

# 地盤に係わる数値解析と変形照査



平成22年05月14日

(財)電力中央研究所 河井 正

1

## 発表概要

### 1. 変形照査の必要性と地盤の数値解析

### 2. 解析事例

—2007年新潟県中越沖地震における東京電力柏崎刈羽原子力発電所構内の地盤沈下について—



Central Research Institute of Electric Power Industry  
Copyright © CRIEPI Year Name

2

## 性能照査型耐震設計

性能照査型耐震設計とは、...

構造物を、その仕様によってではなく、その社会的に要求される性能から規定する耐震設計

簡単にいうと、...

仕様規定：

柱は○本以上、壁厚は△cm以上、など

性能規定：

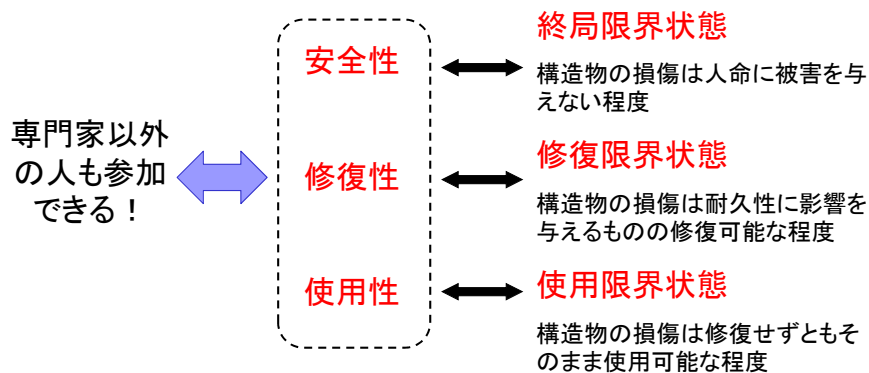
地震時に崩壊して人的被害を生じないこと、など



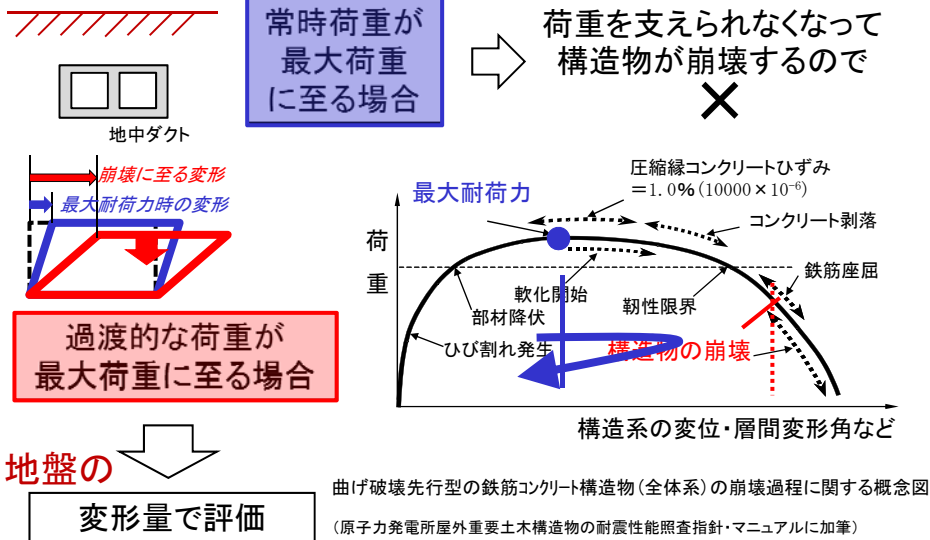
## 目標性能と限界状態

要求される性能は一つとは限らない。基本的に下記の3つの状態に対応して規定される

目標性能 ↔ 性能規定（限界状態）



# 性能設計と変形照査の関係



Central Research Institute of Electric Power Industry  
Copyright © CRIEPI Year Name

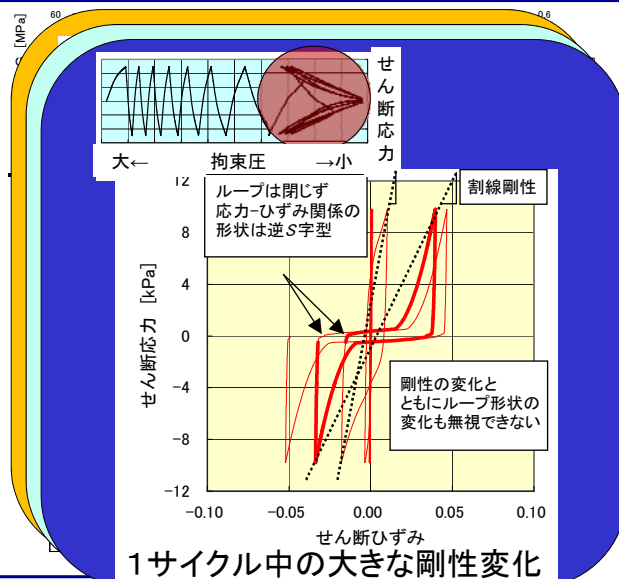
# 複雑な現象(要素レベル)

