

電力中央研究所 地球工学研究所

# 電力土木技術協会 第21回会誌「講座」講習会 (その2 - 原子力, 火力)

電力中央研究所 地球工学研究所

研究参事 大友敬三

2016年7月22日

京都大学 東京オフィス

電力中央研究所

© CRIEPI

電力中央研究所

## 電力施設の耐震解析技術 第3回 原子力発電所の基礎地盤・周辺斜面の耐震解析技術

電力土木, No.381, 2016.1

石丸 真, 岡田哲実

1. はじめに
2. 基礎地盤・周辺斜面の耐震性評価の動向
3. 地盤の非線形時刻歴解析における留意点
  - (1) メッシュ分割
  - (2) 境界条件
  - (3) Rayleigh 減衰
4. 非線形時刻歴解析手法の検証例
  - (1) 破壊進展を考慮した解析手法の概要
  - (2) 斜面の動的遠心力模型実験
  - (3) 動的遠心力実験に対する非線形時刻歴解析
5. おわりに

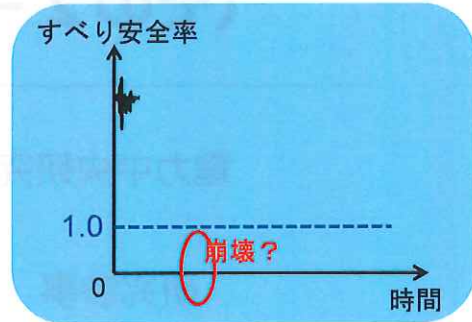
## 基礎地盤・周辺斜面の耐震性評価の動向

### ■ 現行の評価手法

- ・ 解析手法：等価線形解析
- ・ 照査方法：応力照査（力のつり合いに基づくすべり安全率により評価）

大規模な地震では発生ひずみが大きくなり、等価線形解析の適用範囲外となる可能性がある。

すべり安全率は変形が生じる可能性の有無を判定するのみで、地震時残留変位量まで評価できる手法ではない。



### ■ 今後の評価手法の動向

- ・ 解析手法：等価線形解析 ⇒ **時刻歴非線形解析**
- ・ 照査方法：応力照査 ⇒ **変位量照査**

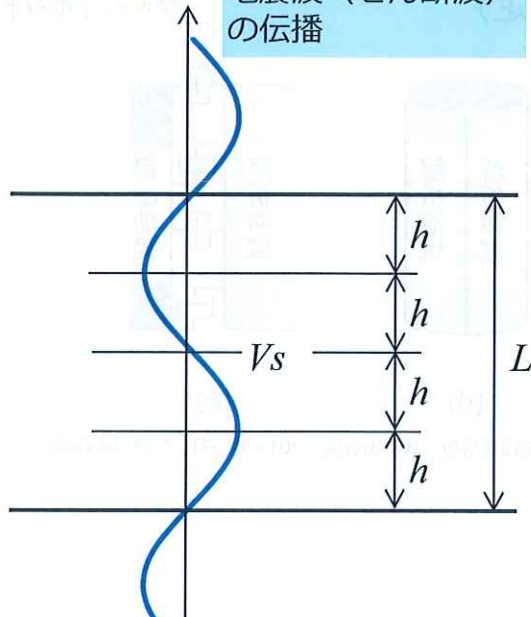
## 原子力発電所建屋基礎地盤ならびに周辺岩盤斜面の限界状態と照査

| 限界状態                             | 評価性能                        | 照査              |                             |
|----------------------------------|-----------------------------|-----------------|-----------------------------|
|                                  |                             | 応答値             | 限界値                         |
| 基礎地盤はすべり、支持力、傾斜に対して安定限界を超えない     | 安定性能                        | すべり面上のせん断力      | すべり面上のせん断抵抗力                |
|                                  |                             | 地震時接地圧          | 極限支持力                       |
|                                  |                             | 最大不等沈下量、残留不等沈下量 | 施設ごとに設定する許容値（例：一般建築物の限界変形角） |
| 周辺斜面のすべり変位は重要施設に有害な影響を及ぼす変位を超えない | 安定性能<br>変形性能（安定性能を満足できない場合） | すべり面上のせん断力      | すべり面上のせん断抵抗力                |
|                                  |                             | すべり変位量          | 斜面ごとに設定する許容値                |

## 地盤の非線形解析における留意点 (1)

メッシュ分割

地震波 (せん断波) の伝播



せん断波速度  $V_s$  を伝播する周期  $T$  の波動の波長  $L$  は

$$L = V_s T$$

一波長の透過を確保するには、少なくとも

$$4h \leq L$$

したがって、

$$h \leq \frac{L}{4}$$

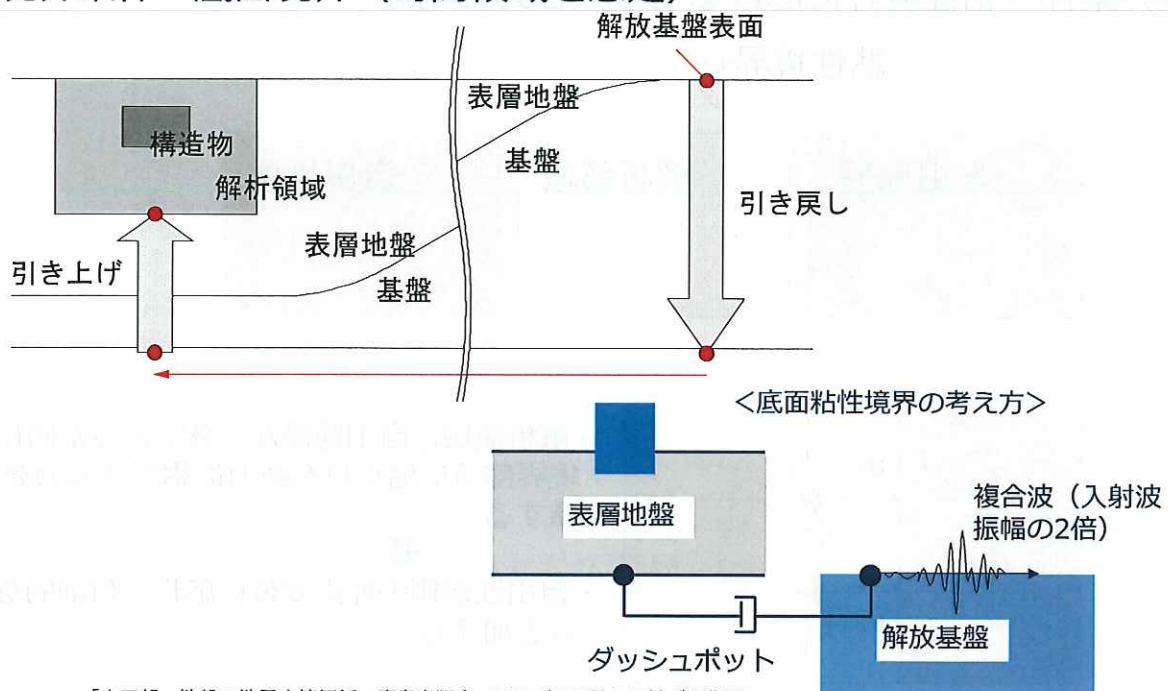
波長の関係式と振動数  $f$  が周期  $T$  の逆数を考慮して

$$h \leq \frac{V_s}{4f}$$

\* 最近の解析事例では、一波長を5~6分割、さらに8分割する例も見られる。

## 地盤の非線形解析における留意点 (2)

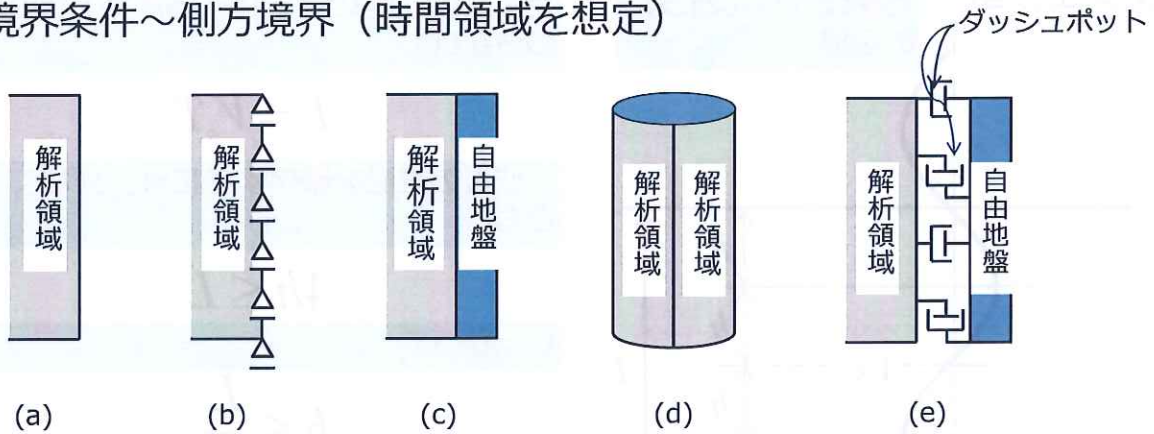
境界条件～底面境界 (時間領域を想定)



