

(64) 高精度衛星測位を用いた 地すべり監視システムの実現可能性の初期検証

瀬川 佳祐¹・宇佐美 拓真・曾根 卓朗・和田 善尚・木谷 友哉²

¹ 静岡大学 大学院総合科学技術研究科 情報学専攻 (〒432-8011 静岡県浜松市中区城北3丁目5-1)
E-mail: k-segawa@kitanilab.org

² 静岡大学 大学院情報学領域 (〒432-8011 静岡県浜松市中区城北3丁目5-1)
E-mail: t-kitani@kitanilab.org

地すべり被害の軽減のため、斜面移動の早期検知が求められている。しかし、現在の地すべり検知に用いられている伸縮計センサや抜き板センサなどでは観測開始が亀裂の発生した後に限定されてしまう。近年、測位衛星数の増加や測位機材の普及など測位のための環境が整ってきた高精度衛星測位技術を利用し、広範囲の斜面移動を早期検知する地すべり監視システムを提案する。システムが実際の地すべり危険区域において地すべり監視を実現可能であるかを検証するために、理想環境下と実環境での観測実験を行った。理想環境下では測位分解能が約 5 mm、測位環境や観測時間に制限がかかる実環境下では約 30 mm となり、従来センサの代替は困難であるが、広範囲の亀裂の発生検知には活用できる観測精度となることが明らかとなった。

Key Words: landslide, rtk, gnss, monitoring, sensing

1. はじめに

現在、豪雨の影響で日本に限らず様々な地域で地すべりによる被害が問題となっている。令和3年7月には静岡県熱海市で大規模な地すべり災害が発生しており、地すべりを発生前に検知する仕組みが必要となっている。

しかし、既存の地すべり監視に用いられているセンサは、既に発生している亀裂の両端を監視するものが主であり、観測精度は 0.1 mm レベルと非常に高い精度となっているが、観測範囲が亀裂付近に限られたエリアとなってしまう問題や、センサそのものが地盤ごと動いてしまうと検知ができない問題、亀裂が発生してからでないと観測が開始できない問題などを抱えている。

本研究では、従来の変位計センサなどを用いた狭い範囲の地すべりの観測ではなく、数百メートルの範囲の地すべりブロック単位の地すべりの観測の実現を目的とする高精度衛星測位技術を用いたシステムの設計と実環境におけるシステムの実現可能性の初期検証を行う。

2. 既存の地すべり検知手法と課題

地すべりが発生するメカニズムと現在行われている地すべり監視の仕組みについて述べる。

(1) 地すべりのメカニズム

地すべりとは、斜面災害の一つで斜面の一部が地下水や重力の影響によってある程度原形を保ったままゆっくりと下方に移動し、ある時点で急激に崩れる現象のことである¹⁾。斜面の地下に水を通じづらい粘土層などが存在すると、台風や大雨などの際に地下水位が上昇し、その結果、斜面が浮力と重力によって地盤ブロックが下方に移動する(図-1)。ブロックの移動が始まった当初は、様々な特徴的な前兆現象が発生し、代表的なものは亀裂、はらみだし(斜面の押出)、樹木の傾き、井戸水の濁りなどである。

(2) 従来の地すべり監視手法

従来の地すべり検知では、センサを地すべり兆候によって生じた亀裂を跨ぐようにして設置し、単純な2点間の移動変位を計測するものが多い。実験場所とする浜松市市竜区でも2020年の8月から簡易的な変位観測計によ

って、地すべりの観測を行っている。以下の図-2は現地に設置されている、鉄線のテンション（張り具合）によって地盤のズレを観測する伸縮計である。伸縮計では0.1 mm 精度での変位観測が可能である。

