

5. 運用中の湛水地すべりの安定性評価を行う上での観測孔配置

Arrangement of observation holes for evaluating the stability of landslides in the reservoir of an operating dam

○山田 政典・吉田 浩・森山 豊・長岡 弘晃・鈴木 祥子・大西 由梨（応用地質株式会社）

1. はじめに

激甚化、頻発化する豪雨対応として気候変動シナリオに基づく河川整備計画の策定・変更が進められるなか、早期に治水機能を増強するため、利水ダムを含む事前放流や既設ダムの治水・利水機能を向上するダム再生等の検討が進められている。しかし、貯水池に地すべりが分布し、運用標高の変更や貯水位下降速度の向上が必要となる場合には地すべりに新たな影響を与える懸念があり、既運用での地すべりの安定性と運用変更後の地すべりの安定性をどのように評価するかが課題となっている。湛水地すべりの安定性は、人為的に地すべりに新たな影響を与えることから、これまでの多くの湛水地すべり事例より得られた知見を踏まえて改訂されてきた技術指針¹⁾²⁾に基づき評価することとされている。最新の技術指針の改定は平成31年3月に行われ、ダム再生等への対応として運用変更後の地すべりへの影響評価では、既運用での地すべりの変動実績を活用した評価が記載され、地すべりの変動を同時刻の実測値（変位、貯水位、地下水位）を用いた安全率変化により示す試みも進められている。一方、地すべりを特徴づけるすべり面は、現地形が形成される過程で素因となる弱面が連続して形成されると考えられ、構成地質等の影響を受けてその性状、物性は変化に富み一義的にすべり面強度を決定し、順解析により実事象と整合する安全率を得ることは難しい。このことから技術指針ではすべり面形状の精度を高め、逆算法により得られた平均すべり面強度を用いて貯水位変動時の安全率を算出することとしている。しかし、実務では単位体積重量、安定地下水位、間隙水圧の残留率等の諸条件を安全側に決めることが多く、運用変更後の地すべりの安定性を安全率で示すために必要となる条件は明確でない。

本論では、これまでの検討³⁾⁴⁾を基に運用ダムの湛水地すべりの安定性評価を行う上での課題、留意点を述べ、実測値（変位、貯水位、地下水位）の連続観測結果を用いた安全率変化による地すべりの安定性評価事例を示す。そして、運用変更後の地すべりの安定性を評価する上での調査・観測孔配置等を提案する。

2. 技術指針での不確実性への対応と課題

技術指針¹⁾では、貯水池運用により新たに地すべり等にかかる不確実性の対応として、下記の対応が取られている。

1) 新技術の活用、実測値を活用した評価

① LP図等を用いた地すべりの抽出、② 高品質ボーリングを用いた未変動のすべり面の抽出（破碎度区分の実施）、③ 連続観測（変位、地下水位）による地すべりの変動要因の分析、④ ダム運用の中での実測値の蓄積とその活用。

2) 安定地下水位の設定

貯水位変動の影響を過小評価しない地下水位設定（豊水期に安定して存在する地下水位）

3) データ蓄積がない条件での貯水位下降時の残留間隙水圧の残留率50%の採用

これまでの実績より条件が整えば残留間隙水圧の残留率を30%に低減可能。

課題として、実測値（変位、貯水位、地下水位）の取得、蓄積を待たず、定性的な情報より未変動（初期安全率 $F_s=1.05$ ）、安全側の検討として安定地下水位なし、貯水位下降時の残留間隙水圧を50%として計算することがある。技術指針の安定計算式では、貯水位下降速度を速めることは残留率の変化に現れることとなるが、運用域とすべり面形状より時々刻々と変化する残留率を50%に固定することで、地すべり変位と実測値を用いた安全率の関連付けができなくなり、運用変更後の地すべりの安定性を浸透流解析による地下水位の変化を用いて予測することもできなくなる。一方、実測値を活用する評価は、地すべりにどの程度の負荷がかかると変位速度が速まるのかを安全率変化で示すものであり、今後の計画安全率の低減による工費縮減や対策工の性能規定に進む上での情報を得ることができると考えられる。

3. 滝水地すべりの安全率変化の影響要素

平成21年7月に改訂された技術指針の解説書である「貯水池周辺の地すべり調査と対策(2010) p130」²⁾に示されている活動歴をもつ3つの地すべり断面形(事例1~3)を用い、基準水面法(2mピッチ)による未水没より全水没に至るまでの貯水位上昇時、残留率50%での貯水位下降時の安定計算を行い、代表標高のスライス応力図(図-1)、全水没条件での貯水位標高-安全率変化図を作成し(図-2)、安全率変化の要因を分析した⁴⁾。