砂の非排水せん断時の挙動

せん断による過剰間隙水圧の発生

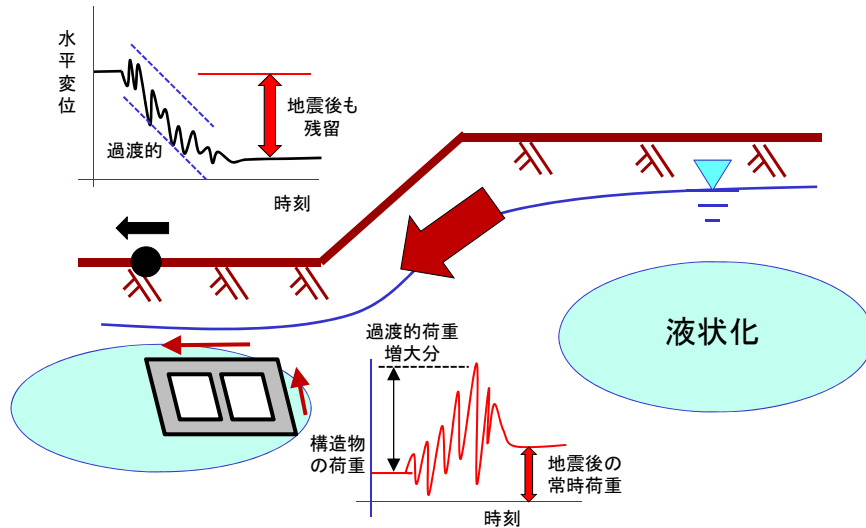
剛性の低下

同じ応力振幅に対してより大きな変形



Central Research Institute of Electric Power Industry  
Copyright © CRIEPI Year Name

## 複雑な現象(境界値問題)



Central Research Institute of Electric Power Industry  
Copyright © CRIEPI Year Name

7

## 数値解析(FEM)の役割

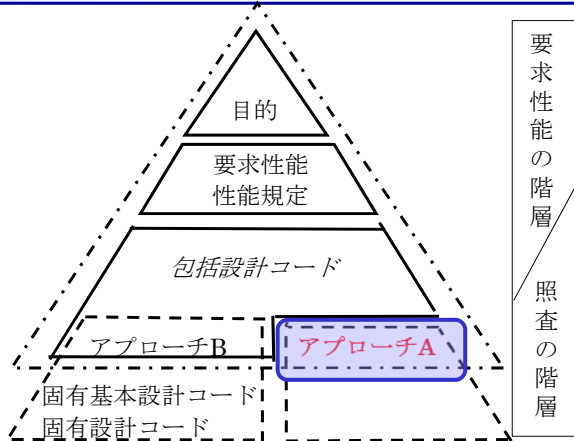
- ・相互に影響する複雑な現象を同時に考慮しつつ変形状態を予測する.
- ・メカニズムを把握し、視覚的に分かり易く説明できる.



Central Research Institute of Electric Power Industry  
Copyright © CRIEPI Year Name

8

性能設計概念に基づいた基礎構造物等に関する設計原則  
(地盤工学会)



適切な信頼度

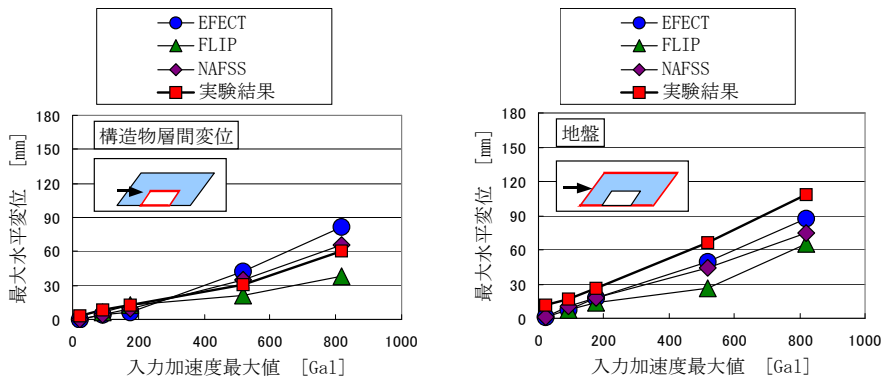
?

