

論文 けい酸塩系表面含浸材による改質部の見かけの拡散係数の推定と発錆遅延期間の試算

黒岩 大地*1・宮里 心一*2

要旨: 本研究では、コンクリート構造物に対する予防保全工法である、けい酸塩系表面含浸材を適用した場合の、コンクリート表層部における見かけの拡散係数の推定方法について検討した。さらに、得られた拡散係数を用いて、表面含浸材を適用することによる腐食発生時期の遅延効果を試算した。拡散係数の推定方法として、無塗布のケースにおける塩化物イオン濃度分布と、表面含浸材を塗布したケースにおける塩化物イオン濃度分布を、等価かぶりを考慮しながらフィッティングさせ、改質部の拡散係数を同定した。この拡散係数を用いた試算により、表面含浸材を塗布することで潜伏期が数年～30年間程度延びることを確認した。

キーワード: けい酸塩系表面含浸材, 塩化物イオン濃度分布, 改質部, 見かけの拡散係数, 腐食発生時期

1. はじめに

コンクリート構造物に対する予防保全工法の一つとして、腐食要因物質の侵入を抑制する効果があり、かつ無色透明で対策後の目視観察が可能な表面含浸材に注目が集まっている。この表面含浸材には、シラン系とけい酸塩系の2種類がある。シラン系表面含浸材は、コンクリート表面に撥水層を形成し、発錆要因物質の侵入を抑制する。また、この材料を用いた補修の効果を評価した研究は多くなされている¹⁾。一方、けい酸塩系表面含浸材は、C-S-Hゲルの形成によりコンクリート表層部を緻密化させ、発錆要因物質の侵入を抑制する。ただし、シラン系表面含浸材の効果を評価した研究と比較すると、けい酸塩系表面含浸材の効果を評価した研究は少なく²⁾、特に塩化物イオンの浸透に対する見かけの拡散係数を具体的に評価した事例は極めて少ない。すなわち、けい酸塩系表面含浸材を適用した場合、含浸部と非含浸部の拡散係数は変化すると考えられているが、その同定方法については確立されていない¹⁾²⁾。したがって、けい酸塩系表面含浸材を塗布した構造物の耐用年数についての予測が定量的になされていない現状にある。

以上の背景を踏まえ本研究では、けい酸塩系表面含浸材の塗布による塩害抑制効果を評価するため、改質部における見かけの拡散係数の推定方法を検討した。ここで、コンクリート標準示方書などにおいては、塩化物イオンの浸透を予測する方法として、見かけの拡散係数と実効拡散係数の2種類を用いる方法が示されている³⁾⁴⁾。この内、本研究では、見かけの拡散係数に着目した。すなわち、けい酸塩系表面含浸材の改質深さを、ビッカース硬さ試験を用いて推定した。そして、無塗布のケースにおける塩化物イオン濃度分布と、けい酸塩系表面含浸材

を塗布したケースにおける塩化物イオン濃度分布を、等価かぶりを考慮しながらフィッティングさせ、改質部における見かけの拡散係数を逆解析した。なお、改質部における見かけの拡散係数は「けい酸塩系表面含浸工法の設計施工指針(案)」に従い、一定と仮定した²⁾。さらに、その結果を用いて、飛沫帯、海岸から100mおよび500mの距離に立地し、かぶりが50mmと70mmの条件で、腐食開始時期を試算し、けい酸塩系表面含浸材を塗布することによる、予防保全の効果を評価した。

2. 実験方法

2.1 供試体概要

表-1に、使用材料の種類と物性値を示す。表-2に、コンクリートの配合を示す。図-1に、供試体概要を示す。100×100×100(mm)の立方体とし、4側面をエポキシ樹脂により被覆し、上面にけい酸塩系表面含浸材を塗布した。塗布時の施工や養生は、文献²⁾に準拠した。

表-1 使用材料の種類と物性値

材料	種類	物性値
セメント	普通ポルトランドセメント	密度:3.16g/cm ³
細骨材	陸砂	密度:2.59g/cm ³
		粗粒率:3.08
		吸水率:2.83%
粗骨材	陸砂利	最大寸法:25mm
		密度:3.16g/cm ³
		粗粒率:6.95
		吸水率:1.46%
水	水道水	-
けい酸塩系表面含浸材	けい酸リチウム(固化型)	pH:11
		密度:1.3g/cm ³
	けい酸塩混合(反応型)	pH:11
		密度:1.3g/cm ³

