

# 各種断面修復工法の暴露試験による再劣化評価

## Evaluation of re-deterioration of Concrete Structure by Exposure Test on various Repair Methods

榎 島 修<sup>\*1</sup> 平 間 昭 信<sup>\*2</sup> 渡 部 正<sup>\*3</sup>  
Osamu Makishima Akinobu Hirama Tadashi Watanabe  
松 林 裕 二<sup>\*4</sup> 魚 本 健 人<sup>\*5</sup>  
Yuji Matsubayashi Taketo Uomoto

### 【要旨】

本報告は、塩害劣化したコンクリート構造物の補修後の再劣化の原因とその対策を明らかにすることを目的として実施した産学 17 団体による共同研究の成果の概要と、追加実施した無機系断面修復材を用いた断面修復工法の再劣化の評価についてまとめたものである。共同研究では、暴露実験を主とした検討によって、母材コンクリートに残存する塩化物量、断面修復工法の補修範囲の差異による再劣化への影響および、補修材料の種類による再劣化への影響を評価した。その結果、部分断面修復した場合の補修境界部の鉄筋腐食が顕著であり、マクロセル腐食が先行して生じる状況が確認された。また、断面修復材に亜硝酸系の材料を用いた場合に補修境界部の腐食が抑制される傾向が認められた。追加試験において無機系断面修復材を適用した場合には、補修境界部の腐食が先行する状況も一部に見られたが、その程度は小さくマクロセル腐食を抑制できる可能性が確認された。

【キーワード】 塩害 補修工法 断面修復材 鋼材腐食 海洋暴露

### 1. はじめに

コンクリート構造物の劣化・損傷部の補修方法として劣化・損傷部の除去と断面を回復させる断面修復工法が多くの劣化原因に対応可能であることから最も代表的なものとなっている。ただし、劣化・損傷の原因が外部からの劣化因子の侵入による場合、劣化損傷部以外にも一定の劣化因子が侵入していることが予想される。そのため、劣化・損傷部あるいは鋼材腐食範囲のみを断面修復材で置き換えるだけでは、コンクリート構造物に再び劣化が生じる場合があることが指摘されている<sup>1)2)</sup>。

そこで本研究は、塩害によって劣化したコンクリート構造物を補修した後に生じる再劣化のメカニズムを明らかにし、合理的な補修設計法を提案することを目的として暴露試験を主とした検討を実施した。

評価対象としては、道路橋の鉄筋コンクリート床版の劣化を想定しており、コンクリート中の塩化物イオン量、補修範囲、補修材料の種類、表面被覆材の有無を要因とした試験体を用い、長期間の海洋環境暴露および内陸環境暴露によって再劣化の発生状況を評価した<sup>3)4)5)6)</sup>。

ここでは、補修材料の仕様の異なる 10 種類について暴露 1 年と 3 年の試験体から取り出した鉄筋の腐食調査を中心に、得られた結果を報告する。また、異なる仕様の補修材料の一つとして追加した無機系断面修復材の鉄筋腐食の状況についても同様の評価を行った結果を報告するものである。

なお、この共同研究は、2002 年 4 月より 5 年間、東京大学生産技術研究所と以下に示す産学 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」の一環として実施したものである。(芝浦工業大学、(株)IHI、BASF ポゾリス(株)、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)、ブリヂストン(株)、前田建設工業(株))

### 2. 実験概要

#### 2.1 試験体の仕様

試験体の形状および主な補修条件を図-1、表-1に示す。試験体の寸法は、15×15×53cm、かぶりを3cmとして鉄筋を2本配置した。このとき、断面修復の範囲をA～Fの6通りの形状とし、補修範囲や補修深さおよび表面被覆材の有無を試験要因とした。

なお、母材のコンクリートは、強度レベルが30N/mm<sup>2</sup>となる水セメント比65%とし、コンクリート打設時の練混ぜ水に塩化カルシウムを添加し、塩化物量を0, 2.4, 4.8 kg/m<sup>3</sup>の3水準設定した。配置した鉄筋は、SD345, D19とし、折り曲げた両端部はエポキシ樹脂で被覆した。