構造物の性能照査に用いられる方法に制限を設けず, しかし, 設計者が規定した性能規定を一定のある適切な信頼度で満足することを証明する, 性能照査の照査アプローチ



適切な信頼度とは？

飽和地盤中のダクト構造物に関する遠心力模型実験の結果と数値解析による最大変位



(予測精度) = (信頼度) . . . ?



## 精度に関して①

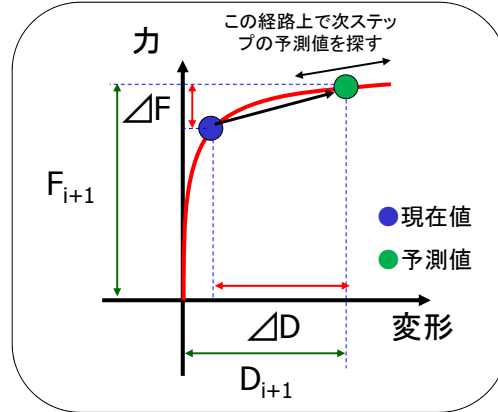
[力のばらつき]

$$\propto \Delta F / F_{i+1}$$

[変位のばらつき]

$$\propto \Delta D / D_{i+1}$$

$$\frac{\Delta F}{F_{i+1}} \ll \frac{\Delta D}{D_{i+1}}$$



非線形性の形状から変形の高精度な予測は**原理的に困難**



## 精度に関して② [地盤固有]

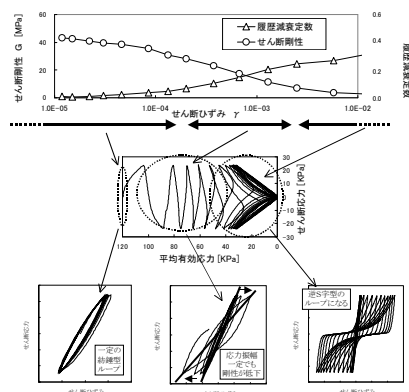
運動方程式

$$M \cdot a + C \cdot v + K \cdot d = F$$

剛性Kは、

- ・ひずみレベル
- ・拘束圧の大きさ
- ・不飽和/飽和(排水条件)

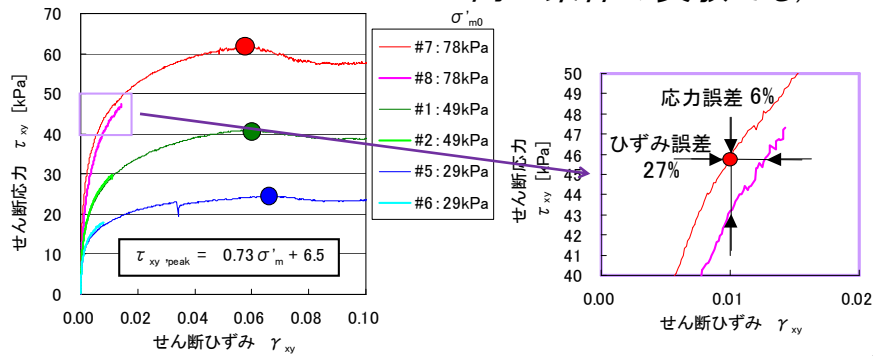
等に依存するが、ひずみや拘束圧は予測対象であるdやその履歴に依存する



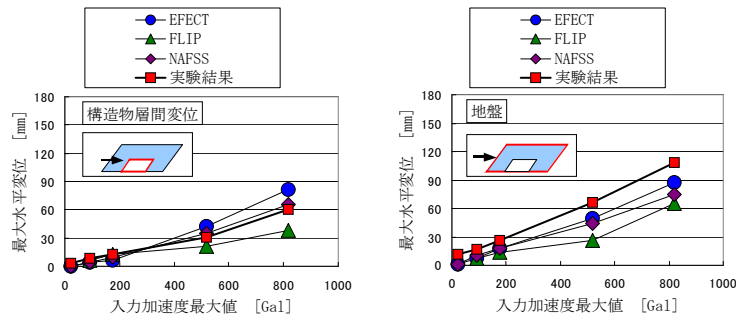
## 精度に関して③[地盤固有]

研究的に実施された比較的均質な砂の

同一条件の実験でも, ...



## もう一度同じ解析結果を見ると

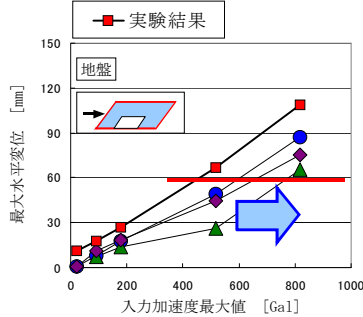


それはムリ...としても,

最大値で合った・合わないの議論をしても信頼度は保証されない,  
 “たまたまにすぎない?” と思います.



