とし、降伏荷重は、0.2%永久伸びに対する荷重とし、荷重-伸び曲線の直線部分に対し伸びが0.2%の隔たりを持つ平行線を引き、原曲線との交点をもって定めた。腐食の度合いが大きいもの、鋼材の取り出し時に傷がついてしまったものは、測定器の制約から降伏荷重の測定は実施しなかった。小型はり供試体は「無防食-海水」2本、「電気防食-海水」2本、大型はり供試体は、全ての供試体の下フランジに配置したPC鋼

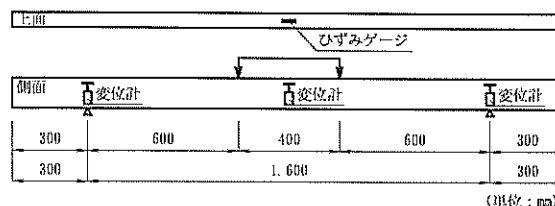


図-15 小型はり供試体の載荷試験概要

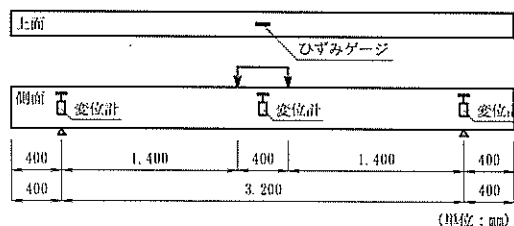


図-16 大型はり供試体の載荷試験概要

材の5本中4本について実施した。

#### (3) PCはりの力学的挙動に関する評価

##### a) 静的載荷試験

###### ① 小型はり供試体

外観目視調査終了後、静的載荷試験を行った。載荷試験の概要を図-15に示す。試験は、1000kN万能試験機を使用し、スパン1600mm、等曲げ区間400mmの2等分点による曲げ載荷試験を行った。計測項目は、荷重、支点およびスパン中央の変位、コンクリート上縁部のひずみ、ひび割れ状況、ひび割れ幅である。載荷試験に先立ち、供試体底面に配置した導電性塗料は除去した。

###### ② 大型はり供試体

小型はり供試体と同様に、外観目視調査終了後に静的載荷試験を行った。載荷試験の概要を図-16に示す。試験は、スパン3200mm、等曲げ区間400mmの2等分点による曲げ載荷試験を行った。試験装置、計測項目は、小型はり供試体と同様である。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。

#### (4) 電流印加がコンクリートに及ぼす影響

##### a) 圧縮強度試験

コンクリートの圧縮強度は、JIS A 1108-1999<sup>10)</sup>、コンクリートの静弾性係数はJSCE-G 502-1999<sup>11)</sup>に準拠して、それぞれ試験を行った。供試体は、φ100×200mmの円柱供試体である。

##### b) 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、鋼材周辺の塩化物イオンの移動による腐食環境の改善が期待できる。静的載荷試験終了後、PC鋼材周辺から分析用コンクリート試料を採取し、鋼材近傍の塩化物イオン含有量を測定した。小型はり供試体、大型はり供試体の試料採取位置を図

-17に示す。小型はり供試体は、図-17a)に示すようにPC鋼材から上下6mmの間の試料を採取した。大型はり供試体は、鋼材近傍の試料を採取することが困難であったため、図-17b)に示すように図の黒色で塗りつぶした部分の試料を採取した。無防食供試体は、はりの塩化物イオンの浸透状況を確認するため、斜線部の位置(供試体底面から0~1cm,1~2 cm,2~3 cm,3~4 cm,6~7 cm,ハンチ部近傍)の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」<sup>12)</sup>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。

(5) 陽極材・参照電極の耐久性に関する評価

a) 網状陽極附着強さ試験

網状陽極方式は、網状陽極をコンクリートに貼り付け、セメント系材料にて陽極材を被覆する。そのため、本方式では、コンクリートと陽極材との付着力が電気防食工法の性能に大きな影響を及ぼすものと考えられる。

試験は、JSCE-K 531-1999<sup>13)</sup>に準拠して、陽極材とコンクリートの附着の状態を評価した。試験方法を図-18に示す。試験は、上部引張用ジグと陽極材との間を接着剤にて貼り付け、その後40×40mmの正方形の4辺にコンクリートまで切り込みを入れ、陽極材に対して鉛直方向に引張力を与えて付着強さを求めた。試験位置は、図-18に示すようにハンチ部とした。試験は、供試体の軸方向の両端部と中央部の計3ヶ所について実施した。

b) 網状陽極アノード分極試験

外部電源方式を用いた陽極材料には、酸化反応に対する抵抗性に優れ消耗しないこと、電流量が増大した場合に懸念される陽極材周辺での塩素ガスの発生、それによる陽極材、コンクリート自身の劣化を生じさせない必要がある。網状陽極の耐久性を評価することを目的に、アノード分極試験を行った。試験方法を図-19に示す。試料は、陽極材を取り外す際に約100×100mmの寸法に切り出して使用した。

試験は、ファンクションジェネレータにより指示電位を与え、ポテンシostatにより指示電位を制御して陽極材の分極曲線を描いた。電位は、IR降下による誤差を避けることができる $E_{im}$ を測定した。分極は、自然電位を起点に掃引速度20mV/minで2Vまで掃引した。

c) 亜鉛シート消耗率試験

亜鉛シート方式は、亜鉛板を犠牲溶解して鋼材を防食するため、暴露期間の経過に伴い亜鉛板が消耗する。本試験は、暴露開始前の亜鉛シートと暴露終了後の亜鉛シート重量を測定することにより、各場所に取り付けた亜鉛板の消耗量を測定した。なお本試験では、暴露前の亜

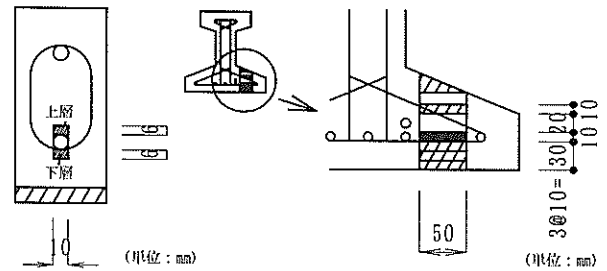


図-17 塩化物イオン含有量測定箇所

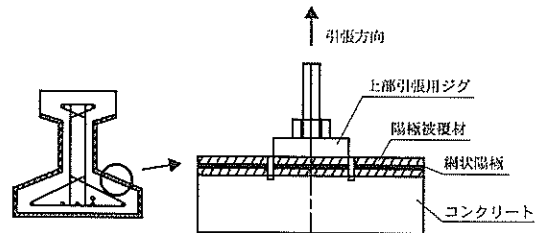


図-18 網状陽極被覆材の付着強さ試験

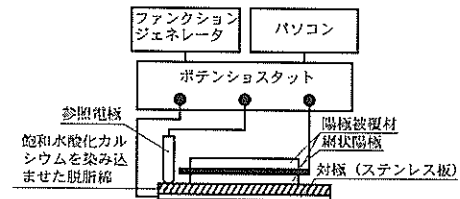


図-19 網状陽極アノード分極試験の概要

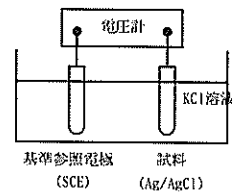


図-20 参照電極の電位測定試験の概要

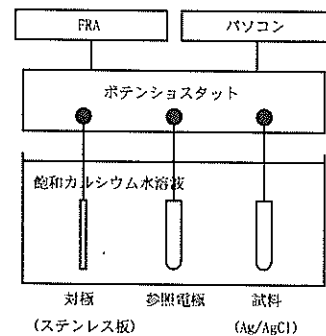


図-21 参照電極の交流インピーダンス試験の概要

鉛シート重量は測定していないため、亜鉛シート寸法により暴露前の重量を換算した。

d) 参照電極の電位測定試験

参照電極の安定性を評価するために、供試体を解体する際に参照電極を取り出し、図-20に示す方法により参照

電極の電位を測定した。本試験は、暴露前と暴露後に測定した基準電極(SCE)と埋め込み電極(Ag/AgCl)の電位差を測定することにより電位の安定性を評価した。

#### e) 参照電極の交流インピーダンス試験

参照電極の電位測定以外に、参照電極の交流インピーダンス試験を行い、参照電極の性能を評価した。

本試験の方法を図-21に示す。本試験は、供試体を解体する際に参照電極を取り外し交流インピーダンスを測定した。測定は、FRAを使用し、各周波数を $10^{-3}$ ~ $10^4$ Hzの範囲で段階的に変えて印加し、その電位、電流のフーリエ積分によるデジタル処理をパソコンで行うことにより複素数を求め、インピーダンスと位相差を求めた。

### 3. 実験結果

#### 3.1 PC鋼材の防食効果に関する評価

##### (1) 小型はり供試体

##### a) 無防食供試体の電気化学的測定

無防食供試体の鋼材腐食状況を電気化学的測定により判定する指標としては、表-18<sup>8)</sup>に示す鋼材電位測定から評価する方法と、表-19<sup>14)</sup>に示す鋼材の分極抵抗測定から腐食速度を判定する方法が提案されている。ここでは、表-18、表-19に提案されている方法からPC鋼材の腐食状況について検討する。

##### ① 「無防食-屋外」

暴露期間と $E_{corr}$ の関係、暴露期間と分極抵抗の関係、暴露期間とコンクリート比抵抗の関係を図-22に示す。ここで、グラフに示す $E_{corr}$ 、分極抵抗、コンクリート比抵抗の平均値は、2体の供試体の軸方向について測定した値の平均値である。最大、最小値は、2体の供試体に関しての軸方向の最大値と最小値である。

図-22a)に示す暴露期間と $E_{corr}$ の関係から、本供試体は時間の経過に伴う $E_{corr}$ の変動は小さく、表-18に示す基準から判断するといずれも90%以上の確率で腐食なしの範囲に推移している。

図-22b)に示す暴露期間と分極抵抗の関係から、暴露開始2年から5.5年にかけて分極抵抗が小さくなる傾向が見られた。しかし、暴露5年以降の値は、表-19に示す基準から評価すると、一部を除き不動態状態の領域に属している。

図-22c)に示す暴露期間とコンクリート比抵抗の関係から、分極抵抗の測定と同様に、コンクリートの比抵抗は暴露開始2年から5年にかけて小さくなる傾向が見られたが、それ以降は大きい値を示した。

以上の結果を総合的に考察すると、本供試体は腐食の傾向が非常に小さいことが推定される。

表-18 電位による腐食判定基準<sup>8)</sup>

電位 (mV vs.SCE)	腐食の確率
-130mVより貴	90%以上の確率で腐食なし
-130mV~-280mV	不確定
-280mVより卑	90%以上の確率で腐食あり

表-19 分極抵抗による腐食判定基準<sup>14)</sup>

分極抵抗 (kΩcm <sup>2</sup> )	腐食速度の判定
130-260より大	不動態状態 (腐食なし)
52以上130以下	低~中程度の腐食速度
26以上52以下	中~高程度の腐食速度
26未満	激しい、高い腐食速度

##### ② 「無防食-海水」

暴露期間と $E_{corr}$ の関係、暴露期間と分極抵抗の関係、暴露期間とコンクリート比抵抗の関係を図-23に示す。

図-23a)に示す暴露期間と $E_{corr}$ の関係から、本供試体は時間の経過に伴い $E_{corr}$ が卑な方向に移行していることがわかる。表-18に示す基準から判断すると、暴露期間が長くなるにつれて不確定領域から90%以上の確率で腐食ありの領域に移行している。また、 $E_{corr}$ の最小値、最大値と平均値の差は、時間の経過に伴い大きくなっている。小林ら<sup>15)</sup>によると、「電位差が100mV~150mV以上の場合には活発な腐食状態にある」と述べていることから、本供試体は腐食が生じている可能性が高いものと推定される。

図-23b)に示す暴露期間と分極抵抗の関係から、暴露開始1年以降、分極抵抗の平均値が小さくなる傾向が見られた。表-19に示す基準から評価すると、「低~中、あるいは中~高程度の腐食速度」の領域に属している。さらに分極抵抗の最大値と最小値にも大きな差が生じている傾向が見られた。

図-23c)に示す暴露期間とコンクリート比抵抗の関係から、季節による変動が見られるが、暴露期間を通して10kΩ・cm以下の値を示し、「無防食-屋外」に比べるとコンクリート比抵抗が小さい。既往の知見<sup>15),16),17),18)</sup>によれば、コンクリートの比抵抗は、水セメント比、含水率が大きいほど、塩化物イオン含有量が多いほど、温度が高いほど小さくなると述べている。本供試体もこれらの要因が寄与したものと考えられる。

以上の結果を総合的に考察すると、本供試体は腐食の傾向が大きいことが推定される。また軸方向の $E_{corr}$ 、分極抵抗の測定結果から、最大値と最小値に差が生じていることから、供試体中のPC鋼材は孔食を引き起こしている可能性も考えられる。このような傾向を示す理由は、コンクリート製作時に多量の塩化物イオンを混入したこ

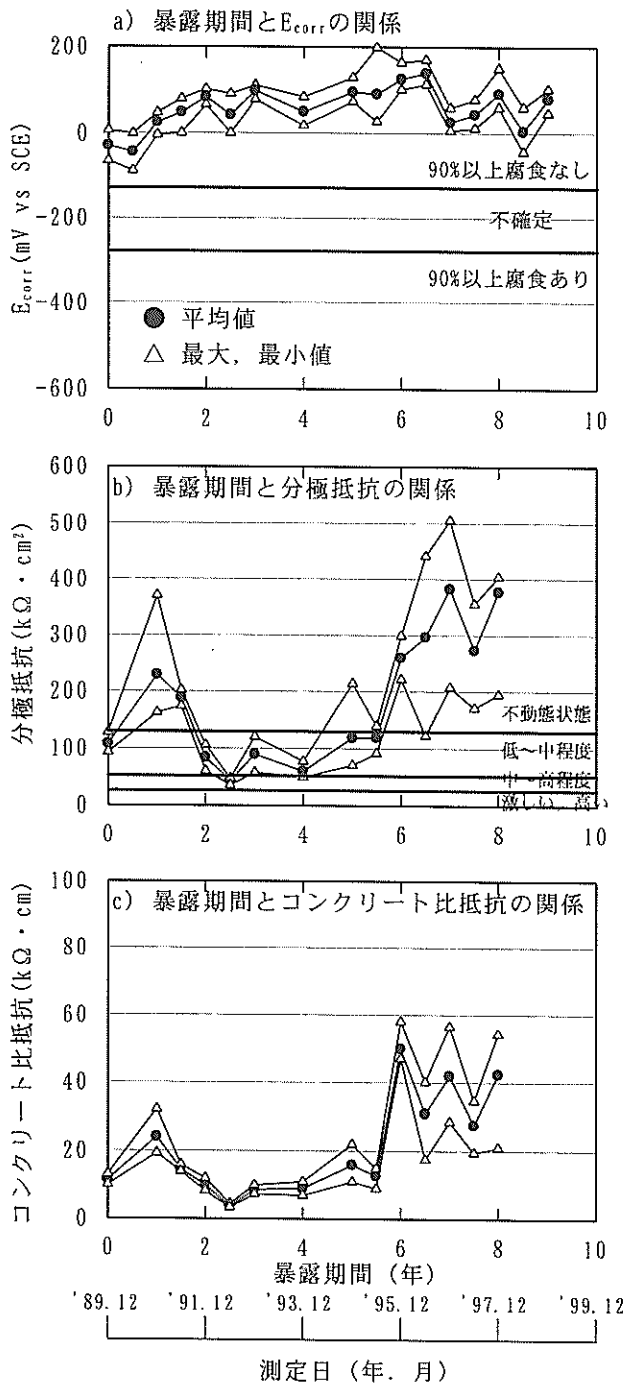


図-22 「無防食-屋外」の電気化学的測定

と、乾燥と湿潤を繰り返す環境に暴露したことによるものと考えられる。

b) 電気防食供試体の電気化学的測定

電気防食を施したコンクリート中の鋼材の防食効果を判定する基準は、前述したように表-17に示す電位シフト基準が用いられている。

ここでは、暴露期間中に計測した電気化学的測定の結果から電気防食を適用した時の鋼材の防食効果について検討する。

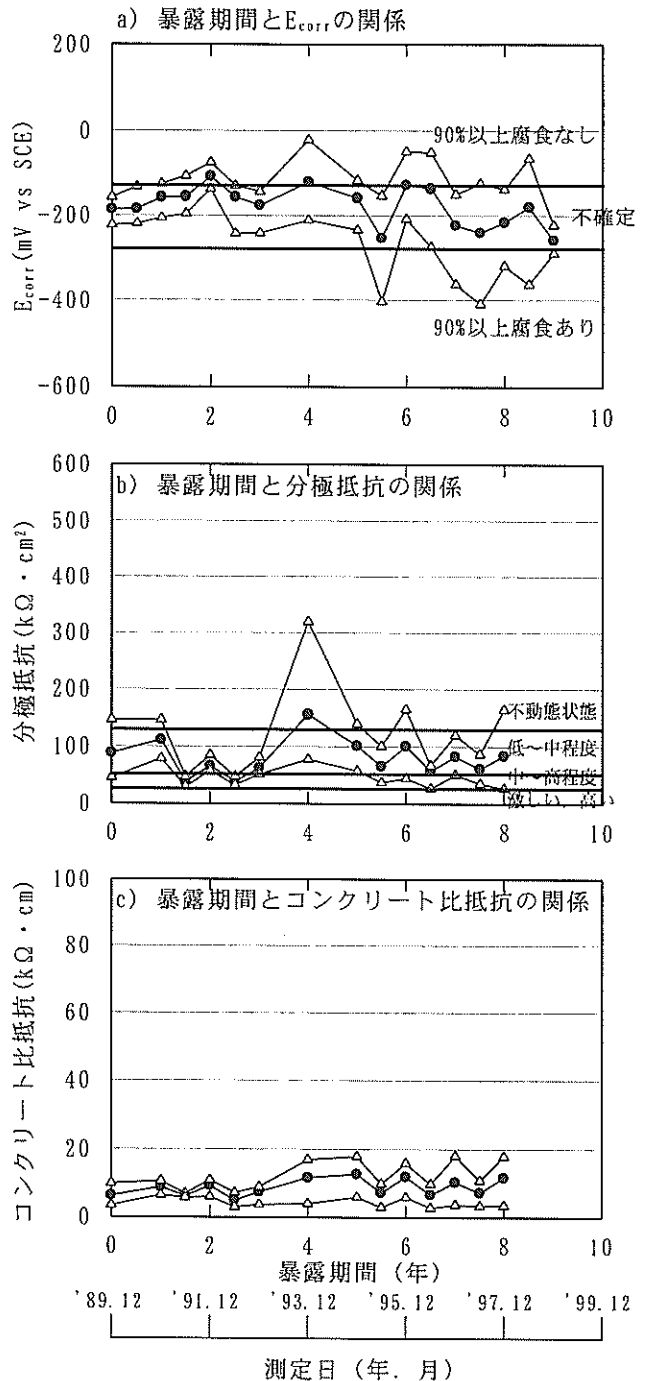


図-23 「無防食-海水」の電気化学的測定

① 「電気防食-海水」

暴露期間と復極量の関係、暴露期間と $E_{ms}$ ・ $E_{24}$ の関係、暴露期間と分極抵抗の関係、暴露期間とコンクリート比抵抗の関係を図-24に示す。

