

## (17) 地上型レーザスキャナを用いた実道路橋におけるスケーリングの定量的評価

## Quantitative Scaling Evaluation of Road Bridge using Terrestrial Laser Scanner

溝口知広<sup>1</sup>, 子田康弘<sup>2</sup>, 岩城一郎<sup>2</sup>, 若林裕之<sup>1</sup>, 小林義和<sup>1</sup>, 白井健二<sup>1</sup>, 原靖彦<sup>1</sup>, 李和樹<sup>3</sup>Tomohiro Mizoguchi, Yasuhiro Koda, Ichiro Iwaki, Hiroyuki Wakabayashi,  
Yoshikazu Kobayashi, Kenji Shirai, Yasuhiko Hara, and Hwa-soo Lee

**抄録:** 寒冷地における道路橋等のコンクリート構造物では、凍結融解の繰り返しと凍結防止剤の大量散布に起因するスケーリングが顕在化している。スケーリングとは構造物表面がフレーク状に剥離する劣化現象であり、これを定量的に評価する技術の開発が要求されている。本研究では、地上型レーザスキャナにより取得した実道路橋の計測データより、スケーリング深さ及びその経年変化の定量評価手法を開発し、その有効性を検証した。

キーワード：道路橋，スケーリング，地上型レーザスキャナ

**Keywords:** Road bridge, Scaling, Terrestrial laser scanner

## 1. 緒 論

寒冷地におけるコンクリート構造物は凍害が生じやすい環境下であり、スケーリングが顕在化している構造物も少なくはない。スケーリングとは、凍結融解の繰り返しと凍結防止剤の大量散布が起因となり、構造物表面のコンクリートがフレーク状に剥離・剥落する劣化現象である。図-1にスケーリングした道路橋の例を示す。この橋梁は1935年に建設され、77年経った現在まで凍結融解による凍害を受け続けており、スケーリングが顕在化している。このスケーリング劣化は、美観の低下のみならず、劣化の進行が著しい場合は構造物内部の鋼材が露出し腐食を招く。そのため、適切に劣化の進行を評価することが重要である。しかしながら、実構造物のスケーリング劣化評価は、点検者による目視点検という定性的な評価法で行われており、定量的な評価は全く行われていない。

一方で近年、地上型レーザスキャナの急速な性能向上に伴い、数百メートル程度の遠距離からでも数ミリ程度の誤差で高精度に、構造物の3次元幾何データが取得可能となった。このスキャナをスケーリング評価に使用することは合理的かつ実用的であると考えられるが、著者らの知る限り、これを実際に使用した例は過去にない。レーザスキャナによるスケーリング評価



図-1 スケーリングした道路橋の例

が実現できれば、定量的な評価が可能となるだけでなく、評価に伴う点検者のリスクを軽減でき、なおかつこれまで点検者が近づくことさえできなかった構造物に対する評価も可能となる。さらにスケーリングの経年変化をも評価できれば、信頼性の高い劣化進行予測が可能となるなど、そのメリットは大きい。

そこで本研究では、地上型レーザスキャナにより取得した実道路橋の計測点群データより、スケーリングを定量的に評価する手法の開発を行った。まず、領域成長法<sup>1)</sup>をベースとし、構造物の竣工時から現在までの合計スケーリング深さを定量的かつ直観的に評価可能な手法を開発した。次に、ICP法<sup>2)</sup>に特徴サンプリング<sup>3)</sup>を統合し、スケーリング深さの経年変化を定量的かつ高精度に評価可能な手法を開発した。また開発した手法を複数のスケーリングした道路橋計測データ

1: 非会員 日本大学工学部情報工学科 (〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原1, Tel: 024-956-8825, E-mail: mizo@cs.ce.nihon-u.ac.jp)

2: 正会員 日本大学工学部土木工学科 (同上)

3: 非会員 日本大学理工学部機械工学科 (〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台1-8-14)

