

論文 農業用 RC 開水路に用いる無機系表面被覆材の耐久性に対する養生の影響

木下 果穂*1・細田 暁*2・浅野 勇*3・佐々木 崇*4

要旨：農業用 RC 開水路では壁面の摩耗劣化等に対する補修として、ポリマーセメントモルタル系被覆材による表面被覆工法が多く実施されている。本研究では、実際の農業用 RC 開水路の補修に多く用いられている補修材料を使用して、緻密な表層品質と高い摩耗抵抗性を得るための施工後の養生方法について検討した。さらに、摩耗抵抗性を向上するために新たに材料設計したポリマーセメントモルタルを使用して、養生が耐久性に与える影響を検討した。

キーワード：表面被覆工法, 農業用 RC 水路, ポリマーセメントモルタル, 養生方法, 摩耗, 重量細骨材

1. はじめに

農業用水を供給する農業水利施設は膨大なストックを有しており、その中でも農業用の用排水路は末端の施設まで含めると延長は約 400,000km にも及ぶ。これらの農業水利施設では、長期間供用された施設の機能低下と施設の維持管理が大きな課題となっている¹⁾。

農業用 RC 開水路では特に、摩耗によって低下した通水性の改善や、鉄筋の腐食に関する劣化因子の侵入抑止を目的とする補修が実施される。主な補修工法は、ポリマーセメントモルタル（以下 PCM と称す）系被覆材による、表面被覆工法である。無機系の表面被覆工法で補修された RC 開水路については、これまでに表面被覆材の経年劣化や、表面被覆材の剥離等の再劣化が認められている。補修材自体の摩耗進行メカニズムと、溶脱も伴う摩耗に対して必要な初期品質は、十分には解明されておらず、表面被覆材に十分な抵抗性を与えるための方法も確立されているとは言えない。さらに、PCM の性能を十分に発揮するためには、少なくとも 1 日間は 90% の湿度の下で養生することが必要であると報告されているが²⁾、現場によっては十分な養生が実施されていないことも多く、養生方法は現場に委ねられているのが実状である。

本研究では、実際の農業用 RC 開水路の補修に多く用いられている PCM を対象に、緻密な表層品質と高い摩耗抵抗性を得るための養生方法について、水流摩耗試験や表層透気試験等を用いて検討する。さらに、高い摩耗抵抗性を発揮するように、新たに材料設計した PCM を使用して、養生が PCM の耐久性に与える影響を検討し、その性能が向上するメカニズムについて考察する。

2. 実験概要

2.1 実験の背景

PCM はモルタルの結合材の一部をポリマーで代替したものである。PCM の硬化はセメントの水和とポリマーフィルム³⁾の形成が同時に進行し、無機-有機ハイブリッド結合材相をもつことが大きな特徴である³⁾。セメント硬化体の形成には適切な水分の供給が、ポリマーフィルムの形成には水分の逸散が必要であり、PCM が十分な性能を発揮するための養生条件が明らかにされているとは言えない。そこで、現場での施工条件も勘案して、様々な条件で養生された PCM の性能を評価する。

2.2 使用材料

本研究では、実際の農業用 RC 開水路の補修に多く用いられている、アクリル粉末樹脂系プレミックスタイプの PCM 系補修材料（記号 AM）と、摩耗に対して高い抵抗性を持つように重量細骨材として比重の大きいフェロニッケルスラグを使用し、新たに材料設計した、PCM 系補修材料（記号 DM）を用いた。

実験に使用した 2 種類の PCM の仕上げ材として、実際に補修現場で用いられている、パラフィンワックスのエマルジョンであるコテ仕上げ補助剤兼被膜養生剤を用いた。

2.3 養生条件

本研究で検討した PCM の養生条件を表-1 に示す。コテ仕上げ補助剤兼被膜養生剤は PCM 打込み 30 分後に塗布し、コテを用いて仕上げを行った。全養生条件の中で 28A' のみ、被膜養生剤は使用していない。

水中養生の水温は $20 \pm 2^\circ\text{C}$ とし、気中養生と封緘養生の際の気温は $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、相対湿度は $60 \pm 5\%$ に制御した。

気中養生のみを実施した 28A と 28A' の試験体以外は、

*1 横浜国立大学 都市イノベーション学府 (学生会員)

*2 横浜国立大学 都市イノベーション学府 准教授 博(工) (正会員)

