

論文 摩耗と溶脱が進行した水路コンクリートにおけるけい酸塩系表面含浸材の適用性

敷地 泰成*1・長谷川 雄基*2・松本 将之*3・林 和彦*4

要旨: 本研究では、摩耗とカルシウム溶脱が進行した水路コンクリートにおけるけい酸塩系表面含浸工法の適用性の検討を目的として、モルタル供試体を使用した基礎実験を行った。結果として、カルシウム溶脱が進行することで、表層部が脆弱となり、摩耗が進行しやすくなることが確認できた。カルシウム溶脱が生じたモルタルにおいても、含浸材による改質効果は発揮されることが分かった。しかしながら、溶脱後に含浸材を塗布した場合に期待できる改質効果は、無溶脱のモルタルに含浸材を塗布する場合に期待できる改質効果よりも劣る可能性が考えられた。

キーワード: 摩耗, カルシウム溶脱, サンドブラスト, 表面含浸材, シリンダー式透気試験, 水セメント比

1. はじめに

近年では、土木構造物のメンテナンスの重要性が社会的にも広く認知され始めている。農業水利施設も例外ではなく、特に水源から圃場までの水輸送や排水を担う農業用排水路は、基幹的な施設のみで国内に約 5 万 km のストックを形成しており、適切なメンテナンスの対応が求められている。水路コンクリートでは、喫水位（最多頻度流量時の水位）以下の壁面において、流水との接触に起因するコンクリート内部のカルシウム（以下、Ca とする）溶脱が進行し、コンクリート表面が徐々に脆弱化する。脆弱化した表面に対して、水流や漂砂の物理的なすり磨きによる摩耗が作用することで、図-1 に示すように、継時的なペーストの消失と粗骨材露出が発生し、表面粗さが増加する。表面粗さが増加した水路コンクリートでは、主として壁面粗度の増加による通水性能の低下が懸念される。



図-1 摩耗と溶脱の複合作用で表面粗さが増加した水路コンクリート壁面

水路コンクリートにおける補修工法としては、表面被覆工法、断面修復工法、表面含浸工法などが挙げられるが、このうち、表面含浸工法の一つであるけい酸塩系表面含浸工法は、単独の工法としての適用のみならず、表面被覆工法や断面修復工法施工前の既存躯体の強化として適用できる汎用性を有している¹⁾。けい酸塩系表面含浸材（以下、本文中の「含浸材」はすべてけい酸塩系表面含浸材を指す）は、含浸材とコンクリート中の Ca が反応して生成された反応物が、微細ひび割れや空隙を充填し、表層部が緻密化するという反応メカニズムである。したがって、改質効果は塗布するコンクリートが保持する Ca 量に大きく影響を受けると考えられる。

先行研究では、外部からの二酸化炭素の侵入に伴い中

性が進行したコンクリートにおいて、含浸材の改質効果を検証した事例がある²⁾ものの、溶脱が進行することにより中性化したコンクリートに対する含浸材の適用性は十分に検討されていない。しかしながら、水路コンクリートにおいて、先述の適用方法により含浸材の改質効果を得るためには、Ca 溶脱した壁面に対する含浸材の改質効果を正確に把握しておく必要がある。

本研究では、摩耗と Ca 溶脱が進行した水路コンクリートにおけるけい酸塩系表面含浸工法の適用性の検討を目的として、モルタル供試体を使用した基礎実験を行った。まず、促進実験により Ca 溶脱が摩耗の進行に及ぼす影響を明らかにした。続いて、Ca 溶脱が進行した供試体に含浸材を塗布することで、摩耗の進行がどのように変化するか、すなわち Ca 溶脱後にも含浸材塗布により改質効果が得られるのかを検証した。最後に、シリンダー式簡易透気試験を用いて、表層部の品質と改質効果

*1 香川高等専門学校 専攻科 (学生会員)

*2 香川高等専門学校 建設環境工学科 講師 博士(農学) (正会員)

