



# 重要構造物基礎岩盤および周辺斜面の 地震時安定性評価に関する取組み

電力中央研究所 地球工学研究所

石丸 真

土木学会 地震工学委員会 平成29年度 第3回研究会

2017年12月19日

 電力中央研究所

© CRIEPI 2017

1



 電力中央研究所

## 発表の内容

重要構造物の基礎岩盤および周辺の岩盤斜面の地震時の変位量評価に着目した『時刻歴非線形解析の開発と適用性検証』

1. 延性的な破壊進展を示す斜面の動的遠心力模型実験  
(時刻歴非線形解析の検証対象)
2. 時刻歴非線形解析による斜面の動的遠心力模型実験  
の再現解析

© CRIEPI 2017

2

# 基礎岩盤・周辺斜面の地震時安定性評価

## ■重要構造物の基礎岩盤の現行の評価手法（原子力発電所の場合）

- 動的解析手法：周波数領域の2次元等価線形解析
- 支持性能の評価：
  - ・すべり安全率
  - ・支持力
  - ・基礎底面両端の鉛直方向の相対変位・傾斜

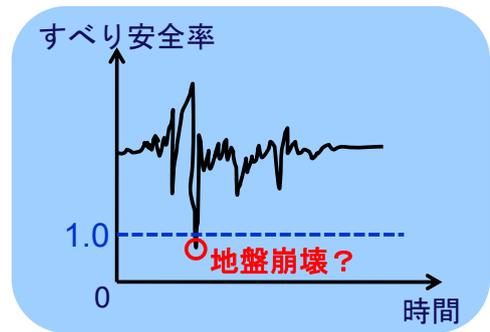
## ■重要構造物周辺の岩盤斜面の現行の評価手法（原子力発電所の場合）

- 動的解析手法：周波数領域の2次元等価線形解析
- 安定性の評価：
  - ・すべり安全率

### <問題点>

※すべり安全率はすべりによる変形が生じる可能性の有無を判定するのみで、変位量まで評価できる手法ではない

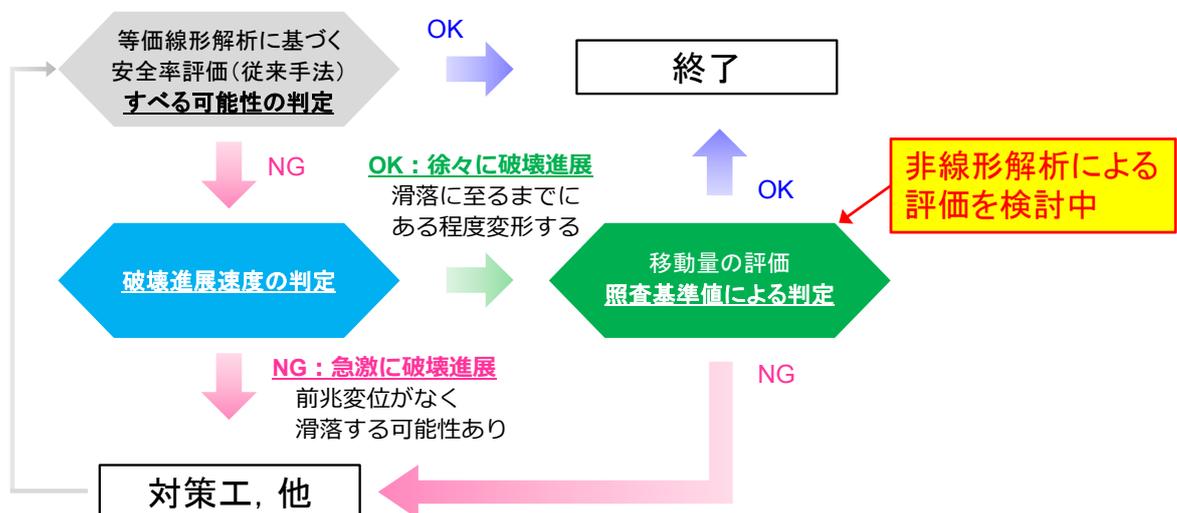
※瞬間的な力のつり合いを満足できない場合に、必ずしも直ちに地盤が不安定化するわけではない



# 新しい評価体系の構築

## ■今後の評価手法の動向

- 動的解析手法：破壊進展を考慮できる非線形解析
- 支持性能の評価：変位量照査  
例えば、基礎底面両端の鉛直方向の相対変位・傾斜



地震時安定性評価フロー(土木学会・原子力土木委員会・地盤安定解析高度化小委員会より)

