

論文 各種仕様で部分断面修復した鉄筋コンクリートの補修効果に関する長期屋外暴露実験

渡部 正^{*1}・松林 裕二^{*2}・岸 利治^{*3}・酒井 雄也^{*4}

要旨：本報告は、鉄筋コンクリート試験体に各種補修材料・工法によって部分断面修復を行い、10年間内陸環境下に暴露した後、鉄筋腐食状況を調査・検討して補修効果について考察したものである。その評価には、著者らが提案する鉄筋腐食の局部ごとの面積率による手法や腐食面積率から求めた腐食の広がり速度による手法などを用いている。その結果、断面修復とコンクリートの境界局部に生じる鉄筋の腐食状況が明らかとなり、これらの対策として、亜硝酸塩系塗布型防錆材および同材と含浸材による併用が効果的であるとの知見が得られた。

キーワード：塩害、鉄筋腐食、補修、断面修復、暴露試験

1. はじめに

著者らの研究グループは、道路橋の鉄筋コンクリート床版を対象として、コンクリート中の塩化物イオン量、断面修復の範囲・深さ、補修材の種類などを要因とした鉄筋コンクリート試験体を作製して、海洋環境下と内陸環境下に長期間暴露し、外観変状調査、電気化学的測定、塩化物イオンの拡散性状の測定、鉄筋腐食状況の調査などを実施している^{1),2),3),4)}。これらは、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ずる再劣化のメカニズムを明らかにすることを目的としている。

塩害により劣化した鉄筋コンクリート構造物、すなわち、鉄筋腐食が生じた構造物を補修する場合には、再劣化などの防止の観点から、部材全面に亘って断面修復するのが理想的であるとされている。しかしながら、現実には、施工条件や経済的観点などの理由から、コンクリートの浮きや剥落が生じた部分についてのみ断面修復するが多い。このような部分断面修復を行った場合には、補修部とコンクリート部の境界部においてマクロセル腐食という局部腐食が生じることが知られている。

既報では、境界部分に発生する鉄筋腐食の広がりや範囲などを考察し、その腐食は、塩化物イオン量 4.8kg/m^3 以下では、境界の前後 10mm 範囲であり、塩化物イオンが存在する場合の腐食量は概ね一定になることを示唆する知見を得ている⁴⁾。今回は、メーカー9社の仕様にて部分断面修復工法を施した鉄筋コンクリート試験体を内陸環境下で10年間暴露し、同試験体から取り出した鉄筋の腐食傾向を詳細に調査・検討したものである。

2. 実験概要

2.1 試験体の形状・寸法および補修仕様

試験体の形状・寸法を図-1に示す。寸法 $15 \times 15 \times 53\text{cm}$ のコンクリート基材にかぶり 3cm で鉄筋を2本配置し、試験体中央に部分断面修復を施すものとした。

コンクリートの配合およびその使用材料は、表-1に示すとおりである。コンクリートには、練混ぜ時に塩化物イオン量が 2.4kg/m^3 となるよう、塩化カルシウム溶液を混和した。鉄筋は、SD345、D19 であり、両端の折り曲げ部分はエポキシ樹脂で塗装を行った。断面修復部は、予め発泡スチロールを配置しておき、その状態でコンクリートを打ち込んで製作した。

各種仕様の補修材料を表-2～表-5に示す。補修は、断面修復部を上側となるように置いて、鉄筋の錆びをワイヤーブラシで除去し、断面修復部のコンクリート下地のケレンおよび清掃を行った後、鉄筋防錆処理、プライマー処理、断面修復および表面被覆を行った。なお、塗布型防錆材を仕様2および仕様9にはコンクリート全面（断面修復部を含む）に、仕様6はコンクリートの断面修復部に施した。また、表面被覆は、各試験体とも、防水層がない道路床版を模して、試験体の上面は施工せず、他の5面を施工した。

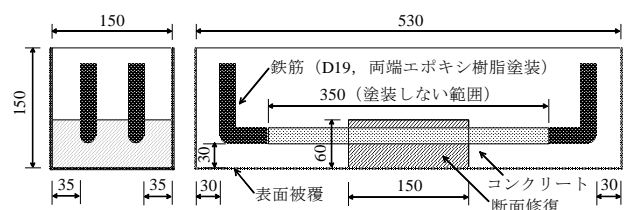


図-1 試験体の形状・寸法 (mm)

