

論文 レーザ計測点群により得られた幾何学特微量による既設コンクリート構造物のひび割れ検出

柴野 一真*1・鈴木 哲也*2

要旨：コンクリート構造物の維持管理において、効率的かつ定量的な構造物の状態把握という観点からレーザ計測点群によるひび割れ検出が試みられている。技術的な課題はひび割れ検出におけるノイズ、有効な幾何学特微量および検出可能なひび割れ幅を明らかにすることである。本研究では1976年に竣工した実構造物を対象にレーザ計測を行い、点群の幾何学特微量によりひび割れ幅1.0~3.5 mmのひび割れの検出を試みた。検討の結果、本研究における計測条件ではひび割れ幅3.5 mmで十分な検出精度を示した。また、非ひび割れ部の表面の粗さとひび割れ幅の関係により、検出精度が変化することが示唆された。

キーワード：三次元形状, Surface variation, 非破壊・非接触検査, 固有値分解, 近傍法, 異常検知

1. はじめに

コンクリート構造物の点検では、構造物の状態を可能な限り具体的かつ定量的に把握することが重要である。コンクリートの劣化は変状が表面に顕在化してくることが多いことから、目視によるひび割れ箇所の同定が広く行われている。ひび割れ箇所の同定は効率化かつ網羅性の観点から、画像解析による自動検出技術や機械学習を援用した高精度な検出法が多く提案されている¹⁾。近年では、レーザスキャナが普及したことで、高精度な三次元点群の取得が可能となっている。基礎的な検討としてレーザスキャナの種類、距離やレーザの入射角が点群情報に及ぼす影響が調査されてきた²⁾。レーザ計測点群によるコンクリートのひび割れ検出に関する既往研究は少なく、主に画像による検出結果を点群に結合する手法の開発が試みられている³⁾。点群情報のみを用いた検出に関して、Stałowskaらは、ひび割れ幅、距離およびレーザの入射角がレーザの座標情報および反射強度情報に及ぼす影響をケイ酸カルシウムの供試体と建築物のひび割れを対象に調査した⁴⁾。筆者らは、レーザ計測点群の反射強度と座標情報による損傷検出手法の開発とそのコンクリート構造物への適用を試みている⁵⁾。レーザ計測点群によるひび割れ検出における技術的な課題は現地計測で得られた点群に含まれるノイズを明らかにすること、ひび割れ検出に有効な幾何学特微量の選択および検出可能なひび割れ幅の同定が挙げられる。

本研究で対象とした水利構造物では、既往研究が対象とするコンクリート表面^{1), 3), 5)}とは異なり、摩耗や風化による粗骨材の露出および不均一な表面が確認された⁶⁾。加えて、実際のレーザ計測時には、計測可能な範囲に限られることから高精度な点群の取得は困難な場合がある。対象表面状態と計測における制約を踏まえると、現地計

測で得られた点群情報によるひび割れ検出器を構築する際に、誤検出の原因となるノイズおよび点群の密度を明らかにする必要がある。

ひび割れを特徴づける変数の探索は重要な課題である。点群の座標情報から幾何学特微量への変換は物体の平面検出または輪郭の検出を目的として多く提案されている⁷⁾。三次元点群の幾何学特微量の算出手順は、任意の点に対し近傍点群を定義し、固有値分解を行う。点群処理において、近傍の定義は任意の半径とした球内の点群である⁸⁾。検出対象の大きさによって、検出精度を最大化する近傍を定義する球の半径（以下、近傍半径という）は異なると考えられる。そのため、ひび割れ幅と幾何学特微量を算出するための近傍半径の関係を明らかにする必要がある。

そこで本研究では、既設コンクリート構造物を対象にレーザ計測を行い、得られた点群の幾何学特微量を用いて局所外れ値度アルゴリズム⁹⁾によるひび割れ検出を試みた。1.0~3.5 mmのひび割れ幅における近傍点群に対して、ひび割れ以外のコンクリート表面が幾何学情報に及ぼす影響を整理した。検出結果よりひび割れ幅、幾何学特微量算出の際に用いる近傍半径および検出精度の関係を検討した。

