

論文 各種表面保護工を用いたコンクリートの耐久性向上効果の評価

竹田 宣典*1・十河 茂幸*2・迫田 惠三*3

要旨：海洋環境下におけるコンクリートに表面被覆材，含浸系の浸透性防水材および透水性型枠などの表面保護工を用いた場合の耐久性の向上効果を把握するために，海洋曝露試験を行った。そのデータを基に，各種表面被覆材自体の塩化物イオンの拡散係数，浸透性防水材および透水性型枠を用いたコンクリートの塩化物イオンの拡散係数を求め，表面保護工による塩化物イオンの遮断性能について定量的な評価を行った結果，これらの表面保護工を用いた場合，いずれも 10 年間程度の範囲において，鉄筋の防食効果があることが確認された。

キーワード：表面被覆材，浸透性防水材，透水性型枠，塩化物イオン，拡散係数

1. はじめに

近年，構造物のライフサイクルコスト（LCC）を考慮した設計施工が求められるようになり，設計時に構造物の耐久性を照査することが重要になっている。また，LCC の低減を図るため，構造物に対して，より高い耐久性が要求されており，海洋環境下のコンクリート構造物に，表面被覆材，浸透性防水材および透水性型枠などの表面保護工を適用し，塩化物イオンの浸透を抑制する事例が増加している。しかしながら，海洋環境下における表面保護工を用いたコンクリートの長期的な耐久性については，十分に明らかにされておらず，土木学会コンクリート標準示方書 [施工編] においても，表面保護工を適用した場合の耐久性の照査方法は示されていない。

筆者らは，各種の表面保護工を適用したコンクリートについて，9～15 年の海洋曝露試験を行い，塩化物イオン浸透性，鉄筋の防食効果について調査してきた^{1),2),3)}。本論文では，表面保護工を用いたコンクリートの塩化物イオンの侵入に伴う鋼材腐食に関する照査方法を確立することを目的として，表面保護工を適用した場合の塩化物イオン侵入のモデルを提案し，これ

らの耐久性向上効果について評価を行った。

2. 実験方法

2.1 供試体

供試体は鉄筋を含む角柱供試体（断面 9cm×18cm，長さ 90cm）と無筋の円柱供試体（直径 15cm，高さ 15cm）とした。角柱供試体の例を図 - 1 に示す。供試体には，異形棒鋼（JIS G 3112，SD295，D19）を配置し，全表面に表面保護工を適用した。円柱供試体は，表面被覆材と浸透性防水材を全面に施した。適用した表面保護工法の種類と適用方法，供試体中の鉄筋のかぶりを表 - 1 に示す。表面被覆材は，中塗り材が柔軟エポキシ樹脂（道路橋の塩害対策指針(案)⁴⁾ 塗装系 B 種），厚膜型エポキシ樹脂（同指針案塗装系 C 種），厚膜型ビニルエステル樹脂（同指針案塗装系 C 種），アクリル系ポリマーセメ

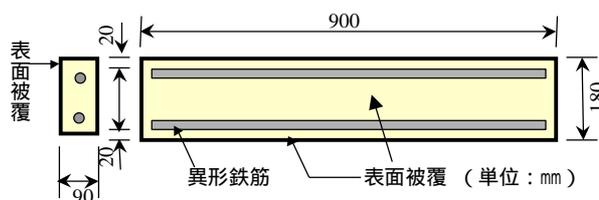


図 - 1 角柱供試体の例（表面被覆材適用）

*1 (株)大林組技術研究所 土木材料研究室 グループ長 博士(工学) (正会員)

*2 (株)大林組技術研究所 副所長 工博(正会員)

*3 東海大学海洋学部教授 海洋土木工学科 工博(正会員)

