

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

維持管理工学研究室 大野 公輔

1 研究背景と目的

近年、コンクリート構造物の補修工法の中で、けい酸塩系表面含浸工法が注目されている。この工法に用いられるけい酸塩系表面含浸材は、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。

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けい酸塩系表面含浸材に撥水材を添加することで、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行い、また、撥水材やコンクリートへの配合によりひび割れ低減効果の実績がある超微細繊維であるセルロースナノファイバー (CNF)、および珪藻土をけい酸塩系表面含浸材に混合添加することにより含浸深さ試験、スケールングに対する抵抗性試験、ひび割れ透水試験を行い、コンクリートに対する耐久性向上効果を調査した。

2. 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

2.1 実構造物への適用試験

まず、実構造物を用い、コンクリート構造物の予防保全対策としてけい酸塩系表面含浸材を適用し、その含浸深さの検証を行った。対象は、1970年に竣工した国道21号にあるRC製の苗部1号函渠である。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箇所にて刷毛にて塗布した。使用した含浸材はNa-K-Liの3種混合けい酸塩系表面含浸材 (SiO₂濃度:16%)で、反応補助材として亜硝酸カルシウムを用いた。塗布量の管理値は反応補助材が125g/m²、けい酸塩系表面含浸材が250g/m²である。

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、ICP-AES分析でNa⁺、K⁺、Li⁺濃度 (mmol/L) 調査して、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¹⁾。

2.2 実構造物試験結果

図-1に施工6ヶ月後のアルカリ金属イオン濃度の分布を、無塗布部分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。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。

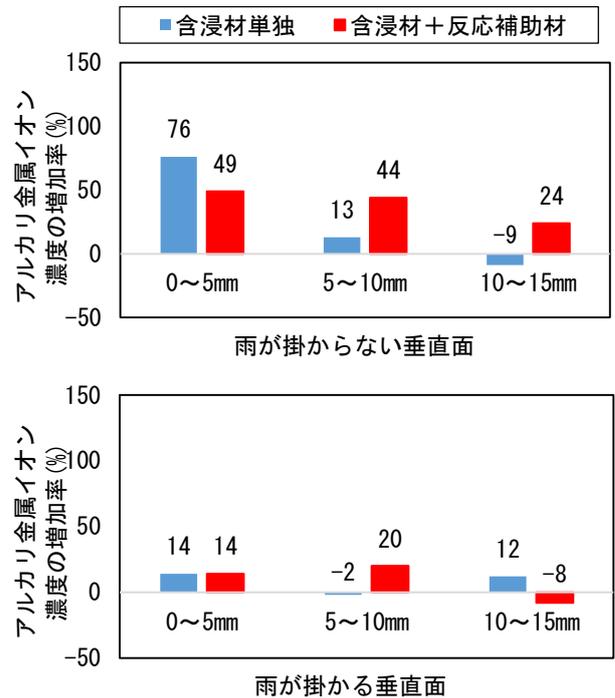


図-1 施工6ヶ月後のアルカリ金属イオン濃度の分布

3 改良した表面含浸材の効果検証試験

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に混入することを試みる²⁾。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。さらに、含浸材にセルロースナノファイバー (CNF) や珪藻土を添加して含浸深さ試験とひび割れ透水試験を実施し、結果を比較検討した。

3.1 使用した添加剤および表面含浸材

けい酸塩系表面含浸材に撥水材、CNFの2%溶液 (以下:CNF液体品)、CNFを乾燥させた粉体 (以下:CNF乾燥品)、および2種類の珪藻土を混合することを試みた。

撥水材 (シリコーン) はけい酸塩系表面含浸材に3%あるいは10%混合して用いた。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効果を付与することを目的としている。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。

使用した表面含浸材は、Na-Li、K-Liの2種混合およびNa-K-Liの3種混合けい酸塩系表面含浸材（SiO₂濃度：16%）で、2.1同様、反応補助材として亜硝酸カルシウムを用いた。

3.2 供試体概要

本研究では、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）」³⁾にしたがって、図-1に示す100×100×100mmの立方体供試体（TYPE I）および50×75mmの円柱供試体（TYPE II）を作製した。

