

撥水材の遮塩性能評価方法に関する検討

Study on Evaluation Method for Control of Chloride Permeability by Water Repellent Agents

斯波 明宏 AKIHIRO SHIBA
 樋口 正典 MASANORI HIGUCHI
 谷口 秀明 HIDEAKI TANIGUCHI
 佐々木 亘 WATARU SASAKI

表面含浸材の一つである撥水材の塩分浸透抑制効果を確認するため、実際に現場で使用する比較的水セメント比の小さいコンクリート供試体に数種類の撥水材を塗布して塩水浸漬試験を行った。その結果、浸漬期間の違いにより塩分浸透性状が異なること、撥水材の種類により低水セメント比のコンクリートに対する塩分浸透抑制効果が通常の場合と異なる可能性があることなどが明らかとなった。また、これらの結果から撥水材の遮塩性能評価手法について検討を行った。

キーワード：撥水材、遮塩性、評価手法、塩水浸漬試験

In order to verify control of chloride permeability by water repellent agents as a kind of surface penetrants, relative low water-cement ratio concrete specimens spread with some water repellent agents were submerged in salt water. The results showed that submergence period has an effect on chloride permeability and chloride permeability for low water-cement ratio concrete is different from that for ordinary water-cement ratio concrete depending on the kind of water repellent agents. In addition, this paper describes evaluation method for control of chloride permeability by water repellent agents.

Key Words: Water Repellent Agents, Control of Chloride Permeability, Evaluation Method, Submergence Test in Salt Water

1. はじめに

表面含浸材はコンクリート表面に塗布するだけで、耐久性能を付与することができるため、その施工性の利便さや比較的安価であることから需要が拡大しつつある。また、土木学会からも表面保護工法設計施工指針（案）¹⁾が 2005 年に発行され、公にも認められる存在となっている。そのなかで、シラン系撥水材の塩分浸透抑制効果については、上記指針や既往の研究結果^{例えば 2)}などからもかなり期待される性能であり、今後、適用事例が増加するものと考えられる。しかし、その性能の評価手法については、現状では定められた規格がなく、各メーカーのカタログ値などを参考にしかるしかない。また、既往の研究や測定事例などでは、比較的水セメント比が大きなコンクリートに適用した事例が多く、PC（プレストレストコンクリート）で使用するようなコンクリートに対する事例が少ないのが現状である。

そこで、本研究では、実際に現場で使用する PC 桁の

コンクリート材料を用い、数種類のシラン系撥水材を塗布して塩水浸漬試験を行った。また、その試験結果から各撥水材の遮塩性能の評価手法について検討を行った。

2. 試験概要

ベースとなるコンクリート供試体の配合を表-1 に示す。セメントは早強ポルトランドセメント、細骨材は陸砂、山砂、粗骨材は陸砂利を使用している。目標強度 40 N/mm²、目標スランプ 12±2.5cm、目標空気量 4.5±1.5%である。水セメント比は 43.1%で単位水量は 148 kg/m³である。

コンクリート供試体はφ100×200mm の円柱供試体とし、現場で製作して所要の養生期間を経た後、土木学会規準「浸漬によるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法」(JSCE-G572-2007)³⁾に準じて打設面側 25mm を切断した。

塗布したシラン系撥水材を表-2 に示す。4 種類のシラ

表-1 配合表

セメント種類	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	Gmax (mm)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
						W	C	S	G	高性能 AE 減水剤
早強	12±2.5	4.5±1.5	43.1	25	43.5	148	343	791	1040	2.401

表-2 シラン系撥水材

名称	成分等	塗布量	塗布回数
撥水材 A	水性シラン系	0.3kg/m ²	3回
撥水材 B	アルキル・アルコキシシラン系	0.3kg/m ²	1回
撥水材 C	水性シラン系	0.3kg/m ²	2回
撥水材 D	シラン・シロキサン系	0.2kg/m ²	1回