*3 農研機構農村工学研究部門 施設保全ユニット長 博(農) (正会員)

*4 デンカ(株) 青海工場セメント・特混研究部グループリーダー 修(工) (正会員)

PCM 打込み面を樹脂フィルムで覆って封緘し、実験室内に静置した。

農業水路の補修は、基本的に農閑期である冬季に、補修前に水路を堰き止めてから PCM にて補修し、補修完了後に水を流す。その環境条件を模擬し、初期養生を実施しない場合の条件として 7A21W を設定した。7A21W の比較として、気中養生と水中養生の順番を逆にした 7W21A を設定した。

28A と 28A' は PCM 打込み後、封緘は行わず、実験室内に静置した。

表面含浸材を使用した 3S25AS と 3S25AK は、材齢 3 日まで封緘養生を実施した。3S25AS は、封緘終了後ただちにシラン系含浸材を塗布し、材齢 28 日まで気中養生を実施した。けい酸塩系含浸材は、封緘終了後ただちに含浸材を塗布し、6 時間後散水をし、さらに 6 時間後含浸材を塗布し、また 6 時間後に散水を行った。その後材齢 28 日まで気中養生を実施した。今回使用した表面含浸材の詳細を表-2 に示す。

2.4 PCM のフレッシュ性状

PCM の練りあがり直後にフロー値、単位容積質量、空気量を計測した。それぞれ「JIS A 1171 フロー試験」、「JIS A 1171 単位容積質量試験」、「JIS A 1171 空気量試験」に準拠して実施した。

表-1 養生条件

記号	養生条件
7W21A	脱型後材齢 7 日まで水中+気中 21 日
28W	脱型後材齢 28 日まで水中
7A21W	気中 7 日+水中 21 日
28A	気中 28 日
28A'	気中 28 日(被膜養生剤使用せず)
3S25A	封緘 3 日+気中 25 日
3S25AS	封緘 3 日+気中 25 日 (材齢 3 日：シラン系含浸材塗布)
3S25AK	封緘 3 日+気中 25 日 (材齢 3 日：けい酸塩系含浸材塗布)

※全養生条件 1 日脱型

表-2 使用した表面含浸材

表面含浸材	外観性状	主成分	系	標準塗布量 (kg/m ²)	塗布回数
シラン系	白色 ペースト状	アルキルアルコキシシラン・シロキサン	無溶剤	0.2	1
けい酸塩系	無色透明 液体状	けい酸ナトリウム	水系	0.3	2

2.5 圧縮強度試験

φ50mm×100mm の試験体を作成し、材齢 28 日の圧縮強度を計測した。圧縮強度試験は JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」を参考にした。圧縮強度は 3 体の平均値で示した。

2.6 促進中性化試験

PCM を用いて平面寸法 150mm×150mm、厚さ 50mm の試験体を作製し、2.3 に示した各養生を行った。材齢 28 日に 50mm×150mm、厚さ 50mm にカットし、エポキシ樹脂系塗料で打込み面以外の面をシールし、促進中性化試験(温度 20±2℃、相対湿度 60±5%、二酸化炭素濃度 10%)を行った。1 週間後(材齢 35 日)、中性化深さを計測した。中性化深さは各試験体 8 箇所計測し、各条件 6 体ずつ試験を実施した。

2.7 表層透気試験(トレント法)

表層透気試験(トレント法)はダブルチャンバーの吸引によってコンクリート表層を真空状態にし、その後吸引を停止し、チャンバー内の気圧が回復するまでの時間から一次元方向の表層透気係数 kT ($\times 10^{-16} \text{m}^2$) を算出する手法である⁴⁾。表-3 に示すような 5 段階のグレードが提案されている。

PCM を用いて平面寸法 150mm×150mm、厚さ 50mm の試験体を作製し、2.3 に示した各養生を行う。養生終了後、エポキシ樹脂系塗料で打込み面以外の面をシールし、材齢 28 日の表層透気係数 kT を計測した。 kT は各養生条件 6 体ずつ試験を実施した。

表-3 表層透気係数に基づく
コンクリート表層部の品質評価基準の例

表層部の グレード	1	2	3	4	5
品質	優	良	一般	劣	極劣
表層透気係数 $kT(\times 10^{-16} \text{m}^2)$	<0.01	0.01-0.1	0.1-1.0	1.0-10.0	10.0<

