地すべり面の形状決定と安全率の算定

The Determination of Landslide Slip Surface Formation and Its Calculation of Safety Factor

玉田 文吾* 福田 順二*
Bungo TAMADA Junji FUKUDA

Abstract

Probe into the landslide slip surface which had been formed in the Tertiary stratum is possible, so that the stability analysis on the slip surface seems to be easy. Since theoretical solution of the safety factor for the slip surface is hardly obtained, the following method is used for the approximate calculation of the safety factor.

(1) There are four kinds of the slip surface in the latent zone that is included in landslide area (this area consists of the latent, active and passive zones). These shear strength constants, c and ϕ , are fundamentally different, and each of distribution in the latent zone are not constants. Hence, the shear strength constant (Cohesion c is considered to be zero) that is obtained by the reverse calculation method is applied in the latent zone, while the shear strength constants that are measured by the shearing test can be used in the active zone and the passive zone.

(2) There are two kinds of pore water pressure on the slip surface, one is the pore water pressure which always acts on the slip surface and another is critical pore water pressure that is required to slide. It is very important to determine accurately the pore water pressure in the slip surface.

The safety factor cannot be calculated up two digits below the decimal by the present stage. The safety factor shows the state that balance between thrust and resistance on the slip surface changes depending on the pore water pressure. From this view point it is concluded that the safety factor cannot estimate the preventive construction against landslide whose sliding is interrupted briefly during drop of the pore water pressure.

キーワード：地すべり，すべり面，安全率，安定解析，地すべりの予知

1. まえがき

地すべりが発生した場合、地すべり防止対策が講じられる。この場合、防止対策の目的は、一度滑動したことのある地層が、再度滑動または変状を発生しないような対策工事を実施することであり、新規地すべりの発生を未然に防止する予防工事ではない。

現在、地すべり防止対策の基本方針ともなっているものとして下記の事項がある。

- (1) 試錐を主力とした地質調査によって、地質構造、および採取コアの鑑定から地すべり面の位置と形状とを把握する。
- (2) 土質試験などを含めて地すべり面のせん断強度定数を求め、地すべり面の安定解析、すなわち安全率などを計算する。
- (3) これに基づいて防止対策を計画、実施した後、安全率がどの程度大きくなるかを検討、これを防止効果と言っている。

これらは一見して簡単な手段のように思えるが、実際に設計施工する場合、色々な問題点がある。例えば、

- 1) 試錐コアだけでは地すべり面の位置を確定させることが難しいため、地質構造とあわせてコアで見出し出された軟弱部分または強風化部分などを地すべり面と見なし、ここを通る円弧すべり面とする場合がある。
- 2) 地すべり面の力学的性質については、残留強度などが測定、使用されているが、求めた数値を根拠に安全率を計算した場合、時には状態と一致しない安全率が得られることがあるため、せん断強度定数の大部分が逆算法によって求められているのが現状である。
- 3) 逆算法は簡単なようであるが、例えば $F=1.0$ と仮定しても粘着力、内部摩擦角の組合せは多数あり、どのような数値を採用するか意外に難しく、安全率決定段階には主観が入るので、せん断強度定数などの値をマニュアル化している。
- 4) 特に問題になるのは安全率の数値をどのようにするのか、例えば滑動中は理論的に安全率 $F_s < 1.0$ は分かるが、0.98になるのか0.97になるのか、一方、

* 西日本工業大学工学部土木工学科

防止対策を実施した場合、 $F_s > 1.0$ になるとして、1.05 でいいのか 1.10 とするのか、これら安全率には、経験を含めて設計者の主観数値と工費・工法に関する要因とがかなり入ってくる。

以上のことから、本文は地すべり面について、

- (1) 客観性を持つと思われる土質試験値が必ずしも適用されない理由は何か。
- (2) 安全率とは何を意味するのか。また地すべり面の場合に限って安全率を 0.01 単位まで求める理由。
- (3) 逆算法に基づく安全率算定上の問題点は何か。

などについて改めて考えると同時に、どのような方法を用いると安全率に多くの客観要因が導入できるかについて検討したものである。

2. 地すべり面の生成と形状

地すべり面とは、地層中の特定部分に形成された連続せん断破壊面であり、不動層と移動層との層界面に沿って生成するが、この面は超薄層（1 ミリ以内）である。テストビットによる地すべり面探査結果によると、地すべり面付近には軟弱粘性土が存在しており、地すべり面の形態は、乱さない軟弱粘性土の一面せん断試験時に見られる破壊面に類似していることから、生成機構は土質力学における粘性土のモール・クーロン破壊基準（圧密・排水両条件を考慮した）が適用されるとされてきた。

このため、地すべり面生成の要因として『地すべり粘土の存在』と、土質力学における『せん断破壊』とが重視され、地すべり面の形状に『円弧すべり面』を適用することがある。

しかし、小規模の表面崩壊を除き、よく見られる第三紀層地すべりでは、下記の地すべり面生成機構を持つため、特別な場合を除いて円弧地すべり面および一般の c, ϕ は適用し難い状態にある。

