

論文 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

長谷川 雄基*1・長束 勇*2・谷村 成*3・佐藤 周之*4

要旨：本研究では、コンクリートの表層品質の評価指標として適用される表層透気係数に着目し、表層透気試験の結果からコンクリートおよび無機系補修材料の耐摩耗性を推定する手法を実験的に検討した。結果として、表層透気係数と摩耗質量との間には関連性のあることが確認でき、表層透気係数から耐摩耗性を推定可能な関係式を示した。しかしながら、けい酸塩系表面含浸材は、塗布する銘柄ごとに表面改質効果が異なることから、表層透気係数と摩耗質量との間には必ずしも一定の傾向が成立しないことが示唆され、本研究で導いた関係式による推定の精度が低下するケースのあることが考えられた。

キーワード：表層透気係数、トレント法、耐摩耗性、農業用水路、サンドブラスト、けい酸塩系表面含浸材

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の耐久性を確保するためのコンクリート表層の品質評価に関する取り組みが広がりをみせている。コンクリートの表層とは、コンクリート構造物の中で、養生や環境条件等の影響を受けて性能が変化する可能性がある領域、と定義されている¹⁾。コンクリートの表層品質を評価するための試験方法は様々に開発・適用されており、例えば、トレント法による表層透気試験²⁾、林らが開発した表面吸水試験³⁾、岸らの提案する表面流水試験⁴⁾などが挙げられる。

水利コンクリート構造物の一種である農業用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、流水や混入土砂の物理的なすり磨き作用と、溶脱という化学的侵食の作用に起因する摩耗が発生する。摩耗が進行すると、水路コンクリートの表面からセメントペーストや細骨材が逐次消失していき、図-1のような粗骨材の露出に至る。粗骨材露出の生じた水路コンクリートでは、コンクリートの表面粗さの増加に伴う壁面の流水抵抗の変化や、断面の消失に伴う耐荷力の低下が懸念される。

既往の研究では、摩耗が進行して粗骨材露出の生じた水路コンクリートの表面粗さを直接的、あるいは間接的に測定するための方法が様々に開発されている（例えば5）、6）、7）。しかし、これらの測定方法は、あくまでも現況評価のための方法であり、竣工直後のコンクリートの表面状態から耐摩耗性を推定する方法については検討されていない。前述の通り、水路コンクリートの摩耗は、コンクリート表面から深さ方向に経時的に進行するものであり、コンクリート表層の品質に大きく影響を受ける劣化と見



図-1 粗骨材の露出が生じた水路コンクリート壁面

なすことができる。したがって、コンクリートの表層品質の評価指標に着目することで、水路コンクリートおよびその劣化対策として使用する無機系補修材料の耐摩耗性を推定することが可能と考えた。

そこで本研究では、コンクリートの表層品質の評価方法として適用される表層透気試験（トレント法）で得られる表層透気係数に着目し、同試験の結果から材料の耐摩耗性を推定することを目的とした。コンクリート供試体とけい酸塩系表面含浸材を塗布したモルタル供試体を使用し、各々の表層透気係数と摩耗質量との関係を検証した。

2. 実験の概要

2.1 供試体の概要

本研究では、表層品質の異なる供試体を得ることを目的とし、配（調）合や養生条件の異なる二種類のコンクリート供試体（以下、Co-1、Co-2 とする）を実験に供し

*1 香川高等専門学校 建設環境工学科 助教 博士(農学) (正会員)

*2 島根大学 生物資源科学部 教授 博士(農学) (非会員)

*3 株式会社アストン 技術部 (正会員)

*4 高知大学 教育研究部 自然科学系 農学部門 准教授 博士(農学) (正会員)

