

論文

劣化した構造物への表面含浸材の適用に関する一検討

原沢 蓉子^{*1}, 伊代田 岳史^{*2}

A Study on Application of Surface Penetrant Materials for the Deteriorated Structure

Yoko HARASAWA^{*1} and Takeshi IYODA^{*2}

要旨: コンクリート構造物の耐久性を向上させる手法の一つとして、表面含浸工法がある。含浸材の研究は新設構造物での検討が多く、既設構造物への適用に関する研究は十分に行われていない。本研究では、含浸材を養生直後に塗布した場合に加え、試験体を劣化環境に一定期間静置した後に含浸材を塗布した場合の、その後の劣化挙動について研究した。その結果、表面含浸材は新設に対しては、塩害・中性化ともに効果は得られたが、既設では塩害に対する効果は得られなかった。含浸材の種類では、シラン系、リチウム系は新設において大きな抑制効果を発揮し、ナトリウム系では新設および既設に対し効果を示した。
キーワード: 表面含浸材、塩害、中性化、劣化

1. はじめに

土木構造物ではコンクリートの打ち放しが多いため、コンクリート内部への塩化物イオンや二酸化炭素等の劣化因子の侵入による鋼材腐食が問題視されている。また、今後、土木構造物の老朽化に伴う、維持補修費の急増が予想されているが、社会基盤整備への投資額は減少傾向にあり、公共整備における最適な維持管理の重要性が高まりつつある。以上より、構造物の耐久性を向上させて長寿命化を可能とし、ライフサイクルコストの縮減につながるような適切な維持管理を行う必要がある。現在、構造物の耐久性を向上させる手法の一つとして、表面含浸工法が提案されている。これはコンクリート表面に含浸材を塗布することにより、コンクリート表層部を改質・保護し、比較的容易かつ経済的に劣化因子の侵入を抑制する手法である。しかし、表面含浸材を使用した研究では、劣化す

る前のコンクリートの試験体を対象とする場合が多く、既設構造物のような劣化後のコンクリートを対象とした研究は、十分には行われていない。

そこで本研究では、劣化していない構造物および劣化している構造物への含浸材の塗布が、塗布後の劣化の抑制に及ぼす影響を把握することを目的とした。新設構造物を模擬し、養生終了直後に、含浸材を塗布して、その後劣化環境に静置したコンクリート試験体、ならびに、既設構造物を模擬して、養生終了後、試験体を劣化環境下において一定期間劣化させ、その後含浸材を塗布し、再び劣化環境下に静置した試験体の、2種類を用いて試験を行った。それぞれ、含浸材塗布後の劣化進行挙動に着目し、含浸材を塗布しない試験体に対する劣化抑制率を把握し、比較および検討を行った。これにより、劣化した実構造物への適用の検討をした。

*1 芝浦工業大学大学院理工学研究科建設工学専攻 修士課程

*2 芝浦工業大学工学部土木工学科 准教授

表-1 使用含浸材・被覆材

含浸材・被覆材	主成分
シラン系含浸材	アルキルアルコキシシラン
けい酸リチウム系	けい酸リチウム
けい酸ナトリウム系	けい酸ナトリウム, けい酸カリウム
セメントペースト	W/C=40% 普通ポルトランドセメント

表-2 配合表

水セメント比 W/C(%)	細骨材率 s/a(%)	空気量 Air(%)	単位量(kg/m ³)			
			W	C	S	G
60	47	4.5	172	287	833	998

2. 実験概要

2.1 供試体諸元

本研究で使用した含浸材ならびに被覆材を表-1に示す。コンクリート表層に撥水層を形成し、水や塩化物イオンの浸透を抑制するシラン系、ならびに脆弱部を固化し、コンクリートの性能を回復するけい酸リチウム系、そして表層を緻密化し、防水性を高めるけい酸ナトリウム系の3種類の含浸材を用いて実験を行った。なお、これらの含浸材と効果を比較するために、無機系被覆工法としてセメントペースト(W/C=40%)も使用した。

