

## 4.2 すべり面推定手法の活用による地すべり発生後の移動形態推定手法に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 21～平 22

担当チーム：土砂管理研究グループ（地すべり）

研究担当者：武士俊也、石田孝司

### 【要旨】

亀裂や段差などの地すべりの徴候が表れた場合には、応急緊急対策や恒久対策の計画を立案し実行される。その際には地すべりがその後を示す動きを的確に判断することが、二次災害防止や警戒避難の検討にあたって重要である。しかし、地すべりの滑落・崩落危険度を評価する手法として確立されたものはない。本研究では、地すべりが動き出した直後の初期段階において滑落・崩落に至る危険度を評価する手法の開発を目的とし、地すべり事例を基にした事例検討や統計分析、地すべり末端部小規模崩落が地すべりの安全率低下に及ぼす影響やすべり面形状との関係分析などの手法を適用して研究を実施した。その結果、滑落・崩落に至る地すべりに寄与する要因として斜面形状、斜面勾配、地すべり長さ、すべり面形状、地すべり土塊の性状、雨量比が抽出され、これらを基に危険度の判断手法を提案した。次に、地すべり末端部の小規模崩落が地すべり全体の安全率を低下させ、滑落・崩落に至る地すべりの誘因となる場合があることを示した。この地すべり末端部の小規模崩落の範囲や規模を推定するために、斜面の面的変位計測手法を開発した。さらに、地すべりの安全率と変位速度の関係などに関する検討により、速度変化に及ぼす安全率低下量について一定の知見を得た。

キーワード：滑落・崩落型地すべり、統計解析、斜面安全率、末端部小規模崩落、面的変位計測

### 1. はじめに

地すべり発生後の対応を考える際には、その規模を迅速に把握し、かつ移動土塊がその後を示す挙動を推定することが必要である。本研究では、地すべりが動き出した直後の初期段階において、その地すべりが滑落・崩落に至る危険度を評価する手法の開発を目的とし、いくつかの面から検討を行ったものである。その概要を以下に示す。

#### ① 地すべりが滑落・崩落に至る危険度評価手法

過去約 10 年の間に災害関連緊急地すべり対策事業が採択された地すべり事例を中心としてその調査結果を収集し、統計解析により滑落・崩落に至る地すべりの素誘因を定量化し、またその危険度を評価する手法を作成した。

#### ② 地すべり末端部の小規模崩落が斜面安定に及ぼす影響

地すべりが滑落・崩落に至る前には、その末端部付近において小規模崩落が発生するケースが多い。この末端部小規模崩落が背後の地すべり全体の安定性に及ぼす影響を斜面安定計算により検討した。

#### ③ 地すべり末端部の小規模崩落範囲を推定するための計測手法

②の検討を踏まえ、地すべりが滑落・崩落に至る前兆

現象としての末端部小規模崩落が地すべり安定性の影響に及ぼすこと、また小規模崩落の前の地表面変状が滑落・崩落時期の予測に繋がると考えられたことから、地上設置形 3D レーザスキャナ（以下、「地上型 LS」と言う。）を用いて地すべりの膨れだしなどの面的変位を把握する手法について検討した。

#### ④ 安全率と地すべり変位速度の関係検討

地すべりが滑落・崩落に至る場合には変位速度は収束することなく加速する。この変位速度を予測する時、地下水位変動→安全率→変位速度→滑落予測という流れでの滑落予測を筆者らは想定している。この流れの中で、既往の研究では安全率→変位速度に関する部分の検討がなされていないため、安全率の変化が変位速度に対して及ぼす影響を評価した。

## 2. 地すべりが滑落・崩落に至る危険度評価手法

### 2. 1 検討方法

平成 13 年度から平成 21 年度に発生し災害関連緊急地すべり対策事業が採択された 187 の地すべり事例を対象として調査報告書などの調査結果を収集した。このうち融雪や原因不明の事例を除き、降雨に起因して発生した 142 の事例を解析対象とした。その上で、各事例の素誘因を整理した。整理した主な項目を以下に示す。

表-1 地すべり変動区分

滑動状況	模式図	状態	現象	滑動量	滑落崖	崩落
Level 1		変動量は極めて軽微	頭部:断続的な開口亀裂。 中央・側部:側部に断続的な亀裂。 末端:変状無し。	小	開口亀裂	
Level 2		頭部が主に変動	頭部:明瞭な滑落崖が連続。 中央・側部:側部に断続的な亀裂。 末端:変状無し、または部分的な押し出し		数十cm~ 1.2m	
Level 3		滑動は頭部~中央・側部で明瞭であり、部分的な表層崩壊が発生	頭部:明瞭な滑落崖が連続。滑落崖以外の段差亀裂。 中央・側部:断続的な段差亀裂。部分的な表層崩壊。 末端:部分的な押し出し・末端崩壊		数十cm~ 1.2m	
Level 4		大きな変位を伴う滑動がブロック全体に及び、部分的に崩落	頭部:落差の大きい滑落崖が連続。滑落崖以外の連続する多数の段差亀裂。 中央・側部:頭部滑落崖が側部まで連続。ブロックを横断する段差亀裂。多数の表層崩壊。 末端:大きな変位を伴う押し出しや末端崩壊がブロック幅全体に及ぶ。部分的に崩壊土砂がブロック外に流れ出している。		mオーダー	↑ 木葉務で崩落として扱う範囲 ↓
Level 5		地すべりブロック全体が崩落	頭部:大きな崩落面が出現。 中央・側部:無数の段差、開口亀裂が発達。 末端:崩壊土砂がブロック外に流出。	大	数m以上	
Level 0 (崩壊)		地すべり滑動を伴わない崩壊 ・河川浸食による末端部の崩壊(末端崩壊により地すべりブロックに変状が現れている場合も含む)		-	-	

① 地形要因：発生位置、縦断・横断形状、河川との関係、斜面勾配 など

② 地質要因：地質年代、岩相区分、地質構造、移動土塊の性状、断層の有無 など

③ 地すべり規模：地すべり幅、長さ、層厚、移動土砂量、すべり面勾配、地すべり分類 など

④ 誘因：連続雨量、日雨量 など  
この結果を基に、滑落・崩落に至りやすい要因を定量的に評価するため、数量化Ⅱ類、および数量化Ⅲ類を用いた多変量解析を行った。

解析に先立ち、滑落・崩落に至った地すべりの定義について検討した。対象とした地すべりの変状の程度や連続性に着目し、表-1に示す形で地すべりの変動状態を Lev.0~Lev.5 に区分した。このう

