(33) 車載型センシング装置を用いた道路法面の変状検出法

野村　碧都[1]・西山　哲[2]・佐守　直人[3]・藤木　三智成[4]

[1]学生会員　岡山大学大学院　環境生命科学研究科（〒700-8530 岡山市北区津島中 3-1-1）
E-mail: p5f86f9u@s.okayama-u.ac.jp

[2]正会員　岡山大学学術研究院教授　環境生命科学学域（同上）

[3]非会員　中電技術コンサルタント株式会社（〒734-8510 広島県広島市南区出汐 2-3-30）
Email: naoto.samori@cecnet.co.jp

[4]非会員　国際航業株式会社　公共コンサルタント事業部（〒660-0805 兵庫県尼崎市西長洲町 1-1-15）

近年，短時間強雨の発生頻度増加により法面崩壊の危機が高まっている．崩壊を未然に防ぐため，予兆である変状を抽出する点検が重要となっている．その点検は近接目視を主として行われている．この手法で得られた結果は技術者の経験や技量によるところが大きい．本研究では構造物の形状を定量的に評価可能なレーザ点群を効率的，面的に取得できる Mobile Mapping System(MMS)を用いた．この点群を Iterative Closest Point(ICP)アルゴリズムを応用した手法で法面変状の定量化を試み，法面点検の補助として活用できるか検討した．その結果，2 時期間の法面変状の方向と量を確認できた．本研究の手法は法面点検の補助としての活用に期待できる．

Key Words: *Road Slope, Extarcting Deformation, MMS, ICP*

1.　背景と目的

日本は約 50 年前に高度経済成長期を迎えた．その期間に道路交通網を発展させるため，国土の約 4 分の 3 を占める産地や丘陵地を切り開き，断面に法面保護工を施すことで道路を増設していった．それらの法面は地下水の飽和・不飽和の乾湿を繰り返しによって，風化・劣化し強度が低下している [1]．また近年は地球温暖化に起因する短時間豪雨 [2]によって法面内部へ地下水が大量に侵入することで法面崩壊の可能性が高まっている [1]．現在，日本の法面点検は近接目視を主として行われている [3]．近接目視とは，路上だけではなく小段や法肩等，対象物に近接して変状の有無や程度を観察する方法である．この手法で得られた結果は技術者の経験や技量によることが大きい定性的な結果である．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になっている．

近年，構造物の形状を定量的に評価可能なレーザ点群データ(以下，点群)を取得できるレーザスキャナを用いた測量が普及している [4]．点群とは 3 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)の集合体である(図-1)．取得した点群はそれぞれの点に値が与えられているため，必要な箇所のみを切り出すことが可能である．点群は定量的データであり法面の形状を定量的に表現できる．そこで本研究では点群を広域かつ効率的に取得できる車載型センシング装置(Mobile Mapping System, MMS)を使用した．MMS とは道路を普通走行することで車両周囲の点群を面的に取得できるセンシング機器である．現在，道路施設の 3 次元地形図作成 [5]をはじめ，河川堤防計測 [6]，道路維持管理 [7]などで活用されている．この計測によって取得された時期の異なる 2 つの点群を ICP(Iterative Closest Point)アルゴリズムを応用した解析手法により 2 時期間の変状抽出を試みる．本研究では MMS で 2 時期間の法面の点群を取得し，ICP による解析で変状抽出の検証を行なった．検証結果によ

