

対策工の斜面安定効果に関する数値解析的研究

防災設計工学研究室 井上 由美子
指導教官 大塚 悟

1. はじめに

斜面防災対策では土砂災害防止法の施行により、ソフト対策としてハザードマップの作成やリスクマネジメントなどの取り組みがなされる一方、ハード対策としてはアンカーや抑止杭などの対策工の技術力向上、経済的かつ合理的な設計法の開発が求められている。現在、実務で用いられている斜面对策工の設計は極限平衡法に準拠した設計方法である。極限平衡法は解析的に簡便であるが、斜面崩壊の詳細なメカニズムや対策工とすべり土塊の間の相互作用を十分には表現できない問題点がある。既往の研究により剛塑性有限要素法 (RPFEM) を用いると斜面の安定性を合理的に評価できることが明らかになっていることから、本研究では対策工を梁要素にモデル化し、既存の RPFEM に導入することで対策工とすべり土塊の相互作用を表現する方法を提案する。対策工の斜面安定効果に関する数値解析を通して本手法の適用性を検討するとともに、対策効果の定量的評価について考察する。

2. 対策工に関する剛塑性構成式の誘導

塑性理論に基づいて杭やアンカーなどの対策工に関する剛塑性構成式を誘導する。剛塑性構成式は安定解析に用いられることから弾性構成式と異なり、応力 (軸力, 曲げモーメント) とひずみ速度 ($\dot{\varepsilon}_n^p, \dot{\varepsilon}_\theta^p$) 間の関係式で記述される。

2.1 楕円型の降伏関数

降伏関数は図1に示す楕円を仮定すると式(1)のように表される。連続関数である楕円型の降伏関数は塑性ひずみ速度が唯一に決定される特徴がある。

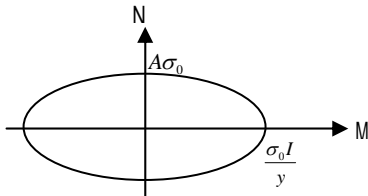


図1 梁要素の降伏関数(楕円型)

$$f(N, M) = (\beta M)^2 + (\alpha N)^2 - \sigma_0^2 = 0 \quad (1)$$

ここに、 N : 軸力, M : モーメント, σ_0 : 降伏応力, $\alpha = 1/A$, $\beta = y/I$, I : 断面 2 次モーメント, A : 断面積, y : 図心軸からの距離

2.2 剛塑性構成式の導出

式(1)の降伏関数から関連流れ則を用いてひずみ速度を求めると、次式ようになる。

$$\dot{\varepsilon}^p = \begin{pmatrix} \dot{\varepsilon}_n \\ \dot{\varepsilon}_\theta \end{pmatrix} = \frac{2\lambda}{\sigma_0^2} \begin{pmatrix} \alpha^2 N \\ \beta^2 M \end{pmatrix} \quad (2)$$

式(2)より導出される剛塑性構成式を展開するのは煩雑なことから、塑性ひずみ速度に式(3)の変換ひずみ速度を新しく定義する。

$$\hat{\varepsilon}^p = \begin{pmatrix} \frac{1}{\alpha} \dot{\varepsilon}_n \\ \frac{1}{\beta} \dot{\varepsilon}_\theta \end{pmatrix} = \frac{2\lambda}{\sigma_0^2} \begin{pmatrix} \alpha N \\ \beta M \end{pmatrix} \quad (3)$$

相当塑性ひずみ速度 $\hat{\varepsilon} = \sqrt{\hat{\varepsilon}^p \cdot \hat{\varepsilon}^p}$ により塑性定数 λ を求め、式(2)に代入すると次式のように簡潔な関係式が得られる。

$$\dot{\varepsilon}^p = \begin{pmatrix} \dot{\varepsilon}_n \\ \dot{\varepsilon}_\theta \end{pmatrix} = \frac{\hat{\varepsilon}}{\sigma_0} \begin{pmatrix} \alpha^2 N \\ \beta^2 M \end{pmatrix} \quad (4)$$

