(23) LiDAR を用いた 土留め壁の変状の計測手法に関する一考察

中原　匡哉[1]・今井　龍一[2]・山本　雄平[3]・石濱　裕幸[4]・
澤城　光二郎[5]・井藤　博章[6]・山岸　真理[7]

[1]正会員　大阪電気通信大学講師　総合情報学部（〒575-0063 大阪府四條畷市清滝1130-70）
E-mail: nakahara@oecu.jp

[2]正会員　法政大学教授　デザイン工学部（〒162-0843 東京都新宿区市谷田町2-33）
E-mail: imai@hosei.ac.jp

[3]正会員　関西大学助教　環境都市工学部（〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35）
E-mail: y_yamamo@kansai-u.ac.jp

[4]正会員　安藤ハザマ　建設本部　土木設計部（〒105-7360 東京都港区東新橋 1-9-1）
E-mail: ishihama.hiroyuki@ad-hzm.co.jp

[5]正会員　安藤ハザマ　技術研究所　フロンティア研究部（〒305-0822 茨城県つくば市苅間 515-1）
E-mail: sawaki.kojiro@ad-hzm.co.jp

[6]正会員　安藤ハザマ　建設本部　土木設計部（〒105-7360 東京都港区東新橋 1-9-1）
E-mail: ito.hiroaki@ad-hzm.co.jp

[7]正会員　安藤ハザマ　建設本部　土木設計部（〒105-7360 東京都港区東新橋 1-9-1）
E-mail: yamagishi.mari@ad-hzm.co.jp

開削工事で設置される土留め壁に過剰な負荷がかかっている場合，目視でその変状を判断するのは難しく，土留め壁が崩壊する事故が発生している．そのため，既存研究では，土留め壁の内部にセンサを設置する手法や表面にターゲットを設置して TS を用いて変状を定量的に計測する技術が提案されている．しかし，導入にかかる費用や工数が膨大となる課題や網羅的に変状を計測できない課題がある．そこで，本研究では，リアルタイムに計測対象の 3 次元データを網羅的に計測できる廉価な LiDAR に着目し，土留め壁の変状の計測に適した LiDAR を調査する．実験の結果，非反復型の計測方式の LiDAR を用いることで，土留め壁の表面に発生した変状を計測できることを明らかにした．今後は，計測データ中に含まれるノイズを除去しつつ，変状を計測することで変状量の算出精度の向上を目指す．

Key Words : *retaining wall, detecting deformation, lidar, point cloud data*

1. はじめに

治水や埋設物の設置等のために実施される開削工事では，掘削面に対して垂直に土留め壁を設置する工法が用いられている．これにより，掘削中に周辺の土砂が崩れたり，地下水が流入することを防ぎ，未然に建設現場の安全を確保している．しかし，設置した土留め壁に過剰に負荷がかかっている場合でも，従来の傾斜計や下げ振り，ジャッキ反力の変化を監視する方法では，設置箇所の変状のみの確認となり，網羅的な監視ができず，負荷が発生している箇所を見逃す可能性がある．一方，網羅的に目視で巡視する方法では，目視で判断するには変化量が小さく，変状の監視は困難である．その結果，現在も土留め壁の崩壊による死亡事故が発生し続けている．そのため，建設 3 大災害 [1]としても挙げられており，土留め壁の崩壊を未然に防止する手法の考案が喫緊の課題である．

この課題に対応するため，既存研究では，光ファイバ

ーセンサーを用いる手法[2]やTS（Total Station）と写真測量を用いる手法[3]が提案されている．光ファイバーセンサーを用いる手法[2]では，土留め壁の内部に光ファイバーセンサーを設置し，土留め壁のひずみの分布を定量的に計測できる．TSと写真測量を用いる手法[3]では，土留め壁上にターゲットを複数設置し，土留め壁の形状を3次元的に可視化できる．これらの手法を適用することで，土留め壁の変状を定量的に把握できる．しかし，本手法では光ファイバーセンサーを設置した箇所のみの監視となる．そのため，土留め壁全体の変状を把握するには，網羅的に設置する必要があり，導入にかかる費用や工数が膨大となる課題がある．TSを用いる手法では，光ファイバーセンサーを用いる手法と同様にターゲットを設置した箇所のみの計測となるため，局所的な変状を網羅的に取得することが困難である．一方，写真測量を用いる手法では，網羅的な形状を取得できるものの，3次元データの生成に膨大な時間を要するため，崩壊までに変状の発見が間に合わない可能性がある．

