

# 地震時における盛土の滑り破壊前の 損傷を考慮した性能照査手法

鉄道地震工学研究センター 地震動力学研究室

研究員 伊吹 竜一

# 本日の発表

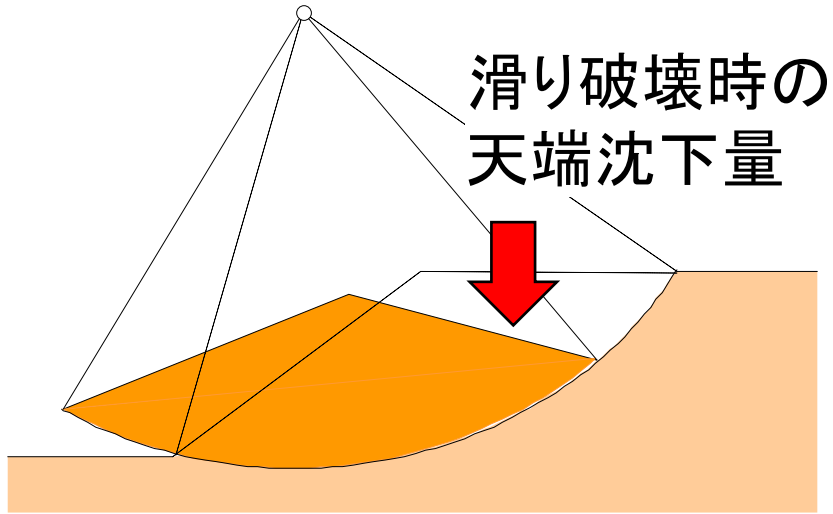
1. はじめに
2. 滑り破壊前の盛土の損傷過程
  - 2.1 遠心模型実験による損傷過程の確認
  - 2.2 FEM解析による応答値算定法
    - (1) 滑り破壊した実験の再現解析
    - (2) 滑り破壊しなかった実験の再現解析
3. 滑り破壊前の損傷を考慮した性能照査手法
4. まとめ

# 本日の発表

1. はじめに
2. 滑り破壊前の盛土の損傷過程
  - 2.1 遠心模型実験による損傷過程の確認
  - 2.2 FEM解析による応答値算定法
    - (1) 滑り破壊した実験の再現解析
    - (2) 滑り破壊しなかった実験の再現解析
3. 滑り破壊前の損傷を考慮した性能照査手法
4. まとめ

# 1. はじめに(研究の背景)

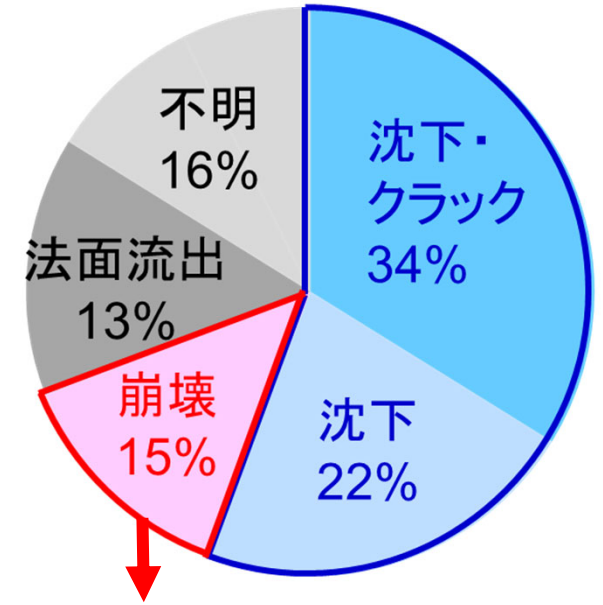
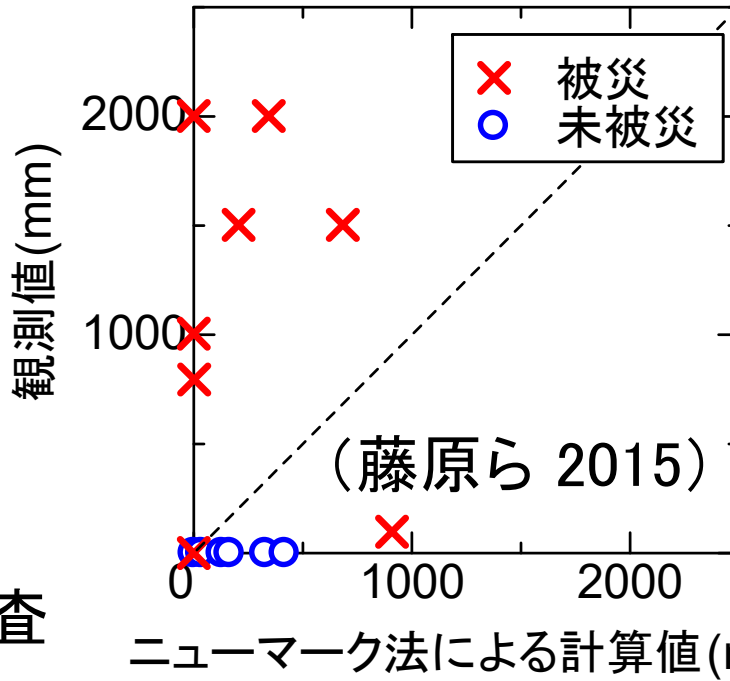
## 現行手法(ニューマーク法)



天端沈下量を用いて復旧性を照査

実務的に有用・多数の実績

## 実被害との比較

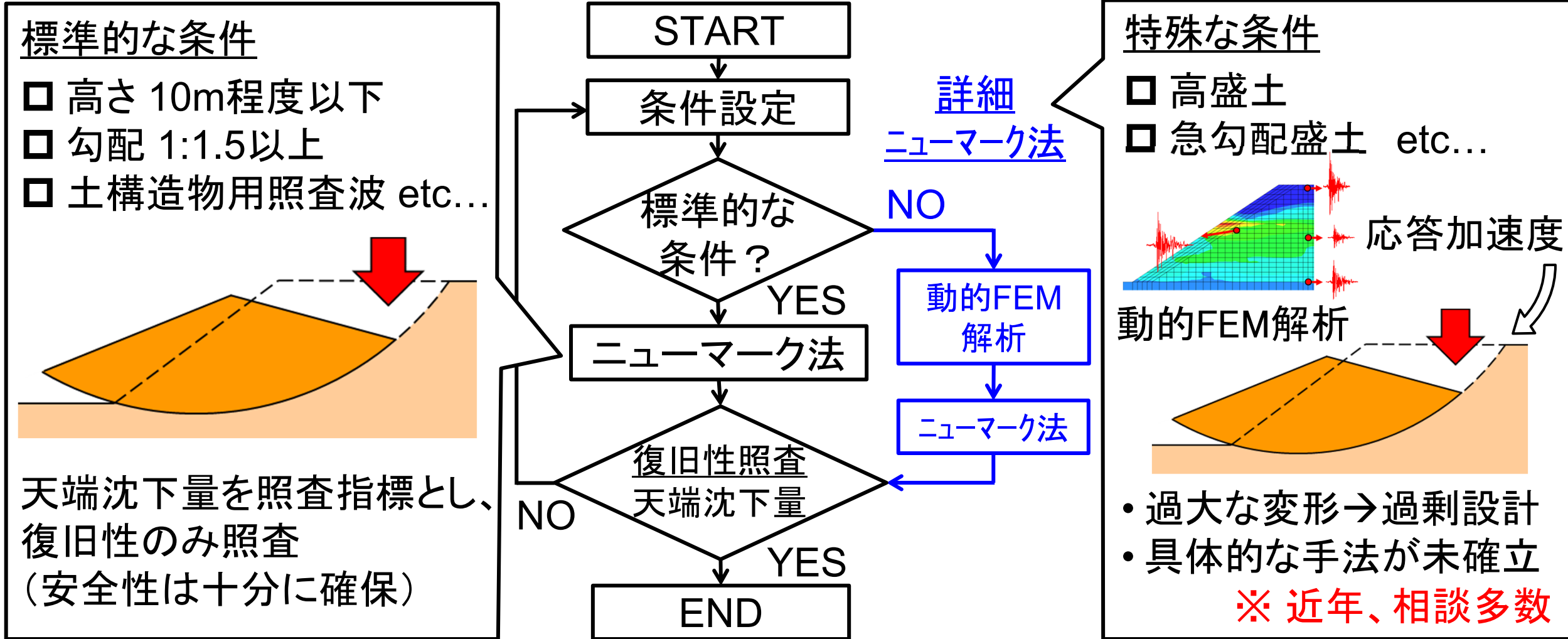


軟弱地盤/集水地形等  
(盛土体の破壊はみられず)

滑り破壊に至らないような損傷が生じる場合がある

課題① ニューマーク法では滑り破壊前の損傷過程を評価できない

# 1. はじめに(研究の背景)



課題② 特殊な条件ではニューマーク法を用いると過剰設計となる場合がある

# 1. はじめに(研究の目的)

## 課題

- ニューマーク法は実務的な計算手法であり、多くの実績があるものの、**滑り破壊を前提としているため、滑り破壊前の損傷過程を評価できない。**
- 特に、標準的でない条件(高盛土、急勾配盛土など)では、ニューマーク法によって**過大な変形が算定されて過剰設計**となる場合がある。

## 目的

- 盛土の滑り破壊前の損傷を考慮した性能照査手法の構築
  - ✓ 遠心模型実験による盛土の**地震時損傷過程の解明**
  - ✓ 上記の損傷過程を評価可能な**応答値算定手法の提案**