試験体の作製に際して、試験体配合は表-2に示す。セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。水セメント比は60%とし、10×10×10cmの角柱型枠に打込み、翌日に脱型した。劣化を促進させるために、6日間実験室にて暴露し、気中養生とした。養生終了後、供試体の打込み面と底面、両端面にエポキシ樹脂を塗布し、側面2面を開放した。開放した2面のうち1面にメーカー基準量の含浸材を塗布し、もう片面には塗布をせず、それぞれの劣化深さを測定し、比較した。

エポキシ樹脂塗布後の工程を、①事前劣化、②含浸材塗布、③事後劣化の3段階にわけ、①および③の工程において中性化促進試験ならび

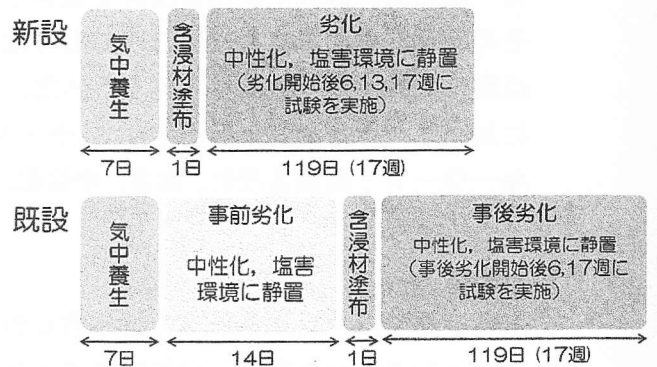


図-1 試験の流れ

に塩水浸せき試験を行い、そして図-1に示すように、新設構造物を模擬した供試体と、既設構造物を模擬した供試体を各試験用に1体ずつ作製試験を行った。なお、試験体は各試験および含浸材・被覆材ごとに1体ずつ用意した。

2.2 中性化促進試験

中性化促進試験は、JIS A 1153を参考に、温度20℃、湿度60%、二酸化炭素濃度5%の環境下で行った。中性化深さの測定は、JIS A 1152に準拠して、フェノールフタレイン溶液を噴霧し変色域を15mm間隔で6点計測し、平均劣化深さを求めた。

2.3 塩水浸せき試験

塩水浸せき試験は、塩分濃度3%、温度20℃の塩水に供試体を浸せきさせて行った。材齢経過後に供試体を取り出して、割裂し、割裂面に硝酸銀水溶液を噴霧した。白色に呈色した部分

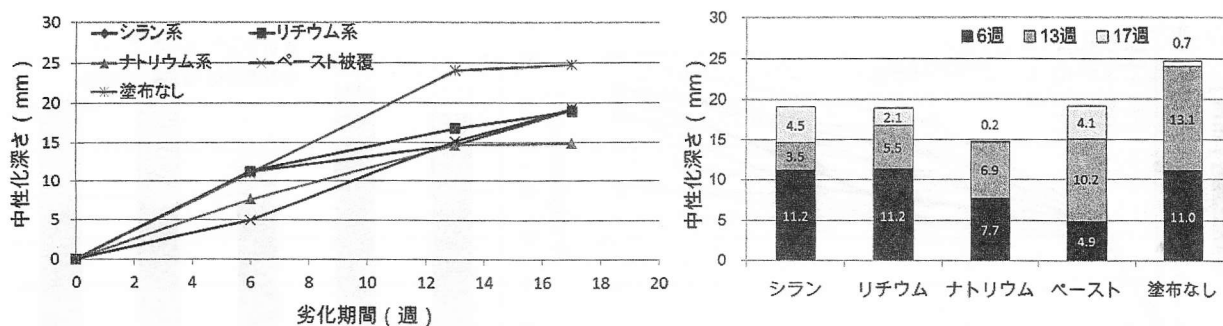


図-2 中性化深さ (新設)

