



共同研究報告書

整理番号 第14号

コンクリート構造物の電気防食に関する 共同研究報告書

昭和63年8月

建設省土木研究所
地質化学部化学研究室
財団法人土木研究センター

Copyright © (1988) 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、複写は、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。

コンクリート構造物の電気防食に関する 共同研究報告書

Cooperative Investigation on Cathodic Protection of Reinforcing Steel in Concrete Structures

建設省土木研究所化学研究室

財団法人 土木研究センター

室 長 片 脇 清
主任研究員 坂 本 浩 行
寺 田 剛

専 務 理 事 田 中 柳之助
研究開発部長 森 芳 徳
専 門 委 員 井 川 一 弘
専 門 委 員 山 本 悟
専 門 委 員 川 又 清

要 旨

近年、海岸地域におけるコンクリート構造物の塩害による損傷が社会問題となっている。建設省では、これらの問題に対処するため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」の研究課題を設け、昭和60～62年度の3カ年にわたって研究を実施している。コンクリート構造物の電気防食は、これらの研究の一環として行ったものである。

本共同研究では、鉄筋およびプレストレストコンクリート供試体ならびに実橋における電気防食試験を行い実用化について検討した。また、塩害で損傷したコンクリート構造物に電気防食を適用する場合、防食範囲を的確に判断する必要があるため、これを判断するための腐食診断方法についても検討した。その結果、電気防食および腐食診断について実用化の見通しが得られたので、電気防食要領（案）と腐食診断方法（案）を作成し、電気防食を実施する場合の設計、施工に役立たせることとした。

キーワード：鉄筋コンクリート、プレストレストコンクリート、塩害、電気防食、腐食診断

まえがき

近年、海岸地域におけるコンクリート構造物の塩害による損傷が社会問題となっている。建設省では、これらの問題に対処するため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」の研究課題を設け、昭和60～62年度の3カ年にわたって研究を行った。コンクリート構造物の電気防食は、これらの研究の一環として行われたものである。

コンクリート構造物の塩害対策として、新設構造物ではかぶりを大きくする、塗装鉄筋の使用等、既設構造物ではコンクリート面の被覆工法、断面修復工法等が行われている。一方、コンクリート構造物の電気防食工法は、わが国ではこれまで実績はないが、米国では凍結防止剤として大量に岩塩を散布することから塩害が深刻となっており、アメリカ連邦道路局（FHWA）のSHRP計画（Strategic Highway Research Program）においては、道路に関する重要な課題に位置づけし、これらの防止対策として積極的に技術開発を進めている。電気防食は、防食効果、耐久性、経済性等検討しなければならない問題点も多いが、腐食環境の厳しい場所やコンクリート中に塩化物が含まれている状態でも防食が可能であることから塩害防止対策として、今後有効なものになるものと期待される。

本共同研究では、鉄筋およびプレストレストコンクリート供試体ならびに実橋における電気防食試験を行い実用化について検討した。その結果、電気防食の施工性および防食効果に対しては良好なことが確認されたもので、これらをもとに、塩害防止のためのコンクリート構造物の鋼材の電気防食要領（案）を作成し、今後に電気防食を適用する場合の参考資料にすることとした。

また、塩害で損傷したコンクリート構造物に電気防食を適用する場合、コンクリート中の鋼材の腐食状況を的確に判断し防食範囲を決定する必要があるので、これについても腐食診断方法を検討した。その結果、腐食診断方法についても実用化の見通しが得られたので、自然電位測定によるコンクリート中の鋼材の腐食診断方法（案）を作成した。

コンクリート構造物の電気防食は、わが国では新しい技術開発であるが防食方法としては原理的には優れた性能を有しているので、現場での積極的な活用を図っていくことを期待したい。

目 次

まえがき

1. 研究目的	1
2. 研究概要	1
3. コンクリートの電気防食に関する研究	3
3.1 小型供試体における試験	3
3.1.1 電気防食の効果の確認試験	4
1) 概 要	4
2) 試験方法	4
3) 試験結果および考察	6
4) ま と め	7
3.1.2 電気防食の鋼材付着力に対する影響試験	7
1) 概 要	7
2) 試験方法	7
3) 試験結果および考察	8
4) ま と め	9
3.1.3 電気防食の PC 鋼材の引張強度に対する影響試験	9
1) 概 要	9
2) 試験方法	9
3) 試験結果および考察	10
4) ま と め	10
3.1.4 クラックがある場合の電気防食試験	10
1) 概 要	10
2) 試験方法	11
3) 試験結果および考察	12
4) ま と め	15
3.1.5 マクロセルがある場合の電気防食試験	15
1) 概 要	15
2) 試験方法	15
3) 試験結果および考察	16
4) ま と め	17
3.1.6 陽極材料の検討試験	17
1) 概 要	17

2) 試験方法	17
3) 試験結果および考察	20
4) ま と め	21
3.2 大型プレストレストコンクリート供試体における電気防食試験	33
1) 概 要	33
2) 試験場所	33
3) 試験方法	33
4) 試験結果および考察	39
5) ま と め	44
3.3 実橋におけるコンクリート中の鋼材の電気防食試験	46
1) 概 要	46
2) 試験方法	46
3) 試験結果および考察	50
4) ま と め	53
4. コンクリート中の鉄筋の腐食診断に関する研究	59
4.1 室内および屋外における腐食診断試験	59
4.1.1 自然電位測定方法に関する試験	59
1) 概 要	59
2) 試験方法	59
3) 試験結果および考察	65
4) ま と め	70
4.1.2 屋外暴露供試体による腐食診断試験	70
1) 概 要	70
2) 試験方法	70
3) 試験結果および考察	73
4) ま と め	76
4.1.3 強制通電による腐食試験	77
1) 概 要	77
2) 試験方法	77
3) 試験結果および考察	77
4) ま と め	77
4.2 実橋における腐食診断試験	79
1) 概 要	79
2) 試験方法	79

3) 試験結果および考察	79
4) ま と め	79
5. 研究結果の総括	80
あとがき	82
附属資料	
I. コンクリート構造物中の鋼材の電気防食要領(案)	85
II. Manual for Cathodic Protection of Reinforcing Steel in Concrete (Draft)	103
III. 自然電位測定によるコンクリート中の鋼材の腐食診断方法(案)	121

1. 研究目的

コンクリート構造物中の鋼材の電気防食に関して実用化の検討を行い、有効な電気防食方法を開発する。また、損傷したコンクリート構造物中の鋼材に電気防食をする場合鋼材の腐食状況を的確に把握して電気防食対象範囲を決定する必要があるため、これについても測定方法を開発する。

2. 研究概要

コンクリート構造物の電気防食は、わが国ではこれまで実績がなく新しい技術開発であるため、官民の技術を結集して対応していくことが必要とされる。そこで、研究を進めるに当たっては建設省土木研究所と(財)土木研究センターとの共同研究によって行うこととした。

研究内容は、電気防食および腐食診断に分けられる。これらの研究概要は次のとおりである。

1) コンクリートの電気防食に関する研究

(1) 電気防食の防食効果の確認試験

鉄筋コンクリート（以下、RC という）供試体を用い、防食電位および防食電流について検討した。

(2) 電気防食の鋼材付着力に対する影響試験

防食電流を一定量流した場合の、鉄筋とコンクリートとの付着力について検討した。

(3) 電気防食の PC 鋼材の引張強度に対する影響試験

防食電流を一定量流した場合の、PC 鋼材とコンクリートとの付着力について検討した。

(4) クラックがある場合の電気防食試験

コンクリート表面から鋼材までに達するクラックがある場合の電気防食の効果について検討した。

(5) マクロセルがある場合の電気防食試験

コンクリート中の鋼材にマクロセルがある場合の電気防食の効果について検討した。

(6) 陽極材料の検討試験

電気防食に用いる陽極材料について陽極性能、施工性等を検討した。

(7) プレストレストコンクリート大型供試体における電気防食試験

プレストレストコンクリート（以下、PC という）桁に電気防食を適用した場合の施工性、防食効果について検討した。

(8) 実橋におけるコンクリート中の鋼材の電気防食試験

実橋に電気防食を適用した場合の、施工性および防食効果について検討した。

2) コンクリート中の鉄筋の腐食診断に関する研究

(1) 自然電位測定方法に関する試験

コンクリート中の鉄筋の自然電位を正確に測定するため、照合電極、直流電圧計、接触液、測定間隔等の測定条件について検討した。

(2) 屋外暴露供試体による腐食診断試験

屋外に暴露した供試体により自然電位と腐食度の関係について検討した。

(3) 強制通電による腐食試験

コンクリート中の鉄筋から強制的にアノード電流を流すことによって鉄筋を腐食させ、自然電位と腐食度の関係について検討した。

(4) 実橋における腐食診断試験

実橋において、自然電位測定による腐食診断試験を行い、その適用性について検討した。

共同研究期間は、昭和61～62年度までの2年間で、研究のフローチャートを図-2.1に示す。

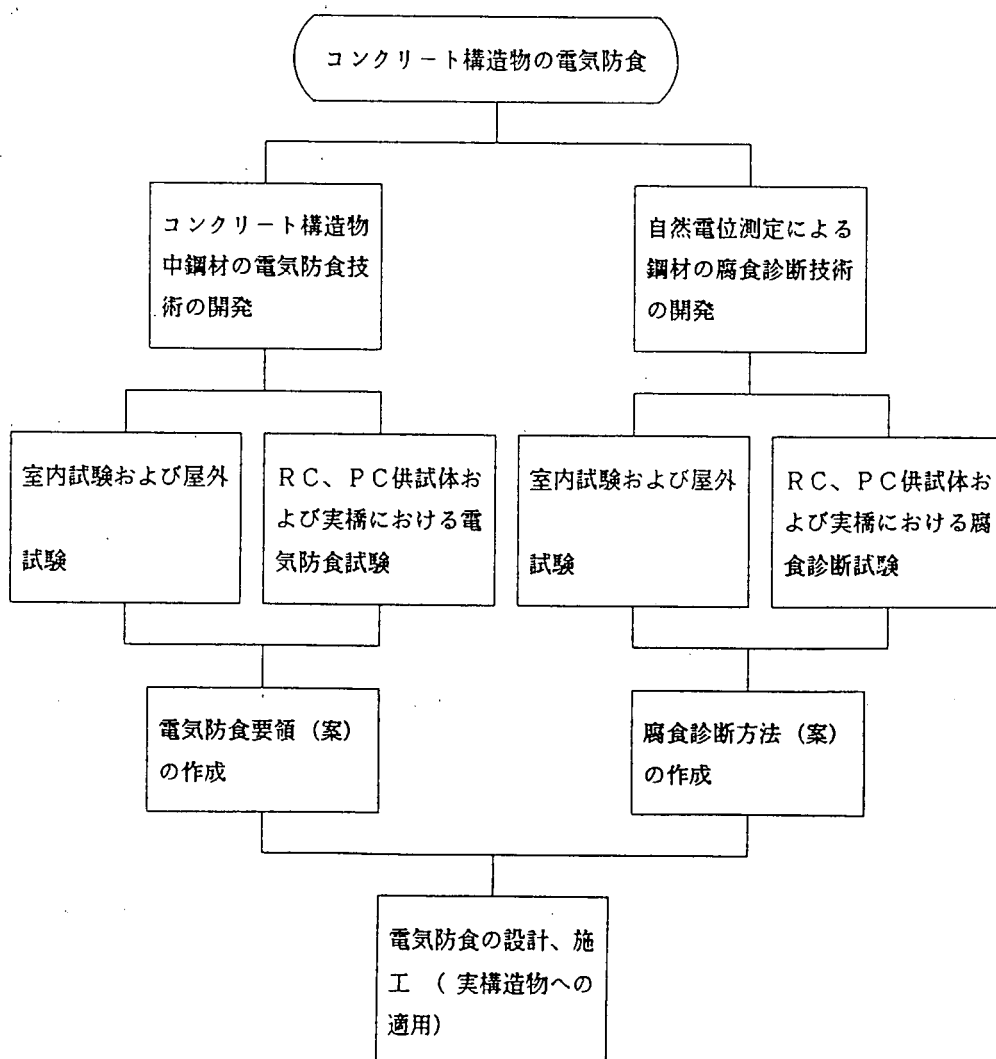


図-2.1 研究のフローチャート

3. コンクリートの電気防食に関する研究

コンクリート構造物の鋼材の電気防食は、我が国においては、これまで適用例がなく、新しい技術開発である。そこで、本試験では、防食効果の確認、鋼材付着力に対する影響、PC鋼材に対する影響、クラックやマクロセルがある場合の防食効果の確認および各種陽極材料の性能比較を目的として、小型供試体を用いて、コンクリート構造物の鋼材の電気防食の基本的適用性を調べた。

また、中型供試体や実橋で、施工性、耐久性および防食効果を確認した。

3.1 小型供試体における試験

表－3.1.1に示す6つの試験項目について、それぞれ小型規模の供試体を作成し試験を行った。コンクリートの示方配合を表－3.1.2に示す。

表－3.1.1 コンクリートの電気防食に関する試験

試験項目	試験目的	供試体番号	供 試 体 の 条 件								個	供試体寸法 (cm) 縦 (厚さ) × 横 × 長さ
			塩分 NaCl (kg/m ²)	かぶり (cm)	鋼種	鋼面積	W/C (%)	セメント 種類	混和剤 AE剤	クラック の有無		
電気防食の 効果の確認	電流密度の影響 かぶり厚の影響 鉄筋の新旧の影響	I	15	2	SR ¹⁾	黒皮付	42	普通	有	無	16	φ15×30
				6.7		さび付						
電気防食の 付着力に対する影響	コンクリートと鋼材間の付着力に対する影響	II	15	6.7	SR ¹⁾	黒皮付	42	普通	有	無	8	φ15×15
電気防食の PC鋼材に対する影響	PC鋼材の引張強度に対する影響	III	15	9.2	SWPR ²⁾	みがき	42	普通	有	無	16	20×20×120
クラックがある場合の 電気防食	クラックがある場合の電気防食の効果の確認	IV	3	2	SR ¹⁾	黒皮付	55	普通	有	有	16	10×20×38.5
マクロセルがある場合の 電気防食	マクロセルがある場合の電気防食の効果の確認	V	3	2	OST ³⁾ -2	黒皮付	55	普通	有	有	5	10×10×50
陽極材料の 検討	性能、耐久性および施工性の検討	VI	3	2	SR ¹⁾	黒皮付	55	普通	有	無	64	10×30×28.5

注1) JIS G 3112 鉄筋コンクリート用棒鋼 SR 24
 注2) JIS G 3536 PC鋼線及びPC鋼より線 SWPR 7A
 注3) 油圧用炭素鋼引抜鋼管 OST-2

表- 3.1.2 コンクリートの示方配合

配合No.	粗骨材の 最大寸法 (mm)	目標 スランブ (cm)	目標 空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 S/a (%)	単 位 量 (Kg/m ³)							測 定 結 果			
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 (C×%)		塩分 NaCl	スランブ (cm)	空気量 (%)	絞り 上り 温度 ℃	
										No.70	303					
I	—	—	—	42	42	160	380	772	1046	—	—	15	—	—	—	
II	—	—	—	42	42	160	380	772	1046	—	—	15	—	—	—	
III	—	—	—	42	42	160	380	772	1046	—	—	15	—	—	—	
IV	20	8.0	5.0	55	42	167	304	773	1047	0.25	0.38	3.0	9.0	5.1	20.0	
V	20	8.0	5.0	55	42	167	304	773	1047	0.25	0.38	3.0	8.0	5.3	20.0	
VI	20	8.0	5.0	55	42	167	304	773	1047	0.25	0.38	3.0	7.5	5.0	20.0	

3.1.1 電気防食の効果の確認試験

1) 概 要

本試験は、厳しい腐食環境下に置かれたコンクリート中鉄筋の電気防食の効果を確認することを目的とした。

2) 試験方法

(1) 供試体：供試体番号 I-1, I-2

形状 $\phi 150 \times 300 \text{ mm}$ のコンクリート供試体（図-3.1.1, 図-3.1.2）に1本の鉄筋（JIS G 3112 SR 24 $\phi 16.0 \text{ mm}$, 図-3.1.3）を埋込み防食対象とした。供試体の鉄筋露出部側面は、その面から塩水の浸透などの影響を除くため、エポキシ樹脂を塗布した。また、鉄筋は通電用リード線をビスどめて取り付けた。

(2) 陽極材料

$\phi 1.5 \text{ mm}$ の白金メッキチタン線（以下 Pt-Ti 線と称す）を用いて通電した。

(3) 暴露条件

塩化ナトリウム（以下 NaCl と称す）および水酸化カルシウム（以下 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ と称す）の飽和混合溶液中に供試体の底部から 2 cm を浸漬し、室内に放置した。

(4) 電流密度

鉄筋供試面積当たり, 0, 5, 10, 20, 30, 50,

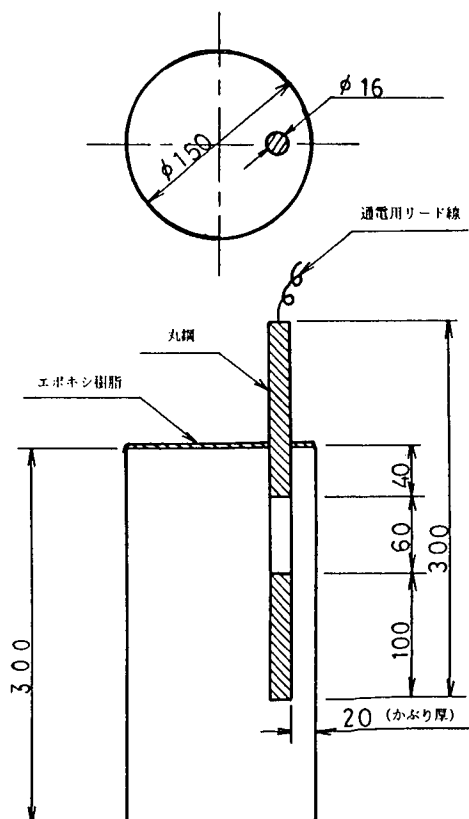


図- 3.1.1 供試体（供試体番号 I-1）

100 mA/m² の 7 種類とした。

(5) 通電方法

直流定電流電源装置を用いて、図- 3. 1. 4 に示す方法で通電した。

(6) 測定内容

- ① 鉄筋の Instant Off 電位：電位測定には、入力抵抗 100 MΩ 以上の電圧計と照合電極として飽和甘こう電極（以下甘こう電極（SCE）と称す）を用いて、通電 OFF 直後の電位を測定し、Instant Off 電位とした。後述の電位測定は全てこの方法で行った。また、照合電極は常に一定の位置に置いて測定を行った。
- ② 分極量：鉄筋の Instant Off 電位とその 4 時間後の電位を測定し、その差を分極量とした。
- ③ 鉄筋の外観観察：試験終了後、供試体を割裂し、鉄筋の外観観察を行った。

- ④ 可溶性 C1⁻ 濃度：試験終了後、供試体を割裂し、鉄筋近傍から採取したコンクリート中の可溶性の C1⁻ 濃度を電位差滴定法により測定した。

(7) 通電期間：約 27 カ月

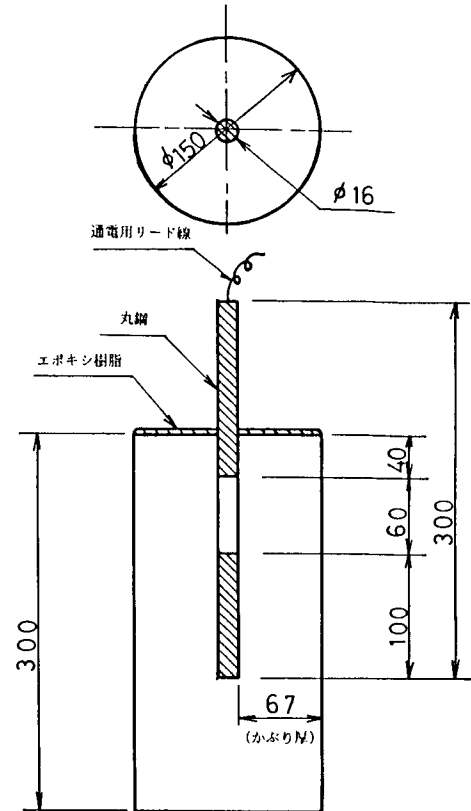


図- 3. 1. 2 供試体（供試体番号 I - 2）

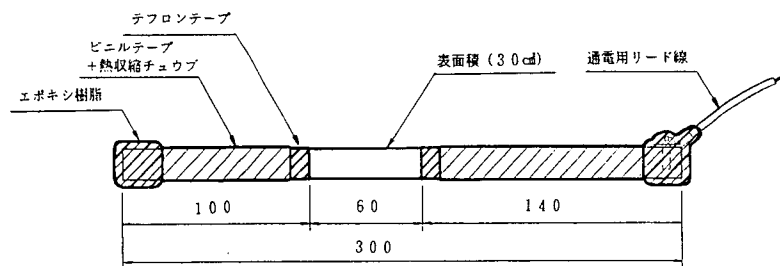


図- 3. 1. 3 鉄筋（供試体番号 1）

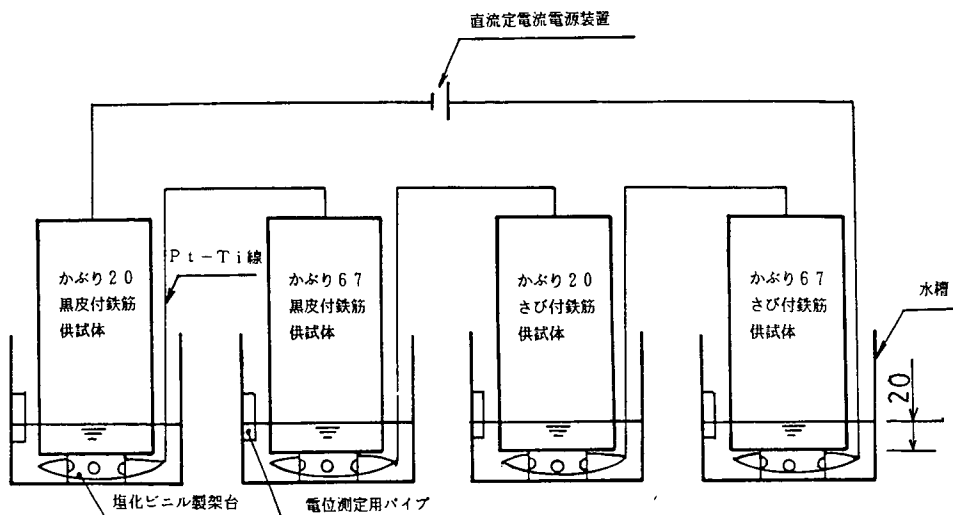


図- 3. 1. 4 通電方法

3) 試験結果および考察

表- 3. 1. 3 に測定結果を示す。

(1) 鉄筋の Instant Off 電位

試験終了直前の、鉄筋の Instant Off 電位は、電流密度が増大するにつれて、電位も卑化する傾向があった。

(2) 分極量

分極量は、かぶり厚20mmのさび付鉄筋で電流密度が10mA/m²のものを除き、電流密度が増大するにつれて増加する傾向があった。分極量が125mV以上あったものは、腐食が発生しておらず、電気防食の効果が確認された。

(3) 防食電流密度

防食電流密度は黒皮付鉄筋で、かぶり厚20mmの場合、10mA/m²程度であった。さび付鉄筋で、かぶり厚20mmの場合、20mA/m²程度であった。なお、本試験環境は非常に厳しいものであると考えられるので実環境での防食電流密度は本試験の結果よりは低くなると考えられる。

(4) 可溶性Cl⁻濃度

表- 3. 1. 4 および図- 3. 1. 5 に測定結果を示す。いずれの供試体においても、防食電流密度が増大するにつれて、Cl⁻濃度が減少した。これは、防食電流によって、Cl⁻イオンが鉄筋表面から遠ざかり、その速度は、電流密度に関係すると考えられる。なお、かぶり厚によって塩分濃度が異なったのは、コンクリート中の塩分濃度が供試体の半径方向で異なったためである。

また、塩分濃度の測定サンプルは、鉄筋から最高10mm離れた箇所から採取したため、塩分の分析値は、鉄筋の表面上よりは高い値を示したと考えられる。従って、鉄筋の表面における塩分濃度はさらに低く、電気防食によって鉄筋の表面の環境は改善されるものと考えられる。

表- 3. 1. 3 防食効果の測定結果

鉄筋表面状態	かぶり厚 (mm)	電流密度 (mA/m ²)	鉄筋終電位 (mV SCE)	分極量 (mV)	腐食の程度	防食効果
黒皮付	20	0	-237	-	激しい	-
		5	-228	42	激しい	×
		10	-353	171	無し	○
		20	-441	203	無し	○
		30	-463	229	無し	○
		50	-535	256	無し	○
		100	-572	278	無し	○
黒皮付	67	0	-112	-	無し	-
		5	-301	161	無し	○
		10	-334	181	無し	○
		20	-422	202	無し	○
		30	-476	253	無し	○
		50	-497	268	無し	○
		100	-621	373	無し	○
さび付	20	0	-227	-	激しい	-
		5	-216	62	激しい	×
		10	-279	22	中程度	×
		20	-363	158	中程度※	○
		30	-380	167	無し	○
		50	-462	197	無し	○
		100	-511	218	無し	○
さび付	67	0	-137	-	無し	-
		5	-237	125	無し	○
		10	-291	265	無し	○
		20	-360	208	無し	○
		30	-385	221	無し	○
		50	-441	229	無し	○
		100	-488	265	無し	○

※コンクリートの空隙部のみで腐食

表- 3. 1. 4 塩分濃度の分析結果

電流密度 (mA/m ²)	塩分濃度 (kg/m ³)			
	黒皮付 かぶり20mm	黒皮付 かぶり67mm	さび付 かぶり20mm	さび付 かぶり67mm
0	29	9	22	11
5	19	9	19	9
10	16	10	21	9
20	18	8	17	7
30	16	8	16	6
50	11	7	17	7
100	9	5	10	5

4) まとめ

(1) コンクリート

中の鉄筋の防食方法として、電気防食は有効であった。なお、防食電流密度は、黒皮付鉄筋で 10 mA/m^2 、さび付鉄筋で 20 mA/m^2 程度であった。

(2) コンクリート

中の鉄筋表面近傍の塩分濃度は、電気防食することによって減少していく傾向があった。

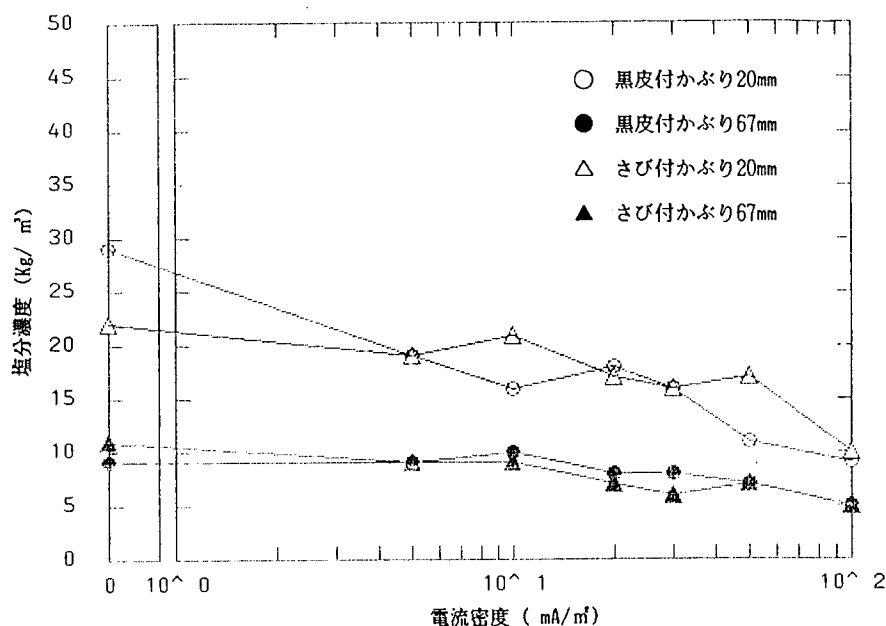


図-3.1.5 防食電流密度と塩分濃度の関係

3.1.2 電気防食の鋼材付着力に対する影響試験

1) 概要

コンクリート中の鋼材を電気防食することによる、鋼材とコンクリートの付着力の変化を確認するため、鋼材の引き抜き試験を行った。

2) 試験方法

(1) 供試体：供試体番号Ⅱ

形状 $\phi 150 \times 150 \text{ mm}$ のコンクリート供試体 (図-3.1.6) に1本の鉄筋 (JIS G 3112 SR 24 $\phi 16.0 \text{ mm}$) を埋込み防食対象とした。供試体の鉄筋露出部側面は、その面からの塩水の浸透などの影響を除くため、エポキシ樹脂を塗布した。また、鉄筋は通電用リード線をビスどめにて取り付けた。

(2) 陽極材料

$\phi 1.5 \text{ mm}$ の Pt-Ti 線を用いて通電した。

(3) 暴露条件

NaCl および $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の飽和混合溶液中に供試体

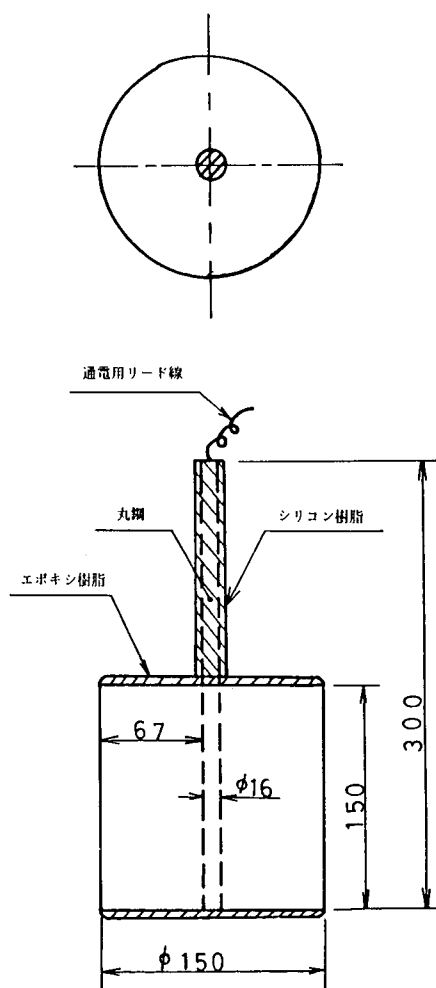


図-3.1.7 通電方法 (供試体番号Ⅱ)

を完全に浸漬し、室内に放置した。

(4) 電流密度

鉄筋供試面積当たり、0, 10, 100mA/m² の3種類とした。

(5) 通電方法

直流定電流電源装置を用いて、図-3.1.7に示す方法で通電した。

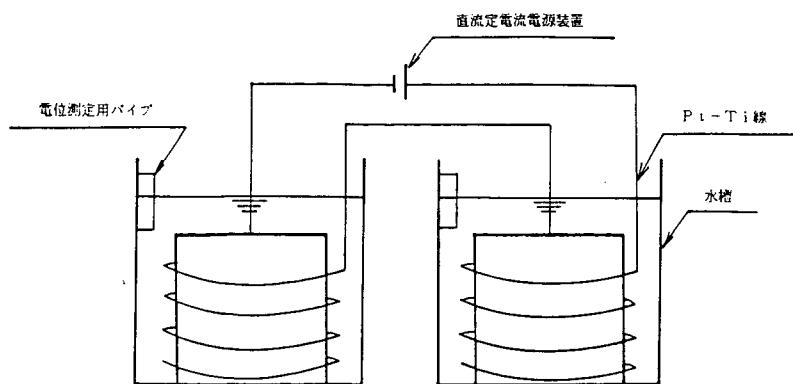


図-3.1.7 通電方法（供試体番号Ⅱ）

(6) 測定内容

① 最大付着応力度：試験終了後、鉄筋の引き抜き試験を、JIS Z 2241に準じて行った。

(7) 通電期間：約6カ月

3) 試験結果および考察

表-3.1.5および図-3.1.8に測定結果を示す。

最大付着応力度は、数値的に相当ばらつきがあるが、比較対象の供試体と防食電流密度100mA/m²のものを比較しても、電気防食による鉄筋とコンクリートの付着力は低下しないものと判断される。

表-3.1.5 最大付着応力度の測定結果

暴露条件	電流密度 (mA/m ²)	最大付着応力度 (Kgf/cm ²)
室内放置	0	49.2
室内放置	0	41.4
塩水浸漬	0	46.6
塩水浸漬	0	52.3
塩水浸漬	0	60.2
塩水浸漬	10	85.6
塩水浸漬	10	75.2
塩水浸漬	10	75.0
塩水浸漬	100	87.0
塩水浸漬	100	44.2
塩水浸漬	100	49.9

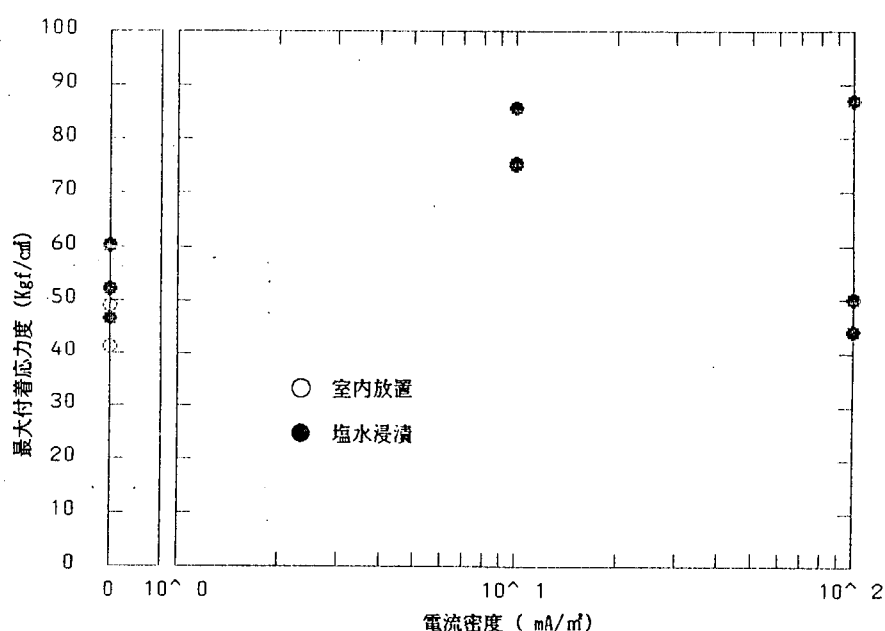


図-3.1.8 最大付着応力度と防食電流密度の関係

4) ま と め

通電6ヶ月間では、電気防食による鉄筋とコンクリートの付着力は低下しなかった。

3. 1. 3 電気防食の PC 鋼材の引張強度に対する影響試験

1) 概 要

コンクリート中の PC 鋼材に電気防食を行った場合、防食電流による PC 鋼材の引張強度に及ぼす影響を確認するため、鋼材の引張試験を行った。

2) 試験方法

(1) 供試体：供試体番号Ⅲ

形状 $200 \times 200 \times 1200 \text{ mm}$ のコンクリート供試体（図-3.1.9）に1本の PC 鋼材（JIS G 3636 SWPR 7A $\phi 9.3 \text{ mm}$ ）を埋込み防食対象とした。供試体の PC 鋼材露出部両側面は、その面からの塩水の浸透などの影響を除くため、エポキシ樹脂を塗布した。また PC 鋼材は通電用リード線をはんだにて取り付けた。

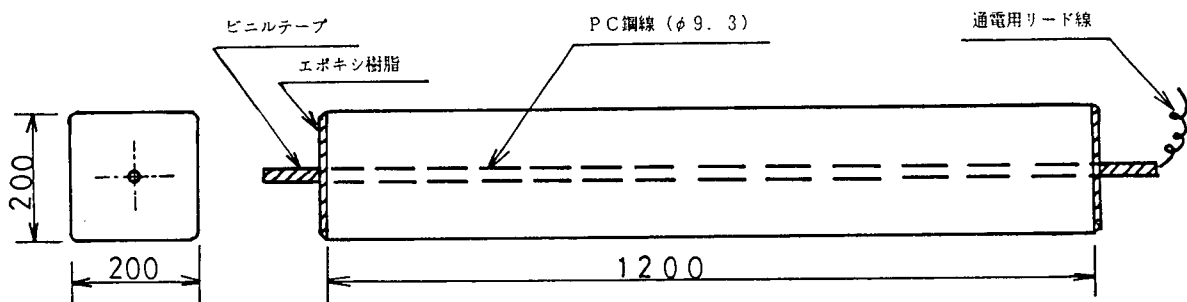


図- 3. 1. 9 供試体（供試体番号Ⅲ）

(2) 陽極材料

$\phi 1.5 \text{ mm}$ の Ti-Pt 線を用いて通電した。

(3) 暴露条件

NaCl および Ca (OH)₂ の飽和混合溶液中に供試体を底部から 2 cm 浸漬し、室内に放置した。

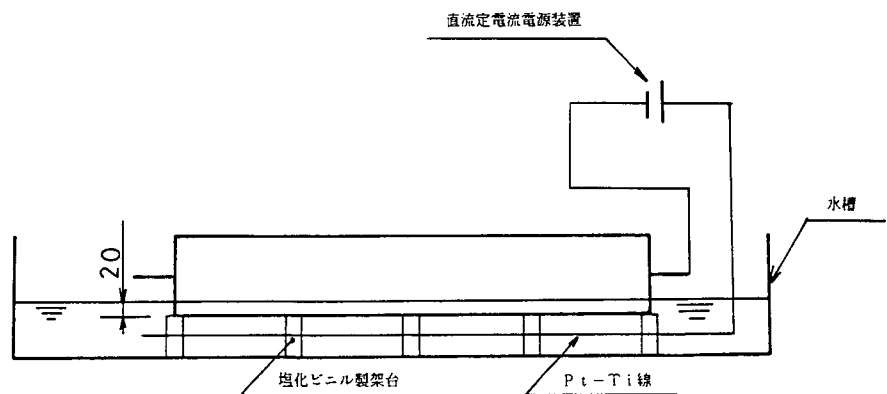


図- 3. 1. 10 通电方法（供試体番号Ⅲ）

(4) 電流密度

鉄筋供試体面積当たり、0, 2, 5, 10, 20, 30, 50, 100 mA/m^2 の8種類とした。

(5) 通电方法

直流定電流源装置を用いて、図-3.1.10に示す方法で通電した。

(6) 測定内容

① 引張強度：試験終了後，供試体を割裂し，PC 鋼材の引張試験を行った。

② 鋼材の Instant Off 電位：通電 OFF 直後の電位を測定し，Instant Off 電位とした。

(7) 通電期間：約16カ月

3) 試験結果および考察

表- 3. 1. 6 および図- 3. 1. 11，図- 3. 1. 12 に測定結果を示す。

図- 3. 1. 11 によると，電流密度が 30 mA/m^2 以上では水素が発生している電位を示している。約16カ月間の通電期間では，この電流密度以上でも電気防食の PC 鋼材の引張強度への影響は見出せなかった。なお，JIS に規定された引張強度は 9050 kgf 以上である。

4) まとめ

通電16カ月では，電気防食により PC 鋼材の引張強度への影響は見出せなかった。

表- 3. 1. 6 引張強度の測定結果

暴露条件	電流密度 (mA/m ²)	引張強度 (kgf)
室内放置	0	9125
室内放置	0	9225
塩水浸漬	0	9325
塩水浸漬	0	9475
塩水浸漬	2	9675
塩水浸漬	2	9500
塩水浸漬	5	9525
塩水浸漬	5	9700
塩水浸漬	10	9025
塩水浸漬	10	9700
塩水浸漬	20	8950
塩水浸漬	20	9700
塩水浸漬	30	9275
塩水浸漬	50	9355
塩水浸漬	100	9475