表－1 コンクリート供試体の示方配合

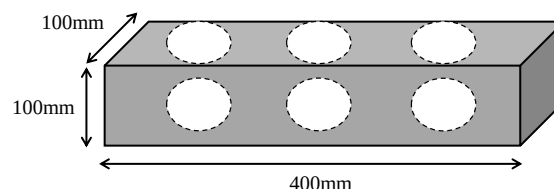
供試体 名称	粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメ ント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 A
Co-1	20	10±2.0	55	5.0	48.5	190	345	807	857	1.70
Co-2	20	12±2.0	45	1.5	40.5	157	350	767	1127	3.85

た。Co-1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：3.15g/cm³）、高知県産硬質砂岩砕石（表乾密度 2.60g/cm³，吸水率 1.33%）、高知県産硬質砂岩砕砂（表乾密度 2.60g/cm³，吸水率 1.58%）、水道水、AE 減水剤である。Co-2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）、栃木県産硬質砂岩砕石（表乾密度 2.63g/cm³，吸水率 1.19%）、埼玉県産硬質砂岩砕砂（表乾密度 2.64g/cm³，吸水率 1.34%）、水道水、高性能減水剤である。両コンクリート供試体の示方配合を表－1 に示す。Co-1 と Co-2 は、それぞれ呼び強度 21N/mm² と 27N/mm² で設計されたものである。

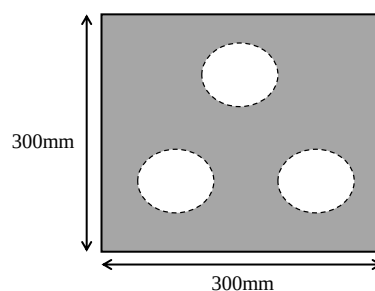
供試体は打設後 24 時間で脱型し、Co-1 は 20℃の恒温水槽内、Co-2 は 20℃の気中で、ともに材齢 28 日以上養生を行った。供試体寸法として、Co-1 は 100×100×400mm の角柱供試体、Co-2 は 300×300、厚さ 60mm の平板供試体である。Co-1 は一体、Co-2 は二体（以下、Co-2①、Co-2②とする）を実験に供した。表層透気試験および促進摩耗試験を行う試験面は、Co-1 は打設面、打設面と対面する面（以下、底面とする）、100×400mm の型枠接触面の二面（以下、それぞれ側面①、側面②とする）の計四面とし、Co-2 は 300×300mm の型枠接触面の一面とした。それぞれの模式図を図－2 に示す。

一方、けい酸塩系表面含浸材（以下、本文中の含浸材の表記は、すべてけい酸塩系表面含浸材を意味する）を塗布したモルタル供試体を用意し、表層透気係数と摩耗質量との関係および含浸材の改質効果を検証した。モルタル供試体は、JSCE-K 572-2012 の「5.1.1 モルタル基板の作製」に準拠して作製した W/C=55%，S/C=3.0 の供試体である。使用材料は、普通ポルトランドセメント（密度：3.15g/cm³）、水道水、JIS 規格（JIS R 5201-1997）を満たす標準砂であり、供試体寸法は 100×100×100mm の立方体とした。本供試体を 10 体用意し、9 体には銘柄の異なる含浸材を塗布し、1 体は無塗布とした。供試体は打設後 24 時間で脱型し、各メーカー指定の仕様で含浸材を塗布した後、材齢 28 日まで 20℃の気中で養生した。含浸材塗布面は、立方体の六面のうち、型枠接触面に対向する二面とし、残りの四面はエポキシ樹脂でシール処理した。上記二面について、それぞれ表層透気試験と促

Co-1:4面を対象とし、3点ずつ試験



Co-2（上から見た図）：1面を対象とし、3点で試験



図－2 コンクリート供試体の試験面の模式図

表－2 使用したけい酸塩系表面含浸材の諸元

記号	主成分*	乾燥固形 分率 (%)	種類
A	Na	32.7	反応型
B	Na	24.2	反応型
C	Na	7.6	反応型
D	Li	13.6	固化型
E	Na, K	31.6	反応型
F	Li	14.5	固化型
G	Na, K, Li	21.5	固化型
H	Na, Li	18.1	固化型
I	Na, K	17.2	反応型

