

塩害により劣化した鉄筋コンクリート部材の補修効果に関する実験的考察

濱田, 秀則
運輸省港湾技術研究所構造部材料研究室研究官

福手, 勤
運輸省港湾技術研究所構造部材料研究室長

阿部, 正美
運輸省港湾技術研究所構造部主任研究官

<https://hdl.handle.net/2324/4495877>

出版情報 : Concrete Research and Technology. 3 (2), pp.85-95, 1992-07-15. Japan Concrete Institute

バージョン :

権利関係 :



塩害により劣化した鉄筋コンクリート 部材の補修効果に関する実験的考察

浜田 秀則^{*1}・福手 勤^{*2}・阿部 正美^{*3}

概要 本研究は、塩害によりかぶりコンクリートが剥落した鉄筋コンクリート部材の補修の方法ならびにその効果を検討するためにに行った。主要目的は、既存の補修工法の補修効果を検討することである。すなわち、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から成る補修工法において、各工程の有する効果の相対比較を行うことを目的とするものである。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塗装の影響は極めて小さい。(2)母材コンクリートとの付着強度が同程度の断面修復材料を使用した場合、材料の相違が補修効果に及ぼす影響は極めて小さい。(3)コンクリートの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発生の有無に左右される。(4)母材コンクリート中の塩分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。

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

1. ま え が き

近年、塩害による鉄筋コンクリート構造物の劣化が各地で相当数報告されている。港湾構造物の場合、栈橋コンクリート上部工の塩害が顕著である。鉄筋コンクリート構造物（部材）の塩害とは、内在塩化物イオンもしくは外来塩化物イオンの影響により、コンクリート内部の鉄筋が発錆し、それに伴いかぶりコンクリートのひびわれ、剥離、剥落が生じることである。

塩害によりかぶりコンクリートが剥落した場合の基本的な補修方法の工程は、

- ① 鉄筋周囲の塩分を含有した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¹⁾。しかしながら、あらゆる場合にこれらのすべての工程が必要であるのか、また、それぞれの工程が全体の補修効果に寄与する程度の相違などはこれまでに明らかにされていない。

このような背景から、本研究は鉄筋塗装、コンクリー

トの断面修復、コンクリートの表面被覆より成る補修工法において各工程の有する効果の相対比較を行うことによって、既存の補修工法の補修効果を検討する目的で実施した。

2. 実験の計画および結果の解析法（分散分析）

2.1 実験の概要

実験の基本的構成は、補修部分を有する鉄筋コンクリート（RC）はり供試体による、内部鉄筋の腐食促進試験および模擬海洋環境暴露試験である。これに付随して種々の劣化評価試験を行った。実験は表-1に示すよう

表-1 実験Ⅰ～Ⅳの分類

		試験の種類	
		腐食促進試験	模擬海洋環境暴露試験
ひびわれ 導入の有無	導入しない	Ⅰ	Ⅲ
	導入する	Ⅱ	Ⅳ

*1 運輸省港湾技術研究所 構造部 材料研究室研究官（正会員）

*2 同 上 構造部 材料研究室長（正会員）

*3 同 上 構造部 主任研究官

に、実験Ⅰから実験Ⅳに分類される。実験Ⅰおよび実験Ⅱでは供試体に対して腐食促進試験を実施した。一方、実験Ⅲおよび実験Ⅳでは模擬海洋環境暴露試験を実施した。また、実験Ⅰおよび実験Ⅲ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Ⅱおよび実験Ⅳ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剥離）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。

2.2 直交計画

先にも述べたが、本研究の目的は、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より成る補修工法において、各工程の有する効果の相対比較を行うことである。そのため、本研究の各実験（Ⅰ～Ⅳ）においては、直交計画に則って供試体を製作した。今回採用した直交計画は、実験計画法の中では「2³型（もしくは2⁷型）」と称されているものである。

表-2に2³型直交表の基本型を示す。実験Ⅰ～Ⅳにおいて取り上げた要因と水準を表-3に示す。供試体を製作する際の要因として、「鉄筋塗装の有無」、「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

表-2 2³型直交表の基本型

列番号 ケース番号	1	2	3	4	5	6	7
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	1	1	1	1
3	0	1	1	0	0	1	1
4	0	1	1	1	1	0	0
5	1	0	1	0	1	0	1
6	1	0	1	1	0	1	0
7	1	1	0	0	1	1	0
8	1	1	0	1	0	0	1
表示	A	B	A×B	C	A×C	B×C	A×B×C (D)

表-3 供試体製作の要因と水準

要 因	水 準
鉄筋塗装の有無	0. 無塗装 1. 塗装
断面修復材料の種類	0. 無収縮セメントモルタル (Ⅰ) 1. ジェムフィックス(SBR)セメントモルタル (Ⅱ)
コンクリートの表面被覆の有無	0. 被覆なし 1. 被覆あり
母材コンクリートの練りませ水の種類 (母材コンクリート中の塩分の有無)	0. 水道水練り (塩分なし) 1. 人工海水練り (塩分あり)