図-24a)に示す暴露期間と復極量の関係から、通電を開始した半年後の復極量の最小値以外は、表-17に示す防食判定基準である100mV以上の復極量を満足していることがわかる。暴露期間中の復極量の平均値は、200~500mVの範囲にあることを考えると十分な防食効果があったも

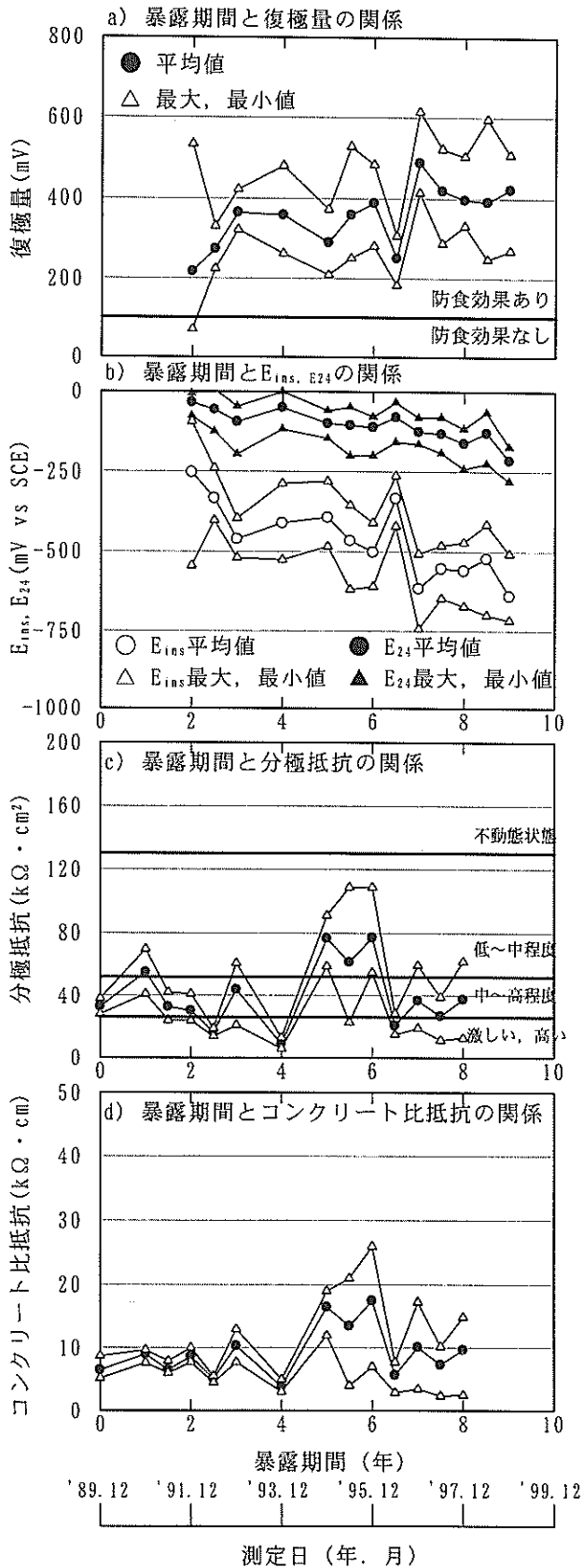


図-24 「電気防食-海水」の電気化学的測定

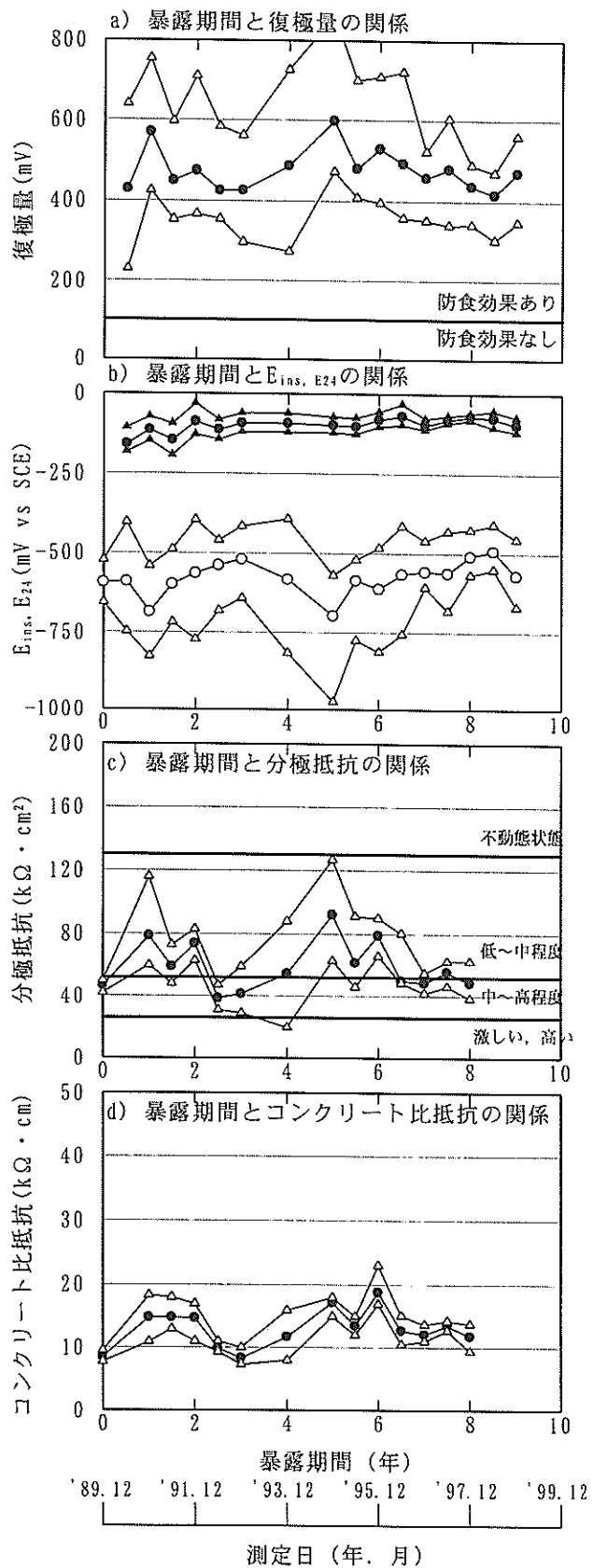


図-25 「電気防食-海水」の電気化学的測定



のと推定される。

図-24b)に示す暴露期間と $E_{ins} \cdot E_{24}$ の関係から、 $E_{ins}$ は時間の経過と共に卑な電位に移行している。この理由は、電流印加により鋼材表面のさびは徐々に還元されたこと<sup>19)</sup>、電気泳動により鋼材-コンクリート界面で水分が増加し酸素の透過性が低下した<sup>20)</sup>等の影響が考えられる。また、 $E_{24}$ も時間の経過と共に卑の電位に移行している傾向が見られる。この理由は、3.1(2)b)大型はり供試体の電気化学的測定で述べる。

図-24c)に示す暴露期間と分極抵抗の関係から、分極抵抗の平均値は $20 \sim 80 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ の範囲にあることがわかる。表-19に示す分極抵抗による腐食速度の基準から判断すると、本供試体は「低から中、あるいは中から高程度の腐食速度」の領域にあり、防食効果がないことを示し、電位シフト基準の結果とは矛盾していることになる。この理由のひとつとしては、前述したように電流印加に伴い鋼材-コンクリート界面の状態が無防食供試体と異なったことが考えられる。

図-24d)に示す暴露期間とコンクリート比抵抗の関係から、暴露期間中のコンクリート比抵抗は $10 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ 以下の時期が多く、時間の経過による著しい変化は見られなかった。

## ②「電気防食-屋内」

暴露期間と復極量の関係、暴露期間と $E_{ins} \cdot E_{24}$ の関係、暴露期間と分極抵抗の関係、暴露期間とコンクリート比抵抗の関係を図-25に示す。

図-25a)に示す暴露期間と復極量の関係から、常時防食判定基準である $100 \text{ mV}$ 以上の復極量を満足していること

がわかる。暴露期間中の復極量の平均値が $400 \sim 600 \text{ mV}$ の範囲にあることを考えると、十分に防食効果があったものと推定される。

図-25b)に示す暴露期間と $E_{ins} \cdot E_{24}$ の関係から、 $E_{ins}$ は常時 $-500 \sim -700 \text{ mV}$  (以下 $E_{ins}$ の値は、vs.SCEの値を示す)の値を示していることがわかる。「電気防食-海水」は、 $E_{ins}$ が時間の経過に伴い変化していたが、本供試体ではその傾向が見られなかった。これまでの報告<sup>21),22)</sup>によれば、通電時の電位は、コンクリートの状態(含水状態、塩化物の有無、ひび割れ、豆板など)、鋼材の状態(さびの有無、鋼材表面のアノード・カソード比など)等の影響を受けることが明らかとされている。本供試体は、これらの変動が小さいため、結果として $E_{ins}$ の変動が小さかったものと考えられる。

図-25c)に示す暴露期間と分極抵抗の関係から、本供試体の分極抵抗は、「電気防食-海水」同様、小さい結果となった。

図-25d)に示す暴露期間とコンクリート比抵抗の関係から、暴露期間中のコンクリート比抵抗は、 $10 \sim 20 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ で、「電気防食-海水」に比べると若干大きい結果となった。この理由は、「電気防食-屋内」に比べるとコンクリートの含水率が低かったこと、塩化物イオン含有量が異なること等によるものと考えられる。

## c) PC鋼材の腐食状況

小型はり供試体の外観目視調査の結果、PC鋼材の腐食によるコンクリートのひび割れ、浮き・剥離は全ての供試体で認められなかった。載荷試験終了後にコンクリートから取り出した各供試体のPC鋼材の腐食状況を図-26

暴露3ヶ月

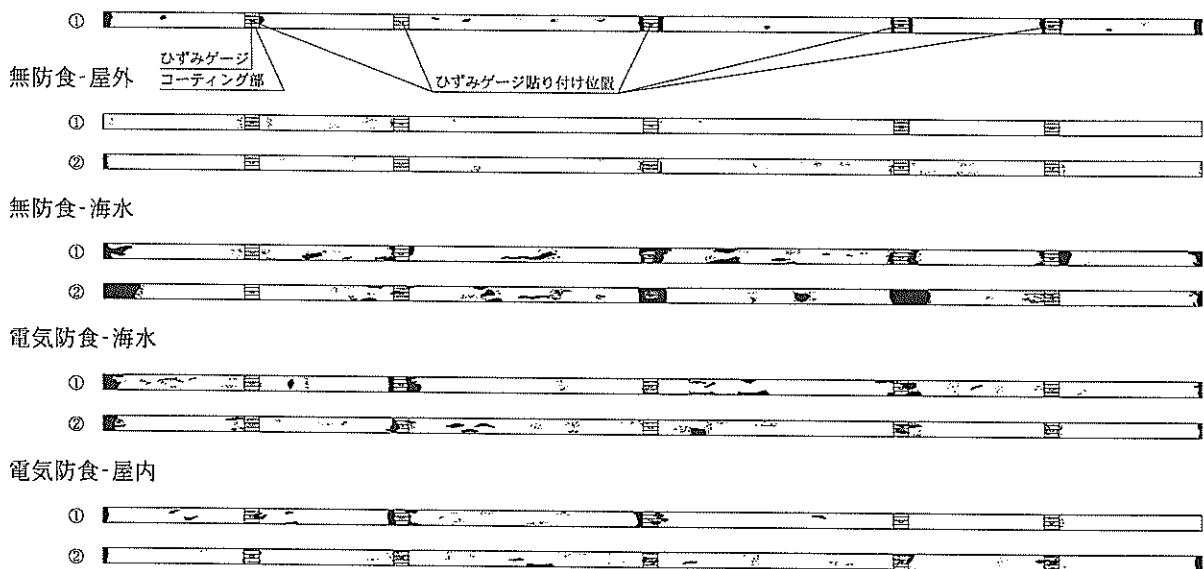


図-26 内部鋼材の腐食状況

黒色部: 腐食発生

に示す。腐食状況調査後に測定した暴露期間と腐食面積率の関係を図-27に示す。PC鋼材には、鋼材のひずみを測定することを目的にひずみゲージを貼り付けていたので、ゲージ貼り付け位置も合わせて示す。

「電気防食-屋内」は、供試体製作から電流印加までに3ヶ月の養生期間があった。その間に腐食が発生する可能性が考えられたので、同一条件下で別途供試体を製作し、暴露3ヶ月での腐食状況、腐食面積率を測定した（本供試体を「暴露3ヶ月」と呼ぶ）。

図-26に示す鋼材の腐食状況から、「暴露3ヶ月」は、ひずみゲージ貼り付け部近傍に腐食が生じていることがわかる。この理由は、コンクリート製作時に混入した塩化物イオンにより、ひずみゲージ貼り付け位置のコーティングとPC鋼材の界面に腐食電池が形成されたことによるものと考えられる。

「無防食-屋外」は、一部に浮き錆が生じている程度であった。この傾向は、電気化学的測定の判定と合致している。10年暴露後の腐食面積率は3.6%であり、暴露前に比べて腐食面積の増加が小さいことが確認された。

「無防食-海水」は、「暴露3ヶ月」と同様に、ひずみゲージ貼り付け部近傍に腐食が集中していることがわかる。場所によっては、コーティング内部に腐食が生じていた。コーティング内部に腐食が生じた理由は、プレストレス導入、解放時にコーティングがはがれたこと、リード線を介して海水が浸入した等の理由によるものと考えられる。ゲージ貼り付け部近傍、コーティング内部には、断面欠損を伴う腐食が生じている箇所が確認された。

「電気防食-海水」も、ゲージ貼り付け部近傍、コーティング内部に腐食が生じていることが確認できた。この理由は、電気防食を開始する前に無防食の状態が1年半あったこと、コーティング部には防食電流が回らなかった

こと等の理由が考えられる。

一方、図-27示す暴露期間と腐食面積率の関係から電気防食を開始してからの腐食面積の増加は非常に小さく、電気防食による防食効果が確認できた。

「電気防食-屋内」も同様に、ゲージ貼り付け部近傍に腐食が生じていることを確認した。しかし、「暴露3ヶ月」と比較すると、腐食の程度に著しい変化がないことが確認された。鋼材の腐食状況を確認した結果、腐食は軽微であり、電気防食による防食効果が確認できた。

今回、電気防食を施した供試体は、分極抵抗の測定から判断すると腐食が進行している結果となったが、実際は腐食が停止しており、今回の試験の範囲では、電気防食を施した供試体の腐食速度を分極抵抗により評価することはできなかった。

#### d) エポキシ樹脂塗装鉄筋の腐食状況

外観目視調査の結果、図-3の上面に配置したエポキシ樹脂塗装鉄筋に沿った腐食によるひび割れが、「無防食-

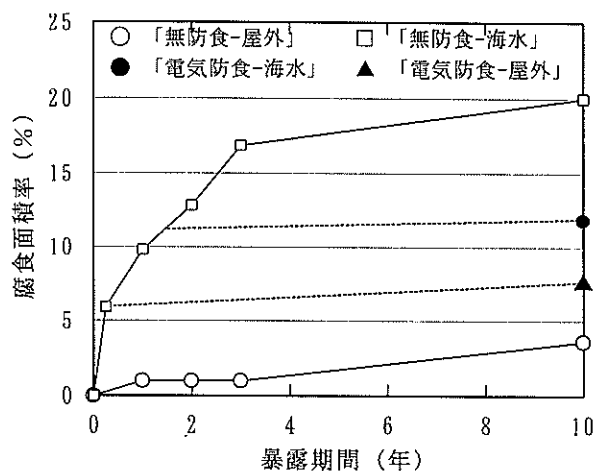


図-27 暴露期間と腐食面積率の関係

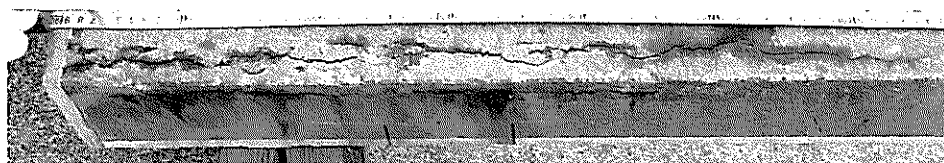


写真-2 腐食ひび割れ状況

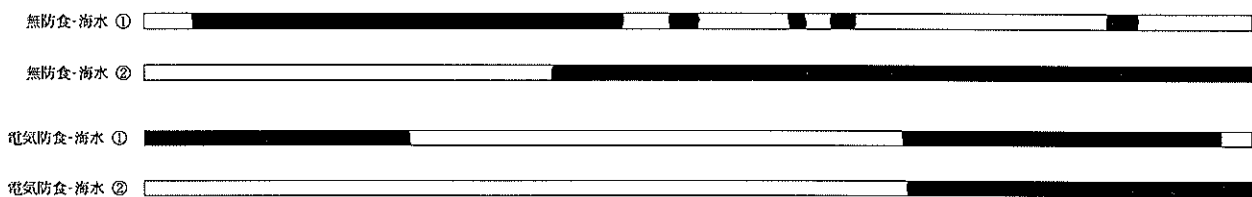


図-28 エポキシ樹脂塗装鉄筋の腐食状況

黒色部：腐食発生

表-20 エポキシ樹脂塗装鉄筋分析結果

供試体名	腐食面積率 (%)	試料	DSC	FE-SEM	XMA	実体顕微鏡
			ガラス転移温度 Tg(°C)	断面形状観察	塩素・ナトリウムの検出	エポキシ樹脂塗膜厚さ (mm)
無防食-屋外②	0	1	108.5	エポ/鉄筋は完全密着	検出なし	0.21~0.57
		2	-	エポ/鉄筋は完全密着	-	0.14~0.28
無防食-海水②	64.1	1	108.4	エポ/鉄筋に隙間あり、腐食による鉄筋表面にうろこ状の筋を観察	エポ/鉄筋に隙間に、塩素ナトリウム検出	0.14~0.21
		2	-	エポキシ樹脂は剥離	-	-
電気防食-海水②	30.8	1	108.5	エポ/鉄筋に隙間あり、腐食による鉄筋表面にうろこ状の筋を観察	エポ/鉄筋に隙間に、塩素ナトリウム検出	0.25~0.61
		2	-	エポキシ樹脂は剥離	-	-
電気防食-屋内②	0	1	108.4	エポ/鉄筋は完全密着	検出なし	0.21~0.57
		2	-	エポ/鉄筋は完全密着	-	0.21~0.57