*1 日本大学 生産工学部土木工学科准教授 博士(工学) (正会員)
 *2 太平洋マテリアル(株) 開発研究所グループリーダー 博士(工学) (正会員)
 *3 東京大学 生産技術研究所教授 博士(工学) (正会員)
 *4 東京大学 生産技術研究所助教 博士(工学) (正会員)

表-1 コンクリートの配および使用材料

粗骨材最大寸法	20mm
水セメント比	65%
スランブ	12±2.5cm
空気量	4.5±1.5%
圧縮強度	34.3N/mm ² (材齢28日)
セメント	普通ポルトランドセメント
細骨材	大井川産陸砂 密度2.58g/cm ³
粗骨材	青梅産陸硬質砂岩系砕石 密度2.64g/cm ³
混和剤	AE減水剤
塩化物イオン量	2.4kg/m ³

表-2 各種仕様の補修材料 (鉄筋防錆処理)

仕様	鉄筋防錆処理	
	種類	使用量
1	EVA系PCP(亜硝酸リチウム系防錆材添加)	0.6 kg/m ²
2	SBR系PCP(亜硝酸カルシウム系防錆材添加)	1.3 kg/m ²
3	SBR系PCP(塩化物イオン吸着材添加)	1.2 kg/m ²
4	アクリル系PCP(亜硝酸リチウム系防錆材添加)	1.5 kg/m ²
5	エポキシ樹脂	0.2 kg/m ²
6	酢ビVeovaアクリル系PCP(亜硝酸リチウム系防錆材添加)	1mm ×2層
7	錆転換塗料 (フェノール変性アルキッド樹脂)	-
8	フタル酸系樹脂 (防錆材添加)	0.14 kg/m ²
9	アクリル系PCP(亜硝酸リチウム系防錆材添加)	1mm

注1) PCP ; ポリマーセメントペースト

表-3 各種仕様の補修材料 (プライマー処理)

仕様	プライマー処理 (断面修復部)	
	種類	使用量
1	アクリル系Em	0.15 kg/m ²
2	けい酸塩系表面含浸材	0.16 kg/m ²
	亜硝酸カルシウム系塗布型防錆材	0.52kg/m ²
3	Veova系PCP	2.0 kg/m ²
4	水性エポキシ樹脂系	0.1 kg/m ²
5	エポキシ樹脂	0.5 kg/m ²
6	亜硝酸リチウム系塗布型防錆材	0.6 kg/m ²
	アクリル系Em	0.2 kg/m ²
7	ケイフッ化物系浸透性固化材	0.1 kg/m ²
8	SBR系PCP	1.9 kg/m ²
9	亜硝酸リチウム系塗布型防錆材	0.35 kg/m ²
	アクリル系PCP(亜硝酸リチウム系防錆材添加)	厚1mm

注1) PCP ; ポリマーセメントペースト

注2) Em ; エマulsion

表-4 各種仕様の補修材料 (断面修復)

仕様	断面修復	
	種類	単位容積質量(kg/m ³)
1	PCM (SBR系)	2,001
2	PCM (SBR系, 亜硝酸カルシウム系防錆材添加)	2,150
3	PCM (Veova系)	2,117
4	PCM (SBR系)	1,427
5	軽量エポキシ樹脂モルタル	750
6	PCM (SBR系, 亜硝酸リチウム系防錆材添加)	1,499
7	PCM (アクリル系)	2,254
8	PCM (SBR系)	1,911
9	PCM (Veova系)	1,950

注1) PCM ; ポリマーセメントモルタル

2.2 試験体の暴露条件

コンクリート試験体は、千葉県千葉市稲毛区の東京大学生産技術研究所・千葉実験所構内に暴露した。暴露場は、海岸より約3km離れた内陸に位置し、飛来塩分の影

表-5 各種仕様の補修材料 (表面被覆)

