論文　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

長谷川　雄基[*1]・佐藤　周之[*2]・野中　資博[*3]

要旨：本研究では，摩耗が生じた農業用コンクリート水路の表面粗さと摩耗深さに着目した劣化度診断手法に関する検討を行った。実水路において簡便に取得可能な表面粗さ指標に着目し，表面粗さ指標と摩耗深さの関係について実験的に検討した。結果として，コンクリートの表面粗さ指標と平均摩耗深さは非常に高い相関関係を有していることが明らかとなり，これにより，実水路の表面粗さを計測することで，間接的に平均摩耗深さを推定できることが示唆された。とくに，本実験条件の範囲内においては，表面粗さ指標の一つである最大高さは，直接的に平均摩耗深さの代替指標として適用できる可能性が考えられた。

キーワード：農業用コンクリート水路，摩耗，表面粗さ，摩耗深さ，サンドブラスト，すりへり

1. はじめに

コンクリートの摩耗に関する研究は古くから数多く為されてきており，研究対象とされる構造物としては，舗装路面と床面が多い[たとえば 1)]。これらの構造物の摩耗は，主として固体同士の接触という，すり磨きとも言うべき物理的作用により進行する。一方，農業用コンクリート水路を初めとする水利構造物の摩耗は，固体と液体（壁面と流水）および固体同士（壁面と流砂）の接触による物理的作用に加え，カルシウムの溶脱によるセメントペーストの化学的変質との複合的な作用により進行する[2)]。このような流体・固体エロージョンおよび溶脱の作用により，摩耗が生じたコンクリート水路の表面は，セメントペーストが先行的に消失し，骨材の露出が生じた特徴的な状態となる。なお，既報では，評価対象構造物ごとに“摩耗”と“すりへり”の言葉の用法に違いのあることを述べた[3)]。本論中では，経時的なコンクリートの表面状態の変化全般を“摩耗”として定義する。

これまでのコンクリートの摩耗に関する研究は，実験室規模での促進試験装置の開発を試みた例が多い[たとえば 4)]。近年では，水利構造物に生じる摩耗現象を再現する装置として，石神らは，高圧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[2)]。長束らは，珪砂を混入した高圧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[5)]。一方，供用中のコンクリート水路に発生した摩耗を定量的に評価した報告は少なく，現状では摩耗に対する劣化度診断や劣化予測の方法は確立されていない。

実水路の摩耗状態を定量的に評価する手法として，型取りゲージやレーザー変位計を使用した表面粗さの実測およびデジタル画像を使用した解析などが提案されている[6, 7, 8)]。これらの方法は，現場作業が簡便であるものが多く，コンクリートの表面粗さを定量的に評価することにより，コンクリート水路の要求性能の一つである通水性能の評価が可能であることが示されている。

一方，摩耗の進行に伴う躯体の構造耐力の健全度を評価するためには，摩耗により消失した断面の深さ，すなわち摩耗深さの正確な測定が不可欠である。さらに，中性化や塩害は，コンクリート外部からの劣化因子の侵入が劣化の進行に大きく関係することから，躯体ごとの摩耗深さを把握することで，両劣化が複合的に進行する場合のより精度の高い劣化度診断の実施が可能となる。しかしながら，供用中の水路に対して摩耗深さを実測する場合，例えば建設初期の状態から同一箇所を継続的にモニタリングするなどの点検体制の構築そのものが必要になり，現実的に計測の困難な場合が多いといえる。

本研究では，摩耗が生じた農業用水路コンクリートの劣化度診断手法の一つとして，実水路において簡便に取得可能な表面粗さから摩耗深さを推定する手法を検討することを目的とした。具体的には，サンドブラストを利用してコンクリート供試体に対して促進摩耗を行うことで，表面粗さ指標と摩耗深さとの関係を評価した。とくに，粗骨材露出が生じた状態のコンクリートの表面粗さと摩耗深さとの関係を詳細に検討した。

