

(62) 多視点画像三次元モデルを用いた目視調査支援システムの石積み擁壁への適用性の検証

西岡 英俊¹・宮崎 貴弘²・笠原 康平³
増田 雄輔⁴・神馬 和歌子⁵・望月 拓実⁶

¹正会員 中央大学理工学部都市環境学科 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

E-mail: nishioka_lab_civil_chuo_u@yahoo.co.jp

²非会員 元・中央大学理工学部都市環境学科 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

³正会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

⁴正会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

⁵非会員 アジア航測株式会社基盤システム開発部 (〒215-0004 川崎市麻生区万福寺 1-2-2)

⁶非会員 アジア航測株式会社基盤システム開発部 (〒215-0004 川崎市麻生区万福寺 1-2-2)

石積み擁壁の維持管理において、汎用カメラで撮影した多視点画像データから SfM (Structure from Motion) 技術で構築した三次元モデルを用いる目視調査支援システムを活用して、定期的な目視検査で変状を定量的に把握することが期待されている。本研究では、主に画像の撮影条件が三次元モデル生成精度およびそれによる積石の変位計測精度に及ぼす影響に着目し、実際の石積み擁壁(高さ 4.5m)で積石の抜出しの変状を模擬した上で、このシステムの適用性を検証した。その結果、壁面に沿って徒歩巡回している際にカメラを壁面に正対させて撮影することができれば、石積み擁壁との撮影距離が 8 m の場合でも 30 mm 程度の変位を検出可能であり、積石の抜け出し等の変状を把握できる可能性があることがわかった。

Key Words: SfM(Structure from Motion), 3D model, masonry retaining wall, visual inspection

1. はじめに

構造物の維持管理として一般的にすべての構造物を対象に、主に異常や不具合を抽出することを目的として定期的な目視点検が行われている。石積み擁壁・ブロック擁壁については、例えば「鉄道路留め擁壁の検査・修繕の手引き」において、通常全般検査における調査項目の例として「石積・ブロック積のゆるみの有無、石積・ブロック積の欠落・欠損の有無」が示されている¹⁾。

これらの石積み擁壁・ブロック擁壁の変状を定量的に把握するには、それを構成する間知石やコンクリートブロックそのもの(以下、積石という)の変位を計測することが有効と考えられるものの、その計測対象が膨大であるため従来の目視点検・レーザー測量では費用・時間等の制約から実質的に計測することは不可能であった。このような現状を打開する新技術として、汎用カメラで撮影した多視点画像データから SfM (Structure from Motion) 技術で構築した三次元モデルを用いる目視調査支援シス

テムの活用が期待されている^{2,3,4)}。ただし、その検証事例はまだ十分ではないことから、本研究では石積み擁壁を対象として、主に画像の撮影条件が三次元モデル生成精度およびそれによる積石の変位計測精度に及ぼす影響に着目して、その適用性を検証した。

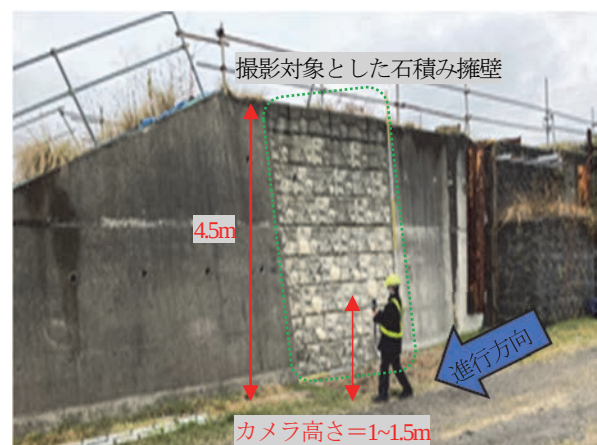


図-1 撮影対象とした石積み擁壁と撮影状況

2. 対象構造物と撮影条件

対象構造物は、鉄道総合技術研究所の盛土試験場にある石積み擁壁（高さ約5 m、図-1）である。撮影は、構造物から2, 5, 8 m離れた距離でそれぞれ行った。また、カメラを壁面に正対させながら壁面に沿って歩行して動画撮影した場合（以下、「正対撮影」と）、ヘルメットにカメラを取り付け、実際の目視検査を想定して首を振る動作を行いながら壁面に沿って歩行して動画撮影した場合（以下、「検査想定」）の2種類の撮影方法とした。撮影時のカメラの高さは概ね地表面から1 m~1.5 m程度で、歩行速度は1.2 m/s程度であった。

