

論文 寒冷地域にて使用する表面含浸材の耐久性能試験

寺澤 正人^{*1}・木村 裕俊^{*2}・中村 洋二^{*3}・鈴木 基行^{*4}

要旨：筆者らは表面含浸工法にて寒冷地域のRC構造物の耐久性を向上させることを考えて、数種の表面含浸材に対し、各種の耐久性能試験を実施した。その結果、(1)けい酸塩系表面含浸材は中性化や凍結融解に対する抵抗性に優れるものもあるが、主成分が同じでもその性能に差があること、(2)シラン系表面含浸材は防水性能等には優れるが、凍結融解作用に対しては、既往の研究にも見られる無処理に比較して表面劣化が進行する現象があることなどを確認した。

キーワード：表面含浸材、表面保護工法、防水、中性化、凍結融解、塩害

1. はじめに

耐用年数にわたり、コンクリート構造物の耐久性を確保することは重要なことである。筆者らは表面含浸工法によって寒冷地域に新設するRC構造物の耐久性を向上させることを検討している。これに対し、過去に多くの研究成果があり、この分野での成果をまとめたものに「表面保護工法 設計施工指針（案）」¹⁾がある。これは、表面保護工法の設計・施工の一連の指針を提案するとともに、共通の試験環境下で多種の表面含浸材に対して実施した耐久性能試験の結果を示している。しかし、寒冷地域での性状把握に必要な凍結融解試験は実施されていない。また、凍結融解試験を実施した過去の研究事例²⁾は、特定な成分の表面含浸材を対象とするものが多く、けい酸塩系とシラン系といった成分が異なる表面含浸材の性能を確認・比較をした事例は少ないと思われる。筆者らは、長期耐久性の確保をより確実なものとするためには、表面含浸材の性能・性状に関するデータの更なる蓄積が必要と考え、数種の表面含浸材に対し、凍結融解試験を含む各種の耐久性能試験を実施して、性状・性能を確認・比較し、考察を加えた。

2. 試験方法

2.1 想定構造物

試験の対象とする想定構造物は、寒冷地域に建設される鉄筋コンクリート構造物とした。

2.2 試験対象とする耐久性能試験項目

2.1に示した想定構造物より判断して以下の4つの耐久性能試験を表面含浸材に対して試験することとした。

- a)吸水率試験：防水性能の把握を目的とした。
- b)中性化に対する抵抗試験：耐久性能の代表的な指標の把握を目的とした。
- c)塩化物イオン浸透に対する抵抗試験：塩害に対する抵抗性の把握を目的とした。
- d)凍結融解試験：凍結融解に対する抵抗性の把握を目的とした。

2.3 試験水準（試験対象とする表面含浸材）

表面含浸材は、「けい酸塩系」と「シラン(撥水)系」に大分される。本研究では、主成分を同一のけい酸塩（けい酸ナトリウム）とする3種の表面含浸材に対してその性能を比較することと、けい酸塩系とシラン系の性能を比較することを目的として、次に示す4種の代表的な表面含浸材（市販品）を選定し、これに「無処理」

*1 飛島建設（株） 土木本部土木設計部コンクリート構造グループ担当課長（正会員）

*2 （独）鉄道建設・運輸施設整備支援機構 東北新幹線建設局技術管理課長

*3 （株）オリエンタルコンサルタンツ 東京事業本部本社事業統括特定プロジェクトリーダー

*4 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻教授 工博（正会員）

を加えた 5 水準にて試験を行った。

(1) 表面含浸材 A

けい酸塩系，無色液体 1 液塗布型

標準塗布量：0.15kg/m²/回の 2 回塗布

(2) 表面含浸材 B

けい酸塩系，無色液体 1 液塗布型

標準塗布量：0.25kg/m²/回の 1 回塗布

(3) 表面含浸材 C

けい酸塩系，黄褐色粉体薬剤にエマルジョンと水を練混して得られるペーストを塗布する。

(以後，「ペースト塗布型」と呼ぶ)