* 主成分の表記

Li：けい酸リチウム，Na：けい酸ナトリウム，
K：けい酸カリウム

進摩耗試験を実施した。

使用した含浸材は、事前に JSCE-K 572-2012 の「6.2 乾燥固形分率試験」と「6.3 種類判定試験」に準拠した試験により、乾燥固形分率と改質機構の種類を明らかにした。各含浸材の主成分、乾燥固形分率、種類を整理したもの

を表－2 に示す。9 銘柄の含浸材は、すべて主成分や乾燥固形分率、改質機構の種類が異なることが確認できた。

2.2 表層透気試験の概要

本研究では、トレント法で得られる表層透気係数を評価指標として、供試体の表層品質を評価した。トレント法は、Roberto J Torrent が開発したダブルチャンバー方式の透気試験機を用いて、測定対象の内部空隙に存在する空気を表面側へ強制的に吸入して物質透過性を評価する試験方法である。

本試験方法は、現在までに国内では JIS 規格や各学会規準で規定されていないが、既往の研究や実務においてはスイス規格 (SIA262) に準拠して測定されるケースが多く⁸⁾、本研究でも同規格に準拠して測定を行った。本試験で得られる表層透気係数の評価方法として、表－3 に示す Torrent らによって提案された表層透気係数のグレーディングを一つの目安とし、本実験で得られた結果の評価を行った。

測定点数は、Co-1 と Co-2 は同一試験面につき三点とし、モルタル供試体は同一試験面につき一点とした。また、表層透気係数は含水率に大きく影響を受けることから⁸⁾、高周波容量式水分計を用いて測定時の供試体の含水率を併せて測定した。

2.3 促進摩耗試験の方法

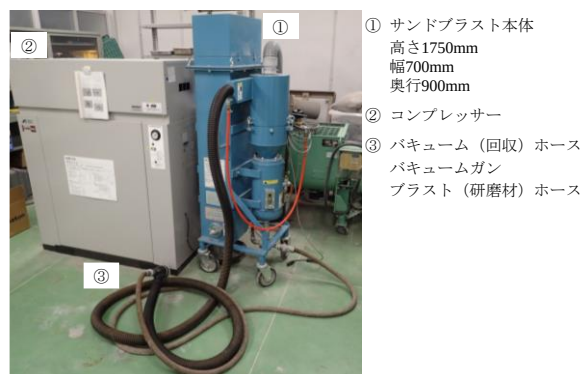
農業用水路コンクリートに生じる摩耗現象を再現し、無機系材料の耐摩耗性を評価するための試験方法として、国内では石神らによる水流摩耗試験⁹⁾や長束らによる水砂噴流摩耗試験が開発されている¹⁰⁾。本研究では、両試験と摩耗のメカニズムがほぼ同一であり、試験機の汎用性や試験の簡易性に優れたサンドブラスト法に着目した。サンドブラストを使用した促進摩耗試験法として、国内では確立されていないが、海外では、ASTM 規格の C418-12 “Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete by Sandblasting” がある。

本実験で使用したサンドブラスト装置は、図－3 に示す通りに構成されており、供試体に対して高圧（吐出圧力 0.5MPa 一定）で研磨材を噴射するものである。既往の研究より、噴射された研磨材の衝撃およびすり磨き作用により、摩耗が生じた農業用水路コンクリートの表面状態を概ね再現可能であること¹¹⁾、無機系補修材料の耐摩耗性を評価可能であること¹²⁾、が確認されている。本試験機は、ブラストガンを手動で操作して表面加工を行うものであり、供試体とブラストガンとを固定する器具は付属されていない。よって、試験時には、図－4 に示すように、試験者がブラストガンと供試体とを人力で固定して実験を行った。

