

表層崩壊に対する RTK-GNSS の適用性検証

国際航業株式会社 正会員 室井翔太, 佐藤渉 非会員 福場俊和, 高知大学 正会員 笹原克夫

1. はじめに

崩壊時刻等の予測を目的として、これまでに実斜面や模型斜面での降雨時や掘削時の崩壊実験による動態モニタリングが行われてきた¹⁾。これらの動態モニタリングでは、実績が豊富な従来の計測機器(例えば、変位杭や伸縮計、傾斜計)が導入され、検討が行われている。

一方で、近年、動態モニタリングが必要な現場では、新たな計測技術として RTK-GNSS が利用されつつある。RTK-GNSS による変位計測精度は一般的に 2~3cm 程度であるが、1 恒星日(23 時間 56 分 4 秒)を母集団とした移動平均により、±1mm の精度が、強制変位実験により実証されている²⁾。

しかし、上記の手法は、ある時点で変位が発生した場合、それが 1 恒星日経過しないと分からないといった時間遅延の問題があり、表層崩壊には適用が難しい。そこで、本報では、恒星日差分法に改良版カルマンフィルタ法を適用することで、時間分解能を損なわずに変位を高精度に取得できる新たな誤差評価処理手法の開発を試み、表層崩壊に対する RTK-GNSS の適用性検証を行ったため、その結果について報告する。

2. 実験方法

2. 1. 実験概要

実験は、2022 年 7 月 27 日に高知県高岡郡佐川町山中の自然斜面(斜面長 17m)で実施した。対象斜面と計測機器の配置、崩壊状況を写真 1 に示す。実験では、機器を設置・計測している斜面を 3 段に分けてバックホウにより掘削し、各段で順次、計測機器の撤去、掘削角の変化や透かし掘り等を実施しながら進めた。その結果、3 段目での整地掘削後に崩壊が発生した。

2. 2. 地盤状況

実験箇所の基盤岩は石灰岩であり、表層には石灰岩の風化残積土や崖錐堆積物が分布している。表土の層厚は、簡易動的コーン貫入試験の結果から、機器設置付近で 1.29m~1.55m 程度である。また、不攪乱試料を用いて測定した結果、 $\rho_t=1.21\text{g/cm}^3$ であり、非常に緩い砂あるいは粘土寄りのシルトで構成されている。

2. 3. 計測機器

計測機器の仕様を表 1 に示す。RTK-GNSS は、1Hz の頻度でほぼリアルタイムに三次元位置座標の取得が可能である。ただし、通信の関係で 300 秒(5 分)毎に計測データを蓄積して伝送するため、計測時間間隔は 300 秒である。変位計測精度は、改良版カルマンフィルタ法により、±1mm を実現した。

なお、複数の崩壊実験における成果により、表層崩壊に必要な計測時間間隔は 400 秒以下、変位計測間隔は 7mm 以下(斜面長 10m)であることが明らかとなっており³⁾、本報での変位計測精度はこれらを満たすと考えられる。

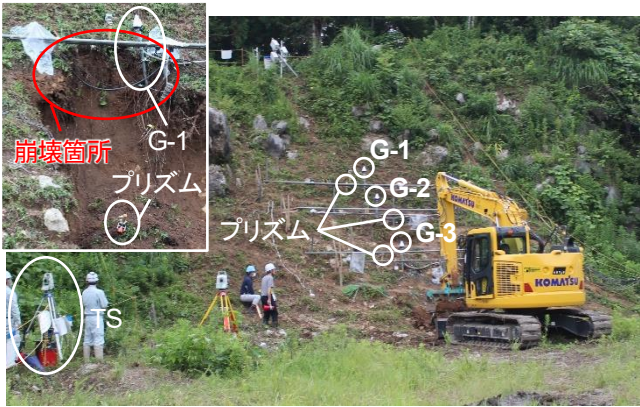


写真 1. 掘削対象斜面と計測機器、崩壊状況

3. 誤差評価処理手法

3. 1. 恒星日差分法

恒星日差分法は、GNSS 計測における誤差要因の一つである衛星配置の違いを低減させることを目的とした手法である⁴⁾。本手法によって、RTK 測位による計測値に対し、大幅な精度向上が実現しているが、その他の誤差要因によって、図 1 に示す通り表層崩壊に適用可能なレベルには達していない。