標準塗布量：0.75kg/m²/回の 2 回塗布

(4) 表面含浸材 D

シラン系（撥水系），無色液体 1 液塗布型

標準塗布量：0.25kg/m²/回の 1 回塗布

なお，供試体への含浸材の標準塗布量や回数はいずれのメーカーが指定するものである。

2.4 準拠試験規格および試験条件

2.2 に示したそれぞれの耐久性試験項目に対して，以下の試験規格・試験条件等にて試験を実施した。

(1) 吸水率試験

準拠規格：JSCE-K 571-2005（表面含浸材の試験方法（案））

供試体寸法：10×10×10cm

試験条件：23±2℃の水道水を浸せき水とした。

(2) 中性化に対する抵抗性試験（フェノールフタレイン溶液法）

準拠規格：JSCE-K 571-2005（表面含浸材の試験方法（案）），JIS A1152:2002（コンクリートの中性化深さの測定方法），JIS A1153:2003（コンクリートの促進中性化試験方法）

供試体寸法：10×10×10cm

試験条件：中性化促進環境は，温度 20±2℃，相対湿度 60±5%，二酸化炭素濃度 5±0.2%とした。

(3) 塩化物イオン浸透に対する抵抗性試験（0.1%フルオレセインナトリウム水溶液，0.1N 硝酸銀溶液法）

準拠規格：JSCE-K 571-2005（表面含浸材の試験方法（案））

供試体寸法：10×10×10cm

試験条件：浸せき塩分溶液は，濃度 3±0.3%の塩化ナトリウム水溶液とした。

(4) 凍結融解試験（水中凍結融解試験法 A 法）

準拠規格：JIS A1148:2001（コンクリートの凍結融解試験方法），JIS A1127:2001（共鳴振動によるコンクリートの動弾性係数，動せん断弾性係数及び動ポアソン比試験方法）

供試体寸法：10×10×40cm

試験条件：+5℃→-18℃→+5℃の 1 凍結融解サイクルは 4 時間とした。JIS A1148:2001によれば，試験開始材齢は水中養生 28 日後であるが，吸水率試験・中性化に対する抵抗性試験・塩化物イオン浸透に対する抵抗性試験と同様に JSCE-K 571-2005 に従い，表面含浸材の塗布後の養生期間 14 日後に試験を開始した。ただし，メーカー指定の養生法として，シラン系の表面含浸材 D では気中乾燥養生を，けい酸塩系表面含浸材 A～C は散水湿潤養生を塗布後に実施した。また「無処理」は実際の構造物の環境を考慮して気中養生とした。それぞれの含浸材に対して養生条件が異なるため表面含浸材の塗布後の養生期間内の最終日に

表 1 基板コンクリートの示方配合表

使用セメント	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)					単位量(ml/m ³)	
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G1	粗骨材 G2	減水剤	AE 剤
普通ポルトランドセメント	55.0	45.5	154.0	280.0	835.9	621.7	414.5	840.0	6.2

粗骨材の最大寸法：20mm

スランプ：8.0±2.5cm

空気量：4.5±1.0%

細骨材：君津産山砂 (F.M=2.6 比重=2.58)

減水剤：標準型 I 種

粗骨材 G1：八王子産砕石 5 号 (F.M=7.0 比重=2.67)

AE 剤：I 種

粗骨材 G2：八王子産砕石 6 号 (F.M=5.9 比重=2.67)

水：水道水

において 24 時間，水中養生を全ての供試体に対して実施した。なお，基板コンクリート（含浸材を塗布する母材コンクリート）の作製・養生方法等は JSCE-K571-2005（表面含浸材の試験方法（案））に準拠することとしたが，基板コンクリートの配合は 2.5 に示すものとした。

2.5 基板コンクリートの示方配合，性状，強度

基板コンクリートの配合は，想定 R C 構造物の標準的な配合として水セメント比＝55％を採用し，表－1 に示す配合とした。なお，フレッシュコンクリートの性状は，練上り温度 22℃，スランプ＝8.0～9.0cm，空気量＝5.1～5.5％であった。また，基板コンクリートの圧縮強度試験の結果の平均値を表－2 に示すが，これらの結果から判断して概ね呼び強度 27N/mm² のコンクリートと同等のものであると判断された。