2.8 促進水流摩耗試験

促進水流摩耗試験⁵⁾は、高圧の水噴流を試験体に衝突させる試験である。平面寸法 70mm×70mm、厚さ 20mm の試験体 6 個を回転ドラムに設置し、回転ドラム中心部に設置されたノズル(図-1)より、高圧の水流が試験体に噴射される。本試験での吐出圧力は 11±1MPa、吐出流量は 6.3±0.3L/min、回転数は約 30rpm であり、ノズルの噴射口から試験体表面までの距離(初期値)は 80mm である。PCM を用いて試験体を作製し、2.3 に示した各養生を行い、養生終了後の材齢 28 日に試験を実施した。各養生条件 3 体ずつ試験を実施した。促進水流摩耗試験では一定時間毎に供試体を試験機から取り出し、レーザー変位計(KEYENCE-500、分解能 10μm)により摩耗深さを

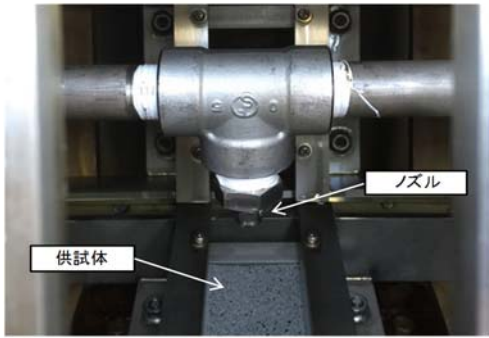


図-1 ノズルと設置された試験体

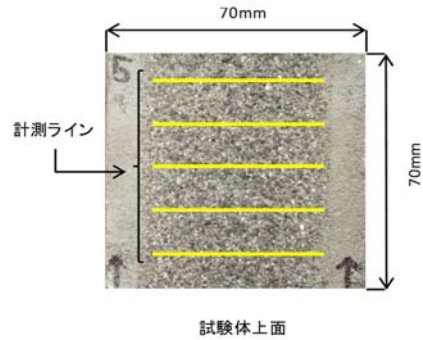


図-2 ノズルと設置された試験体

計測した。図-2 に示すように試験体上面に5本の計測ラインを設け、各ラインにおいて0.1mm間隔で摩耗深さを計測した。全計測点(640×5=3200点)での計測結果の平均値を摩耗深さとした。

2.9 水銀圧入式ポロシメータによる測定

水銀圧入式ポロシメータ(以下MIPと称す)により、閾細孔径⁹⁾を計測した。閾細孔径は透過抵抗を代表する空隙指標であり、MIP測定において試料内部まで圧入する際に通らざるをえない最小の空隙径とされる。物質の通り道となる空隙を有するセメントペースト体積の16%に相当する量の水銀が圧入された時点の空隙が閾細孔径である⁹⁾。

PCMで作製した試験体に2.3に示した各養生を行い、養生終了後、材齢30日で打込み面から2.5×5mmの薄片状の試料を採取し、MIPを実施した。各養生条件2体ずつから試料を採取した。水中養生と気中養生の影響を重点的に観察するため、補修材DMでは7W21A、7A21W、28Aの養生条件のみMIPを実施した。

3. 実験結果と考察

3.1 PCMのフレッシュ性状

使用したPCMのフレッシュ性状について表-4に示す。各試験は3回ずつ実施し、平均値をとった。補修材AMとDMではフロー値と単位容積質量、空気量は同程度であった。

表-4 PCMのフレッシュ性状

記号	モルタルフロー(mm)	単位容積質量(kg/L)	空気量(%)
AM	123	2.24	4.1
DM	133	2.25	5.0

3.2 圧縮強度

図-3に各材料・各養生条件における材齢28日の圧縮強度を示す。28W、7A21Wは水中養生から取り出した直後に試験を実施した。補修材AMでは、全体に大きな差は見られないが、7W21Aと7A21Wのように水中と気中

の2つの養生を施した場合に、他の養生条件に比べ強度は増加する傾向がみられた。これは、水和によるセメントの硬化と水分の逸散によるポリマーフィルムの形成の2つの作用が、強度発現に寄与したことによると考えられる。