また、大規模地すべりにおいて、軟弱部分が、モール・クーロン基準に従って短時間に一時にせん断破壊して地すべり面が形成されるのではなく、地すべり発生時の地表面の変状と発生時の状態を観察すると、滑动部分が下位から上位に向かって波及する形態をたどり、地層中に連続したせん断破壊面が生成するには特別な発生機構がある。

では、どのようにして地すべり面が地層中に形成され、形状はどのようになるのか、テストビットによる地すべり面の直接観察によると、下記ようになる。

(1) 図-1 は、規模の大きい地すべり地区の模式断面図である。この中で“潜在域”と呼称する領域において、地すべり面が在る部分には軟弱な粘性土が存在するが、これはゆるい波状傾斜構造を呈する厚さ 2~5 cm の薄層で、地層中の他の部分に比較すると軟弱ではあるが、

軟弱とは言え土質試験結果によると、非排水強度を用いても、せん断強度定数は意外に大きい¹⁾。加えて物理・力学両性質が鉛直・水平両方向に著しく変化する構造であるため、移動層の斜方分力に基づく最大せん断力だけでは、せん断破壊しない計算になり¹⁾、これが“ c, ϕ 逆算法”を用いる根拠になっている。

(2) 粘性土を観察すると、この中に光沢を持ち、浅い擦過痕を留める不連続なせん断破壊面が残存分布しており、これを“water film 面”と呼称したが²⁾、これらのせん断強度定数は表-1 の超軟弱面（せん断破壊面に厚さ 0.05~0.1 mm の水膜が付着しており、これが潤滑剤となってせん断強度定数を著しく小さくしている）、多数の微小亀裂を含有するセラミックスと同様の状態になっている。このセラミックスが衝撃などを受けると、亀裂が互いに連結して破壊面を形成するように、薄層粘性土中に存在する不連続な water film 面が連結すると、連続したせん断破壊面（地すべり面）になる。water film 面を含む粘性土を“潜在すべり面”、これが存在する領域を潜在域と言うが、生成は、マクロに見れば地殻の変動および強風化作用による地層の粘性土化である。

(3) water film 面間のせん断強度が比較的大きい部分を“未破壊部分”と言っており、潜在域の薄層粘性土は、未破壊部分のせん断強度で保持されている恰好になって

図-1 地すべり面の模式断面図と領域

表-1 water film 面のせん断強度定数

地域	地区	water film面の 粘着力 C_w (kgf/cm^2)	water film面の 内部摩擦角 ϕ_w (deg)	water film面の 厚さ H_f (mm)
口 之 津	富士山	0.060	0° 40'	0.08
	大 抜	0.065	2° 15'	0.07
	新 切	0.090	0° 35'	0.05
	万 詰	0.035	3° 10'	0.06
油 谷	角 山	0.046	3° 20'	0.10
	平 野	0.051	3° 15'	0.08
	油 谷 島	0.042	2° 50'	0.09
北 松	皿 山	0.050	0° 30'	0.08
	中 尾	0.046	1° 10'	0.05
	元 触	0.052	3° 50'	0.07
	赤 木	0.047	3° 30'	0.04
	大 塔	0.066	2° 15'	0.05
	田ノ頭	0.076	3° 10'	0.07

いるが、未破壊部分のせん断破壊は、図-2(a)~(d)形態になっていて、この部分のクリープ破壊であることが、地すべりの前兆現象などから推定されている³⁾。

図-2 地層中の潜在すべり面クリープ破壊模式図

(4) 潜在すべり面の形状は、water film 面が生成した当時の地形、その後受けた地殻の変動量、などによるが、地すべり地区では地層の傾動作用によって一方に傾斜する流れ盤構造が多く見受けられ、地すべり面の形状は潜在すべり面の形状によってほぼ決まってくるが、この領域の地すべり面は、少なくとも円弧にはならない。

(5) 図-1の始端部付近を“主働域”，舌端部付近を“受働域”と呼称する。受働域は、潜在域からの推力を受けて、土質力学で言う受働破壊を生じ、この領域の崩積土の物理・力学両性質がほぼ均等と見なされる場合、近似的には円弧状になる。主働域は潜在域の変状に伴う主働破壊面が地すべり面になり、受働域と同様な地層条件のもとでは、形状は円弧状になるが、この領域の粘着力によっては臨界高が大きく、鉛直方向の引張亀裂または段差が発生する。また、構造作用によって正断層が存在するとき、これに沿って滑落崖を形成する。時には図-3のF、F₄、Bに示したくさび(wedge)が生成して円弧状にはならない。

(6) 大規模な地すべりの地すべり面は、その多くは潜在域のクリープ破壊を発端として発生するため、地すべり面の形状は、潜在域の長さや深度・傾斜に関係する。発生機構を置いて全体の形状だけを考えると、潜在域の長さが短いほど円弧状に、長いほど複合型になる。