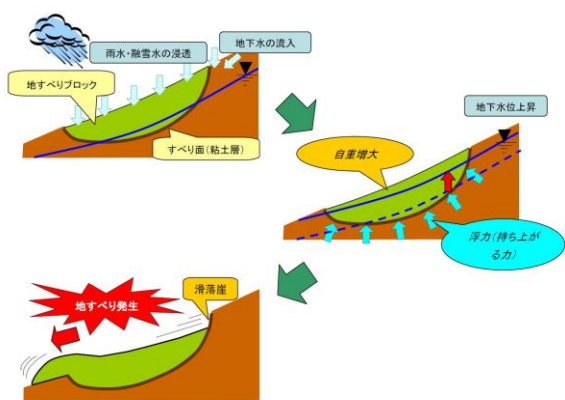


図-1 地すべりのメカニズム



図-2 従来の伸縮計センサ

(3) 地すべり検知の課題

従来センサでは、地盤の亀裂を跨いで設置する必要があった。しかしながら近年、浜松市土木事務所の調査によれば、地盤ブロックごと移動を見せる地すべりの存在が確認されており、従来センサではこのようなタイプの地すべりの検知は困難であると述べている。また、従来センサの設置は亀裂などの地すべり予兆が発生した後となるため、災害対策のためのデータ収集が遅れてしまうという問題点も挙げられる。

3. 高精度衛星測位を用いた地すべり監視システムの提案

GNSS とは、Global Navigation Satellite System の略称で、各国が開発を進めている測位衛星システムの総称である。現在、地球を周回する測位衛星の数は急速に増加している。

(1) 当研究グループで提案している地すべり計測手法²⁾

近年の搬送波位相による高精度衛星測位を用いた地すべり観測においては、地上基準局からの補正情報のもとに地すべり観測点の絶対位置を求めるという手法が主であった³⁾。しかし、このような手法では基準局からの距離（基線長）が長くなるにつれて大きくなる誤差の影響によって、ミリメートルの精度で観測することは困難である。

そこで、我々の研究グループでは対象区域に地すべり観測点を複数設置し、地すべり観測点の間の相対位置の変化を求めるという手法で地すべりの計測を行う。ペアとなる地すべり観測点から補正情報を受け取ることで基線長による誤差の影響を小さくすることができる。

また、我々の地すべり計測手法では地すべり観測点を1時間程度の短時間では移動しない静止点であるとみなし、Static 測位による観測を行う。Static 測位とはドローンなどの移動体に対して適用される Kinematic 測位に対して静止点に対して適用される測位方式である。Static 測位は全ての衛星測位方式の中で最も高精度な測位結果を得ることができる。

(2) 提案する地すべり監視システム

本提案システムでは、図-3に示すような地すべり監視を行う。従来のセンサが亀裂の両端の監視を行うのに対して、提案センサでは複数の地盤ブロックに対してそれぞれの任意の位置に GNSS センサを設置し、センサ間の相対距離を観測することで地盤ブロック単位の広範囲の監視を行う。

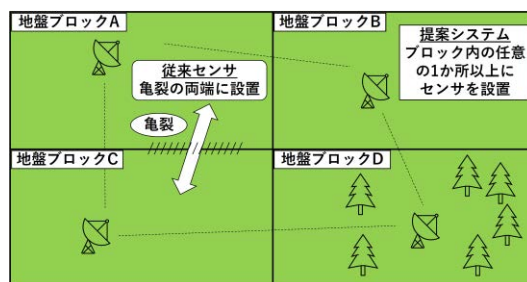


図-3 提案システムの概要図

センサの設置場所が亀裂付近に限られないため、亀裂の発生前から観測を行い、従来センサよりも早いタイミングで地すべりの検知を行うことができる。

また、図-3の地盤ブロックDのようにブロック内の広範囲が森林に覆われており、高精度衛星測位を行うことが困難な場合でも、林道等のブロック内で最も空が開けている場所に GNSS センサを設置することで観測精度の向上が期待できる。

4. 理想環境下におけるシステムの検証実験

提案システムの理想的な測位環境下における観測精度の検証を行うために静岡大学情報学部棟 1号館屋上で2021年7月26日から7月27日に観測実験を行った。

(1) 実験環境

本実験は、大学屋上に提案システムの観測点を3m離して2点設置し、観測実験を行った。観測点は動かさないように固定しており、観測点上空は完全にオープンスカイであるため、測位環境は理想的な条件である。

