

数値震動台プロジェクトの概要

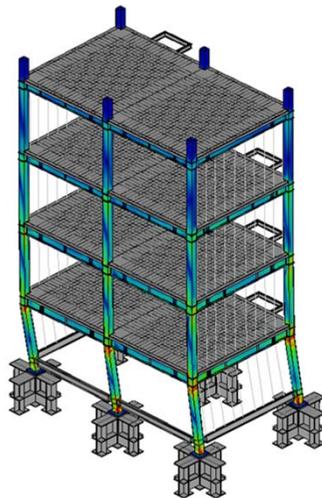
数値震動台開発研究分科会
委員長 大崎 純 (京都大学)

開発の背景

- 防災科学技術の研究開発の中核目標(平成9年, 科技庁答申)
地震災害のあらゆる状況をシミュレートできるようなシステム(地震災害時空間シミュレーションシステム)を開発し, これを用いて地震災害の大幅な軽減のために資する
- 
- 建築物, 土木構造物, ライフライン, 産業施設, 地盤等のあらゆる構造物等の挙動をモデル化し, それにより各地域での脆弱性の評価に活用することができる数値解析システム
- 
- 数値振動台開発に向けた基礎的データを取得するために, E-ディフェンスが建設され, 2005年から稼働開始
 - 防災科研に数値震動台研究開発プロジェクトが設立

数値震動台の開発概要

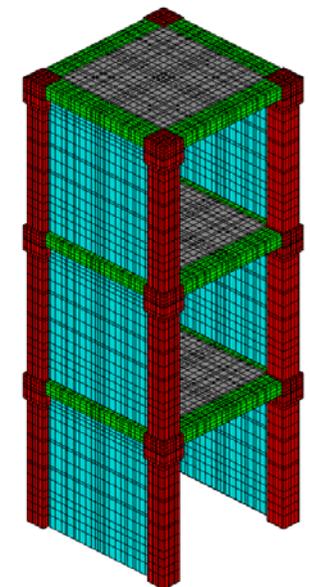
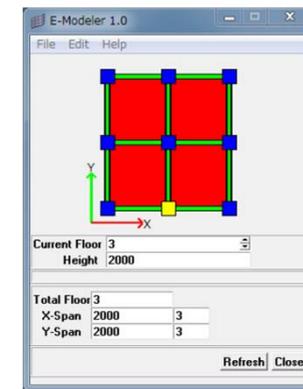
1. 構造物の損傷・破壊過程を再現するシミュレーション技術の開発
 - 局所的な損傷・破壊と全体挙動の同時シミュレーション
2. 室内被害を再現するシミュレーション技術の開発
 - 人的被害, 経済損失の軽減
3. 実験と数値解析データ活用促進のためのプリポスト処理システム
 - 利用促進のための入出インターフェイス
大規模データの利活用の効率化



建物の全体崩壊実験(左)と
その再現解析(右)



天井の脱落実験(上)と
その再現解析(下)



開発モデラー(左)と
構築されたモデル(右)

数値震動台の開発概要

AI, 機械学習

損傷同定,
モニタリング

構造物の破壊
シミュレーション

Eシミュレータ



大型震動台

可視化

設計支援

防災教育

家具・非構造材

建物群の解析,
被害推定

構成則

ソルバー

詳細有限要素解析

スーパーコン
ピュータ

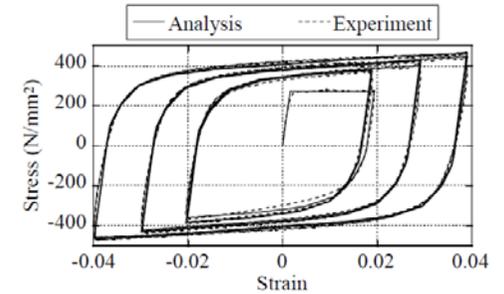
これまでに開発した材料構成則

材料構成則一覧

材料	構成則
鋼材	semi-implicit型ルールを用いた区分線形複合硬化モデル
コンクリート	前川構成則, PDS-FEM
	圧壊およびクラックを考慮した拡張Drucker-Prager則
ゴム	弾性部分をOgden体(超弾性体)としたSimoの粘弾性モデル
地盤	上下負荷面ECモデル 土水連成解析モジュール



