

崩落に至る地すべりの変形プロセスの解明及び崩落範囲推定手法の開発

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：土砂管理研究グループ（地すべり）

研究担当者：石井靖雄、西井稜子

【要旨】

本研究では、過去の崩落・未崩落地すべり事例 36 件を対象に、ひずみとひずみ速度の挙動特性を調査した。その結果、崩落地すべりは、ある一定のひずみとひずみ速度を超えた時に崩落していることが明らかになった。また、崩落範囲推定手法として、複数時期の LP データを用いた PIV 解析を行うことで、現地測量が困難な斜面の変動把握や不安定斜面の面的把握に広く活用できる可能性が示された。また、小型孔曲がり計は、従来の孔内傾斜計に比べ計測限界角度が少なくとも 6 倍向上することが明らかになった。

キーワード：地すべり、ひずみ、ひずみ速度、LP データ、小型孔曲がり計

1. はじめに

日本では年間 100 件前後の地すべりが発生している（国土交通省 HP）。それらの多くは、緩慢な動きを示す崩落に至らない地すべりである。しかし、一部の地すべりは、急激に加速し崩落に至る場合がある（例えば、2013 年 4 月門島地すべり（今泉・土屋、2013））。そのような急激に加速し崩落に至る地すべりに対して、地すべりの変状確認直後から適切かつ迅速なハード・ソフト対策を講じるためには、対象地すべりの崩落時期や崩落規模の予測が極めて重要と考えられる。これまで、崩落時期の予測に関しては、ひずみや変位量を基に崩壊時刻を予測する式（たとえば、斎藤・上沢、1966；斎藤、1968）が提案されており、それらの崩壊予測式は現場で活用されている。しかし、崩壊予測式を適切に運用するためには、対象地すべりがどのクリープ段階にあるかを把握すること、崩落に至る地すべりかどうかを判断することが必要である。しかし、現状では、対象地すべりが崩落に至るかを判別する手法は確立していない。

そこで、本研究課題では、崩壊予測式を適切に運用するために必要な崩落・未崩落地すべりの判別指標の提案を目指した。具体的には、崩落・未崩落地すべりを対象に、崩落に至る（もしくは、崩落に至らない）時の「ひずみ」と「ひずみ速度」の挙動特性を比較し、両者の差異を検討した。

崩落規模の予測に関しては、近年、急速に普及しつつある LP データを用いて、不安定斜面の抽出の可能性について検討した。さらに、不安定斜面の深さを推定するための新たな地中変位観測技術の適用性について検討した。

2. 崩落・未崩落地すべりの挙動特性

2.1 調査方法

本研究では、石田ほか（2011）の地すべり変動区分に基づき（表-1）、地すべりブロック全体が滑動し、

表-1 地すべり変動区分一覧
（石田ほか（2011）の表 1 の一部を抜粋）

区分	状態
レベル1	変動量は軽微であるが、頭部から側部にかけて継続的な段差・亀裂が生じている
レベル2	頭部滑落崖が明瞭であり、側部に断続的な段差・亀裂が生じている
レベル3	側部や末端部に部分的な崩落・押し出しが生じている
レベル4	頭部～側部に明瞭な変状が生じており、末端部では崩落土砂がブロック外に流出する
レベル5	地すべりブロック全体が大きく変動し、崩落土砂がブロック外に流出する



図-1 収集した地すべり事例の位置

表-2 計測項目

項目	説明
最大ひずみ	最大ひずみ速度時のひずみ
加速点ひずみ*	急激にひずみが増加した時のひずみ
最大ひずみ速度	最大のひずみ速度
加速点ひずみ速度*	急激にひずみ速度が増加した時のひずみ速度