行列表示すると次式になる。

$$\begin{pmatrix} N \\ M \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sigma_0}{\hat{\varepsilon} \alpha^2} & 0 \\ 0 & \frac{\sigma_0}{\hat{\varepsilon} \beta^2} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\varepsilon}_n^p \\ \dot{\varepsilon}_\theta^p \end{pmatrix} \quad (5)$$

式(5)に示した剛塑性構成式を既存の斜面安定解析プログラムに組み込むことで、対策工を考慮した斜面安定解析が可能となる。なお、対策工の周面やその端部での摩擦特性を考慮するためにジョイント要素を導入した。ジョイント要素の剛塑性構成式は難波の式((式 6))を用いる。下式はダイレタンシー条件を制約条件とし連立して適用する。係数 ω_s は Lagrange の未定係数である。

$$t = \hat{\gamma}_s \frac{\Delta \dot{u}}{|\Delta \dot{u}|} + \omega_s a \quad (6)$$

ここに、 t : 応力ベクトル,

$$\hat{\gamma}_s = \frac{\hat{c}_s}{1 + \tan^2 \hat{\phi}_s}, \quad a = \begin{pmatrix} \Delta \dot{u}_s \cdot \tan \hat{\phi}_s / |\Delta \dot{u}_s| \\ -1 \end{pmatrix}$$

$\hat{\phi}_s$: 不連続線でのせん断抵抗角, \hat{c}_s : 不連続線での粘着力, $\hat{\phi}_s$: 不連続線での変形の発生を表すせん断抵抗角 (ダイレタンシー角), \hat{c}_s : 応力ベクトル t により定まる材料パラメータ, $\Delta \dot{u}_s$: 相対変位速度の水平方向成分

3. 解析対象のモデル化

解析対象となるモデルの概略を図 2 に示す。斜面安定解析における斜面にはソリッド要素(), 対策工には梁要素()を用いる。斜面と対策工の接触にはジョイント要素()を導入する。接触抵抗力()は対策工周面の粘着摩擦力の物理的意味を持ち、これによって地盤と対策工間の力の伝達を行う。また、梁要素の境界条件にて不静定となる問題点を解決するために、対策工端部での節点に対してもジョイント要素()を導入した。端部抵抗力()は対策工端部での粘着抵抗力を表し、設定する粘着力の大きさを変えることで、地表面における受圧盤の有無等を考慮できる。

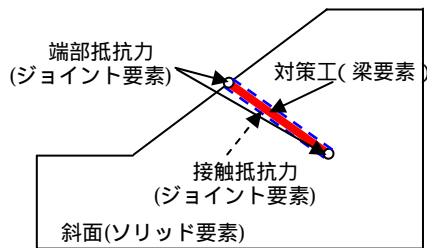


図 2 解析対象のモデル化

4. 対策工による斜面安定効果の検討

地すべり対策工には、抑制工、抑止工など様々なものがある。ここでは最も採用実績の多いアンカー工についての検討を実施する。

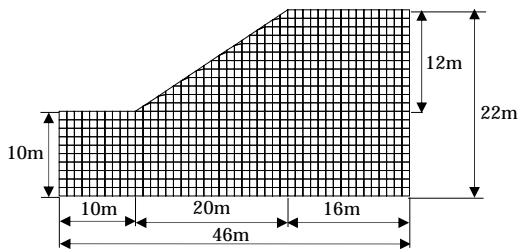


図 3 解析モデル

表 1 土質定数

粘着力 C_s	19.6	kPa
せん断抵抗角 δ	10	°
単位体積重量 t	19.6	kN/m ³

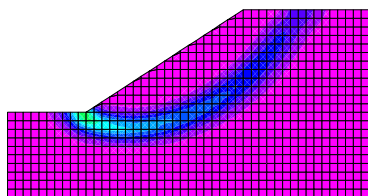


図 4 対策工なし $F_s=1.064$

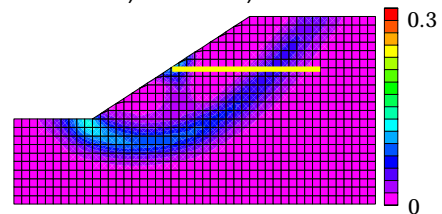
まず対策工なしの単純斜面について安定解析を行った結果、図 4 に示す破壊形態に対して安全率 $F_s=1.064$ が得られた。図より、斜面頂上