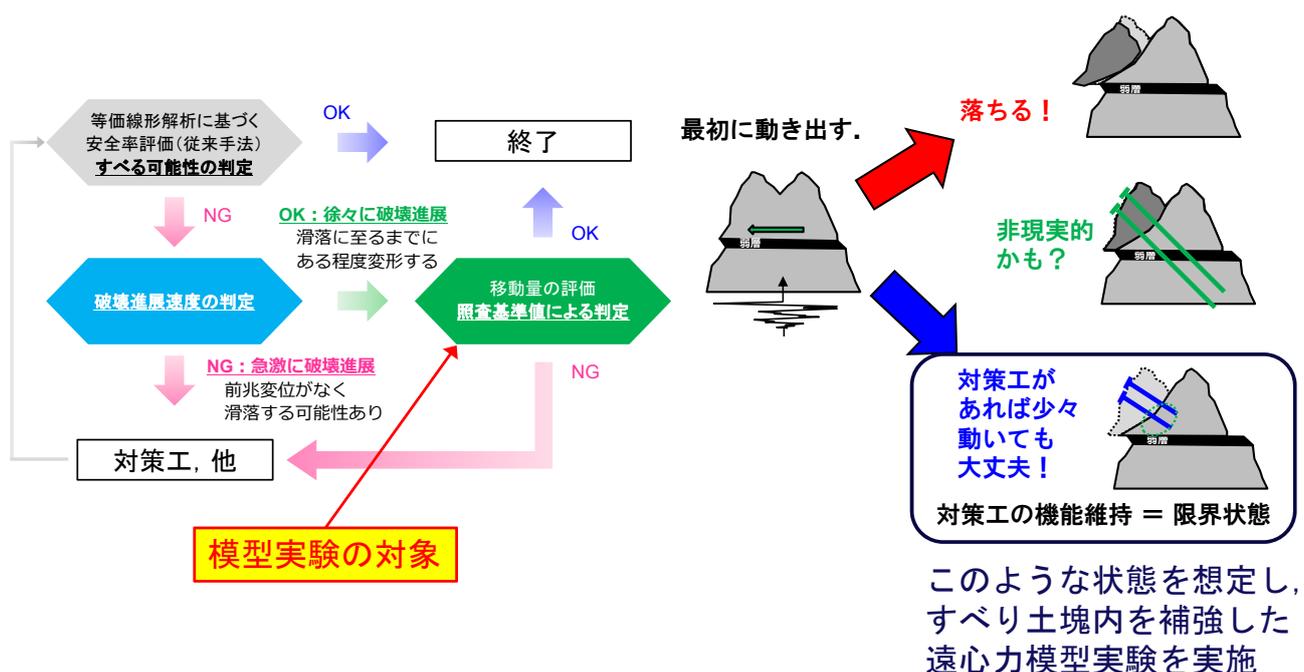
# 発表の内容

重要構造物の基礎岩盤および周辺の岩盤斜面の地震時の変位量評価に着目した『時刻歴非線形解析の開発と適用性検証』

1. 延性的な破壊進展を示す斜面の動的遠心力模型実験  
(時刻歴非線形解析の検証対象)
2. 時刻歴非線形解析による斜面の動的遠心力模型実験の再現解析

石丸 真, 岡田 哲実, 中村 大史, 河井 正, 風間 基樹: 軟岩のせん断破壊後の強度変形特性のモデル化と斜面の地震時すべり安定性評価への適用, 土木学会論文集C (地圏工学), Vol. 73, No. 1, pp. 23-38, 2017.

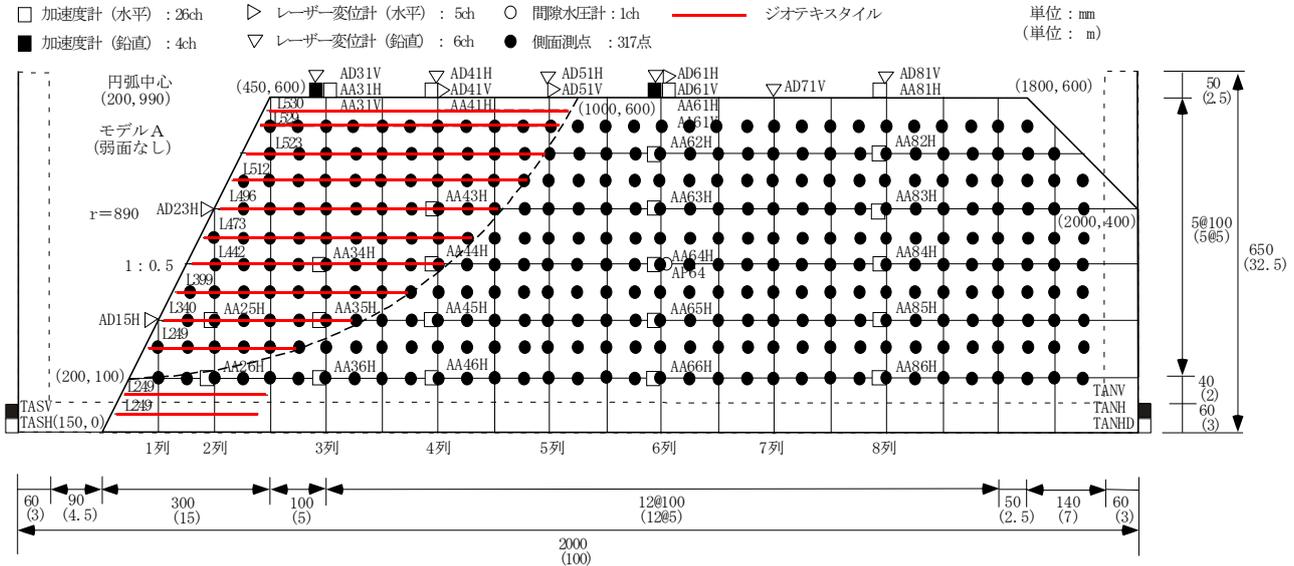
# 模型実験の対象



# 斜面模型形状

- ・ 遠心加速度 50G
- ・ 斜面勾配 1:0.5
- ・ 斜面高さ 60cm (実規模換算30m)

斜面前方を円弧状にジオテキスタイルで補強  
⇒脆性的な崩落を防止する意図



# 地盤材料(解析物性値)

- 斜面模型の作製に用いた地盤材料  
セメント改良土 (養生期間: 7日)

