

大規模斜面崩壊時の地盤振動特性に関する数値実験及び室内実験による比較と検討

和歌山県土砂災害啓発センター

国土交通省近畿地方整備局大規模土砂災害対策技術センター

株式会社エイト日本技術開発

国土交通省国土技術政策総合研究所（大規模土砂災害対策技術センター）

国土交通省国土技術政策総合研究所

○筒井和男

北本楽

海原荘一・高田隆行・谷田佑太

木下篤彦

金澤瑛・中谷洋明

1. はじめに

防災科研のHi-net、F-net や国土交通省の高感度の地震計による観測網を用いた大規模土砂移動の発生検知は、新しい災害監視手法として重要なものである。大規模土砂移動現象が発生する振動特性については、既往研究より知見が蓄積されつつ¹⁾あるが、発生頻度が稀であることから、十分な観測が行われているとは言えない。そこで筆者らは、大規模土砂移動の再現を目指して、室内振動実験を実施している²⁾。しかし、地盤振動を対象とした相似則は確立されておらず、定性的な議論にとどまっている。海外でも地盤振動を用いた斜面移動現象の検知に関する研究³⁾は近年盛んに行われているが理論的考察や数値実験を用いた事例は少ない。そこで、本稿では斜面崩壊とそれに伴う地盤振動の発生、さらに広域的な地盤振動の伝播を再現する数値実験を試みたので報告する。

モデルの検証のため室内実験で得られた振動特性の再現性を検討し、その後、2011年の奈良県赤谷地区での深層崩壊を対象として広帯域地震観測網F-net 野上観測局での観測記録との比較を行った。

2. 数値モデルの概要

①土砂移動②地盤振動の生成（赤谷地区崩壊モデル）③地盤振動の伝播（広域伝播モデル）の3つに大別した数値計算モデルを構築した。

①は、個別要素法による粒状体挙動解析コード（米国ITASCA社製PFC）の3次元コードを用いた。基本要素としての粒子を使って、運動方程式と力の変位の関係式とを交互に陽的に解くことで、土砂移動の計算を行った。②と③は、連続体のラグランジアン解析プログラム（米国ITASCA社製FLAC3D）を用いた。地盤を4面体の組み合わせで表現し、時間方向に差分法、空間方向に有限体積法を用いて離散化したものである。これらのモデルを組わせて、PFCにより斜面の土粒子の流れを計算し、個々の粒子の速度、変位を求め、接触点での力と変位の関係式からFLAC3Dモデルの境界条件として入力を与えて、地盤振動の生成とその電波を計算した。一方で、FLAC3Dモデルとの接触点での力を粒子に適用し、これにより粒子の速度を変位を求めた。これらの計算を時間ステップごとに行うことで、モデルのカップリングを行った。

①と②の初期の粒子配置とメッシュ分割図を図-1に示す。PFC粒子の配置は深層崩壊発生前後のLPデータより地形を反映して実施した。東西1.7km、南北1.9kmである。③広域伝播モデルのメッシュ分割図を図-2に示す。基盤の速度構造は、J-SHISの深部モデルV3.2を参照した。東西50km、南北30km、深さはTP-10kmである。

3. 結果と考察

3.1 室内実験の再現結果

数値計算の妥当性を検証するため、室内水路実験の再現計算を実施した（モデル概要図は略）。PFCで礫を流下させ、FLAC3Dで水路をモデル化した。流下状況の比較を図-3に示す。地盤振動の波形スペクトルを比較したところ、概ね数値実験により再現できることが分かった。

3.2 土砂移動現象の再現結果

赤谷地区の深層崩壊の土砂移動プロセスは明確には分かっていない。しかし、地盤振動観測データは2つのピークを示していることから連続して2回に別れて崩壊が発生した可能性があり、本研究でも上下の2つのブロックに

