

降雨の影響を考慮した三次元簡易 Bishop 法による広域の斜面安定解析

○東北大学工学部建築・社会環境工学科 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の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複数の崩壊が発生した実地形を対象に三次元簡易 Bishop 法を適用する。得られた結果を実際の崩壊分布と比較するとともに、より簡便な手法である Hovland 法による評価結果との比較も行う。これにより、三次元簡易 Bishop 法の特徴や有用性について議論する。

2. 解析手法

2.1 浸透解析

浸透解析には Green-Ampt モデルを用いる。傾斜角 α の傾斜面を考慮したとき、Green-Ampt モデルは以下のように表される。

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

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

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 と I_n は時刻 t_o 及び t_n の時の累積浸透量、 $\Delta t = t_n - t_o$ 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¹⁾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。滑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、Hovland 法では垂直方向の力のつり合い、三次元簡易 Bishop 法では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。はじめに、 T_{ij} 、 N_{ij} 、 W_{ij} をそれぞれ、せん断力、垂直力、重力の大きさとして、それぞれの単位方向ベクトル t_{ij} 、 n_{ij} 、 g を成分を用

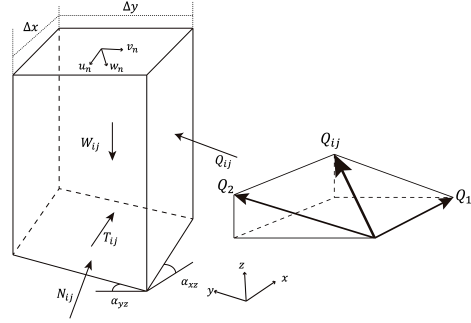


図-1 土柱に働く力と内力の方向
 いて以下のように表現する。

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

a) 三次元簡易 Bishop 法

鶴飼ら²⁾が提案した三次元簡易 Bishop 法を基礎とした式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、2つの式を連立させて安全率を求める。モーメントのつり合いによる式、垂直方向の力の釣り合いによる式をそれぞれ式(4)、式(5)に示す。

$$\sum \left(W l_w + \frac{-A(c - u \tan \phi)(-\eta n_2 t_2 / n_3 + t_3) + F W}{F(-\eta n_2^2 / n_3 + n_3) + (-\eta n_2 t_2 / n_3 + t_3) \tan \phi} l_n + \frac{A(c - u \tan \phi)(-\eta n_2^2 / n_3 + n_3) + W \tan \phi}{F(-\eta n_2^2 / n_3 + n_3) + (-\eta n_2 t_2 / n_3 + t_3) \tan \phi} l_t \right) = 0 \quad (4)$$

$$\sum \left(W - \frac{-A(c - u \tan \phi)(-\eta n_2 t_2 / n_3 + t_3) + F W}{F(-\eta n_2^2 / n_3 + n_3) + (-\eta n_2 t_2 / n_3 + t_3) \tan \phi} n_3 + \frac{A(c - u \tan \phi)(-\eta n_2^2 / n_3 + n_3) + W \tan \phi}{F(-\eta n_2^2 / n_3 + n_3) + (-\eta n_2 t_2 / n_3 + t_3) \tan \phi} t_3 \right) = 0 \quad (5)$$

$$l_t = \mathbf{v} \cdot (\mathbf{r}_b \times \mathbf{t}_{ij}) \quad (6)$$

$$l_n = \mathbf{v} \cdot (\mathbf{r}_b \times \mathbf{n}_{ij}) \quad (7)$$

$$l_w = \mathbf{v} \cdot (\mathbf{r}_g \times \mathbf{g}) \quad (8)$$

ここに、 W は重力、 A は土中の底面積、 c は粘着力、 ϕ は内部摩擦角、 \mathbf{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. 式 (4), 式 (5) を連立することで安全率 F 及び未知数 η を求める. 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.

b) 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. 各種ベクトル及び定数は三次元簡易 Bishop 法のものと同様である.

$$F = \frac{\sum l_i [cA + \{-Wn_3 - uA\} \tan \phi]}{\sum W(-l_n n_3 - l_w)} \quad (9)$$

3. 実地形への適用

3.1 対象地形・解析条件

本研究での対象地域は, 岩手県釜石市の林野火災と豪雨による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³⁾ 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, 図 2 に示す 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⁴⁾ で用いられたものを使用する.

