

報告 補修を施した暴露試験体の塩分の拡散に関する研究

二井谷 教治^{*1}・槇島 修^{*2}・星野 富夫^{*3}・魚本 健人^{*4}

要旨：本研究では，塩害で劣化した鉄筋コンクリート構造物を補修した後，再劣化が生じる原因の究明と対策の提案を目的とし，海洋暴露実験を行っている。本稿は，各種の補修条件で作製した暴露試験体について，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。さらに，それらの結果からコンクリートおよび断面修復材の塩化物イオンの見かけの拡散係数を推定した。その結果，示方書等で示されている算定式による値と比較し，ほぼ妥当なものであった。

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，塩害により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きている。これは，補修後の劣化過程の把握が十分でなく，再劣化を考慮した補修対策がと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，再劣化の原因を明確にすることは，将来的な費用対効果に優れる補修工法を合理的に選定するためにも不可欠である。

そこで本研究では，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を想定し，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。

本報では，海洋暴露試験体を対象とし，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，EPMA（電子線マイクロアナライザー）の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。さらに，これらの調査結果をもとに，試験体製作時からコンク

リートに内在する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。また，FEMによる塩化物イオンの分布状況の将来予測も行ったのであわせて報告する。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

表 - 1 にコンクリートの概要を示す。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，コンクリートに内在する初期塩化物イオン量を3水準設定した。

図 - 1 に試験体の形状寸法の例を示す。試験体は150×150×530mm，鉄筋(SD345,D19)のかぶり厚は30mmとした。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)作製したが，ここでは本稿に使用する3タイプのみを示す。

模擬はつり部には，断面修復材として再乳化形

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 ³
圧縮強度	材齢28日: 34.3N/mm ²

*1 オリエンタル建設(株) 技術研究所 主任研究員 工修 (正会員)

*2 飛鳥建設(株) 土木設計部 主任 (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)

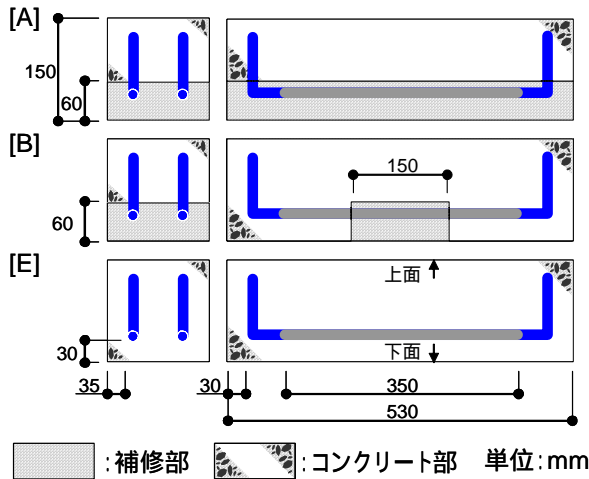


図 - 1 試験体の形状と寸法

表 - 2 設定した試験体の補修条件

記号*	補修部		初期Cl ⁻ 量 (kg/cm ³)	表面被覆
	範囲	深さ		
1-A-無	全面	鉄筋裏	0	上面無し
2-B-無	部分		2.4	
2-B-有			4.8	全面塗布
3-B-有			2.4	
2-A-上下無	全面		2.4	上下面無し
2-E-上下無	補修無し			

*: 塩化物イオン量の水準 - 試験体タイプ - 上面被覆の有無

のポリマー(ベオバ系)を主成分とするポリマーセメントモルタルを共通材料として吹付け充填した。さらに、補修条件に応じて、柔軟形エポキシ樹脂系の表面被覆材を塗布した。なお、上面被覆または、上下面被覆を行わない試験体は、該当する面以外に被覆を施した。

2.2 補修条件

表 - 2 に本稿で使用した試験体の補修条件を示す。本研究では、補修条件の違いが補修後の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、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。

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、マクロセル腐食の発生を想定したものである。また、はつり深さを要因とし、塩化物イオンの再拡散の影響、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、上面の被覆材の有無は、床版

上面の防水の有無を想定したものである。

試験体の記号は、初期塩化物イオン量の水準(0, 2.4, 4.8kg/m³) - 試験体形状(A ~ F) - 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暴露場において実施した。この海洋暴露場は波打ち際に設置されており、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、床版を想定してかぶり側が下になるように設置した。

