

(25) Mobile Mapping System による レーザ点群データを用いた法面変状の定量化

佐守 直人¹・西山 哲²・崎田 晃基³・藤木 三智成⁴・小野 尚哉⁵

^{1,3} 学生会員 岡山大学大学院環境生命科学研究科 (〒700-0081 岡山県岡山市北区津島中 3-1)

E-mail: p9qz9emp@s.okayama-u.ac.jp

² 正会員 岡山大学大学院環境生命科学研究科 (〒700-0081 岡山県岡山市北区津島中 3-1)

⁴ 正会員 国際航業株式会社 技術サービス本部 (〒102-0085 東京都千代田区六番町 2)

⁵ 国際航業株式会社 公共コンサルタント事業部 (〒102-0085 東京都千代田区六番町 2)

日本には多くの法面が存在し、これらの多くは高度経済成長期に作られ、施工 50 年が経過し老朽化が進行している。劣化具合を判断するため、変状把握の必要がある。現在の点検は近接目視を主とした方法で行なっている。しかし、点検者次第で結果に違いが生じ、一様な結果が得られないことが課題となっていた。そこで法面変状を定量的に検出するため、移動計測車両による測量手法 (Mobile Mapping System, MMS) と点群を用いて変状を検出できると考えられる差分解析手法を使用した。MMS の点群取得精度、変状識別性、変状抽出精度の 3 つの検証を行ない、目視で地滑りが起きると判断された法面に対し、地滑りの予兆であるはらみ出しの検出を検証した。トータルステーションで変状が起きていないと判断された対象法面は本研究の検出方法でも同様に変状が起きていないことが確認できた。

Key Words: road slope, point cloud, MMS, ICP, difference analysis

1. 背景と目的

日本は国土の約 7 割を山地・丘陵地で占めている¹⁾。約 50 年前に迎えた高度経済成長期にこれらの山を切土し、法面保護工を施すことで道路交通網を発展させていった。施工後 50 年が経過し、老朽化の影響により法面にはモルタルの剥離や法枠の破断など変状が表れている。法面が崩壊し、周辺に被害を出さないために変状を把握する必要がある。しかし、法面の点検手法は近接目視を主とした触診や打音検査を含む非破壊検査を用いたもので得られた点検結果は技術者の経験や技量によるところが大きい。そのため点検する技術者次第で結果に違いが生じ、一様な結果が得られないことが課題となっていた。

近年、構造物の形状を定量的に評価可能な点群データを取得できるレーザスキャナを用いた測量が急速に普及している。点群データとは三次元座標である X, Y, Z(H) の位置情報やカメラの画像データから得た色の情報 (RGB) を持つ点の集合体である (図-

1)。対象物の点群を回転させ、拡大・縮小することで必要な箇所のみを切り出すことが可能である。これらの点は三次元座標値や RGB 値と定量的データであるため、変状を定量的に表現することが可能であると考えられる。この点群を取得できるレーザスキャナと自己位置姿勢情報を取得するセンサーを車両に搭載した移動計測車両を使用する測量手法 (Mobile Mapping System, MMS) が存在する。

本研究では MMS 測量によって法面を計測し、その計測データの評価から法面に表れる変状を検出できるかを検証する。また変状検出を行なうため、2 時期の点群の重ね合わせを行うことで変状を検出できると考えられる差分解析手法の導入を検討する。

MMS の点群取得精度、MMS で取得された点群の変状識別性、差分解析手法で得られた変状の精度の 3 つの検証を行い、これらの結果に基づき、地滑りが疑われている法面に対し、本手法を用いることで地滑りの予兆である変状のはらみ出しを検出できるかを検証し、目的達成の可否について述べる。



図-1 アンカー設置法面の点群データ
(対象物を 360 度回転させることや拡大・縮小させ、右図のように切り抜くことが可能)