「吉田望：地盤の地震応答解析，鹿島出版会，2011年12月」に基づき作図

## 地盤の非線形解析における留意点 (3)

境界条件～側方境界 (時間領域を想定)

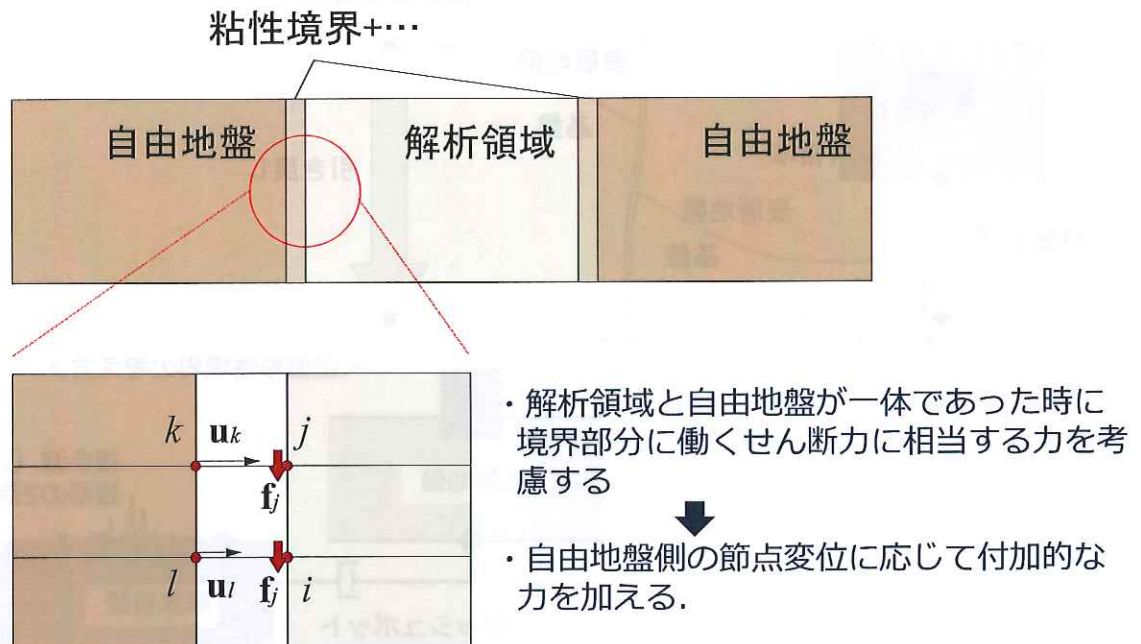


「吉田望：地盤の地震応答解析，鹿島出版会，2011年12月」に基づき作図

- (a)自由境界
- (b)ローラー境界
- (c)側方自由地盤
- (d)繰返し境界
- (e)粘性境界 (周波数領域では伝達境界)

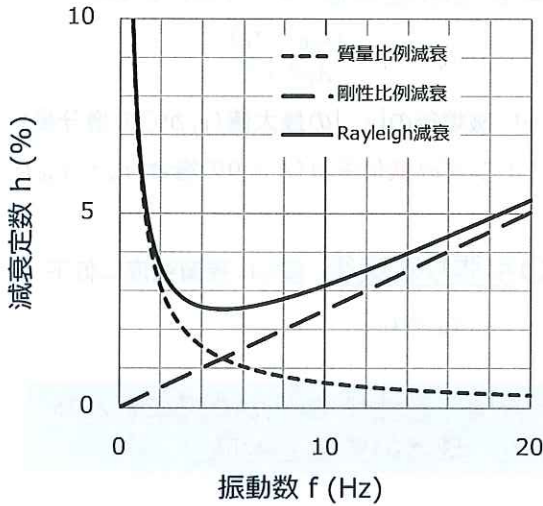
## 地盤の非線形解析における留意点 (4)

境界条件～粘性境界における切り欠き力の考慮



## 地盤の非線形解析における留意点 (5)

### Rayleigh 減衰



$$h_i = \frac{\alpha}{2\omega_i} + \frac{\beta\omega_i}{2}$$

- Rayleigh 減衰は固有モードごとに定義
- 第1項：質量比例項，第2項：剛性比例項

<一般的な設定>

- 実減衰としては履歴減衰のみ考慮
- Rayleigh減衰は数値解析の安定のために剛性比例項のみを結果に影響を与えない範囲で使用

<線形時の減衰設定を重要視した設定>

- 周波数領域と時間領域の解析で応答が一致するようにRayleigh減衰を設定

## 破壊進展を考慮した解析手法の概要 (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）

### マルチスプリングモデル（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，**マルチスプリングモデル（Towhata and Ishihara, 1985）を適用**

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

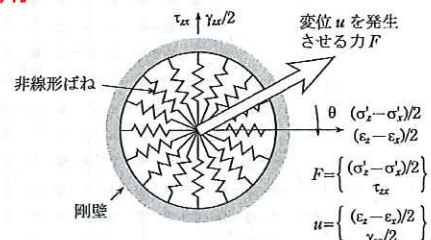
$$u_\theta = (\cos \theta \quad \sin \theta) \begin{Bmatrix} (\varepsilon_z - \varepsilon_x)/2 \\ \gamma_{zx}/2 \end{Bmatrix}$$

- 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

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

- マルチスプリングモデルは，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



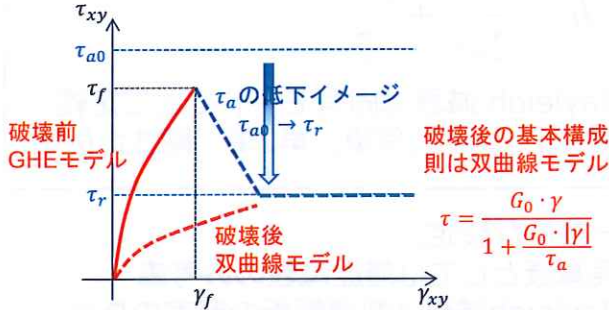
マルチスプリングモデル

横軸に軸差ひずみと軸差応力，縦軸に純せん断によるせん断ひずみとせん断応力を取り，この面上に多数のばねを配置

## 破壊進展を考慮した解析手法の概要 (2)

### 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 $|\gamma_{xy}|$ 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