2. 計測構造物および方法

2.1 計測構造物

レーザ計測を行った構造物は鉄筋コンクリート頭首工である。計測構造物は1976年から供用されており、左岸側の堰柱および門柱部において多数のひび割れが確認された。水流による摩耗のため、門柱部と比較して堰柱部では粗骨材の露出が確認された。

*1 新潟大学大学院 自然科学研究科 (学生会員)

*2 新潟大学 自然科学系 (農学部) 博士 (工学) (正会員)

2.2 計測方法

レーザ計測は構造物全体の点群を取得するため、レーザスキャナを設置できる範囲で計 20 回行った。堰柱部の表面は約 5~20 m 程度の距離で計測を行った。計測に用いたレーザスキャナは Faro® Focus S150 laser scanner である¹⁰⁾。測定範囲は反射率 90 %の対象に対して 0.6~150 m、レーザの波長は 1,550 nm、ビーム発散角は 0.3 mrad (全角, 1/e), ビーム基本径は 2.12 mm (全角, 1/e), 範囲誤差は±1 mm, 角度精度は水平および垂直に対し 19 秒角, スキャナから対象表面の距離が 10 m における三次元位置精度は 2 mm である。任意の距離でのビームスポット径 d は以下の式より算出される。

$$d = r_b + 2 \times (r \times \tan \alpha_{div}) \quad (1)$$

ここで、 r_b はビーム基本径 (全角), r はレーザスキャナと対象表面の距離, α_{div} はビーム発散角 (全角) である。スキャナと対象表面の距離が 10 m のとき, ビームスポット径は約 5.11 mm となる。また, 分解能の設定により点群の点間距離は 10 m のスキャンで 3.1 mm となる。

ひび割れ幅の計測は, クラックスケールを用いて行った。対象構造物の堰柱部に発生したひび割れ最大幅 1.0, 1.6, 2.5, 3.0 および 3.5 mm のひび割れ部を対象とした。ひび割れ幅の選定理由は, 取得点群において最近傍点間距離の最小値が 1.0 mm であり, 分解能の設定により点間距離 3.1 mm の点群が取得されたため, その範囲でおおよそ 5 段階に設定した。ひび割れ部の可視画像を図-1 に示す。白点線で囲まれた箇所はひび割れ幅の計測位置である。対象表面とレーザスキャナ位置との関係から入射角を計算した¹¹⁾。入射のレーザベクトルと対象表面の法線ベクトルが一致したとき, 入射角は 0° とする。ひび割れ部におけるスキャナからの距離は 7.1~15.8 m, 入射角は 33~84° であった。

3. 解析方法

3.1 ひび割れ検出に用いる点群データ

得られた三次元点群に対して, ひび割れ位置を同定し, ひび割れ近傍の点群を対象に幾何学特微量を算出した。検出に用いる点群データの処理を図-2 に示す。レーザ計測点群からひび割れ幅計測位置を同定し, 近傍の点群を抽出した。近傍点群は半径 0.05 m 球内に入る点群と定義した。近傍点群は, ひび割れ箇所すべての点群を同定することは困難であるため, 画像上からひび割れを確認可能な範囲である直径 0.1 m の球内とした。得られた近傍点群をひび割れ部と非ひび割れ部に分類した。

3.2 幾何学特微量

本節では, レーザ計測点群が有する三次元位置情報により得られた幾何学特微量とひび割れ幅の関係について検討を行う。RGB 情報と反射強度情報を用いないひび割

れ検出を試みるため, 三次元の位置情報の空間的な変化が確認できる特徴量を探索する必要がある。平面の検出や顕著度の検出に用いられる Surface variation を幾何学特微量として採用した⁸⁾。Surface variation の算出には固有値分解を用いる。三次元点 $p \in \mathbb{R}^3$ の近傍点の集合を $N(p)$ とし, それらの点の重心は次の式で示される。