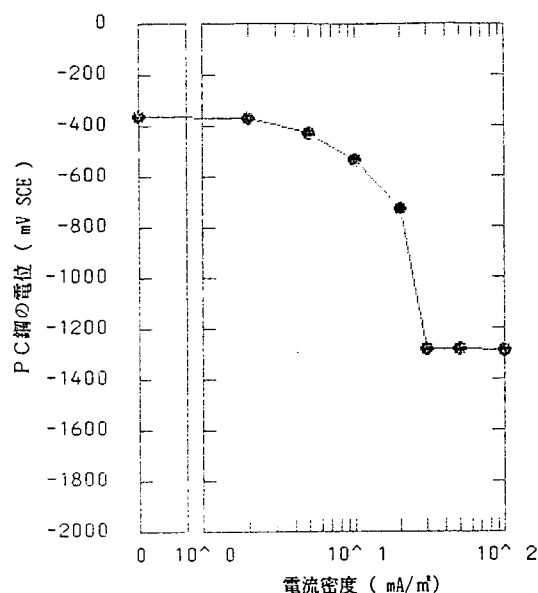


図- 3. 1. 11 各電流密度における PC 鋼材の電位

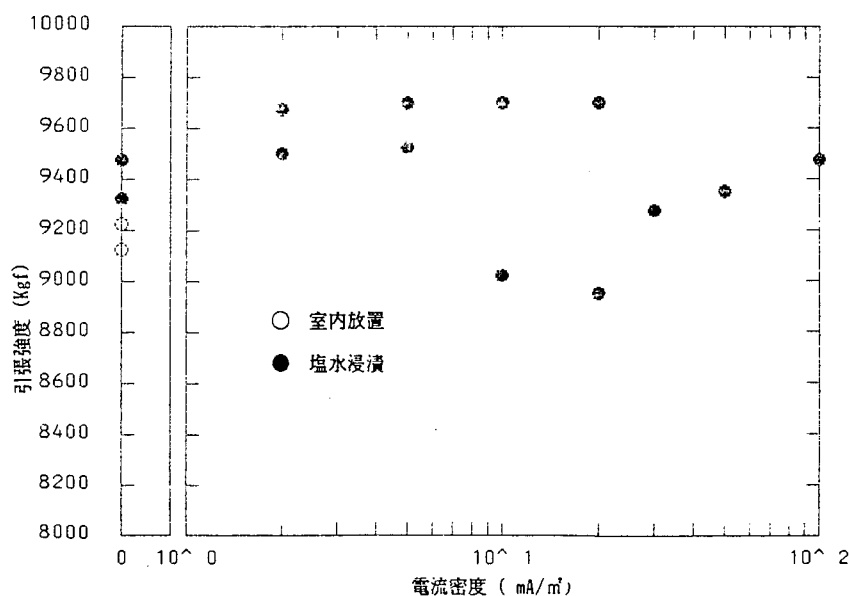


図- 3. 1. 12 引張強度と防食電流密度の関係

3. 1. 4 クラックがある場合の電気防食試験

1) 概要

コンクリート構造物の表面から鋼材まで達するクラックがある場合の電気防食の効果を確認することを目的とした。

2) 試験方法

(1) 供試体：供試体番号Ⅳ－１，Ⅳ－２

形状 $200 \times 385 \times 100 \text{ mm}$ のコンクリート供試体（図－3.1.13，図－3.1.14）に2本の鉄筋（JIS G 3112 SR 24 $\phi 13.0 \text{ mm}$ ）を埋込み防食対象とした。クラックには2種類のクラックを用いた。1つは人工クラックと称し，一方の鉄筋の2カ所に 1 mm 厚の樹脂板を置き，コンクリートを打設した後引抜いて作ったスリットをクラックとしたもの，他方は自然クラックと称し，載荷してクラックを作った。供試体の鉄筋露出部側面は，その面からの塩水の浸透などの影響を除くため，エポキシ樹脂を塗布した。また，各鉄筋は通電用リード線をはんだにて取り付けた。

(2) 陽極材料

$\phi 1.5 \text{ mm}$ の Pt-Ti 線を一次電極とし，カーボン系導電性塗料を二次電極とした陽極材料を用いて通電した。

(3) 暴露条件

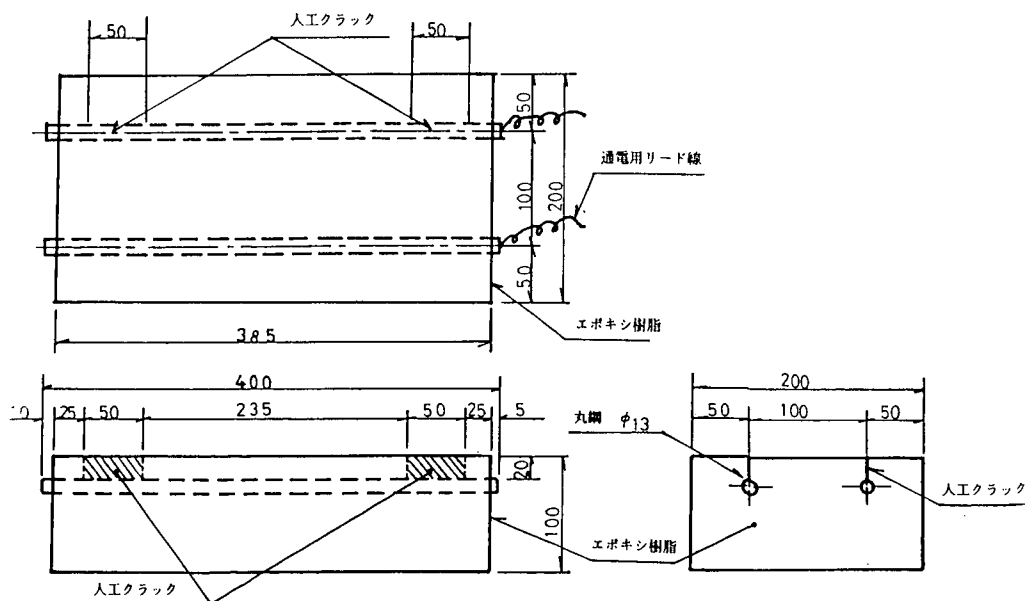
各供試体の半数（4体ずつ）は自然暴露とし，残りの半数は3%食塩水を1日1回約1分間散布した。

(4) 電流密度

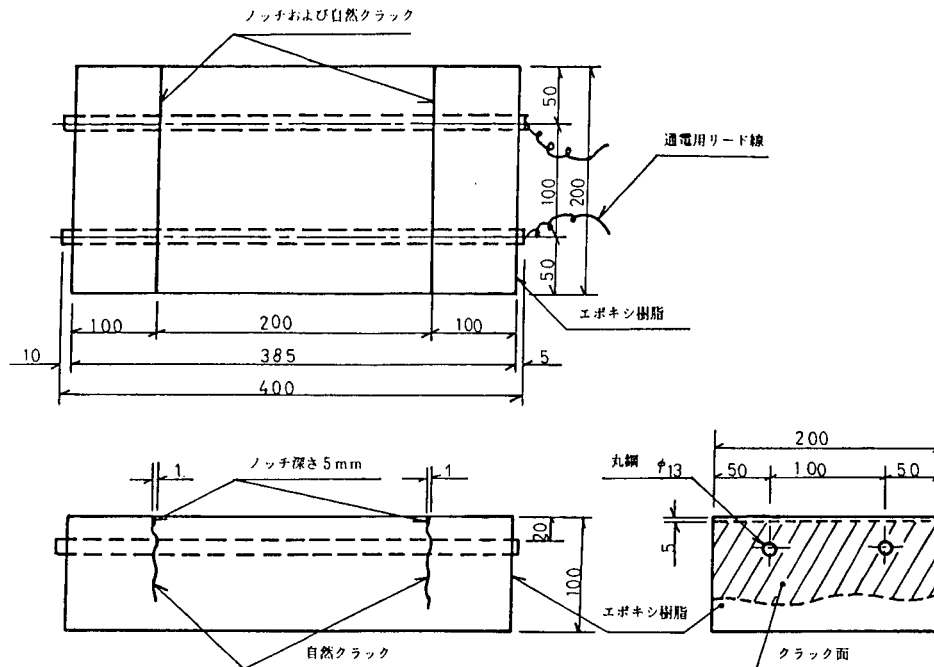
鉄筋供試面積当たり，0，5，10，20 mA/m^2 の4種類とした。

(5) 通電方法

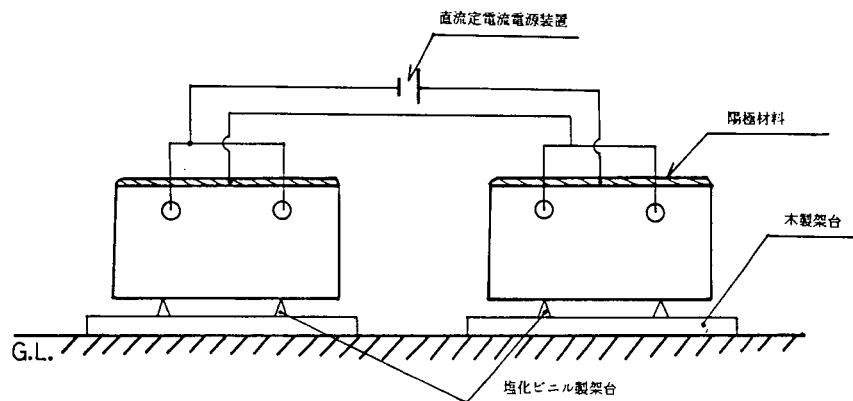
直流定電流電源装置を用いて，図－3.1.15に示す方法で通電した。防食する前の鉄筋電位が -200 mV SCE より卑になるまで塩水散布を行って鉄筋を腐食させた後，電気防食試験を行った。



図－3.1.13 供試体（供試体番号Ⅳ－１，人工クラック）



図－ 3. 1.14 供試体（供試体番号Ⅳ－ 2，自然クラック）



図－ 3. 1.15 通電方法（供試体番号Ⅳ－ 1，Ⅳ－ 2）

(6) 測定内容

- ① 鉄筋自然電位：通電直前の鉄筋自然電位を測定した。
- ② 鉄筋流入電流：各鉄筋へ流入する電流をゼロ抵抗電流計を用いて測定した。
- ③ 鉄筋の Instant Off 電位：通電 OFF 直後の電位を測定し，Instant Off 電位とした。
- ④ 分極量：鉄筋の Instant Off 電位とその20時間後の電位を測定し，その差を分極量とした。
- ⑤ 鉄筋外観観察：試験終了後，供試体を割裂し，鉄筋の外観観察を行った。

(7) 通電期間：約 3 カ月

3) 試験結果および考察

人工クラックがある場合の測定結果を表－ 3. 1. 7 に，自然クラックある場合の測定結果を表－ 3. 1. 8 に示す。

(1) 鉄筋自然電位

電流密度が $0\text{mA}/\text{m}^2$ で、人工クラックの場合はクラック側の鉄筋がアノードとなり、他方がカソードとなってマクロセルを構成し、あたかもクラックのない鉄筋が電気防食されている状態となっていた。この鉄筋の自然電位を測定すると、得られた値はカソードの電位に近いことが分かる。自然クラックの場合は、両方にクラックが入っているため、2本の鉄筋の電位はほぼ等しく、両方の鉄筋が腐食している電位を示す。

(2) 鉄筋流入電流

電流密度が $0\text{mA}/\text{m}^2$ の場合は、卑な電位をもつ一方の鉄筋から貴な電位をもつ他方の鉄筋へ電流が流れている。人工クラックの場合は、電位差が大きいため、最大で $301\mu\text{A}$ 流れ、これを電流密度になおすと $19\text{mA}/\text{m}^2$ にもなる。電気防食している場合で、人工クラック入りでは、鉄筋間に電位差があるため、貴な電位をもつ鉄筋に多くの電流が流れている。自然クラックの場合は両方の鉄筋がほぼ同電位であるため、ほぼ均等に電流が流れている。従って、大きなクラックがある構造物を電気防食する場合は、大きな電流密度が必要となる。

(3) 鉄筋の Instant Off 電位

人工クラックの場合、すなわち大きなクラックがある場合には電流密度と Instant Off 電位の関係は明確でなかった。自然クラックの場合は電流密度が増すにしたがって Instant Off 電位は卑化する。

(4) 分極量と鉄筋表面状態

人工クラックの場合、コンクリートにクラックが入っていない鉄筋は電流密度が $5\text{mA}/\text{m}^2$ で十分な分極量があり、発錆面積も少ない。しかし、クラックが入っている鉄筋は $20\text{mA}/\text{m}^2$ の電流密度でも十分な分極量が得られない。なお、発錆面積は通電前の腐食期間とマクロセルの大きさが違うため、いちがいに判断できない。

自然クラックの場合、電流密度に比例して分極量も増す。前述の通電前の腐食期間における発錆面積が不明なため、防食基準となる分極量を求めるまでには到らなかった。

表-3.1.7 人工クラックがある場合の電気防食の効果

暴露 条件	電流密度 mA/m ²	クラック の有無	自然電位 mV SCE	通 電 直 後		3 ヶ 月 後		DECAY			発錆面積 (%)
				流入電流 μ A	I O 電位 mV SCE	流入電流 μ A	I O 電位 mV SCE	4 時間後 mV SCE	20 時間後 mV SCE	分極量 mV	
塩水	0	無	-276	301	-420	152	-437	—	-245	192	9
		有		-301		-152			-452	-15	34
	5	無	-219	134	-433	114	-341	-396	-209	132	3
		有		21		38			-425	-84	35
散布	10	無	-256	209	-460	191	-392	-402	-252	140	4
		有		96		113			-461	-69	31
	20	無	-241	330	-363	326	-462	-326	-232	230	6
		有		282		275			-337	125	15
自然 暴露	0	無	-242	119	-397	41	-299	—	-206	93	3
		有		-119		-41			-348	-49	31
	5	無	-220	107	-502	87	-327	-269	-180	147	1
		有		44		67			-358	-31	23
	10	無	-244	164	-595	165	-349	-254	-176	173	1
		有		143		142			-284	65	20
	20	無	-251	330	-418	313	-386	-296	-210	176	1
		有		281		297			-310	76	31

表-3.1.8 自然クラックがある場合の電気防食の効果

暴露 条件	電流密度 mA/m ²	クラック の有無	自然電位 mV SCE	通 電 直 後		3 ヶ 月 後		DECAY			発錆面積 (%)
				流入電流 μ A	I O 電位 mV SCE	流入電流 μ A	I O 電位 mV SCE	4 時間後 mV SCE	20 時間後 mV SCE	分極量 mV	
塩水	0	有	-238	27	-432	24	-433	—	-425	8	18
		有		-27		-24			-440	-7	25
	5	有	-205	82	-364	79	-458	-421	-382	76	14
		有		72		75			-397	61	19
散布	10	有	-264	155	-431	157	-460	-406	-378	82	14
		有		151		149			-387	73	24
	20	有	-258	307	-424	320	-518	-392	-347	171	18
		有		305		291			-398	129	20
自然 暴露	0	有	-239	18	-333	9	-333	—	-338	-5	16
		有		-18		-9			-346	-13	25
	5	有	-292	81	-355	78	-351	-287	-257	94	14
		有		74		77			-285	66	18
	10	有	-295	157	-357	157	-388	-310	-277	111	18
		有		149		150			-321	67	19
	20	有	-257	314	-418	316	-500	-281	-217	283	18
		有		297		295			-237	263	19

4) まとめ

- (1) 大きなクラックがある場合は、 20 mA/m^2 以上の防食電流密度が必要であった。
- (2) クラックがある場合でも電気防食は有効であった。

3. 1. 5 マクロセルがある場合の電気防食試験

1) 概 要

コンクリート構造物の鋼材にマクロセルが存在し、腐食している鋼材の電気防食の効果を確認することを目的とした。

2) 試験方法

(1) 供試体：供試体番号 V

形状 $100 \times 100 \times 500 \text{ mm}$ のコンクリート供試体（図- 3. 1. 16）に 1 本の鋼管（OST- $2 \phi 15.0 \text{ mm}$ ）を埋込み防食対象とした。供試体の鋼管露出面は、その面からの塩水の浸透などの影響を除くため、エポキシ樹脂を塗布した。また、鋼管は通電用リード線をはんだにて取り付けた。

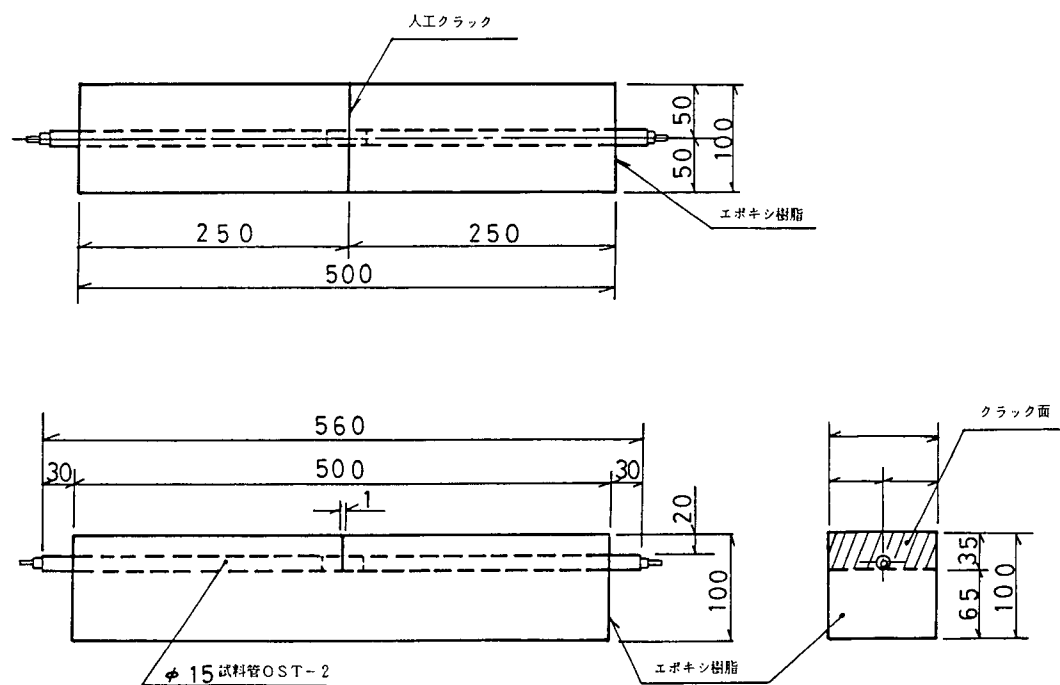


図-3.1.16 供試体 (供試体番号 V)

(2) 陽極材料

$\phi 1.5\text{ mm}$ の Pt-Ti 線を用いて通電した。

(3) 暴露条件

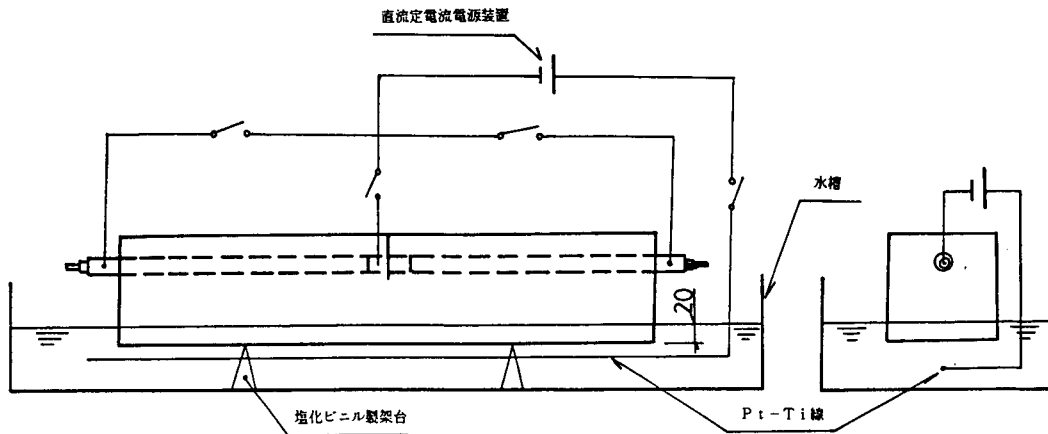
3%食塩水に底部から2cm浸漬し、室内に放置した。

(4) 電流密度

鉄筋供試面積当たり，0，5，10，25，50mA/m²の5種類とした。

(5) 通電方法

直流定電流電源装置を用いて、図－ 3. 1.17に示す方法で通電した。



図－ 3. 1.17 通電方法（供試体番号 V）

(6) 測定内容

- ① 鋼管自然電位：通電直前の鋼管自然電位を測定した。
- ② マクロセル電流：各鋼管へ流入する電流をゼロ抵抗電流計を用いて測定した。
- ③ 鋼管の Instant Off 電位：通電OFF直後の電位を測定し、Instant Off 電位とした。
- ④ 分極量：鋼管の Instant Off 電位とその4時間後の電位を測定し、その差を分極量とした。
- ⑤ 鋼管外観観察：試験終了後、供試体を割裂し、鋼管の外観観察を行った。
- ⑥ 重量減測定：試験終了後、供試体を割裂し、中央部の鋼管の重量を測定した。

(7) 通電期間：約 7 カ月

3) 試験結果および考察

測定結果を表－ 3. 1. 9 に示す。

(1) 腐食電流密度

アノード部（スリットを入れた中央部の鋼管）の面積は 18.8 cm^2 とした。電気防食を行わない場合（ 0 mA/m^2 ）は、アノード部から腐食電流が流出し、コンクリートのスリット部で局部的に腐食した。その腐食深さは約 1 mm であった。腐食減量から求めた平均の腐食電流密度は 16 mA/m^2 であった。

(2) Instant Off 電位

電気防食を行った場合、鋼管がほぼ均一に分極し、いずれの供試体のアノード部にも防食電流が流入した。アノード部の防食電流密度が増加するに従って、Instant Off 電位は卑化した。

(3) 分極量

通電OFF 4時間後における分極量いずれも 260 mV 以上あった。

(4) 防食率

電気防食による防食率(P)を次の式によって、計算すると、

$$P = (W_c - W_p) \div W_c \times 100$$

ここで、 P ：防食率(%)

W_c ：非防食試料の重量減(mg)

W_p ：防食試料の重量減(mg)

10mA/ m^2 の場合を除いて、いずれも94%であり、良好な防食効果が認められた。従って、電気防食がマクロセル腐食に対して有効ことが確認された。なお、電流密度が10mA/ m^2 の試料が90mg腐食したのは、鋼管の接続部の隙間において腐食が生じたためである。また、電気防食を行った試料が10mg腐食した理由は、クラック幅が2mmと広いこと十分な防食電流がスリット部に流入しなかったことおよび供試体を打設してから通電を開始するまでの時間が約5カ月間あったことが考えられる。

4) まとめ

電気防食はマクロセルがある場合も有効であった。

表- 3.1.9 マクロセルがある場合の電気防食の効果

全鋼管 当たりの 電流密度 (mA/ m^2)	アノード部 の電流密度 (mA/ m^2) at 7.8℃	鋼管の平均 Instant Off 電位 (mV SCE)	通電OFF後 4時間後の 鋼管の平均電位 (mV SCE)	分極量 (4時間後) (mV)	アノード部 の重量減 (mg)	平均腐食 電流密度 ²⁾ (mA/ m^2)
0	+1.7 ¹⁾	-306	-	-	160	16
5	-3.9	-580	-267	313	10	1
10	-12.7	-591	-263	328	90 ³⁾	(9)
25	-13.3	-733	-307	426	10	1
50	-35.1	-826	-267	559	10	1

注 1) +：流出 -：流入

注 2) アノード部の面積=18.8cm²
平均電流密度(mA/ m^2)=重量減(mg)×0.1

注 3) 鋼管の接続部(端部)のみに腐食が発生した。

3.1.6 陽極材料の検討試験

1) 概要

コンクリート中の鋼材の電気防食をおこなう場合の陽極材料の性能、耐久性および施工性について知見を得ることを目的とした。

2) 試験方法

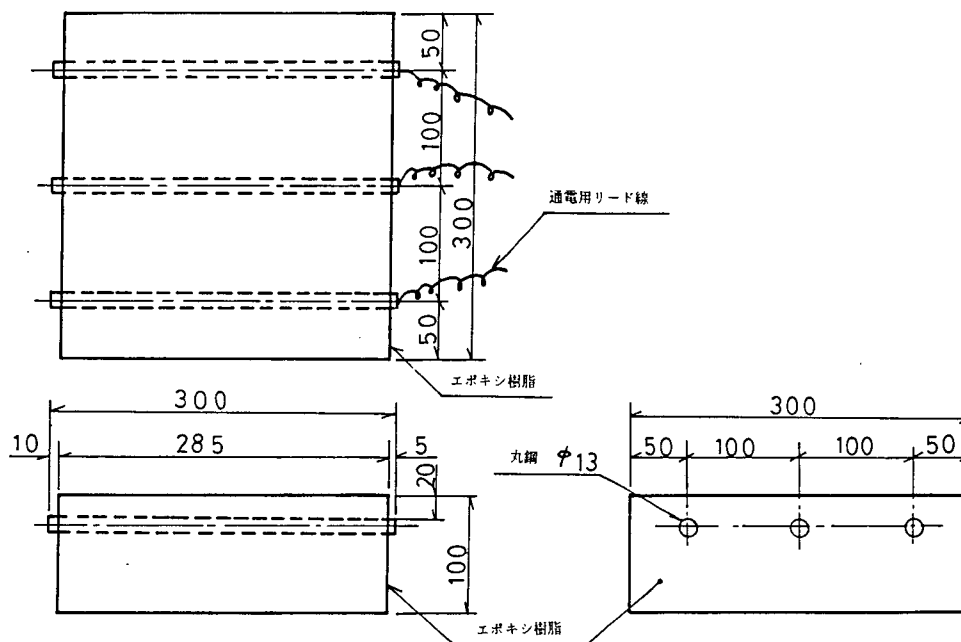
(1) 供試体：供試体番号 VI (表- 3.1.1)

形状285×300×100mmのコンクリート供試体(図-3.1.18)に3本の鉄筋(JIS G 3112 SR 24

φ13.0mm)を埋込み防食対象とした。供試体の鉄筋露出面は、その面からの塩水の浸透などの影響を除くため、エポキシ樹脂を塗布した。また、各鉄筋は通電用リード線をはんだにて取り付けた。

(2) 陽極材料

表－3.1.10に示す7種類の陽極材料について、性能、耐久性および施工性を調べた。図－3.1.19～図－3.1.25に陽極材料の取り付け概要を示す。施工手順を表－3.1.11に示す。



図－3.1.18 供試体（供試体番号Ⅳ）

表－3.1.10 陽極材料の種類と施工仕様

No.	陽 極 材 料 の 種 類		施 工 仕 様	供 試 体 数			
	一次電極	被覆材 (二次電極)		0 mA/m ²	10 mA/m ²	40 mA/m ²	合計
1	酸化物被覆 チタン網状電極	ポリマーセメントモルタル	網状電極 : 270 × 270mm ポリマーセメントモルタル : 厚さ10mm	2	4	4	10
2	Pt-Ti 線電極 ¹⁾	ポリマーセメントモルタル	線電極 : φ1.5 × 400mm × 4 本 ポリマーセメントモルタル : 厚さ10mm	2	4	4	10
3	樹脂線電極	ポリマーセメントモルタル	線電極 : φ7.87 × 400mm × 4 本 ポリマーセメントモルタル : 厚さ15mm	2	4	4	10
4	Pt-Ti 線電極 ¹⁾	導電モルタル ²⁾	線電極 : φ1.5 × 400mm × 2 本 導電モルタル : 厚さ10mm	2	4	4	10
5	Pt-Ti 線電極 ¹⁾	導電性塗料Ⅰ ²⁾	線電極 : φ1.5 × 400mm × 1 本 導電性塗料Ⅰ : カーボン系	2	4	4	10
6	Pt-Ti 線電極 ¹⁾	導電性塗料Ⅱ ²⁾	線電極 : φ1.5 × 400mm × 1 本 導電性塗料Ⅱ : ニッケル系	2	4	4	10
7	亜鉛メタリコン	—	平均膜厚 : 200 μ	2	4	4	10

注1) Pt-Ti : 白金めっきチタン

注2) : 二次電極として機能

(3) 暴露条件

各供試体の半数（各5体）は自然暴露とし、残りの半数は3%食塩水を1日1回約1分間散布した。

(4) 電流密度

鉄筋供試面積当たり、0, 10, 40mA/m²の3種類とした。この電流密度はコンクリート面積に対してであり、鉄筋の表面積当たりに換算するとそれぞれ、0, 24.5, 98.0mA/m²に相当する。

(5) 通電方法

直流定電流電源装置を用いて、図-3.1.26に示す方法で通電した。

表-3.1.11 施 工 手 順

種類	前 処 理	一次電極の設置	被 覆 材 の 施 工	上 塗 り 施 工	硬化時間
1	コンクリート表面をディスクサンダーで研練し、レイタンスを除去する。	ホットメルトガンでコンクリート表面に固定。	こて塗り 厚さ 10mm 可使時間 60分	—————	2時間
2	同 上	被覆材用の型枠を利用して固定。	同 上 厚さ 10mm	—————	同 上
3	同 上	同 上	同 上 厚さ 15mm	—————	同 上
4	同 上	同 上	こて塗り 厚さ 10mm 可使時間 60分	—————	4時間
5	コンクリート表面をサンドペーパーで軽く研練し、レイタンスを除去する。	コンクリート表面に巾3mm, 深さ3mmのスリットを入れホットメルトガンで固定。	はけ塗り（2回塗り） 1回目：ウェット膜厚50~75μ 塗り重ね時間：3時間 2回目：ウェット膜厚50~75μ 塗り重ね時間：24時間	はけ塗り（2回塗り） 1回目：ウェット膜厚75~100 μ 塗り重ね時間：3時間 2回目：ウェット膜厚75~100 μ	3時間
6	コンクリート表面をサンドペーパーで軽く研練し、レイタンスを除去する。	コンクリート表面に巾3mm, 深さ3mmのスリットを入れホットメルトガンで固定。	はけ塗り（2回塗り） 1回目：ウェット膜厚50~75μ 塗り重ね時間：3時間 2回目：ウェット膜厚50~75μ 塗り重ね時間：24時間	はけ塗り（2回塗り） 1回目：ウェット膜厚75~100 μ 塗り重ね時間：1時間 2回目：ウェット膜厚75~100 μ	45分
7	同 上	コンクリートの一端に巾3cm, 長さ5cm 深さ5mm はつりエポキシ樹脂で銅板を固定	工場施工にて亜鉛を吹きつけ 平均膜厚：200 μ	—————	—————

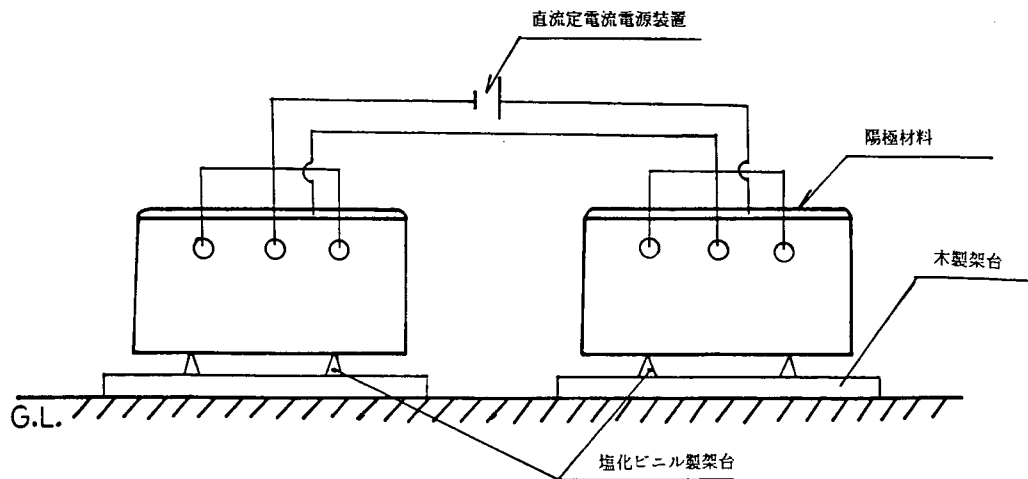


図- 3. 1.26 通電方法 (供試体番号 VI)

(6) 測定内容

- ① 施工性：施工者が施工の難易度を評価した。
- ② 陽極電位：通電前に一回，その後定期的に測定した。
- ③ 浴電圧：陽極材料と鉄筋間の電位差を電圧計を用いて測定した。
- ④ 鉄筋の Instant Off 電位：通電 OFF 直後の電位を測定し，Instant Off 電位とした。
- ⑤ 付着力：被覆材（ポリマーセメントモルタル，導電モルタル，導電塗料Ⅰ，導電塗料Ⅱ）4 種類については初期付着力を調べるため図- 3. 1.18 に示す供試体番号 VI の供試体を用いて施工し付着力を測定した。また，試験終了後に，各陽極材料について，0，10 および 40 mA/m^2 の各 1 個について付着力を測定した。ポリマーセメントモルタルおよび導電モルタルについては， $\phi 100 \text{ mm}$ の鋼製スペシミンと建研式接着力試験器を用いて測定した。導電塗料Ⅰ，Ⅱ および亜鉛メタリコンについては， $\phi 20 \text{ mm}$ のアルミニウムスペシミンとアドヒージョンテスターを用いて測定した。
- ⑥ 陽極材料の外観観察：試験終了後，陽極材料の外観観察を行った。
- (7) 通電期間：陽極材料 No. 7 の亜鉛メタリコンは約 3 カ月で，他の陽極材料は，約 6 カ月。

3) 試験結果および考察

(1) 施工性

各方式とも一次電極の取り付けに関しては，スムーズに短時間で施工できた。亜鉛メタリコンについては，米国での実績から，通電点に銅板を使用した，この銅板のコンクリート面への取り付けが難しかった。

被覆材の施工は，防食対象面積が少量であるため，亜鉛メタリコンを除いて，全て手作業で行った。この中で，導電モルタルはカーボン繊維が入っているため，水を加えて練る際，だんご状になり練り方が難しい。また，大面積を施工する場合の吹きつけ工法には改良の必要がある。

大面積を施工する場合には，今回の供試材料のなかでは，導電性塗料方式が最も有効であると思われる。

(2) 陽極電位, 浴電圧, Instant Off 電位

陽極電位, 浴電圧, Instant Off 電位の測定結果を表-3.1.12~表-3.1.18に示す。陽極電位から陰極電位を引いたものが浴電圧である。陽極性能を見るために陽極の Instant Off 電位を比較した。

電流密度が増すと陽極の分極が進み, Instant Off 電位も貴化している。また, 塩水散布と自然暴露の供試体を比較すると, 塩水散布の方が Instant Off 電位は卑な値を示す。これは塩水が電解に必要な水分の補給に役立っているものと思われる。Instant Off 電位の経時変化で最も陽分極が進みにくいものはニッケル系導電性塗料で, 以下カーボン系, 導電性モルタル, 導電性樹脂, 酸化物被覆電極の順で, 亜鉛メタリコンが最も貴化した。なお, 耐久性のある陽極材料の中で, 陽極電位は電力効率と電源の調整からみて, 陽分極が少ない電極が望ましい。

(3) 付着力

付着力の測定結果を表-3.1.19~表-3.1.26に示す。

通常, 電流が多く流れれば, それだけ電極界面での化学反応も進み, その結果, 発生するガスの量も多くなる。発生したガスは被覆材とコンクリートの間に溜まり, 付着力を減少させる結果となる。

本試験の場合, 電流密度と付着力の関係で明確な差が見出せなかった。導電性モルタルについては, 自然暴露条件においても付着力が劣ることは明らかであり, 施工方法および材料の再検討が必要であると思われる。

(4) 陽極材料の外観観察結果

陽極材料の外観観察結果を表-3.1.27~表-3.1.33に示す。付着力不良箇所の検出は打検によった。導電性樹脂電極+ポリマーセメントモルタル方式にクラックと付着力不良が多く発生していた。これは電極径が8mmと太く, 被覆材の厚みが10mmで, かぶりが薄いためクラックが発生したと思われる。

導電性モルタル+白金メッキチタン電極方式は付着力不良が多くみとめられた。これは施工の難しさと不慣れた施工者によるものと思われる。

導電性塗料方式は上塗り塗膜のフクレが多く発生していた。これは上塗り塗料が通気性に乏しく, ガスが抜けにくいためと思われる。上塗り塗料の材質の再検討が必要である。

亜鉛メタリコン方式は暴露側からの自己腐食が多くみられ, 特に塩水散布の供試体ではその量も多かった。これを防止するため, 耐候性の上塗り塗料が必要であると思われる。

4) まとめ

陽極材料の検討試験の結果をまとめたものを, 表-3.1.34に示す。

- (1) 仕上がり外観は特に問題になるものはなく良好であるが, No.4とNo.7の施工性が劣る。
- (2) コンクリートとの付着性は, 試験前では特に問題になるものはなかった。試験後ではNo.4の場合に低下した。

また、通電後の被覆材の耐久性は、他に比べてNo.4, No.6, No.7が劣る。

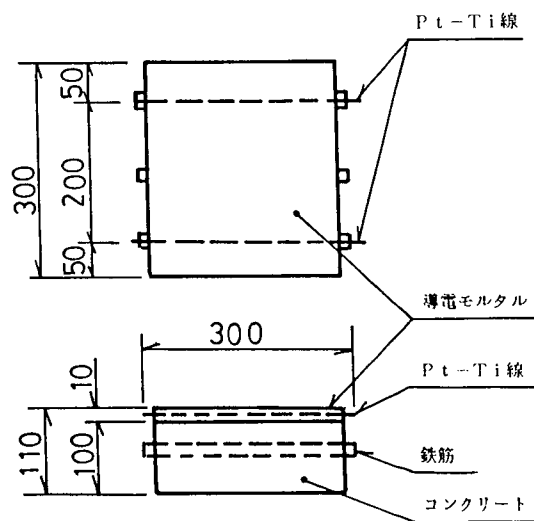
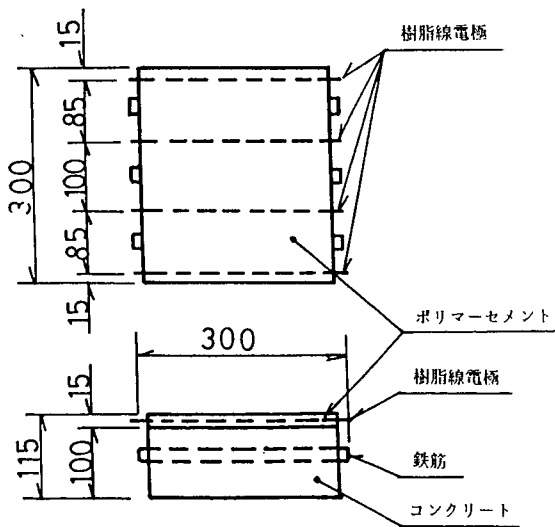
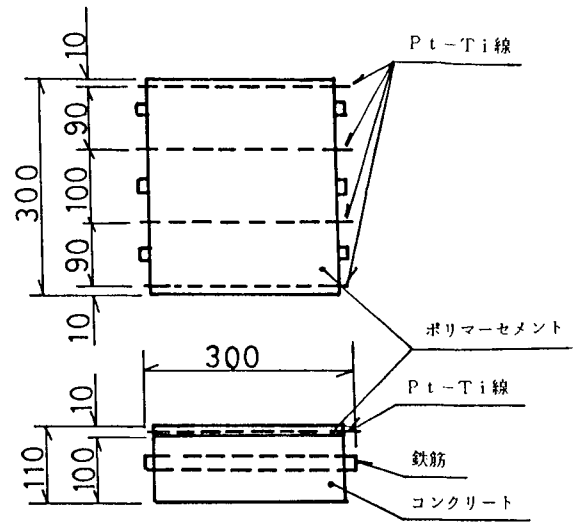
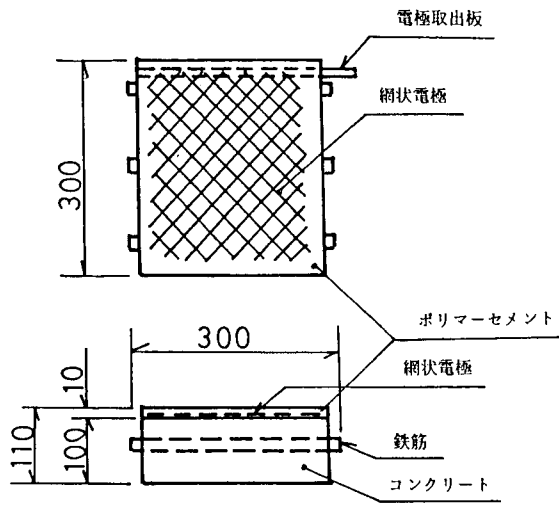
- (3) 陽極電位の変化からみた陽極性能は、No.4, No.5, No.6が良好であり、No.1, No.2, No.3が普通である。No.7は以上の陽極材料に比べると性能が劣る。被覆材に導電性材料を用いたものがポリマーセメントモルタルより良い結果を得ている。
- (4) 施工性および材料費を考慮した経済性は、被覆材として塗装系を用いているものの方がセメントモルタル系に比べて良かった。

表- 3.1.34 陽極材料の評価¹⁾

陽極 材料 No.	通 電 前			通 電 後 (電 気 防 食 6 ヶ 月 後)			経済性
	施工性	外 観 (仕上り)	コンクリートとの付着性	陽極電位	コンクリートとの付着性	外観観察 (被覆材の耐久性)	
1	B	A	A	B	A	A	B
2	B	A	A	B	A	B	B
3	B	A	A	B	A	B	B
4	C	B	A	A	C	C	C
5	A	A	A	A	B	B	A
6	A	A	A	A	B	C	A
7 ²⁾	C	A	B	C	B	C	B

注1) 評価基準(材料間の相対評価) A:良い、B:普通、C:悪い

注2) 陽極材料No.7については電気防食3ヶ月後で評価



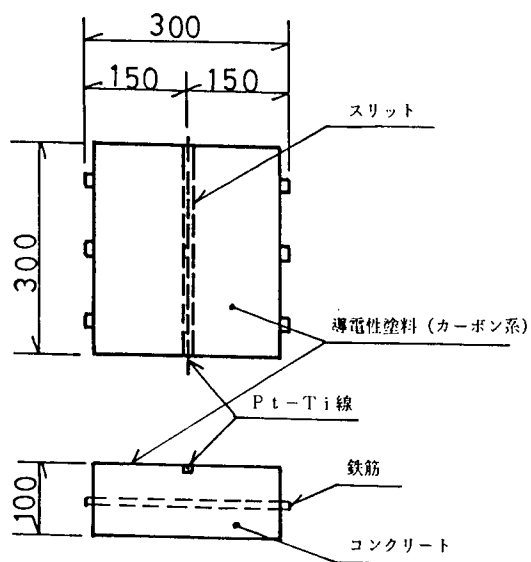


図- 3. 1.23 Pt-Ti 線状電極
+ 導電塗料 I (カーボン系)

