

# 論文 水路コンクリートの摩耗の進行と粗骨材の脱落に関する実験的研究

長谷川 雄基<sup>\*1</sup>・崔 萬權<sup>\*2</sup>・佐藤 周之<sup>\*3</sup>・野中 資博<sup>\*4</sup>

**要旨:** 本研究では、水路コンクリートにおける詳細な摩耗の進行過程、および摩耗の進行により粗骨材の脱落が生じる条件について検討した。サンドブラストを使用し、コンクリート供試体の表面に摩耗状態を再現することで、摩耗の進行によるコンクリート表面の状態変化を実験的に評価した。結果として、コンクリートの表面粗さ指標と粗骨材最大寸法との関係性に注目することで、粗骨材の脱落開始時期を推定できる可能性を示した。摩耗の進行に伴うコンクリート表面粗さの経時的な変化を確認したところ、表面粗さの増加は実水路の流水抵抗増加の要因の一つになり得るが、水路部材としての通水性への影響は小さいと推察できた。

**キーワード:** 水路コンクリート, すりへり, 摩耗, 表面粗さ, サンドブラスト, 通水性能

## 1. はじめに

常に流水環境下で供用される農業用水路コンクリートの喫水位（最多頻度流量時の水位）以下の壁面では、主に流水および混入土砂の摩耗作用によるすりへりが進行する。2007年制定版コンクリート標準示方書「維持管理編」では、すりへりが初めて劣化として位置づけられた。以降、摩耗はすりへりという劣化の一作用要因として位置付けられている<sup>1)</sup>。一方、対象を農業水利コンクリート構造物に限定した既往の研究や書籍、マニュアル類では、摩耗を劣化の一つとして位置づけ、摩耗による劣化が進行すると断面欠損による構造耐力の低下につながることを指摘している<sup>2), 3)</sup>。このように、コンクリートに生じるすりへりおよび摩耗という現象をどのように取扱うかは、すりへりが問題となる構造物ごとの劣化機構を詳細に解明した上で、議論を重ねる必要があると考えられる。このような背景を踏まえ、本論中では水路コンクリート表面の粗さの状態変化全般を摩耗と定義する。

現在までに、水路コンクリートに生じる摩耗の劣化度評価を行う際の定量的な評価指標ならびに測定方法は規定されていない。既往の研究において検討された摩耗による劣化度の評価指標および測定機材を表-1に整理する。いずれの指標も、摩耗による劣化度の評価指標として適用できる、という一定の成果を得ている。しかしながら、これらの指標は、あくまでも表面状態の変化を評価するものであり、通水性能を初めとする諸性能の評価や劣化段階を区分・推定するためには、今後さらに検討が必要である。また、効果的な劣化度診断の実施には、評価対象とする現象や性能に適した簡易かつ合理的な評価指標を選定し、規定する必要がある。

水路コンクリートでは、摩耗の進行により、鋼材露出

表-1 既往研究における主な摩耗の劣化度の評価指標

評価指標	主な測定機材
断面曲線の最大高さ $R_z^{4)}$	型取りゲージ
断面曲線の算術平均粗さ $R_a^{4)}$	レーザー変位計
表面凹凸の屈曲線の延長÷水平長さ <sup>5)</sup>	
型取りゲージ水平幅の骨材浸食面積 <sup>5)</sup>	型取りゲージ
粗骨材露出割合 <sup>6)</sup>	デジタルカメラ
表面積比 <sup>7)</sup>	三次元画像解析ソフト
摩耗深度 <sup>5)</sup>	ノギス