試験条件として、研磨材には、粒度範囲 425～500 μ m、新モース硬度 12 のアルミナ製研磨材を使用した。促進

表－3 Torrent 法による表層透気係数のグレーディング

グレーディング	透気係数 ($\times 10^{-16} \text{m}^2$)	評価
1	< 0.01	非常に良い
2	0.01 – 0.1	良い
3	0.1 – 1.0	普通
4	1.0 – 10	悪い
5	> 10	非常に悪い



図－3 サンドブラスト装置の外観と構成



図－4 サンドブラスト法の試験状況

摩耗試験は、表層透気試験を実施した後に行い、表層透気試験を実施した測定点と同一箇所を試験対象とした。促進摩耗試験実施前後の供試体の質量変化を摩耗質量と定義し、耐摩耗性の評価指標とした。また、研磨材の噴射時間は、既往の研究を参考に、10 秒とした。

3. 結果と考察

3.1 表層透気係数を指標とした表層品質の評価

(1) コンクリート供試体の試験結果

コンクリート供試体から得られた表層透気係数とグレーディングの結果ならびに含水率を表－4 にまとめる。同表中には、表層透気試験における透気量の測定深さである影響深さを併記する。

まず、Co-1 の試験面ごとの表層透気係数を見ると、すべての試験面でほぼ同程度の結果が得られたことが確認できる。グレーディングにおいても、四面すべてで「良

い」という評価結果であった。全体を比較すると、打設面の表層透気係数が他の測定位置と比較してわずかに小さくなったが、これはコテ仕上げによる影響と考えられた。以上より、Co-1の試験面ごとの表層透気係数の差異は軽微であり、いずれの試験面も同程度の表層品質を有していることが確認できた。

つづいて、Co-2の二供試体の試験結果に着目すると、両者は同一の配(調)合および養生条件にもかかわらず、得られた表層透気係数には大きな差異が生じた。この理由は明確ではないが、締固め時の充填状況などに相違があったためと推察された。また、Co-2②は、Co-1と比較して水セメント比が小さいにもかかわらず、両者の表層透気係数は同程度となった。既往の研究では、同一の養生環境であれば、水セメント比が小さいほど表層透気係数は小さくなること、同一の水セメント比であれば、気中養生よりも水中養生の方が表層透気係数は小さくなること、の二点が示されている¹³⁾。本研究では、両供試体の養生環境が異なり、水セメント比の小さいCo-2を気中養生としたことから、両者の表層透気係数が同程度になったと考えられた。

以上のことから、本研究で使用した供試体は、Co-1とCo-2②がほぼ同程度の表層品質を有しており、Co-2①は他と比較して表層品質が劣ると推察された。

(2) モルタル供試体の試験結果

モルタル供試体から得られた表層透気係数とグレーディングの結果ならびに影響深さと含水率を表-5に示す。含浸材を塗布した供試体の透気係数は、無塗布の供試体と比較して、含浸材の銘柄にかかわらず、いずれも小さい傾向が確認できた。よって、本研究で使用した含浸材は、すべて表層部の緻密化に寄与したと推察された。

含浸材塗布による表層部の緻密化、すなわち改質効果に着目すると、銘柄ごとに得られた表層透気係数には差異があり、A、B、Gは比較的小さく、無塗布よりもグレードの高い、「良い」という評価結果が得られた。一方、D、H、Iでは、他の銘柄よりも比較的大きい値であった。表-2を見ると、乾燥固形分率の大きい含浸材を塗布した場合、表層透気係数は概ね小さくなる傾向が見られるものの、現時点では含浸材の主成分、乾燥固形分率、改質機構の種類などが表層透気係数へ及ぼす影響については明確化できていない。この点については、各含浸材に含まれる副成分や添加剤も大きく関連していると推察されることから、今後の検討課題の一つと考えられた。