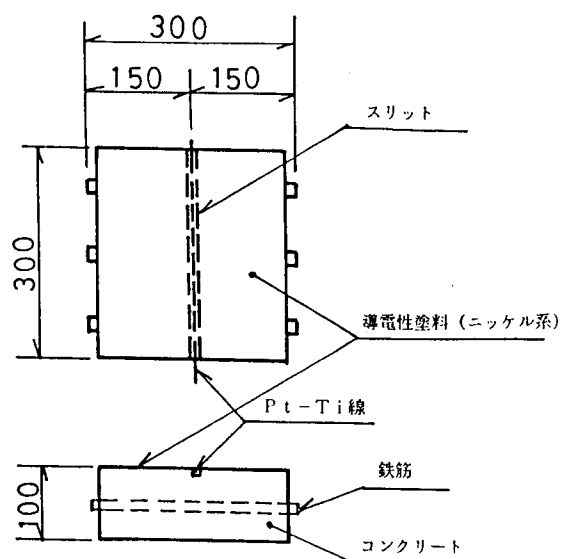


図- 3. 1.24 Pt-Ti 線状電極
+ 導電塗料 II (ニッケル系)

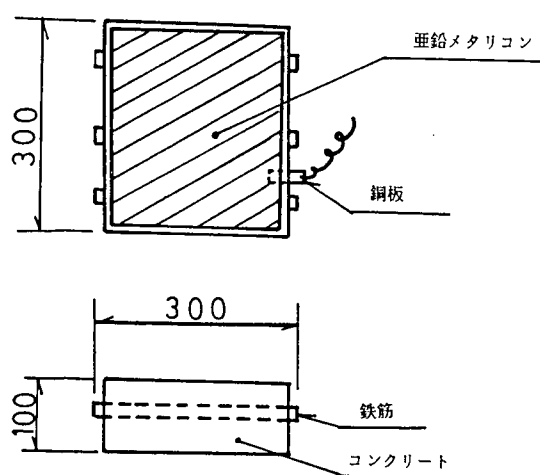


図- 3. 1.25 亜鉛メタリコン電極

表- 3. 1.12 陽極材料の電位および浴電圧の測定結果
(網状電極+ポリマーセメントモルタル)

暴露 条件	電流密度 mA/m ²	自然電位 mV SCE	O N 直 後			1 ケ 月 後			2 ケ 月 後			3 ケ 月 後			6 ケ 月 後		
			浴 電圧 mV	ON電位 mV SCE	IO電位 mV SCE	浴 電圧 mV	ON電位 mV SCE	IO電位 mV SCE	浴 電圧 mV	ON電位 mV SCE	IO電位 mV SCE	浴 電圧 mV	ON電位 mV SCE	IO電位 mV SCE	浴 電圧 mV	ON電位 mV SCE	IO電位 mV SCE
塩水 散布	0	-47		-103			-119			-183			-259			-175	
	10	-38	+1256	+687	+599	+1078	+634	+517	+1365	+872	+776	+1297	+995	+899	+1621	+1082	+970
	10	-38	+1278	+706	+601	+1079	+624	+517	+1335	+818	+716	+1406	+898	+779	+1463	+834	+506
	40	-38	+1738	+943	+678	+1538	+868	+627	+2088	+1369	+1113	+2183	+1269	+1043	+2513	+1551	+1327
自然 暴露	40	-42	+1772	+953	+691	+1638	+869	+633	+2132	+1303	+1076	+1802	+1057	+1200	+2424	+1509	+1103
	0	-52		-79			-88			-68			-90			-37	
	10	-34	+1212	+720	+626	+1050	+664	+576	+1218	+825	+734	+1263	+883	+771	+1793	+1284	+1119
	10	-33	+1192	+709	+621	+1058	+692	+590	+1278	+842	+709	+1294	+856	+704	+1476	+931	+792
暴露	40	-29	+1552	+846	+650	+1393	+811	+615	+1919	+1290	+1073	+1910	+1288	+1239	+2406	+1624	+1215
	40	-29	+1546	+804	+629	+1379	+748	+577	+1890	+1230	+981	+1950	+1285	+1252	+2527	+1658	+1200

表- 3. 1.13 陽極材料の電位および浴電圧の測定結果
(Pt-Ti 線状電極+ポリマーセメントモルタル)

暴露 条件	電流密度 mA/m ²	自然電位 mV SCE	O N 直 後			1 ケ 月 後			2 ケ 月 後			3 ケ 月 後			6 ケ 月 後		
			浴 電圧 mV	ON電位 mV SCE	IO電位 mV SCE	浴 電圧 mV	ON電位 mV SCE	IO電位 mV SCE	浴 電圧 mV	ON電位 mV SCE	IO電位 mV SCE	浴 電圧 mV	ON電位 mV SCE	IO電位 mV SCE	浴 電圧 mV	ON電位 mV SCE	IO電位 mV SCE
塩水 散布	0	-36		-46			-111			-104			-280			-209	
	10	-54	+1459	+919	+706	+1505	+1048	+828	+1905	+1406	+1219	+1745	+1263	+1124	+2069	+1486	+1121
	10	-58	+1519	+950	+748	+1502	+1047	+838	+1910	+1411	+1207	+1822	+1341	+1305	+1987	+1380	+1164
	40	-50	+2317	+1512	+1041	+2304	+1629	+1121	+2479	+1718	+1243	+2285	+1540	+1138	+2961	+1994	+1182
自然 暴露	40	-64	+2339	+1570	+1070	+2364	+1707	+1139	+2446	+1718	+1219	+2295	+1577	+1116	+2996	+2017	+1127
	0	-23		-36			-68			-91			-78			+18	
	10	-38	+1518	+1016	+791	+1544	+1162	+902	+2074	+1681	+1317	+2042	+1671	+1332	+2582	+2103	+1447
	10	-35	+1527	+966	+741	+1630	+1198	+900	+2069	+1600	+1272	+1965	+1518	+1239	+2860	+1891	+1377
暴露	40	-34	+2466	+1689	+1138	+2745	+2155	+1324	+2856	+2210	+1377	+2545	+1911	+1297	+3563	+2625	+1456
	40	-32	+2304	+1602	+1078	+2728	+2213	+1304	+3148	+2577	+1386	+3111	+2568	+1372	+3798	+3000	+1531

表- 3. 1.14 陽極材料の電位および浴電圧の測定結果
(樹脂線状電極+ポリマーセメントモルタル)

暴露 条件	電流密度 mA/m ²	自然電位 mV SCE	O N 直 後			1 ケ 月 後			2 ケ 月 後			3 ケ 月 後			6 ケ 月 後		
			浴 電圧 mV	ON電位 mV SCE	IO電位 mV SCE	浴 電圧 mV	ON電位 mV SCE	IO電位 mV SCE	浴 電圧 mV	ON電位 mV SCE	IO電位 mV SCE	浴 電圧 mV	ON電位 mV SCE	IO電位 mV SCE	浴 電圧 mV	ON電位 mV SCE	IO電位 mV SCE
塩水 散布	0	-110		-129			-199			-233			-203			-105	
	10	-145	+1865	+1315	+764	+2597	+2159	+959	+1573	+1031	+943	+1692	+1146	+938	+1667	+1019	+948
	10	-123	+1698	+1194	+787	+1348	+919	+587	+1458	+961	+895	+1390	+928	+877	+1550	+991	+925
	40	-95	+3034	+2350	+1078	+2844	+2226	+980	+1939	+1235	+1018	+1812	+1132	+981	+2280	+1361	+1074
	40	-101	+2292	+1564	+741	+2710	+2102	+1067	+1880	+1183	+981	+1836	+1125	+965	+2294	+1461	+1110
自然 暴露	0	-113		-127			-200			-126			-191			-126	
	10	-116	+2029	+1481	+816	+3054	+2631	+1133	+2178	+1700	+1160	+1980	+1513	+1476	+2092	+1522	+1176
	10	-119	+1851	+1321	+762	+2898	+2509	+1089	+2039	+1634	+1084	+1872	+1464	+1443	+2154	+1642	+1214
	40	-108	+2150	+1452	+790	+3461	+2913	+1092	+2704	+2078	+1299	+2542	+1900	+1155	+3074	+2264	+1335
	40	-123	+2199	+1486	+746	+3439	+2877	+1025	+2617	+1961	+1239	+2427	+1738	+1216	+2898	+2119	+1272

表- 3. 1.15 陽極材料の電位および浴電圧の測定結果
(Pt-Ti 線状電極+導電モルタル)

暴露 条件	電流密度 mA/m ²	自然電位 mV SCE	O N 直 後			1 ケ 月 後			2 ケ 月 後			3 ケ 月 後			6 ケ 月 後		
			浴 電圧 mV	ON電位 mV SCE	IO電位 mV SCE	浴 電圧 mV	ON電位 mV SCE	IO電位 mV SCE	浴 電圧 mV	ON電位 mV SCE	IO電位 mV SCE	浴 電圧 mV	ON電位 mV SCE	IO電位 mV SCE	浴 電圧 mV	ON電位 mV SCE	IO電位 mV SCE
塩水 散布	0	+17		-61			+3			+53			-23			+24	
	10	+44	+1109	+591	+556	+753	+335	+297	+766	+261	+233	+736	+268	+243	+1015	+443	+381
	10	+55	+1100	+587	+553	+750	+327	+297	+761	+262	+234	+737	+271	+241	+1041	+500	+412
	40	+25	+1443	+749	+652	+938	+304	+247	+1809	+1022	+806	+1710	+1315	+1117	+2383	+1786	+1210
	40	+51	+1423	+725	+627	+1053	+447	+376	+1129	+431	+355	+1178	+593	+439	+2465	+1582	+1119
自然 暴露	0	+7		-39			-25			+38			-34			+49	
	10	-26	+1099	+603	+565	+1124	+733	+527	+1186	+729	+479	+988	+527	+319	+1085	+525	+435
	10	-16	+1054	+590	+557	+743	+361	+326	+819	+419	+346	+735	+312	+255	+1030	+527	+458
	40	+20	+1445	+746	+640	+1077	+528	+436	+1712	+1039	+775	+2434	+1692	+1193	+3249	+2341	+1513
	40	+9	+1463	+742	+637	+1156	+568	+462	+2532	+1811	+1084	+3297	+2461	+1451	+3387	+2428	+1443

表- 3. 1.16 陽極材料の電位および浴電圧の測定結果
(Pt-Ti 線状電極+導電塗料Ⅰ(カーボン系))

暴露 条件	電流密度 mA/m ²	自然電位 mV SCE	O N 直 後			1 ケ 月 後			2 ケ 月 後			3 ケ 月 後			6 ケ 月 後		
			浴 電圧 mV	ON電位 mV SCE	IO電位 mV SCE	浴 電圧 mV	ON電位 mV SCE	IO電位 mV SCE	浴 電圧 mV	ON電位 mV SCE	IO電位 mV SCE	浴 電圧 mV	ON電位 mV SCE	IO電位 mV SCE	浴 電圧 mV	ON電位 mV SCE	IO電位 mV SCE
塩水	0	-82		-118			-138			-168			-115			-136	
	10	-47	+1272	+779	+685	+895	+479	+437	+843	+408	+371	+854	+403	+362	+566	+310	+508
	10	-13	+1274	+760	+679	+872	+434	+394	+857	+354	+327	+862	+353	+317	+1130	+565	+464
	40	-40	+1632	+855	+673	+1369	+716	+613	+1573	+727	+622	+1887	+791	+652	+2278	+1265	+1235
散布	40	-28	+1680	+912	+726	+1339	+687	+592	+1403	+625	+525	+1684	+663	+538	+2069	+1243	+966
自然 暴露	0	-62		-99			-103			-37			-63			-33	
	10	-62	+1245	+755	+661	+869	+487	+447	+803	+389	+359	+888	+517	+487	+1145	+679	+615
	10	-55	+1185	+713	+632	+776	+385	+353	+793	+423	+379	+877	+522	+489	+1129	+677	+601
	40	-82	+1606	+960	+756	+1251	+759	+647	+1879	+1307	+1068	+1884	+1350	+1030	+2916	+2137	+1108
	40	-71	+1732	+977	+715	+1488	+901	+740	+2329	+1730	+1138	+2235	+1646	+1035	+3826	+3000	+1147

表- 3. 1.17 陽極材料の電位および浴電圧の測定結果
(Pt-Ti 線状電極+導電塗料Ⅱ(ニッケル系))

暴露 条件	電流密度 mA/m ²	自然電位 mV SCE	O N 直 後			1 ケ 月 後			2 ケ 月 後			3 ケ 月 後			6 ケ 月 後		
			浴 電圧 mV	ON電位 mV SCE	IO電位 mV SCE	浴 電圧 mV	ON電位 mV SCE	IO電位 mV SCE	浴 電圧 mV	ON電位 mV SCE	IO電位 mV SCE	浴 電圧 mV	ON電位 mV SCE	IO電位 mV SCE	浴 電圧 mV	ON電位 mV SCE	IO電位 mV SCE
塩水	0	-96		-142			-144			-167			-187			-163	
	10	-99	+1023	+466	+422	+784	+333	+300	+848	+354	+326	+792	+334	+308	+1146	+516	+342
	10	-89	+920	+385	+353	+736	+312	+282	+815	+321	+295	+774	+293	+270	+841	+281	+285
	40	-95	+1236	+548	+450	+1020	+468	+397	+1544	+912	+728	+1148	+574	+407	+2560	+1706	+564
散布	40	-104	+1222	+557	+441	+1016	+501	+426	+1398	+808	+678	+1432	+858	+731	+2563	+1756	+595
自然 暴露	0	-109		-130			-148			-59			-126			-74	
	10	-114	+898	+419	+386	+760	+408	+373	+830	+505	+475	+843	+525	+500	+1022	+586	+535
	10	-115	+883	+404	+372	+759	+399	+370	+871	+554	+524	+918	+587	+560	+1001	+565	+515
	40	-103	+1172	+509	+419	+1006	+485	+420	+1131	+631	+554	+1160	+709	+620	+2332	+1601	+746
	40	-102	+1170	+515	+423	+997	+507	+429	+1386	+933	+819	+1333	+897	+766	+1944	+1218	+693

表－ 3. 1.18 陽極材料の電位および浴電圧の測定結果
(亜鉛メタリコン電極)

暴露 条件	電流密度 mA/m ²	自然電位 mV SCE	O N 直 後			3 ケ 月 後		
			浴 電圧 mV	ON電位 mV SCE	IO電位 mV SCE	浴 電圧 mV	ON電位 mV SCE	IO電位 mV SCE
塩水	0	-368		-552			-652	
	10	-389	-191	-577	-597	-49	-583	-604
	10	-380	-40	-518	-538	+553	-29	-282
	40	-279	+248	-221	-294	+403	-462	-557
散布	40	-255	+183	-397	-447	+345	-336	-435
自然	0	-285		-460			-500	
	10	-268	+80	-373	-395	+1458	+934	+871
	10	-265	+58	-350	-374	+1376	+909	+858
	40	-475	+744	+168	+54	+2519	+1734	+1392
暴露	40	-273	+660	+114	+12	+2661	+1942	+1483

表－ 3. 1.19 各陽極材料の通電前の付着力

被 覆 材	測定 位置	付着強度 (Kgf/cm ²)	平均値 (Kgf/cm ²)	破壊面のパーセンテージ (%)		
				コンクリート	被覆材	層間
1) ポリマーセメント モルタル	1	21.4	22.3	10	10	80
	2	18.5		10	0	90
	3	21.7		50	0	50
	4	27.4		10	10	80
1) 導電性モルタル	1	15.9	18.1	0	0	100
	2	17.8		0	0	100
	3	19.7		0	5	90
	4	18.9		0	0	100
2) カーボン系 導電性塗料	1	29	27.8	90	5	0
	2	52		70	30	0
	3	19		100	0	0
	4	48		100	0	0
	5	30		95	5	0
	6	20		90	10	0
	7	17		100	0	0
	8	23		95	5	0
	9	20		95	5	0
	10	20		100	0	0
2) ニッケル系 導電性塗料	1	15	19.2	90	10	0
	2	17		100	0	0
	3	19		100	0	0
	4	21		80	20	0
	5	30		100	0	0
	6	17		50	50	0
	7	15		80	20	0
	8	22		90	10	0
	9	19		100	0	0
	10	17		100	0	0
2) 亜鉛 メタリコン	1	7	9.5	98	2	0
	2	12		95	5	0
	3	10		95	5	0
	4	8		99	1	0
	5	8		99	1	0
	6	9		95	5	0
	7	7		99	1	0
	8	8		95	5	0
	9	10		95	5	0
	10	8		99	1	0

注1) ポリマーセメントモルタル、導電性モルタルはφ100mm の鋼製スベシメンと建研式接着
力試験器を使用して測定した。

注2) 導電性塗料、亜鉛メタリコンはφ20mmのアルミニウムスベシメンとアドヒージョンテス
ターを用いて測定した。

表- 3. 1.20 通電後の付着力 (約6 カ月後)
(網状電極+ポリマーセメントモルタル)

暴露 条件	電流密度 (mA/m ²)	測定 位置	付着強度 (Kg _f /cm ²)	平均値 (Kg _f /cm ²)	破壊面のパーセンテージ (%)		
					コンクリート	被覆材	層間
塩水 散布	0	1	17.2	17.5	0	98	2
		2	17.8		0	10	90
		3	17.6		0	0	100
	10	1	12.7	15.8	0	7	93
		2	17.8		0	2	98
		3	16.8		0	100	0
	40	1	13.4	14.7	1	0	99
		2	15.3		2	0	98
		3	15.3		3	0	97
自然 暴露	0	1	15.0	16.3	10	0	90
		2	17.2		20	0	80
		3	16.6		2	0	98
	10	1	8.9	3.0	5	7	88
		2	0		0	3	97
		3	0		0	5	95
	40	1	16.6	15.1	0	20	80
		2	16.6		0	0	100
		3	12.1		3	5	92

表- 3. 1.21 通電後の付着力 (約6 カ月後)
(Pt-Ti 線状電極+ポリマーセメントモルタル)

暴露 条件	電流密度 (mA/m ²)	測定 位置	付着強度 (Kg _f /cm ²)	平均値 (Kg _f /cm ²)	破壊面のパーセンテージ (%)		
					コンクリート	被覆材	層間
塩水 散布	0	1	7.6	7.4	0	3	97
		2	4.5		0	3	97
		3	10.2		3	3	94
	10	1	12.1	11.7	25	10	65
		2	7.6		1	1	98
		3	15.3		2	60	38
	40	1	20.4	17.1	0	75	25
		2	14.6		0	15	85
		3	16.6		0	10	90
自然 暴露	0	1	19.7	17.4	3	20	77
		2	15.9		2	10	88
		3	16.6		3	2	95
	10	1	15.9	15.4	3	0	97
		2	16.3		10	3	87
		3	14.0		5	3	92
	40	1	0	11.3	15	5	80
		2	18.5		10	7	83
		3	15.5		10	7	83

表- 3. 1.22 通電後の付着力 (約6 カ月後)
(樹脂線状電極+ポリマーセメントモルタル)

暴露 条件	電流密度 (mA/m ²)	測定 位置	付着強度 (Kg _f /cm ²)	平均値 (Kg _f /cm ²)	破壊面のパーセンテージ (%)		
					コンクリート	被覆材	層間
塩水 散布	0	1	13.4	13.7	1	3	96
		2	18.5		3	3	94
		3	9.2		1	1	98
	10	1	16.6	15.7	0	50	50
		2	15.3		0	98	2
		3	15.3		1	1	98
	40	1	19.1	12.4	0	2	98
		2	18.1		10	10	80
		3	0		0	1	99
自然 暴露	0	1	16.6	20.3	3	1	96
		2	13.6		7	0	93
		3	30.6		0	0	100
	10	1	16.6	16.8	2	1	97
		2	17.2		2	1	97
		3	16.6		3	1	96
	40	1	12.5	11.2	3	1	96
		2	9.6		0	3	97
		3	11.5		3	3	94

表- 3. 1.23 通電後の付着力 (約6 カ月後)
(Pt-Ti 線状電極+導電モルタル)

暴露 条件	電流密度 (mA/m ²)	測定 位置	付着強度 (Kg _f /cm ²)	平均値 (Kg _f /cm ²)	破壊面のパーセンテージ (%)		
					コンクリート	被覆材	層間
塩水 散布	0	1	12.0	12.8	0	0	100
		2	14.3		20	0	80
		3	12.0		0	2	98
	10	1	0	4.2	0	0	100
		2	0		1	1	98
		3	12.7		0	2	98
	40	1	7.6	9.5	2	0	98
		2	9.3		2	0	96
		3	11.7		0	2	98
自然 暴露	0	1	0	0	0	2	98
		2	0		0	0	100
		3	0		0	2	98
	10	1	0	0	0	0	100
		2	0		0	0	100
		3	0		0	0	100
	40	1	10.4	3.5	25	0	75
		2	0		0	1	99
		3	0		0	0	100

表- 3. 1.24 通電後の付着力(約6カ月後)
(Pt-Ti 線状電極+導電塗
料Ⅰ(カーボン系))

暴露 条件	電流密度 (mA/m ²)	測定 位置	付着強度 (Kgf/cm ²)	平均値 (Kgf/cm ²)	破壊面のパーセンテージ (%)		
					コンクリート	被覆材	層間
塩水	0	1	10	15.2	95	5	5
		2	12		5	80	15
		3	17		5	95	0
		4	19		70	70	0
		5	18		10	10	10
散布	10	1	19	7.4	40	60	0
		2	9		85	10	5
		3	4		2	96	2
		4	3		5	95	0
		5	2		100	100	0
自然	40	1	1.5	1.0	0	97	3
		2	0.5		0	97	3
		3	0.5		2	97	1
		4	1.5		2	93	5
		5	1		2	98	0
自然	0	1	20	12.0	50	50	0
		2	10		90	10	0
		3	10.5		50	50	0
		4	9.5		10	50	40
		5	10		10	60	30
暴露	10	1	18	12.0	100	0	0
		2	12		98	2	0
		3	18		60	10	30
		4	6		15	85	0
		5	6		1	99	0
暴露	40	1	6	13.0	30	70	0
		2	10		2	98	0
		3	20		25	75	0
		4	15		80	20	0
		5	14		2	98	0

表- 3. 1.25 通電後の付着力(約6カ月後)
(Pt-Ti 線状電極+導電塗
料Ⅱ(ニッケル系))

暴露 条件	電流密度 (mA/m ²)	測定 位置	付着強度 (Kgf/cm ²)	平均値 (Kgf/cm ²)	破壊面のパーセンテージ (%)		
					コンクリート	被覆材	層間
塩水	0	1	19	16.4	35	65	0
		2	21		10	50	40
		3	20		90	10	0
		4	9		93	7	0
		5	13		60	25	15
散布	10	1	11.5	10.5	98	2	0
		2	15		85	3	12
		3	11		70	3	27
		4	6.5		0	45	55
		5	8.5		80	0	20
自然	40	1	8	10.3	40	0	60
		2	4		40	0	60
		3	9.5		95	0	5
		4	11		95	0	5
		5	19		50	10	50
自然	0	1	23	15.6	90	10	0
		2	23		60	40	0
		3	15		100	0	0
		4	10		95	5	0
		5	12		100	0	0
暴露	10	1	10	11.1	80	20	0
		2	10		100	0	0
		3	10.5		10	0	90
		4	15		85	0	15
		5	10		85	0	15
暴露	40	1	11	10.8	99	0	1
		2	10		95	0	5
		3	11		100	0	0
		4	11		60	30	10
		5	11		100	0	0

表- 3. 1.26 通電後の付着力(約3カ月後)
(亜鉛メタリコン電極)

暴露 条件	電流密度 (mA/m ²)	測定 位置	付着強度 (Kgf/cm ²)	平均値 (Kgf/cm ²)	破壊面のパーセンテージ (%)		
					コンクリート	被覆材	層間
塩水	0	1	13	9.1	1	0	99
		2	9		5	0	95
		3	9		10	0	90
		4	9.5		5	3	92
		5	5		3	0	97
散布	10	1	5	5.0	5	1	94
		2	15		1	8	91
		3	4		3	2	95
		4	0.5		3	0	97
		5	0.5		7	2	91
自然	40	1	10	7.5	0	40	60
		2	6		0	40	60
		3	6		0	60	40
		4	8		0	65	35
		5	7.5		0	75	25
自然	0	1	3	2.0	3	0	97
		2	3		5	3	82
		3	2		15	2	83
		4	2		5	0	95
		5	2		2	0	98
暴露	10	1	5	4.8	2	0	98
		2	5		10	5	85
		3	6		5	0	95
		4	4		15	2	83
		5	4		10	2	88
暴露	40	1	9.5	8.1	7	0	93
		2	5		10	10	80
		3	8		5	1	94
		4	10		20	0	80
		5	8		10	0	90

表－ 3. 1. 27 通電後の陽極材料の
外観観察結果(約6 カ月後)
(網状電極+ポリマーセメ
ントモルタル)

暴露 条件	電流密度 (mA/m ²)	外 観 観 察 結 果
塩水	0	異常なし
	1 0	"
		"
散布	4 0	"
		"
自然	0	"
	1 0	"
		付着力不良50%
暴露	4 0	付着力不良 5%
		クラック発生多し

表－ 3. 1. 28 通電後の陽極材料の
外観観察結果(約6 カ月後)
(Pt-Ti 線状電極+ポリ
マーセメントモルタル)

暴露 条件	電流密度 (mA/m ²)	外 観 観 察 結 果
塩水	0	付着力不良12%
	1 0	異常なし
		"
散布	4 0	"
		付着力不良 2%
自然	0	異常なし
	1 0	"
		"
暴露	4 0	付着力不良 8%
		クラック発生少し

表－ 3. 1. 29 通電後の陽極材料の
外観観察結果(約6 カ月後)
(樹脂線状電極+ポリマー
セメントモルタル)

暴露 条件	電流密度 (mA/m ²)	外 観 観 察 結 果
塩水	0	付着力不良18%、線状電極に沿ってクラック
	1 0	— 、 "
		— 、 "
散布	4 0	— 、 "
		— 、 "
自然	0	付着力不良 3%、線状電極に沿ってクラック
	1 0	付着力不良 2%、 "
		— 、 "
暴露	4 0	付着力不良10%、 "
		付着力不良20%、 "

表－ 3. 1. 30 通電後の陽極材料の
外観観察結果(約6 カ月後)
(Pt-Ti 線状電極+導電
モルタル)

暴露 条件	電流密度 (mA/m ²)	外 観 観 察 結 果
塩水	0	異常なし
	1 0	付着力不良15%
		付着力不良10%
散布	4 0	異常なし
		"
自然	0	付着力不良25%、クラック発生少し
	1 0	付着力不良25%、 "
		付着力不良50%、 "
暴露	4 0	付着力不良35%、 "
		付着力不良65%、 "

表- 3. 1.31 通電後の陽極材料の
外観観察結果(約6カ月後)
(Pt-Ti 線状電極+導電
塗料 I (カーボン系))

暴露 条件	電流密度 (mA/m ²)	外 観 観 察 結 果
塩水	0	異常なし
	10	フクレ 0.2%
		異常なし
散布	40	フクレ 10 %
		フクレ 20 %
自然	0	異常なし
	10	"
		"
暴露	40	フクレ 3 %
		フクレ 1 %

表- 3. 1.32 通電後の陽極材料の
外観観察結果(約6カ月後)
(Pt-Ti 線状電極+導電
塗料 II (ニッケル系))

暴露 条件	電流密度 (mA/m ²)	外 観 観 察 結 果
塩水	0	異常なし
	10	フクレ 10 %、ニッケルの溶出
		フクレ 10 %、 "
散布	40	フクレ 60 %、 "
		フクレ 50 %、 "
自然	0	異常なし
	10	フクレ 10 %、ニッケルの溶出
		フクレ 10 %、 "
暴露	40	フクレ 70 %、 "
		フクレ 80 %、 "

表- 3. 1.33 通電後の陽極材料の
外観観察結果(約6カ月後)
(亜鉛メタリコン電極)

暴露 条件	電流密度 (mA/m ²)	外 観 観 察 結 果
塩水	0	亜鉛の溶出
	10	"
		"
散布	40	"
		"
自然	0	亜鉛の溶出
	10	"
		"
暴露	40	"
		"

3.2 大型プレストレストコンクリート供試体における電気防食試験

1) 概 要

本試験はプレストレストコンクリート（以下 PC と称す）桁に電気防食を適用した場合の施工法の検証および、防食効果の確認を行うものである。

(1) 試験項目

① 施工法の検証

- a. 試験施工
- b. 被覆材の劣化状況調査

② 防食効果の確認

- a. 定期計測による鋼材の腐食状況調査
- b. 解体調査による鋼材の腐食状況調査
- c. PC 鋼材の引張強度試験

2) 試験場所

千葉県東葛飾郡関宿町木間ヶ瀬

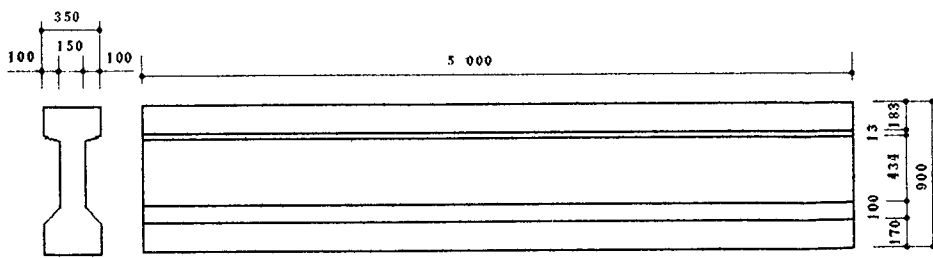
3) 試験方法

(1) 供 試 体

形状 $350\text{ mm} \times 900\text{ mm} \times 5,000\text{ mm}$ の I 型ポストテンション PC 桁。

供試体の仕様を表- 3.2.1 に示す。

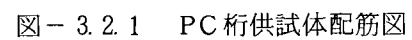
表- 3.2.1 PC 桁供試体の仕様

項 目	仕 様 書	備 考
区 分	ポストテンション	
塩 化 物 濃 度	NaCl 2.4 kg/m^2 (Cl^- 換算 1.5 kg/m^2)	建設省標準仕様書許容値の 2.5 倍
コンクリート品質	ρ_c 400 kgf/cm^2	
セメントの種類	早強セメント	
P C 鋼 材	よ り 線	IT 15.2 mm
	シ ー ス	みがき帯鋼 内径 18 mm × 鋼板厚 0.23 mm
	張 張 力	10 ton
形 状 ・ 寸 法		
数 量	3 体	2 体に電気防食施工

(2) 防食対象

供試体 3 体の内 2 体の鉄筋およびシースを防食対象とした。また、シースへの流入電流を計測するために、各供試体の 3 本のシースの内 1 本を他の鋼材と絶縁した。

供試体の配筋図を図- 3.2.1 に示す。



(3) 防食方式

先に行った小型供試体試験結果より網状電極方式、導電塗料方式の2種類とした。

(4) 施工方法

No. 1 供試体を網状電極方式、No. 2 供試体を非防食およびNo. 3 供試体を導電塗料方式として、図－3.2.2に示す手順に従い、特殊な工種を除き実験者自らが施工を行った。

陽極材の種類と施工仕様を表－3.2.2に示す。

表－3.2.2 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	埋設モニタリング装置	備 考
	一 次 電 極	二 次 電 極				
N0. 1 (網状電極方式)	酸化物被覆チタン網状電極 施工範囲 W=4.3m L=2.4m	—	エアブラスト 施工範囲 W=4.4m L=2.5m ブラスト厚 1mm	ポリマーセメント モルタル吹付 施工範囲 W=4.4m L=2.5m 吹付厚 20mm	鉛照合電極 6本 マクロセルプローブ 6本	電気防食
N0. 2	—	—	—	—	鉛照合電極 6本 マクロセルプローブ 6本	非防食 (比較用)
N0. 3 (導電塗料方式)	白金メッキチタン線状電極 φ1.5mm 施工量 L=4.2m×3本	導電性塗料 施工範囲 W=4.3m L=2.5m 吹付厚 300μm	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 マクロセルプローブ 6本	電気防食

(5) 供試体の暴露条件

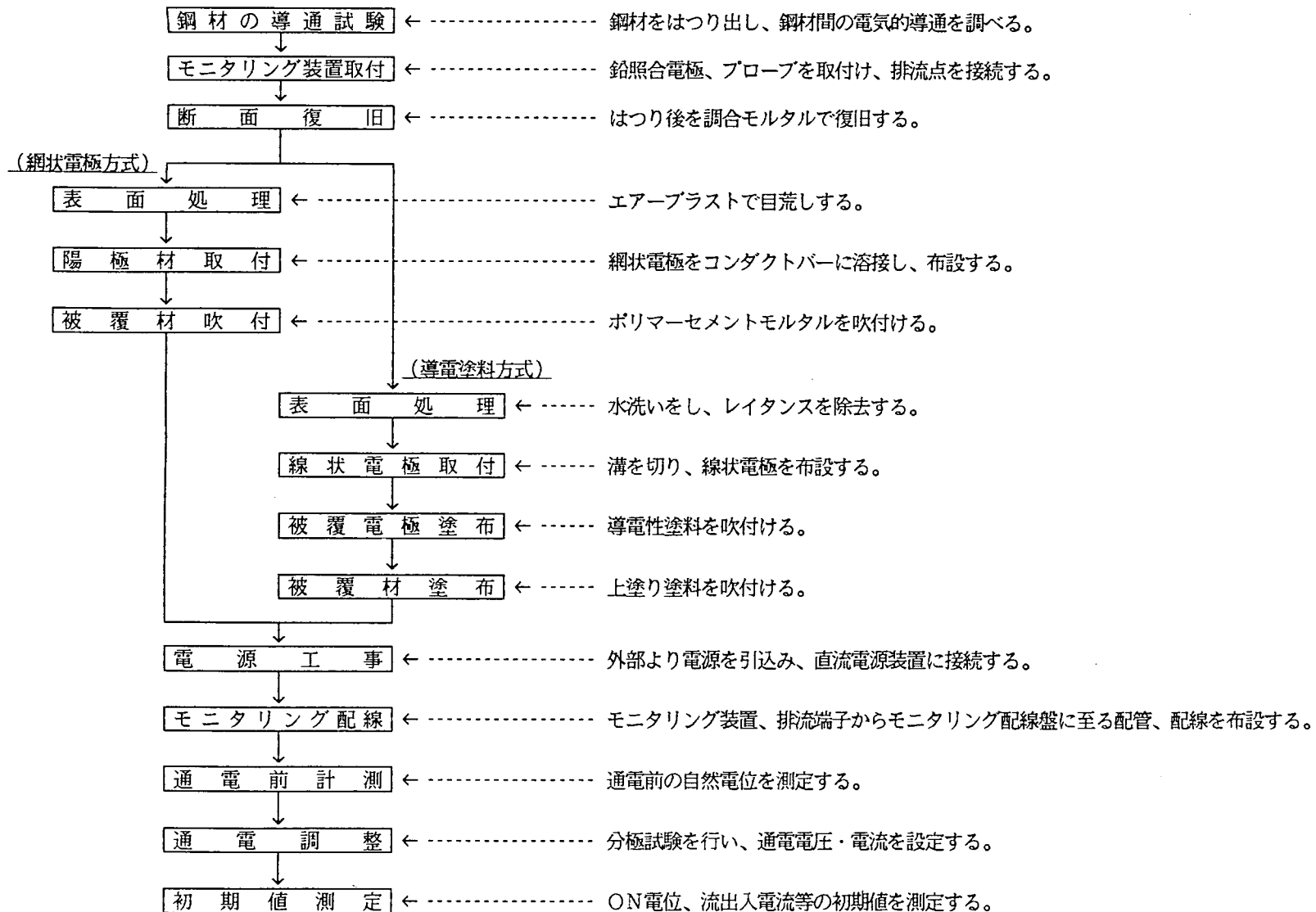
通電後供試体に塩水を散水し腐食を促進する。

表－3.2.3 散水条件

項 目	条 件
塩 分 濃 度	NaCl 2.4 kg/m ³ (Cl ⁻ 換算1.5 kg/m ³)
散 水 量	200ℓ/回
散 水 回 数	1回/週

(6) 施工法の検証

工種別チェックシートを用いて検証項目の観察を行った。



図－ 3. 2. 2 試験施工手順の概要

① 試験施工

- a. 施工手順：各工種における詳細施工手順
- b. 施工性：施工時間，人工，施工の難易度
- c. 施工精度：事前に設定した品質管理目標の達成度
- d. その他

② 被覆材の状況調査

随時被覆材の外観を観察するほか，定期的に付着強度を調査する。

a. 外観調査

外観を目視，木槌で軽くたたくことにより，表面状況，付着状況を観察する。

- ・表面状況：被覆材のふくれ，クラック等の状態
- ・付着状況：被覆材の層間剝離，供試体との界面剝離の状態
- ・その他

b. 付着強度試験

コアカッターで被覆材を切り供試体界面との付着強度を調べる。

(7) 防食効果の確認

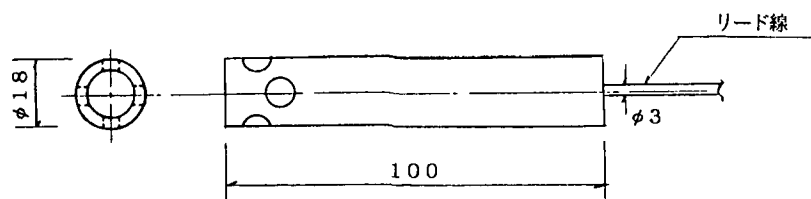
定期計測により鋼材電位等の経時変化を調査するとともに，暴露完了時に供試体を解体して鋼材の腐食状況を観察，防食効果を確認する。

① 定期計測による鋼材の腐食状況調査

埋設した鉛照合電極および計測孔を介して飽和甘こう電極により a～d の計測をするほか，浴電圧，流出入電流，導電性塗料の抵抗値等の測定を行う。

- a. ON 電位：通電状態での陽極，鋼材の電位
- b. Instant Off 電位：電源OFF直後の陽極，鋼材の電位
- c. 分極量：電源OFF 4 時間後の陽極，鋼材の電位
- d. 自然電位：非防食供試体の鋼材の電位
- e. 浴電圧：通電状態での印加電圧
- f. 流出入電流：通電状態での陽極，鋼材，プローブの流出，流入電流

