

◆ 土砂災害特集 ◆

3D レーザースキャナの地すべり計測への適用性

浅野広樹* 石井靖雄** 綱木亮介*** 小山内信智****

1. はじめに

地すべり災害発生時には、地すべりの滑動状況、滑動範囲を早急に調査し、地すべりの運動機構を把握する必要がある。地すべりの滑動状況や滑動範囲を把握するための計測手法として、地盤伸縮計、地盤傾斜計等の計器による手法及び、移動杭測量による手法等が多く用いられている。しかしながら、二次災害の危険性が高い場合には、危険区域内における計器の設置や計測のための作業が困難となる。また、斜面の勾配が急で計測が容易ではない場合もある。そうしたことから安全性が高く、簡便な地すべり調査・計測手法の実用化が望まれる。

地すべり地外から非接触で高密度の三次元座標データの取得が可能な 3D レーザースキャナ(以下、3D スキャナという)は計測範囲等に制約があるものの、従来の計測手法に比べて容易に高密度の地形計測ができる。これまでに、斜面で計測された 3D データを用いてデジタルマッピングを行い、調査・対策検討の基図として使用された事例¹⁾もある。3D スキャナは(1)迅速に安全な計測が可能で、(2)面的なデータの取得が容易なことから、地すべり滑動中や災害直後の斜面の動きの把握に活用できると期待される。筆者らは地すべり地においても移動量の計測、地すべり滑動範囲の面的な把握が可能であることを既に報告²⁾しているが、ここでは、3D スキャナにより地すべりの計測を行う際の留意点を明らかにするため、地すべり移動量計測時に生じる誤差とその原因について検討を行った結果を報告する。

2. 3D スキャナの概要

表-1 に、計測に用いた 3D スキャナの仕様を示す。3D スキャナの計測原理は、汎用的な光波測

表-1 3D スキャナの仕様

計測範囲	2~350m (反射率80%以上の自然物)
スキャニング角/速度	上下方向: 80° (スキャン範囲) / 20 スキャン/秒 左右方向: 340° (スキャン範囲) / 5°/秒
レーザーの広がり角	ミリラジアン 3 mred (100mの距離で30cmのビーム拡幅)
レーザー照査方向に対して直交する方向の精度	3mred × 計測距離 × 1/2 (理論上の最大誤差)
レーザー照射方向の精度	±2.5cm ± 20ppm × 計測距離
本体重量 サイズ	13kg 435 × φ210mm (高さ × 直径)
電源	11~15VDC (max3A)
動作環境	-10~50 °C 雨天、霧、降雪不可

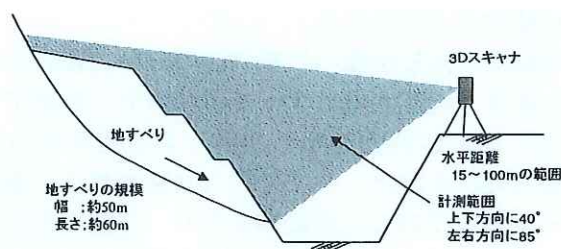


図-1 計測のイメージ

距儀やトータルステーション等と同様に、器械から発射したレーザーが対象物に当たり、反射して戻ってくる時間差を解析して距離を計測するものである。また、距離の計測と同時に受光強度データを取得する機能を有している。3D スキャナは、機械内部のミラーを回転させることによってレーザーの向きを変え高速でスキャニングできる。また、計測対象地に反射物を設置しなくても計測が可能であるという特徴を有している。

3. 計測方法

計測対象斜面は、斜面の末端を切土し、頭部に盛土を行い強制的に変位を生じさせる載荷移動実験³⁾が行われた箇所であり、地すべりの規模は、幅約 50m、長さ約 60m である。図-1 に示すとおり地すべり斜面の対岸からの見通しが良い位置を選定し、そこに 3D スキャナを据え付け、水平方向で 85° の範囲、垂直方向では上下 40° の範囲(水平距離 15~100m の範囲)を計測し、1 回の計

