

実地形を対象とした Hovland 法と三次元簡易 Bishop 法による広域斜面安定解析

○東北大学大学院工学研究科	学生会員	中村 優見
東北大学大学院工学研究科	学生会員	須郷 大地
東北大学大学院工学研究科	学生会員	外里 健太
東北大学災害科学国際研究所	正会員	野村 怜佳
東北大学災害科学国際研究所	正会員	森口 周二
東北大学災害科学国際研究所	正会員	寺田 賢二郎

1. はじめに

日本では降雨や地震に起因する土砂災害が多く発生し、毎年のように人的・物的被害をもたらしている。このような被害を最小化するためには事前対策が重要である。また、豪雨や大地震の際には広域で被害が発生するため、広域での被害分布を俯瞰視した評価結果に基づく効率的な対策が求められる。斜面安定性評価には、極限平衡理論に基づく手法が広く用いられているが、特に三次元条件での実現象に対する精度や性能は十分に検証されていない。そこで本研究では、実際の豪雨によって崩壊が発生した実地形を対象に三次元簡易 Bishop 法と Hovland 法を適用し、両手法の結果の比較および実際の崩壊分布との比較を通じて、両手法の特徴について議論する。

2. 解析手法

2.1 浸透解析

浸透解析には Green-Ampt¹⁾ モデルを用いる。傾斜角 α の傾斜面を考慮したとき、このモデルでは時刻 t_n での累積浸透量が次式のように表される。

$$I_n = I_o + K_s \cos \alpha \Delta t + \frac{\psi \Delta \theta}{\cos \alpha} \left(\ln \left(\frac{I_n \cos \alpha + \psi \Delta \theta}{I_o \cos \alpha + \psi \Delta \theta} \right) \right) \quad (1)$$

$$f_n = K_s (\cos \alpha + \frac{\psi \Delta \theta}{I_n}) \quad (2)$$

ここに、 f_n は浸透率、 K_s は飽和透水係数、 ψ は吸引圧力水頭、 $\Delta \theta$ は含水率の変化、 I_o は時刻 t_o での累積浸透量、 $\Delta t = (t_n - t_o)$ と経過時間である。

降雨強度が Green-Ampt モデルの浸透率よりも大きいとき、地中に浸透しない水は地表水として地表に残る。地表流の解析手法には佐山ら²⁾の研究などで用いられている拡散波モデルを用いる。

2.2 安全率の計算

本研究では極限平衡法に基づく三次元斜面安定解析手法である Hovland 法、三次元簡易 Bishop 法を用いて安全率 F を計算する。すべり面形状は楕円体の一部を仮定し、図1のような土柱に分割し、垂直方向の力のつり合いとモーメントのつり合いを用いて安全率を求める。 T_{ij} 、 N_{ij} 、 W_{ij} をそれぞれ、せん断力、垂直力、土柱重力の大きさとして、それ

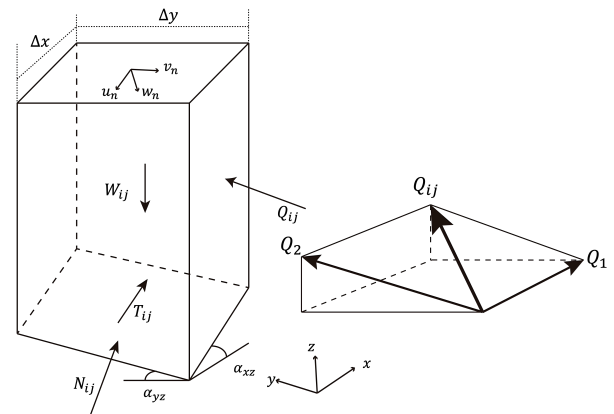


図-1 土柱に働く力と内力の方向
らの単位方向ベクトル t_{ij} 、 n_{ij} 、 g を次式のように表現する。

$$n_{ij} = \begin{pmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{pmatrix}, \quad t_{ij} = \frac{n_{ij} \times v_n}{|n_{ij} \times v_n|} = \begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{pmatrix}, \quad g = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