1m<sup>3</sup>あたりの配合

- 水: 740kg
- 普通ポルトランドセメント: 200kg
- トククレイ: 860kg

- 動的変形特性

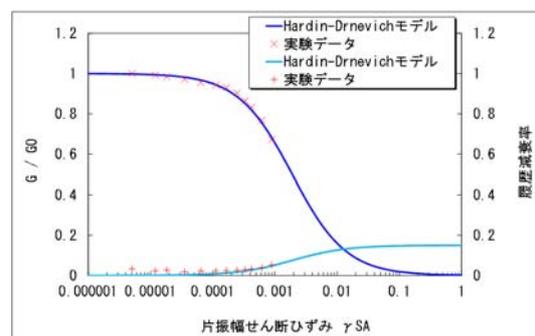
Hardin-Drnevichモデル

- $\gamma_r = 0.0019$
- $h_{min} = 0.02$  (等価線形解析のみ使用)
- $h_{max} = 0.15$

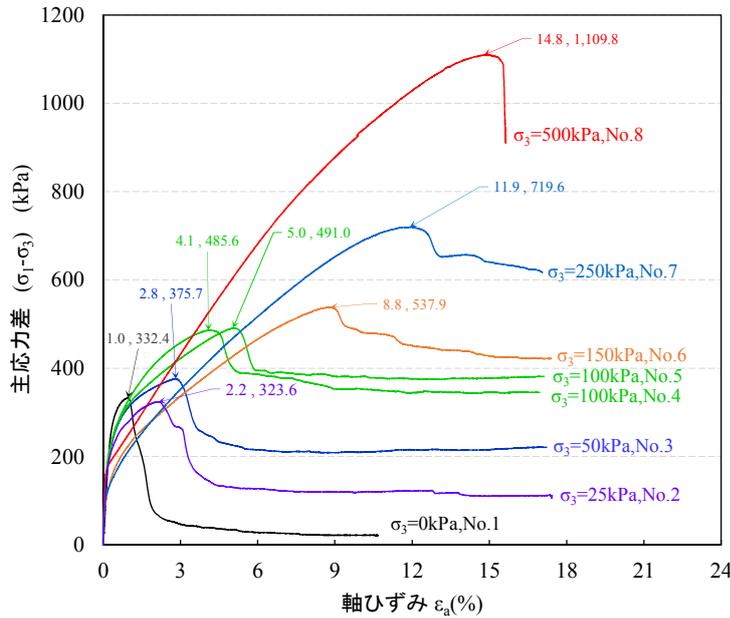
- 剛性比例減衰

- 1次固有振動数 (3.5Hz) で2%
- 2%は微小ひずみ時の値

解析物性値	
湿潤密度	$\rho_t = 15.7 \text{ kN/m}^3$
ピーク強度	$c_p = 96.1 \text{ kN/m}^2$ , $\phi_p = 26.5$ 度 (平面ひずみ圧縮試験)
残留強度	$c_r = 0.0 \text{ kN/m}^2$ , $\phi_r = 33.5$ 度 (平面ひずみ圧縮試験)
引張り強度	$\sigma_t = 156.7 \text{ kN/m}^2$ (一軸引張り試験)
せん断弾性係数	$G_0 = 162600 + 111 \cdot P \text{ kN/m}^2$
ポアソン比	0.469



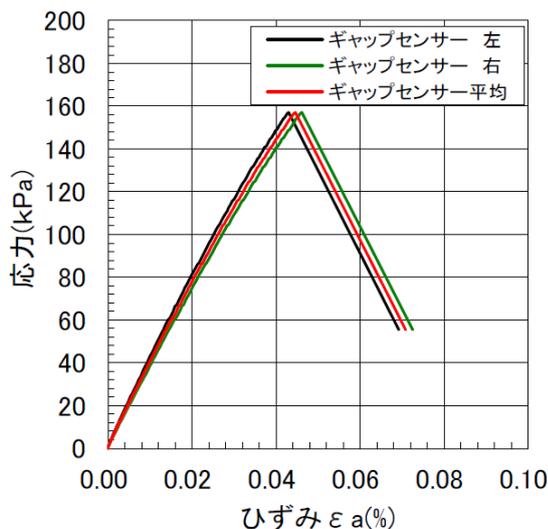
# 平面ひずみ圧縮試験の応力-ひずみ関係



平面ひずみ圧縮試験の試験条件

供試体	形状	矩形
	寸法	断面60mm×80mm 高さ160mm
供試体の養生	養生方法	湿空密閉養生
	養生期間	7日もしくは8日
ひずみ速度	0.5%/min	

# 一軸引張り試験

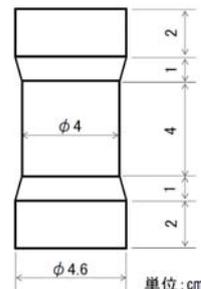


一軸引張り試験結果の一例

引張り強度	$\sigma_t = 156.7 \text{ kN/m}^2$ (一軸引張り試験)
-------	--

一軸引張り試験の試験条件

供試体の養生	養生方法	湿空密閉養生
	養生期間	7日もしくは8日
ひずみ速度	0.5%/min	
変位の測定方法	キャップの左右に設置した ギャップセンサーで測定	



供試体の形状

# 一軸引張り強さおよび供試体の破壊状況

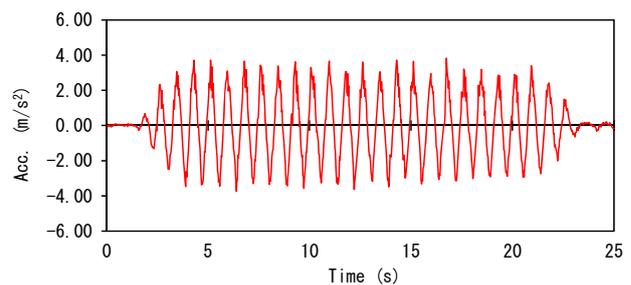


# 入力加速度波形

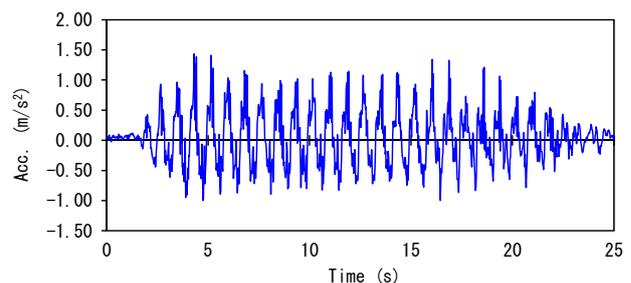
実規模換算1.2Hzの正弦波  
(主要動20波)

加振ステップ	加速度振幅最大値 (m/s <sup>2</sup> )	
	水平動	鉛直動
d03	0.51	0.27
d04	1.44	0.49
d05	3.24	1.02
d06	3.82	1.43
d07	5.10	2.07
d08	5.71	2.68
d09	6.15	3.05
d10	7.04	3.14

入力は水平動のみであるが、振動台のロッキングによると推測される鉛直動も計測  
⇒解析では鉛直動も考慮



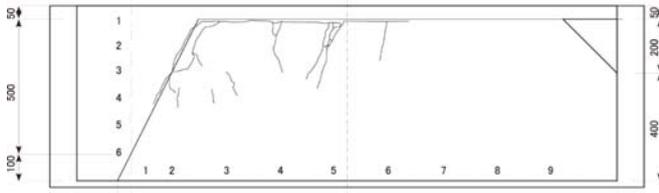
加振ステップd06：水平



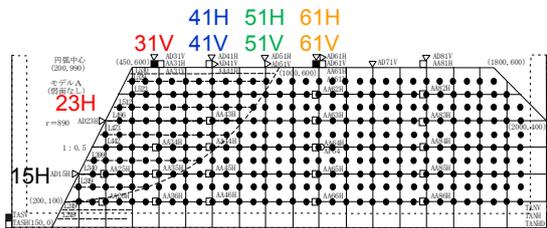
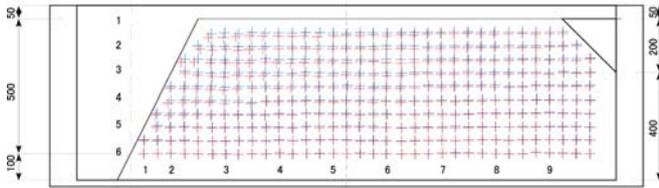
加振ステップd06：鉛直

