

# 層理面に沿った地震時斜面崩壊の数値シミュレーション

## Numerical Simulation for the Slope Failure along a Bedding Plane during Earthquake

樋口邦弘\* (株黒岩測量設計事務所), 若井明彦 (群馬大学),  
鵜飼恵三 (群馬大学), 尾上篤生 (長岡工業高等専門学校)

Kunihiro Higuchi (Kuroiwa Sokuryo Sekkei Co., Ltd.), Akihiko Wakai (Gunma University),  
Keizo Ugai (Gunma University) and Atsuo Onoue (Nagaoka National College of Technology)

キーワード : 地震, 斜面安定, すべり面, 層理, 弾塑性 FEM

Keywords : Earthquake, Slope Stability, Slip surface, Bedding, Elasto-plastic Finite Element Method

### 1. はじめに

著者らは 2004 年新潟県中越地震 (M6.8) により発生した各種斜面崩壊について調査を行っている。本論文では, 小千谷市横渡地区の斜面 (**写真-1**) で発生した平均深さが数 m の平面すべり面を持つ大規模岩盤崩壊を対象とした, 二次元動的弾塑性 FEM による解析事例を紹介する。本崩壊は固結シルト中に存在する薄い凝灰質砂層の層理面がすべり破壊を生じたことにより発生したものと推定される。

今回対象とする地点, すなわち小千谷市横渡地区においては, 信濃川とほぼ平行する北-南の走向を示す白岩層が信濃川に向かって  $20^\circ$  前後で



**写真-1** 解析対象とした斜面 (小千谷市横渡)。

傾斜するいわゆる“流れ盤”構造をなしている。本斜面の崩壊機構などに関する考察は文献 (尾上他 (2005), 鵜飼他 (2005)) を参照されたい。

### 2. 動的弾塑性 FEM 解析

#### 2.1 解析モデル

現場の測量結果に基づき推定した崩壊土塊の三次元形状をみると, すべり土塊の北側 (土塊の移動方向に対して向って右側) で最も薄く, 逆に土塊の南側で最も厚い。解析対象とした二次元断面は, これらの厚さの中間的な厚さを有する位置を基本とした。これらの幾何学形状や解析用に生成した二次元有限要素メッシュ (8 節点要素) を **図-1** に示す。端部に無限境界を用いていないため, 解析領域側方の領域をやや広めに設定してある。解析領域全般が白岩層で構成されていると仮定し, 実際にすべった面の位置に層理を表現するための薄い要素 (5cm 厚) を配置した。崩壊地点の直下の信濃川手前の表層は砂礫層に覆われていると仮定した。

材料定数は土質毎に一般的によく用いられる値を仮定した (**表-1**)。なお層理面のせん断強度 (ピーク強度) の設定に際して, 極限平衡法に基づく検討の結果 (尾上他 (2005)) を参考にした。この妥当性については今後検討が必要であろう。解析では白岩層を弾性体, 層理部分を弾-ひずみ軟化モデル (若井他 (2005)), 砂礫層を弾完全塑

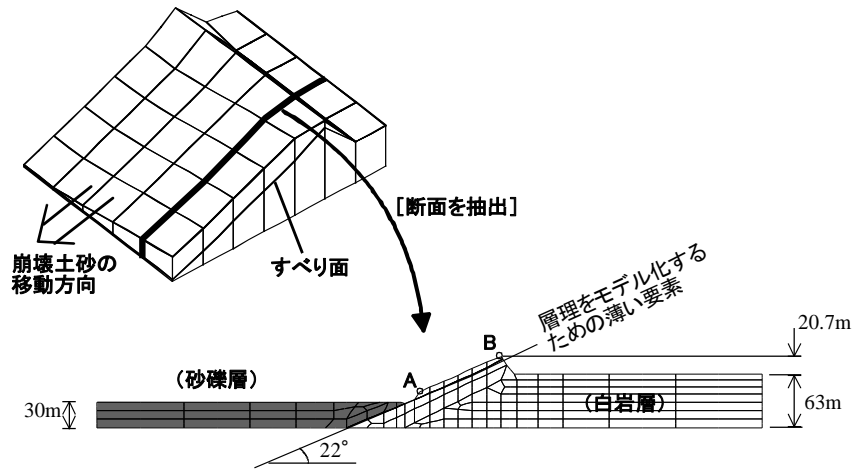


図-1 すべり土塊の三次元形状と二次元有限要素メッシュ.

