

報告 補修を施した鉄筋コンクリート試験体の鉄筋腐食に関する実験

松林 裕二^{*1}・佐藤 幸三^{*2}・岸 利治^{*3}・魚本 健人^{*4}

要旨 : 塩害によって劣化した鉄筋コンクリート構造物を補修した後に生じる再劣化の原因究明および対策提案を目的として、現在、曝露実験を実施している。本報告は、コンクリート中の塩化物イオン量、断面修復の範囲、表面被覆材の有無などの補修条件を要因として実施した屋外曝露期間3年までの実験結果を報告するものである。鉄筋コンクリート試験体中の鉄筋の腐食状況からは、補修条件などによって、鉄筋の発錆状態に差異があることが明らかとなった。

キーワード : 補修, 塩害, 再劣化, 鉄筋腐食, 海洋環境下

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物を補修後、比較的早期に再劣化する事例が報告され、特に塩害に起因するものが増えてきている。近年では、土木構造物の劣化に関わる規準や指針などが刊行され、その対策が整備されてきてはいるが、コンクリート構造物を補修したあとに起こる劣化の過程などについては、未だ明らかではない点が多い。今後、膨大なコンクリート構造物のストックを維持してゆくためには、それらを解明し、将来的な費用対効果に優れる補修工法が合理的に選定できるシステムの構築が必要であると考えられる。

このような状況を踏まえて、筆者らは、塩害による補修後の再劣化メカニズムの解明と適正な対策の選定方法の提案を目的とした研究を行っている。その対象は、道路橋床版の塩害による再劣化を想定したものであり、コンクリート中の塩分量、補修範囲と深さ、表面被覆の有無等を要因として補修条件の異なる鉄筋コンクリート試験体を製作し、実際の海洋環境下および内陸環境下に長期間曝露し、各種測定を行っている¹⁾²⁾³⁾。

本報告は、現在実施中である曝露試験のうち、曝露1年および3年の試験体から取り出した鉄

筋の腐食状況を調査し、補修後の鉄筋の腐食に及ぼす各要因の影響について、検討したものである。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

(1) コンクリートの配合

表-1にコンクリートの使用材料および試験体の配合条件を示す。

表-1 コンクリートの使用材料および試験体の配合条件

水セメント比	65%
セメント	普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm ³)
粗骨材	青梅産硬質砂岩砕石(Gmax20mm, 2.64g/cm ³)
細骨材	大井川産陸砂(密度 2.58g/cm ³)
混和剤	AE 減水剤標準型, AE 剤
塩化物イオン量	0, 2.4, 4.8 kg/m ³
スラブ	12.0 cm
空気量	4.50 %
圧縮強度	34.3 N/mm ² (28 日), 47.5 N/mm ² (1 年)

注) 塩化物イオン量; 腐食要因としての混和量

(2) 鉄筋

鉄筋は JIS G 3112 「鉄筋コンクリート用棒鋼」に規定する SD345, D19 を使用し、加工時の影

*1 太平洋マテリアル(株) 開発研究所 工博 (正会員)

*2 西松建設(株) 技術研究所 (正会員)

*3 東京大学 生産技術研究所 助教授 工博 (正会員)

*4 東京大学 都市基盤安全工学国際研究センター 教授 工博 (正会員)

響を考慮して折曲げ部両端にエポキシ樹脂を塗布した。エポキシ樹脂塗装後の翌日に各鉄筋の質量を測定して基準質量とした。

(3) 対象とした試験体

図-1に試験体の形状および寸法を示す。試験体は150×150×530mm、鉄筋のかぶり厚は30mmとし、模擬はつり部(補修部)の範囲および深さにより6タイプ(A~F)のものを製作した。模擬はつり部は、型枠内底面に発泡スチロールを配置し、コンクリートを打設後、取り除くことによってその形状を設けた。なお、試験体は、2日後に脱型し、3週間養生(気中放置)を行った。

