

第68回(2024年度) 北海道開発技術研究発表会論文

地すべりにおける擁壁変状の 点群計測精度に関する分析

国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 防災地質チーム ○坂本 尚弘
川又 基人

近年は多様な点群取得機器が普及しているが、それらの防災カルテ点検への効果的な活用のためには、機器ごとのスキャン密度や3次元座標精度などの特徴を把握し、カルテ点検における「着目すべき変状」のどの項目に有効かを把握する必要がある。本報告では、地すべりの点検着目箇所である擁壁を対象とし、変形・傾斜・目地ズレの観点から4機種の点群取得機器による5種類の点群データを比較・分析した。その結果、10cm程度の積みブロック破損、擁壁の歪みによる変形、擁壁壁面における2°以上の傾斜変化の把握が可能であることが分かり、地すべりの防災カルテ点検において点群データが有効である可能性を示唆した。

キーワード：防災カルテ点検、高密度三次元点群データ、LiDAR、地すべり

1. はじめに

令和4年に道路防災点検の手引き¹⁾(以下、手引きと略す)が改訂され、防災カルテ点検(以下、カルテ点検と略す)を含めた道路防災点検の効率化や高精度化を目的とした、3次元点群データ(以下、点群データと略す)の活用が求められている。

従来のカルテ点検では、点検着目箇所において目視確認やコンベックス等による計測を行い、前回の点検写真やスケッチとの比較により変状の進行を判断している。しかし、着目箇所以外では前回点検写真が残されていないため、過去の点検結果との比較は難しく、着目箇所以外の災害の兆候を見逃す懸念がある。加えて、カルテ点検対象箇所は膨大であり、技術者や道路管理者の負担を軽減しつつ点検の確実性を担保する方法が求められている。そこで、これらの課題の解決に寄与しうる手法の1つとしてあげられるのが点群データの活用である。点群データは、3次元座標を有する高密度な点群により計測対象の形状を再現することができ、微地形の把握や二時期のデータ間の変状量を定量的に算出することが可能である²⁾。

これまで点群データと言えば航空LP(以下、LPと略す)により取得したものが代表的なものであったが、近年は車両搭載型や手持ちによるものなどの点群取得機器が普及しており、機器の選択肢が増え、点群データを用いた斜面点検への効果的な利活用が期待される。しかし、現状では、これらの新しい点群取得機器により取得された点群データをカルテ点検へ活用する試みは進んでいない。この原因は二つ挙げられる。第一に、各種点群

取得機器に対して、それらの計測で得られた点群データを統一的に比較した事例は少なく、点検に用いる上で重要となる点密度やデータ取得方法の違いなど、機器の特徴が十分に理解されていないためである。第二に、点検において具体的にどのような変状を捉えられるのか明確になっていないためである。

そこで、本報告では、防災カルテ点検の対象となっている地すべりにおいて、4機種の点群取得機器を用いて、積みブロック破損、擁壁の変形歪み、擁壁表面の傾斜及び目地等のズレに関して5種類の点群データを比較し、防災カルテ作成・運用要領のチェックリスト³⁾に記載のある地すべりの「変形・傾斜・目地等のずれ」(表-1)を捉えられるのかを分析した。

表-1 地すべりにおける着目すべき変状のチェックリスト
(案)³⁾(一部抜粋)

発生箇所	変状種別
	種別
自然斜面・植生のり面	亀裂・陥没・隆起
	植生等の異常
	落石・崩壊
	湧水・地表水
対策工・舗装路面・構造物等	亀裂・陥没・隆起
	変形・傾斜・目地等のずれ
	落石・崩壊
	湧水・地表水
	対策工の機能

2. 手法

北海道内の国道で防災カルテ点検の地すべりに関する点検箇所において、地すべりの擁壁間の目地ズレを着目すべき変状としている擁壁を対象に分析した(写真-1)。4機種の点群取得機器により取得された5種類の点群デ