3. 試験結果

3.1 吸水率試験結果

吸水率（コンクリート表面から水分が浸透する程度）の試験結果の一覧を表－3 に，吸水率の経時変化を図－1 に示す。防水性の向上を主

表－2 基板コンクリート圧縮強度結果一覧

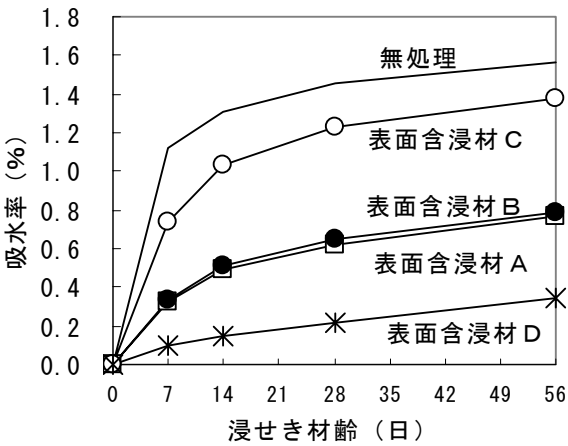
	材齢 (日)	平均圧縮 強度 (N/mm ²)
水中標準養生	28	32.0
水中＋気中養生（薬剤塗布完了日）	35	35.9
水中＋気中養生（試験開始日）	49	36.1
水中＋気中養生（試験開始後28日）	77	36.2
水中＋気中養生（試験開始後56日）	105	36.4
水中＋気中養生（全試験終了日）	122	37.3

目的として開発されたシラン（撥水）系の表面含浸材 D が最も良い性能を示した。一方，けい酸塩系はシラン系に比較して性能は劣るものの，コンクリート表面の緻密化によると思われる防水性が認められた。しかし同一の含浸材形態（液体）の表面含浸材 A と B ではほぼ同等の結果を示したが，ペースト塗布型である表面含浸材 C は，これらに比較して防水性が劣る結果となった。これは比較的ポーラスな表面含浸材 C 自体が吸水したことによるものと考えられる。

3.2 中性化に対する抵抗性試験結果

中性化に対する抵抗性試験結果の一覧を表－4 に，中性化深さの経時変化を図－2 に示す。

けい酸塩系表面含浸材は一般にけい酸と未水和セメントが反応してコンクリートの表面を緻密化する為，中性化に対する抵抗性は高いとされるが，表面含浸材 A ～ C ではその性能が異なり，表面含浸材 C はそれほど高い中性化抵抗性



図－1 吸水率試験結果

表－3 吸水率試験結果一覧

試験名	試験材齢	試験測定項目		無処理	けい酸塩系			シラン系 (撥水系)
					表面含浸材 A	表面含浸材 B	表面含浸材 C	表面含浸材 D
		項目	単位		液体塗布	液体塗布	ペースト塗布	液体塗布
吸水率試験	水浸せき 7 日後	吸水率	(%)	1.12	0.32	0.33	0.74	0.10
		吸水比	(%)	100.0	28.5	29.8	65.8	8.6
	水浸せき 14 日後	吸水率	(%)	1.31	0.49	0.51	1.03	0.15
		吸水比	(%)	100.0	37.0	38.6	78.7	11.1
	水浸せき 28 日後	吸水率	(%)	1.46	0.62	0.65	1.23	0.22
		吸水比	(%)	100.0	42.8	44.8	84.7	15.4
	水浸せき 56 日後	吸水率	(%)	1.56	0.77	0.79	1.38	0.34
		吸水比	(%)	100.0	49.2	50.3	88.4	21.8
	性能順位				2	3	4	1

吸水比 ＝（表面含浸材を塗布した場合の吸水率／無処理の吸水率）×100

が認められないのに対して、表面含浸材Aは比較的良好的な結果が得られている。一方、シラン系表面含浸材は一般的に中性化に対する抵抗性は低いとされているが、今回の試験の結果では、最も結果が良好であったけい酸塩系表面含浸材Aとほぼ同程度の性能を示した。シラン系材料がコンクリート表面の微細空隙に浸透してコンクリート表面の防護をしている可能性が考えられる。

