



# 電力土木技術協会 第21回会誌「講座」講習会 (その1 – 全体概要, 水力, 流通)

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

RI 電力中央研究所

© CRIEPI



RI 電力中央研究所

## 講座企画の趣旨

- ◆ 1995年兵庫県南部地震以降, レベル2地震動に対する耐震性能照査においては, 非線形動的解析の使用が前提
- ◆ 近年, 電力施設の耐震性評価においても, 動的解析が耐震解析の主流
  - 性能規定型設計の普及
  - 高加速度地震観測記録に伴い耐震検討に用いる地震動レベル増大
  - 計算機的能力向上とそれを見込んだ耐震解析ソフトウェア開発とユーザの拡大
- ◆ 電力中央研究所における耐震解析技術が体系化
  - 水力施設(ダム, ゲート), 流通施設(送電用鉄塔, 変電機器), 原子力発電所屋外重要土木構造物, 原子炉建屋基礎地盤, 周辺斜面など

## 講座のねらい

### ◆ 電力土木実務者を対象

- －各種電力施設の耐震解析技術（電中研開発コード，汎用構造解析コードの利用方法）に関わる研究開発状況とこれら解析技術への理解を深めて利用してもらう

### ◆ ユーザの視点に立った解説

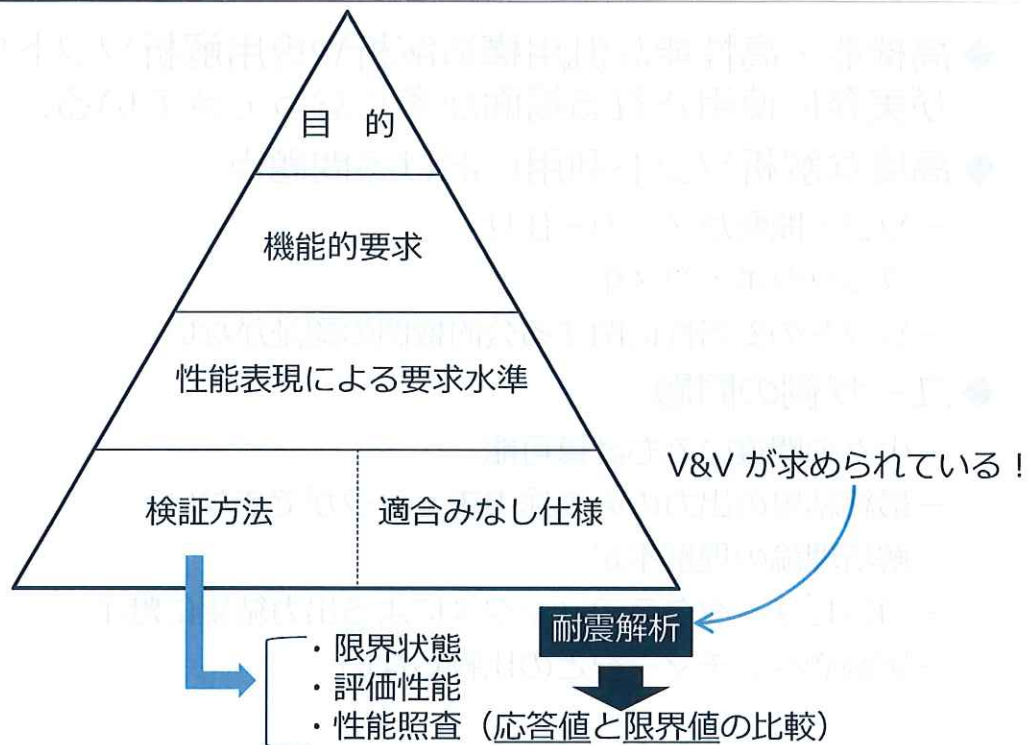
- －解析技術・手法を理解する～この解析技術の魅力は何か～
  - 地震時挙動（限界状態と照査項目），理論背景，数値解析法
- －解析の信頼度・品質を認識する～V&V（Verification（解析手法の妥当性検証）とValidation（解析結果の妥当性評価））の視点～
  - 要素モデルのシミュレーション，静的載荷実験，振動台実験，地震観測などへの適用事例
- －使い方を知る～誤った解析を避けるために～
  - 解析モデル作成の要点，境界処理の考え方，計算制御パラメータ選択の考え方

## 電力施設の耐震解析技術 第1回 講座を始めるにあたって

電力土木，No.379，2015.9  
大友敬三

1. はじめに
2. 耐震解析に求められる要件
  - (1) 性能規定における耐震解析の位置づけ
  - (2) 水力施設
  - (3) 原子力発電所建屋基礎地盤ならびに周辺岩盤斜面
  - (4) 原子力発電所鉄筋コンクリート製地中構造物
  - (5) 流通施設
3. 耐震解析の品質保証について
  - (1) 現状と課題
  - (2) 解析手法の妥当性確認
  - (3) モデル化の妥当性検証
  - (4) 解析結果の妥当性評価
4. おわりに

## 性能規定における耐震解析の位置づけ



## 耐震解析の誤差

照査フォーマットの例  
(耐震性能照査)

$$S \leq R_a = \frac{1}{\gamma_a \gamma_b \gamma_i} R$$

$S$  : 応答値 (解析により求める変位, 応力, ひずみ等)

$R_a$  : 許容限界値 (照査用限界値)

$R$  : 限界値 (材料特性を考慮した変位, 応力, ひずみ等)

$\gamma_a$  : 構造解析係数 (1.0~1.1)

$\gamma_b$  : 部材係数 (1.1~1.3)

$\gamma_i$  : 構造物係数 (構造物の重要度) (1.0~)

重力式コンクリートダム1.5 (非線形解析), 原子力発電所鉄筋コンクリート製  
地中構造物1.2 (非線形解析) → 現状以上に構造解析係数で解析誤差をカ  
バーすることが難しい

## 耐震解析の品質保証が求められる背景

- ◆ 高機能・高性能な汎用構造解析や専用解析ソフトウェアが実務に使用される場面が多くなってきている。
- ◆ 高度な解析ソフト利用における問題点
  - ーソフト開発がメーカー任せ
  - ーブラックボックス化
  - ーソフトの妥当性に関する公的機関の認証がない
- ◆ ユーザ側の問題
  - ー少々の間違いでも計算可能
  - ー最終結果の出力のみで途中チェックができない
  - ー解析理論の理解不足
  - ーコンピュータグラフィックスによる出力結果に魅了
  - ー実験やベンチマークとの比較しない

## 電力土木分野における耐震解析の品質保証

### V&V (Verification & Validation) に関する取組みの現状

- ・ 計算工学分野
- ・ 原子力分野
- ・ 機械分野
- ・ 土木分野 (2012年制定コンクリート標準示方書・設計編・9編 非線形有限要素解析による照査)

連載講座で掲載されている解析条件, 解析事例, 解析結果の評価, etc.