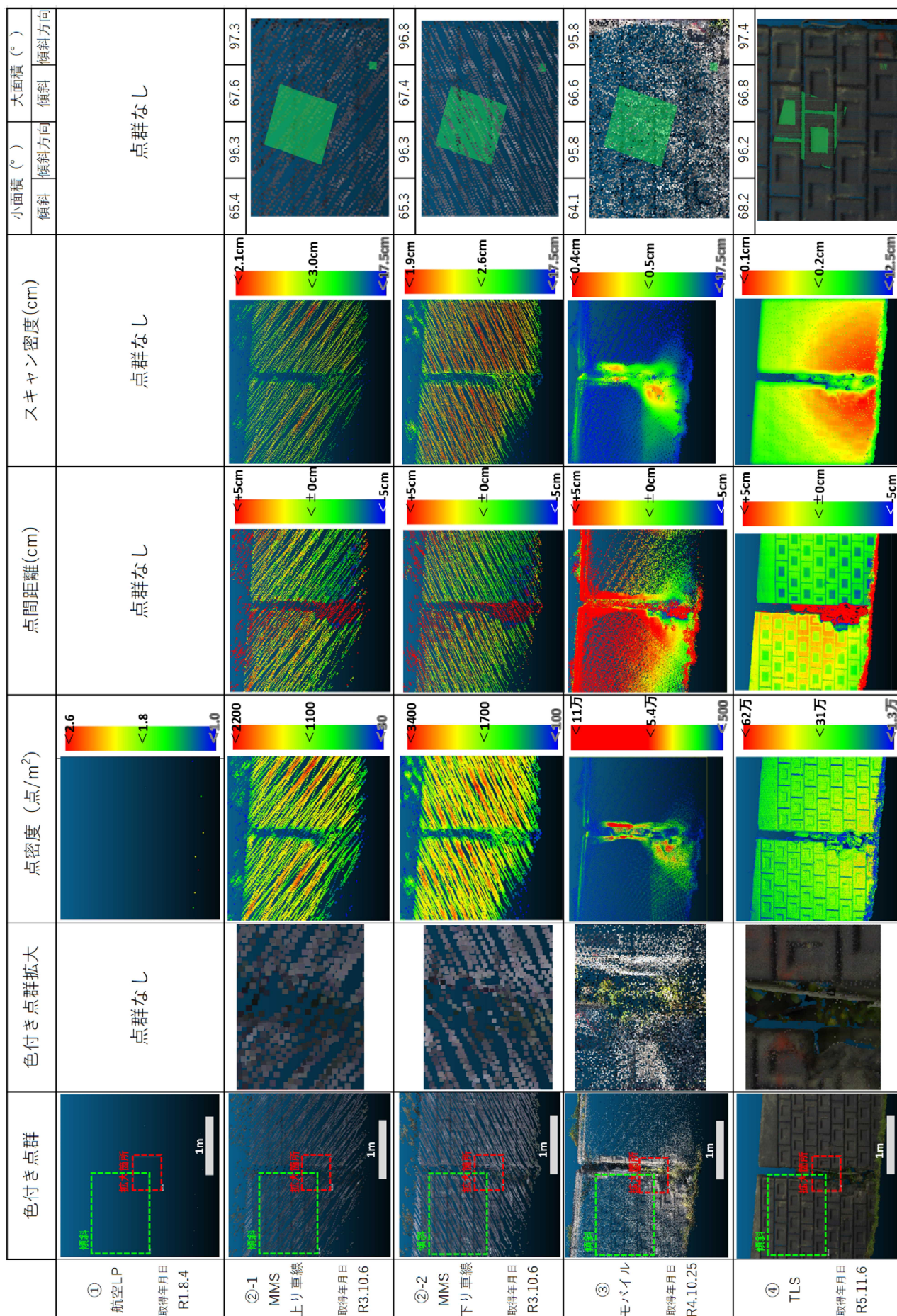


図-3 各種点群取得機器による点群データの比較

Geometric features 機能を用いて半径 0.1m の円に含まれる点群数を算出した。この単位面積あたりの点群数を基に、1㎡ 当たりに含まれる点数に換算し、その平方根から 1m 当たりの平均点数を求め、スキャン密度とした。

