

1. はじめに

三次元的な崩壊運動に関するシミュレーションは、非常に有用な手法と考えられる。既存のモデル LSFLOW は入力パラメータの設定などについて問題点がある。本研究では有限体積法で運動量離散化式を整理し、厚さと流速の連立方程式を解くことによって計算を安定化させ、既存の問題をクリアした。また、崩壊の拡散範囲を予測する時の各因子による影響を議論し、とくに動的摩擦係数と静的摩擦係数との関係を求めた。そして、崩土の拡散・堆積範囲を予測する手法を論証した。

2. プログラム概要

地すべり土塊の運動は、運動方程式と連続式に従うものとし、差分法により解析が行われている。計算を行う際、地すべり土塊の運動は非圧縮性流体として扱うとともに地すべり土塊を構成する土粒子がそれぞれ内部摩擦角を持つ微粒子より構成された流体と考えている。地すべり運動では鉛直方向の流れが水平方向の流れに比べて非常に小さいものと考えられるので、鉛直方向の流れは無視できると仮定して準3次元で計算を行っている。

土塊の運動が流体の支配方程式（ナビエストークスの式）で記述できると仮定し、数値計算で解くには、以下の2方程式が必要になる（Nakamura, H, et. al., 1989）。

質量保存式と運動量式は以下に示している。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{v} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \vec{v}}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{v} \vec{v} = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + f \quad (2)$$

ここで、 ρ 、 v 、 p 、 τ 、 f は密度、流速、圧力、応力テンソル、外力を表す。

構成項は圧力項、内部損失、およびすべり面摩擦力などによって構成される。

基盤面の勾配 $\tan \theta$ を考慮し、圧力項と重力項をまとめて表すことは以下の式できる：

$$-h \nabla p - \rho g h \tan \theta = -\rho g h \nabla h \quad (3)$$

内部損失は内部摩擦角を用いて以下の式で表す。

$$f_m = \rho g \tan \phi_m \quad (4)$$

すべり面における摩擦力を評価するために、Coulomb モデルを使用することができる。

$$f_s = c + \rho g h \tan \phi_s \quad (5)$$

本プログラムの入力に必要なデータは、地すべり発生前の地形、すべり面の地形、地盤物性値などである。地盤物性値とは、地すべり前の斜面を構成する土の密度、すべり面の粘着力、すべり面の摩擦係数、および地すべり崩土のそれらと土の粘性係数などである。

3. 事例地すべりのシミュレーション

兵庫県南部地震により発生した地すべりの中で最も大規模な災害を引き起こしたものは仁川地すべりである。崩壊規模は長さ約 175m、幅約 100m、比高約 30m である。崩壊土量は約 12 万 m³ である。仁川地すべり発生後の計算結果を図-1 に示している。

本研究のモデルで計算した結果、すべり面の動的摩擦角 ϕ_s は 2.5°、崩土の動的摩擦角 ϕ_m は 10.0° を用いた場合が、最もよく実際の地すべり後の地形を再現できた。点線は実際の崩土の拡散範囲で、塗りつぶした範囲は計算した崩土の拡散範囲である。家屋の影響を除いて、よく実際の地形を再現したと思われる。