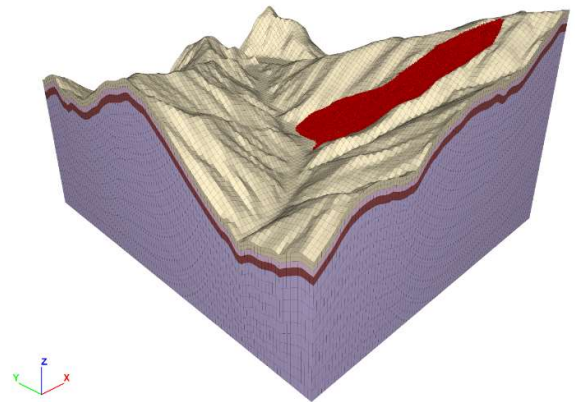


図-1 赤谷地区崩壊モデルのメッシュ分割図。

斜面の赤い粒子はPFC粒子を表す

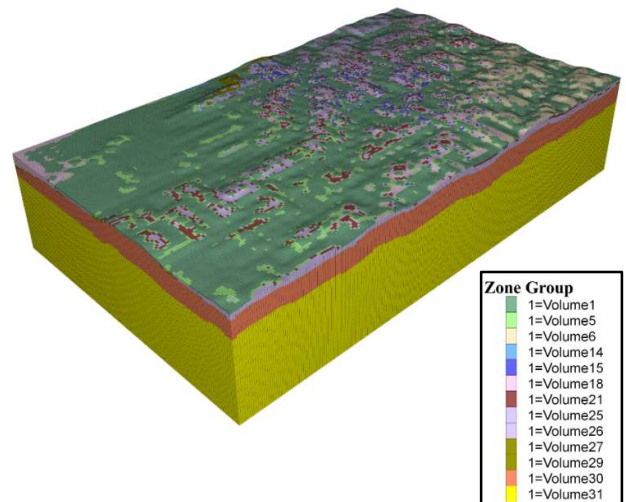


図-2 広域伝播モデルのメッシュ分割図

分かれて崩壊させる計算を行った。

下方の土塊が先行して崩壊した計算結果と崩壊前後の実測（LP）データとの比較を図-4 に示す。対岸への土砂の乗揚げが再現できていないものの、概ね崩壊後の地形を再現することができた。

3.3 地盤振動の再現結果

F-net 野上の位置に最も近い地表ノードの1つ下の加速度波形を求めた。100Hz でサンプリングし、このデータから速度、変位等を求めた。低周波フィルター（0.01~0.1Hz）を通した後に波形とパーティクルモーションの計算値と実測値を比較すると、上下成分と南北成分で良好な再現結果が得られた（図-5, 6）。高周波（1Hz 程度以上）の速度波形に関しては振幅で計算値が実測に比してかなり大きいものであった。スペクトルも高周波成分が大きくなった（図-7）。高周波成分は土砂移動モデルの不連続性のためインパルス的な入力による影響の可能性もあるが、本モデルでの再現は困難であった。しかし、既往研究において、低周波波形によるインバージョンにより土砂の重心移動が求められるとされているが、それと整合性のある結果を得られた。

4. おわりに

実現象の観測が困難な大規模土砂移動現象の数値実験による再現を試みた。個別要素法と有限体積法モデルと組み合わせ、広域での地盤振動の伝播の再現が可能か検証した。個別要素法による土砂移動の再現計算は実測データを概ね再現できた。地盤振動の広域伝播も低周波側での波形を概ね再現することができた。今後も検知技術の向上に向けて検討を深めていきたい。

