

## 資料 4 5 - 2 - 2 - 2

# NRA 技術報告「原子炉施設の建屋三次元地震時挙動の精緻な推定に資する影響因子の分析とそのモデル化に関する検討」について

令和 3 年 4 月 1 4 日  
技術基盤グループ地震・津波研究部門

## 1. 背景及び目的

設置許可基準規則の解釈<sup>1</sup>別記 2 第 4 条（地震による損傷の防止）の 7 は第 4 条第 3 項に規定する基準地震動による地震力の算定の方法として、「基準地震動による地震力は、基準地震動を用いて、水平 2 方向及び鉛直方向について適切に組み合わせたものとして算定すること。なお、建物・構築物と地盤との相互作用、埋込み効果及び周辺地盤の非線形性について、必要に応じて考慮すること。」を求め、技術基準規則の解釈においてもこれを引用している。

審査においては、耐震設計に係る工認審査ガイド（以下「耐震工認ガイド」という。）に基づき、「2.3 設計用地震力の算定」において、水平 2 方向（NS 方向及び EW 方向）及び鉛直方向（UD 方向）について適切に地震力を算定していること、「3.4 地震応答解析」において建物・構築物と地盤間の接触・剥離に留意していることを確認している。事業者は、地盤をばね<sup>1</sup>でモデル化した質点系モデルや簡易な有限要素法（Finite Element Method、以下「FEM」という。）モデル等を用い、質点系モデルの妥当性確認や水平 2 方向及び鉛直方向の地震力の適切な組合せ、建屋側面地盤の回転拘束効果等の検討を行なっている。また、今後、三次元 FEM モデルを活用した精緻な地震応答解析により、建物・構築物の現実的な振動性状や応答性状を評価することが想定される。

地震・津波研究部門は、規制要求の確認に資する知見を拡充し、審査における三次元 FEM モデルを用いた評価の妥当性を確認する際の技術的根拠として活用されることを目的に、平成 29 年度から令和 2 年度までの 4 ヶ年計画で安全研究プロジェクト「地震・津波及びその他の外部事象等に係る施設・設備のフラジリティ評価に関する研究」を実施した。NRA 技術報告「原子炉施設の建屋三次元地震時挙動の精緻な推定に資する影響因子の分析とそのモデル化に関する検討」（以下「本 NRA 技術報告」という。）は、関連する文献の調査や地盤及び建屋を詳細にモデル化した三次元 FEM モデルによる地震応答解析から、耐震解析に関わる基本的な知識、考え方、技術的根拠を整備したものである。

## 2. 本 NRA 技術報告の内容と得られた成果

<sup>1</sup> 建屋と地盤の動的相互作用を表すインピーダンス。実数部と虚数部で表現され、振動数に依存する特性を有する。

## 2.1 文献調査に基づく解析パラメーターの抽出

三次元 FEM モデルによる原子炉施設の応答特性に影響を及ぼす可能性の高い因子について、文献調査による抽出を行い、これら因子をパラメーターとした地震応答解析からその影響を分析した。文献調査により抽出された影響因子は以下のとおり。

- ① 水平 2 方向及び鉛直方向の地震動入力
- ② 有限要素タイプ
- ③ メッシュサイズ
- ④ 格納容器内部の大型機器のモデル化
- ⑤ RC 材料の非線形挙動のモデル化
- ⑥ 建屋－地盤間の接触・剥離現象のモデル化
- ⑦ 建屋－地盤間に接続するジョイント要素に付加する初期応力の算定方法
- ⑧ 減衰のモデル化

このうち、地震応答解析における影響が大きいと想定される「① 水平 2 方向及び鉛直方向の地震動入力」（以下「影響因子①」という。）及び「⑥ 建屋－地盤間の接触・剥離現象のモデル化」（以下「影響因子⑥」という。）について、地震応答解析を行った。なお、影響因子①及び影響因子⑥は、耐震工認ガイドにおいて、確認する対象とされている。

