

数値解析における不確実さと原子力施設の安全性評価における課題
—話題提供—

原子力施設の3次元詳細解析技術と 地震フラジリティ評価

2025年9月8日

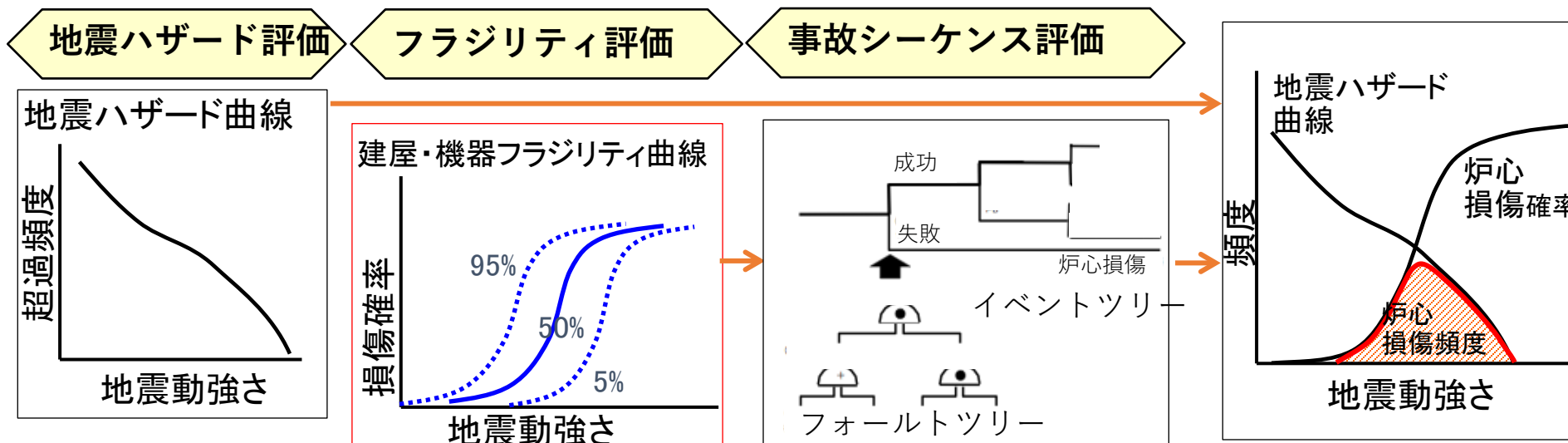
日本原子力研究開発機構

西田 明美

本資料は、原子力規制庁からの受託事業「原子力施設等防災対策等委託費（高経年化を考慮した建屋・機器・構造物の耐震安全評価手法の高度化）」の成果（[3][4]）及び原子力規制庁と日本原子力研究開発機構との共同研究「原子力施設耐震評価用モデルの妥当性確認に関する研究」「原子力施設の三次元耐震解析手法の高度化に関する研究」の成果（[5][7][8][9][10]）を含みます。

フラジリティ評価に関する取り組み

- 原子力規制委員会の実用発電用原子炉の安全性向上評価に関する運用ガイドでは、確率論的リスク評価(PRA)が明記
 - 地震PRA: 設計想定を超える地震動の発生可能性を考慮して、安全を一層確実にするアクシデントマネジメント強化策の検討に有力な手段
 - 近年大きな地震記録
- フラジリティ評価の信頼度、不確かさの定量化が課題
 - 構造健全性評価の観点から損傷(フラジリティ)評価に着目



地震PRAの枠組み

本日の話題

1. 建築分野における設計とPRAの不確かさの取扱い
 2. 原子炉建屋の3次元地震応答解析手法の標準的解析要領
 - 1) 現実的応答: より現実に近い地震時挙動の把握
 - 2) 現実的耐力: より現実に近い損傷モードの同定
 - 3) 現実的応答・耐力に基づくフラジリティ評価
 3. まとめ
- 参考(最近の観測事例)

1. 建築分野における設計とPRAの不確実さの取扱い

1. 建築分野における設計とPRAの不確かさの取扱い

建築分野におけるVVUQ（Verification, Validation and Uncertainty Quantification）は、設計とPRAで異なる。

(1)設計（耐震設計）における数値解析の利用

地震力算定と断面算定など

（基礎の浮き上がりは地盤三次元の例有り[1]など）

ターゲット：保守的かつ合理的な応答

設計で用いている数値解析法では、質点系のSR（Sway-Rocking）モデルを用いている。

余裕を踏まえた設計法が構築されており、（日本建築学会（AIJ）の指針等（荷重指針、鉄筋コンクリート（RC）規準など）にまともっている。

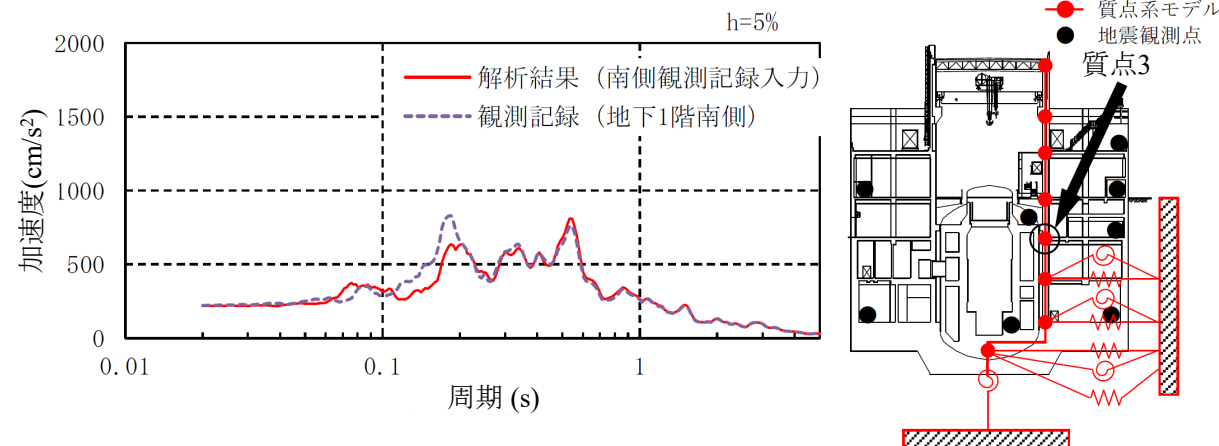
⇒ 安全性の担保

建設後、

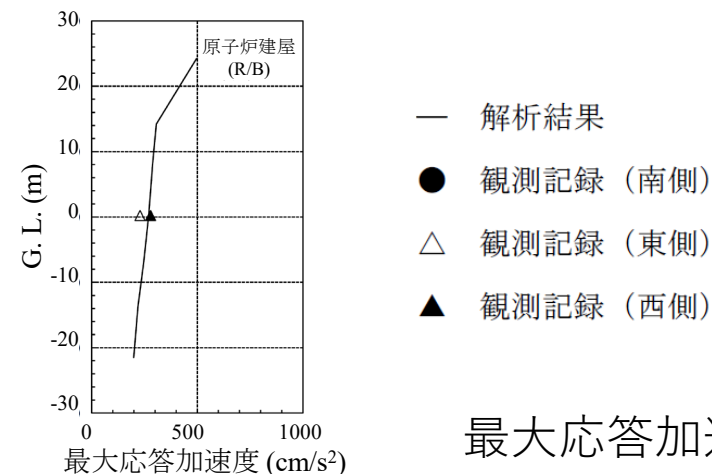
1) 観測地震の応答スペクトルの重ね書きによる比較

2) 最大応答加速度分布と観測加速度との比較

などで妥当性を確認。⇒ さらに精度の良い設計法の構築へ



SRモデル（右）と加速度応答スペクトル[2]



最大応答加速度分布[2]

[1] 塩見忠彦他、3次元FE解析による低接地率基礎浮上り挙動の検討,4; 低接地率の誘発上下動、2022年度日本建築学会大会学術講演梗概集、2022.9.

[2] HTTR原子炉施設の健全性確認に関する報告書、日本原子力研究開発機構、2012.9.

1. 建築分野における設計とPRAにおける不確実さの取扱い

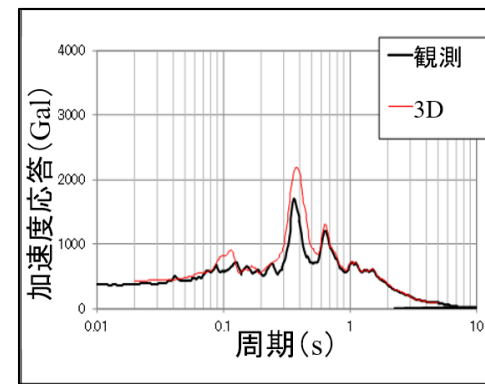
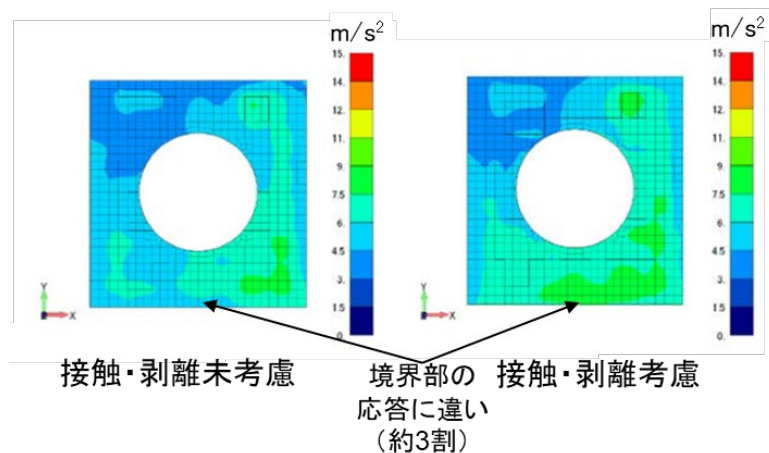
(2) PRA（地震PRA）における数値解析の利用

地震ハザード評価、地震フラジリティ評価、事故シーケンス評価

ターゲット：現実的応答

地震力が大きくなり、非線形範囲や空間分布も含めて、より詳細・複雑なモデル化による数値解析法へ

- 1) 建屋・地盤モデルの感度解析：認識論的不確実さの把握
- 2) 建屋・地盤モデルの妥当性確認：観測記録との比較（多点観測）、要素レベルでの実験結果との比較、複数コードでの比較



加速度応答スペクトル
(3F、南北方向)

感度解析の例（地盤-建屋間の接触・剥離及び基礎浮上りによる影響）^[3]

妥当性確認の例（観測記録と解析結果の比較）^[3]

⇒ 建築における 数値解析の利用と数値解析の妥当性の向上 を目指して作成した 標準的解析要領^[3]

[3] 崔 炳賢他、原子炉建屋の3次元有限要素モデルを用いた地震応答解析手法に関わる標準的解析要領、JAEA-Research 2021-017, 174 Pages, 2022.3（和文）、JAEA-Research 2024-001, 206 Pages, 2024.3（英文）