鉛照合電極・プローブの形状，配置，計測孔の配置，モニタリング配線の系統図を図－3.2.3～図－3.2.7 に示す。



図－3.2.3 鉛照合電極

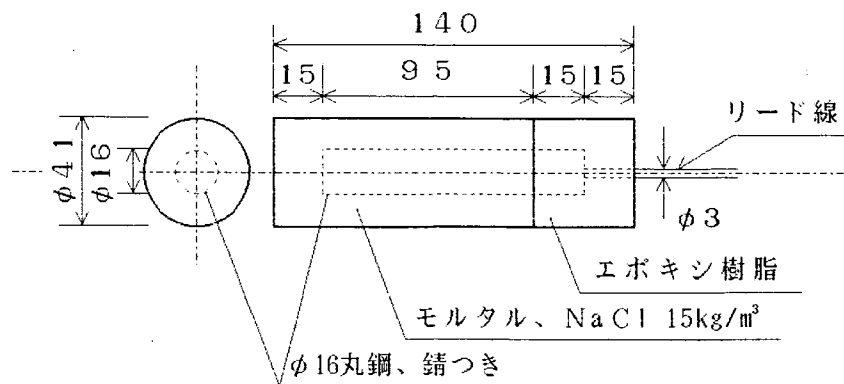


図- 3. 2. 4 マクロセル・プローブ

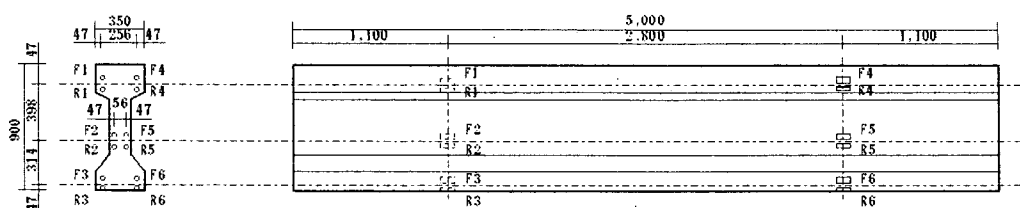


図- 3. 2. 5 照合電極・プローブの配置図

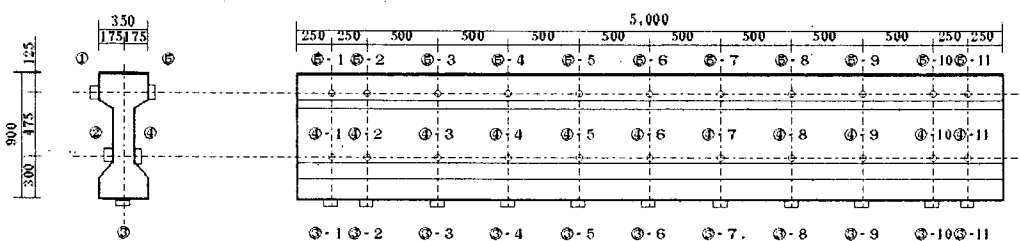


図- 3. 2. 6 計測孔の配置図

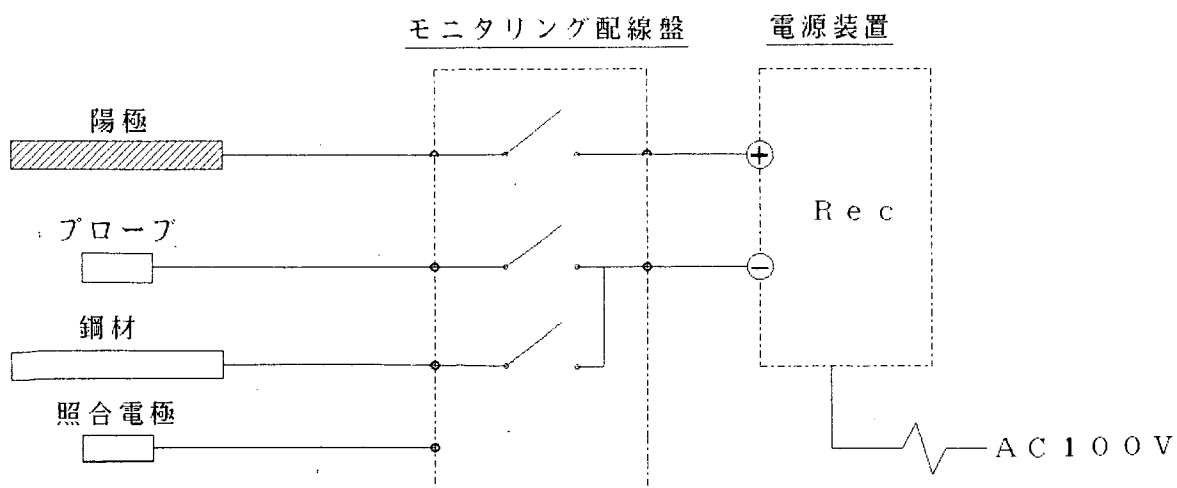


図- 3. 2. 7 モニタリング配線系統図

② 解体調査による鋼材の腐食状況調査

促進暴露した供試体を解体して、鋼材の腐食状況、供試体の塩分・水分含有量等を調査する。

- a. 腐食状況 : 鉄筋, シース, PC 線の表面状態
- b. 塩分含有量: シース周囲のコンクリート, グラウト材の塩分含有量
- c. 水分含有量: シース周囲のコンクリート, グラウト材の水分含有量
- d. その他

③ PC 鋼材の引張強度試験

促進暴露した供試体を解体して、腐食状況調査した後に PC 鋼材の引張強度試験を行う。

4) 試験結果および考察

本試験は電気防食施工後の経過日数が短く、被覆材の状況および防食効果については追跡調査中のため、ここでは、試験施工および初期計測・通電調整結果を報告する。

(1) 試験施工

① 施工手順

試験者相互が工種間の取合い、作業手順を確認しながら施工することで、詳細の施工手順を把握した。

② 施工性

試験者自らが施工を行い、施工時間、施工人工を調査するとともに施工の難易度についても検討を行った。

- ・モニタリング器具取付部のはつり深さが不十分なため、プローブの納まりの悪い部分があった。
- ・網状電極方式では網状電極がたわんで貼りにくく、固定治具使用量が目標の30%増となってしまった。簡便な布設方法を検討して、作業時間の短縮を図る必要がある。
- ・導電塗料方式では線状電極の溝が広すぎて、導電パテの充填がうまくできなかった。

③ 施工精度

事前に設定した品質管理目標の達成レベルを調査した結果、モニタリング器具取付部のはつり寸法の不足が3箇所あった以外は満足することができた。

(2) 初期計測、通電調整

① 自然電位

計測孔を介した SCE による自然電位の計測結果では、大部分が -200mV SCE より貴な電位を示し、塩化ナトリウムを 2.4kg/m^3 混入したにも拘らず、腐食電位に達していなかった。

測定結果を表-3.2.4～表-3.2.6に示す。

表-3.2.4 No.1 供試体の自然電位

1. 埋込鉛照合電極により測定した鋼材の自然電位

(1) 鉄筋+非絶縁シース

(mV SCE)					
R1	R2	R3	R4	R5	R6
-240	-246	-251	-256	-212	-217

(2) 絶縁シース

(mV SCE)	
R3	R6
-266	-230

2. 計測孔を介して飽和甘こう電極により測定した自然電位

(1) 鉄筋+非絶縁シース

(mV SCE)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
①		-198	-174	-192	-157	-170	-153	-187	-193	-178	
②		-191	-192	-191	-176	-190	-162	-203	-185	-181	
③		-192	-174	-183	-145	-189	-160	-185	-175	-164	
④		-208	-211	-179	-190	-181	-175	-189	-194	-205	
⑤		-206	-214	-202	-179	-185	-177	-200	-192	-187	

(2) 絶縁シース

(mV SCE)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
③		-219	-186	-200	-170	-206	-179	-207	-205	-187	

表-3.2.5 No.2 供試体の自然電位

1. 埋込鉛照合電極により測定した鋼材の自然電位

(1) 鉄筋+非絶縁シース

(mV SCE)					
R1	R2	R3	R4	R5	R6
-223	-208	-225	-187	-199	-316

(2) 絶縁シース

(mV SCE)	
R3	R6
-251	-341

2. 計測孔を介して飽和甘こう電極により測定した自然電位

(1) 鉄筋+非絶縁シース

(mV SCE)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
①		-134	-140	-147	-133	-135	-137	-132	-195	-118	
②		-184	-182	-165	-159	-164	-167	-171	-205	-162	
③		-155	-162	-166	-155	-158	-133	-166	-178	-160	
④		-135	-226	-164	-149	-131	-96	-157	-191	-142	
⑤		-121	-215	-132	-127	-124	-125	-135	-135	-132	

(2) 絶縁シース

(mV SCE)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
③		-182	-189	-192	-182	-182	-166	-192	-208	-186	

表-3.2.6 No.3 供試体の自然電位

1. 埋込鉛照合電極により測定した鋼材の自然電位

(1) 鉄筋+非絶縁シース

(mV SCE)					
R1	R2	R3	R4	R5	R6
-201	-193	-209	-229	-216	-217

(2) 絶縁シース

(mV SCE)	
R3	R6
-255	-263

2. 計測孔を介して飽和甘こう電極により測定した自然電位

(1) 鉄筋+非絶縁シース

(mV SCE)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
①		-143	-153	-154	-139	-145	-141	-159	-185	-153	
②		-152	-159	-168	-154	-162	-152	-174	-182	-161	
③		-148	-152	-142	-137	-143	-138	-154	-160	-153	
④		-150	-153	-140	-137	-142	-145	-159	-167	-148	
⑤		-141	-160	-138	-143	-147	-142	-151	-149	-155	

(2) 絶縁シース

(mV SCE)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
③		-191	-195	-186	-183	-185	-184	-199	-205	-197	

② 防食電流密度： 初期の防食電流密度を決定するため、分極試験を行った。米国で行われているコンクリート中鉄筋の防食基準やNACE (National Association of Corrosion Engineers) 基準でいうところの“少なくとも100mV 単方向への分極電位シフト”を防食基準とし、100mV の分極量を得る電流密度を求めた。

測定結果を図-3.2.8 および表-3.2.7～表-3.2.8 に示す。

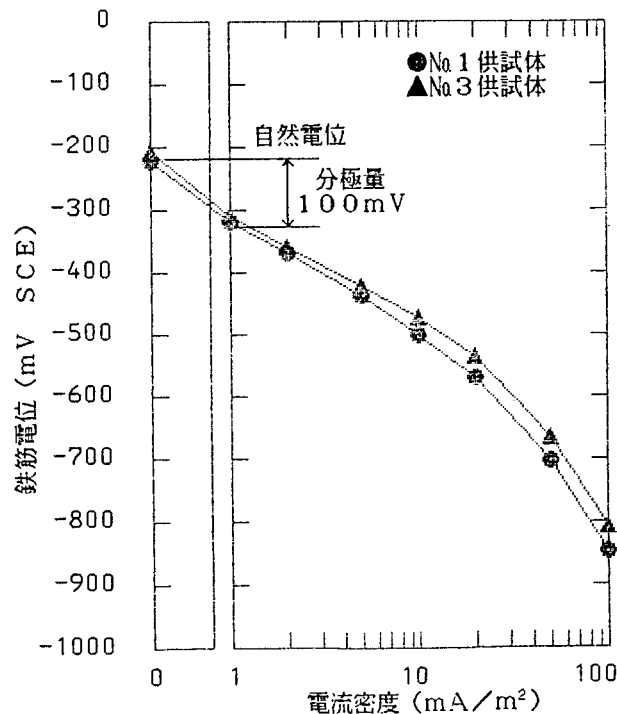


図-3.2.8 分極試験

表- 3. 2. 7 No. 1 供試体の分極試験

照合電極 NO.		(mV SCE)					
条件		R 1	R 2	R 3	R 4	R 5	R 6
1mA/m ²	ON 時	-374	-327	-347	-315	-310	-309
	OFF 瞬時	-320	-321	-328	-308	-305	-303
2mA/m ²	ON 時	-386	-381	-383	-369	-366	-370
	OFF 瞬時	-369	-369	-370	-356	-357	-353
5mA/m ²	ON 時	-475	-462	-461	-459	-445	-452
	OFF 瞬時	-452	-436	-432	-428	-421	-427
10mA/m ²	ON 時	-556	-537	-537	-544	-518	-532
	OFF 瞬時	-502	-496	-490	-495	-480	-492
20mA/m ²	ON 時	-706	-637	-641	-654	-615	-635
	OFF 瞬時	-604	-558	-551	-560	-545	-560
50mA/m ²	ON 時	-905	-827	-794	-854	-794	-817
	OFF 瞬時	-728	-694	-674	-698	-686	-707
100mA/m ²	ON 時	-1,211	-1,054	-1,098	-1,105	-1,005	-1,015
	OFF 瞬時	-884	-844	-794	-844	-836	-851

表- 3. 2. 8 No. 3 供試体の分極試験

照合電極 NO.		(mV SCE)					
条件		R 1	R 2	R 3	R 4	R 5	R 6
1mA/m ²	ON 時	-318	-311	-303	-315	-325	-309
	OFF 瞬時	-294	-302	-295	-307	-318	-302
2mA/m ²	ON 時	-354	-371	-361	-365	-385	-365
	OFF 瞬時	-345	-356	-349	-353	-371	-351
5mA/m ²	ON 時	-427	-455	-442	-432	-466	-440
	OFF 瞬時	-404	-424	-413	-406	-437	-409
10mA/m ²	ON 時	-491	-530	-514	-494	-539	-508
	OFF 瞬時	-454	-480	-468	-451	-492	-458
20mA/m ²	ON 時	-578	-635	-611	-583	-639	-605
	OFF 瞬時	-512	-549	-530	-507	-560	-520
50mA/m ²	ON 時	-736	-846	-800	-757	-832	-797
	OFF 瞬時	-625	-692	-658	-624	-716	-649
100mA/m ²	ON 時	-924	-1,099	-1,036	-966	-1,069	-1,043
	OFF 瞬時	-743	-838	-803	-768	-873	-783

③ 分極量： 通電約 1 カ月後の分極量の測定結果を図- 3. 2. 9, 図- 3. 2. 10 および表- 3. 2. 9, 表- 3. 2. 10 に示す。No. 1 供試体については防食対象全面に亘って 100mV 以上の分極量を得ていた。No. 3 供試体については、一次電極を 3 本設置したが、現在中心の 1 本の電極のみで通電しているため、電極から遠い部分で 100mV の分極量を満足していなかった。

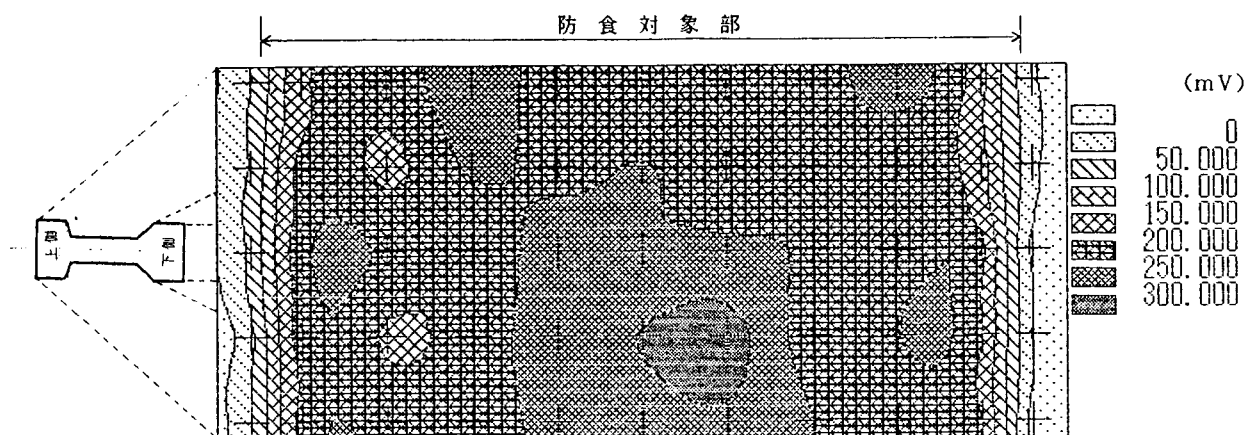


図- 3.2.9 No.1 供試体の分極量 (展開図)

表- 3.2.9 No.1 供試体の分極量

	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
①	+ 45	+189	+211	+290	+214	+214	+223	+222	+274	+167	+ 10
②	+ 52	+222	+184	+258	+235	+254	+226	+244	+204	+171	+ 15
③	+ 58	+239	+242	+206	+278	+254	+258	+245	+217	+216	- 13
④	+ 36	+233	+189	+228	+274	+302	+324	+224	+249	+206	- 3
⑤	+ 45	+220	+232	+231	+261	+269	+293	+251	+210	+201	- 17

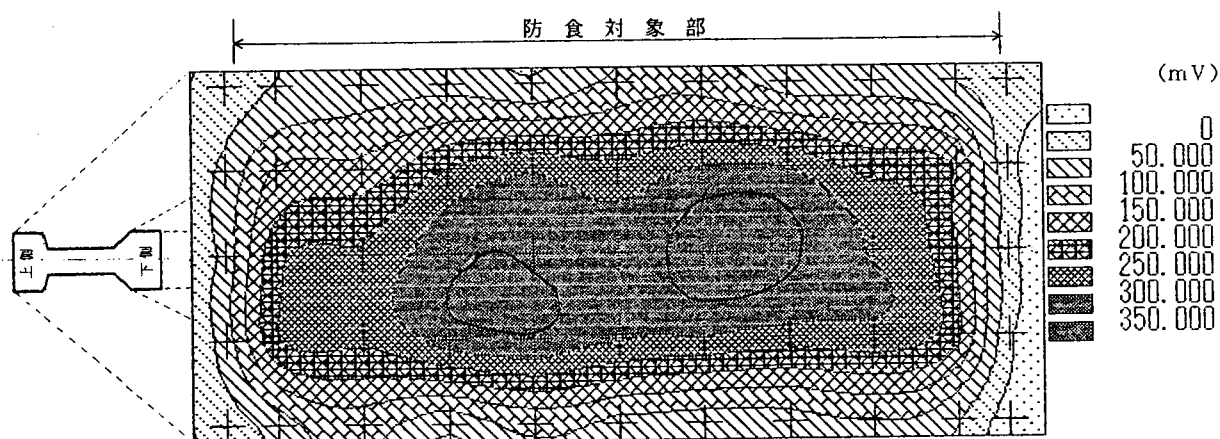


図- 3.2.10 No.3 供試体の分極量 (展開図)

表- 3.2.10 No.3 供試体の分極量

	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
①	+ 15	+ 52	+ 77	+ 85	+ 56	+111	+129	+ 74	+ 77	+ 49	+ 24
②	+ 61	+158	+165	+255	+296	+266	+304	+302	+229	+197	+ 17
③	+ 65	+238	+256	+334	+340	+304	+376	+358	+294	+198	+ 21
④	+ 73	+247	+259	+326	+348	+307	+298	+277	+284	+217	+ 10
⑤	+ 22	+ 72	+122	+ 59	+114	+ 80	+ 69	+ 76	+ 95	+ 53	- 25

- ④ 電 流： 防食対象供試体については、鉄筋プローブや他の鋼材と絶縁した埋設シースにも防食電流が流入しているのが確認された。比較対象試験体のNo.2 供試体では F 6 の鉄筋プローブを除き、電流が流出しており腐食していることを示していた。

測定結果を表－ 3. 2. 11に示す。

表－ 3. 2. 11 流出入電流

(マイナス符号は流出または腐食)

(mA)

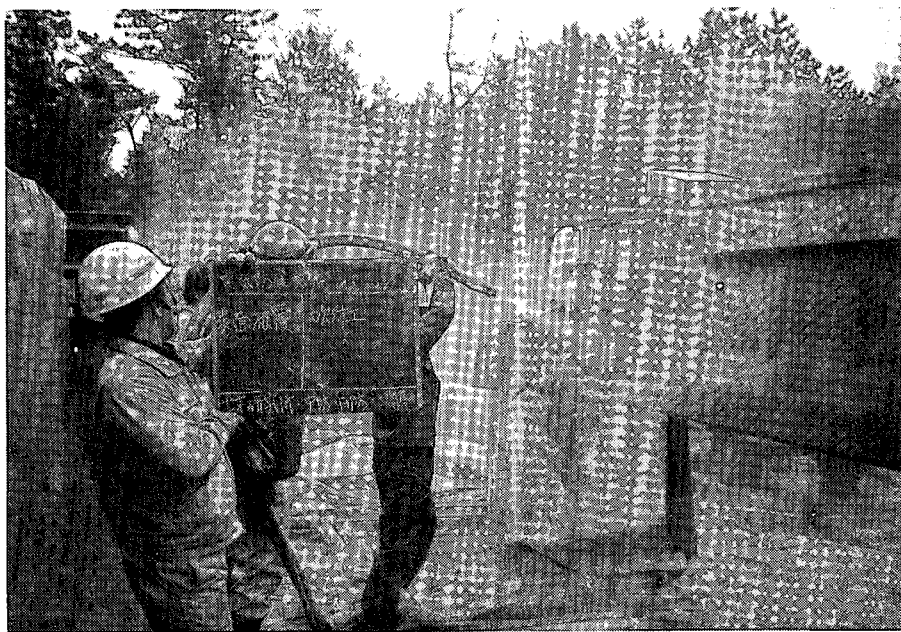
対象 供試体	プ ロ ー ブ						鋼 材		陽 極 A
	F 1	F 2	F 3	F 4	F 5	F 6	C 1	C 2	
No. 1供試体	0. 2 2 2	0. 3 8 1	0. 3 6 7	0. 1 9 7	0. 3 2 6	0. 4 5 9	47. 5	0. 3 4 2	-5 0
No. 2供試体	-0. 0 6 8	-0. 0 3 2	-0. 0 9 4	-0. 1 7 7	-0. 0 3 6	0. 0 0 8	0. 4 1 4	-0. 0 1 0	-
No. 3供試体	0. 3 1 1	0. 3 8 6	0. 3 0 4	0. 3 9 8	0. 3 7 2	0. 3 9 2	47. 8	0. 2 1 5	-5 0

5) ま と め

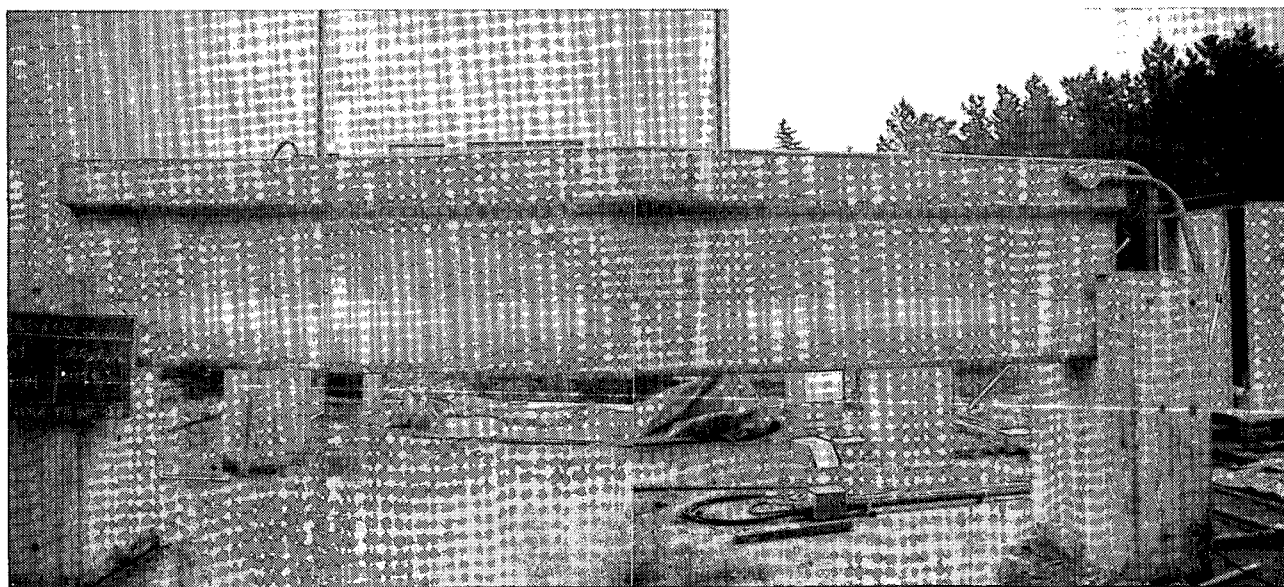
- (1) 施工性については、使用機器の選定および施工法で、改善すべき点があるが、実用化する上で障害となるような問題点はなかった。品質管理の徹底により、現状の施工技術で十分施工可能である。

施工状況と施工後の供試体を写真－ 3. 2. 1，写真－ 3. 2. 2 に示す。

- (2) 防食電流密度は分極試験を行い、 $2\text{mA}/\text{m}^2$ で100mV以上の分極量を得たが、より安全側の $5\text{mA}/\text{m}^2$ を初期値とした。
- (3) 電気防食供試体のプローブ、鋼材には防食電流が流入していることから、防食状態にあることが分かる。
- (4) 通電1ヶ月後の分極量の測定結果から、No.1 供試体は防食対象部全てが100mV以上の分極量を得て、良好な防食効果を維持していることが分かった。No.3 供試体については100mVの分極量を得られていない部分があるため、予備に設置した2本の電極に通電する予定である。
- なお、本実験の防食効果を確認するため継続して供試体の追跡調査を行う。



写真－ 3. 2. 1 施工状況



写真－ 3. 2. 2 施工後の供試体

3.3 実橋におけるコンクリート中の鋼材の電気防食試験

1) 概 要

実橋試験は、電気防食を実際に適用した場合の施工性および防食効果を確認するために実施したものである。

2) 試験方法

(1) 対象橋梁

- ① 橋梁名 : B 橋
- ② 橋梁諸元
 - a. 架設年 : 昭和 10 年
 - b. 形 式 : 鉄筋コンクリート T 桁橋
 - c. 橋 長 : 約 47 m

③ 橋梁位置

日本海に位置し、海岸線から約 60 m に所在。

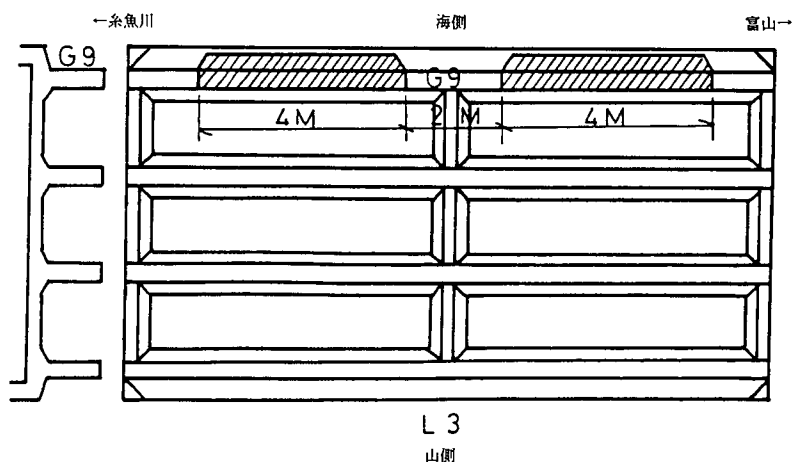
④ 電気防食対象範囲

図－3.3.1 に示す橋梁中央部 (L3) の主桁 (G9) の下記範囲とした。

- a. 海側面 : 80 cm 幅
- b. 底 面 : 40 cm 幅
- c. 山側面 : 30 cm 幅
- d. 長 さ : 4 m × 2 箇所
- e. 防食面積 : A, B 両方式とも各 6 m²

⑤ 鉄筋の腐食状況

架設後 50 年経過して、鉄筋の周囲は膨張性の赤錆のためコンクリートに多数のクラックが発生していた。また、一部の鉄筋では断面欠損を起こしている状況であった。



図－3.3.1 電気防食対象範囲 (//)

(2) 電気防食方法

本試験は、電源に直接接続される一次電極としての線状電極と、一次電極からの電流を分布させるための被覆電極との組み合わせによる外部電源方式により行った。方式としては、導電性樹脂線状電極＋導電性モルタル（A方式）と白金メッキチタン線状電極＋導電性塗料（B方式）の2方式で行った。

防食状態をモニターするため、鉄筋電位モニター用に鉛照合電極、防食電流モニター用に鉄筋プローブをコンクリート中に埋設した。

① 電気防食材料の仕様

a. 線状電極

方式	A	B
型式	導電性樹脂線状電極	白金メッキチタン線
外形	φ 7.87 mm	φ 1.5 mm
使用数	4 m × 3 本	4 m × 3 本

b. 被覆電極

方式	A	B
被覆材	導電性モルタル	導電性塗料
塗布厚	15 mm	150 μm × 2回塗り

c. 上塗塗料

方式	A	B
材料	ウレタン系樹脂	アクリルウレタン系樹脂
塗布厚	200 μm × 1回塗り	25 μm × 2回塗り

d. 電源装置

両方式とも、直流定電圧電源装置を使用した。

方式	A	B
入力	AC 100V, 60 Hz	AC 100V, 60 Hz
出力	DC 18V, 1 A Max.	DC 18V, 0.7A Max.
消費電力	約 38 VA	約 33 VA

e. 埋設照合電極および鉄筋プローブ

電極	鉛照合電極 ¹⁾	鉄筋プローブ ²⁾
材質	鉛	磨き丸鋼
形状	$\phi 18 \times \ell 100 \text{ mm}$	$\phi 13 \times \ell 100 \text{ mm}$
設置個数	16 個	16 個

注1) モルタル、コンクリート中用に開発された照合電極で耐アルカリ性に強い。

注2) 腐食および防食モニタリングに用いる。

(3) 施工前の状況

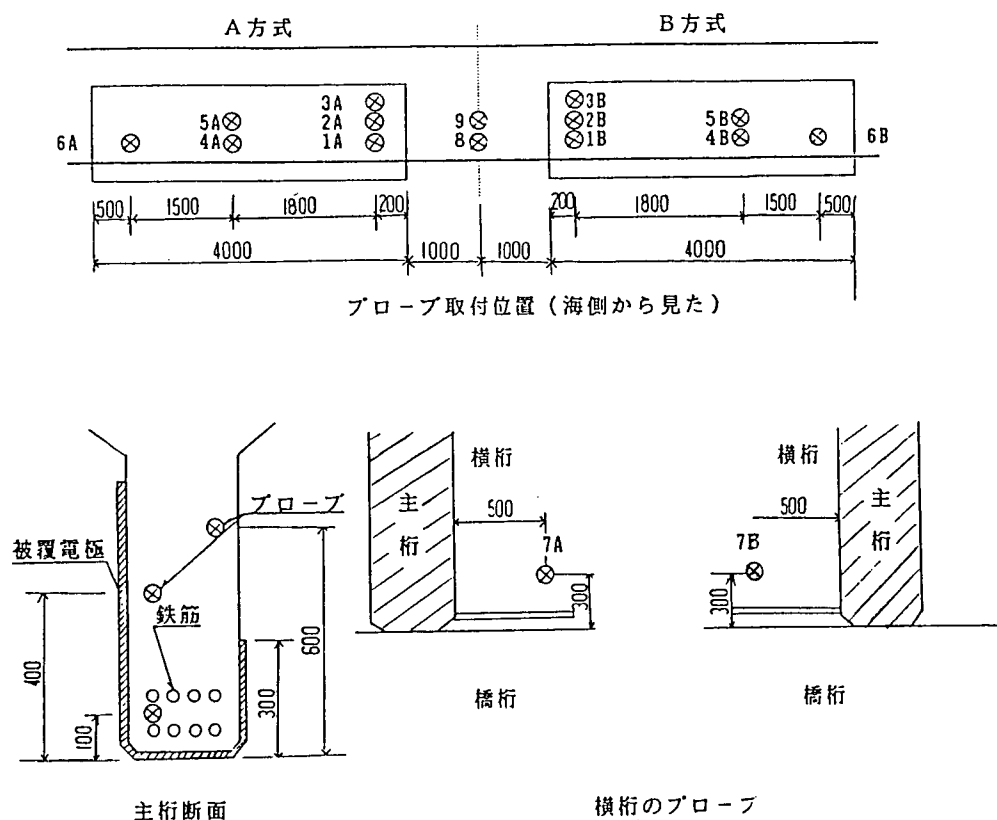
① 鉄筋の表面状態

コンクリートはつり後、鉄筋表面をサンドブラストし、数日後鉄筋表面には薄い赤錆がでている状態で、プレパックドコンクリートで断面修復を行った。本工事の場合、他の工法との比較のためサンドブラストを行ったが、電気防食の場合かなりひどい腐食状態以外サンドブラストの必要はない。

② 鉄筋間導通状態

コンクリートをはつったため、結束線が破断し、導通が不確かになった。そのため、排流用鉄筋³⁾およびスターラップを主鉄筋とスポット溶接を行い導通を完全なものとした。

注3) 防食する主鉄筋の防食電流を帰流させる端子



注記：6A, 7A, 6B, 7Bの鉄筋プローブはNaCl 15 kg/m^3 を混入したモルタルで被覆したうえで埋設した。

図- 3. 3. 2 プローブの取付位置

(4) 測定内容

① 施工後通電前の測定

a. 鉄筋自然電位測定

鉄筋の腐食状況を調べるため、また、電気防食による鉄筋電位の変化をみるため、コンクリート表面より鉄筋の自然電位を測定した。

b. 分極試験

電気防食に必要な通電電流密度（初期値）を求めるため、 $0 \rightarrow 2 \rightarrow 5 \rightarrow 10 \rightarrow 20 \rightarrow 50 \rightarrow 100\text{ mA/m}^2$ へと電流密度（コンクリート面積当たり）を変化させ、各電流密度における鉄筋の電位を測定した。そして、分極量⁴⁾が約100mVになる電流密度を決定し、その電流密度で通電試験を行った。

注4) 電極に出入りする電流によって生じる電位の変化を分極という。

② 定期測定

a. 通電電圧および電流の測定

通電電圧を一定にして電気防食を行った時の電流の変化により鉄筋の防食状態の変化を調

べた。

b. ON 電位および Instant Off 電位の測定

鉄筋の防食状態を評価するため鉄筋の電位を測定する必要があるが、コンクリート表面から鉄筋の電位を測定した場合、IR 降下⁵⁾ (電圧降下) が大きく正しい評価ができない。そこで鉛照合電極を鉄筋の近くに埋設し IR 降下が小さくなるようにし、通電状態での鉄筋の電位 (ON) を測定した。しかし、これでも完全に IR 降下を除去することができないので、通電電流を OFF した直後の電位⁶⁾ (Instant Off 電位) を測定した。

注5) オーム降下ともいう。これは、分極測定において電極を取り巻く電解質や電極表面の反応生成物被膜あるいはこれら双方の電気抵抗によって生ずるものである。

注6) 電源をOFFすると、IR降下は瞬間的に消失する。

c. 分極量の測定

通電電流をOFFすると鉄筋の電位は貴方向へ変化するが、その変化量は良好な防食状態にある鉄筋で大きな値となる。ここでは、Instant Off 電位とその約20時間後の電位の差を分極量とし、各部の鉄筋の分極量を求めた。

3) 測定結果

(1) 施工性

電気防食AおよびB方式とも、施工性に関しては特に問題となることはなかった。

(2) 施工後通電前の測定結果

断面修復後、防食対象部の鉄筋の電位を飽和甘こう電極 (SCE) で測定した。その結果は、両方式対象部ともに、橋桁の底部を中心に $-140 \sim -200 \text{ mV SCE}$ の範囲で貴な値を示した、一方、海側の側面上部では $-240 \sim -300 \text{ mV SCE}$ の範囲で卑な値を示した。これは、橋桁の底部を中心に断面修復を行った結果、底部の鉄筋の表面状態が健全になったためと考えられる。

また、B方式対象部の海側の側面中央部において、自然電位の著しい勾配 ($120 \text{ mV} / 30 \text{ cm}$) が認められ、修復部がカソードに、未修復部がアノードになって腐食が進行するものと考えられた。

(3) 分極試験

通電電流密度を決定するため、分極試験を行った。その結果を表-3.3.1 および図-3.3.2、図-3.3.3 に示す。その結果よりA、B両方式とも通電電流密度を $20 \text{ mA} / \text{m}^2$ (コンクリート面積当たり) であることがわかっ

表-3.3.1 分極試験結果

単位: $\text{mV SCE}^{2)}$

電流密度 mA / m^2 ¹⁾	A方式・測定位置			B方式・測定位置		
	1 A	4 A	6 A	1 B	4 B	6 B
0	-220	-227	-215	-217	-185	-175
1	-221	-228	-218	-224	-197	-182
2	-233	-231	-227	-233	-210	-192
5	-259	-242	-246	-263	-250	-217
10	-300	-260	-277	-303	-291	-244
20	-356	-287	-325	-341	-333	-292
50	-452	-355	-407	-451	-421	-410
100	-532	-429	-480	-611	-529	-543

注1) 電流密度はコンクリート面積 (6 m^2) 当たり。

注2) 電位はIR降下 (電圧降下) 補正後。

た。その電流密度になるように電源を調整したところ通電電圧はA方式で2.71V, B方式で2.54Vであった。

(4) 定期測定の結果

① 通電電圧, 電流

通電電圧およびその電圧を加えたときの陽極の発生電流の測定結果を表-3.3.2および図-3.3.5, 図-3.3.6に示す。発生電流は時間の経過に伴い減少傾向にあった。すなわち, 防食対象である鉄筋に流れる陰極電流密度が減少している。7回の測定の平均電流密度はコンクリート施工面積 6m^2 から 1m^2 あたりに換算すると, A方式では $8.3\text{mA}/\text{m}^2$, B方式では $7.1\text{mA}/\text{m}^2$ であった。これは当初の $20\text{mA}/\text{m}^2$ と比較して, 半分以下に減少した。

また, 鉄筋プローブに関しては流入電流のみでは防食対象部 (No.1, 2, 4, 5, 6) と非防食対象部 (No.3, 7, 8, 9) の差異は明確でない。これは非防食対象部の既設の鉄筋に対して, 埋設したプローブが陰極となりマクロセル電流が流入しているためであると考えられる。7回の測定結果から計算した年間の消費電力は, 両方式ともに, 1m^2 あたり約 0.5KWHr であり, $20\text{円}/\text{KWHr}$ で計算すると 1m^2 あたり約10円の電気料金になる。

2回目測定終了後, 両方式の耐久性を比較するため, 電圧を両方式とも統一して2.50Vとし

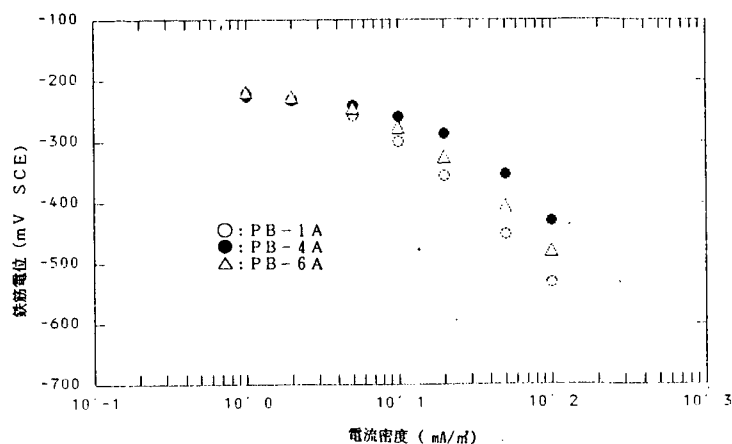


図-3.3.3 分極試験 (A方式対象部)

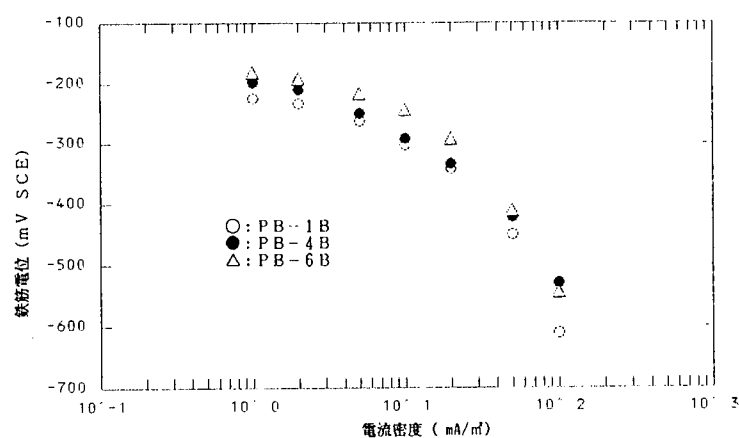


図-3.3.4 分極試験 (B方式対象部)

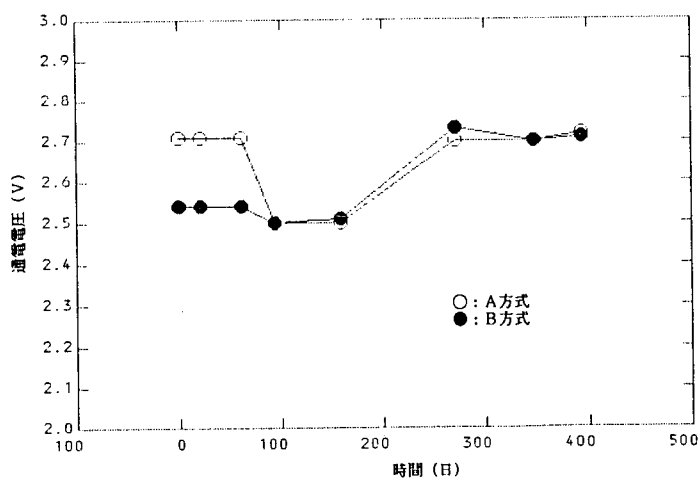


図-3.3.5 通電電圧の経時変化

た。4回目測定終了後、分極量の不足が一部にあったので、両方式とも電圧を2.70Vとした。

② Instant Off 電位

埋設した鉛照合電極によって鉄筋の電位を測定した。通電状態で測定すると IR 降下による誤差を含んでいるため、電源 OFF 直後の電位 (Instant Off 電位) も併せて測定した。その結果を表-3.3.3, および図-3.3.7, 図-3.3.8に示す。

鉄筋への流入電流が大きく減少しているにもかかわらず、Instant Off 電位はほとんど変化していない。

③ 分極量

Instant Off 電位とその約20時間後の電位との差を分極量とし、その経時変化を表-3.3.4 および図-3.3.9, 図-3.3.10に示す。鉄筋への流入電流が大きく減少しているにもかかわらず、分極量の目標値100mVを防食対象部ではほぼ満足していた。Instant Off 電位の測定結果で、分極が進んでいない部分でも電気防食の効果により周囲の環境の変化、鉄筋表面の再不動態化等により自然電位そのものが変化しているの、見掛けの電位のみで防食状態を評価することは難しい。このような場合には分極量を求めて防食

