

# 報告 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

里 隆幸<sup>\*1</sup>・二井谷 教治<sup>\*2</sup>・星野 富夫<sup>\*3</sup>・魚本 健人<sup>\*4</sup>

**要旨:** 本検討では塩害で劣化した RC 構造物を補修した後に再劣化が生じる原因の究明と対策の提案を目的とした暴露実験を行っている。その内、本稿では様々な補修条件で作製した試験体について、解体調査による外来および内在塩分のコンクリートおよび断面修復材への浸透・拡散に関する分析結果について報告する。また、それらの結果から塩化物イオンのみかけの拡散係数を推定した結果および FEM 解析による拡散予測についても報告する。

**キーワード:** 塩害, 補修, 海洋環境下, 再劣化, EPMA, みかけの拡散係数

## 1. はじめに

近年、補修したコンクリート構造物が比較的早期に再劣化する事例の報告が増えている。これには補修後の劣化過程が十分に把握されておらず、再劣化を考慮した補修対策が取られていないことが一因であると考えられる。したがって、再劣化の原因および過程を明確にすることは劣化状況に応じた最適な補修工法を選定するためにも極めて重要である。

以上の点に鑑み、本検討では補修を施したコンクリート構造物の塩害による再劣化メカニズムの解明と適正な対策の提案を目的として各種の検討を実施中である。特に、道路橋床版の再劣化に着目し、コンクリート中の初期塩化物イオン量、補修範囲、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作製し、海洋および内陸環境下での長期間の暴露実験を実施している<sup>1)</sup>。

本報では海洋暴露試験体を対象に、暴露期間 1 年および 3 年における試験体内部の塩化物イオンの分布状況を電子線マイクロアナライザー（以下、EPMA と略記）による面分析および塩分分析試験により調査した結果を報告する。また、これらの調査結果をもとに試験体製作時に

コンクリートに混ぜ込んだ内在塩分および外来塩分の浸透拡散について、コンクリートおよび断面修復材のみかけの拡散係数の算定を試みた。さらに、FEM 解析による塩化物イオンの分布状況の将来予測についても併せて報告する。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体の概要

表-1 にコンクリートの概要を示す。本検討では鉄筋背面のコンクリートに残存する塩化物イオンの影響を評価するために、内在する初期塩化物イオン量を 3 水準設定した。

図-1 に試験体の形状および寸法の例を示す。試験体は寸法を 150 × 150 × 530mm、鉄筋 (SD345,D19) のかぶりを 30mm とした。本検討では断面修復補修を想定した模擬はつり部の範囲および深さにより多種類の形状の試験体を作製したが、ここでは本稿に報告する 3 形状 (A,B,E) のみを示した。

表-1 コンクリートの概要

水セメント比	65%
セメント種別	普通ポルトランドセメント
初期塩化物イオン量	0, 2.4, 4.8kg/m <sup>3</sup>
圧縮強度	材齢28日:34.3N/mm <sup>2</sup>

\*1 大日本塗料 (株) 構造物塗料事業部 開発グループ長 博士 (工学) (正会員)

\*2 オリエンタル建設 (株) 技術研究所 主任研究員 工修 (正会員)

\*3 東京大学 生産技術研究所 技術専門員 (正会員)

\*4 東京大学 生産技術研究所 都市基盤安全工学国際研究センター 教授 工博 (正会員)

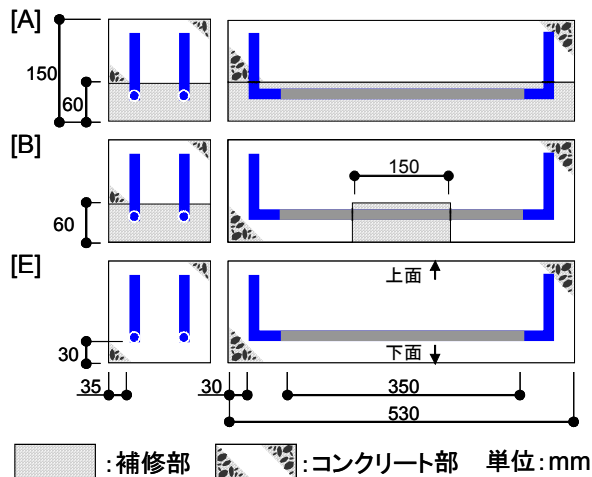


図-1 試験体の形状と寸法

表-2 設定した試験体の補修条件

記号*	補修部		初期Cl量 (kg/m <sup>3</sup> )	表面被覆
	範囲	深さ		
2-A-上下無	全面	鉄筋裏	2.4	上下面無し
2-B-上下無	部分			
2-E-上下無	補修無し			上面無し
2-E-上無				全面塗布
2-E-有				