## 2.2 解析条件及び解析モデル

### 2.2.1 影響因子①のモデル化

本 NRA 技術報告では、過去に IAEA の Kashiwazaki-Kariwa Research Initiative for Seismic Margin Assessment で国際的なベンチマーク解析<sup>ii</sup>の対象となった柏崎刈羽原子力発電所 7 号機原子炉建屋を対象に、図 1 に示す詳細な三次元 FEM モデルを作成した。

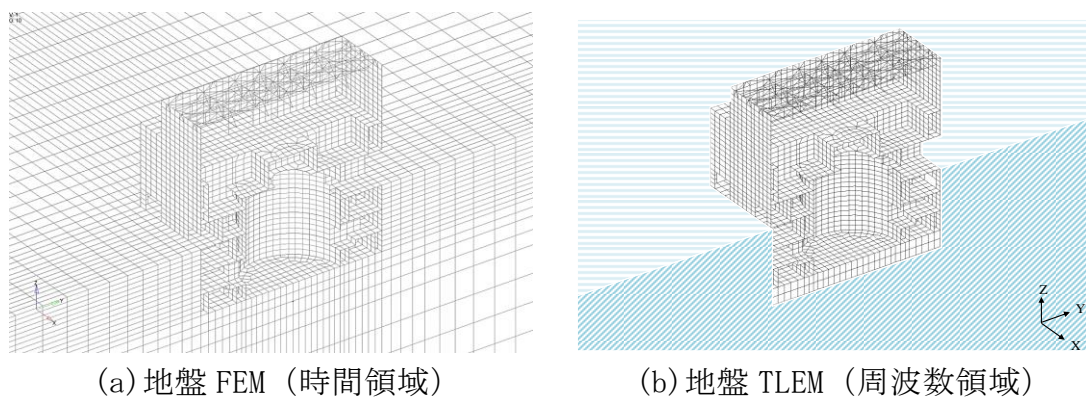


図 1 三次元 FEM モデルの例

ここで、図 1(a) は地盤を FEM でモデル化した三次元 FEM モデル（以下「地

盤 FEM」という。)、図 1(b)は、地盤を薄層要素<sup>2</sup> (Thin Layer Element Method) でモデル化した三次元 FEM モデル (以下「地盤 TLEM」という。)) を示す。なお、図 1(a) (b)の地震応答解析では、各階の応答を評価した。また、建屋の解析モデルは同一である。

使用する地震応答解析手法は、建屋の応答を時間領域で解析する時刻歴応答解析法 (図 1(a)) と周波数領域で解析する周波数応答解析法 (図 1(b)) の 2 種類とした。地盤物性は、上述の影響因子の感度を確認するため、標準的な値とし、せん断波速度は 880m/s とした。地盤内部の構成は、表層地盤を含め地盤のコントラストの無い理想的な一様地盤を仮定した。

### 2.2.2 影響因子⑥のモデル化

建屋と地盤間の接触・剥離及び基礎浮き上がりは、影響因子①では建屋—地盤境界部の節点を共有させることで非線形要素<sup>3</sup> (図 2(a)) が建屋の応答に与える影響を含まない評価とした。一方で、影響因子⑥では、建屋と地盤の剥離・接触及び基礎浮き上りを以下に示す非線形要素 (図 2(a)) 及び簡易な線形要素<sup>4</sup> (図 2(b)) でモデル化することで、図 1 の三次元 FEM モデルに即した非線形現象の影響評価を行った。ここで、非線形要素及び簡易な線形要素とは、建屋と地盤の境界面に配置され、幾何学的な大きさを有しない、ばねとしての次元を有する仮想の構造要素である。