2.4 試験項目および方法

JCI-SC4¹⁾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。図 - 2 に示すように、試料は長さ方向の中央部分の 2 本の鉄筋間から採取した。さらに、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 を行い、塩化物イオンの面分布状況を観察した。

3. 結果および考察

3.1 塩化物イオン含有量

図 - 3 に塩化物イオン量の測定結果を示す。図に示すように、上面に表面被覆の無い、1-A-無と 2-B-無では、コンクリート上面からの塩化物イオンの浸透が見られる。コンクリートの初期塩化物イオン量が 0kg/m³ の場合(1-A-無)では、

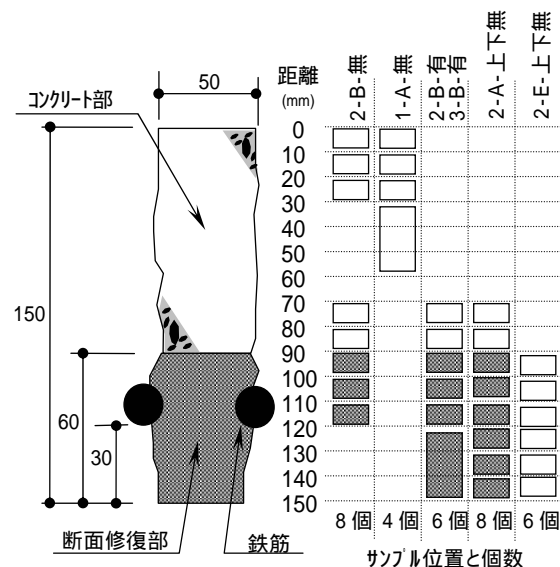


図 - 2 試料の採取位置

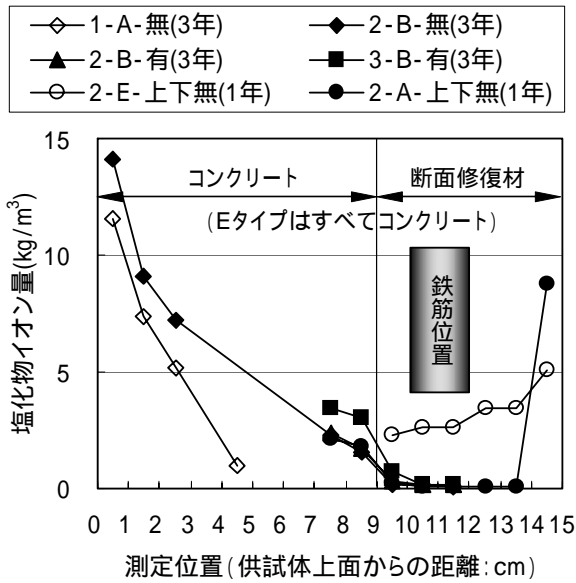


図 - 3 塩化物イオン量測定結果

外部から侵入した塩化物イオンが上面から50mm程度まで達している。補修部がありコンクリートに塩分を混入した試験体である 2-B-無, 2-B-有, 3-B-有では, コンクリートと断面修復材との境界部において, コンクリート側の塩化物イオン量の低下と断面修復材側の塩化物イオン量の増加が認められ, 内部拡散による材料間での塩化物イオンの移動が確認された。また, 下面にも被覆のない 2-A-上下無試験体では, 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の塩化物イオンの移動に比べて大きい。

今回の測定結果では, いず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い。

3.2 塩化物イオンの分布状況

EPMAによる塩化物イオンの面分析結果を図 - 4 ~ 6 に示す。図 - 4 および図 - 5 は, 全面に表面被覆が施され, コンクリートに初期塩化物イオン量がそれぞれ 2.4kg/m^3 および 4.8kg/m^3 混入された試験体のコンクリートと断面修復材との境界部分である。表面被覆材がほとんど塩化物イオンを透過させないため, 試験体内部の塩化物イオンの移動は, コンクリートに含まれる内在塩分の内部拡散のみということになる。