を含めた構造性能の低下に至るケースは報告されていないものの、水路の基本的な性能の一つである通水性能の低下を引き起こす場合が懸念されるため、正確な劣化度評価が必要とされている。先に挙げた示方書では、すりへりによる劣化の進行過程を四段階で区分しており、最終段階に該当する劣化期においては、粗骨材の脱落が進行し、断面欠損が著しく構造性能の低下を引き起こす、としている<sup>1)</sup>。一方、実供用下にある水路コンクリートの摩耗の進行を詳細に評価した報告は少ない。とくに、摩耗の進行した結果、粗骨材の脱落に至ったケースを報告している例は皆無である。つまり、現状では、実環境下で摩耗の進行により粗骨材が脱落する条件や、摩耗による表面状態の変化が通水性能におよぼす影響は明確にされていないといえる。

本研究では、水路コンクリートにおける詳細な摩耗の進行過程および粗骨材の脱落が生じる条件について実験的に検討した。とくに、サンドブラストを使用し、摩耗によるコンクリート表面の状態変化の再現を試みた。これにより、水路コンクリートにおいて粗骨材の脱落が生

\*1 愛媛大学大学院 連合農学研究科 修士 (学生会員)

\*2 慶尚大学校 農業生命科学研究員 博士 (農学) (非会員)

\*3 高知大学 農学部 准教授 博士 (農学) (正会員)

\*4 島根大学 生物資源科学部 教授 農学博士 (正会員)

表-2 摩耗状態の再現実験用のコンクリート供試体の示方配合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 A
20	5.1	55	4.3	47.8	194	353	770	854	0.11

じる条件を検証するとともに、摩耗の進行によるコンクリート表面の状態変化と通水性能との関係性を評価した。

## 2. 実験の概要

### 2.1 サンドブラスト法による摩耗状態の再現方法の検討

本研究では、摩耗の進行による表面状態の経時的な変化を詳細に評価するため、コンクリート供試体の表面に対して摩耗状態の再現を試みた。水利コンクリート構造物に生じる摩耗現象を再現するための試験方法については、石田 (2007) がまとめているように、古くから多くの研究が為されている<sup>8)</sup>。とくに、流体エロージョンの作用を主とした試験として、海外では ASTM C 418 ならびに C 1138 が規格化されている。一方、国内では流体エロージョンの作用を主とした試験方法で規格化されたものはないが、石神ら (2005) は、高压水流を供試体に噴射することで、水の衝撃作用により摩耗現象を再現する水噴流摩耗試験装置を開発した<sup>9)</sup>。長東ら (2010) は、珪砂を混入した高压水を供試体に噴射することで、水の衝撃作用に加え、珪砂によるすり磨きおよび衝撃作用により摩耗現象を再現する水砂噴流摩耗試験機を開発した<sup>10)</sup>。これらの試験は、水路コンクリートの実現に近い摩耗状態を再現することが可能とされるが、各々専用の試験装置が必要となる。

そこで、本実験においては、先述の ASTM 規格に準拠したサンドブラスト法を適用し、サンドブラスト装置(株式会社不二製作所, FDO-F1-F) を使用して摩耗状態の再現を試みた。本手法は、供試体に対して高压 (吐出圧力 0.5MPa 一定) で研磨材を噴射するものであり、硬質な研磨材による衝撃およびすり磨きの作用により、きわめて短時間でモルタル部を消失させることができる。上述の石神らや長東らの提案した各種試験方法と摩耗の発生機構が同一であり、露出した粗骨材の形が概ね残ることから、本手法によっても水路コンクリートに生じる摩耗状態を再現可能と判断した。研磨材には、粒度範囲 425~500 $\mu$ m、モース硬度 12 のアルミナ製研磨材を使用した。

摩耗状態の再現実験に供したコンクリート供試体の示方配合を表-2 に示す。使用した材料は、普通ポルトランドセメント、水道水、高知県産砕砂 (表乾密度 2.60g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 1.58%), 高知県産砕石 (表乾密度 2.60g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 1.33%), AE 減水剤 (ポゾリス No.70)

表-3 対象とした PCS の詳細

砕石サイズ	骨材粒径	空隙率
5号	13.0~20.0mm	22.3%
6号	5.0~13.0mm	22.2%
		25.7%
		18.9%
7号	2.5~5.0mm	20.5%
		22.7%



