

報告 けい酸塩系表面含浸材の含浸深さへの雨掛かりの影響の検証および撥水材の添加による改良品の開発

大野 公輔*1・小林 孝一*2・馬居 武志*3・浅野 達夫*4

要旨：コンクリート構造物の維持管理の重要性が高まる中で、けい酸塩系表面含浸工法に注目が集まっている。本研究では、けい酸塩系表面含浸材を実構造物に塗布し、雨掛かりが含浸深さに与える影響を調査した。そのうえで、けい酸塩系表面含浸材に補助的に撥水材を混入することを提案し、透水量試験、中性化試験、塩化物イオン浸透試験を行い、そのコンクリートの耐久性向上を調査した。その結果、撥水材を混入することは水と塩化物の浸入に対する抵抗性を向上させ、けい酸塩系表面含浸材の効果を阻害することもないことが明らかとなった。

キーワード：けい酸塩系表面含浸材、撥水材、含浸深さ、中性化、塩化物イオン浸透、透水量

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の老朽化や劣化が問題となり、その適切な補修に関して注目が高まっているなかで、劣化が懸念される構造物の予防保全の手段としての、けい酸塩系表面含浸工法の適用事例が多くなってきている。けい酸塩系表面含浸材は有機系の補修材とは違い、少ない工程で施工ができ安価であることや、無色透明の液体であるため、コンクリート表面の外観を大きく変えず、施工後も目視による点検などの維持管理が容易である等の長所がある。

けい酸塩系表面含浸材は、その主成分がコンクリート中の水酸化カルシウムと反応して生じるセメント水和物に類似した生成物が、コンクリート中の微細空隙を充填することにより、コンクリートの表層部分を緻密化し、コンクリートの物質透過に対する抵抗性を向上させるものである。著者らはこれまでけい酸リチウム-けい酸ナトリウム-けい酸カリウム 3 種混合のけい酸塩系表面含浸材を対象として、その劣化抑制の評価やメカニズムの解明を行ってきた^{1), 2)}。これまでも表層が長年の風化に晒された既設コンクリートへの適用を念頭に、けい酸塩系表面含浸材に亜硝酸カルシウム水溶液を反応補助材として併用することを試みてきたが、今回、竣工から 50 年近くが経過した実構造物に対してこの工法を適用する機会を得た。またその結果を踏まえ、ごく初期の性能改善を目指して、撥水材を添加したけい酸塩系表面含浸材を新たに開発して効果を検証したので、それらの結果を紹介する。

2. 実構造物への適用

2.1 試験の概要

まず、実構造物を用い、けい酸塩系表面含浸材の含浸深さの検証を行った。実構造物は 1970 年に竣工した RC 製の函渠（写真-1）であり、表面含浸材を、1) 雨が掛からない側面の内側、2) 雨が掛かる側面外側、および 3) 雨が掛かる上面外側、の 3 箇所（写真-2）に刷毛にて塗布した。

なお、試験に先立ちコンクリートのテストハンマー強度³⁾を測定したところ、側面内側が 24.0MPa、側面外側が 18.9MPa、上面外側が 15.5MPa であった。



写真-1 対象構造物（矢印は試験箇所、左から「側面内側」、「上面外側」、「側面外側」）



写真-2 含浸材の塗布

*1 岐阜大学 大学院自然科学技術研究科 環境社会基盤工学専攻 修士課程（学生会員）

*2 岐阜大学 工学部 社会基盤工学科 教授 博士（工学）（正会員）

*3 馬居化成工業（株）営業本部

*4 馬居化成工業（株）開発部

ルシウムを用いた。

まず、対象とする側面内側、側面外側、上面外側のコンクリート表面のそれぞれ 1.5m² 程度を高圧洗浄機で水洗した。それぞれを約 0.5m² ずつに3分割し、1/3には含浸材のみを、1/3には反応補助材を塗布した翌日に含浸材を塗布し、残り 1/3は無塗布とした。塗布量の管理値はけい酸塩系表面含浸材が 250g/m²、反応補助材が 125g/m²である。