海水」、「電気防食-海水」の計4体に認められた。

外観目視調査によるひび割れ発生状況を写真-2に、腐食が生じていたエポキシ樹脂塗装鉄筋の腐食状況を図-28に示す。

「無防食-屋外」、「無防食-海水」、「電気防食-海水」、「電気防食-屋内」のそれぞれ1体からエポキシ樹脂塗装鉄筋を取り出して行った分析試験の結果を表-20に示す。

被覆樹脂のガラス転移温度の結果、腐食・非腐食による鉄筋被覆樹脂のガラス転移温度には、有意な差は見られなかった。

SEMによる断面形状観察の結果、「無防食-屋外」、「電気防食-屋内」中の鉄筋は、エポキシ樹脂塗膜と鉄筋は密着していたが、「無防食-海水」、「電気防食-海水」中のエポキシ樹脂塗膜と鉄筋間には隙間が見られた。

XMAによる塩素・ナトリウムの検出の結果、エポキシ樹脂塗膜内部には塩素・ナトリウムが検出されなかったが、「無防食-海水」、「電気防食-海水」の鉄筋と塗膜の間には、塩素・ナトリウムが検出された。

以上の結果を考察すると、エポキシ樹脂塗装鉄筋の腐食の原因は、塩素等の腐食促進物質がエポキシ樹脂塗膜を浸透したのではなく、エポキシ樹脂塗膜の剥離により腐食が進行したものと考えられる。

(2) 大型はり供試体

a) 無防食供試体の電気化学的測定

暴露期間と $E_{corr}$ の関係を図-29に示す。

図-29から、時間の経過に伴い $E_{corr}$ は、卑な電位に移行していることがわかる。表-18に示す判定基準から判断すると、本供試体は暴露1年半程度で「90%以上の確率で腐食あり」の領域に移動しており、最終的には-500mV程度の値を示している。以上の結果から、参照電極付近のPC鋼材の腐食は、かなり進行しているものと考えられる。

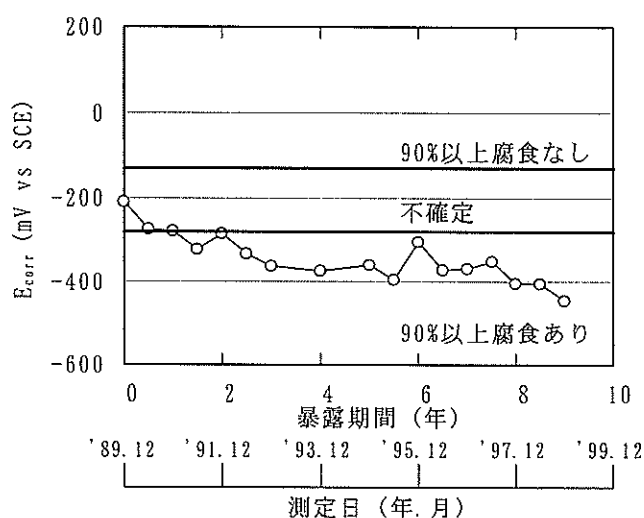


図-29 無防食供試体の電気化学的測定

b) 電気防食供試体の電気化学的測定

① 網状陽極方式

暴露期間と復極量の関係、暴露期間と $E_{ins} \cdot E_{24}$ の関係、暴露期間と通電電流密度の関係を図-30示す。

図-30a)に示す暴露期間と復極量の関係から、網状陽極方式は常に100~300mVの復極量があり、表-17の防食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。

図-30b)に示す暴露期間と $E_{ins} \cdot E_{24}$ の関係から、暴露初期の $E_{ins}$ は-1000mVより卑な電位に推移し、水素発生電位に達していることがわかる。この理由は、鋼材のカソード分極性状がよく、結果として通電電流密度が大きくなったためである。そのため、図-30c)に示すように、暴露半年から、通電電流密度を小さくした。一方、暴露開始1年半から2年に認められる $E_{ins}$ の大きな貴化の現象は、海水散布が約2ヶ月間停止し、コンクリートが乾燥状態になっ

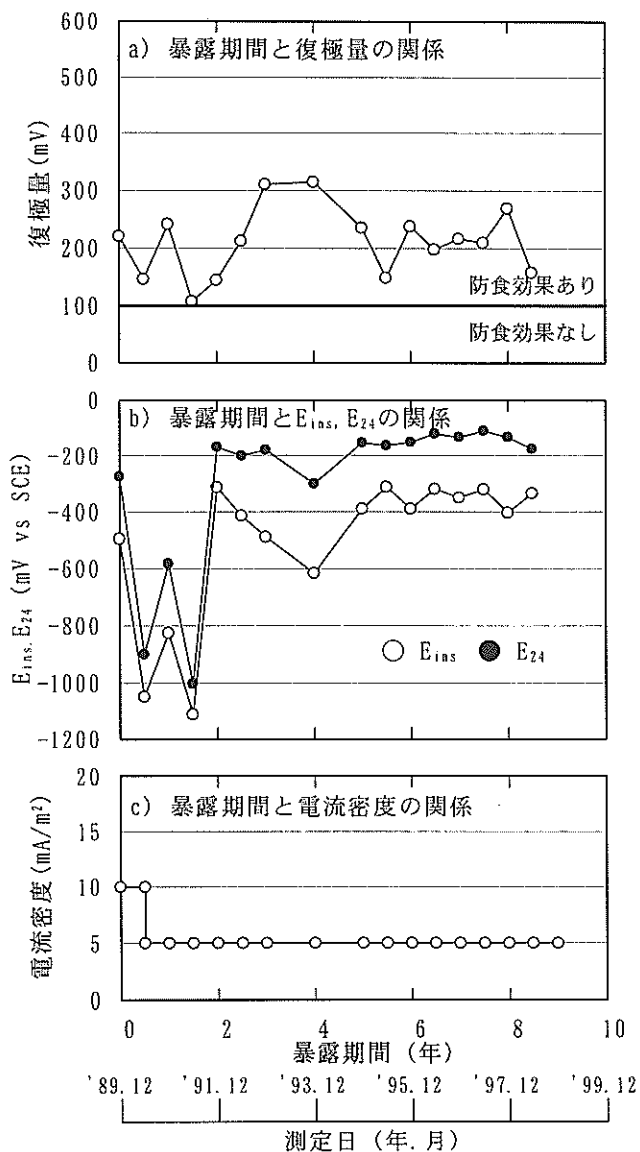


図-30 網状陽極方式の電気化学的測定

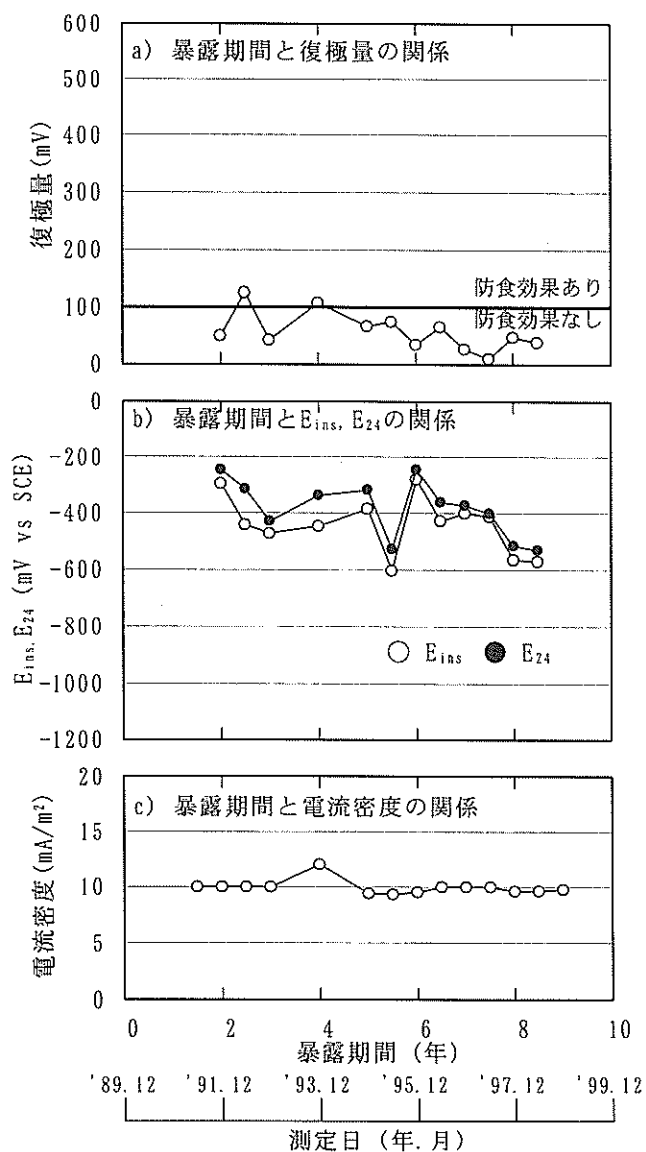


図-31 チタン線方式の電気化学的測定

たことが原因と考えられる。それ以降の $E_{ins}$ は、 $-600\text{mV}$ まで分極したものの、 $-300\sim-400\text{mV}$ の範囲内で推移していた。

②チタン線方式

暴露期間と復極量の関係、暴露期間と $E_{ins}$ ・ $E_{24}$ の関係、暴露期間と通電電流密度の関係を図-31に示す。また、暴露開始時と暴露開始4年後、5.5年後の各チタン線から流れ出した電流の分布を図-32に示す。図-32の①～⑨は、図-8の①～⑨を示す。

図-31a)に示す暴露期間と復極量の関係から、本方式は防食基準である $100\text{mV}$ 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。本方式は、 $\phi 1.5\text{mm}$ の白金メッキチタン線を9本、図-8に示すように配置した方法であるが、図-32に示すように、

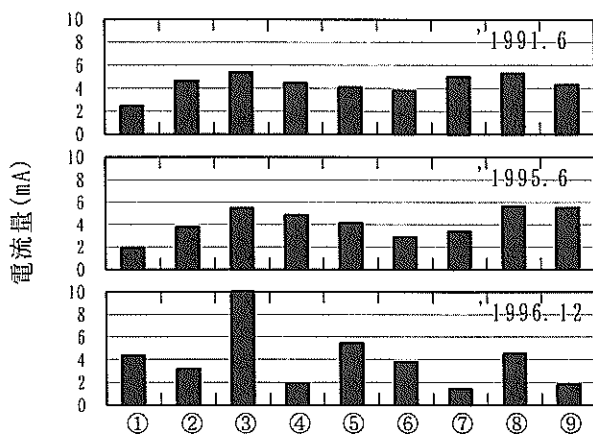


図-32 各チタン線の電流分布

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、陽極材の面積が小さいため、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によるものと考えられる。

### ③亜鉛シート方式

暴露期間と復極量の関係、暴露期間と $E_{ins} \cdot E_{24}$ の関係、暴露期間と通電電流密度の関係を図-33に示す。なお、復極速度についても検討するために、暴露初期における電流遮断時間と復極量の関係を図-34に示す。

図-33a)に示す暴露期間と復極量の関係から、一部防食判定基準である100mVの復極量を満足していない時期がある。しかし、図-33b)に示すように、その時期の $E_{ins}$ が鋼材の防食電位である-770 mVより早であること、図-34に示す復極速度の結果から、その時期(1991年6月、1992年12月)の復極速度が遅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。小型はり供試体のうち、「電気防食-海水」の $E_{24}$ が早に移行している理由も、24時間では鋼材が完全に復極していないことに起因しているものと推定される。

図-33b)に示す暴露期間と $E_{ins}$ の関係から、暴露初期の $E_{ins}$ は、鋼材のカソード分極がよく、亜鉛の $E_{con}$ に近いことがわかる。この理由は、暴露初期の供試体が湿润状態にあり、酸素の拡散が小さいために鋼材がカソード分極しやすかったことに起因しているものと考えられる。

図-33c)に示す暴露期間と通電電流密度の関係から、時期により通電電流密度が変動している。阿部ら<sup>23)</sup>によると、亜鉛シート方式の防食電流密度は、コンクリート表面の含水状態、気温、天候等に影響されることが確認されており、本供試体もこれらの要因が寄与したものと考えられる。

### c) PC鋼材の腐食状況

大型はり供試体の外観目視調査の結果と鋼材腐食状況を図-35～図-38に示す。

鋼材腐食状況は、下フランジの5本について、表-21<sup>24)</sup>に示す鉄筋腐食度の評価基準を参考に、「腐食度Ⅱ、Ⅲ」、「腐食度Ⅳ、Ⅴ」、「断面欠損が1/2以上」の3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-39に示す。

グラフ中の①～⑤は、図-35～図-38の鋼材の①～⑤を示す。

### ①無防食供試体

図-35に、外観目視調査、鋼材腐食状況の結果を示す。

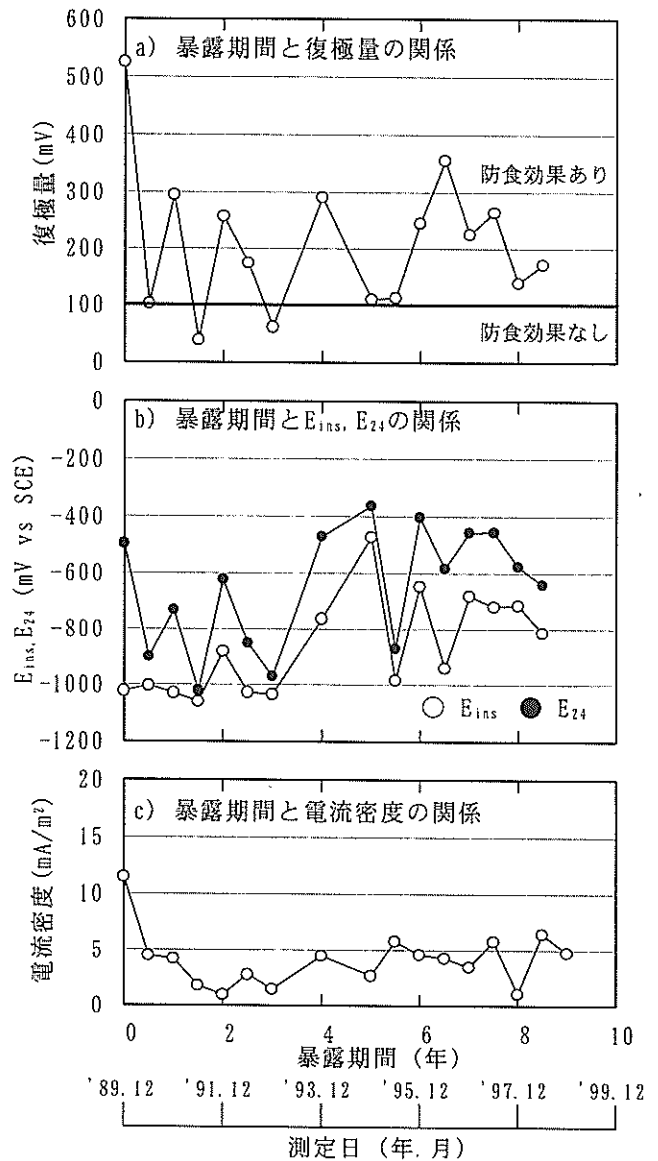


図-33 亜鉛シート方式の電気化学的測定

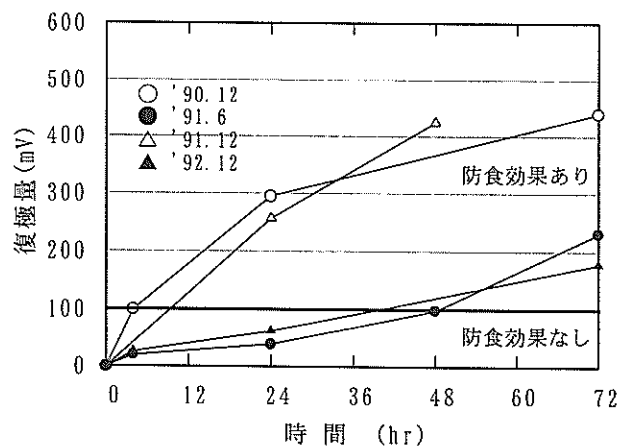


図-34 亜鉛シート方式の復極速度

外観目視調査の一部を写真-3、鋼材腐食状況の一部を写真-5に示す。

外観目視調査の結果、ひび割れが供試体底面、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。

鋼材腐食状況調査の結果、ひび割れ発生箇所、特に錆汁発生箇所等で断面欠損を伴う鋼材腐食が認められた。その傾向は、下フランジ隅角部の鋼材(図-35の①、⑤)に多く見られた。隅角部の鋼材は、一部完全に断面が欠損した箇所も確認された。

②網状陽極方式

図-36に、外観目視調査、鋼材腐食状況の結果を示す。鋼材腐食状況の一部を写真-6に示す。

外観目視調査の結果、陽極材のコーナー部にひび割れが認められた。また、供試体の一部は、浮きが生じていた。しかし、供試体そのものの劣化は全く生じていなかった。

鋼材腐食状況調査の結果、図-36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、電気防食による鋼材の防食効果が確認できた。下フランジ中央部の鋼材(図-36の③)が、図-39からもわかるように、他の鋼材に比べて腐食面積が大きい結果となった。この理由は、小型はりと同様に、③の鋼材はひずみゲージを5ヶ所貼り付けたが、はり製作から電気防食を開始するまでの3ヶ月の間に、ひずみゲージ貼り付け部のコーティングと鋼材の界面に腐食電池が形成されたことによるものと考えられる。