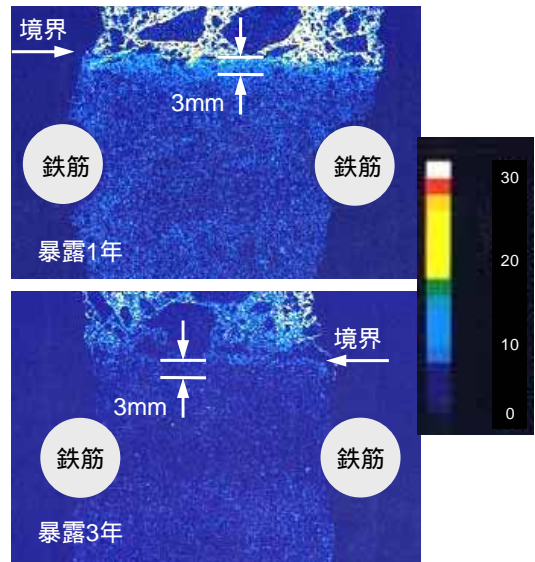


図 - 4 EPMAの結果(2-B-有 境界部)

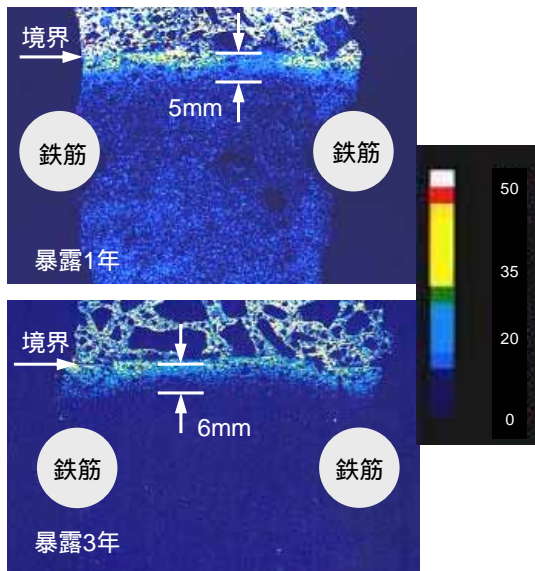


図 - 5 EPMAの結果(3-B-有 境界部)

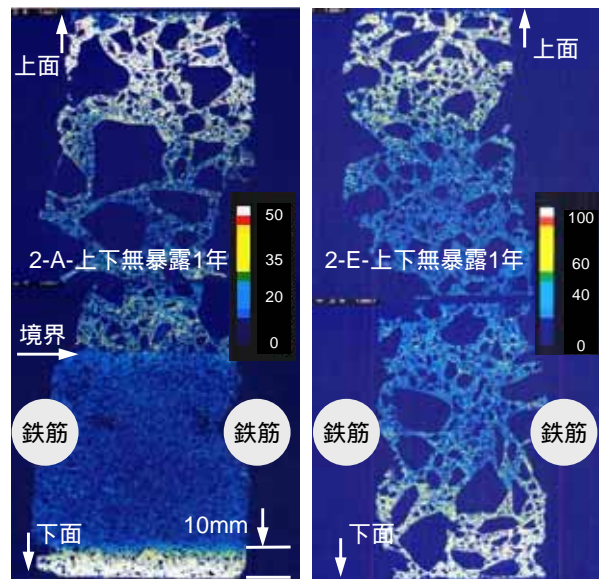


図 - 6 EPMAの結果(上下無し試験体 全体)

図に示すように、コンクリートから断面修復材への塩化物イオンの移動範囲は、2-B-有では、暴露期間1年および3年で3mmと変化が見られず、3-B-有では、暴露期間1年で5mm、3年で6mmとなっており、2年間での塩化物イオンの移動量は少ない。また、コンクリートに含まれる初期塩化物イオン量が多いほど、断面修復材への移動範囲が大きくなることわかる。

図 - 6 は、上面および下面に表面被覆材の無い試験体のEPMA分析の結果である。補修部がなく、すべてコンクリートの2-E-上下無試験体の分析結果が示すように、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わかる。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 - 3 に示す分析結果とあわせて考えると、その深さはおよそ50mm程度であると考えられる。下面側60mmがすべて補修部である2-A-上下無試験体の分析結果をみると、材齢1年でも断面修復材へ外来塩分が浸透していることがわかる。その深さは10mm程度とコンクリートに比べて小さいものの、その部分の塩化物イオン濃度は、コンクリートに比べて高いことがEPMAの画像および図 - 3 の分析結果からわかる。これは、断面修復材の見かけの拡散係数が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ためであると考えられる。いいかえれば、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といえ、過去の研究とも一致する結果となった²⁾。

