

# 沖縄, 島尻層群泥岩分布地域の地すべり

## LANDSLIDES IN THE MUDSTONE AREA OF SHIMAJIRI GROUPS, OKINAWA

中村 真也<sup>1</sup>・木村 匠<sup>2</sup>・宜保 清一<sup>3</sup>

Shinya NAKAMURA, Sho KIMURA and Seiichi GIBO

<sup>1</sup>琉球大学農学部 (〒903-0213 西原町字千原1番地)

E-mail: s-naka@agr.u-ryukyu.ac.jp

<sup>2</sup>琉球大学農学部 (〒903-0213 西原町字千原1番地)

<sup>3</sup>放送大学沖縄学習センター (〒903-0129 西原町字千原1番地)

**Key Words:** classification of landslide types, first-time slides, shear strength, stability analysis

### 1. はじめに

沖縄島の地質は、北部地域は秩父帯および四万十帯に対比され石灰岩を伴う砂泥岩とこの変成岩からなる先新第三系、中南部地域は新第三紀から第四紀にまたがる島尻層群および琉球層群となっている。沖縄島の地すべりの大部分は島尻層群泥岩分布地域に集中し、各種のタイプの地すべりが発生している<sup>1)~5)</sup>。この地域の地すべり防止区域は、都市およびその近郊に位置しており、地域社会に与える影響が大きく、より精度の高い地すべり危険性評価が求められている。

地すべり危険性評価の精度向上のためには、地すべ

りの断面形状の特徴や形態区分、地すべり土のせん断強度特性と安定解析におけるせん断強度の活用、地すべり発生メカニズムと発生場の特徴などについての知識や理解が不可欠である。本論文では、島尻層群泥岩地すべりの類型区分、断面形状特徴、すべり面に関与する強度および発生場について、研究成果を基に論ずる。

### 2. 地すべりの類型区分とそれらの特徴<sup>1)</sup>

島尻層群泥岩分布地域の地すべりは、図-1 および図-2 のように類別整理できる。

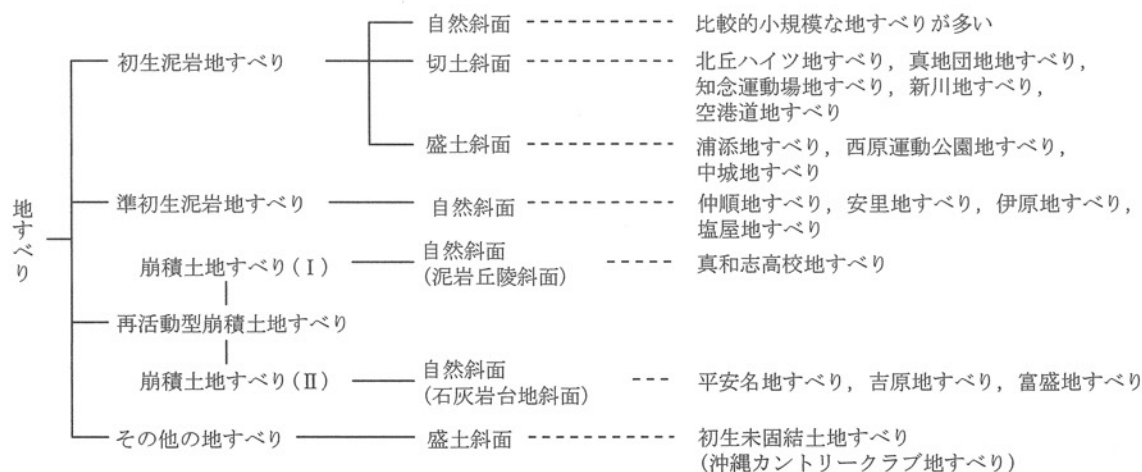


図-1 島尻層群泥岩分布地域における地すべりの類型区分

初生泥岩地すべりは、地すべり地形が不明瞭で、短時間のうちに大きく移動するのが特徴であり、移動体の泥岩は激しく破碎され岩屑化する傾向が強い。発生時のすべり面強度は破碎泥岩のピーク強度や小断層の残留強度などが関与する。初生泥岩地すべり後の移動体のすべり面強度は残留強度付近まで低下するが、大移動後の移動体は当初の推力を失い、大きく再活動することは無い。

