論文　掃流摩耗を想定したコンクリート表層の耐摩耗性評価法に関する検討

村田　哲[*1]・新藤　竹文[*2]・菅野　道昭[*3]・松岡　康訓[*4]

要旨：掃流摩耗を受けるコンクリートは流水中の土砂による摩耗や衝撃によって選択的摩耗現象を生じる。著者らは，珪砂の噴射および高圧水による摩耗試験を提案し，掃流摩耗現象を簡易的に評価することを試みた。その結果，ここに提案する試験は掃流摩耗による選択的摩耗作用を再現できること，また，農林水産省の定める耐摩耗性の照査方法と同様に，標準とする供試体に対する摩耗深さの比によって，検討対象の耐摩耗性の評価が可能であることを確認した。さらに，各種比較試験を実施し，コンクリート表層処理による耐摩耗性の向上について検討した。

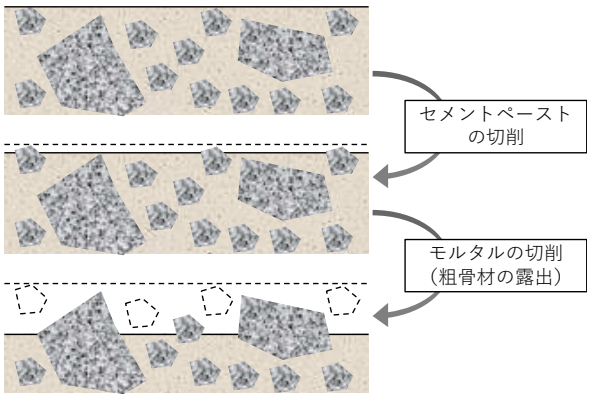
キーワード：摩耗試験，摩耗深さ，耐摩耗性，補修，CF 複合パネル

1.　はじめに

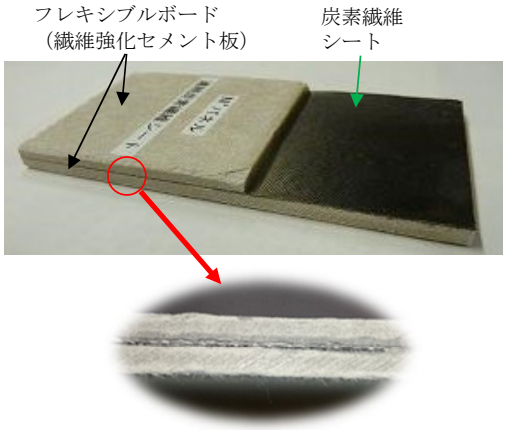
近年，我が国の社会基盤施設は更新期にあり，多くのコンクリート構造物で早急な補修・補強対策が求められている。特に，コンクリート水路などの水利施設では，流水中の土砂による摩耗や衝撃による掃流摩耗作用により，**図－1** に示すようにコンクリート表層から比較的脆弱なセメントペースト，モルタルが先行して切削され，粗骨材の露出を誘発する，いわゆる選択的摩耗現象を生じる [1)]。このような選択的摩耗による劣化が顕在化した水利施設コンクリートでは，平滑性が低下し，流下能力が低下している状態で供用されている場合も多くある。このような水利施設を本来の流下能力まで回復させるためには，再劣化を生じないような十分な耐摩耗性を有するとともに平滑性に優れた適切な材料を用いた補修を施す必要がある。

著者らは，連続炭素繊維シートをフレキシブルボード（厚さ 3mm の繊維強化セメント板）でサンドイッチした薄肉・軽量の PCa パネル（以下，CF 複合パネルと称する）を開発し（**写真－1**），コンクリート構造物の表層リニューアルや剥落防止工への適用を重ねてきた。さらに，その用途展開の一つとして水利施設コンクリートの補修への適用を目指して，ASTM C779（回転ディスク法）摩耗試験による耐摩耗性の評価，および二次元水路実験により粗度係数を評価し，その適用可能性を検証した [2)]。

本稿では，このような掃流摩耗作用を受けるコンクリート表層の耐摩耗性をより的確に評価することを目的に考案した珪砂と高圧水の同時噴射方式による摩耗試験方法について述べるとともに，この試験を適用した，各種の改良を施した CF 複合パネルの耐摩耗性の評価結果について報告する。