- 解析手法の妥当性検証
- モデル化の妥当性確認
- 解析結果の妥当性評価

電力土木分野における耐震解析の V&V の方向性, 方法論の基礎資料

# 電力施設の耐震解析技術

## 第2回 水カダム, ゲートの耐震解析技術\*

電力土木, No.380, 2015.11

山本広祐, 西内達雄

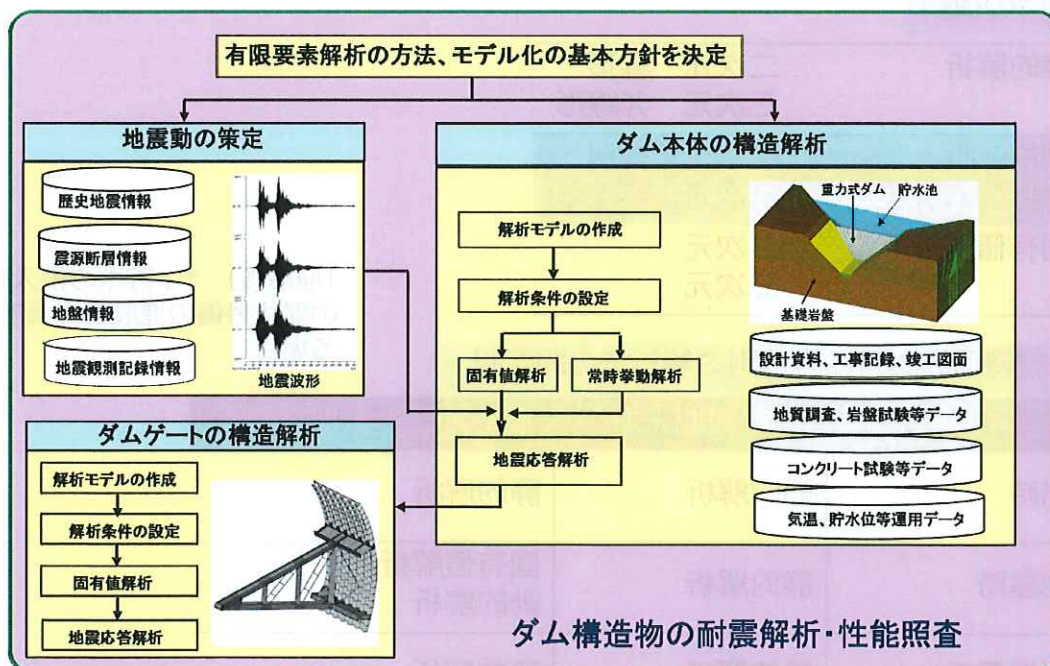
1. はじめに
2. 基本的な耐震解析手順
3. ダム本体, ゲートの耐震解析
  - (1) 重力式コンクリートダム
  - (2) 洪水吐きゲート
4. おわりに

\*第2回連載は, 以下の電中研報告に基づいている:

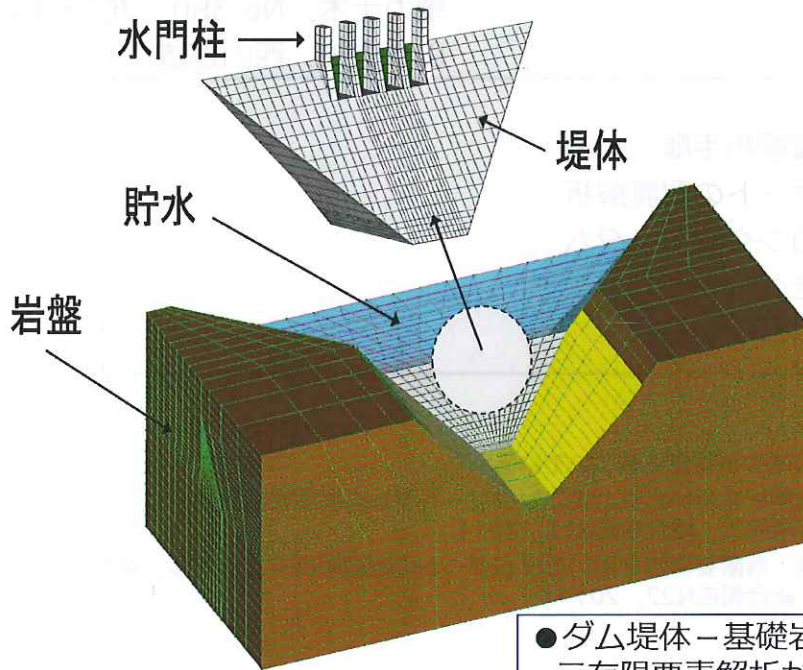
○西内達雄: 有限要素解析を用いた重力式コンクリートダムの耐震性能照査マニュアル, 電力中央研究所報告, 総合報告N21, 2014.

○山本広祐, 齋藤 潔: 有限要素法を用いたダムゲートの耐震解析マニュアル, 電力中央研究所報告, 総合報告N22, 2014.

## ダム構造物の耐震解析の流れ



## ダム本体の三次元解析モデルの例



●ダム堤体－基礎岩盤－貯水池連成系の三次元有限要素解析が理想的。ただし、実務では二次元有限要素解析が基本

## ダム本体の耐震解析モデルの種類

### 解析の種類

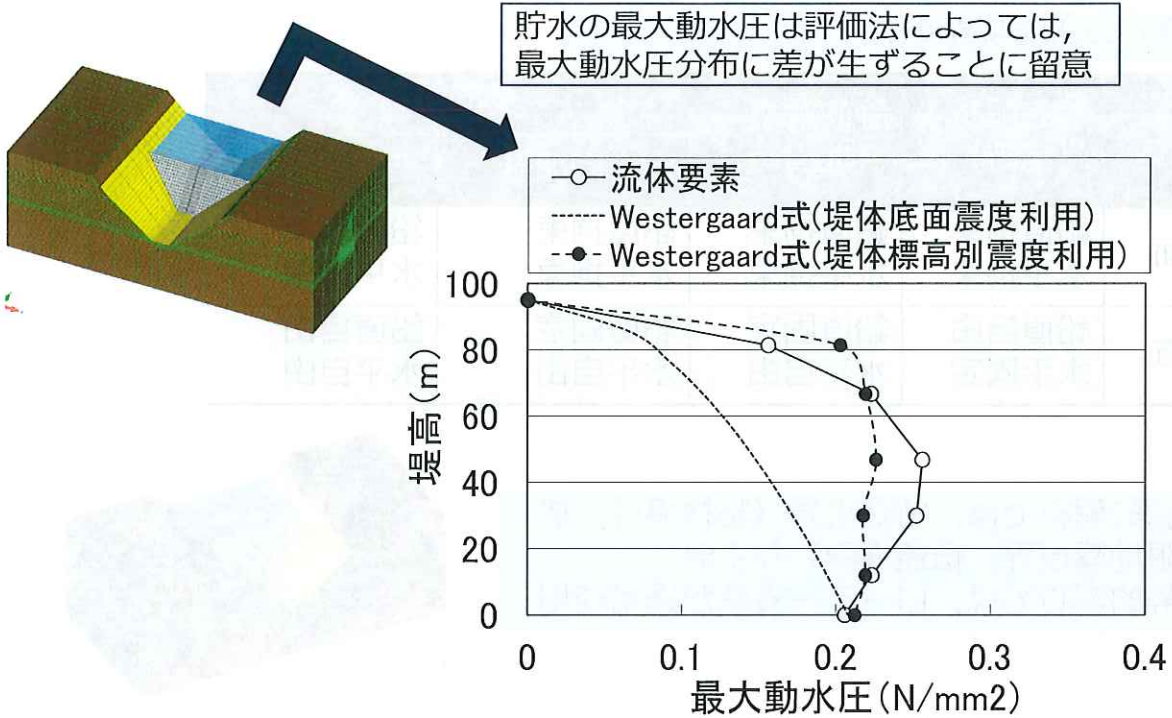
静的解析	二次元	線形
	三次元	非線形
動的解析 (地震応答解析)	二次元	線形
	三次元	非線形
固有値解析	二次元	
	三次元	

(地震後) \* : 貯水の侵入等の堤体損傷の進展を評価する場合

### 地震時荷重の考慮方法別の解析法の組合せ

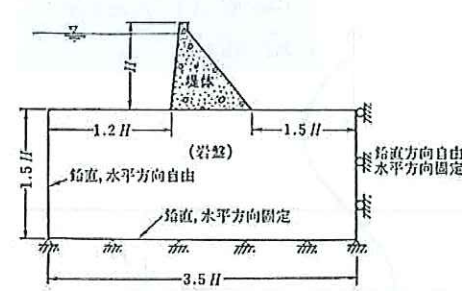
荷重条件	静的地震力	動的地震力 (地震動)
常時	静的解析	静的解析
地震時	静的解析	固有値解析 動的解析
(地震後) *	静的解析	静的解析

## 貯水モデル化方法と最大動水圧分布

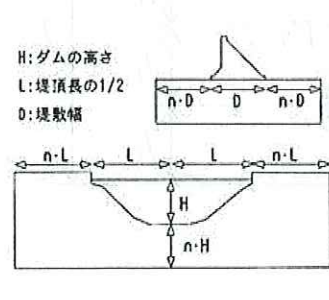
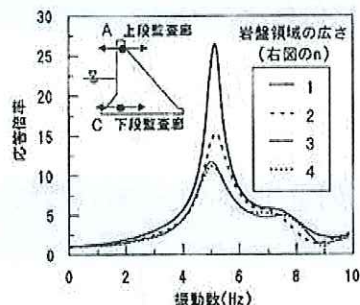