$$\mu_p = \frac{1}{N} \sum_{q \in N(p)} q \quad (2)$$



図-1 ひび割れ部の可視画像

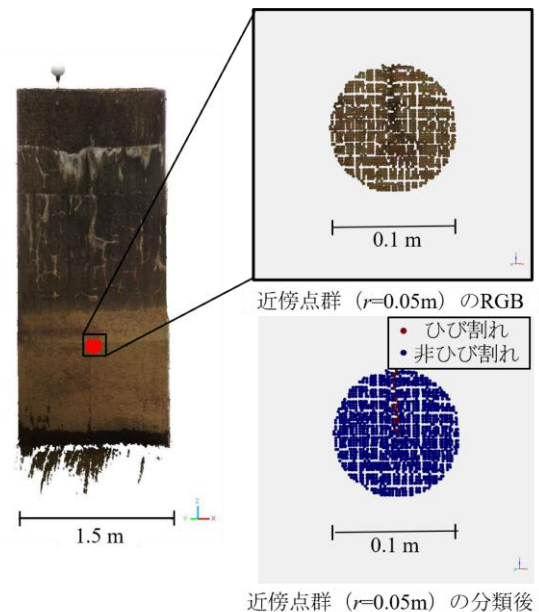


図-2 検出に用いる点群データの処理

共分散行列 M_p は次式で計算される。

$$M_p = \frac{1}{N} \sum_{q \in N(p)} (q - \mu_p)(q - \mu_p)^T \quad (3)$$

M_p の固有値を大きい順に λ_1, λ_2 および λ_3 とすると Surface variation γ_n は以下の式で示される。

$$\gamma_n = \frac{\lambda_3}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3} \quad (4)$$

λ_3 は平面の法線ベクトルに対応し、平面の場合、 λ_1 および λ_2 に比べて λ_3 は極めて小さな値をとり、 γ_n も小さな値をとると考えられる（図-3 (a)）。ひび割れの点群は平面から離れていることから、球を考えると、 λ_1, λ_2 および λ_3 の差は小さくなり、 γ_n が周辺よりも大きな値を示すと考えられる（図-3 (b)）¹²⁾。 γ_n は $N(p)$ を定義する球の半径に影響を受ける。

ひび割れ幅 3.5 mm の近傍半径 0.0125, 0.025, 0.05 および 0.1 m の γ_n を図-4 に示す。近傍半径 0.005 m 程度になると、点群数が少なくなり γ_n を算出できなくなることから、下限を 0.0125 m とした。図-4 から近傍半径 0.0125 および 0.025 m においてひび割れによる γ_n の相違が確認

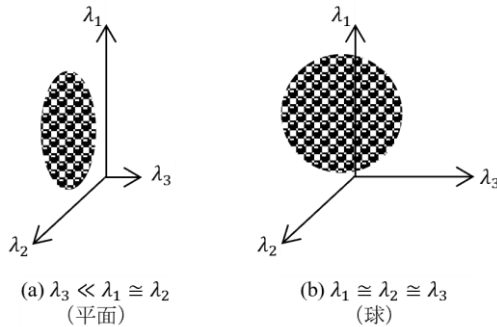


図-3 三次元点群の固有値分解

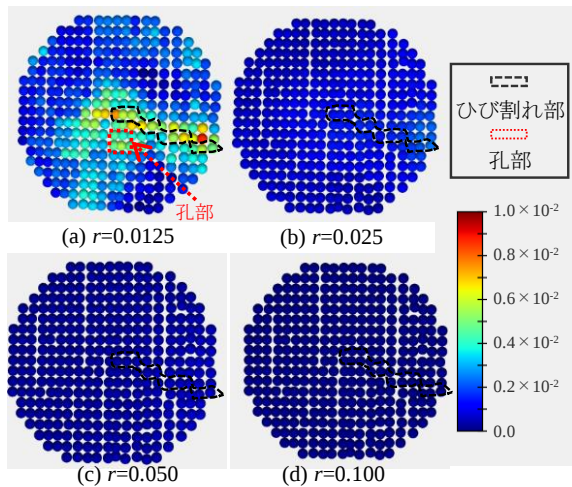


図-4 異なる近傍半径の近傍点群における Surface variation γ_n (ひび割れ幅 3.5 mm)