表 - 1 表面保護工の種類と適用方法

分類	記号	表面保護工の種類	表面保護材の適用方法	鉄筋かぶり
表面被覆材	A	柔軟型エポキシ樹脂	中塗：柔軟型エポキシ樹脂 膜厚 60 μm (1層) 上塗：柔軟型ポリウレタン樹脂 膜厚 30 μm (1層)	20mm
	B	厚膜型エポキシ樹脂	中塗：エポキシ樹脂 膜厚 450 μm (3層) 上塗：アクリルウレタン樹脂 膜厚 40 μm (2層)	
	C	厚膜型ビニルエステル樹脂	中塗：柔軟型ビニルエステル樹脂 膜厚 350 μm (1層) 上塗：ポリウレタン樹脂 膜厚 30 μm (1層)	
	D	アクリル系ポリマーセメント	中塗：アクリル系ポリマーセメント 膜厚 2500 μm (2層) 上塗：アクリルウレタン樹脂 膜厚 30 μm (1層)	
浸透性防水材	S	アルキルアルコキシシラン系	塗布量：400g/m ² (3回に分けて塗布)	40mm
透水性型枠	F	透水シート	透水性シートを型枠の全面に貼り付け、図 - 1 に示す角柱供試体を長辺方向に立てた状態で、上部からコンクリートの打込みを行った	30mm

表 - 2 コンクリートの配合と性質

表面保護工	Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)					スランブ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 材齢 28 日 (N/mm ²)
				水	セメント	細骨材	粗骨材	A E 減水剤			
表面被覆材	15	50.0	48.0	166	332	844	939	0.83	12.5	5.2	40.2
浸透性防水材	20	55.0	46.0	181	330	828	971	0	15.0	2.0	33.1
透水性型枠	15	60.0	50.0	170	283	914	924	0.71	16.0	4.9	32.8

ントの4種類とした。浸透性防水材として、アルキルアルコキシシランを主成分とする材料をコンクリート表面に含浸させた。透水性型枠は、有孔フィルムと不織布からなる透水性シートを用いた⁵⁾。鉄筋のかぶりは、表面被覆材、浸透性防水材、透水性型枠を用いた場合で、それぞれ20mm、40mm、30mmとした。また比較用として、表面保護工を適用していない供試体もそれぞれ作製し、同様の条件で実験を行った。既往の報告によると、浸透性防水材の浸透範囲は数mm程度、透水性型枠の影響深さは数cm程度と考えられる⁵⁾。表面保護工を適用したコンクリートの配合と性質を表-2に示す。セメントには、普通ポルトランドセメント、細骨材には陸砂(表乾密度:2.59~2.61g/cm³,吸水率:1.64~2.97%)、粗骨材には、砕石(表乾密度:2.58~2.66g/cm³,吸水率:0.64~2.09%)を用いた。

2.2 暴露環境

暴露場所は静岡県清水港内の防波堤上(海上大気中)と防波堤付近の水深11mの海底(海中)とした。暴露場所の環境条件を表-3に示す。なお表面被覆材、浸透性防水材を施した後、気中乾燥し、材齢30~40日において暴露を開始した。

表 - 3 暴露環境条件

暴露環境	環境条件
海上大気中 (堤防上)	L.W.L.: +5.0m, 強風時に波しぶきを受ける 年間降水量: 2360mm/年 年平均気温: 16.0
海中 (水深11m)	年平均海水温度: 18.4 Clイオン濃度: 18.4%, pH: 8.29 溶存酸素量: 7.98ppm

表 - 4 試験項目と試験方法

試験項目	試験方法
付着強度	JIS A 6909「建築用仕上材」の付着強度試験
中性化深さ	角柱供試体からコアを採取し、割裂面に、フェノールフタレイン溶液を噴霧し、変色域を測定
塩化物イオン量	表面から2cm毎の深さから試料採取、JCI SC4 (塩素イオン選択性電極を用いた電位差滴定法)により、全塩化物イオン量を定量分析
鉄筋の腐食状況	角柱供試体を解体し、腐食箇所をスケッチし、腐食面積率により評価

2.3 試験項目・試験方法

測定時期は、表面被覆材を用いた場合、暴露後9年、浸透性防水材を用いた場合、暴露後15年、透水性型枠の場合、暴露後10年とした。試験項目と試験方法を表-4に示す。塩化物イオン量測定用の試料は、表面被覆材、浸透性防水材を用いた場合は円柱供試体から採取し、透水性型枠を用いた場合は角柱供試体の側面(図-1における180×900mmの面)から採取した。