## ダム本体の解析モデルの範囲

	静的解析	動的解析
上下流方向	堤高の3.5倍以上	堤高の2.5倍以上
深さ方向	堤高の1.5倍以上	堤高の1.5倍以上



静的解析



動的解析

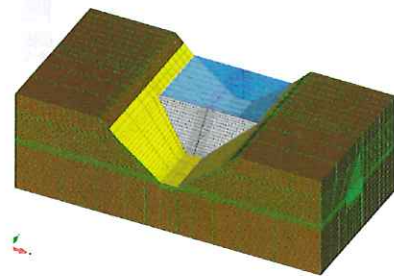
右上図, 下図は「電力中央研究所報告, 総合報告N21, 2014」より転載

## ダム本体解析モデルの境界条件

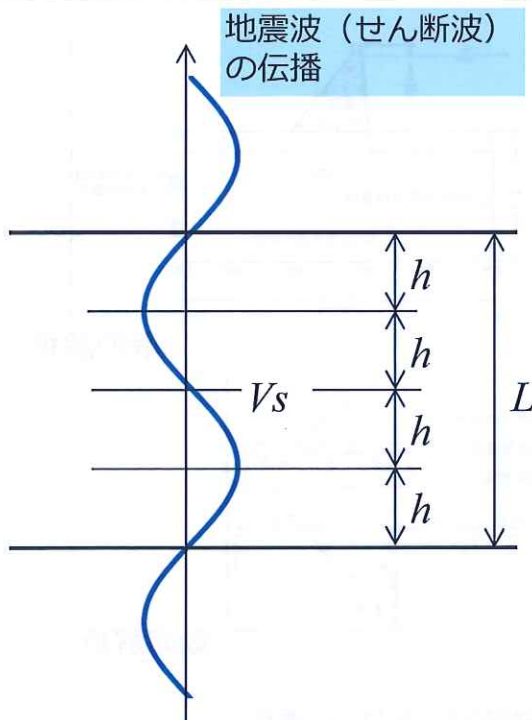
### 解析モデルの境界条件

	静的解析 (常時)	静的解析 (地震時)	動的解析	
			一方向加振	三方向加振
底面	鉛直拘束 水平拘束	鉛直拘束 水平拘束	鉛直拘束 水平拘束	鉛直拘束 水平拘束
側方	鉛直自由 水平固定	鉛直固定 水平自由	鉛直固定 水平自由	鉛直自由 水平自由

- 動的解析では、特殊境界（粘性境界、無限地盤境界、伝達境界）が主流
- 静的解析では、ローラー支承が通常使用



## 有限要素メッシュ分割の考え方



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

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



## 材料特性の設定

### ● 堤体コンクリートの動的引張強度，減衰定数が重要

堤体コンクリートの  
動的引張強度

堤体コンクリートと  
岩盤の減衰定数

圧縮強度

コンクリート配合試験値，ボーリングコア試験値

5%と設定

↓ 1/10

静的引張強度

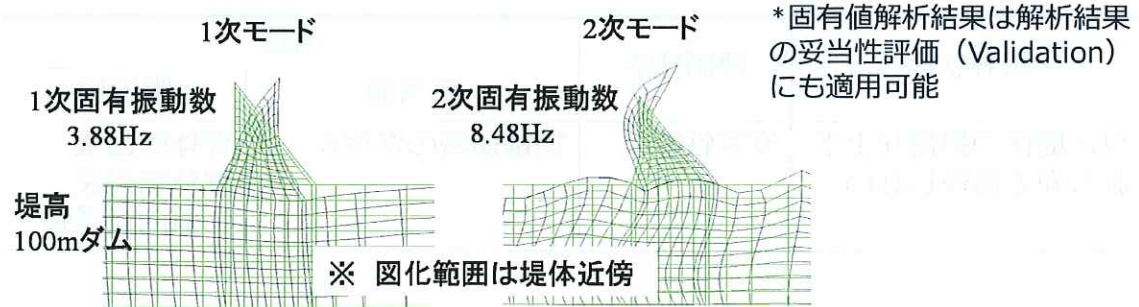
↓ 割増し係数

動的引張強度

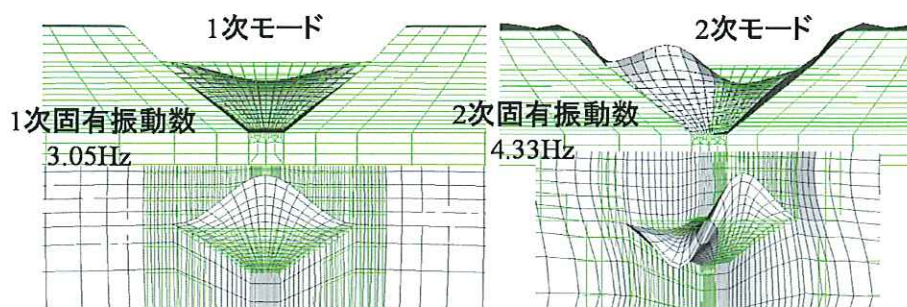
1.4 (国総研資料)，  
1.3 (河川防災技術基準)

↓  
数値解析では，固有値解析結果を基に Rayleigh 減衰として設定

## 解析モデルに応じた振動モードと固有振動数



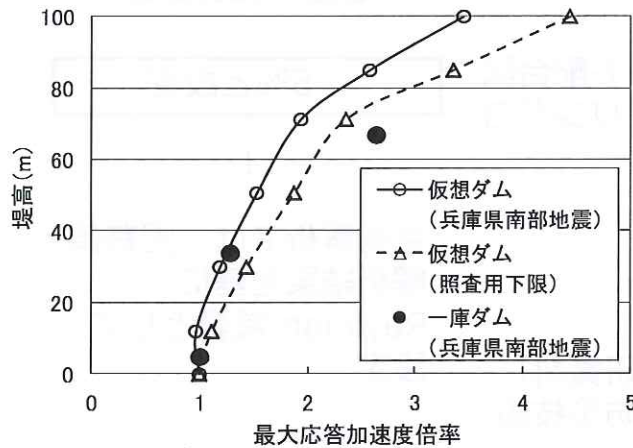
(a)2次元固有値解析



(b)3次元固有値解析

## 解析手法の妥当性検証 (Verification) 用 地震観測データ

1995年兵庫県南部地震における一庫（ひとくら）重力式ダム  
の地震観測記録



一庫重力式ダム（ダム高75m，堤長  
長285m）において，最大加速度が  
ダム底部1.83m/s<sup>2</sup> ダム上部  
4.83m/s<sup>2</sup>が観測

