

NRA 技術報告

NRA Technical Report Series

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

Analysis of Influential Factors that Contribute to Precise Evaluation of Three-Dimensional Seismic Behavior of Buildings in Nuclear Reactor Facilities and Study on Their Modeling Methods

市原 義孝 森谷 寛 小林 恒一 山崎 宏晃 大橋 守人
ICHIHARA Yoshitaka, MORITANI Hiroshi, KOBAYASHI Koichi, YAMAZAKI Hiroaki, and
OHASHI Morito

地震・津波研究部門

Division of Research for Earthquake and Tsunami

原子力規制庁

長官官房技術基盤グループ

Regulatory Standard and Research Department,
Secretariat of Nuclear Regulation Authority (S/NRA/R)

原子力規制委員会
Nuclear Regulation Authority

令和3年3月
March 2021

本報告は、原子力規制庁長官官房技術基盤グループが行った安全研究等の成果をまとめたものです。原子力規制委員会は、これらの成果が広く利用されることを期待し適時に公表することとしています。なお、本報告の内容を規制基準、評価ガイド等として審査や検査に活用する場合には、別途原子力規制委員会の判断が行われることとなります。

本報告の内容に関するご質問は、下記にお問い合わせください。

原子力規制庁 長官官房 技術基盤グループ 地震・津波研究部門
〒106-8450 東京都港区六本木 1-9-9 六本木ファーストビル
電話：03-5114-2226
ファックス：03-5114-2236

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

原子力規制庁 長官官房技術基盤グループ
地震・津波研究部門
市原義孝 森谷寛 小林恒一 山崎宏晃 大橋守人

要 旨

原子炉施設のうち建屋の地震応答解析に関する審査は、一般に建屋と地盤の相互作用を適切に考慮した質点系モデルにより行われる。しかし、「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」(2013)¹及び「耐震設計に係る工認審査ガイド」(2013)²が制定され、新たに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が行われるようになった。これに伴い、建屋の耐震安全性に係る新たな検討として、建屋－地盤連成系の三次元 FEM モデルによる地震応答解析結果が審査で議論されるようになった。

そこで、本 NRA 技術報告では、これまでの審査の論点も踏まえ、三次元 FEM モデルにおける建屋地震時挙動の精緻な推定に資する技術的知見を取得することを目的に、建屋の応答特性に影響を及ぼす可能性の高い影響因子について文献調査を行い、これら影響因子を同定した。本検討で同定した影響因子は以下のとおり。

- a) 水平 2 方向及び鉛直方向の地震動入力
- b) 建屋－地盤間の接触・剥離現象のモデル化

さらに、同定した影響因子をパラメーターとして感度解析及び地震観測記録の再現解析を時間領域及び周波数領域で実施し、それら影響因子が建屋の耐震安全性及び床応答に与える影響を検討した。

上記感度解析及び再現解析の実施に当たって、筆者らは、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構への委託事業より得られた三次元 FEM モデルの入力データ³を基に周波数領域の地震応答解析を実施し、委託事業より得られた時間領域の地震応答解析結果³と比較した。その結果、建屋ひずみレベルで弾性範囲をやや上回るまでの地震動に対する技術的知見として、以下に示す成果が得られた。

- (1) a) の影響因子を対象に、水平 2 方向及び鉛直方向の地震力の組合せが建屋の耐震安全性及び床応答に与える影響を検討した。その結果、本感度解析で対象とした標準的な解析条件下においては、当該影響因子が最大応答加速度の増分比率に与える影響及び

最大増分比率を記録した節点の床応答加速度スペクトルに与える影響は小さいことを確認した。また、鉛直方向の地震動入力による水平方向の振動励起が建屋の耐震安全性及び床応答に与える影響を検討した。その結果、本感度解析で対象とした標準的な解析条件下においては、当該影響因子が最大応答加速度に与える影響及び最大応答加速度を記録した節点の床応答加速度スペクトルに与える影響は小さいことを確認した。

- (2) b)の影響因子に対する分析として、建屋－地盤間の接触・剥離現象をジョイント要素又はばね要素でモデル化した場合にそれらモデル化が建屋の耐震安全性及び床応答に与える影響を検討した。その結果、本感度解析で対象とした標準的な解析条件下においては、建屋－地盤間の接触・剥離現象を考慮していない場合と比較して、当該影響因子をジョイント要素又はばね要素でモデル化することで、地盤の拘束効果が弱まること、建屋－地盤連成系の卓越振動数が低振動数側に移行することを確認した。
- (3) a),b)の影響因子の分析に対し、再現解析で対象とした現実的な解析条件下による地震応答解析結果において、水平方向の観測記録とおおむね整合した結果が得られた。このため、ジョイント要素又はばね要素による当該影響因子の水平方向のモデル化は、本解析条件下においては適切な精度を有しており、かつ、本モデルで採用したパラメータの設定手法には一定程度の適用性があるものと推定した。

Analysis of Influential Factors that Contribute to Precise Evaluation of Three-Dimensional Seismic Behavior of Buildings in Nuclear Reactor Facilities and Study on Their Modeling Methods

ICHIHARA Yoshitaka, MORITANI Hiroshi, KOBAYASHI Koichi, YAMAZAKI Hiroaki, and
OHASHI Morito

Division of Research for Earthquake and Tsunami,
Regulatory Standard and Research Department,
Secretariat of Nuclear Regulation Authority (S/NRA/R)

Abstract

The review of seismic response analyses of buildings in nuclear reactor facilities is generally performed using a lumped mass stick model that appropriately models the soil–structure interaction. However, the “Regulatory Guide of the NRA Ordinance on Standards for the Location, Structure, and Equipment of Commercial Power Reactors” (2013)¹ and the “Regulatory Guide for Reviewing Earthquake-Resistant Design” (2013)² were enacted, and a review of the validity of the lumped mass stick models and the appropriateness of combination of two horizontal and vertical seismic forces has been newly performed. As a new study on the seismic safety of buildings, the results of a seismic response analysis using a 3D FEM model were discussed at the review meetings.

