研究成果報告書

研究開発課題名	表面改質複合工法による農業用水路の長寿命型新補修技術の開発
研究総括者	株式会社 アストン　代表取締役　安藤 尚
研究開発組合	株式会社 アストン 株式会社 総合開発
試験研究機関	国立大学法人 高知大学 国立大学法人 島根大学

１　事業の実施内容

１．１　事業の背景及び目的

現在，我が国の農業水利施設の老朽化が進行しており，とくに取水施設から農地まで用水を輸送するために張り巡らされた膨大な延長の農業用水路の機能保全は，喫緊の課題となっている。

老朽化水路の補修工法は，これまでに様々なものが開発・適用されている。代表的なものとして，水路表面に保護措置を施す表面処理工法（無機系・有機系表面被覆工法，パネル工法，シート工法，表面含浸工法）や部分補修としてのひび割れ補修工法，断面修復工法，目地補修工法などがある。農林水産省では，平成 25 年に「農業水利施設の補修・補強工事に関するマニュアル【開水路補修編】（案）」を策定し（平成 27 年 4 月改正），補修工法ごとの品質規格を明示している。これにより，事業の発注者は，耐久性，経済性，施工性などの総合的な観点から最適な補修工法・材料の選定が可能となる環境が整いつつある。

表面含浸工法は，橋梁などの一般の土木コンクリート構造物の表面保護工法において多数の施工実績を有するが，農業用水路の補修工法としての適用例は少なく，単独工法および無機系被覆材との複合工法について，耐久性，経済性，施工性の検証を行った例は少ない。そのため，同工法の農業用コンクリート水路における補修効果については未だ十分な知見が得られておらず，上述の補修・補強工事に関するマニュアル等においても，表面含浸工法の要求性能やその照査方法に関する情報は記載されていないのが現状である。

表面含浸工法に適用される表面含浸材は，主成分によりシラン系，けい酸塩系（けい酸リチウム系・けい酸ナトリウム系），その他，の三種類に分類される。いずれもコンクリート表層部に含浸させて使用するが，その効果は異なる。けい酸塩系表面含浸材，とくにけい酸ナトリウム系表面含浸材は，既設コンクリート躯体に疎水性などの特殊な性能を付与するのではなく，コンクリート自体を緻密化させ，耐久性などの性能の向上を図るものである。よって，適用方法として，一般的な既設躯体の表面改質のみならず，断面修復時などの下地処理材や無機系被覆材との複合材として，農業用水路補修における適用性は高いと考えられる。しかしながら，現在までに表面含浸材を用いた農業用 RC 開水路の補修工法は確立されておらず，耐久性への影響や費用対効果も明らかになっていないため，表面含浸材の特徴を生かした効果的な補修の実現が困難である。

本研究開発事業（以下，本事業とする）では，研究開発組合が施工実績を有するけい酸塩系表面含浸材と無機系被覆材との複合工法の確立を目的とした。具体的には，被覆材の被覆厚さを従来よりも薄くしつつ，含浸材の表面改質効果で被覆材の接着安定性および耐摩耗性を向上することで，農業用 RC 開水路に適用可能かつ経済的な補修工法の開発である。

１．２　事業の内容及び実施方法

本事業では，表面改質複合工法を構成する材料の性能確認と実証実験による性能確認の二つを柱として研究開発を進めた。材料の性能確認として，研究開発組合が施工実績を重ねてきたけい酸塩系表面含浸材と無機系被覆材（以下，開発対象材料とする）のそれぞれの単独利用時の性能について，市販の材料群の単独利用時の性能と比較した。これら材料群との性能比較結果を踏まえた上で，開発対象材料の複合工法としての性能について，市販の材料を組み合わせた複合工法との性能比較を通して確認した。

実利用を想定した実証実験として，本事業の開発対象材料である 2 種類の表面含浸材と 2 種類の無機系被覆材について，材料の組み合わせや被覆材の塗り厚を変化させた複数の工法パターンを通常環境中の既設 RC 開水路に適用した。これにより，施工方法・施工管理方法およびゼロスパン現象による被覆材上のひび割れの発生状況の相違に基づく被覆材の薄肉化の有効性や経済性を検討し，一工法を抽出した。この工法をもって，第三者機関において，抽出した表面含浸材の単独工法および複合工法の品質確認試験を実施した。また，過酷な寒冷環境となる新潟県長岡市と栃木県那須塩原市の農業用幹線用水路（RC 開水路）にて実証実験を行った。

（１）工法選定のための材料単独（表面含浸材および無機系被覆材）の性能確認

（１）－１　けい酸塩系表面含浸材の性能確認

本事業の開発対象材料である 2 種類のけい酸ナトリウム系表面含浸材は，土木・建築分野のコンクリート構造物の防水・表面保護などに広く適用されており，20 年以上の使用実績を有する国産材料である。同材料を既設コンクリート開水路の補修用に無機系被覆材の下地処理材および表面保護材として複合工法に併用した場合の性能を確認するため，表面含浸材単独での性能評価試験を行った。

本事業では，上記の開発対象とした表面含浸材 2 種類に加え，比較対象用の材料として，市販のけい酸塩系表面含浸材を 8 種類用意した。この 8 種類の表面含浸材は，各メーカーの示す主成分や施工実績を参考に選定した。以上の計 10 種類の表面含浸材を使用して，**表－1** に示す基礎実験を行った。

表面含浸材の要求性能として，先述の補修・補強工事に関するマニュアルでは，一例として，中性化抑止性，耐摩耗性，耐凍害性が挙げられているが，現時点において「明確に整理することはできない」とされている。そこで，本事業では，表面含浸材の基礎特性評価および性能評価試験には，主に土木学会規格※参考文献 1 を採用することとした。**表－1** 中の①～③については含浸材の基礎特性の評価を目的とし，④～⑩については含浸材の単独工法の性能評価を目的とした。

⑩の耐摩耗性試験についてであるが，先述の補修・補強工事に関するマニュアルでは，水砂噴流摩耗試験が採用されている。したがって，マニュアルに則った評価の実施には，水砂噴流摩耗試験の実施が適切である。しかし，本事業においてすべての材料・工法の耐摩耗性能の確認を水砂噴流摩耗試験で実施することは時間的に困難であった。ここで，サンドブラスト法は，試験体に対して一定の高圧力（5MPa）でアルミナ製の研磨材を噴射し，噴射後の試験体の質量減少量を測定する試験方法である。既往の研究で，水砂噴流摩耗試験と比較して同法は短時間での試験が可能であり（水砂噴流摩耗試験の 10 時間における試験結果がサンドブラスト法の 30 秒の試験結果に概ね相当※参考文献 2），かつ水砂噴流摩耗試験で得られる結果との整合性も確保できる※参考文献 3。このことから，本事業での含浸材単独および後述する無機系被覆材単独と複

合工法における耐摩耗性評価のための基礎実験は，水砂噴流摩耗試験の代替としてサンドブラスト法を採用することとした。また，後述する通り，最終的に確定した複合工法の 1 工法についてのみ，マニュアルに則った性能評価をするために，水砂噴流摩耗試験を実施した。

※参考文献 1　JSCE-K 572-2012 けい酸塩系表面含浸材の試験方法（案），（公社）土木学会『コンクリートライブラリー137 けい酸塩系表面含浸工法の設計施工指針（案）』，pp.81-96

※参考文献 2　長谷川ら（平成 29 年）：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，pp.I_215-I_220

※参考文献 3　藤野ら（平成 28 年）：水砂噴流摩耗試験を代替する試験法の開発に関する研究，平成 28 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集，pp.795-796

表－1　含浸材の基礎特性および単独工法における性能評価試験の一覧

	番号	試験名称	試験方法	試験の目的	確認する性能
基礎特性評価	①	反応性確認試験	JSCE-K 572-2012 準拠	セメントペーストとの反応性の有無の確認	水酸化カルシウムとの反応性
	②	乾燥固形分率試験	JSCE-K 572-2012 準拠	含浸材中の固形分量の確認	乾燥固形分含有量
	③	種類判定試験	JSCE-K 572-2012 準拠	含浸材が固化型か反応型のいずれに分類されるかの確認※1	けい酸塩系表面含浸材の種別
単独工法の性能評価	④	吸水率試験	JSCE-K 572-2012 準拠	水分の侵入抑止性の評価	水密性
	⑤	中性化に対する抵抗性試験	JSCE-K 572-2012 準拠	二酸化炭素イオンの侵入抑止性の評価	中性化抑止性
	⑥	塩化物イオン浸透に対する抵抗性試験	JSCE-K 572-2012 準拠	塩化物イオンの侵入抑止性の評価	塩化物イオン浸透抵抗性
	⑦	ひび割れ透水性試験	JSCE-K 572-2012 準拠	ひび割れからの漏水抑止性の評価	ひび割れ補修性
	⑧	表層引張強度試験	建研式付着力試験機を用いた表層の引張強度の測定	表層部の緻密性の評価	緻密性
	⑨	表層透気試験	二重構造のチャンバーを有する透気試験機を用いた表層部の透気係数の測定	表層部の緻密性の評価	緻密性
	⑩	耐摩耗性試験	サンドブラスト法による摩耗質量の測定	耐摩耗性の評価	耐摩耗性

※1　含浸材の種別の特徴は以下の通りである。

固化型・・・主に含浸材の乾燥固形分が微細空隙を充填することにより表層部を緻密化する。

反応型・・・主に含浸材の乾燥固形分とコンクリート中の水酸化カルシウムとの反応物が微細空隙を充填することにより表層部を緻密化する。

（１）－２　無機系被覆材の性能確認

本事業の開発対象材料である無機系被覆材は，硬化収縮によるひび割れや接着不良が生じにくいポリマーセメントモルタルのうち，特にひび割れ抵抗性の高い繊維混入ポリマーセメントモルタルである。性能確認には，通常環境下での使用を想定した普通セメントタイプと，寒冷地環境下での使用を想定した速硬セメントタイプの 2 種類の材料を使用した。

本事業では，上記の開発対象材料 2 種類に加え，比較対象用として，市販のポリマーセメントモルタル（以下，PCM と表記する）を 4 種類用意した。この 4 種類の PCM は，各メーカーの示す主成分や施工実績を参考に選定した。以上の計 6 種類を使用して，PCM の単独工法の性能評価として，以下の①～③の試験を実施した。

① 付着強度試験（確認性能：付着性能）
② 表層透気試験（確認性能：物質移動抵抗性能）
③ 耐摩耗性試験／サンドブラスト法（確認性能：耐摩耗性能）

（１）－３　複合工法の基礎的な性能確認

けい酸塩系表面含浸材と PCM との複合工法の性能評価として，表面にけい酸塩系表面含浸材と PCM を塗布したコンクリート平板（300×300mm，厚さ 60mm）を使用し，以下の①～③の試験を実施した。供試体の作製手順としては，まずコンクリート平板へ含浸材を塗布し，その後に PCM 被覆（厚さ 15mm：コテ塗り）を行った。PCM 被覆後 7 日が経過した時点で PCM 上面へ含浸材塗布を行い，塗布後 28 日間経過した後に以下に示す①～③の試験に供した。

① 付着強度試験（確認性能：付着性能）
② 表層透気試験（確認性能：物質移動抵抗性能）
③ 耐摩耗性試験／サンドブラスト法（確認性能：耐摩耗性能）

（２）開発対象工法（複合工法）の性能確認

（２）－１　通常環境下で供用された既設構造物に対する適用性の確認（小規模実証実験）

材料の性能確認試験と並行し，開発対象材料であるけい酸塩系表面含浸材と PCM 各 2 種類に対し，それぞれを組合せた計 4 工法について，経年した既設 RC 開水路を対象に実証実験を行った。PCM の塗り厚や含浸材塗布の有無などを変化させて，実供用下にある比較的小規模なコンクリート開水路を対象として計 14 区画の試験区を設定した。本小規模実証実験で得られた施工性および工法のコスト比較を踏まえ，寒冷地実証実験で採用する 1 工法を確定した。

（３）確定した複合工法 1 工法の性能確認

（３）－１　現地適用性の確認

小規模実証実験の結果を踏まえ，最終的に 1 工法（含浸材 1 種類＋PCM1 種類）を確定した。確定した工法について，以下の①，②の試験を実施することで，工法の現地適用性の評価を，③，④の試験を実施することで，要求性能の確認を行った。

① 粗度係数測定（水理模型実験による通水性能の評価／確認性能：通水性）
② 初期期凍害に対する抵抗性試験（低温養生した PCM 供試体の圧縮強度試験／確認性能：施工性）
③ 現行の補修マニュアルに準拠した耐摩耗性の評価（水砂噴流摩耗試験／確認性能：耐摩耗性）
④ 第三者機関による品質確認試験（確認性能：後述）

（３）－２　凍害環境下での性能の確認（寒冷地実証実験）

本事業で開発を進める補修工法の過酷な環境下における耐久性を評価するために，施工現場は凍害環境を選定した。実験規模は 100m^2 程度であり，いずれも凍害環境下である異なる地域の二現場で実施工を行った。選定した現場は，新潟県長岡市信濃川左岸および栃木県那須塩原市那須野ケ原の二箇所における長期供用された幹線用水路（RC 開水路）である。

（４）機能監視による確認

機能監視として，定期的に実証実験後の追跡調査を行った。本事業期間内における追跡調査実施時期は以下の通りである。

年度	時期	小規模実証実験（通常環境下）	寒冷地実証実験（凍害環境下）
H27	冬季	施工完了時	－
H28	夏季	約半年経過時（目視による簡易検査）	－
	冬季	約 1 年経過時	施工完了時
H29	夏季	－	約半年経過時（目視による簡易検査）
	冬季	約 2 年経過時	約 1 年経過時

調査項目については，以下の通りである。

・目視および打音検査

・テストハンマー強度

（JSCE-G504「硬化コンクリートのテストハンマー強度の試験方法」に準拠／確認性能：一体化性）

・付着強度試験

（建研式付着力試験機を用いた付着強度の測定／確認性能：付着性）

・表層透気試験

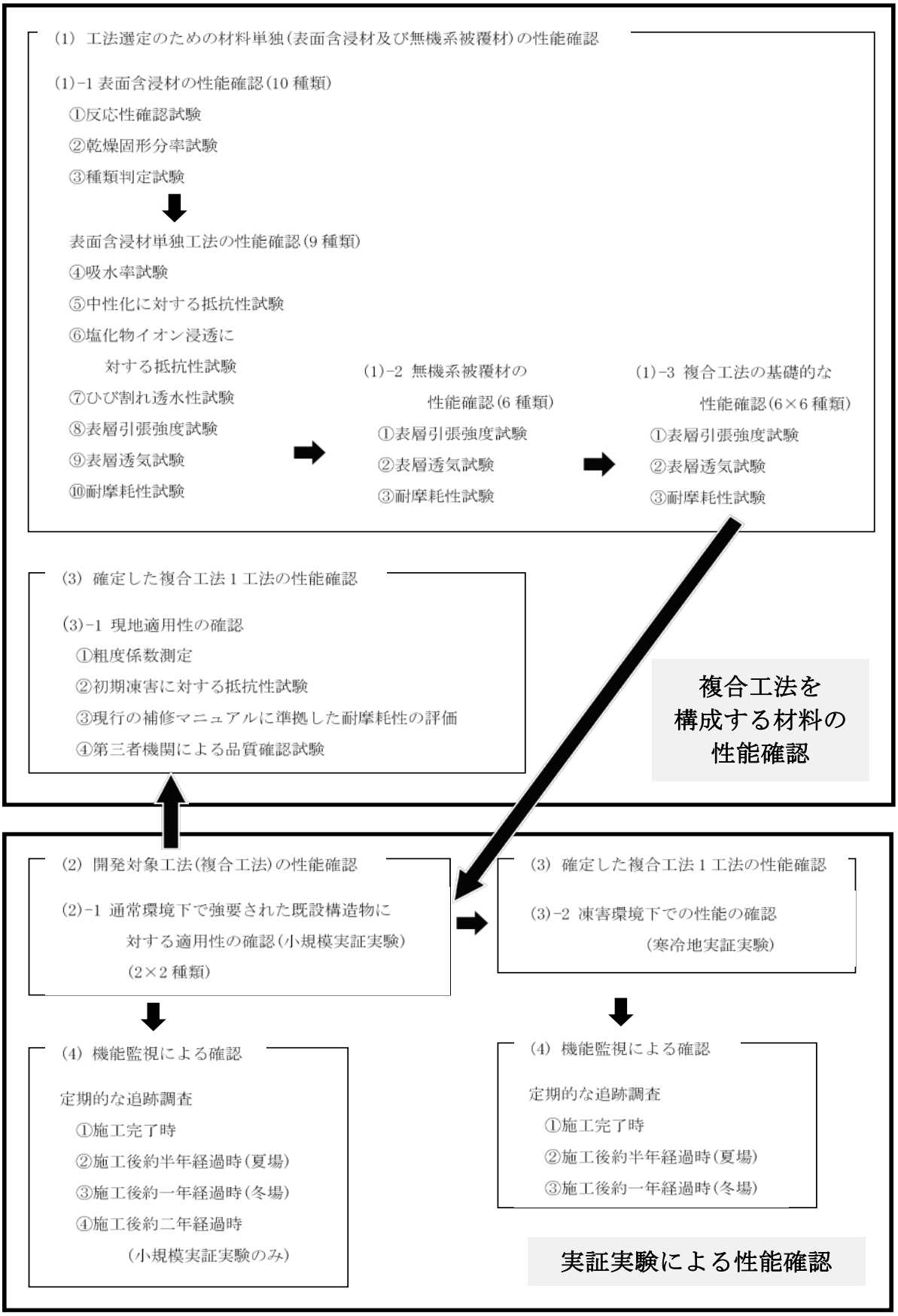
（二重構造のチャンバーを有する透気試験機を用いた表層部の透気係数の測定／確認性能：物質移動抵抗性）

・表面流水試験

（少量の水を同一地点から一定の時間間隔で繰り返し流下させることにより，同一箇所の水の流水距離を測定する試験であり，測定対象の表層部が緻密であるほど流水距離が長くなるため，これにより表層部の緻密性を評価※参考文献 4／確認性能：水密性）

※参考文献 4　家辺ら（2012 年）：水の流下試験によるコンクリート表層の品質評価に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 34，No. 1，pp.670-675

なお，本事業での実施事項を下図のように整理した。



１．３　事業着手時に想定した技術的問題点への対応

技術的問題点	対応
水路補修におけるけい酸塩系表面含浸材の適用性の評価	現状では，水路補修におけるけい酸塩系表面含浸材の要求性能およびその評価試験は明示されていない。よって，JSCE-K 572-2012 に準拠したけい酸塩系表面含浸材の基礎特性評価および性能評価試験に加えて，表層引張強度試験，表層透気試験，耐摩耗性試験を実施し，広くけい酸塩系表面含浸材の性能評価を行うことで，適用性を評価した。
複合工法の性能評価	けい酸塩系表面含浸材と無機系被覆材との複合工法の性能を評価するための手法に確立されたものはない。本事業では，含浸材塗布による無機系被覆材の表面改質効果を評価した。評価項目は，表層引張強度試験，表層透気試験，耐摩耗性試験である。加えて，粗度係数の測定を行い，開水路の基本的な要求性能である通水性能を検証した。
複合工法における薄塗りPCM の優位性の評価	複合工法の特色の一つに，けい酸塩系表面含浸材と無機系被覆材とを組み合わせることで，被覆材の耐久性が向上し，被覆材を薄塗りとしても耐久性が確保できる可能性が挙げられる。本事業では，小規模実証実験に際して，塗り厚の異なる複数の区画を設定することで，薄塗りの優位性を検証した。さらに，施工性という点に着目し，特に寒冷地においては，被覆材の薄塗りと速硬性が優位になることを評価するために，被覆材の初期凍害実験および実験結果を踏まえた寒冷地での実証実験を行った。

