

港湾技研資料

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

No. 725 Mar. 1992

塩害を受けた鉄筋コンクリート部材の補修効果に関する実験

濱 田 秀 則
福 手 勤
阿 部 正 美

運輸省港湾技術研究所



目 次

要 旨	3
1. まえがき	4
2. 既往の成果および本実験で用いた実験計画	6
3. 鉄筋コンクリート部材の断面修復の補修効果に関する実験	8
3.1 ひびわれを導入した供試体の腐食促進試験	8
3.2 ひびわれのない供試体の海洋環境暴露試験	20
3.3 ひびわれを導入した供試体の海洋環境暴露試験	25
3.4 考 察	31
4. コンクリートのひびわれ注入の補修効果に関する実験	33
5. 補修設計に関する提案	42
6. 結 論	44
7. あとがき	45
参考文献	45
付録 自然電極電位の経時変化	46

A Study on the Anti-corrosive Effectiveness of Repairing for Reinforced Concrete Structures Damaged by Salt Attack

Hidenori HAMADA*

Tsutomu FUKUTE**

Masami ABE***

Synopsis

The salt attack of RC structure means cracking and spalling of cover concrete caused by the corrosion of embedded steel bars. The aim of this study is to evaluate the anti-corrosive effectiveness of some repairing methods for the reinforced concrete structures damaged by salt attack. The main objectives of this study are as follows;

(1) To evaluate the anti-corrosive effectiveness of some kinds of existing repairing methods, and to discuss more effective methods.

(2) To discuss the concept of "Design of Repairing" for salt-damaged RC structures, especially the concrete superstructures of wharves.

The main conclusions obtained from this study are as follows;

(1) Steel painting does not have a significant anti-corrosive effect.

(2) To assure the adhesive strength of cross-section repairing material is important.

(3) The anti-corrosive effectiveness of concrete lining depends on the crack occurrence, that is, the effectiveness becomes greater with cracking after repairing.

(4) Water content and chloride content in old concrete are important factors which affect the anti-corrosive effectiveness of repairing.

(5) The workability of epoxy resin injecting materials is better than that of cement based injecting material, however epoxy resin is supposed to have a serious problem for workers' health.

(6) Anti-corrosive effectiveness of crack injecting is rather small, because the injecting depth is only about 3cm from the concrete surface.

(7) Relationship between electro-chemical measurements and corroded area of embedded steel bars are found.

(8) Temperature dependence of the electro resistance between steel bar and stainless steel in sea water is found.

(9) The fundamental concept of "Design of Repairing" is suggested. However, in order to establish the design method it is necessary to establish the quantitative evaluation methods of the environmental condition and the effectiveness of repairing.

Keywords : Salt attack, Repair, Steel painting, Concrete lining, Crack injection.

* Materials Laboratory, Structural Division

** Chief of Materials Laboratory, Structural Division

*** Senior Researcher of Structural Division

塩害を受けた鉄筋コンクリート部材の 補修効果に関する実験

濱田 秀則*
福手 勤**
阿部 正美***

要 旨

鉄筋コンクリート部材の塩害とは、鉄筋の腐食に起因するかぶりコンクリートのひびわれ、剝離、剝落のことをいう。本研究は、このような劣化に対する補修の方法ならびにその効果を検討するために取り行った。

本研究の主要目的は以下に示すとおりである。

1. 現在実際に施工が行われている補修工法の補修効果を検討し、さらに合理的な補修方法を考察する。
2. 塩害により劣化した栈橋コンクリート上部工に関する「補修設計」の確立に寄与する。
一連の実験より以下のような結論が得られた。
 - (1) 鉄筋塗装、コンクリートの断面修復、コンクリートの表面被覆による補修を実施した場合、補修効果に及ぼす鉄筋処理の影響は極めて小さい。
 - (2) 断面修復材と母材コンクリートの付着性を確保することが重要である。
 - (3) コンクリート表面被覆が補修効果に及ぼす影響は補修後のコンクリートのひびわれの有無に左右される。
 - (4) 母材コンクリートの塩分の含有の有無および母材コンクリート中の含水量の多少は補修効果に影響を及ぼす。
 - (5) ひびわれ注入材としてのセメント系よりもエポキシ樹脂系の方がよかった。しかしながら、エポキシ樹脂系は作業員の人体に悪影響を及ぼすことが懸念される。
 - (6) 今回の試験の範囲内では、ひびわれ注入の埋設鉄筋への防食効果は明確に認められなかった。
 - (7) 電気化学的測定結果相互の関係、および電気化学的測定結果と発錆面積率の間の関係について相関性を見い出すことができた。
 - (8) 埋設鉄筋とステンレス対極間の電気抵抗の温度依存性について知見を得ることができた。これは、通常用いられている乾湿繰り返し腐食促進試験の促進効果を裏付けるデータと位置づけることができる。
 - (9) 補修設計法の基本的考え方を示すことができたが、それを確立するまでには至らなかった。そのためには、環境条件の定量的評価手法および補修効果の定量的評価手法を確立することが必要である。

キーワード：塩害、補修、鉄筋塗装、コンクリート断面修復、コンクリート表面被覆、コンクリートひびわれ注入

* 構造部材料研究室
** 構造部材料研究室長
*** 構造部主任研究官

1. まえがき

近年、塩害による栈橋コンクリート上部工の劣化が各地で相当数報告されている。港湾局、港湾建設局等においても、その事態を重視し、全国規模でその実態調査を取り行った。結果は本研究室で取りまとめ港研資料として報告している。¹⁾²⁾

栈橋上部工の塩害とは、海水中に含まれる塩化物イオン(Cl⁻)がコンクリート中へ浸入し、内部鉄筋に到達した後に、その鉄筋を発錆させひいてはかぶりコンクリートのひびわれ、剝離、剝落を生じさせる劣化のことをいう。実構造物の具体的な劣化状況の一例を写真-1～写真-4に示す。写真-1は、はり部材において鉄筋軸方向にひびわれが生じ、そのひびわれから錆汁が露出しているところである。写真-2は床版において内部の鉄筋が発錆し錆汁がコンクリート表面に露出している様子である。写真-3は、はりにおいてかぶりコンクリートが完全に剝落した様子である。また、写真-4は床版においてかぶりコンクリートが完全に剝落した様子である。上記の写真-1から写真-4に示したものは劣化のかなり激しいものであるが、このような劣化が各地で多数報告されている。

本研究は、写真-1～4に示すような塩害により劣化した構造物の補修の方法を検討するために行ったものである。

既存の補修方法の基本的な工程は、図-1.1に示すとおりである。³⁾すなわち、

1. 鉄筋周囲の含塩コンクリートをはつり落とす、
2. 鉄筋表面の錆を落とす、
3. 露出している鉄筋に防錆塗装を施す、
4. 欠落した部材断面を修復する、
5. 旧断面および新断面を含めてコンクリート表面を被覆する、

という、5つの工程からなるものである。

この方法は、補修材料のメーカー、あるいは補修を専

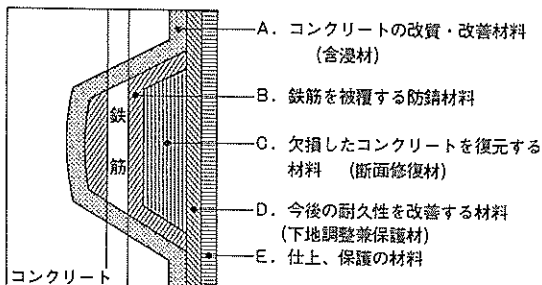


図-1.1 既存の基本的補修工法

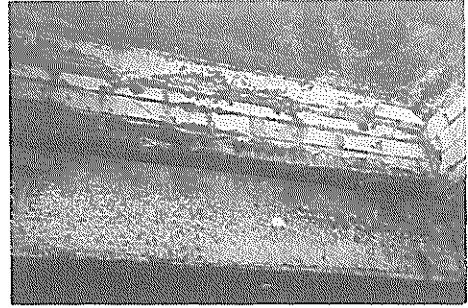


写真-1 鉄筋軸方向にひびわれが生じ錆汁が露出しているはり部材

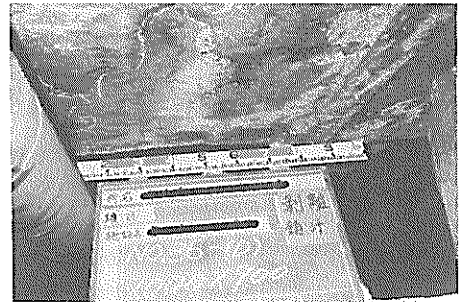


写真-2 内部鉄筋が発錆し錆汁が溶出している床版部材

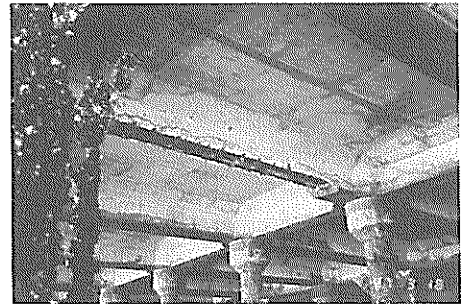


写真-3 内部鉄筋の発錆によりかぶりコンクリートが剝落したはり部材

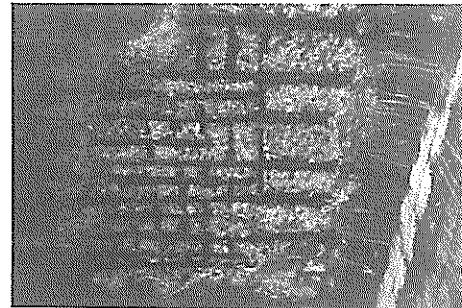


写真-4 内部鉄筋の発錆によりかぶりコンクリートが剝落した床版部材

門とするコンストラクターがこれまでに提案し、商品として市場に発表したものであるが、その補修効果の定量的評価がなされている訳ではない。ただ、一見したところ至極当然のプロセスであるため、一般的にはこれといった反論もなく大方のところこの手法を是認している。

本研究は、この補修方法に疑問を呈することからスタートした。例えば、あらゆる場合にこのすべてのプロセスを実施する必要があるのか、あるいは、鉄筋への防錆塗装は本当に効果があるのか、といった疑問である。

本研究の目的は以下に示すとおりである。

1. 現在、提案され一部で実際に施工が行われている上記の補修工法の補修効果を検討する。
2. 上記1の検討結果を踏まえて、さらに合理的な補修方法を検討する。
3. 塩害により劣化した栈橋コンクリート上部工に関する「補修設計」の確立に寄与する。

本研究の実験計画を図-1.2に示す。図に示されるとおり、実験は実験Iから実験VIに分類される。実験I～実験VIが各々対象としている補修の項目を表-1.1に示す。実験Iおよび実験VIは、予備の実験および補足的実験である。実験IIから実験Vまでの4シリーズが本研究の根幹をなすものである。これらの4シリーズはいずれも図-1.1に示すような、鉄筋の防錆処理、コンクリートの断面修復およびコンクリートの表面被覆を組み合わせた補修を検討の対象としている。

いずれの実験もはり供試体を用いて実験を実施した。

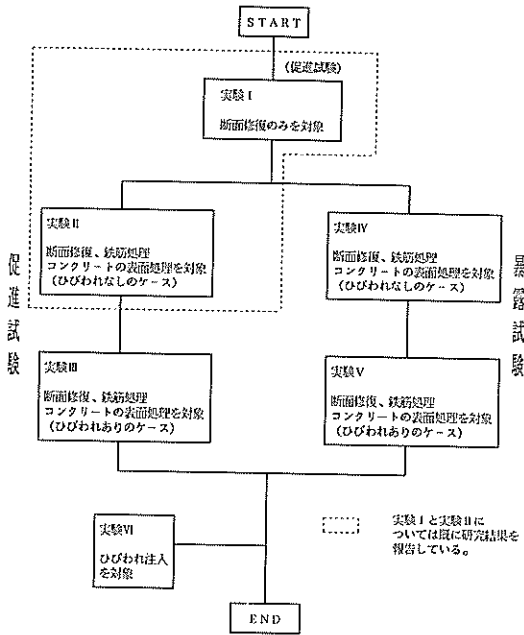


図-1.2 実験の全体計画

実験II～実験Vの基本的な分類を表-1.2に示す。試験の種類およびひびわれ導入の有無の2項目が分類の要因である。表に示されるとおり、実験IIおよび実験IIIでは供試体に対して腐食促進試験を実施した。一方、実験IVおよび実験Vでは飛沫部シミュレーション環境で暴露試験を実施した。また、実験IIおよび実験IVにおいては補修後の部材にひびわれが生じない状態を想定し、供試体へのひびわれの導入は行っていない。それに対して、実験IIIおよび実験Vにおいては、補修後に部材にひびわれ(母材コンクリートと補修材の剝離)が生じるケースを想定し、供試体へのひびわれの導入を実施した。

この全体計画のうち、実験Iと実験IIについては、参考文献4)および5)において既に実験結果を報告しているので本文では詳説することはさけるが、得られた結論を2章で簡潔にまとめる。本研究の実験II～Vの4シリーズにおいては、直交計画に則って実験計画を立案し、結果の解析は分散分析を実施した。本文の2章において、直交計画ならびに分散分析を概説する。それに続く3章において実験III, IV, Vの実験の概要、結果および考察をまとめる。また、4章において実験VIの概要、結果および考察をまとめる。5章においてはそれらの結果をもとに考察した補修設計の考え方を述べ、6章において一連の実験より得られた結論を記す。

表-1.1 補修に関する実験の一覧

実験番号	補修の項目				
	鉄筋処理	断面の修復	コンクリート表面処理	ひびわれの注入	
I		○			(予備の実験)
II	○	○	○		
III	○	○	○		
IV	○	○	○		
V	○	○	○		
VI				○	(補足的実験)

○：試験の対象

表-1.2 実験II～Vの分類

		試験の種類	
		腐食促進試験	飛沫暴露試験
ひびわれの導入の有無	導入しない	II	IV
	導入する	III	V

2. 既往の成果および本実験で用いた実験計画

2.1 既往の成果

本項においては、実験Ⅰおよび実験Ⅱより得られた結論を取りまとめる。先にも述べたが、この2シリーズの詳細については参考文献4)および5)を参照されたい。実験Ⅰはコンクリートの断面修復のみの補修を検討の対象としたものであり、実験Ⅱは鉄筋の塗装、コンクリート断面の修復およびコンクリートの表面被覆という3工程による補修を検討の対象としたものである。両実験とも、鉄筋コンクリート(RC)供試体の腐食促進試験を実施している。この2シリーズの実験より次のような結論が得られている。

(1) 断面修復のみの補修を行った場合で、修復後にひびわれが生じるか、もしくは母材コンクリートと補修材に剥離が生じた場合は、断面修復材の種類にかかわらず内部鉄筋には集中的な腐食が生じた。またその場合、ひびわれ幅が大きいく程、腐食による断面欠損は大きかった。

一方、補修後にひびわれあるいは剥離が生じない場合は、断面修復材の種類によらず埋設鉄筋の腐食は極めて軽微なものであった。

(2) 母材コンクリートに塩分が含まれており、母材コンクリートと補修部を鉄筋が貫いている場合は、母材コンクリート部をアノード、補修部をカソードとするマクロセル腐食が生じた。

(3) 補修材の種類もしくは補修工法の種類の違いによる影響よりも、補修後のひびわれの有無、ひびわれ幅もしくは母材コンクリート中の塩分の有無といった要因の影響の方が大きかった。

(4) 補修後にひびわれが発生しない場合は、鉄筋の防錆塗装およびコンクリートの表面被覆の補修効果は相対的に小さなものとなった。

(5) 補修後のひびわれ、剥離防止という観点に立てば、プレパックドコンクリートの使用はあまり好ましくない。一方、レジコンクリートを使用した場合は極めてひびわれは発生しにくい。また、鉄筋塗装材のアルキッド樹脂とエポキシ樹脂を比較した場合、エポキシ樹脂の方が付着性は良かった。

(6) 補修後のはりの断面剛性は、いずれの材料を使用した場合でももとの水準まで回復された。

2.2 直交計画および分散分析

(1) 直交計画(2³型)

本実験の実験Ⅱ～Ⅴでは、取り上げた実験の要因が補修効果におよぼす影響度合いを客観的に判定することが目的である。このように、取り上げた実験要因が実験結

果に及ぼす影響度合いを定量的に分析する1つの手法として分散分析がある。また、この分散分析を実施するための実験計画の1つに直交計画というものがある。本研究の実験Ⅱ～Ⅴにおいては、直交計画に則った形で実験計画を立案し、結果の解析には分散分析を実施した。今回採用した直交計画は、実験計画法の中では「2³型」と称されているものである。

表-2.1に2³型直交表の基本型を示す。要因は「A」、「B」、「C」の3つであり、各要因の水準は「0」および「1」で表示されている2つである。表中の「A×B」という記号は要因Aと要因Bの交互作用(要因Aと要因Bが重なることが実験結果に及ぼす効果)を示している。また、第7列の「A×B×C」というのは3要因の交互作用を示している。実験Ⅲ～Ⅴにおいて取り上げた要因と水準を表-2.2に示す。表に示すとおり、供試体を製作する際の要因として、鉄筋処理の有無、断面修復材料の種類、コンクリート表面被覆の有無、母材コンクリート中の塩分の有無(母材コンクリートを水道水で練り混ぜた

表-2.1 2³型直交表

実験番号	列番号						
	1	2	3	4	5	6	7
ケース1	0	0	0	0	0	0	0
ケース2	0	0	0	1	1	1	1
ケース3	0	1	1	0	0	1	1
ケース4	0	1	1	1	1	0	0
ケース5	1	0	1	0	1	0	1
ケース6	1	0	1	1	0	1	0
ケース7	1	1	0	0	1	1	0
ケース8	1	1	0	1	0	0	1
表示	A	B	A×B	C	A×C	B×C	A×B×C

表-2.2 実験の要因と水準

要因	水準
鉄筋処理	1. 無処理 2. 処理(アルキッド樹脂)
断面修復材料	1. 無収縮セメントモルタル(I) 2. ゴムラテックス(SBR)セメントモルタル(II)
コンクリートの表面被覆	1. 被覆無し 2. 被覆あり(クロロプレンゴム)
母材コンクリート中の塩分含有	1. なし(水道水で練りませ) 2. あり(海水で練りませ)

場合と海水で練りませた場合)の4つを取り上げた。表-2.1に示す基本型をもとに立案した実験III~実験Vの直交計画を表-2.3に示す。ケース番号の「0」は一体構造(断面欠損のない健全な供試体)および無補修(断面欠損を有するが補修を行っていない供試体)である。ケース番号「1」~「8」が直交計画に則っている。表-2.1の列番号1に「鉄筋処理」、列番号2に「断面修復」、列番号4に「コンクリートの表面処理」、また、列番号7に「練りませ水(塩分含有の有無)」を割り付けた。また、列番号3, 5, 6, の交互作用は誤差として取り扱った。

表-2.3 各種要因の組合せ(2³型)

ケース	鉄筋の処理	断面修復材	表面処理	練りませ水	
0	無	無	無	水道水	(一体構造)
0	無	無	無	水道水	(無補修)
1	無	I	無	水道水	
2	無	I	有	海水	
3	無	II	無	海水	
4	無	II	有	水道水	
5	有	I	無	海水	
6	有	I	有	水道水	
7	有	II	無	水道水	
8	有	II	有	海水	

(ケース1~8が直交計画)

この実験計画における、測定データの構造模型(データの構成)は以下のように仮定される。

$$(\text{測定データ}) = (\text{全体平均}) + (\text{鉄筋処理の効果}) + (\text{断面修復の効果}) + (\text{表面処理の効果}) + (\text{練りませ水の効果}) + (\text{誤差})$$

なお、各要因は水準の数がおのおの2であるため各要因の水準1と水準2の効果は、プラスマイナスの記号が逆であるが、絶対値は等しい数値で表わされることになる。

(2) 分散分析

分散分析の基本的な考え方は、上記の構造模型で示される各要因の効果の大小を客観的に判断することである。この検定は次に示すような計算により行う。

$$\frac{\text{各要因の効果のばらつきの大きさ}}{\text{誤差のばらつきの大きさ}}$$

ばらつきの程度を示す指標として、不偏分散を使用し

上式は次式のように具体化する。⁹⁾

$$\frac{\text{列の効果の不偏分散}}{\text{誤差の不偏分散}} = \frac{V_1}{V_2} = F$$

なお、不偏分散とは次式で表される数量である。

$$V = \frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{\phi}$$

ここに、V : 不偏分散

φ : 自由度

x_i : 各測定データ

\bar{x} : 平均値

なお、自由度を簡潔に説明することは困難なので、これについては文献7)等の専門書を参照されたい。また、この「F」を以下本文ではF値と称する。これまでの研究により、F値の確率分布型は明らかになっている。これについては、文献7)等の専門文献に記載されている。表-2.4に上側確率が5%の場合のF分布表の一部を示す。この表の意味は、「分子の自由度が2、分母の自由度が12であるようなF値が3.89以上になる確率は5%である」ということである。一般には、上側確率5%および1%を1つの目安としており、5%のF値(F_{0.05})を上回る場合は、「確かに有意差あり」、1%のF値(F_{0.01})を上回る場合は、「高度に有意差あり」と判定している。本文においては、分散分析の結果が上側1%確立を超える場合は「極めて強い有意差あり」、上側5%確率を超える場合は「有意差あり」と判断することとした。また、それに加えて、上側確率5%のF値の2分の1を超える場合は「弱いながらも有意差あり」という判断基準を設定し、試験結果の考察を行う際の1つの目安とした。

表-2.4 F分布表の一部

φ ₂ \ φ ₁	φ ₁		
	1	2	3
—	—	—	—
11	4.84	3.98	3.59
12	4.75	3.89	3.49
13	4.67	3.81	3.41
—	—	—	—

表-2.5に示したデータは本研究の中で実際に得られた鉄筋の発錆面積率のデータである。分散分析としては表-2.5を完成させればよいわけである。以下にその手順を示す。

表-2.5 分布分析の手順

要因 ケース	A (鉄筋処理)	B (断面修復)	e (誤差)	C コンクリート 表面被覆	e (誤差)	e (誤差)	D (練りませ水)	測定データ	(データ)-(全体平均)
1	○	○	○	○	○	○	○	5.8	-5.7125
2	○	○	○					23.2	11.6875
3	○			○	○			17.4	5.8875
4	○					○	○	4.8	-6.7125
5		○		○		○		10.4	-1.1125
6		○			○		○	4.2	-7.3125
7			○	○		○	○	8.2	-3.3125
8			○		○			18.1	6.5875
列の効果 x_i	±1.2875	±0.6125	±2.3125	±1.0625	±0.1375	±1.7375	±5.7625	全体平均=11.5125	
$\Sigma(x_i-\bar{x})^2$	13.26125	3.00125	42.78125	9.03125	0.15125	24.15125	265.65125		
v_1	13.26125	3.00125		9.03125			265.65125		
v_2			$\frac{42.78125}{3}$		$\frac{0.15125}{3}$	$\frac{24.15125}{3}$			
$F(v_1/v_2)$	0.59	0.13		0.40			11.88		

$F(1,3; 0.05)=10.1$

$F(1,3; 0.01)=34.1$

- ① 各データと全体平均の差を求める。
 ② 列の効果(x_i)を求める。要因Aの場合の計算式は以下のとおりである。

$$x_i = (-5.7125 + 11.6875 + 5.8875 - 6.7125) / 4 = 1.2875$$

$$x_i = (-1.1125 - 7.3125 - 3.3125 + 6.5875) / 4 = -1.2875$$

- ③ $\Sigma(x_i - \bar{x})^2$ を求める。要因Aの場合の計算式は以下のとおりである。

$$(1.2875 - 0)^2 \times 8 = 13.26125$$

いずれの場合も $x = 0$ となる。

- ④

$$V = \frac{(x_i - \bar{x})^2}{\phi} \text{ を求める。}$$

要因A, B, C, Dの場合は、 $\phi = 1$ であり、誤差eの場合は $\phi = 3$ である。

- ⑤

$$F = \frac{V_1}{V_2} \text{ よりF値を求める。}$$

表-2.5の最下欄に示す「F値」によると、要因D(練りませ水)については「有意差あり」と判定され、要因A,

B, Cについては「有意差なし」と判定される。

以上示したものが本実験において用いた実験計画モデルおよびその分散分析手法である。

3. 鉄筋コンクリート部材の断面修復の補修効果に関する実験

3.1 ひびわれを導入した供試体の腐食促進試験

本項において述べる実験は、図-1.2で示すところの実験IIIに相当する。

3.1.1 実験の概要

本項においては、鉄筋塗装、コンクリート断面の修復、コンクリート表面の被覆という3工程により補修を行ったRCはり供試体において実施した腐食促進試験の結果について述べる。なお、供試体に対しては、補修終了後にひびわれの導入を行った。これは、実構造物(栈橋上部工)において、補修後に上載荷重などによりひびわれが生じる場合を想定している。

3.1.2 実験の方法

(1) 供試体の形状、寸法

図-3.1に供試体の形状および寸法を示す。供試体の外寸は、15×20×140cmの角柱型供試体であり、予めはりの中央部に長さ35cm、高さ7cmの切り欠き部(図-3.1の

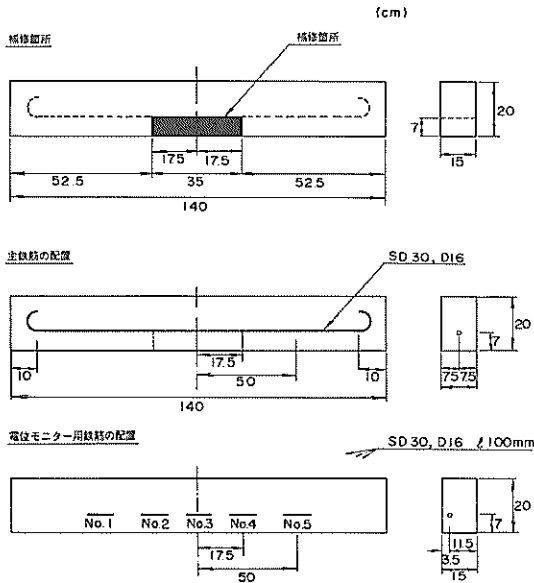


図-3.1 供試体の形状および寸法 (実験Ⅲ)

黒塗り部)を設けておき、その部分に補修を施したものである。この供試体の形状は、写真-3および写真-4に示すようにかぶりコンクリートが一部剥落した状態をモデル化したものである。供試体全面に切り欠き部を設けず供試体の一部に切り欠き部を設けたのは、実構造物の場合でも部材の一部が剥落した場合を想定したものである。

供試体内部には、主鉄筋および電位モニター用鉄筋が埋設されている。いずれも、鉄筋はSD30, D16 (異型鉄筋)である。表-3.1に鉄筋の引張試験結果を示す。主鉄筋は供試体表面からのかぶりか6.2cmの位置に1本埋設されている。また、電位モニター用鉄筋は、長さが10cmであり、底面からのかぶりか6.2cm、側面からのかぶりか