# 実験結果

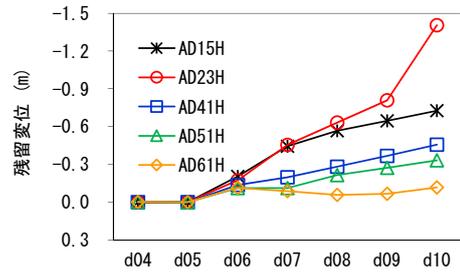
## クラックの発生状況



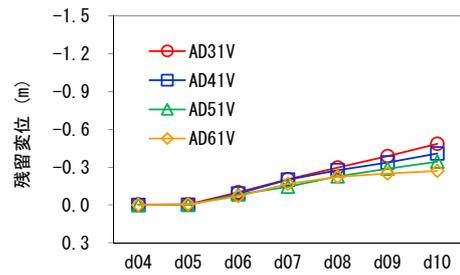
## 実験前後のマーカの移動



## 残留変位



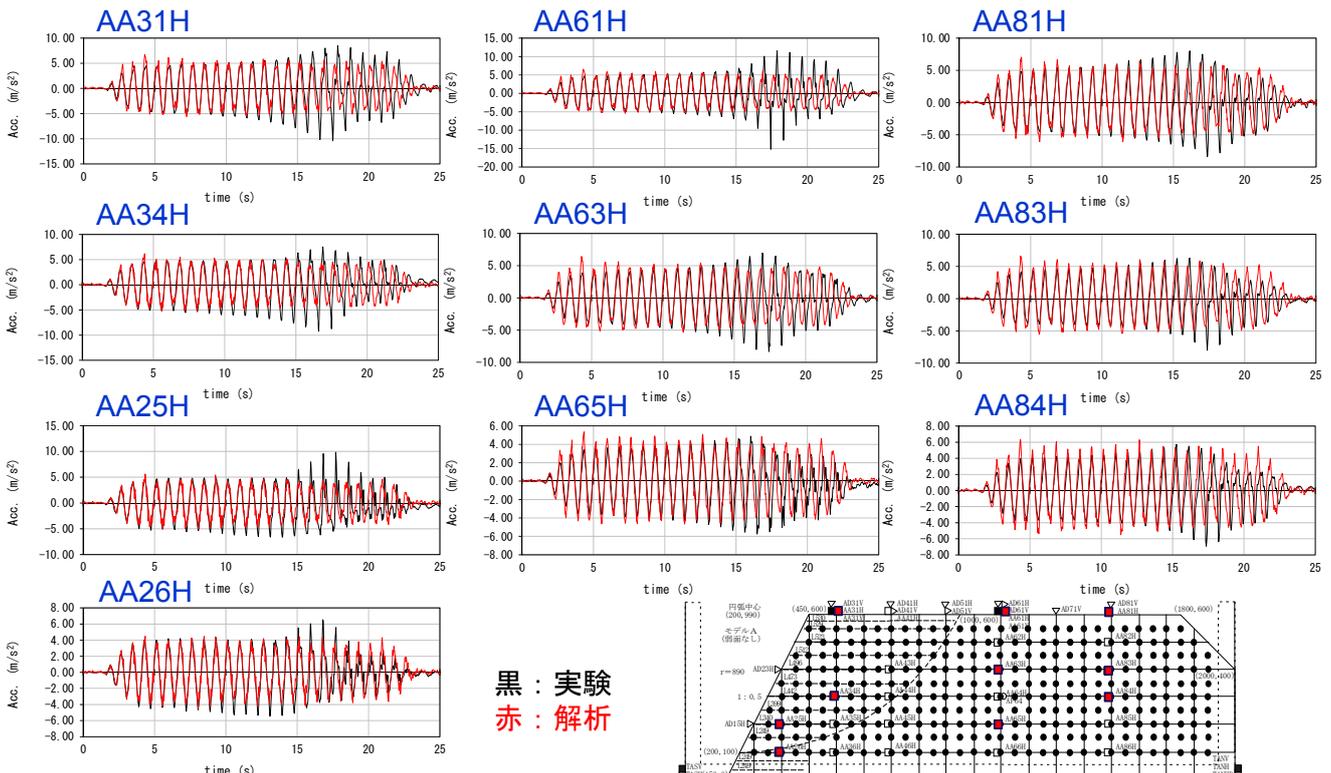
模型表面の水平変位



模型表面の鉛直変位

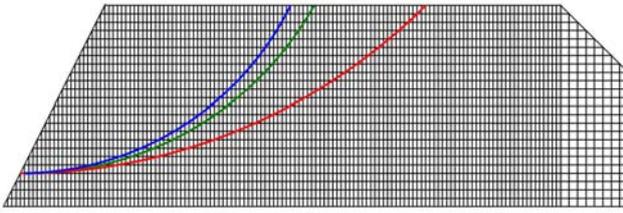
加振ステップd06から残留変位が発生

# 等価線形解析: 水平加速度時刻歴 (d06)

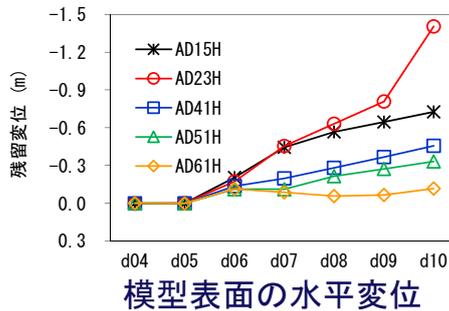


# 等価線形解析によるすべり安全率

## ■ 各加振ステップの最小すべり安全率



— d04 $F_s=1.77$	— d08 $F_s=0.64$
— d05 $F_s=1.29$	— d09 $F_s=0.54$
— d06 $F_s=0.91$	— d10 $F_s=0.52$
— d07 $F_s=0.77$	— ジオテキスタイル境界



- ・ 実験において残留変位が生じるタイミング(加振ステップd06)とすべり安全率 $<1$ が整合
- ・ すべり安全率 $<1$ 以降も有限な変位に収まっているので、すべり安全率 $<1$ と、大規模な崩落は等価ではない

### 破壊進展速度の判定 (判定手法は一例)

⇒自重と残留強度によるすべり安全率

ジオテキスタイル境界 : 1.55

d08のすべり面 : 2.14

d10のすべり面 : 1.92

- ・ 地震動の作用により残留強度に低下しても自重で崩落することはない

- ・ 変位量照査が適用可能

# 発表の内容

重要構造物の基礎岩盤および周辺の岩盤斜面の地震時の変位量評価に着目した『時刻歴非線形解析の開発と適用性検証』

1. 延性的な破壊進展を示す斜面の動的遠心力模型実験 (時刻歴非線形解析の検証対象)
2. 時刻歴非線形解析による斜面の動的遠心力模型実験の再現解析

石丸 真, 岡田 哲実, 中村 大史, 河井 正, 風間 基樹: 軟岩のせん断破壊後の強度変形特性のモデル化と斜面の地震時すべり安定性評価への適用, 土木学会論文集C (地圏工学), Vol. 73, No. 1, pp. 23-38, 2017.