2. 検証手法

本章では MMS 測量と差分解析手法、対象とした法面、設置したターゲットの概要について述べる。

MMS 測量 (図-2) は機器を搭載した自動車の普通走行で道路周辺の地形・地物に関する三次元位置情報を効率的かつ面的に取得可能な測量手法である。1 秒間に 100 万点スキャンのレーザスキャナと GNSS (Global Navigation Satellite System) 受信機、慣性計測装置などのセンサーを車両に搭載している。この手法は道路²⁾や河川³⁾などの管理で活用されている。

差分解析手法 (図-3) とは SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) と呼ばれる自己位置推定と地図構築を同時に行うスキャンマッチングアルゴリズムの 1 つの ICP (Iterative Closest Points) を応用した手法である。スキャンマッチングとは 2 つのスキャン (点群) の形状が一致するように位置合わせする技術のことである。ICP は 2 つの点群で最も近い点同士を対応付け、点群全体で位置の最適化 (回転移動と平行移動) を行う。対応付けと最適化を繰り返す。2 つの点群でそれぞれの距離が最も近づいた際にアルゴリズムを終了する。差分解析手法では ICP 終了時の点群状況を応用し 2 つの点群で対応付けられている点の座標値を比較することでその点の変化量をベクトルで検出できると考えられる手法である。

計測対象とした法面は目視点検によって地滑りの可能性が疑われている、国道 9 号沿いの全長約 70 m、高さ約 10 m の法枠付き法面 (図-4) である。この法面は 1987 年に切土で道路拡幅工事が行われ、その断面に法枠付きグラウンドアンカー工法によって法面が施された。そして 2016 年 5 月 1 日にアンカー頭部保護コンクリートが落下し、コンクリート片が車道に落ちる事故が発生した。その後各種調査観測が実施され、目立った変状拡大は認められないが、アンカー破断箇所周辺の法面が起点側に変位する変動形態が想定される法面であると判断された。また法面には 1 辺 0.7 m のターゲットを、調整用基準点

として法面全体を囲むようにして 8 点、変動が予想される起点側に 6 点設置した。1 時期目の計測時期を 2018 年 1 月 13 日、2 時期目を同年 5 月 28 日として約 4 か月の期間を空けて計測を行なった。MMS 車両は 50 km/h で対象法面との距離が 12 m ほどである追い越し車線を走行し法面の点群を取得した。



図-2 法面を対象に MMS 測量を行っている様子

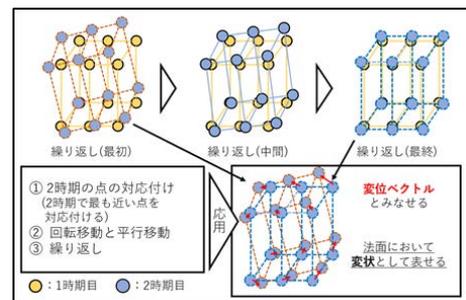


図-3 差分解析手法のアルゴリズム

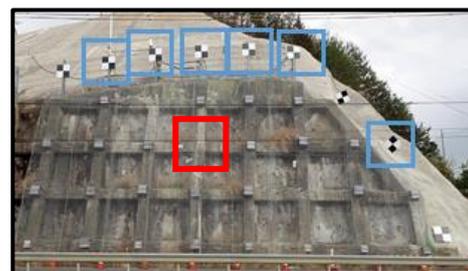


図-4 対象法面 (赤枠はアンカー頭部保護コンクリートが落下した箇所、青枠は検証用基準点)

