

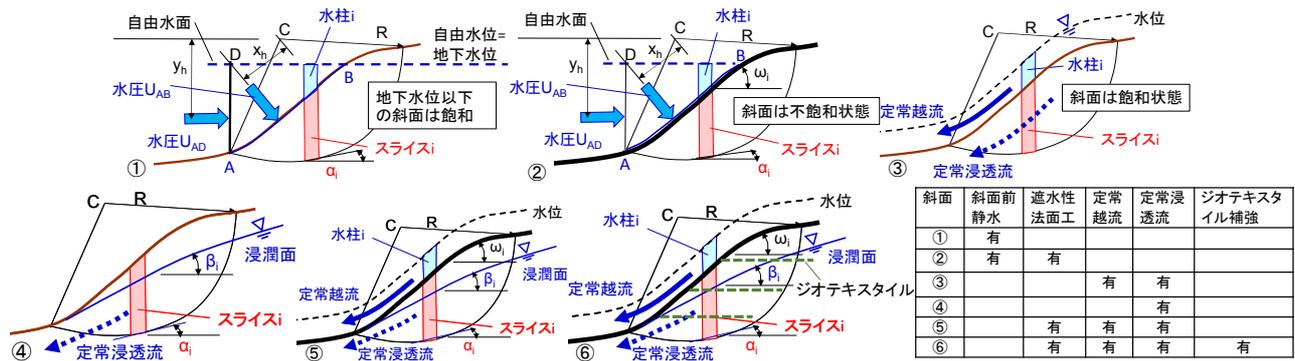
定常越流を受ける盛土斜面の簡易安定解析

斜面安定, 定常越流, 修正フェレニウス法円弧すべり安定解析, 浸潤面, 法面工

複合技術研究所 国際会員 Antoine DUTTINE
東京理科大学 名誉会員 ○龍岡文夫

1. はじめに: 盛土構造の河川・海岸堤防や津波防潮堤、フィルダム・ため池堤体等は、洪水や津波が引き起こした越流による下流斜面での侵食や全体すべりによって崩壊する場合がある。侵食防止に、コンクリートパネルなどの法面工が設置される。ここでは、盛土の下流斜面の全体すべり安定性に対する定常越流の深さと浸潤面位置の影響、及び遮水性法面工と盛土補強の効果を、二次元円弧すべり安定解析によって検討した。

2. 諸要因の影響・効果の定式化: 図1に示す6つの異なる条件の斜面の全体円弧すべり安全率 F_s を、「各スライス両側面に作用する間隙水圧は水平であり有効土圧の合ベクトルはスライス底面に平行」と仮定する修正 Fellenius 法の枠組みで定式化した(式1~6)。臨界すべり面に対する安全率は、 F_s の最小値である。これらの式の誘導の詳細は、文献¹⁻³⁾を参照されたい。これらの要因の組み合わせを変えた別の条件の斜面の F_s は、同様にして導ける。



$$F_s = \frac{\sum [c'_i \cdot l_i + W'_i \cdot \cos \alpha_i \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W_i \cdot \sin \alpha_i) + \sum (W_{wi} \cdot \sin \alpha_i) - U_{AD} \cdot y_h / R} \quad (1); \quad F_s = \frac{\sum [c'_i \cdot l_i + \{W_i \cdot \cos \alpha_i + \frac{W_{wi}}{\cos \omega_i} \cdot \cos(\alpha_i - \omega_i)\} \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W_i \cdot \sin \alpha_i) + \sum (W_{wi} \cdot \sin \alpha_i) - U_{AD} \cdot y_h / R} \quad (2)$$

$$F_s = \frac{\sum [c'_i \cdot l_i + \{W_i \cdot \cos \alpha_i - W_{bi} \cdot \{\cos \alpha_i + \sin \omega_i \cdot \sin(\alpha_i - \omega_i)\}\} \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W_i \cdot \sin \alpha_i) + \sum (W_{wi} \cdot \sin \alpha_i)} \quad (3); \quad F_s = \frac{\sum [c'_i \cdot l_i + \{W_i \cdot \cos \alpha_i - W_{bi} \cdot \{\cos \alpha_i + \sin \beta_i \cdot \sin(\alpha_i - \beta_i)\}\} \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W_i \cdot \sin \alpha_i)} \quad (4)$$