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に比べてEPMAによる面分析の有効性が認められる。

次に、EPMAに使用した試料を用いて、含まれる全塩分量を測定した。なお、ここでの分析は、JCI-SC5¹⁾で定める簡易塩分分析法に従って行い、試料のコンクリート部分に含まれる骨材

を出来るだけ取り除いた試料を用いた。

図 - 7 ~ 8 は、EPMA に使用した試料のJCI-SC5 による分析結果をJCI-SC4 による分析結果と比較して示したものである。JCI-SC5 による分析結果は、JCI-SC4 による結果とよく一致しており、ここで行った方法による簡易分析でも、精度よく塩化物イオン量を測定できることがわかった。したがって、この方法はEPMAによる塩化物イオンの面分析試料に対して、塩化物イオン量の定量的把握の補完的役割になりえる。

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が、将来ど

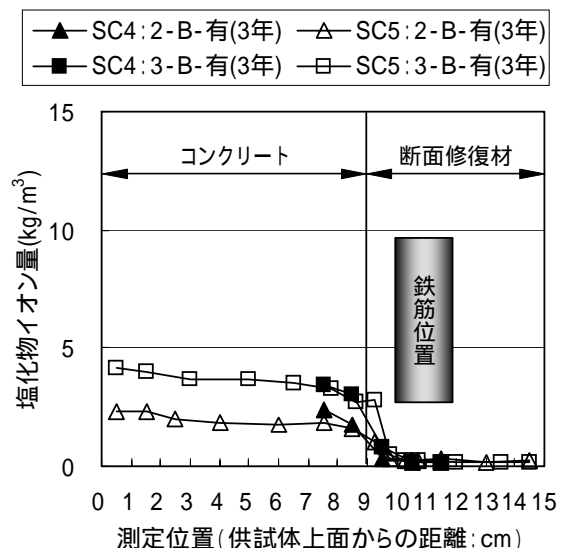


図 - 7 EPMA に使用した試料の塩分分析結果 1

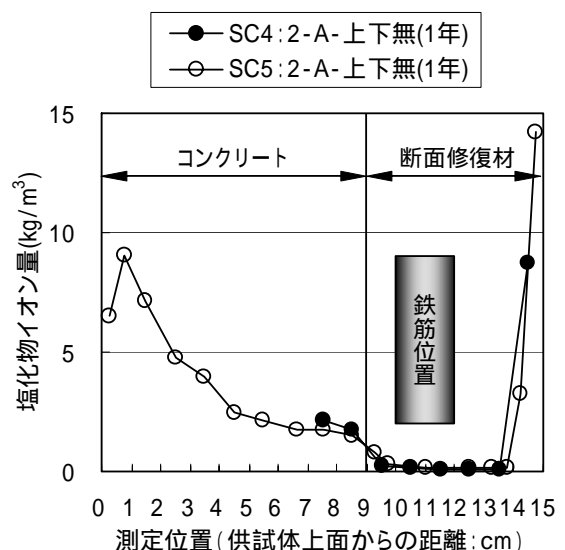


図 - 8 EPMA に使用した試料の塩分分析結果 2

のような時期に劣化を開始するかを把握することは、維持管理上重要である。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。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。

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³⁾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/m³), C_0 : コンクリート表面における塩化物イオン濃度(kg/m³), t : 材齢(年), γ_{cl} : ばらつきを考慮した安全係数、一般に 1.3, D_d : 塩化物イオンの拡散係数(cm²/年), erf : 誤差関数。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 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、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 12.0kg/m³となり、土木学会³⁾および国土交通省⁴⁾による飛沫帯における設定値である 13.0kg/m³とほぼ一致した。本実験の暴露環境から考えると、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 1.5(cm²/年)であった。土木学

表 - 3 見かけの拡散係数の推定値

供試体	分析時期	表面塩化物イオン量 (kg/m ³)			見かけの拡散係数 (cm ² /年)		
		実験	土木学会	国土交通省	実験	土木学会	国土交通省
1-B-無	1年	11.5	13.0	13.0	1.4	3.41	1.35
2-A-無	1年	11.3			2.0		
1-A-無	3年	13.2			1.2		
2-B-無	3年	12.1			1.3		
平均		12.0			1.5		

会および国土交通省による予測値は、それぞれ 3.41(cm²/年), 1.35(cm²/年)である。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。

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および将来予測を行った。FEM は、Fick の拡散式に基づく 2 次元解析ソフトを使用し、断面修復材の見かけの拡散係数は、コンクリートの 1/10 と仮定した。