図－1　選択的摩耗現象模式図



写真－1　CF 複合パネル

*1 大成建設(株) 技術センター 土木技術研究所 土木構工法研究室，修(工)（正会員）
*2 大成建設(株) 技術センター 土木技術研究所，工博（正会員）
*3 成和リニューアルワークス(株) 技術・営業統括部
*4 成和リニューアルワークス(株) 工博（正会員）

2.　試験概要

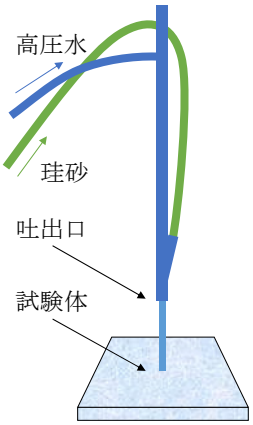
2.1　摩耗試験の諸条件

ここに提案する摩耗試験の概要を**図－2** に，試験状況を**写真－2** に示す。本摩耗試験は，汎用の高圧洗浄機の吐出口に混合ノズルを取付け，水の高圧移動に伴う負圧により吸引した珪砂を試験体表層に噴射し，掃流摩耗を模擬する方法である。**図－3** に示すように，噴射水の圧力を高くすると，噴射される水と珪砂の量は直線的に増加するが，噴射水の圧力を 1000 psi（約 6.90 MPa）とすると，噴射時間 5 分程度と短時間で試験体を貫通した。一方，250 psi（約 1.72 MPa）とすると，負圧が足らず珪砂が一時的に閉塞する等，噴射量が不安定となる場合が生じた。そこで，噴射水の圧力は，長束らの実験 [1]における噴射圧力が約 2.0 MPa であることを鑑み，また，摩耗の進行を緩やかに，かつ珪砂を安定的に噴射することのできる 300 psi（約 2.07 MPa）に設定した。なお，**図－3** は閉塞していない場合の噴射量である。

摩耗試験の諸条件を**表－1** に示す。珪砂混入水の噴射口からの圧力は 300 psi（約 2.07 MPa），水砂噴射量 3.434 *l*/min（珪砂 0.177 *l*/min，水 3.257 *l*/min），研磨材には 4 号珪砂を用い，一度試験に用いた珪砂は再利用しないものとした。

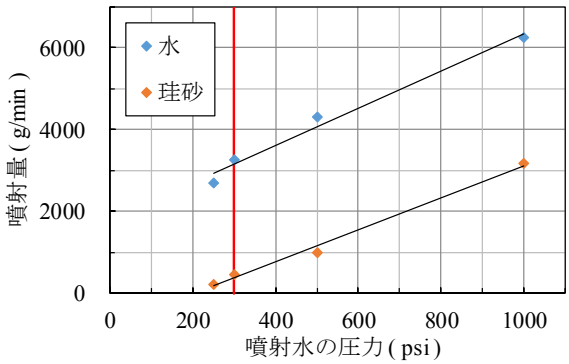
ここで，サンドブラスト法（ASTM C418 [3]）では噴射距離は 76 mm としている。目視観察ではあるが，この噴射距離では珪砂と高圧水のリバウンドにより噴射が阻害される状況が確認され，摩耗試験への影響が懸念された。そこで，リバウンドの影響がない範囲で，できるだけ試験体に近い噴射距離として 152 mm に設定した。なお，本試験の噴射距離はノズル径 10 mm の約 15 倍であり，サンドブラスト法の噴射距離（ノズル径 6.4 mm の 約 12 倍）とほぼ同等の条件といえる。

摩耗試験中は目視で試験体を観察し，試験体に変化が生じた場合には摩耗試験を中断して外観を観察した。最大摩耗深さはデプスゲージを用いて測定した。なお，摩耗時間が 30 分を経過しても変化がない場合には試験を終了することとした。