ン系撥水材を選定し、それぞれ各メーカーが推奨する施工手順にしたがって供試体の切断面に塗布を行った。切断面（塗布面）以外の面はすべてエポキシ樹脂により被覆した。なお、比較のため、撥水材無塗布の供試体も準備した。

塩水浸漬試験は、前述の土木学会規準に準じて行い、温度 20±2℃、NaCl 濃度 10%の溶液にそれぞれ 4 ヶ月、8 ヶ月、12 ヶ月間浸漬した。撥水材塗布後約 2 週間気中養生（温度 20±2℃、湿度 60±5%）を経た後、塩水浸漬試験（図-1）を開始した。

所定の浸漬期間が終了した段階で、供試体を塩水から取り出し、割裂面に 0.1N 硝酸銀を噴霧して塩分浸透深さを測定した。その後、JIS A 1154「硬化コンクリートに含まれる塩化物イオンの試験方法」に準じて表面（切断面）から深さ 10mm ごとに深さ 50mm まで塩化物イオン濃度を測定した。また、割裂面に水を噴霧して撥水材の浸透深さも測定した。



図-1 塩水浸漬試験

表-3 撥水材浸透深さ

種別	浸透深さ カタログ掲載値	浸透深さ 測定値
撥水材 A	約 4mm	2.8mm
撥水材 B	7~10mm	5.3mm
撥水材 C	4~5mm	2.9mm
撥水材 D	約 6mm	4.0mm

3. 試験結果

(1) コンクリート圧縮強度

コンクリートの圧縮強度は材齢 3 日で 36.0N/mm²、材齢 7 日で 43.2N/mm²、材齢 28 日で 49.1N/mm²であり、ほぼ目標どおりの結果であった。

(2) 撥水材浸透深さ

試験終了時点（12 ヶ月経過）での撥水材の浸透深さ測定結果を表-3 に示す。また、浸透深さ測定状況を図-2 に示す。図の上段は無塗布供試体で、下段は撥水材 A であり、表面（上側）からわずかに白くなっている範囲が、撥水材浸透領域である。撥水材 B がやや大きく、

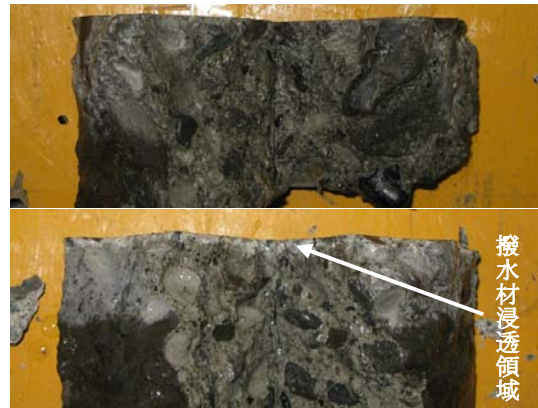


図-2 撥水材浸透深さ測定状況
(上段：無塗布，下段：撥水材 A)

次いで撥水材 D, 撥水材 A, C はほぼ同じである。カタログ結果などに比べると、コンクリートの水セメント比が小さい影響もあって、全体的に浸透深さは小さい傾向にある。

(3) 塩分浸透深さ

0.1N 硝酸銀溶液噴霧による塩分浸透深さ測定状況を図-3 に測定結果を図-4 に示す。凡例の A~D は各撥水材塗布供試体, NO は無塗布供試体を表している。無塗布供試体は4ヶ月でおよそ20mmに達し、その後、浸漬期間の増加に伴い、塩分浸透深さも増加している。図中には各供試体の塩分浸透深さと浸漬期間について \sqrt{t} 則に準じた回帰式を示したが、無塗布供試体およびいずれの撥水材塗布供試体もほぼその傾向に合致していると考えられる。撥水材塗布供試体はいずれも塩分浸透深さが無塗布に比べて小さく、特に撥水材 B はその傾向が顕著である。