Applicability of 3D Laser Scanner for Measurement of Landslide Movement



写真-1 3D スキャナによる計測画像 (受光強度)

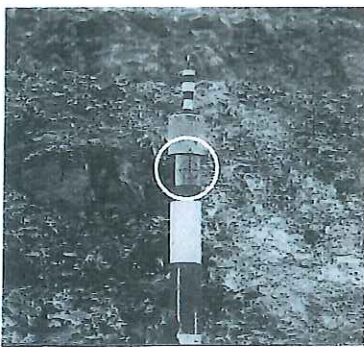
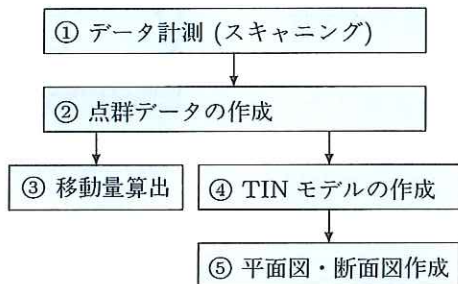


写真-2 反射シール貼付状況



注) 図中の TIN とは点群データの各点を頂点とする三角形平面を製作し立体的に表現する手法

図-2 計測データの解析の手順

するセンサーが付いていることから、写真-2 のように移動杭の頭部に 5cm 四方の反射シールを貼付し、移動杭設置位置のレーザーの反射強度を高め、位置の特定が容易になるようにした。写真-1 の No.11 付近の拡大図の様に 1つの反射シールに対して 4つの異なった反射強度が見られる。これは、使用した器械

測におけるスキャニング回数は 1 回とした。

写真-1 に今回測定した 3D スキャナによる受光強度の計測画像を示す。地すべり地には、13 本の移動杭を設置し、遠隔地から測距と測角を同時に行うトータルステーションによる計測をほぼ同時期に行っている。トータルステーションによる計測値は数 mm 程度の誤差が生じている可能性があるが、10cm オーダーの実際の移動量に対して、数 mm 程度の計測誤差は微小で無視できる範囲内であると考え、トータルステーションによる計測値 (以下、実測値という) を正值とみなし、3D スキャナによる計測結果との比較を行い、計測誤差の検証を行った。

双方の計測結果を比較するためには、計測画像 (写真-1) 上で移動杭の位置を特定する必要があり、計測画像上に何らかの目印となるものが必要となった。使用した 3D スキャナは反射して戻ってきたレーザーの強さである受光強度の違いを識別

のレーザーが 3mrad (100m 先で 30cm の拡がり) で拡幅すること、レーザーの計測角度は 0.07° 間隔で計測していることから、1つの反射シールに複数のレーザー照射が重なったために、このような画像になったと考えられる。

3D スキャナ及びトータルステーションによる移動杭の計測は、地すべりの滑動前後の 2 時期 (1 回目の計測の 8 日後に 2 回目の計測を行った) に同一地点から行い、この期間の移動量を求めている。計測から解析までの手順は図-2 に示すとおりであり、現地で計測したスキャニングデータをパソコン上で 3次元座標系の点群データに変換している。さらに、3D スキャナの計測データを解析 (平面・断面図等の作成) するために、パソコン上で実測値を与え公共座標系への変換を行った。

まず、既知点として不動点の 3 点 (No.3, 6, 11) に実測値を与え座標変換したところ、変換点はデータ上の一部の領域に偏っていたことから変換

点から離れた位置では計測した斜面と著しく異なる結果となった。そこで、3点の不動点に加え、その値を真値として新たな既知点を1点及び2点増やし、座標変換を行ったところ、3D スキャナの計測値と実測値の差は10cm 以下でいずれも大きな差が見られなくなった。したがって、災害時の計測を想定して地すべりを取り囲む様に、5地点 (No.3、No.6、No.10、No.11、No.14) の実測値を3D スキャナの計測データに与えて公共座標系に変換することにした。