補修材DMでは、気中養生のみを実施した28Aの圧縮強度が最も小さく、水中養生または封緘養生によって強度が増進している傾向がみられる。また、先に気中養生を実施した7A21Wよりも、先に水中養生を実施した7W21Aと、最初の3日間封緘養生を行った3S25Aの圧縮強度が大きい。これは、初期に水中養生による水分の供給や、封緘養生による水分逸散の抑制によって、セメントの水和を初期に促進することが強度発現に影響したと考えられる。圧縮強度は補修材DMの方が初期水和の影響を大きく受けるが、その原因については使用材料の影響など詳細に検討する必要がある。

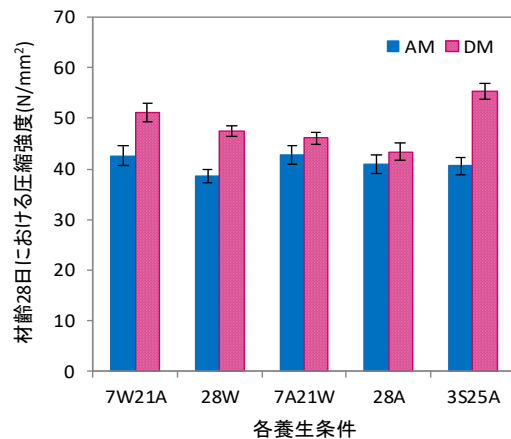


図-3 材齢28日における圧縮強度

3.3 中性化深さ

図-4に中性化深さの計測結果を示す。補修材AMとDMの両材料において、28Aと28A'の中性化深さが顕著に大きかった。図-9でも考察するように、細孔組織が粗になったことによると考えられる。補修材DMでは、28Aと28A'の中性化深さが補修材AMに比べ2-3倍大

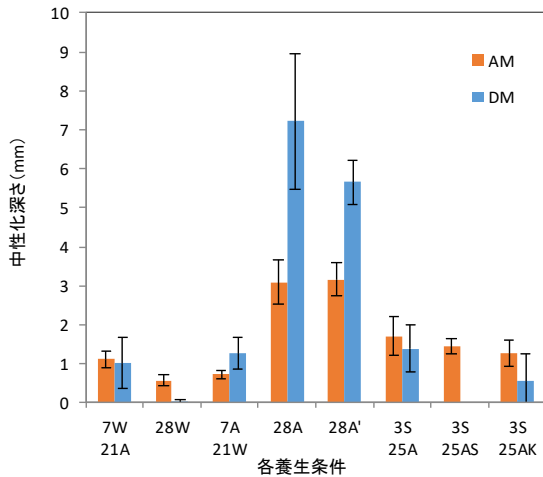


図-4 中性化深さ

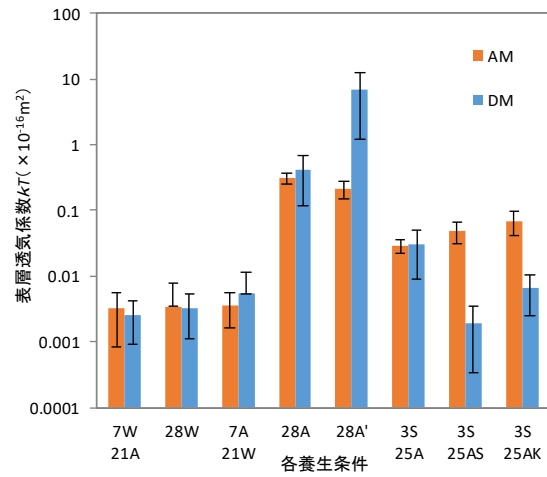


図-5 表層透気係数 kT

表-5 材齢 28 日における表面含水率 (%)

	7W21A	28W	7A21W	28A	28A'	3S25A	3S25AS	3S25AK
AM	3.6	6.5	6.8	3.2	3.2	3.6	3.9	4.0
DM	3.6	4.0	4.0	2.8	3.0	3.7	3.6	3.4

きかった。一方で、封緘養生を実施した 3S25A, 3S25AS, 3S25AK では、特にシラン系表面含浸材によって、中性化抵抗性が向上していることが確認された。後述する表層透気係数 kT の結果においても、シラン系含浸材による性能の向上が見られている。この原因説明は今後の課題である。補修材 DM では、養生条件や表面含浸材が中性化抵抗性に与える影響が大きいことが分かったが、その原因については使用したフェロニッケル細骨材の遷移帯の構造等、より詳細な検討が必要である。

