

# モルタルの耐摩耗性に対する 表面含浸材の効果に関する一考察 — 水流摩耗試験による評価 —

農研機構 金森 拓也 森 充広 川邊 翔平

## 1. はじめに

農林水産省の調査<sup>1)</sup>によると、2020（令和2）年時点で標準耐用年数を超過した基幹的農業水利施設は再建設費ベースで5.6兆円に上ると報告されている。さらに2030（令和12）年には、その額は8.4兆円にまで増加する見込みであり、施設の老朽化に伴う維持管理費の増大が懸念される。このような中、コンクリート構造物の維持管理においては、変状が顕在化する前に対策を行うことがライフサイクルコストの縮減に有効であることが認識され<sup>2)</sup>、今後、老朽化した農業水利施設を更新する際には、あらかじめ耐久性を高める対策をとることが重要と考えられる。

新設コンクリート構造物の耐久性を向上させる手法として、本報では、表面含浸材（以下、含浸材）に着目する。液状のコンクリート改質材である含浸材は、けい酸塩系含浸材とシラン系含浸材の2種類に大別され、前者は固化物の生成によりコンクリート中の空隙構造を充填する機能、後者はアルキル基の固着により吸水防止層を形成する機能があるとされる<sup>3)</sup>。これらの機能によって、コンクリート中への水分および劣化因子の侵入を抑制し、各種劣化に対する抵抗性を高める効果が期待できる。また、材料費・工事費が安価である、施工が容易である、施工に伴う外観上の変化が少ないなどの利点がある。

一般土木構造物や建築物を対象として、含浸

材は既に多くの利用実績があり、コンクリート構造物の主要な劣化である中性化や塩害、凍害に対する含浸材の効果を検証した研究も多数行われている。例えば、中性化に関しては、一般にシラン系含浸材よりもけい酸塩系含浸材において抑制効果が高いこと<sup>4)</sup>、そのメカニズムとしては析出物による空隙充填とけい酸塩による炭酸の吸収が影響していること<sup>5)</sup>、打継部のような透気性が大きい部位に対しても高い効果が得られること<sup>6)</sup>などが報告されている。塩害に関しては、塩水浸漬による室内試験<sup>7)</sup>や15年にわたる現地暴露試験<sup>8)</sup>の結果などから、塩化物イオンの浸透抑制に対するシラン系含浸材の有効性が示されている。凍害に関しては、含浸材を塗布した供試体のスケーリング抵抗性を評価するために、ASTM C 672に準拠した試験が試みられている。その結果、シラン系含浸材はスケーリングの進行を遅延させる効果を有する一方で、凍結融解サイクルが増加し吸水防止層が崩壊すると、スケーリング量が急激に増加する現象が確認されている<sup>9)</sup>。このように、一般土木・建築分野では、含浸材の適用および関連する研究が盛んに行われており、含浸材の有効性や適用に際しての留意点が明らかになりつつある。

それに対し、農業水利施設に対する含浸材の適用については、けい酸塩系含浸材と無機系被覆材を複合した補修技術が提案される<sup>10)</sup>など近年注目され始めているが、特に水と接触する

環境における含浸材の適用性は十分に検証されていない。さらに、農業水利施設の特徴的な劣化である「摩耗」に対する含浸材の効果が検証された研究報告もわずかであり、例えば、けい酸塩系含浸材を対象とした上野らの報告<sup>11)</sup>や、シラン系含浸材を対象とした石神らの報告<sup>12)</sup>があるものの、農業水利施設への含浸材の適用を考える上では、さらなる知見の蓄積が必要と考えられる。

そこで、著者らは、含浸材が耐摩耗性に及ぼす影響に関する知見の拡充を目的に、けい酸塩系含浸材、シラン系含浸材、および両者の併用の3パターンで含浸材を塗布したモルタルに対し、農業用水路の摩耗を模擬できる水流摩耗試験<sup>13)</sup>を実施した。本報では、その結果を報告するとともに、水流摩耗試験を活用した改質深さの評価の可能性について考察する。

## 2. 実験概要

### (1) 使用材料

含浸材を塗布するモルタル基板は、JSCE-K572に準拠し、水セメント比55%、砂セメント比3のモルタルとした。セメント種は普通ポルトランドセメント、細骨材はJIS標準砂とした。

含浸材は、けい酸塩系含浸材とシラン系含浸材を各1種とし、その塗布パターンは、けい酸塩系含浸材の単体塗布、シラン系含浸材の単体塗布および両者の併用塗布の3つとした。表-1に表面含浸材の種類および標準塗布量を示す。