2.7cmの位置に5本埋設されている。数種の電気化学的計測を実施するために、主鉄筋および電位モニター用鉄筋にはリード線が接続されている。

(2) 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 (比重3.16)である。粗骨材は比重2.67, 粗粒率6.58の砕石であり、細骨材は比重2.57, 粗粒率2.98の砕砂である。コンクリートの配合を表-3.2に示す。また、コンクリートの品質試験結果を表-3.3に示す。なお、練りませ水として水道水と海水の2種類を使用することとしたが、製作工場の所在地の関係で、海水の入手が困難であったため、NaCl3.3%溶液を海水の代用として使用した。

(3) 補修材料

a) 鉄筋塗装材

鉄筋塗装材として、アルキッド樹脂 (さび転換型特殊顔料系高耐食プライマー)を使用した。なお、その塗布は鉄筋表面をサンドブラストにより磨いた後、ハケを使用した三層塗りとした。

表-3.3 コンクリートの品質試験結果

練り水	スランプ (cm)	Air (%)	コン温 (°C)	圧縮強度 (kgf/cm ²)	弾性強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)
水道水	6.5	3.3	14		(×10 ⁵)	
				335	2.46	21.0
				332	2.28	22.6
				320	2.49	29.7
				340	2.34	25.4
				332	2.39	24.7
海水*	8.5	3.2	13	354	2.15	26.6
				394	2.68	25.5
				393	2.29	23.1
				376	2.31	31.4
				379	2.36	26.7

*NaCl 3.3%溶液で代用した

表-3.1 鉄筋の引張試験結果

材質	呼び径	試験片長さ (mm)	試験片重さ (g)	断面積 (cm ²)	降伏荷重 (ton)	降伏点 (kgf/cm ²)	引張荷重 (ton)	引張長さ (kgf/cm ²)
SD30	D16	400	607.2	1.934	7.25	3749	10.67	5517
		400	606.3	1.931	7.20	3729	10.52	5448
		394	598.0	1.933	7.30	3777	11.07	5727

表-3.2 コンクリートの配合

Gmax (mm)	Slump (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
					W	C	G	S	減水剤	AE剤
20	8±2.5	4±1	60	46	165	275	1020	852	5.5	1.0

b) コンクリートの断面修復材料

コンクリートの断面修復材料として、無収縮セメントモルタル、およびゴムラテックス (SBR) セメントモルタルの2種類を使用した。表-3.4にこれら2種の材料の材令28日における圧縮強度、弾性係数、引張強度を示す。

表 3.4 コンクリートの断面修復材の種類および圧縮強度、弾性係数および引張強度

	圧縮強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²) (×10 ⁶)	引張強度 (kgf/cm ²)
無収縮 モルタル	536	2.65	25.4
	536	2.44	27.2
	543	2.67	24.9
	541	2.65	25.4
	539	2.60	25.7
ゴムラテックス (SBR) セメントモルタル	385	1.90	18.8
	396	1.92	20.5
	395	1.96	25.8
	395	1.92	20.5
	393	1.93	21.4

c) コンクリートの表面処理材

コンクリートの表面処理材として、クロロプレンゴム系のコンクリート表面被覆材を使用した。処理方法は、コンクリート表面の下地処理を行った後、メーカーの仕様に従い7層仕上げとした。図-3.2にその構造を示す。なお、膜厚は約2mmである。

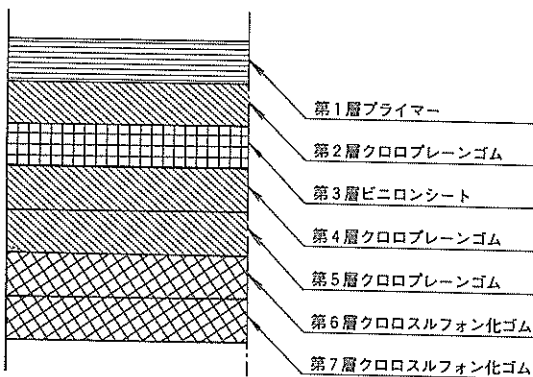


図-3.2 コンクリート表面被覆の構造

(4) 供試体製作の手順

図-3.3に供試体製作の手順を示す。図に示すように、まず初めに中央部に断面欠損(鉄筋の露出)を有するRCはりを製作した。次に、鉄筋の露出部の表面の処理を行

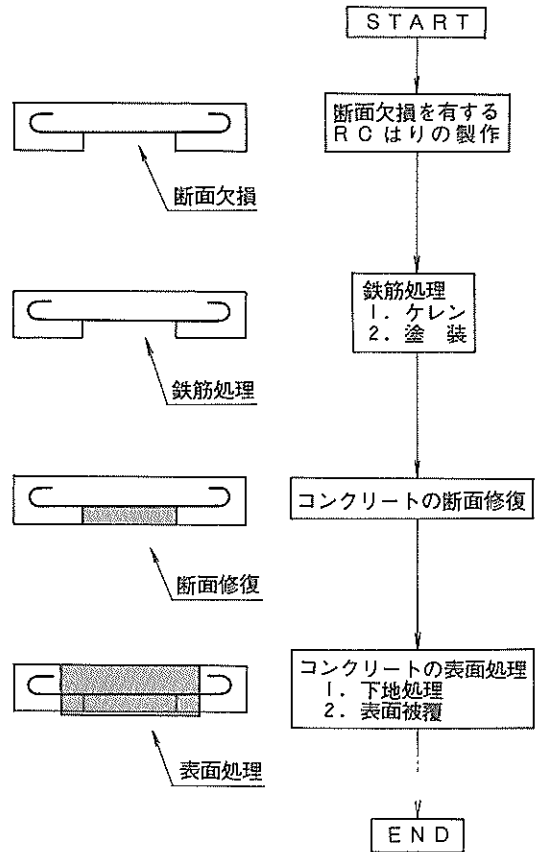


図-3.3 供試体製作の手順

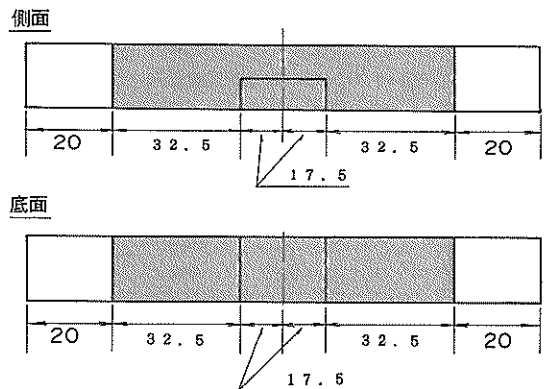


図-3.4 コンクリートの表面被覆箇所

った。鉄筋表面の処理は表面の磨きおよびアルキッド樹脂による塗装である。その後、欠損断面の修復を行った。使用材料は、前述したとおり、無収縮セメントモルタルとゴムラテックス (SBR) セメントモルタルであり、いずれの場合も欠損部に型枠を設けて修復を行った。断面修復材料が十分硬化した後に、コンクリート表面の被覆を行った。図-3.4に表面被覆を実施した部分を示す。側

面および底面について処理を行い、上面は無処理とした。
 (5) 供試体へのひびわれの導入

先に示した手順で補修を行い、表面処理材料が十分硬化、接着した後に、曲げ載荷によりひびわれを導入した。図-3.5に曲げ載荷方法の概要を示す。支点間距離120 cm、載荷点間距離40cmの三等分点載荷とした。また、載荷時の最大荷重は、式(1)により計算した計算破壊荷重の3分の1に設定した。

$$Mu = As \cdot fy \cdot d \left(1 - \frac{0.60 \cdot p \cdot fy}{fc'} \right) \quad (1)$$

ここに Mu : 破壊モーメント (kgf・cm)

As : 鉄筋の断面積 (cm²)

fy : 鉄筋の降伏点強度 (kgf/cm²)

d : 断面の有効高さ (cm)

p : 鉄筋比 (As/bd)

b : 断面の幅

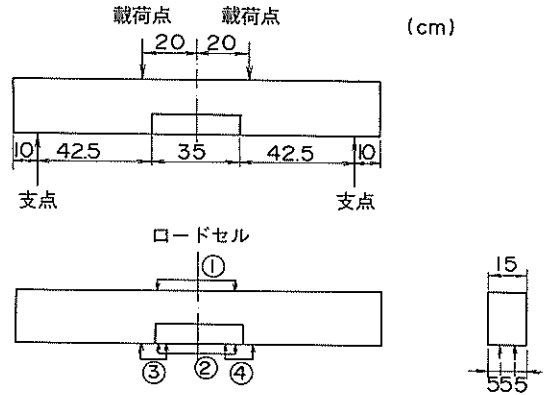
fc' : コンクリートの圧縮強度 (kgf/cm²)

なお、計算に用いた各数値を表-3.5に示す。また、載荷により導入されたひびわれ幅の最大値(載荷時および除荷時)を表-3.6に示す。これらのひびわれは、一体構造(ケース0)の供試体を除いていずれの供試体の場合も母材コンクリートと断面修復材との境界部分に発生した。

表-3.7にこのひびわれ幅の分散分析結果を示す。表は鉄筋処理の有無、コンクリート断面修復材の違い、コンクリート表面処理の有無、および母材コンクリートの練りませ水の違いがひびわれ幅に及ぼす影響度合いをF値で示している。これを見ると、「表面処理」の有意差が顕著である。表-3.6を見ると、表面処理のない供試体では残留ひびわれ幅が0.1mm以上あるのに対して、表面処理を施した場合はいずれも0.1mm以下である。これより今回実施したコンクリートの表面処理は、ひびわれ幅を小さくする効果を有しているといえる。また、載荷時最大ひびわれ幅について「鉄筋処理」に有意差が認められる。すなわち、鉄筋処理を実施している方が、ひびわれ幅は小さくなる。この原因としては、鉄筋に塗装を施すことにより鉄筋とコンクリートの摩擦が向上するということが考えられるが明らかではない。

(6) 供試体の促進養生方法

供試体の腐食促進養生方法として、乾湿繰り返し法⁹⁾を用いた。乾湿繰り返し条件は図-3.6に示すように、60±5℃の高温海水浸せき3日、15±5℃の気中乾燥4日の計7日を1サイクルとするものであり、この腐食促進養生を20サイクル実施した。



- ① 30 cm π型ゲージ (E1算定用)
- ② 30 cm π型ゲージ (ひびわれ幅算定用)
- ③ 10 cm π型ゲージ (ひびわれ幅算定用)
- ④ 10 cm π型ゲージ (ひびわれ幅算定用)

図-3.5 曲げ載荷方法 (ひびわれ導入)

表-3.5 荷重計算に用いた数値

As	1.986 (cm ²)
fy	3752 (kgf/cm ²)
d	13 (cm)
p	0.0102
fc'	(σ_{ss}) ³³² (水道水練) (kgf/cm ²) 379(海水練)

表-3.6 曲げ載荷により導入したひびわれ幅

	最大荷重 (tf)	載荷時最大ひびわれ幅 (mm)	除荷時最大残留ひびわれ幅 (mm)
0-1	1.49	0.045	0.030
2	1.49	0.095	0.033
1-1	1.50	0.245	0.115
2	1.49	0.251	0.103
2-1	1.50	0.183	0.072
2	1.50	0.172	0.072
3-1	1.50	0.273	0.122
2	1.51	0.300	0.133
4-1	1.49	0.097	0.030
2	1.50	0.085	0.027
5-1	1.50	0.376	0.163
2	1.50	0.323	0.141
6-1	1.50	0.222	0.090
2	1.50	0.183	(データなし)
7-1	1.50	0.286	0.124
2	1.50	0.291	0.117
8-1	1.50	0.196	0.064
2	1.50	0.183	0.061

表 3.7 びびわれ幅の分散分析結果

	鉄筋 処理	断面 修復	表面 処理	練り まぜ水
載荷時最大 びびわれ幅	15.72	4.79	75.37	8.64
除荷時最大 残留びびわれ幅	3.70	3.70	37.77	2.12

$F(1,3;0.05) = 10.1$

$F(1,3;0.01) = 34.1$

$\frac{1}{2}[F(1,3;0.05)] = 5.05$

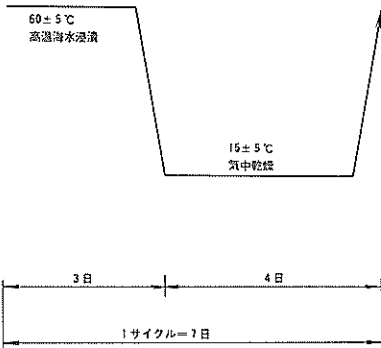


図-3.6 腐食促進養生方法 (乾燥繰り返し法)

(7) 測定項目および測定方法

実施した測定項目の一覧を表-3.8に示す。実施した測定は、埋設鉄筋の電気化学的計測、腐食状況観察ならびにコンクリート中の塩分含有量の測定である。電気化学的計測のうち、自然電極電位については促進養生期間中定期的に測定を実施した。その他の項目については、腐食促進養生を20サイクル終了した後に実施した。以下、各々について測定方法を概説する。

表 3.8 測定項目一覧

測定項目
1. 自然電極電位 — 主鉄筋, 電位モニター用鉄筋 — (促進サイクル中経時的に実施)
2. 動電位分極曲線(不動態のグレイド) — 主鉄筋, 電位モニター用鉄筋 —
3. 定電位ステップ法(定電位電流密度) — 主鉄筋, 電位モニター用鉄筋 —
4. 腐食状況観察(発錆面積率の算定) — 主鉄筋, 電位モニター用鉄筋 —
5. コンクリート中の塩分含有量

a) 自然電極電位

図-3.7に自然電極電位の測定方法の概要を示す。図に示すように、供試体を海水に浸せきした状態で測定を行った。なお、参照電極として銀-塩化銀電極を使用した。

b) 動電位分極曲線

動電位分極曲線の測定方法の概要を図-3.8に示す。図に示すとおり、作用電極(鉄筋)、対極、参照電極の3電極方式により実施した。対極としてステンレス鋼板を、参照電極として銀-塩化銀電極を使用した。電位の掃引は、自然電極電位を起点として+1000mV (v.s. Ag-AgCl) と-1000mV (v.s. Ag-AgCl) の間を掃引速度40 mV/minで行った。図-3.9に動電位分極曲線の測定結果

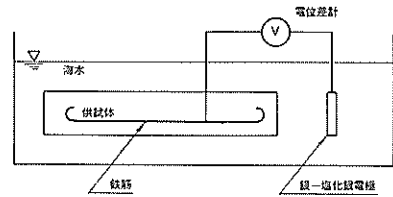


図-3.7 自然電極電位の測定方法

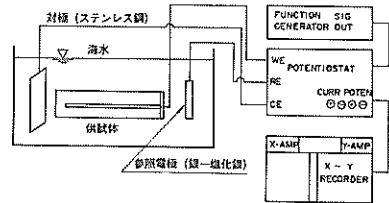


図-3.8 電気科学的測定方法(動電位分極曲線, 定電位ステップ法)

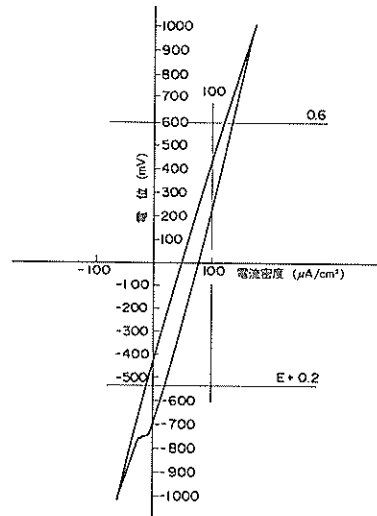


図-3.9 動電位分極曲線の測定結果の一例

の一例を示す。この動電位分極曲線より、鉄筋の不動態の状態を概ね判定する基準である「不動態のグレイド」を求めた。不動態のグレイドの判定基準を表-3.9および図-3.10に示す。¹⁰⁾なお、ここでいう電流密度とは、得られた電流値を鉄筋の表面積で除した値である。

表3.9 不動態のグレイドの判定基準

グレイド 0	電流密度が一度でも $100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ を超えるもの
グレイド 1	電流密度が $10 \sim 100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ にあるもの
グレイド 2	電流密度が一度でも $10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ を超え、かつグレイド 1 または 3 に含まれないもの
グレイド 3	電流密度が $1 \sim 10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ にあるもの
グレイド 4	電流密度が一度でも $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ を超え、かつグレイド 1, 2 および 3 に含まれないもの
グレイド 5	電流密度が、 $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ を超えないもの

鉄筋の自然電極電位を E_n として、電位が $E_n + 0.2\text{V} < E < 0.6\text{V}$ の範囲で上記の判断を行う。

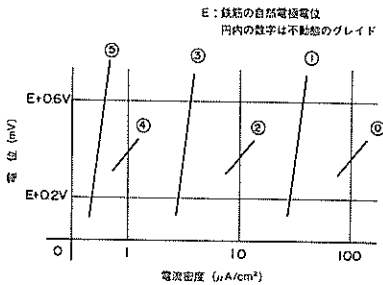


図-3.10 不動態のグレイドの判定基準

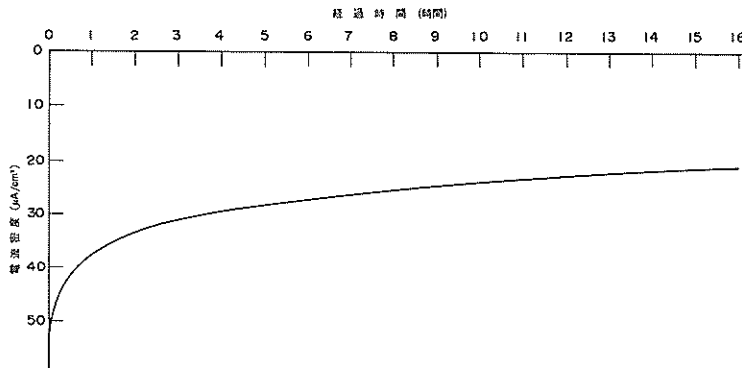


図-3.11 定電位ステップ法の測定結果の一例

c) 定電位ステップ法

定電位ステップ法の測定方法の概要を図-3.8に示す。測定システムは動電位分極曲線と全く同様であり、3電極方式により実施した。作用電極(鉄筋)の電位を参照電極に対して -1000mV に保持し、その時に作用電極(鉄筋)と対極(ステンレス鋼板)の間を流れる電流を連続的に測定した。図-3.11に、定電位ステップ法の測定結果の一例を示す。図に示すように、作用電極と対極の間に生じる電流は時間の経過とともに徐々に減少し、次第に一定値に落ち着く。この時の電流量は、作用電極(鉄筋)へ供給される酸素の量に支配される。すなわち、鉄筋への酸素供給量が多くなるほど測定される電流値も大きくなる。本研究においては、供試体間の相対比較をする際には、一応の目安として5時間経過時の電流値を用いた。これは、ほぼ5時間が経過すると、測定初期の急減が収束し、それ以後漸減の状態に入るためである。

d) 腐食状況観察

上記 a) ~ c) の電気化学的測定を終了した供試体を削岩機を用いて破碎し、コンクリート中の主鉄筋および電位モニター用鉄筋を取り出した。まず初めに取り出した鉄筋の写真撮影を行い、次に発錆状況の観察図を作成した。この図をもとに発錆面積を算定し、発錆面積率を求めた。なお、発錆面積率は、鉄筋全表面積に対する発錆面積の割合を百分率で表示したものである。

e) コンクリート中の塩化物含有量

供試体の破碎を実施する際に、図-3.12に示すように、供試体中央部の鉄筋直上に位置する母材コンクリートより塩分定量用試料を採取した。取り出したコンクリート

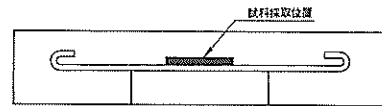


図-3.12 塩化物含有量試験用試料の採取箇所

より粗骨材部分を取り除き、モルタル部分だけを取り出した。これらの試料を粉砕機を用いて149 μ mのふるいを全通するように微粉砕した。定量する塩化物は可溶性塩化物イオンとし、粉末試料約5gを蒸留水50ccに24時間浸せし、粉末試料から蒸留水中へ溶出してきた塩化物イオンを測定した。

3. 1. 3 実験の結果

(1) 埋設鉄筋の自然電極電位

図-3.13および図-3.14に促進養生期間中の自然電極電位の経時変化の一例を示す。自然電極電位の値は供試体間で若干の違いが見られるが、促進期間中の電位の変化の傾向はいずれの供試体も大差はない。促進養生期間中の変化の傾向としては、いずれの場合もわずかに卑化してゆく傾向である。

表 3.10 自然電極電位の分散分析結果

—— 主鉄筋 ——

促進サイクル数	鉄筋処理	断面修復	表面処理	練りませ水
0	0.29	0.14	6.24	0.37
1	0.00	0.07	4.24	5.36
2	0.04	0.02	4.24	11.40
3	0.00	0.00	3.58	6.98
4	0.01	0.01	3.73	8.71
5	0.06	0.00	4.17	8.19
6	0.03	0.00	4.15	7.83
7	0.03	0.01	3.82	7.78
8	0.23	0.01	1.95	6.90
9	0.20	0.09	3.20	10.54
10	0.13	0.56	6.52	6.11
11	0.79	0.93	11.19	8.16
12	0.40	0.71	8.65	5.98
13	0.94	0.91	11.66	10.75
14	0.05	0.17	5.42	2.25
15	0.20	0.62	6.09	3.22
16	0.47	0.79	24.78	8.73
17	0.70	0.41	27.58	8.10
18	0.06	0.06	2.19	0.01
19	1.19	0.02	28.25	2.77
20	0.14	0.03	3.95	0.00

$F(1, 3; 0.05) = 10.1$

$F(1, 3; 0.01) = 34.1$

$\frac{1}{2}[F(1, 3; 0.05)] = 5.05$

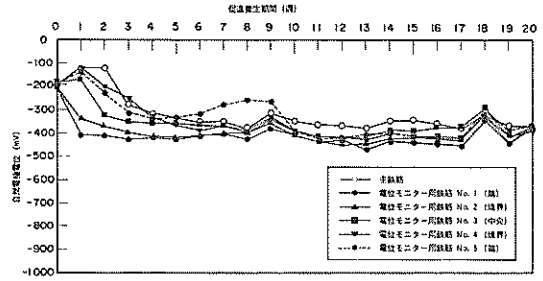


図-3.13 埋設鉄筋の自然電極電位の経時変化（一体構造、0-1）

表 3.11 自然電極電位の分散分析結果

—— 電位モニター用鉄筋
(No.1と No.5の平均)・端部 ——

促進サイクル数	断面修復	表面処理	練りませ水
0	0.67	0.41	1.06
1	2.64	1.93	63.72
2	0.92	8.31	146.60
3	3.59	14.01	241.65
4	0.02	0.04	20.88
5	0.04	0.05	12.50
6	0.12	0.52	11.17
7	0.04	0.02	10.65
8	0.00	0.05	18.53
9	0.02	0.14	8.75
10	0.32	0.01	9.98
11	0.01	0.60	31.68
12	0.12	1.66	18.86
13	3.08	54.37	586.97
14	0.32	0.61	5.51
15	0.56	2.26	15.34
16	0.51	7.77	48.14
17	0.36	6.47	48.29
18	0.00	0.07	0.41
19	1.48	14.84	58.82
20	0.21	0.59	0.52

$F(1, 3; 0.05) = 10.1$

$F(1, 3; 0.01) = 34.1$

$\frac{1}{2}[F(1, 3; 0.05)] = 5.05$

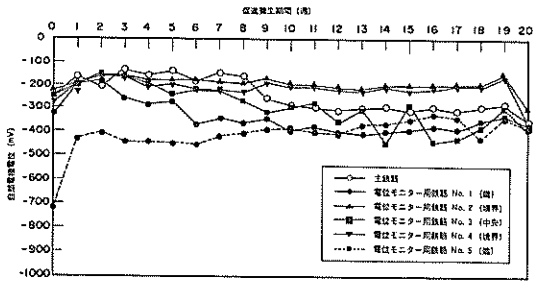


図-3.14 埋設鉄筋の自然電極電位の経時変化 (ケース 4, 4-2)

表 3.12 自然電極電位の分散分析結果

—— 電位モニター用鉄筋
(No.2とNo.4の平均)・境界部——

促進 サイクル数	鉄筋処理	断面修復	表面処理	練り ませ水
0	0.01	0.00	18.14	0.06
1	0.06	1.65	22.62	10.77
2	0.34	0.79	11.52	4.82
3	0.23	0.00	5.60	8.29
4	0.42	0.07	4.89	4.49
5	0.15	0.04	4.27	6.96
6	0.24	0.00	3.35	4.04
7	0.05	0.04	4.94	4.50
8	0.06	0.03	3.45	3.82
9	0.06	0.00	7.04	2.91
10	0.06	0.15	7.28	3.23
11	0.02	0.41	8.39	4.08
12	0.01	0.28	8.84	4.02
13	0.03	0.09	5.26	2.52
14	0.04	0.01	7.67	1.40
15	0.04	0.16	9.81	2.67
16	0.00	0.75	19.14	5.61
17	0.00	0.69	20.17	5.43
18	0.10	0.05	4.33	0.10
19	0.03	0.11	15.50	4.05
20	0.09	0.30	5.79	0.76

$F(1,3;0.05)=10.1$ [Light Gray Box]

$F(1,3;0.01)=34.1$ [Medium Gray Box]

$\frac{1}{2}[F(1,3;0.05)]=5.05$ [Dark Gray Box]

表 3.13 自然電極電位の分散分析結果

—— 電位モニター用鉄筋
(No.3)・中央部——

促進 サイクル数	鉄筋処理	断面修復	表面処理	練り ませ水
0	0.19	0.48	477.60	1.97
1	0.70	1.75	25.24	0.05
2	0.11	0.45	13.69	1.53
3	0.00	0.10	12.23	1.03
4	0.00	0.24	9.60	0.33
5	0.03	0.00	4.63	0.20
6	0.01	0.10	5.70	0.08
7	0.04	0.04	4.54	0.14
8	0.19	0.11	4.57	0.11
9	0.00	0.23	23.61	0.05
10	0.47	1.24	8.66	0.74
11	1.13	2.26	15.77	0.30
12	0.63	1.28	12.03	0.42
13	0.36	3.44	45.53	1.17
14	0.41	0.00	7.46	0.84
15	0.19	0.15	13.04	0.43
16	1.99	2.45	27.21	0.03
17	1.80	1.13	24.46	0.39
18	0.07	0.10	4.79	0.79
19	3.40	0.87	31.00	1.98
20	0.48	1.08	3.81	0.05

$F(1,3;0.05)=10.1$ [Light Gray Box]

$F(1,3;0.01)=34.1$ [Medium Gray Box]

$\frac{1}{2}[F(1,3;0.05)]=5.05$ [Dark Gray Box]