Therefore, in this NRA technical report, for the objective of obtaining the technical knowledge that contributes to the precise evaluation of the seismic behavior of buildings in 3D FEM models, influential factors that are likely to affect the response characteristics of the building were identified through a literature survey, based on the issues of the review meeting so far. The influential factors identified in this study are as follows.

- a) seismic input in two horizontal and vertical directions and
- b) modeling the contact-separation phenomena between soil and structure.

Then, their effects on the seismic safety and floor response of the building were examined by the sensitivity analyses and simulation analyses of a seismic event to reproduce the records in both the time domain and frequency domain using these influential factors as parameters.

In carrying out the above sensitivity analyses and simulation analyses, the authors conducted seismic response analyses in the frequency domain based on the input data of the 3D FEM model obtained from the project³ conducted by Japana Atomic Energy Agency under the auspices

of the NRA, and compared the results with those in the time domain obtained in the project³. In summary, the following results were obtained as technical knowledge on seismic motion in the regime up to the building strain level slightly exceeding the elastic range.

- (1) For the influential factor a), the effects of the combination of two horizontal and vertical directions seismic forces on the seismic safety and floor response of the building were evaluated. As a result, it was confirmed that under the standard analysis conditions used in this sensitivity analysis, the factor a) had little influence on the maximum response acceleration incremental ratio and the floor response acceleration spectrum of the node recording the maximum incremental ratio. In addition, the influences of horizontal vibration excitation due to vertical seismic input on the seismic safety of the building and floor response was examined. Thus, it was confirmed that under the standard analysis conditions used in this sensitivity study, the factor a) had little influence on the floor response acceleration spectrum of the node recording the maximum response acceleration.
- (2) To analyze influential factor b), the effect of modeling the contact-separation phenomenon between soil and structure with joint elements or spring elements on the seismic safety of the building and floor response was examined. Consequently, it was confirmed that under the standard analysis conditions used in this sensitivity analysis, compared to without the contact-separation phenomenon between soil and structure, modeling the factor b) with joint elements or spring elements weakens the effects of restraining the soil, and the dominant frequency of the soil-structure coupled system shifts to the lower frequency side.
- (3) In contrast to the analysis of the influential factors of a) and b), the results of the seismic response analysis under realistic analysis conditions (the target of the simulation analysis), were almost the same as the seismic observation data in the horizontal directions. Therefore, it is presumed that the horizontal modeling of the influential factors with joint or spring elements has sufficient accuracy under the conditions of this analysis and that the setting methods of the parameters in the model have a certain degree of applicability.

目 次

1. 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 研究の目的	7
1.3 報告書の構成	8
2. 研究の概要	10
2.1 研究の進め方	10
2.2 研究の適用範囲	11
2.3 研究の対象	12
2.4 研究の着眼点：原子炉施設の地震時挙動の精緻な推定に資する影響因子	13
2.5 研究の方法	16
3. 地震応答解析の基本方針	22
3.1 地震応答解析手法及び地震応答解析モデル	22
3.2 入力地震動	36
3.3 水平方向及び鉛直方向の地震応答解析結果の組合せ	43
4. 地震応答解析モデルの作成	44
4.1 感度解析で使用する地震応答解析モデル	44
4.2 再現解析で使用する地震応答解析モデル	53
5. 地震応答解析結果	60
5.1 感度解析結果	60
5.2 再現解析結果	71
6. 考察	87
6.1 水平 2 方向及び鉛直方向の地震動入力原子炉建屋の地震時挙動に与える影響	87
6.2 建屋－地盤間の接触・剥離現象のモデル化が原子炉建屋の地震時挙動に与える影響	95
7. 結論	111
謝辞	114
参考文献一覧	115
付録 1 三次元 FEM モデルによる地震応答解析結果	118
付録 2 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)	155
付録 3 質点系モデルにおける側面回転ばねの適用範囲及び適用条件に関する考察	190
執筆者一覧	200

表 目 次

表 2.1	地震応答解析モデルと解析ケースの関係	20
表 3.1	構造材料	29
表 3.2	使用材料の物性値.....	29
表 3.3	原子炉建屋の減衰定数.....	29
表 3.4	三次元 FEM モデルの重量分布	30
表 3.5	感度解析で使用する地盤物性値	30
表 3.6	原子炉施設の振動試験と解析評価一覧 (BWR)	31
表 3.7	再現解析で使用する地盤物性値	32
表 3.8	原子炉建屋が立地する敷地のマグニチュード M と等価震源距離 X_{eq} の調査結果.....	38