図－2　摩耗試験概要

写真－2　試験状況



図－3　噴射量－噴射水の圧力

表－1　摩耗試験の諸条件

項目	条件
噴射水の圧力	300 psi（約2.07 MPa）
噴射水量	3.434 *l* /min
噴射距離	152 mm
研磨材	4号珪砂
粒径	0.61 mm ～ 1.18 mm
珪砂の体積濃度	0.052
ノズル径	φ 10 mm
試験時間	30 分

表－2　試験ケース 1

試験体	○ JIS-28	■ PIC-N	◆ PIC-D
概要	JIS標準モルタル（材齢28日）	ポリマー含浸CFパネル	
		含浸前乾燥：無	含浸前乾燥：有
含浸率(%)	－	14.0	19.3

表－3　試験ケース 2

試験体		A	B	C	D1	D2	D3	D4
上塗り材	種類（弾性率）	高弾性タイプ（約1300 MPa）	ポリウレタン系 中弾性タイプ（約700 MPa）	低弾性タイプ（約20 MPa）	ポリウレタン系（低弾性タイプ）と中塗り材との混合材料			
	被覆厚 (μm)	400	400	400	400	200	200	200
	塗布回数	2	2	2	2	2	3	4
	全厚 (μm)	800	800	800	800	400	600	800
中塗り材	種類	特殊ポリオレフィン系混和剤を用いた弾性モルタル（被覆厚 1 mm）						

2.2 試験体概要

試験体は□200mm×200mm とし，市販のコンクリート平板（□300mm×300mm）にエポキシ樹脂で接合した。

(1) 標準モルタル試験体（JIS-28）

摩耗深さ比較用の標準モルタル試験体 JIS-28 は，JIS R 5201 セメントの物理試験方法に準拠し，W/C＝0.5，S/C＝3.0 の配合のものを作製した。摩耗試験に供した試験材齢は 28 日とした。

(2) ポリマー含浸処理 CF 複合パネル（PIC-N，PIC-D）

ASTM C779 摩耗試験を用いた耐摩耗性の評価 [2)]において，アクリル系ポリマーを含浸処理した CF 複合パネルは耐摩耗性が向上し，普通コンクリート（W/C=45%，圧縮強度 47N/mm^2）と同等となったことを踏まえ，同様の手法でアクリル系ポリマーを含浸処理した CF 複合パネルを作製した。試験体は，CF 複合パネルにポリマーを含浸する前に高温乾燥させた試験体 PIC-D と，乾燥させずにポリマーを含浸させた試験体 PIC-N とした。ポリマー含浸前の質量に対する質量増加率は，PIC-N が 14.0 %，PIC-D が 19.3 %であった。

(3) 被覆処理 CF 複合パネル

表層を樹脂被覆処理した CF 複合パネルを作製した。被覆材は上塗り材と中塗り材の二層で構成される。作製した試験体は上塗り材の種類と被覆厚の異なる試験体 A，B，C，D1，D2，D3 および D4 の 7 体とした。

上塗り材は，試験体 A，B，C がポリウレタン系であり，試験体 A は高弾性タイプ（弾性率 1300 MPa 程度），試験体 B は中弾性タイプ（弾性率 700 MPa 程度），試験体 C は低弾性タイプ（弾性率 20 MPa 程度）である。また，試験体 D1，D2，D3 および D4 に用いた上塗り材はポリウレタン系被覆材（低弾性タイプ）と中塗り材（特殊ポリオレフィン系混和剤を用いた弾性モルタル）との混合材料である。

試験体 A，B，C，D1 の被覆厚はすべて 400μm×2 回塗り（800μm）とし，上塗り材の種類の違いを比較検討した。試験体 D2，D3，D4 は上塗り材の一層当たりの被覆厚を半分（200μm）とし，塗布回数を 2 回～4 回と加減して上塗り材厚さを 400μm～800μm とし，厚みの違いを比較検討した。