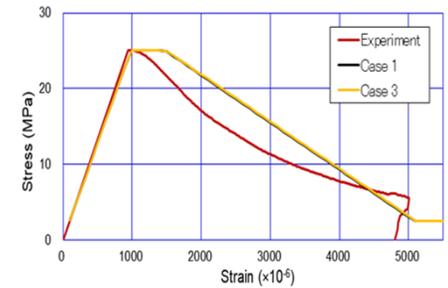
鉄骨造建物試験体



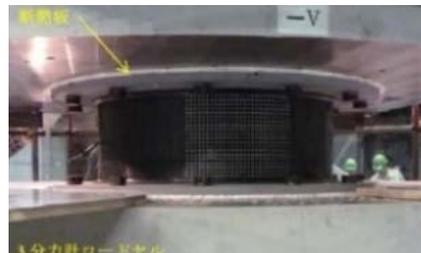
鋼材の繰り返し挙動の再現



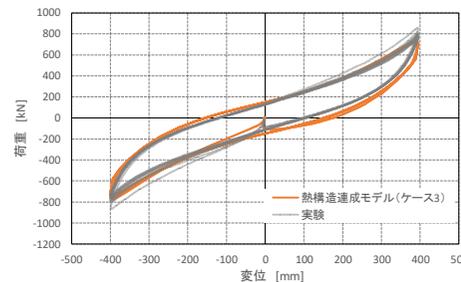
RC造建物試験体



コンクリートの圧壊・軟化挙動の再現



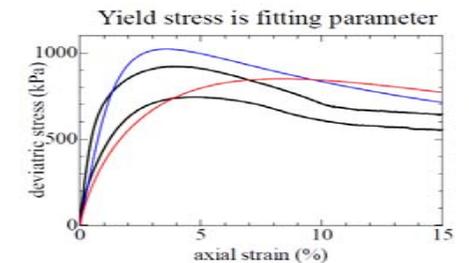
積層ゴム免振支承



免振支承の荷重-変位関係

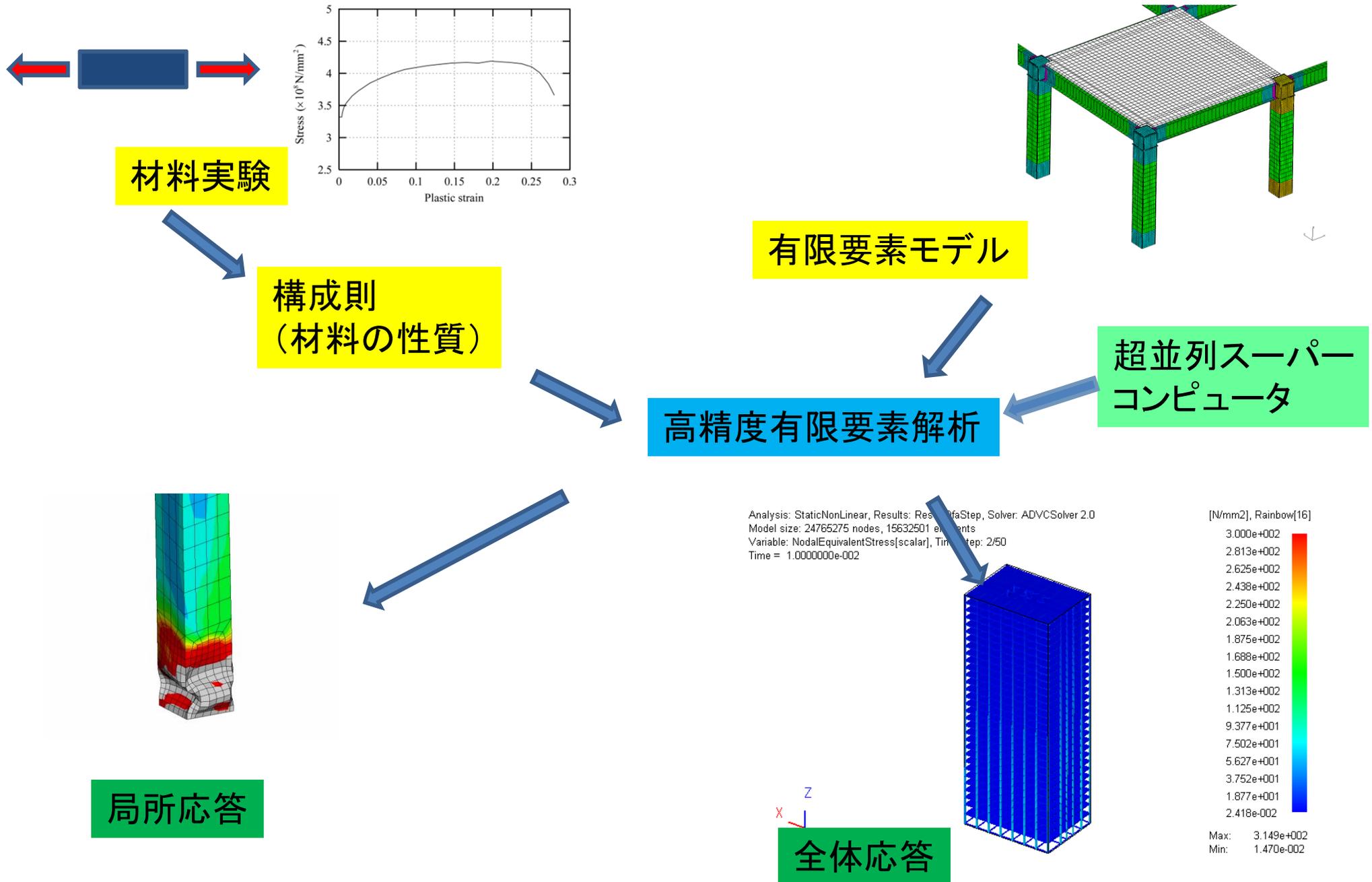


地盤構造試験体



地盤材料の応力-ひずみ関係

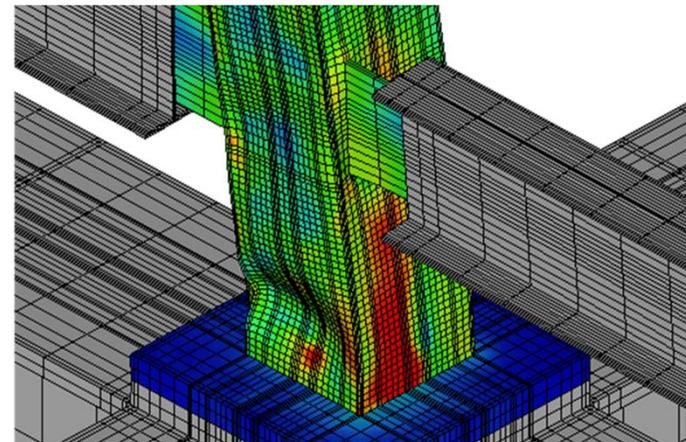
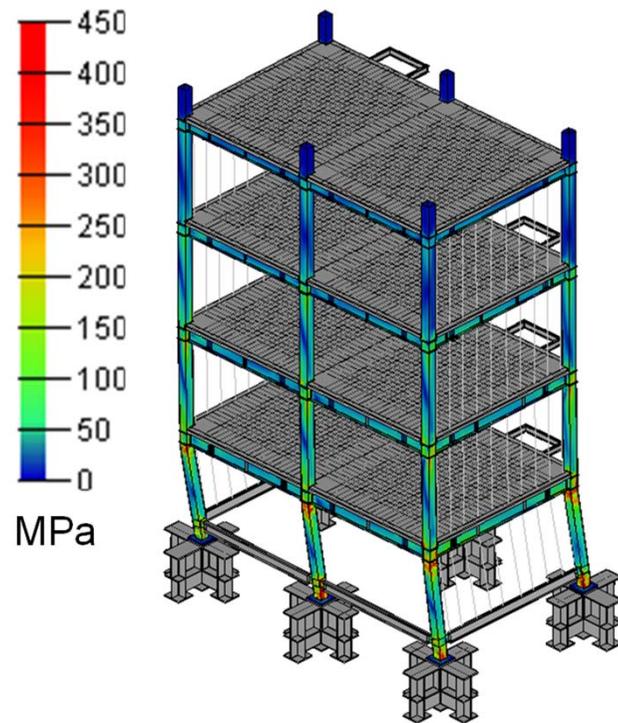
Eシミュレータの概要： 骨組解析



E-ディフェンス実験の再現解析：鉄骨骨組

1. 構造物の損傷・破壊過程の再現

- 構造物のマイクロおよびマクロな挙動の同時シミュレート
 - 構造物の形状を忠実に再現する詳細有限要素モデル