部から法先に亘る円弧状のせん断領域が確認できる。次に、対策工の挿入角度、長さ、本数の 3 項目について対策工の安定効果に関する検討する。

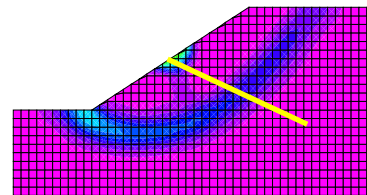
対策工の材料定数として、降伏軸力は $200kN$ 、降伏曲げモーメントは $0.01kN \cdot m$ 、直径 $0.2m$ とした。対策工端部の粘着力には大きな値 ($C_p = 10000kPa$) を用いてアンカーの定着部及び地表面側を剛結した。また、対策工周面の粘着力および摩擦角はなく、地盤との力の伝達は対策工の両端のみで行われる。つまり、ここではアンカーにプレストレスを導入した場合(設計安全率)を想定している。

4.1 対策工の挿入角度

対策工の長さを一定の条件にて挿入角度を変えて安定効果の検討を行った。挿入角度が水平および 34.5° のときの塑性ひずみ速度分布をそれぞれ図 5 の a) および b) に示す。



a) 対策工 0° $F_s=1.122$



b) 対策工 34.5° $F_s=1.145$

図 5 塑性ひずみ速度分布

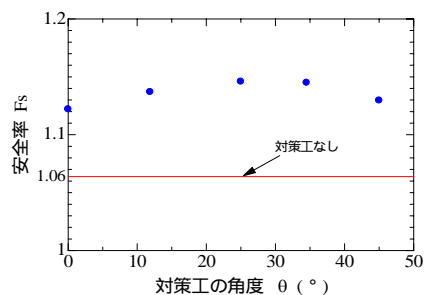


図 6 対策工の角度と安全率 F_s の関係

図 5-a), b) と図 4 を比較するとせん断領域の形状や大きさは概ね同じであるが、斜面側の対策工端部付近でのひずみ分布に違いが見られる。対策工の挿入角度と安全率の関係を図 6 に示した。挿入角度の増加とともに安全率も上昇するが、 25° 以降は減少に転じている。

4.2 対策工の長さ

対策工の挿入角度を一定にし、挿入長さを変えて斜面安定効果の検討を行った。

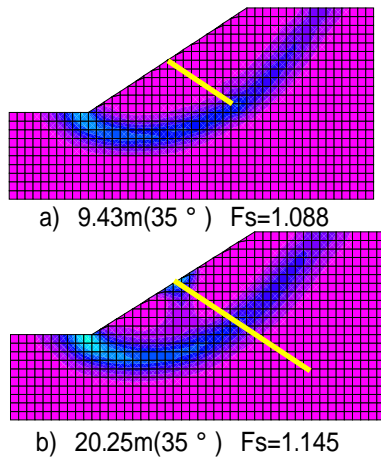


図7 塑性ひずみ速度分布

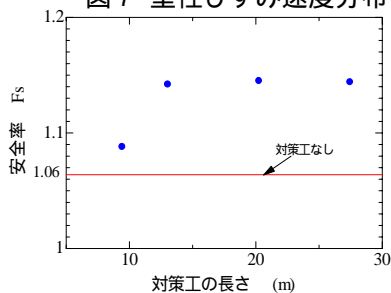


図8 対策工の長さとお安全率 F_s の関係

図7-a)は対策工の外側にすべり線が形成されており、周辺地盤とともに動いていると考えられる。安全率は図4と同程度であり、対策工の安定効果は見られない、一方、b)ではすべり土塊の移動に対する対策工の抵抗力の発現に起因して安全率の増加が見られる。図8に示す対策工の長さとお安全率 F_s の関係から、この事例では安全率は長さが約15m以上になると頭打ちとなる傾向が見られる。

4.3 対策工の本数

対策工の本数を変えて安定効果の検討を行った。対策工の挿入角度・長さは同じである。図9-b)はa)と比較すると斜面上部でのせん断領域が緩和しており、安全率も上昇している。図10から対策工の本数が多いほど安全率は上昇する傾向にあることが分かる。