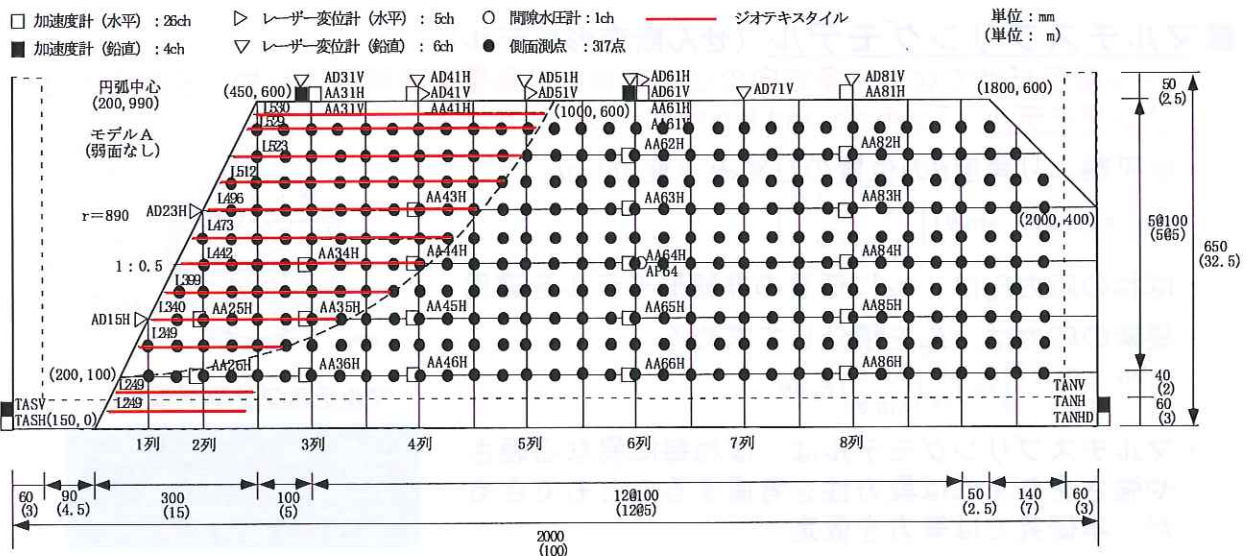
＜引張り方向＞

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

## 動的遠心力実験における斜面模型形状 (解析手法の妥当性検証 (Verification) 用実験)

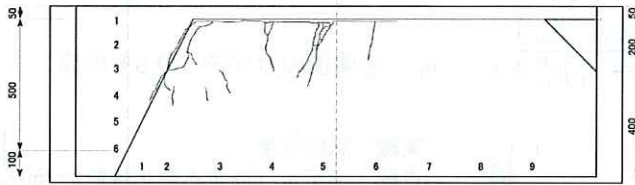
- ・遠心加速度 50G
- ・斜面勾配 1 : 0.5
- ・斜面高さ 60cm (実規模換算30m)

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  
⇒実際の斜面に対しては鉄筋挿入工やロックボルト工に相当

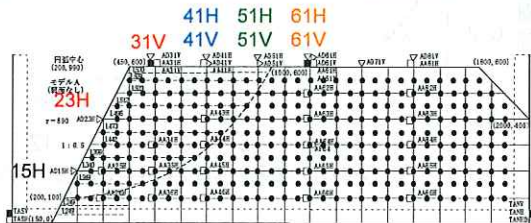
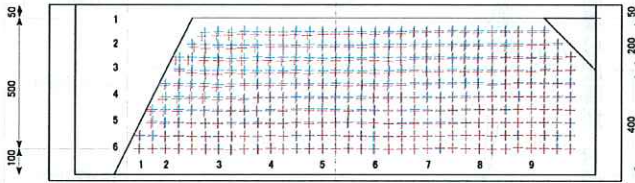


## 実験結果

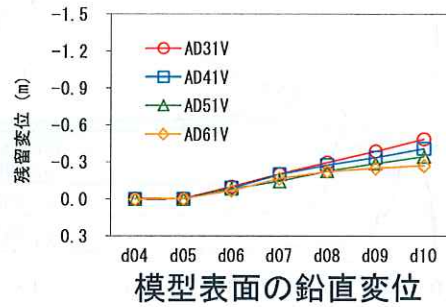
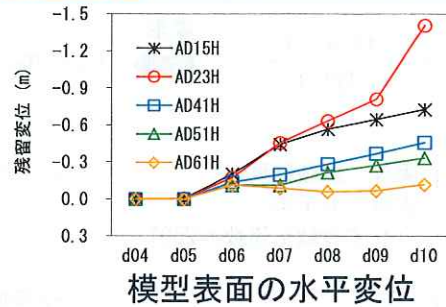
### ■ クラックの発生状況



### ■ 実験前後のマーカの移動



### ■ 残留変位



加振ステップd06から有意な残留変位が発生

## 検証用実験の解析条件

### ● 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

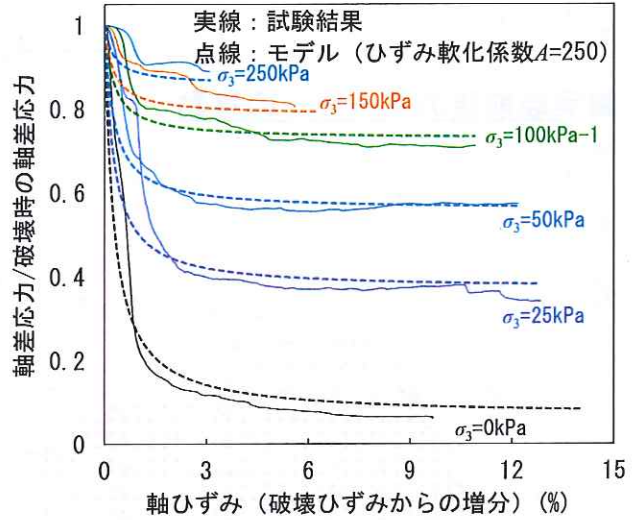
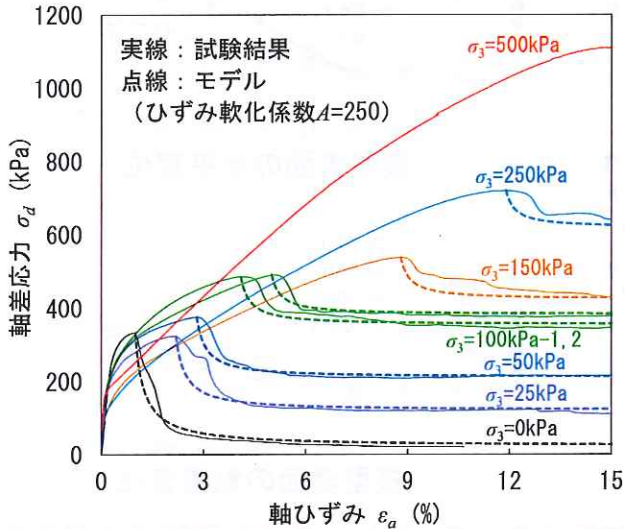
- ・ばねの本数 (半円): 12本
- ・履歴曲線のタイプ: 双曲線モデル
- ・基準せん断強度  $\tau_a$   
 $\gamma_r \times G_0 = 0.0019 \times \text{各要素の } G_0$
- ・最大減衰定数  $h_{\max}$  0.15
- ・粘着力  $c$   $96.1 \text{kN/m}^2$
- ・内部摩擦角  $\phi$   $26.5$ 度
- ・引張り強度  $\sigma_t$   $156.7 \text{kN/m}^2$
- ・残留粘着力  $c_r$   $0.0 \text{kN/m}^2$
- ・残留摩擦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

- ・ひずみ軟化係数  $A$  250

# ひずみ軟化係数Aについて

ピーク後のひずみ軟化過程の応力-ひずみ関係のフィッティングからA=250と設定

$$\tau_a = \tau_r + \frac{(\tau_{a0} - \tau_r)}{A\gamma^p + 1} \quad \xrightarrow{\text{変形}} \quad \sigma_d = \sigma_{dr} + \frac{(\sigma_{df} - \sigma_{dr})}{A(1 + v_f)\varepsilon_a^p + 1} \quad v_f: \text{破壊後のひずみ (0.5を仮定)}$$

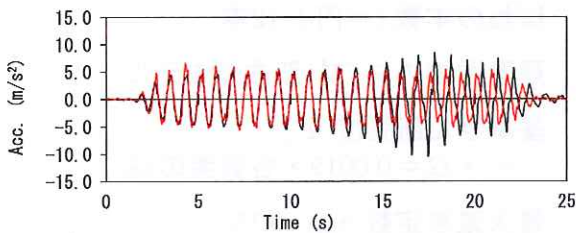


平面ひずみ圧縮試験の応力-ひずみ関係

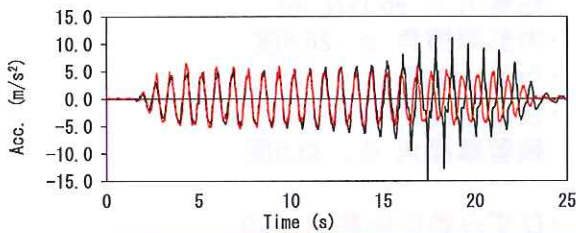
## 解析結果：ひずみ軟化考慮 (d06) ～解析手法の妥当性検証 (Verification)～

● 等価線形解析 (水平加速度)

