

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 19 日現在

機関番号：17701

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23246081

研究課題名(和文) コンクリート構造物の長寿命化におけるけい酸塩系表面含浸材の役割とその評価方法

研究課題名(英文) A role and evaluation methods of Silicate-based Surface Penetrant to prolong the service life of concrete structure

研究代表者

武若 耕司 (TAKEWAKA, KOJI)

鹿児島大学・理工学研究科・教授

研究者番号：10155054

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 37,700,000円、(間接経費) 11,310,000円

研究成果の概要(和文)：けい酸塩系表面含浸材の特徴は、コンクリート表層部を改質することで劣化因子の侵入を抑制させるもので、施工の容易さと経済性から利用が急増している。しかし、この材料の効果に関する研究は少なく、コンクリート表層部の改質範囲や性能改善の定量評価は未だ不十分である。本研究では、けい酸塩系表面含浸材の効果を定量的に評価し、既存構造物の長寿命化対策として有効に活用するための補修設計方法および施工管理方法に対する提言を行った。

なお、本研究による主な成果は、土木学会から発刊された「けい酸塩系表面含浸工法の設計施工指針(案)」に盛り込まれている。

研究成果の概要(英文)：Silicate-based Surface Penetrant, which improves mechanical properties of surface concrete and provides resistivity against ingress of harmful substances, is increasingly being applied to concrete structures. However, its penetration property and improved condition of the penetrated portion, which must be important factors to estimate the long-time performance of applied concrete structure, has not been clear quantitatively yet. In this study, by evaluating its effectiveness on concrete surface quantitatively, new guideline for design and construction methods to use Silicate-based Surface Penetrant has been proposed.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・土木材料・施工・マネジメント

キーワード：けい酸塩系表面含浸材 反応型 固化型 浸透深さ 改質深さ 品質検査 コンクリート表層部 劣化抑制

1. 研究開始当初の背景

けい酸塩系表面含浸材(以下、「含浸材」と称す場合もある)は、元々は、北欧、北米、オーストラリア等の国々で、土木・建築コンクリート構造物の防水対策として同次多発的に開発されたものである。我が国では1970年代から利用され始めたが、その後、独自の進化を遂げ、2000年代に入ってからコンクリートの耐久性を向上させる手法の一つとして、利用が検討されるようになってきた。最近でも、他の材料・工法に比べて比較的手軽に施工でき、コストパフォーマンスもよいことから、予防保全的に構造物を維持するための補修工法として注目されている。また、研究開始当時、この含浸材を取り扱っている我が国のメーカーおよび輸入販売元は40社近くにも上り、その市場規模も100億円近くに達しており、その後もさらに拡大する傾向にあるとみられていた。

その一方で、含浸材自身およびこれを使用した補修工法の性能については、未だ不明な点も多かった。2005年4月に土木学会で「表面保護工法設計施工指針(案)」が制定され、その中で表面含浸工マニュアルが策定された。しかし、その記載の多くは、シラン系(撥水系)含浸材についてのものであり、けい酸塩系表面含浸材の性能の特徴や適用範囲等に関する具体的な記述はなかった。また同時に規定された含浸材の性能確認試験方法についてみても、例えば、含浸材の性能評価の重要な指標の一つである含浸深さの測定方法にけい酸塩系のための規定がない等、けい酸塩系表面含浸材の性能を適切に評価するには不十分であった。なお、2006年4月に土木学会「コンクリートの表面被覆および表面改質技術研究小委員会」の報告書がコンクリート技術シリーズ68号として出版され、けい酸塩系表面含浸材の技術の現状についても取りまとめられたが、その中でも、「けい酸塩系表面含浸材を補修材料として有効に活用するためには、含浸材の補修メカニズムを踏まえた適切な試験方法を劣化機構ごとに規定して、この材料の適用範囲を明確にすることが未だ課題として残される」と示されている状態であった。

2. 研究の目的

けい酸塩系表面含浸材の特徴は、コンクリート表層部を改質することで劣化因子の侵入を抑制させるもので、施工の容易さと経済性から、特に、既存構造物の長寿命化の観点からの予防保全対策として利用が急増している。しかし、この材料によるコンクリートの耐久性向上効果に関する研究は少なく、コンクリート表層部の改質範囲や性能改善の定量評価は未だ不十分である。従って、適用範囲や効果持続性の明確化等の補修設計に必要な情報の収集、施工方法と性能との関連性等といった品質確保のための施工管理方法の確立等は急務である。本研究は、上記し