図-5 は各浸漬期間における無塗布供試体に対する各撥水材の塩分浸透深さの比を示した図である。塩分浸透深さ比では、各撥水材の効果がより明確に表されており、浸漬期間4ヶ月では0.3~0.7程度の塩分浸透抑制効果となっている。ただし、浸漬期間8ヶ月では全体的に塩分浸透深さ比が増加し、その後はほぼ一定の傾向を示している。最終的な塩分浸透抑制効果としては、撥水材 A, C が0.85程度、撥水材 D が0.7程度、撥水材 B は0.4程度となっている。このことは撥水材の塩分浸透抑制効果が定常状態になるまで、ある程度の期間を要すると思われるため、塩水浸漬試験を実施する場合は試験期間が短いと塩分浸透抑制効果を過大に評価する可能性があり、試験期間の設定には注意が必要であると言える。

(4) 塩化物イオン濃度分布

各浸漬期間において測定された各供試体の塩化物イオン濃度分布をそれぞれ図-6~図-8 に示す。各図には濃度分布よりフィックの第2法則に基づく拡散方程式の解(式(1))により回帰した塩化物イオン濃度分布曲線を示している。

$$C(x,t) = C_{a0} \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_{ap} \cdot t}} \right) \right\} \quad (1)$$

ただし、 x : 暴露面から全塩化物イオンを測定した箇所までの距離 (cm), t : 浸漬期間 (年), $C(x,t)$: 距離 x (cm), 供用期間 t (年) において測定された全塩化物イオン (%), C_{a0} : コンクリート表面の全塩化物イオン (%), D_{ap} : 試験による見掛けの拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$),

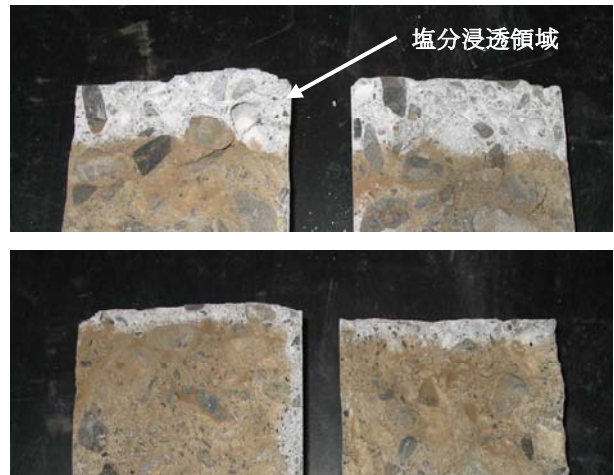


図-3 塩分浸透深さ測定状況 (浸漬期間 12 ヶ月)
(上段: 無塗布, 下段: 撥水材 B)

