

海洋構造物の耐久性向上技術に関する 共同研究報告書

—新設コンクリート橋への電気防食適用に関する研究成果と
新設コンクリート橋の電気防食マニュアル(案)—

平成12年12月

建設省土木研究所材料施工部化学研究室
(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会

Copyright © (2001) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所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。

海洋構造物の耐久性向上技術に関する 共同研究報告書

—新設コンクリート橋への電気防食適用に関する研究成果と
新設コンクリート橋の電気防食マニュアル(案)—

建設省土木研究所 材料施工部化学研究室 室 長 明嵐 政司
主任研究員 守屋 進
前化学研究室 寺田 剛

(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会

大井川沖暴露試験共同研究委員会

要 旨

塩害を確実に防止し、PCコンクリート橋の耐久性向上させるための限食技術として、新設時に電気防食工法の適用に関する技術的検討を共同研究で行った。その成果をとりまとめ、新設コンクリート構造物の電気防食マニュアル(案)を提案した。

キーワード：新設コンクリート構造物，塩害，耐久性向上，防食技術，電気防食工法

まえがき

コンクリート構造物の設計施工に際しては強度を主とした力学的性質はもちろんのこと耐久性も重要な検討事項である。しかしながら、耐久性に関する配慮が十分でなかった。このため、昭和50年代後半から日本海沿岸や沖縄などの海岸付近のコンクリート構造物の塩害が表面化して以来、関係各機関で研究が行われているが、耐久性の問題は経験的要素の集積に基づく判断が多く、その解決にはさらに長期にわたる研究を待たねばならない。

コンクリート構造物の塩害対策としては、現在、「道路橋の塩害対策指針（案）」（（社）日本道路協会）昭和59年2月発行があり、密実なコンクリートを作ることなどを基本対策とし、コンクリート塗装、エポキシ樹脂塗装鉄筋等の対策がある。しかしこれらは経過的な措置として定められたものであり、より確実な防食方法を確立することが求められている。

塩害を確実に防止し、PCコンクリート橋の耐久性向上させるための防食技術として、新設時に電気防食工法を適用することに関する技術的検討を共同研究で行った。その成果をとりまとめ、新設コンクリート構造物の電気防食マニュアル（案）を提案した。

海洋構造物の耐久性向上技術に関する共同研究 第2分科名簿

建設省土木研究所材料施工部化学研究室	室長	明嵐 政司
同	主任研究員	守屋 進
前化学研究室		寺田 剛
(社) プレストレスト・コンクリート建設業協会		
大井川沖暴露試験共同研究委員会		
株式会社ピー・エス		酒井 博士
同		石井 浩司
オリエンタル建設株式会社		狩野誠一郎
同		近藤 順
住友建設株式会社		藤田 学
同		迎 邦博
株式会社富士ピー・エス		吉田 秀光
新設橋梁電気防食工法検討ワーキング		
株式会社ピー・エス メンテナンス部		穴沢 雅明
株式会社ナカボーテック RC事業部		井川 一弘
日本防食工業(株)新規事業開発プロジェクト		山本 悟
住友大阪セメント株式会社建材事業部		川俣 孝治
株式会社東京興業貿易商会 建材設備営業部		古賀創一郎

目 次

まえがき

1. 研究目的	1
2. 電気防食に関する試験	2
2. 1 新設コンクリート橋の電気防食工法	2
2. 2 電気防食開始時期の検討	3
2. 3 電気防食の施工性と維持管理方法の検討	14
2. 4 長期電気防食効果の検証	24
3. 新設コンクリート橋への電気防食適用性の検討	33
3. 1 新設コンクリート橋の電気防食の特長	33
3. 2 考慮すべき項目	34
4. ライフサイクルコストに関する検討	35
4. 1 概説	35
4. 2 コストパフォーマンスの考え方	35
4. 3 劣化コンクリート構造物に適用した場合の検討	39
4. 4 構造物建設時に適用した場合の検討	42
4. 5 防食ライフサイクルコストに関する検討例	45
あとがき	47

付属資料

1. 電気防食に関する試験データ集及び写真集	49
2. 新設コンクリート橋の電気防食マニュアル（案）	

1. 研究目的

海洋環境に建設されるコンクリート構造物では、潮風や海水飛沫によって供給される塩分の浸透に起因する損傷、いわゆる塩害が懸念される。近年、海峡横断道路橋や湾岸道路橋の建設は増加しており、そのストックの長寿命化と維持管理費用の節減を図ることは社会のニーズであると言える。

本研究は、コンクリート構造物に建設時から電気防食工法を施すことにより、長寿命化を指向した防食技術の開発を目的とした。

まず、防食電流を供給する最適時期については、鉄筋コンクリート小型供試体（以下RC小型供試体と称す）を用いて行った。また、新設構造物に設置する陽極の施工性や電気防食の維持管理手法については、プレテンション方式プレストレストコンクリート大型供試体（以下プレテン大型供試体と称す）で実施した。加えて、1985年から1987年まで実施した共同研究（土木研究所共同研究報告書第14号参照）で作製したポストテンション方式プレストレストコンクリート大型供試体（以下ポステン大型供試体と称す）に施工した電気防食装置に関して、2000年9月まで追跡調査を行ってきた。この供試体の解体調査を行い、電気防食の防食効果について検証を行った。

2. 電気防食に関する試験

2. 1 新設コンクリート橋の電気防食工法

2. 1. 1 工法の種類と特徴

電気防食工法には、外部から交流電流を得て、電源装置で直流に変換し、強制的に電流を流し続ける外部電源方式と、イオン化傾向の大きい金属（亜鉛、アルミニウム、マグネシウム）を陽極材とし、その金属が酸化することによって、電流を得る流電陽極方式とに大別される。新設コンクリート橋に適用する場合、流電陽極方式は、施工性やコスト比較で劣るため向かない。外部電源方式においても、新設橋には向かないものもあり、本研究で試験した工法は、現時点の技術で充分適応可能であると推定されたものである。各工法の概要と特徴を表2-1に示す。

表 2-1 電気防食工法の概要と特徴

工法	陽極材種	外形	設置方法	特徴
帯状陽極A (TG)	チタン	細かいメッシュ状のチタン材を帯状に切断し、そのチタン基材に貴金属酸化物を被覆した陽極をモルタルで被覆し、棒状に仕上げたもの。	鉄筋組み立て前に、型枠のベース上に陽極を置き、鉄筋組み立て後、絶縁材で鉄筋に固定し、コンクリートを打設する。	桁製作時の工程を少なくする工夫がされている。 陽極と鋼材の短絡の可能性が少ない。
パネル陽極 (TM)	チタン	メッシュ状のチタン基材に貴金属酸化物を被覆した陽極を繊維入りのモルタルで被覆し、型枠状に仕上げたもの。	型枠組立て後、その内側にパネル陽極を設置し、鉄筋を組みコンクリートを打設する。	永久型枠工法の利点と電気防食の複合防食効果が期待できる。陽極と鋼材の短絡の可能性が少ない。
亜鉛アルミ 溶射陽極 (AS)	亜鉛アルミ	コンクリート表面に薄い面状の陽極とそれを保護する塗装からなっている。	桁製作完了後、溶射工法で亜鉛とアルミニウムの混合金属の皮膜を形成し、仕上げに保護のため塗装する。	安価である。 補修が可能。 桁製作工程に支障がない。
チタン溶射 陽極 (TS)	チタン	コンクリート表面に薄い面状の陽極。	桁製作完了後、溶射工法でチタニウムの皮膜を形成する。	安価である。 補修が可能。 桁製作工程に支障がない。
帯状陽極B (RM)	チタン	細かいメッシュ状のチタン材を帯状に切断し、そのチタン基材に貴金属酸化物を被覆した陽極。	鉄筋組み立て後に、かぶりコンクリート内に、筋状に絶縁材で鉄筋に固定し、コンクリートを打設する。	施工が容易。 比較的安価。
内部挿入 陽極 (TR)	チタン	表面に対して垂直な穴にカーボン基材のバックフィルを注入し、チタン棒を挿入する。	桁製作完了後、数十cm間隔で穴をあけ、バックフィルを注入し、チタン棒を挿入する。チタン棒間はチタン線で繋ぎ一体化する。	安価である。 補修が可能。 桁製作工程に支障がない。

2. 2 電気防食開始時期の検討

2. 2. 1 試験概要

6種類の陽極材料を用いた電気防食と比較用の無防食1種類の計7種類のRC供試体について促進試験を行い、自然電位を経時的に測定し、順じ電気防食を開始した。また、最後に供試体を解体し、鉄筋の腐食状況を観察し、電気防食効果を検証した。

(1) 供試体の種類と形状

① コンクリートの配合

供試体に用いたコンクリートの配合の例を表2-2に示す。セメントは普通ポルトランドセメント、設計基準強度を23.5 N/mm²とした。塩化物が浸透した構造物を模擬するため、供試体作製時に5.6 kg/m³の塩化物(NaClで10 kg/m³)を混入した。

表 2-2 コンクリートの配合

粗骨材 の最大 寸法 (mm)	スランプフロー の範囲 (cm)	空気量 の 範囲 (%)	水セメント 比 W/C (%)	細骨材 率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)					NaCl (kg/m ³)
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤	
									高性能減水剤	
20	8.0	1.5	69.6	45.0	160	230	887	1100	2.30	5.5

② 鉄筋

防食対象として黒皮付きの丸鋼(φ13mm、JIS G 3112 SR235)を供試体あたり2本埋設した。

③ 供試体形状

供試体形状は、横200×高さ100×長さ400mmで、鉄筋は純かぶりで35mmの位置に埋設した。

(2) 電気防食工法

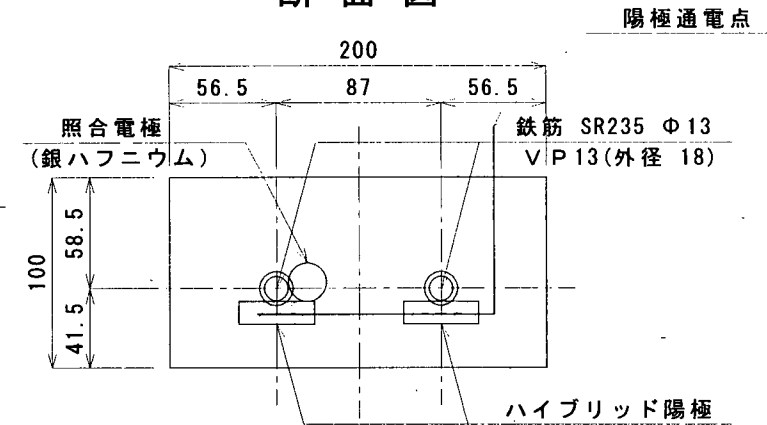
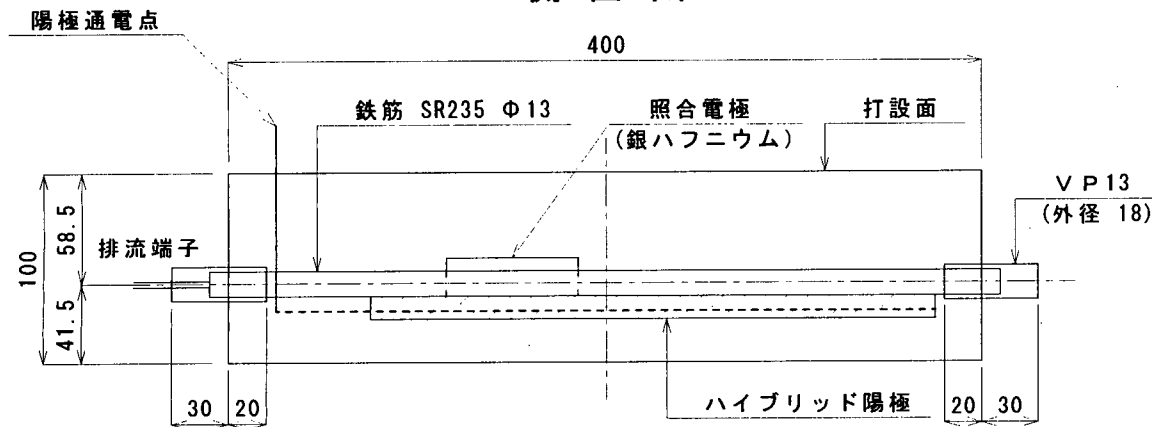
工法による防食効果の違いを明らかにするため、6種類の電気防食工法を適用した。用いた工法を以下に示す。また、陽極の設置状況を図2-1～2-6に示す。また、無防食の供試体を図2-7に示す。

- ① 带状陽極A(以下TGと表す)方式
- ② パネル陽極(以下TMと表す)方式
- ③ 亜鉛アルミ擬合金溶射(以下ASと表す)方式
- ④ チタン溶射(以下TSと表す)方式
- ⑤ 带状陽極B(以下RMと表す)方式
- ⑥ 内部挿入(以下TRと表す)方式

(3) 促進試験

促進試験機を使用し、乾湿繰り返し試験を行った。1サイクルを7日間とし、1サイクル当たり10分間水道水を散水し、それ以外は気温30℃、湿度60%の一定の環境に保持した。

断面図



平面图

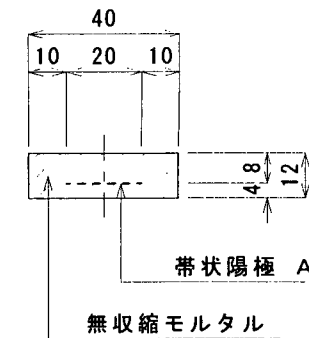
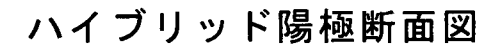
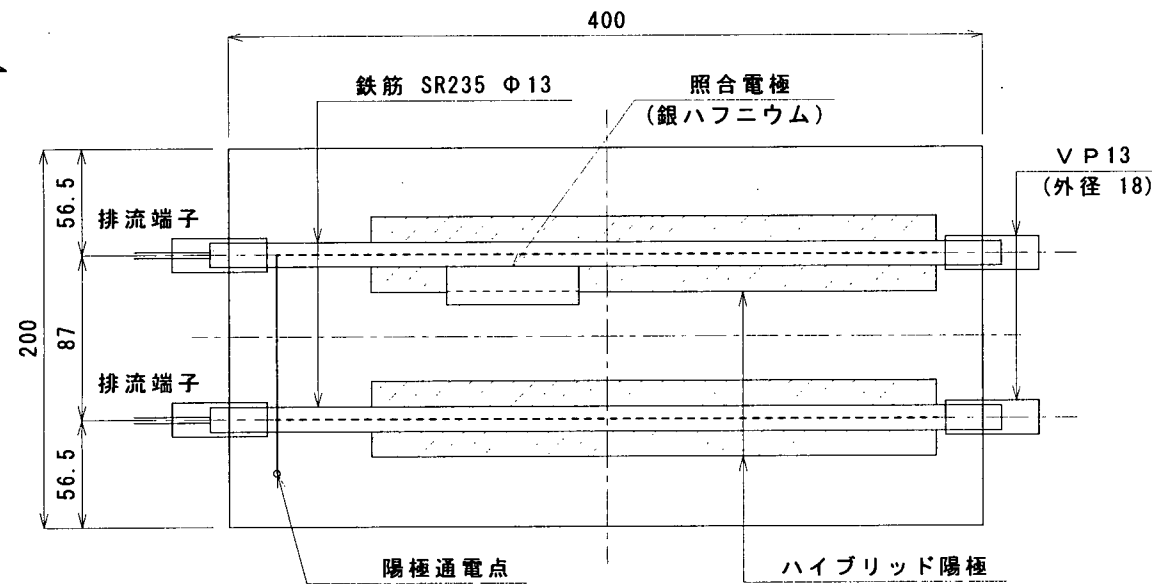
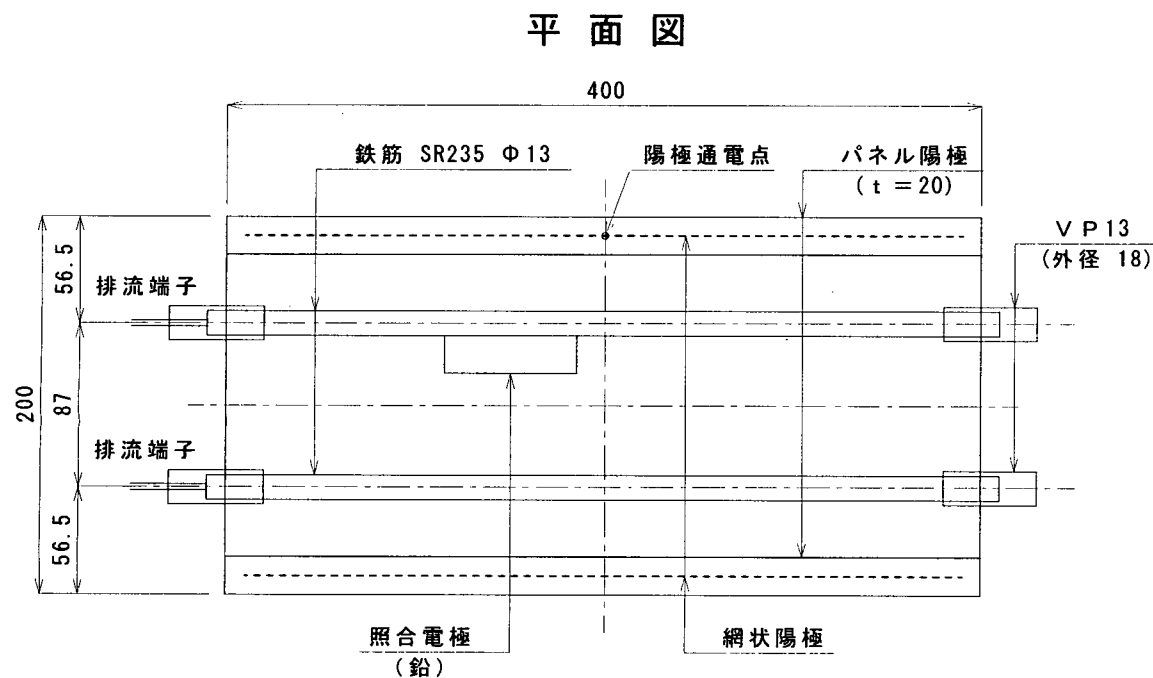
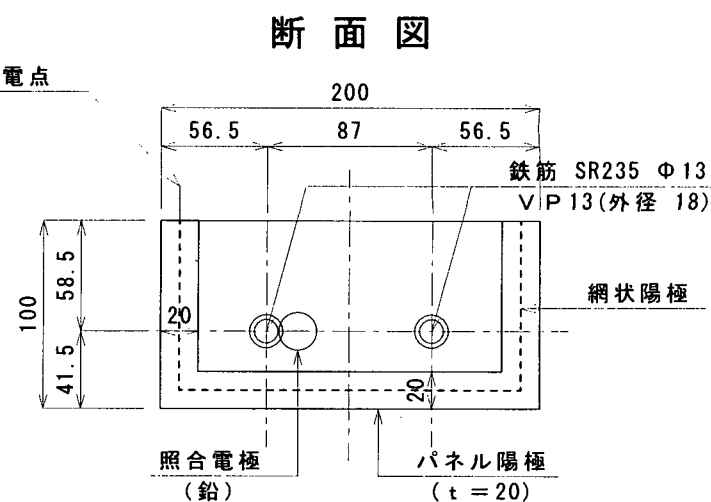
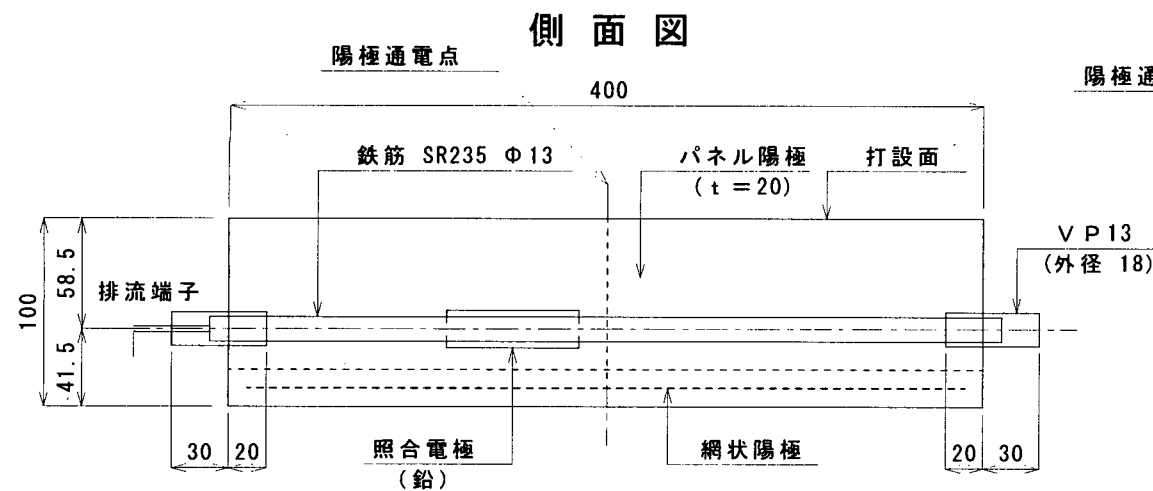


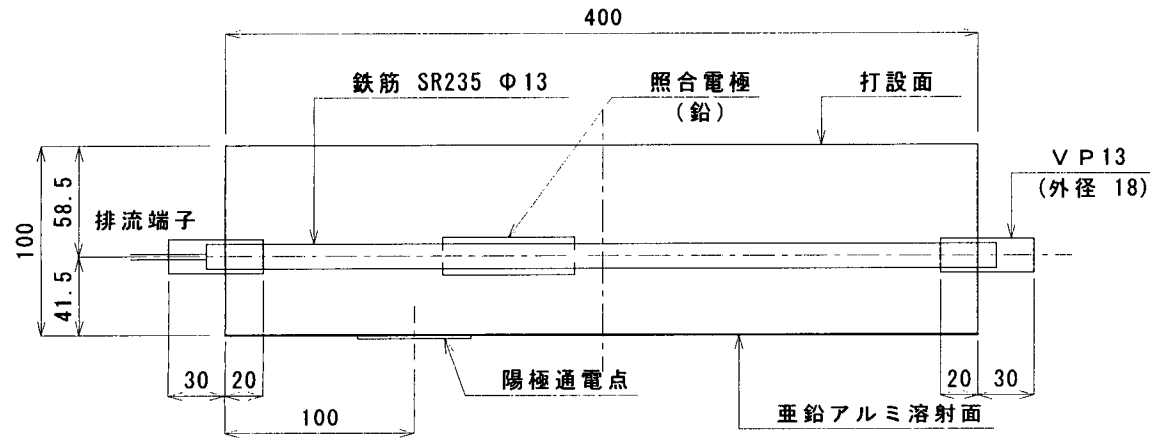
図 2-1 R C 小型供試体 (T G)



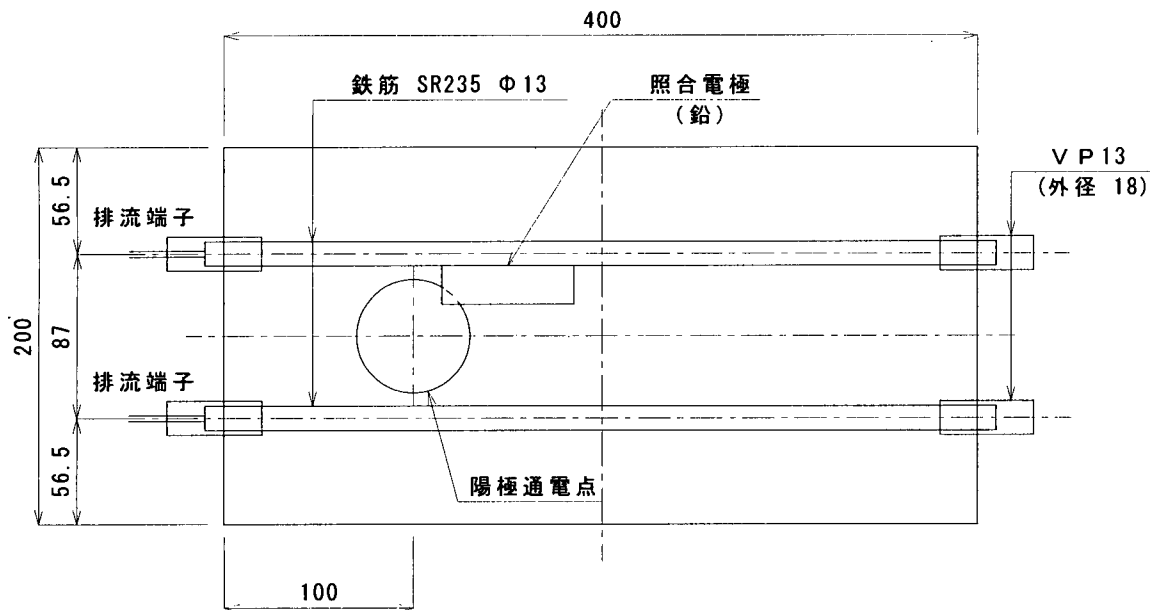
(単位 : mm)

図 2-2 RC 小型供試体 (TM)

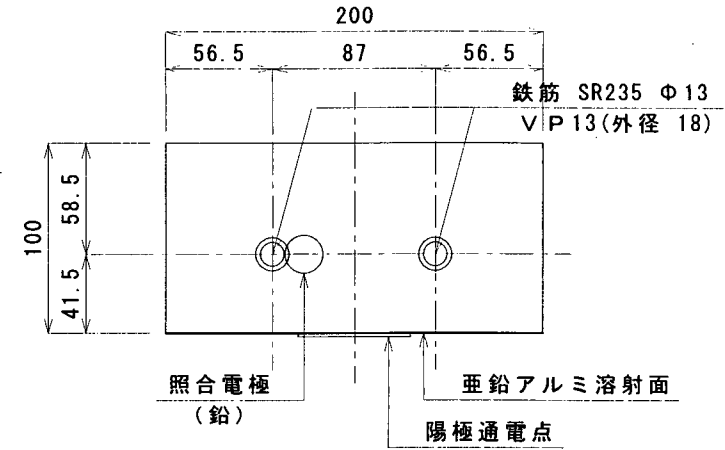
側面図



平面図



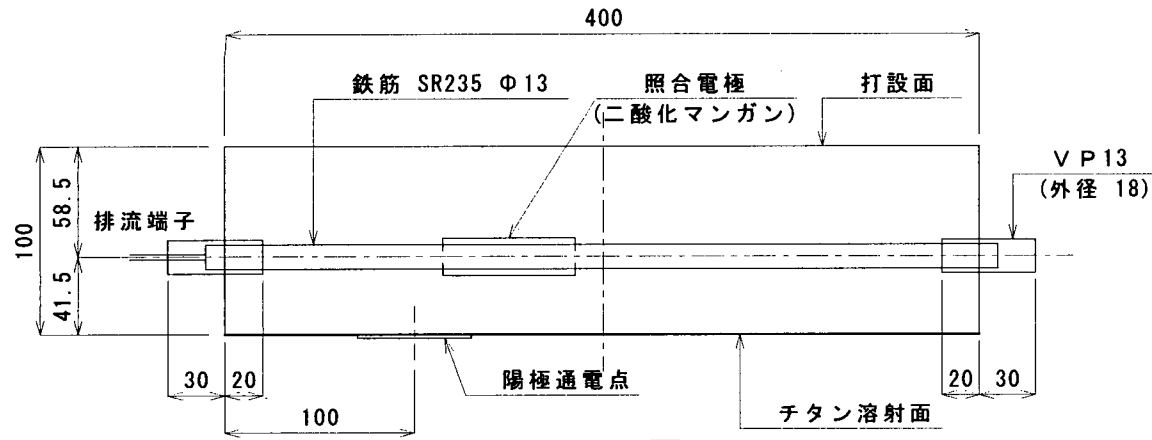
断面図



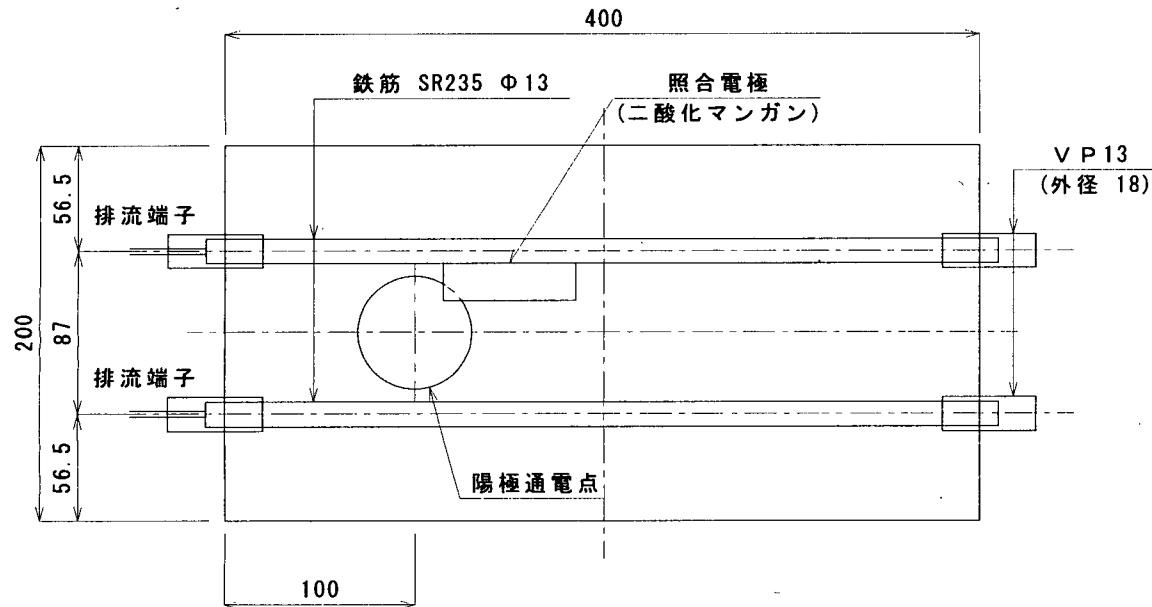
(単位 : mm)

図 2-3 RC小型供試体 (AS)

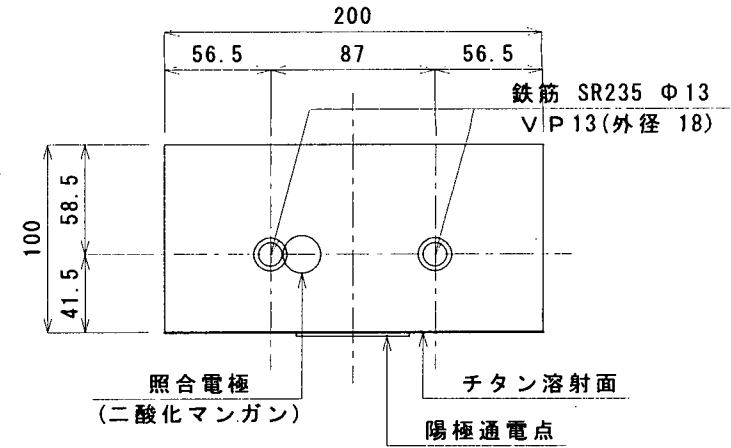
側面図



平面図

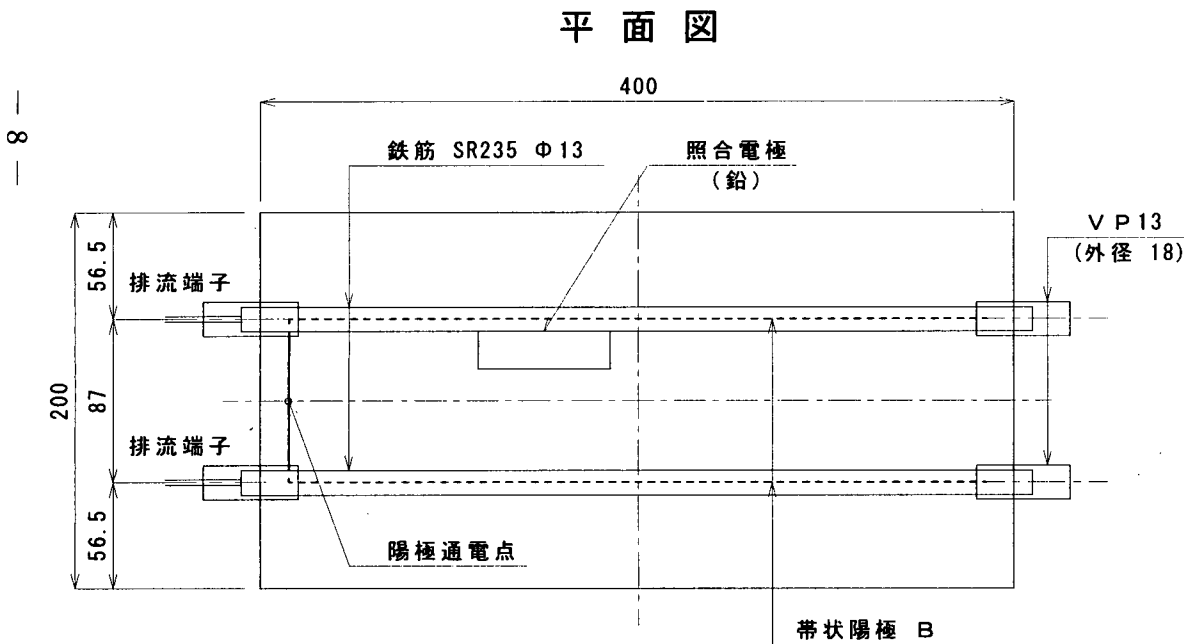
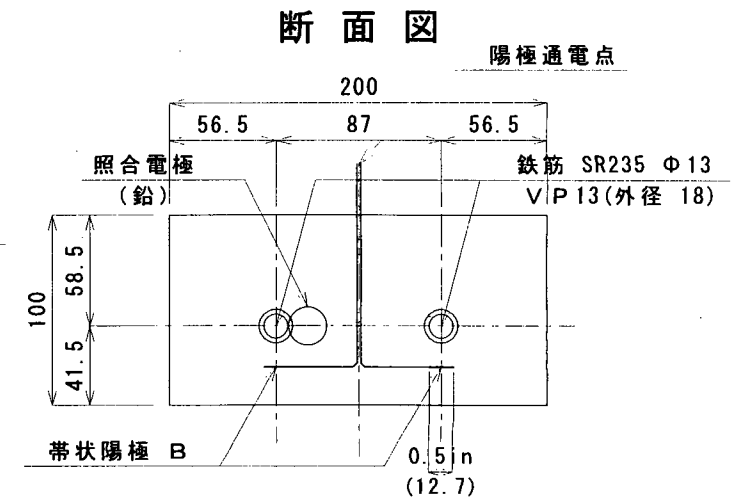
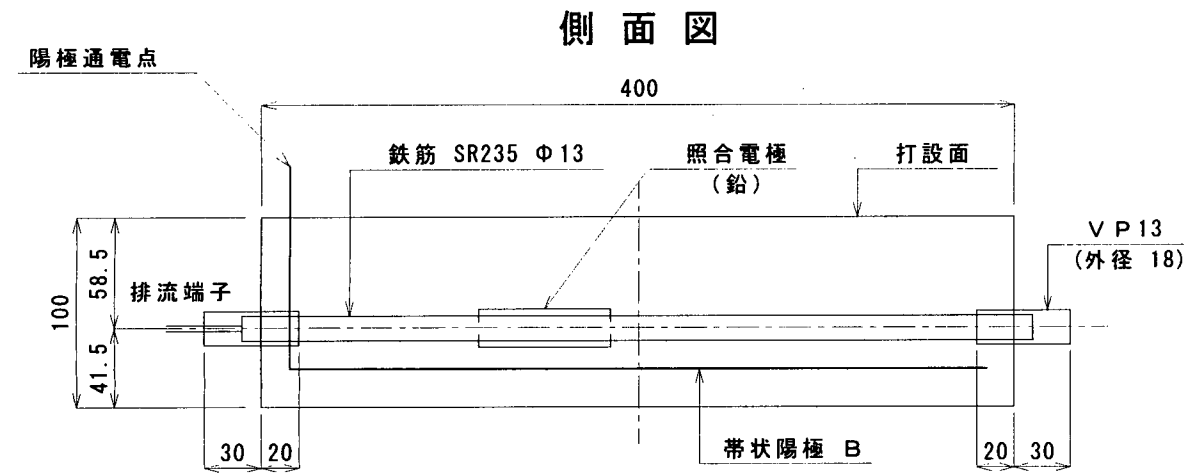


断面図



(単位 : mm)

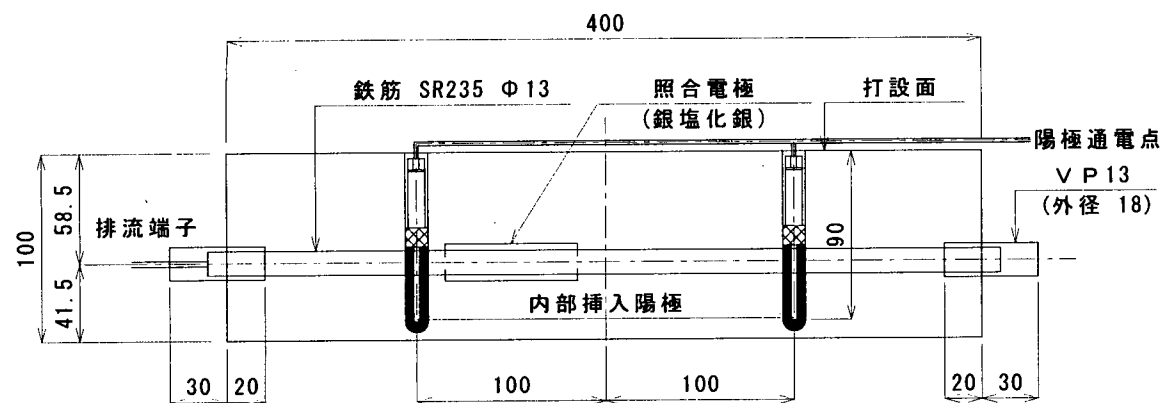
図 2-4 RC小型供試体 (TS)



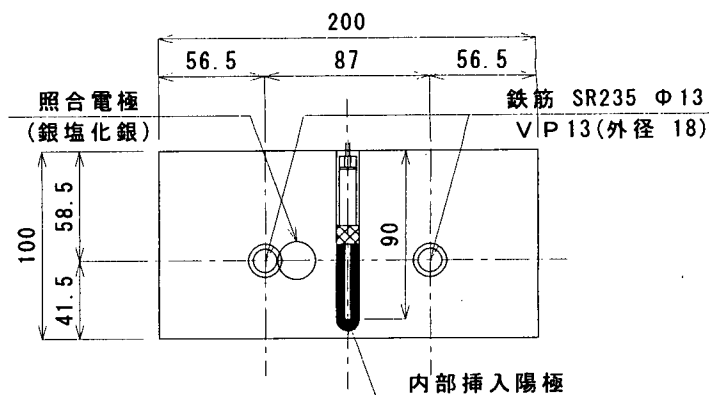
(単位 : mm)

図 2-5 RC 小型供試体 (RM)

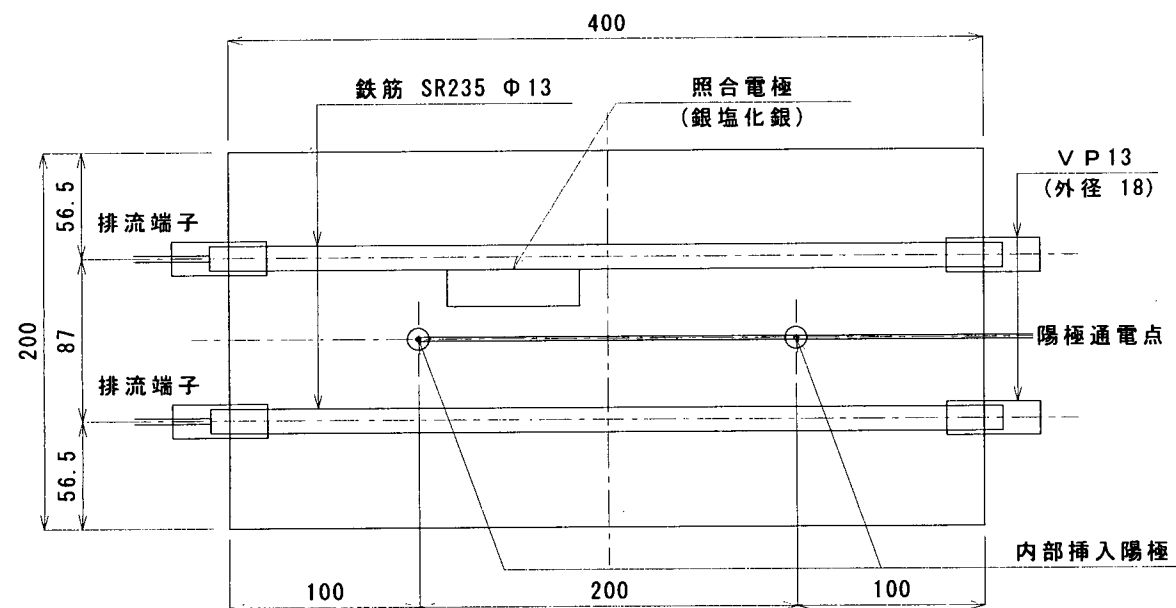
側面図



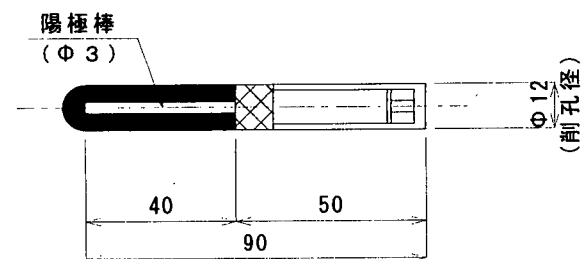
断面図



平面図



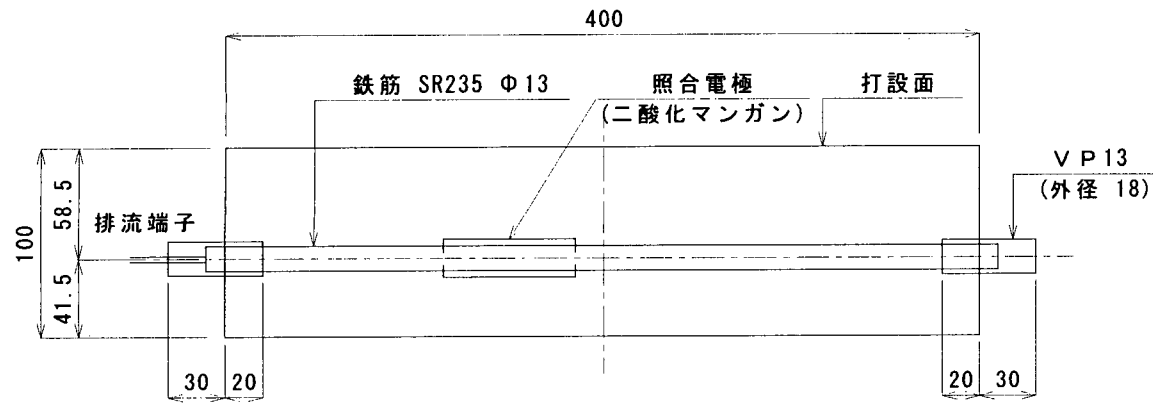
内部挿入陽極



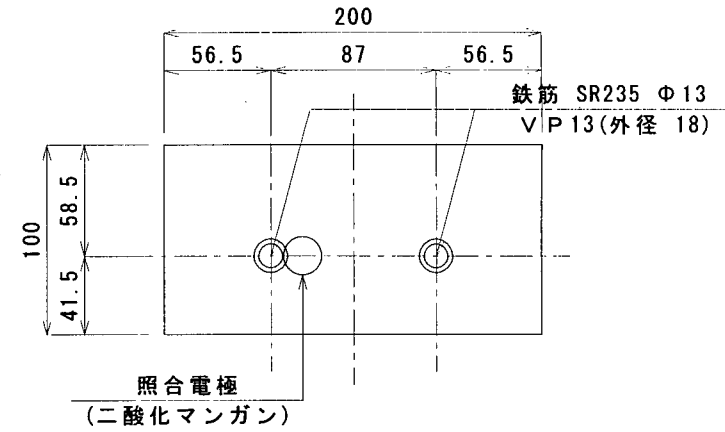
(単位: mm)

