

実例及びシミュレーションを基にした地滑りを支配する主要パラメータの抽出

東京大学大学院 学生会員 ○福永 勇介  
 東京大学大学院 正会員 小長井 一男  
 東京大学大学院 正会員 Jörgen Johansson  
 東京大学大学院 正会員 沼田 宗純

1. 研究の前提及び目的

巨大地震に見舞われた地が深刻な被害を受けるか否かは、その表層地盤の地質的・地形的特徴に深く根差している。その中でも、日本で1964～1981に生じたM7.0以上の地震による死者の半数以上は地滑りに依るものである (Kobayashi(1981))。

地質学的な特徴を捉える為に被災地ではボーリングや地滑り土塊からのブロックの切り出しが行われ、数少ない標本から多くの物性パラメータが得られるものの、それはあくまで各地点での情報に過ぎずそれを補間・補外しその辺り一帯の地盤が同等の物性を有するものとして解析を行っている。一方、地形の調査も行われてはいるが、何が原因となりどの様に現地勢が形成されたのか(地滑り前後による地形の変化等)の情報しか得られないせいか地質調査の方が優先され参考程度に留まっている。結果、様々な報告書において地形の特徴を説明するのに殆どページが割かれていない。

これを受け、本稿は地滑りのリスク評価の為に地滑りを支配する実測可能な主要パラメータが一体何であるかを見出す事を目的として、地滑りの速度及び等価粘性係数、そして最終到達距離について考察を行うものである。

2. 流動化した地滑りの速度及び等価粘性係数の推定

地滑り土を非圧縮性のNewton流体と見做し、流化時に建物の壁等に付いた泥撥ねが放物運動に従う事からこれを基に地滑り土の流化速度を推定し、延いては等価(流動化した土をNewton流体と見做したという意味での等価)粘性係数を抽出する事を試みた。

ここでは2003年5月26日の三陸南地震(M7.0)によって生じた築館の地滑りを例に考える。ここは丘に切り込む様な谷地形になっており、1962年以來の開墾により土で埋め戻された軟弱地盤であった。その為、

今回丁度その谷に沿う様に、平均勾配6, 7[deg.]を持って水平方向に180[m],鉛直方向に27[m]に渡り地滑りが生じている。ここで、地滑り土塊の運動について考えると、支配方程式は(1)で表される。

$$\rho g \sin \theta + \mu \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} = 0 \tag{1}$$

ここに、 $\rho g$ :単位体積重量;17[kN/m<sup>3</sup>], $\theta$ :斜面の傾斜角;2.32[deg.],  
 $v$ :流化速度, $\mu$ :等価粘性係数

図1に示す泥撥ねが観測された地点では地滑り土塊の深さが $H = 1.2$ [m]に達し、流化速度が $v = 3.0$ [m/s]となったので $\mu$ は(2)のようになった。

$$\mu = \frac{1}{2v} \rho g H^2 \sin \theta = 4.1 \times 10^3 \text{ [Pa} \cdot \text{s]} \tag{2}$$

この粘性係数は中空振り剪断試験による砂質土の1/10～1/100と小さく、殆ど傾斜の無い緩斜面でさえかなりのスピードをもって長距離流下する可能性を秘めている事が分かった。

速度の推定に用いた泥撥ねは地滑りが生じた領域の東端、言わば支流から求めたものなので、もし同等の等価粘性係数が本流で観測されれば(2)より速度は地滑り土塊の深さの二乗に比例する事から、本流では支流の約2倍の速度即ち7～8[m/s]に達したものである。

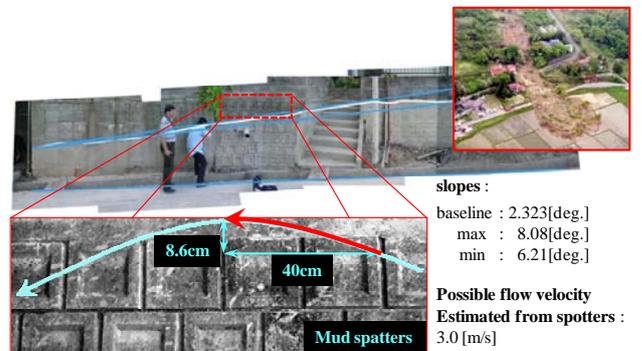


図1 擁壁に残った泥撥ね(築館)

keyword 泥撥ねから推定した流化速度 $v$ , 等価粘性係数 $\mu$ , MPM, 形状維持可能な負荷限界 $F$

連絡先 〒153-8885 東京都目黒区駒場4-6-1 生産技術研究所 Bw-206 小長井研究室 TEL 03-5452-6098

**3. 粘着力を持つ地滑りの最終到達距離を支配する主要なパラメータの抽出**

地滑り全体を要素試験とするアナロジーから地滑り後の土塊形状が剪断強さに関連するものと考え、擬三次元のMPM(Material Point Method)を解析スキームとする地滑りのシミュレーションを行った。