3. 表面保護工を用いたコンクリートの塩化物イオン侵入のモデル化

表面保護工を用いたコンクリートの塩化物イオン侵入のモデルを図 - 2 に示す。モデル A は、表面被覆材の塩化物イオン拡散係数 (D_s) とコンクリートの塩化物イオン拡散係数 (D_c) を個別に設定し、2層の材料として塩化物イオン侵入量を予測するモデルである。モデル B は、表面保護工によって、表面の境界条件が変化すると考え、表面塩化物イオン濃度が Co から Co' に低下すると仮定し、改質された部分を含めたコンクリートの拡散係数 (Dc') を用いて、塩化物イオン侵入量を予測するモデルである。

本研究では、塩化物イオンの侵入が式 (1) の拡散方程式で表されると仮定し、測定された塩化物イオン濃度の分布に適合するように、モデル A では表面被覆材の拡散係数 (D_s) を求め、モデル B ではコンクリートの拡散係数 (Dc')、表面塩化物イオン濃度 (Co') を求めた。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = Dc \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (1)$$

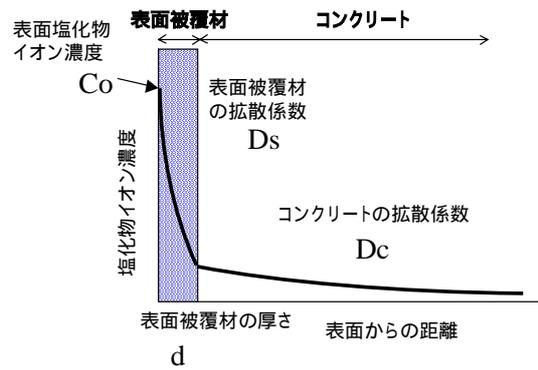
ここに、 $u = u(x,t)$: 位置 x , 時刻 t での塩化物イオン濃度 (kg/cm^3), t : 時刻 (sec), x : 表面からの距離 (cm), Dc : 見かけの拡散係数 (cm^2/sec)

表面被覆材を用いた場合は、モデル A を適用し、図 - 3 に示す様にコンクリートおよび表面被覆材を格子に分割し、1次元の有限体積法により式(1)を解いた。最端部の格子(半コントロールボリューム)を表面被覆材とし、格子の長さは、それぞれの表面被覆材の膜厚とした。各コントロールボリュームの長さは 0.5cm とした。境界条件として、最端部の格子点の塩化物イオン濃度を、表面被覆材を用いていないコンクリートにおける表面塩化物イオン濃度の値とした。コンクリート内部側の境界条件は、十分離れた場所(表面から 20cm)で、 $u / \partial x = 0$ とした。

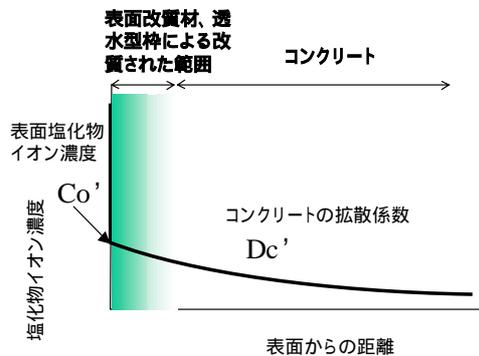
浸透性防水材あるいは透水性型枠を用いた場合は、表面部と内部で拡散係数は異なると考えられるが、改質された範囲が不明確であり、改

質効果は深さにより変化することから、モデル B を適用し、コンクリート全体としての拡散係数 (Dc') と表面塩化物イオン濃度 (Co') によって評価した。式 (2) に示す拡散方程式の解の式における見かけの拡散係数 (Dc') と表面塩化物イオン濃度 (Co') を最小二乗法により求めた。

$$C = Co' \left\{ 1 - \text{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dc' \cdot t}} \right) \right\} \quad (2)$$



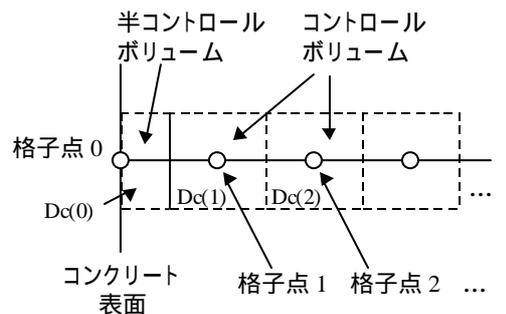
(a) モデル A (表面被覆材の場合)