ち、地すべりブロック全体が大きく変動してブロック境界沿いに連続した明瞭な変状が発生し、滑落・崩落土砂

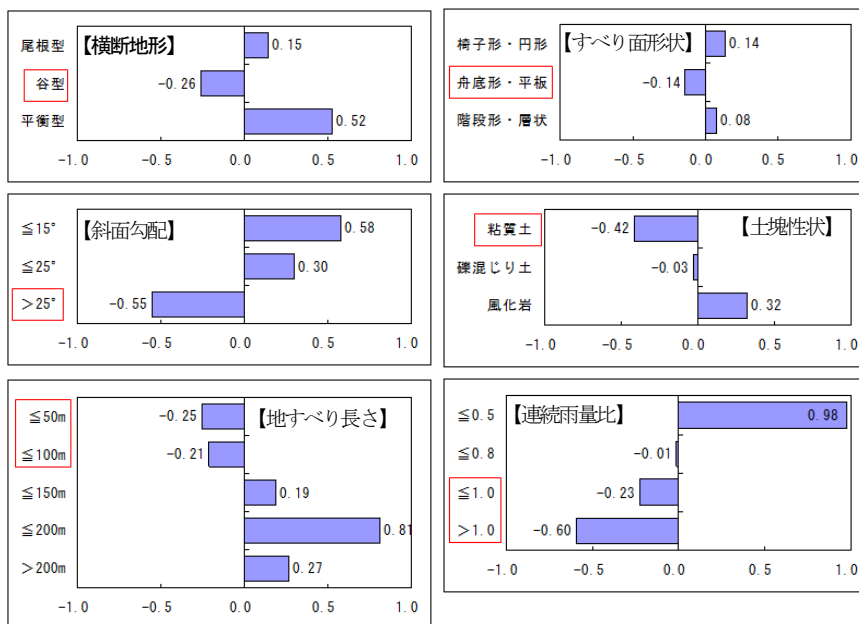


図-1 カテゴリースコアグラフ

(横軸がカテゴリースコアを示し、カテゴリースコアの値がマイナス側に示されているほど「滑落・崩落に至る」寄りに判別される)

がブロック外へ流出した Lev.4 および Lev.5 の状態に至ったものを、滑落・崩落に至った地すべりとして扱うこととした。

## 2. 2 数量化Ⅱ類

滑落・崩落の有無と各要因の判定を行い、滑落・崩落の有無と相関性が高い要因を選定して数量化Ⅱ類による分析を行った。ここでは、目的変数（滑落・崩落の有無）と相関が高く、互いに高い相関が見られない6つの説明変数として、「横断地形」、「斜面勾配」、「地すべり長さ」、「すべり面形状」、「移動土塊の性状」、「連続雨量比」（地すべり発生時の連続雨量／既往最大日雨量）について分析を実施した。その結果を図-1に示す。

数量化Ⅱ類による分析の結果、斜面の横断地形は谷型、斜面勾配 25° 以上、地すべり長さは 100m 以下、すべり面形状は船底型・平板、移動土塊の性状は粘質土、連続雨量比は 0.8 以上の地すべりは、滑落・崩落に至りやすい傾向があることが認められた。

解析の結果として、各項目のカテゴリースコアの加算値が+0.1277 より低い場合にはその地すべりは滑落・崩落に至りやすいと判断され、対象とした事例の判別率的中率は 73%となった。今後、滑落・崩落を判別するための上記の項目と数値について検証を行う予定である。

## 2. 3 数量化Ⅲ類

2.2で抽出された6要因には降雨に関する項目がある。しかし少ない降雨で滑落・崩落に至った地すべりと、降雨が多い時に滑落・崩落に至った地すべりとを一律に扱っているため、降雨前の地中の地下水状態を反映できなかった。そこで、降雨の要因である連続雨量比を含まない説明変数を用いて数量化Ⅲ類による分析を行い、その

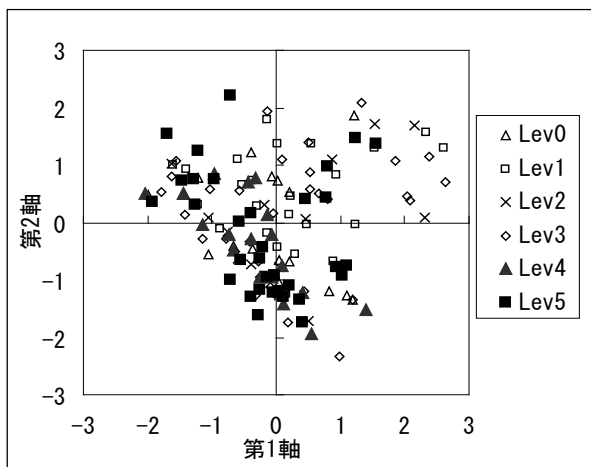


図-2 数量化Ⅲ類による散布図

## 4.3 すべり面推定手法の活用による地すべり発生後の移動形態推定手法に関する研究

後、降雨の大きさ毎の散布図を作成してサンプルの分布傾向などを比較した。ただし、降雨の要因である連続雨量比を除くと主要な要因が少なくなることから、降雨に関する説明変数を除いて目的変数（滑落・崩落）と相関が見られる 11 項目（斜面勾配、地すべり長さ、横断地形、移動土塊の性状、すべり面形状、すべり面勾配、移動土塊層厚、移動土砂量、斜面における地すべり位置、地質、地すべり分類）を用いて数量化Ⅲ類による分析を行った。分析の結果得られた散布図を図-2に示す。

滑落・崩落に至った地すべり（Lev.5 および Lev.4）のサンプルは図の左下側（第1軸、第2軸の負の方向）に偏って分布しているのに対し、それ以外のサンプルは原点からやや右上側（第1軸、第2軸の正の方向）に偏る傾向となった。

地すべり発生時の現地調査により得られる情報に対応するカテゴリ数量から第1軸、第2軸それぞれの合計値を散布グラフにプロットすることにより、その位置から、地すべりが滑落・崩落に至る危険度の判断目安のひとつとすることが考えられる。

今後、数量化Ⅱ類による判定方法と併せて、検証を行う予定である。

## 3. 地すべり末端部の小規模崩落が斜面安定に及ぼす影響

### 3. 1 検討方法

地すべり末端部の土塊の消失と背後の地すべり土塊の安全率への影響を把握するため、地盤伸縮計による計測データが存在した 8 事例を対象としてフェレニウス法による二次元斜面安定計算を行った。ここで、 $c$  と  $\phi$  は逆算法により求めることとした。

斜面安定計算を行う際には、一般的に地すべりの滑動状態を考慮して現状の安全率を仮定した上で、これに合致するすべり面強度定数を逆算により決定する方法が取られる。ここでは、滑落・崩落に至る地すべりの誘因のひとつとして想定している地すべり土塊末端部の崩落土砂量と安定性の低下量をそれぞれ定量的に求めることがひとつの目的であるため、地すべり変位速度とその時の安全率の関係を求めた検討事例<sup>1)</sup>を基にして地すべり移動速度と安全率の関係を近似式で表した。この関係を図-3に示す。その上で、対象事例の地盤伸縮計データから得られる第2次クリープ段階の移動速度を前述の近似式に当てはめて崩落前の安全率を求めた。なお、変位速度から推定した安全率が 1.0 を下回るものは、変位速度と安全率の関係から外れたものとみなし、便宜上安全率を

