

16 湛水地すべりの安全率変化の影響要素

Factors influencing changes in the safety factor for flooded landslides

○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（応用地質株式会社）

1. はじめに

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⁾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、ダム再生と関連して運用変更時の地すべりへの影響評価に関し、運用ダムの既運用での地すべりの動態状況等を活用した評価の実施が追記され、多くのダムで運用と地すべり変位に関するデータの蓄積が進められている。

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の異なる応力条件で出現した弱面が連続して形成されるものと考えられる。よって、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検討を行うこととしているが、運用時の地すべりの動態状況の把握、データ蓄積によりいろいろな新たな知見が得られ始めている。

本論では、運用ダムでの実測値を用いた検討で得た知見を踏まえて湛水地すべりの安全率変化の影響要素を分析し、今後の湛水地すべりの検討を進める上での留意事項を述べる。

2. 検討方法

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、同一条件（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-2・4・6）、貯水位標高-安全率変化図（図-7）を作成し、安全率変化の要因を分析した³⁾。計算条件は、各事例のスライス分割図に示した。

3. 湛水地すべりの安全率変化の要因分析

3事例の分析結果を以下に示す。

事例 1(図-1・2)：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-2に示した。部分水没条件（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 ともに大きく低下する。また、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。

事例 2(図-3・4)：未水没時（EL. 10m $F_s=1.050$ ），部分水没時（EL. 26m 最低安全率 $F_s=0.986$ ），全水没時（EL. 73m $F_s=1.281$ ）の25スライスの応力変化を図-4に示した。部分水没条件（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. 73m）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 ともに大きく低下する。また、高標高スライスで地すべり力 T の低下量が大きく、安全率は高くなる。

事例 3(図-5・6)：未水没時（EL. 8m $F_s=1.050$ ），部分水没時（EL. 26m 安全率 $F_s=1.003$ ），全水没時

(EL. 68m $F_s=1.278$) の 35 スライスの応力変化を図-6 に示した。部分水没条件 (EL. 26m) では、すべり面傾斜角 α が大きく、「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. 68m) 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 とともに大きく低下する。また、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と考えられる。

3事例の安定地下水位の有無、全水没条件での貯水位標高-安全率変化図を示した（図-7）。湛水地すべりの貯水位変動時の安全率は、すべり面形状に規制され、最低安全率が出現する標高がある。よって、運用域（水没深さ）とすべり面形状の関係を踏まえた評価が必要である。

なお、本検討では、技術指針¹⁾を準拠に、単位体積重量を $\gamma=18.0\text{ kN/m}^3$ とし、すべり面強度は、未変動と想定し（初期安全率 $F_{so}=1.050$ ），最大鉛直層厚より粘着力 c' を推定し、内部摩擦角 ϕ' を逆算により求め、全スライス同じすべり面強度としている。しかし、本分析より、各スライスの地すべり抵抗力 S 、地すべり力 T は、構成地質や破砕度による単位体積重量の変化、形成場により変化するすべり面強度や地下水位の変化の影響を受け、スライス毎に変化する。よって、貯水池運用の変更等の外力が変化する条件での地すべりの動態を安全率を用いて予測する場合、地すべりの単位体積重量のモデル化や室内試験によるすべり面強度の領域毎の設定を行う等、実事象をできるだけ説明できるよう解析モデルの精度を高めていくことが必要と考えられる。

