

港 湾 技 研 資 料

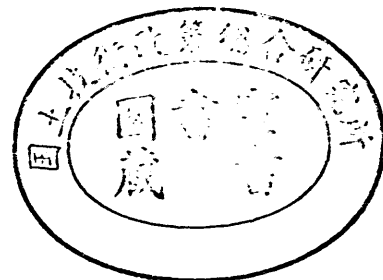
TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 706 June. 1991

コンクリート表面被覆の塩害防止効果ならびにその評価法について

濱	田	秀	則
福	手		勤
阿	部	正	美
山	本	邦	夫

運輸省港湾技術研究所



目 次

要旨	3
1. まえがき	3
2. 研究の目的ならびに本文の構成	4
3. 新規に製作したコンクリートの表面塗装に関する実験（実験Ⅰ）	4
3. 1 実験開始の経緯	4
3. 2 実験概要	4
3. 3 実験結果	11
3. 4 考察	15
4. 材令の経過したコンクリートの表面塗装に関する実験（実験Ⅱ）	18
4. 1 実験開始の経緯	18
4. 2 実験概要	18
4. 3 実験結果	23
4. 4 考察	27
5. 研究の結論	28
6. あとがき	29
参考文献	29
付録	29
埋設鉄筋の自然電極電位の経時変化（実験Ⅱ）	29

Effect and Evaluation of Concrete Surface Coatings for the Prevention of Salt Attack

Hidenori HAMADA *
Tsutomu FUKUTE **
Masami ABE ***
Kunio YAMAMOTO *

Synopsis

Concrete is a widely-used construction material. The need to protect concrete structures from deterioration is surveyed along with various protective approaches that may be taken to protect them. This paper focuses on the use of protective coatings as the means of protecting concrete structures.

There is a dearth of information as to the effects of protective coatings on the prevention of salt attack under severe marine environments such as in the splash zone. The aim of the research reported here is to gather quantitative data on the performances of several coating systems under the marine environment.

Main conclusions obtained in this study are as follows;

- 1 Concrete surface coating is effective in protecting concrete structures against salt attack.
- 2 Most of tested coating materials show a good durability under marine environments.
- 3 Some epoxy-based materials show the color-change in coating surfaces from white to yellow.
- 4 Electro-chemical measurements of embedded steel are effective in determining corrosion conditions non-destructively, and also in evaluating the coating systems indirectly.
- 5 Colour measurements are effective in quantifying color changes in the coating surface.
- 6 In order to make an adequate evaluation of the coating systems, an index of weather resistance and an index of salt resistance are necessary.
- 7 Concrete structure should be coated in early stage of its service life.
- 8 Earlier concrete structure is coated, easier the evaluation of its effects becomes.

Keywords : Salt attack, Marine environments, Concrete surface coating, Corrosion of steel, Anticorrosion, Durability

* Materials Laboratory, Structural Division

** Chief of Materials Laboratory, Structural Division

*** Senior Researcher of Structural Division

コンクリート表面被覆の塩害防止効果ならびにその評価法について

濱田 秀則*
福手 勤**
阿部 正美***
山本 邦夫*

要 旨

本研究は、コンクリート構造物の防食法の一つであるコンクリートの表面被覆を対象としており、

(1)コンクリートの表面被覆の塩害防止効果を定量的に把握する

(2)コンクリート表面被覆材料の評価手法を検討する

ことを主要な目的としている。

一連の実験より、以下に示すような結論が得られた。

(1)試験の対象とした塗装システムは、一部に例外はあるものの、全体的にその耐久性はよかった。

(2)エポキシ樹脂系の塗装システムの中には、塗膜の表面が白色から黄食へと変色するものがあった。

(3)ひびわれ幅0.2mmの範囲内では、塗膜のひびわれ追従性が認められた。

(4)電気化学的測定は、内部の鉄筋の状態を検討する上で有効であった。

(5)塗膜の色彩変化を定量化する上で、色彩測定は有効であった。

(6)塗装システムを評価するにあたっては、その耐久性（耐候性）および耐塩害性の双方を評価することが必要である。

(7)塗装を実施する以前の供用期間が長くなるほど、塗装の効果が相対的に低下してくる。

(8)塗装を実施する以前の供用期間が長くなるほど、塗装の効果を正確に評価することが難しくなる。

キーワード：塩害、海洋環境、コンクリート表面被覆、鉄筋腐食、防食、耐久性

1. まえがき

近年、コンクリート構造物の劣化が各地で報告され、社会問題の一つとなっている。海洋環境下におけるコンクリート構造物の劣化も多数報告されるようになった。

コンクリート構造物の劣化にはいくつかの種類がある。空気中の炭酸ガスの作用による中性化、海水の作用によるエトリングタイトの生成などによりコンクリート自体の物性が変化する場合、また、コンクリート中に侵入した塩化物によりコンクリート中の鉄筋が発錆する場合もある。構造物をとりまく環境により、劣化の状況、劣化の程度は異なってくる。

塩害とは、コンクリート中へ塩化物が侵入することによりコンクリート内部の鉄筋が発錆し、ひいてはかぶりコンクリートのひびわれ、剥離、剥落へとつながる劣化をいう。現在この塩害対策として種々の方法が検討されている。

塩害による鋼材の腐食に対する防食法は次のように分類できる。

(1)水分、酸素および塩素イオンなどの腐食性物質を環境中から除去する

(2)かぶりコンクリート中への腐食性物質の侵入、拡散を防止する

(3)かぶりコンクリート中の腐食性物質が鋼材表面に到達

* 材料研究室

** 材料研究室長

*** 構造部主任研究官

するのを防止する

- (4)鋼材として防食性の高いものを使用する
- (5)コンクリート中の鉄筋に電気防食を施す
- (6)防錆剤を使用する

また、コンクリートのみで対処する防食法を第1種防食法、コンクリート以外を併せ用いるものを第2種防食法と分類することもある。

本研究では、上記の(2)を目的とする第2種防食法の一つであるコンクリートの表面塗装を研究の対象としている。コンクリートの表面に何らかの塗装を施すということは、土木の分野ではこれまでにその例も少なく比較的新しい技術と位置付けることができる。そのため、その塩害防止効果の定量的な評価、およびそれに基づく材料の選択基準も現時点では確立されていない。以上の状況に鑑み、本研究はコンクリート表面塗装を港湾構造物の塩害防止、耐久性向上手法として広く適用していくための基礎的試験として実施したものである。

2. 研究の目的ならびに本文の構成

前章でも述べたが本研究はコンクリート構造物の防食法のうち第2種防食法に属するコンクリートの表面被覆を対象としている。本研究においては、

- (1)コンクリートの表面被覆の塩害防止効果を定量的に把握する
- (2)コンクリート表面被覆材料の評価手法を検討することを主要な目的としている。

コンクリートに表面塗装を施す時期には、大別して2つのケースがある。1つは、構造物の新設時あるいは建設後比較的短期間のうちに実施する場合であり、この場合はコンクリート中にはさほど塩分が侵入していないものと考えられる。もう1つの場合は、建設後、比較的長い期間を経た後に実施する場合であり、この場合はコンクリート中に比較的多量の塩分が含まれているものと考えられる。この2つの場合を想定して、本研究では2つの異なる試験を実施した。1つは新規に製作したコンクリートに表面塗装を施し、その効果を検討したものであり、もう1つは比較的材令の経過した実構造物からコンクリート部材を切り出し、それに種々の表面塗装を施し、その後腐食促進試験を実施したものである。本文の3章においては前者、すなわち新しいコンクリートに表面塗装を施した場合の実験の概要ならびに結果を取りまとめ、4章においては、比較的材令の経過したコンクリートに表面塗装を施した場合の実験の概要ならびに結果を取りまとめた。

3. 新規に製作したコンクリートの表面塗装に関する実験(実験1)

3.1 実験開始の経緯

本実験は那覇港の臨港道路にあるプレストレストコンクリート橋(以下、PC橋と略記)の塩害防止対策を検討することを目的として開始したものである。本PC橋は昭和59年に竣工したものであり、PC桁としてプレキャストの工場製品が使用されている。本PC橋は那覇港の湾岸に位置し、常時波しぶきや潮風の影響を受ける環境にある。このため、塩害環境としてはかなり厳しい環境に置かれていることになる。加えて、本橋の建設は「道路橋の塩害対策指針」が改訂される前であったので、PC鋼材のかぶり厚がわずかに3cmで設計されている。このため、本橋の塩害防止、耐久性向上のために何等かの防食塗装を実施することが決定された。ところが、先にも述べたが塗装材料の評価手法も未だ確立されておらず、材料選定の基準も曖昧である。このため、材料選定の際の一資料とするために本実験を開始したものである。

3.2 実験概要

(1)実験シリーズ

本実験は大きく分けて3つの実験シリーズから成っている。それらはいずれも鉄筋コンクリート(以下RCと略記)製の供試体を用いて実施されているという点は共通であるが、供試体の暴露環境がそれぞれ異なっている。3つを簡潔に説明すると以下のとおりである。

1)実環境での暴露試験(シリーズ1)

PC橋の桁の下に暴露架台を設け、そこに供試体を暴露した。

2)飛沫部シミュレーション装置での暴露試験(シリーズ2)

港湾技術研究所(以下、港研と略記)構内の人工的飛沫環境シミュレーション装置に供試体を暴露した。

3)乾湿繰り返しによる腐食促進試験(シリーズ3)

高温海水浸せきと気中乾燥を繰り返す腐食促進試験を実施した。

各試験については後に詳述する。

(2)供試体

本実験はRC供試体の暴露試験である。使用した供試体の形状を図-1に示す。なお、3シリーズともに同様の供試体を使用した。外寸は150×150×800mmの角柱型供試体である。なお、供試体のコーナーは面ヅラが15mmとなるように面取してある。図に示すように供試体内部には、かぶり厚が20mmとなるように主鉄筋(SR24、φ13の丸鋼)が2本埋設されている。なお、この2本の主鉄

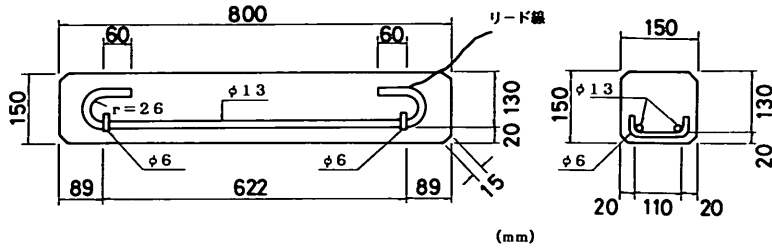


図-1 供試体の形状、寸法

筋は、φ6の丸鋼により溶接連結されており、電気的には接続された状態となっている。また、この2本の鉄筋には電気化学的測定を実施するためのリード線が接続され、供試体外部へつながっている。この供試体の表面全面に数種類（1供試体につき1種類）の塗装を施した。

(3)コンクリート用材料およびその配合

使用したセメントは普通ポルトランドセメントである。セメントの物理試験結果を表-1に示す。また、使用した骨材は、粗骨材として酒匂川産砕石、細骨材として台湾産川砂を使用した。骨材の物理試験結果を表-2に示す。これらの材料を用いて表-3に示す配合でコンクリートを製作した。なお、練り混ぜ水として水道水を使用した。表に示されているとおり、コンクリートの配合はW/C=37%と50%の2種類である。W/C=37%の配合は那覇港のPC橋のPC桁の製作に使用したコンクリートと同一である。また、W/C=50%はこれと比較する意味において、通常の港湾工事に用いられているコンクリートにより近い配合条件を設定したものである。

(4)コンクリートの打設および養生

コンクリート用材料はパッチャープラントにより練り混ぜ、型枠内に打設した。コンクリートの締め固めは棒状バイブレーターを用いて行った。打設後1日で脱型し、材令3日まで湿潤養生、その後材令28日まで室内気中養生を実施した。その後、コンクリート表面に各種塗装を施した。

(5)コンクリート表面の塗装材料

今回、試験の対象とした塗装材料を表-4に示す。選択の基準として以下に示す3項目を考慮した。

- 1)既に市販されている材料とする。
- 2)実績がある材料とする。
- 3)材料的に幅広く選択する。(参考として、塗装材料の分類の一例を図-2に示す)

また、表-4に施工工程、標準使用量も併せて示すが、これはいずれも材料メーカーの指示する標準仕様であ

表-1 セメントの物理試験結果

比重	比表面積 (cm ² /g)	凝 結			安定性	圧縮強度 (kgf/cm ²)		
		水量 (%)	始発時刻	終結時分		3日	7日	28日

表-2 骨材の物理試験結果

骨材の種類	比重	吸水率 (%)	単位容積重量 (kg/m ³)	洗い試験 (%)	有機不純物	粗粒率
細骨材	2.66	1.17	—	2.40	良	2.50
粗骨材	2.76	1.06	1658	0.62	良	6.75

表-3 コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 (AE減水剤)
20	12±2.5	50	44.5	165	330	804	1061	3.300

り、供試体への塗装もこの仕様に従って行った。なお、塗装はコンクリート表面が乾燥している状態で実施した。

(6)暴露環境および促進試験方法

前述したとおり供試体の暴露環境ならびに促進環境の相違により、本実験は大きく3つに分類される。以下にその各々について説明する。

1)シリーズ1 (実環境での暴露試験)

本シリーズは実際の橋桁と同一環境下における暴露試験である。写真-1にその暴露状況を示す。写真に示すとおり、実橋の橋桁の下に暴露用架台を設置し、その上に供試体を並べたものである。この架台は海面上約6~7

表-4 塗装材料および仕様

a) Aタイプ：アクリル系ポリマーセメント

工程	使用材料	塗装回数	標準使用量	次工程への施工間隔	塗装方法
下塗	シラン系浸透剤*	2	0.3kg/m ²	1時間以上	ハケ、ローラー
中塗	アクリル系ポリマーセメント	1	2.0 "	18時間以上	コテ
上塗	塩素系ポリオレフィン系樹脂	1	0.2 "	1時間以上	ハケ、ローラー
"	シリコンエマルジョン	1	1.0 "	18時間以上	ハケ、吹付け
"	シリコン樹脂	1	0.15 "	5時間以上	ハケ、吹付け、ローラー

*：含浸材

b) Bタイプ：SBR系ポリマーセメント

工程	使用材料	塗装回数	標準使用量	次工程への施工間隔	塗装方法
下塗	ケイ酸リチウム*	2	0.4kg/m ²	1日以上	ハケ、ローラー、吹付け
中塗	亜硝酸塩系特殊浸透性防錆剤*	2	0.5 "	1日 "	"
上塗	SBR系ポリマーセメントモルタル	1	22.5 "	7日 "	乾式吹付け

*：含浸材

c) Cタイプ：柔軟型エポキシ樹脂

工程	使用材料	塗装回数	標準使用量	次工程への施工間隔	塗装方法
プライマー	エポキシ樹脂	1	0.1kg/m ²	1日以上	ハケ、ローラー
パテ	"	1	0.6 "	"	コテ、ヘラ
中塗	柔軟型厚膜エポキシ樹脂	1	0.35 "	"	ハケ、ローラー、エアレス
上塗	柔軟型ポリウレタン樹脂	1	0.12 "	"	ハケ

d) Dタイプ：アクリルゴム

工程	使用材料	塗装回数	標準使用量	次工程への施工間隔	塗装方法
下地調整	ポリマーセメント	1	1.5kg/m ²	3日以上	コテ
プライマー	エポキシ樹脂	2	0.3 "	2時間以上	吹付け
中塗	アクリルゴム	2	2.0 "	1日以上	"
上塗	アクリルウレタン樹脂	2	0.5 "	"	"

e) Eタイプ：クロロプレングム

工程	使用材料	塗装回数	標準使用量	次工程への施工間隔	塗装方法
下地調整	ゴムラテックス混入セメントペースト	1	3.75kg/m ²	2日以上	コテ
下塗	エポキシ変性合成樹脂	1	0.12 "	1時間以上	ローラー、ハケ
中塗	クロロプレングム	3	0.75 "	3時間 "	ハケ
上塗	クロロスルホン化ポリエチレン	2	0.5 "	2.5時間 "	ハケ

f) Fタイプ：ガラスフレーク添加ビニール樹脂

工程	使用材料	塗装回数	標準使用量	次工程への施工間隔	塗装方法
プライマー	エポキシ樹脂*	1	0.1kg/m ²	2時間以上	ハケ
パテ	"	1	0.3 "	16時間以上	ヘラ
中途	ガラスフレーク添加ビニールエステル樹脂	2	1.1 "	"	ハケ
上塗	アクリルウレタン樹脂	1	0.12 "	1日以上	ハケ

*：含浸材

mの高さにある。波がかなり激しい時はしぶきを受けるが、通常の場合は潮風の影響を受ける環境である。橋桁

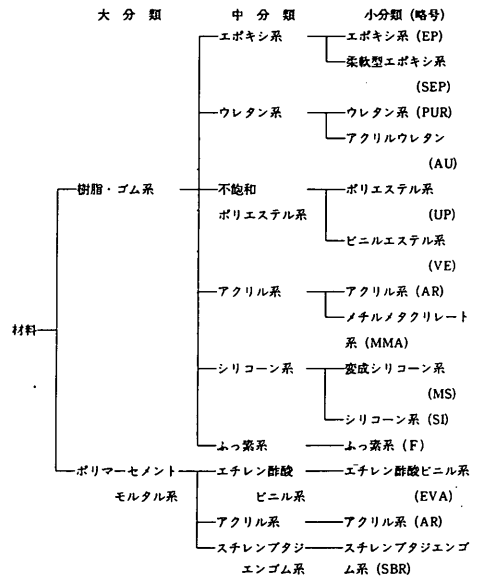


図-2 塗装材料の分類の一例

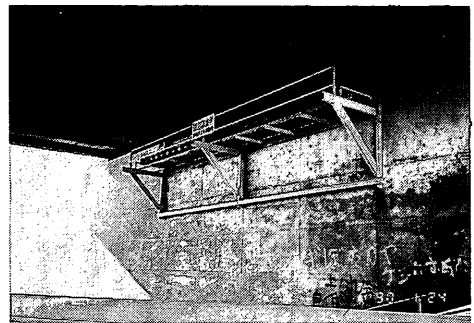


写真-1 那覇港PC橋脚 underside の供試体の暴露状況

の下にあるため直射日光は受けない。この環境において供試体を1年間暴露した後に種々の試験を実施した。

2) シリーズ2

(飛沫部シミュレーション装置での暴露試験)