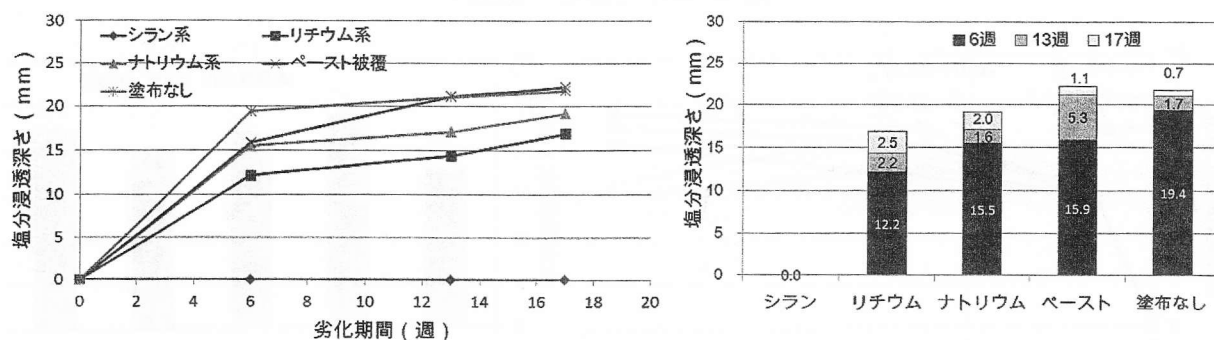


図-3 塩分浸透深さ (新設)

を塩分浸透深さとして測定した。塩分浸透深さの測定は、2.2 の中性化深さの測定と同様に行った。なお、中性化深さならび塩分浸透深さの測定は、中性化、塩害ともに新設は劣化後 6 週、13 週、17 週、既設は劣化後 8 週と 19 週の時点で行った。

3. 実験結果

3.1 新設への表面含浸材の適用効果

新設構造物を模擬して、養生終了後すぐに含浸材・被覆材を塗布し、劣化環境下に置いた供試体の試験結果を図-2 (中性化) と図-3 (塩害) に示す。それぞれ、劣化ごとに、材齢の経過に伴う中性化と塩化物イオンの浸透深さの関係および、含浸材・被覆材ごとの浸透深さの関係を示した。

中性化については、劣化 6 週では、大きな違いは見られないが、劣化 13 週以降では、すべての含浸材が塗布なしに比べて中性化の抑制効果を示した。いずれの含浸材も、6 週以降は、中性化しにくくなり、材齢の経過に伴い、横ば

いとなる傾向を示した。一方で、セメントペーストを被覆した場合では、材齢 6 週の時点においては、中性化深さが最も小さいものの、その後も中性化深さは増加する傾向を示した。このことより、セメントペーストの被覆では、長期的に中性化を抑制する効果は見られないことがわかった。また、本研究で使用した含浸材ならびに被覆材において、ナトリウム系が最も中性化抑制効果を示す結果となった。

塩害については、図-3 に示す通り、ペースト被覆を除く他の工法において、無塗布と比べて、材齢の経過に伴い、塩化物イオンの浸透深さが小さくなっていることがわかる。特に、シリラン系が最も高い抑制効果を示した。これは、シリラン系の含浸材による供試体表面における撥水層形成の影響を受けて、供試体内部に塩水が浸透しなかったためと考えられる。また、セメントペーストを被覆した場合では、中性化とは異なり、他の含浸材と同様に、材齢の経過に伴い塩化物イオンの浸透を抑制する傾向を示した。これは、本研究では、気中養生を 6 日間行った後