4.3 すべり面推定手法の活用による地すべり発生後の移動形態推定手法に関する研究

安全率の推移を把握することとした。

3.2 斜面安定計算結果

検討を実施した事例のうち、いくつかの事例を抜粋し、その結果を以下に示す。なお、図中の赤色の線はすべり面形状、青色の線は地下水位を示している。

〔事例①〕

地すべり移動速度から初期安全率を $F_s=1.042$ として計算を行った結果を図-4に示す。地すべり末端部が $34.5m^3$ 崩落した時点で安全率は1.0を下回った。末端部小崩落によりすべり面長が短くなり、滑動力に比べて抵抗力が低減したことにより安全率が低下したものである。なお、すべり面が欠損しない浅い末端部小崩落の場合には、更に末端部の崩落土量が必要となる。

〔事例②〕

地すべり移動速度から初期安全率を $F_s=1.109$ とし、地すべり末端部で土塊を欠損させた時の安全率の変化を見た。図-5には初期状態から末端部小崩落を経てオーバーハングが生ずる過程における地形と安全率変化を示した。地すべり末端部が崩落する前の初期状態(①)から、すべり面末端部で約 $23m^3$ の小崩落が発生することにより安全率は約5%低下した(②)。次にオーバーハングが生ずる形でこの小崩落の背面がすべり面に沿って約 $30m^3$ 欠損することにより安全率はさらに約6%低下し、1.0を下回った(③)。

図-6は、③の状態からオーバーハングを解消し、さらにその後再びオーバーハングが生ずる過程における地形と安全率変化を示した。③の状態からオーバーハング部が脱落する形で約 $50m^3$ の末端部小崩落が生じたことにより逆に安全率は約5%上昇した(④)。次にこの状態からオーバーハングが生ずる形で約 $60m^3$ が欠損することにより再び安全率は約5%低下し安全率は1.0を下回った。

〔事例③〕

地すべり移動速度から初期安全率を $F_s=1.076$ とにおいて地すべり末端部の侵食と表

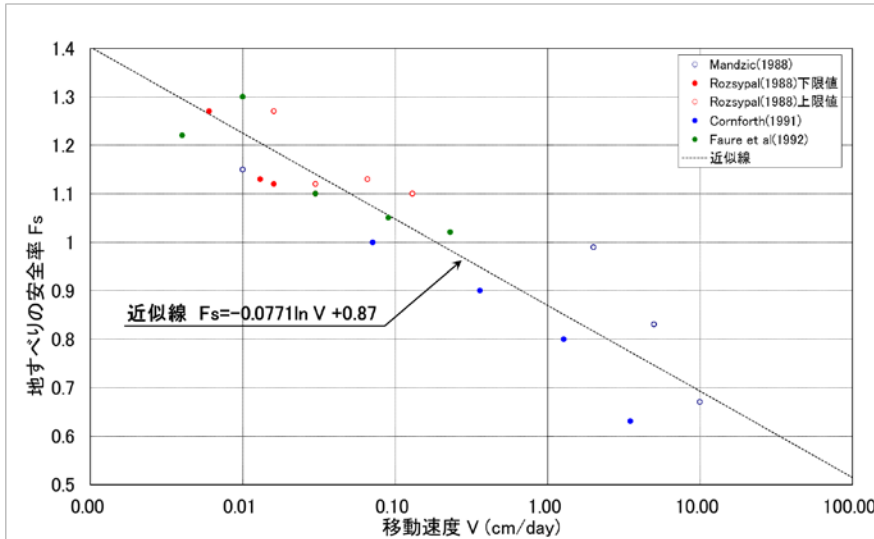


図-3 地すべりの滑動状態と安全率の関係 (文献1)などを基に作成)

1.0とした。この検討で対象とした事例においては、地すべりが滑落・崩落する前の末端部付近の小規模崩落の形状や土砂量を確認できないものが大半であった。そこで検討に際しては、地すべり土塊末端付近が河川の攻撃斜面にあたることや急勾配斜面であることなど、各地すべりの特性や条件を考慮し、地すべり土塊末端部の侵食や表層崩壊などを想定して地すべり土塊末端部の欠損形状として与え、安全率が1.0を下回るまで逐次斜面安定計算を繰り返し、末端部小崩落あるいは侵食による安定限界土砂量を把握するとともに、その状態に至るまでの

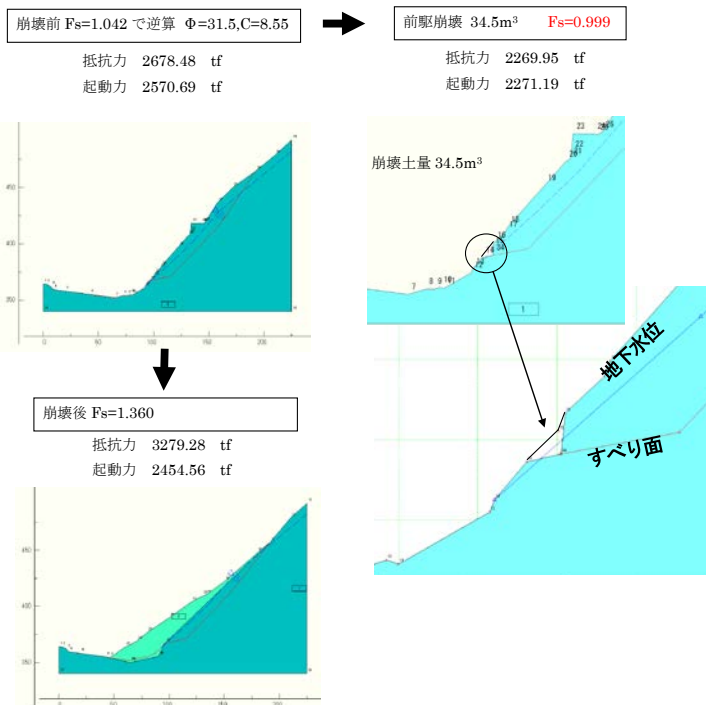


図-4 事例①の検討結果

#### 4.3 すべり面推定手法の活用による地すべり発生後の移動形態推定手法に関する研究

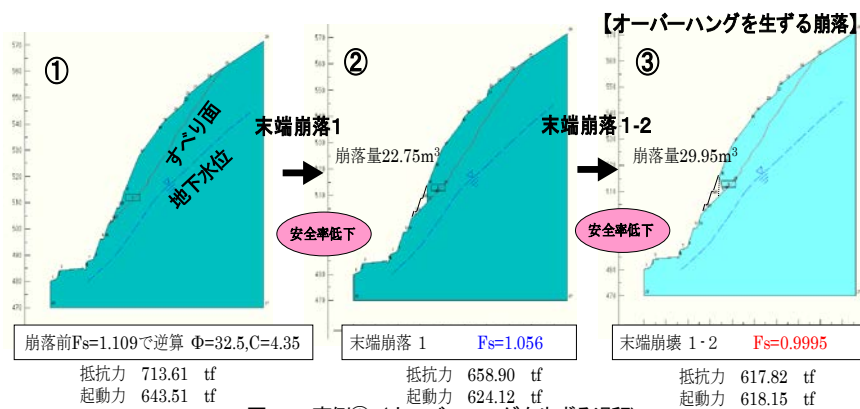


図-5 事例② (オーバーハングを生ずる過程)