準初生泥岩地すべりは、斜面下部に既往の地すべりを伴うが、初生域に当たる地すべり頭部の斜面は地すべり地形が不明瞭である。滑動形態は初生泥岩地すべりと同様、急激で大きい移動量で特徴付けられる。発生時のすべり面強度は、初生泥岩地すべり域では破碎泥岩のピーク強度と断層等の鏡肌の残留強度が動員されると共に、既往すべり面域では主に残留強度が動員されると考えられる。これは、島尻層群泥岩では残留強度からの回復がほとんどないため、過去のすべり面がそのまま維持されれば基本的に残留強度となる<sup>7), 8)</sup>。さら

に、島尻層群泥岩では切土などの除荷による応力解放が確認されていることから、既往地すべりが長期にわたって泥岩の応力解放を促して泥岩の強度を低下させ、地すべり発生の一因となると考えられる。

再活動型崩積土地すべりは泥岩起源の崩積土が堆積する斜面で発生する地すべり(I)と琉球層群が帽岩を為すメサ状斜面で発生する地すべり(II)の二つに区分される。

再活動型崩積土地すべり(I)は、斜面頂部まで地すべり地形が形成されているが、地すべりはいくつかのユニットに分離して滑動する。滑落崖の規模は小さく、一回の移動量も小さい。崩積土で地すべりが発生する場合、当初はすべり面強度として完全軟化強度が主に動員されるが、すべり後のすべり面強度は残留強度付近まで低下する。この地すべりは小規模な地形改変も誘因になることがあるが、これは地すべりの小ユニット化と低いすべり面強度が素因となっていると考える。