計測画像上の5地点の座標変換点の選定手法には、最大受光強度を示す位置をソフトウェアで自動的に抽出し、抽出された点に実測の座標値を与える手法と、任意に手動で選択して実測値を与える手法とがある。写真-1のNo.11付近の拡大図で示したように1つの反射シールに対して複数の異なった反射強度が見られた。その中からどの地点に実測の座標値を与えるかによって誤差の生じ方が違うと考えられることから、手動で入力する手法で、受光強度が最大となった位置と2番目に高い位置を座標変換点として選定し、2回目の計測データにパターンを変えて実測値を与えた。その結果について、植生の影響が少なく斜面の中央付近であるNo.15、No.16の地点において実測値との平面的なずれの確認を行ったところ、受光強度が最大の地点を座標変換点として実測値を与えた場合より誤差が小さな値を示す場合があった (No.15において実測値とのずれがそれぞれ1.8cmであったが、No.16においては3.6cm に対して2.6cm のずれであった)。

しかしながら、計測画像中でシールミラーのどの位置を座標変換点とすれば最も誤差が少なくなるかを計測の度に調べることは、煩雑な作業な割に大きな精度の向上は期待できないと考えられる。また、最大受光強度の位置を杭の位置とした方が人為的な要因で誤差が生じることが少ないと考えられる。そのため、最大反射強度を示す点を自動的に抽出しその点で座標変換を行うこととした。

4. 計測結果及び考察

4.1 移動ベクトル

移動前の3D スキャナの計測結果より作成した平面図上に、3D スキャナと実測値から求めた移動ベクトルを重ね合わせたものを図-3に示す。移動ベクトルは移動杭設置位置における2時期の計測結果より得られた座標値の差 (水平方向) を示している。3D スキャナによる計測結果は、移

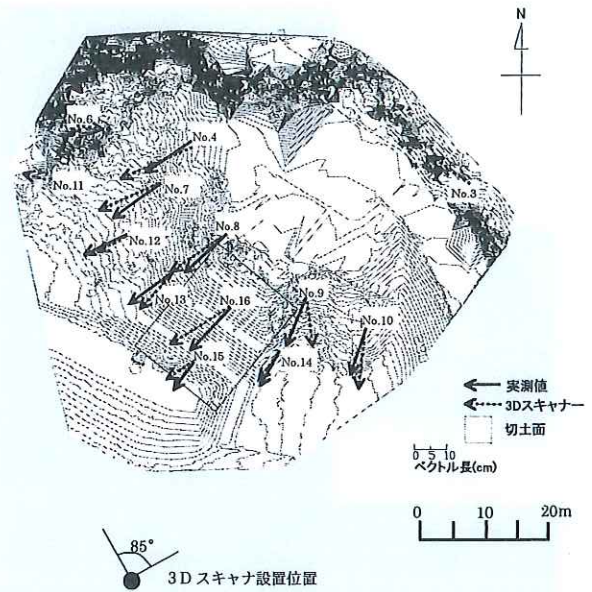


図-3 移動ベクトル図

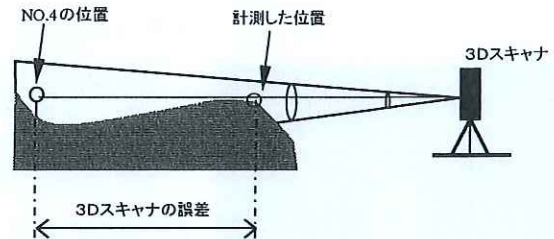


図-4 No.4 において誤差の生じた原因

動量が大きかった地点 (移動量10~20cmの箇所) では、実測値と概ね同じ移動方向を示しているものの、不動点 (No.3, 6, 11) においても、移動量が計測されている。不動点での移動方向はレーザーの照射方向と概ね直交する方向となっている。また、全体的にみても移動ベクトルの終点と実測値の終点にズレが生じている方向は、レーザーの照射方向と概ね直交する方向である。このことから、3D スキャナはレーザーの照射方向の計測誤差と比較して、照射方向に直交する方向の計測誤差が大きくなる特性をもっていると考えられる。なお、No.6とNo.11は移動方向が異なっているが、これはレーザーの拡幅する性質とレーザーの計測方向がスキャン毎に微妙に異なる等の器械的な特性や、座標変換に伴って生じる座標値のずれ等、複合的な要因で誤差が生じるためと考えられる。

