

# 論文 算術平均粗さによる凍結融解作用を受けたかぶりコンクリートの劣化評価に関する研究

齋藤 憲寿\*1・徳重 英信\*2

**要旨**：算術平均粗さを用いて凍結融解作用を受けたかぶりコンクリート表面の凹凸を定量的に評価する手法について基礎的検討を行った。その結果、算術平均粗さによる評価は測定条件の違いによる影響が小さく、劣化指標として安定性に優れていること、凍結融解抵抗性との関係性が認められることを明らかにした。また、ステレオカメラを用いて実構造物のかぶり部を測定した結果、室内実験と同様の傾向を示していることから、算術平均粗さによってかぶりコンクリートの評価が可能であることを確認した。

**キーワード**：算術平均粗さ、かぶりコンクリート、凍結融解抵抗性、ステレオカメラ、スケーリング

## 1. はじめに

東北地方など積雪寒冷地の構造物は、昼夜の寒暖差や日射等の影響で凍結融解作用を受けることにより、かぶりコンクリートのひび割れ、スケーリング、ポップアウト、剥落崩壊といった様々な凍害劣化が発生する。また、コンクリート構造物の多くは供用開始から数十年が経過しており、今後短期間に集中して劣化時期を迎えると予想されている。そこで、構造物の維持管理を適切に行うためには凍害劣化程度を定量的に把握することが重要となる。

劣化診断における外観調査方法は打診や赤外線カメラなど様々なものが提案されているが、主に目視によって調査が行われている。目視は測定機器を必要とせず診断が容易である一方、評価基準が定性的であるため、評価者の熟練度の違いによって評価が異なる可能性が指摘されている<sup>1)</sup>ことから、本研究ではコンクリート表面の粗さを定量的に評価する方法として算術平均粗さ(Ra)に着目した。算術平均粗さは工業製品の表面粗さを表すパラメータとして多岐にわたり活用されており、コンクリートの研究分野ではせん断付着強度<sup>例えば、2)</sup>や水路壁面の健全度<sup>例えば、3)</sup>などの指標として用いられているが、凍結融解作用を受けたコンクリート表面の劣化指標として用いた研究は少ない。

本研究は、算術平均粗さを用いて凍結融解作用を受けたかぶりコンクリートの劣化程度を定量的に評価することを目的として、レーザー変位計を用いて算術平均粗さを測定して測定条件が及ぼす影響について検討するとともに、室内凍結融解試験を実施して算術平均粗さと凍結融解抵抗性の関係性を明らかにした。さらに実際の構造物を対象に、ステレオカメラを用いて算術平均粗さの測定を行い、かぶりコンクリートにおける算術平均粗さの劣化指標としての適用性について検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 算術平均粗さの概要

本研究では、算術平均粗さを用いて凍結融解作用を受けたコンクリート表面の凹凸の数値化を行った。算術平均粗さは JIS B 0601 に定義されているものであり、一つの凹凸が測定値に及ぼす影響が非常に小さく、安定した結果が得られるのが特徴である。図-1 に概念図を示す。

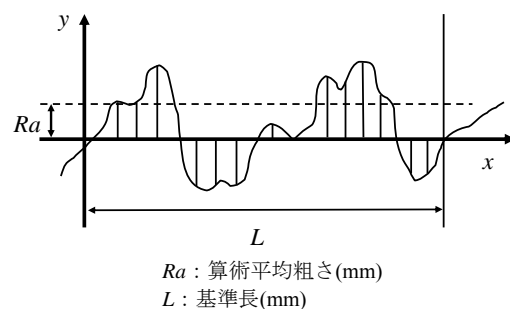


図-1 算術平均粗さの概念図

算術平均粗さ(Ra)とは、測定対象の凹凸部分について基準長さLを抜き取り、この抜き取り部分の平均線の方向にx軸、縦倍率の方向にy軸を取り、粗さ曲線を $y=f(x)$ で表したときに求められる値をマイクロメートル( $\mu\text{m}$ )で表したものであるが、本研究では凍結融解作用を受けたコンクリート表面の凹凸を数値化するため、 $y=f(x)$ の値をミリメートル(mm)で表した。計算式を式(1)に示す。

$$Ra = \frac{1}{L} \int_0^L |f(x)| dx \quad (1)$$

### 2.2 算術平均粗さの測定方法

算術平均粗さの測定機器は写真-1 に示す表面形状測定装置を用いた。この装置は、3軸方向に制御可能なロボットと分解能0.02mmのレーザー変位計、アンプ、計測ユニット、PC上の計測プログラムが連動することによ