砕石サイズ: 5号 砕石サイズ: 6号 砕石サイズ: 7号

図-1 砕石サイズごとの PCS の一例

である。コンクリート供試体は、幅 150mm×長さ 215mm、厚さ 50mm の型枠に打設した。打設後 24 時間は乾燥を防ぎながら室温 20°C の室内に静置し、脱型後に室温 20°C 一定で材齢 3 日まで気中養生を行った。その後、初期状態の表面粗さを測定し、再現実験を開始した。本実験では、とくに摩耗の進行による粗骨材の露出から脱落に至る過程の詳細評価を目的としていることから、効率的に上記の表面状態を得るために早期材齢 (3 日) にて試験を開始した。再現実験は、供試体に対して 60 秒程度満遍なく研磨材を噴射した。目視にて表面状態の変化を確認しながら、表面粗さの測定と研磨材の噴射とを交互に繰り返した。

### 2.2 ポーラスコンクリートの表面状態と摩耗が進行した水路コンクリートの表面状態との相似性の評価

本研究では、コンクリート表面からの粗骨材の脱落条件を評価するために、まず各種ポーラスコンクリート供試体 (Porous Concrete Specimen 以下, PCS) を対象として基礎的な検討を行った。普通コンクリートは連続粒度の骨材が使用され、粗骨材同士の間には空隙にモルタルが隙間なく充填されている。一方、PCS はほぼ等しい粒径の骨材のみが使用され、その周りに結合材をまぶすことで、骨材同士が接点に近い状態で接合されている。すなわち、PCS は多孔質であり、普通コンクリートと比較して表面が粗いという性質を有する。このことから、

水路コンクリートにおいて、摩耗の進行により粗骨材がほぼ完全に露出した状態を PCS の表面状態に近いものと仮定し、表面粗さを実測することで、上記仮定が成立するかを含めて検証した。

実験には、砕石サイズおよび空隙率が異なる六種類の PCS を用いた。使用した PCS の詳細を表-3 に、砕石サイズごとの PCS の表面状態を例として図-1 に示す。供試体は 230mm×230mm、厚さは 60mm の直方体である。

### 2.3 表面粗さの測定方法および評価対象とした粗さ指標

摩耗による劣化度評価には、表面粗さを定量的に示す必要がある。本研究では、表面粗さの測定機材として、レーザー変位計(株式会社 KEYENCE、高速・高精度 CCD レーザー変位計 LK-G155)を使用した。同機器の精度は 0.01mm である。レーザー変位計により、0.2mm 間隔で供試体の断面曲線を実測し、計測した曲線に対して傾斜補正を施した。得られた断面曲線から表面粗さを示す指標を算出した。供試体ごとの断面曲線の取得本数は、深い空隙を有し、表面凹凸が著しい PCS については 40 本、コンクリート供試体については 150mm の幅に対して 25mm ごとに 5 本とした。

表面粗さの指標としては、断面曲線における最大高さ(断面曲線の平均線に対して最も高い山頂と最も深い谷の和)  $R_z$  ならびに算術平均粗さ(断面曲線の平均線からの差の絶対値を平均した値)  $R_a$  を検討した。 $R_z$  と  $R_a$  の概念図を図-2 に示す。両指標は、JIS B0601 (2001) (表面性状：輪郭曲線方式) にて概念が規定されており、表-1 に示した粗骨材露出割合や表面積比といった、他の評価指標とも高い相関関係が確認されている<sup>6),7)</sup>。また、