(4) 傾斜・傾斜方向

Cloud Compare を用いて、任意に設定した仮想面に対し、丹波の抽出手法⁵⁾により傾斜及び傾斜方向を算出した。傾斜の分析位置は、TLS の点群データで視認できる擁壁積みブロック横の大きさ 0.1m×0.1m 程度の「小さな平たい面」と、大きさ 0.5m×0.5m 程度の「大きな面」の 2 箇所で計測した。

3. 結果

5 種類の点群データについて、色付き点群・点密度、点間距離とスキャン密度及び擁壁の傾斜について分析した結果を図-3 に示す。

(1) 色付き点群・点密度

LP の点密度は約 2 点/㎡ であった。点群データに色情報はなく、路肩にはまばらに点群があるものの擁壁本体には点群がないため擁壁の存在を判読できなかった(図-3①)。

MMS データ上り車線の点密度は約 50 から 2,200 点/㎡ であり、左上から右下方向の斜め方向に筋状の点群データを取得していた。破損箇所を拡大しても破損箇所を正確に読み取るのは難しい(図-3②-1)。

MMS データ下り車線の点密度は約 100 から 3,400 点/㎡ であった。上り車線より約 1.5 倍点密度が高かった。右上から左下方向の斜め方向に筋状の点群データを取得していた。擁壁の存在は確認できるが拡大しても積みブロックの模様は読み取りづらい。下方の青色は路肩にある植生の影響と思われる。積みブロックの模様や破損箇所は上り車線から取得したものと同様に読み取りづらかった(図-3②-2)。

モバイルデータの点密度は約 500 から 11 万点/㎡ だった。図中の色付き点群拡大箇所は数万点/㎡ の点密度を有しており写真と同様な擁壁の損傷形状が読み取れ、ペイントされた赤い線や擁壁の模様・浮いた発泡目地材も読み取れた。しかし、点密度の密疎差は大きく、破損箇所以外の壁面部分は判読困難だった(図-3③)。

TLS データの点密度は約 1.3 万から 62 万点/㎡ で擁壁下方の点密度は高かった。比較した 4 機種の中で、最も色付き点群が鮮明かつ点密度が高かった。擁壁の陰影が明確かつ積みブロックの形状が明瞭に読み取れ、白抜け部分もなかった(図-3④)。

(2) 点間距離とスキャン密度

MMS 上り車線及び MMS 下り車線は、左側擁壁右上と右

側擁壁右上は 5cm 以上の点間距離を示す赤色を示したほか、概ね似たような配色傾向となった。また、目地部の積みブロック破損箇所を捉えられていた。スキャン密度は上り車線 3.0cm、下り車線 2.6cm となり擁壁に近い下り車線側の方が計測精度が高かった。(図-3②-1、②-2)。

モバイルデータは、左側擁壁の上半分が広域に 5cm 以上の点間距離を示す赤色を示した。目地部の積みブロック破損箇所はよく捉えられている。スキャン密度は 0.5cm となった(図-3③)。

TLS データは、左側擁壁の中間部が横広に 5cm 以上の点間距離を示す赤色となった。積みブロックの形状もよく再現できており、目地部の破損箇所もよく捉えられている。スキャン密度は 0.2cm だった(図-3④)。

LP は擁壁本体に点群がなく、算出できなかった(図-3①)。

(3) 擁壁の傾斜

傾斜及び傾斜方向を表-6 に示す。平均との偏差は、大きな面では平均に対して 1° 以内に収まっていた。小さな平たい面のモバイル及び TLS の傾斜においては 1.7° 及び 2.4° を示し平均との偏差が大きかった。