(b) モデル B

(浸透性防水材、透水性型枠の場合)

図 - 2 表面保護工を用いたコンクリートの塩化物イオン侵入のモデル



$Dc(i)$: 各コントロールボリュームの拡散係数

図 - 3 有限体積法の計算格子

4. 実験結果と考察

4.1 外観および付着強度

いずれの表面保護工を用いたコンクリートも、供試体の外観からは劣化の徴候は認められず、いずれの表面被覆材もふくれ、はがれなどの変状はなかった。曝露9年後の表面被覆材の付着強度を図-4に示す。いずれの表面被覆材も付着強度の平均値は 2.0N/mm^2 以上であった。これらより、9年間の曝露による表面被覆材自体の劣化は小さいと考えられる。また、本実験からは、浸透性防水材自体の耐久性については明らかにできなかった。

4.2 塩化物イオンの侵入

(1) 塩化物イオンの侵入量

表面被覆材を用いたコンクリートの暴露後9年における塩化物イオンの侵入量を図-5に示す。表面被覆材を用いた場合の表面部(深さ0~2cm)の塩化物イオン濃度は、有機系被覆材(A,B,C)では、表面被覆を行わない場合に対して、海上大気中で約15~30%、海中で7~10%程度、ポリマーセメント系被覆材(D)では、海上大気中で約50%、海中で約40%となった。表面被覆材の種類によって、塩化物イオンの遮断性能に差異が認められるが、いずれの表面被覆材も塩化物イオンの遮断効果が認められ、実構造物の鉄筋位置における塩化物イオン量を抑制することが可能であると考えられる。しかしながら、塩分が常に供給される環境に長期間曝露した場合、表面被覆材を通して、コンクリート中に塩化物イオンが侵入することが確認された。

浸透性防水材および透水性型枠を用いたコンクリートの曝露終了時における塩化物イオン侵入量を図-6に示す。シラン系の浸透性防水材を塗布した場合、表面部(深さ0~2cm)の塩化物イオン濃度は、塗布しない場合に対して、海上大気中で約1/4、海中で約1/2となり、5cmより深い位置においても、塩化物イオン侵入量を1/2以下に抑制されることが確認された。透水性型枠を用いた場合においても、表面から5cmの範囲の塩化物イオン侵入量は、海上大気

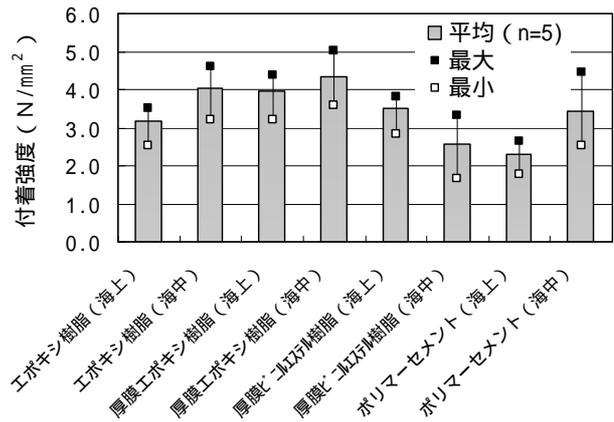


図-4 表面被覆材の付着強度

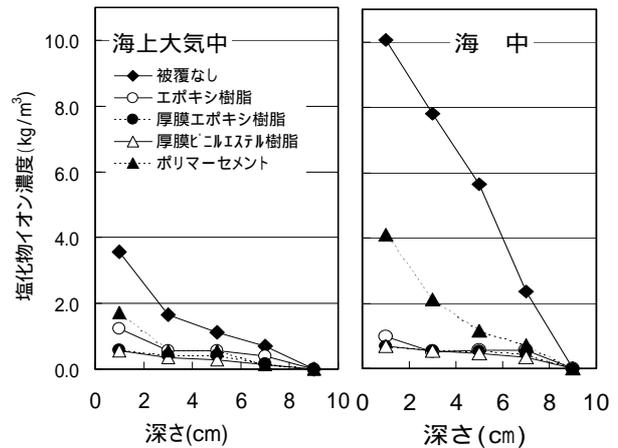


図-5 塩化物イオンの侵入量(表面被覆材)