施工1ヶ月後および施工半年後に試料を採取し、土木学会規準「けい酸塩系表面含浸材の試験方法(案)(JSCE-K572-2012)」⁴⁾に従って表面含浸材の含浸深さを分析した。本来はけい酸塩から生成したC-S-Hの分布を試験するべきであるが、けい酸塩から生成したC-S-Hはセメント水和物と組成が極めて近いため、分離して定量することが困難である。そのため、表面含浸材に含まれるナトリウムイオン(Na⁺)、カリウムイオン(K⁺)、リチウムイオン(Li⁺)のコンクリート中での分布を試験することによって、けい酸塩から生成したC-S-Hの分布を推定することとした。なお、含浸材の無塗布箇所については施工1ヶ月後のみに試料採取と分析を行った。

施工面をφ5.4mmのコンクリートドリルで深さ5mmごとに15mmまで削孔し、削孔粉を採取して試料とした。そして試料約0.5gをフラスコに取り、純水30mlを加え、30分間加熱および振とうした。その後全体が50mlとなるよう再び純水を加え、24時間以上放置した後、ろ紙でろ過し、希釈調整と塩酸添加を行いICP-AES分析でNa⁺、K⁺、Li⁺濃度(mmol/L)に換算して、表面含浸材塗布箇所と無塗布箇所の濃度を比較することによって、表面含浸材の含浸深さを確認した。その際、無塗布箇所に対するアルカリ金属イオン濃度(mmol/L)の増加率が30%以上となる深さを「含浸深さ」とした⁴⁾。

2.2 試験結果

(1) 施工1ヶ月後

図-1に施工1ヶ月後のアルカリ金属イオン濃度の分布を、無塗布供試体におけるアルカリ金属イオン濃度に対する増加率として示す。

表面含浸材単独、および反応補助材+表面含浸材のいずれも深さ0~5mmおよび5~10mmでアルカリ金属イオン濃度の増加率が高くなっていることが確認できた。塗布された表面含浸材がこの深さまで含浸したものと考えられ、この深さまではけい酸カルシウム水和物(C-S-H)の保護層が形成されることが推測できる。一方、含浸深さは最大でも10mmまでに留まっているため、けい酸塩系表面含浸材による改質はコンクリートのごく表層に留まっているといえる。