事例 1

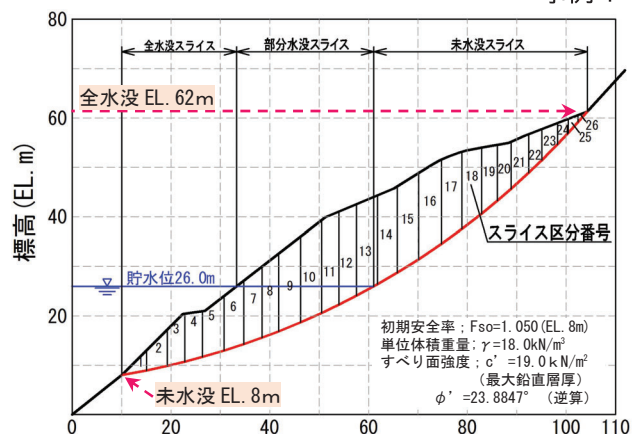


図-1 事例 1 スライス分割図

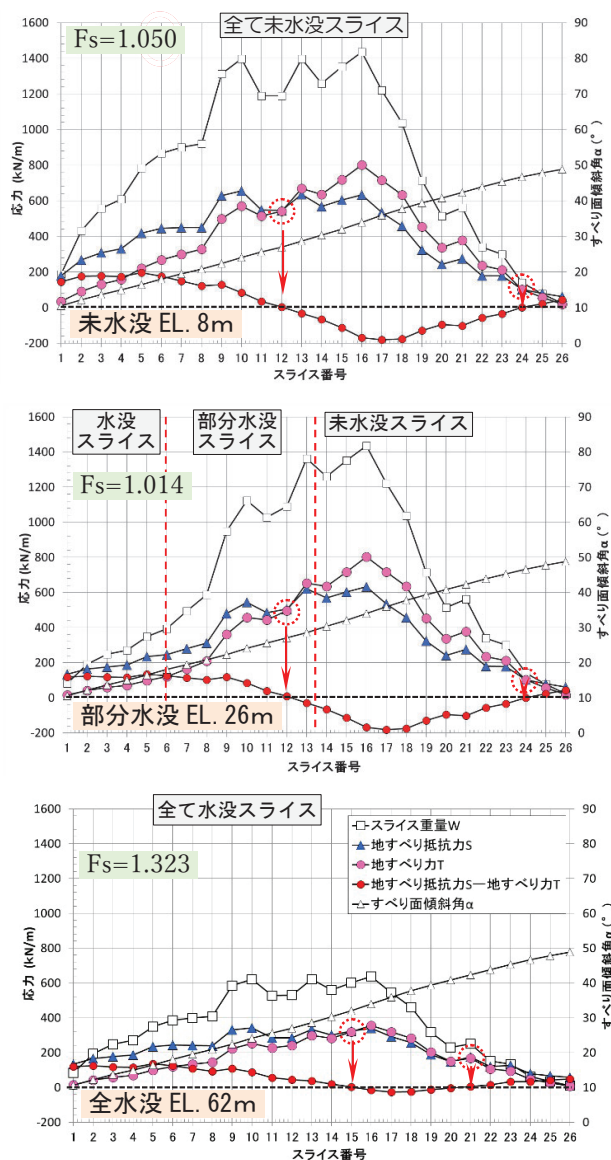


図-2 事例 1 水没条件とスライス応力図

事例2

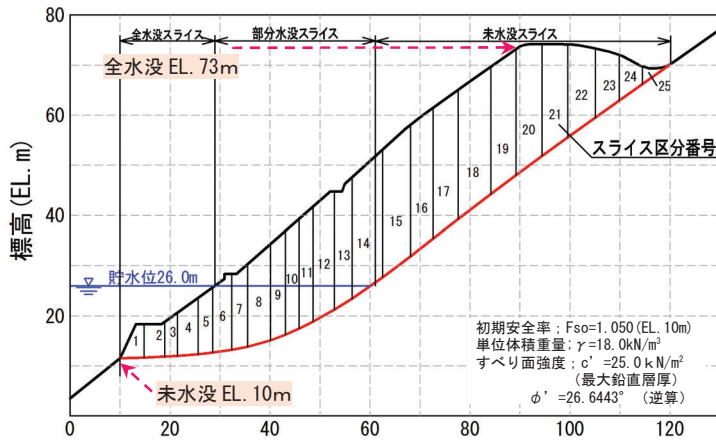


図-3 事例2 スライス分割図

事例3

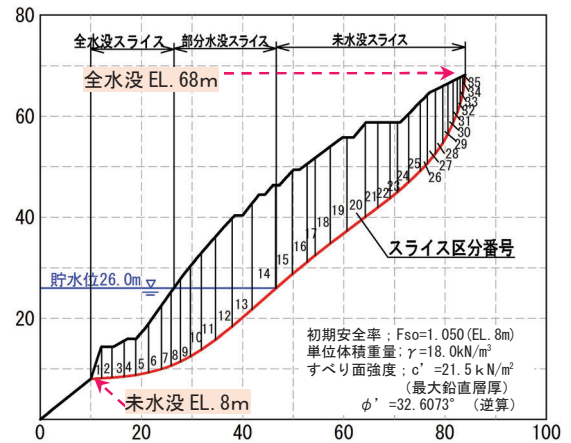


図-5 事例3 スライス分割図

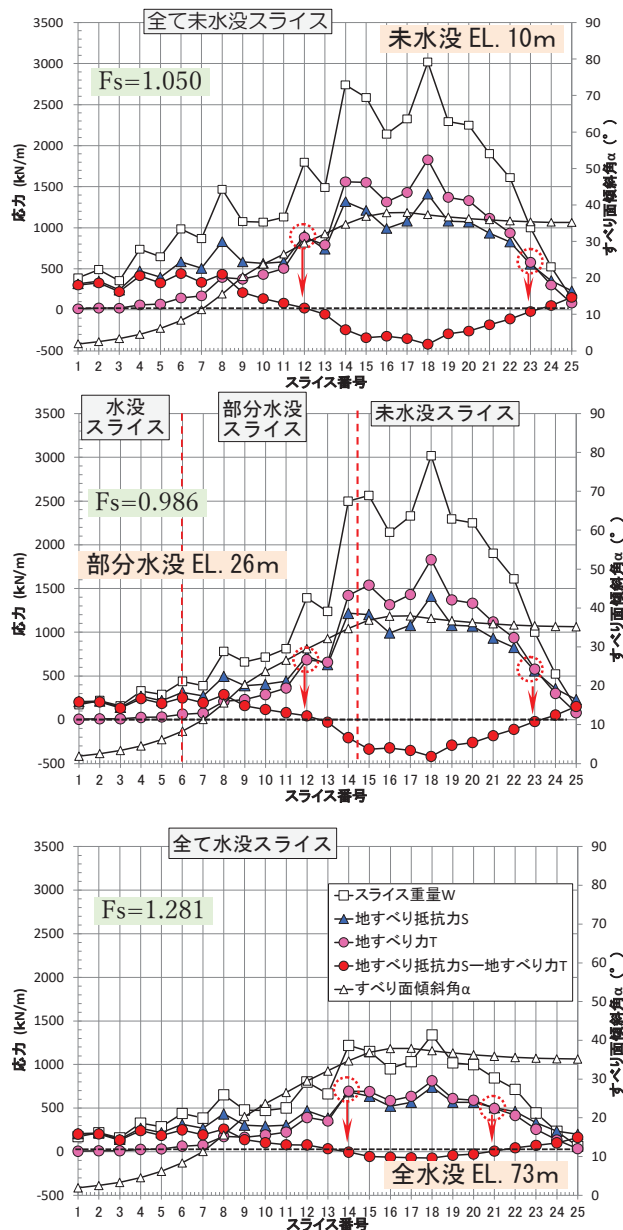


図-4 事例3 水没条件とスライス応力図

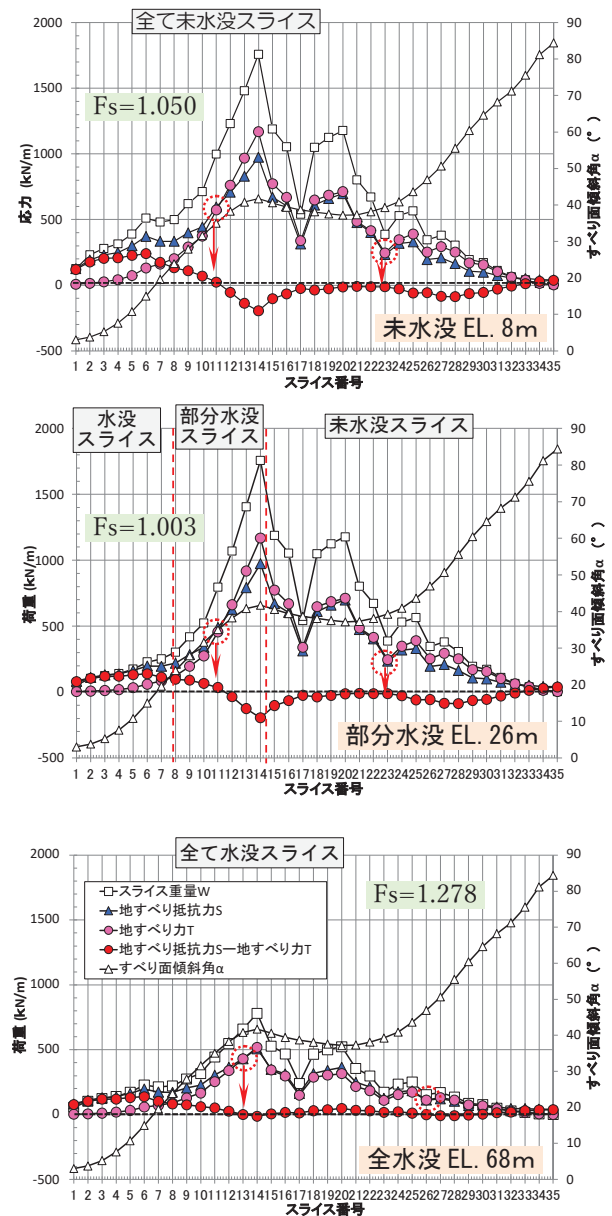


図-6 事例3 水没条件とスライス応力図

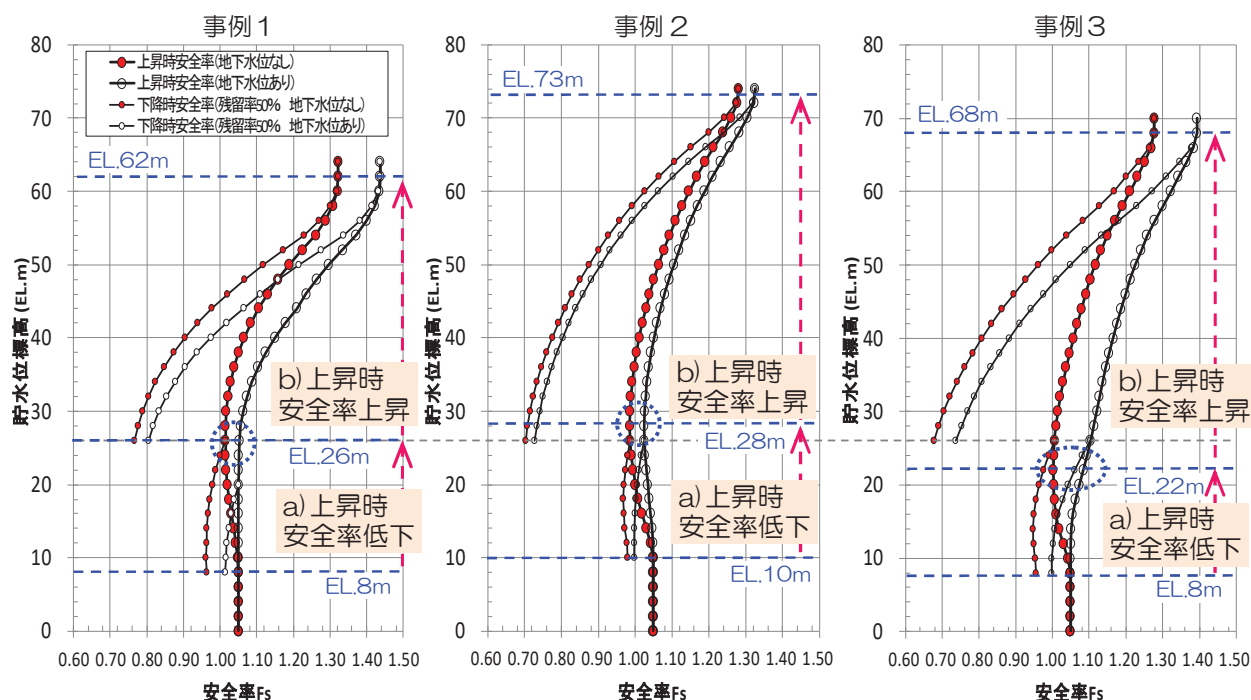


図-7 安定地下水位の有無，全水没条件での貯水位標高一安全率変化図

4. 技術指針での不確実性の対応と課題

技術指針では，地すべり等に人為的に水没という新たな影響を及ぼす不確実性に対し，大きく下記の対応が取られていると考えられる。