*3 香川高等専門学校 建設環境工学科 助教 博士(工学) (非会員)

*4 香川高等専門学校 建設環境工学科 准教授 博士(工学) (正会員)

表-1 供試体の養生・実験条件

番号	養生・実験条件	凡例
No.1	水中養生 (28 日)	■
No.2	水中養生 (28 日) → 促進溶脱試験 (28 日)	□ (点線)
No.3	水中養生 (28 日) → 含浸材塗布・養生* (28 日)	□ (横線)
No.4	水中養生 (28 日) → 促進溶脱試験 (28 日) → 含浸材塗布・養生* (28 日)	□ (斜線)

*含浸材塗布後の養生方法として、7日間の散水養生後は21日間の気中養生(25℃程度の室温)とした。

の関係について考察した。

2. 実験の概要

2.1 供試体の概要

本研究では、セメント系材料としてモルタルを対象とし、促進溶脱や含浸材塗布の時期が異なる条件を設定した。供試体の養生・実験条件は表-1に示す通りであり、No.1は標準供試体、No.2は溶脱による表層の変質が生じたケース、No.3は標準供試体に対する含浸材の改質効果を評価するケース、No.4は溶脱が生じた後に含浸材を塗布して補修するケース、を想定した。なお、表中の凡例は、3章で結果を図示する際に使用する。No.1~4の各条件において準備されたモルタル供試体を対象として、シリンダー式簡易透気試験により表層品質を評価した後、促進摩耗試験を行った。

No.1~4のすべての条件において、水セメント比(以下、W/Cとする)は、40、50、60%の3水準用意し、砂セメント比は2.0とした。本研究においては、いずれのW/Cにおいても単位セメント量は一定として、単位水量を変更することでW/Cを変化させた。モルタルの作製に使用した材料は、普通ポルトランドセメント(密度: 3.16g/cm³)、安山岩系砕砂(表乾密度: 2.61g/cm³、吸水率: 1.50%)、水道水である。供試体寸法は80×136mm、厚さ40mmであり、打設後24時間は20℃の室内で静置し、脱型後は20℃の恒温水槽で材齢28日目まで養生した後、各実験条件に合わせた工程を経て、シリンダー式簡易透気試験と促進摩耗試験に供した。促進溶脱試験における溶脱面およびシリンダー式簡易透気試験と促進摩耗試験の試験面、さらに含浸材の塗布を行う面は、No.1~No.4のすべてにおいて打設面の対面に位置する面(底面)とした。本研究で使用した含浸材は、けい酸ナトリウムが主成分であり、土木学会規準「けい酸塩系表面含浸材の試験方法(案)(JSCE-K 572-2012)」における種類判定試験において反応型に分類される材料である。

2.2 電気的促進法による促進溶脱試験の概要

本研究では、電気的促進法により促進溶脱試験を行った。溶脱促進試験機の概要を図-2に示す。試験装置は、アクリル製の水槽、水槽内に供試体を設置するための仕切り版、ステンレスメッシュ電極、定電圧電源装置、蒸