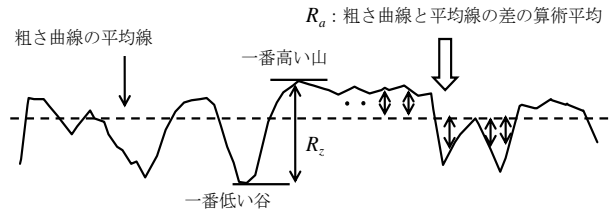


図-2 対象とした表面粗さ指標の概念図

後述する通水性能の指標として用いられる Manning の粗度係数と関連付けることができ、現時点では摩耗による劣化度を評価する上で、最も汎用性の高い指標である。

## 3. 結果と考察

### 3.1 サンドブラストによる摩耗状態の再現性の評価

サンドブラストを用いて、コンクリート供試体に実水路コンクリートの摩耗状態を再現したところ、図-3 に示す結果が得られた。すべての写真を俯瞰すると、以下のような表面状態の変化が確認できる。まず、初期状態である平滑面からモルタル部の消失および粗骨材の露出が発生する(測定 1~2 回目)。続いて粗骨材の露出が著しくなり、粗骨材の脱落に至る(測定 3~4 回目)。コンクリート表面に対して満遍なく粗骨材の脱落が生じた後に、さらに深さ方向に位置する粗骨材が露出する(測定 5~6 回目)、というものである。

コンクリート標準示方書「維持管理編」における、一般的なすりへりの劣化過程に鑑みると、これらの表面状態の変化は、実水路コンクリートにおける摩耗の進行過程と同様である。したがって、サンドブラストを使用す

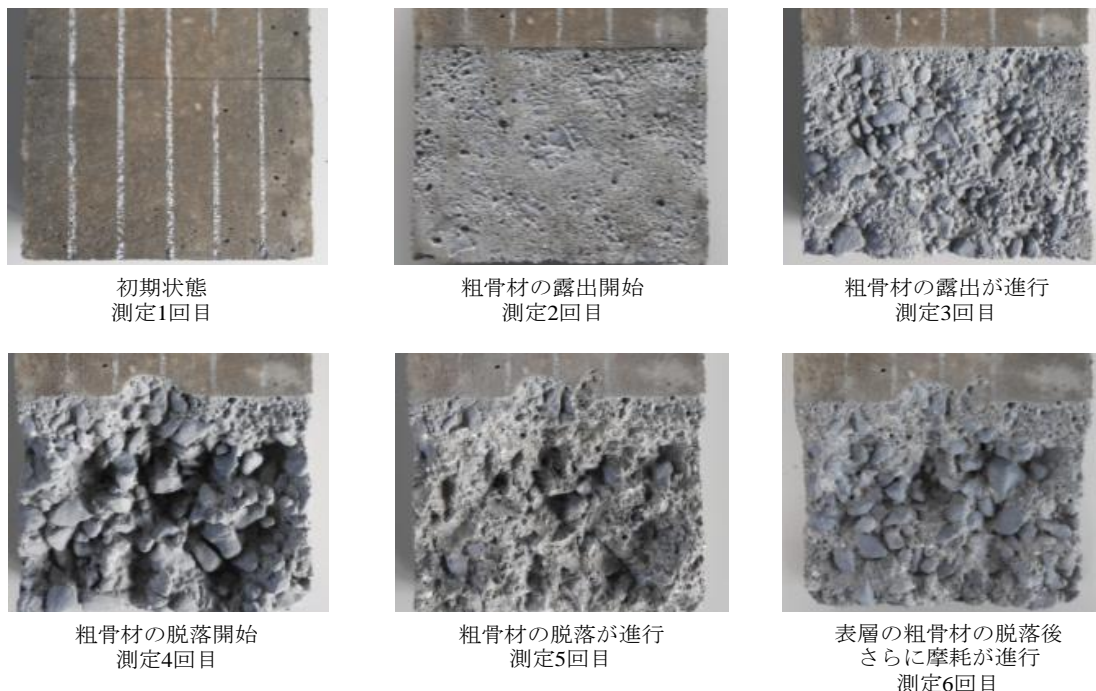


図-3 サンドブラストにより摩耗状態を再現したコンクリート供試体

ることで、実水路に生じる摩耗状態を概ね再現できていると考えられた。しかしながら、今後、本手法を水路コンクリートおよび補修材料の耐摩耗性を評価するための試験方法として広く適用するためには、より詳細な検討が必要である。例えば、前述したように、本手法はセメントペーストおよび骨材と比較して硬質な研磨材を使用するものであり、試験をとおして、露出した粗骨材自体が摩耗し、目視にて僅かながら丸みを帯びていることを確認した。一方、上述の石神らや長束らの報告では、露出した骨材の状態については明示されていない。よって、サンドブラストを使用した場合の摩耗機構と現在提案されている各種試験方法や実水路コンクリートにおける摩耗機構との整合性について詳細に検証する必要がある。

