

研究報告

貯水池周辺地すべりに関する総合的研究について



桑島 偉倫

河川政策グループ
研究主幹



桑原 啓三

JICE 技術顧問



新井 勝明

河川政策グループ
上席主任研究員

研究の背景と目的

日本列島は、第四紀以降のプレート活動に伴う岩盤の隆起と破壊が続いている。我が国のこうした国土形成上の要因に加え、降水量が多く岩盤の風化変質作用が促進されやすく降雨による浸食活動が盛んである、地すべりの誘因となる地震等が頻発するといった国土条件から、多くの地すべり地形が存在する。

地すべりの発生は、地中の岩盤強度や風化の状況、地下水の状況といった諸条件に左右されるが、ダム貯水池周辺斜面においては、人為的な水位変動（ダムの運用に伴う貯水水位の上昇・下降）の影響を受けるため、通常の地すべりとは異なる配慮が必要となる。

貯水池周辺に地すべりが発生すると、ダム本体の安全性はもとより、貯水池の機能等に重大な影響を及ぼすこともあるため、発生の可能性を検討し、所要の対策を事前に講ずることが重要であることは言うまでもない。

近年、気候変動の影響に伴う治水安全度、利水安全度の低下が懸念される中で、既設のダムをより効率的に活用することにより、これらの課題に対処しようとする取り組みも進められているが、貯水池の運用形態の変更に伴う、地すべり機構の解明、評価が必要とされている。

本研究は、貯水池周辺地すべりの対策にあたって、これまで蓄積されてきた事例等を踏まえた地形、地質的素因に関する考察、土質強度定数（ c' 、 ϕ' ）の適用性、水位変動等に伴う残留間隙水圧の残留率の算定等、より適切な調査・分析・評価のために必要となる諸条件の整理や、合理的な対策工を選定するための三次元的な安定解析に関する評価など、合理的かつ効果的なアプローチが現場で行えるための解説書作成にあたっての論点整理を目的に、検討を進めてきたものである。

また、最新の技術的知見を反映させるため、自主研究と

して JICE が主催する懇談会（座長：中山浩之 東京農工大学名誉教授）において検討いただいた。

地すべりの特性

1 地層構造による概括的な地すべり特性の把握

地すべりが発生する可能性を適切に評価し、効果的かつ効率的な対策を立案するためには、地質区分による岩相分布の特徴や地すべり地の地形的特性を踏まえ、どのような地質構造においてこういった地すべり形態が生じやすいのかを、概括的に理解することが重要である。

地すべりの発生は、斜面内部の岩盤強度や風化程度などに関わる岩質的な要因（岩相規制）と地質構造や地形との関係（構造規制）とに大きく関わっている。また、岩質的な要因は地質構造とも深く関連しており、地すべりが多発する箇所には地域性が存在する。

地すべりの発生に際し留意すべき代表的な例を以下に挙げる。

- ① 固結が不十分で含水により強度低下を起こしやすい新第三紀や第四紀の堆積岩、特に浸食を受けやすい海成の黒色泥岩やグリーンタフなど、すべり面になりやすい粘土鉱物を形成しやすい岩体から構成されている場合。
- ② 地殻変動で岩石が圧砕され、鏡肌がみられるような岩盤が分布する構造線や破碎帯が連続する場合。
- ③ 火山岩の貫入に伴う熱水作用や、後火山現象である温泉作用、硫気作用などを受け粘土化した変質帯や、この上に生成された火山岩の破碎物が分布する場合。

これらを踏まえて、地すべり発生について我が国における地質区分毎の概括的な整理を行った。

2 地形判読による個別の地すべり特性の把握

多くの地すべりは、長年月の間に運動を繰り返すのが一般的であり、その結果、斜面の変形が特異な地形として残る。このような地形特性は、地形図上では周辺の山腹斜面において等高線がほぼ平行なのに対し、地すべり部では上部の等高線が上に凸で、間隔が急に縮まり、中部では逆に広がり、末端部では下に凸となり再び縮まるという等高線の乱れとなって現れる。