2. 実験の概要

2.1 コンクリート供試体の概要

*1 愛媛大学大学院　連合農学研究科　修士　(学生会員)
*2 高知大学　農学部　准教授　博士　(農学)　(正会員)
*3 島根大学　生物資源科学部　教授　農学博士　(正会員)

表－1　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*
20	10	55	5	48.5	190	345	807	857	1.7

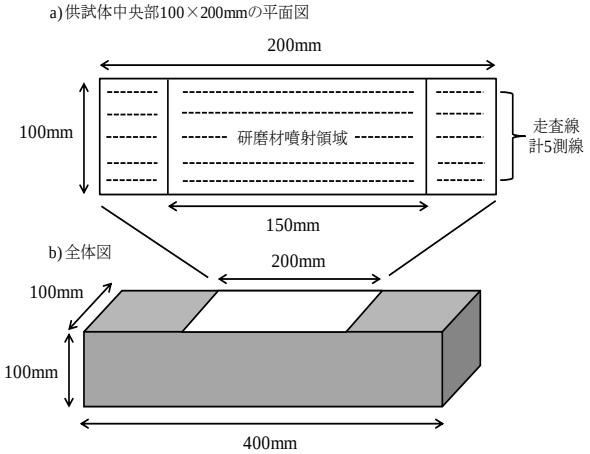
本研究では，角柱コンクリート供試体を使用して摩耗深さの評価を実施した。使用した材料は普通ポルトランドセメント（密度：3.15g/cm^3），高知県産硬質砂岩砕石（表乾密度 2.60g/cm^3，吸水率 1.33%），高知県産硬質砂岩砕砂（表乾密度 2.60g/cm^3，吸水率 1.58%），水道水，AE 減水剤（ポゾリス No.70，BASF ジャパン㈱）である。コンクリート供試体の示方配合を**表－1** に示す。角柱供試体は，100×100×400mm の型枠に打設し，打設後 24 時間静置した後に 20℃の恒温水槽内で材齢 28 日まで標準水中養生を行った。

コンクリートの表面粗さおよび摩耗深さの変化量は，使用材料や配合条件により変化する可能性がある。一方，コンクリートの深さ方向における粗骨材面積率の変化は水セメント比の影響をほとんど受けない，という知見がある [9]。加えて，水密性が求められる農業用コンクリート水路の水セメント比は一般的に 55%以下となること，とくに小規模な二次製品のコンクリート開水路の粗骨材最大寸法は 20mm のものが多いこと，を考慮して本研究では，基礎的なデータとして**表－1** に示す一通りの配合条件のみを対象とした。しかしながら，単位水量，単位セメント量や細骨材率などの他の配合条件，あるいは締固め程度などの施工条件の影響については，今後，実水路のデータ蓄積と合わせて検討する必要がある。上記配合にて作製した三本の円柱供試体の材齢 28 日における圧縮強度は 42.9N/mm^2，密度は 2.34g/cm^3 であった。

2.2 摩耗状態の再現に使用するサンドブラストの概要

コンクリートの表面粗さ指標と摩耗深さの関係を評価するためには，コンクリート供試体の表面に摩耗状態を再現する必要がある。そこで，本研究では，サンドブラストを使用して摩耗の進行に伴う表面状態の変化を評価した。サンドブラストを使用した促進摩耗試験の方法として，国内で確立されたものはないが，海外では例えば，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（株式会社不二製作所，FDO-F1-F）は，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。筆者らは，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コンクリート水路の表面状態を概ね再現可能であることを確認している [3]。研磨材には，粒度範囲 53～63μm，新モース硬度 12 のアルミナ製研磨材を使用した。



図－1　供試体に対する研磨材噴射領域の模式図

写真－1　試験時の供試体の摩耗状況

2.3 表面粗さおよび摩耗深さの評価方法

本研究では，材齢 28 日経過後のコンクリート供試体の表面に研磨材を噴射し，目視にて表面状態の変化を確認しながら，適宜計測と研磨材の噴射とを繰り返した。計測項目は質量減少量，表面粗さ，摩耗深さの三項目である。本実験では，供試体の研磨材噴射領域内において，サンドブラストを手動で移動させることで，噴射領域の全面に均一に摩耗が生じるように操作した。そのため，噴射時間と表面状態の変化との正確な関係性を示すことは困難である。よって，本論では各指標の変化量を質量減少量と関連付けて評価した。