*1 金沢工業大学大学院 工学研究科環境土木工学専攻 (学生会員)

*2 金沢工業大学 環境・建築学部環境土木工学科 教授 (正会員)

2.2 実験ケース

表-3 に実験ケースを示す。表面含浸材を塗布しないケース(以後「無塗布」とする)と、けい酸リチウム系表面含浸材を塗布したケース(以後「A」とする)、およびけい酸ナトリウム・カリウム系表面含浸材を塗布したケース(以後「B」とする)の計3水準とした。

2.3 促進暴露

塩水浸漬(30℃、濃度 3.0%の NaCl 水溶液中へ完全に浸漬)が 12 時間、および気中乾燥(30℃、RH70%)が 72 時間の、計 3.5 日間を 1 サイクルとする促進暴露を、塗布後 28 日目から 75 サイクル行った。

2.4 測定方法

(1) ビッカース硬さ

JIS-Z-2244 に準拠し、ビッカース硬さ試験機を用いてビッカース硬さを測定した。

(2) 全塩化物イオン濃度

JSCE-G-573 に準拠し、ドリルを用いて供試体から試料を採取し、可溶性塩化物イオン濃度を測定した。その後、全塩化物イオン濃度へ換算した⁵⁾。

3. 実験結果

3.1 ビッカース硬さ

図-2 に、塗布面からの深さとビッカース硬さの関係を示す。これによれば、ケース B では、7mm 以内において、塗布の値が無塗布の値と比べて高くなったことを確認できる。一方、8mm 以深において、無塗布と塗布の値がほぼ同等になったことを確認できる。したがって、ケース B の改質深さは 7mm 程度であると推定される。同様に、ケース A の改質深さは 5mm 程度であると推定される。

表-2 配合

W/C [%]	s/a [%]	単位量 [kg/m ³]			
		W	C	S	G
55	45	175	318	770	985

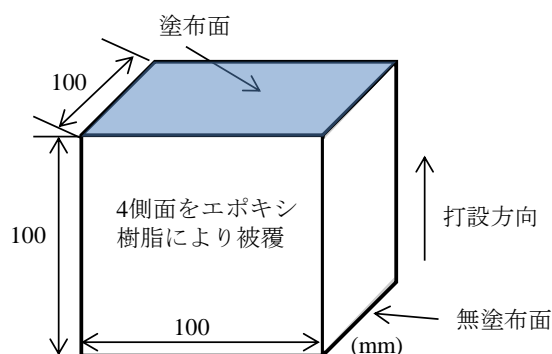


図-1 供試体概要

3.2 見かけの拡散係数の推定方法

見かけの拡散係数の推定方法を、実験結果の一例を示しながら説明する。

図-3 に、無塗布における全塩化物イオン濃度分布を示す。これに対し、フィックの拡散則による逆解析を行い、非改質部における見かけの拡散係数を求める。その結果、見かけの拡散係数は 2.5 cm²/年と算出された。

また、図-4 に、ケース B における全塩化物イオン濃度分布を示す。ここで、ビッカース硬さ試験により推定された改質深さから、深さ 7mm を境に改質部と非改質部を区別する。

次に、図-5 に、けい酸塩系表面含浸材による改質部における遮塩効果を、式(1)を用いて等価かぶり⁶⁾へ換算した後の、全塩化物イオン濃度分布を示す。

$$C_i = -C_s \times \frac{\sqrt{D_c}}{\sqrt{D_s}} \quad (1)$$

c_i : 等価かぶり (mm) c_s : 改質深さ (mm)

D_s : 改質部における見かけの拡散係数 (cm²/年)

D_c : 非改質部における見かけの拡散係数 (cm²/年)

すなわち、改質部においては、表面含浸材の遮塩効果に相当するかぶりが、コンクリート表面より外側に厚くなったと仮定する。ここでは 6 水準を仮に設定し、図-5 の(1)は改質部の拡散係数を 0.20 cm²/年と設定した場合を、(2)は 0.30cm²/年とした場合を、(3)は 0.40cm²/年とした場合を、(4)は 0.45cm²/年とした場合を、(5)は 0.60cm²/年とした場合を、および(6)は 1.00cm²/年とした