暴露試験の様子を写真-2に示す。飛沫部シミュレーション装置は港研構内の屋外にあり、1日に2回(12時間に1回)、1回あたり3時間の海水のスプレーがなされる装置である。これは、元来橋桁下面の常時波しぶきがかかる環境をシミュレートする目的で設置されたものであり、コンクリートに対する塩害環境としては最も厳しい部類に属するものと考えられる。また、本装置は海岸沿いにあり、昼間、特に春から秋にかけては常時直射日光を受ける環境にある。写真よりわかるとおり、供試体



写真-2 飛沫部シミュレーション装置での供試体の暴露状況

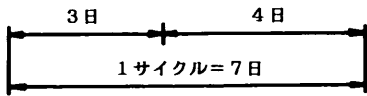
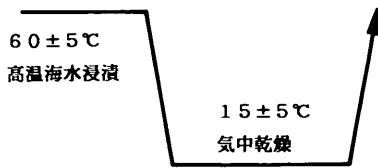


図-3 乾湿繰り返し試験条件

は数 cm 間隔で並べて設置されており、設置時の供試体の上面は直射日光および海水の噴霧をまともに受けるが、側面および下面は上面に比べるとその影響は小さいと言える。前項で述べた実環境での暴露試験と同様に、供試体の暴露を1年間継続した後に、種々の試験を実施した。

3) シリーズ3 (乾湿繰り返し促進試験)

乾湿繰り返しの試験条件を図-3に示す。図に示すとおり、1サイクルは7日(1週間)であり、そのうち3日間は高温海水浸せき(60±5℃)を行い、4日間は平温気中乾燥(15±10℃)を行うものである。この乾燥と湿潤の繰り返しを20サイクル行った。その後、種々の試験を実施した。なお、自然電極電位の測定は促進期間中定期的に実施した。

(7) 供試体の一覧

表-5に試験に用いた供試体の一覧を示す。供試体の数量はシリーズ1が7体、シリーズ2が14体、シリーズ3が16体の計37体である。シリーズ1では全ての供試体

表-5 供試体一覧

	供試体番号	W/C	塗装システム	備考
実環境での暴露試験	RE-A-1	37	A	全供試体がひびわれなし
	RE-B-1	37	B	
	RE-C-1	37	C	
	RE-D-1	37	D	
	RE-E-1	37	E	
	RE-F-1	37	F	
	RE-0-1	37	無塗装	
飛沫部シミュレーション環境での暴露試験	SE-A-1,2	37	A	1:ひびわれなし 2:ひびわれあり
	SE-B-1,2	37	B	
	SE-C-1,2	37	C	
	SE-D-1,2	37	D	
	SE-E-1,2	37	E	
	SE-F-1,2	37	F	
	SE-0-1,2	37	無塗装	
乾湿繰り返し腐食促進試験	A-A-1,2	37	A	1:ひびわれなし 2:ひびわれあり
	A-B-1,2	37	B	
	A-C-1,2	37	C	
	A-D-1,2	37	D	
	A-E-1,2	37	E	
	A-F-1,2	37	F	
	A-037-1,2	37	無塗装	
A-050-1,2	50	無塗装		

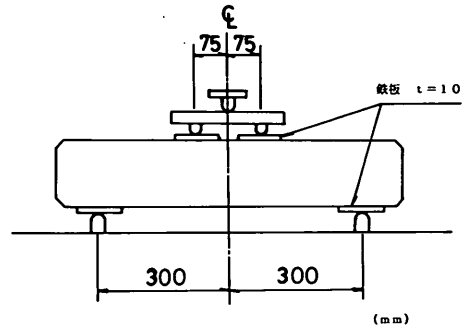


図-4 曲げ荷重試験方法

がひびわれを有しない状態で暴露を行ったが、シリーズ2およびシリーズ3では半数の供試体に、暴露開始前に曲げ荷重によりひびわれを導入した。表中にも示すが、供試体番号の末尾の数字が「1」の供試体にはひびわれの導入を行っておらず、番号が「2」のものがひびわれの導入を行ったものである。

(8) 供試体へのひびわれの導入方法

供試体へのひびわれの導入は、各種の塗装を施し、それらが十分硬化した後に曲げ荷重により行った。荷重方法の概要を図-4に示す。導入するひびわれ幅は荷重時最大幅が0.2mmとなるようにした。まず初めに全く塗装を施していない供試体の荷重を実施し、荷重時の最大曲げひびわれ幅が0.2mmとなる時の荷重を求めた。これに

引き続いて実施した、塗装を施した供試体の載荷における最大荷重を、無塗装の供試体の載荷の際の最大荷重に統一した。何れの場合も載荷時には塗膜の表面にはひびわれは見られなかった。

(9) 暴露後の試験項目および試験方法

試験項目の一覧を表-6に示す。各シリーズの試験項目は若干異なる。シリーズ1は沖縄で試験を実施し、シリーズ2およびシリーズ3は港研で試験を実施した。

1) 外観観察

暴露場所から取り出した供試体表面をまず水道水で水洗いし、海藻などの付着物をできる限り除去した。その後、塗膜表面の目視による表面観察を行うと同時に写真撮影を行った。観察は塗膜表面の劣化、ひびわれ、変色等に特に注意して行った。

2) 塗膜の色彩 (三刺激値)

塗膜の変色を定量的に評価する目的で本測定を行った。本測定は三刺激色彩計を用いて行い、三刺激値 (X, Y, Z) を求めた。(JIS Z 8701 に準拠) 供試体中での測定箇所を図-5に示す。本図に示すとおり、供試体の一面あたり3箇所(1供試体あたり12箇所)を設定し、1箇所あたり5個(1供試体あたり60個)のデータを採取した。

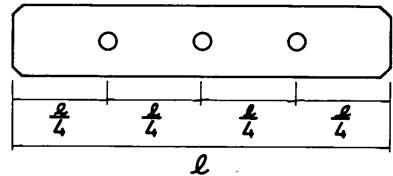
3) 塗膜の電気抵抗

塗膜の電気抵抗の測定方法を図-6に示す。本図に示すとおり、供試体を海水に浸せきした状態で、供試体中の埋設鉄筋と海水中的ステンレス鋼板との間の電気抵抗を測定した。なお、測定には周波数100Hzの交流電流を使用した。図よりわかるとおり、本測定の測定値は、塗膜の電気抵抗に加えて、コンクリートの電気抵抗と海水の抵抗も含むことになるが、この両者は塗膜の抵抗に比

べて十分小さいことが予想されるので、本研究においては本測定値を塗膜の抵抗値として取り扱った。

4) 内部鉄筋の自然電極電位

内部鉄筋の自然電極電位の測定方法を図-7および図-8に示す。シリーズ1(沖縄で実施)とシリーズ2およびシリーズ3(港研で実施)では若干その方法が異



○ 測定箇所

図-5 色彩計測のポイント

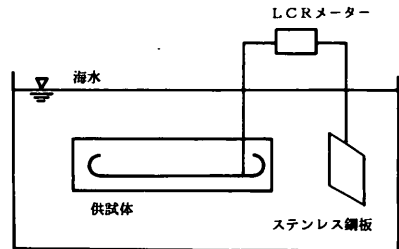


図-6 電気抵抗の測定方法

表-6 試験項目

	試験項目
実環境での暴露試験	<ol style="list-style-type: none"> 1. 外観観察 2. 埋設鉄筋の自然電極電位 3. 塗膜の付着強度 4. コンクリートの塩分含有量
飛沫部シミュレーション装置での暴露試験	<ol style="list-style-type: none"> 1. 外観観察 2. 塗膜の色彩測定 (色の3刺激値) 3. 塗膜の電気抵抗 4. 埋設鉄筋の自然電極電位 5. 動電位分極曲線 6. 定電位ステップ法 7. コンクリートの塩分含有量 8. 埋設鉄筋の発錆面積率
乾湿繰り返し腐食促進試験	<ol style="list-style-type: none"> 1. 外観観察 2. 埋設鉄筋の自然電極電位 (促進サイクル中定期的に) 3. 動電位分極曲線 4. コンクリート中の塩分含有量 5. 埋設鉄筋の発錆面積率

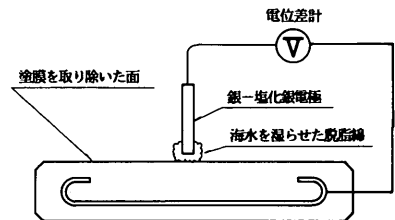


図-7 自然電極電位の測定方法 (シリーズ1)

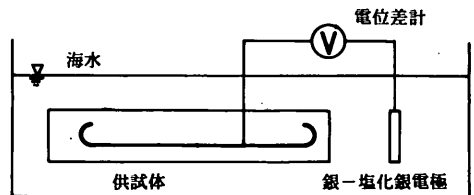


図-8 自然電極電位の測定方法 (シリーズ2)

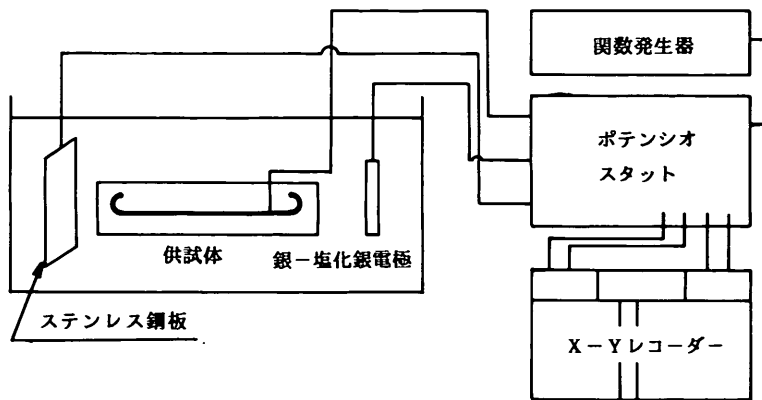


図-9 電気化学的測定方法

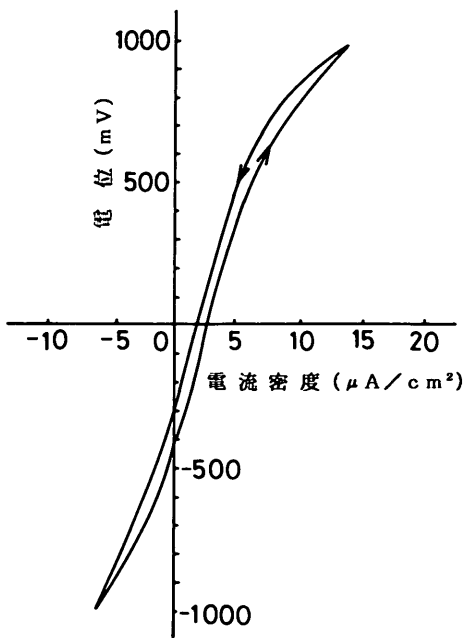


図-10 分極曲線の一例

なる。シリーズ1においては、電位測定に先立ち供試体の一面においてグラインダーによりその塗膜を除去した。図-7に示すようにその除去した面に海水を十分含んだ脱脂綿を介して参照電極（銀-塩化銀電極）を接触させる方法で電位の測定を実施した。一方、シリーズ2およびシリーズ3においては、塗膜の除去は行わず、図-8に示すように供試体を海水に浸せきした状態で電位を測定した。なお、この場合も参照電極としては銀-塩化

銀電極を用いた。また、シリーズ3においては、促進サイクルを実施している間も電位の測定を定期的に行った。

5) 動電位分極曲線および不動態のグレイドの判定

図-9に分極曲線の測定システムを示す。図に示すとおり、供試体を海水中に浸せきした状態で3電極方式により測定を行った。参照電極として、銀-塩化銀電極を、また対極としてステンレス鋼板を使用した。分極は動電位方式により行い、鉄筋の自然電極電位からスタートして、参照電極に対して+1000mVと-1000mVの間を掃引速度40mV/minで掃引した。

本測定により得られる分極曲線（電位-電流曲線）の一例を図-10に示す。この分極曲線より鉄筋の表面の不動態の状態を6ランクに判定したものが不動態のグレイドである。²⁾不動態とは鉄筋表面の酸化被膜のことであり、この不動態が健全であれば鉄筋の発錆は著しく抑制されることが知られている。他方、不動態が何らかの原因（塩害の場合は塩素イオンが原因となる）で破壊されると鉄筋の発錆が急速に進むことになる。この不動態のグレイドの判定基準を図-11に示す。E+200mV (E=自然電極電位) と+600mVの間で分極曲線がどの領域を通過するかによりグレイドの判定を行うものである。一般には、グレイド5が最も不動態の状態が良いと判定され、グレイド0ではほとんど不動態は存在しないと判定される。その間は数字の大きい方が不動態の状態が良いと判定される。

6) 定電位ステップ法³⁾

本測定の測定システムは前項で述べた動電位分極曲線の測定システムと全く同様である。本測定においては、

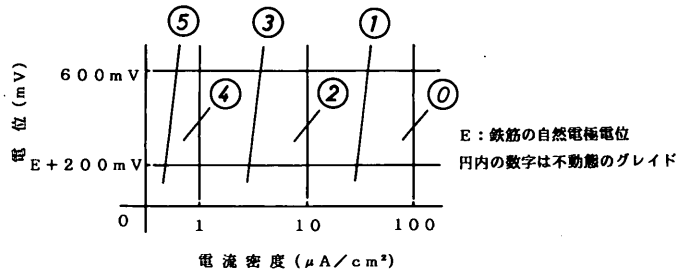


図-11 不動態のグレイドの判定基準

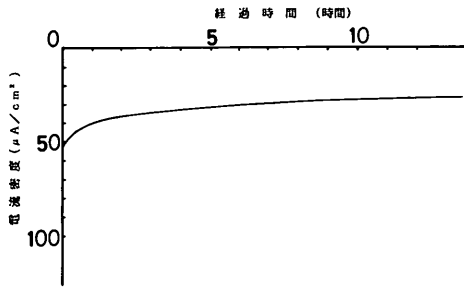
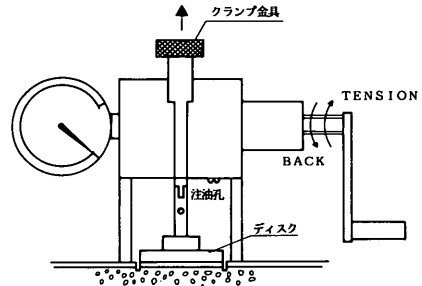


図-12 定電位ステップ法より得られる時間
- 電流曲線の一例



● ディスク (接着面) 40×40 (mm)

図-13 付着強度測定方法

鉄筋の電位を参照電極に対して -1000mV に保持して、その時に鉄筋と対極(ステンレス鋼板)の間を流れる電流を経時的に測定するものである。本測定により得られる時間-電流曲線の一例を図-12に示す。本図よりわかるとおり、流れる電流は時間の経過とともに徐々に減少していき、次第に一定値に収束して行く。この電流の値は鉄筋への酸素の供給量に支配される。⁴⁾すなわち、鉄筋に供給される酸素の量が多い程、流れる電流が大きくなる。

前項の動電位分極曲線は鉄筋の不動態の状態を電気化学的に判定するのに対して、本定電位ステップ法は鉄筋への酸素の供給の難易を電気化学的に判定するものである。

7) 塗膜の付着力

本測定はJIS-A-6910に準拠して実施した。つまり、図-13に示すように、塗膜表面に $40\times 40\text{mm}$ の大きさの、コンクリートに至るまでの切り込みを導入し、この切り込みを導入した箇所が付着力測定用の特別な取り付け具を接着剤により接着した。接着剤が十分硬化した後に、

この取り付け具を引っ張ることにより付着強度を測定した。

8) コンクリート中の塩分含有量

シリーズ1および2の場合は、ドリル式試料採取器を用いて供試体中の所定の位置より塩分含有量測定用微粉末試料を採取した。本機器は試料採取に際して、粗骨材も同時に取り込むためデータのばらつきが若干大きくなる(試料中への粗骨材の混入率が一定でないため)という欠点を有するが、逆に所定のかぶり厚さの場所から比較的正確に試料の採取ができるという利点を有する。一方、シリーズ3では埋設鉄筋の近傍よりコンクリート塊を取り出し、そのモルタル部分を微粉碎したものを試料とした。以上のようにコンクリートの微粉碎試料を用いて、全塩分の測定を行った。なお、測定方法はJCI(日本コンクリート工学協会)の方法に準拠した。また、鉄筋の発錆が進んでいる供試体については、発錆している箇所の周囲のコンクリートについても塩分量の測定を行った。

9) 埋設鉄筋の観察(発錆面積率の算定)

以上、1)~8)までの測定を終了した供試体を削岩機を用いて破碎し、埋設鉄筋を取り出した。その後、鉄筋の発錆状況の観察を行い、スケッチ図を作成するとともに写真撮影を行った。このスケッチ図をもとに発錆面積率の算定を行った。なお、発錆面積率とは、鉄筋全表面積に対する発錆面積の割合であり、本文においてはパーセントで表示した。

3.3 実験結果

(1) シリーズ1 (実環境における暴露試験)

1) 供試体の外観性状

暴露1年を経過した供試体の表面はいずれも少し汚れていた。しかし、塗膜の傷、ひびわれ、剥離といった、いわゆる劣化は生じておらず、総じて供試体は健全であった。

2) 自然電極電位

自然電極電位の測定結果を表-7に示す。総じて電位は貴であり、ASTMが示している腐食領域⁵⁾(銀-塩化銀電極基準で-228mVより卑の場合は90%以上の確率で腐食が生じている。)よりも貴である。しかし、これは一つには測定方法の影響が考えられる。前述したとおり、本シリーズ1においては、参照電極を供試体表面に接触させる方法で測定を行ったが、その場合供試体中の含水量が電位の測定値に影響を及ぼす。すなわち、供試体が乾燥している程、測定される電位は比較的貴の値をとる。このため、本シリーズで測定された電位は、シリーズ2、シリーズ3(後述)と比べて含水量が比較的少ないために測定値が貴となったものとも考えられる。

3) 塗膜の付着強度

付着強度の測定値を表-7に示す。破壊形状を見ると、塗装システム「A」(RE-A-1)は上塗材と中塗材の間で剥離が生じていたのに対し、その他のシステムは全てコンクリート面と下塗材の剥離、もしくはコンクリート内

での破壊が生じていた。塗装システム「A」と「D」(RE-D-1)が他の塗装システムに比べて付着強度が劣る結果となったが、両者ともにJIS A 6910に規定されている複層塗材の条件(5.0kgf/cm²)を満足していること、また、コンクリートとの付着強度は十分あったことより、いずれの塗装システムの場合も付着強度は特に問題ないものと判断される。

