

## 実験の計画と現状 WS 報告

酒井 理哉, 佐藤 雄亮, 宮川 義範, 豊田 幸宏

(財) 電力中央研究所 地球工学研究所 構造工学領域  
〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646  
 [{m-sakai, satoy, miyagawa, toyoda}@criepi.denken.or.jp](mailto:{m-sakai, satoy, miyagawa, toyoda}@criepi.denken.or.jp)

大規模数値シミュレーション技術を高度化していくためには、複雑な物理現象を適切にモデル化し、解析結果の妥当性を実験などにより確認していく必要がある。本研究プロジェクトにおいて、地盤 - 建屋 - 機器の連成による原子力プラントの数値シミュレーション技術向上のために、従来耐震評価上十分考慮されていない、シミュレーションモデルの接合箇所などについて、力学挙動、振動応答、減衰特性などの現象を把握し、基本的な検証データの取得は不可欠である。特に、大規模数値シミュレーションにおいて、相互作用が生じる建屋 - 機器の部位でのモデル化に着目した実験の計画について以下に概要を述べる。

地震の多いわが国では耐震安全性を確保しつつ、合理的な設計手法を構築するために、対象構造物や機器のモデルを作成し、大型振動台を用いた実験検討が行われてきた。これらの振動実験においては、実大規模のモデルを用いて、各種連成挙動を考慮し、終局的な耐震強度まで評価することが要求されているが、振動台のテーブルサイズと加振限界やモデルの境界条件によるモデル化の制約が存在し、スケール効果などにより実際の応答挙動を再現できないなど問題が生じている。

一方、構造部材の力学的挙動を評価するために、対象とする構造物の一部分をモデル化して、大型のモデルによる載荷実験による評価も数多く行われてきている。これらの部材モデルの載荷実験においては、振動台を用いた加振に比べ、大容量のアクチュエーターを用いて動的挙動までの評価が可能であるが、地震動が構造系全体に入力された状態での部材応答は、直接評価できないデメリットが存在した。

このような技術的な課題を克服し、今回のターゲットとなる建屋・機器などの連成を考慮した異材接合部のモデル化と振動実験による検証においては、構造物の一部材について加振実験を行い、他の部分を数値解析することにより全体系応答を求めるハイブリッド実験の適用が効果的である。ハイブリッド実験は 1970 年代から研究が進められ、質点系の数値モデルと力学実験の連携による動的な荷重を作用した構造物の応答評価が実現されてきた。しかしながら、既存のハイブリッド実験法では、数値モデルと載荷機構の制約により、適用可能な構造形式・載荷形式が限られていたため、複雑な全体系の数値モデルと載荷機構の改良が必要であった。

電力中央研究所では、複数の加振機を組み合わせた載荷機構を用いた部分モデルによる力学実験と、非線形多自由度有限要素法による全体系数数値解析を連携させることにより、全体系応答と局所損傷の関係を同時に評価できるシステムである「ハイブリッド動的力学試験システム」の開発を行い、実用化を進めてきた。本プロジェクト研究において、この耐震実験評価手法を用いて、マルチスケール構造モデリングに関する実証的なデータを得られることが期待できる。

今後は、文献調査により建屋 - 機器間の異材接合部に関する既往検討、各種基準類 (AIJ 各種合成構造設計指針、JEAG 4601 など) を把握し、想定された荷重条件、破損モードを整理し、課題を抽出する。また、現行の設計上の観点から、非常に剛な支持構造部などは、検討範囲に含めないようスクリーニングする。これらの課題抽出結果に基づき実験計画を策定する。実験は、2009 (要素モデル実験)、2010 (構造実験) の 2 ヶ年で実施する予定である。

# 実験の計画と現状

(財)電力中央研究所 構造工学領域  
酒井理哉, 佐藤雄亮  
宮川義範, 豊田幸宏

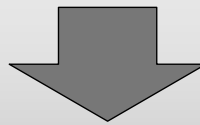
1

## 耐震評価実験の背景・位置づけ

- **耐震上の観点からプラント全体解析を行う意義**
  - 多数の機器から構成され、それぞれの固有振動数で応答するプラント全体の数値シミュレーション解析により、耐震評価における見落としの有無を確認する。
- **耐震実験の必要性**
  - 多質点モデルで考慮されていない異材接合部などへのFEM解析モデルを適用するには、実験的な裏付けが必要。例えば、自動車設計での車両衝突シミュレーションでは、多数の構成要素からなる解析モデルで、溶接部などの接合箇所については、要素試験結果から構造同定して得られた近似モデルで、適切な物性値を与えて精緻化している。