そこで，本研究ではリアルタイムに計測対象の3次元データを取得できるLiDAR（Light Detection And Ranging）に着目した．近年では，LiDARをドローンに搭載して上空から土木構造物の出来高の計測や出来形の管理に活用する要領[4]やLiDARから取得される3次元点群データ（以下，点群データ）を用いて変状を計測する技術[5]が提案されている．また，市販のビデオカメラと同程度の価格で入手することが可能となっていることもあり，活用の幅が拡大しつつある．しかし，LiDARを土留め壁の変状の計測に適用した事例は見られず，その適用可能性は明らかになっていない．そのため，本研究では，土留め壁の変状の定量的な計測に適したLiDARを調査し，その適用可能性を検証する．

2. 既存機器の調査

本章では，現場導入の敷居が低い市販の廉価なLiDARを調査し，土留め壁の変状の計測に適した機種を選定する．調査結果を**表-1**に示す．調査結果から，現行のLiDARは計測方式が反復型と**図-1**に示すような非反復型の二種類に大別できることがわかる．反復型とはLiDARを定点で静止して計測させた場合に，常に同じライン上をレーザ測線が計測する方式である．そのため，局所点を常時観測する必要がある場合に適している．ただし，**図-2**に示すように定点で静止して計測している限り，レーザの測線間を計測できないため，土留め壁全体の網羅的な計測はできない．一方，非反復型はレーザの照射範囲内を網羅的に計測できるようにレーザの測線位置を変更しながら計測できる方式である．そのため，計測対象物を網羅的に計測したい場合に適している．

表-1 生成した点群データの精度

LiDARメーカー名	計測方式	測線数	計測精度	計測距離	FOV
OS-1 16 OUSTER	反復型	16	3cm	120m	水平360° 垂直40°
VLP-16 Velodyne		16	3cm	100m	水平360° 垂直30°
M8 Quamergy		8	3cm	100m	水平360° 垂直20°
XT-16 Hesai		16	2cm	120m	水平360° 垂直30°
Horizon Livox	非反復型	-	2cm	260m	水平81.7° 垂直25.1°
Avia Livox		-	2cm	450m	水平70.4° 垂直77.2°



図-1 非反復型の計測方式のLiDAR（Livox社Horizon）

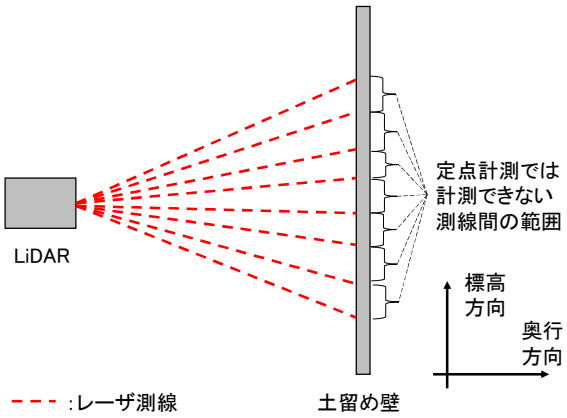


図-2 反復型のLiDARによるレーザ測線間で計測できない範囲

LiDARを用いて土留め壁の変状を計測する場合，土留め壁近くは建設機械や作業員が通過するため，土留め壁から離れた地点から広範囲に現場を定点計測する必要がある．そのため，土留め壁の変状の計測には，遠く離れた定点からでも網羅的に計測が可能な非反復型のLiDARが適していると推察される．以上のことから，本研究では，土留め壁の幅を考慮して，より水平方向に広範囲に計測可能なLivox社のHorizon（**図-1**）で土留め壁の変状を計測可能か検証することとした．