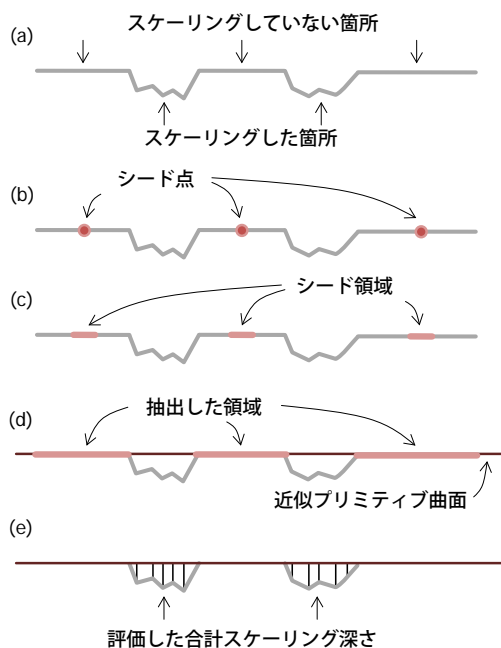


図-2 合計スケールリング深さ評価手法の概要

に適用し、その有効性を評価した。

## 2. 領域成長法による合計スケールリング深さの評価

本章では、領域成長法<sup>1)</sup>を用いた合計スケールリング深さの評価手法について、まず、その基本的な考え方を述べる。既設構造物の中には竣工時の図面が保管されていない場合が少なからずあるため、計測点群上で深さを直接評価する必要がある。またスケールリングは構造物表面の水がかり部で進行するものであり、構造物全体というよりも限定された範囲で生じる。そのため本手法では、領域成長法を利用し、計測データ中のスケールリングしていない箇所から点群を可能な限り抽出し、抽出点群に対して最小二乗曲面を当てはめる。この曲面を構造物健全時の部材形状とみなし、各計測点からの符号付き距離を算出し、これを合計スケールリング深さとして定量評価することは、極めて妥当な方法であると考えられる。以下に提案手法の概要を述べ、詳細は文献<sup>1)</sup>に譲る。概要を図-2に示す。

### [手順1] シード点選択とシード領域生成

ユーザはマウス操作で対話的にシード点を選択する。ここでいうシード点とは、スケールリングが発生しておらず、構造物表面が比較的滑らかな部分にあるデータ点である。次に各シード点から、ある一定距離  $r$  内にある点集合をシード領域として抽出する。本報で示す例題では全て  $r=150\text{mm}$  に設定した。

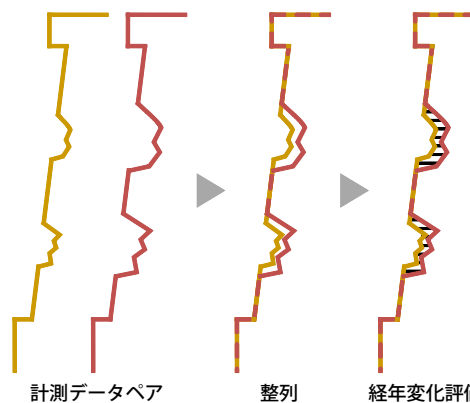


図-3 スケールリング経年変化評価手法の概要

### [手順2] 領域拡大による部材形状推定

次に、シード領域への近傍点の追加と領域への曲面当てはめを繰り返し行い、シード領域を反復的に拡大する。結果として、指定した閾値  $th$  以内で単一曲面で近似可能な最大限大きな点集合と、その近似曲面が抽出できる。この曲面を健全時の部材形状とみなす。

### [手順3] 符号付距離計算による合計深さ評価

最後に、各点から抽出曲面までの符号付距離を計算し、これを合計スケールリング深さとして評価する。

スケールリングの評価領域はユーザ毎に、また評価目的によっても異なるため、シード点はユーザ操作で指定するようにしている。また構造物表面のほとんどは平面、円柱面、円錐面といったプリミティブ曲面で設計されるため、これを領域成長法でも使用した。