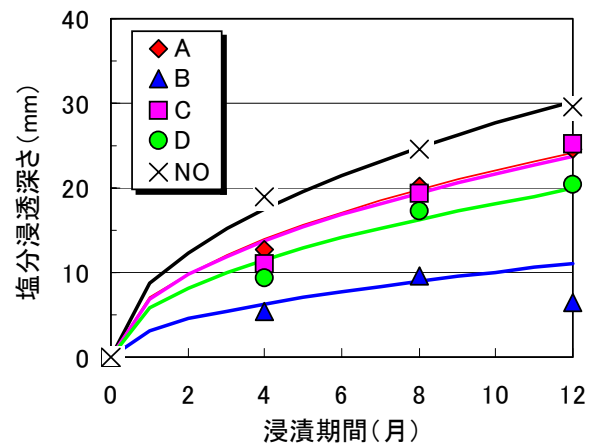


図-4 塩分浸透深さ測定結果

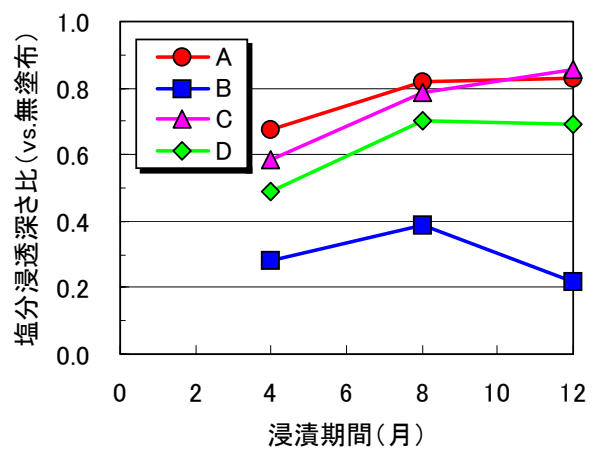


図-5 塩分浸透深さ比

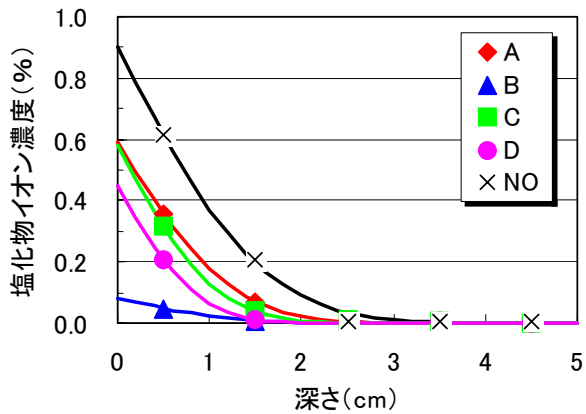


図-6 塩化物イオン濃度分布
(浸漬期間 4ヶ月)

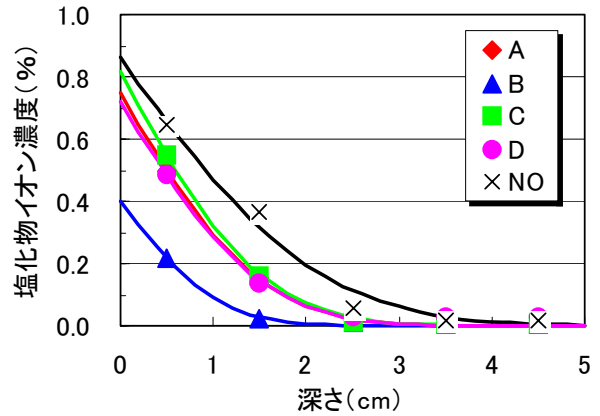


図-7 塩化物イオン濃度分布
(浸漬期間 8ヶ月)

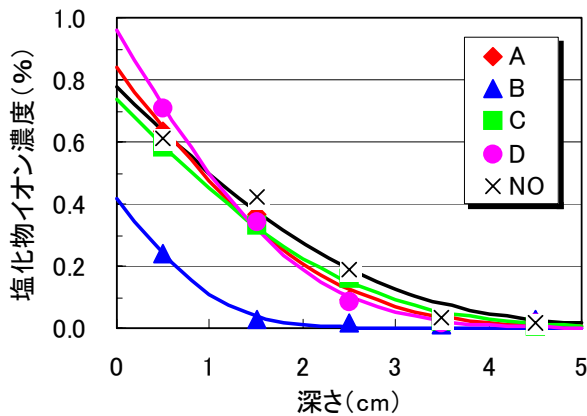


図-8 塩化物イオン濃度分布
(浸漬期間 12ヶ月)

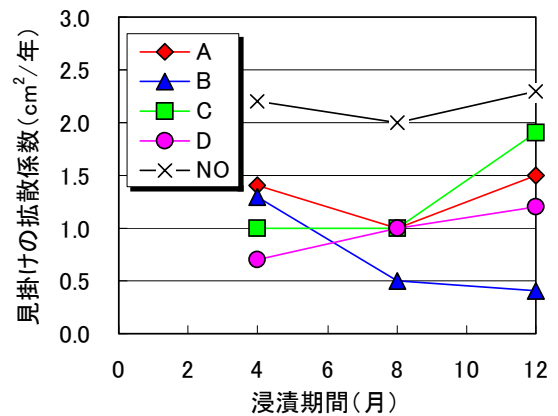


図-9 見掛けの拡散係数と浸漬期間

erf: 誤差関数
$$\text{erf}(s) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^s e^{-t^2} dt$$