使用したカメラは、SONY製FDR-X3000Rで、撮影モードは【4K最高画質モード、フレームレート：30 fps、画角：広、ブレ補正：強】の設定で動画撮影を行った。このほか、比較のための真値として、Artec社製3Dスキャナーを用いたレーザー測量を実施した。

3. SfM解析と精度評価の方法

本研究では、SfM解析にはAgisoft社製Metashape（ver. 1.5.5）を使用した。なお、SfM解析時には、レンズ歪の影響を補正するカメラレンズキャリブレーションを行った。また、モデルによっては影など不要な部分のデータを手動で削除した。生成した三次元モデルの一例を通常

描画とワイヤーフレームの各表示形式で図-2に示す。

本研究では、モデル化精度の定量的評価を行うため、壁面上に測線を設け、ある区間内に基準点を2点を取り、2点を結ぶ直線を基線として各評価点と基線の差分により壁面の凹凸の形状の再現精度を評価した。なお、SfM解析による評価点の座標値はワイヤーフレームと測線の交点である。一方、レーザー測量による評価点は、基準点を含む幅約1 mmの帯状の範囲の点群データとした。さらに各ケースで生成される三次元モデルの分解能の違いを評価する指標として、基準点間の評価点の数を基準点の距離で除した値を（見かけ上の）点密度（単位：点/m）とした。この点密度の値が大きいほど分解能が高く、凹凸形状の再現精度が高いことを表す。

SfM解析に用いる静止画像は、4K動画から一定のフレームレートで抽出した。本研究では、SfM解析時間短縮のため、撮影時のフレームレート（30 fps）の1/5となる6 fpsで静止画を抽出した。歩行速度は1.2 m/s程度であったことから、6 fpsで抽出した場合には、カメラの移動距離1 mあたりの画像枚数は約5枚（ $= 6 \text{ 枚/s} \div 1.2 \text{ m/s}$ ）となる。例として、撮影距離8 mの正対撮影時に6 fpsで抽出した場合について、SfM解析により得られたカメラ位置を図-3に示す。なお、抽出枚数の削減がモデル化の精度に及ぼす影響については、別途鉛直断面での比較により、概ねカメラ設置高さ付近では点密度の有意な低下が生じないこと、および撮影距離を5 m以上確保すれば高さ4.5 mまでのモデル化が可能であることを事前に確認している。この確認結果の一例を図-4に示す。



