

地表の変位からすべり線形状を推定する手法と適用事例

石田孝司* 藤澤和範** 藤平 大*** 浅井健一**** M.Constantin*****

1. はじめに

地割れなど地すべりの兆候を確認した場合には、速やかにその規模を把握し、応急緊急対策を行うことが、被害の拡大を防ぐ上で重要である。一般的には調査ボーリングや調査孔を利用した動態観測によりすべり面深度や地すべり規模を把握するが、作業には日数を要する。また地すべり地内での作業であり、安全確保の点から慎重な対応が求められることはもとより、地すべりの動きが大きく作業を実施できない場合等もある。そこで本研究では、応急緊急対応に際して速やかにすべり面形状を推定するため、測線における地表の変位ベクトルからこれを推定する手法について検討を行い、その計算プログラムを作成した。本稿ではその手法の概要、並びに実事例への適用結果について紹介する。本手法は土木研究所において基本的な検討と計算プログラムの作成を行った後、国際航業(株)、日本工営(株)、基礎地盤コンサルタンツ(株)、(株)アイエステー、(株)キタック、(株)レイディックとの共同研究により検証とプログラム改良を行ったものである。なお本手法はすべり面形状を2次元断面で推定するものであるため、計算により得られる線形を「すべり線」と称することとする。

2. すべり線形状推定手法の概要

地表の変位ベクトルからすべり線形状を推定する手法に関する既往の研究としては、例えば宮澤

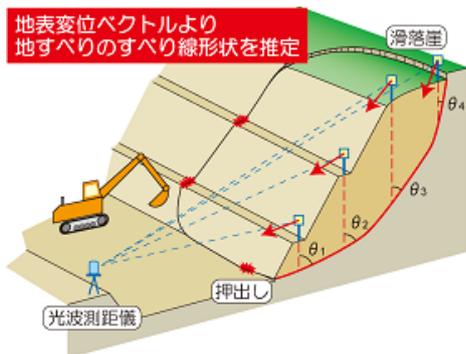


図-1 すべり線形状推定手法のイメージ

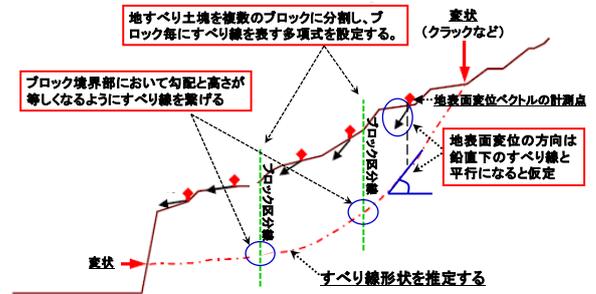


図-2 本研究で開発した手法の概要

ら¹⁾が挙げられる。これらの研究では、地すべりの地表の複数地点における変位ベクトルデータを用い、地表の亀裂等によって確認できる頭部の滑落崖または地すべり末端を通るように各地点の変位ベクトルの方向に応じてすべり線形状を作図する手法が提案されている。

本手法は、地すべり地内で相互の位置関係をほぼ一定に保ってすべり面上を移動する複数の地すべりブロックの変形量は移動量に比べて小さいとする仮定のもとで、地表面の測点の移動軌跡はその鉛直下方のすべり線形状とほぼ平行となるという宮澤ら¹⁾の考え方をベースとする。そして図-2に示すようにブロック区分線により地すべりの断面を複数のブロックに分割し、各ブロックのすべり線形状を多項式で表す。その上で多項式同士の境界において同じ高さ・同じ勾配となるように複数の多項式を繋ぎ、1本のすべり線としてその形状を表すものである。本手法の計算を実施するプログラムへの主な入力項目は、①測線に沿った地形形状および変位計測点位置、②地すべりの頭部と末端部の位置、③各変位計測点における2軸または3軸の変位量、④地すべり断面を複数のブロックに分割するブロック区分線である。これらに加え、すべり線がその地点を通過する地中境界点を設定することができる。例えば地質構造に規制されてすべり線に変曲点が生ずる椅子型すべり等の場合には、想定される変曲点付近に地中境界点を設定することで、変曲点を有するすべり線形状であっても実際に近いすべり線形状の推定が可能である。また、地すべり頭部で滑落崖を形成して

Application of the method of estimating slip plane through ground surface displacement of landslide.