3.1 事例1分析結果

未水没時(EL. 8m $F_s=1.050$)、部分水没時(EL. 26m 最低安全率 $F_s=1.014$)、全水没時(EL. 62m $F_s=1.323$)の26スライスの応力変化を図-1に示す。部分水没時(EL. 26m)では、すべり面傾斜角 α が小さく、「地すべり抵抗力 $S >$ 地すべり力 T 」となる斜面下部で水没深の増加によりスライス重量 W が減少し、安全率が低下する。一方、全水没条件(EL. 62m)では、スライス重量 W が全スライスで水中重量となり、地すべり抵抗力 S 、地すべり力 T ともに大きく低下し、高標高スライスですべり面傾斜角 α が大きいことから地すべり力 T の低下量が大きく、安全率は高くなる。以上より、湛水時(貯水位上昇時)の安全率変化は、水没による各スライス重量 W の変化とすべり面傾斜 α による応力バランスの変化による。よって、これら二つの要素を決定づける、すべり面形状の精度向上が重要である。

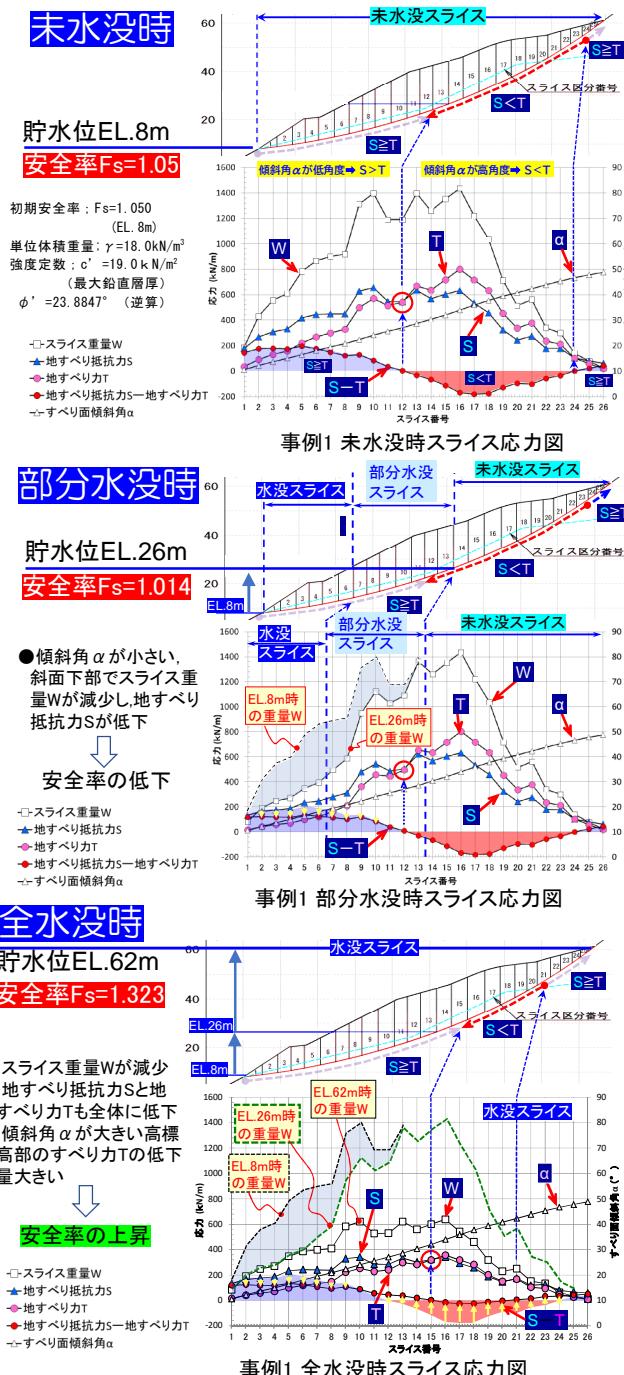


図-1 水没条件とスライス応力図(事例1)