3. 検証実験

本実験では，2 章で選定した LiDAR を用いて土留め壁を模した壁面（以下，模擬壁）を対象に変状が発生する前後を計測し，比較することで，変状を検出可能か確認する．

(1) 実験内容

本実験では，LiDAR の計測精度が低下しやすい悪天候の環境下でも変状を計測可能かを確認するため，屋外で雨天時に 70m 離れた地点にある幅約 4.5m，高さ約 2.0m の高さの模擬壁を Horizon で計測する．模擬壁と LiDAR の設置位置を**図-3** に示す．本実験では，現場内を移動する作業員や建設機械によるオクルージョンを考慮して，常に模擬壁を計測できるように LiDAR を 5 台設置する．計測時には，模擬壁の裏側から一部の壁面を押し出し，**図-4** に示すように模擬壁の前方に対して 6cm の変状を発生させる．この変状を発生させる前後で同じ地点からそれぞれ 5 分間の計測を行うものとする．

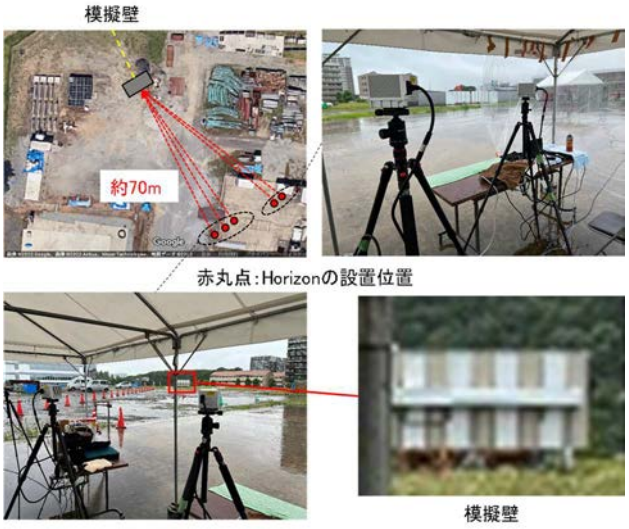


図-3 模擬壁と LiDAR の設置位置

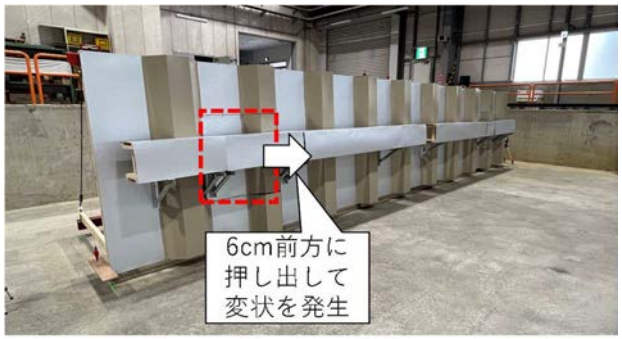


図-4 模擬壁の変状の発生方法

(2) 評価方法

本実験では，変状前後の点群データを用いて変状量を算出し，手動で発生させた変状量を正解データとして評価する．変状量の算出方法を**図-5** に示す．まず，現場に設置された三角コーン等の地物を特徴として各 LiDAR で計測した点群データの座標系を一意の座標系に位置合わせを行う．次に，位置合わせ後の 5 台分の LiDAR の点群データから模擬壁の点群データを手動で切り出して取得し，正面となる奥行方向に対して**図-5** の赤枠で示すように一定の大きさのグリッドで分割する．今回はグリッドの大きさに 0.20m を設定した．そして，分割したグリッドごとに奥行方向に対して最大の点を抽出する．最後に，変状発生後で抽出した点に対する発生前で抽出した点の奥行方向の差分量を変状量として算出し，実際の変状量と比較して評価する．