再活動型崩積土地すべり(II)は、メサ状斜面で発生

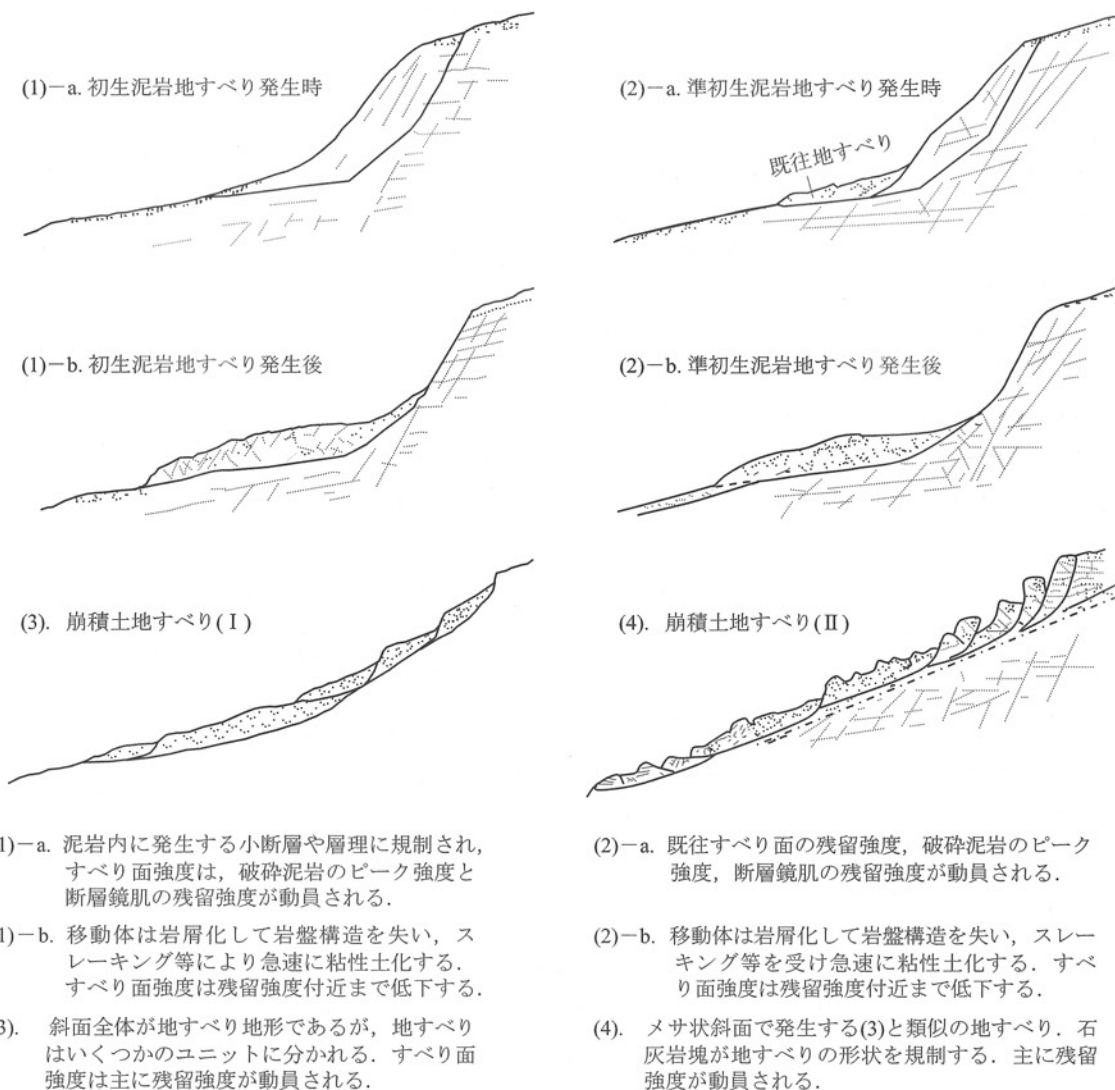


図-2 島尻層群泥岩分布地域における地すべり類型の示す地形断面とすべり面に動員される土質強度

する地すべりであり、すべりブロックがいくつかのユニットに分離したり、すべり面強度に残留強度が動員されるなど、地すべり(Ⅰ)と類似するが、移動体中に含まれる石灰岩塊が地すべりの形状を規制し、滑動を抑制する。移動体は、丘陵頂部の石灰岩が非常にゆっくりとした速度で分離し、基盤の泥岩が風化して形成された粘性土と共に斜面に供給されたものである。

### 3. 地すべりの形状的特徴<sup>2)</sup>

#### (1) 断面形状

島尻層群泥岩分布地域で発生した地すべり 14 事例について縦断面形状(地すべり斜長  $L$ 、すべり面最大鉛直深度  $D$ 、すべり面平均勾配  $\alpha$ )を調べた。 $L$  は、主縦断面におけるすべり面(線)の上端と下端が地表面と交わる2点の長さで、 $\alpha$  は2点を結んだ直線の勾配である。 $L$  は17m~237mの範囲で平均値が81mであり、31m~60mが多く、 $D$  は2.7m~20.8mの範囲で平均値が8.8mで10m以下が多い。 $\alpha$  は8.4°~23.0°の範囲で平均値が17.2°であり、20°~23°が多い。末端切土斜面で発生した地すべりは、 $L$  および  $D$  がそれぞれ70m以下、10m以下と小さく、 $\alpha$  は21°以上の比較的急なものが多い。

#### (2) $L$ 、 $D$ および $\alpha$ の相互関係

$L$  と  $D$  の関係は、全体として  $L$  が大きいほど  $D$  が大きくなる。縦断面形状比  $L/D$  は3.9~15.0で、上野(2001)<sup>8)</sup>の示した2.8~19.2の範囲に収まり、平均値は9.5であった。 $L$  と  $\alpha$  の関係を図-3に示す。末端切土斜面で発生した地すべりは  $\alpha$  が大きく  $L$  が小さい。 $D$  と  $\alpha$  の関係については、 $\alpha$  が大きくなるにつれて  $D$  が小さくなった。図-4に地すべり移動量と  $\alpha$  の関係を整理した。移動量は、地すべり前後の平面図における地すべり長さの中間点の位置の水平距離である。 $\alpha$  は、移動量が大きくなるにつれて小さくなり、10°前後で落ち着いた。この