表-6 各種点群取得機器における傾斜平均との差

	3次元による計測				平均との差			
	小さな平たい面		大きな面		小さな平たい面		大きな面	
	傾斜	傾斜方向	傾斜	傾斜方向	傾斜	傾斜方向	傾斜	傾斜方向
MMS上り	65.4	96.3	67.6	97.3	0.4	-0.1	-0.5	-0.5
MMS下り	65.3	96.3	67.4	96.8	0.5	-0.1	-0.3	0
モバイル	64.1	95.8	66.6	95.8	1.7	0.4	0.5	1
TLS	68.2	96.2	66.8	97.4	-2.4	0	0.3	-0.6
平均	65.8	96.2	67.1	96.8	-	-	-	-

(4) 点群判読の評価

機種ごとの点群、点間距離及びスキャン密度の結果と評価の詳細について表-7 に記載する。なお、スキャン密度は目地ズレ境界部に多く分布する緑色の値を記載した。

表-7 点群判読の評価

	点群（擁壁の判読）			点間距離 (破損判読)	スキャン 密度 (c m)
	存在の 判読	模様の 判読	破損 判読		
LP	×	×	×	×	×
MMS上り	○	△	△	△	2.6
MMS下り	○	△	△	△	3.0
モバイル	○	△	○	○	0.5
TLS	○	○	○	○	0.2

4. 考察

(1) 積みブロック破損と擁壁歪みによる変形

積みブロックにおいて横 10cm×縦 20cm 程度の破損が認められた(写真-1 中)。色付き点群において、MMS では欠損状況は不明瞭であったが、モバイルでは確認できた。先行研究では 10cm 程度の対象物の形状を正確に捉える上での点群数の目安が 1 万点/㎡と報告されており⁹⁾、モバイルで積みブロックの欠損状況が明瞭に確認できたのは 5 万点/㎡以上の点密度での点群取得ができていたためと考えられる(図-3③)。一方で、点群数が数百から数千点/㎡の MMS データにおいても、仮想平面からの点間距離を求めることにより破損箇所に対して点間距離の明瞭な差(5cm 以上の点間距離)として破損箇所を抽出することができた(図-3②-1、②-2)。

次に、擁壁の歪みについて、MMS 上り車線、下り車線及び TLS は左側擁壁の中間部と右側擁壁右上に 5cm 以上の点間距離を示す赤色が分布しており、両者はある程度同様の傾向を示していた(図-3)。一方で、モバイルは赤色の範囲が壁面全体に広く表示され MMS 及び TLS とは傾向が異なった。モバイルの点密度(図-3③)において、擁壁上端部を拡大すると点群が 2 重になっていた(図-4)。これは、同一の壁面を 1 往復以上移動しながら計測したため、その間に位置推定等による誤差が生じた影響と考えられる。MMS も移動を伴う計測であるが、モバイルよりも高精度の IMU(慣性測量装置)等を搭載していることに加え、一方向への移動の計測のため、モバイルで確認されたような計測の誤差は相対的に少ないと考えられる。また TLS は計測器を三脚に据え付けての計測であるため、移動に伴う位置推定の誤差は生じない。

すなわち、点群取得機器の性能及び点群取得方法の違いが、壁面歪みの再現性に影響したと考えられる。以上を踏まえ、モバイルは局所的な計測には向いている一方で、着目点外の定量的な計測という観点ではその計測誤差を含めた慎重な議論が必要であると言える。

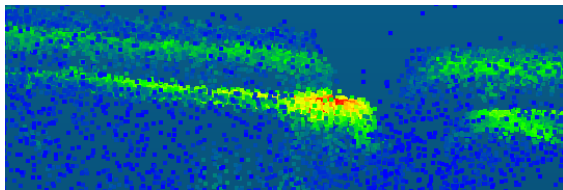


図-4 擁壁上端部が2重になった点群

(2) 擁壁の傾斜

各種点群取得機器における傾斜の平均との偏差はモバイル及び TLS では小さな平たい面においてそれぞれ 1.7° 及び 2.4° となり、大きな面よりもその偏差は大きくなった(表-7)。これは対象とする面の面積が小さくなると、それぞれの位置情報やデータ間の重ね合わせに伴う誤差の影響が大きくなることを意味する。