3.3 塩化物イオン浸透抵抗性試験結果

塩化物イオン浸透に対する抵抗性試験結果の

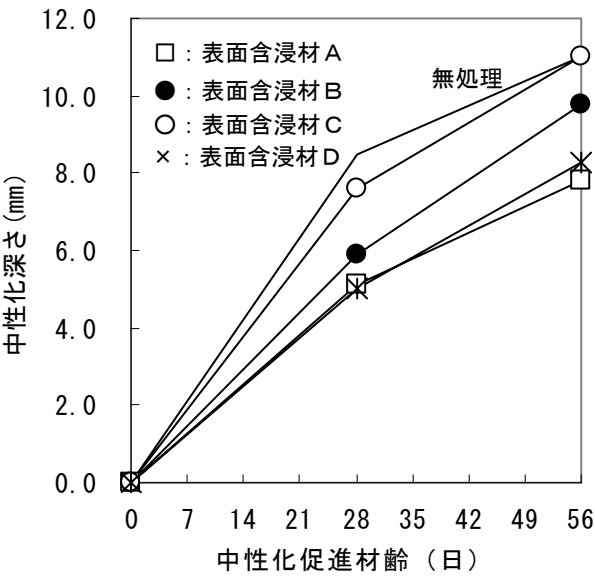


図-2 中性化に対する抵抗性試験結果

一覧を表-5に、塩化物イオン浸透深さの経時変化を図-3に示す。塩化物イオン浸透に対する抵抗性においても、撥水効果のあるシラン系表面含浸材Dが最も良好な効果を発揮した。一方、けい酸塩系の表面含浸材は、シラン系に比較してその効果は低い、一定の効果を示した。しかし、表面含浸材Bが最も効果が低く、表面含浸材AとCはほぼ同等の性能を示した。このようにけい酸塩系表面含浸材では、先に示した防水性・中性化に対する抵抗性と同様に、主成分が同一であっても、その効果に差が見られた。

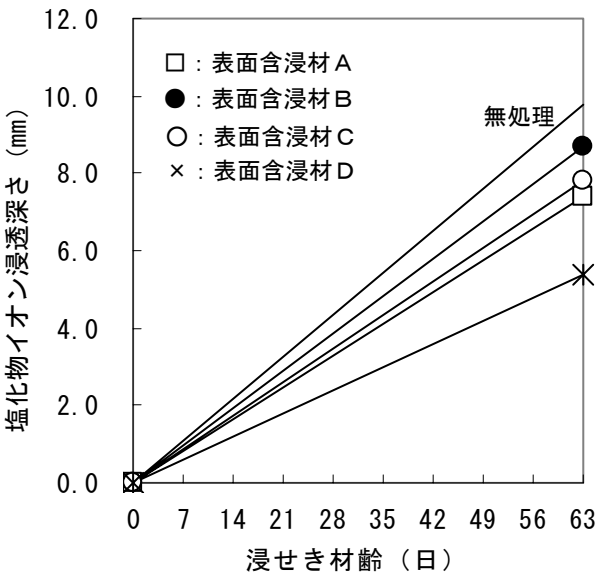


図-3 塩化物イオン浸透に対する抵抗性試験結果

表-4 中性化に対する抵抗性試験結果一覧

試験名	試験材齢	試験測定項目		無処理	けい酸塩系			シラン系 (撥水系)
					表面含浸材A	表面含浸材B	表面含浸材C	表面含浸材D
		項目	単位		液体塗布	液体塗布	ペースト塗布	液体塗布
中性化に対する 抵抗性試験	中性化促進 28日	中性化深さ	(mm)	8.5	5.1	5.9	7.6	5.0
		中性化深さ比	(%)	100.0	60.4	68.8	89.6	58.6
	中性化促進 56日	中性化深さ	(mm)	11.0	7.8	9.8	11.0	8.3
		中性化深さ比	(%)	100.0	70.6	88.7	99.6	75.2
	性能順位				1	3	4	2