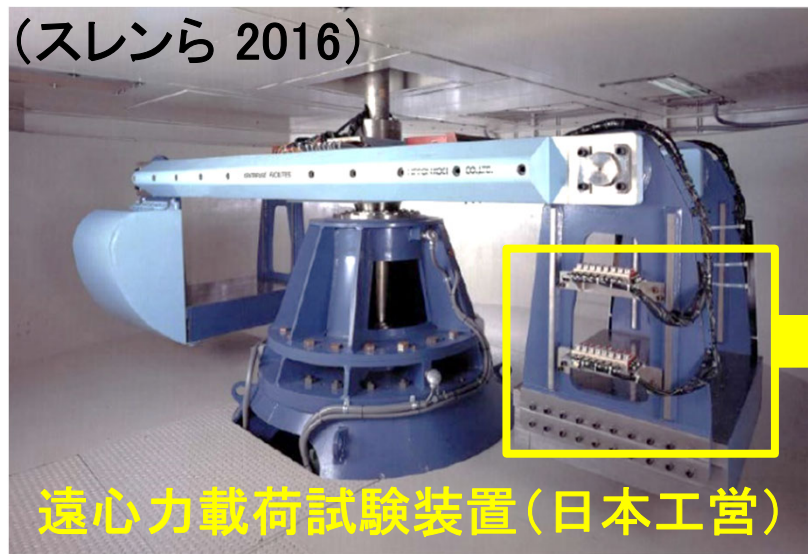
# 本日の発表

1. はじめに
2. 滑り破壊前の盛土の損傷過程
  - 2.1 遠心模型実験による損傷過程の確認
  - 2.2 FEM解析による応答値算定法
    - (1) 滑り破壊した実験の再現解析
    - (2) 滑り破壊しなかった実験の再現解析
3. 滑り破壊前の損傷を考慮した性能照査手法
4. まとめ



## 2.1 遠心模型実験による損傷過程の確認

(スレンら 2016)



遠心力載荷試験装置 (日本工営)



盛土模型を設置



高速で回転



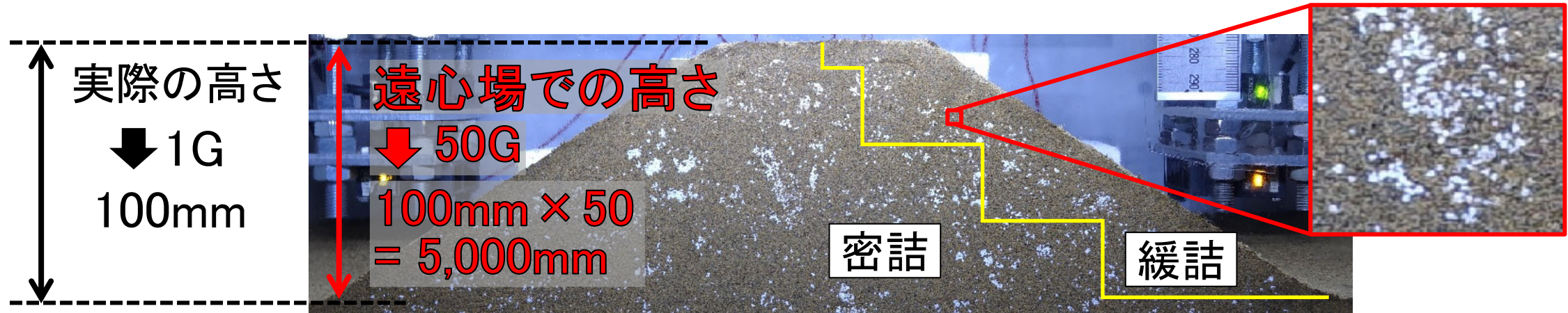
高速度カメラ  
(振動台に固定)

- 模型を回転させて遠心力を載荷  
⇒ 実規模相当の応力状態を再現
- 高速度カメラを振動台に固定し、  
**加振中の盛土を撮影** (実物換算で0.5秒間隔)

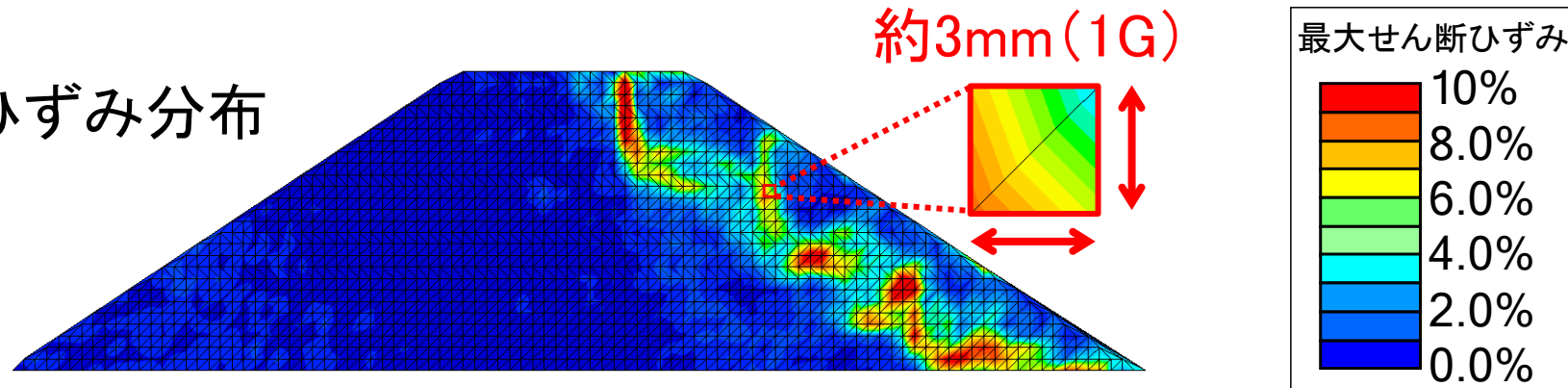
加振中の実規模盛土を観察可能



## 2.1 遠心模型実験による損傷過程の確認(予備実験)



最大せん断ひずみ分布  
(加振前後)