図 2-6 RC小型供試体 (TR)

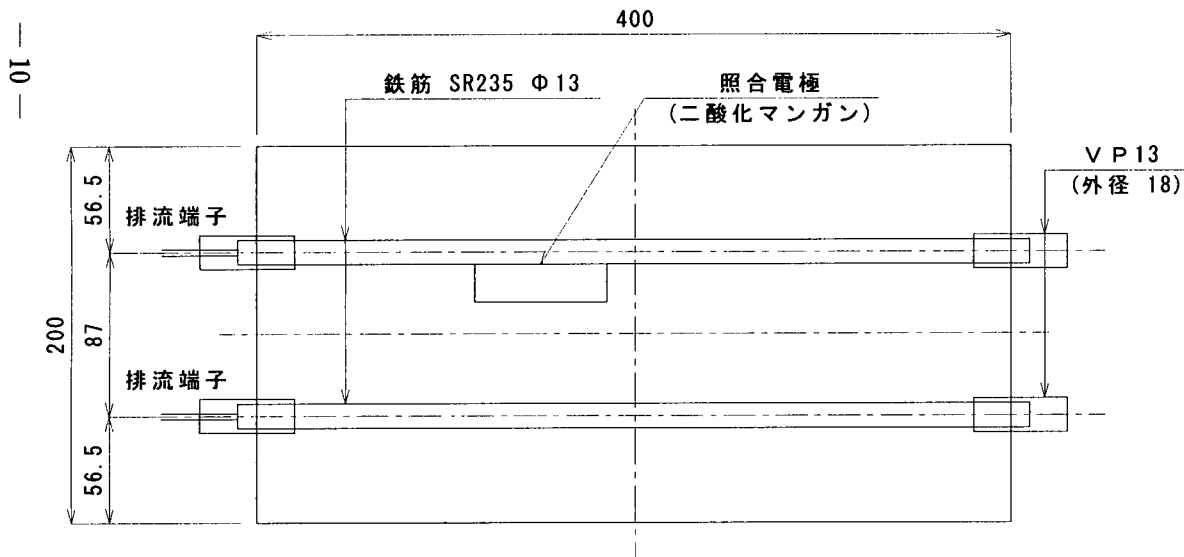
側面図



断面図



平面図



(単位 : mm)

図 2-7 RC小型供試体 (BL)

2. 2. 2 測定項目

(1) 自然電位の測定

腐食が始まったか否かを判定するため、埋設した照合電極を使用し、1月おきに鉄筋の自然電位を測定した。判定基準は、土木研究所共同研究報告書第14号の2章3項の基準（参照）とした。

(2) 分極電位の測定

陽極材料の有無や種類による電気防食の効果の差異を確認するため、上記6種類の電気防食工法を用い試験した。1ヶ月に1回、電位測定を行い、復極量が100 mV前後になるよう電流を調整した。

(3) 鉄筋の腐食量調査

電気防食開始後、半年後および1年半後に、コンクリート供試体を解体し、鉄筋の腐食量を腐食面積率と腐食減量で調査した。

2. 2. 3 試験結果

(1) 通電開始時期と防食効果の関係

各陽極材料毎に6体の供試体を製作し、それぞれコンクリート打設から通電開始するまでの時間や通電の期間を変えた場合の防食効果について調査した。その状況を表2-3に示す。

コンクリート打設から約7月後にNo. 2、3および4供試体の通電を開始した(1998年10月8日)。その際、No. 1供試体を解体し、通電までの腐食面積を調査した。通電開始後半年を経過した時点(1999年4月13日)でNo. 3供試体を解体し腐食面積を調査した。また、No. 5およびNo. 6供試体も通電を開始した。

表 2-3 各供試体の通電状況

供試体No.	1998年2月25日	1998年10月8日	1999年4月13日	1999年10月8日	2000年4月6日
No. 1	打設	解体			
	無防食225日	225			
No. 2	打設	通電開始			→ 解体
	無防食225日	電防546日			
No. 3	打設	通電開始	→ 解体		
	無防食225日	電防187日			
No. 4	打設	通電開始		→ 解体	
	無防食225日	電防365日			
No. 5	打設		通電開始	→ 解体	
	無防食412日		電防178日		
No. 6	打設		通電開始		→ 解体
	無防食412日		電防359日		

1回目の通電開始から1年後に、No. 3(通電期間1年)とNo. 5(通電期間約半年)を解体し、腐食面積と鉄筋の腐食減量を調査した。1年半経過後、残っているNo. 2(通電期間1年半)およびNo. 6供試体(通電期間1年)

を解体し、腐食面積と鉄筋の腐食減量を調査した。なお、腐食面積だけでは防食効果の判定には不十分であることがわかったため、鉄筋の腐食減量調査も途中から実施した。

腐食減量調査から求めた通電開始時期と防食率の関係を図2-8に示す。供試体製作時から防食開始までの期間が225日から412日間あり、塩分を混入したためその間腐食が進行した。その間の腐食面積12～31%とばらつきがあった。防食試験開始半年後の解体試験結果では、無防食試験体で13%腐食面積が増大し、防食試験体では最大で5%の増加であった。腐食面積から評価した場合効果ありと判定できるが定量的評価はできないため、その後は重量測定も行うこととした。その結果、防食開始までの期間が225日の場合、通電率が62%(No. 4供試体)および71%(No. 2供試体)の防食率は全ての電気防食方式の平均で双方とも87%であり、一方、防食開始までの期間が412日の場合、通電率では47および30%の防食率は、それぞれ56と60%であった。腐食減量から見た電気防食の効果は、90%程度確保できることが判明した。また、初期の無防食期間の長さが防食率に大きく影響することがわかった。

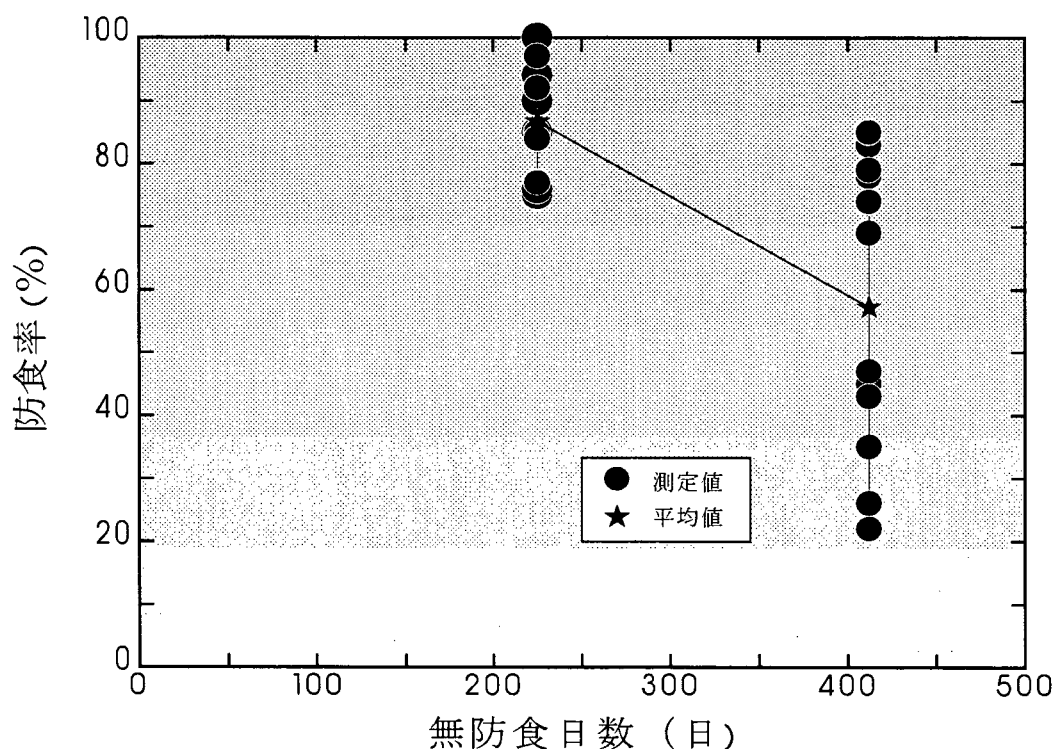


図 2-8 通電率と防食率の関係

(2) 復極量と防食効果の関係

試験期間が最も長いNo. 2供試体の復極量の経時変化を図2-9に示す。電気防食の防食基準として、一般的にいられている100 mV以上の復極量を下回った期間が長いAS供試体は防食率で77%と低く、それ以外は平均で90%の防食効果であった。このことから、復極量100 mV以上の防食基準は妥当であると判断できる。

なお、RW供試体は1本の鉄筋のリード線が破断していたため、一方の鉄筋に電流が全て流入し2倍の電流が

一方の鉄筋に流入していたため、復極量が300 mV近くまで増大した。

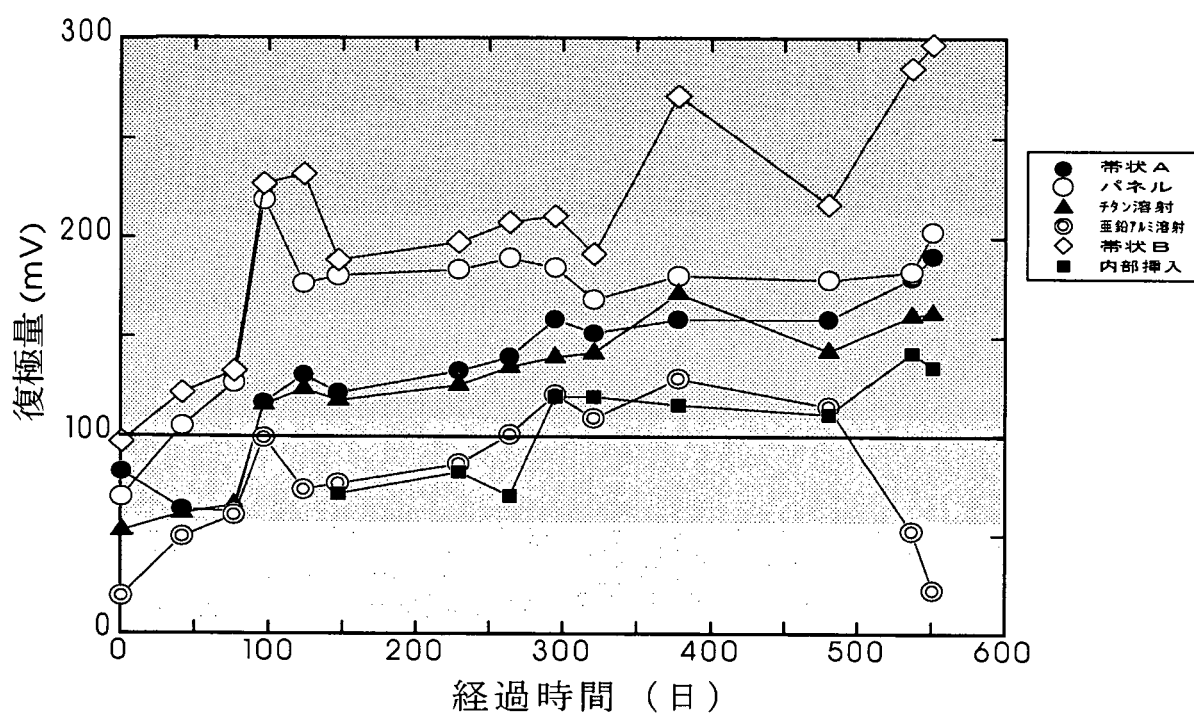


図 2-9 復極量の経時変化

2. 3 電気防食の施工性と維持管理方法の検討

2. 3. 1 試験概要

5種類の電気防食工法について、陽極の施工性を確認するため実物大のプレテンPC大型供試体を用いて、施工性試験を行った。合わせて、電気防食を設置した供試体との対比のための無防食の供試体も製作した。その後、土木研究所構内に供試体を暴露し、経時的調査を実施し、その有効性を確認した。電気防食工法の維持管理の効率化を目的とした遠隔管理システムの有効性を確認した。

(1) 供試体の種類と形状

① コンクリートの配合

供試体に用いたコンクリートの配合を表2-4に示す。セメントは早強ポルトランドセメント、設計基準強度を49.1 N/mm²とした。塩化物が浸透した構造物を模擬するため、供試体作製時に5.6 kg/m³の塩化物(NaClで10 kg/m³)を混入した。

表 2-4 コンクリートの配合

粗骨材 の最大 寸法 (mm)	スラブ・フロー の範囲 (cm)	空気量 の 範囲 (%)	水セメント 比 W/C (%)	細骨材 率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)					NaCl (kg/m ³)
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤	
									高性能減水剤	
20	8.0	1.5	37.1	39.0	156	420	710	1128	4.620	5.5

②供試体形状

供試体の形状は、横640×高さ350×長さ5300 mm(スラブ橋 JIS A 5313 AS-05 相当品)である。

(2) 暴露条件

土木研究所構内の建設材料研究施設に暴露した。なお、大気中暴露である。

(3) 電気防食工法

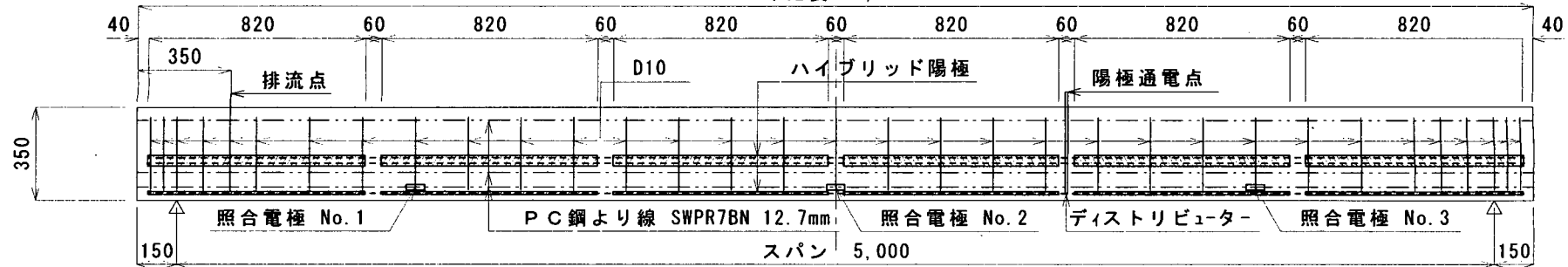
試験に用いた5種類の電気防食工法を以下に示す。また、供試体に設置した状況を図2-10～14に示す。併せて、比較のため無防食の供試体(図2-15)も製作した。

- ① 帯状陽極A(TG)方式
- ② パネル陽極(TM)方式
- ③ 亜鉛アルミ溶射(AS)方式
- ④ チタン溶射(TS)方式
- ⑤ 帯状陽極B(RM)方式

側面図

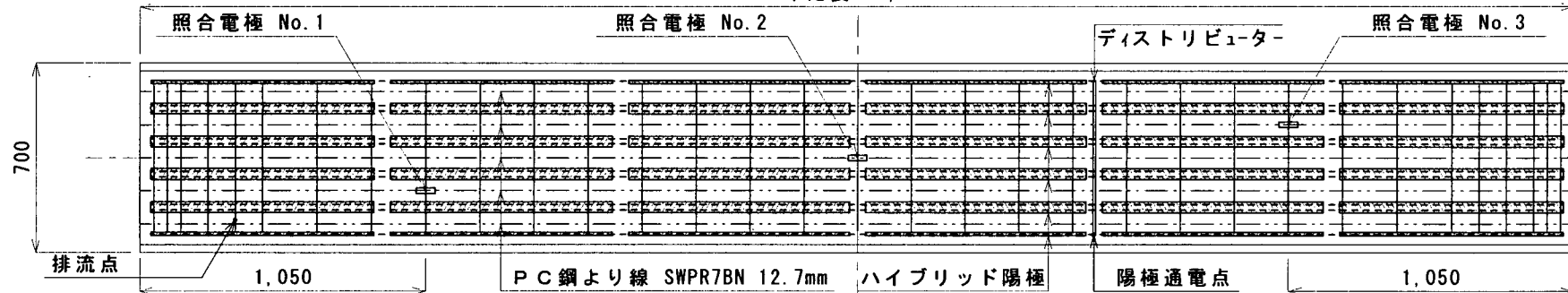
(単位: mm)

けた長 5,300



平面図

けた長 5,300

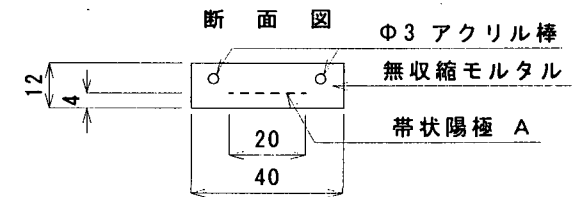


断面図

PC 桁の詳細構造は、図 2-15 参照

照合電極: 銀ハフニウム

ハイブリッド陽極詳細図



側面図

平面図

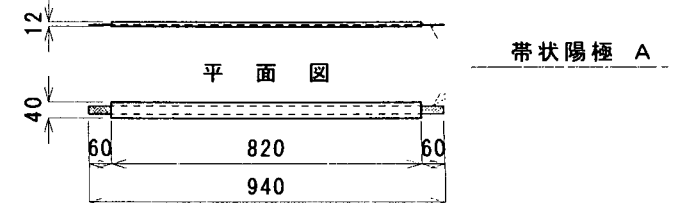
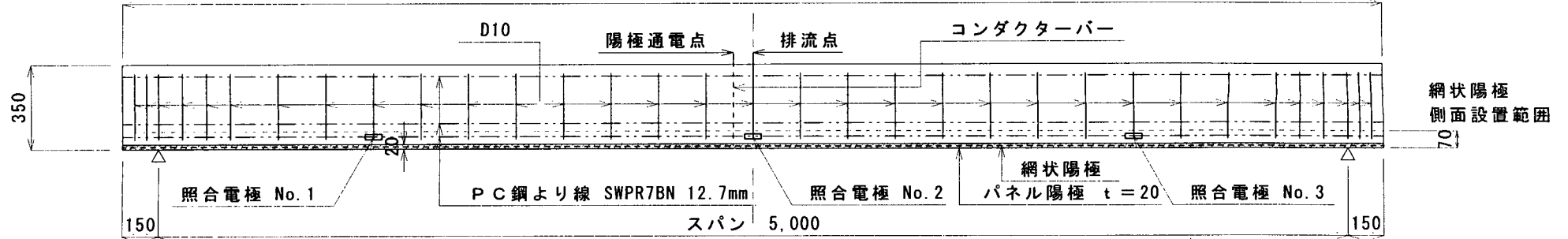


図 2-10 PC 桁供試体 (TG)

側面図

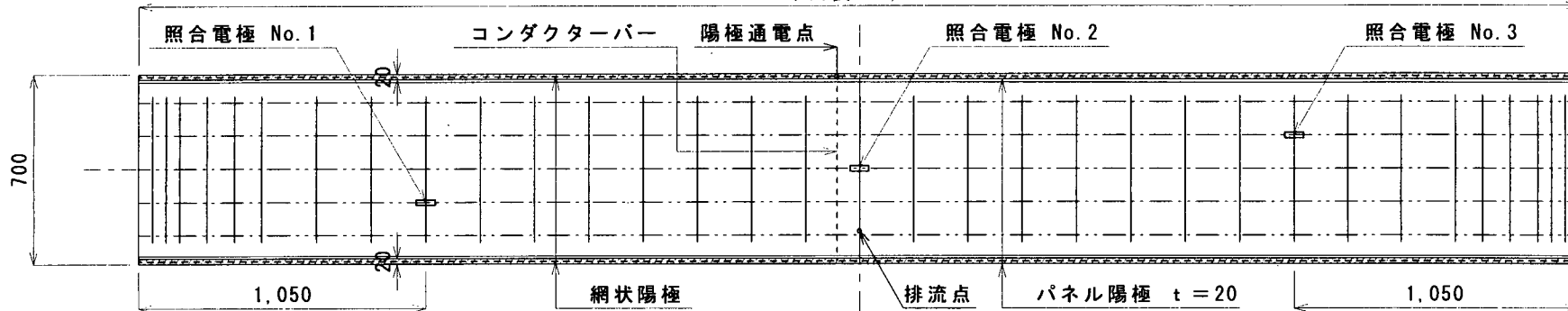
(単位: mm)

けた長 5,300



平面図

けた長 5,300



断面図

640

照合電極: 鉛

PC桁の詳細構造は、図 2-15 参照

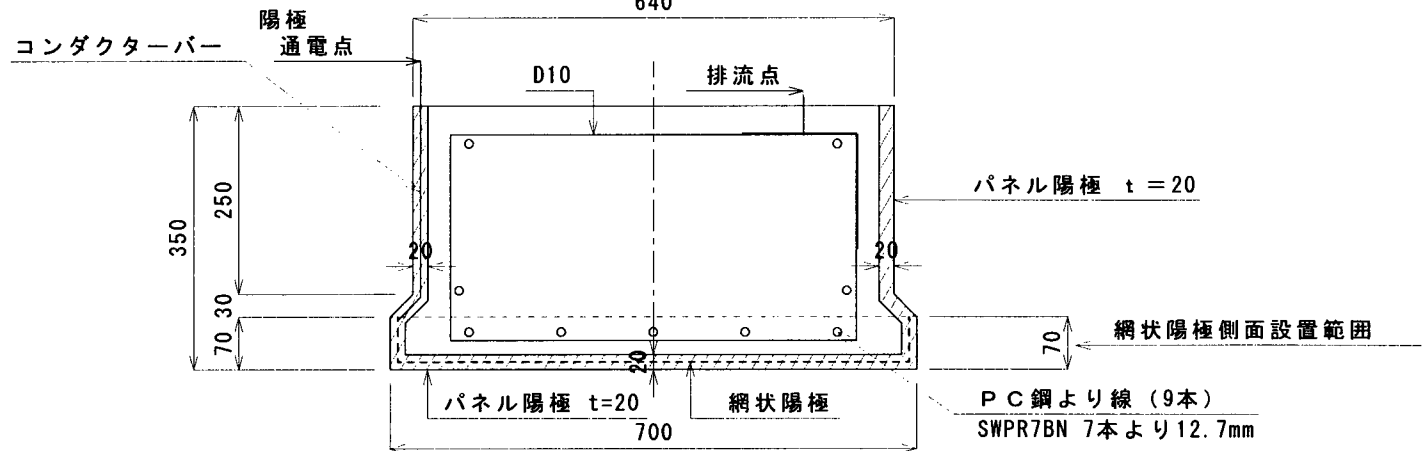
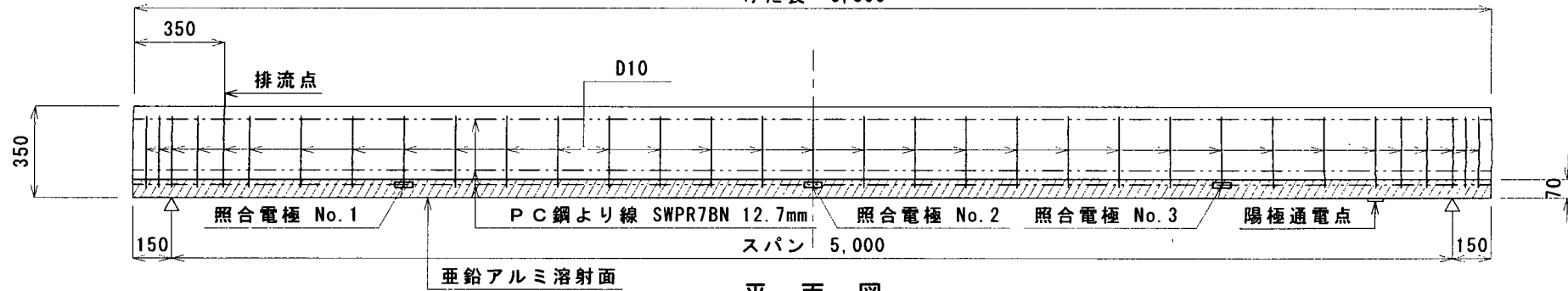


図 2-11 PC桁供試体 (TM)

側面図

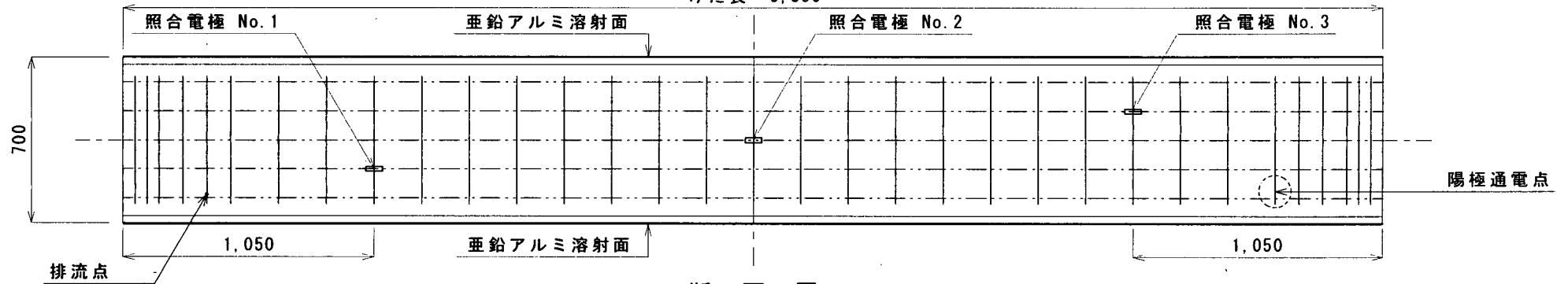
(単位：mm)

けた長 5,300



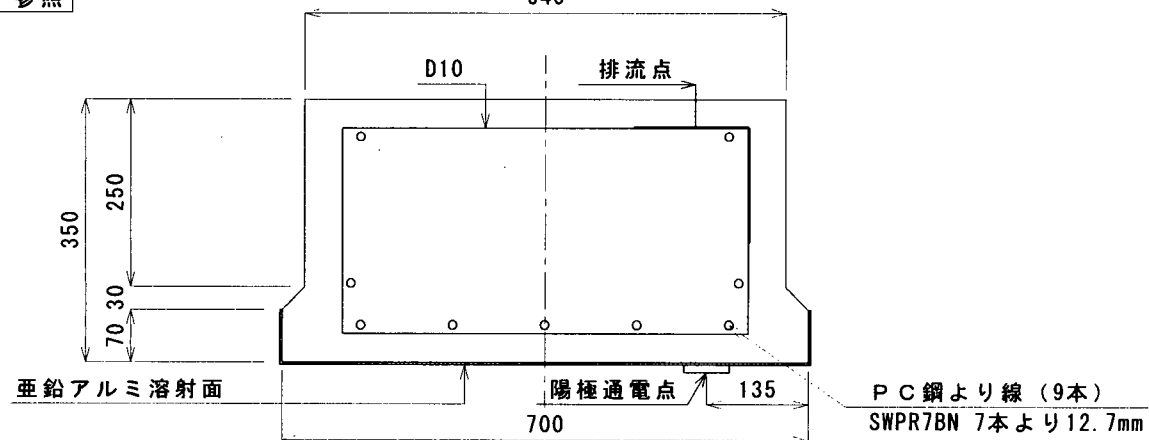
平面図

けた長 5,300



断面図

640



PC桁の詳細構造は、図 2-15 参照

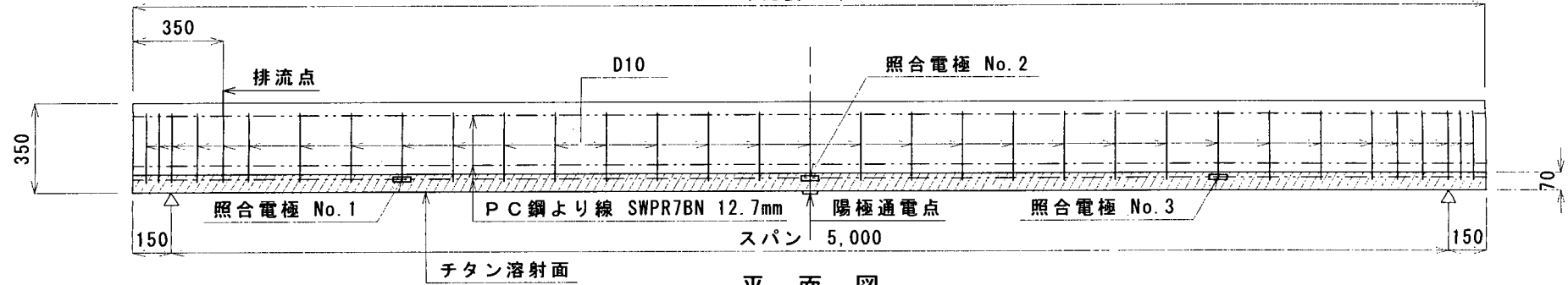
照合電極：鉛

図 2-12 PC桁供試体 (AS)

側面図

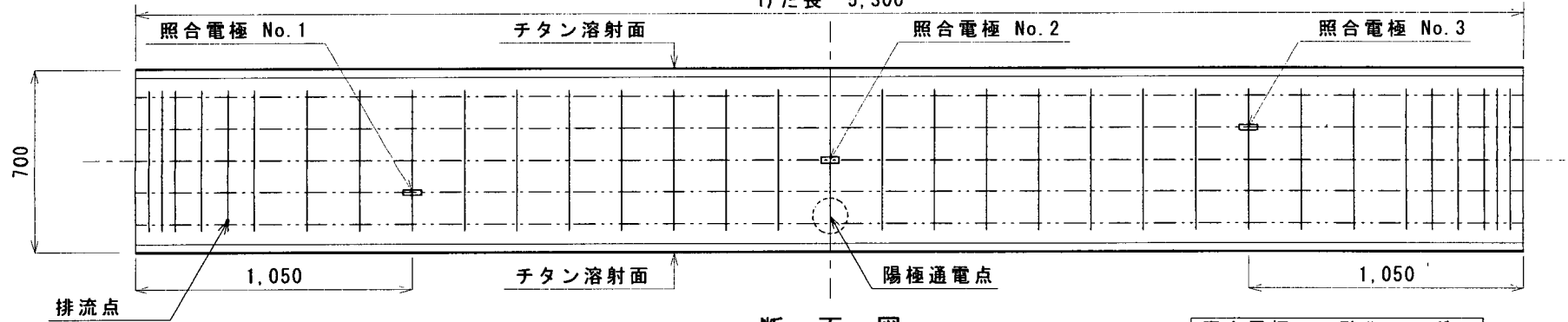
(単位：mm)

けた長 5,300



平面図

けた長 5,300



断面図

640

照合電極：二酸化マンガ

P C 桁の詳細構造は、図 2-15 参照

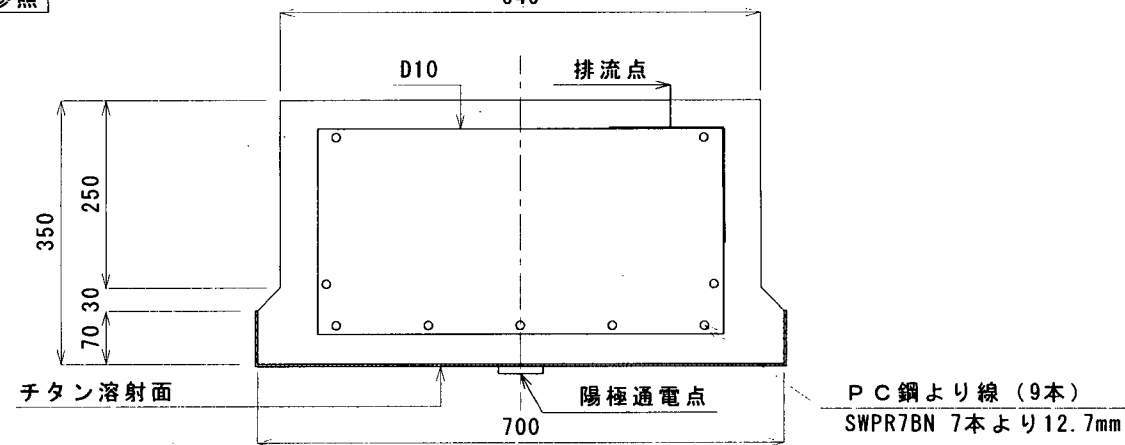
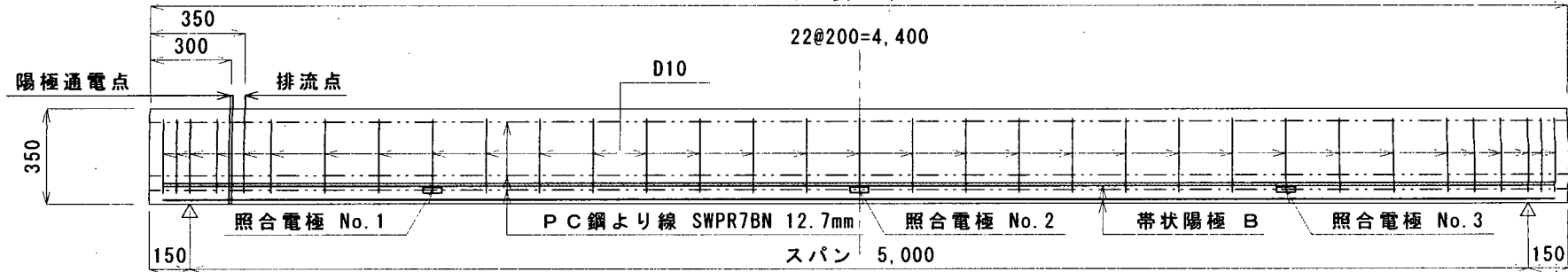


図 2-13 P C 桁供試体 (TS)

側面図

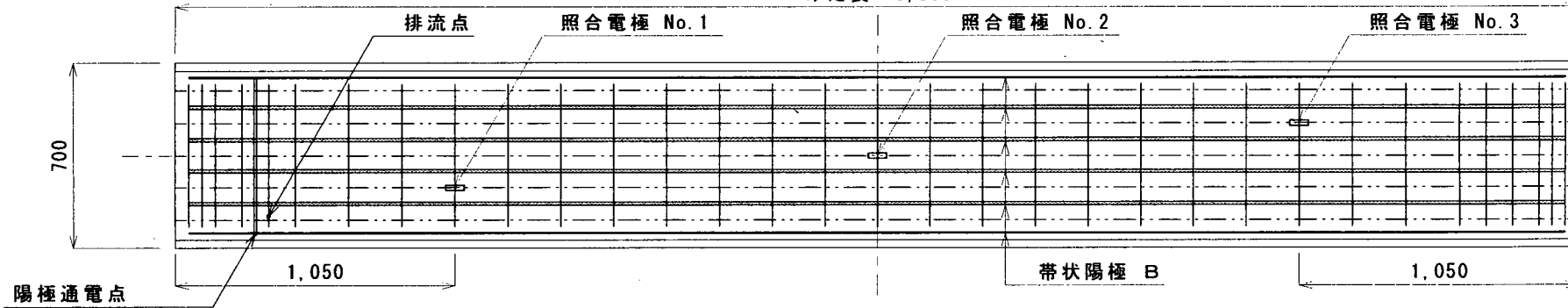
(単位: mm)

けた長 5,300



平面図

けた長 5,300



断面図

照合電極: 鉛

PC桁の詳細構造は、図 2-15 参照

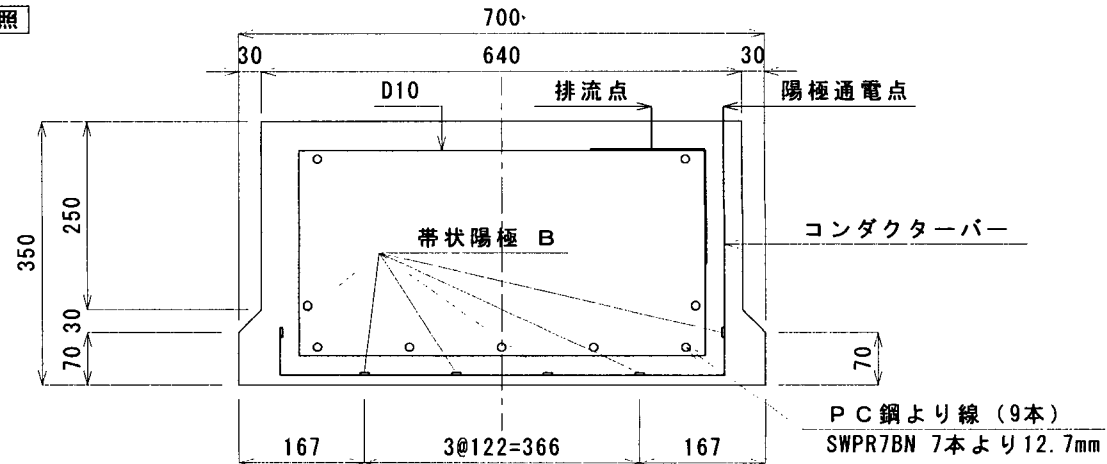
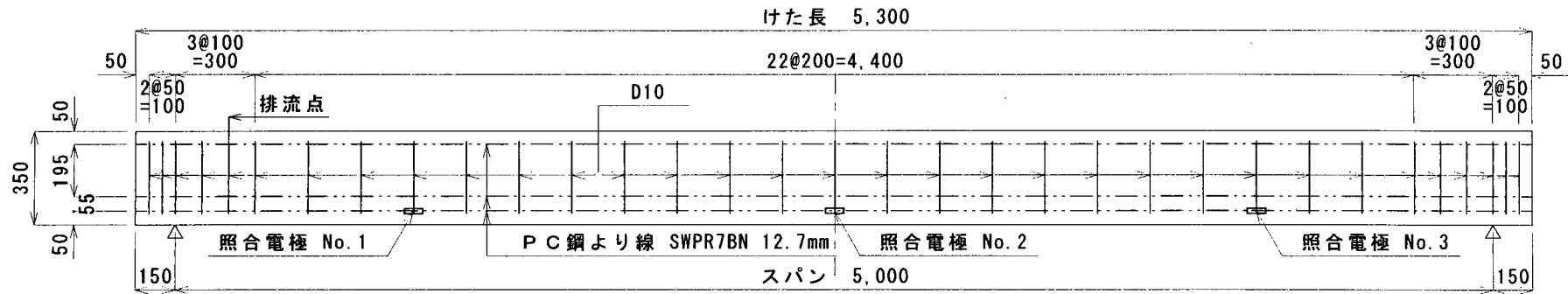


図 2-14 PC桁供試体 (RM)

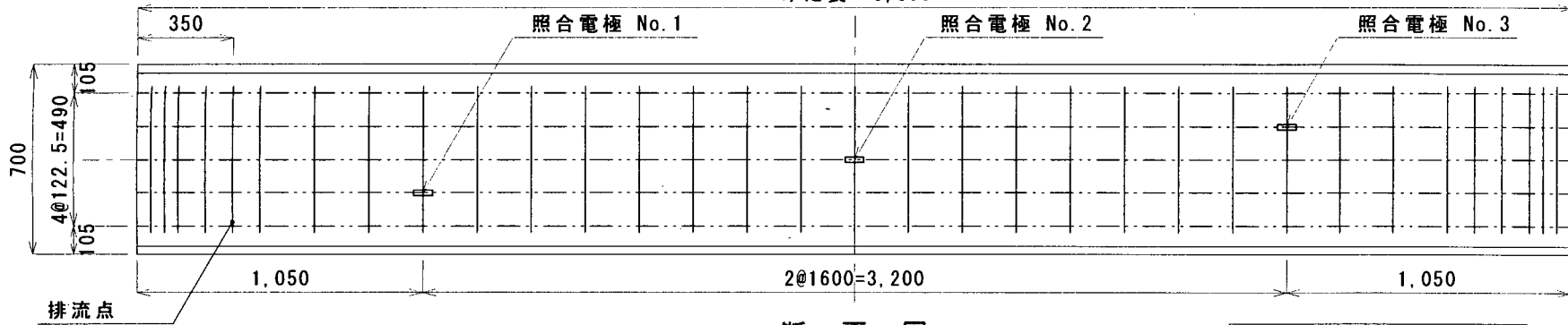
側面図

(単位 : mm)



平面図

けた長 5,300



断面図

照合電極 : 二酸化マンガ

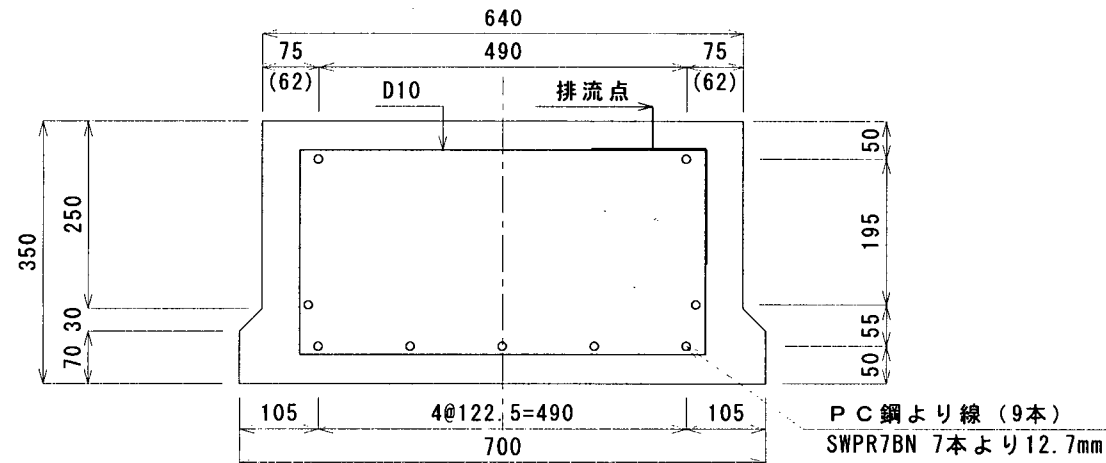


図 2-15 PC桁供試体 (BL)