いる場合などには、その勾配を入力することにより、すべり線形状へ反映させることを可能とした。プログラムの演算手順については文献²⁾を参照されたい。

3. 適用事例

以下に、日本とルーマニアの両国の地すべり地で計測した地表変位計測結果を基にすべり線形状を解析した事例、並びに空中写真測量結果を用いて推定した地表面変位ベクトルを基に解析した事例について、通常の地すべり調査に基づいて確定されたすべり面（以下、「調査結果を基に確定されたすべり線」という。）と、本手法の計算プログラムによる解析結果（以下、「プログラムによる解析結果」という。）を対比し、結果を紹介する。

3.1 切土斜面での適用事例

対象としたA地すべりは、幅約50m、長さ約80mの規模で、道路拡幅のための切土により亀裂等の変状が発生したものであり、その全景を写真-1に示す。斜面の地質は頁岩を基盤とし、凝灰岩を挟んでひん岩が上位に存在する流れ盤斜面である。

変状の進行が確認されたため、本手法によるすべり線形状推定を目的として、測線に沿って切土法面の小段に計4箇所の地表計測点を設け、6月9日にトータルステーションにより計測点の初期座標を計測した。同年7月24日から26日にかけての約160mmの降雨により、地すべり頭部亀裂をまたいで設置されていた地盤伸縮計が約60mmの変位を観測した。また、7月27日にトータルステーションにより計測した変位量は各計測点ともに約60mmであった。7月24日から26日をはさんで進行したのり枠の亀裂の状況を写真-2に示す。

計測により得られた地表の変位ベクトルを基にしてすべり線推定プログラムで解析した結果を図-3に示す。解析にあたっては、地すべり頭部の亀



写真-1 A地すべりの全景



(前年12月に撮影)

(7月28日に撮影)

写真-2 のり枠に生じた亀裂の進行状況

裂を挟んで設置されていたぬき板により変位ベクトルを算出し計算に反映させた。また、現地踏査の結果、この地すべりのすべり線形状は地質構造に規制された椅子型もしくは船底型であると想定し、すべり線の勾配が変化すると想定される付近にブロック区分線を設定した。

図-3のケース1は、ブロック区分線を地すべり頭部付近の勾配変化点付近に設定し、また頭部亀裂の勾配方向に地中境界点1点を設けて解析を実施した結果である。概ね調査結果を基に確定されたすべり線形状に合致する形となったが、末端部付近の形状に差異が生じている。そこで、地すべりの末端に近い勾配変化点周辺にブロック区分線を追加して解析を実施した結果をケース2に示す。その結果、プログラムによる解析結果は、調査結果を基に確定されたすべり線形状にほぼ合致する形となった。このケースのように地質構造に規制

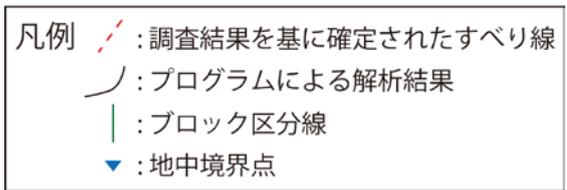
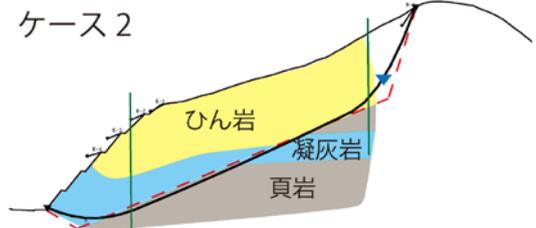
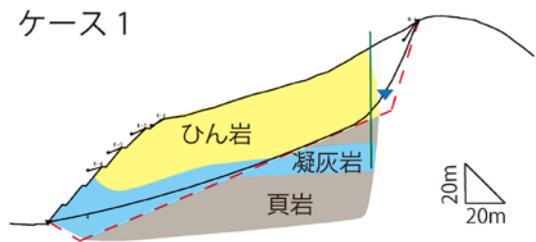


