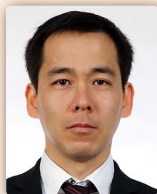


- 鉄道一般
- 車両
- 軌道
- 構造物
- 防災
- 電力
- 信号通信情報
- 材料
- 環境
- 人間科学
- 浮上式鉄道

# 斜面の崩壊メカニズムを探る

地震時の斜面の動的挙動と崩壊メカニズムを解明するために、鉄道総研が(独)原子力安全基盤機構ほかの研究グループとともに実施してきた実験的、解析的な検討結果の概要を報告します。実験結果については、特に世界最大級の振動台を使用して岩盤斜面を模擬した振動台加振実験から得られた知見として、地震動の増幅・位相遅れを評価することの重要性について紹介します。また、解析的検討としては、斜面崩壊が生じる際のすべり土塊の挙動を評価することに主眼を置き、新たに開発した粒子法を振動台実験に適用して実施した大変形解析の結果を紹介します。



**中島 進**  
Susumu Nakajima  
構造物技術研究部  
基礎・土構造研究室  
副主任研究員  
[専門分野] 地盤工学



**篠田 昌弘**  
Masahiro Shinoda  
構造物技術研究部  
基礎・土構造研究室  
主任研究員  
[専門分野] 地盤工学



**渡辺 健治**  
Kenji Watanabe  
構造物技術研究部  
基礎・土構造研究室  
主任研究員  
[専門分野] 地盤工学



**阿部 慶太**  
Keita Abe  
構造物技術研究部  
基礎・土構造研究室  
副主任研究員  
[専門分野] 地盤工学

## 斜面崩壊

斜面崩壊とは、急傾斜の斜面が地震や豪雨などによって崩壊に至る現象です。崩壊が生じる部位や形態は、**図1**のように多様ですが、その破壊メカニズムは十分に分かっていません。

このうち、比較的崩壊が大規模となりやすいすべり破壊の危険度は、すべり安定解析によって評価されるのが一般的です。そして、想定する地震動に対して、検討対象の斜面が所要の安全性を確保できない場合には、安全性を向上させるために、グラウンドアンカー工、抑止杭工法(☞参照)などの対策工が検討されることとなります。

## すべり安定解析

すべり安定解析における斜面の安定

### ☞ グラウンドアンカー工

安定な岩盤層などに定着したアンカー工を介して引張力を地盤に伝達することにより地盤の安定化を図る工法。

### ☞ 抑止杭工法

岩盤層など安定した地層に打設した杭の抵抗力によって、不安定な斜面の安定化を図る工法。

性は、**図2**に示すように、斜面のずれが生じるすべり面上に作用する回転モーメントと抵抗モーメントとの比から求めるすべり安全率を指標として評価されます。しかしながら、地震時にすべり安全率が瞬間的に許容値を下回ったとしても、地震による斜面崩壊の程度や影響範囲は、斜面の物理・力学・幾何学的特性によって大きく異なると考えられます。

そこで、鉄道総研では、(独)原子力安全基盤機構を中心とする研究グループの中で、斜面の崩壊メカニズムを把握し、斜面の地震時安定性評価法の高度化を目的とした研究に取り組んできました<sup>1)2)</sup>。

## 振動台試験

斜面の崩壊メカニズムを把握するための検討は、鉄道総研所有の小型・中型振動台を用いて基礎検討を行った後に、(独)防災科学技術研究所、兵庫耐震工学研究センターの実大三次元震動破壊実験施設(E-Defense(☞参照))で実施しました。

E-Defenseでの振動台実験では、**図3**に示すように長さ20m、幅15m

崩壊現象		すべり等による崩壊				トップリング崩壊		バックリング崩壊	
崩壊形態	落石	ブロックの崩壊	平面すべり崩壊	くさび崩壊	円弧すべり崩壊	複合すべり崩壊	たわみ性トップリング崩壊		ブロックトップリング崩壊
破壊モデル									