\*1 秋田大学大学院 工学資源学研究所生産・建設工学専攻 (学生会員)

\*2 秋田大学大学院 工学資源学研究所土木環境工学専攻 教授 博(工) (正会員)

り、任意の位置における凹凸の深さを自動で高精度に計測することが可能である。

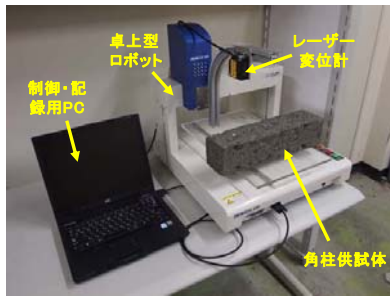


写真-1 表面形状測定装置

算術平均粗さの測定は角柱供試体の側面中央部を対象に、スケーリング深さを計測して粗さ曲線を求め、算術平均粗さを算出する。しかし、算術平均粗さを用いてコンクリート表面の劣化程度の評価を行うためには、測定条件が算術平均粗さに及ぼす影響について検討する必要がある。そこで、表面の凹凸が異なる3種類の角柱供試体を対象に、表-1 に示す測定条件を変えて算術平均粗さを測定して特性分析を行った。

表-1 測定条件

測定条件	パラメータ	備考
測定ピッチ	1.5 mm	測定ピッチの長さは1プロットあたりの四方の測定範囲を示す。
	3 mm	
	6 mm	
	12 mm	
測定面積	4032 mm <sup>2</sup> (48×84)	測定範囲は角柱供試体(側面)の中央部とした。
	8064 mm <sup>2</sup> (96×84)	
	16128 mm <sup>2</sup> (192×84)	

### 2.3 使用材料、配合および供試体の製造

普通ポルトランドセメント(密度 3.16 g/cm<sup>3</sup>)、細骨材として混合砂(表乾密度 2.57 g/cm<sup>3</sup>、吸水率 3.40%、粗粒率 2.75)、粗骨材として碎石(表乾密度 2.67 g/cm<sup>3</sup>、吸水率 1.09%、粗粒率 6.60)、天然樹脂酸塩を主成分とする AE 剤を使用した。表-2 にコンクリートの配合を示す。

表-2 コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法(mm)	スランブ(cm)	空気量(%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	AE剤 A
20	8±1	6±1	55	45.3	172	313	785	977	0.188
20	8±1	6±1	65	47.3	172	265	832	963	0.159
20	8±1	6±1	75	49.3	172	229	888	941	0.137

供試体の製造は粗骨材、細骨材、セメント、水および AE 剤の順に容量 50 リットルのパン型強制練りミキサに投入して 90 秒間練混ぜを行った。その後、JIS A 1101 および JIS A 1128 に準じてスランブおよび空気量を測定した。供試体は 100×100×400 mm の鋼製型枠を使用して角

柱供試体を製造した。型枠の半分程度の容積となるように 1 層目の試料を投入し、棒形内部振動機を用いて締固めを行った。同様に 2 層目の試料を投入して締固めを行った。そして、供試体の製造後に標準養生を行った。

### 2.4 凍結融解試験方法および測定項目

標準養生終了後、JIS A 1148(A 法)に準じて凍結融解試験を行った。水セメント比 75% のコンクリートは凍結融解 300 サイクルまで試験を行ったが、水セメント比 55% および 65% のコンクリートは凍結融解過程におけるコンクリート表面の劣化傾向を得るため、300 サイクル以後も試験を継続した。

測定項目は質量減少率、相対動弾性係数、算術平均粗さ、最大スケーリング深さ(コンクリート表面の凹凸の最大値と最小値の差)の測定を行った。さらに、ASTM C 672 に準じて目視による劣化判定を行った。なお、算術平均粗さの測定ピッチは 3 mm、測定面積は 16128 mm<sup>2</sup> とした。