- 1) 地すべりの抽出（LP 図等の活用），すべり面の認定（高品質ボーリング），すべり面での連続観測（設置式孔内傾斜計観測）等による地すべりの把握，実運用の中でのデータ蓄積とその反映（新技術の活用，実測値を活用した評価）。
- 2) 貯水位変動の影響を過小評価しない地下水位の設定（安定地下水位の設定）
- 3) 貯水位下降時の間隙水圧の残留率（データ蓄積がない条件で経験値より残留率 50%）

しかし，運用ダムでの実測値（貯水位，地下水位，変位）を用いた検討結果を見ると，貯水池際の水没深の深い中・小規模の地すべりでの安定計算結果は技術指針の検討と大きな差異は生じない。しかし，未水没域が広い大規模地すべりでは降雨による未水没域の地下水位上昇の影響により不安定化し，安全率の低下が大きくなる場合がある。よって，多雨時に行われる洪水調整時には降雨と貯水位変動双方の影響を受け，技術指針の検討より

厳しい条件が出現することが考えられる。これは，上記 2) の設定とも関係すると考えられ，運用ダムでの実測値より得られた知見を踏まえ，新設ダムで考慮すべき地すべりへの影響要素を明らかとし，検討をさらに最適化していくことが望まれる。

5. 安定地下水位が安全率に与える影響

未湛水地すべりの安定計算では，多くは地下水位観測期間の最高水位時の地すべりの変動状況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し，計画安全率まで向上する不足力に対して対策工を計画する。