

◆ 報 文 ◆

地すべり地末端の崩落斜面における 地盤変位の遠隔計測支援技術の開発

樋口佳意* 藤澤和範** 藤平 大*** 小原嬢子****

1. はじめに

地すべりブロックの末端部や境界部での小規模地すべりや崩壊の発生が災害となることは経験的事実である。この地すべり末端部や境界部の崩落土砂からなる堆積物は、背後の地すべり土塊や崩壊の拡大を抑えている可能性が大きい。しかしながら、人命救助や道路の通行確保等のため、応急処置として一時的でも崩落土砂を除去しなければならぬ場合がある。除去作業は安全性を確保するため、監視員を配置するなど慎重に行われているが、背後の地すべりの誘発や再崩落による二次災害の危険性がある。また、対策を検討する上で早急な地すべり規模等の調査が必要となるが、これらの調査も安全に実施されなければならない。

このような崩落危険斜面の変動を遠隔から計測できれば、安全性を客観的に評価しながら作業が行える。遠隔から変動量を計測する方法として、画像解析やレーザースキャナ等の利用が挙げられる。しかし、これらの方法は標的（プリズム等）を使用しないため10cm程度の計測精度¹⁾であり、再崩落の前兆となるような斜面の変動を捉えるには十分な精度とは言い難い。

その一方で、標的を用いず遠隔からmm単位で計測する手法としてノンプリズム型のトータルステーションがある。新潟県魚沼市下折立（旧湯之谷村）の佐梨川左岸で発生し河道を一時閉塞した斜面崩壊現場（写真-1）^{2),3)}においても、130m程度の監視距離での計測に利用されたが、機械の精度（3mm）を超える最大9mmの誤差が認められている。この誤差は、霧や積雪などの影響のない計測値が安定した時期に生じており、同一点を正確に計測できていないために生じる視準誤差の可能性が高い。また、夜間は視認性が低下するため、計測が不可能になる場合も考えられる。地すべり地末端の崩落斜面では、工事の安全管理などで行われる計測に比して安全に監視できる場所が斜面から遠くなるため、このような視準誤差が生じやすい条件にある。したがって、ノンプリズム

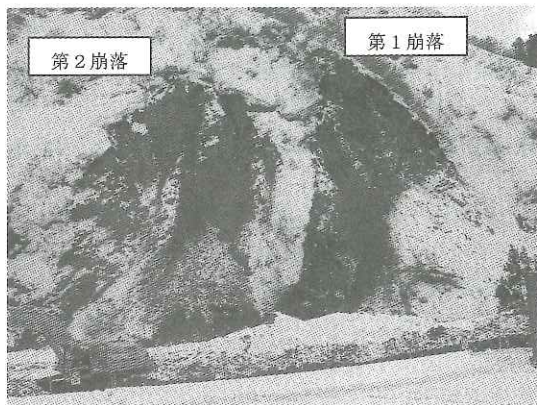


写真-1 佐梨川左岸の斜面崩壊^{2),3)}

型のトータルステーションを用いる場合においても、何らかの標的が必要であり、さらに緊急時には夜間に斜面を監視できる計測技術が必要である。そこで、筆者らは、危険な斜面に立入ることなく標的を崩壊斜面に設置し、遠隔から地盤変位を計測する手法を開発した。本稿では、開発した標的およびその設置方法について報告する。

2. 崩落斜面の特徴および既往の計測技術

2.1 崩落斜面の特徴

図-1に示すように、斜面下部の崩落はその上部にある地すべりの末端部であることがあり、崩落土砂の除去等には二次災害の恐れから慎重な対応が求められる。このような地すべり末端の崩落事例^{4),5)}をみると、9割以上の斜面が河川あるいは海に面しており、構成している土層は岩または崩積土が7割を占めている。地質的な傾向はみら

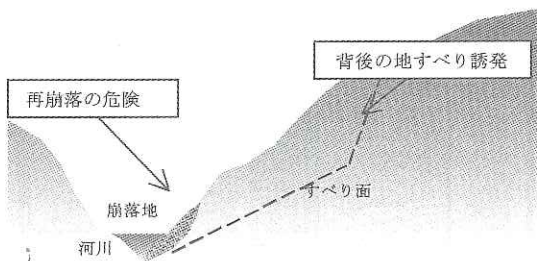


図-1 地すべり地末端の崩落斜面

Supporting Method for Remote Monitoring of Ground Displacement at Failed Slopes in Toe of Landslide with Secondary Disaster Risk