### 3.2 PCS とコンクリート供試体との表面状態の比較検討

PCS の表面状態と摩耗が進行した水路コンクリートの表面状態との相似性について検証する。各種 PCS およびコンクリート供試体における表面粗さの測定結果を表-4、5 にそれぞれまとめる。 $R_z$  と  $R_a$  に加え、 $R_z$  の平均値を供試体の最大骨材寸法  $G_{max}$  で除した値である  $R_z/G_{max}$  を算出した。

全体として、PCS の  $R_z$  および  $R_a$  はともに碎石サイズの大きさに比例して増加傾向にあることがわかる。また、算出した表面粗さが PCS の種類ごとに異なることから、各 PCS が異なる表面状態を有することが定量的に確認できる。一方、コンクリート供試体についても、それぞれの表面状態ごとに粗さ指標の数値は異なることから、摩耗の進行に伴い表面粗さが変化していることがわかる。

コンクリート供試体において算出した表面粗さ指標と各種 PCS の表面粗さ指標とを比較すると、数値上では、7号碎石を使用した PCS の表面状態が粗骨材の露出が生じた表面状態（測定3回目）と近いことがわかる。また、5号および6号碎石を使用した PCS の表面状態は粗骨材の脱落が生じている表面状態（測定4回目以降）と近いことがわかる。以上のことから、表面粗さの数値のみからの判断ではあるが、PCS の表面状態と粗骨材の露出あるいは脱落が生じた水路コンクリートの表面状態とが近い状態と見なせると判断し、以降の検討を進めた。

### 3.3 水路コンクリートにおける粗骨材の脱落条件の検討

#### (1) 実水路における粗骨材の脱落メカニズム

実水路コンクリートにおける粗骨材の脱落メカニズムについて検討する。なお、本研究における粗骨材の脱落とは、最大骨材寸法の粗骨材が脱落することと定義する。本実験では、基本的にサンドブラストのみを使用してコンクリートの摩耗を再現した。しかし、測定4回目の状態から測定5回目の状態へ移行する際に、サンドブラストによる研磨作用のみでは全面に渡る粗骨材の脱落を再現できなかったため、露出した粗骨材に対して工具を用

表-4 PCS の表面粗さの測定結果

PCS の種類		$R_z$ (mm)	$R_a$ (mm)	$R_z/G_{max}$
5号 22.3%	平均値	16.07	3.01	0.80
	標準偏差	4.01	0.76	
6号 22.2%	平均値	9.16	1.50	0.70
	標準偏差	2.82	0.48	
6号 25.7%	平均値	10.18	1.70	0.78
	標準偏差	2.29	0.34	
7号 18.9%	平均値	3.70	0.50	0.74
	標準偏差	0.86	0.12	
7号 20.5%	平均値	3.10	0.38	0.62
	標準偏差	0.73	0.13	
7号 22.7%	平均値	3.92	0.58	0.79
	標準偏差	0.94	0.17	

表-5 コンクリート供試体の表面粗さの測定結果

測定回		$R_z$ (mm)	$R_a$ (mm)	$R_z/G_{max}$
1回目	平均値	0.32	0.04	0.02
	標準偏差	0.19	0.01	
2回目	平均値	2.28	0.33	0.11
	標準偏差	0.52	0.06	
3回目	平均値	4.52	0.90	0.23
	標準偏差	1.33	0.28	
4回目	平均値	17.55	4.22	0.88
	標準偏差	3.45	0.60	
5回目	平均値	10.56	2.19	0.53
	標準偏差	1.91	0.71	
6回目	平均値	15.06	3.41	0.75
	標準偏差	3.91	1.03	