*加速点: 図-2に図示。

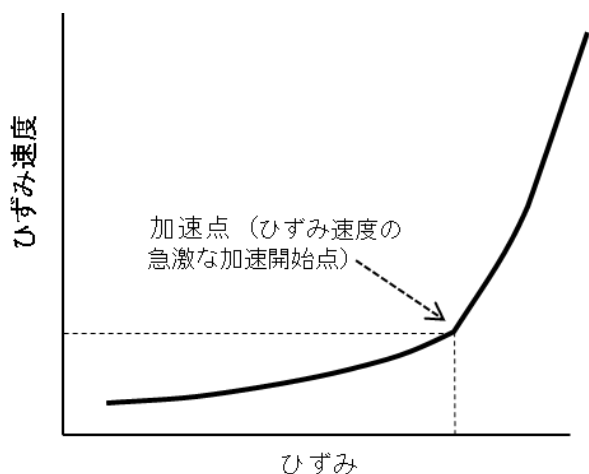


図-2 ひずみ速度と時間の模式図

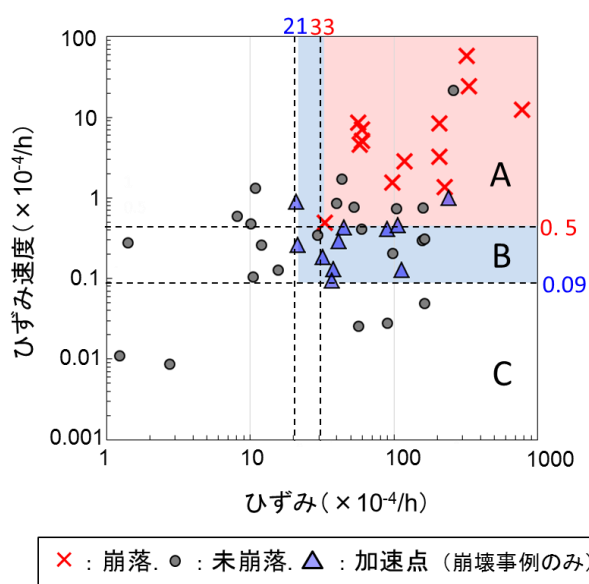


図-3 ひずみと最大ひずみ・加速点ひずみ速度の関係

末端部で土砂がブロック外に流出したもの(レベル4~5に該当)を崩落地すべり、流出せずブロック内で停止したもの(レベル1~3)を未崩落地すべりと定義した。解析対象地すべりは、1962年~2015年に発生した崩落地すべり13件、未崩落地すべり23件である(図-1)。崩落地すべりデータの一部には、先行研

究のデータ(斎藤・上沢, 1966; 斎藤, 1987など)も利用した。本研究では、「ひずみ」を斜面長に対する滑落崖の斜距離の比と定義した。そして、滑落崖に設置された地盤伸縮計の観測値を地盤伸縮計設置時の滑落崖の斜距離に加算し、経時的なひずみデータを算出した。また、「ひずみ速度」は1時間あたりのひずみの増加量とした。そして、表-2、図-2に示した4項目の値を算出した。なお、崩落地すべりのうち2事例は、加速点が不明瞭なため、解析対象から除いた。

2.2 崩落・未崩落地すべりの挙動特性

図-3に崩落・未崩落事例の最大ひずみ速度とその時点のひずみを示す。また、崩落事例の加速点ひずみ速度とその時点のひずみを示す。崩落・未崩落事例の最大ひずみ速度、ひずみの分布域は重複する箇所もあるが、崩落事例は最大ひずみ速度・ひずみがともに大きく、未崩落事例は最大ひずみ速度・ひずみがともに小さい、もしくはどちらの値か小さい傾向を示す。この分布傾向を整理するために、崩落事例が分布する領域A、崩落事例の加速点が分布する領域B、それ以外の領域Cに分類した。崩落事例は、加速を開始する領域B(ひずみ 21×10^{-4} 以上、ひずみ速度が $0.09 \times 10^{-4}/h$ 以上)を経て、領域A(ひずみ 33×10^{-4} 以上、ひずみ速度 $0.5 \times 10^{-4}/h$ 以上)の範囲で崩落に至ったことがわかる。すなわち、崩落に至る地すべりには、ある一定以上のひずみとひずみ速度に達することが必要であると考えられた。ただし、未崩落事例の一部には、領域Aに達したにも関わらず、崩落に至っていない事例も認められた。今後、この要因を明らかにしていく必要があるが、ひずみ・ひずみ速度を指標に崩落の切迫性を評価できる可能性が示された。

3. 崩落範囲推定手法の開発

3.1 LPデータを用いた不安定斜面の抽出

近年、急速にLP測量が普及しつつあり、場所によっては、複数時期のLPデータの蓄積が進んでいる。そのような複数時期のLPデータは、現地測量が困難な斜面の変動把握、不安定斜面の面的把握に広く活用できる可能性がある。そこで、本研究では、複数時期のLPデータを用いて、3次元変位量を算出し、不安定斜面の抽出を試みた。対象斜面は、現地測量によって不安定斜面の頭部境界は明らかになっているが、末端境界は、急傾斜のため現地測量ができず、明らかになっていない場所である。撮影期間毎の水平・鉛直成分の変位量は、PIV(Particle Imaging Velocimetry)法による画像マッチング(例えば、Mukoyama, 2010)