表-3 実験ケース

ケース	含浸材の主成分
無塗布	-
A	Li
B	Na+K

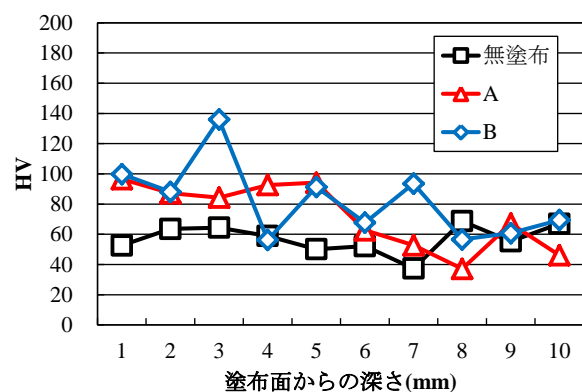


図-2 ビッカース硬さの分布

場合を示す。例えば図-5の(1)では、式(1)へ具体的な値を代入した式(2)に示す通り、等価かぶりは24mmと推定された。

$$-24 = -7 \times \frac{\sqrt{2.5}}{\sqrt{0.2}} \quad (2)$$

したがって、表面含浸材により改質されたことにより、元々は7mmの深さが改質されていないコンクリートに置き換えると24mmになる。よって、表面より外側に17mm(=24mm-7mm)の厚さのコンクリートが被覆されることを意味する。すなわち、図-5の(1)~(6)を比較すると、仮定した改質部の拡散係数が小さいほど、厚いコンクリートが表面より外側に被覆されると推定される。

さらに、図-6では、無塗布の全塩化物イオン濃度分布と照合するため、等価かぶりを考慮した分が負側に厚くなってしまった横軸を、原点(x=0)から塩化物イオン濃度分布が表記されるように移動した後に、無塗布とケースBに対するフィックの拡散則による近似線を引き、フィッティングさせる。例えば図-6の(1)では、ケースBの塩化物イオン濃度分布のプロットが、図-5の(1)に示されるx軸より右へ17mm移動される。