された。近傍半径が小さいほど γ_n の最大値は大きくなり、ひび割れ部と非ひび割れ部の差が確認された。近傍半径 0.0125 では、中央下部で $3 \times 10^{-3} \sim 5 \times 10^{-3}$ の値が確認され、非ひび割れ部における孔部が影響するものと考えられる。以上より、ひび割れ検出に最適な近傍半径はコンクリート表面の粗さやひび割れ幅に影響を受けると考えられる。コンクリート表面粗さの定量化は粗度係数の推定や付着強度特性の評価の観点から、触針式、レーザ変位計¹³⁾および三次元画像解析による¹⁴⁾粗さ曲線から評価指標の算出が試みられている。評価指標として、ある直線内の粗さ曲線から得られるスキューネス、算術平均粗さ、最大山高さ、最大谷高さ等が採用されている。 γ_n と既往の指標を比較すると、 γ_n より粗さの三次元空間分布を表現可能であると考えられる。以降の検討では、図-4 より近傍半径 0.05 m 以上ではひび割れと γ_n の対応が確認されなかったことから、近傍半径 0.0125 および 0.025 m の球内の点を γ_n の算出に用いた。

3.3 局所外れ値度によるひび割れ検出

ひび割れ幅と幾何学特徴量によるひび割れ検出精度の関係を明らかにするため、 γ_n を用いた局所外れ値度アルゴリズム⁹⁾によるひび割れ部の検出を行った。取得したレーザ計測点群においてひび割れに対応する点群数は、ひび割れ以外の点群数と比較して極めて少数であるため、教師なし異常検出アルゴリズムの一種である局所外れ値度アルゴリズムを用いた。局所外れ値度アルゴリズムとは、局所密度の違いから局所外れ値度を計算し、局所外れ値度が閾値を超えるものをひび割れとして検出する方法である。

ひび割れ検出には半径 0.05 m の近傍点群を 1 データセットとし、変数は γ_n の指標のみとした。近傍半径 0.0125 および 0.025 m の点群により γ_n に対して各モデルを作成し、精度の比較を行った。データ分割はひび割れ部の点群とひび割れ部の点群数と同数の非ひび割れ部の点群を検証データとし、その他を訓練データとした。評価指標が最大になるような近傍の点群数を設定した。局所外れ値度アルゴリズムによるモデルの評価には AUC を用いた。AUC は異常判定の閾値、偽陽性率および真陽性率の関係を示す ROC 曲線の下部面積を示し、異常検知器の指標に用いられている¹⁵⁾。AUC が 0.8 以上の場合、良好な検出が可能であると考えられている¹⁶⁾。

4. 結果および考察

4.1 異なるひび割れ幅の点群における Surface variation の分布

図-5 にひび割れと非ひび割れの分類点群と異なるひび割れ幅の近傍点群における近傍半径 0.025 m の γ_n を示す。本研究では、点群密度の指標として近傍点群の点群数を用いている。点群数は 3.0 mm, 2.5 mm, 1.6 mm, 1.0