(2) 施工半年後

図-2に施工半年後のアルカリ金属イオンのコンクリ

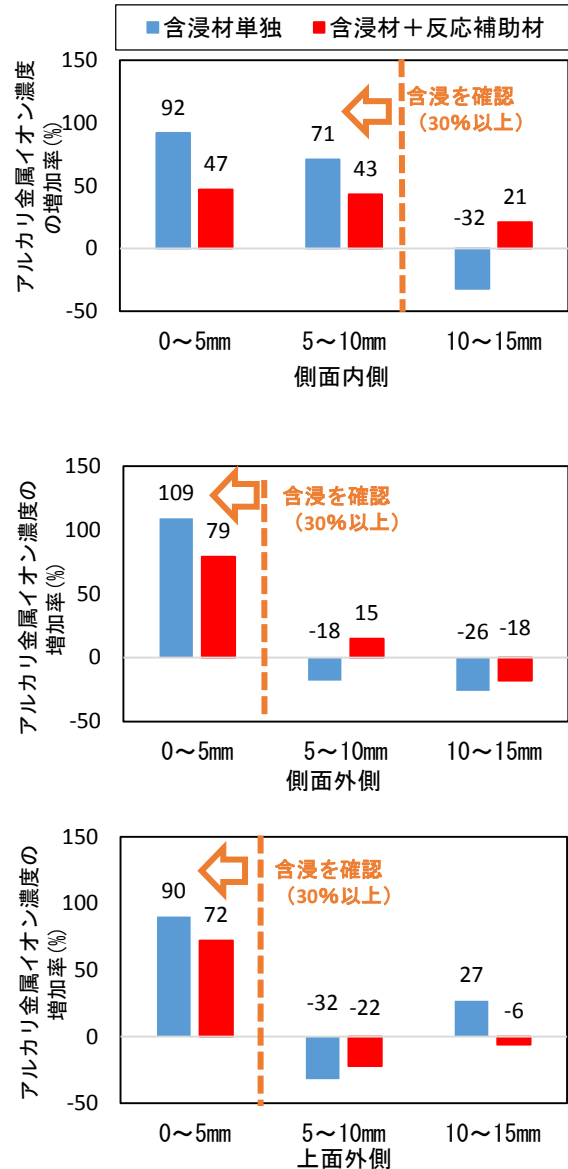


図-1 1ヶ月後のアルカリ金属イオン濃度のコンクリート表面からの深さ方向への分布(無塗布に対する増加率)

ート表面からの深さ方向の分布を、無塗布供試体におけるアルカリ金属イオン濃度に対する増加率として示す。

① 雨掛かりのない側面内側

施工後半年が経過した後においては、表面含浸材単独、および反応補助材+表面含浸材のいずれも、水溶性アルカリ塩のアルカリ金属イオン(Na⁺、K⁺、Li⁺)が含浸深さ10mmまでの表層部に残っていることを確認した。側面内側でアルカリが表層部に残留しているのは、雨掛かりのない面で降雨による影響がないことが理由と考えられる。

② 雨掛かりのある側面外側

一方で雨かかりのある側面外側については、表面含浸材単独、および反応補助材+表面含浸材ともに、アルカ

りは 5mm 以上の深さでも検出されたため、若干内部へ移動したのと考えられる。ただし、測定された量は少ない。これらは降雨の影響であると考えられ、施工1ヶ月の段階で表層に存在していたアルカリは、その後コンクリート内部に浸透するよりも壁面の下側に溶出したと考えられる。

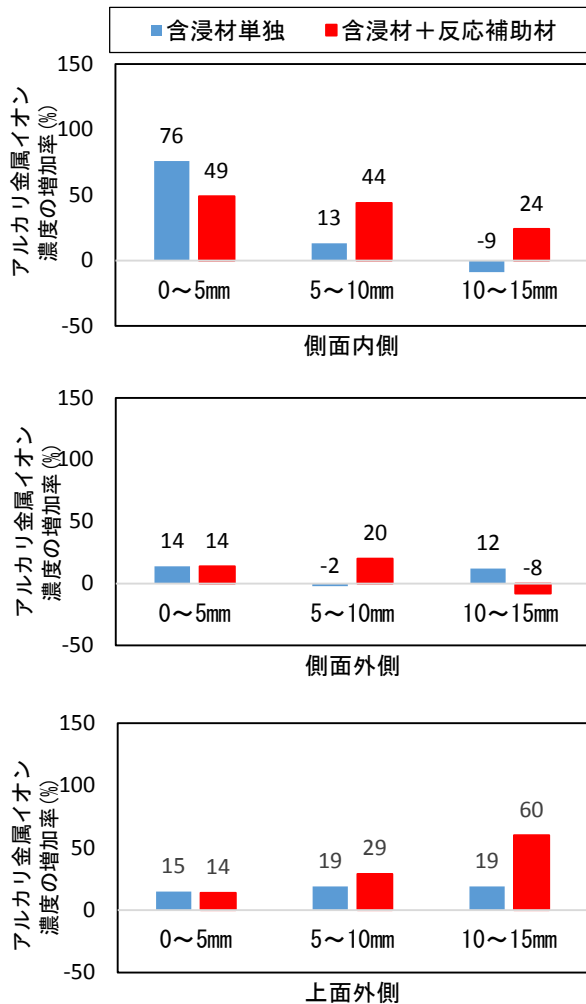


図-2 半年後のアルカリ金属イオン濃度のコンクリート表面からの深さ方向への分布(無塗布に対する増加率)