中性化深さ比 = (表面含浸材を塗布した場合の中性化深さ / 無処理の中性化深さ) × 100

表-5 塩化物イオン浸透に対する抵抗性試験結果一覧

試験名	試験材齢	試験測定項目		無処理	けい酸塩系			シラン系 (撥水系)
					表面含浸材A	表面含浸材B	表面含浸材C	表面含浸材D
		項目	単位		液体塗布	液体塗布	ペースト塗布	液体塗布
塩化物イオン 浸透に対する 抵抗性試験	塩水浸せき 6 3 日	塩化物イオン 浸透深さ	(mm)	9.8	7.4	8.7	7.8	5.4
		塩化物イオン 浸透深さ比	(%)	100.0	75.5	88.8	79.6	55.1
	性能順位				2	4	3	1

塩化物イオン浸透深さ比 = (表面含浸材を塗布した場合の塩化物イオン浸透深さ / 無処理の塩化物イオン浸透深さ) × 100

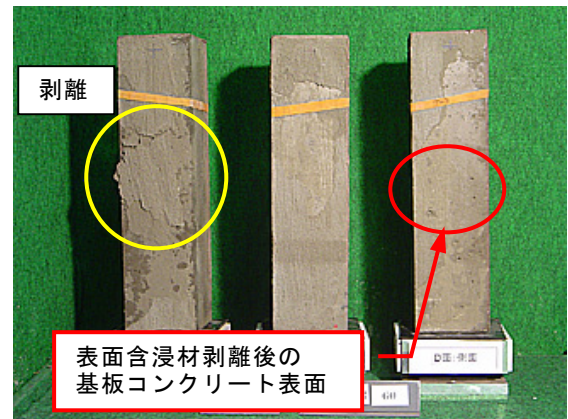
3.4 凍結融解試験結果

写真－１～５に凍結融解 300 サイクル完了時点での供試体の外観写真（表面含浸材 C は、後に示すように大部分の含浸材が剥離し、正確な試験の継続が困難となった 60 サイクル完了時点を掲載する）を示す。表面劣化の程度をみると、けい酸塩系である表面含浸材 A の凍結融解に対する抵抗性が最も良く、これに表面含浸材 B が

次ぐという結果であった。ペースト塗布型の表面含浸材 C では 30 サイクル経過時点から徐々に含浸材の片状の剥離が見られ、写真－４のように 60 サイクル経過時点で大半が剥離した。なお、この時点で基板コンクリート表面のモルタル分の脱落・粗骨材の露出などの表面劣化（スクーリング）は確認されなかった。また、シラン系の表面含浸材 D では、初期のサイクル経過時点か