図-1　法面のレーザ点群データ

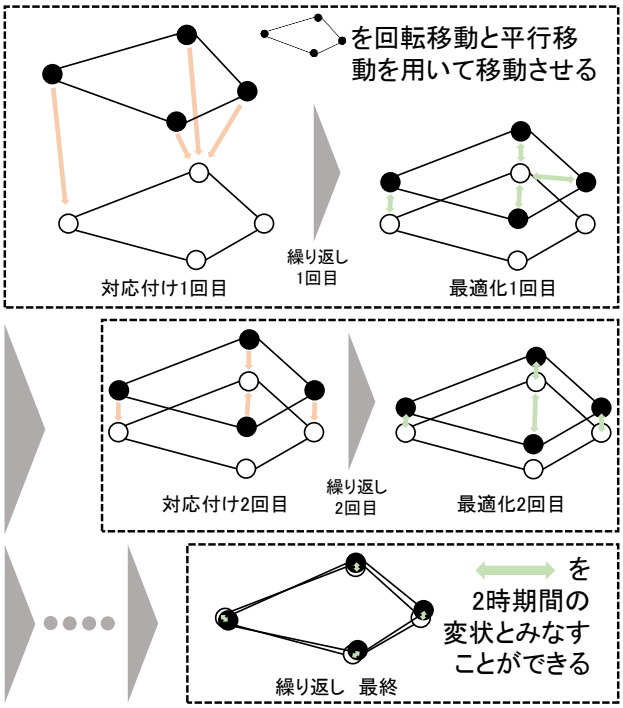

図-2 ICPアルゴリズムによる変状量算出のしくみ

り，本手法が法面点検における補助，スクリーニング手法として，活用できるかを考察する．

2. 研究概要

(1) Mobile Mapping System

MMS とは車両で走行しながら連続的に高精度の点群が迅速に取得できるセンシング機器である．本研究では計測用ポット(レーザスキャナ，GNSSアンテナ2機，400万画素スポットカメラ8台)，走行距離計，慣性計測装置，車内には解析ソフトとして InertialExolorer，Radmin，AutoP を一式搭載した MMS 車両を使用した．レーザスキャナは位相差式で 1 秒間に 100 万点スキャンできるものを使用した．

(2) Iterative Closest Point

ICP のアルゴリズム内容について説明する．点群をメッシュと呼ばれる正方形の格子に区切る．2 時期間の点群でそのメッシュ内と同位置の点群で最も近い点群同士を結びつけ(対応付け)，群全体で位置の最適化(回転移動と平行移動)を行なう．この対応付けと最適化のセットを繰り返し，2 つの点群で距離が最も近づいた際にアルゴリズムを終了する．2 つの点群で対応付けられている点の座標値を比較しメッシュ内でベクトルの平均値をとり，その値をメッシュの変化量とみなす(図-2)．2時期間の変状をベクトルで表すことができると考えられる．

(3) 対象法面と計測概要

計測対象としたのは国道 9 号沿いの全長約 70m，高さ

図-3 計測対象とした法枠付き法面

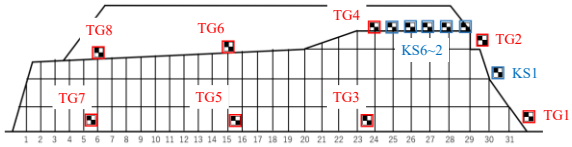

図-4 法面上に設置したターゲット一覧

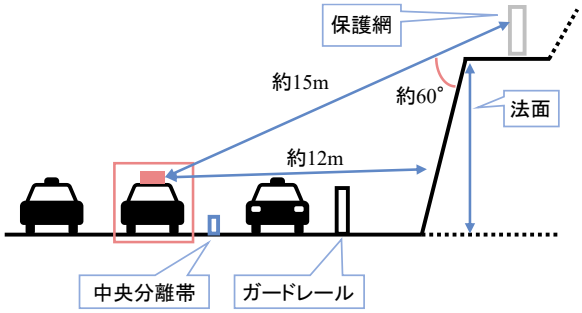

図-5 計測時の MMS 車両と対象法面の関係

約10mの法枠付き法面である(図-3)．法面上には1辺0.7mの合計 14 点のターゲットを設置した(図-4)．8 点を調整用基準点(TG)として，6 点を検証点(KS)として設置した．TGとはMMS計測にて取得した点群のずれを補正するために使用するターゲットのことである．TG 座標をトータルステーション(TS)で取得した座標に変換することで点群全体のひずみ(系統誤差)を補正する．本研究ではTGによる補正を行なった点群を使用している．KS は MMS 計測で取得した点群の精度を求めるために使用するターゲットのことである．MMS 計測時の条件について述べる．1 時期目を 2018 年 1 月 13 日，2 時期目を同年の 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 車両は対象法面との距離が約 12m である車線を 50km/h で走行し，法面の点群を取得した(図-5)．

