

# 発生過程を考慮した個別要素法による斜面崩壊土砂の運動に関する解析

○八千代エンジニアリング株式会社 武蔵由育  
 京都大学大学院農学研究科 山崎美穂  
 独立行政法人土木研究所 梁偉立  
 京都大学大学院農学研究科 小杉賢一郎  
 京都大学大学院農学研究科 水山高久

## 1. はじめに

急傾斜地崩壊による災害事例を対象とした調査では、崩壊土砂の多くは部分的に土塊の形状を維持した状態となっており、完全に流動化していない<sup>①</sup>。既往の崩壊土砂の運動に関する研究の多くは、被害が大きくなる場合を予測するために崩壊土砂の流動化の過程や流動化した崩壊土砂の運動を対象としているが、今後効率的な対策を実施していくためには十分に流動化する前に停止するような崩壊の運動についても明らかにし、対象となる斜面で発生すると推定される崩壊の運動をより具体的に検討する必要がある。

土砂が水分を含むことにより、部分的に土塊の形状を維持した状態で流下する過程については、水路実験による崩壊実験結果を対象とした再現計算により、個別要素法の要素間に引張力にも抵抗する間隙バネ(pore-spring)を導入した「拡張個別要素法」を用いることで再現できることが示されている<sup>②</sup>。

今後、この手法を用いて降雨により発生する崩壊の運動を予測するためには、崩壊発生時の土層の含水率等を推定した上で、土層の水分条件に応じたバネ係数等のパラメータ設定手法を確立することが課題となる。

従って本研究では、降雨浸透解析・安定解析により算定された崩壊発生時の土層の水分条件をもとに、拡張個別要素法に用いるパラメータを算定する手法について検討し、実際に発生した斜面崩壊を対象とした再現計算による適用性の確認を行った。

## 2. 解析方法

本検討で使用する拡張個別要素法の基礎式は、以下の式(1)~(2)に示す通りである。

$$m \cdot \ddot{u} + \eta \cdot \dot{u} + k \cdot u = f \quad \text{----- (1)}$$

$$I \cdot \ddot{\phi} + \eta \cdot r^2 \cdot \dot{\phi} + k \cdot r^2 \cdot \phi = f_\phi \quad \text{----- (2)}$$

ここに、 $u$ :変移(ベクトル)、 $\phi$ :回転変移、 $m$ :質量、 $I$ :慣性モーメント、 $r$ :要素半径、 $f$ :外力(ベクトル)、 $f_\phi$ :回転外力、 $k$ :バネ係数、 $\eta$ :ダッシュポットの粘性係数である。

各要素間に作用する力は、図-1に示すように各要素の接触時のみ作用する反発バネ(Rebounding Spring)と反発・引張の両方に作用する間隙バネ(Pore-Spring)により表される。

再現計算は、1999年6月29日に京都大学 上賀茂試験地内で発生した表層崩壊を対象とした。崩壊斜面の勾配は29°、高さは35mであり、崩壊規模は高さ11m、幅11m、崩壊深1.5mであり、崩壊土砂量約350m<sup>3</sup>である。

崩壊発生時は6/29 6:00~6/30 8:00の27時間に198.5mmの降雨があり、崩壊発生直前の6/30 1:00に最大雨量45.5mm/hrが観測されている。

降雨・流出過程について浸透流解析を行うとともに、斜面の安定解析を行い、安全率Fsが1以下となる時点の間隙水圧分布を図-2に示すように算出した。安全率が1以下となる時間は図-3に示すように実際に崩壊が発生した時間と一致しており浸透流解析・安定解析の妥当性が確認されている。