### 2.5 ステレオカメラを用いた構造物調査への適用性の検討

算術平均粗さの測定において、レーザー変位計は非接触で客観性に優れた測定機器であるが、本研究では角柱供試体が対象であることから構造物への適用性は低いといえる。そのため、非接触で持運びや作業が容易であるステレオカメラ(写真-2)と 3次元写真計測ソフトを用いて算術平均粗さの測定を行うこととした。表-3 にステレオカメラの性能を示す。そこで、ステレオカメラの精度を確認するとともに、凍害劣化が認められる構造物の算術平均粗さを測定して角柱供試体の実験結果との比較を行い、構造物調査への適用性について検討を行った。

表-3 ステレオカメラの性能



有効画素数	1017万画素
撮影素子	1/2.3型CCD×2
撮影感度	AUTO, 400, 800, 1600
寸法	124.0 mm × 65.9 mm × 27.8 mm
質量	250 g

写真-2 ステレオカメラ

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 算術平均粗さの特性分析

表-4 に表面の凹凸が異なる角柱供試体の外観を示す。なお、角柱供試体の配合は表-2 に示す水セメント比 75% のものとし、凍結融解 0, 170, 300 サイクル終了時において算術平均粗さの測定を行った。0 サイクルではスケーリングが認められず、全体的に平滑で施工時にできた気泡がいくつかあるが、最大スケーリング深さは 6.2 mm であった。また、170 および 300 サイクルでは供試

表-4 供試体の外観

サイクル数	角柱供試体(側面) 黄枠:測定範囲(16128 mm <sup>2</sup> )	測定範囲のスケーリング深さ
0 サイクル		
170 サイクル		
300 サイクル		

体表面に粗骨材がいくつか露出する程度のスケーリングであるが、粗骨材の露出は170サイクルよりも300サイクルが著しく、最大スケーリング深さは170サイクルで13.1 mm、300サイクルで16.9 mmであった。

測定面積を一定とし、測定ピッチを変えて算術平均粗さの測定を行った。図-2に測定面積を16128 mm<sup>2</sup>としたときの測定ピッチと算術平均粗さの関係を示す。0サイクルでは測定面が全体的に平滑であるため、算術平均粗さは測定ピッチを変化させても一定であった。一方、170サイクルでは0サイクルと同様に測定ピッチを変化させても一定であったが、300サイクルでは測定ピッチが12 mmになると、6 mm以下と比べて算術平均粗さがやや小さくなる傾向であり、これは測定面積を4032、8064 mm<sup>2</sup>と変化させた場合も同様であった。この理由として、粗骨材の露出によりコンクリート表面の凹凸が激しくなるとスケーリング深さの増減が著しくなるため、測定ピッチが長い場合では算術平均粗さの算出に誤差が生じると考えられる。しかし、誤差は最大で0.1 mm程度であることから、測定ピッチの違いが算術平均粗さの算定へ及ぼす影響は小さいといえる。

測定ピッチを一定とし、測定面積を変えて算術平均粗さの測定を行った。図-3に測定ピッチを3 mmとしたときの測定面積と算術平均粗さの関係を示す。0サイクルでは全体的に平滑であるため、算術平均粗さは測定面積を変化させても一定であった。しかし、粗骨材が露出している170および300サイクルでは測定面積によって大きく異なり、この傾向は測定ピッチを1.5~12 mmと変化させても同様であった。これは、コンクリート中に含まれる粗骨材の分布や寸法などのばらつきによるものであり、算術平均粗さの測定面が同じであっても測定面積によって表面の凹凸状況が相違したものと考えられる<sup>4)</sup>。つまり、測定面積が小さい場合では算術平均粗さを過小または過大に算出してしまふ可能性があるため、適切な測定面積の算定については今後検討が必要である。

図-4に測定ピッチおよび測定面積を変化させたときの最大スケーリング深さと算術平均粗さの関係を示す。各供試体につき測定ピッチを4パターン、測定面積を3パターンと変えた合計36パターンをプロットした。スケ