(4) 補修方法および補修材料

模擬はつり部のコンクリート下地は、ワイヤーブラシや圧搾空気等を用いて表面の汚れ、レイトンスおよび埃を除去した。その後、補修部を上向きに設置し、ポリマーセメントペースト(ベオバ系再乳化形粉末樹脂)をコンクリート部分にのみプライマーとして塗布し、断面修復材は同種のポリマーを主成分とするポリマーセメントモルタルを吹付け施工し、6日間の養生を行った。

表面被覆工は、全面に被覆を行ったものは6面、上面被覆を行わない試験体は、上面(コンクリート打設面)を除く5面に実施した。被覆面は、表面の目粗しを行い、エポキシ樹脂系プライマーを塗布し、エポキシ樹脂パテ材でパテ処理を行った。更に、柔軟型エポキシ樹脂中塗り材を2層塗布し(目標乾燥膜厚320 μ m)、柔軟型ウレタン樹脂上塗り材を1層(目標乾燥膜厚30 μ m)塗装した。

表-2に断面修復材の主な基本物性値を示す。

2.2 補修条件

表-3に設定した補修条件を示す。本実験では、補修条件の違いが補修後の再劣化に及ぼす

表-2 断面修復材の強度特性

項目	材齢	試験結果
曲げ強度	7日	8.78 N/mm ²
	28日	9.75 N/mm ²
圧縮強度	7日	48.3 N/mm ²
	28日	59.3 N/mm ²
静弾性係数	28日	22.8 kN/mm ²

影響を明らかにすることを目的としており、実験要因は、はつり深さと範囲、母材コンクリート中へ混和する塩化物イオン量とした。

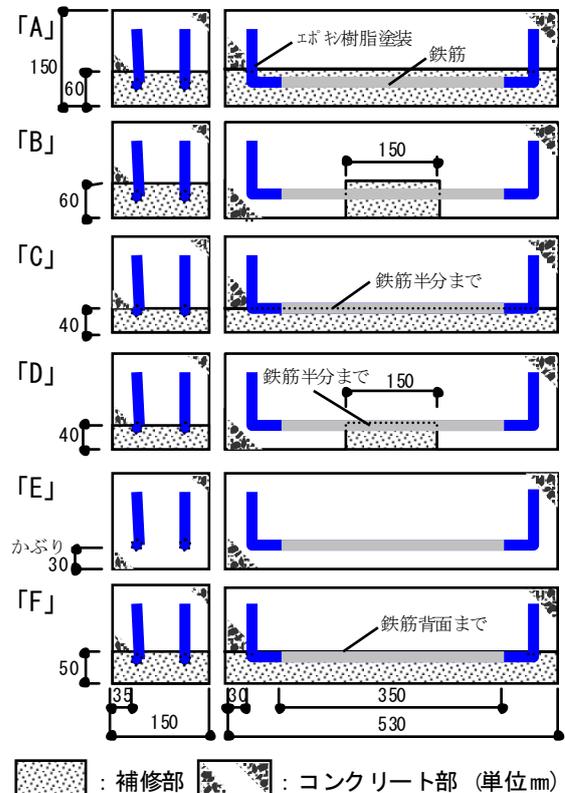


図-1 試験体の形状および寸法

表-3 設定した試験体の補修条件

記号*	補修		Cl ⁻ 量 (kg/m ³)	表面被覆
	範囲	深さ		
1-A-無	全面	鉄筋裏	0	上面無し
1-B-無	部分			
1-E-無	補修無し			全面塗布
1-E-有				
2-A-無	全面	鉄筋裏	2.4	上面無し
2-B-無	部分			
2-C-無	全面	鉄筋半分		
2-D-無	部分			
2-A-有	全面	鉄筋裏		全面塗布
2-B-有	部分			
2-C-有	全面	鉄筋半分		
2-D-有	部分			
2-F-有	全面	鉄筋背面		
3-A-有	全面	鉄筋裏	4.8	
3-B-有	部分			
3-C-有	全面	鉄筋半分		
3-D-有	部分			