4) コンクリート中の塩分含有量

コンクリート中の塩分含有量の測定結果を同じく表-7に示す。塩分量は塗装システム「A」を施した供試体と無塗装(裸)の供試体について実施した。両者を比較すると、コンクリート表面の塗膜により、塩化物の侵入が妨げられていることがわかる。ちなみに、今回の供試体のコンクリートの場合だと、0.01%が0.15kg/m³(Cl-V.Sコンクリート)に相当する。無塗装の供試体の場合でも、塩分の浸透は表面近傍に限られ、かぶり20mm以上になると少量の塩分しか侵入していないことがわかる。

(2) シリーズ2

(飛沫部シミュレーション装置での暴露試験)

1) 供試体の外観性状

塗装システム「B」(供試体番号SE-B-1, SE-B-2)では、わずか2か月程度ですべての供試体の塗膜に大きなひびわれが発生した。その状況を写真-3に示す。ひびわれが発生した後、ほどなくしてすべての塗膜が剥落した。その他の塗装システムを施した供試体では、暴露1年の範囲では際立った表面劣化は認められなかったが、いくつかの塗膜の表面が黄色に変色しているのが認められた。この変色は暴露時の上面が最もひどく、側面および底面の変色は顕著なものではなかった。

2) 供試体表面の色彩測定

供試体表面の色彩測定結果を表-8に示す。表中、「上面」、「側面」、「底面」とあるのは暴露期間中の状況である。また、表中の「Y」は反射率(明るさ)を表す。すな

表-7 試験結果(シリーズ1)

供試体 番号	自然電極 電位 (mV)	付着強度 (kgf/cm ²)				塩分含有量 (%)			
		暴露前		暴露1年後		試料採取深さ (mm)			
						5	15	25	35
RE-A-1	+12	13.1	6.2	5.0	4.3	0.001	0.001	0.001	0.001
RE-B-1	+1	21.9	20.6	21.8	31.2				
RE-C-1	+40	18.1	15.5	34.3	30.0				
RE-D-1	+4	7.7	7.1	7.5	6.5				
RE-E-1	-43	10.6	22.5	25.0	32.5				
RE-F-1	-94	28.7	18.4	40.6	40.6				
RE-0-1	-4					0.091	0.004	0.002	0.002

(v.s Ag-AgCl electrode)

(NaCl v.s Concrete in weight)

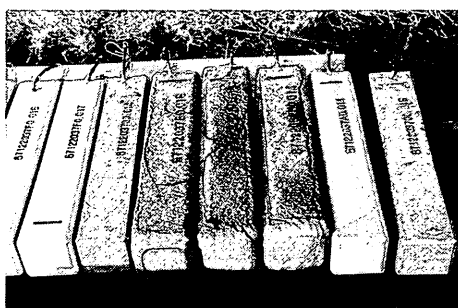


写真-3 塗装システム [B] に発生した大きなひびわれ (真中の3体)

表-8 塗膜の色彩測定結果 (シリーズ2)

供試体番号	上面*1)			側面*1)			底面*1)		
	Y	x*2	y*2	Y	x	y	Y	x	y
SE-A-1	31.25	0.36	0.37	37.76	0.32	0.34	40.50	0.31	0.32
SE-B-1	22.77	0.32	0.33	31.94	0.34	0.35	30.52	0.32	0.32
SE-C-1	28.80	0.40	0.39	34.60	0.34	0.35	34.94	0.35	0.35
SE-D-1	31.62	0.39	0.38	37.20	0.35	0.36	39.95	0.34	0.34
SE-E-1	46.62	0.31	0.33	39.89	0.34	0.36	42.99	0.33	0.34
SE-F-1	34.09	0.40	0.39	39.42	0.36	0.37	48.88	0.32	0.33
SE-O-1	20.97	0.33	0.35	20.13	0.33	0.36	18.58	0.35	0.36

*1: 上面, 側面, 底面=暴露時の状態を示す

*2: $x=X/(X+Y+Z)$, $y=Y/(X+Y+Z)$, X, Y, Z=色の三刺激値

表-9 試験結果 (シリーズ2)

供試体番号	自然電極電位 (mV)	電気抵抗 (kΩ) 0.1kHz	不動態の グレイド	定電位ステップ法 による電流密度 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	発錆 面積率 (%)
SE-B-1 -2	-466 -494	0.04 0.04	2 2	10.8 10.8	0.07 2.43
SE-C-1 -2	-547 -450	0.76 1.63	4 4	0.2 1.2	0.00 0.00
SE-D-1 -2	-258 -265	1.55 1.41	5 4	3.4 0.1	0.21 0.00
SE-E-1 -2	-463 -466	0.10 0.14	3 4	0.4 2.7	0.00 0.00
SE-F-1 -2	-493 -330	0.22 7.15	5 5	0.1 0.1	0.00 0.00
SE-O-1 -2	-487 -411	0.05 0.04	3 2	4.3 10.8	1.91 3.55

(v.s Ag-AgCl electrode)

わち、「Y」の値が小さいほど色覚的には暗い色ということになる。また、「x」、「y」はそれぞれ色相を表し、「x」

が大きくなるほど赤が強く感じられる色相を示し、「y」が大きくなるほど緑が強く感じられる色相を示す。また、「x」、「y」の両方が大きくなると、黄色が強く感じられる色相となる。また、表中の塗装システム「B」(供試体番号 SE-B-1) は塗膜が剥離した後の測定結果であるため、塗膜の色彩ではなく母材コンクリートの色彩測定結果を示している。また表中に示す数字は、各々12データ(側面は24データ)の平均値である。これを見ると、上面の方が側面、底面に比べて全体的に「Y」が小さく、また、「x」、「Y」が大きくなっていることがわかる。これより、1年間海水の噴霧を受け、かつ直射日光を受けることにより、塗膜の表面は、色彩工学で言うところの「明るさ」、「鮮やかさ」を失い、また、当初白色だったものが徐々に黄色へと変色していることがわかる。

3) 塗膜の電気抵抗

塗膜の電気抵抗が防食性能に及ぼす影響は現在のところ明確に解明されていないが、塗膜の防食性能を評価する上で一つの目安となることが予想される。すなわち、塗膜の電気抵抗が大きいほど、塩素イオンをはじめ各種のイオンの拡散性(透過性)は小さくなるものと思われる。表-9に塗膜の電気抵抗の測定結果を示す。表中の塗装システム「B」は塗膜が剥離した後の測定結果である。これより、無塗装の場合(供試体番号 SE-O-1, 2)と併せて判断すると、塗膜が無い場合の抵抗、すなわちコンクリートのみの抵抗は約40Ωにすぎないが、塗膜がある場合は、数100~数1000Ωになることがわかる。また、各塗装システムごとに、No.1(ひびわれなし)とNo.2(ひびわれ導入)を比較しても有意な差は認められず、ひびわれを導入することによる電気抵抗の低下は認められない。

4) 自然電極電位

同じく表-9に自然電極電位の測定結果を示す。これよりわかるとおり、本シリーズの測定結果はシリーズ1に比べて、かなり「卑」の値を示している。ASTM 規準によると、-228mV(銀-塩化銀電極)以下で腐食確率が90%と規定されているが、これより判断すると、塗装システム「A」の供試体(SE-A-1, SE-A-2)以外はすべて腐食していることになる。先にも述べたが、本シリーズは、図-8に示す方法で電位を測定した。この方法を採用すると、図-7に示す方法(シリーズ1で採用)に比べて測定される電位は「卑」となる傾向がある。このために、今回の測定結果も全体的に「卑」となったものと考えられる。電位の値そのもので鋼材の腐食状況を論じることが現時点では難しい。

5) 不動態のグレイド

動電位分極曲線より判定した不動態のグレードを同じく表-9に示す。この場合も、塗装システム「B」(SE-B-1, SE-B-2)は塗膜剥落後の測定結果である。これを見ると、塗膜のない場合(SE-B-1, SE-B-2, SE-O-1, SE-O-2)はグレードが「2」前後であるのに対し、塗膜を有する場合は、グレードが「4」あるいは「5」である。このことより、塗膜のない供試体の鉄筋の不動態は一部が既に破壊されているのに対し、塗膜を有する供試体の鉄筋は比較的良好な不動態を有しているものと考えられる。

6) 定電位ステップ法

定電位ステップ法の測定結果(定常状態における電流密度)を同じく表-9に示す。この場合も塗装システム「B」(SE-B-1, SE-B-2)は塗膜剥落後の測定結果である。これを見ると、塗膜のない場合(SE-B-1, SE-B-2, SE-O-1, SE-O-2)は4~10 μ A/cm²程度であるのに対し、塗膜を有する場合は0.1~3.4 μ A/cm²の範囲に分布している。これより、塗膜を有することにより、コンクリート中への酸素の侵入が抑制されていることがわかる。特に、塗装システム「F」(SE-F-1, SE-F-2)は2供試体ともに0.1 μ A/cm²であり、酸素侵入抑制効果が大きいことが示唆される。

7) 埋設鉄筋の腐食状況

同じく表-9に埋設鉄筋の発錆面積率(鉄筋の全表面積に対する発錆面積の割合)を示す。塗装のない場合(SE-O-1, SE-O-2)でも2~3%の発錆面積率しか示しておらず、全ての供試体でその鉄筋の状況は概ね良好であった。この中で、塗膜の有無の影響を比較すると、塗膜を有する供試体中の鉄筋はほとんど発錆が認められなかったが、塗膜のない供試体中の鉄筋には、少量ではあるが発錆が認められた。

8) コンクリート中の塩分含有量

表-10にコンクリート中の塩分含有量の測定結果を示す。これを見ると、表面からの深さが比較的大きい範囲(50~70mm)では、塗装の有無による塩分含有量の差は認められず、いずれも0.003~0.005%の値となった。しかし、表面からの深さが小さい場合(30mm)は塗膜の有無の影響が認められた。塗膜を有する供試体では、30mmの場合も50mmの場合とほぼ同様で、0.005%程度の塩分含有量であるが、塗膜のない場合(SE-O-1, SE-O-2)は、30mmで0.013~0.017%の塩分を含有しており、塗膜を有する場合のほぼ3倍である。これより、塗膜を有することによりコンクリート中への塩素の侵入が抑制されていることがわかる。また、錆の生じている鉄筋の周囲の塩分含有量は他の部分に比較して極めて大きくなっ

表-10 コンクリート中の塩分含有量
(シリーズ2)

供試体 番号	試料採取深さ (mm)			腐食鉄筋の 周囲
	30	50	70	
SE-A-1 -2	0.003 0.005	0.005 0.003	0.005 0.003	
SE-B-1 -2	0.009 0.009	0.003 0.003	0.005 0.003	0.476
SE-C-1 -2	0.005 0.006	0.005 0.003	0.005 0.005	
SE-D-1 -2	0.005 0.005	0.005 0.005	0.005 0.005	
SE-E-1 -2	0.005 0.005	0.005 0.005	0.005 0.005	
SE-F-1 -2	0.005 0.005	0.003 0.005	0.005 0.005	0.009
SE-O-1 -2	0.013 0.017	0.005 0.006	0.006 0.005	0.641 0.440

(NaCl v.s Concrete in weight)

ていることが示された。

(3) シリーズ3 (乾湿繰り返し促進試験)

1) 供試体の外観性状

本シリーズにおいても、シリーズ2と同様、塗装システム「B」の耐久性が極めて悪かった。促進サイクル開始後、わずか数サイクル後に塗膜に大きなひびわれが発生し、ほどなくしてすべて剥離、剥落した。その他の塗装システムでは、促進サイクルを20サイクル行った後でも浮き、剥離、はがれといった大きな表面劣化は認められなかった。しかしながら、本シリーズの場合もシリーズ2と同様に、一部の塗装システムにおいて塗膜の表面が白色から黄色へと変色したものがあつた。

2) 埋設鉄筋の自然電極電位

図-14~21に促進期間中1サイクルごとに測定した電位の経時変化を示す。なお、各測定は乾燥から湿潤の状態に移行した直後に図-8に示す方法で実施した。なお、そのときの海水は低温(15℃)の状態である。これを見ると、塗装システム「B」の供試体の埋設鉄筋の電位が6サイクルを境に「卑」へシフトしていることがわかる。この理由としては、1つには塗膜のひびわれ、剥離、剥落が考えられる。しかしながら、初めから無塗装の供試体では電位が大きく卑化する傾向は認められない。また、塗装システム「B」以外の塗装を施した供試体では、いずれの場合も促進サイクル開始後、数サイクル(2~3サイクル)の間は電位が約100mV程度卑化するものの、その後はほぼ一定の値を保持している。自然電極電位の測定値は、鉄筋の電位とそれに隣接する電解質の電位の差を示している。⁷⁾鉄筋自体の電位が大きく変動するとは

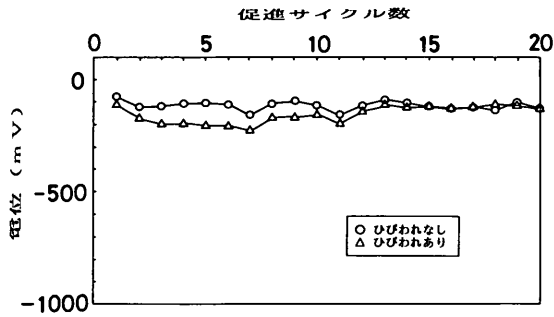


図-14 自然電極電位の経時変化 (塗装システムA)

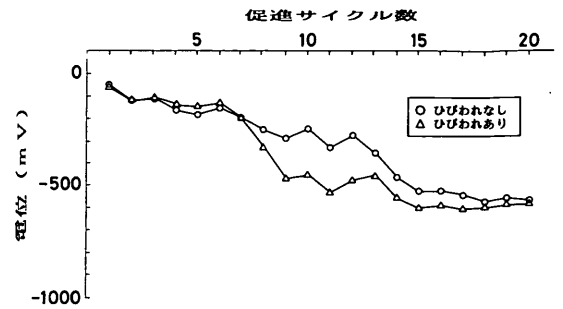


図-15 自然電極電位の経時変化 (塗装システムB)

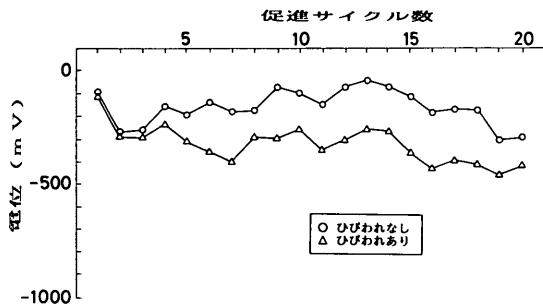


図-16 自然電極電位の経時変化 (塗装システムC)

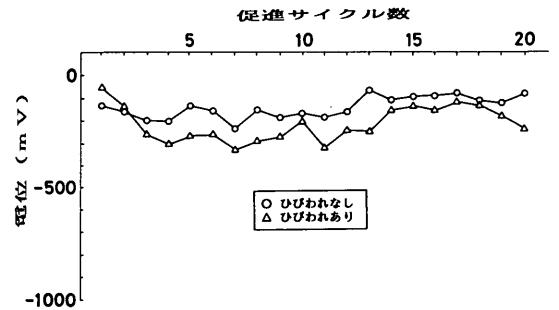


図-17 自然電極電位の経時変化 (塗装システムD)

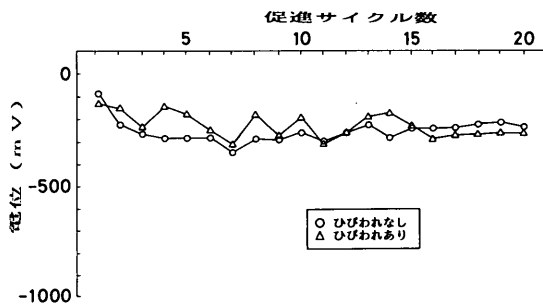


図-18 自然電極電位の経時変化 (塗装システムE)

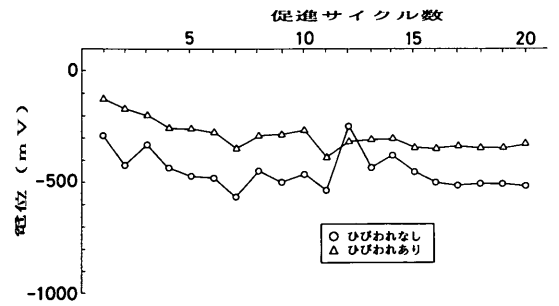


図-19 自然電極電位の経時変化 (塗装システムF)

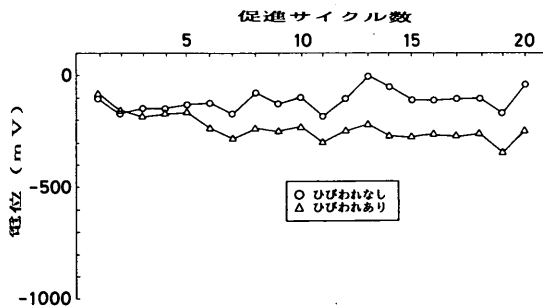


図-20 自然電極電位の経時変化
(無塗装, W/C=37%)

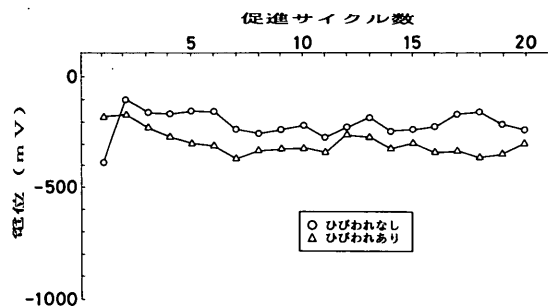


図-21 自然電極電位の経時変化
(無塗装, W/C=50%)

考えられない。このことを踏まえ、促進期間中の平均的な電位の経時変化より考察すれば、促進20サイクルの間、埋設鉄筋（その周囲の状況も含めて）に大きな変化は生じてないものと考えられる。

3) 不動態のグレイド

表-11に促進サイクル20サイクルを行った後に求めた不動態のグレイドを示す。これを見ると、塗装システム「B」(A-B-1, A-B-2)および無塗装供試体(A-O37-1, A-O37-2, A-O50-1, A-O50-2)のグレイドは大半が2程度であり、不動態の状態が余り良くない(不動態の一部が既に破壊されている)ことがわかる。一方、その他の塗装を施している供試体のグレイドはいずれも4もしくは5を示しており、不動態の状態は極めて良いことがわかる。