## 3. ICP法によるスケールリング深さの経年変化評価

スケールリング深さの経年変化を知ることが、将来の進行を予測する上で極めて重要である。しかしながらこの経年劣化は数ミリ/年から十数ミリ/年程度であり、なおかつ構造物表面の局所領域で発生するため、点検者が目視でこれを確認することは困難である。これを実現するためには、一定時間間隔で構造物を高精度に計測し、取得した時系列データを高精度に整列させ、その差分を計算することが必要となる。そこで本手法では、異なる2時期に取得した計測データペアを入力とし、まず構造物中のエッジなどの特徴領域から点をサンプリングする。次に、これを利用してICP法<sup>2)</sup>によりデータペアの高精度な整列を行い、最後にペア間の差分を計算し、これを経年変化として評価する。

本手法では2時期計測データ $\langle P, Q \rangle$ を入力とし、以下の手順でスケールリング深さの経年変化を評価する。

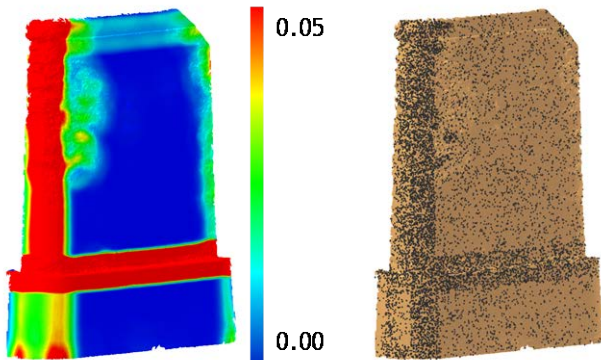


図-4 形状特徴量算出(左)とサンプリング点(右)

図-3に概要を示す。

#### [手順1] 形状特徴量算出とサンプリング

本手法ではまず、Paulyらの手法<sup>3)</sup>を利用して、データ $P$ 中の各点 $p_i$ の形状特徴量 $f(p_i)$ を算出する。この特徴量は、構造物中のエッジや大きく湾曲した領域で大きく、逆に平らな領域では小さくなる。この特徴量を利用して、図-4に示す例のように、 $f(p_i)$ が大きな領域からは多くの点を、逆に小さな領域からは少ない数の点をサンプリングする。

#### [手順2] ICP法によるデータペアの高精度整列

ICP法は、計測データペア $\langle P, Q \rangle$ の整列を行うために広く用いられている<sup>2)</sup>。この手法では、対応点の探索と、変換パラメータの計算及び変換を反復的に行うことで、データペアの整列を行う。具体的には、まず $P$ 内の各サンプリング点 $p_i$ に対し、 $Q$ 内の点集合のうちで $p_i$ との距離が最小となる最近点 $q_{(i)}$ を探索する。次にこの距離の総和が最小となるよう、各点を $p_i \rightarrow p_i^+$ と変換するパラメータを求め、これを $P$ に適用することで $P$ を $Q$ に整列させる。手順1でサンプリングした点を利用することで、この整列を高精度化できる。

#### [手順3] 差分計算による経年変化の評価

最後に、変換後の各点 $p_i^+$ から、 $Q$ 内の点集合のうちの最近点 $q_{(i)}$ を探索し、その点間距離をスケーリング経年変化として評価する。

## 4. 実験結果

図-5に、図-1に示す橋脚の計測データに対する合計スケーリング深さの評価結果を示す。本手法では、計測点群を点間隔が約10mmになるよう間引いており、図-5の例では点数は593,931である。複数箇所から取得したデータを1つに統合することも考えられるが、