### (2) 供試体の作製方法

上述の配合で練り混ぜたモルタルを70×70

表-1 表面含浸材の概要

略称	種類	標準塗布量 (ml/m <sup>2</sup> )
K	けい酸塩系	200
S	シラン系	240
KS	けい酸塩系+シラン系	200 + 200

×20mmの型枠に2層に分けて打設した。打設上面は左官ごてにて成型し、左官面を試験面とした。打設後は温度20℃、相対湿度50%の気中環境で乾燥を防ぎながら静置し、材齢2日で脱型した。脱型から材齢7日までは20℃の水中環境で養生し、材齢7日以降は再び温度20℃、相対湿度50%の気中環境に移行した。気中養生期間の材齢35日にけい酸塩系含浸材を、材齢36日にシラン系含浸材を試験面に塗布し、その後は試験日の材齢63～65日まで養生を継続した。ただし、水流摩耗試験を飽水状態で開始するために、試験の3日前から水中に浸漬させた。なお、同様の養生条件で含浸材を塗布していない「原状供試体」も作製した。すなわち、供試体の種類は原状、K、S、KSの4つであり、それぞれn=3とした。

### (3) 水流摩耗試験

水流摩耗試験は、高圧の水噴流を供試体表面に噴射することで、供試体を強制的に摩耗させる試験である。試験装置の概要を図-1に示す。本実験における試験条件は表-2に示す通りであり、所定の試験時間において、供試体が摩耗した深さを図-2に従いに測定した。摩耗深さは、10mm間隔で設定した5測線を対象に、レーザー変位計（計測ピッチ0.1mm）を用いて測

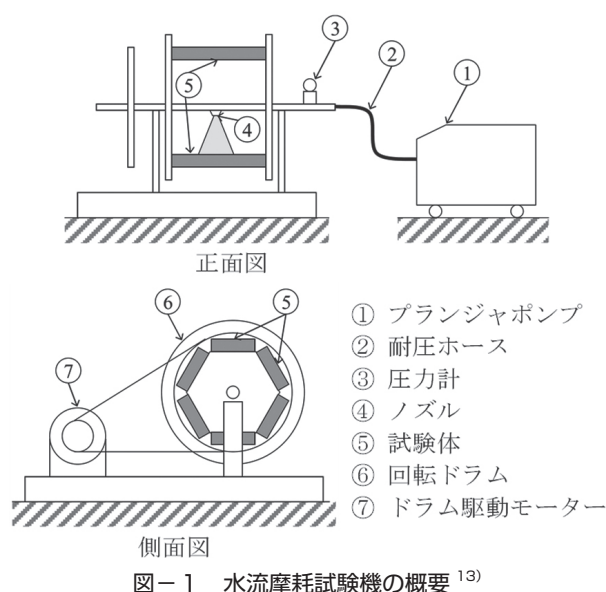


図-1 水流摩耗試験機の概要<sup>13)</sup>

表-2 水流摩耗試験の試験条件

項目	条件
水圧 (MPa)	11 ± 1
流量 (L/min)	18 ± 1
噴射距離 (mm)	80
噴射角度 (度)	40
試験時間 (h)	0 (初期値), 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 6, 8, 10

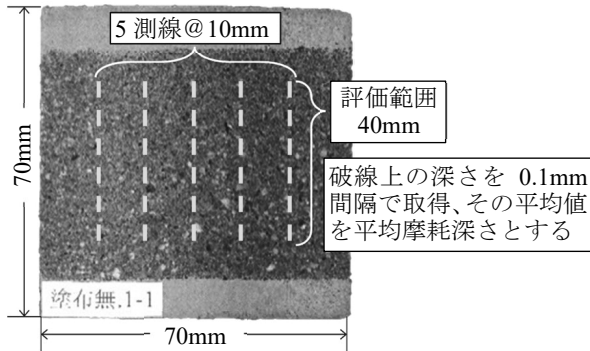


図-2 平均摩耗深さの算出方法

定した。測定後、各測線の中央40mmの範囲のデータを抽出し、5測線のデータ(400×5=2,000点)を平均した値を供試体の「平均摩耗深さ」として求めた。

### 3. 結果

水流摩耗試験における試験時間と平均摩耗深さの関係を図-3に示す。なお、図-3は、左からK供試体、S供試体、KS供試体の順で示しており、それぞれ比較として原状供試体の結果も併記している。また、K供試体とSおよ