た点を実験的に明確し、含浸材を既存構造物の長寿命化対策として有効に活用するための新たな材料開発も行いながら、これを用いた補修設計方法および施工管理方法に対する提言を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

(1) コンクリート中への含浸材の浸透過程と反応メカニズムに関する検討

含浸材のコンクリート中への浸透過程ならびに反応メカニズムを明確にし、これらに及ぼす各種要因の影響を定量化させる。また、浸透深さあるいは改質深さの測定方法を提案する。含浸材はコンクリート中の Ca^{2+} イオンと反応するが、その反応は水分の存在状況にも依存する。また、中性化が生じている場合や高炉スラグ等の混和材を使用した場合のように、コンクリート中の Ca^{2+} イオンが相対的に少なくなると、含浸材がその効果を十分に発揮しない可能性もある。そこで、含浸材塗布時の水分供給量、コンクリートの含水率、あるいは混和材の使用や中性化が含浸材の反応性に及ぼす影響を反応化学の観点から検討し、定量評価を試みる。また、研究代表者らのこれまでの検討で、浸透深さについては、含浸材の主成分である Na^+ イオンに着目し、塗布後のコンクリートでその濃度分布を測定することで、含浸材が浸透した深さを把握できるとしている。また、含浸材による改質深さは、含浸材と反応するコンクリート中の Ca^{2+} イオン量の分布から把握できるとしている。そこで、コンクリート中の Na^+ イオンや Ca^{2+} イオン量の分布を、コンクリート中の細孔分布の変化あるいは微小硬度計によるコンクリート中の硬度分布の測定結果との比較することで、これらの指標の妥当性を確認する。(宮里, 五十嵐, 櫛原)

(2) 各種劣化現象に対する含浸材の抑制効果の定量評価に関する検討

コンクリート構造物の各種劣化現象に対する含浸材の抑制効果について検討を行うとともに、これらの性能を評価するための試験方法を提案する。補修工法として含浸材に期待される性能は、劣化因子のコンクリート中への侵入を抑制し、劣化進行を遅らせることである。ここでは、新設構造物の予防保全と既設構造物の事後保全を対象として、含浸材の有効性を実験的のみではなく、反応化学の観点から理論的にも考察する。なお検討対象とする劣化現象としては、塩害、中性化、凍害、酸性劣化、アルカリ骨材反応、乾燥収縮、ひび割れ、等である。(武若, 山口, 宮里, 濱田, 綾野, 五十嵐, 櫛原)

(3) 構造物への効果的な含浸材の施工方法の確立に関する検討

含浸材を最も効果的にコンクリート表面に施工する方法について検討を行うとともに、他工法との複合的な利用の有効性ならびに適用範囲について明確にさせる。

具体的には、(1)で明確になった含浸材の浸

透過程や反応メカニズムを考慮し、その性能を最も有効に発揮させるための施工方法、施工時期等を実験的に検討する。また、得られた結果を基に、数種類の実構造物を対象として施工実験を実施し、問題点を把握する。さらに、含浸材が無色透明であることから、施工管理が難しいことに鑑み、施工範囲や施工量を適切に把握できる施工検査手法についても検討する。(武若, 濱田, 綾野, 山口)

(4) 含浸材施工後の品質検査の方法の確立

含浸材を施工した後の品質検査の方法について検討を行う。また、既に施工されている構造物において含浸材の有効性を確認し、取りまとめる。具体的には、含浸材施工後のコンクリートにおいて、品質改善が適切になされていることを把握することは重要である。ここでは、「テストハンマー」、「透気性試験」、「電気抵抗試験」、「超音波法」等による試験が、品質改善を定量的に把握できる検査試験方法として利用可能であるかを検討する。(綾野, 濱田, 山口, 櫛原)

(5) 含浸材データベースの構築

上記4つの項目の研究結果を基に、含浸材をコンクリート構造物の補修工法に有効に活用するための方策を提案ならびに将来の性能評価に役立つデータベースを構築する。(綾野, 櫛原, 山口)

4. 研究成果

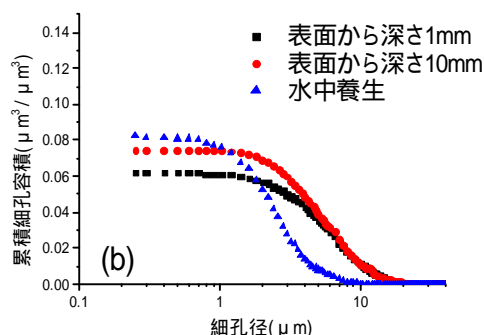
本研究は前章で述べたように大きく5項目に大別されるが、主な成果は土木学会から発行された「けい酸塩系表面含浸工法の設計施工指針(案)」(以下、「指針(案)」)に盛り込まれている。以下に各項目の成果の概要を示す。

