

論文 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

中山 英明*1・細田 暁*2・川邊 翔平*3・長谷川 雄基*4

要旨：本研究では、表面被覆工法に用いる無機系材料の摩耗抵抗性の適切な評価手法を提案するための検討を実施した。摩耗エネルギーの異なる二つのサンドブラスト試験を用いて、材料・養生方法の異なる供試体の摩耗抵抗性を調査した。その結果、本研究で用いた中で吐出圧が 0.5MPa と高いサンドブラスト試験による質量減少量は、表層透気係数および圧縮強度と強い相関が示された。さらに、実際の水路における暴露試験との相関を調べ、表層透気係数と摩耗量の間に緩い相関が見られた一方で、サンドブラスト試験では溶脱を伴う摩耗に対する抵抗性が十分に評価できない可能性が見られた。

キーワード：表面被覆工法、摩耗抵抗性、サンドブラスト試験、表層透気試験、暴露試験

1. はじめに

農業用水利施設の RC 開水路において、長期間の供用中に水流による摩耗を始めとする劣化が進行し、適切な維持管理が求められている。摩耗等によって劣化した RC 開水路の補修方法として、ポリマーセメントモルタル(以下 PCM と称す)を用いた無機系表面被覆工法が主に使用されている。工法の耐用年数は 20 年と設定されており、少なくとも供用期間中に被覆厚さよりも摩耗深さが小さくなる必要がある¹⁾。また、摩耗抵抗性の高い材料が開発されれば、より長期間の供用も可能となる。

「農業水利施設の補修・補強工事に関するマニュアル」においては、耐摩耗性の照査方法として水砂噴流摩耗試験が規定されているが、試験機が国内に一台しかない状況であり、試験にも多大な労力を要する¹⁾。長谷川らは、サンドブラスト法を用いた簡易な手法が、水砂噴流摩耗試験の代替となる可能性を報告している²⁾。しかし、サンドブラスト法による検討は、JIS モルタルに対して行われたものはあるものの、PCM に対する検討は十分ではない。

第二著者の既往の研究³⁾により、PCM の施工後の適切な養生により、水流摩耗試験による摩耗抵抗性が向上することが示されている。また、水流摩耗試験より計測された平均摩耗深さと、表層透気試験を用いた表層透気係数との間にも相関が認められ、摩耗抵抗性とモルタルの緻密性に関係があることが示唆されている。表層透気試験は、実構造物に対しても適用できるため、PCM の施工時の品質管理や施工後の検査にも活用できる可能性がある。

本研究では、RC 開水路の補修に用いる PCM の摩耗抵

抗性を簡易に評価できる手法の構築を目的とする。複数の PCM および JIS モルタルに対して、二つの摩耗エネルギーの異なるサンドブラスト試験を行い、各種の PCM の摩耗抵抗性を比較し、養生の影響について分析する。そして、これらの供試体に対して表層透気試験、圧縮強度試験も実施し、サンドブラスト試験による摩耗抵抗性との相関を調べる。さらに、実際の水路で 2 年間行った暴露試験による摩耗量と、上記の試験との相関を調べる。

2. 実験概要

2.1 供試体の作製方法

本研究では、複数の PCM と JIS モルタルを用い、養生条件を変化させて供試体を作製した。使用材料を表-1 に示したが、既往の研究で使用した PCM である AM と DM も含み、早強タイプの試作品である DM2 を含めた。各材料のフレッシュ性状を調べるため、フロー値、空気量および単位容積重量を計測し、結果を表-2 に示す。モルタルの打込み後 24 時間は、気中養生の場合には封緘せずに室温 20℃で相対湿度 60%の室内に静置し、水中および封緘養生の供試体に対しては樹脂ラップ(ポリ塩化ビニリデン)を用いて封緘し同室に静置した。水中養生を施す供試体は、材齢 1 日で樹脂ラップを取り除いた後に脱型し、材齢 7 日まで 20℃の水槽に静置した。封緘養生の供試体は、材齢 7 日まで、脱型せず室内に静置した。材齢 7 日以後、水中養生および封緘養生の供試体は、試験を実施する材齢まで室内で気中養生を行った。