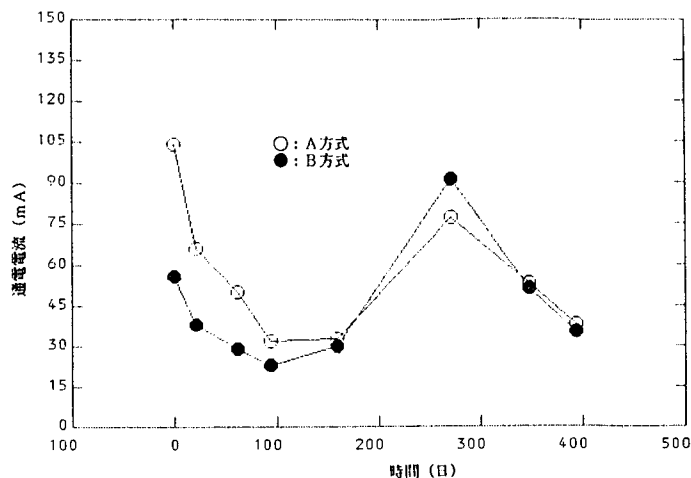


図-3.3.6 通電電流の経時変化

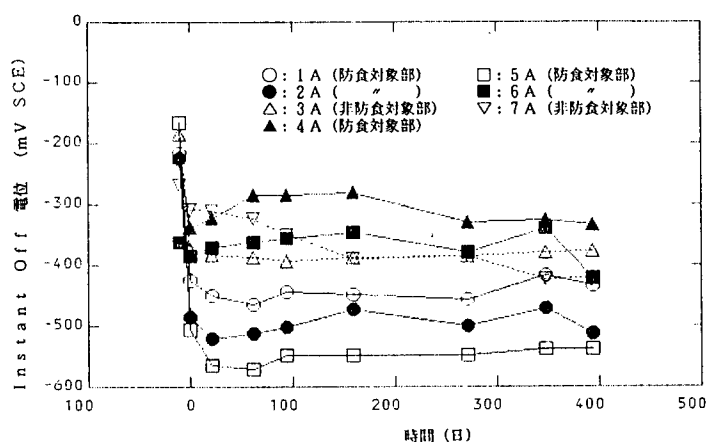


図-3.3.7 Instant Off 電位の経時変化 (A方式)

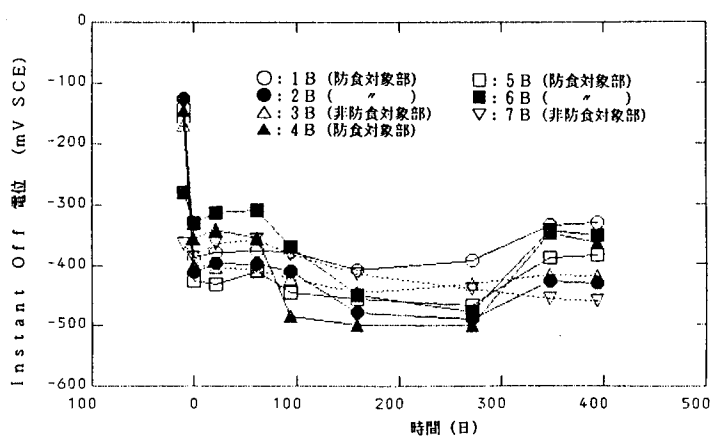


図-3.3.8 Instant Off 電位の経時変化 (B方式)

効果を評価するのが好ましく、

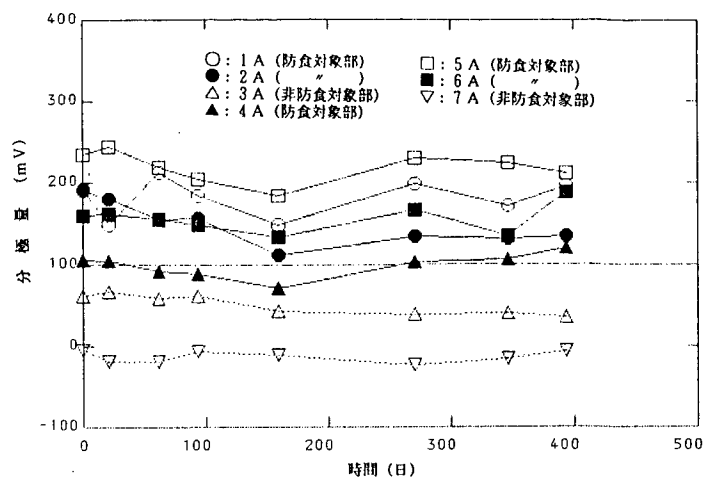
これによれば防食対象部の大部分で十分な防食状態にあった。

4) ま と め

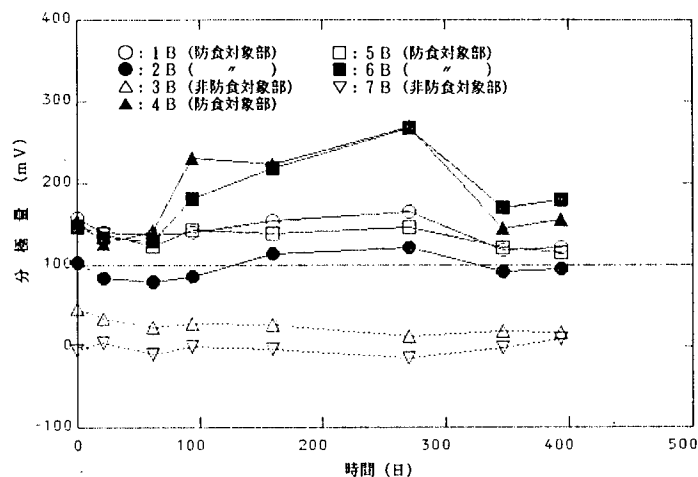
実橋における電気防食の施工性および防食効果の追跡調査約1年間から、次のようなことがわかった。なお、1年半後の測定においても、前述のことが確認された。

- (1) 電気防食A, B両方式とも、施工性は特に問題がなかった。
- (2) 分極試験結果から、初期において必要な防食電流密度は $20\text{mA}/\text{m}^2$ （コンクリート面積当たり）であった。
- (3) 通電試験結果から、防食電流密度は初期の $20\text{mA}/\text{m}^2$ から大きく減少し、平均で $7.1\sim 8.3\text{mA}/\text{m}^2$ になった。しかし、鉄筋の電位は更に分極が進んで卑な値になっている部分が多く、良好な防食状態を維持しているものと判断できる。

- (4) 分極量の測定結果から、防食対象部（No 1, 2, 4, 5, 6）では、ほぼ 100mV 以上の分極量を得ており、十分な防食効果があることがわかった。



図－3.3.9 分極量の経時変化（A方式）



図－3.3.10 分極量の経時変化（B方式）

表- 3.3.2 通電電圧, 通電電流の測定結果

測定項目	通電電圧 (V)		通電電流 (mA)		鉄筋プローブ流入電流 (μA) A方式部							中央部		鉄筋プローブ流入電流 (μA) B方式部						
	A	B	A	B	1A	2A	3A	4A	5A	6A	7A	8	9	1A	2A	3A	4A	5A	6A	7A
初期値 S.61.10.29	2.71	2.54	104	56	10.5	16.8	5.04	7.56	50.4	2.69	0.34	流出	0.50	6.25	1.78	2.16	2.42	3.53	0.39	1.40
1回目 S.61.11.18	2.71	2.54	66	38	7.56	12.2	2.69	1.89	16.4	2.90	0.26	0.30	0.29	2.16	3.23	4.02	2.07	7.22	0.83	1.24
2回目 S.61.12.18	2.71	2.54	50	29	5.57	8.09	2.01	1.03	11.4	1.39	0.33	0.07	0.24	1.08	2.28	2.92	1.16	3.83	0.52	0.94
3回目 S.62. 1.20	2.50	2.50	32	23	3.26	3.90	1.39	1.47	5.41	0.66	0.38	0.05	0.65	0.25	0.55	0.68	0.47	1.68	0.23	0.31
4回目 S.62. 3.26	2.50	2.51	33	30	7.37	4.83	1.40	0.70	5.38	0.41	1.03	0.09	0.10	1.51	6.09	3.36	1.88	6.92	2.34	1.98
5回目 S.62. 7.16	2.70	2.73	77	91	10.7	21.4	5.80	27.3	15.8	2.90	3.40	0.30	流出	15.9	5.3	8.1	11.0	17.0	16.4	5.2
6回目 S.62. 9.30	2.70	2.70	53	51	3.41	8.72	3.28	9.60	7.61	2.07	2.91	0.08	流出	4.27	0.65	4.15	2.40	3.01	7.76	2.88
7回目 S.62.11.16	2.72	2.71	38	35	2.36	5.35	1.94	5.06	4.29	2.43	1.65	0.05	流出	3.14	0.60	2.54	1.28	1.60	4.27	2.40

表- 3.3.3 通電電位, Instant Off 電位の測定結果

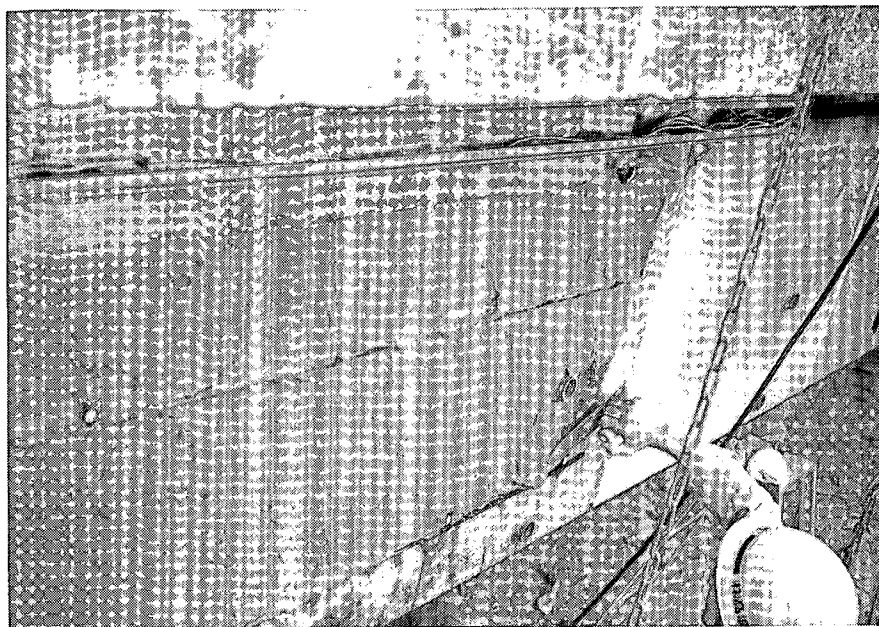
単位: mV v s SCE

方式	測定位置	通電前	初期設定時 S.61.10.29		1回目 S.61.11.18		2回目 S.61.12.18		3回目 S.61. 1.20		4回目 S.62. 3.26		5回目 S.62. 7.16		6回目 S.62. 9.30		7回目 S.62.11.16	
			ON	I.O.	ON	I.O.	ON	I.O.	ON	I.O.	ON	I.O.	ON	I.O.	ON	I.O.	ON	I.O.
方式 A	1 A	-216	-454	-425	-495	-450	-513	-465	-485	-443	-482	-448	-483	-456	-437	-416	-452	-433
	2 A	-225	-524	-486	-555	-520	-546	-512	-519	-502	-488	-472	-530	-501	-487	-471	-525	-512
	3 A	-185	-392	-372	-396	-384	-399	-387	-396	-394	-393	-388	-394	-385	-380	-379	-379	-377
	4 A	-222	-360	-338	-340	-322	-301	-286	-299	-286	-292	-281	-344	-330	-341	-325	-346	-333
	5 A	-167	-608	-506	-649	-565	-652	-571	-606	-548	-600	-547	-618	-548	-592	-537	-586	-538
	6 A	-362	-416	-385	-404	-371	-393	-362	-383	-357	-395	-346	-405	-380	-342	-340	-442	-420
	7 A	-268	-312	-309	-326	-310	-336	-323	-351	-350	-389	-389	-393	-385	-422	-423	-420	-421
中央	8	-268	-236	-235	-221	-221	-223	-222	-231	-231	-241	-239	-247	-246	-226	-227	-225	-224
	9	-182	-286	-278	-293	-280	-304	-291	-374	-374	-385	-386	-378	-373	-358	-359	-359	-360
方式 B	1 B	-161	-404	-385	-400	-377	-396	-374	-402	-378	-441	-409	-435	-392	-366	-333	-361	-329
	2 B	-126	-412	-410	-404	-396	-407	-397	-419	-411	-490	-479	-509	-490	-433	-427	-436	-431
	3 B	-169	-400	-400	-407	-402	-415	-409	-425	-423	-448	-446	-442	-431	-415	-416	-418	-418
	4 B	-144	-369	-355	-360	-339	-372	-355	-510	-485	-524	-499	-525	-500	-363	-345	-382	-362
	5 B	-143	-436	-424	-447	-431	-434	-411	-464	-445	-482	-457	-516	-467	-406	-387	-400	-383
	6 B	-279	-337	-330	-324	-312	-324	-309	-388	-369	-487	-451	-503	-477	-369	-342	-375	-349
	7 B	-362	-385	-385	-362	-362	-362	-356	-382	-382	-414	-414	-447	-439	-455	-457	-460	-461

表- 3.3.4 分極量の測定結果

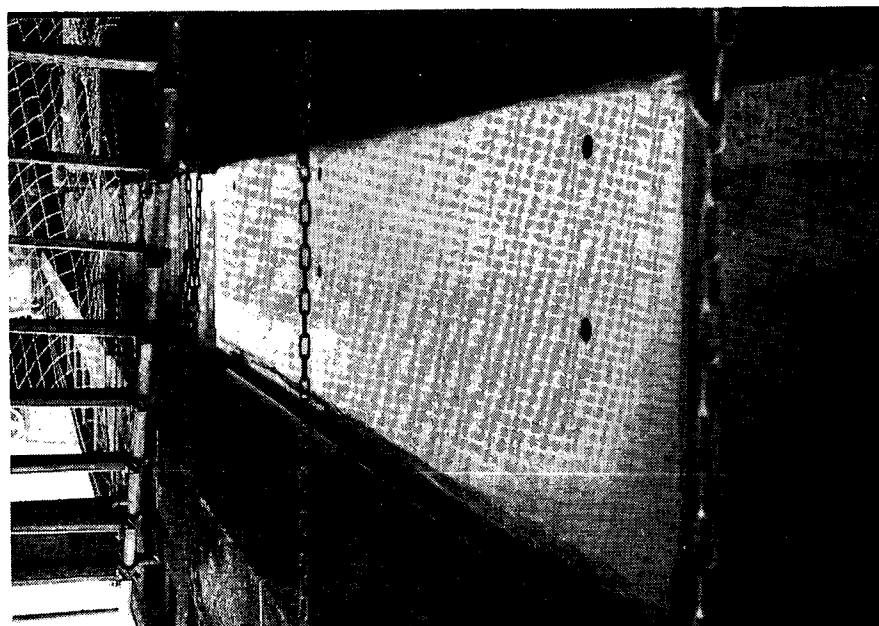
単位: mV

方式	測定位置	初期設定時 S.61.11.29	1 回目 S.61.11.18	2 回目 S.61.12.18	3 回目 S.61. 1.20	4 回目 S.62. 3.26	5 回目 S.62. 7.16	6 回目 S.62. 9.30	7 回目 S.62.11.16
方式	1 A	192	149	213	184	148	198	171	195
	2 A	191	180	155	157	112	134	131	135
	3 A	62	67	59	62	44	39	41	36
	4 A	107	105	92	89	72	103	106	121
	5 A	234	243	218	204	185	230	224	211
	6 A	160	161	155	149	134	166	134	188
	7 A	-5	-18	-18	-6	11	-24	-15	-7
中央	8	-1	-1	-14	1	1	-7	-1	3
	9	-10	-14	-13	8	3	-8	-2	3
方式	1 B	158	140	138	140	154	166	119	122
	2 B	103	84	79	86	114	122	92	95
	3 B	47	35	24	28	27	13	19	17
	4 B	155	127	142	232	224	268	146	157
	5 B	149	139	124	144	139	147	122	116
	6 B	147	135	130	182	219	267	170	179
	7 B	-4	4	-9	0	-3	-14	-1	10



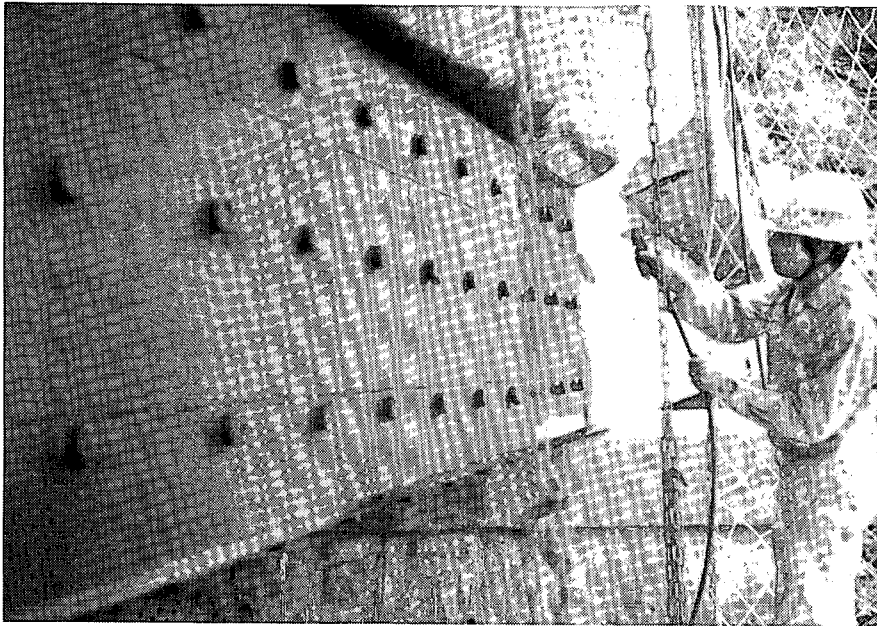
写真－ 3. 3. 1

A方式，導電モルタル
のこて塗り



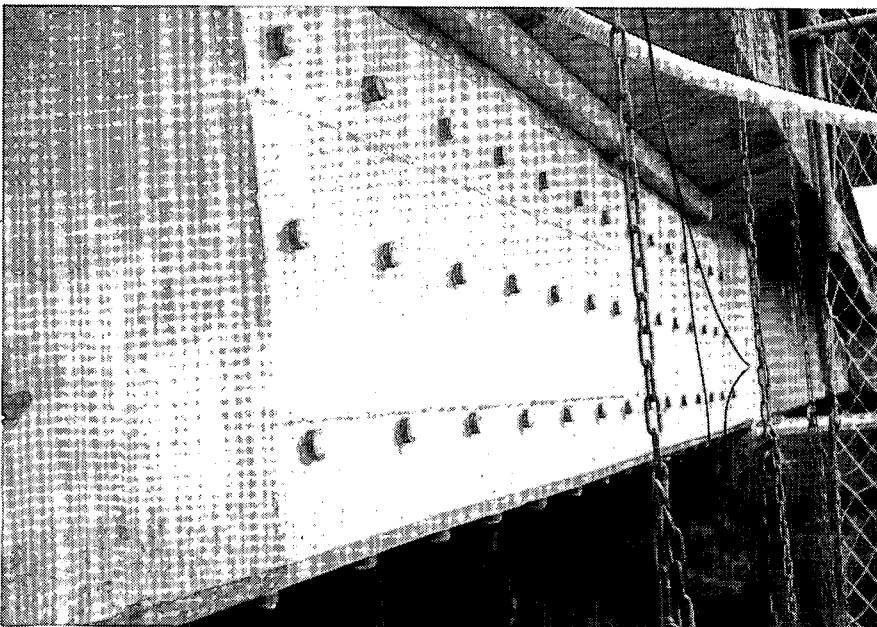
写真－ 3. 3. 2

A方式，電気防食工事
完成後



写真－ 3. 3. 3

B方式，導電性塗料の
塗布



写真－ 3. 3. 4

B方式，電気防食工事
完成後

4. コンクリート中の鉄筋の腐食診断に関する研究

塩害等で損傷を受けたコンクリート構造物中の鉄筋の腐食程度を非破壊で的確に評価し、その腐食程度に応じた適切な対策を実施することは、コンクリート構造物の維持管理上重要な事である。

コンクリート中の鉄筋の腐食を非破壊で診断する方法は各種検討されているが、その中から測定が簡易な自然電位測定法を選んだ。自然電位測定法は、すでにASTMに基準化されているが、実用化するには測定条件、測定値の評価などについて検討を加える点が残されている。本共同研究では、これらの点を明らかにすることを目的として、測定方法および自然電位と腐食診断を行い、自然電位測定法の適用性を調べた。

4.1 室内および屋外における腐食診断試験

自然電位測定法により鉄筋の腐食診断を正確に行うために、自然電位の測定方法および自然電位と腐食の関係について検討した。試験項目および供試体の性状を表-4.1.1および図-4.1.1～図-4.1.6に示す。

4.1.1 自然電位の測定方法に関する試験

1) 概要

自然電位を正確に測定するために、測定に用いる接触液、照合電極、直流電圧計および鉄筋の腐食箇所を検知するための測定間隔について検討した。

2) 試験方法

(1) 接触液の検討

コンクリート中の鉄筋の自然電位の測定は、照合電極をコンクリート表面に接触させて行う。一般に、コンクリート表面は乾燥しているので測定前に水溶液で湿らせる必要がある。本報ではこの溶液を接触液と称し、測定に適した接触液の種類および湿潤時間について検討した。

① 供試体

表-4.1.1の供試体番号1, 塩分濃度 0 kg/m^3 , $100\times100\times400\text{ mm}$

表-4.1.1の供試体番号14, 3 kg/m^3 , $100\times100\times400\text{ mm}$

② 接触液

3%塩化カリウム水溶液, 人工海水, 水道水

飽和水酸化カルシウム水溶液 (以下, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ と称す)

③ 照合電極

飽和甘こう照合電極 (以下, 甘こう電極と称す) 4本

④ 直流電圧計

入力抵抗 $100\text{ M}\Omega$, 4チャンネル

表-4.1.1 試験項目および供試体の形状

試 験 項 目	因 子	供試体番号	塩分Cl ⁻ (Kg/m ²)				か ぶ り (mm)			鋼 種				鋼 表 面			W/C (%)			セメント		混 和 剤			クラック		個数	図番	供試体寸法(mm) 縦(厚さ)×横×長さ
			0	0.6	1.2	3.0	10	20	50	SR	SD	PC	結束線	さび	黒皮	みがき	40	55	65	普通	高炉	無し	AE剤	防錆剤	有り	無し			
屋外暴露試験	塩 分 浸 透	1	○					○			○			○			○		○			○			○		45	4.1	100×100×400
	セメントの種類	2	○					○			○			○			○			○			○		○		3		
	混 和 剤	3	○					○			○			○			○			○				○		3			
		4	○					○			○			○			○					○		○		3			
	水/セメント比	5	○					○			○			○		○		○			○			○		3			
		6	○					○			○			○			○			○				○		3			
	ク ラ ッ ク	7	○					○			○			○			○			○			○		3	4.2			
	鋼 表 面	8	○					○			○			○			○			○			○		○		3	4.1	
		9	○					○		○					○		○			○			○		○		3		
	鋼 種	10	○					○				○		○			○		○			○			○		3	4.3	
		11	○					○				○		○			○		○			○			○		3		
	塩 分 量	12		○				○			○			○			○		○			○			○		3	4.1	
		13			○			○			○			○			○		○			○			○		3		
		14				○		○			○			○			○		○			○			○		3		
	か ぶ り 厚	15	○					○			○			○			○		○			○			○		3	4.4	
		16	○							○		○			○			○			○				○		3		
測定間隔の検討	かぶり厚	17	○					○		○				○			○		○			○		○		2	4.5	150×150×2000	
		18	○						○	○				○			○		○			○		○		1	4.6		
アノード電流試験		19					○			○	○				○			○		○				○		24	4.7	100×100×200	

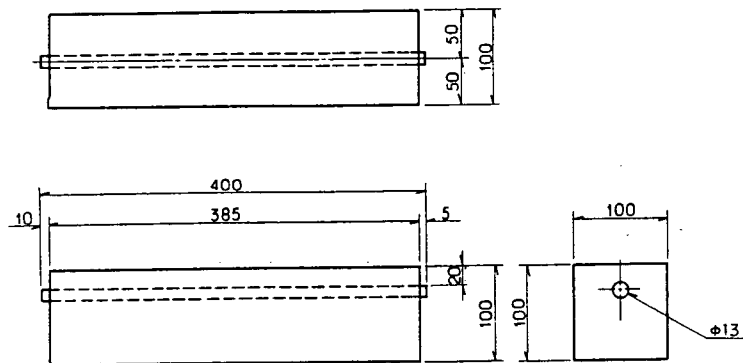


図- 4. 1. 1 供試体形状

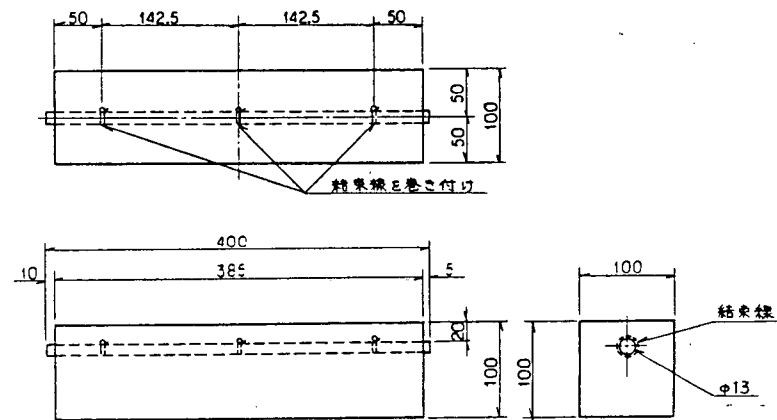


図- 4. 1. 3 供試体形状

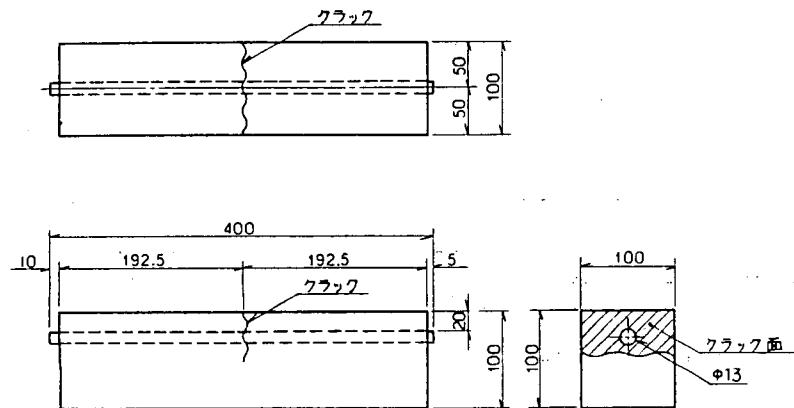


図- 4. 1. 2 供試体形状

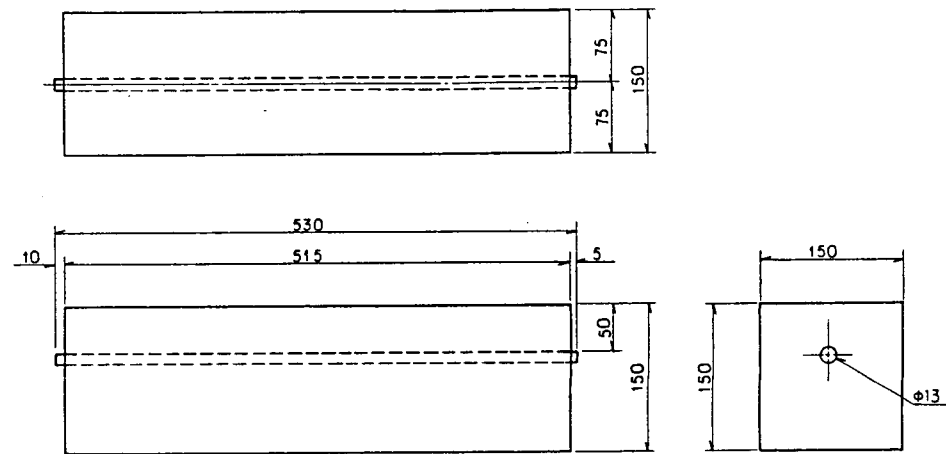


図- 4. 1. 4 供試体形状

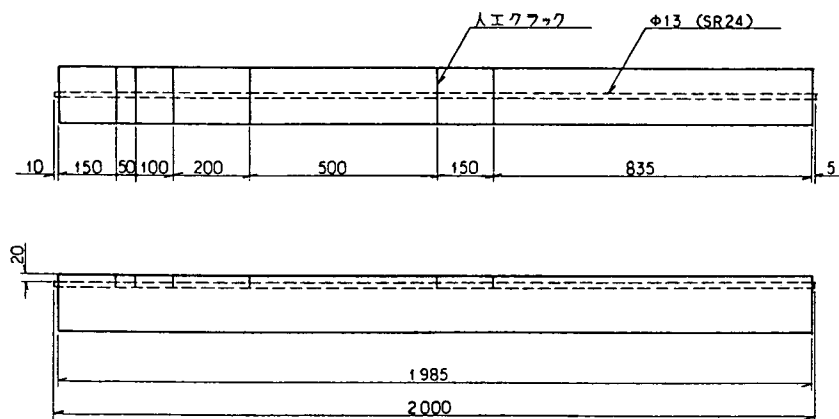


図- 4. 1. 5 供試体形状

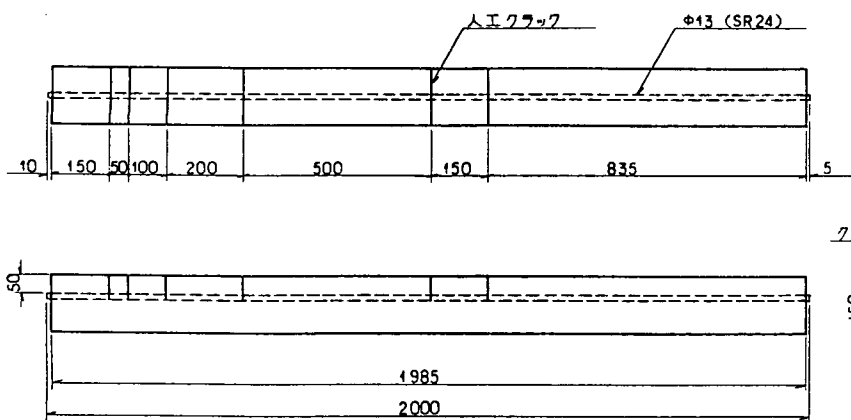


図- 4. 1. 6 供試体形状

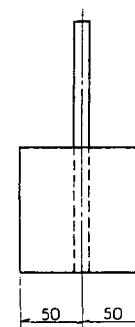
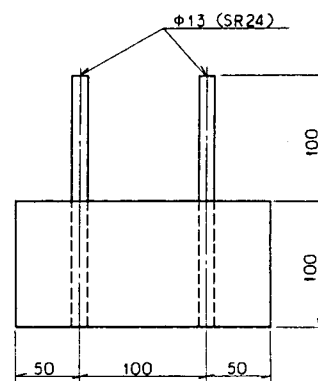
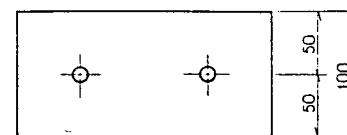
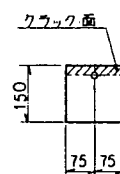


図- 4. 1. 7 供試体形状

⑤ 測定手順

図-4.1.8に示すように、4本の樹脂管($\phi 16 \times 70 \text{ mm}$)をコンクリート供試体の表面に並べて立て、接着剤で固定した。樹脂管内に脱脂綿を厚さ 10 mm に詰め、この上に甘こう電極を立てた。4種類の接触液を各々の樹脂管内に 2 mL ずつ滴下し、直流電圧計で鉄筋の自然電位を連続6時間測定した。

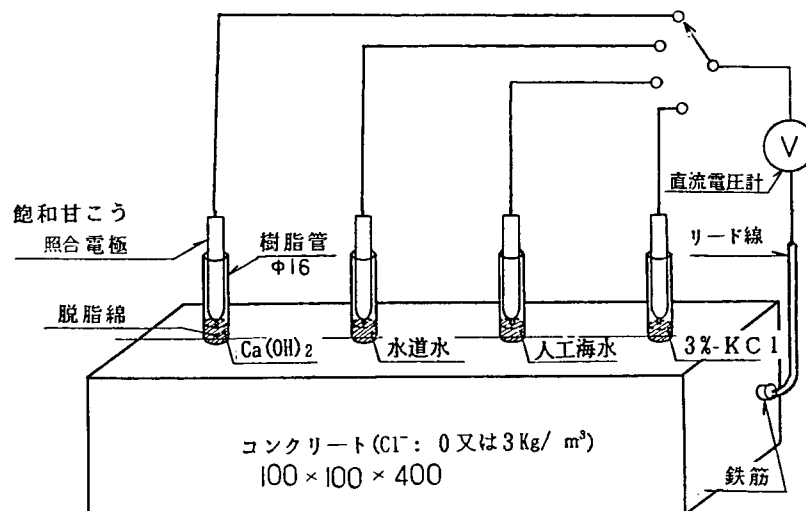


図-4.1.8 接触液の検討

(2) 照合電極の検討

コンクリート構造物中の鉄筋の自然電位を測定するのに適した実用的な照合電極について検討した。

① 照合電極

甘こう電極、鉛照合電極、飽和硫酸銅照合電極（以下、硫酸銅電極と称す）

② 供試体

PCコンクリート供試体、塩分濃度 0 kg/m^3 , $100 \times 100 \times 2000 \text{ mm}$

屋外に自然暴露

③ 接触液

$\text{Ca}(\text{OH})_2$

④ 直流電圧計

入力抵抗 $100 \text{ M}\Omega$

⑤ 測定手順

接触液の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を脱脂綿に含浸させ、これを供試体の表面に置いてコンクリート表面を局部的に湿らせた。この脱脂綿に鉛照合電極、甘こう電極および硫酸銅電極の順に当て、同一のPC鋼線の自然電位を測定した。測定値は全て甘こう電極基準(SCE)に換算した。照合電極の構造を図-4.1.9に示す。

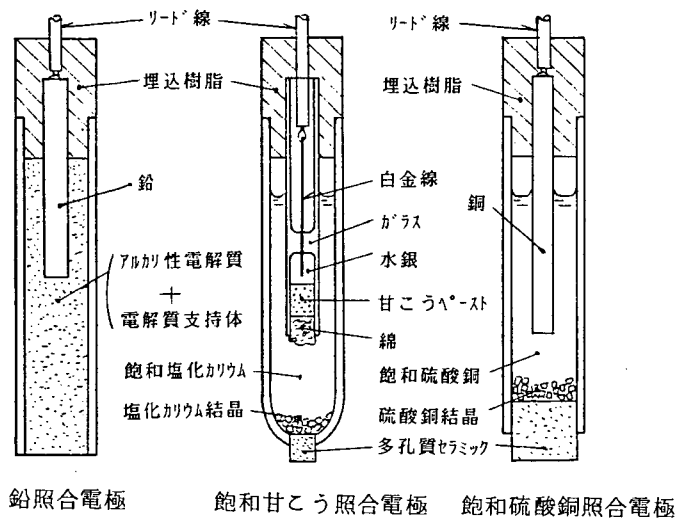


図- 4. 1. 9 照合電極の構造

(3) 直流電圧計の入力抵抗の検討

コンクリート中の鉄筋の自然電位測定に適した直流電圧計の入力抵抗について検討した。

① 直流電圧計

入力抵抗 1, 10, 100, 10000 $M\Omega$

② 供試体

表- 4. 1. 1 の供試体番号 1, 100×100×400 mm

室内で約 1 年間自然放置して乾燥

③ 接触液

$\text{Ca}(\text{OH})_2$

④ 照合電極

鉛照合電極

⑤ 測定手順

図- 4. 1. 10 に示すように, 供試体の表面を $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を含浸させた脱脂綿で 20 分以上湿らせた後に, 鉛照合電極を供試体に当てた。直流電圧計とゼロ抵抗電流計を直列に接続し, 鉄筋の自然電位を測定するとともに, 測定回路に流れる電流を測定した。

(4) 測定間隔の検討

自然電位によって鉄筋の腐食箇所を検知するために必要な適正な測定間隔について検討した。

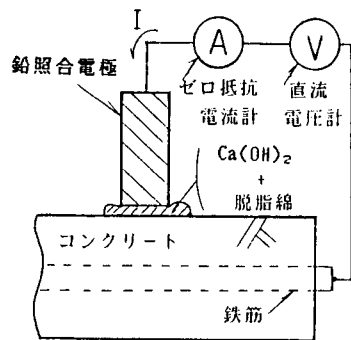
① 供試体

表- 4. 1. 1 の供試体番号 17 (かぶり厚 20 mm) および 18 (かぶり厚 50 mm)

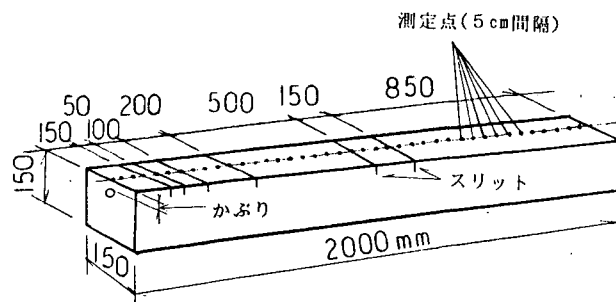
塩分濃度 0 kg/m^3 , 150×150×200 mm, 2 mm 巾スリット合計 6 箇所

② 暴露条件

3% 食塩水を屋外試験場にて 1 日 1 回の割合で 7 カ月間散布



図－ 4. 1.10 入力抵抗の検討



図－ 4. 1.11 測定間隔の検討

③ 接 触 液

$\text{Ca}(\text{OH})_2$

④ 照合電極

甘こう電極

⑤ 直流電圧計

入力抵抗 $100\text{ M}\Omega$ 以上, 2 チャンネル

⑥ 測定手順

接触液の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を含浸させた脱脂綿を鉄筋の直上に 5 cm 間隔に並べてコンクリート表面を湿らせた後, 照合電極を測定点に順に当てて鉄筋の自然電位を測定した。測定箇所を図－ 4. 1.11に示す。

3) 試験結果および考察

- (1) 接触液を変えて鉄筋の自然電位を測定した結果を表－ 4. 1. 2, 表－ 4. 1. 3, 図－ 4. 1.12および図－ 4. 1.13に示す。

塩分を含まない供試体の自然電位は, 接触液の添加直後から急激に卑 (マイナス) 方向に変化した。接触液に $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を用いた場合の自然電位は約 20 分後にほぼ安定した。また, 自然電位は接触液によって異なった値を示し, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を用いた場合が最も卑だった。

接触液によって自然電位が異なったのは, 接触液とコンクリートの界面で生じた液間電位差の自然電位は接触液によって異なった値を示し, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を用いた場合が最も卑だった。

塩分を含む供試体の自然電位は, いずれの接触液においても約 10 分後にほぼ安定した。また, 違いによると考えられる。液間電位差は, コンクリート中のアルカリ成分である飽和水酸化カルシウム水溶液が水道水のような他種の溶液と接する界面で生じる。従って接触液に $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 液を用いればコンクリートのアルカリ成分と同じなので, 液間電位差は生じ難いと考えられる。さらに, 図－ 4. 1.12において $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を用いて測定した自然電位が最も早く安定したので, 接触

表- 4. 1. 2 接触液と自然電位
($C1: 0\text{ kg/m}^3$)

時間 (分)	接 触 液			
	3% KCl	人工海水	水道水	Ca(OH) ₂
0	-4	-2	-10	-48
1	-16	-5	-27	-63
2	-22	-7	-31	-67
5	-30	-12	-36	-76
10	-35	-16	-38	-82
24	-41	-20	-40	-87
34	-43	-22	-40	-88
44	-45	-24	-41	-89
54	-47	-25	-41	-89
60	-48	-26	-40	-89
60	-48	-26	-40	-89
90	-52	-28	-37	-89
120	-54	-30	-37	-89
150	-56	-31	-35	-88
180	-58	-32	-33	-88
240	-60	-34	-30	-87
300	-62	-36	-28	-86
360	-64	-37	-26	-84

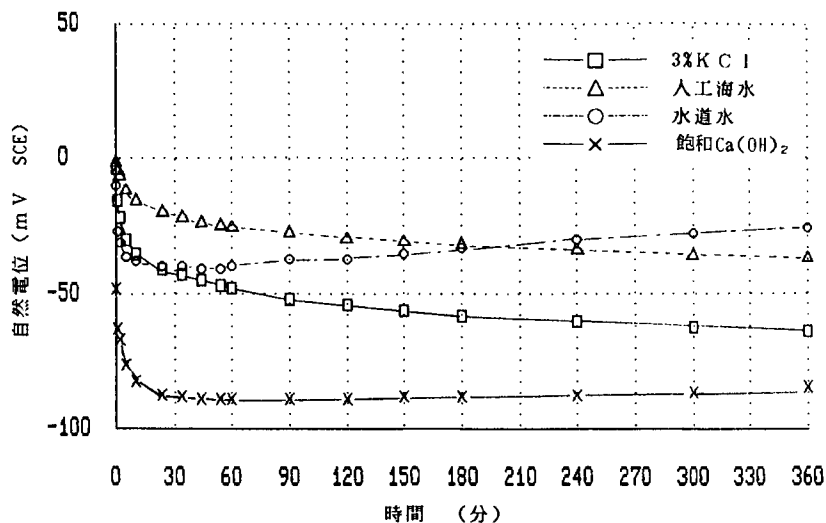


図- 4. 1. 12 接触液と自然電位 ($C1: 0\text{ kg/m}^3$)