表-4 本実験における直交計画

ケース	鉄筋塗装	断面修復	表面被覆	練りませ水
一体構造	無	無	無	水道水
無補修	無	無	無	水道水
1	無	Ⅰ	無	水道水
2	無	Ⅰ	有	人工海水
3	無	Ⅱ	無	人工海水
4	無	Ⅱ	有	水道水
5	有	Ⅰ	無	人工海水
6	有	Ⅰ	有	水道水
7	有	Ⅱ	無	水道水
8	有	Ⅱ	有	人工海水

(ケース1～8が直交計画)

ンクリートの練りませ水の種類（母材コンクリート中の塩分の有無）」の4つを取り上げた。表-2に示す基本型をもとに立案した供試体製作の直交計画を表-4に示す。この8ケースに加えて、「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）」も製作した。表-2の列番号1に「鉄筋塗装（要因A）」、列番号2に「断面修復（要因B）」、列番号4に「表面被覆（要因C）」、また、列番号7に「練りませ水（母材コンクリート中の塩分の有無）（要因D）」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。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）は以下のよう仮定される。

$$(\text{測定データ}) = (\text{全体平均}) + (\text{鉄筋塗装の効果}) + (\text{断面修復の効果}) + (\text{表面被覆の効果}) + (\text{練りませ水の効果}) + (\text{誤差})$$

2.3 分散分析

本実験においては、得られた実験結果の分散分析を実施した。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²⁾。

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

この「F」を以下本文ではF値と称する³⁾。これまでの研究により、F値の確率分布型（一般にF分布と称されている）は明らかになっている⁴⁾。分析結果の判定は、一般には上側確率5%および1%が1つの目安とされ、分散分析の結果が上側1%確率を超える場合は「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」と判断されている。本研究においては，それに加えて，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」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。

3. 実験の方法

3.1 供試体の形状，寸法および製作の手順

図-1 に本研究で用いた供試体の基本的形状および寸法を示す。実験 I, II, III, IV で供試体の寸法が幾分異なるが，基本的形状は全く同様である。図-1 に示した寸法は，実験 II において用いた供試体のものである。図に示されるとおり，供試体は角柱型であり，あらかじめの中央部に高さ 7 cm の切り欠き部（図-1 の黒塗り部）を設けておき，その部分を補修したものである。また，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。使用した鉄筋はいずれも SD 30 の D 16 である。なお，使用に際してはサンドブラスト等の特別な処理はしていない。そのため，鉄筋表面は一部黒皮が混在した状態であった。

主鉄筋は供試体表面からのかぶり高が 6.2 cm 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 10 cm であり，底面からのかぶり高が 6.2 cm，側面からのかぶり高が 2.7 cm の位置に 5 本埋設されている。5 本の電位モニター用鉄筋のうち 1 本は供試体のほぼ中央部の母材コンクリートと修復モルタルの境界に位置する（図-1 で No. 3 に相当，以後「補修部」と称する）。また，5 本のうちの 2 本は母材コンクリートと修復モルタルの境界に位置し，鉄筋の半分は母材コンクリート，残りの半分は補修モルタルに埋設されている（図-1 で No. 2, No. 4 に相当，以後「境界部」と称する）。また，残りの 2 本は供試体の両端部の母材コンクリート中に埋設されている（図-1 で No. 1, No. 5 に相当，以後「母材部」と称する）。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。

供試体の製作手順を以下に示す。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。その際，断面欠損部分においては鉄筋はその表面の約 2 分の 1 が露出している。次に，鉄筋の露出表面の塗装を行った。塗装に先立って鉄筋表面を磨き，その後アルキッド樹脂系耐食プライマーを用いて塗装を行った。通常，実構造物で取り行われている補修工事では鉄筋の全周にわたり，コンクリートをはつり落とし，塗装を行うようにしている。したがって，本実験で取り行った鉄筋塗装の方が塗装の面積は小さいことになる。鉄筋塗装材が十分硬化した後に，コンクリート面をワイヤブラシで