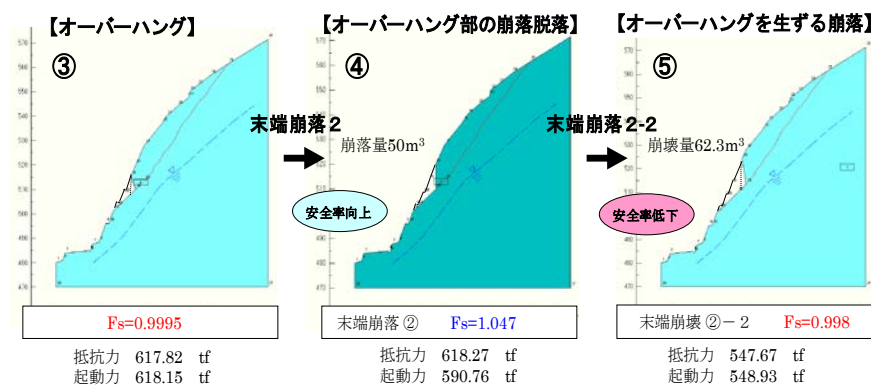


図-6 事例② (オーバーハング部欠損と再形成過程)

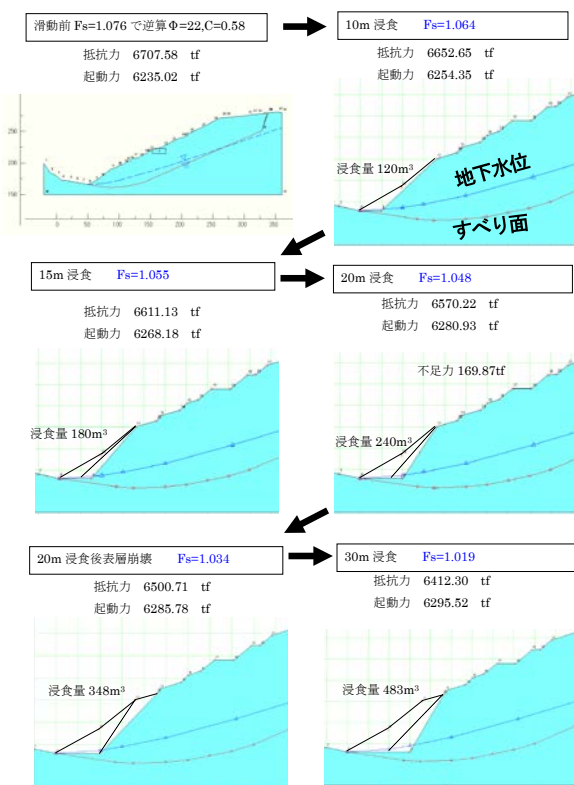


図-7 事例③ (オーバーハング部欠損と再形成過程)

層崩壊が交互に進行する状況での限界崩壊土量を検討した。その結果を図-7に示す。このケースでは、地すべり末端部が崩落した際に境界となった深度が地すべりのすべり面より浅い位置にあったことから、地すべり末端部の土塊の欠損による形状変化により安全率が低下したものである。

### 3.3 崩落誘因としての末端部小崩落の評価

滑落・崩壊に至る地すべりの不安定化の要因は、第2次クリープから第3次クリープへ移行するきっかけを与える要素であると考えられる。その要因としては、地形形状の変化、すなわち末端部小崩落による土塊の欠損やすべり面の短絡化により地すべり土塊の斜面安定上のバランスが変化し安全率が低下する場合や、地下水位の上昇が影響する場合などが考えられ

る。

今回検討対象とした事例においては、地下水位が確認されていない、もしくはすべり面以深にあるものが多かったことから、ここでは地下水位条件を固定して、土塊の形状の変化(末端部小崩落)や、小崩落に伴うすべり面の短絡化によるすべり抵抗力の変化に起因する斜面安全率の変化に関する検討を行った。その結果、地すべり末端部での小規模崩落は地すべり全体の安全率を低下させる要因となることがわかった。

## 4. 地すべり末端部の小規模崩落範囲を推定するための計測手法

### 4.1 検討方法

地すべりが滑動し滑落・崩壊に至る前に、地すべり末端部周辺の面的な変形計測により、すべり面位置や地すべり範囲、また小規模崩落の規模を予測するために、地上型LSを用いた地すべりの面的な変状計測を試みた。ここでは、土木研究所構内での地上型LSの基本性能と計測時の留意点等を把握するための試験、およびいくつかの斜面や構造物を対象とした現地計測を通じて、地上型LSによる複数時期の取得データの差分解析による地

盤変位の面的把握手法について検討した。

## 4. 2 予備試験

### 4.2.1 実施内容

予備試験で確認した主な項目は以下のとおりである。

#### ① 測定可能距離の確認

測定距離と反射強度の関係を確認し、本研究における試験斜面や構造物の測定可能範囲を確認した。

#### ② 入射角度の確認

斜面を斜め方向から測定した場合には、地上型 LS からのレーザー光の反射率が低くなる。そこで、レーザー光が対象物に対して斜めに入射する場合の計測の信頼度を確認するため、同一対象物の角度を変化させての計測を古なった。

#### ③ 座標変換方法の検討

対象が広範囲となる場合や、機械を再設置した場合などには複数の取得データを合成する必要がある。そこで合成方法として主に用いられている機械点バック点法とタイポイント法それぞれを用いた合成を行い、座標変換方法としての適用性の検討を行った。なお、機械点バック点法は地上型 LS を固定機械点に水平に設置し、地上型 LS の据え付け方向を決めるターゲット（バック点）を計測することにより、毎回の計測データ点群に同一の機械座標系を割り付ける手法である。またタイポイント法は、計測対象範囲内に複数のターゲット（タイポイント）を設置し、これらの位置関係から最適となる座標変換パラメータを求め、毎回の計測データ点群に同一の機械座標系を割り付ける手法である。

#### ④ 対流が計測値に与える影響確認

貯水池などを挟んで計測対象斜面が存在する場合には、対流の影響が懸念される。そのため、対流が計測値に対してどの程度影響を与えるかについて確認するための試験を行った。試験実施日は残暑の平成 22 年 9 月 1 日の炎天下、土木研究所構内の試験走路を利用し、3D スキャナと計測対象物の間を 200m とし、対象物はベニヤ板（1枚は正対、1枚は 30° 傾けた状態）として、散水前、散水中および散水直後にそれぞれ計測した。