図-3 A地すべりのすべり線解析結果

される場合など、すべり線形状が椅子型、もしくは船底型と想定される場合には、ブロック区分線をすべり線の変曲点付近に適切に設定し、また地中境界点を上部のブロック区分線付近に設定することにより、適切なすべり線形状を推定しやすくなると言える。

3.2 乱されたシルト質土で構成される地すべりへの適用事例（ルーマニア）

ルーマニア国ブザウ地方で発生したColti-Alunis地すべりを対象として本手法の適用を試みた。地すべりの全景を写真-3に示す。この地すべりは、土塊が乱されながら大きく滑動した後の状態ではあるが、その後も変位が認められたことから、主測線上に5箇所の地表計測点を設け、トータルステーションにより各計測点の変位ベクトルを計測し、その結果を基にすべり線推定プログラムで解析を行った。その結果を図-4に示す。

ケース1（上段）は、ブロック区分線と地中境界点を設定せず、頭部滑落崖の勾配40度を勾配条件として入力して解析した結果である。プログラムによる解析結果は、地すべりの中腹部から脚部にかけては、調査結果を基に確定されたすべり線位置よりも深い位置に描かれた。

ケース2（中段）では、すべり線形状に変曲点があるものと仮定し、地すべり上部のすべり線の変曲点と想定した位置付近にブロック区分線と地中境界点を設定して解析した結果である。なおこのケースでは、地すべり頭部の勾配条件を入力していない。プログラムによる解析結果は全体的に浅い位置となった。

ケース3（下段）は、ケース2の計算条件に加えて、地すべり頭部の勾配40度を条件入力し解析した結果である。解析結果は、調査結果を基に確定されたすべり線に近い形状となった。



写真-3 Colti-Alunis地すべりの全景

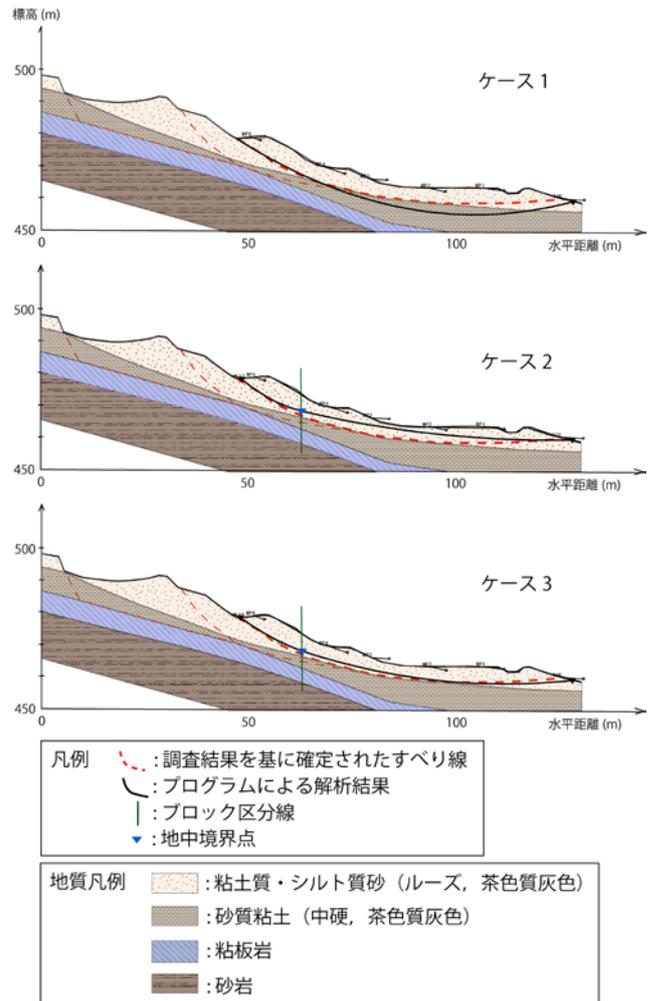


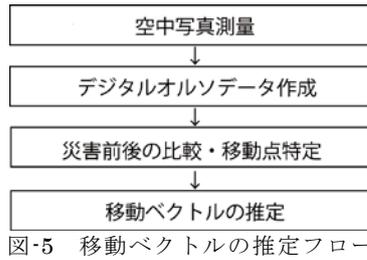
図-4 Colti-Alunis地すべりのすべり線解析結果

ケース1のようにブロック区分線を設定しない場合には、地すべり頭部から末端部までのすべり線形状をひとつの多項式で表すために実際とは異なる形状となる場合がある。またケース2とケース3との比較より、地すべり頭部のすべり線の勾配を条件として入力することにより、より適切なすべり線形状を推定しやすくなると言える。