表面被覆材の適用範囲は、かぶり背面以外を表面被覆材で覆った状態(1面開放)を道路床版から水分や塩分等

1. 土木事業本部 土木技術部 設計グループ 2. 技術研究所 第三研究室 3. 前田建設工業株式会社  
4. 太平洋マテリアル株式会社 5. 芝浦工業大学

が供給される状況を再現するものとし、比較として全面を表面被覆材で覆った形状を設定した。

補修材料の仕様の異なる場合の試験体は、図-1に示した標準的な部分断面修復の形態であるタイプBとした。また、表面被覆材の適用範囲は1面開放とした。このときの補修材料の仕様を表-2に示す。なお、各仕様における表面被覆材の仕様は異なるが、いずれも評価材齢3年までは外部からの塩化物の浸透は認められていない。

## 2.2 試験体の暴露条件

コンクリート試験体は、海洋環境と内陸環境に暴露した。海洋環境は、静岡県伊豆半島東海岸の常時海水飛沫を受ける厳しい腐食環境である。内陸環境は、千葉市の東京大学生産技術研究所千葉実験所であり、海岸から3km内陸の飛来塩分の影響を受けない環境である。

## 2.3 鉄筋腐食の評価方法

鉄筋の腐食面積の測定は、所定の材齢(1年および3年)で試験体を割裂し、取り出した鉄筋に透明フィルムを巻き付け、発生部分を写し取った。写し取った腐食範囲は、白黒の二値化した画像に取込み、画像処理ソフトを用いて部位ごと(コンクリート部、断面修復部、境界部)に腐食面積を算出した。

鉄筋の腐食減量は、試験体の作製以前に測定した鉄筋重量から、所定の材齢で取り出した鉄筋をクエン酸二アンモニウム10%水溶液に浸漬し、ワイヤーブラシを用いて腐食部分を除去した後の鉄筋重量を差し引いて求めた。

## 3. 部分断面修復試験体の鉄筋腐食状況

### 3.1 鉄筋腐食面積率の分布

鉄筋腐食面積率は、鉄筋中央部の350mmの範囲を対象にした。特に部分断面修復における補修境界部を中心とした部位ごとに腐食面積率で評価した結果について示す。母材コンクリートの塩化物量を $2.4\text{kg/m}^3$ 、表面被覆材を1面開放とした場合(2-B-無)の海洋暴露と内陸暴露に鉄筋腐食面積率の分布を図-2、図-3に示す。

図に示すように、鉄筋端部からの位置に応じた腐食面積率として表したものである。このとき、0~100mmは、コンクリート部、100mm~175mmは断面修復部、175mmは、鉄筋中央部を示す。なお、このときの腐食面積率は、2本の鉄筋の左右の平均値を表したものである。

図に示すように、いずれの環境条件においても断面修復材とコンクリートの境界部の鉄筋腐食面積率が他の部位よりも大きいことが認められた。このとき、腐食面積率が大きい境界部の範囲は、補修の境界から±10mmに限定されている。

また、コンクリート部と断面修復部を比較すると、塩化物を含むコンクリート側が先行して腐食するものと、

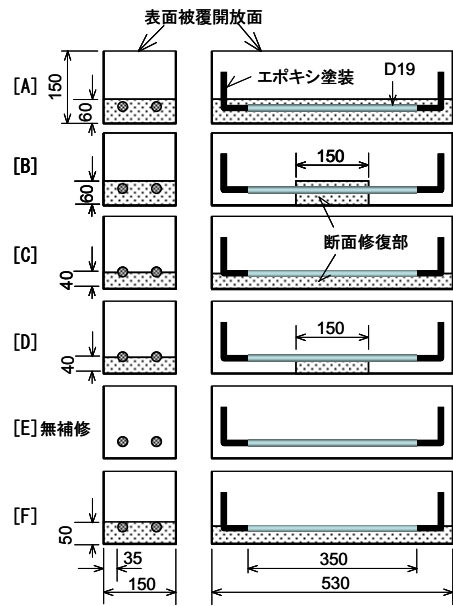


図-1 試験体形状と寸法 (mm)

表-1 主な補修条件

記号	補修範囲	断面修復深さ	塩化物イオン量 (kg/m <sup>3</sup> )	表面被覆
1-A-無	全面	鉄筋背面10mm	0	1面開放
1-B-無	部分	鉄筋背面10mm	0	1面開放
2-A-無	全面	鉄筋背面10mm	2.4	1面開放
2-B-無	部分	鉄筋背面10mm	2.4	1面開放
2-C-無	全面	鉄筋中央	2.4	1面開放
2-D-無	部分	鉄筋中央	2.4	1面開放
3-A-有	部分	鉄筋背面10mm	4.8	全面被覆
3-B-有	全面	鉄筋背面10mm	4.8	全面被覆
3-C-有	部分	鉄筋中央	4.8	全面被覆
3-D-有	部分	鉄筋中央	4.8	全面被覆