サンドブラスト試験を行う供試体の寸法は、100×100×50mm とし、二つのサンドブラストによる掘削を同一の表面に対して実施できるように設定した。厚さ

*1 横浜国立大学大学院 都市イノベーション学府 都市地域社会専攻 (学生会員)

*2 横浜国立大学大学院 都市イノベーション研究院 教授 (正会員)

*3 農業・食品産業技術総合研究機構 農村工学研究部門 施設工学研究領域 施設保全ユニット (正会員)

*4 香川高等専門学校 建設環境工学科 助教 (正会員)

表－1 使用材料

試験	使用材料	詳細
サンドブラスト試験	AM	プレミックスタイプの繊維混入 PCM
	DM1	砂につき重量細骨材を使用した試作 PCM
	DM2	早強タイプの試作 PCM
	JIS	JIS5201 に準拠した標準モルタル
暴露試験	AM	同上
	DM1	同上
	TM	繊維入り抗摩耗 PCM

表－2 フレッシュ性状

	フロー値 (mm)	単位容積重量 (kg/l)	空気量 (%)
AM	12.9	2.2	4.5
DM1	12.6	2.4	6.0
DM2	14.0	2.2	9.0
JIS	17.1	2.3	6.0

を 50mm とし、サンドブラスト試験の前に表層透気試験を実施できるようにした。配合および練混ぜ方法はメーカーの仕様に準拠し、打設 30 分後、コテ仕上げ補助剤兼被膜養生剤を用いて、すべての供試体に対して均一に一回散布させコテ仕上げを行った。1 時間後、養生条件に応じて樹脂ラップをかけた。また、圧縮強度試験用の円柱供試体 (φ50×100mm) をサンドブラスト試験の供試体を作製したのと同じバッチのモルタルで作製し、養生剤による仕上げは行わず、材齢 28 日後に計測した。

K 用水路における暴露試験では、供試体の寸法は 300×300×60mm とし、摩耗量測定用のステンレス製ピンを埋設した。

2.2 表層透気試験

ダブルチャンバー法の表層透気試験 (トレント法) を、各供試体のサンドブラスト試験を開始する前に、材齢 28 日において実施した。なお、供試体作製時の仕上げ面に対して表層透気試験を実施するため、試験時に気体が漏れないように、シリコンゴムを用いた治具をチャンバーと供試体の間に設置する配慮を行った。

2.3 サンドブラスト試験

サンドブラスト試験で用いる試験機の性能を表－3 に示す。サンドブラスト A は長谷川らが使用したものと同じであり、図－1 に示す。ブラストガン中央部に研磨材噴射口、その周縁部に吸引口がある。供試体を掘削したのち研磨材と粉塵は吸引され、分離層で粉塵を分離し、回収された研磨材は再度ブラストホースを通して吐出される。なお、粉塵の完全な分離はできず、研磨された粉塵が少し含まれても、試験結果に影響のない試験条件を確認し、定期的に研磨材を交換した。試験時にはブラストガンを試験者が手で保持して実施した。

一方、サンドブラスト B は図－2 のように専用治具でサンドブラスト試験機を固定し、供試体との距離を一定に保持して研磨材を吐出する方法を取る。研磨材は回収されない。また、サンドブラスト A や、水砂噴流摩耗試験などの室内試験とは異なり、現地へ持ち運びすることも可能である。携帯式レーザー変位計と合わせて用いることで、開水路壁面の平均摩耗深さを調査することも想定している。さらに、試験機を構成するブラストガン、コンプレッサーは市販のものであるため、簡便な手法として開発されている。

供試体の養生終了後の材齢 28 日にサンドブラスト B、材齢約 3 ヶ月でサンドブラスト A の試験を実施した。当初は両試験を材齢 28 日に実施したが、サンドブラスト A の研磨材と粉塵の分離が完全でないことに伴う掘削力低下が試験結果に影響を及ぼした可能性が判明し、材齢 3 ヶ月で再度実施した。それぞれのサンドブラスト機に所定の摩耗時間を設定し、質量減少量お

