

数値解析と実験の連携推進への成果と課題

数値震動台研究開発分科会 委員長 大崎 純 (京都大学)



■ 第4期(2016~2022年度)の成果

- 数値震動台設置の経緯と数値震動台の概要
- 材料構成則の高度化
 - 鋼材の延性破断
 - コンクリートの圧縮破壊と引張クラック
- 利便性の向上
 - 解析モデルのメッシュモデル作成ソフト(E-Modeler)
 - 実験結果との多点比較ソフトウェア(E-Validator)
- 実験と数値解析の連携推進への課題
 - E-ディフェンスを用いたV&V (VerificationとValidation)
 - 実験と数値解析の協調への課題
 - 振動実験によるパラメータ同定と妥当性確認の例



第4期(2016~2022年度)の成果



2023年3月27日 数值震動台成果発表会

数値震動台開発プロジェクト設置の経緯

<u>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)</u>
 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



• 防災科研に数値震動台研究開発プロジェクトを設置



数値震動台の概要

- 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 1
 - 局所的な損傷・破壊と全体挙動の同時シミュレーション手法の開発
- 2. 人的被害と経済損失の軽減のためのシミュレーション技術
 - 地震時室内被害の再現手法の開発
- 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
 - 入出力インターフェイス、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)

生きる、を支える科学技術







天井の脱落実験(左)と その再現解析(右)









生きる、を支える科学技術 **防災科研**

数値震動台の第3期までの開発

■ 第1フェーズ

- 建築構造の大規模有限要素解析の フィージビリティスタディ
 - 31階建て鉄骨造建物の弾塑性地震応答 解析(7400万自由度,1500万要素)

■ 第2フェーズ

- 局所挙動と全体挙動の同時解析の フィージビリティスタディ
 - 4層鉄骨造建物の崩壊挙動の再現
 - コンクリート橋脚の曲げ破壊の再現



31階建て鉄骨造建物のメッシュモデル(左:全体図,右:拡大図)





第4期(2016~2022年)の開発目標

シミュレーション技術を活用した耐震性評価に関する研究:

- ・E-ディフェンス実験を再現するシミュレーション技術(数値震動台)
- ⇒性能向上,利便性向上等に関する研究開発を行い,耐震性評価への活用を目指す (防災科学技術研究所中長期計画の要約)

■ 性能向上

- 鋼材の延性破断モデル、コンクリートの圧縮破壊と引張クラックモデル
- 長時間継続地震を受ける免震支承の挙動再現
- 地盤と地中構造物の相互作用解析
- 非構造部材の損傷,破断と全体崩壊の解析

■ 利便性向上

- 建築構造のメッシュモデルを作成するソフトウェアの開発(E-Modeler)
- 多数(数百CH)の実験結果と解析結果を比較・分析するソフトウェアの開発(E-Validator)
 耐震性評価への活用
 - 解析結果のデータを分析,活用するためのWG(データサイエンスWG)を発足



• 地震時の損傷推定への活用



- 数值震動台研究開発分科会
 委員長:大崎純教授(京都大学),委員:7名
- 建築ワーキンググループ
 主査: 宮村 倫司 准教授(日本大学),メンバー:7名
- ・設備ワーキンググループ
 主査:磯部 大吾郎 教授(筑波大学),メンバー:5名
- 地盤ワーキンググループ
 - 主査:飯塚 敦 教授(神戸大学),メンバー:7名
- データサイエンスワーキンググループ
 - 主査:小檜山 雅之 教授(慶應義塾大学),メンバー:4名

(R5年3月27日現在)



2023年3月27日 数值震動台成果発表会

鋼材の延性破断

■ 開発目標

 大規模骨組に利用できる延性破断モデ ルと開発と実験による破断の再現

■開発方針

- 内部損傷を代表する損傷変数を 構成則に導入
- 応力三軸度の考慮
- 準陰的解法⇒劣化挙動まで再現

■ 成果概要

• 部材実験での延性破断を再現



変形指標αの定義 (*ĉ^p*: 相当塑性ひずみ, *T*: 応力三軸度)



変形指標αと損傷変数Dの関係



柱梁接合部モデル(左)と スカラップまわりの損傷変数分布(右)



M. Ohsaki, J. Fujiwara, T. Miyamura and H. Namba, Implicit finite element analysis of ductile fracture of steel frame under cyclic deformation, Japan Architectural Review, Vol. 5(2), pp. 150-163, 2022.