3. MMS に関する検証

MMS 計測の点群取得精度を求める．TS 計測で得た座標値を真値として，MMS 計測と TS 計測で取得された KS の中心座標を比較することでMMS計測の点群の精度とする．点群の座標値は X，Y，Z で平面直角座標系の VI 系で表す．取得した KS の中心座標を以下の式で表す．

$$DIS = OBS - TV \tag{1}$$

$$\overline{DIS} = \frac{\sum DIS}{n} \tag{2}$$

表-1　MMS 測量の KS 座標値から
TS 測量の KS 座標値を引いた較差

MMS測量-TS測量	較差(m)			総計(m)	
	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔXY	ΔZ
KS1	-0.041	-0.021	0.014	0.046	0.014
KS2	-0.001	-0.029	0.053	0.029	0.053
KS3	-0.015	-0.004	0.034	0.016	0.034
KS4	0.005	-0.023	0.052	0.024	0.052
KS5	0.012	-0.001	-0.014	0.012	-0.014
KS6	-0.003	-0.011	0.012	0.011	0.012
平均値	-0.007	-0.015	0.025	0.023	0.025
最大値	0.041	0.029	0.053	0.046	0.053
RMSE	0.017	0.010	0.024	0.012	0.024

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(DIS - \overline{DIS})^2}{n}} \qquad (3)$$

ここでDIS：較差，OBS：MMS での観測値，TV：TS の観測値，$\overline{DIS}$：較差の平均値，n：検証点数，$RMSE$：二乗平均平方根誤差(Root Mean Squared Error)とし$RMSE$を MMS 測量の誤差とする．$\overline{DIS}$は MMS 測量と TS 測量で得た座標を表し，$RMSE$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表す．**表-1** は MMS で計測した KS の座標値から TS で計測した標値を引いた較差を表示している．これらの座標値は 1 時期目の値である．MMS 測量で取得した点群はΔXY 方向(地面と水平方向)で 12mm，ΔZ 方向(地面と垂直方向)で 24mm であることが分かった．

4. ICP に関する検証

MMS 計測によって得られた点群を用いて ICP 手法の変状抽出の検証した．対象法面の法枠 4 つを使用し 1 時期目にはそのままの法面点群を MMS 計測にて取得し，2 時期目には模擬変状を与えて，それを ICP 手法により検出できるかを検証する．法枠内に設置した模擬変状について説明する(**図-6**)．法枠 A は 1 時期目と 2 時期目ともに模擬変状を設置せず，解析の結果，変状が検出されないことを確認する．法枠 B の 1 時期目には模擬変状を設置せず，2 時期目には全長約 1m で深さ最大 40mm 程度で表面のコンクリートを削る，はつり落としを法枠中央右付近に行なった．法枠 C，D では 1 時期目に模擬変状を設置せず，2 時期目にはそれぞれ厚さ 10mm，20mm の一辺 0.5m のシートを設置した．ICP 手法がどの程度の変状を抽出できるかを検証する．また**図-6** の通り，法面上には氷柱や植生などの点群が存在している．そこでこの点群を除去するフィルタリングを行ない，解析を行なう．本研究ではメッシュサイズを 10cm で解析を行った．