表-1 解析に用いた材料定数の一覧 (基本ケース).

	ヤング率 $E(\text{kN/m}^2)$	ポアソン比 $\nu$	粘着力 $c(\text{kN/m}^2)$	内部摩擦角 $\phi(^{\circ})$	ダライタシ角 $\psi(^{\circ})$	単位体積重量 $\gamma(\text{kN/m}^3)$
白岩層	100000	0.3	—	—	—	18
層理面	10000	0.3	50(ヒーク強度)	0	0	18
砂礫層	10000	0.3	0	30	0	18

性モデルと仮定した。簡単化のため、ひずみ軟化材料におけるせん断帯の幅の考慮は省略した。従って、層理面要素のひずみ軟化時の塑性化によるエネルギー消散は各要素内で均一になされると仮定している。Rayleigh 減衰の定数は、振動周期 0.2~2.0s で約 3%程度 of 粘性減衰を得るような値として、 $\alpha = 0.171$ ,  $\beta = 0.00174$  とした。入力地震波形として、山古志村竹沢での強震観測記録 (EW 成分: 図-2) をメッシュ下端に入射した。

## 2.2 解析結果①(層理面の残留強度を変えた一連の解析ケース)

層理部分のひずみ軟化特性を図-3 のように変化した 4 ケースの解析を行った。Case 1 はひずみ軟化をしない場合 (弾完全塑性モデル) である。Case 1 に関して、A 点と B 点の水平加速度の時刻歴を図-4 に示す。入力波形の最大振幅とこれらの振幅とを比較すると、A 点では約 2 倍、B 点では約 4 倍の加速度の増幅が見られる。

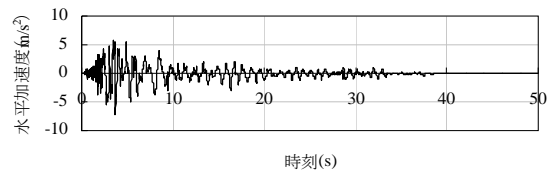


図-2 入力波形 (水平加速度時刻歴).

各ケースの解析で得られた A 点の水平変位の時刻歴を図-5 に示す。ひずみ軟化の顕著なケースほど、応答変位量が大きくなっている。また、Case 2, 3, 4 では地震後に変位増加が継続していることからわかるように、層理面上の土塊の滑動を抑止するために必要なせん断強度が、層理面上ではもはや発揮されておらず、残留強度状態に至っている。Case 4 の地震発生 50 秒後の残留変形状を 図-6 に示す。層理面に沿って不連続なすべり変位が生じている。

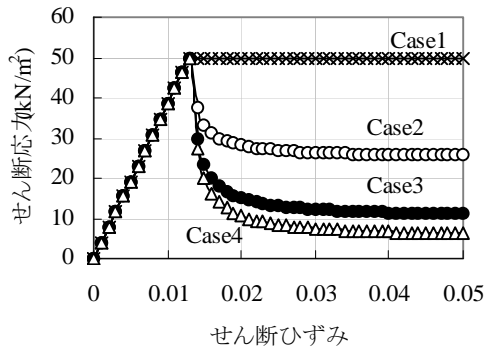


図-3 層理面の土の応力ひずみ関係.