 - 材料の損傷・破壊現象を再現可能な構成則



E-ディフェンス実験の再現解析：鉄筋コンクリート橋脚

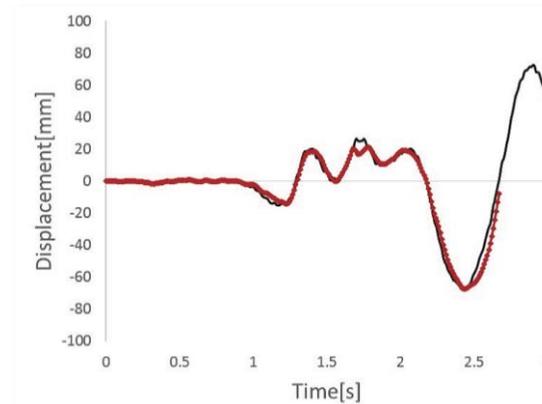
- コンクリートの弾塑性構成則として前川構成則を再定式化して実装
- コンクリートの亀裂を解析する手法を開発 (PDS-FEM)
- JR鷹取波加振実験の再現解析を実施



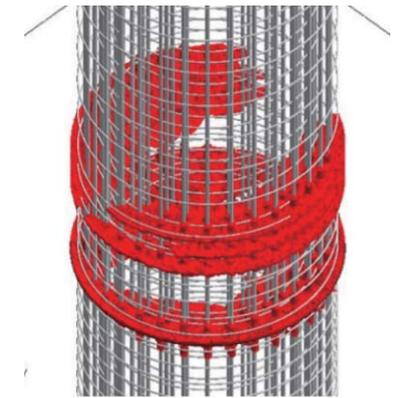
RC橋脚試験体



解析モデル



変位応答
(黒：実験，赤：解析)



亀裂進展状況

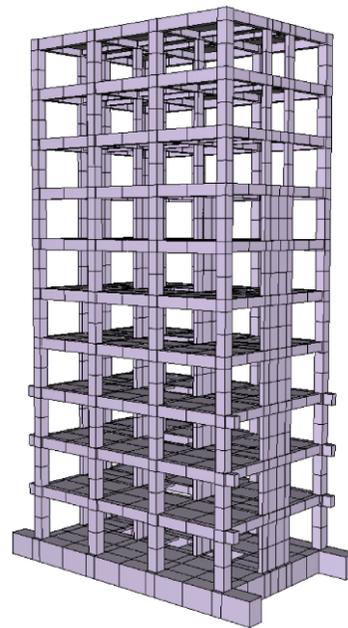
- 阪神淡路大震災でみられた橋脚の破壊形式(曲げ先行型破壊)の再現に成功

E-ディフェンス実験の再現解析：鉄筋コンクリート造建物

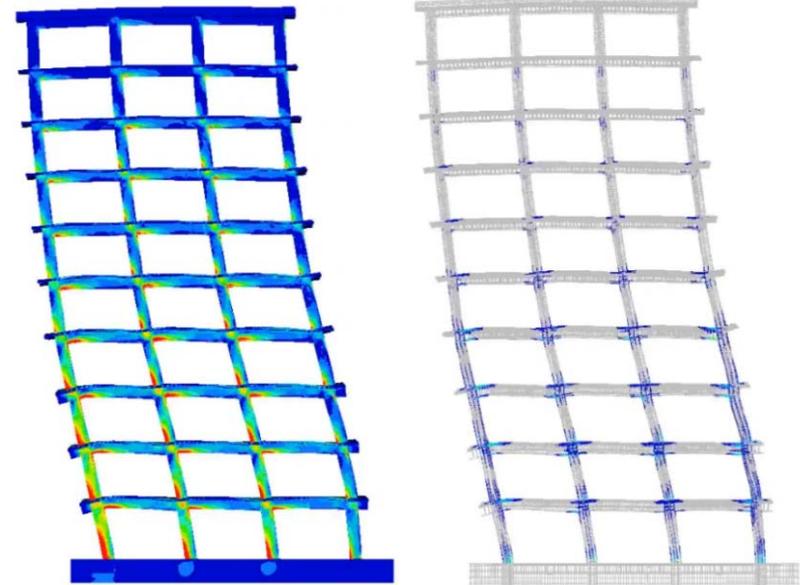
- コンクリートの弾塑性構成則として拡張Drucker-Prager則を実装
- 鉄筋も含めて鉄筋コンクリート造建物全体を詳細にモデル化
- JMA神戸波加振実験の再現解析を実施