統合誤差を考慮して単一計測データのみを扱っている。図-5(a)には指定したシード点を、図-5(b)には平面を利用した領域成長法により抽出された点群を示す。閾値 $th$ は10mmに指定した。図-5(c)に示す評価結果より、平面領域の大部分では距離がゼロに近く、図中の左上部分に局所的に深いスケーリングが発生しており、最深部では150mm程度スケーリングしていることが確認できた。図-5(d)には円錐を利用した点群抽出のためのシード点を、図-5(e)には抽出点群を、図-5(f)にはその評価結果を示す。大型構造物の場合、その表面に施工誤差に起因する数センチ程度の歪みが含まれ、単一のシード点では適切に抽出が行えないため、複数個指定するようにしている。こちらは閾値 $th$ を20mmとした。図-5(c)、(f)より、直観的な評価が実現できていることが確認できる。さらに精度評価のため、構造物表面のある2ラインを対象に、構造物表面までの奥行きを0.01mmの精度で2次元的に測定した結果と、点群上で評価した結果のうちの該当箇所とを比較した。その結果、本手法では約2mmの精度でスケーリングを評価できていることを確認している<sup>1)</sup>。

図-6に、図-1とは別の道路橋と、その橋台計測データに対する合計スケーリング深さの評価結果を示す。こちらの橋梁は図-1のものとは比べると供用年数は少ないが、より厳しい寒冷な地域にあるため、多量の凍結防止剤が散布されていると考えられ、それゆえ中心部分で150mm程度の深いスケーリングが確認された。

図-7に、図-1の橋脚のスケーリング深さの経年変化評価結果を示す。スケーリングは冬期にのみ進行するため、2010年から2012年の3年間、冬以外の時期にほぼ同一地点から橋脚の計測を行い、取得した3つの時系列点群データに対して実験を行った。点数はいずれも約60万である。図-7(a)には、2010年と2012年のデータの整列結果を示す。図-7(b)から(d)には、それぞれ3ペアに対する経年変化の評価結果を示す。いずれの結果からもほとんどの部分でゼロに近い値が得られ、プラスはほとんど見られず、スケーリングが進行したと思われる部分でマイナスの値が得られていることから、整列が高精度に行えたと言える。また同じ橋脚を別地点から計測した3時期データからも、図-7とほぼ同じ結果が得られており、結果の妥当性が証明できている。また図中の黒枠部分ではプラスの値が見られ、なおかつ時間の経過とともに徐々に大きくなっている。スケーリングの過程では、構造物表面で