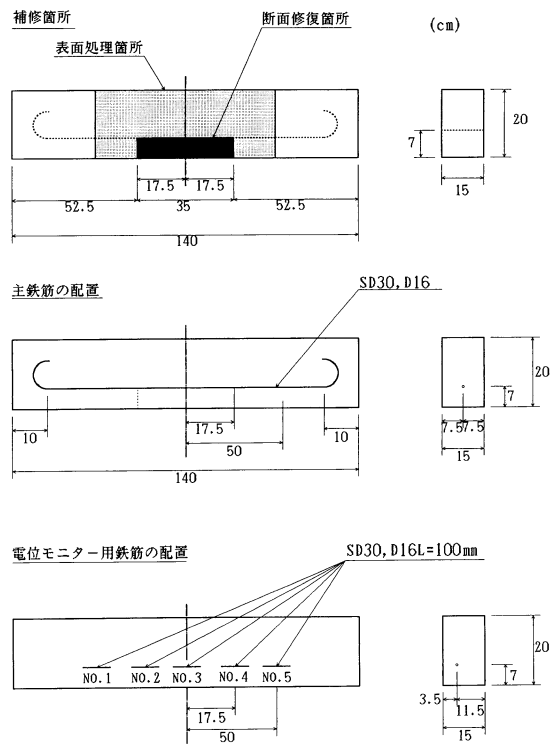


図-1 供試体の形状および寸法（実験 II）

磨き，欠損断面の修復を行った。断面修復材料は，後述するとおり無収縮セメントモルタルとゴムラテックスセメントモルタルの 2 種であり，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，供試体の側面および底面（図-1 で網掛け部に相当）にコンクリート表面の被覆を行った。

3.2 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，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-5 に示す。なお，練りませ水として水道水と人工海水（NaCl 3.3% 溶液）の 2 種類を使用した。

3.3 補修材料

(1) 鉄筋塗装材

鉄筋塗装材として，アルキッド樹脂系耐食プライマー（さび転換型特殊顔料混入プライマー）を使用した。塗

表-5 コンクリートの配合

G _{max} (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
					W	C	G	S	減水剤	A E 剤
20	8±2.5	4±1	60	46	165	275	1020	852	5.5	1.0

布に先立って、鉄筋表面の汚れを十分に落とした後、ハケを使用した三層塗りとした。

(2) 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（高性能収縮低減剤を添加したもの）、およびゴムラテックスセメントモルタル（超速硬セメントとSBRラテックスを混合したプレミックスタイプのモルタル）の2種類を使用した。表-6にこれら2種の材料の材令28日における基本的物性の試験結果を示す。

表-6 断面修復材の基本的物性

	圧縮強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)
無収縮セメントモルタル	539	2.60×10^5	25.7
ゴムラテックスセメントモルタル	393	1.93×10^5	21.4

(3) コンクリートの表面被覆材

コンクリートの表面被覆材として、クロロプレネウム系のコンクリート表面被覆材を使用した。被覆方法は、コンクリート表面をワイヤブラシで磨いた後、メーカーの仕様に従い7層仕上げとした。図-2にその構造を示す。なお、合計膜厚は約2mmである。

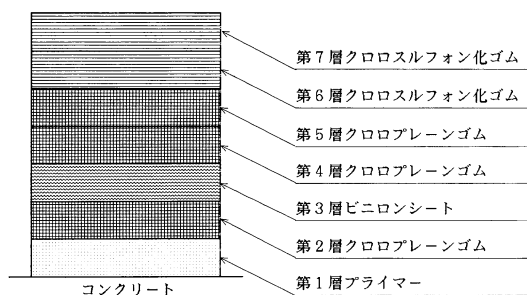


図-2 コンクリートの表面被覆の構造

3.4 供試体へのひびわれの導入

実験Ⅱおよび実験Ⅳにおいては、表面被覆が十分に硬化、接着した後に、3等分点曲げ荷重によりひびわれを導入した。その際、断面修復区間がすべて最大曲げモーメント区間に入るように設定した。荷重時の最大荷重は、式(1)⁵⁾により計算した計算破壊荷重の3分の1に設定した。

$$M_u = A_s \cdot f_y \cdot d \cdot \frac{(1 - 0.60 \cdot p \cdot f_y)}{f_c} \quad (1)$$

ここに M_u : 破壊モーメント (kgf・cm)

A_s : 鉄筋の断面積 (cm²)

f_y : 鉄筋の降伏点強度 (kgf/cm²)

d : 断面の有効高さ (cm)

p : 鉄筋比 (A_s/bd)

b : 断面の幅 (cm)

f_c : コンクリートの圧縮強度 (kgf/cm²)

荷重を実施する際に、母材コンクリートと補修モルタルの境界部（コンクリート底面）にπ型ゲージを取り付けておき、ひびわれの発生およびひびわれ幅を測定した。コンクリートの表面被覆を実施していない供試体についてはコンクリートの表面に直接π型ゲージを取り付けた。一方、コンクリートの表面被覆を実施している供試体については被覆材の上からπ型ゲージを取り付けた。

ひびわれの発生状況の概要を図-3に示す。ひびわれは、補修を行った供試体の場合はすべて母材コンクリートと断面修復材との境界部分に発生しており、ひびわれというよりむしろ剥離と呼ぶべき性質のものであった。表面被覆を施していない供試体では除荷時残留ひびわれ幅が0.1mm以上あるのに対して、表面被覆を施している場合はいずれも0.1mm以下であった。なお、荷重後に観察したところ塗膜表面にはひびわれは発生していなかった。これより今回使用したコンクリートの表面被覆