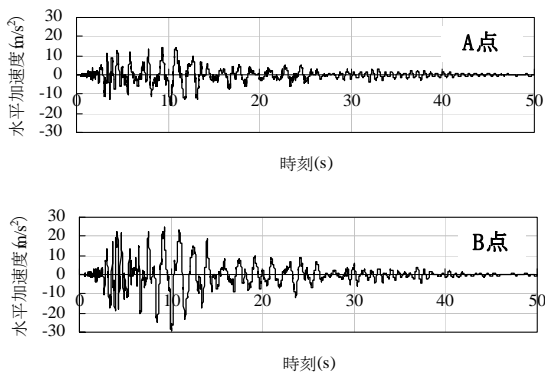


図-4 移動土塊における加速度増幅 (Case 1).

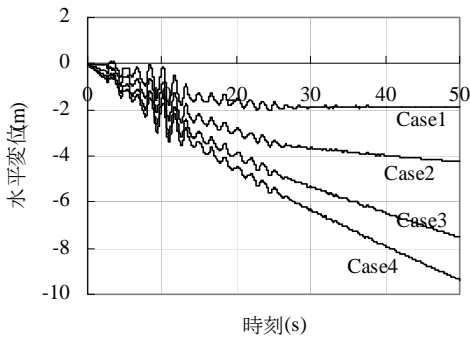


図-5 A 点の水平変位の時刻歴.

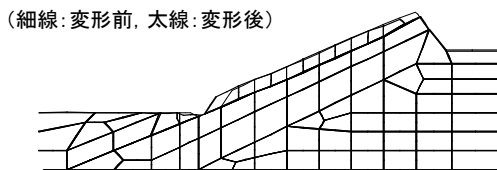


図-6 地震発生 50 秒後の残留変形状 (Case 4).

図-5 における土塊のすべり移動速度はいずれも実際の速度よりかなり小さい。この点について、パラメトリック・スタディにより検討を加える。次節以降では、層理面のピーク強度およびヤング率の大きさ、粘性減衰定数の大きさをそれぞれ操作した際のすべり量の変化を調べる。

### 2.3 解析結果② (層理面のピーク強度を変えた一連の解析ケース)

層理部分のピーク強度を変え (残留強度は  $5.0 \text{ kN/m}^2$  で一定), ひずみ軟化特性をそれぞれ図-7 のように変化させた 3 ケースの解析を行った。各ケースの解析で得られた A 点の水平変位の時刻歴を図-8 に示す。ピーク強度が極めて小さなケース (Case 6) では、地震初期におけるせん断剛性の小さいことが増幅率の低下をもたらし、Case 5 より若干小さい残留変位を得た。ピーク強度の大きさは残留変位の大きさにそれほど強く影響しないことがわかる。

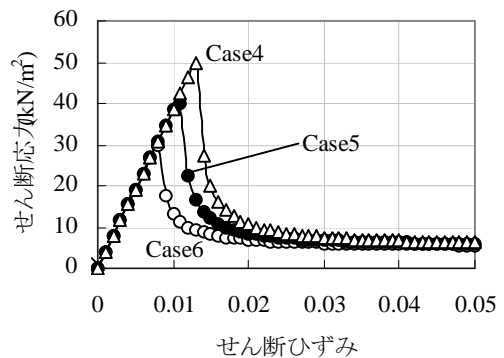


図-7 層理面の土の応力ひずみ関係.

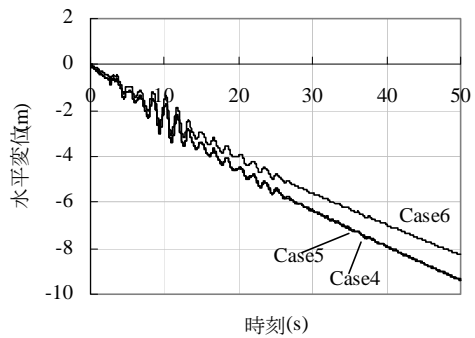


図-8 A 点の水平変位の時刻歴.