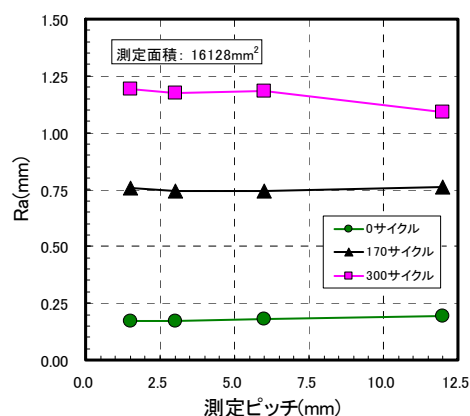


図-2 測定ピッチとRaの関係

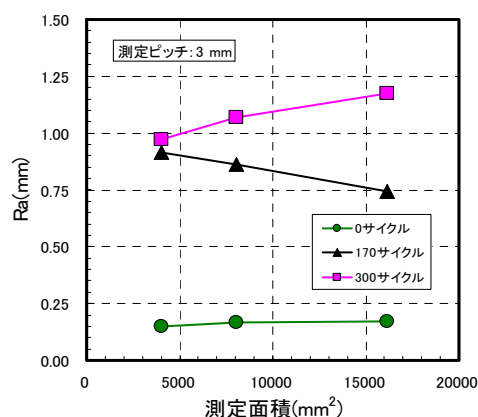


図-3 測定面積とRaの関係

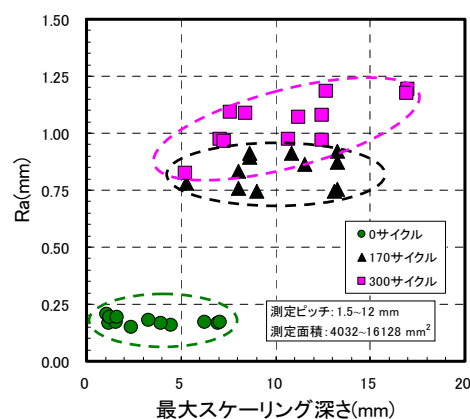


図-4 測定条件を変化させたときの最大スケーリング深さとRaの関係

ーリングにより供試体表面の凹凸が大きくなるにつれて測定値が分散しているが、算術平均粗さは最大スケーリング深さに対して変動が小さいことがわかった。これは、最大スケーリング深さの算出方法が凹凸の最大値と最小値の差であることから、測定区間内の一地点で大きな凹凸が測定されることにより値が大きく変動するため<sup>5)</sup>、最大スケーリング深さは測定ピッチや面積の違いにより大きく異なる値を示す傾向が強いといえる。したがって、算術平均粗さはコンクリート表面の劣化指標として安定