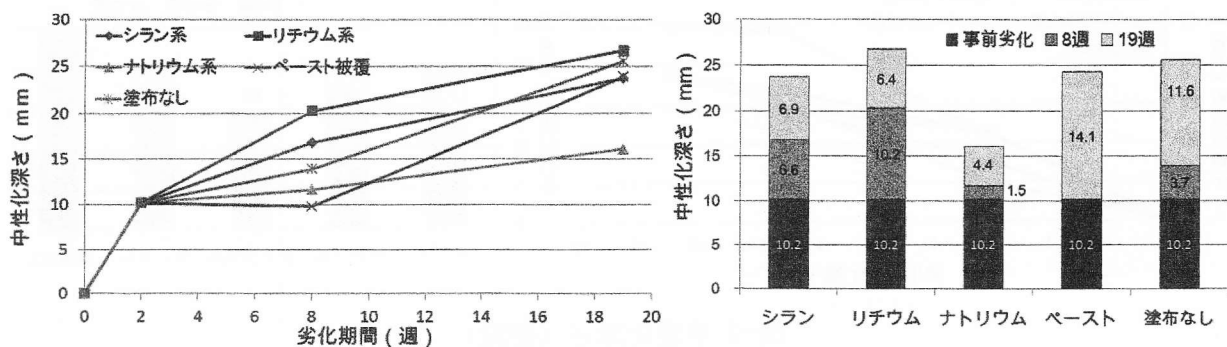


図-4 中性化深さ (既設)

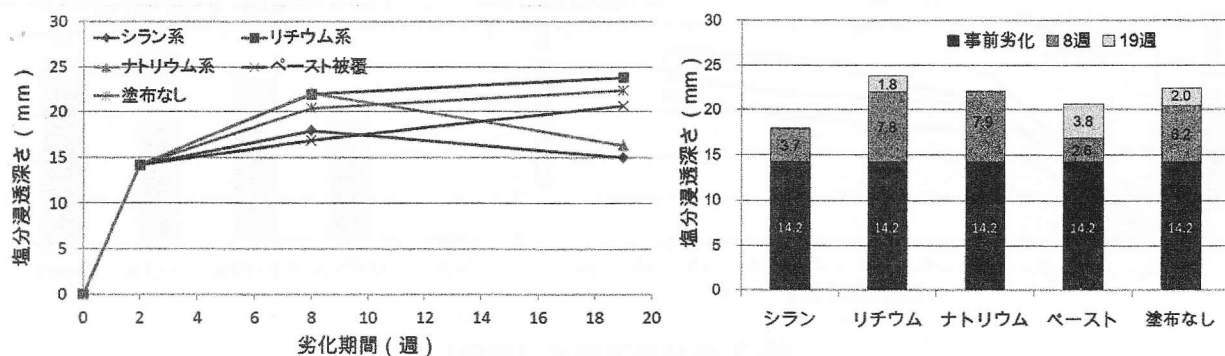


図-5 塩分浸透深さ (既設)

に、含浸材を塗布し、塩水浸せき試験を行ったために、養生期間中に水和反応が十分に進行しなかったと考えられる。そのため、塩水浸せき中に、水和反応が進むことで、空隙構造が緻密になり、塩化物イオンの浸透を抑制したと考えられる。17週においては、塗布なしと同程度の浸透深さとなった。また、リチウム系とナトリウム系では、塗布なしと比べて抑制効果を示した。

3.2 既設への表面含浸材の適用効果

図-4に既設構造物を模擬して、事前劣化させた供試体の、中性化深さの結果を示す。中性化環境下にて、2週間事前劣化(10.17mm)させた供試体に、表面含浸材を塗布し、その後再び劣化環境に静置して、中性化後のコンクリートに対する、表面保護工法の劣化抑制効果の把握および検討を行った。中でも、最も中性化抑制効果を示したものは、ナトリウム系であった。これは、ナトリウム系が未中性化域まで含浸し、改質したためと考えられる。シラン系およびリチウム系は、塗布後も中性化深さは大きくなる

傾向を示した。ペースト被覆では、事前劣化終了時から8週の時点まで劣化の進行は確認できなかった。しかし、8週目以降は、材齢の経過に伴い、中性化深さは大きくなった。8週から19週の劣化速度に着目すると、ペースト被覆と塗布なしでは同程度となり、ペースト被覆による中性化の抑制効果は確認できなかった。

図-5に塩水中で2週間事前劣化(14.17mm)させた塩分浸透深さの結果を示す。事前劣化後に含浸材・被覆材を塗布した場合、リチウム系、ペースト被覆では、塗布なしと同様に、劣化期間が長くなるほど、塩分浸透深さは増加する傾向を示した。なお、シラン系とナトリウム系では、8週までは塩分浸透深さは増加し、その後は減少する結果を示した。これらの、塗布後から19週までの塩分浸透深さの変化は、5mm程度であった。したがって、シラン系およびナトリウム系の含浸材による、塩分浸透深さの減少は、各供試体における骨材の有無等の影響を受けた結果であると考えられる。なお、この影響を考慮すると、塩分浸透に対する抵抗性は、撥