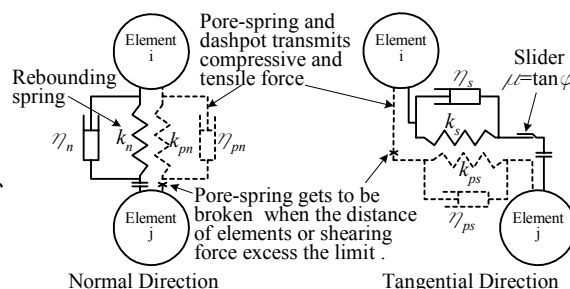


図-1 拡張個別要素法モデルの概念図

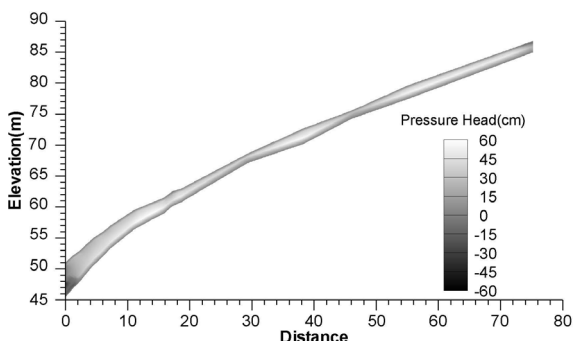


図-2 崩壊発生時の間隙水圧分布

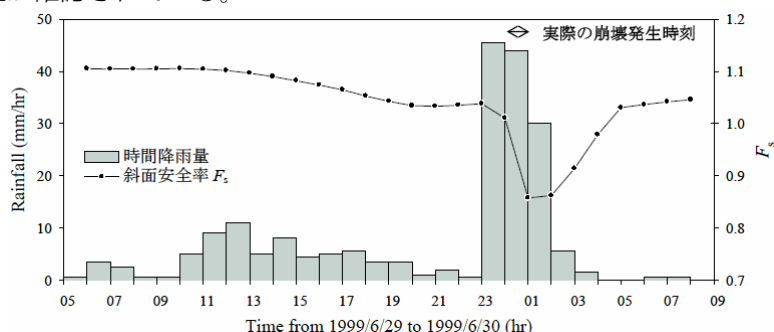


図-3 降雨波形と安全率Fsの算出結果

土層の水分条件の変化による崩壊発生は、含水率上昇による土層の質量の増加と間隙水圧上昇による土層の強度低下が主な要因として考えられ、拡張個別要素法による解析では各要素の質量変化、および間隙バネによる引張力の低下、すなわち間隙バネの係数  $k_p$  の値の減少として表される。

各要素の質量については、式(3)に示すように含水率から求められる浸透流解析の各メッシュの土層の密度と、各メッシュに位置する個別要素とその空隙を合わせた密度が一致するように与えるものとした。

$$\sigma_E = \left\{ (1 - \theta_s) \cdot \sigma_s + \theta \cdot \rho_w \right\} \cdot (1 + e) \quad \text{----- (3)}$$

ここに、 $\sigma_E$ : 個別要素法の要素の密度、 $e$ : 個別要素法の要素間の空隙比(本検討では等径要素六角配置により  $e=0.103$ )、 $\sigma_s$ : 土粒子の密度( $2.65\text{g/cm}^3$ )、 $\rho_w$ : 水の密度( $1.0\text{g/cm}^3$ )、 $\theta_s$ : 飽和体積含水率、 $\theta$ : 体積含水率である。

また、不飽和土の体積含水率  $\theta$  と負の圧力水頭  $\psi$  の関係は式(4)に示すように表される<sup>③</sup>。

$$S_e = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r) = Q(\ln(\psi / \psi_m) / \sigma) \quad \text{----- (4)}$$

ここに、 $\theta_r$ : 残留体積含水率、 $\psi_m$ :  $\theta = \theta_r$  のときの負の圧力水頭、 $\sigma$ : 空隙率対数分布の標準偏差、 $Q$ : 標準正規分布の上側確率である。

式(4)の関係は図-4に示すように表されることから、個別要素間の引張力が土層の間隙水の負の圧力に比例して表されるものと仮定すると、 $s_e=0.5$ における間隙バネ係数  $k_{pm}$  を与えることにより、各要素の間隙バネ係数  $k_p$  は浸透流解析の各メッシュの圧力水頭から式(5)により算定することができる。