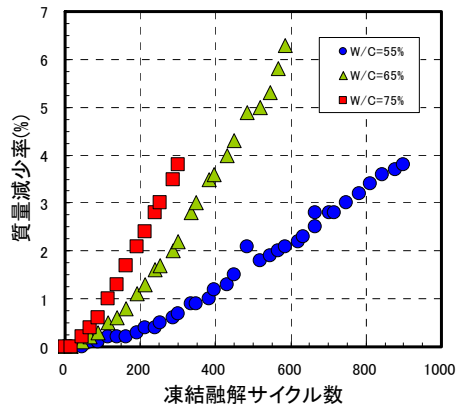


図-5 凍結融解サイクル数と質量減少率の関係

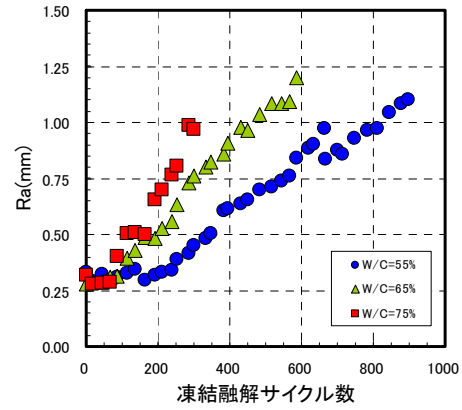


図-6 凍結融解サイクル数とRaの関係

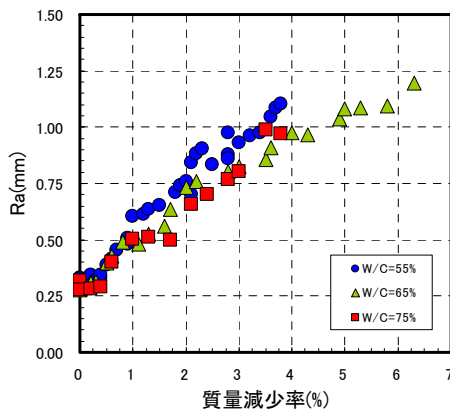


図-7 質量減少率とRaの関係

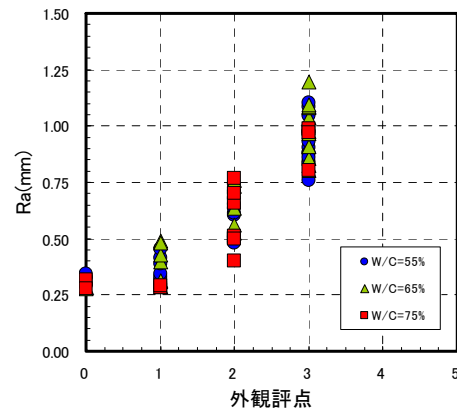


図-8 外観評点とRaの関係

性が優れていることが確認された。

### 3.2 凍結融解試験結果

凍結融解作用を受けたコンクリート表面の劣化程度を算術平均粗さによって評価するため、JIS に準じて凍結融解試験を実施し、コンクリートの凍結融解抵抗性と算術平均粗さの関係を検討した。図-5 に凍結融解サイクル数と質量減少率の関係を示す。凍結融解サイクル数の増加とともに質量減少率は増加しており、凍結融解300サイクル終了時の水セメント比55%の供試体は0.7%、65%の供試体は2.2%、75%の供試体は3.8%と水セメント比が高いほど顕著であった。また、相対動弾性係数は凍結融解サイクル数の増加とともに低下しており、凍結融解300サイクル終了時の水セメント比55%では95%、65%では86%、75%では57%であった。

図-6 に凍結融解サイクル数と算術平均粗さの関係を示す。算術平均粗さは測定ピッチ3mm、測定面積16128mm<sup>2</sup>で一定として供試体側面を測定した。凍結融解試験直後はごく表層のセメントペーストやモルタルの剥離が主であるため算術平均粗さの増加は小さいが、凍結融解サイクル数が増加してモルタルが剥離し、粗骨材が露出するほど算術平均粗さが大きくなっている。また、この傾向は水セメント比が高いほど顕著で、図-5と同様で

あった。

図-7 に質量減少率と算術平均粗さの関係を示す。両者は水セメント比に関係なくほぼ正の相関関係にある。したがって、算術平均粗さを用いてコンクリート表面の凹凸を測定することにより、凍結融解作用を受けたコンクリート表面の劣化程度を評価できることが確認できた。なお、相対動弾性係数と算術平均粗さの関係は配合によって異なり、両者の間には明確な相関が認められなかった。

図-8 に目視による外観評点と算術平均粗さの関係を示す。算術平均粗さは外観評点の増加にしたがって大きくなっていった。また、各評点の算術平均粗さのばらつきの範囲は外観評点0で0.05mm、外観評点1で0.20mm、外観評点2で0.36mmと外観評点が高くなるほどばらつきが大きくなる傾向であるが、水セメント比の違いによる各評点のばらつきの範囲は同程度であった。

図-9 に最大スケール深さと算術平均粗さの関係を示す。最大スケール深さが増加すると算術平均粗さも増加の傾向を示すが、その傾向は水セメント比が高いほど顕著であった。しかし、その挙動を見ると算術平均粗さは増加し続けるのに対し、最大スケール深さは3.5~5.0mmおよび10.0~13.0mmの範囲で増加が小さ

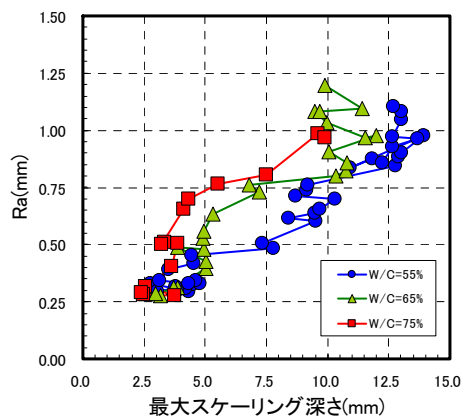


図-9 最大スケールンク深さと Ra の関係

くなっていた。そこで図-8 を見ると、最大スケールンク深さが 3.5~5.0 mm は外観評点 2, 10.0~13.0 mm は外観評点 3 に相当することから、スケールンクの進行に伴う粗骨材の露出の程度が影響していると考えられる。つまり、供試体表面のモルタルが剥離して粗骨材に達した場合や粗骨材間のモルタルがある程度剥離した場合、剥離するモルタルの割合が減少することにより最大スケールンク深さの増加速度が低下した<sup>5)</sup>と考えられるが、算術平均粗さは広範囲を対象としているため、その影響が小さいといえる。