びKS供試体では、縦軸のスケールが異なることに注意されたい。

まず、図-3において、破線で示す原状供試体に着目すると、試験開始から30分までは急激に摩耗が進行し、その後は緩やかに摩耗が進行している。これは、モルタル供試体は高压水流による衝撃に対して相対的に強い細骨材と弱いペーストから構成されており、細骨材が表面に露出するまでは摩耗の進行が速く、細骨材の露出に伴って摩耗の進行が遅くなったためと考えられ、既往研究の傾向とも一致する<sup>13)</sup>。

次に、K供試体に着目すると、試験時間10時間を通して、原状供試体よりも平均摩耗深さが小さくなっており、このことから、けい酸塩系含浸材の塗布によって摩耗の進行が遅延することが示された。また、図-3からは、試験時間が小さい部分(すなわち、表層から浅い範囲)において、原状供試体とK供試体の差が大きい状況が確認でき、これについては4章において考察する。

続いて、S供試体およびKS供試体について、原状供試体と比較すると、両者とも試験時間が小さい部分では原状供試体よりも平均摩耗深さが小さく、特にKS供試体でその差が顕著であることが確認できる。一例として、図-4に試験時間15分時点の供試体の摩耗状況を示すが、KS供試体で摩耗抑制効果が高いことは外観からも明らかである。このことから、表層部に限ってみれば、シラン系含浸材の塗布によっ

※ 図中のエラーバーは標準偏差を表す (n=3)

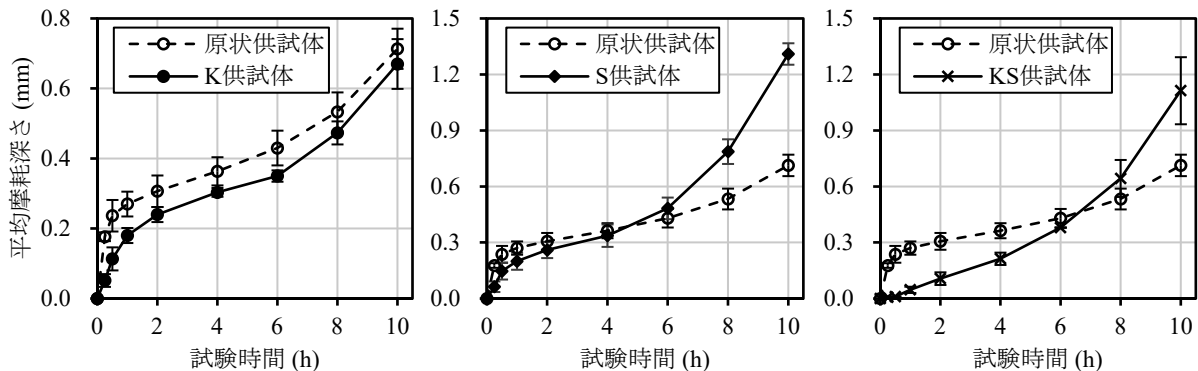


図-3 水流摩耗試験における試験時間と平均摩耗深さの関係

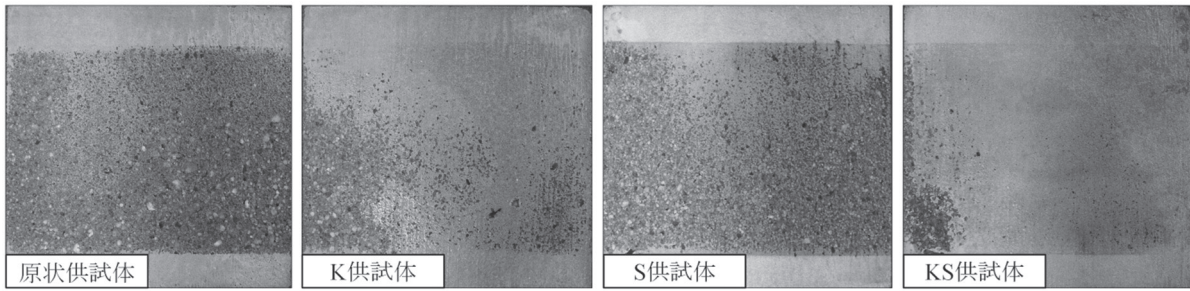


図-4 水流摩耗試験 15分時点における供試体の摩耗状況

でも摩耗は抑制され、さらに、けい酸塩系含浸材と併用することで摩耗抑制効果は大幅に向上することが示唆された。なお、シラン系含浸材は、けい酸塩系含浸材のようにコンクリート中の空隙組織を緻密化する効果をもたず、一般には摩耗抑制に対する適用は想定されていないが<sup>14)</sup>、本実験では表層部の耐摩耗性の向上に寄与する結果となった。この要因としては、石神らの報告<sup>12)</sup>でも示されているように、シラン系含浸材の有する撥水性・遮水性によってコンクリート中への水の浸透を防いだことが考えられ、「水」による摩耗作用に対しては一定の効果が得られる可能性があると考えられる。しかしながら、S供試体、KS供試体では、試験時間の経過に伴って平均摩耗深さが急激に増加する傾向も確認され、試験時間10時間における平均摩耗深さは、S供試体では原状供試体の1.84倍、KS供試体では原状供試体の1.56倍と、結果的に原状供試体よりも大きくなった。現時点では、この原因について定かではなく、今後、他の製品も含めて追加試験を行い、メカニズムを明らかにする必要がある。