# 構成モデル(1)

## ■前提条件

- ・ 新たなパラメータをあまり必要としない，実務的な解析手法
- ・ 2次元全応力モデル（平面ひずみ）

## ■多重せん断ばねモデル（せん断変形モデル）

- ・  $\tau - \gamma$ 関係だけでなく，多方向のせん断挙動の影響を表現するため，多重せん断ばねモデル（Towhata and Ishihara, 1985）を適用

- ・ 水平軸より角度 $\theta$ の位置のひずみ（変位） $u_\theta$

$$u_\theta = (\cos \theta \quad \sin \theta) \begin{Bmatrix} (\varepsilon_z - \varepsilon_x)/2 \\ \gamma_{zx}/2 \end{Bmatrix}$$

- ・ ばねの応力 $F_\theta$ は， $u_\theta$ に任意の非線形モデルを適用
- ・ 要素の応力は， $F_\theta$ を積分して求める

$$\begin{Bmatrix} (\sigma_z - \sigma_x)/2 \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = \int_{-\pi}^{\pi} \begin{pmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{pmatrix} F_\theta d\theta$$

- ・ 多重せん断ばねモデルは，ばね毎に異なる硬さや強さを与えれば異方性を考慮することもできるが，本研究では等方を仮定

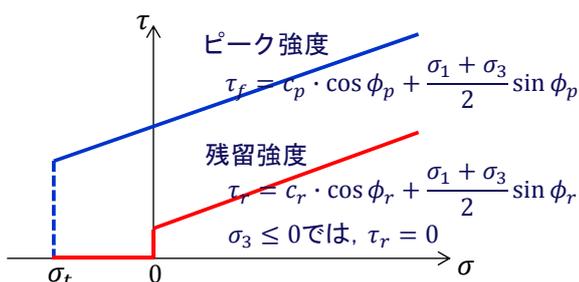
# 構成モデル(2)

## ■除荷後の履歴挙動

- ・ Masing則の減衰特性を調整できるように仮定の骨格曲線を導入（Ishihara, et al., 1985）
- ・ ひずみの関数として与えられた任意の要素の減衰定数を満足できるように，各ばねの減衰定数を設定（Ozutsumi and Iai, 2001）
- ・ 減衰定数のモデル化：Hardin and Drnevichモデル

$$h = h_{max}(1 - G/G_0)^{\beta_1} \quad \beta_1 : \text{調整パラメータ}$$

## ■強度・破壊の定義



### ○強度の定義

- ・  $\tau_f$ と $\tau_r$ は時々刻々の応力状態に基づき算出
- ・ 破壊後の引張り強度 $\sigma_{tr}$ ：  
せん断破壊後は初期値保持  
引張り破壊後はゼロ

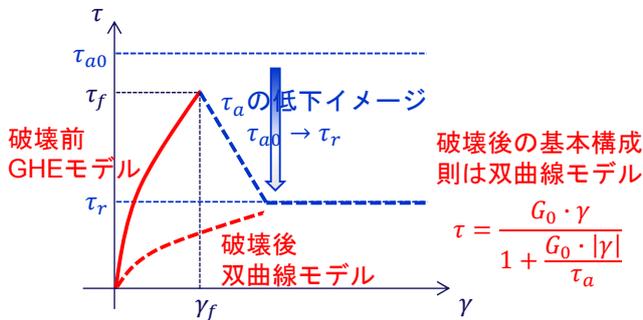
### ○せん断破壊の判定 ○引張り破壊の判定

$$\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2} \geq \tau_f \quad \sigma_3 \leq \sigma_t$$

# 構成モデル(3)

## 破壊後のモデル化

<せん断方向> 規準せん断強度 $\tau_a$ を低下



○せん断破壊後: ひずみ軟化を考慮

$$\tau_a = \tau_r + \frac{(\tau_{a0} - \tau_r)}{A\gamma^p + 1}$$

$\gamma^p$ : 破壊後の $|\gamma|$ の最大値( $\gamma_f$ からの増分量)

$A$ : ひずみ軟化係数 ( $A = 0$ の場合:  $\tau_a = \tau_{a0}$ )

○引張り破壊後: 直ちに残留強度に低下

$$\tau_a = \tau_r$$

せん断破壊あるいは引張り破壊が発生した場合は、双曲線モデルの規準せん断強度 $\tau_a$ を残留強度まで低下させることによって、破壊の影響を考慮

<引張り方向>

破壊後の引張り強度 $\sigma_{tr}$ を超える引張り応力はモール円の平行移動により配分

# 時刻歴非線形解析: 解析条件

### ●境界条件

- ・底面: 固定
- ・側面: ジョイント要素  
引張り・せん断: 抵抗なし  
圧縮:  $1.0 \times 10^8 \text{kN/m}^2$

### ●計算時間刻み・残差力処理

- ・計算時間刻み:  $1.0 \times 10^{-4}$ 秒
- ・反復計算なし
- ・残差力: 次ステップ持ちこし

### ●自重解析

- ・動解と同じ非線形物性を使用して実施

### ●入力波形

- ・d04→d05 → d06(すべり安全率<1)