mm および 3.5 mm のひび割れ幅の点群の順で多かった。スキャナから表面までの距離は 3.5 mm, 1.0 mm, 1.6 mm, 2.5 mm および 3.0 mm のひび割れ幅の点群の順で大きく、入射角は 1.6 mm, 1.0 mm, 3.5 mm, 2.5 mm および 3.0 mm のひび割れ幅の点群の順で大きかった。点群密度はや入射角に影響を受けるとされており¹⁾、本研究で用いた点群においても同様の傾向が確認された。ひび割れ幅 1.0 mm では、ひび割れ部の周辺で $3.0 \times 10^{-4} \sim 3.5 \times 10^{-4}$ の値が確認され、非ひび割れ部よりも小さな値であった (図-5 (a))。最大値は 7.0×10^{-4} であり、他のひび割れ幅の点群と比較しても 10 分の 1 程度小さな値をとっていることから、コンクリート表面の凹凸による変化であると考えられる。ひび割れ幅 1.6 mm では、中心部ではひび割れによる γ_n の差は確認できないが、右上のひび割れ箇所に対応する箇所で最大値 4.2×10^{-3} が確認された (図-5 (b))。図-1 (b) の可視画像から、ひび割れ幅計測位置で確認されたひび割れよりも幅の広いひび割れに起因するものと考えられる。ひび割れ幅 2.5 mm では、上部のひび割れ部において $1.3 \times 10^{-3} \sim 1.5 \times 10^{-3}$ 程度の値を取り、非ひび割れ部よりも高い値が確認された (図-5 (c))。下部のひび割れ部では、 γ_n が $0.7 \times 10^{-3} \sim 0.9 \times 10^{-3}$ 程度の値を取り、非ひび割れ部との違いが確認されなかった。中心から右下にずれた箇所では、非ひび割れ部であるにもかかわらず γ_n が $1.4 \times 10^{-3} \sim 1.5 \times 10^{-3}$ と高い値が確認され、ひび割れ検出に影響を与えるノイズとなる可能性が考えられる。該当箇所は、図-1 (c) の可視画像から局所的な孔が確認された。ひび割れ幅 3.0 mm では、左下のひび割れ部周辺では γ_n が $0.5 \times 10^{-2} \sim 0.6 \times 10^{-2}$ 程度の高い値を取り、ひび割れ部が極大値をとるような分布が確認された (図-5 (d))。右のひび割れ部では γ_n が $0.1 \times 10^{-2} \sim 0.2 \times 10^{-2}$ 程度の非ひび割れ部と同様の値を示した。図-1 (d) の可視画像から右のひび割れは左のひび割れ部と異なる幅であることと、粗骨材の露出に起因する表面のばらつきによりひび割れ部における顕著な γ_n の差は確認されなかったと考えられる。ひび割れ幅 3.5 mm では、中心から右へかけてひび割れが確認され、 γ_n は $1.25 \times 10^{-3} \sim 2.25 \times 10^{-3}$ 程度の高い値をとることが確認された。

点群密度の差やひび割れ以外の表面状態などのノイズはあるが、ひび割れ幅 2.5 mm 以上の場合、 γ_n によりひび割れを示すことが可能であると考えられる。

4.2 ひび割れ幅と γ_n の近傍半径および検出精度の関係

図-6 にひび割れ幅、 γ_n の近傍半径と局所外れ値度によるひび割れ検出精度の関係を示す。 γ_n の近傍半径が 0.0125 m の場合、ひび割れ幅が大きくなるにつれて AUC は大きくなる傾向が確認され、ひび割れ幅 3.5 mm では AUC が 0.91 と最大値が確認された。近傍半径が 0.025 m の場合、ひび割れ幅が 1.0~3.0 mm では AUC が 0.6~0.7 の

範囲であり、ひび割れ幅 3.5 mm のみ AUC が 0.82 と高い値が確認された。以上の結果から、ひび割れ幅が 3.5 mm の場合のみ γ_n による検出が可能であり、近傍半径が 0.025

