

三次元簡易 Bishop 法を用いた広域の土砂災害リスク評価

○東北大学工学部建築・社会環境工学科
東北大学大学院工学研究科
東北大学災害科学国際研究所
東北大学災害科学国際研究所

学生会員 須郷大地
学生会員 藤田真粹
正会員 森口周二
正会員 寺田賢二郎

1. 目的

日本には急峻な山地が広く分布し、崩壊の危険性を検討すべき斜面が多く存在する。加えて地震や台風などの災害も頻発するため、それによる影響を考慮した斜面安定解析を行い、被害を最小限に抑える対策が必要となる。本研究では、三次元斜面安定解析手法である Hovland 法¹⁾と三次元簡易 Bishop 法²⁾の2種類の手法を用いて広域の土砂災害のリスク評価を行い、その特徴と解析精度について分析することを目的とする。

2. 解析手法

二次元の斜面安定解析手法としては Fellenius 法と簡易 Bishop 法が広く用いられており、それぞれを三次元へと拡張した手法として Hovland 法と三次元簡易 Bishop 法が提案されている。Hovland 法においては土柱間内力を考慮していないのに対し、三次元簡易 Bishop 法においては一部の土柱間内力を考慮していることが2手法の解析精度に差を生む要因である。本研究ではこれらの手法を広域実地形の斜面安定解析に適用する。すべり面情報の算出、地形の表現、解析結果の可視化については藤田³⁾の提案した手法を用いた。

Hovland 法の安全率の算出式¹⁾を参考に、ベクトルを用いて抵抗力、滑動力を表記したものを以下の式(1)、(2)に示す。

$$\mathbf{Q}_i = [cA_i + \mathbf{n}_i \cdot (\mathbf{e}_g + \mathbf{k})(\mathbf{t}_i \cdot \mathbf{u}_i)(W_i - W_{Wi})\tan\phi]\mathbf{u}_i \quad (1)$$

$$\mathbf{S}_i = -[\mathbf{t}_i \cdot (\mathbf{e}_g + \mathbf{k})W_i]\mathbf{t}_i \quad (2)$$

ここに F は安全率、 c は粘着力、 ϕ は内部摩擦角、 A_i はすべり面の面積、 W_i は土柱重量、 $\mathbf{n}_i$ 、 $\mathbf{t}_i$ はそれぞれすべり面に垂直、平行な単位ベクトル、 $\mathbf{e}_g$ は重力方向の単位ベクトル、 $\mathbf{u}_i$ はすべり体がすべる方向の単位ベクトル、 $\mathbf{k}$ は設計水平震度を要素の勾配方向と同一水方向にベクトルとして与えたもの、 W_{Wi} は土柱内の地下水が占める重量であり、水の単位体積重量と表層内の地下水位の積により算出されるものである。以上よりすべり体全体の抵抗力 $\mathbf{Q} = \sum \mathbf{Q}_i$ と滑動力 $\mathbf{S} = \sum \mathbf{S}_i$ について以下の式(3)より安全率 F を算出する。

$$F = \frac{|\mathbf{Q}|}{\mathbf{S} \cdot \mathbf{u}_i} \quad (3)$$

次に、三次元簡易 Bishop 法の安全率の算出式²⁾を参考に、任意方向の回転軸と基盤面を考慮できるよう修正した

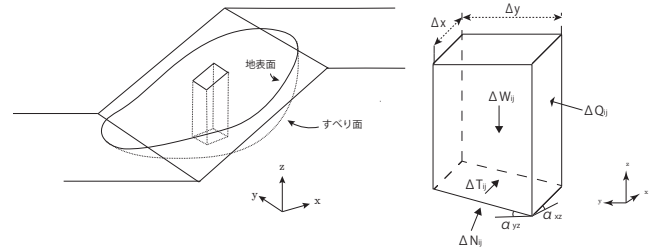


図-1 分割土柱と土柱にはたらく力

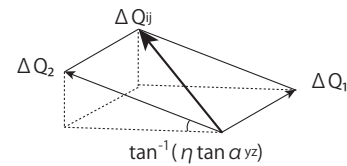


図-2 土柱間内力の方向の仮定

ものを以下の式(4)、(5)に示す。

$$F = \sum_i \sum_j [(\mathbf{r}_2 \times \mathbf{e}_b) \cdot \mathbf{v}_i [c\Delta x\Delta y(1 + \eta \tan^2 \alpha_{yz}) + \{\Delta W_{ij} - u_{ij}\Delta x\Delta y(1 + \eta \tan^2 \alpha_{yz})\} \tan\phi / m_\alpha]] \quad (4)$$