表- 4. 1. 3 接触液と自然電位
($C1: 3\text{ kg/m}^3$)

時間 (分)	接 触 液			
	3% KCl	人工海水	水道水	Ca(OH) ₂
0	-84	-105	-73	-125
1	-101	-110	-101	-136
2	-108	-114	-111	-144
5	-118	-121	-120	-162
10	-123	-125	-122	-171
24	-126	-128	-122	-174
34	-127	-129	-122	-176
44	-128	-130	-122	-176
54	-129	-130	-121	-176
60	-130	-131	-120	-176
60	-130	-131	-120	-176
90	-131	-131	-116	-177
120	-132	-132	-112	-175
150	-132	-133	-115	-174
180	-133	-133	-116	-173
240	-133	-132	-117	-171
300	-134	-132	-117	-169
360	-134	-131	-116	-167

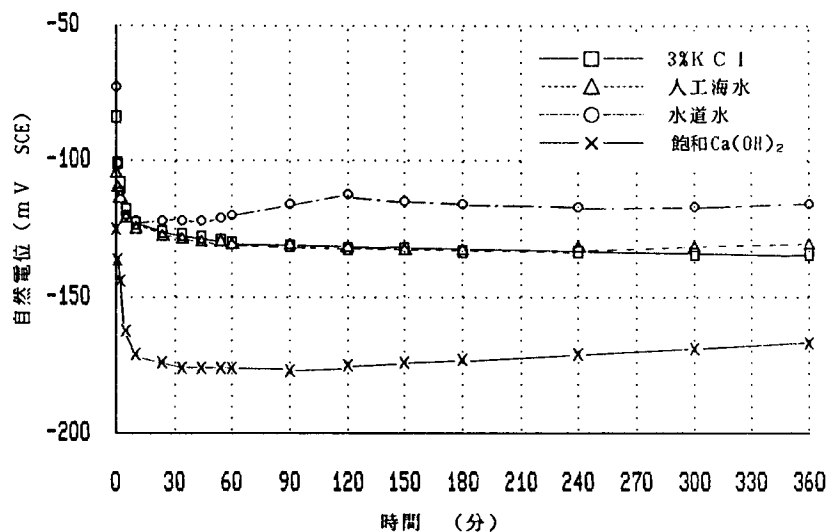


図- 4. 1. 13 接触液と自然電位 ($C1: 3\text{ kg/m}^3$)

液には $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を用いることにした。

(2) 照合電極の検討

コンクリート供試体中の PC 鋼線の自然電位を 3 種類の照合電極で測定した結果を表- 4. 1. 4 にします。測定結果は、全て甘こう電極基準 (SCE) に換算した。

電極を下向きにした場合、鉛照合電極と甘こう電極とでは同様な値を示したが、硫酸銅電極では異なった値を示した。これは硫酸銅電極の内部液が電極の先端部で接触液の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ によ

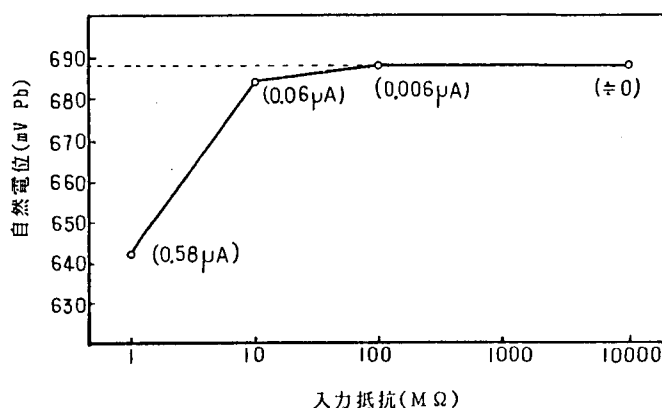
て汚染され測定値に誤差を生じたものと考えられる。

甘こう電極および硫酸銅電極を上向きにして測定した結果、内部液が不足の場合に電位が大きく変動し測定が出来なかった。これは電極の先端に気泡が上昇し、電極内部の抵抗が非常に高くなったためである。従って、これらの構造の照合電極は、内部液を満たす必要がある。

表－ 4. 1. 4 PC鋼線の自然電位

(mV SCE)

照合電極の種類	内部液の量	電極の向き		
		下向き	横向き	上向き
鉛	—	－14	－13	－14
飽和甘こう	満	－13	－13	－13
	不足	－14	－13	測定不能
飽和硫酸銅	満	+29 ～+41	+34 ～+56	+42 ～+57
	不足	+42 ～+49	+38 ～+43	測定不能



図－ 4. 1. 14 入力抵抗と自然電位

(3) 直流電圧計の入力抵抗の検討

入力抵抗の異なった直流電圧計を用いて、室内で乾燥させたコンクリート供試体中の自然電位を鉛照合電極で測定した結果を図－ 4. 1. 14に示す。

入力抵抗が $1M\Omega$ および $10M\Omega$ の直流電圧計では $100M\Omega$ 以上の場合に比較して測定値がそれぞれ $46mV$ および $4mV$ ほど小さくなり、測定値に誤差を生じた。これは、図－ 4. 1. 14の中に示すように入力抵抗に反比例した大きさの電流が測定回路（照合電極／コンクリート／電圧計）に流れたためである。従って、乾燥したコンクリート中の鉄筋の自然電位を測定するには、入力抵抗が $100M\Omega$ 以上必要と考えられる。

(4) 測定間隔の検討

屋外で塩水散布又は自然暴露を7ヶ月間行った供試体（ $150 \times 150 \times 2000mm$ ）について、鉄筋に沿って $5cm$ の間隔で自然電位を測定した結果を表－ 4. 1. 5 および図－ 4. 1. 15～図－ 4. 1. 17に示す。

塩水散布を行った供試体（かぶり厚 $20mm$, $50mm$ ）の鉄筋は、コンクリートのクラックの位置で激しく腐食し、自然電位は $-300mV$ SCE より卑な値を示した。

自然暴露を行った供試体の鉄筋は、一部のクラックの位置でわずかに腐食し、自然電位は $-100mV$ SCE より貴な値を示した。

塩水散布、かぶり厚 $20mm$ （図－ 4. 1. 15）の供試体の自然電位は、腐食部の面積の密度が高い部分（ $15 \sim 50cm$ ）で卑な値を示し、健全な部分（ $120 \sim 200cm$ ）で貴な値を示した。しかし、それ

それぞれの腐食箇所に対応した卑な自然電位は測定出来なかった。また、健全な部分においても -350mV SCE より卑な値を示し、ASTMの基準にある「90%以上の確率で腐食している： -350mV CSE (-270mV SCE)」範囲に入っていた。これは、鉄筋の腐食箇所（アノード）から健全な部分（カソード）へ電流が流れ、健全部の電位が卑方向に分極したためと考えられる。従って、自然電位の測定間隔を短く取っても局所的な腐食箇所の検出は難しく、測定間隔は $10\sim 30\text{cm}$ が実用的であると考えられる。

表- 4.1.5 測定間隔の検討

距離 (cm)	自 然 電 位 (mV SCE)		
	塩 水 散 布		自然暴露
	かぶり厚 20mm	かぶり厚 50mm	かぶり厚 20mm
0	-475	-373	-61
5	-506	-389	-43
10	-490	-372	-72
15	-488	-390	-58
20	-475	-365	-55
25	-499	-403	-69
30	-473	-366	-70
35	-493	-380	-58
40	-468	-363	-49
45	-494	-396	-72
50	-460	-369	-66
55	-466	-381	-66
60	-443	-365	-61
65	-461	-368	-88
70	-420	-349	-55
75	-452	-361	-66
80	-386	-344	-66
85	-422	-361	-59
90	-385	-368	-73
95	-424	-364	-63
100	-379	-340	-72
105	-399	-363	-84
110	-401	-338	-76
115	-384	-360	-73
120	-373	-324	-63
125	-374	-342	-73
130	-367	-318	-63
135	-374	-335	-60
140	-353	-322	-63
145	-370	-333	-66
150	-377	-313	-66
155	-384	-333	-59
160	-373	-319	-56
165	-367	-358	-67
170	-363	-320	-77
175	-373	-329	-55
180	-376	-313	-58
185	-365	-330	-84
190	-380	-323	-67
195	-380	-359	-78

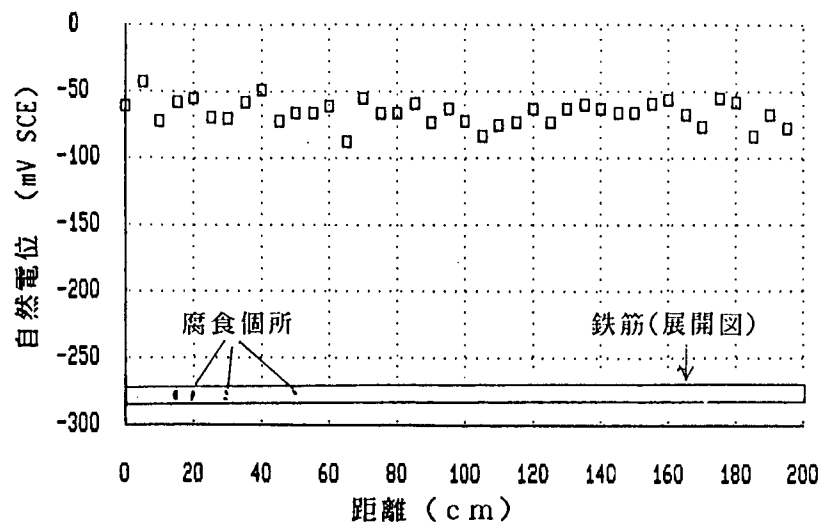


図- 4.1.15 腐食箇所と自然電位
(塩水散布, かぶり厚20mm)

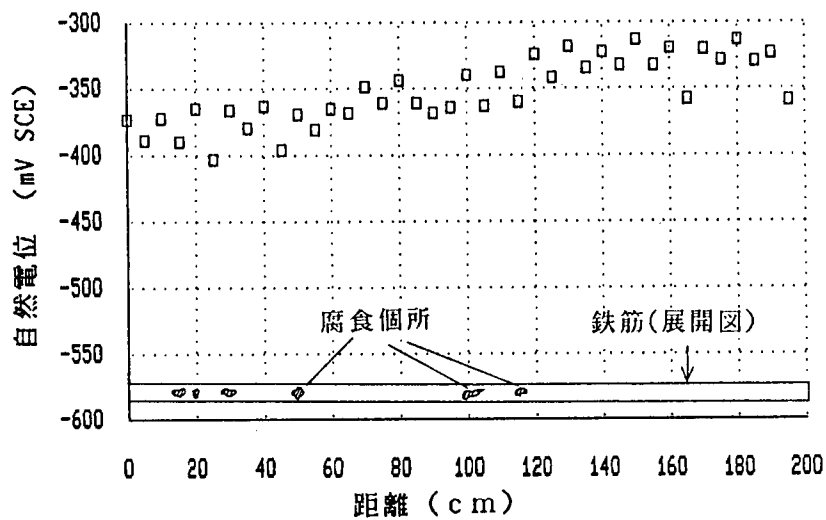


図- 4.1.16 腐食箇所と自然電位
(塩水散布, かぶり厚50mm)

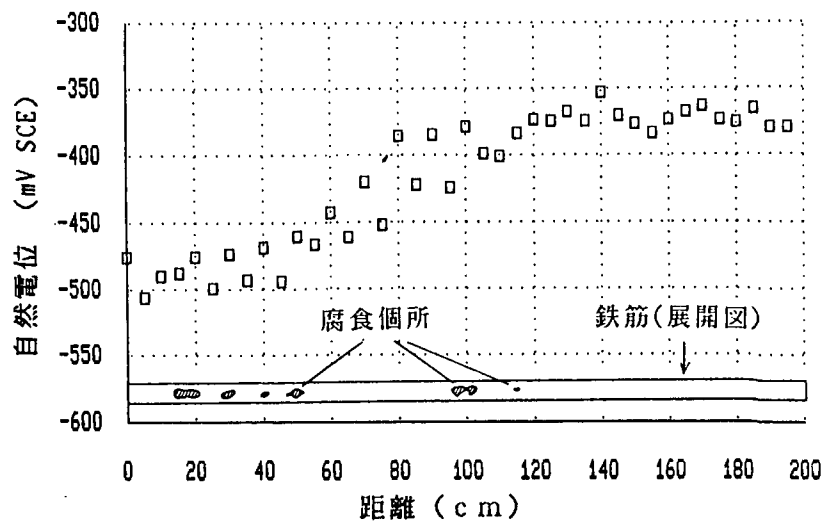


図- 4.1.17 腐食箇所と自然電位
(自然暴露, かぶり厚20mm)

4) ま と め

- (1) 自然電位の測定に際しコンクリート表面を事前に湿潤させる接触液は飽和水酸化カルシウム水溶液が適当であると考えられる。
- (2) 内部液を有する照合電極を上向きに使用する場合は、内部液を電極の先端まで満たす必要がある。
- (3) 自然電位の測定に用いる直流電圧計の入力抵抗は $100\text{ M}\Omega$ 以上が必要である。
- (4) 自然電位の測定間隔は、 $10\sim 30\text{ cm}$ が実用的と考えられる。

4.1.2 屋外暴露供試体による腐食試験

1) 概 要

自然電位から鉄筋の腐食を診断するために、屋外に暴露した小型供試体により自然電位と腐食の関係を調べた。

2) 試験方法

(1) 供 試 体

供試体は、表-4.1.1の供試体番号1～16で形状は $100\times 100\times 400\text{ mm}$ 又は $150\times 150\times 530\text{ mm}$ とした。使用した鉄筋は、JIS G 3112 SD30A $\phi 13\text{ mm}$ 又はSR24 $\phi 13\text{ mm}$ である。1本の鉄筋をそれぞれのコンクリート供試体に埋設した。コンクリートの示方配合を表-4.1.6に示す。

表-4.1.6 コンクリートの示方配合

供試体番号	粗骨材の最大寸法 (mm)	目 標 スランプ (ca)	目 標 空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 S/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)								測 定 結 果		
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤		塩分 NaCl	防錆剤 (g/m ³)	スランプ (ca)	空気量 (%)	硬化上り温度 (°C)
										No.70 (mm)	303 (mm)					
1	20	8.0	5.0	55	43	167	304	773	1047	760	0.38	-	-	8.0	4.9	20.0
2	"	"	"	"	"	"	"	770	1039	"	"	-	-	10.2	4.0	20.4
3	"	"	"	"	"	196	356	762	1028	"	"	-	-	11.5	1.1	20.2
4	"	"	"	"	"	167	304	773	1047	"	"	-	3.0	10.8	3.9	20.0
5	"	"	"	40	40	"	418	681	1044	"	"	-	-	7.5	4.2	"
6	"	"	"	65	45	"	257	828	1031	"	"	-	-	9.4	5.4	"
7	"	"	"	55	43	"	304	773	1047	"	"	-	-	11.0	5.3	"
8	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	-	-	7.2	4.6	20.4
9	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	-	-	7.8	5.0	"
10	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	-	-	8.1	5.2	20.0
11	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	-	-	8.0	4.8	"
12	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	9.89	-	8.2	5.2	"
13	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	19.78	-	8.3	4.8	"
14	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	49.46	-	8.4	5.0	"
15	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	-	-	11.0	5.3	"
16	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	-	-	8.5	4.8	"

(2) 暴露条件

供試体を屋外の試験場に並べて設置し、自然暴露、乾燥繰返し又は塩水浸漬を約7ヶ月間行った。

① 自然暴露

供試体を屋外の試験場に自然放置した。暴露状況を写真－4.1.1に示す。

② 乾湿繰返し

供試体を水槽内に並べて設置し、3%食塩水を1日12時間の割合で水槽内に入れ乾湿を繰返した。暴露状況を写真－4.1.2に示す。

③ 塩水浸漬

供試体を樹脂製の容器に入れ3%食塩水で完全に浸漬した。暴露状況を写真－4.1.3に示す。

(3) 測定項目

① 自然電位

下記の要領で供試体の自然電位を約1ヶ月毎に測定した。

- a. 照合電極：甘こう電極
- b. 接触液：Ca(OH)₂，20分以上湿潤後
- c. 測定点：鉄筋に最も近いコンクリート表面で鉄筋に沿って10cm間隔，計3点
- d. 直流電圧計：入力抵抗 100MΩ以上，2チャンネル

② 塩分量

供試体を割裂した後、鉄筋近傍におけるコンクリート中の可溶性塩分量を下記の要領で測定した。

- a. 試料採取：コンクリート・ドリルで粉碎
- b. 抽出：試料5gにイオン交換水200gを加え攪拌し、室温で12時間以上放置
- c. 分析：上澄液を希硝酸で中和後、イオン検知管でCl⁻イオンを分析
- d. 換算：換算値(Cl⁻kg/m³)=分析値(ppm)×0.092

ただしコンクリートの比重を2.3 ton/m³とした。

③ 水分量

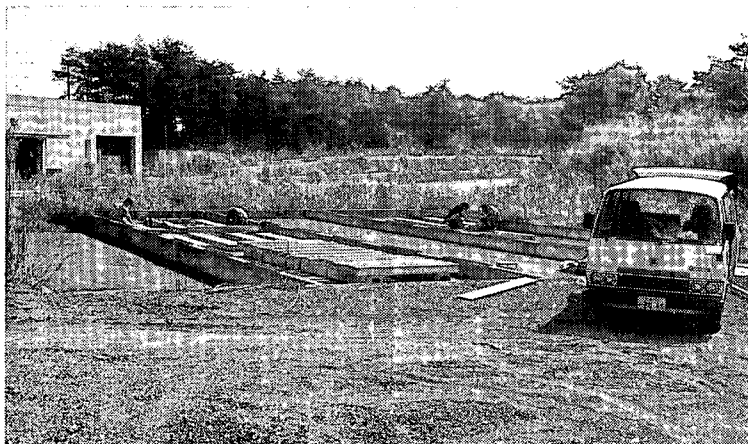
供試体のコンクリートを碎き、110℃で恒量になるまで乾燥した。

試料が含む水の重さを乾燥重量で割って水分量(%)とした。

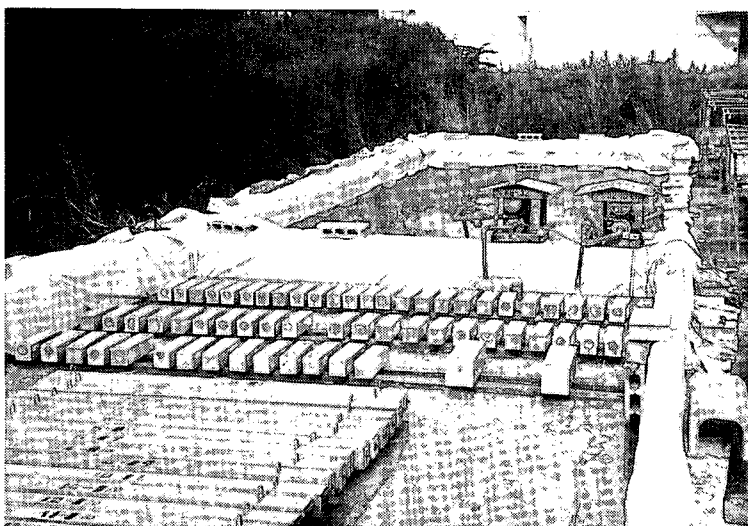
④ 鉄筋の腐食面積率

鉄筋の自然電位を測定した後に供試体の鉄筋をはつり出し、腐食箇所のスケッチ図から腐食面積を求めた。腐食面積を鉄筋の全面積で割って腐食面積率を算出した。

$$\text{腐食面積率(\%)} = \text{腐食面積(cm}^2\text{)} \div \text{鉄筋の全面積(cm}^2\text{)} \times 100$$



写真－4.1.1 自然暴露



写真－4.1.2 乾燥繰返し



写真－4.1.3 塩水浸漬

3) 試験結果および考察

屋外暴露供試体の鉄筋の自然電位を測定した後、供試体を割裂して鉄筋の表面を観察した。鉄筋は、いずれもコンクリートのかぶり厚が薄い側を中心に腐食した。鉄筋表面観察のスケッチ図の例を図-4.1.18に示す。また、鉄筋の自然電位、鉄筋の腐食面積率、塩分量および水分量の結果を表-4.1.7および表-4.1.8に示す。

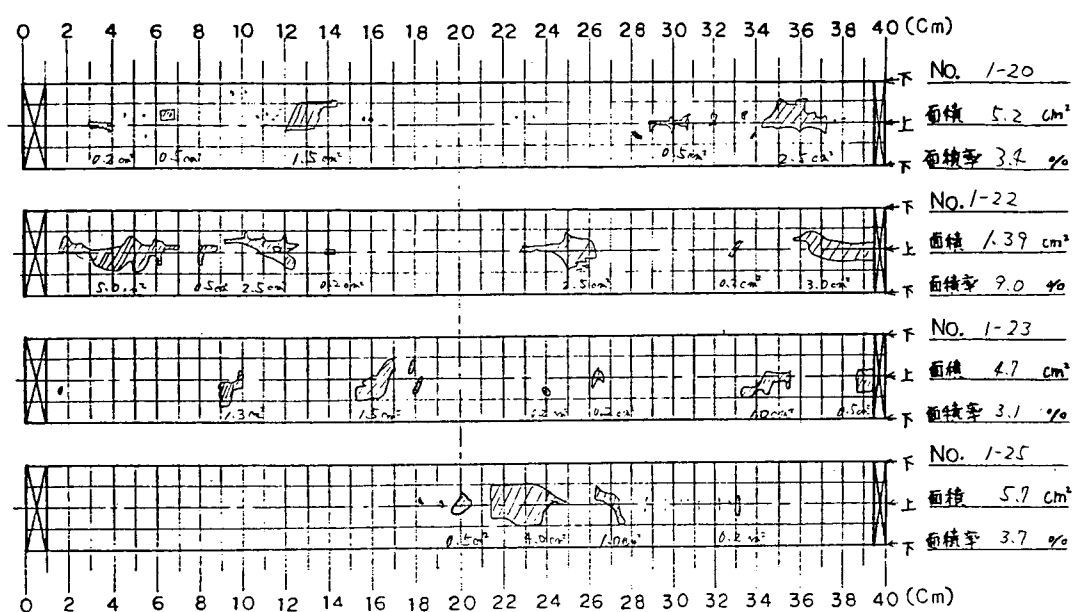


図-4.1.18 鉄筋のスケッチ図

自然電位と腐食面積率の関係を調べるために、異形鉄筋の自然電位および腐食面積率の結果（みぎきおよびPC鋼線の結果を除く合計55体）を図-4.1.19に示す。

図-4.1.19では、自然電位が卑であるほど鉄筋の腐食面積率は指数関数的に高くなった。この結果から、自然電位と鉄筋の腐食の程度とは関係があると考えられる。

鉄筋の腐食の確率および腐食面積率を自然電位によって区分けした結果を表-4.1.9に示す。自然電位が -200mV SCE より貴な範囲では鉄筋の腐食は認められなかった。自然電位が $-200\sim -300\text{mV SCE}$ の範囲では、腐食は認められないか又は中程度（腐食面積率：0～9%）であり -300mV SCE より卑な範囲では自然電位が卑であるほど腐食の程度（面積率）は高かった。

ASTMの基準では自然電位と腐食の確率について述べているが、本報の結果から、自然電位によって腐食の確率ばかりでなく腐食の程度も推定出来ると考えられる。

なお、実構造物においては、自然電位の異なる複数の鉄筋がコンクリート中に存在し、図-4.1.15に示すように腐食部（アノード）と健全部（カソード）とが影響し合った自然電位を示すので、実構造物における自然電位の測定結果を蓄積し、表-4.1.9の結果を検証する必要があると考えられる。

表- 4. 1. 7 屋外暴露試験結果 (その1)

暴露 条件	供試体 番号	電位 (mV SCE)								腐食 面積率 (%)	塩分量 (kg/m ³)	水分量 (%)
		経過時間 (月)										
		0	1	1.5	2.5	3.5	5	6	7			
自然	1.1	-134	-64	-108	-108	-91	-81	-45	-43	—	—	—
	1.2	-125	-99	-113	-135	-107	-85	-47	-47	—	—	—
	1.3	-137	-92	-150	-119	-110	-83	-54	-46	—	—	—
	1.4	-137	-103	-134	-117	-103	-82	-50	-46	—	—	—
	1.5	-183	-153	-183	-167	-145	-116	-85	-70	—	—	—
	1.6	-149	-119	-138	-119	-109	-91	-65	-61	—	—	—
	1.7	-125	—	—	—	—	—	—	—	0	—	—
	1.8	-179	—	—	—	—	—	—	—	0	—	—
	1.9	-164	—	—	—	—	—	—	—	0	—	—
乾湿	1.10	-167	-121	-179	—	—	—	—	-178	0	.17	3.1
	1.11	-127	-96	-165	—	—	—	—	-165	0	.17	3
	1.12	-144	-110	-178	—	—	—	—	-178	0	.16	2.9
	1.13	-138	-109	-173	-166	—	—	—	-165	0	.09	4.6
	1.14	-142	-104	-159	-155	—	—	—	-155	0	.23	5
	1.15	-133	-93	-162	-155	—	—	—	-155	0	.09	4.1
	1.16	-134	-95	-148	-153	-119	-302	-344	-344	4.5	1.2	3.64
	1.17	-134	-97	-157	-159	-132	-171	-167	-167	0	1.47	3.18
	1.18	-130	-93	-150	-151	-117	-160	—	—	0	—	3.02
	1.19	-135	-89	-149	-154	-121	-208	—	—	0	—	3.66
	1.20	-139	-99	-160	-158	-127	-225	-325	-330	3.4	6.44	3.01
	1.21	-132	-90	-145	-147	-120	-366	-401	-401	6.8	2.76	2.61
	1.22	-134	-88	-153	-162	-127	-366	-376	-296	9	4.6	3.83
	1.23	-133	-90	-153	-150	-119	-290	-353	-366	3.1	7.36	2.16
	1.24	-136	-94	-160	-164	-259	-419	—	—	2.5	—	3.85
	1.25	-131	-95	-159	-156	-123	-362	-362	-325	3.7	5.52	3.84
	1.26	-150	-106	-167	-161	-294	—	—	—	.13	1.56	1.7
	1.27	-141	-104	-163	-140	-127	-369	-365	-340	6.4	6.44	2.88
	1.28	-135	-91	-155	-160	-134	-353	-343	-324	4.7	5.98	2.86
	1.29	-134	-92	-150	-160	-125	-339	-338	-317	3.3	5.52	3.28
	1.30	-142	-101	-155	-165	-138	—	—	—	0	1.66	2.4
	1.31	-152	-124	-172	-299	-295	—	—	—	.7	2.48	2.4
	1.32	-147	-108	-161	-169	-137	-389	-375	-374	8.4	6.44	3.19
	1.33	-141	-99	-146	-156	-133	-300	-371	-315	—	—	—
	1.34	-137	-94	-167	-169	-142	-184	-155	-364	—	—	—
	1.35	-150	-142	-181	-233	-125	-222	-337	-366	—	—	—
	1.36	-135	-96	-168	-154	-292	-402	-384	-360	—	—	—
	1.37	-141	-96	-180	-163	-267	-410	-379	-363	—	—	—
	1.38	-124	-83	-155	-137	-121	-158	-371	-317	—	—	—
	1.39	-133	-90	-162	-159	-138	-408	-404	-360	—	—	—
	1.40	-128	-89	-159	-157	-123	-304	-329	-343	—	—	—
	1.41	-142	-108	-177	-176	-136	-357	-356	-374	6.2	6.44	3.01
	1.42	-138	-85	-162	-152	-174	-398	-418	-386	7	7.36	3.38
	1.43	-153	-113	-191	-175	-138	-402	-416	-387	8.1	5.52	2.83
	1.44	-146	-93	-162	-151	-120	-369	-403	-377	—	—	—
	1.45	-149	-93	-162	-149	-119	-389	-393	-371	—	—	—

※ 供試体性状

SD30A φ13

かぶり 20mm

普通セメント

A E 剤入

水/セメント比 55 %

塩分量 0 kg/m³

表- 4.1.8 屋外暴露試験結果 (その2)

供試体 性状	暴露 条件	供試体 番号	電位 (mV SCE)										腐食 面積率 (%)	塩分量 (kg/m ³)	水分量 (%)
			経過時間 (月)												
			0	1	1.5	2.5	3.5	4	5	6	7				
高炉セメント	乾湿	2.1	-132	-98	-135	-122	-101	—	-137	-207	-283	.5	2.76	2.72	
	乾湿	2.2	-146	-82	-126	-130	-104	—	-112	-112	-128	—	—	—	
	浸漬	2.3	-134	-103	-221	-356	-269	—	-283	-258	-216	2	—	3.05	
混和剤 無し	乾湿	3.1	-128	-97	-141	-153	-131	—	-318	-382	-261	—	—	—	
	乾湿	3.2	-148	-113	-156	-156	-151	—	-341	-390	-373	13	5.06	4.13	
	浸漬	3.3	-173	-160	-293	-376	-242	—	-355	-400	-371	7.6	6.44	4.63	
防錆剤	乾湿	4.1	-149	-118	-172	-175	-154	—	-334	-319	-339	—	—	—	
	乾湿	4.2	-127	-88	-152	-166	-137	—	-156	-160	-366	1.2	6.44	3.94	
	浸漬	4.3	-130	-113	-293	-420	-240	—	-324	-345	-354	2.6	4.6	4.43	
水/セメント比 40 %	乾湿	5.1	-145	-95	-189	-185	-160	—	-217	-183	-164	—	—	—	
	乾湿	5.2	-151	-99	-181	-180	-161	—	-184	-136	-145	0	1.84	3.39	
	浸漬	5.3	-141	-99	-189	-179	-212	—	-220	-131	-112	0	.92	4.31	
水/セメント比 65 %	乾湿	6.1	-163	-122	-165	-171	-388	-418	—	—	—	5.6	1.56	2.2	
	乾湿	6.2	-173	-134	-180	-181	-187	—	-465	-444	-453	—	—	—	
	浸漬	6.3	-143	-118	-167	-166	-387	—	-452	-454	-450	17.2	6.9	3.73	
クワクワ有り	乾湿	7.1	-154	-77	-380	-439	-389	—	-460	-418	-350	8.8	5.52	3.26	
	乾湿	7.2	-154	-80	-152	-419	-399	—	-446	-407	-311	—	—	—	
	浸漬	7.3	-156	-113	-574	-440	-340	—	-545	-399	-373	9	6.44	4.78	
さび付	乾湿	8.1	-243	-164	-204	-192	-160	—	-214	-191	-255	—	—	—	
	乾湿	8.2	-221	-115	-153	-187	-172	—	-299	-337	-321	(7.9)	6.9	2.82	
	浸漬	8.3	-215	-172	-314	-533	-291	—	-283	-316	-352	(7.7)	4.6	4.01	
みがき	乾湿	9.1	-260	-200	-298	-284	-266	—	-330	-319	-246	0	4.6	3.09	
	乾湿	9.2	-256	-197	-304	-289	-307	—	-349	-342	-255	—	—	—	
	浸漬	9.3	-254	-222	-547	-562	-379	—	-328	-315	-225	.3	3.68	2.72	
結束線付	乾湿	10.1	-137	-85	-148	-161	-143	—	-322	-340	-397	2.3	4.6	2.85	
	乾湿	10.2	-135	-71	-154	-156	-142	—	-351	-341	-385	—	—	—	
	浸漬	10.3	-138	-108	-184	-249	-313	—	-284	-329	-333	5.9	2.76	4.37	
PC鋼	乾湿	11.1	-178	-147	-230	-234	-222	—	-261	-254	-216	—	—	—	
	乾湿	11.2	-181	-142	-192	-234	-213	—	-233	-257	-233	0	4.14	2.63	
	浸漬	11.3	-179	-169	-234	-250	-211	—	-199	-231	-214	0	2.76	4.06	
塩分量 0.6 kg/m ³	乾湿	12.1	-134	-105	-143	-171	-230	—	-414	-405	-397	—	—	—	
	乾湿	12.2	-130	-97	-149	-173	-155	—	-403	-416	-411	8.1	7.36	2.97	
	浸漬	12.3	-115	-106	-358	-606	-415	—	-437	-436	-451	5.5	7.36	3.93	
塩分量 1.2 kg/m ³	乾湿	13.1	-133	-111	-189	-205	-177	—	-318	-386	-360	3.5	5.06	4.16	
	乾湿	13.2	-140	-104	-183	-187	-159	—	-304	-329	-348	—	—	—	
	浸漬	13.3	-173	-135	-196	-473	-321	—	-352	-357	-384	7.2	6.44	3.78	
塩分量 3.0 kg/m ³	乾湿	14.1	-200	-154	-189	-270	-275	—	-401	-407	-393	10.4	6.9	5.19	
	乾湿	14.2	-197	-148	-163	-230	-297	—	-332	-326	-312	—	—	—	
	浸漬	14.3	-178	-133	-211	-731	-417	—	-558	-442	-493	8.5	9.66	3.79	
かぶり厚 10 mm	乾湿	15.1	-153	-113	-173	-456	-460	-488	—	—	—	7.8	1.56	2.56	
	乾湿	15.2	-146	-116	-157	-401	-453	—	-511	-432	-471	—	—	—	
	浸漬	15.3	-143	-109	-365	-671	-471	—	-520	-518	-512	14.9	5.06	3.3	
かぶり厚 50 mm	乾湿	16.1	-139	-94	-144	-148	-116	—	-191	-179	-210	0	1.38	2.86	
	乾湿	16.2	-139	-88	-154	-136	-119	—	-155	-154	-141	—	—	—	
	浸漬	16.3	-141	-90	-388	-545	-238	—	-198	-231	-179	0	2.3	3.37	

※ 標準仕様

SD30A φ13

かぶり 20mm

普通セメント

AE剤入

水/セメント比 55 %

塩分量 0 kg/m³

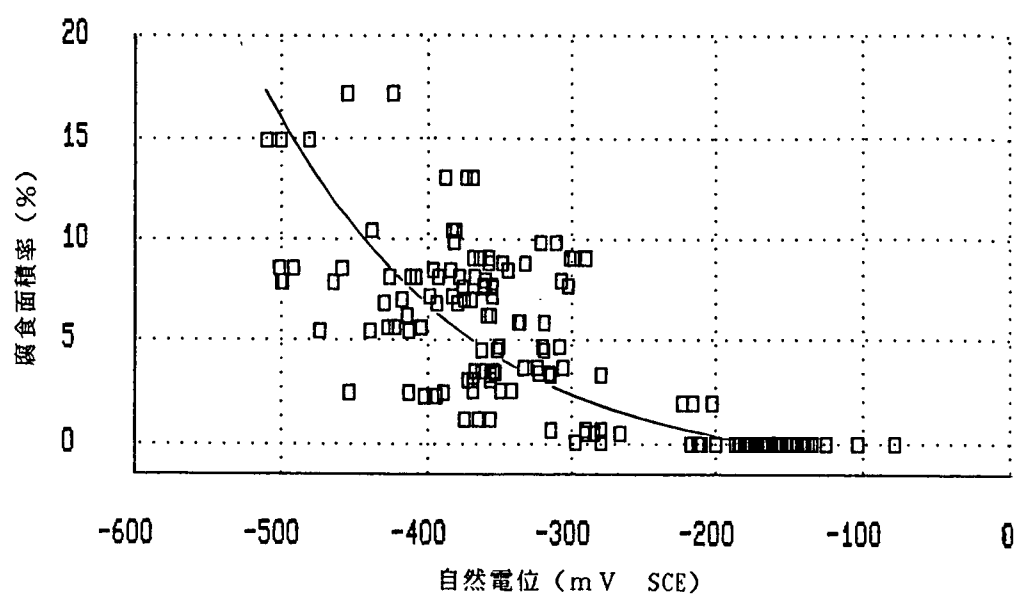


図- 4.1.19 自然電位と腐食面積率

表- 4.1.9 自然電位と鉄筋の腐食

自然電位 E の範囲 (mV SCE)	腐食の確率 (%)	腐食面積率 (%)
$E \geq -200$	0	0
$-200 > E \geq -300$	68	0 ~ 9
$-300 > E \geq -400$	100	0.7 ~ 13
$-400 > E$	100	2.5 ~ 17

4) まとめ

屋外暴露供試体による試験結果から、自然電位が -200mV SCE より貴な範囲では鉄筋の腐食は認められなかった。自然電位が -200mV SCE より卑な範囲では、自然電位が卑であるほど鉄筋の腐食程度は高かった。

4.1.3 強制通電による腐食試験

1) 目的

コンクリート中の鉄筋から強制的にアノード電流を流すことによって鉄筋を腐食させ、自然電位と腐食の関係を調べた。

2) 試験方法

(1) 供試体

供試体は、表－4.1.1の供試体番号19で形状は $100 \times 100 \times 200 \text{ mm}$ とし2本の鉄筋（SR24， $\phi 13 \times 200 \text{ mm}$ ）を平行に立ててコンクリートに打設した。

(2) 試験条件

a. 試験環境

恒温室 25℃，100%

b. 通電方法

1本の鉄筋をアノードに、もう1本の鉄筋をカソードにした。

電流密度：0，2，5，10，20，50，100，200mA/ m^2 鉄筋

c. 通電期間：71日間

(3) 測定項目

通電終了後の自然電位，鉄筋の腐食面積率

3) 結果および考察

通電終了後のアノード鉄筋の自然電位を表－4.1.10に示す。電流を切った直後の自然電位は貴な値を示し、通電時のアノード分極が残っていた。その後、自然電位は卑に変化し、アノード電流密度が高いほど卑であった。また、アノード電流密度が高いほど腐食面積率は高かった。

アノード電流を切ってから2日後の自然電位と鉄筋の腐食面積率の関係を図－4.1.20に示す。自然電位が卑であるほど腐食面積率は高く、屋外暴露供試体による試験結果（図－4.1.19）と同様な傾向が認められた。

4) まとめ

コンクリート中の鉄筋からアノード電流を流すことによって鉄筋を腐食させた結果、自然電位が卑であるほど腐食面積率は高く、屋外暴露供試体による試験結果と同様な傾向が認められた。

表- 4. 1.10 自然電位と腐食面積率 (強制通電試験)

供試体 番号	電流密度 mA/m ²	自然電位 (mV SCE)							腐食面積率 (%)
		直後	3hr後	27.5hr後	2日後	3日後	6日後	15日後	
19.11	0	-171	-172	-180	-157	-132	-119	-162	.5
19.12	0	-140	-134	-138	-125	-95	-81	-116	.8
19.13	0	-132	-146	-144	-131	-101	-98	-128	.4
19.21	2	531	415	-54	-103	-79	-102	-169	2
19.22	2	154	-226	-234	-229	-196	-187	-217	11
19.23	2	547	433	-64	-81	-63	-91	-137	2
19.31	5	547	-201	-207	-203	-172	-131	-151	4
19.32	5	591	304	-191	-178	-141	-138	-194	3
19.33	5	519	-202	-219	-204	-172	-154	-149	5
19.41	10	554	-186	-257	-234	-182	-126	-114	5
19.42	10	449	-317	-323	-299	-252	-216	-209	10
19.43	10	575	-36	-210	-198	-154	-117	-156	3
19.51	20	264	-384	-366	-350	-309	-285	-270	10
19.52	20	567	-280	-310	-301	-256	-230	-233	9
19.53	20	620	-198	-231	-219	-182	-160	-188	3
19.61	50	274	-393	-398	-376	-334	-302	-277	30
19.62	50	527	-344	-375	-366	-321	-283	-267	41
19.63	50	508	-320	-357	-337	-284	-256	-231	32
19.71	100	576	-355	-393	-373	-327	-283	-272	40
19.72	100	526	-389	-387	-351	-304	-237	-199	52
19.73	100	213	-418	-408	-382	-334	-287	-275	44
19.81	200	43	-440	-438	-418	-372	-341	-342	65
19.82	200	326	-424	-431	-415	-376	-351	-353	80
19.83	200	406	-471	-484	-482	-439	-408	-357	85