試験体



解析モデル

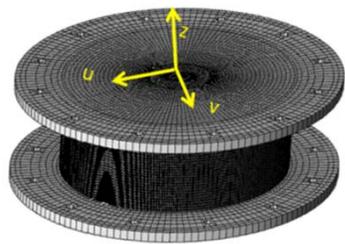


相当塑性ひずみ分布
(左:コンクリート, 右:鉄筋)

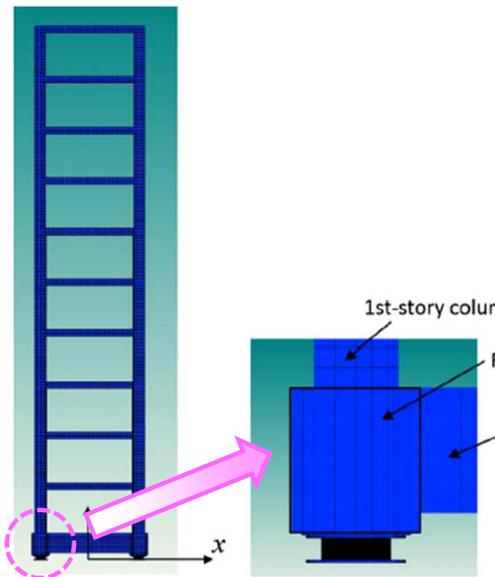
- 柱梁接合部の鉄筋の応力集中が見られ、実験での損傷との対応が確認できた
- 実験結果との多点比較により、精度向上の為の課題を抽出した

Eーディフェンス実験の再現解析：積層ゴム免震

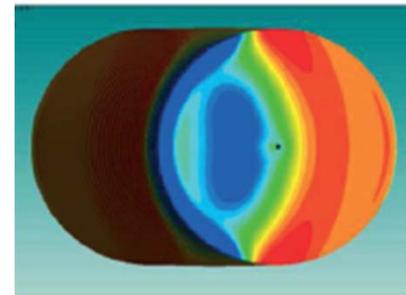
- 弾性部分をOgden体(超弾性体)としたSimoの粘弾性モデルを開発・実装
- 建築構造物の応答低減に広く用いられている積層ゴム免振装置の解析
 - 建物との連成解析：設計用地震波による加振
 - 熱連成解析：Eーディフェンス実験の再現



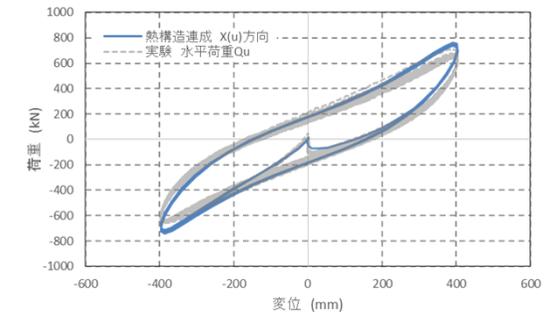
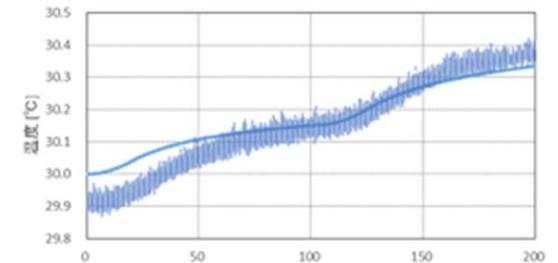
積層ゴム免振装置
(上：実験，下：解析)



建物との連成解析



支持面の応力分布
(赤：圧縮，青：引張)