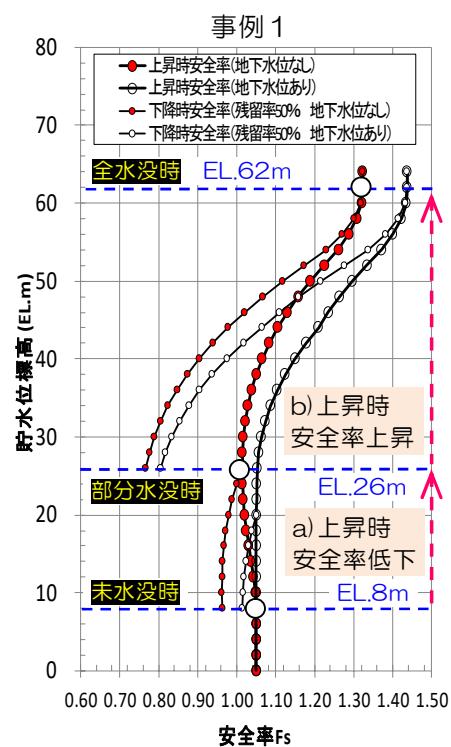


図-2 貯水位標高-安全率変化図
(全水没条件 安定地下水位の有無)

図-2より湛水地すべりの貯水位上昇時の安全率は、すべり面形状に規制され、ある標高に最低安全率が出現し(EL. 26m)、貯水位上昇時に安全率がa)低下からb)上昇に変化する。よって、運用域とすべり面形状の関係を踏まえた評価によりおおよその運用変更時の地すべりの安定性を評価することができる³⁾。よって、運用

変更時の地すべりの安定性を安全率で予測する場合、検討条件（すべり面形状、安定地下水位、初期安全率、単位体積重量、すべり面強度）の最適化が重要である。

3.2 安定地下水位が安全率に与える影響

多くの地すべりでは、すべり面での変位の連続観測が行われることではなく、変位と地下水位の詳細な関係は把握できない。よって、最高水位の連続と地すべりの変動種別により初期安全率を設定し、逆算により平均すべり面強度を算出後、計画安全率まで向上させる対策工を計画する。一方、湛水地すべりの安定計算では、貯水位変動の影響を大きく見込み、不確実性を低減するため、観測最高水位を採用せず、長期間にわたり存在する地下水位（安定地下水位：豊水期に安定して存在する水位）等を観測結果より設定し、貯水位変動時の最低安全率に対して対策工を計画する¹⁾²⁾。しかし、技術指針に追記された運用実績を活用した評価のためには、実測値（変位、貯水位、地下水位の時間データ）の蓄積が必要となる。図-3に技術指針に基づき設定した安定地下水位を平行に+1mから+4m上昇させ、初期安全率を未変動（ $F_{so}=1.05$ ）として逆算強度を算出し、貯水位上昇・下降（残留率50%）した場合の安全率変化を示した⁴⁾。安定地下水位を高く設定するほど、粘着力固定時の内部摩擦角 ϕ' は大きくなり、安全率カーブは右に移動し、同一標高の安全率は増加する。よって、運用実績を活用した評価、運用変更後の地すべりの安定性を評価するためには、安定地下水位を適切に設定する必要がある。

図-3 安定地下水位変化時の貯水位標高-安全率変化図（事例1）

し、同一標高の安全率は増加する。よって、運用実績を活用した評価、運用変更後の地すべりの安定性を評価するためには、安定地下水位を適切に設定する必要がある。

3.3 未水没域の地下水位上昇が安全率に与える影響

運用ダムでは未水没域の地下水位上昇の影響により地すべりの変位速度が早くなることがある。技術指針の検討は、貯水位操作による影響の把握を主に対象としているが、洪水調節前の貯水位変動は降雨と重なること多く、降雨により貯水池際の地下水位が堰上るため、降雨と貯水位変動による影響を明確に分けることは難しい。図-4に未水没域の安定地下水位と平行に+1mから+4m未水没域の地下水位を上昇した時の貯水位下降開始時（EL. 26m）の安全率を算出した⁴⁾。+4m時の下降開始時の安全率は $F_{so}=1.052 \rightarrow 0.948$ と0.104低下し、EL. 26m→8mへの貯水位下降時の安全率低下量0.072より大きい。このことから変位と整合する安全率を算出するためには未水没域の降雨時の地下水位変動の影響を考慮する必要がある。