これらの地形的特性は、地形図や空中写真から判読することができるが、近年では、航空レーザー測量（レーザープロファイラー）が普及しており、こうした技術の活用により、地すべり地形の見落としが少なくなる。

地すべりの安定性

貯水池周辺斜面においては、降雨、融雪および河川の浸食などの原因に加え、ダム の 湛 水 という 新 た な 要 因 が 作 用 す る こ と に よ り、安 定 し て い た 地 す べ り 地 が 再 び 運 動 し た り、履 歴 の な い 箇 所 で 新 た な 地 す べ り が 発 生 す る こ と が あ る。

これまでの事例を整理すると、図-1 に示すように貯水池周辺で発生した地すべりの約 6 割が初期湛水時に発生している。また、初期湛水では貯水位の上昇時に、運用時では下降時に地すべりが発生する傾向が認められる。

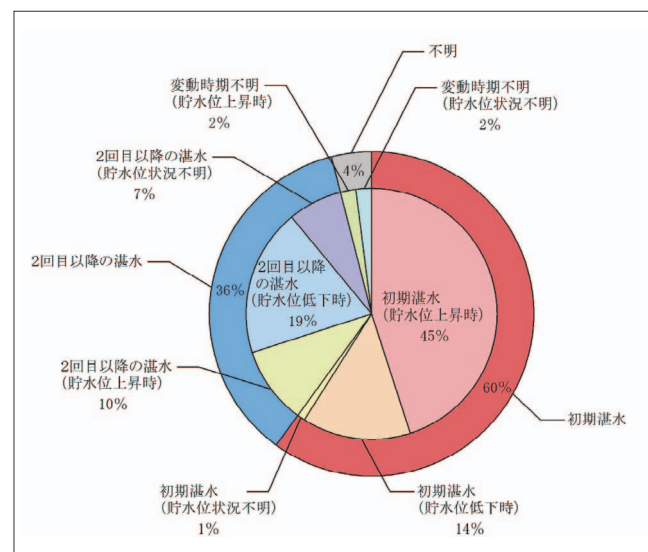


図-1 貯水池周辺で発生した地すべりの貯水位状態

湛水に伴う地すべりの発生要因としては、主として次のものが考えられる。

- ① 地すべり土塊の水没による浮力の発生

- ② 貯水位の急激な下降による残留間隙水圧の発生
- ③ 水没による斜面上部部の地下水位の上昇（堰上げ）
- ④ 水際斜面の浸食・崩壊による受働部分の押え荷重の減少（末端崩壊）

湛水に伴う地すべりの安定性は、湛水前の状態と浮力、堰上げ、残留間隙水圧等の原因の影響度により異なり、極めて複雑なため、概査・精査・機構解析を踏まえたうえで、基準水面法による安定計算により総合的に評価することが必要である。この際、地すべり特性を踏まえて、どのような局面で地すべりが発生しやすいかを理解しておくことも、発生要因を分析するうえで重要となる。

これまでの調査事例によると、9 割以上の地すべりが 50% 以下の水没割合で発生しており、水没割合が 70% を超えると地すべりが発生していないことがわかる（図-2 参照）。