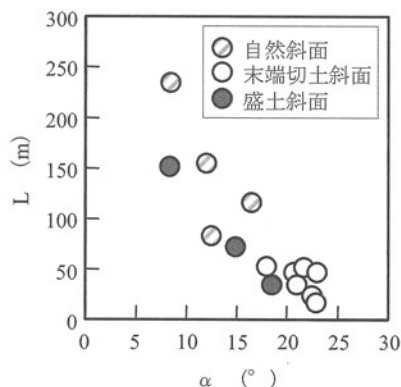


図-3 すべり面平均勾配  $\alpha$  と地すべり斜長  $L$  の関係

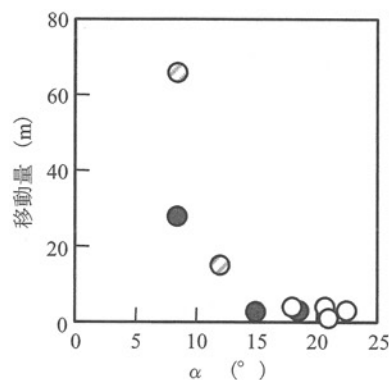


図-4 すべり面平均勾配  $\alpha$  と移動量(中腹部)の関係

$\alpha = 10^\circ$  は、大移動後のすべり面で発揮される強度と密接に関係しており、泥岩の有する最小強度である残留強度に依存している。一方、 $\alpha$  の大きい末端切土斜面の地すべりでは、移動量が小さく、すべり面の発達に至らないため、破砕ピーク強度の関わりが大きいと推察される。初生型泥岩地すべりは、短期間での大移動と滑動の急激な沈静化で特徴づけられているが、末端切土斜面で発生するものについてはすべり面の平均勾配が比較的大きく、移動量は小さい。

### 4. 地すべりに関与する強度

#### (1) 島尻層群泥岩の強度図<sup>9),10)</sup>

図-7は三軸圧縮およびリングせん断試験から得られた強度定数  $c'$ 、 $\phi'$  をプロットしたものである。図において、強風化・破砕泥岩および弱風化泥岩の強度、完全軟化強度および残留強度の各グループが特徴的に位置付けられている。強風化・破砕泥岩および弱風化泥岩の  $c$  と  $\phi$  の間には破線で示したような直線関係が認められる。点線で示した切片の  $c' = 32.5\text{kN/m}^2$ 、 $\phi' = 35.0^\circ$  は、経験的に強風化泥岩や破砕泥岩における限界破壊強度とみなしたもので、完全軟化強度付近にまで及ぶ網掛け部分が強風化・破砕泥岩の強度ゾーンとして位置付けることができる。

泥岩の完全軟化強度は  $\phi$  軸上の  $\phi' = 23^\circ \sim 30^\circ$  の範囲で与えられた。残留強度は、 $\phi' = 9^\circ \sim 17^\circ$  の範囲にあり、 $\phi' \leq 10^\circ$  のような低い値は残留せん断面が鏡肌を呈するほどに発達した試料で得られたもので、含有される配向性粘土鉱物総量が支配的要因である。