図-4 未湛水域の地下水位上昇時の安全率変化（事例1）

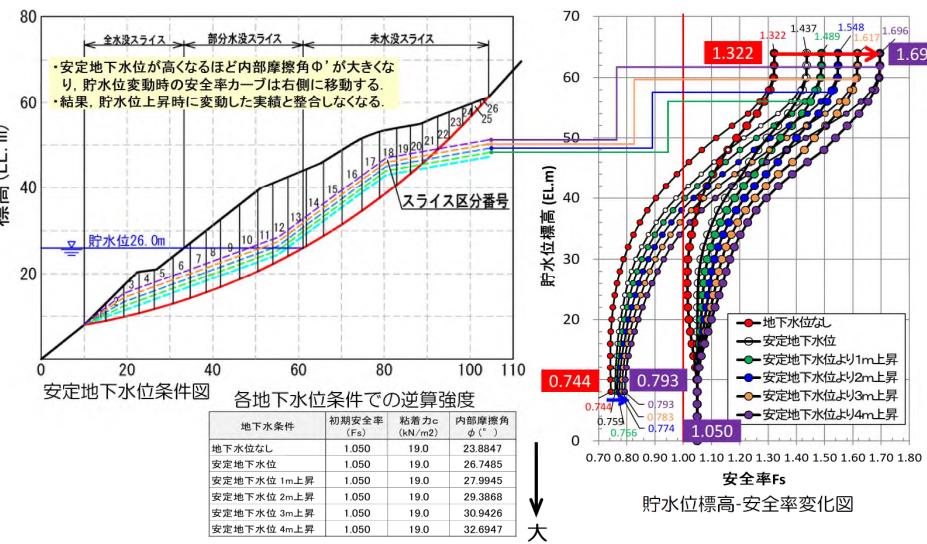
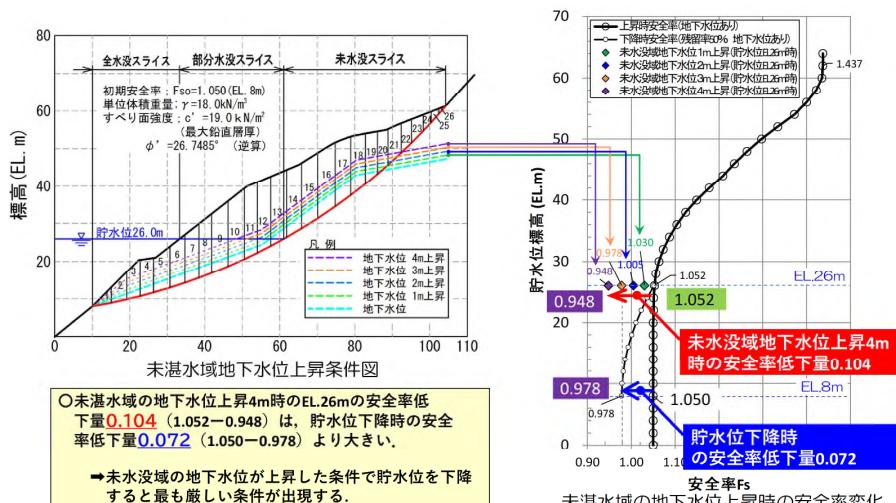


図-3 安定地下水位変化時の貯水位標高-安全率変化図（事例1）



4. 滝水地すべりの実測値を用いた安定性評価事例

4.1 実測値を用いた安定性評価方法

1) 地すべり断面形状等の設定

検討対象は、秩父帯北帯に位置する貯水池地すべり (J 地区) である。基盤地質は主に泥質混在岩よりなり、すべり面は付加時の断層や地質境界等に規制される。DEM データを用いた地形解析図を用いた微地形判読、現地踏査により地すべりの平面形を決定し (図-5)，高品質コアの観察によるすべり面の抽出、動態観測による変位すべり面等を用いた地質解析より地質断面図を作成した (図-6)。また、地すべり内部の性状変化に着目した破碎度区分を行い (図-7)，破碎度区分毎に高品質コアより求めた単位体積重量を与えて、安定解析モデルとした。

2) 実測値を用いた安定度評価の方法

実測値を用いた安定度評価は、同時刻の変位、貯水位、地下水位データを用いて貯水位変動や降雨等が地すべりに与える影響を安全率変化により示す (図-8)。計算式は技術指針の簡便法 (基準水面法) を用い¹⁾、運用時の変位速度と安全率の整合が図れるよう解析モデルの精度を高めることが求められる。また、すべり面での設置式孔内傾斜計による連続観測と地すべり変位と関連する地下水観測孔の設置の最適化が重要となる。