目 次

図 1.1	報告書の構成.....	9
図 2.1	IAEA で過去に国際的なベンチマーク解析の対象となった原子炉建屋の三次元 FEM モデルの作成例.....	12
図 2.2	地震応答解析結果を評価する代表節点の例	21
図 3.1	代表的な平面図.....	33
図 3.2	代表的な断面図.....	34
図 3.3	代表的な平面図における剛性評価範囲	35
図 3.4	Noda らの経験的な方法に基づき得られた加速度時刻歴波形	39
図 3.5	再現解析で使用する地震諸元 (2007 新潟県中越沖地震本震)	40
図 3.6	地震計の設置位置.....	40
図 3.7	基礎スラブ上での観測記録 (加速度時刻歴波形)	41
図 3.8	基礎スラブ上での観測記録 (加速度応答スペクトル)	42
図 4.1	時間領域の基準モデル (C1-1) (感度解析: 地盤 FEM によるモデル化)	48
図 4.2	周波数領域の基準モデル (C1-2) (感度解析: 地盤 TLEM によるモデル化)	48
図 4.3	感度解析で使用する RC 造のレーリー減衰の特性	49
図 4.4	時間領域の接触・剥離モデル (C6-1) (感度解析: 地盤 FEM によるモデル化)	50
図 4.5	周波数領域の接触・剥離モデル (C6-2) (感度解析: 地盤 TLEM によるモデル化)	50
図 4.6	時間領域の剥離・滑り・浮き上がりのモデル化概念図 (C6-1) (感度解析: 地盤 FEM によるモデル化)	51
図 4.7	周波数領域の剥離・滑り・浮き上がりのモデル化概念図 (C6-2) (感度解析: 地盤 TLEM によるモデル化)	51
図 4.8	ジョイント要素に適用する応力-変位関係	52
図 4.9	基礎-底面地盤間のジョイント要素に付加する初期応力の算定方法のモデル化概念図 (地盤 FEM によるモデル化)	52
図 4.10	時間領域の基準モデル (C9-1) (再現解析: 地盤 FEM によるモデル化) ..	55
図 4.11	周波数領域の基準モデル (C9-2) (再現解析: 地盤 TLEM によるモデル化)	55
図 4.12	再現解析で使用する RC 造のレーリー減衰の特性	56
図 4.13	地盤の動的ひずみ依存特性.....	57
図 4.14	時間領域の接触・剥離モデル(C10-1)(再現解析: 地盤 FEM によるモデル化)	58
図 4.15	周波数領域の接触・剥離モデル(C10-2)(再現解析: 地盤 TLEM によるモデル	

化).....	58
図 4.16 時間領域の剥離・滑り・浮き上がりのモデル化概念図 (C10-1) (再現解析:地盤 FEM によるモデル化)	59
図 4.17 周波数領域の剥離・滑り・浮き上がりのモデル化概念図 (C10-2) (再現解析:地盤 TLEM によるモデル化).....	59
図 5.1 クレーン階 伝達関数 [基準モデル (感度解析)]	67
図 5.2 最大応答加速度分布 [基準モデル (感度解析)]	67
図 5.3 床応答加速度スペクトル [基準モデル (感度解析)]	68
図 5.4 クレーン階 伝達関数 [接触・剥離モデル (感度解析)]	69
図 5.5 最大応答加速度分布 [接触・剥離モデル (感度解析)]	69
図 5.6 床応答加速度スペクトル [接触・剥離モデル (感度解析)]	70
図 5.7 観測点の加速度時刻歴波形の比較 [基準モデル (再現解析)]	79
図 5.8 観測点の床応答加速度スペクトルの比較 [基準モデル (再現解析)]	80
図 5.9 3階観測点の伝達関数 [基準モデル (再現解析)]	81
図 5.10 最大応答加速度分布 [基準モデル (再現解析)]	81
図 5.11 床応答加速度スペクトル [基準モデル (再現解析)]	82
図 5.12 観測点の加速度時刻歴波形の比較 [接触・剥離モデル (再現解析)]	83
図 5.13 観測点の床応答スペクトルの比較 [接触・剥離モデル (再現解析)]	84
図 5.14 3階観測点の伝達関数 [接触・剥離モデル (再現解析)]	85
図 5.15 最大応答加速度分布 [接触・剥離モデル (再現解析)]	85
図 5.16 床応答加速度スペクトル [接触・剥離モデル (再現解析)]	86
図 6.1 最大応答加速度の増分比率コンター図 (C1-2) (感度解析:周波数領域) ..	91
図 6.2 床応答スペクトルの比較 (C1-2) (水平 1 方向 vs 水平 2 方向及び鉛直方向:感度解析:周波数領域)	92
図 6.3 鉛直方向入力時の水平方向の最大応答加速度コンター図 (C1-2) (感度解析:周波数領域)	93
図 6.4 床応答スペクトルの比較 (C1-2) (鉛直 vs 水平 2 方向 vs 水平 2 方向+鉛直方向:感度解析:周波数領域)	94
図 6.5 クレーン階 地盤 FEM による伝達関数の比較 (感度解析:時間領域)	103
図 6.6 クレーン階 地盤 TLEM による伝達関数の比較 (感度解析:周波数領域)	103
図 6.7 地盤 FEM による最大応答加速度分布の比較 (感度解析:時間領域)	104
図 6.8 地盤 TLEM による最大応答加速度分布の比較 (感度解析:周波数領域) ..	104
図 6.9 地盤 FEM による床応答加速度スペクトルの比較 (感度解析:時間領域) ..	105
図 6.10 地盤 TLEM による床応答加速度スペクトルの比較 (感度解析:周波数領域)	106

図 6.11	3階 地盤 FEM による伝達関数の比較（再現解析：時間領域）	107
図 6.12	3階 地盤 TLEM による伝達関数の比較（再現解析：周波数領域）	107
図 6.13	地盤 FEM による最大応答加速度分布の比較（再現解析：時間領域）	108
図 6.14	地盤 TLEM による最大応答加速度分布の比較（再現解析：周波数領域）	108
図 6.15	地盤 FEM による床応答加速度スペクトルの比較（再現解析：時間領域）	109
図 6.16	地盤 TLEM による床応答加速度スペクトルの比較（再現解析：周波数領域）	110