#### (2) 地すべり移動量とすべり面平均強度<sup>5)</sup>

##### a) 末端部移動量の小さい仲順地すべり

平成10年10月5日に沖縄島中部北中城村で発生した斜面の中腹に既往地すべりを擁する準初生地すべり

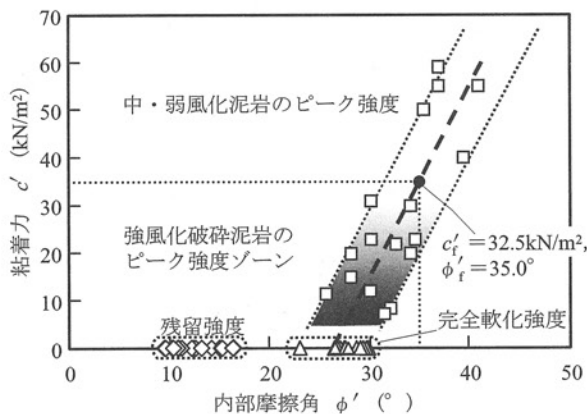


図-5 島尻層群泥岩の強度図

である。地すべりは、426mm(9月5日から10月4日、沖縄市胡屋)の長雨と160mm(10月5日、同)の豪雨の後に発生しており、間隙水圧の上昇が直接的な誘因と考えられる。地すべりの規模は長さが約150m、幅が上方部で約90m、末端部で約120m、総面積が約1.7ha、斜面勾配が約12°で、本地域の地すべりとしては比較的規模の大きい地すべりである(図-6)。水平方向の移動量は、すべりブロックの上方部および中腹部で約15mで、末端部では0.5~1m(約3m隆起)であった。ボーリング調査により、すべり面は、鏡肌面(Bv-2, 3, 4)および破碎泥岩(Bv-5)からなることが確認された。末端部の隆起は、すべり面付近の泥岩層が滑動に抗しつつ圧縮せん断変形したものと判断された。すべり面土(および破碎泥岩)を採取し、リングせん断試験により完全軟化強度 $\phi_{fs}=29.5^\circ$  ( $c_{fs}=0$ )および残留強度 $\phi_r=9.3^\circ$  ( $c_r=0$ )、三軸圧縮試験(CU)により破碎泥岩のピーク強度 $c'_p=35.0\text{kN/m}^2\sim 50.0\text{kN/m}^2$ 、 $\phi'_p=16.5^\circ\sim 35.5^\circ$ が得られた。

安定解析では、まず地下水位に実測最高水位を充て、二次元修正簡便式により、 $c' = -137.4\tan\phi' + 39.2$  ( $Fs=1.00$ )を得た。すべりブロック中腹部・上方部の鏡肌を呈するすべり面において残留強度( $\phi_r=9.3^\circ$ )の、破碎状態泥岩からなるブロック末端部においては破碎ピーク強度( $c'_p=50.0\text{kN/m}^2$ 、 $\phi'_p=35.5^\circ$ )の関与

を想定した。なお、破碎ピーク強度は、すべり面領域において動員され得る最大強度として、最大の実測値を採用している。「残留係数を導入した安定解析法」<sup>11)</sup>の考えに基づき、すべり面平均強度定数 $\bar{c}' = 6.7\text{kN/m}^2$ 、 $\bar{\phi}' = 13.3^\circ$ を算定した。また、図-5の縦断面図において、繰返し計算を行って残留強度および破碎ピーク強度の関与領域を分けし、境界 a-a を示した。すべり面に動員される異なる複数の強度の領域が区別されることにより、地下水排除工の効果の評価や抑止杭の効果的な打設等が可能になる。

### b) 移動量の大きい安里地すべり

平成18年6月10日に沖縄島中部中城村で発生した準初生地すべりである。地すべり発生の誘因は、519mm(5月1日から6月9日、北中城村安谷屋)の長雨と95mm(6月10日)の豪雨である。地すべり本体の規模は、長さ約240m、幅最大約120m、斜面勾配約10°、滑落崖の高さは約30mであった。地すべり本体の移動量は、上方、中腹および末端のいずれも約70mであった。地すべりは一旦静止した後に二次すべり発生を契機に再滑動し、末端部が流動化して最終的には長さ約500m、最大幅約260mとなった。

本体すべりブロック上方部のボーリングコア(Bv-3)より、深度13.35mに鏡肌を呈するすべり面が確認され、同様な鏡肌面はBv-2, 4, 5においても認められた。末端部のボーリングコア(Bv-6)においては、13m付近まで激しく破碎され粘土化(完全軟化状態)が進んでいることが確認された。リングせん断試験により $\phi_{fs}=27.8^\circ$  および $\phi_r=10.8^\circ$ 、三軸圧縮試験(CU)により破碎泥岩のピーク強度 $c'_p=12.1\text{kN/m}^2\sim 52.8\text{kN/m}^2$ 、 $\phi'_p=29.9^\circ\sim 33.0^\circ$ が得られた。