$$F = \sum_i \sum_j [((c - u_{ij}\tan\phi)\Delta x\Delta y \{ (1 + \eta \tan^2 \alpha_{yz}) (\tan^2 \alpha_{xz} + \tan^2 \alpha_{yz}) / J_1 - \{ \tan^2 \alpha_{xz} + (1 - \eta) \tan^2 \alpha_{yz} \} \} + \Delta W_{ij} \{ F / J_2 + (\tan^2 \alpha_{xz} + \tan^2 \alpha_{yz}) \tan\phi / J_1 \} / m_\alpha]] / \sum_i \sum_j \Delta W_{ij} \quad (5)$$

ここに、

$$J_1 = \sqrt{\tan^2 \alpha_{xz} + \tan^2 \alpha_{yz} + (\tan^2 \alpha_{xz} + \tan^2 \alpha_{yz})^2} \quad (6)$$

$$J_2 = \sqrt{1 + \tan^2 \alpha_{xz} + \tan^2 \alpha_{yz}} \quad (7)$$

$$m_\alpha = \frac{1 + \eta \tan^2 \alpha_{yz}}{J_2} + \frac{\{ \tan^2 \alpha_{xz} + (1 - \eta) \tan^2 \alpha_{yz} \} \tan\phi}{F} \quad (8)$$

$\mathbf{r}_1$ は楕円体中心から土柱重心までの位置ベクトル、 $\mathbf{r}_2$ は楕円体中心からすべり面までの位置ベクトル、 $\mathbf{e}_b$ はすべり面の勾配方向を表す単位ベクトル、 $\mathbf{e}_h$ は水平面内でのすべり面の勾配方向を表す単位ベクトル、 $\mathbf{v}_i$ は回転軸方向の単位ベクトル、 u_{ij} はすべり面上の間隙水圧、 α_{xz} 、 α_{yz} はそれぞれすべり面と xz 平面、 yz 平面がなす角度、 K_h は設計水平震度、 η は図-1のような力がはたらく土柱において図-2のように仮定される土柱間内力の方向に関する未知定数である。図-2における Q_1 および Q_2 の方向はそれぞれ x 軸、 y 軸に一致する。

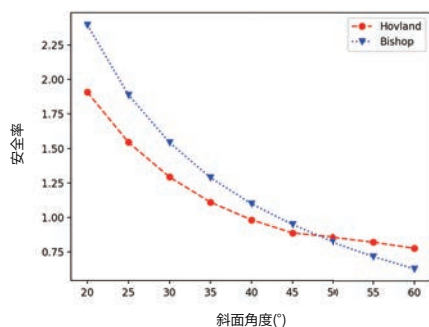


図-3 斜面角度による安全率

三次元簡易 Bishop 法により算出される安全率は式 (4), (5) の非線形連立方程式を解くことによって求められる。解析的に解くことが不可能であるため、Newton-Raphson 法を用いて安全率 F と未知定数 η の算出を行う。

3. 単純斜面への適用

BALIGH⁴⁾, GENS⁵⁾, LAM⁶⁾, HUNGER⁷⁾ の研究に用いられたモデルと同様のものでも解析手法の検証を実施した。検証結果を以下の表-1 に示す。斜面勾配は 1:2, 設定する楕円体は半径 $R = 7.8 \text{ m}$ の球とし、球の中心位置は斜面垂直方向に $R/2$ だけ離れた位置とする。土質定数については、土の単位体積重量 $\gamma = 9.8 \text{ kN/m}^3$, 内部摩擦角 $\phi = 0^\circ$, 粘着力 $c = 7.644 \text{ kN}$ とする。またメッシュは 0.5 m の正方形メッシュにより表現した。本研究の Hovland 法による安全率は過去の研究と概ね合致し、三次元簡易 Bishop 法による安全率はやや大きく算出されていることが確認できる。

