

# 斜面上の岩盤ブロックの振動台模型実験に対する数値シミュレーション

中電技術コンサルタント(株)	非会員	清田 亮二
中電技術コンサルタント(株)	正会員	岩田 直樹
中電技術コンサルタント(株)	非会員	足立 光
中電技術コンサルタント(株)	非会員	高橋 裕徳
琉球大学	正会員	藍壇 オメル
琉球大学島嶼防災研究センター	正会員	渡嘉敷 直彦

## 1. はじめに

主要な道路や原子力発電所などの重要土木構造物に隣接する岩盤斜面は、動的解析による耐震安定性評価が実施されている。この際、岩盤は均質な弾性体として評価されることが一般的である。しかしながら、岩盤の挙動は、内在する不連続面分布の影響を大きく受けた不連続体的な挙動を示すことが知られており、岩盤斜面の耐震安定性を適切に評価するためには、この不連続体的な挙動を適切に評価できる手法とプログラムの実用化が急務となっている。本研究では、琉球石灰岩で岩盤斜面を模した振動台実験結果<sup>1)</sup>を基に、有限要素法等により数値シミュレーションを行い、斜面上の岩盤ブロックの地震時挙動に対する適用性について検討を行った。

## 2. シミュレーション手法

本研究では、以下に示す Newmark 法、有限要素法 (FEM)、不連続変形法 (DDA) の 3 手法により、振動台模型実験のシミュレーションを行った。なお、何れの手法も解析モデルサイズは実験模型と同サイズとしている。実験装置の概要は写真-1 に示すとおりである。

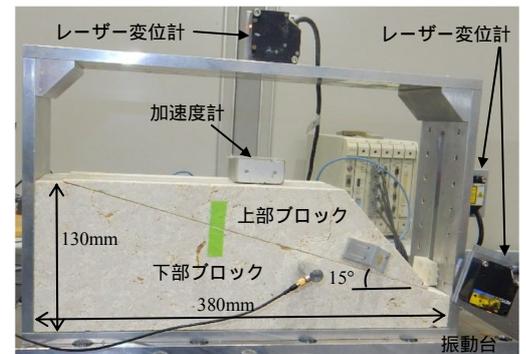


写真-1 振動台模型実験装置

### (1) Newmark 法

不連続面の滑りに対して Newmark 法による再現シミュレーションを行う。Newmark 法は、滑りブロックを剛体と仮定し、滑り面上のせん断力と抵抗力の差より等価加速度に換算し、ブロックの速度、変位を逐次計算し、速度がゼロになるまで変位量を累積するものである。

### (2) 有限要素法 (FEM)

直接積分法による時刻歴非線形解析でシミュレーションを行う。解析モデルを図-1 に示す。岩盤は線形の平面ひずみ要素で、滑り面はジョイント要素でモデル化する。なお、ジョイント要素については、滑りと剥離を考慮できるようなバネ定数を設定する。

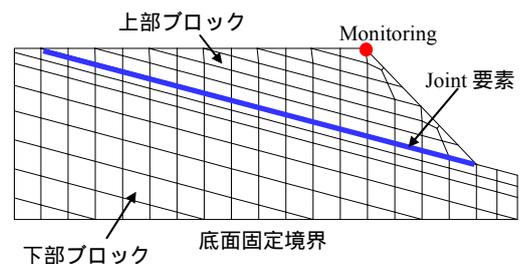


図-1 FEM モデル

### (3) 不連続変形法 (DDA)

不連続変形法 (DDA) は、任意形状の弾性体ブロックにおける変位・変形を動的、準静的に解析する手法であり、ブロック間のすべり、剥離および接触を考慮した大変形問題の解析が可能である。解析モデルを図-2 に示す。なお、DDA では、入力加速度から変換した変位を下部ブロックに強制変位として与える。

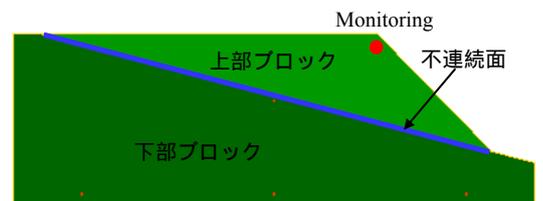


図-2 DDA モデル

## 3. 実験結果概要

振動台模型実験による加速度応答と上部ブロックの変形の観測値を図-3 に示す。入力地震動は模擬地震波であり、

キーワード 岩盤斜面, 斜面安定, 不連続面, 地震時挙動, 残留変形, シミュレーション

連絡先 〒734-8510 広島市南区出汐2丁目3番30号 中電技術コンサルタント株式会社 原子力プロジェクト室

T E L 082-256-3416

周波数 2Hz，最大加速度 670Gal で加速度振幅を段階的に増加させる波形である．これに対して，上部ブロックは，9.5 秒付近の-475Gal 程度で滑動を開始し，1 回の振幅で非常に大きなすべりが生じる．なお，別途実施した傾斜実験から求めた強度特性として，滑動開始までのピーク強度は 40° 程度，滑動後の残留強度は 36°程度が得られている．本検討では，この結果に対するシミュレーションを行う．