2. 3. 2測定項目

(1) 施工性確認試験

桁の製作工程に何ら支障なく陽極の設置ができた。

(2) 分極電位の測定

試験開始から1年半の間は、現地の赴き、供試体1体につき3個埋設した照合電極により、鉄筋、陽極のON、IO電位およびOFF4時間後電位、通電電流、通電電圧を1～2ヶ月おきに測定を行った。その際、外観観察も行った。

(3) 遠隔監視システムによる遠隔制御

西暦2000年2月に、電話回線を利用した遠隔監視システムを設置し、埋設した照合電極による鉄筋のインスタントオフ電位(E_{io})、インスタントオフ電位から通電オフ4時間後までの電位変化の連続測定、通電電流、通電電圧の測定を実施した。また、遠隔操作による通電電流の調整も行った。

2. 3. 3試験結果

(1) 電気防食試験結果

測定結果を図2-16に示す。全ての供試体で100 mV以上の復極量が得られており、正常に防食電流を供給できているものと判断できる。また、その時の防食電流密度は5 mA/m²と少ない電流で防食が可能であった。

無防食の供試体の自然電位は、約300日経過後に一時卑化したがその後上昇した。自然電位から見た腐食判定では、腐食していないものと判断できる。

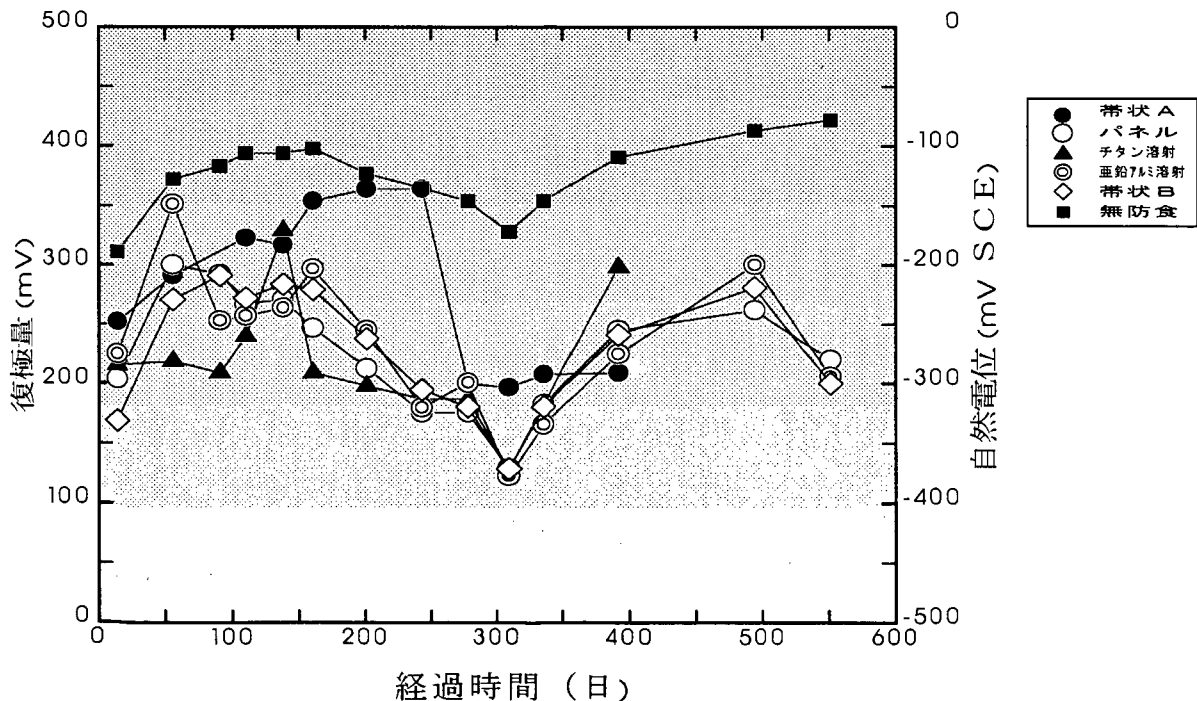


図2-16 プレテン大型供試体の復極量と自然電位の経時変化

(2) 各陽極材料の外観

暴露開始後約1年半経過した時点までは、全く変状はみられず、開始時の外観を維持している。

(3) 遠隔監視装置による管理結果

電話回線を利用し、鉄筋電位と出力電圧をモニターした結果の一部を図2-17に示す。本供試体(TS)は、定電流方式で通電しているため、陽極と鉄筋間の抵抗に逆比例して出力電圧が調整されていることがモニターできた。また、鉄筋電位(インスタントオフ電位)も1日の間で変化していることもモニターできた。この原因は、気温の変化によって、鉄筋の分極抵抗が変化することや照合電極電位が変化するためであると思われる。

遠隔で復極量の測定を実施した1例を図2-18に示す。このように遠隔監視装置を利用することによって、簡易に電気防食を維持管理できることがわかる。

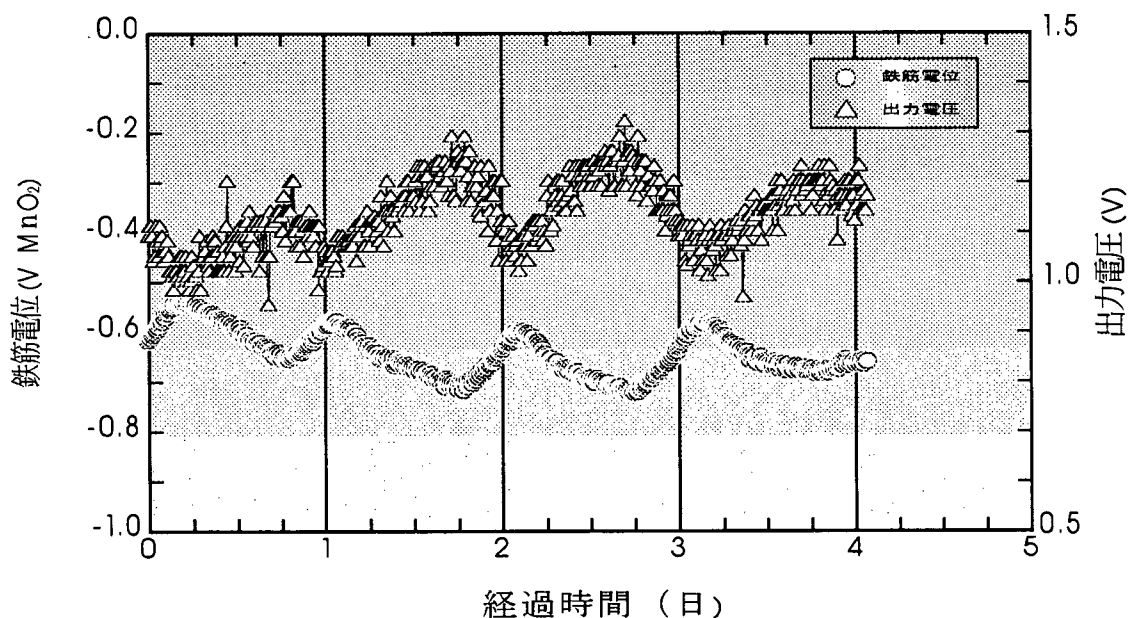


図 2-17 プレテン大型供試体 (TS) モニター例

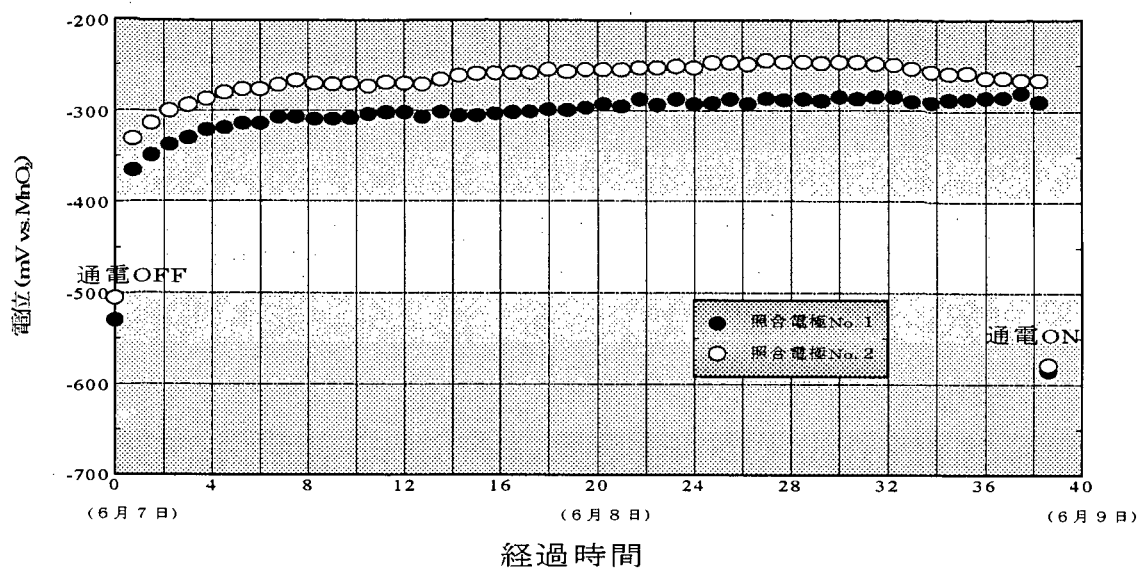


図2-18 鉄筋電位の経時変化（遠隔監視による通電のON、OFF）

2. 4 長期電気防食効果の検証

2. 4. 1 試験概要

本試験は、1985年（昭和60年）から開始した建設省総合技術開発プロジェクト「コンクリートの耐久性向上技術の開発」において実施された研究課題の一環としておこなわれた研究「コンクリート構造物の電気防食に関する共同研究」において製作した供試体を用いて実施した。試験開始当初の目的は、大型プレストレストコンクリート桁に電気防食を適用した場合の施工性の検証と防食効果の確認であった。以後約12年間、電気防食を適用し続け、電気防食効果の判定には十分な時間が経過したので、解体調査を行い、その効果を検証することを目的とした。

(1) 供試体の種類と形状

① コンクリートの配合

供試体に用いたコンクリートの配合を表2-5に示す。セメントは早強ポルトランドセメント、設計基準強度を39.2N/m²とした。

表2-5 コンクリートの示方配合表

粗骨材 の最大 寸法 (mm)	スランプ・フロー の範囲 (cm)	空気量 の 範囲 (%)	水セメント 比 W/C (%)	細骨材 率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)					NaCl (kg/m ³)
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 高性能減水 剤	
20	8.0 ±2.0	2.0 ±1.0	37.1	39.4	156	420	712	1150	4.2	2.4

② 供試体形状

供試体の形状は、横350×高さ900×長さ5000mm（供試体の種類：スラブ橋旧 JIS A5313I型ポストテンションPC桁）で、塩害環境を模擬するため作製時に総量規制値のほぼ5倍である2.4kg/m²の塩分（NaCl）を混入した。供試体の形状を図2-14に示す。

(2) 暴露条件

通電開始約2年間は、1週間に5回、3%塩化ナトリウム水溶液を散水し、その後は大気中に自然暴露した。

(3) 電気防食工法

試験に用いた2種類の電気防食工法の陽極材料の種類と施工仕様を表2-6に示す。

表 2-6 陽極材料の種類と施工仕様

供試体No.	陽極材		表面処理工	仕上被覆工	埋設モリタック [®] 装置	備考
	一次陽極	二次陽極				
No. 1 (網状陽極方式) (TM)	酸化物被覆チタン網状陽極 施工範囲 W=4.3m L=2.4m	——	サンドブラスト 施工範囲 W=4.4m L=2.5m ブラスト厚=1mm	ポリマーセメントアルモルタル吹き付け 施工範囲 W=4.4m L=2.5m 吹付厚=20mm	鉛照合電極 6 本 マクロセルフロー [®] 6 本	電気防食
No. 2		——			鉛照合電極 6 本 マクロセルフロー [®] 6 本	無防食 (比較用)
No. 3 (導電塗料方式) (CC)	白金めっきチタン線状陽極 φ 1.5mm 施工量 L=4.2m×3本	導電性塗膜 施工範囲 W=4.3m L=2.5m 吹付厚 300μ	水洗い	水溶性アクリル樹脂塗料吹付 施工範囲 W=4.4m L=2.5m 吹付厚 70μm	鉛照合電極 6 本 マクロセルフロー [®] 6 本	電気防食

2. 4. 2 測定項目及び方法

(1) 電位測定

1) 電気防食供試体

電気防食供試体 (No. 1 及び No. 3) について図 2-19 に示す計測孔内に飽和甘こう基準電極(SCE) を押し当てオン電位 E_{on} 、インスタントオフ電位 E_{io} 及び 4 時間電位 E_{off4} 、オフ 24 時間電位 E_{off24} を測定した。

2) 無防食供試体

無防食供試体 (No. 2) について、図 2-19 に示す計測孔の位置に飽和甘こう基準電極(SCE) を押し当て自然電位を測定した。

(2) 分極試験

電気防食供試体 (No. 1 及び No. 3) について、オフ電位 E_{off24} 測定完了後に下記の電流密度において、インスタントオフ電位 E_{io} を測定した。電位測定の方法は、照合電極の配置に最も近い計測孔 (合計 6 点体) に飽和甘こう基準電極(SCE) を押し当てインスタントオフ電位 E_{io} を測定した。

電流密度: 0, 1, 2, 5 および 10 mA/m²

測定結果は、縦軸にインスタントオフ電位 E_{io} 、横軸に電流密度の対数目盛のグラフで表し、実験開始時「土木研究所共同研究報告書 (整理番号: 14 号)」のグラフと比較検討した。

(3) 表面観察

各供試体の表面を観察し、たたき試験を行ってコンクリートの浮き、はく離箇所等を確認した。

各供試体については写真撮影を行うとともに、展開図に劣化状況を記入した。

(4) 塩分濃度測定

1) コア採取

コア (φ 50 mm) を供試体の下フランジ下面中央および、ウェブ中央から採取した。

2) 塩分分析

塩分分析は「硬化コンクリート中に含まれる全塩分の簡易分析方法 (JCI-SC5) <塩化物イオン選択性電極を用いた電位差滴定法>」に従って全塩分量を測定し、分析結果は単位コンクリート体積当たりの塩化物イオン質量 (Cl kg/) とした。

(5) 鋼材表面観察

寸法が 0.5 m × 0.5 m の範囲で供試体の鉄筋、シースをはつりだし、表面状態を観察した。

(単位: mm)

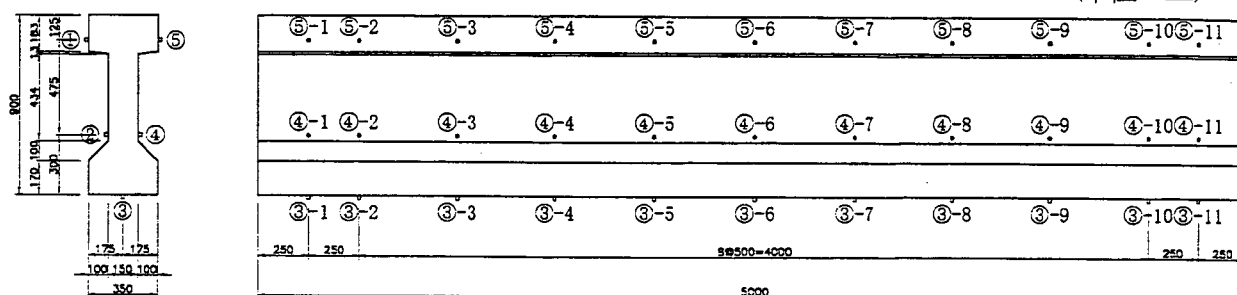


図 2-19 電位計測孔配置図

2. 4. 3 施工法の検証

施工法の検証は、土木研究所共同研究報告書 (整理番号: 第 14 号) に報告してある。

2. 4. 4 試験結果

(1) 通電状況

供試体の解体調査前における通電状況を表 2-7 に示す。

防食電流密度は供試体 No. 1 及び No. 3 においてそれぞれ 2.8 及び 2.7 mA/m² であり、僅かであった。

表 2-7 通電状況

(符号がマイナスの場合電流が流出傾向)

		面 積 (m ²)	電 圧 (V)	電 流 (mA)	電流密度 (mA/m ²)
供試体 No. 1	全体	4.3×2.4=10.3	1.2	29.1	2.8
	シーす	—	—	0.18	—
供試体 No. 2	鉄筋	—	—	-0.014	—
	シーす	—	—	+0.014	—
供試体 No. 3	全体	4.3×2.5=10.8	2.1	29.1	2.7
	シーす	—	—	測定不能 (スイッチ故障)	—

(2) 電気防食供試体の復極量 ΔE_{24} 分布

電気防食供試体 (No. 1 および No. 3) における復極量 ΔE_{24} 分布を図 2-20 及び図 2-21 に示す。ここで、復極量 ΔE_{24} はオフ 24 時間後の電位 E_{24} からインスタントオフ電位 E_{io} を減じたものである。

両供試体においても、 ΔE_{24} は全ての測定個所において、防食基準である 100 mV 以上の復極量が得られた。

(3) 無防食供試体

無防食供試体 (供試体 No. 2) における自然電位分布を図 2-22 に示す。

自然電位は、下フランジの側面及び下面で -200 mV vs. SCE よりも卑な値を示した。

(4) 分極試験

分極試験結果を図 2-23 及び図 2-24 に、実験開始時の分極試験結果 (共同研究報告書第 14 号より) と併せて示す。

分極試験の結果を比較した結果、供試体 No. 1 および No. 3 共に実験開始時より勾配が急になっており両供試体とも分極が進んだ。

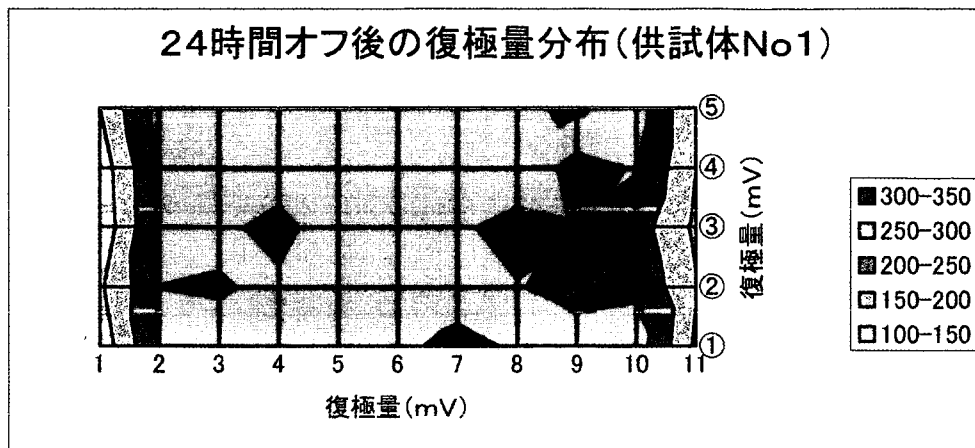


図 2 - 2 0 供試体 No.1 の復極量 ΔE_{24} 分布

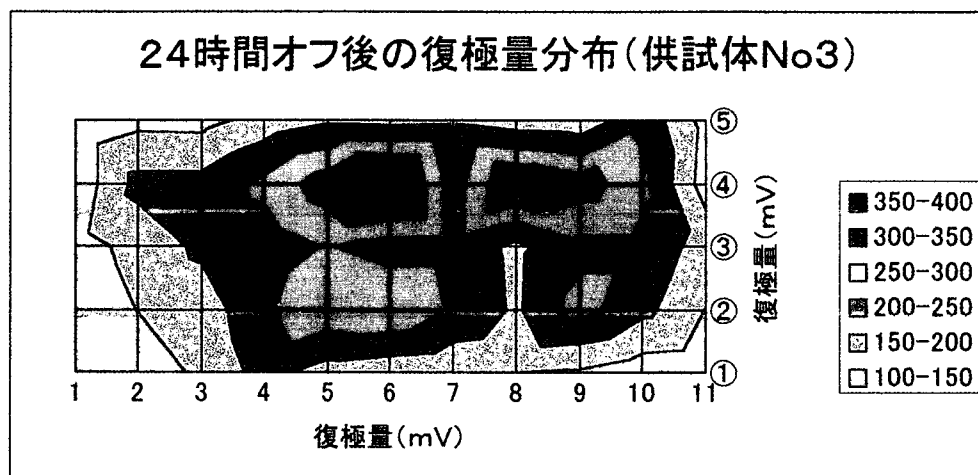


図 2 - 2 1 供試体 No.3 の復極量 ΔE_{24} 分布

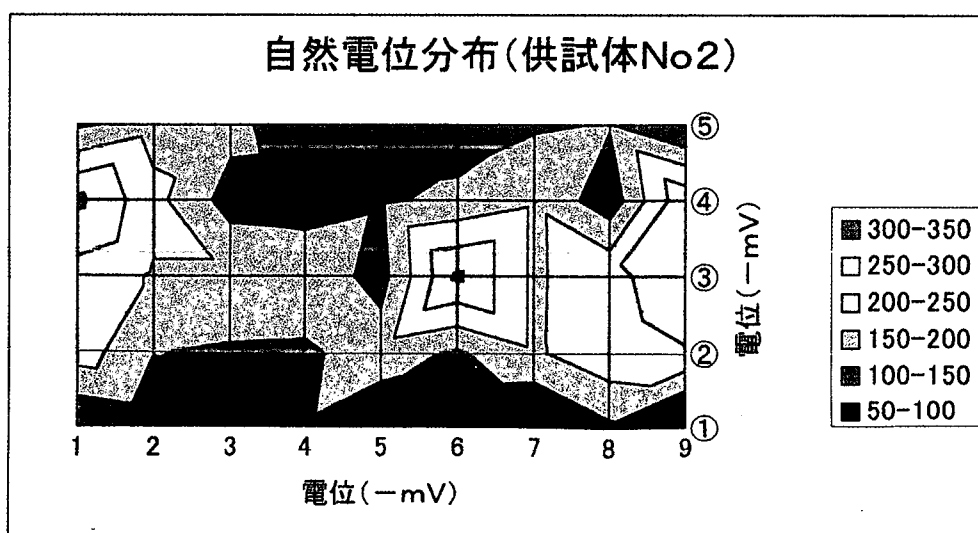


図 2 - 2 2 供試体 No.2 の自然電位分布

分極試験(供試体No1)

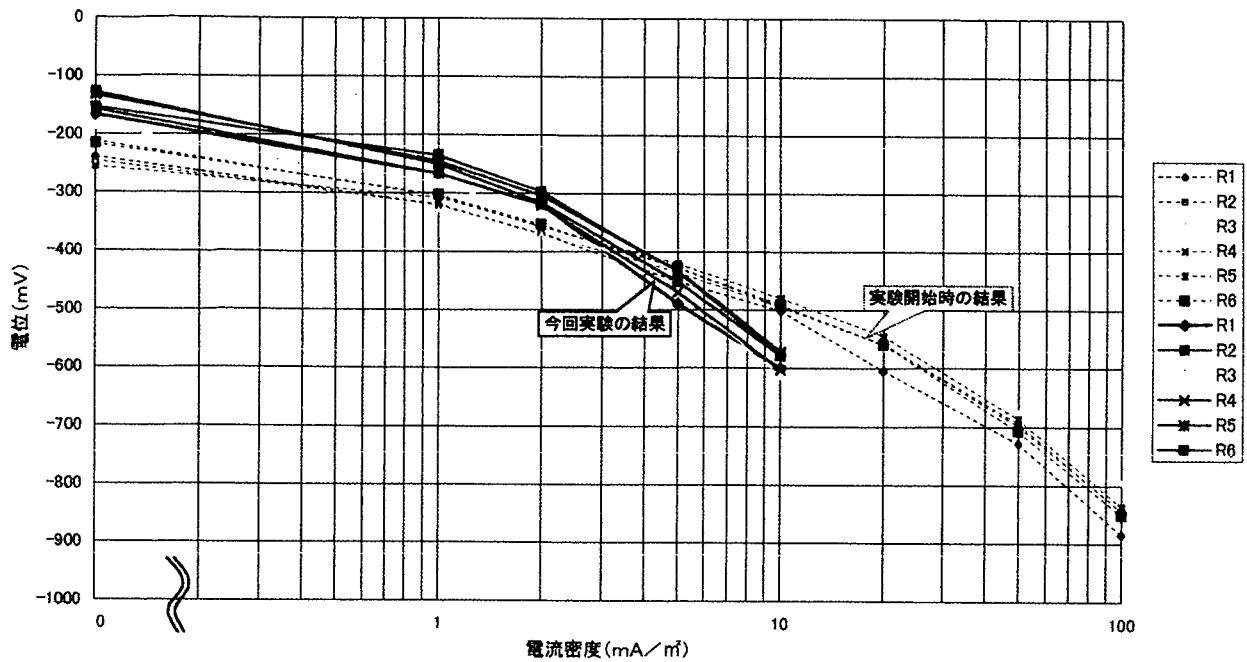


図 2 - 2 3 供試体 No.1 の分極試験結果

分極試験(供試体No3)

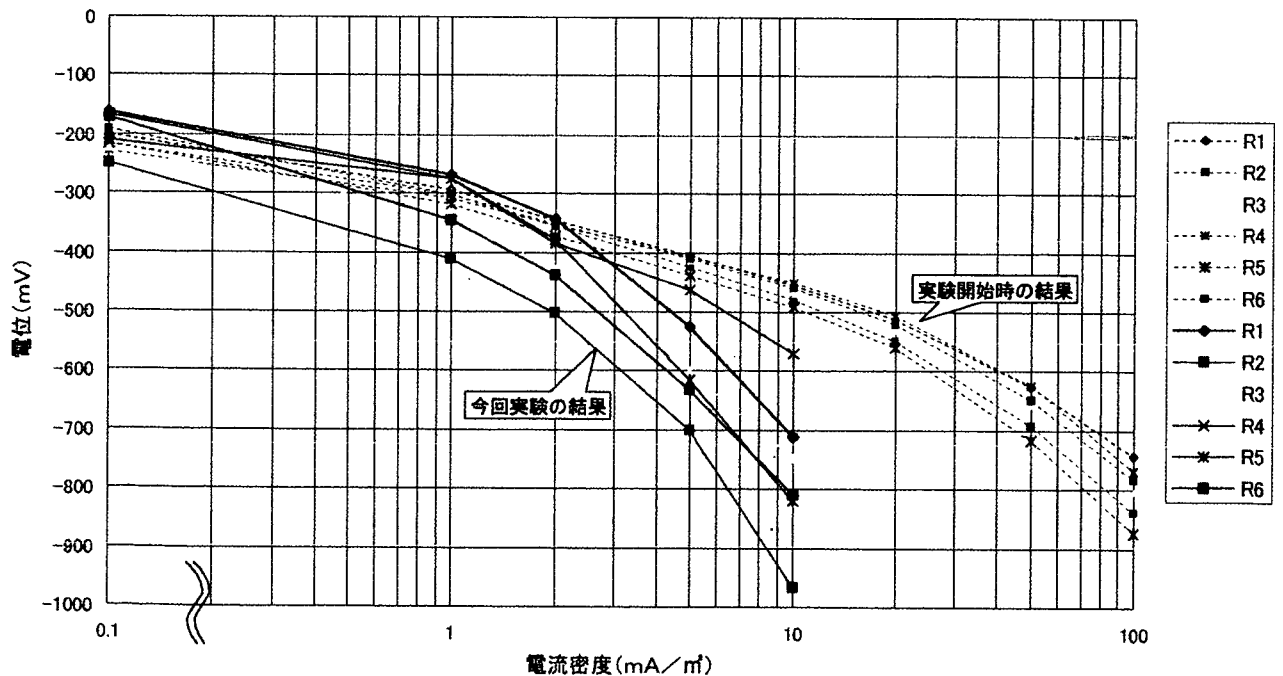


図 2 - 2 4 供試体 No.3 の分極試験結果

(5) 供試体表面観察

各供試体の表面観察結果を以下に示す。

・供試体No. 1

仕上げ被覆工のモルタル層（以下、オーバーレイと称す）の浮き箇所が10ヶ箇所、クラック箇所が3箇所確認された。

・供試体No. 2（無防食）

供試体に浮き、クラック、錆汁が多数確認された。

・供試体No. 3

電気防食範囲内では導電性塗膜の浮きが4箇所及び一次電極を中心に黒褐色の汚れ、丸鋼ブロープ設置後の注入モルタルの浮きが3箇所確認された。

(6) 鉄筋表面観察

はつり出した鉄筋の表面観察結果を以下に示す。

腐食状況は表2-8の段階表示に基づいて評価した。

表2-8 腐食状況の段階表示

段階の表示	腐食の目視による段階表示
0	施工時の状況を保ち、以降の腐食が認められない。
1	部分的に腐食が認められる。軽微な腐食。
2	表面の大部分が腐食している。部分的に断面が欠損している。
3	鉄筋の全周に渡り断面の欠損がある。
4	鉄筋の断面が当初の2/3～1/2欠損している。

(J C I : 海洋コンクリート構造物の防食指針 (案) 1983. 2)

・供試体No. 1

はつり出した鉄筋、シースは全て段階表示「0」であった。

・供試体No. 2（無防食）

鉄筋に多数の腐食箇所が確認された。シースにも1箇所腐食箇所が確認された。

鉄筋の腐食はスターラップ筋に多く発生しており、特にかぶり厚が少ない箇所では激しい腐食が確認された。

・供試体No. 3

はつり出した鉄筋、シースは全て段階表示「0」であった。

(7) 塩分分析結果

供試体から採取したコア試料について全塩分量を分析した結果を表2-9に示す。

供試体No.1の全塩分量は2cmまでは3.43～3.79 kg/m²で最も高く、2cm以上では2.87～3.18 kg/m²とほぼ一定の値を示した。また、他の供試体よりも低い値を示した。

供試体No.2では、2cmまでの全塩分量は11.69～18.76 kg/m²と高い値を示し、深くなるほど低くなった。また、他の供試体よりも最も高い値を示した。

供試体No.3では、2cmまでの全塩分量は10.25～8.71 kg/m²と最も高く、深いほど低い値になった。また、非防食供試体No.2よりも同一深さにおいて低い値を示した。

表2-9 コア試料による全塩分量分析結果

	測定深度毎の全塩分量 (Cl kg/m ³)		
	コンクリート表面-2cm	2cm-4cm	4cm-6cm
供試体 No.1 底面	3.43	2.87	2.87
供試体 No.1 ウェブ	3.79	2.97	3.18
供試体 No.2 底面	18.76	13.33	6.87
供試体 No.2 ウェブ	11.69	8.51	7.78
供試体 No.3 底面	10.25	6.15	4.51
供試体 No.3 ウェブ	8.71	6.57	3.89

2. 4. 5 考察

・分極量と防食効果について

供試体 No.1 及び No.3 の電気防食範囲では、24 時間後の復極量が全て 100 mV 以上の値であった。鉄筋、シースの状態もまったく腐食が発生していない状態であった。

このことから、共同研究報告書第 14 号で設定した電気防食の防食基準として「復極量が 100 mV 以上」が適切であることが確認できた。

・分極試験について

今回行った分極試験では、実験開始時に比べ、分極しやすくなっている。これは、長期にわたる電気防食によって鋼材の表面状況が改善され、鋼材表面に保護被膜が形成された(再不働態化した)ものと考えられる。

・防食電流密度について

供試体 No.1 及び No.3 の電流密度は、それぞれ 2.8 mA/m^2 及び 2.7 mA/m^2 であった。これらの値は、一般に塩害を受けたコンクリート構造物に対する防食電流密度が $10 \sim 40 \text{ mA/m}^2$ であるのに比較して非常に低かった。このことから塩分が鋼材表面に到達する以前に電気防食を適用することによってわずかな電流密度で防食ができることが確認できた。

・塩分量について

塩分の浸透は、供試体 No.1 がもっとも少なく、コンクリート表面から内部の深度ごのと差も少なかった。これは、オーバーレイによりコンクリート表面が被覆されていたため、塩水噴霧による塩分の浸透が軽減されたためと考えられる。供試体 No.3 では、導電被覆の遮水性が低いために塩分の浸透が若干あったものと考えられる。一方、無防食供試体 No.2 では、コンクリート表面が裸であるため塩分が著しく浸透したものと考えられる。

3. 新設コンクリート橋への電気防食適用性の検討

3. 1 新設コンクリート橋の電気防食の特長

新設コンクリート構造物への電気防食適用には以下の特長がある。

3. 1. 1 設計の観点から

(1) コンクリートかぶりの軽減

環境にコンクリート構造物を新設する場合は、コンクリート中への塩分浸透を考慮し、コンクリートのかぶりを十分にとる必要がある。塩分の浸透速度はコンクリートの品質や施工時条件によって異なるが「J C I-R 1 海洋構造物の防食指針 (案)」によれば75～125mmとなっており、死荷重や建築限界などの問題がある。一方、電気防食は、塩分浸透があってもコンクリート中鋼材を防食するのでかぶりを一般環境のかぶりに軽減できる特長がある。

(2) 飛来塩分防護設備の軽減

塩害環境に於いてコンクリート構造物を建造する場合、コンクリート打設時期までの飛来塩分によって鋼材の腐食が施工後にも問題となるため防護設備が必要であるが、電気防食を適用することによってこれらの防護設備が軽減できるという特長がある。

(3) コンクリート欠陥の補償

施工後のコンクリートクラックのような欠陥が発生しても、電気防食を適用することによって鋼材の腐食を防止できるという特長がある。

(4) 狭隘な所への適応が可能

既設の橋梁では橋台と橋桁のような狭隘な所へは防食工法を適用することが不可能であるが、陽極を新設時に予め設置することによってこのような個所への適用が可能であるという特長がある。

3. 1. 2 施工性

電気防食を新設時に適用することにより、補修工事としての電気防食に比較して施工性の面で下記の特長がある。

- ①コンクリート劣化部のはつり、断面復旧などが不要である。
- ②鋼材間の電氣的導通の確保が容易である。
- ③照合電極及び排流点の設置が容易である。
- ④陽極の設置が容易である。

3. 1. 3 防食性

新設構造物へ電気防食適用することにより防食性の面で、補修工事に比較して下記の特長がある。

- ①鋼材表面にさび層が無いので微弱な防食電流で防食効果を維持できる。
- ②鋼材表面が均一な不働態であるので分極し易く、防食電流の分布が良いため均一な防食効果が期待できる。
- ③微弱な防食電流で防食効果を維持できるため、電気防食に要する電力費が少ない。

3. 2 考慮すべき項目

新設コンクリート構造物への電気防食適応には以下の項目を考慮しなければならない。

3. 2. 1 設計の観点から

(1) 樹脂被覆鉄筋は使用しない

樹脂被覆鉄筋は絶縁性であるため防食電流が流入しないこと並びに、鉄筋間の電氣的な導が取れないので電気防食が適用できない。

(2) ポリマーを多量に含むコンクリートは使用しない

塩分浸透を抑制する目的で使用する高ポリマーコンクリートは、電気抵抗が高いために電気防食の効果が期待できない。また、陽極近傍に於けるポリマーの変質が問題になることがあるのでポリマーを多く含む材料の使用は避けるべきである。

(3) 金属繊維を含むコンクリートは使用しない

金属繊維は陽極と接触すると腐食するので問題となる。

また、電気防食は、陽極から出た防食電流がコンクリートを介して鋼材表面に流入することによって効果がある。金属繊維のように電子伝導材があると、陽極と鋼材が短絡（ショート）するので鋼材表面に防食電流が流入しないため、防食効果は得にくい。

(4) 陽極と鋼材が短絡しない構造にする

埋込式の陽極方式では陽極と鋼材が短絡しないように、絶縁性の固定具などを用いた構造とする。

(5) P C 鋼材への配慮

防食電流が P C 鋼材に偏って流入すると P C 鋼材が水素脆化を生じるほどの電位に達する可能性があるので、防食電流ができるだけ均一になるように陽極の配置を考慮しなければならない。

3. 2. 2 施工時

①工程管理の面から、本体工事と電気防食工との取り合いの検討を十分に行う。

②施工管理の面から、陽極と鋼材との接触がないことを電位差や電気抵抗で確認し記録しなければならない。

3. 2. 3 防食効果

埋込式の陽極方式では、陽極が P C 鋼材により近い位置に設置されることがあるので P C 鋼材が水素脆化を起こさないような電位（ -1000 mV vs. CSE より貴）に管理しなければならない。このような電位管理には、自動制御機能を有した遠隔監視装置が有効である。

4. ライフサイクルコストに関する検討

4. 1 概説

最近、コンクリート構造物の塩害防止対策としての電気防食法の有効性は広く知られるようになった。その意味では、電気防食は社会的に認知された防食技術の段階に入ったものと考えられる。

一方、この電気防食の実際の適用についてみると、コンクリート構造物に陽極材を設置し、これと防食対象となるコンクリート中の鋼材と直流電源装置まで配線配管するという、従来の土木補修工事とは異なる内容であるため、現状では従来工法（表面被覆工法や断面修復工法などを以下、従来工法とする）と比べて非常に施工コストの高い工法であるとのイメージが一般的である。このような意味から、現状の電気防食は、塩害防止方法として最も信頼性の高い工法であるが、施工コストは従来工法と比較してコスト高い工法と表現できる。

しかし、これは、工法の有効性と初期施工コスト（イニシャルコスト）を取り上げた場合の比較である。電気防食のイニシャルコストが従来の工法と比較して割高であっても、その塩害防止効果が長期間持続し、そのコンクリート構造物の耐久性を維持できるならば、その後のランニングコストは大幅に低減し、最終的にはトータルコストが従来の工法に比べ、低減されることも十分予想される。

そこで、本章では、電気防食のライフサイクルコストについて、そのイニシャルコストとランニングコストを従来工法と比較して検討する。なお、この場合には、新設コンクリート構造物に劣化予防対策として適用する場合と既に塩害環境下に設置され損傷を受けたコンクリート構造物に塩害防止対策として適用した場合の二つのケースを取り上げる。また、電気防食のコストパフォーマンスについて、実橋例も用いた検討結果を示す。

4. 2 コストパフォーマンスの考え方

4. 2. 1 防食ライフサイクルコストの定義

コンクリート構造物の性能レベルを供用可能な範囲に保持するために必要な防食費用をあわせたものを防食ライフサイクルコストとした。したがって、新たに構造物を建造する費用は、本検討には含まない。

防食ライフサイクルコストは、大別して2つに分類される。一つは、構造物の耐食性を向上させるために必要な初期投資費用（イニシャルコスト）、二つ目は、初期投資費用により付加された耐食性向上のための機能を保守・点検・補修するために必要な維持管理費用（ランニングコスト）である。

$$LCC = \Sigma IC + \Sigma RC \quad (\text{式} 4-1)$$

ここで、LCC： 防食ライフサイクルコスト

IC： 初期投資費用

RC： 維持管理費用

ここでは、検討に必要なコスト項目について表 4-1 に示すように暫定的に定義し、以下の検討に用いることとする。

表 4-1 コスト項目とその詳細

防食法	コスト項目	費用発生時期	費用細目
A 種 (B, C 種を除く、新設時に適用する方法)	イニシャルコスト	建設時	耐久性を考慮した建設費の総額。かぶりの増大、エポキシ塗装鉄筋、永久型枠等の費用を含む。
	ランニングコスト	供用中	耐久性保持のための費用。劣化変状が生じ、補修する場合は、下記の電気防食または従来工法のイニシャルコストが適用される。
B 種 (電気防食)	イニシャルコスト	電気防食適用時	新設または補修時に電気防食を適用するために必要な費用の総額。補修時の適用における断面欠損修復費は除外する。
	ランニングコスト	電気防食適用中	電気防食の効果を持続するために必要な費用。直流電源の電気代、交換必要な部品の交換など。
C 種 (表面被覆)	イニシャルコスト	補修工事時	新設または補修時に従来工法を適用するために必要な費用の総額。補修時の適用における断面欠損修復費も含む。
	ランニングコスト	補修後の供用中	従来工法の効果を持続するために必要な費用。塗装材の塗り替え費用など。

A 種：新設時に適用する方法（かぶり、エポキシ塗装鉄筋、永久型枠等）

B 種：新設または補修時に適用する電気防食工法

C 種：新設または補修時に適用する表面被覆工法

また、本章における検討では、表 4－1 に示した各防食法のコストを図 4－1 に示すような大まかな比率とし検討に用いている。

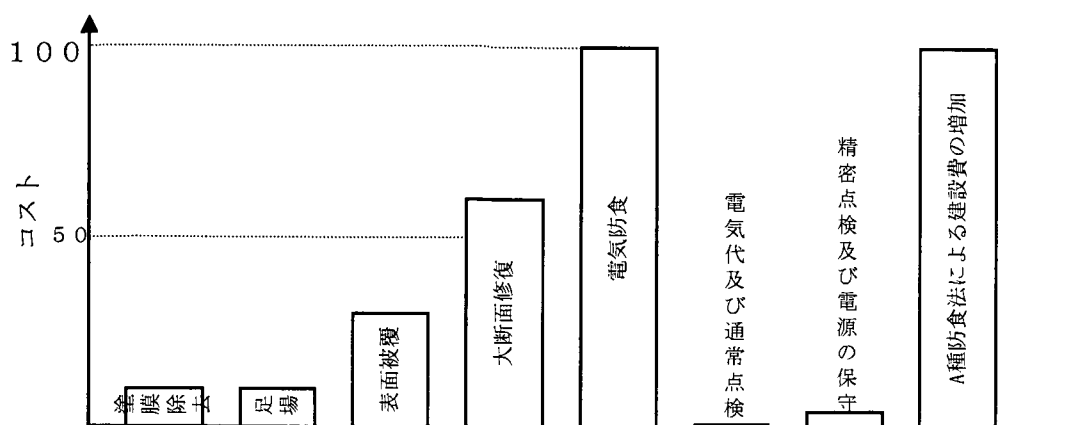


図 4－1 コスト比較

4. 2. 2 防食ライフサイクルコストによる経済比較手法

防食ライフサイクルコストの算定にあたっては、各費用の支払われる時期が異なることに留意する必要がある。つまり、物価上昇率等により将来の価格が変動する。

そこで、本報告書においては、すべての経費を現在の価値に換算して合計する、現価法とした。また、表 4－1 に示したように、将来に発生する外的費用（利用者の利便性や環境、社会活動等に及ぼす間接的費用）は、加算していない。

4. 2. 3 構造物の塩害環境と設計耐用年数

塩害環境におけるコンクリート構造物の供用年数と性能レベルは、図 5－2 のように表すことができる。

ここで、性能レベルとは、建設時を 100 とした場合の塩害環境における構造物の腐食程度による構造的耐力の低下を示す。ここでは、魚本や宮川の研究成果を参考に、便宜的に表 4－2 のように定義することとした。