(2) 理想環境下の実験結果

図-4は1時間の観測から得られる3600エポックの測位結果の中央値をその時間の代表値として24時間分をプロットした図である。全エポックのうち高精度な測位解(Fix解)となったエポックは約99%であった。図-4より理想的な測位環境下では、提案システムによる観測が約5mmの範囲内に収束することが分かる。

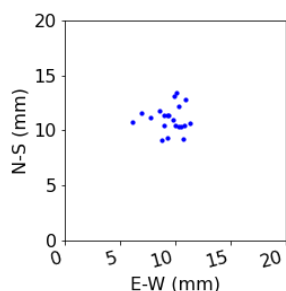


図-4 理想条件下に設置した2観測点間の相対位置の観測結果

5. 実環境下におけるシステムの検証実験

本実験は、提案システムが実環境下において地すべり検知に必要な精度が得られることの検証、観測時間や基線長の変化による観測精度の変化の検証を目的とする。2022年1月25日から2月18日と3月29日から4月11日の2つの期間において、浜松市天竜区の地すべり危険区域での実験を行った。

(1) 実験環境

本実験は、浜松市天竜区内に存在する2か所の地すべり危険区域を対象区域として観測実験を行った。2つの地すべり危険区域の位置関係を次の図-5示す。

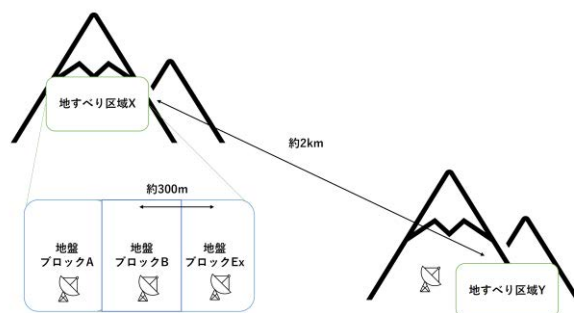


図-5 2つの地すべり危険区域の位置関係

対象区域Xは区域内が3つの地盤ブロックから構成されている。図-5に示すように地盤ブロックA・地盤ブロックB・地盤ブロックExが並んでおり、地盤ブロックA・Bは地盤の動きが報告されているブロックである。地盤ブロックExでは地盤の動きが報告されていない。観測点を設置した場所は図-6左に示すように、背の高い木に囲まれているため測位環境が悪い。



図-6 地盤ブロックBの観測点上空(左)
地すべり区域Yの観測点上空(右)

対象区域Yでは過去に斜面崩壊が発生した崖の下に観測機材を設置して観測を行った。図-6右は対象区域Yの観測点上空の写真である。対象区域Xの地盤ブロックBに比べると上空の視界が開けており測位環境が良い。

本実験では対象区域Xと3つの地盤ブロックに1つずつ、対象区域Yに合計4つの観測点を設けた。4つの観測点には、全て同じ観測機材を設置した。

観測機材はGNSSモジュールと制御用のマイコン、ソーラーパネルとバッテリーから構成される。GNSSモジュールにはu-blox社製のZED-F9P⁴⁾とANN-MB-00を使用した。制御用のマイコンでは省電力化のために、事前に設定したタイムスケジュールでGNSSモジュールの電源のONとOFFを切り替えている。GNSSモジュールから得られたデータはSDカードに保存するよう設計した。図-7は、本実験で設置した観測機材である。



図-7 地すべり危険区域に設置した観測機材

(2) 実環境下の実験結果

対象区域 X では、2022 年 1 月 25 日から 2 月 18 日の実験で 4 時間に 30 分間だけ GNSS モジュールの電源を ON とするスケジュールで観測を行い、3 月 29 日から 4 月 11 日の実験で 6 時間に 2 時間だけ GNSS モジュールの電源を ON とするスケジュールで観測を行った。これらの実験から得られたデータから観測時間の変化による精度変化の検証を行った。本検証で用いたデータは地盤ブロック Ex と地盤ブロック B に設置した観測点間のものであり、基線長は約 350 m であった。観測は 1 Hz で行った。