略 語 表

BEM	Boundary Element Method (境界要素法)
BWR	Boiling Water Reactor (沸騰水型原子炉)
FEM	Finite Element Method (有限要素法)
FRS	Floor Response Spectrum (床応答スペクトル)
IAEA	International Atomic Energy Agency (国際原子力機関)
JEA	The Japan Electric Association (日本電気協会)
PGA	Peak Ground Acceleration (地表面最大加速度)
PWR	Pressurized Water Reactor (加圧水型原子炉)
RB	Reactor Building (原子炉建屋)
RC	Reinforced Concrete (鉄筋コンクリート)
RCCV	Reinforced Concrete Containment Vessel (鉄筋コンクリート製原子炉格納容器)
RPV	Reactor Pressure Vessel (原子炉圧力容器)
S	Steel (鉄骨)
SRC	Steel Reinforced Concrete (鉄骨鉄筋コンクリート)
SRSS	Square Root Sum of Squares (二乗和平方根)
TLEM	Thin Layer Element Method (薄層要素法)
T.M.S.L.	Tokyo Mean Sea Level (東京湾平均海面)

用語の定義

(あ行)

一様地盤	全ての地層を1つの完全な水平成層と仮定した地盤。
影響因子	三次元 FEM モデルによる原子炉施設の地震応答解析結果に影響を及ぼすおそれのある因子。
エネルギー伝達境界	地震応答解析モデルとして地盤を FEM 等の離散的手法でモデル化する際の地盤側方に設定する境界条件の1つ。波動の逸散を理論的に考慮した境界。

(か行)

解放基盤面	基準地震動を策定するために、基盤面上の表層や構造物が無いものとして仮想的に設定する自由表面であって、著しい高低差がなく、ほぼ水平で相当な広がりを持って想定される基盤の表面。なお、ここでいう「基盤」とは、おおむねせん断波速度 $V_s=700\text{m/s}$ 以上の硬質地盤であって、著しい風化を受けていないものをいう。
感度解析	いくつかのパラメーターを変動させ、その影響度合いを計算により評価する手法。ここでは、影響因子をパラメーターとした三次元 FEM モデルによる標準的な解析条件下での地震応答解析をいう。
基準地震動	設置許可基準規則の第4条第3項の「その供用期間中に当該耐震重要施設に大きな影響を及ぼすおそれがある地震」による地震動をいう。
基礎入力動	地震動が入射したときの建屋—地盤境界部の動き。地盤ばねを介して建屋に作用する入力地震動に相当する。
境界要素法 (BEM)	波動方程式を満たす基本解を用い、半無限地盤のような領域の問題を地表面のような境界面上の問題に帰結させた手法。

(さ行)

再現解析	いくつかのパラメーターを変動させ、実現象を解析的に再現し、評価する手法。シミュレーション解析ともいう。ここでは、影響因子をパラメーターとした三次元 FEM モデルによる現実的な解析条件下での地震観測記録を活用した地震応答解析をいう。
------	--

材料構成則	連続体に仮定された物体において、相対的に微小な要素の、その構成物質固有の特性を記述するもの。一般に応力-ひずみ関係がこれに該当する。
三次元 FEM モデル	建屋を構成する主要な構造体（屋根トラス、基礎スラブ、耐震壁及び床スラブ等）又は、地盤を立体的にモデル化した解析モデル。ここでは、建屋-地盤連成系の地震応答解析モデルとして、主に地盤を有限要素法等の離散的な手法又は、地盤ばね等の簡易な手法でモデル化した解析モデルをいう。
時刻歴応答解析	地震動の時刻歴波形を入力として、時間領域で建屋の応答を求める地震応答解析。
地震時土圧	地震時に作用する土圧。ここでは、地下外壁に作用する土圧として、静止土圧に地震時増分土圧を加えて求める。
周波数応答解析	地震動の時刻歴波形をフーリエ変換して、周波数領域で建屋の応答を求める地震応答解析。
ジョイント要素	建屋と地盤の接触面での剥離や滑りをモデル化するための垂直ばね要素とせん断ばねで構成される要素。
水平成層地盤 数値減衰	各地層を完全な水平成層と仮定した地盤。 空間や時間を離散化することで現れる数値的な減衰効果。つまり、空間や時間を離散化することで、扱える波数領域や周波数領域が限定され、波長が短い波や振動数が高い波を数値解析的にうまく表現できなくなり、結果的に波動のエネルギーが減衰してしまう効果のことをいう。
すべり安定性	地震時に建屋の基礎底面に生じるすべり面上のせん断力の和がそのすべり面上のせん断抵抗力の和以下であること。
静的漸増解析	建屋に対して静的な震度や荷重を漸増载荷して、その载荷荷重と水平変位の関係等によって建屋全体の耐震性能を評価する手法。
設計基準強度	建屋の構造計算において基準とするコンクリートの圧縮強度。
接地率	地震応答解析結果の最大転倒モーメントと建屋の総重量、建屋の基礎幅から求まる比率。ここでは、基礎と底面地盤が接地している面積の比率をいう。

せん断波速度	振動方向が地震波の進行方向と直交する波（横波）の速度。Vsともいう。
(た行)	
耐震重要施設	設計基準対象施設のうち、地震の発生によって生ずるおそれがあるその安全機能の喪失に起因する放射線による公衆への影響の程度が特に大きいものをいう。
田治見の振動アドミッタンス理論	半無限弾性体の地表面点加振解を求め、地反力分布に従い積分して基礎の変位を求める方法。なお、ここでいう「振動アドミッタンス」は、動的地盤ばねの振動数依存成分の逆数で動的地盤柔性に相当する。
建屋－地盤の相互作用	地震時に建屋と地盤がお互いに影響を及ぼしあう効果。
弾性限界	施設各部に地震力が作用したときに弾性を保つ限界点。
弾性設計用地震動	基準地震動との応答スペクトルの比率が、目安として0.5を下回らないような値で、工学的判断に基づいて設定された地震動をいう。
等価線形解析法	構造材料や地盤材料の非線形挙動を等価な線形材料物性値に近似して解析を行う方法。ここでは、建屋－地盤間の非線形挙動をばね要素により等価な剥離・滑り・基礎浮き上がり範囲に近似した解析も含めて等価線形解析という。
(な行)	
Newmark- β 法	時刻 n の応答結果から時刻 $n+1$ の応答を予測する方法。数値積分法の1つであり、加速度法に分類される衝撃加速度法、段階加速度法、線形加速度法、平均加速度法を1つの公式で表した方法。
粘性境界	地震応答解析モデルとして地盤を FEM 等の離散的手法でモデル化する際の地盤側方に設定する境界条件の1つ。境界部分に粘性ダンパーを設けることで波動の逸散をモデル化した境界。
Novak の方法	地盤を深さ方向にスライスした二次元平面ひずみの半無限均質地盤中の剛な円形基礎を加振したときの力と変位の関係から側面地盤ばねを求める方法。