3. 地すべり面の探査と形状決定

地すべり面の位置(深度)、形状決定は、現在主として試錐コアの判定から実施されている。コアの採取率がよい場合、経験豊富な技術者ならば、形状決定について特に問題はないがように思える。何故ならば、潜在域を持つ地すべり地区において、地すべり面は地層中の粘性土中に生成され、これの生成には特定の地層と一定のプロセスがあり、地質構造の観点から判定することができる⁴⁾。

地すべり発生後において、地表面には明瞭な滑落崖、

図-3 主働域における陥没帯(くさび)の形成

舌端部などの変状を生じることが多く、これらから主働・受働両域を推定することは可能であり、採取コアーとを総合すると地すべり面の形状は確定することになる。しかし、実際には下記の理由によって、位置、形状の決定は簡単ではない。

(1) 1本の試錐コアーの中には複層の粘性土が存在し、肉眼判定では何れも軟弱に見える。含水比は容易に測定できるが、含水比の大小は必ずしも“地すべり面含有粘土”(地すべり面が含まれる粘性土⁵⁾)を示さず、地すべり面の判定を阻害する。

(2) 地すべり面は薄層であり、試錐の際の乱れとウォッシュアウトを受け、このため地層層序関係が不明確になり、地すべり面の位置に迷うことがある。超薄層の地すべり面を試錐コアーによって直接探査することは極めて難しい。

(3) 地すべり面付近は、移動することによって部分的な圧縮または引張作用を受け、上下に共役亀裂面を発生することがあり、地すべり面の検出を困難にする。

今までに多数の地区で地すべり地区横断面図を見てきたが、円弧の地すべり面が多く、地区内が多くのブロック分割されている。すべてを否定するものではないが、地すべり面探査と確定の難しさを示唆している。

このため、地すべり面探査方法としてテストピット(試掘孔)による方法があり、これによると地すべり面の深度、種類、物理・力学的性質、地すべり面付近の地質構造などが判明する。しかし、薄い地すべり面を探査するために、推定深度が大きい場合、テストピットの管理を含めて掘削経費はかなりの額になるので、現在でも特別の地すべり地区以外には実施されていない。

地すべり面の形状だけを知るためならば円弧でも不合理な点はなく、地すべり現象を説明するだけならば位置(深度)に若干の差があっても支障はない。問題は、地すべり面の形状を基に安定解析を行うことである。特に、地すべり面の形状を基準として、粘着力、内部摩擦角などを逆算法で仮定して『排土によって安全率が0.06上昇し、更にアースアンカー打設が安全率を0.05引き受けるため、全体の安全率が1.15になる』などの安全率計算は、数値上では簡単なことであるが、事実はどうであろうか。

表-2は c 、 ϕ 、 γ 各値を仮定したうえ、一般に用いられる安全率計算式

$$F_s = \frac{c \cdot L + W \cdot \cos \theta \cdot \tan \phi}{W \cdot \sin \theta} \dots\dots\dots(1)$$

によって安全率を求めた例であり、地すべり面は単純な平面状、かつ間隙水圧は考慮していない模式的計算である。この目的は、地すべり面の形状によって(表では地すべり面の深度 h および地すべり面長 L 、傾斜 θ

表-2 地すべり面の深度、角度、長さを関数とした安全率の試算

粘着力 c (tf/m ²)	内部摩擦角 ϕ (deg)	単体重量 γ (tf/m ³)
0.1	15°	1.7

深 度 h (m)	地すべり面 の 長 L (m)	水 平 面 との 角度 θ (deg)	安全率 F_s
5	10	10°	1.588
	11	11°	1.441
	12	12°	1.318
	13	13°	1.214
	14	14°	1.125
	15	15°	1.047
6	10	10°	1.577
	11	11°	1.431
	12	12°	1.309
	13	13°	1.205
	14	14°	1.116
	15	15°	1.039
7	10	10°	1.569
	11	11°	1.423
	12	12°	1.302
	13	13°	1.199
	14	14°	1.110
	15	15°	1.034
8	10	10°	1.563
	11	11°	1.418
	12	12°	1.297
	13	13°	1.194
	14	14°	1.106
	15	15°	1.029

を変化させて)安全率がどのように変化するかを表示するためである。使用するせん断強度定数が大きいほど差違は大きいが、安全率0.01が問題になる場合、地すべり面の形状が与える影響は大きく、地すべり面の形状把握はかなり重要である。

地すべり防止対策に先行して必ず実施されるのが試錐である。この段階でテストピットに代わり、試錐によって地すべり面の探査を目的にした開発したものが“地すべり面探査装置⁶⁾”である。この装置は、試錐過程において地すべり面を直接探査するもので、探査原理である『掘削中のロッドの回転トルクは、地すべり面などの弱面に達した瞬間、急激に低下する』ことを利用し、回転トルクをリアルタイムで測定する。探査装置は図-4に示すように、全長2.0mの円筒状のもので、先端にダブルコーアチューブを取付け、ロッドと連結して地質調査と同じように掘削すればよい。

