

# 論文 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

長谷川 雄基<sup>\*1</sup>・太田垣 晃一郎<sup>\*2</sup>・佐藤 周之<sup>\*3</sup>・野中 資博<sup>\*4</sup>

**要旨:** 供用中のコンクリート水路には、流水の摩耗作用などによりすり減りが生じる。本研究では、すり減りが生じたコンクリート水路に対する劣化度診断手法として、三次元画像解析を用いた表面粗さの評価を試みた。三次元的な指標である表面積比は、粗骨材露出の程度を良好に反映しており、すり減りによるコンクリート表面の劣化度を面的に評価することが可能であることが示された。表面積比は、表面粗さの二次元的な評価指標である算術平均粗さと最大高さの両者と高い相関関係を有しており、現段階ではこれら全てが劣化度診断を行う際の性能指標として利用可能であることがわかった。

**キーワード:** コンクリート水路, すり減り, 摩耗, 骨材露出, 三次元画像解析, 表面積比, スキューネス

## 1. はじめに

コンクリート水路における特徴的な変状の一つにすり減りがある。すり減りの主たる発生要因としては、流水および流水中の土砂による摩耗作用と、セメントペースト部からのカルシウムイオンの溶出に伴う組織構造の脆弱化が挙げられている<sup>1)</sup>。つまり、すり減りは物理的要因と化学的要因が複合的に作用し、劣化として進行していく。また、上記の発生要因は、どちらも流水の存在下で発生するものであり、農業水利施設の一種であるコンクリート水路で高い頻度で顕在化する劣化といえる。

コンクリート水路ですり減りが進行すると、モルタル部分が選択的に摩耗し、粗骨材の露出が生じるとされる<sup>2)</sup>。骨材露出が生じた水路では、とくに、コンクリート表面の凹凸の増加により、計画的な流量の輸送にかかわる水理性能に悪影響を及ぼすとされる<sup>3)</sup>。また、コンクリート水路のような薄肉の部材で構成される構造物では、すり減りの進行による粗骨材の脱落などで断面欠損が生じ、劣化期に至ると構造性能に悪影響を及ぼす恐れがある。

一方、農業用のコンクリート水路の維持管理では、鉄筋コンクリート中の鋼材の露出や腐食・断面欠損に至るような過度にすり減りが進行した状態になった事例は報告されていない<sup>4)</sup>。しかしながら、2007年に制定されたコンクリート示方書「維持管理編」では、すり減りの進行過程が図-1のように示されている<sup>5)</sup>。同示方書では、すり減りによる劣化の過程を、すり減りが発生するまでの潜伏期、粗骨材が露出するまでの進展期、粗骨材が脱落するまでの加速期、断面欠損が著しく性能の低下が顕著になる劣化期、に分けることとしている。ところが、各劣化段階を明確に区別するための性能指標や照査

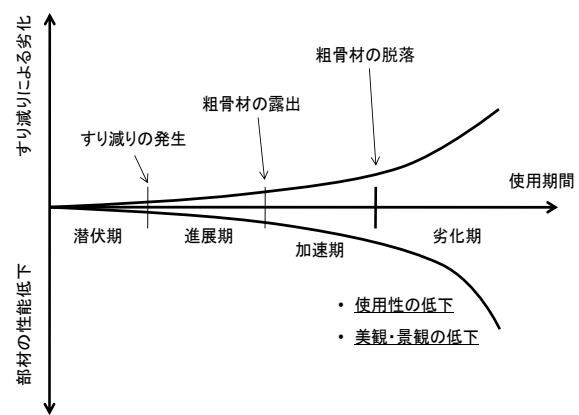


図-1 すり減りの進行過程概念図

方法は明示されていない。すなわち、現状では劣化度診断に基づく補修・補強や改築といった機能保全のための対策方針の決定に必要な定量的根拠を明示しにくいと考えられる。

すり減りが生じたコンクリート水路の劣化度診断を実施するためには、コンクリート表面の凹凸を定量的に評価する必要がある。既往の研究の多くでは、算術平均粗さ  $R_a$  や最大高さ  $R_z$  といった、コンクリート表面から取得した二次元データを指標化した劣化度診断手法が提案されている<sup>4, 6, 7, 8)</sup>。ところが、水理性能に係る通水性は、コンクリートと水が接している「面」が影響を及ぼすものであり、二次元データでの評価で十分であるのか、についての検討も必要である。より面的に凹凸を評価するのであれば、コンクリート水路の通水面全体を三次元的に評価するとともに、二次元的な指標との整合性を検討する必要があると考えられる。