仕様	表面被覆		
	工程	種類	使用量
1	プライマー	アクリル樹脂系	0.2 kg/m ²
	パテ	アクリル樹脂系	0.5~0.8kg/m ²
	中塗	アクリル樹脂系	0.35kg/m ² ×2層
	上塗	ウレタン樹脂系	0.12 kg/m ²
2	プライマー	けい酸塩系表面含浸材	0.16 kg/m ²
	プライマー	塗布型防錆材	0.52kg/m ²
	素地調整	PCP (SBR系, 防錆材添加)	厚約2mm
	中塗	柔軟形PCM (アクリル系)	1.2kg/m ² ×2層
3	上塗	柔軟形ポリウレタン樹脂系	0.2kg/m ² ×2層
	プライマー	エポキシ樹脂系	0.3 kg/m ²
	素面形成	珪砂 (5号)	1.0 kg/m ²
	プライマー	ウレタン樹脂系	0.06 kg/m ²
4	中塗	ウレタン樹脂系	厚2~3mm
	上塗	ウレタン樹脂系	0.2kg/m ² ×2層
	プライマー	エポキシ樹脂系	0.1 kg/m ²
	パテ	エポキシ樹脂系	0.5 kg/m ²
5	中塗	柔軟形エポキシ樹脂系	0.35kg/m ² ×3層
	上塗	柔軟形アクリルウレタン樹脂	0.12 kg/m ²
	プライマー	エポキシ樹脂系	0.2 kg/m ²
	パテ	エポキシ樹脂系	0.5 kg/m ²
6	中塗	柔軟形エポキシ樹脂系	0.2kg/m ² ×層
	上塗	フッ素樹脂系	0.15 kg/m ²
	プライマー	変性アクリル樹脂系	0.2 kg/m ²
	パテ	PCM (アクリル系)	0.5 kg/m ²
7	中塗	柔軟形PCM (アクリル系)	0.8kg/m ² ×3層
	上塗	柔軟形アクリル樹脂系	0.2kg/m ² ×2層
	プライマー	特殊アクリル樹脂系	0.1 kg/m ²
	中塗	PCM (アクリル系)	0.6~0.8kg/m ²
8	中塗	弾性セメントフィラー (アクリル系)	0.17kg/m ² ×2層
	上塗	アクリルシリコン樹脂系	0.12 kg/m ²
	不陸調整	PCP (SBR系)	3.8 kg/m ²
	プライマー	エポキシ変性樹脂	0.12 kg/m ²
9	中塗	クロロブレンゴム	0.25 kg/m ²
	繊維補強	ビニロン繊維織布	1層
	中塗	クロロブレンゴム	0.25kg/m ² ×2層
	上塗	ハイパロンゴム	0.25kg/m ² ×2層
9	プライマー	塗布型防錆材	0.35 kg/m ²
	下塗	PCM (アクリル系)	厚1mm
	中塗	PCM (アクリル系)	厚1mm
	上塗	柔軟形アクリルウレタン樹脂	0.15kg/m ² ×2層

注1) PCP ; ポリマーセメントペースト

注2) PCM ; ポリマーセメントモルタル

響をほとんど受けない環境下である。暴露期間は、2002年1月から2012年6月まで10年5ヶ月間である。

2.3 鉄筋の腐食面積率の測定方法

試験体の外観観察後、試験体を割裂して鉄筋を取り出し、鉄筋端のエポキシ樹脂塗装部分を除いた鉄筋 350mm の範囲に透明フィルムを巻きつけて発錆部分をマジックで写し取って2値化した。この画像から専用の画像処理ソフトを用いて腐食面積率を測定した。

3. 試験結果および考察

3.1 試験体の外観

暴露 10 年目における試験体の外観は、一部に表面被覆材の上塗材に割れや亀裂が生じているものの、中塗材内部までの損傷・劣化は生じておらず、かつ鉄筋腐食による変状は全ての試験体で見られなかった。なお、コンクリートから断面修復材の背面への塩化物イオンの拡散

を懸念して分析してみたが、鉄筋近傍の断面修復材の塩化物イオン量は 0.5kg/m^3 以下であり、腐食限界量 1.2kg/m^3 に達していないことを確認している。また、鉄筋の腐食減量の測定も行っているが、腐食減量が顕著に大きくなく、コンクリート部分と断面修復部分の腐食減量を区別できないため、本報告では評価を除外している。

3.2 腐食トレース図による鉄筋腐食の概況

鉄筋の腐食トレース図を図-2に示す。同図は、鉄筋の深さ方向 1/2 ずつ透明フィルムで転写しており、図の下側 1/2 がかぶり側、上側 1/2 が反かぶり側を示している。試験体には2本の鉄筋を配置しているが、ここでは1本のみを図示した。