# 耐震評価実験の目的

- 従来剛接合で評価されてきた異材接合部(コンクリート、鋼材)の力学特性、振動特性、減衰特性などを把握する。
- 建屋 - 機器のシミュレーションを行うAdv\_solidの機能検証に資するデータを得る。



- 大型振動台実験では、モデル化が難しいため、ハイブリッド実験による評価が必要

# ハイブリッド実験手法の開発経緯

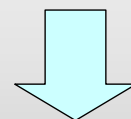
兵庫県南部地震で高速道路  
橋脚に生じた損傷例



局所的には座屈  
とき裂による破損  
が生じた



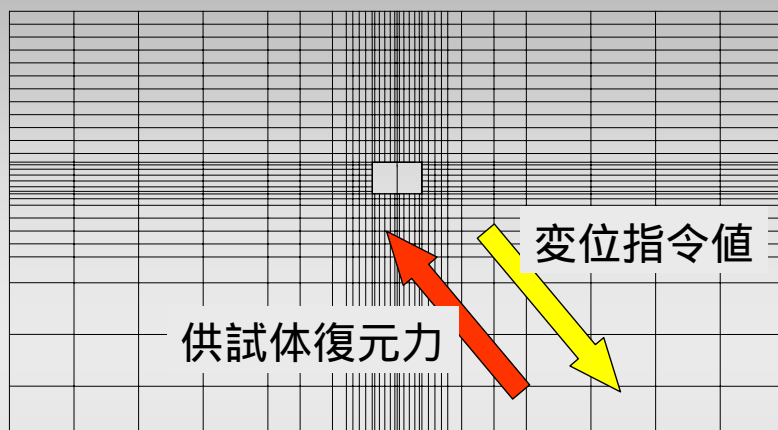
構造系全体応答と局  
所破損を同時に評価  
することが重要



新しい実験・解析  
手法の開発が必要

構造系全体が大きく応  
答し残留変形を生じた

# R C 地中構造物ハイブリッド実験例



地盤を含めた2連ダクト形式地中構造物の  
全体系地震応答解析

実規模隔壁モデル  
の3軸載荷試験



IR CRIEPI

5

## システムのコアとなる技術

- 数値積分法:  $\alpha$  operator splitting ( $\alpha$ -OS) 法(中島1993)
  - ハイブリッド試験に適した2つの積分手法
    - OS法: 線形部に陰的なNewmark  $\beta$ 法を適用し, 非線形部に陽的な予測子修正子法(predictor corrector method) を適用した積分法
    - $\alpha$ 法: 高次モードの応答を安定して解く数値積分法
- 数値解析部: TDAP III
  - 市販の非線形有限要素解析コード
  - 静的・動的な非線形解析が実行可能
- 加振機制御技術
  - 逆運動学処理に基づく多軸載荷制御