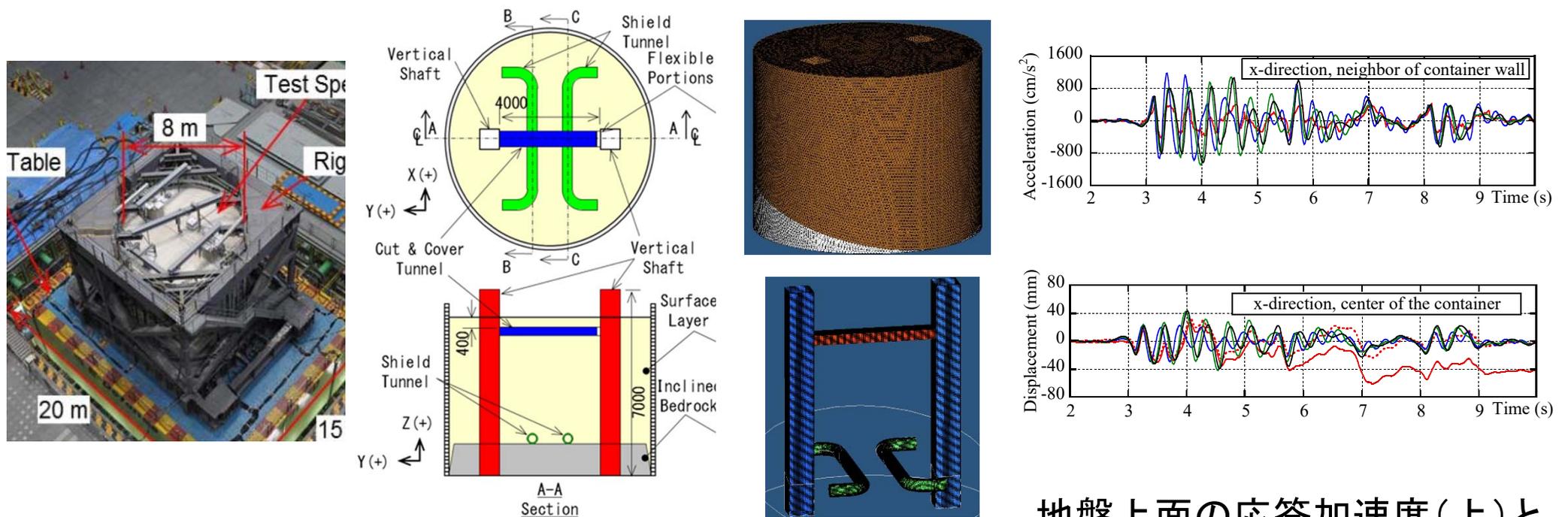


熱連成解析結果
(上：温度上昇，
下：荷重－変位関係)

- 積層ゴムと建物の連成解析
 - 免振装置の建物支持面の垂直応力の不均一性を確認
- 高減衰ゴムの温度依存性を考慮した熱連成解析(再現解析)
 - 高減衰ゴムの加振時の温度上昇と温度依存性を再現

E-ディフェンス実験の再現解析：地盤地中構造物

- 地盤の構成則(下荷荷面ECモデル)を開発・実装
- 適切な解析条件の検討：メッシュモデル，境界条件の設定
- JR鷹取波加振実験の再現解析



試験体概要(左:実験写真,
右上:平面図,右下:断面図)

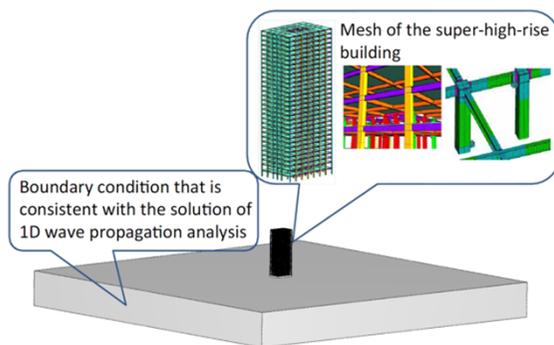
解析モデル

地盤上面の応答加速度(上)と
応答変位(下)

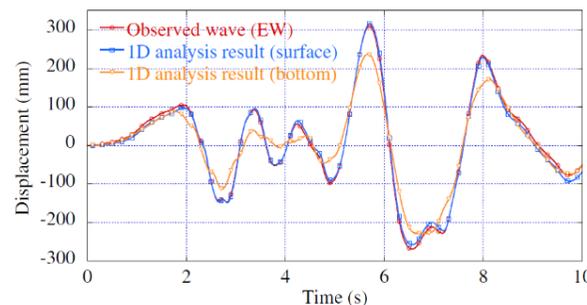
- 地盤上面の応答加速度と応答変位を良好に再現
- 残留変位の再現が今後の課題

HPCI 戦略分野3への成果展開

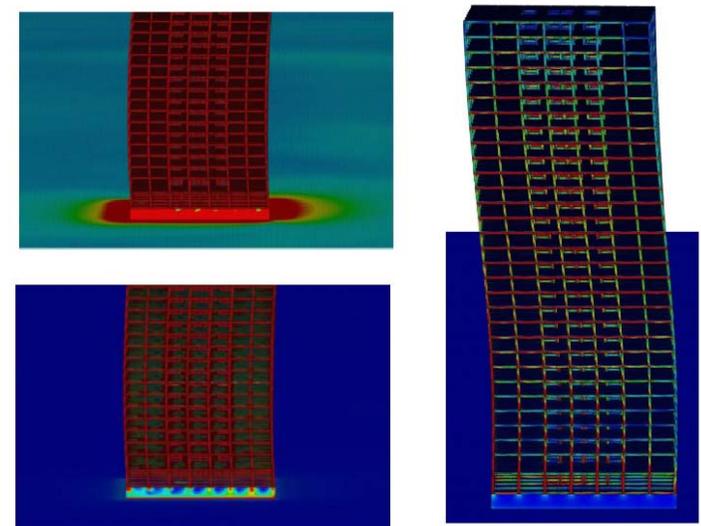
- 地盤建物一体大規模計算の実行可能性を検証
 - 地盤と建物の相互作用を一体モデルにより考慮
 - 要素数: 28,363,862, 節点数: 37,311,413
 - 京コンピュータを用いた解析