③チタン線方式

図-37に、外観目視調査、鋼材腐食状況の結果を示す。外観目視調査の一部を写真-4、鋼材腐食状況の一部を写

真-7に示す。

外観目視調査の結果、供試体には腐食による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定される。また、図-37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。この理由は、前述したように、過大な電流を印加したチタン線は、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の低下による劣化が生じたものと考えられる。

鋼材腐食状況調査の結果、図-37、図-39からわかるように、無防食供試体と同様に下フランジ隅角部の鋼材(図-37の①、⑤)に腐食傾向が認められた。特に、腐食ひび割れ発生箇所に断面欠損を伴う腐食が生じていた。電位シフトが100mVに達していなければ、防食効果がないことを示す結果となった。

今回提案したチタン線方式は、電流分布が悪く十分な防食効果が期待できず、さらなる検討が必要である。

④亜鉛シート方式

図-38に、外観目視調査、鋼材腐食状況の結果を示す。

表-21 鉄筋腐食度の評価基準<sup>24)</sup>

腐食度	評価基準	図面
I	腐食がなく黒皮の状態	
II	鉄筋表面に僅かな点錆が生じている状態	
III	鉄筋表面に薄い浮き錆が拡がって生じており、コンクリートに錆が付着している状態	
IV	やや厚みがある膨張性の錆が生じているが、断面欠損は比較的少ない状態	
V	鉄筋全体にわたって著しい膨張性の錆が生じており、断面欠損がある状態	
	断面欠損が1/2以上	

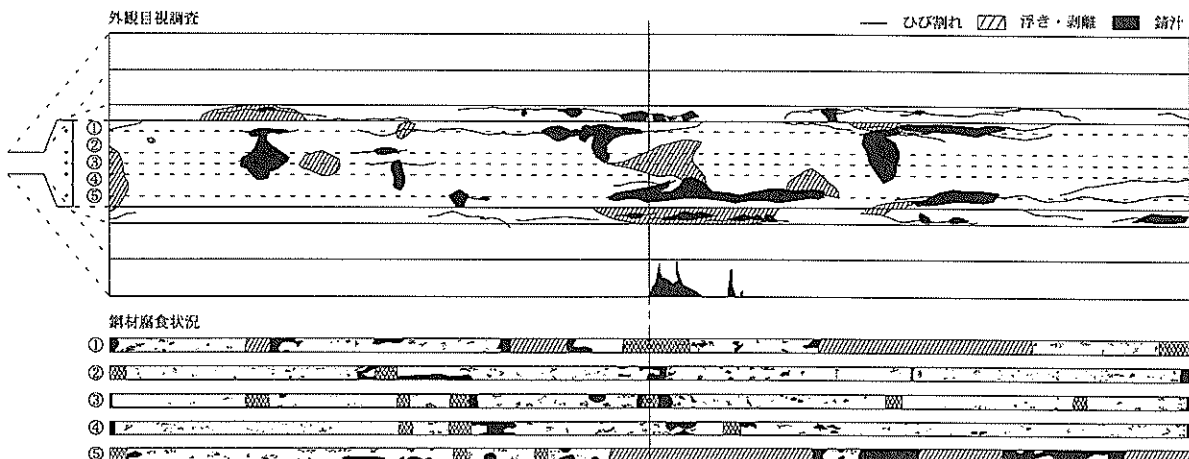


図-35 無防食供試体の外観目視調査・内部鋼材の腐食状況

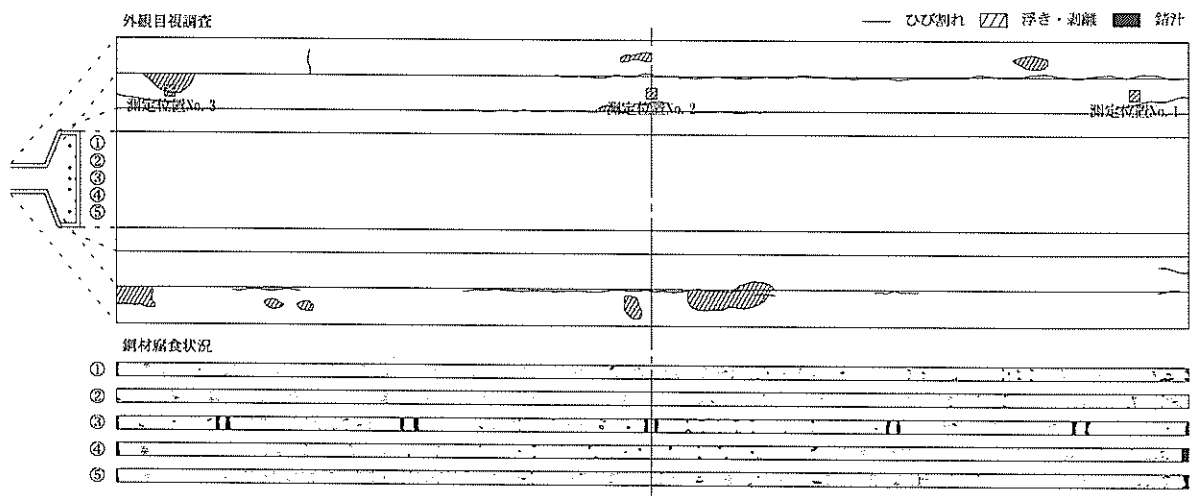


図-36 網状陽極方式の外観目視調査・内部鋼材の腐食状況

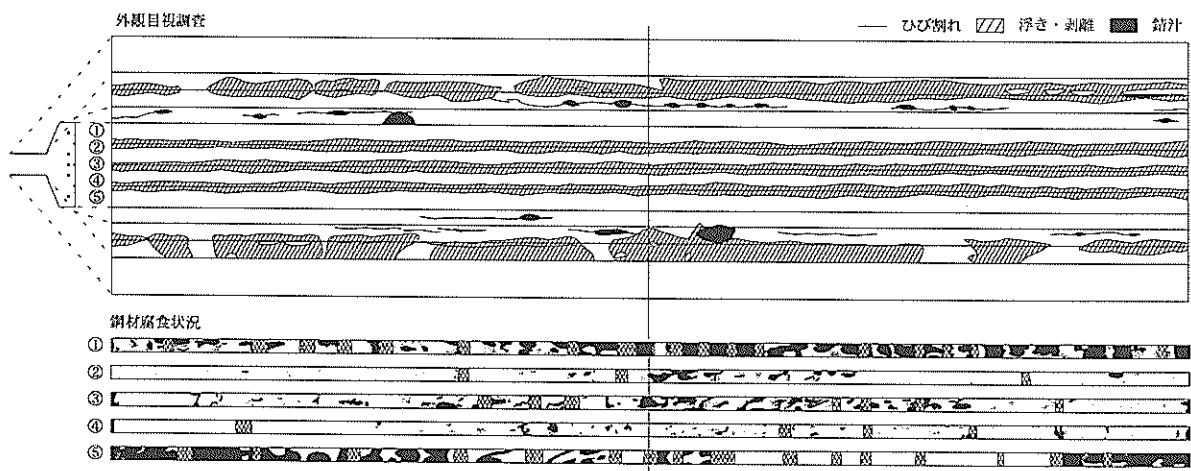


図-37 チタン線方式の外観目視調査・内部鋼材の腐食状況

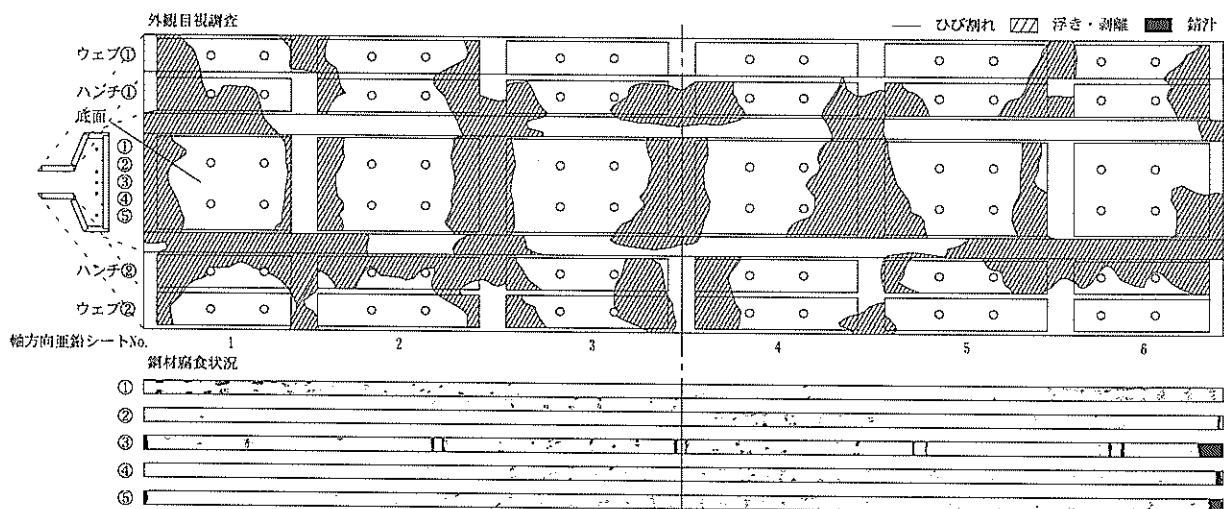


図-38 亜鉛シート方式の外観目視調査・内部鋼材の腐食状況

鋼材腐食状況の一部を写真-8に示す。

外観目視調査の結果、亜鉛シートと供試体間に浮きが生じている箇所が確認された。しかし鋼材腐食状況調査の結果、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確認できた。電気防食板に浮きが生じている箇所と亜鉛シートの消耗量についての考察は3.5で行う。

### 3.2 PC 鋼材の機械的性質に関する評価

3.1のPC鋼材の防食効果に関する評価から、適切な工法、管理のもとで電気防食を施した供試体は、鋼材の防食効果が認められた。ここでは、長期にわたる電流印加がPC鋼材の機械的性質に及ぼす影響、腐食したPC鋼材の機械的性質について考察する。

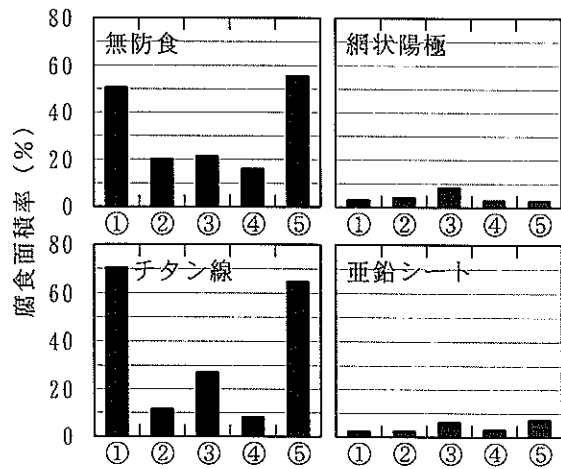


図-39 大型はり供試体の腐食面積率



写真-3 無防食供試体の外観目視調査

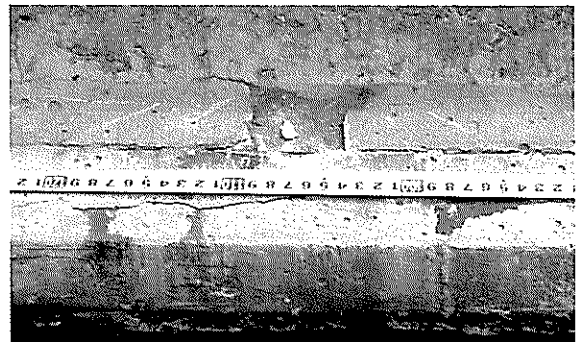


写真-4 チタン線方式の外観目視調査

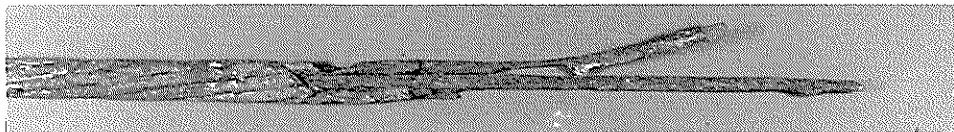


写真-5 無防食供試体の鋼材の腐食状況

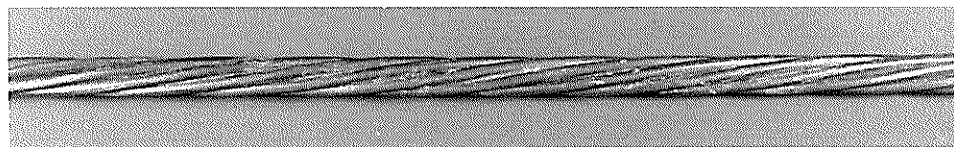


写真-6 網状陽極方式の鋼材の腐食状況



写真-7 チタン線方式の鋼材の腐食状況

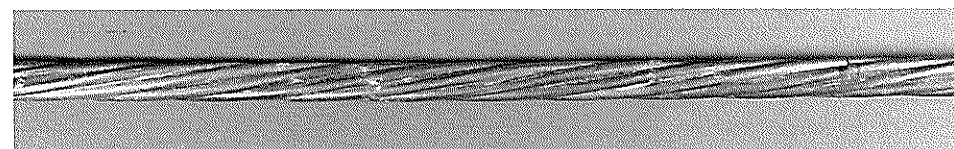


写真-8 亜鉛シート方式の鋼材の腐食状況



(1) 小型はり供試体のPC鋼材の引張試験

小型はり供試体のPC鋼材の引張試験結果を表-22に示す。暴露期間と引張荷重比、暴露期間と降伏荷重比、暴露期間と伸び比の関係を図-40に示す。ここで、引張荷重、降伏荷重、伸びは、規格値<sup>4)</sup>に対する比率である。「無防食-海水」の10年暴露時の降伏荷重は、腐食による断面欠損が認められたので計測しなかった。

図-40a)に示す暴露期間と引張荷重比の関係から、無防食状態で暴露した「無防食-海水」は、時間の経過に伴い引張荷重が段階的に低下している傾向が見られる。暴露10年後には、鋼材が腐食による断面欠損部で破断しており、規格値を満足しない結果となった。一方、暴露途中から電気防食を施した「電気防食-海水」は、暴露10年後も規格値以上を満足しており、電気防食は鋼材の機械的性質にも悪影響を及ぼさないことが確認できた。

図-40b)に示す暴露期間と降伏荷重比の関係から、「無

防食-海水」は、引張荷重と同様に暴露10年後も規格値以上を満足していた。

図-40c)に示す暴露期間と伸び比の関係から、「無防食-海水」は、既往の知見<sup>25),26)</sup>と同様に、鋼材腐食により伸びは規格値に対して半分程度の値に低下した。「電気防食-海水」も、「無防食-海水」に比べると伸び性能の低下は小さいが、規格値を満足しない結果となった。この理由は、本供試体の電気防食を開始したのは暴露開始1年半以降であり、それ以前に腐食が進行していたこと、鋼材の破断位置は、ひずみゲージ貼り付け位置のコーティング内部であり、その箇所に防食電流が入らなかったこと等が考えられる。

(2) 大型はり供試体のPC鋼材の引張試験

大型はり供試体のPC鋼材の引張試験結果を表-23に示す。各供試体のPC鋼材の引張荷重比、降伏荷重比、伸び比の結果を図-41に示す。ここで、引張荷重、降伏荷重、

表-22 小型はり供試体のPC鋼材の引張試験結果

	暴露 期間 (年)		引張荷重 (kN)		比率	降伏荷重 (kN)		比率	伸び (%)		比率
			各試験片	平均値		各試験片	平均値		各試験片	平均値	
			規格値		88.8		1.00	75.5		1.00	3.5
無防食-海水	1	①	94.7	92.4	1.04	87.8	88.5	1.17	-	-	-
		②	90.0			89.2					
	2	①	94.0	94.0	1.06	86.9	86.9	1.15	3.9	3.9	1.11
		③	①	89.8	89.8	1.01	85.8	85.8	1.14	2.8	2.8
	10	①	91.0	86.5	0.97	-	-	-	2.7	2.1	0.59
		②	82.0			1.4					
電気防食-海水	10	①	92.3	92.5	1.04	86.9	86.4	1.14	3.3	3.2	0.91
		②	92.6			85.8			3.1		

表-23 大型はり供試体のPC鋼材の引張試験結果

	鋼材 位置	引張荷重 (kN)	比率	降伏荷重 (kN)	比率	伸び (%)	比率
規格値	-	88.8	1.00	75.5	1.00	3.5	1.00
無防食	②	29.0	0.33	-	-	0.8	0.23
	③	30.0	0.34	-	-	1.1	0.31
	④	31.0	0.35	-	-	0.7	0.20
	⑤	89.7	1.01	83.4	1.10	2.9	0.83
	①	95.3	1.07	85.0	1.13	6.1	1.74
網状陽極	②	102.0	1.15	95.8	1.27	3.9	1.11
	④	72.0	0.81	-	-	1.2	0.34
	⑤	95.7	1.08	88.5	1.17	5.8	1.66
	①	21.0	0.24	-	-	0.5	0.14
チタン線	②	91.9	1.03	82.7	1.10	5.0	1.43
	④	30.0	0.34	-	-	0.7	0.20
	⑤	25.0	0.28	-	-	0.4	0.11
	①	96.0	1.08	87.7	1.16	5.5	1.57
亜鉛シート	③	88.0	0.99	-	-	1.8	0.51
	④	102.0	1.15	93.9	1.24	5.8	1.66
	⑤	91.8	1.03	87.6	1.16	3.3	0.94

伸びは、小型はり同様、規格値に対する比率である。図-41に示す①～⑤は、図-35～図-38に示す鋼材①～⑤を示す。

図-41a)に各供試体の引張荷重比を示す。網状陽極方式、亜鉛シート方式は、鋼材を取り出すときに傷が生じた試験片(網状陽極方式の④、亜鉛シート方式の③)を除けば、規格値以上の荷重を有しており、電気防食は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、すべて腐食による断面欠損部で破断しており、引張荷重も規格値の3割程度と著しく低下した。チタン線方式も、無防食供試体と同様、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。

図-41b)に各供試体の降伏荷重比を示す。降伏荷重の測定は、測定器の制約から比較的健全な鋼材に絞って行った。試験を行ったPC鋼材は、全て規格値以上の荷重を満足していた。

図-41c)に各供試体の伸び比を示す。伸びに関しても、網状陽極方式および亜鉛シート方式は、傷のついた鋼材(網状陽極方式の②、④、亜鉛シート方式の③、⑤)を除き、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線方式は、規格値に対して2割