(は行)

薄層要素法	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、深さ方向には有限要素法と同じ離散化手法を用いる方法。
半無限境界	無限に広がる地盤を有限の領域で表すために設ける境界。地震応答解析モデルとして地盤を FEM 等の離散的な手法でモデル化する場合、エネルギー伝達境界や粘性境界等が用いられる。
ひずみエネルギー比例型減衰	固有値解析結果を用いて算定するひずみエネルギーに比例するとした減衰。
非線形解析法	構造材料や地盤材料の非線形挙動を試験結果等に基づいた応力-ひずみ関係に収束するように解析を行う方法。ここでは、建屋-地盤間の非線形挙動をジョイント要素により解析する方法も含めて非線形解析法という。
複素減衰	振動数によらず一定の減衰を与えるモデルで、剛性と減衰をまとめて複素数で表す減衰。
付着力	基礎と底面地盤間に作用する引張強度。

(や行)

床応答加速度スペクトル	建屋の地震応答解析により得られた床位置での節点の加速度時刻歴波形から計算された応答スペクトル。
-------------	---

(ら行)

離散的方法	建屋の周辺地盤を有限要素法や境界要素法、薄層要素法等で離散化して直接地盤をモデル化する方法。
レーリー減衰	質量マトリクス \mathbf{M} と剛性マトリクス \mathbf{K} にそれぞれ係数を乗じてその和で表した減衰

1. 序論

1.1 研究の背景

1.1.1 国内の規制基準

平成 25 年 7 月に施行された「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」(2013)⁴ (平成 25 年原子力規制委員会規則第 5 号。以下「設置許可基準規則」という。) の第 4 条第 3 項では、「耐震重要施設は、その供用中に当該耐震重要施設に大きな影響を及ぼすおそれがある地震による加速度によって作用する地震力に対して安全機能が損なわれるおそれがないものでなければならない。」と規定している。当該規定は「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」(2013)¹ (平成 25 年 6 月 19 日原子力規制委員会決定。以下「設置許可基準規則の解釈」という。) で「別記 2 のとおりとする。」とされ、別記 2 の 7 に、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。」、「基準地震動による地震力の算定に当たっては、地震応答解析手法の適用性及び適用限界等を考慮の上、適切な解析法を選定するとともに、十分な調査に基づく適切な解析条件を設定すること。」及び「地震力の算定過程において建物・構築物の設置位置等で評価される入力地震動については、解放基盤表面からの地震波の伝播特性を適切に考慮するとともに、最新の科学的・技術的な知見を踏まえて、その妥当性が示されていること。」を求めている。

これらの規定に関して、耐震設計の厳格な妥当性確認に活用することを目的として策定した「耐震設計に係る工認審査ガイド」(2013)² (平成 25 年 6 月 19 日原子力規制委員会決定) では、「2.3 設計用地震力の算定」の【審査における確認事項】の(1)において、「S クラスの施設に対する、基準地震動 S_s による地震力は、基準地震動 S_s を用いて、水平 2 方向及び鉛直方向について適切に算定していること。」とし、その設定の考え方を確認することとしている。また、「3.4.1 地震応答解析手法及び地震応答解析モデル」の【確認内容】の(1)の③において、「地震応答解析手法の設定に当たっては、手法の適用性、適用限界等を考慮のうえ、適切な手法を選定すること。ここで、地震応答解析手法及び地震応答解析モデルの妥当性の検討においては、地震観測記録や精緻・詳細な解析に基づく検討結果等に基づいて妥当性の検討及び評価を行っていること。」を求めている。(2)の①の c)においても、「建物・構築物の地震応答解析モデルにおいては、水平方向及び鉛直方向の地震入力時の建物・構築物の現実的な振動性状や応答性状を適切に表現できるものであること。」とし、また、d)においても、「建物・構築物の地震応答解析モデルの現実的な剛性評価が振動性状及び応答性状に及ぼす影響を把握し、必要に応じて、建物・構築物の設計地震力や機器・配管系の入力地震力について検討していること。なお、剛性算定対象における設計基準強度と実強度の関係等に留意する。」を求めている。(2)の②の c)においても、建物・構築物と

地盤との相互作用に関し「建物・構築物の埋め込み状況や配置の実状を考慮した相互作用効果への影響について検討していること。なお、建物・構築物の埋め込み形状や埋め戻し部の仕様、隣接建屋、建物・構築物と地盤間の接触・剥離、基礎底面での支持地盤との付着効果等が相互作用の算定及び建物・構築物の応答結果に及ぼす影響等に留意する。」を求めている。また、「3.5.2 水平方向及び鉛直方向地震力の組合せ」の【確認内容】の(1)では、水平方向及び鉛直方向地震力の組合せについて、「なお、各方向の入力地震動の位相特性や建物・構築物の三次元応答特性により応答の同時性を考慮する必要がある場合は、各方向の各時刻歴での応答値を逐次重ね合わせる等の方法により、応答の同時性を考慮していること。」を求めている。