(1) コンクリート中への含浸材の浸透過程と反応メカニズムに関する検討

含浸材の種類によって、影響要因とその影響度が異なることを明らかにし、その反応メカニズムに基づき水酸化カルシウムと反応して新たなC-S-Hを生成する「反応型」とそれ自身が乾燥固化して空隙を充填する「固化型」に区別した。また、そのための判定方法とそれぞれ施工条件を明確にした。例えば、反応型にはCaイオンと水分の供給が不可欠となるが、固化型の場合は過剰な水分供給は逆に固化反応を阻害するなど、種類に応じた取り扱いが必要となる。この考え方は指針(案)にも反映されている。

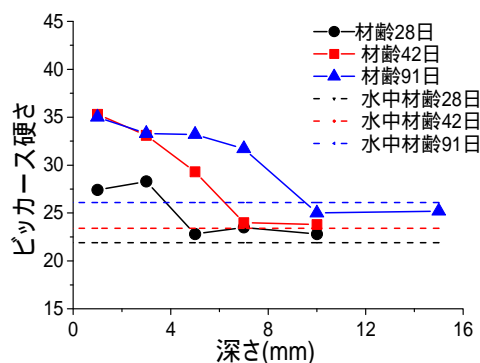
また、特に反応型含浸材は、粗大毛細管空隙の中でも比較的小さな径以下の毛細管空隙内部に不連続な空隙径分布を形成し、それによって物質透過性を低下させることが分かった(図-1)。さらに、組織の緻密化にともなう微小硬度の増加が確認されたことから、微小硬度の変化からゲル空隙比の変化を計算し、けい酸塩系表面含浸材の反応によるC-S-H生成量の推定方法を示した(図-2, 図-3)。

なお、高炉スラグセメントやフライアッシュ



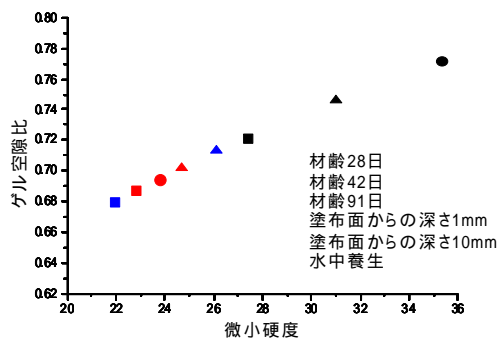
注) 図中の「表面から深さ1mmおよび10mm」は、材齢14日に含浸材を塗布し、その後、湿空養生77日経過後(材齢91日)であり、「水中養生」とは脱型直後から水中養生した材齢91日である。

図-1 セメントペーストの空隙径分布比較



注) 図中の「材齢28日、42日、91日」は、材齢14日に含浸材を塗布し、その後湿空養生を実施したものであり、「水中養生」とは脱型後に水中養生したものである。

図-2 微小硬度試験結果



注) 図中記号の形状は「材齢」を示し、色は「含浸材塗布の有無と測定位置」を示している。「表面から深さ1mmおよび10mm」は、材齢14日に含浸材を塗布し、その後、湿空養生したものであり、「水中養生」とは脱型直後から水中養生したものである。

図-3 微小硬度から算出したゲル空隙比

セメントなどのようにセメント量が少なく含浸材が反応するための水酸化カルシウムが不足する場合、塗布直前に飽和水酸化カルシウム水溶液を追加する処理を行うことによって改質効果を向上させることが示された。

一方、浸透深さに関しては、けい酸塩系表面含浸材の主成分であるNa, Li, Kイオンの

細孔溶液中の増加量に着目した浸透深さが、微小硬度による改質深さ、ならびに電気伝導率と良好な相関関係を示すことから、イオン分布による浸透深さの評価結果の妥当性を示したと同時に、電気伝導率による改質深さの推定が可能であることを示した。

(2)各種劣化現象に対する含浸材の抑制効果の定量評価に関する検討

各種劣化現象に対する含浸材の抑制効果を暴露試験および促進試験により評価した。その結果、適切な設計、施工がなされた場合には、塩分浸透、中性化、凍害、化学的浸食、ひび割れ、透水・吸水・漏水、すり減り、に対する劣化進行抑制効果あるいは補修効果があることを確認した。ただし、期待する効果を得るためには、使用目的および対象とするコンクリートの特性に応じた材料を選定し、その材料に応じた施工を適切に実施することが不可欠である。この考え方も指針（案）に反映されている。