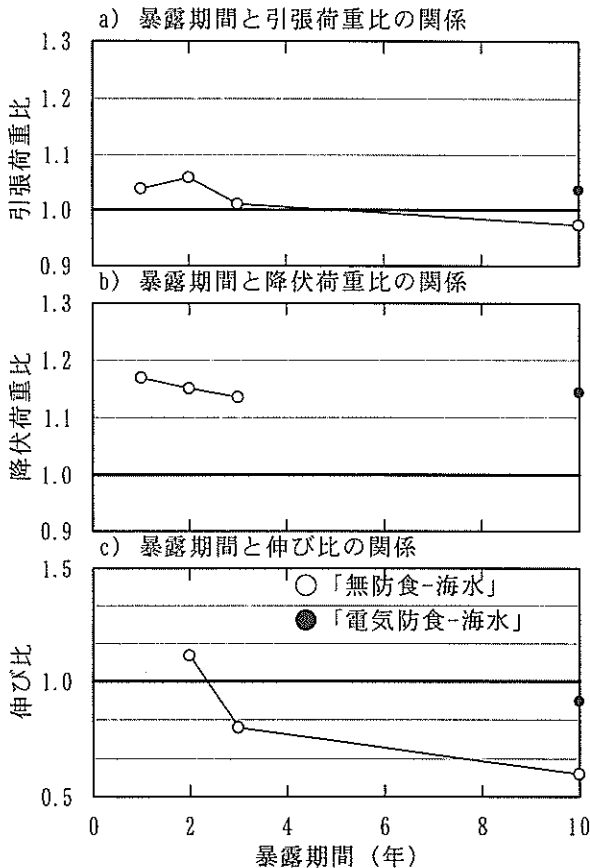


図-40 小型はり供試体のPC鋼材引張試験

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、電気防食により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線方式、および無防食供試体は、PC鋼材の機械的性質が著しく低下した。

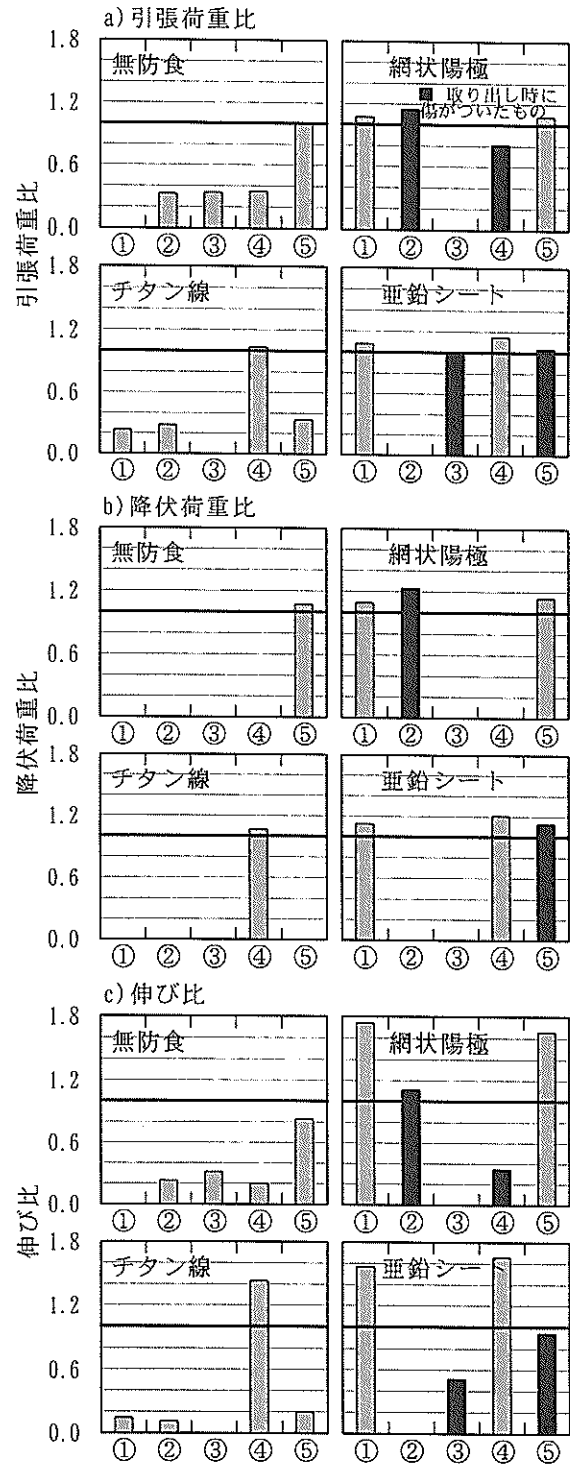


図-41 大型はり供試体のPC鋼材引張試験

(3) 水素脆化によるPC鋼材の機械的性質

これまでの研究成果によれば、鋼材の電位が-1000mVより卑になると水素ガスが発生すること、水素ガス発生に起因した遅れ破壊は、PC鋼材の断面収縮率(絞り)に最も大きい影響を与えること、外的要因ではpHの影響を大きく受けると述べている。

今回の実験では、図-30a)に示す電気化学的測定から、網状陽極方式の暴露初期の $E_{ms}$ は、-1000mVより卑な値を示しており、水素発生を引き起こしているものと考えられる。しかし、PC鋼材の引張試験から、本試験片の機械的性質、破断面に変化は生じていないことが確認された。

また、既往の研究<sup>1),27),28)</sup>によれば、水素脆化は、過防食時の鋼材電位、その状況にさらされた時間により異なるが、水素発生環境の回避により水素脆化を防止することが可能であると述べている。暴露初期で水素発生を引き起こしていたと考えられる網状陽極方式も、その後の水素発生環境を回避したことによりPC鋼材の機械的性質に変化は生じなかったものと考えられる。

3.3 PC はりの力学的挙動に関する評価

3.2のPC鋼材の機械的性質に関する評価から、電流印加がPC鋼材の機械的性質に悪影響を及ぼさないことが確認された。一方、長期間にわたる電流印加は、PC鋼材とコンクリートの付着性状の低下を引き起こす可能性が示唆される。ここでは、はり部材としての性能を確認することを目的に、静的載荷試験の結果からPCはりの力学的挙

動について考察する。

(1) 小型はり供試体

a) 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-24に示す。「無防食-屋外」、「無防食-海水」は、暴露開始1,2,3年目でも載荷試験を行った。その結果も合わせて示す。表-24に示す計算値は、以下の仮定に基づいて計算した。

ひび割れ発生荷重は、全断面有効とし、部材の最下縁応力がコンクリートの引張強度に達した時にひび割れが発生するものと仮定した。終局荷重は、コンクリート標準示方書<sup>29)</sup>に準拠して計算した。計算に用いた材料の力学的性質を表-25に示す。

コンクリートは、供試体から採取したコアの圧縮強度のばらつきが大きかったため、供試体製作から材齢28日で実施した管理供試体の実験値を用いた。PC鋼材は、今回実施したPC鋼材の引張試験結果(表-22, 23)の最大値を用いた。

暴露期間とひび割れ発生荷重比の関係、暴露期間と終局荷重比の関係を図-42に示す。ひび割れ発生荷重比、終局荷重比は、同一条件下、2体の平均値を示している。

図-42a)に示す暴露期間とひび割れ発生荷重比の関係から、10年暴露供試体は、ひび割れ発生荷重比で0.9~1.0の範囲にあることがわかる。ひび割れ発生荷重は、1kNピッチで目視にて観察したが、1kNの誤差が約8% (1/11.8)

表-24 小型はり供試体のひび割れ発生荷重・終局荷重

	暴露期間 (年)	ひび割れ発生荷重 (kN)		比率	終局荷重 (kN)		比率	破壊 モード
		各供試体	平均値		各供試体	平均値		
基準	0	11.8	11.8	1.00	26.1	26.1	1.00	コンクリート圧壊
無防食-屋外	1	11.8	11.3	0.96	22.5	24.6	0.94	コンクリート圧壊
		10.8			26.6			
	2	10.8	10.8	0.92	26.4	26.9	1.03	
		10.8			27.3			
	3	10.8	10.8	0.92	25.3	25.3	0.97	
10	11.8	11.3	0.96	24.1	23.5	0.90		
	10.8			22.8				
無防食-海水	1	9.8	9.8	0.83	27.7	27.2	1.04	コンクリート圧壊
		9.8			26.6			
	2	10.8	10.3	0.87	27.3	27.4	1.05	
		9.8			27.4			
	3	9.8	9.8	0.83	25.5	25.5	0.98	
	10	11.8	11.3	0.96	22.1	22.1	0.84	
		10.8			22.0			
電気防食-海水	10	11.8	11.8	1.00	23.6	23.6	0.90	
		11.8			23.6			
電気防食-屋内	10	10.8	10.8	0.92	27.6	27.6	1.06	
		10.8			27.5			
計算値	-	8.6	8.6	0.72	19.2	19.2	0.74	コンクリート圧壊

表-25 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 $f_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 $f_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 $E_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	有効緊張力 $\sigma_{pc}$ (N/mm <sup>2</sup> )	降伏強度 $f_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 $f_u$ (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 $E_s$ (N/mm <sup>2</sup> )
小型はり	65.3	4.4	28050	900	1856	1967	192000
大型はり				800			

に相当することを考えると、今回のばらつきは電流の印加によるものより測定精度によるものと考えられる。

また実験値は、計算値以上の荷重であることを考えると、電流印加に起因したひび割れ発生荷重の低下はないものと推定される。

図-42b)に示す暴露期間と終局荷重比の関係から、「電気防食-屋内」は、終局荷重比で1.0以上あり、電気防食が力学的挙動の低下を招くことはないことがわかる。一方、「電気防食-海水」は、暴露開始1年半以降電気防食を行ったが、終局荷重が1割程度低下した。この理由は、3.2(1)で述べたように、暴露開始から1年半無防食状態であったためにPC鋼材が腐食して機械的性質が若干低下していること、エポキシ樹脂塗装鉄筋の腐食ひび割れに伴う圧縮側コンクリートが劣化したこと等が考えられる。

「無防食-海水」も、鋼材の腐食に伴うPC鋼材の機械的性質の低下により「電気防食-海水」以上に荷重が低下した。

b) 変形性能

各供試体の荷重-変位の関係を図-43に示す。「無防食-屋内」、「無防食-海水」は、暴露期間がはりの変形性能に及ぼす影響を確認するため、同一条件下で暴露した1,2,3年目の結果も合わせて示す。「電気防食-海水」は、「無防食-海水」の1,2,3年目の結果、および暴露10年目の結果を示す。

各供試体とも、時間の経過に伴うはりの力学的挙動に明確な変化は見られなかった。電気防食を施した供試体(図-43c, d)の変形性能にも変化が見られないことを考えると、長期間にわたる電流印加がPCはりの力学的挙動に悪影響を及ぼすことはないものと推定される。

c) ひび割れ幅・ひび割れ分散性状

コンクリートと鋼材の付着性状が低下した場合、ひび割れの分散性状が低下し、ひび割れがある箇所に集中する傾向が見られる。ここでは、静的載荷試験中に発生したひび割れ、ひび割れ幅からコンクリートと鋼材の付着性状について考察する。

基準供試体、および暴露10年後に実施した各供試体の載荷試験時に発生したひび割れ分散性状を図-44に、等曲げ区間内に発生した荷重と最大ひび割れ幅(図-44の太線部)の関係を図-45に示す。ここでは、同一種類2体中1体

の結果を示す。

図-44に示すひび割れ分散性状から、各供試体とも、基準供試体とほぼ等しいひび割れ分散性を示していることがわかる。

図-45に示す荷重とひび割れ幅の関係から、電流印加が荷重とひび割れ幅の関係に変化を引き起こしていないことがわかる。

以上から、これまでに印加してきた電流範囲内では、コンクリートと鋼材の付着性状に変化はなく、電気防食がはりの力学的挙動に悪影響を及ぼすことはないものと考えられる。

(2) 大型はり供試体

a) 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-26に示す。

計算値は、小型はり供試体で算出した方法と同一である。計算は、表-25に示す値を用いた。

図-46a)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い。

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、3.1(2)で述べたように、フランジ隅角部の鋼材(図-35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、計算値以上であり、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。

図-46b)に示す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、フランジ隅角部の鋼材の破断により、残り3本の鋼材(図-35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

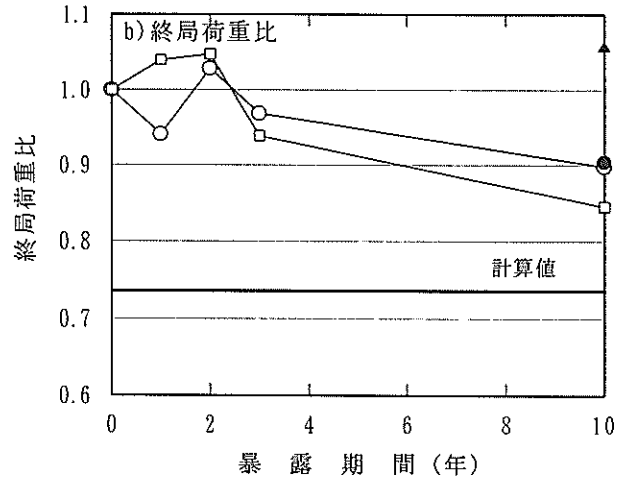
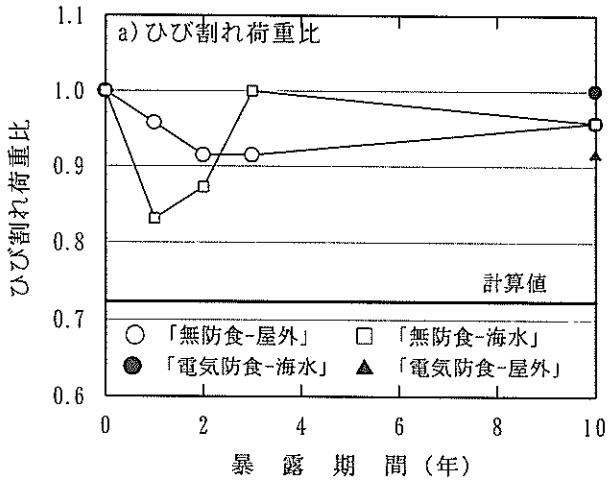


図-42 暴露期間とひび割れ荷重比・終局荷重比の関係 (小型はり供試体)

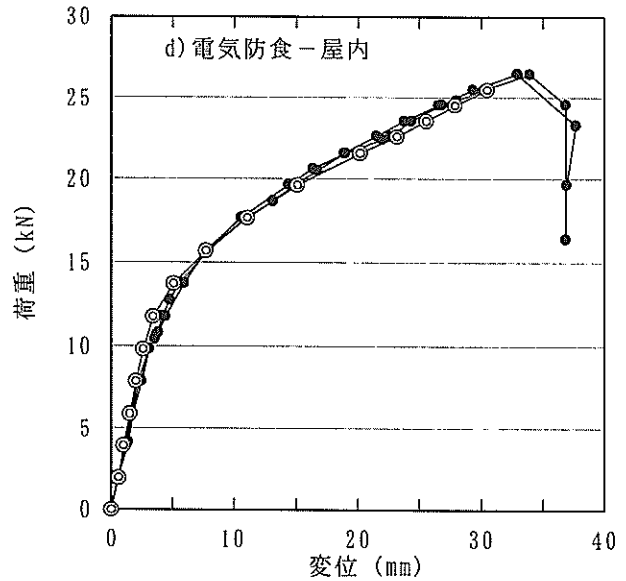
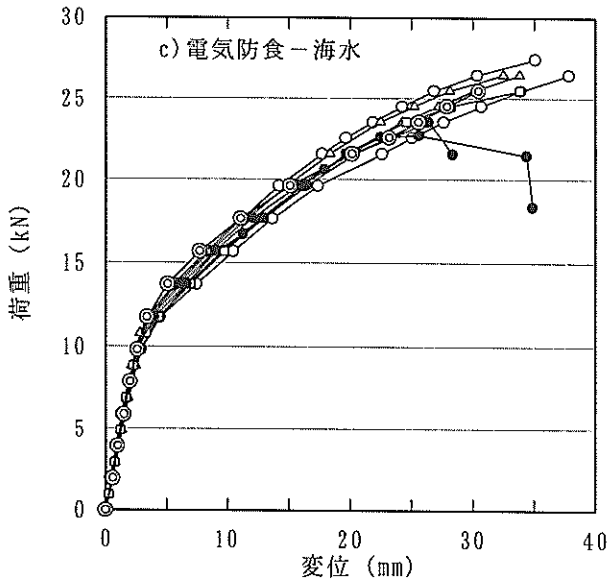
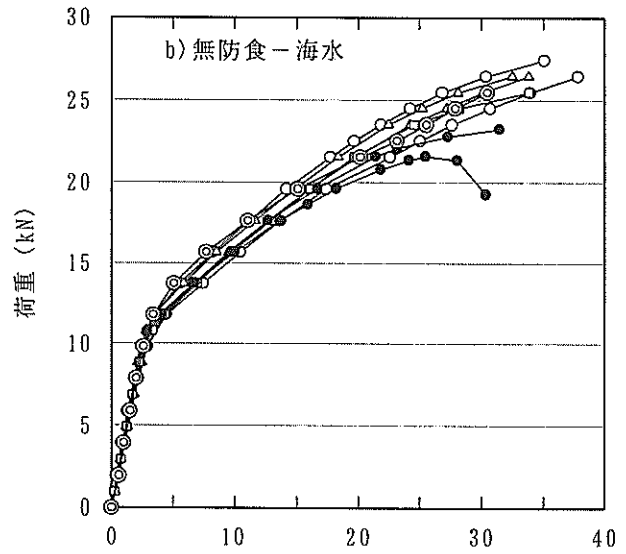
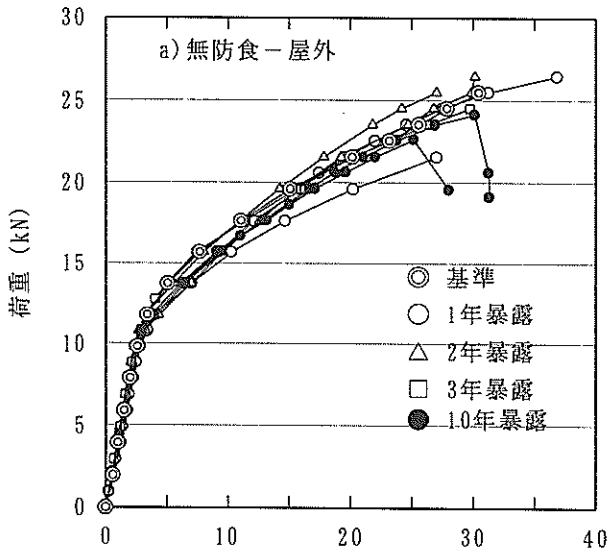