2. 原子炉建屋の3次元地震応答解析手法の標準的解析要領

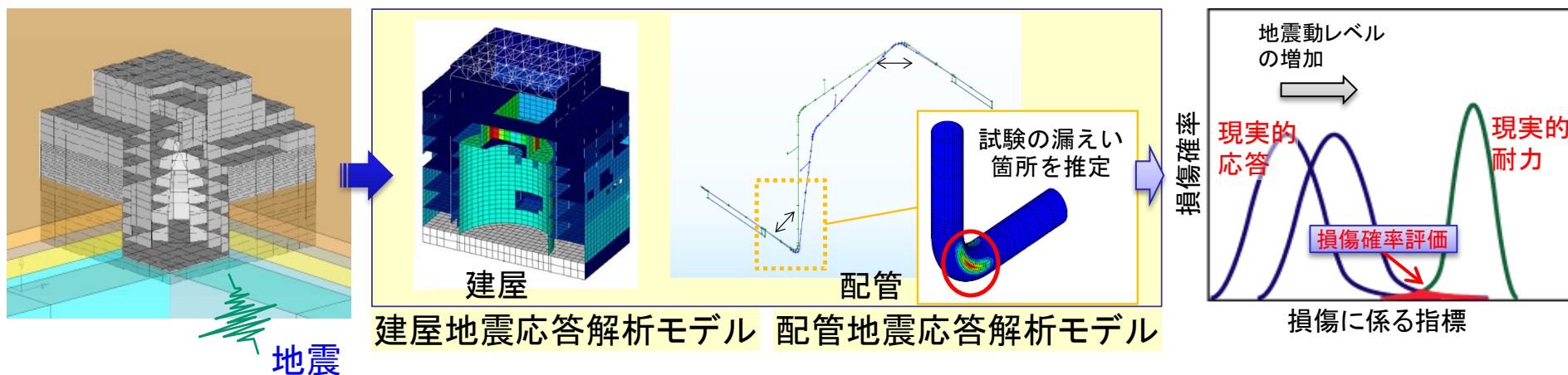
※2. のp7-25, 27の資料は、以下の公開資料を引用したものです。

[4] <https://www.jaea.go.jp/04/anzen/seika/houkoku/r02/pre3.pdf>

フラジリティ評価に関する取り組み

地震時の建屋及び機器・配管のフラジリティ評価に関する研究

- 現実的応答に係る3次元詳細モデルを用いた地震応答解析手法の整備、標準化
- 現実的応答・耐力の評価に基づくフラジリティ評価手法の整備
 - ✓ 安全上重要な建屋・機器・配管の損傷に係る詳細挙動の把握
 - ✓ 経年事象を考慮した配管フラジリティ評価手法の整備
- 現実的応答に係る機構施設を活用した地震観測等のデータ取得（原子力規制庁との共同研究等）



建屋・機器・配管の
解析モデルの詳細化

建屋・機器・配管の地震応答評価や耐力評価

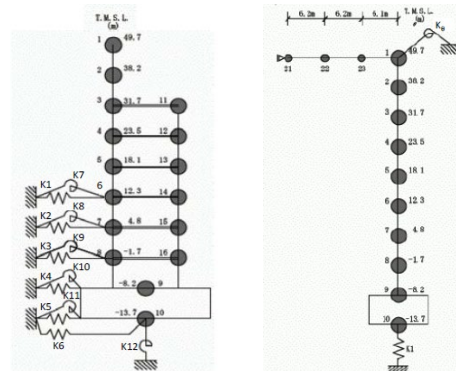
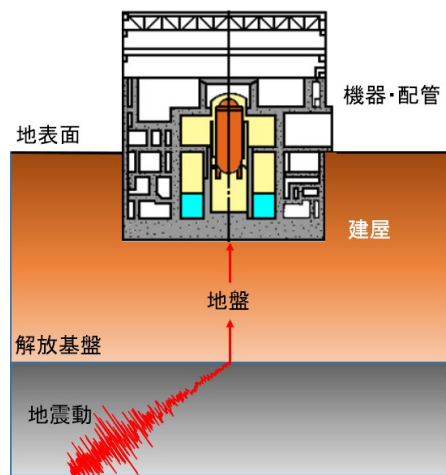
フラジリティ評価

建屋3次元詳細モデルを活用した fragility 評価

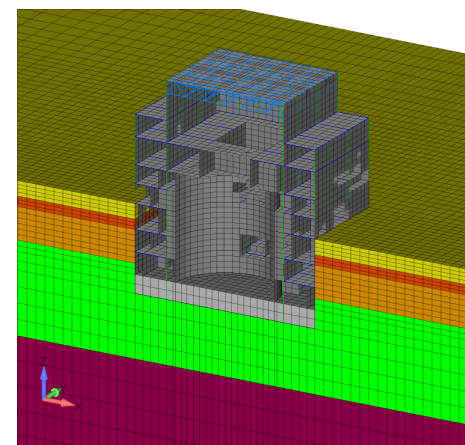
- ・ fragility 評価では局部応答・局部損傷を含む現実的応答・現実的耐力評価が重要
 - 新潟県中越沖地震において従来法の課題が認識
 - ・ 床柔性、地盤-建屋相互作用、3次元入力等
 - 3次元詳細モデルの有効性
- ・ 局部応答・局部損傷を表現できる建屋3次元詳細モデルを活用することで、機器への入力に係るより現実的な応答・耐力評価が期待

本研究の目的

- 1) 現実的応答: より現実に近い地震時挙動の把握
- 2) 現実的耐力: より現実に近い損傷モードの同定
- 3) 現実的応答・耐力に基づく fragility 評価



水平方向 上下方向
従来法(質点系モデル)

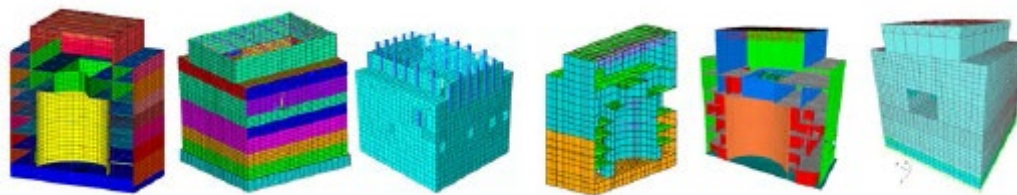


3次元詳細モデル

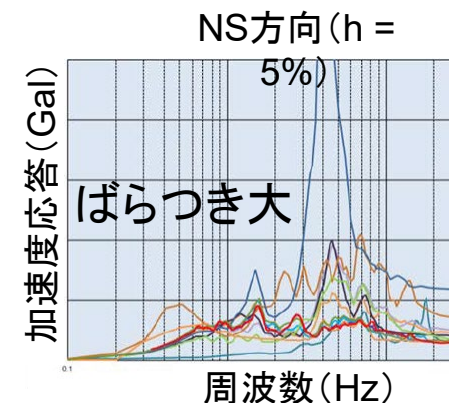
-
- 1) 現実的応答：より現実に近い地震時挙動の把握
 - 2) 現実的耐力：より現実に近い損傷モードの同定
 - 3) 現実的応答・耐力に基づくフラジリティ評価

1) 現実的応答: より現実に近い地震時挙動の把握 建屋3次元詳細モデルに係る課題

建屋3次元詳細モデルのモデル化は解析者に依存 (IAEA (International Atomic Energy Agency), 2013)

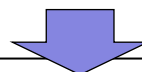


IAEAの国際ベンチマークプロジェクトにおける
建屋3次元詳細解析モデル例



床の加速度応答スペクトルの比較 (3F)

IAEAより提供された実プラント情報をもとに建屋3次元詳細モデル
を作成し、地震応答解析を実施⇒建屋応答のばらつき大



解析者に依存せず一定の品質を確保できる
標準的なモデル化や解析手法の指針となるものが必要

解析者が建屋3次元詳細モデルを用いた地震応答解析を
実施する際の手順、方法、留意すべき事項、技術的根拠等
を標準的解析要領として整備

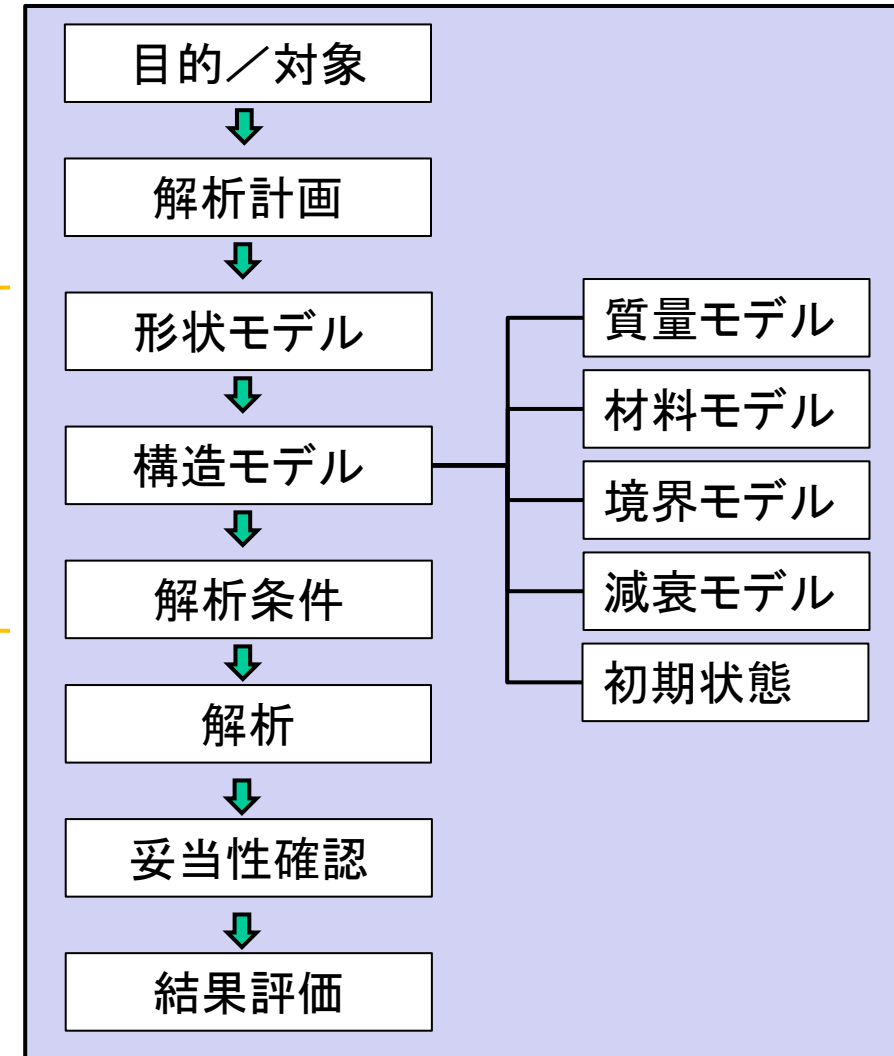
1) 現実的応答: より現実に近い地震時挙動の把握 建屋3次元詳細モデルのモデル化因子

解析結果に影響を及ぼす因子 (モデル化因子)

モデル化因子の感度解析により
建屋応答への影響を評価

＜代表的なモデル化因子＞

- ①モデル化範囲（非構造壁）
- ②水平2方向及び鉛直方向の地震動入力
- ③有限要素タイプ
- ④メッシュサイズ
- ⑤大型機器のモデル化
- ⑥非線形材料物性のモデル化
- ⑦地盤-建屋間の接触・剥離及び基礎浮上のモデル化
- ⑧初期応力のモデル化
- ⑨減衰のモデル化