TYPE I供試体は、寸法100×100×400mmの角柱供試体を打設後翌日に脱型し、6日間標準水中養生を行った後、図-2に示す寸法に切断をして28日間標準気中養生した。供試体が所定の材齢に達したら、試験面に表面含浸材を塗布後、合計28日間養生を行った。スケールに対する抵抗性試験用供試体のみ、切断面のうち2面を曝露面として、残り4面はエポキシ樹脂で被覆した。なお、本研究で用いたけい酸塩は反応型であるが、製品の仕様に従い、そ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。

一方、TYPE IIの円柱供試体は、寸法100×75mm円柱供試体を埋設型枠である塩ビ管内に打設後、翌日に脱型し、6日間標準水中養生を行った後、図-2に示す寸法に切断し、28日間標準気中養生した。養生期間中にひび割れを圧縮試験機にて導入した上で、クラックスケールにより測定したひび割れの幅が0.2mm以下のものを20体と0.2mm以上0.5mm以下のものを30体の合計50体用意した。TYPE Iと同様に、養生完了後に、試験面に表面含浸材を塗布後、28日間養生を行った。

撥水材を3～10%、CNF乾燥品を5%、および珪藻土を5%添加したけい酸塩系表面含浸材の塗布量は250g/m²（ただし、CNF溶液をけい酸塩に混入した場合には500g/m²）、反応補助材としての亜硝酸カルシウムの塗布量は125g/m²である。

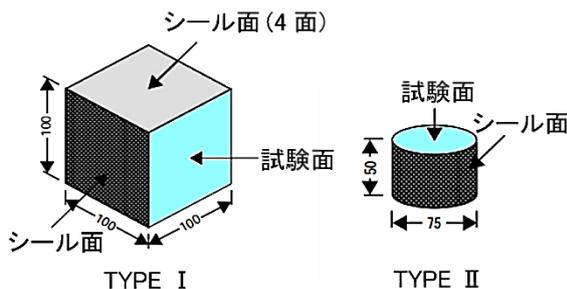


図-2 供試体概要

3.3 試験概要

TYPE Iを用いて2.1と同様の方法で、CNF型含浸材の含浸深さ試験を行った。反応補助材を塗布した翌日にCNF型含浸材を塗布し、施工面をφ5.4mmのコンクリートドリルでノギスのデプスパーで深さを調べながら2mm深さごとに試料を掘削して10mmまで掘削し、削孔粉を採取して試料とした。深さ方向の粉体試料の採取位置は6か所以上とした。

表-1に透水量試験の塗布パターンを示す。供試体はTYPE Iを用いた。メスピペットに5ml弱の蒸留水を注ぎ、計測途中で5ml以上減量してしまった場合は再度蒸留水の補給を行い計測した。試験開始から約1週間後に透水量を測定した。

表-1 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-2に中性化に対する抵抗性試験の塗布パターンを示す。供試体はTYPE Iを用いた。中性化促進開始28日後、試験体を割裂し、フェノールフタレインを噴霧して中性化深さ比を算出した。

表-2 中性化に対する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-Li	-	-
K-Li	-	-
Na-K-Li	-	-
	3%	有
	10%	有

表-3に塩化物イオン浸透抵抗性試験の塗布パターンを示す。供試体はTYPE Iを用いた。試験開始から63日後に供試体を取り出して割裂し、ウランinおよび硝酸銀液の噴霧による蛍光の部分の塩化物イオン浸透深さ比として算出した。

表-3 塩化物イオン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%	-

表-4にスケーリングに対する抵抗性試験の塗布パターンを示す。供試体はTYPE Iを用いた。凍結融解試験機に容器に入れた供試体を入れ、12時間を1サイクルとして60サイクル行い、6サイクルごとにスケーリング片を採取した。採取したスケーリング片を恒温槽にて24時間乾燥させ、その後、精密秤でスケーリング片の質量の測定を行った。

表-4 スケーリングに対する抵抗性試験の塗布パターン

けい酸塩	撥水材	CNF液体	反応補助材
無塗布	-	-	-
Na-K-Li	-	-	有
	3%	-	有
	-	けい酸塩とCNF2%溶液を1:1で混合	有
	3%	-	-
シリコーン	原液	-	-

表-5、表-6にひび割れ透水試験の塗布パターンを示す。供試体はTYPE IIを用いた。ここで、面塗布とは供試体の表面全体に前述の塗布量で塗布することである。また、線塗布とは供試体の表面に生じているひび割れ近傍に沿って1g/cmで集中的に塗布することである。供試体を、ひび割れ透水性試験装置に設置し、けい酸塩系表面含浸材の塗布前、および塗布して養生も終了した後にひび割れ透水試験を実施した。