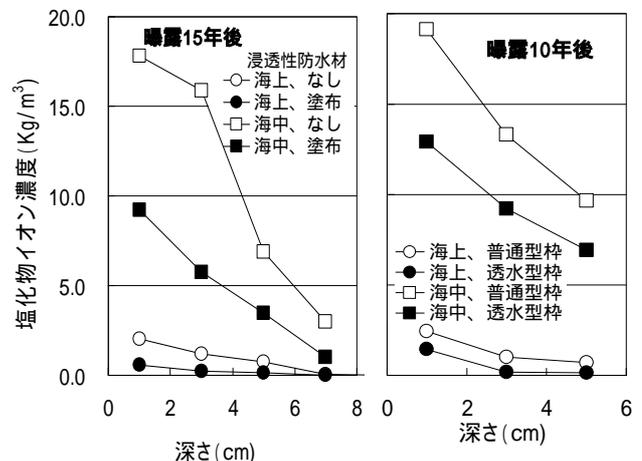


図-6 塩化物イオンの侵入量

(浸透性防水材, 透水性型枠適用)

中、海中いずれにおいても、普通型枠を用いた場合の60~70%程度となり、透水性型枠による塩化物イオン侵入の抑制効果が認められた。

(2) 表面被覆材の塩化物イオンの拡散係数

前章に示す方法により、塩化物イオン侵入量の分布を用いて、表面被覆材の見かけの拡散係数(D_s)を求めた結果を、表-5および図-7

に示す。表面被覆材を用いた場合の表面塩化物イオン濃度 (Co) は、環境条件のみに影響されると仮定し、被覆材を用いていないコンクリートの表面塩化物イオン濃度と同じ値を用いた。W/C が 50% のコンクリートの見かけの拡散係数は $3 \times 10^{-8} \sim 6 \times 10^{-10} \text{cm}^2/\text{sec}$ 程度と算定され、有機系被覆材 (A,B,C) では $10^{-11} \sim 10^{-10} \text{cm}^2/\text{sec}$ 程度、ポリマーセメント系被覆材 (D) では、 $2 \times 10^{-9} \text{cm}^2/\text{sec}$ 程度となった。

また、有機系被覆材の拡散係数は、海上大気中の方が海中に比べて 2~4 倍大きな値となったが、ポリマーセメント系被覆材の拡散係数は、海上大気中、海中ではほぼ同じであった。この理由は明らかでないが、表面被覆材の紫外線や乾湿繰返しによる変質、膜厚の差異などが影響していると考えられる。

(3) 浸透性防水材および透水性型枠を用いたコンクリートの拡散係数

浸透性防水材および透水性型枠を用いたコンクリートの拡散係数を図 - 8 および図 - 9 に示す。浸透性防水材を用いた場合、拡散係数は塗布しないものに対して、海上大気中で約 60%、海中で約 90% となり、表面塩化物イオン濃度は、海上大気中で約 1/4、海中で約 1/2 となり、表面塩化物イオン濃度を低減する効果が大きくなった。透水性型枠を用いた場合は、表面塩化物イオン濃度は、普通型枠に比べて 70~80% となったが、拡散係数は、海上大気中では、普通型枠の約 1/4、海中ではほぼ同等であった。浸透性防

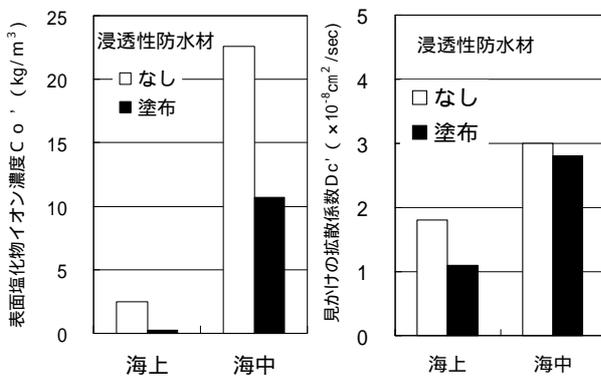


図 - 8 浸透性防水材を用いたコンクリートの表面塩化物イオン濃度 (Co') と拡散係数 (Dc')

