

地盤の深層崩壊による被害範囲推定に向けた基礎的検討

九州大学工学部 学生会員 ○田中 大貴 九州大学大学院 正会員 笠間 清伸 正会員 古川 全太郎

1. 背景および目的

地盤の深層崩壊とは、山地及び丘陵地の斜面が豪雨や地震、融雪などを誘因として風化の進んだ層だけではなくその下の基盤まで崩壊する現象であり、近年増加傾向にある。深層崩壊は、表層崩壊と比べ従来のハード対策では対応が難しく、ひとたび発生すると広範囲に大きな被害を及ぼす可能性があるため、災害の前兆現象や発生位置及びその規模を事前に推定し避難誘導などのソフト対策を進めていくことが極めて重要になる¹⁾。本文では、地盤の深層崩壊の危険度および深層崩壊にともなう土砂の移動到達範囲を推定するための基礎的検討として、三次元斜面安定解析を用いて斜面の崩壊領域を決定し、崩壊後の土砂の到達範囲を数値解析的に検討した。

2. 深層崩壊の危険度評価と土砂移動に関する解析概要

深層崩壊の危険度評価では図-1 に示すビショップ法を元にした三次元分割法により検討した。三次元分割法では、斜面を水平断面が長方形 ($\Delta x \times \Delta y$) の柱状要素に分割して、ビショップ法で回転モーメントの力のつり合いにより安全率を導く手法であり、次式で表される。

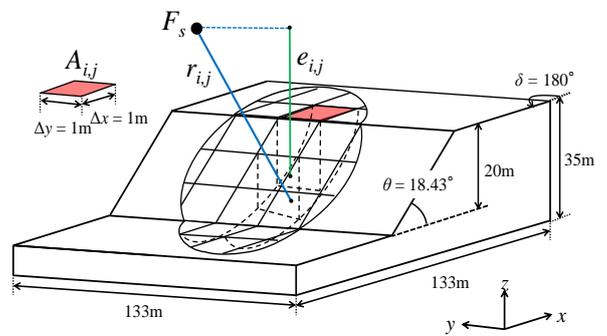


図-1 三次元斜面図

$$F_s = \frac{\sum r_{i,j} \{c_{i,j} A_{i,j} + (W_{i,j} - u_{i,j} A_{i,j}) \tan \phi_{i,j}\} / m_{\alpha_{i,j}}}{\sum W_{i,j} [r_{i,j} \sin \alpha_{i,j} + k_{eq} e_{i,j}]} \quad (1)$$

$$m_{\alpha_{i,j}} = \cos \varepsilon_{i,j} + (\sin \alpha_{i,j} \tan \phi_{i,j}) / F_s \quad (2)$$

$$\varepsilon_{i,j} = \cos^{-1} \left(1 / \sqrt{1 + \tan^2 \alpha_{x_{i,j}} + \tan^2 \alpha_{y_{i,j}}} \right) \quad (3)$$

$$\alpha_{i,j} = \tan^{-1} \left\{ \tan \alpha_{x_{i,j}} \cos \delta + \tan \alpha_{y_{i,j}} \sin \delta \right\} \quad (4)$$

なお、添え字の i, j は柱状要素の分割した時の x, y 方向の格子番号を表す。また、 R_{ij} は球の半径、 c_{ij} は粘着力、 A_{ij} は断面積、 W_{ij} は自重、 u_{ij} は間隙水圧、 e_{ij} は滑り面からの鉛直距離、 ε_{ij} はそれぞれの格子における滑り面の傾斜角、 α_{ij} は方位角 δ により導かれる角度で、 $\alpha_{x_{ij}}$ が x 成分の滑り面の x 方向の傾斜角、 $\alpha_{y_{ij}}$ が y 成分の滑り面の y 方向の傾斜角を表す。また、 k_{eq} は地震による地殻変動により生じる震度である。それぞれの入力定数を表-1 に示す。それぞれの導き方については参考文献²⁾ を参照されたい。

上記の斜面安定解析により最小の安全率となる滑り面を決定した後、滑り面上の土砂が崩壊・移動すると仮定し、図-2 のような外力が崩壊土砂内の柱状要素に作用すると仮定した。柱状要素にかかる力は、土塊の自重 W と土塊の側面に作用する水平

表-1 用いた入力定数

名称	記号	設定値	単位
傾斜角(x成分)	θ	18.43	°
傾斜角(y成分)	β	0	°
方位角	δ	180	°
粘着力	c	41.65	kPa
内部摩擦力	ϕ	15	°
単位体積重量	γ	18.82	kN/m ³
間隙水圧	u	0	kN/m ²
初速度(x成分)	u_0	0	m/s
初速度(y成分)	v_0	0	m/s
格子の幅(x成分)	Δx	1	m
格子の幅(y成分)	Δy	1	m
重力加速度	g	9.807	m/s ²
土圧係数	K_0	0.7412	—
震度(x方向)	k_{eqx}	0	—
震度(y方向)	k_{eqy}	0	—
震度(z方向)	k_{eqz}	0	—

土圧 P ，土中要素の底面にかかるせん断抵抗 R ，地盤からの垂直反力 N ，地震力 F_v ， F_x ， F_y および間隙水圧 u である．これらの力の合力に比例して崩壊土砂は加速度 a で加速・減速するため土塊の質量を m と表したとき次式で表される³⁾．

$$m \cdot a = (W + F_v + F_x + F_y) + \left(\frac{\partial P_x}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial P_y}{\partial y} \Delta y \right) + R \quad (5)$$