中塗り材には特殊ポリオレフィン系混和剤を用いた弾性モルタルを用い，被覆厚はすべての試験体で 1mm とした。

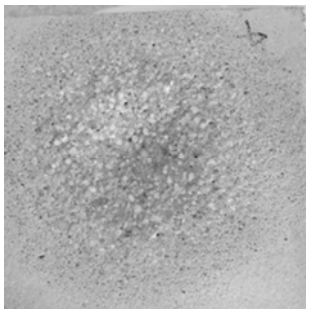
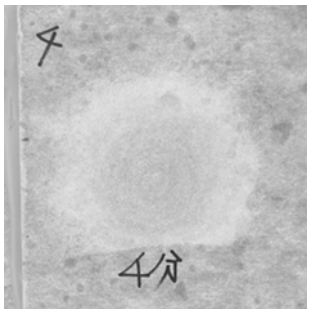
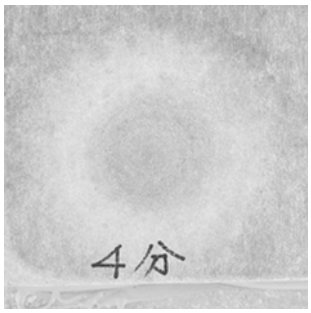
2.3 試験ケース

摩耗試験は，試験体 JIS-28，PIC-N および PIC-D を対象とした試験ケース 1 と，試験体 A，B，C，D1，D2，D3 および D4 を対象とした試験ケース 2 とした。なお，**表－1** に示す摩耗試験の諸条件は同一とする。

試験ケース 1 を**表－2** に示す。試験ケース 1 は，標準モルタル試験体とポリマーを含浸させた CF 複合パネルを摩耗試験に供し，摩耗深さによる耐摩耗性の評価を試みた。

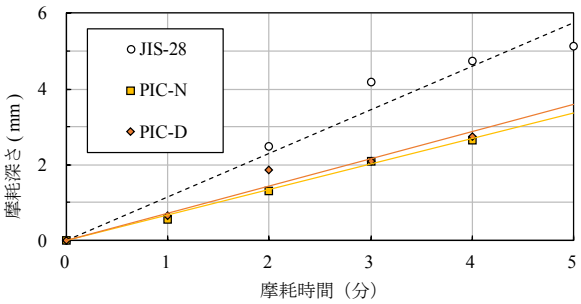
試験ケース 2 を**表－3** に示す。試験ケース 2 は，表層の被覆材の耐摩耗性を比較検討した。摩耗による損傷は

表－4　摩耗状況（試験ケース 1）

試験体	○ JIS-28	■ PIC-N	◆ PIC-D
4分時点での摩耗状況			

表－5　摩耗深さ（試験ケース 1）

試験体		摩耗深さ (mm)		
		○ JIS-28	■ PIC-N	◆ PIC-D
摩耗時間	0 分	0.00	0.00	0.00
	1 分		0.57	0.67
	2 分	2.48	1.32	1.86
	3 分	4.17	2.10	2.10
	4 分	4.73	2.65	2.74
	5 分	5.12		
4分時点での摩耗深さの比		1.0	0.6	0.6



図－4　摩耗深さ－摩耗時間（試験ケース 1）

非常に小さいため，被覆材の損傷に要した摩耗時間，剥離発生の有無を記録した。

3. 試験結果

3.1 試験ケース 1

試験体 JIS-28，PIC-N および PIC-D に摩耗試験を実施した。摩耗状況を**表－4** に，摩耗深さを**表－5** に，摩耗深さ－摩耗時間関係を**図－4** にそれぞれ示す。

表－4 より，試験体 JIS-28 は，摩耗作用によってまず表層のセメントペーストが切削され，細骨材が露出していることが分かる。試験体 PIC-N および PIC-D は摩耗を受けた部分に同心円状の変色が認められるが，試験体 JIS-28 に生じたような大きな表層変状は認められない。

表－5 より，摩耗時間 4 分時点での摩耗深さについて比較する。試験体 PIC-N および PIC-D の摩耗深さはいずれも約 2.7mm で同等であり，乾燥処理によってポリマー含浸率を向上させた試験体 PIC-D の耐摩耗性の向上は認められなかった。一方，試験体 JIS-28 の摩耗深さは約 4.7mm であり，この摩耗深さを基準とすると，試験体 PIC-N および PIC-D の摩耗深さの比は 0.6 となり，ポリマーを含浸させた CF 複合パネルは標準モルタル試験体と比較して摩耗による切削を受けにくいことが分かる。