水材や透水性型枠を用いた場合、海上大気中においては、拡散係数と表面塩化物イオン濃度のいずれも低減されるが、塩化物イオンが多量に供給される海中においては、塩化物イオンの拡散係数の低減効果は小さいことが確認された。

(4) 塩化物イオン侵入モデルの適合性

塩化物イオン侵入モデルを用いて算定した塩化物イオン分布と実測値を図 - 10 に示す。いずれの表面保護工を用いた場合も、曝露後 10 年程度の範囲では、解析値と実測値との適合性は良く、前述のモデルにより表面保護工を用いた場合の塩化イオンの侵入予測が可能と考えられる

表 - 5 表面被覆材の見かけの拡散係数

種類	海上		海中	
	Co (kg/m ³)	Ds (Dc) (cm ² /s)	Co (kg/m ³)	Ds (Dc) (cm ² /s)
被覆なし(Dc)	4.2	3.2×10^{-8}	12.4	5.5×10^{-8}
エポキシ	(4.2)	5.2×10^{-11}	(12.4)	1.3×10^{-11}
厚膜エポキシ		1.3×10^{-10}		5.6×10^{-11}
厚膜ビニルエステル		8.6×10^{-11}		4.1×10^{-11}
ポリマーセメント		2.1×10^{-9}		1.8×10^{-9}

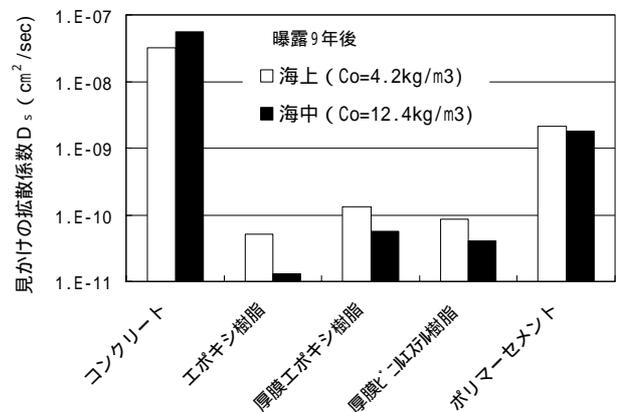


図 - 7 表面被覆材の見かけの拡散係数

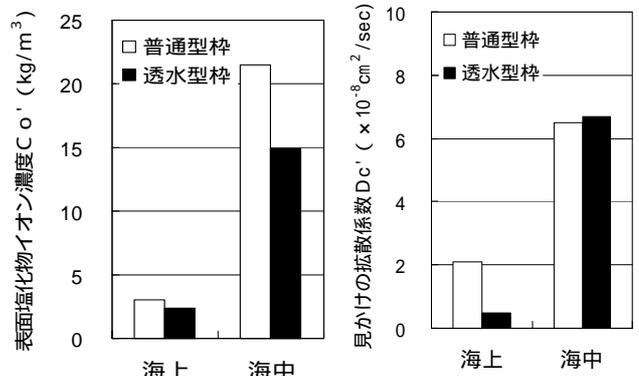


図 - 9 透水性型枠を用いたコンクリートの表面塩化物イオン濃度 (Co') , 拡散係数 (Dc')

が、表面保護材自体の性能の変化も考慮して、さらに長期的な適合性を確認する必要がある。

4.3 中性化深さおよび鉄筋の防錆効果

表 - 6 に中性化深さと鉄筋の腐食程度を示す。表面被覆材を用いた場合は、海上大気中において、中性化は全く進行していないが、浸透性防水材を用いたものは、用いない場合に比べて中性化が進行していた。これは、浸透性防水材を塗布することにより、雨水の浸透が抑制され、コンクリート内部の含水率が低く保たれたために、中性化が進行したと考えられる。また、いずれの表面保護工を用いた場合にも、約 10 年間の範囲では、表面保護工を用いない場合に比べて、鉄筋腐食の進行は抑制されており、表面保護工の防食効果が認められた。