(1) ロッドの回転トルクは、図-5の装置を用いて測定器に伝達、1秒間に6回発信される電磁波はレコーダーにも記録されるため、連続したトルク値が測定できる。図-6は、現地でレコーダーが記録したデータ例(長崎県石倉地すべり)で、縦軸にトルク(kgf・m)、横軸に深度(時間)を表示したもので“トルク-深度曲線”と言っている。振動状にの曲線が得られるが、実測によ

るとロッド1回転毎に山が現れることが判明している。

(2) 地すべり面は、図-7に示したようにトルク-深度曲線において低トルク部として記録されるが、低トルク帯が見易くなるよう、コンピュータによって作図処理したものである。このようにトルク信号(情報)が地表面においてすべて記録されているため、解析が容易になる。これによると、

14.789 m~14.790 m→1 mm (弱面の厚さ)

14.795 m~14.797 m→2 mm (弱面の厚さ)

になっており、14.789~14.797 m間には地すべり面を含む厚さ8 mmの間に二層の弱面が存在する(集水井にて確認)。このように、地すべり面付近には移動の際に発生した共役せん断破壊面が付随することがある。

(3) 地すべり面探査装置の特徴は、トルクの鉛直方向連続値と同時に、ダブルコアチューブにて地層の鉛直方向試料も採取できるため、地すべり面を含有する地層

および地質構造、地層層序が判明することである。特に地すべり面付近に分布する破碎帯の状態、透水層の状態、移動層および不動層の構造などと比較することができ、地すべりの素因、誘因、構造を検討する資料になる。

(4) 探査装置を用いると、条件によっては(ダブルコアチューブなどがよく整備されているとき)、地すべり面深度をcm単位、地すべり面の厚さをmm単位で探査可能なことが実証されている。問題は、地すべり地区1地点に限って探査を実施しても、地層中には、地すべり面以外に層界面、せん断破壊面など多くの弱面が存

図-4 地すべり面探査装置 (センサー部)

I) 計測ロッド

II) 受信装置

図-5 回転トルクの連続測定装置

図-6 トルク-深度曲線

図-7 トルク-深度曲線による地すべり面深度決定

在する場合があります。探査装置は、これらの弱面も探査するため、単独地点では何れが地すべり面か判断できないことがある。よって主働、受働各領域に1本ずつ、潜在域の長さにもよるが普通3本程度の“探査ボーリング”（地すべり面探査装置を取り付けた試錐）を実施すれば、縦方向において、精度のよい地すべり面形状が確定できる⁷⁾。

(5) 探査ボーリングを実施した場合、ある区間において近接して複数の地すべり候補面が検出されることがある⁸⁾。地すべりが発生して試錐を実施する期間、滑動はほぼ落ち着いており、地層構造から見て何れの面が地すべり面か判断に迷う事態が生じる。このため変位計（パイプ式ひずみ計）をこれらの位置に設置する必要がある。今まででも、調査ボーリング孔にはパイプ式ひずみ計を設置しているが、室内実験結果によれば、ストレインゲージの位置とすべり面との位置とが10 cm以上ズレると、ひずみ量はすべり面の位置を示さないことが判明している⁹⁾。探査装置を用いると、計測器類の正確な設置位置が可能になり、自動観測装置によって地すべりの挙動を把握することができる。

4. 地すべり面の力学的性質

安全率を求めるための粘着力、内部摩擦角両値は土質試験によって測定されてきた。以前、筆者等は、土質試験用試料の多くを試錐コア中における粘性土部分から得ていたが、これらのせん断強度定数¹⁰⁾を安定解析に用いた場合、不安定な状態にならないため、土質試験に問題があると考えたことがある。

テストピットを用いた地すべり面試料採取法に切り換えてから、地すべり面の形態と構造とが判明し、既述のwater film面を始として、滑動経歴を持つ地すべり面はその形態から、大別して“せん断型地すべり面”と“摩擦型地すべり面”となる¹¹⁾。各型は、それぞれ2種類に分けられる。各種の地すべり面および力学的性質は、下記の特徴がある。

(1) せん断Ⅰ型地すべり面は厚さ10 cmの程度の粘

性土中（地すべり面含有粘土層）に地すべり面が存在する。water film面が連続して地すべり面に転化したものであり、移動量が大きくなると、擦過作用を受けて形態が変化してこの型になる。過圧密、せん断時非排水形式になり、ピーク強度として全応力表示の

$$c_{cu} > 0, \phi_{cu} > 0 \dots\dots\dots(2)$$

定数になり、せん断時の過剰間隙水圧を測定すると、有効応力表示の定数

$$c' > 0, \phi' > 0 \dots\dots\dots(3)$$

がそれぞれ求まる。

(2) せん断Ⅱ型地すべり面とは、層界面に沿って生成する薄層粘土（最大5 mm程度）中にすべり面がある。正規圧密、排水形式になり、強度定数は、

$$c' > 0, \phi' > 0 \dots\dots\dots(4)$$

になる。特別な土質試験法を必要とするが、リングせん断試験機にける残留強度に近い値になる。

(3) 摩擦Ⅰ型地すべり面は層界面に生成し、ここに残存する薄い水膜を潤滑剤として滑動する。生成条件が厳しく、どの地区においても見られるものではない。せん断強度定数は小さく、せん断強度定数は式(5)になり、