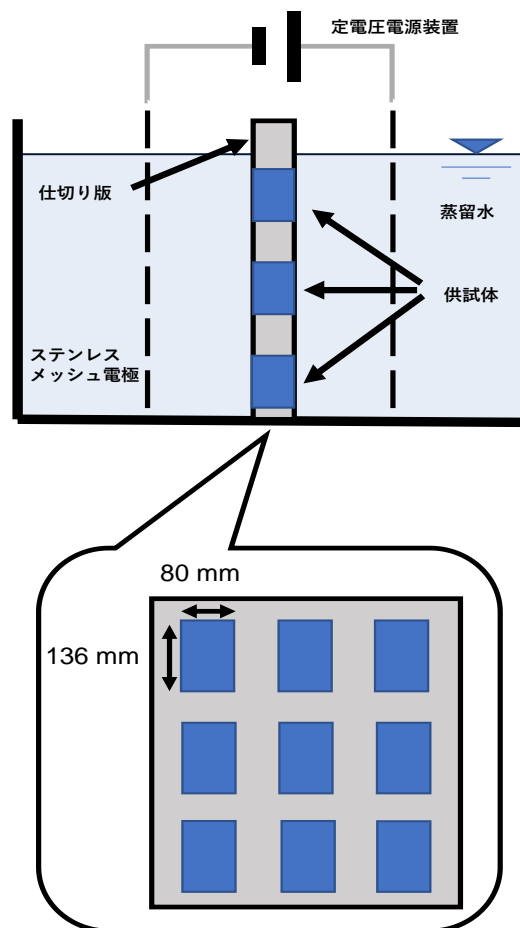


図-2 促進溶脱試験機の概要

留水から構成される。仕切り版には、9か所の貫通孔(80×136mm)があり、そのなかに、Ca溶脱面とその対面以外の4面を非電導性のシリコンで被覆した供試体を設置した。仕切り版の厚みは、供試体の厚みと同等の40mmである。水槽内は蒸留水で満たし、電極間に30Vの定電圧を作用させてCa溶脱を促進させる。試験日数は28日とした。これらの試験機の構成や試験条件については、既往研究³⁾を参考にした。

促進溶脱試験を行った試験条件(No.2とNo.4)については、促進摩耗試験終了後に供試体を割裂し、割裂断面にフェノールフタレイン溶液を散布して未発色深さを測定した。溶脱領域はCaの溶出により内部のpHが下がることから、本研究では、上記の通り測定した未発色深さを溶脱深さと定義した。

2.3 サンドブラスト法による促進摩耗試験の概要

水路コンクリートにおける摩耗は、舗装コンクリートのように表面から比較的均一に断面欠損する現象ではなく、ペースト、細骨材の順に消失し、粗骨材が露出する現象である。水路コンクリートにおける特有の摩耗現象を再現するための促進試験はいくつか検討されているが、本研究では、高圧で研磨材を噴射して供試体表面を促進摩耗させるサンドブラスト法を適用した。サンドブラスト法による促進摩耗試験については、水路コンクリートにおける摩耗現象の再現性の検討⁹⁾や、試験機の可搬性を高めた検討⁹⁾などが進められている。本研究では、これらの先行研究を参考に、市販の小型サンドブラスト試験機を使用して、促進摩耗試験を行った。

使用したサンドブラスト試験機のブラストガン先端には、直径4mmの噴射口があり、エアークンプレッサーと接続している。エアークンプレッサーの所要空気圧力は0.5~0.8MPaであり、コンプレッサー内に圧縮エアを溜め込み、フットバルブによってエアの放出を操作する。この圧縮エアにより研磨材の吸い上げを行い、エアと研磨材を吹き付ける。試験時の状況は図-3に、サンドブラストによる試験範囲は図-4にそれぞれ示す通りであり、ブラストガンから供試体表面までの距離は100mmとし、供試体に対して研磨材が垂直に噴射されるように設置した。噴射時間は60秒であり、研磨材にはアルミナ製の#60（平均粒径212~300 μ m）を使用した。摩耗量の評価指標として、試験前後の供試体の質量を測定し、試験後の質量減少量を摩耗量とした。