しかし，湛水地すべりの安定計算では，先に述べたように，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，観測最高水位時を採用せず，長期間にわたり存在する地下水位（安定地下水位）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⁾。

ここでは，安定地下水位を高く設定し，未変動として逆算強度を算出した場合に貯水位変動時の安全率がどのように変化するかを確認した。検討断面は事例 1 を用い，計算した安定地下水位は，

当初の安定地下水位+1m から+4m 上昇させた条件とし（図-8）、平均すべり面強度は、安定地下水位毎に逆算により求め（表-1）、貯水位変動時の安全率変化を貯水位標高-安全率変化図に示した（図-9）。

図-9 より安定地下水位を高く設定するほど安全率カーブは右に移動し、安全率が高くなり、貯水位変動の影響を受けにくくなる。よって、安定地下水位を見込まない条件で最も低い安全率が算出される。しかし、地すべり末端まで貯水位を下降した際の最低安全率の差異は比較的小さい。これは、各安定地下水位の初期安全率を $F_{s0}=1.050$ としているためと考えられ、安定地下水位を高くすることで逆算強度が大きくなり、結果として最低安全率の差異が小さくなったものと考えられる。

6. 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事象が認められることがある。技術指針の検討は、貯水位の人為的操作による影響の把握を対象としているが、洪水調節時の貯水位変動は降雨と重なることが多く、降雨により貯水池際の地下水位が堰上がり、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。ここでは、未水没域の地下水位上昇の影響を把握するため、図-10 に示す未水没域の地下水位の上昇条件での安全率変化を示した（図-11）。また、同図には EL.26m より貯水位を下降した条件の安全率変化を示した。貯水位下降時の最低安全率は $F_s=0.978$ であり、未水没域の地下水位上昇が +3m の時（ $F_s=0.978$ ）と同じであり、3m 以上未水没域の地下水位が上昇すると、貯水位下降時の影響より降雨の影響が大きくなる。よって、運用ダムの湛水地すべりの検討では、未水没域の地下水位を計測し、地すべり変位との関係を明らかにすることが重要である。

仮に、未水没域の地下水位が上昇した条件で、貯水位を下降した場合、地すべり上部と同様に下部の地下水位も上昇していると考えられ、安全率変化は図-12 となり、技術指針による最低安全率