れず、火成岩から堆積岩まで多種多様である。また、安全に遠隔計測が可能と推定される位置は、斜面からの水平距離で50～300m程である。

2.2 既往の計測技術^{6),7)}

(1) 目視監視

人間の目視による監視は、状況への適応力があり、総合的な判断が下せるといふ点でたいへん有効である。しかし、その一方で、時間とともに集中力が低下する、緩速変化を知覚しにくい、客観性がないなどの限界もある。また、崩落斜面へ立入っての監視は危険である。

(2) 地盤伸縮計、光ファイバセンサ

斜面災害発生時の応急的な計測手段としては地盤伸縮計によるのが一般的であるが、作業員が危険な斜面に立入って設置する必要がある上、計測開始までの時間を要するといった課題がある。また、計測レンジが20～30cm程度と限られているため、計測レンジを越える変位が生じた場合には、盛換え作業などのために再度斜面に立入る必要がある。近年では光ファイバを用いた計測手法もあるが、地盤伸縮計と同様の課題が挙げられる。

(3) トータルステーション (プリズム型)

斜面の遠隔監視手法として一般的に用いられており、長距離かつ高精度に計測することが可能である。また、自動追尾システムを搭載している機種であれば、無人による自動観測も可能であり、1点当たりの計測時間は数秒程度である。しかしながら、光波を用いるプリズム型で観測する場合にはプリズムや反射シートを対象斜面に設置する必要がある、これらの設置には人が危険斜面に立入らなければならない。

(4) トータルステーション (ノンプリズム型)

1. で述べたように、トータルステーションには、プリズムや反射シートを必要としないレーザー光を用いたノンプリズム型もある。(3)の光波には劣るものの高精度かつ長距離で計測することができる。また、自動追尾観測ができないため手動での計測になるが、1点当たりの計測時間はプリズム型と同程度である。このため、人が立入れない危険斜面での計測には有効な手法である。しかしながら、観測対象物の反射率が精度に影響し、反射率が低下すると計測不能になる。また、複数の観測点を繰り返し計測する場合、観測点の特定は観測者の記憶にゆだねられるため、同一の点を計測できているのか客観的な評価に疑問が残る。

(5) 3D レーザースキャナ、画像解析、GPS

トータルステーションの他にも遠隔から監視で

きる手法として、3D レーザースキャナ、画像解析、GPSなどがある。3D レーザースキャナは面的な計測が可能であり、移動量を3次元で捉えることができる。しかし、精度が粗く、計測自体は数十秒で行えるが、解析処理に数時間の時間を要するという課題がある。また、写真画像解析なども同様に、一定の精度を得るためには処理時間を必要とする。GPSの場合は、地盤伸縮計などと同様に機器を設置するために斜面に立入る必要がある。また、一定の精度を得るためには時間平均処理などの演算が必要であり、長期の観測には有効であるがリアルタイムでの判断が迫られる応急緊急の現場での活用は難しい。

3. 新しく開発した計測技術

3.1 崩落斜面の計測に必要な条件と機器の選定

地すべり地末端の崩落斜面において地盤変位を安全かつ精度よく計測するためには、次の①～③のような条件を考えなければならない。

①遠隔からの設置・計測が可能なこと

崩落現場は急峻であることが多く、再崩落などの二次災害の危険があるため、作業員が立ち入れない場合が多い。このため、崩落地から離れた場所からの資機材の設置や計測が可能であること。

②緊急時に速やかに計測できること

地すべりや崩壊は、その発生場所や発生時刻を事前に予想できない場合が多い。また、災害発生後は、人命救助や被害の拡大を防止するため、可及的速やかな対応が必要となる。このため、観測機器は、現場で調達が困難な特殊な機器ではなく、市場に流通しており、直ちに手配できるものがよい。