3.4 表層透気係数

表-5 に市販の含水計 (Tramex 社の CMEX II) によって計測した材齢 28 日での表面含水率を、図-5 に表層透気係数 kT を示す。 kT は表面含水率の影響を大きく受けると報告されており、含水率が 5.5% 以下で計測することが推奨されている。補修材 AM の試験体では、含水率が 6% 以上となるものがあつた。これらの試験体では、高含水率であることにより kT が小さくなっている可能性も考えられる。補修材 AM と DM とともに、他の養生条件に比べて、28A と 28A' の kT が大きく、中性化深さと同様の傾向がみられた。水中養生を実施した、7W21A, 28W, 7A21W の方が封緘養生を実施した 3S25A よりも kT は小さい値を示した。水分の供給による水和の促進によると考えられるが、図-4 の中性化深さと合わせて考えると、高い含水率の影響で kT が小さくなった可能性も考えられる。

補修材 DM の養生条件 3S25A, 3S25AS, 3S25AK では、特にシラン系表面含浸材によって、透気抵抗性が向上し

ていることが確認された。補修材 AM ではそのような傾向は認められず、この原因については今後詳細に分析する予定である。

3.5 平均摩耗深さ

図-6 に PCM の摩耗が進行する様子と、図-7, 図-8 に材齢 28 日における平均摩耗深さの経時変化データを示す。図-6 からは、重量細骨材を用いた補修材 DM で、骨材の離脱が補修材 AM に比べて明らかに抑制されている状況が確認できる。

補修材 AM については気中養生のみを実施した 28A と 28A' の平均摩耗深さの値が他の養生条件よりも大きく、次に封緘養生を実施した 3S25A, 3S25AS, 3S25AK の順に平均摩耗深さは減少し、特にけい酸塩系表面含浸材を使用した 3S25AK の耐摩耗性が向上した。これは、封緘養生と含浸材の効果によって表層が緻密化し、耐摩耗性が向上したためだと考えられる。また、水中養生を実施した試験体の平均摩耗深さは全ケースの中でも小さく、7W21A, 7A21W, 28W の順に平均摩耗深さの値は減少する。このことから、水和を十分に促進させることが耐摩耗性を向上させるのに効果的であると考えられる。さらに、28A と 28A' 以外の養生条件では、摩耗促進時間 4-5 時間付近から曲線の勾配が大きくなり、摩耗速度が増加していることが確認できる。これはごく表層において養生の効果が発揮され、内部に進むと耐摩耗性が小さいことを示している。補修材 DM では、補修材 AM と同様に 28A と 28A' の平均摩耗深さの値が他の養生条件よりも大きく、封緘養生によって平均摩耗深さが大きく減少

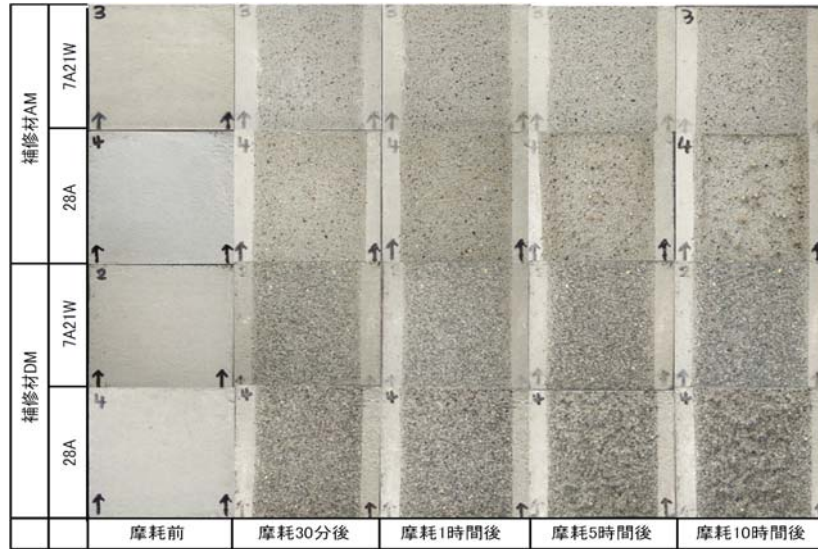


図-6 PCMの摩耗進行の様子

し、特にけい酸塩系含浸材によって耐摩耗性が向上している。さらに、水中養生を実施した養生条件の平均摩耗深さの値も補修材 AM と同様に小さいが、特に 7W21A の摩耗深さの値が非常に小さい。このことから、水和の促進に加えて、水分の逸散によってポリマーによるフィルム効果が発揮され、水流の衝突する試験体の表層が緻密になり、耐摩耗性が向上したことが考えられる。