4) 埋設鉄筋の腐食状況

同じく表-11に埋設鉄筋の発錆面積率を示す。無塗装の供試体の一部に発錆面積率が1~4.1%というものがあるが、その他はいずれも1.0%以下であり、鉄筋の発錆自体は極めて軽微であることがわかる。このわずかな発錆状況の範囲内で考察すると、無塗装の供試体では、わずかに発錆している箇所が認められるのに対して、塗装を施している供試体ではほとんど発錆は認められず、塗装の効果があることがわかる。

5) コンクリート中の塩分含有量

同じく表-11にコンクリート中の塩分含有量の測定結果を示す。なお、本測定は、埋設鉄筋の近傍より採取したコンクリート塊を試料として取り行ったので、かぶり

厚さは20~30mm程度である。これを見ると、塗膜の遮塩効果が明らかである。無塗装の供試体の場合、0.05~0.3%であるのに対し、塗装を施した供試体(システム「B」を除く)では、0.005~0.02%であり、平均的に見て、塗装供試体の塩分含有量は無塗装供試体のその約10分の1程度である。

3. 4 考察

(1) 塗膜の耐久性ならびに防食効果

今回の試験の対象とした6種類の塗装システムのうちでは、塗装システム「B」の塗膜の耐久性が最も悪かった。シリーズ2およびシリーズ3において、暴露試験ならびに促進試験開始後、わずか1~2か月で塗膜にひびわれが生じ、ほどなくすべて剥落した。しかし、シリーズ1ではこのようなひびわれ、剥落は生じなかった。シリーズ1においては、供試体はシリーズ2およびシリーズ3で受けるような乾湿繰り返しは受けない。このことを考えると、この劣化の原因は、乾湿繰り返しであることが予想される。すなわち、塗装システム「B」の塗膜の乾燥収縮量が大きいものと考えられる。塗装システム「B」以外のシステムではその表面には際立った劣化は認められず、総じて塗膜は健全であった。

また、全体的に見て塗膜を有する供試体のコンクリート内部に含有される塩分量は、塗膜を有しない供試体に比べて小さく、塗膜の遮塩効果が確認された。一方、酸素の透過性も塗膜が存在することにより、無塗装のコンクリートに比べて小さくなっていることが確認された。このことより、塗膜が存在することにより、内部鉄筋の防食性が向上していることが明らかである。

(2) 塗膜表面の色彩測定の有効性

図-22および図-23に色彩測定結果の一例を示す。図-22は塗装システム「A」の供試体の測定結果であり、図-23は無塗装の供試体、すなわちコンクリート表面の色彩の測定結果である。塗装システム「A」は暴露時に上面となっていた塗膜の表面が黄色へと変色していた。図-22よりわかるとおり、塗膜の色が原色(白色)を保持していた面と、黄色へ変色していた面とが明確に区分された。一方、図-23を見ると、表面の変色がさほど顕著でないコンクリート面はいずれもが類似した測定結果を示していることがわかる。これより、塗膜の変色を色彩測定を行うことにより定量的に評価することが可能であることが示された。

(3) 埋設鉄筋の電気化学的測定の有効性

図-24~図-26に鉄筋の電気化学的測定結果と発錆面積率の関係を示す。なお、シリーズ1~3の試験結果を同一の図中に示している。

表-11 試験結果(シリーズ3)

供試体番号	不動態のグレイド	発錆面積率(%)	塩分含有量(%)
A-A-1	5	0.0	0.005
-2	4	0.1	0.008
A-B-1	3	0.0	0.020
-2	2	0.0	0.016
A-C-1	4	0.0	0.005
-2	4	0.1	0.008
A-D-1	5	0.0	0.005
-2	5	0.0	0.006
A-E-1	5	0.0	0.005
-2	5	0.3	0.006
A-F-1	5	0.0	0.005
-2	4	0.5	0.019
A-O37-1	4	0.0	0.053
-2	2	1.9	0.131
A-O50-1	2	1.0	0.126
-2	2	4.1	0.276

(NaCl v.s Concrete in weight)

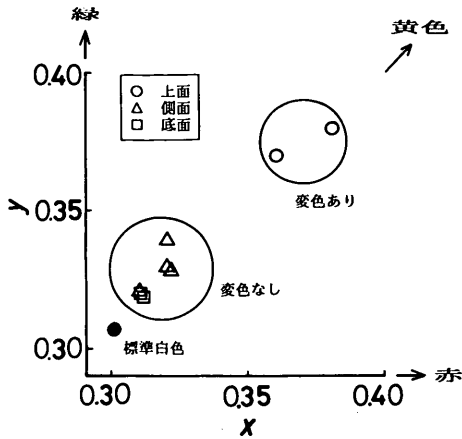


図-22 塗膜の色度図 (塗装システムA)

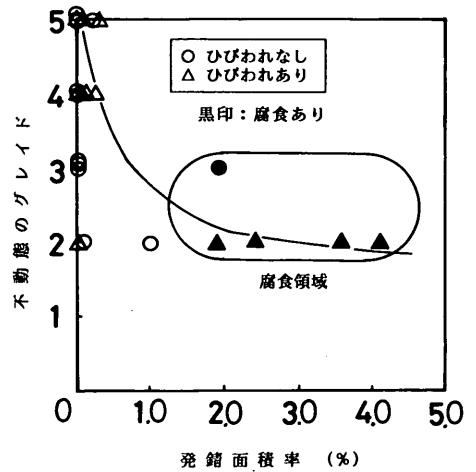


図-25 不動態のグレイドと発錆面積率の関係

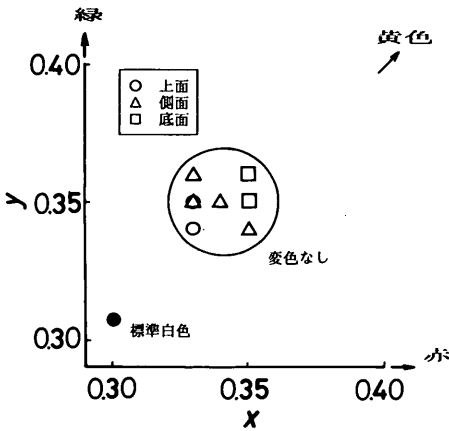


図-23 塗膜の色度図 (無塗装)

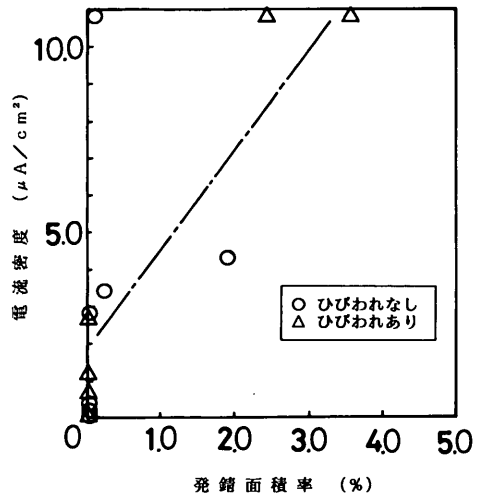


図-26 電流密度と発錆面積率の関係

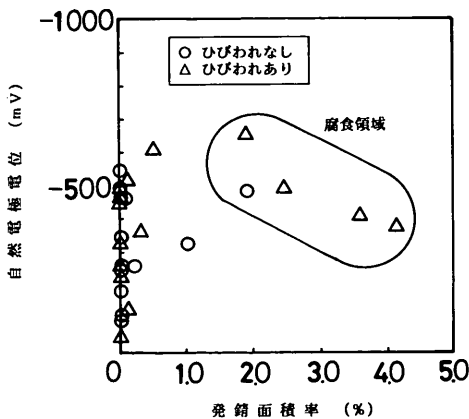


図-24 鉄筋の自然電極電位と発錆面積率の関係

図-24に鉄筋の自然電極電位と発錆面積率の関係を示す。一次的な相関性は認められないが、発錆が生じている鉄筋(図中に楕円で囲んだ部分)の自然電極電位はいずれも $-400 \sim -500\text{mV}$ と、比較的「卑」な値を示した。また、逆に言えば、自然電極電位が $-100 \sim -300\text{mV}$ 程度の比較的「貴」な値を示した鉄筋には発錆は認められなかった。しかしながら、鉄筋の電位は鉄筋の状態のみで決定されるわけではなく、鉄筋の環境条件の影響も受け、かつ測定方法(コンクリートの含水状態)の影響も受ける。したがって、測定された電位の値のみで鉄筋の状況を推定することは難しいものと考えられる。

図-25に鉄筋の不動態のグレイドと発錆面積率の関係

を示す。発錆が認められた鉄筋（図中に楕円で囲んだ部分）はいずれもグレードが2もしくは3であった。逆に言えば、グレードが4もしくは5といった、不動態が比較的良好と判定された鉄筋には発錆は認められなかった。

図-26に定電位ステップ法より得られた電流密度と発錆面積率の関係を示す。図よりわかるとおり、発錆が認められない場合は電流密度も小さい。しかし、電流密度が大きくなるに従い発錆が認められるようになった。著者らはこれまでも、この不動態のグレードと定電位ステップ法を総合的に評価することにより、内部鉄筋の状況を比較的良好と推定することができることを示している。⁹⁾これは、鉄筋の不動態が完全な状態にあるか(不動態のグレードが5に相当)、もしくは鉄筋への酸素の供給が全く無いか(定電位ステップ法での電流密度が0に相当)のいずれかの条件が満足されれば、鉄筋の発錆は理論上生じ得ないという原理に基づいている。このことを踏まえ、図-27に示すような図を考案した。これは横軸に定電位ステップ法より得られた電流密度をとり、縦軸に不動態のグレードをとり両者の関係をプロットしたものである。なお図よりわかるとおり、両軸とも原点から離れる程鉄筋は腐食しやすいことを示す。著者らは、この図中に鉄筋の腐食領域と非腐食領域が設定できるものと考えた。図-27は今回得られた測定結果をプロットしている。黒塗りが発錆が認められた鉄筋のデータであり、白抜きが発錆が認められなかったものである。今回の測定結果に基づいた場合、同図に示すような腐食領域が設定された。これは一例にすぎないが、電気化学的測定結果を合理的かつ総合的に解釈することにより、内部鉄筋の腐食状況に関して有意な知見が得られるものと考えられる。

(4)内部鉄筋の腐食に影響を及ぼすその他の要因

図-28に塗膜の電気抵抗(コンクリートの抵抗も含む)と鉄筋の発錆面積率の関係を示す。鉄筋の発錆が認められる場合(図中の楕円で囲んだ部分)は抵抗はいずれも低い領域にあった。逆に言えば、高抵抗の塗膜を有する場合は、内部鉄筋に発錆は認められなかった。

図-29にコンクリート中の塩分含有量と鉄筋の発錆面積率の関係を示す。図を見てわかるとおり、塩分含有量が大きくなるにつれて、鉄筋の発錆も増加することが認められた。これより、塗膜の抵抗、コンクリート中の塩分含有量も内部鉄筋の腐食に影響を及ぼす要因の一つであることが考えられる。

(5)各種塗装システムの評価法

以上、RC 供試体を使用した実験により、各種塗装シス

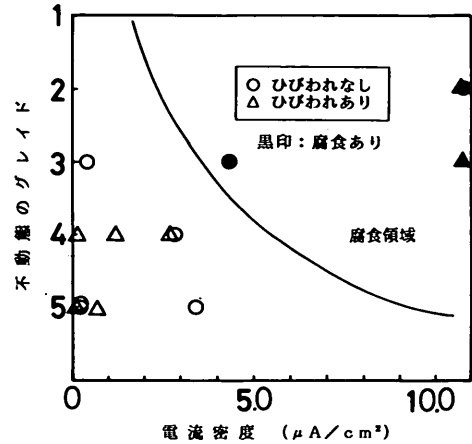


図-27 埋設鉄筋の腐食判定図

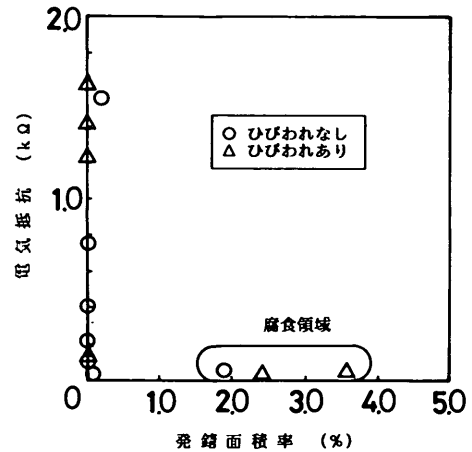


図-28 塗膜の電気抵抗と発錆面積率の関係

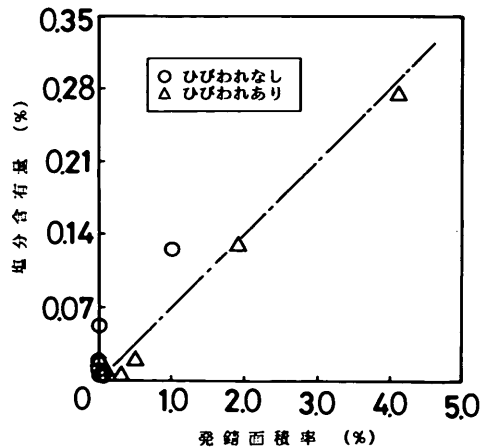
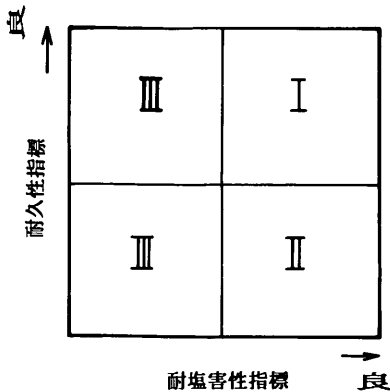


図-29 コンクリート中の塩分含有量と発錆面積率の関係

テムを施した場合の、その塗膜の挙動、内部鉄筋の防食性を検討してきた。その結果、塗膜を評価、選択するにはその耐久性（耐候性）および耐塩害性の双方から評価することが必要であることが示唆された。種々の塗装システムを評価、選択する際の一つの方法として、著者らは図-30に示すような図を考えてみた。これは横軸に耐塩害性指標をとり、縦軸に耐久性（耐候性）指標をとったものである。現段階で両指標を具体的に定義することは難しいが、耐塩害性指標というのは、塗膜の遮塩性、酸素透過抑制性等を基に定義されるものであり、耐久性（耐候性）指標というのは、表面劣化抵抗性、表面変色抵抗性、付着力損失抵抗性等を基に定義されるものである。著者らは図に示すとおり、塗装システムを大まかに4つに分類することを考えた。領域Ⅰに属するものは耐塩害性、耐久性（耐候性）ともに優れた塗装システムであり「使用可」の材料であると判断される。一方、領域Ⅲに属するものは、耐塩害性が所定の性能を満足していないために「使用不可」の材料であると判断される。また、領域Ⅱに属するものは耐塩害性は所定の性能を満足するが、耐久性（耐候性）に問題がある材料であり、塗装の対象となる構造物の環境条件ならびに塗装を施す目的（塗膜に要求される耐用年数、等）によっては「使用可」と判断される材料である。この評価図については、今後さらに検討を加えていきたいと考えている。

(6) 暴露試験と促進試験の比較

本研究において採用した乾湿繰り返し腐食促進試験は



- Ⅰ：使用可
- Ⅱ：条件によっては使用可
- Ⅲ：使用不可

図-30 塗装システムの評価図

一般的によく用いられているが、どの程度腐食を促進させるのかは明らかでない。ここでは、コンクリート中の塩分含有量を一つの指標として、暴露試験と促進試験を比較してみる。水セメント比が37%の無塗装コンクリート中の、表面からの深さ20~30mmの塩分含有量を見ると、実環境の場合（シリーズ1）で0.002%、飛沫部シミュレーション環境（シリーズ2）で0.015%、乾湿繰り返し促進環境（シリーズ3）で0.092%となっている。この塩分含有量のデータだけで3者を比較すると、実環境（1年）：飛沫部シミュレーション環境（1年）：促進環境（20サイクル）= 1：7.5：46となる。無論、これは塩分含有量だけの比較であるが、乾湿繰り返しの促進効果が認められる。

4. 材令の経過したコンクリートの表面塗装に関する実験（実験Ⅱ）

4.1 実験開始の経緯

2章でも述べたが、コンクリートに表面塗装を施す時期は大まかに分けて2つの場合が考えられる。すなわち、新設時と比較的材令を経た時である。後者の場合は補修の一環として実施されることが多いが、塗装単独で実施される場合もある。本章で述べる実験は、比較的材令を経た時に塗装単独で実施される場合を想定している。第二港湾建設局（以下、二建と略記）では、横浜港再開発に伴う高島棧橋の撤去に併せて、その既存棧橋を利用した種々の研究、調査を計画した。本章で述べる実験もその一環として港研が二建より供試体の提供を受け実施したものである。すなわち、材令34年が経過した高島棧橋の梁部材、柱部材、床版部材より切り出したコンクリート部材を供試体として、その表面に種々の表面塗装を施し、腐食促進試験を行い、その防食効果を検討した。一方、二建においても同様の塗装供試体を京浜港に設置された暴露架台上に暴露しており、長期暴露後の塗膜の劣化等に関するデータを収集することになっている。最終的には両者の試験結果を比較、検討する計画である。

4.2 実験概要

(1) 概要

前節でも述べたとおり、本章で述べる実験は実構造物より切り出したRCコンクリート部材を供試体とし、その表面に各種塗装を行い、その後腐食促進試験を実施したものである。なお、古い記録によると、コンクリートの配合は水：セメント：骨材= 1：2：4（容積比）である。