地盤建物一体モデル



1次元波動解析による
基盤面での地震波

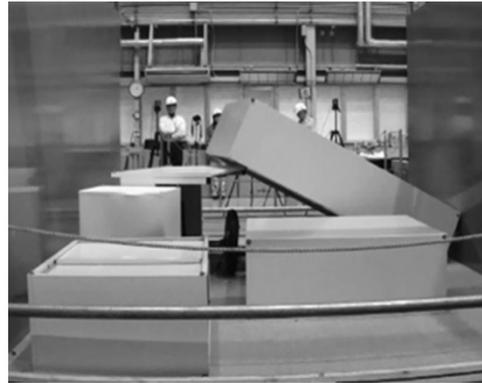


得られた相当応力分布
左上:地盤, 左下:基礎, 右:建物

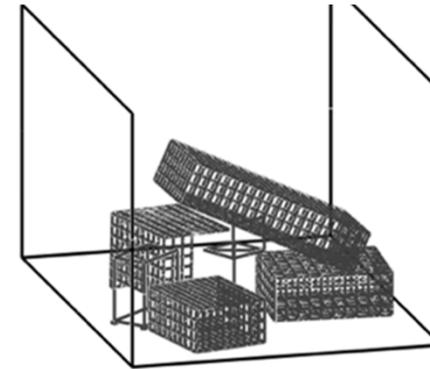
- 1億自由度規模の大規模計算の実行可能性を示した
- 地盤建物相互作用に関する知見を得た
 - 固い地盤では相互作用の影響は少ない

家具などの転倒・天井の崩壊解析

家具

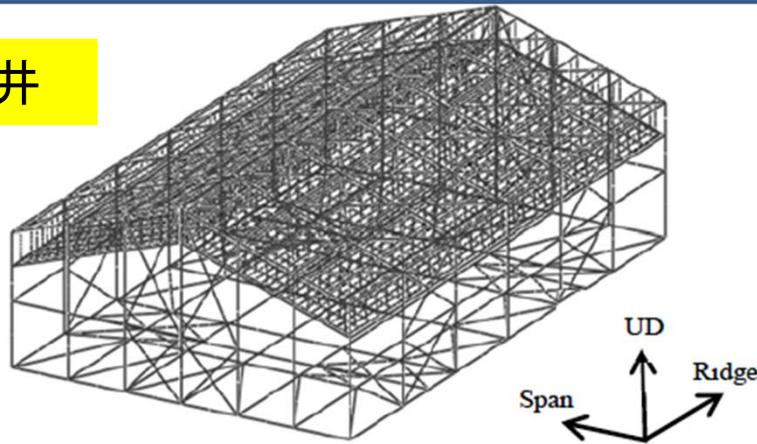


実験結果

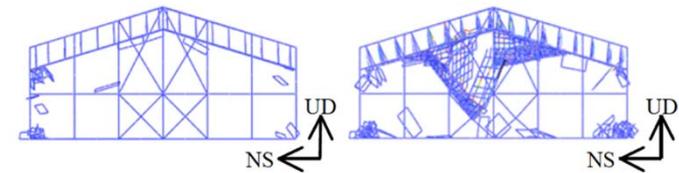


解析結果

天井



吊り天井付き体育館モデル



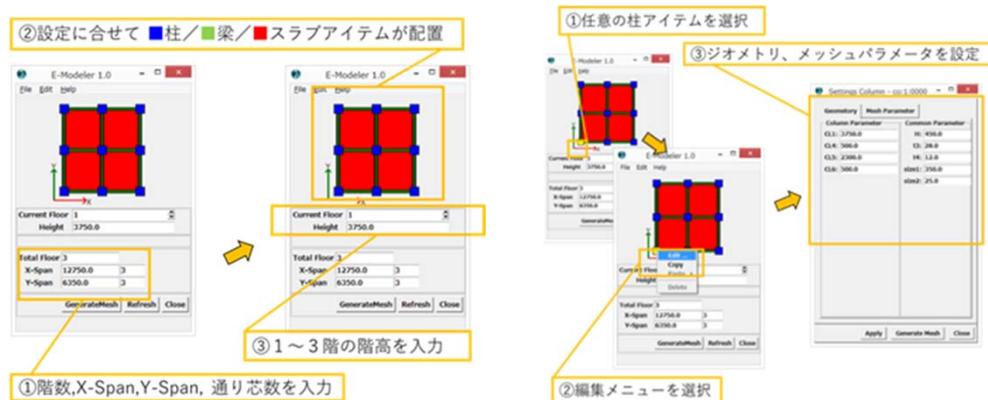
(a) 16.6 [s] (b) 72.9[s]
天井の崩壊挙動

利活用促進のためのプリポスト開発

- 詳細有限要素モデルの簡易構築機能
 - 詳細モデルを用いた解析の活用促進のための機能開発
- 大規模データのポスト処理機能
 - 多点計測されたEーディフェンス実験結果との比較によるVerification & Validation
 - 現象の分析や耐震性評価の効率的な活用のための、データの抽出、加工、表示機能開発
- 室内被害の可視化機能
 - 防災教育への活用に向けたリアリティの高い可視化機能開発