### 3.3 ステレオカメラを用いた構造物の算術平均粗さ測定の適用性の検討

構造物を対象とした算術平均粗さを測定するための機器として、持運びや作業が容易であるステレオカメラを用いた。まず、ステレオカメラの精度を確認するため、写真-3 に示す直径と深さがそれぞれ異なる孔を開けた金属板を作製した。そして、ステレオカメラを用いて孔の深さを測定し、直径と深さが測定値に及ぼす影響を検討した。

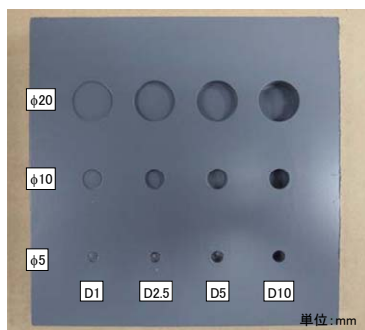


写真-3 深さ測定用金属板

図-10 に金属板の削孔深さとステレオカメラの測定値の関係を示す。なお、撮影環境として十分な照度の下、ズーム機能を使わずに撮影距離を 400 mm に設定して撮影を行った。金属板を対象としたステレオカメラの測定

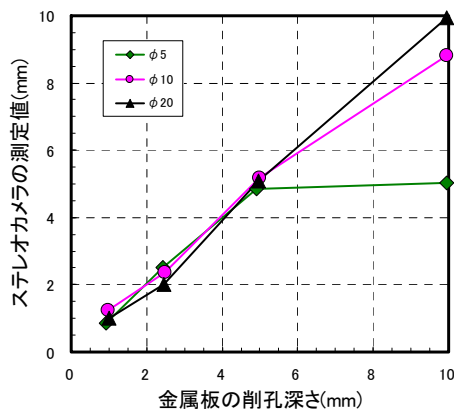


図-10 金属板の削孔深さとステレオカメラの測定値の関係

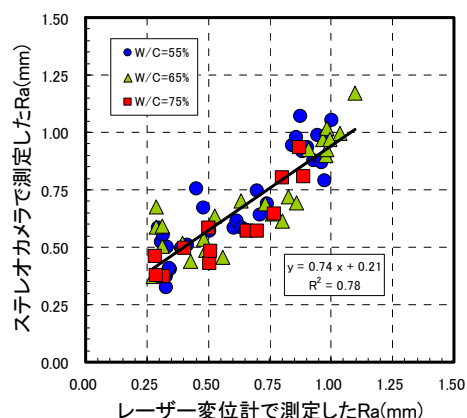


図-11 レーザー変位計とステレオカメラで測定した Ra の関係

値は孔の深さに応じて大きくなっていった。また、深さ別の測定誤差は深さ 1, 2.5, 5 mm では孔の直径に関係なく 0.5 mm 以下であるが、深さ 10 mm の誤差はφ20 mm で 0 mm, φ10 mm で 1.2 mm, φ5 mm で 4.9 mm と直径が小さくなるほど誤差が大きくなっていった。これは、対象物の色の変化や模様が比較的少ない場合、3次元写真計測ソフトの解析処理において真値と解析値に誤差が生じる可能性<sup>6)</sup>があり、孔の直径よりも深さが大きい場合では孔へ光が届かずに内部が暗いため、解析処理において深さの認識ができなかったと考えられる。したがって、ステレオカメラを用いて凹凸の深さを測定できることを確認したが、コンクリートの劣化状況や測定箇所によっては誤差が生じる可能性があるため注意が必要である。

図-11 にレーザー変位計とステレオカメラを用いて測定した算術平均粗さの関係を示す。どちらも凍結融解繰返しによりスケールンクが増加するほど算術平均粗さが大きくなっており、レーザー変位計で測定した算術平均粗さとステレオカメラで測定した算術平均粗さの間には相関関係が認められた。そこで、ステレオカメラを用