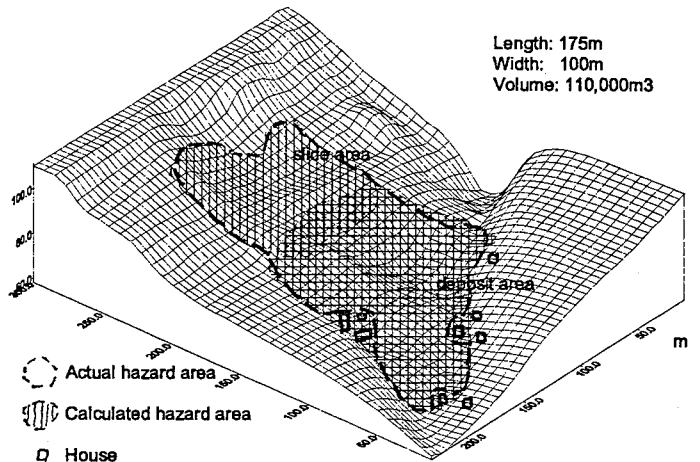


図-1 仁川地すべりの計算立体図

図-2は計算した仁川地すべりの経時的な断面変化図である。断線は崩壊発生前の原斜面で、実線は崩壊後の斜面である。他の線は経過時間ごとの土塊の運動状況を示している。

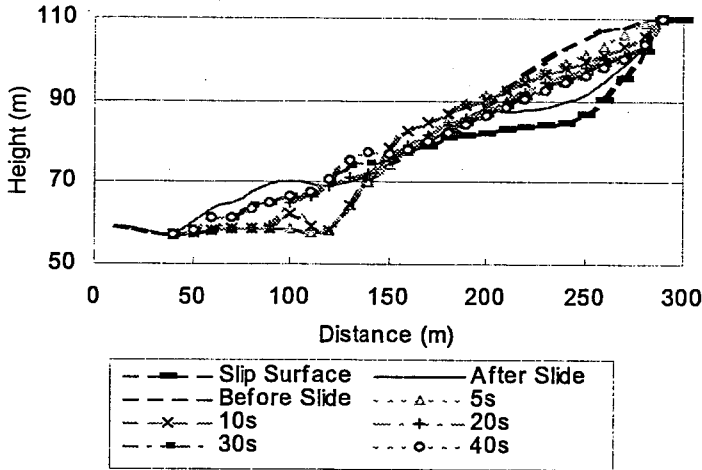


図-2 仁川地すべり計算結果断面図

運動形態は斜面上部から崩壊が発生し、下部斜面を押し出すように崩壊が進行していくという結果となった。計算では、崩壊は発生から約35秒でほぼ停止しており、また40秒で完全に停止にいたっている。移動土塊全体の平均運動速度は約20m/sである。

4. 静的摩擦係数と動的摩擦係数の関係式

既往の研究はすべり面摩擦係数と内部摩擦係数をトライアンドエラーで繰り返し計算を行い、いくつかの事例で地すべりの拡散・堆積範囲が最も近似している値を求めている。本研究では地すべり事例を増し、静的摩擦係数、即ち安定解析で求めたすべり面摩擦係数 $\tan \phi_c$ とすべり面の動的摩擦係数 $\tan \phi_s$ および崩土の動的摩擦係数 $\tan \phi_m$ との関係を見出すことを試みた。そこで、前述した仁川地すべりを含め、20箇所の地すべりについて新たに三次元シミュレーションを行った。これをまとめた静的摩擦係数 $\tan \phi_c$ と動的摩擦係数 ($\tan \phi_s + \tan \phi_m$) との関係を図-3に示す。点線は静的摩擦係数と動的摩擦係数との関係を示す線である。

今回は降雨、地震などの誘因別に地すべり発生斜面のすべり面の静的摩擦係数と崩土の動的摩擦係数との関係を得るには事例が少なかつたため、ここでは誘因を考慮せず全解析データによって両者の関係を求めた。得られた関係式は

$$\tan \phi_s + \tan \phi_m = 0.41 \tan \phi_c + 0.10 \quad (3)$$

である。相関係数は0.77で、両者の間には良

い相関があると思われる。

また全データをほぼカバーするように、プラスマイナス $\tan 4^\circ$ で2本の直線を引くと、図中の上限と下限の点線になる。すなわち、(3)式より、 $\pm \tan 4^\circ$ の幅で、地すべり崩土の拡散範囲を予測するための値を設定できるものと考えられる。これは地すべり崩土の拡散範囲を予測するとき、平均値のみならず、最大および最小拡散範囲を予測することはより意味の大きいことと思われるからである。

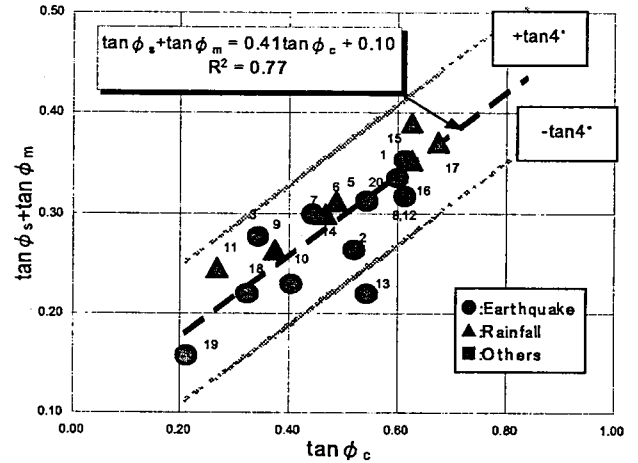


図-3 静的と動的摩擦係数との関係

崩土の拡散範囲予測の方法および手順を提案する。まず、二次元断面で臨界すべり面を求め、このすべり面の静的摩擦係数を求める。次に、すべり面の形状と斜面の地質・地形を考慮しながら崩壊範囲を決める。そして、式(3)を用いて、平均的な動的摩擦係数を求める。この動的摩擦係数に予測幅を考慮して、崩土の最大および最小摩擦係数を求める。さらに、三次元地形データを用いて、本モデルを利用し、崩土の最大および最小拡散・堆積範囲を計算する。

参考文献

- Nakamura, H., Tunaki, R., Ishihama, S. (1989): Simulation model for debris movement of landslide, Proceedings of the Japan-China Symposium on Landslides and Debris Flows, Niigata, pp.81-86.
 郎 焯華・中村浩之 (1997) : 地震による崩壊の特徴とそのモデル斜面における理論的解析—中国永登地震を例として—, 地すべり, Vol. 34, No. 3, pp. 25-33.