表 4-2 腐食程度と性能レベル

腐食程度	段 階	変 状	構造物の耐力	性能レベル
なし	健全域 (第1段階)	変状なし	大	100
小	腐食初期 (第2段階)	内部ひびわれの開始		80
中	腐食中期 (第3段階)	外部ひびわれの開始	中	50
大	腐食後期 (第4段階)	かぶり破壊	小	最低容認安全 レベル
	腐食末期 (第5段階)	構造物の破壊	なし	

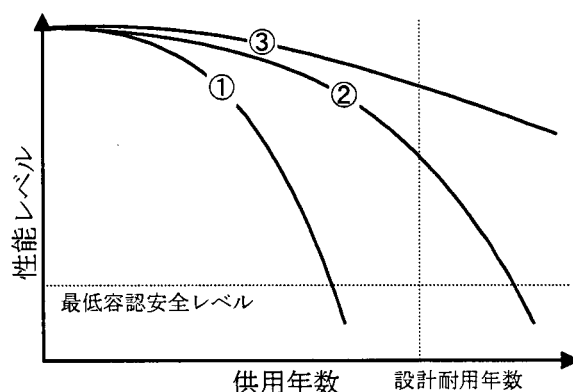


図 4-2 コンクリート構造物の供用年数と性能レベル

コンクリート構造物における塩害の進行は、その構造物のおかれた内的および外的環境により異なる。図4-2では、内的および外的な塩害環境の最も厳しい環境を①として、穏やかな環境を③として示した（塩害環境の厳しさ①>>②>>③）。図4-2の③の塩害環境として非常に穏やかな環境では十分な耐久性を有するのに対し、①のような非常に厳しい塩害環境では、設計耐用年数の半ばにおいて性能レベルが最低容認安全レベルを下回ることとなる。

そこで、本報告書においては、①のような非常に過酷な塩害環境において、構造物の設計耐用年数を60年以上とした場合の検討を行うこととした。

なお、図4-2の①、③のそれぞれの環境として、①の場合を日本道路協会「道路橋の塩害対策指針（案）・同解説」の塩害対策を必要とする地域とし、③を塩害対策の必要のない地域とした。

4. 3 劣化コンクリート構造物に適用した場合の検討

劣化コンクリート構造物における電気防食のコストパフォーマンスについて、以下のケースを想定し、比較検討を行った。

4. 3. 1 劣化初期の段階から従来工法により補修する場合

劣化初期の段階に従来工法として、表面被覆工法を適用した場合を図4-3に示す。

このケースは、コンクリート構造物への塩化物イオンの浸透はあるものの、断面欠損等の損傷には至らない程度の性能レベルで表面被覆を施すこととした。この場合、表面被覆を施しても、コンクリート内部に塩化物イオンは残留しているため、性能レベルは徐々に低下する。大断面修復レベルまで性能レベルが低下しない範囲においては、表面被覆により性能レベルを維持できるが、定期的な再塗装が必要となる。再塗装の場合には、足場の架設と旧塗膜材の撤去を行わなければならない。

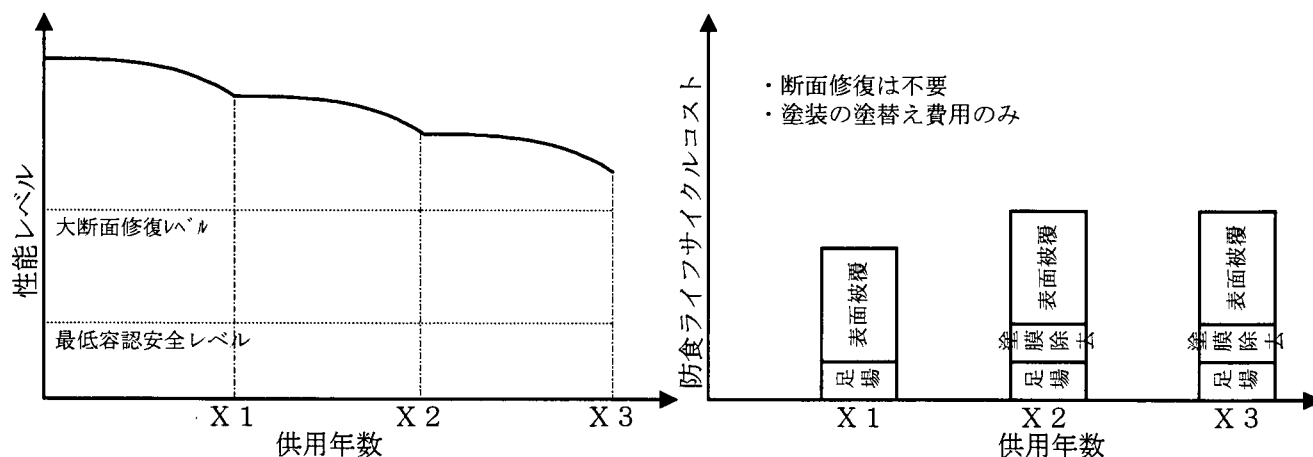
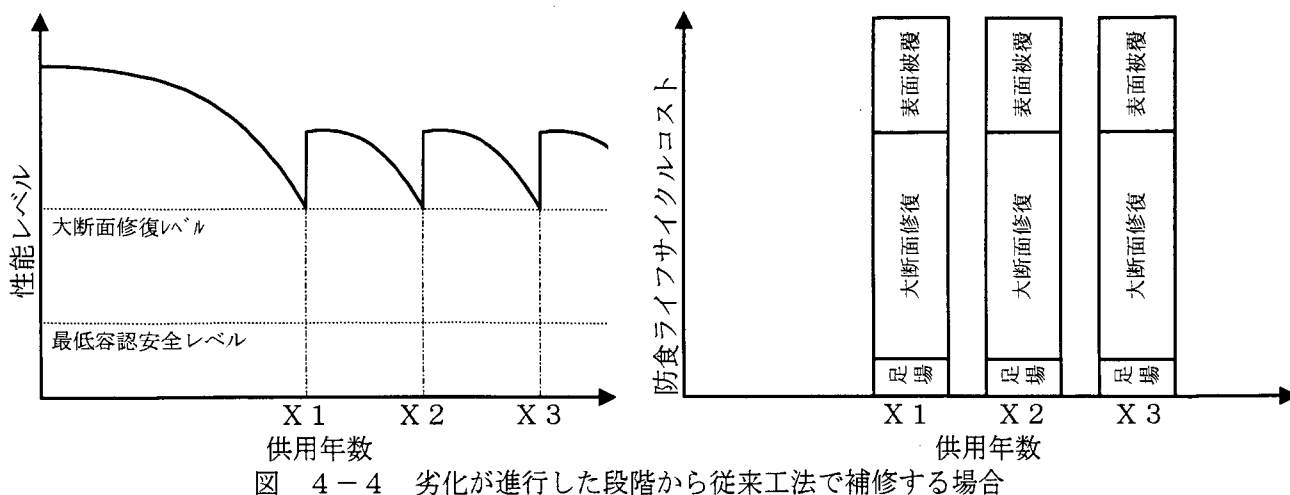


図 4-3 劣化初期の段階から従来工法で補修する場合

4. 3. 2 劣化が進行した段階に従来工法により補修する場合

劣化が進行した段階に従来工法として、大断面修復と表面被覆を施す場合を図4-4に示す。

このケースでは、劣化が進行し大断面修復レベルまで性能レベルが低下しているため、先ず大断面修復を施した後に表面被覆を行う。しかし、このような大断面修復レベルまで性能レベルが低下するような塩害環境では、コンクリート内部に多量の塩化物イオンが蓄積され、これを完全に除去することは不可能である。したがって、このケースでは、補修後に再び大断面修復レベルまで性能レベルが低下し、再度、大断面修復と表面被覆を施すこととしてライフサイクルコストを算出した。

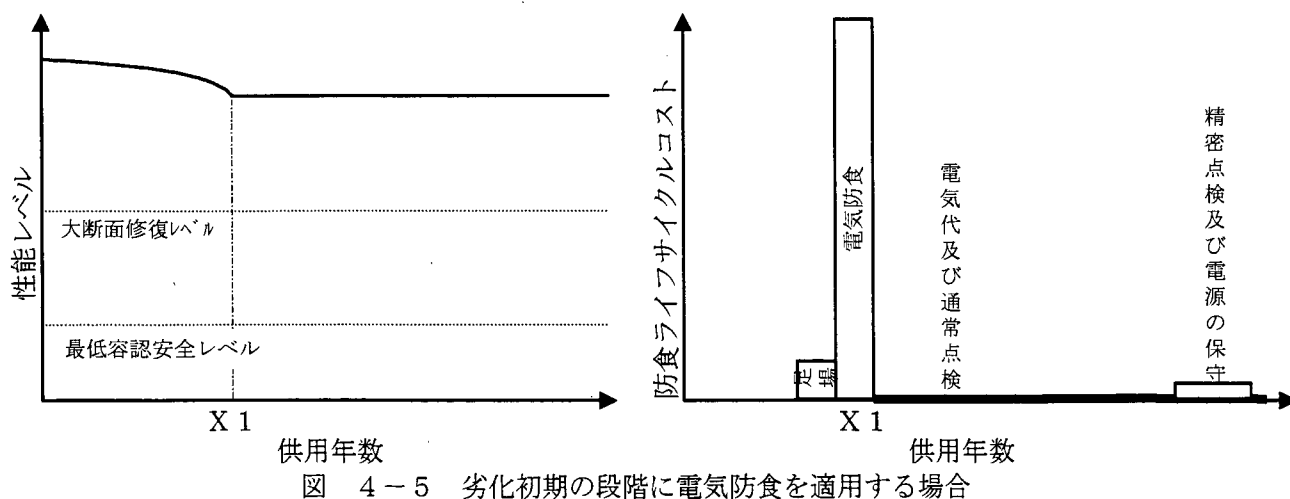


4. 3. 3 劣化初期の段階に電気防食を適用する場合

劣化初期の段階に電気防食を適用する場合を図 4-5 に示す。

このケースでは、断面修復等の必要のない段階であるため、電気防食のインシヤルコストのみで良い。ただし、電気防食のランニングコストとして、電気代と通常点検、精密点検、電源保守費用等が必要である。

電気防食は、腐食の停止の有効性および信頼性が最も高い方法である。したがって、このケースでは、電気防食システムの維持管理がランニングコストにより確実に行われる限り、性能レベルは電気防食を適用したレベルを保持するとした。



4. 3. 4 劣化が進行した段階で電気防食を適用する場合

劣化が進行した段階で電気防食を適用した場合を図4-6に示す。

このケースは、前述のケース3と同様な考え方であるが、電気防食の適用段階で性能レベルが大断面修復レベルまで低下しているため、大断面修復を行った後に電気防食を適用することとなる。したがって、イニシャルコストは劣化初期の段階に電気防食を適用する場合に比べて増加する。しかし、性能レベルは大断面修復により上昇するとともに、電気防食によりその性能レベルを保持することが可能である。したがって、劣化初期の段階から従来工法により補修する場合や劣化が進行した段階に従来工法により補修する場合に比べ、塩害防止方法としては信頼性が高く、防食ライフサイクルコストはその構造物の残存供用年数が長期化するほど、減少する。

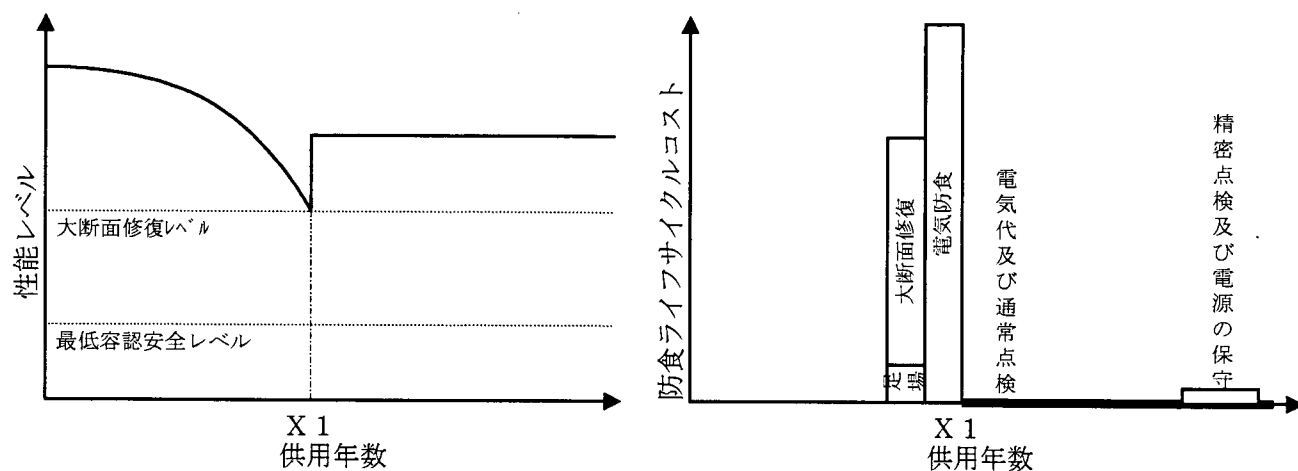


図 4-6 劣化が進行した段階に電気防食を適用する場合

4. 4 構造物建設時に適用した場合の検討

新設コンクリート構造物における電気防食のコストパフォーマンスについて、以下のケースを想定し、比較検討を行った。

4. 4. 1 新設コンクリート構造物に耐食性向上の対策を施さない場合

新設のコンクリート構造物に塩害対策をなにも施さない場合を図4-7に示す。

本検討では、コンクリート構造物は非常に過酷な塩害環境に立地するとしているため、このケースでは設計耐用年数に比べ極めて早い時期に最低容認安全レベルを下回ることとした。この場合には、構造物への耐食性向上に必要なコストは全く発生しないが、性能レベルが最低容認安全レベルを下回った後に、構造物の撤去と架け替えの費用が発生することとなる。このような架け替えでは、今回検討対象とはしていない間接費用（利便性や環境に関わるコスト）の比率が、防食ライフサイクルコストの中で増大する。

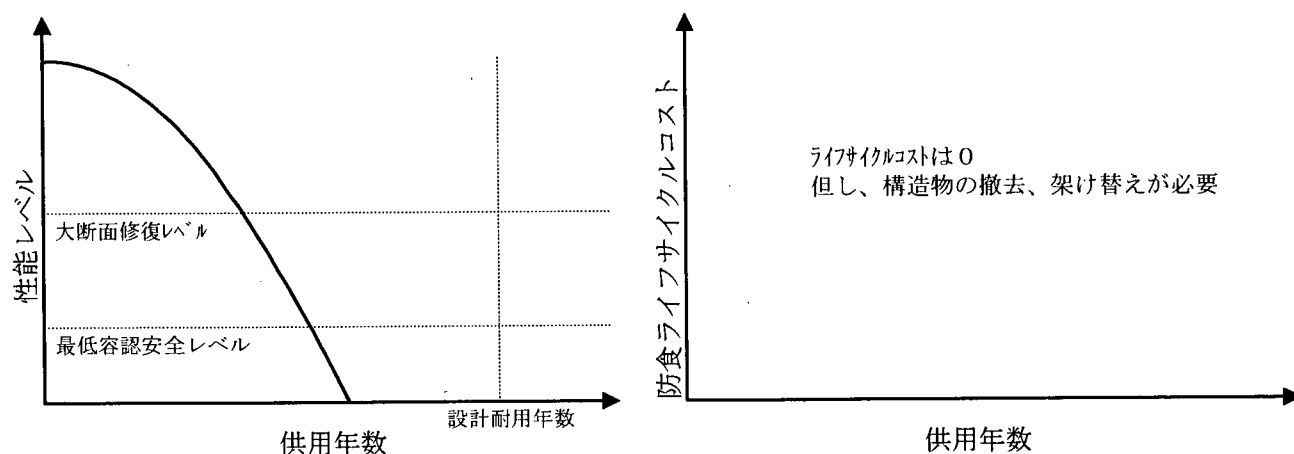


図 4-7 新設コンクリート構造物に塩害対策を施さない場合

4. 4. 2 耐食性向上をかぶりに依存する場合

塩害地域にあるコンクリート構造物の耐食性をコンクリートのかぶりに依存する場合を図4-8に示す。

このケースでは、コンクリートのかぶりにより、塩化物イオンが鋼材位置に到達するまでの時間の範囲では、構造物の性能レベルは健全な状態を保持できる。しかし、塩化物イオンが鋼材近傍での発錆塩化物イオン量を上回ると性能レベルは急激に低下し、腐食に起因したかぶりの剥離剥落が生じ、大断面修復が必要なレベルとなる。

このケースでは、コンクリートのかぶり増加による構造物の建設コストの増加と、性能レベルが大断面修復レベルより低下した場合の大断面修復と表面被覆の費用が必要である。

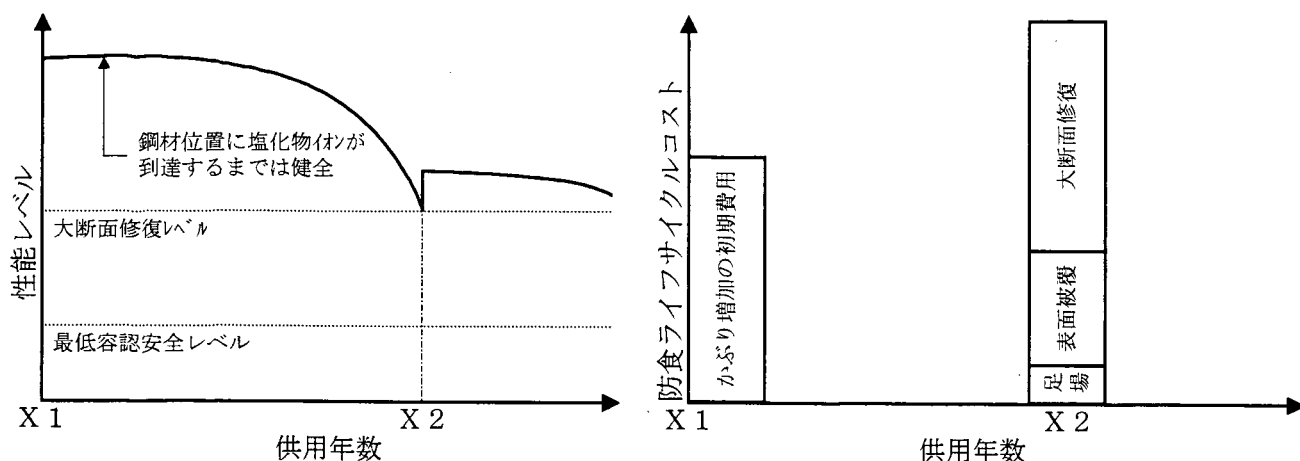


図 4-8 新設コンクリート構造物の耐食性をかぶりに依存する場合

4. 4. 3 耐食性向上をエポキシ塗装鉄筋等に依存する場合

耐食性をエポキシ塗装鉄筋や永久型枠等の表 5-1 に示す A 種防食法を適用した場合を図 4-9 に示す。

このケースでは、これら A 種防食法がその性能を確実に発揮できる施工をした場合に限って信頼性が高いものとし、性能レベルの低下はないものとした。この場合の補修コストは、建設時に適用する A 種防食法のイニシャルコストである。

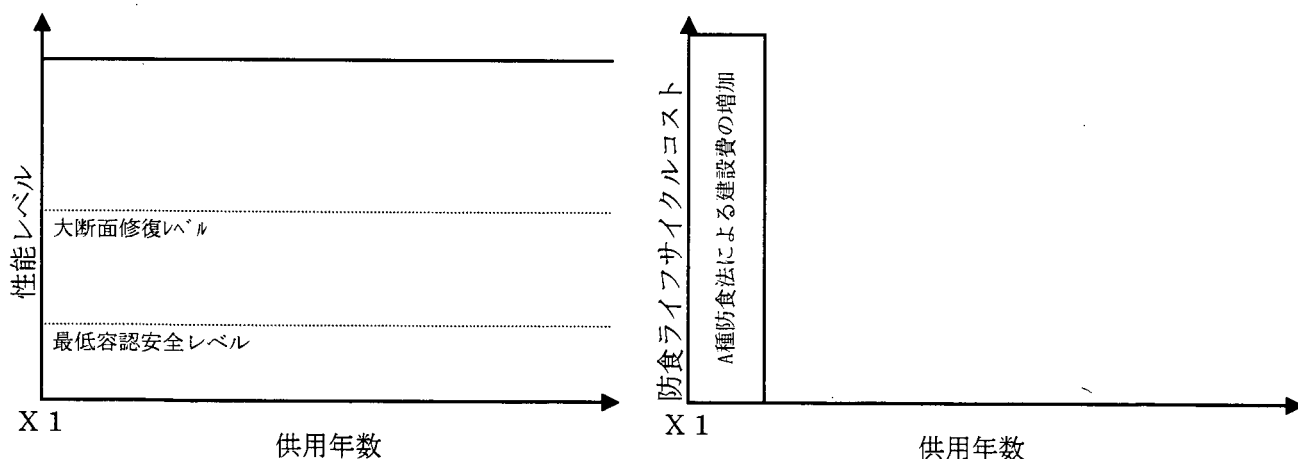


図 4-9 新設コンクリート構造物にA種防食法を適用する場合

4. 4. 4 耐食性向上を表面被覆に依存する場合

新設コンクリート構造物に新設時の段階から表面被覆を施した場合を図 4-10 に示す。

このケースでは、構造物の性能レベルの低下を塗膜の遮塩性能の低下とし、塗膜の定期的な塗り替えが必要であるとした。したがって、この場合には定期的な塗り替えにより構造物の性能レベルを健全なレベルに保持できるが、塗膜の除去と再塗装のコストが発生する。

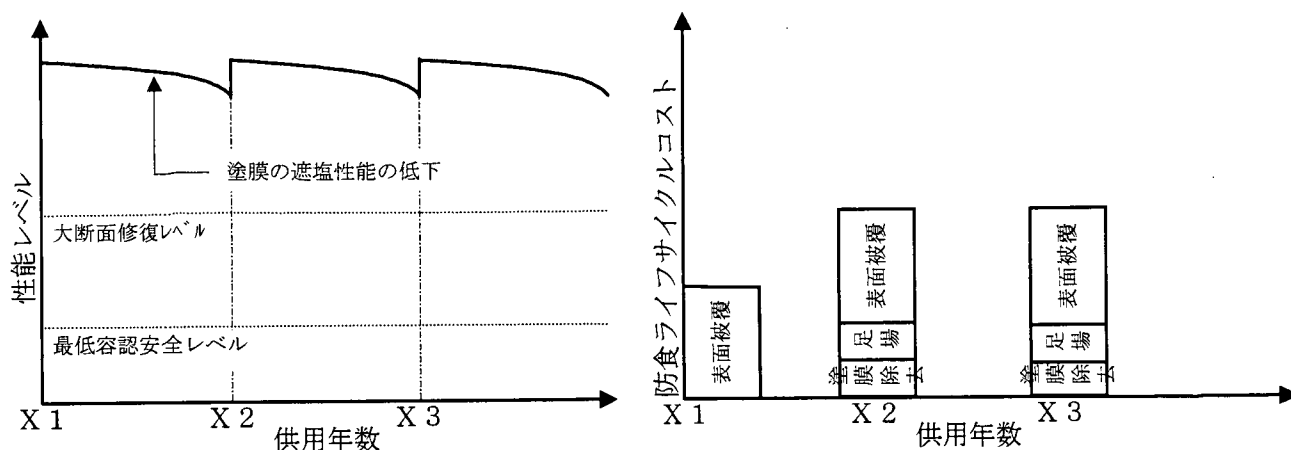


図 4-10 新設コンクリート構造物に表面被覆を施す場合

4. 4. 5 新設時に電気防食を適用する場合

新設のコンクリート構造物の建設時に電気防食を適用する場合を図 4-11 に示す。

このケースでは、電気防食のインシヤルコストのみで良い。ただし、電気防食のランニングコストとして、電気代と通常点検、精密点検、電源保守費用等が必要である。

電気防食は、腐食の停止の有効性および信頼性が最も高い方法であるため、このケースでは、電気防食システムの維持管理がランニングコストにより確実に行われる限り、性能レベルは電気防食を適用したレベルを保持するとした。

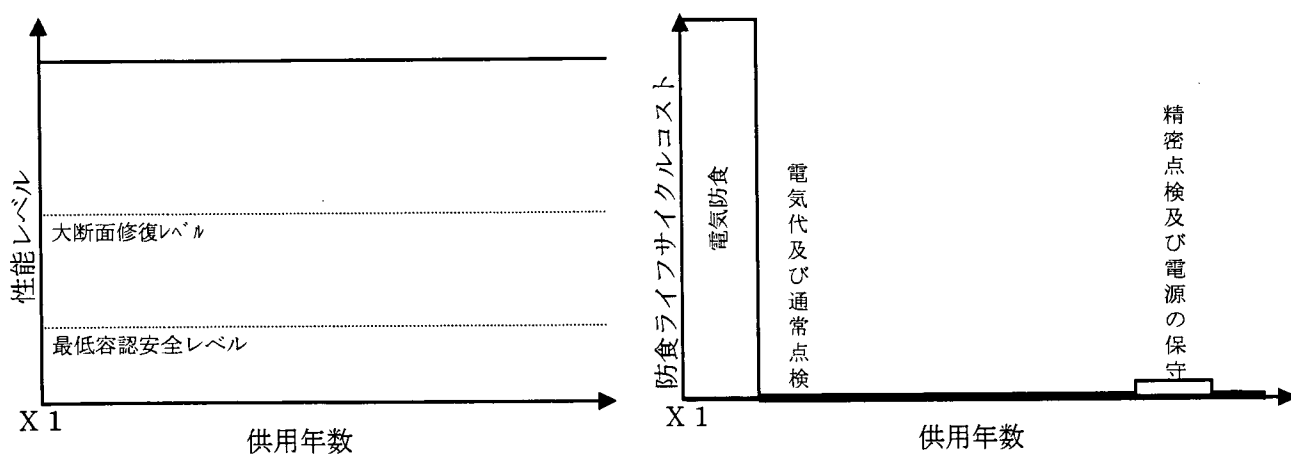


図 4-11 新設コンクリート構造物に電気防食を適用する場合

4. 5 防食ライフサイクルコストに関する検討例

新設時に電気防食を適用した場合の防食ライフサイクルコストについて、一例を示し、他の耐食性向上技術と比較する。

□新設道路橋 A

この道路橋は、図 4-2 に示した塩害環境の最も厳しい環境①にある構造物で、図 4-12 に示す形状のポストテンション方式のプレストレストコンクリート橋である。

防食ライフサイクルコストを算定するにあたり用いた算出条件を以下に示す。

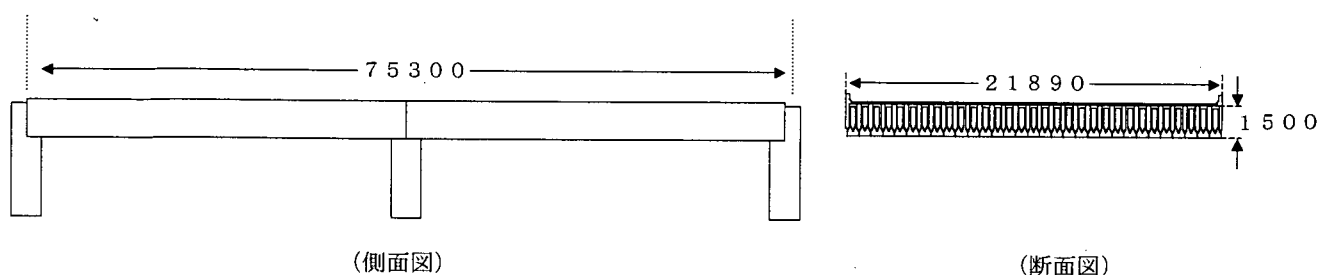


図 4-12 新設道路橋 A の概要

<算出条件>

- ① 電気防食方式の施工費は、配線配管工事費と直流電源設置費を含む
- ② 防食対象は、構造物の底面および下フランジ側面とする
- ③ 施工面積合計は、各方法とも 1,635.3 m²とする
- ④ 電気防食の電気料金は各工法とも 25 円/m²/年で算出した
- ⑤ 電気防食では、20 年経過毎（20 年目、40 年目）に電源装置および配線配管材を替えるものとした
- ⑥ なお、この 20 年経過毎の配線配管工事において、足場を設置することとし、足場面積は配線配管ルート延長×幅 1.5m とした
- ⑦ 足場費用は、5,000 円/m²とした
- ⑧ 電気防食設備である排流端子、照合電極、陽極は 60 年間取替えないこととした
- ⑨ 配線配管および電源装置設置以外の作業は、ヤード内で実施するものとし、対象物のヤードからの移動の費用は含まない
- ⑩ 表面被覆工法の初期工事費は下記のように算出した（施工対象は電気防食と同様）

施工費＝表面塗装＋足場費

表面塗装費：15,000 円/m²

足場費用：5,000 円/m²

- ⑪ 表面被覆工法の補修は、10 年経過毎におこなうものとした

補修費＝塗膜除去＋表面塗装＋足場費

塗膜除去+表面塗装費：25,000 円/㎡

足場費用：5,000 円/㎡

⑫ 従来工法の補修費は 10 年経過毎に劣化部補修および表面塗装を行うものとした

補修費=劣化部補修+表面塗装+足場費=50,000 円/㎡

<算出結果>

設計耐用年数を 60 年間として、防食ライフサイクルコストを試算した結果を表 4-3 および図 4-13 に示す。

表 4-3 60 年間の防食ライフサイクルコストの概算

単位:百万円

電気防食工法			表面被覆工法(初期から塗装)			従来工法(劣化部補修+塗装)		
費用区分		コスト	費用区分		コスト	費用区分		コスト
初期工事費	施工費(直工)	104.7	初期工事費	施工費(直工)	34.6	初期工事費	施工費(直工)	0.0
維持費	電気料金(60年分)	2.6	維持費		—	維持費		—
補修費	電源装置取替費	22.0	補修費	表面塗装費 足場費	216.5 43.3	補修費	劣化部補修	259.8
	配線配管取替費	28.8					表面塗装費	199.2
	足場費	1.9					足場費	43.3
総 計		160.0	総 計		294.4	総 計		502.3

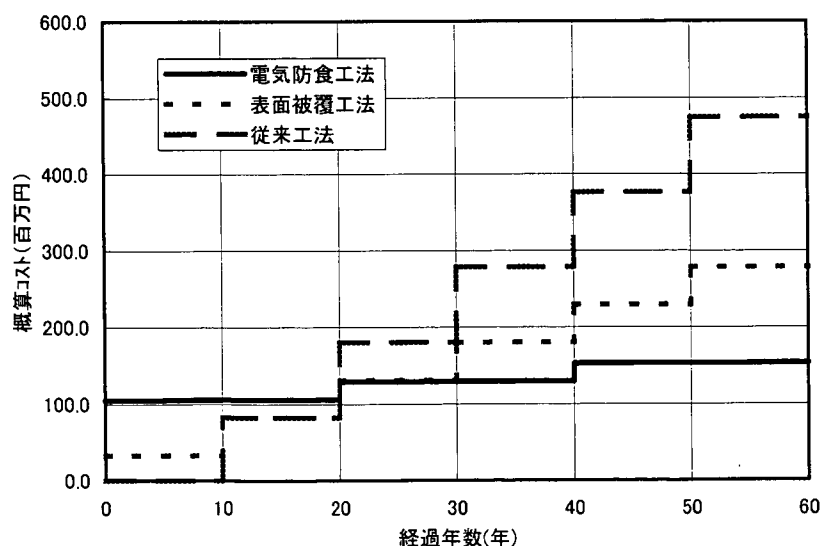


図 4-13 60 年間の防食ライフサイクルコストの試算結果

あとがき

塩害を受けることが想定される環境に建設されるコンクリート橋の防食方法として、塗装鉄筋の使用、コンクリート表面被覆や、密実な高流動コンクリートの適用などさまざまな方法が提案または適用されているが、長期間にわたるコンクリートの防食に関する信頼性を確保することは困難である。すなわち、かぶりや密実なコンクリートは、塩分の浸透が従来のコンクリートに比べて遅いだけでいずれ鋼材に腐食が発生する。また、表面被覆は、時間の経過とともに被覆が劣化して塩分の浸透を阻止できなくなることが考えられる。塗装鉄筋も初期欠陥部から腐食が生じることが考えられる。これらの防食方法は完全ではなくいずれ鋼材が腐食した時点で補修を考慮せざる終えないのが現状である。近年、塩害を受けたコンクリート橋の最終的な補修方法として適用され始めた電気防食工法を建設当初から適用することで、確実な防食を行ないコンクリート橋の信頼性を向上させることを目的として（社）プレストレスト・コンクリート建設業協会と共同研究を実施した。本報告書は、共同研究で実施した試験結果をとりまとめたものであり、成果として「新設コンクリート橋の電気防食マニュアル（案）」を作成した。

今後、特に厳しい塩害環境でコンクリート橋の建設に際し本報告書およびマニュアル（案）がコンクリート橋の信頼性向上に役立てば幸いである。

本共同研究にこれまで係わった関係者名簿を以下に記す。

建設省土木研究所材料施工部化学研究室 元室長	坂本 浩行
（社）プレストレスト・コンクリート建設業協会	
（株）ピー・エス	服部 政昭
（株）ナカボーテック	矢島 秀治
住友大阪セメント（株）	大塚 靖
同	山本 誠
日本防蝕工業（株）	田代 賢吉
同	川岡 岳晴
（株）東京興業貿易商会	小川 文生

謝辞

大型PC桁の長期電気防食試験の実施にあたっては、飛島建設株式会社にお世話になりました。ここに謝意を表します。

付属資料

1. 電気防食に関する試験データ集及び写真集
2. 新設コンクリート橋の電気防食マニュアル（案）

電気防食に関する試験データ集及び写真集

電気防食開始時期の検討試験測定データ

SCE換算

1998年 6月3日 通電開始 127日前 室温 20℃ 湿度

		TG1	TG2	TG3	TG4	TG5	TG6
通電電流(mA)							
浴電圧(V)							
鉄筋	IO電位	-207	-226	-228	-196	-197	-210
	OFF4H後						
復極量							
アノード	IO電位						
	OFF4H後						
		TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM6
通電電流(mA)							
浴電圧(V)							
鉄筋	IO電位	-243	-266	-265	-278	-246	-247
	OFF4H後						
アノード	ON電位						
	IO電位						
	OFF4H後						
		TS1	TS2	TS3	TS4	TS5	TS6
通電電流(mA)							
浴電圧(V)							
鉄筋	IO電位	-187	-205	-210	-231	-193	-178
	OFF4H後						
アノード	ON電位						
	IO電位						
	OFF4H後						
		AS1	AS2	AS3	AS4	AS5	AS6
通電電流(mA)							
浴電圧(V)							
鉄筋	IO電位	-260	-263	-261	-250	-265	-259
	OFF4H後						
アノード	ON電位						
	IO電位						
	OFF4H後						
		RM1	RM2	RM3	RM4	RM5	RM6
通電電流(mA)							
浴電圧(V)							
鉄筋	IO電位	-217	-222	-225	-225	-220	-218
	OFF4H後						
アノード	ON電位						
	IO電位						
	OFF4H後						
		TR1	TR2	TR3	TR4	TR5	TR6
通電電流(mA)							
浴電圧(V)							
鉄筋	IO電位						
	OFF4H後						
アノード	ON電位						
	IO電位						
	OFF4H後						
		BL1	BL2	BL3	BL4	BL5	BL6
鉄筋	IO電位		-144	-177	-183	-170	-151
水分計	1回目		4.8	4.0	4.5	4.6	4.8
	2回目		4.9	4.7	4.6	4.8	4.6
	3回目		4.7	4.6	4.7	4.8	4.7

電気防食開始時期の検討試験測定データ

SCE換算

1998年 8月18日 通電開始 51日前 室温 28℃ 湿度

		TG1	TG2	TG3	TG4	TG5	TG6
通電電流(mA)							
浴電圧(V)							
鉄筋	IO電位	-157	-172	-184	-174	-156	-166
	OFF4H後						
アノード	復極量						
	IO電位						
	OFF4H後						
		TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM6
通電電流(mA)							
浴電圧(V)							
鉄筋	IO電位	-204	-227	-207	-231	-202	-208
	OFF4H後						
アノード	ON電位						
	IO電位						
	OFF4H後						
		TS1	TS2	TS3	TS4	TS5	TS6
通電電流(mA)							
浴電圧(V)							
鉄筋	IO電位	-125	-134	-161	-168	-159	-146
	OFF4H後						
アノード	ON電位						
	IO電位						
	OFF4H後						
		AS1	AS2	AS3	AS4	AS5	AS6
通電電流(mA)							
浴電圧(V)							
鉄筋	IO電位	-228	-213	-200	-220	-225	-237
	OFF4H後						
アノード	ON電位						
	IO電位						
	OFF4H後						
		RM1	RM2	RM3	RM4	RM5	RM6
通電電流(mA)							
浴電圧(V)							
鉄筋	IO電位	-186	-182	-244	-206	-192	-201
	OFF4H後						
アノード	ON電位						
	IO電位						
	OFF4H後						
		TR1	TR2	TR3	TR4	TR5	TR6
通電電流(mA)							
浴電圧(V)							
鉄筋	IO電位						
	OFF4H後						
アノード	ON電位						
	IO電位						
	OFF4H後						
		BL1	BL2	BL3	BL4	BL5	BL6
鉄筋	IO電位		-119	-122	-134	-104	-124
	1回目		4.5	4.6	4.4	4.4	4.7
水分計	2回目		4.6	4.5	4.6	4.6	4.7
	3回目		4.2	4.4	4.4	4.5	4.4

電気防食開始時期の検討試験測定データ

SCE換算

1998年 9月22日 通電開始 16日前

室温 25.5℃

湿度

97%

		TG1	TG2	TG3	TG4	TG5	TG6
通電電流(mA)							
浴電圧(V)							
鉄筋	IO電位	-529	-536	-449	-504	-539	-483
	OFF4H後						
	復極量						
アノード	IO電位						
	OFF4H後						
		TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM6
通電電流(mA)							
浴電圧(V)							
鉄筋	IO電位	-287	-273	-352	-301	-255	-283
	OFF4H後						
	復極量						
アノード	IO電位						
	OFF4H後						
		TS1	TS2	TS3	TS4	TS5	TS6
通電電流(mA)							
浴電圧(V)							
鉄筋	IO電位	-463	-455	-497	-477	-527	-484
	OFF4H後						
	復極量						
アノード	IO電位						
	OFF4H後						
		AS1	AS2	AS3	AS4	AS5	AS6
通電電流(mA)							
浴電圧(V)							
鉄筋	IO電位	-588	-523	-431	-597	-631	-448
	OFF4H後						
	復極量						
アノード	IO電位						
	OFF4H後						
		RM1	RM2	RM3	RM4	RM5	RM6
通電電流(mA)							
浴電圧(V)							
鉄筋	IO電位	-509	-499	-513	-518	-505	-517
	OFF4H後						
	復極量						
アノード	IO電位						
	OFF4H後						
		TR1	TR2	TR3	TR4	TR5	TR6
通電電流(mA)							
浴電圧(V)							
鉄筋	IO電位						
	OFF4H後						
	復極量						
アノード	IO電位						
	OFF4H後						
		BL1	BL2	BL3	BL4	BL5	BL6
鉄筋	電位		-389	-399	-575	-475	-437
水分計	1回目		7.5	5.3	7.2	7.7	7.1
	2回目		8.1	6.5	7.7	7.4	7.3
	3回目		7.5	5.7	9.1	8.6	9.5

電気防食開始時期の検討試験測定データ

SCE換算

1998年 10月8日 通電開始 直後

室温 23.7℃

湿度

		TG1	TG2	TG3	TG4	TG5	TG6
通電電流(mA)			0.404	0.403	0.401		
浴電圧(V)			1.116	1.029	1.097		
鉄筋	IO電位		-562	-479	-529	-435	-439
	OFF4H後		-480	-436	-456		
	復極量		82	43	73		
アノード	IO電位		549	530	563	12	23
	OFF4H後		395	353	406		
		TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM6
通電電流(mA)			0.404	0.407	0.403		
浴電圧(V)			2.356	2.170	1.972		
鉄筋	IO電位		-346	-440	-355	-263	-302
	OFF4H後		-277	-417	-310		
	復極量		69	23	45		
アノード	IO電位		1123	1101	952	81	22
	OFF4H後		572	563	129		
		TS1	TS2	TS3	TS4	TS5	TS6
通電電流(mA)			0.403	0.405	0.404		
浴電圧(V)			1.188	1.189	1.179		
鉄筋	IO電位		-512	-524	-548	-446	-413
	OFF4H後		-460	-489	-501		
	復極量		52	35	47		
アノード	IO電位		642	638	599	114	156
	OFF4H後		609	600	569		
		AS1	AS2	AS3	AS4	AS5	AS6
通電電流(mA)			0.405	0.406	0.403		
浴電圧(V)			0.346	0.434	0.324		
鉄筋	IO電位		-734	-660	-744	-507	-505
	OFF4H後		-715	-623	-727		
	復極量		19	37	17		
アノード	IO電位		-1101	-1115	-1090	-1125	-1143
	OFF4H後		-1135	-1175	-1132		
		RM1	RM2	RM3	RM4	RM5	RM6
通電電流(mA)			0.404	0.404	0.404		
浴電圧(V)			1.154	1.096	1.095		
鉄筋	IO電位		-592	-549	-544	-498	-503
	OFF4H後		-495	-509	-502		
	復極量		97	40	42		
アノード	IO電位		525	527	528	-22	12
	OFF4H後		324	322	321		
		TR1	TR2	TR3	TR4	TR5	TR6
通電電流(mA)							
浴電圧(V)							
鉄筋	IO電位						
	OFF4H後						
	復極量						
アノード	IO電位						
	OFF4H後						
		BL1	BL2	BL3	BL4	BL5	BL6
鉄筋	電位			-413	-437	-385	-393
	1回目			6.3	8.4	7.5	10.8
水分計	2回目			6.0	6.7	6.8	7.7
	3回目			6.7	7.2	7.6	8.8