#### ⑤ 地披植生の影響確認

計測対象となる地すべりの地表面が裸地であることは希であり、多くの場合は植生で覆われていることが想定される。地上型 LS の計測に際して、植生の生育や季節変化はノイズデータとなるため一般的には排除すべきものであるが、地すべりの切迫状況などによっては植生の影響を含んだまま斜面の挙動を評価しなければならない

### 4.3 すべり面推定手法の活用による地すべり発生後の移動形態推定手法に関する研究

ケースが考えられる。そこで、地披植生の影響の程度を確認するための試験を実施した。試験方法は、植生が繁茂した斜面を対象とし、スキャン条件を統一した上で複数回の計測を行い、その差を比較することとした。なお、この試験は平成 22 年 10 月 8 日に秩父地方にて実施した。

### 4.2.2 計測結果

研究期間を通して使用した地上型 LS は(株)トプコン製の GLS-1000（註；平成 22 年 4 月以降は GLS-1500 を用いた。両機器とも計測精度は同一であるが、GLS-1500 は計測速度が向上した機種。平成 22 年 4 月のアーチダム堤体計測に際して両機種を使用した計測を実施し、GLS-1500 を用いても GLS-1000 と同等の計測精度を有していることを確認した。）を用いた。

#### ① 測定可能距離の確認

実験は地上型 LS から測定対象のベニヤ板までの距離を変えて、100m、200m、300m、350m の 4 ケースを行った。実験結果として、計測距離に対する点群データ（座標データ）の取得点数、平均誤差、RMS（平均二乗偏差）、正規化RMSを整理し、表-2および図-8に示す。ここで、RMSはデータの散らばり具合を示す二乗平均平方根、正規化RMSはRMS値を平均距離で正規化したものである。この結果、データ取得点数は計測距離が長くなるほど低下し、平均誤差やRMS値は大きくなる傾向にあることがわかる。計測対象物までの距離が 300m を超えると急激に誤差が大きくなることから、実験で使用した危機を用いた計測を行う場合には計測対象までの距離を 300m 以内とすることが、計測点の取得率

表-2 誤差産出結果（計測距離との関係）

計測距離	データ取得点数(点)		平均誤差(cm)		RMS(cm)		正規化RMS(cm)	
	垂直	45°	垂直	45°	垂直	45°	垂直	45°
100m	13,384	10,233	3.1	6.2	3.1	6.2	0.3	0.5
200m	12,882	9,422	3.6	9.1	3.7	9.1	0.3	0.8
300m	10,609	5,339	3.8	12.4	4.3	12.7	2.1	2.9
350m	7,549	1,322	4.4	15.2	7.0	16.7	5.4	6.9

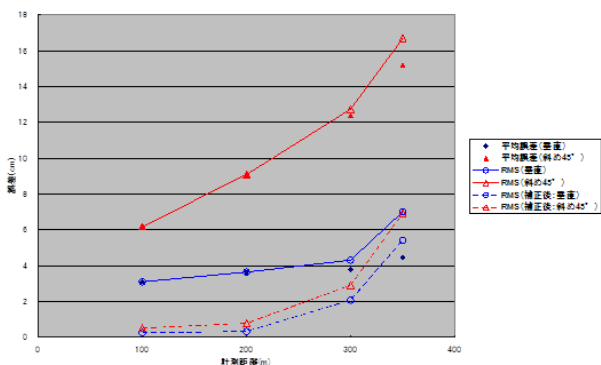


図-8 計測距離と誤差の関係

を高く保つことができ、実用上計測可能な範囲であることを確認した。

### ② 入射角度の確認

計測距離200mの条件において計測対象物への入射角度を0°（正対）から75°までの5ケースで行った。その結果を図-9に示す。3D スキャナと正対する角度が最も計測点の取得率が高く、距離誤差も小さいことがわかった。計測角度と誤差の関係からは入射角度が60°から75°の間で極端に誤差が大きくなったことから、地上型LSの設置に際しては60°以内程度の入射角で計測できる範囲が望ましいと考えられる。

表-3 誤差産出結果（角度との関係）

角度(°)	データ取得点数(点)	平均誤差(cm)	RMS(cm)	正規化RMS(cm)
0°	12,882	3.6	3.7	0.3
30°	10,749	6.6	6.7	0.6
45°	9,422	9.1	9.1	0.8
60°	6,222	13.2	13.2	1.2
75°	1,008	26.3	26.4	2.6

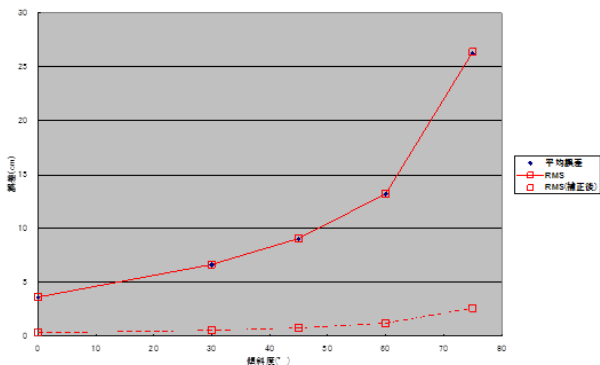


図-9 計測対象物の角度と誤差の関係

### ③ 座標変換方法の検証

座標変換方法について比較検討を行った結果、試験条件においては機械点バック点法よりもタイポイント法の方が座標値のズレが少ないことがわかった。タイポイント法は、2つの計測対称面の重複する部分において複数の同一点を選定し、これらの点を結合点として2つの画像を結合させる方法である。この結合点が全て不動点であれば最も高精度な座標変換方法となるため、各回の計測時にトータルステーション（以降、「TS」という。）によりその位置を確認する、或いは計測期間中地上型LSを据えっぱなしにしての計測が可能であれば、この方法は最も適切であることがわかった。

しかし、地すべり斜面の計測に際しては確実に不動点となる位置を押さえることが困難な場合もあること、また地上型LSを据えっぱなしとできない状況が想定され、

### 4.3 すべり面推定手法の活用による地すべり発生後の移動形態推定手法に関する研究

これらのことに起因して計測データ点群に歪みが生じる可能性が高い。そのため、本研究を通して、前記した2つの方法とは異なる独自の座標変換方法を考案した。なお、本研究における差分処理方法はこの独自に考案した方法を採用した。