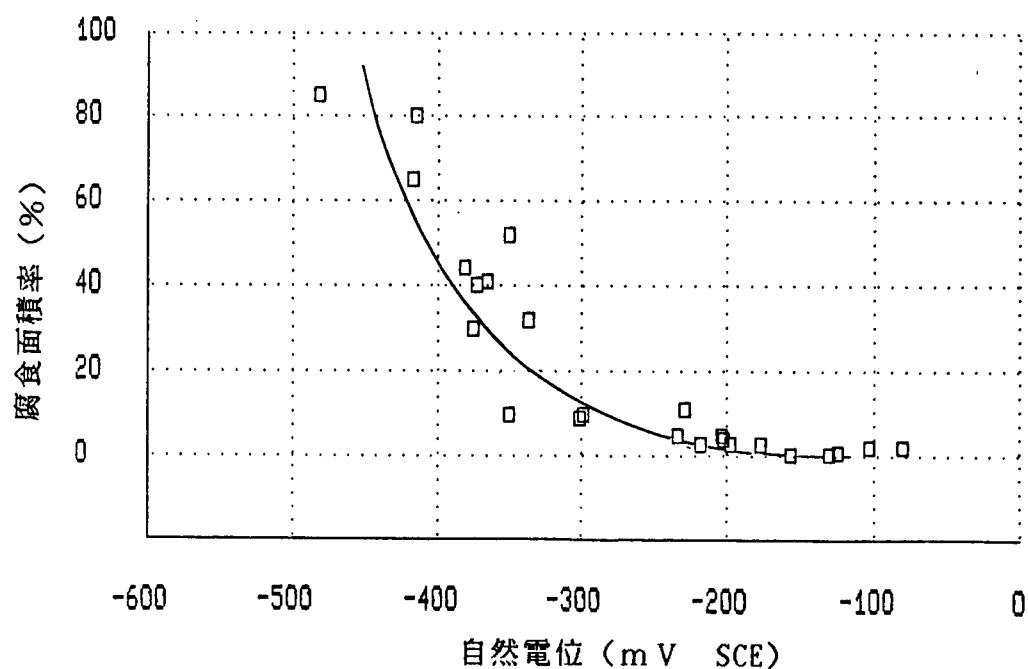


図- 4. 1.20 自然電位と腐食面積率
(強制通電試験)

4.2 実橋における腐食診断

1) 概 要

実橋においては鉄筋の自然電位分布から腐食診断を行い、自然電位測定法の適用性を調べた。

2) 試験方法

実橋（B橋）は、海岸線から約60mに位置するRCT桁橋で、橋桁の鉄筋が激しく腐食していたために桁底部を中心にプレパックド工法により修復した。

自然電位は、桁の150×400cmの範囲でコンクリート表面に格子状（25×30cm）に印した測定点に甘こう電極を当てて測定した。自然電位の測定は修復の前後に行った。

3) 試験結果および考察

鉄筋の自然電位を橋桁の修復前に測定した結果、桁の底部を中心に $-350 \sim -450$ mV SCEの範囲で非常に卑な値を示した。桁の底部の鉄筋をはつり出して観察したところ鉄筋が激しく腐食していた。このことは、屋外暴露供試体による試験結果（表-4.1.9）と一致した。

修復後の自然電位の分布を図-4.2.1に示す。自然電位は、橋桁の底部を中心に $-140 \sim -200$ mV SCEの範囲で貴な値を示した。一方、海側の側面上部では $-240 \sim -300$ mV SCEの範囲で卑な値を示した。これは、橋桁の底部を中心に修復を行った結果、底部の鉄筋の表面状態が健全になったためと考えられる。また、海側の側面中央において自然電位分布に著しい勾配が認められ、修復部がカソードに、未修復部がアノード部になって鉄筋の腐食が進行すると考えられる。

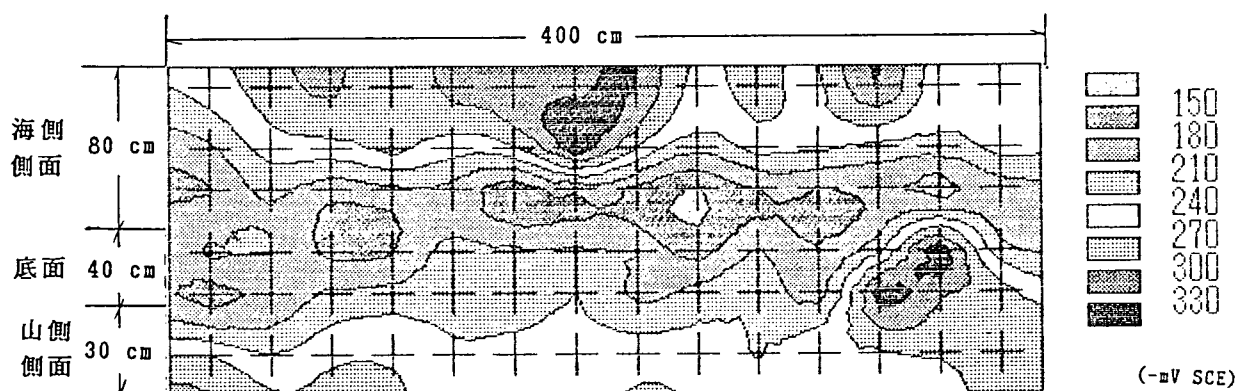


図-4.2.1 実橋の自然電位分布

4) ま と め

- (1) 自然電位測定法によって鉄筋の腐食診断を非破壊で行えることが確認された。
- (2) 実橋において、自然電位が $-350 \sim -450$ mV SCEを示す鉄筋は腐食したことが確認された。
- (3) 自然電位分布から、修復部がカソードに、未修復部がアノード部になって鉄筋の腐食が進行すると考えられた。

5. 研究結果の総括

コンクリート構造物の電気防食試験および鋼材の腐食診断試験結果を総括すると次のとおりである。

5.1 電気防食の効果の確認試験

- (1) コンクリート中の鉄筋の防食方法として、電気防食は有効であった。この場合の防食電流密度は、小型供試体、かぶり 20mm 、黒皮付鉄筋で $10\text{mA}/\text{m}^2$ 、さび付鉄筋で $20\text{mA}/\text{m}^2$ 程度であった。
- (2) コンクリート中の鉄筋表面近傍の塩分濃度は、電気防食をすることによって減少する傾向があった。

5.2 電気防食の鋼材付着力に対する影響試験

- (1) 通電6カ月間では、防食電流密度 $100\text{mA}/\text{m}^2$ のものでもPC鋼材とコンクリートの付着力の低下は認められなかった。

5.3 電気防食のPC鋼材の引張強度に対する影響試験

- (1) 通電16カ月では、電気防食によりPC鋼材の引張強度への影響はなかった。
- (2) 電流密度が $30\text{mA}/\text{m}^2$ 以上でかぶり 10cm では、水素を発生している電位を示していた。

5.4 クラックがある場合の電気防食試験

- (1) クラックがある場合でも、電気防食は有効であった。しかし、大きなクラックがある場合は、 $20\text{mA}/\text{m}^2$ 以上の防食電流密度が必要であった。

5.5 マクロセルがある場合の電気防食試験

- (1) 電気防食は、マクロセルがある場合でも有効であった。

5.6 陽極材料の検討試験

- (1) 仕上がりや外観は特に問題になるものではなく良好であるが、一部に施工性の劣るものもあった。一般に、施工性はモルタル系よりも塗装系のものの方が良かった。
- (2) コンクリートとの付着性は、特に問題になるものはないが、導電性セメントモルタルの一部に付着性が低いものも認められた。
- (3) 通電後の被覆材の耐久性は、ポリマーセメントモルタル系が比較的良かった。
- (4) 陽極電位変化から見た陽極性能は、白金-チタン線状電極+導電モルタルおよび導電性塗料の組み合わせが良好であった。逆に、良くなかったものとして垂鉛メタリコンがある。

5.7 大型プレストレストコンクリート供試体における電気防食試験

- (1) 施工性は、改善すべき点が残されているが実用化する上で障害となるような問題点はなかった。

- (2) 防食電流密度は分極試験結果から、初期値を $5\text{mA}/\text{m}^2$ とした。
- (3) 通電1カ月後の分極量の測定結果から、酸化物被覆チタン網状電極方式を用いたものは、防食対象部では全てが 100mV 以上の値で良好な防食状態を維持していることが分かった。一方、導電性塗料方式を用いたものは、一本の線状電極を使用した場合には 100mV 以上の分極量が得られていない部分があったので、予備に設置した二本の線状電極に通電した。なお、長期の防食効果を確認するために追跡調査を行うことにしている。

5.8 実橋におけるコンクリート中の鋼材の電気防食試験

- (1) 電気防食のいずれの方式とも、施工性は特に問題がなかった。
- (2) 初期において必要な防食電流密度は、分極試験結果から $20\text{mA}/\text{m}^2$ であった。
- (3) 防食電流密度は1年半後では、初期の $20\text{mA}/\text{m}^2$ から大きく減少し平均で $7.1\sim 8.3\text{mA}/\text{m}^2$ になった。しかし、鉄筋の電位は分極が進んで卑な値となっている部分が多く、良好な防食状態を維持しているものと判断できる。
- (4) 防食対象部においては1年半後でも、ほぼ 100mV 以上の分極量を得ており十分な防食効果があることが分かった。

5.9 自然電位測定方法に関する試験

- (1) 自然電位の測定に際しコンクリート表面を事前に湿潤させる接触液は飽和水酸化カルシウム水溶液が適当であると考えられる。
- (2) 内部液を有する照合電極を上向きに使用する場合は、内部液を電極の先端まで満たす必要がある。
- (3) 自然電位の測定に用いる直流電圧計の入力抵抗は、 $100\text{M}\Omega$ 以上が必要である。
- (4) 自然電位の測定間隔は、 $10\sim 30\text{cm}$ が実用的であると考えられる。

5.10 屋外暴露供試体による腐食診断試験

- (1) 自然電位は、鉄筋の腐食程度を知るうえで有効であることが分かった。
- (2) 自然電位が、 -200mV SCE より貴な範囲では鉄筋の腐食は認められなかった。一方、自然電位が -200mV SCE より卑な範囲では、自然電位が卑であるほど鉄筋の腐食程度は高かった。

5.11 強制通電による腐食試験

- (1) コンクリート中の鉄筋から強制的にアノード電流を流すことによって鉄筋を腐食させた結果、自然電位が卑であるほど腐食面積率は高い傾向にあった。

5.12 実橋における腐食診断試験

- (1) 鉄筋の自然電位を測定することによって、鉄筋の腐食診断を非破壊的に判断できることが確かめられた。

あ と が き

コンクリートの電気防食は、実橋試験、陽極材試験、プレストレストコンクリート桁試験結果などから、コンクリートの鉄筋の防食方法として有効なものであると判断された。また、コンクリート中鉄筋の腐食診断は、コンクリート中の鉄筋の自然電位を測定することによって鉄筋の腐食状況を非破壊的に検出できることが分かった。これらの結果をもとに、コンクリート構造物中の鋼材の電気防食要領(案)および自然電位測定によるコンクリート中の鋼材の腐食診断方法(案)を作成した。

今後、コンクリート構造物の電気防食および劣化診断を行う場合は、これらのものを参考にすると良いと思われる。なお、電気防食要領(案)および腐食診断方法(案)については試験の追跡調査、現場での適用試験等によって、さらに実用的なものにしていく必要がある。

謝 辞

コンクリート構造物の電気防食の共同研究に当っては、下記の方々に多大の御協力を頂きました。記して感謝の意を表します。

(敬 称 略)

桑原 啓三	建設省土木研究所 地質化学部長(現地質官)
室 稜	建設省高田工事事務所 調査第二課長
井沢 慎治	建設省高田工事事務所糸魚川国道維持出張所技術係長
荒居 昇	(財)土木研究センター 事務局長
善 一章	中川防蝕工業(株) 常務取締役
千葉 丈夫	中川防蝕工業(株) 技術開発部 部長代理
山本 郁雄	中川防蝕工業(株) 技術研究所 グループリーダー
篠田 吉史	中川防蝕工業(株) 技術開発部 主務
小林 豊治	日本防蝕工業(株) 常務取締役
玉利 昭一	日本防蝕工業(株) 技術開発部 部長
石川 光男	日本防蝕工業(株) 技術開発部
池松 敬介	日本防蝕工業(株) 技術開発部
大河原重昭	飛島建設(株) 総合企画本部技術開発部 課長
肥沼 年光	飛島建設(株) 総合企画本部技術開発部 主任
松島 洋	飛島建設(株) 総合企画本部技術開発部
石川 朗	飛島建設(株) 総合企画本部技術開発部

附 属 資 料

- I. コンクリート構造物中の鋼材の電気
防食要領 (案)
- II. Manual for Cathodic Protection
of Reinforcing Steel in Concrete
(Draft)
- III. 自然電位測定によるコンクリート中
の鋼材の腐食診断方法 (案)



I. コンクリート構造物中の鋼材の電気
防食要領 (案)



目 次

1. 総 則	89
1.1 適用範囲	89
1.2 電気防食の基本方針	89
1.3 電気防食工法の手順	89
2. 防食基準	90
2.1 管理電位	90
2.2 防食電流密度	91
3. 腐食状況調査	92
4. 電気防食方法	92
4.1 防食方法の選択	92
4.2 防食装置	92
4.2.1 外部電源方式	92
4.2.2 流電陽極方式	94
5. 設 計	94
6. 施 工	94
6.1 関係諸規則	94
6.2 施工手順	95
7. 保守点検	98
8. 防食効果	100
9. 参考資料	101



1. 総 則

1.1 適用範囲

本要領は、常時大気に暴露されるコンクリート構造物中の鋼材の電気防食に適用する。

〔解説〕

本要領は、常時大気中に暴露されている橋脚、橋桁、橋床版などのコンクリート構造物に用いる電気防食工法について述べる。適用範囲外の、常時水中に浸漬しているコンクリート構造物中の鉄の電位は酸素の拡散が少ないため非常に卑な電位を示す。また、コンクリートに鉄筋までいたるクラックが発生し、その中に常時水が溜まっている場合などでは海水中の鋼の防食基準で防食する必要がある。

1.2 電気防食の基本方針

本要領の電気防食は、コンクリート構造物が塩害により損傷するのを防止するために用いる。

〔解説〕

電気防食工法は、新設あるいは劣化がいまだ潜在化している段階（塩分がコンクリート中に浸透し、鋼材付近まで達している段階）で適用する場合と、劣化した既設構造物に対し、補修後に適用する場合がある。諸外国の例では、既設構造物に適用した例がほとんどであるが、コストの面を考慮すると潜在化の段階で適用するのが望ましい。

また、新設で、厳しい腐食環境下の構造物に対して適用することも有効である。

1.3 電気防食工法の手順

電気防食は、適切な手順に従って行うものとする。

〔解説〕

合理的かつ経済的な電気防食の手順を図－1に例示する。

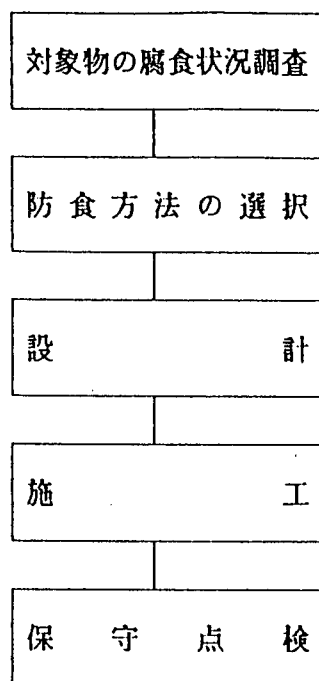


図-1 電気防食の手順例

2. 防食基準

2.1 管理電位

防食電流遮断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。

〔解説〕

鋼材に防食電流が流入すると、その電位は卑方向に移行する。これをカソード分極と呼んでいる。コンクリート構造物内の鋼材に対する防食電位については、多くの研究がなされており、各種の値が発表されている。これは、コンクリートの性状、環境条件、鋼材の表面状態などにより、それぞれ異なった値を示すためである。

コンクリート中の鉄筋の防食電位の例として次のようなものがある。

- 1) 塩化物の多い環境で -500mV vs CSE (-420mV vs SCE)、汚染されたコンクリート中で -710mV vs CSE (-630mV vs SCE)¹⁾。
- 2) -850mV vs CSE (-770mV vs SCE)²⁾。
- 3) -770mV vs CSE (-690mV vs SCE)³⁾。
- 4) $-850\text{mV} \sim -1000\text{mV vs Ag/AgCl}$ ($-840\text{mV} \sim -990\text{mV vs SCE}$)⁴⁾。
- 5) 孔食防止のためにその塩化物濃度における孔食発生電位より卑にすればよく、すでに孔食を発

生しているときは、自然電位より 50mV 電位を卑化させればよい⁵⁾。

(6) 100mV のカソード分極 (IR 降下を除いた電位変化)⁶⁾

ここで、CSE : 飽和硫酸銅電極, SCE : 飽和甘こう電極, Ag/AgCl : 海水塩化銀電極

日本コンクリート工学協会では 1983 年、海洋コンクリート構造物の防食指針(案)を作成し、ひびわれが発生した場合のように、鉄筋が直接海水に接するような環境を条件として -850mV vs CSE を提案している。

上記のごとく、コンクリート構造物の防食電位は環境などにより、大幅に変化する可能性があるため、100mV の電位変化量を採用することが最も实际的であり、信頼性が高いと考えられる。ここでいうカソード分極電位は、防食電流を流したままの状態で測定する電位 (ON 電位) ではなく、電流を切った直後の電位であり、Instant Off Potential とよばれるものである。コンクリートは、抵抗率の高い電解質であるから、電流を流したままでの測定値には当然 IR 降下が含まれる。この IR 降下を除いた真の分極電位 (Polarization Potential) と、不通電状態の定常電位との差が真の電位変化量 (分極量) である。実際の測定にあたっては、電流切断直後の電位と、数時間放置しほぼ安定した時点の電位の差を取ればよい。

環境その他によっては、100mV より少ない電位変化量で防食できることもあるが、100mV 以上の変化があれば十分な防食状態になる。また、過大な防食電流の適用は生成したアルカリによるコンクリートの軟化や PC 鋼の水素脆化をおこすおそれがあるので、通常分極電位 (防食電流切断後の値) が -1100mV vs SCE より卑にならないように注意する必要がある。

2.2 防食電流密度

通電初期の防食電流密度は分極試験を行い、100mV 以上の電位変化量を得る値とする。

〔解説〕

海水中に浸漬しているコンクリート構造物の防食電流密度は、通常 $2 \sim 5 \text{ mA/m}^2$ 程度であり、比較的小さい。これは、酸素の拡散が少ないためである。

これに対して、大気中に暴露されているコンクリート構造物では、酸素の拡散速度が大きく、また、外部から運ばれる塩分などの浸透によって腐食作用は大きくなり、防食電流密度も大きくなる。通常、 $10 \sim 30 \text{ mA/m}^2$ 程度であり、環境、コンクリートの性状、かぶり厚さなどにより異なる。従って、初期の防食電流密度は分極試験を行い、100mV 以上の電位変化量を得る値を求める必要がある。

また、長期間の通電により必要防食電流は次第に抵減する傾向にあり、その後の電位変化量の管理により、防食電流を調整すれば、より経済的である。

防食電流密度算出のための、防食面積はコンクリート中の鋼材の面積を計算することが望ましい

が、実際には困難なことも多く、表面近くに位置する鋼材が十分防食されればコンクリート構造物の防食の目的は達成されるため、防食しようとするコンクリートの表面積をとればよい。

3. 腐食状況調査

次の項目について、腐食状況調査を行う。

- (1) コンクリートの劣化状況
- (2) コンクリート中の鋼材の自然電位

〔解説〕

- (1) コンクリート中の鋼材の腐食により、ひびわれが発生し、コンクリートと鋼材の密着力が不良となっているところや、ジャンカなどのコンクリート劣化部は取り除く必要がある。
- (2) コンクリート中の鋼材の自然電位を別冊の「自然電位測定によるコンクリート中の鋼材の腐食診断方法(案)」によって測定し、“腐食が生じていない”と判定された箇所を除いて防食範囲とする。

4. 電気防食方法

4.1 防食方法の選択

電気防食は、外部電源方式または流電陽極方式により行う。

〔解説〕

電気防食には、外部電源方式と流電陽極方式とがある。外部電源方式は、直流電源装置の⊖側に被防食体を接続し、電解質中に設置した耐久性電極を電源装置の⊕側に接続して、防食電流を連続して流す方法である。流電陽極方式は、電解質中の被防食体に対し、卑な電位を有する合金陽極を電氣的に接続し、両者の電位差による電池作用を利用して、連続的に防食電流を流す方法である。

防食方法の選択にあたっては、対象物の構造、その置かれた環境、気象状況、コンクリートの抵抗率、電源の有無、維持管理を考慮して選択する必要がある。

4.2 防食装置

4.2.1 外部電源方式

- (1) 電極装置

電極装置は次の方法を標準とする。

- (1) コンクリート表面に網状電極（酸化物被覆チタン電極，導電性樹脂電極など）を配置し，その上をポリマーセメントモルタルで覆う方法。
- (2) コンクリート表面に線状電極（酸化物被覆チタン電極，導電性樹脂電極，白金メッキチタン電極など）を配置し，その上に導電性ポリマーセメントモルタルで覆う方法。
- (3) コンクリート表面に線状電極（酸化物被覆チタン電極，白金メッキチタン電極など）を配置し，その上に導電性塗料を塗布し，耐候性のある上塗り塗料を塗装する方法。
- (4) コンクリート表面に亜鉛を溶射し，その上に耐候性のある上塗り塗料を塗装する方法。

〔解説〕

大気に暴露されたコンクリートは抵抗率が高いので，防食電流を均一に流すには電極を防食対象と同程度の面積にするか，電極間隔を密にする必要がある。また，電極を単にコンクリート表面に配置しただけでは，鉄筋との抵抗が高く通電しにくいので，電極の上に導電性ポリマーセメントモルタルまたは，導電性塗料などを被覆する必要がある。被覆材料は，付着性が良く抵抗率の小さいものを選んで用いる必要がある。

また，導電性塗料や亜鉛溶射の場合には，耐候性を向上させるために，耐候性塗料を上塗りとして使用する必要がある。

(2) 電源装置

電源装置は，直流電源装置を標準とする。

〔解説〕

電源装置 1 回路の防食対象面積は，コンクリートの抵抗率が大きいことや維持管理の容易さを考慮して，選定することが望ましい。

また，電源装置については，通常の電気防食では次のような電源装置が広く用いられる。

1) 定電位直流電源装置

この装置は，防食対象の電位を埋設した照合電極を用いて，鉄筋の電位を所定の値に保つように，防食電流を自動的に増減させる装置である。

2) 定電圧直流電源装置

この装置は，所定の電圧で防食電流を供給するものである。

3) 定電流直流電源装置

この装置は，所定の電流を防食対象に供給するものである。

4.2.2 流電陽極方式

(1) 陽極装置

陽極装置は、流電陽極用亜鉛を標準とする。

〔解説〕

流電陽極方式で防食する場合、流電陽極を防食対象と同程度の面積にする必要があり、その形状はシート状が望ましい。流電陽極には、亜鉛系、アルミニウム系、マグネシウム系があるが、現在のところ、大きな面積の陽極に加工するには亜鉛が最適である。

また、陽極としての性能を発揮するためには、バックフィル材（石膏、ベントナイト、ぼう硝、水などを混合したもの）が必要である。

5. 設 計

設計にあたっては、長期に安定した電流を常時供給できるように留意する。

〔解説〕

1) 電源電圧

直流電源装置の直流側（二次側）の電源電圧は、60V以下とする。

2) 配線および配管材料の仕様と許容電流値

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。

3) モニタリング装置の選定と配慮

電気防食効果を常時把握するために、コンクリート中の鉄筋に溶接した電位測定端子を適当数設ける。また、電位測定用照合電極をコンクリート中に埋設する。

6. 施 工

6.1 関係諸規則

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などに準拠する。

〔解説〕

施工においては、関連する基準などを遵守しなければならないが、主として、関連するものを挙

げると次のようなものがある。

1) 土木工事共通仕様書

第8章塗装，第4節コンクリート面の塗装

2) 土木工事安全施工技術指針

第1章・第2節足場作業，第3節玉掛作業，第5節溶接

3) 電気設備技術基準

電気防食の電源装置を使用する施設に対して適用される規則である。

4) JIS規格またはその他の基準

JIS規格以外に，特記仕様書などに記載された事項に準拠すること。

5) 道路橋の塩害対策指針(案)・同解説

参考資料 補修事例，補修一般

6) 道路橋補修便覧

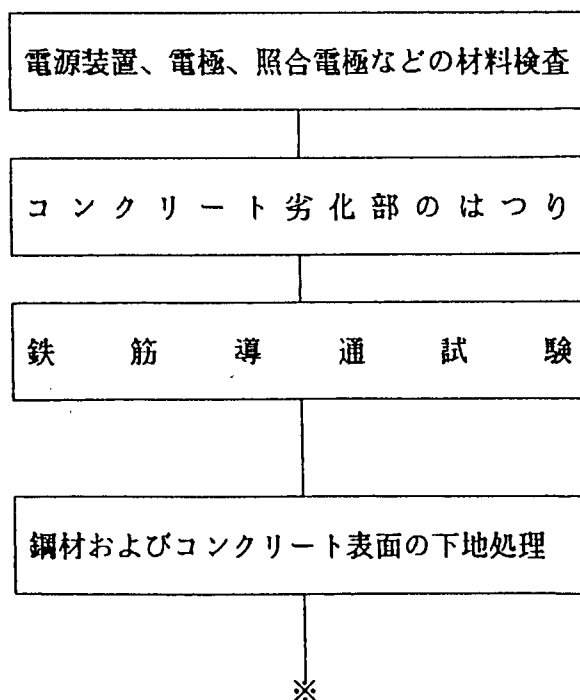
7) 道路橋示方書・同解説

6.2 施工手順

施工は，適切な手順に従って行う。

〔解説〕

補修工事で行われる施工手順を図－2に例示する。



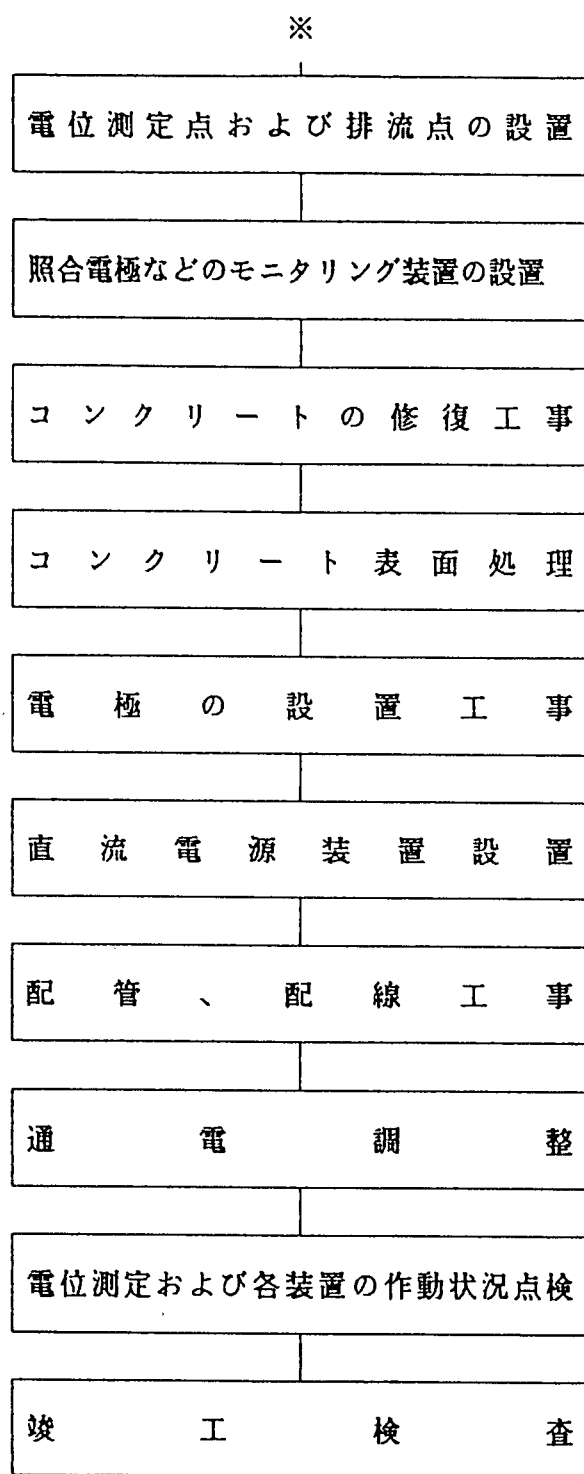


図-2 施工手順例

(1) コンクリート劣化部のはつり

コンクリート中の鋼材の腐食により、ひびわれが発生し、コンクリートが剝離し、落下しそうな部分やジャンカなどのコンクリート劣化部は取り除く。

(2) 鉄筋導通試験

防食対象となるコンクリート中の鋼材が、電氣的に一体であることは電気防食施工上の必須条件であるから、施工前に検査する必要がある。

コンクリート表面の各部をはつり、高入力抵抗 ($100 M\Omega$ 以上) の直流電圧計により鋼材相互の電位差を測定し、0mV程度であれば導通しているといえる。もし、導通不良が発見された場合はボンド工事を行って鉄筋が電氣的に一体となるようにする。

(3) 鋼材およびコンクリート表面の下地処理

コンクリートをはつった箇所の鋼材表面の錆はケレンする必要がある。また、コンクリート表面は補修工法に適した下地処理をする。

(4) 電位測定点および排流点の設置

コンクリート表面をはつり、排流用鉄筋を防食対象の鋼材に溶接し、電位測定用リード線および排流用リード線をコンクリート構造物内で直接取りつけ、外部に引き出しておく必要がある。なお、リード線の取りつけ部はエポキシ樹脂等で保護する。

(5) 照合電極およびモニタリング装置の設置

電位測定用照合電極などのモニタリング装置を設置するにあたっては、既設コンクリートと新しく使用するモルタルの間に空隙を生じないように、モルタルを充填する。また、モニタリング装置のセンサーの周囲に、十分モルタルが密着するように注意する。

(6) コンクリートの修復工事

コンクリートの劣化状況に応じて断面修復工事を行う。補修に用いる材料は、抵抗率の高い樹脂系のものは避ける。

(7) コンクリート表面処理

コンクリート表面に金属などが露出していると電極装置と防食対象の鋼材が短絡するため、コンクリート表面をパコメーターや目視で慎重に調べ、金属があれば除去する必要がある。

また、ポリマーセメントモルタル、導電性塗料および亜鉛溶射などで、コンクリート表面を覆う場合、適切な方法で表面処理を行い、下地への密着を良好にすることが必要である。なお、コンクリート表面から鉄筋の電位を測定する場合は、誤差を少なくするため、陽極材料等を部分的に被覆せずに残しておくことが必要である。

(8) 電極装置の設置工事

防食方式により異なるが、コンクリート表面に電極（線、網状）を樹脂製のピンなどを利用して取りつける。亜鉛溶射方式では、現場で直接溶射する。また、排流点、および陽極の通電点などは損傷を受けやすいので、十分に被覆材などで保護する。その後、被覆工事を行う。

(9) 直流電源装置設置工事（外部電源方式のみ）

防食対象構造物付近の適当な場所に設置しアンカーボルトなどを用い、十分に固定する。また、電気設備技術基準に準拠し、第3種接地工事を施さなければならない。

(10) 配管工事

配管工事に使用する電線管は、硬質塩化ビニル電線管または厚鋼電線管を使用しなければならない。

接続箱は、電極装置設置箇所および排流点に設ける。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は、中継用の接続箱を設ける。

(11) 配線工事

使用する電線は、JIS規格に適合した600Vビニル絶縁電線、クロロプレン外装ケーブル、ビニル外装ケーブルまたはポリエチレン外装ケーブルとする。また、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。

(12) 通電調整（外部電源方式のみ）

コンクリート中の鉄筋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。所定の防食電流密度になるように通電を調整する。

(13) 検 査

1) 材料検査

使用材料の検査は、現場に搬入された際に、数量の確認、寸法、外観などの検査を抜き取りで行う。

2) 竣工検査

検収は、防食対象施設の電位変化測定のほか、試験成績書および工事記録写真などの書類検査により行う。

7. 保守点検

電気防食装置の保守点検は、次の項目によって行う。

- (1) 電源装置の調査
- (2) 電極の調査
- (3) モニタリング装置の調査
- (4) 配線、配管の調査

〔解説〕

- (1) 点検項目および実施時期

点検項目および実施時期を表－１に示す。

表－１ 点検項目および実施時期

項目／種類	定 期 点 検
実 施 時 期	毎 年 １ 回
電 源 装 置	電圧、電流、絶縁、メーターなどのチェックおよび清掃
電 極 装 置	電 流 、 外 観
モ ニ タ リ ン グ 装 置	作動状況のチェック
配 線 、 配 管	目視、通電点、排流点などのチェック
電 位 測 定	ポータブル照合電極および埋込み電極により代表点の測定

(2) 電源装置（外部電源方式のみ）

直流電源装置の運転状況の確認は、最低２ヶ月毎に１回程度行い、その運転状況を記録することが望ましい。

前回の点検記録と比較して、出力電圧が大幅に変動している場合は、回路に異状が発生していると考えられるので、その回路の精密点検を行う必要がある。

また、点検時の電位測定の結果に基づいて、通電電流または通電電圧の調整を行う。

(3) 電極装置

亜鉛溶射電極や導電性塗料は別として、電極の劣化状態を目視観察で判断することは難しい。したがって、各電極からの通電電流を測定し、設計電流値または許容電流値以下で通電されていることを確認する必要がある。また、許容電流以上の電流が流れている場合には、同一回路内電極の故障などが考えられるので、故障の原因を究明し、補修しなければならない。

(4) 配線、配管

腐食環境の厳しい場所に電線が敷設されているので、定期点検時には、配線の絶縁抵抗を測定し、絶縁不良と思われる箇所は速やかに補修する必要がある。

8. 防食効果のモニタリング

適正な数量の埋設型照合電極を設置する。

〔解説〕

モニタリング装置には、電位測定用照合電極、鉄筋プローブ、防食効果測定用電気抵抗プローブ、マクセルプローブなどがある。

(1) 電位測定用照合電極

適切な防食を行うには、防食対象物の電位管理が必要である。また、橋脚、橋床版などは外部から電位測定を行うには、足場などが必要となる。従って、埋設型の照合電極が有効である。埋設型照合電極は多種あるがコンクリートという強アルカリ性環境中で比較的、長時間安定した電位を示すものに塩化銀電極、鉛電極、モリブデン電極、水銀電極などがある。

(2) 鉄筋プローブ

防食電流密度を測定するためのもので、防食対象と同じ表面状態で、同じ材質のものが理想的である。

(3) 防食効果測定用電気抵抗プローブ

腐食に基づく金属の減肉により増加する電気抵抗を測定して、腐食量の経時変化を測定するもので、ある程度の長期間にわたる防食効果のモニタリングに有効である。この金属は、防食対象と同材質のものが望ましい。

(4) マクセルプローブ

予め塩分を混入したモルタルで被覆した鉄筋をコンクリート中に埋設し、これを人工アノード部とし、この鉄筋の電位や電流を測定して防食効果を判定するものである。

9. 参考資料

〔電気防食の原理〕

コンクリート中の鋼材は高アルカリにより、その表面は不動態化しており、ほとんど腐食しない。しかし、塩分が鋼材に接触すると、鋼材の不動態被膜はこわれ、腐食が発生する。この腐食箇所は、他の鋼材表面と比較すると、電位的に卑な値であり、この部分から電流が他の健全部へと流出する。すなわち、この部分がアノード部であり、他の部分がカソード部である。

この鋼材に、外部から電流を与えると、まず電流はカソード部へ流れ、カソード部の電位は卑方向へ変化する。そして、アノード部とカソード部の電位差が0になったとき、電流が流れなくなり、腐食は停止する。これを電気防食法という。

〔電気防食の施工例〕

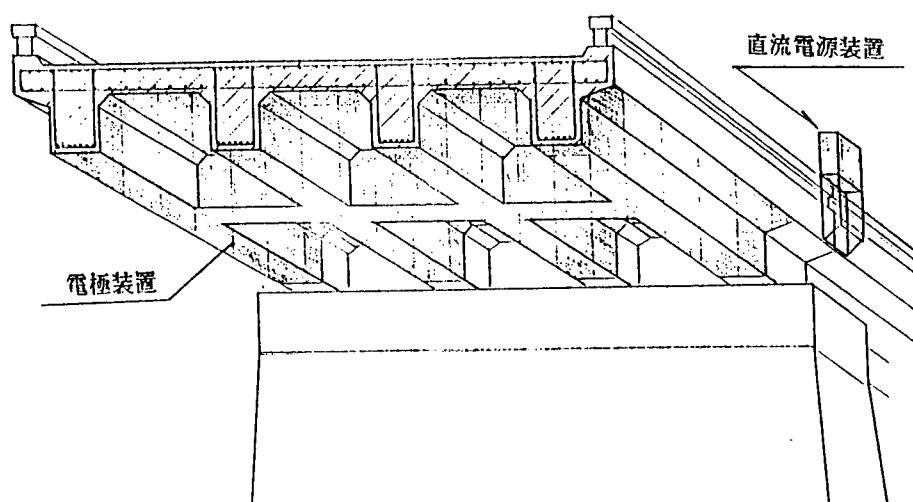


図-1 橋梁の電気防食施工例（全体図）

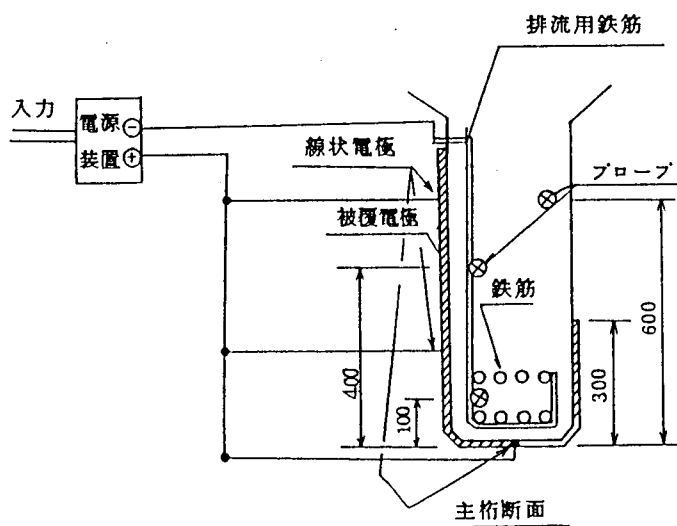


図-2 橋梁の電気防食施工例（詳細図）

〔参考文献〕

- 1) D.A. Hausman: Mater. Perform., 8, No.10, 25 (1969)
- 2) John E. Slater: NACE Paper No.132,7 (1979), 日本コンクリート工学協会：海洋コンクリート構造物の防食指針(案), P30-33, (1983)
- 3) J.B. Vrabie, B.E. Wilde: NACE Paper No.135,8 (1979)
- 4) Bernard Heuze: NACE Paper No.138,8 (1979)
- 5) J.F. Henriksen: Corrosion Science, 20, 1249 (1980)
- 6) John A. Apostolos, Richard A. Carello, Kerri M. Howell: Conference on Cathodic Protection of Reinforced Concrete Bridge Decks, Paper No.16
- 7) R.A. Gummom: Cathodic Protection — A Critical Review of NACE Standard RP-01-69, Paper 343 Corrosion '86
- 8) J.A. Lehman: Conference on Cathodic Protection of Reinforced Concrete Bridge Decks, Paper No.23, (1985)
- 9) William R. Schutt: Conference on Cathodic Protection of Reinforced Concrete Bridge Decks, Paper No.10 (1985)
- 10) H.C. Schell, D.G. Manning: Evaluating the Performance of Cathodic Protection System on Reinforced Concrete Bridge Structure, NACE Paper No.263 (1985)
- 11) Robert P. Brown, Rodney G. Powers: Update on the Use of Conductive Materials for Cathodic Protection of Steel in Concrete, NACE Paper No.264 (1985)
- 12) B.W. Cherry, A.S. Kashimiran: Cathodic Protection of Steel Embedded in Porous Concrete, Br. Corros., 18, No.4 (1983)
- 13) Bernard Heuze: Cathodic Protection on Concrete Offshore Platforms, Mater. Perform., 19, No.5 (1980)
- 14) J.A. Apostolos: Cathodic Protection of Reinforced Concrete Using Metalized Coating and Conductive Paints, Transportation Research Board (1984)
- 15) 小林豊治：コンクリート中における鋼材の腐食・防食(I)～(V), さび, 100号～104号 (1985-1986)
- 16) W.F. Perenchio, J.R. Landgren, R.E. West, K.C. Clear: Cathodic protection of Concrete Bridge Substructures, National Cooperative Highway Research Program Report 278, Transportation Research Board (1985)
- 17) B.L. Martin, J.E. Bennett: An Activated Titanium Mesh Anode for the Cathodic Protection of Reinforcing Steel in Concrete, Paper 147, Corrosion '87
- 18) G.G. Clemena: Electrically Conductive Portland Cement Concrete, Paper 122, Corrosion '87

II. Manual for Cathodic Protection
of Reinforcing Steel in Concrete
(Draft)



II. Manual for Cathodic Protection
of Reinforcing Steel in Concrete
(Draft)

CONTENTS

	Page
1. General	107
1.1 Scope	107
1.2 Basic Concept of Cathodic Protection	107
1.3 Process of Cathodic Protection	107
2. Criteria for Cathodic Protection	108
2.1 Potential Criteria	108
2.2 Cathodic Current Density	109
3. Investigation of Corrosion	110
4. Methods of Cathodic Protection	110
4.1 Selection of Method	110
4.2 Apparatus	110
4.2.1 Impressed Cathodic Protection System	110
4.2.2 Galvanic Cathodic Protection System	111
5. Design	112
6. Construction	112
6.1 Related Rules	112
6.2 Process	112
7. Maintenance and Inspection	115
8. Monitoring of Protective Effects	117
9. Reference Materials	117



1. General

1.1 Scope

This manual covers the cathodic protection of steel within concrete structures perpetually exposed to air.