撥水材塗布の有無によらず、浸漬期間の増加に伴い、塩化物イオンの拡散が進展しているのがわかる。また、塩分浸透深さと同様、無塗布に比べて撥水材の塩分浸透抑制効果が表れていることが確認できる。撥水材 B については、特にその効果が際立っており、12ヶ月の時点でも表面から10mm以深にはほとんど塩化物イオンが浸透していないことがわかる。

撥水材 A, C, D については、浸漬期間 4ヶ月、8ヶ月では塩分浸透抑制効果が明瞭であるが、12ヶ月では無塗布とあまり変わらない結果となっている。また、塩分浸透深さでは撥水材 A, C よりも撥水材 D のほうがより効果が大きかったが、塩化物イオン濃度分布ではほぼ同じになっている。塩分浸透深さ測定と塩化物イオン濃度測定はいずれも同じ供試体を用いているため、実際には両者の相関性は高いと考えられる。このような結果が生じた要因としては、塩化物イオン濃度測定は10mm

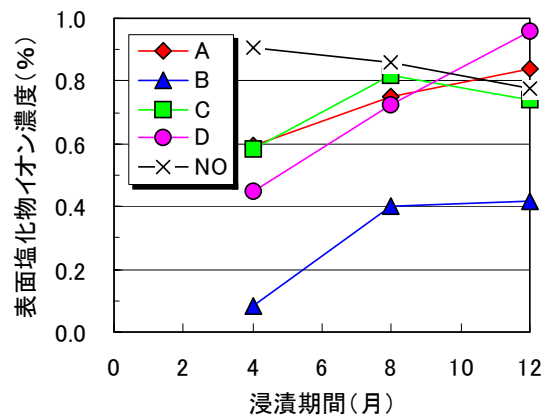


図-10 表面塩化物イオン濃度と浸漬期間

ごとの平均値であり、必ずしも厳密な分布を示していないこと、浸漬期間が長い場合、供試体側面側で塩分浸透が大きくなり、塩化物イオン量を過大に評価する可能性があることなどが考えられる。

次に、回帰により得られた見掛けの拡散係数および

表面塩化物イオン濃度と浸漬期間の相関を図-9 および図-10 に示す。無塗布供試体では見掛けの拡散係数は浸漬期間によらずほぼ同じであり、表面塩化物イオン濃度は若干減少傾向を示すものの変化は少なく、拡散方程式の解（式(1)）での評価が妥当なものと判断される。撥水材 A, C, D については、見掛けの拡散係数がほぼ同じか若干増加傾向にあるが、無塗布に比べると小さくなっている。

表面塩化物イオン濃度は、いずれの撥水材も浸漬期間 4 ヶ月では無塗布に比べてかなり小さく、その後増加し、浸漬期間 8 ヶ月以降は増加が小さくなっている。撥水材 B については、見掛けの拡散係数が減少し、表面塩化物イオン濃度が増加していることから、表面付近での塩化物イオンの蓄積が大きいものと推測される。撥水材 B と他の撥水材とで差が大きくなった要因の一つとして、水セメント比が比較的小さいコンクリートに対する撥水材そのものの浸透性や効果の発揮度合いが異なるためと考えられる。

また、本結果からも、コンクリート配合や塗布材料に応じて浸漬期間を適切に設定することが重要と言える。

4. 遮塩性能評価手法の検討

撥水材の遮塩性能評価手法としては、前述の結果などを見ると、表面塩化物イオン濃度や見掛けの拡散係数を材料や配合に応じて低減する手法が簡易な方法であるが、厳密には撥水材が機能しているのは表面数 mm 程度であり、それ以深は無塗布のコンクリートである。そこで、撥水材浸透厚さ部分に対しては撥水材に対する見掛けの拡散係数を用い、それ以深については、コンクリートそのもの見掛けの拡散係数を用いて塩分浸透を評価する手法を試みた。