\*1 高知大学大学院 総合人間自然科学研究科 農学専攻 (学生会員)

\*2 愛媛大学大学院 連合農学研究科 (独立行政法人水資源機構) 修士 (非会員)

\*3 高知大学 農学部農学科 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)

本論では、すり減りが生じたコンクリート水路の劣化度診断技術として、三次元画像解析ソフトウェアを利用して水路の表面状態の評価を行った。とくに、骨材露出が生じたコンクリート水路の表面の表面積比に着目し、すり減りの劣化度診断における性能指標としての妥当性および二次元データとの関係性を検証した。また、すり減りが生じたコンクリート水路の劣化状態を定量的に分類する方法について検討した。

## 2. 調査の概要

### 2.1 三次元画像解析ソフトウェアを用いた評価方法

#### (1) 三次元画像解析ソフトウェアの概要

本研究で使用した三次元画像解析ソフトウェアは Kuraves-K (倉敷紡績株式会社, 以下 Kuraves-K とする) である。本ソフトウェアは、同一箇所を対象に撮影した 3 枚のデジタル画像から、被写体の立体構造を三次元空間座標系に数値化する機能を有する。解析結果の一例を図-2 に示す。Kuraves-K は、撮影に使用するデジタルスチールカメラ (以下、デジカメとする) の機種や性能に関わらず解析が可能とされており、現場での作業は 1 箇所につき 3 枚の画像取得のみであり、作業の簡便性に優れている。本実験で使用したデジタル一眼レフカメラ (SONY, α380) は、有効画素数 1420 万画素である。撮影方法の概略を図-3 に示す。撮影では焦点距離を 42cm 一定とし、中心から左右に 2cm ずつ水平移動して一箇所につき三枚の画像を取得した。

本研究では、画像解析の対象領域を 10cm×10cm に設定した。理由は、一般的に、コンクリート水路に使用される粗骨材の最大寸法が 20~25mm 程度であり、事前に最大粗骨材寸法と露出する骨材の表面積を検討した予備実験を踏まえ、10cm×10cm あれば安定した表面積比の解析値を得ることができたためである。解析を行う際の要素数は、上記予備実験により精度良く解析可能な節点数 1600 点 (40×40 点) とした。

#### (2) 撮影時の照射条件

画像解析を行う際には、被写体の明度が解析結果に影響を及ぼすことが考えられる。とくに、供用中の水路を

調査する場合、撮影時の照射条件により、同一の地点においても異なった解析結果が得られる可能性がある。そこで本研究では、事前にコンクリート水路の同一箇所を対象として、照射条件が解析結果に及ぼす影響を検証した。撮影する時間をずらすことで、解析面全体が日光に曝されている状態と解析面全体が影に覆われている状態の画像を取得した。上記 2 種類に加えて、解析面全体が影に覆われている状態をデジカメのフラッシュ機能を使用して撮影したものについても検証した。

### 2.2 調査対象とした水路

図-1 に示したそれぞれの劣化段階のうち、水路の要求性能を低下させるのは、粗骨材の露出が発生してからであると考えられる。すなわち、同図中の加速期以降を詳細に調査していくことが必要であると考えられる。また、同じ骨材露出という現象であっても、水路の供用年

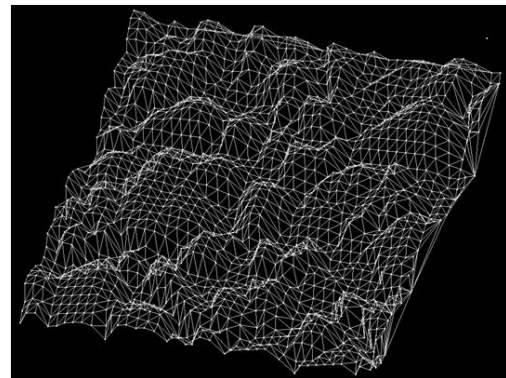


図-2 三次元化した例 (調査対象 No.8)