3.3 空中写真測量による変位データを基にした適用事例

平成18年4月に山形県朝日町で発生した大船木地区地すべりを対象とし、すべり線形状推定手法の適用に際して必要となる地表面変位ベクトルを、地すべり発生前後の空中写真測量により取得し適用することを試みた。なお本地区の地質は、新第三紀中新世の堆積岩類を基盤としている。

地表面の移動ベクトルは、図-5に示すフローに従い推定を行った。地すべり発生前後それぞれの空中写真測量による地形図作成後、災害前後の地形から同一移動点を同定するため、よりビジュアル



【地すべり発生前】 【地すべり後】
図-6 地すべり発生前後のオルソ画像

ルに地形の表現が可能なデジタルオルソデータを作成した(図-6)。これを用いて地すべり前後で同一点と考えられる2箇所を特定し、それぞれの移動ベクトルを算出した。その結果を図-7に示す。この例に示すように、地すべり発生前後の空中写真を用いることにより、すべり線形状の推定が可能であることが示された。

なお、この事例では、2地点の変位ベクトルの方向が極端に違うことに起因し、地中境界点を設けない場合には地すべり頭部と末端部の位置を満足する解を得ることができなかつたが、地中境界点を設けることにより実際のすべり線に近い形状を表すことができたものである。

4. おわりに

地表の変位ベクトルを用いて地すべりのすべり線形状を推定する手法の概要、並びにこれの適用

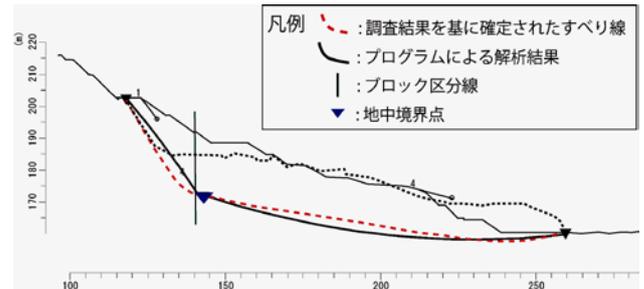


図-7 大船木地区地すべりのすべり線解析結果

事例を紹介した。現時点では、特にすべり線形状が椅子型や船底型のように強い変曲点を有する場合には、頭部滑落崖の勾配や、周辺の地質構造等を手がかりとしてすべり線形状を予め想定し、ブロック区分線や地中境界点を適切な位置に設定するための技術者判断を要する。現在、本プログラムの利用マニュアル(仮称)を作成中であり、また本プログラムはHP等で公開する予定であるため、広く活用いただき、その結果の検証等を通じて、より使い勝手の良いものに改良していきたいと考えている。

最後になりましたが、現地計測や試料の提供にご協力を頂きました関係機関の皆様に対しまして厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 宮澤圭、吉澤孝和：地すべり地の地表変位測量データを利用した三次元すべり面形状の推定、土木学会論文集、No.645/III-50、pp.51～62、2000
- 2) 小嶋伸一、藤澤和範、田中尚、武石明：すべり面推定プログラムの適用性の検討、第46回日本地すべり学会研究発表会講演集、pp.323～326、2007

石田孝司*



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
Koji ISHIDA

藤澤和範**



(株)高速道路総合技術研究所砂防研究担当部長(前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***



国土交通省都市・地域整備局 企画専門官(前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 TOHEI

浅井健一****



独立行政法人土木研究所つくば中央研究所材料地盤研究グループ地質チーム 総括主任研究員
Kenichi ASAI

M.Constantin*****



ルーマニアアカデミー地理学研究所 主任研究員、Ph.D
Mihaela CONSTANTIN