

地すべり

釜井俊孝 (かまい としたか)

京都大学防災研究所 教授

1. 「地すべり」とは

地すべりとは何かと言う問いは、実は難問である。その証拠に多くの人々が専門や経験の違いによって、微妙に異なる定義を述べている。しかし、少なくともわが国では、重力によって斜面が比較的ゆっくりと、塊となって滑る現象（マスマーブメント）であるというコンセンサスがあるので、ここではそうした現象を「地すべり」と呼ぶ事にしたい。

地すべりは、本質的にその地域の地形・地質・地下水の影響を強く受けて成立している。したがって、地盤工学の立場から地すべりを見る場合でも、背景としての地盤環境を無視する事ができない。すなわち、地すべりを上手に扱うには、地盤に関する理学・工学の幅広い知識と経験が必要である。ここでは、そうした地すべり現象を出来るだけわかりやすく解説していきたいと思う。

2. 地形地質と地すべり

2.1 地すべり地形

虎が死して皮を残すように、地すべりは動いて地形を残す。すなわち、発生後に傷跡（地形）が、明瞭に残るのが、地すべりの特徴である。地すべりに特徴的な地形の事を「地すべり地形」というが、最もわかりやすい「地すべり地形」は、「滑落崖」である。「滑落崖」とは読んで字のごとく、地すべりの本体が滑り落ちた結果、地山との境界に形成された「崖」のことである。多くは、上流端の「頭部滑落崖」が明瞭であるが、地すべりによる変位が大きい場合は、側部にも「滑落崖」が発達する。

口絵写真—12は、2008年6月の岩手・宮城内陸地震によって発生した荒砥沢地すべりの全景である。こうした大規模な地すべりでは、多くの場合「滑落崖」の直下に、移動方向に直交する地表面の凹み、すなわち「陥没帯」が発達する。また、「陥没帯」の下流側には、いくつもの小山が見られるが、これらは「分離小丘」と呼ばれ、移動してきた元の地山の断片である。この地すべりは、対岸の尾根に衝突して停止したが、末端部では圧縮変形によって、「隆起」や「圧縮亀裂（移動方向に平行な割れ目）」などの特徴的な地形が形成された。

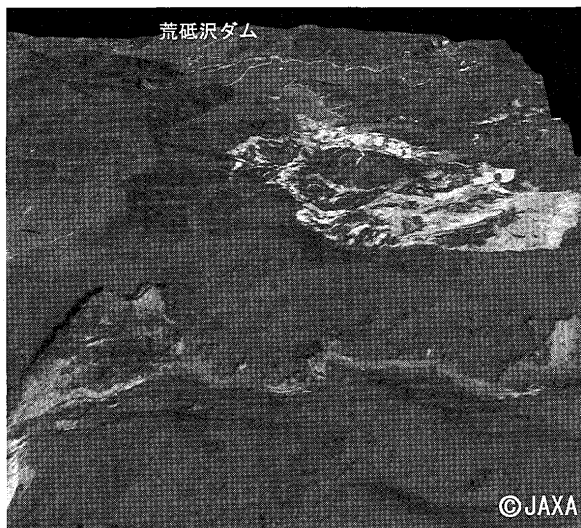
こうした地すべり地形は、多くの地すべりに共通して見られる地形の単位、すなわちパーツである。しかし、そのパーツの組合せ方や大小関係は、個々の地すべりで微妙に異なり、その違いは、すべり面の形や地すべりの活動形式を反映していると考えられる。したがって、こうした地すべり地形を手がかりに、逆に「地すべりがど

の様に動いたのか」を推定する事が可能である。荒砥沢地すべりのケースでは、垂直移動量よりも水平移動量が大きく、「陥没帯」と「分離小丘」の発達が顕著であった。こうした地すべり地形から、この地すべりが緩傾斜の直線的なすべり面に沿って動いた事、すべり面は恐らく層理面に沿っている事などを推定することが可能である。

地すべり地形は過去の地すべり現象の記録であるが、それを探す事は同時に将来の地すべりのリスクを知る事にもつながる。なぜなら、地すべりの多くが、過去の地すべり地形の上で発生しているからである。こうしたケースを「再活動型地すべり」と呼んでいる。上記の荒砥沢地すべりの場合もそうしたケースであった。これは、斜面にとって地すべりとは「治らない傷」の様なもので、一旦地すべりが発生すると、その場所で破壊現象が繰り返すようになるためと考えられている。

以上の様に、地すべり地形を調べる事には、多くのメリットがある。その手段として以前は、直接現地へ赴く必要があったが、最近では、比較的簡単に地形図の画像が閲覧できるようになり¹⁾、Google Earth等の普及もあって、パソコンの前に居ながらにして地形を観察する事が可能である。しかし、依然として、地すべり地形を調べる最も強力な手段は、空中写真の実体視である事には変わらない。実体視とは、6割程度の面積が重なるように連続して撮影された1対（ステレオペア）の鉛直空中写真（飛行機からカメラを鉛直下方に向けて撮影された写真）を、肉眼で立体視する事により、地形を詳しく観察する手法である。高度差が強調されて見えるため、微妙な地表の段差も判定する事が可能である。地すべりに限らず、多くの分野で地形観察に使われている標準的な手法であるが、地すべり地形を判読するには、写っているものと地すべりの関係を解釈し、記載する必要がある。このため、若干の訓練が必要であるが、最近では多くの参考書が出版されている。一方、この手法によって、全国の地すべり地形の分布が調査され、分布図も作成されている²⁾。