電気防食開始時期の検討試験測定データ

SCE換算

1998年 11月19日 通電開始

42日後

室温 21.0℃

湿度

		TG1	TG2	TG3	TG4	TG5	TG6
通電電流(mA)			0.402	0.399	0.396		
浴電圧(V)			1.023	0.988	1.02		
鉄筋	IO電位		-445	-397	-431	-396	-400
	OFF4H後		-382	-337	-376		
	復極量		63	60	55		
アノード	IO電位		549	530	563	12	23
	OFF4H後		395	353	406		
		TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM6
通電電流(mA)			0.4	0.403	0.4		
浴電圧(V)			3.29	2.65	2.42		
鉄筋	IO電位		-349	-379	-346	-263	-279
	OFF4H後		-244	-341	-283		
	復極量		105	38	63		
アノード	IO電位		1280	1230	1090	23	-8
	OFF4H後		867	828	617		
		TS1	TS2	TS3	TS4	TS5	TS6
通電電流(mA)			0.398	0.401	0.399		
浴電圧(V)			1.176	1.214	1.137		
鉄筋	IO電位		-395	-446	-419	-364	-348
	OFF4H後		-334	-397	-359		
	復極量		61	49	60		
アノード	IO電位		706	704	640	138	157
	OFF4H後		702	666	611		
		AS1	AS2	AS3	AS4	AS5	AS6
通電電流(mA)			0.4	0.401	0.398		
浴電圧(V)			-0.137	-0.059	-0.138		
鉄筋	IO電位		-511	-525	-466	-493	-461
	OFF4H後		-462	-468	-409		
	復極量		49	57	57		
アノード	IO電位		-693	-630	-654	-705	-639
	OFF4H後		-771	-708	-762		
		RM1	RM2	RM3	RM4	RM5	RM6
通電電流(mA)			0.4	0.4	0.399		
浴電圧(V)			1.06	1.01	1.01		
鉄筋	IO電位		-424	-426	-420	-419	-401
	OFF4H後		-302	-396	-395		
	復極量		122	30	25		
アノード	IO電位		545	547	547	-19	2
	OFF4H後		387	389	381		
		TR1	TR2	TR3	TR4	TR5	TR6
通電電流(mA)							
浴電圧(V)							
鉄筋	IO電位						
	OFF4H後						
	復極量						
アノード	IO電位						
	OFF4H後						
		BL1	BL2	BL3	BL4	BL5	BL6
鉄筋	電位			-311	-363	-312	-308
水分計	1回目			5.0	4.9	5.0	5.0
	2回目			4.9	4.6	4.8	5.1
	3回目			5.0	4.9	5.0	5.1

電気防食開始時期の検討試験測定データ

SCE換算

1998年 12月24日 通電開始

77日後

室温 21.7℃

湿度

		TG1	TG2	TG3	TG4	TG5	TG6
通電電流(mA)			0.403	0.4	0.397		
浴電圧(V)			0.986	0.959	0.974		
鉄筋	IO電位		-449	-406	-420	-415	-393
	OFF4H後		-387	-332	-364		
	復極量		62	74	56		
アノード	IO電位		481	473	493	-42	-29
	OFF4H後		343	352	352		
		TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM6
通電電流(mA)			0.4	0.403	0.401		
浴電圧(V)			3.43	2.632	2.377		
鉄筋	IO電位		-1073	-1075	-1063	-1165	-998
	OFF4H後		-946	-1027	-989		
	復極量		127	48	74		
アノード	IO電位		734	604	382	-896	-730
	OFF4H後		187	182	-99		
		TS1	TS2	TS3	TS4	TS5	TS6
通電電流(mA)			0.399	0.401	0.399		
浴電圧(V)			1.089	1.131	1.083		
鉄筋	IO電位		-179	-242	-223	-199	-192
	OFF4H後		-114	-192	-170		
	復極量		65	50	53		
アノード	IO電位		851	841	801	280	296
	OFF4H後		835	828	785		
		AS1	AS2	AS3	AS4	AS5	AS6
通電電流(mA)			0.4	0.402	0.399		
浴電圧(V)			-0.206	-0.183	-0.236		
鉄筋	IO電位		-1157	-1183	-1117	-1180	-1142
	OFF4H後		-1097	-1129	-1051		
	復極量		60	54	66		
アノード	IO電位		-1411	-1411	-1397	-1439	-1386
	OFF4H後		-1401	-1428	-1395		
		RM1	RM2	RM3	RM4	RM5	RM6
通電電流(mA)			0.4	0.401	0.4		
浴電圧(V)			1.027	0.997	1.001		
鉄筋	IO電位		-1096	-1113	-1117	-1126	-1107
	OFF4H後		-963	-1078	-1079		
	復極量		133	35	38		
アノード	IO電位		-162	-165	-166	-720	-720
	OFF4H後		-296	-300	-298		
		TR1	TR2	TR3	TR4	TR5	TR6
通電電流(mA)							
浴電圧(V)							
鉄筋	IO電位						
	OFF4H後						
	復極量						
アノード	IO電位						
	OFF4H後						
		BL1	BL2	BL3	BL4	BL5	BL6
鉄筋	電位			-158	-179	-139	-131
	1回目			5.2	5.3	5.1	5.6
水分計	2回目			5.2	5.4	5.2	5.5
	3回目			5.0	5.1	5.3	5.6

電気防食開始時期の検討試験測定データ

SCE換算

1999年 1月13日 通電開始

97日後

室温 23.4℃

湿度

		TG1	TG2	TG3	TG4	TG5	TG6
通電電流(mA)			0.804	0.803	0.804		
浴電圧(V)			1.086	1.008	1.038		
鉄筋	IO電位		-485	-418	-412	-418	-376
	OFF4H後		-368	-293	-319		
	復極量		117	125	93		
アノード	IO電位		539	511	589	-14	3
	OFF4H後		357	334	366		
		TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM6
通電電流(mA)			0.803	0.803	0.804		
浴電圧(V)			4.34	2.974	2.719		
鉄筋	IO電位		-418	-392	-400	-268	-266
	OFF4H後		-199	-281	-233		
	復極量		219	111	167		
アノード	IO電位		1455	1830	1317	-2	-19
	OFF4H後		868	879	625		
		TS1	TS2	TS3	TS4	TS5	TS6
通電電流(mA)			0.804	0.803	0.804		
浴電圧(V)			1.259	1.284	1.217		
鉄筋	IO電位		-388	-438	-400	-392	-349
	OFF4H後		-272	-338	-300		
	復極量		116	100	100		
アノード	IO電位		822	777	726	69	126
	OFF4H後		703	694	654		
		AS1	AS2	AS3	AS4	AS5	AS6
通電電流(mA)			0.804	0.803	0.804		
浴電圧(V)			0.095	0.079	0.125		
鉄筋	IO電位		-548	-540	-503	-480	-449
	OFF4H後		-449	-436	-408		
	復極量		99	104	95		
アノード	IO電位		-698	-634	-671	-692	-679
	OFF4H後		-767	-738	-783		
		RM1	RM2	RM3	RM4	RM5	RM6
通電電流(mA)			0.804	0.803	0.803		
浴電圧(V)			1.148	1.037	1.058		
鉄筋	IO電位		-467	-404	-416	-422	-385
	OFF4H後		-240	-337	-354		
	復極量		227	67	62		
アノード	IO電位		600	594	582	-6	9
	OFF4H後		381	389	383		
		TR1	TR2	TR3	TR4	TR5	TR6
通電電流(mA)							
浴電圧(V)							
鉄筋	IO電位	-326	-340				
	OFF4H後						
	復極量						
アノード	IO電位						
	OFF4H後						
		BL1	BL2	BL3	BL4	BL5	BL6
鉄筋	電位			-353	-337	-338	-288
	1回目			4.6	4.7	4.6	4.7
水分計	2回目			4.5	4.5	4.7	4.8
	3回目			4.6	4.8	4.5	4.9

電気防食開始時期の検討試験測定データ

SCE換算

1999年 2月9日 通電開始 124日後 室温 20°C 湿度

		TG1	TG2	TG3	TG4	TG5	TG6
通電電流(mA)			0.804	0.803	0.804		
浴電圧(V)			1.021	1.025	1.016		
鉄筋	IO電位		-387	-402	-382	-402	-374
	OFF4H後		-256	-263	-236		
	復極量		131	139	146		
アノード	IO電位		549	532	556	-4	5
	OFF4H後		369	333	383		
		TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM6
通電電流(mA)			0.802	0.803	0.803		
浴電圧(V)			5.73	3.44	3.114		
鉄筋	IO電位		-366	-388	-415	-228	-262
	OFF4H後		-189	-253	-220		
	復極量		177	135	195		
アノード	IO電位		1727	1396	1240	26	9
	OFF4H後		936	952	682		
		TS1	TS2	TS3	TS4	TS5	TS6
通電電流(mA)			0.804	0.804	0.804		
浴電圧(V)			1.194	1.256	1.221		
鉄筋	IO電位		-303	-425	-405	-392	-358
	OFF4H後		-179	-316	-284		
	復極量		124	109	121		
アノード	IO電位		773	740	726	120	129
	OFF4H後		728	701	674		
		AS1	AS2	AS3	AS4	AS5	AS6
通電電流(mA)			0.804	0.803	0.804		
浴電圧(V)			0.164	0.065	0.203		
鉄筋	IO電位		-336	-392	-341	-420	-375
	OFF4H後		-263	-294	-252		
	復極量		73	98	89		
アノード	IO電位		-826	-777	-817	-759	-819
	OFF4H後		-788	-724	-720		
		RM1	RM2	RM3	RM4	RM5	RM6
通電電流(mA)			0.803	0.803	0.803		
浴電圧(V)			1.205	1.131	1.138		
鉄筋	IO電位		-577	-540	-539	-504	-502
	OFF4H後		-345	-467	-470		
	復極量		232	73	69		
アノード	IO電位		540	544	545	-33	-9
	OFF4H後		341	349	352		
		TR1	TR2	TR3	TR4	TR5	TR6
通電電流(mA)							
浴電圧(V)							
鉄筋	IO電位	-279	-327	-300			
	OFF4H後						
	復極量						
アノード	IO電位						
	OFF4H後						
		BL1	BL2	BL3	BL4	BL5	BL6
鉄筋	電位			-407	-368	-351	-332
	1回目			4.8	4.6	5.0	5.1
水分計	2回目			5.3	5.4	5.4	5.9
	3回目			4.9	5.0	5.1	5.2

電気防食開始時期の検討試験測定データ

SCE換算

1999年 3月4日 通電開始 147日後 室温 30℃

湿度 60%

		TG1	TG2	TG3	TG4	TG5	TG6
通電電流(mA)			0.806	0.806	0.806		
浴電圧(V)			1.002	1.007	0.997		
鉄筋	IO電位		-352	-353	-332	-347	-312
	OFF4H後		-230	-229	-215		
	復極量		122	124	117		
アノード	IO電位		534	494	541	14	3
	OFF4H後		377	344	386		
		TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM6
通電電流(mA)			0.805	0.806	0.807		
浴電圧(V)			6.473	3.637	3.206		
鉄筋	IO電位		-360	-330	-339	-229	-230
	OFF4H後		-179	-228	-203		
	復極量		181	102	136		
アノード	IO電位		1716	1399	1196	-44	4
	OFF4H後		982	968	769		
		TS1	TS2	TS3	TS4	TS5	TS6
通電電流(mA)			0.806	0.806	0.807		
浴電圧(V)			1.258	1.246	1.26		
鉄筋	IO電位		-261	-301	-315	-308	-296
	OFF4H後		-143	-201	-203		
	復極量		118	100	112		
アノード	IO電位		827	802	778	156	155
	OFF4H後		774	748	733		
		AS1	AS2	AS3	AS4	AS5	AS6
通電電流(mA)			0.808	0.807	0.808		
浴電圧(V)			0.101	0.123	0.158		
鉄筋	IO電位		-300	-370	-323	-386	-383
	OFF4H後		-224	-267	-234		
	復極量		76	103	89		
アノード	IO電位		-555	-616	-605	-573	-602
	OFF4H後		-594	-664	-663		
		RM1	RM2	RM3	RM4	RM5	RM6
通電電流(mA)			0.806	0.806	0.806		
浴電圧(V)			1.139	1.091	1.131		
鉄筋	IO電位		-434	-476	-515	-465	-429
	OFF4H後		-245	-396	-435		
	復極量		189	80	80		
アノード	IO電位		547	552	545	-18	-18
	OFF4H後		364	373	364		
		TR1	TR2	TR3	TR4	TR5	TR6
通電電流(mA)		0.804	0.805	0.804			
浴電圧(V)		2.264	2.454	2.372			
鉄筋	IO電位	-282	-349	-318	-220	-303	
	OFF4H後	-211	-288	-263			
	復極量	71	61	55			
アノード	IO電位	1181	1190	1170	-15	-72	
	OFF4H後	859	773	754			
		BL1	BL2	BL3	BL4	BL5	BL6
鉄筋	電位			-440	-278	-286	-244
	1回目			5.1	5.0	4.9	4.9
水分計	2回目			4.9	4.9	4.7	5.3
	3回目			4.8	4.6	4.7	4.9

電気防食開始時期の検討試験測定データ

SCE換算

1999年 4月13日 通電開始 187日後 室温 30.5℃ 湿度 61%

		TG1	TG2	TG3	TG4	TG5	TG6
通電電流(mA)			0.8	0.801	0.8		
浴電圧(V)			1.016	1.047	1.024		
鉄筋	IO電位		-329	-345	-318	-283	-250
	OFF4H後		-196	-207	-183		
	復極量		133	138	135		
アノード	IO電位		543	492	549	-17	-8
	OFF4H後		390	349	397		
		TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM6
通電電流(mA)			0.8	0.8	0.801		
浴電圧(V)			8.22	4.19	3.65		
鉄筋	IO電位		-360	-319	-336	-199	-187
	OFF4H後		-176	-200	-189		
	復極量		184	119	147		
アノード	IO電位		1790	1410	1230	-71	5
	OFF4H後		1030	1010	850		
		TS1	TS2	TS3	TS4	TS5	TS6
通電電流(mA)			0.8	0.8	0.8		
浴電圧(V)			1.39	1.36	1.38		
鉄筋	IO電位		-233	-259	-274	-237	-221
	OFF4H後		-107	-151	-155		
	復極量		126	108	119		
アノード	IO電位		918	886	868	142	156
	OFF4H後		856	819	813		
		AS1	AS2	AS3	AS4	AS5	AS6
通電電流(mA)			0.798	0.8	0.801		
浴電圧(V)			0.042	-0.028	-0.056		
鉄筋	IO電位		-280	-351	-312	-327	-339
	OFF4H後		-194	-235	-207		
	復極量		86	116	105		
アノード	IO電位		-465	-542	-530	-500	-514
	OFF4H後		-544	-604	-599		
		RM1	RM2	RM3	RM4	RM5	RM6
通電電流(mA)			0.8	0.8	0.8		
浴電圧(V)			1.24	1.04	1.06		
鉄筋	IO電位		-413	-376	-390	-381	-315
	OFF4H後		-215	-288	-297		
	復極量		198	88	93		
アノード	IO電位		580	560	550	0	0
	OFF4H後		390	390	380		
		TR1	TR2	TR3	TR4	TR5	TR6
通電電流(mA)		0.72	0.82	0.8			
浴電圧(V)		2.23	2.46	2.37			
鉄筋	IO電位	-240	-310	-292	-210	-275	
	OFF4H後	-158	-226	-226			
	復極量	82	84	66			
アノード	IO電位	1190	1190	1170	-38	-58	
	OFF4H後	924	894	862			
		BL1	BL2	BL3	BL4	BL5	BL6
鉄筋	電位			-225	-223	-164	-187
	1回目			4.4	4.8	4.6	4.5
水分計	2回目			4.5	4.6	4.5	4.7
	3回目			4.5	4.6	4.5	4.6

電気防食開始時期の検討試験測定データ

SCE換算

1999年 5月25日 通電開始 229日後 室温 30℃ 湿度 60%

		TG1	TG2	TG3	TG4	TG5	TG6
通電電流(mA)			0.801		0.8	0.801	0.8
浴電圧(V)			1.043		1.055	0.986	0.978
鉄筋	IO電位		-324		-319	-311	-315
	OFF4H後		-184		-173	-221	-210
	復極量		140		146	90	105
アノード	IO電位		550		551	551	530
	OFF4H後		394		400	388	390
		TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM6
通電電流(mA)			0.801		0.801	0.8	0.8
浴電圧(V)			9.992		4.022	6.355	6.3
鉄筋	IO電位		-362		-336	-357	-353
	OFF4H後		-172		-183	-187	-182
	復極量		190		153	170	171
アノード	IO電位		1934		1265	1496	1566
	OFF4H後		948		890	863	1065
		TS1	TS2	TS3	TS4	TS5	TS6
通電電流(mA)			0.801		0.8	0.801	0.8
浴電圧(V)			1.486		1.469	1.403	1.58
鉄筋	IO電位		-221		-265	-262	-305
	OFF4H後		-86		-138	-188	-173
	復極量		135		127	74	132
アノード	IO電位		979		927	906	897
	OFF4H後		905		867	845	830
		AS1	AS2	AS3	AS4	AS5	AS6
通電電流(mA)			0.798		0.802	0.801	0.8
浴電圧(V)			0.247		0.086	0.285	0.092
鉄筋	IO電位		-274		-312	-323	-339
	OFF4H後		-173		-196	-259	-270
	復極量		101		116	64	69
アノード	IO電位		-360		-445	-329	-435
	OFF4H後		-549		-570	-547	-533
		RM1	RM2	RM3	RM4	RM5	RM6
通電電流(mA)			0.801		0.8	0.8	0.8
浴電圧(V)			1.315		1.084	1.105	1.088
鉄筋	IO電位		-436		-396	-436	-302
	OFF4H後		-228		-294	-364	-228
	復極量		208		102	72	74
アノード	IO電位		594		558	544	574
	OFF4H後		387		345	387	389
		TR1	TR2	TR3	TR4	TR5	TR6
通電電流(mA)		0.76		0.8	0.8	0.8	
浴電圧(V)		2.29		2.436	2.68	2.512	
鉄筋	IO電位	-210		-227	-238	-236	
	OFF4H後	-140		-173	-148	-174	
	復極量	70		54	90	62	
アノード	IO電位	1188		1184	1197	1190	
	OFF4H後	956		931	896	929	
		BL1	BL2	BL3	BL4	BL5	BL6
鉄筋	電位			-215	-217		-185
水分計	1回目			4.0	4.8		4.5
	2回目			4.3	4.9		4.4
	3回目			4.5	4.7		4.5

電気防食開始時期の検討試験測定データ SCE換算
 1999年 6月29日 通電開始 264日後 室温 30°C 湿度 60%

		TG1	TG2	TG3	TG4	TG5	TG6
通電電流(mA)			0.78		0.78	0.78	0.78
浴電圧(V)			1.065		1.077	0.992	0.986
鉄筋	IO電位		-334		-339	-311	-322
	OFF4H後		-175		-167	-207	-196
	復極量		159		172	104	126
アノード	IO電位		628		577	560	532
	OFF4H後		398		401	392	397
		TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM6
通電電流(mA)			0.61		0.61	0.61	0.61
浴電圧(V)			8.82		3.539	6.1	6.06
鉄筋	IO電位		-353		-326	-361	-338
	OFF4H後		-168		-177	-179	-176
	復極量		185		149	182	162
アノード	IO電位		1894		1236	1613	1622
	OFF4H後		1065		880	940	995
		TS1	TS2	TS3	TS4	TS5	TS6
通電電流(mA)			0.79		0.79	0.99	0.79
浴電圧(V)			1.543		1.541	1.562	1.632
鉄筋	IO電位		-214		-263	-286	-301
	OFF4H後		-74		-125	-194	-159
	復極量		140		138	92	142
アノード	IO電位		1019		967	982	936
	OFF4H後		936		915	912	872
		AS1	AS2	AS3	AS4	AS5	AS6
通電電流(mA)			0.82		0.82	1.02	1.01
浴電圧(V)			0.452		0.225	0.751	0.285
鉄筋	IO電位		-284		-318	-314	-332
	OFF4H後		-163		-186	-223	-238
	復極量		121		132	91	94
アノード	IO電位		-273		-374	-103	-318
	OFF4H後		-546		-561	-553	-549
		RM1	RM2	RM3	RM4	RM5	RM6
通電電流(mA)			0.61		0.81	1.01	1.01
浴電圧(V)			1.229		1.095	1.176	1.248
鉄筋	IO電位		-426		-399	-457	-302
	OFF4H後		-215		-293	-367	-208
	復極量		211		106	90	94
アノード	IO電位		586		562	560	644
	OFF4H後		395		391	357	423
		TR1	TR2	TR3	TR4	TR5	TR6
通電電流(mA)		1.05		0.99	0.99	0.99	
浴電圧(V)		2.563		2.699	2.877	2.778	
鉄筋	IO電位	-256		-259	-265	-275	
	OFF4H後	-136		-152	-133	-137	
	復極量	120		107	132	138	
アノード	IO電位	1246		1343	1301	1269	
	OFF4H後	992		972	971	983	
		BL1	BL2	BL3	BL4	BL5	BL6
鉄筋	電位			-200	-230		-195
	1回目			4.5	4.6		4.6
水分計	2回目			4.7	4.9		4.7
	3回目			4.6	5.0		4.5

電気防食開始時期の検討試験測定データ

SCE換算

1999年 7月30日 通電開始 295日後

室温 30.6℃

湿度 77%

		TG1	TG2	TG3	TG4	TG5	TG6
通電電流(mA)			0.804		0.804	804	0.804
浴電圧(V)			1.056		1.066	0.999	0.996
鉄筋	IO電位		-350		-341	-322	-322
	OFF4H後		-198		-183	-220	-210
	復極量		152		158	102	112
アノード	IO電位		552		558	547	527
	OFF4H後		400		402	391	401
		TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM6
通電電流(mA)			0.602		0.599	0.602	0.599
浴電圧(V)			7.551		3.4	6.083	5.93
鉄筋	IO電位		-343		-425	-340	-332
	OFF4H後		-174		-184	-190	-182
	復極量		169		241	150	150
アノード	IO電位		7085		1272	1672	1771
	OFF4H後		1862		860	953	1003
		TS1	TS2	TS3	TS4	TS5	TS6
通電電流(mA)			0.803		0.803	1.004	0.798
浴電圧(V)			1.328		1.333	1.348	1.441
鉄筋	IO電位		-227		-266	-263	-272
	OFF4H後		-85		-137	-168	-140
	復極量		142		129	95	132
アノード	IO電位		890		854	868	862
	OFF4H後		854		820	834	827
		AS1	AS2	AS3	AS4	AS5	AS6
通電電流(mA)			0.805		0.805	1.005	0.996
浴電圧(V)			0.147		0.056	0.205	0.65
鉄筋	IO電位		-279		-314	-320	-322
	OFF4H後		-170		-190	-231	-236
	復極量		109		124	89	86
アノード	IO電位		-480		-520	-470	-517
	OFF4H後		-568		-597	-586	-589
		RM1	RM2	RM3	RM4	RM5	RM6
通電電流(mA)			0.604		0.804	1.005	1.005
浴電圧(V)			1.234		1.096	1.13	1.25
鉄筋	IO電位		-402		-335	-337	-312
	OFF4H後		-210		-235	-249	-218
	復極量		192		100	88	94
アノード	IO電位		611		594	588	663
	OFF4H後		425		416	384	442
		TR1	TR2	TR3	TR4	TR5	TR6
通電電流(mA)		1.069		0.998	0.998	0.999	
浴電圧(V)		2.426		2.534	2.527	2.488	
鉄筋	IO電位	-254		-246	-262	-239	
	OFF4H後	-134		-140	-124	-127	
	復極量	120		106	138	112	
アノード	IO電位	1233		1259	1250	1256	
	OFF4H後	1033		981	995	1000	
		BL1	BL2	BL3	BL4	BL5	BL6
水分計	電位			-223	-202		-195
	1回目			4.9	5.0		5.2
	2回目			5.1	5.2		5.0
	3回目			4.8	4.9		5.1

電気防食開始時期の検討試験測定データ SCE換算
 1999年 8月25日 通電開始 321日後 室温 30°C 湿度 63%

		TG1	TG2	TG3	TG4	TG5	TG6
通電電流(mA)			0.805		0.806	0.804	0.805
浴電圧(V)			1.07		1.078	0.971	0.976
鉄筋	IO電位		-353		-360	-323	-376
	OFF4H後		-194		-180	-257	-229
	復極量		159		180	66	147
アノード	IO電位		595		568	561	515
	OFF4H後		405		406	397	397
		TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM6
通電電流(mA)			0.604		0.601	0.604	0.599
浴電圧(V)			7.506		3.376	5.919	6.242
鉄筋	IO電位		-356		-348	-354	-333
	OFF4H後		-175		-185	-187	-185
	復極量		181		163	167	148
アノード	IO電位		1933		1234	1604	1769
	OFF4H後		1058		867	978	1056
		TS1	TS2	TS3	TS4	TS5	TS6
通電電流(mA)			0.806		0.805	1.008	0.8
浴電圧(V)			1.254		1.363	1.267	1.382
鉄筋	IO電位		-253		-251	-294	-308
	OFF4H後		-81		-124	-230	-164
	復極量		172		127	64	144
アノード	IO電位		846		913	942	822
	OFF4H後		866		868	871	837
		AS1	AS2	AS3	AS4	AS5	AS6
通電電流(mA)			0.806		0.806	1.006	0.998
浴電圧(V)			-0.233		-0.216	-0.272	0.068
鉄筋	IO電位		-300		-334	-319	-320
	OFF4H後		-171		-207	-222	-231
	復極量		129		127	97	89
アノード	IO電位		-778		-793	-720	-774
	OFF4H後		-715		-733	-765	-702
		RM1	RM2	RM3	RM4	RM5	RM6
通電電流(mA)			0.605		0.804	1.006	1.005
浴電圧(V)			1.191		1.053	1.084	1.179
鉄筋	IO電位		-491		-423	-443	-313
	OFF4H後		-220		-347	-384	-215
	復極量		271		76	59	98
アノード	IO電位		580		576	578	677
	OFF4H後		417		409	385	453
		TR1	TR2	TR3	TR4	TR5	TR6
通電電流(mA)		1.014		1.000	1.000	1.001	
浴電圧(V)		2.189		2.175	2.415	2.401	
鉄筋	IO電位	-260		-250	-274	-253	
	OFF4H後	-144		-146	-127	-131	
	復極量	116		104	147	122	
アノード	IO電位	1237		1247	1225	1238	
	OFF4H後	1037		962	1019	1028	
		BL1	BL2	BL3	BL4	BL5	BL6
鉄筋	電位			-311	-273		-267
水分計	1回目			5.0	6.7		4.8
	2回目			4.8	6.8		4.6
	3回目			4.8	4.7		4.7

電気防食開始時期の検討試験測定データ

SCE換算

1999年 10月21日 通電開始

378日後

室温 30℃

湿度 60%

		TG1	TG2	TG3	TG4	TG5	TG6
通電電流(mA)			0.8		0.8	0.8	0.8
浴電圧(V)			1.09		1.1	1.05	1.03
鉄筋	IO電位		-344		-342	-363	-374
	OFF4H後		-185		-174	-262	-229
	復極量		159		168	101	145
アノード	IO電位		558		558	553	516
	OFF4H後		399		395	375	389
		TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM6
通電電流(mA)			0.6		0.6	0.6	0.6
浴電圧(V)			9.7		3.79	7.82	7.55
鉄筋	IO電位		-348		-324	-338	-326
	OFF4H後		-169		-177	-174	-180
	復極量		179		147	164	146
アノード	IO電位		2010		3340	1790	1910
	OFF4H後		1080		1310	1040	1110
		TS1	TS2	TS3	TS4	TS5	TS6
通電電流(mA)			0.8		0.8	1	0.81
浴電圧(V)			1.45		1.5	1.51	1.57
鉄筋	IO電位		-218		-251	-340	-353
	OFF4H後		-75		-113	-245	-192
	復極量		143		138	95	161
アノード	IO電位		971		956	961	898
	OFF4H後		913		913	920	870
		AS1	AS2	AS3	AS4	AS5	AS6
通電電流(mA)			0.8		0.8	1	1
浴電圧(V)			0.1		0	3.72	0.13
鉄筋	IO電位		-273		-306	-301	-324
	OFF4H後		-158		-185	-215	-233
	復極量		115		121	86	91
アノード	IO電位		-550		-589	-265	-592
	OFF4H後		-624		-648	-711	-607
		RM1	RM2	RM3	RM4	RM5	RM6
通電電流(mA)			0.6		0.8	1	0.92
浴電圧(V)			1.32		1.12	1.17	1.38
鉄筋	IO電位		-411		-339	-357	-290
	OFF4H後		-194		-235	-266	-192
	復極量		217		104	91	98
アノード	IO電位		650		601	600	790
	OFF4H後		440		430	402	480
		TR1	TR2	TR3	TR4	TR5	TR6
通電電流(mA)		0.94		1.00	1.05	1.00	
浴電圧(V)		2.61		2.54	2.34	2.41	
鉄筋	IO電位	-244		-242	-165	-244	
	OFF4H後	-133		-135	-54	-124	
	復極量	111		107	111	120	
アノード	IO電位	1300		1250	1090	1220	
	OFF4H後	1060		1048	598	1060	
		BL1	BL2	BL3	BL4	BL5	BL6
鉄筋	電位			-347	-281		-304
	1回目			4.7	5.2		4.6
水分計	2回目			4.8	5.4		4.6
	3回目			4.7	4.8		4.3

電気防食開始時期の検討試験測定データ

SCE換算

2000年 1月31日 通電開始 480日後 室温 29.9℃

湿度 60.6

		TG1	TG2	TG3	TG4	TG5	TG6
通電電流(mA)			0.800				0.800
浴電圧(V)			1.14				1.05
鉄筋	IO電位		-344				-350
	OFF4H後		-164				-191
	復極量		180				159
アノード	IO電位		560				529
	OFF4H後		393				389
		TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM6
通電電流(mA)			0.600				0.600
浴電圧(V)			11.98				8.35
鉄筋	IO電位		-334				-328
	OFF4H後		-151				-166
	復極量		183				162
アノード	IO電位		2170				1832
	OFF4H後		1069				1091
		TS1	TS2	TS3	TS4	TS5	TS6
通電電流(mA)			0.800				0.810
浴電圧(V)			1.7				1.77
鉄筋	IO電位		-216				-378
	OFF4H後		-55				-181
	復極量		161				197
アノード	IO電位		1064				954
	OFF4H後		969				915
		AS1	AS2	AS3	AS4	AS5	AS6
通電電流(mA)			0.800				0.050
浴電圧(V)			26.84				47.5
鉄筋	IO電位		-184				-302
	OFF4H後		-132				-294
	復極量		52				8
アノード	IO電位		2500				1930
	OFF4H後		-507				-624
		RM1	RM2	RM3	RM4	RM5	RM6
通電電流(mA)			0.600				0.920
浴電圧(V)			1.61				1.72
鉄筋	IO電位		-496				-298
	OFF4H後		-211				-170
	復極量		285				128
アノード	IO電位		751				1034
	OFF4H後		538				771
		TR1	TR2	TR3	TR4	TR5	TR6
通電電流(mA)		0.930				1.000	
浴電圧(V)		3.56				2.67	
鉄筋	IO電位	-251				-249	
	OFF4H後	-109				-111	
	復極量	142				138	
アノード	IO電位	1454				2347	
	OFF4H後	1101				1264	
		BL1	BL2	BL3	BL4	BL5	BL6
鉄筋	電位				-160		-262
	1回目				4.8		3.1
	2回目				5.2		4.3
	3回目				5.0		4.6

電気防食開始時期の検討試験測定データ

SCE換算

2000年 3月28日 通電開始 537日後 室温 30℃

湿度 60%

		TG2			TG6
通電電流(mA)		0.800			0.80
浴電圧(V)		1.199			1.056
鉄筋	IO電位	-358			-355
	OFF4H後	-167			-198
	復極量	191			157
アノード	IO電位	640			585
	OFF4H後	410			405
		TM2			TM6
通電電流(mA)		0.600			0.600
浴電圧(V)		13.47			8.73
鉄筋	IO電位	-366			-404
	OFF4H後	-163			-180
	復極量	203			224
アノード	IO電位	2168			1789
	OFF4H後	1099			1149
		TS2			TS6
通電電流(mA)		0.800			0.810
浴電圧(V)		1.793			1.808
鉄筋	IO電位	-223			-429
	OFF4H後	-61			-212
	復極量	162			217
アノード	IO電位	1235			1223
	OFF4H後	998			927
		AS2			AS6
通電電流(mA)		0.800			1.000
浴電圧(V)		26.91			0.411
鉄筋	IO電位	-142			-322
	OFF4H後	-120			-321
	復極量	22			1
アノード	IO電位	2500			-804
	OFF4H後	-507			-784
		RM2			RM6
通電電流(mA)		0.6			0.92
浴電圧(V)		1.69			1.658
鉄筋	IO電位	-620			-336
	OFF4H後	-243			-206
	復極量	377			130
アノード	IO電位	866			1107
	OFF4H後	633			723
		TR1			TR5
通電電流(mA)		0.940			1.000
浴電圧(V)		3.888			2.849
鉄筋	IO電位	-248			-290
	OFF4H後	-113			-121
	復極量	135			169
アノード	IO電位	3325			2373
	OFF4H後	1127			1107
				BL4	BL6
鉄筋	電位			-289	-232
水分計	1回目			4.9	4.7
	2回目			4.9	4.6
	3回目			4.9	4.7

電気防食の施工性と維持管理方法の検討試験測定データ

SCE換算

			1998年	10月8日	天気	晴	温度	
			TG	TM	TS	AS	RM	BL
通電電流(mA)			76.2	25	31.5	29.44	35	
浴電圧(V)			1.365	3.934	1.038	1.958	1.057	
鉄筋	ON電位 (mV)	Rf1	-612	-488	-451	-535	-452	-180
		Rf2	-637	-538	-393	-547	-465	-203
		Rf3	-602	-493	-463	-407	-415	-183
	IO電位 (mV)	Rf1	-562	-461	-432	-525	-440	
		Rf2	-565	-490	-374	-538	-451	
		Rf3	-532	-451	-438	-404	-391	
	OFF4時間後 (mV)	Rf1	-312	-255	-199	-282	-267	
		Rf2	-312	-268	-195	-268	-285	
		Rf3	-278	-266	-203	-243	-224	
	復極量 (mV)	Rf1	250	206	233	243	173	
		Rf2	253	222	179	270	166	
		Rf3	254	185	235	161	167	
アノード	ON電位 (mV)	Rf1	737	3435	563	1150	602	
		Rf2	728	3385	444	1138	589	
		Rf3	767	3427	560	1275	640	
	IO電位 (mV)	Rf1	490	1360	490	747	534	
		Rf2	492	1283	386	730	524	
		Rf3	568	1344	486	866	577	
	OFF4時間後 (mV)	Rf1	300	925	447	-456	272	
		Rf2	307	912	367	-445	254	
		Rf3	343	914	447	-417	315	

備考

電気防食の施工性と維持管理方法の検討試験測定データ

SCE換算

			1998年	11月19日	天気	晴	温度	
			TG	TM	TS	AS	RM	BL
通電電流(mA)			48	25.5	18	29.5	35.5	
浴電圧(V)			1.48	14.76	1.126	3.22	1.23	
鉄筋	ON電位 (mV)	Rf1	-600	-575	-406	-677.2	-520	-119
		Rf2	-645	-584	-210	-670.9	-532	-147
		Rf3	-602	-582	-414	-444	-488	-118
	IO電位 (mV)	Rf1	-555	-536	-386	-651	-498	
		Rf2	-554	-514	-192	-649	-507	
		Rf3	-546	-501	-393	-427	-457	
	OFF4時間後 (mV)	Rf1	-272	-218	-137	-266	-235	
		Rf2	-271	-221	-50	-224	-238	
		Rf3	-238	-211	-128	-185	-177	
	復極量 (mV)	Rf1	283	318	249	385	263	
		Rf2	283	293	142	425	269	
		Rf3	308	290	265	242	280	
アノード	ON電位 (mV)	Rf1	819	14030	678	2490	709	
		Rf2	818	14010	463	2500	696	
		Rf3	859	13990	694	2730	745	
	IO電位 (mV)	Rf1	557	2560	588	1610	583	
		Rf2	524	2590	407	1640	576	
		Rf3	579	2520	602	1870	625	
	OFF4時間後 (mV)	Rf1	346	1171	549	-377	362	
		Rf2	365	1167	410	-336	357	
		Rf3	401	1176	569	-298	362	

備考

電気防食の施工性と維持管理方法の検討試験測定データ

SCE換算

			1998年	12月24日	天気	晴	温度	
			TG	TM	TS	AS	RM	BL
通電電流(mA)				25.5	18	21	35.5	
浴電圧(V)				17.78	1.086	3.514	1.248	
鉄筋	ON電位 (mV)	Rf1		-545	-380	-494	-510	-101
		Rf2		-543	-202	-504	-521	-134
		Rf3		-563	-387	-371	-490	-115
	IO電位 (mV)	Rf1		-515	-355	-482	-482	
		Rf2		-510	-186	-486	-513	
		Rf3		-496	-358	-352	-463	
	OFF4時間後 (mV)	Rf1		-209	-123	-209	-207	
		Rf2		-215	-37	-191	-210	
		Rf3		-220	-111	-161	-169	
	復極量 (mV)	Rf1		306	232	273	275	
		Rf2		295	149	295	303	
		Rf3		276	247	191	294	
アノード	ON電位 (mV)	Rf1		16968	667	3000	732	
		Rf2		16959	454	2996	721	
		Rf3		16915	680	3121	753	
	IO電位 (mV)	Rf1		2948	579	2187	609	
		Rf2		2939	407	2104	588	
		Rf3		2986	617	2250	650	
	OFF4時間後 (mV)	Rf1		1251	556	-458	393	
		Rf2		1244	413	-441	389	
		Rf3		1237	578	-409	432	

備考

電気防食の施工性と維持管理方法の検討試験測定データ

SCE換算

1999年			1月12日		天気		晴		温度10.1℃	
			TG	TM	TS	AS	RM	BL		
通電電流(mA)			26.4	21	22.9	20.9	29.5			
浴電圧(V)			1.687	15.32	1.07	4.073	1.18			
鉄筋	ON電位 (mV)	Rf1	-632	-462	-402	-464	-468	-90		
		Rf2	-691	-458	-213	-478	-477	-125		
		Rf3	-640	-497	-410	-406	-447	-102		
	IO電位 (mV)	Rf1	-572	-440	-380	-450	-452			
		Rf2	-561	-448	-190	-469	-470			
		Rf3	-545	-467	-389	-398	-440			
	OFF4時間後 (mV)	Rf1	-255	-180	-113	-196	-194			
		Rf2	-249	-183	-22	-184	-195			
		Rf3	-222	-191	-103	-165	-158			
	復極量 (mV)	Rf1	317	260	267	254	258			
		Rf2	312	265	168	285	275			
		Rf3	323	276	286	233	282			
アノード	ON電位 (mV)	Rf1	933	14330	681	3273	706			
		Rf2	945	14670	470	3263	696			
		Rf3	1006	14250	718	3334	728			
	IO電位 (mV)	Rf1	722	10370	595	2640	606			
		Rf2	561	12830	410	2436	617			
		Rf3	622	11010	621	2849	647			
	OFF4時間後 (mV)	Rf1	342	1288	560	-374	396			
		Rf2	372	1284	412	-363	395			
		Rf3	403	1274	580	-344	433			

備考

電気防食の施工性と維持管理方法の検討試験測定データ

SCE換算

			1999年	2月9日	天気	晴	温度10℃	
			TG	TM	TS	AS	RM	BL
通電電流(mA)			53.2	21	34	20.9	29.5	
浴電圧(V)			1.75	16.77	1.37	8.63	1.2	
鉄筋	ON電位 (mV)	Rf1	-631	-460	-501	-406	-473	-90
		Rf2	-695	-453	-300	-451	-481	-125
		Rf3	-638	-499	-516	-479	-458	-102
	IO電位 (mV)	Rf1	-553	-437	-476	-404	-462	
		Rf2	-577	-412	-266	-440	-466	
		Rf3	-551	-481	-489	-456	-438	
	OFF4時間後 (mV)	Rf1	-250	-166	-113	-174	-184	
		Rf2	-243	-169	-32	-171	-182	
		Rf3	-218	-181	-99	-164	-148	
	復極量 (mV)	Rf1	303	271	363	230	278	
		Rf2	334	243	234	269	284	
		Rf3	333	300	390	292	290	
アノード	ON電位 (mV)	Rf1	1027	16180	824	7182	722	
		Rf2	1022	16180	568	7150	717	
		Rf3	1007	16110	832	7118	742	
	IO電位 (mV)	Rf1	773	3160	632	3230	610	
		Rf2	657	3360	442	3830	612	
		Rf3	770	3180	727	3220	641	
	OFF4時間後 (mV)	Rf1	343	1267	574	-437	386	
		Rf2	372	1262	440	-427	388	
		Rf3	399	1249	596	-420	422	

備考

電気防食の施工性と維持管理方法の検討試験測定データ

SCE換算

1999年			3月4日	天気	晴	温度14℃		
			TG	TM	TS	AS	RM	BL
通電電流(mA)			70.3	20.9	21.3	20.9	29.2	
浴電圧(V)			1.728	15.799	1.089	3.746	1.203	
鉄筋	ON電位 (mV)	Rf1	-661	-464	-369	-351	-472	-96
		Rf2	-686	-448	-190	-881	-479	-115
		Rf3	-632	-497	-374	-294	-460	-95
	IO電位 (mV)	Rf1	-621	-435	-349	-347	-461	
		Rf2	-605	-402	-169	-844	-465	
		Rf3	-575	-436	-350	-289	-438	
	OFF4時間後 (mV)	Rf1	-262	-170	-108	-166	-188	
		Rf2	-249	-174	-40	-305	-184	
		Rf3	-228	-189	-94	-117	-154	
	復極量 (mV)	Rf1	359	265	241	181	273	
		Rf2	356	228	129	539	281	
		Rf3	347	247	256	172	284	
アノード	ON電位 (mV)	Rf1	1035	15260	684	2231	730	
		Rf2	1009	15270	483	1682	721	
		Rf3	1066	15206	698	2257	740	
	IO電位 (mV)	Rf1	582	2704	585	1196	617	
		Rf2	592	2763	410	649	610	
		Rf3	617	2652	599	1216	634	
	OFF4時間後 (mV)	Rf1	332	1235	556	-619	398	
		Rf2	349	1231	442	-758	403	
		Rf3	375	1214	576	-570	433	

備考

電気防食の施工性と維持管理方法の検討試験測定データ

SCE換算

			1999年	4月13日	天気	晴	温度19.5℃	
			TG	TM	TS	AS	RM	BL
通電電流(mA)			105	20.5	19	20.9	29.5	
浴電圧(V)			1.831	9.6	1	0.76	1.1	
鉄筋	ON電位 (mV)	Rf1	-680	-431	-346	-303	-437	-115
		Rf2	-702	-433	-243	-758	-443	-134
		Rf3	-641	-460	-343	-263	-424	-119
	IO電位 (mV)	Rf1	-644	-404	-328	-299	-423	
		Rf2	-625	-394	-219	-728	-427	
		Rf3	-598	-412	-321	-256	-405	
	OFF4時間後 (mV)	Rf1	-282	-177	-111	-139	-193	
		Rf2	-261	-188	-68	-366	-187	
		Rf3	-232	-207	-96	-42	-161	
	復極量 (mV)	Rf1	362	227	217	160	230	
		Rf2	364	206	151	362	240	
		Rf3	366	205	225	214	244	
アノード	ON電位 (mV)	Rf1	1128	9140	636	36	680	
		Rf2	1104	9140	508	-419	670	
		Rf3	1161	9100	648	77	690	
	IO電位 (mV)	Rf1	592	1880	563	-258	590	
		Rf2	609	1930	448	-692	590	
		Rf3	638	1890	574	-220	620	
	OFF4時間後 (mV)	Rf1	320	1160	544	-733	370	
		Rf2	340	1150	460	-961	370	
		Rf3	368	1130	564	-638	400	