一方で、小さな平たい面の範囲での傾斜の算出においても、4 種類のデータのそれぞれの傾斜角度の偏差は

2° 程度に収まった。そのため、擁壁に 2° 以上の変状が発生した場合、その把握ができる可能性がある。

(3) 目地等のズレ

既存の点検においては、着目する目地のズレ幅には、コンベックスを当て 1mm 単位での計測を行っている(写真-1 中)。図-3 に示したスキャン密度は点群データにおける計測可能な目地ズレ幅の限界値を意味する。コンベックスによる 1mm よりもスキャン密度の値が大きい場合は正確な計測はできない。本報告の点群取得機器のうち、スキャン密度は TLS は 2mm、モバイル機器は 5mm、MMS 下り車線は 26mm であった。よって、この条件においては、いずれの機器でも 1mm 単位での計測には限界があり、目地等のズレ幅を点群により把握することは困難であることを明らかにした。

表-8 点群取得機器の評価

	変形		傾斜		目地ズレ
	破損	擁壁歪み	小さな平たい面	大きな面	
LP	×	×	×	×	×
MMS上り	△	△	○	○	×
MMS下り	△	△	○	○	×
モバイル	○	△	△	○	×
TLS	○	○	△	○	×

(4) 各種点群取得機器の評価

上記(1)から(3)に記述した機種ごとの特徴から変形・傾斜・目地ズレについて評価を行った(表-8)。

まず、LP は上空から点群レーザーを照射するため、約 70 度の傾斜がある擁壁の壁面にはレーザーが照射されず、従来のカルテ点検の項目を満たすのに必要と考えられる点密度を確保出来なかった。

次に、MMS の点密度は、モバイルや TLS と比べて低いいため、積みブロックの模様の判読は困難だが(表-6)、擁壁の歪み変形及び傾斜を読み取ることが出来た(表-8)。また壁面の仮想平面を近似し、それとの点間距離の計算により、積みブロックの破損状況等も把握可能であった。さらに MMS データは公共測量精度に基づく位置情報を有しており、カルテ点検の対象項目の擁壁においては、着目箇所に対する定量的な指標に基づく点検の実現が期待できる。

また、モバイルは他の点群取得機器と比べて経済性・機動性に優位性があり、容易に点群を取得できる。特に、損傷箇所等の着目箇所を集中的に点群取得することで 5 万点/㎡以上を確保でき、10cm 程度の擁壁の損傷の状況を把握ができた。一方で計測範囲が狭く、また移動計測に伴う位置推定の誤差等の懸念もある(図-3③)。点群取得する際は、誤差が少なくなるような計測方法を採用

することで、定量的な議論に資する高精度の点群データを得られることが期待できる。

その他、TLS は最も点密度が高く、破損箇所及び積みブロックの模様も明確に判読できた（図-3④）。一方で、位置情報のないデータを Cloud Compare による位置合わせ機能を用いた場合の傾斜や方位の計測は人為的な位置合わせの誤差の影響を考慮する必要がある（表-7）。以上の課題は、現地計測段階で評定点の設置・観測を行い位置情報を取得することで解決が可能である。また、それぞれのデータ容量に着目すると、TLS は点密度が高いためデータ容量も大きく、2 番目にデータ容量の大きいモバイルと比較しても約 15 倍の差がある（表-5）。対象箇所に適した点密度でのデータ取得を行うことが、今後の点群データの効果的な運用においても重要と考えられる。