$$k_p = k_{pm} \cdot \psi / \psi_m \quad \text{----- (5)}$$

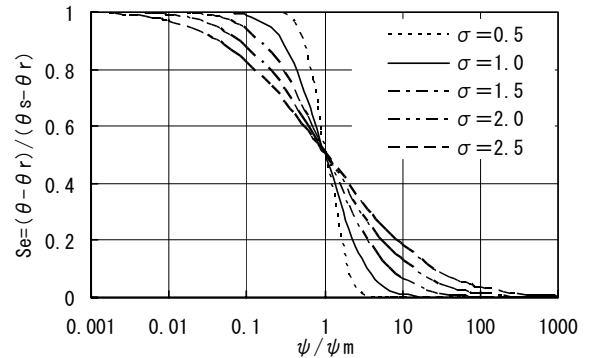


図-4 式(4)による  $\psi$  と  $\theta$  の関係

### 3. 解析結果

以上に示した方法により、崩壊土砂の移動を解析した結果を図-5に示す。

計算結果の崩壊深は実際よりも大きくなり、その結果として崩壊土砂の到達距離が実際よりも大きくなっているが、崩壊発生位置は実際の発生状況と一致しており、今後  $s_e=0.5$  における間隙バネ係数の設定方法について詳細に検討することで、精度向上を図ることが可能と考えられる。

### 4. おわりに

本検討では、降雨浸透解析から得られた土壌水分条件をもとに拡張個別要素法における各要素の質量と間隙バネ係数を設定する方法について検討した。

間隙水圧・体積含水率などの水分条件については崩壊発生時点のものを用いているが、実際には崩壊土砂の移動により変化すると考えられること、要素の質量、間隙バネ係数以外のパラメータについても水分条件変化の影響を受ける可能性があることなど、より詳細な検討が課題ではあるが、本手法により降雨による崩壊発生から崩壊土砂の移動、停止までの過程を解析することで、今後の斜面崩壊の対策を行う上で対象とする崩壊についてより詳細な検討が可能になると考えられる。

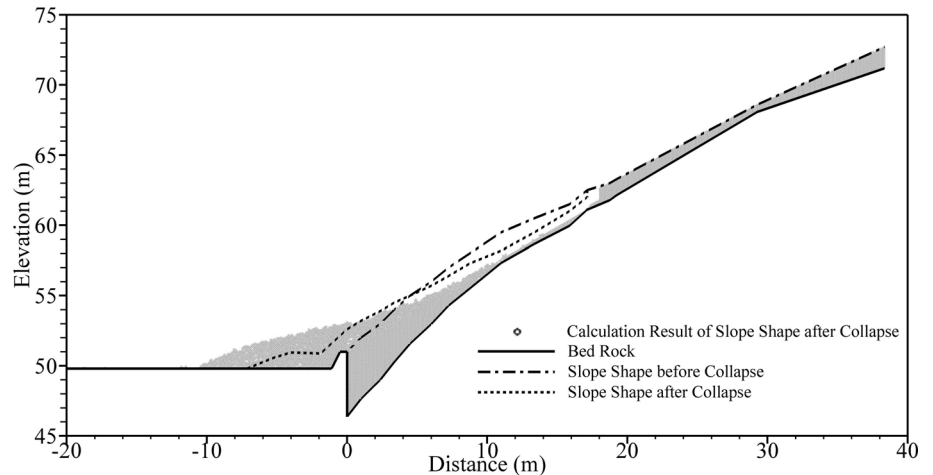


図-5 実際の崩壊形状と解析結果の崩壊形状の比較

反発バネのパラメータ:  $k_n=k_s=7.5e+7$ ,  $\eta_n=\eta_s=1.0e+5$

間隙バネのパラメータ:  $k_{pn}=1.0e+3$ ,  $k_{ps}=1.0e+1$ ,  $\eta_{pn}=3.65e+2$ ,  $\eta_{ps}=3.65e+1$  ( $k_{pn}, k_{ps}$  は  $S_e=0.5$  における値)

① 武蔵由育, 水山高久: がけ崩れ災害における崩壊土砂の運動の実態 砂防学会誌, Vol.61, No.5, p.31-36, 2009

② Yoshiiku Musashi, Takahisa Mizuyama, Miho Yamasaki: Study on Collapsed Soil Movement by Flume Experiments and Application of Distinct Element Method Corresponding to Fluidized Conditions, Asia-Pacific Symposium on New Technologies for Prediction and Mitigation of Sediment Disasters, JSECE Publication No.55, p.66-67, 2009

③ Kenichiro Kosugi: General Model for Unsaturated Hydraulic Conductivity for Soils with Lognormal Pore-Size Distribution, Soil Sci. Soc. Am. J. 63:270-277, 1999