表-5 0.2mm以下のひび割れ透水試験の塗布パターン

けい酸塩	塗布種別	撥水材	CNF液体	反応補助材
無塗布	面塗布	-	-	-
Na-K-Li		3%	-	有
		-	けい酸塩とCNF2%溶液を1:1で混合	有
		-	-	-

表-6 0.2mm以上0.5mm以下のひび割れ透水試験の塗布パターン

けい酸塩	塗布種別	CNF液体	CNF乾燥	珪藻土①	珪藻土②	反応補助材	
無塗布	面塗布	-	-	-	-	-	
Na-K-Li		けい酸塩とCNF2%溶液を1:1で混合	-	-	-	-	有
	線塗布	けい酸塩とCNF2%溶液を1:1で混合	-	-	-	-	-
		-	-	5%	-	-	-
		-	-	-	5%	-	-
		-	5%	-	-	-	-

3.4 効果検証試験結果

図-3にアルカリ金属イオン濃度の分布を、無塗布部分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。反応補助材を併用した場合の方が、特に、0~2mm付近でより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が、CNFの使用が2mm以内でのごく表層のアルカリ金属イオン濃度の増加率に与える影響はほとんど認められなかった。

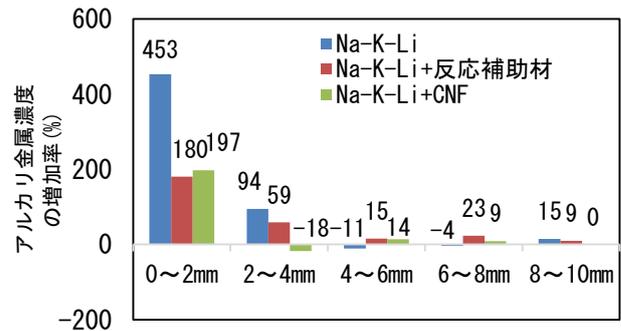


図-3 含浸深さ試験結果

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。けい酸塩系表面含浸材に少量の撥水材を添加することで、透水抑制効果の改善に役立つことが確認された。

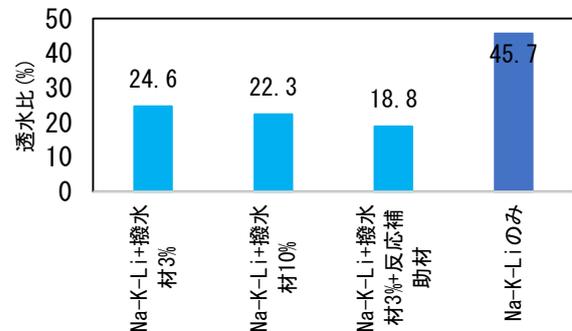


図-4 透水量試験結果

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。撥水材を添加しても、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。

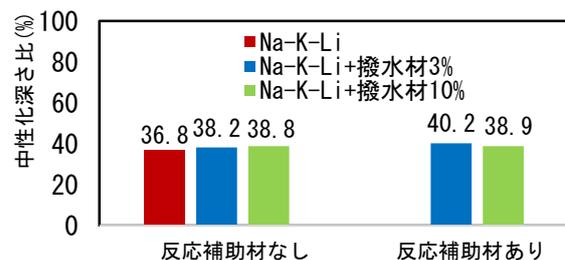


図-5 中性化に対する抵抗性試験結果

図-6 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、無塗布供試体に対す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）として示す。けい酸塩系表面含浸材に少量の撥水材を添加することで、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。

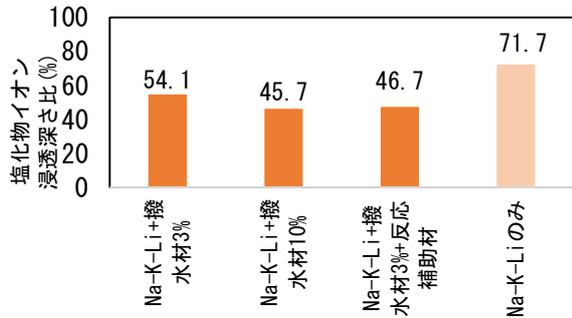


図-6 塩化物イオン浸透に対する抵抗性試験結果

図-7 にスケーリングに対する抵抗性試験の結果を、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スケーリングによる質量損失比として示す。いずれの試験においても反応補助材を併用するとスケーリング量が少なく、耐凍害性に対して効果があった。その中でも特に、反応補助材に表面含浸材と CNF 溶液の併用法による組合せにおいて一番スケーリング量が少ないことが確認された。

