

地震による斜面崩壊到達距離推定のための 擬似三次元ラグランジアン粒子有限差分法

Pseudo-Three Dimensional Lagrangian Particle Finite Difference Method for Evaluation of Distal Ends of Earthquake-Induced Landslides

沼田 宗純*・小長井 一男*

Muneyoshi NUMADA and Kazuo KONAGAI

1. はじめに

2001年1月13日、エルサルバドルの南岸沖で発生した地震は、およそ108,000の家屋を倒壊させ、少なくとも944人の命を奪った。この地震の死者の7割以上に相当する730人の犠牲者は、サンサルバドル市郊外のたった1箇所斜面崩壊によるものである¹⁾(図1)。この斜面崩壊は、1984年の長野県西部地震での御岳崩れのように、火山性碎屑物が崩壊したものである。火山性碎屑物が崩壊すれば、その土砂は極めて長距離を流下し被害を拡大する。地震が関わったものとしては、長野県西部地震の御岳崩れの他にも1970年のPeru地震でのワスカラン山(Mt. Huascaran, 6,700 m EL)の山腹崩壊が特筆すべきものである。2,000万 m^3 もの土砂がワスカラン山腹を流下しYungayの町は完全に土砂に埋まり、20,000人を超える人の命が奪われた。

予測される斜面崩壊の規模がさして大きくない場合には、亀裂開口のモニタリング、不安定な土砂の削ぎ落とし、斜面保護工、アンカーや抑止杭の打設、排水工の整備など

の対応が有効である。しかしその規模が著しく大きい場合には、すべりそのものを止めること自体が極めて困難である。その場合には、崩壊土砂がどの程度の量に達しどこまで流下するかを予測することが重要になる。

斜面崩壊のプロセスを、①危険斜面の抽出、崩壊発生の有無、②運動形態、土砂到達範囲の解明、という2段階に分ける。①は地質調査から得られる地形、植生分布、地下水位をもとに、古典的な安定解析を行うことで判断できる。ところが、②を行うためには、制約の大きい地質調査結果を用いて、固相・液層・気層が混在し、それらの相互作用が全体挙動の特徴を複雑に変化させていく斜面崩壊の一部始終を解析することが求められるのである。

本研究は、新たにKonagaiら^{2,3,4)}が構築しつつある地盤の大変形解析法LPFDM(Lagrangian Particle Finite Difference Method)をプラットフォームとして現地計測可能な情報を用いて、長距離斜面崩壊を記述できるモデルの構築を目指すものである。

2. LPFDM

一般的に変形の記述法には、ラグランジュ式記述とオイラー式記述がある。ラグランジュ式記述は物体とともに移動していく座標系で計算が行われ、要素が物体に直接対応しているため、複雑な構成関係式をもつ地盤解析に適している。

一方、オイラー式記述は空間に固定された座標系で計算が行われるため、水などの流れを解析するのに適している。

Sulsky⁵⁾はこのオイラー式記述で、固体の変形を記述することを試みた。この手法はMPM(Material Point Method)と呼ばれるもので、解析対象となる物質を多数



図1 Las Colinasの斜面崩壊(2001)