また、No.4の地点では、3D スキャナと実測値の移動ベクトルの始点にズレが生じている。No.4付近の地形は、図-4に示すように3D スキャナ側が盛り上がった形状をしていた。3D スキャナはNo.4の移動杭よりも3D スキャナ側の地表面の距離を計測したため、誤計測となったと考えられる。

3D スキャナのレーザー照射方向に沿うような傾斜面を計測する場合には、大きな誤差を生じやすいと考えられる。

4.2 3D スキャナの計測誤差

3D スキャナの計測誤差を明らかにするため、3D スキャナの計測結果から求めた移動杭の座標値を実測値と比較し、計測誤差の検証を行った。ここでは、2 時期(地すべりの移動前後)に計測した 13 地点の計 26 データを用いて、移動杭設置位置の誤差を求めた。

図-5 に、各移動杭における計測誤差を示す。図は 20cm 以上の計測誤差を省いているが、最大の計測誤差を示した箇所は No.4 で、移動前の計測誤差は 100.8cm、移動後の値は 101.8cm であった。No.4 の計測結果は、前節で図-4 を用いて述べたとおり地形が原因で他と比べて極めて大きな計測誤差となった。

No.4 の次に大きな計測誤差を示した箇所は、No.12 で移動前の 11.1cm であった。なお、他の移動杭での計測結果は 10cm 未満の誤差であった(図-6)。全体の計測誤差の平均値は 12.7cm(標準偏差 26.2)で、No.4 のデータを除いて計測誤差の平均値を求めると 5.4cm(標準偏差 2.3)であった。

各移動杭の計測距離と計測誤差の関係を図-7 に示す。図-7 は No.4 で計測された 1m を上回る計測誤差のデータを除いて作成した。また、図中の直線は、レーザーが平面状の物に垂直に当たった場合の理論上の最大誤差(レーザーの照射範囲である円の半径)で、 $3\text{mrad} \times \text{計測距離} \times 1/2$ で求められる。

各計測距離において誤差はばらついているが、多くは理論上の最大誤差値より下回っている。一方、今回理論上の最大誤差より大きな値を示した箇所は、26 データ中 4 データ (No.4 と No.12 の位置) であった。理論上の最大誤差は前述の通り、レーザーが垂直な面に当たった場合の円の半径を想定しているが、No.4 と No.12 の付近の斜面の方向は概ねレーザーの照射方向と直交する方向となっており、レーザーの照射方向に沿った地表面の勾配は緩くなっている。このように傾斜のゆるい地点を計測する場合には、レーザーの照射面は扁平な楕円状となり、レーザーの照射面積が拡がることによって理論上の最大誤差を更に上回る誤差が生じたと考えられる。