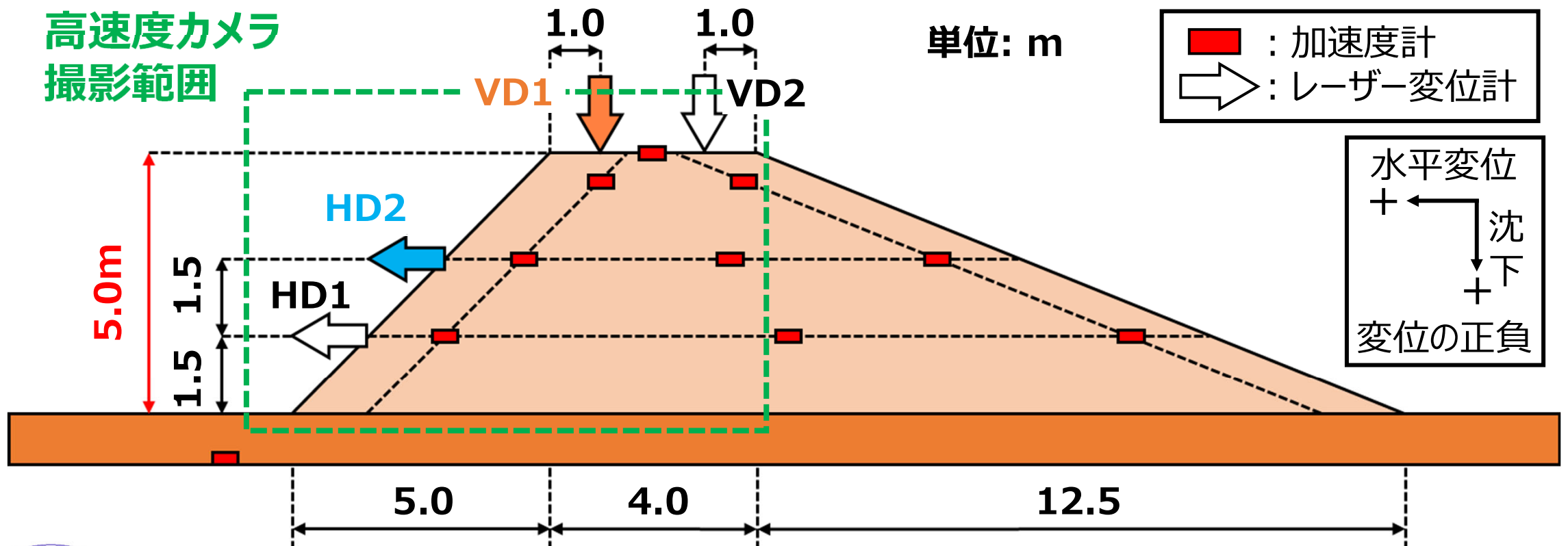


- ① 遠心加速度50G場での振動台実験
- ② 高解像度画像を**高速度カメラ**で取得
- ③ 画像解析により**加振中**の変位量やひずみ分布を算定

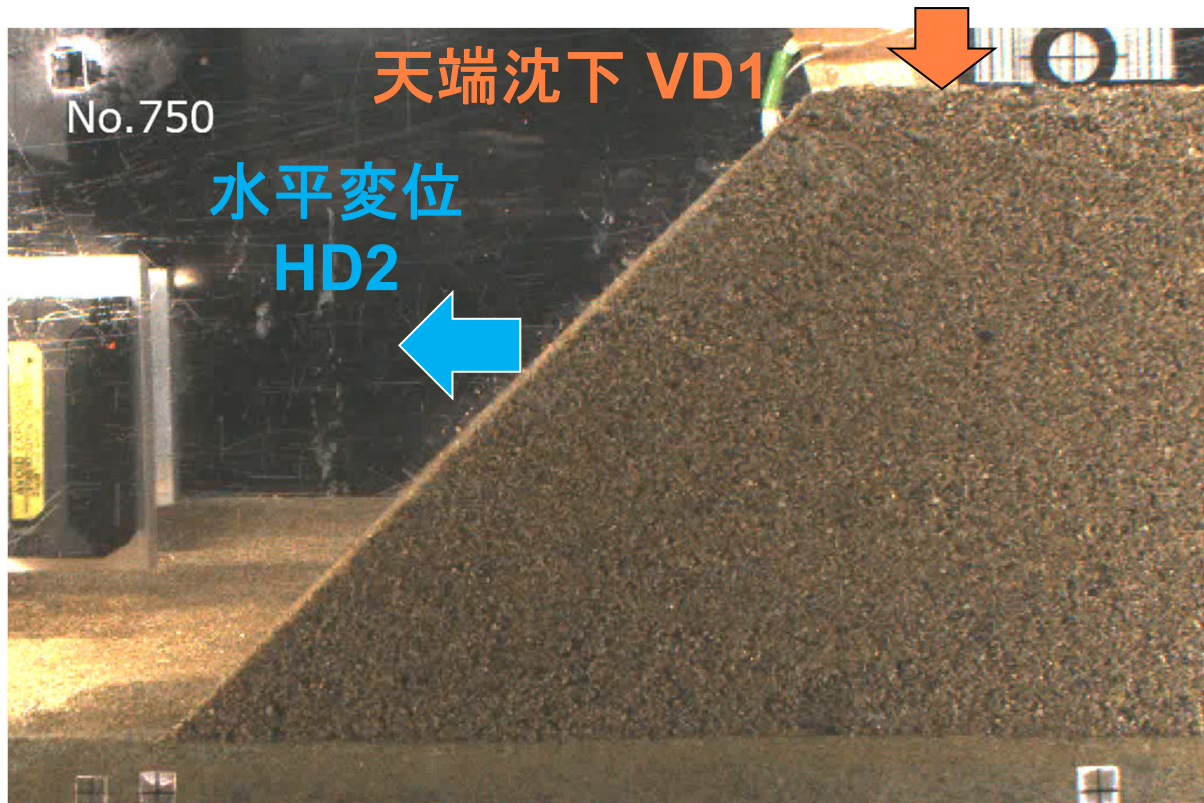
実規模盛土の  
損傷過程を詳細に把握

# 2.1 遠心模型実験による損傷過程の確認

- 高さ5m(50G場換算)、左側法面勾配1:1.0
- 盛土体:江戸崎砂( $D_c=95\%$ ) 支持層:セメント改良土
- 入力波:スペクトル I (鉄道における標準設計地震動)

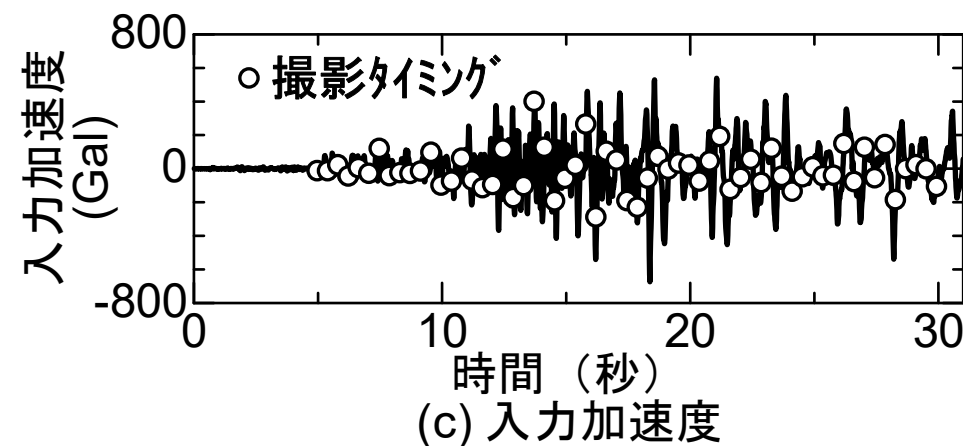
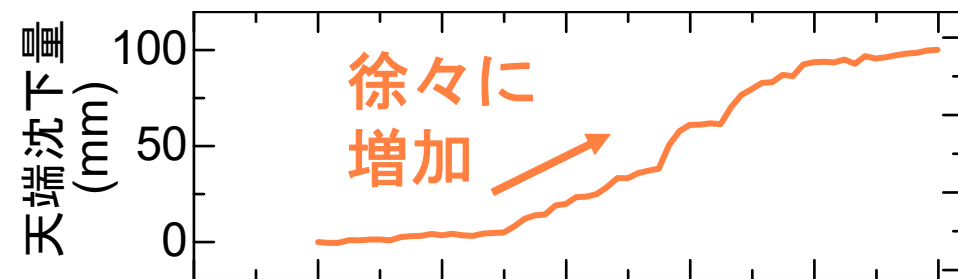