１．４　事業の実施体制

（１）事業実施主体（新技術研究開発組合）を構成する民間企業の名称

① 株式会社 アストン

② 株式会社 総合開発

（２）試験研究機関の名称

① 国立大学法人 高知大学 農学部 流域水工学研究室

② 国立大学法人 島根大学 生物資源科学部 施設機能工学研究室

（３）役割分担

研究開発の項目	事業実施主体（新技術研究開発組合）		試験研究機関	
	(株)アストン	(株)総合開発	高知大学	島根大学
試験体作製	○	◎	－	－
試験用材料提供	◎	○	－	－
試験体試験実施	◎	○	◎	◎
実現場試験実施	○	◎	◎	◎
性能評価	◎	○	◎	◎

１．５　事業の年度計画と実績

項　　目	平成 27 年度		平成 28 年度		平成 29 年度	
	上期	下期	上期	下期	上期	下期
表面含浸材の基礎性能評価						
複合工法の性能評価						
複合工法の農業用水路補修に対する適合性評価						
過酷な環境下での選定した複合工法の性能評価						
実証試験現場における機能監視						

注）━━━ は計画、━━━ は実績。

１．６　研究開発の概要、結果、課題等

（１）工法選定のための材料の性能確認

（１）－１　けい酸塩系表面含浸材の性能確認

現在市販されており，施工実績のあるけい酸塩系表面含浸材 48 種類について書類にて実態調査を行い，各メーカーの示す主成分や施工実績を参考に，本事業の開発対象材料の比較対象用材料として 8 種類の材料を選定した。

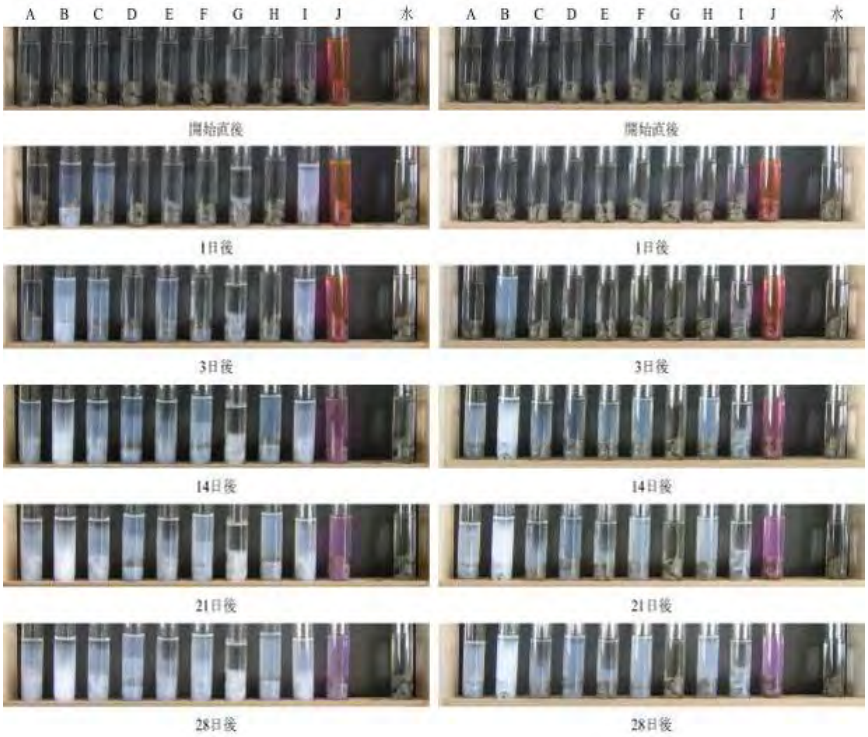
以降の本文および図表では，開発対象材料 2 種類を A，C，比較検討用材料 8 種類を B，D~J として表記し，以下の検討を行った。

①反応性の確認

本試験は，所定量（6mL）のけい酸塩系表面含浸材を入れた試験管中にセメントペースト片を浸漬させて，含浸材とセメントペースト中の水酸化カルシウムとの反応性を確認する試験である。試験管中に白濁が確認される場合，反応性を有する含浸材であると判定する。

けい酸塩系表面含浸材は，材料の乾燥固化物およびコンクリート躯体中の水酸化カルシウム

と反応して生成されたセメント水和物に近い組成の C-S-H ゲルがコンクリートの空隙を充填することで，コンクリート表層部を緻密化させるものである。しかし，補修が検討される既設水路などではコンクリートが中性化し，表層部の水酸化カルシウムが消費されている場合には，表面改質効果を十分に得られない場合もあることが考えられる。そこで，本試験では，JSCE-K 572-2012 の手順通り，作製直後のセメントペースト片を用いた試験に加え，促進中性化させたセメントペースト片を用いた試験も実施した。促進中性化させたセメントペーストに対する反応性を検証することで，中性化が進行した既設躯体に対する表面改質効果を推定することが可能となる。促進中性化させたセメントペーストは、JIS A 1153 に則り，促進期間 4 週間で促進中性化を行ったものである。反応性確認試験の結果を**図－1** に示す。図中では，試験対象とした 10 種類の含浸材 A～J を左から並べており，比較用として純水を用いた結果も併せて示す。



a) 作製直後のセメントペースト片　b) 促進中性化させたセメントペースト片

図－1　反応性確認試験の結果

作製直後のセメントペースト片を用いた試験では，B, C, I が 1 日後から白濁を始めており，3 日後では，とくに B と I ではっきりとした反応生成物が確認できる。その後，14 日後ではすべてのけい酸塩系表面含浸材で白濁が生じており，28 日後ではすべてのけい酸塩系表面含浸材含浸材ではっきりとした反応生成物が確認できた。

一方，促進中性化させたセメントペースト片を用いた試験では，1 日後ではいずれのけい酸塩系表面含浸材も白濁が確認されず，3 日後の B において最初の白濁が確認できた。その後，14 日後では G を除くすべてのけい酸塩系表面含浸材で白濁が生じているが，はっきりとした反応生成物が確認できるのは B のみである。28 日後では G を除くすべてのけい酸塩系表面含浸材で反応生成物が確認できたものの，全体的に作製直後のセメントペースト片を使用した場合と比較して，白濁色は薄いことが分かる。したがって，促進中性化させたセメントペースト

片を用いた試験では，全体的に反応生成物が確認されるまでの時間は長くなることが明らかとなった。

以上のことから，けい酸塩系表面含浸材ごとに反応生成物が生じるまでの時間には差異のあることが分かった。また，セメントペーストが中性化している場合は，反応に要する水酸化カルシウムの量が少ないため，反応生成物ができるまでの時間は長くなることが確認できた。

②けい酸塩系表面含浸材の乾燥固形分率および③種類判定

乾燥固形分率試験は，所定量（100±0.1g）のけい酸塩系表面含浸材を一定温度で乾燥させ，乾燥前後の質量比（%）を用いて，液体材料である含浸材中の乾燥固形分率を求める試験である。含浸材と躯体コンクリートとの反応に寄与するのは乾燥固形分であることから，乾燥固形分率はけい酸塩系表面含浸材の改質効果に大きく影響する指標である。

種類判定試験は，上記の乾燥固形分率試験で得た乾燥固形分を粉砕し，純水に対する溶解性の有無を確認する。この時，沈殿物が残り乾燥固形分が難溶性である場合，固化型けい酸塩系表面含浸材と判定する。一方，水溶液が無色透明になり，乾燥固形分が可溶性であると判定され，かつ乾燥固形分が溶解した水溶液にセメントペースト試験片を投入したものにおいて白濁がある場合は反応型けい酸塩系表面含浸材と判定する。

上記の試験について，JSCE-K572-2012 では，含浸材の乾燥温度を 105±5℃としている。しかしながら，同条件は実施工環境よりも乾燥温度が高く，反応型の再溶解性が実環境下よりも低く評価されることが懸念されている※参考文献 5。そのため，実施工を想定した常温乾燥（20±5℃）の条件についても併せて検討した。

※参考文献 5　大嶋ら（平成 27 年）：けい酸塩系表面含浸材の種類判定試験における溶解条件の検討，土木学会第 70 回年次学術講演会，V-579，pp.1157-1158

けい酸塩系表面含浸材の物性値と乾燥固形分率を**表－2** にまとめる。また，種類判定試験で得られた乾燥固化物の溶解状況を**図－2** と **3** に，ろ過液の反応性確認試験の結果を**図－4** に示す。なお，ろ過液の反応性確認結果は，乾燥固形分を得る際の乾燥温度にかかわらず同様であったため，常温乾燥固形分を使用した場合のみを示す。

表－2 より，試験対象とした 10 種類のけい酸塩系表面含浸材は，比重や pH 値といった基本的な物性値が異なる。さらに，既設コンクリート躯体の微細空隙の充填性に大きく関係する乾燥固形分率も大きく異なることが確認できた。また，105±5℃の乾燥条件で得た乾燥固形分率と比較して，20±5℃で得た乾燥固形分率（常温乾燥固形分率）の方が大きくなる傾向が把握できた。この理由として，乾燥温度が低いものの方が，固形分中に水分が多く残存していたためと考えられた。

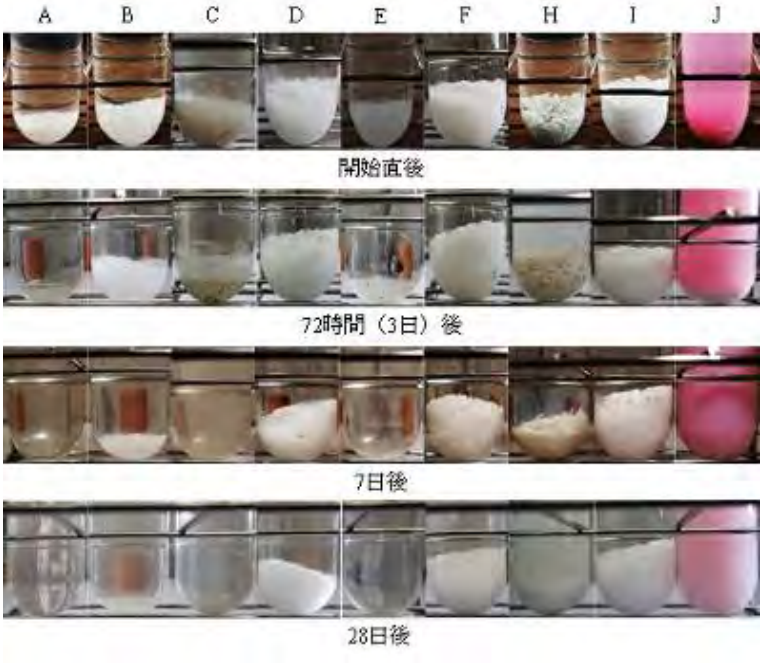
以上の結果を基に，以降のけい酸塩系表面含浸材の単独工法における試験結果や複合工法における試験結果については，得られた試験結果と含浸材の特性，主として乾燥固形分率に着目した考察を行った。

表－2　けい酸塩系表面含浸材の物性値と常温乾燥固形分率

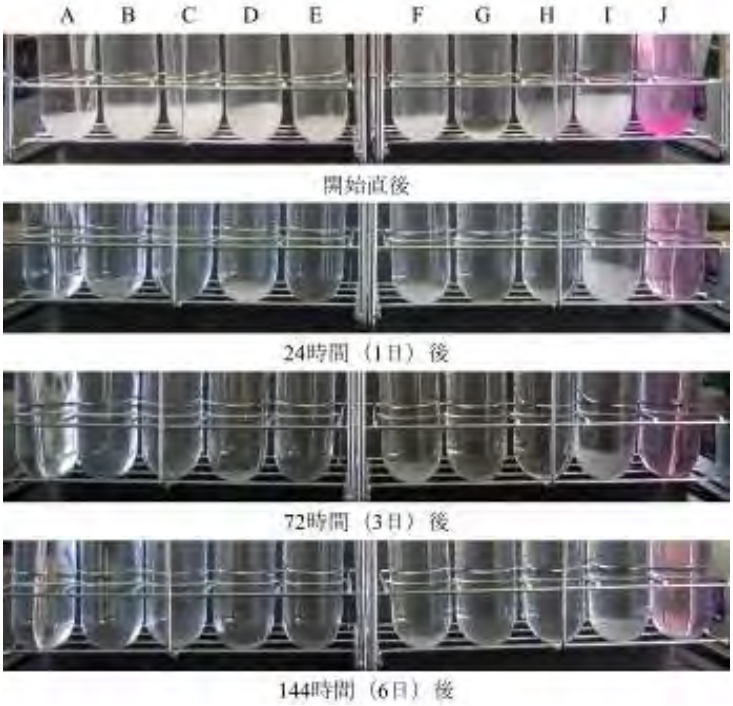
記号	比重	pH 値	乾燥固形分率※1 (%)	常温乾燥固形分率※2 (%)
A	1.25	11.4	32.7	42.5
B	1.16	11.1	24.2	33.2
C	1.06	11.3	7.6	12.8
D	1.08	11.1	13.6	15.9
E	1.05	11.4	31.6	37.0
F	1.07	10.5	14.5	22.2
G	1.25	5.9	-	38.3
H	1.12	11.0	21.5	20.9
I	1.11	12.0	18.1	24.4
J	1.08	11.2	17.2	19.4

※1　105±5℃の乾燥条件で得られた乾燥固形分率を示す。

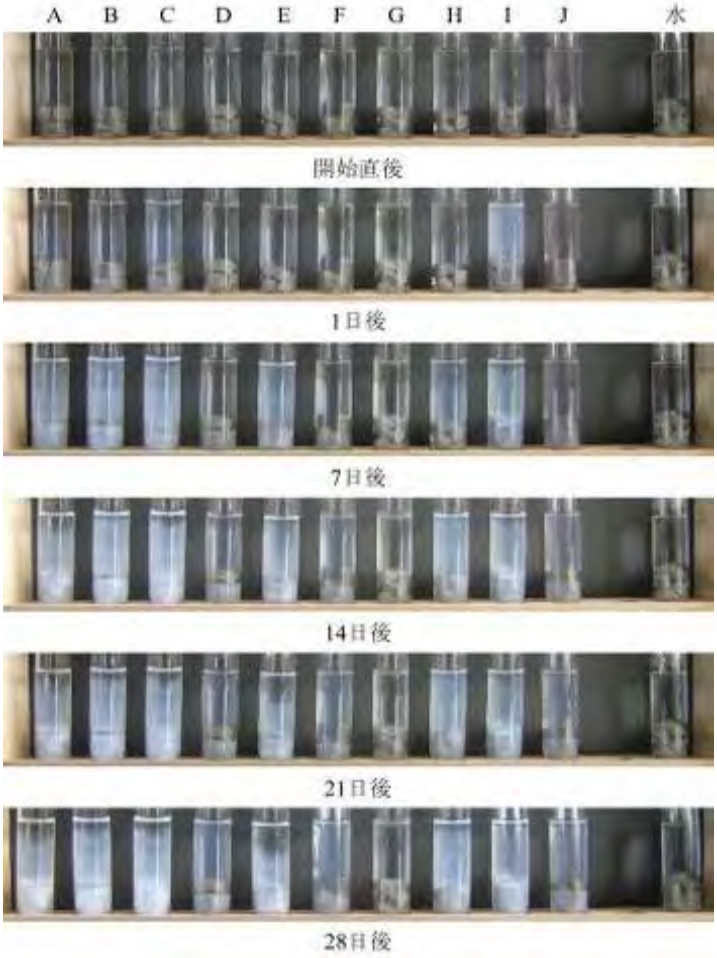
※2　20±5℃の乾燥条件で得られた乾燥固形分率を示す。



図－2　乾燥固化物の溶解状況（JSCE-K 572 に準拠，乾燥条件：105±5℃）



図－3　乾燥固化物の溶解状況（乾燥条件：20±5℃）



図－4　ろ過液の反応性確認試験の結果（常温乾燥固形分を使用）

図－2 と **3** を見ると，乾燥固形分の作製における乾燥時の温度条件の差異により，種類判定の結果に相違のあることが確認できた。JSCE-K 572 に準拠した 105±5℃の乾燥条件では，反応型に分類されるけい酸塩系表面含浸材は，A，B，C，E，J であるのに対し，常温乾燥条件では，I のみ固化型で，他のものはすべて反応型であることが分かる。乾燥条件による試験結果の相違については，先述した通り，既往の文献※参考文献 5 でも指摘されており，含水化合物であるけい酸アルカリの性状が乾燥温度に大きく影響されることに起因するためであった。以後の含浸材単独工法の性能確認における検討では，実施工を想定した常温乾燥固形分率の結果を用いることとした。

図－4 を見ると，G では反応生成物を確認することができない。よって，試験規準に則り，G はけい酸塩系表面含浸材以外の材料と判断できた。

以上より，含浸材の基礎特性の評価に係る①～③の試験で得られた 10 種類の含浸材の基礎特性を**表－3** にまとめる。

表－3　試験対象 10 種類のけい酸塩系表面含浸材の基礎特性のまとめ

記号	比重	pH 値	液色	乾燥固形分率（%）	常温乾燥固形分率（%）	種類
A	**1.25**	**11.4**	**無色透明**	**32.7**	**42.5**	**反応型**
B	1.16	11.1	無色透明	24.2	33.2	反応型
C	**1.06**	**11.3**	**無色透明**	**7.6**	**12.8**	**反応型**
D	1.08	11.1	無色透明	13.6	15.9	反応型
E	1.05	11.4	無色透明	31.6	37.0	反応型
F	1.07	10.5	無色透明	14.5	22.2	反応型
G	1.25	5.9	無色透明	-	38.3	不明
H	1.12	11.0	無色透明	21.5	20.9	反応型
I	1.11	12.0	淡白色透明	18.1	24.4	固化型
J	1.08	11.2	赤橙色透明	17.2	19.4	反応型

表－3 より，試験対象とした 10 種類のけい酸塩系表面含浸材がそれぞれ異なる特性を有していることが確認できた。また，G については，種類判定試験の結果，けい酸塩系表面含浸材以外の材料と判断されることから，以降の試験では対象外とし，その他の 9 種類を使用して検討を進めた。

以後の含浸材単独工法の性能確認における指標の一つとするため，乾燥固形分率試験で得られた結果から，けい酸塩系表面含浸材の塗付量中の乾燥固形分量を算出した。なお，乾燥固形分量は実施工を想定して，常温乾燥固形分率の結果から算出した。算出した結果を**表－4** にまとめる。

表－4　けい酸塩系表面含浸材の塗布量中の常温乾燥固形分率による乾燥固形分量

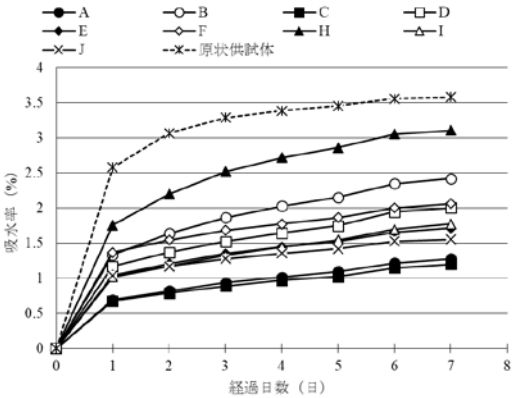
記号	乾燥固形分率（%）	常温乾燥固形分率（%）	主成分※	標準塗布量※（g/㎡）	塗布量中の乾燥固形分量（g/㎡）
A	32.7	42.5	けい酸ナトリウム	300	127.5
B	24.2	33.2	けい酸ナトリウム	300	99.6
C	7.6	12.8	けい酸ナトリウム	500	64.0
D	13.6	15.9	けい酸リチウム	300	47.7
E	31.6	37.0	けい酸ナトリウム、けい酸カリウム	261.25	96.6
F	14.5	22.2	けい酸リチウム	300	66.6
H	21.5	20.9	けい酸リチウム、けい酸ナトリウム、けい酸カリウム	250	52.2
I	18.1	24.4	けい酸リチウム、けい酸ナトリウム	200	48.8
J	17.2	19.4	けい酸ナトリウム、けい酸カリウム	280	54.3