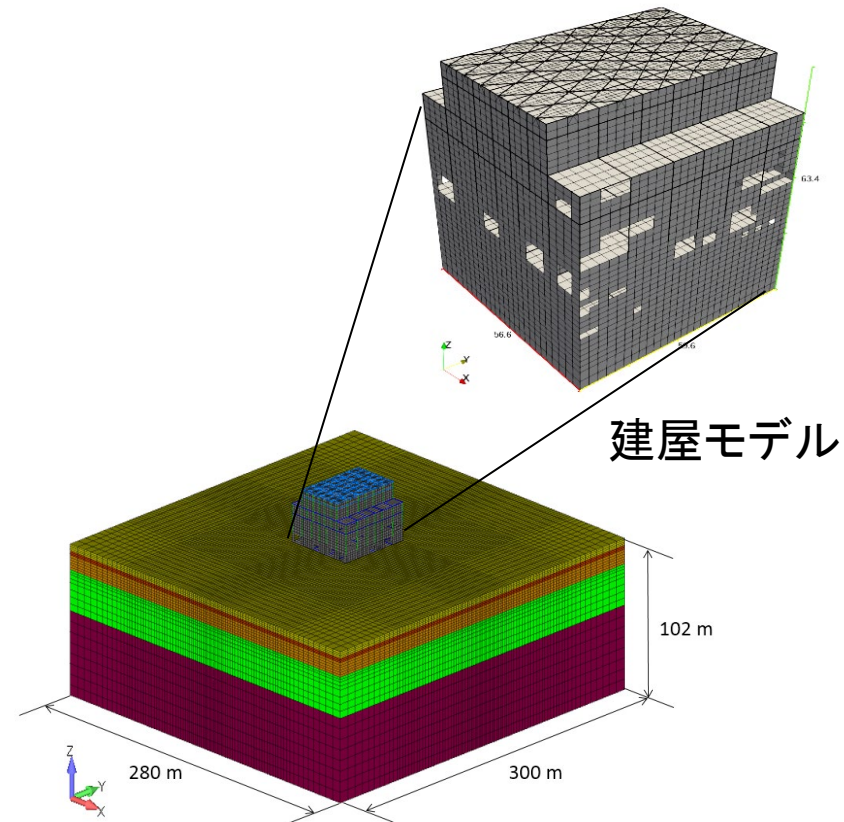
建屋3次元詳細モデルを用いた
地震応答解析のフロー

1) 現実的応答: より現実に近い地震時挙動の把握 建屋3次元詳細モデルの概要

3次元詳細モデル構築のためのモデルプラント(BWR)建屋



モデルプラントの例



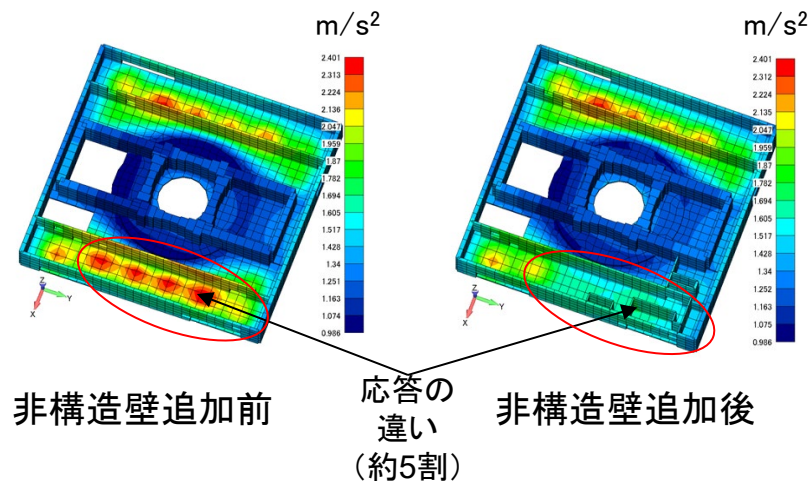
3次元詳細モデル

1) 現実的応答: より現実に近い地震時挙動の把握 感度解析によるモデル化因子の影響評価例

代表的なモデル化因子による建屋応答への影響を評価し、留意すべき事項を検討

① モデル化範囲による影響

耐震壁に加えて非構造壁の追加による影響を評価

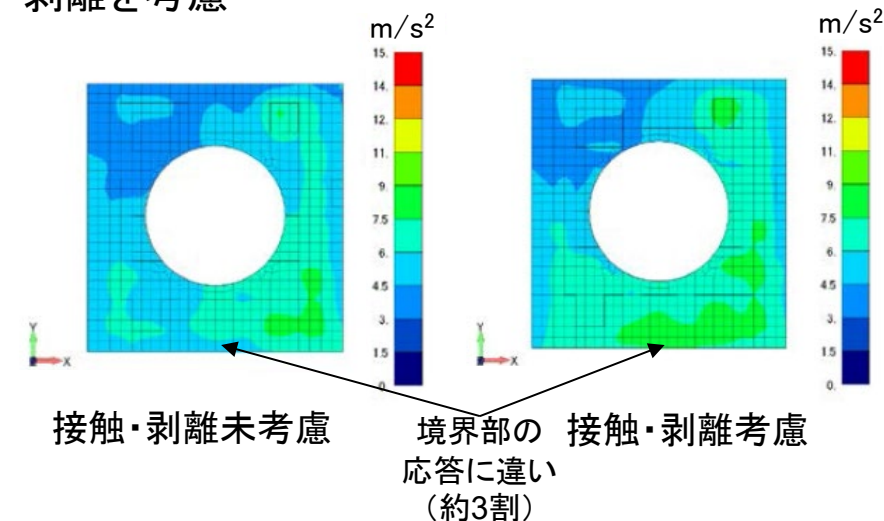


最大応答加速度(3F, 上下方向)

より現実に忠実な壁のモデル化範囲の考慮

⑦ 地盤-建屋間の接触・剥離及び基礎浮上りによる影響

地盤-建屋間に非線形ジョイントを導入し、接触・剥離を考慮



最大応答加速度(B1F, 上下方向)

地盤-建屋間の接触・剥離考慮のためには非線形相互作用のモデル化が重要

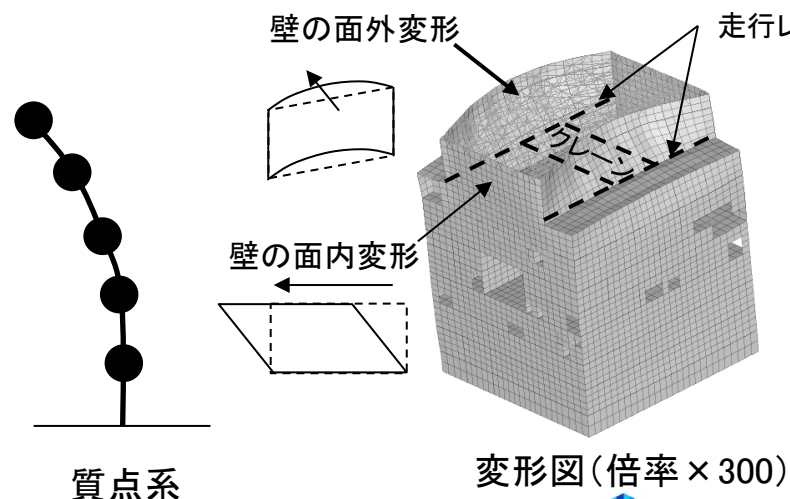
代表的なモデル化因子の建屋応答への影響に関する知見をとりまとめ、3次元詳細モデルを用いた地震応答解析を実施する際の留意事項として整理