一方、地すべりの規模が大きければ、衛星画像を使った観察も可能である。例えば、わが国の陸域観測技術衛星（だいち：ALOS）には、マルチバンド画像用、白黒実体視用画像用、合成開口レーダー用の3種類のセンサーが搭載されており、これらを組み合わせて地すべり地形の観察を行う事が可能である。図—1は、衛星画像を実体視してDEM（数値地形モデル：標高値を持ったグリッドデータ）を作成し、マルチバンド画像を貼り付け

図—1 ALOS による荒砥沢地すべりの観測結果³⁾

て作成した鳥瞰図である³⁾。

2.2 すべり面の起源

地すべりを底面まで掘削すると、移動層と地山の境界が見つかる事がある。この境界部は、ごく薄い事が多いので面として扱い、「すべり面」と呼ばれている。厚さがある面とは言い難い場合や、すべり面を含む地層を指す場合は、「すべり層」と言うこともある。すべり面(層)は、通常は連続する滑らかな面(層)であるが、初性的な地すべりや特殊な地質条件では不明瞭な場合がある。図—2は、ある古墳の発掘中に発見された地すべりの断面を示している。この地すべりでは地山の最上部が液状化して「すべり層」が形成され、古墳の盛土が滑った。メカニズムとしては、荒砥沢地すべりと同様なので、形態もそっくり(ミニチュア)である。すなわち、地すべり全体は底部のすべり面に沿って水平に移動したが、頭部から中央部の引張り場では、副次的に回転すべり(スランブ)が発生した。これらの回転すべりから取り残された三角断面の部分が口絵写真—12の分離小丘である。また、図—3は、スロバキアの地すべりの断面図である⁴⁾。この地方では、堅い岩石(トラバーチン)の重みによって柔らかい泥岩の上面が変形し、トラバーチンがブロック状に移動するタイプの地すべりが多く見られる。こうしたタイプでは、全体を貫く滑らかなすべり面は形成されない。

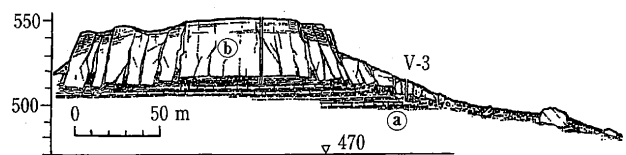
すべり面は、あらゆる地盤破壊現象に見られるが、地すべりのすべり面が、他と大きく異なるのは、上記の様にすべり面の形成に地質構造、岩質等が深く関わっている点である。例えば、ある地域に存在する地すべりを調べると、特定の地層(凝灰岩の薄層や炭層)がすべり面となっている事が多い。その結果、地すべりのすべり面は、一般の斜面崩壊よりも深く、全体の規模も大きくなる。また、一般の斜面崩壊がほとんど発生しない緩傾斜の斜面でも、すべり面が形成され地すべりが発生する場合がある。

2.3 地すべりの分類

自然界には、様々な種類の地すべりが存在するので、



図—2 今城塚古墳における地すべりの断面



図—3 スロバキア東部における地すべりの断面

(a): 古第三系の砂岩泥岩互層

(b): トラバーチン

古くから分類が試みられてきた。しかし、分類をするには、何らかの分類基準が必要である。これについても様々なものがあるが、植村(1980)⁵⁾は次のように整理した。

○幾何学的概念による分類

- ・形態的特徴…円弧型地すべり、板状すべりなど

○物理的概念による分類

- ・材料物質の種類…岩盤すべり、崩積土すべりなど
- ・運動様式…クリープ、落下、すべり、流れなど(Vanes)

○地質学的概念による分類

- ・地域性…第三紀層地すべり、北松型地すべりなど(小出)
- ・時代性…化石地すべりなど
- ・歴史性…一次すべり、幼年型地すべりなど(渡)

地すべりの分類では次のような小出(1955)⁶⁾の地質構造による分類が有名である。カテゴリーの異なる事象を分類基準として並列させるのには疑問があるという意見や、破碎帯地すべりの意味があいまいであるとの批判もあるが、とにかく、最初に日本の地すべりを網羅した分類であった。簡単でわかりやすいので、小出の3大分類として、今でも良く使われている。

○第三紀層地すべり(新潟・北陸等)

○破碎帯地すべり(中央構造線・御荷鈴帯・三波川帯)

○温泉地すべり(火山地帯)