表-2 補修材料の仕様

No.	プライマー		断面修復材	
	主剤	助剤	主剤	助剤
0	PCP (Veo)	—	PCM (Veo)	—
1	PE (EVA)	—	PCM (SBR)	—
2	アルカリ付与剤	亜硝酸系防錆剤	PCM (SBR)	亜硝酸系防錆剤
3	PCP (Veo)	—	PCM (Veo)	—
4	水性エポキシ樹脂	—	PCM (SBR)	—
5	エポキシ樹脂	—	エポキシ樹脂モルタル	—
6	PE (Acr)	—	PCM (SBR)	亜硝酸系防錆剤
7	浸透性固化剤	—	PCM (Acr)	—
8	PCP (SBR)	—	PCM (SBR)	—
9	PCP (Acr)	亜硝酸系防錆剤	PCM (Veo)	—

PE:ポリマーエマルジョン, PCP:ポリマーセメントペースト, PCM:ポリマーセメントモルタル  
Acr:アクリル系, SBR:スチレンブタジエンゴム系,  
Veo:ヘオパ系, EVA:エチレン酢酸ビニル系

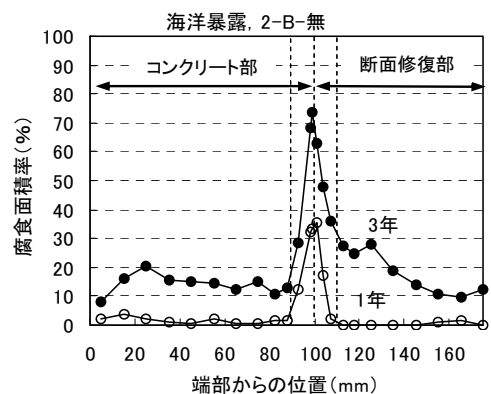


図-2 鉄筋腐食面積率の分布 (海洋暴露)

断面修復部が先行して腐食する形態が認められた。また、補修境界の±10mm 付近を詳細に見ると、境界面をはさんだコンクリート部と断面修復部の両方で腐食が進行している状況が認められた。

次に、補修材料の仕様の異なる場合の補修境界部のコンクリート側10mm と断面修復側10mm における腐食面積率の関係を図-4 に示す。

一般に、部分断面修復を行うと、塩化物を含むコンクリート側が先行して腐食するとされているが<sup>7)</sup>、本研究では図-4 に示すように多くの場合がコンクリート側の鉄筋腐食が先行している状況が認められる。なお、プライマーおよび断面修復材に亜硝酸系の防錆剤を用いた場合、両部位の腐食の進行が小さく、かつ同等に進行する状況が認められた。これは、亜硝酸塩が境界部のコンクリート側に浸透拡散したことによって防錆効果が見られたものと推察され、再劣化の原因の一つと考えられているマクロセル腐食の発生抑制に寄与する可能性があるものと期待される。

### 3.2 鉄筋腐食減量による腐食速度の評価

再劣化の進行を予測するためには、補修条件に応じた鉄筋腐食減量による腐食速度が重要なデータとなる。ただし、今回の暴露試験では、3年経過した段階においても明確な孔食が認められず腐食減量が極めてわずかであること、腐食の進行状況の異なる部位ごとに腐食減量が求められないことから、腐食面積率から腐食減量を推定することを試みた。

一連の鉄筋腐食評価結果を基に、腐食面積率から算定した腐食速度(%/年) と腐食減量の測定による腐食速度( $\text{mg}/\text{cm}^2/\text{年}$ ) の関係を図-5 に示す。図に示すように、腐食面積率によると腐食速度と腐食減量による腐食速度には一定の直線関係が認められた。この結果より、鉄筋の腐食減量が少ない場合には、腐食面積率を測定することで腐食減量による腐食速度を推定することが可能であるものと考えられた。

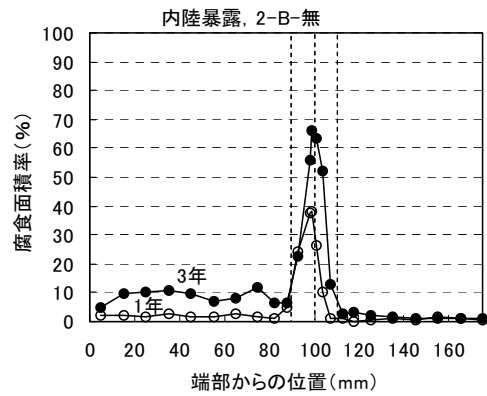


図-3 鉄筋腐食面積率の分布 (海洋暴露)