IR CRIEPI

6

# 増分型 $\alpha$ -OS法の定式化

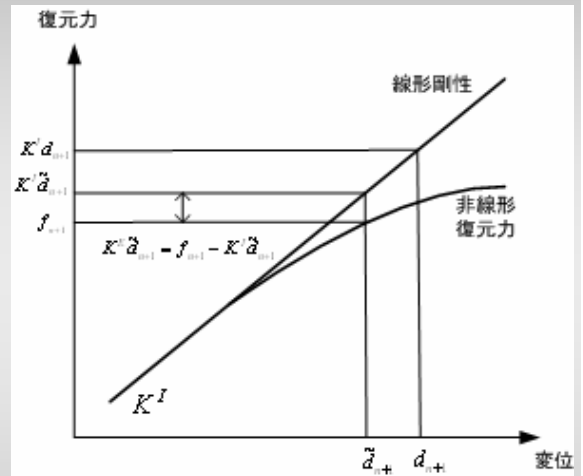
## • $\alpha$ -OS法の運動方程式

$$\begin{aligned} & \left( \frac{1}{\beta \Delta t^2} \begin{bmatrix} M^{11} & M^{12} \\ M^{21} & M^{22} \end{bmatrix} + (1+\alpha) \frac{\gamma}{\beta \Delta t} \begin{bmatrix} C_t^{11} & C_t^{12} \\ C_t^{21} & C_t^{22} \end{bmatrix} + (1+\alpha) \begin{bmatrix} K_t^{11} & K_t^{12} \\ K_t^{21} & K_t^{22} \end{bmatrix} \right) \Delta \begin{Bmatrix} d_1^i \\ d_2^i \end{Bmatrix} \\ & = (1+\alpha) \begin{Bmatrix} P_{t+\Delta t}^1 \\ P_{t+\Delta t}^2 \end{Bmatrix} - \alpha \begin{Bmatrix} P_t^1 \\ P_t^2 \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} \tilde{E}_t^1 \\ \tilde{E}_t^2 \end{Bmatrix} + (1+\alpha) \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & K^{22t} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 \\ \tilde{d}_{t+\Delta t}^2 \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} 0 \\ f_{t+\Delta t}^2 \end{Bmatrix} \\ & - \alpha \left( \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & K^{22t} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 \\ \tilde{d}_t^2 \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} 0 \\ f_t^2 \end{Bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} M^{11} & M^{12} \\ M^{21} & M^{22} \end{bmatrix} \left( \frac{1}{\beta \Delta t} \begin{Bmatrix} v_1^i \\ v_2^i \end{Bmatrix} + \frac{1}{2\beta} \begin{Bmatrix} a_1^i \\ a_2^i \end{Bmatrix} \right) \\ & - (1+\alpha) \begin{bmatrix} C_t^{11} & C_t^{12} \\ C_t^{21} & C_t^{22} \end{bmatrix} \left( \Delta t \left( 1 - \frac{\gamma}{2\beta} \right) \begin{Bmatrix} a_1^i \\ a_2^i \end{Bmatrix} - \frac{\gamma}{\beta} \begin{Bmatrix} v_1^i \\ v_2^i \end{Bmatrix} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{Bmatrix} \tilde{E}_t^1 \\ \tilde{E}_t^2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} M^{11} & M^{12} \\ M^{21} & M^{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_1^i \\ a_2^i \end{Bmatrix} + \int_0^t \begin{bmatrix} C_t^{11} & C_t^{12} \\ C_t^{21} & C_t^{22} \end{bmatrix} d \begin{Bmatrix} v_1^i \\ v_2^i \end{Bmatrix} + \int_0^t \begin{bmatrix} K_t^{11} & K_t^{12} \\ K_t^{21} & K_t^{22} \end{bmatrix} d \begin{Bmatrix} d_1^i \\ d_2^i \end{Bmatrix}$$