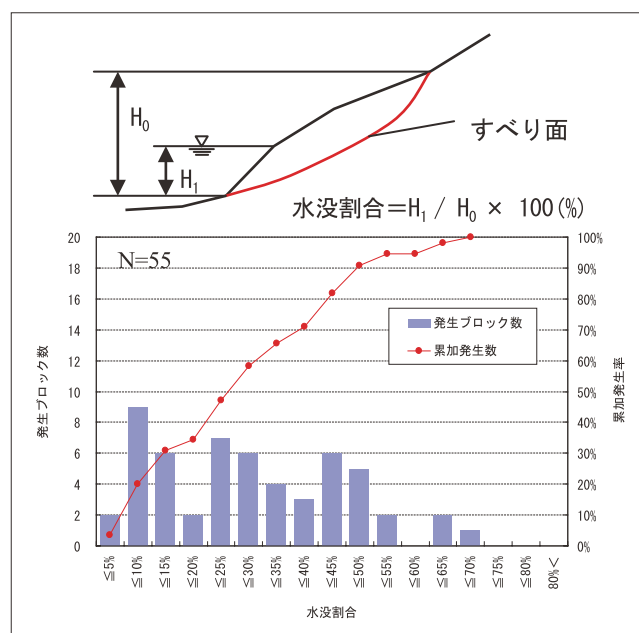


図-2 地すべりの発生率と水没割合

貯水位上昇時には、約 7 割の地すべりが 20 ~ 50% の水没割合で発生している（図-3 参照）。

また、貯水位下降時には、8 割以上の地すべりが 45% 以下の水没割合で発生している（図-4 参照）。

このことは、地すべり発生機構の分析、対策の立案、モニタリング等に大きな示唆を与える。貯水位上昇時に発生する地すべりの多くは、湛水初期に発生しているが、その主たる要因が、浮力の発生や堰上げの影響によることを示している。また、貯水位下降時に発生する地すべりの多くは残留間隙水圧の影響に起因していると考えられる。

地質構造の違いによる条件も勿論加味する必要があるが、

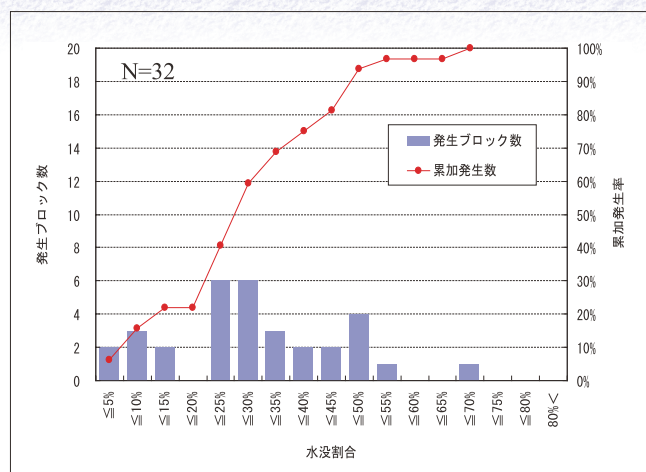


図-3 貯水位上昇時における地すべり発生率と水没割合

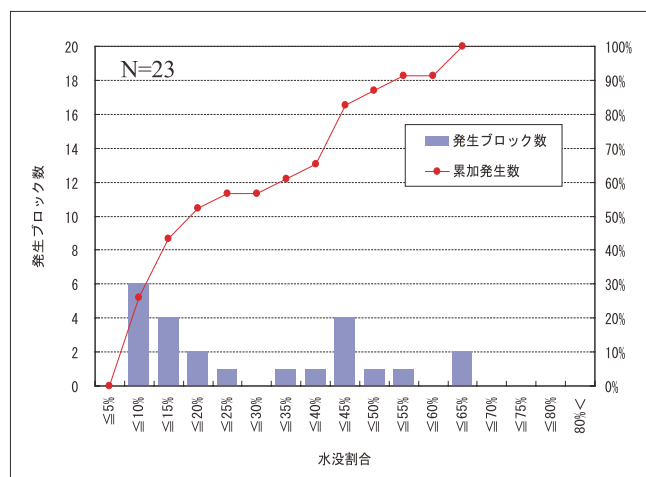


図-4 貯水位低下時における地すべり発生率と水没割合
 湛水の影響による斜面の不安定化に関しては、水位の状況により留意すべきポイントが読み取れる結果となっている。