図-43 荷重-変位の関係 (小型はり供試体)

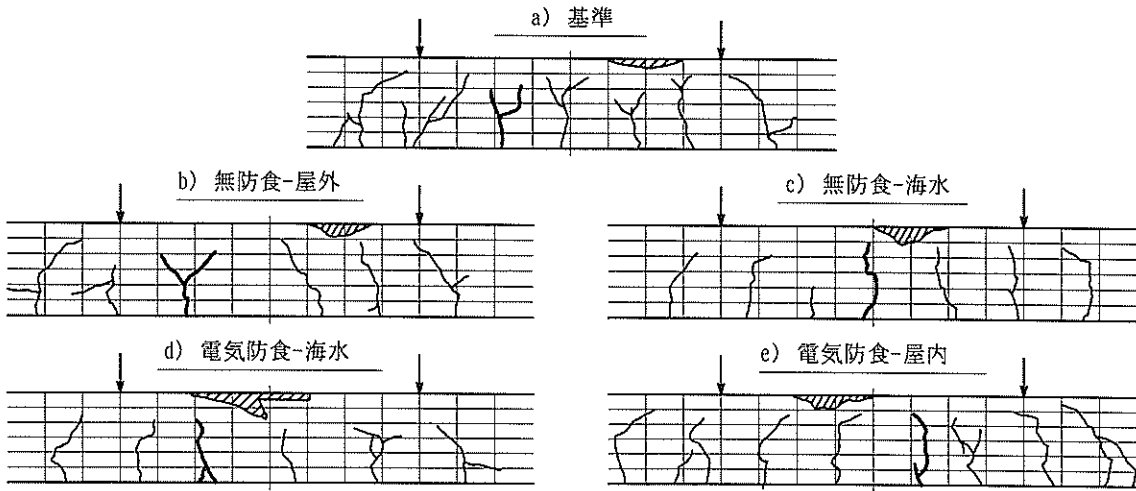


図-44 ひび割れ分散性状 (小型はり供試体)

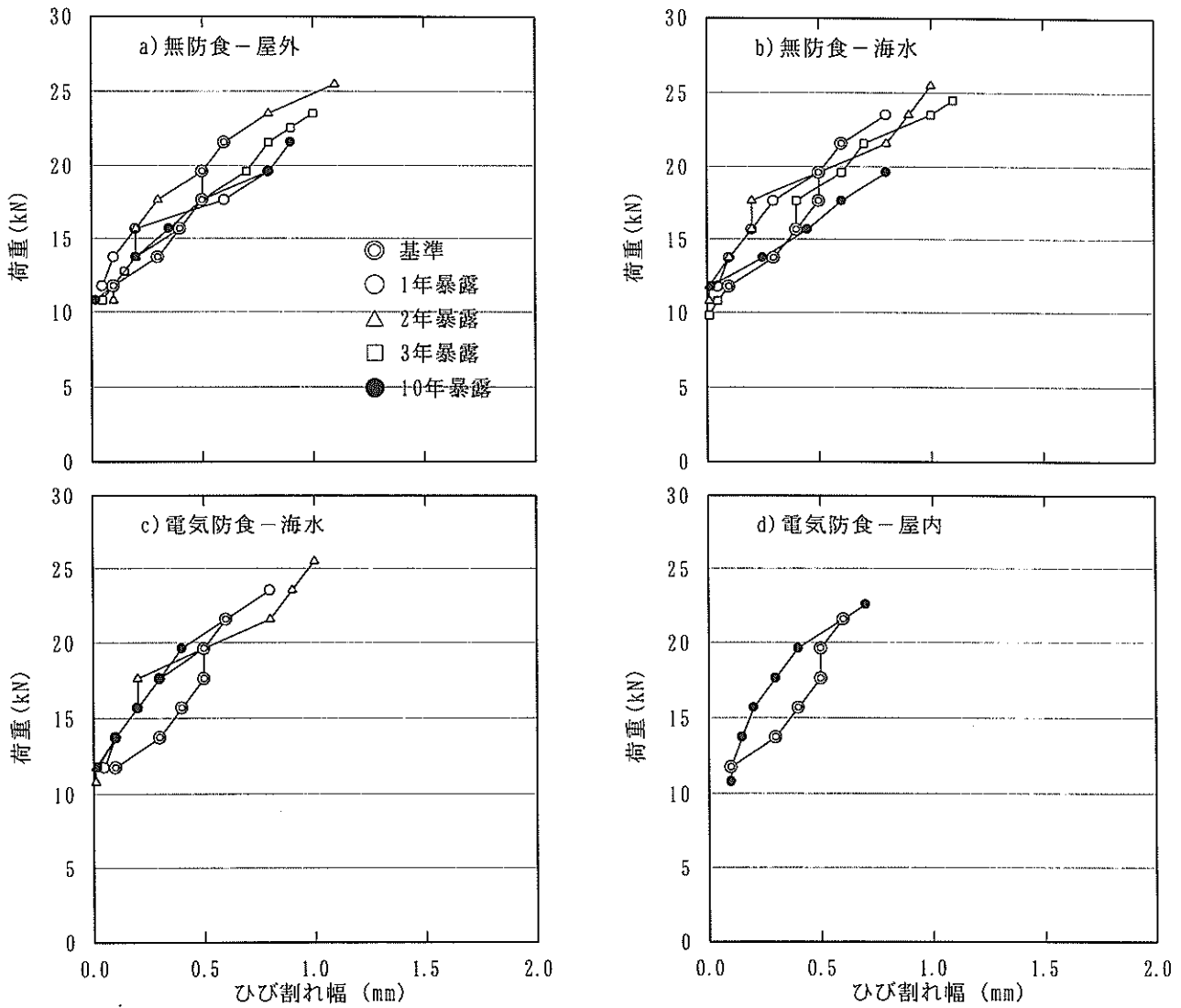


図-45 荷重-ひび割れ幅の関係 (小型はり供試体)

表-26 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
計算値	80.8	1.03	196.7	0.96	—

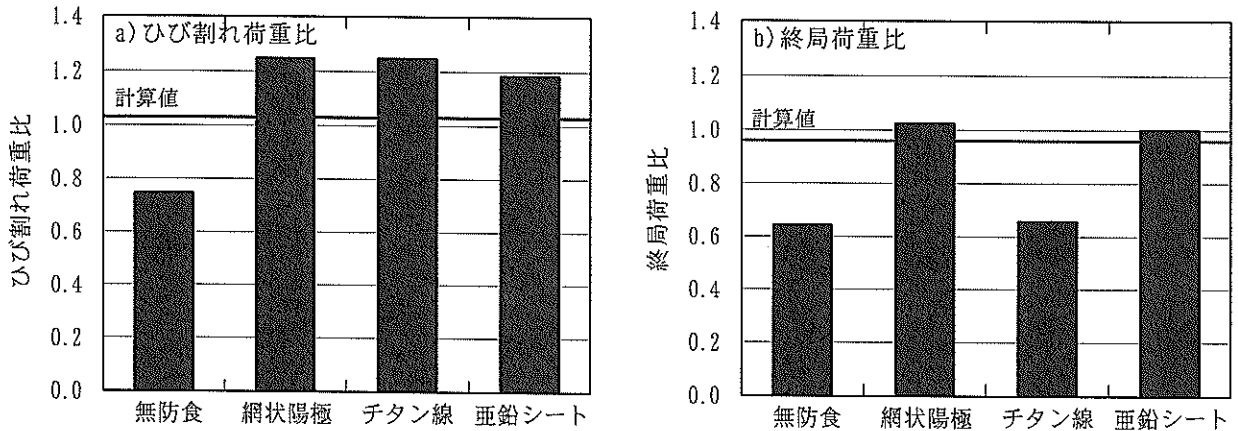


図-46 ひび割れ荷重比・終局荷重比 (大型はり供試体)

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-35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-変位の関係に関しては、実験値と解析値を比較した。解析は、コンクリート構造解析専用の二次元(平面応力)有限要素解析コードのSBETAを用いた。解析に用いたコンクリートとPC鋼材の応力-ひずみ関係を図-47に示す。荷重-変位の解析値と実験値を図-48に示す。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。コンクリートの圧縮強度 $f'_c$ 、引張強度 $f_t$ 、弾性係数 $E_c$ は、表-25に示す値を使用し、ピーク時のコンクリートのひずみ $\epsilon_c$ は、0.002とした。

PC鋼材は、コンクリート標準示方書に準じたモデル<sup>29)</sup>を使用した。なお各鋼材配置箇所のPC鋼材の機械的性質

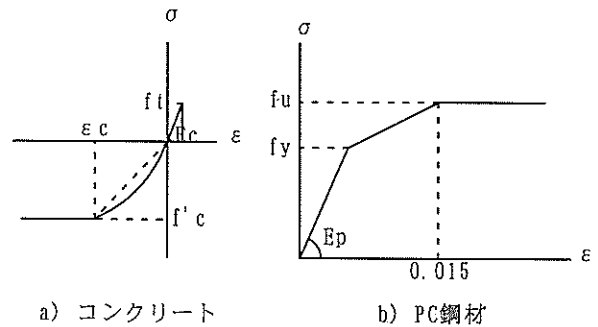


図-47 解析に用いた応力-ひずみの関係

表-27 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% <sup>(注)</sup>	健全	健全	健全	0.7% <sup>(注)</sup>
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

は、表-23に示すPC鋼材の引張試験の結果を用いることが望ましいが、傷がついている試験片があったこと、載荷試験で鋼材が破断した箇所とPC鋼材の引張試験を実施した箇所が異なること等の理由から、ここでは表-25に示す引張荷重の最大値を使用した。

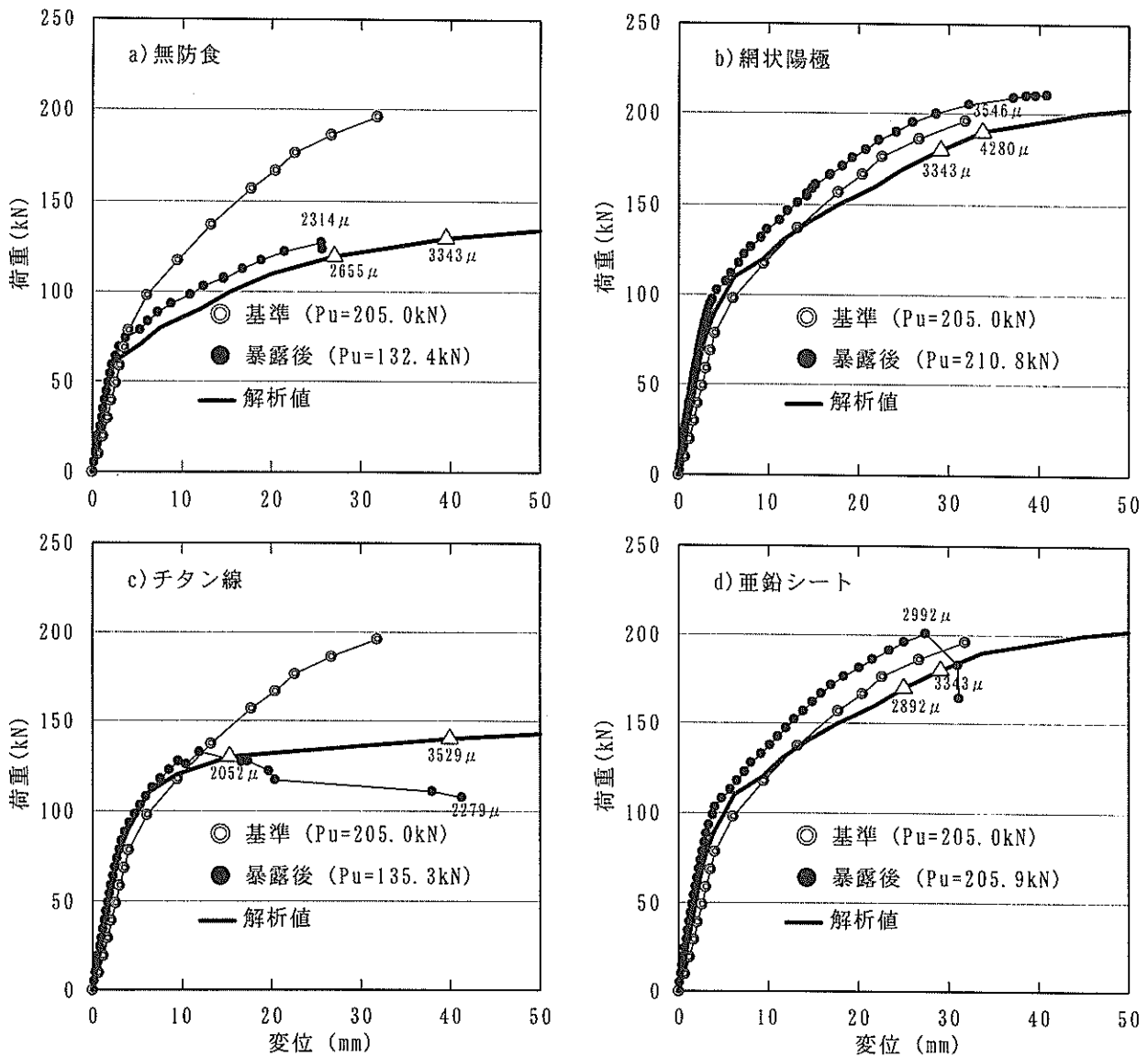


図-48 荷重-変位の関係 (大型はり供試体)

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-27に示す状態を仮定して解析した。

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網状陽極方式、亜鉛シート方式は、表-27に示すように全てのPC鋼材が健全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-37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、表-27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-48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載荷試験時に発生したひび割れの分散性状を図-49に、荷重と等曲げ区間内に発生した主要なひび割れ幅 (図-49の



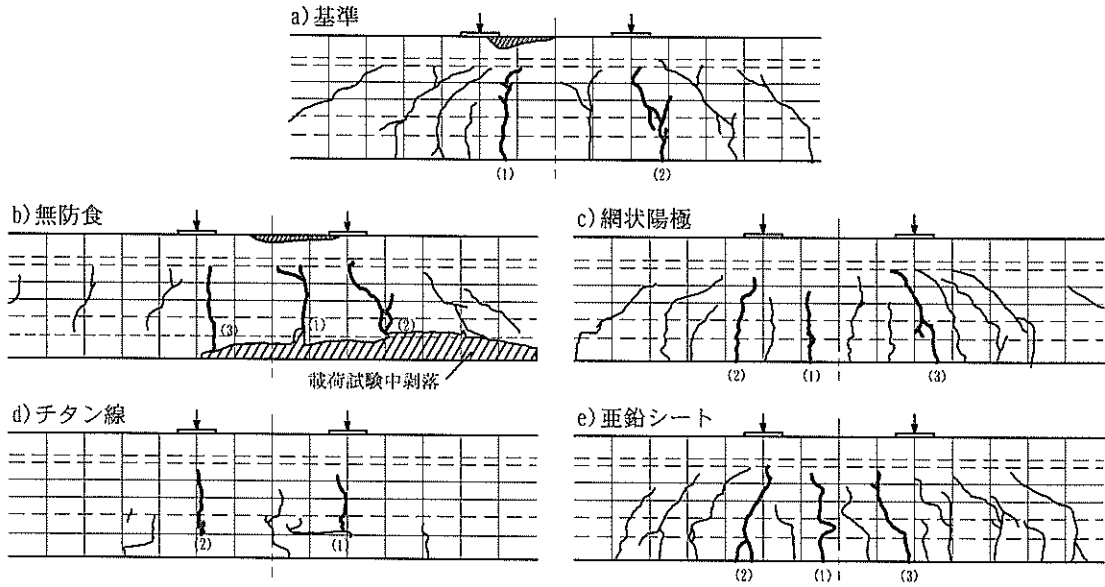


図-49 ひび割れ分散性状 (大型はり供試体)

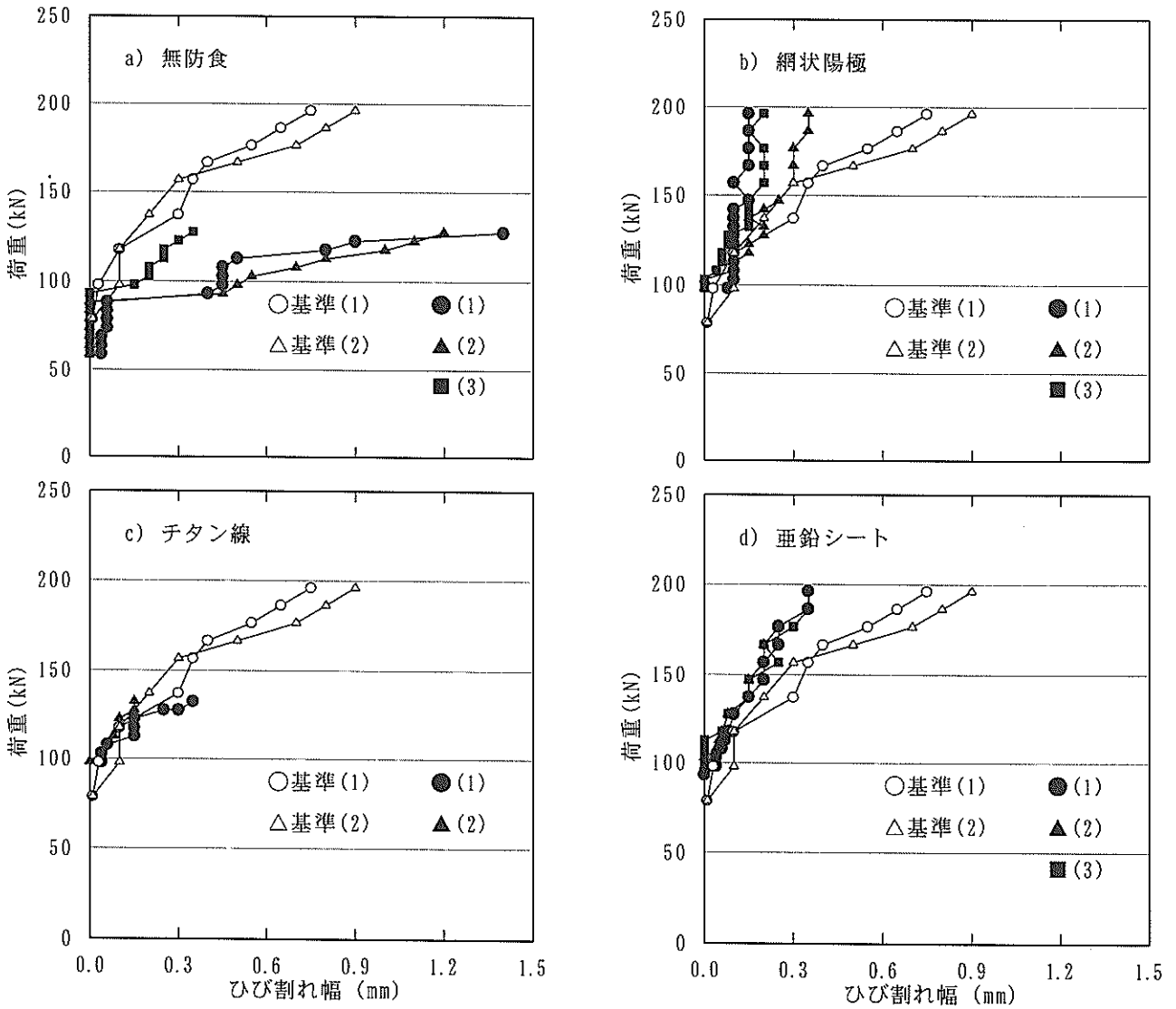


図-50 荷重-ひび割れ幅の関係 (大型はり供試体)