1.1.2 原子炉施設の地震応答解析の概要

原子炉施設のうち建屋の地震応答解析は、建屋の各部に分布している質量を床位置に集中させた質点系モデルにより、水平方向、鉛直方向それぞれ独立に解析することが一般的であり、その基本的な考え方は設置許可基準規則の解釈においても踏襲されている。しかし、設置許可基準規則の解釈において、「地震による損傷の防止」（第4条）が大幅に強化されたことにより、従来の質点系モデルによる地震応答解析だけではなく、水平2方向及び鉛直方向の地震力の組合せによって引き起こされる建屋の三次元的な応答特性が柱や梁、壁等の耐震要素に与える影響やそれら耐震要素を支持構造物とする耐震重要設備に与える影響を評価することが新たに求められるようになった。これに伴い、設置許可基準規則の解釈への適合性確認の新たな論点として、三次元 FEM モデルによる質点系モデルの妥当性確認や水平2方向及び鉛直方向に対する建屋及び機器設備への影響評価等が設置許可基準規則施行後の新規制基準適合性に係る審査の場で議論されるようになった。

1.1.3 三次元FEM解析による原子炉施設の地震応答解析に関する文献調査

三次元 FEM 解析による原子炉施設の地震応答解析の例として、土方ら（2011）⁵、Miyasaka ら（2007）⁶、Moore ら（2013）⁷、羽場崎ら（2014）⁸、田邊ら（2017）⁹等が挙げられる。

土方ら（2011）⁵は、2007年新潟県中越沖地震時に建物近傍の表層地盤において建屋と地盤の相対変位に起因すると思われる比較的大きな地盤沈下から、建屋周辺地盤の強非線形状態と建物と地盤間の剥離・滑り現象の発生を指摘している。当該論文では、これら建屋周辺の地盤変状について、地盤の逐次非線形性を考慮し、建物と地盤間にジョイント要素を接続した逐次非線形解析を行うことで、地震後の地盤変状を定性的に説明できる可能性があることを示している。

Miyasaka ら（2007）⁶は、鋼板コンクリート構造（以下「SC構造」という。）を採用した原子炉施設に対し、その構造種別を SC 構造又は鉄筋コンクリート構造（以下「RC構造」という。）と見立てた場合に質点系モデル及び三次元モデルの振動特性に与える影響について、その検討結果を述べている。当該論文では、強制加振試験によって得られた実験結

果と解析結果との比較から、質点系モデルにおいても SC 構造の主要な振動特性を捉えられるとしつつも、三次元 FEM 解析によって、より詳細な振動特性の評価や局所的な応答の評価ができる可能性があることを示している。

田邊ら (2017)⁹は、三次元 FEM モデルを用いて断面検討を行う際のクライテリア設定方法として、部材全体の各限界状態（弾性限界、機能維持限界）における各要素のびずみ状態を分析し、平均せん断ひずみと各要素の局所ひずみとの関係性を調査している。当該論文では、その分析及び調査結果から質点系モデルで考慮されるクライテリアとの関係性を整理し、各限界状態に対するクライテリアの指標案を示している。また、今後、指標案を耐震設計法として採用する上での課題として、データの蓄積と定量的な結果の信頼度の向上を指摘している。

質点系モデル及び三次元 FEM モデルによる原子炉施設の補助壁がその応答特性に影響を与える例として、東京電力ホールディングス株式会社 (2008)¹⁰（以下「東電」という。）、独立行政法人原子力安全基盤機構 (2008)¹¹（以下「JNES」という。）等が挙げられる。

東電 (2008)¹⁰は、設計時に耐震要素として考慮していなかった遮蔽壁等について、上下階に応力伝達が可能と考えられる壁を再評価し、新たに耐震要素（補助壁）として取り入れることで質点系モデルによる地震応答解析結果と観測記録との整合性が向上することを示している。

JNES (2008)¹¹は、剛性を評価する壁として耐震壁及び補助壁を考慮した三次元 FEM モデルを作成し、その地震応答解析結果が観測記録をよくシミュレートしていることを示している。

水平 2 方向及び鉛直方向の地震力が原子炉施設の応答特性に影響を与える例として、九州電力株式会社 (2014)¹²（以下「九電」という。）、日本原子力発電株式会社 (2018)¹³（以下「原電」という。）、美原ら (2015)¹⁴等が挙げられる。

九電 (2014)¹²は、川内原子力発電所 1 号機工事計画認可申請（補正）の概要に関する補足説明資料において、水平 2 方向及び鉛直方向の地震力を考慮した場合に、PWR の原子炉建屋に対し、従来の水平 1 方向及び鉛直方向の評価に加え更なる設計上の配慮の必要性が想定される部位を示している。

原電 (2018)¹³は、東海第二原子力発電所工事計画認可申請（補正）の水平 2 方向及び鉛直方向地震力の適切な組合せに関する補足説明資料において、三次元 FEM モデルによる地震応答解析結果と観測記録の比較を行っている。当該文献では、東北地方太平洋沖地震の地震観測記録において、オペフロにおける EW 方向の床応答加速度スペクトルの 10Hz 付近の増幅が見られるとし、これに対し、使用済燃料貯蔵プールを構成するウェル壁のプールゲート部による鉛直方向地震力の水平方向の振動励起の影響を指摘している。

美原ら (2015)¹⁴は、水平 2 方向入力 RC 構造の建屋に与える影響に関して、円筒型壁を対象に三次元 FEM モデルを用いた定量的な評価を行い、水平 1 方向入力による応答結果と比較することで非線形応答レベルまでの影響を検討している。当該論文では、従来

の質点系モデルで対象としている壁全体の平均せん断ひずみに着目すれば、せん断ひずみ 1000 μ 程度までの非線形レベルにおいて水平 2 方向入力による影響は小さいことを示している。

RC 材料の非線形挙動が原子炉施設の応答特性に与える例として、OECD/NEA (1996)¹⁵、前川ら (1999)¹⁶、福浦ら (1999)¹⁷、長沼ら (2000)¹⁸、栗本ら (2000)¹⁹、梅木ら (2014)²⁰等が挙げられる。