1) 現実的応答: より現実に近い地震時挙動の把握

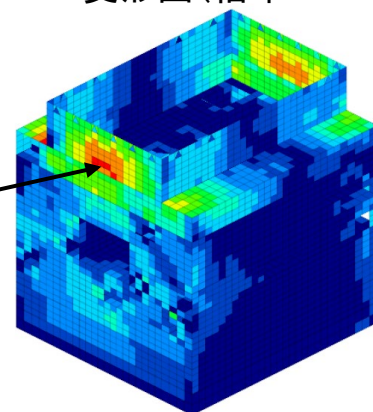
事例1: 壁の面外変形の影響

新潟県中越沖地震において建屋の天井クレーンに損傷発生

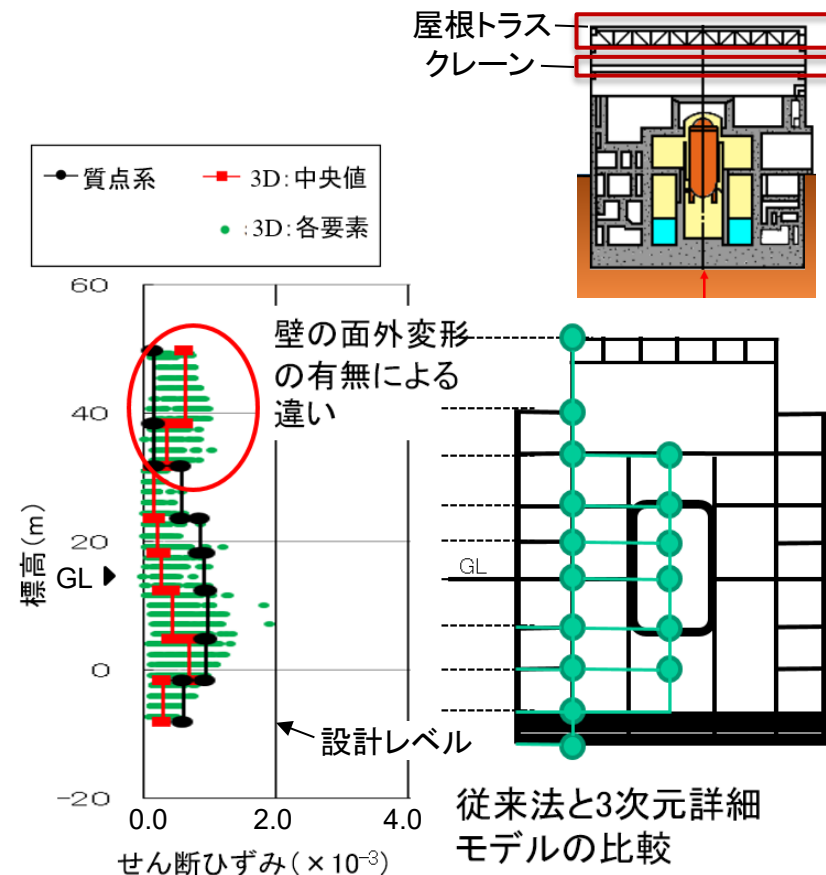
➤ 3次元詳細モデルにより質点系モデルでは表現困難な壁の面外変形の影響を確認



壁の面外変形に
起因するせん断
ひずみの発生



せん断ひずみ分布

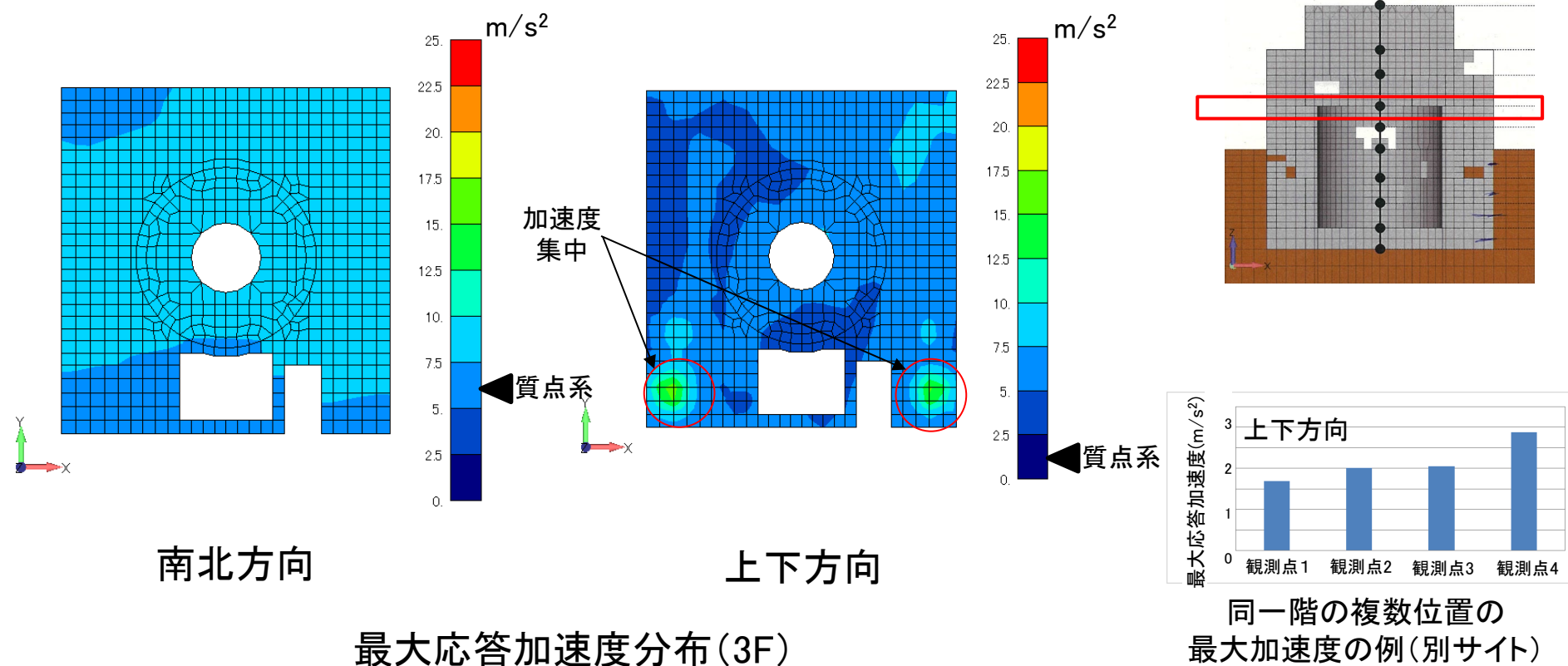


クレーン階や屋根トラス等の現実的かつ合理的な耐震評価のためには、壁の面外変形等のより現実的な局部応答の考慮が重要

1) 現実的応答: より現実に近い地震時挙動の把握

事例2: 床柔性の影響

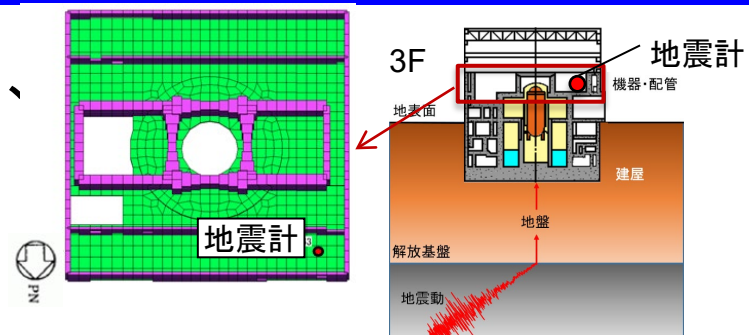
3次元詳細モデルにより質点系モデル(剛床)では表現困難な床柔性の影響を評価



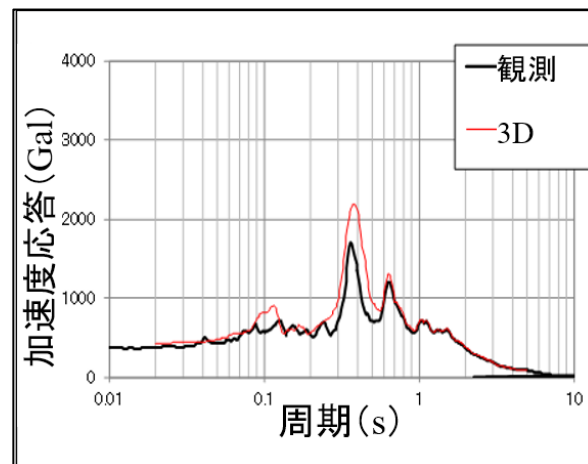
重要機器や配管等の設置床位置における現実的応答評価が可能
→ 機器や配管等への入力 of 精緻化が期待

1) 現実的応答: より現実に近い地震時挙動の把握 モデルの妥当性確認

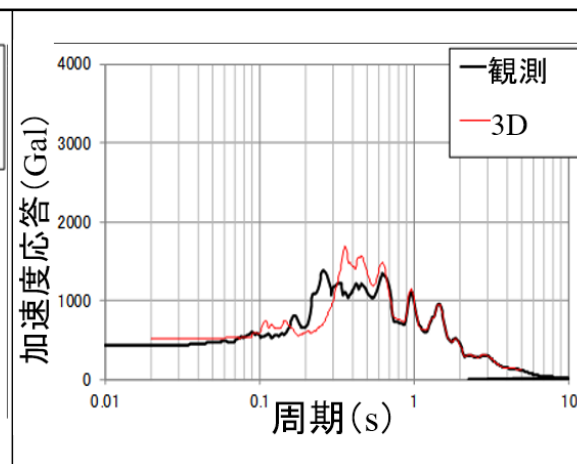
建屋3次元詳細モデルの妥当性を確認するため、
観測記録と解析結果の比較を実施



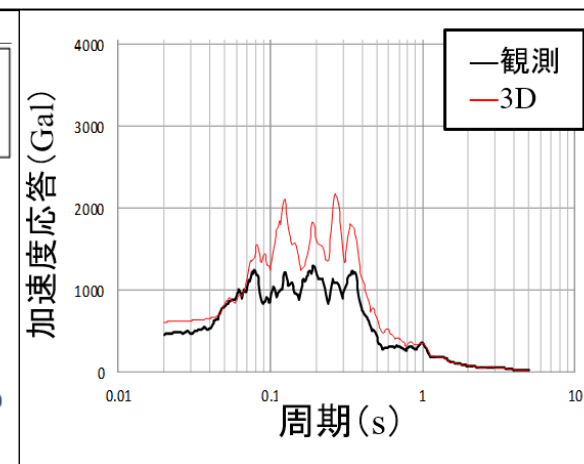
南北方向



東西方向



上下方向



観測記録と解析結果の比較(3F)
(2007年新潟県中越沖地震の加速度応答スペクトル(h=5%))

建屋3次元詳細モデルによる解析結果は観測記録を概ね良好に再現。

1) 現実的応答: より現実に近い地震時挙動の把握

建屋3次元詳細モデルを用いた地震応答解析手法の標準的解析要領の整備

本文	解説
➤標準 - 一般事項 - 解析の目的及び対象 - 解析領域 - 形状モデルの作成 - 構造モデルの作成(附①,⑥,⑦) - 質量モデル - 材料モデル(附⑤) - 減衰の数値モデル(附②) - 周波数領域における数値モデル - 境界接合部モデル(附③) - 入力地震動(附④) - 初期状態モデル - 数値解析に関する条件設定 - 解析結果の妥当性確認(附⑧) - 解析結果利用の留意点	➤標準 - 一般事項 - 解析の目的及び対象 - 解析領域 - 形状モデルの作成 - 構造モデルの作成 - 質量モデル - 材料モデル - 減衰の数値モデル - 周波数領域における数値モデル - 境界接合部モデル - 入力地震動 - 初期状態モデル - 数値解析に関する条件設定 - 解析結果の妥当性確認 - 解析結果利用の留意点
➤参考文献	
➤附属書 ①有限要素タイプの違いによる影響 ②減衰のモデル化の違いによる影響 ③側面剥離・滑りの考慮の有無による影響 ④上下動の地盤連成による影響 ⑤鉄筋コンクリート非線形地盤応答への影響 ⑥有限要素の精度の違いによる影響 ⑦有限要素のメッシュサイズの違いによる影響 ⑧解析結果の妥当性確認	

3次元詳細モデルの代表的なモデル化因子の影響評価結果等を踏まえ、建屋3次元詳細モデルを用いた地震応答解析手法に係る国内初の標準的解析要領を整備(JAEAレポート)
⇒耐震安全性評価に係る技術的知見として規制庁のNRA技術報告書に反映

-
- 1) 現実的応答：より現実に近い地震時挙動の把握
 - 2) 現実的耐力：より現実に近い損傷モードの同定**
 - 3) 現実的応答・耐力に基づくフラジリティ評価

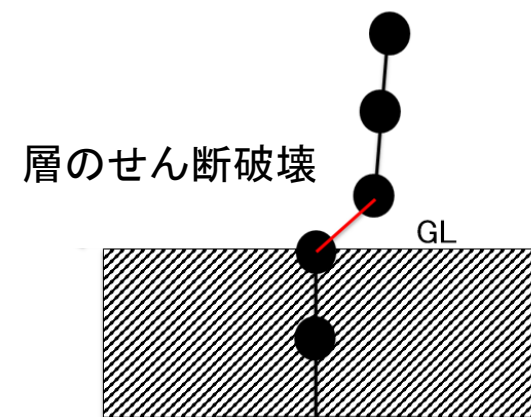
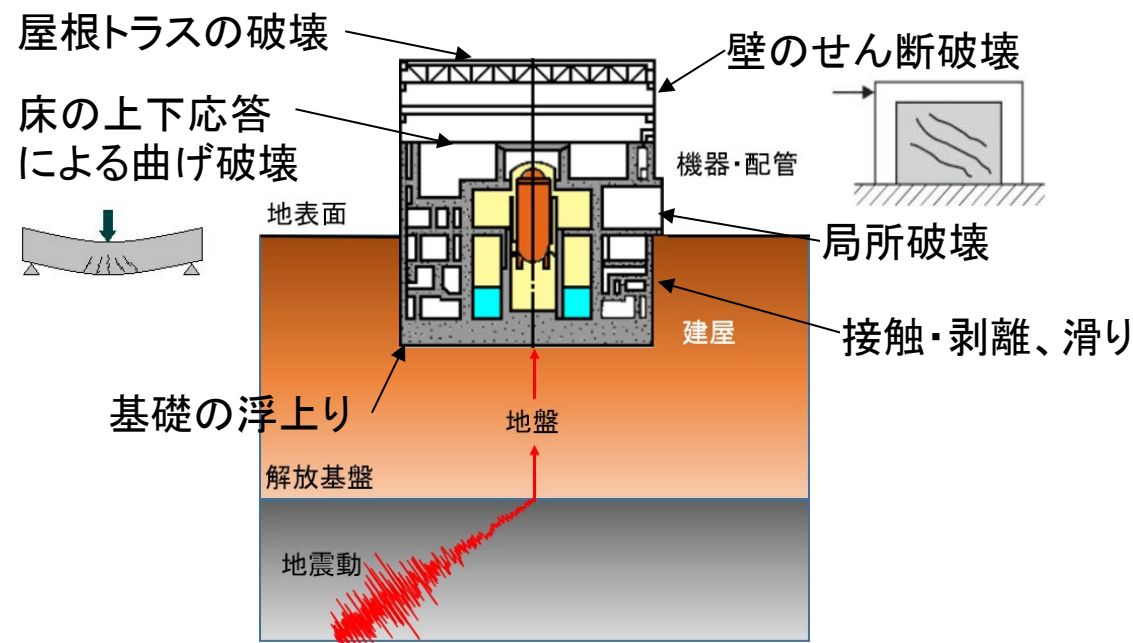
2) 現実的耐力: より現実に近い損傷モードの同定 地震時の建屋の損傷モード