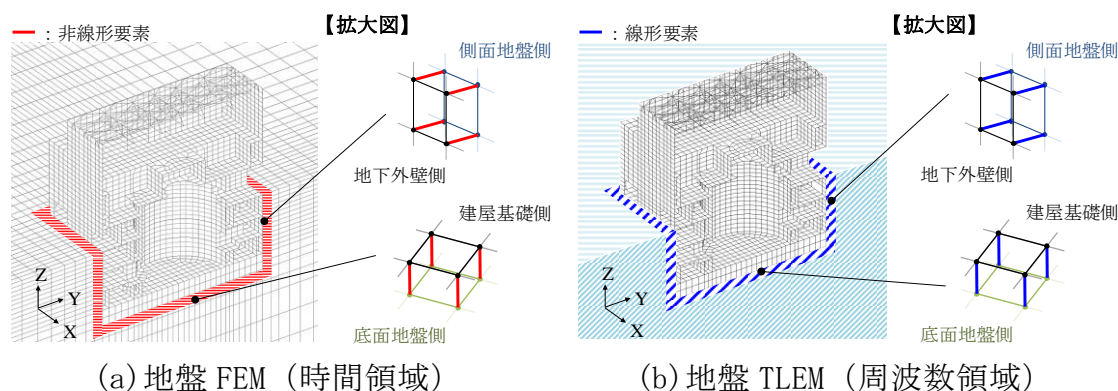


図 2 建屋と地盤間の接触・剥離及び基礎浮き上りのモデル化の例

<sup>2</sup> 水平方向及び鉛直方向の半無限の解析領域を成層地盤でモデル化し、水平方向には波動方程式を満たす解を用い、深さ方向には FEM と同じ離散化手法を用いる方法。

<sup>3</sup> 建屋と地盤の境界面での剥離や滑りといった非線形現象を表すために設ける垂直ばねとせん断ばねで構成される要素。図 2(a)では、引張 (剥離もしくは基礎浮き上がり) が生じると応力を伝達せず、摩擦抵抗力に達すると滑りが生じる設定とし、ジョイント要素を用いた。

<sup>4</sup> 非線形要素と同様の力の伝達を行うことができない簡易なばね要素。図 2(b)では、事前解析を行った結果から、剥離、滑りが生じる範囲を定め、同範囲に配置されたばね要素の剛性を非常に柔らかくすることで、当該部に応力を生じさせない設定とした。ばね要素のモデル化に当たっては、剥離・滑り範囲が安全側の設定となるよう建屋が埋め込まれている地下外壁 4 面、基礎底面 1 面の計 5 面に対し、剥離・滑り・基礎浮き上がり範囲が最大となる時刻を求め、それら時刻に基づく結果を解析モデルの各構面に反映した。

### 2.2.3 入力地震動

水平方向及び鉛直方向の入力地震動は、日本電気協会<sup>iii</sup>による経験的な方法による応答スペクトルとし、Noda et al.<sup>iv</sup>の方法に基づき、応答スペクトルの振幅包絡線の経時的変化を定めた。このとき、水平2方向については、NS方向及びEW方向同位相とし、水平2方向及び鉛直方向の最大応答加速度は、東京電力ホールディングス株式会社<sup>v</sup>の長岡平野西縁断層帯における地震動評価を参考に、水平2方向600gal、鉛直方向400galとし、地表面に解放基盤面を設定した。

### 2.3 解析結果

2.2 で定める解析条件及び解析モデルより得られた影響因子①及び影響因子⑥の解析結果は、以下のとおりである。

- ・ 2.2 で定める解析条件においては、BWRの原子炉建屋の水平1方向入力による解析と水平2方向及び鉛直方向入力による解析結果の比較から、影響因子①が各階の最大応答加速度及び床応答スペクトルに与える影響は小さいことを確認した。
- ・ 一方、建屋-地盤境界部のモデル化条件を変えた影響因子⑥については、建屋と地盤間を非線形要素もしくは簡易な線形要素とすることで地盤の拘束効果が低下すること、簡易な線形要素を用いた地盤 TLEM では、鉛直方向の床応答スペクトルの一部周期帯に、建屋回転挙動の増大に伴う応答の増幅が現れることを確認した<sup>5</sup> (図3(c))。