サンドブラストによりコンクリート表面を摩耗させた場合，粗骨材の露出が進行すると，研磨材の衝撃およ

びすり磨き作用のみでは，摩耗の進行が著しく低下することが確認されている [3]。本実験では，上記状態が確認された時点で試験終了とした。また，実コンクリート水路において摩耗が生じる部材位置は，常時水中に位置する側壁と底版である。そこで，角柱供試体の左右面および底版上部を実コンクリート水路の両側壁および打設面とそれぞれ定義し，部材位置における表面粗さおよび摩耗深さの特性の違いの有無を検討した。

供試体表面に対する研磨材の噴射領域は，**図－1** に示す通りであり，供試体長手方向の中央部 100×150mm の領域とした。試験時の供試体の摩耗状況を**写真－1** に示す。表面粗さおよび摩耗深さの測定には，精度 0.01mm のレーザー変位計（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。レーザー変位計の走査距離は 200mm であり，供試体横断方向に 20mm 間隔で設定した 5 測線に対して，研磨材噴射領域の 150mm および未噴射領域の 50mm の区間を走査させ，0.2mm 間隔でデータの収集を行った。

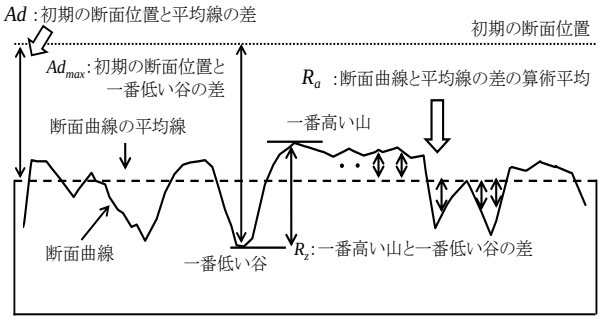
表面粗さ指標および摩耗深さの算出範囲は，研磨材の噴射領域内における中央部 100×100mm の領域とした。得られた計測線に対して傾斜補正を施した後に，摩耗深さおよび表面粗さ指標を算出した。摩耗深さと表面粗さ指標の概念図を**図－2** に示す。平均摩耗深さ（以下，Ad とする）は，初期の断面位置と断面曲線の平均線の差であり，最大摩耗深さ（以下，Ad_{max} とする）は初期の断面位置と断面曲線における最も深い谷の差である。表面粗さ指標としては，R_z：断面曲線における最大高さ（断面曲線の平均線に対して最も高い山頂と最も深い谷の差）および R_a：算術平均粗さ（断面曲線の平均線からの差の絶対値を平均した値）を検討した。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，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るため [10]，コンクリート水路の摩耗状態を評価する際に着目される例が多い指標である。

3. 結果と考察

3.1 目視確認による表面粗さの評価

小規模から大規模まで莫大なストックを形成するコンクリート水路の劣化度診断を効率よく遂行するためには，目視およびそれに近い診断技術が求められる。例えば，摩耗が生じたコンクリート水路において，細骨材や粗骨材の露出が開始した時期と，その時点の表面粗さ指標の数値とを関連付けることができれば，目視確認でも確実性の高い劣化度の判定が可能となる可能性がある。