## 適切な信頼度



この図のような過小評価をしないためには...

- ・入力を大きくする
- ・変位を **過大評価できる** 物性を設定する

etc.

\*動的解析の場合は、剛性小 ≠ 過大評価

(信頼度) =

- ・メカニズムが正しいこと
  - ・相対的な大小関係が逆転しないこと
- 工学的に安全側の評価ができること



## 発表概要

### 1. 変形照査の必要性と地盤の数値解析

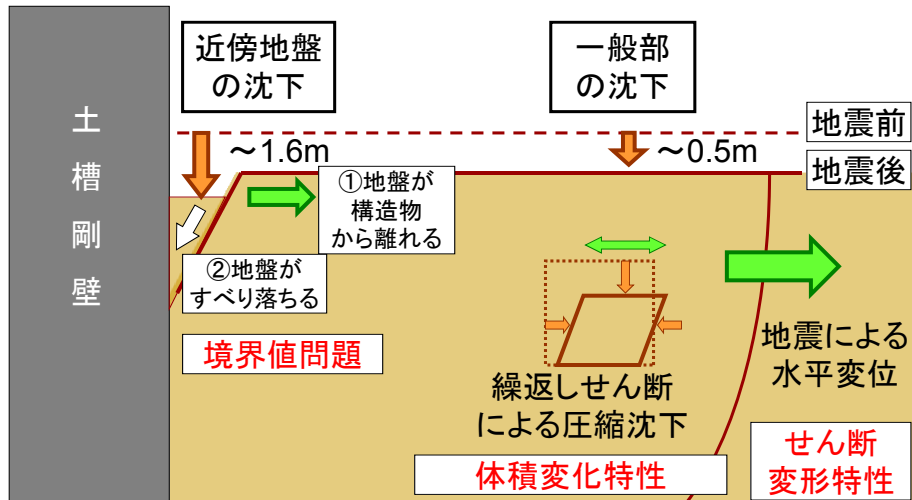
### 2. 解析事例

— 2007年新潟県中越沖地震における東京電力柏崎刈羽原子力発電所構内の地盤沈下について —



## 沈下メカニズムの推定

### 2種類の沈下メカニズム

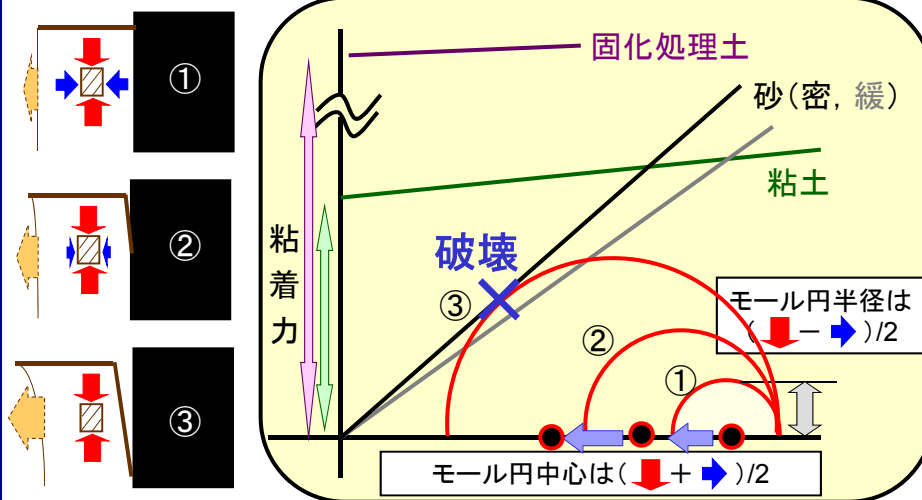


Central Research Institute of Electric Power Industry  
Copyright © CRIEPI Year Name

17

### 沈下メカニズムの推定(壁近傍)

鉛直有効土被り圧(  $\downarrow$  )は一定で側方土圧(  $\rightarrow$  )が減少する。



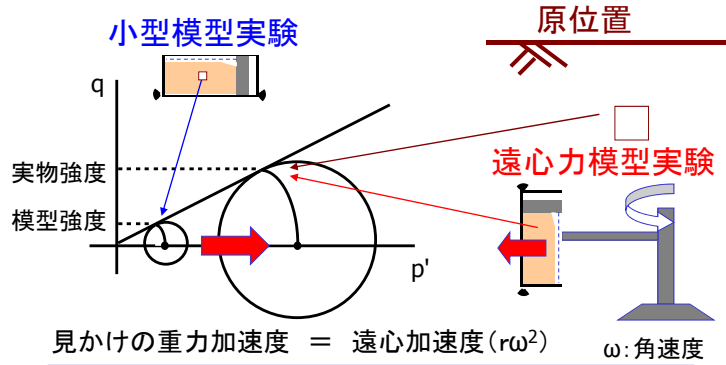
Central Research Institute of Electric Power Industry  
Copyright © CRIEPI Year Name