**3. 1 MPMの概要**

兼ねてより大変形する土の解析スキームとしてFEM・FDMベースのものが広く用いられて来たが、格子が著しく変形し計算が破綻する為うまく追跡する事が出来なかった。又、流体解析を目的としたCFDには履歴依存の構成式を用いておらずFVM等の格子法によるものが主流であり同様の問題がある。そこで移流項を粒子でその他の項を格子で計算するmesh-freeなPIC(Particle-in-Cell; Harlow(1955))を固体力学に応用した(Sulsky et al(1994))のがMPMである。MPMでは粒子が全ての物理量を格子を飛び越えて移動し、格子節点はタイムステップ毎に定位置に戻される為大変形に於いても格子の罫れは解消される。

**3. 2 MPMによる解析とその結果**

図2の様に地滑り土塊の初期長さ $L_{2,ini}$ ( $L_{1,ini} = 0$ )のみ変化させて、表1に示すパラメータを用いて地滑り終了迄の $L_1, L_2$ を逐次計算したところ図3のようになった。

地滑り開始後暫くは地滑り土塊は $L_1 + L_2 = L_{2,ini}$ をほぼ満たしながら運動するが、先端が水平な面に達すると達した部分は斜面より大きな摩擦力を受けて鈍くなり且つ運動方向に重力を受けないので追随する土塊に押され、形状を維持可能な負荷限界 $F$ に達し土塊全長は収縮する( $L_1 + L_2 < L_{2,ini}$ )。そして解析の結果、 $L_1, L_2$ には限界値 $L_{1,ult}, L_{2,ult}$ が存在する事が分かった。 $L_{1,ult}$ の存在は、初期長さ $L_{2,ini}$ が限界値 $F$ に関係せず最終到達距離に上限が有る事を示唆している。同様に $L_{2,ult}$ の存在は $F$ の存在からの当然の帰結と言える。

次に、地滑り土塊の初期幅を変化させて逐次計算を行った結果、図4のようになった。この図に於ける限界値 $F$ への到達後のグラフの傾き $dL_2/dL_1$ は初期幅が広い程緩やかになっている。これは、以下の様に説明出来る。 $dL_2/dL_1$ に水平面、斜面上夫々の土塊の断面積を乗じると $-dV_2/dV_1$ (ここに、 $dV_1, dV_2$ は水平面、斜面上夫々の土塊の流量を表す)となるので、 $dV_2 - dV_1$ は傾斜の変わり目周辺で孕んだ土塊の流量を表す。従って、 $dL_2/dL_1$ がより緩やかになるのは、 $dV_2 - dV_1$ がより大き

くなる事により初期の限界値 $F$ に到達した後でも僅かながらも $F$ が増加していく為であると考えられる。

表 1 MPMシミュレーションに用いたパラメータ

MPM parameters	cell size	0.2×0.2 [m]
	initial arrangement of particles in a cell	2×2
	time increment	5.0×10 <sup>-4</sup> [s]
sliding surface	slope angle	20 [deg.]
	frictional angle $\mu_1, \mu_2$	0.2, 0.8
landslide mass	Young's modulus	2.0×10 <sup>6</sup> [s]
	specific density	1,600 [kg m <sup>-3</sup> ]
	Poisson's ratio	0.3
	internal friction angle	30 [deg.]

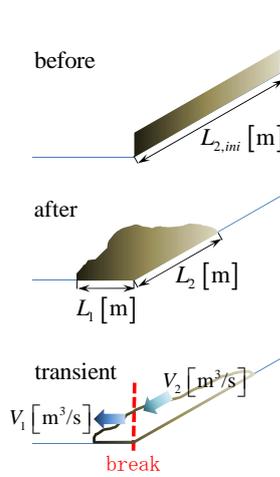


図 2 地滑りの模式図

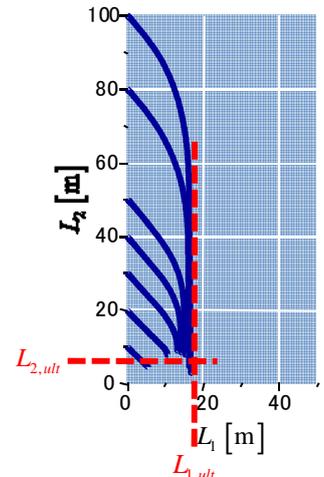


図 3  $L_1, L_2$ の時系列 (初期長さ別)

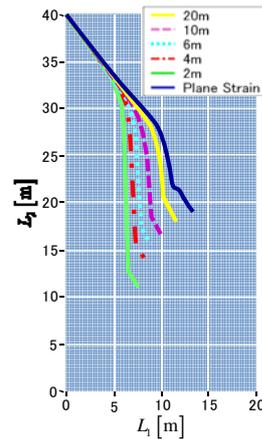


図 4  $L_1, L_2$ の時系列 (初期幅別)

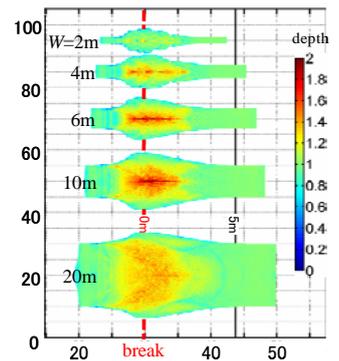


図 5 地滑り後の土塊形状

reference

Sulsky, D., Z., Chen, and H. L., Schreyer: A particle method for history dependent materials, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, **118**, 179-196, 1994.