同図から中央の断面修復部分は概ね腐食は生じては無く、両端のコンクリート部分は内在塩化物イオンによる腐食が発生し、反かぶり側よりもかぶり側が多い傾向にある。これは、コンクリート打設時にかぶり側が下側となっていたため、ブリーディング等の影響で鉄筋の下

面側が錆びやすくなったのであろうと考えられる。また、断面修復とコンクリートの境界部分には、腐食が生じている様子がわかる。これらの状況をより明確に示すため、鉄筋の長さ方向を 2mm 間隔に細分化して腐食面積率を求め、以降の考察を行うこととする。なお、これらの細分化した腐食面積率を局部腐食面積率と称する。

3.3 局部腐食面積率による鉄筋腐食の広がり状況

鉄筋腐食の広がり状況を数値化するため、以下の手順で局部腐食面積率を算出して考察する。局部腐食面積率は、上述のように鉄筋の長さ方向を 2mm 間隔に細分化して腐食面積率を求めたものであり、かつ鉄筋周長の 1/2 をかぶり側と反かぶり側に分けて算出した。すなわち、かぶり側または反かぶり側の長さ 2mm が全て腐食している場合には、局部腐食面積率は 100%となる。鉄筋 2本かつ断面修復部の中央から左右の計4データの局部腐食面積率の平均値を求め、断面修復の中央からの距離との関係を示したものが図-3である。なお、コンクリート試験体製作時の配筋精度の関係で一部にごく僅かではあるが鉄筋位置のずれが生じていたため、局部腐食面積率の算出にあたって断面修復の中央が鉄筋中央となる位置補正を行っているものもある。

局部腐食面積率を図示すると、断面修復、境界およびコンクリート中の各部位の鉄筋腐食の広がり状況がよくわかり、特に、境界近傍の腐食状況を明確に示していることがわかる。全体的な鉄筋腐食の傾向としては、断面修復部分では腐食がほとんど生じておらず、コンクリートとの境界で腐食が極大となり、コンクリート部分では反かぶり側の腐食は僅かに生じ、かぶり側ではブリーディングによる影響と思われる鉄筋腐食が多く生じている状況がわかる。また、境界部分の卓越した局部腐食は、かぶり側と反かぶり側とでは、コンクリート部分のような差異は見受けられず、ほぼ同様である。以下は、局部腐食面積率によって明確となる境界部分を中心に考察する。

仕様1、仕様3および仕様4は、断面修復で多用されているポリマーセメントペーストによる鉄筋防錆を施した後にポリマーセメントモルタルで断面修復を行ったものであり、これらは何れも境界近くを頂点とした局部腐食が生じていることがわかる。各仕様ともに鉄筋防錆処理材には防錆材を配合しており、境界の腐食極大値は仕様1が他よりもやや小さくなっているが、境界に生じる腐食抑制までを望むことが困難であると推察する。