18

## 遠心力模型実験の必要性と原理

せん断変形特性: 微小ひずみ  $p^{0.5} \Rightarrow$  大ひずみ  $p^{1.0}$   
 破壊強度 :  $p^{1.0}$  (但し粘着力がある場合は  $c' + p^{1.0}$ )  
 体積変化特性:  $p^{??}$

異なる拘束圧依存性を同時に満足する必要がある!

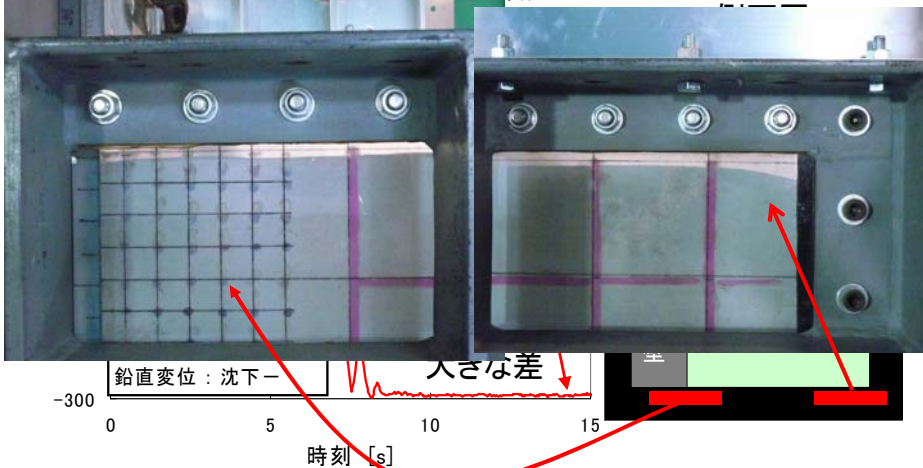


Central Research Institute of Electric Power Industry  
 Copyright © CRIEPI Year Name

19

## 遠心力模型実験の概要

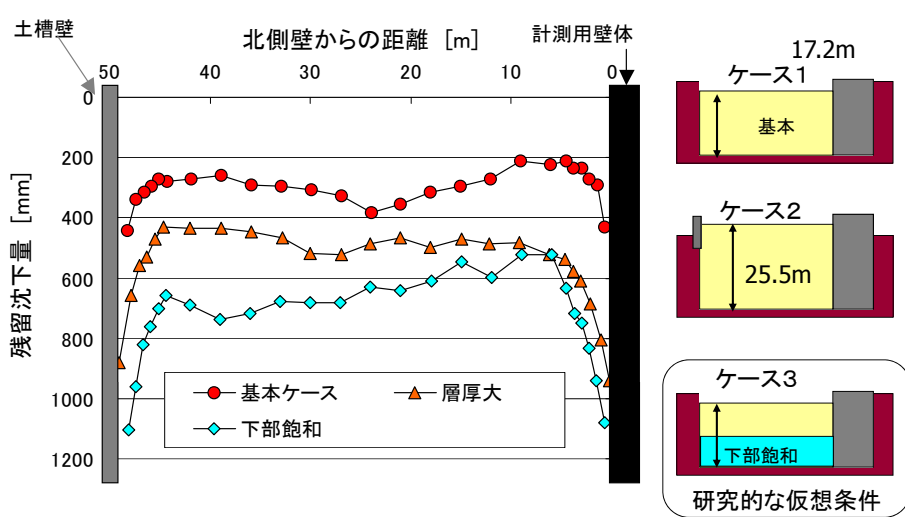
変位時刻歴 (現地観測波形にトズ加振)



Central Research Institute of Electric Power Industry  
 Copyright © CRIEPI Year Name