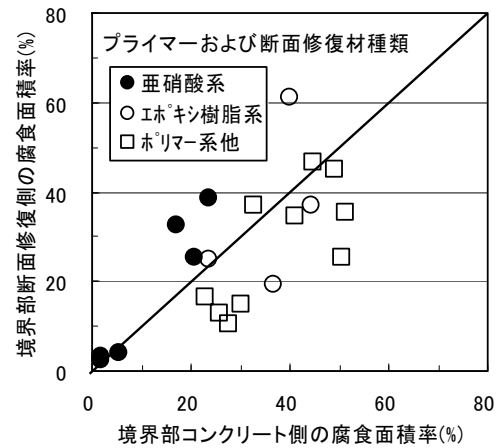


図-4 断面修復境界部の腐食面積率

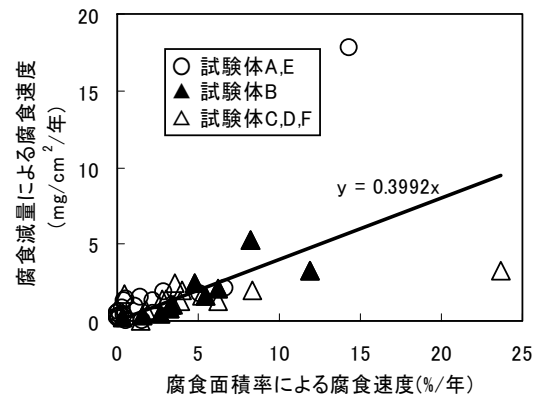


図-5 断面修復境界部の腐食面積率

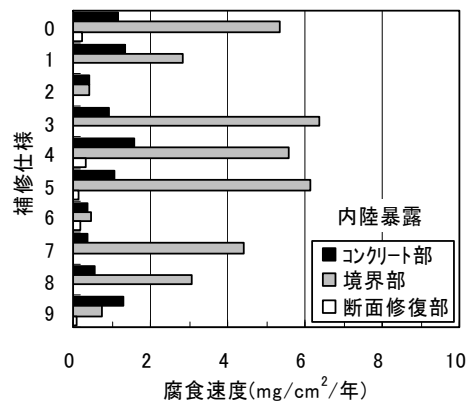
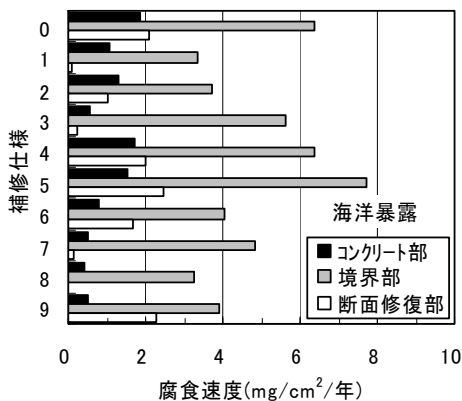


図-6 鉄筋各部位の腐食速度

この関係を使って、部分断面修復した場合のコンクリート部、断面修復部および境界部の腐食速度を推定した。補修材料の仕様の異なる場合の腐食速度を海洋暴露と内陸暴露に分けて図-6に示す。図に示すように、内陸暴露に比べて、海洋暴露の方が腐食速度の速い傾向が見られる。なお、暴露期間3年においてもコンクリートに内在する塩化物が断面修復部における鉄筋位置まで達していないことがいずれの試験体でも確認されている<sup>8)</sup>ことから、暴露環境の違いは水分や温度条件の差異が主な要因となっているものと考えられる。コンクリート部、断面修復部および境界部で見ると、内陸暴露の一部を除いて境界部の腐食速度がコンクリート部、断面修復部より著しく大きい結果を示した。

#### 4. 無機系断面修復材の評価

##### 4.1 実験概要

追加実施した無機系断面修復材の仕様を表-3に示す。ここで用いた断面修復材は、ポリマーを使用しない無機系の材料で構成され、湿式吹付け工法によって施工されるものであり、ノズル先端において圧縮空気によって搬送した硬化促進剤を添加し補修面に吹付ける新しいタイプの断面修復材<sup>9)</sup>である。