4.3 移動量の算出誤差

前節では、3D スキャナによる計測誤差について述べたが、3D スキャナの計測データを用いて

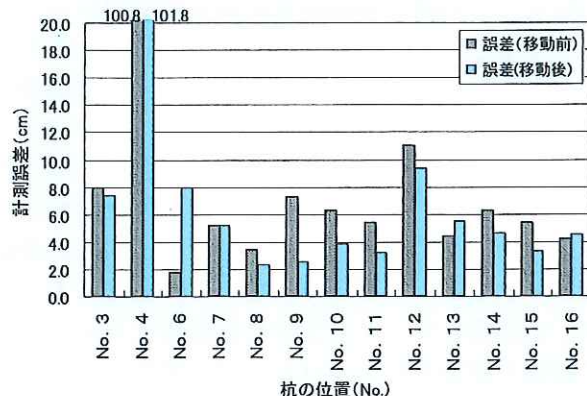


図-5 各測点における計測誤差

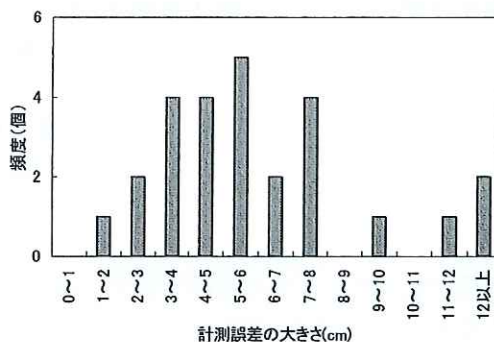


図-6 計測誤差の頻度分布

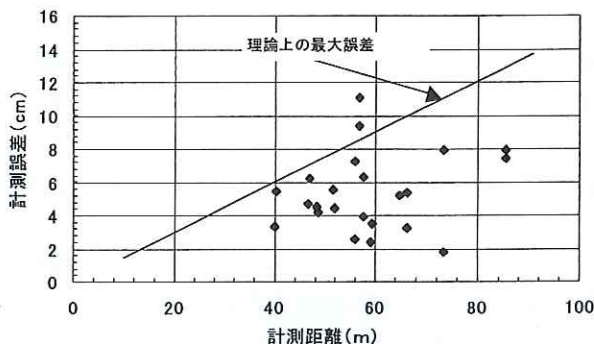


図-7 計測距離と誤差の関係

算出した移動量の差を検証した。3D スキャナの計測データを基に移動量を算出した結果と、実測値から移動量を求めた結果を比較(図-8)し、両者の差を算出誤差として頻度分布を示した(図-9)。

図-6 と図-9 の頻度分布を比較すると移動量算出誤差は小さくなる傾向が認められた。図-6 は 5~6cm の頻度が最も多く、図-9 では 1~2cm の頻度が最も多くなっている。

測点の計測誤差の平均値は 12.7cm (標準偏差 26.2)、移動量算出誤差の平均値は 4.4cm (標準偏差 3.8) となっており誤差の平均値も移動量の算出誤差の方が小さくなっている。測点の計測誤差が突出して大きな No.4 の移動前後の値(図-5)を除いた測点の計測誤差の平均値は 5.4cm (標準偏差

2.3) で、この値も移動量算出誤差の平均値の方が小さな値となった。移動量は、2 時期の計測データ (座標値) の差を求めたものであり、移動杭間の相対的な値である。そのため、No.4 の様に 3D スキャナの計測データは個々の測点における誤差が 100cm と大きな場合であっても移動量算出誤差は 6.5cm と小さくなるものもあった。今回の計測結果は、全般としては各座標値の計測誤差は大きいですが、2 時期のデータを比較し移動量を求めることで移動の傾向を捉えられるものが多かった可能性がある。

しかし、No.3 では、移動前後の 3D スキャナの計測誤差は図-5 に示した通り 8cm 以下であったが、移動量の算出誤差は 15cm となり、計測誤差が大きくなる場合もあった。

図-10 に測定位置から各測点までの距離と移動量算出誤差の関係を示す。移動量算出誤差は計測距離に比例して大きくなる傾向が認められ、計測距離が約 60m までの範囲は概ね 5cm 以下の誤差、計測距離が約 80m までの範囲は概ね 7cm 以下の誤差となっている。

4.4 2 時期の図面の比較

地すべりの面的な移動状況を把握するため、3D スキャナの計測データより作成した 2 時期の平面図を重ねあわせた。図-11 は地すべり末端部切土斜面の部分を示したものであり、2 時期のコンタがずれている箇所が、移動した場所であることを示している。No.16 付近のコンタのズレは大きくなっているが、No.15 より下方はコンタのズレは小さくなっている。コンタのズレの大小の比較により地すべりの移動範囲の把握ができる。