フラジリティ評価では様々な建屋の損傷モードの考慮が必要

地震時に建屋及び周辺地盤において考えられる損傷モード

- 建屋: 壁のせん断破壊、曲げ破壊、局所破壊、鉄筋の降伏、屋根トラスの破壊、床の上下応答による曲げ破壊等
- 地盤と建屋の境界: 接触・剥離、滑り、基礎の浮上り等

質点系モデルでは上記のような詳細挙動が模擬できない

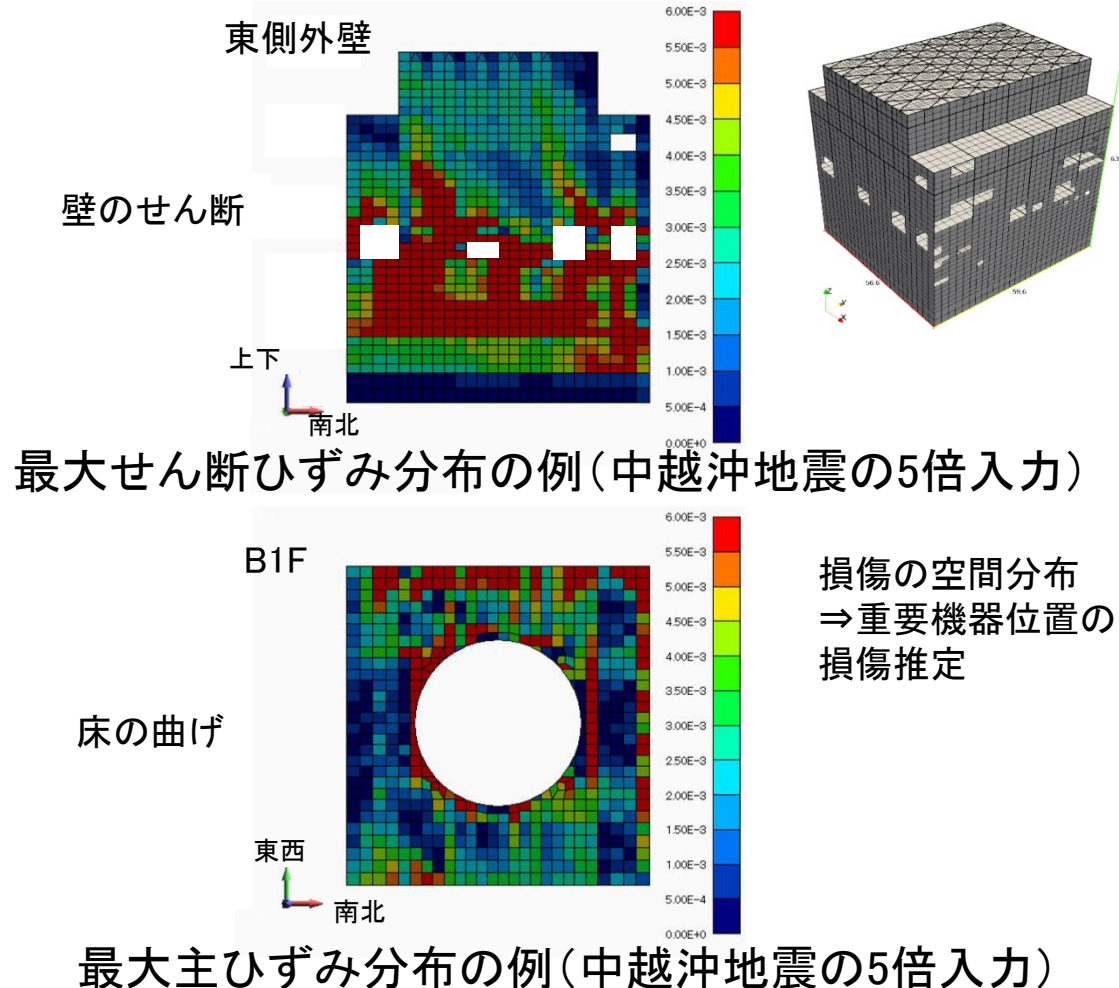
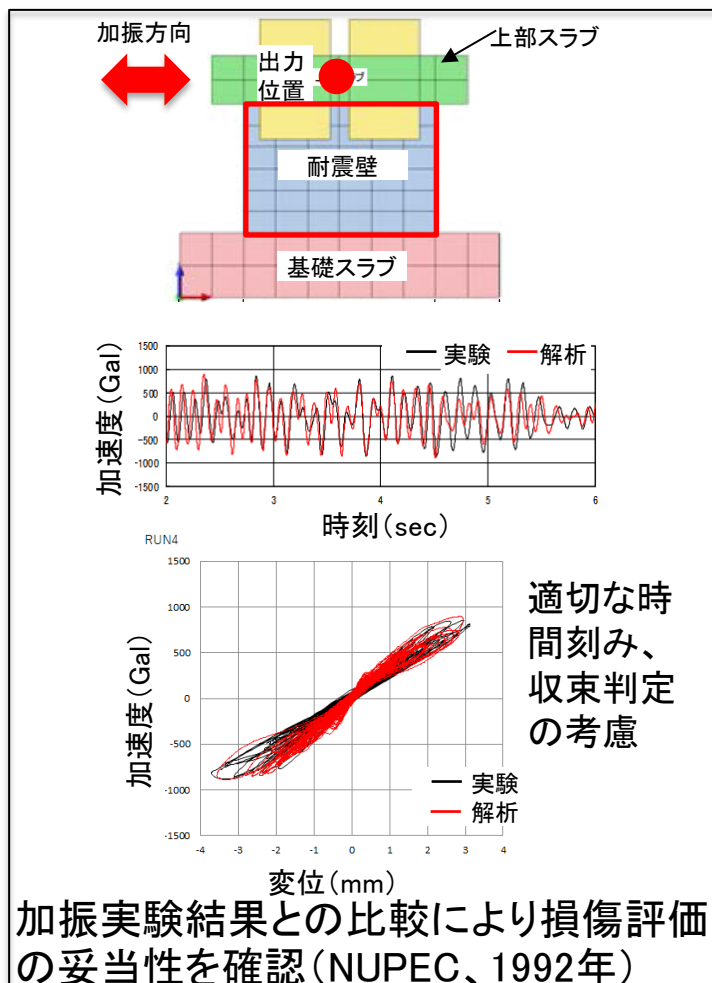


質点系モデルの
建屋損傷モード例

2) 現実的耐力: より現実に近い損傷モードの同定

事例1: 建屋の損傷推定(コンクリート非線形)

実験との比較により解析手法の妥当性を確認し、3次元詳細モデルにより建屋の壁や床等のせん断破壊、曲げ破壊等の損傷を評価



局部損傷の分析等により建屋の損傷モードを同定し、損傷過程や破損状態の推定に成功

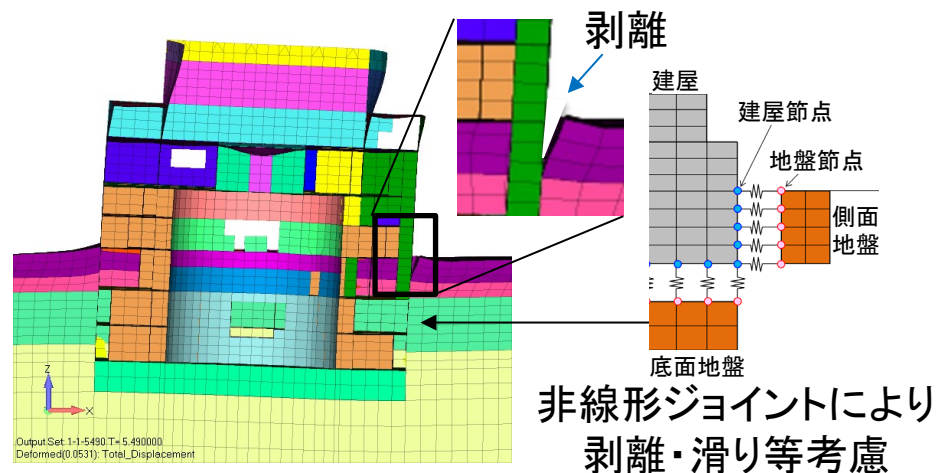
2) 現実的耐力: より現実に近い損傷モードの同定

事例2: 建屋の損傷推定(地盤-建屋の非線形相互作用)

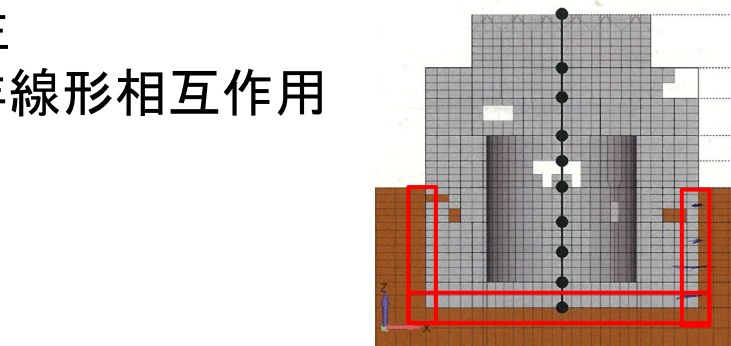
建屋周辺地盤が沈下する等の地震被害の発生

- 3次元詳細モデルを用いて、地盤-建屋の非線形相互作用を考慮した剥離や滑り等の詳細挙動を分析

建屋変形よりも表層の地盤変形が大きい
ため、建屋が傾いた側で剥離発生。



地盤と建屋の境界における剥離の例



中越沖地震における周辺地盤沈下被害例
(東京電力、2007年)

地盤-建屋の3次元的な非線形相互作用を考慮することで、地盤と建屋の境界の損傷モードを同定し、剥離や滑り等の局部損傷を再現

3次元挙動を考慮することで建屋損傷の空間分布や損傷過程の評価を実現。これらの成果は地震リスク評価に係る技術的知見として活用可能

-
- 1) 現実的応答：より現実に近い地震時挙動の把握
 - 2) 現実的耐力：より現実に近い損傷モードの同定
 - 3) 現実的応答・耐力に基づくフラジリティ評価