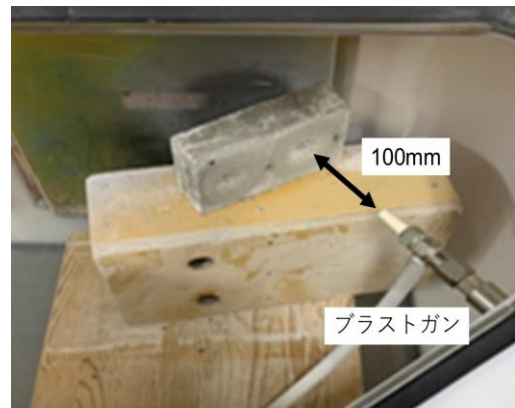


図-3 促進摩耗試験の状況

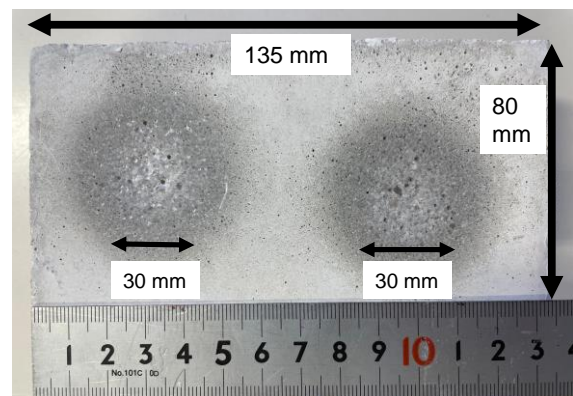


図-4 サンドブラスト試験の範囲

2.4 シリンダー式簡易透気試験の概要

促進摩耗試験のほか、溶脱による表層の変質および含浸材による表層の改質状況を評価するために、シリンダー式簡易透気試験を実施した。本試験は、外部電源が不要であり、短時間かつ簡易に表層部の品質評価ができる試験として提案されている⁹⁾。本試験は、本体シリンジ（ストッパー付吸引ハンドル付き）およびシリコン製ガスケットから構成されている。試験方法は図-5に示す通りであり、シリコン製ガスケットを装着後、シリンジを試験面に押し当てて内部のピストンを引き上げ、シリンダー内部の圧力を減圧してストッパーで固定し、60秒経過後にストッパーを抜いて復圧させてシリンダーの目盛りを読み取り、流入空気量を測定するものである。流入空気量が小さいほど、表層部が緻密な状態と評価できる。

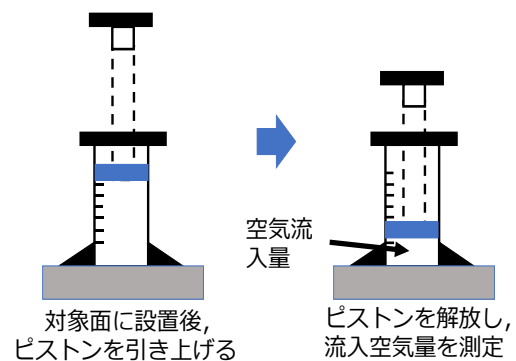


図-5 シリンダー式簡易透気試験の概略図

表-2 促進溶脱後のW/Cごとの溶脱深さ

W/C (%)	溶脱深さ (mm)
40	3.2
50	4.2
60	4.9

3 結果と考察

3.1 促進溶脱試験による供試体の溶脱状況

実験条件 No.2 の供試体における W/C ごとの溶脱深さの測定結果を表-2 に示す。結果として、W/C の増加に

伴い溶脱深さは大きくなることが確認された。この傾向は既往研究⁷⁾と同様のものであり、各 W/C の供試体における緻密性の差異が考えられた。W/C が小さくなるほど緻密な構造となるため、内部から Ca が溶出しにくくな

ったと推察された。

ここで、No.1 と No.2 の実験条件における W/C ごとの透気試験の結果を図-6 に示す。全体として、溶脱が生じることで、標準供試体と比較して流入空気量が大きくなる、すなわち表層部の緻密性が低下することが確認できた。また、標準供試体である No.1 においては、W/C ごとの流入空気量の差はほとんど見られないが、溶脱後の No.2 においては、W/C ごとに明確な流入空気量の差異が確認できた。

以上のことから、本研究の配合・試験条件においては、W/C ごとに溶脱の進行には差異があり、溶脱深さが大きくなるほど透気試験で得られる流入空気量も大きくなったことから、溶脱が進行するほど表層部の Ca が溶出し、表層が粗化することが確認された。

3.2 溶脱が摩耗の進行に及ぼす影響

標準供試体である試験条件 No.1 と促進溶脱を行った供試体である No.2 の促進摩耗試験の結果を図-7 に示す。図-7 より、いずれの W/C においても、No.2 の方が摩耗量は大きくなった。本結果は、先行研究³⁾で得た結果と同様の傾向であり、溶脱が進行することで表層部が脆弱となり、摩耗が進行しやすくなることが確認できた。