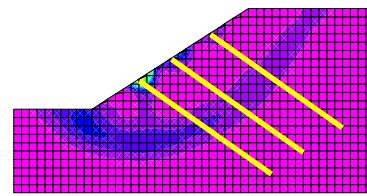
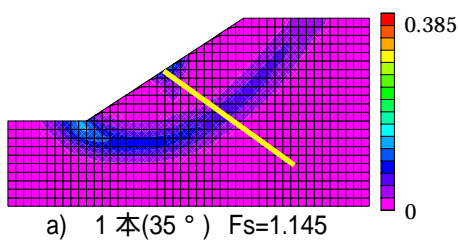


図9 塑性ひずみ速度分布

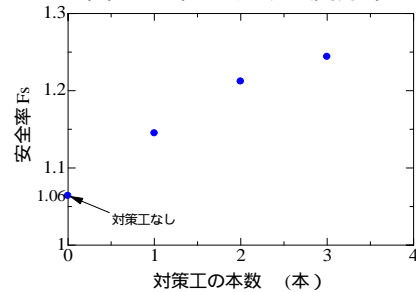


図10 対策工の本数とお安全率の関係

以上より、本事例解析では対策工の長さおよび本数は斜面の安定性向上に大きく寄与するが、挿入角度による安定効果はあまり見られなかった。

5. 対策工周面の摩擦特性を考慮した解析事例

アンカーを用いた対策工の極限耐力時における斜面安定効果について検討する。アンカーは定着部とテンドンの2つの構造体から構成されるが、煩雑さを避けるために全長で地盤との粘着力や摩擦力が作用するものとした。対策工の材料定数は降伏軸力 $200kN$ 、降伏曲げモーメント $0.01kN \cdot m$ 、直径 $0.2m$ とする。図11に対策工と地盤間のすべり抵抗力が小さく(粘着力 $C_c=1kPa$)、対策工両端は引き抜けるように端部抵抗力を設定(粘着力 $C_p=0.01kPa$)した解析結果を示す。図12にはすべり抵抗力が大きい場合($C_c=10000kPa$)の解析結果を示す。図12では斜面のり面側に受圧盤があることを想定して補強材を地盤に固定して、地盤側が引き抜けるように設定した。

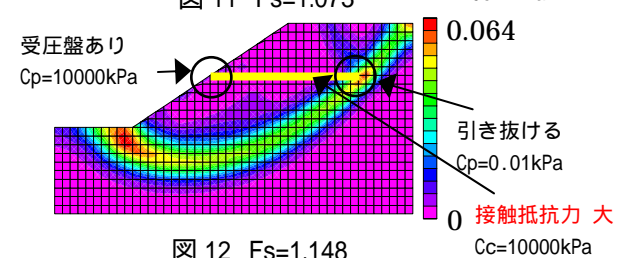
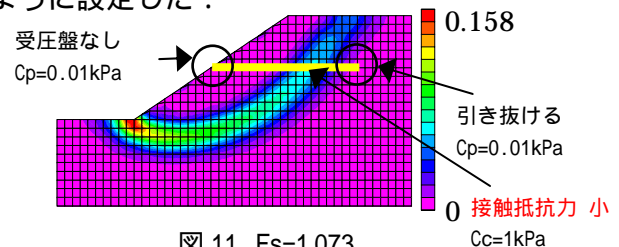


図 11 および図 12 より，対策工周囲のすべり抵抗（摩擦抵抗）を大きく設定すると，破壊形態が拡大することから破壊形態は対策工の周面摩擦特性に依存することがわかる．また，図 13 に示すように対策工内に発生する軸力分布にも周面摩擦特性の影響を確認できる．すべり抵抗が小さいと，軸力はほとんど発生していないが，すべり抵抗が大きいと発生する軸力も大きくなり安全率が上昇した．これより対策工の安定効果と軸力の発生が対応することがわかる．