a) Hovland 法

Hovland 法では土柱間に働く内力を無視して計算する。Hovland 法での式を以下に示す。

$$F = \frac{\sum l_t [cA + \{-W_{ij}n_3 - uA\} \tan \phi]}{\sum W_{ij}(-l_n n_3 - l_w)} \quad (4)$$

$$l_t = v \cdot (r_b \times t_{ij}) \quad (5)$$

$$l_n = v \cdot (r_b \times n_{ij}) \quad (6)$$

$$l_w = v \cdot (r_g \times g) \quad (7)$$

ここに、 A は土中の底面積、 c は粘着力、 ϕ は内部摩擦角、 r_b は楕円体中心から土柱の滑り面までの位置ベクトル、 r_g は楕円体中心から土柱の中心までの位置ベクトルである。

b) 三次元簡易 Bishop 法

鵜飼ら³⁾が提案した三次元簡易 Bishop 法を用いて計算を行う。土柱間内力 Q_{ij} は xz 平面内では水平方向の成分 Q_1 を有し、 yz 平面内では水平方向と $\tan^{-1}(\eta \tan \alpha_{yz})$ の角度を有する成分を持つ。ここで、安全率 F に加えて新たな未知数 η が現れるため、次のモーメントのつり合いによる式と垂直方向の力のつり合いによる式を連立させることでこれ

Key Words: 斜面安定解析, 三次元簡易 Bishop 法, 斜面災害

〒 980-8572 仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1 災害科学国際研究所 4F S403-S404, TEL 022-752-2132, FAX 022-752-2133

ら二つの未知数を求める．

$$\sum \left(W_{ij} l_w + \frac{-A(c - u \tan \phi)(-\eta n_2 t_2 / n_3 + t_3) + F W_{ij}}{F(-\eta n_2^2 / n_3 + n_3) + (-\eta n_2 t_2 / n_3 + t_3) \tan \phi} l_n + \frac{A(c - u \tan \phi)(-\eta n_2^2 / n_3 + n_3) + W_{ij} \tan \phi}{F(-\eta n_2^2 / n_3 + n_3) + (-\eta n_2 t_2 / n_3 + t_3) \tan \phi} l_t \right) = 0 \quad (8)$$

$$\sum \left(W_{ij} - \frac{-A(c - u \tan \phi)(-\eta n_2 t_2 / n_3 + t_3) + F W_{ij}}{F(-\eta n_2^2 / n_3 + n_3) + (-\eta n_2 t_2 / n_3 + t_3) \tan \phi} n_3 + \frac{A(c - u \tan \phi)(-\eta n_2^2 / n_3 + n_3) + W_{ij} \tan \phi}{F(-\eta n_2^2 / n_3 + n_3) + (-\eta n_2 t_2 / n_3 + t_3) \tan \phi} t_3 \right) = 0 \quad (9)$$

各種ベクトル及び定数は Hovland 法のものと同様である．なお，これは非線形連立方程式となるため Newton-Raphson 法を用いて計算する．

3. 実地形への適用

3.1 対象地形・解析条件

対象地域は，岩手県釜石の一部であり，林野火災の後に豪雨によって複数の斜面崩壊が発生した地域である．豪雨前後に実施された UAV 観測⁴⁾で得られた標高データと国土地理院の提供する数値標高モデルを用いて，600m × 600m の領域で空間解像度 1m として作成された地形データを用いて解析を行う．解析パラメータや降雨の入力条件については，外里ら⁵⁾で用いられたものを使用する．

3.2 斜面安定解析結果

三次元簡易 Bishop 法と Hovland 法による斜面安定解析の結果をそれぞれ図 2a) と b) に示す．ここで，実際の崩壊箇所はそれぞれの図に赤色で示す．三次元簡易 Bishop 法による解析において，本来であれば危険箇所ではないと想定される谷部に沿って不自然に安全率が低く判定されている部分を確認できる．この問題は，収束計算の初期値と楕円体の設定条件によって解消される可能性があるが，現段階では完全に解消できていないため，これ以降は考慮せずに考察を行う．両手法による結果を比較すると，不安定と判定されている箇所は，そのサイズに大小はあるものの，位置は概ね一致していることが確認できる．また，全体的に Hovland 法の方が安全率が低くなっており，三次元簡易 Bishop 法に比べ，危険側に判定していることが確認できる．実際の崩壊箇所との比較では，Hovland 法の方が一致する結果となった．