最後に、仮に設定された改質部における見かけの拡散

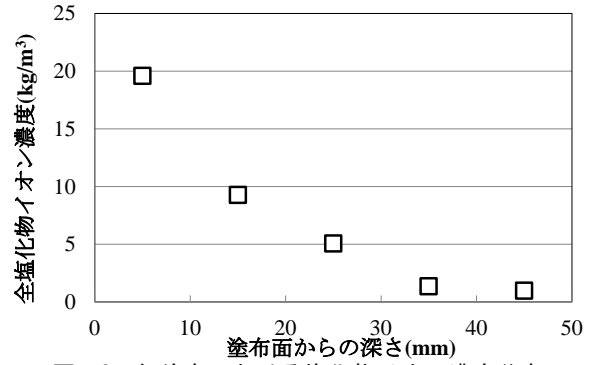


図-3 無塗布における塩化物イオン濃度分布

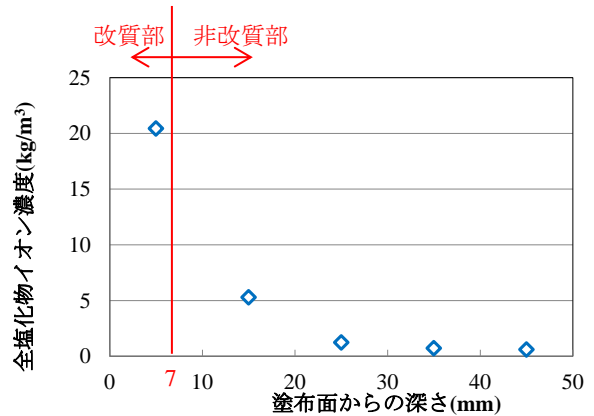


図-4 Bにおける塩化物イオン濃度分布

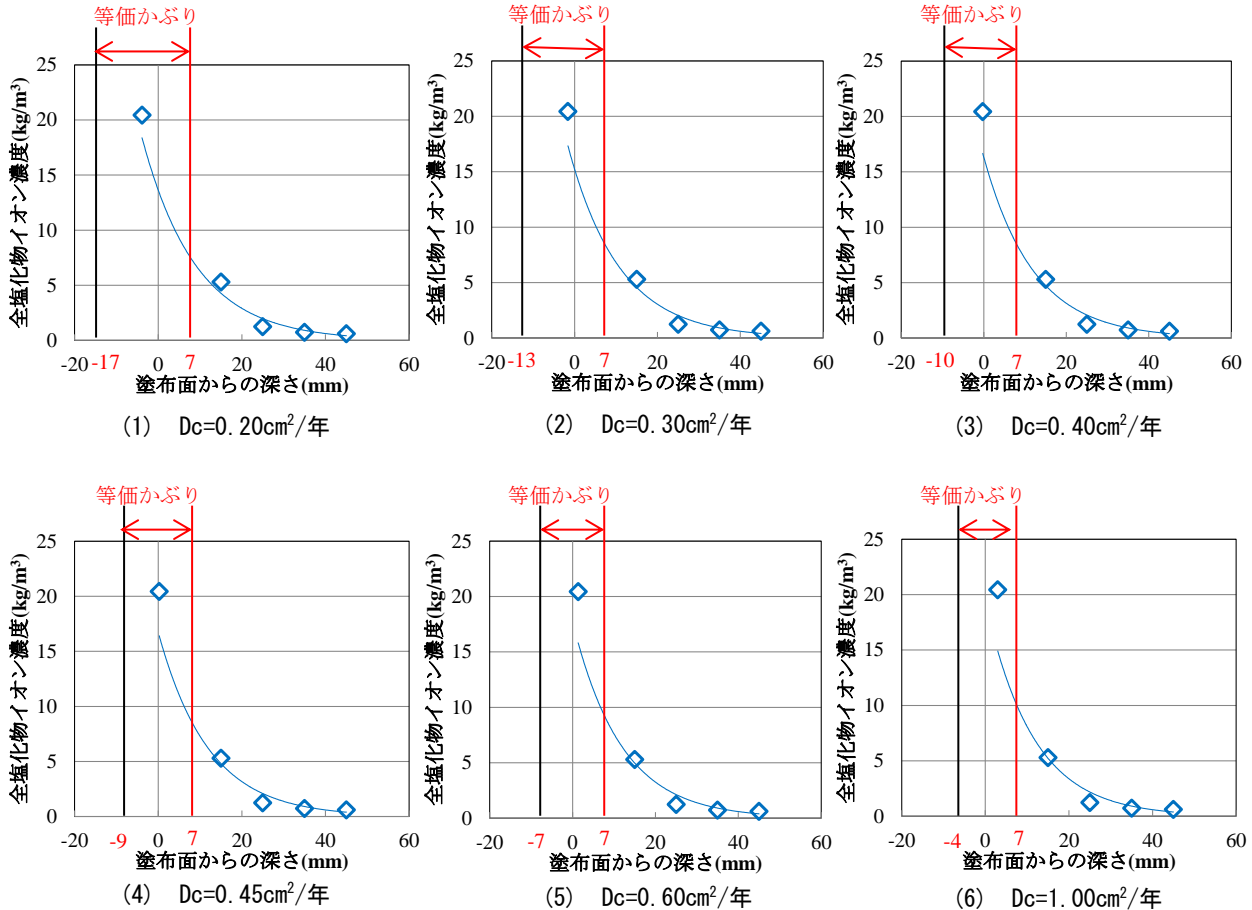


図-5 等価かぶりへの換算

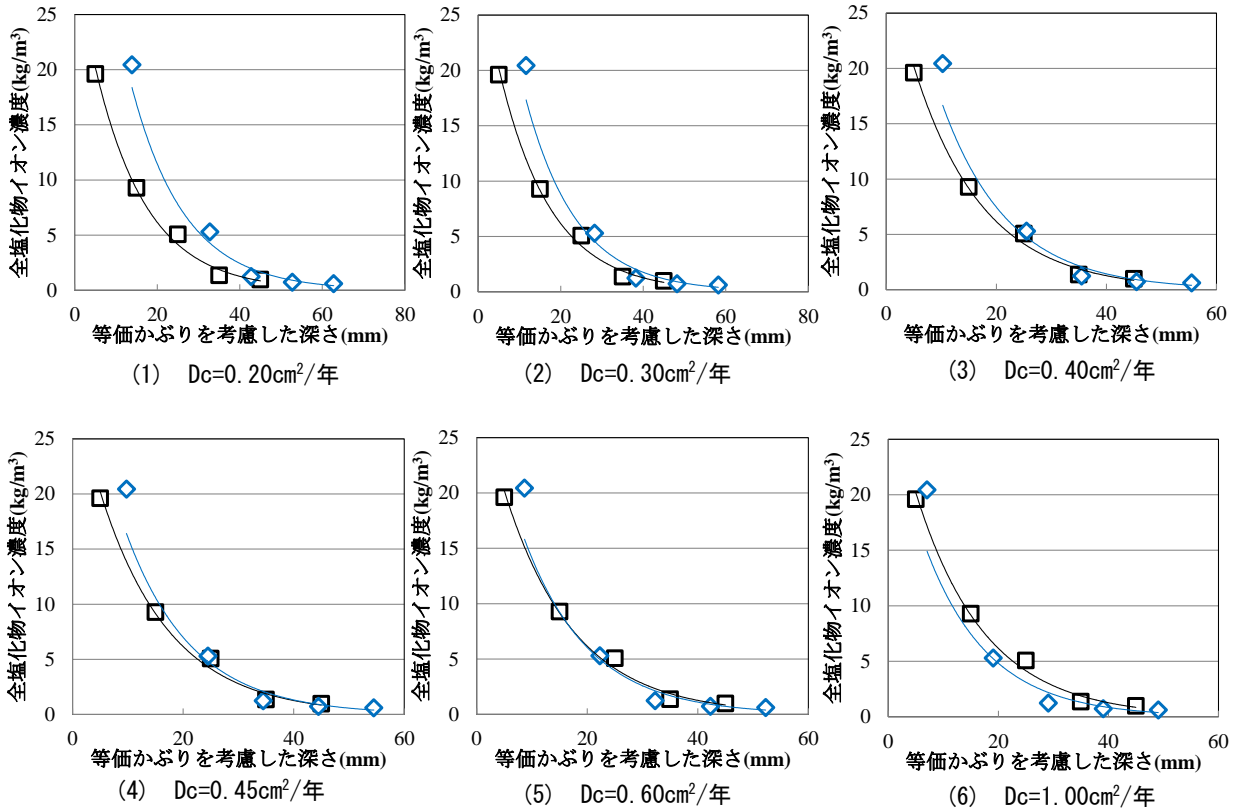


図-6 無塗布とのフィッティング

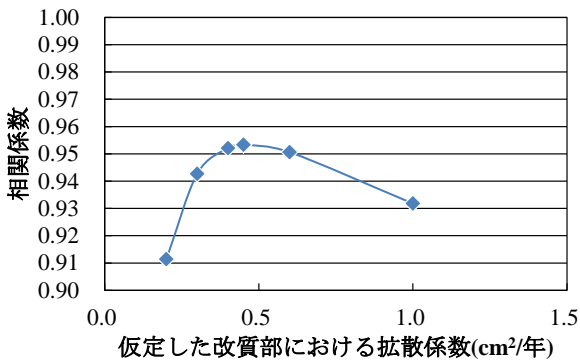


図-7 図-6 における相関係数

係数のうち、何れが適するかを判断するため、図-7 において、図-6 における無塗布と B のケースの全塩化物イオン濃度の相関係数を評価する。これによれば、最も相関係数が高い拡散係数は $0.45\text{cm}^2/\text{年}$ であることを確認できる。したがって、この値が改質部における見かけの拡散係数であると推定した。

3.3 全塩化物イオン濃度

図-8 に全塩化物イオン濃度の分布を示す。この図を基に、3.2 に示した方法で改質部における見かけの拡散係数を推定した。結果を図-9 に示す。これによれば、表面含浸材を塗布した両ケースともに無塗布と比較し、見かけの拡散係数は低減することを確認できた。特にケース B では無塗布と比較し、見かけの拡散係数が 18% に抑制された。