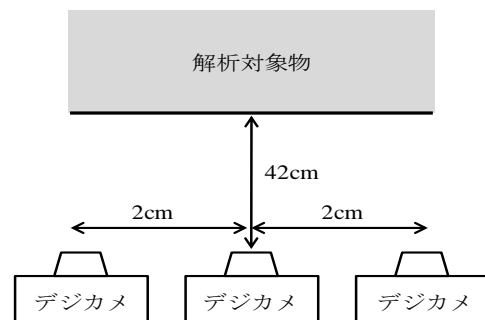


図-3 撮影方法の簡略図



図-4 調査対象水路の例 (左から調査対象 No.4, 6, 8)

数や供用環境，配合および使用した粗骨材の最大寸法などといった種々の条件により，粗骨材の露出状態や分布に違いが生じる。

以上のことから，本研究では，骨材露出が生じた水路に対して，目視調査にて粗骨材の露出状態，分布などを確認したうえで，骨材露出の状態が異なった13種類の水路を調査対象として抽出した。調査対象の一部を例として図-4に示す。加えて，建造後間もない状態の水路（潜伏期）とモルタル部分の溶出が始まっている水路（進展期）についても，それぞれ目視調査にて確認を行ったうえで，各々1種類ずつを調査対象として選定した。なお，劣化期に相当する粗骨材の脱落が顕著であり，鋼材の露出や腐食が生じている水路については目視調査でも確認することができなかったため，本研究では対象外とした。

### 2.3 表面粗さの評価方法

Kuraves-Kによる解析では，隣り合った節点ごとに三角網を形成し，各三角網の表面積を算出する。そして，解析領域内のすべての三角網の表面積を足すことによって，簡単に解析対象の表面積を算出する機能を有する。本研究では，解析領域として設定した100cm<sup>2</sup>（10cm×10cm）を基準値1として換算した表面積比を算出し，すり減りが生じたコンクリート水路の劣化度診断の性能指標としての妥当性を検討した。また，算出した表面積比を表面粗さの二次元的な評価指標である算術平均粗さ（粗さ曲線の平均線からの差の絶対値を平均した値） $R_a$ ，最大高さ（粗さ曲線の平均線から最も高い山頂と最も深い谷の和） $R_z$ と比較することにより，三次元データと二次元データの関係性を検討した。 $R_a$ と $R_z$ の概念図を図-5に示す。

JIS B0601のスキューネスの式を用いて，コンクリートの表面形状を分類化する手法が提案されている<sup>7)</sup>。この手法を用いることにより，すり減りが生じたコンクリート水路の劣化段階を定量的に区別することができる可能性がある。スキューネスは以下の(1)式で算出される。

$$R_{sk} = \frac{1}{R_q^3} \left[ \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N Z_n^3 \right] \quad (1)$$

ここで， $R_{sk}$ :スキューネス， $Z_n$ :粗さ曲線の平均線からの高さ又は深さ (m)， $N$ :データ数， $R_q$ :二乗平均平方根粗さである。 $R_q$ は以下の(2)式で表すことができる。

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N Z_n^2} \quad (2)$$

$R_{sk}$ が正の場合は，コンクリート表面の凹凸の高さ分布が平均線よりも下に分布していることを示し，表面の凸部分が大きく尖り，山頂部分から深い位置に高さ分布が偏っているという特長を有する。 $R_{sk}$ が負の場合は，コンクリート表面の凹凸の高さ分布が平均線よりも上に分布していることを示し，山頂部分から高い密度で，凹凸の高

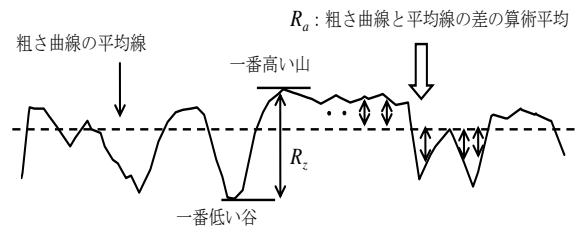


図-5  $R_a$ と $R_z$ の概念図

表-1 照射条件別の解析結果

	$R_a$ (mm)	$R_z$ (mm)	表面積比
条件1	0.64	3.27	1.066
条件2	0.62 (3.1%)	3.57 (9.2%)	1.105 (3.7%)
条件3	0.59 (7.8%)	3.11 (4.9%)	1.063 (0.3%)