#### ④ 対流が計測値に与える影響確認

試験の結果、正対させた場合も30°傾けた場合も概ね一定値を示しており、地上型LSと計測対象物間の水蒸気やこれに伴う対流の影響はほとんど見られないことを確認した。

#### ⑤ 地披植生の影響確認

試験対象とした斜面を写真-1に示す。また、計測1回目の点群データを図-10に示す。植生を計測した点と地



写真-1 試験対象とした斜面の状況



図-10 点群データ（計測1回目）



図-11 植生除去処理の状況（計測1回目）



図-12 植生除去後（計測1回目）

表面を計測した点が混在している点群データが取得されていることから、以下の手法で植生の影響を除去し、地盤面の形状を抽出することを試みた。

- ・点群データを0.5×0.5mメッシュで区分
- ・各メッシュ内において高さ値が最小となる点を代表値として抽出
- ・上記の処理を1回目計測のみで最小値を抽出、また複数計測回を重ね合わせて抽出する場合を試行

図-11は計測1回目の点群データから植生除去処理を行った結果を示す。メッシュ単位で最小値となる高さ値を抽出した部分を黒色で表示し、それ以外の部分を朱色で表示してある。また、図-12には植生除去後の点群データを示した。メッシュ単位の中で最小となる高さ値を抽出することにより、植生部を完全に除去するまでには至っていないものの、地表面を計測したと見られる点が多く抽出された。この傾向は計測2回目以降のデータを重ね合わせてもほぼ同等の結果となり、同じ条件で計測した場合には地表面の形状を把握することの可能性が示された。

### 4.3 地すべり末端部周辺の変状を把握するための面的変位計測

#### 4.3.1 方法

平成21年度には地すべりの動きがあると想定される自然斜面3箇所及び構造物(アーチ式ダム堤体)1箇所を試験地として設定し地上型LSを用いて2回の地形計測を実施した。平成22年度は春～夏にかけて第3回目の計測を、また秋には第4回目の計測を行った。解析に際しては、地上型LSによる計測と併せて実施したTSによる計測値や、管理者が実施している孔内傾斜計測定値、GPS計測値などを用いて、地上型LSにより取得した複数時期の地形データの差分解析結果との比較検証を行った。試験地のうち2箇所についてその結果を以下に記す。なお、この2箇所の計測概要を表-4に示す。

表-4 試験地における計測の概要

地区	A地区(道路沿い斜面)	B地区(貯水池隣接斜面)
計測日	<ul style="list-style-type: none"> <li>・1回目: 2009/09/10</li> <li>・2回目: 2009/11/27</li> <li>・3回目: 2010/06/16</li> <li>・4回目: 2010/11/25</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・1回目: 2009/09/15</li> <li>・2回目: 2009/12/04</li> <li>・3回目: 2010/06/15</li> <li>・4回目: 2010/10/08</li> </ul>
取得点間隔設定	10m先で約5cm間隔	200m先で約10cm間隔
計測対象までの距離	約10~40m	約100~200m

#### 4.3.2 A地区(道路沿い斜面)

A地区は、旧国道の路面を頭部とする地すべりであり、孔内傾斜計測定の結果、近年も年間約10cmの沈下を

#### 4.3 すべり面推定手法の活用による地すべり発生後の移動形態推定手法に関する研究

む変位が継続している。計測対象とした斜面は地すべり末端部ではないが、動きの大きな地表面変位量を3Dスキャナで把握可能であることを確認する目的で、当地区を試験地のひとつとして選定した。

計測対象範囲内には18名の検証点を設けており、各回の計測時に地上型LSでの計測と併せてTSにより各検証点の座標を取得した。TS計測の結果、初回と第4回の検証点の変化量は、上下方向に約6~10cm沈下し、水平方向には約2~8cmの谷側へ向かう動きであった。一方、地上型LSにより取得した地形データの差分解析結果もTS計測結果と同程度の変位量を示した。3Dスキャナによる取得データの差分解析結果を図-13に示す。また、主測線の地形変化を示す断面図を図-14に示す。

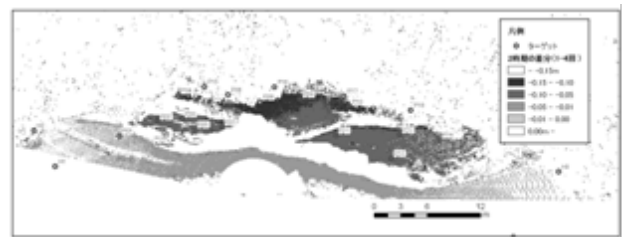


図-13 地上型LSによる取得データの差分解析結果

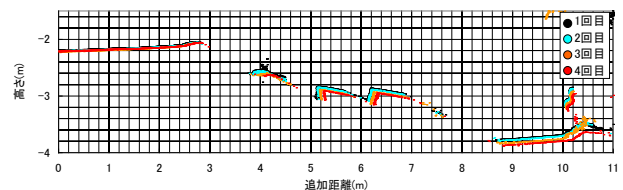


図-14 地上型LSより作成した断面図

#### 4.3.3 B地区(貯水池隣接斜面)

B地区では貯水池の対岸より対象斜面を計測した。対象斜面内には3箇所の検証点を設け、A地区と同様に各回の計測時にはTSによりその座標を取得し、地上型LSの差分処理結果との比較を行った。図-15に初回と第4回の差分解析結果を示す。なお、当試験地では孔内傾斜計測定およびGPSによる変位観測が実施されており、

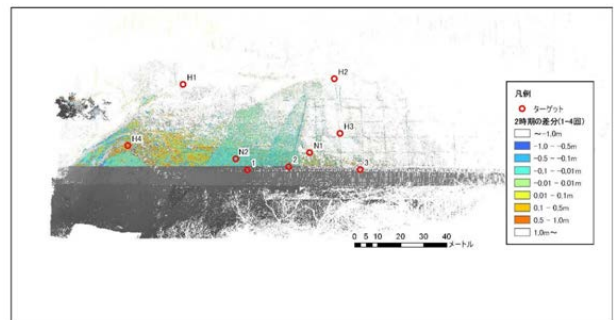


図-15 地上型LSによる取得データの差分解析結果



これらのデータとの比較も行った。

GPS 観測の結果を見ると、平成 21 年 9 月から平成 22 年 10 月までの約 1 年にわたる試験期間中に地すべりの変位はほとんどなかった。TS 計測による検証点座標の変化量が 1cm 未満であったことは、GPS 観測結果と整合している。一方、地上型 LS により取得した地形データの差分処理結果においても大きな変位は確認されず、TS 計測と一致する結果となった。

#### 4.3.4 考察

これらの計測結果より、TS 計測等の精密変位観測と比較して、3D スキャナによる地形計測は、機械誤差以上の変位に対してほぼ同等の精度で変位を把握することが可能であるといえる。従って、地すべり斜面の地表面の特定点における変位追跡を目的として 3D スキャナによる計測を適用することの可能性が示された。さらに、地表面の面的変位の傾向を把握することが可能であることから、膨れだしなど目視では確認できない程度の変状の把握も可能であると考えられる。