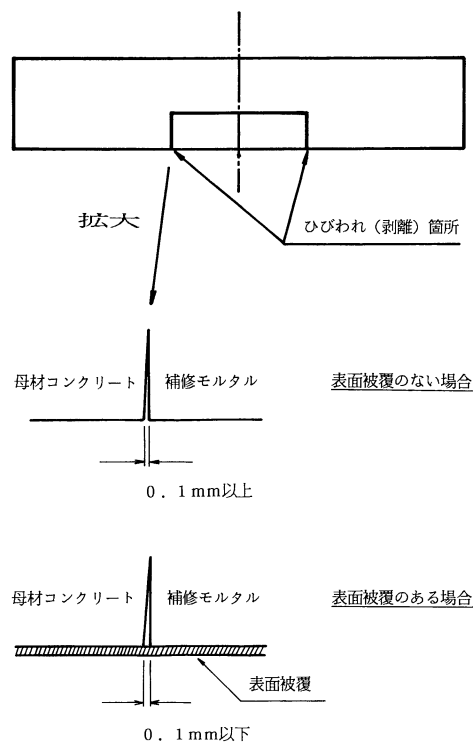


図-3 ひびわれ発生概要

材料は、ひびわれ追従性に優れているとともに、被覆膜自体にある程度の引張強度があるものと考えられ、このためにひびわれ幅を小さくする効果を有していたと考えられる。

3.5 供試体の暴露方法および促進養生方法

供試体の暴露は港湾技術研究所構内の飛沫部シミュレーション装置で実施した。本装置は海洋環境のうちの飛沫部（スプラッシュゾーン）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1年間供試体を暴露した。

供試体の腐食促進養生方法としては、乾湿繰り返し法⁶⁾を用いた。乾湿繰り返し条件は、 $60 \pm 5^\circ\text{C}$ の高温海水浸せき3日、 $15 \pm 5^\circ\text{C}$ の気中乾燥4日の計7日が1サイクルであり、この乾湿繰り返しを20サイクルまで実施した。

3.6 測定項目および測定方法

測定項目は表-7に示すとおり、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、自然電極電位は暴露中および促進養生中定期的に測定を実施した。その他の項目は、暴露および促進養生が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。

(1) 埋設鉄筋の電気化学的計測

自然電極電位は、供試体を海水に浸せきした状態（実験Ⅰ、Ⅱ）もしくは参照電極（銀-塩化銀電極）を海水で湿らせた布を介して測定対象の鉄筋の直上のコンクリート表面に押し当てた状態（実験Ⅲ、Ⅳ）で測定した。

動電位分極曲線の測定は供試体を海水に浸せきした状態で、作用電極（鉄筋）、対極（ステンレス鋼板）、参照電極（銀-塩化銀）の3電極方式により実施した。鉄筋の電位を $\pm 1000\text{ mV}$ （v. s. Ag-AgCl）の間で速度40

mV/minで掃引した。また、この測定結果より、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⁷⁾。「不動態のグレイド」とは分極曲線の形状などから埋設鉄筋の不動態の状態を大まかに判定するものであり、グレイド「0」から「5」までの6段階で判定される。この中でグレイド「0」はほとんど不動態が破壊された状態を示し、グレイド「5」はほぼ不動態が健全であることを示す。グレイド「1」～「4」はその中間であり、数字が大きいくほど不動態の状態はよいことを意味する。

定電位ステップ法の測定も供試体を海水に浸せきした状態で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 -1000 mV 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。測定され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。本研究においては、供試体間の相対比較をする際には、一応の目安として測定開始後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。

(2) 埋設鉄筋の腐食状況観察

削岩機を用いてコンクリートを破碎し、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、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。

(3) 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、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。モルタル部分を微粉碎した試料約5gを蒸留水50ccに24時間浸せきし、粉末試料から蒸留水中へ溶出してきた塩化物イオン量を測定した。

4. 実験の結果および考察

4.1 埋設鉄筋の電気化学的測定

(1) 自然電極電位

図-4に実験Ⅱにおける主鉄筋の自然電極電位の経時変化の一例を示す。今回測定を行った供試体において、各供試体間で自然電極電位の値に差異が認められるものの、 -500 mV より卑な値を示すものは皆無であった。ASTMの基準⁸⁾によると、 -228 mV （v. s. Ag-AgCl）より低い電位であると腐食が生じている可能性が高いとされている。表-8に実験Ⅱの促進養生期間中に測定した自然電極電位の分散分析の結果を示す。図-4および表-8より以下に示すような傾向が読み取れる。

a. 主鉄筋において、促進養生の前半においては、

表-7 測定項目一覧

		実験Ⅰ	実験Ⅱ	実験Ⅲ	実験Ⅳ
自然電極電位	主鉄筋 電位モニター	○ ○	○ ○	○	○ ○
動電位分極曲線	主鉄筋 電位モニター	○	○ ○		
定電位ステップ法	主鉄筋 電位モニター	○	○ ○		
腐食状況観察	主鉄筋 電位モニター	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○
コンクリート中の塩分含有量		○	○		