水層形成するシラン系が最も効果を示した。また、リチウム系は、塗布なしと同程度の値を示し、本研究で使用した含浸材ならびに被覆材において、塩分浸透に対する抵抗性は最も低い結果となった。

3.3 表面含浸材が塩分濃縮に与える影響

表面含浸材はコンクリート表面に含浸材を浸透させることによって構造物の耐久性を向上させる。しかし、すでにコンクリート中に塩化物イオンが存在していた場合、含浸材の浸透によって表層の塩化物イオンがコンクリート内部に押し込まれ、塩分濃縮現象と同じ現象が引き起こされる可能性が考えられる。そこで、含浸材の塗布が塩分濃縮現象の発生に与える影響について、実験的に検討を行った。図-6に電位差滴定試験の結果を示す。塩水に2週間浸漬させ、深さ10.20mmまで塩化物イオンを浸透させた。その後、含浸材・被覆材を塗布し、20℃ RH60%の環境に6週間静置した。そして、供試体を深さ方向に5mm間隔でカットし、極力骨材を除いて、粉砕した後、深さごとの全塩分量を測定した。無塗布の供試体は、塩水に浸漬後、表面保護工を施さずに中性化促進装置に6週間静置した。無塗布の場合、深さ0.75cmから1.25cmにかけて塩分量が増加し、塩分濃縮の発生が確認できる。この塗布なしの供試体の結果と比較して、その他の全ての含浸材において、含浸材塗布による塩分濃縮現象は見られなかった。

3.4 含浸材の性能評価に関する検討

表-3（中性化）、表-4（塩害）に、材齢17週における含浸材・被覆材塗布による劣化の抑制率を示す。なお、新設は塗布なしの劣化深さ、既設は事後劣化で進行した劣化深さに対する抑制率である。シラン系は、塩害に対する抑制率が最も高く、中性化に対しては低い傾向を示した。塩害および中性化において、新設は、既設と比べて高い抑制率となった。これは、コンクリートの内部状態が撥水層の形成に影響を及ぼしたためであると考えられる。通常、シラン系含浸材を塗布し、割裂面を水に浸すことにより、

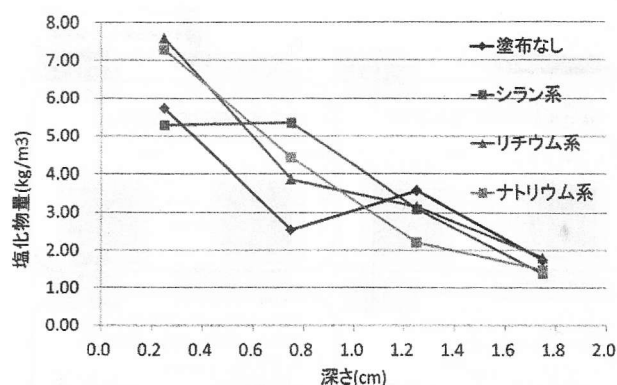


図-6 表面含浸材と複合劣化の関係

表-3 中性化における含浸材性能評価

(mm)	シラン系	リチウム系	ナトリウム系	ペースト被覆	塗布なし
新設	19.1	18.9	14.8	19.2	23.6
抑制率	19%	20%	37%	19%	
既設	21.9	25.0	14.9	20.1	
抑制率	7%	-6%	37%	15%	

表-4 塩害における含浸材性能評価

(mm)	シラン系	リチウム系	ナトリウム系	ペースト被覆	塗布なし
新設	0.0	16.9	19.1	22.2	23.0
抑制率	100%	27%	17%	3%	
既設	15.8	23.3	17.9	19.6	
抑制率	31%	-1%	22%	15%	