3.2 各供試体における耐摩耗性の評価

(1) コンクリート供試体の促進摩耗試験結果

コンクリート供試体の促進摩耗試験結果を図-5に示す。図中のエラーバーは標準偏差を示す。同図より、Co-1の試験面ごとの摩耗質量の差異は小さいことが分かる。

表-4 コンクリート供試体の表層透気係数

供試体名	表層透気 係数 ($\times 10^{-16} \text{m}^2$)	評価	影響深さ (mm)	含水率 (%)
Co-1 打設面	0.020	良い	22.0	3.5
Co-1 底面	0.028	良い	25.3	4.4
Co-1 側面①	0.031	良い	26.7	4.2
Co-1 側面②	0.025	良い	24.7	4.3
Co-2 ①	0.387	普通	60.0	3.5
Co-2 ②	0.033	良い	28.3	4.2

表-5 モルタル供試体の表層透気係数

供試体名	表層透気 係数 ($\times 10^{-16} \text{m}^2$)	評価	影響深さ (mm)	含水率 (%)
無塗布	0.235	普通	54.5	4.2
A	0.087	良い	41.5	4.4
B	0.089	良い	41.5	4.8
C	0.100	普通	44.0	5.0
D	0.160	普通	49.5	4.9
E	0.124	普通	45.0	4.6
F	0.110	普通	46.0	4.9
G	0.066	良い	39.5	4.6
H	0.135	普通	47.0	4.6
I	0.140	普通	47.5	4.7

既往の研究のコンクリート角柱供試体(100×100×400mm)を対象としたサンドブラスト法による試験結果においても、測定位置にかかわらず摩耗質量の経時変化は同程度となっている¹⁴⁾ことから、本実験でも同様の傾向を示したと言える。つまり、サンドブラスト法において本実験で用いた寸法程度のコンクリートを供試体とする場合、供試体の測定面の相違が試験結果に及ぼす影響は軽微と考えられた。

図-5を見ると、全体としてCo-2①の摩耗質量のみが他の供試体および測定位置と比較して明らかに大きい。

Co-1 と Co-2 の結果では、コンクリートの呼び強度と耐摩耗性との関係性は確認できない。したがって、前節の表層透気試験の結果と同様に、Co-2①は他の供試体よりも表層品質が劣っており、摩耗質量が大きくなったと推察された。

以上のことから、コンクリート供試体における表層透気係数と耐摩耗性の間には関連性があることが示唆された。両者の関係については、次節で詳細な検討を行う。

(2) モルタル供試体の促進摩耗試験結果

モルタル供試体の促進摩耗試験結果を図-6 に示す。供試体名は、塗布した含浸材の銘柄であり、Nは無塗布を意味する。

図-6 より、含浸材を塗布した供試体は、すべて無塗布の供試体よりも摩耗質量が小さいことが分かる。よって、銘柄にかかわらず、すべての含浸材が供試体表層部の緻密化に寄与し、耐摩耗性が向上したことが確認できた。無塗布供試体 (N) を基準とした摩耗質量の変化率を算出したところ、すべての銘柄で 70～91% の範囲内となった。このことから、銘柄ごとの耐摩耗性の向上効果は 9～30% と評価でき、塗布した含浸材ごとに耐摩耗性の向上効果に差異のあることが確認できた。また、前節と同様に、耐摩耗性の評価においても、含浸材の主成分、乾燥固形分率、改質機構の種類と試験結果との間に明確な関係は確認できなかった。

以上のことから、含浸材を塗布することで、モルタル供試体の耐摩耗性が向上したこと、銘柄ごとの耐摩耗性の向上効果には差異があること、の二点が確認できた。

3.3 表層透気係数と耐摩耗性の関係

前節までの結果より、表層透気係数と耐摩耗性の間には関連性があることが示唆された。本節では、両者の関係を詳細に検証し、本研究目的である、表層透気係数を指標とした耐摩耗性の推定について検討した。本研究で対象としたすべての供試体および測定位置における摩耗質量と表層透気係数との関係を図-7 に示す。