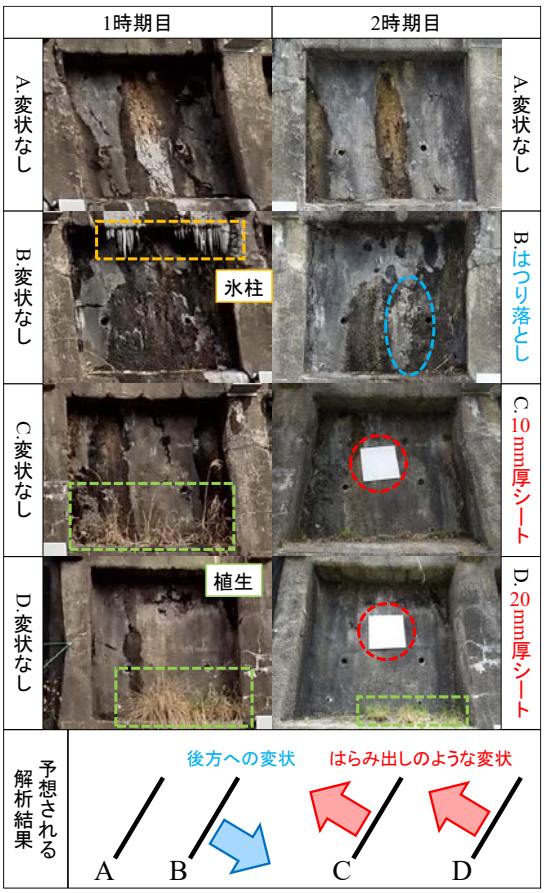

図-6　枠内に設置した模擬変状

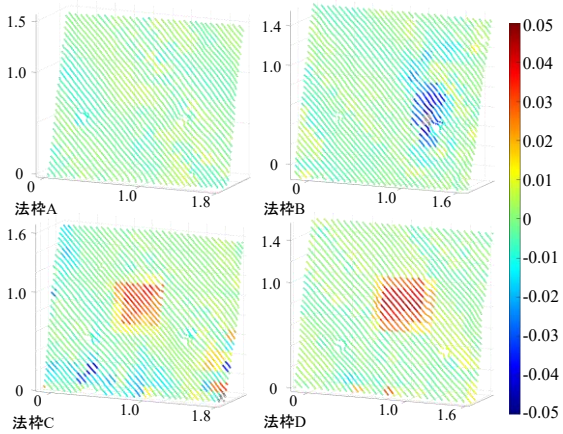

図-7　2 時期間の模擬変状の解析結果(m)

結果は**図-7** のと通りである．それぞれ予想していた通り．法枠 A では変状が検証されず，法枠 B，C，D でははつり落としを行った箇所，シートを設置した箇所が変状として表れている．

5. アンカー設置後の法面変化抽出の検証

本法面は 2 時期目計測後，アンカーを打設した．その後の 2019 年 7 月 10 日に MMS 計測を行ない，点群を取得

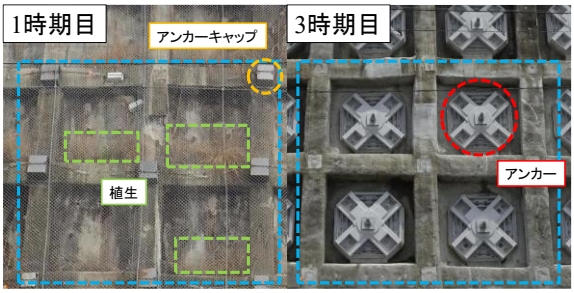

図-8　アンカー設置前後

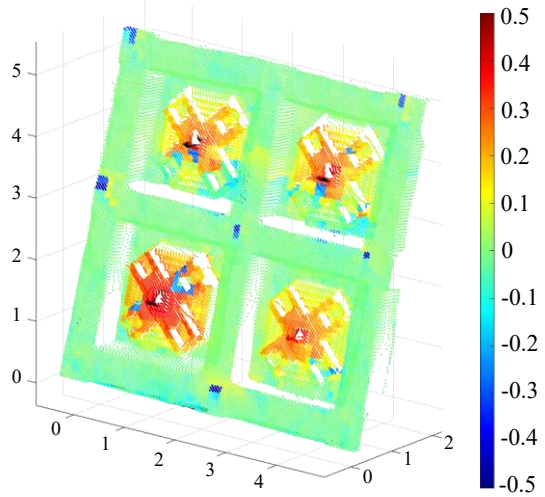

図-9　アンカー設置後の変状抽出の解析結果(m)