図-8 左は 3 時間に 30 分間の観測から得られた対象区域 X の地盤ブロック B と Ex に設置された観測点間の相対位置を示したものである。高精度な測位解である Fix 解を得られたのは全体の約 50 % であった。30 分間の観測から得られた 1800 エポックのうち Fix したエポックの中央値をその時間帯の代表値としてプロットしている。1 日に 30 分×6 回の観測を 25 日間行った結果が約 100 mm の範囲内に収束していることが図-8 左から分かる。

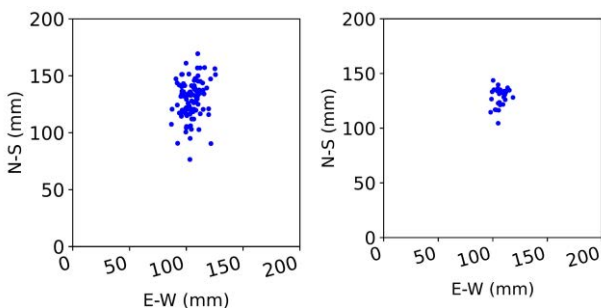


図-8 30分間の観測から得られた相対位置 (左)
2時間の観測から得られた相対位置 (右)

図-8 右は 6 時間に 2 時間の観測から得られた対象区域 X の地盤ブロック Y と Ex に設置された観測点間の相対位置を示したものである。高精度な測位解である Fix 解を得られたのは全体の約 55 % であった。2 時間の観測から得られた 7200 エポックのうち Fix したエポックの中央

値をその時間帯の代表値としてプロットしている。1 日に 2 時間×4 回の観測を 14 日間行った結果が約 30 mm の範囲内に収束していることが図-8 の右から分かる。

6. まとめ

検証実験から、理想的な測位環境下では約 5 mm の精度で観測を行うことができることが分かった。しかし、山間部などの実環境下では、樹木などの測位障害物の存在や消費電力の問題に起因する観測時間の制限などの条件によって観測精度が低下し、我々が実験を行ったフィールドでは約 30 mm の観測精度となった。山間部であれば他のフィールドでも同様に観測精度が低下することが予測される。

現在の提案システムの観測精度では、伸縮計などの従来センサを代替することは難しい。しかし、提案システムが従来センサに対して優れる点である観測範囲や観測開始時期などの点を活かして広範囲の地すべり予兆の監視を行い、従来センサと併用することで地すべり監視をより効果の高いものにできると考える。

今後は、地すべり監視システムとして成立するための観測時間や基線長の決定を行い、限られた条件の中で最大限の観測精度を得るための観測手法や得られたデータから誤ったデータを取り除き精度を向上させる手法の検討を課題として研究を進める。

謝辞：本研究は Hamamatsu ORI プロジェクトの一環として浜松市と株式会社フジヤマから現地実験について支援を受けた。

本研究は JSPS 科研費 17H01731 の助成を受けた。

参考文献

- 1) 農林水産省：地すべり災害を予防・軽減するための活動の手引き，
<https://www.maff.go.jp/j/nousin/noukan/tyotei/t_zisuberi/pdf/yobou_tebiki_1.pdf>，2008（入手 2022.6.11）。
- 2) 静岡県浜松市土木事務所：令和 2 年 7 月豪雨災害関連緊急地すべり対策事業大滝地区（静岡県浜松市天竜区佐久間町大字大井），2020。
- 3) Gili, J. A., Corominas, J., and Rius, J.: Using Global Positioning System techniques in landslide monitoring, *Engineering Geology*, Vol. 55, No. 3, pp. 167-192, 2000.
- 4) u-blox: u-blox F9 high precision GNSS module Data sheet, <https://content.u-blox.com/sites/default/files/ZED-F9P-04B_DataSheet_UBX-21044850.pdf>，2022（入手 2022.6.11）。