#### 4. けい酸塩系含浸材を対象とした改質深さの評価に関する考察

本実験において、含浸材がモルタル表層の耐摩耗性の向上に一定の効果があることが示されたが、含浸材を適用したモルタルも徐々に摩耗し、いずれは改質された表層部が消失することを想定すると、どの深さまで耐摩耗性が向上しているのかといった「改質深さ」の情報も重要

と考えられる。そこで、けい酸塩系含浸材を例に、水流摩耗試験によって得られた結果から改質深さの評価を試みる。

図-5に、水流摩耗試験における平均摩耗深さ（表面からの深さ）と摩耗速度の関係を、原状供試体とK供試体について示す。なお、摩耗速度とは、図-3における各プロット間の傾きに相当する。図-5より、原状供試体をみると、表面に近いほど摩耗速度が大きく、表面からの深さが大きくなるにつれて摩耗速度は徐々に小さくなり、約0.3mm以深において横ばいもしくは微増する傾向に転じている。これは、前述のように、細骨材とペースト部の相対的な耐摩耗性の違いに関係していると考えられる。一方、K供試体は、原状供試体と大まかな傾向は同じであるが、原状供試体と比較して表層部の摩耗速度が著しく小さいことがわかる。また、表層から約0.3mmより深い範囲では、両者の

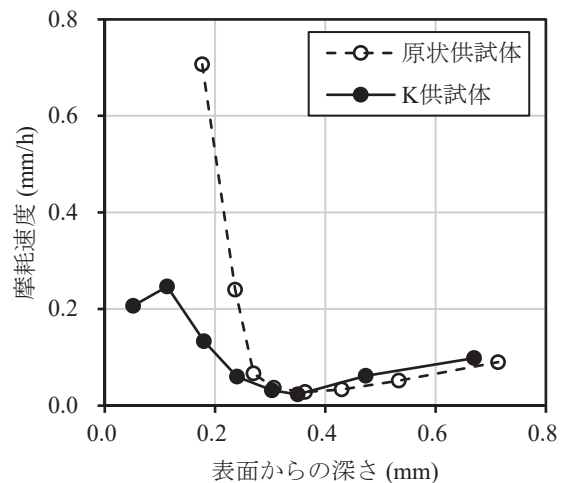


図-5 水流摩耗試験における摩耗速度の深さ分布



摩耗速度がほぼ同等となっている。このことから、けい酸塩系含浸材の塗布によって、改質した深さは約0.3mmと推定され、これは細骨材までのかぶり部分のペーストが緻密化されたものと考えられる。

ここで、今回使用したけい酸塩系含浸材に関して、JSCE-K 572による含浸深さ試験を実施した結果として、含浸深さは0.8mmと判定されている<sup>15)</sup>。すなわち、含浸深さ試験で得られた含浸深さと比較して、水流摩耗試験で推定された改質深さは0.3mmと小さい値となった。この要因としては、(1) JSCE-K 572による含浸深さが過大に評価されている可能性、(2) 0.3mm以深まで含浸しているが、水流摩耗試験では骨材の影響が支配的であり判定できない可能性、(3) 含浸しているが耐摩耗性の向上には寄与しなかった可能性、が考えられる。

(1)に関して、既報<sup>15)</sup>に示す含浸深さ試験では、表面から0～1mm, 1～2mm, 2～4mm, 4～6mm, 6～8mm, 8～10mmの深さで測定したアルカリ金属イオン濃度を、それぞれ代表する深さとして0.5mm, 1.5mm, 3mm, 5mm, 7mm, 9mmの点にプロットし、それを指数関数で近似することによって含浸深さを求めている。すなわち、表面から0～1mmの範囲のデータは1点のみであり、今回のように含浸深さが0.1mmオーダーと小さい場合には、過大に評価されている可能性が考えられる。一方、水流摩耗試験では、試験時間の間隔や水圧を調整することによって、1mm未満の浅い範囲で複数のデータを取得することが可能であり、深さ方向の詳細な分布を評価したい場合には有効な手法となりうる。