一方、実験条件ごとの W/C と摩耗量の関係については、明確な傾向は確認されなかった。加えて、No.1 と No.2 の摩耗量の増加量についても、W/C ごとに明確な傾向は見られなかった。一般に、W/C が小さくなるほど表層部の緻密性は高くなることから、No.1 については、W/C と摩耗量には比例関係があると推察される。また、3.1 の結果を踏まえると、W/C が大きいほど溶脱が進行して表層部が脆弱となることから、No.2 においても、W/C と摩耗量には比例関係があると考えられる。本研究において、これらの関係について明確な傾向が見られなかった理由の一因として、使用したサンドブラスト試験機の性能が考えられた。本研究で使用した試験機は、先述の通り、直径 4mm の噴射口から研磨材を噴射し、供試体表面の直径約 30mm の領域を摩耗させる。この摩耗範囲は、先行研究⁴⁾で検討された試験機の摩耗範囲よりも約 20mm 程度小さく、結果として、本研究では得られる摩耗量が小さく、W/C ごとの細かな差異を評価しづらい条件だった可能性がある。また、モルタルの摩耗は、表面のペーストが消失して摩耗範囲全体に細骨材が露出する状態となると、摩耗の進行速度が大きく低減することが知られている³⁾。本研究では、試験面を打設面の対面（底面）としたが、本来、底面は、打設時に細骨材が密集しやすい特性を有しており、ペーストが比較的早期に消失して、細骨材の露出が生じた可能性がある。

以上を踏まえると、本研究では、先行研究⁴⁾⁵⁾を参考に種々の試験条件を設定したが、今後、本研究で使用し

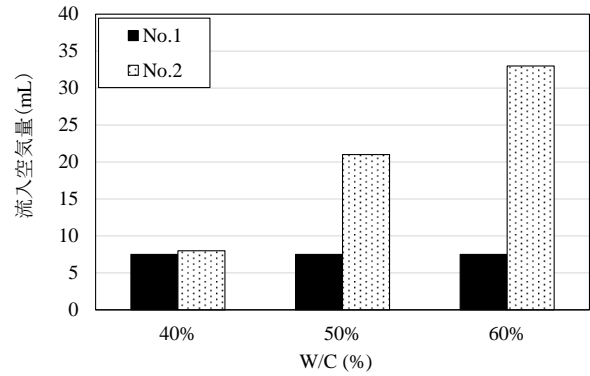


図-6 透気試験の結果 (No.1 と No.2)

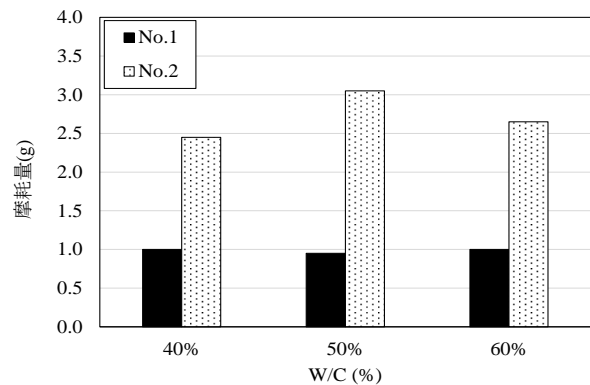


図-7 促進摩耗試験の結果 (No.1 と No.2)

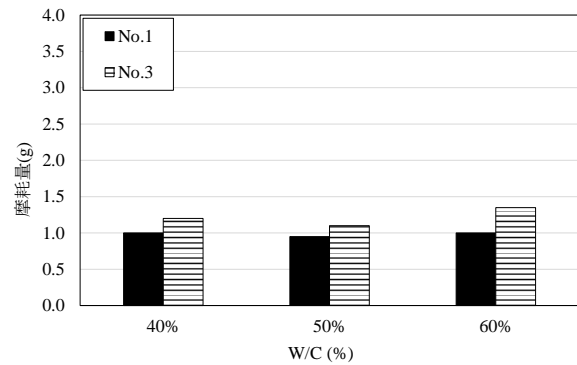


図-8 促進摩耗試験の結果 (No.1 と No.3)