*:塩分量の水準-試験体タイプ-上面被覆の有無

補修条件としたはつりの範囲は、部分的に断面修復を行った場合を想定しており、その境界部は、腐食の発生を想定したものである。はつり深さの要因は、塩化物イオンの再拡散の影響、や鉄筋周囲の塩分の存在状態が再劣化に及ぼす影響を検討することを意図したものである。また、上面の被覆材の有無は、床版上面の防水層の有無を想定したものである。

なお、試験体の記号は、混入塩分量の水準(1 : 0kg/m³, 2 : 2.4kg/m³, 3 : 4.8kg/m³)—試験体のタイプ(A~F)—上面被覆の有無を示している。

2.3 曝露条件

海洋曝露は、静岡県伊豆半島東海岸の曝露場において実施した。この海洋曝露場は、波打ち際に設置されており、曝露試験体は、満潮時には波で洗われ、常時海水飛沫を受ける極めて厳しい腐食環境下にある。

内陸曝露は、千葉県千葉市稲毛区の東京大学生産技術研究所・千葉実験所構内の曝露場において実施した。曝露場は、海岸より約 3km 内陸に位置し、飛来塩分はほとんどない。

なお、海洋曝露場および内陸曝露場の近接の網代および千葉測候所の 2001 年 12 月～2004 年 11 月までの月平均の気象データを表-4 に示す。

2.4 試験項目および方法

(1) 鉄筋の腐食面積率および腐食グレード評価

各曝露条件において曝露 1 年および 3 年経過後の試験体の外観を観察した後、試験体を割裂して取り出した鉄筋に透明フィルムを巻き付け、発錆部分を写し取り(中央 350mm)、画像解析装置を用いて腐食面積を測定した。腐食面積は、

図-2 に示す区分で各試験体のコンクリートと補修の界面が網羅できるように分割し、各試験体の腐食面積率は、コンクリートと補修の界面が隣り合う区分面を境界部とし、コンクリート部、境界部および補修部に分け、鉄筋端部を除く全面積に対する割合として算出した。鉄筋の腐食状況を表-5 に示す腐食グレードで評価した。

(2) 鉄筋の腐食量の測定

コンクリートに埋設する前の鉄筋の質量をあらかじめ測定し、解体時に取り出した鉄筋の質量減少から、腐食量を求めた。なお、錆の除去は、60℃のクエン酸二アンモニウム 10%水溶液に鉄筋を 24 時間浸漬し、ワイヤーブラシを用いて行った。曝露せずに保管しておいた鉄筋についても同様の作業を行ない、黒皮分を補正した。

表-4 曝露場近接の気象データ (月平均)

場所	月平均気温, °C		相対湿度, %RH	降雨量, mm	日射時間, 時間
	平均	最低~最高			
網代	16.3	6~27	69.7	1855	1522
千葉	16.1	5~28	69.3	1279	1642

注) 気象庁ホームページより

表-5 腐食グレードの評価基準

グレード	評価基準
I	黒皮の状態、または錆は生じているが全体的に薄い錆であり、コンクリート面に錆が付着していない
II	部分的に浮き錆があるが、小面積の斑点状の錆である
III	断面欠損は目視では認められないが、浮き錆が生じている
IV	断面欠損が生じている