③雨掛かりのある上面外側

表面含浸材単独、および反応補助材+表面含浸材ともに、アルカリは内部への浸透が進んでいた。上面外側のため、副生した水溶性アルカリ金属塩は降雨の影響でコンクリート内部に浸透して、特に反応補助材を併用した場合には深さ 15mm まで浸透していることが確認された。一方、反応補助材を併用した場合の方が、表面含浸材単独の場合よりも施工面表層部により緻密な C-S-H 層が形成されると考えられるため、表面含浸材単独の場合の水溶性アルカリ金属塩は 15mm よりも奥に浸透していることも考えられる。

以上の実験結果から、雨が掛かる上面外側といった水平面では、表面含浸材はコンクリート内部に浸透でき、より深い位置までコンクリートを改質できている可能性があったが、雨が掛かる側面といった垂直面では、副生したアルカリ塩が下側に溶出してしまっている可能性があることが分かった。

3. 改良した表面含浸材の効果検証試験

前章で調査を行ったのは副生した水溶性アルカリ塩の分布であって、けい酸塩の反応生成物である C-S-H 層の分布を直接測定したものではない。しかし反応型のけい酸塩系表面含浸材の場合には、未反応のけい酸塩は水と接触すると再溶解するため、ここでのアルカリイオンと同様に降雨の影響を受ける可能性がある。水平面の場合にはより内部に浸透できるというプラスの効果があるが、垂直面の場合には降雨で洗い流され、期待した効果が発揮できない可能性がある。

そこで、特に施工初期に屋外で、降雨で洗い流されることを防ぐために、撥水材をけい酸塩系表面含浸材を混入することを試みる⁵⁾。ここでは、けい酸塩系表面含浸材に撥水材を混入することが、中性化や塩分浸透に対する抵抗性の向上効果を阻害しないかを調査することとした。

3.1 表面含浸材の種類

用いたけい酸塩系表面含浸材は表-1に示す6種類であるが、いずれも SiO₂濃度は16%である。さらに前章と同様に反応補助材として亜硝酸カルシウムも用いた。表面含浸材、反応補助材ともに、塗布量は2.1に示した通りである。

表-1 含浸材の種類

略号	主成分	撥水材
Na-Li	けい酸ナトリウム, けい酸リチウムの混合	0%
K-Li	けい酸カリウム, けい酸リチウムの混合	0%
Na-K-Li	けい酸ナトリウム, けい酸カリウム, けい酸リチウムの混合	0, 3, 10%

このうち、3種混合のけい酸塩系表面含浸材(Na-K-Li)に撥水材(シリコン)を3~10%混合したものを用いた。この混合率で使用した場合のコンクリート表面に対する撥水材の塗布量は、通常の撥水系表面含浸工法における塗布量と比べて大幅に少ないため、塗布後の1ヶ月程度の初期の段階では撥水効果を発揮するものの、塗布後半年ほど経過すると、風雨や紫外線の影響より撥水材の効果は薄れる。したがって、主剤のけい酸塩系表面含浸材が反応してセメント硬化体組織を緻密化する効果を発揮するまで、含浸材が洗い流されるのを防ぐという補

助的效果を付与することを目的としている。

また、撥水材の添加により塗布後に水をはじくため、通常のけい酸塩系表面含浸材と比較すると、塗布確認がしやすい点も有益である（写真-3）。撥水材の効果は長期的には薄れるため、長期経年後に、けい酸塩系表面含浸材を再塗布する際に、表面を研磨して撥水材の成分を剥がす必要もない。