すべりブロック中腹部・上方部のすべり面は鏡肌を呈する程発達し、一方、末端部のすべり面付近土が完全軟化状態になっていたことから、前者に残留強度( $\phi_r=10.8^\circ$ )を、後者に完全軟化強度( $\phi_{fs}=27.8^\circ$ )の関与を想定し、地下水位を実測最高水位とて $\bar{c}' = 0.0\text{kN/m}^2$ 、 $\bar{\phi}' = 12.3^\circ$ が得られた。 $\bar{\phi}' = 12.3^\circ$ は、

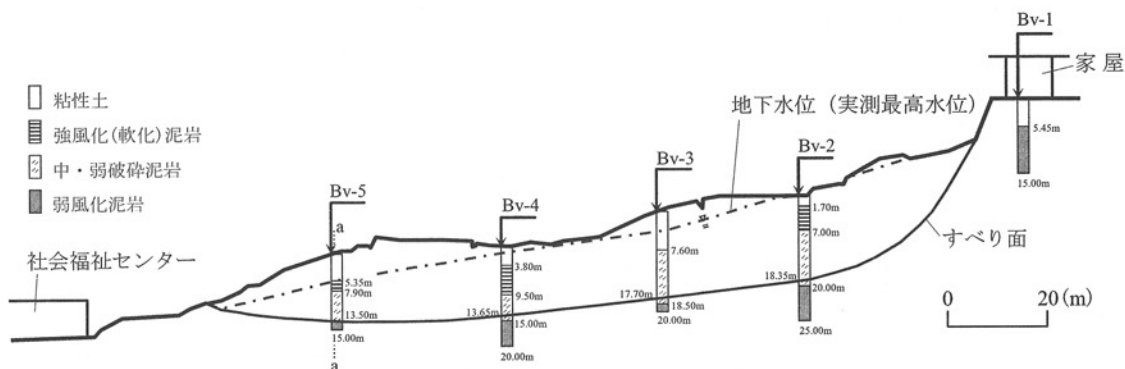


図-6 仲順地すべりの縦断面図

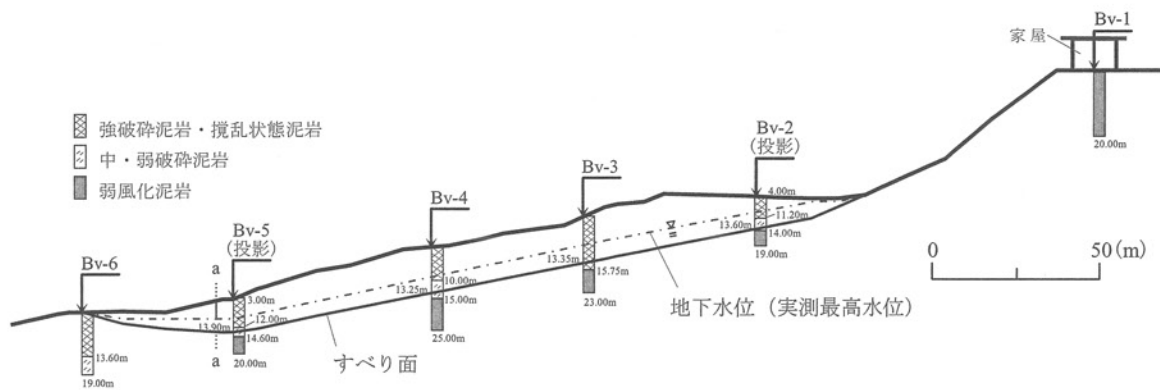


図-7 安里地すべりの縦断面図

残留強度 ( $\phi_r = 10.8^\circ$ ) にかかなり近く、鏡肌面が広範囲で認められたことと合致する。

### 5. 地すべり発生場の特徴<sup>2)</sup>

代表的な地すべりのすべり移動前の不安定斜面の縦断面を図-8に示した。また、図-9に島尻層群泥岩分布地域における初生型地すべりの類別と地すべりの発生場の特徴も合わせ整理し、危険度評価に必要な調査項目を示した。