3) すべり面強度 (c' , ϕ') の設定

すべり面強度 c' , ϕ' は、地すべりの変位速度の変化点 (変動開始時の場合 $F_s=1.00$) と変動後の変動種別 (A: 0.95, B: 0.98, C: 1.00)¹⁾ より初期安全率を仮定し、鉛直最大層厚より粘着力 c' を設定し、内部摩擦角 ϕ' を逆算により算出する。なお、逆算時の水位条件は、変化点での各孔の同時刻の地下水位を用いる (図-9)。異なる変化点での c' , ϕ' を算出し、最も変位速度の変化と整合する値を採用する。

4.2 実測値を用いた地すべりの安定性評価事例

1) 平成 30 年 7 月豪雨時の変動状況

J 地区は常時から緩慢な動きが認められ、年間 1~2 cm (変動 C) で活動しており、降雨時、貯水位下降時に変位速度が変化する (図-10)。平成 30 年 7 月豪雨時では一時的に 1.0mm/日 (変動 A) 以上を記録し、この変動加速により地すべり対策工 (集水井、アンカーワーク等) を施工した。

2) 安全率変化

無降雨条件の安定解析の結果、J 地区では貯水位が高標高ほど、安全率が高くなる傾向を示す (図-10, 図-11)。地すべり変動と安全率変化を比較すると、7 月 7~8 日の豪雨に伴って地下水位が上昇し、貯水位がサーチャージ水位まで上昇するが、変位速度に明瞭な上昇は認められ