表－3 サンドブラストの性能

	サンドブラスト A	サンドブラスト B
吐出圧	0.5MPa	0.2MPa
研磨材 (粒径)	フジランダム A-36 (アルミナ製, 425~500μm)	珪砂 5 号 (300~600μm)
吐出距離	10~20mm	50mm
ノズル口径	φ50mm	φ4.5mm
吐出形状	直線状	スプレー状
バキュームの有無	有	無
試験時間	5, 15, 30 (秒)	15, 45, 90 (秒)

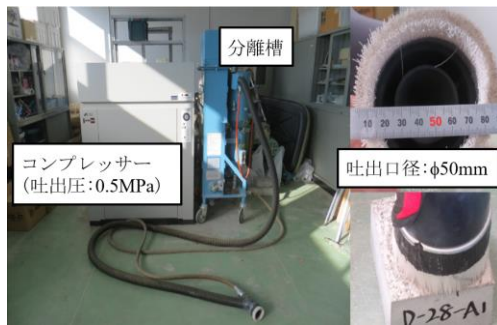


図-1 サンドブラスト A の概要

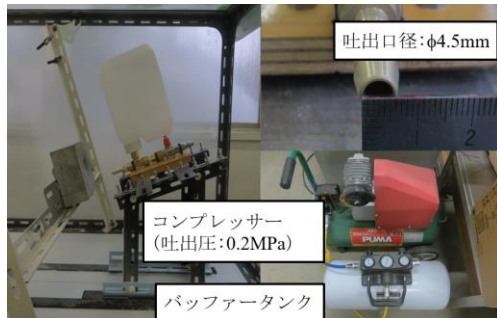


図-2 サンドブラスト B の概要

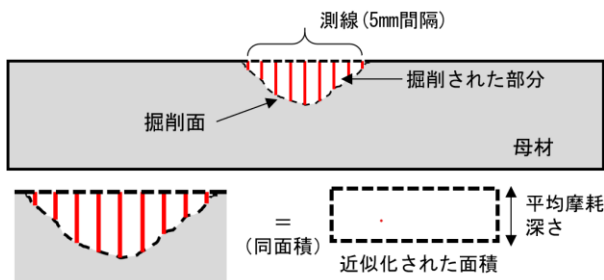


図-3 平均摩耗深さの概念図

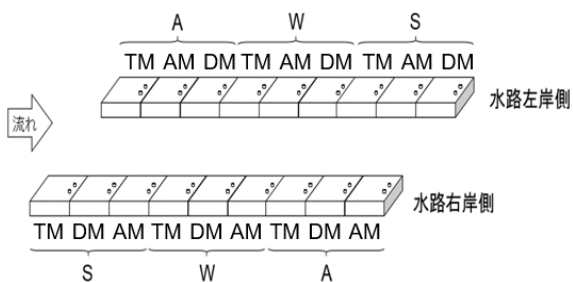


図-4 暴露供試体の配置方法



図-5 暴露供試体の配置の様子(右岸)

よび平均摩耗深さを計測した。質量減少量は、摩耗前後の供試体の質量を、電子天秤(精度 0.01g)を用いて計測した。供試体の含水率の変化による質量変化も影響を及ぼす可能性があるため、各試験時間における摩耗直前、直後の質量を記録した。平均摩耗深さはレーザー変位計(0.1mm 間隔, 9 測線)を用いて、掘削面を通る測線における掘削深さをプロットしたのち、掘削面の面積を長方形に近似化させ深さ方向の距離を平均した値である。概念図を図-3 に示す。測線の間隔は 5mm とし、掘削面の図-3 における紙面直交方向の奥行の測定幅はサンドブラスト A で 40mm, サンドブラスト B で 20mm として設定した。

2.4 暴露試験

実際の用水路(K 用水路)にて、暴露試験を実施した。供用時の K 用水路では流速約 2m/s, 水深約 2m であり、非灌漑期(9 月下旬~3 月下旬)では完全に落水する。非灌漑期に材齢約 4 ヶ月の試験体を、両岸にある河床の試験体設置用床版の上に設置し、約 2 年間暴露させた。設置した模式図を図-4, 設置された供試体の様子を図-5 に示す。各試験体に埋設した摩耗量測定用ピンの間(100mm)の平均摩耗深さを、レーザー変位計より計測した。