した．この点群を 3 時期目の点群として，1 時期目の点群と比較することでアンカー打設前後の変化を抽出できるか検証した．アンカー打設前後の法面の変化点は法枠交点のアンカーキャップの撤去，法枠内アンカーの新設である(図-8)．その解析の結果は図-9 の通りである．まず法枠内アンカーを新設した箇所に着目する．今回注目した法枠のうち，左下以外は植生の影響もあり，十分な変状としてとらえられていないものの，アンカーを新設した箇所を法面前面に変位する変状として抽出することができている．続いて法枠交点のアンカーキャップについて着目する．1 時期目には設置されており，3 時期目からは撤去されたため，法面後方へ移動した変状として抽出されているが，すべてのアンカーキャップが抽出できているわけではなかった．

6. 結論

本研究では現在の法面点検において定性的であることと効率性に関して課題があることを背景として，MMS で取得した点群を使用し，ICP 手法で法面の 2 時期間の変状抽出を試みた．法面点検の補助，スクリーニング手法としての活用が期待できるかを目的として，MMS と ICP に関わる 2 つの検証を行なった．

1 つ目の検証では MMS 計測で得られる点群の精度を求めた．その結果，MMS 計測の精度は RMS 誤差で表し，地面と水平方向(ΔXY)で 12mm，標高方向(ΔZ)で 24mm 以下であった．

2 つ目の検証では模擬変状を用いて，ICP 手法で 2 時期間の法枠の比較をすることでこれらの変状を抽出できるかを検証した．その結果，ICP 手法で 10mm の厚さ，一辺 0.5m の法面前面に変位する変状と法面後方に変位する変状を抽出することができた．

この 2 つの検証結果をもとに法枠内アンカーが新設された 3 時期目の点群の変化点抽出を試みた．その結果，新設アンカーと法枠交点のアンカーキャップの撤去を変化点として抽出することが確認できた．

以上より，法面を MMS で点群として取得し，ICP アルゴリズムによって変状を抽出するという本手法は法面点検の補助，スクリーニング手法としての活躍が期待できる．本手法は MMS という効率的に測量できる機器を使用しているため，法面点検のパトロールを MMS 車両の普通走行で置き換えることができる．そこで取得できる点群は座標値を持つ定量的なデータであるため，ICP アルゴリズムにより解析することで 2 時期間の変状を数値で取得することができる．この点群と変状量データを蓄積して，長期的な管理を行なうことで維持管理に効果を発揮すると考えられる．また今後の展望として河川堤防や道路など維持管理対象物への本手法の適用例を増やしていきたい．

参考文献

1) 国土交通省近畿地方整備局近畿技術事務所：道路法面維持管理のためのハンドブック(案)，2009.
2) 気象庁：気候変動レポート 2020.
3) 国土交通省道路局：道路土光構造物点検要項，2018.
4) 国土地理院：地上レーザスキャナを用いた公共測量マニュアル(案)，2018.
5) 石川貴一朗，天野嘉春，橋詰匠，瀧口純一，清水聡：モービルマッピングシステムによる都市空間モデリング，計測自動制御学会産業論文集，Vol.8，No.17，pp132-139，2009.
6) 橘菊生，間野耕司，島村秀樹，西山哲：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，Vol.54，No.4，p166-177，2015.
7) 今村一紀，佐田達典，江守央：MMS による 3 次元点群データを用いた道路構造物抽出に関する研究，土木学会論文集 F3(土木情報学)，Vol.71，No.2，ppI_106-I_113，2015.