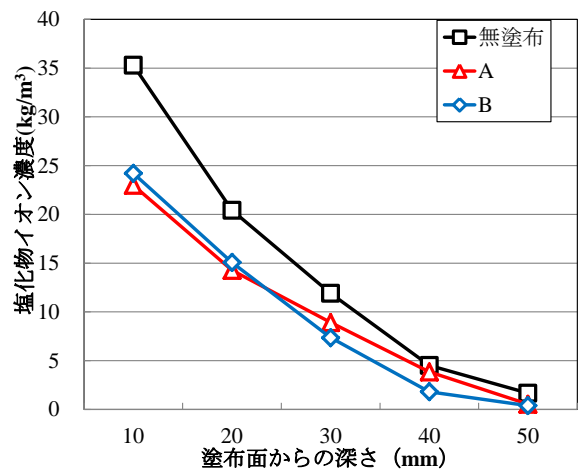


図-8 全塩化物イオン濃度分布

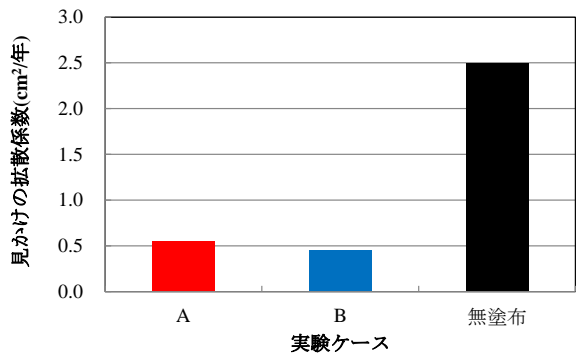


図-9 改質部における見かけの拡散係数

4. 実構造物へ予防保全工法として適用した場合の腐食発生時期の試算

4.1 試算の条件

3章で得られた改質深さおよび見かけの拡散係数の値を用いて、表-4に示す条件の実構造物へ、建設直後に予防保全工法としてけい酸塩系表面含浸材が塗布された場合の、腐食発生時期を試算した。すなわち、3.3で得られた見かけの拡散係数を使用し、発錆限界塩化物イオン濃度が 1.2kg/m^3 に達するまでの期間を推定した。ここで、実構造物の立地条件として、飛沫帯、汀線から100mの位置および汀線から500mの位置の3水準を設定した。また、かぶりの条件として、50mmと70mmの2水準を設定した。

4.2 試算方法

塗布したケースでは、3.3に示した見かけの拡散係数を式(1)に代入し、等価かぶりを算出した。その結果、各かぶりは表-5に示す通りとなった。

4.3 かぶりが50mmの場合の試算結果

図-10に、かぶりを50mmと設定した場合の腐食発生時期を示す。これによれば、何れの条件においても、無塗布と比較しけい酸塩系表面含浸材を塗布することで、潜伏期は延長されることが確認された。特に、構造物が汀線から500mの位置を条件に設定した場合において、ケースAでは14年間、ケースBでは25年間も潜伏期が延長されることを確認した。

4.4 かぶりが70mmの場合の試算結果

図-11に、かぶりを70mmと設定した場合の腐食発生時期を示す。これも、かぶり50mmの結果と同様に、けい酸塩系表面含浸材を塗布することで、潜伏期は延長されることが確認された。さらに、構造物が汀線から500mの位置を条件に設定した場合において、ケースAでは20年間、ケースBでは33年間も潜伏期が延長されることを確認した。

表-4 試算の条件

項目	数値		
	汀線からの距離(m)	飛沫帯	100
表面塩化物イオン濃度(kg/m^3)	13	4.5	2
かぶり(mm)	50, 70		
発錆限界塩化物イオン濃度(kg/m^3)	1.2		

表-5 等価かぶりを考慮した各ケースにおけるかぶり

かぶり	ケース		
	無塗布	A	B
50mm	50mm	56mm	60mm
70mm	70mm	76mm	80mm

4.5 評価

かぶり50mmと70mmの試算結果を総合評価する。かぶりに拘らず飛沫帯や汀線から100mにおいて、極めて短期間で腐食が発生した。また、けい酸塩系表面含浸材を塗布しても、無塗布と比較し、腐食発生時期は2倍程度に延長されているものの、腐食が15年以内に発生した。すなわち、海岸に近い構造物である場合、かぶりを増加させても腐食の発生は早く、さらにけい酸塩系表面含浸材を塗布しても工学的に顕著な効果は発揮されないと考えられる。

一方、汀線から500mにおいて、かぶりが70mmの無塗布と、かぶりが50mmのケースAでは、腐食が33年目程度に発生した。ここで、かぶりが50mmの無塗布においては、18年で腐食が発生したことを踏まえると、Aを塗布することにより、かぶりを20mmも厚くせず、50mmのまま、腐食発生の時期を15年間も遅延できる効果が認められた。さらに、Bを塗布することにより、それ以上の効果が期待できる。