表-3.10~表-3.13に主鉄筋および電位モニター用鉄筋の自然電極電位の分散分析結果を示す。なお、5%確率のF値の2分の1を上回る場合は表中に網掛けで示した。表-3.10に示す主鉄筋についてみると、促進養生の前半(13サイクル程度まで)においては「練りませ水」に有意差が認められる。すなわち、母材コンクリート中に塩分が含まれている方が電位は卑となる。しかし、促進養生の後半(14サイクル以降)になるとその有意差が次第に薄れてくる。また、促進養生の後半(10サイクル以降)になると、「表面処理」に有意差が認められるようになる。すなわち、表面処理を施している方が電位は貴となる。表-3.11に示す端部に位置する電位モニター用鉄筋の場合、「練りませ水」の有意差が極めて大きい。す

なわち、練りませ水に海水を使用すると、電位は卑となる。なお、表-3.11において「鉄筋処理」の項目がないのは端部に位置する電位モニター用鉄筋には、いずれの鉄筋にも処理がなされていないためである。表-3.12および表-3.13に示す境界部と中央部に位置する電位モニター用鉄筋の場合、「練りませ水」の有意差はほとんど見られず「表面処理」の有意差が大きくなる。すなわち、表面処理を実施している方が電位は貴となる。

以上の結果より以下のことが考えられる。促進養生を実施すると必然的に供試体中の含水量が大きくなるため、練りませ水として海水を使用した場合は、その中に含まれる塩素イオンがコンクリート中の細孔溶液に溶け易くなる。したがって、埋設されている鉄筋の自然電極電位は卑の値を呈することになる。一方、促進養生サイクルの回数を重ねていくと、外部から浸入する海水中に含まれる塩素イオンがコンクリート中に蓄積されてくる。コンクリートの表面処理は外部からの海水の浸入を抑制する効果を有するため、表面処理を施している供試体中の

鉄筋の自然電極電位は表面処理を施していない場合に比べて貴の値を示す。なお、「鉄筋処理」と「断面修復」の有意差は主鉄筋についても、またいずれに位置する電位モニター用鉄筋についても認められなかった。

(2) 動電位分極曲線

表-3.14に促進サイクル終了後に測定した動電位分極曲線より判定した不動態のグレードを示す。また、この不動態のグレードの分散分析結果を表-3.15に示す。表よりわかるとおり、主鉄筋の場合も電位モニター用鉄筋の場合も、「鉄筋処理」、「断面修復」に有意差はほとんどなく、「表面処理」に有意差が認められる。中でも、中央部と境界部に位置する電位モニター用鉄筋の場合にそれが顕著である。すなわち、表面処理を施している方が、不動態のグレードは高くなる傾向を示す。これは、表面処理を施すことにより、施していない場合に比べて、ひびわれが存在する場合でも外部からの供試体中への海水の浸入が抑制されるため、その結果埋設鉄筋が良好な不動態を保っているものと考えられる。

表-3.14 不動態のグレード

供試体 No.	主鉄筋	電位モニター用鉄筋				
		No. 1 (端)	No. 2 (境界)	No. 3 (中央)	No. 4 (境界)	No. 5 (端)
0-1	2	0	1	1	1	1
	2	3	1	2	1	2
	3	0	1	0	0	4
	4	0	1	0	0	1
1-1	2	1	0	0	0	2
	2	2	1	0	0	1
2-1	2	2	2	2	2	1
	2	2	1	2	2	1
3-1	2	0	0	2	0	1
	2	2	2	0	1	1
4-1	3	1	4	4	4	2
	2	3	2	4	3	1
5-1	2	0	0	1	0	1
	2	1	0	0	0	1
6-1	4	2	4	1	4	1
	2	3	4	4	5	2
7-1	2	2	0	0	0	0
	2	2	0	0	1	2
8-1	2	1	2	-	2	1
	2	2	1	2	4	0

表-3.15 不動態のグレイドの分散分析結果
(促進サイクル終了後)

		鉄筋 処理	断面 修復	表面 処理	練り ませ水
主 鉄 筋		0.00	0.00	4.50	4.50
電位 モニター 用鉄筋	端 部 (No. 1,5の平均)	—	0.71	2.82	4.41
	境界部 (No. 2,4の平均)	0.06	0.06	31.12	2.88
	中央部 (No. 3)	0.33	5.33	33.33	0.33

$F(1,3; 0.05) = 10.1$

$F(1,3; 0.01) = 34.1$

$\frac{1}{2}[F(1,3; 0.05)] = 5.05$



一方、主鉄筋および端部に位置する電位モニター用鉄筋については、境界部および中央部に位置する電位モニター用鉄筋に比べて「練りませ水」の有意差が大きくなっている。この両者は母材コンクリート中に初期の段階から混入されていた塩素イオンにより、不動態の破壊が進んだことを意味している。

(3) 定電位ステップ法

表-3.16に促進サイクル終了後に測定した定電位ステップ法の測定結果（電流密度で表示）を示す。また、この定電位電流密度の分散分析結果を表-3.17に示す。表よりわかるとおり、主鉄筋の場合も電位モニター用鉄筋の場合も「表面処理」に有意差が認められる。特に、境界部に位置する電位モニター用鉄筋の場合はその有意差が顕著である。すなわち、表面処理を施している方が、定電位電流密度が小さくなり、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示されている。また、主

表-3.16 定電位ステップ法の測定結果

供試体 No.	主鉄筋	電位モニター用鉄筋					
		No. 1 (端)	No. 2 (境界)	No. 3 (中央)	No. 4 (境界)	No. 5 (端)	
0-1	14.4	44.0	39.0	41.0	29.2	22.0	
	2	12.9	41.0	23.6	26.8	29.6	28.4
	3	54.3	40.0	156.0	160.0	148.0	15.2
	4	58.6	37.0	168.0	220.0	184.0	28.0
1-1	16.4	38.5	44.0	48.0	51.0	22.4	
	2	6.3	36.8	40.0	104.0	45.0	42.2
2-1	8.3	25.0	12.6	8.2	17.0	26.0	
	2	8.1	33.2	16.4	14.7	18.8	30.0
3-1	11.0	31.0	42.0	32.2	29.0	33.0	
	2	20.0	22.0	30.0	51.0	29.0	29.0
4-1	7.4	33.0	6.0	1.3	6.4	23.8	
	2	15.4	23.6	10.2	14.2	13.6	39.0
5-1	15.4	33.0	34.0	10.0	32.0	30.0	
	2	15.8	31.0	31.1	33.0	39.5	29.0
6-1	5.5	22.8	6.2	(92.0)	6.4	19.2	
	2	6.0	—	7.5	2.4	6.8	18.8
7-1	17.1	23.4	39.0	23.0	39.0	37.0	
	2	10.0	40.0	31.6	20.0	31.1	25.0
8-1	10.6	17.8	10.1	—	14.2	16.4	
	2	17.4	18.8	16.2	—	16.2	28.0

表中の値は電流密度 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
測定開始後 5 時間の値

表-3.17 定電位ステップ法の分散分析結果
(促進サイクル終了後)

		鉄筋 処理	断面 修復	表面 処理	練り ませ水
主鉄筋		0.20	5.94	9.08	4.01
電位 モニ ター 用 鉄 筋	端部 (No. 1,5の平均)		0.16	6.32	0.57
	境界部 (No. 2,4の平均)	0.50	0.39	32.20	0.00
	中央部 (No. 3)	0.94	0.05	2.78	0.01

$F(1,3; 0.05) = 10.1$

$F(1,3; 0.01) = 34.1$

$\frac{1}{2}[F(1,3; 0.05)] = 5.05$

鉄筋の場合、明確ではないものの「断面修復」に弱いながらも有意差が認められる。

(4) 腐食状況観察 (発錆面積率)

表-3.18に埋設鉄筋の発錆面積率を示す。また、この発錆面積率の分散分析結果を表-3.19に示す。「表面処理」と「練りませ水」に有意差が認められるものの、「鉄筋処理」および「断面修復」に全く有意差が認められない。主鉄筋の場合、端のフック部では「練りませ水」の有意差が大きく、中央部では「表面処理」の有意差が大きい。すなわち、端のフック部では初期の段階から母材コンクリート中に塩素イオンが含まれていると、鉄筋の発錆が進むことがわかる。一方、コンクリートの表面処理を施すことにより、内部鉄筋の発錆が抑制されていることがわかる。主鉄筋の場合は、この両者が発錆面積率を支配している。


表-3.18 埋設鉄筋の発錆面積率


(%)


供試体 No.	主鉄筋		電位モニター用鉄筋				
	全体	フック部	No. 1 (端)	No. 2 (境界)	No. 3 (中央)	No. 4 (境界)	No. 5 (端)
0-1	28.2	30.1	70.2	63.8	52.2	89.2	91.3
2	18.0	11.9	66.6	46.8	46.3	49.1	39.8
3	44.1	8.0	48.1	95.1	94.1	90.5	1.3
4	33.4	3.4	39.1	92.8	100	73.5	53.2
1-1	49.6	1.3	39.1	95.9	80.2	99.2	48.6
2	46.4	3.9	57.3	94.9	82.8	98.5	57.3
2-1	58.1	47.1	61.4	73.8	40.9	50.9	57.6
2	67.5	73.7	97.7	95.4	49.1	99.7	75.3
3-1	66.8	44.8	66.3	97.7	96.9	93.6	91.8
2	56.3	29.5	35.0	97.7	89.5	79.2	80.7
4-1	12.3	23.5	73.5	0	27.2	30.3	42.4
2	15.6	18.7	63.0	54.8	86.9	0.5	47.3
5-1	66.5	36.1	61.2	99.2	96.1	99.5	86.1
2	84.0	68.4	84.1	97.7	95.1	99.5	82.8
6-1	3.8	7.0	52.7	2.8	11.1	2.8	35.5
2	13.6	26.8	60.9	20.1	0	0	55.5
7-1	50.4	18.7	41.6	96.1	73.8	94.3	74.8
2	47.6	14.0	79.4	94.3	94.1	91.5	45.5
8-1	50.7	43.4	63.2	64.0	49.1	80.2	51.2
2	54.6	57.6	61.2	96.1	85.9	97.7	91.5

表-3.19 埋設鉄筋の発錆面積率の分散分析結果

		鉄筋 処理	断面 修復	表面 処理	練り ませ水
主鉄筋	全 体	0.00	0.24	7.29	14.02
	フック部	0.35	0.08	2.61	32.92
電位 モニタ ー用 鉄筋	端 部 (No. 1,5の平均)		0.00	0.32	13.90
	境界部 (No. 2,4の平均)	0.01	0.01	5.47	2.83
	中央部 (No. 3)	0.24	2.25	13.16	2.19

$F(1,3; 0.05) = 10.1$ 

$F(1,3; 0.01) = 34.1$ 

$\frac{1}{2}[F(1,3; 0.05)] = 5.05$ 

端部に位置する電位モニター用鉄筋の場合、「練りませ水」の有意差が大きく、境界部および中央部に位置する電位モニター用鉄筋の場合「表面処理」の有意差が大きくなって来る。これは主鉄筋の場合と同様の理由によるものと考えられる。また、主鉄筋の場合も電位モニター用鉄筋の場合も「鉄筋処理」および「断面修復」に有意差は認められない。

(5) コンクリート中の可溶性塩化物含有量

表-3.20にコンクリート中の可溶性塩化物含有量の測定結果を示す。また、この塩化物含有量の分散分析結果を表-3.21に示す。表よりわかるとおり、「表面処理」の有意差が顕著である。すなわち、表面処理を実施することにより塩分の侵入が抑制されている。「練りませ水」に弱いながらも有意差が認められるが、「表面処理」のそれに比べて小さい。すなわち、コンクリートの表面処理を施さない場合には初期に混入した塩分量より多量の塩分が促進養生中に供試体中に侵入していることになる。

3. 1. 4 総括

表-3.22に実験Ⅲの結果を総括する。表より明らかとなり、「表面処理」の有無が最も大きな有意差を示している。また、主鉄筋および端部に位置する電位モニター用鉄筋については「練りませ水」中の塩分の有無、すなわち母材コンクリート中の塩分の有無の有意差も認められる。特に、自然電極電位の経時変化より考察すれば、補修後初期の段階では「練りませ水」すなわち「母材コンクリート中の塩分の有無」の影響が支配的であるが、促進養生の回数を重ねるにつれて「表面処理」の影響が大きくなって来る。


表-3.20 コンクリート中の可溶性塩化物含有量


供試体 No.	可溶性塩分含有量*(%)
0-1	0.108
2	0.050
3	0.158
4	0.116
1-1	0.098
2	0.087
2-1	0.059
2	0.060
3-1	0.156
2	0.119
4-1	0.010
2	0.030
5-1	0.138
2	0.097
6-1	0.020
2	0.010
7-1	0.129
2	0.156
8-1	0.090
2	0.097


* モルタルに対する重量パーセント

表-3.21 コンクリート中の可溶性塩化物含有量の分散分析結果

鉄筋処理	断面修復	表面処理	練りませ水
1.21	3.47	33.40	6.90

$F(1,3; 0.05) = 10.1$ 

$F(1,3; 0.01) = 34.1$ 

$\frac{1}{2}[F(1,3; 0.05)] = 5.05$ 

また、主鉄筋およびそれぞれ異なる位置に置かれた電位モニター用鉄筋でその影響要因がそれぞれ異なる結果となった。すなわち、主鉄筋の場合、「表面処理」と「練りませ水」に有意差が認められる。著者らは、既出の参考文献(4, 5)において、母材コンクリート中に予め塩分が存在するとその部分がアノード、補修部分がカソードとなるマクロセル腐食が生じることを報告している。今回の試験結果もこのことを裏付けるものといえる。

一方、端部に位置する電位モニター用鉄筋の場合、「練

表—3.22 試験結果の総括（実験Ⅲ）

		鉄筋 処理	断面 修復	表面 処理	練り ませ水
主 鉄 筋	自然電極電位			○	○
	不動態のグレイド				
	定電位ステップ法		△	△	
	発錆面積率			△	○
鉄筋位 モニター 用 (端)	自然電極電位				○
	不動態のグレイド				
	定電位ステップ法			△	
	発錆面積率				○
鉄筋位 モニター 用 (境界)	自然電極電位			○	△
	不動態のグレイド			○	
	定電位ステップ法			○	
	発錆面積率			△	
鉄筋位 モニター 用 (中央)	自然電極電位			○	
	不動態のグレイド		△	○	
	定電位ステップ法				
	発錆面積率			○	
塩分含有量				○	△

○：有意差あり
△：弱いながらも有意差あり

りませ水」の有意差が大きい。他方、境界部および中央部に位置する電位モニター用鉄筋の場合は「表面処理」の有意差が大きくなる。また、全体的にみて「鉄筋処理」および「断面修復」の有意差はほとんど認められない。

3. 2 ひびわれのない供試体の海洋環境暴露試験

本項において述べる実験は、図—1.2で示すところの実験Ⅳに相当する。

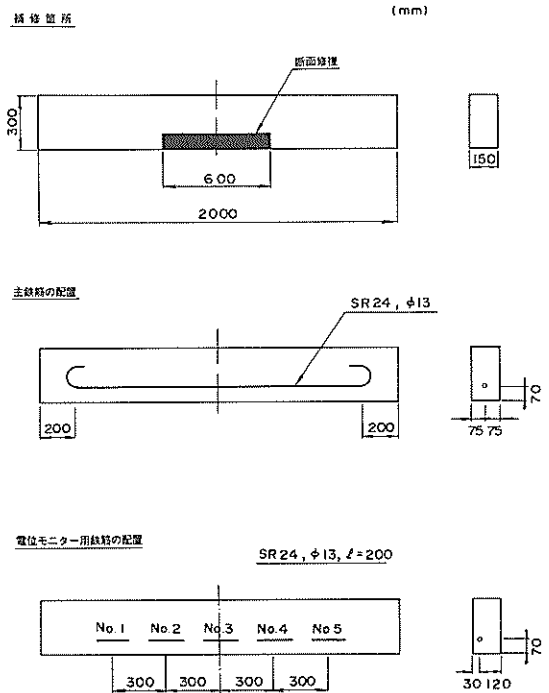
3. 2. 1 実験の概要

本項においては、鉄筋塗装、コンクリート断面の修復、コンクリート表面の被覆という3工程により補修を行ったRCはり供試体において実施した海洋環境暴露試験の結果について述べる。なお、供試体に対しては、ひびわれの導入を行っていない。これは実構造物において補修後にひびわれが生じない場合を想定している。

3. 2. 2 実験の方法

(1) 供試体の形状、寸法

図—3.15に供試体の形状、寸法を示す。供試体の外寸は15×30×200cmの角柱型供試体であり、予めはりの中央部に長さ60cm、高さ7cmの切り欠き部を設けておき、その部分に補修を施したものである。供試体内部には、



図—3.15 供試体の形状、寸法、(実験Ⅳ)

主鉄筋および電位モニター用鉄筋が埋設されている。鉄筋はいずれも、SR24、φ13（丸鋼）である。主鉄筋は供試体底面からのかぶりか6.35cmの位置に1本埋設されている。また、電位モニター用鉄筋は長さが20cmであり、底面からのかぶりか6.35cm、側面からのかぶりか2.35cmの位置に5本埋設されている。自然電極電位を測定するために主鉄筋、電位モニター用鉄筋にはリード線が接続されている。

(2) コンクリート用材料およびその配合

コンクリート製作に使用した材料は、3.1.2で述べたものと全く同一である。(表—3.2, 表—3.3参照)

(3) 補修材料

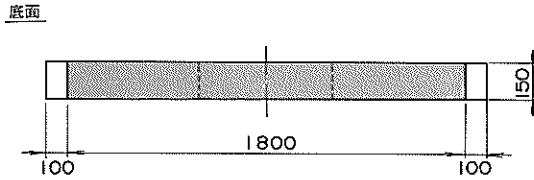
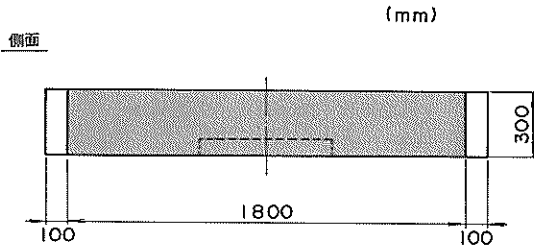
本実験で用いた補修材料は、鉄筋塗装材、コンクリートの断面修復材、コンクリートの表面処理材のいずれも3.1.2で述べたものと同一のものである。

(4) 供試体製作の手順

供試体製作の手順は3.1.2で述べた方法(図—3.3参照)と全く同様である。図—3.16に表面被覆を行った部分を示す。側面および底面について処理を行い、上面は無処理とした。

(5) 供試体の暴露

補修を終えた供試体は、港研構内の飛沫部シミュレーション装置に暴露した。飛沫部シミュレーション装置というのは、海洋環境のうちの飛沫部（スプラッシュゾー



■ : 表面処理箇所

図-3.16 コンクリートの表面被覆箇所

ン)を人工的に作り出すものであり、1日に2回、1回につき3時間の海水のスプレーを供試体に与えるものである。このような環境に2年間供試体を暴露した。(海水のスプレーは2年間でトータル4380時間である)なお、各供試体製作1ケースにつき供試体を2体ずつ準備したが、そのうちの1体については暴露1年で各種試験を実施し、残りの1体については2年まで暴露を継続した。

(6) 測定項目および測定方法

実施した測定項目は表-3.23に示すように、埋設鉄筋の自然電極電位および腐食状況観察ならびにコンクリート中の塩分含有量である。以下、各項目につき測定方法を説明する。

表-3.23 測定項目一覧

測定項目
1. 自然電極電位 — 電位モニター用鉄筋— (暴露期間中経時的に)
2. 腐食状況観察(発錆面積率の算定) — 主鉄筋、電位モニター用鉄筋—
3. コンクリート中の塩分含有量

a) 自然電極電位

図-3.17に自然電極電位の測定方法の概要を示す。参照電極(銀-塩化銀電極)を海水で湿らせた布を介して測定対象の電位モニター用鉄筋の直上のコンクリート表

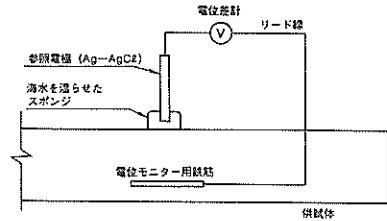


図-3.17 自然電極電位の測定方法

面に押し当てた状態で電位の測定を行った。また、測定を行う前に、コンクリートに海水を散布しコンクリートを湿らせた状態で測定を行った。

b) 埋設鉄筋の腐食状況の観察

試験方法は3.1.2と全く同様である。腐食状況の評価値として発錆面積率を求めた。

c) コンクリート中の塩化物含有量

塩分定量用試料の採取箇所(図-3.12参照)および塩分定量方法は3.1.2と全く同様である。

3. 2. 3 実験の結果

(1) 自然電極電位

図-3.18および図-3.19に暴露期間中の電位モニター用鉄筋の自然電極電位の経時変化の一例を示す。測定された電位は各供試体ごとに差異があるものの総じて貴(-100~-400mV)である。また、いずれの供試体の場合も暴露期間中に大きく変動する傾向はない。また、表-3.24~表-3.26に、自然電極電位の測定値の分散分析結果を示す。表-3.24に示す端部に位置する電位モニター

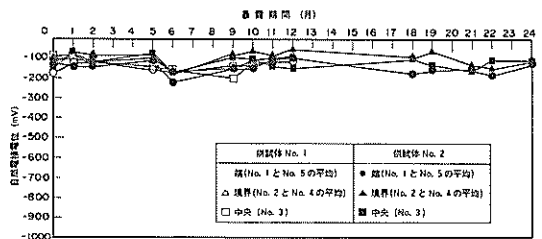


図-3.18 埋設鉄筋の自然電極電位の経時変化(一体構造)

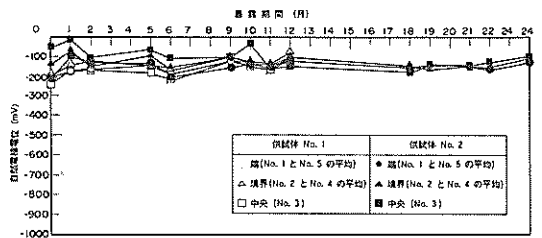





図-3.19 埋設鉄筋の自然電極電位の経時変化(ケース4)

表一3.24 自然電極電位の分散分析結果
—— 電位モニター用鉄筋(端部) ——

暴露期間(月)	断面修復	表面処理	練りませ水
0	0.54	0.00	2.82
1	0.08	0.99	5.71
2	0.01	0.33	0.39
5	2.04	1.37	0.03
6	0.94	1.42	0.02
9	0.67	5.95	1.24
10	0.42	6.57	1.74
11	0.17	2.99	2.14
12	0.17	2.99	2.14
18	0.16	7.70	2.61
19	2.21	7.40	0.23
21	0.14	4.29	0.26
22	0.87	3.13	0.09
24	0.12	4.09	0.05


$F(1,3; 0.05) = 10.1$ 


$F(1,3; 0.01) = 34.1$ 


$\frac{1}{2}[F(1,3; 0.05)] = 5.05$ 

表一3.25 自然電極電位の分散分析結果
—— 電位モニター用鉄筋(境界部) ——

暴露期間(月)	鉄筋処理	断面修復	表面処理	練りませ水
0	0.29	0.00	0.02	2.05
1	0.27	0.00	5.21	12.00
2	0.86	0.18	2.19	4.24
5	0.57	0.18	0.19	1.30
6	0.47	0.03	2.65	3.49
9	0.05	0.02	3.51	5.25
10	0.47	0.02	2.17	5.18
11	0.07	0.05	1.28	3.87
12	0.19	0.17	1.60	3.45
18	0.12	0.05	3.42	3.48
19	0.01	0.00	2.09	1.52
21	0.02	0.27	2.51	2.48
22	0.99	0.45	0.79	2.27
24	0.00	0.00	2.53	2.70


$F(1,3; 0.05) = 10.1$ 


$F(1,3; 0.01) = 34.1$ 


$\frac{1}{2}[F(1,3; 0.05)] = 5.05$ 

表一3.26 自然電極電位の分散分析結果
—— 電位モニター用鉄筋(中央部) ——

暴露期間(月)	鉄筋処理	断面修復	表面処理	練りませ水
0	2.61	0.73	0.82	0.06
1	4.06	2.40	10.92	4.97
2	5.46	0.43	7.84	1.16
5	2.12	0.04	2.75	3.19
6	5.87	0.08	5.94	0.01
9	0.75	0.03	10.60	2.48
10	0.38	0.10	12.35	8.22
11	0.00	0.03	3.09	1.68
12	1.40	0.64	4.41	1.58
18	1.78	0.09	8.42	0.06
19	0.49	0.21	2.40	0.12
21	1.82	0.25	3.39	0.10
22	0.77	0.19	3.83	0.00
24	1.39	0.31	2.77	0.05

$F(1,3; 0.05) = 10.1$ 

$F(1,3; 0.01) = 34.1$ 

$\frac{1}{2}[F(1,3; 0.05)] = 5.05$ 

用鉄筋の場合は「表面処理」に、表一3.25に示す境界部に位置する電位モニター用鉄筋の場合は「練りませ水」に弱いながらも有意差が認められるが、暴露期間を通じてその有意差が認められる訳ではなく、明確な傾向とは言い難い。表一3.26に示す中央部に位置する電位モニター用鉄筋の場合、「表面処理」に有意差が認められる。しかしこの場合も、暴露期間を通じてそれが続く訳ではない。

(2) 埋設鉄筋の発錆面積率

表一3.27～表一3.30に主鉄筋および電位モニター用鉄筋の暴露1年時および2年時における発錆面積率を示す。表一3.27および表一3.28に示す主鉄筋について暴露1年時と暴露2年時を比較してみる。端部(フック部)について見ると、2年時よりも1年時の方が発錆面積率が大きくなっているケースが多い。

これは、供試体間のばらつきによる誤差に加えて、この部分の発錆は暴露開始から1年の間に多く進むためと考えられる。すなわち、図一3.20に示す鉄筋腐食の進行状況の概念図において、曲線(2)のような腐食進行になるものと考えられる。一方、中央部においては2年時の方が1年時よりもかなり大きな値を示している。このことより、中央部においては暴露1年までより、1年から2年

表一3.27 埋設鉄筋の発錆面積率
——主鉄筋、暴露1年時—— (%)

ケース番号 (供試体 No.)	端 部 (フック部)	中央部	全 体
無補修 (0-1')	11.5	56.6	28.6
一体構造 (0-1)	9.7	10.5	10.0
1 (1-1)	5.8	9.9	7.4
2 (2-1)	23.2	11.7	18.8
3 (3-1)	17.4	9.6	14.4
4 (4-1)	4.8	1.9	3.7
5 (5-1)	10.4	5.6	8.6
6 (6-1)	4.2	1.6	3.2
7 (7-1)	8.2	1.6	5.7
8 (8-1)	18.1	8.4	14.4