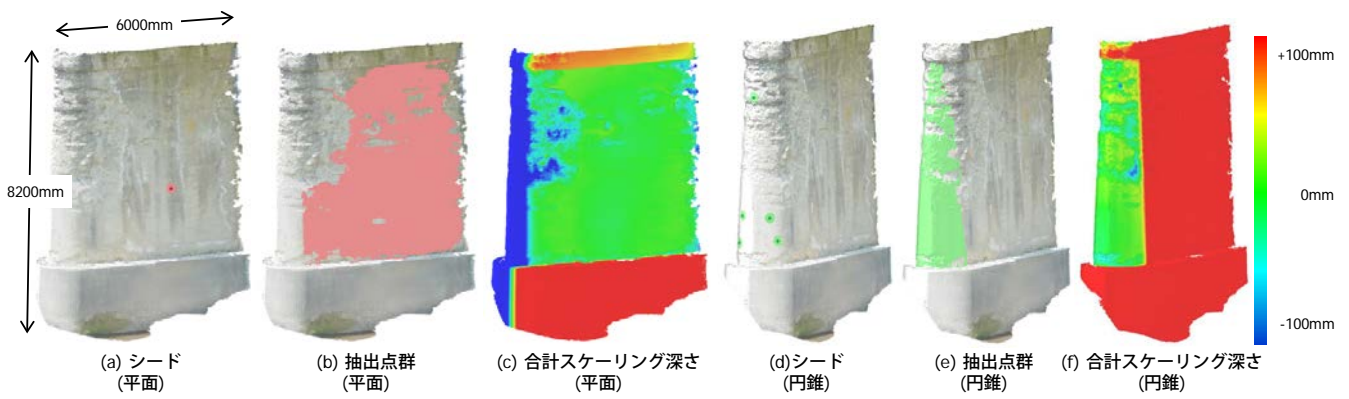


図-5 合計スケーリング深さの評価結果

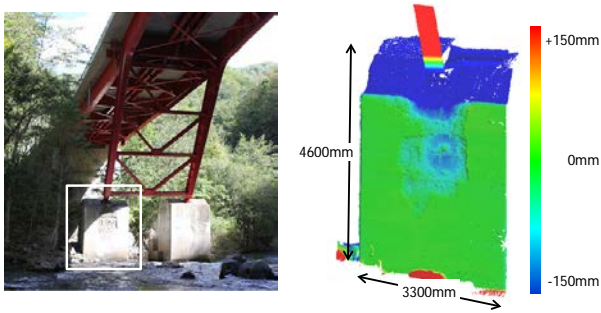


図-6 合計スケーリング深さの評価結果

徐々に浮きが進行し、ある時剥離する。黒枠部分の結果はこの過程をとらえたものであり、写真からも同じ現象を確認している。

## 5. 結 論

本報では、地上型レーザスキャナに基づき、コンクリート構造物のスケーリングを定量的に評価可能な手法を提案し、その有効性を評価した。本手法により得られた合計深さと経年変化を合わせて考えることで、将来のスケーリング進行予測が可能になる。今後は、スケーリング体積、及びその経年変化を定量的に評価

する手法の開発を行う予定である。さらに同じ道路橋を継続的に計測し、地域差によるスケーリング進行速度の違いも評価する予定である。

**謝辞：**この研究は、平成 22 年度、23 年度日本大学学術研究助成金(総合研究)、科学研究費補助金(23710180)、2012 年度国際科学技術財団研究助成の支援のもとで行われました。レーザ計測にあたっては、リーグルジャパンの松田様、佐々木様にご協力を頂きました。また本調査では、(財)ふくしま市町村建設支援機構の大越様にご協力を頂きました。

## 参考文献

- 1) T. Mizoguchi *et al.*, "Quantitative Damage Assessment of Concrete Structures based on 3D Laser Scanning," Proc. IEEE IGARSS 2011, pp.2129-2132, 2011.
- 2) S. Rusinkiewicz and M. Levoy, "Efficient variants of the ICP algorithm," Proc. International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling, pp.145-152, 2001.
- 3) M. Pauly *et al.*, "Efficient Simplification of Point-Sampled Surfaces," Proc. IEEE Visualization, pp.163-170, 2002.

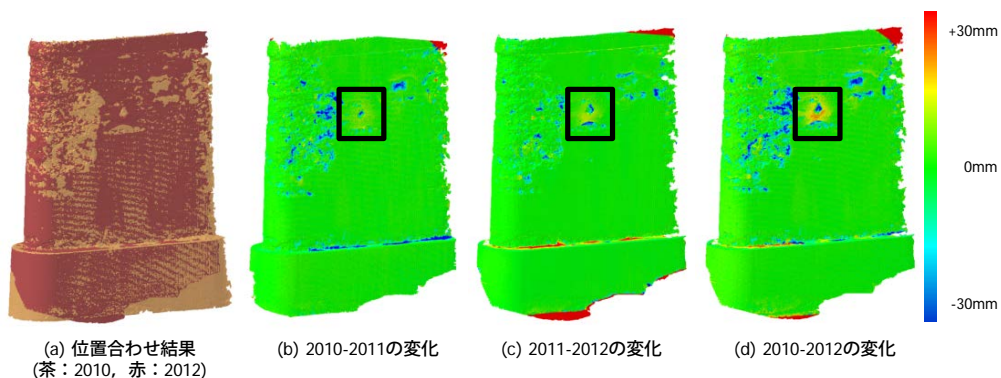


図-7 スケーリング深さの経年変化の評価結果