地すべりの危険性の高い不安定斜面の地形条件として、斜面における既往地すべりの存在がまず挙げられる。既往地すべり土体の滑落による応力解放が斜面深部に影響し、新たな地すべりの発生の危険性が高まる。末端切土による横圧減少によっても斜面上方の不安定化が加速される。地質条件としては、既往地すべりと上方斜面との関係の把握が重要になる。既往地すべりが不安定斜面の下方部に位置している場合に既往すべり面がすべり面に転化する可能性が大である。また、地質弱面の進行性破壊に因る拡張や走向傾斜は泥岩地すべりの発生機構と密接に関係している。地すべり発生の危険性の高いすべり面付近泥岩の強度は、既往すべり面および小断層等の地質弱面においては残留強度近くにまで低下している。応力解放後に長年月を経て、地すべり発生に至っていることを考えると、泥岩の緩みや風化弱化について把握することも重要になる。すなわち、想定されるすべり面付近泥岩の残留強度、完全軟化強度およびピーク強度の測定試験や物理的・鉱物学的分析の実施が必要不可欠である。初生型地すべり斜面は、発生場の特徴も加味し、「下方部に既往地すべりを擁する斜面」、「中腹部に既往地すべりを擁する斜面」および「切土されている斜面」の3つに類別できる。不安定斜面について地形条件、地質条件、土質条件等に留意して調査を実施し、土質強度を活用した安定解析を

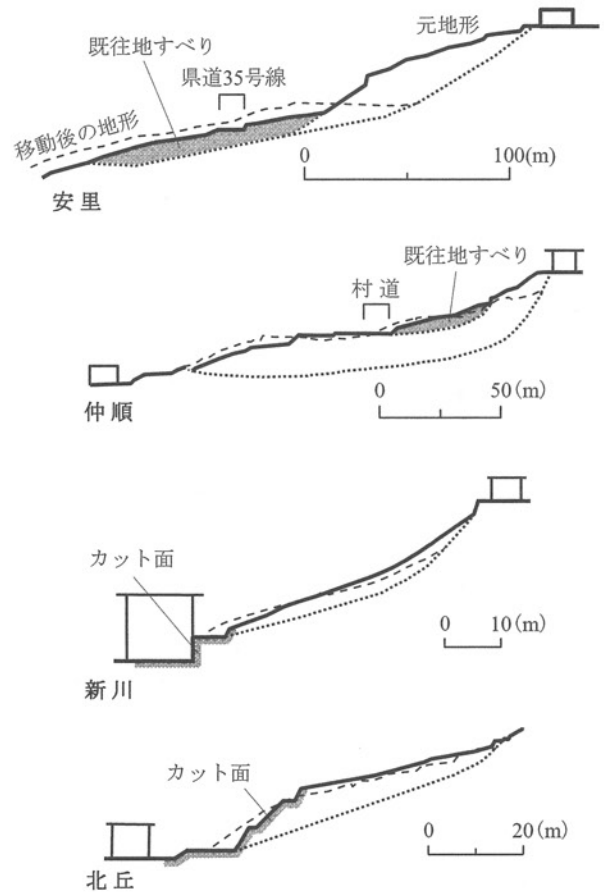


図-8 安里地すべり等の移動前の不安定斜面

行うことで、合理的で適切な初生型地すべりの危険度評価が可能となると考える。

### 6. まとめ

本論文では、島尻層群泥岩分布地域の地すべりの類型区分、形状の特徴、すべり面に関与する強度および発生場について、研究成果を基に論じた。地すべりは初生泥岩地すべり、準初生泥岩地すべり、再活動型崩積土地すべり(I)および(II)に大別される。地すべりは、比較的規模が小さく、すべり面深度が10m以下で、

類別	地形条件	地質条件	土質条件等	
			残留強度 関与域	破碎ピーク強度 関与域
初生型 泥岩地すべり	斜面下方部に 既往地すべりが存在	既往すべり面の存在	—— 既往すべり面 →すべり面へ転化	滑落による横圧 減少(応力解放) に伴う泥岩層の 緩み  押え土圧除去 (応力解放)に 伴う泥岩層の 緩み
		走向が斜面と一致する 地質弱面の存在	広がりのある連続的 地質弱面 →すべり面へ転化	
	斜面中腹部に 既往地すべりが存在	走向が斜面と一致する 地質弱面の存在		
	末端切土	走向が斜面と一致する 地質弱面の存在		弱化した 破碎風化 泥岩 ↓ すべり面 へ転化
危険度評価	一次評価	二次評価	(三次評価)	
調査・分析	地形・地すべり特性 の評価 変状・履歴の評価	斜面地表変状の把握・計測 地中変動の計測 地質弱面の把握	試料採取と土質試験等 〔残留強度および破碎ピーク強度の測定 物理的・鉱物学的性質の分析, 安定解析〕	