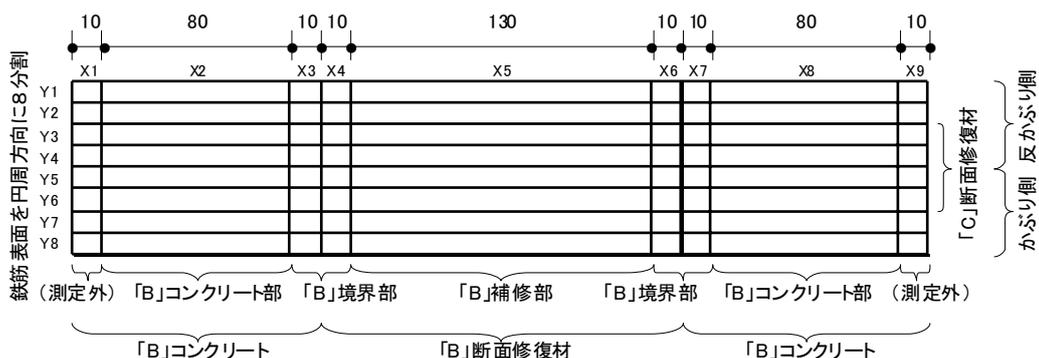


図-2 腐食面積の測定分割位置

3. 結果および考察

3.1 試験体の外観

海洋および内陸環境下に 3 年間曝露した各試験体の表面には、鉄筋の腐食による鉄筋に沿ったコンクリートのひび割れや被覆材の亀裂は生じておらず、再劣化は顕在化していない。

3.2 鉄筋の腐食面積率の経時変化

図-3は、部分断面修復を模した試験体 B の腐食面積率と曝露期間との関係を示したものである。曝露期間の経過に伴って各腐食面積率は増加しており、塩化物イオン量が多いほど増加は大きい。また、上述のように、試験体には腐食によるひび割れや亀裂は生じておらず、曝露期間 3 年においては、鉄筋の腐食は著しいものではない。また、曝露期間 1 年のものは、全体的には腐食が少なく、実験要因ごとの差異を見出しにくいことから、以下は、曝露期間 3 年における腐食面積率によって、考察を行うこととした。

図-4は、内陸曝露および海洋曝露による各試験体の鉄筋の腐食面積率を表したものである。図中の括弧内の記号は、コンクリート部、境界部および補修部の腐食グレードを示している。

3.3 曝露場所による鉄筋腐食の影響

図-4における海洋曝露の鉄筋の腐食面積率は、内陸曝露によるものよりも一部を除き大きい。海洋曝露場所は、飛来塩分を受ける環境にある。別途行った塩化物イオン量の測定結果では、塩化物イオンは、上面を被覆していないコンクリート表面から約 5cm まで進入しており、コンクリート中から断面修復材へ移動しているものの、鉄筋までは到達していないことが確認されている¹⁾。また、補修を施していない塩化物イオン量 0kg/m^3 の試験体 E の腐食はほぼゼロであることと表-4に示した気象条件から、鉄筋の腐食の差異は、海水・雨水による水分が要因であると推察される。