いて人為的に衝撃を与え、脱落を進行させた。つまり、本研究の結果からは、摩耗という単一の劣化現象のみでは、粗骨材の脱落が生じにくいと推察された。

ここで、長期供用された水路コンクリートの摩耗の進行には、流水と混入土砂による物理的な外力の作用に加え、カルシウム溶脱によるセメントペーストの脆弱化が大きく影響することが知られている<sup>11)</sup>。また、水路コンクリートにおいて粗骨材露出が進行すると、露出した粗骨材により摩耗の進行速度が低減されるという報告がある<sup>12)</sup>。つまり、実環境下の水路コンクリートでは、粗骨材露出が著しくなると、溶脱により粗骨材周辺部のセメントペーストが徐々に脆弱化し、脆弱部に物理的な作用が継続的に加わることで、粗骨材の脱落が生じると考えられる。例えば、下水道施設に使用されるコンクリート

では、酸、無機塩類、腐食性ガスなどの化学的侵食によりセメントペーストの脆弱化が速やかに進行し、粗骨材の脱落に至ることが知られている<sup>13)</sup>。

以上より、実環境下の水路コンクリートにおいては、摩耗のみでは粗骨材の脱落は生じ難く、溶脱を始めとする他の要因が複合的に影響していることが確認できた。

## (2) 粗骨材の脱落時期の推定

水路コンクリートにおける粗骨材の脱落開始時期の定量的な推定を試みた。まず、各種 PCS における  $R_z/G_{max}$  に着目すると、すべての供試体において  $R_z/G_{max}$  は  $0.71 \pm 0.09$  と一定の範囲内になることがわかる。とくに、一般的に水路コンクリートに使用される最大粗骨材寸法と同程度の大きさである 5 号砕石を使用した PCS の  $R_z/G_{max}$  は 0.80 となった。通常、水路コンクリートにおいて、摩耗により生じた表面粗さの最大深さが使用した粗骨材の最大寸法を超えると、粗骨材の脱落が始まると考えられる。すなわち、 $R_z/G_{max}$  が 1 を超えると粗骨材の脱落が始まる。一方、前節で述べたように、本論では PCS の特性を踏まえ、PCS の表面状態を摩耗の進行により骨材が露出あるいは脱落した状態と仮定している。この仮説が成り立つとすれば、普通コンクリートにおいて、摩耗の進行によりコンクリートの表面が PCS に近い状態になると、粗骨材とモルタル部の接点がほとんどないため、粗骨材の脱落が生じると考えられる。したがって、実環境下における水路コンクリートで  $R_z/G_{max}=0.80$  に近い値となる場合には、粗骨材の脱落が生じる状態であり、 $R_z/G_{max}=0.80$  を粗骨材の脱落が開始する閾値として使用できる可能性が考えられた。

上記結果を踏まえ、コンクリート供試体における  $R_z/G_{max}$  に着目すると、PCS を対象とした測定により得られた  $R_z/G_{max}=0.80$  という値に近い結果となったのは、測定 4 回目および測定 6 回目の 2 条件であった。両条件とも、部分的に粗骨材の脱落が生じている状態である。一方、測定 5 回目も粗骨材の脱落が生じているものの、コンクリート表面のほぼ全面にわたり粗骨材の脱落が生じた結果、表面の粗さ自体は小さかったため、 $R_z/G_{max}$  も小さくなったと考えられた。