(2) 供試体

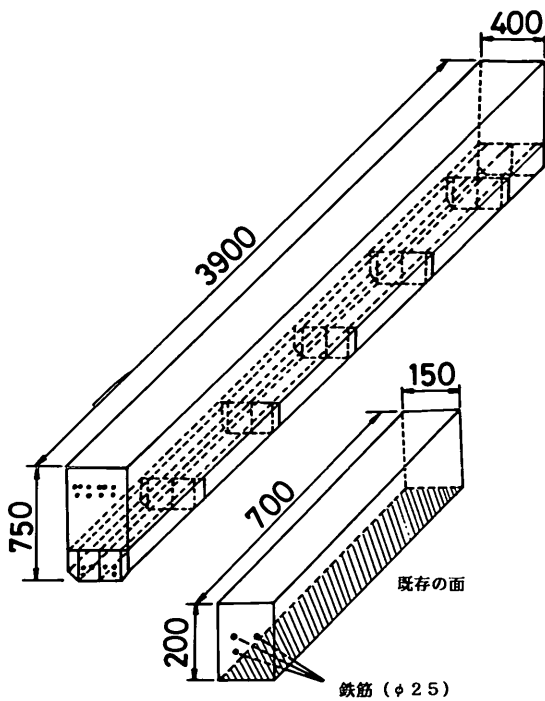


図-31 梁からの供試体の切り出し

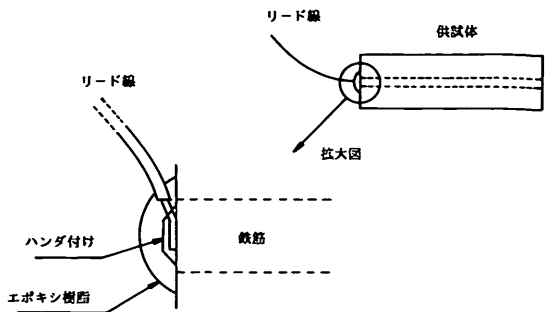


図-33 鉄筋へのリード線の接続

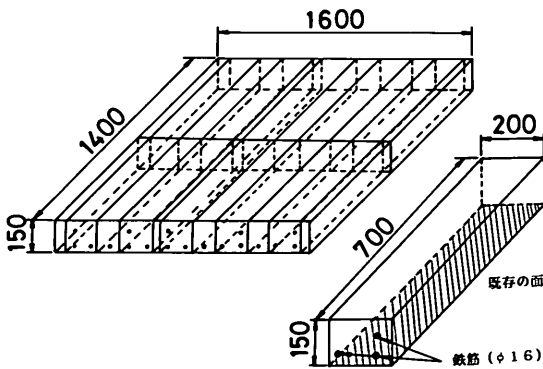
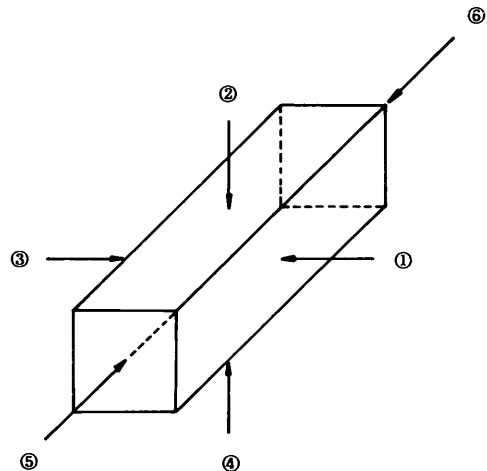


図-32 床版からの供試体の切り出し



- | | |
|-------|----------------------|
| ① | オリジナル塗装面 |
| ② | エポキシ樹脂系システムⅠ(薄膜型)塗装面 |
| ③ ⑤ ⑥ | エポキシ樹脂系システムⅡ(厚膜型)塗装面 |
| ④ | エポキシ樹脂ワニス系プライマー層塗装面 |

図-34 供試体の塗装方法の概要

図-31および図-32に梁および床版からの供試体の切り出し方法の概要を示す。切り出す供試体の寸法は150×200×700mmの直方体と規定したが、実際には現場の状況等により多少の誤差が生じている。また個々の供試体には図に示されるようにいずれも2～3本の鉄筋(丸鋼)を含んでいる。なお、後に示すが鉄筋のかぶり厚さは統一されておらずまちまちである。また、切り出した供試体のうちの一面は供用時のコンクリート表面であるが、残りの3面は切断面であるため供試体中の塩分濃度もか

なり不均質である。このように、本章で述べる実験では不均質かつ不確定要素の多い供試体を使用した。なお、供試体は全部で45体である。

まず初めに供試体中の鉄筋へリード線を接続した。図-33にその概要を示す。コンクリート切断面内の鉄筋切断面にリード線をハンダ付けし、その部分をエポキシ樹脂により保護した。なお、リード線は後に鉄筋の自然電極電位、分極曲線などの電気化学的測定を行うために取り付けたものである。

次に供試体表面に種々の塗装を実施した。図-34に塗装方法の概要を示す。個々の供試体の長手方向の一面(図中の①に相当)をオリジナル塗装面とし、この面には各供試体ごとに異なる様々な種類の塗装システムにより塗装を行った。その塗装の種類および仕様の一覧を表-12に示す。表に示すように塗装システムは全部で12種類で

ある。また、これらに用いた塗装仕様は材料メーカーが指示するものであり、供試体への塗装はメーカーの擁する専門作業員が実施した。これより、このオリジナル塗装面の塗膜の品質は極めて良いものと思われる。また同表に各々の塗装がなされた供試体番号も併せて示す。なお、供試体番号12, 24, 36, 42はオリジナル塗装面が無

表-12(1) 塗装材料および仕様

材料名	アクリル系ポリマーセメント		厚膜型ポリウレタン樹脂塗装システム
	I	II	I
防錆処理(1)	エポキシ樹脂塗料	変性エポキシ樹脂	防錆用エポキシ樹脂塗料
防錆処理(2)	-----	ポリマーセメントペースト	-----
シーラー	アクリルエマルジョン	-----	-----
プライマー	-----	ポリマーセメントペースト	ポリウレタン樹脂プライマー
パテ	-----	-----	-----
断面修復	アクリルエマルジョン	ポリマーセメントモルタル	エポキシ樹脂軽量モルタル
下地調整	アクリルエマルジョン	-----	エポキシ樹脂パテ
下塗(1)	-----	-----	-----
下塗(2)	-----	-----	-----
中塗(1)	エポキシ樹脂塗料	ポリマーセメントペースト	厚膜型ポリウレタン樹脂塗料
中塗(2)	-----	-----	-----
中塗(3)	-----	-----	-----
上塗(1)	ウレタン樹脂塗料	変性エポキシ樹脂	柔軟型ポリウレタン樹脂塗料
上塗(2)	-----	シリコンエマルジョン	-----
上塗(3)	-----	シリコン樹脂	-----
塗装供試体番号	1, 13, 25, 37	2, 14, 26	5, 17, 29, 39

表-12(2) 塗装材料および仕様

材料名	SBR系ポリマーセメント		ポリブタジエン樹脂塗装システム
	I	II	I
防錆処理(1)	ウレタン系防錆剤	-----	防錆用エポキシ樹脂塗料
防錆処理(2)	変性PET系防錆剤	-----	-----
シーラー	-----	-----	-----
プライマー	-----	-----	ポリウレタン樹脂プライマー レジガードURプライマー
パテ	-----	-----	-----
断面修復	-----	-----	エポキシ樹脂軽量モルタル
下地調整	SBR系ポリマーセメントモルタル	-----	エポキシ樹脂パテ
下塗(1)	-----	アルカリ性付与表面強化材	-----
下塗(2)	-----	特殊浸透性塩害防除材	-----
中塗(1)	SBR系ポリマーセメントモルタル	-----	ポリブタジエン樹脂塗料
中塗(2)	-----	-----	-----
中塗(3)	SBR系ポリマーセメントモルタル	-----	-----
上塗(1)	塩化ゴム系樹脂シーラー	ポリマーセメントモルタル	柔軟型ポリウレタン樹脂塗料
上塗(2)	アクリル系弾性仕上材	-----	-----
上塗(3)	-----	-----	-----
塗装供試体番号	3, 15, 27, 38	4, 16, 28	7, 19, 31

表-12(3) 塗装材料および仕様

材料名	柔軟型エポキシ樹脂		クロロレンゴム系ポリエチレン樹脂
	I	II	I
防錆処理(1)	変性エポキシ樹脂さび止め塗料	-----	アルギッド樹脂
防錆処理(2)	-----	-----	-----
シーラー	-----	-----	-----
プライマー	エポキシ樹脂プライマー		エポキシ変性樹脂
パテ	エポキシ樹脂パテ	-----	-----
断面修復	-----	-----	SBR系ポリマーセメントモルタル
下地調整	-----	-----	SBR系ポリマーセメントモルタル
下塗(1)	-----	-----	-----
下塗(2)	-----	-----	-----
中塗(1)	柔軟型エポキシ樹脂塗料	ポリブタジエン弾性塗料	クロロレンゴム
補強布	-----	-----	ビニロン繊維
中塗(2)	柔軟型エポキシ樹脂塗料	ポリブタジエン弾性塗料	クロロレンゴム
中塗(3)	-----	-----	-----
上塗(1)	柔軟型ポリウレタン樹脂塗料	柔軟型ポリウレタン樹脂塗料	クロロスルフォン化ポリエチレン
上塗(2)	-----	-----	-----
上塗(3)	-----	-----	-----
塗装供試体番号	6, 18, 30, 40	8, 20, 32	11, 23, 35

表-12(4) 塗装材料および仕様

材料名	アクリル系ポリマーセメント		超厚膜無溶剤型エポキシ樹脂
	I	II	I
防錆処理(1)	エポキシ樹脂塗料	防錆材入り変性エポキシ樹脂	-----
防錆処理(2)	-----	-----	-----
シーラー	アクリルエマルジョン	-----	-----
プライマー	-----	-----	-----
パテ	-----	-----	-----
断面修復	-----	-----	-----
下地調整	アクリルエマルジョン	カチオン系アクリルポリマーセメント	-----
下塗(1)	塩化ゴム	変性エポキシ樹脂	-----
下塗(2)	-----	-----	-----
中塗(1)	アクリルゴム	アクリルゴムエマルジョン	-----
中塗(2)	-----	-----	-----
中塗(3)	-----	-----	-----
上塗(1)	ウレタン樹脂塗料	アクリル・ウレタン樹脂	無溶剤型エポキシ樹脂
上塗(2)	-----	-----	-----
上塗(3)	-----	-----	-----
塗装供試体番号	9, 21, 33, 41	10, 22, 34	43, 44, 45

塗装のものであり、この面に対しては塗装の非専門作業員がプライマーの一層塗りを行った。一方、供試体の残りの5面(図中②~⑥に相当)の塗装は塗装の専門家でない作業員が手作業で実施した。これは、塗装作業を実施する作業員の技能の良否が塗膜の品質に及ぼす影響を見ることを目的の1つとしたためである。

供試体表面②にはペイントタイプのエポキシ樹脂系塗料(薄膜型)を用い、供試体表面③, ⑤, ⑥はローラー塗付タイプのエポキシ樹脂系塗料(厚膜型)を用いた。この両者の仕様を表-13に示す。同表に示すように、薄膜型, 厚膜型ともに3層塗りとした。また、供試体表面④は、エポキシ樹脂塗料を塗る際に使用した下塗りプライマーの一層塗りとした。これは、施工不良等に起因する粗悪な塗装面のような極めて質の良くない塗膜を想定している。以上示したように、供試体(長型直方体)の6表面には4種類の異なる塗装システムにより塗装を行った。この4種類の塗装面の中では、オリジナル塗装面①が最も品質が良く、次いで、厚膜型エポキシ樹脂塗装面③⑤⑥, 薄膜型エポキシ樹脂塗装面②, 最も品質が劣るのがプライマー塗装面④となる。

先にも述べたが、実構造物(栈橋上部工)より切り出した供試体であるため、内部鉄筋のかぶり厚さが供試体によりまちまちである。表-14に内部鉄筋の各塗装面からの深さを示す。同表にも示すが、供試体には1~3本の内部鉄筋が存在しており、その各々について各塗装面からの深さを計測した。

(3)促進試験方法

本試験においても乾湿繰り返し促進試験を実施した。試験条件は図-3に示すとおりである。

(4)促進期間中および促進期間後の試験項目および試験方法

表-13 エポキシ樹脂塗料の塗装仕様

		薄膜型ペイント	原膜型ペイント
下塗り	種別	プライマー (エポキシ樹脂ワニス)	プライマー (エポキシ樹脂ワニス)
	使用量	0.11kg/m ²	0.11kg/m ²
中塗り	種別	エポキシ樹脂塗料	エポキシ樹脂被覆材料
	使用量	0.12kg/m ²	0.8kg/m ²
上塗り	種別	エポキシ樹脂塗料	エポキシ樹脂被覆材料
	使用量	0.12kg/m ²	1.35kg/m ²
塗装方法		ハケ塗り	ローラー塗り
塗装面番号*		②	③ ⑤ ⑥

*: 図-34参照

1)外観観察

3.2節で述べた方法と同様であり、塗膜表面の劣化、ひびわれ、変色などに注意して観察を行った。

2)内部鉄筋の自然電極電位

自然電極電位の測定は図-8に示す方法を用いた。参照電極として銀-塩化銀電極を用いた。なお、本測定は

表-14(1) 埋部鉄筋の各塗装面からの距離

						(cm)
供試体番号	鉄筋番号	a	b	c	d	
1	1	10	5	10	11	
	2	10	13.5	10	2.5	
	3	19	4	1	12	
2	1	19	12	4	1	
	2	9	4	11	11	
	3	9	12	3	11	
3	1	10	11.5	5.5	3	
	2	10	4	5.5	10.5	
4	1	10	12	3	6	
	2	10	5	10	6	
5	1	11	12	9	3	
	2	18	4	2	11	
	3	11	4	9	11	
6	1	17	12	3	3	
	2	10	12	10	3	
	3	10	2.5	10	12.5	
7	1	10	3	6	10	
	2	10	11	6	2	
8	1	11	11.5	4	2	
	2	11	3	4	10.5	
9	1	9	12.5	11	3	
	2	18	11.5	2	4.5	
	3	9	5.5	11	10.5	
10	1	10	11	10	4	
	2	9	3	11	12	
	3	8	4	2	10	
11	1	17.5	5.5	2.5	10.5	
	2	9.5	11.5	10.5	4.5	
	3	9.5	3.5	10.5	12.5	
12	1	9	5	10	11	
	2	9	12	3	11	
	3	17	11	4	3	
13	1	10	9	12	7	
	2	3	9	12	14	
14	1	11	13	8	6	
	2	3	12	9	14	
15	1	12	10	10	4	
	2	3	10	10	13	
16	1	10	10	7	10	
	2	2.5	10	14.5	10	
17	1	4	10	13	10	
	2	12	11	5	9	
18	1	2	12.5	7.5	14	
	2	10	12.5	7.5	6	
19	1	5	13	7	11	
	2	8	13	7	8	

促進サイクルを実施している間、1サイクルごとに実施した。

3) 動電位分極曲線および不動態のグレイドの判定

分極曲線の測定方法および不動態のグレイドの判定方法は3.2節で述べた方法と同じである。

表-14(2) 埋部鉄筋の各塗装面からの距離 (cm)

供試体番号	鉄筋番号	a	b	c	d
20	1	7.5	10	10	7.5
	2	5	11	9	10
21	1	6	9	10	10
	2	8	8	8	11
22	1	8	9	10	8
	2	5	9.5	9.5	11.5
23	1	6	12	8	10
	2	9	12	8	7
24	1	12.5	10	7.5	6
	2	11.5	8	8.5	8
25	1	12	5	10	8
26	1	11.5	7	8	8.5
27	1	11	8.5	10	7
	2	11	4.5	10	11
28	1	10	5	11	10
29	1	12	8	8	7
	2	9	11	8	7
30	1	10	8	10	7
31	1	10	6	10	8
32	1	12	6	8	9
33	1	10	7	8	8
34	1	10	7.5	10	7.5
35	1	13	7.5	7	7.5
	2	13	5	7	10
36	1	5	8	10	11
37	1	11	7.5	7.5	9
	2	18	6	8	2
38	1	12	5.5	8	8.5
39	1	14	5	6	10
	2	11	6	9	9
40	1	11	5.5	9	9.5
41	1	12	6	6	9
42	1	12	9	7	6
43	1	---	---	---	---
	2	11	12	9	5.5
44	1	11	9	5	12
	2	4	10	12	11
45	1	8	8	12	7
	2	5	8	12	10

- a : オリジナル塗装面からの深さ
- b : 厚膜型エポキシ樹脂塗装面からの深さ
- c : 薄膜型エポキシ樹脂塗装面からの深さ
- d : プライラー塗装面からの深さ

4) 定電位ステップ法

本測定の測定方法およびデータの解釈法は3.2節で述べた方法と同じである。

5) コンクリート中の塩分含有量

塩分含有量試験用試料の採取は、ドリル式試料採取器により行った。図-35に試料採取位置の概要を示す。図に示すように、1つの塗装面に2箇所の採取箇所を設定し、1つの採取箇所につき2つの異なる深さの試料を採取した。図よりわかるとおり、ドリルによる掘削を行う際、まずはじめに深さ20~40mmの試料を採取し、次いで深さ40~60mmの試料を採取した。前者の試料(20~40mm)により求めた塩分量をかぶり厚30mmにおける塩分含有量とし、後者の試料(40~60mm)により求めた塩分量をかぶり厚50mmにおける塩分含有量として取り扱った。なお、塩分の測定はJCI(日本コンクリート工学協会)の方法に準拠し、可溶性塩分含有量を求めた。

6) 埋設鉄筋の観察 (発錆面積率の算定)

埋設鉄筋の観察は3.2節で述べた方法と同様であり、発錆面積率として、鉄筋全表面積に対する発錆面積率の割合をパーセントで表示した。

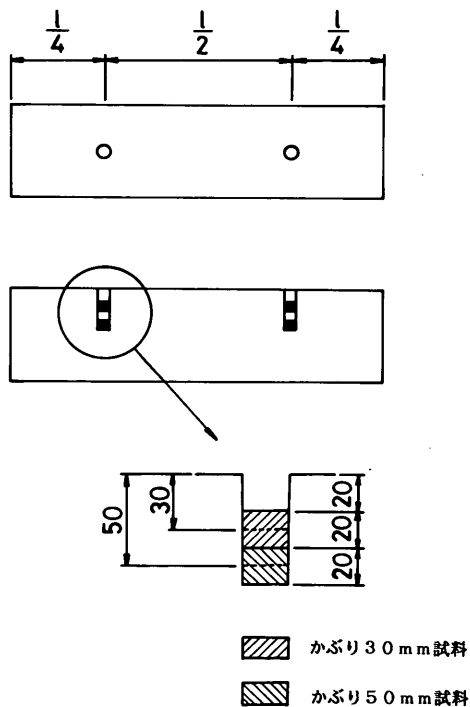


図-35 塩分定量用試料の採取方法概要

4.3 実験結果

(1) 供試体の外観性状

促進サイクル20サイクルを経過した後の各供試体の塗膜は、全体的に見てさほど劣化は進んでいなかった。しかしながら、一部の塗膜には直径1cm程度の浮きが生じているものも見られた。これらの浮きは塗装の専門家