法肩

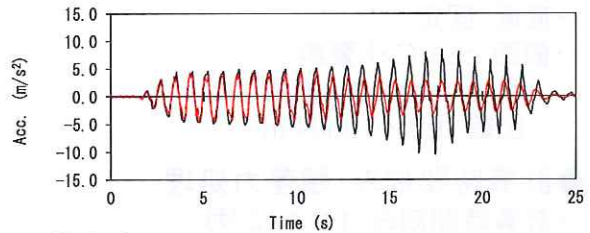


天端中央

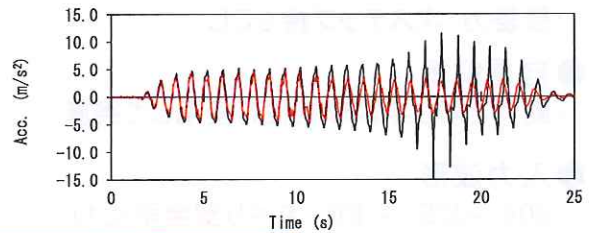


● 時刻歴非線形解析 (水平加速度)

法肩



天端中央



<時刻歴非線形解析の加速度応答>

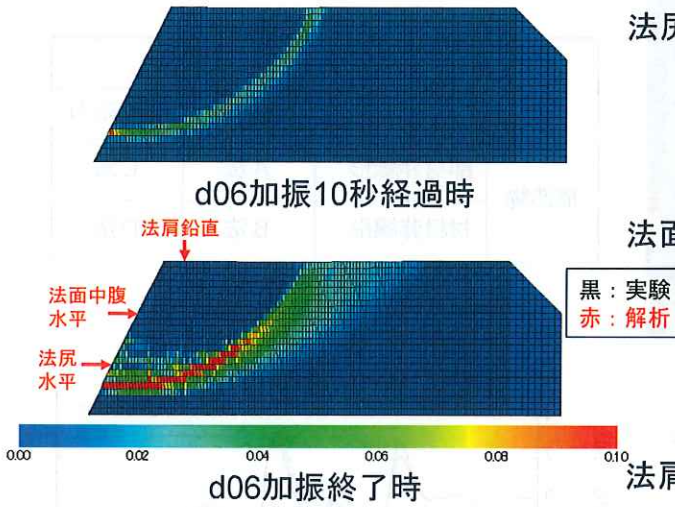
- ・ 等価線形解析に比べて、破壊に伴う位相のずれは再現
- ・ 振幅の増大は再現できていない

黒：実験  
赤：解析

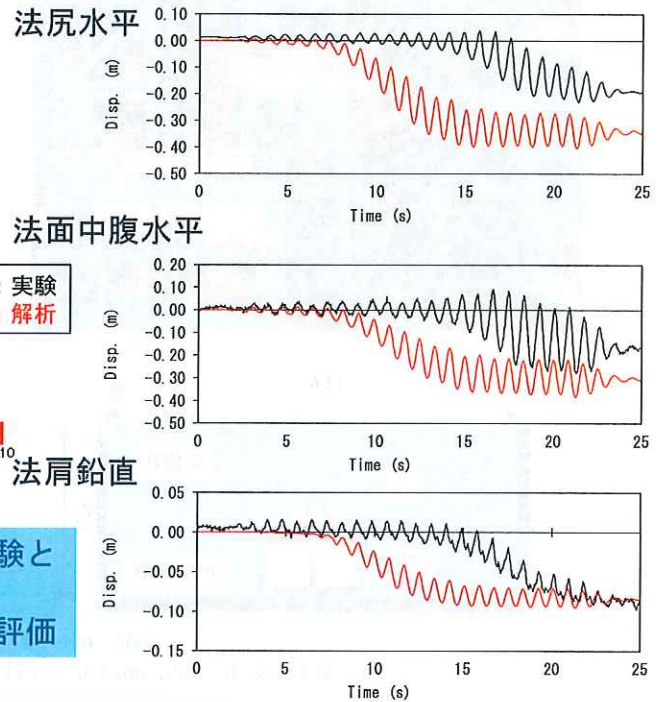


# 解析結果：ひずみ軟化考慮 (d06) ～解析手法の妥当性検証 (Verification)～

●最大せん断ひずみ分布



●時刻歴非線形解析 (水平・鉛直変位)



- ・ 残留変位が生じる加振レベルは模型実験と同じ
- ・ 解析結果は実験結果に対して保守的な評価

## 電力施設の耐震解析技術

### 第4回 原子力・火力発電所の地盤・土木構造物の耐震解析技術

電力土木, No.382, 2016.3

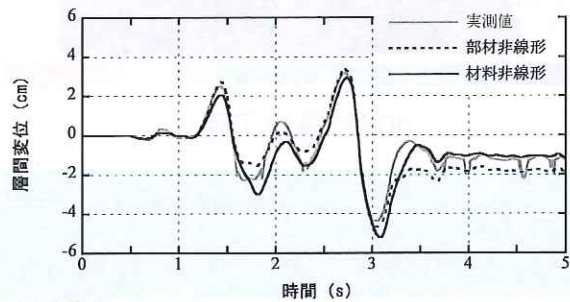
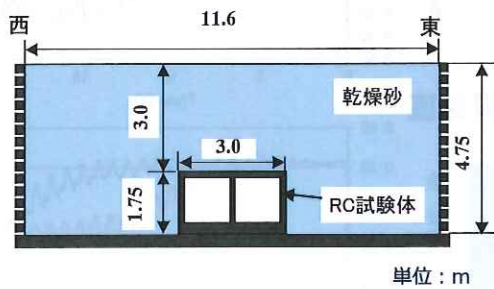
宮川義範, 石丸 真

1. はじめに
2. 液状化地盤の解析
  - (1) 有効応力解析
  - (2) 物性の取得
3. 鉄筋構造のせん断破壊の解析
4. 地中構造物の地震応答解析の入力と境界条件
5. おわりに

## 二次元動的非線形有限要素解析手法の 妥当性検証 (Verification) 事例



|     |       | 地盤  |      |
|-----|-------|-----|------|
|     |       | 全応力 | 有効応力 |
| 構造物 | 部材非線形 | A法  | C法   |
|     | 材料非線形 | B法  | D法   |



「電力土木, No.365, pp.3-8, 2013」より転載

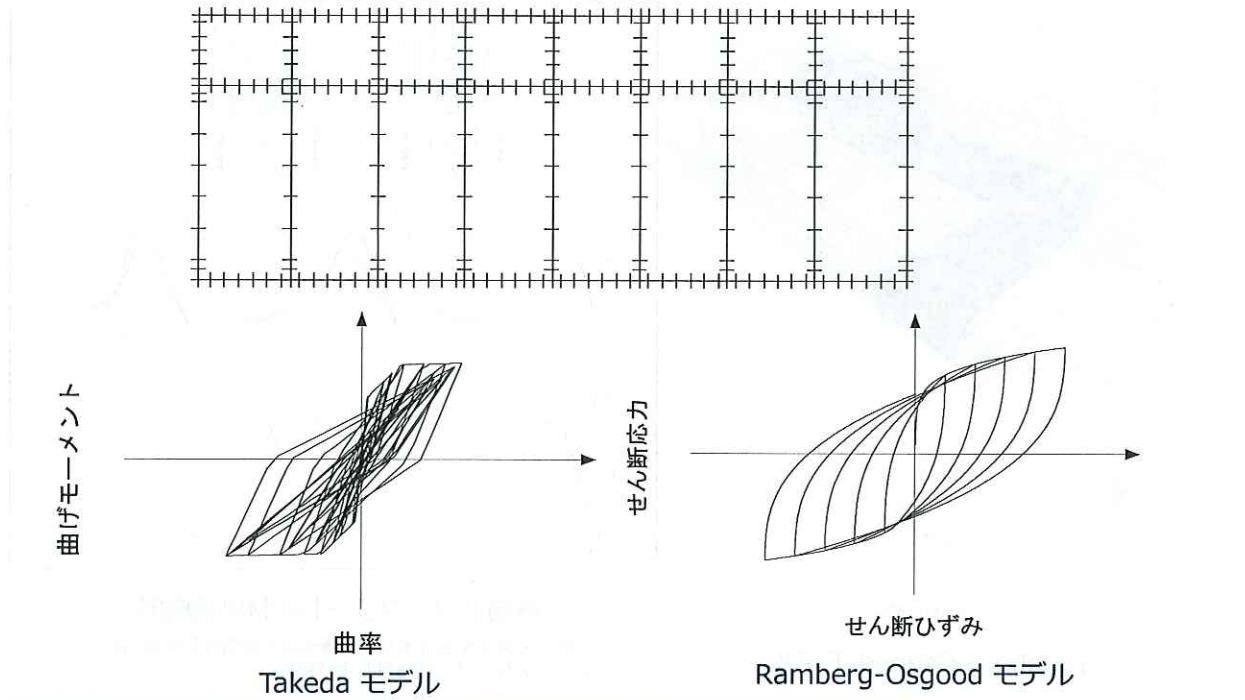
## 原子力発電所鉄筋コンクリート製地中構造物の限界 状態と照査

| 限界状態            | 評価性能 | 照査           |                |
|-----------------|------|--------------|----------------|
|                 |      | 応答値          | 限界値            |
| すべての部材がせん断破壊しない | 耐荷力  | 最大せん断力       | せん断耐力          |
| かぶりコンクリートが剥落しない | 変形性能 | 層間変形角        | 限界層間変形角        |
|                 |      | 曲率           | 終局曲率           |
|                 |      | 圧縮縁コンクリートひずみ | 圧縮縁コンクリート限界ひずみ |