## 2.1 遠心模型実験による損傷過程の確認



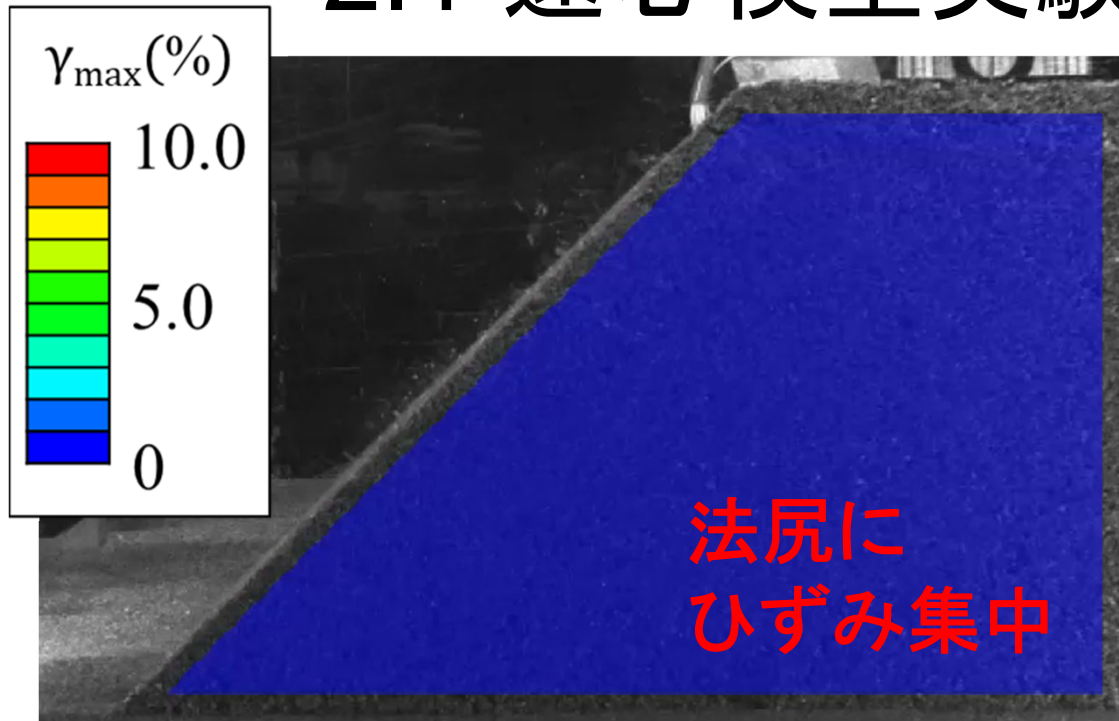
➤ 1回目の加振(スペクトル I)で滑り破壊

滑り破壊に至る前に損傷が進行





# 2.1 遠心模型実験による損傷過程の確認

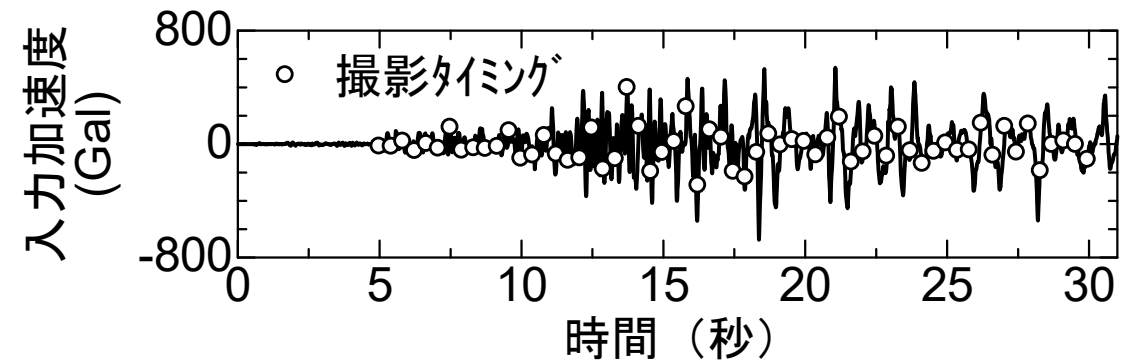
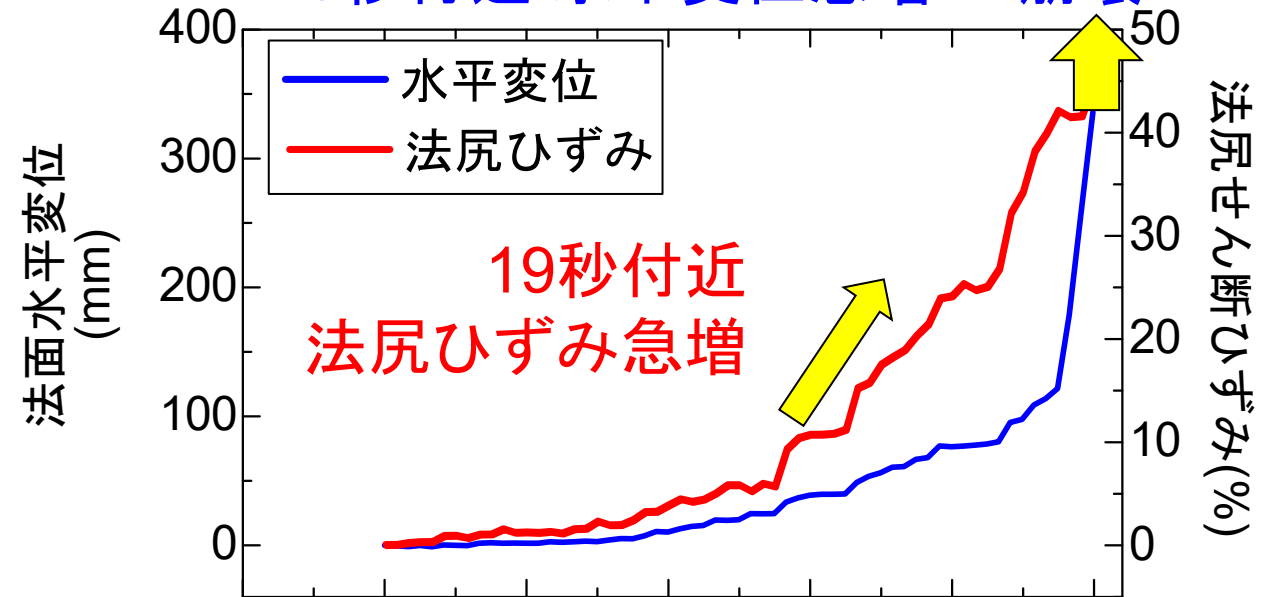


最大せん断ひずみ $\gamma_{max}$ 分布

## 滑り破壊前の損傷過程

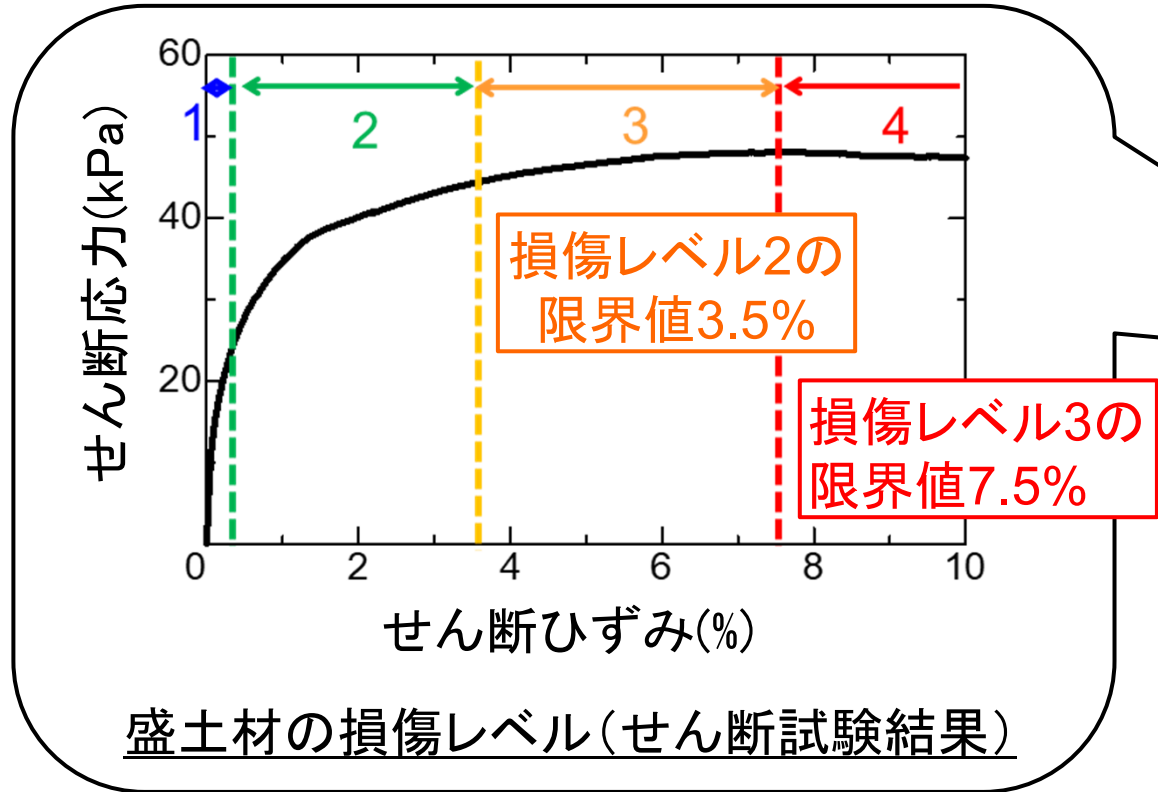
- ① 法尻にひずみ集中
- ② 法尻を起点に内部へひずみ進展
- ③ 滑り線の発生

29秒付近 水平変位急増 → 崩壊

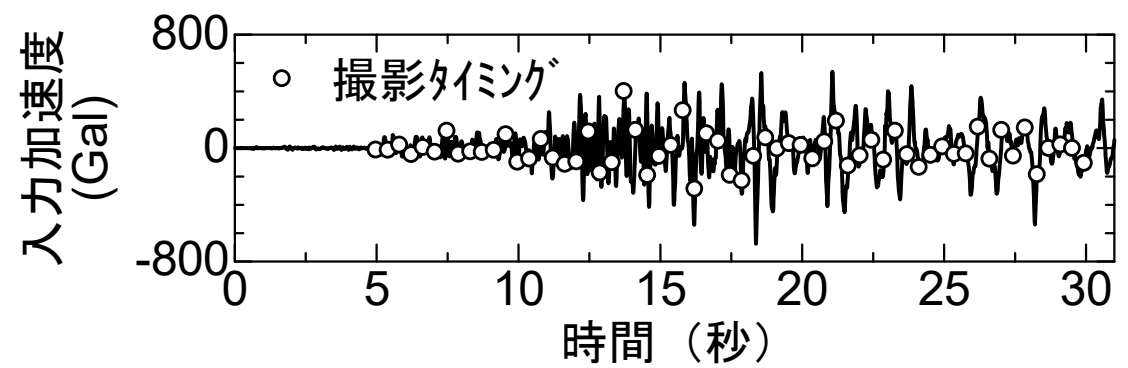
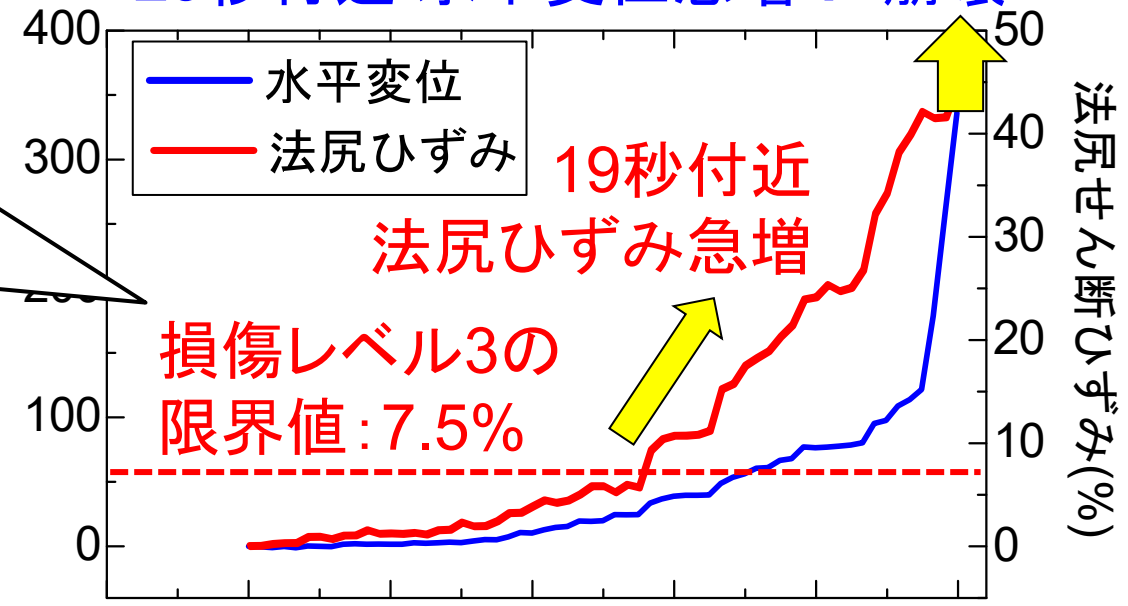