\*:塩化物イオン量の水準-試験体形状-表面被覆方法

断面欠損を想定した補修部には断面修復材として再乳化形のポリマー(ベオバ系)を配合したポリマーセメントモルタルを吹付け充填した。さらに、補修条件に応じて、表面被覆材(柔軟形エポキシ樹脂系中塗および柔軟形ポリウレタン樹脂系上塗)を塗布した。なお、上面または上下面被覆を行わない試験体は該当する面以外に同種類の表面被覆を施した。

## 2.2 補修条件

表-2に本稿で報告する試験体の補修条件を示す。本検討では補修条件の違いが再劣化に及ぼす影響を明らかにすることを目的としており、断面修復のはつり深さと範囲、コンクリートの初期塩化物イオン量および表面被覆の有無を要因とし、組み合わせは全部で22種類である。

この内、形状A試験体はかぶり側のコンクリートをすべてはつり取る全断面修復を想定した。一方、形状B試験体の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、マクロセル腐食の発生を確認するものである。また、

はつり方法を要因とし、塩化物イオンの拡散の影響、ならびに鉄筋周囲の塩化物イオンの存在状態が再劣化に及ぼす影響を検討することを目的とした。なお、上面における表面被覆の有無は床版上面の防水工の有無を想定したものである。

ここで、試験体の記号は初期塩化物イオン量の水準(0, 2.4, 4.8kg/m<sup>3</sup>)-試験体形状(A,B,E)-上面被覆の有無を示している。

## 2.3 暴露条件

海洋暴露は静岡県伊豆半島東海岸の波打ち際に設置されている暴露場で実施した。本暴露場は常時海水飛沫を受ける極めて厳しい塩害環境である。試験体は道路橋床版を想定し、かぶり側(補修部)が下になるように設置した。

## 2.4 試験項目および方法

JCI-SC4<sup>2)</sup>で定める塩分分析法に従って試験体内部に含まれる全塩分量を測定した。試料は図-2に示すように長さ方向の中央部分の2本の鉄筋間から採取した。また、隣接する位置から採取した試料によって、加速電圧20kV、サンプル電流1μAの条件でEPMA分析を行い、塩化物イオンの分布状況を観察した。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 塩化物イオン含有量