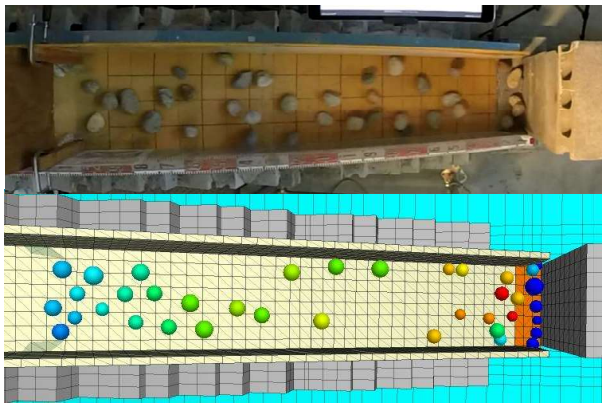


図-3 室内実験と再現モデルの比較。流下開始 1.5 秒後

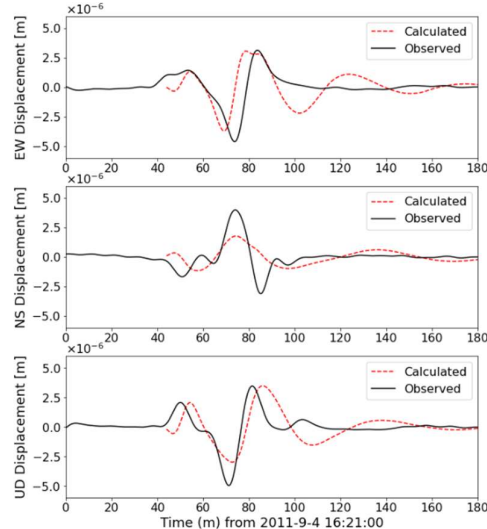


図-5 Fnet 野上での低周波変位の実測波形と計算波形。

上：東西成分、中：南北成分、下：上下成分

参考文献

- 1)海原ほか：高感度地震観測網による大規模土砂移動発生時の地盤振動特性と検知，砂防学会誌，2021
- 2)筒井ほか：土砂移動時の地盤振動の再現—模型実験からの考察—，砂防学会誌，2021
- 3)Burtin et al.: Seismic monitoring of torrential and fluvial processes, Earth Surface Dynamics, 2016

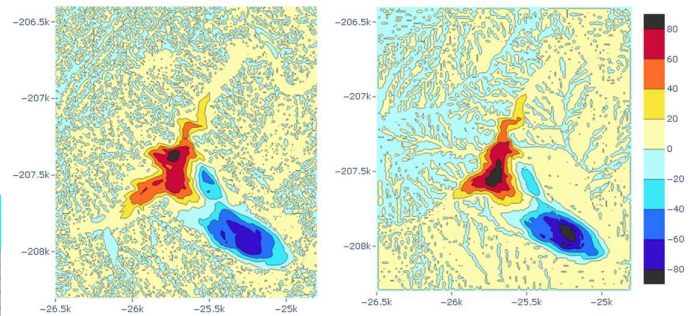


図-4 赤谷地区の地形変化。左：実測、右：計算結果

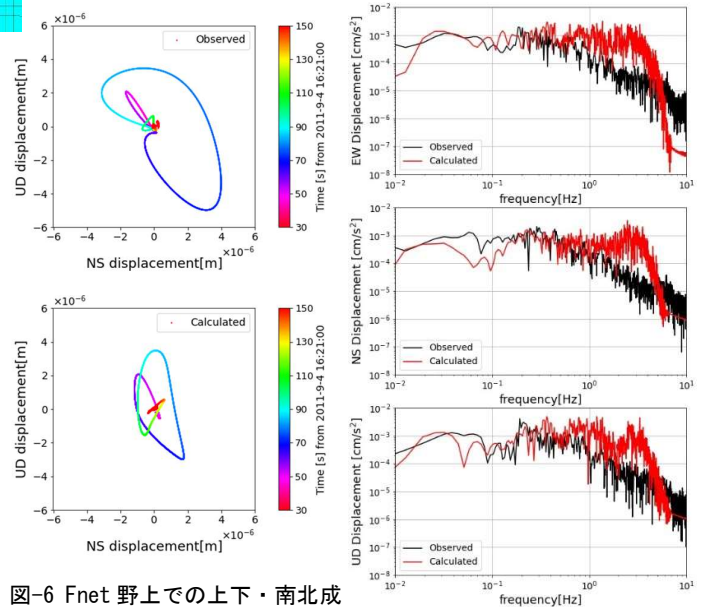


図-6 Fnet 野上での上下・南北成分のパーティクルモーション。

上：実測、下：計算結果

図-7 速度スペクトルの比較。上：東西成分、中：南北成分、下：上下成分