3.2 結果

実際の斜面崩壊箇所を図 2 に赤色で示す. また, 三次元簡易 Bishop 法, Hovland 法による解析結果をそれぞれ図 3, 4 に示す. 実際の崩壊箇所と解析結果を比較すると, 崩壊箇所 3,4 に関しては, 三次元簡易 Bishop 法, Hovland 法のどちらの解析結果にも危険箇所として判定されているが, 崩壊箇所 1,2 はどちらにも危険箇所として判定されていないことが確認でき, 両手法によって得られた崩壊分布は類似した傾向を示している. 一方で, 特に図 3, 図 4 右側に関して, Hovland による解析では危険箇所を過大評価している箇所が多く確認でき, 三次元簡易 Bishop 法の方が実被害の傾向をより正確に捉えられていることがわかる.

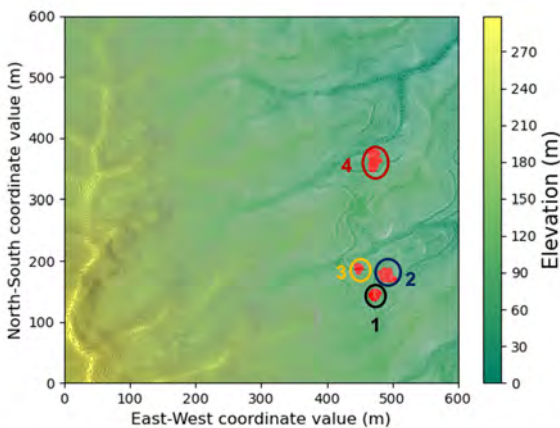


図-2 実際の斜面崩壊箇所

4. まとめ

本研究では, 釜石市の広域地形に対して解像度 1m のメッシュデータを用いて三次元簡易 Bishop 法, Hovland 法による斜

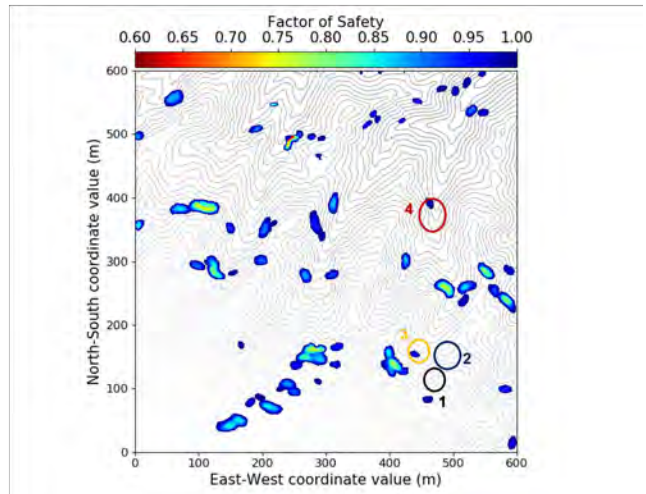


図-3 三次元簡易 Bishop 法による安全率分布

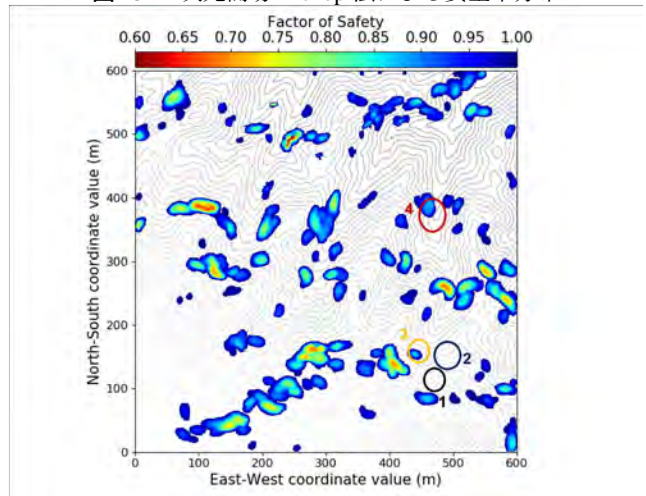


図-4 Hovland 法による安全率分布

面安定解析を実施した. 実際の崩壊箇所との比較や両手法の比較の結果から, 実崩壊箇所をとらえる傾向は大きく変わらないものの, 3次元簡易 Bishop 法を用いることで Hovland 法で多く発生する過大評価の地点を減らすことが可能であることが確認できた. 一方で, 解析で崩壊箇所を危険箇所として抽出できないところも存在した. これは細かな地質情報などを考慮できていないことが原因と考えられることから, 今後さらなる検討が必要である.

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.