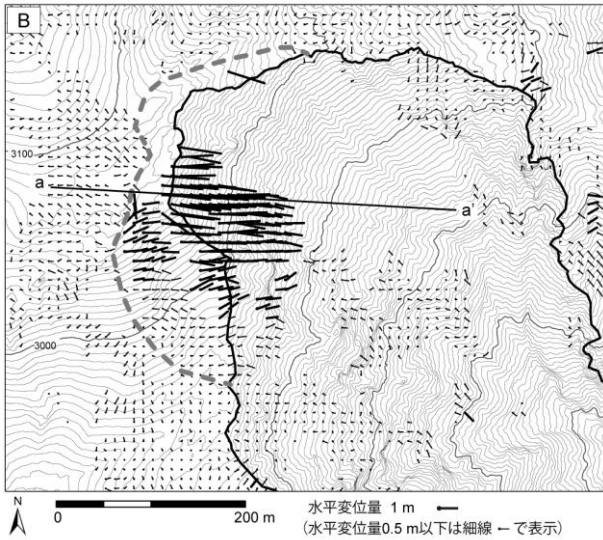


図-4 2009年～2012年における水平変位量
 太破線：現地測量データから推定される変動・不動
 斜面の境界（推定境界）。解析データは1mDEMを使用（西
 井ほか、2015から引用）

により算出した。図-4にPIV解析結果の一例を示す（西井ほか、2015）。PIV解析から算出された水平変位量が0.5m以上を示す斜面では、現地測量データと概ね対応した解析結果が得られた。また、これまで現地測量データが欠如していた急斜面（末端）においても、LPデータから変位ベクトルを算出することで、不安定斜面の末端が推定された。ただし、現地測量では変位が確認されていない場所（推定境界の外側）においても、小さな変位ベクトルが算出されており、それらは誤差と考えられた。

今後、PIV解析の適用可能な斜面の条件や誤差の原因を明らかにしていく必要があるが、他の現場への積極的な活用が期待できる。

3.2 小型孔曲がり計による塩ビ管の形状計測

現在、地中内部の変位量を把握する方法として、挿入孔内傾斜計を用いた計測が広く普及している。しかし、ガイド管の変形（せん断）が2～4cm程進むと計器を挿入できなくなることが（独立行政法人土木研究所ほか、2010）、同一ガイド管における長期間の観測データ取得の妨げとなっている。したがって、従来の孔内傾斜計の計測限界角度を超える計測器の開発が必要であると考えられる。

本研究では、角速度と加速度の6軸センサーの小型孔曲がり計（TAG0012 TYPE-A（多摩川精機））を用いて、計測限界角度を実験により調査した（表-3、4）。

図-5に示すように、長さ2m程の塩ビ管（VP40、VP50）を計測対象として、各実験条件下で計測間隔3

表-3 小型孔曲がり計の仕様

項目	説明
センサ構成	ジャイロ MEMS×3軸 加速度計 MEMS×3軸
センサ外形（剛体部）	φ 15 mm×60 mm
鉛直計測精度	5/1000以下

表-4 実験条件

実験条件	VP 40 ¹⁾	VP 50 ²⁾
	θ	θ
Case 1	0°	0°
Case 2	10°	10°
Case 3	30°	30°

1) 塩ビ管内径 40 mm. 2) 塩ビ管内径 50 mm.

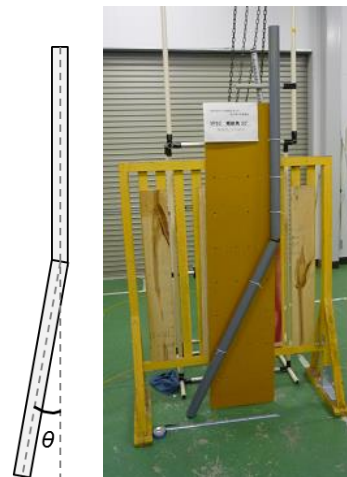


図-5 計測角度の模式図と実験の様子

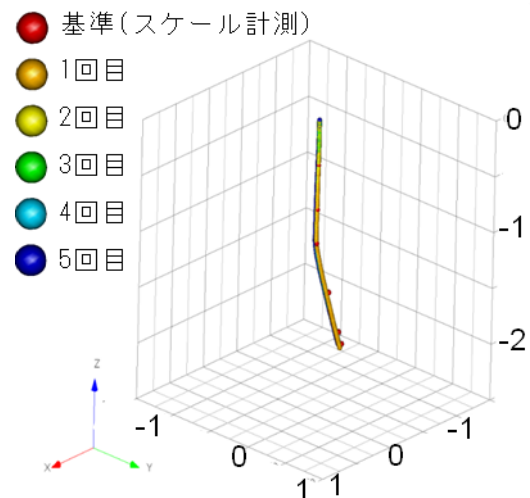


図-6 VP40 ($\theta = 30^\circ$) の計測結果

cm以下で5回ずつ計測した。なお、従来の孔内傾斜計の計測限界角度(図-5の角度 θ を指す)は、CADでの計算では、約 5° という計算値が得られている(計測器サイズ669 mm \times 30 mm、挿入管サイズの内径45.5 mmの条件)。