以下に、指針（案）発刊後、モルタル吹付け工に対して実施した劣化抑制効果の検証例を示す（表-1、図-4～6）。新設構造物を想定した供試体（New）および施工後約30年経過した法面からのコア供試体（Old）を用いて、それぞれ含浸材塗布（A）と無塗布（B）の劣化抑制効果（透水量、塩化物イオン浸透量、中性化）を比較したものである。

表-1 実験条件の組み合わせ

Case	Structure	Surface penetrant
A	New	×
B		
A'	Old	×
B'		

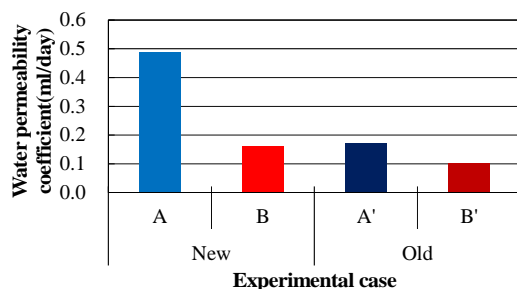


図-4 透水量試験

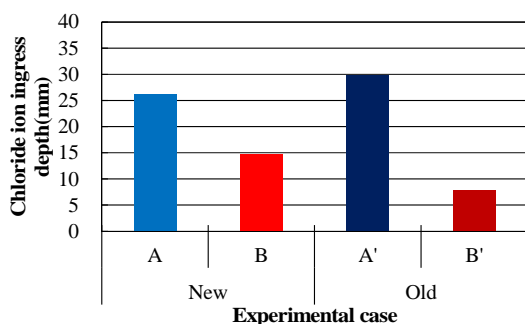


図-5 塩化物イオン浸透試験

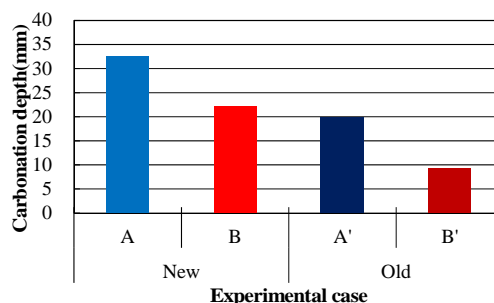


図-6 中性化試験

新設、既設に拘わらず、いずれの場合も含浸材の効果がある程度認められ、吹付けモルタルに対しても十分に適用可能であることが示された。

(3)構造物への効果的な含浸材の施工方法の確立に関する検討

記(1)の検討により、含浸材はその主成分に応じて反応型と固化型に分類されることが明確となり、指針（案）には反応型か固化型をになった。さらに、反応型の養生には十分な水分が不可欠である反面固化型の養生には過剰な水分供給は控えるべきである等、含浸材の効果を発揮するためには、その特性に応じた施工方法を選定すべきであることを実験的に確認した。これらの成果を取りまとめ、含浸材種類の事前判定方法とそれに応じた設計施工を実施するための指針（案）を確立した。なお、その後の検討の結果、指針（案）に示されている事前判定方法は、一部の反応型を誤って固化型に判定する可能性があることが明らかとなった。そこで、判定手順を一部改良し種類判定の精度を向上させた。

(4)含浸材施工後の品質検査の方法の確立

実構造物ならびにモデル試験体を用いた実験的検討により、含浸材施工後の品質検査手法について検討した。その結果に基づき、含浸材施工後のコンクリートへの浸透深さの確認方法、ならびに含浸材塗布後のコンクリートの改質効果を確認するための各種要求性能に応じた品質検査方法を新たに確立した。さらに、品質改善後のコンクリートに対する長期性能予測手法を構築した。これらの成果により、施工前の効果予測、施工後の品質検査、さらに性能の将来予測、といった設計施工維持管理システムを構築することができた。また、微細なひび割れが、透水性、中性化等に及ぼす影響とそれに対する改質効果を確認するための微細ひび割れ試験体の作製方法も新たに提案した。

(5)含浸材データベースの構築

目的とする改質効果、構造物の環境、塗布対象コンクリートの特性、等に応じた材料選定、施工方法、および評価手法を踏まえたマニュアルを取りまとめ、将来の設計施工の際に参考となるデータベースを構築した。また、成果報告会を開催し、これらの成果を広く公表した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計17件)

小出至也, 室谷卓実, 五十嵐心一, 電気泳動法によるけい酸塩系表面含浸材の改質部の物性と改質深さの推定, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol.36, No.1, 2014 (印刷中)