図-3に3年間暴露後の塩化物イオン量の測

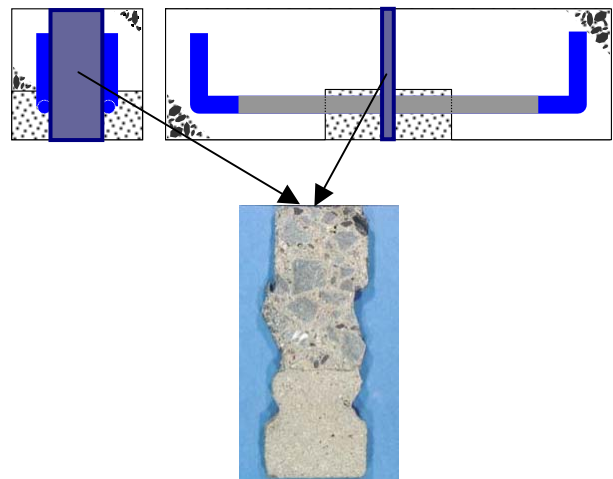


図-2 試料の採取位置

◇ 2-A-上下無 ▲ 2-B-上下無 △ 2-E-上下無  
● 2-E-上無 \* 2-E-全有

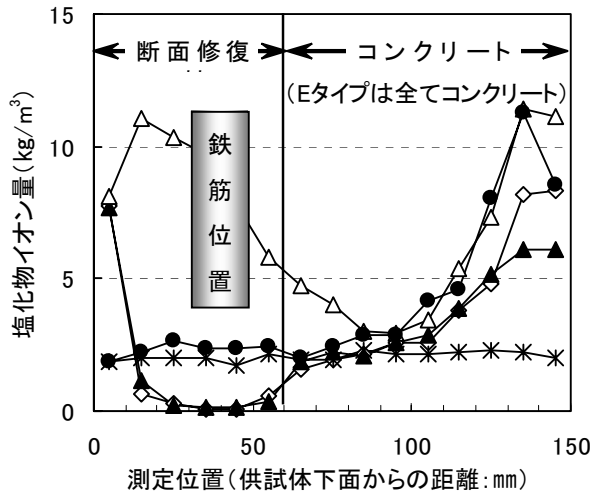


図-3 3年暴露後の塩化物イオン量測定結果

定結果を示す。この結果から、断面修復を施していない形状 E の試験体について、表面被覆材の有無によって塩分の浸透状況に違いが認められた。即ち、全面被覆した場合 (2-E-有) では塩化物イオンは偏在することなく、ほぼ均一な濃度で分布していることから、表面被覆は外来塩分の浸透を有効に阻止しており、塩分の分布状態は試験体を作成した時の状況からほとんど変化していないものと考えられる。これに対し、上面に被覆が無い場合 (2-E-上無) では下面側では外来塩分の浸透を全面被覆の場合と同程度に阻止しているものの、上面からの塩分の浸透は著しく、初期塩化物イオン量 ( $2.4\text{kg/m}^3$ ) を考慮すると外来塩分は少なくとも下面から 50mm 程度まで浸透しているようである。また、上下面に被覆が無い場合 (2-E-上下無) では上面および下面の双方から塩分の浸透が認められ、特にかぶり側である下面では鉄筋腐食に起因するコンクリートのひび割れ発生により、上面よりも塩分の浸透が著しかった。以上の結果は道路橋床板のような構造物において、断面修復補修後の再劣化を防止するためには断面修復部分に表面被覆を適用するだけではなく、床板上部からの塩分の浸透を防止するために適切な防水工が必要であることを示唆するものである。

○ 2-A-上下無(1年) □ 2-E-上下無(1年)  
● 2-A-上下無(3年) ■ 2-E-上下無(3年)

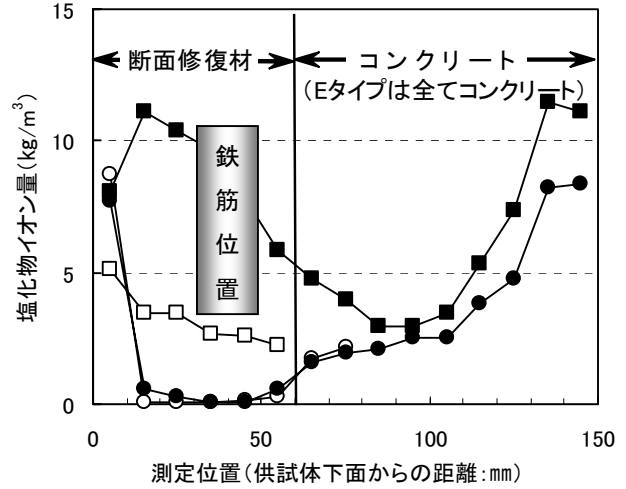


図-4 塩化物イオン量測定結果の経時変化

一方、断面修復を施した試験体 (2-A-上下無および 2-B-上下無) においては形状の違い (A および B) に拘わらず、コンクリートと断面修復との境界部において塩化物イオンのコンクリート側での低下と断面修復材側での増加が認められ、内部拡散による塩化物イオンの移動が確認された。また、外部からの断面修復材への塩化物イオンの浸透が顕著であり、母材コンクリートから断面修復材への塩化物イオンの移動に比べて大きかった。ただし、今回のように、3ヶ年程度の暴露期間では何れの場合も断面修復材中に存在している鉄筋位置での塩化物イオンの増加は認められなかった。

図-4には断面修復の有無を要因として、塩化物イオンの浸透状況の経時変化を示した。この結果から、鉄筋近傍の塩化物イオン量の経時変化は断面修復の有無によって違いが認められ、断面修復が無い場合では暴露1年目から3年目にかけて塩化物イオンの浸透が顕著であった。これに対し、断面修復した場合では暴露1年目から3年目にかけての鉄筋近傍における塩化物イオンの拡散浸透はごくわずかであった。