③数mmの変化を把握できること

崩落斜面では、わずかな変化が再崩落の兆候として現れることがある。このため、数mmの地盤変動を確実に捉える必要がある。

以上の条件を満たす機器を検討した結果、地すべり地末端の崩落斜面の計測に適する観測機器として、国土地理院登録トータルステーション2級Aクラス(測距精度 $2\text{mm} \pm 2\text{ppm}$)の機器を用いることとした。もちろん、実際の災害時において、より高精度な機器が手配できる場合には、2級Aより上級の機種を用いる。また、観測距離が長くなるほど測角による誤差が大きくなるため、測距のみを使用することとした。なお、2.2で述べたように、光波による場合でもレーザー光による場合でも、反射物となる何らかの標的が計測性能を

向上するために必要となる。

3.2 標的およびその設置方法の開発

3.2.1 標的 (ターゲット) の開発

(1) 標的 (ターゲット) の条件

トータルステーションによる測距では、プリズム方式でもノンプリズム方式でも、対象物からの反射光は3%程度以上の反射率を確保する必要がある。そのためには、標的を反射率の高い材料にすることと、光波あるいはレーザーを十分反射し得る大きさの標的にすることが必要となる。

トータルステーションの光波およびレーザーのスポット径は、図-2に示すように、距離が遠くなるにつれて楕円形のスポットがねじれながら拡散して進んでいく。この楕円形のスポットの拡散は、表-1に示すように距離により楕円の短軸と長軸の長さが変わり、同じ距離でのスポット径は光波の方が大きい。観測に必要な距離300m程度で用いられる標的 (反射鏡) については、1素子プリズムで直径63.5mm、反射シートで60×60mmが規格化されているが、プリズムを用いない場合には表-1に示すスポット径以上の大きさの標的にする必要がある。

(2) 標的の開発

上述の条件を考慮し、写真-2に示すようなインク入りのガラス製カプセル (長さ79mm、直径10mm) を開発した。インクには、反射率向上のため、再帰反射の効果が期待できる直径50 μ mのガラスビーズを混入している。また、インクの色については、一般に白色の反射率が大きいと言われていたが、11色のインクについてトータルステーションの光波およびレーザー光の反射強度を室内試験で調べた結果、最も反射率が大きかった桃色を採用することにした。インクの量については、直径65mm程度の標的が形成できる1mlとした。

このカプセルを計測対象となる斜面にぶつけて標的を形成することにより、視準の目印としての効果、反射率向上の効果が発揮される。また、斜面に設置された標的が目視で識別できない場合においても、光波あるいはレーザー光反射率を確認することにより標的の位置を特定することができる。

3.2.2 設置方法の開発

(1) 設置の条件

これまで述べたように、標的の設置に求められる距離は50～300m程度である。また、不安定な岩塊など、特定の箇所に精度よく設置する必要も

表-1 光波およびレーザーのスポット径

計測距離(m)	光波(mm×mm)	レーザー(mm×mm)
10	15×26	4×7
20	29×58	7×14
50	73×145	10×20
100	145×291	12×40
200	291×582	25×80
300	437×873	38×120
500	727×1,454	60×200

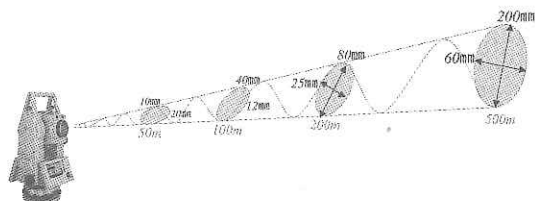


図-2 レーザースポット径のイメージ

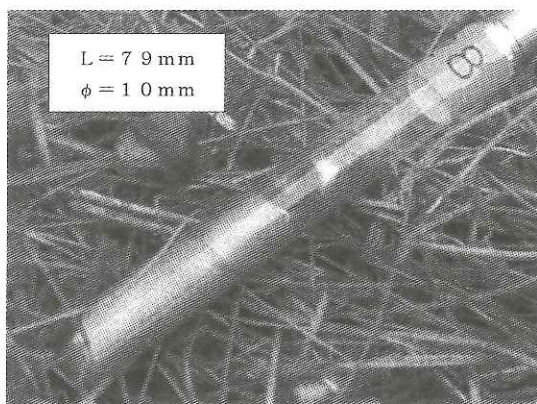


写真-2 インク入りガラスカプセル

ある。さらに、応急緊急で使用する事が想定されるため、ラジコンヘリコプターや火薬類を用いた投擲手法など、特殊な技能、資格、許認可などが必要な手法ではなく、緊急時に誰でも設置できる方法が望ましい。