仕様5は、上述とは対照的に鉄筋防錆処理および断面修復ともエポキシ樹脂系の材料で構成されたものであるが、上述仕様と同様に境界部における腐食抑制は見受けられない。

仕様7および仕様8は、鉄筋防錆処理に錆転換塗料ま

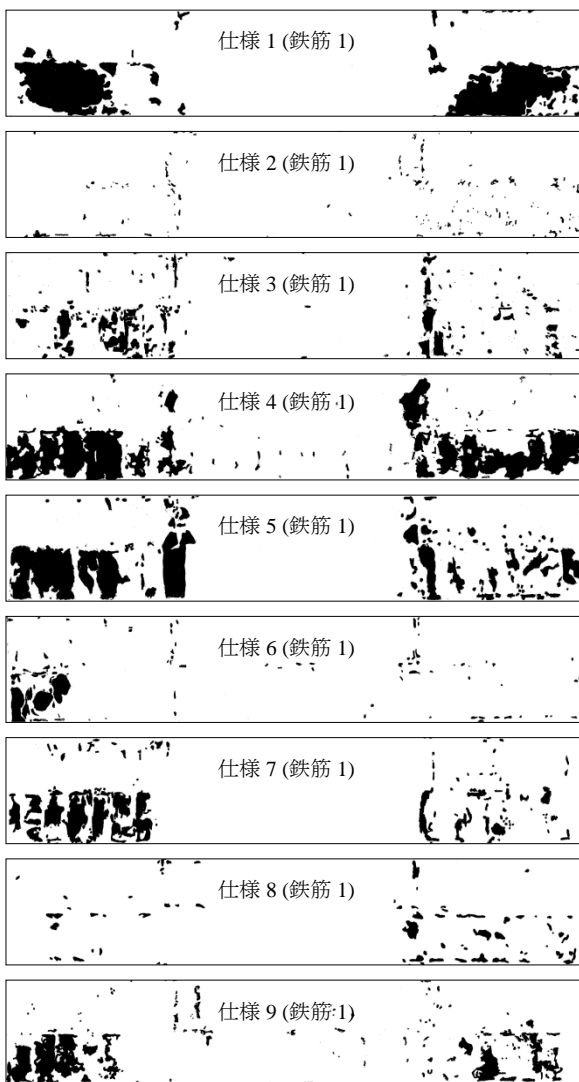


図-2 暴露10年後の鉄筋の腐食トレース図

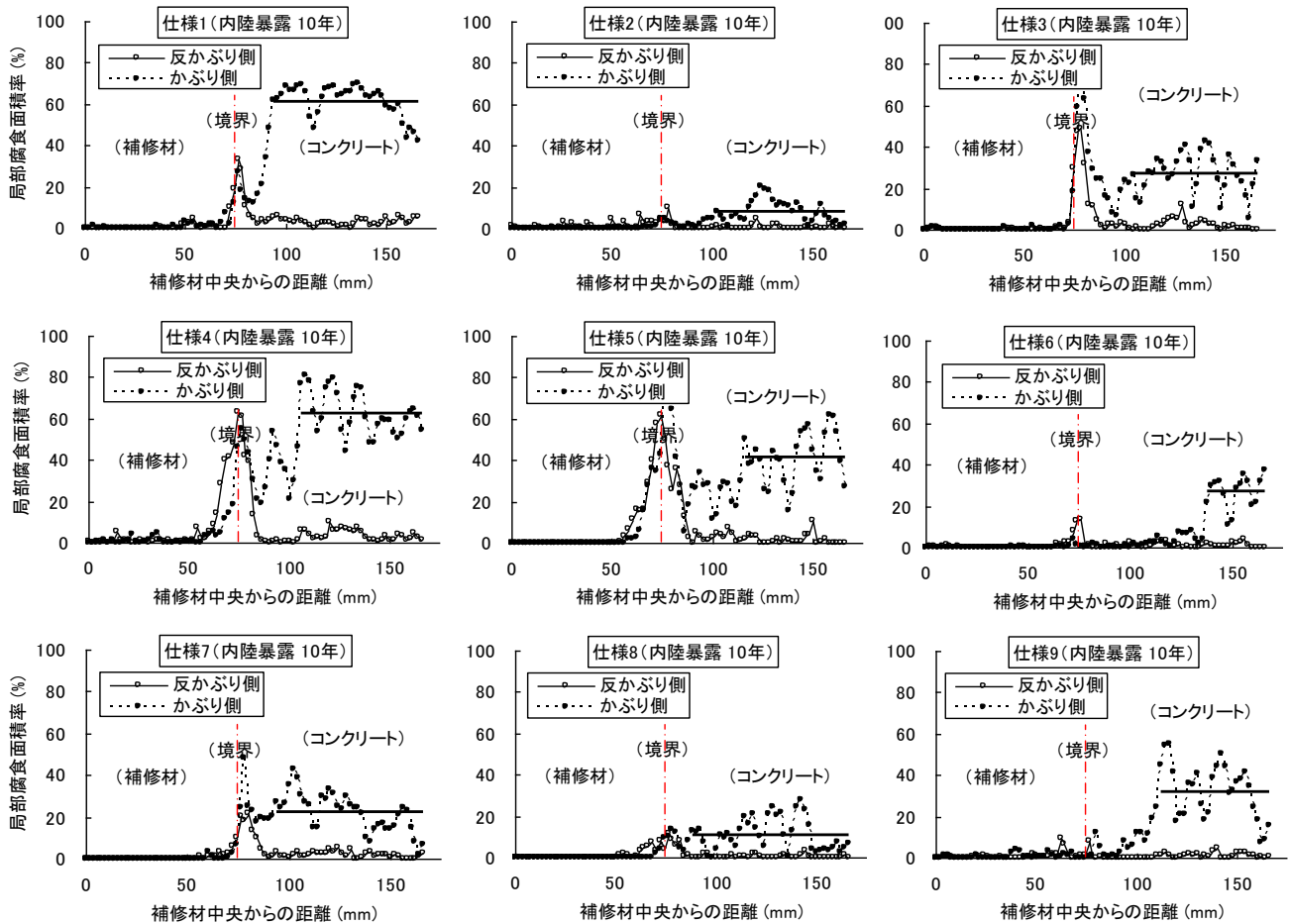


図-3 局部腐食面積率

たは防錆材を加えたフタル酸樹脂を用いたものであり、前者は上述と同様な傾向であるが、後者の境界部分の腐食は、防錆材の種類やメカニズムは明らかではないが、前出までのものよりもやや少ない。

一方、仕様2、仕様6および仕様9は、ポリマーセメント系補修材に塗布型防錆材などを併用したものであり、境界近傍の鉄筋腐食は著しく少ない。その傾向は、仕様9よりも仕様6が顕著である。これは、防錆材の塗布によって鉄筋腐食抑制に有効な亜硝酸イオンが断面修復部分の鉄筋に沿って浸透・拡散した影響で、差異は鉄筋周囲の亜硝酸イオン量に関係していると推察する。さらに仕様2では境界近傍の腐食がほぼなく、コンクリート部分の腐食も著しく少ない。これは上述と同様に亜硝酸イオンの影響であり、更に既報^{5,6)}でも示されているようにアルカリ性付与材として塗布したけい酸塩系含浸材との相乗効果によるものと推察する。なお、これらの塗布型防錆材などの腐食抑制因子の分析や検討は、今回の実験では実施していないため、今後の課題としたい。

また、図中のコンクリート部分に示した太線は、かぶり側コンクリート部分でばらついている鉄筋腐食の平均

を表わしたものであり、境界10mmを除くコンクリート部分の平均値を求めた後、当該範囲で同値以上となった位置から外側の局部腐食面積率の平均値を示したものである。これらから、仕様によってコンクリート部分かぶり側の腐食の差異があることがわかるものの、その考察は、以降の腐食面積率の経時変化と共に行うこととする。

3.4 暴露材齢に伴う鉄筋表面での腐食の広がり

部分断面修復による各部分の腐食の鉄筋表面での経時的な広がりを検討するため、腐食面積率と暴露期間との関係を示したものが図-4である。腐食面積率は、断面修復とコンクリートの境界前後10mm(計20mm幅)、これを除く断面修復部分およびコンクリート部分に大別している。なお、コンクリート部分は、上述の暴露10年目の結果では、反かぶり側の腐食は著しく少なく、かぶり側の腐食が顕著であったが、かぶり側と反かぶり側の腐食がほぼ同じである断面修復部分と比べるため、かぶり側と反かぶり側の平均値で表すこととした。なお、コンクリート部分のかぶり側のみの値は、図示した約2倍の値であった。