写真-3 撥水材を混入したけい酸塩系表面含浸材の塗布後の様子（水をはじいている）

表-2 透水量試験の塗布パターン

けい酸塩	撥水材	反応補助材
無塗布	-	-
Na-K-Li	-	-
	3%	有
		-
10%	-	

表-3 中性化促進試験の塗布パターン

けい酸塩	撥水材	反応補助材
無塗布	-	-
Na-Li	-	-
K-Li		-
Na-K-Li	-	-
	3%	-
		有
10%	-	-
	有	-

表-4 塩分浸透抵抗性試験の塗布パターン

けい酸塩	撥水材	反応補助材
無塗布	-	-
Na-K-Li	-	-
	3%	有
		-
10%	-	-

3.2 試験の概要

土木学会標準「けい酸塩系表面含浸材の試験方法(案) (JSCE-K572-2012)」³⁾にしたがって、透水量試験、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を実施した。

供試体が所定の材齢に達したら、反応補助材として亜硝酸カルシウム 125g/m²をコンクリート表面に塗布し、適切な期間で養生を行った後、けい酸塩系表面含浸材を 250g/m²塗布した。なお、けい酸塩の塗布前後には、供試体の塗布面に対して散水は行っていない。また、供試体は同一要因のものを3体ずつ作製した。

表-2 に透水量試験の、表-3 に中性化に対する抵抗性試験の、表-4 に塩化物イオン浸透抵抗性試験の、含浸材と反応補助材の組合せを示す。

3.3 実験結果および考察

(1) 透水量

図-3、図-4 にけい酸塩系表面含浸材を塗布した場合の無塗布供試体に対する透水量の比（透水比）を示す。

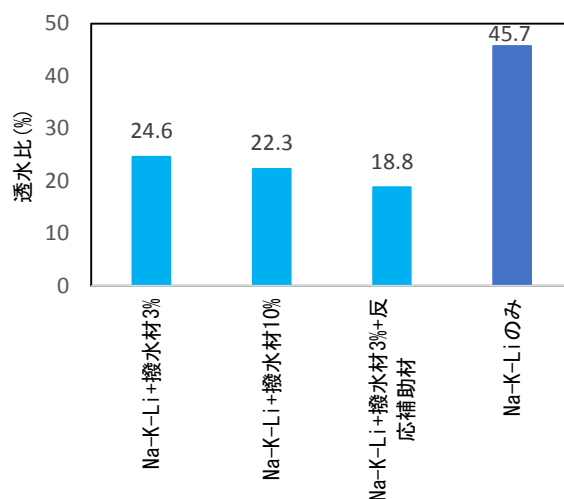


図-3 透水量試験の結果

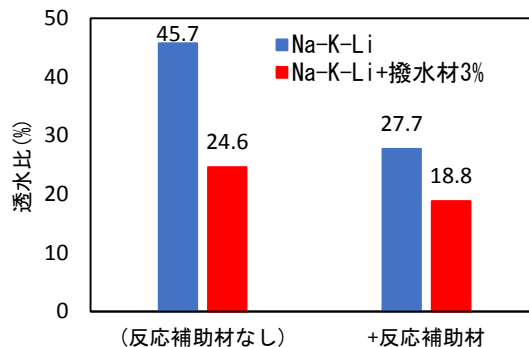


図-4 透水量試験の結果

撥水材の有無や量、反応補助材の使用の有無にかかわらず、いずれの場合もけい酸塩系表面含浸材を使用する

ことによって透水量を減少させることができた。また撥水材を添加すると、少ない添加量でも透水抑制効果の改善が図れることが確認された。透水量比は表面含浸材のみの場合で45%から24%へと改善し、反応補助材を併用している場合には撥水材を3%添加することによって27%から18%へと改善し、撥水材の添加は透水抑制効果の改善に役立つことが確認された。

(2) 中性化に対する抵抗性

図-5 に促進中性化 28 日後の供試体の中性化深さを、無塗布供試体に対する比（中性化深さ比）として示す。

Na-K-Li の 3 種混合系のけい酸塩系表面含浸材は、Na-Li および K-Li の 2 種混合系よりも中性化に対して効果が高い傾向がみられた。けい酸塩系表面含浸材の中性化抑制メカニズムについては既報²⁾で述べた通り、けい酸の反応より生成する C-S-H が空隙を充填して二酸化炭素の侵入を遮断するのに加え、けい酸自身が二酸化炭素と反応し、これを吸収する。特に 3 種混合系のけい酸塩は二酸化炭素との反応により複雑な結晶を形成し、中性化に対する抵抗性が高い。