試験中に確認した特徴的な表面状態をその時の表面粗さ指標とともに**写真－2** にまとめる。また，2013 年制定



図－2　摩耗深さおよび表面粗さ指標の概念図

a) 打設後初期の状態

2013年制定コンクリート標準示方書「維持管理編」すりへりの劣化過程中の“潜伏期”に該当

表面粗さ指標
R_z=0.28, R_a=0.03

b) 細骨材の露出開始

2013年制定コンクリート標準示方書「維持管理編」すりへりの劣化過程中の“進展期”に該当

表面粗さ指標
R_z=0.94, R_a=0.12

c) 粗骨材の露出開始

2013年制定コンクリート標準示方書「維持管理編」すりへりの劣化過程中の“加速期”に該当

表面粗さ指標
R_z=2.02, R_a=0.26

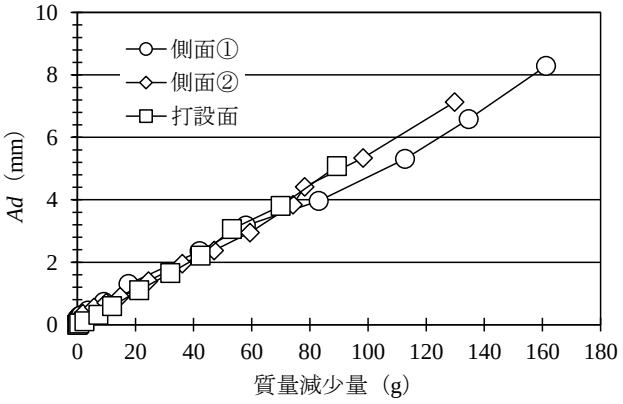
d) 粗骨材の露出が進行

2013年制定コンクリート標準示方書「維持管理編」すりへりの劣化過程中の“加速期”に該当

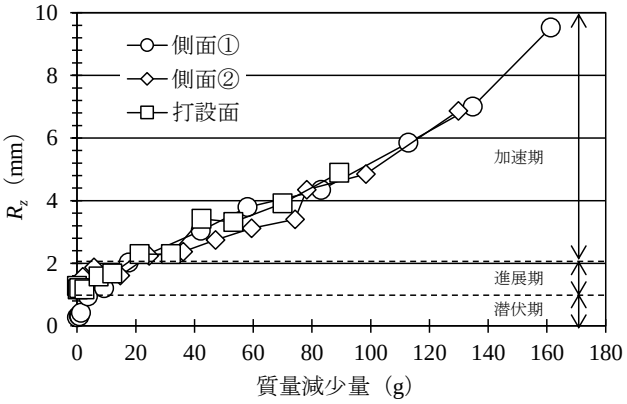
表面粗さ指標
R_z=4.34, R_a=0.91

写真－2　表面状態の経時変化および表面粗さ指標

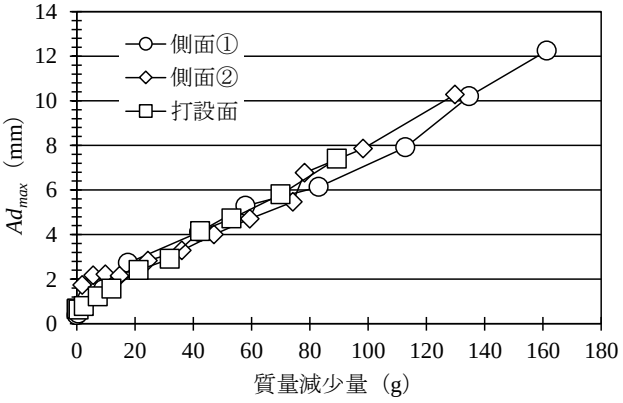
コンクリート標準示方書「維持管理編」[11]において示されるすりへりの劣化過程を引用し，各表面状態の劣化段階について併記した。なお，同示方書中には，粗骨材の脱落発生後の劣化段階を“劣化期”として区分しているが，本研究では，供試体からの粗骨材脱落が確認できなかったため，加速期までを評価対象とした。