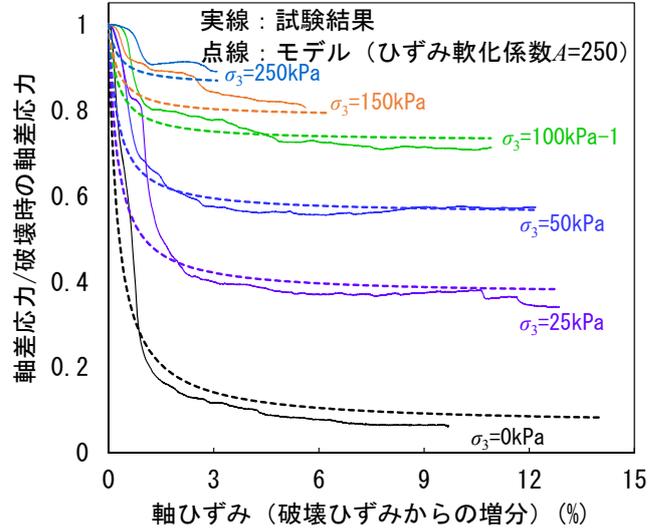
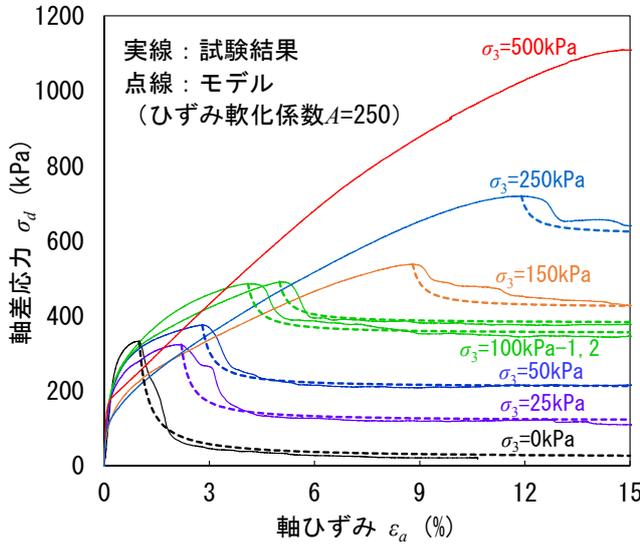
### ●非線形モデルのパラメータ

- ・ばねの本数(半円): 12本
- ・履歴曲線のタイプ: 双曲線モデル
- ・基準せん断強度  $\tau_a$   
 $\gamma_r \times G_0 = 0.0019 \times \text{各要素の } G_0$
- ・最大減衰定数  $h_{\max}$  0.15
- ・粘着力  $c$  96.1kN/m<sup>2</sup>
- ・内部摩擦角  $\phi$  26.5度
- ・引張り強度  $\sigma_t$  156.7kN/m<sup>2</sup>
- ・残留粘着力  $c_r$  0.0kN/m<sup>2</sup>
- ・残留摩擦角  $\phi_r$  33.5度
- ・ひずみ軟化係数  $A$  250

# ひずみ軟化係数Aについて

下式によるフィッティングからA=250と設定

$$\tau_a = \tau_r + \frac{(\tau_{a0} - \tau_r)}{A\gamma^p + 1} \quad \text{変形} \quad \sigma_d = \sigma_{dr} + \frac{(\sigma_{df} - \sigma_{dr})}{A(1 + \nu_f)\epsilon_a^p + 1}$$

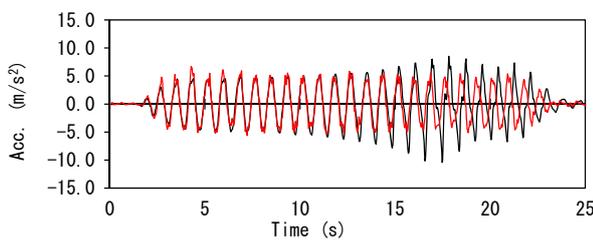


平面ひずみ圧縮試験の応力-ひずみ関係

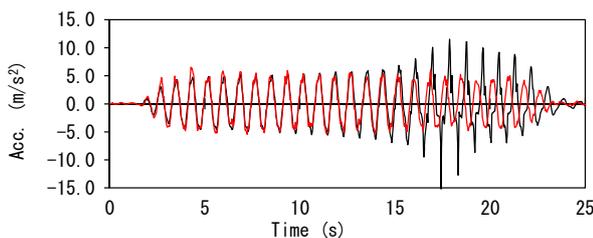
# 解析結果(加速度)

● 等価線形解析 (水平加速度)

法肩

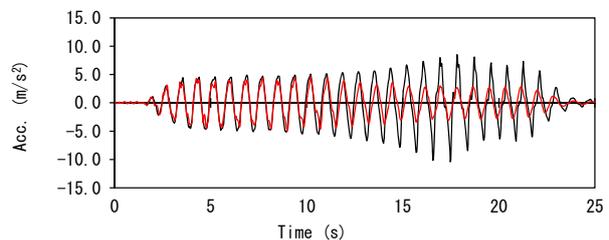


天端中央

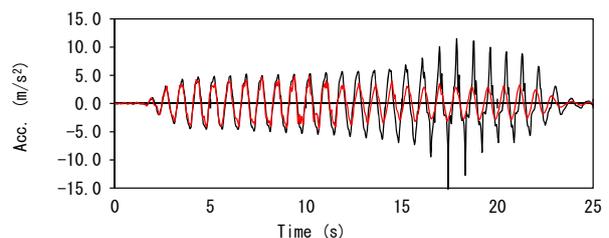


● 時刻歴非線形解析 (水平加速度)