20

## 遠心力模型実験結果の概要



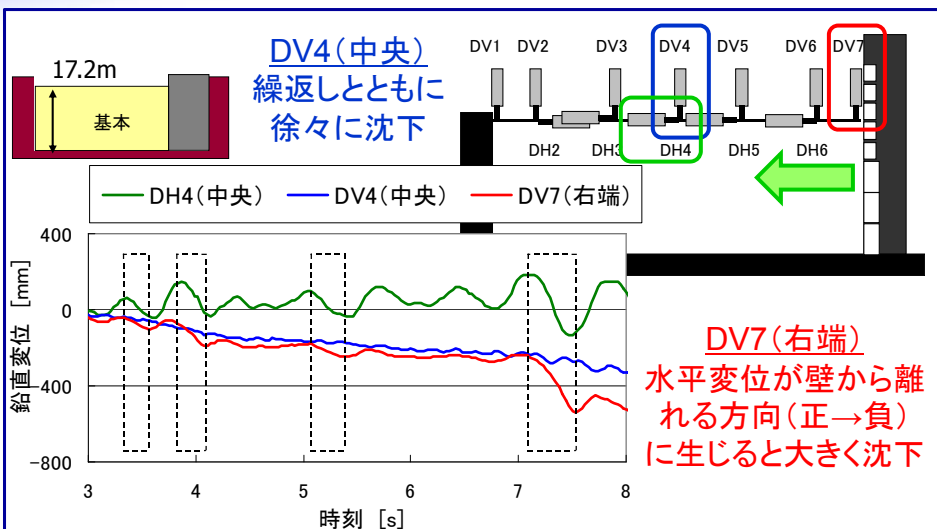
いずれのケースも端部が大きく沈下



Central Research Institute of Electric Power Industry  
Copyright © CRIEPI Year Name

21

## 遠心力模型実験結果の概要



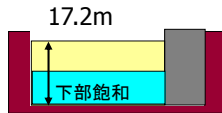
層厚を大きくしたケースも傾向は同じ！



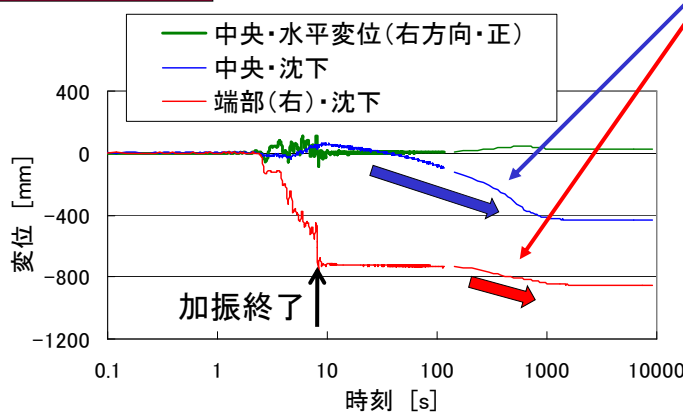
Central Research Institute of Electric Power Industry  
Copyright © CRIEPI Year Name

22

## 遠心力模型実験結果の概要



加振後の水圧消散に伴う沈下！



Central Research Institute of Electric Power Industry  
Copyright © CRIEPI Year Name

23

## GEOASIAによる数値シミュレーション

**GEOASIA:**

ALL SOILS ALL STATES ALL ROUND **GEO-ANALYSIS** INTEGRATION

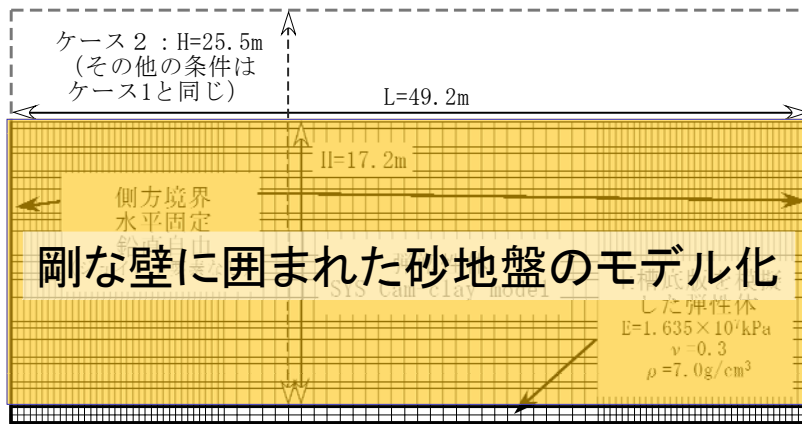
SYS Cam-clay modelを搭載し、水~土骨  
格連成式(連続式)のモデル化は田村流・  
Christian 流に基づく、有限変形有限要素  
解析コード



Central Research Institute of Electric Power Industry  
Copyright © CRIEPI Year Name