さ分布が山頂部分付近に偏っているという特長を有する。コンクリート表面の凹凸の高さ分布が平均線を挟んでほぼ対称となる場合は， $R_{sk}$ が0となる。

本調査で対象としたすべての水路の $R_{sk}$ を算出し，上記の正・負および0で分類することにより，すり減りが生じたコンクリート水路の劣化段階を定量的に区別した。なお， $R_a$ と $R_z$ ， $R_{sk}$ は，解析面の中に横断線を任意に10本引き，横断線を粗さ曲線へと傾斜補正して粗さ曲線ごとに各指標を算出し，その平均値を採用した。

## 3. 結果と考察

### 3.1 照射条件が解析結果に及ぼす影響

照射条件の違いが解析結果に及ぼす影響を検証した。同一の解析面を対象として，解析面全体が日光に曝されている状態を条件1，解析面全体が影に覆われている状態を条件2，解析面全体が影に覆われている状態をデジカメのフラッシュ機能を使用して撮影した場合を条件3とする。各条件の解析結果を表-1に示す。ここで，画像を撮影する際の被写体の明度として，解析面全体が日光に曝されていれば十分とし，条件1の解析結果より算出した $R_a$ ， $R_z$ ，表面積比を真値と仮定した上で，各条件におけるそれぞれの指標の誤差率を同表( )中に示す。

すべての指標において，条件ごとにばらつきが生じていることが分かる。しかしながら，誤差率に着目すると，最大となるものでも条件2の解析結果より算出した $R_z$ で9.2%であり，どの値も非常に小さい。とくに，表面積比については，誤差率がそれぞれ3.7%，0.3%と極めて小さな値である。

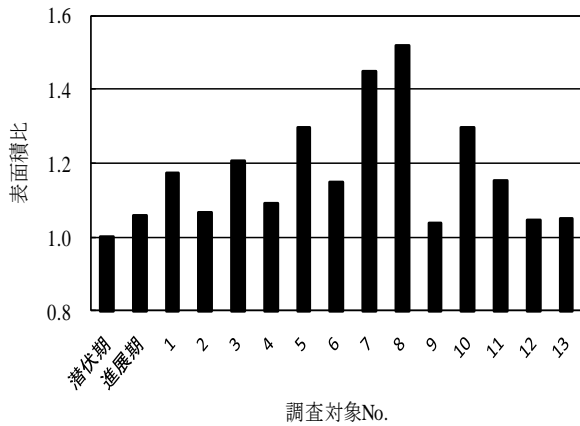


図-6 調査対象水路の表面積比

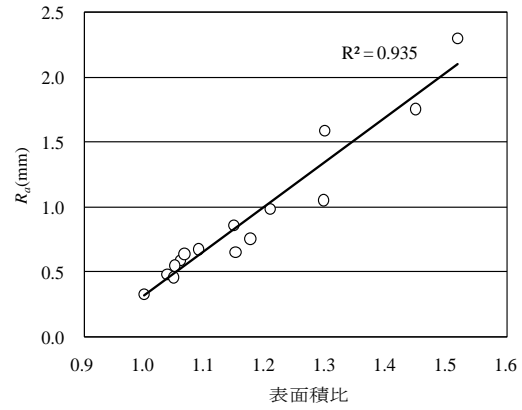


図-7 表面積比と  $R_a$  との関係

表-2 調査対象水路の解析結果

	$R_c$ (mm)	$R_a$ (mm)	$R_{sk}$	表面積比
潜伏期	1.64	0.33	-0.18	1.000
進展期	3.40	0.59	-0.33	1.059
1	5.06	0.76	-0.33	1.175
2	3.27	0.64	0.01	1.066
3	5.01	0.99	0.11	1.208
4	3.94	0.67	0.04	1.090
5	8.34	1.59	-0.26	1.298
6	5.01	0.86	0.32	1.148
7	9.37	1.75	-0.30	1.449
8	9.39	2.30	-0.27	1.518
9	2.82	0.48	-0.08	1.038
10	5.77	1.05	-0.02	1.297
11	4.19	0.65	0.03	1.151
12	2.79	0.46	0.00	1.048
13	3.16	0.55	-0.21	1.050