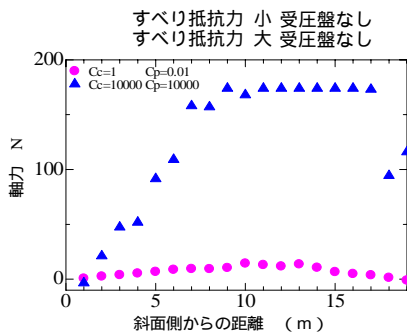


図 13 対策工内に発生する軸力分布図

6. 抑止杭による斜面安定効果の検討

次に抑止杭として対策工を導入した解析を行った．対策工と地盤の接触部分には摩擦特性を考慮した．抑止杭の降伏軸力は $100kN$ ，降伏曲げモーメントは $100kN \cdot m$ ，直径 $0.5m$ とし，抑止杭両端の節点ジョイントは非常に小さい値 $C_p = 0.01kPa$ を用い，杭が引き抜けるケースを想定した．

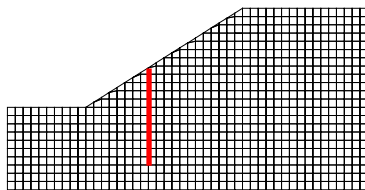


図 14 解析モデル

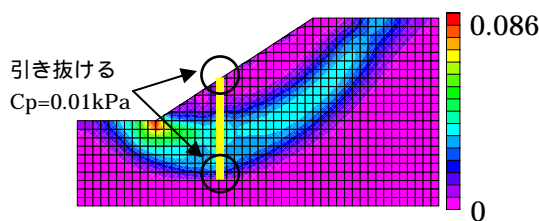


図 15 $C_c=1kPa$ $F_s=1.105$

図 15 に示す崩壊形態では対策工なしと比べてせん断領域の幅が広がっている．図 16 に杭内部に発生する軸力分布，図 17 に曲げモーメント分布を示す．すべり抵抗の値により軸力分布に若干の差違があるが，全体的にほぼ一致する結果となった．

アンカーでは軸力が抵抗力として発揮されていたのに対し，杭では曲げモーメントが抵抗に寄与していることから本解析手法の妥当性が確認できた．

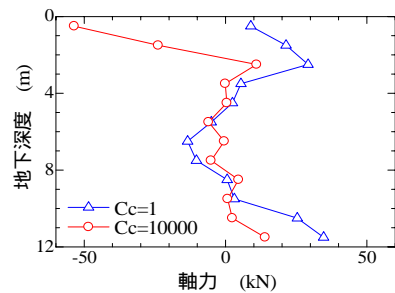


図 16 杭内に発生する軸力分布図

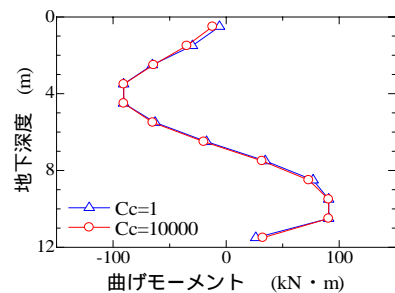


図 17 杭内に発生する曲げモーメント分布図

7. まとめ

対策工を梁要素にモデル化し，剛塑性構成式を定式化した．対策工を導入した斜面安定解析から対策工の安定効果について検討した．以下に得られた知見を記す．

対策工を梁要素でモデル化して導入することにより，地盤との相互作用を反映した解析結果が得られた．対策工が斜面安定に及ぼす効果の定量的評価への適用性を確認した．

以上より本研究にて提案した解析手法の妥当性が確認された．一方，ここで示した解析事例は初生すべりに関するものであり，実際問題への適用性を考察するためには既存すべり線が存在する斜面についての検討も必要であると考えられる．また，本研究での検討は 2 次元問題に限定されている．2 次元問題では安全率を過大評価する恐れがあることから，対策工の適切な安定効果を検討するためには 3 次元問題への拡張が重要であり，今後の課題としたい．

参考文献

- 1) 鷲津久一郎，宮本博，山田嘉昭，山本善之，川井忠彦：有限要素法ハンドブック 基礎編：培風館，pp.206-220，1981.
- 2) 難波雅史：剛塑性有限要素法による再すべり型地すべり斜面の安定解析と対策工に関する検討，長岡技術科学大学修士論文，pp.35-49，2004.