a) 通常描画表示 b) ワイヤーフレーム表示

図-2 生成した三次元モデルの例

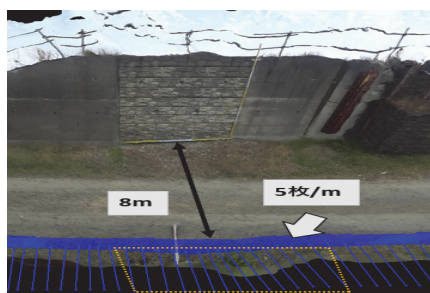


図-3 撮影距離8 mにおける5枚/mで作成したモデルとカメラ位置（図中の青い四角）

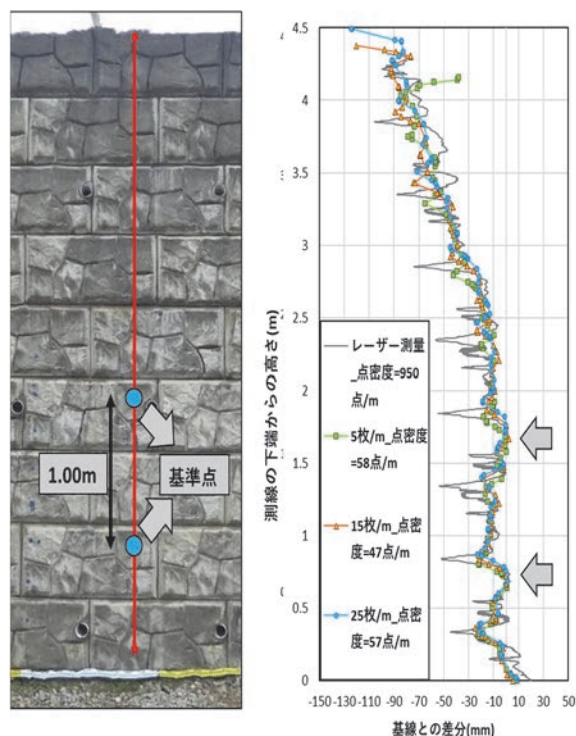


図-4 画像抽出枚数がモデル化に及ぼす影響（撮影距離5 m）

4. 正対撮影時の撮影距離が積石の抜け出しの評価精度に及ぼす影響

ここでは、撮影時の構造物からの距離が積石の抜け出し量の評価精度にどのような影響を与えるかについて検討する。積石の抜け出しの変状は、図-5に示すように積石の表面に工芸用粘土を厚さ約10 mm、30 mmに調整して貼り付けることで模擬した。断面解析（指定した断面における点群座標の出力）を行う測線は、図-6に示すようにカメラ位置に近い高さ1.5 m付近で、粘土の貼り付け位置を跨ぐように水平方向に設定した。

SfM解析に用いる静止画像は、「正対撮影」で構造物との撮影距離2, 5, 8 mで粘土の貼り付け前後（以下、粘土有り、粘土無しという）を撮影した動画から6 fps（カメラの移動距離に対する画像枚数が5枚/m程度）で抽出した。各ケースの断面解析の結果をレーザー測定の結果および点密度とともに図-7に示す。

図-7より、構造物との撮影距離が2 mの場合、積石間の幅が狭い溝における凹凸形状の再現は困難であったが、粘土の厚さ（約 10mm、30 mm）をほぼ正確に捉えることができていたことがわかった。また、構造物との撮影距離が8m程度まで離れても積石自体の抜け出し量が30 mm程度となれば、その前後で撮影された画像から作成された3次元モデル同士を比較することによって、明らかな変状として検知可能があることがわかった。