いて凍害劣化が認められる構造物の算術平均粗さを測定することを試みた。

建設後 19~58 年が経過した秋田県内の 12 のコンクリート橋を対象として、合計 26 ヶ所の橋台または橋脚側面からφ74~103 mm のコアを採取した。そしてステレオカメラを用いて算術平均粗さを測定し、角柱供試体の実験結果と比較した。図-12 に構造物と角柱供試体の外観評点と算術平均粗さの関係を示す。なお、図中の角柱供試体の結果はステレオカメラで測定した値であるため、レーザー変位計で測定した図-8 の値と異なっている。構造物表面のスケーリング状況を観察すると、骨材の露出が認められる程度の粗さでも全体的に凹凸が小さい傾向であるため、外観評点 0~4 では大きな差が見られなかったが、スケーリングが著しい外観評点 5 では算術平均粗さが大きくなることを確認された。また、各評点における算術平均粗さのばらつきを見ると、構造物の測定値は角柱供試体の下限値と接する位置に多く分布していることがわかる。この理由として、構造物の粗骨材最大寸法や粗骨材量、凍結防止剤などの影響が考えられるが、本研究の範囲では明らかにすることができなかったため、これらの要因が算術平均粗さに与える影響を今後検証する必要がある。

#### 4. まとめ

本研究では、算術平均粗さを用いて凍結融解作用を受けたコンクリートの表面の凹凸を定量的に評価することを目的として、算術平均粗さの特性分析を行うとともに、凍結融解試験を行って凍結融解抵抗性との関係性を明らかにした。そして、ステレオカメラを用いて算術平均粗さの測定を行い、構造物への適用性について検討を行った。得られた結果は以下のとおりである。

- 1) 算術平均粗さは測定ピッチや測定面積など測定条件が異なる場合でも変動が小さいため、コンクリート表面の劣化指標として安定性が優れていることが確認された。
- 2) 凍結融解試験初期はごく表層のセメントペーストやモルタルの剥離のため、算術平均粗さの増加は小さいが、凍結融解サイクル数の増加によりモルタルが剥離して粗骨材が露出するほど算術平均粗さは大きくなった。
- 3) 凍結融解作用を受けた供試体表面のモルタル層が剥離して粗骨材に達した場合や粗骨材間のモルタルが剥離した場合など、剥離するモルタルの割合が減少することによって最大スケーリング深さの増加速度は低下するが、算術平均粗さは広範囲を対象としているため、その影響が小さい。
- 4) 実構造物は骨材の露出に対し全体的に凹凸が小さ

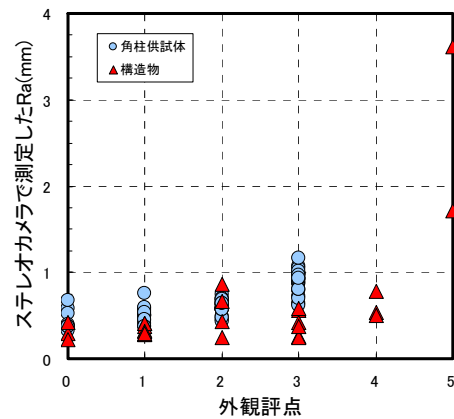


図-12 外観評点とステレオカメラで測定した Ra の関係

い傾向であるため、外観評点 0~4 では大きな差が見られなかったが、スケーリングが著しい外観評点 5 では算術平均粗さが大きくなることを確認された。

謝辞：本研究を実施するにあたり、秋田大学 故 加賀谷誠教授にご指導を頂きました。また、構造物調査において秋田県建設部道路課の協力を得ました。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 柿原巧弥, 千歩修, 長谷川拓哉：凍害劣化を受けた RC 造構造物の目視による各種性能に関する劣化評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.851-856, 2010.7
- 2) 槇谷貴光, 香取慶一, 林静雄：コンクリート打継目における表面粗さの評価とせん断力伝達能力に関する実験研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.17, No.2, pp.171-176, 1995.7
- 3) 本間新哉, 北村浩二, 加藤敬：水路摩耗における健全度評価と構造的機能に関する考察, 農村工学研究所技報第 207 号, pp.1-11, 2008.3
- 4) 加藤智丈, 石神暁郎, 渡嘉敷勝, 森充広：農業用鉄筋コンクリート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.2, pp.931-936, 2009.7
- 5) 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第 209 号, pp.17-27, 2009.3
- 6) 林田宏, 内藤勲, 遠藤裕丈：デジタルカメラ写真と 3 次元写真計測ソフトを用いたスケーリング深さの定量化に関する検討, 寒地土木研究所月報, No.690, pp.29-34, 2010.11