○：試験を実施したことを示す。

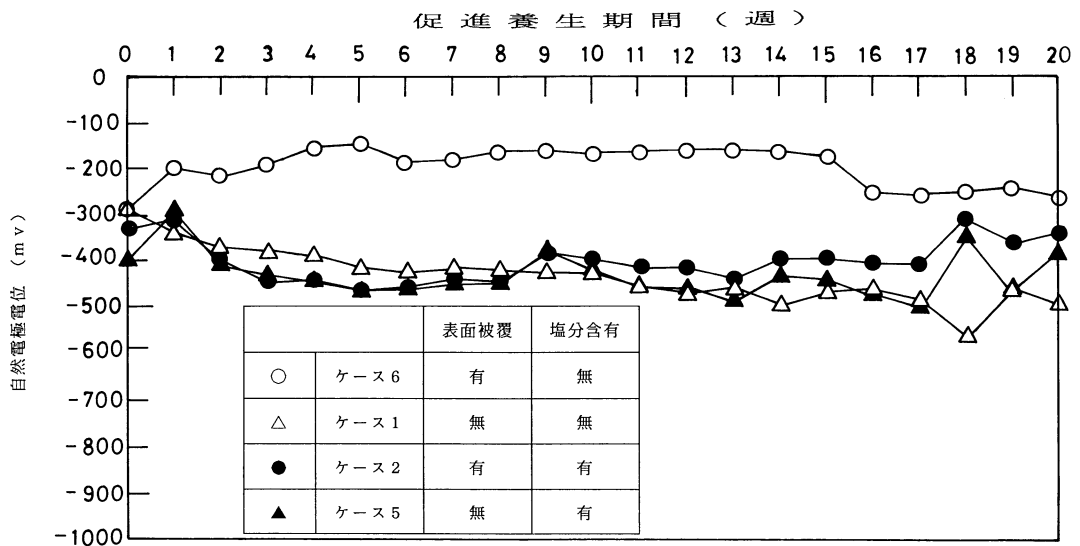


図-4 主鉄筋の自然電極電位の経時変化の一例（実験Ⅱ）

表-8 自然電極電位の分散分析結果の一例（実験Ⅱ）

促進養生 期間 (週)	主鉄筋		電位モニター用鉄筋					
			母材部		境界部		補修部	
	表面被覆	練りませ水	表面被覆	練りませ水	表面被覆	練りませ水	表面被覆	練りませ水
0	△				○		◎	
1		△		◎	○	○	○	
2		○	△	◎	○		○	
3		△	○	◎	△	△	○	
4		△		○			△	
5		△		○		△		
6		△		○			△	
7		△		○				
8		△		○				
9		○		△	△		○	
10	△	△		△	△		△	
11	○	△		○	△		○	
12	△	△		○	△		○	
13	○	○	◎	◎	△		◎	
14	△			△	△		△	
15	△			○	△		○	
16	○	△	△	◎	○	△	○	
17	○	△	△	◎	○		○	
18								
19	○		○	◎	○		○	
20					△			

◎：極めて強い有意差あり
○：有意差あり
△：弱いながらも有意差あり

「練りませ水の種類」に有意差が認められる。すなわち、海水練りの方が自然電極電位は卑（比較的低い値）となる。一方、促進養生の後半になると、

「コンクリート表面被覆の有無」の有意差が認められるようになる。

b. 「母材部」の電位モニター用鉄筋の場合、「練りま

ぜ水の種類」の影響が顕著であり、海水練りの方が電位は卑となる。一方、「補修部」および「境界部」の電位モニター用鉄筋の場合、「コンクリート表面被覆の有無」の有意差が認められ、表面被覆を施している方が電位は貴（比較的高い値）となる。

c. 「鉄筋塗装の有無」、「断面修復材料の種類」の有意差は主鉄筋においても電位モニター用鉄筋においても全く認められない。

以上述べた a～c の傾向は実験 I、実験 III、実験 IV においても概ね同様であった。

(2) 動電位分極曲線（不動態のグレイドの判定）

表-9 に動電位分極曲線より判定した不動態のグレイドを示す。また、その分散分析結果を表-10 に示す。表よりわかるとおり、実験 I（ひびわれなし）の場合、「練りませ水の種類」に極めて強い有意差が認められる

表-9 不動態のグレイド

ケース番号	実験 I	実験 II			
		主鉄筋	電位モニター用鉄筋		
			母材部	境界部	補修部
一体構造	3	2.5	1	1.5	1
無補修	0	0	1.75	0	0
1	2	2	1.25	0	0
2	3	2	1.25	2	2
3	3	2	1	0	1.5
4	2	3	1.5	3.5	3.5
5	2	1.5	0.5	0	0.5
6	5	3.5	2.25	4	3
7	5	2	1	0	0.5
8	2	2	0.75	2	4