$$c_w \approx 0, \phi_w > 0 \dots\dots\dots(5)$$

実験結果によると、 $\phi_w \leq 8^\circ$ が得られている。

(4) 摩擦Ⅱ型地すべり面は、物理・力学両性質が異なる層界面に沿って生成する。光沢、条痕があり、層界面にある超薄層の水を潤滑剤として摩擦滑動する。ただし水膜が超薄層のため、土粒子が直接接触する部分もある。抵抗力度はクーロン式よりも摩擦法則によって示される。摩擦Ⅰ型を流体摩擦型とすれば、摩擦Ⅱ型は境界摩擦型になる。特殊な試験法になるが、強度定数は

$$c_f = 0, \phi_f > 0 \dots\dots\dots(6)$$

になり、 c_f が 10° を越えることは珍しく、条件が揃うと滑動によって、せん断Ⅱ型へと形態が変化する場合がある。

図-8は、4種類の地すべり面形態を模式的に示したものであるが、どの地区においてもこの順序で配列することを示したものではない。また、単種類の地すべり面だけで構成されることも希である。また、単一と思われる長大地すべり面は、生成機構の複雑性から、水平方向の力学的性質の変化に富むせん断破壊面に属するため、地すべり面の土質試験および力学的性質に関して下記的事项が注目される。

(1) 潜在域において4種類の地すべり面の分布状況と

配列とは規則性がない。このため、ある地すべり面長において4種類の地すべり面の分布長(範囲)を確定させることができない。これは探査試錐の間隔を短くしても解決することは困難である。表-3のように、せん断型地すべり面と摩擦型地すべり面との力学的性質には、かなりの差があるので、各種類毎の地すべり面長が確定しないと、厳密には力学的性質の意味がない。

(2) ある種の地すべり面長が確定したとしても、同一種類の地すべり面についても力学的性質にかなりのバラツキがある¹²⁾。土質試験用の試料はテストピットから直接採取するのが理想的であるが、この方式の採取には費用がかかり、一地区内から多数の試料を採取することは調査費の面から難しいのが現状である。

(3) 滑動することによって、地すべり面の種類が変化する場合がある。例えば、

- (i) 摩擦Ⅱ型地すべり面→せん断Ⅱ型地すべり面
- (ii) 摩擦Ⅰ型地すべり面→せん断Ⅰ型地すべり面
- (iii) water film 面→せん断Ⅰ型または

Ⅱ型地すべり面

の各事例が見いだされている。また、滑動を繰り返ることによって ϕ' が変化することも見いだされている。

(4) 地すべり面が受ける間隙水圧の影響は、地すべり面の種類によって異なり、摩擦型地すべり面はせん断型地すべり面に比較して影響が少ない。

図-8 4種類の地すべり模式図

表-3 地すべり面の種類とせん断強度定数

地区名	力学的性質			
	せん断Ⅰ型	せん断Ⅱ型	摩擦Ⅰ型	摩擦Ⅱ型
切留 No.1 (秋田)	16° 20'	18° 50'	8° 07'	11° 01'
押田 (秋田)	19° 52'	21° 23'	12° 17'	17° 25'
振内 No.1 (北海道)	16° 06'	18° 09'	7° 24'	8° 48'
木屋川 (山口)	14° 10'	17° 20'	7° 15'	8° 25'

5. 地すべり面形状を主体とした安全率の算定法

地すべり安定解析の際、必ず計算される安全率は防止対策をたてる際の根拠として必要とされてきた。抑止杭

における推力計算、切土または盛土の必要性、排水効果の判定など、安全率を基準にして算定するため、安全率が0.01 違うと工事費何百万円の差違ともなれば問題は深刻であり、安全率を詳細に求めている一面がある。

安全率の工学的な意味は、地すべり面の力学的性質を根拠にして、地すべり面の均衡を定量的に表示するもので、原則的な考え方として、

全地すべり面に働く有効せん断抵抗力

全地すべり面に作用する斜方分力

の比率として表示している。このため、地すべり面の形状が不確定(斜方分力に関係)、地すべり面の力学的性質不定(せん断抵抗力に関係)のまま安全率を求めることは、安全率のための安全率になる。

また、計算上の安全率が $Fs \geq 1.0$ ならば、滑動は発生せず防止対策不要は理解できるが、現象として $Fs = 0.99$ と $Fs = 0.98$ とはどのような差違があるのか、安全率は移動速度および地すべり現象との関係を定量的に表示するものではない。

いま、地すべり面の形状を x 、地すべり面全体の粘着力を y 、内部摩擦角を z としたとき、 x 、 y 、 z と何れも未知数では三元一次方程式を解くのと同様であるが、安全率の計算に対して3個の方程式を立てることが難しく、1個の方程式からは解は得られない。

ここで、 c 、 ϕ 逆算法は、 y 、 z を未知数とする二元一次方程式を解くことになるが、2個の方程式を得ることができず、 y 、 z のうち何れかを決定することによって解を得る方法である。このため地すべり面の形状が判明していることが条件である。