24

## 数値シミュレーションの概要



底面境界：加速度入力位置（水平のみ入力の場合は鉛直固定）

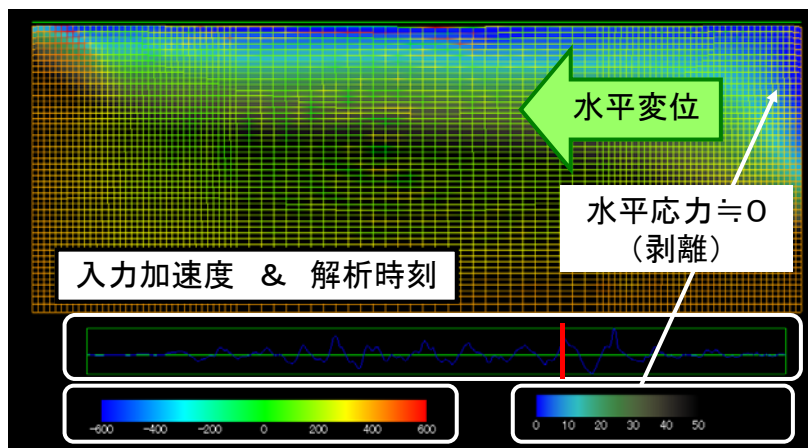
地盤の物性パラメータは構成式シミュレーションで設定  
(すべてのケースを同じ材料パラメータで計算)



Central Research Institute of Electric Power Industry  
Copyright © CRIEPI Year Name

25

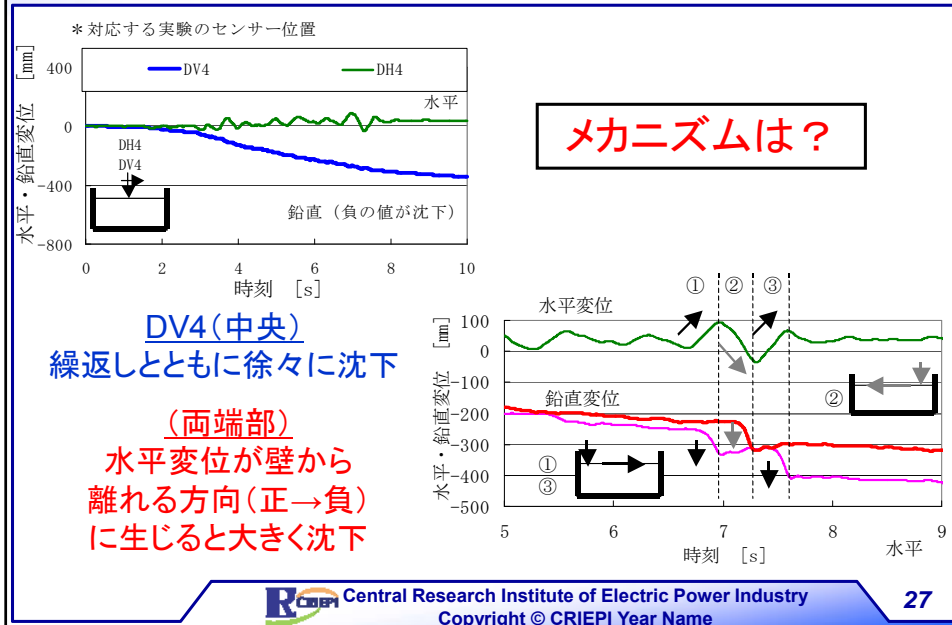
## 数値シミュレーションの概要



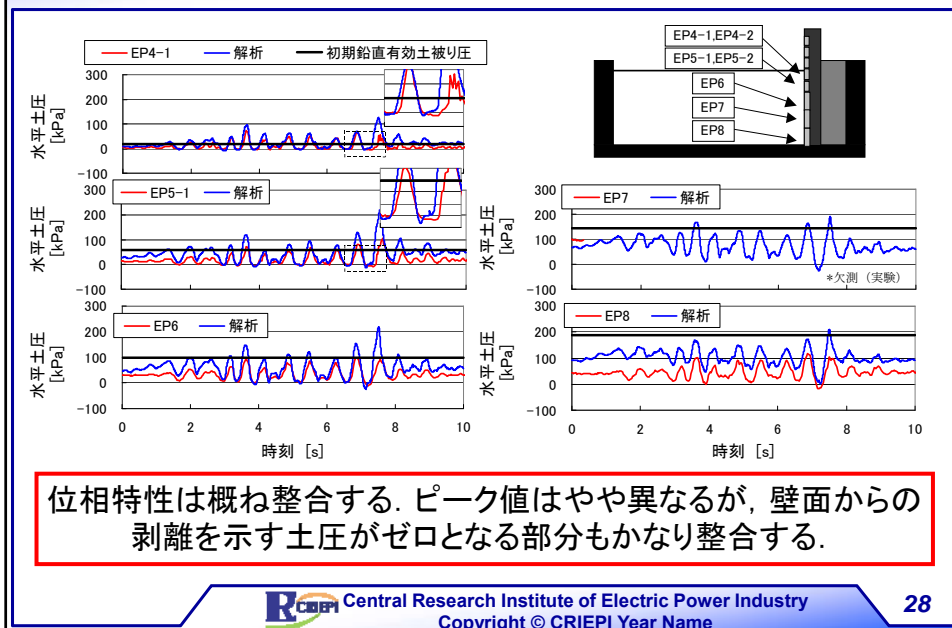
Central Research Institute of Electric Power Industry  
Copyright © CRIEPI Year Name