図-9 島尻層群泥岩分布地域における初生型地すべりの類別と評価

すべり面平均勾配が 20° 程度のものが多い。すべり面平均勾配は移動量が大きくなるにつれて小さくなる。多くのせん断試験結果から作成した強度図によって、泥岩の各状態における強度の特徴と位置づけが明らかになる。地すべり再活動時に関与する強度は、すべり面の大部分に残留強度が動員され、末端部に動員される強度は移動量によって異なる。既往地すべりの存在する斜面と末端切土斜面において、初生型地すべりの危険性が高まる。地質弱面の存在とすべり面およびすべり面付近土の土質強度特性が地すべりの発生・再発生と密接に関係しており、それらについての調査・分析がより精度のよい地すべり危険度評価に繋がると考えられる。

今後、地すべりと土質強度の関係についてのさらなる研究、系統的な地すべり区分研究の推進、初生泥岩地すべり抽出手法の開発、モデル試験地での詳細な観測・試験・解析など、実効的な危険度評価の実施のための積極的な取り組みが望まれる。

#### 参考文献

- 1) 陳伝勝, 宜保清一, 佐々木慶三, 中村真也: 沖縄, 島尻層群泥岩分布地域の地すべり類型区分の試み—地すべりの危険度評価に関連して—, 日本地すべり学会誌, Vol.43, No.6, 1-12, 2007.
- 2) 宜保清一, 中村真也, 木村匠, 陳伝勝: 沖縄, 島尻層群泥岩分布地域における初生型地すべりの縦断面形状と発生場の特徴—地すべりの危険度評価に関連して—, 日本地すべり学会誌, Vol.46, No.3, 22-29, 2009.
- 3) 木村匠, 宜保清一, 中村真也, 佐々木慶三, 周亜明: 島尻層群泥岩地すべりの発生・再滑動に関与する強度—沖縄,

安里地すべりを事例として—, 日本地すべり学会誌, Vol.47, No.3, 138-146, 2010.

- 4) 中村真也, 宜保清一, 林義隆: 残留係数を導入した地すべりの三次元安定解析—沖縄, 仲順地すべりについて—, 農業土木学会論文集, No.229, 47-53, 2004.
- 5) 中村真也, 宜保清一, 木村匠, ヴィタナ ブッディ シワクタ: 各種地すべり形態におけるすべり面平均強度定数—沖縄, 島尻層群泥岩地すべりを事例として—, 日本地すべり学会誌, Vol.48, No.5, 9-20, 2011.
- 6) 中村真也, 宜保清一: 地すべり土の回復強度と垂直応力の影響, 地すべり, Vol.37, No.3, 18-24, 2000.
- 7) 中村真也, 宜保清一, 江頭和彦, 吉永安俊: 地すべり土の回復強度と鉱物組成との関係, 地すべり, Vol.37, No.3, 10-17, 2000.
- 8) 上野将司: 地すべりの形状と規模を規制する地形・地質要因の検討, 日本地すべり学会誌, Vol.38, No.2, 1-10, 2001.
- 9) 宜保清一, 中村真也, 比嘉優, 吉沢光三: 安定解析に必要な強風化・破碎泥岩の強度—沖縄, 島尻層群泥岩斜面の安定問題—, 農業土木学会論文集, No.227, 113-118, 2003.
- 10) 中村真也, 宜保清一, 吉沢光三, 比嘉優: 島尻層群泥岩の切土斜面の安定度評価に有効な強度図, 土と基礎, Vol.53, No.4, 11-13, 2005.
- 11) 宜保清一: 残留係数を導入した安定解析法—沖縄島尻層群泥岩地すべりへの適用—, 地すべり, Vol.33, No.2, 46-50, 1996.

(2012.7.15 受付)