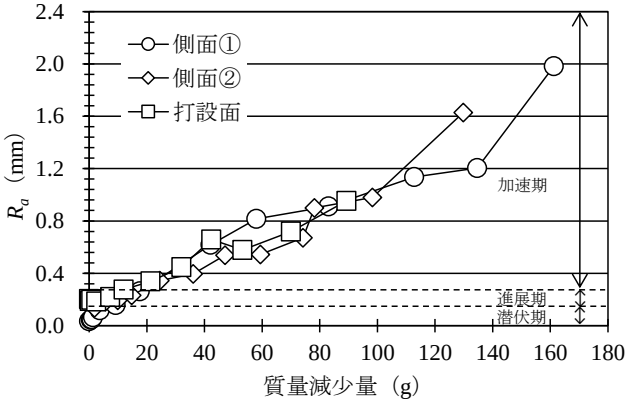
図－3　*Ad* と質量減少量との関係



図－5　R_z と質量減少量との関係



図－4　Ad_{max} と質量減少量との関係



図－6　R_a と質量減少量との関係

全体として，表面状態の変化に対応して二種類の表面粗さ指標はいずれも増加していることが確認できる。とくに，**写真－2** 中の c)と d)の表面状態は，どちらとも劣化段階としては“加速期”に該当するものであるが，表面粗さ指標および外観に大きな違いのあることから，場合によっては“加速期”を前期と後期の二種類に分けた評価も必要になるといえる。既往の知見では，粗骨材の露出開始以降は粗骨材の露出程度に応じて表面粗さが大きく変化すると示されている[12]。加えて，摩耗の進行が水路の要求性能に影響をおよぼす可能性があるのは粗骨材の露出開始以降であること，実水路において粗骨材の脱落が進行し，断面欠損および鋼材露出に至る例はほとんどないこと[11]，の二点が指摘されている。したがって，摩耗に対するコンクリート水路の劣化度診断においては，とくに加速期の表面状態の変化を詳細に評価することが不可欠といえる。

一方，粗骨材の露出開始以前の状態は，消失したセメントペーストおよび細骨材もわずかであり，水路の要求性能に影響を及ぼす可能性はほとんどないと考えられる。ここで，c)の表面粗さ指標に着目すると，R_z は 2.02mm，R_a は 0.26mm である。したがって，目視で摩耗に対する劣化度診断を実施するに当たり，初めて粗骨材露出を確認した表面状態を R_z=2mm 程度，R_a=0.25mm 程度と見なし，定量的に評価できる可能性が考えられた。

3.2 摩耗深さおよび表面粗さの増加傾向の評価

サンドブラストの噴射により摩耗状態を再現したコンクリート供試体の摩耗深さおよび表面粗さ指標と質量減少量との関係を**図－3，4，5，6** にそれぞれ示す。

図－3 および**図－4** を見ると，供試体の側面と打設面のいずれにおいても，*Ad* と Ad_{max} は同様の傾向で増加していることが確認できる。つまり，本実験の範囲内では，側面および打設面の摩耗の進行特性には違いの無いことが明らかとなった。しかしながら，実水路の摩耗の進行においては，物理的な作用のみならず，セメントペーストからのカルシウム溶脱が大きく作用することが知られている[2]。加えて，実水路においては部材位置ごとに摩耗のメカニズム自体が異なる，という知見もある[13]。したがって，実水路の側壁と底版において得られる摩耗深さの特性については，現地試験を基に詳細な評価を進める必要があると考えられた。

同一面かつ同一質量減少量における *Ad* と Ad_{max} の関係をみると，Ad_{max} の方が概ね 2～4mm 程度大きい値であることが分かる。先述したように，コンクリート水路において摩耗が進行すると，モルタルの先行的な消失と粗骨

材露出に伴い，表面の凹凸が発生する。つまり，粗骨材の露出開始以降の摩耗深さは，初期の断面位置から露出した骨材までの深さとなる場合が多くなると推測される。一方，中性化や塩害の進行に関わる劣化因子が侵入するのはセメントペースト部であることから，*Ad* のみを指標とするのは，上記劣化の進行評価に際して危険側の評価となり得る。よって，現段階では，摩耗という単一の劣化の進行を評価する場合は *Ad* を指標とし，他の劣化の評価において摩耗の進行を加味する場合は Ad_{max} を指標とするのが望ましいと考えられた。しかしながら，現時点では，着目すべき指標を明確に判断することは困難である。今後は，摩耗の進行そのものに加えて，中性化や塩害の進行を関連付けた総合的な視点からの評価が必要であるといえる。