上式を差分化して，各時間ステップで柱状要素の高さの変化を計算することで崩壊土砂の移動，到達範囲を解析した．詳しい解析法については参考文献⁴⁾を参照されたい．

3. 解析結果

図-1 に示す傾斜角 18.43° ，高さ 20 m の仮想斜面を対象に解析を行った．解析で用いた入力定数を表-1 に示す．想定した斜面は，縦横とも 133 m であり，これを縦横とも 1 m ずつに格子で分割した．一様な単位体積重量，粘着力および内部摩擦力を有する斜面を仮定し，地盤内の間隙水圧を 0 と仮定した．また，地震による外力はないとした．高さ $15 \sim 100\text{ m}$ において安全率を 5 m ごとに計算し，安全率が小さくなる範囲では 0.5 m ごとに計算した．

図-3 に三次元斜面安定解析により得られた安全率の空間分布を示す．図中の点の位置が安全率を計算したすべり円弧の中心であり，点の色が安全率の大きさを示している．図のように円弧の中心 $(x, z) = (57.5, 69.5)$ ，円弧の長さ 63.24 m ならびにすべり面の長さ 87 m の時に安全率が最小で， $F_s = 2.19$ となった．

図-4 に斜面中心部における $t = 0.008$ 秒後と $t = 2.40$ 秒後の崩壊土砂の形状を示す．このとき，各時間のステップの値を $\Delta t = 0.008$ 秒に設定した．図に示すように時間の経過と共に崩壊土砂が移動しており，崩壊土砂の移動・到達距離を上手く推定できる可能性がある．

参考文献

- 1)地頭菌隆：深層崩壊に挑む，土木學會誌，第100巻，第八号，pp.7-9，2015.
- 2)Reid, M. E. Christian, S. B, Brien, D. L, and Henderson, S. T. : Scoops3D-Software to analyze three-dimensional slope stability throughout a digital landscape : U.S Geological Survey Techniques and Methods, Chapter-2.Basis of the Slope-Stability Analysis, pp.7-26, 2015.
- 3)佐々恭二：地すべり・斜面崩壊の運動予測—改良そりモデルとシュミレーションモデル—，京都大学防災研究所年報第30号 B-1，pp.8-12，1987.
- 4)岩佐義朗・井上和也・水鳥雅文：氾濫水の水利の数値解析法，京大防災研究所年報第23号 B-2，pp3~6，1980.

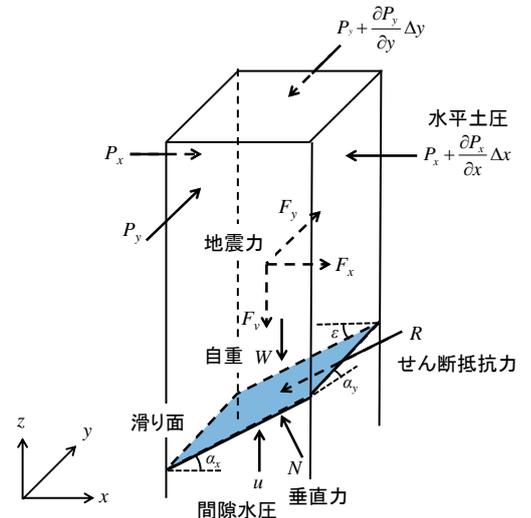


図-2 崩壊土砂の柱状要素に働く力

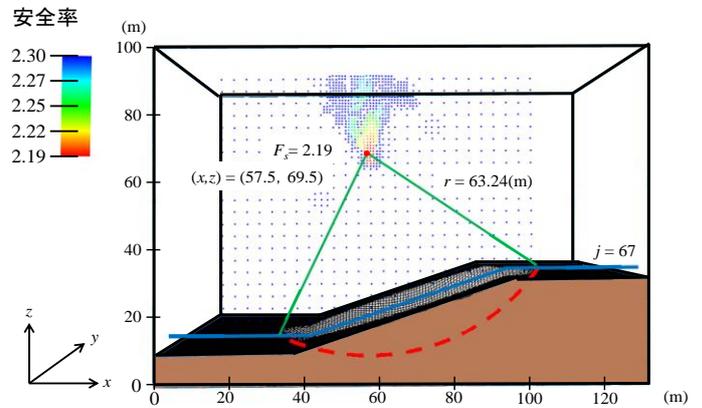


図-3 斜面の安全率の空間分布

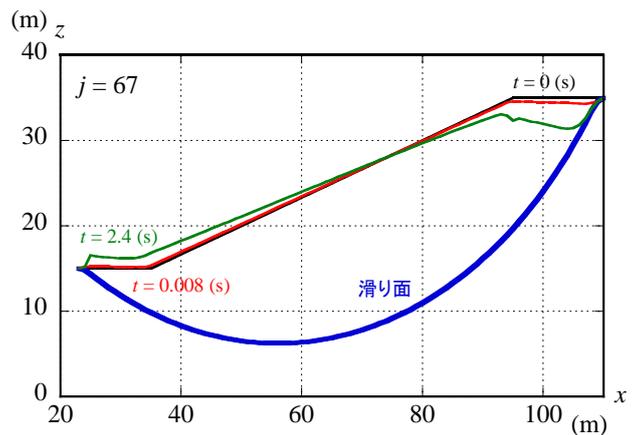


図-4 崩壊土砂の時間変化