また、末端切土面の移動状況を把握するため、

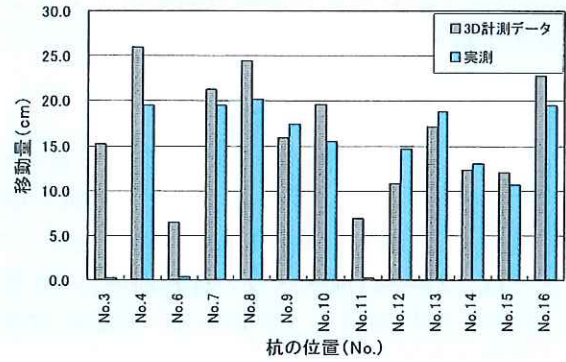


図-8 移動量の計測結果

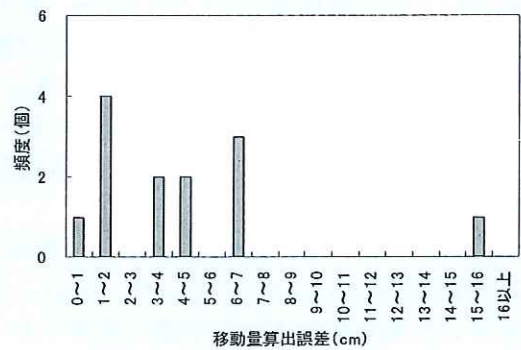


図-9 移動量算出誤差の頻度分布

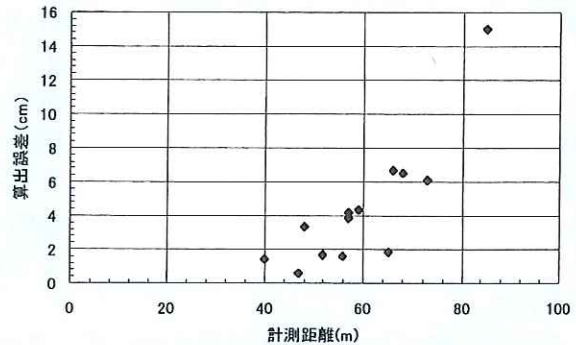


図-10 計測距離と移動量算出誤差の関係

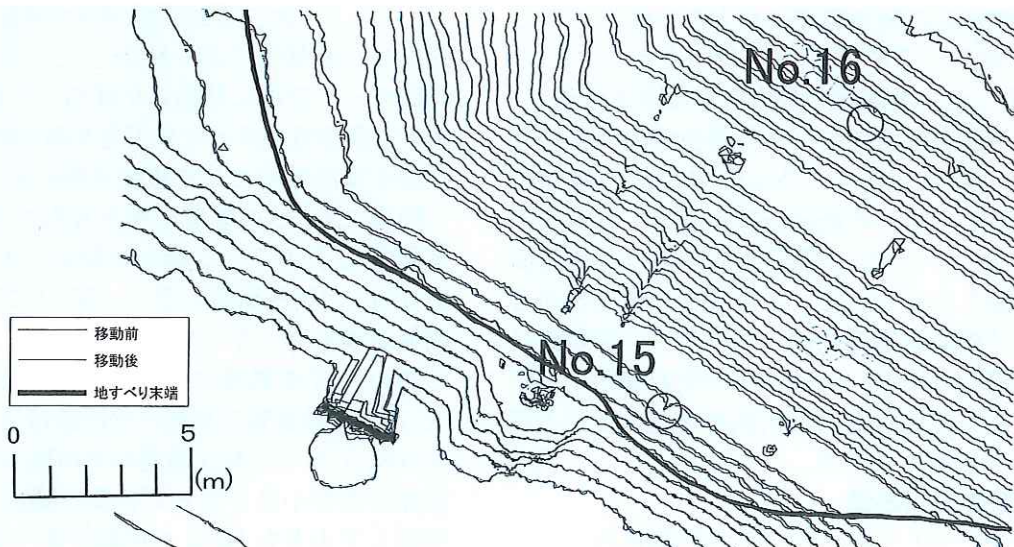


図-11 2 時期の計測データから作成した平面図の重ね合わせ

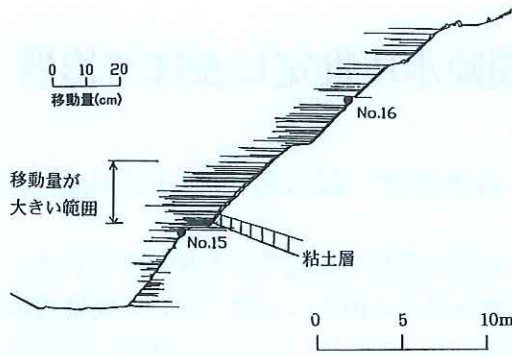


図-12 断面図 (No.15~No.16) と移動量

今回得られたデータを用いて No.15, No.16 を通る断面図を作成したものを図-12 に示す。移動量は 2 時期の同一標高地点の座標値の差を用いて求めているため、移動方向は全て水平方向になっている。しかしながら移動量の分布を見ると、No.15 より上部に移動量の大きい範囲が認められた。

なお、この部分は現地調査の結果によれば粘土層が分布している部分であり、移動に伴う押し出しが特に顕著な部分であった。3D スキャナの計測結果を用いて断面図を作成することにより、移動量の特に大きな部分を判読することができた。

5. まとめ

3D スキャナを用いた移動量計測の際に生じる誤差とその原因について検討した結果、次のことが明らかとなった。

- (1) 3D スキャナの計測誤差は、レーザーの照射方向よりも、照射方向と直交する方向の計測誤差が大きくなる傾向にある。
- (2) 3D スキャナのレーザーの照射方向に沿うような緩斜面となっている場所では誤計測となり大きな誤差を生じやすい。
- (3) (2) で述べた誤差の大きなデータを対象から外して計測誤差を評価すると、今回の計測誤差の平均値は 5.3cm であり、概ね計測距離に応じ

て理論上生じる誤差の範囲内であった。

(4) 移動量算出誤差は、3D スキャナの計測誤差を打ち消し合い小さくなる場合と逆に大きくなる場合があった。今回の計測結果では計測距離 60m までの範囲は概ね 5cm 以下の誤差、計測距離 80m までの範囲は概ね 7cm 以下の誤差で計測できた。