図-7 より、摩耗質量と表層透気係数との間には一定の傾向があり、表層透気係数の増加に伴い摩耗質量も概ね増加することが分かる。直線近似すると、式(1)を得ることができ、決定係数 (R^2) は 0.51 となった。

$$y = 9.08x + 4.26 \quad (1)$$

ここに、 y : 摩耗質量 (g), x : 表層透気係数 ($\times 10^{-16} \text{m}^2$) である。

したがって、式(1)を適用することで、コンクリートおよび含浸材塗布モルタルの表層透気係数の測定結果を基に、耐摩耗性を概ね推定できるといえる。

一方、コンクリート供試体とモルタル供試体をそれぞれ分けて、表層透気係数と摩耗質量の相関係数 (r) を算出すると、コンクリート供試体が 0.98、モルタル供試体

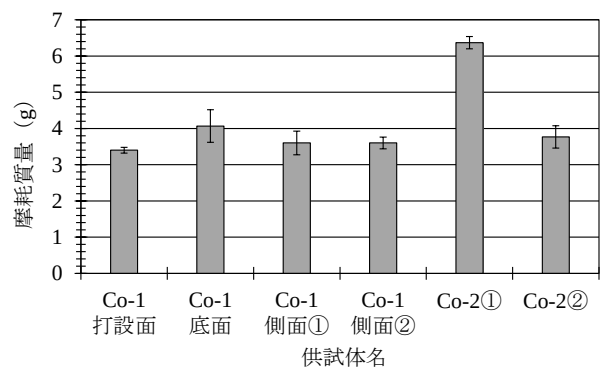


図-5 コンクリート供試体の摩耗質量

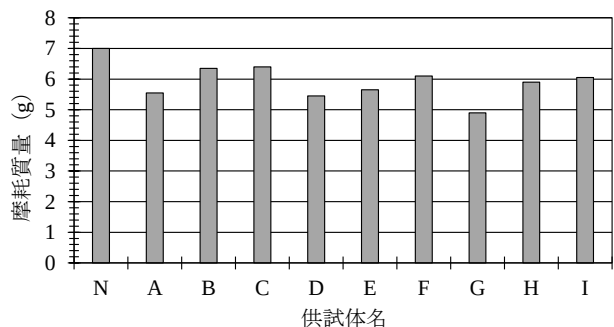


図-6 モルタル供試体の摩耗質量

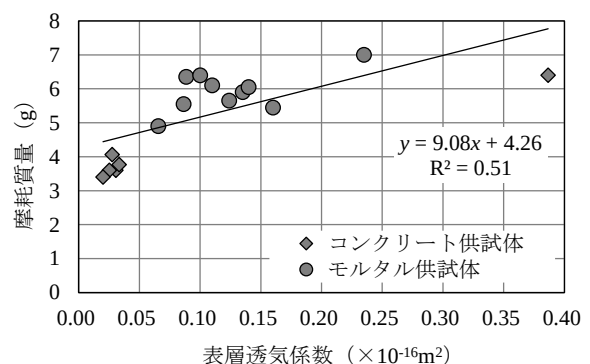


図-7 摩耗質量と表層透気係数との関係

が 0.59 となった。このことから、現時点では、含浸材を塗布したモルタル供試体では、摩耗質量と表層透気係数との間には、常に明確な関係が成立するとは断言できない。これに起因して、本検討で算出した式(1)の決定係数が小さくなったと推察できる。

この理由として、一つ目は、含浸材の改質効果が挙げられる。すなわち、すべての含浸材が改質効果を発揮したことから、取得可能なデータ範囲が限定され、各データ同士の傾向を把握しづらかった可能性が考えられる。二つ目は、含浸材の銘柄ごとの改質効果の差が影響した可能性である。具体的には、含浸材は、先述の通り、主成分の組合せや使用する副成分、添加剤により、多種多様な特性を有すると推察される。すなわち、塗布する含浸材ごとに、表層透気係数の向上効果と耐摩耗性の向

上効果の比率が大きく異なるケースがあると示唆される。これにより、すべての含浸材に共通するような摩耗質量と表層透気係数との相関関係が明確に表れにくかったと考えられた。