この分類の長所は、我が国の山地斜面で「粘土」が形成されやすい条件を端的に表現している点である。すなわち、第三紀層(特に、泥岩、凝灰岩)は固結度が低く、風化して粘土化しやすい傾向がある。破碎帯(結晶片岩地帯)では、地層が地殻変動による変形を受け、多くの割れ目が形成されているため、水が浸透して風化・粘土

化しやすい。この傾向は、泥質片岩（泥岩を源岩とする結晶片岩）において、特に顕著である。火山地帯では、温泉変質により粘土が形成される。つまり、この分類は、「地層が風化・粘土化すると、せん断強度が低下するので、地すべりが発生しやすくなる」という仕組みを地質学的に表現したものだといえる。

2.4 地すべり地帯

図-4は、わが国の主要な地すべりの分布を示している。地すべりは、日本海側のいわゆるグリーンタフ地帯（図-4の網かけ部）と中央構造線に沿う三波川帯付近に集中的に分布している。小出の分類によると、前者は主として新第三紀の泥岩に関連する「第三紀層地すべり」であり、後者が結晶片岩に関連する地すべりで、「破碎帯地すべり」に相当する。九州では、長崎・佐賀両県付近にややまとまった分布が見られる。これらは、玄武岩と石炭を含む地層に関連した地すべりで、「北松型地すべり」と呼ばれている。こうした地すべりが偏在する「地すべり地帯」の形成は、地すべりの発生が地層の岩質と構造に支配されることの証拠でもある。

地すべりの発生を考える際には、伝統的に素因と誘因に分けて考えるのが一般的である。素因とは、病気における体質の様なもので、誘因とは直接のトリガーの事である。地すべり地帯は、地すべりという病気になりやすい素因を抱えた地域であるといえる。

2.5 地すべりと地質構造

地すべりは、移動体が地山から切り離される現象なので、それを可能にする地質構造が重要な素因になる。特に、層理・片理面の走向傾斜と斜面の向きは重要で、流れ盤斜面において大規模な地すべりが多く発生する傾向がある（図-5 I, IV）。これは物性の境界や柔らかい薄層がすべり面となりやすいためである。一方、図-5 II, IIIのように傾斜が急で垂直に近い場合は、受け盤斜

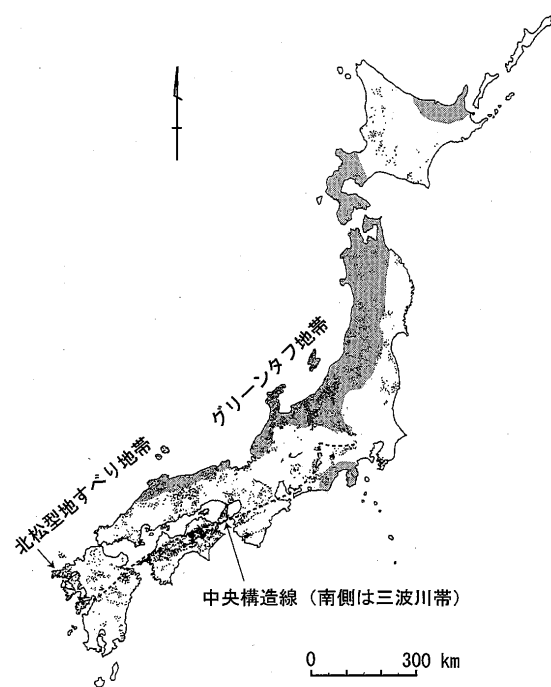


図-4 主要な地すべりの分布

面において、地層の回転・転倒現象（トップリング）が発生し、地すべりに発展する事がある⁷⁾。

帽子の様に堅く厚い岩体（火山岩、トラバーチン等）が、柔らかい地層（泥岩、凝灰岩等）の上にはほぼ水平に載っている構造をキャップロック構造と呼ぶ（図-3）。キャップロックには、割れ目が発達する事が多く、岩盤としての透水性は良好である。したがって、下位の地層との境界面が粘土化してすべり面となり、大規模な地すべりが発生する。「北松型地すべり」は、そうした地すべりの典型例である。

また、断層や節理によって岩体が地山から切り離され、地すべりに発展する事例も多く知られている。例えば、近畿の内陸盆地の周辺では、活断層の運動に巻き込まれた半固結の砂・シルト岩中に「層状破碎帯」と呼ばれる一種の層面断層が形成され、地すべりのすべり面となっている⁸⁾。

第三紀層の分布域では、背斜構造の軸部に地すべりが集中する傾向が見られる。これは、軸部には節理が密に発達するため、風化が進行しやすい事、軸部から両翼に向かって流れ盤となることなどが関係していると考えられる。また、構造発達の影響により、新鮮な岩石でも、軸部のものは流れやすく、ひずみやすい物性を持っているという報告もある⁹⁾。