表一3.29 埋設鉄筋の発錆面積率
——電位モニター用鉄筋、暴露1年時——

ケース番号 (供試体 No.)	No. 1 (端)	No. 2 (境界)	No. 3 (中央)	No. 4 (境界)	No. 5 (端)
無補修 (0-1')	0	2.0	2.5	6.3	0
一体構造 (0-1)	0	0	0	0	0
1 (1-1)	0	0	0	0	0
2 (2-1)	1.2	27.8	64.6	7.4	3.7
3 (3-1)	1.0	31.1	12.5	3.5	1.7
4 (4-1)	0	0	0	0	0
5 (5-1)	7.8	9.2	1.7	2.9	9.3
6 (6-1)	0	0	0	0	0
7 (7-1)	1.3	1.9	0.5	0.9	30.4
8 (8-1)	1.2	3.6	7.6	12.7	0.8

表一3.28 埋設鉄筋の発錆面積率
——主鉄筋、暴露2年時—— (%)

ケース番号 (供試体 No.)	端 部 (フック部)	中央部	全 体
無補修 (0-2')	6.18	34.11	28.33
一体構造 (0-2)	1.04	0.29	0.44
1 (1-2)	0.98	9.71	7.90
2 (2-2)	17.82	12.83	13.86
3 (3-2)	35.25	24.86	27.01
4 (4-2)	1.17	16.43	13.27
5 (5-2)	22.76	19.18	19.92
6 (6-2)	1.89	13.29	10.93
7 (7-2)	0.78	3.84	3.20
8 (8-2)	10.60	5.14	6.27

表一3.30 埋設鉄筋の発錆面積率
——電位モニター用鉄筋、暴露2年時——

ケース番号 (供試体 No.)	No. 1 (端)	No. 2 (境界)	No. 3 (中央)	No. 4 (境界)	No. 5 (端)
無補修 (0-2')	3.52	16.39	1.82	14.93	0
一体構造 (0-2)	1.20	1.21	1.21	1.94	2.79
1 (1-2)	0	1.21	1.21	1.21	2.91
2 (2-2)	11.17	5.34	1.82	2.91	0
3 (3-2)	3.76	7.65	6.92	3.04	4.49
4 (4-2)	1.21	0	1.21	0	0
5 (5-2)	3.28	17.61	5.34	19.43	13.60
6 (6-2)	0.24	0.24	0.73	0.24	0.24
7 (7-2)	22.22	2.79	58.52	0	4.37
8 (8-2)	1.46	4.61	10.68	11.53	15.42

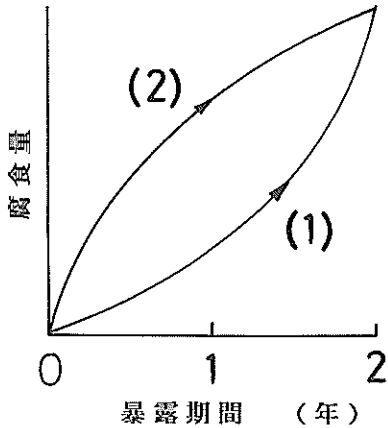


図-3.20 鉄筋腐食の進行状況の概念図

にかけて発錆が多く進むものと考えられる。すなわち、図-3.20において曲線(1)のような腐食進行になるものと考えられる。

次に、表-3.29および表-3.30に示す電位モニター用鉄筋について暴露1年時と2年時を比較してみる。一部の鉄筋（例えば、ケース2とケース3）においては2年時の方が1年時よりも小さくなっているが、これは、測定値のバラツキによるものであり、この場合は1年から2年にかけて発錆がさほど進行しなかったものと解釈される。しかしながら、全体的にみると、1年時より2年時の方が発錆面積率は大きくなっており、暴露1年から2年にかけて発錆が進行していることが伺える。

また、表-3.31、表-3.32に発錆面積率の分散分析結果を示す。表-3.31に示す主鉄筋の場合、フック部の発錆面積率に対して「練りませ水」に有意差が認められる。すなわち、母材コンクリート中に塩分が含まれていると、補修部分ではなく、端部（フック部）が発錆する。この傾向は3.1で述べた実験Ⅲにおいても同様の傾向が見られた。すなわち、塩分を含んだ母材コンクリート部がアノード、塩分を含まない補修部分がカソードとなるマクロセル腐食が生じるためである。一方、「鉄筋処理」、「断面修復」、「表面処理」の有意差はほとんど認められない。

表-3.32に示す電位モニター用鉄筋の場合は暴露1年時に境界部に位置する鉄筋、暴露2年時に中央部に位置する鉄筋に「練りませ水」の有意差が認められる。また、主鉄筋の場合と同様に、「鉄筋処理」、「断面修復」、「表面処理」の有意差はほとんど認められない。主鉄筋の場合も電位モニター用鉄筋の場合も、総じて「練りませ水」すなわち「母材コンクリート中の塩分の有無」が支配要因であり、その他の3要因にはほとんどその有意差が認められなかった。

表-3.31 分散分析結果

——主鉄筋の発錆面積率——

		鉄筋処理	断面修復	表面処理	練りませ水
暴露1年	端（フック）	0.59	0.13	0.40	11.88
	中央	3.11	0.66	0.12	5.07
	全体	1.42	0.00	0.15	12.13
暴露2年	端（フック）	0.79	0.04	1.71	14.25
	中央	0.83	0.04	0.16	0.58
	全体	0.86	0.01	0.34	1.83

$$F(1,3; 0.05) = 10.1$$

$$F(1,3; 0.01) = 34.1$$

$$\frac{1}{2}[F(1,3; 0.05)] = 5.05$$

表-3.32 分散分析結果

——電位モニター用鉄筋の発錆面積率——

		鉄筋処理	断面修復	表面処理	練りませ水
暴露1年	端 (No.1と5の平均)	1.03	1.09	1.28	3.00
	境界 (No.2と4の平均)	0.85	1.81	0.85	14.11
	中央 (No.3)	1.39	0.66	0.85	1.96
暴露2年	端 (No.1と5の平均)	2.36	0.78	1.05	0.82
	境界 (No.2と4の平均)	1.53	1.73	1.23	0.51
	中央 (No.3)	2.06	0.58	1.32	7.37

$$F(1,3; 0.05) = 10.1$$

$$F(1,3; 0.01) = 34.1$$

$$\frac{1}{2}[F(1,3; 0.05)] = 5.05$$

(3) コンクリート中の塩分含有量

表-3.33に塩分含有量の測定結果を、また表-3.34にその分散分析結果を示す。表-3.34によると、「練りませ水」に有意差が認められるが、暴露2年時では暴露1年時の時に比べてそれは低下する。これは暴露期間中に供試体中に外部から徐々に海水が浸入していることを示している。また、「鉄筋処理」、「断面修復」、「表面処理」の有意差はほとんど見られない。3.1で述べた実験Ⅲの場合は「表面処理」の有意差が顕著に認められたが、本実験Ⅳの場合はその有意差がほとんど認められないのが特徴である。

表-3.33 コンクリート中の塩分含有量
(可溶性)

ケース番号	暴露1年時	暴露2年時
無補修	0.197	0.058
一体構造	0.020	0.048
1	0.010	0.019
2	0.158	0.145
3	0.167	0.179
4	0.019	0.020
5	0.107	0.130
6	0.030	0.020
7	0.010	0.145
8	(0.040)	0.100

(対モルタル重量パーセント)

表-3.34 分散分析結果
—— コンクリート中の塩分含有量 ——

	鉄筋処理	断面修復	表面処理	練り ませ水
暴露1年時	1.71	0.29	0.15	9.95
暴露2年時	0.04	0.68	1.45	4.92

$$F(1,3; 0.05) = 10.1$$

$$F(1,3; 0.01) = 34.1$$

$$\frac{1}{2}[F(1,3; 0.05)] = 5.05$$

3. 2. 4 総括

表-3.35に実験結果を総括する。これを見ると、全体を通じて、試験データの支配要因は「練りませ水」であることがわかる。しかし、その影響度合いはさほど大きなものではない。他方、「鉄筋処理」、「断面修復」、「表面処理」の有意差はほとんど認められなかった。すなわち、異なる8ケースの補修の効果に差異はないといえる。最も重要と思われるのは、「表面処理」に有意差が認められないことである。本実験IVでは補修後の供試体にひびわれを導入していない。これより、補修後の部材にひびわれが発生しない場合は表面処理を実施することの必要性は低下してくるものと思われる。

3. 3 ひびわれを導入した供試体の海洋環境暴露試験

本項において述べる実験は、図-1.2で示すところの実験Vに相当する。

3. 3. 1 実験の概要

本項においては、鉄筋塗装、コンクリート断面の修復、

表-3.35 試験結果の総括 (実験IV)

	鉄筋 処理	断面 修復	表面 処理	練り ませ水
発錆面積率				○
鉄筋位 モニター 用(端)	自然電極電位			
	発錆面積率			
鉄筋位 モニター 用(境界)	自然電極電位			
	発錆面積率			△
鉄筋位 モニター 用(中央)	自然電極電位		△	
	発錆面積率			△
塩分含有量				△

○：有意差あり

△：弱いながらも有意差あり

コンクリート表面の被覆という3工程により補修を行ったRCはり供試体において実施した海洋環境暴露試験の結果について述べる。なお、供試体に対しては、補修後にひびわれの導入を行った。これは実構造物において補修後に上載荷重などによりひびわれが生じる場合を想定している。

3. 3. 2 実験の方法

(1) 供試体の形状、寸法

図-3.21に供試体の形状、寸法を示す。供試体の外寸は15×30×200cmの角柱型供試体であり、予めはりの中央部に長さ50cm、高さ7.5cmの切り欠き部を設けておき、その部分に補修を施したものである。供試体内部には主鉄筋および電位モニター用鉄筋が埋設されている。いずれも、鉄筋はSD30、D16(異型鉄筋)である。主鉄筋は供試体底面からのかぶりか67mm、側面からのかぶりか42mmの位置に2本埋設されている。また、電位モニター用鉄筋は長さ20cmであり、底面および側面からのかぶりか67mmの位置に5本埋設されている。自然電極電位を測定するために、主鉄筋および電位モニター用鉄筋にはリード線が接続されている。

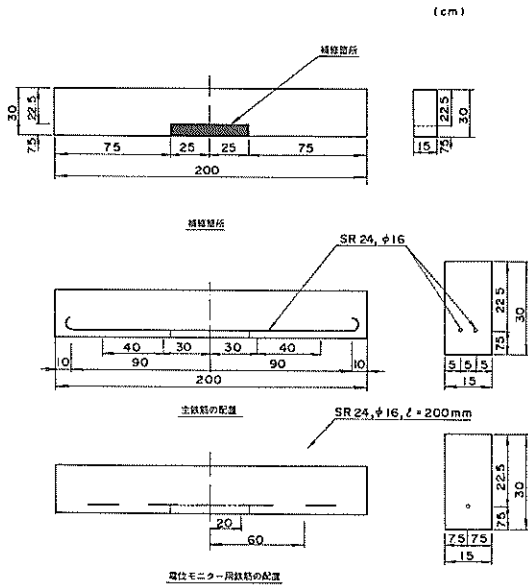


図-3.21 供試体の形状、寸法

(2) コンクリート用材料および配合

コンクリートの製作に使用した材料は3.1.2で述べたものと全く同様である。(表-3.2, 表-3.3参照)

(3) 補修材料

本実験で用いた補修材料は、鉄筋塗装材、コンクリートの断面修復材、コンクリートの表面処理材のいずれも3.1.2で述べたものと同一のものである。

(4) 供試体製作の手順

供試体製作の手順は3.1.2で述べた方法と全く同様である。(図-3.3参照) 図-3.22に表面被覆を実施した部分を示す。側面および底面について処理を行い、上面は無処理とした。

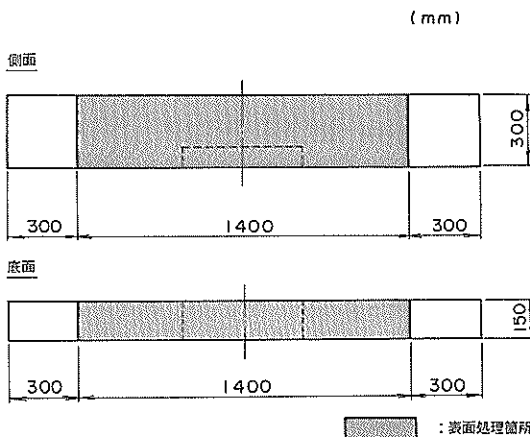


図-3.22 表面被覆箇所

(5) 供試体へのひびわれの導入

上に示した手順で補修を行い、表面処理材料が十分、硬化、接着した後に曲げ載荷によりひびわれを導入した。図-3.23に、曲げ載荷方法の概要を示す。支点間距離180cm、載荷点間距離60cmの3等分点載荷とした。また、載荷時の最大荷重は前出の(1)式より求めた計算破壊荷重の3分の1とした。なお、計算に用いた各数値を表-3.36に示す。

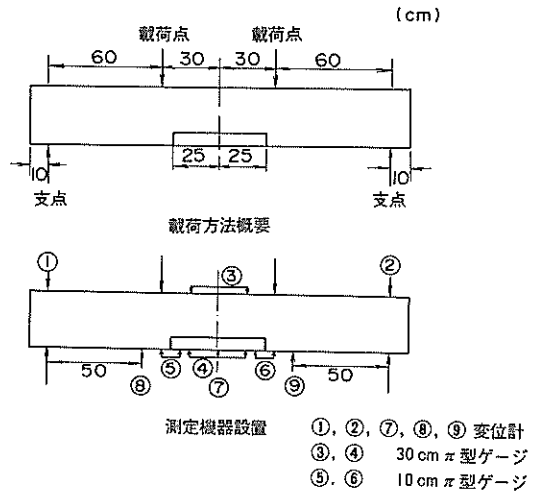


図-3.23 曲げ載荷方法 (ひびわれ導入)

表-3.36 荷重計算に用いた数値

A_s	3.972 (cm ²)
f_y	3752 (kgf/cm ²)
d	22.5 (cm)
p	0.0118
f_c'	(水道水練り) (kgf/cm ²) (海水練り)

載荷により導入されたひびわれ幅の最大値(載荷時および除荷時)を表-3.37に示す。これらのひびわれの発生はいずれも母材コンクリートと断面修復材との境界部分であった。表-3.38にこれらのひびわれ幅の分散分析結果を示す。3.1で述べた実験IIIの場合と全く同様に「表面処理」の有意差が顕著である。表-3.37を見ると、表面処理を施していない場合は除荷時最大残留ひびわれ幅が0.1mm以上になるが、表面処理を施していればいずれも0.1mm以下である。これより今回実施した表面被覆にはひびわれ幅を小さくする効果があることがわかる。また、「表面処理」ほど顕著ではないが、「鉄筋処理」にもその有意差が認められる。載荷時の最大ひびわれ幅につ

表-3.37 曲げ載荷により導入したひびわれ幅

	最大荷重 (tf)	載荷時最大ひびわれ幅 (mm)	除荷時最大残留ひびわれ幅 (mm)
0-1	3.50	0.255	0.109
2	3.50	0.150	0.068
1-1	3.49	0.340	0.145
2	3.56	0.342	0.148
2-1	3.49	0.239	0.097
2	3.50	0.211	0.067
3-1	3.49	0.342	0.170
2	3.49	0.330	0.158
4-1	3.50	0.193	0.084
2	3.49	0.156	0.048
5-1	3.48	0.386	0.150
2	3.51	0.416	0.174
6-1	3.50	0.282	0.096
2	3.51	0.323	0.114
7-1	3.49	0.367	0.119
2	3.49	0.410	0.128
8-1	3.49	0.266	0.080
2	3.52	0.267	0.072

表-3.38 ひびわれ幅の分散分析結果

	鉄筋処理	断面修復	表面処理	練りませ水
載荷時最大ひびわれ幅	9.24	0.72	41.51	0.72
除荷時最大残留ひびわれ幅	0.12	1.04	16.62	0.46

$F(1,3;0.05)=10.1$

$F(1,3;0.01)=34.1$

$\frac{1}{2}[F(1,3;0.05)]=5.05$

いてのみであるが、鉄筋処理を実施している方がひびわれ幅は小さな値を示した。この傾向は、3.1で述べた実験IIIにおいても見られた。

(6) 供試体の暴露

補修を終え、ひびわれの導入を実施した供試体を港研構内の飛沫部シミュレーション装置に暴露した。この環境に20ヶ月間供試体を暴露した。(海水のスプレーは20ヶ月でトータル3650時間である) なお、供試体製作の各1ケースにつき供試体2体を準備したが、その内の1体については暴露12ヶ月で各種試験を実施し、残りの1体

については暴露20ヶ月を経過した時点で各種試験を実施した。

(7) 測定項目および測定方法

実施した測定および測定方法は3.2で述べた実験IVと全く同様である。なお、本実験Vの場合は主鉄筋の自然電極電位についても暴露期間中経時的に測定を行った。

3.3.3 実験の結果

(1) 自然電極電位

図-3.24および図-3.25に暴露期間中の自然電極電位の経時変化の一例を示す。各供試体ごとに、測定された電位の値には若干の差があるが、全体的には貴な値(最も卑な場合でも-400mV程度)である。また、いずれの場合も、暴露期間を通じて大きく変動する傾向は認められなかった。

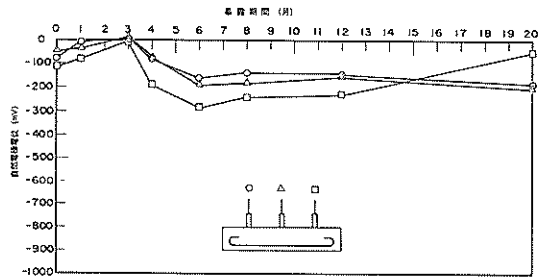


図-3.24 埋設鉄筋の自然電極電位の経時変化(ケース4, 4-2, 主鉄筋)

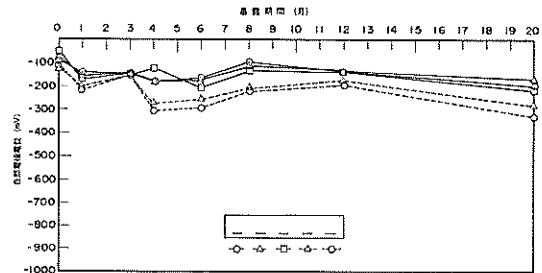


図-3.25 埋設鉄筋の自然電極電位の経時変化(ケース4, 4-2, 電位モニター)

表-3.39~表-3.42に自然電極電位の分散分析結果を示す。表-3.39に示す主鉄筋についてみると、「表面処理」および「練りませ水」の有意差が認められる。また、その影響度合いは暴露期間が長くなるほど顕著になっている。一方、「鉄筋処理」および「断面修復」に有意差は認められない。

表-3.40に示す端部に位置する電位モニター用鉄筋の場合、4つの要因のいずれの有意差も認められない。ま

た、表-3.41および表-3.42に示す境界部および中央部に位置する電位モニター用鉄筋についてみると、「表面処理」の有意差が認められる。しかしながら、その他の3要因の有意差はほとんど認められない。

主鉄筋についても電位モニター用鉄筋についても、「表面処理」の有意差が比較的大きくでた。これは実験Ⅲの場合も同様であったが、補修後の供試体にひびわれを導入していることがその原因であると考えられる。すなわち、補修後の供試体にひびわれが生じても、コンクリートの表面処理がある場合はない場合に比べて、外部からのコンクリート中への海水（塩素イオン）の浸入が抑制

されているものと考えられる。

(2) 埋設鉄筋の発錆面積率

表-3.43～表-3.46に主鉄筋および電位モニター用鉄筋の暴露12ヶ月時および20ヶ月時における発錆面積率を示す。全体的に見ると、主鉄筋、電位モニター用鉄筋ともに暴露12ヶ月時よりも20ヶ月時の方が発錆面積率は大きくなっており、経時的に埋設鉄筋の発錆が進んでいることが伺える。

表-3.47および表-3.48に発錆面積率の分散分析結果を示す。表-3.47に示す主鉄筋の場合、暴露12ヶ月時についてみると、「表面処理」の有意差が顕著に認められ

表-3.39 自然電極電位の分散分析結果
——主鉄筋——

暴露期間(月)	鉄筋処理	断面修復	表面処理	練りませ水
0	1.30	0.12	5.71	2.62
1	0.45	0.02	8.63	6.84
3	0.56	0.03	1.95	4.74
4	0.43	0.88	4.96	6.17
6	1.45	4.10	5.79	6.09
8	2.35	3.81	4.42	4.71
12	3.53	5.20	23.56	14.73
20	0.28	1.19	12.59	11.46

$F(1,3;0.05)=10.1$

$F(1,3;0.01)=34.1$

$\frac{1}{2}[F(1,3;0.05)]=5.05$

表-3.40 自然電極電位の分散分析結果

——電位モニター用鉄筋、
No.1とNo.5(端)の平均

暴露期間(月)	鉄筋処理	断面修復	表面処理	練りませ水
0	0.42	2.83	1.21	2.48
1	0.34	0.02	2.13	0.93
3	0.68	0.00	0.16	0.04
4	0.43	0.88	4.96	6.17
6	0.03	0.01	0.20	0.09
8	0.06	0.11	1.78	0.90
12	0.02	0.24	6.19	0.99
20	0.16	3.29	4.77	0.83

$F(1,3;0.05)=10.1$

$F(1,3;0.01)=34.1$

$\frac{1}{2}[F(1,3;0.05)]=5.05$

表-3.41 自然電極電位の分散分析結果

——電位モニター用鉄筋、
No.2とNo.4(境界)の平均

暴露期間(月)	鉄筋処理	断面修復	表面処理	練りませ水
0	1.80	0.01	5.05	3.64
1	27.24	11.70	112.63	28.29
3	0.20	0.34	0.54	1.45
4	0.00	0.33	1.47	0.89
6	1.90	9.28	12.13	0.02
8	0.02	1.71	8.52	1.02
12	0.09	1.08	10.78	2.92
20	0.89	1.70	4.44	0.01

$F(1,3;0.05)=10.1$

$F(1,3;0.01)=34.1$

$\frac{1}{2}[F(1,3;0.05)]=5.05$

表-3.42 自然電極電位の分散分析結果

——電位モニター用鉄筋、
No.3(中央)の平均

暴露期間(月)	鉄筋処理	断面修復	表面処理	練りませ水
0	0.82	0.02	3.42	1.92
1	12.37	16.67	129.02	26.35
3	3.19	0.29	1.13	2.71
4	0.85	0.30	8.33	2.80
6	0.02	2.56	6.98	0.03
8	0.07	4.29	11.76	3.10
12	0.06	1.27	7.62	1.43
20	1.55	3.58	12.38	0.16

$F(1,3;0.05)=10.1$

$F(1,3;0.01)=34.1$

$\frac{1}{2}[F(1,3;0.05)]=5.05$

表-3.43 埋設鉄筋の発錆面積率
——主鉄筋、暴露12ヶ月時—— (%)

ケース番号 (供試体 No.)	端部 (フック部)	中央部	全体
一体構造 (0-1')	0.45	0	0.14
	3.30	2.01	2.42
無補修 (0-1)	3.69	30.31	21.85
	1.43	31.71	22.09
1 (1-1)	2.91	4.53	4.02
	0.45	6.63	4.67
2 (2-1)	7.11	1.97	3.60
	7.72	3.41	4.78
3 (3-1)	1.82	3.01	2.63
	0.22	7.92	5.48
4 (4-1)	2.10	3.31	2.92
	4.79	0.68	1.98
5 (5-1)	2.55	8.13	6.36
	2.04	8.95	6.76
6 (6-1)	8.56	2.27	4.27
	3.25	3.34	3.31
7 (7-1)	1.79	6.31	4.87
	0.76	6.85	4.92
8 (8-1)	2.91	2.70	2.76
	7.30	2.75	4.20

表-3.44 埋設鉄筋の発錆面積率 (20ヶ月時)
——主鉄筋—— (%)

ケース番号	端部 (フック部)	中央部	全体
一体構造	8.3	2.2	29.8
	6.3	0.7	46.0
無補修	39.1	25.5	4.1
	74.9	32.5	2.5
1	13.80	8.7	10.3
	7.7	7.4	7.5
2	68.7	14.5	31.7
	25.5	1.0	8.8
3	24.4	8.9	13.9
	37.2	12.0	20.0
4	66.3	0.5	21.4
	53.8	0.4	17.4
5	19.3	13.3	15.2
	19.2	15.8	16.9
6	9.3	0.4	3.2
	44.4	3.7	16.6
7	84.8	22.1	42.1
	34.2	24.9	27.9
8	74.8	9.7	30.3
	43.6	9.2	20.1

表-3.45 埋設鉄筋の発錆面積率
——電位モニター用鉄筋、
暴露12ヶ月時—— (%)

ケース番号 (供試体 No.)	No. 1 (端)	No. 2 (境界)	No. 3 (中央)	No. 4 (境界)	No. 5 (端)
無補修 (0-1')	0	25.09	53.30	24.18	0
一体構造 (0-1)	0	0	0	0	0
1 (1-1)	0	0	21.70	19.60	0
2 (2-1)	0	4.67	6.59	3.48	5.31
3 (3-1)	7.33	38.28	25.18	22.53	1.28
4 (4-1)	0	0	3.66	0	0
5 (5-1)	5.68	12.73	18.68	20.70	0.37
6 (6-1)	0	0.73	4.67	0.64	0
7 (7-1)	0	20.15	6.59	37.09	0
8 (8-1)	0	7.88	0.18	13.92	0

表-3.46 埋設鉄筋の発錆面積率 (20ヶ月時)
——電位モニター筋—— (%)


ケース番号 (供試体 No.)	No. 1 (端)	No. 2 (境界)	No. 3 (中央)	No. 4 (境界)	No. 5 (端)
無補修 (0-2')	0	21.0	53.2	24.4	2.0
一体構造 (0-2)	0	0	0	0	0
1 (1-2)	0	12.5	0	18.5	0
2 (2-2)	1.5	12.4	3.6	2.7	7.8
3 (3-2)	1.6	6.7	52.0	26.2	11.7
4 (4-2)	0	0	0	0	15.2
5 (5-2)	7.4	30.1	19.4	15.8	12.8
6 (6-2)	0	0	0	0	0
7 (7-2)	0	46.1	66.5	26.7	6.4
8 (8-2)	0	29.5	6.4	14.5	0


る。しかしながら、暴露20ヶ月時においては、「表面処理」に有意差は認められない。また、「鉄筋処理」「断面修復」について暴露12ヶ月時に弱いながらもその有意差があるが、暴露20ヶ月時においてはその有意差は認められない。表-3.48に示す電位モニター用鉄筋の場合、暴露12ヶ月時に境界部および中央部に位置する鉄筋について「表面処理」の有意差が認められる。しかしながら、暴露20ヶ月においては、その有意差も認められなくなる。