写真－１ 無処理 (300 サイクル終了時) 状況



写真－４ 含浸材 C (60 サイクル終了時) 状況



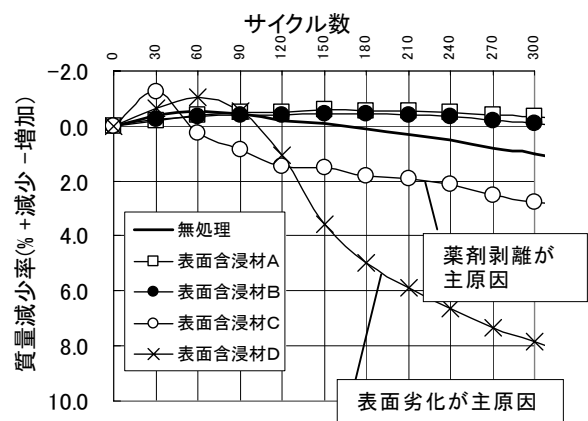
写真－２ 含浸材 A (300 サイクル終了時) 状況



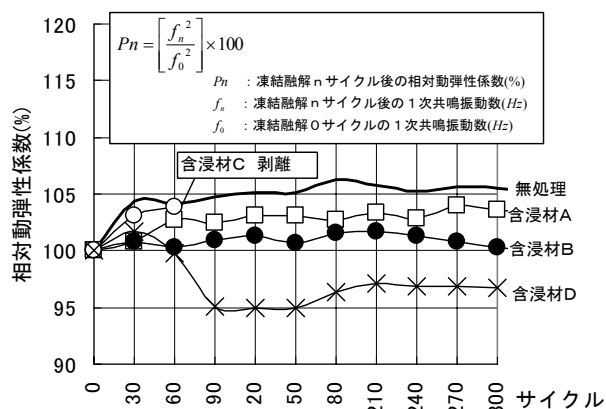
写真－５ 含浸材 D (300 サイクル終了時) 状況



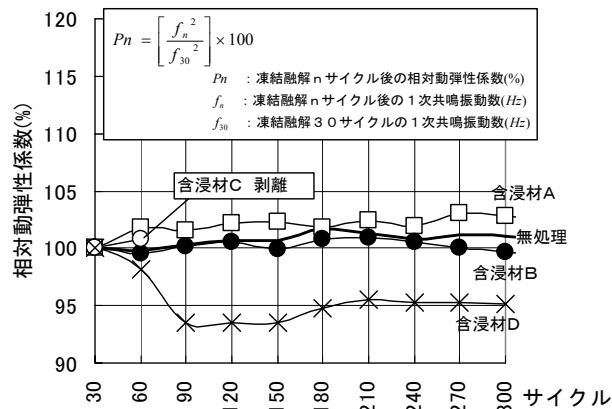
写真－３ 含浸材 B (300 サイクル終了時) 状況



図－４ 質量変化図



図－5 相対動弾性係数変化図



図－6 修正した相対動弾性係数変化図

らスケーリングが開始しはじめて 300 サイクル時点では写真－5に示すように写真－1に示す無処理よりも表面劣化が進行した。これは筆者らの試験条件とは異なる条件下で実施された既往の研究³⁾にも示される現象と同様である。図－4には質量変化図を示す。初期のサイクルにおいては、すべての供試体で吸水が原因と思われる質量増加（増加程度の違いは試験前の養生方法の違いや表面含浸材の防水性能によると思われる）が見られるが、最終的な質量減少量の程度は外観観察から判断可能な表面劣化の程度と呼応しており、客観的に凍結融解に対する抵抗性を測る指標としては有用であると思われる。図－5には相対動弾性係数の変化図を示す。これを見ると、質量減少率が「無処理」よりも小さな表面含浸材AとBの値が「無処理」よりも小さくなっており、外観観察及び質量減少率より判断される表面劣化の程度と一致しない。図－5を見ると凍結融解0～30サイクルにおいて、「無処理」の相対動弾性係数は他に比較して大きく上昇を見せている（原因は吸水の大きさとそれに伴う強度増進などと考えられる）ため、便宜的に相対動弾性係数の計算時の初期サイクルを30サイクルとして計算したものを図－6に示す。本図の傾向は質量減少率及び外観観察から得られる表面劣化の程度と概ね一致する。このように相対動弾性係数を凍結融解に対する抵抗性の指標とする場合には、吸水の程度等を勘案して適宜補正する必要があるものと思われる。

4. まとめ

けい酸塩系3種、シラン系1種の表面含浸材に対し、特定の条件下で吸水率、中性化に対する抵抗性、塩化物イオンの浸透に対する抵抗性および凍結融解試験を実施して以下の結果を得た。

- (1) けい酸塩系表面含浸材はすべての耐久性項目に対して一定の向上効果があることが確認された。ただし、主成分が同一であっても、表面含浸材間に性能差があることが確認された。
- (2) シラン系表面含浸材は、特に防水性や塩化物イオンの浸透に対する抵抗性において良好な効果を持つが、凍結融解試験においては、無処理よりも表面劣化が進行するという現象がみられた。

今回の研究では、表面含浸材のごく一部の事象を把握したに過ぎない。性能差の要因の追求などのために更なる研究を継続したいと考えている。

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），丸善，2004.4
- 2) 例えば、志賀正和、金久保雅之、黒井登起雄、松村仁夫：硬化コンクリートの表面改質効果に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.26, No.1, pp.741-746, 2004.6
- 3) 遠藤祐丈、田口史雄、林大介、坂田昇：浸透性吸水防止材を塗布したコンクリートのスケーリング特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.26, No.1, pp.987-992, 2004.6