※主成分および標準塗布量は，書類調査結果を記載した。

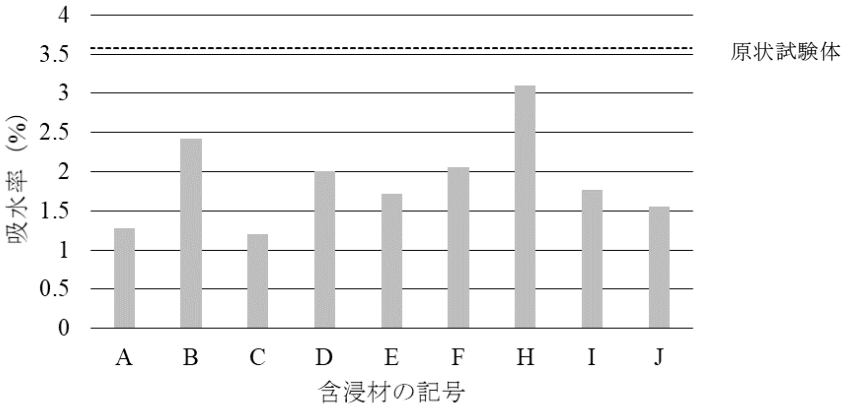
④含浸材を塗布したモルタル供試体の吸水率

モルタル供試体を使用して，けい酸塩系表面含浸材の水分侵入抑止性を検証した。試験方法は JSCE-K572-2012 に則り，一辺 100mm の立方体の対向する 2 面を残し，4 面をシーリング処理した。残り 2 面について含浸材を塗布し，7 日間水中に浸漬させて一日ごとに質量変化量を測定した。水中浸漬前の質量に対する，各時間経過時の水中浸漬後の質量の比を吸水率として算出した。なお，含浸材塗布後から試験開始までの静置期間は 28 日であり，含浸材の塗布量は**表－4** の標準塗布量とした。

けい酸塩系表面含浸材を塗布したモルタル供試体の吸水率の継時変化を**図－5** に，7 日経過時点の吸水率を**図－6** に示す。



図－5　含浸材を塗布したモルタル供試体の吸水率の継時変化



図－6　含浸材塗布供試体の 7 日経過時点の吸水率

図－5 より，原状供試体の吸水率は，試験開始後 1 日経過時点から大きく増加することが分かる。一方，けい酸塩系表面含浸材を塗布した供試体の吸水率は，けい酸塩系表面含浸材の種類にかかわらず，原状供試体よりも小さいことが確認できた。**図－6** より，吸水率の低減効果はけい酸塩系表面含浸材の種類により差異があり，吸水率の増加は H を塗布した供試体で最も大きく，A と C を塗布した供試体で最も小さくなった。よって，開発対象材料である A と C の含浸材の優位性が明らかとなった。

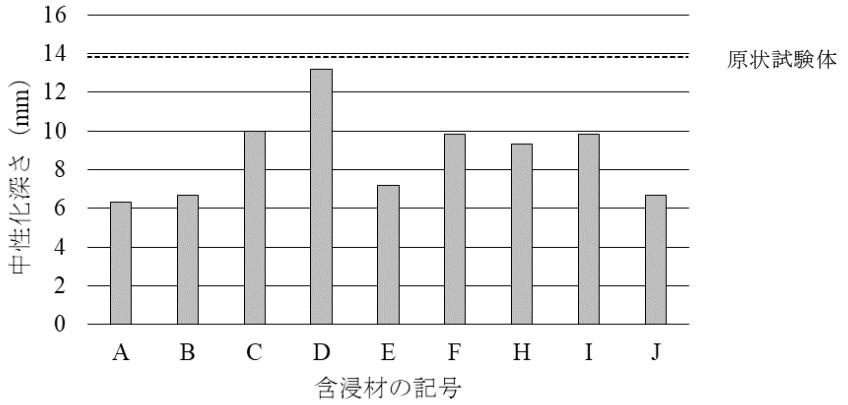
一方，吸水抑止性と塗布量中の乾燥固形分量との相関関係は確認できなかった。

以上のことから，けい酸塩系表面含浸材の塗布により供試体の吸水率は小さくなり，水分侵入抑止性を発揮することが確認できた。そして，本事業で対象とする A，C の両者とも，吸水率改善の点で他の含浸材よりも優位性を有することが明らかとなった。

⑤中性化に対する抵抗性

けい酸塩系表面含浸材の中性化に対する抵抗性を評価した。試験方法は JSCE-K572-2012 に則り，一辺 100mm の立方体の対向する 2 面を残し，4 面をシーリング処理した。残り 2 面について含浸材を塗布し，JIS A 1153 に則り，促進期間 4 週間で促進中性化を行った。促進試験後，供試体を割裂して 1.0%濃度のフェノールフタレイン溶液を噴霧し，供試体表面から変色域までの深さを中性化深さとした。含浸材塗布後から試験開始までの静置期間は 28 日であり，含浸材の塗布量は**表－4** の標準塗布量とした。

けい酸塩系表面含浸材を塗布したモルタル供試体の中性化深さを**図－7** に示す。



図－7　含浸材塗布供試体の中性化深さ

図－7 より，全体として，けい酸塩系表面含浸材の塗布により，供試体表面からの炭酸ガスの侵入抑制が可能となり，供試体の中性化深さは小さくなることが確認できた。つまり，けい酸塩系表面含浸材の塗布は，コンクリートの中性化に対する抵抗性を向上させることが示された。けい酸塩系表面含浸材の種類ごとの抵抗性の差異を見ると，A，B，E，J を塗布した供試体の中性化深さは比較的小さくなるのに対し，D を塗布した供試体では無塗布供試体と同程度となった。

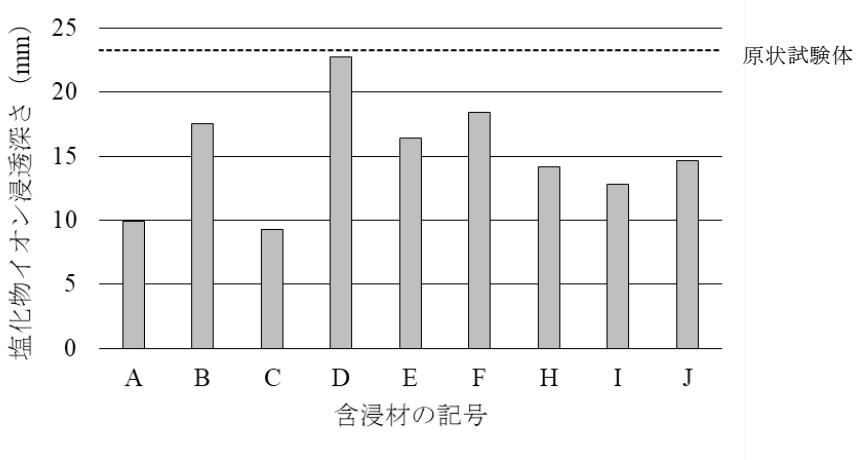
塗布量中の乾燥固形分量に着目すると，固形分量が最も多い A が最も中性化深さが小さく，固形分量が最も少ない D が最も中性化深さが大きい結果となった。固形分量が比較的少ないにも関わらず中性化深さが小さくなった J を除くと，固形分量が多いものは中性化抑止性も高い傾向が示された。

本実験結果より，開発対象材料である A の中性化抑止性が他と比較して優れていること，C は A には劣るものの原状試験体と比較して中性化抑止性を有していること，の二点が確認できた。

⑥塩化物イオン浸透に対する抵抗性

けい酸塩系表面含浸材の塩化物イオン浸透に対する抵抗性を評価した。試験方法は JSCE-K572-2012 に則り，一辺 100mm の立方体の対向する 2 面を残し，4 面をシーリング処理した。残り 2 面について含浸材を塗布し，濃度 3%の塩水に浸漬させて 4 週間静置した。静置後，供試体を割裂して 0.1 mol/L 硝酸銀溶液を噴霧し，供試体表面から変色域までの深さを塩化物イオンの浸透深さとした。含浸材塗布後から試験開始までの静置期間は 28 日であり，含浸材の塗布量は**表－4** の標準塗布量とした。

けい酸塩系表面含浸材を塗布したモルタル供試体の塩化物イオン浸透深さ**図－8** に示す。



図－8　含浸材塗布供試体の塩化物イオン浸透深さ

図－8 より，全体として，けい酸塩系表面含浸材を塗布することで，供試体表面からの塩化物イオンの浸透を抑制することができ，原状供試体よりも塩化物イオンの浸透深さは小さくなることが確認できた。ただし，含浸材の種類ごとの差異を見ると，D は塩化物イオンの浸透に対する抵抗性をほとんど発揮しておらず，A と C は最も抵抗性の高いことが明らかとなった。

塗布量中の乾燥固形分量に着目すると，A と D について，固形分量が最も多い A は塩化物イオンの浸透深さが小さく，固形分量が最も少ない D は塩化物イオンの浸透深さが大きく，中性

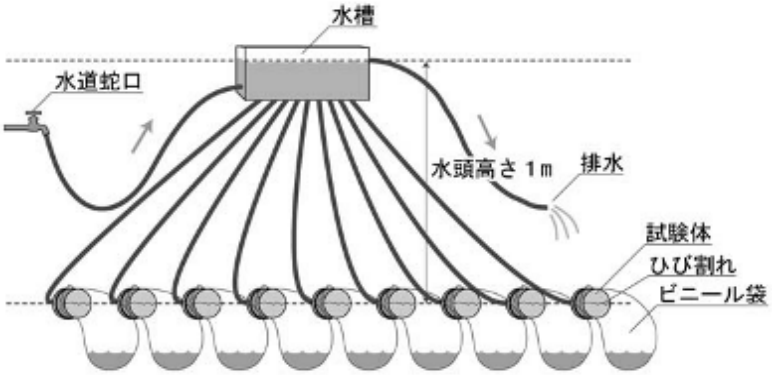
化抑止性と同様の傾向が確認できた。

以上の結果から，開発対象材料である A と C の含浸材における塩化物イオンの浸透に対する抵抗性の優位性が明らかとなった。

⑦ひび割れ透水性

農業用コンクリート水路におけるひび割れ補修方法において，ひび割れ幅が小さい場合（幅 0.2mm 未満）は表面被覆工法を適用することとなっている。ただし，背面からの滲出水がある場合はこれを適用できない。表面含浸材には，幅 0.2mm の漏水ひび割れに対する補修効果が期待できることから，ひび割れからの漏水抑止性を検証するために，JSCE-K572-2012 に準拠したひび割れ透水性試験を実施した。本試験は，JIS K 6741 に規定する呼び径 75mm の VU 管に打設したコンクリート供試体について，事前に割裂試験により貫通ひび割れを導入し，加圧透水試験を実施するものである。試験装置は**図－9** に示す通りであり，1m となる水頭圧を作用させることが可能なものとする。一つの試験体の寸法は直径 75mm，高さ 50mm であり，本試験では，割裂後に測定した貫通ひび割れ幅が 0.02mm～0.18mm のコンクリート供試体を 100 個用意し，含浸材塗布前の状態（原状供試体）で透水試験を実施し，透水量ごとに 3 区分にグルーピングした。

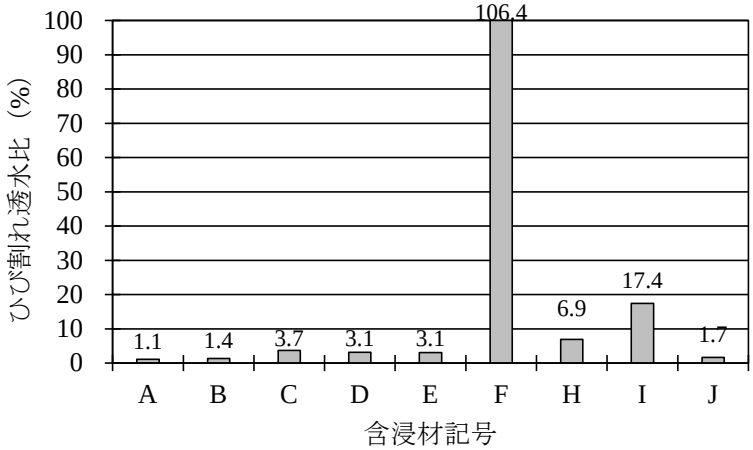
原状供試体のグループを**表－5** に示す。それぞれの区分ごとに任意に供試体を抽出して各けい酸塩系表面含浸材を塗布し，原状供試体の透水量区分およびけい酸塩系表面含浸材の種類ごとの漏水抑止性を検証した。含浸材塗布後から試験開始までの静置期間は 28 日であり，含浸材の塗布量は**表－4** の標準塗布量とした。試験結果は，原状供試体の透水量に対する含浸材塗布後の透水量の比をひび割れ透水比として表す。試験結果を**図－10，11，12** に示す。



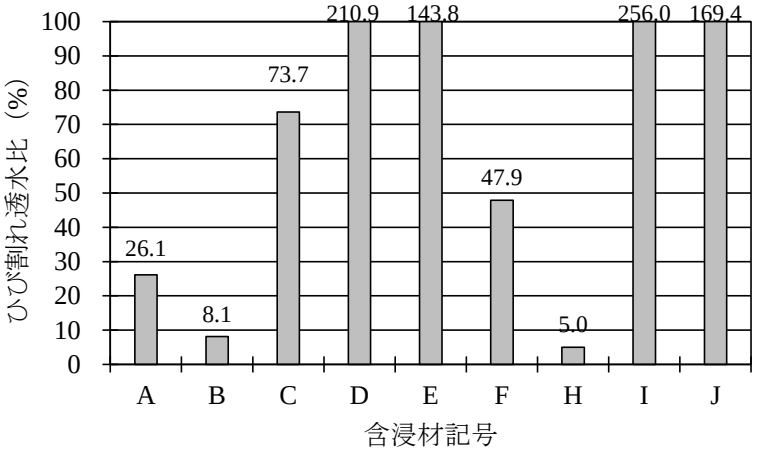
図－9　ひび割れ透水性試験装置の例

表－5　原状供試体のグループ

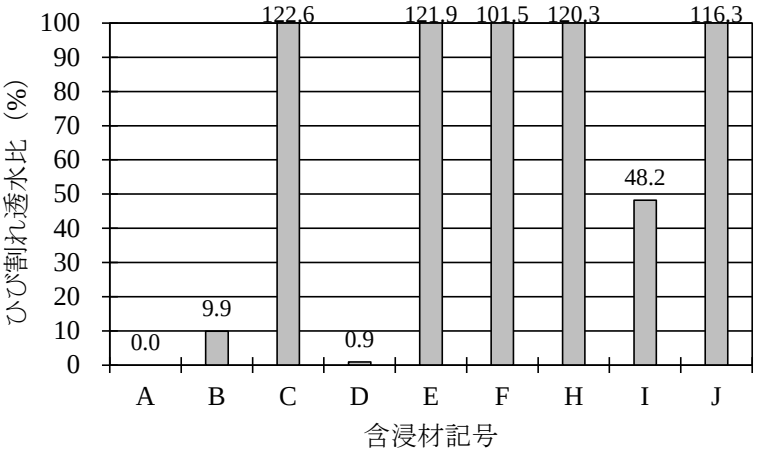
透水量区分	透水量（g/day）	平均透水量（g/day）	ひび割れ幅（mm）	平均ひび割れ幅（mm）
小	5～979	432	0.03～0.07	0.04
中	1017～5976	3454	0.02～0.09	0.05
大	7176～433656	38360	0.03～0.18	0.07



図－10　含浸材塗布供試体のひび割れ透水比
（原状供試体の透水量区分：小）



図－11　含浸材塗布供試体のひび割れ透水比
（原状供試体の透水量区分：中）



図－12　含浸材塗布供試体のひび割れ透水比
（原状供試体の透水量区分：大）

図－10，11，12 より，原状供試体の透水量区分ごとに，ひび割れ透水比は異なることが確認できる。透水量区分：小では，F を除き，全体としてけい酸塩系表面含浸材による透水抑制効果が十分に発揮されていることが分かる。とくに，A，B，J は，非常に優れた透水抑制効果を示した。

一方，透水量区分の中と大では，ほとんどのけい酸塩系表面含浸材においてひび割れ透水比が 100%以上，すなわちけい酸塩系表面含浸材塗布前よりもひび割れからの透水量が大きい，という結果となった。また，A，D，I では，透水量区分：中よりも大の方が，ひび割れ透水比は小さくなるなど，けい酸塩系表面含浸材の透水抑制効果を正確に評価することは困難であった。

以上のことから，現時点では，けい酸塩系表面含浸材の透水抑制効果は，原状供試体の透水量が少ないひび割れに対しては十分に発揮されるが，ひび割れが大きく，透水量の多い場合には効果の得られない可能性が示された。しかしながら， 塗布量中の乾燥固形分量に着目すると，固形分量が多い A と B はいずれの透水量区分においても，透水抑制効果が高いことが確認できた。

以上より，透水抑制効果を正確に評価できたと考えられる透水量区分：小の結果に基づくと，開発対象材料である A と C は，いずれも優れたひび割れ補修性を有していると確認できた。

⑧表層引張強度

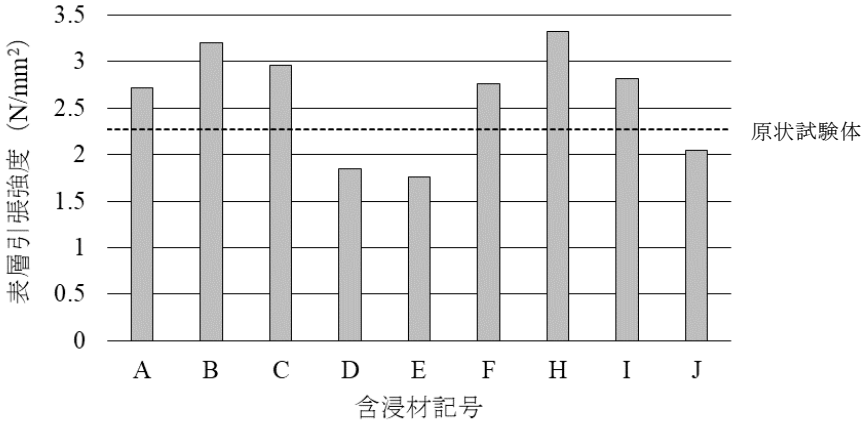
図－13 に示す建研式付着力試験機を用いて，けい酸塩系表面含浸材を塗布したコンクリート平板供試体の表層引張強度を測定し，表層部の緻密化による表層品質の向上効果を評価した。なお，この試験は，前述の土木学会規格※参考文献 6 を適用し，後述の PCM 単独工法および複合工法の付着力試験と同様に建研式付着力試験機を用いた試験であるが，表面含浸材単独利用の場合，試験体に塗布した材料は試験体に含浸するため，材料の付着性を評価するものではなく，表層部の緻密化による改質効果を判定することを目的としたものである。

試験方法として，呼び強度 27N/mm^2，水セメント比 45%で作製したコンクリート平板（300×300mm，厚さ 60mm）に含浸材を塗布し，含浸材塗布面においてエポキシ樹脂で接着させた 40×40mm の鋼製治具を一軸引張することで，引張強度を測定した。含浸材塗布後から試験開始までの静置期間は 28 日であり，含浸材の塗布量は**表－4** の標準塗布量とした。同一面について 3 箇所の測定を実施した。