表-3.47 分散分析結果

— 主鉄筋の発錆面積率 —

		鉄筋 処理	断面 修復	表面 処理	練り ませ水
暴露 12 ヶ月	端 (フック)	0.18	6.94	40.66	2.08
	中 央	5.34	1.78	56.6	1.34
	全 体	6.92	8.18	18.15	4.01
暴露 20 ヶ月	端 (フック)	0.15	6.44	3.08	0.00
	中 央	1.86	2.47	4.85	0.24
	全 体	0.72	2.90	0.01	0.05

$F(1,3; 0.05) = 10.1$ 

$F(1,3; 0.01) = 34.1$ 

$\frac{1}{2}[F(1,3; 0.05)] = 5.05$ 

(3) 供試体中の塩分含有量

表-3.49に、暴露12ヶ月時および20ヶ月時におけるコンクリート中の塩分含有量の測定結果を示す。また、表-3.50にその分散分析結果を示す。これによると、暴露12ヶ月時においても20ヶ月時においても「練りませ水」に有意差が認められる。しかしながら、暴露12ヶ月時の方が暴露20ヶ月時に比べてその影響度合いが大きい。これは暴露期間が長くなると、徐々に供試体中への海水（塩素イオン）の浸入が進んでいることを示している。その他の3要因の有意差は暴露12ヶ月時においても暴露20ヶ月時においてもほとんど認められない。

3. 3. 4 総括


表-3.51に実験Vの試験結果を総括する。主鉄筋および境界部、中央部に位置する電位モニター用鉄筋については「表面処理」の有意差が顕著であった。これは、先にも述べたが、補修後のひびわれの存在によるところが大きい。


一方、「練りませ水」の影響はコンクリート中の塩分含有量についてその有意差が認められるが、埋設鉄筋の発錆状況に関してはその影響は現れなかった。これは3. 1および3. 2で述べた実験IIIおよび実験IVの結果とは異なるものであった。この原因の1つとして供試体端部のコ

表-3.48 分散分析結果

— 電位モニター用鉄筋の発錆面積率 —

		鉄筋 処理	断面 修復	表面 処理	練り ませ水
暴露 12 ヶ月	端	1.19	0.14	1.67	7.62
	境 界	0.66	5.10	19.97	2.16
	中 央	3.93	1.38	17.52	1.06
暴露 20 ヶ月	端	0.15	0.03	0.28	0.54
	境界	2.71	1.29	5.93	0.46
	中 央	0.39	3.03	4.78	0.06

$F(1,3; 0.05) = 10.1$ 

$F(1,3; 0.01) = 34.1$ 


$\frac{1}{2}[F(1,3; 0.05)] = 5.05$ 


表-3.49 コンクリート中の塩分含有量 (可溶性)


ケース番号	暴露12ヶ月時	暴露20ヶ月時
無補修	0.030	0.020
一体構造	0.020	0.040
1	0.010	0.020
2	0.069	0.087
3	0.079	0.149
4	0.010	0.020
5	0.089	0.145
6	0.020	0.039
7	0.059	0.059
8	0.129	0.078


表-3.50 分散分析結果

— コンクリート中の塩分含有量 —

		鉄筋 処理	断面 修復	表面 処理	練り ませ水
暴露 12ヶ月時		9.94	4.76	0.06	42.88
暴露 20ヶ月時		0.42	0.02	3.77	18.25

$F(1,3; 0.05) = 10.1$ 

$F(1,3; 0.01) = 34.1$ 

$\frac{1}{2}[F(1,3; 0.05)] = 5.05$ 

ンクリートの含水量が比較的少なかったことが考えられる。鉄筋腐食に影響をおよぼす塩素イオンはコンクリートの細孔溶液中に溶出しているものであるが、コンクリートが乾燥していると、この細孔溶液中の塩素イオンが

表-3.51 試験結果の総括 (実験V)

		鉄筋 処理	断面 修復	表面 処理	練り ませ水
主 鉄 筋	自然電極電位			○	○
	発錆面積率	△	△	○	
鉄筋 位モ ニタ ー用 (端)	自然電極電位				
	発錆面積率				
鉄筋 位モ ニタ ー用 (境界)	自然電極電位			○	
	発錆面積率			○	
鉄筋 位モ ニタ ー用 (中央)	自然電極電位			○	
	発錆面積率			○	
塩分含有量					○

○：有意差あり

△：弱いながらも有意差あり

少なくなる。本暴露試験場は直射日光を受け易い場所であるため、供試体が比較的乾燥していたと考えられるが、明確ではない。

また、主鉄筋の発錆面積率について「鉄筋処理」および「断面修復」の有意差がわずかに認められるが明確ではない。電位モニター用鉄筋についてはこの両者の有意差は全く認められなかった。

3.4 考 察

3.4.1 鉄筋塗装およびコンクリートの断面修復の補修効果

参考文献4), 5)において取りまとめた実験IIおよび本文の3.1~3.3において取りまとめた実験III~実験Vの結果を見ると、鉄筋処理、コンクリートの断面修復、コンクリートの表面被覆の3工程により補修を行った場合、「鉄筋処理(アルキッド樹脂)の有無」、「断面修復材料の違い」がはり(供試体)の補修効果に及ぼす影響はほとんど認められなかった。

今回の実験で用いた断面修復材料は前述したとおり、無収縮セメントモルタルとSBRセメントモルタルであ

る。表-3.4にこの両者の基本的物性値を示しているが、強度、弾性係数で両者でかなりの差がある。しかしながら、この両者の違いがはり(供試体)の補修効果に及ぼす影響はほとんど認められなかった。曲げ載荷の際のひびわれ発生荷重がこの両者で差がなかったことより、この両者で母材コンクリートとの付着性に差がなかったことが推察されるが、このために両者で補修効果に差異が認められなかったものと考えられる。

参考文献4), 5)で取りまとめた実験Iの中で著者らは物性の大幅に異なる7種類の断面修復材料を用いて補修を行ったはり(供試体)について、腐食促進試験を行った結果、その補修効果にはほとんど差が認められなかったことを報告している。はり(供試体)の補修効果を決定するのはむしろ、補修後のはり(供試体)にひびわれが生じるかどうかである。すなわち、断面修復材料の選定にあたって留意すべきは母材コンクリートとの付着性の良否であると考えられる。

3.4.2 コンクリートの表面処理の補修効果

主鉄筋の発錆面積率および中央部および境界部に位置する電位モニター用鉄筋の発錆面積率に着目して「コンクリートの表面処理」の効果について考察する。表-3.52にその結果をまとめる。分散分析の結果が上側5%確率を超える場合は有意差あり(○)、上側確率5%のF値の2分の1を越える場合は弱いながらも有意差あり(△)、そして上側5%確率のF値の2分の1に満たない場合は有意差なしと判断した。表より明らかとなり、表面処理の有意差を左右するのは供試体にひびわれがあるかどうかである。はり(供試体)にひびわれが生じる場合は「表面処理」の有意差が顕著であるが、ひびわれが生じない場合はその有意差はほとんどなくなる。逆にいえば、補修後の部材にひびわれが生じる可能性がある場合は表面処理が必須となる。他方、補修後の部材にひびわれが生じる危険性がない場合は表面処理の持つ効果は相対的に小さなものとなる。先にも述べたが、今回用いたコンクリートの表面処理材はひびわれ追従性に優れたものである。このことより、表面処理材の選定にあたってはひびわれ追従性に優れた材料を選定することが重要であるものと考えられる。

3.4.3 母材コンクリート中の塩分の有無の影響

主鉄筋の発錆面積率、中央部および端部に位置する電位モニター用鉄筋の発錆面積率に着目して「母材コンクリート中の塩分の有無」の効果について考察する。表-3.53にその結果をまとめる。なお、表中の記号は前項3.4.2において述べた定義に従っている。この表より、大きく2つの傾向を読み取ることができる。1つは、母材

表一3.52 コンクリート表面処理の効果

				暴露試験					
				ひびわれなし			ひびわれあり		
				実験 IV			実験 V		
				主鉄筋	電位モニター用鉄筋 (中央)	電位モニター用鉄筋 (境界)	主鉄筋	電位モニター用鉄筋 (中央)	電位モニター用鉄筋 (境界)
促進試験	ひびわれなし	実験 II	主鉄筋	×	×				
			電位モニター用鉄筋 (中央)	×		×			
			電位モニター用鉄筋 (境界)		×				
	ひびわれあり	実験 III	主鉄筋				○	○	
			電位モニター用鉄筋 (中央)				△		○
			電位モニター用鉄筋 (境界)					△	

○：有意差あり
 △：弱いながらも有意差あり
 ×：有意差認められず

表一3.53 母材コンクリート中の塩分の有無の効果

				暴露試験							
				ひびわれなし				ひびわれあり			
				実験 IV				実験 V			
				主鉄筋 (全体)	主鉄筋 (端部)	電位モニター用鉄筋 (中央)	電位モニター用鉄筋 (端部)	主鉄筋 (全体)	主鉄筋 (端部)	電位モニター用鉄筋 (中央)	電位モニター用鉄筋 (端部)
促進試験	ひびわれなし	実験 II	主鉄筋 (全体)	○	○						
			主鉄筋 (端部)	○		△	×				
			電位モニター用鉄筋 (中央)		×						
			電位モニター用鉄筋 (端部)		×						
	ひびわれあり	実験 III	主鉄筋 (全体)				×	△			
			主鉄筋 (端部)				○		×	×	
			電位モニター用鉄筋 (中央)					×			
			電位モニター用鉄筋 (端部)						○		

○：有意差あり
 △：弱いながらも有意差あり
 ×：有意差認められず

コンクリート中の塩分の有無は電位モニター用鉄筋よりも主鉄筋の方に大きな影響を及ぼしているという点である。すなわち、前にも述べたが母材コンクリート中に塩分が存在すると、母材コンクリートの部分がアノード、補修部がカソードとなるマクロセル腐食が生じるため補修部分よりもむしろ補修部分の周囲の鉄筋が発錆する結果となる。

2つ目は、暴露試験よりもむしろ促進試験の方が母材コンクリート中の塩分の有無の影響を受けるという点である。両者の大きな相違点は供試体のコンクリート中の含水量である。促進試験に供している供試体の方が暴露試験に供している供試体に比べて、海水中に没している時間が長くなるので必然的にコンクリート中の含水量は大きくなる。このため、母材コンクリート中の塩分がコンクリート中の細孔溶液に流出し易い状況となり、結果的に鉄筋腐食に及ぼす影響が大きくなったものと考えられる。

ここで、栈橋上部コンクリート工について考えてみる。はり部材も床版部材もそのコンクリートは波しぶきの影響を受けて常時高い含水状態に置かれている。したがって、本文で対象としている栈橋上部コンクリートは、一連の試験中の暴露試験よりもむしろ促進試験に近い状況であると考えられ、母材(旧)コンクリート中の塩分の影響を受けやすいものと推察される。

4. コンクリートのひびわれ注入の補修効果に関する実験

本章で述べる実験は、図-1.2で示すところの実験VIに相当する。

4.1 実験の概要

本章で述べる実験は、コンクリートのひびわれ注入補修による内部鉄筋の防錆効果を検討することを目的として実施した。ひびわれ注入による補修を実施したRCはりの腐食促進試験を行い、内部鉄筋の腐食状況を調べた。また、同時に数種の電気化学的測定を取り行い、その有効性についても考察を行った。

4.2 実験の方法

4.2.1 供試体の形状、寸法

供試体は2種類ある。図-4.1に供試体の形状、寸法を示す。外寸はいずれも、15×15×80cmの角柱型供試体である。一方は、フックを有するSD40、D13の異型鉄筋がかぶり厚さ6.85cmの位置に埋設されている。もう一方は、フックを有するSD40、D16の異型鉄筋がかぶり厚さ2.85cmの位置に埋設されている。いずれの場合も、電気化学的計測を実施するために、鉄筋にリード線が接続

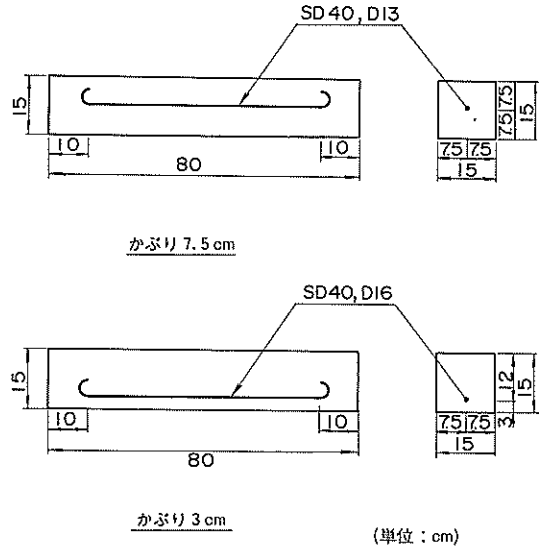


図-4.1 供試体の形状、寸法(実験VI)

表-4.1 供試体の一覧

	供試体 No.	ひびわれの状態	注入材の種類
D13シリーズ	13-1	曲げひびわれ導入	注入せず
	13-2	ひびわれ無し	
	13-3	割裂ひびわれ導入	注入せず
	13-4	"	"
	13-5	"	注入材 I
	13-6	"	"
	13-7	"	注入材 II
	13-8	"	"
D16シリーズ	16-1	曲げひびわれ導入	注入せず
	16-2	ひびわれ無し	
	16-3	割裂ひびわれ導入	注入せず
	16-4	"	"
	16-5	"	注入材 I
	16-6	"	"
	16-7	"	注入材 II
	16-8	"	"

されている。

4.2.2 供試体の一覧

表-4.1に供試体の一覧を示す。D13シリーズが8体、D16シリーズが8体の計16体である。供試体へのひびわれの導入方法は、「曲げ」によるものと「割裂」によるものの2種類がある。この両者の方法については後述する。両シリーズとも供試体No.1が曲げによりひびわれの導入を行ったものである。これには、ひびわれ注入材の注入は行っていない。供試体No.2はひびわれの導

表-4.2 コンクリートの配合

Gmax (mm)	Slump (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)					
					W	C	G	S	減水剤	AE 剤
20	8±2.5	4±1	60	46	165	275	1020	852	5.5	1.0

表-4.3 使用コンクリートの品質

スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)
6.5	4.7	326	2.41×10 ⁵	24.6
		314	2.38×10 ⁵	23.8
		318	2.26×10 ⁵	26.2
		332	2.28×10 ⁵	23.8
		323	2.33×10 ⁵	24.6

入を行っていない健全なものである。また、No. 3からNo. 8まではすべて割裂によりひびわれの導入を行った。そのうち、No. 3とNo. 4はひびわれ注入を行っておらず、No. 5とNo. 6は注入材Ⅰを用いてひびわれの注入を行い、No. 7とNo. 8は注入材Ⅱを用いてひびわれの注入を行った。注入材Ⅰと注入材Ⅱについては後述する。

4. 2. 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（比重3.16）である。粗骨材は比重2.67、粗粒率6.58の砕石であり、細骨材は比重2.57、粗粒率2.98の砕砂である。コンクリートの配合を表-4.2に示す。また、コンクリートの品質試験結果を表-4.3に示す。

4. 2. 4 供試体へのひびわれの導入方法

前述したとおり、D13シリーズ、D16シリーズとも供試体No. 1は曲げ載荷によりひびわれを導入した。図-4.2にその載荷方法を示す。本実験においては、当初破壊荷重の計算値の2分の1（0.5Pu）を最大荷重と設定した。ところが、この場合、0.2~0.3mmしかひびわれ幅が確保できなかった。ひびわれ注入材の仕様説明によると、注入材がひびわれ内部へ十分に充填されるためには、ひびわれ幅が0.3mm以下だと困難であると記されている。また、この載荷荷重をさらに大きくして、ひびわれ幅を増加させようとするれば、急速に鉄筋の降伏につながり、ひびわれ幅が一挙に数mmに開くことが予想された。したがって、残りの供試体については、割裂により供試体へのひびわれの導入を行うこととした。図-4.3に割裂載荷方法の概要を、表-4.4に割裂により生じたコンクリート表面の最大ひびわれ幅を示す。図-4.3に示す位置において、供試体の上面と下面から集中荷重をかけ、コンクリートにひびわれを生じさせた。載荷を行うにあたっては、コンクリートにひびわれが発生したらただちに除荷

曲げ載荷方法

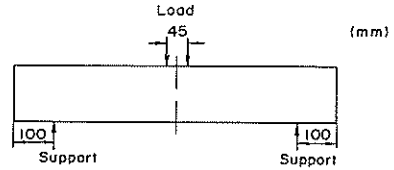


図-4.2 曲げ載荷方法（ひびわれ導入）

割裂方法

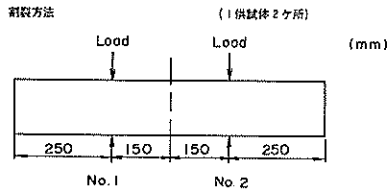


図-4.3 割裂載荷位置

表-4.4 割裂載荷により導入した最大ひびわれ幅

供試体 No.	ひびわれ幅 (mm)	
	No. 1	No. 2
13-1	0.2*	
13-2		
13-3	1.1	0.7
13-4	1.1	0.1
13-5	0.5	1.0
13-6	0.6	0.6
13-7	0.8	0.8
13-8	1.2	0.6
16-1	0.3*	
16-2		
16-3	0.5	0.4
16-4	0.3	0.3
16-5	0.3	0.4
16-6	0.3	0.3
16-7	0.3	0.9
16-8	0.6	0.6

*曲げ載荷によるひびわれ

を行った。表よりわかるとおり、ひびわれ幅は、0.3~1.2 mmに分布した。若干ばらつきが大きいきらいはあるが、載荷方法の性格上、この程度のばらつきは不可避であると判断し、また、ひびわれ注入の効果を検討するには適度のひびわれ幅であると判断した。

4. 2. 5 ひびわれ注入材

実験に用いた注入材は、表-4.5に示すとおり、セメント系から1種類、エポキシ樹脂系から1種類の計2種類とした。注入材Iの配合はセメント材料：水が2：1である。また、注入材IIの配合は、主剤：硬化剤が2：1である。いずれも、メーカーの指示する配合に従った。

4. 2. 6 ひびわれ注入の方法

図-4.4にひびわれ注入方法の概要を示す。図に示すとおり、まず供試体の3面（2側面および底面）のひびわれを幅3～4cmのエポキシ樹脂によりシールした。また、残りの1面（上面）においては、2つのひびわれ注入材の注入口を設けて残りの部分をエポキシ樹脂によりシールした。このシールしたエポキシ樹脂が十分硬化し、附着強度が十分達成されるのを待ってひびわれ注入を行った。注入はグリースポンプを使用し、まず、1つの注入口から注入材を押し込み、他方の注入口から注入材があふれ出るまで行った。次に、この注入方向を変えて同様のことを行った。なお、腐食促進試験を実施する際は、上面のみ、シールしたエポキシ樹脂をグラインダーで取り除いたが、2側面と底面についてはシールしたままで試験に供した。

4. 2. 7 腐食促進試験方法

促進試験方法は図-3.6に示す乾湿繰り返し法である。これを20サイクルまで実施した。

4. 2. 8 測定項目および測定方法

表-4.6に測定項目の一覧を示す。埋設鉄筋の電気化学的計測および腐食状況の観察である。

(1) 埋設鉄筋とステンレス対極間の電気抵抗

図-4.5に測定方法を示す。供試体およびステンレス鋼板を海水中に浸せきした状態で測定を行った。計測には市販のLCRメーター（インダクタンス、電気容量、電気抵抗計測器）を使用し、測定に際しては周波数100Hzの交流を使用した。

(2) 自然電極電位の温度補正

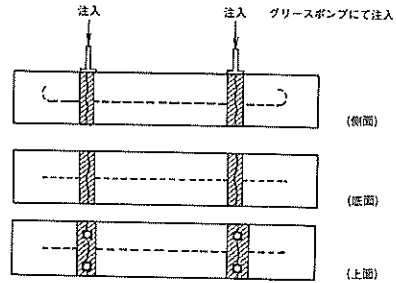
自然電極電位の測定方法は図-3.7に示すとおりである。表-4.6に示すとおり、自然電極電位は、乾湿繰り返しサイクル中経時的に実施した。また、1サイクルの間中は高温時と低温時の2度行った。ところが、参照電極の電位は温度依存性があるので、その補正が必要となる。図-4.6に参照電極の電位と温度の関係を示す。この図に従い、高温時（60℃）の自然電極電位の測定値を補正した。

(3) その他の測定項目

その他の項目の測定方法は3章において述べてある方法と全く同様である。

表-4.5 ひびわれ注入材

注入材I	セメント微粒子材料
注入材II	エポキシ樹脂系注入材



封鎖部：エポキシ樹脂によりシール

図-4.4 ひびわれ注入方法

表-4.6 測定項目

乾湿繰り返し養生中	<ol style="list-style-type: none"> 埋設鉄筋の自然電極電位 埋設鉄筋とステンレス対極間の電気抵抗 <p>1～2は1サイクル中2回（低温時、高温時）測定を行った</p>
乾湿繰り返し養生後（20サイクル終了後）	<ol style="list-style-type: none"> 埋設鉄筋の自然電極電位 動電位分極曲線 定電位ステップ法 発錆状況の観察（発錆面積率の算定）

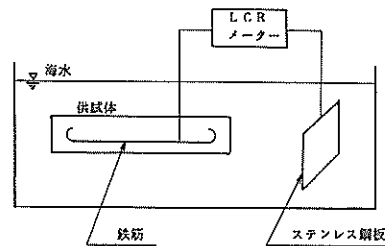


図-4.5 埋設鉄筋とステンレス対極間の電気抵抗の測定方法

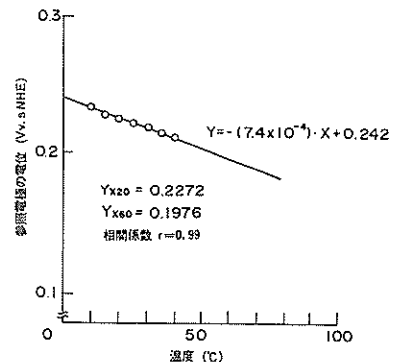


図-4.6 銀一塩化銀電極の温度依存性

4. 3 実験の結果および考察

4. 3. 1 ひびわれ注入の施工性

ひびわれの注入作業は著者らも含めて、港研の研究員(ひびわれ注入作業に関しては素人)が実施した。実際に注入をやってみた感じでは、注入材I(セメント系)に比較して、注入材II(エポキシ系)の方が施工性はよかった。しかしながら、エポキシ系を使用する際、その特異な臭気と揮発性シンナーのため若干気分が悪くなり、軽い目まいを感じた。一方、セメント系を使用する際はそのようなことはなかった。

4. 3. 2 自然電極電位

図-4.7に促進サイクル期間中の自然電極電位の経時変化の一例を示す。ここでは一例を示したが、電位変化の全体的な傾向はいずれの供試体も類似のものであった。全体の傾向として明らかなのは、高温時の測定データの方が低温時に比較して「卑」となることである。この傾向は前出の参考文献4)においても同様のことを報告している。

表-4.7に促進サイクル前後の自然電極電位の変化量を示すが、これを見てもわかるとおり、促進サイクル実施後はすべての供試体の電位は「卑」の方向へシフトした。しかし、その卑化はいずれの場合も前半の数サイクルの間に生じており、10サイクルを過ぎるといずれの場合も大きな変動は認められなかった。このことは、促進サイクルの前半では供試体中への海水の浸透などにより内部鉄筋を取り巻く環境に変化が生じているものの、後半は比較的その状態が落ち着いていたことを示唆している。自然電極電位の値、および経時変化からはひびわれ注入の効果を読み取ることはできなかった。

4. 3. 3 埋設鉄筋とステンレス対極間の電気抵抗

表-4.8と表-4.9に促進20サイクル経過後の埋設鉄筋とステンレス対極間の電気抵抗の変化を示す。また、図-4.8に促進サイクル中の電気抵抗の経時変化の一例を示す。これを見ると明らかなように、低温時には徐々に電気抵抗が増大するのに対して、高温時にはほぼ一定である。この傾向はすべての供試体で見られた。また、低温時に比べて高温時の方が抵抗はかなり小さな値であった。なお、低温時と高温時の抵抗の違いについては補足試験を行い確認したので後に詳述する。

4. 3. 4 動電位分極曲線(不動態のグレイド)

表-4.10に不動態のグレイドの測定結果を示す。ひびわれ注入の有無、あるいは注入材の種類の影響は認められなかった。

4. 3. 5 定電位ステップ法

表-4.10に定電位ステップ法より得られた電流密度を

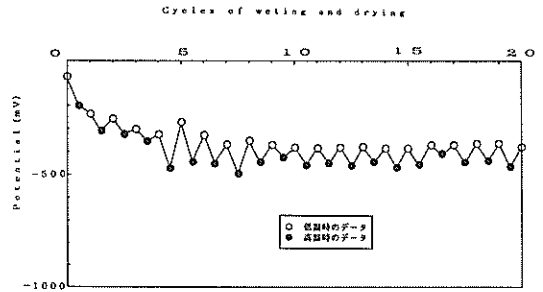


図-4.7 埋設鉄筋の自然電極電位の経時変化(16-6)

表-4.7 促進サイクル20サイクル経過後の自然電極電位の変化

		0サイクル	20サイクル後	変化量	備考
D13 シリーズ	13-1	-118	-234	-116	注入せず
	2	-87	-327	-240	ひびわれなし
	3	-341	-368	-27	注入せず
	4	-326	-391	-65	＃
	5	-339	-454	-115	I
	6	-16	-311	-235	＃
	7	-60	-337	-277	II
	8	-70	-291	-221	＃
D16 シリーズ	16-1	-135	-338	-203	注入せず
	2	-111	-340	-229	ひびわれなし
	3	-242	-378	-136	注入せず
	4	-187	-361	-174	＃
	5	-306	-400	-94	I
	6	-70	-379	-309	＃
	7	-94	-403	-309	II
	8	-268	-383	-115	＃

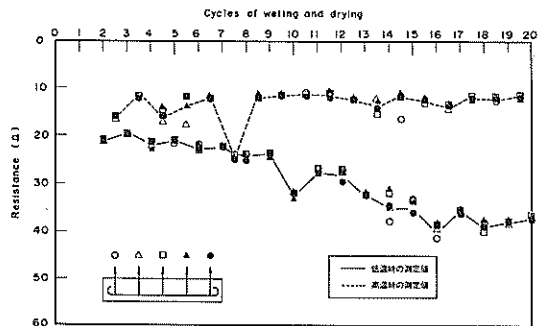


図-4.8 埋設鉄筋とステンレス対極間の電気抵抗の経時変化の一例(13-5)

示す。D13シリーズのエポキシ樹脂系注入材を用いた供試体(13-7および13-8)でその値が幾分小さくなっているものの、全体的にはひびわれ注入の有無、あるいは注入材の種類の影響は認められなかった。