2.6 地すべりと粘土鉱物

地すべりのすべり面に、特殊な高塑性の（ネットリとした）粘土が存在する事は、古くから気付かれていた。これらは「地すべり粘土」や「すべり面粘土」と呼ばれている。しかし、粘土が存在したから地すべりが発生したのか、地すべり運動の結果として粘土が出来たのかという点については議論が分かれている。ただ、粘土の鉱物分析をすると、多くの場合、すべり面粘土にスメクタイト（粘土鉱物の一種）が含まれている事がわかっている。もちろん、地山を構成する岩石は多様なので、すべり面粘土は何種類かの粘土鉱物の組合せとして形成されているのが普通である。しかし、そうした様々な粘土鉱物組合せの中に、スメクタイトが必ず含まれているという点が重要である。このことが、「地すべりの発生にス

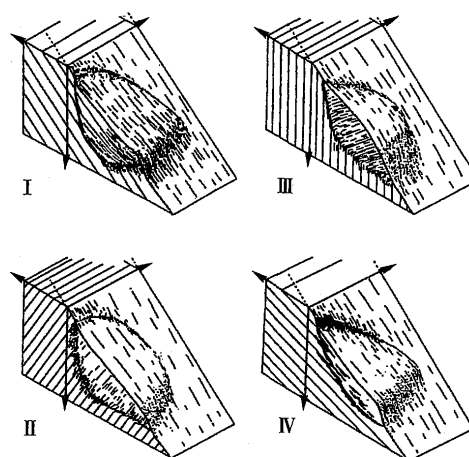
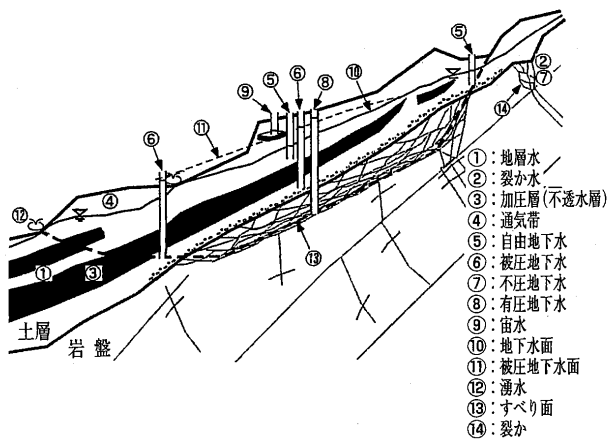


図-5 層理・節理と斜面の関係が岩盤クリープと地すべりに及ぼす影響⁷⁾

図—6 地すべりにおける地下水の分布¹¹⁾

メクタイトが滑剤として作用しているのではないか」という考えが、広く受け入れられている根拠となっている。

一方、地震時に発生した軽石層の地すべりでは、すべり面でハロイサイトと呼ばれる粘土鉱物が多く発見されており、スメクタイトは見られない。この事は、誘因によって滑剤の機能性が異なる事を示唆していると考えられている¹⁰⁾。

2.7 地すべりと地下水

地すべり地では、豊富な地下水が存在する事が多く、岩石を風化させ、粘土が生成する上で重要な役割を担っていると考えられている。もちろん、誘因として間隙水圧が上昇するためにも、地下水の存在は不可欠である。しかし、地すべりを含めて山地斜面における地下水分布は複雑である。図—6は、模式図であるが、様々な場所に地下水が存在する事、深い部分では被圧されている事、地下水が通りやすい「みずみち」がある事を示している¹¹⁾。

すべり面付近の深い位置にある地下水は、被圧されている事が多いので、あまり移動せず、周囲の岩盤と化学的に平衡状態にあると考えられる。こうした地下水は、陽イオン交換によって Ca^{2+} よりも Na^+ , K^+ に富み、陰イオンとしては HCO_3^- が多いという特徴的な水質を持っている。

3. 地すべりの運動

3.1 地すべりの速度

地すべりでは、一旦、滑りやすい条件が作られると、長い間運動が続くのが普通である。そして一度止まっても、地下水の増加や人為作用などにより不安定化すると、再び動き出すということを繰り返す。地すべりが動く速度にはかなりの幅があるが、普通の地すべりは1日で数mmから数cmといった程度である。しかし、まれに高速で運動する場合があります、甚大な人的被害を発生させてきた。しかし、過去の事例を調査した結果によると、頻度分布は不連続であり、分布の谷間である5m/日を境に「速い地すべり」と「遅い地すべり」に区分できるといわれている¹²⁾。

3.2 運動の様式

Vanes (1958)¹³⁾は、地すべりを運動の様式 (Type of movement) と地山の種類 (Type of Material before movement) によって区分した。すなわち、縦軸に運動様式として崩落 (Falls), トップル (Topples), 滑動 (回転: Rotational Slides), 滑動 (並進: Translational Slides), 水平方向拡大運動 (Lateral spread), 流動 (Flows), 複合運動 (Complex) をあげ、横軸に地山の種類として岩盤 (Bedrock), 土 (Engineering Soil) をとって地すべり現象を網羅的に示した。Vanes (1978)¹⁴⁾では、土を更に、崩土 (Debris) と土 (Earth) に区分している。この分類方法は、巧みな図解で示されていたため、言葉の壁を越えた理解をわれわれにもたらし、説得力のある分類となった。