電位モニター用鉄筋については、各々 2～4 本の平均値である。

表-10 不動態のグレイドの分散分析結果

		鉄筋塗装	断面修復	表面被覆	練りませ水
実験 I	主鉄筋				◎
実験 II	主鉄筋				
	電位モニター I	母材部			
		境界部		○	
		補修部	△	○	

◎：極めて強い有意差あり
○：有意差あり
△：弱いながらも有意差あり

が、その他の 3 要因に有意差は認められない。すなわち、練りませ水として海水を用いた場合は、水道水を用いた場合に比べて鉄筋の不動態の破壊が進んでいることを示している。一方、実験 II（ひびわれあり）の場合、境界部および補修部の電位モニター用鉄筋について、「コンクリート表面被覆の有無」の有意差が認められる。すなわち、表面被覆を施している方が、不動態のグレイドは高くなる傾向を示す。これより、表面被覆を施すことにより施していない場合に比べて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。

(3) 定電位ステップ法

表-11 に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、この分散分析結果を表-12 に示す。主鉄筋の場合も電位モニター用鉄筋の場合も「コンクリート表面被覆の有無」の有意差が認められる。すなわ

表-11 定電位ステップ法の測定結果

ケース番号	実験 I	実験 II			
		主鉄筋	電位モニター用鉄筋		
			母材部	境界部	補修部
一体構造	10.6	13.7	33.9	30.4	33.9
無補修	75.6	56.5	30.1	164.0	190.0
1	18.8	22.7	35.0	45.0	76.0
2	----	8.2	28.6	16.2	11.5
3	7.9	15.5	28.8	32.5	41.6
4	12.1	11.4	29.9	9.1	7.8
5	12.7	15.6	30.8	34.2	21.5
6	6.8	5.8	20.3	6.7	2.4
7	----	13.6	31.4	35.2	21.5
8	15.9	14.0	20.3	14.2	----

表中の値は電流密度（ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ）であり、各々 2～4 本の平均値である。

表-12 定電位ステップ法の分散分析結果

		鉄筋塗装	断面修復	表面被覆	練りませ水
実験 I	主鉄筋			○	○
実験 II	主鉄筋		△	△	
	電位モニター I	母材部		△	
		境界部		○	
		補修部			

○：有意差あり
△：弱いながらも有意差あり

ち、表面被覆を施している方が、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、実験Ⅱの主鉄筋において、「断面修復材料の種類」に弱いながらも有意差が認められ、実験Ⅰにおいて「練りませ水の種類」の有意差が認められるが、この原因は明確ではない。

4.2 腐食状況観察（発錆面積率）

表-13に主鉄筋の発錆面積率、表-14に電位モニター用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-15に示す。なお、表-13および表-15において主鉄筋を「フック部」と「全体」の2種類で示した。「フック部」というのは両端のフック（屈曲した部分）を示しており、母材コンクリート中に埋設されている部分である。一方、「全体」というのはフック部を含む主鉄筋の全体を示している。この表より以下のことが読み取れる。ひびわれを導入していない実験Ⅰおよび

実験Ⅲにおいては、「練りませ水の種類」の有意差が顕著である。すなわち、練りませ水として海水を使用している方が発錆面積率は大きくなる。しかしながら、「鉄筋塗装の有無」、「断面修復材料の種類」、「コンクリート表面被覆の有無」には全く有意差が認められない。一方、ひびわれを導入している実験Ⅱおよび実験Ⅳにおいては、「コンクリート表面被覆の有無」に有意差が認められるようになる。すなわち、表面被覆を施していない方が発錆面積率は大きくなる。

また、実験Ⅳにおいて「断面修復材料の種類」に弱いながらも有意差が認められるが、主鉄筋の場合は断面修復材料Ⅱを使用した方が発錆面積率が小さくなり、電位モニター用鉄筋（境界部）の場合は断面修復材料Ⅰを使用した方が発錆面積率が小さくなるという結果であり、主鉄筋の場合と電位モニター用鉄筋の場合でその効果の方向が異なるため、明確な傾向であるとは言い難い。全体的にみて、「鉄筋塗装の有無」および「断面修復材料の種類」に関してはほとんど有意差は認められない。

4.3 コンクリート中の塩化物含有量

表-16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、この分散分析結果を表-17に示す。供試体にひびわれを導入していない実験Ⅰにおいては、「練りませ水の種類」に極めて強い有意差が認められ、「コンクリート表面被覆の有無」に弱いながらも有意差が認められる。また、「鉄筋塗装の有無」に有意差が認められ、鉄筋塗装を施している方が塩分含有量が小さくなる傾向が認められるが、理論的に考察するのは難しく、これはデータのばらつきによるものと考えられる。一方、ひびわれを導入した実験Ⅱにおいては、「コンク

表-13 主鉄筋の発錆面積率

(%)