小型孔曲がり計を用いて、すべての実験条件の塩ビ管形状を計測することが可能であった。今回の実験では、小型孔曲がり計の計測限界角度を確認することができなかったが、少なくとも、 30° までの孔曲がりには対応できることが明らかになった。したがって、ガイド管の変形形態によるが、小型孔曲がり計は、孔内傾斜計の挿入が不能なガイド管を計測するための代替機となり得ることが示された。また、小型孔曲がり計は、ガイド管の溝がなくても、形状を計測できるため、地下水観測孔の塩ビ管においても、その形状を計測し、すべり面深度の推定に活用できる可能性がある。ただし、今回の実験では、計測長2 m($\theta=0^\circ$)に対して、計測結果は3 cm程(最大6 cm)のバラツキが認められた。図-6に、計測結果の一例を示す。角度 30° のVP40に対する5回の計測では、最大値と最小値の差分は最大0.036 m(到達位置zの値)だった。これらの計測値のバラツキの原因として、主に、計測器の姿勢制御の不安定さが考えられた。したがって、精度を高めていくためには、計測器の姿勢制御の改良が必要と考えられた。

4. まとめ

本研究課題では、崩落・未崩落地すべりを対象に、崩落に至る(もしくは、崩落に至らない)時の「ひずみ」と「ひずみ速度」の挙動特性を比較し、両者の差異を検討した。崩落事例は、加速を開始する領域B(ひずみ 21×10^{-4} 以上、ひずみ速度が $0.09 \times 10^{-4}/h$ 以上)を経て、領域A(ひずみ 33×10^{-4} 以上、ひずみ速度 $0.5 \times 10^{-4}/h$ 以上)で崩落に至ることが明らかになった。今回の解析では、一部の未崩落事例が領域Aに分布するため、崩落・未崩落事例を完全に判別することはできなかった。しかし、ひずみ・ひずみ速度の関係を時

系列で整理することで、崩落・未崩落を判別するための参考指標として活用できると考えられた。

崩落範囲推定手法については、複数時期のLPデータを用いたPIV解析を行うことで、現地測量が困難な斜面の変動把握や不安定斜面の面的把握に広く活用できる可能性が示された。また、小型孔曲がり計は、従来の孔内傾斜計に比べ、計測限界角度が少なくとも6倍向上することが明らかになった。今後、実用化するためには、計測器の姿勢制御を向上することが必要と考えられた。

参考文献

- 1) 国土交通省ホームページ: http://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/h27dosh/h27_dosyasaigai.pdf
- 2) 今泉文寿・土屋 智(2013): 静岡県浜松市門島地区で発生した斜面崩落. 日本地すべり学会誌, 50, 183-185.
- 3) 斎藤迪孝・上沢 弘(1966): 斜面崩壊時期の予知. 地すべり, 2, 7-12.
- 4) 斎藤迪孝(1968): 第3次クリープによる斜面崩壊時期の予知. 地すべり, 4, 1-8.
- 5) 石田孝司・宇都忠和・武士俊也・本間宏樹・藤原民章・水谷俊夫(2011): 滑落・崩落に至る地すべりの特徴に関する分析. 第50回日本地すべり学会研究発表会講演集, 89-90.
- 6) Mukoyama, S.(2010): Estimation of ground deformation caused by the Earthquake (M7.2) in Japan., 2008, from the Geomorphic Image Analysis of high resolution LiDAR DEMs. Journal of Mountain Science, 8, 239-245.
- 7) 西井稜子・石井靖雄・森永高行・守谷武史・光永健男・安齋徳夫・佐藤 匠・加藤容子・本間信一(2015): 多時期の航空レーザー測量データを用いた不安定斜面の3次元変位量の検討—早川 流域アレシ崩壊地の例—. 平成27年度砂防学会研究発表会概要集B, 114-115.
- 8) 独立行政法人土木研究所・応用地質株式会社・坂田電機株式会社・日本工営株式会社(2010): 地すべり地における挿入式行内傾斜計 計測マニュアル, 理工図書.

DEFORMATION PROCESSES OF LANDSLIDE TOWARD FAILURE AND DEVELOPMENT OF ESTIMATION METHOD OF THE FAILURE AREA

Budget : Grants for operating expenses
General account

Research Period : FY2011-2015

Research Team : Erosion and Sediment
Control Research Group
(Landslide Research Team)

Author : ISHII Yasuo
NISHII Ryoko

Abstract : We investigated the relation between strain and strain rate of past 36 failure and non-failure types of landslides. The results indicated that failure occurred when both strain and strain rate exceeded threshold values. With regard to estimation of unstable areas, PIV analysis using LP data at multiple periods can efficiently detect an unstable area such as inaccessible and/or wide areas. Then, the limit of measure angle with pipe-form measuring device was at least more than 30°, which was 6 times than that with a usual borehole inclinometer.

Key words: landslide, strain, strain rate, LiDAR data, pipe-form measuring device