ない作業員が塗装を実施したものに発生しており、施工方法に若干の問題があったことが考えられた。しかし、これらの浮きは比較的軽微なものであり、塗膜の剥落にいたるものではなかった。また、一部の供試体の隅角部には傷が見られたが、これは供試体運搬中の偶発的なものであり、乾湿繰り返し作用によるものではない。

(2) 内部鉄筋の自然電極電位

付図-1から付図-45に促進サイクル期間中の鉄筋の

表-15(1) 試験結果

供試体番号	鉄筋番号	不動電位の グレード	電流密度 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	発錆面積率 (%)
1	1	0	12.13	22.0
	2	2	16.38	36.3
	3	4	0.58	50.6
2	1	0	67.30	58.7
	2	4	4.29	27.5
	3	2	6.09	7.5
3	1	1	20.46	52.8
	2	2	11.63	89.3
4	1	4	0.69	8.1
	2	4	1.76	5.7
5	1	1	11.25	23.4
	2	4	1.39	6.0
	3	2	7.25	28.3
6	1	4	1.24	29.9
	2	1	11.85	11.6
	3	4	0.32	11.5
7	1	2	2.21	29.1
	2	2	6.12	30.9
8	1	1	12.38	30.0
	2	1	8.37	7.4
9	1	1	9.88	70.3
	2	2	6.04	15.3
	3	2	4.03	17.1
10	1	4	1.41	29.8
	2	5	0.14	24.2
	3	----	----	16.3
11	1	4	0.16	26.2
	2	4	0.16	28.7
	3	5	0.26	36.0
12	1	4	0.49	29.4
	2	5	0.22	43.4
	3	1	14.45	33.3
13	1	4	0.50	13.0
	2	4	0.08	33.0
14	1	1	3.22	8.2
	2	2	4.68	34.2
15	1	2	6.95	17.9
	2	2	13.34	53.4
16	1	2	6.72	13.9
	2	2	16.38	46.3
17	1	2	10.56	18.2
	2	3	3.48	4.7
18	1	1	13.77	60.5
	2	4	0.65	3.9
19	1	5	1.45	19.6
	2	2	7.39	4.3

表-15(2) 試験結果

供試体番号	鉄筋番号	不動電位の グレード	電流密度 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	発錆面積率 (%)
20	1	2	4.53	10.8
	2	2	12.58	5.9
21	1	4	0.33	4.2
	2	4	25.36	37.1
22	1	2	6.66	19.1
	2	2	5.77	29.7
23	1	4	0.62	5.4
	2	----	----	9.3
24	1	0	1.68	81.1
	2	1	7.75	29.8
25	1	4	0.10	99.0
26	1	4	1.36	98.4
27	1	5	0.05	----
	2	4	0.77	79.9
28	1	4	0.43	99.9
29	1	4	0.22	65.0
	2	4	0.20	67.5
30	1	1	14.49	60.2
31	1	5	0.17	39.7
32	1	5	0.01	38.4
33	1	2	12.78	53.8
34	1	1	19.33	89.8
35	1	4	0.18	68.8
	2	4	0.20	82.2
36	1	2	5.58	75.6
37	1	0	52.53	46.2
	2	4	0.31	80.7
38	1	2	4.97	47.1
39	1	----	----	----
	2	3	2.52	100.0
40	1	4	0.36	92.1
41	1	4	0.64	98.7
42	1	4	1.82	94.1
43	1	----	----	56.2
	2	2	2.82	16.6
44	1	1	6.91	20.6
	2	2	6.49	90.6
45	1	5	0.97	4.3
	2	4	0.26	8.2

自然電極電位の経時変化を示す。これらの図を見てみると、2つの大きな傾向が読み取れる。1つは、同一の供試体中の鉄筋はほぼ同一の値を示し、かつ同一の変化を示すことである。これは、一つの供試体中では、鉄筋周囲の環境がほとんど均一であるということを示唆している。2つめは、大半の供試体(No.20, 32, 36, 45を除いて)においては、促進サイクル期間中に電位の変動はほとんど認められないということである。上に挙げた4供試体のうちでも、No.45のみが明確な単化傾向を示しているが、残りの3体はわずかに単化の傾向を示しているのみである。このことは、鉄筋周囲の環境が促進サイクル期間中に大きくは変動していないことを示す。自然電極電位の厳密な意味付けは未だ明確ではない。⁹⁾したがって、今回のデータから、すぐに、促進期間中に鉄筋の腐食は進行していないという結論を導くことはできない。

(3) 不動態のグレイドおよび定電位ステップ法

両者の測定結果を表-15に示す。不動態のグレイドはグレイド0からグレイド5までかなり幅広く分布していた。また、本表に示した電流密度は、定電位ステップ法の測定開始後5時間を経過した時点での電流値を鉄筋表面積で除したものである。これも、 $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 以下から、最大では $50 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ までかなり幅広く分布していた。この両測定結果と鉄筋の実際の腐食状況との関係については次項の考察でまとめる。

(4) コンクリート中の塩分含有量

図-36~50に塩分含有量試験結果を示す。表中の塩分濃度はコンクリートに対する Cl^- の重量パーセントである。また、採取深さ3cmは2~4cmの範囲を示し、5cmは4~6cmの範囲を示す。これを見てわかるとおり、塩分濃度は極めて大きくばらついている。これは、実構造物から供試体を切り出した際も、ほぼこれだけのばらつきが生じていたと考えるべきであろう。3章の実験結果より類推すれば、乾湿繰り返しを20サイクル実施した後に、 $W/C=50\%$ のコンクリートがかぶり3cmで含有する塩分量は約0.1~0.2%である。したがって、この値を大幅に越える塩分含有量を示す場合は、試験開始時からすでにコンクリート中に存在していたものと考えられる。一方、いずれの塗装システムの場合も、0.1%以下というケースもある。これは塗膜の遮塩効果を示すデータとして取り扱うこともできるが、その効果を定量的に評価すること、また、それをもとに異なる塗装システム間の比較をすることは困難である。

(5) 埋設鉄筋の発錆面積率

表-15に発錆面積率の測定結果を示す。わずかに4~5%程度の発錆しか示さないものもあれば、100%を示

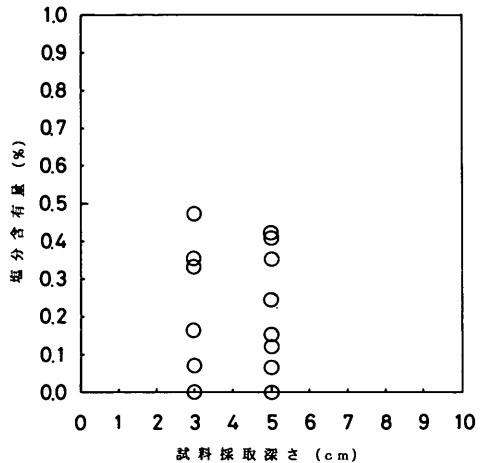


図-36 コンクリート中の塩分含有量

(アクリルポリマーセメント I からの深さに対して)

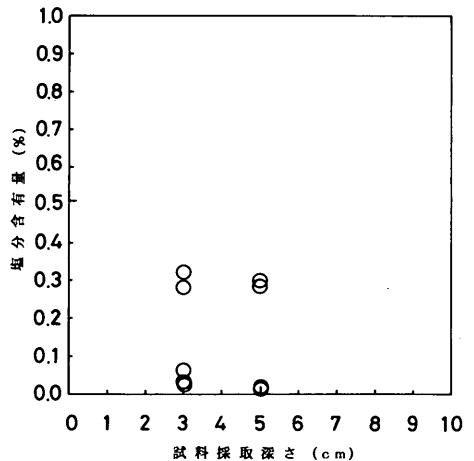


図-37 コンクリート中の塩分含有量

(アクリルポリマーセメント II からの深さに対して)

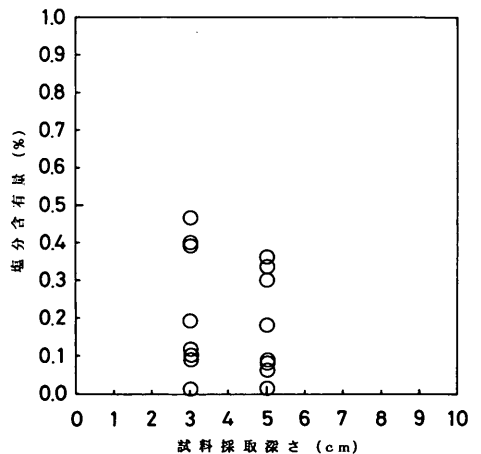


図-38 コンクリート中の塩分含有量

(厚膜型ポリウレタン樹脂塗装面からの深さに対して)

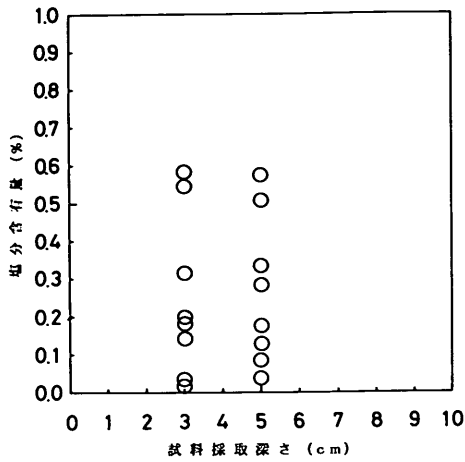


図-39 コンクリート中の塩分含有量
(SBR系ポリマーセメントIからの深さに対して)

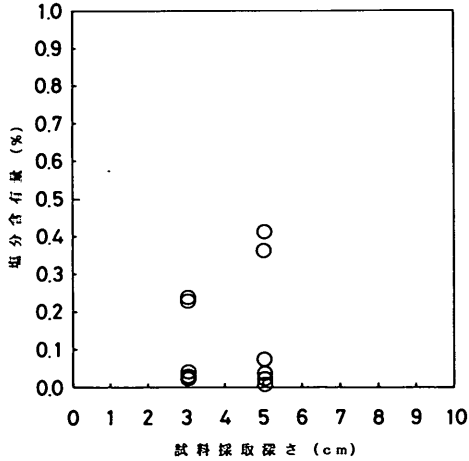


図-40 コンクリート中の塩分含有量
(SBR系ポリマーセメントIIからの深さに対して)

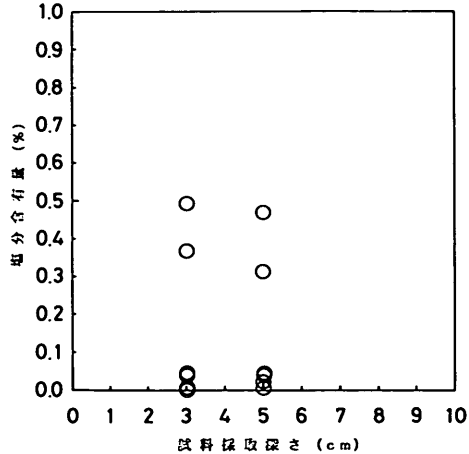


図-41 コンクリート中の塩分含有量
(ポリブタジエン樹脂塗装面からの深さに対して)

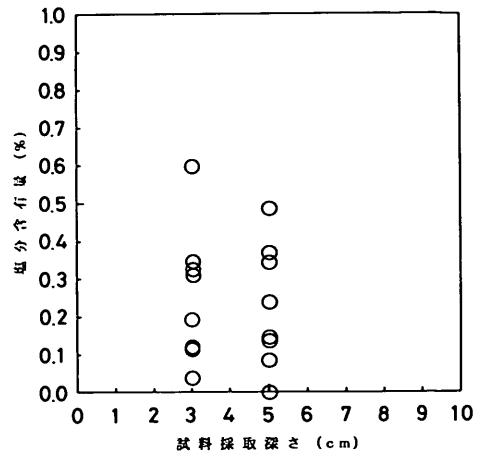


図-42 コンクリート中の塩分含有量
(柔軟型エポキシ樹脂塗装面Iからの深さに対して)

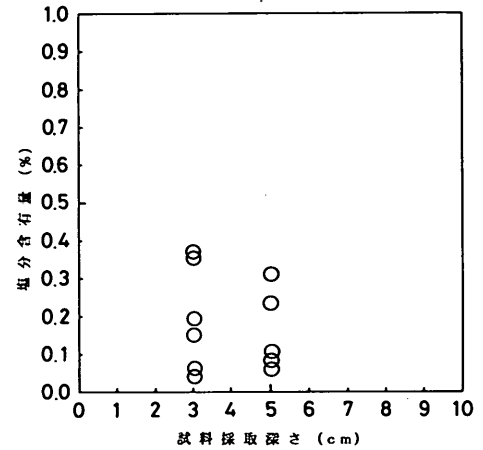


図-43 コンクリート中の塩分含有量
(柔軟型エポキシ樹脂塗装面IIからの深さに対して)

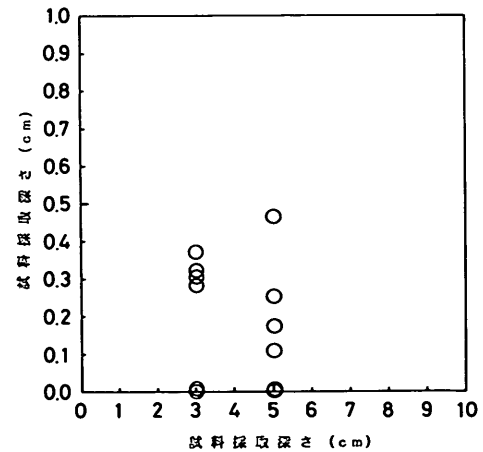


図-44 コンクリート中の塩分含有量

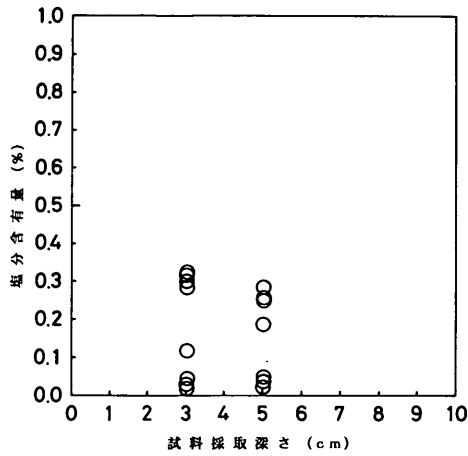


図-45 コンクリート中の塩分含有量
(アクリルゴム系ポリマーセメント I からの深さに対して)

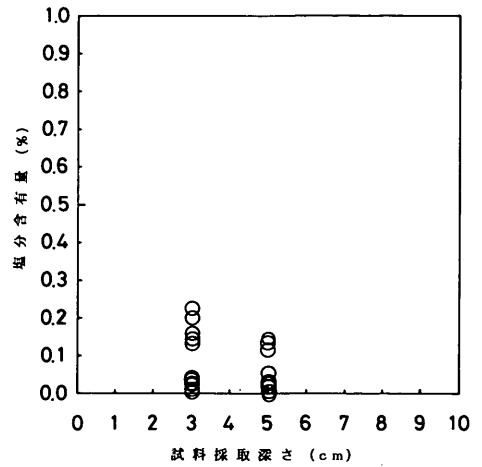


図-48 コンクリート中の塩分含有量
(厚膜型エポキシ樹脂塗装面からの深さに対して)

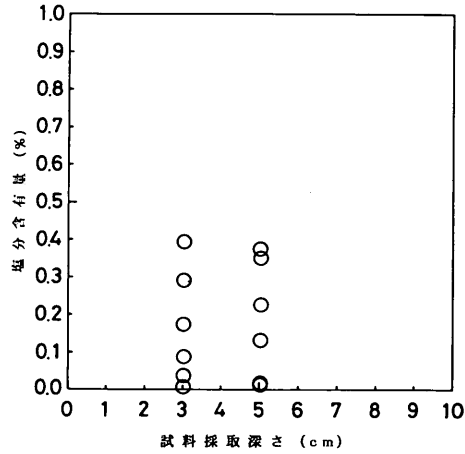


図-46 コンクリート中の塩分含有量
(アクリルゴム系ポリマーセメント II からの深さに対して)

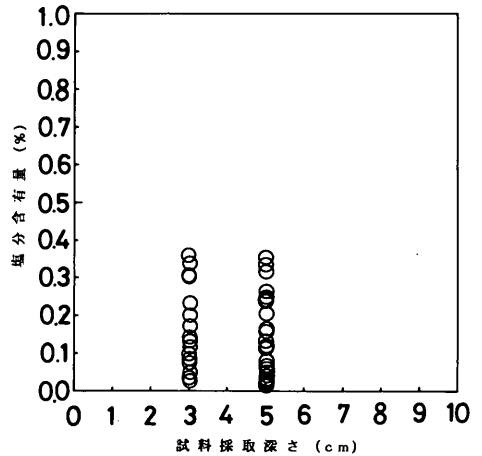


図-49 コンクリート中の塩分含有量
(薄膜型エポキシ樹脂塗装面からの深さに対して)

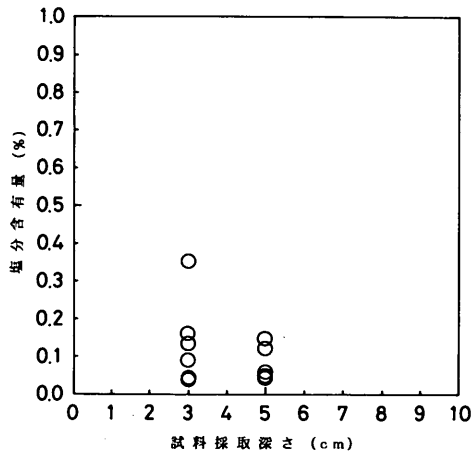


図-47 コンクリート中の塩分含有量
(超厚膜無溶剤型エポキシ樹脂からの深さに対して)

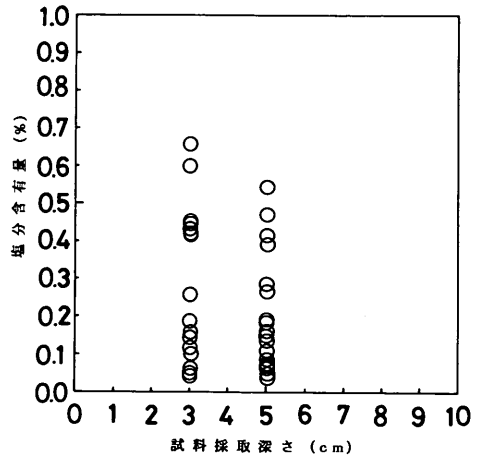


図-50 コンクリート中の塩分含有量
(プライマー面からの深さに対して)