撥水材の浸透深さについては、表-3 の値を参考とし、表面塩化物イオン濃度は、無塗布供試体の浸漬期間 4 ヶ月、8 ヶ月、12 ヶ月の平均値、コンクリートの見掛けの拡散係数は同じく無塗布供試体の平均値とした。なお、表面塩化物イオン濃度は土木学会コンクリート標準示方書〔設計編〕⁴⁾の塩化物イオン浸透予測手法に準じて、固定値とした。

撥水材の見掛けの拡散係数は、4 ヶ月、8 ヶ月、12 ヶ月の塩化物イオン濃度測定値との残差が最も少なくなるよう回帰により求めた。

検討の結果、各撥水材の見掛けの拡散係数は撥水材 A $0.17\text{cm}^2/\text{年}$ 、撥水材 B $0.08\text{cm}^2/\text{年}$ 、撥水材 C $0.16\text{cm}^2/\text{年}$ 、撥水材 D $0.21\text{cm}^2/\text{年}$ となった。これを基に、各撥水材に関する塩化物イオンの浸透状況および無塗布の場合の浸

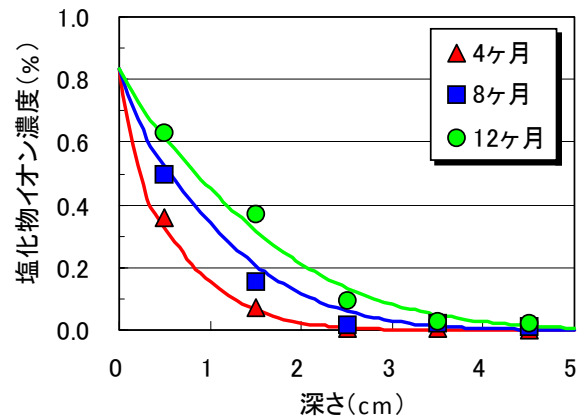


図-11 塩分浸透評価（撥水材 A）

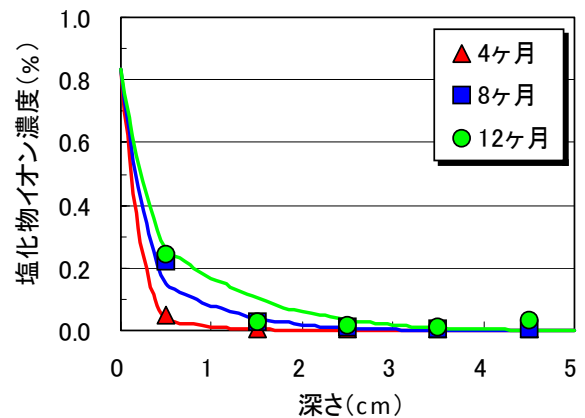


図-12 塩分浸透評価（撥水材 B）

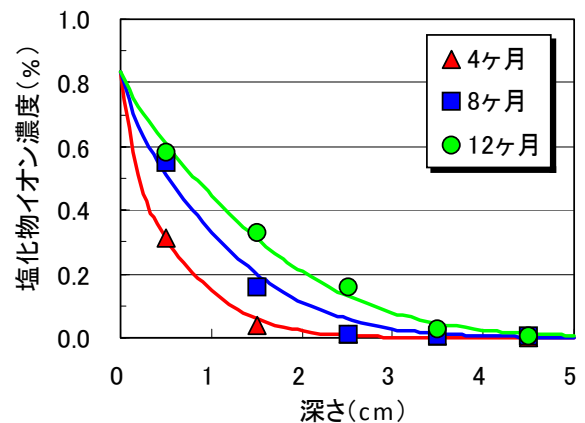


図-13 塩分浸透評価（撥水材 C）

透状況を図示すると、それぞれ図-11～図 15 のようになる。撥水材 B は前述した結果のとおり最も見掛けの拡散係数が小さくなった。また、撥水材 D は見掛けの拡散係数が最も大きい、撥水層厚さが撥水材 A, C に比べて大きいため、結果としては同じような効果となっている。図から、特に撥水材 B については撥水層部分での塩化物イオン濃度勾配が大きく、遮塩性能が良く現れている。その他の撥水材については、浸漬期間 4ヶ月の場合に撥水層とコンクリート層での塩化物イオン濃度勾配の違いが確認できるものの、浸漬期間 8ヶ月以降では、違いはかなり小さくなっている。ただし、無塗布の場合に比べれば、遮塩性能の違いは明らかである。