### 5. 安全率と地すべり変位速度の関係検討

#### 5.1 検討目的

中村ら<sup>2)</sup>は 73 件の地すべりデータを基にした解析結果より、地すべりの速さが 10mm/hr を越えるとはほぼ滑落することを示した。しかし、地形や地すべりタイプ等により臨界速さが異なることから、速度以外の他の要因を含めて滑落予測を行うことの必要性を指摘している。本研究においては、地すべりが加速し滑落に至る危険度を判断する目安を示すことをひとつの目的としている中、地すべりの変位速度を推測する時に、地下水変動→安全率→変位速度→滑落予測という流れの中で、既往研究では検討がなされていない安全率→速度変化に関する部分に着目し、安全率の変化が変位速度に対して及ぼす影響を評価した。

#### 5.2 対象とした地すべりの概要

地すべりの動きを地盤伸縮計等により観測されており、かつ主測線に沿って複数位置で地下水位観測がされている地区のうち、比較的大きな変位を示した 5 地区を対象として解析を行った。なお、各地区は比較的大きな変位を記録したものの、滑落・崩落に至ることなく減速し収束したものである。

〔相道寺地区(長野県)〕地すべりの規模は長さ約 60m、幅約 60m、最大移動層厚約 8.5m、斜面勾配約 20° であり、第三紀の堆積岩(砂岩、礫岩等)を基盤とし、その

#### 4.3 すべり面推定手法の活用による地すべり発生後の移動形態推定手法に関する研究

上部に強風化凝灰岩や凝灰質砂岩などを起源とする崩積土が載る。地すべりはこの崩積土層の中にすべり面を形成して滑動した。誘因は降雨・融雪であり、地盤伸縮計設置後に約 900mm の動きが観測された。

〔中三栖地区(和歌山県)〕長さ約 430m、幅約 250m、最大移動層厚約 26m、斜面勾配約 20° であり、基盤岩は四万十累層群に属する中生層を基岩とする破碎帯地すべりである。尾根部直下に地すべりが形成され、台風による豪雨に伴い滑動が活発化した。

〔T地区〕長さ約 160m、幅約 100m、最大移動層厚約 17m、斜面勾配約 35° であり、谷頭部を頭部として比較的急勾配の斜面にて発生した。新第三紀の砂岩泥岩互層を基盤とし、梅雨前線による豪雨に伴い地すべりが発生した。約 2,000mm の変位量を記録したが、滑落・崩落に至ることなく収束した。

〔N地区〕長さ約 220m、幅約 130m、最大移動層厚約 18m、斜面勾配 10° 未満であり、新第三紀の軽石層、砂岩、凝灰岩を基盤としている。融雪水が誘因となって滑動した。

〔U地区〕長さ約 120m、幅約 80m、最大移動層厚約 9m、斜面勾配約 17° であり、標高 300~500m 程度のなだらかな段丘状の丘陵斜面側方部に形成された崩積土地すべりである。変成岩類(泥質片岩)を基盤とし、梅雨期の豪雨により地すべりが顕在化した。

#### 5.3 解析方法

対象とした地すべりはそれぞれ主測線に沿って複数位置にて地下水観測がなされている。また、計測開始時期はまちまちであるが、地すべり頭部の亀裂等をまたいで地盤伸縮計による変位観測がなされている。これらの観測データを用い、安全率と変位速度の関係を比較した。安全率の算出に際しては、二次元断面でのフェレニウス法による計算を実施した。すべり面強度は粘着力を地すべり層厚から想定するとともに、地すべりが滑動する直前の安全率を 1.0 と仮定して逆算法により求めることとし、1 時間毎に安全率を計算した。なお、解析対象期間内に応急緊急対策として押え盛土工が施工された地区もあるが、聞き取り等により設置日時とその形状を把握するなどし、極力実際の断面形状の変化が安定計算に反映されるように努めた。