備考

電気防食の施工性と維持管理方法の検討試験測定データ

SCE換算

			1999年	5月25日	天気	晴	温度℃	
			TG	TM	TS	AS	RM	BL
通電電流(mA)			109	21	20	20.8	29	
浴電圧(V)			1.848	5.706	0.907	0.538	1.023	
鉄筋	ON電位 (mV)	Rf1	-680	-383	-284	-322	-386	-129
		Rf2	-697	-382	-226	-442	-396	-149
		Rf3	-637	-403	-274	-259	-367	-126
	IO電位 (mV)	Rf1	-636	-355	-267	-321	-375	
		Rf2	-616	-350	-308	-442	-379	
		Rf3	-590	-363	-252	-259	-343	
	OFF4時間後 (mV)	Rf1	-272	-171	-102	-172	-181	
		Rf2	-252	-178	-77	-223	-183	
		Rf3	-227	-190	-86	-88	-148	
	復極量 (mV)	Rf1	364	184	165	149	194	
		Rf2	364	172	231	219	196	
		Rf3	363	173	166	171	195	
アノード	ON電位 (mV)	Rf1	1153	5316	609	217	633	
		Rf2	1136	5313	516	98	622	
		Rf3	1201	5290	625	281	654	
	IO電位 (mV)	Rf1	608	1551	551	137	564	
		Rf2	633	1533	472	139	551	
		Rf3	666	1506	568	223	584	
	OFF4時間後 (mV)	Rf1	313	1106	531	-684	323	
		Rf2	337	1100	472	-735	320	
		Rf3	365	1086	551	-599	356	

備考

電気防食の施工性と維持管理方法の検討試験測定データ

SCE換算

1999年			6月29日		天気		曇		温度29.5℃	
			TG	TM	TS	AS	RM	BL		
通電電流(mA)			35	16.8	22.6	20.6	21			
浴電圧(V)			1.087	4.98	0.936	0.202	0.964			
鉄筋	ON電位 (mV)	Rf1	-450	-359	-309	-393	-365	-130		
		Rf2	-464	-359	-244	-286	-371	-161		
		Rf3	-429	-379	-302	-142	-335	-146		
	IO電位 (mV)	Rf1	-432	-345	-297	-380	-359			
		Rf2	-434	-338	-230	-274	-363			
		Rf3	-409	-360	-289	-132	-324			
	OFF4時間後 (mV)	Rf1	-235	-165	-100	-214	-181			
		Rf2	-235	-168	-67	-58	-180			
		Rf3	-206	-181	-88	88	-141			
	復極量 (mV)	Rf1	197	180	197	166	178			
		Rf2	199	170	163	216	183			
		Rf3	203	179	201	220	183			
アノード	ON電位 (mV)	Rf1	610	4620	614	-43	596			
		Rf2	609	4620	528	64	590			
		Rf3	649	4600	627	208	628			
	IO電位 (mV)	Rf1	478	1446	560	-78	549			
		Rf2	484	1492	483	32	542			
		Rf3	511	1474	570	170	585			
	OFF4時間後 (mV)	Rf1	243	1087	534	-123	328			
		Rf2	335	1084	460	33	329			
		Rf3	366	1070	550	178	368			

備考

電気防食の施工性と維持管理方法の検討試験測定データ

SCE換算

			1999年	7月30日	天気	晴	温度30. 0℃	
			TG	TM	TS	AS	RM	BL
通電電流(mA)			53.9	16.8	22.6	20.6	21	
浴電圧(V)			1.119	2.869	0.842	0.2	0.856	
鉄筋	ON電位 (mV)	Rf1	-455	-309	-250	-332	-307	-162
		Rf2	-488	-316	-244	-317	-312	-182
		Rf3	-438	-319	-240	-290	-280	-171
	IO電位 (mV)	Rf1	-436	-291	-228	-320	-302	
		Rf2	-431	-296	-231	-307	-303	
		Rf3	-400	-298	-224	-279	-268	
	OFF4時間後 (mV)	Rf1	-239	-168	-103	-178	-172	
		Rf2	-234	-166	-100	-172	-173	
		Rf3	-202	-164	-93	-186	-140	
	復極量 (mV)	Rf1	197	123	125	142	130	
		Rf2	197	130	131	135	130	
		Rf3	198	134	131	93	128	
アノード	ON電位 (mV)	Rf1	636	2549	556	803	558	
		Rf2	629	2540	528	817	551	
		Rf3	686	2533	569	841	583	
	IO電位 (mV)	Rf1	475	1208	533	717	524	
		Rf2	477	1218	507	718	512	
		Rf3	505	1218	546	740	550	
	OFF4時間後 (mV)	Rf1	318	912	511	-411	266	
		Rf2	317	913	490	-405	266	
		Rf3	349	915	523	-420	299	

備考

電気防食の施工性と維持管理方法の検討試験測定データ

SCE換算

			1999年	8月25日	天気	晴時々曇	温度32. 1℃	
			TG	TM	TS	AS	RM	BL
通電電流(mA)			56.4	17	22.9	20.1	21	
浴電圧(V)			1.136	4.433	0.942	1.068	0.946	
鉄筋	ON電位 (mV)	Rf1	-465	-360	-302	-385	-360	-130
		Rf2	-475	-370	-248	-323	-366	-161
		Rf3	-428	-381	-295	-306	-327	-146
	IO電位 (mV)	Rf1	-445	-333	-279	-371	-349	
		Rf2	-442	-340	-225	-311	-347	
		Rf3	-409	-344	-270	-292	-308	
	OFF4時間後 (mV)	Rf1	-237	-156	-88	-193	-168	
		Rf2	-229	-154	-60	-151	-166	
		Rf3	-206	-159	-76	-132	-128	
	復極量 (mV)	Rf1	208	177	191	178	181	
		Rf2	213	186	165	160	181	
		Rf3	203	185	194	160	180	
アノード	ON電位 (mV)	Rf1	656	4064	626	659	584	
		Rf2	639	4053	542	721	578	
		Rf3	684	4039	638	739	618	
	IO電位 (mV)	Rf1	481	1424	556	556	533	
		Rf2	482	1415	485	601	530	
		Rf3	519	1461	568	607	571	
	OFF4時間後 (mV)	Rf1	296	991	530	-619	281	
		Rf2	303	993	474	-578	283	
		Rf3	356	987	546	-558	321	

備考

電気防食の施工性と維持管理方法の検討試験測定データ

SCE換算

温度18.0°C

1999年			10月21日		天気		晴	温度18.0°C	
			TG	TM	TS	AS	RM	BL	
通電電流(mA)			27	17	22	20	21		
浴電圧(V)			1.114	12.4	1.12	1.95	1.1		
鉄筋	ON電位 (mV)	Rf1	-449	-416	-390	-435	-434	-99	
		Rf2	-472	-422	-170	-400	-441	-116	
		Rf3	-420	-468	-389	-351	-400	-113	
	IO電位 (mV)	Rf1	-434	-385	-363	-417	-420		
		Rf2	-439	-409	-152	-385	-420		
		Rf3	-397	-412	-363	-328	-370		
	OFF4時間後 (mV)	Rf1	-227	-148	-17	-180	-179		
		Rf2	-220	-147	36	-145	-175		
		Rf3	-197	-176	-2	-130	-133		
	復極量 (mV)	Rf1	207	237	346	237	241		
		Rf2	219	262	188	240	245		
		Rf3	200	236	361	198	237		
アノード	ON電位 (mV)	Rf1	655	11880	703	1500	660		
		Rf2	635	11890	480	1540	650		
		Rf3	690	11810	717	1590	700		
	IO電位 (mV)	Rf1	507	2120	590	1220	560		
		Rf2	501	1940	391	1210	560		
		Rf3	544	1890	601	1250	610		
	OFF4時間後 (mV)	Rf1	344	1130	560	-503	340		
		Rf2	348	1130	420	-469	340		
		Rf3	372	1100	580	-454	390		

備考

電気防食の施工性と維持管理方法の検討試験測定データ

SCE換算

2000年			1月31日	494	天気	晴	温度18.0℃	
			TG	TM	TS	AS	RM	BL
通電電流(mA)			0	17	0	21	21	
浴電圧(V)			0	21.55	0	4.78	1.2	
鉄筋	ON電位 (mV)	Rf1	-30	-428	150	-526	-466	-91
		Rf2	-30	-449	150	-510	-480	-81
		Rf3	-30	-513	150	-424	-450	-89
	IO電位 (mV)	Rf1	-30	-389	150	-502	-455	
		Rf2	-30	-392	150	-491	-464	
		Rf3	-30	-440	150	-396	-419	
	OFF4時間後 (mV)	Rf1	-30	-135	150	-176	-177	
		Rf2	-30	-137	150	-165	-177	
		Rf3	-30	-164	150	-147	-141	
	復極量 (mV)	Rf1	0	254	0	326	278	
		Rf2	0	255	0	326	287	
		Rf3	0	276	0	249	278	
アノード	ON電位 (mV)	Rf1	-30	21030	150	4237	730	
		Rf2	-30	21000	150	4257	710	
		Rf3	-30	20900	150	4341	750	
	IO電位 (mV)	Rf1	-30	2590	150	2774	616	
		Rf2	-30	2510	150	2705	599	
		Rf3	-30	2380	150	2808	640	
	OFF4時間後 (mV)	Rf1	-30	1110	150	-235	358	
		Rf2	-30	1108	150	-224	356	
		Rf3	-30	1079	150	-208	395	

備考

電気防食の施工性と維持管理方法の検討試験測定データ

SCE換算

			2000年	3月28日	551 天気	曇り後雨	温度13.0℃	
			TG	TM	TS	AS	RM	BL
通電電流(mA)			13.9	13	0	12.8	12.8	
浴電圧(V)			1.104	12.8	1.247	3.97	1.036	
鉄筋	ON電位 (mV)	Rf1	-414	-362	-539	-374	-381	-81
		Rf2	-451	-378	-270	-396	-394	-66
		Rf3	-398	-426	-546	-342	-364	-72
	IO電位 (mV)	Rf1	-421	-355	150	-363	-371	
		Rf2	-421	-362	150	-383	-375	
		Rf3	-370	-385	150	-321	-337	
	OFF4時間後 (mV)	Rf1	-237	-137	150	-138	-172	
		Rf2	-228	-139	150	-177	-171	
		Rf3	-204	-165	150	-133	-139	
	復極量 (mV)	Rf1	184	218	0	225	199	
		Rf2	193	223	0	206	204	
		Rf3	166	220	0	188	198	
アノード	ON電位 (mV)	Rf1	635	12390	684	3590	651	
		Rf2	639	12380	583	3570	637	
		Rf3	699	12310	690	3620	670	
	IO電位 (mV)	Rf1	535	1935	150	3300	590	
		Rf2	523	1978	150	3220	580	
		Rf3	558	1922	150	3170	650	
	OFF4時間後 (mV)	Rf1	379	1101	150	-508	374	
		Rf2	387	1099	150	-547	374	
		Rf3	408	1071	150	-503	408	

備考

電気防食開始時期の検討試験

鉄筋腐食観察結果

(T G 供試体 No. 2)



No. 1 鉄筋

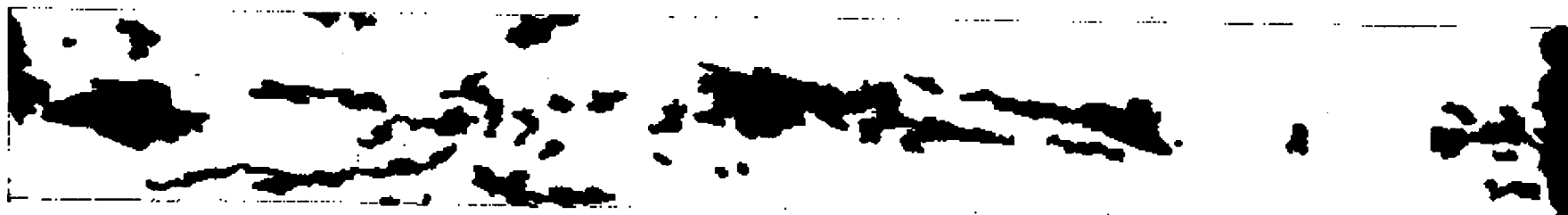


No. 2 鉄筋

電気防食開始時期の検討試験

鉄筋腐食観察結果

(T G 供試体 No. 6)



No. 1 鉄筋



No. 2 鉄筋

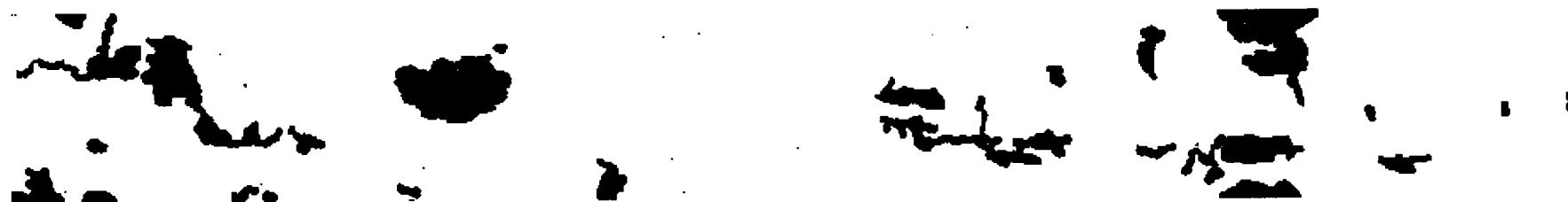
電気防食開始時期の検討試験

鉄筋腐食観察結果

(TM供試体 No. 2)



No. 1 鉄筋



No. 2 鉄筋

電気防食開始時期の検討試験

鉄筋腐食観察結果

(T M 供試体 No. 6)



No. 1 鉄筋



No. 2 鉄筋

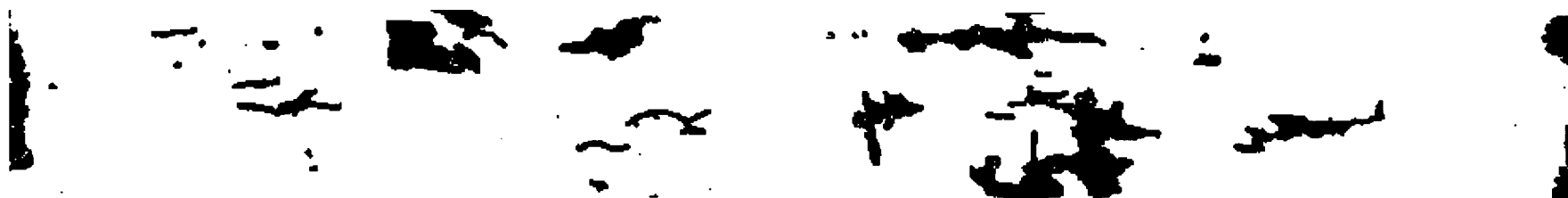
電気防食開始時期の検討試験

鉄筋腐食観察結果

(AS 供試体 No.2)



No. 1 鉄筋



No. 2 鉄筋

電気防食開始時期の検討試験

鉄筋腐食観察結果

(AS 供試体 No. 6)



No. 1 鉄筋

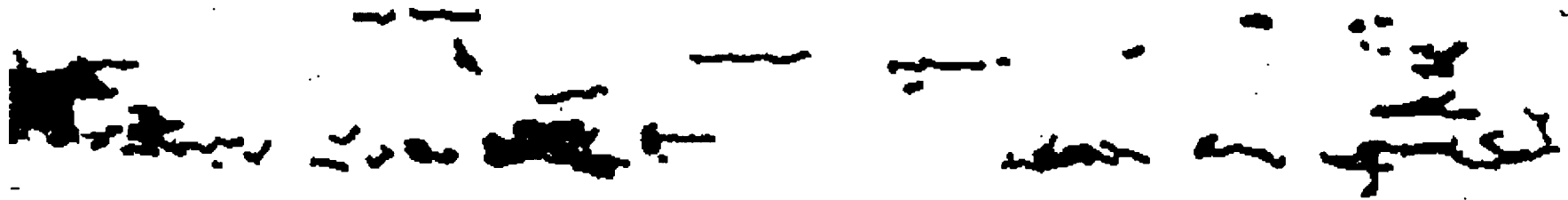


No. 2 鉄筋

電気防食開始時期の検討試験

鉄筋腐食観察結果

(T S 供試体 No. 2)



No. 1 鉄筋



No. 2 鉄筋

電気防食開始時期の検討試験

鉄筋腐食観察結果

(T S 供試体 No. 6)



No. 1 鉄筋



No. 2 鉄筋

電気防食開始時期の検討試験

鉄筋腐食観察結果

(RM供試体 No. 2)



No. 1 鉄筋



No. 2 鉄筋

電気防食開始時期の検討試験

鉄筋腐食観察結果

(RM供試体 No. 6)



No. 1 鉄筋

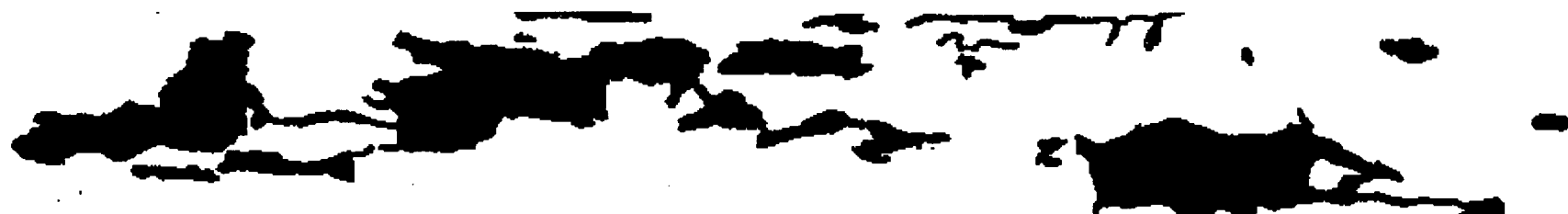


No. 2 鉄筋

電気防食開始時期の検討試験

鉄筋腐食観察結果

(T R 供試体 No. 1)



No. 1 鉄筋



No. 2 鉄筋

電気防食開始時期の検討試験

鉄筋腐食観察結果

(T R 供試体 No. 5)



No. 1 鉄筋



No. 2 鉄筋

電気防食開始時期の検討試験

鉄筋腐食観察結果

(B L 供試体 No. 4)



No. 1 鉄筋

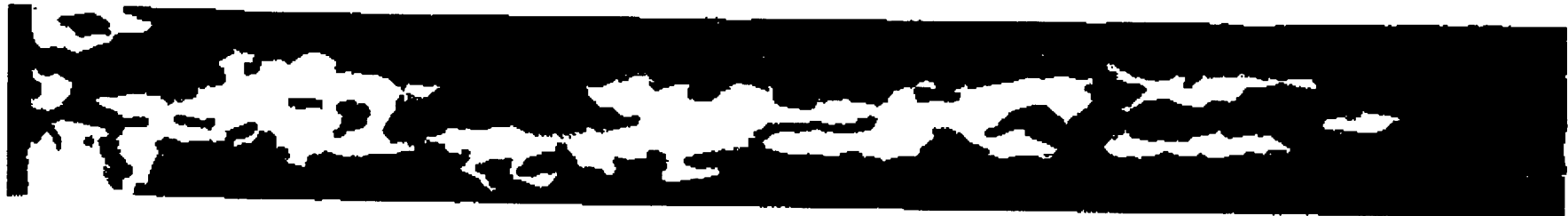


No. 2 鉄筋

電気防食開始時期の検討試験

鉄筋腐食観察結果

(B L 供試体 No. 6)