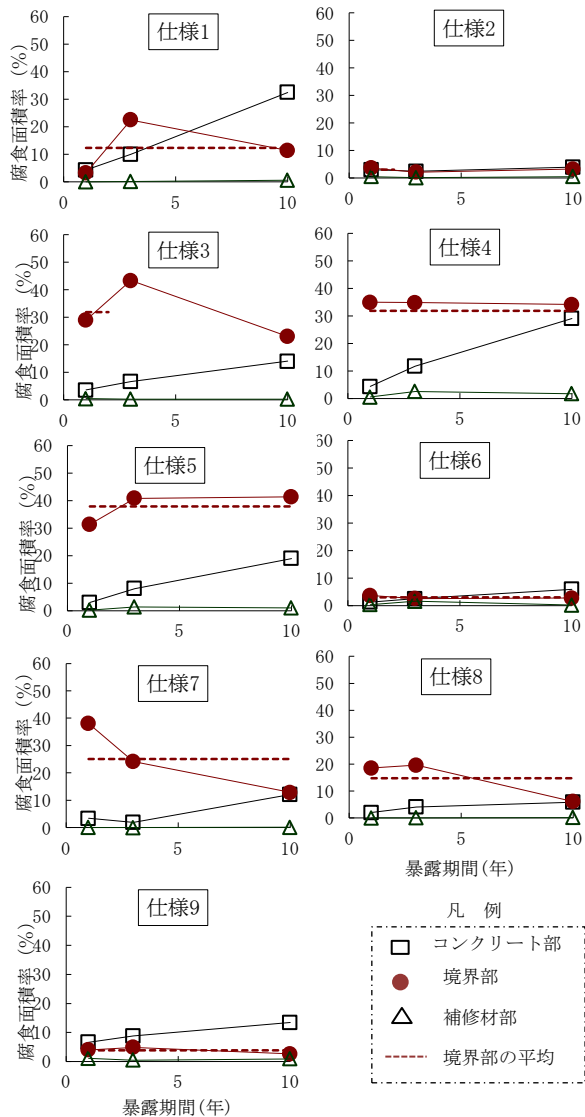


図-4 腐食面積率と暴露期間の関係

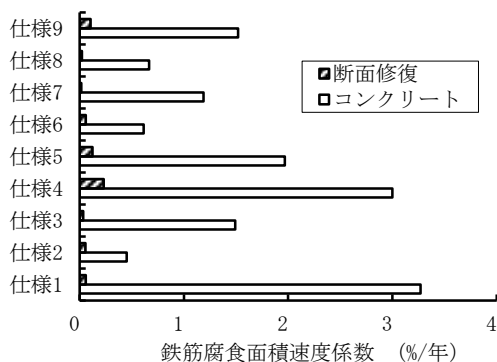


図-5 コンクリートおよび断面修復部分の指標 (腐食面積速度係数)

同図から、コンクリート部分の鉄筋腐食面積は期間の経過に対して比例的に増加し、経時に伴って鉄筋表面上を腐食が広がっていることがわかる。この傾向は、断面修復を施さないコンクリート中の一般的な腐食進行と同

様な傾向であるが、各仕様によって、その広がり速度に差異がある。これは、鉄筋防錆処理や断面修復による母材コンクリートとの塩化物イオン濃度や電導性などの電気化学的な差異、または表面被覆による酸素や水分の透過性の差異とも捉えられなくはないが、本実験の結果のみでは原因は特定しがたい。また、断面修復部分の鉄筋腐食は、コンクリート中の塩化物イオンの拡散が鉄筋腐食限界まで達していないため、ほとんど見受けられないが、酸素や水分などの腐食因子の侵入によっては、コンクリート部分と同様な腐食進行となることが推定される。

境界部分の腐食面積率は、仕様 2,4,5,6,9 では暴露 1 年から 10 年にかけての変化はほとんど見受けられない。一方、仕様 1,3,7,8 においては、暴露 3 年から 10 にかけての腐食面積率が減少している。鉄筋腐食の広がりが経時的に減少するという事は考えられないので、腐食面積率を測定する際の人為的な誤差や試験体間のバラツキなどが影響しているものと考えられる。したがって、補修境界付近の腐食面積率は、暴露 1 年から 10 年にかけてほとんど変化していないと考えるのが適当であると判断され。ただし、経過時間に伴う腐食は、鉄筋表面から深さ方向にも進行してゆく可能性もあるため、これらの局所的な評価手法を今後確立する必要があると考える。

以上の結果および考察から、各種の断面修復ごとの腐食の鉄筋表面での経時的な広がりを以下の手法で示すこととする。コンクリート部分と断面修復部分の腐食の経時的な広がりは、鉄筋腐食面積率 A_{cr} と暴露期間 t との関係を一関数 ($A_{cr} = \alpha \times t$) で近似し、それぞれの傾き α を腐食面積速度係数として算出する。境界部分は、3 材齢の腐食面積率の平均値で表わした。なお、コンクリート部分は暴露開始初期からブリーディングによる影響を考慮して、切片を有する一関数 ($A_{cr} = \alpha \times t + \beta$) でも試算したところ、切片(腐食面積率) β の平均は 2% と小さかったため、切片を持たない関数で表すこととした。これらの算出値を図示すると図-5 および図-6 となる。これらが各部分の腐食の鉄筋表面での広がり指標のまとめであり、小さい値ほど再劣化は生じにくいといえる。