太線部) の関係を図-50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。

一方、無防食供試体、チタン線方式は、ひび割れ分散性状が低下し、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。

### (3) 付着挙動に関する検討

これまでの結果から、小型はり供試体、大型はり供試体ともに、電流印加によるコンクリートとPC鋼材との付着性状に変化がないものと推定された。

電流印加に伴うコンクリートと鋼材の付着力低下に関する既往の研究<sup>1),27),30),31),32)</sup>によれば、電流印加によるコンクリートと鋼材の付着力の低下は、コンクリートの細孔溶液に含まれるアルカリが、電流印加に伴うイオン移動により鋼材近傍に集積すること、過大な電流が印加された場合には、鋼材近傍に水素ガスが発生することに起因すると述べている。

石井<sup>1)</sup>は、アルカリイオンの集積量と付着応力の低下の関係から、上田<sup>27)</sup>は、塩化物イオン量と積算電流密度の掛け合わせた値と付着応力の低下の関係からそれぞれ付着応力の低下に影響を及ぼす積算電流密度の限界値を算出している。

付着応力は、コンクリート強度、配合(粗骨材量)、鉄筋位置、かぶり、鉄筋経など影響因子が多いこと、引抜き試験による付着挙動とはりの載荷試験による付着挙動が異なること等、これまでの研究成果と今回の実験結果を比較することは難しい。

今回は、塩化物イオン量と積算電流密度を掛け合わせた値と最大付着応力比を関連づけた上田<sup>27)</sup>の研究成果を参考に、今回実施したはりの積算電流密度と付着挙動について考察する。

塩化物イオン含有量と積算電流密度(vs.鋼材表面積)を掛け合わせた値と最大付着応力比の関係を図-51に示す。上田<sup>27)</sup>の引抜き試験データを○、石井<sup>1)</sup>の引抜き試験データを□にそれぞれ示す。両試験の概要を表-28に示す。合わせて今回のはり供試体の積算電流密度に塩化物イオン含有量を掛け合わせた結果を①~④の縦太線で示す。上田<sup>27)</sup>は、エポキシ樹脂塗装鉄筋の品質基準を参考に、最大付着応力比の目安を80%、すなわち塩化物イオン含有量と積算電流密度を掛け合わせた値が20000 (kg/m<sup>3</sup>×A・h/m<sup>2</sup>)以下に抑えることを条件としている。

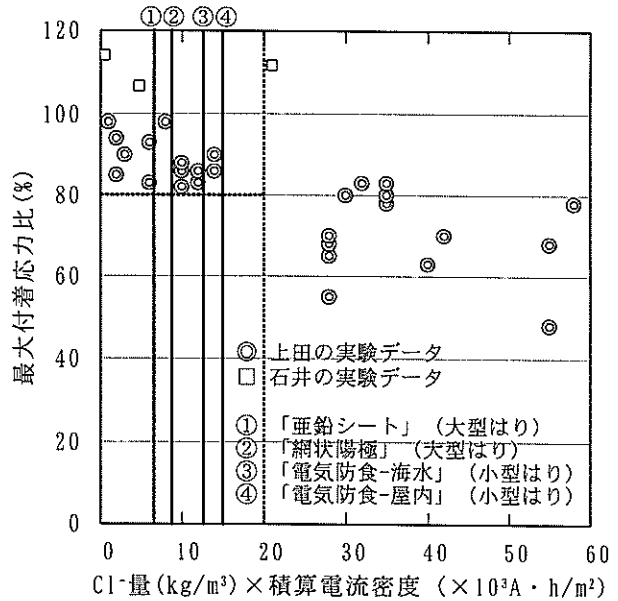


図-51 Cl-量×積算電流密度と最大付着応力比の関係

表-28 電流印加と付着力の評価

実施試験	石井 <sup>1)</sup> の 実験データ	上田 <sup>27)</sup> の 実験データ
	供試体	φ15cm×15cm
水セメント比	37	54
初期Cl-含有量	9	8
鋼材	φ9.3PCより線	D13鉄筋
今回の Cl <sup>-</sup> ×印加電流 での付着力	低下なし	10~20%低下

図-51から、今回のはり供試体の塩化物イオン含有量と積算電流密度を掛け合わせた値の領域では、上田<sup>27)</sup>の実験データでは、最大付着応力比が10~20%低下している傾向にある。一方、石井<sup>1)</sup>の実験データでは、今回の塩化物イオン含有量と積算電流密度の掛け合わせた値以上の電流を印加しても最大付着応力比は低下していない。今回の試験、石井<sup>1)</sup>の試験は、上田<sup>27)</sup>の実験に比べてコンクリートの強度が高かったこと、PC鋼より線の付着性状が異形鉄筋に比べてよかったこと等、PCはりがRCはりに比べて付着性状に有利な条件として働いたことが、両試験で付着挙動が異なる要因であると考えられる。今回行ったPCはりの実験から、少なくとも塩化物イオン含有量に積算電流密度を掛け合わせた値が15000(kg/m<sup>3</sup>×A・h/m<sup>2</sup>)程度であれば、PCはりのコンクリートとPC鋼材の付着性状に変化がないものと推定される。

### 3.4 電流印加がコンクリートに及ぼす影響

長期間にわたる電流印加がコンクリートの諸性状に及

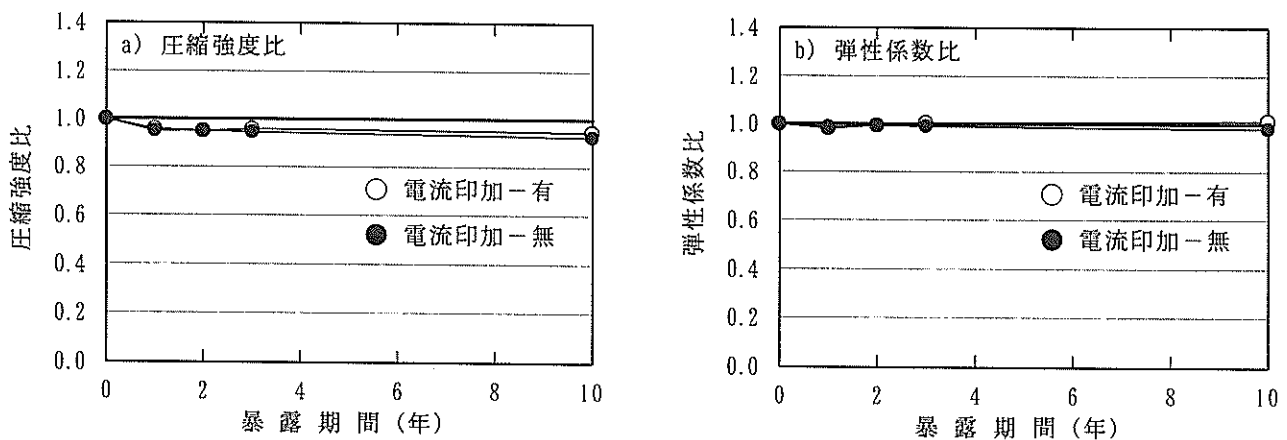


図-52 暴露期間と圧縮強度比・弾性係数比の関係

ばす影響を考察するため、室内環境下に電流印加を施した円柱供試体の結果から、コンクリートの力学特性について考察する。また、はり供試体の鋼材近傍のコンクリートを取り出し、電流印加に伴う塩化物イオンの移動についても考察する。

(1) 圧縮強度試験

材齢28日の強度（圧縮強度  $63.4\text{N/mm}^2$ 、静弾性係数  $21600\text{N/mm}^2$ ）を基準とした時の暴露期間と圧縮強度比の関係を図-52a)に、暴露期間と静弾性係数比の関係を図-52b)にそれぞれ示す。

図-52a)に示す暴露期間と圧縮強度比の関係から、電流印加の有無に関わらず、圧縮強度比は同様な挙動を示している。しかし、両供試体とも暴露1年後には、約5%程度強度が低下している。「電流印加-無」は、屋内に供試体を放置しており乾燥状態にあったこと、「電流印加-有」は、供試体の端面に電流が局所的に流れていることに起因したコンクリート端面の劣化が要因のひとつと考えられる。

図-52b)に示す暴露期間と静弾性係数比の関係から、圧縮強度と同様に電流印加の有無が静弾性係数に影響を及ぼすことはないものと推定される。

(2) 塩化物イオン含有量測定

a) 小型はり供試体

鋼材近傍での電流印加に起因した塩化物イオンの移動量を把握するため、「無防食-海水」、「電気防食-海水」について、塩化物イオン含有量を測定した。PC鋼材の上層、下層部の塩化物イオン含有量を図-53に示す。上層、下層部は、図-17a)に示す箇所である。

図-53から、上層、下層部ともに電気防食を施した供試体の塩化物イオン含有量が無防食供試体より小さく、石井<sup>1)</sup>、上田<sup>27)</sup>の知見に合致する結果となった。

G.Anderson<sup>33)</sup>よれば、陽極と反対側になる部分(今回の

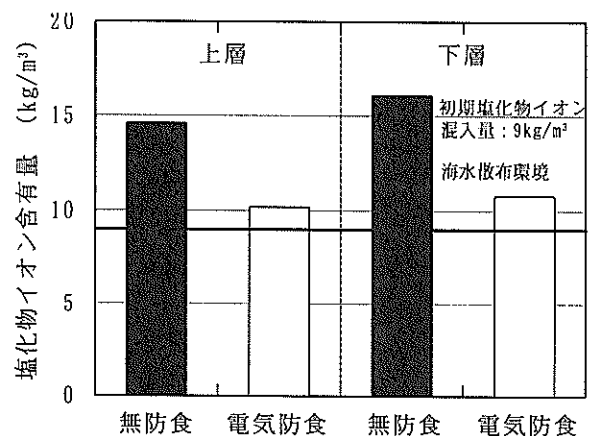


図-53 塩化物イオン含有量測定

実験では上層部)は、効果が現れにくい部分(シャドー・スポット)があるとされている。しかし今回の測定では、上層部も「無防食-海水」に比べると塩化物イオン含有量が小さいことを考えると、上層部にも電流が流入していることが推定される。

次に、印加電流に伴う塩化物イオンの移動について考察する。上田の報告<sup>27)</sup>では、積算電流密度と鋼材近傍の塩化物イオンの移動量に相関関係があると述べている。図-54に、上田<sup>27)</sup>の研究データ(◎:初期塩化物イオン含有量  $8\text{kg/m}^3$ 、鋼材から5mm位置の塩化物イオン測定データ)を示す。今回と同一供試体、同一暴露環境下で1,2,3年間暴露後に測定したデータ、および今回測定したデータ(○:上層部, ●:下層部)も合わせて示す。

電流印加に伴う塩化物イオンの移動量は、今回暴露した海水散布環境では、塩化物イオンがコンクリート内部に移流・拡散により浸透しているため、印加電流に伴う塩化物イオンの移動量を適切に評価することができない。今回は、同一条件下で電気防食を施した「電気防食-海水」

と、「無防食-海水」の鋼材近傍で採取した塩化物イオン含有量の差を電流印加による塩化物イオン移動量と定義した。電流印加に伴うイオンの移動は、細孔溶液中のイオン濃度、セメント種類、コンクリートの比抵抗等により変化することを考えると、今回のデータで塩化物イオンの移動量を定量的に予測するのは困難である。今回は、塩化物イオンの移動の傾向を大まかに予測することを目的とする。

図-54に示す積算電流密度と塩化物イオンの移動量の関係から、積算電流密度に比例して塩化物イオンが鋼材近傍から陽極材方向に移動していることがわかる。上層部と下層部で塩化物イオンの移動量を比較すると、暴露1,2,3年目のデータと同様に下層部の方が塩化物イオンの移動量が多い傾向にある。この理由は、鋼材表面に流入する印加電流量が異なること、各コンクリート位置の細孔溶液中のイオン濃度が異なることに起因したイオン移動速度の変化によるものと考えられる。

b) 大型はり供試体

無防食供試体における図-17b)の斜線部分、塗りつぶし部分の塩化物イオン含有量の測定結果を図-56に示す。各供試体の鋼材かぶり位置(図-17b)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-56に示す。

図-55に示す無防食供試体の塩化物イオン含有量測定結果から、鋼材位置近傍の塩化物イオンは、ハンチ部および底面からそれぞれ浸透している可能性が示唆される。

図-56示す各供試体の塩化物イオン含有量の測定から、小型はり供試体同様、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、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。

チタン線方式は、無防食供試体と同等の値を示していることから、今回測定した箇所周辺には電流が印加されていないものと推定される。

3.5 陽極材・参照電極の耐久性に関する評価

これまでの実験結果から、塩害環境下における電気防食の有効性が確認できた。最後に、電気防食を構成する上で重要な構成要素である陽極材と、防食効果をモニタリングする参照電極の耐久性について考察する。

(1) 網状陽極方式の陽極性能評価

陽極被覆材-はり界面の付着強さ試験の結果を表-29に示す。ここで、試験実施位置は、図-36のNo.1~No.3の

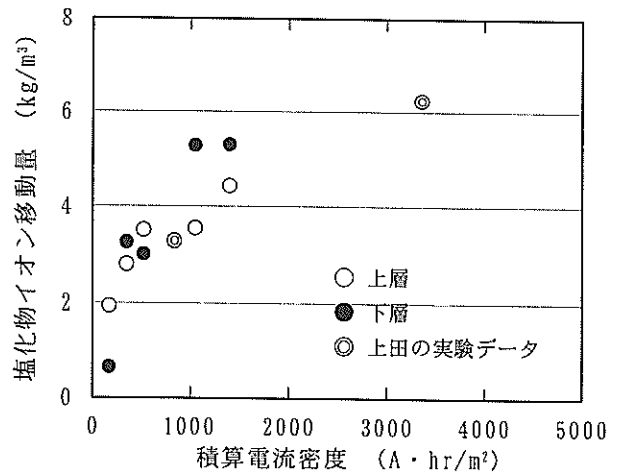


図-54 積算電流密度と塩化物イオン移動量の関係

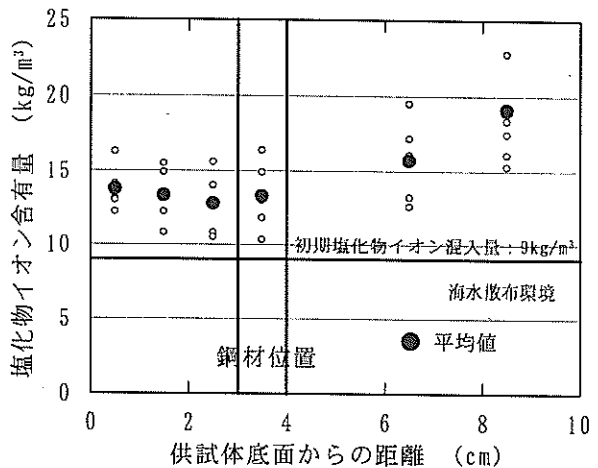


図-55 無防食供試体の塩化物イオン含有量測定

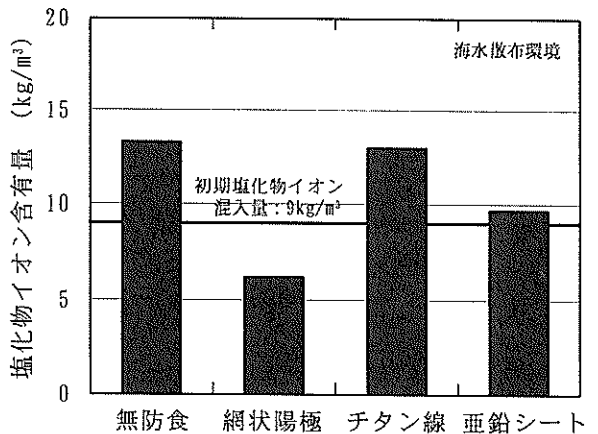


図-56 各供試体の塩化物イオン含有量測定

位置である。また陽極材のはつりだし時に採取した網状陽極材のアノード分極試験の結果を図-57に示す。測定したデータを相対的に比較するため、実構造物の試験データ<sup>34)</sup>を引用した。

表-29に示す結果から、今回試験を行った3ヶ所すべて、

付着強さ試験に関する目標値<sup>35)</sup>である1N/mm<sup>2</sup>以上を満足していた。一方、測定位置No.3の付着強度が低下している理由は、図-36からもわかるように、測定した箇所は、陽極被覆材の浮きが生じていたためであると考えられる。

網状陽極材のアノード分極試験の結果を図-57に示す。武若<sup>36)</sup>によれば、塩化物イオンを含むコンクリートに電気防食を施した場合には、塩化物イオンが陽極材周辺に集積し、陽極の電位が約1.2V(vs.Hg/HgO)より貴になると塩化物イオンが電子と結合し、塩素ガスを発生すると報告している。塩素ガスの発生は、次亜塩素酸や塩酸の生成によるpHの低下をもたらす、最終的には陽極材、陽極被覆材の劣化、剥離等を招くおそれがある。