\* スペクトル I (最大加速度670Gal) 入力

# 2.1 遠心模型実験による損傷過程の確認



29秒付近 水平変位急増 → 崩壊



滑り破壊の発生過程

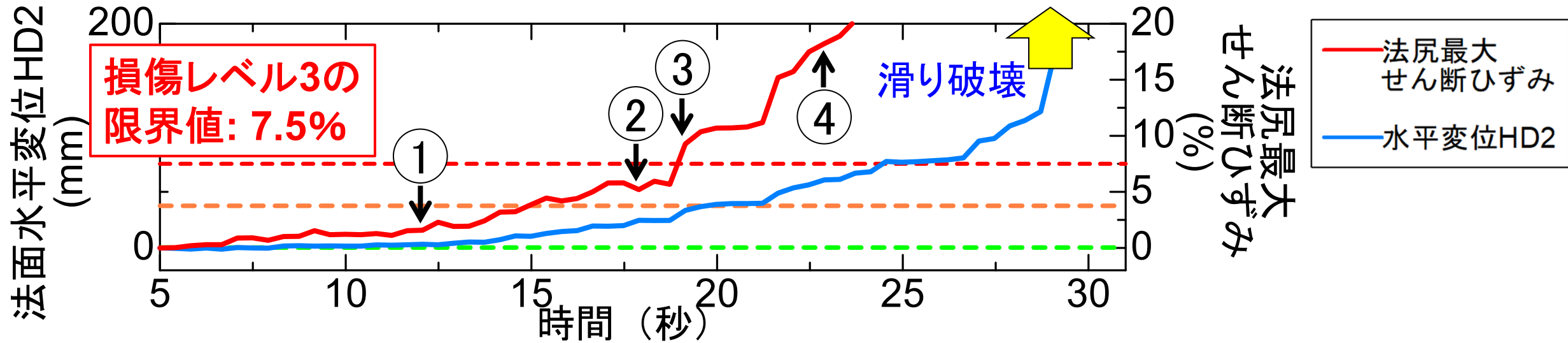
法尻部が損傷レベル3を超過

→ 法尻部が局所破壊 → 滑り破壊

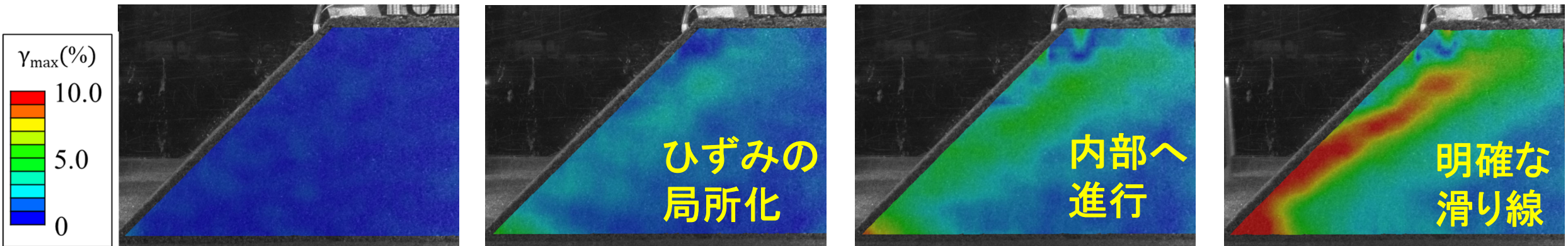
\* スペクトル I (最大加速度670Gal) 入力



# 2.1 遠心模型実験による損傷過程の確認



①12.1秒: 損傷レベル2 ②17.9秒: 損傷レベル3 ③19.1秒: 損傷レベル4 ④22.9秒: 滑り破壊

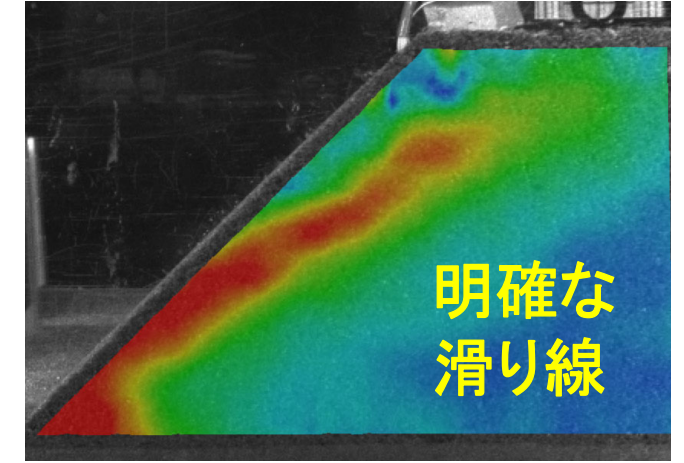
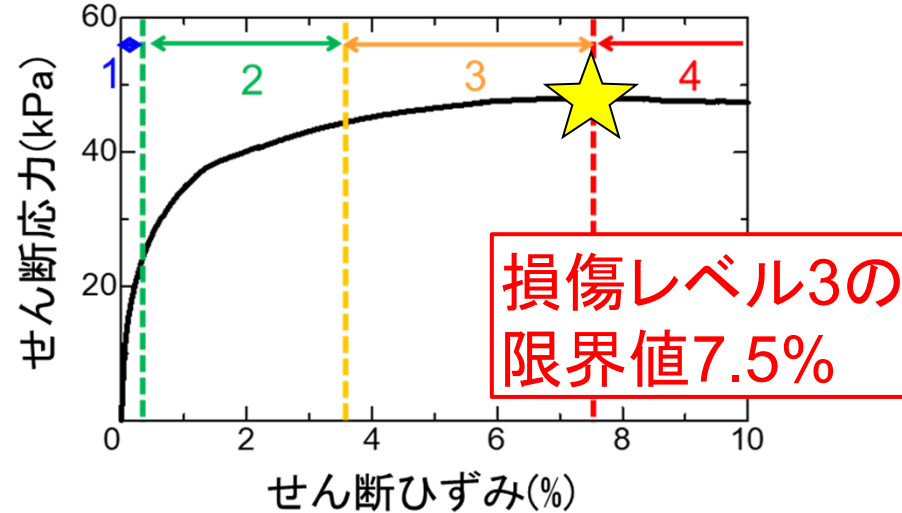
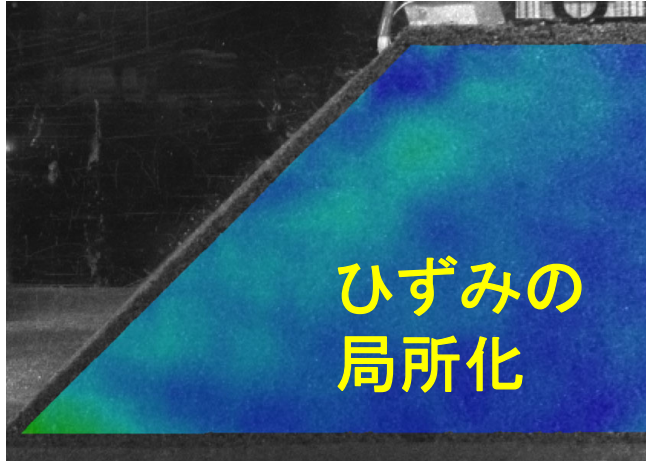


法尻せん断ひずみと盛土材の損傷レベルにより、盛土の損傷状況を評価可能



## 2.1 遠心模型実験による損傷過程の確認

### ➤ 滑り破壊前の損傷過程



- ① 法尻にひずみ集中
- ② 法尻ひずみが損傷レベル3を超過  
→ 局所的にせん断破壊
- ③ 破壊が内部へと進行  
盛土体が滑り破壊

### ➤ 滑り破壊に対する安全性の限界値 = 法尻せん断ひずみが損傷レベル3を超過

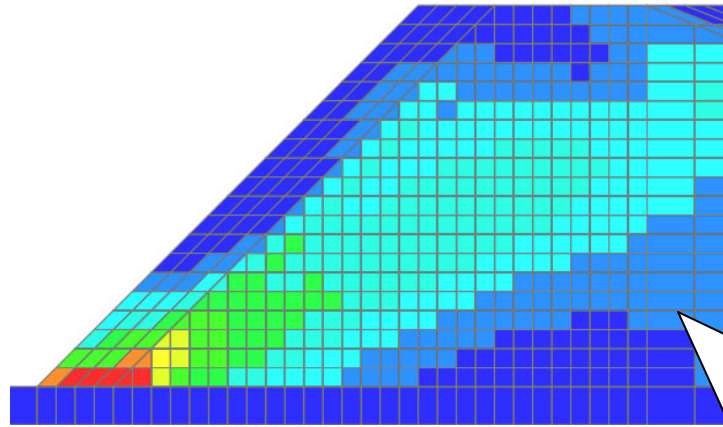
※ 標準的な勾配(1:1.5)では複数回の加振でも滑り破壊しないことを別途確認  
⇒ 滑り破壊に対して十分な安全性を有している

# 本日の発表

1. はじめに
2. 滑り破壊前の盛土の損傷過程
  - 2.1 遠心模型実験による損傷過程の確認
  - 2.2 FEM解析による応答値算定法
    - (1) 滑り破壊した実験の再現解析
    - (2) 滑り破壊しなかった実験の再現解析
3. 滑り破壊前の損傷を考慮した性能照査手法
4. まとめ