断面修復材の下地処理としては、エチレン酢酸ビニル系のポリマーに亜硝酸系防錆剤を混入したプライマーを塗布した。表面被覆には、柔軟性アクリルウレタンを主剤とする表面被覆材を用いた。補修形状は、図-1に示した標準的な部分断面修復であるBタイプとした。試験体作製状況を写真-1、写真-2に示す。

##### 4.2 無機系断面修復材の鉄筋腐食状況

暴露期間3年における鉄筋の腐食状況を図-7に示す。図に見られるように、内陸暴露に比べて海洋暴露における腐食面積がやや大きい状況が認められる。いずれの暴露環境においても腐食範囲は、コンクリート部に限定され、断面修復範囲には腐食はほとんど発生していなかった。補修境界部については、海洋暴露においてわずかに腐食が認められる程度であった。

次に、補修境界部20mmの範囲のコンクリート側と断面修復側の腐食面積率の関係を図-8に示す。図に示すように、補修境界部における腐食面積率は他の補修材料の仕様と比べて小さく、ややコンクリート側に多い傾向であった。この結果から、無機系断面修復材の適用によって補修境界部のマクロセル腐食の抑制効果が期待できる可能性があるものと考えられる。塩化物を多く含有するコンクリート部材に対し、ポリマーセメントモルタルのような導電性の低い材料を用いて断面修復を行った場合、補修された鉄筋と連続する既存コンクリート部材内部の鉄筋において著しいマクロセル腐食が生じる場合が

表-3 無機系断面修復材を用いた補修材料の仕様

プライマー	断面修復材	施工方法	試験体形状
ポリマーエマルジョン (EVA系)	繊維入り 硬化促進セメントモルタル	吹付け	タイプB



写真-1 試験体作製状況 (下地処理: プライマー塗布)



写真-2 試験体作製状況 (吹付け施工による断面修復)

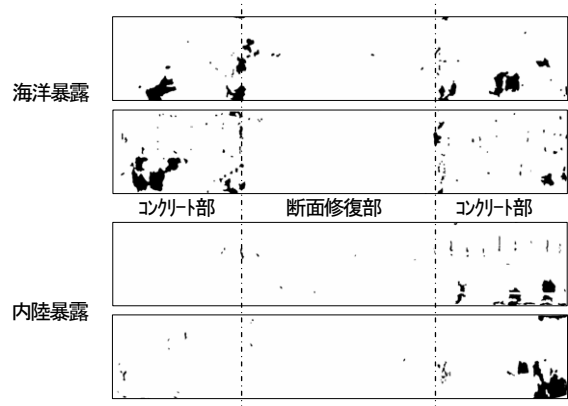


図-7 暴露期間3年における鉄筋腐食状況

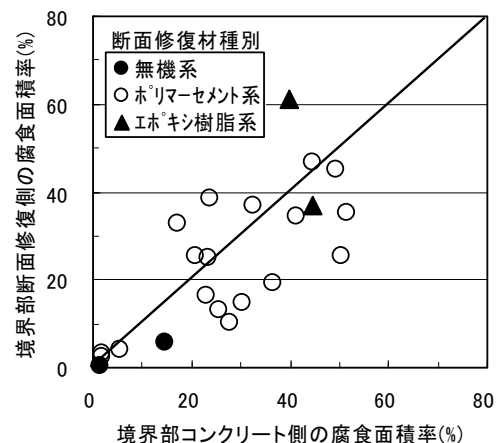


図-8 断面修復境界部の腐食面積率

あることが指摘されている<sup>10)</sup>。ここで確認されたマクロセル腐食の抑制状況は、母材コンクリートと無機系断面修復材の導電性が近いことによるものと推察される。

先に示した腐食面積率から腐食減量による腐食速度を推定した結果を、表-4および図-9に示す。図に示すように、断面修復範囲では、腐食減量による腐食速度は極めて小さいものであった。海洋環境では、コンクリート部に比べ補修境界部の腐食速度が大きい傾向を示していたが、その程度は、図-6に示した他の補修材料と比較しても小さいものであった。