図-57から、今回採取した試料は、塩素ガスが発生すると考えられる通電電流密度が約30mA/m<sup>2</sup>であることがわかる。通常のコンクリート構造物で適用しているレベルの電流密度は、10mA/m<sup>2</sup>(vs.コンクリート表面積)程度であることを考えると、現段階では問題はないものと考えられる。また今回採取した試料は、他の試料と比較すると低電流密度の領域で分極曲線が立ち上がっているが、これは陽極材近傍の水分の影響、陽極構造の差と考えられる。

### (2) 亜鉛シート方式の陽極性能評価

各場所に設置した亜鉛シートの消耗率の結果を図-58に示す。ここで、軸方向亜鉛シートNo.、箇所の名称は、図-38に示す箇所を示す。各箇所の亜鉛シート消耗率の平均値を図-59に示す。

図-58、図-59の結果から、ウェブに配置した亜鉛シートの消耗が他の箇所に比べて一番大きいことがわかる。次にハンチ部が消耗しており、はり底面の消耗が一番小さい。

ウェブの消耗率が大きい理由は、ウェブに配置した電気防食板は、上面をモルタルにて処理しておらず、コンクリートと電気防食板の隙間から海水浸透と乾燥が繰り返されたことが、亜鉛シートを著しく消耗させたものと考えられる。すなわち、鋼材に電流が印加されて消耗する以外に、亜鉛自身の消耗も大きいことが要因のひとつであると推定される。軸方向に着目すると、はり端部の消耗がはり中央部よりも多い傾向にある。端部は、中央部に比べスターラップのピッチが小さかったことが、亜鉛の消耗が大きかった理由のひとつと考えられる。

図-38に示す外観目視調査による亜鉛シート保護板の浮きと亜鉛シートの消耗には、明確な関係が認められなかった。

### (3) 参照電極の性能評価

長期間にわたり供試体中に埋め込んだ参照電極の性能

表-29 陽極被覆材の付着強さ試験

測定位置	付着強度 (N/mm <sup>2</sup> )	破断状態
No. 1	2.4	コンクリートとオーバーレイ材の界面
No. 2	2.5	ジグとオーバーレイ材の界面
No. 3	1.2	コンクリートとオーバーレイ材の界面

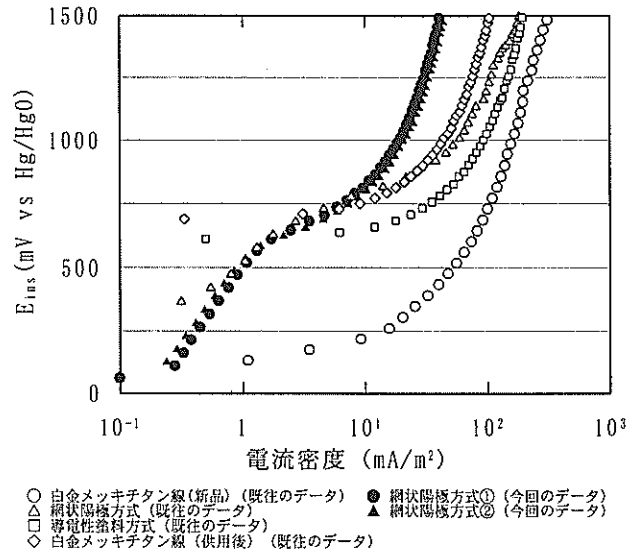


図-57 網状陽極材のアノード分極試験

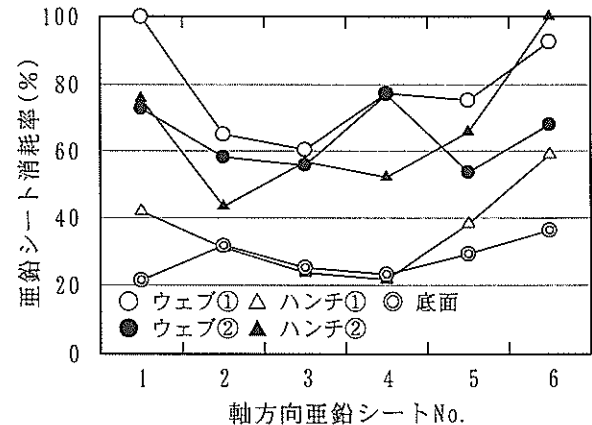


図-58 軸方向の亜鉛シート消耗率

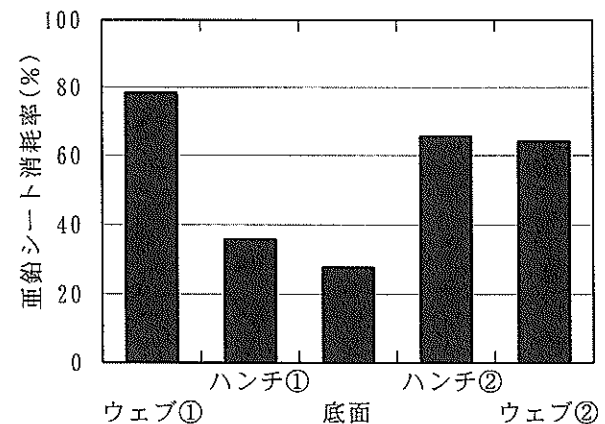


図-59 各箇所の亜鉛シート消耗率の平均値

を評価するため、基準電極と埋め込み電極の電位測定と参照電極の交流インピーダンス試験を行った。

基準電極と埋め込み電極の電位測定結果を表-30に示す。10年暴露終了時に測定した結果、どの種類の参照電極も暴露初期に比べ10~20mV程度変化していることがわかる。これは、参照電極中に存在する電解液がコンクリート中へ溶出したためと考えられる。参照電極の交流インピーダンス試験の結果を図-60に示す。ここでは、相対的に比較するため他の参照電極の測定結果も合わせて示す。

理想的な参照電極<sup>37)</sup>は、「参照電極表面での電極反応が可逆であって、電解液中のある化学種とNernstの平衡電位式に従って応答すること」とされている。すなわち、インピーダンスが小さいほど応答がよく、参照電極の電位の安定性があることを意味する。ここでは、既往の測定結果と相対的に比較して参照電極の性能を評価する。

図-60の結果から、実験室で保管しているAg/AgCl電極のインピーダンスが一番小さいことがわかる。このことは、参照電極の性能が優れていることを意味する。一方、網状陽極方式に埋設していたAg/AgCl電極は、実験室に保管しているものと比較するとインピーダンスが大きい。しかし、他の参照電極と比較するとインピーダンスは比較的小さく、著しい性能低下は引き起こしてはいないものと考えられる。

#### 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9kg/m<sup>3</sup>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はりについて、

- ①PC鋼材の防食効果に関する評価
- ②PC鋼材の機械的性質に関する評価
- ③PCはりの力学的挙動の評価
- ④電流印加がコンクリートに及ぼす影響
- ⑤陽極材・参照電極の耐久性に関する評価

について検討した。その結果、以下の結論を得た。

PC鋼材の防食効果に関する評価では、

- (1) 暴露期間中の電気化学的測定により防食効果があると判断された、導電性塗料方式（小型はり供試体）、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がないと判定されたチタン線方式、および無防食供試体は、鋼材の腐食が進行していた。
- (2) チタン線方式が防食効果を得ることができなかった

表-30 基準電極と埋め込み電極の電位差計測

電極No.	測定電位 (mVvs. SCE)	初期との差 (mV)
初期値	-46.0	0.0
無防食-1	-46.5	-0.5
無防食-2	-56.2	-10.2
チタン線-1	-91.1	-45.1
チタン線-2	-33.3	12.7
亜鉛シート-1	-31.4	14.6
亜鉛シート-2	-32.5	13.5

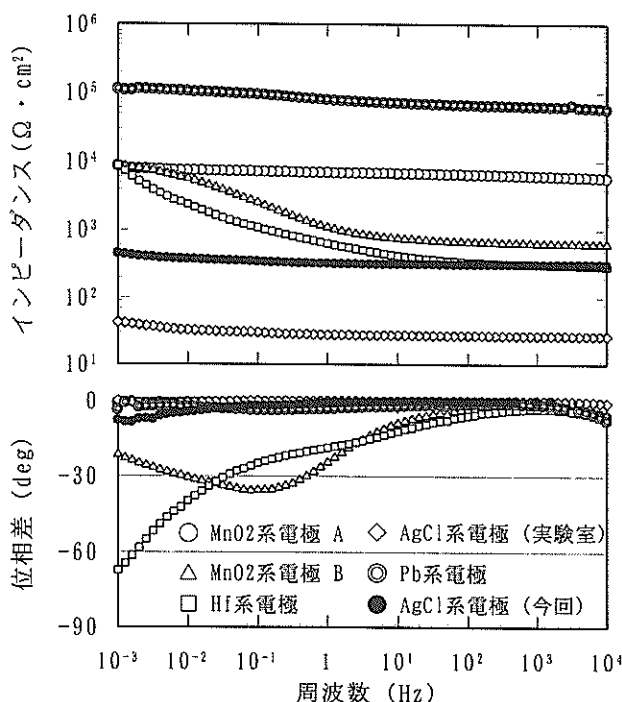


図-60 参照電極の交流インピーダンス試験

理由は、今回配置したφ1.5mmのチタン線9本の電流分布が不均一になるに従い、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、その箇所へ電流が流れなくなったことによるものと考えられる。

PC鋼材の機械的性質に関する評価では、

- (1) 電気防食により防食効果が認められた網状陽極方式、亜鉛シート方式のPC鋼材の引張荷重、降伏荷重、伸びは、試験片取り出し時に傷を受けたものを除き、規格値以上を満足していた。
- (2) 同一環境下のもと、無防食状態で暴露した供試体は、PC鋼材の機械的性質の規格値を満足しなかった。特に大型はりに使用したPC鋼材の引張荷重は、規格値の30%程度、伸びは20%程度の性能しか有さなかった。

PCはりの力学的挙動に関する評価では、

- (1) 電気防食による防食効果が見られた導電性塗料方式、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、変形性能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、電気防食による防食効果が見られなかったチタン線方式、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。
- (2) ひび割れ分散性状、等曲げ区間内のひび割れ幅の結果から、今回の積算電流密度の範囲内では、鋼材近傍に集積するアルカリイオンに起因した付着性状の低下は認められなかった。

電流印加がコンクリートに及ぼす影響では、

- (1) 電流印加は、コンクリートの強度特性に悪影響を及ぼすことはないものと考えられる。
- (2) コンクリート内部の塩化物イオンは、PC鋼材に電流が印加されることにより、鋼材近傍から陽極材に向かって移動し、その量は積算電流密度に依存する傾向が認められた。

陽極材・参照電極の耐久性に関する評価では、

- (1) 網状陽極方式の暴露10年後の陽極被覆材の付着強度は、測定した3ヶ所全てで規格値以上を満足していた。また、アノード分極試験により、今回使用した陽極材は、現段階で約30mA/m<sup>2</sup> (vs. コンクリート表面積) 以下の電流印加であれば、塩素ガス発生による陽極材の劣化は生じないものと判断された。
- (2) 亜鉛シート方式の亜鉛の消耗は、海水浸透と乾燥が繰り返されるウェブ、鉄筋量が多いはり端部で大きくなる傾向が認められた。亜鉛の消耗率は、小さい箇所では20%程度、大きい箇所では100%消費しており、平均値は約55%であった。
- (3) 供試体中に10年間埋設されていた参照電極(Ag/AgCl)の著しい性能低下は認められなかった。

暴露10年にわたる本研究成果から、適切な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。

## 5. あとがき

今回の実験では、10年間にわたる電気防食がPC鋼材の

機械的性質、はりの力学的挙動に悪影響は与えず、暴露初期の性能を維持していることを確認した。また、この状態を維持するためには、適切な設計と施工、および施工後の維持管理が重要であることを把握できた。

設計に関しては、暴露される環境、材料に応じた物性値をインプットデータとして、電流分布、コンクリート近傍に集積するイオンの移動等を時間軸で予測することができれば、その環境にあった陽極材、防食回路の合理的な設計と、構造物の耐用年数の予測が可能になるものと考えられる。

現状では、電気防食を行うための構成材料(陽極材、参照電極、計測・排流端子、配線・配管、直流電源装置等)の耐用年数は十分に明らかとなっていない。本研究の結果から、今回使用した陽極材の性能は、10年間は保持されることが明らかとなったが、さらに陽極材の耐用年数を定量的に評価する技術を明らかにしていくことも必要であると考えられる。

維持管理に関しては、防食効果をモニタリングすることや電気防食システムに異常がないことを確認する上で、定期的な管理が必要不可欠である。今日では、遠隔装置によるモニタリングシステムも構築されているが、さらに適切かつ合理的な点検方法を検討する必要があると考えられる。

(2001年5月30日受付)

## 謝辞

本研究は、港湾技術研究所、早稲田大学関研究室、(株)ナカポーテック、(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、(株)ナカポーテック千葉丈夫氏、(株)ピー・エス石井浩司氏、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学部生佐古武彦氏(現早稲田大学大学院)、(株)ピー・エス桐川潔氏、陽極材・参照電極の耐久性試験の実施にあたり(株)ナカポーテック技術開発研究所の方々、エポキシ樹脂塗装鉄筋の分析試験の実施にあたり東亜合成(株)機能製品事業部の方々にお世話になりました。また、本研究のとりまとめにあたり、材料研究室山路徹研究官、Tarek Uddin Mohammed研究官、渡邊弘子受託研究員にご協力を頂きました。ここに記して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トコンクリート部材への電気防食の適用に関する研究、早稲田大学学位論文、1996年

- 2) 大即信明・榎野紀元・片脇清士・宮川豊章:コンクリート構造物の耐久性シリーズ 塩害 (I), 技報堂出版, 1987年, pp.16-20.
- 3) 片脇清士:最新のコンクリート防食と補修技術, 株式会社山海堂, 1999年, pp.55.
- 4) 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.
- 5) 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, 1994年, pp.49.
- 6) コンクリート構造物の電気化学的補修工法研究会:コンクリート構造物の電気化学的補修工法設計・施工マニュアル:1998年1月, pp.9-13.
- 7) 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, 1994年, pp.54.
- 8) ASTM C876 : Half-Cell Potentials of Reinforcing Steel in Concrete 1980
- 9) 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.
- 10) 土木学会:コンクリート標準示方書[規準編], コンクリートの圧縮強度試験方法(JIS A 1108-1999), 1999年, pp.467-468.
- 11) 土木学会:コンクリート標準示方書[規準編], コンクリートの静弾性係数試験方法(JSCE-G 502-1999), 1999年, pp.432-434.
- 12) 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), 1991年, pp.17.
- 13) 土木学会:コンクリート標準示方書[規準編], 表面被覆材の付着強さ試験方法(JSCE-K 531-1999), 1999年, pp.572-574.
- 14) CEB Working Party V/4.1 : Strategies for Testing and Assessment of Concrete Structures affected by Reinforcement Corrosion(darft4), BBRI-CSTC-WTCB, 1997
- 15) 小林一輔:コンクリート構造物の耐久性診断シリーズ 3 鉄筋腐食の診断, 森北出版株式会社, pp.81.
- 16) 千葉丈夫, 堺考司, 大越威, 小熊文雄:流電陽極方式による電気防食における因子の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.1, 1993年, pp.767-770.
- 17) 石川光男, 堺考司, 大越威, 千葉丈夫:コンクリート中鉄筋の電気防食における通電システムに関する研究, コンクリート年次論文報告集, Vol.15, No.1, 1993年, pp.771-776.
- 18) 川俣孝治:積雪寒冷地におけるコンクリート構造物の電気防食法に関する研究, 土木学会論文集, No.557/V-34, 1997年, pp.65-75.
- 19) 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, 1994年10月, pp. 49
- 20) 片脇清士:最新のコンクリート防食と補修技術, 株式会社山海堂, 1999年, pp.201.
- 21) 関博:コンクリート構造物に対する電気化学的応用, コンクリート工学, Vol.36, No.2, 1998年, pp.21
- 22) 阿部正美, 福手勤, 濱田秀則, 三浦幸治:コンクリート中の鉄筋のマクロ腐食と電気防食によるアノード, カソードへ流入する電流および分極量, 港湾技術研究所報告, Vol.33, No.2, 1994年, pp.175-205.
- 23) 阿部正美, 福手勤, 濱田秀則, 三浦幸治:港湾における鉄筋コンクリート構造物への流電陽極方式による電気防食適用に関する基礎的試験, 港湾技術研究所資料, No.740, 1992年
- 24) 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.
- 25) 田中良樹・河野広隆・渡辺博志・鈴木雅博:塩害を受けたプレテンションPC桁の耐荷性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21.No.3, 1999年, pp.973-978.
- 26) 木村哲士・河野広隆・田中良樹:塩害を受けたPC鋼材の腐食性状と伸び性能, 土木学会第55回年次学術講演会, V-361, 2000年, pp.724-725.
- 27) 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サリネーションの適用に関する研究, 京都大学学位論文, 1999年
- 28) 芦田公伸・上田隆雄・溝口茂・宮川豊章:PC鋼材の水素吸蔵特性に着目したデサリネーション処理方法の検討, 土木学会論文集, No.641/V-46, 2000年, pp.231-240.
- 29) 土木学会:コンクリート標準示方書[設計編], 1996年
- 30) C.E.Locke, C.Dehganian, L.Gibbs : Effect of impressed current on bond strength between steel rebar and concrete, CORROSION/83, Paper, No.178
- 31) 黒井登起雄:電流作用を受けた硬化ペーストの諸特性, 第44回セメント技術大会講演集, 1990年, pp.846-851.
- 32) 武若耕司, 馬庭秀士:コンクリート構造物の塩害対策における電気防食の適用性に関する検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.13, No.1, 1991年, pp.573-578.
- 33) G.Anderson : Chloride Extraion and Re-aikalisation of Concrete, Hong Kong Contracor, 1990年, pp.20-25.
- 34) 野村昌弘・前田好裕・石村勝則・平俊勝:北陸自動車道大慶寺橋での電気防食試験の評価, コンクリート工学, Vol.37, No.12, 1999年, pp.17.
- 35) 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, 1994年, pp.102.



- 36) 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
- 37) 藤嶋昭・相澤益男・井上徹:電気化学測定法(上), 技報堂出版株式会社, 1984年

港湾空港技術研究所資料 No.1008

2001.9

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所

横須賀市長瀬3丁目1番1号

TEL. 0468(44)5040 URL <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社ポートサイド印刷

Copyright © (2001) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。