a) 粘土貼り付けの様子

b) 壁面全体図

図-5 粘土による積石抜け出しの模擬状況

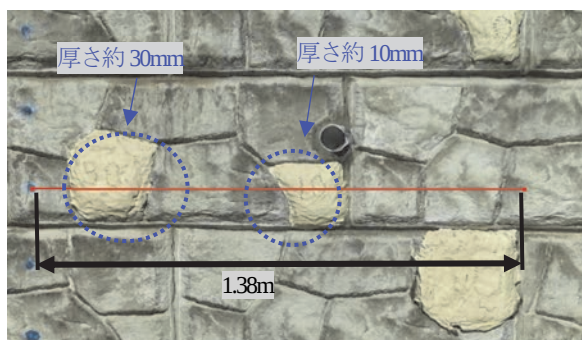


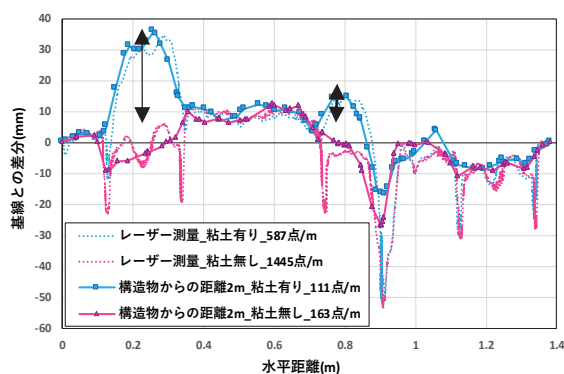
図-6 積石抜け出しの断面解析を行った測線（図中赤線）

5. 検査想定での撮影におけるモデル構築精度

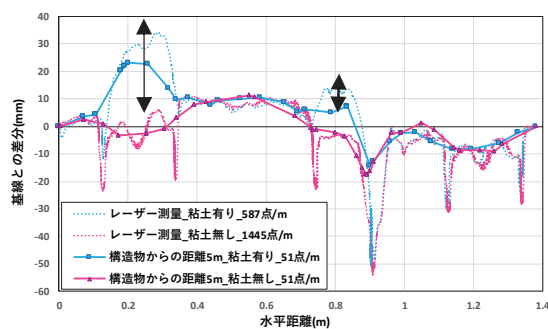
ここでは目視調査の徒歩巡回を想定した「検査想定」の撮影条件が三次元モデル構築精度に及ぼす影響について検討する。具体的には、粘土無しの条件での図-6に示す水平方向の測線で6 fpsで抽出した静止画を用いて断面解析を行い、凹凸形状の再現精度の比較を行った。

図-8 a)に構築された三次元モデルと使用したカメラ位置を示す。図-8 b)より「検査想定」の撮影条件では正対撮影条件と比べて点密度の値が小さくなるほか、凹凸の傾向は再現できるものの絶対変位量の誤差も大きくなっており、モデルの精度が低下したことがわかる。なお、カメラの移動距離に対する画像枚数を増やしてモデルを作成しても、モデルの精度は改善しなかった。

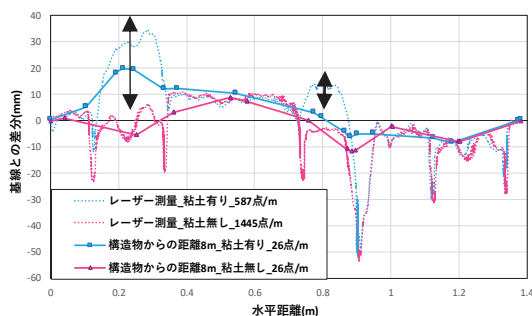
このように、「検査想定」の撮影条件で生成されたモデルの精度が低くなった理由としては、正対撮影と比べ



a) 撮影距離 2m



b) 撮影距離 5m

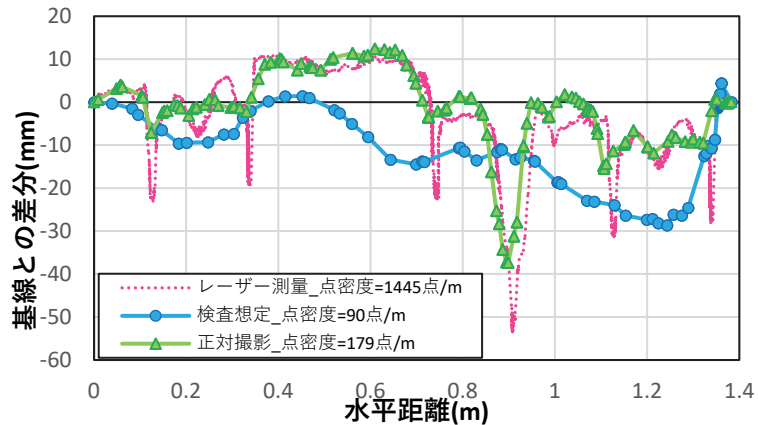


c) 撮影距離 8m

図-7 粘土貼り付け前後での壁面の凹凸形状の比較



a) 三次元モデル (カメラ位置)



b) 水平方向における凹凸形状の比較

図8 構造物との撮影距離2mで「検査想定」の撮影条件から作成されるモデルと水平方向の凹凸形状の比較

て地表面や別の構造物が多く映り込むことにより、モデルの対象を擁壁と認識出来ず、画像のアライメントの際に大きく歪みを生じたことが考えられる。また、画角が大きく変化し、かつその変化速度も一定ではない動画から一定のフレームレートで静止画を抽出したことにより、部分的に撮影密度が低い静止画像群を含めてモデル化したことでカメラ位置の推定誤差が大きくなったことも要因の一つと考えられる。