以上より、表層透気係数と摩耗質量との間には関連性のあることが確認でき、表層透気係数から耐摩耗性を推定できる可能性が示された。しかし、含浸材のように、個々に異なる特性を有する材料を対象とした場合、本結果から得られた関係式の推定精度が低下することが考えられた。

5. まとめ

本論では、コンクリートの表層品質の評価指標として適用される表層透気係数に着目し、表層透気試験の結果からコンクリートや無機系補修材料の耐摩耗性を推定することを目的とした。得られた成果を以下にまとめる。

- (1) 表層透気係数と摩耗質量の間には関連性のあることが確認でき、表層透気係数から耐摩耗性を推定できる可能性が示された。
- (2) 本研究で使用した9銘柄のけい酸塩系表面含浸材は、いずれも改質効果を発揮し、表層透気係数の低下と耐摩耗性の向上に寄与した。
- (3) 本研究で導いた関係式による耐摩耗性の推定では、けい酸塩系表面含浸材のように、個々に異なる特性を有する材料を対象とした場合、推定の精度が低下するケースのあることが考えられた。

今後、材料の特性を加味した詳細な分析とバックデータの蓄積を行い、本検討手法の適用性を検証する予定である。

謝辞

本研究は、農林水産省官民連携新技術研究開発事業「H27-H29 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」の助成を受けたものである。また、本研究の一部は、高知大学拠点研究プロジェクト(革新的な水・バイオマス循環システムの構築)の助成を頂いて実施した。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 公益社団法人 土木学会：構造物表面のコンクリート品質と耐久性検証システム研究小委員会(335 委員会) 成果報告およびシンポジウム講演概要集, 2008
- 2) R. J. TORRENT : A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site, Materials and Structures, Vol.25, No. 6, pp.358-365, 1992
- 3) 林 和彦, 細田 暁：表面吸水試験によるコンクリート構造物の表層品質の評価方法に関する基礎的研究, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol.69, No. 1, pp.82-97, 2013
- 4) 家辺麻里子, 秋山仁志, 岸 利治：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, 2012
- 5) 加藤 敬, 本間新哉, 北村浩二, 今泉眞之：開水路における壁面の凹凸から水路の粗度係数を求める試み, 農村工学研究所技報, Vol.207, pp.183-193, 2008
- 6) 加藤智丈, 石神暁郎, 渡嘉敷 勝, 森 充広：農業用水路に生じる摩耗に関する調査手法, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.931-936, 2009
- 7) 太田垣晃一郎, 長谷川雄基, 鈴木哲也, 松本伸介, 佐藤周之：三次元画像解析によるコンクリート水路表面粗度の測定手法に関する研究, 農業農村工学会論文集, Vol.80, No.4, pp.7-13, 2012
- 8) 半井健一郎, Robert J. TORRENT : 表層透気試験(トレント法)の実務展開, コンクリート工学, Vol.52, No.7, pp.595-600, 2014
- 9) 石神暁郎, 森充広, 渡嘉敷勝, 増川晋：農業用水路コンクリートに生じる摩耗現象と促進試験方法に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 78, No. 2, pp. 805-810, 2005
- 10) 長束勇, 上野和広, 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. 78, No. 2, pp. 89-95, 2010
- 11) 長谷川雄基, 崔萬權, 佐藤周之, 野中資博：水路コンクリートにおける摩耗の進行と粗骨材の脱落に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.736-741, 2014
- 12) 小嶋啓太, 長谷川雄基, 佐藤周之：サンドブラストを利用した補修材料のすりへり抵抗性評価方法の検討, 平成27年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集, pp.682-683, 2015
- 13) 松崎晋一郎, 吉田 亮, 岸 利治：単位水量と水セメント比がコンクリート表層の透気性に及ぼす影響とその養生依存性, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.757-762, 2009
- 14) 長谷川雄基, 佐藤周之, 野中資博：摩耗が生じた農業用コンクリート水路の劣化度診断手法に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.619-624, 2015