3. MMS の点群取得精度

本章では MMS の点群取得精度を検証する。

MMS で取得した点群のうち、ターゲットの中心に最も近い点を MMS 測量で取得されたターゲットの中心座標とした。また真値を 2 級 A のトータルステーション (TS) と仮定し計測した。MMS と TS で取得した点を比較した結果を平均較差と RMS 誤差 (平均二乗誤差) で表した。比較したターゲットは変動が予想されている法面を囲むターゲットである。なおターゲットの中心座標取得には点群処理にはフリーソフトの Cloud Compare⁴⁾を利用した。平均較差は TS と MMS で得た座標の差を示し、RMS 誤差は点群の X,Y,Z 方向のそれぞれの差分を最確値としたばらつきを示す。地面と水平の平面である XY 平面と法面の高さ方向である Z 方向で比較した。MMS の平均較差と RMS 誤差を以下の式で表す。

$$DIS = OBS - TV \quad (1)$$

$$\overline{DIS} = \frac{(\sum DIS)}{n} \quad (2)$$

$$RMS = \sqrt{(\sum DIS^2)/n} \quad (3)$$

ここで DIS : 較差, OBS : 観測値, TV : 真値, \overline{DIS} : 較差の平均値, n : 検証点数, RMS : 平均二乗誤差とし RMS 誤差を MMS 測量の誤差とする。その結果, 平均較差は ΔXY で 20 mm, ΔZ で 30 mm 未満, 誤差はそれぞれ 20 mm, 25 mm 未満であった。調整用基準点を用いて調整計算を行なった MMS データの平均較差は ΔXY で 25 mm, ΔZ で 30 mm 未満, 誤差はそれぞれ 20 mm, 25 mm 未満であった。調整計算データは MMS 測量で取得した調整用基準点の座標を TS で取得したものに重ね合わせることで取得したものである。MMS 測量で取得された点群データは調整計算を行なったもの, 行わなかったもの, とともに地図情報レベル 1000 である水平方向で 0.70 m, 標高方向で 0.33 m 未満を満たしているため, 良好な精度のデータが得られたといえる。

4. MMS の変状識別性

模擬変状供試体を法面に設置し, MMS で取得した点群の抽出可能な変状の規模を検証する。

変状に見立てた模擬変状供試体を用いて MMS 測

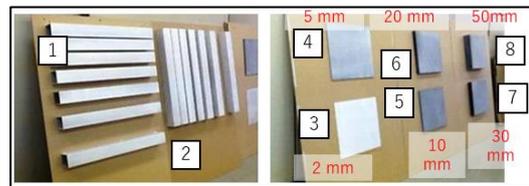


図-5 模擬変状供試体の仕様

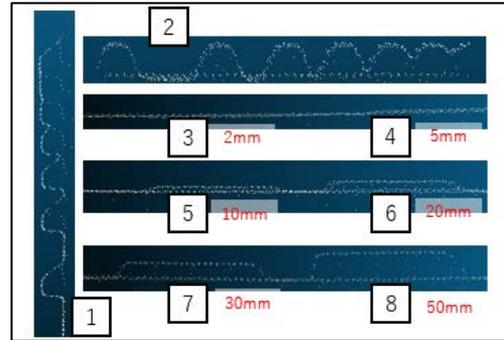


図-6 模擬変状供試体の点群断面

量で取得された点群が変状として再現されるか検証する。供試体は法尻付近にレーザスキャナと概ね正対して設置した。模擬供試体は図-5のように亀裂を模した間隔を分けた 2 つ, 段差を模した 3 つを設置した。計測データを用いて確認したところ, 1 辺が 0.7 m のターゲット上ではデータの点密度は 967 (点 / m²) であった。取得された供試体付近の点群を幅 0.5 m 程度の帯状に切り出し断面表示する。図-6 の断面図により供試体の概略形状が明瞭に表現されていることがわかる。1 と 2 の結果より横方向の模擬亀裂は 20 mm, 縦方向で 10 mm であれば目視で検知できる。4~8 の結果から模擬段差は 10 mm 以上の変状であれば検知できることが確認された。

5. 差分解析手法の変状抽出精度

本章では差分解析手法の変状の検出精度を検証する。4 つの法枠に一定の変状を与えられるシート設置やはつり落とし (模擬変状) を行なった。1 時期目は変状を与えず, 2 時期目は模擬変状を与え, その間の変状を求める。2 時期目の法枠 1 は変状を与えず, 法枠 2 は一部のコンクリートを削り最大 40 mm 程度のはつり落としを与えた。法枠 3, 4 にはそれぞれ 10, 20 mm のシートを設置した (図-7)。解析結果として模擬変状が見られるかを検証する。結果は法面の断面図として, 図-8 に書かれた数値を変状量, 矢印を変状の向きと量を表す。10 mm 程度のはらみ出しは変状として確認できることが分かった。