3.4 上面の被覆材の有無による鉄筋腐食の影響

図-4の塩化物量 2.4kg/m^3 の試験体 B, C および D の被覆材の有無を見ると、上面にも被覆材を施した鉄筋の腐食面積率は、被覆しなかった

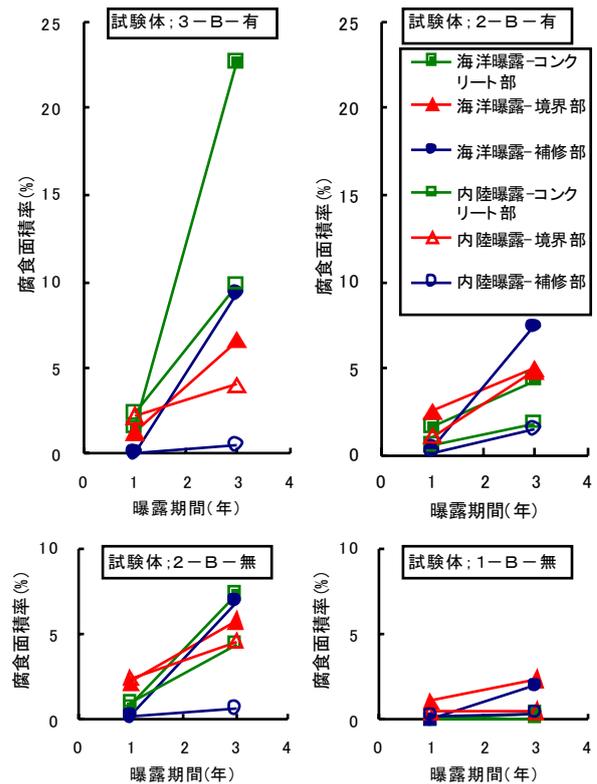


図-3 試験体 B の腐食面積率と曝露期間の関係

ものよりも小さい。また、その部位の腐食面積率は、一部を除いて補修部よりもコンクリート部および境界部の方が大きい。これは、上面の被覆材によって水分や酸素などの腐食因子が遮断されるためであると推察され、床版等補修時においては、防水層がコンクリート部における再劣化の抑制に効果があると考えられる。

3.5 はつり深さおよび範囲による鉄筋腐食の影響

梁の長手方向の全面断面修復によって鉄筋背面まではつりを行った状況を模した試験体 F の腐食面積率は、鉄筋半分まで現れる状況とした同じ塩化物イオン量 2.4kg/m^3 の試験体 C よりも大きく、その腐食箇所のほとんどが境界部である。また、その腐食グレードも境界部で高く、腐食は境界面に集中している。なお、鉄筋背面裏まで十分にはつりを行った状況を模した試験体 A については、内陸曝露のものは腐食が少ないが、海洋曝露のものは腐食が多いものの、いずれも腐食グレード I であり、腐食はごく初期のものである。また、これは、吹付け補修の際に鉄筋が下側となる反かぶり側に、腐食が集中してい