また、各種けい酸塩系表面含浸材と撥水材単体についての比較では両者に大きな差を認めるには至らなかった。

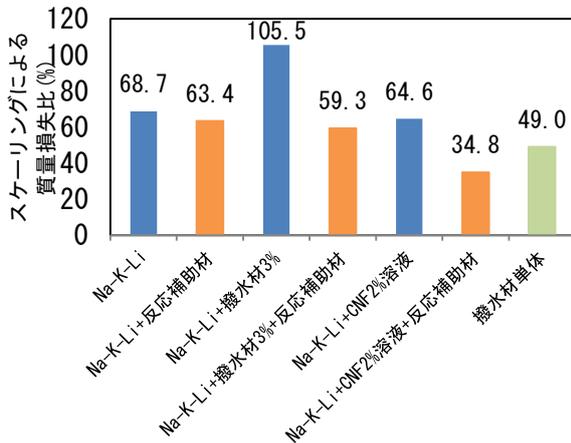


図-7 スケーリングに対する抵抗性試験結果

図-8 にひび割れ透水試験の結果を、無塗布供試体のひび割れ透水量に対する含浸材塗布後のひび割れ透水量の比（ひび割れ透水比）として示す。

0.2mm 以下のひび割れ透水試験の結果については、けい酸塩系表面含浸材単体および反応補助材とけい酸塩系表面含浸材を併用したことにより 0.2mm 以下の閉塞効果が認められた。

一方、0.2mm 以上 0.5mm 以下のひび割れ透水試験の結果については、薬剤の再塗布を繰り返して閉塞の確認を行

ったところ、けい酸塩系表面含浸材に CNF や珪藻土などの閉塞材料を混合して塗布を繰り返すことで、ひび割れが閉塞していき、ひび割れ透水抑制効果を得ることができた。

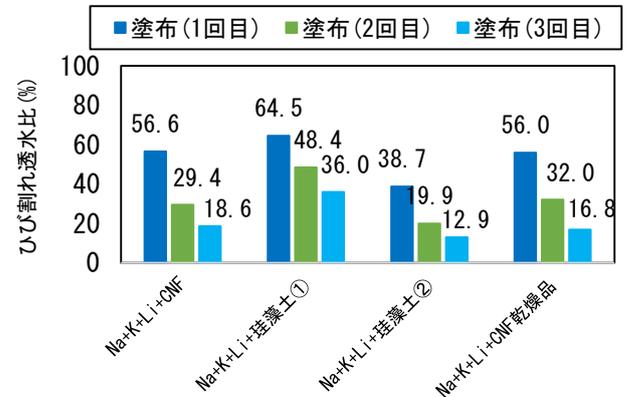
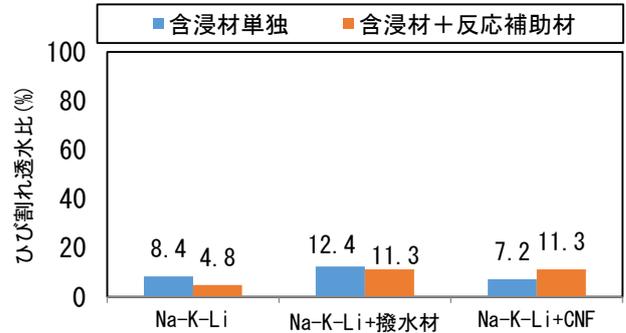


図-8 ひび割れ透水試験結果

4 結論

撥水材、CNF、および珪藻土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しつつ、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。そして、CNFの添加によって形成される粘性の付与が、特に、耐凍害性に有効であり、珪藻土の中でも細孔のない形状が、特に、ひび割れ透水性に有効であった。ただし、撥水材の添加量は極めて少なく、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。CNF や珪藻土を表面含浸材に混入することの効果についても実地試験を行うことにより、更に検証を進めていく必要がある。

参考文献

- 1) 土木学会：けい酸塩系表面含浸工法の設計施工指針（案）、コンクリートライブラリー137、2012. 7
- 2) 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.
- 3) 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.