*東京大学生産技術研究所 人間・社会部門

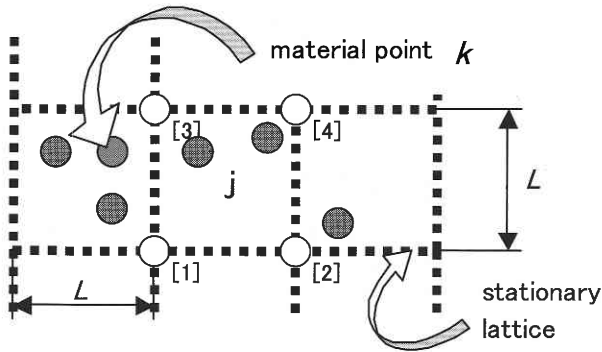


図2 オイラー格子 (破線) とラグランジュ粒子群

の粒子 (ラグランジュ粒子群) で表現する. これらの粒子は物質の情報 (ラグランジュ変数) を持ち運び, 空間に固定された矩形格子 (オイラー座標) 間を自由に動き回ることによって変形を追跡する (図2). 粒子によって運ばれたラグランジュ変数 (位置, 質量, 応力, ひずみ, 間隙水圧などのあらゆる物質情報) は一定時間さざみごと, 粒子の存在する格子に投影される. それらは形状関数を用いることで, 矩形格子の節点 (計算点) に集約されていく. そしてこの格子点で運動方程式を解くことで, 次の時間ステップでの格子点の変位増分が計算される. このとき, 格子は粒子を載せながらわずかに変形することになりラグランジュ変数も更新される. 変形した格子は次の計算サイクルに備え, 移動した粒子をその位置に残し, 再び元の位置に戻される.

LPFDM は地盤の変形解析で多用されている FLAC (Fast Lagrangian Analysis for Continuum) を MPM の解析スキームに投影したもので, FLAC の簡便さを損なうことなく, 著しく大きな変形までの解析が可能となる.

3. 斜面崩壊モデル

ここで紹介する斜面崩壊モデルは基本的には LPFDM と同じであるが, 計算格子 (水平面で正方形格子) が斜面上に投影されている点が異なる (図3). 計算はこの投影された格子上で行われることになる. 水平面上では正方形の格子も, この斜面上ではもはや正方形の形をとどめない. 一般に曲面上への投影であるから, 投影された要素も平面を保持しないが, この要素と周辺の要素がおおよそ同一平面 (面) 上にある程度小さく取られているとすれば, 面上の運動方程式は容易に解くことができる.

この斜面崩壊モデルでは, 表層移動体は大きく移動・変形することが可能なラグランジュ粒子群 (図3中の面上の粒子) によって表現されている. すなわち移動する地すべりブロックはこの面上に広がるマットのような非線形の2

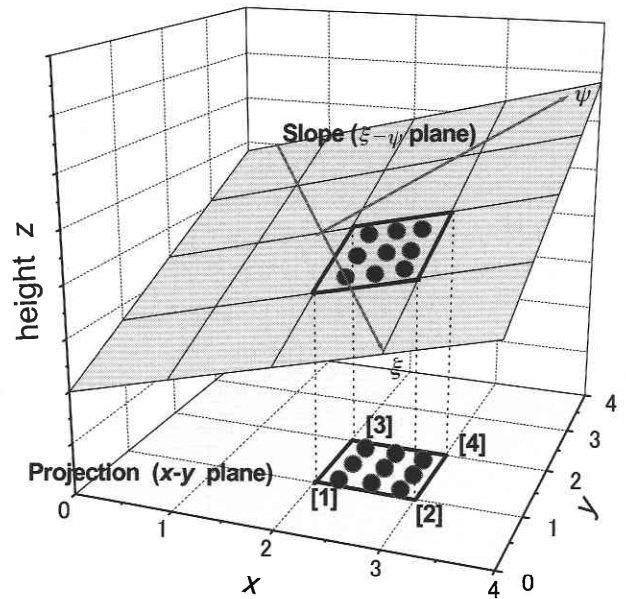


図3 オイラー格子 (x-y 座標系) の斜面 ($\xi-\psi$ 面) 上への投影

次元曲面体でモデル化していることになる. したがって, このブロックが崩壊過程で当初の形状を大きく崩していく場合でも, その一体性は保たれている.

このようなモデル化は, 攪拌の度合いの大きな斜面崩壊までも記述するものではないが, 斜面のマス・ムーブメントを記述するパラメータを以下の3つのデータセットとしてまとめていることになる.

- (1) 地形 (等高線情報)
- (2) 滑り面の物性
- (3) 地すべりブロックの面内変形を支配する物性

これらの中で (1) は容易に計測できる. そして, 得られた標高データをオイラー座標系 (図2における平面) の格子点に与えることで, 地形 ($\xi-\psi$ 面) を表現することができる. (2) の滑り面の物性も, 滑落崖近くなど滑り面が露出している場所があれば, サンプルの採取は容易であり, 必要な物性値を高速リングせん断試験などで得ることができる. (3) を評価するのがもっとも困難であるが, 例えば当該地域の近隣で過去に発生した地すべりブロックの変形パターンは地表で観察可能であるから, これを自然の大規模なせん断試験と見なすことで, 適切なパラメータを推定できると期待される. このように地すべり土塊を2次元マットと見なすモデル化はその表面が植生で覆われ, それらの根のマトリックスが土塊を板状体としている状況で特に有効であろうと思われる.