法肩



天端中央



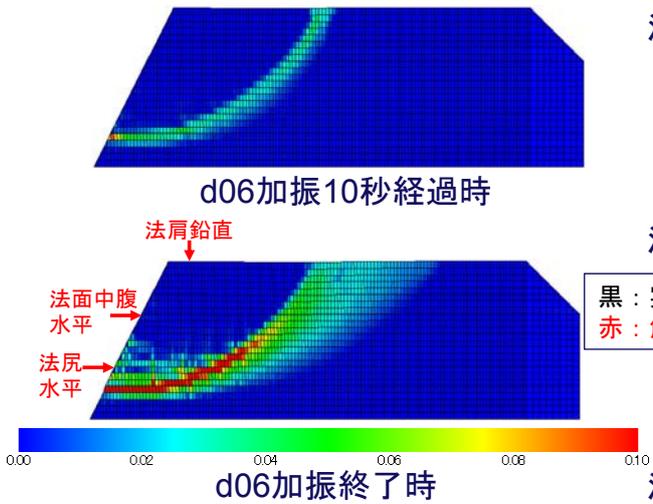
時刻歴非線形解析の加速度応答

- ・ 等価線形解析に比べて、破壊に伴う位相のずれは再現
- ・ 振幅の増大は再現できていない

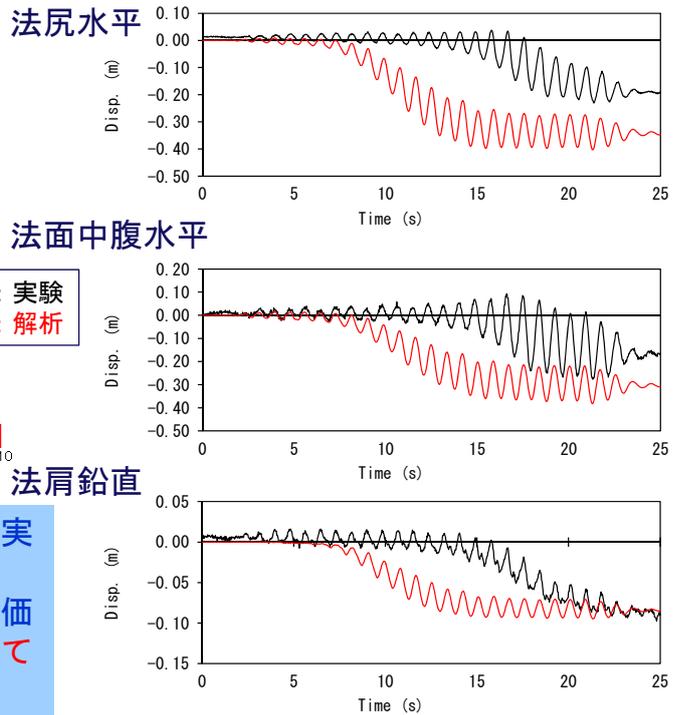
黒：実験  
赤：解析

# 解析結果(最大せん断ひずみ・変位)

## ●最大せん断ひずみ分布



## ●時刻歴非線形解析(水平・鉛直変位)



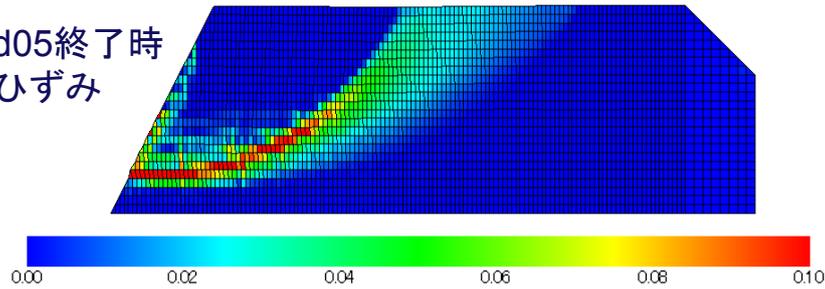
残留変位が発生する加振ステップは模型実験と同じ  
 解析結果は実験結果に対して保守的な評価  
 (破壊後の強度・剛性の異方性を考慮していないことが原因と推測)

# ひずみ軟化係数に関する パラメトリックスタディ

# 直ちに残留強度に低下する場合

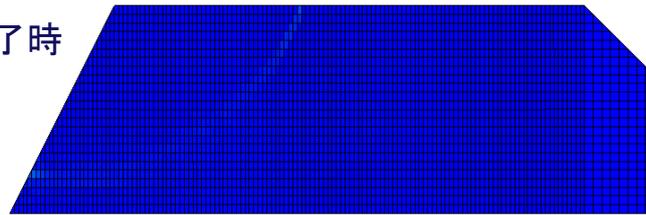
## ■ $A=10^8$ (直ちに残留強度に低下する場合)

加振ステップd05終了時  
最大せん断ひずみ



## ■ $A=250$

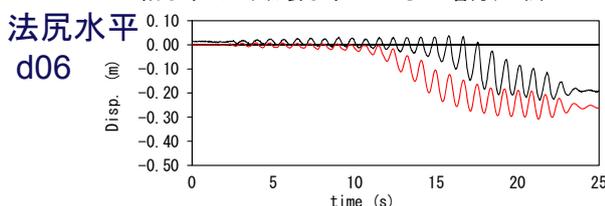
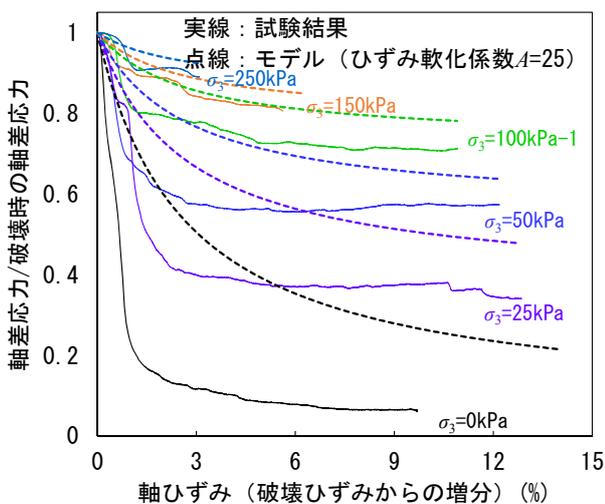
加振ステップd05終了時  
最大せん断ひずみ



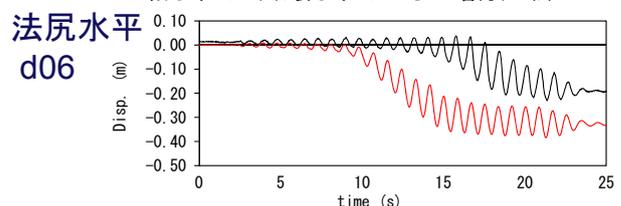
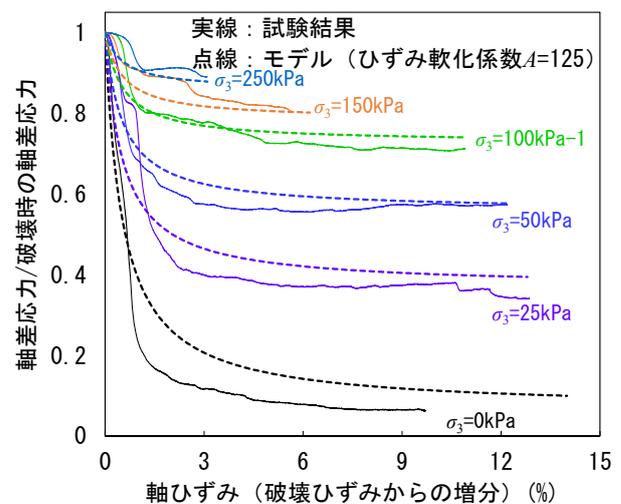
せん断破壊後に直ちに残留強度に低下する場合，模型実験で残留変位が発生していない加振ステップd05で大きなせん断ひずみが発生する。