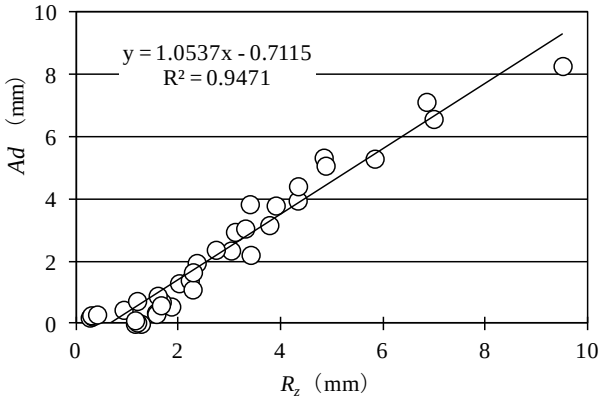
図－5 および**図－6** より，摩耗深さと同様に，二種類の表面粗さ指標も質量減少量に比例して増加していることが分かる。また，計測面ごとの両指標の変化傾向の違いは見られない。前節で述べた結果より，粗骨材の露出開始（R_z=2.02mm，R_a=0.26mm）以降の劣化段階はすべて“加速期”に該当する。しかし，両指標は同一の“加速期”に区分されているものの，幅広い範囲の数値を示した。よって，摩耗に対する劣化度診断を適切に実施するためには，粗骨材の露出程度と通水性能を初めとする水路の要求性能との関係性を正確に評価しておく必要があるといえる。

3.3 表面粗さと摩耗深さとの関係性の検討

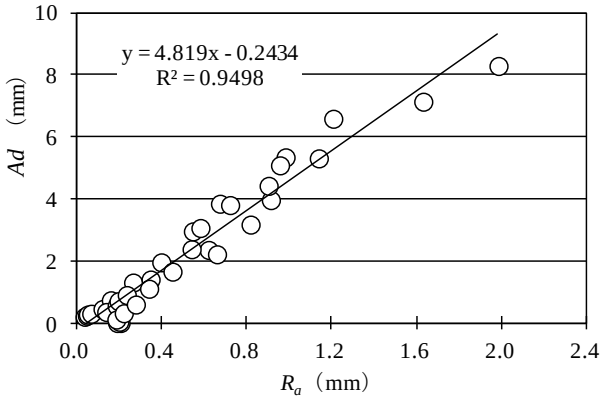
摩耗が生じた供用中のコンクリート水路において，表面粗さから摩耗深さを推定することを目的とし，*Ad* と R_z および R_a との関係をそれぞれ検証した。得られた結果を**図－7** および**図－8** に示す。前節の結果より，本実験においては，計測面ごとの摩耗深さおよび表面粗さ指標の変化の傾向には違いが見られなかったことから，両図には三計測面すべての結果を同一凡例にてプロットした。

全体として，*Ad* と R_z および R_a との間には高い正の相関関係のあることが確認できる。両図において一次式にて近似直線を推定し，決定係数 R^2 を算出すると，どちらも約 0.95 と非常に高い値となった。また，本実験結果より示された関係式は，それぞれ Ad=1.0537R_z-0.7115，Ad=4.819R_a-0.2434 となり，これらの関係式により，実水路で計測した表面粗さから間接的に摩耗深さを推定できることが示唆された。

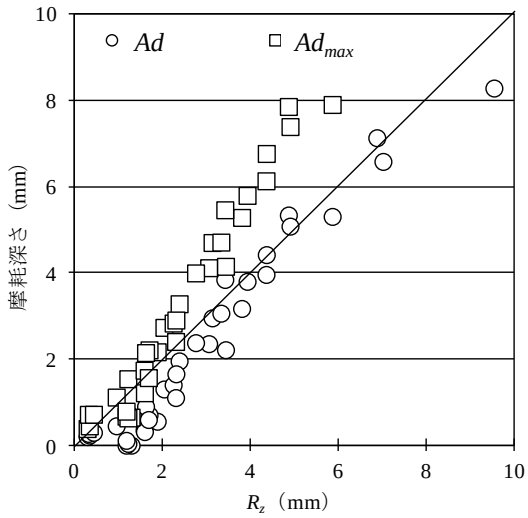
加藤らは，複数の現場打ちコンクリート水路の摩耗状態を調査し，供用後約 40 年が経過したコンクリート水路の R_a は 0.4～1.0mm，R_z は 2～6mm になることを報告している [4]。これらの値を本結果と照合すると，供用から 40 年経過したコンクリート水路の *Ad* は，最大でも