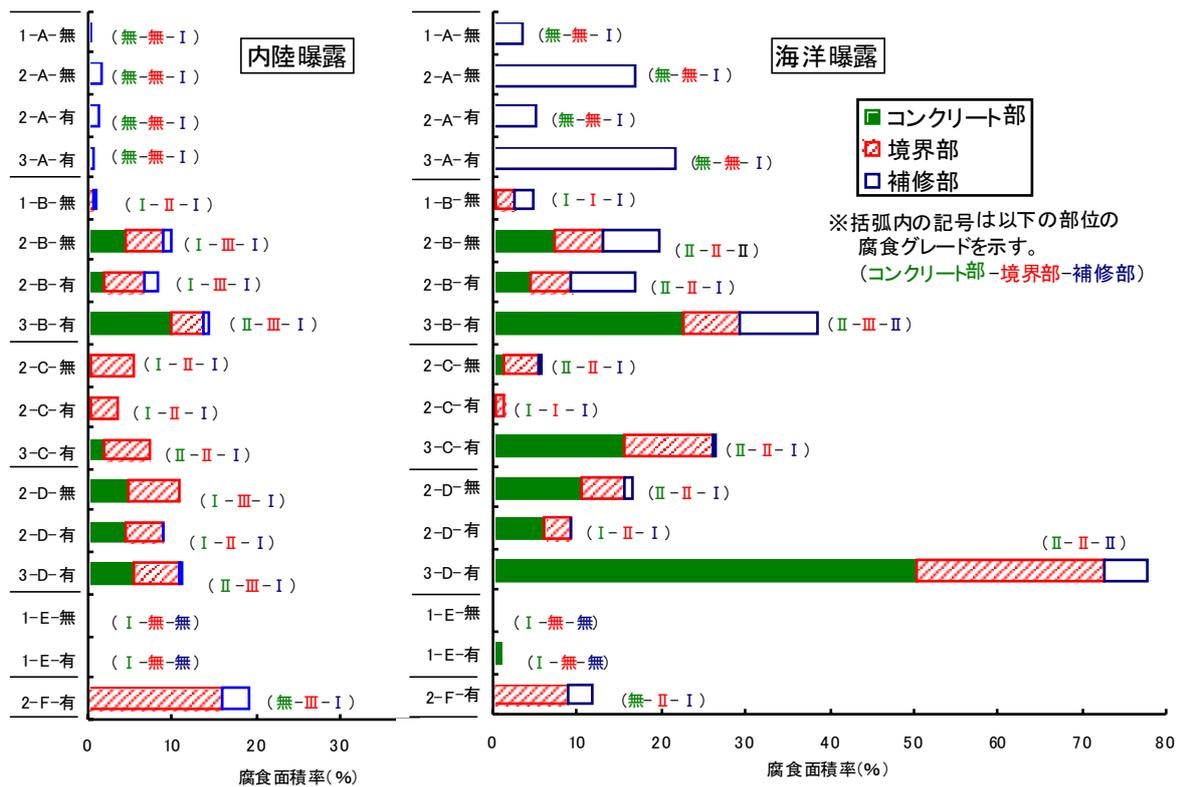


図-4 各試験体の腐食面積率 (曝露期間3年)

注) 試験体記号 ; 「塩化物イオン量 (1:0kg/m³, 2:2.4kg/m³, 3:4.8kg/m³) - 形状 - 被覆材有無」, 括弧内の「無」; 当該部位がないことを示している (例; 試験体 F は、境界部と補修部のみ)

ることから、吹付け補修の際にわずかながら生じた空隙や移動水分による可能性が考えられる。これらのことから、全面断面修復を行う場合には、鉄筋裏側まで十分にはつき取りを行うことが望ましいと考える。

部分断面修復によって鉄筋背面裏まで十分にはつき取りを行った塩化物イオン量 2.4kg/m³ の試験体 B の全腐食面積率は、鉄筋半分まで現れる状況とした同じ塩化物イオン量の試験体 D よりも、海洋曝露では大きく、内陸曝露では同程度である。しかし、前述の試験体 A の腐食原因の推定のように、海洋曝露における補修部の腐食が何らかの状況で生じたものと考えて、コンクリート部と境界部の腐食面積率の和を比較すると、試験体 D の腐食面積率は、試験体 B と同程度かわずかに大きい。本試験体よりも部分断面修復箇所が広い場合には、鉄筋が半分まで現れる状態のはつき取りでは、境界部が広がってしまうため、部分断面修復を行う場合には、鉄筋背面まで十分にはつき取りを行うことが望ましいと考える。

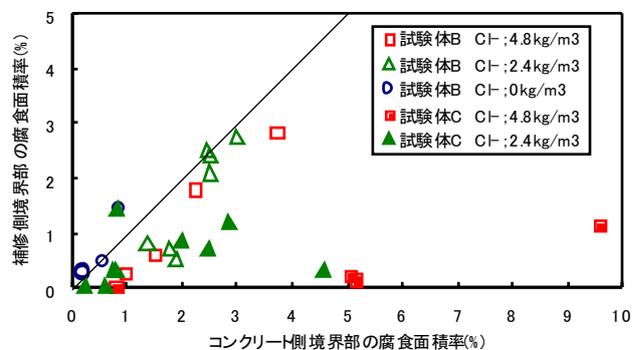


図-5 コンクリート側境界部と補修側境界部鉄筋の腐食面積率

3.6 境界部の鉄筋腐食

全面断面修復のため十分にはつき取りを行わない場合や部分断面修復を行う際には、補修部と周囲のコンクリートに境界部が生じる。図-4でもこれら境界部の腐食面積率は、コンクリートに初期塩分を混入したものは、補修部やコンクリート部よりも比較的大きく、その腐食グレードも高い。

図-5は、海洋曝露および内陸曝露の試験体 B

および C の境界部の鉄筋の腐食面積率をコンクリート側と補修側に細分し、コンクリート側境界部と補修側境界部の腐食面積率の関係として表したものである。コンクリート側境界部の腐食面積率は、補修側境界部よりも大きく、境界部の鉄筋の腐食は、境界部のコンクリート側で発生していることを示している。これらの状況は、電気化学的に断面修復部の腐食実験を行った長滝らの結果⁴⁾と一致している。