図-7 法面に与えた模擬変状の2時期の様子

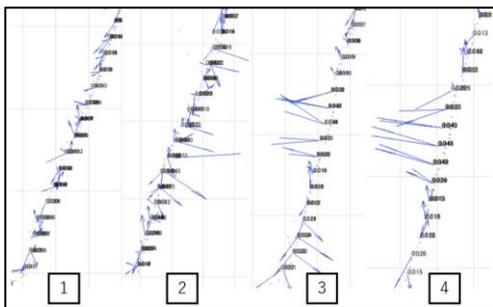


図-8 模擬変状を与えた法面の解析結果

6. 法面全面に対する本手法の検証

対象法面に本手法を用いた検証について述べる。対象法面に対して MMS で点群を取得し差分解析手法を用いて2時間、約4か月の期間で起きた変状を抽出した。この範囲の法面の検証用基準点の中心座標をTSで測定した結果、2時間間の平均較差は平面方向で2 mm、標高方向で-1 mm、RMS 誤差はそれぞれ1 mmであり、これらの誤差は機械誤差程度であったため、本法面には変動が生じていない。MMS、差分解析手法を用いて対象法面で変状が抽

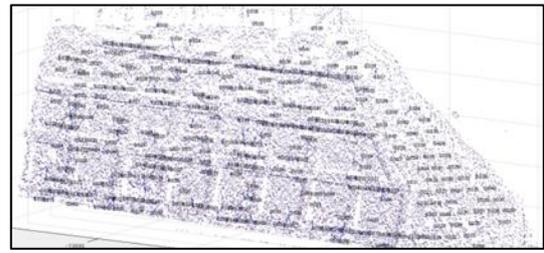


図-9 地滑りを疑われている法面の解析結果

出されないことを確認する。MMS で取得した2時間の点群を解析した結果が図-9である。変状の向きを矢印の向き、変状の大きさを数値で表している。この法面が実際にははらみ出しを起こしている場合、広域に変状が表れると予想される。本研究対象の法面の解析結果は植生や氷柱が1時期目には存在するが、2時期目には存在していないことによる点群の誤差や MMS 測量が持つ誤差などが全体に表れているものの広域に変状が起きていないことが確認できる。本手法で変状を求められることがわかった。

7. 結論

本研究は MMS と差分解析手法を用いることで法面の2時間間の変状を検出することを目的とし3つの検証を行なった。MMS 測量における調整計算データの誤差は水平方向で25 mm 未満、標高方向で30 mm 未満で10 mm 程度で変状を識別できる点群を得られることがわかった。差分解析手法で得られる変状は約10 mm のはらみ出しを模した変状と40 mm 程度の欠落を模した変状であった。これらの結果と対象法面を計測することで地滑りの可能性を持つ法面ははらみ出しが表れていないことがわかった。本手法ではらみ出し箇所を検出することが可能である。今後は MMS 測量の持つ誤差や調整計算による補正を向上させることについて検証する余地がある。

参考文献

- 1) 国土技術研究センター：国土を知る，<<http://www.jice.or.jp/knowledge/japan>>，（入手2020.6.10）。
- 2) 坂井康一，大石岳史：全方位映像を活用した道路維持管理業務支援に関する研究，生産研究，70号，pp.51-56，2018。
- 3) 橋菊生，間野耕司：河川堤防計測へのモバイルマッピングシステムの適用，写真測量とリモートセンシング，54号，pp.166-177，2015。
- 4) CloudCompare open source project：CloudCompare，<<http://www.danielgm.net/cc/>>，（入手2020.6.10）。