形成された撥水層を目視で確認することができる。しかしながら、事前に劣化させて既設を模擬した供試体では、撥水層を確認できなかった。供試体を塩水から取り出した後、20℃ RH60%の環境下にて1日乾燥させたが、表層の乾燥状態に比べて、内部では水が残存していたためだと考えられる。リチウム系では、他の含浸材に比べ劣化抑制率は低い結果を示した。リチウム系は、乾燥により固化し、改質効果を発現させるには、コンクリートを乾燥状態に保つ必要がある²⁾。したがって、本研究において、塩害に対する性能評価を算出したが、適用外である。さらに、アルカリ骨材反応抑制や美観・景観に

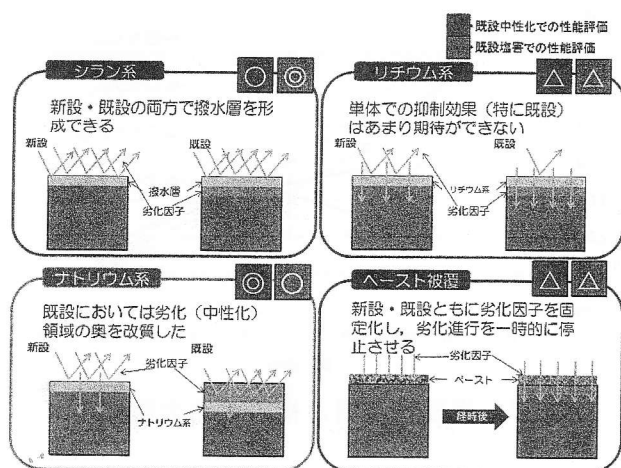


図-7 各含浸材・被覆材の性能評価

関する性能に対しては適用対象ではあるが、中性化抑制や剥落抵抗性には他の工法と併用するなどの検討が必要と定められており¹⁾、本研究においても中性化に対して低い結果となった。ナトリウム系含浸材は、中性化に対して、新設・既設の両方で大きな効果を示した。ナトリウム系含浸材はコンクリート中の水酸化カルシウムと反応して C-S-H ゲルを生成し、空隙を緻密化する作用がある²⁾。本来コンクリートは多量の水酸化カルシウムを有しているが、中性化が起ると水酸化カルシウムは消失してしまう。そのため中性化の既設供試体において、ナトリウム系による抑制が困難と考えられるが、結果として高い抑制率を示した。これは、ナトリウム系含浸材が水酸化カルシウムの不足する中性化域の、さらに奥の未中性化域まで浸透し、その未中性化域を改質したことで大きな抑制効果を発揮したと考えられる。また、ナトリウム系は水を媒体として内部に浸透するため、塗布直後は湿潤状態に保つ必要がある²⁾。そのため内部に水分が存在する塩害の既設供試体については、その水分を媒体としたために、より奥まで含浸

し、深部まで改質したと考えられる。

また、図-7 に各含浸材・被覆材の、既設の中性化および塩害に対する性能評価および、本研究により得られた実験結果の傾向をまとめた。既設塩害に対しては、シラン系が最も高い抑制効果を示した。なお、新設においても同様の結果であった。既設の中性化に効果を示したのは、ナトリウム系であった。新設、既設、および劣化因子により、それぞれ適する含浸材が異なることを確認した。

4. まとめ

本研究の範囲内で得られた結論を以下に記す。なお、今後は実環境下においても検討する必要がある。

- (1) 表面含浸材は、新設に対しては塩害・中性化ともに抑制効果を示した。既設で塩害に対する抑制効果を示したのは、シラン系のみであった。
- (2) シラン系およびリチウム系は新設に対して抑制効果を発揮し、ナトリウム系ならびにペースト被覆では新設と既設で同程度の抑制率を示した。
- (3) 既設構造物への適用に際し、劣化の種類や期間に応じて適した表面含浸材があることを確認した。特に、中性化にはナトリウム系、塩害にはシラン系の効果が顕著であった。

参考文献

- 1) 土木学会，コンクリートライブラリー119 表面保護工法設計指針（案）
- 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）