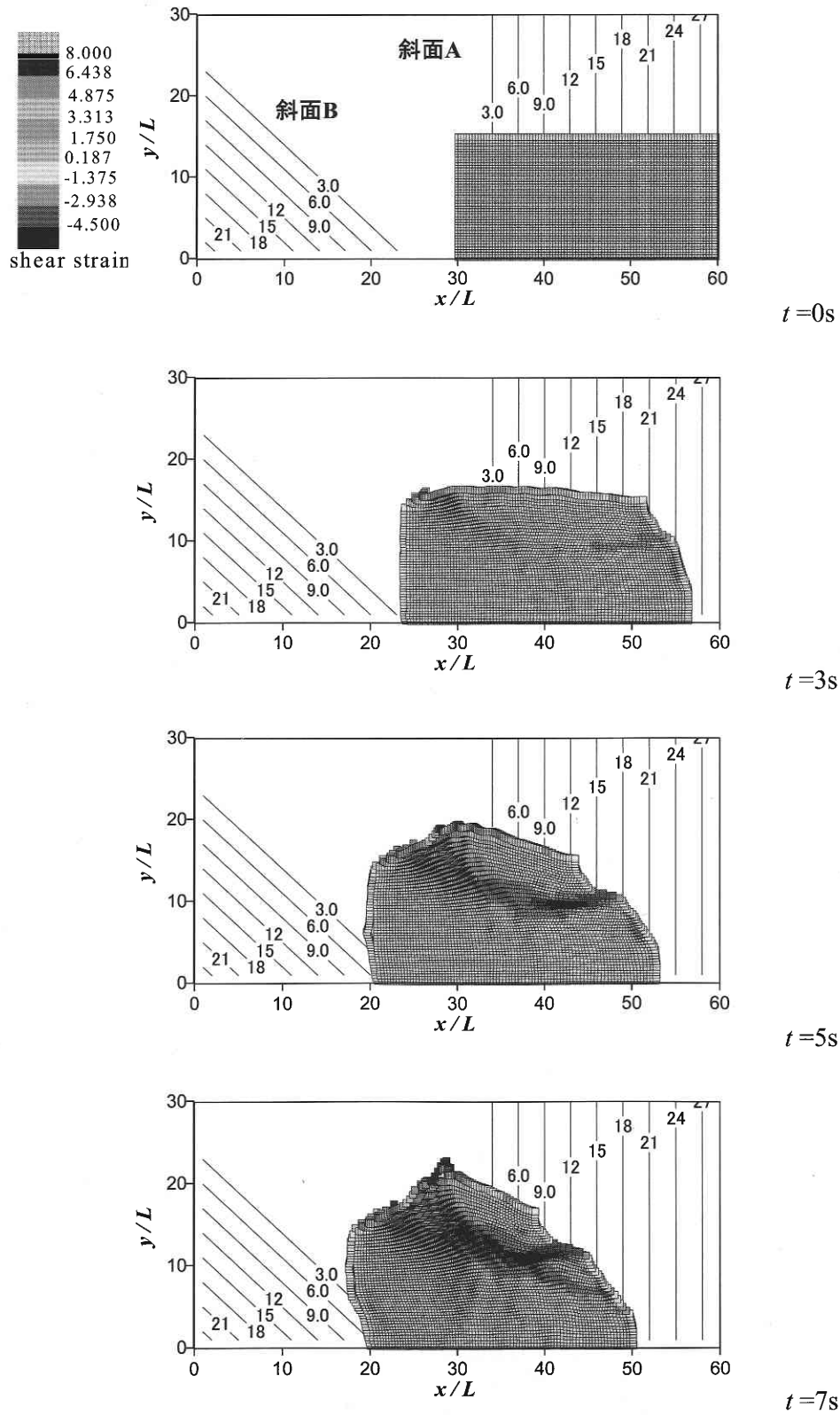


図4 斜面崩壊のシミュレーション例 (x-y水平面への投影)