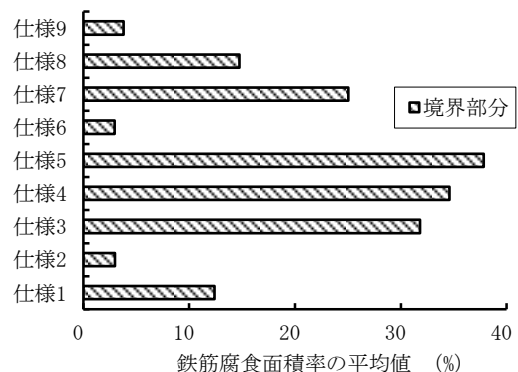


図-6 境界部分の指標 (腐食面積率の平均値)

4. まとめ

本論文は、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ずる再劣化のメカニズムを明らかにする研究の一環として、各種の部分断面修復を行った試験体の内陸暴露 10 年の試験結果のうち、鉄筋腐食に着目して考察を行ったものである。その結果、以下のようなことが明らかになった。

- (1) 腐食面積を細分化した局部腐食面積率による評価は、鉄筋腐食の広がりを表わす指標として有効であり、特に、断面修復とコンクリートとの境界近傍の腐食状況を明確に示すことができる。
- (2) 部分断面修復の境界部分を除くコンクリート部分や断面修復部分の鉄筋の腐食進行は、鉄筋表面上で経時に比例的に広がるものの、境界部分では、1 年までに急激に鉄筋表面へ広がった後、その後の広がりにはばばない。ただし、鉄筋の断面方向への進行に留意することが必要である。
- (3) 現在市販されている 9 社の仕様を評価した結果、多くのものは断面修復とコンクリートの境界部分で腐食が生じたが、断面修復部分の鉄筋近傍のコンクリートへ塗布型防錆材を塗布したものは、境界部分の局部腐食が抑制される。
- (4) 境界部分の腐食抑制に加えてコンクリート部分の鉄筋腐食の抑制には、塗布型防錆材に加えてアルカリ性付与材などのけい酸塩系含浸材の併用が有効である可能性がある。

以上、本論文では部分断面修復を行った内陸暴露 10 年の鉄筋腐食についての考察を行った。今後は、電気化学的測定結果や塩化物イオンの拡散状態の測定結果なども総合的に評価して、部分断面修復に関する課題を解決していく予定である。

なお、本研究は、東京大学生産技術研究所と以下に示す産学 20 団体との共同研究として開始し、現在も有志により一部活動を行っているものである。

芝浦工業大学、(株)IHI、BASF ジャパン(株)、(株)大林組、オリエンタル白石(株)、(株)熊谷組、佐藤工業(株)、ショーボンド建設(株)、住友大阪セメント(株)、太平洋マテリアル(株)、大日本塗料(株)、電気化学工業(株)、東急建設(株)、飛鳥建設(株)、西松建設(株)、日本化成(株)、(株)ブリヂストン、前田建設工業(株)、ニチエー吉田(株)、コニシ(株)

参考文献

- 1) 星野富夫, 松林裕二, 戸田勝哉, 魚本健人: 劣化した鉄筋コンクリート構造物の補修工法に関する研究, コンクリート工学, Vol.47, No.6, 2009.6
- 2) 里隆幸, 二井谷教治, 星野富夫, 魚本健人: 補修を施した海洋暴露試験体の塩分拡散に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.1113~1118, 2007
- 3) 戸田勝哉, 石関嘉一, 伊藤学, 魚本健人: 電気化学的測定による補修を施したコンクリートの研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.757~762, 2007
- 4) 渡部正, 松林裕二, 元売正美, 宮下剛: 部分断面修復で施工した鉄筋コンクリートの補修評価に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.1018~1023, 2012
- 5) 伊部博, 原謙治, 越川松宏: コンクリート用塗布型浸透性防錆剤の防錆効果に関する実験, セメント技術年報 40, pp.435~438, 1986
- 6) 平居孝之, 齊藤仁, 越川松宏: 腐食抑制剤の塗布工法に関する研究—既設 RC 構造物に適用して 5 年間の浸透性確認結果—, 第 45 回セメント技術大会梗概集, pp.638~641, 1991