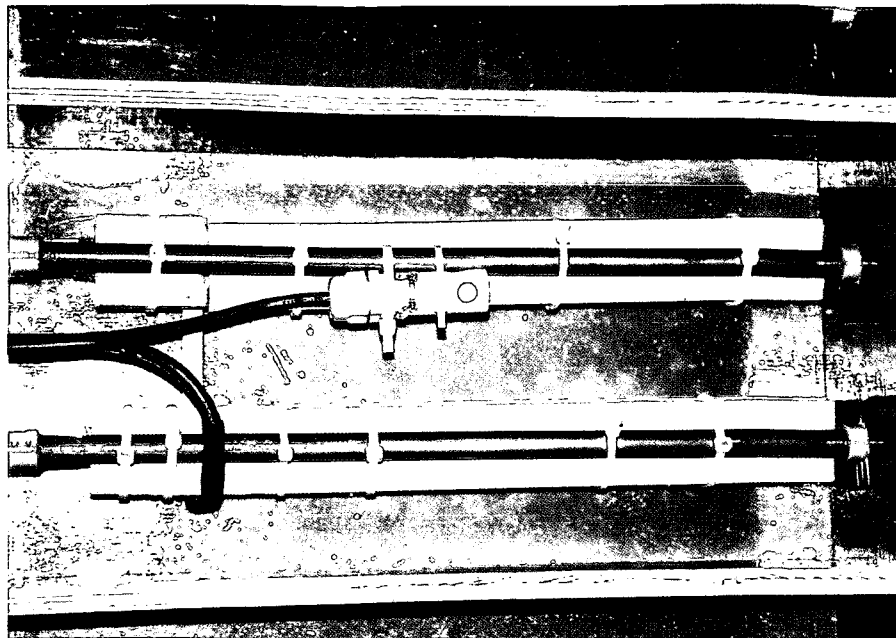


No. 1 鉄筋

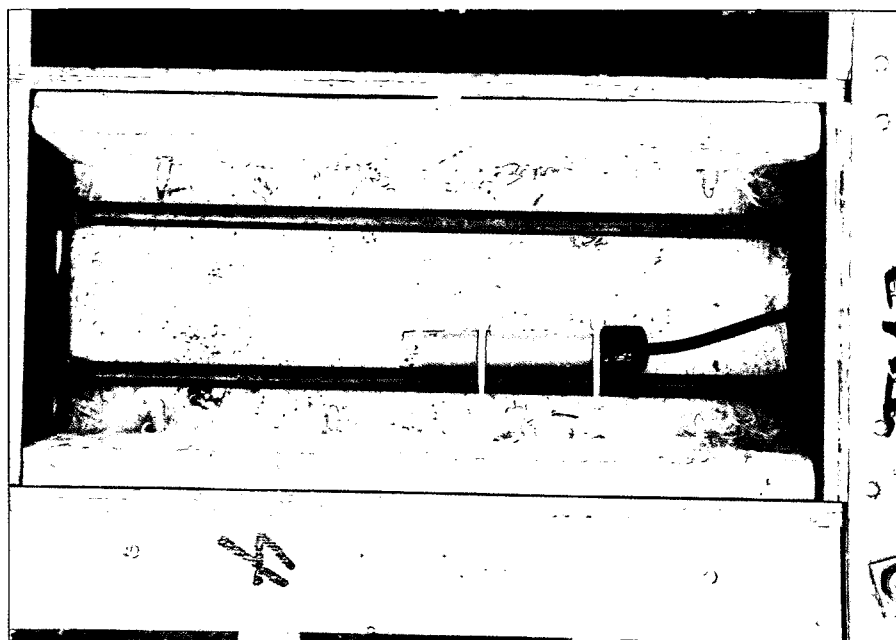


No. 2 鉄筋

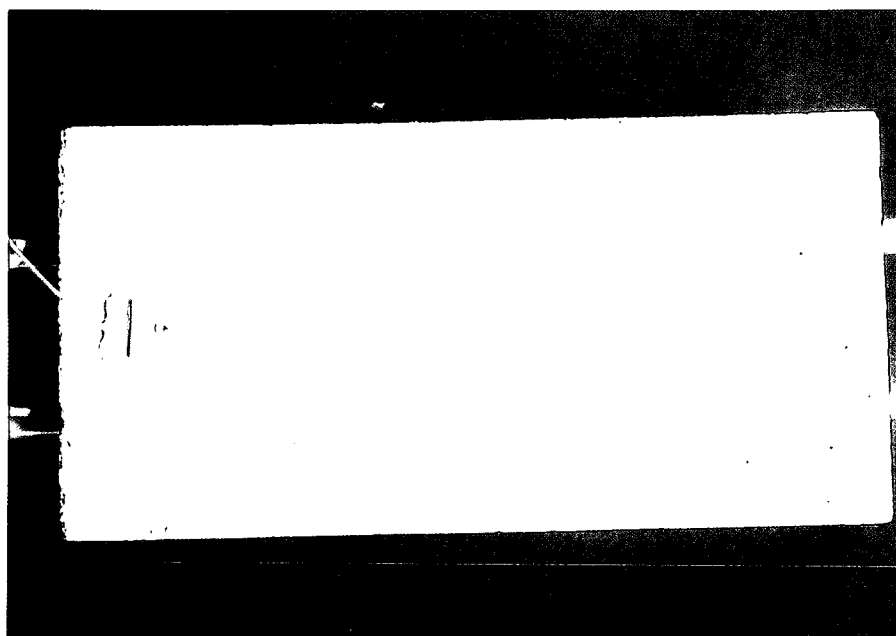
R C 小型供試体
 帯状陽極 A 方式
 陽極、照合電極
 設置状況

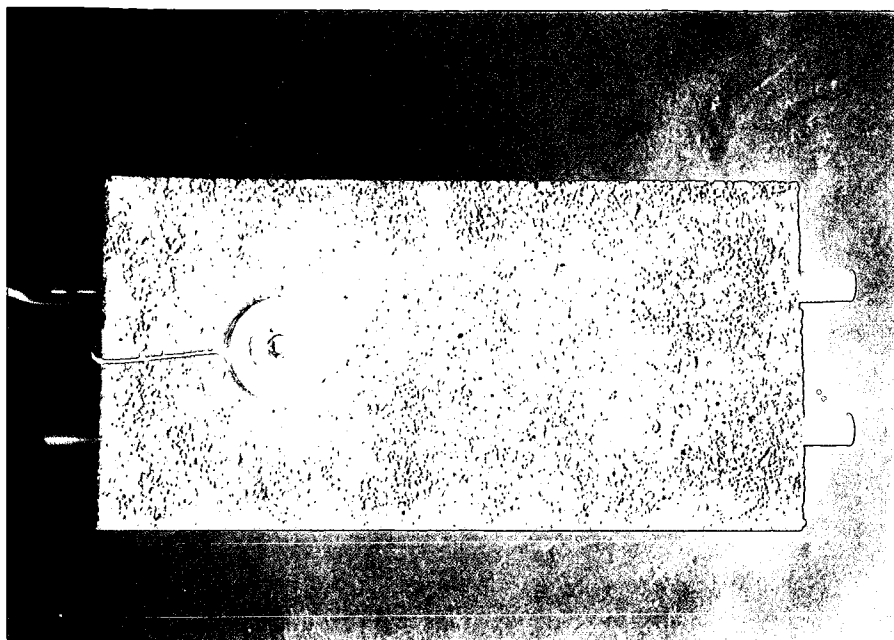


R C 小型供試体
 パネル陽極方式
 陽極、照合電極
 設置状況

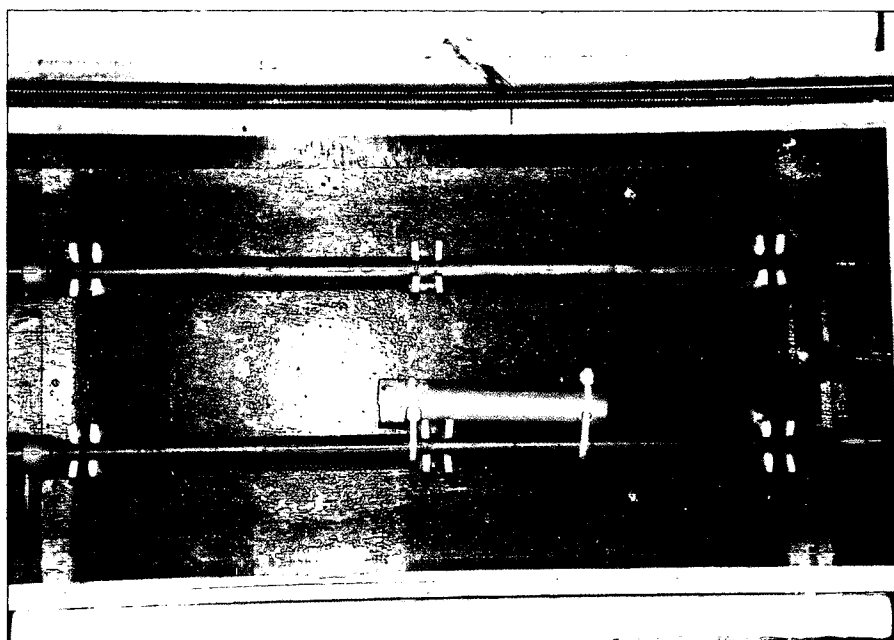


R C 小型供試体
 アルミ亜鉛擬合金溶射方式
 陽極
 設置状況

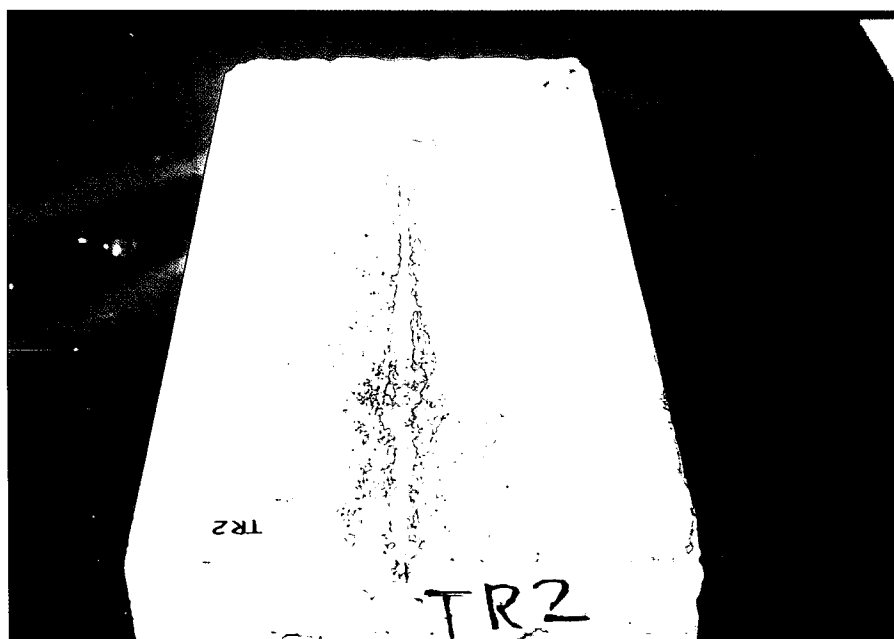




R C小型供試体
チタン溶射方式
陽極
設置状況

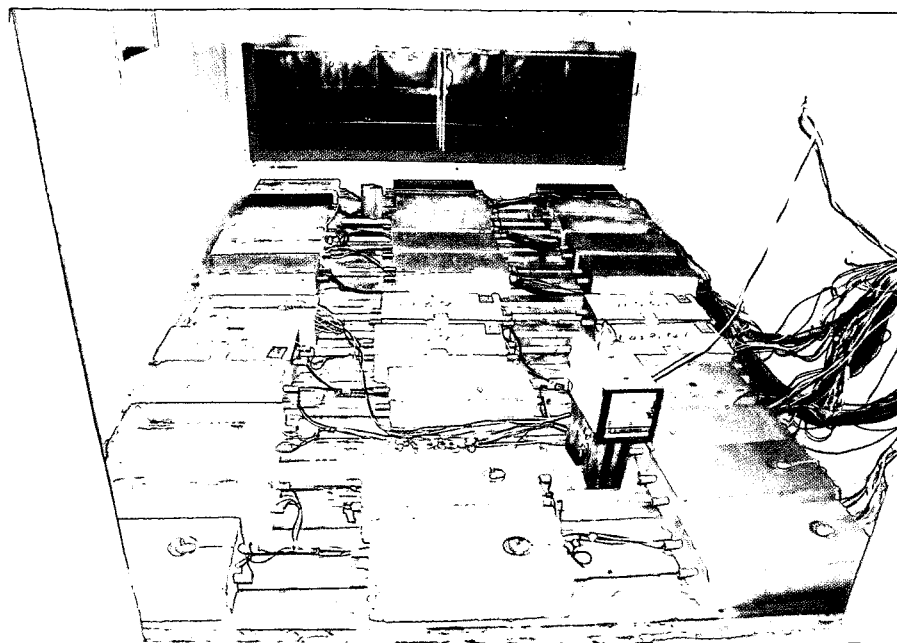


R C小型供試体
帯状陽極B方式
陽極、照合電極
設置状況

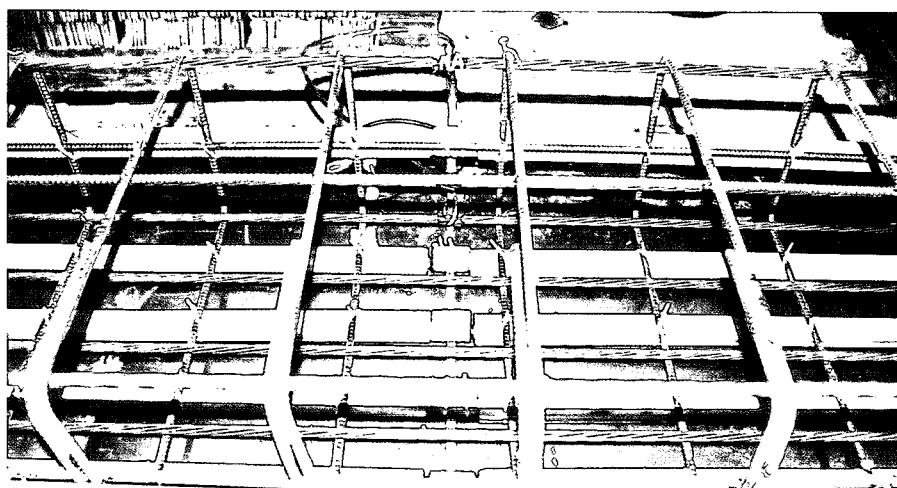


R C小型供試体
内部挿入方式
陽極
設置状況

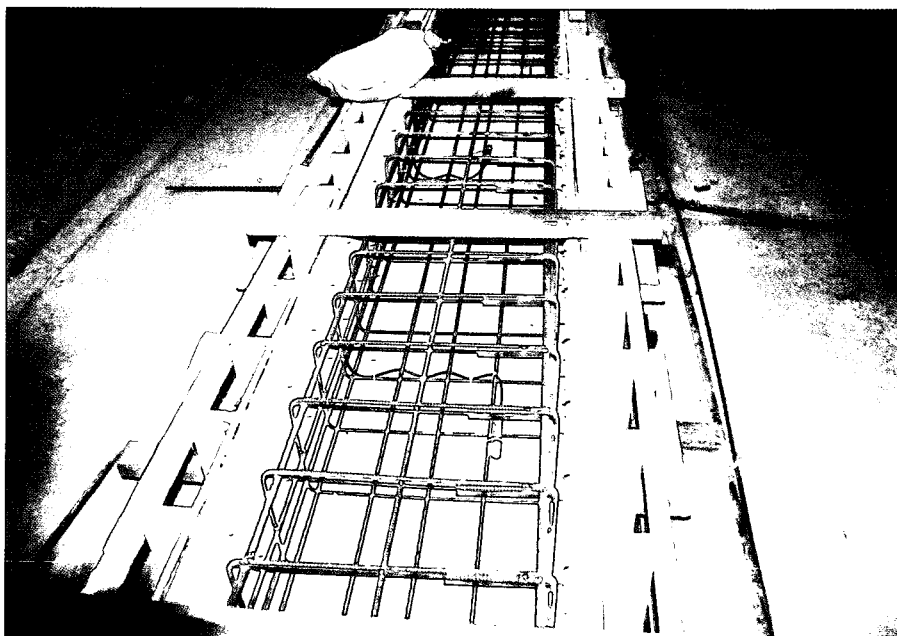
R C 小型供試体
促進試験機内
供試体
設置状況



P C (プレテン) 大型供試体
帯状陽極 A 方式
陽極、照合電極
設置状況



P C (プレテン) 大型供試体
パネル陽極方式
陽極、照合電極
設置状況

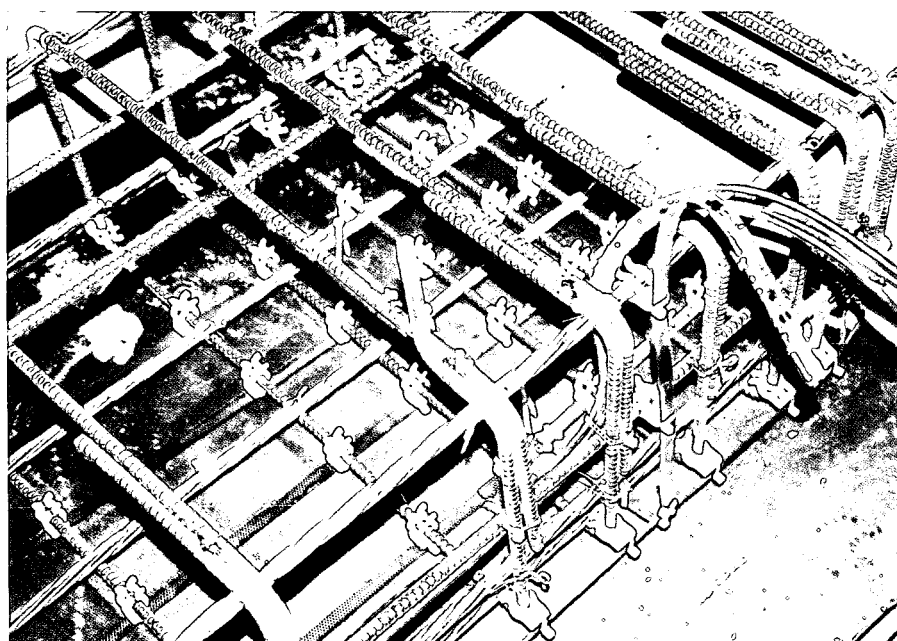




PC（プレテン）大型供試体
アルミ亜鉛擬合金溶射方式
陽極
施工状況

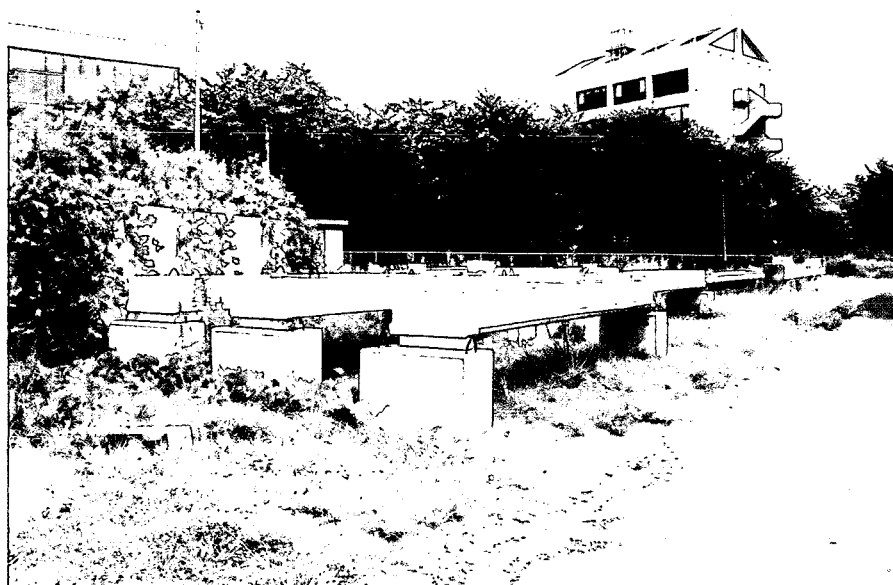


PC（プレテン）大型供試体
チタン溶射方式
陽極
施工状況

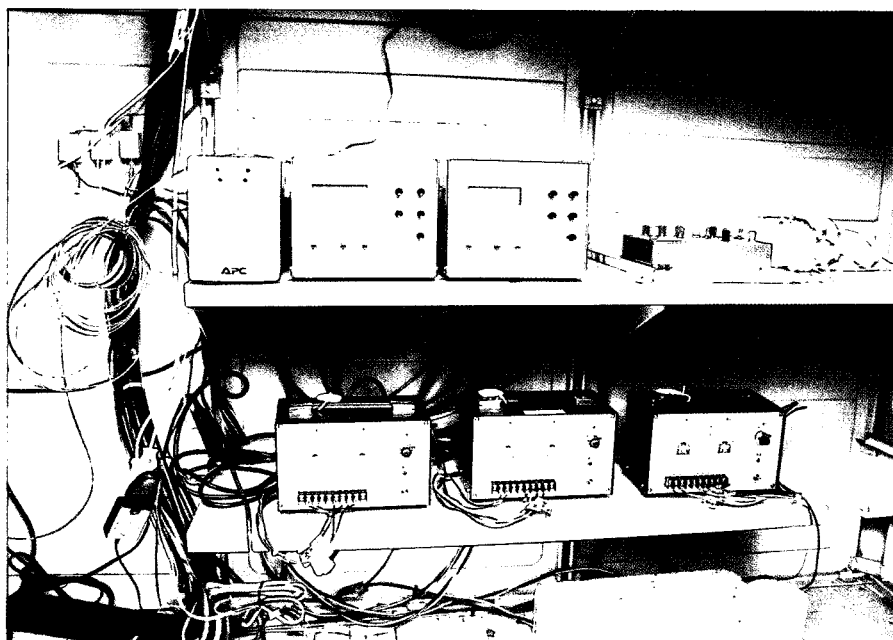


PC（プレテン）大型供試体
帯状陽極B方式
陽極、照合電極
設置状況

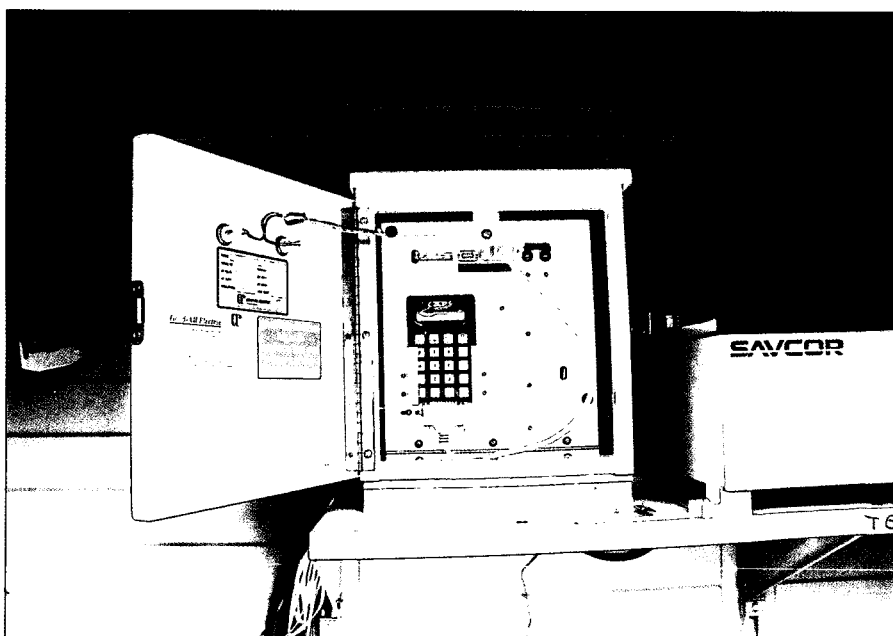
PC (プレテン) 大型供試体
曝露試験場
供試体
設置状況

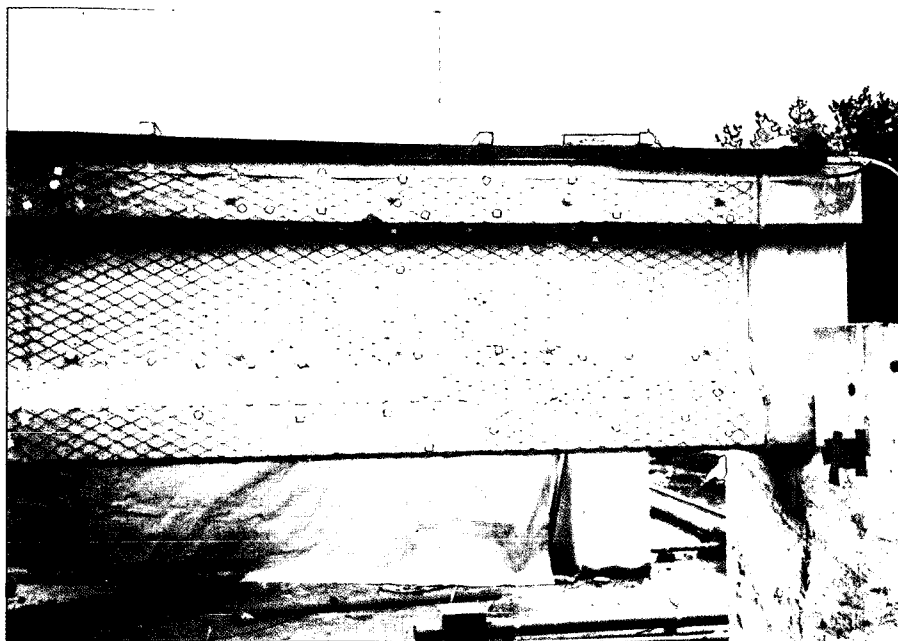


PC (プレテン) 大型供試体
7M・带状 A・B 補方式
遠隔監視装置
設置状況

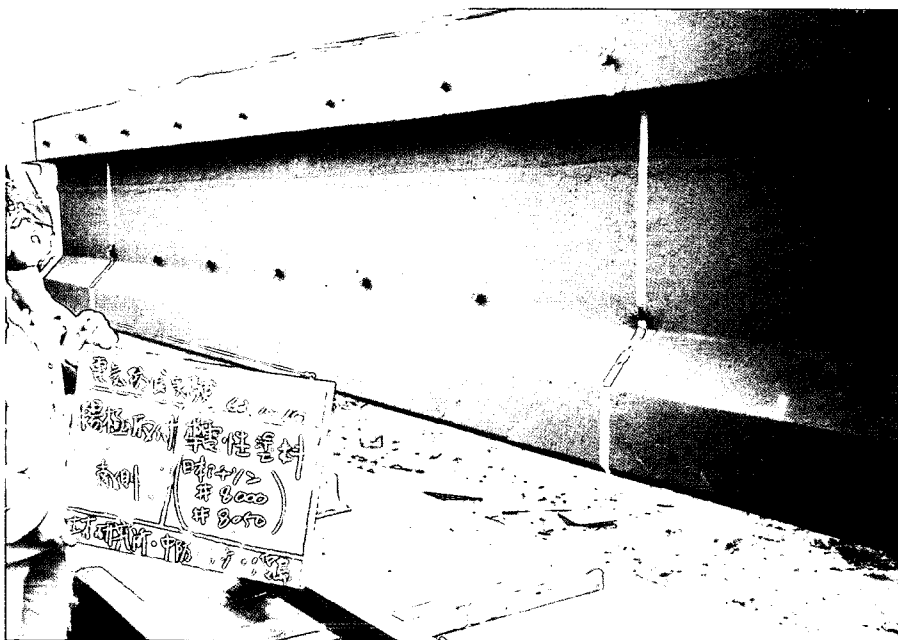


PC (プレテン) 大型供試体
チタン溶射方式
遠隔監視装置
設置状況





P C（ポステン）大型供試体
網状陽極方式
陽極
施工状況

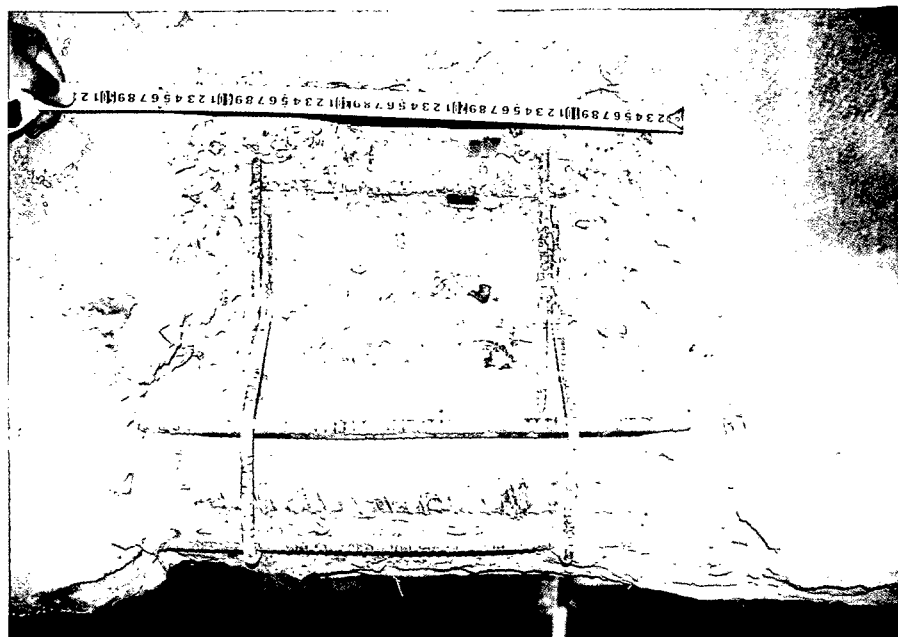


P C（ポステン）大型供試体
導電塗料方式
陽極
施工状況



P C（ポステン）大型供試体
曝露試験場
供試体
設置状況

PC（ポステン）大型供試体
 網状陽極方式
 鉄筋表面状態
 観察結果（12 年経過後）

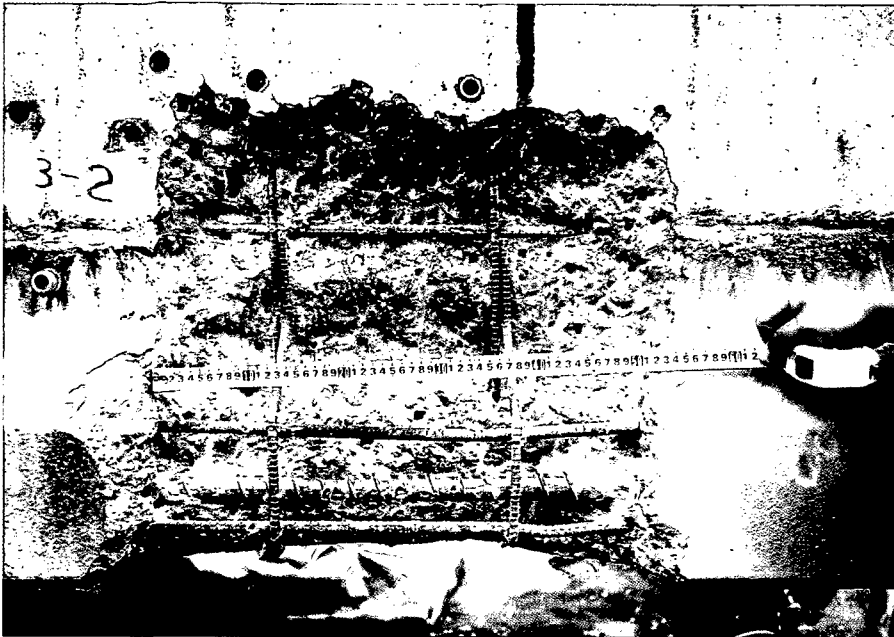


PC（ポステン）大型供試体
 網状陽極方式
 鉄筋表面状態
 観察結果（12 年経過後）



PC（ポステン）大型供試体
 網状陽極方式
 鉄筋表面状態
 観察結果（12 年経過後）





P C (ポステン) 大型供試体
導電塗料方式
鉄筋表面状態
観察結果 (12 年経過後)

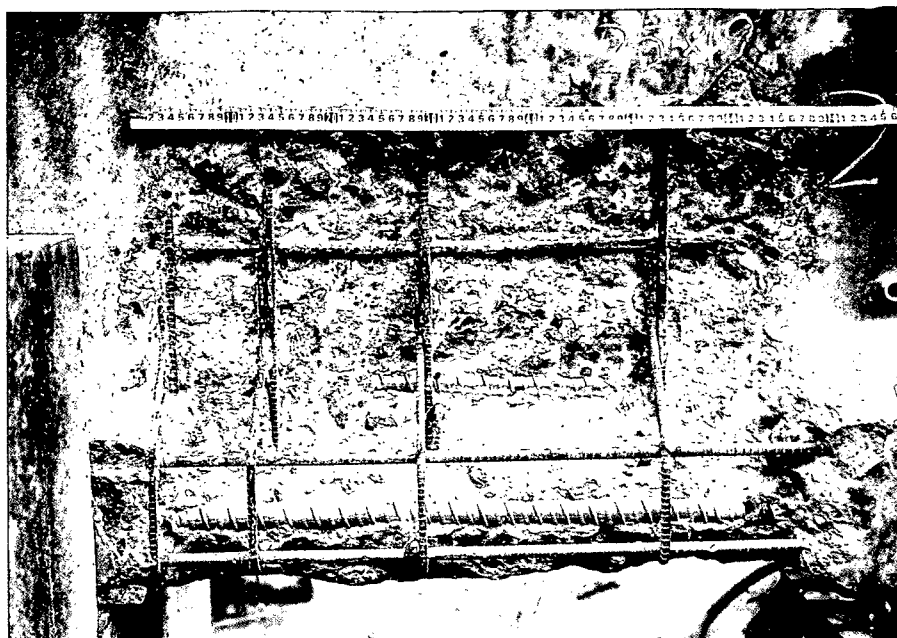


P C (ポステン) 大型供試体
導電塗料方式
鉄筋表面状態
観察結果 (12 年経過後)



P C (ポステン) 大型供試体
導電塗料方式
鉄筋表面状態
観察結果 (12 年経過後)

PC（ポステン）大型供試体
無防食
鉄筋表面状態
観察結果（12年経過後）

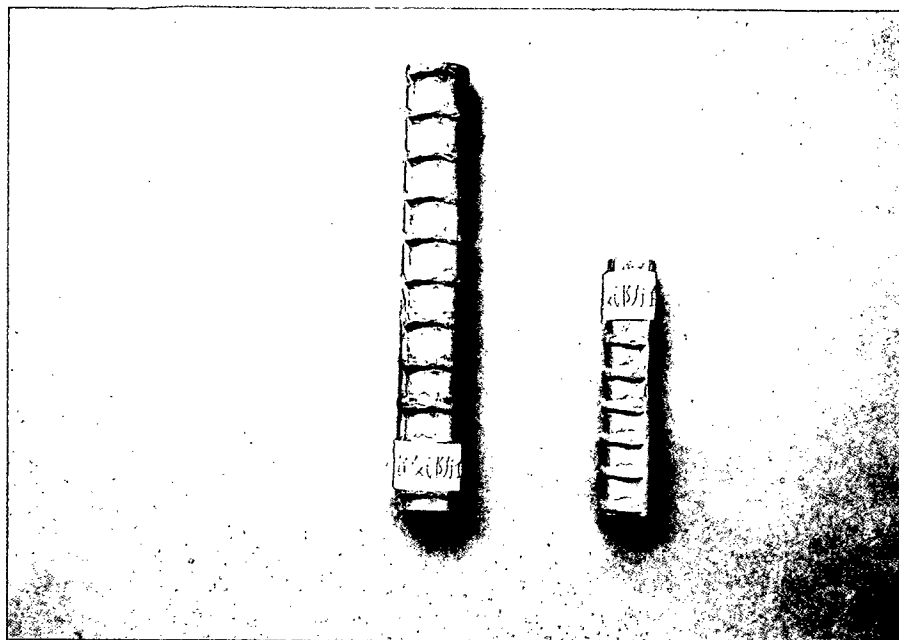


PC（ポステン）大型供試体
無防食
鉄筋表面状態
観察結果（12年経過後）

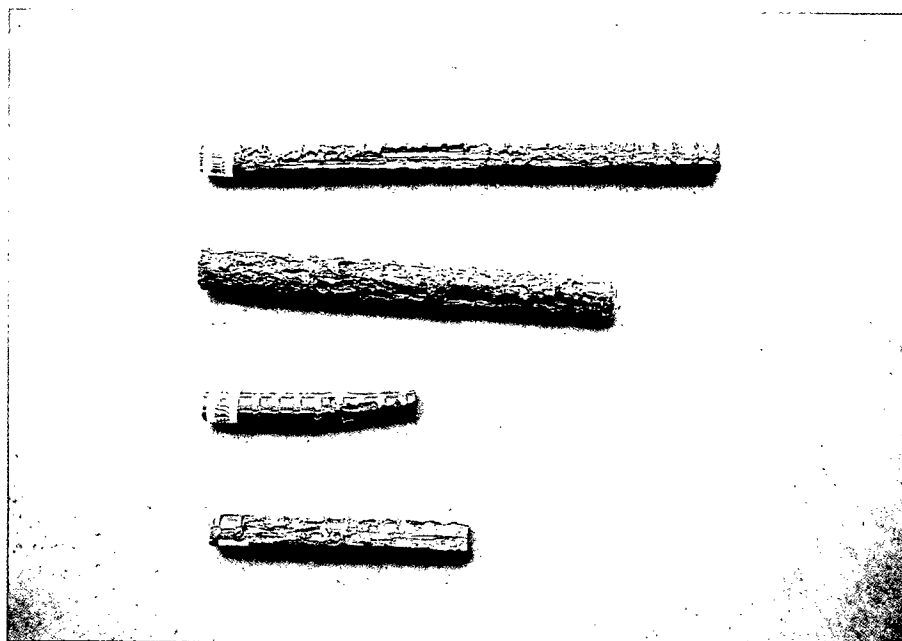


PC（ポステン）大型供試体
無防食
鉄筋表面状態
観察結果（12年経過後）

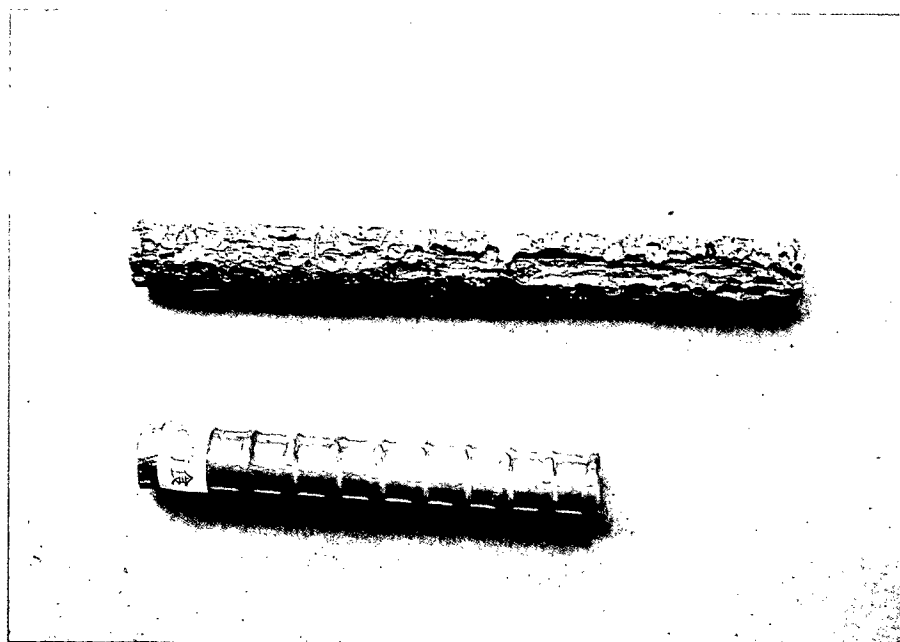




P C (ポステン) 大型供試体
電気防食
鉄筋表面状態(表面処理後)
観察結果 (12 年経過後)



P C (ポステン) 大型供試体
無防食
鉄筋表面状態(表面処理後)
観察結果 (12 年経過後)



P C (ポステン) 大型供試体
電気防食、無防食
鉄筋表面状態(表面処理後)
観察結果 (12 年経過後)

新設コンクリート橋の電気防食マニュアル（案）

平成１２年１２月

建設省土木研究所材料施工部化学研究室

（社）プレストレスト・コンクリート建設業協会

目 次

1. 総則	1
1. 1 適用の範囲	1
1. 2 用語の定義	3
2. 電気防食工法の概要	6
2. 1 電気防食の原理	6
2. 2 電気防食工法の選定	8
3. 電気防食の設計と施工	10
3. 1 電気防食工法の設計	10
3. 1. 1 防食電位	10
3. 1. 2 防食電流密度	11
3. 1. 3 防食方法の選択	13
3. 1. 4 防食回路の設計	13
3. 1. 5 モニタリング回路の設計	15
3. 1. 6 使用材料の品質	16
3. 2 電気防食の施工	19
3. 2. 1 施工一般	19
3. 2. 2 鉄筋およびP C鋼材の導通試験等	19
3. 2. 3 排流端子および測定端子の設置	20
3. 2. 4 照合電極の設置	20
3. 2. 5 陽極の設置	20
3. 2. 6 直流電源等設備の設置	21
3. 2. 7 配線・配管	21
3. 2. 8 モニタリング装置の設置	23
3. 2. 9 初期通電調整	23
4. 維持管理	26
4. 1 維持管理の基本	26
4. 2 維持管理の方法	26

1. 総 則

1. 1 適用の範囲

本マニュアル（案）は、電気防食工法を塩害による鋼材の腐食が懸念される新設のコンクリート橋上部工に適用することを基本とする。

【解説】 これまでコンクリート構造物の補修は、表面被覆工法、断面修復工法などの対症療法的な工法で対応してきた。しかし、一旦浸入した塩化物を除去することは極めて困難であり、これが原因となって再補修を繰り返しているのが実状である。これに対して電気防食工法は、コンクリートを電解質としてコンクリート中の鋼材へ微少電流を流すことにより、鋼材の電位を卑な方向に変化させ鋼材の腐食を電気化学的に抑制する工法である。アメリカ連邦道路局（FHWA）は 1982 年に「電気防食工法は塩害により劣化したコンクリート構造物を防食する唯一の方法である」とし、1994 年には「塩害により損傷した構造物を更新する前に電気防食工法の適用について再検討せよ」とコメントしており、電気防食工法を信頼性の高い塩害補修工法と位置付けている。

電気防食工法には、①塩化物を含有するコンクリートを除去する必要がなく、②鋼材の防錆処理が不要、③鋼材の電位測定により防食効果を随時確認できるなどの利点があり、既設構造物の防食工法として普及してきた。しかし、電気防食工法は新設のコンクリート橋上部工への適用においても RC、PC に関わらず且つその規模を問わず適用できる。新設のコンクリート橋上部工へ適用する場合は、設置のための表面処理あるいは断面修復などの補修工程が無く、かぶりを軽減した設計とすることも可能になる利点がある。

電気防食工法は、イニシャルコストが従来の工法に比して割高であり、適正な防食状態を維持するためのランニングコスト（電気料金、保守・点検費用等）も必要であるが、コンクリート構造物の耐久性を維持することによって以後の補修費用は大幅に低減でき、結果としてライフサイクルコストを小さくすることが期待できる。さらに、鋼材の腐食が顕在化する前に適用することによって付帯的な補修工程が不要となれば、一層のコスト低減が期待できる。

一方、電気防食工法の適用にあたり、次の事項は検討が必要である。

- ①コンクリートの電気抵抗が高い場合
- ②防食する鋼材との導通がとれない金属が存在する場合
- ③アルカリシリカ反応性による区分（JIS A 5308 付属書 1）が B の骨材を用い、アルカリ骨材反応の恐れがある場合
- ④足場の仮設ができない場所
- ⑤部材に電気防食工法の構成要素（陽極、照合電極、電源装置など）を設置する空間がない場合
- ⑥鋼繊維補強コンクリートなど、陽極と防食対象の鋼材とが短絡する恐れがある場合
- ⑦電源がとれない場合

なお、橋脚などのコンクリート橋上部工以外の箇所への電気防食工法の適用に関しては本マニュアル（案）を準用することとし、本マニュアル（案）に記載のない事項は、「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)
などが参考にできる。

1. 2 用語の定義

本マニュアルにおいて使用する用語を、次のように定義する。

電気防食	: 金属を電気化学的に安定な電位領域に変化させ腐食を停止させること。
カソード(陰極)防食	: 腐食停止または低減のため金属の電位を卑方向へ変化させることを陰極防食という。
アノード(陽極)防食	: 腐食停止または低減のため金属の電位を貴方向へ変化させることを陽極防食という。
外部電源方式	: 直流電源を用いて防食電流を供給する電気防食の総称で、対極には主に耐久性の高い電極が使用される。
流電陽極方式	: 金属の持つ固有の電位差を利用する電気防食法であり、被防食体より電位の卑な金属を陽極材料(流電陽極という)として利用するカソード防食法。
流電陽極	: 流電陽極方式の電気防食において用いられる陽極で、主に亜鉛、アルミニウム、マグネシウム合金などが用いられている。
不溶性陽極	: 外部電源方式の電気防食において用いられる陽極で、陽極反応に対して耐久性の高い電極をいう。例えば、白金めっきチタン、カーボン、白金族酸化物を被覆したチタンなど。
アノード(陽極)	: 電解質に浸された2個の電極の組合わせにおいて、正電流が電極から電解質の方向に流れる極。外部電源を用いる電気防食(カソード防食)においては、電源の正(+)極に接続された極(電極)がアノードである。腐食というアノードとは、局部電池のミクロなアノード点を意味する場合と、腐食電池におけるマクロなアノード領域を意味する場合がある。
アノード反応	: アノードで生じている電極反応で、酸化反応が行われる。主なアノード反応には次のものがある。 $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$ $\text{Zn} \rightarrow \text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^-$ $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$ $2\text{Cl}^- \rightarrow \text{Cl}_2 + 2\text{e}^-$
カソード(陰極)	: 電解質に浸された2個の電極の組合わせにおいて、正電流が電解質から電極の方向に流れる極。外部電源を用いる電気防食(カソード防食)においては、電源の負(-)極に接続された極(被防食体)がカソードである。
カソード反応	: カソードで生じている電極反応で、還元反応が行われる。主なカソード反応には次のものがある。 $2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$ $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$
電極電位	: 金属と電解質との界面に存在する電位。金属がイオンとなって溶解しようとする

傾向は、この電位によって表すことができる。

平衡電位	: 分極していない可逆的電極電位。
E_{on}	: 通電時に測定される電位で、ON電位と称し、電圧降下（IRドロップ）の誤差を含んだ値である。
E_{io}	: 電圧降下の誤差を除くために行われる測定において、通電を停止した直後の電位で、インスタントオフ電位と称している。
E_{of}	: 復極試験において、通電を停止し、十分に時間が経過した後の電位でオフ電位と称し、自然電位に近い値となる。
自然電位	: 金属の置かれた環境における固有の電位。自然電極電位あるいは腐食電位ともいう。
防食電位	: 電気防食（カソード防食）において、腐食を停止させるために到達すべき最低限必要な電位。
防食電流	: 防食電位を保つため、被防食体に対し流すべき電流。
防食電流密度	: 防食電位を保つために必要な単位面積当りの電流で、通常 mA/m^2 で表す。コンクリート構造物においては、防食対象鉄筋の単位面積当りで表示する場合と、コンクリート表面積当りで表示する場合とがある。防食初期の電流密度を初期防食電流密度、防食状態の維持に必要な電流密度を定常電流密度という。
腐食電池	: 電気化学的腐食が進行するための構成要素となるアノードとカソードからなる電気化学的系の総称。代表的なものとして、濃淡電池、異種金属接触電池、温度差電池などがある。
マクロセル	: 腐食電池の形成が大きな領域にまたがるときその腐食電池をマクロセルという。
ミクロセル	: 腐食電池の形成が小さな領域であるときその腐食電池をミクロセルという。
貴	: 電極電位の正方向を指す。
卑	: 電極電位の負方向を指す。
分極	: 電極に出入りする電流によって電位に変化が生ずる現象。卑方向への変化を陰分極、貴方向への変化を陽分極という。
分極量	: 分極の変化量。
分極曲線	: 外部から様々な大きさの電流を印可し、その時の電流密度と電位の関係をプロットした線。片対数グラフで表示することが多い。
復極	: 電極反応において生じた分極が物理的または化学的作用により減少すること。電気防食では、通常、通電を停止し分極状態から自然の状態に戻る現象をいう。
復極量	: 復極の変化量。
活性態	: 金属がその環境において、溶解（腐食）状態にあるとき、その金属は活性態にあるという。

不働態	：卑な金属が本来の活性を失って、貴金属のような挙動を示し溶解しなくなる状態をいう。金属表面に形成された薄く緻密な被膜（主に酸化物）が関与している。
不活性態	：熱力学的にその金属が金属として安定な状態。
水素脆化	：腐食、酸洗い、電解、電気防食、溶接などによって生じた水素が、金属中に吸蔵されて材質が脆くなること。
対極	：電気回路を形成するためには陰極と陽極が対になる必要があり陰極に対し陽極が、陽極に対し陰極がそれぞれ対極となる。
照合電極	：一般に絶対的な値を求めることのできない電位に対し、その値の基準となる電極。基準電極、参照電極ともいう。照合電極は、はっきりと定義され安定な電位を示すものでなければならない。甘こう電極、銀塩化銀電極、硫酸銅電極、水素電極などがある。
銀塩化銀電極	：塩化銀を飽和した塩化カリウム水溶液に銀電極を挿入した照合電極。
硫酸銅電極	：硫酸銅の飽和溶液中に金属銅を挿入した照合電極
甘こう電極	：ガラス容器の底に水銀を入れ、その上に糊状の甘こう（カロメル： HgCl_2 ）を置き、さらにその上に塩化カリウム水溶液を満たした照合電極。
I R 降下	：電解質や反応生成物被膜などの電気抵抗を有する物質中に電流が流れるときに生ずる電圧降下。電気抵抗が比較的高い電解質であるコンクリート構造物では電位測定の誤差要因となることから、この誤差を除去するために、電流を遮断して、その直後の値（インスタントオフ電位）を測定することが行われる。
直流電圧計	：自然電位、電極電位、防食回路の電圧などの測定に用いる。測定の場合、測定回路にある回路抵抗より十分に高い値の入力抵抗を持つ電圧計を選定する。
入力抵抗	：入力インピーダンスともいい、電圧計の特性値の一つで、測定内容によってはこの大きさが測定誤差に大きく関係する。コンクリートのように抵抗が高い（特に乾燥時）場合、入力抵抗は 100 MΩ 以上必要である。
排流点	：直流電源のマイナス端子と接続するコンクリート中の鉄筋との接続点。
バックフィル材	：電気防食（カソード防食）において、アノードの接地抵抗を下げ、あるいは流電陽極の性能を保持し溶解を容易にするために、陽極の外面に充填する物質。
通電調整	：防食管理の目的で、鉄筋の復極状態あるいは分極状態に応じて防食電流を調整すること。

2. 電気防食工法の概要

2. 1 電気防食の原理

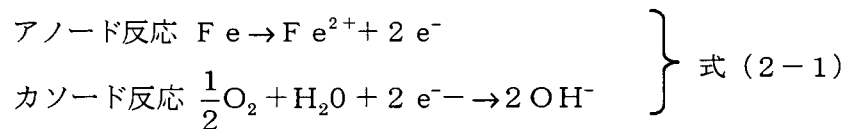
電気防食工法は、コンクリートに配置した陽極からコンクリートを介して鋼材に電流を供給することにより、腐食部と健全部との電位差を無くし、鋼材の腐食を抑止する工法である。

【解説】

(1) 塩化物イオンによるコンクリート中鋼材の腐食

コンクリート中の鋼材は pH= 12~13 のアルカリ性環境下であり、鋼材の表面は不動態皮膜（厚さ 20~60 Å）により保護され、腐食は進行しない。しかし、コンクリート中に塩化物イオンが一定量以上浸入すると、鋼材表面の不動態皮膜が局部的に破壊され、アノード部（破壊部）とカソード部（健全部）との間に電位差が生じると同時に破壊部から健全部へ電流が流れ鋼材が腐食する。

図 2-1 に鋼材の腐食反応の概要を示す。鋼材の表面では、鋼材がイオン化し電位が卑となるアノード反応（酸化反応）と酸素が還元するカソード反応（還元反応）が式（2-1）のように進行する。アノード反応およびカソード反応は同時に進行し、水酸化第二鉄 $[\text{Fe}(\text{OH})_2]$ が生成される。さらにこの水酸化第二鉄は、脱水して水和酸化物 $[\text{FeOOH}]$ （赤錆）となる。また、一部は四酸化三鉄 $[\text{Fe}_3\text{O}_4]$ （黒錆）となって鋼材表面に錆層を形成する。



この錆層は多孔質で腐食を抑制する効果が小さく、腐食は進行する。また、鋼材に生成した錆は元の鋼の 2~3 倍の体積となるため、この膨張圧によってコンクリートにひびわれや剥離が生じ、腐食を著しく進行させることになる。

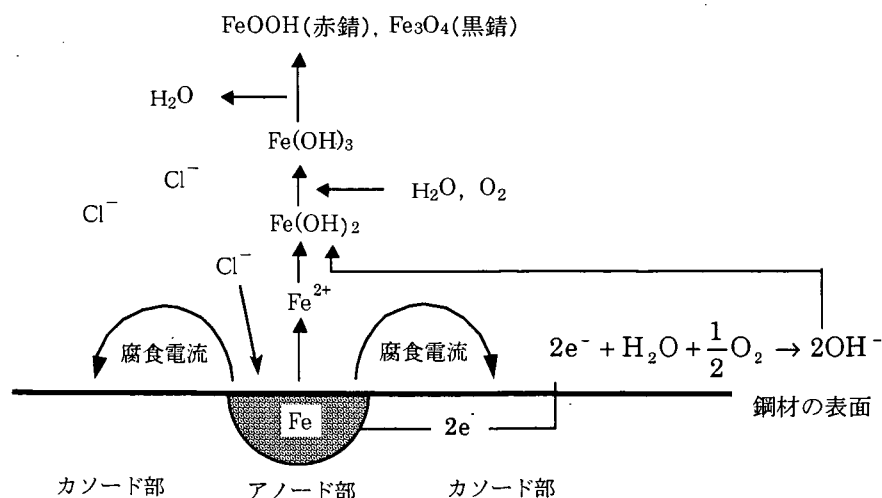


図 2-1 鋼材の腐食反応の概要

(2) 電気防食法の原理

上述したように、不動態皮膜の健全部（カソード部）と塩化物イオンに破壊された部分（アノード部）との間に生じた電位差により電流が流れて鋼材が腐食する。電気防食はコンクリート表面に設置した陽極から防食電流を鉄筋表面に流すことにより腐食電流を停止させる方法である。電気防食工法の概念図を図2-2に示す。

図2-3に鋼材腐食と電気防食の原理を示す。この図は電気防食の原理を鉄筋の電流と電位との関係で示したものである。図中①はアノード部の反応、同②はカソード部の反応である。ここで、防食電流を I_{p1} とすると、腐食電流 I_c が I_{c1} に低減する。さらに大きな防食電流 I_{p2} を流すと腐食電流が0となり、鋼材は完全に防食される。この電位 E_2 が防食電位である。

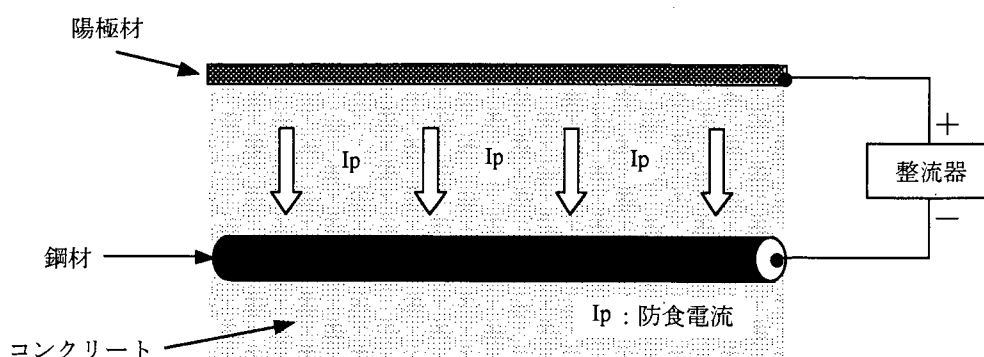


図 2-2 電気防食工法の概念図

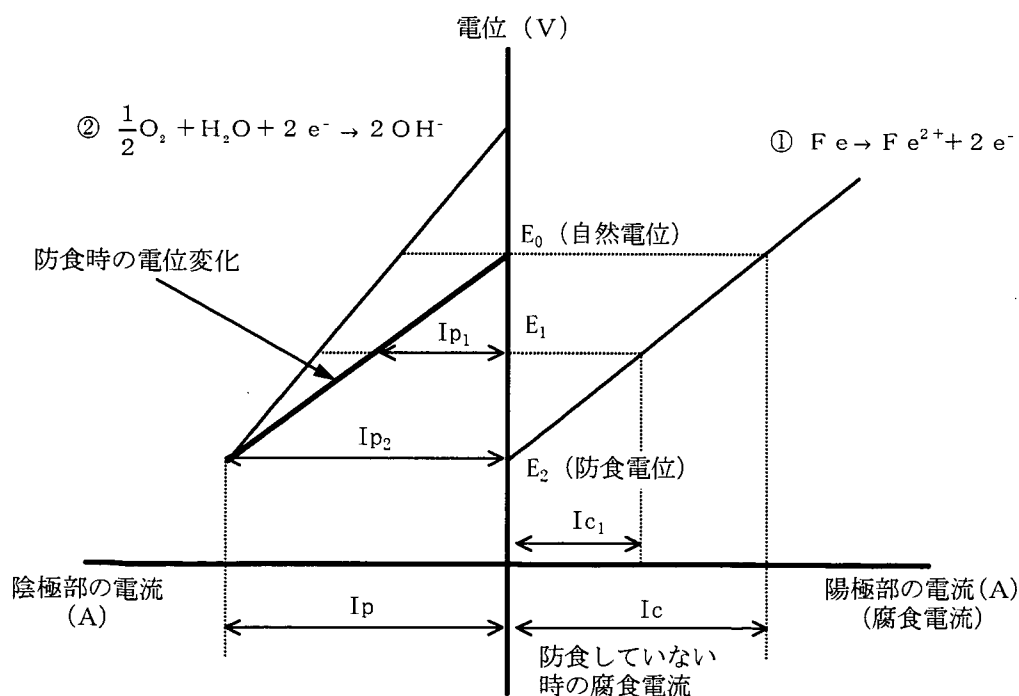


図 2-3 鋼材腐食と電気防食の原理

2. 2 電気防食工法の選定

新設のコンクリート橋上部工に適用する電気防食工法は、外部電源方式の中から選定することを基本とする。

【解説】 竣工直後のコンクリート橋上部工では、内部鋼材および躯体コンクリートが健全であることから、必ずしも電気防食を施す必要が無い、あるいは通電させても非常に微弱な電流でよいため、状況に応じて通電量を制御できる外部電源方式を採用するのが妥当である。

外部電源方式をとる電気防食工法には表 2-1 に示す方式があり、いずれかの方式を選定して施工することとする。選定に当たっては各方式の特徴が十分活用できるよう検討する。なお、今後新たに提案される方式については、防食性能、耐久性、施工性等について詳細に検討し、当該方式の優位性を十分把握してから適用できるものとする。

表 2-1 各電気防食方式の特徴（外部電源方式）

方 式	陽極			陽極の設置方法例
	陽極の形状	材質	被覆材	
チタンメッシュ方式	面状	チタン	セメント系モルタル コンクリート	部材製作時に設置 (埋設型枠による設置)
チタン溶射方式	(面状)	チタン	(必要に応じて用いる)	部材製作後に設置
導電性塗料方式	(面状)	白金チタン線 導電塗膜	特殊上塗り塗料	部材製作後に設置
チタングリッド方式	帯状	チタン	セメント系モルタル	部材製作時に設置 (ハイブリッド陽極を用いる)
チタンリボンメッシュ方式	帯状	チタン	セメント系モルタル コンクリート	部材製作時に設置 (チタンリボンモールドを用いる)
チタンロッド方式	棒状	チタン	カーボン系バックフィル 材	部材製作後に設置

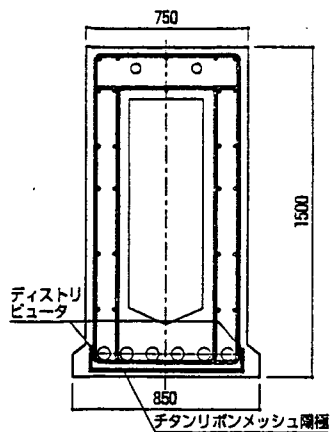
次に新設のコンクリート橋上部工への電気防食工法の適用例を図 2-4 に示す。ここに示した 4 例の設置方法の概略を下に示す。

チタンリボンメッシュ方式は、チタンリボンモールドおよびディストリビューターを設置し、コンクリートを打設する。この例では、チタンリボンモールドは桁軸方向垂直に、すなわち梯子状に設置している。

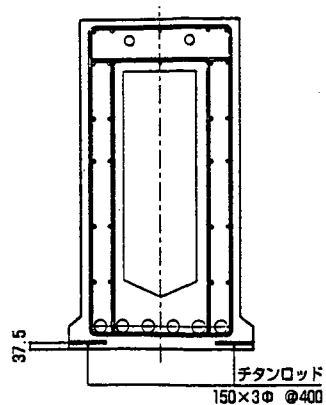
チタンロッド方式では、PC 桁の作製時に照合電極、排流端子を設置する。チタンロッドはコンクリート打設後にドリルで削孔して挿入し、チタンワイヤーで結線する。

チタングリッド方式は、チタングリッド陽極をセメントモルタルで被覆したハイブリッド陽極を桁軸方法の所定の位置に固定し、コンクリートを打設する。それぞれの陽極はディストリビューターに接続する。

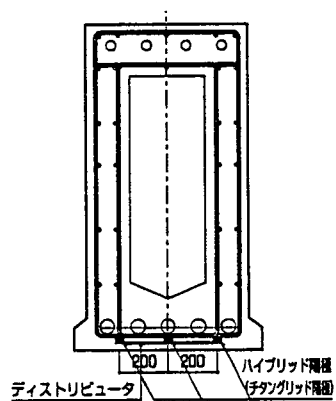
チタン溶射方式は、照合電極、排流端子は PC 桁の作製時に設置し、コンクリート打設後に高純度チタンをアーク溶射によりコンクリート表面に吹き付けることにより設置する。



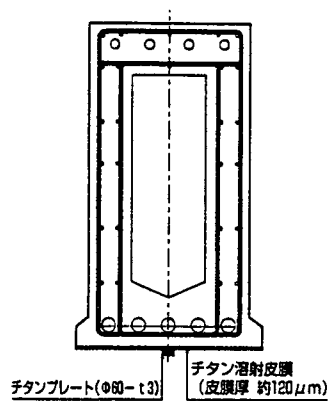
a) チタンリボンメッシュ方式



b) チタンロッド方式



c) チタングリッド方式



d) チタン溶射方式

図 2-4 新設のコンクリート橋上部工への電気防食工法の適用例 (単位: mm)

3. 電気防食の設計と施工

3. 1 電気防食工法の設計

3. 1. 1 防食電位

(1) 防食電流適用前後の電位変化量を基準として、防食状態を管理する。電位変化量の基準は、100mV以上とする。

(2) PC鋼材の電位は、飽和銅硫酸銅電極(CSE)基準で-1000mVより卑な電位にならないものとする。

【解説】

(1) 電気防食の基本的な防食原理は、腐食環境下で金属が保持する電位を外部電流によって強制的に変化させ、腐食の生じない電位（この電位を防食電位と呼ぶ）まで移行させるものである。コンクリート中の鋼材に対しては、通常、マイナス方向（一般に、卑な方向と呼ぶ）へ電位を移行させることによって防食を図るカソード防食法が用いられる。このカソード防食法は、海水中や土壌中にある鋼構造物においてはすでに確立された方法として広く使用されており、この場合には、飽和銅硫酸銅電極(CSE)基準で-850mVに達すれば防食状態になることが認められており、この値が防食電位となっている。

これに対してコンクリート中の鋼材にカソード防食を施す場合には、

- ・コンクリートは高いpH値を示すこと
- ・電解質であるコンクリートの電気抵抗が一般に大きいこと
- ・同一構造物の異なる部分で状態に差異が生じること
- ・時間の経過に伴って状態に変化が生じること

などから、防食に対する考え方も通常的环境にある鋼材の場合とは異なる。コンクリートの高アルカリ性によって不働態化している鋼材に塩分の影響によって腐食が生じる場合には、その腐食は孔食の発生に端を発している。したがって、理論的には、防食電位としてこの孔食が起こらなくなる電位（これを孔食停止電位と呼ぶ。その値は約-670mV(CSE基準))を用いることが妥当であると考えられる。しかし実際には、上述したようなコンクリート環境の特徴から、コンクリート中の鋼材の電位そのものを直接測る場合には、かなりの誤差が避けられない。

このような点を考慮して、現在、コンクリート構造物の電気防食における防食電位の設定基準として最も汎用性があると考えられているものが、電位シフト基準と呼ばれるものである。この基準は、電位の絶対値を対象とするのではなく、通電によって生じる鋼材の電位変化量を設定対象として用いるものである。これによって、環境や時間の変化あるいは使用電極などの測定方法の違いが電位の測定結果に及ぼす影響を考慮することなく、一義的に防食基準を設定できる。具体的には、「電気防食中に一時的に通電を停止させ、停止直後の鋼材電位とその後安定した時点での電位の差（復極量）が所定の値以上ある場合」あるいは、「通電直後の鋼材電位とその後通電を継続して電位が安定した時点での値との差（分極量）が所定の値以上ある場合」として測定できる。