OECD/NEA (1996)¹⁵では、財団法人原子力発電技術機構 (以下「NUPEC」という。) による RC 構造の H 型断面耐震壁の振動台実験に対し、分布ひび割れモデルを用いたシミュレーション解析を複数の解析コードで行い、その結果を比較している。

前川ら (1999)¹⁶、福浦ら (1999)¹⁷は、著者らによる従来の RC 材料に対する 2 方向ひび割れモデルの再構築を行い、従来モデルや実験結果との比較を行っている。当該文献では、さらにその力学モデルを拡張した最大 4 方向の独立して交差するひび割れを有する構成則を構築し、実験結果との比較を行っている。

長沼ら (2000)¹⁸、栗本ら (2000)¹⁹は、NUPEC による RC 構造の H 型断面耐震壁の振動台実験に対し、三次元 FEM 非線形解析プログラムを使用した動的応答解析によるシミュレーション解析を行い、その結果の比較を行っている。

梅木ら (2014)²⁰は、三次元 FEM 非線形解析プログラムによる材料構成則の組合せが静的漸増解析結果及び動的応答解析結果に与える影響を検討している。当該論文では、静的漸増解析において、非線形解析プログラムによる材料構成則の組合せの影響はほとんどに表れないものの、動的応答解析において、水平力-変位関係に若干の差が表れることを示している。

建屋の減衰が原子炉施設の応答特性に与える例として、鬼塚ら (2015)²¹等が挙げられる。

鬼塚ら (2015)²¹は、異なる減衰特性を有する構造物群からなる大規模構造系の地震応答解析に適用する適切な減衰モデルが見当たらないことを踏まえ、要素別レーリー減衰を用いた減衰のモデル化方法を提案している。当該論文では、原子炉建屋と内包する原子炉圧力容器等の大型機器を集中質点でモデル化した質点系モデルに対し、提案する要素別レーリー減衰と従来の減衰モデルによる地震応答解析結果との比較を行い、ひずみエネルギー比例型減衰と比較してその誤差は小さいことを示している。

建屋-地盤の相互作用が原子炉施設の応答特性に与える影響の例として、鈴木ら (2014)²²、東電 (2016)²³、Inoue ら (2011)²⁴、猪田ら (2011)²⁵、中村ら (2011)²⁶、等が挙げられる。

鈴木ら (2014)²²は、側面地盤ばねの評価法の一つである Novak の方法 (1987)²⁷について、並進ばねの適用性に関する比較等に対し、回転ばねの適用性に関する知見が少ないことを指摘している。当該論文では、原子炉建屋を対象に地盤を FEM、建屋-地盤間にジョイント要素、建屋を質点系でモデル化した三次元 FEM モデルによる地震応答解析結果と

従来の質点系モデルによる地震応答解析結果との比較から、埋込み深さを 10m とした場合の側面地盤の回転拘束効果について、その適用性を示している。

東電（2016）²³は、柏崎刈羽原子力発電所 6 号及び 7 号炉工事計画認可申請（補正）の建屋側面地盤の回転拘束効果を考慮することの妥当性に関する補足説明資料において、防水層と地盤間の摩擦力による力の伝達可能性、剥離と土圧変動を考慮した（摩擦抵抗による）建屋拘束効果、隣接建屋や建屋周辺の詳細な地盤状況に対する側面回転ばねの適用性、Novak の方法による側面地盤ばねの円形仮定の妥当性、建屋－地盤間にジョイント要素を接続した二次元 FEM モデルによる地反力分布、建屋周辺のマンメイドロックの影響について検討を行っている。

Inoue ら（2011）²⁴は、隣接建屋が床応答スペクトルに与える影響について、埋込みの深い軟岩系の敷地に立地する BWR の原子炉建屋を対象に観測記録の再現解析を行った結果から、建屋周辺の表層土の沈下が顕著な場合において、その影響が大きくなる可能性を指摘している。

猪田ら（2011）²⁵、中村ら（2011）²⁶は、原子炉施設周辺の地盤の不整形性や周辺建屋の隣接効果が原子炉建屋の応答特性に与える影響について、建屋－地盤連成系の三次元 FEM モデルによる地震応答解析を行い、地盤の不整形性を考慮することで基礎入力動及び建屋の応答が若干低減すること、隣接建屋による基礎入力動及び建屋応答への影響はほとんどみられないことを示している。

原子炉施設内部の原子炉格納容器及び原子炉圧力容器等の大型機器のモデル化がその応答特性に影響を与える例として、JNES（2008）¹¹等が挙げられる。

JNES（2008）¹¹は、建屋－大型機器を連成させた多軸質点系モデルによる観測記録のシミュレーション解析結果から、質量の大きい設備を建屋モデルに連成した場合と連成しない場合の中間階の床応答スペクトルの比較を行い、両者の結果に相違がほぼ見られないことから、これら大型機器のモデル化が建屋の応答特性に与える影響はほとんどないことを示している。

原子炉施設に適用する有限要素タイプの違いがその応答特性に影響を与える例として、崔ら（2017）²⁸等が挙げられる。

崔ら（2017）²⁸は、適用する有限要素タイプの違いによって生じる応答のばらつきの定量化と統計的な分析を行うため、原子炉施設の建屋モデルを質点系、シェル要素、ソリッド要素でモデル化し、断層モデルに基づいて評価したハザード適合波による地震応答解析結果から、これらモデル化手法の違いが建屋応答に与える影響を評価している。

原子炉施設に適用するメッシュサイズがその応答特性に与える影響に着目した例として、土方ら（2010）²⁹、三菱重工業（2011）³⁰（以下「MHI」という。）等が挙げられる。