図－4 より，摩耗時間 4 分の範囲では，試験体 JIS-28，PIC-N および PIC-D の摩耗深さは摩耗時間に比例して大きくなる傾向が確認できる。試験体 JIS-28 は試験体 PIC-N および PIC-D と比較して摩耗深さの増え方が一様でない。これは，試験体 JIS-28 に細骨材が含まれているため，セメントペーストが切削を受けて摩耗が進行するときと，細骨材が剥がれて摩耗が進行するときで，摩耗の進行速度が異なるためであると推察される。

3.2 試験ケース 2

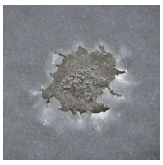
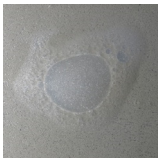
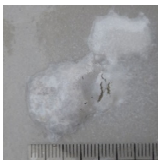
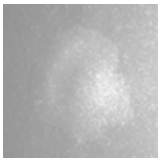
試験体 A，B，C，D1，D2，D3 および D4 に摩耗試験を実施した。代表的な被覆材損傷状況を**表－6** に，上塗り材の損傷に要した平均摩耗時間を**図－5** にそれぞれ示す。なお，上塗材の損傷に要した平均摩耗時間は，上塗材に孔が発生した時間の平均値とした。

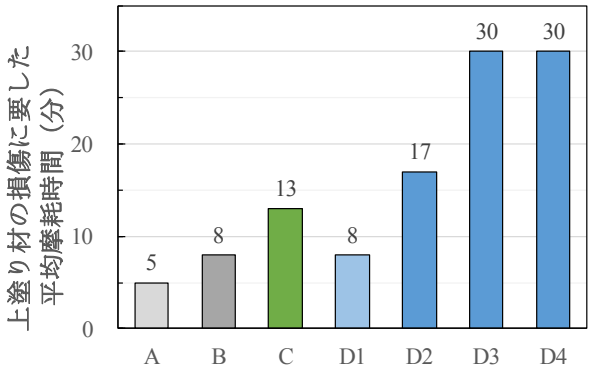
(1) 上塗り材の影響

被覆材に用いた上塗り材の種類が異なる試験体 A，B，C および D1 について比較する。

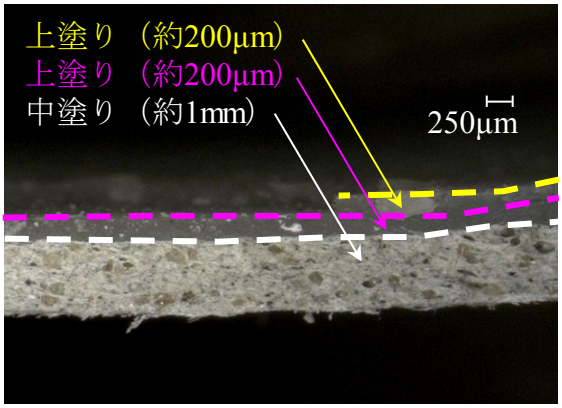
試験体 A は 5 分で上塗り材に小孔が発生したものの，中塗り材と上塗り材の間に水が侵入して剥離が進行することはなく，良好な付着性能を示した。試験体 B は 8 分で上塗り材に小孔が発生し，試験体 C は 13 分で小孔が発生した。試験体 C は上塗り材の損傷後，容易に剥離が

表－6 代表的な被覆材損傷状況（試験ケース 2）

試験体	A	B	C	D1	D2	D3	D4
代表的な被覆材損傷状況	 7分時点	10分時点	 18分時点	 D1 22分時点		 D2 14分時点	
上塗り材と中塗り材の付着性能	付着良好 孔の周囲が剥離	付着良好 孔の周囲が剥離	付着が悪い 容易に剥離拡大	付着良好 珪砂侵入部剥離		損傷なし	
上塗り材の損傷に要した平均摩耗時間（分）	5	8	13	8	17	30 以上	30 以上



図－5 上塗り材の損傷に要した平均摩耗時間（試験ケース 2）



写真－3 試験体 D2 の顕微鏡写真

拡大し，内部に浮きが発生した。試験体 D1 は摩耗時間 8 分で上塗り材に小孔が発生したが，上塗り材と中塗り材の間に高圧水と珪砂が侵入しても剥離がほとんど進行せず，強い付着性能が確認された。