[Explanation]

This manual describes the cathodic protection of concrete structures perpetually exposed to air, such as bridge piers, beams, and decks. The electric potential of steel in underwater concrete structures, which are out of the scope of this manual, is much less noble, as in such cases there is very little diffusion of oxygen. For underwater concrete structures containing cracks which water penetrates, so that steel bars are always exposed to water, cathodic protection criterion must be based on procedures for steel in seawater.

1.2 Basic Concept of Cathodic Protection

The cathodic protection described in this manual protects concrete structures from corrosion due to salt contamination.

[Explanation]

Cathodic protection may be applied in either of two cases. First, it may be applied to concrete structures which are newly installed, or in cases where deterioration of steel has not yet occurred. Second, in cases where the concrete was deteriorated but the damage has been repaired. Most applications in foreign countries fall under the second category, i.e., applications to deteriorated structures. It would be economically more effective, however, to incorporate cathodic protection when a structure is first built. Cathodic protection is also effective for new structures in a corrosive environment.

1.3 Process of Implementing Cathodic Protection

Implementation of cathodic protection should follow an appropriate procedure.

[Explanation]

Fig. 1 presents a rational and economical procedure for implementing cathodic protection.

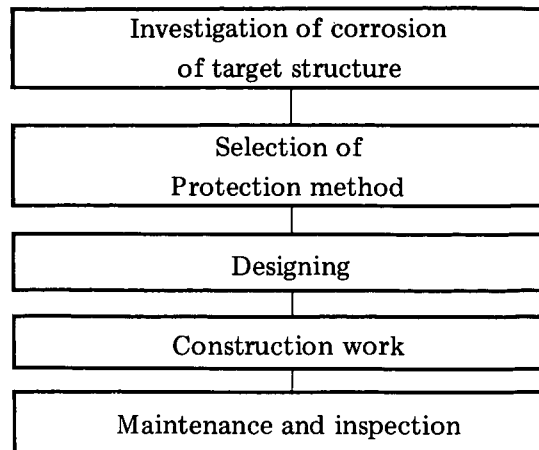


Fig. 1 Procedure for Implementation

2. Criteria for Cathodic Protection

2.1 Potential Criteria

Corrosion of a concrete structure shall be controlled on the basis of the potential shift before and after the turning-off of a cathodic current. This potential shift shall be 100mV or more.

[Explanation]

When a cathodic current is applied to a steel bar, the electric potential of the bar shifts towards the less noble direction. This phenomenon is called cathodic polarization.

There are many studies on cathodic potentials of steel in concrete structures, and many values have been reported, which differ depending of the properties of the concrete, the environmental conditions, and the surface conditions of the steel bar. Examples of reported potentials are given below*.

- 1) -500 mV vs CSE (-420 mV vs SCE) in chloride-rich environment; -710 mV vs CSE (-630 mV vs SCE) in contaminated concrete¹⁾
- 2) -850 mV vs CSE (-770 mV vs SCE)²⁾
- 3) -770 mV vs CSE (-690 mV vs SCE)³⁾
- 4) -850 mV -1000 mV vs Ag/AgCl in sea water (-840 mV -990 mV vs SCE)⁴⁾
- 5) To prevent pitting corrosion, the cathodic potential should be less noble than the pitting potential; if pitting corrosion has already occurred, the cathodic potential should be 50 mV less noble than the corrosion potential.⁵⁾
- 6) Cathodic polarization of 100 mV (potential change excluding IR drop)⁶⁾

- * CSE: copper/copper-sulfate electrode
 SCE: saturated calomel electrode
 Ag/AgCl: silver/silver-chloride in sea water electrode

In 1983, the Japan Concrete Engineering Association prepared a "Guide to the Corrosion Protection of Marine Concrete Structures" (draft), in which they proposed a cathodic potential of -850 mV vs CSE for reinforcing steel bars in direct contact with seawater because of cracks in the surrounding concrete.

As mentioned above, cathodic protection potentials of concrete structures vary considerably by case, and it is therefore very practical to adopt a 100 mV cathodic polarization shift to the cathodic protection criteria. The cathodic potential here referred to is not the one at the time the cathodic current is flowing (the "On" potential); rather, it is the potential as measured just after the cathodic current has been shut off (the "Instant Off" potential). The "On" potential necessarily includes in IR drop, as concrete is an electrolyte of high resistivity. The true potential shift (polarization degree) is the difference between the true polarization potential (which is exclusive of the IR drop) and the steady potential that is measured when no cathodic current is flowing. In practice, this difference can be calculated as the difference between the potential immediately after the cathodic current has been shut off and the potential several hours afterwards, when the potential has presumably stabilized.

Although cathodic polarization of less than 100 mV may, depending on the environmental factors, provide sufficient corrosion protection, polarization of 100 mV or more is suggested.

The "instant off" potential should generally not become less noble than -1100 mV vs SCE , because an excessive cathodic current may form a strong alkali that will soften the concrete and cause hydrogen embrittlement of PC steel bars.

2.2 Cathodic Current Density

A polarization test should be carried to set the cathodic current density so that the cathodic polarization reaches 100 mV or above.

[Explanation]

The cathodic current density for concrete structures under seawater is usually set to a low value, in the range of $2\text{--}5\text{ mA/m}^2$, because there is little oxygen diffusion in such an environment.

Concrete structures exposed to air, on the other hand, are subject to much greater corrosion, due to the higher diffusion rate of oxygen and the infiltration of corrosive materials, such as salt, from the environment. A larger cathodic current density is therefore required, normally one in the range of $10\text{--}30\text{ mA/m}^2$, although the ideal varies depending on such factors as the environment and the properties and cover thickness of the concrete. Therefore, the initial value of cathodic current density should be set so that cathodic polarization of 100 mV or more can be obtained.

The cathodic current necessary for sufficient corrosion protection tends to slowly decrease over a long period of time, and it is therefore economical to allow for adjustment of the control of cathodic current density.

To calculate the cathodic current density, it would be best to first determine the total surface area of steel bars in the target concrete structure. In practical terms, however, this may be too difficult. Because the target concrete structure will be sufficiently protected when the steel bars lying near the surface are protected, it is adequate to base the density calculation on the surface area of the target concrete structure.

3. Investigation of Corrosion

Corrosion shall be investigated in terms of:

- 1) Deterioration of concrete
- 2) Corrosion potential of steel bars in the concrete

[Explanation]

- (1) Cracks, deteriorated concrete, and concrete loosened by corrosion of steel bar should be chipped away.
- (2) The corrosion potentials of the steel bars in the target concrete structure should be measured according to the "Diagnosis of Steel Bars in Concrete by Investigation of Corrosion Potentials" (draft) (see Appendix). This allows areas not requiring protection to be excluded from the calculations of the amount of protection required.

4. Methods for Cathodic Protection

4.1 Selection of Method

This cathodic protection system shall be either impressed cathodic protection or galvanic cathodic protection.

[Explanation]

There are two systems of cathodic protection: the impressed cathodic protection system, and the galvanic cathodic protection system. In the former, a continuous cathodic current is provided by connecting the negative terminal of a DC power source to steel, and the positive terminal to durable anodes set. The galvanic system also provides a continuous cathodic current, in this case by connecting the steel to an alloy anode less noble than the steel creating a galvanic cell due to the potential difference between the two electrodes.

The choice of which system to use must be based on the target structure, the environment and weather conditions, the resistivity of the concrete, the availability of a power source, and considerations of maintenance and handling.

4.2 Apparatus

4.2.1 Impressed Cathodic Protection System

(1) Electrodes

Standard anodes are described below.

- (1) A mesh anode (a titanium anode coated with mixed metal oxide, or a conductive polymer anode) is placed around the surface of the concrete structure, and is covered with a polymer modified mortar.
- (2) Wire anodes (of titanium coated with mixed metal oxide, of conductive polymer, or of platinum-plated titanium) are arranged on the surface of the concrete structure and covered with a polymer modified mortar.

- (3) Wire anodes (made of titanium coated with mixed metal oxide, or of platinum-plated titanium) are arranged on the surface of the concrete structure, and are coated with a conductive paint, which is then coated with a weatherproof surface paint.
- (4) Zinc is metallized onto the surface of the concrete structure, then coated with a weatherproof surface paint.

[Explanation]

Because of the high resistivity of a concrete structure exposed to air, uniform cathodic current can be achieved only when the anode is designed either so that its total surface is roughly equivalent to that of the target structure, or else in the form of closely-arranged anode wires.

In addition, if only the anode is on the target surface, there will be high resistivity between the anode and the steel bar, and insufficient cathodic current. Therefore, a layer of conductive mortar or paint should be provided on the anode and the concrete surface. This layer should be one that strongly adheres to concrete.

Conductive paint or metallized zinc should be coated with a weatherproof surface paint for protection against weathering.

(2) Power Source

The power source shall be of direct current.

[Explanation]

It is most practical to decide the area to be covered per circuit on the bases of resistivity of concrete and of ease of maintenance and handling.

The following power sources are common in conventional cathodic protection systems.

1) Constant-potential DC Power Source

A reference electrode is embedded in the target structure, and the power source automatically controls the cathodic current so as to constantly maintain the steel bar at specified potential.

2) Constant-voltage DC Power Source

The power source supplies a constant specified voltage.

3) Constant-current DC Power Source

The power source supplies a constant, specified cathodic current.

4.2.2 Galvanic Cathodic Protection System

(1) Anode

The standard anode for this system is of zinc for galvanic cathodic protection.

[Explanation]

The surface area of the anode for the galvanic protection system should be nearly equivalent to that of the target concrete; the desirable shape for the anode is thus in the form of a sheet. Such an anode can be of zinc, aluminum, or magnesium; of these, zinc is best for large areas.

In order to achieve most effective results, a backfill material (a mixture of gypsum, ben-

tonite, sodium sulfate, and water) may be used to promote the activity of the anode.

5. Design

The cathodic protection system shall be designed so that steady current can be supplied for a long term.

1) Supply Voltage

The output voltage of a DC power source shall be 60V or lower.

2) Specifications for Wiring and Piping Materials and Allowable Current.

Materials for wiring and piping shall be those proven to meet the relevant requirements of JIS (Japan Industrial Standards), and the allowable current for each electric circuit shall be within the limit specified in "Technical Criteria for Electric Installations."

3) Monitoring Terminals

The actual cathodic protection shall be monitored by terminals which shall be welded to steel bars in the target concrete for this purpose. Reference electrodes shall also be embedded in the concrete.

6. Construction

6.1 Related Rules

The construction work shall be conducted on the basis of "Common Specifications for Civil Engineering", "Technical Guidelines for Safety in Civil engineering", "Technical Criteria for Electrical Installations", JIS, and other relevant specifications.

[Explanation]

All relevant standards and rules must be obeyed. The major ones among them are as follows.

1) Common Specification for Civil Engineering

Section 4, "Coating of Concrete Surfaces", in Chapter 8, "Coating"

2) Technical Guidelines for Safety in Civil Engineering

The following sections of Chapter 1:

Section 2, "Scaffold Preparation"

Section 3, "Sliding Work"

Section 5, "Welding"

3) Technical Criteria for Electric Installations

The power sources used are covered by these specifications

4) JIS and other criteria

Relevant JIS specifications, and other specially mentioned items, must be obeyed

5) Guidelines on Measures for Protecting Road Bridges against Salt-Induced Damage (draft)

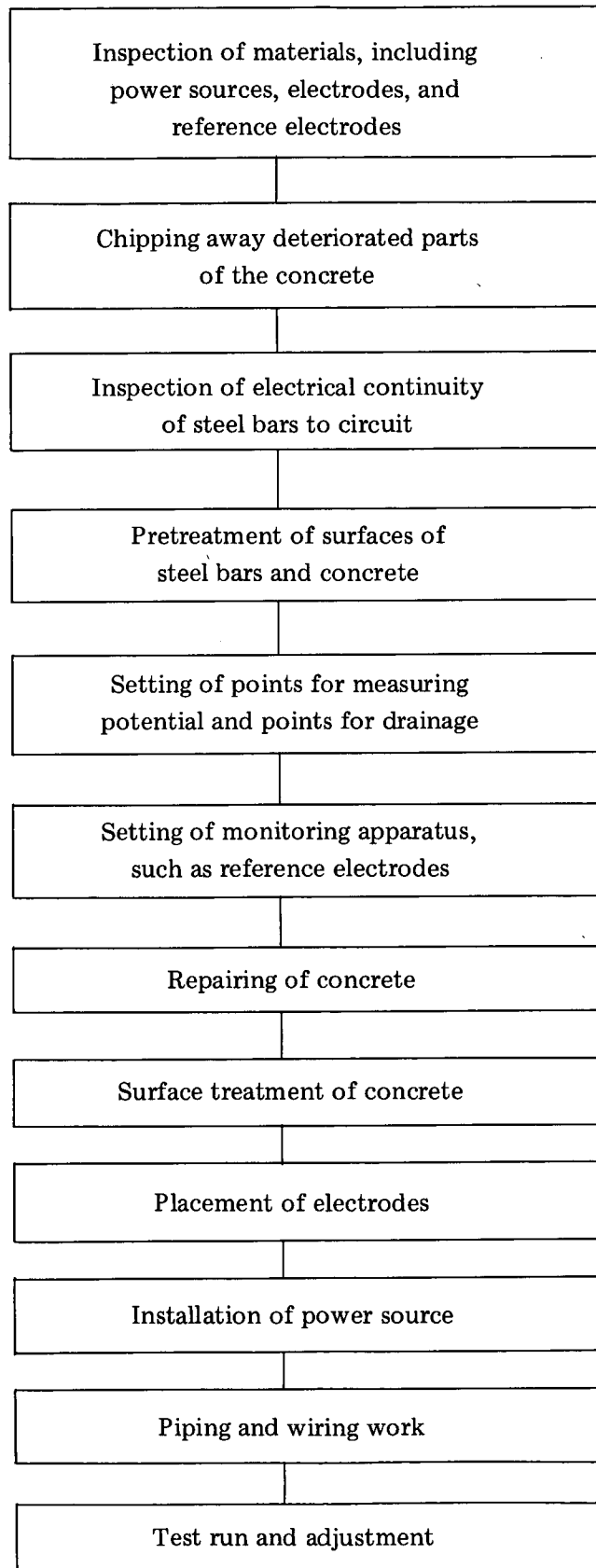
Detailed descriptions and reference materials (examples of repairs)

6.2 Processes

Construction shall be carried out in an appropriate series of processes.

[Explanation]

Fig. 2 illustrates a process-flow for repair work.



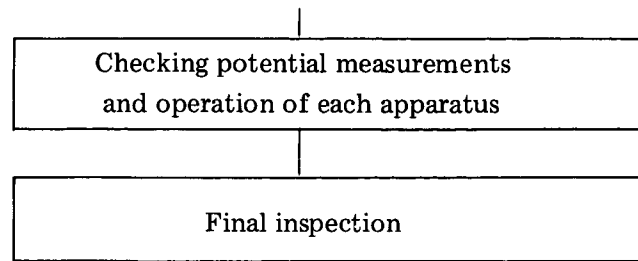


Fig. 2 Construction Work

[Explanation]

- (1) Chipping away deteriorated parts of the concrete
Cracked, peeled, and embrittled part, should be chipped away.
- (2) Inspection of electrical continuity of steel bars
The target structure's reinforcing steel bars must be electrically connected at the beginning of construction work.
After the damaged concrete has been chipped away, potential differences between all steel bars shall be measured with a DC voltmeter of high input impedance (100 M or above). Good connection has been achieved when all measurements are close to 0 mV. Any poor connection, must be improved.
- (3) Pretreatment of surfaces of steel bars and concrete
Steel bar surfaces exposed after the chipping away of concrete must be cleaned. The concrete surface should also be appropriately treated for repairing work.
- (4) Setting of points for measuring potential and points for current drainage.
After chipping away the surface of concrete, a steel bar is welded to a reinforcing steel bar in the concrete, in order to effect current drainage. A lead wire for potential measurement is connected to the reinforcing bar, and a lead wire for drainage is connected to the drainage bar. These connection points are covered with epoxy resin, and the wires extend out through the concrete, where their ends are exposed.
- (5) Setting of monitoring apparatus, such as reference electrodes
After a monitoring apparatus is installed, the hole in which it is installed must be carefully filled with mortar, with no void remaining in the interface between the concrete and the mortar. The sensor of the monitoring apparatus must also be completely surrounded with mortar.
- (6) Repairing of concrete
The parts of concrete that have been chipped away shall be replaced with concrete or mortar of sufficiently low resistivity.
- (7) Surface treatment of concrete
The concrete's surface is checked, either by eye or with a Pacometer, in order to determine whether there are any metal pieces or fragments adhering to it. If any are found, they must be removed, because a metal fragment can cause a short-circuit between the electrode and a reinforcing steel bar.
Before applying mortar, conductive paint, or metallized zinc to the concrete, it is necessary

to treat the concrete surface to obtain good adhesion. For measuring the potential of a reinforcing bar from the surface of concrete, a part of the concrete remain uncoated and exposed.

(8) Placement of electrodes

Although placement varies somewhat according to the system used, the anode (wire or mesh) is generally fixed onto the surface of the concrete with resin pins. If metallized zinc is used, it is applied directly, onsite. Connection points for drainage connections and for anodes should be carefully and completely protected with an appropriate coating before the concrete structure is restored, as such connection points are easily damaged.

(9) Installation of DC power source (impressed cathodic protection system only)

The DC power source is fixed with anchor bolts at a suitable place near the target structure. The power source must be provided with a third-class grounding, as called for by the Technical Criteria for Electric Installations.

(10) Conduits

Conduits must be of rigid PVC pipes or thick-wall steel

Junction boxes are located at spots for electrode installation and drainage. Relaying boxes may be used when the distance between two junction boxes would be otherwise be too long, or when too many wires would otherwise have to be encased in one conduit, which would impede wiring efficiency.

(11) Wiring work

Wires must be 600 V-rated PVC insulated wires, and cables must be 600 V-rated cables sheathed with chloroprene, PVC, or PE. Wires and cables must all meet JIS requirements. Connections of wires and cables shall be within junction boxes, and the connections must be completely covered with insulating material, and then with a water-tight protective material.

(12) Test run and adjustment (impressed cathodic protection system only)

The corrosion potentials of steel bars in the target structure are measured, and the cathodic current density is determined through the polarization test. The current is then adjusted to obtain the cathodic current density.

(13) Inspections

1) Materials

Materials shall be inspected when they are brought into the construction site; quantities, dimension, and appearances shall be inspected by sampling.

2) Construction tests

Construction work concludes with inspections to confirm the effects of the cathodic protection system, with test report on materials and apparatus, and with photographs.

7. Maintenance and Inspection

The maintenance and inspection of a cathodic protection system covers the following items.

- 1) Power source
- 2) Electrodes
- 3) Monitoring apparatus
- 4) Wiring and Conduits

[Explanation]

(1) Inspection Items and Periods

Table 1 Inspection Items and Periods

Item/Kind	Periodic Inspection
Period	Yearly
Power Source	Check of current, voltage, insulation, and instruments. Cleaning of apparatus and instruments
Electrodes	Current and appearance
Monitoring Apparatus	Check of operations
Wiring and Piping	Checking of routes and connections
Pontential	Measuring at specified points with portable/ embedded reference electrodes

(2) Power source (impressed cathodic protection system only)

It is a good policy to inspect the operation of the DC power source at least once every two months, and to record the findings.

If the output voltage greatly differs from that at the previous inspection, an abnormality in the circuit is suggested, and the circuit must then be precisely inspected.

The power source voltage and the cathodic current may be adjusted as necessary depending on measured potentials.

(3) Electrodes

With the exceptions of metallized zinc and conductive paints, electrodes would be very difficult to inspect visually. Inspection is therefore done by measuring the cathodic potential and the electrode current to check whether they are within the allowable limits. A current over the limit or an abnormal cathodic potential indicates a problem in an electrode, and that problem must be pinpointed and repaired.

(4) Wiring and Conduits

As they are installed in a corrosive environment, electric wires and cables must be inspected for insulation resistance, and any problems must be pinpointed and repaired.

8. Monitoring of Protective Effects

An appropriate number of reference electrodes shall be embedded in the target structure.

[Explanation]

Monitoring apparatuses include reference electrodes (to measure potential), rebar probes, electric resistance probes (to measure the protective effect), and macrocell probes.

(1) Reference electrodes

The target's potential must be controlled if proper corrosion protection is to be effected. Traditional measuring of potentials at the concrete surface in bridge piers and decks requires scaffolding. This can be avoided, however, if reference electrodes are embedded in the target structure for carrying out these measurements.

There are many types of reference electrodes, but those which show a stable functioning over a long period of time in a strongly alkaline environment (such as that of concrete) are of silver chloride, lead, molybdenum, or mercury.

(2) Rebar probes

These measure the cathodic current density. Ideal probes are of the same material as the target, with similar surface conditions.

(3) Electric resistance probes

These probes measure the change over time in corrosion by determining the increase in electric resistance caused by the decrease in metal thickness due to metal's corrosion. They are effective for monitoring the protective effects over a long period. Optionally, they should be of the same material as the target metal.

(4) Macrocell probes

These are steel bars which are covered with mortar blended with salt, and embedded in the target concrete. They serve as artificial anodes, and their potentials and currents are measured in order to judge the protective effects of the system.

9. Reference Material

[Principle of Cathodic Protection]

Because of the high alkalinity of concrete, the surface of a steel bar in concrete is passivated and does not corrode. Salt contamination, however, destroys the passivated film on the steel bar, facilitating corrosion. The potential of a corroded part of the bar's surface is less noble than other parts of the surface, so that electric current flows from the corroded parts to non-corroded parts: i.e., the corroded part acts as an anode and the other parts as a cathode.

When an external protective current is applied to the steel bar, the current first flows to the cathode, shifting the potential to negative direction. When the potential difference between the anode and the cathodes disappears, all current flow will cease, halting the corrosion. This is a principle of the cathodic protection.

[Installation Examples]

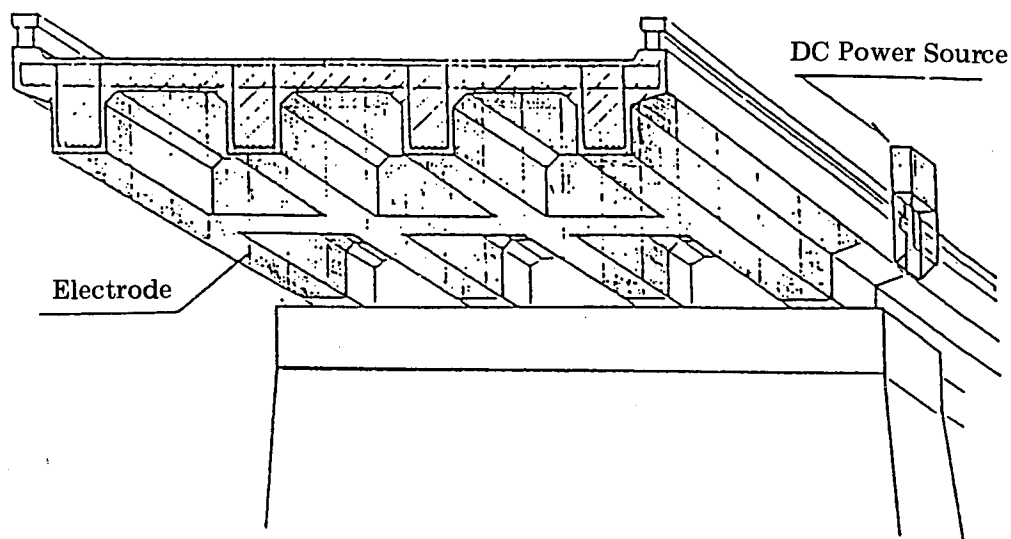


Fig. 1 Bridge beam (whole view)

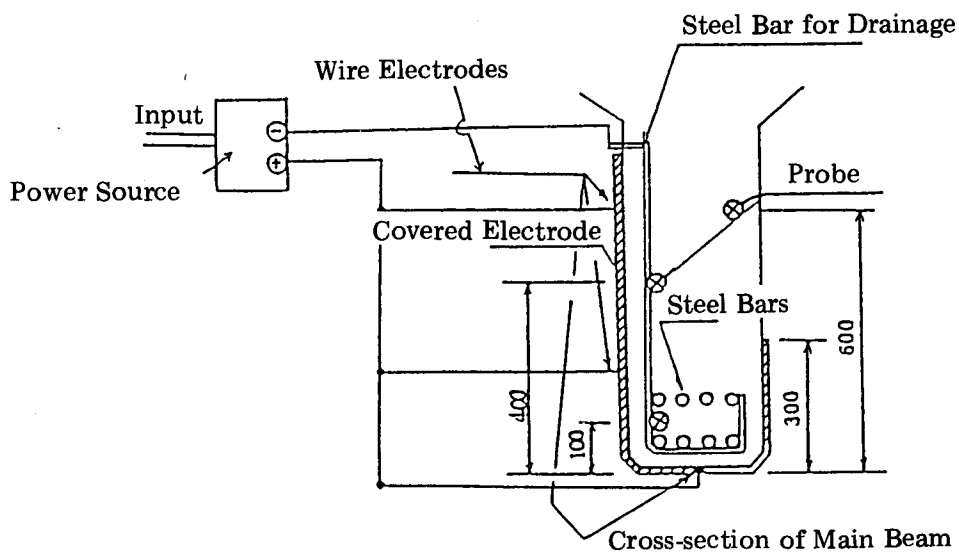


Fig. 2 Bridge Beam (detailed view)

[References]

- 1) D.A. Hausman: Mater. Perform., 8, No.10, 25 (1969)
- 2) John E. Slater: NACE Paper No. 132,7 (1979), Japan Concrete Institute: Guide for Protection of Marine Concrete Structures (Draft), P30—33, (1983)
- 3) J.B. Vrable, B.E. Wilde: NACE Paper No.135,8 (1979)
- 4) Bernard Heuze: NACE Paper No.138,8 (1979)
- 5) J.F. Henriksen: Corrosion Science, 20, 1249 (1980)
- 6) John A. Apostolos, Richard A. Carello, Kerri M. Howell: Conference on Cathodic Protection of Reinforced Concrete Bridge Decks, Paper No.16
- 7) R.A. Gummom: Cathodic Protection — A Critical Review of NACE Standard RP-01-69, Paper 343 Corrosion '86
- 8) J.A. Lehman: Conference on Cathodic Protection of Reinforced Concrete Bridge Decks, Paper No.23, (1985)
- 9) William R. Schutt: Conference on Cathodic Protection of Reinforced Concrete Bridge Decks, Paper No.10 (1985)
- 10) H.C. Schell, D.G. Manning: Evaluating the Performance of Cathodic Protection System on Reinforced Concrete Bridge Structure, NACE Paper No.263 (1985)
- 11) Robert P. Brown, Rodney G. Powers: Update on the Use of Conductive Materials for Cathodic Protection of Steel in Concrete, NACE Paper No.264 (1985)
- 12) B.W. Cherry, A.S. Kashimiran: Cathodic Protection of Steel Embedded in Porous Concrete, Br. Corros., 18, No.4 (1983)
- 13) Bernard Heuze: Cathodic Protection on Concrete Offshore Platforms, Mater. Perform., 19, No.5 (1980)
- 14) J.A. Apostolos: Cathodic Protection of Reinforced Concrete Using Metalized Coating and Conductive Paints, Transportation Research Board (1984)
- 15) T. Kobayashi: Corrosion and Protection of Reinforcing Steel in Concrete, Sabi, No. 100~104, (1985—1986)
- 16) W.F. Perenchio, J.R. Landgren, R.E. West, K.C. Clear: Cathodic protection of Concrete Bridge Substructures, National Cooperative Highway Research Program Report 278, Transportation Research Board (1985)
- 17) B.L. Martin, J.E. Bennett: An Activated Titanium Mesh Anode for the Cathodic Protection of Reinforcing Steel in Concrete, Paper 147, Corrosion '87
- 18) G.G. Clemena: Electrically Conductive Portland Cement Concrete, Paper 122, Corrosion '87

III. 自然電位測定によるコンクリート中 の鋼材の腐食診断方法（案）



目 次

1. 適用範囲	125
2. 自然電位の測定方法	125
2.1 測定手順	125
2.2 測定場所の選定	125
2.3 鋼材間の導通調査	126
2.4 測定範囲および測定点位置の決定	126
2.5 鋼材へのリード線接続	126
2.6 電位測定	126
3. 使用計器	126
3.1 直流電圧計	126
3.2 照合電極	127
3.3 鋼材接属金具	127
4. データの記録と腐食診断方法	127
4.1 データの記録	127
4.2 腐食診断方法	128



1. 適用範囲

この方法は、橋脚、橋桁、橋床版などのコンクリート構造物中の鋼材の腐食程度を診断するのに適用する。

2. 自然電位の測定方法

2.1 自然電位の測定方法

自然電位の測定は図-1に示すように、高入力抵抗直流電圧計のマイナス端子に照合電極のリード線を接続し、照合電極の先端をコンクリート表面に当てて行う。測定手順は次のとおりである。

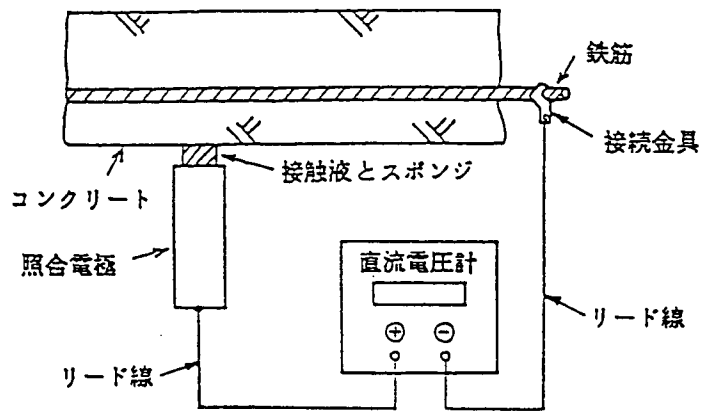
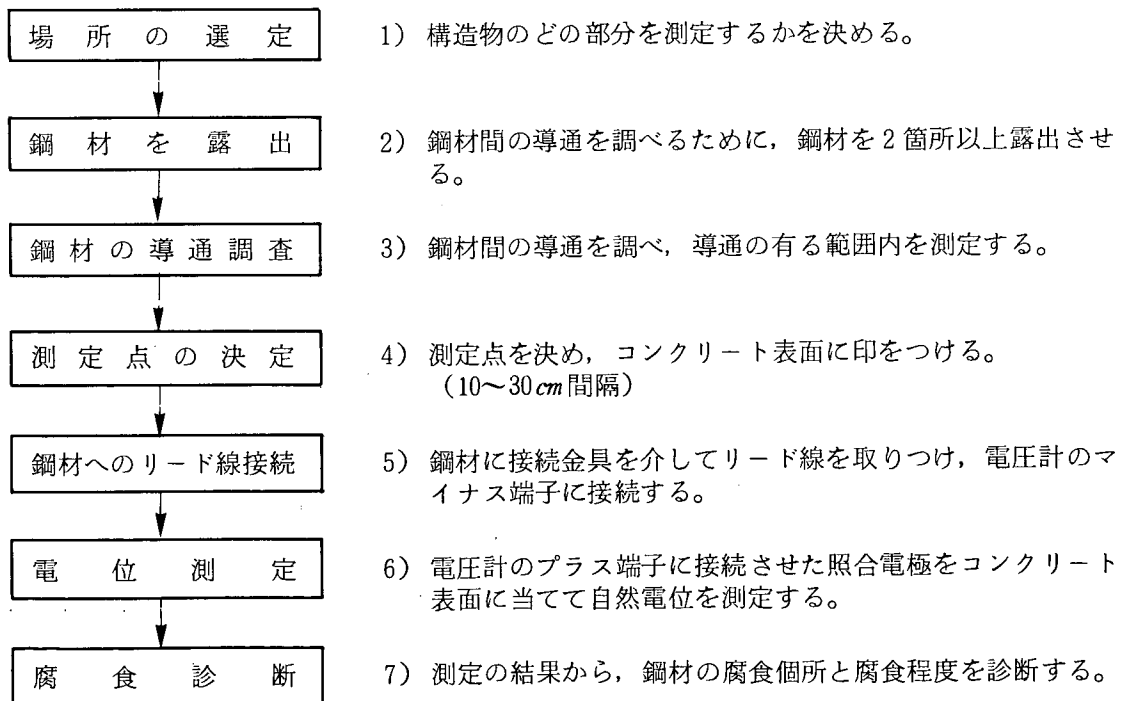


図-1 自然電位の測定



2.2 測定場所の選定

測定場所は、コンクリート構造物内において①ひびわれやさび汁が認められる場所、②強度的に重要な場所、③腐食しやすい場所等を選定する。

2.3 鋼材間の導通調査

鋼材間の導通は、鋼材を2箇所以上露出させて、さび層をヤスリなどで完全に除去した後、直流抵抗計または直流電圧計を用いて抵抗値または電圧値を測定することにより行う。抵抗値が 5Ω 未満または電圧値が0mV程度で、安定した値を示す場合は、鋼材間に導通が有るものとする。抵抗値が前述より大きい値を示す場合は、導通が無いものとし、選定場所を変更し導通の再確認を行う。

2.4 測定範囲および測定点位置の決定

測定範囲は、2.(2)で選定したおおよその測定場所をさらに明確にし、その範囲における測定点位置は一定間隔で格子状に配置する。なお、測定間隔は10～30cmとし、構造物の腐食環境や形状などを考慮して決定する。

2.5 鋼材へのリード線接続

リード線は接続金具を十分に磨かれた鋼材に接続し、電気的な接触をとる。

2.6 電位測定

自然電位の測定は図-1に示すように、接続金具である測定用リード線付ワニ口クランプを鉄筋に接続させ、これを直流電圧計のマイナス端子に、また、リード線付の照合電極先端をコンクリート表面に接触させ、これを直流電圧計のプラス端子に接続して行う。なお、照合電極先端とコンクリート先端の間には接触液（飽和水酸化カルシウム溶液）を含浸させたスポンジまたは脱脂綿を介在させる。

また、コンクリート表面が乾燥している場合は、水で20分以上湿らせた後に電位測定を行う。

測定した全ての自然電位を飽和甘こう電極基準（SCE）に換算する。換算式を以下に示す。

表-1 照合電極の電位

照 合 電 極	照合電極の電位 Eref (mV SCE)
鉛 照 合 電 極	-725
飽和硫酸銅電極	74
飽和甘永電極	0
飽和塩化銀電極	-46

$$E = E_m \times (-1) + E_{ref} \quad E : \text{換算値 (mV SCE)}$$

E_m : 測定値 (mV SCE)

E_{ref} : 使用した照合電極の電位、表-1を参照。

3. 使用計器

3.1 直流電圧計

入力抵抗は、 $100M\Omega$ 以上の電圧計を使用する。

3.2 照合電極

実構造物の側面および底面に照合電極を当てて自然電位を測定する場合、照合電極に電解質溶液を用いているものは、内部液を電極の先端まで満たすか、内部液が先端に接触するように工夫する必要がある。ただし、鉛照合電極の内部液は固定されているので、上下左右のいずれの方向に向けても測定が可能である。

3.3 鋼材接続金具

測定用リード線を鋼材に接続する治具としては、大型ワニ口ランプ等を用いる。

4. データの記録と腐食診断方法

4.1 データの記録

自然電位の実測値は、表-2の腐食診断データシートに換算値と併せて記録する。なお、データシートには、構造物の所在地や構造物名称等を記載する。

表-2 腐食診断データシート(例)

腐食診断データシート									
所在地					測定年月日	__年__月__日			
構造物名称					測定時間	__時～__時			
構造物形状	W(m) __ L(m) __ H(m)				測定場所				
施工年月	__年__月				測定者	__, __			
構造物環境	塩分(大, 中, 小) __				天候	温度__℃, 湿度__%			

自然電位測定結果

※使用照合電極: _____ 照合電極

※換算照合電極: _____ 照合電極

実測値/換算値 単位(-mV)

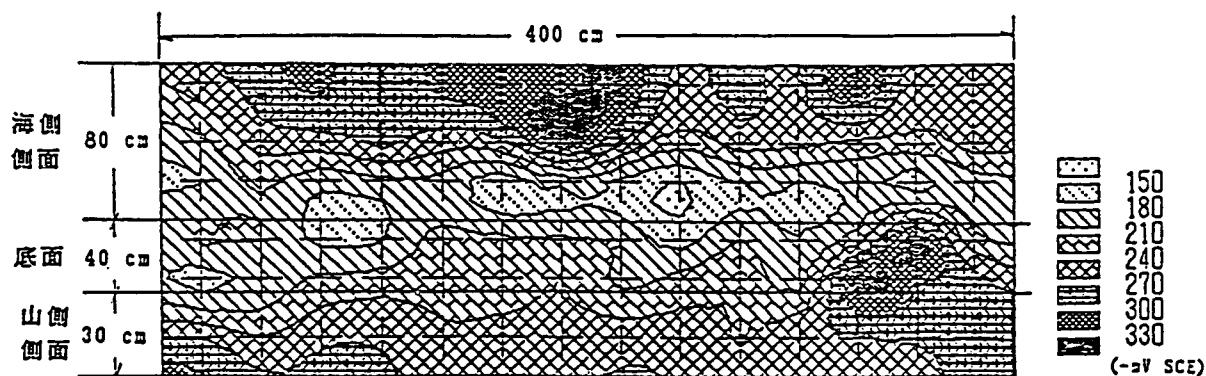
平面座標記録

X Y	1	2	3	4	5	6	7	8
1	/	/	/	/	/	/	/	/
2	/	/	/	/	/	/	/	/
3	/	/	/	/	/	/	/	/
4	/	/	/	/	/	/	/	/
5	/	/	/	/	/	/	/	/
6	/	/	/	/	/	/	/	/

4.2 腐食診断方法

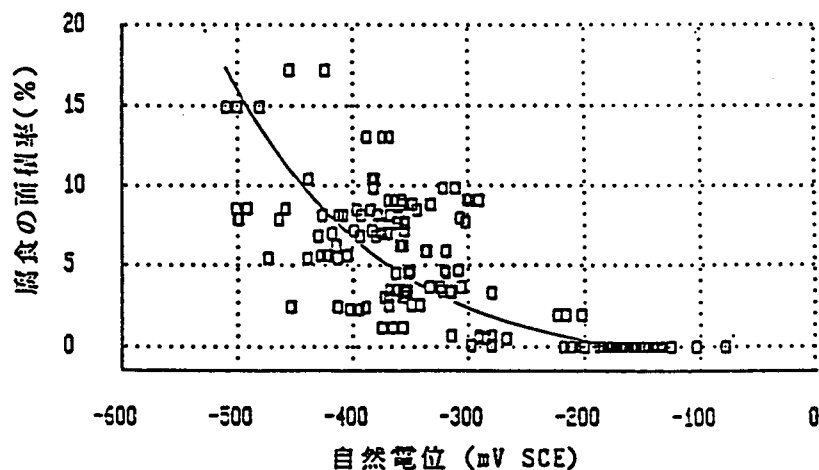
自然電位の分布図を描き，腐食個所のおおよその腐食程度を診断する。

自然電位の分布図には，図－2に示すような等電位線図，または自然電位をいくつかの段階に分け，これらに対応する記号や色を配置したパターン等がある。



図－2 実橋の自然電位分布

自然電位は，図－4，表－3に示すように自然電位が卑であるほど腐食の程度が大きくなる傾向が認められるが，自然電位のみから正確な腐食の程度は診断し難いので，自然電位の分布図から，卑な電位を示した数個所を選び，コンクリートをはつて鋼材表面の腐食程度を観察し，その腐食程度を基準にして相対的に腐食程度を診断することが望ましい。



図－4 自然電位と腐食の面積率

表－3 電位と鉄筋の腐食の関係

自然電位 E (mV SCE)	腐食の判定
$-200 \leq E$	腐食が生じていない
$-300 \leq E < -200$	腐食が生じていない場合と腐食が生じている場合がある
$E < -300$	腐食が生じている

コンクリート構造物の電気防食に関する共同研究報告書

共同研究報告書

第 14 号 1988 年 8 月

片 協 清 田 中 柳之助
坂 本 浩 森 川 芳 徳
寺 田 剛 井 川 一 弘
山 本 悟
川 又 清

要 旨

近年、海岸地域におけるコンクリート構造物の塩害による損傷が社会問題となっている。本共同研究では、これらの問題に対処するため鉄筋およびプレストレストコンクリート供試体ならびに実橋における電気防食試験を行い実用化について検討した。また、塩害で損傷したコンクリート構造物に電気防食を適用する場合、防食範囲を的確に判断するための腐食診断方法についても検討した。その結果、電気防食および腐食診断について実用化の見通しが得られたので、電気防食要領（案）と腐食診断方法（案）を作成し、電気防食を実施する場合の設計、施工に役立たせることとした。

キーワード：鉄筋コンクリート、プレストレストコンクリート、塩害、電気防食、腐食診断

郵便はがき

305-□□

四十円切手
をはって下
さい。

茨城県つくば市大字旭一番地

建設省土木研究所

地質化学部化学研究室

御中

No. _____

No. _____

配布先氏名

○

配布先住所

土木研究所共同研究報告書第14号 部

上記のとおり受領しました。

所 属（住所）

氏 名

印