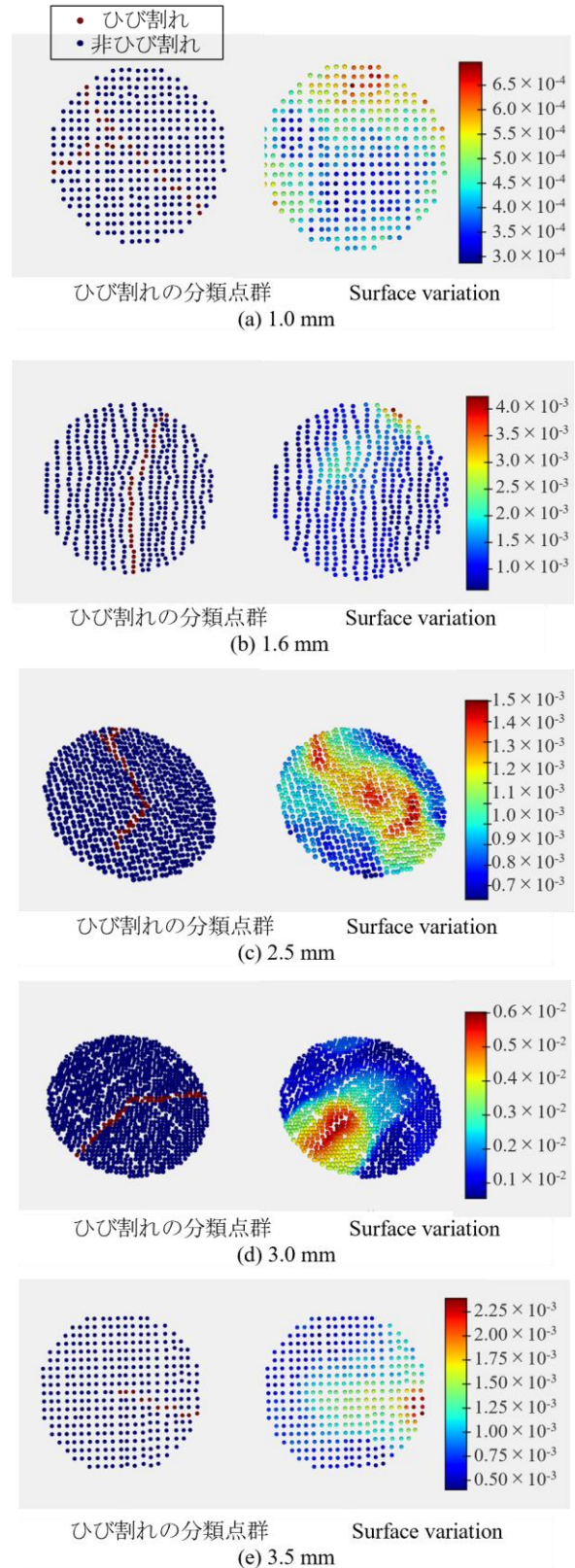


図-5 異なるひび割れ幅の点群における Surface variation γ_n ($r=0.025$ m)

mの γ_n を用いた場合よりも近傍半径 0.0125 m の γ_n を用いた方がより高い精度での検出が可能であることが示された。図-7 に近傍半径 0.0125 m の γ_n を用いた局所外れ値度によるひび割れ検出結果を示す。ひび割れ幅 1.0 および 1.6 mm の検出結果では、全体的に誤検出が確認され、正確な検出は不可能であった。ひび割れ幅 2.5 および 3.0 mm の検出結果では、ひび割れ部における検出は可能であったが、誤検出も確認され、偽陽性率の高いモデルとなった。ひび割れ幅 3.5 mm の検出結果では、右上に一点の誤検出が確認されたが、高精度にひび割れの検出が可能であった。

ひび割れ幅 2.5 mm では、近傍半径 0.025 m の γ_n による AUC が大きく、ひび割れ幅 3.0 mm では、近傍半径 0.0125 m の γ_n による AUC の方が大きかった。以上の結果から、検出するひび割れ幅に対する γ_n の最適な近傍半径は異な