### 3.2 塩化物イオンの分布状況

図-5～6に上面および下面に表面被覆材の無い試験体の EPMA による塩化物イオンの面分

析結果を示す。図-5は断面修復補修を施していない試験体の EPMA 分析の結果である。暴露を開始してからわずか1年後で上面および下面からかなりの深さまで外来塩分が浸透していることが判る。また、1年後では上面からと下面からの塩化物イオンの浸透深さはほぼ同程度であり、図-4に示す塩化物イオン量の分析結果も考慮すると、その深さは50mm程度であると推定された。

一方、図-6に示した下面側60mmが全て断面修復補修部である2-A-上下無試験体の分析結果を見ると、断面修復材にも外来塩分が浸透しており、その深さは暴露1年で10mm程度、3年で13.4mm程度とコンクリート部分への浸透深さに比べて小さいものの、その部分の塩化物イオン濃度はコンクリート部分に比べて高いことがこのEPMA画像および図-4の分析結果から明らかである。これは断面修復材の見かけの拡散係数はコンクリートに比べて小さいが、単位セメント量が大きいため、多量の塩化物イオンを固定化している可能性が考えられる。この結果は表層部のポリマーセメントモルタルが遮塩効果を発揮していることを示しており、既往の研究結果<sup>3)</sup>とも一致している。

このように、材料間で生じる局所的な塩化物イオンの移動や表層部分での局所的な濃縮を評価する場合には塩化物イオン含有量の分析よりもEPMAによる面分析の方が有効であることを確認した。

#### 4. 見かけの拡散係数

##### 4.1 拡散式との近似による推定

塩害を受けるコンクリート構造物において、劣化の開始時期を予測しておくことは経済的かつ効果的な維持管理を行う上で重要である。一般的には鋼材位置での塩化物イオンの浸透量を予測し、鋼材の腐食発生時期を推測するが、この場合、構造物の表面における塩化物イオン量およびコンクリートの見かけの拡散係数が必要となる。

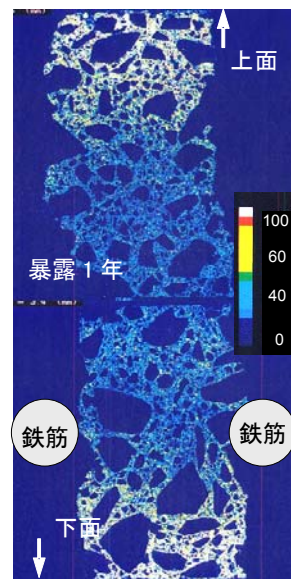


図-5 EPMA 面分析画像 (2-E-上下無)

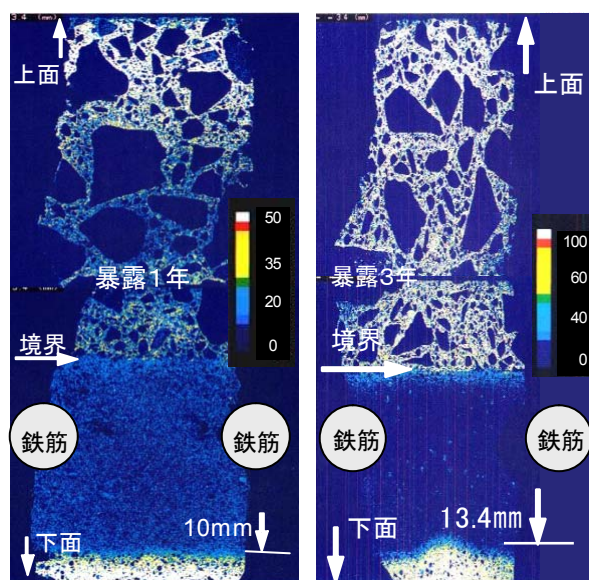


図-6 EPMA 面分析画像 (2-A-上下無)

そこで、本実験で行った暴露実験の結果から、土木学会による塩化物イオンの拡散式<sup>3)</sup>によって表面塩化物イオン量およびコンクリートの見かけの拡散係数の推定を試みた。土木学会による塩化物イオンの拡散式を(1)に示す。

$$C_{xd} = \gamma_{cl} \cdot C_0 \left( 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{0.1 \cdot x}{2\sqrt{D_d \cdot t}} \right) \right) \quad (1)$$