補修材 DM の平均摩耗深さの値は、28W を除く各養生条件において、補修材 AM の半分程度まで減少していた。このことから、重量細骨材を使用し、新たに材料設計した補修材 DM が、耐摩耗性に関して有効であることが確認された。

3.6 閾細孔径

図-9 に中性化深さと閾細孔径の関係、図-10 に透気係数 kT と閾細孔径の関係を示す。水中養生と封緘養生が各補修材中性化深さと透気係数 kT とともに、閾細孔径との間に正の相関が見られた。2 種類の PCM から得られた分析結果において、閾細孔径と物質移動抵抗性の間に正の相関が見られ、適切な養生によって閾細孔径は小さくなることが確認された。

水中養生と気中養生の順番について、空隙構造の観点からも考察する。補修材 AM では養生条件 7W21A と 7A21W における閾細孔径は同等であり、養生の順番の影響は見られなかった。補修材 DM では 7A21W よりも 7W21A の方が明らかに小さい閾細孔径を示した。表層透気係数や中性化深さの観点では 2 つの養生条件による供試体はほぼ同等の結果を示したが、水流摩耗試験では 7A21W の方が優れた性能を示した。補修材 DM が水流摩耗試験で高い抵抗性を発揮した理由については空隙構造の観点だけでは説明ができず、骨材界面の性状にも着目して、さらに分析を重ねる予定である。

被膜養生剤の効果についても分析する。補修材 AM の 28A は被膜養生剤を使用していない 28A' よりも閾細孔径が大きかった。補修材 AM では 28A と 28A' の中性化深さと透気係数は同程度であるが平均摩耗深さは 28A の方が大きい。しかし補修材 DM では同様の傾向は見られなかった。被膜養生剤が PCM の品質に与える影響は本研究の結果のみでは十分に判断できず、今後検討する必要がある。

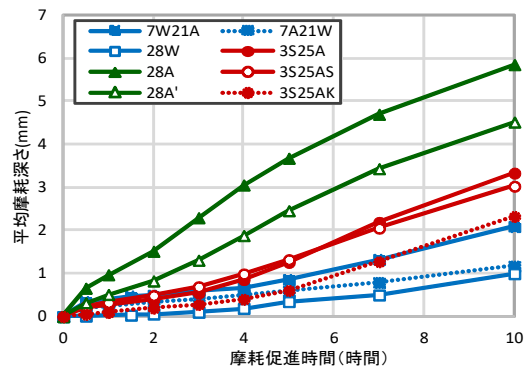


図-7 平均摩耗深さ (AM)