3.7 鉄筋の腐食減少量

図-6に海洋および内陸曝露 3 年の鉄筋の腐食減少量と腐食面積率の関係を示す。腐食面積率の結果と同様に、内陸曝露した鉄筋の腐食減少量は、海洋曝露のものよりも小さい。しかし、両者ともコンクリート中の鉄筋腐食の進行としては初期の段階であると考えられる。

4. まとめ

各種条件により補修を行った鉄筋コンクリート試験体を海洋環境下および内陸環境下に曝露し、3 年目の解体調査を行ない、その鉄筋の腐食状況を検討した結果をまとめると、以下のようになる。

- (1) 3 年間海洋曝露を行った試験体中の鉄筋の腐食面積率は、3 年間内陸曝露したものよりも一部を除き大きい。
- (2) 上面の被覆によって、コンクリート部および補修境界部における腐食が低減される。
- (3) 全面断面修復および部分断面修復による補修を行う場合には、鉄筋背面裏まで十分なはつり取りを行うことが必要である。
- (4) コンクリートに初期塩分を混入したものは、補修材と既設コンクリートの鉄筋の境界部には腐食が生じやすく、その腐食量は既設コンクリート側の方が多い。

5. おわりに

本報は曝露 3 年目の結果であり、曝露実験は現在も継続している。今後、さらに継続実施し、その結果を報告する予定である。なお、本研究は、東京大学生産技術研究所 魚本研究室と以下

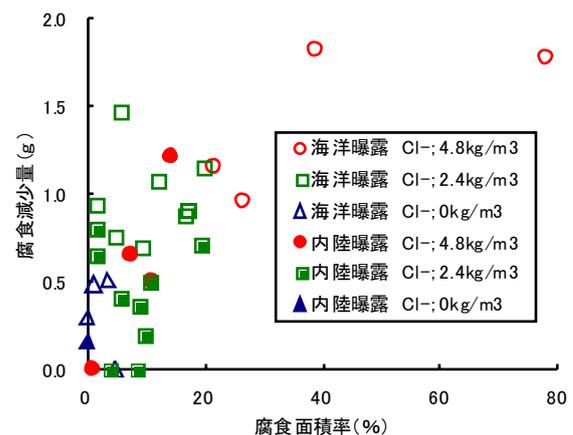


図-6 鉄筋の腐食減少量と腐食面積率

に示す産学 17 団体との共同研究「劣化したコンクリート構造物の補修工法に関する共同研究」として行っているものである。

東急建設(株)、日本化成(株)、ショーボンド建設(株)、オリエンタル建設(株)、芝浦工業大学、太平洋マテリアル(株)、住友大阪セメント(株)、大日本塗料(株)、西松建設(株)、石川島播磨重工業(株)、飛鳥建設(株)、佐藤工業(株)、ブリヂストン(株)、熊谷組(株)、(株)エヌエムビー、電気化学工業(株)、前田建設工業(株)

参考文献

- 1) 槇島修, 伊藤正憲, 榊原弘幸, 魚本健人: 補修した構造物の塩分移動が鉄筋腐食に及ぼす影響に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.955-960, 2005
- 2) 伊藤学, 星野富夫, 戸田勝哉, 魚本健人: 補修を施した鉄筋コンクリートの電気化学的測定に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.961-966, 2005
- 3) 松浦誠司, 森本丈太郎, 元売正美, 魚本健人: 各種補修条件が補修後の再劣化に及ぼす影響に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.1645-1650, 2005
- 4) 長滝重義, 大即信明, 守分敦郎, 宮里心一: 鉄筋コンクリート部材の断面修復部における腐食形成に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.544, V-32, pp.109-119, 1996