地すべり面探査装置の使用、地すべり面の種類に応じた力学的性質の測定によって、安全率は従前以上に正確に計算されることになる。よって“ c 、 ϕ 逆算法”も不要になり、安全率計算は解決したように思えるが、多くの問題がある。

(1) 安全率を地すべり防止対策に必要な数値に限定した場合、一度滑動したことのある地すべり面は、地すべり面探査装置において探査可能であり、初期に実施される試錐過程で、その地域の地質構造と共に地すべり面の形状が、候補面として把握されるため、従来のように試行的に円弧すべり面を想定する必要はない。現在、潜在域において全面的に地すべり面探査装置だけを用いて探査した事例はないが、テストピットを用いて地すべり面の形状を確定した例については報告した¹³⁾。

地すべり発生後であるから、地表面には変状が見られ、これから受働域、潜在域、主働域の区分はある程度可能であり、地すべり候補面に計器を設置すると、わずかな挙動に対しても反応するため¹⁴⁾、地すべり面の形状を確認することができる。安全率計算の第一歩は地すべり面

の形状確認になる。

(2) 次に地すべり面全体の力学的性質を把握することであるが、現在、地すべり面探査装置ではこれの種類と分布状況まで探査できない。主働域・受働域は、地すべり面の発生機構から見て、せん断Ⅰ型地すべり面が生成している。この領域は、地すべり面が比較的短く、試料採取も容易、加えて土質試験結果に基づく c' 、 ϕ' が適用できる場合もある。

潜在域での土質試験は、多数実施する程正確な値が得られるが、少ないときには近似値の性格を帯びる。現実の問題として多数の試料採取(テストビットによる)と試験とは不可能である。もちろん同一種類で短い地すべり面では土質試験結果が十分に適用できる。

(3) 以上のことから、地すべり面全体の力学的性質を求める方法として、一部分(潜在域に対して)逆算法を適用する。

① 受働、主働両域については c' 、 ϕ' を用いる。

② 潜在域では地すべり面のせん断特性から、 $c'=0$ 、 $\phi'>0$ として 地すべり面全体の安全率が1.0になるよう ϕ' だけを求める逆算を行う。これは、この領域に分布する4種類の地すべり面の平均値を示すことになる。

③ $c'=0$ と見なすことは砂層斜面の安定を求めることと同じになり、地すべり面の平均傾斜 θ に関係する。地すべり面上に地下水がないとき $\theta \leq \phi'$ であるが、常時、地下水位があるときは $\theta < \phi'$ でなければ安定条件は得られない。この観点からも、特に潜在域の地すべり面の形状は重要である。地すべり面の力学的性質にはそれぞれの地区によって特徴があるが、画一的な円弧地すべり面では、特徴を示すことが難しい。

6. 算定法に対する問題点

以上の準逆算法を用いた場合、下記の点が問題になる。

(1) 地すべり発生後、滑動を停止したときも、地すべり面には図-9のような間隙水圧が存在している。すなわち、常時地すべり面上に存在する地下水圧(水深)を言う。降雨によって再滑動するのは、 ϕ' の値が変化するのはなく間隙水圧が作用し、地すべり面の有効応力が低下するため、このとき再滑動に必要な最小間隙水圧を“限界間隙水圧”と言う。地すべり面に作用する間隙水圧が残留水圧から限界水圧に達するには一定量以上の先行降雨量(例えば350 mm以上)に続く降雨強度(例えば日降雨量70 mm以上)を必要とし、これを地すべり発生の降雨パターンとしているが、降雨量はある地区の地すべり面の力学的性質に関係する。このため、地すべり面における間隙水圧(または地下水位)の変動測定は重要かつ必要である。逆算法において $Fs=1.0$ として ϕ' を求める場合、地すべり面に作用する限界間隙水

圧の考慮は重要な条件である。これを無視することは、潜在域における逆算法を無意味にしてしまう。

(2) 地すべり面に働く間隙水圧は、自由地下水(地すべり面上の地下水深)と被圧地下水(地すべり面下部から作用する水圧)とに起因する二種類ある。このため、地すべり面上の地下水深を測定しただけでは対応できない地区があり、地すべり面に間隙水圧計を設置する必要がある。

(3) 先端開放型の地すべりは受働域がほとんどないため、残留・限界両間隙水圧にも、ほとんど差違はないが、受働域の抵抗が大きい場合、限界間隙水圧をこえて滑動を開始し、理論的に $Fs<1.0$ になって推力を発揮する。また、主働域においては、滑落崖または陥没帯付近の地層が一体となって作用するとき、ここに“くさび”が形成され、これによる推力(横圧力)が発生するので¹⁵⁾、これを加味する必要がある。主働・受働両域の状態把握は軽視できない。