電位変化量の測定にあたって用いる通電停止直後の電位、あるいは通電開始直後の電位としては、コンクリートの高抵抗による通電中の電位降下（IR降下と称する）を除去した電位（この電位のことを以下、インスタントオフ電位あるいはIO電位と称する）が用いられる。また、通電の停止あるいは開始後、電位が安定するまでの時間は、環境やコンクリートの状態によって異なるが、おおむね4～24時間の間に安定する場合が多い。したがって、通常は24時間後の電位をその目安とするとよい。ただし、コンクリートが高含水状態であるような場合には、電位が安定するまでに数日から数週間かかる場合もあるので注意を要する。

具体的にどの程度の復極量あるいは分極量があれば、コンクリート中の鋼材に十分な防食効果が確保されるかについては、これまでの研究を総合すると、100mV以上であればよいとするものが多い。また、コンクリート中の鋼材の電気防食に関する内外の基準・規定類をみても、その多くが100mV以上という値を採用している。したがって、本マニュアルにおいても、この100mVを最低限満足しなければならない値とした。

（2）コンクリート中の環境を $pH=12.5$ とした場合、理論的には鋼材の電位が -1050mV （CSE基準）より卑な電位になると、鋼材周辺に水素が発生することになる。この電位は、鋼材周辺コンクリートの pH によって異なるものの、これまでにコンクリート中の鋼材における水素発生状況について検討したいずれの実験結果においても、 -1000mV （CSE基準）より貴な電位では水素の発生は見られなかった。一方、PC鋼材の水素脆化感受性を検討した実験結果においては、 -1100mV より卑な電位となると、急激に鋼材の破壊強度が低下するという結果も得られている。これらのことから、電気防食を施したPC鋼材においては、その電位を -1000mV より卑な電位とし、鋼材周辺に水素が発生しないように電位管理を行わなければならない。

なお、PC鋼材以外のコンクリート中の鋼材の電気防食を行う場合には、基本的には、それ自身の脆化を考慮して電位の最卑値を設定する必要はない。ただし、PC鋼材周辺環境の水素量を最小限にとどめるために、これらPC鋼材以外についても、極力その電位は -1000mV （CSE基準）より卑な電位にするのがよい。

3. 1. 2 防食電流密度

（1）通電初期の防食電流密度は、鉄筋およびPC鋼材それぞれについて実施する分極試験結果に基づきその値を決定する。

（2）陽極単位面積あたりの防食電流密度は、 $100\text{mA}/\text{m}^2$ を越えないものとする。

【解説】

（1）通電初期の防食電流密度はElogI試験法によって定めるとよい。ElogI試験法とは、まず、構造物に設置した陽極を用いて内部の鋼材へ徐々にカソード電流を供給し、その時の鋼材電位の変化の状況を鋼材周辺に埋設した電極を用いて読み取って、鋼材の電位－電

流密度曲線（この曲線のことを一般に、カソード分極曲線と呼ぶ）を作成する。そして、この分極曲線において、鋼材電位が自然電位から3. 1（1）に従って防食に必要な電位量だけ変化するときの電流量を、通電初期の防食電流量として設定するものである。なお、防食電流量は通常、陽極施工面積1 m²あたりの供給電流量（一般に、これを防食電流密度と称する。単位はmA/m²）で表される。

また、このE logI 試験は、PC鋼材、補強用鉄筋あるいは金属製シースそれぞれに対して、埋め込まれた電極すべての位置で実施し、いずれの鋼材のいずれの個所においても防食条件（電位変化量あるいは防食電位）を満足する電流密度の中で、できるだけ小さな値を防食電流密度とするのがよい。

なお、長期の通電により、通常、必要防食電流量は次第に減少する傾向にある。したがって、初期の通電量を長期間維持しておくことは、不経済となるばかりではなく、鋼材を過防食状態とする可能性も高くなる。このため、その後の通電電流密度については、各定期点検時に測定される電位変化量あるいは防食電位などの結果を基に、その量を修正するものとする。

（2）陽極と鋼材の間に過大な電流が流れた場合には、鋼材が過防食状態となる危険性が高くなるばかりではなく、電気防食システムの耐久性や構造物の諸性能に対して悪影響を及ぼす可能性も高くなる。

例えば、過大な電流が供給された場合には、陽極で発生する酸化反応によってその周辺のコンクリートのpHが著しく低下し、陽極システムの劣化を招く可能性がある。また、過大な電流が鋼材に供給された場合には、鋼材とコンクリートの界面にコンクリート中の陽イオンが集積して、両者の付着を疎外することも指摘されている。さらに、コンクリート中に反応性あるいは潜在的反応性の骨材が存在している場合には、過度の通電によって、アルカリ骨材反応が促進されたり、これまで現れなかった反応が現れたりすることも指摘されている。これらの現象はいずれも、通常電気防食を行うために供給される電流量の数十倍から数百倍の値であるが、防食が確実に行われる範囲で出来るだけ供給電流密度を少なくすることは、電気防食システムおよび構造物の性能を長期にわたって確保する上から重要である。

したがってここでは、陽極から鉄筋に供給される電流密度の上限値を米国などでの実績も考慮に入れて、100mA/m²とした。

3.1.3 防食方法の選択

- (1) 構造物の形状、施工環境等を考慮して、適切な電気防食工法を選択しなければならない。
- (2) 電気防食工法を選択する場合、事前に、陽極システムの配置と防食電流の均一性について確認しなければならない。

【解説】

(1) 電気防食工法の選択にあたっては、対象構造物の形態と対象部位、環境条件（気象、海象）、コンクリートの抵抗率、電源の有無、景観性、耐用年数、維持管理の難易度、実績、工期、コスト（イニシャル、トータル）等を考慮して選択する必要がある。

(2) PC構造物に電気防食を適用するにあたっては、防食電流の不均一は局部的なPC鋼線の過防食状態を生じ、場合によっては水素脆化の危険性も生じるため危険である。したがって、陽極システムは、電気防食適用範囲全面に防食電流を安定かつ均一に供給できる性能を有することが極めて重要である。また、配置方法によっては防食電流の部分的な過不足を生じる可能性のある電気防食工法もあるため、適用にあたっては、事前に、シミュレーション等の方法で、陽極の配置と鋼材に流入する電流の関係について確認を行い、最適な陽極の配置方法を決定する必要がある。

3.1.4 防食回路の設計

- (1) 防食回路の設計にあたっては、防食電流の供給が均一となる回路設計としないといけない。
- (2) 防食システムは、長期に安定した電流を常時安定して供給できるものでなければならない。

【解説】

(1) コンクリート構造物の電気防食においては、通常の工事に関する各種設計のほかに、電気防食の回路を構成するための設計が必要である。この防食回路の設計は、防食システムが所定の性能を確実に発揮出来るように行うものであり、通常、以下の項目について考慮する必要がある。

- ・回路全体として適切な電位分布が得られていること
- ・防食装置は耐久性に優れていること
- ・電気防食の施工がしやすく、運用時は安全性が確保されていること
- ・経済性に優れていること

このうち、確実な防食を行う観点からは、特に電気防食の適用対象となっている鋼材全てが適切な電位となるために、所定の電流が出来るだけ均一に陽極から各鋼材へ流れるような陽極の配置、供給電流量の設定等を行わなければならない。このような回路設計の規定は、コンクリート構造物の電気防食に対してはこれまでのところ我が国には存在しないが、

米国では、連邦道路局が策定した「橋床版に対する電気防食法のガイドライン」等があり、参考となる。

しかし、コンクリート構造物に対して電気防食を行う場合には、コンクリート中の環境が均一であるとは限らず、しかも、内部鋼材の配筋状況も構造形式によって、また、部材ごとに異なってくる。特にPC構造物においては、通常、種類の異なる鋼材がコンクリート中に混在しその配筋状況も複雑となっている場合が多い。また、PC鋼材へ過度な電流が供給されるような状況は、絶対に避けなければならない。このような状況において、PC構造物に対して、これまでのように経験の積み重ねだけで最適な電気防食回路の設計を行うことは困難を伴う場合が多いと予想される。したがって、事前調査において示した防食電流が不均一となる要因について十分調査を行い、それらを把握した上で、これらの情報をもとに、防食回路設計を行うことが極めて重要である。

(2) 防食回路の設計にあたっては、陽極システム、モニタリング機器（照合電極など）、配線配管材、直流電源装置などの電気防食システムが長期にわたって安定した防食が行われるように配慮し、次に示す項目ごとに設計を行う。

- (a) 防食回路の規模：一般に、電気防食回路の規模が小さいほど電流分布の均一性は確保しやすいが経済性は劣る。また、1回路の規模の設定にあたっては、実際の電気防食運用時の保守点検の効率なども考慮する必要がある。
- (b) 陽極装置およびその配置：陽極装置は、防食の施工および施工後の運用において問題のないことを確認したものでなければならない。また、陽極装置の設置は、電気防食対象域全体に設置することを基本とする。
- (c) 配線・配管材料およびその配置：電気防食においては、防食回路の構成およびモニタリングのための配線・配管を行わなければならない。配線・配管に使用する材料は、JIS規格に適合したもので、各電気回路の許容電流値は電気設備技術基準で定められた許容範囲内とする。また、配線・配管位置の設計は、構造物の使用状態や構造物全体の補修計画などを考慮して行わなければならない。
- (d) 電源装置・電源収納箱およびその設置：外部電源方式で用いる電源の出力側電圧は、電気設備技術基準に準拠して、60V以下とする。また、電源装置の収納箱は、設置環境が塩害環境であることを考慮し、収納する電源装置の耐久性を確保できるように密閉性に優れたものであるとともに、収納箱自体の耐久性も優れていなければならない。なお、流電陽極方式では電源装置は必要としないが、陽極材の消耗に伴う耐用年数を設計において考慮しておかなければならない。
- (e) モニタリング装置およびその配置：電気防食効果を常時把握するために、コンクリート中のPC鋼材や補強用鉄筋等に適当な方法で付設した電位測定用端子を適当数設けなければならない。また、必要に応じて、電位測定用照合電極や腐食速度測定用プローブをコンクリート中に埋め込むとよい。

3.1.5 モニタリング回路の設計

- (1) 照合電極は、防食回路 1 回路当り、2 個以上設置することを基本とする。
- (2) 防食電流の不均一性を生じる箇所、または生じる可能性が予想される箇所には、必ず照合電極を設置し、その部位の鋼材の電位をモニタリングできるようにしなければならない。

【解説】

防食電流の供給による鋼材の電位変化をモニタリングする装置として、現状では照合電極が用いられている。この照合電極には、飽和銀塩化銀照合電極や鉛照合電極などがあるが、電極の種類により測定される電位の値が異なるため、使用する電極の種類と基準電極との換算値を明確に示しておく必要がある。また、照合電極の選定にあたっては、水素基準電極との電位差（換算値）が長期にわたり安定しているものでなければならない。

プレテンション方式の P C 構造物においては、P C 鋼線の水素脆化の危険性を回避するため、P C 鋼線の電位のモニタリングが極めて重要である。したがって、事前調査の結果から均一な防食電流の供給が可能であると判断される場合においても、同一防食回路内に最低でも 2 個以上の照合電極を設置し、複数の電位情報を得るモニタリング回路の設計を行う。

また、事前調査の結果あるいはシミュレーション等の解析結果から、防食電流の不均一性を生じる可能性のある部位、または将来生じる可能性のある部位には、必ず照合電極を設置し、その部位の鋼材電位のモニタリングを行う必要がある。

ポストテンション方式の P C 構造物においては、P C 鋼線がシース内部に配置されているため、水素脆化についての検討は必要ない。

3. 1. 6 使用材料の品質

電気防食の材料には以下の機能を有するものを使用する。

- (1) 陽極材料は防食電流をコンクリート中の鋼材に対して長期間安定的に供給できるものを使用する。
- (2) 照合電極はコンクリート中において長期間安定的な電位を示すものを使用する。
- (3) 配線配管材料は防食性・耐候性に優れ、要求される性能を満足する材料を使用する。
- (4) 直流電源装置は防食対象部に十分な電流量を供給することができるだけの容量を有し、長期間安定的に防食電流を供給できるものを使用する。

[解説]

(1) コンクリート中の鋼材に対して効果的に電気防食を行うためには、以下の点を満足させる陽極材料を選定する必要がある。

- 1) 防食電流を防食対象であるコンクリート中の鋼材に対してより均一に供給できるもの。
- 2) 電流を供給することによって、その陽極性能が低下しないこと。
- 3) 電流を供給することによって、その陽極に接するコンクリートのpHを大きく低下させ、陽極の機能を低下させないこと。

陽極材料を選定する際には、防食対象となる鋼材の必要電流密度、電流分布、コンクリートの抵抗等の条件を考慮して、防食の過不足または陽極反応に対して機能を損なわないような材料を使用しなければならない。陽極材料に必要とされる性能としては、通電することによって陽極および陽極上に被覆された被膜が必要耐用年数以前に消耗しないこと、陽極の分極抵抗が小さく、通電に伴い大きくならないことが必要である。

性能および耐用年数に関する試験方法については、国内ではまだ確立されていないが、米国の基準を参考として以下に記述した。この試験方法の基準を満足することで40年以上の耐用年数を得ることができると考える。

NACE (National Association of Corrosion Engineers) Standard TM0294-94, Item No. 21225

「Testing of Embeddable Anodes for use in cathodic protection of Atmospherically Exposed Steel-Reinforced Concrete」

現状において使用実績が多く、かつその性能が評価されている陽極材料としては以下のものがある。ここでは、代表的な陽極材を記したが、今後の研究開発によって材料の品質・規格は更新される可能性が十分にある。

表 3-1

方式	陽極の材料	形状	備考 (参考名称)
外部電源方式	チタン	面状	チタンメッシュ方式
		線状	チタングリッド方式 リボンメッシュ方式
		点状	チタンロッド方式
		面状	チタン溶射方式
		線状	導電性塗料方式
	導電性塗料	面状	
	チタン亜鉛合金	面状	チタン亜鉛溶射方式
	アルミ亜鉛合金	面状	アルミ亜鉛溶射方式
	亜鉛	面状	亜鉛溶射方式

(2) 電気防食の効果を判断するためには、防食対象構造物、各防食回路の代表点に電位測定を目的とした照合電極を設置する必要がある。現状においては、コンクリート中の鋼材に樹脂製固定具を用いて固定する、あるいは鋼材近傍のコンクリート中に埋設するなどして照合電極を設置することが多い。

照合電極に必要とされる性能としては、コンクリート中において長期間安定的な電位を示し、防食効果の判定基準となる復極試験の期間中に不安定な電位を示さないものを使用する。電極・ケーブルの材料はコンクリート中の高pH環境において十分な耐久性を有し、周囲からの電氣的な干渉を受け難いものとする。

参考までに、現状においてコンクリート埋設型で10年以上の実績を有し、長期耐久性が確認されている照合電極材料を下表に示す。

表 3-2

電極の種類
銀塩化銀電極
鉛電極
二酸化マンガン電極
ハフニウム銀電極

(3) 電気防食では継続的に通電を行うことによって防食効果を維持することができる。従って、使用する配線配管はその置かれる環境を考慮し、紫外線や塩などに対して長期の耐久性を有する材料でなければならない。配線配管は、要求される以下の性能を満足する材料を選定する。また、交換が容易な取付け方法を行うことを基本とする。

- 1) 防食・耐候性に優れていること。
- 2) 陽極を取り付けた箇所に設置する配管の固定材料は、防食電流の流入により材質の変化が生じないものであること。

電気防食の陽極を設置した箇所に使用する配管の固定材料は、樹脂製のものが望ましい。これは、配管材料への防食電流の流入による電気防食の有効性の低下と、配管固定材料の品質の低下を防止するためである。なお、金属製の配管や配管固定材料を使用する場合は、樹脂等で被覆処理することで防食電流による影響を防止することができるため、使用できるものとする。

現状において使用されることの多い配線・配管材料を下表に示す。

表 3-3

用途	材料の種類	規格
防食電源用配線	600V架橋ポリエチレン絶縁 ビニルシースケーブル	JIS C 3605
照合電極用配線	静電遮蔽付制御用ビニル絶縁 ビニルシースケーブル	JCS 258C
照合電極用配線	クロロプレン外装ケーブル	JIS C 3315
保護管	鋼製電線管	JIS C 8305
保護管	硬質ビニル電線管	JIS C 8430
保護管	合成樹脂製可とう電線管	JIS C 8411
接続箱	樹脂製プルボックス	

(4) 電気防食の直流電源装置は初期通電調整時に実施する分極試験を考慮し、防食対象部に十分な電流量を供給することができるだけの容量を有するものを使用する。また、長期間安定的に防食電流を供給できるものを使用する。電源装置は交換が容易な取付け方法を行うことが望ましい。なお、直流電源装置は制御方

式の違いにより、定電圧方式、定電流方式、定電位方式、混合方式などに分けられる。

電源装置を収納する筐体（ボックス）は、その設置される環境条件に対して十分な防食性、耐候性を有するものを使用するものとする。

3. 2 電気防食の施工

3. 2. 1 施工一般

(1) 電気防食の施工にあたっては、選択された工法ごとに定められた手順にしたがって施工を行わなければならない。

(2) 電気防食の施工にあたっては、土木工事共通仕様書、土木工事安全施工技術指針、電気設備技術基準、JIS規格および関連する基準等に準拠するものとする。

【解説】

電気防食の施工手順や方法は、選択した電気防食工法の種類によって異なるため、事前に適用する電気防食工法について検討した上で、施工計画を立案しなければならない。

3. 2. 2 鉄筋およびP C鋼材の導通試験等

(1) 防食対象となる全ての鋼材は、各防食回路ごとに電氣的に一体となっていることを確認しなければならない。また、導通不良が確認された鋼材については適当な方法によって他の鋼材との導通を確保しなければならない。

(2) 外部電源方式の電気防食工法においては、陽極と接するかあるいは、距離が近く電氣的導通のある鋼材についてこれを除去するか、または、電氣的に絶縁された状態を確保するような処理を施さなければならない。

【解説】

(1) 導通の確認方法は、防食対象となる鋼材すべてについて、直流電圧計により、各鋼材間の電位差を測定することにより行う。この場合、電位差が1 mV以下であれば電氣的導通は確保されている。

導通不良箇所が発見された場合、確実な方法により鉄筋およびP C鋼材との導通を確保する。ただし、スポット溶接やアーク溶接のような高熱により処理する方法は、加熱によりP C鋼線が破断することが懸念されるので使用してはならない。

(2) コンクリート表面に露出した結束線やスペーサー等の金属は原則として除去する。なお、これら金属をガス等で切断する際は、P C鋼線が加熱されないように十分注意を払う必要がある。また、事前調査によりかぶりの小さい箇所が確認された場合は、他の箇所と同程度のかぶりとなるようかぶり厚さを増加させなければならない。かぶりの増加が不可能な場合には、この箇所の防食回路を単独に設けるか、この位置に照合電極を設置し、鋼材の電位がモニタリングできるようにする必要がある。

3. 2. 3 排流端子および測定端子の設置

(1) 排流端子および測定端子は、電気防食 1 回路について、鉄筋および PC 鋼材それぞれから 1 ヶ所以上設置するものとする。

(2) PC 鋼材に排流端子および測定端子を設置するにあたっては、クランプあるいはネジ止めなど溶接以外の方法によって固定しなければならない。

【解説】

排流端子および測定端子に使用する材料は、J I S G 3 1 1 2 と同等品程度のものを用いる。

排流端子および測定端子の設置は、鉄筋の場合にはアーク溶接等の溶接で良いが、この場合には熱が PC 鋼線に伝わらないように十分注意する必要がある。なお、PC 鋼線は熱による破断の危険があるため、絶対に溶接による方法を用いてはならない。この場合には、クランプやネジ止めなど機械的に固定する方法を用いる必要がある。採用する方法については、その固定の確実さについて事前に十分検討しておく必要がある。

排流端子および測定端子の電氣的導通について、設置後に各鋼材と直流電圧計により電位差を測定し 1 mV 以下であることを確認する。

3. 2. 4 照合電極の設置

防食効果確認のため、電気防食施工範囲のコンクリート中には、埋込み型照合電極を適正な数量、設置しなければならない。

【解説】

使用する照合電極は、コンクリート中での長期信頼性や耐久性のあるものを選定しなければならない。

照合電流の取り付けは、コンクリート中の鋼材の防食電流の分布を阻害しない位置に、プラスチック製の取り付け治具を用いて鋼材近傍に固定する。埋め戻すモルタルは、コンクリートと同程度の電氣的抵抗を有するものを使用し、照合電極の周辺に空隙が生じないようにモルタルを充填する。

照合電極設置の埋め込み完了後、照合電極が正常に作動しているかについて高抵抗直流電圧計により確認する。

3. 2. 5 陽極の設置

(1) 陽極は、電気防食の適用方式や適用工法によって設置方法が異なるので、それぞれに定められた仕様に従って適正な施工をしなければならない。

(2) 設置した陽極と鉄筋および PC 鋼材は、電氣的に絶縁されていなければならない。

【解説】

(1) 陽極の設置は、適用する防食方式に最も適した方法により、電気防食が確実に実施できるようにその施工および施工管理しなければならない。

(2) 外部電源方式における電気防食では、設置した陽極と鉄筋および PC 鋼材が電氣的に絶縁されていなければ、電気防食システムを構成することが不可能となる。陽極の設置では、鉄筋および PC 鋼線と陽極が接触することがないように入念な確認を行うとともに、陽極の設置後は、陽極と排流端子との電圧を測定し電氣的に絶縁されていることを確認する。一般には、陽極と排流端子の電位差が 10mV 程度以上であれば絶縁が確保されている。

3. 2. 6 直流電源等設備の設置

設計において選定された直流電源装置等設備およびこれを収納するボックスを防食対象構造物付近の適当な場所に固定する。また、電気設備技術基準に準拠し D 種接地工事を施さなければならない。

【解説】

直流電源装置等設備とは、外部電源方式においては防食電流を供給する直流電源装置と照合電極による鋼材電位のモニタリング装置を含む設備であり、流電陽極方式においては防食電流および鋼材電位のモニタリング装置の設備である。維持管理の簡略化のため、これら装置に電話回線による遠隔監視制御システムが付加される場合もある。

これら設備の選定に際しては、長期の信頼性と耐久性を有することを確認しておく必要がある。

これら設備は、コンクリート製の台座にアンカーボルトなどで確実に固定することが重要である。また、海岸線に設置する場合には、年間の潮位等を考慮して海水飛沫があたらない位置を選定する必要がある。

落雷の多い地域では、避雷針などの落雷対策も必要となる。

3. 2. 7 配線・配管

排流端子や照合電極設置等の設置位置に接続箱を設置し、各接続箱と直流電源装置とを電線管により配管し配管内に電線を通し接続する。使用する電線管や電線は耐久性に優れたものを選定し、接続箇所は、防水性、耐久性に優れた方法により接続しなければならない。

【解説】

電線管は、硬質塩化ビニル電線管が一般に用いられる。

接続箱は、電極装置設置箇所および排流端子設置箇所に設ける。ただし、接続箱相互間の距離が非常に長い場合や電線管内に収納する電線の本数が多く、配線の作業性が悪い場合には、中継用の接続箱を設けることもある。

使用する電線は、600V ビニル絶縁電線、クロロブレン外装ケーブル、ビニル外装ケーブルなどが用いられている。それらは、J I Sあるいはそれに準じる規格に適合するものの中から選定することを基本とするが、コンクリート中の鋼材の電気防食工法は新しい技術であるため、必ずしも既存の規格がそのまま応用できるとは限らないので、性能が確認された材料を使用してもよい。電線の接続は、接続箱内で行い絶縁部は絶縁材などを使用し、完全な水密処理を施す必要がある。

3. 2. 8 モニタリング装置の設置

防食効果の確認や装置の稼動状況を確認するためのモニタリング装置を設置する。モニタリング装置には、目的に応じて以下のものを用いる。

- (1) アナログあるいはデジタル式のメータを防食電源装置に組み込む。
- (2) 防食電源装置に付随し、必要な測定項目を満足するリモートモニタリング装置を設置する。
- (3) 防食電源装置に付随し、必要な測定項目を満足しかつ防食電流の制御可能な機能を有したリモートモニタリング制御装置を設置する。

[解説]

防食効果の確認や装置の稼動状況を確認するためのモニタリング装置を設置し、鉄筋あるいはP C鋼材の電位(通電時の電位、通電停止直後の電位、通電停止後4時間、20時間あるいはそれ以上経過)、電源電圧、防食電流などの測定を行う必要がある。

これまでは、防食対象物に近接して設置された防食装置に組み込まれたメータ類(電流計、電圧計)を用いてあるいは携帯型のデジタルマルチメータなどを用いて、その場所です定の測定を行っている。測定項目のうち、鋼材の電位(通電時の電位、通電停止直後の電位)、電源電圧や防食電流は短時間で測定できるが、通電停止後の電位は数時間ないし数十時間必要とする場合もある。また、危険な場所あるいは季節の厳しい場合には定期的な保守・管理が困難となる場合もある。

これに対し、リモートモニタリング装置を用いると、管理事務所などの遠隔地から電話回線を通し測定を指示し実行することが可能で、防食効果の測定、装置の稼動状況を随時確認することができる。

さらには、リモートモニタリング・制御装置を用いると、測定業務はもとより、防食電流の変更を自由に遠隔地から行うことができ、水素脆化の懸念があるP C鋼材の水素脆化を回避するにはこの種の装置の採用が望ましい。

3. 2. 9 初期通電調整

防食工事終了後、防食対象内に埋設された照合電極を用い、鉄筋またはP C鋼材の自然電位を測定した後、分極試験を行い、防食電流密度を決定する。防食電流密度が決定したら、その値に防食対象の面積に乗じた電流を供給できるように直流電源装置を調整する。

[解説]

防食電流密度は対象ごとで異なるので、ブロック分けした対象ごとに防食特性を求める必要がある。そのためには、以下の要領で分極試験を行う。

①自然電位(E_{corr})の測定

鉄筋あるいはP C鋼材に防食電流を供給する前の自然状態の電位で、コンクリート中に埋設した照合電極を用いて高入力抵抗($10M\Omega$ 以上)の直流電圧計により測定する。

②防食電流の供給

防食対象のコンクリート面積当たり $1\sim 50\text{mA}/\text{m}^2$ の電流密度を十分供給できる直流電源装置を用い、小さな電流密度から順次増加させる。 $50\text{mA}/\text{m}^2$ の電流密度においても十分な分極が得られない場合には、適宜電流密度を増加させる。この際の直流安定化電源は定電流装置が好ましい。

③防食電流の維持

1つの電流密度で3～20分間維持する。電流の変化が大ききようであれば適宜調整する(定電流装置であれば電流の変化はほとんどない)。

④通電時の電位 (E_{on}) の測定

所定の時間が経過した後、埋設照合電極より、通電時の鉄筋あるいはP C鋼材の電位を測定する。この測定値にはI R降下による誤差が含まれている。

⑤通電停止直後の電位 (Instant off電位、 E_{io}) の測定

防食回路に通電中の電流を停止した直後の鉄筋あるいはP C鋼材の電位で、この電位はI R降下を除いた真の電位に近い値である。

電流の停止は直流電源のアウトプットスイッチをオフにして行い、メインスイッチを使用しない。電流停止直後の E_{io} の測定は速やかに行う(1秒以内)。

測定が複数の位置について行われる場合には、 E_{io} 測定前の E_{on} と同じ値(近い値)になるのを待つ。

⑥電流密度 (i) を増加させ、 E_{io} 、 E_{on} の測定を繰り返す。

⑦防食電流密度の決定

①～⑥により得られたデータを元に $E\text{-log}i$ の関係をグラフに示す。この場合、I R降下を除いて測定された E_{io} と陽極材料が施工されているコンクリート面積当たりの電流密度(i)のデータを用いて、片対数方眼紙の対数軸が電流密度となるようにして図を作成する。得られた図から、電位と電流密度(対数)が直線関係になる点、あるいは防食が達成される分極量に対応する電流密度を求める。

⑧通電

⑦で求められた防食電流密度に対象の面積に乗じた値の電流となるように、直流電源装置の調節ツマミを操作する。

直流電源装置には電流を供給する仕方で次のように分類される。

(a) 定電圧方式：

概ね鉄筋あるいはP C鋼材の腐食状況に応じた防食電流が供給され、大きい電流が必要となときに大きな電流が流れ、小さな電流で十分な時には小さな電流が流れる傾向がある。ただし、この方式は、環境変化(温度、水分量、塩分量、コンクリートの抵抗率など)に追従できない場合には防食電流に過不足を生じるので、定期的な通電調整が必要である。

特に、通電初期では電流の減少が大きく、防食不足となる場合もある。

(b) 定電流方式：

初期の通電調整時に求めた防食電流を環境変化に拘わらず一定に供給する。ただし、この方式は、環境変化により防食に必要な電流が大きく変化した場合に防食電流に過不足を生じるので、定期的な通電調査が必要である。

(c) 定電位方式：

埋設照合電極と鉄筋あるいはP C鋼材の電位を検出し、常時所定の電位になるように防食電流を増減している。ただし、この方式は、ノイズの影響を受けやすく、過大な防食電流を供給する可能性があるので注意を要し、ノイズ対策が重要である。

(d) 混合方式：

前3方式の欠点を補った方式で、定電圧方式と定電位方式の組み合わせあるいは定電流方式と定電位方式を組み合わせたものである。通常は、定電圧方式あるいは定電流方式で防食電流を供給し、定期的（1時間～24時間毎）に自動で鉄筋あるいはP C鋼材の E_{io} を測定し（複数の位置の電位）、何れかが分極不足であればわずかに防食電流を増加させ、逆に何れかが分極過多であればわずかに防食電流を減少させる。

この方式であれば、ノイズなどによる誤動作により電流を増減したとしてもその量はわずかなため、過防食や分極不測への心配は極めて少なく優れた方式であり、可能な限り本方式を採用する。

4. 維持管理

4. 1 維持管理の基本

(1) 電気防食装置は防食期間中その防食機能を保持することを目的として、定期的に電源装置を含む防食回路の点検、通電後の防食効果の確認を実施し、記録する必要がある。

(2) 食対象構造物の規模、立地・環境条件等を考慮し、維持管理の簡略化・省力化が行えるときはリモートモニタリング装置を利用した維持管理を行うことが望ましい。

[解説]

(1) 電気防食装置の防食機能の有効性を確認するためには、電源装置の稼働状況、防食回路の異状の有無、モニタリング装置を利用して鋼材の電位や復極量を定期的に点検し、その防食機能が確保されているかどうか確認を行うことが大切である。また、その結果を記録・保存し、防食機能の不具合や必要となる防食電流量の過不足などが確認された場合には、防食機能を確保するために調整・補修を行わなければならない。維持管理項目の詳細については4. 2 維持管理の方法項の中に記述した。

(2) 防食機能の有効性を確認するには上記の項目について定期的に確認を行うことが必要となるが、これらは電源装置やモニタリング装置から得られる数値で管理をすることが可能である。したがって、これらの数値を定期的に記録し、その結果を基に行う通電調整を電話線などの通信機器に対応したリモートモニタリング装置を利用することで、現地における測定作業に代用することができる。

一般的に、防食対象となる構造物の規模や立地・環境条件または要求される防食条件によって、リモートモニタリング装置を使用した維持管理の自動化・省力化が有効である場合には、通電開始時からリモートモニタリング装置を導入することが望ましい。また、これら遠隔モニタリングを利用した管理方法では自動的に防食に必要な電圧・電流を制御する装置の実用化も進められており、それらの制御装置を標準的に装備することで、将来的にはメンテナンスを大幅に軽減することが可能になると考えられる。

4. 2 維持管理の方法

防食期間中は電気防食装置の効果の確認および保守を目的として定期的に以下の項目を実施する必要がある。

(1) 防食期間中は定期的に鋼材の防食状況について確認を行うために、次の事項について確認し記録する。

- ① 通電一時停止直後電位（インスタントオフ電位）
- ② 通電停止後安定した時の電位（自然電位）
- ③ 電位復極量（分極量）

(2) 防食効果の確認試験の結果から鋼材のインスタントオフ電位および復極量が目標値から外れた場合には速やかに防食電流量を調整しなければならない。特に、P C 鋼材のインスタントオフ電位が所定の値（水素発生電位）より卑になった場合には、通電を停止し、一定期間放置する。その後、防食電流量を減らし、通電を開始する。

(3) 電気防食装置がその防食機能の低下・損失を引き起こすような劣化や損傷がないかを確認し記録する。

[解説]

(1) 3. 1. 1 項の防食電位で述べたように、鋼材の腐食を防止するには、鋼材の腐食状態における電位（自然電位）を基準にし、所定量（例えば卑な方向に 100mV）の電位変化（分極）を与える必要がある。通電当初は自然電位からの分極でよいが、時間経過と共に、鋼材近傍のコンクリート環境の腐食性が改善されるので、鋼材の自然電位も変化して行く。また、季節変化に伴う自然電位の変化あるいは防食に必要な防食電流の変化などもあり、定期的な通電調整が必要である。そのために、時間経過後の鋼材の自然電位を把握するために、電流を停止し、自然電位（厳密にはこれに近い値）を測定することが行われる。

① インスタントオフ電位

鉄筋あるいはP C 鋼材の防食管理の目的で電位を測定することが行なわれているが、R C 構造物と異なり、水素脆化の可能性を有するP C 構造物ではより正確な電位測定が必要である。しかし、通電状態で測定される鉄筋やP C 鋼材の電位（on 電位）には、通電電流とコンクリートの抵抗による電圧降下（I R 降下、I R ドロップ）が誤差として含まれるため、その測定値からは防食効果あるいは真の電位を評価することができない。そこで、その誤差を除く目的で、一時的に電流を停止し、その直後の電位を測定することが行われる。すなわち、 $I = 0$ とすることで、誤差である電圧降下（ $I R = 0$ ）を除いている。理論的には測定は電流停止後からの時間が短いほどよいが、測定器及び測定技術の関係で困難となる場合が多い。通常は、電流停止後 0.1～1 秒程度であれば数%以内の測定誤差で鉄筋あるいはP C 鋼材の電位測定を行うことができる。

② 自然電位

通電開始前であれば、鋼材の自然電位は埋め込まれた照合電極を用いて直ちに測定することができるが、防食開始後では、鋼材に防食電流が供給され分極状態（例えば、自然電位から卑な方向に 100～200mV

変化している状態)となっているため直ちに測定することはできない。そこで、通電中の防食電流を停止し鋼材の電位が自然電位に戻る(復極という)のを待ち、それを測定する。自然電位に戻るには、防食対象の置かれている環境、コンクリートの質、水分、塩分濃度あるいは酸素の供給性などの影響を受けさまざまな時間を要する。通常は4時間あるいは20時間程度で十分自然電位に近い値まで復極するが、数十時間も要する場合もある。

③ 復極量(分極量)

防食効果の目標値となる指標でありインスタントオフ電位と自然電位の差を指す。通電当初であれば、自然電位から卑な方向に100~200mV変化させるので分極量と言うが、通電中であれば、既に通電前の自然電位は変化しており再度その値を確認する必要がある。そのために、上述のような方法により新たに自然電位を測定するが、復極という手法を用いるので通電当初の表現が分極量であるのに対し、復極量としている。すなわち、

$$\text{復極量} = \text{自然電位} - \text{インスタントオフ電位}$$

の計算を行い、その値が目標値と比較し、少なければ防食電流を増加させ、逆に目標値以上であれば防食電流を低減させる。

参考までに復極試験の手順を以下に示す。

- 1) 通電時の鉄筋の電位(E_{on})を測定する。鉄筋の電位はコンクリート中に埋設された照合電極利用し、高入力抵抗(100M Ω 以上)の直流電圧計で測定する。
 - 2) 防食電流を遮断した直後の電位(E_{io})を測定する。ここで測定される値はIRドロップによる誤差が小さくなっている。測定箇所が複数の場合、同様の作業を繰り返し測定する。
 - 3) 防食電流を遮断し、十分復極した後の鉄筋の電位(E_{of})を測定する。電位はその時点のコンクリート環境及び表面状態に応じた自然電位へと変化する。
- 測定された E_{io} と E_{of} との差(復極量)を算出する。

概念図を図4-1に示す。

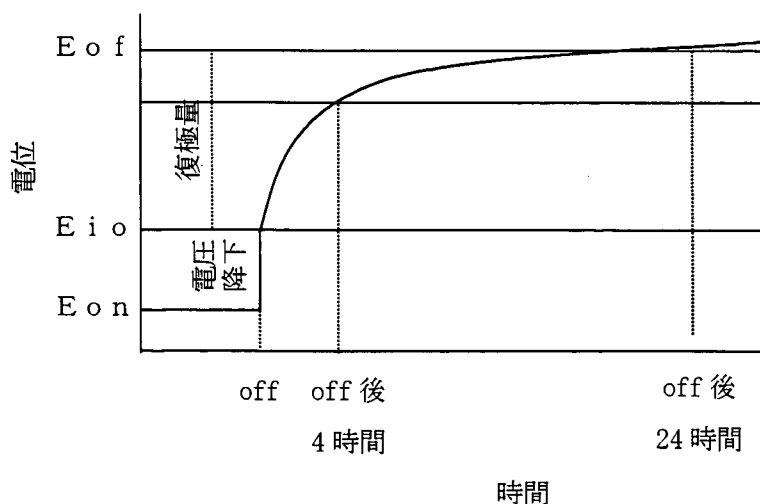


図 4-1 復極の概念図

(2) 一般に、鋼材の防食に必要な電流密度は季節変化や通電時間の経過と共に変化するので、防食工事完了時実施した分極試験結果に基づいて求めた防食電流密度では次第に過不足を生じる。そのため、防食効果の確認試験を実施する必要を生じるがその結果に基づいて、以下の調整を行う。

1) 復極量が不足している場合

目標の復極量 ΔE_o と測定された復極量 ΔE_m を元に、概略的には下式に従い、現在流れている電流 I_o から I_c に調整する。

$$I_c = I_o \times \frac{\Delta E_o}{\Delta E_m}$$

2) 復極量が過剰である場合

目標の復極量 ΔE_o と測定された復極量 ΔE_m を元に、概略的には下式に従い、現在流れている電流 I_o から I_c に調整する。

$$I_c = I_o \times \frac{\Delta E_o}{\Delta E_m}$$

3) インスタントオフ電位が水素脆化電位まで卑化している場合

R C構造物とP C構造物とでは電位に対する評価は大きく異なる。R C構造物であれば、分極が進行し鋼材の電位が水素発生電位まで低下しても特に問題は生じないので、通電調整に緊急性はない。しかし、P C鋼材は、水素吸収量、P C鋼材の強度、引っ張り荷重などの条件が合えば、P C鋼材は脆化を起し、破断する可能性がある。P C鋼材に侵入した水素はP C鋼材の結晶格子間や欠陥部に存在するが、特に結晶格子間の水素が脆化に関与すると言われている。P C鋼材中の水素は、その表面から継続して侵入がなければ再び外部に逃げて行き、脆化を回避することができる。既往の研究によれば、通電停止時間を概ね1週間程度とすることで、P C鋼材の特性は回復していることが明らかとなっている。なお、電位制御機能付きのリモートモニタリング装置を取り付けることにより、同装置が常時、P C鋼材の電位を監視し、自動で防食電流を調整するので、P C鋼材が水素発生電位まで低下する可能性は極めて少ないものとなる。また、本装置は、分極不足に対しても自動で電流の増加を行っているので、常時最適な防食条件下で構造物の防食管理が可能となる。

(3) 電気防食装置がその防食機能の低下を引き起こすような損傷がないかを確認するためには、定期的に以下の点検を実施することが必要である。

1) 通常点検

通常点検は、構造物の維持管理者が、定期的に目視可能な箇所について行い、劣化の発生時期、異状箇所およびその状況を記録するものである。異状箇所が発見された場合には、その箇所について詳細な点検を実施し、復旧を行うものとする。

通常点検項目については表4-1の点検項目表に取りまとめた。

2) 定期点検

定期点検は、電気防食に関して専門知識を有する調査員が、定期的に異状箇所の有無を点検し、劣化の発

生時期、異状箇所およびその状況を記録するものである。異状箇所が発見された場合には、その状況について詳細な点検を実施し復旧を行うものとする。

定期点検項目については、表４－１の項目表に取りまとめた。

３）詳細点検（臨時点検）

詳細点検は、電気防食に関して専門知識を有する調査員が、日常点検、定期点検の際に異状箇所が発見された場合や、地震や台風などの天災、火災などが構造物に作用した場合に実施し、その状況を記録するものである。異状箇所が発見された場合には、その状況について詳細な点検を実施し復旧を行うものとする。定期点検項目については、表４－１の項目表に取りまとめた。

なお、異状箇所の原因が特定できない場合は、項目表に記載のない設備や項目についても詳細な調査を実施し、その状況を記録し復旧を行うものとする。

表 ４－１ 点検項目表

装置名	点検項目	点検内容	点検の種類			点検方法	点検の判断基準
			通常	定期	臨時		
直流電源装置	外観	塗装、損傷、発錆を確認する。	○	○	○	目視	損傷、腐食が進行していないこと。
		扉の開閉、施錠を確認する。		○	○	目視	スムーズな開閉が行え、施錠されていること。
		配線・端子の損傷、腐食を調べる。			○	目視	損傷、腐食が進行していないこと。
	稼動状態	表示灯の点灯を確認する。	○	○	○	目視	表示灯が点灯していること。
	計測	通電電流量、電源電圧を確認する。		○	○	測定	異常なふらつきがないこと。 異常値を示していないこと。
モニタリング装置	外観	塗装、損傷、発錆を確認する。	○	○	○	目視	損傷、腐食が進行していないこと。
		配線・端子の損傷、腐食を調べる。			○	目視	損傷、腐食が進行していないこと。
	稼動状態	表示灯の点灯を確認する。	○	○	○	目視	表示灯が点灯していること。
	計測	電位値を確認する。		○	○	測定	異常なふらつき、大きな変動がないこと。 水素発生電位まで卑下していないこと。
		復極量を確認する		○	○	測定	所定の復極量が得られていること。
陽極材	外観	電気防食対象部のコンクリート表面のひびわれ、錆汁を確認する。		○	○	目視	腐食を伴うひびわれ、錆汁がないこと。
		陽極材、陽極の被覆材のひびわれ、浮きを確認する。			○	目視 打診	陽極材・被覆材に大きなひびわれや浮きがないこと。
	計測	陽極と鉄筋間の短絡を調べる。			○	測定	短絡していないこと。
		陽極電位を調べる。			○	測定	大きな変動がないこと。
配線・配管	外観	配線・配管の汚れ、損傷を確認する。		○	○	目視	汚れ、損傷がないこと。

点検頻度

点検の頻度は、設備の設置環境により異なってくることが考えられるが、点検頻度の決定に際しては、各施設の特質を考慮し、事前に維持管理計画を策定しておくことが大切である。ここでは標準的な点検頻度を表4-2に示した。

リモートモニタリング装置を設置した場合には点検作業の大幅な省力化が可能となるが、定期的に端末へアクセスし稼動状況や測定値を確認、記録する必要があるため、事前に運用計画の検討を行うことが重要である。

表 4-2 標準的な点検頻度

通常点検	定期点検	詳細点検（臨時点検）
1回／6ヶ月	1回／2年	異状発生時