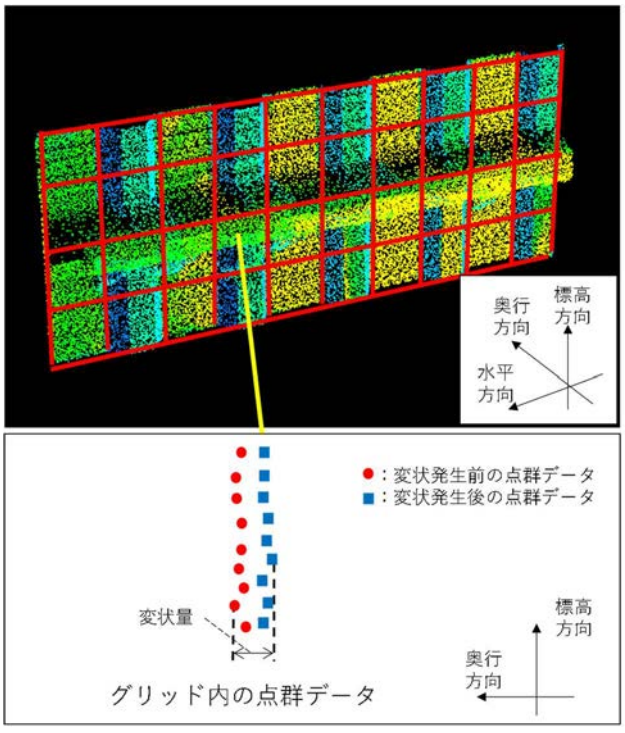


図-5 変状量の算出方法

(3) 結果と考察

模擬壁の変状の算出結果を可視化した結果を**図-6** に示す．図では，**図-5** に示すグリッドごとに算出した変状量が奥行き方向の負の方向に大きいほど赤色，正の方向に大きいほど青色，変状量が小さいほど黄緑色になるように可視化した．そのため，模擬壁の一部が前方に押し出されたと推定できれば押し出されて変状が発生した箇所が赤色で可視化される．まず，6cm の変状を発生させた場合の可視化結果を確認すると，変状を発生させた付近では，周辺と比較して赤色の点で可視化できていることがわかる．計測当日は雨天時の屋外だったことを考慮すると，このことから，土留め壁の変状の計測に LiDAR

を適用できる可能性が高いと考えられる．ただし，算出結果を確認すると，7cm 以上の変状量が算出されている．これは，本実験で利用した Horizon の計測精度が標準偏差で 2cm であることを考慮すると実際の模擬壁よりも LiDAR に近い側にノイズが発生したためと推察される．

次に，3cm の変状を発生させた場合の可視化結果を確認すると，変状を発生させた箇所とその周辺には差異が見られず，変状を発生させた箇所には 4～7cm 程度の変状量が算出された．これは 6cm の変状を発生させた場合と同様に Horizon の計測精度の限界で模擬壁の全体にノイズが発生したためと推察される．

以上のことから，土留壁の変状の計測に LiDAR を適用できる可能性は高いと考えられる．ただし，その変状量を LiDAR の計測精度よりも高精度に計測するには，計測された点群データの中からノイズを除去した上で土留め壁の変状を算出する必要があると考えられる．このノイズの傾向を確認するため，土留め壁を計測した点群データのうち，平坦な箇所を対象に近似平面を生成し，各点の垂直距離ごとの点数の分布を確認した結果を**図-7** に示す．図を確認すると正の正規分布に近い分布となっていることがわかる．そのため，今後は近似平面を用いて近似平面に近い点のみを残し，ノイズを除去することでより高精度に土留め壁の変状を計測できるか検証する必要がある．