3. 2. 改良版カルマンフィルタ法

恒星日差分値に対し、さらに計測誤差を低減させるため、時系列解析の一種として知られるカルマンフィルタを適用した。なお、カルマンフィルタを実施する上で、観測値および状態を決定するカルマンゲインについて、パラメータとして固定値を付与する手法が一般的であるが、本報では、新たな手法として、都度、任意の期間における計測値のバラつきを求めてパラメータを更新する可変値を与えることとした。

これらの誤差評価処理手法の適用により、時間分解能を損なわずに、従来に比べて大幅に精度向上した変位を取得することができた(図 1)。

表 1. RTK-GNSS 計測機器の仕様

モジュール	U-blox NEO-M6T
アンテナ	フラット型 (Tallysman 33-1421-10-0150)
受信衛星	GPS, QZSS, GLONASS
周波数帯	1 周波
計測時間間隔	300 秒(※計測頻度は 1Hz)
変位計測精度	±1mm

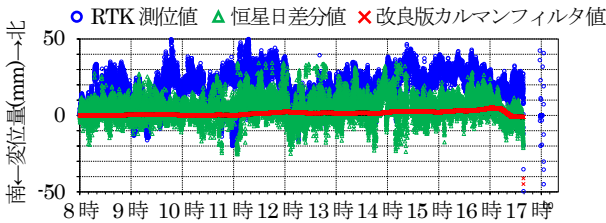


図 1. 誤差評価処理による G-1 計測精度の向上結果

キーワード: 表層崩壊, RTK-GNSS, 恒星日差分法, 改良版カルマンフィルタ法, 掘削実験

連絡先: 〒183-0057 東京都府中市晴見町 2-24-1 国際航業株式会社 TEL:042-307-7471

4. 実験結果

4. 1. RTK-GNSS 計測結果

対象斜面での掘削開始(8時44分41秒)から表層崩壊(16時38分37秒~40分21秒)までの改良版カルマンフィルタ値による時系列変位グラフを図2に示す。下段に設置したG-3は計測開始早々に撤去したため、特に顕著な変位は得られなかった。一方で、中段のG-2および上段のG-1は、2段目掘削途中の11時頃から小規模崩壊発生後の16時10分頃まで、北方向(山側)・下方向に変位が累積する傾向が見られた。なお、山側の変位は、機器のセンサ部を1本の短支柱で接続して設置していることから、地面は斜面下方に動いているもののセンサ部は山側に転倒したためと推定される(図3)。また、これらの変位は、掘削間の待機中も収束することなく累積しており、掘削による地盤強度の継続的な低下が変位に表れていると考えられる。

その後、G-1は、16時11分頃に南方向(斜面側)に急変し、下方向の変位速度も急増している状況が確認できる。実際に、同時刻では小規模な崩壊が発生しており、これを契機に、表層崩壊に向けて進行スピードが上がったと解釈できる。

以上の通り、改良版カルマンフィルタ法の適用により、従来のRTK-GNSS計測では実現できなかった表層崩壊発生までの詳細な変位挙動について把握することができた。

4. 2. TS 結果との比較

本実験では、上・中・下段の3箇所にターゲットとなるプリズムを設置し、トータルステーション(TS)による計測も実施した。その中で、上段における崩壊直前(15時以降)のZ方向変位状況について、G-1の上下方向と比較した結果を図4に示す。TSでは、小規模崩壊の発生時刻を含む16時8分47秒~11分29秒の欠測前後で下方向の顕著な変位が発生しているが、G-1においても同時刻に同方向の変位が確認でき、またそれ以前についても整合的な結果が得られている。これは、改良版カルマンフィルタ法を適用した値の信頼性が高いことを意味する。

ただし、それ以降は、TSでは変位が加速度的に増加しているのに対し、RTK-GNSSでは一時的に収束している。これは、小規模崩壊の発生まで概ね同様の推移であったことを考慮す

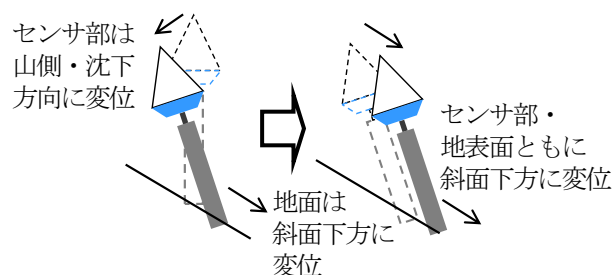


図3. 山側変位の要因(左:小規模崩壊以前, 右:崩壊直前)