# ひずみ軟化係数 $A=25, 125$

## ■ $A=25$

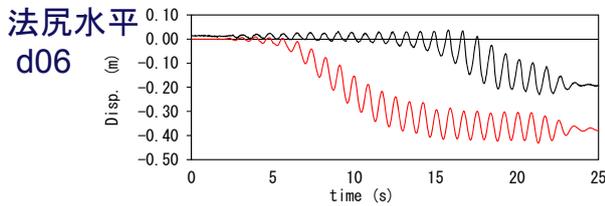
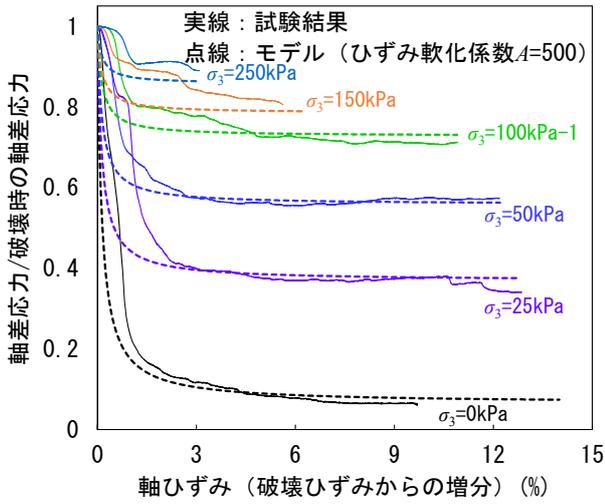


## ■ $A=125$

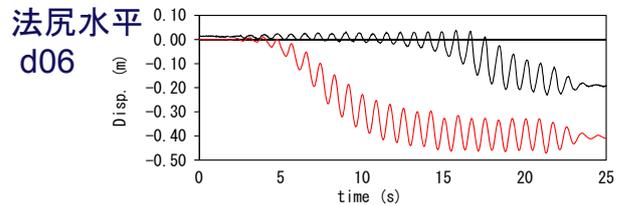
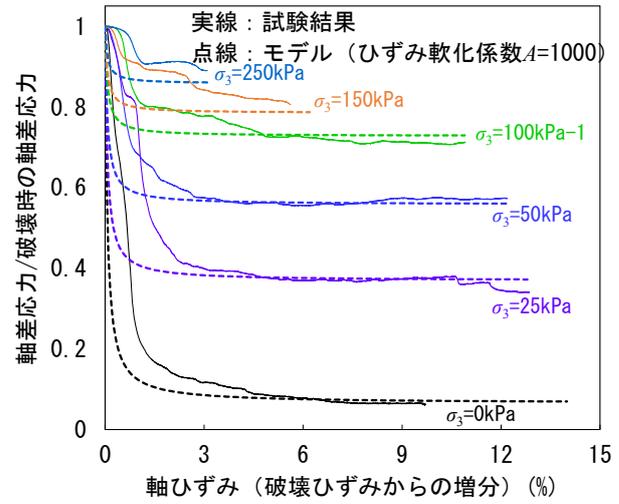


# ひずみ軟化係数A=500, 1000

## A=500

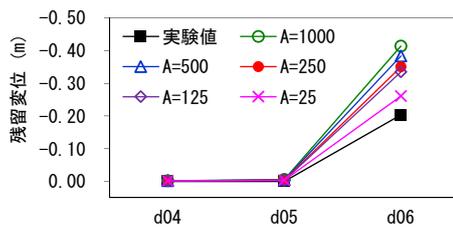


## A=1000

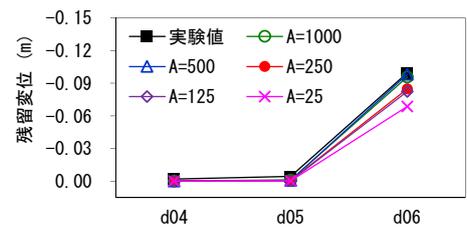


# 残留変位 (加振ステップ d04 ~ d06)

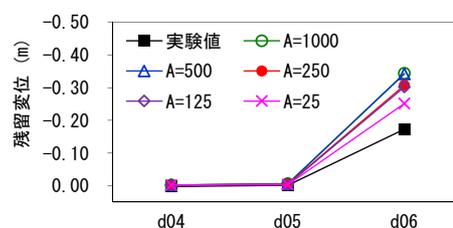
## 15H



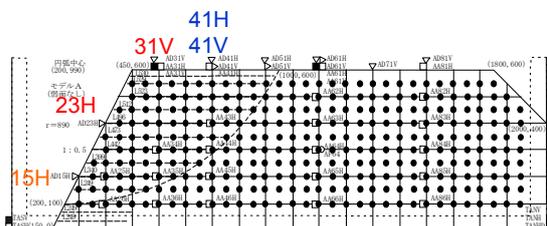
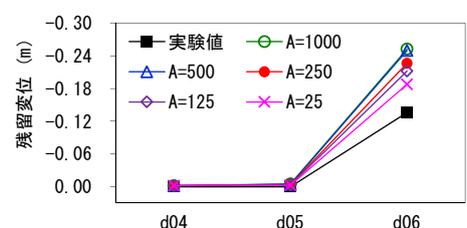
## 31V



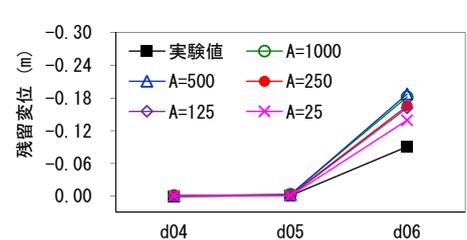
## 23H



## 41H



## 41V



# まとめ

## ● 動的遠心力模型実験から確認された知見

- ・ 等価線形解析によるすべり安全率評価は、すべりによる残留変位が生じるか否かの判定としては妥当。
- ・ ただし、すべり安全率が1を下回ることで、大規模な崩壊・崩落が発生することは等価ではない。

## ● 時刻歴非線形解析による再現解析

- ・ 残留変位量に関しては、実験結果に対して保守的な評価（ひずみ軟化速度が大きい残留強度設定にすることで、より保守的な評価となる）
- ・ より定量的な変位量評価を行うためには、破壊後の強度・剛性の異方性を考慮することが重要と考えられる。

## ● 課題

- ・ 変位量の照査基準値の合理的な設定  
例) 対策工がある斜面に対しては対策工の機能限界  
基礎岩盤に対しては構造物の傾斜、相対変位量等の許容値