図1 斜面の崩壊形態の例

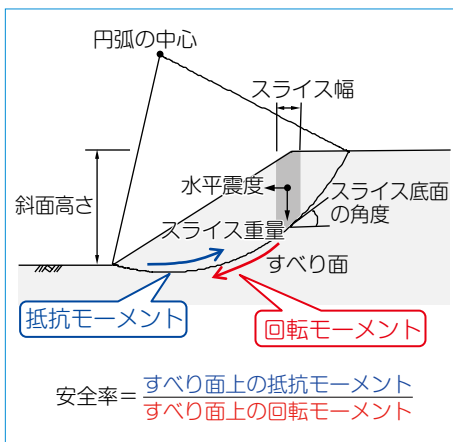


図2 すべり安定解析の模式図

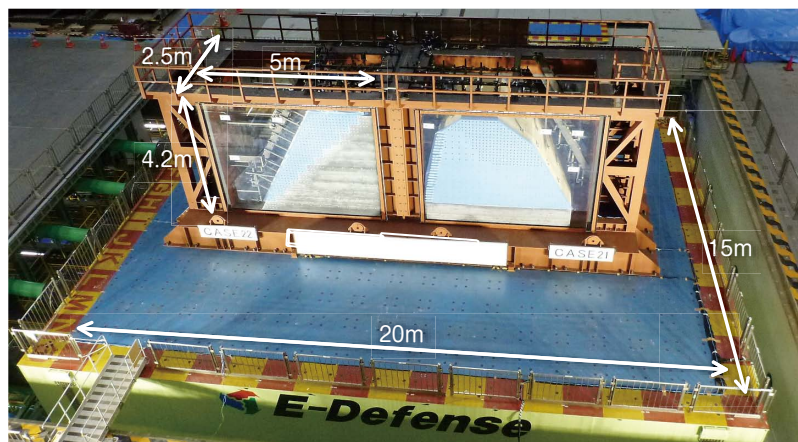


図3 E-Defenseの振動台および斜面模型

の振動台上に、幅5m×奥行き2.5m×高さ4mの土槽を二基連結して加振実験を実施しました。小型・中型振動台では載荷を行うことが不可能な水平動・鉛直動の位相を自在に変化させた同時加振を実施することが可能となっています。

### 斜面模型

斜面模型は、図4に示すように、風化(☞参照)した岩盤斜面を模擬した一層斜面模型(Case21)と、堅固な岩盤斜面内に局所的に軟弱な地層(弱層)が存在する斜面(Case22)を想定して構築しました。

加振は、正弦波および新潟県中越沖地震における観測波を振幅調整した波形を用いて行いました。

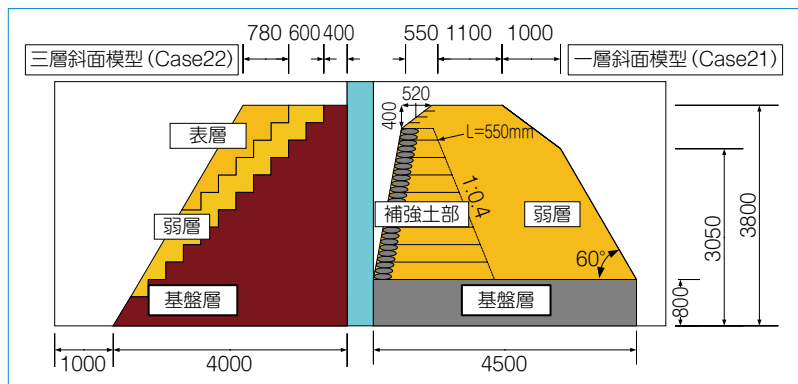


図4 大型振動台実験における斜面模型(単位: mm)