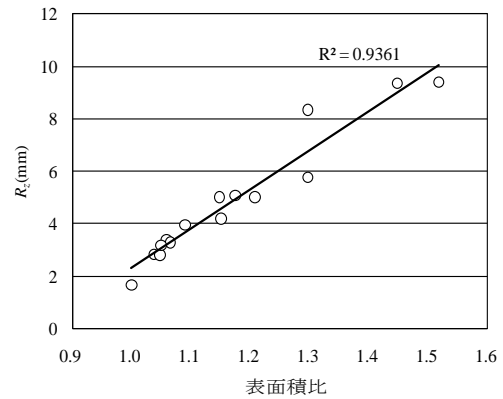


図-8 表面積比と  $R_c$  との関係

実際に、供用中の水路の劣化度診断を行う際には、水路をとりまく各種の環境条件および気象条件により、解析面の明度を常に同一の条件にして画像撮影を行うことが困難な場合もあると考えられる。しかし、上記の結果を考慮すると、Kuraves-K を使用した解析においては、照射条件が解析結果に大きな影響を及ぼさないことが示され、作業性という面で効率的な劣化度診断を行うことが可能であると考えられた。

### 3.2 表面積比を性能指標とした劣化度診断

#### (1) 表面積比の性能指標としての妥当性の検証

すり減りが生じたコンクリート水路の面的な評価を行うことを目的として、解析により得られた15種類の調査対象水路の表面積比を比較した結果を図-6に示す。また、調査対象水路の解析結果を表-2に示す。

図-6より、潜伏期および進展期の水路においては表面積比に大きな増加は見られない。また、目視調査にて、粗骨材の露出が生じていると判断した加速期に該当する水路（調査対象 No.2, 9, 12, 13）では、進展期の水路の表面積比と同程度の値を示した。進展期の水路の表面

積比に大きな増加が見られない原因としては、コンクリート水路の表面にすり減りが生じた初期の段階では、コンクリート表面がまんべんなく摩耗されるためと考えられた。また、粗骨材の露出が生じ始めた段階、すなわち加速期初期の段階では、部分的に粗骨材が露出しているだけに過ぎないため、進展期の表面積比と比較して大差がなかったと考えられた。

一方、全体的に見ると、同じ加速期に該当する水路でも、表面積比はそれぞれ異なっている。とくに、調査対象 No.8 の水路は、No.9 と比較して表面積比が約1.5倍となった。コンクリート水路の表面積比が増加する要因として考えられることは、粗骨材がどれだけ凸に露出しているか、ということである。すなわち、同一の骨材露出という現象であっても、粗骨材露出の程度が異なれば表面積比の増加量も異なる。また、表面積比の増加分が異なれば水路の要求性能に及ぼす影響も異なることが考えられる。