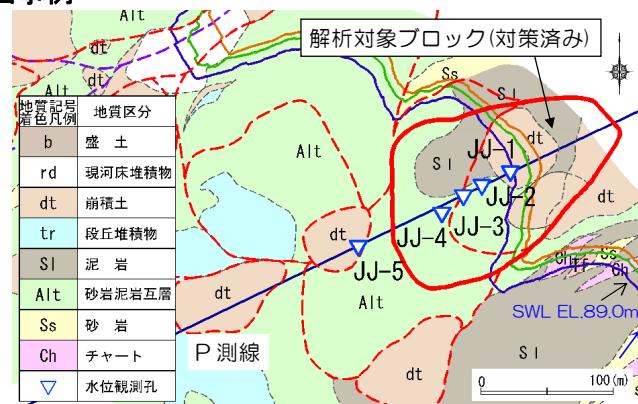


図-5 地質平面図 J 地区

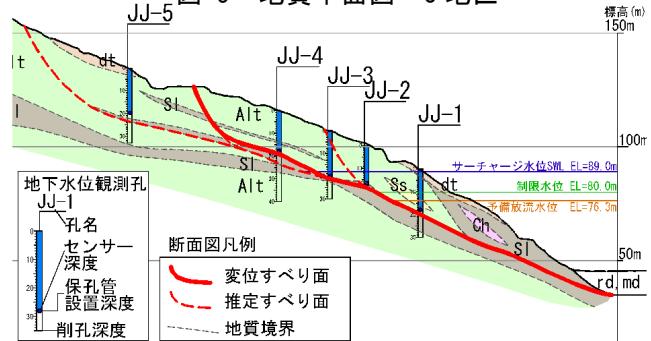


図-6 地質断面図 J 上流地区 P 测線

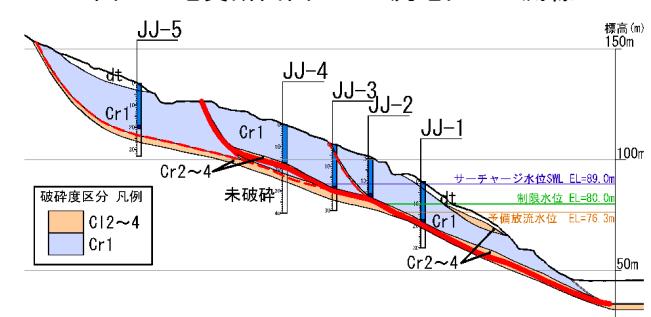


図-7 破碎度区分図 (安定解析モデル) P 测線

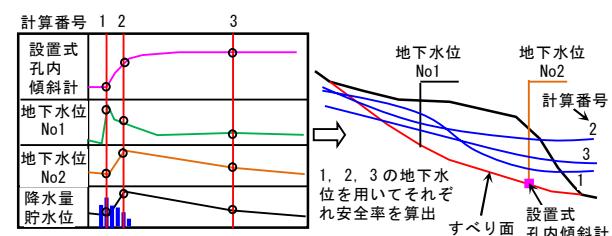


図-8 実測値を用いた安定度評価の模式図

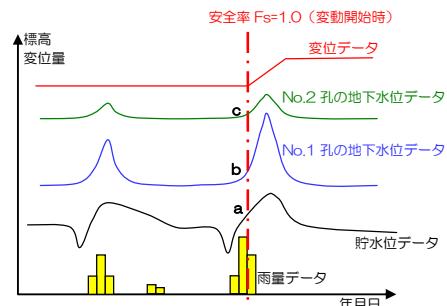


図-9 変動状況に応じた初期安全率の設定例

ず、安全率は貯水位と共に上昇している(番号 32-34). サーチャージ水位から貯水位が下降すると、変位速度も急上昇し、安全率も一定勾配で低下する(番号 38-46). 貯水位が EL. 79m から上昇に転じた時に、変位速度は変動 A から変動 B に低下し、この時に安全率は上昇に転じる(番号 47). その後、貯水位が EL. 82m 程度まで上昇すると変動速度はさらに低下し(変動 C), 安全率は徐々に上昇する(番号 49-51). このように地すべり変位速度と安全率の整合は高い(図-10).