全体的には測定値との差が見られる箇所があるものの、おおむね測定結果と本手法により算出した各撥水材の塩分浸透曲線は合致しており、撥水材の遮塩性能評価手法として適用できる可能性が高いものと考えられる。ただし、ここで算出した撥水材の見掛けの拡散係数および撥水層厚さは、わずかに異なるだけで遮塩性能に大きく影響を及ぼすため、数値の設定については適切な試験方法の基で、十分にデータを検討することが重要と考えられる。

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- ① 撥水材の浸透深さや遮塩性能は、対象とするコンクリート配合により大きく異なる可能性がある。
- ② 撥水材の遮塩性能が定常状態になるにはある程度の期間が必要であり、試験期間の設定に注意を要する。
- ③ 撥水層に撥水材特有の見掛けの拡散係数を設定することで、撥水材の遮塩性能をおおむね評価することが可能である。

本研究で適用した撥水材の遮塩性能評価手法は、撥水層の見掛けの拡散係数を求める必要があり、現状では実験で確かめることが必要である。今後はデータの蓄積等により、目安となる指標値が得られれば、撥水材の遮塩性能に対する事前の設計や検討が可能になるものと考えられる。

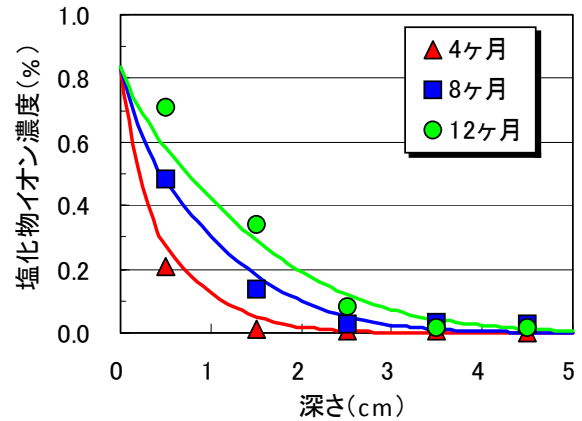


図-14 塩分浸透評価 (撥水材 D)

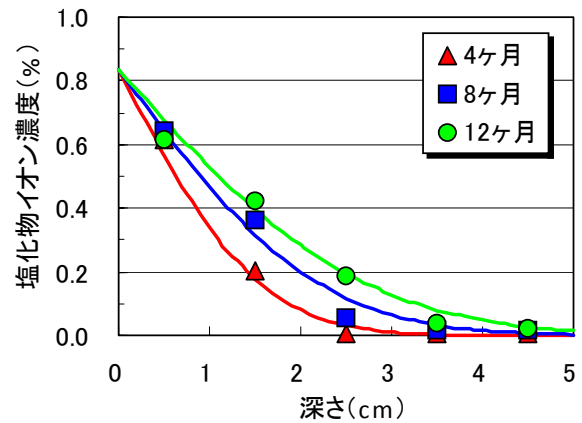


図-15 塩分浸透評価 (無塗布)

参考文献

- 1) 土木学会：表面保護工法設計施工指針 (案)，コンクリートライブラリー119，2005.4
- 2) 叶健児ほか：表面含浸工法による土木構造物の耐久性向上に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.27, No.1, pp.1897-1902, 2005.7
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書[規準編]2007年制定，2007
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書 [設計編] 2007年制定，2007