部材非線形解析  
 材料非線形解析

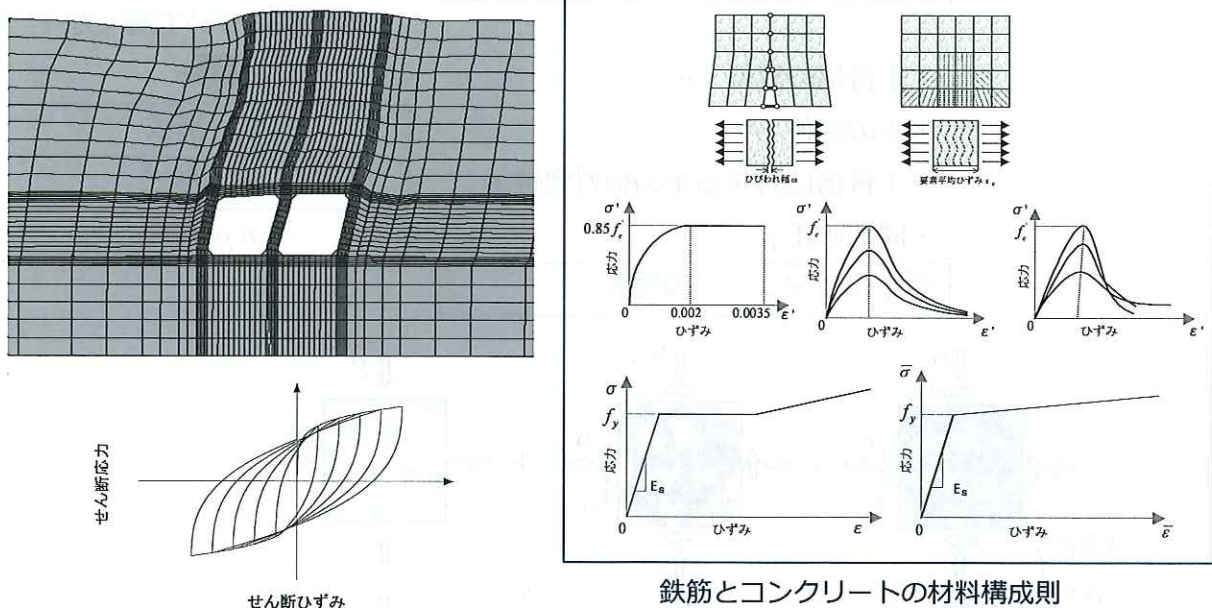
## 地中構造物の解析モデル：A法，C法

### 8 連2層構造物の梁要素モデル



## 地中構造物の解析モデル：B法

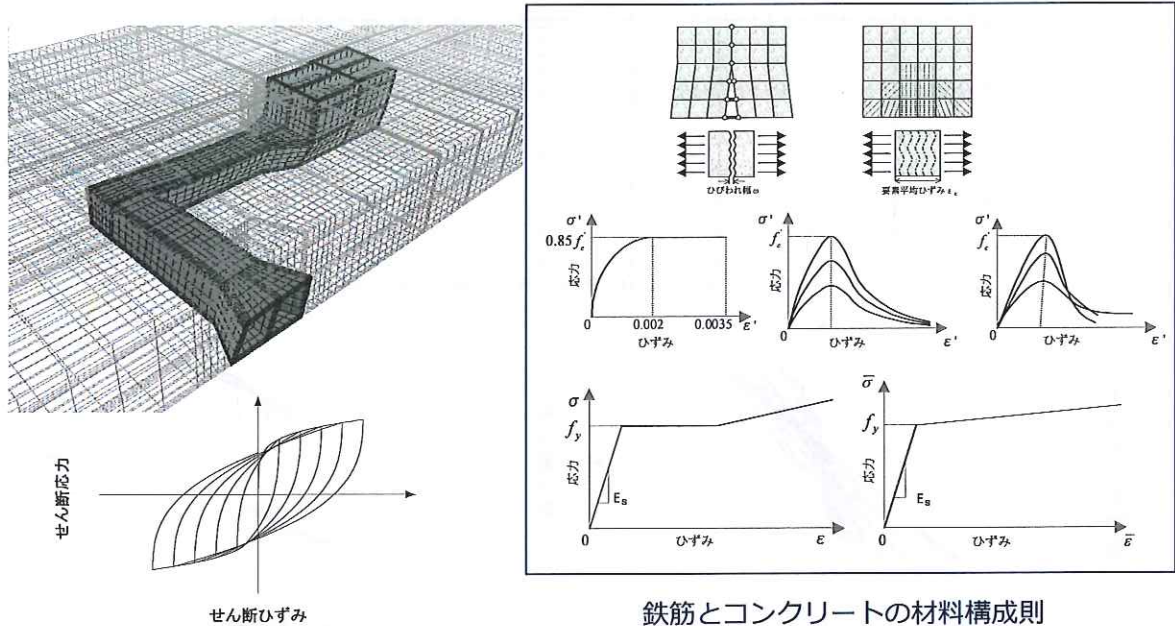
### 地盤連成系の二次元平面要素モデル



「原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル，2005年6月」より転載

## 地中構造物の解析モデル：B法

### 地盤連成系のソリッド（三次元）要素モデル



Ramberg-Osgood モデル

鉄筋とコンクリートの材料構成則

「原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル, 2005年6月」より転載

## 液状化地盤の解析～有効応力解析

●有効応力解析

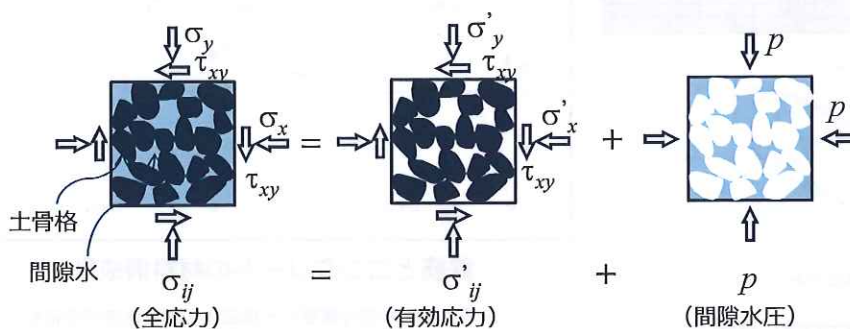
二相系支配方程式

- ・土骨格の変位  $u$
- ・水の変位  $U$
- ・土骨格に対する水の相対変位  $w$
- ・間隙水圧  $p$

どの変数について解くか？

|          |
|----------|
| $u-U$ 形式 |
| $u-w$ 形式 |
| $u-p$ 形式 |

ダイレイタンシーの考慮



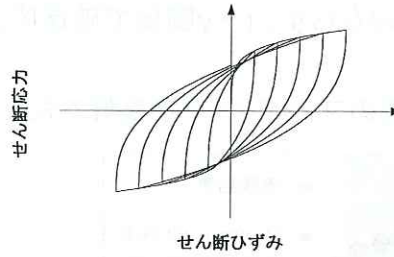
「吉田望：地盤の地震応答解析, 鹿島出版会, 2011年12月」に基づき作図

# ダイレイタンスーの考慮方法

●ダイレイタンスーの考慮方法

○せん断強度, せん断剛性を増減させる方法

- ・非排水条件下では合理的
- ・利便性高い
- ・三次元化が難しい

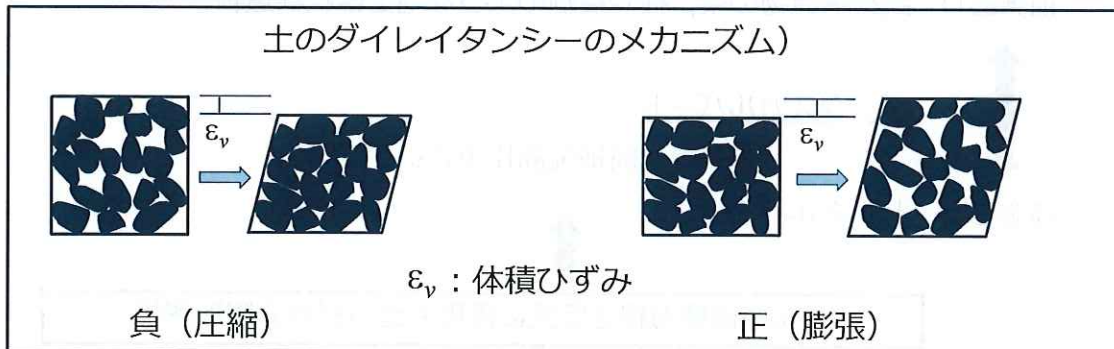
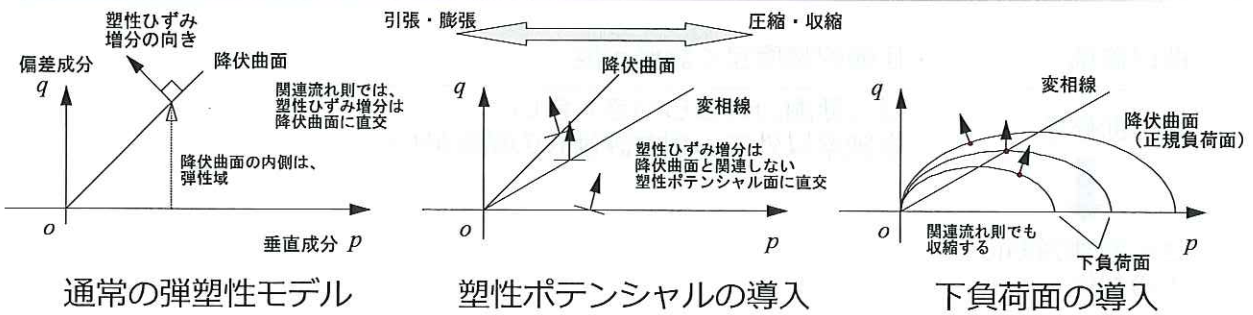