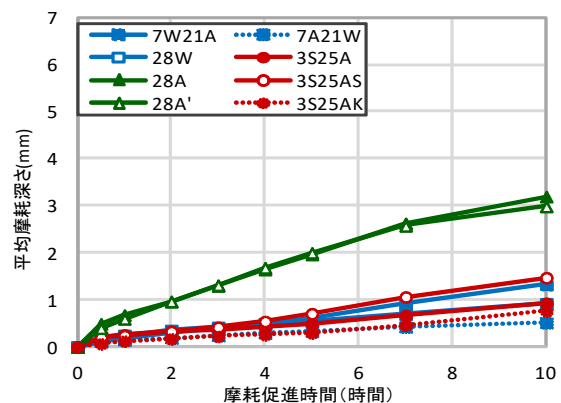
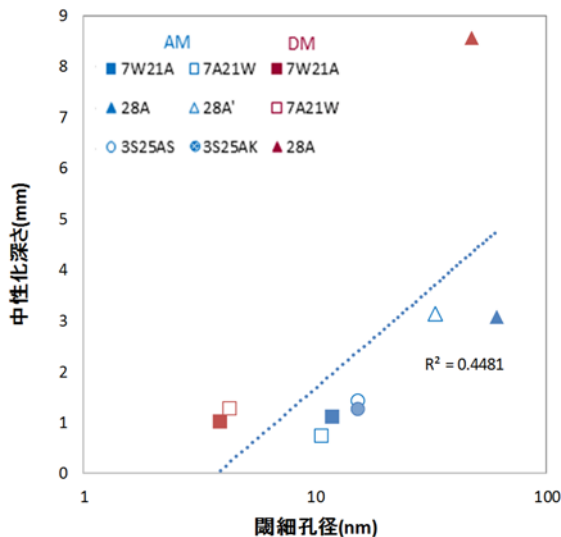
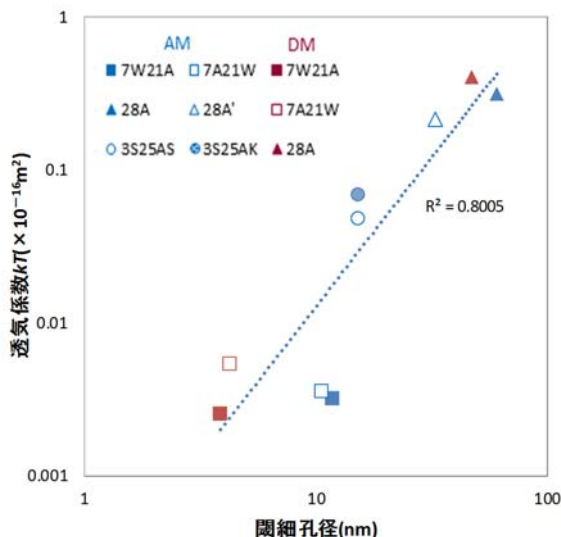


図-8 平均摩耗深さ (DM)



図一9 中性化深さと閾細孔径の関係



図一10 表層透気係数と閾細孔径の関係

4. 結論

農業用 RC 開水路の補修に用いられる補修材と、高い耐摩耗性を発揮するように、新たに材料設計した補修材を用いて、PCM が高い耐久性を発揮するために必要な養生方法について検討した。PCM の耐久性を評価するため、圧縮強度、中性化深さ、表層透気係数 kT 、水流摩耗試験、閾細孔径について検討を行った。本研究において使用した PCM について結論として以下のことが言える。

- (1) PCM の性能は養生条件の影響を大きく受け、PCM の耐久性を向上させるには、適切な養生の実施が重要である。
- (2) PCM は水中養生による水分の供給や封緘養生によ

って水分逸散の抑制をすると、圧縮強度、中性化抵抗性、透気抵抗性、耐摩耗性が向上した。

- (3) 水流摩耗試験において、水中養生や封緘養生の効果が発揮され、ごく表層における摩耗速度が非常に小さくなった。
- (4) 高い耐摩耗性を発揮するように重量細骨材を用いて材料設計した PCM において、水流摩耗試験の結果から摩耗に対する高い抵抗性が確認された。
- (5) PCM の閾細孔径は中性化深さと表層透気係数 kT と正の相関があり、適切な養生を施すことによって閾細孔径は小さくなった。
- (6) 補修現場における養生方法として、封緘養生、または散水による水分の供給を行うことが効果的である。施工後の留意点として適切な養生の実施を取り上げることが重要である。

謝辞

本研究は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の「SIP インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」(管理法人：JST)によって実施されました。本研究の実施には川邊翔平氏をはじめ、国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構の方々と、七澤章氏をはじめ、デンカ株式会社の方々にご協力いただきました。謝意を表します。

参考文献

- 1) 北村浩二：農業用水路のストックマネジメントにおける劣化予測に関する、農村工学研究所報告，第 49 号，pp.202-205，2010.2
- 2) 中井裕司，豊福俊泰，内田明：補修用ポリマーセメントの養生方法と中性化に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.1678-1683，2012.7
- 3) 大濱嘉彦：よくわかる「ポリマーセメントコンクリート/ポリマーコンクリート」の基本と応用，(株)建築技術，pp.13-24，2007.7
- 4) 国土交通省東北地方整備局，コンクリート構造物の品質確保の手引き(案)(橋脚，橋台，函渠，擁壁編)，pp.23-24，2015.12
- 5) 渡嘉敷勝：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，第 52 号，pp.16-26，2013.3
- 6) 酒井雄也，岸利治：閾細孔径に基づくコンクリート中の物質移動の定量評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.688-693，2014