4. 不安定化のメカニズム

4.1 クリープ

地すべりの前駆的現象として、変形が徐々に進行するクリープが出現することがある。その場合は、一定速度で変形が進行する二次クリープの後、変形が加速してゆく三次クリープが出現し、破壊 (地すべり) に至るという過程をたどるのが普通である。室内実験では、三次クリープの開始時点で局所的破壊が発生し、その後の変位が加速される過程で破壊域 (すべり面) がつながっていく現象が観察されている¹⁵⁾。

クリープ現象は、地すべり発生時刻の予知に大きく貢献している。斉藤 (1966)¹⁶⁾は、クリープ現象を利用した地すべり発生時刻の予知に成功した。その後、図—7の様なより簡単な方法 (変位速度の逆数プロット) が、福園 (1990)¹⁷⁾によって提案され、広く用いられている。

4.2 地すべりの誘因

大多数の地すべりは、土のせん断破壊現象に他ならない。すなわち、すべり面に沿って滑らそうとする力 (せん断力) が増えてせん断抵抗力を上回るか、せん断抵抗力がせん断力以下に低下すれば、地すべりが発生する。こうした状況に至った原因を、地すべりの「誘因」と呼ぶ。実際の誘因は様々で必ずしも一つだけとは限らないが、地震、豪雨、人工地形改変等が考えられる¹⁸⁾。

地震は発生すると影響が甚大であるが、それほど頻繁な現象ではない。したがって、平常時における主な誘因は、地下水の増加、すなわち間隙水圧の増加である。したがって、主な発生時期は融雪期、梅雨期、台風シーズンという事になる。

また、道路建設等による地すべり土塊先端の切り取り、地すべり内を通る道路の建設による集水・浸透条件の変化、ダムの湛水による地下水位の上昇などが誘因となって再発した事例がある。

4.3 特殊なメカニズムによる地すべり

地すべりの中には、通常とは異なる発生・運動メカニズムを持つものもある。重要なものとしては、クイッククレイの地すべり、液状化による地すべり、亀裂性岩盤のすべり・トッピング等 (図—5Ⅱ, Ⅲ) である。

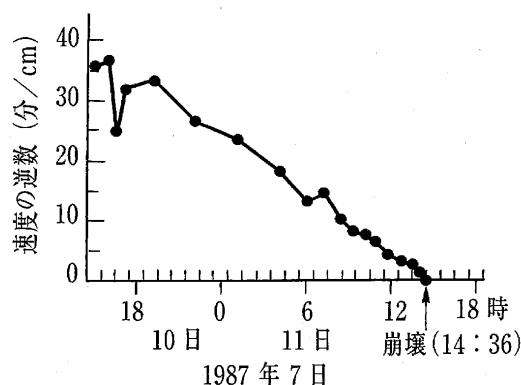


図7 移動速度の逆数を用いた地すべり発生時刻の予知成功例（長野県・袖地地すべり）

クイッククレイの地すべりは、後氷期にアイソスタシーによる隆起を経験し、クイッククレイ (Quick clay) が地表に露出し、斜面を形成している地域（北欧、北アメリカ）に良く見られる。こうした地域では、わずかなせん断応力の増加に起因する局部破壊（乱れ）が全体に波及し、大規模な地すべりに発展することが知られている。

低地では地震時に液状化による側方流動が良く知られているが、斜面でも液状化が原因と思われる地すべりの事例が知られている。地すべりの場合はすべり層が液状化すれば良く、必ずしも移動層全体が液状化する必要はないが、地下浸食等によってルーズな土の構造が、すべり面付近に存在していることが重要である。こうした地すべりの例としては、兵庫県南部地震による宅地の谷埋め盛土の地すべり¹⁹⁾や1984年長野県西部地震の際の松越の崩壊が挙げられる。また、地すべり移動層の透水係数が高く、融雪等によって大量の地下水が供給された場合でも、限界動水勾配以上の間隙水圧が発生し液状化に至る。1969年の水沢新田地すべりはこうした事例であった。

5. 安定計算

5.1 地すべりの安定計算が難しいわけ

地すべり対策工事の合理的な設計のためには、極限（限界）平衡法に基づく安定計算を行うのが、通常のプロセスであろう。しかし、地すべりの場合、安定計算で正解を得るのは容易ではない。その理由を挙げて見たいと思う。

理由1：すべり面せん断強度の問題。安定計算に不可欠であるが、簡単には決められない。ピーク強度？ 残留強度？ はたまたその中間なのか？ 地すべりによる変形がどの程度進んでいるかは、一応の目安ではあるが決め手を欠く。さらに、地すべりが運動する速度によっても、せん断強度が変化する（高速流動時の粒子破碎等）。いずれにしても地すべりは大変形問題なので、リングせん断試験等の特殊な試験が必要になる。