### E-Defense

実大三次元震動破壊実験施設(愛称: E-Defense)は、実大規模の建物(戸建2棟分、中層建物もそのまま)などに兵庫県南部地震クラスの地震の揺れを前後・左右・上下の三次元に直接与えることで、その揺れや損傷、崩壊の過程を詳細に観察・計測することができます。

### 風化

岩石などが特に地表付近において、化学的あるいは物理的に変化する現象で、風化の進行によって、岩石を構成する鉱物の結びつきが弱まったり、鉱物自体が変質するために、元の材料よりもぜい弱化します。

## 崩壊形態の違い

各ケースの斜面模型の崩壊状況を図5に示します。図5にはすべり安定解析にて評価したすべり面を併せて示しています。

三層斜面模型では、実験で確認されたすべり面と安定解析によるすべり面は良く一致しています。このことは、堅固な岩盤斜面を対象とする場合には、局所的に弱い土層の有無を評価することが特に重要であることを示唆しています。

一方で、一層斜面模型では、実験では比較的浅い位置にすべり面が

生じたのに対して、安定解析では深い領域にすべり面が発生すると評価されています。こうした違いの理由としては、斜面内での加速度応答の増幅・位相遅れ(☞参照)の影響が考えられます。

図6は斜面内での応答加速度の分布図の例を示しています。斜面の右上部分がマイナス800gal程度を示す濃い紫色となっています。斜面の崩壊を引き起こす慣性力は加速度がマイナスの値を示す際に生じるため、この時点では斜面の右上部分、つまり実験ですべり面が生じた箇所に大きなせん断力が作

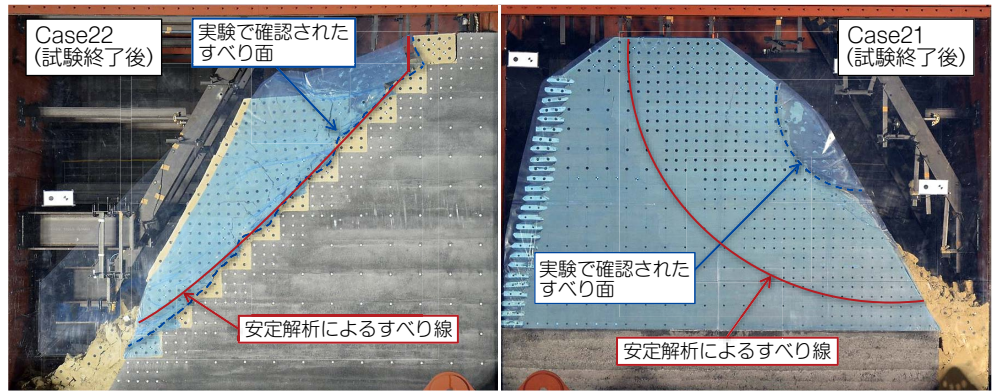


図5 斜面模型の崩壊状況

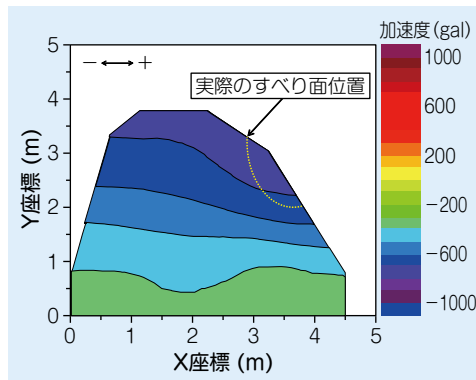


図6 応答加速度の分布図の例

用していたと想定できます。

図6に示したすべり安定解析では、斜面地盤内に均一な地震力を作用させたため、このような応答の増幅・位相遅れの影響は評価することができず、実験と解析ですべり面位置にずれが生じたと考えられます。このことから、風化した岩盤層で構成される比較的弱い斜面では、地震動の増幅・位相遅れの影響を適切に評価することが重要であるといえます。