室谷卓実, 小出至也, 五十嵐心一, 異なるけい酸塩系表面含浸材の微細ひび割れに対する補修効果の比較, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol.36, No.1, 2014 (印刷中)

小出至也, 五十嵐心一, 渡辺晋吾, けい酸塩系表面含浸材によるフライアッシュ混入セメントペーストの組織変化, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol.35, No.1, 2013, pp.1621-1626

中村慎, 武若耕司, 山口明伸, 坂元貴之, 塗布後養生の違いが各種表面含浸材の効果に与える影響に関する研究, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol.34, No.1, 2012, pp.1630-1635

山本昌宏, 谷村成, 藤井隆史, 安藤尚, 綾野克紀, 微細なひび割れを持つコンクリート試験体の作製方法とそれを用いたひび割れ補修材の性能確認試験方法に関する研究, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 査読有, Vol.12, 2012, pp.467-472

坂元貴之, 武若耕司, 山口明伸, 櫛原弘貴, 各種表面含浸材の塩分浸透および中性化に対する抑制効果, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol.33, No.1, 2011, pp.1625-1630

櫛原弘貴, 武若耕司, 山口明伸, 添田政司, 濱田秀則: けい酸塩系表面含浸材の表層品質改善効果が透気係数に与える影響に関する研究, 日本材料学会, コンクリート構造物の補修・補強・アップグレード論文報告集, Vol.11, 2011, pp.329-336

林亮太, 櫛原弘貴, 武若耕司, 山口明伸, 濱田秀則: けい酸塩系表面含浸材の施工状態評価に用いる現場試験方法に関する研究, 日本材料学会, コンクリート構造物の補修・補強・アップグレード論文報告集, 査読有, Vol.11, 2011, pp.343-348

〔学会発表〕(計25件)

小出至也, 五十嵐心一, けい酸塩系表面含浸材改質層の電気伝導率の評価に基づく中性化進行パラメーターの推定, 第68回セメント技術大会, 2014.5.13, ホテルメトロポリタン(東京)

黒岩大地, 宮里心一, 西野英哉, 庭田和之, けい酸塩系表面含浸材の塗布がモルタル吹付工の耐久性に及ぼす影響, 日本学術会議材料工学連合講演会, 2013.11.25, 京都テルサ(京都)

小出至也, 五十嵐心一, けい酸塩系表面含浸材によるフライアッシュ混入セメントペーストの空間構造の変化, 土木学会第68回年次学術講演会, 2013.9.4, 日本大学(千葉)

中村慎, 武若耕司, 山口明伸, 西尾拓真, 伊藤貴峰, けい酸塩系表面含浸材の種類判定および各種劣化因子抑制効果に関する基礎的研究, 土木学会第68回年次学術講演会, 2013.9.4, 日本大学(千葉)

黒岩大地, 宮里心一, 高島達行, けい酸塩系表面含浸材による鉄筋コンクリートの腐食抑制効果の実験と試算, 第66回セメント技術大会, 2012.5.29, ホテルメトロポリタン(東京)

伊藤貴峰, 武若耕司, 山口明伸, 坂元貴之, 中村慎, 塗布後養生方法の違いが表面含浸材の中性化抑制性能に与える影響, 平成23年度土木学会西部支部研究発表会, 2012.3.3, 鹿児島大学(鹿児島)

宮里心一, けい酸塩系表面含浸材が鉄筋腐食速度に及ぼす影響, 日本材料学会第60期学術講演会, 2011.5.25, 大阪大学(大阪)

〔その他〕

ホームページ等

<http://oce.oce.kagoshima-u.ac.jp/~concrete>

6. 研究組織

(1)研究代表者

武若 耕司 (TAKEWAKA, Koji)
鹿児島大学・理工学研究科・教授
研究者番号: 10155054

(2)研究分担者

濱田 秀則 (HAMADA, Hidenori)
九州大学・工学(系)研究科・教授
研究者番号: 70344314

綾野 克紀 (AYANO, Toshiki)
岡山大学・環境生命科学研究科・教授
研究者番号: 10212581

五十嵐 心一 (IGARASHI, Shinichi)
金沢大学・環境デザイン学系・教授
研究者番号: 50168100

宮里 心一 (MIYAZATO, Shin-ichi)
金沢工業大学・環境建築学部・教授
研究者番号: 60302949

山口 明伸 (YAMAGUCHI, Toshinobu)
鹿児島大学・理工学研究科・教授
研究者番号: 50305158

櫛原 弘貴 (HAZEHARA, Hiroataka)
福岡大学・工学部・助教
研究者番号: 70580182