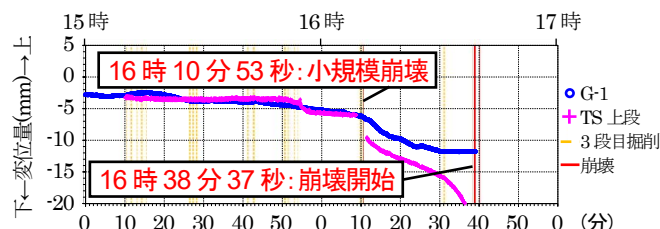


図4. 改良版カルマンフィルタ値とTS計測変位の比較

ると、崩壊直前に設置位置の違いによる影響が生じた可能性がある(写真1の通り、TS上段プリズムの方が崩壊箇所に近い)。

5. まとめ

掘削崩壊実験にRTK-GNSS機器を導入し、表層崩壊に対するRTK-GNSSの適用性について検証を行った。その際、計測誤差の低減のため、新たな誤差評価処理手法(恒星日差分法+改良版カルマンフィルタ法)を開発・適用した。結果として、表層崩壊に必要な変位計測精度を満たすことができ、表層崩壊や崩壊前の変位を捉えられた。また、TSの計測変位と比較したところ、概ね整合的な結果が得られた。

今後は、掘削状況に対する計測変位をより詳細に考察するとともに、他の計測機器(伸縮計や傾斜計等)との比較検証、さらには佐川WGの目的である崩壊予測についても検討を行う。

謝辞

本報をまとめるにあたり、高知大学主幹・複数の大学・民間企業参画の「高知斜面崩壊発生予測モニタリングシステム研究開発コンソーシアム(通称「佐川WG」)」のメンバーとしてご協力いただいた皆様に心より御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 笹原他: 実大規模模型斜面の多段階掘削に伴う崩壊時刻の予測—福岡式を用いた検討—, 地盤工学ジャーナル, Vol.13, No.1, pp.13-25, 2018.
- 2) 藤原他: RTK-GNSSによる地盤変位計測の高速道路法面への適用性に関する検証, 土木学会論文集 F3(土木情報学), Vol.76, No.1, pp.18-31, 2020.
- 3) 笹原他: 斜面上の変位モニタリングに必要な計測精度-斜面規模と計測精度の関係-, 地盤工学ジャーナル, Vol.17, No.2, pp.217-225, 2022.
- 4) 土木研究所・モニタリングシステム技術研究組合: 土木構造物のためのモニタリングシステム活用ガイドライン(案), 土木研究所資料, 第4408号, p.875, 2020.

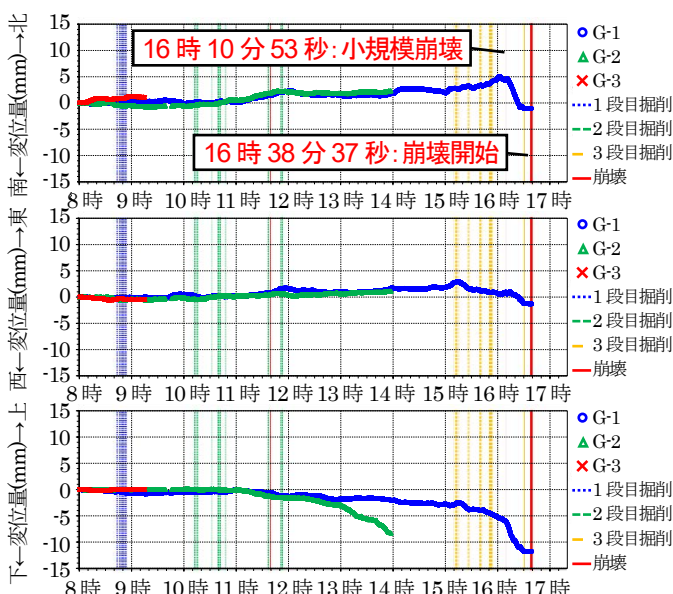


図2. 改良版カルマンフィルタ値による掘削・崩壊時の変位