# 2.2 FEM解析による応答値算定法

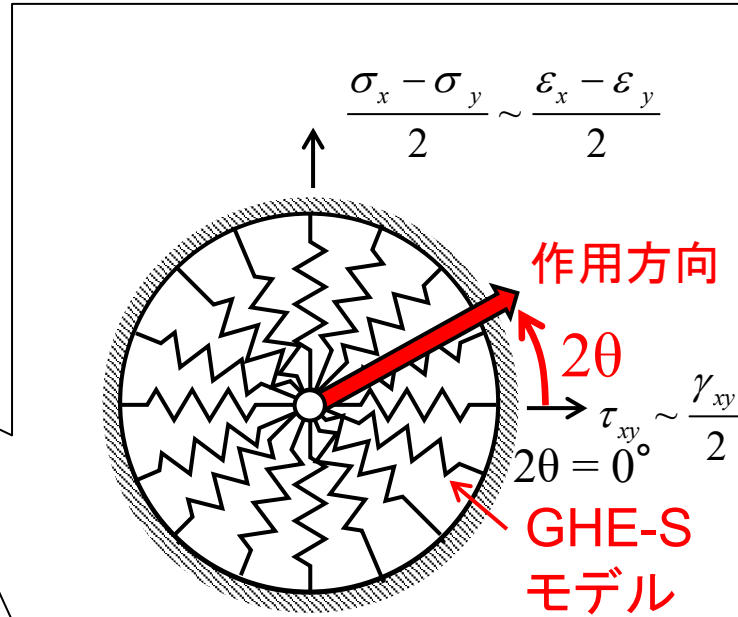
破壊に関する安全性照査 ⇨ 法尻に発生する損傷レベル3までのせん断ひずみの算定



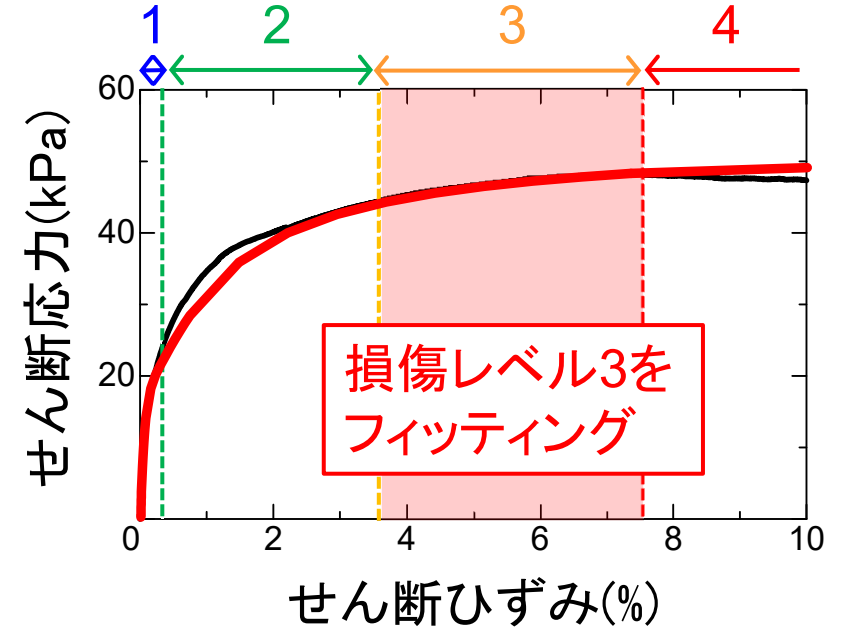
応答値算定法

||

2次元動的FEM解析



1) 多重せん断ばねモデル

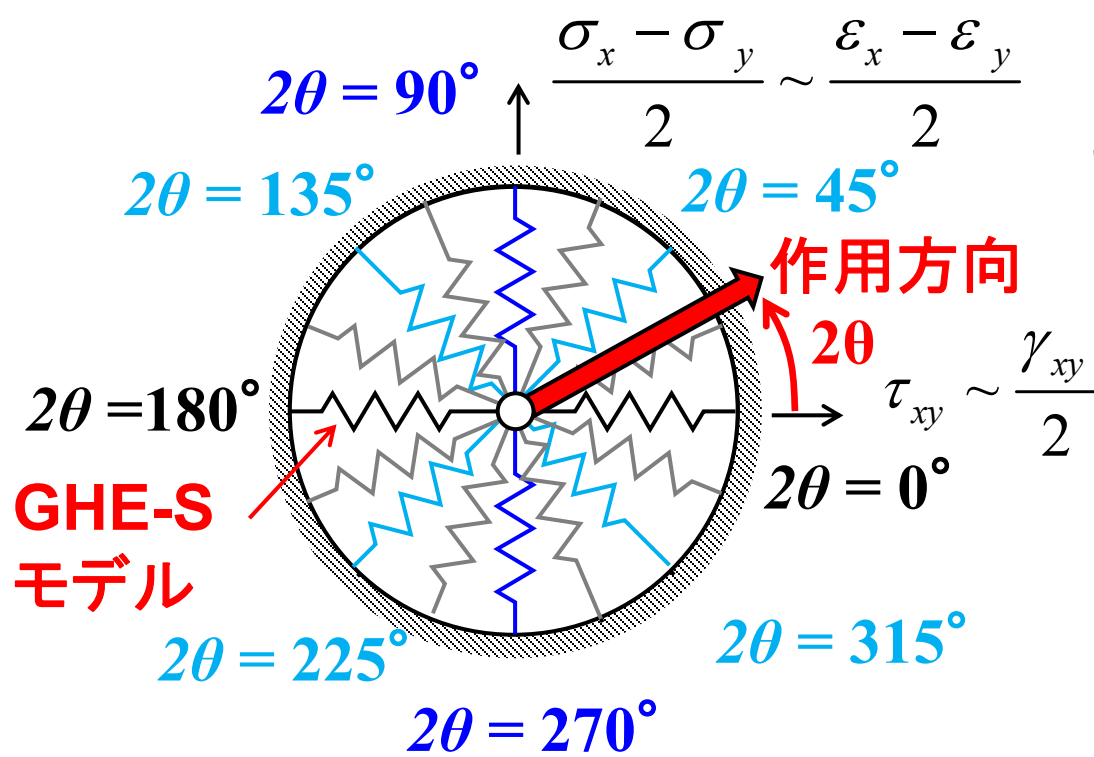


2) GHE-Sパラメータの設定

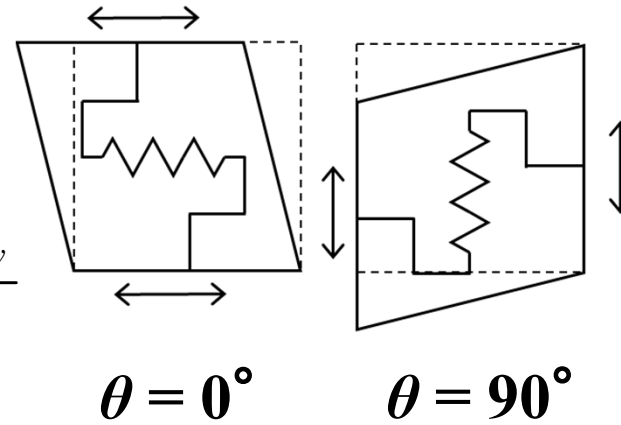
- 多方向のせん断を評価可能
  - ひずみの局所化を評価可能
  - GHE-Sモデル(鉄道標準)を適用可能(従来の詳細ニューマーク法から追加パラメータ無)
- 勾配に応じた初期せん断の影響を考慮可能

# 2.2 FEM解析による応答値算定法

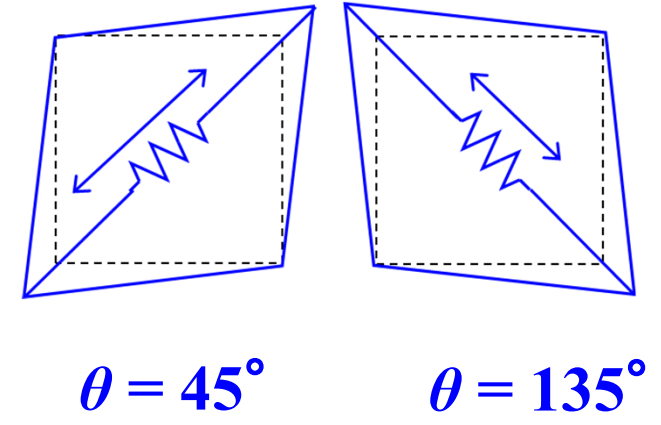
## 多重せん断ばねモデル (Multiple Shear Spring Model)