すものまで幅広く分布していた。このばらつきも、供試体を実構造物から切り出した時から存在していたものと考えられる。

4. 4 考察

(1) 塗膜の耐久性

促進サイクル期間中には、いずれの塗膜にも顕著な劣化は認められなかった。これより、今回の試験で対象とした塗装システムの耐久性は、促進サイクル20サイクルの範囲では問題ないものと考えられる。また、塗装材メーカーの熟練技能者が塗装した塗膜と、非専門家の作業員が塗装した塗膜との間に顕著な差は認められなかった。したがって、促進サイクルの範囲では施工者の技能差は塗膜の耐久性に大きな影響は及ぼさないものと考えられる。

(2) 電気化学的測定結果と発錆状況の関係

図-51に自然電極電位（促進20サイクル後の測定値）と発錆面積率の関係を示す。大半の鉄筋が $-400 \sim -500$ mVの範囲にあり、両者の間に有意な関係は認められなかった。

図-52に不動態のグレードと発錆面積率の関係を示す。図-25に示したもほど両者の関係は明確ではない。しかし、図中にだ円で囲んだ部分を除いて考えると、点線で示すような傾向がわずかに認められる。この傾向は、図-25で示された傾向と同じである。一方、図中にだ円で囲んだ部分のように、発錆面積率が70~100%という高率でありながら、不動態のグレードが4という高い値を示すものがあった。このような結果が得られた原因は、鋼材表面に堆積した腐食生成物（錆）によるものと考えられる。これらの鉄筋の場合は、腐食生成物と非腐食金属との付着が特に強かった。このため、この腐食生成物が一種の被膜の役割を果たしているものと思われる。

図-53に定電位ステップ法より得られた電流密度と発錆面積率の関係を示す。両者の間には図-26で見られたような明確な相関性は認められない。図中にだ円で囲んだ部分の鉄筋は図-52の中でだ円で囲んだ部分の鉄筋と同一である。このように、発錆面積率が高率であるにもかかわらず、電流密度が小さくなる原因は、先にも述べたとおり、非腐食金属表面に堆積した腐食生成物によるものと思われる。つまり、この一種の被膜のために酸素が遮られているものと考えられる。

図-54に不動態のグレードと電流密度（定電位ステップ法の結果）の関係を示す。これは、図-27にならって、この両者の情報から鉄筋の腐食状況を推定することを試みたものである。図中には腐食面積率をいくつかに分

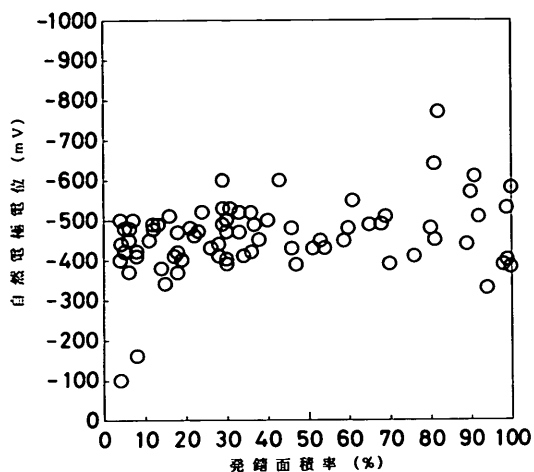


図-51 自然電極電位と発錆面積率の関係

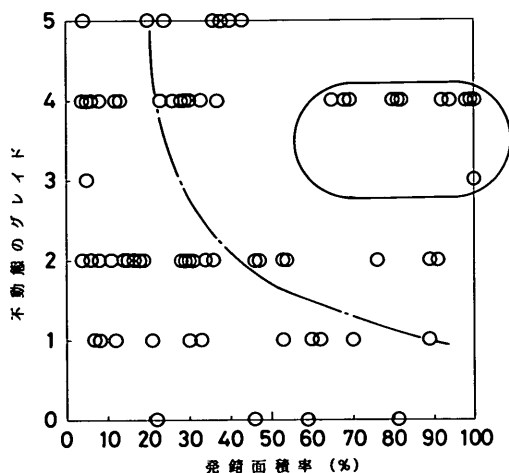


図-52 不動態のグレードと発錆面積率の関係

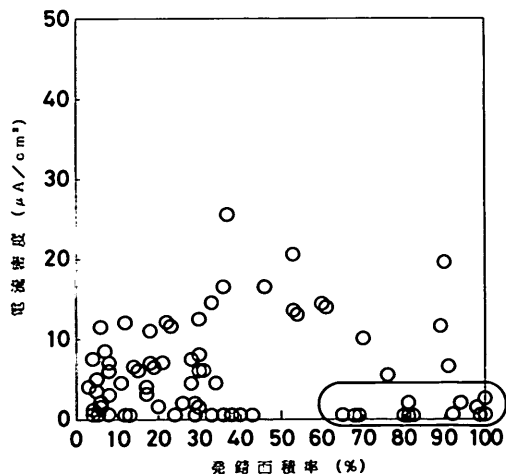


図-53 電流密度と発錆面積率の関係

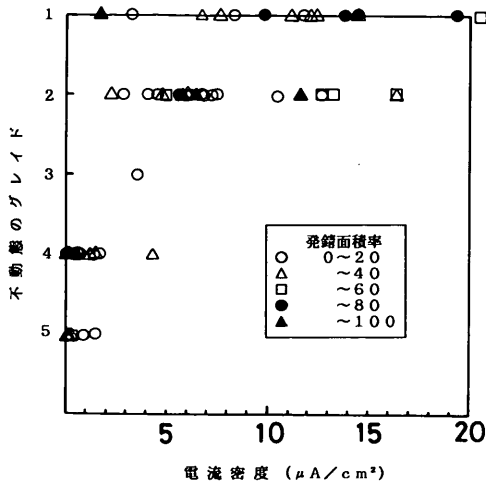


図-54 不動態のグレイドと電流密度の関係

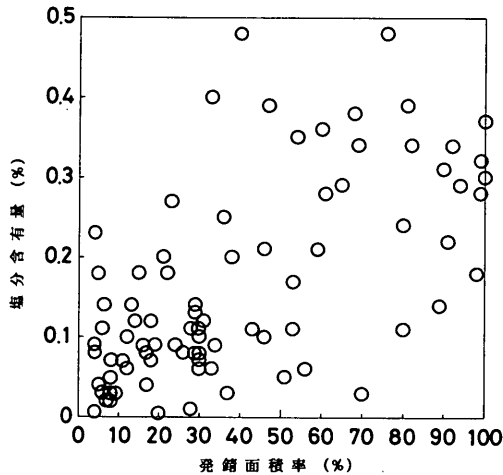


図-55 塩分含有量と発錆面積率の関係

して記号を変えてプロットしてある。なお、本図中では、図-52および図-53に楕円で示した鉄筋の測定データは除外した。その理由は、これらの鉄筋の状況が他の鉄筋に比べて異なっており、同列では比較できないと考えたからである。図-54を見ると、発錆面積率40%を境界として、それより発錆面積率が大きい領域と小さい領域を区分することが出来るようである。しかし、図-27に示したような明確な区分は出来ない。

(3)コンクリートの塩分含有量と鉄筋腐食の関係

図-55にコンクリートの塩分含有量と発錆面積率の関係を示す。図-29で示したような明確な相関は認められないものの、弱い正の相関性は認められる。すなわち、

塩分含有量が多いほど鉄筋の発錆面積率が大きくなる傾向がある。

(4)3章の実験結果との比較

3章で述べた実験においては、鉄筋の発錆面積率と電気化学的測定結果、あるいは鉄筋の発錆面積率とコンクリート中の塩分含有量等との間に比較的明確な関係を見出すことが出来た。(図-25~図-29参照)一方、本章の実験では、3章ほどの明確な傾向を見ることが出来なかった。これは、明らかに使用した供試体の違いに起因するものである。すなわち、3章においては、製作直後のコンクリートに塗装を施し、本章においては30数年間の海洋環境暴露を経たコンクリートに塗装を施したものである。両者を単純に比較することは困難であるが、少なくとも以下に示すような考察をすることは可能であろう。

1)塗装を実施する時期は塗装の効果を左右する重要な要因である

4章で述べた実験の供試体は既に材令30数年を経たコンクリートであった。このために、塗装を実施した後の促進試験の影響は相対的に小さなものとなった。言い換えれば、構造物に塗装を施す時期としては、若材令であればあるほどよく、材令が過ぎれば過ぎるほど塗装の効果は相対的に薄れてくる。参考文献10)においても同様のことが結論づけられている。

2)塗装を実施する時期が早いほど、その効果の評価が容易となる

これは、上記1)とも関連するが、3章と本章の結果を比べてみると明らかである。小林らは、参考文献11)の中で、耐久性設計の考え方の中で、コンクリート表面塗装の効果を評価することを試みている。これは、腐食が一旦始まった後は、酸素拡散が唯一の律速条件であるという考えに基づいている。しかし、かなり材令の経過したコンクリートでは、既に発錆している箇所とそうでない箇所が混在しており、塗装を施すことにより新たなマクロセルが生じる可能性も否定できない。また、実構造物においては、酸素の供給経路は必ずしも単純ではない。従って、材令が経過した後に実構造物に塗装を施す場合は、その効果を評価することは一般に難しくなる。

5. 結論

一連の実験より得られた結論を以下にまとめる。

塗膜の性状

- (1)今回、試験を実施した塗装システムは、一部に例外はあったものの、全体的に見てその耐久性はよかった。
- (2)エポキシ樹脂系の塗装システムの中には、塗膜の表面

が白色から黄食へと変色するものがあった。

(3)コンクリートのひびわれ幅が0.2mmの範囲内では、塗膜にはひびわれは認められなかった。

電気化学的測定および色彩測定の有効性

(4)本試験で実施した電気化学的測定は、内部鉄筋の性状、ひいては塗膜の防食性能を検討する上で有効であった。ただし、自然電極電位はその意味づけが明確ではない。

(5)塗膜の色彩変化を定量化する上で、色彩測定（色の三刺激値の測定）は有効であった。

塗装システムの評価

(6)塗装システムを評価するにあたっては、その耐久性（耐候性）および耐塩害性の双方から検討することが必要である。

塗装実施の時期

(7)塗装を実施する以前の供用期間が長くなるほど、塗装の効果が相対的に低下してくる。

(8)塗装を実施する以前の供用期間が長くなるほど、塗装の効果を正確に評価することが難しくなる。

6. あとがき

コンクリートの表面被覆は、建築分野では比較的その歴史は古いが、土木構造物への適用事例は極めて少ない。しかし、塩害を初めとするコンクリートの劣化が社会問題化する中で、徐々に使用実績も増えつつあり、今後ますます増加していくことが予想される。我々ユーザー側とすれば、その効果のある程度把握すると同時に、今後新たに出てくる様々な材料を正確に取捨選択する方法を身につけておく必要がある。これらのことを念頭において本実験を開始した。塗装システムの評価方法を完全な形で提示するまでには至らなかったが、その方向は見えてきたと思う。また、実験を継続していく間にも、種々の新しい材料が市場に出てきている。特に、上塗り材としてフッ素系の塗料を使用すると、極めて耐候性が良くなるという報告もあり、それらを含めた追加試験も開始した。その試験結果を待って、さらに進んだ考察を行いたいと考えている。

最後に、本研究を実施するにあたり、多大な御協力をいただきました。沖縄総合事務局ならびに第二港湾建設局の方々に厚くお礼申し上げます。また、研究の遂行全般にわたり、協力していただいた材料研究室の田中寛君に厚く御礼申し上げます。

(1991年3月27日受付)

参考文献

1) コンクリート構造物の表面保護工便覧(案)・同解説版

神高速道路公園, 日本材料学会, 1989.3

2) 大即信明: コンクリート中鉄筋の腐食に及ぼす塩素の影響に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第24巻第3号, 1985.9

3) 藤嶋昭, 相澤益男, 井上徹: 電気化学的測定法(上) 技報堂出版, 1984.11

4) 浜田秀則, 大即信明, 原茂雅光: 酒田港および鹿児島港に暴露したコンクリート梁の耐海水性(材令10年結果報告), 港湾技研資料, No.614 1988.6

5) ASTM C876-77: Half Cell Potentials of Reinforcing Steel in Concrete

6) 喜多英明, 魚崎浩平: 電気化学の基礎, 技報堂出版 1983.4

7) P. Schiessl, et. al: Corrosion of Steel in Concrete, Report of the Technical Committee 60 -CSC, RILEM, 1988

8) 大即信明, 浜田秀則, 原茂雅光: 各種補修を施したコンクリート梁の促進海水養生試験, 港湾技研資料 No. 631, 1988.12

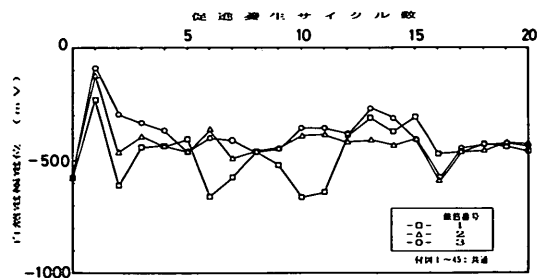
9) 大即信明, 池上明夫, 福手勤, 高木兼士: 種々の材料の鉄筋防食性能についての電気化学的評価, コンクリート工学論文集, 第1巻, 第2号, 1990.7

10) 例えば, 塚田卓: 塩害を受けるRC構造物の被覆防食に関する基礎実験, 土木学会第44回年次学術講演会論文集, 1989.10

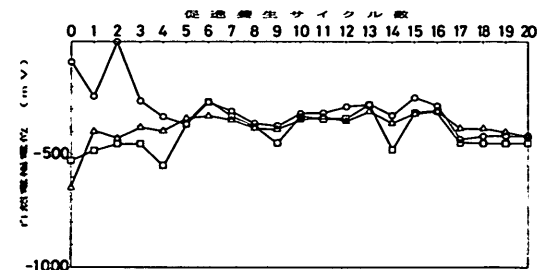
11) 小林和夫, 宮川豊章, 久米生泰: 耐久性設計の手法に基づいた鉄筋コンクリート部材の表面処理効果, 土木学会論文集, 第390号/V-8, 1988.2

付録

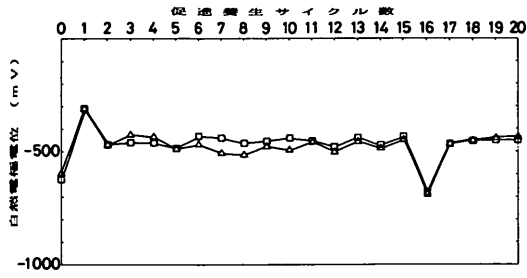
埋設鉄筋の自然電極電位の経時変化 (実験II)