コンクリートの圧縮破壊と引張クラック

■ 開発目標

- 圧縮破壊と引張クラックの再現
- ■開発方針

 - 引張クラック:

クラックひずみを内部変数とする ポアソン効果を考慮

- 準陰的解法
- 成果概要
 - 部材実験でのクラック進展を再現
 - 中規模入力に対する建物挙動を再現







RC梁の曲げ破壊実験の再現 (上:引張クラックひずみ分布, 下: 圧縮損傷変数分布)



RC造建物の震動実験の再現 (引張クラックひずみ分布)



長時間継続地震を受ける免震支承の挙動再現

■ 開発目標

- ゴムの大変形挙動の再現
- エネルギー吸収による発熱・温度変化と 材料特性の変化の反映

■開発方針

- 粘超弾性モデルと弾塑性モデルの重ね合わせ
- 熱伝導解析と構造解析の連成による、温度変化と材料の温度依存性の考慮

■ 成果概要

- ・1方向載荷時の挙動を再現
- 発熱による温度上昇を再現





ゴム材料モデル概要図 (青:弾塑性,赤:粘超弾性) 高減衰ゴム免震支承の 載荷実験の再現解析 (変形,相当塑性ひずみ分布)



(荷重変位関係)



高減衰ゴム免震支承の 載荷実験の再現解析 (温度変化の時刻歴)



地盤と地中構造物の相互作用の解析

■ 開発目標

- 地盤の非線形挙動の再現
- 地盤と地中構造物の相互作用の再現

■開発方針

- ・地盤構成則(下負荷面ECモデル)の開
 発
- メッシュモデル等の解析条件検討
- せん断土層のモデル化

■ 成果概要

- 地盤構成則の開発と実装
- 震動台実験の地盤の加速度応答を再現



下負荷面ECモデル概要図 (点線: 降伏曲面,赤実線: 下負荷面, 青実線: 上負荷面)



地盤・地中構造物実験 (E-ディフェンス, 2012年)



メッシュモデル (左: 地盤,右: 地中構造物)





非構造部材の損傷、破断と全体崩壊の解析

■ 開発目標

- 大空間施設の天井脱落被害の再現
- ■開発方針
 - 天井の部材構成を再現
 - 各構成部材の破断をモデル化
 - 大空間施設の構造骨組モデルと天井モ デルを統合して一体的に解析

■ 成果概要

- 構造骨組と天井の地震時挙動を再現
- 天井落下箇所の傾向を再現
- 天井脱落に至るメカニズムを再現





実大試験体(左)と解析モデル(右)







利便性の向上への目標

■ 開発の背景

- 建物の全体挙動と局所挙動の同時解析
 - → 数百万~数千万自由度
- 解析そのものの時間に加えて、メッシュモデルの作 成と、解析結果の処理にも膨大な時間が必要
- ■メッシュモデルの作成
 - 建築骨組の特徴
 - 柱,梁等の一定断面部材のアセンブル構造
 - 変形,損傷は接合部まわりに集中
 - 6面体ソリッド要素を用いて精度と計算効率を両立
- ■解析結果の処理(実験結果との比較)
 - メタデータ(センサ種別,位置等)を付与
 - 多数の応答量の同時比較を自動化

生きる、を支える科学技術







建物の3次元形状を再現する解析モデル



E-Modeler

■ 開発目標

建築構造骨組のメッシュモデル作成の効率
 化

■開発方針

- 対象: 鉄骨造, RC造の建築構造骨組
- 鉄骨造: 6面体ソリッド要素
- RC造: 6面体ソリッド要素(コンクリー ト), トラス要素(鉄筋)

■ 成果概要

- 通り芯が直交する建築構造骨組のメッシュ モデル作成を効率化
- 基本的な境界条件の設定





操作画面(左)と入力ダイアログボックス(右)



骨組全体モデル(左)と部分切り出しモデル(右)

^{生きる、を支える科学技術}

NIED

E-Validator

■ 開発目標

数百CHの実験データと解析データの比
 較の自動化

■開発方針

- センサの情報(種別,設置位置,方向
 等)のメタデータ化
- 対応する解析結果を自動抽出

■ 成果概要

 実験データと解析データを自動比較す るプログラムを開発

• 小規模実験での試用, 検証





試験体に設置された センサーの種別と位置

الالاستيتين

全変位データの

類似度の分析

0.2

0

 $Q^{\underline{S}}0.1$

E-Validatorのクラス図



類似度の高い変位波形(上)と 類似度の低い変位波形(下)



第4期の数値震動台開発のまとめ(1)

■ 性能向上

- 鋼構造建物の解析
 - 延性破断モデルを開発
 - 部材の再現解析を実施
- コンクリート造建物の解析
 - 圧縮破壊,引張クラックモデルを開発
 - 中規模地震下のRC造建物の挙動を再現
- 免震構造物の解析
 - ゴムの粘超弾塑性と温度依存性を考慮する 解析手法を提案
 - 免震支承の1方向載荷挙動を再現
- 地盤と地中構造物の相互作用解析
 - 地盤の構成則を開発, 実装
 - 震動台実験の加速度応答を再現
- 非構造部材の損傷,破断と全体崩壊の解析
 - 大空間施設の天井脱落実験を再現

生きる、を支える科学技術







鋼材の延性破断再現

RC造建物のクラック分布





天井の脱落解析

第4期の数値震動台開発のまとめ(2)