5. 点検における点群データの効果的な活用に向けて

北海道内の国道において、MMS データは R1 年から R4 年にほぼ全線で取得済み⁸⁾であり、点検着目外箇所の点群データを得られる。加えて、MMS データは公表⁹⁾されており点群データは誰でも入手できる。そこで具体的な利用方法として、既存 MMS 点群データを「初期値」とし、モバイル等により着目箇所に対して随時データを取得し、それら点群データを蓄積・比較していくことが挙げられる。これにより、従来では限られた箇所のみだった「定量的な指標」に基づく点検結果の判断が可能となる。

図-5 に複数の点群データを組み合わせる表示させた例を示す。モバイル+LP の計 2 種類（図-5 左）では LP により道路面など全体の高低差がわかるものの、LP は色無し点群であるため細かな状況がわかりにくい。一方で、モバイル+LP+MMS の計 3 種類（図-5 右）では、MMS のデータにより斜面や道路との位置関係が明確になった。このように MMS のデータを基にその他のデータを組み合わせ、データを蓄積していくことが、カルテ点検や維持管理を行う上で有効であると考えられる。一方で、それらのデータを空間的・時間的に一元管理することが、データ蓄積型の点検¹⁾を実現する上で重要であり、今後検討していくことが望ましい。

今後は、どの点群計測機器で取得した点群データが、カルテ点検における「着目すべき変状」のどの項目に効果的に活用できるのかを明らかにし、カルテ点検に適した現場データ取得手法、変状解析手法、評価手法について検討を進めて行きたい。

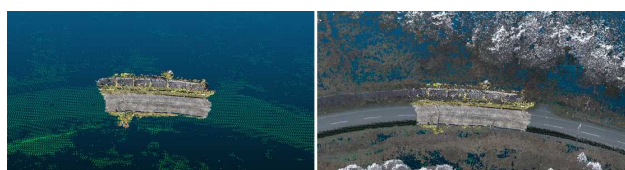


図-5 MMS データの有無による見え方の比較

5. まとめ

本報告の結果は以下のようにまとめられる。

- ・擁壁の変形のうち破損においては、モバイルにより取得した点群データに 10cm 程度の欠損状況を明確に確認できた。TLS では擁壁歪みの変形傾向が読み取れた。
- ・壁面に 2° 以上傾斜の変化が生じる場合には点群データによる変状の把握が可能と考えられる。
- ・実測値 1mm の目地ズレに対し、点群データでは最大でも 2mm のスキャン密度となり、本報告の条件では点群取得機器による把握は困難であると考えられる。
- ・今後は、カルテ点検に適した現場データ取得手法、変状解析手法、評価手法について検討を進めたい。

謝辞：国土交通省北海道開発局建設部道路維持課には、資料提供に快く協力していただいた。この場を借りて御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 一般社団法人全国地質調査業協会連合会：道路防災点検の手引き（豪雨・豪雪等）〔改訂版〕 -DX 時代に向けたチャレンジ、145p.、2022.
- 2) 西山哲：災害に関する調査技術および調査データの活用 災害に対する調査・モニタリング技術の現状と今後の課題、地盤工学会誌、第 71 巻、第 1 号、pp.2-6、2023.
- 3) 財団法人道路保全技術センター：防災カルテ作成・運用要領、208p.、1996.
- 4) 国土交通省：3 次元計測技術を用いた出来型管理要領（案）令和 6 年 3 月版、1422p.、2024.
- 5) 丹波正和：スマートフォンを用いた簡便な面構造データ抽出方法、応用地質、第 65 巻、第 2 号、pp.64-70、2024.
- 6) 坂本尚弘、川又基人、倉橋稔幸：防災カルテ点検における着目すべき落石の大きさの分析、第 67 回北海道開発技術研究発表会、pp.697-700、2023.
- 7) モバイルスキャン協会：モバイル端末スキャンマニュアル、10p.、2022.
https://mobilescan.jp/sdm_downloads/manual/（令和 7 年 1 月 6 日閲覧）
- 8) 一般財団法人日本デジタル道路地図協会：MMS による三次元点群データ等の提供のご案内
<https://www.drm.jp/pointcloud/>（令和 6 年 7 月 5 日閲覧）