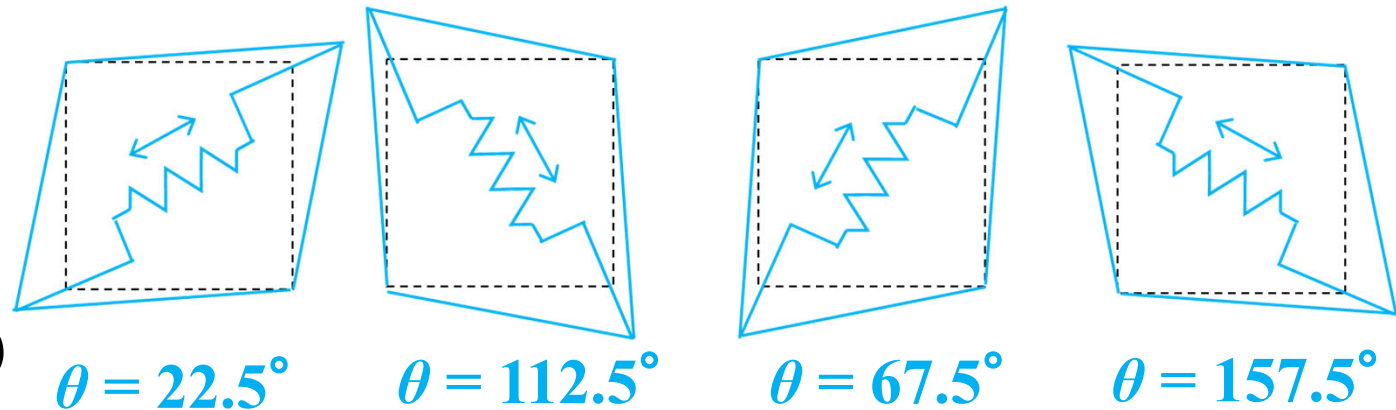
【単純せん断】



【多重せん断ばね2本】

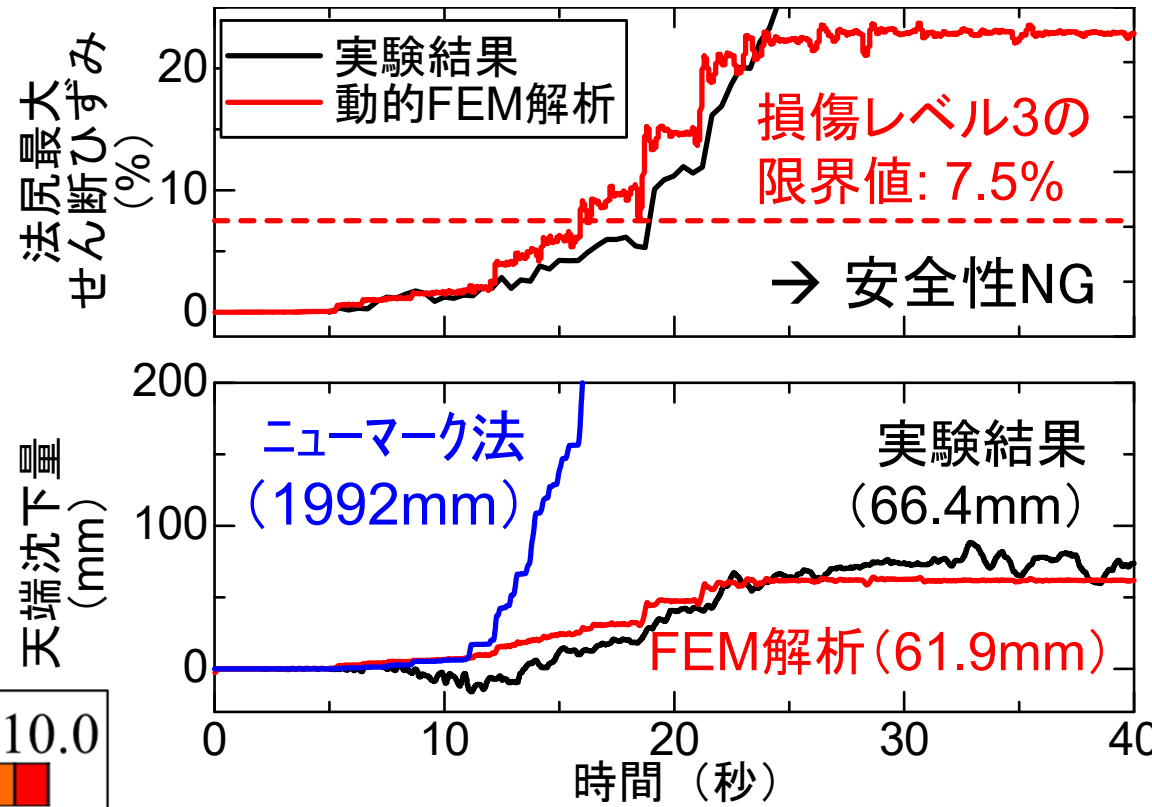
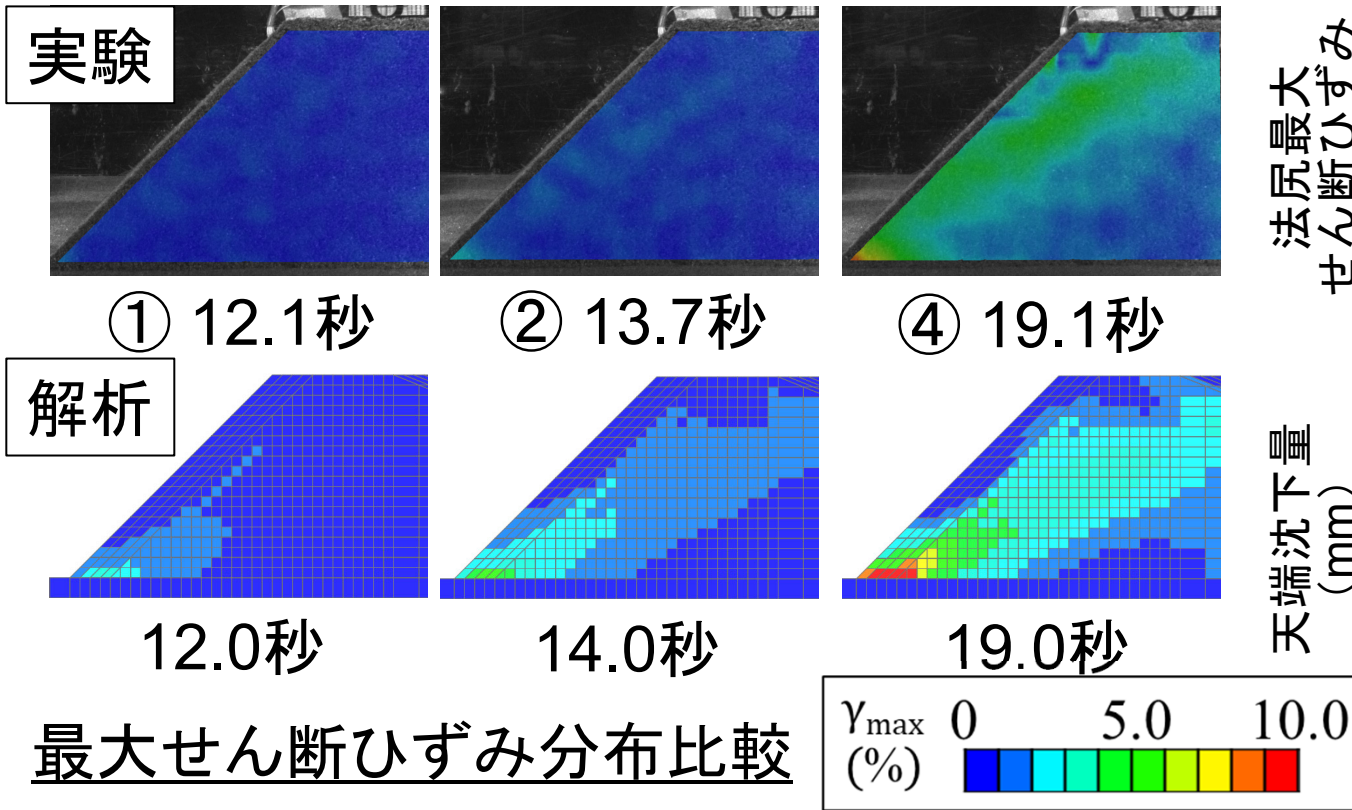


【多重せん断ばね4本】



- 多方向のせん断を評価可能
- せん断ばねは18本に設定  
(実空間で5度ごとのせん断を評価)