(2) 設置方法の開発

上述の条件を考慮し、写真-3に示すようなクロスボウ (ボウガン) を用いる方法を開発した。クロスボウは資格や許認可が不要であり、空輪にあたっての制限もなく18歳以上であれば誰でも扱うことができる。また、特殊な技能も必要なく、写真-4、5のように初めて扱う人でも一定の精度で的に命中させることができる。なお、今回採用したクロスボウはバーネット社 (英) 製であるが、一定数量が国内にも流通しており入手は容易である。

写真-6に示すように、クロスボウの矢先に前述のインク入りカプセルを取り付けて射出することにより、300m程度離れた斜面でも±30cm程度の位置精度で標的を形成することができる。もちろん、近距離では命中精度は当然よくなる。なお、今回用いた矢は、長さ509mm、直径5.8mmのポートン社（米）製である。

クロスボウを用いることで標的を設置することが可能であるが、命中精度を高めるため、写真-7

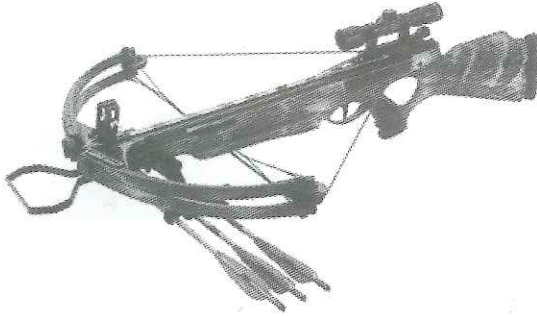


写真-3 クロスボウ（ボウガン）



写真-4 クロスボウの試射状況

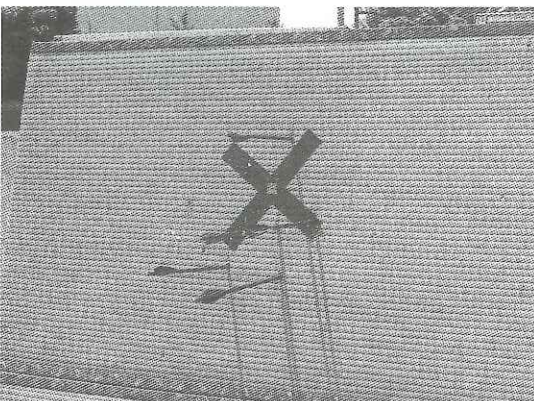


写真-5 発射地点から100m先の的

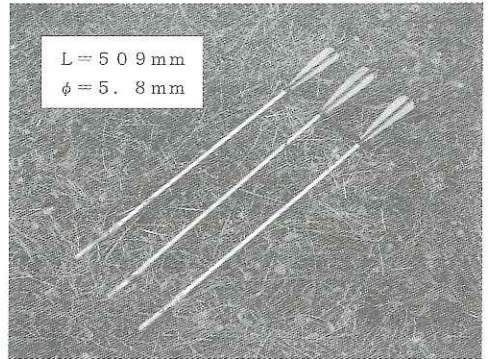


写真-6 インク入りカプセルを取り付けた矢



写真-7 クロスボウ据付発射架台

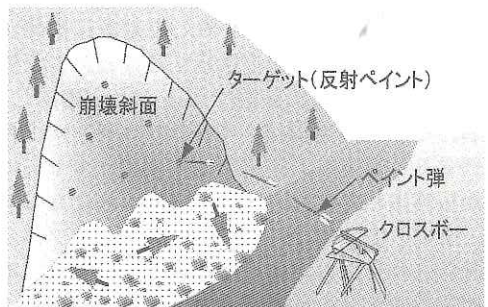


図-3 標的設置のイメージ

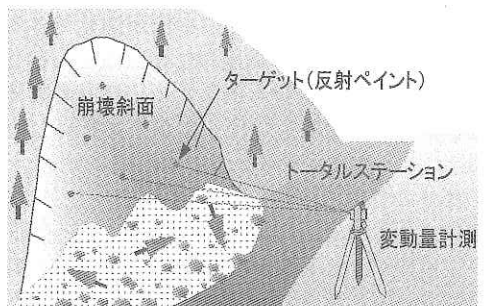


図-4 観測のイメージ

に示すような水平角と仰角が制御できる据付架台を開発した。これにより、誰が扱っても容易に、目的とする位置に標的を設置することができる。

以上の標的と設置方法の開発により、図-3、4に示すような遠隔監視手法を開発した。

4. 現場実験による性能確認