(5) 2 時期の 3D スキャナの計測より作成した平面図を重ね合わせるにより滑動範囲の把握が可能であり、さらに断面図を作成し、移動量を表示することにより、特に移動量の大きな部分を把握できた。

今回計測した地すべりの規模は小さかったが、斜面勾配の緩い範囲や植生の多い部分のデータの取得はできなかった。地すべりの計測にあたっては計測地点から対象となる地点までの距離や斜面の勾配、植生の影響等による現地の条件を考慮して計測範囲や座標変換点を設定する必要があると考えられる。また、今回は計測データが少なかつたため、誤差の評価を十分に行っていない。しかしながら、3D スキャナは面的な地形の遠隔計測が可能であるという優位性が確認できた。

今後、他の地すべりにおける計測結果を加えて検討を進め、計測の際に生じる誤差や留意点について整理を行い、3D スキャナの地すべり計測への活用のための指針等をまとめる予定である。

参考文献

- 1) 小野尚哉、他：ノンプリズム型 3D スキャ式光波測距儀 (明日可) による地すべり 3 次元モニタリング適用例, 第 39 回日本地すべり学会研究発表講演集, pp.47-50, 2000.
- 2) 浅野広樹、石井靖雄、網木亮介：3D スキャナによる地すべり移動量計測の検討, 第 40 回日本地すべり学会研究発表講演集, pp.279-282, 2001.
- 3) 石井靖雄、網木亮介、浅野広樹、杉本宏之：現地載荷による地すべり移動特性に関する考察, 土木技術資料, Vol.43, No.11, pp32-37, 2001.

浅野広樹*



独立行政法人土木研究所
土砂管理研究グループ
地すべりチーム研究員
Hiroki ASANO

石井靖雄**



同 土砂管理研究グループ
地すべりチーム
主任研究員
Yasuo ISHII

網木亮介***



ネパール王国水資源省
治水砂防局
(前 地すべりチーム
上席研究員), 学術博
Dr.Ryosuke TSUNAKI

小山内信智****



独立行政法人土木研究所
土砂管理研究グループ
地すべりチーム
上席研究員, 農博
Dr.Nobutomo OSANAI