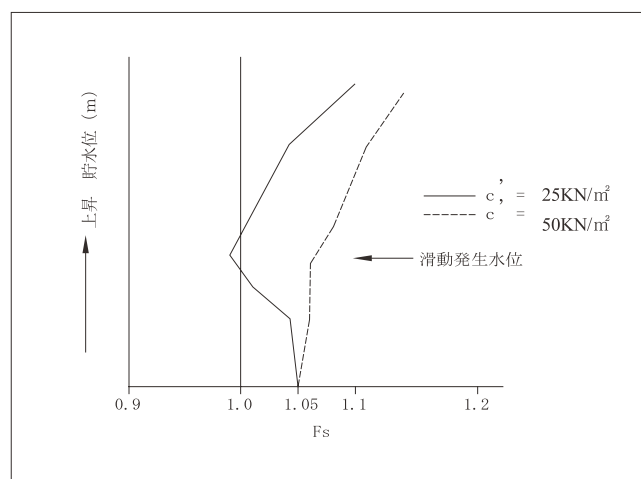
すべり面の土質定数

すべり面の土質強度定数 (c' 、 ϕ') を正確に把握し、斜面の安定を評価することは極めて難しい。このため、従来は湛水前のすべり面の安全率 F_{s0} を推定し、逆算法により求めた c' 、 ϕ' を設計に採用するのが一般的であり、土質試験の結果は、主としてその妥当性を確認する補助手段として用いられてきた。このため、ともすれば安全側の設計となっていたことも否めない。

土質強度定数を試験により求める場合、1つのすべり面でも変化に富み、限定された地点での試料採取による土質試験の結果を、そのまま平均的なすべり面の強度としては使用できないこと、せん断強度としてピーク強度、完全軟化強度、残留強度のどの値を地すべりの安定解析に用いる

べきかといった課題を有する。

図-5 は、異なる粘着力 (c') を設定した場合の、貯水位上昇に伴う安全率 (F_s) の変化を示したものであるが、当該斜面では、滑動発生水位で実際に地すべりが発生しており、土質強度定数の設定如何によっては実現象が再現できないことがわかる。

図-5 粘着力 c' と貯水位上昇時の安全率 F_s の変化

すべり面のせん断強度の特性は極めて重要なため、試験を行い照査することが望ましい。近年では、ボーリング技術の進展により、ミストボーリング等極力不攪乱の試料採取も可能となっており、これらを活用した調査・解析・評価を進めること、また、試験方法、条件、結果等をデータベースとして蓄積し、研究を重ねていくことも重要である。

三次元的な安定解析

貯水池周辺地すべりの安定解析は、主測線を用いた二次元解析で行われるのが一般的である。しかしながら、実際の地すべりブロックの形状は、中心部に比べ側部ではすべり面が浅くなる場合や、すべり面の横断形状が左右非対称である場合がある。特に、大規模な地すべりにおいては、主測線を用いた二次元解析だけの検討では、安定性の評価や対策工の計画が合理的でない場合がある (図-6 参照)。

二次元解析が行われてきた主な理由としては、

- ① 複雑な自然現象を単純化できる。
- ② 主断面をもとに防止対策を安全側で計画できる。
- ③ 調査費を軽減できる。

といったことが挙げられるが、斜面安定解析手法が歴史的に、盛土や構造物の検討で、幅方向を無限延長として取り

扱ってきた土質力学の分野で発展してきたことも大きい。

安定解析をより合理的な方法で実施する必要がある場合には、すべり面や地下水位を三次元的に捉える調査を実施し、地すべりの機構を明らかにしたうえで、測線を複数設定した準三次元的な安定解析や、三次元安定解析を行うことが考えられる。