3) 現実的応答・耐力に基づくフラジリティ評価 フラジリティ評価手法の高度化に向けて

3次元挙動を考慮したフラジリティ評価手法の考え方

建屋の注目部位のフラジリティ評価

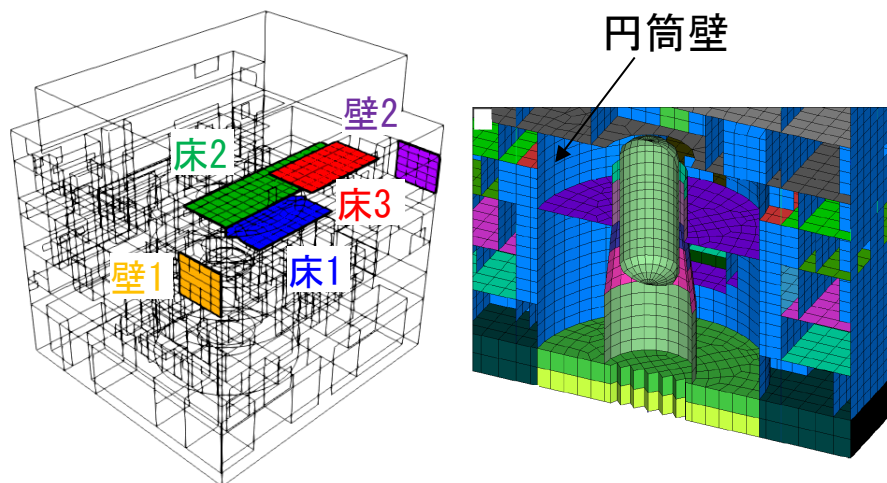
機器への影響度等により建屋の注目部位を選定

損傷モード

壁：せん断破壊、床：曲げ破壊

損傷指標

最大せん断ひずみ：5360 μ (AESJ, 2015)



注目部位の例

建屋各層のフラジリティ評価

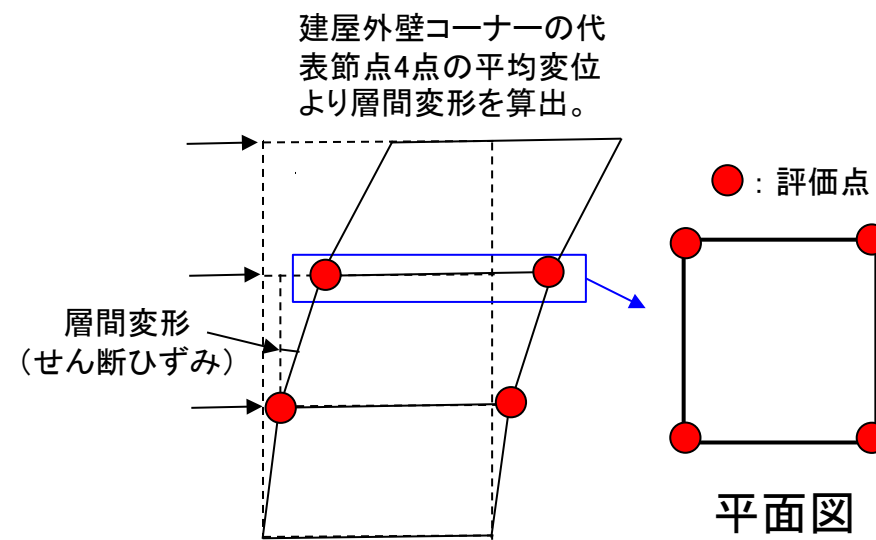
各層の層間変形による建屋のフラジリティを検討

損傷モード

層のせん断破壊

損傷指標

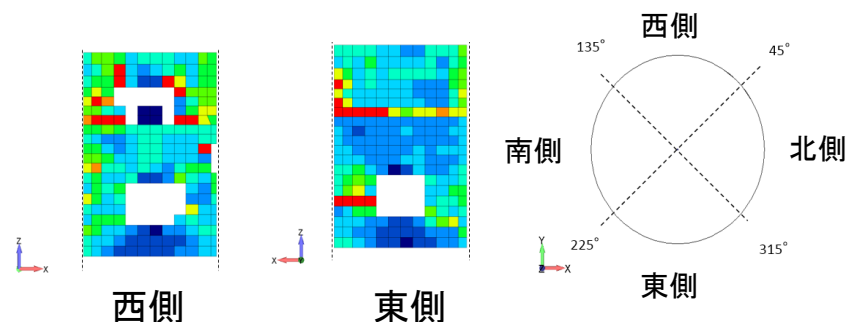
同左



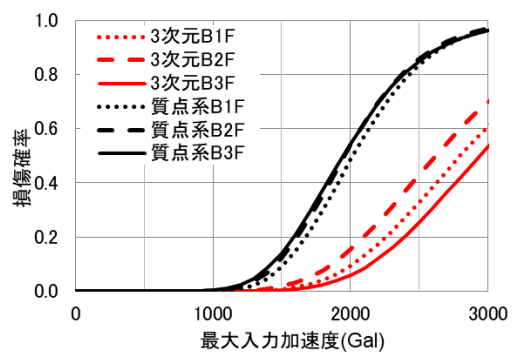
層間変形の概略図

3) 現実的応答・耐力に基づくフラジリティ評価 フラジリティ評価の事例

建屋の注目部位のフラジリティ評価 重要機器等の設置位置などのフラジリティ算定

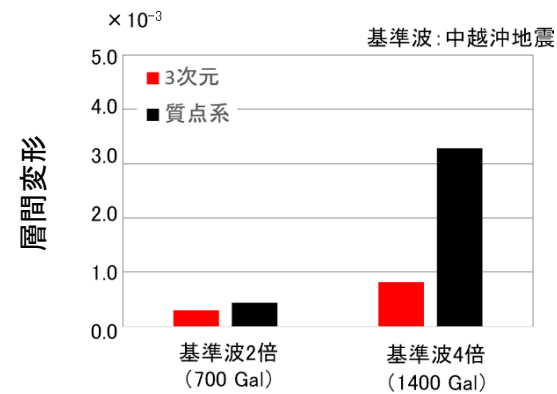


最大せん断ひずみ分布の例(円筒壁)

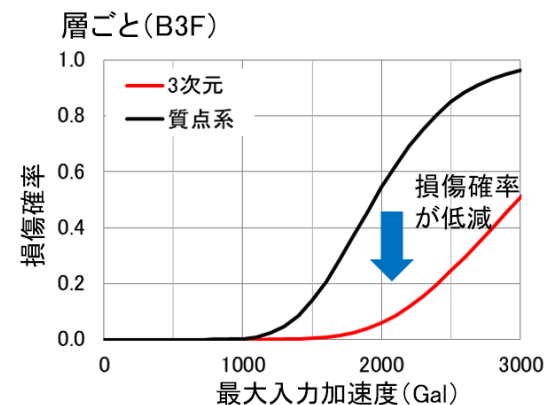


フラジリティ評価の例(円筒壁)

建屋各層のフラジリティ評価 各層の層間変形によりフラジリティ算定



最大層間変形の例(B3F)



建屋各層のフラジリティ評価の例(B3F)

建屋の3次元挙動を考慮した現実的かつ合理的なフラジリティ評価手法を整備

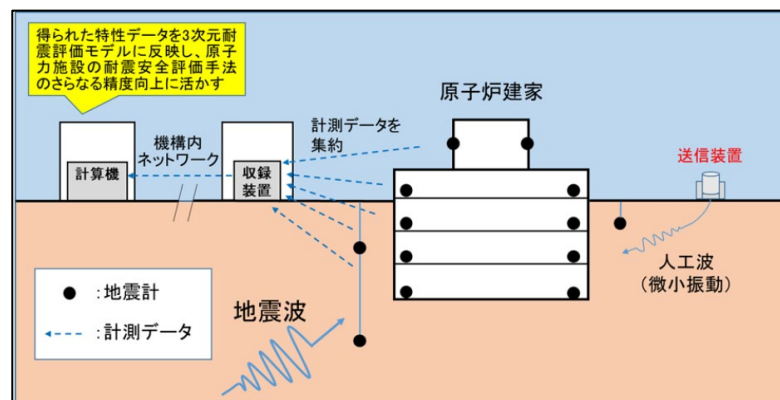
大規模観測システムを活用した耐震評価手法の高精度化

原子力施設の耐震安全性をさらに高い精度で評価することを目的に、原子力規制庁との共同研究の一環として、機構施設である高温工学試験研究炉（HTTR）を対象に、地盤や建屋の床だけでなく壁にも地震計を設置し、自然地震と人工波の両方を観測可能な大規模観測システムを世界で初めて整備。（プレス発表、2020）。

- 常設地震計と任意位置を計測可能なモバイル型地震計を組み合わせることで、建屋3次元詳細モデルの妥当性確認に必要な局所の応答データを取得可能。
- 3次元詳細モデルのさらなる精緻化及び耐震評価や原子力安全にかかわる人材育成への貢献が期待。



HTTR



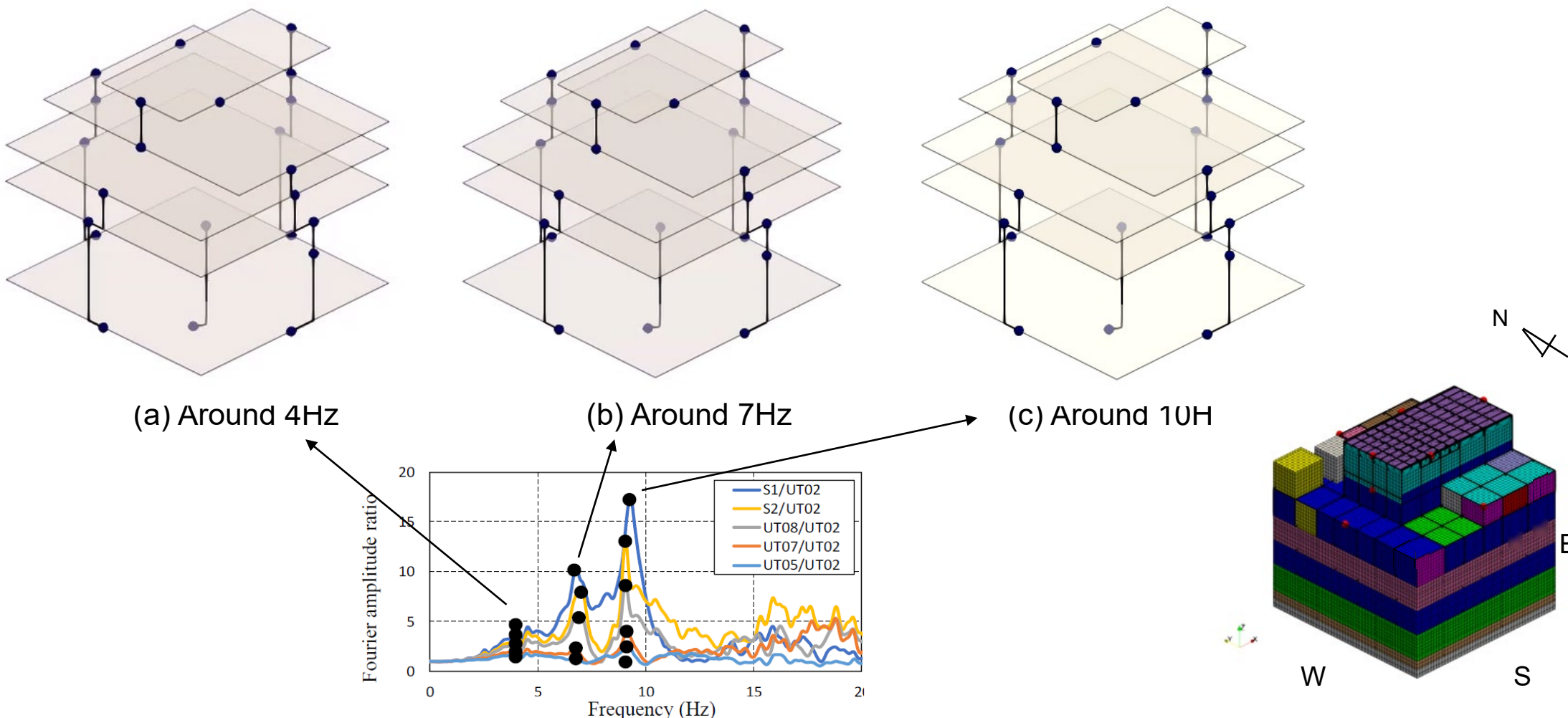
大規模観測システムの概要



送信装置の振動発生機

大規模観測システムを活用した耐震評価手法の高精度化^[5]