## 不安定化したすべり土塊の挙動

円弧すべり安定解析は、想定する地震動に対して、斜面の安定性を評価する手法ですが、地震時に斜面が不安定化する場合には、その影響として、すべり土塊の移動距離や構造物への衝撃力など、すべり土塊の挙動を評価することも重要となります。

過去に実施してきた振動台実験では、

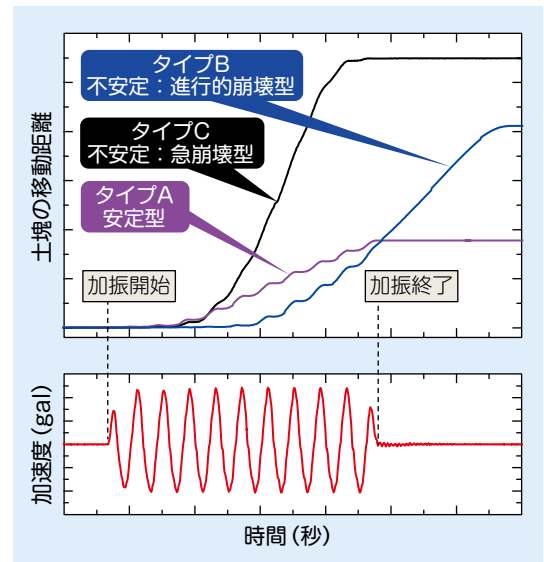


図7 不安定化したすべり土塊の地震時挙動のイメージ図(下段:入力加速度, 上段:すべり土塊の変位量の時刻歴)

高速度カメラを用いてすべり土塊内部のターゲットを追跡することにより、加振中のすべり土塊の挙動を精緻に評価してきました。その結果のイメージを図7に示します。

斜面の勾配や材料強度などを系統的に変化させて模型実験を実施した結果、すべり崩壊のタイプは概ね3通りに分類できることが分かりました。一つ目は、図7中、タイプAのように地震力が作用している間のみ段階的にすべり土塊の変位量が増大し、加振終了後は変位がそれ以上増加しない場合です。こうした斜面は、地震により生じる土塊の変位量を適切に評価できれば、安全性や対策工の評価などを合理化できます。