以上の結果から、表面積比という指標は、すり減りが生じたコンクリート水路に対して劣化度診断を行う際の

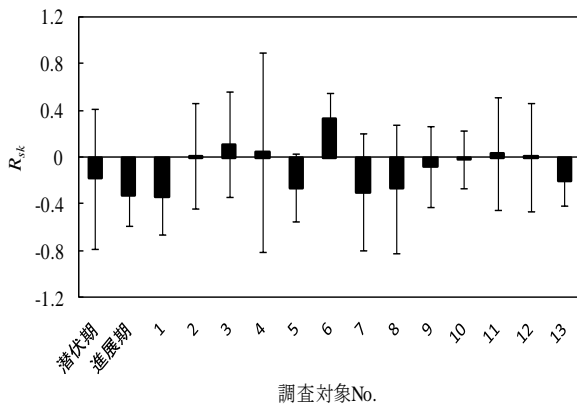


図-9 調査対象水路の  $R_{sk}$

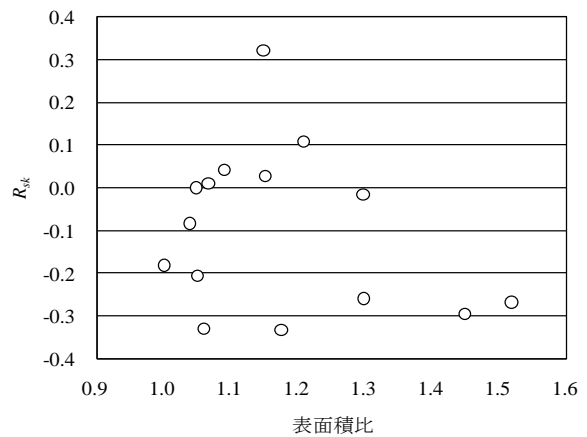


図-10  $R_{sk}$  と表面積比の関係

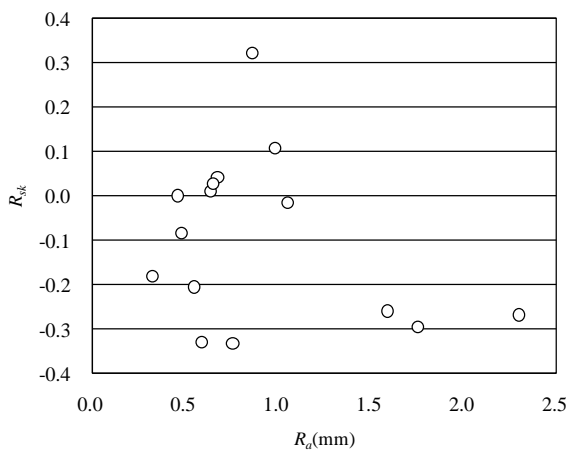


図-11  $R_{sk}$  と  $R_a$  の関係

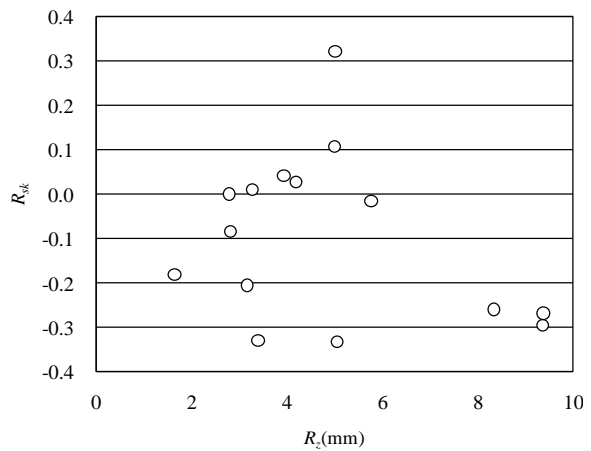


図-12  $R_{sk}$  と  $R_z$  の関係

性能指標となりうるものが示された。今後、水路の供用年数と表面積比との関係や、表面積比の増加に伴う水路の性能低下、特に水理性能の低下について明確化していく必要がある。

## (2) 二次元データとの関係性

コンクリート水路の表面粗さを定量的に評価する二次元的な指標である算術平均粗さ  $R_a$  および最大高さ  $R_z$  と表面積比との関係性を検討した。表面積比と  $R_a$  との関係性を図-7に、表面積比と  $R_z$  との関係性を図-8に示す。

両図より、表面積比と  $R_a$  および  $R_z$  は非常に高い正の相関性があることが分かる。これは、摩耗作用によりコンクリート水路にすり減りが生じると、モルタル分の消出と粗骨材の露出が発生し、水路の表面粗さが増加するというを示している。すなわち、表面積比は表面粗さの増加を良好に反映する指標であると考えられた。

既往の研究では、 $R_a$  および  $R_z$  に着目し、すり減りが生じた現地水路の機能診断や劣化度予測が行われている<sup>6)</sup>。ここで、表面積比と二次元的な表面粗さ指標との間に高い相関性があることを考慮すれば、既往の研究で示された機能診断手法および劣化度予測手法を適用できる可能

性がある。例えば、現地水路の調査結果から、供用後約40年が経過した水路の表面粗さは、 $R_a$  が0.4~1.0mm、 $R_z$  が2~6mmであると報告されている<sup>8)</sup>。これを本調査結果と照合すると、供用後約40年に相当する水路の表面積比は1.038~1.297となる。以上のことから、二次元データである  $R_a$  および  $R_z$ 、そして三次元データである表面積比のどちらにおいても、すり減りが生じたコンクリート水路の表面粗さを評価可能であると考えられた。

ここで、改めて三次元画像解析の特長を整理する。Kuraves-Kを用いた劣化度診断手法の特長として、コンクリート表面を「面的」に捉えられることに加えて、レーザー変位計やデータロガーといった特殊な機器が不要で、現場での作業性が非常に高いということが挙げられる。また、二次元データ取得のためには、水路内の対象とする部分や取得する横断線の本数(標本数)を検討する必要がある。今後、コンクリート水路の表面粗さと水理性能との関係を明確化していくにあたって、三次元画像解析による調査は膨大な量のデータの蓄積に資することができると思われる。