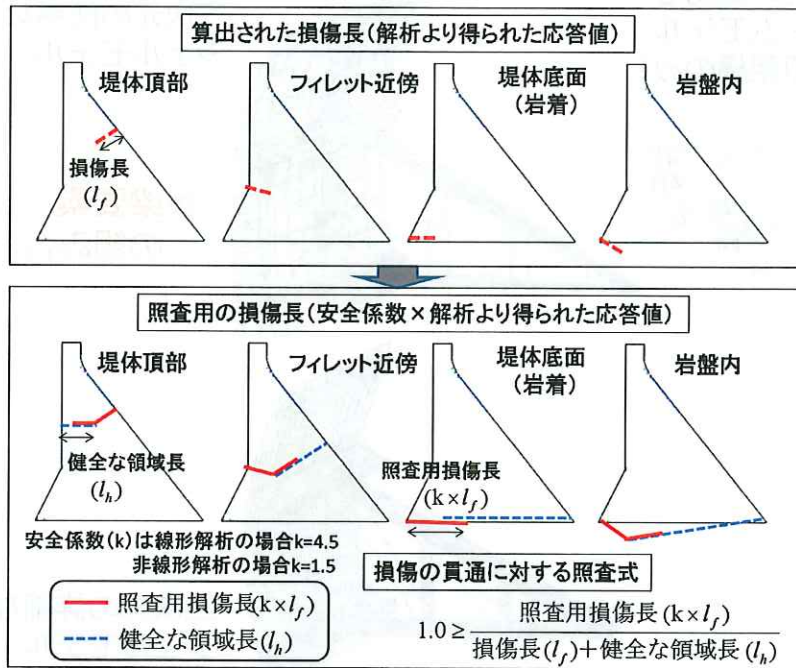


「電力中央研究所報告，総合報告N21，2014」より転載

## 重力式コンクリートダムの限界状態と照査

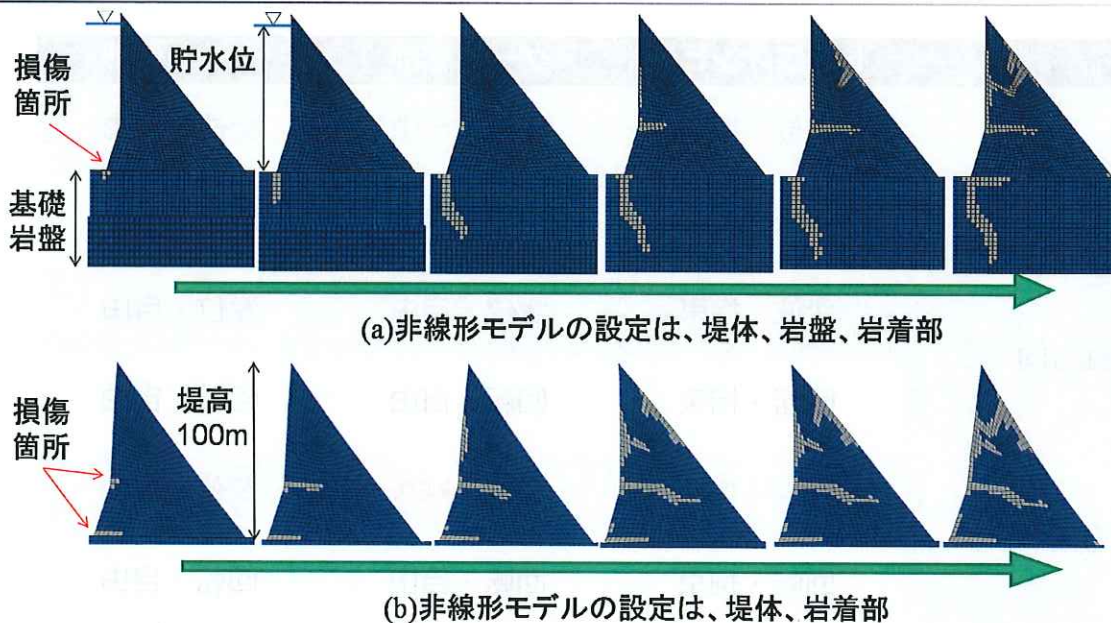
限界状態	評価性能	照査	
		応答値	限界値
ダム堤体の損傷が上下 流方向で貫通しない	安定性能	損傷領域の進展長	堤体断面幅 堤体岩盤長 岩盤内貫通長

## 耐震性能照査の手順



「電力中央研究所報告, 総合報告N21, 2014」より転載

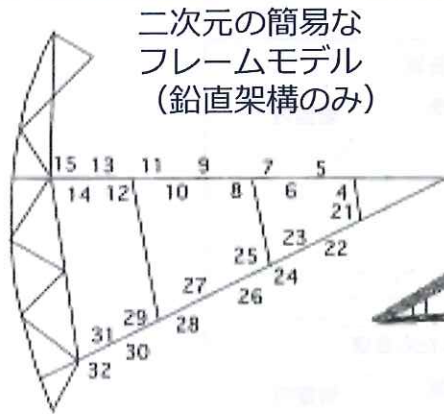
## 動的解析における損傷状態の比較



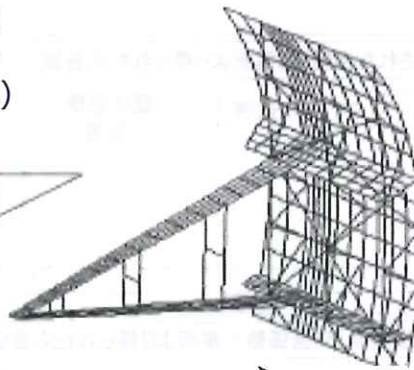
岩盤を線形モデルとした場合は、堤体損傷を安全側に見積もる傾向となる。

「電力中央研究所報告, 総合報告N21, 2014」より転載

## 解析モデルの種類（ラジアルゲートの例示）

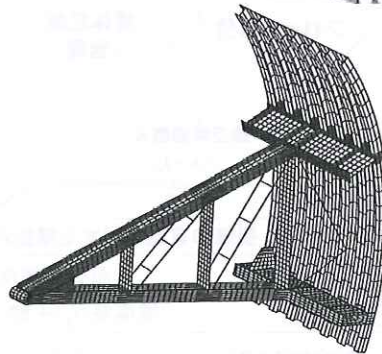


二次元の簡易な  
フレームモデル  
(鉛直架構のみ)



三次元の簡易な  
シェルモデル

● 梁要素、シェル要素  
の組み合わせ



三次元の詳細な  
シェルモデル

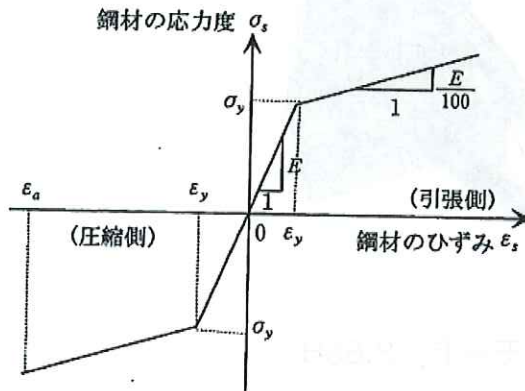
## 解析モデルの境界条件（ラジアルゲートの例示）

	トラニオンピン	ゲート底部	ゲート側部
上下流方向	変位・拘束	変位・自由	変位・自由
	回転・拘束	回転・自由	回転・自由
ダム軸方向	変位・拘束	変位・自由	変位・自由
	回転・拘束	回転・自由	回転・自由
鉛直方向	変位・拘束	変位・ <b>拘束</b>	変位・自由
	回転・拘束	回転・自由	回転・自由

● ローラーゲートについては、主ローラーで上下流方向の変位成分を拘束。それ以外は、ラジアルゲートと同様。

## 材料特性の設定

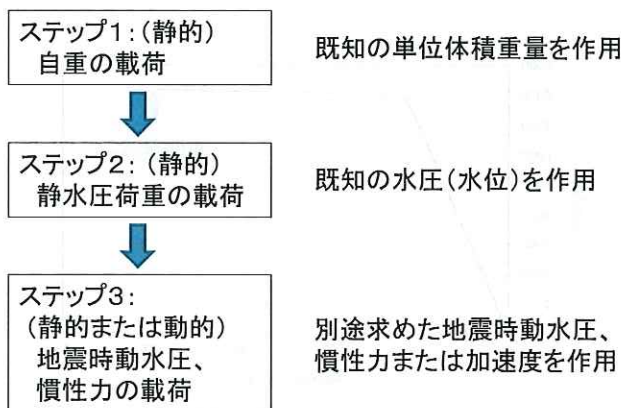
- 材料特性：静的な材料特性
- 縦弾性係数と降伏応力（0.2%耐力）  
⇒使用材料の規格値  
⇒鋼材メーカーによる材料検査成績書  
⇒実際の材料試験値



- 応力ひずみ曲線：バイリニアモデル
- 材料構成則：移動硬化を適用
- 減衰定数：2%（線形解析），1%（非線形解析）

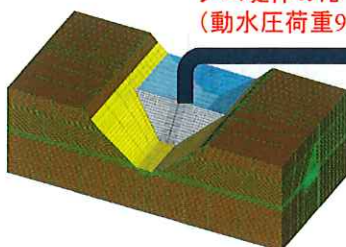
$\sigma_y$ ：降伏応力  
 $\epsilon_y$ ：降伏ひずみ  
 $\epsilon_a$ ：許容ひずみ  
 $E$ ：鋼材のヤング係数

## ダムゲート解析における基本的なステップ

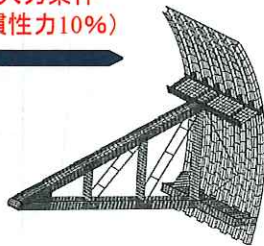


- 必要に応じて
- 線形静的解析
  - 非線形静的解析
  - 線形動的解析
  - 非線形動的解析

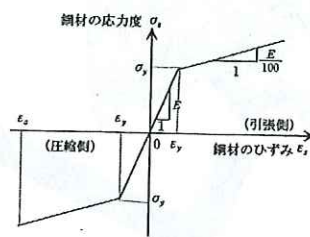
ダム堤体の応答値を入力条件  
(動水圧荷重90%、慣性力10%)