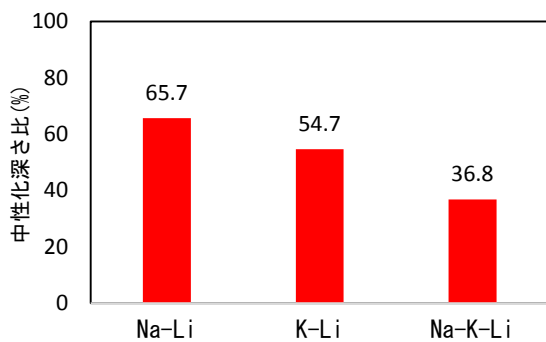


図-5 中性化に対する抵抗性試験の結果（いずれも撥水材、反応補助材とも使用せず）

次に、3 種混合系への撥水材の添加と反応補助材の使用が中性化抑制に与える影響を図-6 に示す。結果とし

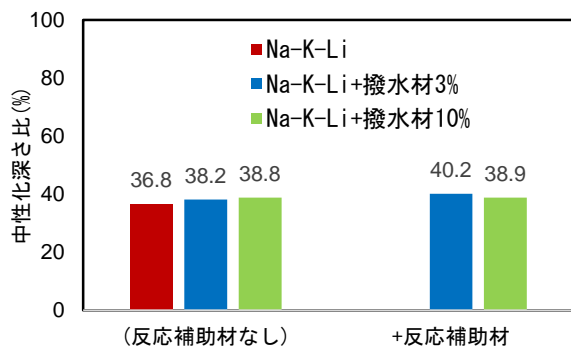


図-6 中性化に対する抵抗性試験の結果

て、反応補助材の使用の有無にかかわらず、撥水材の使

用が中性化の抑制率に与える影響はほとんど認められなかった。これは撥水材の物質透過抵抗性は液体の水に対して発揮されるためであり、気体である二酸化炭素の侵入に対する抵抗性には影響を与えなかったものと考えられる。一方、撥水材の添加が、中性化の抑制という観点から、けい酸塩系表面含浸材の効果に与える悪影響は認められないとも言える。

(3) 塩化物イオンの浸透に対する抵抗性

図-7、図-8 に 63 日間塩化物水溶液に浸漬した供試体への塩化物イオン深さを示す。いずれも表面含浸材を使用しない供試体における塩化物イオン浸透深さに対する比（塩化物イオン浸透深さ比）として示している。