けい酸塩系表面含浸材を塗布したコンクリート供試体の表層引張強度を**図－13** に示す。破断面の状況はすべて母材破断であった。

※参考文献 6　JSCE-K 572-2012 けい酸塩系表面含浸材の試験方法（案），（公社）土木学会『コンクリートライブラリー137 けい酸塩系表面含浸工法の設計施工指針（案）』，p.205

図－13　建研式付着力試験機



図－14　含浸材の単独工法を適用したコンクリート供試体の表層引張強度

図－14 より，全体として，けい酸塩系表面含浸材を塗布した供試体の表層引張強度は，無塗布のものと比較して大きくなることが確認できた。特に，B，C，H のけい酸塩系表面含浸材を塗布することで，供試体の表層引張強度は 0.5N/mm^2 以上増加した。

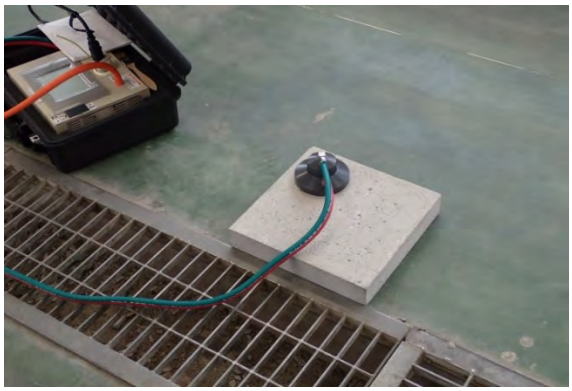
一方，D，E，J は，無塗布のものよりも表層引張強度が小さくなることが確認された。したがって，けい酸塩系表面含浸材の塗布が表層引張強度に及ぼす影響は含浸材の種類ごとに差異があり，含浸材によっては表層引張強度の増加に寄与しないものもあることが確認できた。また，塗布量中の乾燥固形分量と表層引張強度の相関関係は確認できなかった。

本実験結果より，開発対象材料である A と C は，いずれも表層引張強度の増加に寄与し，特に C は，9 種類の含浸材の中でも比較的大きい数値を示すことが確認できた。

⑨表層透気係数

透気試験機を用いてコンクリート表層部の透気係数を測定し，表層部の緻密性の向上効果を評価した。試験方法として，呼び強度 27N/mm^2，水セメント比 45%で作製したコンクリート平板（300×300mm，厚さ 60mm）に含浸材を塗布し，含浸材塗布面において，**図－15** に示すような二重構造のチャンバーを有する透気試験機を用いて表層部の透気係数を測定した。本試験機は，二重チャンバーを有することにより，横方向からの空気の取り込みの影響を外側のチャンバーで除外することで，内側のチャンバーが深さ方向のみの透気性を測定できる仕組みのものである。本試験方法は，現在までに日本では規格化されていないが，スイス規格（SIA 262：2003）が存在しており，同規格に準拠して測定と評価を行った。同規格の透気係数による品質グレードを**表－6** に示す。含浸材塗布後から試験開始までの静置期間は 28 日であり，含浸材の塗布量は**表－4** の標準塗布量とした。同一面について 3 箇所の測定を実施した。

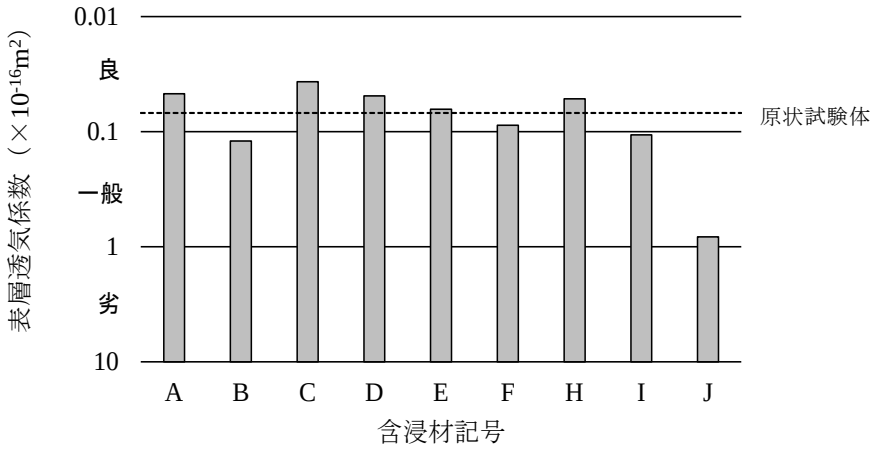
けい酸塩系表面含浸材を塗布したコンクリート供試体の表層透気係数を**図－16** に示す。



図－15　本試験で使用したトレント式表層透気試験機

表－6　透気係数による品質のグレード

透気係数(×10^{-16}m^2)	0.001～0.01	0.01～0.1	0.1～1	1～10	10～100
透気性グレード	1	2	3	4	5
透気性評価	優	良	一般	劣	極劣



図－16　含浸材の単独工法を適用したコンクリート供試体の表層透気係数

図－16 より，全体として，透気性グレード：2／透気性評価：良の良好な試験結果を示したもののうち，特に A，C，D，H の含浸材を塗布した供試体は比較的小さい表層透気係数を示し，F および透気性グレード：3／透気性評価：一般の試験結果を示した B，I，J を塗布した供試体では，無塗布供試体よりも表層透気係数が増加することが確認できた。このことから，含浸材ごとに透気係数に及ぼす影響は異なることが確認された。

本事業では，含浸材塗布による表層部の緻密化を評価するために，表層引張強度試験と表層透気試験の 2 種類の試験を実施した。これらの 2 種類の試験結果を比較すると，例えば B の含浸材のように，表層引張強度の向上（強度の増加）には寄与するが，表層透気係数の向上（係数の減少）には寄与しない含浸材が確認された。また，含浸材の塗布量中の乾燥固形分量との相関関係はいずれの試験においても確認できなかった。

以上の結果を整理すると，開発対象材料である A と C を塗布することで，いずれも表層透気係数は小さくなり，9 種類の含浸材の中でも両材料は優れた透気係数を示すことが確認できた。

⑩耐摩耗性

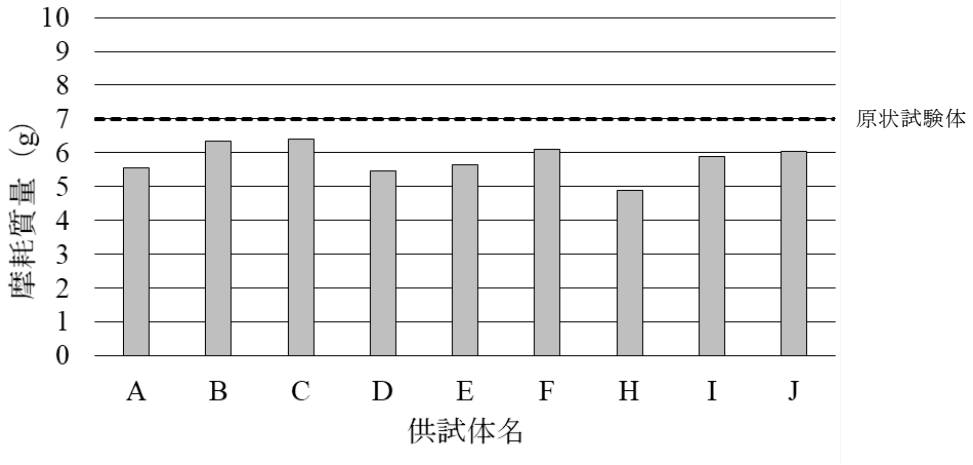
農業水利施設に特有の劣化である摩耗に対する抵抗性を評価した。試験方法は**図－17** に示すサンドブラスト装置を使用した先述のサンドブラスト法であり，研磨材には粒度範囲 425～500μm，新モース硬度 12 のアルミナ製研磨材を使用し，研磨材の噴射時間は 10 秒とした。本実験では，摩耗の進行による骨材露出が試験結果に及ぼす影響を極力排除するために，モルタルを供試体とした。モルタル供試体は, W/C=55%, S/C=3.0 で作製した立方体（100×100×100mm）であり，立方体の 6 面のうち，型枠接触面で対向する 2 面に含浸材を塗布し，試験面とした。含浸材塗布後から試験開始までの静置期間は 28 日であり，含浸材の塗布量は**表－4** の標準塗布量とした。各試験面について 1 回ずつの試験を実施した。

けい酸塩系表面含浸材を塗布したモルタル供試体の摩耗質量を**図－18** に示す。**図－18** より，けい酸塩系表面含浸材を塗布した供試体の摩耗質量は，すべて無塗布の供試体よりも小さくなることが確認された。よって，含浸材塗布による耐摩耗性の向上が示された。また，他の試験と同様に，含浸材ごとに試験結果に及ぼす影響には差異があり，耐摩耗性の向上については，含浸材 H が最も効果的であることが確認できた。また，含浸材の塗布量中の乾燥固形分量との相関関係は確認できなかった。

以上の結果を整理すると，開発対象材料である A と C は，他の含浸材と比較して耐摩耗性の優位性は見られないものの，原状試験体と比較して耐摩耗性の向上効果を有することが確認できた。

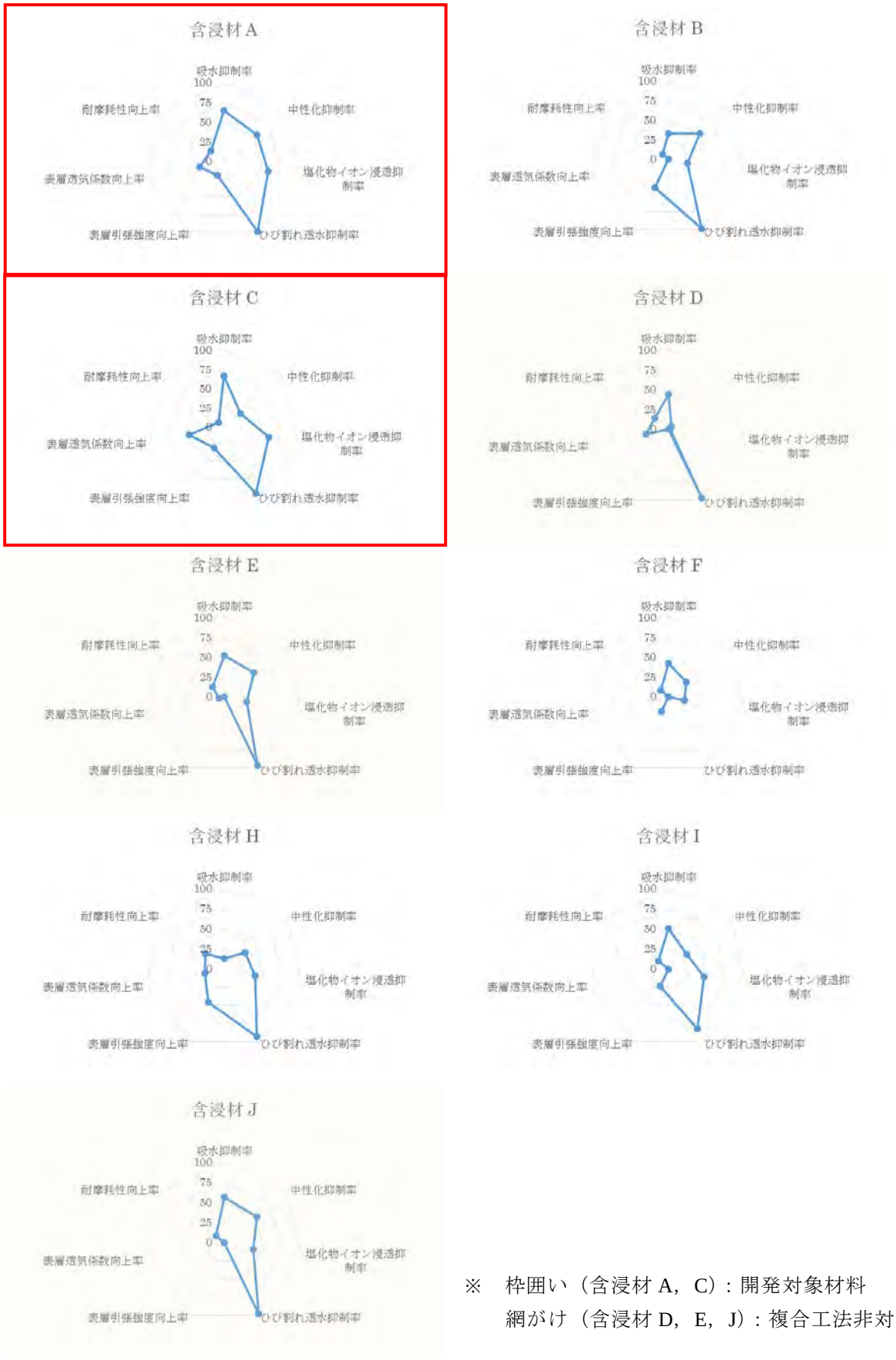
① サンドブラスト本体
高さ1750mm，幅700mm，奥行900mm
② コンプレッサー
③ バキューム（回収）ホース
バキュームガン
ブラスト（研磨材）ホース

図－17　本試験で使用したサンドブラスト装置の外観



図－18　含浸材の単独工法を適用したモルタル供試体の摩耗質量

以上のけい酸塩系表面含浸材の単独工法における試験結果を**図－19** に整理した。



※　枠囲い（含浸材 A，C）：開発対象材料
　　網がけ（含浸材 D，E，J）：複合工法非対象

図－19　含浸材の単独工法における試験結果のまとめ

図－19 では，各試験結果の数値について，含浸材無塗布供試体の試験結果に対する各含浸材塗布供試体の試験結果の比率で示した。良好な試験結果の場合，数値が大きくなるよう，試験によっては逆比を適用した。

図－19 より，開発対象材料 A，C および比較検討用材料 H は，すべての試験を通して，総合的に良好な試験結果を得られたことが確認できた。また，含浸材 B と I は，表層透気係数比は大きな数値となったものの，総合的には比較的良好な試験結果であると評価できる。

なお，けい酸塩系表面含浸材と PCM との複合工法において，両者の組合せの相違により，含浸材単独の性能が複合工法の性能に及ぼす影響が明確ではないが，両者の付着力に最も影響があると考えられる表層引張試験の結果を重視し，複合工法の性能確認試験では，表層引張強度が低かった D，E，J を除く 6 種類のけい酸塩系表面含浸材を対象とした。

（1）－２　無機系被覆材単独利用の場合の性能確認

現在市販されており施工実績のある PCM 20 種類について書類にて実態調査を行い，各メーカーの示す主成分や施工実績を参考に，本事業の開発対象材料の比較対象用材料として 4 種類の材料を選定した。

以降の本文および図表では，開発対象材料 2 種類を 1，2，比較検討用材料 4 種類を 3~6 として表記する。試験対象とした 6 種類の PCM の概要を**表－7** にまとめる。

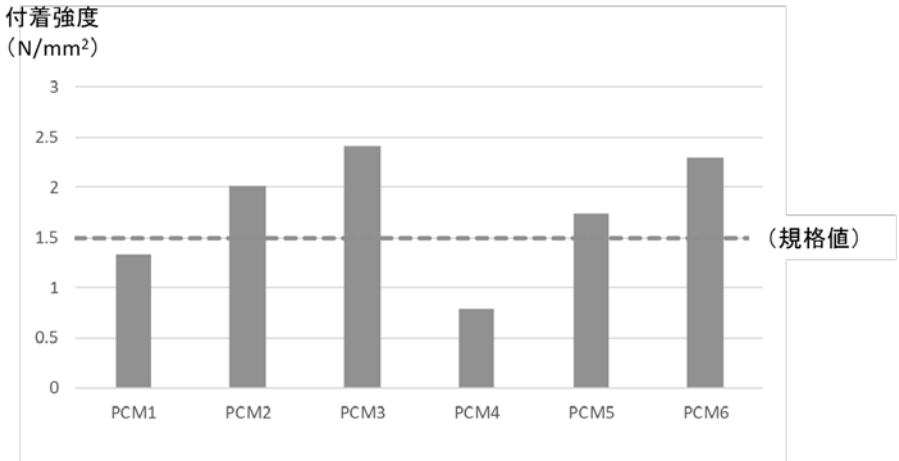
表－7　試験対象 6 種類の PCM の概要

番号	概要
PCM1	**形態：プレミックス** **主成分：普通セメント，繊維配合，アクリル樹脂** **練上り比重：2.10（立米あたり材料：粉体 1,800kg+水 297 kg）**
PCM2	**形態：プレミックス** **主成分：速硬セメント，繊維配合，アクリル樹脂** **練上り比重：2.14（立米あたり材料：粉体 1,825kg+水 310 kg）**
PCM3	形態：粉体と混和材を現地で混合して使用 主成分：普通セメント，繊維配合，アクリルエマルジョン 練上り比重：2.05（立米あたり材料：粉体 1,775kg+混和材 71kg+水 202kg）
PCM4	形態：プレミックス 主成分：普通セメント，繊維配合，アクリル樹脂 練上り比重：2.10（立米あたり材料：1,800kg+水 300 kg）
PCM5	形態：粉体と混和材を現地で混合して使用 主成分：普通セメント，繊維配合，アクリルエマルジョン 練上り比重：2.06（立米あたり材料：1,860kg+混和材 149kg+水 149kg）
PCM6	形態：プレミックス 主成分：普通セメント，高炉スラグ，繊維配合，アクリル樹脂 練上り比重：2.14（立米あたり材料：粉体 1,840kg+水 304 kg）

①付着強度試験

建研式付着力試験機を用いて，PCM を塗布したコンクリート平板供試体の付着強度を測定し，PCM の付着性を評価した。試験方法として，呼び強度 27N/mm^2，水セメント比 45%で作製したコンクリート平板（300×300mm，厚さ 60mm）に PCM 被覆し，PCM 被覆面においてエポキシ樹脂で接着させた 40×40mm の鋼製治具を一軸引張することで，付着強度を測定した。PCM はコテ塗りで厚さ 15mm に仕上げた。PCM 被覆後 28 日間経過した後に試験に供し，同一面について 3 箇所の測定を実施した。

PCM 被覆したコンクリート供試体の付着強度を**図－18** に示す。参考のため，マニュアル規格値の 1.5N/mm^2（標準条件）を破線で示した。なお，破断面の状況はすべて母材破断であった。



図－20　PCM の単独工法を適用したコンクリート供試体の付着強度

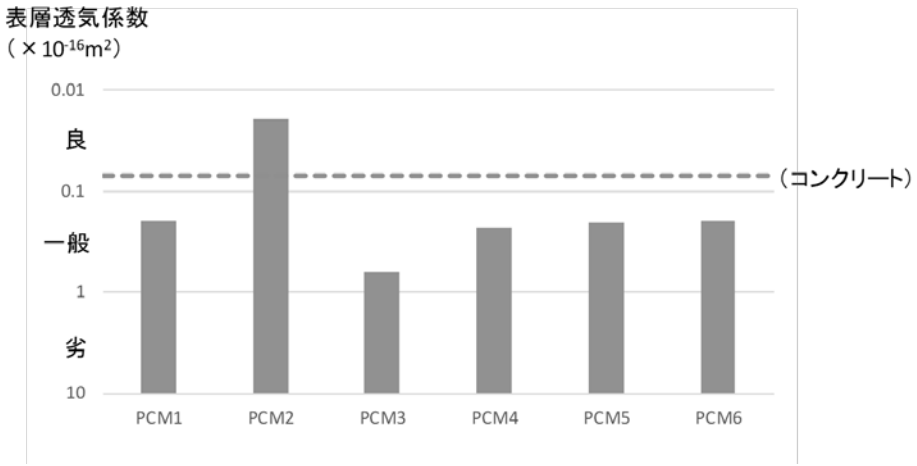
図－20 より，PCM の種類ごとに付着強度には差異があり，なかでも PCM 2，3，6 の付着強度は 2.0N/mm^2 以上と比較的大きな数値を示すことが確認できた。一方，PCM 4 の付着強度は 1.0N/mm^2 以下となり，他と比較して著しく小さくなった。