たような小型のサンドブラスト試験機における最適な試験条件および評価可能な品質の範囲について詳細に検討する必要があると考えられた。

3.3 溶脱した供試体に対する含浸材の改質効果

まず、標準供試体である試験条件 No.1 と標準供試体に含浸材を塗布した No.3 の促進摩耗試験の結果を比較し、本研究で使用した含浸材の基本的な改質効果について、摩耗抵抗性という観点から評価する。結果は図-8 に示す通りであり、いずれの W/C においても、No.1 と No.3 の摩耗量は同程度となり、W/C ごとの差異も確認されなかった。いずれの W/C においても No.3 の方が摩耗量は

大きくなっているが、両者の差異は最大でも 0.5g 未満とごく小さい値であることから、データのばらつきの範囲内と推察される。通常、含浸材塗布により表層部が改質されて摩耗抵抗性は向上するが、本研究においては、標準供試体が 28 日間の水中養生を経て品質が高かったこと、促進摩耗試験の対象とした試験面が底面であり、3.2 で述べた理由から、含浸材無塗布の状態でも摩耗抵抗性が高かったこと、という二点の理由から、No.1 と No.3 の摩耗量に差異が確認できなかった可能性が考えられた。

続いて、溶脱供試体の No.2、標準供試体に含浸材を塗布した No.3、溶脱後に含浸材を塗布した No.4 の結果を比較し、溶脱した供試体における含浸材の改質効果を検討する。No.2、No.3、No.4 の促進摩耗試験の結果を図-9 に示す。結果として、いずれの W/C においても実験条件ごとの摩耗量の差異は同様の傾向を示した。具体的には、No.2 の摩耗量が最も大きく、No.3 が最小となり、その間に No.4 となった。No.2 と No.4 の比較から、促進溶脱試験を経て Ca 溶脱が生じたモルタルにおいて、含浸材を塗布することで改質効果が発揮され、摩耗抵抗性が改善されたと考えられる。ここで、No.3 の供試体について、先述した試験方法に起因する理由から、本研究のデータ上では含浸材の改質効果は確認できないものの、実際の現象としては改質効果が適切に発揮されていると仮定して考えると、No.3 と No.4 の結果では No.4 の摩耗量の方が大きいことから、溶脱後に含浸材を塗布した場合に期待できる改質効果は、無溶脱のモルタルに含浸材を塗布する場合に期待できる改質効果よりも劣る可能性が推察された。これは、改質効果がモルタル内部の Ca 量に大きく影響を受けるためと考えられる。したがって、溶脱後においても含浸材の改質効果を高めるためには、例えば先行研究⁸⁾で示されているように、Ca 補助剤を併用して含浸材塗布と併せて外部から Ca を供給する方法が考えられる。

No.4 の結果のみを比較すると、各 W/C における摩耗量は同程度である。このことから、本研究の結果のみからは、表面からどの程度の深さまで溶脱していたとしても、得られる改質効果は同程度となる可能性がある。ここで、既往研究を参照すると、金森ら⁹⁾は、含浸材の改質効果について、改質深さと摩耗深さとを関連付けた考察を行っている。また、ビッカース硬度試験を用いた含浸材の改質評価においては、含浸材塗布により改質された深さに加えて、未改質部に対する改質部のビッカース硬度の増分という二つの指標に着目した検討が進められている¹⁰⁾。これらの先行研究を参照し、本研究の結果を受けた今後の展開として、改質深さ、溶脱深さ、溶脱後の改質深さ、改質部と未改質部の物性の差、といった各指標を定量化し、本実験で得た結果の科学的な裏付けや