$$\beta = \frac{(1-\alpha)^2}{4}, \quad \gamma = \frac{1}{2} - \alpha$$

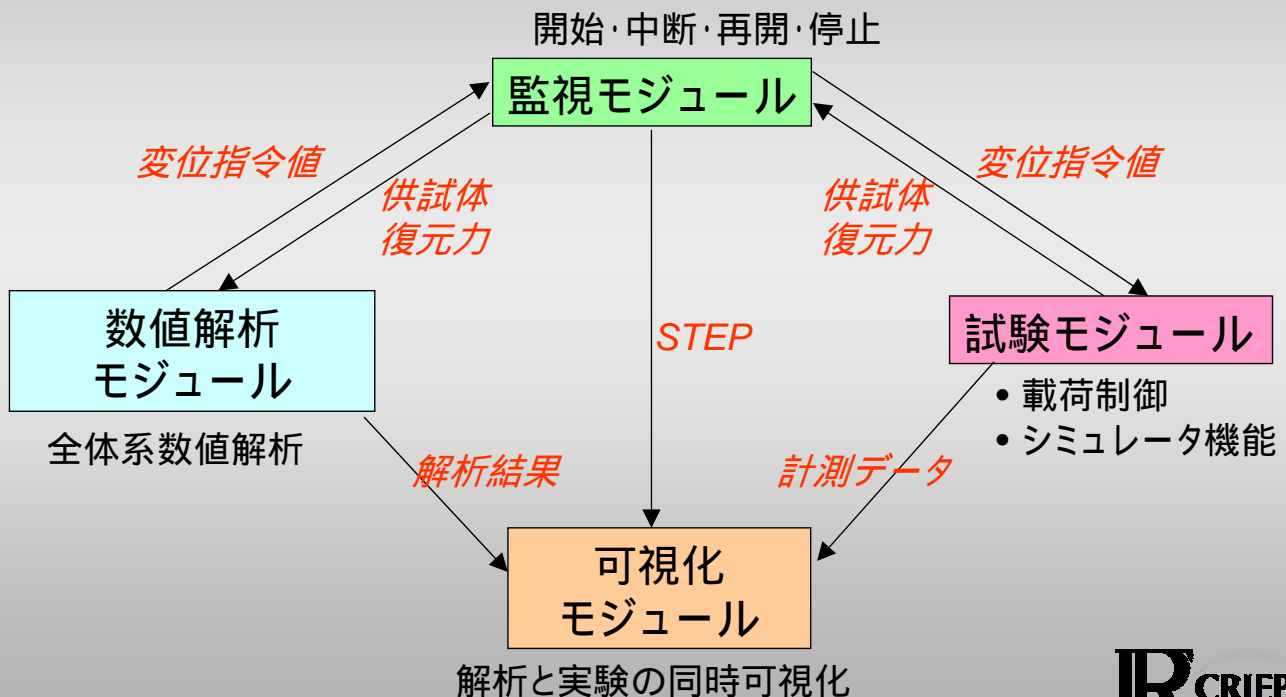
上添え字1: 数値部分  
上添え字2: 実験部分



7



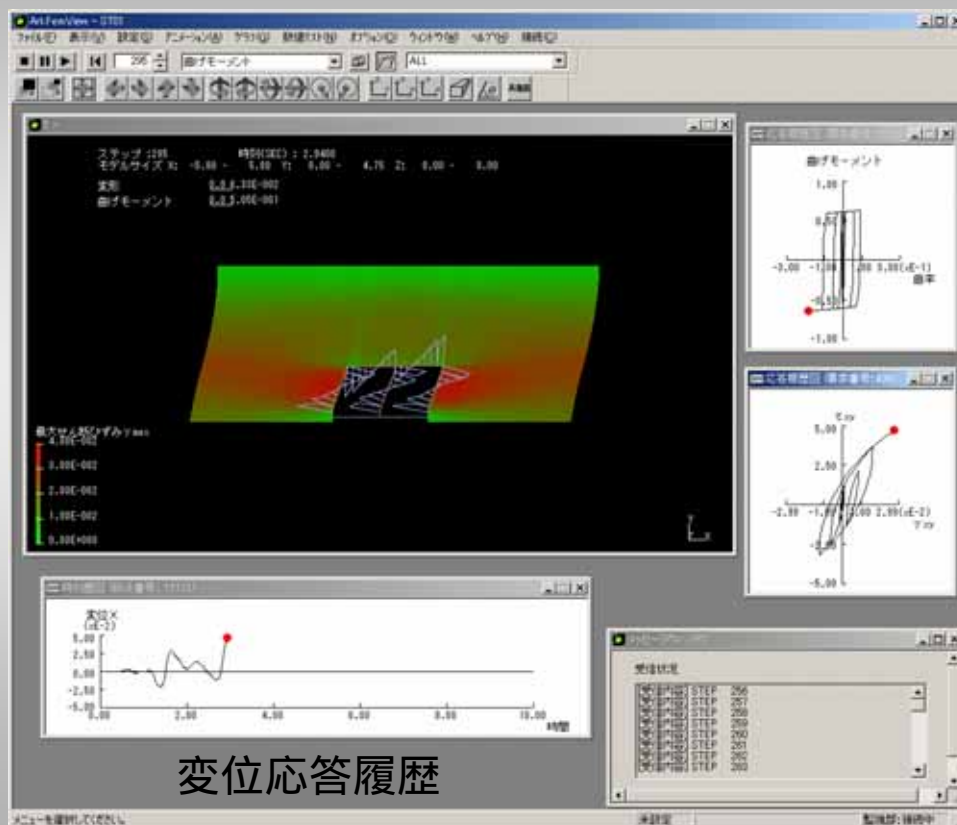
# システム構成とデータフロー



8



# 全体系可視化の実行例



IR CRIEPI

## 開発したハイブリッド試験システムの特徴

- 数値解析部分にFEMを適用したため、従来のハイブリッド試験より、適用範囲が広がり、適切なモデル化が可能
- 実規模の構造部材を用いた実験により、正しい破壊モードの評価が可能
- 地震や台風など動的な荷重の影響を考慮可能
- 部分的なモデルで試験するため低コスト

IR CRIEPI

# 今後の予定

- 文献調査により建屋 - 機器間の異材接合部に関する既往検討、各種基準類(AIJ各種合成構造設計指針、JEAG 4601など)を把握し、想定された荷重条件、破損モードを整理し、課題を抽出する。
- 現行の設計上の観点から、非常に剛な支持構造部などは、検討範囲に含めないようスクリーニングする。これらの課題抽出結果に基づき実験計画を策定する。
- 実験は、2009(要素モデル実験)、2010(構造実験)の2カ年で実施予定。



11

# 電中研のハイブリッド実験設備

- 低コストで精度良く構造物の破壊まで評価可能なハイブリッド動的力学試験システムによる新たな実験的研究を展開し、電力設備のより一層の設計合理化・長寿命化・安全性実証などに貢献する。



- ・大型振動台
  - ・加振機システム
  - ・油圧源
  - ・反力床, 反力壁, 荷重フレーム
  - ・制御システム
- などにより構成される



12