表-4.8 促進サイクル20サイクル経過後の電気抵抗の変化（低温時の測定値）

		2週	20週	変化量	備考
D13 シリーズ	13-1	26.39	121.40	95.01	注入せず
	2	31.13	222.00	190.87	ひびわれなし
	3	24.44	88.97	64.53	注入せず
	4	23.47	98.46	74.99	＃
	5	21.03	36.77	15.74	I
	6	24.19	74.37	50.18	＃
	7	26.10	84.34	58.24	II
	8	31.70	109.46	77.76	＃
D16 シリーズ	16-1	22.05	74.71	52.66	注入せず
	2	26.11	66.10	39.99	ひびわれなし
	3	21.20	58.39	37.19	注入せず
	4	19.63	52.68	33.05	＃
	5	17.84	43.04	25.20	I
	6	21.49	58.14	36.65	＃
	7	20.98	79.18	58.20	II
	8	18.93	58.15	39.22	＃

表-4.9 促進サイクル20サイクル経過後の電気抵抗の変化（高温時の測定値）

		2週	20週	変化量	備考
D13 シリーズ	13-1	20.24	32.50	12.26	注入せず
	2	28.46	40.78	12.32	ひびわれなし
	3	17.03	15.84	-1.19	注入せず
	4	19.43	18.37	-1.06	＃
	5	16.22	12.73	-3.49	I
	6	18.99	22.93	3.94	＃
	7	22.70	19.44	-3.26	II
	8	25.80	25.85	0.05	＃
D16 シリーズ	16-1	16.37	19.62	3.25	注入せず
	2	19.38	13.12	-6.26	ひびわれなし
	3	14.77	16.51	1.74	注入せず
	4	13.62	15.23	1.61	＃
	5	13.47	13.12	-0.35	I
	6	16.19	17.42	1.23	＃
	7	17.03	15.01	-2.02	II
	8	14.83	14.25	-0.58	＃

表-4.10 電気化学的測定結果

No.	自然電極電位 (mV)	不動態のグレード	定電位電流密度 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	総合劣化指数*	備考
13-1	-238	4	7.3(2)	2	注入せず
2	-315	4	6.7(2)	2	ひびわれなし
3	-450	2	19.1(4)	12	注入せず
4	-456	2	16.3(4)	12	＃
5	-477	2	18.4(4)	12	I
6	-310	3	18.4(4)	8	＃
7	-361	2	14.1(3)	9	II
8	-394	3	11.3(3)	6	＃
16-1	-442	2	14.8(3)	9	注入せず
2	-468	2	17.0(4)	12	ひびわれなし
3	-449	2	14.5(3)	9	注入せず
4	-422	2	17.0(4)	12	＃
5	-466	2	18.3(4)	12	I
6	-416	2	15.3(4)	12	＃
7	-405	2	14.0(3)	9	II
8	-428	2	17.3(4)	12	＃

*総合劣化指数 = (5 - 不動態のグレード) × (定電位電流密度の評価)

4. 3. 6鉄筋の腐食傾向の総合評価（総合劣化指数）

著者らは1つの試みとして、不動態のグレードと定電位ステップ法の測定結果をもとに内部鉄筋の腐食傾向を評価する指数（ここでは総合劣化指数と名付ける）を考案してみた。指数の定義は次式による。

$$\text{総合劣化指数} = (5 - \text{不動態のグレード}) \times (\text{電流密度の評価値})$$

なお、電流密度の評価値とは、表-4.11に示す基準に基づくものである。この式よりわかるとおり、総合劣化指数が大きくなるほど、鉄筋の腐食にとっては不利な条件となる。表-4.10に総合劣化指数の算出結果を示す。

表—4.11 定電位ステップ法より
得られた電流密度の評価

電流密度 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	評価値
0~ 5	1
~10	2
~15	3
~20	4
20~	5

表—4.12 埋設鉄筋の発錆面積率

供試体番号	発錆面積率(%)	備考
13-1	12.1	注入せず
13-2	6.3	ひびわれなし
13-3	31.3	注入せず
13-4	27.2	"
13-5	8.3	I
13-6	9.8	"
13-7	24.2	II
13-8	12.5	"
16-1	22.7	注入せず
16-2	37.8	ひびわれなし
16-3	14.0	注入せず
16-4	17.7	"
16-5	17.3	I
16-6	13.3	"
16-7	18.7	II
16-8	21.6	"

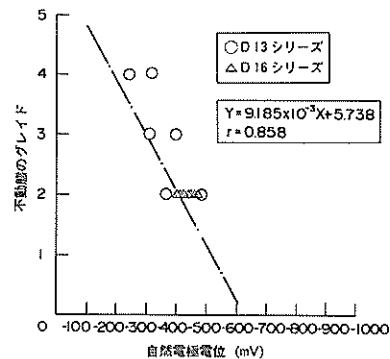
D13シリーズにおいてひびわれ注入を実施した場合（供試体No. 5～No. 8）に総合劣化指数が低くなる傾向が見られるが、全体的にみるとひびわれ注入の有無あるいは注入材の種類の影響は明確ではない。

4. 3. 7埋設鉄筋の発錆状況

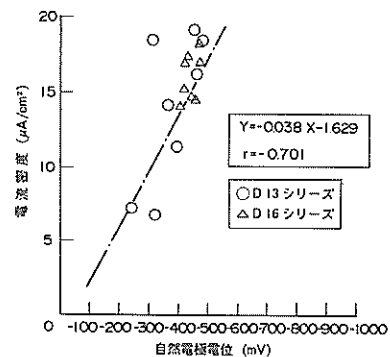
鉄筋の発錆状況の評価値として鉄筋の発錆面積率を用いた。表—4.12に発錆面積率の算定結果を示す。全体的に発錆面積率は10%を越えており、発錆量は多い方であった。D13シリーズでは、No. 3, No. 4に比べてNo. 5～No. 8が発錆面積率が小さいことから、ひびわれ注入の効果を認めることができるが、D16シリーズでは注入を行っていないものほとんど差がない。供試体を破壊する際に、ひびわれ部の観察を同時に行い、注入材の充填がどの程度であったかを観察したが、注入口の周囲2～3cm程度の円状にしか充填されておらず、必ずしも鉄筋周囲まで注入材が届いてない状況であった。

4. 4 電気化学的測定結果に関する考察

図—4.9～図—4.15に電気化学的測定値相互の関係および電気化学的測定値と発錆面積率の関係を示す。これを見るとわかるとおり、電気化学的測定値相互にはかなり高い相関性が認められる。一方、電気化学的測定値と発錆面積率の相関は相関係数で0.5程度である。著者らは参考文献4)でまとめた実験においても同様に検討を行ったが、その時は電気化学的測定値の総合評価と発錆面積率の間に相関係数0.87という高い相関性がみられた。参考文献4)でまとめている実験と今回の実験との相違は供試体のひびわれの有無である。参考文献4)においてまとめた実験では供試体へのひびわれの導入は行っていない。コンクリート供試体にひびわれがあると電気化学的測定値の解釈が難しくなることが前出の参考文献10)において報告されており、今回の実験で電気化学的測定値と発錆面積率の間の相関が若干悪くなったのもひびわれの存在によるものと考えられる。



図—4.9 不動電極のグレイドと自然電極電位の関係



図—4.10 定電位ステップ法(電流密度)と自然電極電位の関係

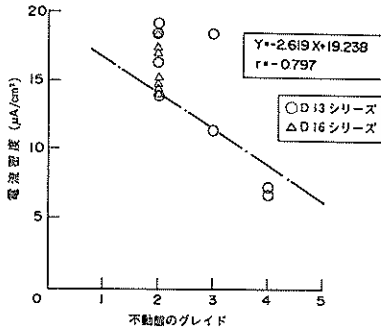


図-4.11 定電位ステップ法(電流密度)と不動態のグレイドの関係

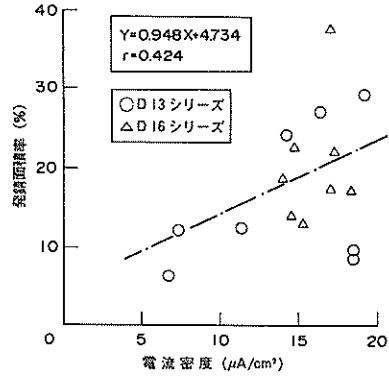


図-4.14 発錆面積率と定電位ステップ法(電流密度)の関係

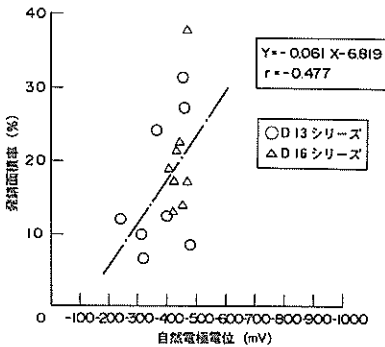


図-4.12 発錆面積率と自然電極電位の関係

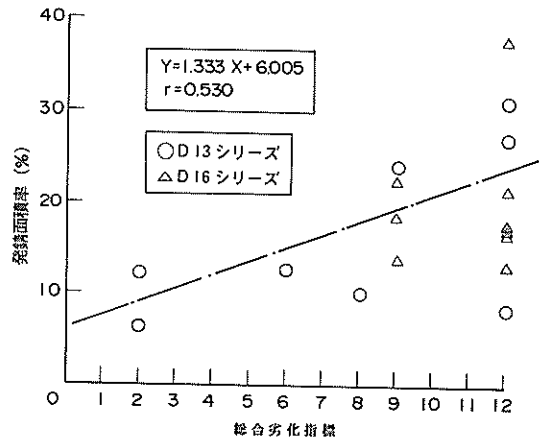


図-4.15 発錆面積率と総合劣化指標の関係

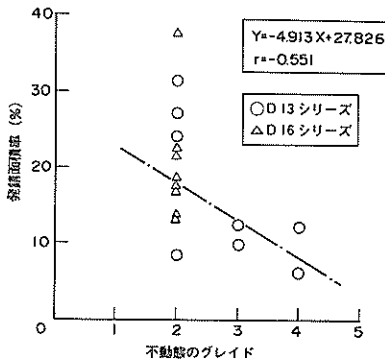


図-4.13 発錆面積率と不動態のグレイドの関係

4. 5 自然電極電位および埋設鉄筋とステンレス対極間の電気抵抗の温度依存性に関する検討

先に実験結果のところで、乾湿繰り返し1サイクル中に2度の測定を実施したところ、自然電極電位ならびにコンクリート内部鉄筋とステンレス対極間の電気抵抗がかなり大きく変動することがわかった。この両者の温度依存性について検討を行ったので本項においてとりまとめる。

供試体を海水中に浸せきし、その後の電位および抵抗の経時変化を海水の温度を上昇させた場合と不変の場合とに分けて測定した。図-4.16～図-4.19に自然電極電位の経時変化を示す。温度上昇の場合も温度一定の場合も海水浸せき後、電位は卑化する傾向にある。しかし、図を見てわかるとおり、図-4.16、図-4.17に示す温度一定の場合に比べて、図-4.18、図-4.19に示す温度が上昇する場合の方が明らかに卑化の程度が大きい。両者を比較してみると、温度が上昇する場合の方が100mV以上の卑化を示す。

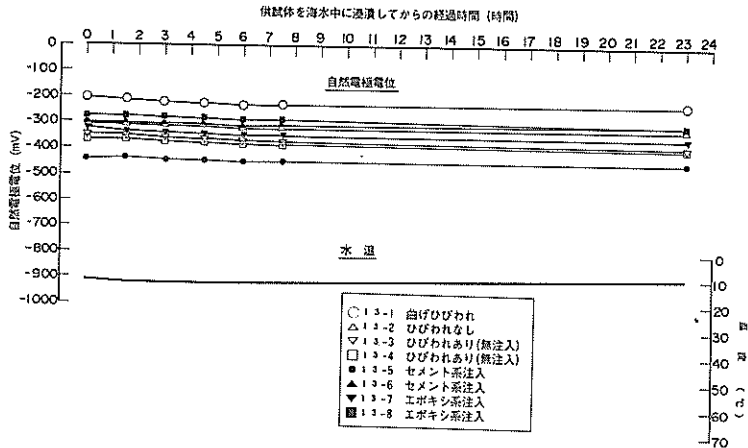


図-4.16 自然電極電位の経時変化 (温度一定の場合, D13シリーズ)

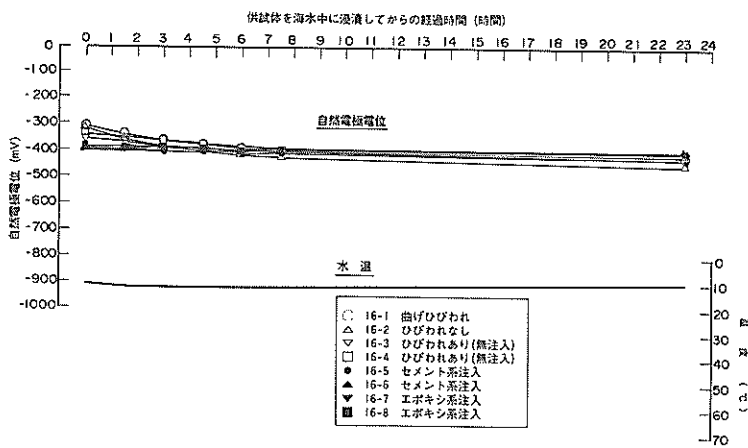


図-4.17 自然電極電位の経時変化 (温度一定の場合, D16シリーズ)

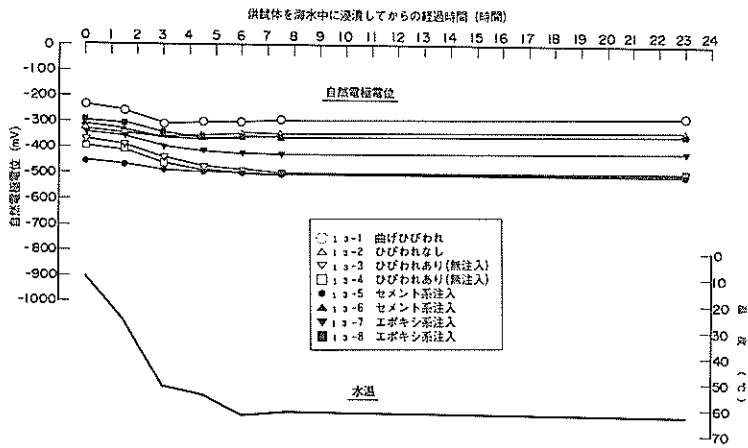


図-4.18 自然電極電位の経時変化 (温度上昇の場合, D13シリーズ)

図-4.20および図-4.21に電気抵抗の経時変化の一例を示す。供試体番号13-1, 16-1のみ示したが、その他の供試体の場合もその傾向は全く同様であった。両図より明らかとなり、温度が一定の場合は浸せき開始後

わずかに抵抗が低下するがさほど大きくはない。一方、温度が上昇する場合は、温度に比例するように抵抗は低下してゆき、温度が一定になると抵抗も一定となる。温度が不変の場合でも抵抗がわずかに低下するのは、コン

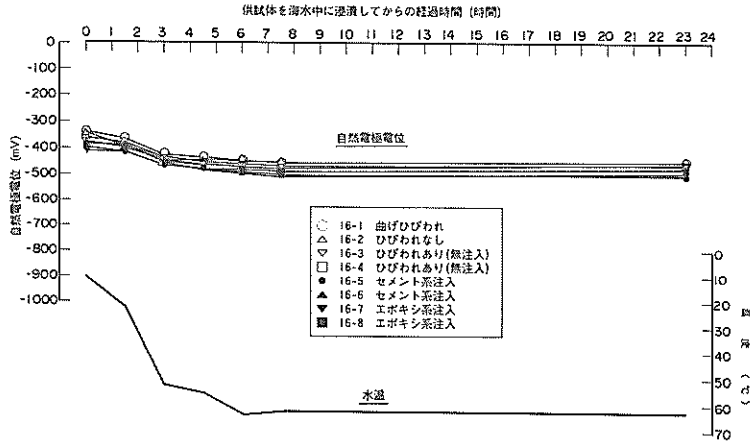


図-4.19 自然電極電位の経時変化 (温度上昇の場合, D16シリーズ)

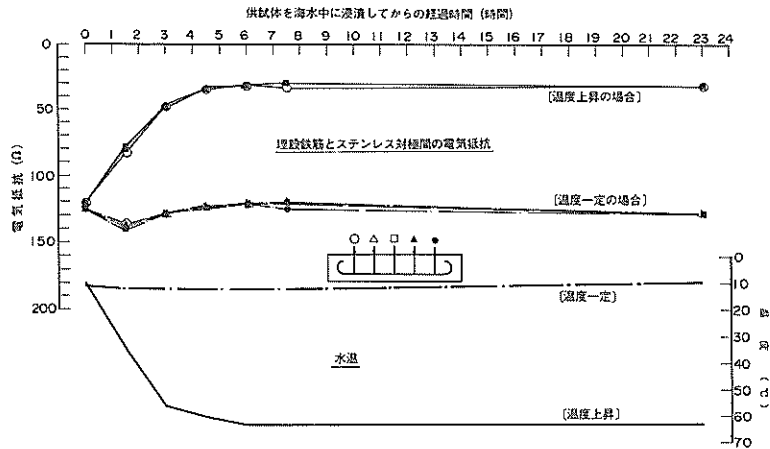


図-4.20 埋設鉄筋とステンレス対極間の電気抵抗の経時変化の一例 (13-1)

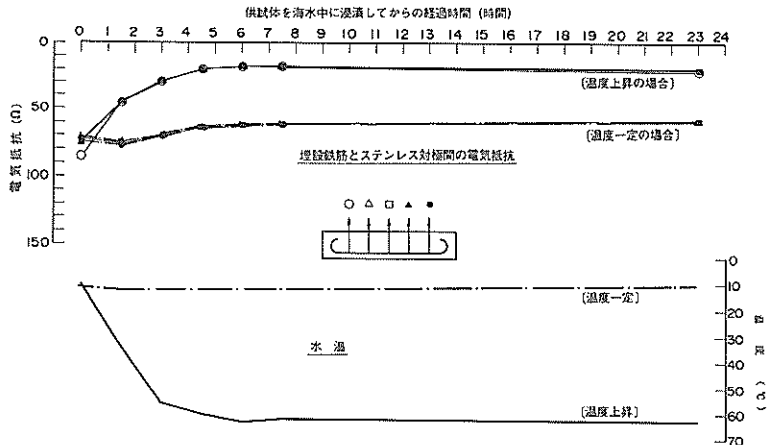


図-4.21 埋設鉄筋とステンレス対極間の電気抵抗の経時変化の一例 (16-1)

クリート中へ海水が浸入していくためであり、一方、温度が上昇すると急激に抵抗が低下していくのは、温度が上昇するにしたがい海水の電気（イオン）伝導度が、増大していくためと考えられる。¹²⁾

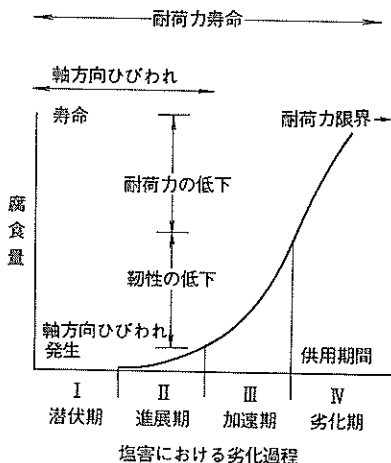
5. 補修設計に関する提案

5.1 概要

本章においては、塩害を受けた栈橋上部コンクリート部材（はり、床版）の補修設計の考え方について考察し、一連の実験より得られた結果が本設計の考え方の中どこに取り入れられるのかを検討する。ここで述べる考え方というのは、当研究室を中心にこれまでに実施してきた鉄筋コンクリート部材の塩害に関する調査、研究をもとに考察しつつあるものであり、広くオーソライズされているわけではない。本考え方は、現在すぐに実務に適用できるまでには至っていないが、将来的にはこれに近い形の補修設計（耐久性設計のI部分と考えることができる）を確立し、構造物の合理的な維持、管理、補修が行われるようになることを目指すものである。

5.2 補修設計の考え方

ここで述べる補修設計は、構造物の経年劣化を基礎に理論を展開する。図-5.1は鉄筋コンクリート構造物の塩害劣化過程における時間と鉄筋の腐食量の関係を示したものである。¹³⁾ 本図に示されるとおり、鉄筋コンクリート構造物の塩害による劣化過程は4段階に分けて説明される。構造物自体の耐久性の良否、また構造物の置かれ

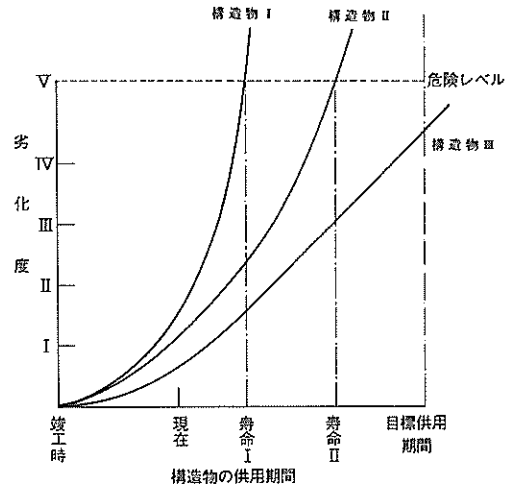


- I：塩素イオンの拡散期（ひびわれがある場合は極端に短くなる）
- II：腐食開始から軸方向ひびわれの発生まで
- III：酸素の供給が急増し、腐食速度が急上昇する。
- IV：耐力の低下が進む時期

図-5.1 鉄筋コンクリート構造物の塩害による劣化の過程

ている環境条件の相違により各過程の長さが異なってくるが、塩害により劣化する構造物はこのモデルに従うものと考えられている。

このモデルをベースとして図-5.2に示すような構造物の劣化度曲線というものを考案した。これは、構造物の供用期間と劣化度の関係を示したものである。



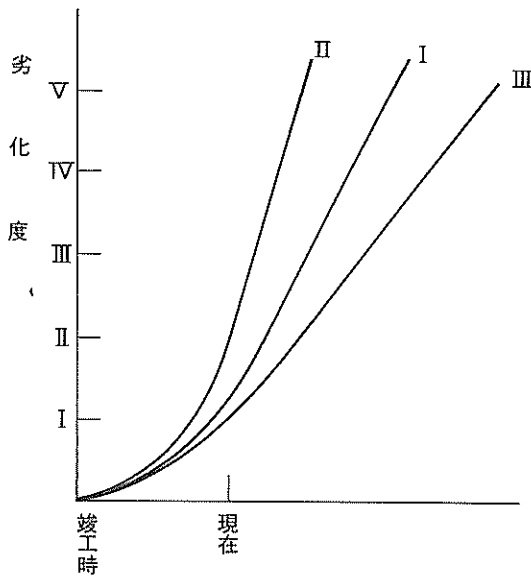
- 構造物 I：施工、材料ともに悪く耐久性の悪い構造物の例
- 構造物 II：IとIIIの中間の耐久性を維持する構造物の例
- 構造物 III：耐久性が良く基本的には補修を必要としない構造物の例

図-5.2 構造物の劣化度曲線（自然曲線）

この図が、構造物の劣化状態と時間を関係づける最も基本的なものである。図中の3本の曲線（I～III）は各々異なる構造物の劣化度曲線を示しており、この中ではIが最も耐久性が悪く、IIIが最も耐久性がよいことを示している。この図では、無名数の劣化度（I～V）という指標をたて軸に取り、構造物の供用期間を横軸に取った。栈橋の劣化度の判定法の一つの方法として沿岸センター発行のマニュアルに記載されている方法がある。¹⁴⁾これは構造物表面の目視観察により劣化度を判定する方法である。

仮に今、劣化度Vに達した時がその構造物の寿命であると仮定した場合、構造物Iの寿命が図中の寿命Iとなり、構造物IIの寿命が図中の寿命IIとなり、いずれも目標供用期間前に寿命に達することになる。他方、構造物IIIは目標供用期間よりも寿命の方が長いということになる。すなわち、構造物Iと構造物IIについては補修が必要であるが、構造物IIIでは補修を必要としないのである。この劣化度曲線を自然曲線と称することにする。

この劣化度曲線（自然曲線）において環境条件の概念をどのように取り込んでゆくかを示したものが図-5.3である。構造物が全く同一であっても、その置かれてい



構造物の供用期間

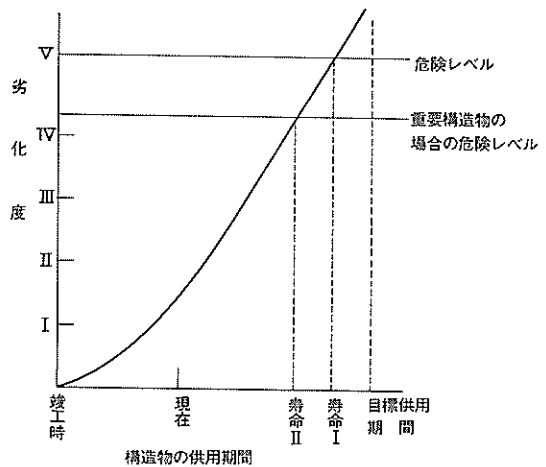
- I：中庸の環境条件の場合
- II：厳しい環境条件の場合
- III：穏やかな環境条件の場合

図-5.3 環境条件の考え方

る環境条件が異なれば劣化度曲線も異なるものとなる。ある栈橋が、曖昧な表現であるが、「中庸の環境条件」に置かれた場合の劣化度曲線を図中の曲線 I と仮定すると、同一の栈橋がそれよりも「厳しい環境条件」に置かれたとすると、これが劣化度曲線 II の方へシフトすることになる。一方、「穏やかな環境条件」に置かれたとすると、劣化度曲線 III の方へシフトすることになる。劣化度曲線（自然曲線）における環境条件の概念は以上述べたとおりである。

また、劣化度曲線（自然曲線）において重要構造物の概念をどのように取り込んでいくかを示したものが図 5.4 である。通常の構造物（重要構造物以外）の寿命を仮に劣化度 V（危険レベル）に達した時と仮定すると、図中の自然曲線で示されている構造物の寿命は図中で示す寿命 I となる。ところが、重要構造物（重要構造物の定義としては、社会的役割が大き、もしくは使用不能になったときの経済的損失が大き等）の危険レベルを通常の構造物に比べて厳しくし、劣化度 VI 程度に設定する。そうすると、その寿命は図中に示す寿命 II となり、通常の構造物に比べて若干寿命が短くなる。以上示した考え方が重要構造物の概念の取り込み方である。