これらの PCM 自体の付着強度が，含浸材を塗布することでどのように変化するのかを複合工法の試験において確認することとした。

②表層透気試験

表層透気試験機を用いて，PCM を塗布したコンクリート表層部の透気係数を測定し，表層部の緻密性を評価した。試験方法としては，呼び強度 27N/mm^2，水セメント比 45%で作製したコンクリート平板（300×300mm，厚さ 60mm）に PCM を被覆し，二重構造のチャンバーを有する表層透気試験機を用いて表層部の透気係数を測定した。PCM はコテ塗りで厚さ 15mm に仕上げた。PCM 被覆後 28 日間経過した後に試験に供し，同一面について 3 箇所の測定を実施した。

PCM で被覆したコンクリート供試体の表層透気係数を**図－19** に示す。参考のため，前述のけい酸塩系表面含浸材単独工法の表層透気試験において得られた含浸材無塗布コンクリート供試体の表層透気係数 0.069（×10^{-16}m^2）を破線で示した。



図－21　PCM の単独工法を適用したコンクリート供試体の表層透気係数

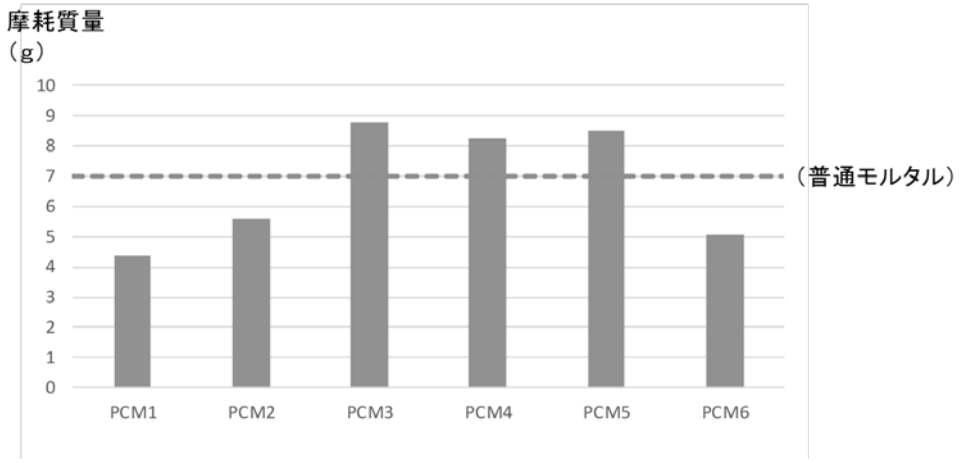
図－21 より，PCM の種類ごとに表層透気係数には差異があり，特に透気性グレードが２（透気性評価：良）を示した PCM 2 は他と比較して著しく小さい表層透気係数が得られたことから，他の製品よりも表層部の物質移動抵抗性の高いことが確認できた。

一方，PCM 3 の表層透気係数は，透気性グレードが３（／透気性評価：一般）を示したものの，他と比較して明らかに大きくなった。このことから，PCM 3 は，付着強度試験では良好な結果が得られたものの，表層透気試験においては他と比べて良好な結果は得られず，両試験における種類ごとの試験結果の良否には，必ずしも明確な関係性は存在しないことが推察された。

③耐摩耗性試験

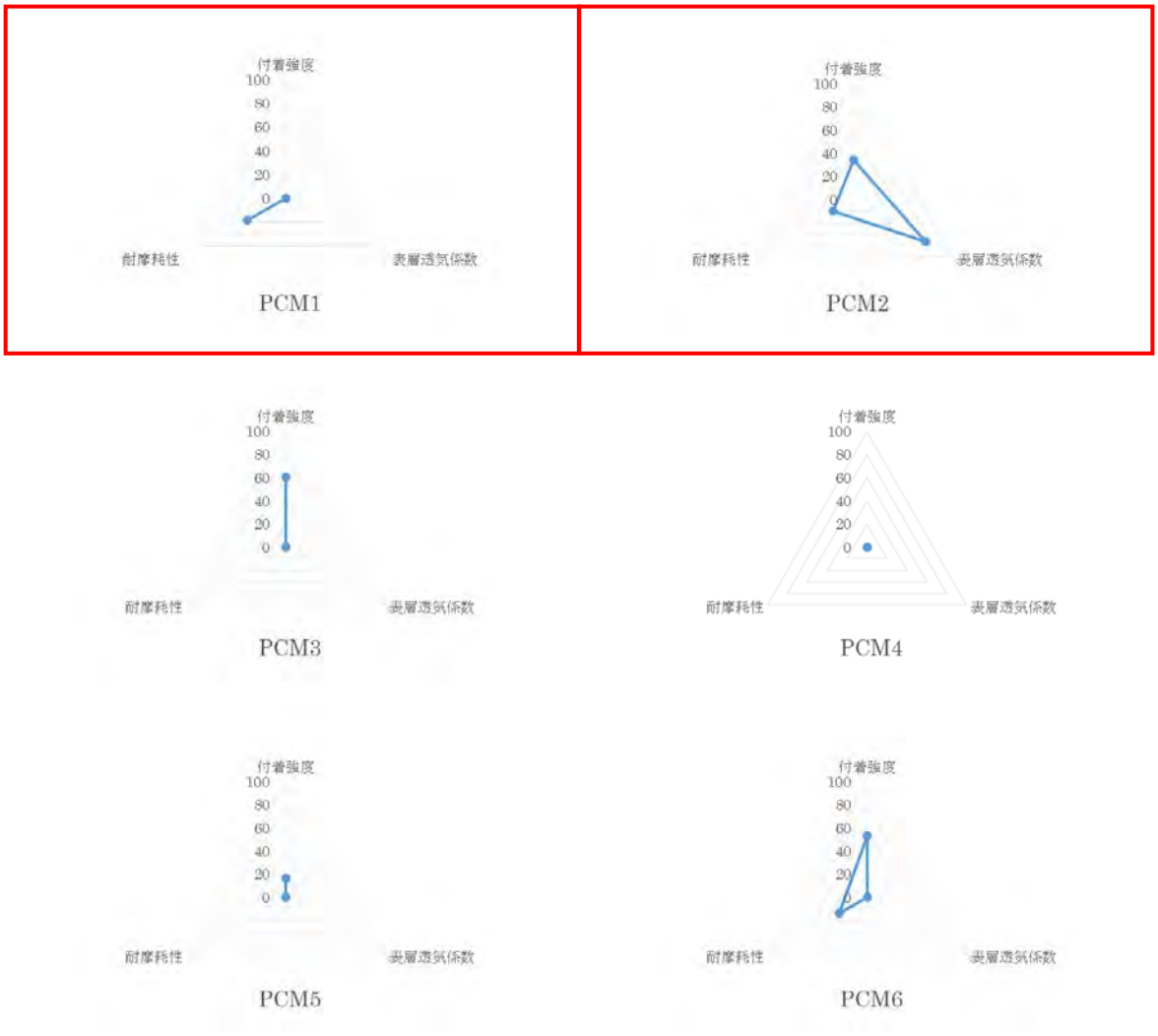
PCM の耐摩耗性を評価した。試験方法は，けい酸塩系表面含浸材の単独工法の試験と同様に，P.2 で概説した通りである。研磨材には粒度範囲 425～500μm，新モース硬度 12 のアルミナ製研磨材を使用し，研磨材の噴射時間は 10 秒とした。呼び強度 27N/mm^2，水セメント比 45%で作製したコンクリート平板（300×300mm，厚さ 60mm）に PCM 被覆し，サンドブラスト法により摩耗質量を測定した。PCM はコテ塗りで厚さ 15mm に仕上げた。PCM 被覆後 28 日間経過した後に試験に供し，同一面について 3 箇所の測定を実施した。

PCM 被覆したコンクリート供試体の摩耗質量を**図－20** に示す。参考のため，前述のけい酸塩系表面含浸材単独工法の耐摩耗性試験において得られた含浸材無塗布普通モルタル供試体の摩耗質量 7.0（g）を破線で示した。



図－22　**PCM の単独工法を適用したコンクリート供試体の摩耗質量**

図－22 より，PCM の種類ごとに摩耗質量には差異があり，とくに PCM 1，2，6 の摩耗質量は比較的小さく，耐摩耗性が高いと評価できる。一方，PCM 3，4，5 の摩耗質量は同程度であり，前述の 3 種類と比較して耐摩耗性は小さいことが確認できた。



※　枠囲い（PCM 1，2）：開発対象材料

図－23　**PCM の単独工法における試験結果のまとめ**

以上の PCM の単独工法における試験結果について，各試験の参考値に対する向上率で**図－23** のように整理する。総合的に良好な試験結果となったものは，開発対象材料 PCM 2 であった。

（1）－3　複合工法の性能確認

前述のように選定した 6 種類のけい酸塩系表面含浸材と 6 種類の PCM を使用して，複合工法による表層品質の向上効果を検証した。複合工法の試験方法は，P.4 で述べた通りであるが，表面にけい酸塩系表面含浸材と PCM を塗布したコンクリート平板（300×300mm, 厚さ 60mm）を使用した。供試体の作製手順として，まずコンクリート平板へ含浸材を塗布し，各メーカー指定の養生方法（定期的な散水の有無）に従い 28 日間養生した。その後に PCM 被覆（厚さ 15mm：コテ塗り）を行った。PCM 被覆後 7 日が経過した時点で PCM 上面へ含浸材塗布を行い，塗布後 28 日間経過した後に試験に供した。含浸材の塗布量は**表－4** の標準塗布量とした。

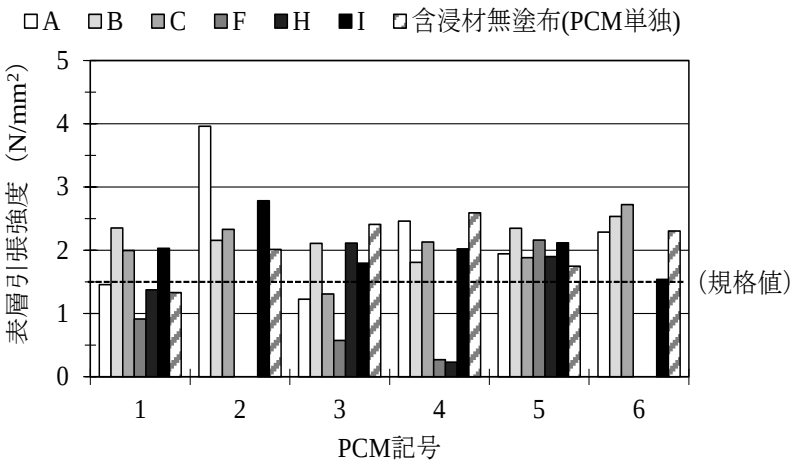
①付着強度

複合工法における表層品質，すなわち含浸材塗布による PCM の表層品質の向上効果を検証するために，建研式付着力試験機を用いて付着強度を測定した。測定面においてエポキシ樹脂で接着させた 40×40mm の鋼製治具を一軸引張することで，付着強度を測定した。同一面について 3 箇所の測定を実施した。けい酸塩系表面含浸材と PCM との複合工法を適用した供試体を使用して得られた試験結果を**図－24** に，けい酸塩系表面含浸材の塗布による PCM の付着強度の向上率を**表－8** に示す。

F と H の含浸材を使用したケースのうち，PCM2 と含浸材 F，H および PCM6 と含浸材 F，H の組合せにおいて，複数回の再試験をしても破断面が座金と供試体の界面であり，付着強度の測定が不可能であった。これは，材料の相性により含浸材が PCM 表面に滞留してガラス質を形成したことが原因と考えられた。したがって，F や H の含浸材は，PCM に対しては含浸しにくいことが推察された。F と H の含浸材の特徴として，**表－4** より，F は本事業で使用した含浸材の中で唯一，主成分がけい酸リチウム単独であり，H の主成分はけい酸リチウム，けい酸カリウム，けい酸ナトリウムの複合である。よって，主成分にけい酸リチウムが含まれる含浸材は PCM への浸透が困難になる可能性がある。一方， I の主成分にもけい酸リチウムが含まれているが，上記のような測定不可能になる現象は確認されなかった。このことから，主成分の配合割合において，けい酸リチウムの占める割合が大きいものほど，PCM への浸透が難しくなることが示唆された。

本実験では，試験後の破断面の状況は，①母材破断，②PCM と母材との界面破断，③PCM 破断，④PCM と座金との界面破断，という複数種類が確認されており，現時点では得られた表層引張強度を単純比較し，組合せの良否を正確に評価することは困難である。しかしながら，全体として，PCM に含浸材を塗布することで，PCM 単独と比較して付着強度は増加するケースが多いことが確認できた。

以上より，開発対象材料である PCM1 と 2 および含浸材 A と C について整理すると，いずれの組み合わせにおいても含浸材を塗布することで付着強度は増加することが確認できた。特に PCM2 と含浸材 A の組合せにおいて，最も大きい付着強度の向上率を示した。



図－24　けい酸塩系表面含浸材と PCM との複合工法における付着強度

表－8　けい酸塩系表面含浸材の塗布による PCM の付着強度の向上率※（%）

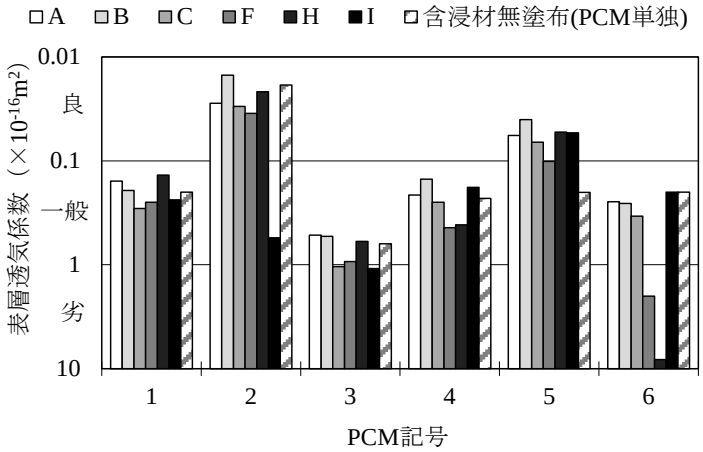
	A	B	C	F	H	I
1	10	77	50	0	3	52
2	97	7	16	－	－	38
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	11	34	8	24	9	21
6	0	10	18	－	－	0

※ 含浸材無塗布（PCM 単独）に対する増加率を示す。付着強度が増加するほど向上率は大きくなる。

網掛け表記は向上している条件を示す。

②表層透気係数

二重構造のチャンバーを有する透気試験機を用いて表層部の透気係数を測定し，複合工法における表層部の緻密性を評価した。同一面について 3 箇所の測定を実施した。複合工法で得られた表層透気係数を**図－25** に，けい酸塩系表面含浸材の塗布による PCM の表層透気係数の向上率を**表－9** に示す。



図－25　けい酸塩系表面含浸材と PCM との複合工法における表層透気係数

表－9　けい酸塩系表面含浸材の塗布による PCM の表層透気係数の向上率※（%）

	A	B	C	F	H	I
1	22	3	0	0	32	0
2	0	20	0	0	0	0
3	17	15	0	0	5	0
4	7	35	0	0	0	22
5	72	80	67	50	74	73
6	0	0	0	0	0	0

※ 含浸材無塗布（PCM 単独）に対する向上率を示す。透気係数が小さくなるほど向上率は大きくなる。
網掛け表記は向上している条件を示す。

まず，**図－25** より，2 と 5 の PCM を被覆した供試体では一部（PCM 2＋含浸材 I，PCM5＋含浸材 F の組合せ）を除き，概ね含浸材の種類にかかわらず表層透気係数は $0.1\times10^{-16}m^2$ 以下という小さい値であり，緻密性の高いことが示された。一方，PCM 3 では，いずれの含浸材を使用した場合でも，表層透気係数は $1.0\times10^{-16}m^2$ 付近という大きい値を示した。

次に，**表－9** より，含浸材の塗布による表層透気係数の向上率を見ると，PCM 5 では，塗布する含浸材の種類にかかわらず，表層透気係数は大きく改善することが確認された。しかしながら，全体としては，含浸材の塗布により表層透気係数が改善する組合せは少なかった。

以上の結果より，全体的な傾向として，PCM にけい酸塩系表面含浸材を塗布しても，表層透気係数が向上する組合せは少なかった。しかしながら，得られた表層透気係数の数値自体に着目すると，PCM 2 および 5 とけい酸塩系表面含浸材の組合せにおいては，比較的表層透気係数は小さい値となることが示された。

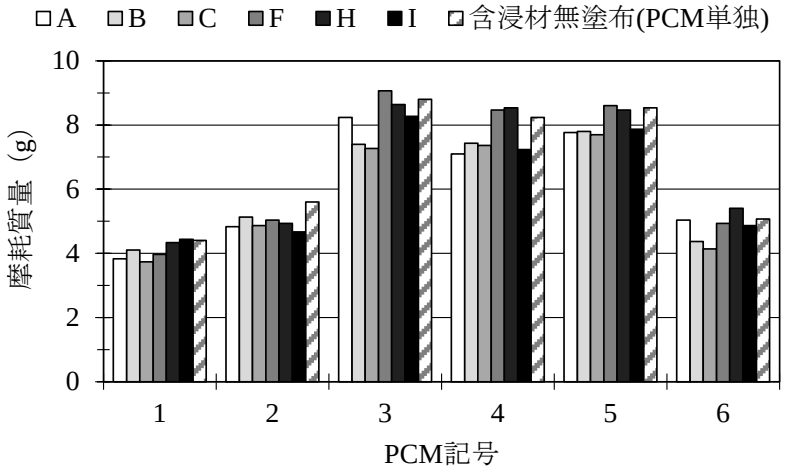
開発対象材料である PCM1 と 2 および含浸材 A と C について整理すると，表層透気係数が向上する組合せは，PCM1 と含浸材 A の組合せのみであった。したがって，開発対象材料の組合せは，表層透気係数の向上には大きく寄与しない可能性が示された。

③耐摩耗性

サンドブラスト法により，複合工法の耐摩耗性を評価した。試験方法は，各材料の単独工法の試験と同様であり，研磨材には粒度範囲 425～500μm，新モース硬度 12 のアルミナ製研磨材を使用し，研磨材の噴射時間は 10 秒とした。同一面について 3 箇所の測定を実施した。けい酸塩系表面含浸材と PCM との複合工法における摩耗質量を**図－26** に，けい酸塩系表面含浸材の塗布による PCM の耐摩耗性の向上率を**表－10** に示す。

全体として，PCM 1，2，6 を被覆した供試体は，塗布する含浸材の種類にかかわらず摩耗質量が小さくなることが確認できた。特に PCM 2 では，含浸材無塗布の場合と比較して，いずれの含浸材を塗布した場合でも摩耗質量は小さくなる，すなわち耐摩耗性が向上することが確認できた。

以上より，開発対象材料である PCM1 と 2 および含浸材 A と C について整理すると，いずれの組み合わせにおいても含浸材を塗布することで耐摩耗性は向上することが確認できた。また，その向上率もすべての組合せの中で比較的良好な数値であることが示された。