表-1 過去の研究との安全率の比較

BALIGH	GENS	LAM
1.402	1.41	1.386-1.472
HUNGR	Hovland(本研究)	Bishop(本研究)
1.422	1.453	1.767

また、同様の条件で斜面角度のみ 20° から 60° まで 5° 刻みで変化させて解析を実施した結果を以下の図-3 に示す。ここで設定した条件では、斜面角度が 50° 付近までは Hovland 法により算出される安全率が小さく、斜面角度が 50° 付近より大きい斜面角度では三次元簡易 Bishop 法により算出される安全率が小さくなる傾向が確認された。

4. 実地形への適用

宮城県丸森町の一部地域を対象とし、設定する土質定数は土の単位体積重量 $\gamma = 16.6 \text{ kN/m}^3$, 内部摩擦角 $\phi = 35^\circ$, 粘着力 $c = 5.1 \text{ kN}$ とする。またメッシュは 5 m の正方形メッシュにより表現した。Hovland 法を用いた解析により得られた結果を図-4 に、三次元簡易 Bishop 法を用いた解析により得られた結果を図-5 に示す。これらの図では、安全率が 1 以下として評価された部分を着色して示している。両手法で全体的な分布は類似しているが、局所的に分布に差があることが確認できる。

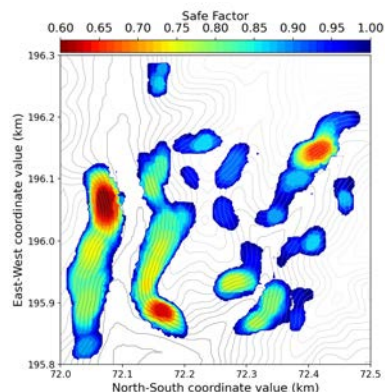


図-4 Hovland 法による安全率

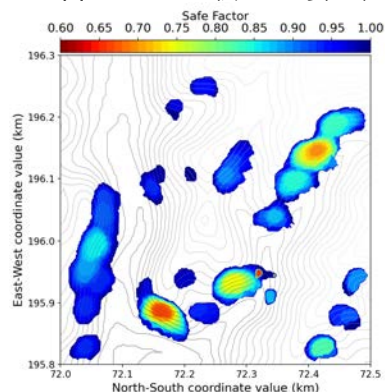


図-5 三次元簡易 Bishop 法による安全率

5. 結論

本研究では三次元の地形に対して Hovland 法と三次元簡易 Bishop 法を用いて斜面安定解析を実施した。三次元簡易 Bishop 法では内力を考慮し計算精度に優れる一方で、Hovland 法に比べて計算コストが増大するため、広域地形への適用をする場合には大きなデメリットとなり得る。一方で、力学的により適切なモデル化となる簡易 Bishop 法を用いることで、より適切な評価結果を出力できる。本論文では、1 つの実地形を対象として評価を行ったのみであるが、今後更なる検証を重ね、実地形を対象とした場合の簡易 Bishop 法の利点や欠点を整理する予定である。

参考文献

- Hovland, H. J.: Three-dimensional slope stability analysis method, *Int. J. of Mechanical Science*, Vol. 103, No. 9, pp. 971-986, 1977.
- 鶴飼恵三, 細堀健司: 簡易 bishop 法, 簡易 janbu 法および spencer 法の三次元への拡張, 土木学会論文集, No. 394, pp. 21-26, 1988.
- 藤田真粹: 降雨と地震のマルチハザードを考慮した広域土砂災害予測手法の開発, 東北大学工学部建築・社会環境工学科卒業論文, 2020.
- Baligh, M. and Azzouz, A.: End effects on stability of cohesive slopes, *ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol. 101, pp. 1105-1117, 1975.
- Gens, A., H. J. and Cavounidis, S.: Three-dimensional analysis of slices in cohesive soils, *Geotechnique*, Vol. 38, pp. 1-23, 1988.
- Lam, L. and Fredlund, D.: A general limit equilibrium model for three-dimensional slope stability analysis, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 30, pp. 905-919, 1993.
- Hungr, O.: An extension of bishop's simplified method of slope stability analysis to three dimensions, *Int. J. of Mechanical Science*, Vol. 37, No. 1, pp. 113-117, 1987.