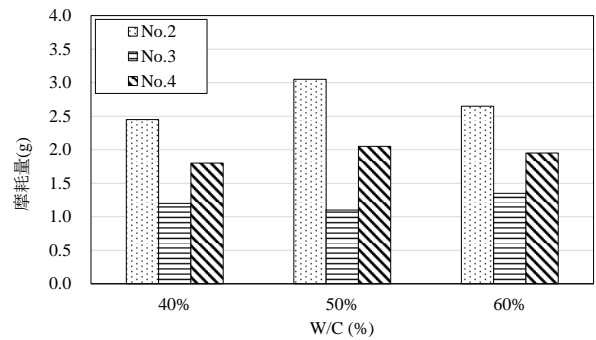


図-9 促進摩耗試験の結果 (No.2, No.3, No.4)

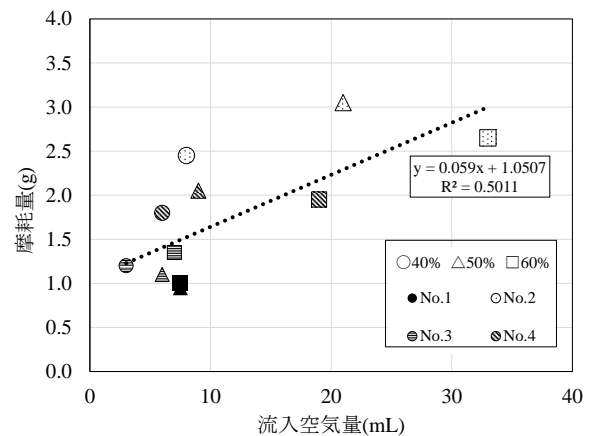


図-10 摩耗量と流入空気量の関係

論理構成を構築していく予定である。

3.4 表層の品質と摩耗抵抗性の関係

既往研究^{11), 12)}では、表層品質の評価指標である透気係数と摩耗抵抗性の間には一定の関係のあることが示されている。そこで、溶脱という表層の変質が生じた場合において、透気試験の結果と摩耗抵抗性に相関があるのか検証した。No.1~4 のすべての実験条件における流入空気量と摩耗量の結果を図-10 に示す。図-10 中のすべてのデータについて、近似直線を算出すると、(1)式の近似式が得られた。

$$y = 0.059(x) + 1.0507 \quad (1)$$

ここに、 x : 流入空気量 (mL), y : 摩耗量 (g) である。

相関を検証するために決定係数 (R^2) を算出したところ 0.50 であり、摩耗量と流入空気量には緩い正の相関があることが確認された。この決定係数は、既往研究^{11), 12)}と同程度の値であることから、溶脱による変質の有無にかかわらず、透気試験の結果と摩耗抵抗性との間には同様の関係が成立することが分かった。しかしながら、相関自体は緩いものであり、例えば(1)式を適用して透気試験の結果から摩耗抵抗性を推定するためには、さらにデータ蓄積をして近似式の精度を高めることや、相関が強くなる範囲を特定する、などの作業が必要となる。

4 まとめと今後の展望

本研究では、摩耗と Ca 溶脱が進行した水路コンクリートにおけるけい酸塩系表面含浸工法の適用性の検討を目的として、モルタル供試体を使用した基礎実験を行った。得られた成果を以下に示す。

- (1) 本研究の配合・試験条件においては、W/C ごとに溶脱の進行には差異があり、溶脱深さが大きくなるほど透気試験で得られる流入空気量も大きくなった。
- (2) Ca 溶脱が進行することで、表層部が脆弱となり、摩耗が進行しやすくなることが確認できた。
- (3) Ca 溶脱が生じたモルタルにおいても、含浸材による改質効果は発揮されることが分かった。しかしながら、溶脱後に含浸材を塗布した場合に期待できる改質効果は、無溶脱のモルタルに含浸材を塗布する場合に期待できる改質効果よりも劣る可能性が考えられた。
- (4) Ca 溶脱による変質の有無にかかわらず、透気試験の結果と摩耗抵抗性との間には緩い相関があることが確認された。