$$F_s = \frac{\sum [c'_i \cdot l_i + \{W_i \cdot \cos \alpha_i - W_{bi} \cdot \{\cos \alpha_i + \sin \beta_i \cdot \sin(\alpha_i - \beta_i)\} + \theta_i \cdot W_{wi} \cdot \cos \alpha_i\} \cdot \tan \phi'_i]}{\sum (W_i \cdot \sin \alpha_i) + \sum (W_{wi} \cdot \sin \alpha_i)} \quad (5)$$

図1 様々な条件の斜面と安全率を求める式

斜面①(式1): 浸透流と越流がない浸水斜面である。 l_i と α_i はスライス i の底面長さおよび水平面からの傾斜角、 W'_i はスライス有効重量 (=全重量 W_i -浮力) である。ここでは、不飽和部分での粘着力 c' の見かけの増分を無視し内部摩擦角 ϕ' は飽和時と同じと仮定する。分母は「滑動モーメント M_d /すべり円弧半径 R 」 $=\sum (W'_i \cdot \sin \alpha_i)$ であるが、他の斜面の F_s と関連させるために各スライスの W_i と上方の水柱の重量 W_{wi} を用いて定式化している。分母の第2項は $\sum (W_{wi}$ による ΔM_d) $/R$ であり水柱の重心がすべり円弧中心 C の右側にある時に正である。第3項は、「AD面に作用する総水平水圧による M_d 成分」 $/R$ (<0) である。両者の合計は、斜面 AB に作用する総水圧 U_{AB} による $\Delta M_d/R$ (<0) である。

斜面②(式2): 表面遮水型フィルダムのように、遮水性法面工によって盛土は不飽和状態になっている。 ω_i はスライス上端の傾斜角であり、 $(W_{wi}/\cos \omega_i) \cdot \cos(\alpha_i - \omega_i)$ はスライス上端に作用する水圧 $W_{wi}/\cos \omega_i$ のすべり面直交成分である。斜面①と比較すると、1)不飽和スライスの全重量 W_i は飽和時よりも減少している分 M_d は減少し、2) 分子の抵抗モーメント M_r は、すべり面での有効直荷重が W'_i ではなく W_i と W_{wi} によって加わって大幅に増加しているため大幅に増加している。これら二つの要因のため、 F_s は斜面①よりも大幅に増加する。

斜面③(式3): 遮水性法面工は設置されていない状態で定常越流と定常浸透流の作用を受けている。ここでは越流は水深一定の等流としているが、実際には上流ほど深い射流となる。式3は、水柱の高さをスライス毎に変化させればその場合に対する近似式となる。式3の分子は、 $\alpha_i = \omega_i$ の場合は式1の分子と一致し、すべり面全体に対しては式1の分子が近似式となる。分母の $\sum (W_{wi} \cdot \sin \alpha_i)$ (>0) は \sum (各水柱重量 W_{wi} によるスライス上端に作用する水圧 U_{wi} とせん断力 S_{wi} による増分 ΔM_d) $/R$ に等しい。ただし、すべり円弧の左右端の鉛直面に作用する水圧による ΔM_d は無視している。分母 $=M_d/R$ は、式1での第2項が大幅に増加し第3項が消滅しているため大幅に増加している。これらのため、 F_s は斜面①よりも大幅に低下している。

斜面④(式4): 盛土内に浸潤面があるが、越流はない。 β_i は、スライス内の浸潤面の水平面からの角度である。分子は、 $\alpha_i = \beta_i$ だと式1の分子と一致し、すべり面全体では式1の分子で近似できる。一方、分母 $=M_d/R$ は、式1での第2,3項が消えて大幅に増加している。このため、 F_s は斜面①よりも大幅に低下している。一方、越流がないことから、斜面③よりは安定している。