Analysis using the Acceleration Response Excited by an Earthquake



Examples of building deformation mode (the earthquake occurred on 13 Feb. 2021)

[5] Nishida, A., et al., A study on the improvement of accuracy of three-dimensional seismic evaluation analysis method for nuclear buildings using a large-scale observation systemSMiRT-26, 2022.8. (発表資料を引用) ※図はIASMiRT提供

3. まとめ

1) 現実的応答:より現実に近い地震時挙動の把握

建屋3次元詳細モデルを用いた地震応答解析に係る標準的解析要領を整備。耐震安全性評価に係る技術的知見として規制庁のNRA技術報告書に反映。

2) 現実的耐力:より現実に近い損傷モードの同定

3次元挙動を考慮することで建屋損傷の空間分布や損傷過程の評価を実現。地震リスク評価に係る技術的知見として活用可能。

3) 現実的応答・耐力に基づくフラジリティ評価

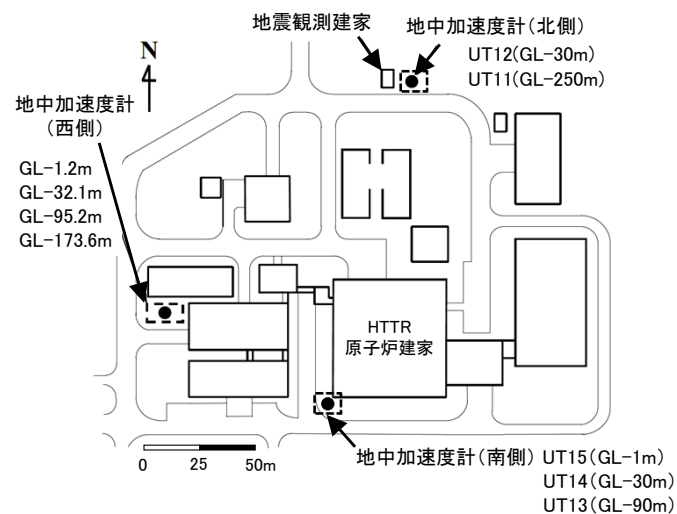
建屋の3次元挙動を考慮した現実的かつ合理的なフラジリティ評価手法を整備。

今後の取り組み

- 地盤・建屋・機器・配管の総合的な安全性向上に係る3次元詳細解析手法の整備や標準化
- 大規模観測システムを活用した標準的解析要領の適用性確認
- リスク情報活用に向けた地震PRAの手法の高度化、等

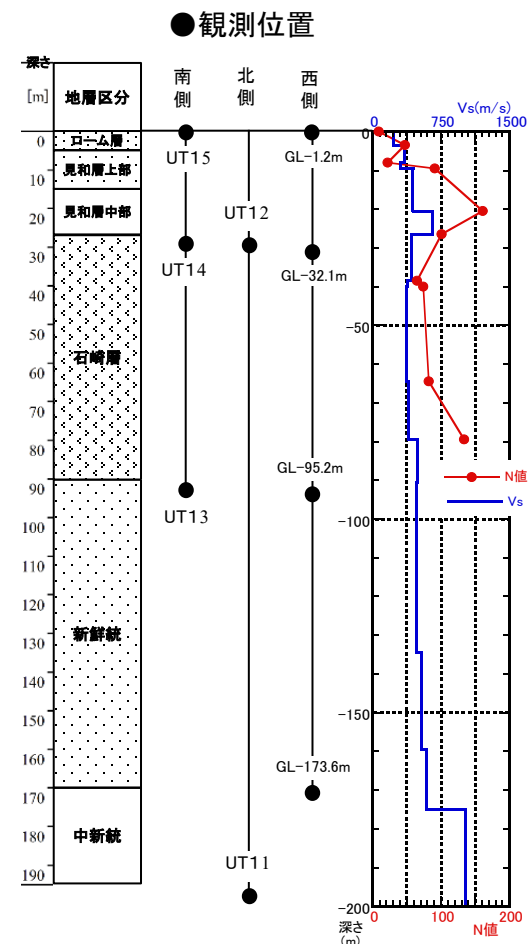
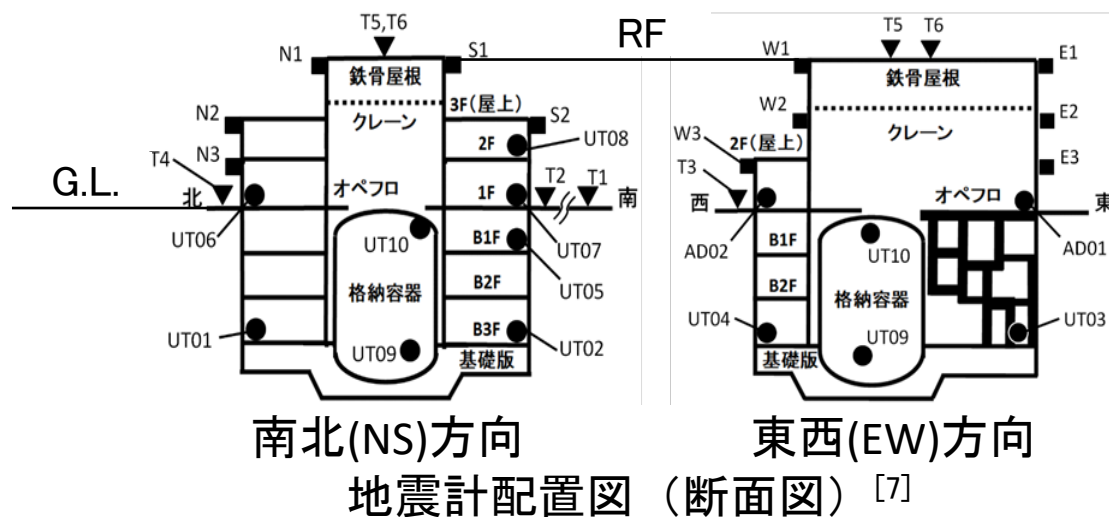
参考資料

大規模観測システムの概要



- HTTR建家の主体構造
主に鉄筋コンクリート造、鉄骨造屋根
- 建家平面寸法
52.0m(NS) × 500m(EW)
- 階数
地下3階、地上2階建て
- 基礎
板厚50mのベタ基礎。支持地盤である第四紀層の石崎層に直接設置

鉛直アレーの設置状況^[6]



柱状図 地震計 深さ Vs値とN値
西側観測点近傍地盤柱状図^[6]

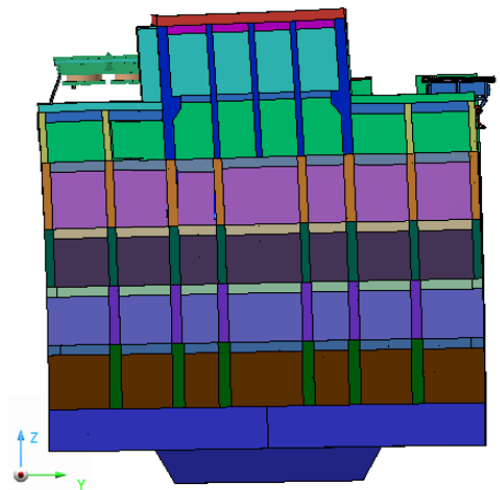
[6] 蛭沢勝三他:原研大洗サイトにおける鉛直アレー地震動データベース、JAERI-Data/Code 2001-009、2001.3.

[7] 山川光稀他:原子炉施設の三次元耐震解析手法の高度化に関する研究(その6:位相差を考慮した振動モードの分析)、2023年度日本建築学会大会学術講演梗概集, 2023.9.

Comparison Between Observation Records and Analysis Results [8]

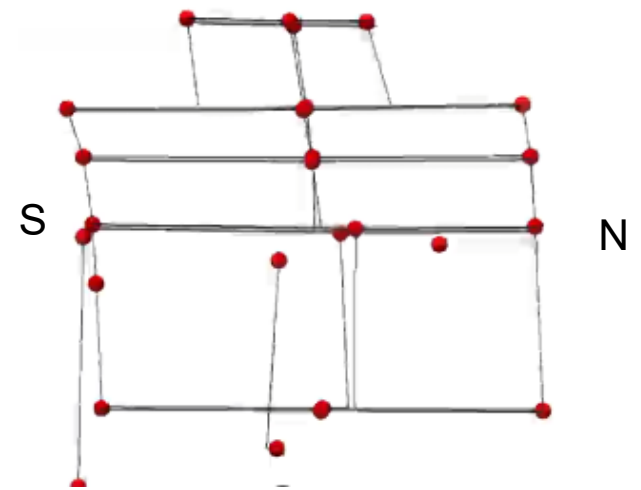
Deformation mode

Analysis results



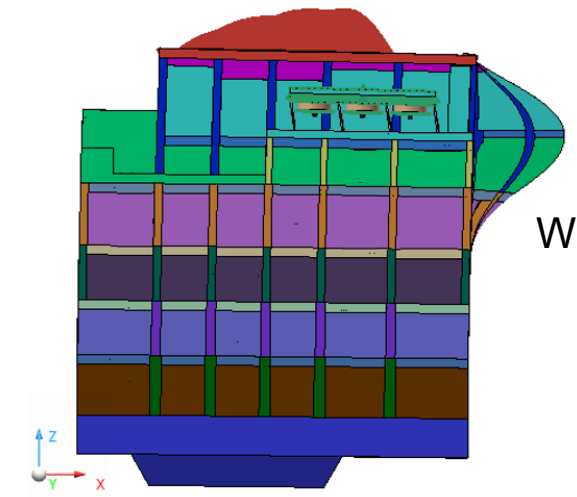
6.81 Hz (NS dir.)

Observation records



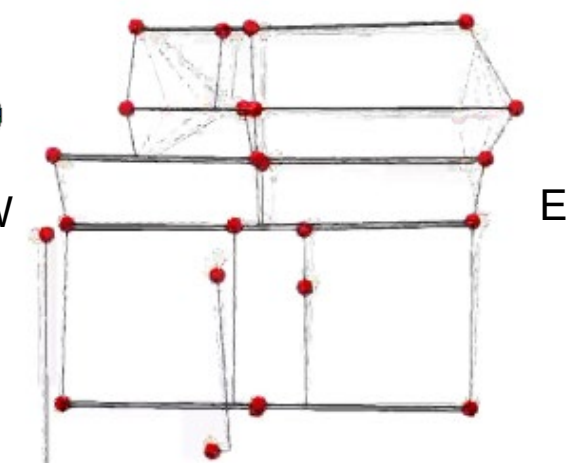
Near 7 Hz (NS dir.)