○弾塑性構成則の枠組み

- ・扱いづらい
- ・適用性が高い

$$\{d\sigma'\} = [D]\{d\varepsilon\}$$

# 弾塑性モデルによるダイレイタンスーの考慮方法

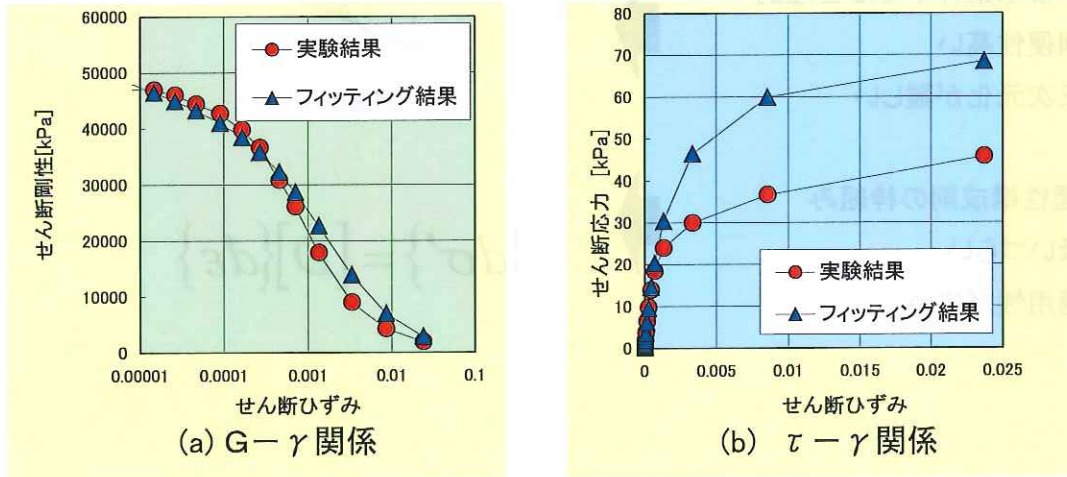


「吉田望：地盤の地震応答解析，鹿島出版会，2011年12月」に基づき作図

## 地盤物性の取得方法

大きなひずみ領域を対象とする場合は、  
G- $\gamma$ 関係のみならず、 $\tau$ - $\gamma$ 関係で破壊応力超過の有無を確認！

<G- $\gamma$ 関係のフィッティングが良好でも、 $\tau$ - $\gamma$ 関係で $\tau$ を過大評価する事例>



「原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針 <技術資料>，2005年6月」より転載

## 材料非線形解析と地中構造物の関わり

曲げ破壊

- ・比較的精度良く評価可能

せん断破壊

- ・せん断耐力のばらつき大きい
- ・単純梁以外での耐力評価式の精度低い

せん断補強筋により対処

補強あり 建築構造物の梁，柱や橋脚のような地上線状構造物