図－26　けい酸塩系表面含浸材と PCM との複合工法における摩耗質量

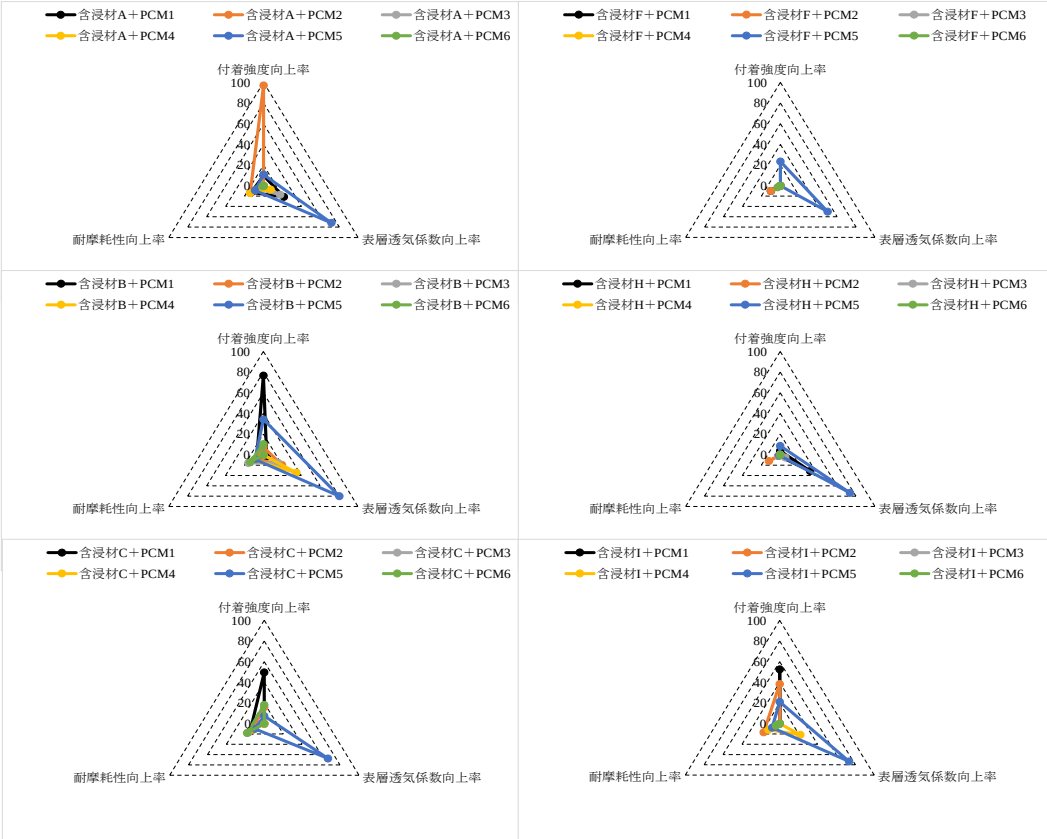
表－10　けい酸塩系表面含浸材の塗布による PCM の耐摩耗性の向上率※（%）

	A	B	C	F	H	I
1	13	7	15	10	2	0
2	14	8	13	10	12	17
3	6	16	17	0	2	6
4	14	10	11	0	0	12
5	9	9	10	0	1	8
6	1	14	18	3	0	4

※ 含浸材無塗布（PCM 単独）に対する向上率を示す。摩耗質量が小さくなるほど向上率は大きくなる。

以上の複合工法の試験結果について，**図－27** のように整理する。図中では，各試験結果について，含浸材無塗布供試体（PCM 被覆のみ）の結果に対する含浸材塗布供試体（含浸材＋PCM）の結果の比率で示す。PCM の種類により表層引張強度比が著しく低下することがなかった含浸材は，A，B，C，I であった。同様に，PCM の種類により表層透気係数比が著しく増加することがなかった含浸材は A，B，C であり，摩耗質量比はすべての組合せで概ね同程度の向上率を示す結果となった。

以上を総括すると，相対的に良好な試験結果を示したけい酸塩系表面含浸材を 1 種類挙げると，含浸材 A が最も優れているといえる。同様に，PCM について 1 種類挙げると，PCM 2 が優れているといえる。また，含浸材 A および PCM 2 以外の開発対象材料である含浸材 C および PCM 1 についても，他の比較対象材料と比較して概ね同等以上の性能を示した。



図－27　複合工法の試験結果のまとめ

（２）開発対象工法の性能確認

（２）－１　通常環境下で供用された既設構造物に対する適用性の確認（小規模実証実験）

材料の性能確認試験と並行し，開発対象材料であるけい酸塩系表面含浸材（含浸材 A と C）と PCM（PCM1 と 2）各 2 種類に対し，それぞれを組合せた計 4 工法について，通常環境下にある経年した小規模既設 RC 開水路を対象に試験を行った。PCM の塗り厚や含浸材塗布の有無などを変化させ，RC 開水路を対象として計 14 区画の試験区を設定した。本実験で得られた施工性および工法のコスト比較を踏まえ，寒冷地における大規模実証実験で採用する 1 工法を確定した。

（２）－１－１　工法の概要

先述の通り，開発対象材料であるけい酸塩系表面含浸材 2 種類（A と C），PCM 2 種類（1，2）に対し，既設 RC 開水路を対象として実験を行った。対象とした RC 開水路は，高知大学農学部内の鉄筋コンクリート構造であり，供用後 40 年以上が経過している。水路の規模は，幅 0.8m，高さ 1.0m，壁厚 0.1m と比較的小規模であり，試験区間の総延長は約 50m である。同水路は，塩害，凍害，アルカリシリカ反応などといった特殊な自然環境・材料条件に起因する劣化は確認できないものの，初期の乾燥収縮や温度応力に起因するひび割れと喫水線（約 0.2m）以下における摩耗が発生している。小規模実証実験における計 14 区画の工法概要を**表－11** に示す。

表－11　小規模実証実験における工法概要

区画番号	工法番号	含浸材			PCM		試験概要
		材料記号	下地面塗布量 (g/m²)	被覆面塗布量 (g/m²)	材料記号	塗り厚 (mm)	
No.1	①	A	200	100	1	不陸調整+3	・含浸材＋PCM
No.2	②	A	200	100	1	不陸調整+5	・同一材料で厚さに差異
No.3	③	C	400	100	1	不陸調整+3	・含浸材＋PCM
No.4	④	C	400	100	1	不陸調整+5	・同一材料で厚さに差異
No.5	-	-	-	-	1	不陸調整+3	・PCM のみの施工
No.6	⑨	-	-	-	1	不陸調整+5	・同一材料で厚さに差異
No.7	⑤	A	200	100	2	不陸調整+3	・含浸材＋PCM
No.8	⑥	A	200	100	2	不陸調整+5	・同一材料で厚さに差異
No.9	⑦	C	400	100	2	不陸調整+3	・含浸材＋PCM
No.10	⑧	C	400	100	2	不陸調整+5	・同一材料で厚さに差異
No.11	-	-	-	-	2	不陸調整+3	・PCM のみの施工
No.12	⑩	-	-	-	2	不陸調整+5	・同一材料で厚さに差異
No.13	-	-	-	-	2	不陸調整+3	・躯体のひび割れ無処理
No.14	-	-	-	-	2	不陸調整+5	・同一材料で厚さに差異

（２）－１－２　施工性の調査結果

小規模実証実験で採用した**表－11** の①～⑩の工法について，施工性比較を行った。まず，日進量による施工性比較表を**表－12** に示す。

施工性比較において、含浸材塗布工を含む複合工法と PCM 被覆工単独工法の比較を行うため，構成人員が含浸材塗布工および PCM 被覆工それぞれ同数となるよう 9 人体制とした。

表－12 より，①～⑧の 8 種類の複合工法では⑤および⑦が最も施工性に優れることが確認できた。施工工程は材料の種類にかかわらず同一である。なお，2 種類の PCM のうち，速硬性材料である PCM 2 は，施工後直ちに硬化を始め，長時間の止水が困難な現場に対して非常に効果的である。

次に，塗り厚が薄いものは，当然のことではあるが，施工時の作業効率が大幅に優れており，特に上記のような速硬性の材料を施工する場合でも，施工性を確保でき，コテ塗りの際に支障なく施工することができた。

ただし，⑨および⑩の PCM 被覆工のみの工法と比較すると，速硬性材料である PCM 2 を使用した⑩に対しては，施工性が劣る結果となった。

表－12　小規模実証実験における施工性比較調査表

工法番号	含浸材塗布工日進量（㎡/日）	PCM 被覆工日進量（㎡/日）	全体日進量（㎡/日）
①	195	45	36
②	195	40	33
③	195	45	36
④	195	40	33
⑤	195	60	46
⑥	195	54	42
⑦	195	60	46
⑧	195	54	42
⑨	－	40	40
⑩	－	54	54

（２）－１－３　小規模実証実験で採用した工法の経済比較

小規模実証実験で採用した**表－11** の①～⑩の工法について，経済比較を行った。経済比較表を**表－13** に示す。

表－13　小規模実証実験で採用した複合工法における経済性比較調査表

工法番号	費用（100m² 当り）							1m² 当たり
	含浸材塗布工			PCM 被覆工			合計	
	材料費	労務費	諸雑費	材料費	労務費	諸雑費		
①	243,600	77,163	6,945	289,800	346,928	20,816	985,251	9,852
②	243,600	77,163	6,945	434,700	385,474	23,128	1,171,010	11,710
③	145,000	77,163	6,945	289,800	346,928	20,816	886,651	8,866
④	145,000	77,163	6,945	434,700	385,474	23,128	1,072,410	10,724
⑤	243,600	77,163	6,945	335,800	260,194	15,612	939,313	9,393
⑥	243,600	77,163	6,945	503,720	289,106	17,346	1,137,880	11,378
⑦	145,000	77,163	6,945	335,800	260,194	15,612	840,713	8,407
⑧	145,000	77,163	6,945	503,720	289,106	17,346	1,039,280	10,392
⑨	-	-	-	434,700	385,474	23,128	843,302	8,433
⑩	-	-	-	503,720	289,106	17,346	810,172	8,101

※ 不陸調整については平均厚さ 1mm として算出

表－13 より，①～⑧の 8 種類の複合工法では⑦が最も経済性に優れることが確認できた。この理由については，まず PCM 2 の材料費自体は PCM 1 と比較して高いものの，PCM 2 は速硬性の材料であることから，被覆後のコテ押さえなどの工程が不要であり，労務費と諸雑費が安く抑えられるためである。結果として，PCM 被覆工全体の費用を安くすることができた。次に，含浸材 C は A と比較して材料費が安く，かつ施工に係る労務費と諸雑費は両材料とも同じであることから，含浸材塗布工全体の費用を小さくすることができた。

ただし，⑨および⑩の PCM 被覆工のみの工法を含めると，含浸材の塗布工を含む分，同等

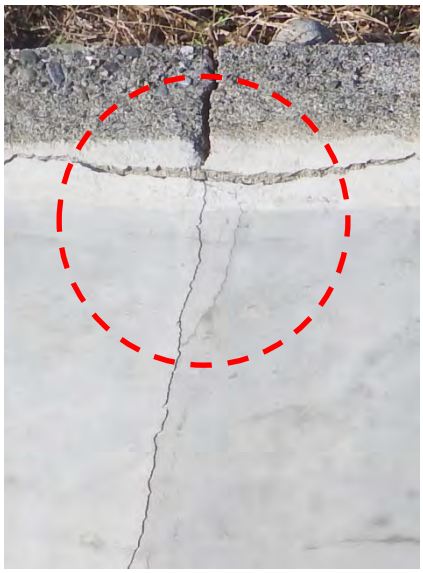
もしくはやや劣る場合がある結果となった。

（２）－１－４　小規模実証実験で採用した工法の被覆材塗り厚の差異による耐久性比較

PCM の塗り厚の差異による各種挙動の変化を確認するために，既設躯体のひび割れを無処理の状態で PCM をまたいで施工した区画（区画 No.13 と 14）においては，PCM の被覆厚が厚い区画 No.14 では，施工後 24 時間程度でゼロスパン現象が発生しており， PCM 被覆材上のひび割れが確認された。**図－28** は施工後約 2 年時点の追跡調査時の状態であり，浮きの発生へと劣化の進行が確認された。

一方，PCM の被覆厚が薄い区画 No.13 では，同様に施工後 24 時間程度で被覆材上にひび割れが見られたものの，被覆材の乾燥収縮や温度応力により自閉し，現在までに不具合は確認されていない。したがって，今後の経過観察は引き続き行う必要があるが，施工後の材料の状態に着目した結果からは，本事業の達成目標の一つである PCM の薄塗りの有効性が確認できた。

区画 No.13
PCM 塗り厚：不陸調整＋3mm



区画 No.14
PCM 塗り厚：不陸調整＋5mm

被覆材の塗り厚が厚い区画 No.14 において
被覆材上に生じたひび割れ（ゼロスパン現象）

図－28　被覆材の塗り厚の差異によるひび割れ発生の有無

（２）－１－５　小規模実証実験の追跡調査の結果（一年点検結果）

小規模実証実験の施工現場を対象にした追跡調査について，一年点検の結果を**表－14** にまとめる。（調査日：平成 29 年 1 月 13 日）

表－14　小規模実証実験における一年点検の結果

区画番号	工法番号	PCM の塗り厚（mm）	テストハンマー強度（N/mm^2）	表層引張強度（N/mm^2）	表層透気係数（×10^{-16}m^2）	表面流水距離（mm）
No.1	①	不陸調整+3	36.6	2.0	0.011	107.7
No.2	②	不陸調整+5	40.3	2.2	0.001	137.3
No.3	③	不陸調整+3	35.0	2.2	0.001	98.0
No.4	④	不陸調整+5	39.6	2.3	0.001	153.7
No.5	-	不陸調整+3	35.8	2.1	0.001	112.7
No.6	⑨	不陸調整+5	44.4	2.1	0.014	104.7
No.7	⑤	不陸調整+3	33.8	1.5	0.010	159.3
No.8	⑥	不陸調整+5	39.6	2.1	0.005	124.3
No.9	⑦	不陸調整+3	37.6	2.0	0.001	106.0
No.10	⑧	不陸調整+5	41.5	2.2	0.001	89.0
No.11	-	不陸調整+3	38.3	2.2	0.001	83.7
No.12	⑩	不陸調整+5	42.2	1.3	0.001	160.0
No.13	-	不陸調整+3	40.4	2.0	0.002	102.3
No.14	-	不陸調整+5	40.7	1.5	0.016	147.3

a）目視および打音検査

ひび割れ処理を実施していない区画 No.13 と 14 において，先述したようにゼロスパン現象が生じており，それに起因した被覆材のひび割れと浮きが生じているのを確認した。また，PCM の塗り厚が厚い方が，既設躯体の膨張収縮挙動に伴う浮きの発生範囲が広くなることが確認された。

b）テストハンマー強度

補修工事前の既設躯体において測定した計 14 区画のテストハンマー強度の平均値は 23.5N/mm^2 であったことから，一年点検で測定したテストハンマー強度は，いずれの区画においても良好な数値を示したといえる。塗り厚の差異に着目すると，塗り厚の厚い方が大きい数値となった。

c）表層引張強度

全体として，概ね 2.0N/mm^2 程度となった。一年点検の時点では，塗り厚の差異や含浸材塗布の有無による影響は明確には確認できなかった。

d）表層透気係数

補修工事前の既設躯体において測定した計 14 区画の表層透気係数の平均値は $2322\times10^{-16}m^2$（躯体の透気性が高すぎてほとんど測定不能のレベル）であった。補修後，一年点検の結果では，概ね $0.001\sim0.015\times10^{-16}m^2$ であることから，いずれの区画においても良好な数値を示しており，補修により表層部は空気の通りにくい緻密な状態と判断できた。

e）表面流水距離

補修工事前の既設躯体において測定した計 14 区画の表面流水距離の平均値は 16.0mm であったことから，一年点検の結果では，区画ごとに結果のばらつきは見られるが，全体として表面流水距離は大きく増加していることが確認できた。したがって，補修材表面は補修前の既設躯体と比較して吸水性が低く，緻密な状態と判断できた。

（２）－１－６　小規模実証実験から得られた結果のまとめ

小規模実証実験では，施工性および施工直後から施工後一年までの追跡調査を実施するとともに，採用した工法の経済性の比較を行った。施工後一年までの段階では，いずれの工法を採用した場合でも，全体的には施工箇所において不具合などがほとんど生じていないことを確認した。施工性および経済性比較の結果から，けい酸塩系表面含浸材 C と速硬性材料である PCM2 を使用する工法が，他の工法と比較して優れていることが確認できた。

以上のことから，寒冷地実証実験で採用する工法は，**表－11** 中の工法番号⑦「けい酸塩系表面含浸材：C，PCM：2，被覆厚：不陸調整＋3mm」をベストマッチングとして確定した。

（３）確定した 1 工法の性能確認

（３）－１　現地適用性能の確認

①粗度係数の測定

ベストマッチングとして確定した 1 工法（けい酸塩系表面含浸材：C，PCM：2，被覆厚：不陸調整＋3mm）について，水理模型実験により工法の粗度係数を推定し，通水性能の評価を行った。

本実験で使用する模型開水路の断面寸法は，水路幅 920mm，水路高さ 670mm であり，延長は 20m である。本水路内において，選定した工法を両側壁および底板部に施工し，通水試験を実施した。選定工法施工後の実験水路の断面寸法は，水路幅 850mm，水路高さ 300mm である。施工後の実験水路内面を**図－29** に示す。

図－29　選定工法施工後の実験水路内面

本実験では，通水状態の水路において水面形の追跡を行うことにより，粗度係数の推定を試みた。水面形追跡においては，まず水深測定区間における最上流地点（上流から 7m 地点）の水深をポイントゲージ（株式会社 KENEK，PH-340）で測定した。続いて，高精度超音波式変位センサ（株式会社 KEYENCE，UD-500）を用いて，既知の水深からの水位変動を 2m 間隔で測定することで，水路内の水面形を追跡した。水位変動の計測地点は計 5 測点である。超音波センサによる水位変動の測定は，1 測点につきサンプリング間隔 0.1 秒で，30 秒間のデータ収集を行った。これにより得られた 300 個のデータの平均値を，その測点における水深とした。測定区間は，上流における流入の影響と水路最下流端における堰の影響を考慮して，水路中央の 8m とした。各機器の分解能はポイントゲージが 0.01m，超音波センサが 0.1mm である。

実験時の水理条件として，流量，勾配，水路下流端の堰高を調整することにより，様々な水理条件下における通水実験を行い，数値計算法により粗度係数を算出した。本手法は，壁面の流水抵抗により生じる水面形の変化，すなわち漸変流の水面勾配から粗度係数を算出するものである。まず，開水路の流れにおいて流下方向に関して水路の断面形状が変化しない，一様断面水路における式（1）の不等流の基礎方程式を考える。

$$\frac{dh}{dx}=\frac{I_b-\dfrac{n^2Q^2}{\{bh/(b+2h)\}^{4/3}b^2h^2}}{1-\dfrac{\alpha Q^2}{gb^2h^3}} \qquad (1)$$

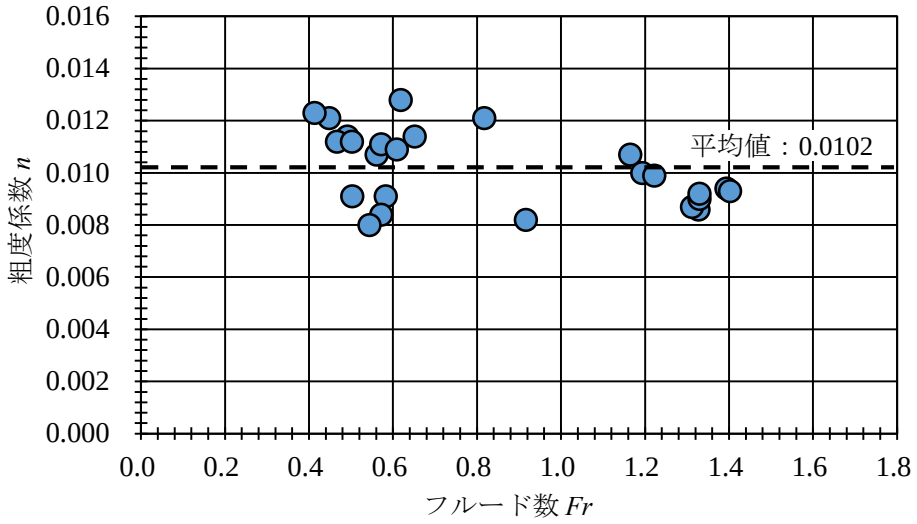
ここで，x は流下方向，h は水深（m），Q は流量（m^3/s），α は流量係数（=1），g は重力加速度（m/s^2），b は水路幅（m），I_b は水路床勾配，n は粗度係数（$s/m^{1/3}$）である。本研究では，Δx=2.0m として粗度係数を変化させて，Runge-Kutta-Gill 法により数値積分し，水深についての実測値 h_0 と計算値 h_c による評価関数の最も小さい粗度係数の値を，その流れにおける粗度係数とした。なお，評価関数としては式（2）の χ 二乗誤差 E を採用した。

$$E=\frac{1}{N}\sum_{i=0}^{N}\frac{\left(h_{0,i}-h_{c,i}\right)^2}{h_{0,i}} \qquad (2)$$