ここに、 $x$ : コンクリート表面からの距離(mm),  $C_{xd}$ :  $x$ における塩化物イオン濃度(kg/m<sup>3</sup>),  $C_0$ : コンクリート表面における塩化物イオン濃度

( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $t$ : 材齢(年),  $\gamma_d$ : ばらつきを考慮した安全係数(一般には1.3),  $D_d$ : 塩化物イオンの拡散係数( $\text{cm}^2/\text{年}$ ),  $erf$ : 誤差関数である。

表面塩化物イオン量およびコンクリートの見かけの拡散係数の推定は、**図-3~4**に示す試験体の塩化物イオンの分析結果と式(1)の拡散式による計算値とがほぼ等しくなるように、外挿法によって行った。

**表-3**に外挿法によって求めた表面塩化物イオン量および見かけの拡散係数を示す。表面塩化物イオン量の推定値は  $12.5\text{kg}/\text{m}^3$  となったが、土木学会<sup>4)</sup>および国土交通省<sup>5)</sup>による飛沫帯における設定値である  $13.0\text{kg}/\text{m}^3$  とほぼ一致しており、本実験の暴露環境においては妥当な値であると考えられる。また、塩化物イオンの見かけの拡散係数の推定値は  $1.26(\text{cm}^2/\text{年})$  であった。土木学会および国土交通省による予測値は、それぞれ  $3.41(\text{cm}^2/\text{年})$ ,  $1.35(\text{cm}^2/\text{年})$  であるので、実験結果による推定値は国土交通省による予測値とほぼ等しい結果となった。なお、暴露実験に用いた断面修復材の見かけの拡散係数はコンクリートの1/10程度であった。

#### 4.2 FEMによる塩化物イオンの拡散予測

上記で求めた表面塩化物イオン量および見かけの拡散係数の推定値を用い、試験体内部における塩化物イオンの分布状況の解析および将来予測を行った。FEM解析にはFickの拡散式に基づく2次元解析ソフトを使用した。

**図-7**はFEMによる解析結果とJCI-SC4による分析結果とを比較した結果で、2-B-上下無試験体の例である。FEMによる解析値は暴露開始からの材齢1年、3年および10年の予測を含んでいる。解析条件としては、見かけの拡散係数および表面塩化物イオン量は材齢に拘わらず一定とし、表面被覆材は塩化物イオンをまったく透過させないものと仮定した。**図-7**の結果は実験から外挿した諸数値を用いているため、分析結果と暴露1年および3年の解析結果とはよく一致している。また、今般の解析対象のように上下面に表面被覆が無い場合、暴露10年後では断

表-3 見かけの拡散係数の推定値

	表面塩化物イオン量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	見かけの拡散係数 ( $\text{cm}^2/\text{年}$ )	
		コンクリート	断面修復材
暴露実験	12.5	1.26	0.105
土木学会	13.0	3.41	—
国土交通省	13.0	1.35	—