試験体 A→B→C では上塗り材を高弾性→中弾性→低弾性としており，上塗り材の損傷に要する時間は 5 分→8 分→13 分と長くなったことから，上塗り材の耐摩耗性は低弾性タイプとすることで向上することがわかる。一方，低弾性タイプは中塗り材との付着性能が低下し，上塗り材に小孔が空いた場合に容易に剥離が拡大するおそれがあるため，上塗り材には中塗り材との適度な付着性能が求められると考えられる。

(2) 上塗り材被覆厚と塗布回数の影響

試験体 D1 に用いた上塗り材と中塗り材を用い，上塗り材一層当たりの被覆厚を半分の 200μm とした試験体 D2，D3 および D4 を摩耗試験に供し，摩耗状況を比較した。

試験体 D2 は摩耗時間 17 分で上塗り材に小孔が発生した。試験体 D3 および D4 は，摩耗時間 30 分では上塗り材の損傷は確認されなかった。

試験体 D1 に対して試験体 D4 は，上塗り材および中塗り材ともに同一の材料を用い，被覆厚も 800μm で同一であるが，上塗り材損傷に要する時間は 8 分に対して 30 分以上と，耐摩耗性が大きく向上している。このことから，耐摩耗性の向上には，上塗り材一層あたりの被覆厚を薄くして塗布回数を増やす方法が有効であると分かる。

4. 考察

4.1 選択的摩耗作用の再現性

水利施設コンクリートは，まず表層の比較的脆弱なセメントペーストが摩耗によって切削，次にモルタル分が切削され，粗骨材が露出するという選択的摩耗作用を受ける。試験ケース 1 の試験体 JIS-28 は，損傷状況より，表層のセメントペーストが先行して摩耗作用を受けている様子が確認できる。また，摩耗時間－摩耗深さより，試験体 PIC-N および PIC-D と比較して摩耗深さの増え方が一様でないことから，選択的摩耗による摩耗現象を擬似的に再現できていると推察される。すなわち，著者らが提案した珪砂の噴射および高圧水による摩耗試験に供することで選択的摩耗作用に対して耐摩耗性の評価が可能であると考えられる。

4.2 被覆材の耐摩耗性を向上させる方法

試験体 D2 を摩耗試験に供し，摩耗時間 22 分で上塗り材に φ8 mm 程度の小孔が生じたのち，摩耗時間 25 分で小孔が φ10 mm に拡大したところで試験を中止し，被覆材を CF 複合パネルから切出して実体顕微鏡写真にて観察した（**写真－3**）。被覆材の損傷は上塗り材二層目のみであることが確認できる。また，上塗り材一層目と二層目の間に剥離は生じておらず，付着性能が極めて良好であることが分かる。

このことから，被覆材の耐摩耗性を向上させるには上塗り材の耐摩耗性が優れているだけでなく，上塗り材同士の付着性能および上塗り材と中塗り材との付着性能が良好な材料であることが有効であることがわかる。

4.3 既往の摩耗試験との相関

開水路補修・補強工事マニュアル（案）[4]によると，「耐摩耗性は，砂を含む水の噴流によるすり磨き及び衝撃による摩耗作用を擬似している島根大学の水砂噴流摩耗試験により照査する」と示されており，その品質規格値は標準モルタル試験体に対する各補修材の平均摩耗深さの比で規定されている。水砂噴流摩耗試験による摩耗深さについて，長束ら [1]は「水砂噴流摩耗試験機の噴射圧力 2.0 MPa ではキャビテーションによる摩耗作用は生じておらず，水砂噴流摩耗試験機の摩耗作用は珪砂によるすり磨きおよび衝撃作用が支配的であると考えられる」と述べている。このことから，仮に珪砂の噴射量が摩耗深さや被覆材の損傷に及ぼす主要因であるとすれば，著者らが実施した摩耗試験と水砂噴流摩耗試験との相関関係は，珪砂の噴射量の比で評価できると考えられる。