26

## 変位に関する数値シミュレーション結果



## 応力に関する数値シミュレーション結果



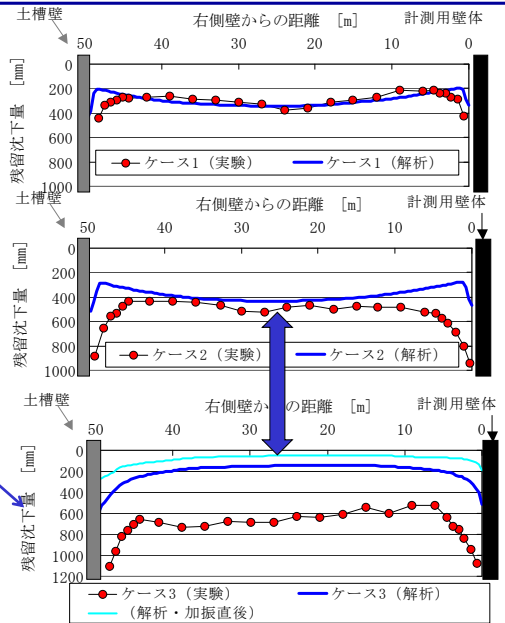
## 変位に関する数値シミュレーション結果

相対関係は？

実験同様に解析でも  
ケース1<ケース2  
(層厚小) (層厚大)

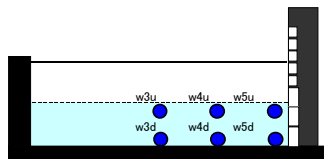
メカニズムが異なる  
ケース1・ケース2  
との相対関係は×  
メカニズムは再現！  
→加振終了後に沈下する

CRIEPI Central Re

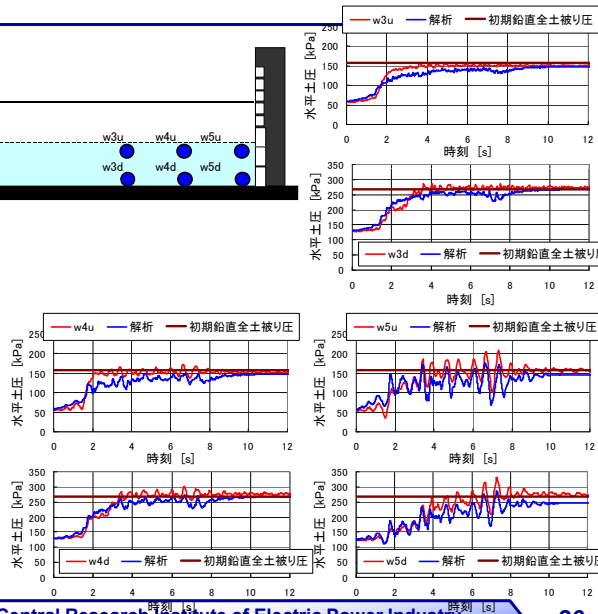


## 飽和地盤の解析結果について

過剰間隙水圧は  
実験と解析とで概  
ね整合する



液状化が発生することは評価できているため、液状化する場合の沈下量を別の方法で見積もることも可能



CRIEPI

Central Research Institute of Electric Power Industry  
Copyright © CRIEPI Year Name

30

## まとめ(地盤の地震時応答と～)

(信頼度) =

- ・メカニズムが正しいこと
- ・相対的な大小関係が逆転しないこと → 工学的に安全側の評価ができること

### メカニズム

- ・沈下のタイミング等から中央部が土の体積圧縮, 端部が主働すべりで沈下していることは再現できた.
- ・下部が飽和した場合は中央部の沈下は加振中にほとんど生じず, 過剰間隙水圧の消散に伴って沈下することが再現できた.

### 相対的な大小関係

- ・不飽和地盤で層厚の大小と沈下の大小の関係は再現できた.
- ・飽和地盤の沈下量は相対的に小さくなったため別途考慮することが必要となる.



## 地盤に関する数値解析の使い方の提案

評価対象の挙動に関係する地盤の応答を把握

(信頼度) =

- ・メカニズムが正しいこと
- ・相対的な大小関係が逆転しないこと
- 工学的に安全側の評価ができること

支配的な応力・変形状態を把握

単純化して室内試験で定量化

構成式応答の確認

境界条件等を設定して地震応答解析

単純化した条件と要素の応答との乖離を確認

メカニズム

相対関係