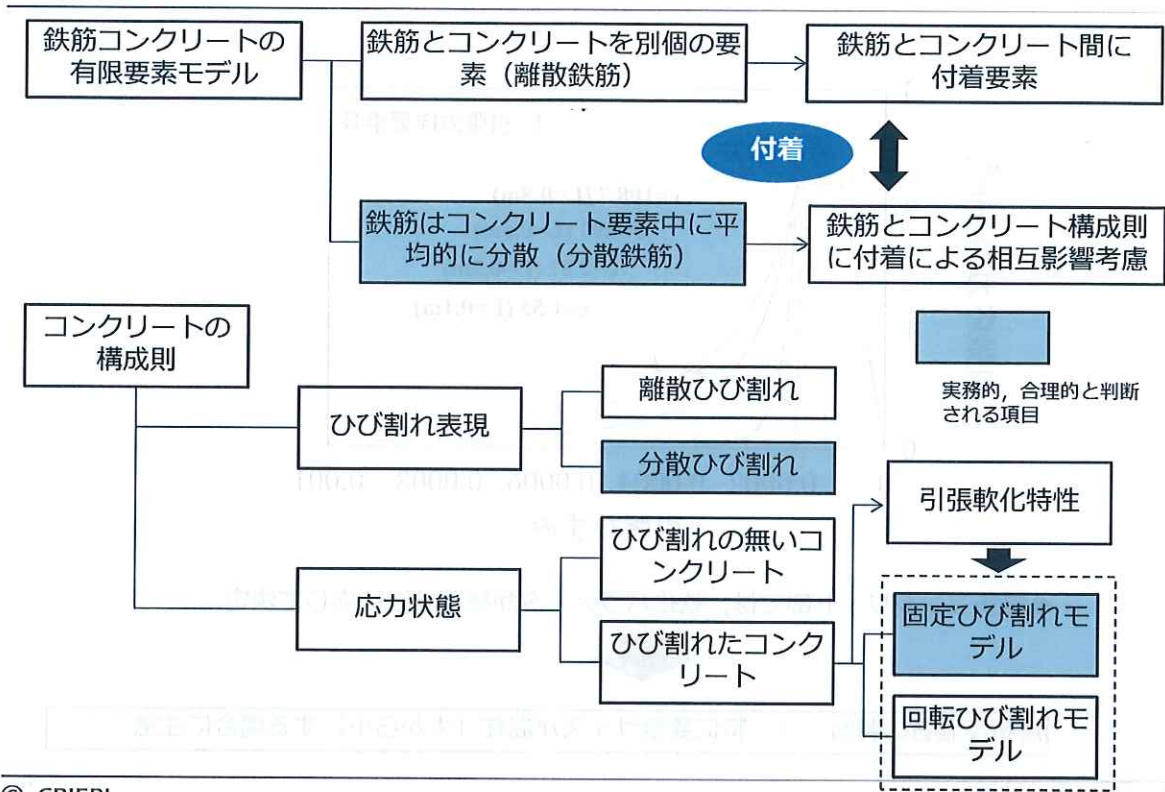
ボックスカルバート

- ・面外せん断補強筋比小さい

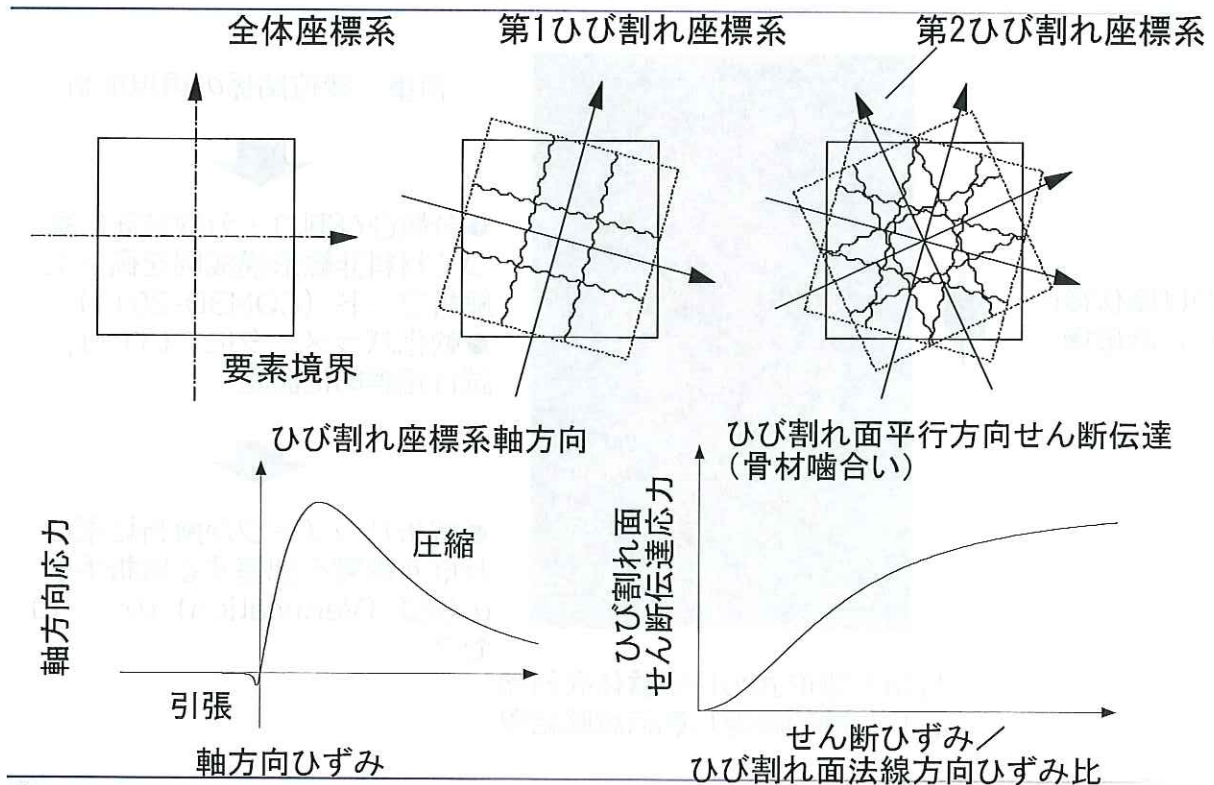
補強なし トンネル

せん断破壊過程を忠実に再現できる材料非線形解析

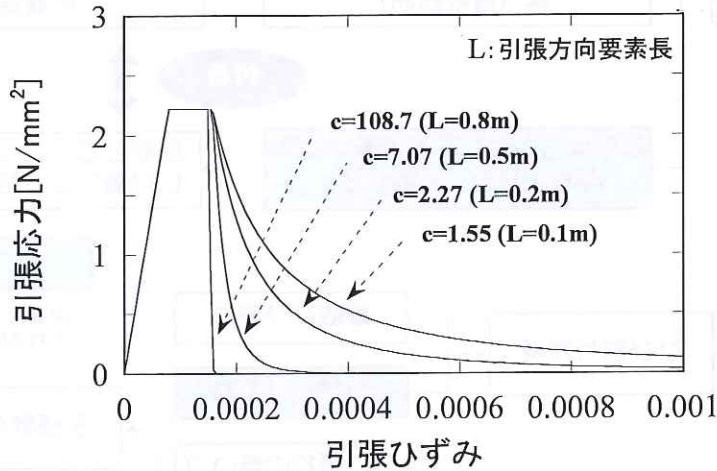
## 鉄筋とコンクリートの材料非線形構成則



## 固定ひび割れモデル



## 引張軟化特性パラメータの要素寸法依存性



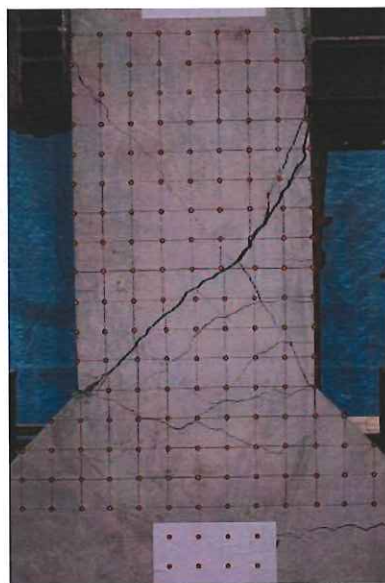
- 無筋コンクリート部では、軟化パラメータが要素寸法に応じて決定



解析実施者の判断 ⇒ 特に要素サイズが混在（大から小）する場合に注意

## 材料非線形解析による解析事例

曲げ降伏後の  
せん断破壊



片持ち梁形式の柱試験体を対象  
とした静的繰返し載荷試験結果

荷重－変位関係の再現解析



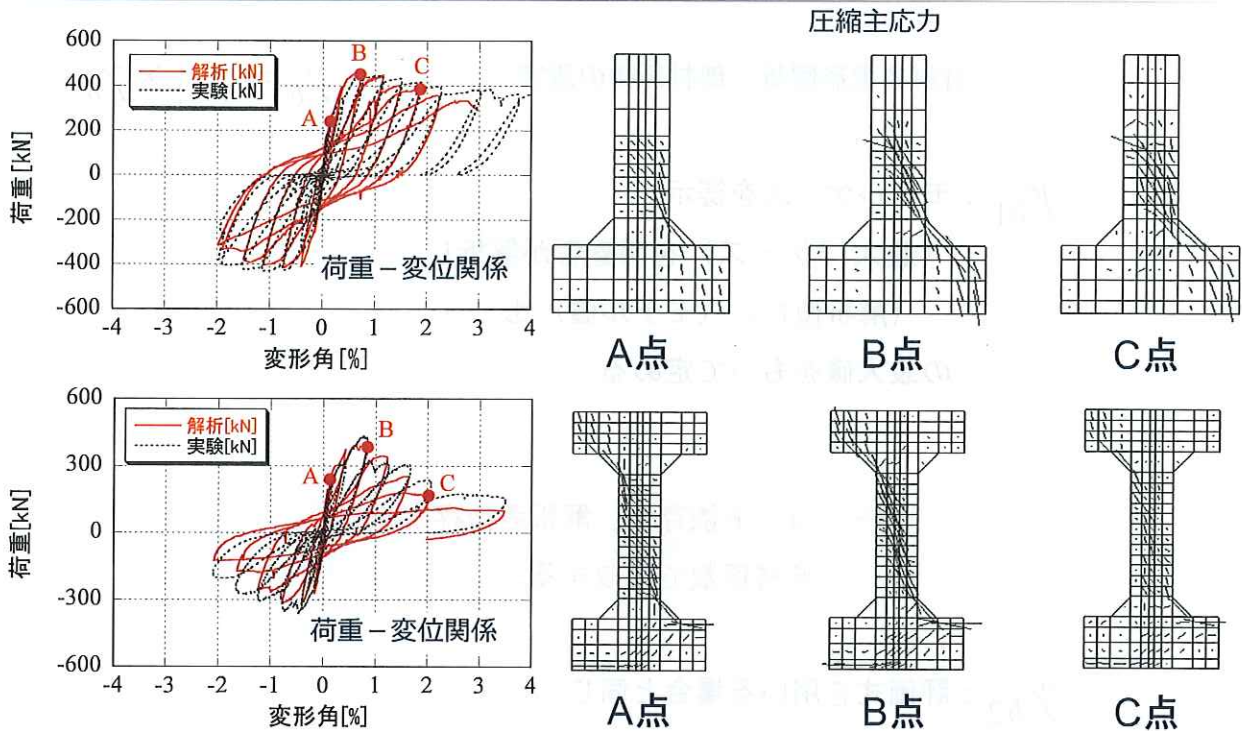
- 分散ひび割れ・分散鉄筋に基づく材料非線形構成則を備えた解析コード (COM3D-2011)
- 軟化パラメータについては、試行錯誤的に設定