3. 実験結果と考察

3.1 サンドブラスト試験と評価指標に関する検討

二つの摩耗エネルギーが異なるサンドブラスト試験から得られた摩耗抵抗性について比較する。その際に、摩耗抵抗性を評価する適切な指標について検討した。

それぞれのサンドブラストを設定した摩耗時間まで掘削した結果、サンドブラスト A では 15 秒以降にすり鉢状に深く掘削される状況が観察され、実際の RC 水路で発生する摩耗深さと対応していないと考えられた。また、サンドブラスト B では 45 秒まで掘削量は極めて小さいことが分かった。二つのサンドブラスト試験の結果の相関を調べるに当たり、実際の水路で発生する摩耗深さと同程度とするために、サンドブラスト A では掘削開始後 5 秒, サンドブラスト B では掘削開始後 90 秒における結果を使用することとした。

次に、摩耗抵抗性を評価する指標として、質量減少量と平均摩耗深さについて検討した。図-6 より、二つのサンドブラスト試験による質量減少量には、明確な相関が確認された。同一材料においては、気中養生のものが、最も摩耗抵抗性が小さい傾向が基本的には見られた。しかし、質量減少量を指標として用いる場合、供試体の含水率によっては、試験期間中の供試体の乾燥による質量減少が発生する場合があります。掘削量が小さい状態で検討する場合に留意する必要がある。