斜面⑤ (式5) : 定常越流と定常浸透流があるが、斜面の侵食防止のために遮水性法面を設置してある。スライス上端に作用する水圧 U_i とせん断力 S_{wi} の合力は水柱重量 W_{wi} に置き換えられて、 W_{wi} は ω_i に左右されないで、式5には ω_i が含まれていない。スライス上端で W_{wi} によって有効に作用する鉛直荷重を $\theta_i \cdot W_{wi}$ ($\theta_i = 0 \sim 1$)、法面工裏での間隙空気・水圧の上昇を $(1-\theta_i) \cdot W_{wi}$ として、 $\theta_i = A_D / (A_D + A_W)$ (A_D と A_W はスライスの浸潤面より上と下の面積) と仮定した。 θ_i が 1.0 に近いほど、 M_i は大きくなり斜面③よりも安定になる。浸潤面の上昇によって法面工裏に蓄積する間隙空気の逸散の影響は無視する。

斜面⑥ (式5と6) : 斜面の侵食防止のために設置したコンクリートパネルの法面工は、下流法尻の支持地盤の洗堀と越流が天端から下流法面に向かって落下する時の引き剥し力によって不安定化して変位・変形すると、盛土は侵食される。斜面⑥では、盛土をジオテキスタイル層等で補強し、一体化した法面工を補強材に連結して安定化している。この場合の F_s は、補強材層 i のすべり面位置での引張り抵抗を $T_{r,i}$ (式6) として式5の分子に $\sum T_{r,i}$ を加えることによって得られる。

$$T_{r,i} = T_i \cdot \sin \alpha_i + T_i \cdot \cos \alpha_i \cdot \tan \phi'_i; T_i = \min \{ T_{k,i}; T_{p,i} = 2 \int \sigma'_{v,i} \cdot \tan \phi'_{B,i} \cdot dx \} \quad (6)$$

$T_{k,i}$ は引張り破断強度、 $T_{p,i}$ は引抜け抵抗、 $\phi'_{B,i}$ はジオテキスタイル層と盛土の間の摩擦抵抗角 ($= \phi'$ と仮定)、 $\sigma'_{v,i}$ は引抜け部分の平均有効上載圧である。

3. 解析結果 : 図2に解析条件と斜面①の臨界すべり面を図3に臨界すべり面を、図4に解析による安全率を示す。各斜面で臨界すべり面を求めた場合の安全率は、すべり面を斜面①の臨界すべり面に固定した場合よりも小さくなる。また、安全率 (図4a) は、静水に浸水した斜面①と比較すると、斜面②では表面遮水によって著しく高くなり、斜面④では浸透流のため低くなり、斜面③では加えて越流のため最も低くなっている。安全率は、斜面③と比較すると斜面⑤では遮水性法面工の設置によって向上し、斜面⑥では盛土補強によって更に向上している。図4bを見ると、斜面③、⑤、⑥の安全率はいずれも越流が深くなるほど低下するが、斜面⑤、⑥は $h=7m$ でも安全率 >1.0 を保っている。しかし、