## 5. まとめ

本報告は、塩害劣化によって補修したコンクリート構造物の再劣化メカニズムを明らかにすることを目的とした暴露実験の結果、以下のようなことが明らかとなった。

- (1) 部分的な断面修復を行うと塩化物を含んだ母材コンクリート部や断面修復部に比べて、補修境界±10mmの範囲の鉄筋腐食が顕著となる。
- (2) 断面修復材の種類によってその鉄筋腐食状況に差異が認められ、亜硝酸系を用いたものにマクロセル腐食による鉄筋腐食発生の抑制効果が認められた。
- (3) 腐食面積率によって算出した腐食速度と腐食減量から求めた腐食速度が直線関係にあることが認められた。この結果、鉄筋の腐食量がわずかである段階で腐食減量の推定を行う場合、腐食面積率から腐食減量による腐食速度が推定可能であるものと考えられた。
- (4) 無機系断面修復材を用いた補修工法では、補修境界部の鉄筋腐食はわずかであり、マクロセル腐食による鉄筋腐食発生の抑制効果が認められた。

### 【参考文献】

- 1) 松本武海, 佐藤隆義, 天木儀一: 塩害変状コンクリート桁の再補修 羽越本線葡萄川橋梁, 土木施工, 37巻, 12号, pp.65-68, 1996.
- 2) 日本コンクリート工学協会: コンクリート構造物の補修工法研究委員会報告書(II), 1994.

表-4 腐食速度の推定結果

環境	部位	腐食面積率(%)		腐食面積率による腐食面積速度A(%/年)	腐食量による腐食速度B(mg/cm <sup>2</sup> /年)
		材齢1年	材齢3年		
海洋	コンクリート部	0.75	5.32	1.671	0.667
	境界部	8.99	10.1	3.929	1.568
	補修部	0.05	0.13	0.044	0.018
内陸	コンクリート部	0.46	3.76	1.174	0.469
	境界部	3.36	0.81	0.579	0.231
	補修部	0.09	0.04	0.021	0.008

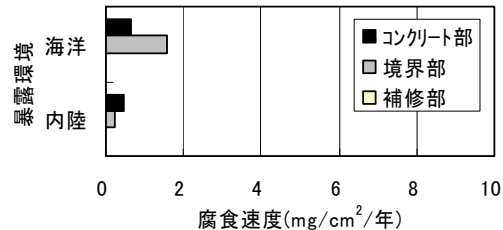


図-9 鉄筋部位の腐食速度(無機系断面修復材)

- 3) 渡部正, 松林裕二, 槇島修, 魚本健人: 部分断面修復が補修後の再劣化に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, vol.29, pp.1059-1064, 2007.
- 4) 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.
- 5) 松林裕二, 元売正美, 伊藤正憲, 加藤佳孝, 魚本健人: 断面修復材中の鉄筋の腐食進行に関する実験, 土木学会第61回年次学術講演会講演概要集, V-292, pp.581-582, 2006.
- 6) 渡部正, 佐藤幸三, 槇島修, 早川健司, 魚本健人: 断面修復工法の種類, 環境条件が鉄筋腐食に及ぼす影響, 土木学会第61回年次学術講演会講演概要集, V-017, pp.33-34, 2006.
- 7) 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.
- 8) 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検討, コンクリート工学年次論文集, vol.29, pp.1113-1118, 2007.
- 9) 川端康夫, 槇島修: 新しい断面修復用湿式吹付け工法(TDRショット工法)の開発と補修工事への適用, (財)高速道路技術センター高速道路保全業務改善研究発表会, 2006.
- 10) 出村克宣, 大濱嘉彦, 伊部博: 補修後5年を経過した鉄筋コンクリート造構造物の鉄筋腐食, コンクリート構造物の補修工法と電気防食に関するシンポジウム, pp.29-32, 1994.

**Summary** This paper outlines the results of a joint research conducted by 17 industrial and academic organizations to identify the causes of re-deterioration of repaired concrete structures subject to deterioration due to salt damage and the remedial measures to be taken. This paper also presents the results of additional evaluation of the effectiveness of methods for restoring the cross section using inorganic materials for controlling re-deterioration. The main component of the joint research was a weathering test. The salt content remaining in concrete, the parent material, and the effects on re-deterioration according to the range of repair made by a method of repair of cross section and to the type of repair material were evaluated. As a result, it was confirmed that the corrosion of reinforcement was outstanding at the boundary of the repaired section and macrocell corrosion occurred first in the case where part of the cross section was repaired. It was also recognized that the use of nitric acid materials for repairing the cross section resulted in the corrosion at the boundary of the repaired section being controlled. In the additional evaluation, it was found that the corrosion at the boundary of the repaired section occurred first in the case where inorganic repair materials were used. The degree of corrosion was, however, small and the possibility of controlling macrocell corrosion was verified.

**Key Words:** corrosion-induced damage due to salt attack, repair method, patching material, corrosion of steel, marine exposure,