#### 4. シミュレーション結果

図-4 に各手法による上部ブロックの変形と実験の観測値との比較を示す．なお，何れの手法も滑りや剥離の判定は，Mohr-Coulomb の破壊規準に基づく．

Newmark 法では，実験結果と同程度の強度特性として，ピーク強度  $\phi_p=40^\circ$ ，残留強度  $\phi_r=37^\circ$ を用いると，滑動開始時刻および滑動量が観測値と概ね一致する結果が得られた．

FEM では，Newmark 法で得られた強度特性を用いて，弾性係数  $E_d$  を供試体の超音波速度試験結果から設定した 7.0GPa，ポアソン比  $\nu_d$  を 0.33 とし解析を行った．FEM による解析の結果，観測値と比べると 1 波長前の 9.0 秒付近で滑りが生じており，滑動量も小さい．この要因として，FEM では破壊の判定は各ジョイント要素で行われるため，局所的な破壊により早期に滑動が開始することや，滑り面全体が一度に破壊するのではなく，ロッキングを伴って滑り面の両サイドから徐々に内側に破壊するため，変位量が小さくなっていることが考えられる．

DDA では，FEM 解析と同じ物性値を用いて解析を行った．ただし，今回の解析ではプログラムの機能上，不連続面の残留強度が考慮できないため，残留強度はピーク強度と同じ値を設定した．DDA による解析の結果，4 秒付近から滑動が生じており，変位速度も観測値と異なる．この要因として，今回の解析では入力加速度を強制変位に置き換えて入力しており，上部ブロックには慣性力が作用せず，下部ブロックの加振に伴う摩擦のみにより上部ブロックが挙動していることやロッキング時の影響などが推察される．

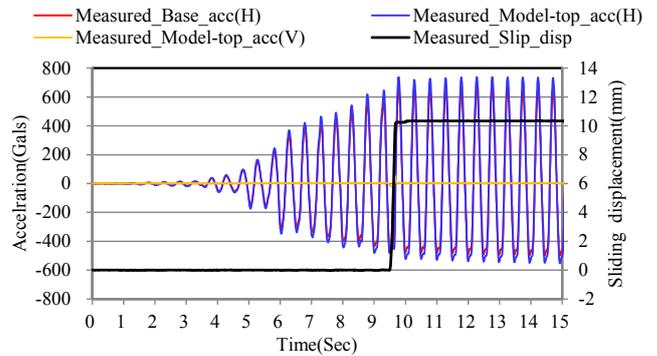
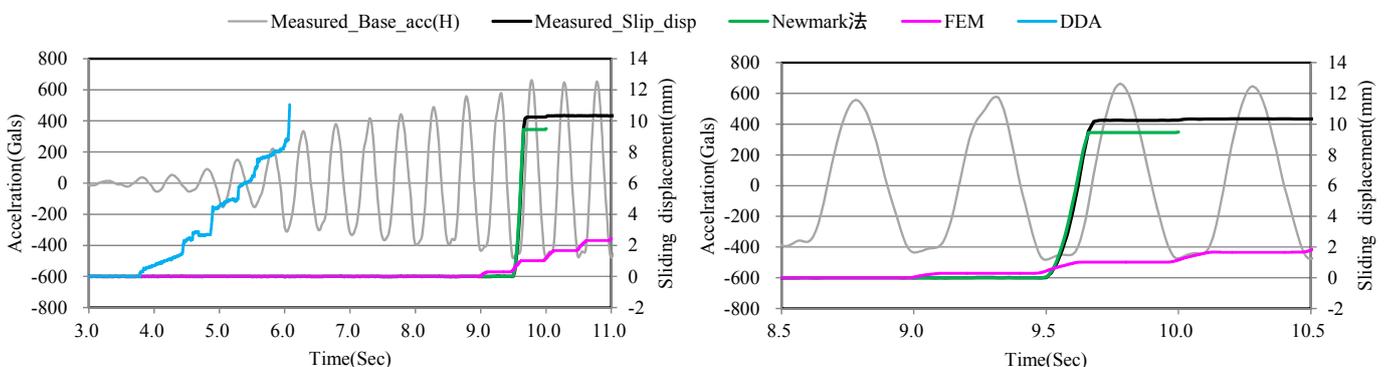


図-3 振動台模型実験による観測結果



a) 3 秒 ~ 11 秒

b) 9.5 秒付近の拡大

図-4 各解析手法の上部ブロックの変形と観測値の比較

#### 5. 今後の課題

今回の検討では，実験結果に対して 3 手法による数値シミュレーションを行った．Newmark 法では，実験で得られた強度特性を設定すれば概ね観測値と整合するような結果が得られたが，FEM，DDA では観測値の再現が出来なかった．今後，斜面上の岩盤ブロックの地震時挙動に対して適用するには，上記で述べた要因を改善するとともに，滑り面のモデル化や物性値の設定に関する事項や，FEM では滑り面の破壊後でも上部ブロックに慣性力が作用し続けるなど外力の作用方法についても検討する必要がある．また，実斜面への適用に向けては，実挙動と実験における挙動の違いやスケール効果の影響等についても検討する必要がある．

#### 参考文献

- 1) 足立光・岩田直樹・清田亮二・高橋裕徳・藍檀オメル：振動台模型実験による斜面上の岩盤ブロックの地震時挙動，平成 28 年度土木学会中国支部研究発表会投稿論文