ここで，N はデータ数，h_0 は測定水深（m），h_c は計算水深（m），添え字の i（i=7，9，11，13，15）は水深の流下方向における測定地点番号である。

本実験で得られた粗度係数とフルード数との関係を**図－30** に示す。本実験で使用した模型開水路でこれまでに行ってきた同種の実験結果では，粗度係数はフルード数と相関関係を有し，フルード数の増加に伴い粗度係数が一定値に漸近する傾向を確認している※参考文献 5。本実験では，フルード数が 0.5 以上となることを目安として水理条件を設定したところ，すべての水理条件下で算出した粗度係数の平均値は 0.0102，標準偏差は 0.0014 となった。これらの数値は，各メーカーが示している一般的な補修用モルタルの粗度係数の数値や，本実験開水路を所有する高知大学でこれまでに行ってきた実験結果に鑑みて，ばらつきの小さく，補修用モルタルの粗度係数として妥当な数値と考えられた。したがって，本工法の粗度係数を 0.0102 と推定した。

ここで，土地改良事業計画設計基準「水路工」（2001，農林水産省農村振興局）における粗度係数の標準的な数値を参照すると，コンクリート（現場打ちフルーム，暗渠等）では，0.012～0.016，コンクリート（既製フリューム類）では 0.012～0.016，セメント（モルタル）では 0.011～0.015 である。したがって，本工法の粗度係数は，通水性能を十分に確保できていることが確認された。



図－30　推定した粗度係数とフルード数との関係

※参考文献 5　長谷川ら（平成 27 年）：水理模型実験による開水路の粗度係数推定方法に関する提案，農業農村工学会誌，83(2)，pp.35-38

②初期凍害に対する抵抗性の評価試験

確定した 1 工法について，寒冷地で施工する場合を考えて，低温環境下における PCM の効果特性を実験的に検証した。実験では, PCM2 に加えて, 比較用として, PCM1, PCM6, JIS R5201 に準拠して作製したモルタル供試体（水セメント比 50%，砂セメント比 3.0），の 4 種類を試験に供した。各供試体の練り混ぜにはモルタルミキサを使用し，φ50×100mm のサミットモールドに打設した。練り混ぜ時間については各メーカー指定の時間とした。

供試体打設後，速やかに 5℃一定の温度に設定したインキュベーターへ投入し，所定の材齢が経過した供試体をインキュベーターから取り出し，脱型後，圧縮強度の測定を行った。試験材齢として，1，2，3，4，5，6，12，24 時間目および 3，7，28 日目の 11 条件とした。いずれの試験においてもサンプル数は 3 とした。

圧縮強度の測定結果を**表－15** に示す。表中の測定不能は，供試体が脱型時，あるいは研磨時に破損した，すなわち十分に強度発現していなかったことを示す。**表－16** より，いずれの供試体も打設後 2 時間以内では，十分に硬化しておらず，測定ができる状態ではなかったことが分かる。その後, PCM2 のみ, 3 時間経過時から強度を発現していることが確認できた。PCM2 は，速硬性という特性を有していることから，他の材料と比較して低温環境下においても早期に強度を得られることが示された。一方, 他の材料では, 打設後 3 日間経過時から強度発現を示し，材齢 28 日に達すると，PCM2 よりも圧縮強度が大きくなることが明らかとなった。

以上のことから，寒冷地や冬季の低温環境下で補修施工を行う際には，速硬性である PCM2 を使用した場合，養生時間は最低でも 3 時間程度確保できれば型枠の撤去が可能になるとともに，初期凍害を受けずに強度を発現していくことが確認できた。

表－15　各供試体における圧縮強度の測定結果

経過時間	PCM 1	**PCM 2**	PCM 6	JIS モルタル
1　(h)	測定不能	**測定不能**	測定不能	測定不能
2　(h)	測定不能	**測定不能**	測定不能	測定不能
3　(h)	測定不能	**4.96**	測定不能	測定不能
4　(h)	測定不能	**5.71**	測定不能	測定不能
5　(h)	測定不能	**7.79**	測定不能	測定不能
6　(h)	測定不能	**8.55**	測定不能	測定不能
12　(h)	測定不能	**9.62**	測定不能	測定不能
24　(h)	測定不能	**11.43**	測定不能	測定不能
3　(day)	9.57	**11.76**	3.49	10.23
7　(day)	19.70	**19.10**	16.43	20.67
28　(day)	31.03	**23.27**	34.77	36.03

※ 表中の数値の単位：N/mm^2

③ 現行の補修マニュアルに準拠した耐摩耗性の評価（水砂噴流摩耗試験）

確定した 1 工法（含浸材 C＋PCM2）の耐摩耗性について，「農業水利施設の補修・補強工事に関するマニュアル【開水路補修編】(案)」で示される水砂噴流摩耗試験を実施し，評価した。

試験方法は，同マニュアルの「表面被覆材の水砂噴流摩耗試験 (案)」に示される通りであり，水圧 2MPa，試験時間 10 時間，投入砂量 3 リットル，リール回転数 30rpm の条件で実施した。水砂噴流摩耗試験 10 時間経過後の平均摩耗深さと，標準供試体（水セメント比 50%，砂セメント比 3.0，材齢 28 日）の平均摩耗深さとの比で耐摩耗性を評価した。結果を**表－16** に示す。

表－16　確定工法の水砂噴流摩耗試験結果

使用材料		試験	平均摩耗深さ（mm）		相対比率※
含浸材	PCM	体数	対象試験体	標準モルタル	
－	2	2	5.50	4.39	1.25
C	2	1	4.80		1.09

※ 相対比率は標準モルタルを基準とした摩耗時間 10 時間時点における比率を表したものである。

表－16 より，PCM 単独および含浸材 C との複合工法いずれについても，標準モルタルとの相対比率 1.5 以下という無機系被覆材の品質規格値を満足する結果となった。また，含浸材 C を使用した複合工法については， PCM 単独のものより相対比率が低下した結果となった。このことから，含浸材 C と PCM 2 の組合せが無機系被覆材の耐摩耗性の向上に寄与することを確認した。

④第三者機関による品質確認試験

確定した１工法（けい酸塩系表面含浸材：C，PCM：2）について，一般財団法人建材試験センター中央試験所において表面含浸材単独および複合工法の品質確認試験を実施した。

使用材料のうち、表面含浸材については，１．１事業の背景及び目的において述べたとおり「農業水利施設の補修・補強工事に関するマニュアル【開水路補修編】（案）」においてその要求性能及び品質規格について明確に示されていない。そこで，本事業では，工法選定のための材料の性能確認と同様，表面含浸材の品質を評価する目的で土木学会規格試験を採用することとした。なお，改質効果に関する品質項目については，規格に基づき原状試験体（含浸材無塗布供試体）との相対比率で性能評価することとしたが，規格には品質規格値の設定はないため，メーカー目標値を定めた。試験結果を**表－17** に示す。

また，複合工法についても先述の補修・補強工事に関するマニュアルには規格がないため，無機系被覆工法の品質規格に準ずることとした。試験結果を**表－18** に示す。

表－17 より，けい酸塩系表面含浸材 C は，いずれの目標値も満足する結果が得られた。また，**表－18** より，複合工法（けい酸塩系表面含浸材：C，PCM：2）は，いずれの規格値も満足する結果が得られた。

以上のことから，確定した工法の農業用水路補修における適用性が第三者機関において確認された。

表－17　表面含浸材の試験結果（JSCE-K572）

試験項目	メーカー目標値	試験結果	判定
反応性確認試験	－	反応性あり	－
乾燥固形分率	－	7.64%	－
種類判定試験	－	反応型	－
外観観察	－	外観変化なし	－
含浸深さ	－	1.9㎜	－
透水量	透水比 90%以下	65%	合格
吸水率	吸水比 90%以下	82%	合格
中性化に対する抵抗性	中性化深さ比 90%以下	32%	合格
塩化物イオン浸透に対する抵抗性	塩化物イオン浸透深さ比 95%以下	91%	合格
スケーリングに対する抵抗性	質量損失比 90%以下	84.81%	合格
ひび割れ透水性	ひび割れ透水比 50%以下	33.18%	合格
加圧透水性	水の浸透深さ比 90%以下	76.70%	合格

表－18　複合工法の試験結果

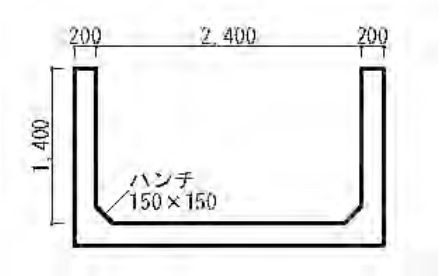
品質項目	照査方法	品質規格値（無機系被覆材）	試験結果	判定
中性化速度	促進中性化試験 JIS A 1153（4 週）	深さ 5mm 以下 速度係数 18mm/√年以下	深さ 2.4mm 速度係数 8.6mm/√年	合格
圧縮強度	圧縮強度試験 JSCE-K561（28 日）	21.0N/mm^2 以上	42.5 N/mm^2（7 日） 44.0 N/mm^2（28 日）	合格
長さ変化率	長さ変化率試験 JIS A 1129（28 日）	0.05%以下	0.04%	合格
相対動弾性係数	凍結融解試験 A 法 JIS A 1148 （300 サイクル）	85%以上	96%	合格

（３）－２　寒冷地における大規模実証実験

（３）－２－１　工法の概要および施工性

確定した 1 工法（けい酸塩系表面含浸材 : C，PCM : 2，被覆厚 : 不陸調整＋3mm）について，大規模実証実験を実施した。過酷な環境下における対象工法の施工性や耐久性を評価するために，寒冷地の二現場を対象とした。

対象地は**図－31** に示す新潟県長岡市信濃川左岸および**図－32** に示す栃木県那須塩原市那須野ケ原にそれぞれ位置する鉄筋コンクリート製開水路である。



竣工 ： 平成 3 年（1991 年）

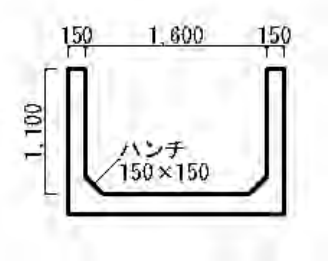
構造 ： RC 造　現場施工　三面水路

健全度ランク ： S-4

施工部位 ： 左右壁面，底版

施工延長/面積 ： 18.0m/97.56 ㎡

図－31　新潟県長岡市信濃川左岸実証実験開水路概要



竣工 ： 昭和 52 年（1977 年）

構造 ： RC 造　現場施工　三面水路

健全度ランク ： S-4

施工部位 ： 左右壁面（ハンチから上面）

施工延長/面積 ： 43.4m/82.5 ㎡

図－32　栃木県那須塩原市那須野ケ原実証実験開水路概要

竣工年度はそれぞれ平成 3 年と昭和 52 年であり，補修工事の施工延長と面積は 18.0m/97.56m^2 および 43.4m/82.5m^2 である。事前調査を行ったところ，両水路はともに健全度ランクが S-4 に分類されるものと推定した。なお，那須塩原市の現場では，水が完全に切れる環境では無かったため，底版の補修および事前調査は行っていない。

事前に室内試験で確認した通り，PCM2 は，練り上がり後 3 時間程度で初期凍害の影響を受

けないとされる圧縮強度 5Nmm² を発現することが分かっている。今回の補修工事においては，両現場ともに仕上げ後 4～6 時間（材料練上がり後 6～8 時間）で雨天に見舞われた。しかしながら，施工完了時点では仕上げ面と強度ともに問題が発生していないことが確認された。また，寒冷地であっても，材料の予熱などの特別な措置をすることなく，対象工法により支障なく施工完了することができた。

（３）－２－２　寒冷地実証実験の追跡調査結果

寒冷地実証実験における事前調査と一年後の追跡調査結果を以下の**表－19**，および**図－33～35** にまとめる。（調査日：平成 29 年 10 月 15～18 日）

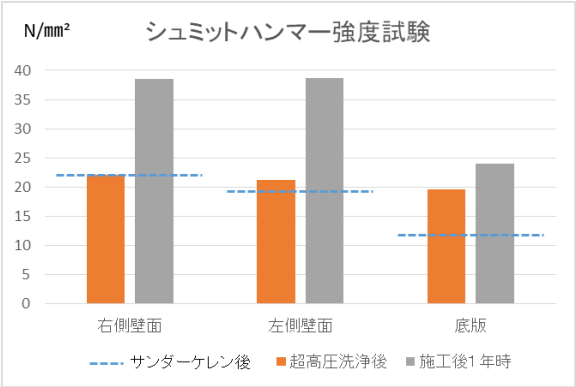
表－19　寒冷地実証実験の一年後の追跡調査における目視確認および打音検査結果

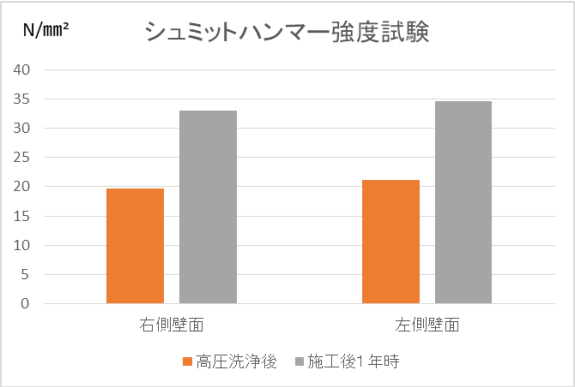
検査箇所	目視確認		打音検査
	ひび割れ	変形	浮き
右側壁面	変状なし	変状なし	変状なし
左側壁面	変状なし	変状なし	変状なし
底版	変状なし	変状なし	変状なし

長岡市 信濃川左岸

検査箇所	目視確認		打音検査
	ひび割れ	変形	浮き
右側壁面	変状なし	変状なし	変状なし
左側壁面	変状なし	変状なし	変状なし

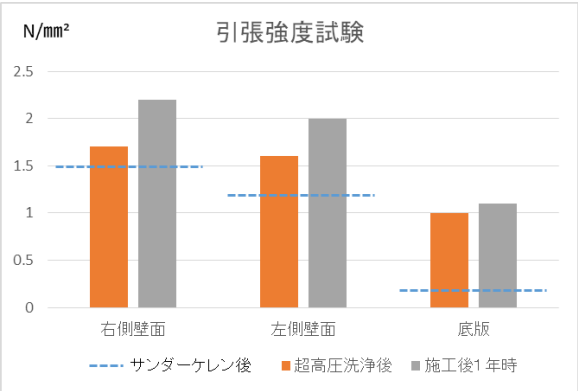
那須塩原市 那須野ヶ原

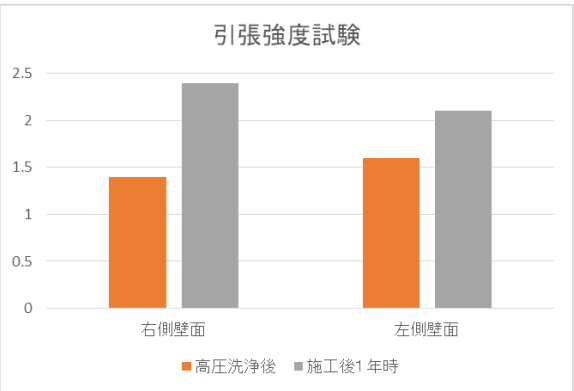




長岡市 信濃川左岸　　那須塩原市 那須野ヶ原

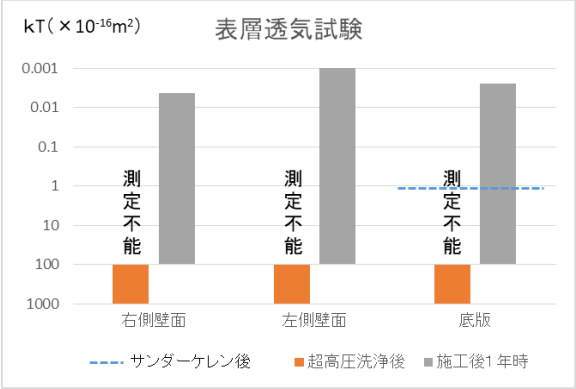
図－33　寒冷地実証実験における事前調査と一年後の追跡調査結果（1）



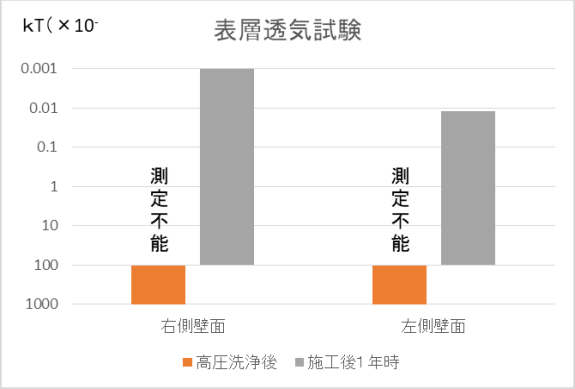


長岡市 信濃川左岸　　那須塩原市 那須野ヶ原

図－34　寒冷地実証実験における事前調査と一年後の追跡調査結果（2）



長岡市 信濃川左岸



那須塩原市 那須野ヶ原

図－35　寒冷地実証実験における事前調査と一年後の追跡調査結果（3）

①長岡市　信濃川左岸

a) 目視および打音検査

表—19 より，いずれの測定位置においてもひび割れ，浮きなど変状は確認されず，健全な状態であった。

b）テストハンマー強度

図—33 より，テストハンマー強度試験の結果，施工後一年後の測定値はいずれの測定位置においても補修前と比較して増加しており，標準的な現場打ち鉄筋コンクリート開水路の設計強度である 21N/mm^2 以上を確保するものであった。このことから，補修効果が認された。

c）表層引張強度

図—34 より，表層引張強度試験の結果，施工後一年後の測定値はいずれの測定位置においても補修前と比較して増加したものであった。壁面については，無機系被覆材の付着強度の品質規格である 1.5N/mm^2 以上を確保するものであった。しかし，底版については，同品質規格値である 1.5N/mm^2 を下まわったが，同品質規格において厳しい環境を考慮した 1.0N/mm^2 以上は確保するものであった。このことから，一定の補修効果が確認されたが，今後の追跡調査で注視していく必要がある。

d）表層透気係数

図—35 より，表層透気試験の結果，施工後一年後の測定値はいずれの測定位置においても補修前と比較して低下したものであった。透気係数は 0.001～0.01×10^{-6}m^2 の範囲となっており，透気性グレーディングでは「優」と区分される良好な数値を示した。よって，施工後 1 年時点では補修効果を発揮していることが確認できた。