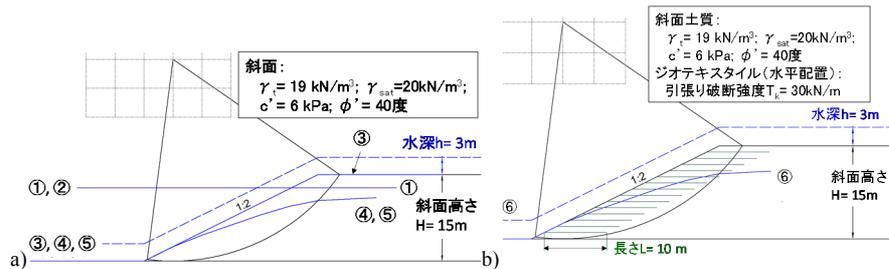


図2 解析条件(すべり面は斜面①での臨界すべり面): a) 斜面①~⑤; b) 斜面⑥

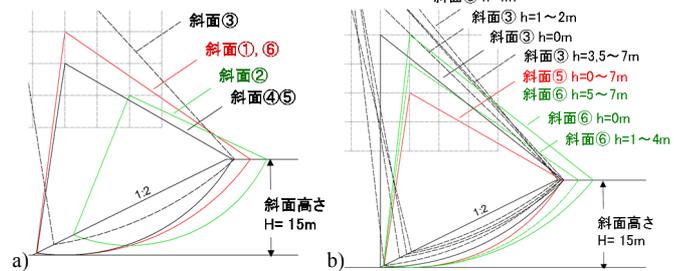


図3 臨界すべり面: a) 斜面①~⑥で越流深さ $h=3m$; b) 斜面③~⑥で異なる h

斜面⑤では法面工を補強材層に固定していないので、法面工が不安定化すると安全率は斜面③の値 (<1.0) に低下することになる。従って、深い越流に対して安定を保てるのは、斜面⑥であると言える。斜面⑥は、補強材層を長くして引張り破断強度を増加させれば、より安定になる。

なお、安全率 <1.0 になった場合の残留円弧すべり変位解析、及び地震荷重を考慮した安全率と残留すべりの解析は、ここに示した解析法に基づいて実施できる。

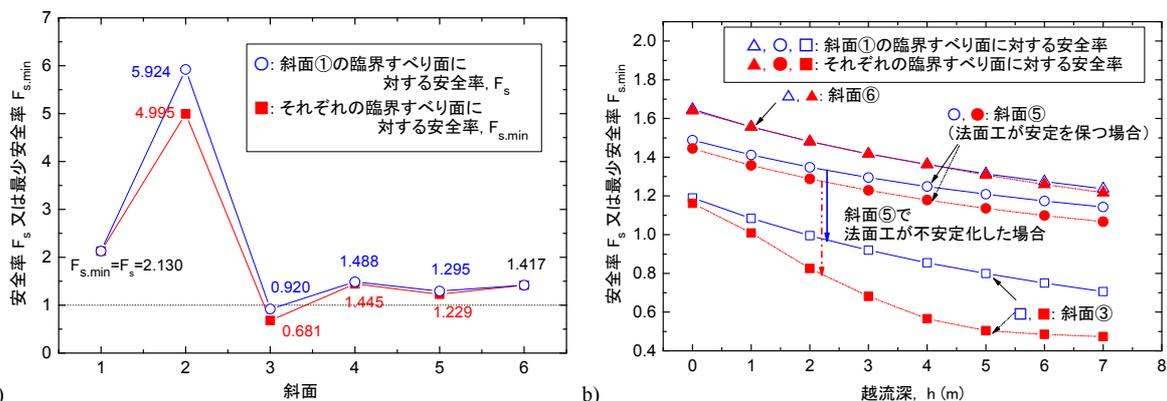


図4 a) 図2の条件での各斜面の安全率: b) 安全率に対する越流水深 h の影響

4. まとめ : 越流を受ける盛土の下流斜面の全体すべり安定性の簡易解析法を示した。斜面の全体安定性は越流が深くなるほど低下するが、ジオテキスタイルでの盛土補強、補強材に連結した遮水性の一体法面工の設置とそれに伴う浸潤面の低下によって越流による安定性の低下を大幅に低減できることを示した。

<参考文献> 1) 龍岡文夫・デュッティン、アントワン・矢崎澄雄・毛利栄征・上野和広(2015~2017): (連載)地盤工学・技術ノート、第21~42回盛土の地震時残留すべり計算①~⑥、基礎工月 2015年3月号~2017年4月号。2) 龍岡文夫・デュッティン、アントワン(2017): スライス法による円弧すべり斜面安定解析における諸留意点、雑誌ダム技術、No.361,1月号、5-30頁。3) 龍岡文夫・Antoine DUTTINE(2017): 斜面のスライス法による円弧すべり安定解析での諸留意点、52回地盤工学研究発表会 (名古屋)