	実験Ⅰ		実験Ⅱ		実験Ⅲ		実験Ⅳ	
	フック部	全体	フック部	全体	フック部	全体	フック部	全体
一体構造	2.7	3.8	10.0	23.1	2.3	10.0	0.4	1.3
無補修	0.1	37.3	2.7	38.7	2.8	28.6	0.5	22.0
1	15.3	21.3	1.2	48.0	1.4	7.4	0.3	4.3
2	2.7	2.8	28.9	62.8	5.6	18.8	1.4	4.2
3	0.4	0.6	17.8	61.6	4.2	14.4	0.2	4.1
4	8.7	10.6	10.1	14.0	1.2	3.7	0.7	2.5
5	1.4	4.9	25.0	75.3	2.5	8.6	0.4	6.6
6	3.9	3.9	8.1	8.7	1.0	3.2	1.1	3.8
7	3.3	4.8	7.8	49.0	2.0	5.7	0.2	4.9
8	13.3	15.1	24.1	52.7	4.4	14.4	1.0	3.5

フック部の場合も鉄筋の全表面積を分母としている。

表-14 電位モニター用鉄筋の発錆面積率

(%)

	実験Ⅰ			実験Ⅱ			実験Ⅲ			実験Ⅳ		
	母材部	境界部	補修部	母材部	境界部	補修部	母材部	境界部	補修部	母材部	境界部	補修部
一体構造	6.7	8.6	13.0	67.0	62.2	49.3	0	0	0	0	0	0
無補修	5.1	19.2	71.0	35.4	88.0	97.1	0	4.2	2.5	0	24.6	53.3
1	10.2	14.4	16.5	50.6	97.1	81.5	0	0	0	0	9.8	21.7
2	1.0	2.8	5.6	73.0	80.0	45.0	2.5	17.6	64.6	2.7	4.1	6.6
3	5.8	2.8	3.8	68.5	92.1	93.2	1.4	17.3	12.5	4.3	30.4	25.2
4	8.8	5.9	4.1	56.6	21.4	57.1	0	0	0	0	0	3.7
5	6.4	2.2	10.8	78.6	99.0	95.6	8.6	6.1	1.7	3.0	16.7	18.7
6	1.0	1.3	2.5	51.2	6.4	5.6	0	0	0	0	0.7	4.7
7	0.3	5.4	5.2	60.3	94.1	84.0	15.9	1.4	0.5	0	28.6	6.6
8	18.7	15.5	11.7	66.8	84.5	67.5	1.0	8.2	7.6	0	10.9	0.2

表-15 発錆面積率の分散分析結果

			鉄筋塗装	断面修復	表面被覆	練りませ水
実験Ⅰ	主鉄筋	フック部				◎
		全体				○
	電位モニターⅠ	母材部				
		境界部				
		補修部				
実験Ⅱ	主鉄筋	フック部				○
		全体			△	○
	電位モニターⅠ	母材部				○
		境界部			△	
		補修部			○	
実験Ⅲ	主鉄筋	フック部				○
		全体				○
	電位モニターⅠ	母材部				
		境界部				○
		補修部				
実験Ⅳ	主鉄筋	フック部		△	◎	
		全体	△	△	○	
	電位モニターⅠ	母材部				△
		境界部		△	○	
		補修部			○	

◎：極めて強い有意差あり
○：有意差あり
△：弱いながらも有意差あり

リート表面被覆の有無」に極めて強い有意差が認められ、「練りませ水の種類」の有意差が小さくなる。これより、コンクリートにひびわれが存在する場合は、コンクリート中への海水の浸入を抑制するために、表面被覆を実施することが重要となってくることがわかる。

4.4 考 察

(1) 鉄筋塗装およびコンクリートの断面修復の補修効果

以上の実験結果によると、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の3工程により補修を行った場合、「鉄筋塗装の有無」、「断面修復材料の種

表-16 コンクリート中の可溶性塩化物含有量

(重量パーセント)

	実験Ⅰ	実験Ⅱ
一体構造	0.090	0.079
無補修	0.150	0.137
1	0.090	0.093
2	0.320	0.060
3	0.249	0.138
4	0.243	0.020
5	0.300	0.118
6	0.142	0.015
7	0.230	0.143
8	0.081	0.094

(C1⁻ v.s. モルタル)

表-17 塩化物含有量の分散分析結果

	鉄筋塗装	断面修復	表面被覆	練りませ水
実験Ⅰ	○		△	◎
実験Ⅱ			◎	△

◎：極めて強い有意差あり
○：有意差あり
△：弱いながらも有意差あり

類」が供試体の補修効果に及ぼす有意差は極めて小さなものであった。

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ゴムラテックス (SBR) セメントモルタルである。表-6 にこの両者の基本的物性値を示しているが、強度、弾性係数は両者で差がある。しかしながら、この両者の違いが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強度に差がなかったことが推察されるが、このために補修効果に差異が認められなかったものと考えられる。しかしながら、両者の遮塩性、酸素透過性といった物性に関するデータがないため、考察が厳密性に欠ける点は免れない。