以上のことから、摩耗による劣化が生じた水路コンクリート壁面の劣化度診断および劣化予測を行う上で、 $R_z/G_{max}=0.80$  を指標として粗骨材の脱落が開始する時期を推定できることが明らかとなった。しかしながら、本検討は PCS の表面状態が摩耗の進行したコンクリートの表面状態に近い状態であることを、粗さ指標のみに着目して仮定した結果である。また、脱落の対象とする粗骨材の最大寸法は 20mm に限定している。よって、上記の指標が実水路において広く適用可能か否かは、今後のデータ蓄積をとらして明確化する必要がある。

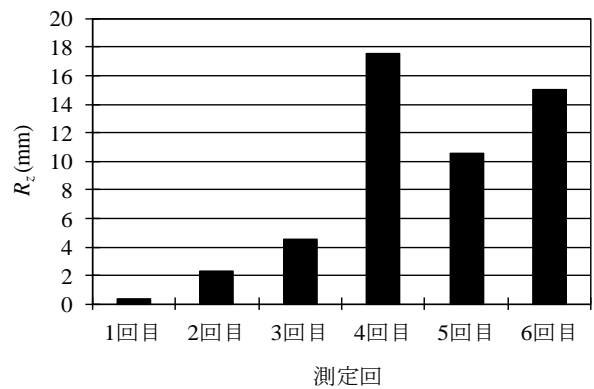


図-4 コンクリート供試体の  $R_z$  の経時変化

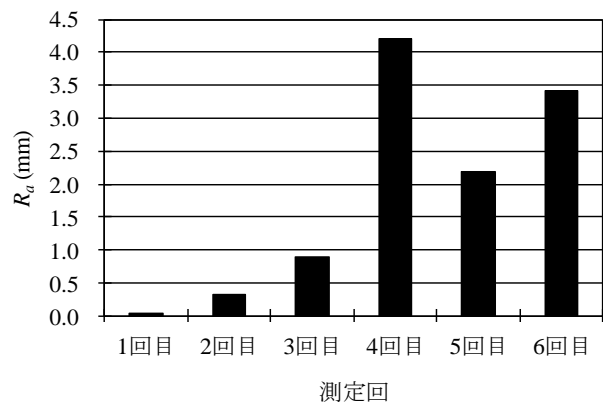


図-5 コンクリート供試体の  $R_a$  の経時変化

## 4. 摩耗の進行と通水性能との関係性の評価

本章では、これまでに得られた実験結果を踏まえ、摩耗の進行と通水性能との関係性について考察する。再現実験より得られた、各表面状態における  $R_z$  と  $R_a$  の算出結果を図-4, 5 にそれぞれ示す。

両図の段階的な変化は同様の傾向を示しており、摩耗が進行すると、粗骨材の露出が進行するまでは表面粗さが緩やかに増加する。そして、部分的に粗骨材の脱落が確認される状態になると、表面粗さは著しく大きくなり、粗骨材の脱落が全面的に広がると、表面の平滑性が回復し、表面粗さは小さくなる。その後は、再度の粗骨材露出および脱落を繰り返し、それに応じて表面粗さが同様の変化をすると推察できる。

水路の通水性能は、流水と壁面とが直接接することによって由来することから、摩耗の進行に伴う表面粗さの変化と強い関係性を有するとされる。一般に、通水性能を評価する際には、Manning の平均流速公式における粗度係数が指標となる。図-4, 5 を考慮すると、粗度係数は表面粗さ指標の増減に対応して、同様の傾向で増減すると考えられる。中矢ら (2008) は、供用期間 40 年の摩耗状態に相当する模擬摩耗版による水理模型実験の結果から、 $R_z$  ならびに  $R_a$  と粗度係数  $n$  ( $s/m^{1/3}$ ) との関係式を以下の式 (1), (2) のように提案した<sup>14)</sup>。

$$n = 0.042 \times (0.26 \times R_z)^{1/6} \quad (1)$$

$$n = 0.042 \times (2 \times R_a)^{1/6} \quad (2)$$

上式は実験式であり、適用範囲はそれぞれ  $R_z=4.0 \pm 1.43\text{mm}$ ,  $R_a=0.5 \pm 0.12\text{mm}$  とされる。再現実験を実施したコンクリート供試体のうち、適用範囲内となったのは測定3回目から得られた  $R_z$  のみであったため、本検討では同結果について上式を適用して試算した。