しかし、(2)に示したように、水流摩耗試験では細骨材の露出の影響を強く受けるため、骨材が露出する深さ以深では含浸材によるペースト部の改質効果がうまく判定できていない可能性も否定できない。この点については、骨材を含まないセメントペースト供試体を用いた試験を行うなど、さらなる検証が

必要と考えている。

## 5. おわりに

表面含浸材がモルタルの耐摩耗性に及ぼす影響を水流摩耗試験によって検証した結果、けい酸塩系含浸材の塗布によって摩耗の進行が遅延することが確認された。また、シラン系含浸材においては、表層部に限り、摩耗が抑制される傾向がみられ、けい酸塩系含浸材とシラン系含浸材を併用した場合にその傾向はより顕著であった。一方で、シラン系含浸材を塗布した場合、表面から深い範囲では逆に摩耗の進行が加速する傾向もみられた。さらに、検討の余地はあるが、水流摩耗試験において、深さ方向の摩耗速度の分布に着目することによって、改質深さを推定できる可能性が示唆された。

1章で触れたように、一般土木構造物や建築物に比べて、農業水利施設で含浸材が適用される事例は少なく、絶えず水と接触する環境における含浸材の効果や、中長期的な効果の持続性などについて、十分な知見が得られているとは言い難い。これらの点について、今後、農業水利施設の供用環境・劣化機構を模擬した室内実験や、実構造物でのモニタリング調査などを通じて検証していくことが望まれる。なお、本報は金森らの論文<sup>15)</sup>をもとにまとめたことを付記する。

## 参考文献

- 1) 農林水産省 (2021) : 令和3年度食料・農業・農村白書, p.136
- 2) 国土交通省 (2020) : 令和2年度国土交通省白書, p.146
- 3) 遠藤裕丈 (2016) : シラン系/けい酸塩系表面含浸材の特徴と適切な使用方法, 防水ジャーナル, No.531, pp.25-28
- 4) 坂元貴之, 武若耕司, 山口明伸, 樋原弘貴 (2011) : 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, Vol.33, No.1, pp.1625-1630
- 5) TRAN CONG PHUC, 浅野達夫, 馬居武志, 小

- 林孝一 (2017) : けい酸塩系表面含浸材の中性化抑制効果及びその抑制機構に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1651-1656
- 6) 槇島修, 小林剛, 笠井和弘 (2019) : 表面含浸材を適用したコンクリート打継部の中性化抑制に関する検討, とびしま技報, No.67, pp.7-8
- 7) 平田真佑子, 今本啓一, 清原千鶴, 渡辺恭子 (2019) : 表面含浸材を塗布したコンクリートの塩化物イオン浸透特性に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.1661-1666
- 8) 林大介, 坂田昇, 松田芳範, 遠藤裕丈 (2019) : シラン・シロキサ系表面含浸材の開発および長期耐久性の実証, コンクリート工学, Vol.57, No.10, pp.777-784
- 9) 遠藤裕丈, 田口史雄, 宮本修司, 村中智幸, 後藤浩之, 林大介, 坂田昇, 名和豊春 (2011) : シラン系表面含浸材による寒地コンクリート構造物の耐久性向上効果, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol.67, No.1, pp.69-88
- 10) 官民連携新技術研究開発事業, 表面改質複合法による農業用水路の長寿命型新補修技術の開発, 研究成果報告書 (<https://www.maff.go.jp/j/nousin/sekkei/kanmin/attach/pdf/kanryou-141.pdf>), 2022.10.07 確認
- 11) 上野和広, 長谷川雄基, 山本昌宏, 高橋慶吉, 佐藤周之, 長束勇 (2017) : けい酸塩系表面含浸材による無機系材料の耐摩耗性改善効果, H29 農業農村工学会大会講演会講演要旨集, pp.572-573
- 12) 石神暁郎, 森充広, 渡嘉敷勝, 増川晋 (2005) : 農業用水路コンクリートに生じる摩耗現象と促進試験方法に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.805-810
- 13) 渡嘉敷勝 (2013) : 農業用コンクリート水路における摩耗機構および促進摩耗試験に関する研究, 農村工学研究所報告, 52, pp.1-57
- 14) 土木学会 (2005) : 表面保護工法設計指針 (案) [工種別マニュアル編], コンクリートライブラリ 119, p.160
- 15) 金森拓也, 森充広, 川邊翔平, 豊吉明彦 (2022) : 水流摩耗試験による表面含浸材のモルタル改質効果の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.1, pp.1438-1443