(2) コンクリートの表面被覆の補修効果

主鉄筋および補修部、境界部の電位モニター用鉄筋の発錆面積率に基づき、「コンクリート表面被覆の有無」の補修効果について考察する。表-18 にその分散分析結果をまとめる。表より明らかとなっており、「コンクリート表面被覆の有無」の有意差を左右するのは供試体のひびわれの有無である。供試体にひびわれが生じる場合は「コンクリート表面被覆の有無」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認められない。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被覆が必須となる。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被覆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被覆材料はひびわれ追従性に優れていた。このことより、表面被覆材料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1つの重要な要因となるものと考えられる。

(3) 母材コンクリート中の塩分の有無の影響

主鉄筋および補修部、母材部に位置する電位モニター用鉄筋の発錆面積率に基づき、「練りませ水の種類」の影響について考察する。表-19にその分散分析結果をまとめる。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、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、補修部分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母材コンクリート中の鉄筋が発錆する結果となる。この現象は、参考文献3)において取りまとめた実験においても

表-18 コンクリート表面被覆の分散分析結果

		実験Ⅰ	実験Ⅱ	実験Ⅲ	実験Ⅳ
主鉄筋	全体		△		○
電位モニター用鉄筋	補修部		○		○
	境界部		△		○
ひびわれの有無		無	有	無	有

○：有意差あり
△：弱いながらも有意差あり

表-19 母材コンクリート中の塩分の有無の分散分析結果

		実験Ⅰ	実験Ⅱ	実験Ⅲ	実験Ⅳ
主鉄筋	全体	○	○	○	
	7ヶ部	◎	○	○	
電位モニター用鉄筋	補修部				
	母材部		○		△
試験の種類		促進試験		暴露試験	

◎：きわめて強い有意差あり
○：有意差あり
△：弱いながらも有意差あり

確認されている。

2つ目は、暴露試験よりも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。促進試験の供試体の方が暴露試験の供試体に比べて、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とが推察される。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溶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。また、暴露試験に比べて促進試験の方が供試体が高温下に置かれるため鋼材の腐食速度が大きくなり、このために練りませ時に混入した塩分の影響を受け易かったものと考えられる。

5. 結 論

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部分を有するRCはり供試体を用いた腐食促進試験および模擬海洋環境暴露試験を行い、その補修効果を検討した。その結果以下に示す結論が得られた。

- (1) 上記の3工程による補修を行った場合、補修効果に及ぼす鉄筋塗装の影響は極めて小さい。
- (2) 母材コンクリートとの付着強度が同程度の無収縮セメントモルタル、ポリマーセメントモルタルなどの断面修復材料を使用した場合、材料の相違が補修効果に及ぼす影響は極めて小さい。
- (3) コンクリートの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、ひびわれ（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、断面修復箇所の周囲の母材コンクリート中の鉄筋が腐食する。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。

6. あ と が き

港湾コンクリート構造物、主に栈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年以上が経過した。その間、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はおらず，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を実施した。また，実験を進めると同時に，「補修設計」の考え方についても検討を加えた⁹⁾。今後は，本研究の成果を補修設計の中にどのように取り入れて行くかを検討していきたいと考えている。

本実験シリーズを開始したのが昭和 61 年であり，これまでに 5 年以上の期間が経過した。この間，港湾技術研究所の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。

参 考 文 献

- 1) 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

技術一技術の現状一，(財)日本コンクリート工学協会・防食研究委員会，1989. 1

- 2) 大村 平：実験計画法と分散分析のはなし，日科技連，1984. 3
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 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，March 1981
- 7) 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
- 8) ASTM C 876-77：Half Cell Potential of Reinforcing Steel in Concrete，1977
- 9) 浜田秀則・福手 勤・阿部正美：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，港湾技研資料，No. 725，1992. 3

(原稿受理年月日：1992 年 1 月 10 日)

A Study on the Corrosion Preventive Effectiveness of Repair Methods for Reinforced Concrete Structures Damaged by Salt Attack

By Hidenori Hamada, Tsutomu Fukute and Masami Abe

Concrete Research and Technology, Vol. 3, No. 2, July 1992

Synopsis The salt attack on RC structure causes cracking and spalling of cover concrete due to the corrosion of embedded steel bars. The main purpose of this study is to evaluate the corrosion preventive effectiveness of the existing repairing method composed of coating of steel, patching by mortar materials and surface coating of concrete. The conclusions obtained from this study are as follows ; (1)Coating of steel does not have a significant corrosion preventive effectiveness in the repairing method. (2)The corrosion preventive effectiveness of the two concrete repairing materials used in this study is almost same. (3)The corrosion preventive effectiveness of the surface coating of concrete depends on cracks between concrete and patching mortar, that is, the effectiveness becomes greater with the cracks. (4)Moisture and chloride contents in concrete are significant factors which affect the corrosion preventive effectiveness of repairing.

Keywords : salt attack, repair, coating of steel, patching, surface coating of concrete