### 3.3 スキューネスによる表面形状の分類化

すり減りによる劣化段階をそれぞれ定量的に分類化することができれば、より効率的な機能診断の実施が可能となる。そこで、スキューネス  $R_{sk}$  を用いて表面形状の分類化を試みた。調査対象水路の  $R_{sk}$  を図-9 に示す。

同図から、すり減りによる劣化段階のうち、潜伏期と進展期の水路の  $R_{sk}$  はどちらも負の値となった。一方、加速期の水路の  $R_{sk}$  に着目すると、正負が混在する結果となった。すなわち、加速期の水路については粗骨材がどのように露出しているかによって、 $R_{sk}$  による分類が異なることが考えられた。また、図-9 に示した各解析対象における  $R_{sk}$  の標準偏差に着目すると、非常に大きなばらつきがある。これは、解析面である 10cm×10cm の領域において、横断線を引く場所により、表面の凹凸の特徴が異なることを示していると考えられた。したがって、 $R_{sk}$  を用いて評価を行う場合には、水路のどの部分を対象として横断線を引くかに注意する必要がある。

$R_{sk}$  と表面積比の関係について検討した。 $R_{sk}$  と表面積比の関係を図-10 に示す。同図より、表面積比が約 1.1~1.3 の範囲では  $R_{sk}$  の値は正と負が混在しており、それ以外では  $R_{sk}$  は負の値になるという傾向が分かる。また、 $R_{sk}$  と同じ二次元的な指標である  $R_a$  および  $R_z$  との関係それぞれ図-11, 12 に示す。両図においても、 $R_z$  が約 4~5mm,  $R_a$  が約 0.6~1.0mm という範囲では  $R_{sk}$  の値は正負が混在し、それ以外では  $R_{sk}$  が負の値になる傾向を示している。

以上の結果を踏まえると、すり減りによる劣化段階のうち、潜伏期と進展期および加速期の初期において  $R_{sk}$  は負の値となり、加速期が進行すると  $R_{sk}$  は正負が混在した値となることが分かった。

### 4. まとめ

本研究では、三次元画像解析技術を用いて、すり減りが生じたコンクリート水路の劣化度診断を行い、表面粗さの三次元的な評価方法について検討した。本研究で得られた結果を以下に整理する。

- (1) Kuraves-K を用いた三次元画像解析では、撮影時の照射条件の違いに起因する被写体の明度の違いは解析結果に大きな影響を及ぼさなかった。
- (2) コンクリート水路の表面の表面積比は、粗骨材の露出程度を良好に示していると考えられ、三次元的な指標である表面積比を用いて、水路表面の面的な評価が可能であることが示された。
- (3) 表面積比は、 $R_a$  および  $R_z$  と非常に高い相関関係があることから、作業の簡便性が高い三次元画像解析による調査は膨大な量のデータの蓄積に資することができると考えられた。

- (4)  $R_{sk}$  を指標としてすり減りによる劣化段階を分類した場合、潜伏期および進展期は負の値となり、加速期においては正負が混在する結果となった。

### 5. 今後の展望

今後は、表面積比と水路の供用年数や要求性能とを関連付けて、総合的に評価を行っていくことが求められる。とくに、水路の表面の「面」的な評価が重要になると考えられる水理性能に関しては、一般的に水理性能の指標として使用される Manning の粗度係数や水路内の通水量と表面粗さとの関係を明確化していく必要がある。

三次元画像解析を用いる手法は、作業の簡便性に優れているため、本手法によりデータの蓄積を行い、二次元および三次元データの両面からコンクリート水路の劣化度を評価していく予定である。

### 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。最後に記して謝意を表します。

### 参考文献

- 1) 農林水産省農村振興局：農業水利施設の長寿命化のための手引き, pp.28-29
- 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.27, No.1, pp.805-810
- 3) 石神暁郎, 渡嘉敷 勝, 森 充広, 増川 晋：農業用コンクリート水路における断面修復材の耐摩耗性評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.739-1744
- 4) 本間新哉, 北村浩二, 加藤 敬：農業用鉄筋コンクリート製開水路壁面の凹凸評価手法, 農村工学研究所技報, Vol.209, pp.17-27, 2009.3
- 5) 土木学会 コンクリート委員会編：コンクリート標準示法書「維持管理編」, 社団法人 土木学会, pp.207-208, 2007.3
- 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) 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.23-28, 2008.12
- 8) 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