結果として、算出した粗度係数は 0.014 となり、現場打ちコンクリートフルームの設計基準値である 0.012～0.016 の範囲内となった。よって、一見すると、測定3回目の表面状態程度であれば、粗骨材が露出して表面粗さが増加したとしても、水路部材として通水性能にはほとんど影響をおよぼさないといえる。しかし、ここで注意せねばならないことは、粗度係数を性能指標とした通水性能の評価手法そのものについてである。今回得られた結果は、あくまでも水路の表面粗さの影響のみを反映する実験式に着目した評価結果である。一方、実水路にて推定する粗度係数には、水路の表面粗さの影響のみならず、水路の湾曲や断面形状、水路内の植生や土砂の堆積などといった、多くの流水抵抗となりうる要因の影響が含まれる。加えて、前述したように、対象としたコンクリート供試体の摩耗状態は、サンドブラストにより再現したものであり、その再現性についてはさらに検討を進める必要がある。以上のことから、今後は実水路を対象として、表面粗さの変化と通水性能との関係性をさらに検証するとともに、通水性能の評価方法そのものについても検討することが必要と考えられた。

## 5. まとめ

本論では、水路コンクリートにおける詳細な摩耗の進行過程および粗骨材の脱落条件を実験的に検証した。本研究で得られた成果を以下にまとめる。

- (1) サンドブラスト法を適用することで、摩耗が生じた実水路コンクリートの表面状態を概ね再現可能と考えられた。
- (2) 摩耗が生じた水路コンクリート壁面の劣化度診断および劣化予測を行う上で、 $R_z/G_{\max}=0.80$  を指標として粗骨材の脱落開始時期を推定できる可能性が示された。
- (3) 粗骨材の露出により表面粗さが増加した供試体に対して、実験式を適用して粗度係数を推定したところ、粗度係数は設計基準値の範囲内となった。

## 謝辞

本研究の一部は、科研費(23380143)の助成を受けたもの

である。記して感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 土木学会 コンクリート委員会編：2013年制定コンクリート標準示方書「維持管理編」, 社団法人土木学会, pp.250-263, 2013.10
- 2) 農林水産省農村振興局編：農業水利施設の長寿寿命化のための手引き, p.6, 2011.5
- 3) 中 達雄, 高橋順二編：農業水利施設のマネジメント工学, 養賢堂, pp.119-123, 2010
- 4) 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, 2008.3
- 5) 北村浩二, 本間新哉, 今泉眞之, 加藤 敬：農業用水路の壁面の摩耗劣化と継目劣化の予測, 農業農村工学会論文集, Vol.76, No.2, pp.123-134, 2008.4
- 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) 長谷川雄基, 太田垣晃一郎, 佐藤周之, 野中資博：すり減りが生じたコンクリート水路の劣化度診断に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.2, pp.1423-1428, 2012
- 8) 石田知子：水理構造物のコンクリートの摩耗評価に関する試験方法の現状, コンクリート工学, Vol.45, No.3, pp.50-54, 2007.3
- 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. 4
- 11) 森充広, 渡嘉敷勝, 山崎大輔, 加藤智丈：長期供用された農業用水路のコンクリート通水表面の変質, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.919-924, 2009
- 12) 上野和広, 長束勇, 石井将幸：開発した水砂噴流摩耗試験機の促進倍率, 農業農村工学会論文集 Vol.78, No.2, 2010.4
- 13) 和泉意登志：コンクリートの劣化と補修がわかる本, セメントジャーナル社, pp.76-81, 2009
- 14) 中矢哲郎, 渡嘉敷勝, 森 充広, 森 丈久：摩耗したコンクリート水路表層形状からの粗度係数推定手法, 農業農村工学会論文集, Vol.76, No.6, pp. 501-506, 2008.12