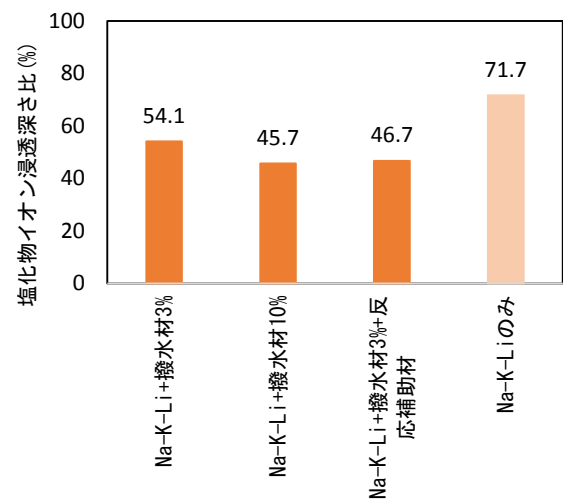


図-7 塩化物イオン浸透に対する抵抗性試験の結果

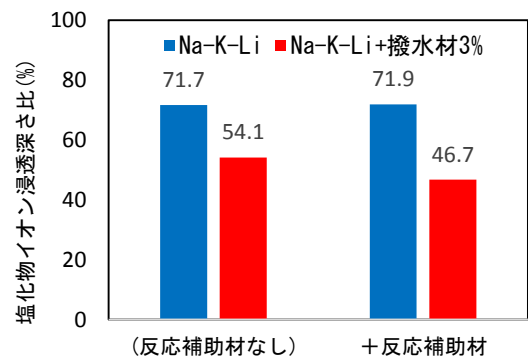


図-8 塩化物イオン浸透に対する抵抗性試験の結果

けい酸塩系表面含浸材を塗布すると、いずれの場合にも塩化物イオンの浸透に対する抵抗性は向上するが、撥水材を添加した結果、塩化物イオン浸透深さ比は71%から46~54%へと向上した。また、反応補助材を併用することによる塩化物イオンの浸透性の向上効果よりも、撥水材の添加の方が塩化物イオン浸透抑制効果の改善に役立つことが確認された。

中性化の場合と異なり撥水材の効果が大きいのは、塩化物イオンは水に溶解してモルタル中に浸入するため、水の侵入を防ぐ撥水材を添加したことの影響が大きかったものと考えられる。

5. 結論

本研究では、まず実構造物に対してけい酸塩系表面含浸材を塗布し、雨掛かりが含浸深さに与える影響を調査した。その結果を踏まえ、撥水材を混合したけい酸塩系表面含浸材を使用し、けい酸塩系表面含浸材を塗布したコンクリートの耐久性向上に関する検討を行った。

得られた知見を次にまとめる。

- 1) 雨掛かり条件の異なる側面内側、側面外側、上面外側にけい酸塩系表面含浸材を塗布し、アルカリ金属イオンの含浸深さを調査したところ、雨掛かりのある上面外側については施工後1ヶ月から半年の間に含浸深さが大きくなった。一方、雨掛かりのある垂直面ではアルカリ金属イオンが減少しており、降雨によって外部に流出した可能性がある。
- 2) けい酸塩系表面含浸材に撥水材を添加することで、開発した表面含浸材が少ない添加量でも透水抑制効果の改善に役立つことが確認された。
- 3) けい酸塩系表面含浸材の中性化抑制効果は、撥水材を添加しても、撥水材の添加は中性化の抑制という観点から、けい酸塩系表面含浸材の効果に与える悪影響は認められなかった。
- 4) けい酸塩系表面含浸材に撥水材を添加することで、少ない添加量でも、塩化物イオンの浸透に対する抵抗性を向上させることができた。

以上の結果から、撥水材をけい酸塩系表面含浸材に少量添加すると、けい酸塩系表面含浸材の長所を生かす

つ、特に水が関与する物質透過抵抗性を向上させることができた。ただし前述のように、撥水材の添加量は小さく、その効果は材齢の経過とともに薄れるため、今後、より長期での性状を試験で確認する必要がある。さらに、ここで開発した表面含浸材についても実構造物に試施工を行い、その長期的な効果を調査する予定である。

謝辞

実構造物に対する試験施工においては、国土交通省 中部地方整備局 岐阜国道事務所のご協力をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Tran Cong Phuc, Shinichi Kojima, Tatsuo Asano, Koichi Kobayashi: Improvement of Concrete Durability by Silicate-Based Surface Penetrants and Calcium based Supplemental Agent, 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.16, pp.557-560, 2016.10
- 2) Tran Cong Phuc, Koichi Kobayashi, Tatsuo Asano, Shinichi Kojima: Carbonation proofing mechanism of silicate-based surface impregnations, Advanced Concrete Technology, Vol. 16, No. 10, pp. 512-521, 2018. 10
- 3) 土木学会規準「硬化コンクリートのテストハンマー強度の試験方法 (JSCE-G504-2013)」, 2013.
- 4) 土木学会規準「けい酸塩系表面含浸材の試験方法 (案) (JSCE-K572-2012)」, 2012.
- 5) 原川卓真, 鶴田浩章: コンクリート用表面含浸材料の諸性質と劣化抑制効果, 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.10, pp.405-412, 2010.10