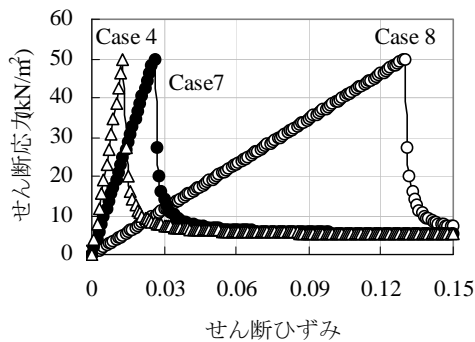


図-9 層理面の土の応力ひずみ関係.

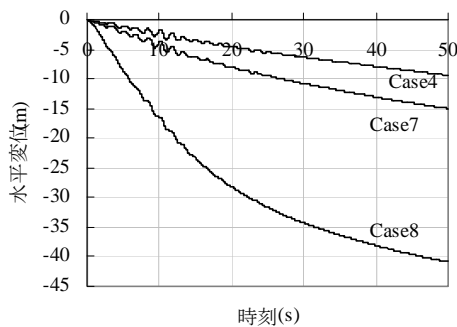


図-10 A 点の水平変位の時刻歴.

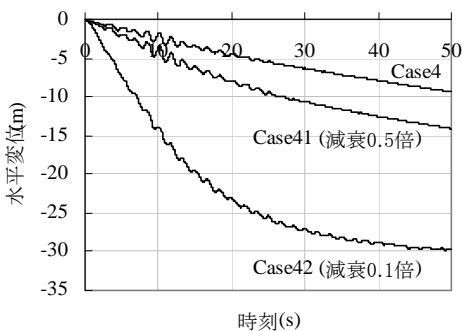


図-11 A 点の水平変位の時刻歴.

## 2.4 解析結果③（層理面のヤング率を変えた一連の解析ケース）

層理部分のヤング率を変え、ひずみ軟化特性をそれぞれ図-9のように変化させた3ケースの解析を行った。各ケースの解析で得られたA点の水平変位の時刻歴を図-10に示す。層理面のヤング率の低下に伴い、層理部分が変形しやすくなるた

め、残留変位はそれに対応して大きくなる。精度良い予測のためには、ヤング率の適切な設定が重要である。

## 2.5 解析結果④（粘性減衰の大きさを変えた一連の解析ケース）

Case 4において、Rayleigh 減衰の定数の大きさを0.5倍 (Case 41)、0.1倍 (Case 42) としたケースの解析を行った。各ケースの解析で得られたA点の水平変位の時刻歴を図-11に示す。粘性減衰の低下に伴い、残留変位は極めて大きくなるのが分かる。一方、移動し始めてからの速度については大きな違いが見られない。大規模な土塊移動現象をFEMにより再現する場合、粘性減衰の定数の選択は重要である。

## 3. まとめ

実際の現場では層理面上部の土塊が滑り落ちて大崩壊に至ったが、層理面のひずみ軟化特性を考慮した弾塑性構成モデルを用いたFEM解析により、これを再現することができた。

今後は、層理面のモデル化に用いるヤング率や減衰定数などの妥当性について、現場採取土の室内力学試験の結果などを踏まえて、さらに検討を進める必要がある。

## 参考文献

- 鵜飼恵三, 尾上篤生, 若井明彦, 樋口邦弘 (2005) : 中越地震時の地すべりの移動量に関する考察, 第44回日本地すべり学会研究発表会(印刷中).  
尾上篤生, 鵜飼恵三, 若井明彦, 樋口邦弘 (2005) : 新潟県中越地震における斜面崩壊と層理の強度, 土と基礎 (投稿中).  
若井明彦, 釜井俊孝, 鵜飼恵三 (2005) : 高町団地における盛土崩壊事例の有限要素シミュレーション, 宅地地盤の安全性と性能評価に関するシンポジウム論文集 (印刷中).