$F_s=0.978$ より低い安全率の出現が懸念される。よって、湛水地すべり安定計算に用いる地下水面形は、同定解析により適正化された解析モデルを用いて実施された浸透流解析による推定地下水面形によることが望ましい¹⁾。

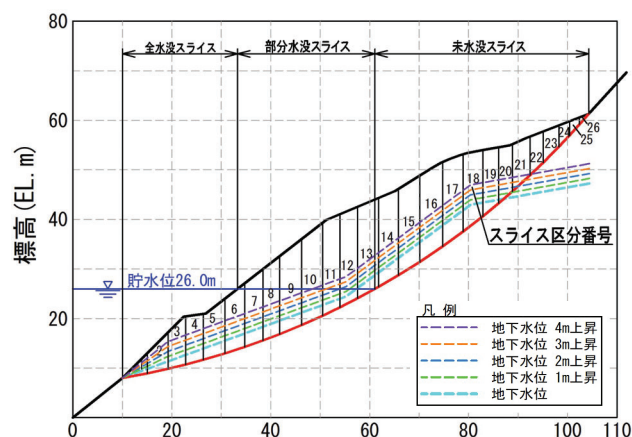


図-8 安定地下水位条件図

表-1 各地下水位条件での逆算強度一覧

地下水条件	初期安全率 (F_s)	粘着力 c (kN/m^2)	内部摩擦角 ϕ (°)
地下水位なし	1.050	19.0	23.8847
安定地下水位	1.050	19.0	26.7485
安定地下水位 1m上昇	1.050	19.0	27.9945
安定地下水位 2m上昇	1.050	19.0	29.3868
安定地下水位 3m上昇	1.050	19.0	30.9426
安定地下水位 4m上昇	1.050	19.0	32.6947