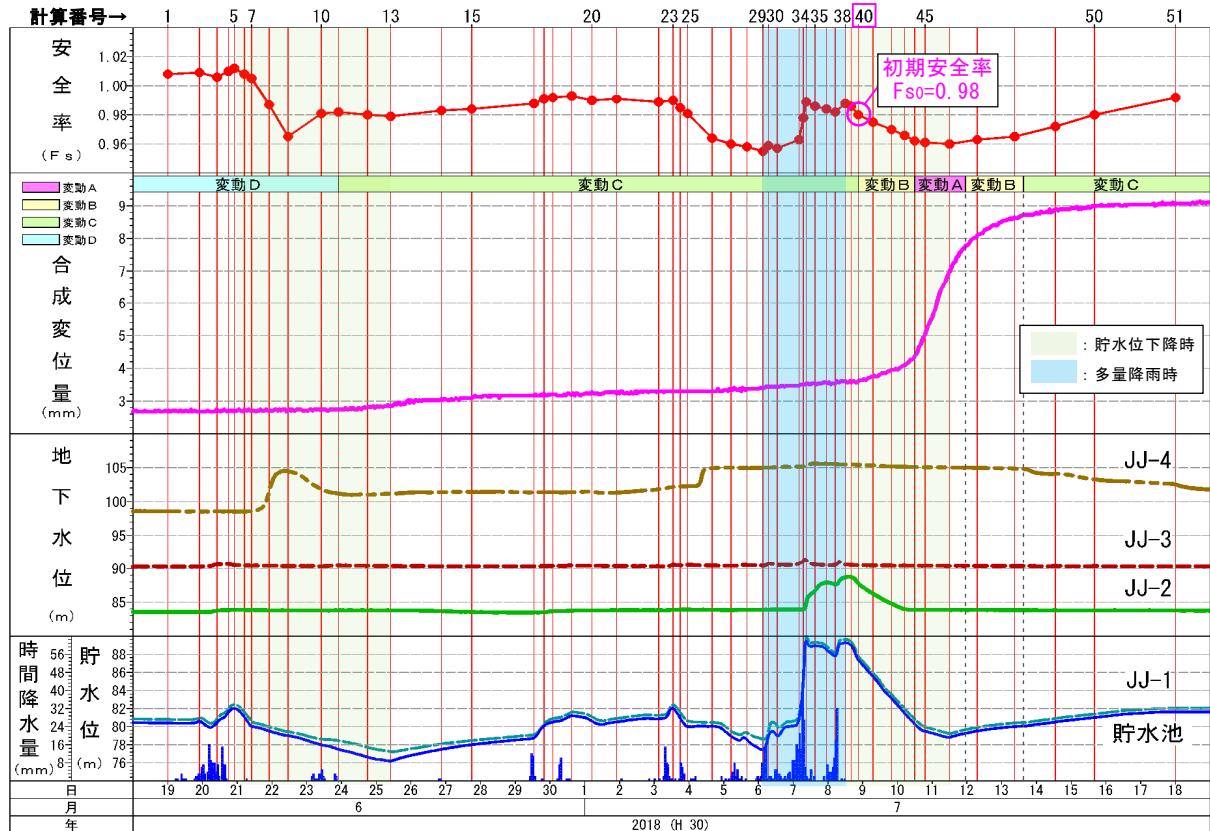


図-10 J 地区 観測結果と実測値を用いた安全率変化

地下水位観測結果によれば、貯水池際の JJ-1 孔および中腹部の JJ-2 孔は貯水位変動と連動するが降雨の影響はほとんど認められないのに対し、ブロック頭部の JJ-4 孔では降雨の影響を受けて地下水位が上昇し、高止まる傾向が認められる(図-10 の計算番号 7~10, 25 以降). 実測値の安全率変化は、上記の貯水位変動とともに、頭部 JJ-4 孔の地下水位上昇に伴い、安全率が大きく変化する. 無降雨で貯水位変動した場合の安全率変化は、図-11 の番号 2~7 (▲) で、技術指針に準拠した上昇時安全率カーブ(●線；残留率 0%)より若干低い安全率で並行し、上昇・下降時の安全率の差はほとんどない. 一方、多量降雨時の貯水位上昇時(番号 29~34 ; +), 下降時(番号 34 ~46 ; ♦) の安全率変化は、技術指針の残留率 50% の下降時 1 安全率カーブ(■線)より大幅に低い安全率で、技術指針の上昇時安全率カーブの傾きと並行して変化しており、技術指針の検討が安全側とならない条件も存在することが解る.

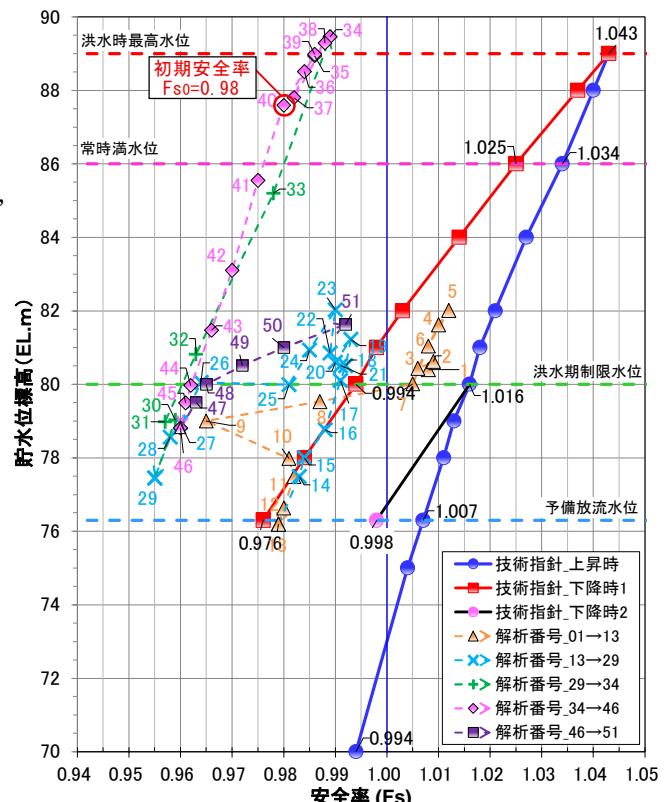


図-11 J 地区 貯水位標高—安全率変化図
(番号は図-10 上端の計算番号と同じ)

5. 運用中の湛水地すべりの安定性検討に必要な観測孔配置

事例1を用いた変動要因の分析、湛水地すべりの影響要素の検討および運用ダムの実測値を用いた安定度評価事例より、運用変更時の湛水地すべりの安定性の予測を行うためには、未水没域を含むすべり面形状、安定地下水位、単位体積重量モデル等の精度を高めることが必要である。また、変位すべり面での連続観測と未水没域の地下水位変動を最適な位置で計測し、蓄積した実測値を用いて地すべりの変位速度と整合するすべり面強度 $c' \phi'$ を設定する必要がある。図-12の湛水地すべりの誘因①②③に対する調査・観測の考え方と留意事項を整理し、観測孔の配置(図-12)、調査・観測の項目、実施順位等を提案する(表-1)。

調査・観測の考え方

①空中写真、LP図等によるブロック区分・検討測線の設定、②現地踏査による地質図作成(素因想定)、③文献等によるすべり形状比を用いたすべり面形状の推定⁵⁾、④洪水時最高水位標高(BV-1)での高品質コア等によるすべり面認定及び③で推定したすべり面形状の修正によるBV-2(すべり面-洪水時最高水位交点)位置の推定・実施、⑤BV-3(すべり面-運用変更下限水位交点)、BV-4(未水没域中部)の実施、⑥BV-5(未水没域上部)、BV-6(ブロック頭部)の実施。