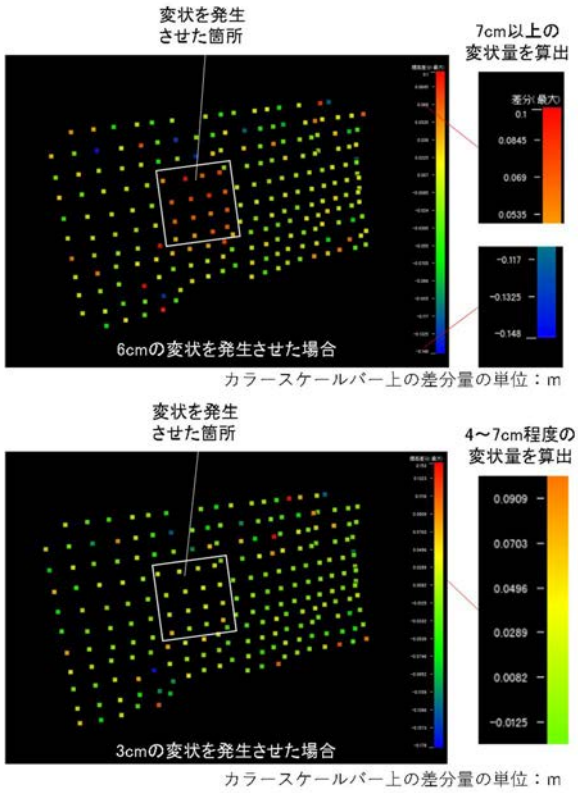


図-6　変状の算出結果の可視化結果

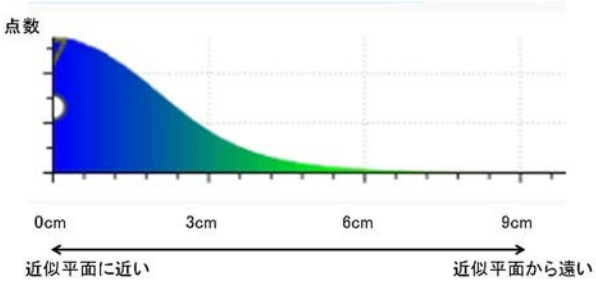


図-7　近似平面に対する各点の垂直距離の分布

4.　おわりに

本研究では，土留め壁の変状の定量的な計測の実現に向けて LiDAR に着目し，変状の計測に適した LiDAR を調査した．そして，調査の結果から選定した非反復型の LiDAR を用いて，検証実験を行い，土留壁の変状を計測できる可能性が高いことを明らかにした．ただし，計測した点群データ中に含まれるノイズの影響で変状量の正確な算出が困難なことがわかった．今後は，正規分布に着目して，ノイズを除去した上で変状量を算出する技術を開発する予定である．

謝辞：本研究の遂行にあたっては，安藤ハザマ社 黒台昌弘氏，大阪経済大学 情報社会学部 中村健二教授と井上晴可准教授および摂南大学 経営学部 塚田義典准教授よりご意見を賜った．ここに記して感謝の意を表す．

参考文献

1)　厚生労働省：緊急対策『STOP！”建設 3 大災害”』，＜https://jsite.mhlw.go.jp/tochigi-roudoukyoku/content/contents/001308549.pdf＞，（入手 2023.5.31）．

2)　金口義胤，小島 謙一，村田修，大木基裕，伊藤裕昌，山浦剛俊，馬場行雄：仮土留め壁に設置した光ファイバーの適用に関する検討，第 38 回地盤工学研究発表会，JGS38，pp.2285-2286，2003.

3)　松丸貴樹，小島謙一，田中祐二：3 次元可視化技術を用いた掘削工事における土留め壁の変形挙動の評価，地盤工学会誌，62 巻 8 号，pp.16-19，2014.

4)　国土交通省：無人航空機搭載型レーザスキャナーを用いた出来形管理要領（土工編）（案），＜https://www.hrr.mlit.go.jp/gijyutu/i_Construction/youryou_kijun/11kisaikensa/11_9_koukuureza_dekidaka_doko.pdf＞，（入手 2023.5.31）．

5)　Zheng, J., Yao, W., Lin, X., Ma, B., Bai and L.: An Accurate Digital Subsidence Model for Deformation Detection of Coal Mining Areas Using a UAV-Based LiDAR, *Remote Sens*, Vol.14, No.2, pp.421-429, 2022.