水砂噴流摩耗試験は，6 角形の回転ドラムに 6 体の試験体が取付けられており，6 体の試験体が同時に摩耗作用を受ける。珪砂混入水の噴射口からの圧力は約 2.0MPa，試験機に投入する珪砂の量は 3*l*（試験機内水量 280*l*），水量約 89 *l*/min（試験体 1 枚あたり 14.833 *l*/min），摩耗範囲は幅 35～50 mm，長さ 195 mm であることから，噴射面積は 35 mm × 195 mm = 6825 mm^2 として計算した。なお，研磨材は 0.6 mm 以下の細粒分を除去した 4 号珪砂を 5 時間ごとに全量入れ替えながら使用したとしている。

表－7 摩耗試験の比較

試験条件		水砂噴流摩耗試験	著者らが実施した摩耗試験
噴射水の圧力 (MPa)		約2.0	約2.07 (300 psi)
研磨材		4号珪砂（繰返し使用）	4号珪砂（1度だけ使用）
水砂噴射量 (L / min)	水量（①）	14.676	3.257
	珪砂量（②）	0.157	0.177
	水+珪砂（③）	14.833	3.434
珪砂の体積濃度（④＝②÷③）		0.011	0.052
供試体の噴射面積（⑤） (mm^2)		6825	78.54
		摩耗範囲 35mm × 195mm	吐出口断面積 φ10 mm
噴射面積当たりの珪砂の噴射量（②÷⑤） (× 10^{-3} L / min / mm^2)		0.023	2.254
水砂噴流摩耗試験の珪砂噴射量に対する比率		1	98

著者らが実施した摩耗試験の条件と比較すると，噴射水の圧力はほぼ同等，研磨材の材料は同一で，噴射面積は内径 10 mm の吐出口断面積 78.54 mm^2 とすると，噴射面積あたりの珪砂の噴射量は水砂噴流摩耗試験の約 98 倍であった（**表－7**）。なお，珪砂の噴射量の比率は，研磨材の繰り返し使用の有無，噴射面積の算出方法などが影響すると考えられるが，本稿ではこれらを考慮せず，概算で算出した。

開水路補修・補強工事マニュアル（案）[4]では，実水路における概ね 20 年間の摩耗深さは水砂噴流摩耗試験で 10 時間相当とされている。今回の試験の範囲ではあるが，単位面積あたりの珪砂の噴射量の比率で比較すると，著者らが実施した摩耗試験における摩耗時間約 6 分に相当する。なお，この相関性については，共通の標準供試体を用いた比較試験を行なうとともに，実構造物での実測データを集積することで，より明確になるといえる。

5. まとめ

本稿により得られた知見を以下にまとめる。

(1) 珪砂の噴射および高圧水による摩耗試験によって，擬似的に選択的摩耗作用を生じさせることが可能であること，また，農林水産省の定める照査方法と同様に，標準モルタル試験体に対する平均摩耗深さによって耐摩耗性の評価が可能であることが明らかとなった。

(2) 珪砂の噴射量が摩耗深さや被覆材の損傷に及ぼす主要因であるとすると，著者らが提案した摩耗試験は既往の水砂噴流摩耗試験と比較して概ね 98 倍の速さで摩耗が進行し，実水路における概ね 20 年間の摩耗深さは，摩耗時間約 6 分に相当する。

(3) 被覆材の耐摩耗性を向上させるには上塗り材の耐摩耗性が優れているだけでなく，上塗り材同士の付着性能および上塗り材と中塗り材との付着性能が良好な材料であることが有効である。

参考文献

1) 長束勇，上野和弘，渡嘉敷勝，石井将幸：水砂噴流摩耗試験機の試作とその性能評価，農業農村工学会論文集，Vol.266，pp.25-31，2010.4

2) 橋本理，新藤竹文，松岡康訓，竹井勝美：連続炭素繊維シート複合パネルの耐摩耗性および粗度係数の評価，土木学会第 71 回年次学術講演会，pp.469-470，2016.9

3) ASTM C418-12, Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete by Sandblasting, ASTM International, 2012

4) 農林水産省：開水路補修・補強工事マニュアル（案），2015.5