留意事項

移動土塊に砂岩、チャート等の硬質な亀裂性岩盤が分布する場合、透水性が高く地すべり変動と連動する地下水位が捉えられないことがある。そのような場合はコア性状等を踏まえてストレーナー区間を検討し、地下水位観測孔の再設置を試みる。一方、すべり面の勾配が急な場合や未水没域が狭い場合、湛水の影響を受け易くなる。よって、調査・観測孔の配置は、適宜得られた情報により最適化する(BV-3'の実施等)。

表-1 調査・観測の目的、項目および実施順位

孔番	調査・観測の目的			動態観測項目		実施順位	
	すべり面形、安定地下水位、単位体積重量等	誘因①：貯水位下降による残留間隙水圧増加	誘因②：降雨による地下水位上昇	誘因③：①②による貯水池際の地下水堰上げ	孔内傾斜計	地下水位	
BV-1	◎	◎			挿入式 →設置式連続	連続	1
BV-2	◎	◎	◎	◎	挿入式 →設置式連続	連続	2
BV-3	◎	◎	◎	◎	挿入式	連続	3
BV-3'	◎	◎		○	挿入式	連続	4
BV-4	◎		◎	○	挿入式	連続	3
BV-5	◎		◎		挿入式	連続	4
BV-6	◎		◎		(挿入式)	連続	5

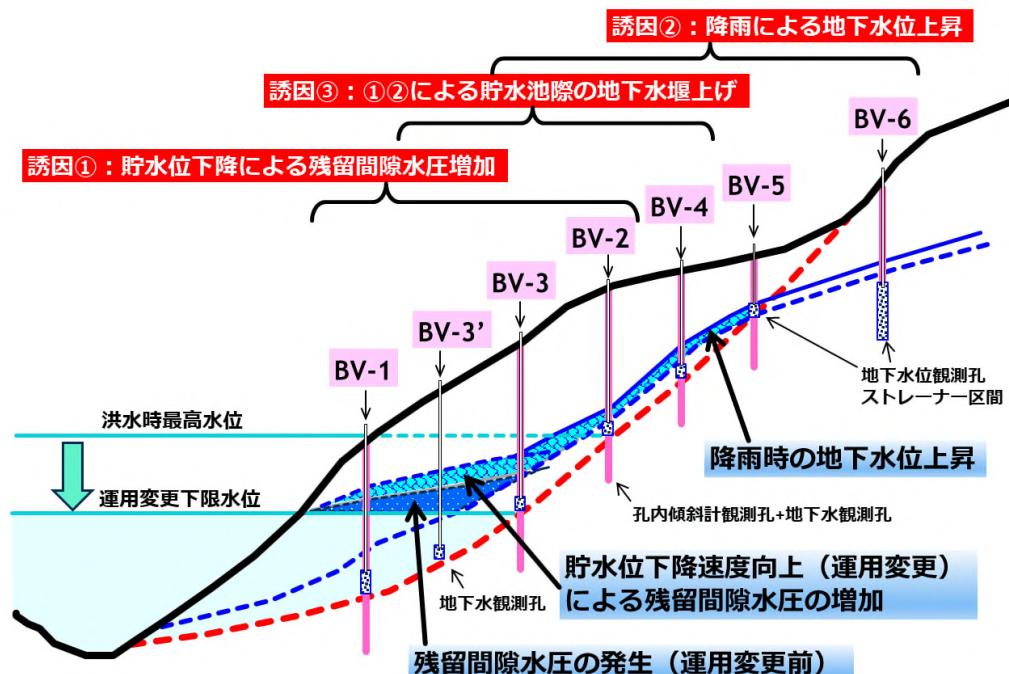


図-12 変動誘因と調査・動態観測の配置

文 献

- 1) 国土交通省水管理・国土保全局河川環境課 治水課. 貯水池周辺の地すべり等に係る調査と対策に関する技術指針・同解説. 2019.
- 2) 国土技術研究センター(2010)：貯水池周辺の地すべり調査と対策、古今書院、pp. 119-141
- 3) 山田政典、森山豊、吉田浩、古宮一典(2017)：貯水位変動の影響を受け易い地すべりの抽出方法、日本応用地質学会研究発表会講演論文集 2017, pp. 87-88
- 4) 山田政典、吉田浩、森山豊、鈴木祥子、長岡弘晃、大西由梨、坂本祐樹(2022)：湛水地すべりの安全率変化の影響要素：日本応用地質学会研究発表会講演論文集 2022, pp. 81-86
- 5) 山田政典、荒谷忠、森山豊、坂本祐樹(2019)：四国の付加体地すべりの分布・規模とすべり面を規制する要素との関係：日本応用地質学会中国四国支部研究発表会発表論文集 2019, pp. 31-36