詳細モデルの簡易構築

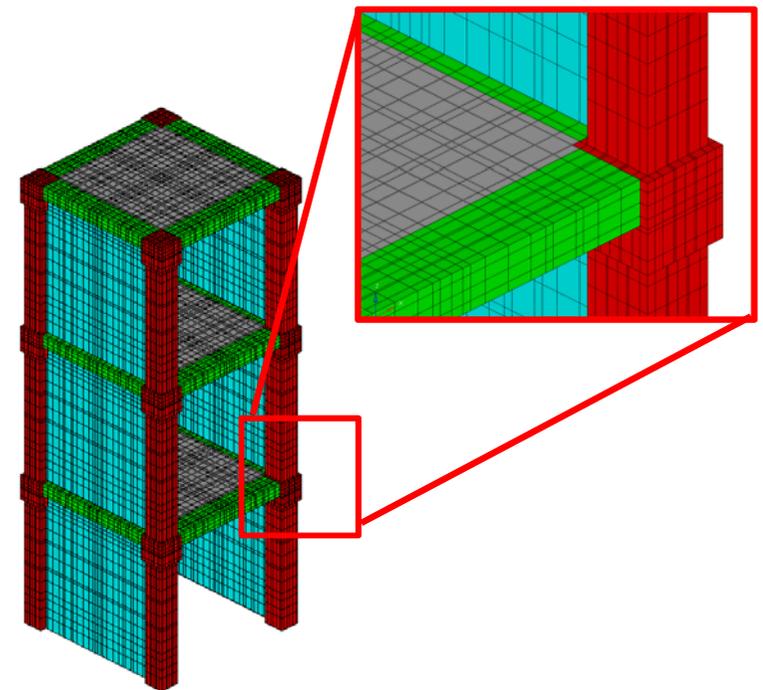
- 3次元ソリッド用の建築骨組み構造向けのモデリングツールとしてE-Modelerを開発



(a) 建物の設定

(b) 各階ごとの設定

建物と各階のパラメータの設定のみでモデル作成可能

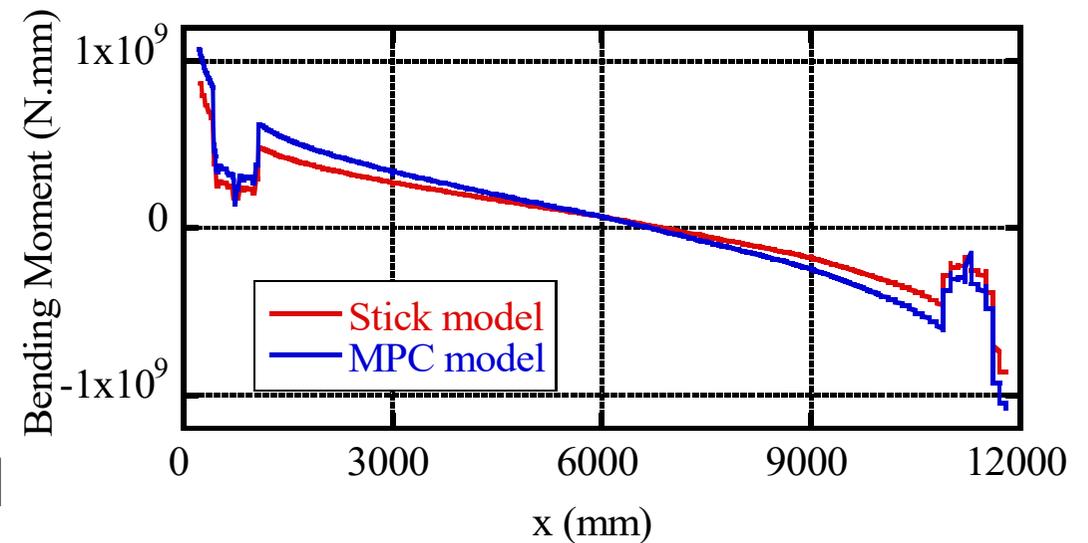
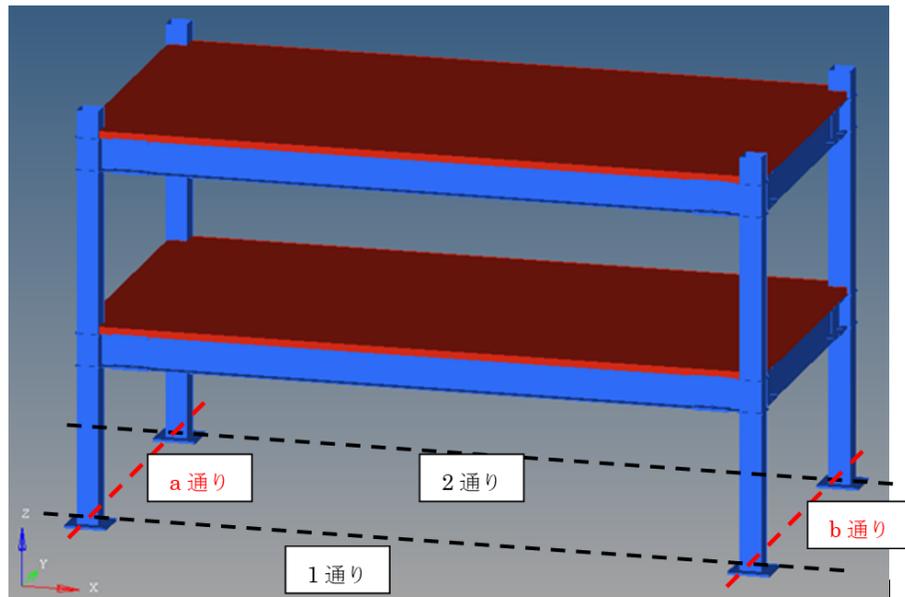