■利便性向上

生きる、を支える科学技術

紛私研

- 建築構造のメッシュモデルを効率よく作成する ソフトウェアを開発(E-Modeler)
 - グリッドが直交する建築骨組を対象
 - 基本的な境界条件の設定
- 多数(数百CH)の実験結果と解析結果を比較・
 分析するソフトウェアを開発(E-Validator)
 - 実験データと解析データを自動比較
 - 小規模実験での試用,検証
- 耐震性評価への活用
 - 解析結果のデータを分析,活用するためのWG (データサイエンスWG)を発足
 - 地震損傷推定,実損傷との対応等について議論





E-Modelerによる建物モデル作成



E-Modelerによる建物モデル作成



実験との連携推進への課題



2023年3月27日 数值震動台成果発表会

数値震動台と実大実験との関係

- 数値震動台の位置付け:
 建築および土木構造物の地震時の崩壊過程をシミュレートするための仮想震動台
 - •利用目的:

E-ディフェンスの大規模実大実験を用いた高精度有限要素解 析の精度検証とモデルの妥当性確認 (Verification and Validation, V&V)

• V&Vのための課題:

大規模有限要素解析のV&Vのために必要な大量の 計測データの利用法と計測手法物理実験と数値シミュレーションのコラボレーション



E-ディフェンスを用いたV&V

- 構造物の地震時応答と崩壊挙動を解明するための 大型実大実験と数値シミュレーション スケール効果?
- 大型実大実験によるV&Vの必要性の理論的明確化
- ブラインド解析(シミュレーション)コンテスト
- ASEBIによる実験データの提供

• 詳細有限要素解析によるベンチマークデータの提供

V&Vの階層
材料 (弾性,弾塑性,粘性) ↓
部材 (梁,柱,接合部,柱脚, ダンパー,免震支承)
 ↓ 構造要素 (部分骨組) ↓
* 小規模骨組 (平面骨組,層モデル)
↓ 大規模実大骨組?



Eーディフェンス実験を用いたV&Vの困難点

- <u>数値解析結果における誤差(不確定性)の蓄積</u>
 - 物理モデルを数学モデルに近似することによる誤差
 - 入力データの誤差(材料構成則,減衰など)
 - 形状を近似することによる誤差
 - 境界条件を理想化することによる誤差
- Epistemic uncertainty (lack of knowledge)の低減
 - 弾性材料特性, 試験体形状, 質量, 載荷重量など
 - 詳細な材料試験(多軸,繰返し,破壊),減衰特性 (摩擦,接触),振動特性
 - 詳細な入力加速度(ロッキングを含む)
- <u>変位や加速度などの大域的応答量だけでなく、ひずみなどの局</u> <u>所応答量を比較する</u>
 - ⇒ 詳細な有限要素解析の精度検証



Eーディフェンス実験を用いたV&Vの困難点

- 多くの不確実なパラメータが存在する
- 複数の不確実なパラメータが存在し、それらが関連するときの妥当性確認は困難(Uncertainty Propagation, Uncertainty Quantification (UQ))
- 応答量の詳細な計測は困難
 - -多点計測,画像計測,3Dスキャン
- 実験は1回あるいは数回しか実行できない
 - 確率的な評価は困難
- <u>数値解析を多数回行い,実験結果が許容範囲にあり,高い確</u> <u>信度あるいは尤度を持つことを確認する</u>
 - -ベイズ推定,機械学習



実験と数値解析の協調

- 数値解析のV&Vを目的とした震動台実験のための詳細な計画
 ⇒<u>系統的かつ論理的な枠組みが必要</u>
- 少数の実験での大量の計測データの利用(処理)方法の提案
- 数値解析のV&Vのために有効な計測方法の提案
- 実験前の詳細有限要素解析の実行
- 部材モデルやコンポーネントモデルでV&Vしたプログラムと モデルを用いて、大規模実験結果をシミュレートできること を示す。
- 数値解析で予測した通りの実験結果が得られる。



振動実験によるパラメータ同定と妥当性確認

- 振動台実験により多軸繰返し載荷を実現
- ・塑性化箇所を取り換えて複数回実験(骨組は弾性)
- 複合硬化(等方・移動)弾塑性繰返し構成則のパラメータ同定



M. Ohsaki, B. Do, J. Fujiwara, T. Kimura and T. Yamashita, Two-step parameter identification of multi-axial cyclic constitutive law of structural steels from cyclic structural responses, Structures, Vol. 46. pp. 2014-2030, 2022.



振動実験によるパラメータ同定と妥当性確認

- 計測ノイズを考慮した応答量のガウス過程による近似
- ベイズ最適化によるパラメータ同定,多点計測による精度向上
- 大規模実験 ⇒ 多数のコンポーネント実験の同時実行も可能



M. Ohsaki, B. Do, J. Fujiwara, T. Kimura and T. Yamashita, Two-step parameter identification of multi-axial cyclic constitutive law of structural steels from cyclic structural responses, Structures, Vol. 46. pp. 2014-2030, 2022.





数値震動台による建築・土木構造の解析に適したモデルの開発

- E-ディフェンス実験による妥当性確認
- 実験では再現できない現象、詳細な応答評価、多数
 回のシミュレーション

•都市レベルの解析のためのモデル