開発した標的とその設置方法の妥当性を確認するため、図-5に示すようなロックフィルダムの下流リップラップ(勾配27°)を崩落斜面と想定した実験を行った。リップラップの材料は、僅かに風化した花崗岩と砂岩を主体(写真-6)としており、実際の崩壊斜面でも見られる石である。なお、本実験以前に実際の崩壊斜面での実験も試みたが、斜面に立入って標的の設置状況などを確認できなかったため、実現場の代替として実大規模に近いロックフィルダムを利用した。

(1) クロスボウの設置性能

クロスボウ据付架台の制御性能を確認するため、のり尻から下流に50~350m離れた場所より5~45°の仰角で矢を発射し、命中精度を確認するとともに、発射仰角を設定するための確認試験を行った。

図-6に試験結果を示す。図中のプロットは、発射地点を水平距離0m高さ0mとしたときのリップラップ上の到達点である。これを見ると、事前に検討した理論曲線と概ね一致した地点に標的が到達しており、発射仰角を設定することにより標的を目標とする地点に設置できることを確認した。なお、この理論曲線は、空気抵抗が速度の2乗に比例すると仮定し、インク入りカプセルや矢の形状から算出した運動方程式より導かれたものである。また、このようにして得られたグラフは、緊急時に矢の発射仰角を可及的速やかに設定するための早見表として活用する予定である。

クロスボウ据付架台の組立てから発射までの時間は5分程度であり、発射点と観測点の位置さえ定めれば緊急時にも速やかに計測が開始できることを確認した。また、風速の影響はほとんど受けないが、万が一の場合もあるため、標的の設置は風速5m/sec程度以下で行うのが望ましいと思われる。

(2) 標的の性能

クロスボウによって射出された標的が、斜面において直径65mm程度以上の大きさで形成されること、トータルステーションで所定の反射率が得られことを確認するため、形成された標的を目視

により確認するとともにトータルステーションによる反射率の計測を行った。また、実際の斜面災害は雨天中に発生することが多いため、雨天の場合と晴天の場合でそれぞれ確認した。

写真-8に標的の形成状況を示す。標的の形状は、矢が岩に当たる際の角度によっては円形と限らず楕円形の場合もあるが、すべての地点で直径65mm以上の標的が形成されることを確認した。また、標的の形成された箇所の反射率は、図-7に示すように、標的周辺に比べて数倍から数十倍大きくなり、トータルステーションの望遠鏡でも識別できない距離にある標的でも反射率の大きさ