# 2.2 (1) 滑り破壊した実験の再現解析



安全性照査

復旧性照査

損傷過程 : 法尻へのひずみの蓄積 → 盛土内部への進展を評価可能

安全性の照査 : 照査指標(法尻最大せん断ひずみ)を精度良く評価可能

復旧性の照査 : 照査指標(天端沈下量)を精度良く評価可能 → **ニューマーク法は過大評価**

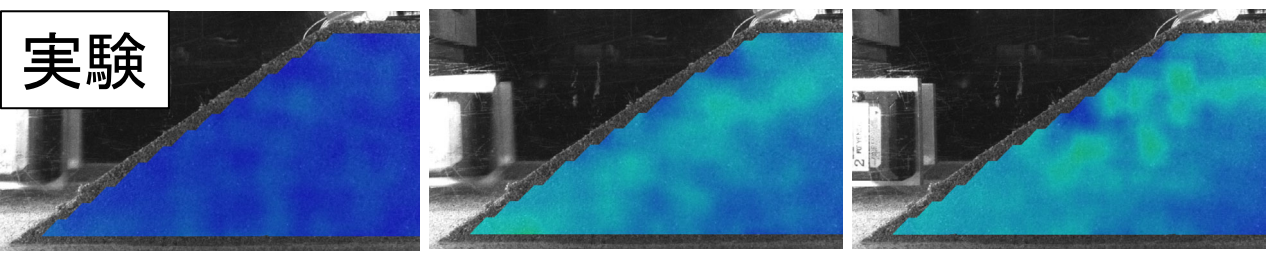




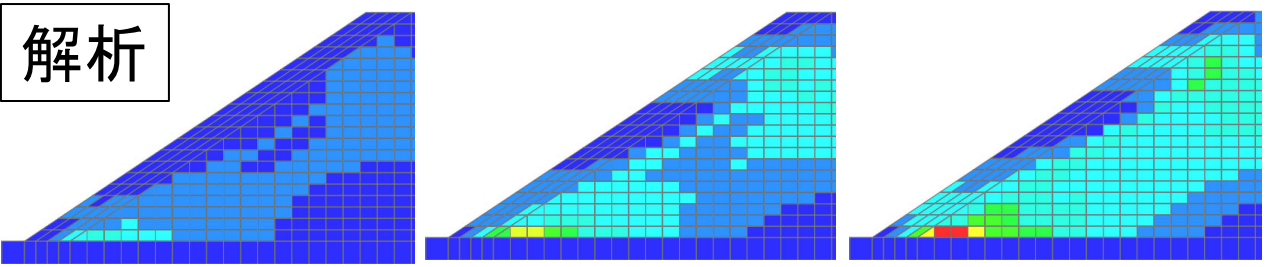
# 2.2 (2) 滑り破壊しなかった実験の再現解析

安全性照査

復旧性照査



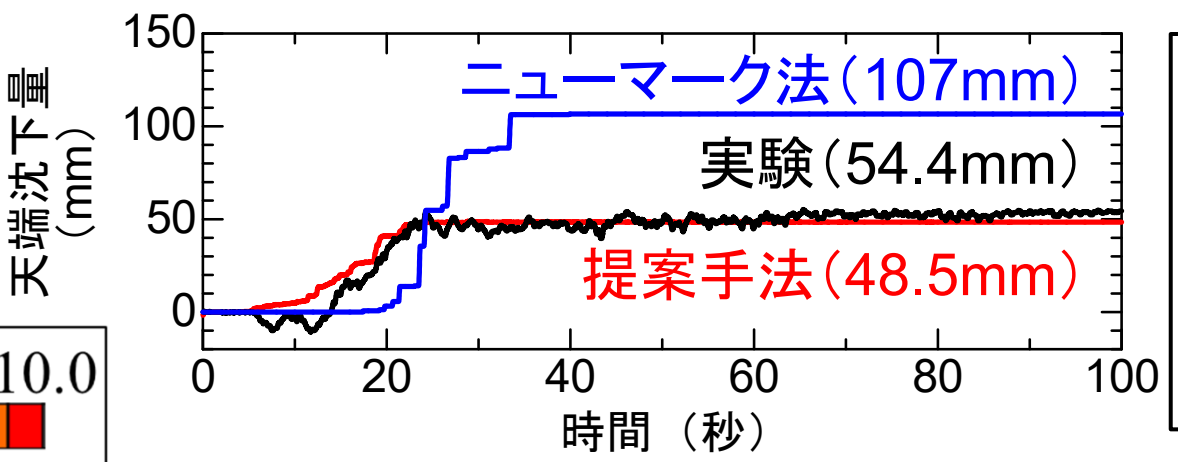
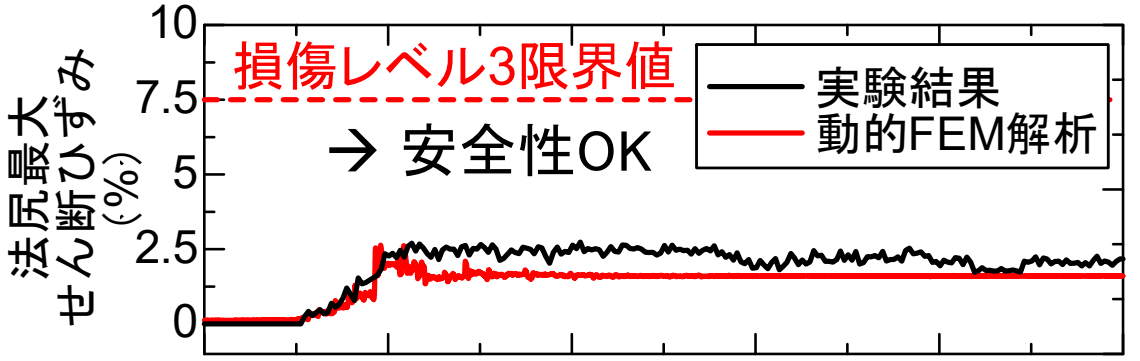
① 15.1秒      ② 20.1秒      ③ 100.0秒



15.0秒      20.0秒      100.0秒

最大せん断ひずみ分布比較

$\gamma_{max}$  (%)      0      5.0      10.0



損傷過程：全体的に変形が生じることを評価可能(1:1.5の標準的な勾配)

安全性の照査：法尻最大せん断ひずみを精度良く評価(損傷レベル3は超過しない)

復旧性の照査：天端沈下量を精度良く評価 →ニューマーク法でも妥当な値を評価

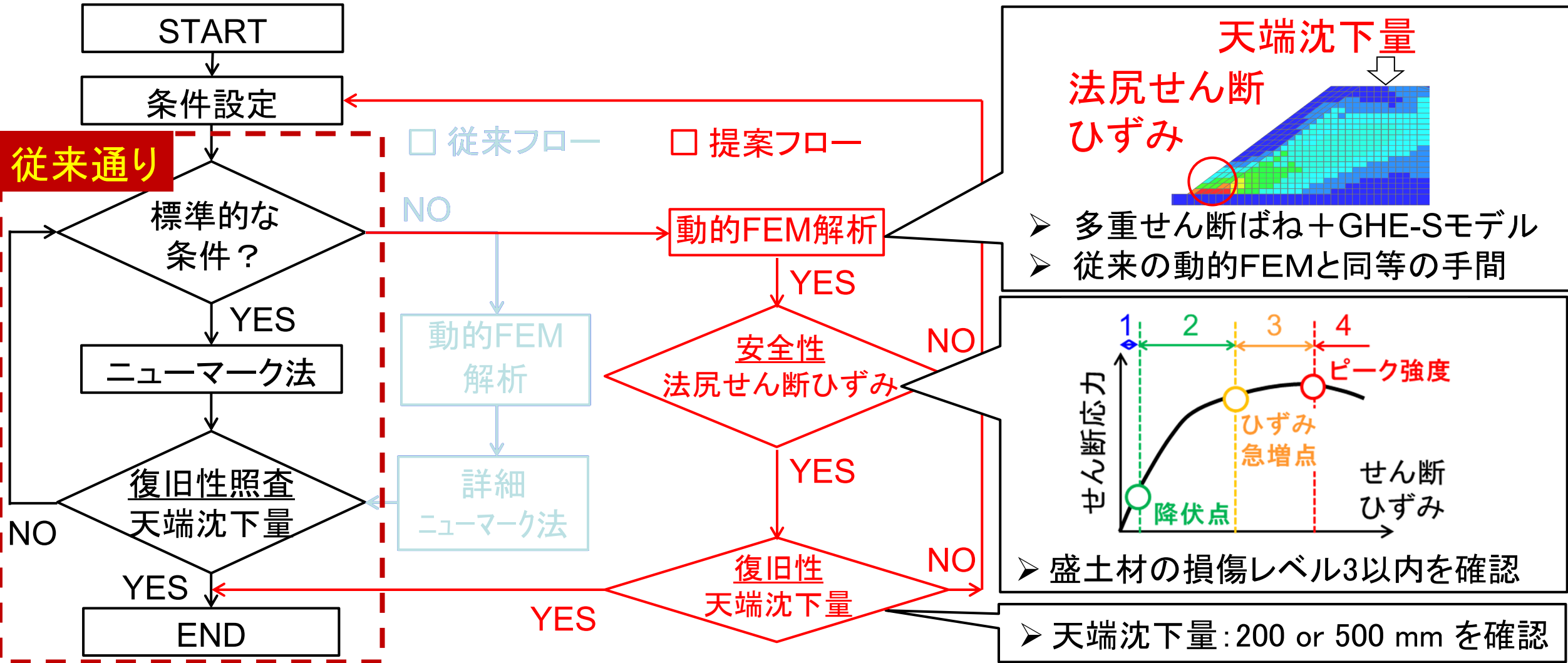




# 本日の発表

1. はじめに
2. 滑り破壊前の盛土の損傷過程
  - 2.1 遠心模型実験による損傷過程の確認
  - 2.2 FEM解析による応答値算定法
    - (1) 滑り破壊した実験の再現解析
    - (2) 滑り破壊しなかった実験の再現解析
3. 滑り破壊前の損傷を考慮した性能照査手法
4. まとめ

# 3. 滑り破壊前の損傷を考慮した性能照査手法



詳細ニューマーク法と同等の手間で安全性・復旧性照査が可能

# 本日の発表

1. はじめに
2. 滑り破壊前の盛土の損傷過程
  - 2.1 遠心模型実験による損傷過程の確認
  - 2.2 FEM解析による応答値算定法
    - (1) 滑り破壊した実験の再現解析
    - (2) 滑り破壊しなかった実験の再現解析
3. 滑り破壊前の損傷を考慮した性能照査手法
4. まとめ

## 4. まとめと成果の活用

### まとめ

- ① 遠心振動台実験により、盛土の**滑り破壊前の損傷過程**を把握した。  
**法尻にせん断ひずみが集中し、盛土材料の損傷レベル3を超過すると滑り破壊が生じる**ことを確認した。
- ② 滑り破壊前の法尻に発生するせん断ひずみや、天端沈下量を精緻に評価できる**実務的な応答値算定手法(FEM)**を提案した。
- ③ 法尻せん断ひずみを照査指標とした**安全性の照査を行うことで、滑り破壊前の損傷を考慮可能な性能照査手法**を構築した。

### 成果の活用

- 特殊条件(急勾配、高盛土等)の盛土の地震時安全性/復旧性の照査
- 標準的な条件の盛土の建設・補強コストの削減 等にご活用いただけます。

# 参考文献

- 伊吹竜一, 土井達也, 井澤淳, 小島謙一: 弱点箇所を見極めた設計により盛土の地震時安全性を高める, RRR, Vol. 79, No.2, 2022
- 土井達也, 伊吹竜一, 井澤淳, 小島謙一, 鈴木聡: 損傷過程を追跡可能な盛土の耐震性能評価手法, 鉄道総研報告, 第35巻, 第5号, 2021
- J. Izawa, T. Doi, A. Suzuki and K. Kojima: Seismic Design of Embankments in Consideration of Damage Process during Earthquakes, QR, Vol.63, No.1, 2022

# 地震時における盛土の滑り破壊前の 損傷を考慮した性能照査手法

鉄道地震工学研究センター 地震動力学研究室

研究員 伊吹 竜一