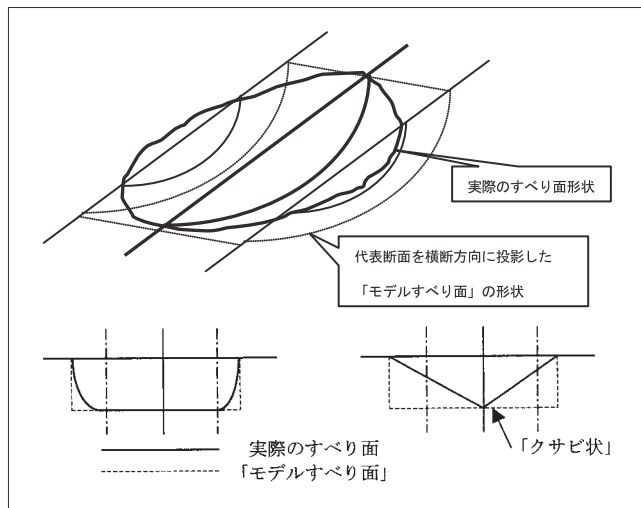


図-6 三次元的なすべり面形状の例

以下に、三次元安定解析を行った結果を二次元的に評価した場合の考察を示すこととする。

図-7 に示す地すべり地の変動状況から、現状の安全率を 1.00 とし三次元ヤンプ法により安定解析を行った結果、すべり面の平均的な土質強度定数 $c'=22.627\text{KN/m}^2$ 、 $\phi'=23.30^\circ$ を得た。この c' 、 ϕ' を用いて、A～H の 8 つの測線で二次元安定解析を行った結果を図-8 に示す。

すべり面の土質強度定数が同一すべり面上で一定とした場合、地すべりブロック全体として安全率は 1.0 となっ

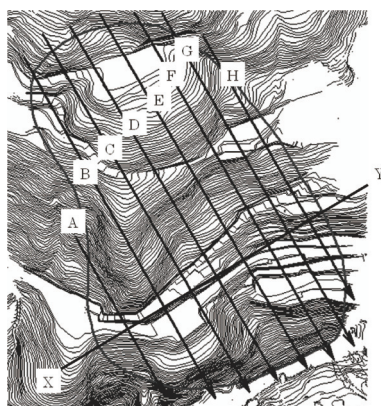


図-7 地すべり地平面図

ているが、個別測線上で二次元断面の安全率をみても 1.0 を下回ったり上回ったりすることがわかる。

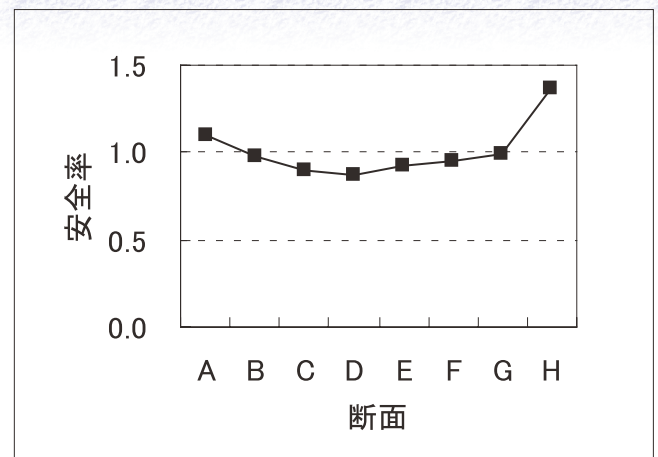


図-8 二次元安定解析結果

また、中心測線に近い断面の安全率は概して低く、三次元安定解析の結果を二次元で見ると、やや危険側の評価となるが、このことは、従来の主測線二次元解析で対策工を選定する場合、安全側の評価となりがちとなることが理解できる。

おわりに

世界的な気候変動の影響による治水・利水安全度の低下が懸念されるなか、ダムサイトが限りある資源でもあることを考えれば、既存のストックを如何に効率的・効果的に活用していくかという視点が益々重要となる。ダムの再開発や容量の再編を行う場合、貯水池周辺の地すべり対策は、そのボトルネックともなりかねない。

本稿の内容は、自主研究として行ってきた解説書の整理のごく一部を紹介したものにすぎない。「貯水池周辺の地すべり調査と対策」については、地すべりの特性から概査、精査、解析の各段階、対策工の計画、湛水時の斜面管理に至るまで体系的に整理しており、要約版が JICE のホームページにも掲載する予定であるので、是非参考にさせていただきたい。

最後に、本研究に多くのご指導をいただいた懇談会メンバーに感謝申し上げますとともに、現場でご苦労されている技術者諸氏の一助となることを祈念して本稿を閉じることとする。

参考文献

- 1) 国土交通省河川局 平成 21 年 7 月 「貯水池周辺地すべり調査と対策技術指針（案）・同解説」
- 2) (財) 国土開発技術研究センター 平成 7 年 9 月 「貯水池周辺地すべり調査と対策」（株）山海堂