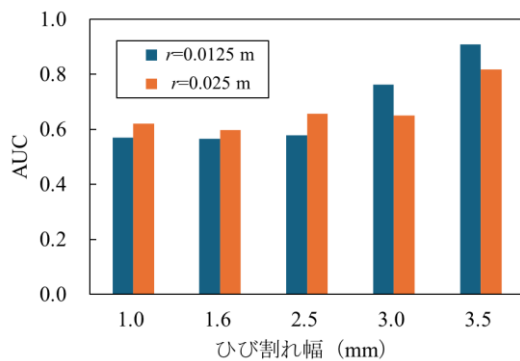


図-6 ひび割れ幅、 γ_n の近傍半径と局所外れ値度によるひび割れ検出精度の関係

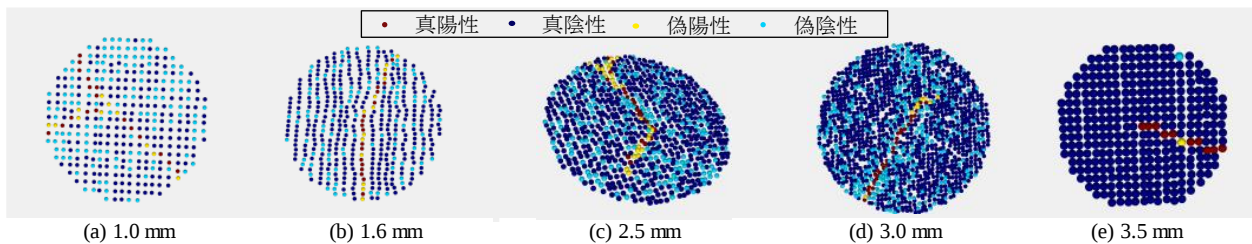


図-7 γ_n ($r=0.0125$ m) の局所外れ値度によるひび割れ検出結果

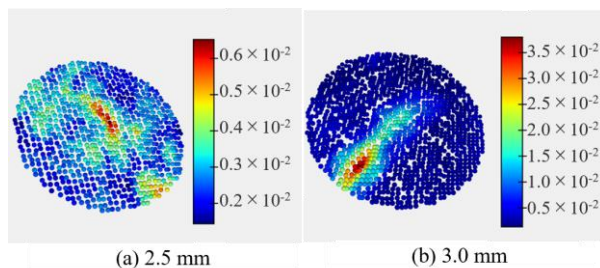


図-8 ひび割れ幅 2.5 および 3.0 mm の点群における Surface variation γ_n ($r=0.0125$ m)

ると推察される。図-8 にひび割れ幅 2.5 および 3.0 mm の近傍点群における近傍半径 0.0125 m の γ_n を示す。ひび割れ幅 2.5 mm における近傍半径 0.0125 m の γ_n は非ひび割れ部において $0.3 \times 10^{-2} \sim 0.4 \times 10^{-2}$ 程度の値が確認され (図-8 (a)), ひび割れ部に対して局所的な粗さの影響が大きかったものと考えられる。図-1 (c)の可視画像から図-1 (a), (e)と比較して、コンクリート表面が不均一であることが確認された。ひび割れ幅 3.0 mm における近傍半径 0.0125 m の γ_n はひび割れ部において近傍半径 0.025 m の γ_n と比較して (図-5 (d)), 最大値において約 6 倍の値が確認され、ひび割れとひび割れ部以外の差が顕著になった。図-9 にひび割れ幅と非ひび割れ部における γ_n の変動係数の関係を示す。ひび割れ幅 2.5 mm における γ_n の変動係数は近傍半径 0.025 m よりも近傍半径 0.0125 m の場合の方が大きく、コンクリート表面粗さによるばらつきの増加が確認された。ひび割れ幅 3.0 mm における γ_n の変動係数は近傍半径 0.025 m よりも近傍半径 0.0125 m が大きかったが、差はひび割れ幅 2.5 mm に比べて小さかった。近傍半径 0.0125 m~0.025 m の範囲では、ひび割れ幅 3.0 mm の非ひび割れ部の表面粗さが γ_n に与えた影響は小さいと考えられる。以上より、表面粗さとひび割れ幅による γ_n が類似している場合、検出が困難になることが示唆された。汎用的なひび割れ検出器の作成にはひび割れ部近傍における γ_n のばらつきおよび検出対象とするひび割れ幅を考慮する必要があると考えられる。

5. おわりに

本研究では、既設コンクリート構造物を対象にレーザ

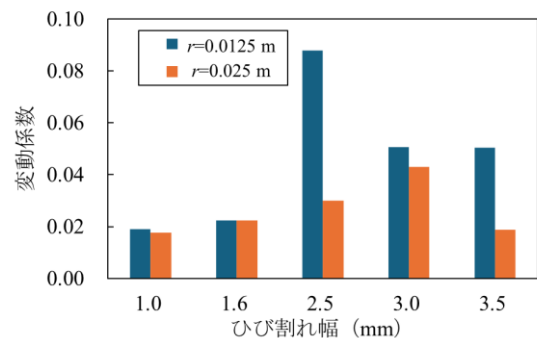


図-9 ひび割れ幅と非ひび割れ部における γ_n の変動係数の関係

計測を行い、点群の幾何学特徴量によるひび割れ検出を試みた。実コンクリートの表面、ひび割れ幅、幾何学特徴量算出の際に用いる近傍半径および検出精度の関係を検討した。今回対象としたひび割れにおいて、検討結果をまとめると以下の通りとなる。