### ☞ 加速度応答の増幅

加速度応答の振幅が入力よりも大きくなることを、加速度応答の増幅といいます。

### ☞ 加速度応答の位相遅れ

構造物の部位によって加速度応答の波形に遅れが生じることを加速度応答の位相遅れといいます。

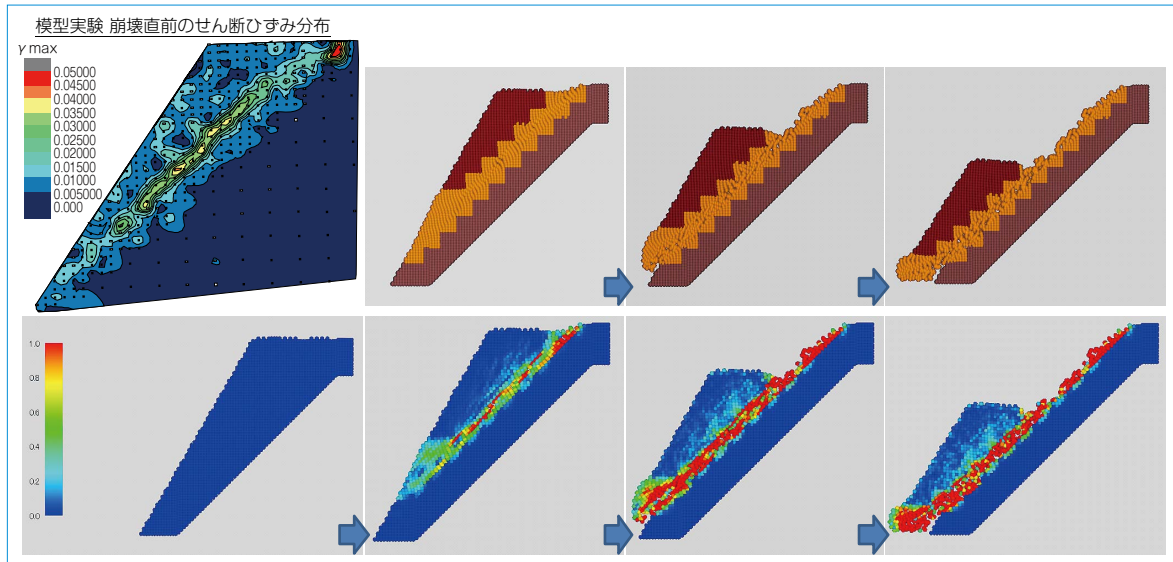


図8 MPMによる振動台実験の再現解析結果(上段：変形図，下段：せん断ひずみ分布図)

次に、タイプBは加振初期にはタイプAと同様に段階的に変位が増大するものの、変位量が増加し過ぎたために、不安定化し、加振終了後においても変位の進行が止まらなくなる崩壊形態です。

最後に、タイプCは加振初期から変位が急増し崩壊に至るタイプで、最も危険な崩壊形態です。

円弧すべり安定解析では、不安定化した後の挙動は評価できないため、斜面周辺施設の安全性をより適切に向上させるためには、このようなすべり土塊の挙動を適切に評価することが重要です。

### 大変形解析

近年、斜面崩壊や液状化など、地盤の大変形が引き起こす2次災害のリスク評価の観点から、大変形解析のニーズが高まっています。

#### 有限要素解析

複雑な形状・性質を持つ物体を単純な小部分(格子)に分割して近似し、全体の挙動を予測する解析手法です。汎用性があり応用範囲が広いので、地盤解析をはじめとして広く使われています。

#### MPM (Material Point Method)

地盤を粒子で表し、地盤の大きな変化や土砂の飛散を扱うことができる解析手法です。

しかし、有限要素解析(☞参照)では大変形時に有限要素がゆがんでしまうために、大変形問題への適用が困難でした。

一方で、鉄道総研ではMPM(☞参照)と呼ばれる大変形・流動解析手法を開発しており、斜面の崩壊問題への適用も進めてきました。

Case22の振動台実験を対象として、MPMによる解析を行った結果<sup>3)</sup>の一例を図8に示します。上段に示した変形図は図5上段に示した実験の崩壊形態と良好に整合していることが分かります。また、図8下段に示した最大せん断ひずみの分布をみると、模型実験の画像解析結果と同様に、弱層内でせん断ひずみが大きくなっており、局所的に存在する弱層の変形によって、斜面が崩壊に至る実際の挙動を良く表現できています。

### おわりに

地震時における斜面崩壊が鉄道に被害を与えた事例は数多く、急しゅんな国土を有する我が国においては、斜面の安全性評価は鉄道の安全輸送に直結する重要な課題です。本報告では、斜面の地震時安全性向上に向けて、鉄道総研が外部の研究機関や行政機関と連携して実施してきた研究の一部を報告しました。

引き続き、本検討より得られた知見を活用して鉄道の安全輸送に貢献できればと考えております。RRR

### 文献

- 1) 中島進, 篠田昌弘, 渡辺健治, 阿部慶太, 佐名川太亮: 規模の異なる振動台実験による自然斜面の地震時安定性評価, 鉄道総研報告, Vol.27, No.6, pp.5-12, 2013
- 2) 村田雅明, 中村英孝, 篠田昌弘, 中島進, 中村晋, 河井正: 原子炉建屋周辺斜面の安定性評価に関する考え方, 第47回地盤工学研究発表公演概要集, pp.1633-1634, 2012
- 3) 阿部慶太, 井澤淳, 中村晋, 河井正, 中村英孝, 村田雅明: FEMおよびMPMによる大型斜面模型の振動台実験の解析的検討, 第48回地盤工学研究発表公演概要, pp.1877-1878, 2013