(4) 以上の方式を用いた場合でも、潜在域には、せん断Ⅰ型地すべり面も分布しており、これの分布範囲が広いと c' の平均値は零にはならない。例えば、潜在域の地すべり面が50 m程度、平均深度10 m程度、平均傾斜 15° のとき、逆算法を用いた場合に比較して、 c' は 0.1 tf/m^2 の差があり、 ϕ' においても 2° 程度の差はある¹⁶⁾。地すべり面上の地層の単位体積重量を $\gamma=1.75 \text{ tf/m}^3$ と仮定、間隙水圧を考えないときでも式(1)の形式を用いると

$$\Delta Fs = \frac{0.1 \times 50 + 816 \cdot \tan 2^\circ}{218} = 0.15$$

の差違が生じる。その他を含めて誤差は避け難い。現段階では、地すべり面の形状が確定した後の安全率は、どのような条件で安定が崩れるのかを数値で検討する方法として用い、かつ対策をたてるもので、安全率を0.01まで求めることは計算上可能であっても実際には難しく、単なる計算上の操作になる可能性が高いので、これを工費の算出に用いる場合には、この点を考えておく必要がある。

図-9 間隙水圧の時間的变化

7. あとがき

地すべり面探査装置実用化を機に、地すべり防止対策に焦点を合わせ、再滑動開始時の安全率計算について検討し、まとめたものが本論文である。

(1) 潜在域について ϕ' の逆算法を採用したことは、この領域における土質試験結果を否定するものではない。大規模地すべりでは、できるだけ土質試験結果を用いることが望ましく、潜在域の土質試験用試料は、テストピットまたは集水井において採取すべきであるが、費用などの面から試料採取に制限を受ける。従って、地すべり面探査装置による地すべり面の形状決定に重点を置いた解析法を提案した。

(2) 主働、受働両域においては、地すべり面の機構から見て、両域の形状が大略確定した場合、土質試験試料として試験コアーが用いられるので、測定した c' 、 ϕ' を用いる方が簡単、かつ正確である。

(3) 全域において地すべり面の間隙水圧を測定した場合、特に潜在域では、 ϕ' の平均値を逆算法によって求めても、地すべり面の位置と形状とが把握されている限り、現在の安全率算定方法に比較すれば、得られた値はかなり正確である。これは潜在域の一地点において詳しい土質試験を実施するよりも、実用面においては利用価値が大きい。

(4) 陥没帯の推力を除いて、地すべり防止対策は、限界間隙水圧以上の間隙水圧発生防止がポイントになる。

今まで、地下水排除工法は抑制工法として地すべり防止の補助的要素が強かったが、地すべり面の形状と作用する間隙水圧とが判明すると、集水井、大型排水ボーリングなどで対応できる¹⁷⁾。従来、抑止杭またはアースアンカー工法だけで防止工事が終わった例はなく、大部分

が排水工法を併用してきた。これは杭などに作用する推力を軽減させることが目的でもあったが、安全率に対しての数値対策であった色彩が強い。

地すべり地区の地下水の挙動は複雑であり、地下水排除が十分できない場合もある。このような場合に限って、補助工として杭などを用いるべきではなかろうか。

計算例については、引続き別編で報告する。

参考文献

- 1), 2), 3), 10) 玉田文吾：第三紀層地すべりの発生機構について、土と基礎、Vol. 21, No. 8, 1973.
- 4) 玉田文吾：第三紀層地すべりの素因と地質学的背景、新砂防、Vol. 33, No. 1, 1980.
- 5) 玉田文吾：地すべり解析における土質力学の領域、土と基礎、Vol. 29, No. 7, 1981.
- 6) 玉田文吾、山崎宣悦、遠藤真一：試験過程における地すべり面探査、西日本工業大学地盤工学研究所報告、Vol. 10, 1994.
- 7), 13) 玉田文吾：テストピットによる地すべり面の探査、地すべり、Vol. 19, No. 2, 1982.
- 8) 玉田文吾、福田順二：地すべり面の転位現象を考慮した防止対策、西日本工業大学地盤工学研究所報告、Vol. 9, 1993.
- 9) 玉田文吾、福田順二、仲野昭治郎：間隙水圧・移動量同時測定装置の特性（第一報）、第34回地すべり学会研究発表会講演集、1995.
- 11) 玉田文吾：地すべり面の種類と力学的性質との関係、地すべり、Vol. 22, No. 2, 1985.
- 12), 16) 玉田文吾、福田順二：地すべり面における力学的性質とそのパラッキ、西日本工業大学地盤工学研究所報告、Vol. 8, 1992.
- 14) 玉田文吾、福田順二、仲野昭治郎：間隙水圧・移動量同時測定装置の特性（第二報）、第35回地すべり学会研究発表会講演集、1996.
- 15) 玉田文吾：地すべりの予知と予防（その4）、地すべり技術、Vol. 23, No. 1, 1996.
- 17) 玉田文吾、田中盛正：陥没性地すべり面のレオロジー挙動、第35回地すべり学会研究発表会講演集、1996.