本研究における基礎実験の結果として、上記の(1)~(4)の知見が得られたが、一方で、関連する課題も複数抽出された。一つ目は、本研究で使用した規模の小型サンドブラストで促進摩耗試験を行うためには、細かな品質の差異を評価可能な試験条件を詳細に検討する必要がある。二つ目は、含浸材による改質、溶脱、摩耗の三種類の現象は、すべてセメント硬化体の表面から深さ方向に進行する現象であることから、深さ方向の物性変化を主軸として、相互に関連付けられないか検討し、改質効果のより正確なメカニズムの解明や評価方法を検討する必要がある。最後に、透気試験のような完全非破壊試験で得られる表層品質の評価指標を活用して、水路コンクリートにおける普遍的な劣化である摩耗について、劣化状態の推定や進行予測の手法が立案できれば有益と言える。これらの課題について、今後検討を進めていく予定である。

謝辞

本研究の遂行に当たり、香川高等専門学校専攻科（当時）の高石地晴氏と同本科の平石佳雅氏には実験において多大な協力を頂いた。また、本研究の一部は、科学研究費補助金 20K15626「けい酸塩系表面含浸材の汎用的利用に向けた実験的検討」の助成を受けたものである。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 谷村 成, 長谷川雄基, 佐藤周之, 長束 勇: けい酸塩系表面含浸工法によるコンクリート水路補修の現状と展望, 平成 27 年度農業農村工学会大会講演要旨集,

7-07, pp.686-687, 2015.

- 2) 原沢蓉子, 伊代田岳史: 劣化した構造物への表面含浸材の適用に関する一検討, 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.14, pp.547-552, 2014.
- 3) 渡嘉敷 勝, 森 充広, 中矢哲郎, 森 丈久: カルシウム溶脱したペースト硬化体の耐摩耗性, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.719-724, 2010.
- 4) 長谷川雄基, 小嶋啓太, 佐藤周之, 長束 勇: サンドブラスト法による無機系材料の促進摩耗試験方法の検討, 農業農村工学会論文集, Vol.85, No.2, I_215-I_220, 2017.
- 5) 金森拓也, 川邊翔平, 浅野 勇, 高橋良次, 森 充広: 可搬式サンドブラスト装置およびそれを用いたモルタル系材料の耐摩耗性評価試験法の開発, 農業農村工学会論文集, Vol.85, No.2, pp.I_271-I_278, 2021.
- 6) 渡辺 健, 山口喜堂, 廣本達也, 橋本親典, 石丸啓輔: シリンダーへの空気流入を利用した簡易透気試験に関する検討, 第 15 回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.15, pp.319-324, 2015.
- 7) 橋本勝文, 横田 弘, 佐々木亮輔: 長期にわたる水および溶脱現象に伴うセメント硬化体特性の評価, セメント・コンクリート論文集, Vol.67, No.1, pp.407-412, 2013.
- 8) 金堀雄伍, 樋原弘貴, 添田政司, 西嶋大貴: けい酸塩系表面含浸材とカルシウム溶液を併用したコンクリートの品質改善に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.1657-1662, 2015.
- 9) 金森拓也, 森 充広, 川邊翔平, 豊吉明彦: 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, 2022.
- 10) 近藤拓也, 宮里心一, 西野英哉, 横井克則: けい酸塩系表面含浸工法の吸水抑止性および耐凍害性に関する定量評価方法の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.1587-1592, 2018.
- 11) 中山英明, 細田 暁, 川邊翔平, 長谷川雄基: 農業用 RC 水路の表面被覆工法に用いる無機系材料の摩耗抵抗性の評価手法, コンクリート工学年次論文集, Vol.43, No.1, pp.1079-1084, 2021.
- 12) 長谷川雄基, 長束 勇, 谷村 成, 佐藤周之: 表層透気係数を指標とした水路コンクリートおよび無機系補修材料の耐摩耗性の推定に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.601-606, 2017