ダムの解析モデル



ラジアルゲートの解析モデル



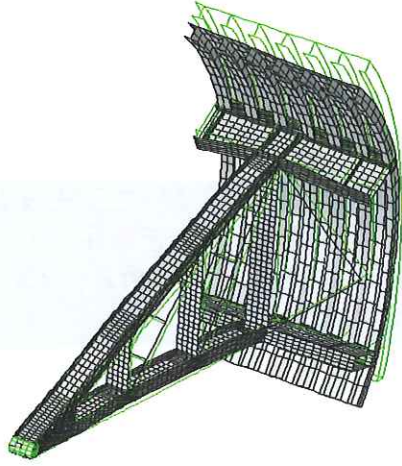
$\sigma_y$ ：降伏応力  
 $\epsilon_y$ ：降伏ひずみ  
 $\epsilon_a$ ：許容ひずみ  
 $E$ ：鋼材のヤング係数

材料非線形の考慮

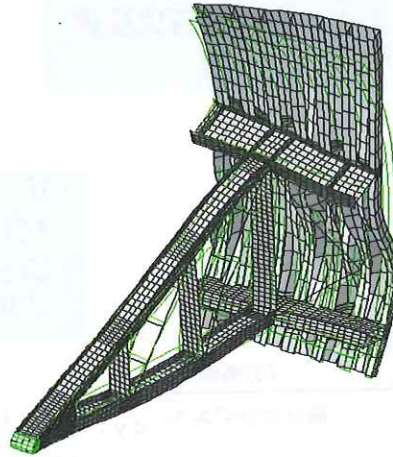
## 三次元固有値解析における振動モードと固有振動数

- 付加質量を考慮，全体振動を例示

\*固有値解析結果は解析結果の妥当性評価 (Validation) にも適用可能



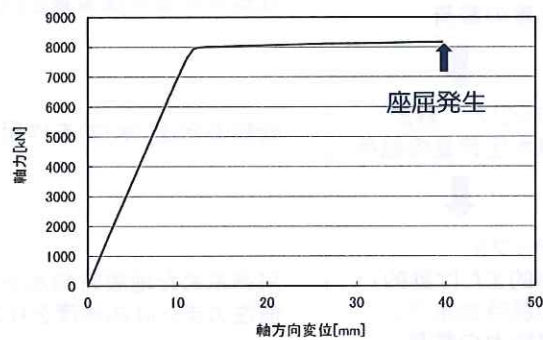
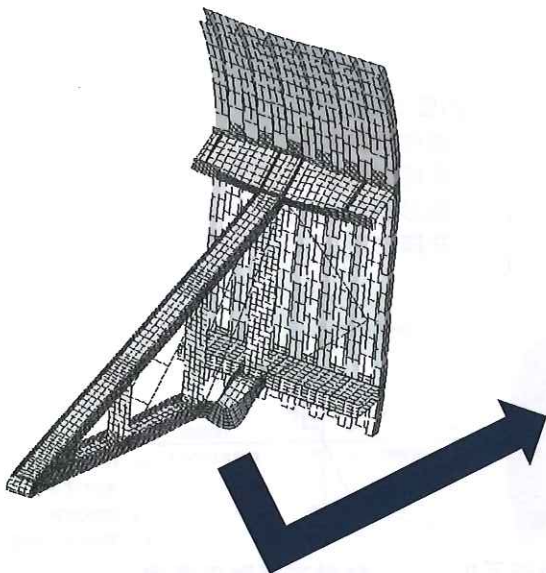
(a) 4次モード, 5.10Hz



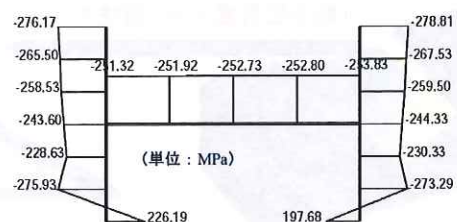
(b) 15次モード, 8.66Hz

## 静的座屈解析による座屈モード，荷重－変位関係，断面応力

- (脚柱に許容製作公差程度の初期不整を考慮)