図－7　*Ad* と R_z との関係



図－8　*Ad* と R_a との関係



図－9　二種類の摩耗深さと R_z との関係

わずか 6mm 以下と小さいものであることが分かる。これは，コンクリート水路における摩耗深さは，モルタルが消失する段階までは経時的に増加する傾向にあるが，ある程度粗骨材が露出すると，進行速度が低下し，摩耗深さの増加量も小さくなるためと推察された。

二種類の摩耗深さと R_z との関係を**図－9** に示す。*Ad* は R_z とほぼ等しい値であり，Ad_{max} と R_z との差は概ね 2mm 程度であることが確認できる。これら三種類の指標の視覚的な関係は，**図－2** に示す通りであり，Ad_{max} と

R_zの差は，局所的にではあるが，消失したセメントあるいはモルタルの深さを示すと考えられる。先述したように，本実験においては，全体的な Ad が最大でもわずか 6mm 以下であったため，消失したセメントおよびモルタル深さは小さいものであり，AdやAd_{max}とR_zは近しい値となった可能性が考えられた。このことから，摩耗深さを評価するに当たり，R_zを直接的に Ad の代替指標として適用できることが示唆された。しかしながら，本結果は，あくまでもサンドブラストを使用した促進摩耗実験から得られたものである。本実験より得られた摩耗深さと表面粗さ指標との関係が実水路の摩耗状態においても成立するか否かは，今後精査する必要がある。

サンドブラストを使用した促進摩耗は，セメントペーストや骨材と比較して硬質な研磨材を噴射するものであるため，わずかではあるが，骨材自体にも摩耗が生じる。一方，実水路の摩耗は，細骨材の脱落や粗骨材自体の摩耗がより生じ難い状況であると考えられる。よって，今後は本実験で得られた結果について，実水路のデータ蓄積を通して，サンドブラストの摩耗機構と実水路の摩耗機構の整合性も含めて詳細に検証する必要がある。

4. まとめ

本論では，実水路において簡便に取得可能な表面粗さから摩耗深さを推定することを目的として，表面粗さと摩耗深さとの関係について実験的に検討した。得られた成果を以下にまとめる。

(1) コンクリート水路の摩耗に対する劣化度診断を目視にて実施するに当たり，初めて粗骨材露出を確認した表面状態を R_z=2.02mm，R_a=0.26mm の数値と関連付けて評価できることが示唆された。

(2) 本研究における実験方法および実験条件の範囲内では，供試体の側面および打設面の摩耗の進行特性には違いの無いことが確認された。

(3) R_zおよびR_aとAd，Ad_{max}はすべて同一の傾向で増加することが確認できた。

(4) 実水路の表面粗さを計測することで，間接的に摩耗深さを推定できることが示唆された。とくに，本実験条件の範囲内では，R_zを直接的に Ad の代替指標として適用できる可能性が考えられた。

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) 堀口　敬：コンクリートの摩耗に関する研究の現状，コンクリート工学，Vol.31，No.10，pp.17-27，1993.10

2) 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

3) 長谷川雄基，崔　萬權，佐藤周之，野中資博：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.36, No.1, pp.736-741, 2014

4) 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

5) 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

6) 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

7) 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

8) 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

9) 佐藤周之，緒方英彦，野中資博，服部九二雄：コンクリート水路における骨材露出の評価に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.30, No.1, pp.699-704, 2008

10) 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

11) 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

12) 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

13) 長谷川雄基，崔　萬權，松浦　悟，佐藤周之，野中資博：コンクリート水路の部材位置における摩耗状態の定量的評価に関する研究，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol.12，pp.135-140，2012.11