Analysis results

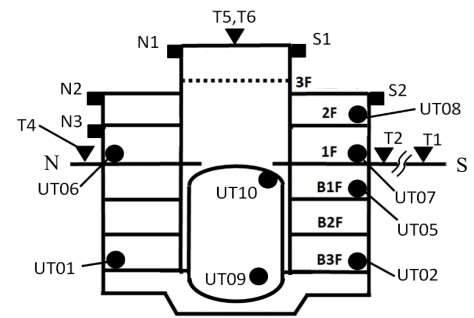


6.68 Hz (EW dir.)

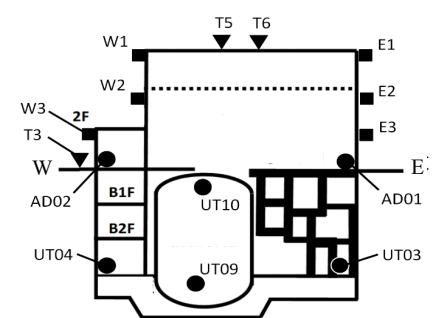
Observation records



Near 7 Hz (EW dir.)



NS section

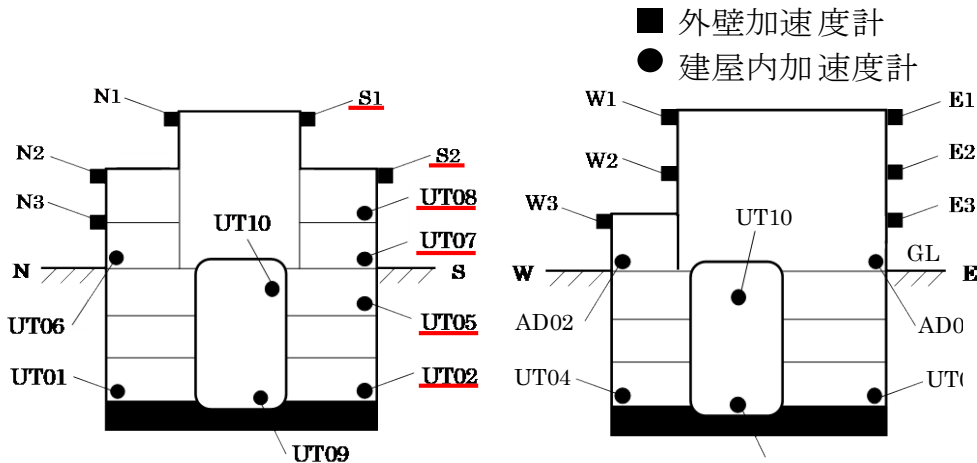


EW section

Accelerometer locations

[8] Choi, B., et al. : A study on improvement of three-dimensional seismic analysis method of nuclear building using a large-scale observation system (part3: improvement and validation of three-dimensional seismic analysis method), SMiRT27, 2024.3. (発表資料を引用) ※図はIASMiRT提供

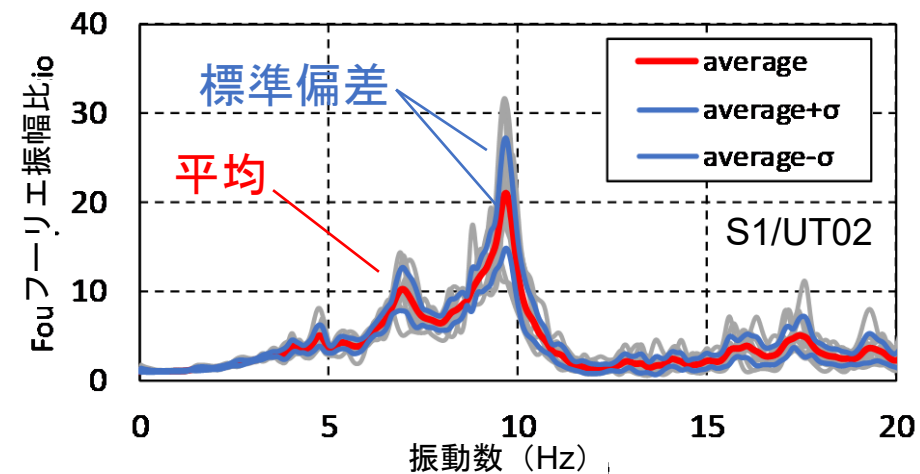
取得した主な地震観測記録 [9]



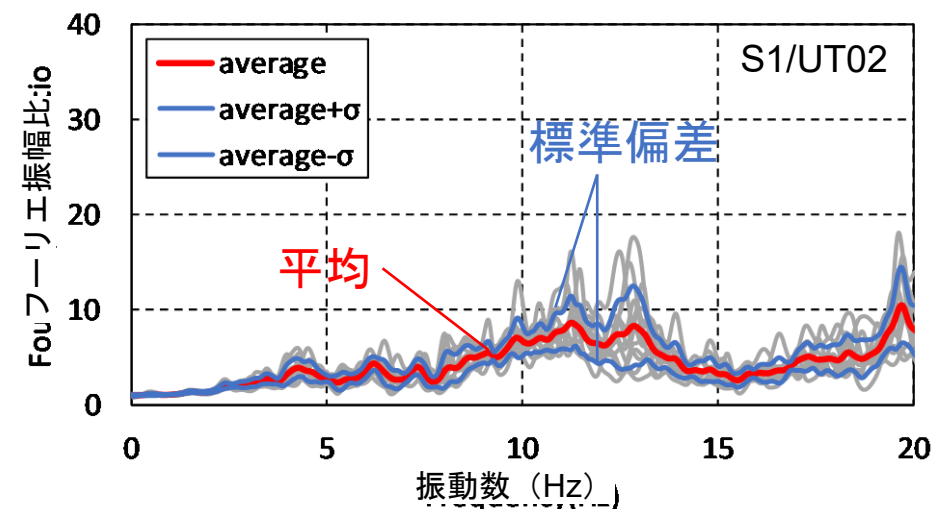
加速度計設置位置

対象とする地震観測記録一覧

大洗町震度	観測記録情報		震源深さ (km)	マグニ チュード	最大加速度(Gal)		
	地震発生日	震央地名			NS	EW	UD
震度3	2020年4月12日	茨城県南部	53	5	21.7	22.3	16.2
	2020年11月22日	茨城県沖	45	5.7	20.4	23.5	16.8
	2020年12月30日	茨城県沖	56	5.2	41.7	21.7	19.7
	2021年2月13日	福島県沖	55	7.3	46.5	31.1	35.5
震度2	2020年5月4日	茨城県沖	45	4.4	11.2	3.54	4.99
	2020年5月11日	茨城県沖	47	5.8	10.3	6.66	9.87
	2020年6月1日	茨城県北部	97	5.2	8.58	4.76	4.46
	2020年6月4日	茨城県沖	52	4.8	11.6	15.4	7.42
	2020年9月17日	茨城県北部	55	4.3	10.8	4	3.89
	2020年10月5日	茨城県沖	87	4.5	11.5	3.56	3.75
	2021年1月26日	茨城県沖	64	4.2	9.63	5.25	4.57



フーリエ振幅比の平均とばらつき (NS方向)



フーリエ振幅比の平均とばらつき (EW方向)

観測記録による卓越振動数、振動モードの分析 [10]

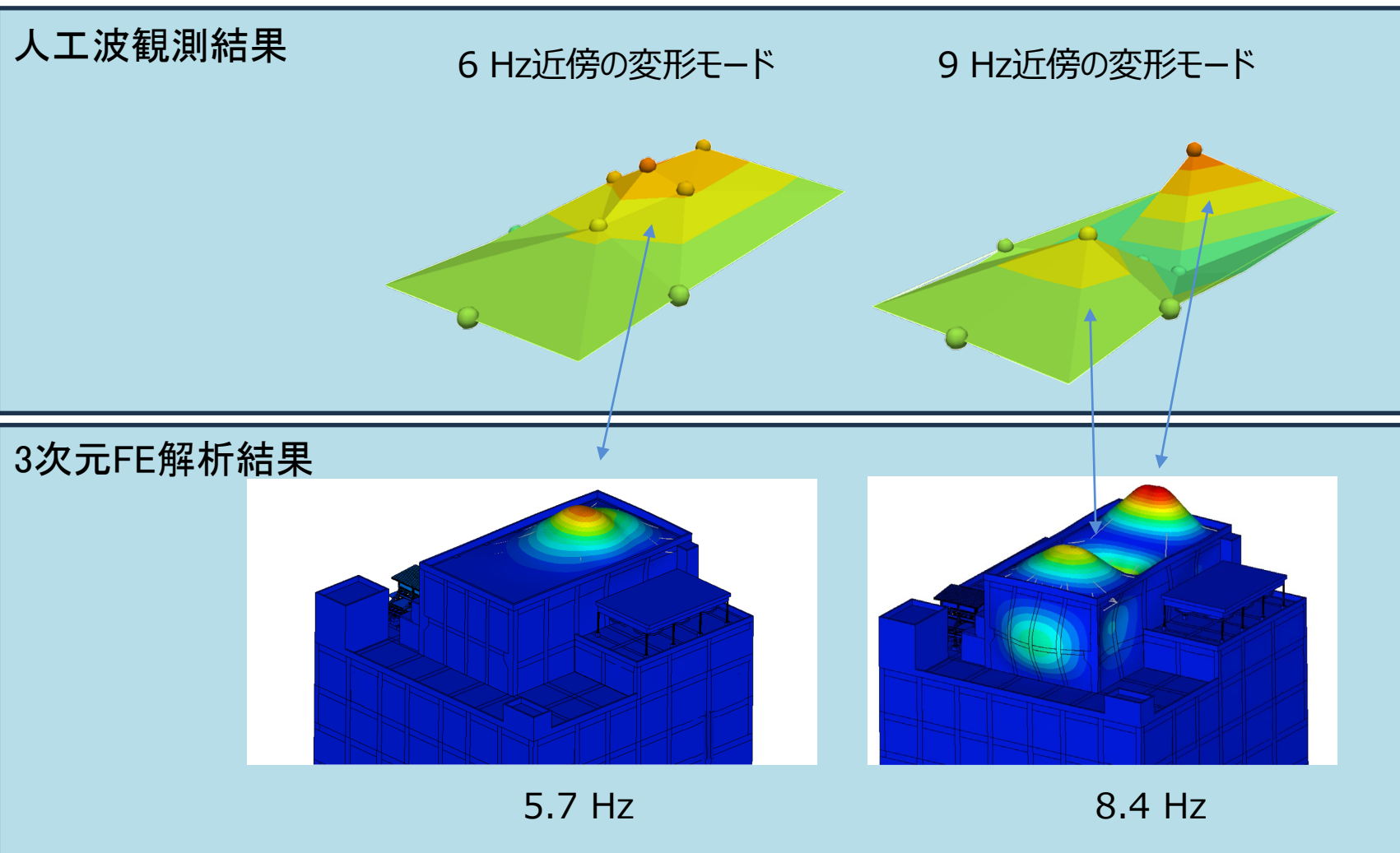


図5 建屋局所（屋根）応答の比較の例

[10] 塩見忠彦他、原子炉施設の三次元耐震解析法の高度化に関する研究(その7:建屋の振動特性と三次元有限要素モデルの構築), 日本建築学会大会学術講演梗概集、2024.9.
(発表資料を引用)