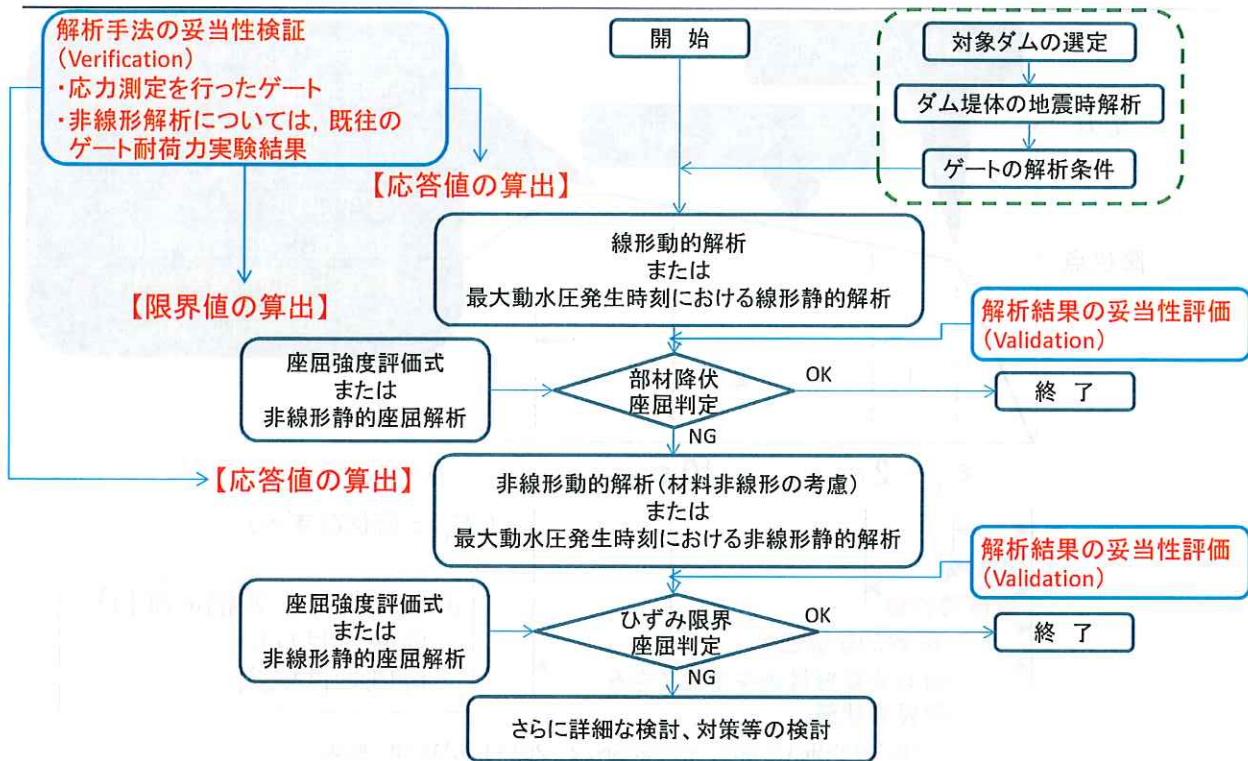


荷重－変位関係



座屈箇所の応力分布

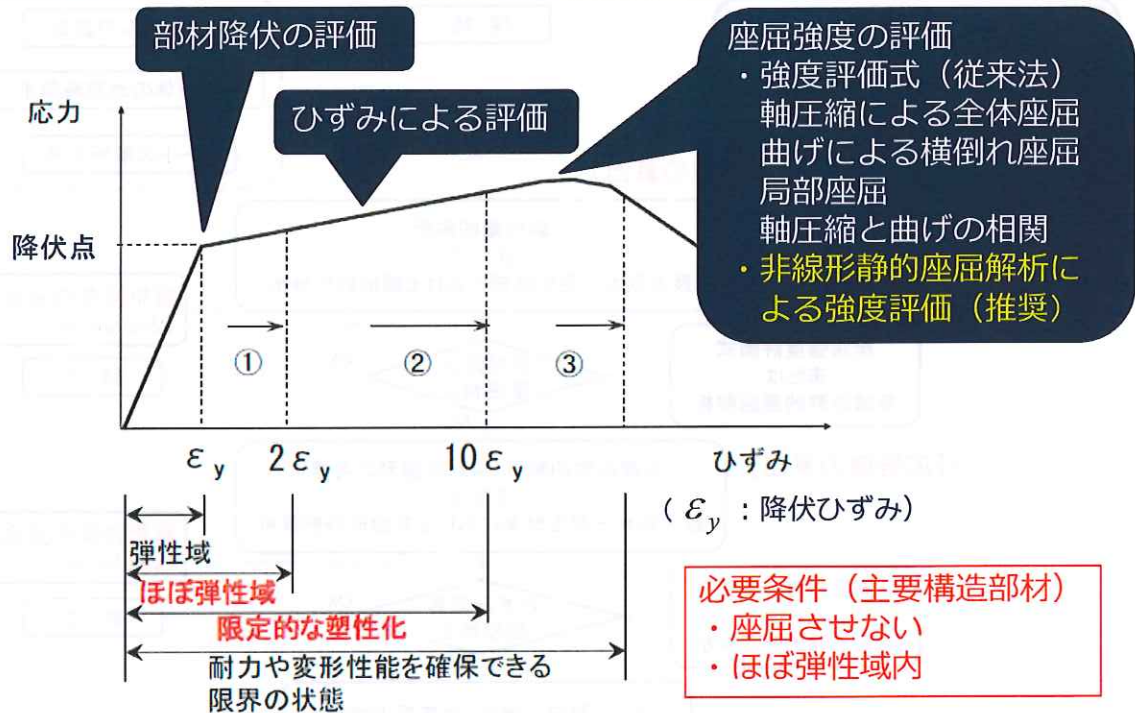
## ダムゲートの耐震性能照査の手順



## ダムゲートの限界状態と照査

限界状態	評価性能	照査	
		応答値	限界値
主要構造部材は座屈限界を超えない	座屈耐力	最大合成応力	限界座屈強度 横倒れ座屈強度
主要構造部材はほぼ弾性範囲にとどまる	降伏耐力	最大合成応力	降伏応力
	塑性化	最大ひずみ	$2\varepsilon_y$ $\varepsilon_y$ : 降伏ひずみ
補助構造部材はほぼ弾性範囲内または限定的な塑性化にとどまる	降伏耐力	最大合成応力	降伏応力
	塑性化	最大ひずみ	$2\varepsilon_y$ または $10\varepsilon_y$ $\varepsilon_y$ : 降伏ひずみ

# 応力－ひずみ関係における限界状態と限界値



## 電力施設の耐震解析技術 第5回 流通施設の耐震解析技術

電力土木, No.386, 2016.6  
佐藤清隆, 佐藤雄亮, 佐藤浩章,  
宮川義範

1. はじめに
2. 送電用鉄塔の耐震解析
  - (1) 解析技術の現状
  - (2) 解析方法
  - (3) 耐震解析の活用と今後の展開
3. 変電設備の耐震解析
  - (1) 変電設備の耐震設計法
  - (2) 東北地方太平洋沖地震での変電設備被害と解析例
  - (3) 変圧器ブッシングの耐震解析の新たな方法



## 架空送電用鉄塔の震害事例



地震動による345kV鉄塔の倒壊  
(1999年台湾集集地震)



地震動による66kV鉄塔の折れ曲がり  
(1999年台湾集集地震)



片継脚鉄塔と地震動との共振  
が原因

「電力中央研究所報告, 調査報告U99023, 1999」より転載

## 送電用鉄塔の限界状態と照査

限界状態	評価性能	照査	
		応答値	限界値
鉄塔全体が倒壊限界を超えない, または腕金が折損限界を超えない	座屈耐力	最大軸力 (圧縮, 引張)	座屈強度

## 架空送電用鉄塔の耐震性

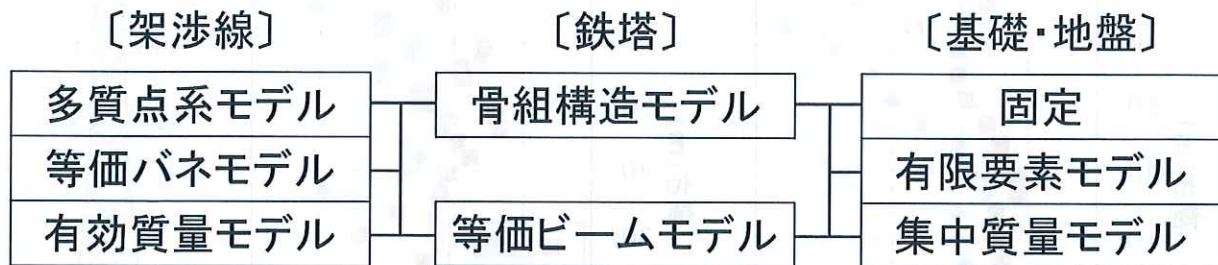
- ◆ 地震動の直接的影響（慣性力）は小さい。
  - －長周期構造物
  - －風荷重が支配的
  - －ただし，特殊な形式には影響
- ◆ 基礎地盤の安定性の影響が大きい。
  - －地すべり
  - －不同沈下
  - －地盤液状化
  - －四脚独立基礎ではわずかな基礎間不同変位が部材応力発生に及ぼす影響が大きい。

## 架空送電用鉄塔の耐震設計

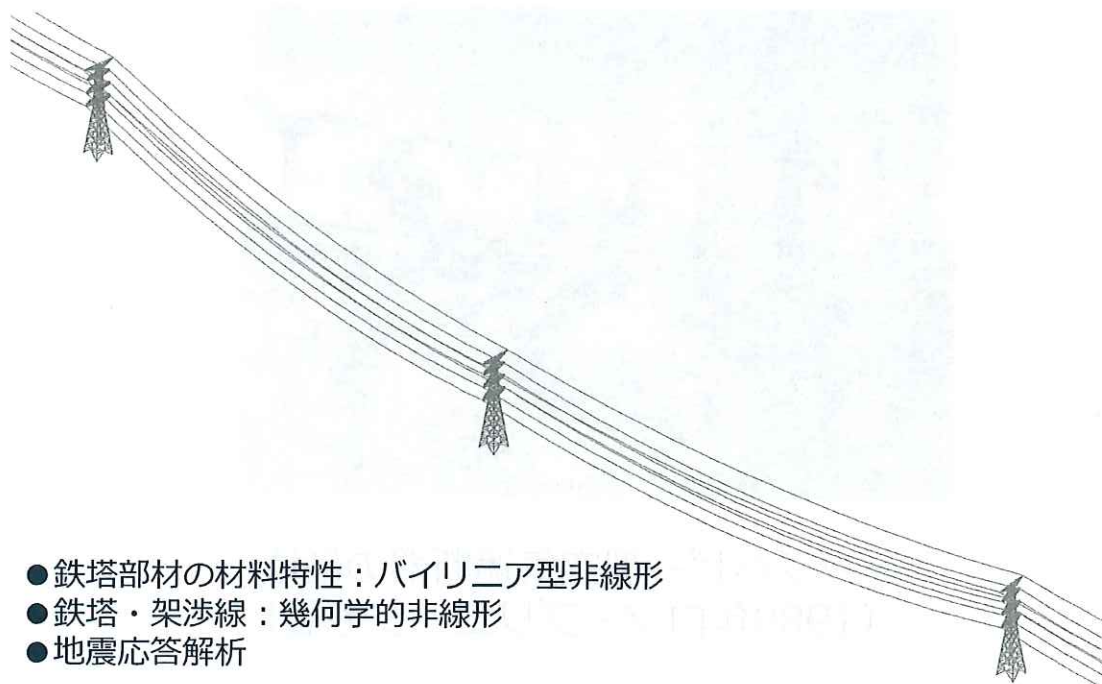
- ◆ 耐震基準類はない。
- ◆ 特殊な形状の鉄塔などで地震荷重が支配的と想定される場合には耐震性検討
- ◆ 耐震性検討は事業者の個別判断

	耐震設計法	適用ケース
鉄塔	層せん断力係数法	標準的な鉄塔
	動的解析法	特殊な鉄塔，地盤と共振する場合
基礎	震度法	逆T基礎，良好な地盤の杭・深礎基礎
	応答変位法	軟弱な地盤の杭・深礎基礎
	動的解析法	軟弱な地盤，急峻な尾根，特殊な基礎，鉄塔と共振する場合