- (1) 点群密度の差やひび割れ以外の孔部が見られたが、ひび割れ幅 2.5 mm 以上の点群では、ひび割れ部の γ_n は非ひび割れ部よりも大きな値が確認された。
- (2) 本研究で用いた計測条件では、ひび割れ幅が 3.5 mm の場合のみ γ_n による高精度な検出が可能であり、近傍半径が 0.025 m の γ_n を用いた場合よりも近傍半径 0.0125 m の γ_n を用いた方がより高い精度での検出が可能であることが示された。
- (3) 非ひび割れ部における表面の粗さが大きくなるとひび割れ幅による γ_n の差が相対的に小さくなることが示され、検出精度が低下することが示唆された。

謝辞

コンクリート頭首工でのレーザ計測には新潟県農地部および株式会社日本水工コンサルタントの協力を得た。ここに記して感謝申し上げる。

参考文献

- 1) 島本由麻, 鈴木哲也: ヒストグラム平坦化を活用した道路橋床版での遊離石灰の自動検出に関する解析的検討, 農業農村工学会論文集, Vol.91, No.1, I_69-I_76, 2023.3
- 2) Kaasalainen, S., Jaakkola, A., Kaasalainen, M., Krooks, A. and Kukko, A.: Analysis of incidence angle and distance effects on terrestrial laser scanner intensity: Search for correction methods, Remote Sensing, Vol.3, No.10, pp.2207-2221, Oct.2011
- 3) Gao, Y., Li, H., Fu, W., Chai, C. and Su, T.: Damage volumetric assessment and digital twin synchronization based on LiDAR point clouds, Automation in Construction, Vol.157, 105168, Nov.2023
- 4) Stałowska, P., Suchocki, C. and Rutkowska, M.: Crack detection in building walls based on geometric and radiometric point cloud information, Automation in Construction, Vol.134, 104065, Dec.2021
- 5) 柴野一真ほか: レーザ計測による農業水利施設の三次元損傷データの構築, 水土の知: 農業土木学会誌, Vol.91, No.6, pp.3-6, 2023.6
- 6) 渡嘉敷 勝: 農業用コンクリート水路における摩耗機構および促進摩耗試験に関する研究, 農村工学研究所報告, Vol.52, pp.1-57, 2013.3
- 7) Hackel, T., Wegner, J. D. and Schindler, K.: Contour detection in unstructured 3D point clouds, In Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, pp.1610-1618, Jun.2016
- 8) Compute geometric features, CloudCompareWiki: https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php/Compute_geometric_features (閲覧日: 2024 年 1 月 5 日)
- 9) Breunig, M. M., Kriegel, H. P., Ng, R. T. and Sander, J.: LOF: identifying density-based local outliers, In Proceedings of the 2000 ACM SIGMOD international conference on Management of data, pp.93-104, May.2000
- 10) FARO Focus Laser Scanner, FARO: <https://www.faro.com/ja-JP/Products/Hardware/Focus-Laser-Scanners> (閲覧日: 2024 年 1 月 5 日)
- 11) Soudarissanane, S., Lindenbergh, R., Menenti, M. and Teunissen, P.: Scanning geometry: Influencing factor on the quality of terrestrial laser scanning points, ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing, Vol.66, No.4, pp.389-399, Jul.2011
- 12) Rusu, R. B.: Semantic 3D object maps for everyday manipulation in human living environments, KI-Künstliche Intelligenz, Vol.24, pp.345-348, Aug.2010
- 13) 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. 258, 501-506, 2008. 12
- 14) 太田垣晃一郎ほか: 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.311-317, 2012.8
- 15) 井出 剛, 杉山 将: 異常検知と変化検知, 講談社, 2015.1
- 16) El Khouli, R. H., Macura, K. J., Barker, P. B., Habba, M. R., Jacobs, M. A. and Bluemke, D. A.: Relationship of temporal resolution to diagnostic performance for dynamic contrast enhanced MRI of the breast, Journal of Magnetic Resonance Imaging: An Official Journal of the International Society for Magnetic Resonance in Medicine, Vol. 30, No. 5, pp. 999-1004, 2010.11