以上述べたような種々の条件を加味しながら各栈橋（もしくは各部材）について、劣化度曲線（自然曲線）を



- 寿命 I：通常の自然寿命
- 寿命 II：重要構造物の場合の自然寿命

図-5.4 重要構造物の考え方

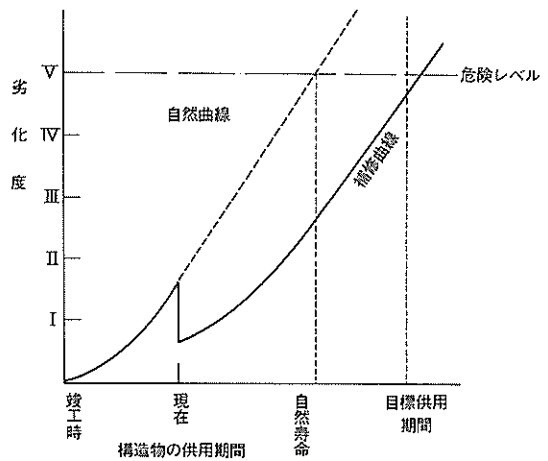


図-5.5 補修の考え方（補修曲線）

描く作業が補修設計の第一歩となる。次に、「補修」の概念をこの劣化度曲線の中にどう取り込んでいくかを示したものが、図-5.5 である。ある栈橋の自然曲線が図中の点線（現在以降）で示したものであるとすると、この栈橋は目標供用期間に達する前に寿命を迎えることになる。ところが、この栈橋にある種の補修を施した場合が実線で示す曲線（補修曲線と名づける）である。図中に示すとおり、補修を行うことにより、構造物の劣化度が若干回復するがその後はやはり経時的に劣化が進行するものと考えている。しかしながら、補修を行うことにより、構造物の寿命を目標供用期間よりも長くすることができる。以上述べたものが、補修の概念である。

ところが、一概に補修といってもその方法、補修材料は様々であり、補修効果も一様ではない。補修のグレイ

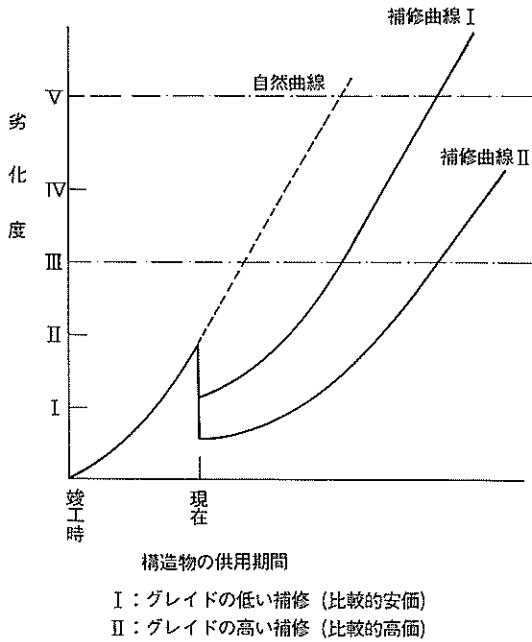


図-5.6 補修のグレードの考え方

ド(補修効果の良否)の概念を補修曲線の中にどうとらえていくかを示したものが図-5.6である。表現が曖昧であるが、グレードの高い補修を実施した場合が図中に示す「補修曲線II」となり、グレードの低い補修を実施した場合が図中に示す「補修曲線I」となる。補修後の寿命も必然的に補修曲線II(グレードの高い補修)の方が長くなる。

以上示した一連の考え方を取りまとめると、補修設計法の手順は図-5.7に示すようになる。基本的にはまず、構造物の自然曲線を設定し、自然寿命が目標供用期間よりも短い場合は、補修を行う必要性が生じるのである。補修工法の選定に際しては数種の補修曲線を設定し、その中より、目標供用期間まで構造物の寿命を延ばすことのできる最も経済的な補修工法を選択することになる。

本文の3章および4章でまとめた一連の実験結果は図-5.7の中に矢印で示す「数種のグレードの異なる補修曲線を作成する」段階で反映されることになる。

6. 結論

一連の実験より得られた結論を以下に列挙する。

鉄筋塗装、コンクリート断面の修復、コンクリート表面の被覆という3工程による補修を行った場合、

- (1) 補修効果に及ぼす鉄筋処理の影響は極めて小さい。
- (2) 断面修復材料の選定に際して重要となるのは断面修復材と母材コンクリートの付着性である。

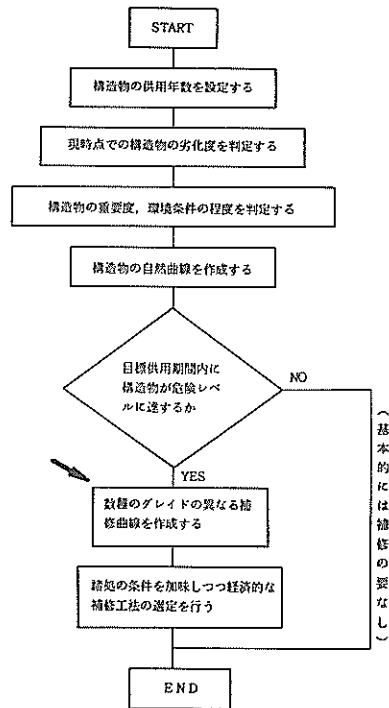


図-5.7 補修設計の手順

(3) コンクリート表面被覆が補修効果に及ぼす影響は補修後のコンクリートのひびわれの有無に左右される。すなわち、断面修復後にコンクリートにひびわれ(断面修復材と母材コンクリートとの剝離)が生じる場合は表面被覆の効果が大きくなるが、ひび割れ(剝離)が生じない場合は表面被覆の効果は相対的に低下する。

(4) 母材コンクリートに塩分が含まれていると、その部分がアノード、断面修復部分がカソードとなるマクロセルが生成し、断面修復箇所の周辺の鉄筋が腐食する。なお、この腐食は母材コンクリート中の含水量が多くなるほど顕著なものとなる。

コンクリートのひびわれ注入の補修効果に関して、

(5) ひびわれ注入として、セメント系1種、エポキシ樹脂系1種を使用した。施工性はエポキシ樹脂系の方がよかった。しかしながら、エポキシ樹脂系を使用する場合は、揮発性シンナーを利用することから長時間にわたる施工の際は作業員の人体に悪影響を及ぼさぬような配慮が必要である。

(6) 今回の試験の範囲内では、ひびわれ注入の埋設鉄筋への防食効果は明確に認められなかった。これは、1つには注入材の浸入が予想以上に浅かったこともその原因と考えられる。これは、セメント系、エポキシ樹脂系ともにそうであった。

(7) 電気化学的測定結果相互の関係, および電気化学的測定結果と発錆面積率の間の関係について相関性を見出すことができた。

(8) 埋設鉄筋とステンレス対極間の電気抵抗の温度依存性について知見を得ることができた。

補修設計法に関して,

(9) 補修設計法の基本的考え方を示すことができたが, それを確立するまでには至らなかった。今後, 環境条件の定量的評価手法および補修効果の定量的評価手法を確立することが必要である。

7. あとがき

港湾コンクリート構造物, 主に棧橋コンクリート上部工において塩害が顕在化してから既に10年近くが経過した。その間, 当研究室においてもこの問題について精力的に研究が行われ, その根本的な原因, 劣化のメカニズムについてはほぼ明らかになった。しかしながら, 一旦劣化した構造物の補修方法あるいは新設の構造物の塩害防止方法については系統だった理論, 考え方も確立されておらず, 個々の現場担当者の技術的, 経験的な判断に委ねられているのが現状である。そのような現状を踏まえ, 合理的な補修方法を確立するために本研究はスタートした。また, 実験を進めていくうちに, 「補修設計」というものの必要性を痛感し, その考え方についても検討を加えた。本文をまとめるに際しては一連の実験シリーズより得られた結果と「補修設計」の考え方をリンクさせた形のレポートができればと当初は考えたが残念ながらその段階までは達することはできなかった。今後の課題として検討を続けたいと思う。

本実験シリーズの実験 I の供試体製作を実施したのが昭和60年であり, これまでに5年の期間が経過した。この間, 材料研究室に在籍した職員の方々には何らかの形で労を煩わせている。その労に対してここに記して御礼申し上げる次第である。

(1991年11月31日受付)

参考文献

1) 大即信明, 原茂雅光, 浜田秀則: 棧橋上部工劣化実態

概略調査報告, 港湾技研資料, No.617, 1988.6

2) 大即信明, 原茂雅光, 浜田秀則: 棧橋上部工劣化実態
詳細調査報告, 港湾技研資料, No.627, 1988.9

3) 鉄筋腐食による損傷を受けたコンクリート構造物の
補修技術—技術の現状—, (財)日本コンクリート工学協
会・防食研究委員会, 1989. 1

4) 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

5) 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, 鉄筋腐食による損
傷を受けたコンクリート構造物の補修技術に関する
シンポジウム論文集, pp.29~36, 1989.1

6) 大村平: 実験計画法と分散分析のはなし, 日科技連,
1984.3

7) 例えば, 朝尾正, 安藤貞一, 楠正, 中村恒夫: 最新実
験計画法, 日科技連, 1973.1

8) 岡村甫: コンクリート構造の限界状態設計法(コン
クリートセミナー4), 共立出版, 1978.11

9) 宮川豊章, 片脇清: コンクリート中鋼材の塩化物腐食
調査および試験方法, コンクリート工学, Vol.19,
No.3, 1981.3

10) 大即信明: コンクリート中の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

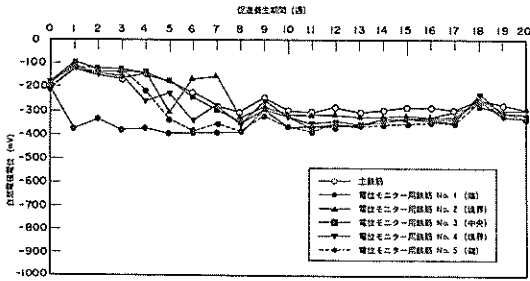
11) 藤嶋昭, 相澤益男, 井上徹: 電気化学測定法(上),
技法堂出版, 1984.11

12) 喜多英明, 魚崎浩平: 電気化学の基礎, 技法堂出版,
1983.4

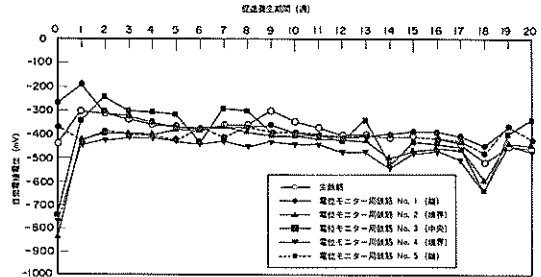
13) 宮川豊章, 小林和夫, 藤井学: 塩分雰囲気中におけ
るコンクリート構造物の寿命予測と耐久性設計, コン
クリート構造物の寿命予測と耐久性設計に関するシ
ンポジウム論文集, 1988.4

14) 港湾コンクリート構造物の劣化防止, 補修に関する
技術調査報告書, —劣化防止・補修マニュアル
(案)一, (財)沿岸開発技術研究センター, 1987.9

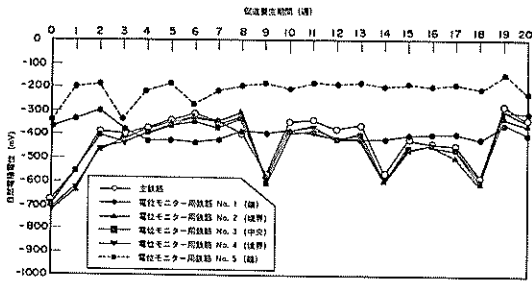
付録 埋設鉄筋の自然電極電位の経時変化



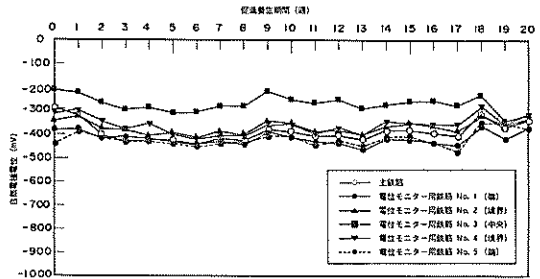
付図—1 実験III (0-2, 一体構造)



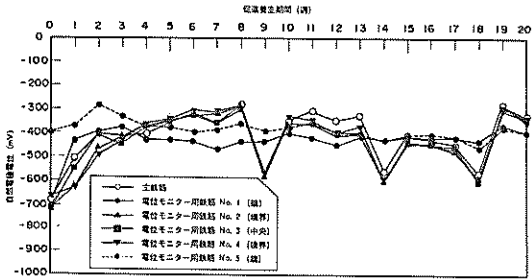
付図—5 実験III (1-2)



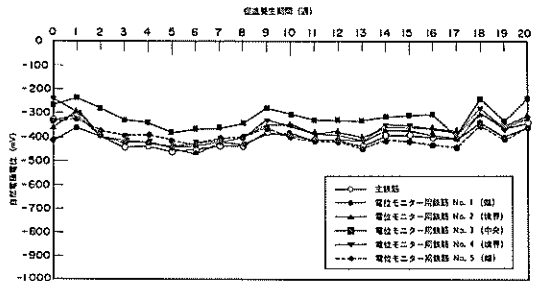
付図—2 実験III (0-3, 無補修)



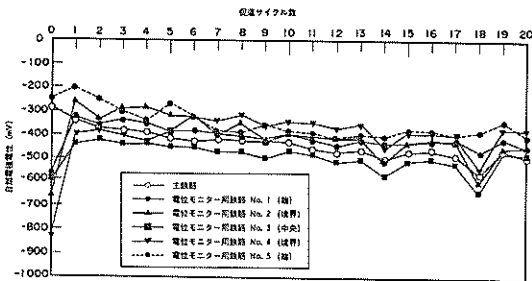
付図—6 実験III (2-1)



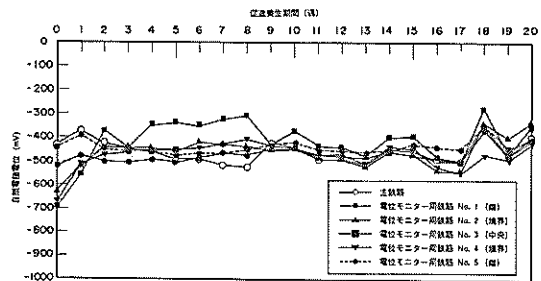
付図—3 実験III (0-4, 無補修)



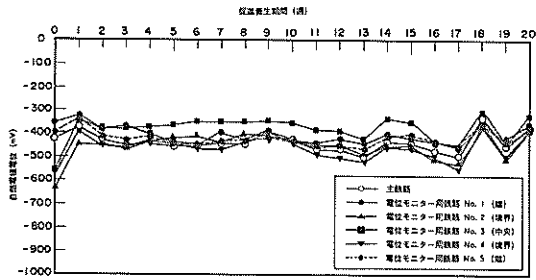
付図—7 実験III (2-2)



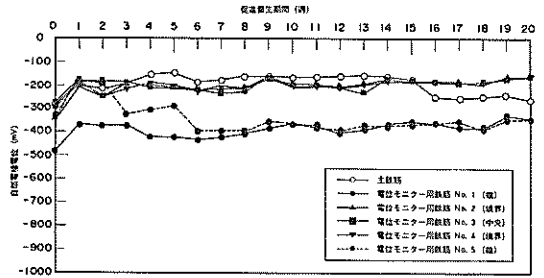
付図—4 実験III (1-1)



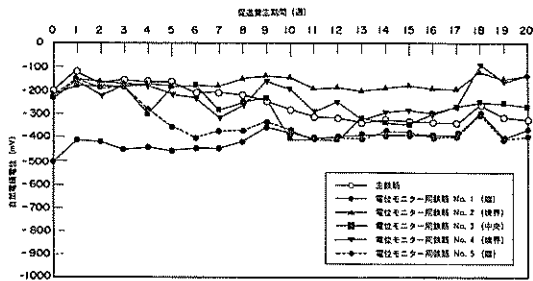
付図—8 実験III (3-1)



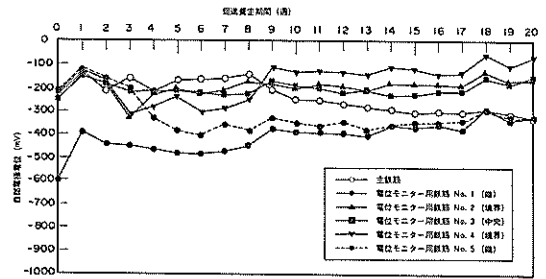
付図—9 実験III (3-2)



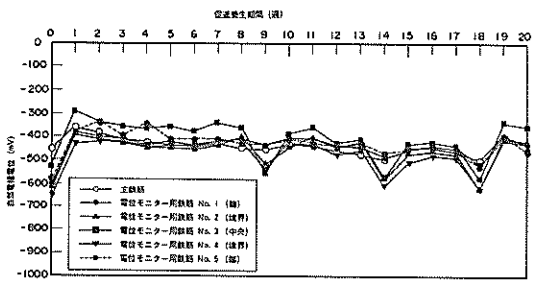
付図—13 実験III (6-1)



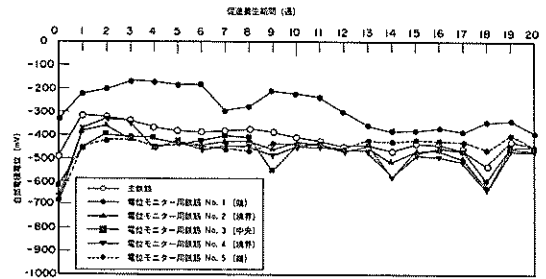
付図—10 実験III (4-1)



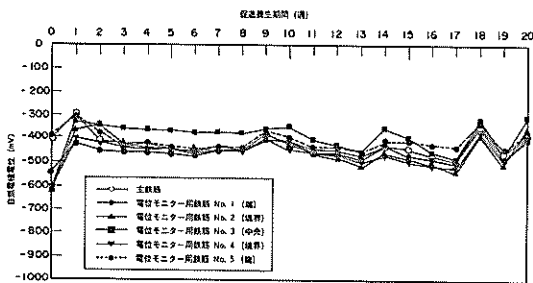
付図—14 実験III (6-2)



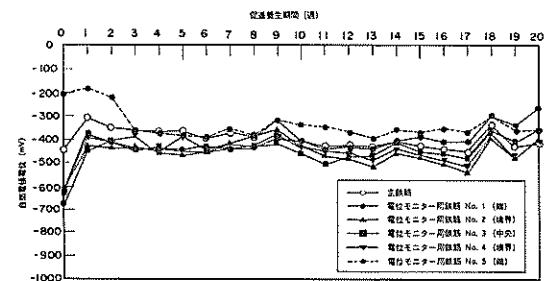
付図—11 実験III (5-1)



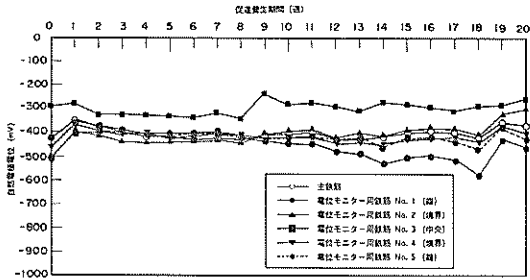
付図—15 実験III (7-1)



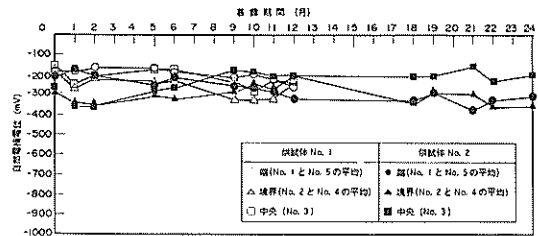
付図—12 実験III (5-2)



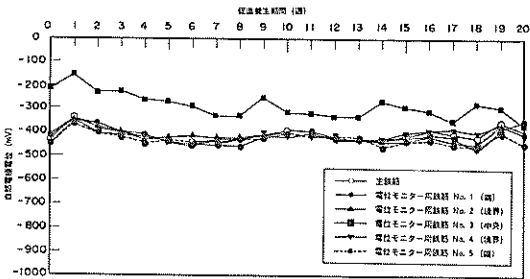
付図—16 実験III (7-2)



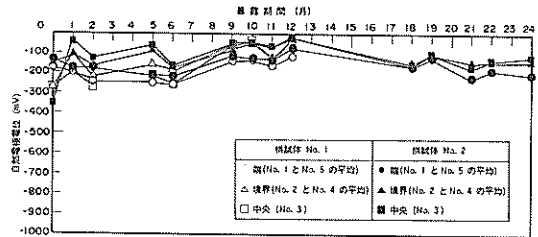
付図-17 実験III (8-1)



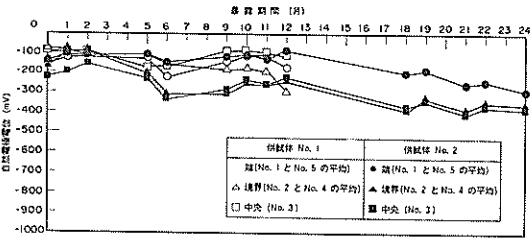
付図-22 実験IV (ケース3)



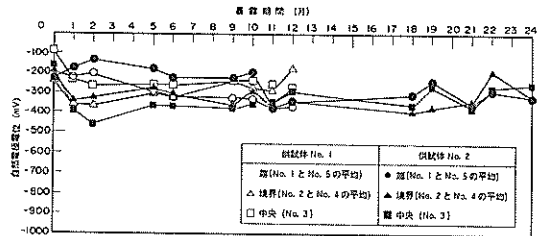
付図-18 実験III (8-2)



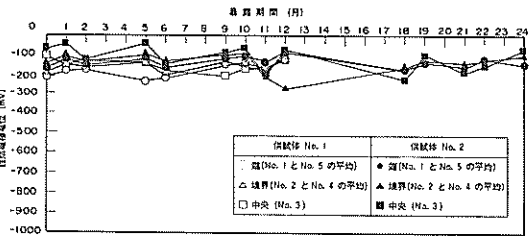
付図-23 実験IV (ケース5)



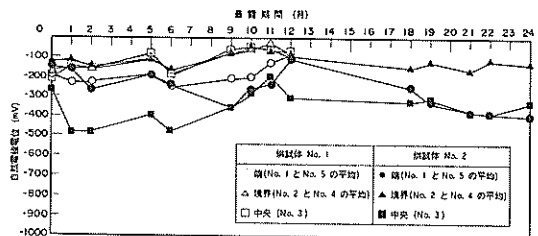
付図-19 実験IV (無補修)



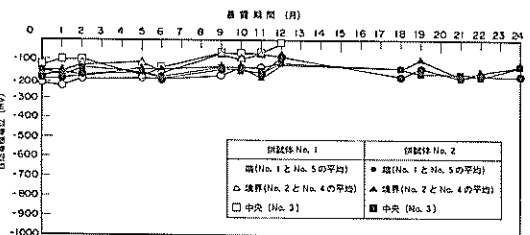
付図-24 実験IV (ケース6)



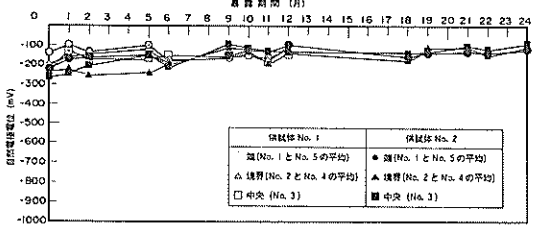
付図-20 実験IV (ケース1)



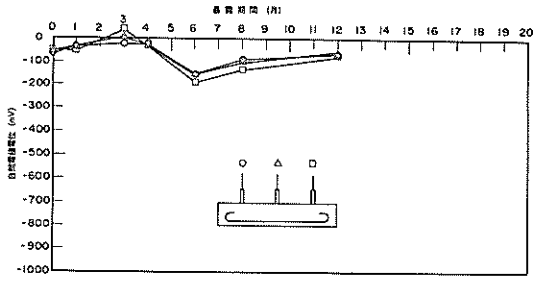
付図-25 実験IV (ケース7)



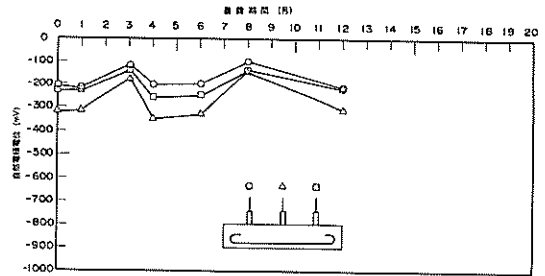
付図-21 実験IV (ケース2)



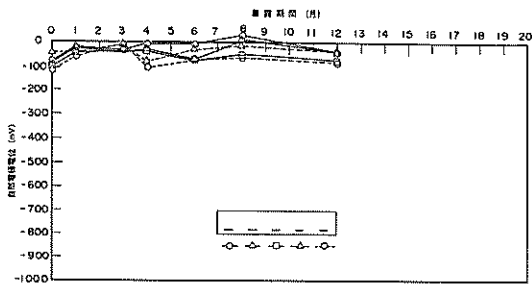
付図-26 実験IV (ケース8)



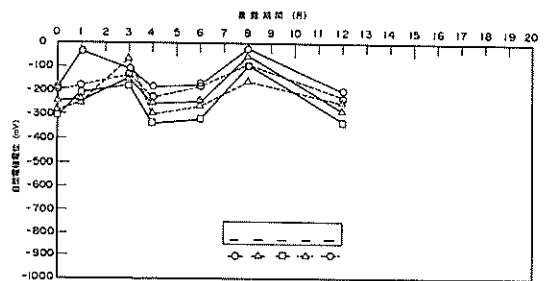
付図-27 実験V (0-1, 一体構造, 主鉄筋)



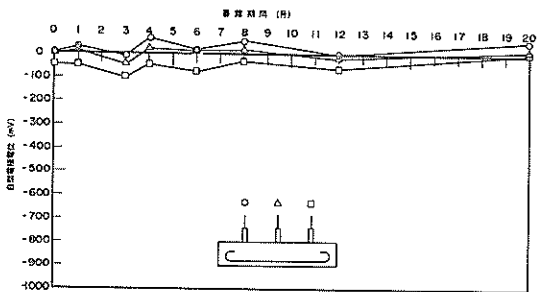
付図-31 実験V (0-3, 無補修, 主鉄筋)



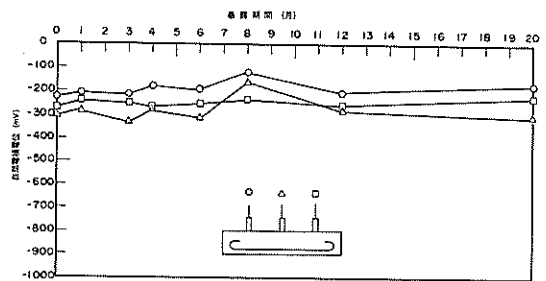
付図-28 実験V (0-1, 一体構造, 電位モニター)



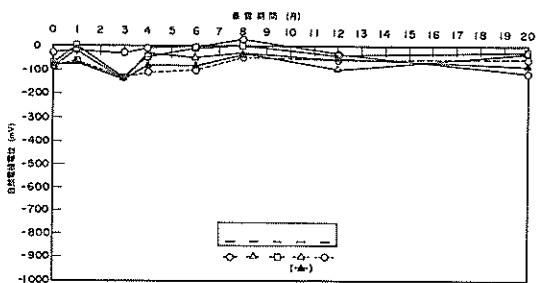
付図-32 実験V (0-3, 無補修, 電位モニター)