地下侵食が関連した結晶片岩地すべりの移動機構

「地すべり」Vol. 35, No. 1 (通巻第 133 号) pp. 1~8, 1998 年 (平成 10 年) 6 月

古谷 元, 佐々恭二, 日浦啓全, 福岡 浩

本研究では, 善徳地すべりで地下侵食土砂の自記観測, 土層変形の観測, そして土層内部の地下水流動層の探査を行い, 岩屑質の結晶片岩地すべりの移動機構について検討した。その結果から地すべりの移動機構は, 地すべり活動に起因した地下侵食と地下侵食に起因した地すべり活動が連鎖する構造であることが明らかになった。

黄土地すべりのすべり面形状の特性と崩土の拡散範囲の予測

「地すべり」Vol. 35, No. 1 (通巻第 133 号) pp. 9~18, 1998 年 (平成 10 年) 6 月

郎 煜華, 中村浩之

黄土地すべりの多発地域の黄土厚さ, 地下水位, 斜面勾配, および地震が地すべりのすべり面形状および安全率に与える影響について議論し, その特性を明らかにした。二次元斜面安定解析による地すべり危険斜面を予測するとともに, 三次元的な崩土の拡散範囲を予測方法を提案し, 中国甘肅省黒方台段丘面の地すべりによって検証した。

降雨時の斜面安定性の全体安全率による評価

「地すべり」Vol. 35, No. 1 (通巻第 133 号) pp. 19~23, 1998 年 (平成 10 年) 6 月

鶴飼恵三, 祭 飛, 坂上最一, 若井明彦

飽和・不飽和透流解析とせん断強度低減有限要素法を連立させ, 降雨時の斜面の全体安全率を計算する実用的な方法を提案する。土の透水特性の違いが, 斜面内の水位上昇の傾向や安全率の変化に大きく影響することが示された。

付加テクトニクスから見たベネズエラ・アンデス山系の地すべり分布特性

「地すべり」Vol. 35, No. 1 (通巻第 133 号) pp. 24~29, 1998 年 (平成 10 年) 6 月

久保田哲也

国内・外を問わず, 地すべり危険箇所を判定する上で, 地質・地質構造と地すべり分布の関係を把握しておくことは重要と思われる。構造線周辺では, 地すべりが多発することが知られており, 分布状況の研究も進んでいる。構造線は過去に造山作用の盛んであった, あるいは現在も進行中のプレート境界に存在し, その地質構造は複雑である。この, 構造線周辺の地質構造の相違による分布頻度の差については, 防災上重要であるにもかかわらず, 明確にモデル化されていないと考える。従って, ここでは大陸縁辺に位置する山系の中でも, 付加構造が比較的簡単でプレートテクトニクスの理論が応用し易く, 第四紀の火山も存在しない, つまり, 地質的に付加テクトニクスを使用した説明に適した事例であり, 地すべりの分布状況も知られているベネズエラ・アンデス山系の Bocono 構造線周辺における地すべり分布の特徴を中央構造線の例などと比較し検討したので報告する。

土の剪断の進行に伴う剪断面の表面構造の変化

「地すべり」Vol. 35, No. 1 (通巻第 133 号) pp. 30~36, 1998 年 (平成 10 年) 6 月

岸本良次郎, 向井田善朗

土の剪断開始から剪断変位 500 mm の間に形成される剪断面を特徴づけるミクロの表面構造を電子顕微鏡で観察した。この構造には, 土塊小片や土粒子の配列の仕方により将棋倒し状, 擦痕, 平滑の 3 種類がある。剪断初期には第一のものが優勢で, 剪断の進行とともに後の 2 者が発達する。

地すべり面の形状決定と安全率の算定

「地すべり」Vol. 35, No. 1 (通巻第 133 号) pp. 37~45, 1998 年 (平成 10 年) 6 月

玉田文吾, 福田順二

第三紀層中に形成された地すべり面の探査が可能になったので, 地すべり面の安定解析が容易になったように思える。しかし, 地すべり面の安全率計算は非常に複雑である。よって, 安全率の近似計算に下記の方法を用いる。

(1) 地すべり地区の潜在域には 4 種類の地すべり面があるが, これらのせん断強度定数は基本的に異なるうえ, 潜在域における 4 種類の地すべり面の分布範囲は一定ではない。このため, 1 ヶ所程度で厳密に地すべり面のせん断強度定数を測定して見ても, 潜在域の力学的性質を把握することは難しい。従って, 潜在域では, 確定した地すべり面に対して逆算法から得られたせん断強度定数 (粘着力 c をゼロと見なして) を適用する。しかし, 主働, 受働両領域では, 土質試験から得られたせん断強度定数を用いる。

(2) 地すべり面には 2 種類の間隙水圧がある。一つは, 地すべり面に常時作用している間隙水圧, 一方は滑動に必要な限界間隙水圧である。上記の方式による場合, 地すべり面の両間隙水圧を正確に決定しなければ計算の工学的意味がない。

現在では, 安全率が小数以下 2 桁まで計算出来る状態ではない。安全率は, 間隙水圧によって変化する地すべり面の均衡状態を示すものであり, この観点から見れば, 安全率は, 間隙水圧の減少によって一時的に停止した地すべりの再発防止工事の積算 (例えば, ある工事のよって安全率が 0.05 増加すると言った) に用いることは意味がない。