②那須塩原市 那須野ヶ原

a) 目視および打音検査

表—19 より，いずれの測定位置においてもひび割れ，浮きなど変状は確認されず，健全な状態であった。

b）テストハンマー強度

図—33 より，テストハンマー強度試験の結果，施工後一年後の測定値はいずれの測定位置においても補修前と比較して増加しており，標準的な現場打ち鉄筋コンクリート開水路の設計強度である 21N/mm^2 以上を確保するものであった。このことから，補修効果が認された。

c）表層引張強度

図—34 より，表層引張強度試験の結果，施工後一年後の測定値はいずれの測定位置においても補修前と比較して増加しており，無機系被覆材の付着強度の品質規格である 1.5N/mm^2 以上を確保するものであった。このことから，補修効果が確認された。

d）表層透気係数

図—35 より，表層透気試験の結果，施工後一年後の測定値はいずれの測定位置においても補修前と比較して低下したものであった。透気係数は 0.001×10^{-6}m^2 以下（右岸壁面）と 0.0120×10^{-6}m^2（左岸壁面）となっており，透気性グレーディング区分では右岸壁面は「優」，左岸壁面は「良」と，右岸と左岸とで差異はあるものの，いずれも良好な数値といえる。よって，施工後 1 年時点では補修効果を発揮していることが確認できた。

１．７　機能監視の概要、結果、課題等

機能監視として，小規模実証実験と寒冷地実証実験ともに，定期的に実証実験後の追跡調査を行った。現在まで（小規模：施工後 2 年，寒冷地：施工後 1 年）の追跡調査で得られた結果を総括すると，すべての試験において，補修前のコンクリート躯体と比較して，表面改質複合工法の補修効果を確認することができた。

しかしながら,補修工法の耐久性や PCM の薄塗りによる優位性を詳細に確認するためには,長期に渡るモニタリングが必要である。よって，本事業期間終了後も定期的な追跡調査を継続していくことで，補修効果の経時変化を評価していく予定である。

２　事業の成果

２．１　成果の内容

本事業では、農業用水路補修に適したけい酸塩系表面含浸材および PCM との複合化工法を開発した。開発した工法の概要は次のとおりである。

（１）使用材料

本工法で使用する材料を以下に示す。

①けい酸塩系表面含浸材

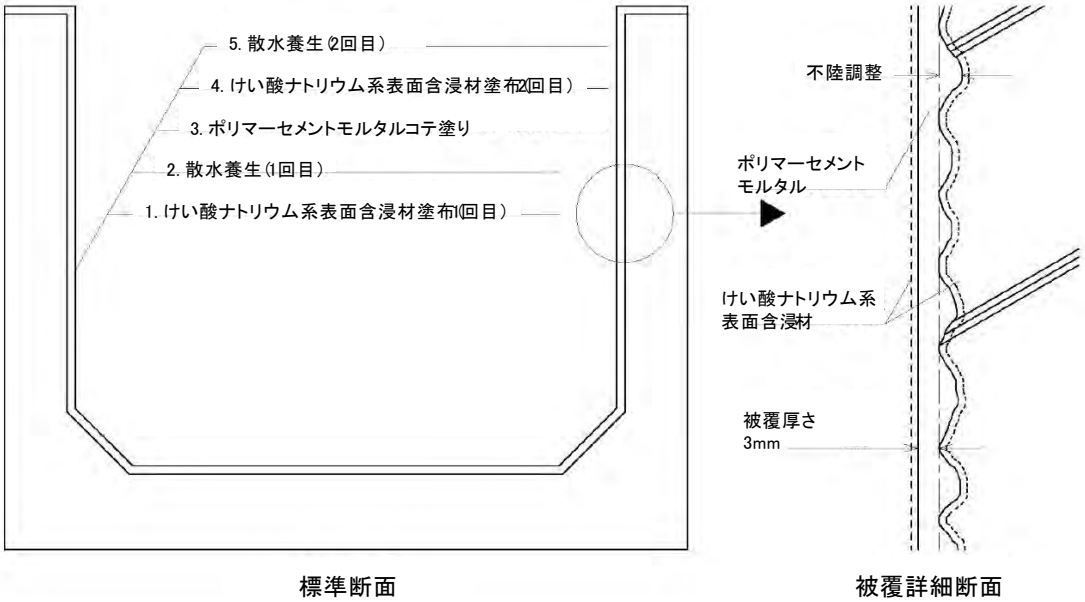
種類	反応型けい酸塩系表面含浸材
主成分	けい酸ナトリウム
比重（密度）	1.05～1.09（g/c ㎥）
pH 値	11.3～12.3
液色	無色透明
乾燥固形分率	7.0～9.0%

②無機質表面被覆材（ポリマーセメントモルタル）

形態	プレミックスタイプ
主成分	速硬セメント、繊維配合、アクリル樹脂
練り上がり比重	2.14（立米当たり材料：粉体 1825kg+水 310kg）

（２）工法概要図

本工法の概要図を**図－36** に示す。



図－36　工法概要図

（３）施工手順

本工法の施工手順を以下に示す。

① 高圧洗浄	高圧洗浄により脆弱部や汚れを除去する
↓	
② 含浸材塗布（１回目）	含浸材を噴霧器で散布し、ローラー等で引き延ばす
↓	(塗布量：４００ｇ／㎡)
③ 散水養生（１回目）	水を噴霧器等で散布し、ローラー等で引き延ばす
↓	(塗布量：１５０ｇ／㎡)
④ PCM コテ塗り	PCM をコテにより塗りつける
↓	(被覆厚さ：不陸調整＋３ｍｍ)
⑤ 含浸材塗布（２回目）	含浸材を噴霧器で散布し、ローラー等で引き延ばす
↓	(塗布量：１００ｇ／㎡)
⑥ 散水養生（２回目）	水を噴霧器等で散布し、ローラー等で引き延ばす
	(散水量：１５０ｇ／㎡)

（４）施工管理

本工法の施工管理方法を以下に示す。

工 程	作業内容	施工管理の内容
準 備	材料搬入	搬入確認　：搬入毎、ロット毎に記録する。 品質管理　：材料の品質を試験成績表で確認する。 含浸材は、比重およびｐＨ値検査を実施し、記録する。＊（写真０１）
下地処理	高圧洗浄	品質管理　：頻度を設けて、付着強度（下地）を測定し、記録する。 出来形管理：施工前後の表面状態、施工状況、使用機械、施工時の洗浄圧力などを確認し、記録する。
含浸材塗布（１回目）	含浸材散布	品質管理　：頻度を設けて、施工前後にフェノールフタレイン溶液を噴霧し、呈色状況を記録する。＊（写真０２） 出来形管理：施工前後の表面状態、施工状況、使用機材、使用数量を確認し、記録する。
表面被覆＊＊	配合・練り混ぜ	出来形管理：作業開始時に試験練りを行い、施工環境に応じて、最適な水比・練り混ぜ時間を確認し、記録する。 品質管理　：頻度を設けて、供試体を作成し、圧縮強度（材齢２８日）を測定し、記録する。 両壁面、底版の被覆厚さは、施工中は検診針等で測定し、施工後は、施工前に取り付けた厚み管理ガイドを被覆材の硬化後に除去して、ノギス等で測定する。（写真０３） 出来形管理：練り上がり材料毎に作業時間を計測し、可使時間以内であることを確認し、記録する。
含浸材塗布（２回目）	含浸材塗布	出来形管理：施工前後の表面状態、施工状況、使用機材、使用数量を確認し、記録する。
養 生	養 生	養 生　：天候、最低温度、最高温度、湿度を測定し、記録する。（低温対策などを行った場合は別途記録する。）
施工完了		品質管理　：頻度を設けて付着強度（被覆後）を測定し、記録する。 出来形管理：仕上がり状態を施工箇所・部位毎に測定または目視点検し、記録する。 材料の総使用量が分かるもの（空缶、梱包材など）を撮影する。（写真０４）

＊　けい酸塩系表面含浸工法独自の項目については、赤文字にて表示。
＊＊ 本工法は、不陸調整と表面被覆を同じ材料（PCM）で行う。

写真０１　：　材料搬入

比重検査

ｐＨ値検査

写真０２　：　フェノールフタレイン溶液噴霧

呈色なし（施工前）

呈色あり（施工後）

写真０３　：　被覆厚さ管理

被覆厚さ測定（施工中）

被覆厚さ測定（施工後）

写真０４　：　材料の使用量管理

空体検収（ＣＳクリアー空缶・ＣＳモルタル空袋）

（5）成果のまとめ

本事業で得られた成果を以下にまとめる。

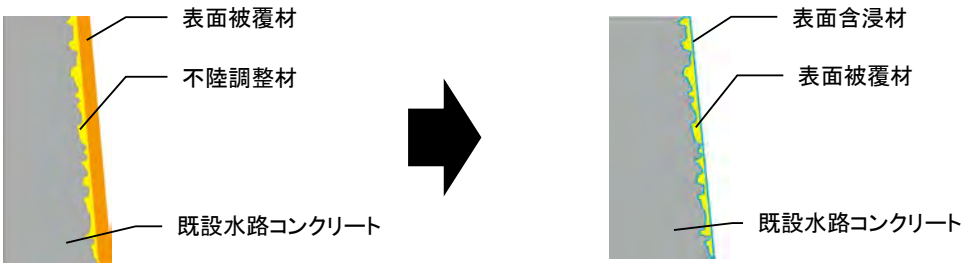
1) 農業用 RC 開水路の補修にけい酸塩系表面含浸材を適用する際の要求性能，性能評価試験方法，目安となる評価結果は明らかになっていない。そこで，JSCE-K 572-2012 を踏まえた適用性評価の基本となるよう，本事業の評価結果をとりまとめた。
2) けい酸塩系表面含浸材と無機系被覆材との複合工法では，組合せにより発現する各種性能に差異があることを確認した。この原因について，本事業期間内ですべてを明確にすることはできなかったが，複合工法の性能について，目安となる評価結果およびその試験方法を示すことができた。
3) 含浸材単独の試験や無機系補修材単独の試験では良好な結果を示したにもかかわらず，複合工法とした場合には発現する各種性能が小さくなる場合があった。この事象について明確な理由は解明できなかった。しかし，本事業で研究開発の対象とした複合工法は，両者（含浸材，無機系補修材）の性能を阻害することなく効果を発揮することを確認した。
4) 既設 RC 開水路を対象として実施した実験結果から，本事業で研究開発を進めた複合工法は，薄肉化による施工性・経済性を改善できることが明らかとなった。同時に，表面被覆工法で問題となるゼロスパンひび割れに対する抵抗性の向上を確認した。
5) 過酷な環境条件のひとつである凍害環境下での本複合工法の施工性，適用性を確保すべく，基礎実験にて選定した速硬性無機系補修材を用いた現地実証試験から，施工性の改善（短時間での施工）を確認した。
6) 寒冷地実証試験として選定した異なる地域の二現場において，竣工時ならびに施工 1 年後の機能監視結果から，初期欠陥に該当する変状がないこと，凍害の影響を受けていないことを確認した。長期の耐久性ならびに安定性については，今後機能監視を継続する必要がある。
7) 従来技術との比較として，施工性，経済性，耐久性について以下のように評価した。比較する従来技術は，無機系被覆材（PCM 単独工法／塗り厚：5mm）とした。

項目	工法種類	経済性※	工程	品質	安全性	施工性※	環境負荷
条件	－	直接工事費の㎡当たり単価	施工環境の影響（初期強度発生までの時間）	品質基準（ゼロスパン現象）	有害物質含有の有無	同一構成人員での日進量	景観破壊の有無
従来技術	普通セメントタイプ PCM 単独工法	8,433 円／㎡	施工環境の影響を受けやすい（2日）	品質基準を満たす（発生しやすい）	無機質で有害物質を含まない	40 ㎡／日	景観を損なわない
開発技術	反応型けい酸塩系表面含浸材＋速硬セメントタイプ PCM 複合工法	8,407 円／㎡	施工環境の影響を受けにくい（3時間）	従来技術より向上（抑制効果を発揮）	無機質で有害物質を含まない	46 ㎡／日	景観を損なわない

※ 経済性および施工性についての条件および内訳は次のとおりである。

条件　施工数量：300 ㎡　／　構成人員：9 人

項目	含浸材塗布工		PCM 被覆工		合計	
	日数	金額	日数	金額	日数	金額
従来技術	－	－	8 日	2,529,906 円	8 日	2,529,906 円
開発技術	2 日	687,324 円	5 日	1,834,818 円	7 日	2,522,142 円



従来技術　　複合工法による薄肉化

２．２　目標の達成度

（１）成果から得られる効果

本事業の成果から，以下の効果が想定される。

1) すでに全国の一部で適用されている含浸工法について，農業用 RC 開水路補修における適用性や留意点の一部を示すことが可能となる。
2) 本事業で提案する材料群を使用した複合工法では，含浸材の特性と無機系被覆材の特性が十分に発揮され，効果的な補修効果を得ることができる。具体的には，含浸材の表面改質効果により被覆材の接着安定性や耐摩耗性を向上させることができる。
3) 過酷な凍害環境での RC 開水路の補修工法として，本事業で提案する複合工法は適用することができる。
4) 現状では，無機系補修材の耐久性を確保するためには，被覆材の塗り厚を厚くし，既設躯体への水分や劣化因子の侵入を防止するという考えが一般的である。しかし，本事業で確認した含浸材を併用することで，必ずしも被覆材の塗り厚を厚くする必要がなく，施工性やコストの面でも有利に施工することができる。

（２）従来技術との比較

１）比較する従来技術：

無機系被覆材（PCM 単独工法／塗り厚：5mm）

２）従来技術に対する優位性

①経済性：同等程度

②工程　：優位（施工環境条件の面で優位）

③品質　：優位（無機系被覆材の品質を満足し，ゼロスパン現象を抑制する）

④安全性：同等

⑤施工性：優位（同一人員構成での日進量で優位）

⑥周辺環境への影響：同等

２．３　成果の利用に当たっての適用範囲・留意点

本新技術で適用する表面含浸材は，JSCE-K 572 の種類判定試験で反応型に分類されるけい酸ナトリウム系表面含浸材である。よって，同材料を塗布含浸させる際，既設コンクリート躯体や無機系被覆材が湿潤状態であることが適用条件となる。また，けい酸ナトリウム系表面含浸材は，既設躯体のひび割れを閉塞させて，耐久性の確保が可能となる材料であるが，0.2mm 以上のひび割れ幅に対しては，注入工法や充填工法により、別途ひび割れを処理する必要がある。

けい酸塩系表面含浸材と無機系被覆材との組合せについて，特定の材料同士の組合せにおいて，含浸材が被覆材へ浸透せずに表面に滞留してガラス質を形成し，建研式による付着強度が

測定不可能，または小さくなる可能性のあることが確認された。したがって，複合工法の適用においては，事前に各材料単独の性能のみならず，両者を組み合わせた場合の性能確認をしておくことが必要である。

３　普及活動計画

３．１　想定される利用者

農業用水利施設管理者

３．２　利用者への普及啓発等の方法

インターネットによる情報発信，業界誌等への広告掲載，展示会等での広報活動，学会等での論文発表など

３．３　利用者に対するサポート体制、参考資料等

技術指導の実施および技術資料の作成

３．４　特許・実用新案等の申請予定

申請予定なし

４　研究総括者による自己評価

審査のポイント	着眼点	申請時計画目標[注1]	自己評価[注2]	自己評価の理由[注3]
目標の達成度	・効果（従来技術に対する優位性）	・被覆材の厚みを従来より薄くしつつも含浸材の表面改質効果により被覆材の接着安定性や耐摩耗性を向上させること	Ⓐ：優れている B：概ね妥当 C：不十分	・基礎実験から小規模実証実験および寒冷地大規模実証実験までを連動して遂行し，従来技術に対する優位性を示すことができたため
	・信頼性（品質、精度、安全性、耐久性等）	・含浸材と被覆材の単独および複合の目標値または規格値を満足すること	Ⓐ：優れている B：概ね妥当 C：不十分	・第三者機関において確認できたため（一部試験については未了）
	・適用範囲・適用条件等	・過酷な自然環境下でも複合工法が適用できること	Ⓐ：広範囲に適用 B：概ね妥当 C：限定的	・凍害環境下において施工時や施工後の不具合が発生しないことが確認できたため

普及の可能性	・想定される利用者への普及啓発の方法	・関連する学協会等で成果を公表すること ・インターネットによる情報発信を行うこと ・業界誌への広告掲載等を通じて広報活動を行うこと	Ⓐ：十分な利用が見込まれる Ｂ：概ね妥当 Ｃ：限定的	・得られた成果を学会発表や論文集にて公表できたため ・自社 web サイトにて材料・工法の詳細を明記できたため ・コンサルタント企業等へ向けた勉強会を開催し，技術説明を進めることができたため
	・利用者に対するサポート体制 （設計・積算・施工等の参考資料、相談窓口等）	・技術指導の実施および技術資料の作成	Ⓐ：十分に整備されている Ｂ：概ね妥当 Ｃ：改善が必要	・本組合を中心として組織される水路補修改修工法研究会にて，利用者に対するサポート体制を整えているため
総合コメント 注４	全体として，当初の計画通りに概ね目的を達成することができた。しかし，複合工法では組合せる材料ごとに性能が大きく変化するため，本事業の実証実験で使用した材料の使用は効果的ではあるが，全ての材料で同様の効果が得られるものでは無いという点に注意が必要である。			

注１）成果報告書に記載の研究開発目標を記載する。
注２）評価結果欄は，A･B･C のうち「A」を最高点，「C」を最低点として 3 段階で記入（○付け）する。
注３）自己評価の理由を記載する。
注４）総合的なコメントを記載する。

５　今後の課題及び改善方針

今後の課題として，本事業で開発した複合工法の長期に渡る耐久性の評価が挙げられる。

また，開水路補修における含浸工法のマニュアル化などを進める場合，複合工法における材料ごとの組合せには性能確認が必要であるため，品質規格化が必要である。

なお，本新技術である複合工法における複合工法における無機系被覆材の被覆厚 3mm の根拠について補足説明する。

無機系被覆材の被覆厚さの薄肉化において設定した被覆厚さを 3mm とした根拠は，開発対象材料として使用した PCM の最大骨材寸法による施工可能な最小施工厚さが要因となっている。

無機系被覆材の被覆厚さに対する品質規格としては，現行の補修補強マニュアルにおいて中性化抑止性の要求性能の項目で，補修効果が期待される期間中，中性化深さが被覆厚さに収まるよう設定されており，この耐用期間が概ね 20 年と想定されていることから，設計厚さが 5mm 程度の被覆厚さで施工されている事例が多いとの記述がある。

また，無機系被覆材の被覆厚さは，耐摩耗性に対して直接影響を及ぼす要因ではあるが，同

マニュアルにおける品質規格として，標準供試体に対する摩耗深さ比が 1.5 以下とされていることから，試験結果の摩耗深さは設計厚さを規定するものではないと認識している。

その他の基本的要求性能である付着性，一体化性，寸法安定性の品質規格についても，被覆厚さを規定するものとはなっていない。

従って，中性化抑止性が中性化深さ 3mm を満足する無機系被覆材であれば，単独で被覆厚さ 3mm で設計可能であると考えられる。

ただしこれは，無機系被覆材単独の性能規定であるため，伸び性能に乏しい無機系被覆材を老朽化した農業用開水路の施工現場に適用した場合においては，既設水路躯体の伸縮に追従できず，ひび割れが生じるゼロスパン現象の発生，あるいは母材剥離による浮きが生じる等の不具合に対処できないという問題の対策が必要であるのが実情であると認識している。

これを，既設水路躯体の母材の強度向上による接着安定性が期待できることから，表面含浸材を併用することで現場施工に対応可能な補修工法とすることが，複合工法の開発目的のひとつであり，本研究における各種性能確認試験および実証実験で効果が確認できたものと考える。

本複合工法は, 第三者機関における試験において, 中性化促進試験の結果が中性化深さ 2.4mm であったことから，設計被覆厚さを 3mm として想定耐用期間は 20 年以上であると考える。