図 - 9 ~ 10 は、FEM による解析結果と JCI-SC4 による分析結果との比較を示す。FEM による解析値は、暴露後の材齢 1 年、3 年および 10 年の予測を含む。解析条件としては、見かけ

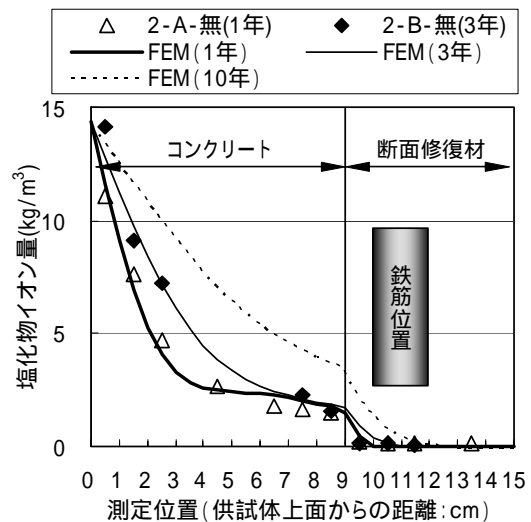


図 - 9 FEM による解析結果 1

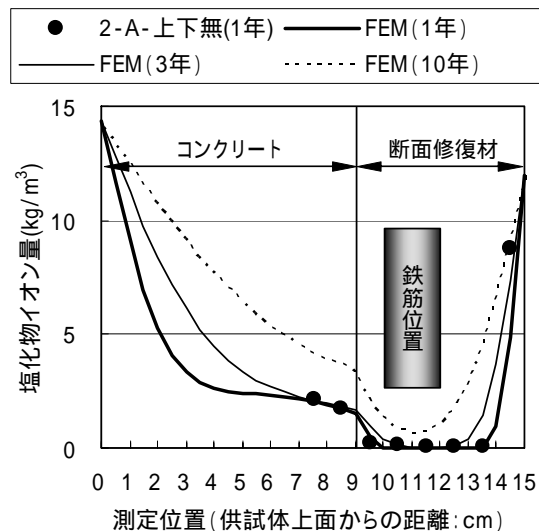


図 - 10 FEM による解析結果 2

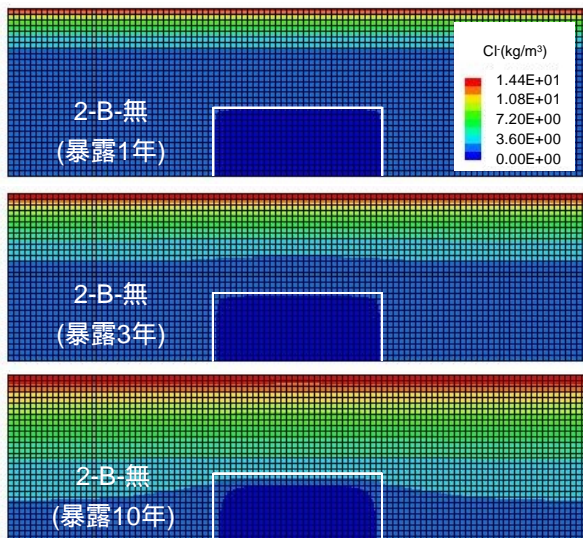


図 - 1 1 FEM による塩化物イオンの分布状況

の拡散係数および表面塩化物イオン量は材齢にかかわらず一定とし、表面被覆材は塩化物イオンをまったく透過しないものと仮定した。

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する。また、下面に表面被覆があっても上面に無い場合は、暴露 10 年では、鋼材位置にかなりの量の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 - 1 1 に示す。同図は、2-B-無試験体の例で、暴露開始後 1 年、3 年および 10 年の分布状況である。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 (2.4kg/m^3) および上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、鋼材位置の塩化物イオン量も高くなることが予測される。

4. まとめ

補修条件の異なる試験体を 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)塩化物イオンの移動は、外部から表面被覆のない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。
- (2)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、妥当なものであった。

- (3)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。
- (4)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として、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)、飛鳥建設(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) (社)日本コンクリート工学協会：JCI 規準集, pp.106-134, 2004.4
- 2) 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
- 3) (社)土木学会：コンクリート標準示方書 [施工編], pp.24-28, 2002
- 4) 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 (), pp.44-47, 2001.3