理由2：異方性の問題。地すべりの頭部と末端部では、応力状態が大きく異なるので、均質な材料であっても誘導異方性^{注1)}の問題が発生する。平均的な強度として、

直接せん断の結果が現象と一致する事が多いといわれている²⁰⁾。しかし、そもそも地すべりは、地質構造影響を強く受けており、構造異方性^{注2)}が卓越する現象なので、単純にはいきそうもない。

理由3：間隙水圧の問題。地すべりにおける地下水のあり方は複雑である。通常のボーリング孔内水位を無条件に静水圧とするのは無理がある。さらに、破壊時の過剰間隙水圧がどうなるかは、計測事例もほとんど知られていない。

理由4：破壊の非斉時性の問題。クリープ現象が存在することから明らかのように、既存のすべり面が存在する場合でも、最初から地すべり全体でせん断抵抗力は発揮されない。実際に、変形（ひずみ）が伝播する現象が観測されており、活動の度にすべり面では局所破壊と破壊の伝播が、繰り返されていると考えられる。

理由5：三次元形状の問題。現状では二次元安定計算が主流である。そのためには代表断面を決めることが必要であるが、地すべりの場合、形状が複雑なのでそれは容易ではない。

5.2 それでも安定計算—逆算法の魔力—

前節で述べたように、地すべりは境界条件も様々で力学的にも非常に複雑な現象である。その安定計算には、すべり面の情報（位置と形状）、移動層の重さ、すべり面の強度、地下水条件等、取得するのに多大な労力を必要とする諸々のデータが不可欠であるが、仮にそれらが得られたとしても、前節の理由1～5で述べたように、そもそも安定計算の前提が成り立たない場合が多いと考えられる。しかし実際には、すべり面については何となくわかるけれども、せん断強度（抵抗）に関する困難さの方が深刻であるという場合が一般的である。したがって、地すべりでは、土質試験データを直接使用しないで済む逆算法が広く用いられてきた。

逆算法とはとにかく現状の安全率を適当に決めて、せん断強度をそれに合うように修正してゆくやり方である。通常はせん断力を既知とし、現状安全率を1.0と置いてせん断抵抗力を求め、せん断強度定数 (c' , ϕ') を逆算する。ついで、設定した計画安全率に達するのに必要なせん断抵抗力の増加量（杭やアンカー等による）、間隙水圧（地下水位）低下量（排水施設による）を求める。この場合、せん断強度は、あくまでも安定計算用で、土質試験結果とは異なるのが普通である。

このように、逆算法はかなり大胆な方法であるが、現状よりも安全率を15～20%上昇させると、地すべりは実際に停止し、10年程度は安定的に推移することが経験上知られている。さらに極端な場合は、せん断力だけを求め、その20%程度を抑止力として付加する設計も応急対策として実際に行われている。その場合、必要な情報は、移動層の重さとすべり面形状のみということ

注1) 応力誘導異方性ともいう。地盤内部で一般的である異方応力状態によって発生する強度の異方性。

注2) 固有異方性ともいう。粒子配列、地質構造等、その場所の地盤本来の性質によって発生する強度の異方性。

初級講座

になり、問題がかなり単純化される。

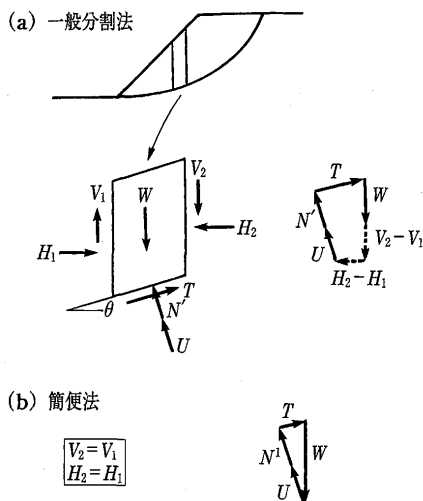
5.3 安定計算の具体的プロセス

安定計算を行うには、斜面をいくつかの領域（スライス）に区分し、分割されたスライスにおける力の釣合いから、せん断力とせん断抵抗力を計算する。次にこうした各スライスの力を合計し、合計せん断力と合計せん断抵抗力の比を安全率として定義する。

スライスに働く力の中で、特にスライス間力（スライス同士が及ぼし合う力）は具体的に求めることが困難である。そこでこれらを何とかして省略し、安全率を求めることになる。どの程度省略するかは考案者の自然観を反映するため、様々な手法が存在している。中でも最も大胆な手法は、簡便法（スウェーデン法）と呼ばれる計算法である。簡便法では、すべてのスライス間力は釣り合い、打ち消し合っていると仮定して無視する。この手法は、大胆な仮定を含むものの、計算が簡便であることから広く普及しており、現在わが国の地すべり安定計算、すなわち逆算法は、ほとんどこの手法によって行われている。

一方、Morgenstern and Price 法（以下 MP 法）、Spencer 法等の一般分割法や Janbu 法、Bishop 法などは、何らかの意味でスライス間力を考慮する手法であり、スウェーデン法をより“高度化”したものとして提案されている。図—8 に一般分割法と簡便法における力の釣合い、および簡便法（スウェーデン法）の安全率 F_s の定義を示した。