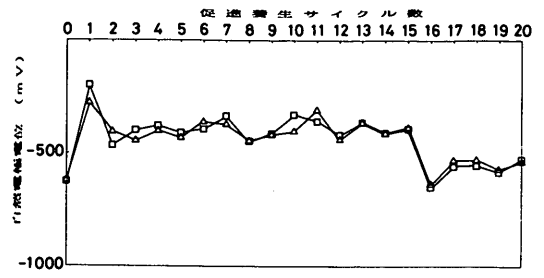
付図-1 供試体No.1



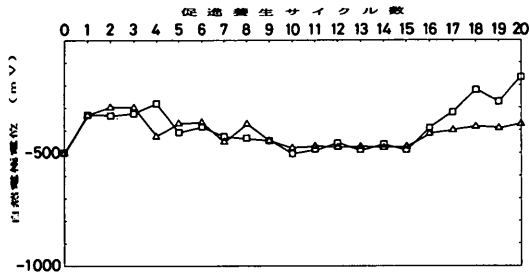
付図-2 供試体No.2



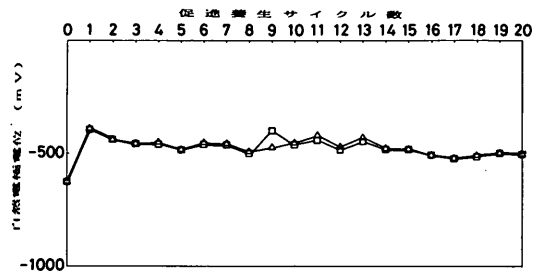
付図-3 供試体No.3



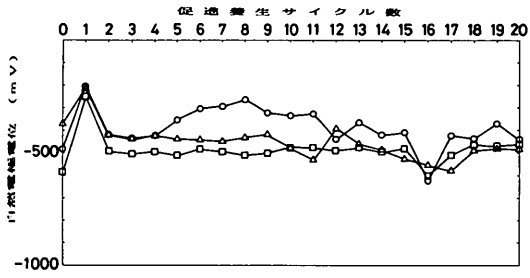
付図-7 供試体No.7



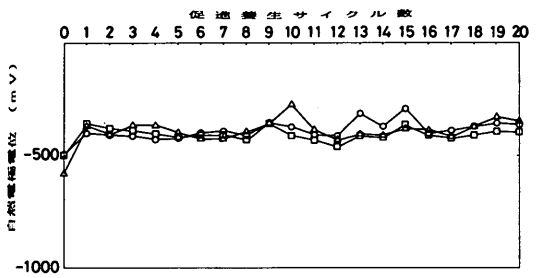
付図-4 供試体No.4



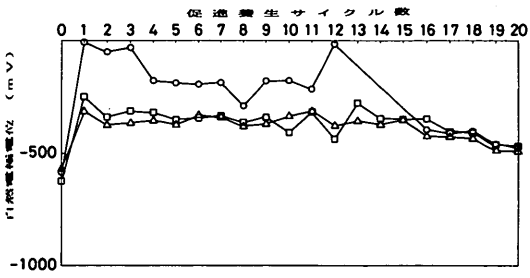
付図-8 供試体No.8



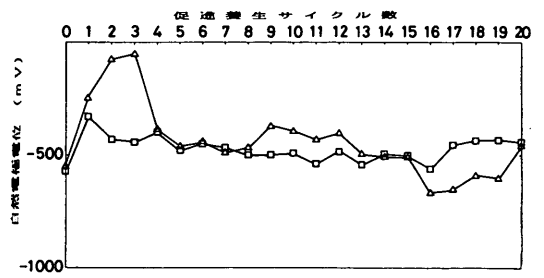
付図-5 供試体No.5



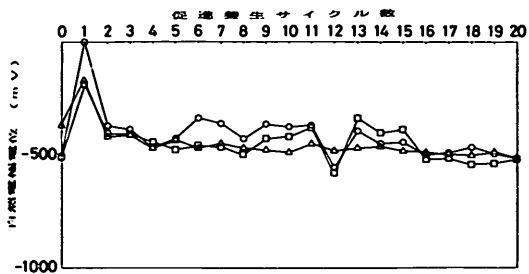
付図-9 供試体No.9



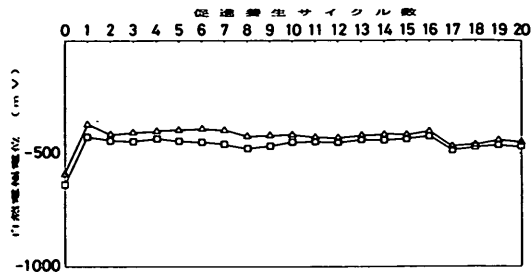
付図-6 供試体No.6



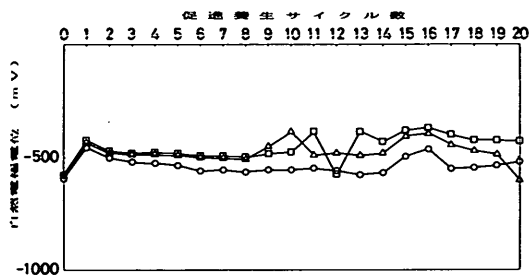
付図-10 供試体No.10



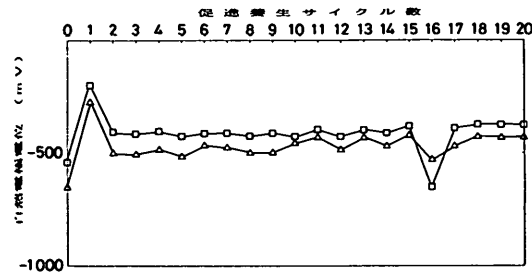
付図-11 供試体No.11



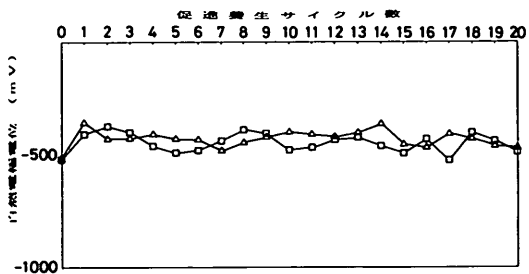
付図-15 供試体No.15



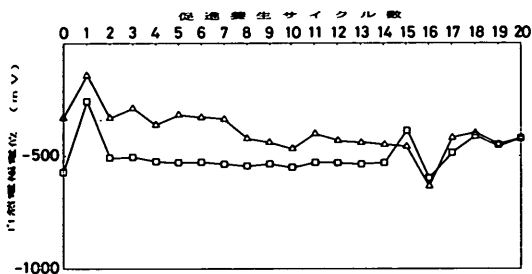
付図-12 供試体No.12



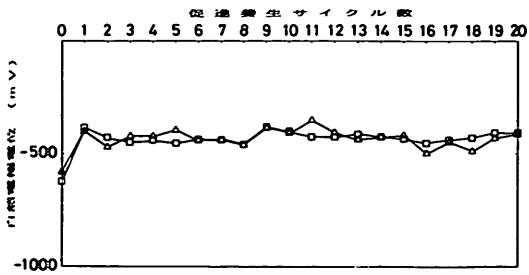
付図-16 供試体No.16



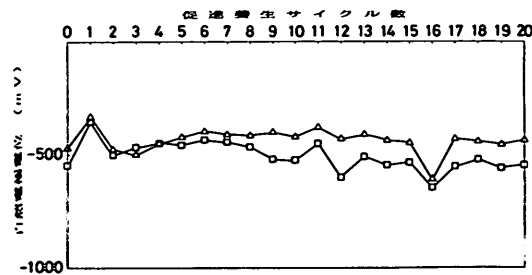
付図-13 供試体No.13



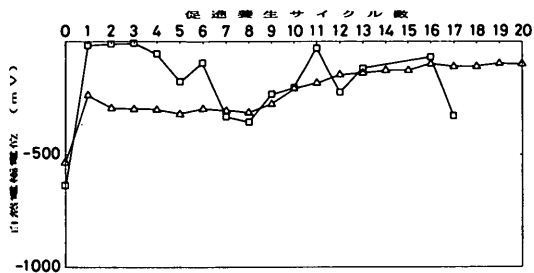
付図-17 供試体No.17



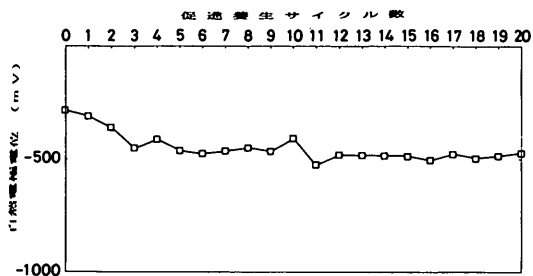
付図-14 供試体No.14



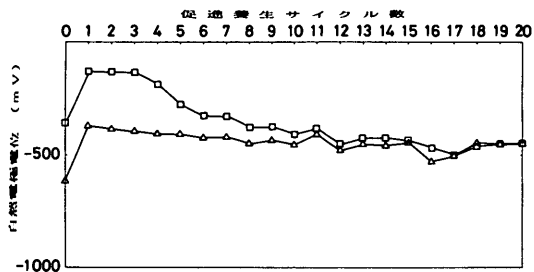
付図-18 供試体No.18



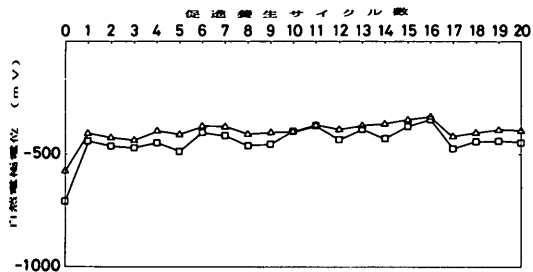
付図-19 供試体No.19



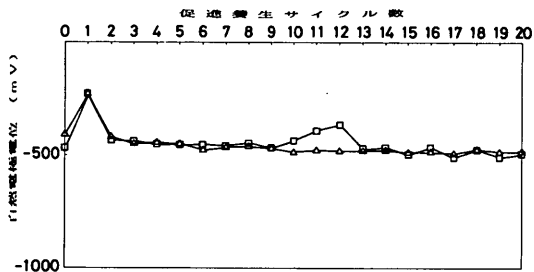
付図-23 供試体No.23



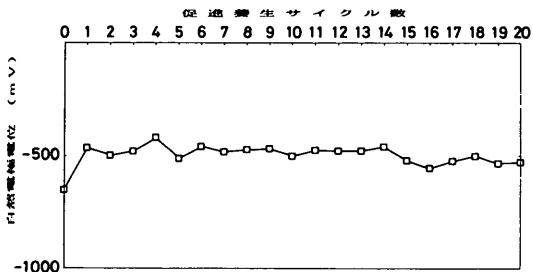
付図-20 供試体No.20



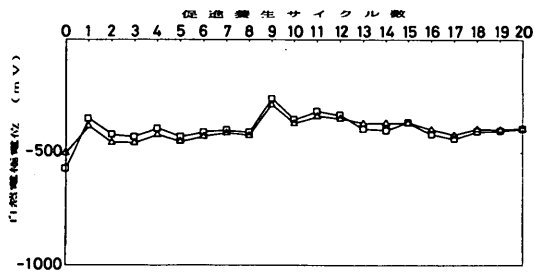
付図-24 供試体No.24



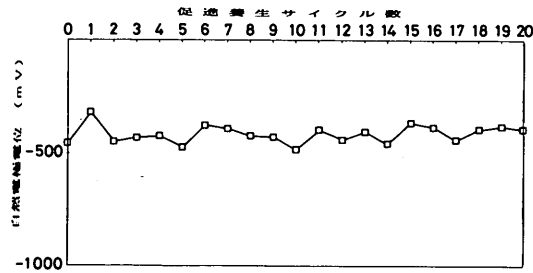
付図-21 供試体No.21



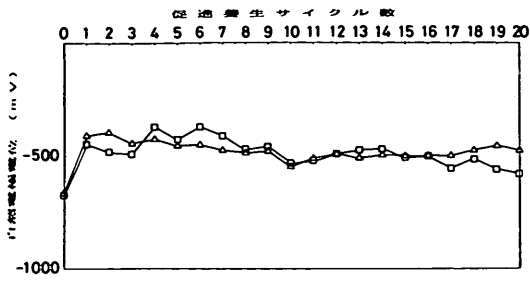
付図-25 供試体No.25



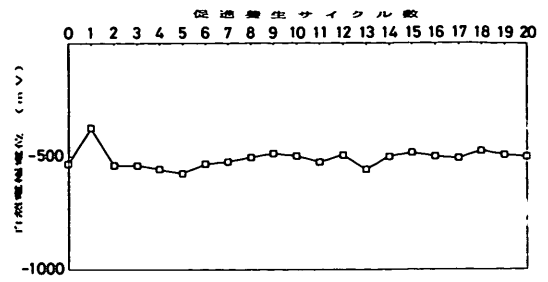
付図-22 供試体No.22



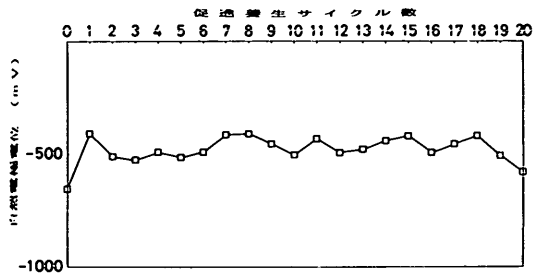
付図-26 供試体No.26



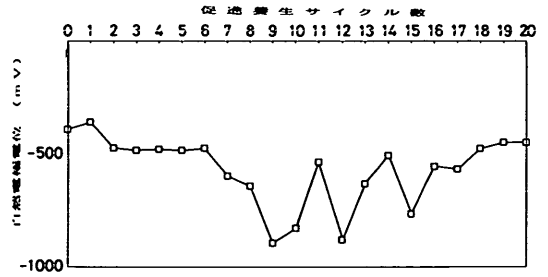
付図-27 供試体No.27



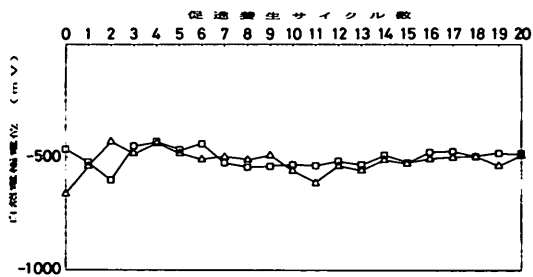
付図-31 供試体No.31



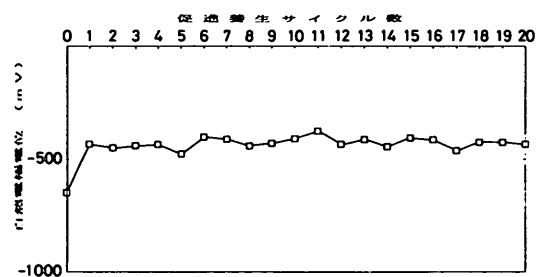
付図-28 供試体No.28



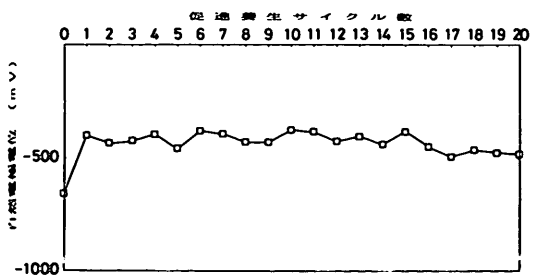
付図-32 供試体No.32



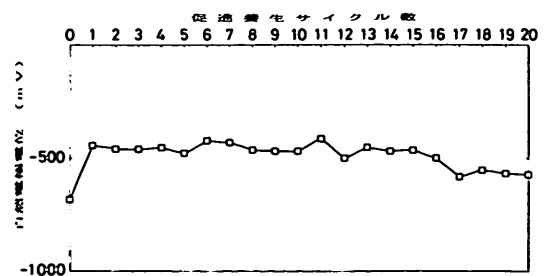
付図-29 供試体No.29



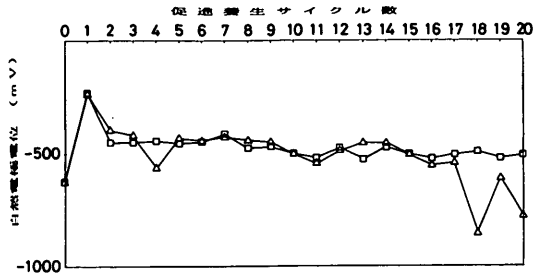
付図-33 供試体No.33



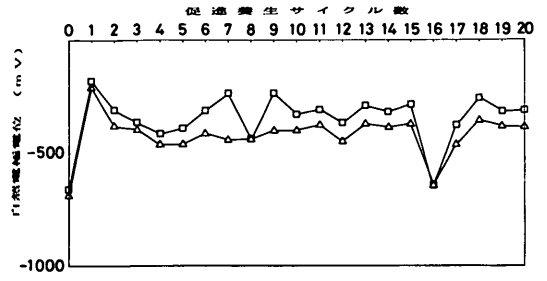
付図-30 供試体No.30



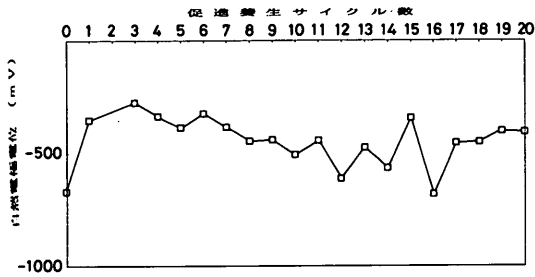
付図-34 供試体No.34



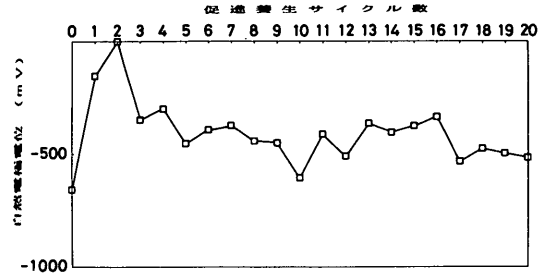
付図-35 供試体No.35



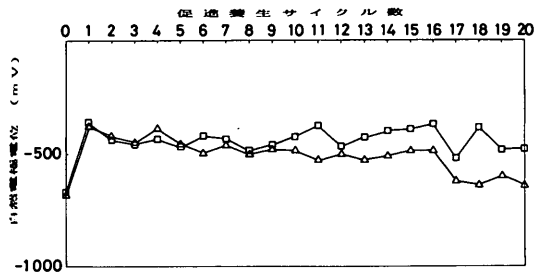
付図-39 供試体No.39



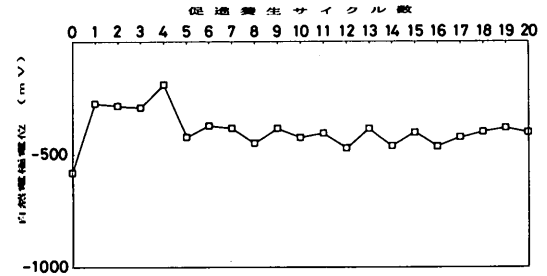
付図-36 供試体No.36



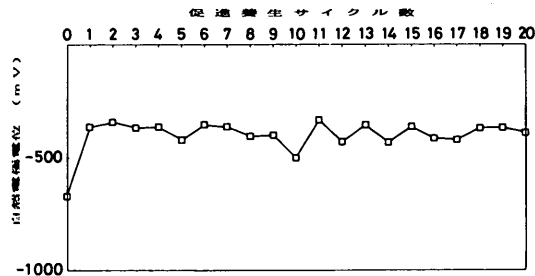
付図-40 供試体No.40



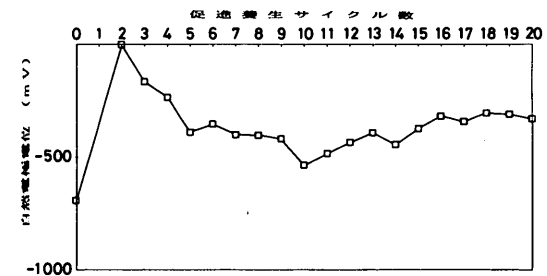
付図-37 供試体No.37



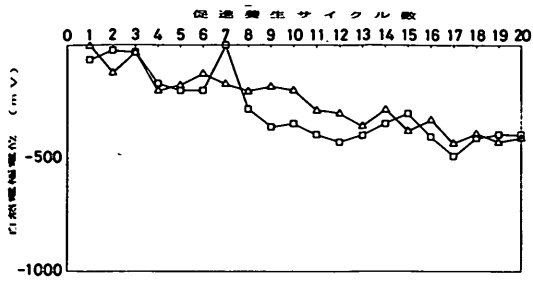
付図-41 供試体No.41



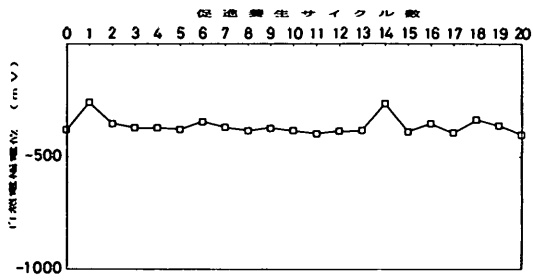
付図-38 供試体No.38



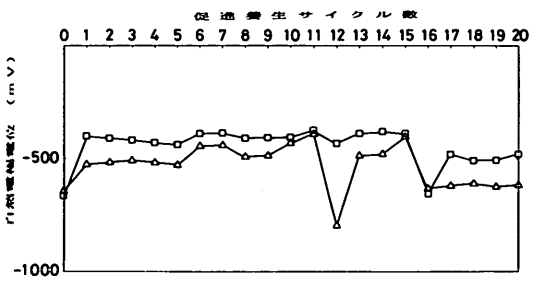
付図-42 供試体No.42



付図-43 供試体No.43



付図-44 供試体No.44



付図-45 供試体No.45

港湾技研資料 No.706

1991.6

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 阿部写真印刷株式会社

Published by the Port and Harbour Research Institute
Nagase, Yokosuka, Japan.

Copyright © (1991) by P.H.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.H.R.I.

この資料は、港湾技術研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本資料の全部又は一部の転載、複写は、港湾技術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。