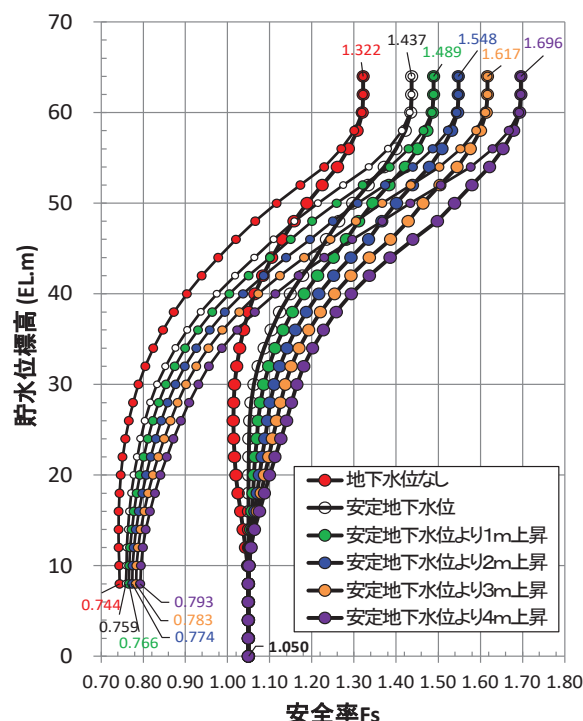


図-9 安定地下水位を上昇させた条件の貯水位標高-安全率変化図

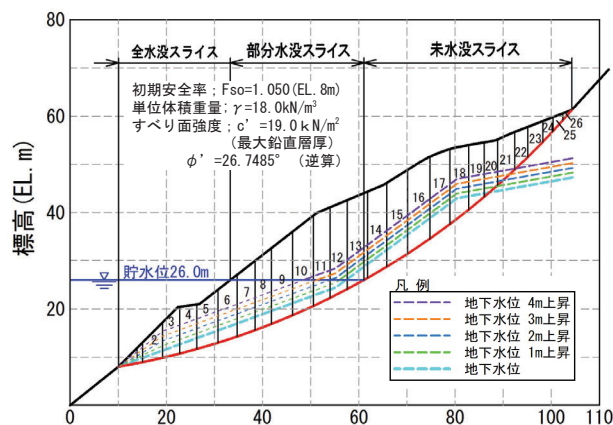


図-10 未湛水域地下水位上昇条件図

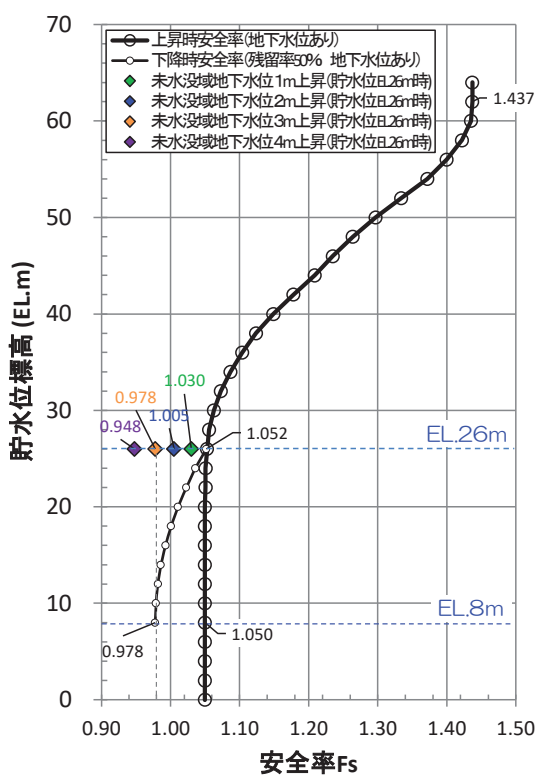


図-11 未湛水域の地下水位上昇時の安全率変化と貯水位下降時の安全率変化

また、対策工の検討では、未水没域の地下水位上昇の抑制の必要性を検討することが望ましい。

7. おわりに

技術指針の説明図書²⁾に記載された3事例の断面形を用い、湛水地すべりの安全率変化への影響要素の検討を行い、以下の事項が明らかとなった。

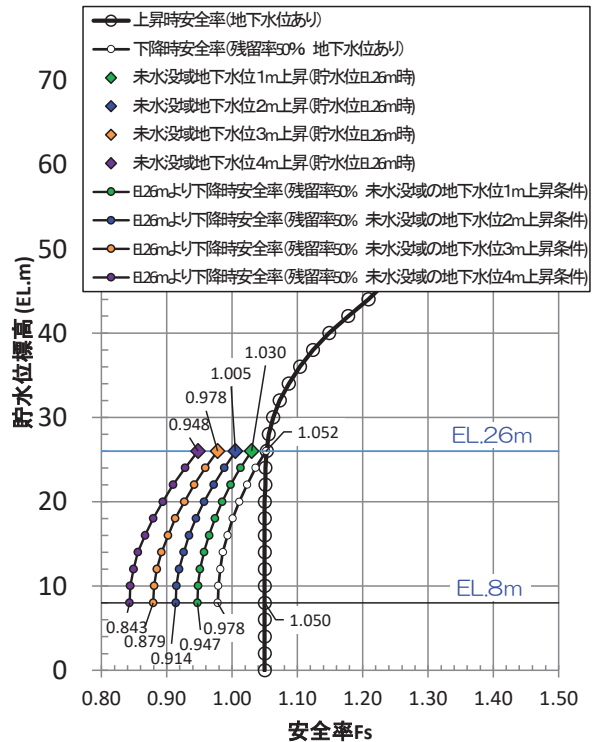


図-12 未湛水域の地下水位上昇を踏まえた事例1の最低安全率の出現条件

1. 湛水時（貯水位上昇時）の安全率変化は、各スライスの水没によるスライス重量 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、すべり面形状の把握、入力条件（すべり面形状、初期安全率設定、単位体積重量、すべり面強度分布等）を最適化することが重要である。
2. 事例1での安定地下水位の上昇による貯水位下降時の最低安全率の変化は、初期安全率を同じとすることで逆算強度が大きくなり、比較的小さくなることが考えられる。
3. 湛水地すべりでは降雨時の未水没域の地下水位変動を考慮した安定度評価、対策工の検討が必要と考えられる。

文 献

- 1) 国土交通省 水管理・国土保全局(2019): 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
- 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