#### 5.4 安全率と変位速度の関係

##### 5.4.1 解析結果

対象とした 5 地区の解析結果を図-3に示す。相道寺地

#### 4.3 すべり面推定手法の活用による地すべり発生後の移動形態推定手法に関する研究

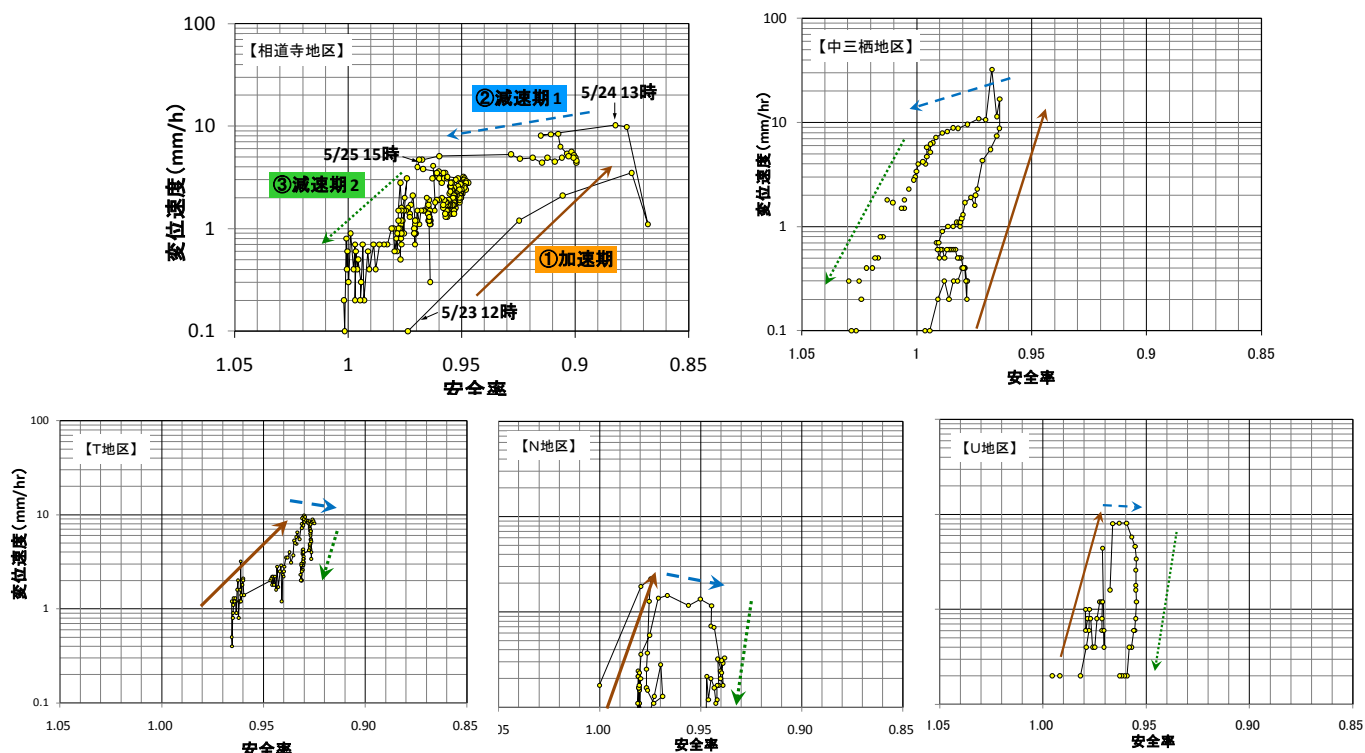


図-3 対象5地区の安全率と変位速度の関係

区を見ると、安全率の低下に伴い変位速度が上昇し〔①加速期〕、その後変位速度は大きくは低下しないが安全率が上昇する期間〔②減速期1〕を経て、安全率の上昇を伴いながら収束に向かう〔③減速期2〕という関係が示された。この傾向は中三栖地区においてもほぼ同様であった。一方、N地区、U地区では、①加速期を経た後、安全率は引き続き低下しているが変位速度は②減速期1に入り、大きな安全率低下を伴わないまま③減速期2に入り収束に向かうという関係が見られた。

下を要しているのに対し、T地区（第三紀層地すべり）は3~4%であり、斜面が急勾配であることが影響している可能性がある。また、中三栖地区およびU地区（破碎帯地すべり）では約3%である。これらのことから、すべり面の土質性状に影響を及ぼす基盤地質の違いや、地形の影響により、変位速度が安全率から受ける影響の受けやすさが異なることが示唆される。この数字の差異が今後変位速度の予測を行っていく上で重要であると考えられる<sup>3)</sup>。

#### 5.4.2 安全率と変位速度の変化パターン

減速期1を経て減速期2に至る過程は、地下水位（本来はすべり面間隙水圧）の低下等に伴い安全率が低下しても、速度を有していた地すべり土塊がすぐには減速できないということを表していると考えられる。また、特に中三栖地区では、安全率が1.0を越えても変位が継続していることから、地すべり滑動に伴いすべり面強度が低下していることを示していると考えられる。一方、N地区・U地区での変動パターンは、急速な変位を記録した間の地形変化等を反映している可能性が考えられる。

#### 5.4.3 安全率が変位速度に影響する係数

変位速度が1mm/hrから10mm/hrに上昇する際に、相道寺地区（第三紀層地すべり）では約10%の安全率低

#### 6. まとめ

地すべりが滑落・崩落に至る危険度を評価する手法の提示を目的として、いくつかの面からの検討を行った。その結果、以下のことがわかった。

- (1) 数量化Ⅱ類による解析結果から、斜面の横断地形は谷型、斜面勾配25°以上、地すべり長さは100m以下、すべり面形状は船底型・平板、移動土塊の性状は粘質土、連続雨量比は0.8より大きい値を示す地すべりは、滑落・崩落に至りやすい傾向がある。
- (2) 各項目のカテゴリースコアの加算値から、滑落・崩落に至る地すべりを判別する手法を提示した。
- (3) 11要因を用いた数量化Ⅲ類による分析から、滑落・崩落に至る地すべりの特徴を示す散布図を作成した。11要因の傾向を基に散布図にプロットすることで、

地すべりが滑落・崩落に至る可能性を判断する目安のひとつとなることがわかった。

- (4) 地すべり末端部小崩落の形状を反映させた二次元斜面安定計算の結果、地すべり末端部での小崩落は地すべり全体の安全率を低下させる要因になり得ることが示された。
- (5) 3D スキャナを用いた各種試験の結果、現地条件にもよるが、地すべり斜面の地形変化量を面的に把握する手法として、地上型 LS を用いることが有効であることがわかった。検討を通して、計測に際しての留意点や限界を明らかにすると共に、計測方法や取得した複数時期の地形データの差分処理を行うための独自の方法を確立した。
- (6) 地すべりの安全率と変位速度の関係から、地下水位（本来はすべり面間隙水圧）の低下等に伴い地すべりの安全率が上昇しても、速度を有していた地すべり土塊はすぐには減速できないことを表している可能性があることを示した。
- (7) すべり面の土質性状に影響を及ぼす基盤地質の違

#### 4.3 すべり面推定手法の活用による地すべり発生後の移動形態推定手法に関する研究

いや地形の影響により、変位速度が安全率から受ける影響の受けやすさが異なることが示唆された。この数字の差異が今後、地すべり変位速度の予測を行う上で重要な意味を持つと考えられる。

本研究により得られた上記の成果や知見を活かし、今後は滑落・崩落に至る地すべり土塊の変形プロセスを明らかにすることで、地すべり範囲の早期の確定手法、さらには地すべりの滑落・崩落時期の予測手法への展開を図る予定である。

#### 参考文献

- 1) e.g. Mandzic : Stability of unstable final slope in deep iron mine, Procs of 5<sup>th</sup> Int, pp455-458, 1988
- 2) 中村浩之・小林玲子：地すべりの滑落臨界速さ，第32回地すべり学会研究発表会講演集，pp.377-378, 1985
- 3) 石田孝司・宇都忠和・武士俊也・本間宏樹：地すべりの変位速度と安全率変化の関係に関する検討事例，第50回日本地すべり学会研究発表会講演集（投稿中）

## RESEARCH OF THE METHODOLOGY THAT CAN ESTIMATE LANDSLIDE MOVEMENT AT EARLY STAGE OF LANDSLIDE OCCURRENCE

**Budget** : Grants for operating expenses,  
General account

**Research Period** : FY2009-2010

**Research Team** : Erosion and sediment control  
research group  
(Landslide research team)

**Author** : TAKESHI Toshiya, ISHIDA Koji

**Abstract** : When some cracks or steps which are signs of landslide are occurred, emergency measurement or permanent measures will be carried out. And it is important to decide precisely what way to move the landslide after that on the occasion of preventing second disaster or deciding the time for evacuation. However, there is no confirmed method that can evaluate the degree of danger that a landslide to collapse. So we analyzed characteristics of collapsed type landslide using multivariate analysis. And we analyzed the effect of small scale collapse at the toe area of landslide for factor of safety. Further, we tried to develop the method that can measure areal displacement using three-dimensional laser scanner and estimate small collapse extent at the toe area of landslide. Here we showed that categories as follows are related to the occurrence of collapse-type landslide; Transverse topography shape at landslide occurred area, slope incline, length of landslide, shape of slip plane, condition of landslide body, and the ratio of the total amount of continuous rainfall between at landslide occurred and largest recorded. And we showed a small collapse at the toe area of landslide has prospects to induce collapse-type landslide. Also it was found that small size collapse at the toe area of landslide will influence factor of safety of landslide to be decrease. Furthermore, we developed the method that can measure the areal displacement using three-dimensional laser scanner and an acquisition of finite difference.

**Key words** : collapse-type landslide, statistical analysis, factor of safety, small size collapse at the toe of landslide, measuring for areal ground surface displacement