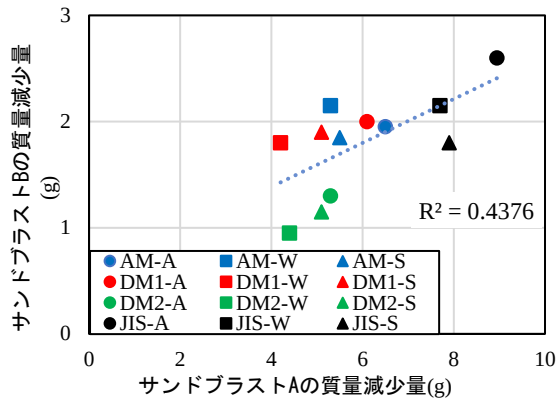


図-6 サンドブラスト試験の質量減少量の比較

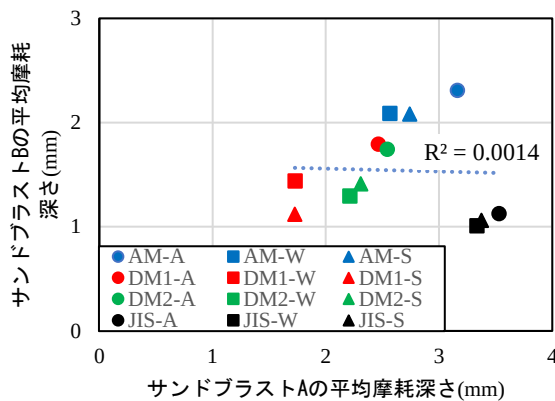


図-7 サンドブラスト試験の平均摩耗深さの比較

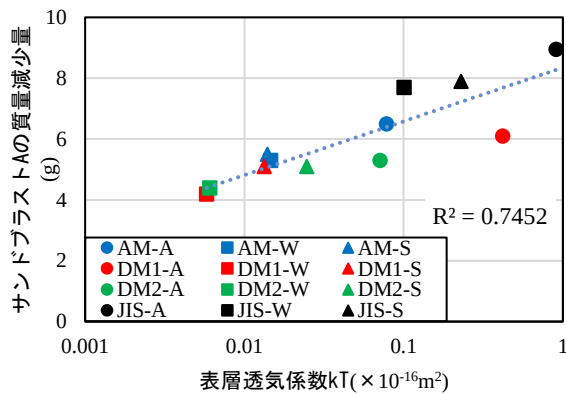


図-8 サンドブラスト A と kT の相関

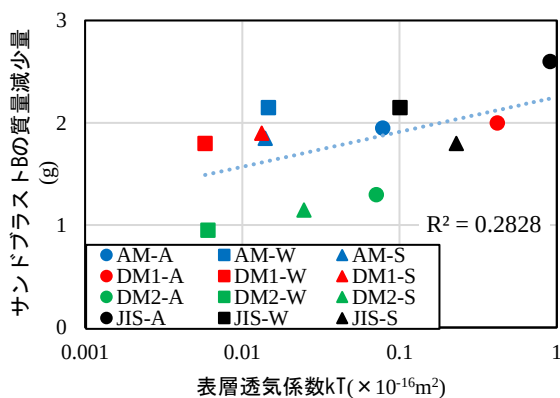


図-9 サンドブラスト B と kT の相関

一方、平均摩耗深さを用いて分析したところ、図-7 より明確な相関が確認されなかった。その理由として、サンドブラストの掘削を供試体の仕上げ面に実施したため、掘削前の供試体表面の凹凸や空気泡等によって、算出される平均摩耗深さの結果が大きな影響を受ける場合があるためであると考えている。

以上の検討より、本研究において、サンドブラスト試験の結果の分析においては、質量減少量を用いることとした。

3.2 サンドブラスト試験の結果の考察

サンドブラスト試験より得られる供試体の摩耗抵抗性の評価を、質量減少量の結果より考察する。

図-6 より、サンドブラスト A の結果では、すべての材料において、気中養生した供試体の摩耗抵抗性が最も低い結果となった。また、すべての供試体で水中養生した供試体の摩耗抵抗性が最も高かったが、JIS モルタルと AM では封緘養生との差はわずかであった。

一方、サンドブラスト B では、各材料において、必ずしも気中養生の供試体の摩耗抵抗性が最小ではなく、必ずしも水中養生の供試体の摩耗抵抗性が最大ではなかった。サンドブラスト A ではほとんど差の見られなかった DM1 と DM2 の質量減少量が、サンドブラスト B では大きな差が見られた。また、DM2 のみ、サンドブラスト B による質量減少量が小さいことが確認されている。筆者らは、摩耗エネルギーの小さいサンドブラスト B においては、試験期間中の供試体の乾燥による質量減少や、掘削面への研磨材の付着による影響が含まれている可能性も否定できないと考えており、今後、検討が必要である。

3.3 サンドブラスト試験と表層透気試験の相関

ここでは、サンドブラスト試験による質量減少量と、表層透気係数および強度との相関を調べた結果について考察する。

サンドブラスト A、B による質量減少量と表層透気係数(以下 kT と称す)の関係を図-8 および図-9 に示す。

kT は、値が小さいほど緻密性が高いことを示し、対数軸を取って質量減少量との相関を調べた。図-8 より、サンドブラスト A における質量減少量と kT には明確な相関が認められた。すべての試験体で気中養生の供試体が最も大きな kT を示し、封緘養生や水中養生により kT が小さくなる傾向が明らかである。また材料別の水中、封緘養生に着目すると、DM2、DM1、AM、JIS の順に緻密性及び質量減少量の優劣が確認されたが、気中養生では必ずしも優位性が一致していない。特に、DM1 の kT からは、水中養生と封緘養生を行ったときの高い緻密性に比べて、気中養生では緻密性を大きく損ねていることが分かる。これは DM1 に含まれるスラグ系重量骨材が、適切に養生された場合に、骨材界面が緻密化されること

の影響であると考察しているが、原因の解明において詳細な検討が必要である。

図-9より、サンドブラストBの質量減少量とkTの相関は、図-8に比べて大幅に低下した。このことから筆者らは、サンドブラストBによる質量減少量の計測精度や乾燥による質量減少の影響があると考えている。

またkTは、供試体の含水率の影響を大きく受けることが指摘されている。電気インピーダンスによる含水計(CMEX-II)で計測した含水率が5.5%以下であることが推奨されている。本研究では、表層透気試験の開始前の含水率は計測されていない。2節に記したように、材齢28日まで気中養生しているために含水率の影響は大きくはないと考えているが、今後、材齢や含水率の影響についても検討を深める必要がある。