## 送電用鉄塔の動的解析モデルの種類

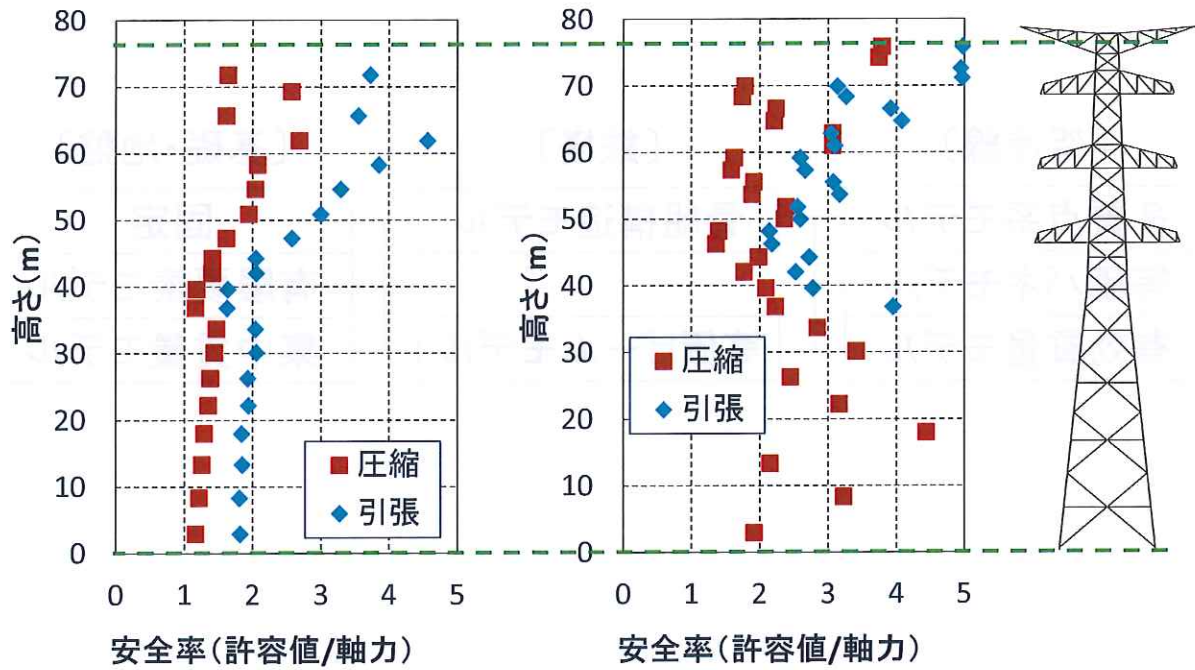


## 鉄塔－架渉線連成系モデル（3基4径間）の例



- 鉄塔部材の材料特性：バイリニア型非線形
- 鉄塔・架渉線：幾何学的非線形
- 地震応答解析

## 地震応答解析（3基4径間）結果の例



## 変電機器の震害事例



トップヘビー型空気遮断器の倒壊  
(1989年ロマ・プリエータ地震)

「電力中央研究所報告，調査報告U0027，1990」より転載

## 変電用機器の限界状態と照査

限界状態	評価性能	照査	
		応答値	限界値
がいし、またはがいし管の発生応力が破壊限界を超えない	破壊限界	最大引張応力	破壊応力
センタークランプ方式ブッシング下端とガスケット接触部の発生応力が破壊限界を超えない	破壊限界	最大引張応力	破壊応力
センタークランプ方式ブッシング下端口開き量が漏油を伴う口開き量を超えない	変位性能	最大口開き量	許容口開き量

## 変電機器の耐震性

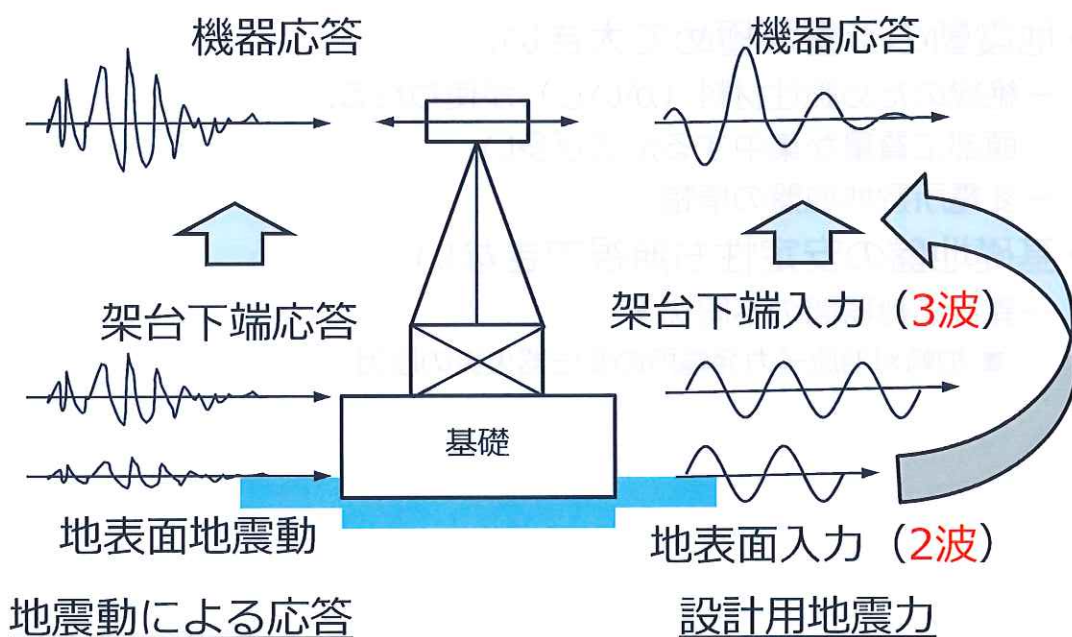
- ◆ 地震動の影響が極めて大きい。
  - － 絶縁のため脆性材料（がいし）が使われる。
  - － 頭部に質量が集中する形式が多い。
  - － 変電所敷地地盤の増幅
- ◆ 基礎地盤の安定性も無視できない。
  - － 異なる機器間の不同沈下
    - 柏崎刈羽原子力発電所の変圧器火災の原因

## 変電機器の耐震設計

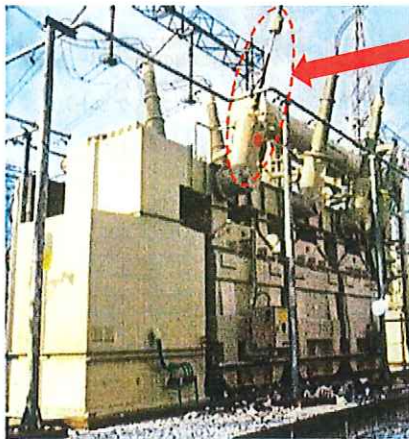
- ◆ 日本電気協会「変電所等における電気設備の耐震設計指針 JEAG 5003-2010」
- ◆ 1978年宮城県沖地震による甚大な変電機器被害を教訓として制定（擬共振法による動的設計法）
- ◆ 設計用地震力 **0.3g共振正弦3波（振動数範囲0.5～10Hz）**
  - －0.3gは全国一律で変電所地表面で定義\*
  - －別の言い方では, **1.8G**（減衰定数5%の最大加速度応答）