しかし、中村（1978）²¹⁾ がわが国の多くの地すべりについて示したように、すべり面が円弧からはずれた一般



分割されたスライスに働く力の釣合い

簡便法（スウェーデン法）の安全率 F_s は、次式で与えられる。

$$F_s = \frac{c' \sum l + \tan \phi' \sum (W \cos \theta - U)}{\sum W \sin \theta}$$

ここで、 c' ：粘着力
 ϕ' ：内部摩擦角
 l ：すべり面長
 θ ：すべり面傾斜
 W ：土塊重量
 U ：換算間隙水圧

図—8 スライスに働く力の釣合いと簡便法による安定計算法

形の場合、“原始的”とされるスウェーデン法と一般分割法を代表する MP 法の違いは、6%以下でしかない（スウェーデン法の結果は常に低いので安全側）。この程度の違いは、地下水位を間隙水圧として用いることの危険性や“進行性破壊”の影響を考慮することによって容易に吸収可能であり、地形測量等の誤差を考慮すれば大きな違いとはいえない。

5.4 最近の動向

これまで地すべり対策の現場では、土質試験結果はあまり使用されてこなかった。その背景としては、ともかく目の災害に対処することが求められていた事、均質材料（単一すべり面強度）、代表断面（二次元解析）を前提とした古典的な土質力学的手法が、地すべりの現実とかけ離れていた事が挙げられる。こうした状況を改善するには、地盤の不均一性を前提とした不安定化機構の理解が必要である。地盤の構造（地質）や地学的プロセスを考慮した不安定化（破壊）機構の理解が重要な意味を持つと思われる²²⁾。

そうした試みの一つとして、順算による三次元安定計算の事例がある。すべり面の場所（頭部、底部、側部）や地質によって異なる土質試験結果を適用したところ、妥当な安全率が求められた^{23)~25)}。これらの解析では、側部抵抗の割合は全体の10~50%に達しており、適切な解析のためには、側部抵抗の評価が重要であることが示された。

6. 対策工事

地すべり対策工事には、様々な種類のものが提案されている。基本的には、以下の3種類であるが、これらが単独で行われることは少なく、組み合わせる場合が多い。

1. 排水ボーリング、集水井戸、排水トンネル等によって地下水位を低下させ、間隙水圧を減少させる（主として、せん断抵抗の増加）。
2. 土工（頭部排土、末端盛土）によってバランスを回復させる（せん断力の減少とせん断抵抗の増加）。
3. 杭やアンカーによってせん断抵抗を増加させる。

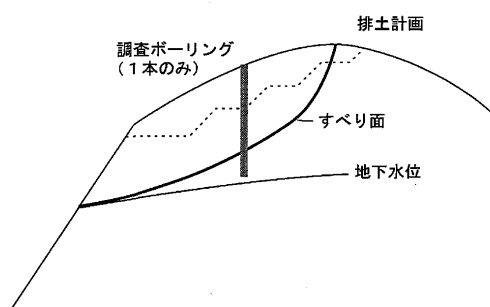
設計には必要抑止力（計画安全率まで上昇させるのに必要なせん断抵抗）を安定計算によって求める。しかし、緊急の場合には、末端に押さえ盛土を行い、ともかくせん断抵抗を付加して沈静化させる事が多い。

7. 筆者の失敗例

逆算法による安定計算では境界条件を間違えても、ともかく最後の設計まで行き着けるので、結果（安全率）がおかしいことに気が付きにくいという欠点がある。その典型例として筆者の失敗例を紹介したい。

具体例は、福島県の Y 地すべりにおける頭部排土計画である。当初は図—9 a) の様なすべり面と地下水位に関する情報が与えられ、設計がスタートした。手順どおり、現状安全率を1.0、計画安全率を1.2と設定し、排土計画を設計した。調査ボーリングでは、地下水位はす

a) 対策工事開始前の認識 (設計の前提)



b) 再調査後の認識

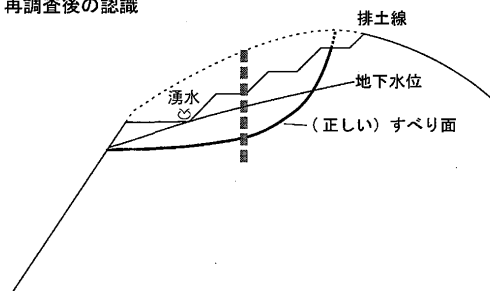


図-9 ある地すべりにおける排土計画の失敗

べり面以下であった。この時点で、何かがおかしいことに気が付くべきであったが、工事がスタートし、排土がほぼ完成した直後、法面が動きだした。地すべりの発生である。

再調査の結果、①すべり面の位置と形状が間違っていた。②地すべりの側部に小さな断層があり、そこから大量の地下水が移動層中に供給されていた。ということが判明した。正しいすべり面と地下水位で再計算すると、当初の設計では安全率は若干低下してしまうこともわかった（自然は実に正直である）。その後、排土をやり直すと共に、地下水排除工事を追加した結果、地すべりは安定化した。