3.4 サンドブラスト試験と圧縮強度試験の相関

圧縮強度と質量減少量の関係を図-10と図-11に示す。全材料において気中、封緘、水中の順に強度が増大することが明確に見られ、特にDM1は養生による強度増進が著しいことが分かった。図-10より、サンドブラストAによる質量減少量と圧縮強度には極めて高い相関が確認された。一方で、図-11に見られるように、サンドブラストBの質量減少量と圧縮強度の相関は、図-10に比べると低かった。この結果も、サンドブラストBの摩耗エネルギーが小さいことに伴う誤差や乾燥による質量減少等の影響を示唆していると考えられる。

3.5 暴露試験の結果と考察

K用水路にて、約2年間暴露したPCM供試体の摩耗量を計測した。暴露供試体の摩耗深さと、本研究で実施したサンドブラスト試験Aおよび暴露試験開始の直前に実施した表層透気試験の結果との関係を調べた。

図-12に暴露供試体の摩耗量の経時変化を示す。同じ材料間で比較した場合、摩耗抵抗性は、気中、封緘、水中の順に高くなり、特に2年後の計測結果においては、供試体作製時の養生の摩耗抵抗性に及ぼす影響が明瞭に確認された。また材料別に比較すると、DM1の摩耗量が全体的に大きく、本研究で検討したサンドブラスト試験や表層透気試験で見られたDM1のAMに対する優位性が、2年間の暴露試験の結果においては見られなかった。

図-13にサンドブラストAの質量減少量と、暴露約2年の摩耗深さの関係を示す。TMについてはサンドブラスト試験を実施していない。AMとDM1のどちらの材料においても、養生の影響は同じ傾向を示し、水中養生の供試体が最も高い摩耗抵抗性を示した。しかし、DM1の暴露供試体の摩耗深さがAMよりも大きい結果となり、サンドブラスト試験Aによる評価と逆転する結果となった。実際の水路の暴露環境では、本研究の室内試験では考慮できていない溶脱による影響もあると考えられる。

暴露試験において、DM1が低い摩耗抵抗性を示した原因については、詳細な検討が必要である。

図-14にkTと、暴露約2年の摩耗量の関係を示す。kTは、暴露する前の供試体の計測値を使用した。kTと摩耗量に緩い相関が確認されたが、材料によって同じ養生条件でもkTのばらつきが大きく、測定面である供試体作製時の仕上げ面の不陸の影響も考えられる。