表1 地すべりブロックの物性値 (Lagrangian parameters)

ヤング係数:	$5 \times 10^7 \text{ N/m}^2$	粘着力 c :	9800 N/m^2
Poisson 比:	0.30	強度低減: ピーク強度到達後の ϕ , c の低減	50%
密度:	1700 kg/m^3	滑り面上の初期摩擦角	0.5 rad
内部摩擦角 ϕ :	0.5 rad	Cundall の local non-viscous damping 係数	0.8

4. 斜面崩壊シミュレーション

斜面崩壊のシミュレーション例を以下に示す。表1は地すべりブロックの物性値である。2次元曲面格子に配置されたラグランジュ粒子群の構成式には適切なものを使えばよいが、ここでは移動土塊は単純な Mohr-Coulomb の破壊基準に従うものとし、この基準を記述する2つのパラメータ、すなわち、粘着力と内部摩擦角はラグランジュ粒子ごとにばらつきを持たせ、全体としてなめらかな応力・歪関係を再現するようにした。

既に前節で述べたように、この手法ではあらゆる地形を表現することが可能であるが、ここで例示する斜面は限られた数の平面の集合で表現されている。空間的に交わる複数の平面のなかで最上面が地形を規定するものとするれば、自動的に標高データを作成でき大幅に入力の手間を省くことができるからである。

図3 (a) - (e) はこの斜面の平面図を示す。図中の等高線は、この図の左下から右上に向かって下り勾配の斜面 A と、右から左に向かって下り勾配の斜面 B が近接している状況を示している。この斜面 A に整然と配置されたラグランジュ粒子 (図3 (a)) は瞬時に重力場に置かれ、自重によって斜面を滑り始める。地すべりブロック末端が平坦部に差し掛かりスピードを落とすと、これが後続の土に押される形になるが、側方に地形の拘束がないので、次第にはらみだすように側方へ広がっていく。ブロック先端が斜面 A に到達すると地すべりはその進行を妨げられ、幾分斜面 A に乗り上げるものの、次第にその向きを左上に転じていく。

5. ま と め

LPFDM を解析のプラットフォームとして、地すべりブロックを2次元マットでモデル化した斜面崩壊解析のスキームを提案した。提案されたモデルでは水平面上に固定さ

れたオイラー正方格子が斜面上に投影されている以外は本来の LPFDM となら変わりがない。しかし大きく移動し変形する土塊の動きを、格子の制約がなく自由に動くことのできるラグランジュ粒子群で表現し、一方滑り面の標高を空間に固定されたオイラー格子点に固有なデータとして与えるなど、極めて計算効率の高いスキームになっている。さらに入力データセットが現実の斜面の調査で確認しやすい形に整理されており、この点でも、長距離流動土砂崩壊の解析に適したものであるといえる。ここに紹介したシミュレーションではモデルの潜在能力の高さを示すことができたが、今後地すべりマットの厚みの変動を考慮し、土塊のレオロジーの変化の影響を記述できるような改良を加えた上で、過去の崩壊事例を検討していく予定である。

(2002年10月15日受理)

参 考 文 献

- 1) Konagai, K. *et al.* [2002], Las Colinas landslide caused by the January 13, 2001 Off the Coast of El Salvador Earthquake, *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, 2 (1), 1-15.
- 2) Konagai, K. and J., Johansson [2001], Two Dimensional Lagrangian Particle Finite Difference Method for Modeling Large Soil Deformations, *Structural Eng./ Earthquake Eng.* 18 (2), 91s-95s.
- 3) Konagai, K. and J. Johansson [2001]. "Lagrangian Particles for Modeling Large Soil Deformations." *Proc., Seismic Fault-induced Failures*, Konagai *et al.* eds., IIS, University of Tokyo, 99-106.
- 4) Konagai, K. and M., Numada [2002], Pseudo-three dimensional Lagrangian Particle Finite Difference Method for modeling long-traveling soil flows, *Journal of Japan Society of Dam Engineers*, 12 (2), appearing.
- 5) Sulsky, D., Chen, Z. and Schreyer, H. L. [1994]: A particle method for history dependent materials: *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 118, 179-196.