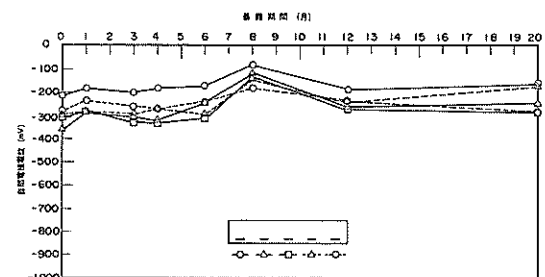
付図-29 実験V (0-2, 一体構造, 主鉄筋)



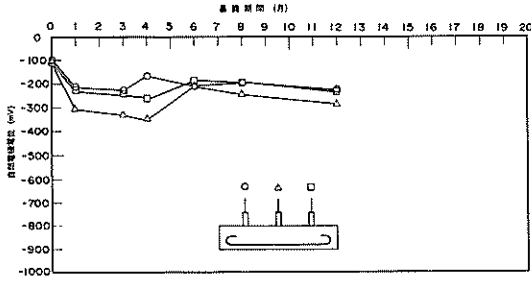
付図-33 実験V (0-4, 無補修, 主鉄筋)



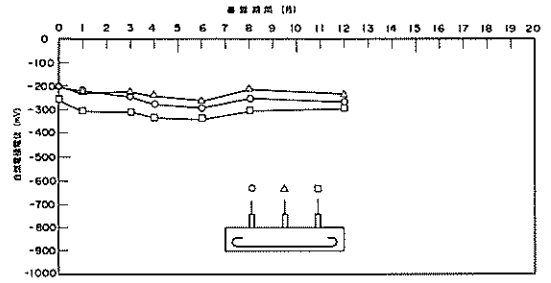
付図-30 実験V (0-2, 一体構造, 電位モニター)



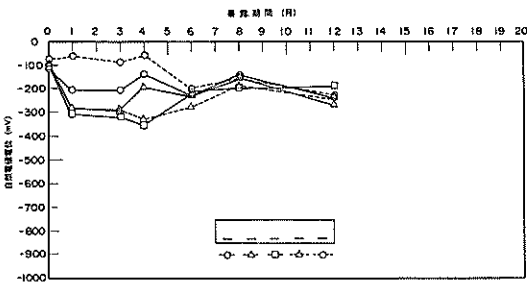
付図-34 実験V (0-4, 無補修, 電位モニター)



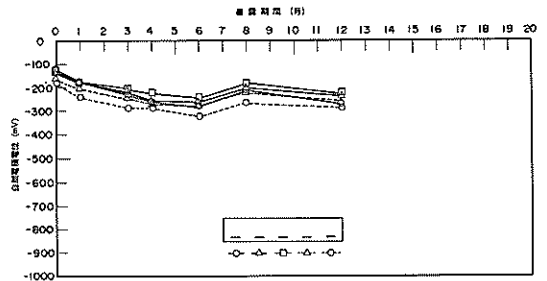
付図—35 実験V (1-1, 主鉄筋)



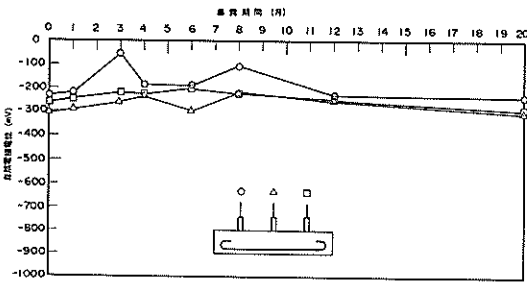
付図—39 実験V (2-1, 主鉄筋)



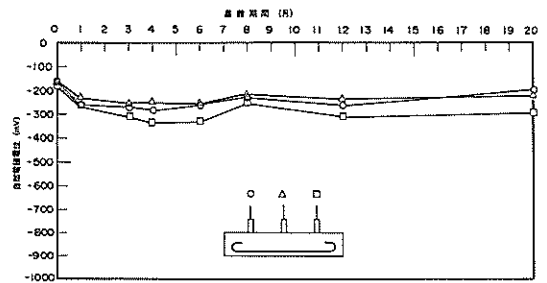
付図—36 実験V (1-1, 電位モニター)



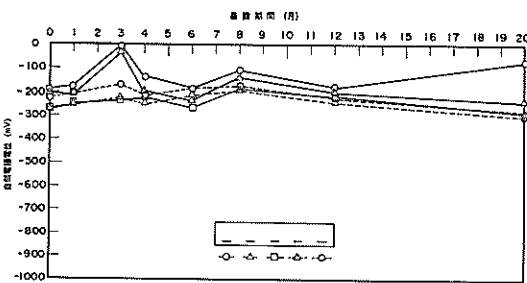
付図—40 実験V (2-1, 電位モニター)



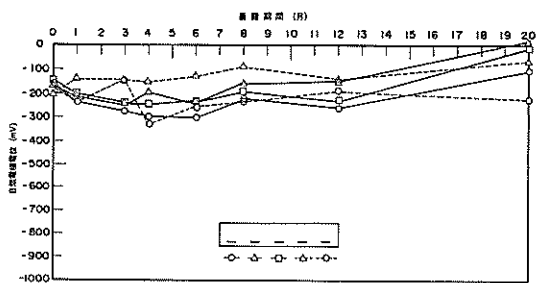
付図—37 実験V (1-2, 主鉄筋)



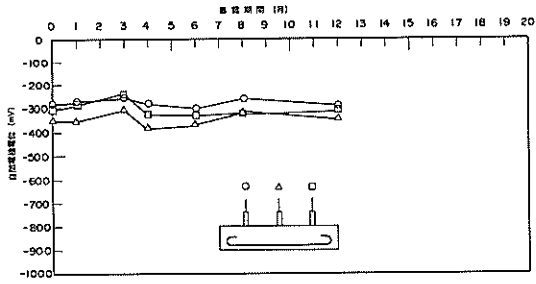
付図—41 実験V (2-2, 主鉄筋)



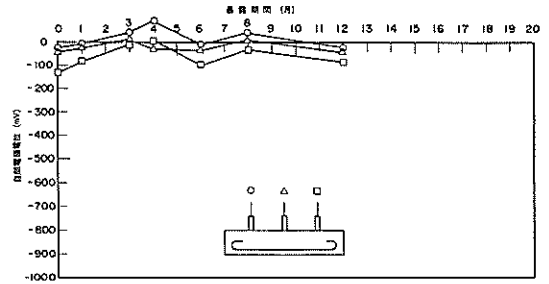
付図—38 実験V (1-2, 電位モニター)



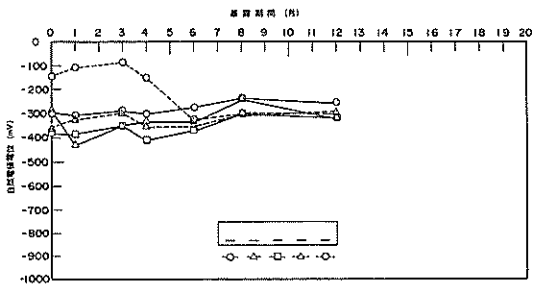
付図—42 実験V (2-2, 電位モニター)



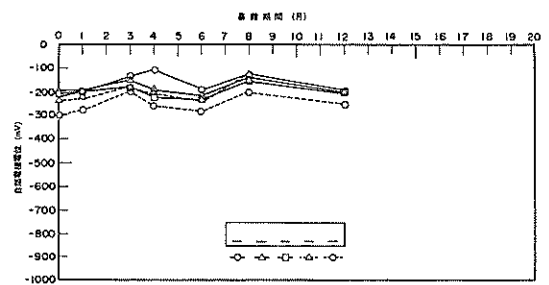
付図-43 実験V (3-1, 主鉄筋)



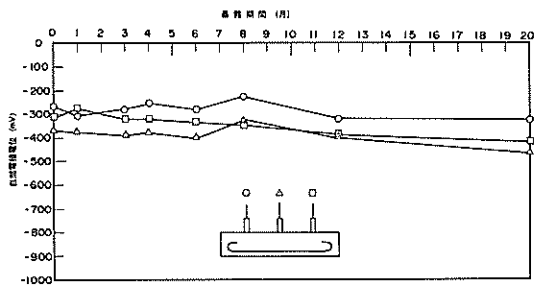
付図-47 実験V (4-1, 主鉄筋)



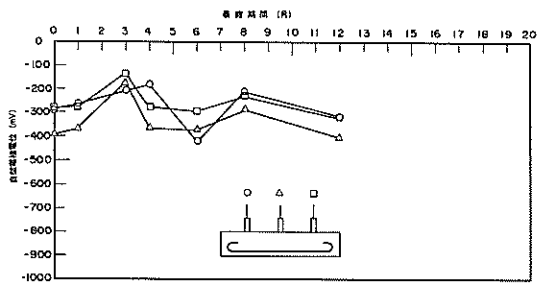
付図-44 実験V (3-1, 電位モニター)



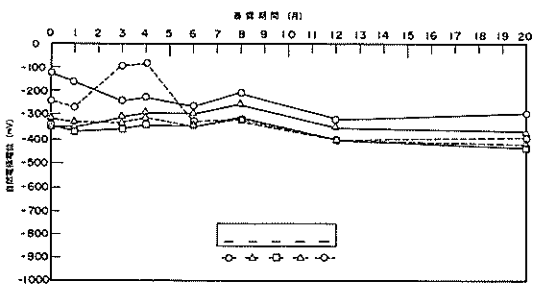
付図-48 実験V (4-1, 電位モニター)



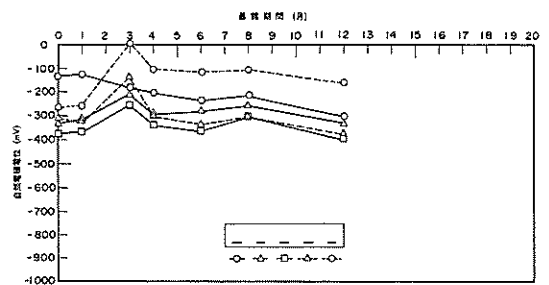
付図-45 実験V (3-2, 主鉄筋)



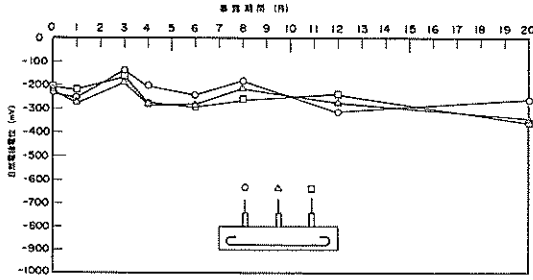
付図-49 実験V (5-1, 主鉄筋)



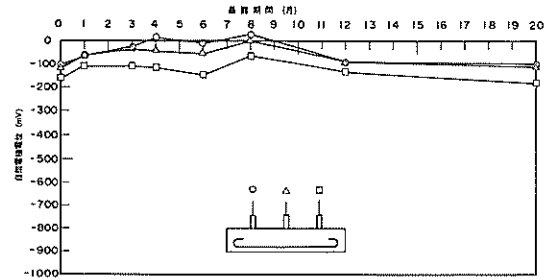
付図-46 実験V (3-2, 電位モニター)



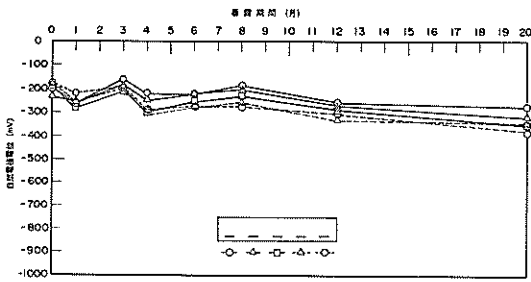
付図-50 実験V (5-1, 電位モニター)



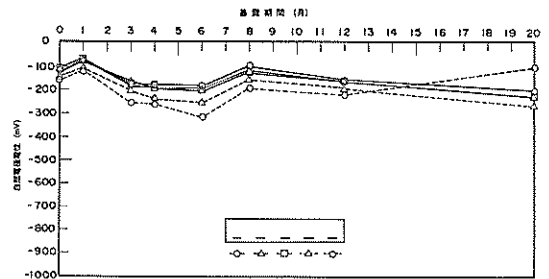
付図-51 実験V (5-2, 主鉄筋)



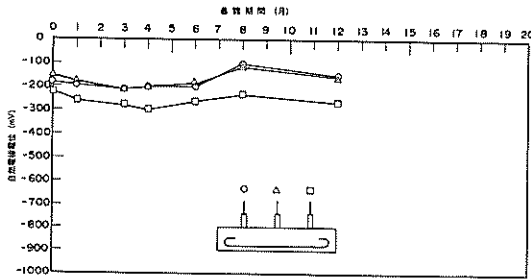
付図-55 実験V (6-2, 主鉄筋)



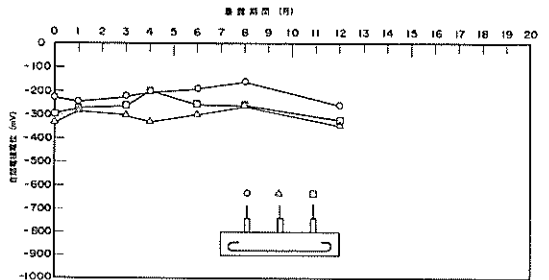
付図-52 実験V (5-2, 電位モニター)



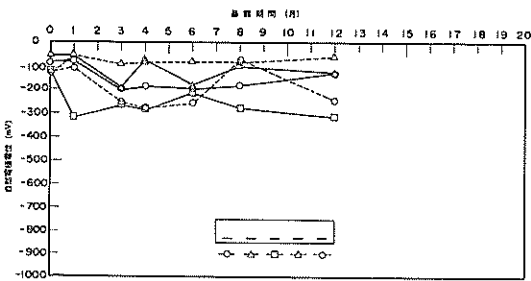
付図-56 実験V (6-2, 電位モニター)



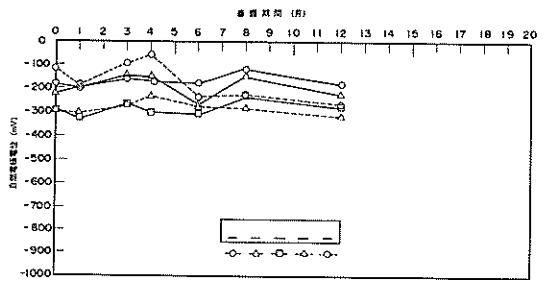
付図-53 実験V (6-1, 主鉄筋)



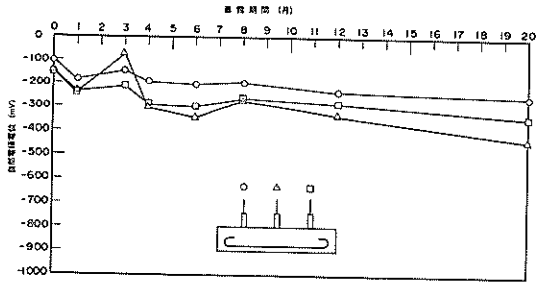
付図-57 実験V (7-1, 主鉄筋)



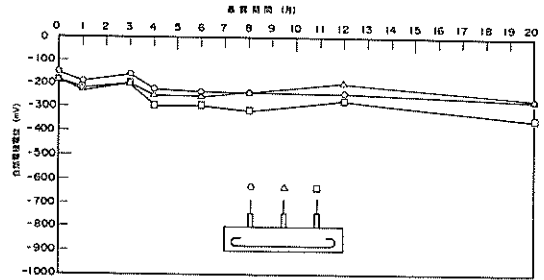
付図-54 実験V (6-1, 電位モニター)



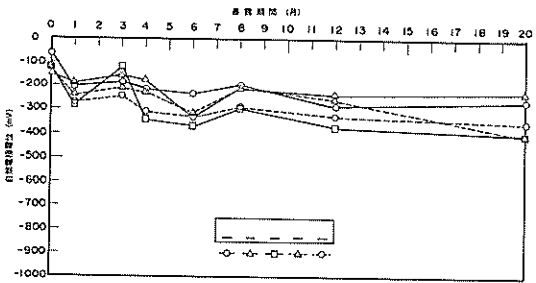
付図-58 実験V (7-1, 電位モニター)



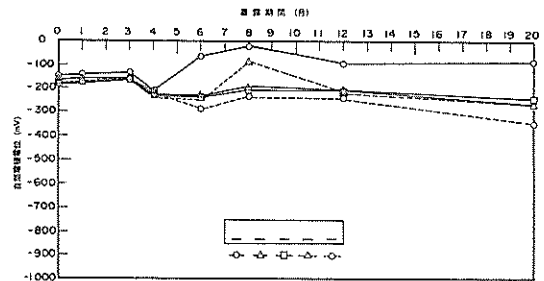
付図-59 実験V (7-2, 主鉄筋)



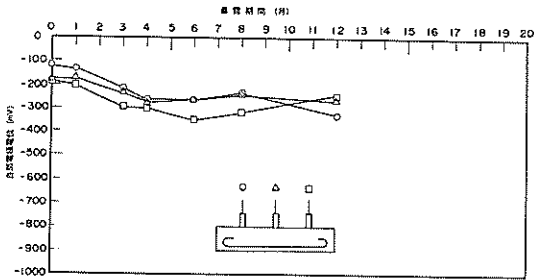
付図-63 実験V (8-2, 主鉄筋)



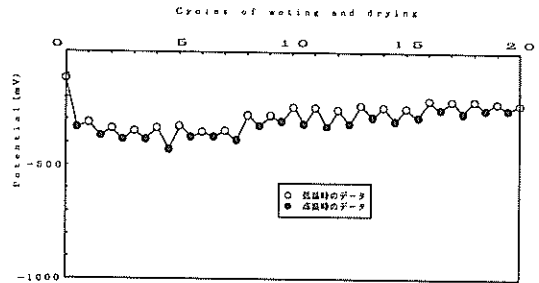
付図-60 実験V (7-2, 電位モニター)



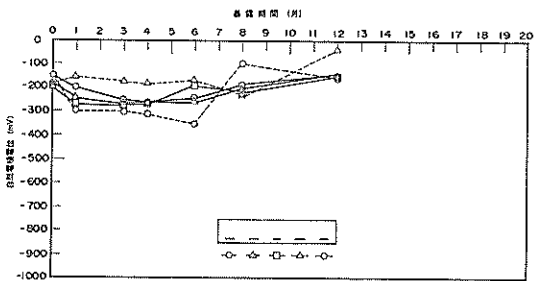
付図-64 実験V (8-2, 電位モニター)



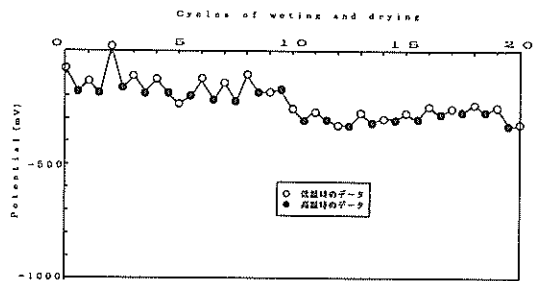
付図-61 実験V (8-1, 主鉄筋)



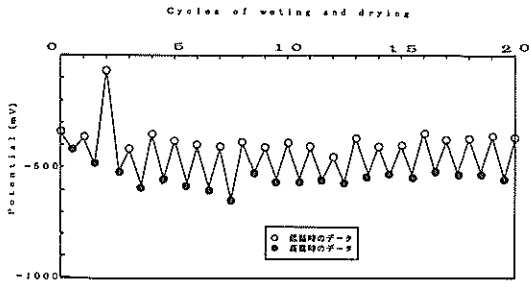
付図-65 実験VI (13-1)



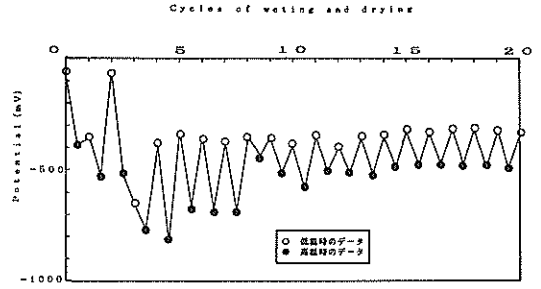
付図-62 実験V (8-1, 電位モニター)



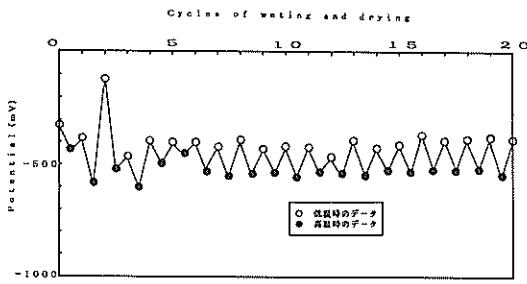
付図-66 実験VI (13-2)



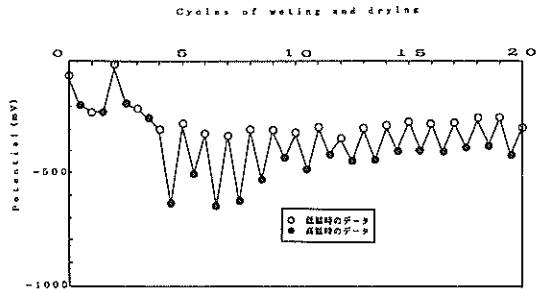
付図-67 実験VI (13-3)



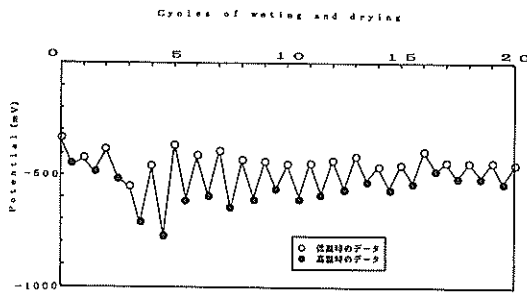
付図-71 実験VI (13-7)



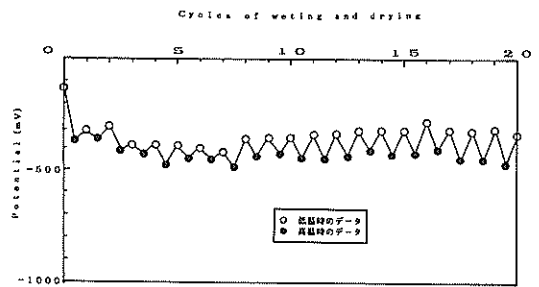
付図-68 実験VI (13-4)



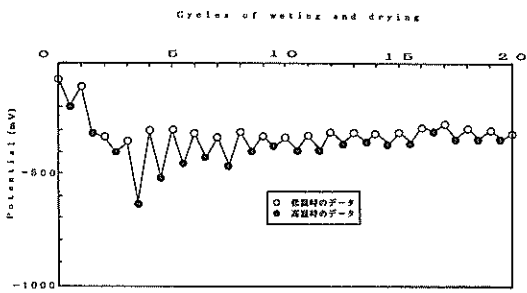
付図-72 実験VI (13-8)



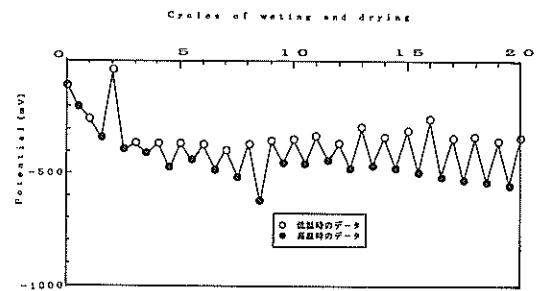
付図-69 実験VI (13-5)



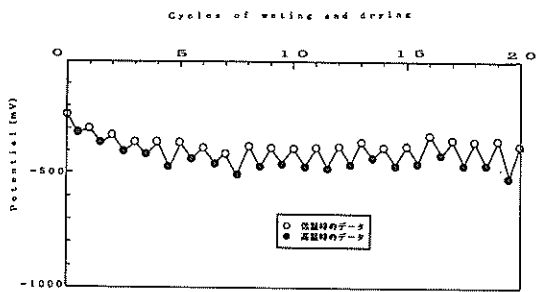
付図-73 実験VI (16-1)



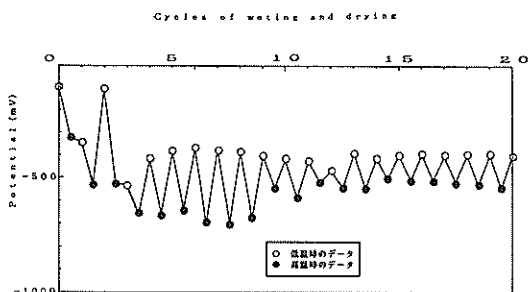
付図-70 実験VI (13-6)



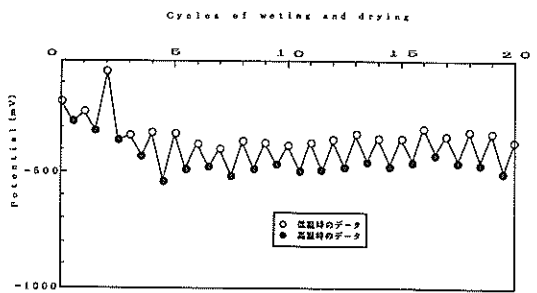
付図-74 実験VI (16-2)



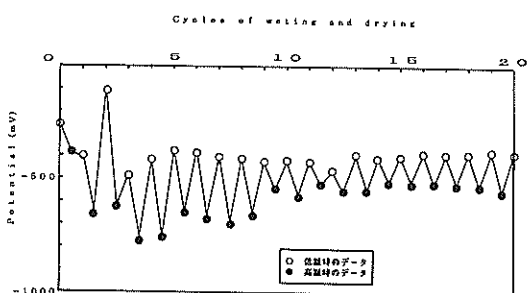
付図-75 実験VI (16-3)



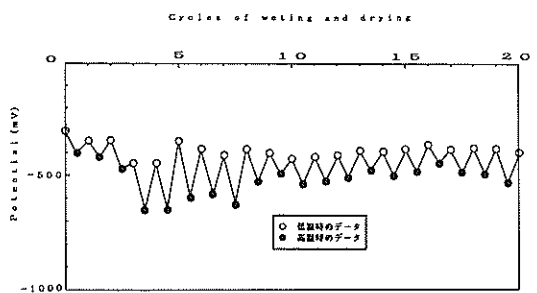
付図-78 実験VI (16-7)



付図-76 実験VI (16-4)



付図-79 実験VI (16-8)



付図-77 実験VI (16-5)

港湾技研資料 No. 725

1992. 3

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 株式会社 昭和工業写真印刷所

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

Copyright © (1992) 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。