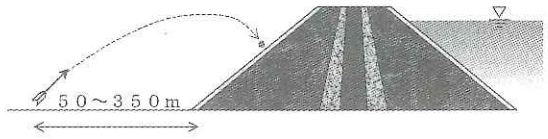


図-5 現場実験のイメージ

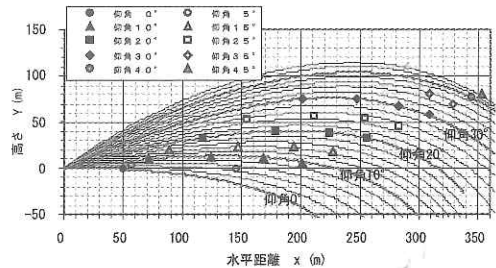


図-6 矢の軌道の理論曲線と実測データ

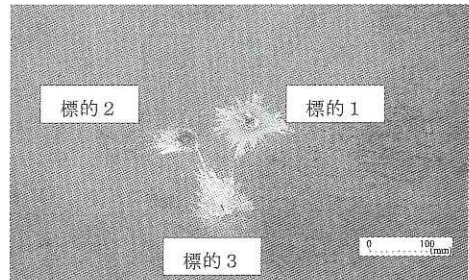


写真-8 形成された標的の例

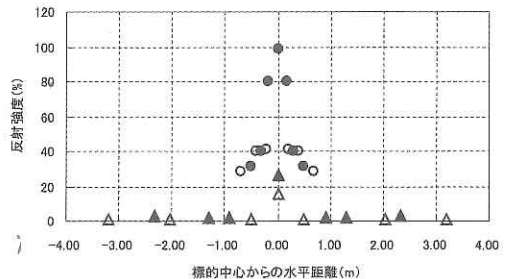


図-7 反射率~距離関係

から観測点の位置が特定できることが確認された。また、夜間でも計測することを確認した。しかしながら、先行降雨などによって対象斜面が濡れている場合には、インクが付着するものの降雨によって洗い流されることがあった。また、標的として形成された場合でも、激しい雨などで標的が膜状に濡れると反射強度が著しく低下することも確認された。ただし、付着したインクは、120kPa ($\approx 1.2\text{kgf/cm}^2$) の高水圧を散水しても剥がれないことを事前に確認しており、また時間経過で表面の水膜がなくなれば反射率は回復する。

また、光波 (プリズムモード) では、必要な反射率 (3%程度) に対して0~1%しか得られず、計測不能であった。これに対し、レーザー光 (ノンプリズムモード) による計測性能は向上し、標的がない場合には反射率が1%程度の測点でも計測に十分な10~99%の反射率が得られた。

以上の結果から、開発したインク入りカプセルが標的としての機能を十分発揮し、実用でも効果が得られることが確認されたが、濡れた岩盤などでも付着するインクへの改良が課題として残された。

5. まとめ

筆者らは、地すべり地末端の崩落斜面のような二次災害の危険のある斜面において、その斜面に立入らず安全かつ高精度に遠隔から地盤変位を計測できる手法として、トータルステーションの標的を遠隔から設置する方法を開発した。これにより、トータルステーションのうちノンプリズム型では、誤差の中でも最も影響が大きいと考えられる視準誤差を解消できるようになった。以下に標的とその設置方法について、今回の成果と今後の課題をそれぞれまとめる。

(1) 標的

ガラスビーズを混合したインク入りのガラスカプセルを開発し、これまでのノンプリズム計測よりも計測データの信頼性を向上させることができた。しかし、降雨時には標的の反射材としての性能が低下するため、濡れた岩盤などにも付着できるインクへの改良が必要である。また、岩盤だけでなく土砂にも設置できる標的も必要となる。

(2) 設置方法

標的の設置方法としてクロスボウを用いた方法を開発した。発射仰角を制御できる据付架台を開発したことにより、300mでも $\pm 30\text{cm}$ の位置精度で標的を形成できた。今後、発射仰角と距離に関するデータ数を増やし、仰角設定時に使用する早見表の精度を向上することが課題となる。

末筆ながら本研究の趣旨を理解し、実験現場を快くご提供頂いた国土交通省東北地方整備局沼上川ダム管理所の方々に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 浅野広樹、石井靖雄、網木亮介：3Dレーザー・スキャナーによる地すべり移動量の検討、第40回日本地すべり学会研究発表会講演集、pp.279-281, 2001.
- 2) (財)砂防・地すべりセンター：佐梨川斜面崩壊対策検討委員会、現地視察会資料、2004.
- 3) 国土交通省北陸地方整備局湯沢砂防事務所：2.10湯之谷村佐梨川土砂崩落災害応急復旧対策工事報告書
- 4) (財)砂防地すべりセンター：地すべり移動量の整理、2001.
- 5) 網木亮介、藤澤和範、又吉博美、柳原幸希：平成10年度地すべり危険箇所調査、建設省土木研究所砂防部地すべり研究室室内資料、pp.31-37, 1999.
- 6) (財)測量調査技術協会：測量技術の進展、15周年記念事業図書、1995.
- 7) (財)地すべり対策技術協会：地すべり観測便覧、1997.

樋口佳意*



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所土砂管理
研究グループ地すべりチーム
交流研究員
Kei HIGUCHI

藤澤和範**



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所土砂管理
研究グループ地すべりチーム
上席研究員
Kazunori FUJISAWA

藤平 大***



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所土砂管理
研究グループ地すべりチーム
主任研究員
Masaru TOUHEI

小原嬢子****



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所土砂管理
研究グループ地すべりチーム
研究員
Joko OHARA