- 解析パラメータが解析結果に及ぼす影響を把握する解析手法の検証 (Verification) のプロセス



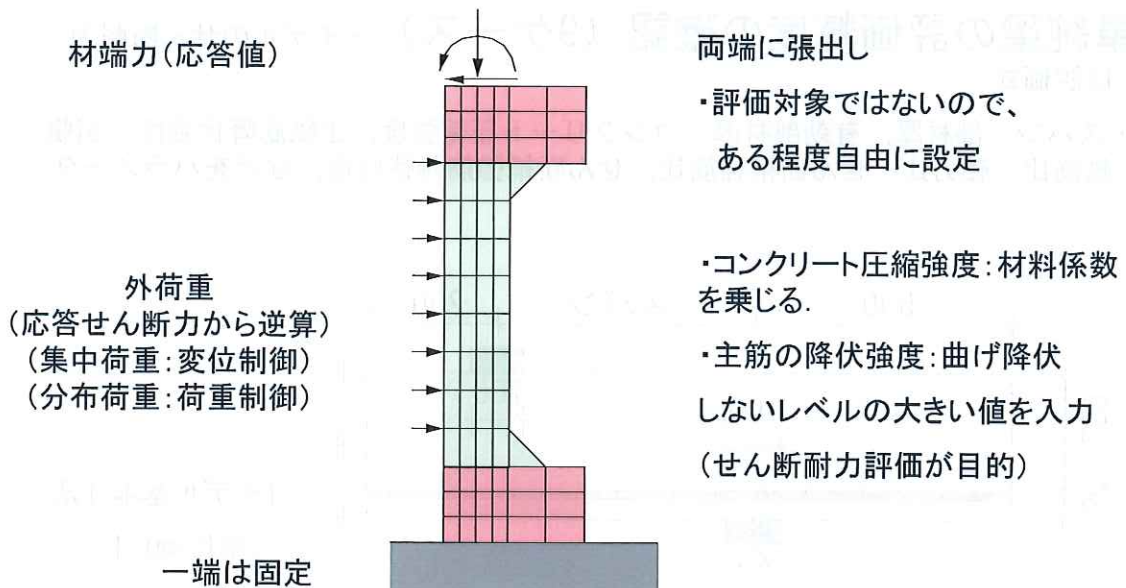
## 材料非線形解析による解析事例



「土木学会論文集E2, Vol.70, No.4, pp.402-416, 2014」より転載

## せん断耐力評価のための材料非線形解析の妥当性検証 (Verification)

### 材料非線形解析 モデル化



「原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル, 2005年6月」より転載

## 妥当性検証結果の部材係数設定への反映

材料非線形解析 部材係数の設定

$$\gamma_b = \gamma_{b1} \times \gamma_{b2}$$

$\gamma_{b1}$  : モデルケースを提示  
 (最大17ケース) を照査者が解析し、  
 (解析値) / (モデル値) 比  
 の最大値をもって定める

← コード依存性、解析者依存性を  
 部材係数で吸収する

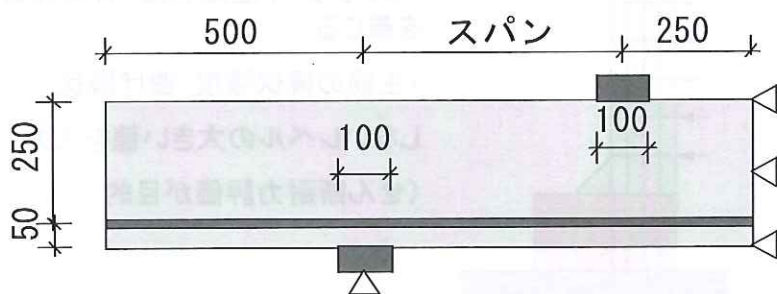
$\gamma_{b2}$  : 評価式を用いる場合と同じ

## 検証用実験 (集中荷重)

材料非線形解析 部材係数設定用モデル (集中荷重)

単純梁の評価精度の確認 (9ケース) ・モデルのせん断耐力  
 は評価式

- ・ スパン, 部材厚, 有効部材厚, コンクリート圧縮強度, 主鉄筋降伏強度, 引張鉄筋比, 軸力比, せん断補強筋比, せん断補強筋降伏強度, などをパラメータ



[モデル基本寸法  
 (単位mm)]

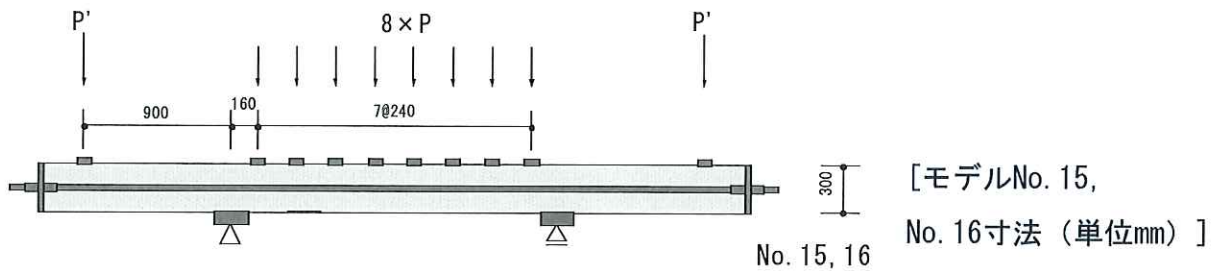
「原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル, 2005年6月」より転載

## 検証用実験（分布荷重）

材料非線形解析 部材係数設定用モデル（分布荷重）

### 分布荷重部材への適用性確認（8ケース）

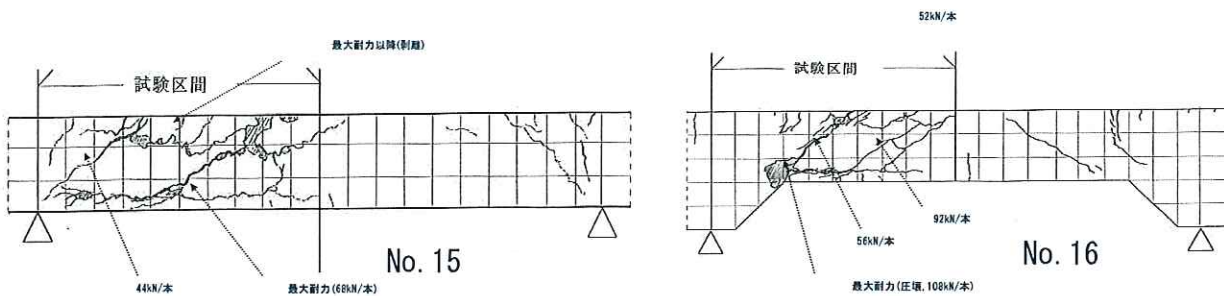
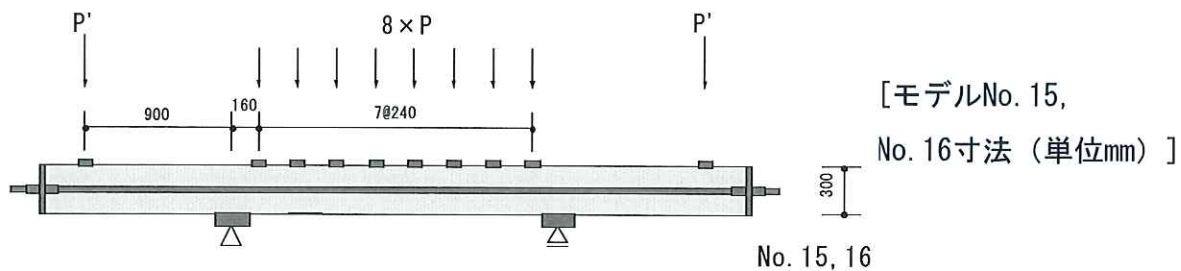
- ・ 8ケースについては、実験結果があるため、それと比較
- ・ スパン、部材厚、有効部材厚、コンクリート圧縮強度、主鉄筋降伏強度、引張鉄筋比、軸力比、せん断補強筋比、せん断補強筋降伏強度、などをパラメータ



「原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル, 2005年6月」より転載

## 検証用実験（分布荷重）

### 分布荷重部材のひび割れ図（No. 15, No. 16）



「原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル, 2005年6月」より転載