\*日本全国における再現期間75年間の基盤加速度期待値と全国の代表変電所の表層地盤加速度増幅率に基づいて設定

## 変電機器の耐震設計用地震力



# 2011年東北地方太平洋沖地震による変電機器 地震被害事例の解析（モデル化）

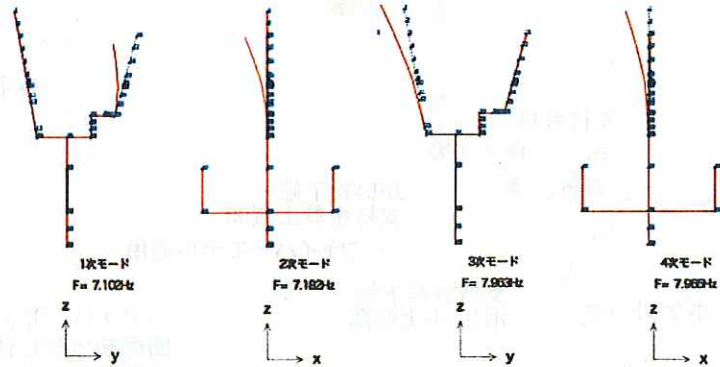


破損したブッシング（2次側）

\*固有値解析結果は、解析結果の妥当性評価（Validation）にも適用可能

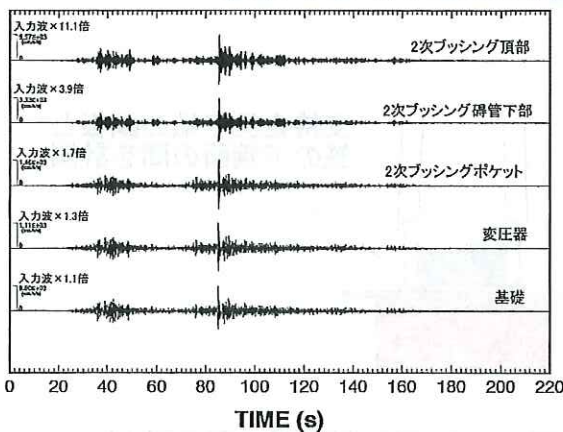
仙台変電所における275kV変圧器ブッシングの破損

「電力中央研究所報告，研究報告N12016，2013」より転載



解析モデルと固有値解析結果

# 2011年東北地方太平洋沖地震による変電機器 震害事例の解析（解析結果）



←「電力中央研究所報告，研究報告N12016，2013」より転載

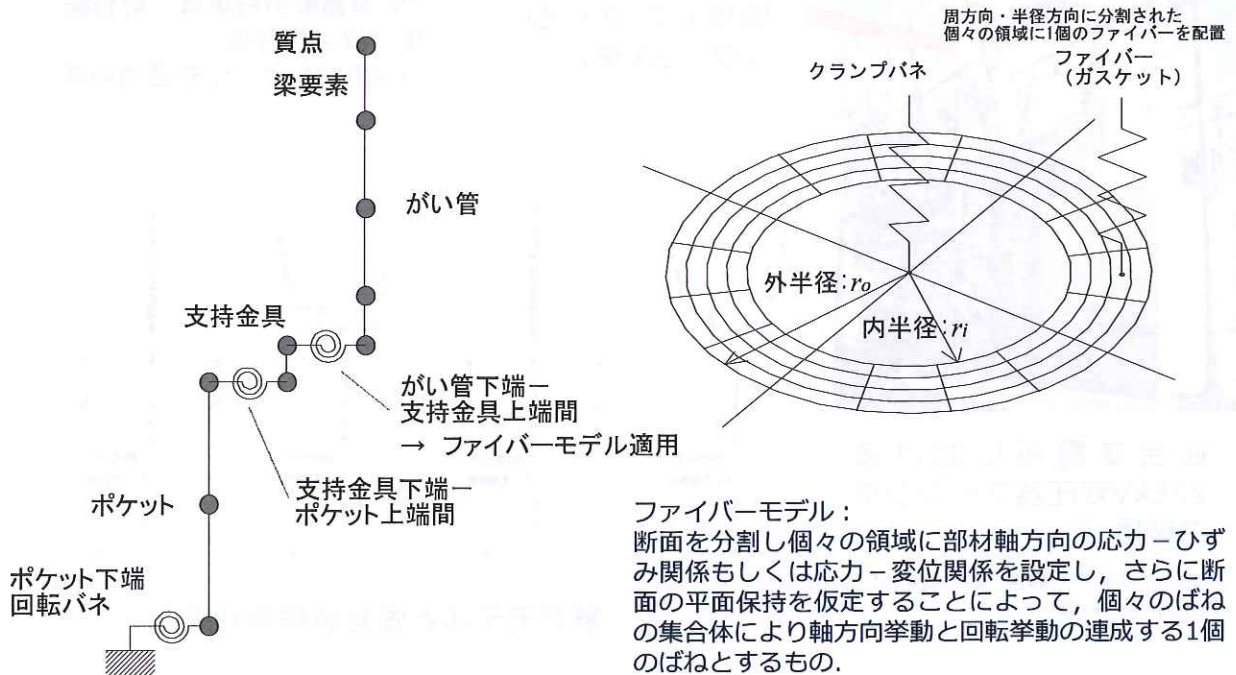
基礎，変圧器，ブッシングの  
応答加速度

被害状況を説明できるとともに、解析手法の妥当性を検証（Verification）

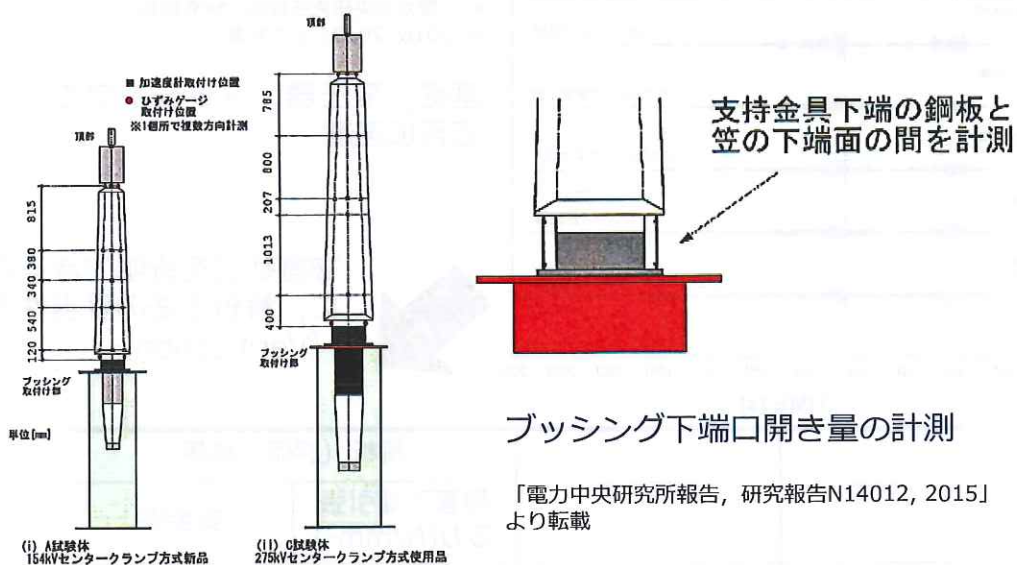
対象	評価性能	解析（評価）結果	
		碍管下端引張応力(N/mm <sup>2</sup> )	安全率
1次ブッシング	碍管許容応力 42(N/mm <sup>2</sup> )	35	1.22
2次ブッシング		44	0.95

# 変圧器ブッシングの新たな耐震解析手法

## ●多質点はりモデルとファイバーモデル



# センタークランプ方式変圧器ブッシングの加振試験 (解析手法の妥当性検証用実験)

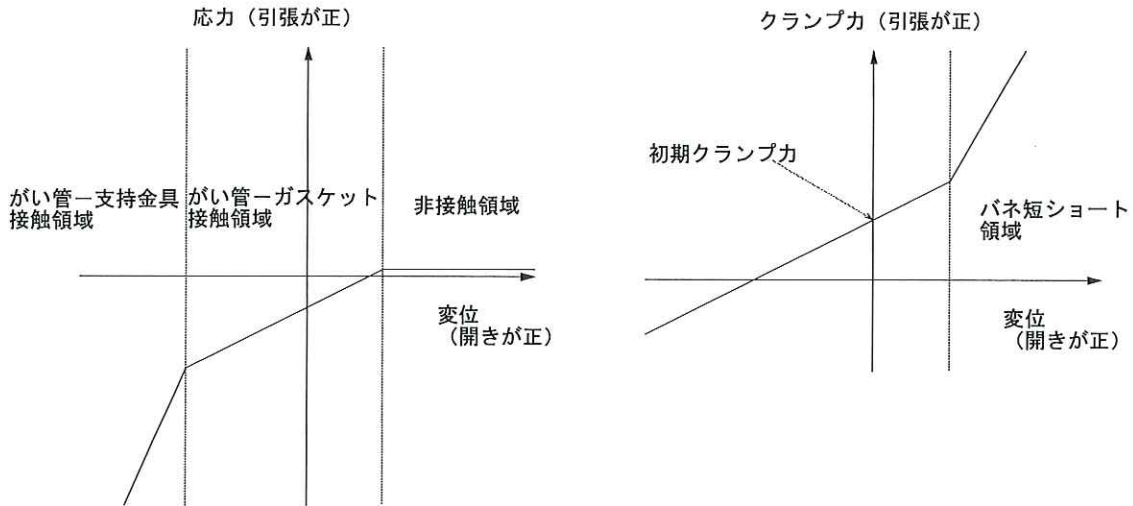


## 加振試験の供試体

ポケット下端より, 共振正弦3波,  
8種類の地震波を入力



# ファイバーばねの特性



# ファイバーモデル解析のブッシング加振試験結果による解析手法の妥当性検証 (Verification)