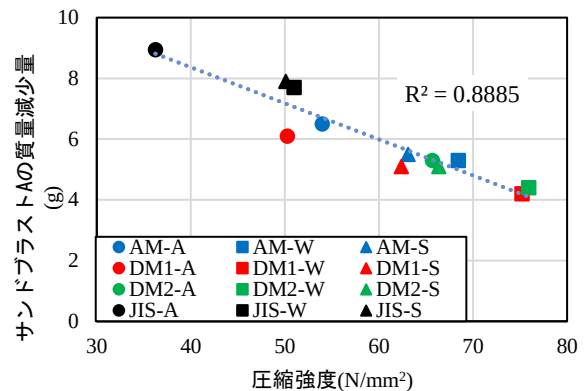


図-10 サンドブラストAと圧縮強度の相関

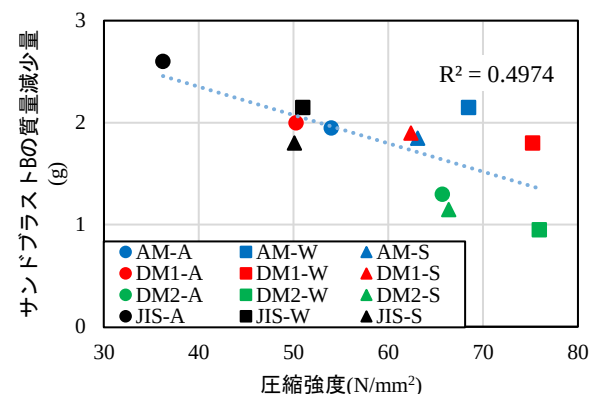


図-11 サンドブラストBと圧縮強度の相関

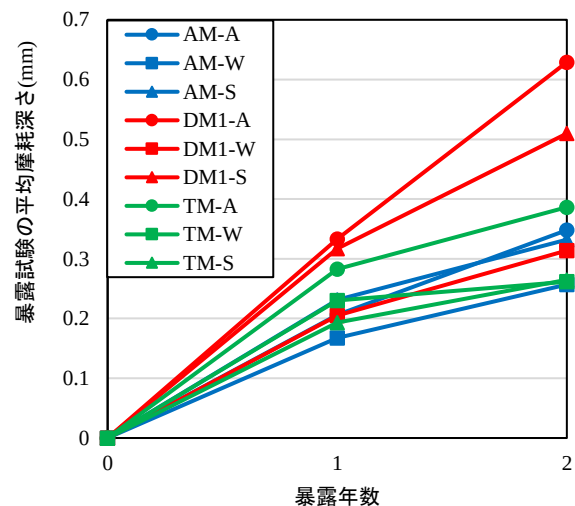


図-12 暴露試験の経時変化

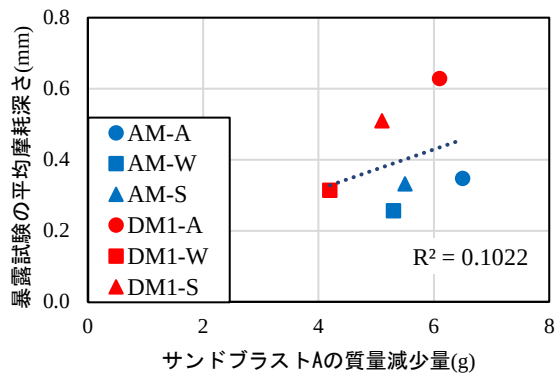


図-13 サンドブラスト試験と暴露試験の関係

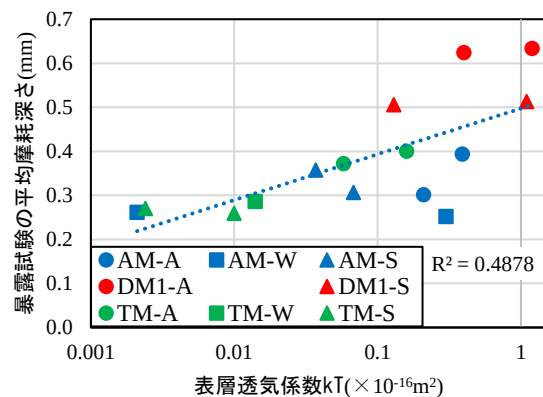


図-14 kT と暴露試験の関係

4. まとめ

本研究では、表面被覆工法に用いる PCM の摩耗抵抗性の適切な評価手法を提案するための検討を実施した。得られた結果を以下に整理する。

- (1) サンドブラスト試験において、供試体の仕上げ面に実施する場合に摩耗深さが小さい場合、平均摩耗深さは評価指標として適していない。
- (2) サンドブラストの摩耗エネルギーが小さく、質量減少量が小さい場合、供試体の含水状態によっては乾燥による質量減少の影響が生じる可能性がある。

- (3) サンドブラスト試験 A から得られた質量減少量と、表層透気係数および圧縮強度に強い相関が見られた。
- (4) サンドブラスト試験 A で高い摩耗抵抗性を示した材料が、2 年の暴露試験では逆に低い摩耗抵抗性を示した。サンドブラスト試験では、溶脱を伴う摩耗に対する抵抗性が十分に評価できない場合があると思われる。
- (5) 暴露を実施する前の表層透気係数と、暴露試験による摩耗抵抗性には緩い相関が確認された。

謝辞

本研究は、令和元年度イノベーション創出強化研究推進事業 課題番号：29001A 課題名：農業用コンクリート開水路の無機系表面被覆工の性能低下に関する基礎的研究、による助成を受けて実施しました。また、本研究の実施において、デンカ株式会社の佐々木崇氏、高知大学の佐藤周之先生にご協力いただきました。謝意を表します。

参考文献

- 1) 農林水産省農村振興局整備部設計課施工企画調整室：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），2015.4
- 2) 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補修材の促進摩耗試験方法の検討，農業農村工学会論文集，No.305，pp215-220，2017.12
- 3) 木下果穂，細田暁，浅野勇，佐々木崇：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.1，pp1717-1722，2017