4. まとめ

本研究では，釜石市の広域地形を対象として，三次元簡易 Bishop 法と Hovland 法による斜面安定解析を実施した．両手法の結果の比較から，危険箇所として判定される箇所は類似する傾向が見られた．実際の崩壊箇所との比較では，Hovland 法では崩壊箇所を安全率が 1.0 以下の危険箇所と

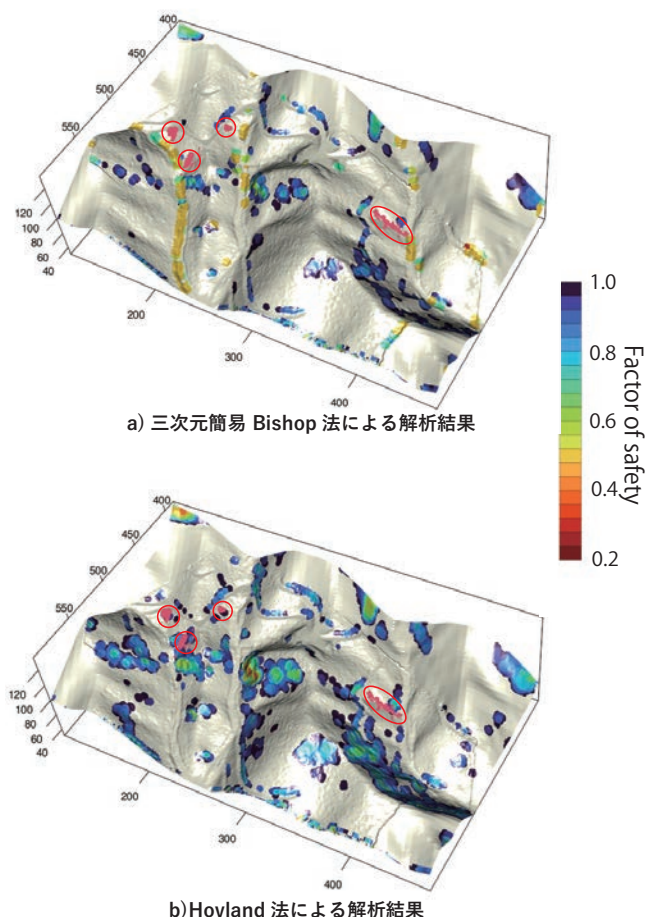


図-2 斜面安定解析結果と実際の被害箇所との比較
判定できた一方で，三次元簡易 Bishop 法では危険箇所として判定することができず，三次元簡易 Bishop 法では危険箇所を過小評価する可能性が確認された．力学的には，三次元簡易 Bishop 法の方が高度な計算となるが，地質条件が十分に考慮されていないことや，比較する実際の崩壊箇所が少なかったことから，本研究の結果のみではどちらの手法が優れているかの断定は難しく，今後更なる検討が必要である．

参考文献

- 1) Heber Green, W. and Ampt, G. A.: Studies on soil physics., *The Journal of Agricultural Science*, Vol. 4, No. 1, p. 1 - 24, 1911.
- 2) Sayama, T., Ozawa, G., Kawakami, T., Nabesaka, S. and Fukami, K.: Rainfall - runoff - inundation analysis of the 2010 pakistan flood in the kabul river basin, *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 57, No. 2, pp. 298-312, 2012.
- 3) 鶴飼恵三, 細堀建司: 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*, Vol. 1988, No. 394, pp. 21-26, 1988.
- 4) Touge, Y., Hasegawa, M., Minegishi, M., Kawagoe, S. and Kazama, S.: Multitemporal uav surveys of geomorphological changes caused by postfire heavy rain in kamaishi city, northeast japan, *CATENA*, Vol. 220, p. 106702, 2023.
- 5) Tozato, K., Dolojan, N. L. J., Touge, Y., Kure, S., Moriguchi, S., Kawagoe, S., Kazama, S. and Terada, K.: Limit equilibrium method-based 3d slope stability analysis for wide area considering influence of rainfall, *Engineering Geology*, Vol. 308, p. 106808, 2022.