失敗の原因は、ひとことで言えば調査不足であるが、すべり面以下の亀裂を反映した孔内水位を地下水位としてしまったこと、代表断面の位置（当時、三次元解析は一般的ではなかった）が適切でなかった点が致命的だったと思える。

以上は、筆者の初心者時代における失敗例の一つである。もし、当時こうした初級講座があれば、これらを未然に回避できたかも知れない。先人の失敗が、若い読者諸氏の糧となれば幸いである。

参 考 文 献

- 1) 国土地理院 Web サイト, 地図閲覧サービス (ウォッチズ) <http://watchizu.gsi.go.jp/>
- 2) 防災科学技術研究所・地すべり地形分布図データベース Web サイト http://lsweb1.ess.bosai.go.jp/jisuberi/jisuberi_mini/LSkaisetsu.asp
- 3) 宇宙航空研究開発機構・地球観測研究センター Web サ

イト, 陸域観測技術衛星「だいち」(ALOS) による平成20年(2008年)岩手・宮城内陸地震の緊急観測結果について(5)

http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/img_up/jdis_iwatemiyagi_eq_080702.htm

- 4) Zarba Q. and Mencl, V.: 地すべりとその対策, 松尾新一郎訳, 鹿島出版会, 249 p., 1971.
- 5) 植村 武: 地すべり考, 自然災害と水—そのひきがねとなる水—, 災害科学総合研究班, pp. 37~48, 1980.
- 6) 小出 博: 日本の地すべり—その予知と対策—, 東洋経済新報社, 259p., 1955.
- 7) 千木良雅弘: 風化と崩壊—第3世代の応用地質学—, 未来社, 204p., 1995.
- 8) 藤田 崇: 地すべりと地質学, 古今書院, pp. 137~217, 2002.
- 9) 岩松 暉・服部昌樹・西田彰一: 地すべりと岩石の力学的性質—新潟県山中背斜を例として—, 地すべり, Vol. 11, No. 1, pp. 13~20, 1974.
- 10) 田中耕平: 崩壊・地すべりと地すべり粘土, 中村三郎編 地すべり研究の発展と未来, 大明堂, pp. 105~110, 1996.
- 11) 浅野志穂: 雨・雪・地下水, 地すべり—地形地質の認識と用語—, 日本地すべり学会, pp. 207~218, 2004.
- 12) 大八木規夫: 分類/地すべり現象の定義と分類, 地すべり—地形地質の認識と用語—, 日本地すべり学会, pp. 3~13, 2004.
- 13) Vanes, D. J.: Landslide types and Processes, in Landslides and Engineering Practice, edited by Eckel, E. B., Highway Research Board, Special Report, 29, pp. 20~47, 1958.
- 14) Vanes, D. J.: Slope movement types and processes, in Landslides Analysis and control, edited by Shuster, R. L. and Krizek, R. L., Highway Research Board, Special Report, 176, pp. 11~33, 1978.
- 15) Kamai, T.: Monitoring the process of ground failure in repeated landslides and associated stability assessments, *Engineering Geology*, No. 50, pp. 71~84, 1998.
- 16) 齊藤迪隆・上沢 弘: 斜面崩壊時期の予知, 地すべり, Vol. 2, No. 2, pp. 7~12, 1966.
- 17) 福岡輝旗: 平均速度の逆数による斜面崩壊発生時刻の予測, 防災科学技術研究所報告, No. 46, pp. 45~81, 1990.
- 18) 古谷尊彦: ランドスライド—地すべり災害の諸相—, 古今書院, 213p., 1996.
- 19) 釜井俊孝・守随治雄: 斜面防災都市—都市における斜面災害の予測と対策—, 理工図書, 200 p., 2002.
- 20) 太田秀樹: 室内・原位置試験結果の安定解析への適用, 入門シリーズ13 土の強さと地盤の破壊入門, 地盤工学会, pp. 235~265, 1987.
- 21) 中村浩之: 地すべり斜面の安定計算式の検討, 土木技術資料, Vol. 20, No. 8, pp. 21~26, 1978.
- 22) 徳江俊秀: 地盤の破壊問題に関する一考察, 第28回土質工学研究発表会講演集, pp. 605~606, 1993.
- 23) 太田英将: 土質試験結果の安定解析への適用, 実測値のみを用いた斜面安定解析の可能性, 日本地すべり学会関西支部シンポジウム, pp. 43~56, 2006.
- 24) 中川 渉: 神戸層群の三次元安定解析, 実測値のみを用いた斜面安定解析の可能性, 日本地すべり学会関西支部シンポジウム, pp. 57~67, 2006.
- 25) 真弓孝之: 安定解析における土質試験結果の適用性, 実測値のみを用いた斜面安定解析の可能性, 日本地すべり学会関西支部シンポジウム, pp. 69~91, 2006.