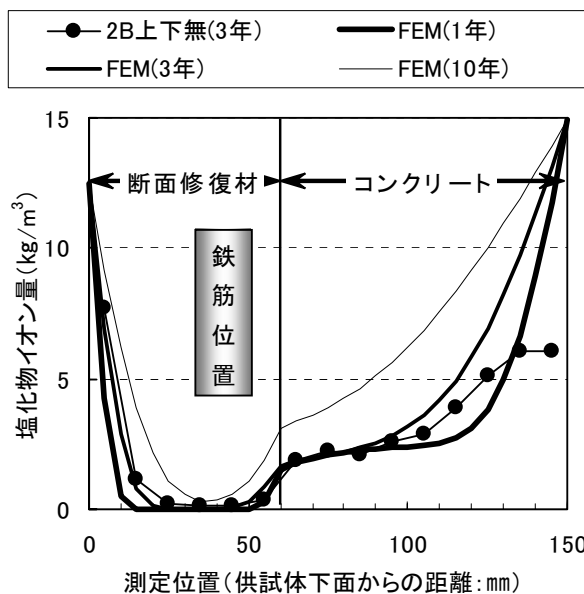


図-7 FEMによる解析結果

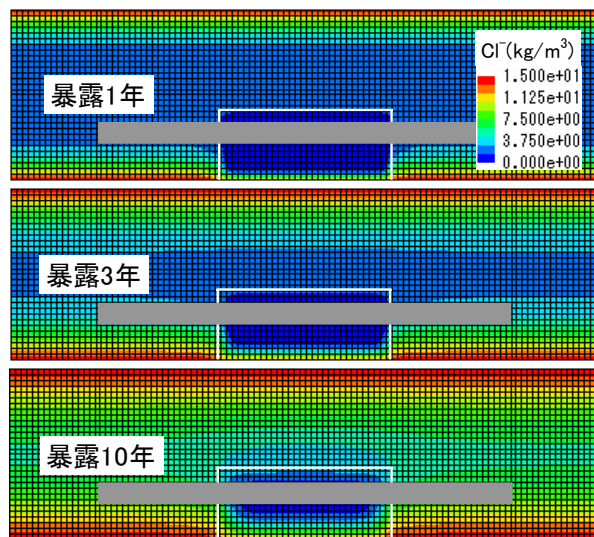


図-8 FEMによる塩化物イオンの分布状況  
(2-B-上下無供試体)

面修復部分であっても鉄筋位置に塩化物イオンが浸透するものと予測される。

FEM解析による試験体内部の塩化物イオンの分布状況を**図-8**に示す。同図は暴露開始後1年、3年および10年の分布状況である。この解

析結果から、暴露開始 10 年後にはコンクリートに含まれる初期塩化物イオン ( $2.4\text{kg/m}^3$ ) および上下面から浸入する塩化物イオンの拡散によって、かなりの量の塩化物イオンが断面修復材の内部にも浸透拡散し、鉄筋位置近傍の塩化物イオン量も高くなることが予測される。また、この図から、母材コンクリートと断面修復材の塩化物イオン浸透拡散速度の違いが明確に見て取れる。

## 5. まとめ

塩害で劣化した RC 構造物を補修した後に再劣化が生じる原因の究明と対策の提案を目的に、補修条件の異なるコンクリート試験体の暴露実験を実施した。3 年間海洋環境下に暴露した結果、塩化物イオンの浸透拡散に関して以下のことが確認された。

- (1)道路橋床板のような構造物において、断面修復補修後の再劣化を防止するためには断面修復部分に表面被覆を適用するだけでなく、床板上部からの塩分の浸透を防止するために適切な防水工が必要であることが示唆された。
- (2)表面被覆が無い場合、塩化物イオンの移動は外部から断面修復材への移動量に比べて、母材コンクリートからの移動量は少ない。
- (3)本暴露実験において拡散式を用いた外挿法により推定した表面塩化物イオン量およびコンクリートの見かけの拡散係数は土木学会および国土交通省による値と比較して妥当なものであった。
- (4)表面被覆材が上面に施されていない場合では、暴露開始 10 年後には、鋼材位置にかなりの量の塩化物イオンが拡散浸透すると予測される。
- (5)塩化物イオンの分布状況を検討する場合、種々の分析および解析方法が適用できるが、それぞれの特徴を理解し、目的に応じて使い分けることで、より有効な活用が可能となる。

## おわりに

本研究は暴露実験の期間を最長 10 年間とし、

継続調査により再劣化メカニズムについての検討を進める予定である。

なお、本研究は東京大学生産技術研究所 魚本研究室と以下に示す産学 17 団体（東急建設(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)、石川島播磨重工業(株)、西松建設(株)、飛島建設(株)、日本化成(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)）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研究』として実施されているものである。

## 参考文献

- 1) 例えば、二井谷 教治、榎島 修、星野 富夫、魚本 健人：補修を施した暴露試験体の塩分拡散に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.28、CD-ROM 版、2006.7
- 2) (社)日本コンクリート工学協会：JCI 規準集、pp.106-134、2004.4
- 3) 小林 一輔、大濱 嘉彦、星野 富夫：ポリマーセメントモルタルライニングの塩化物遮塩性能と耐久性、土木学会論文集、第 420 号/V-13、pp.251-258、1990.8
- 4) (社)土木学会：コンクリート標準示方書 [施工編]、pp.24-28、2002
- 5) 国土交通省土木研究所ほか：ミニマムメンテナンス PC 橋の開発に関する共同研究報告書 (III)、pp.44-47、2001.3