6. おわりに

本研究では、高さ4.5 mの石積み擁壁を対象として、撮影条件やモデルの作成条件によってモデル精度に影響を与えるかどうかを検討した。「正対撮影」の場合、モデル精度は、構造物との撮影距離に大きく依存することがわかった。また、構造物との撮影距離が8 m程度まで離れても異なる時点で撮影された画像を比較することでその間に生じた30 mm程度の変位量を検出可能であり、目視検査において積石の抜け出し等の変状を捉えることが期待できることがわかった。

現在、変位量に関する定量的な基準は定められていないが、模型石積み擁壁で積石自体を引き抜いた実験⁹⁾では最大耐力を発揮する際の引抜き変位量が45 mm程度であったことや、従来の目視検査では元々の表面の凹凸が大きい石積み擁壁において30 mm程度の積石の抜出しを定量的に把握すること自体が困難と考えられることなどを踏まえれば、本システムの精度(30 mm程度の積石の抜出しを変状として検知可能)は十分に有益なものと考えられる。特に鉄道沿線の石積み擁壁の検査業務を想定すると、これまでも定期的実施していた線路脇の徒歩巡回の際に線路を挟んで反対側の石積み擁壁をカメラを正対させながら撮影するだけで、積石の抜出しの変状の有無に関する定量的な情報が得られることは、維持管理

業務の信頼性向上に大きく貢献するものと考えられる。

一方、「検査想定」の場合、画像枚数がモデル生成に大きく影響を与え、画像枚数を増やすことでモデルが大きく歪み、正常にモデルが作成されない可能性があることがわかった。カメラの向きが変化する撮影条件の場合には、撮影した動画の中からSfM解析に適した静止画像群を如何に効率的に抽出するかが精度向上の重要な課題と考えられる。その方法の一つとして、画像変化量に着目した抽出⁹⁾を行うことで精度向上できる可能性があると考えており、今後検討を深めていく予定である。

謝辞：比較検証用のレーザー測量の実施は、(株)オーピーティーに協力いただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 国土交通省鉄道局監修，鉄道総合技術研究所編：鉄道土留め擁壁の検査・修繕の手引き，鉄道総合技術研究所鉄道技術推進センター，p.29，2013.
- 2) 佐藤登，藤田智弘，宮武裕昭：道路土工構造物を対象とした簡易的写真測量手法に関する研究，第60回地盤工学シンポジウム平成28年度論文集，地盤工学会，pp.147-152，2016.
- 3) 新名恭仁，野中秀樹，小林裕介，長峯望，西岡英俊：多視点画像 3次元モデルの土木構造物維持管理への適用に向けた提案と試行結果，土木学会論文集 F4 (建設マネジメント)，Vol.74, No.2, I_19-I_30，2018.
- 4) 小林裕介，増田雄輔，笠原康平，向嶋宏記，西岡英俊，望月拓実：3Dデジタル可視化技術で鉄道構造物の目視検査を支援する，*Railway Research Review*，Vol. 75，No.5，2021.
- 5) 湯浅友輝，高柳剛，樺健典，酒井久和，小野祐輔，伊吹竜一：小型模型石積み壁を用いた引き抜き崩壊実験，土木学会第72回年次学術講演会概要集，pp.845-846，2017.
- 6) 向嶋宏記，内藤直人，村田和哉，笠原康平，増田雄輔，長峯望，小林裕介：SfMの画像変化量による静止画取得方法，土木情報学シンポジウム講演集，Vol. 44，No.51，2019.