5. まとめ

表面保護工を適用したコンクリートの約 10 年の曝露試験の結果、以下のことが確認された。

(1) いずれの表面被覆材もふくれ、はがれなどの変質はなく、十分な付着強度を有しており表面被覆材自体の劣化は小さい。

(2) いずれの表面被覆材においても、塩化物イオンの遮断効果が認められたが、塩化物イオンが常に供給される環境においては、表面被覆材を通してコンクリート中に塩化物イオンが侵入することが確認された。表面被覆材の見かけの拡散係数は、有機系被覆材では $10^{-11} \sim 10^{-10} \text{cm}^2/\text{sec}$ 程度、ポリマーセメント系被覆材では $2 \times 10^{-9} \text{cm}^2/\text{sec}$ 程度であった。

(3) 浸透性防水材や透水性型枠を用いた場合は、海上大気中においては、拡散係数と表面塩化物イオン濃度のいずれも低減されるが、塩化物イオンが多量に供給される海中においては、塩化物イオンの拡散係数の低減効果は小さい。

(4) 表面被覆材の塩化物イオン拡散係数、浸透性防水材、透水性型枠を用いたコンクリートの塩化物イオン拡散係数を用いた予測モデルにより、約 10 年間の範囲では、表面保護工を用いた場合の塩化物イオンの侵入予測が可能である。

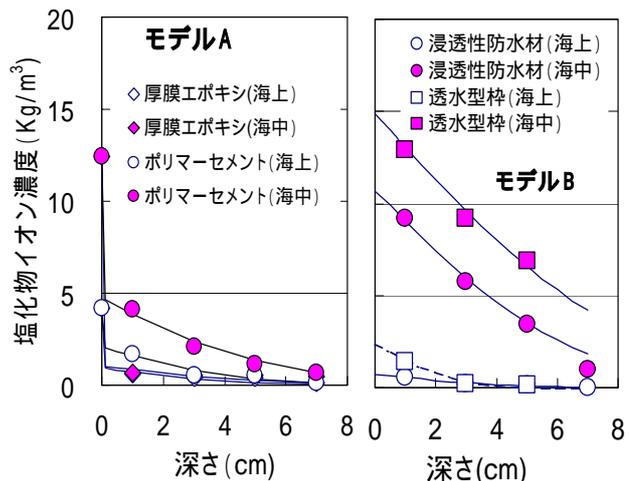


図 - 10 塩化物イオン侵入モデルの適合性

表 - 6 中性化深さ、鉄筋の腐食程度

表面保護工	種類	中性化深さ (mm)		腐食面積率 (%)	
		海上	海中	海上	海中
表面被覆材	なし (W/C:50%)	1.2	0	3.5	8.5
	エポキシ樹脂	0	0	0.8	1.5
	厚膜型エポキシ	0	0	0.8	1.0
	厚膜型ビニルエステル	0	0	1.0	1.7
	アクリル系ポリマーセメント	0	0	1.7	2.5
浸透性防水材	なし (W/C:55%)	1.8	0.2	3.0	20.1
	浸透性防水材	6.6	0.3	0.0	12.2
透水性型枠	なし (W/C:60%)	2.7	0	0.1	2.0
	透水性シート	0.1	0	0.0	0.0

(5) いずれの表面保護工を用いた場合も約 10 年間の範囲では、鉄筋の防食効果が認められた。

参考文献

- 1) 竹田宣典, 十河茂幸, 迫田恵三: 各種コンクリート塗装材料による海洋環境下における鉄筋コンクリートの防食効果, 第43回日本学術会議材料研究連合会講演会, 1999
- 2) 迫田恵三, 竹田宣典, 外岡雅則, 山根千学: 海洋環境下における撥水材を含浸させたコンクリートの性質鉄筋, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.24, No.1, pp.1407-1412, 2002
- 3) 竹田宣典, 十河茂幸, 迫田恵三: 透水性型枠の海洋環境下における耐久性向上効果の評価, 第58回土木学会年次学術講演会概要集, 2003
- 4) 日本道路協会: 道路橋の塩害対策指針(案), p.51, 1984
- 5) 竹田宣典, 平田隆洋, 十河茂幸, 芳賀孝成: 透水性シートを用いた型枠によるコンクリート表面の品質改善, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.11, No.1, pp.683-688, 1989