E-Modelerによって作成されたモデル

- 簡便な操作により、鉄骨、RC建物の詳細有限要素モデルの作成が可能となった

大規模データのポスト処理機能

- 3次元ソリッド要素による精密メッシュを用いたFEM解析結果として得られた応力のデータを用いて、骨組みの断面力を求めるポスト処理を開発



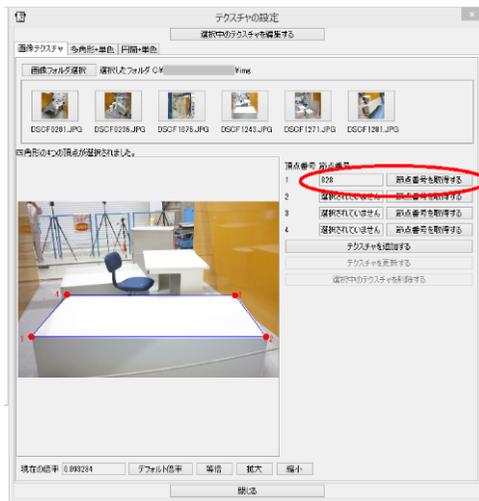
1通りの梁の曲げモーメント分布

計算例モデル

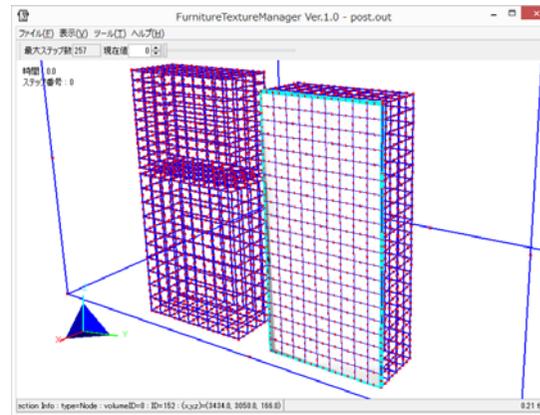
- 鉄骨骨組みの詳細有限要素解析結果から、断面力分布を算出し、可視化することができた

室内被害の可視化機能

- 家具のテクスチャ貼り付けプログラムを作成
- 3次元動画と解析結果の融合プログラムを開発



テクスチャの選択



画像テクスチャの貼付け



3次元動画との融合

- E-ディフェンス実験の再現解析結果と3次元動画との融合機能を開発し、拡張現実(AR)動画を作成

今後の構想

構造物の損傷・破壊過程を再現するシミュレーション技術を基にした研究課題

- 繰返し外力に対する累積損傷を高精度に表現できる材料構成則の開発



- 数回地震に対する残余耐震性評価

- 高精度・高解像度の損傷解析による学習データの生成



- 構造ヘルスマモニタリングとAIによる損傷箇所の即時被害

- 詳細シミュレーション結果を基にした街区レベルの被害推定手法の開発



- 物理シミュレーションベースの街区の高精度被害推定

- 家具・非構造材の詳細シミュレーションモデル



- 重要施設のリスク分析, 長周期地震に対する被害予測

利活用促進のためのプリポスト技術を基にした研究課題

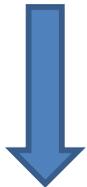
- 詳細モデルでは、設計変更によるモデルの改良は多大な労力を要し、活用へのハードルとなる。
- 高精度な構成則においては、パラメータ数が多くなり、その設定は数値解析が専門でないユーザーにとってハードルとなる。



部材追加, 断面変更を容易に反映できるメッシュ生成手法
材料パラメータ同定手法

- 設計支援のためのプリポスト処理システム

- Eーディフェンス実験で取得された映像は高い臨場感と迫力を持って体験可能であるが、その数は限られる。
- VRを活用した防災教育のためには充実したコンテンツの生成が重要。
- 様々な状況での室内被害の仮想被害映像を生成することにより、体験者それぞれの状況に合わせた被害経験の提供



構造室内連成解析モジュール
リアリティのある三次元可視化技術
空間センサーから家具モデルを自動構築する技術

- VR 映像の防災教育への活用

数値震動台プロジェクト体制

- 数値震動台研究開発分科会
 - 委員長:大崎 純 (京都大学)
 - 委員:6名
- 建築ワーキンググループ
 - 主査:宮村 倫司 (日本大学)
 - 委員:8名
- 設備ワーキンググループ
 - 主査:磯部 大吾郎(筑波大学)
 - 委員:6名
- 地盤ワーキンググループ
 - 主査:飯塚 敦(神戸大学)
 - 委員:7名
- 土木ワーキンググループ (H26年度活動終了)
 - 主査:小國 健二(慶應義塾大学)
 - 委員:6名
- 防災科学技術研究所担当研究員
 - 3名

数値震動台プロジェクトの外部評価

数値震動台研究開発評価委員会：

委員長：大阪大学大学院 工学研究科 地球総合工学専攻
多田 元英 教授

委員： 理化学研究所 計算科学研究機構
平尾 公彦 機構長

委員： 電力中央研究所 原子力リスク研究センター 自然外部事象研究チーム
豊田 幸宏 副チームリーダー

これまでの成果と今後の構想への評価(S, A, B, Cの4段階評価)：

- | | |
|---------------------|----|
| 1. 成果の広範さ | A+ |
| 2. 構造シミュレーションの完成度 | A |
| 3. 室内被害シミュレーションの完成度 | A |
| 4. 利便性向上に向けた開発の有用性 | B+ |
| 5. 成果の発表・公表 | A- |
| 6. 今後の構想への期待 | A |

数値震動台プロジェクトの外部評価

評価頂いた点(抜粋)

- 実大実験結果に基づく検証
「本プロジェクトは、E-defenceを用いた実大スケール加振試験と両輪で進められており、貴所の強みを最大限生かしたものである。」
- 組織体制
「WGのメンバーによる卓越した努力で、高度な成果を挙げられたと評価します。」
- 今後の構想
「本構想では、上流から下流に至るまでバランスよく開発項目がラインアップされている。」

指摘・課題(抜粋):

- データサイエンス、AI、機械学習との連携
- 広く開かれた活動への発展
- プロジェクトの全体像の見える化