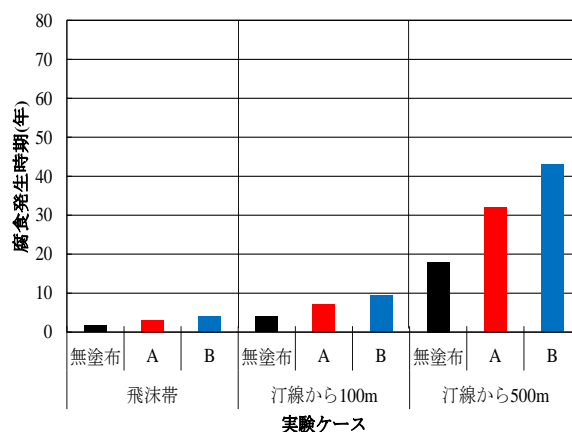


図-10 かぶり50mmにおける試算結果

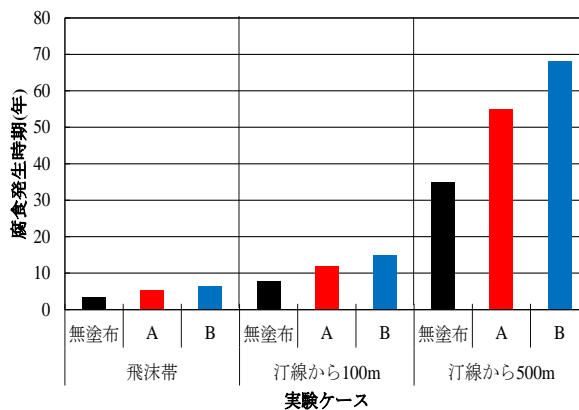


図-11 かぶり70mmにおける試算結果

5. まとめ

本研究で得られた主な成果を列挙する。

- (1) けい酸塩系表面含浸材を塗布することにより改質された表層部における、見かけの塩化物イオン拡散係数を推定する一手法を提案できた。
- (2) 水セメント比が55%のコンクリートを75サイクルに亘って塩水浸漬と気中乾燥させた結果、けい酸リチウム系表面含浸材を塗布したケースでは、5mm程度の改質部における見かけの塩化物イオン拡散係数が、22%に低減された。また、けい酸ナトリウム・カリウム系表面含浸材を塗布したケースでは、7mm程度の改質部における見かけの塩化物イオン拡散係数が、18%に低減された。
- (3) 実構造物が汀線から500mの位置にあり、かぶりが50mmを対象に、試算した結果によれば、けい酸リチウム系表面含浸材の塗布により、潜伏期が約18年間延びた。また、けい酸ナトリウム・カリウム系表面含浸材の塗布により、潜伏期が約25年間延びた。同様に、かぶりが70mmで試算した結果によれば、けい酸リチウム系表面含浸材の塗布により、潜伏期が約20年間延びた。また、けい酸ナトリウム・カリウム系表面含浸材の塗布により、潜伏期が約33年間延びた。
- (4) 海岸に極めて近い構造物の場合、けい酸塩系表面含浸材を塗布しても、かぶりを20mm厚くさせることと同様に、腐食の発生を顕著に遅延させる効果は発揮

されない。一方、汀線から500mに立地する構造物の場合、けい酸塩系表面含浸材を予防保全工法として塗布することにより、かぶりを20mm厚くさせること以上に、腐食の発生を遅延させることが期待できた。

謝辞

本研究を進めるにあたり、エバープロテクト(株)高島達行様、金沢工業大学大嶋俊一先生にご協力いただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリートライブラリー119「表面保護工法設計施工指針(案)」, pp.100-114, 2005
- 2) 土木学会：コンクリートライブラリー137「けい酸塩系表面含浸工法の設計施工指針(案)」, 2012
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書[維持管理編], pp.111-113, 2007
- 4) 日本コンクリート工学協会：「コンクリート構造物の長期性能照査支援モデルに関するシンポジウム委員会報告書・論文集」, pp.143-163, 2004
- 5) 後藤年芳, 五寶光基, 野島昭二：硬化コンクリート中の全塩化物イオン濃度迅速法の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.785-790, 2010
- 6) 土木学会：コンクリートライブラリー119「表面保護工法設計施工指針(案)」, pp. 203-251, 2005