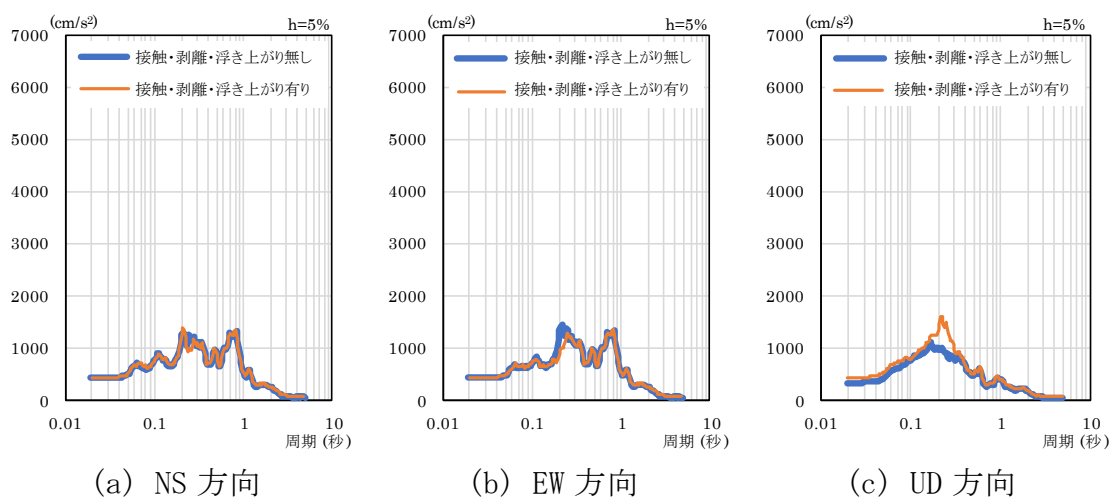


図3 地盤 TLEM による床応答スペクトルの比較 (地下3階)

<sup>5</sup> 図3は、影響因子の感度の違いを明確にするため、安全側の設定を行っている。また、図3の接触・剥離・浮き上がり無し（青線）は、建屋と地盤間の接触・剥離及び基礎浮き上がりを考慮しない影響因子①の解析モデル、接触・剥離・浮き上がり有り（赤線）は同現象を考慮とした影響因子⑥の解析モデルによる結果を示す。

## 2.4 本研究の成果

本研究では、建屋ひずみレベルが弾性範囲から弾性をやや上回る範囲までの地震動を対象に、詳細な三次元 FEM モデルの作成及び解析を行い、地震時挙動の分析・評価により得られた技術的知見を建屋及び機器設備の耐震安全性評価上の留意点として整理した。整理した留意点は、「原子炉施設の建屋三次元地震時挙動の精緻な推定に資する動的耐震解析要領(案)」(以下「動的耐震解析要領(案)」という。)として取りまとめ本 NRA 技術報告に加えた。

## 3. まとめ

本 NRA 技術報告は、設置許可基準規則の解釈<sup>i</sup>及び耐震工認ガイドにおける、影響因子①及び影響因子⑥に対する地震応答解析等の技術的知見を拡充するものである。したがって、現行の規制基準及びガイドを改定する必要はない。

本 NRA 技術報告は、建屋三次元地震時挙動の精緻な推定に関するものであり、動的耐震解析要領(案)は、①現行の三次元 FEM モデルを用いた質点系モデルの妥当性確認や水平 2 方向及び鉛直方向の地震力の適切な組合せ等に関する審査及び②将来のより現実的な振動性状や応答性状を見据えた三次元 FEM モデルの妥当性確認の際に活用される。

---

<sup>i</sup> 実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈

<sup>ii</sup> International Atomic Energy Agency (IAEA), Review of Seismic Evaluation Methodologies for Nuclear Power Plants Based on a Benchmark Exercise, IAEA TECDOC No. 1722, 2013

<sup>iii</sup> 日本電気協会、原子力発電所耐震設計技術指針基準地震動策定・地質調査編 JEAG4601-2007、2008

<sup>iv</sup> Noda, S. et al. Response Spectra for Design Purpose of Stiff Structures on Rock Sites, The OECD/NEA Workshop on the Relations between Seismological Data and Seismic Engineering Analyses, 2002, pp.16-18

<sup>v</sup> 東京電力 HD 株式会社、柏崎刈羽原子力発電所 6 号及び 7 号炉 基準地震動の策定について、第 404 回(第 151 回核燃料施設等の新規制基準適合性に係る審査会合と合同)原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合、資料 4-3-1、2016、  
<https://www2.nsr.go.jp/data/000165352.pdf> (2020 年 4 月 20 日確認)