土方ら（2010）²⁹は、2007 年新潟県中越沖地震における柏崎刈羽原子力発電所 5 号機原子炉建屋の三次元挙動を有限要素法によりシミュレーション解析するため、建屋及び地盤を FEM で連成させた解析モデルを用いて検討を行っている。当該論文では、解析の目的を

壁の応力分担を知ることとしているため、建屋のメッシュサイズはやや粗く、階高に対して2分割、平面に対して20×20分割としている。また、地盤のメッシュサイズは、高振動数側の解析対象振動数を10数Hzとしているため、せん断波とメッシュサイズから得られる固有振動数が20Hzを超えるように約5mとしている。

MHI (2011)³⁰は、建屋－地盤の相互作用を考慮した地震応答解析における三次元FEMモデルの作成方針において、使用するメッシュサイズの考えを述べている。当該報告書では、三次元FEMモデルのメッシュサイズについて、建屋の動的な応答と建屋－地盤の相互作用の影響を考慮し、振動数が70Hzまでのせん断波を透過するメッシュサイズとしてその最大値を最小波長の1/5以下に設定する方針を示している。

これら調査事例は、地盤を地盤ばね等の簡易な手法でモデル化し、建屋のみを立体的にモデル化した三次元FEMモデルや地盤を有限要素法等の手法で立体的にモデル化し、建屋を簡易な質点系でモデル化した三次元FEMモデル、又は地盤及び建屋を有限要素法等で詳細かつ立体的にモデル化した三次元FEMモデル等であった。モデル化対象は、硬岩系の敷地に立地するPWRの原子炉施設の建屋や軟岩系の敷地に立地するBWRの原子炉施設の建屋を対象としたものが多いものの、仮想の建屋等を対象とした事例も見られた。入力地震動は、おおむね建屋ひずみレベルで弾性範囲をやや上回る程度までの応答スペクトル波や観測記録波等の波形であったが、それらを係数倍して終局状態まで検討した事例もあった。

以上の調査結果より、三次元FEMモデルによる建屋地震時挙動評価に関して、精緻な推定とまではいかないまでも一定程度の知見が既往の研究等により蓄積されていることを確認した。しかし、三次元FEMモデルによる建屋地震時挙動を精度良く評価するためには、建屋の応答特性に影響を及ぼす可能性の高い因子を文献調査等から同定し、その傾向を感度解析等の手法により分析した上で、原子力発電所の敷地内で記録された実観測波によって実建屋及び実地盤の挙動からその適用性を確認することが必要になる。特に地盤及び建屋を有限要素法等の離散的な手法で詳細かつ立体的にモデル化した三次元FEMモデルによる精緻な検討が望まれるものの、これらモデルによる地震応答解析は、扱うモデル規模が大きくなるため、解析に要する時間や労力等の計算コストが高く、既往の研究においても限られた技術的知見しか蓄積されていない。このため、このような精緻化された地震応答解析の技術的知見を蓄積する必要性は極めて高いと言える。

1.2 研究の目的

上記の研究の背景及びこれまでの審査の論点も踏まえ、本研究では、建屋の地震時挙動の精緻な推定に資する技術的知見を取得することを目的に、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、文献調査による同定を行い、これら同定した因子をパラメーターとした感度解析からその影響を分析した。また、上記感度解析で得られた技術的知見に対し、地震観測記録の再現解析から、当該影響因子のモデル化の妥当性を考察した。

本 NRA 技術報告では、上述の研究で得られた三次元 FEM モデルの作成及び解析に係る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本文及び付録に整理した。これら留意点は、水平 2 方向及び鉛直方向の地震力の組合せ等に関する審査において、その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が期待される。

1.3 報告書の構成

本 NRA 技術報告は、図 1.1 に示すように、第 1 章（序論）、第 2 章（研究の概要）、第 3 章（地震応答解析の基本方針）、第 4 章（地震応答解析モデルの作成）、第 5 章（地震応答解析結果）、第 6 章（考察）、第 7 章（結論）及び付録で構成される。

第 1 章では、本研究の序論として、研究の背景、研究の目的及び本 NRA 技術報告の構成を説明する。

第 2 章では、本研究の概要として、研究を進めていく上での手段と適用範囲、研究対象とする原子炉施設、考察を行う上での研究の着眼点及び地震応答解析による研究の方法を説明する。

第 3 章では、三次元 FEM モデルによる地震応答解析として、その手法の選択や解析モデルの設定、入力地震動の評価やその作成方法並びに水平方向及び鉛直方向の地震応答解析結果の組合せ方法に関する基本方針を説明する。

第 4 章では、第 3 章の基本方針に基づき作成した地震応答解析モデルとして、感度解析で使用した地震応答解析モデルと再現解析で使用した地震応答解析モデルを説明する。また、主要な影響因子と各地震応答解析モデルの関係を示す。

第 5 章では、地震応答解析結果として、感度解析で実施した地震応答解析と再現解析で実施した地震応答解析の結果を説明する。

第 6 章では、第 2 章の研究の着眼点で述べた影響因子が、原子炉建屋の地震時挙動に与える影響を考察する。

第 7 章では、本研究で得られた成果を示す。

付録 1 から付録 3 では、本文記載以外の影響因子による地震応答解析結果、三次元 FEM モデルによる地震応答解析上の留意点、質点系モデルにおける側面回転ばねの適用範囲及び適用条件に関する考察を示す。

本 NRA 技術報告では、2.1 に示す委託事業により得られた三次元 FEM モデルの入力データ及びその解析結果³を第 4 章の地震応答解析モデル、第 5 章の地震応答解析結果、第 6 章の考察、付録 1 の地震応答解析結果で使用した。また、同事業で得られた技術的基礎に相当する知見を付録 2 の三次元 FEM モデルによる地震応答解析上の留意点で活用した。

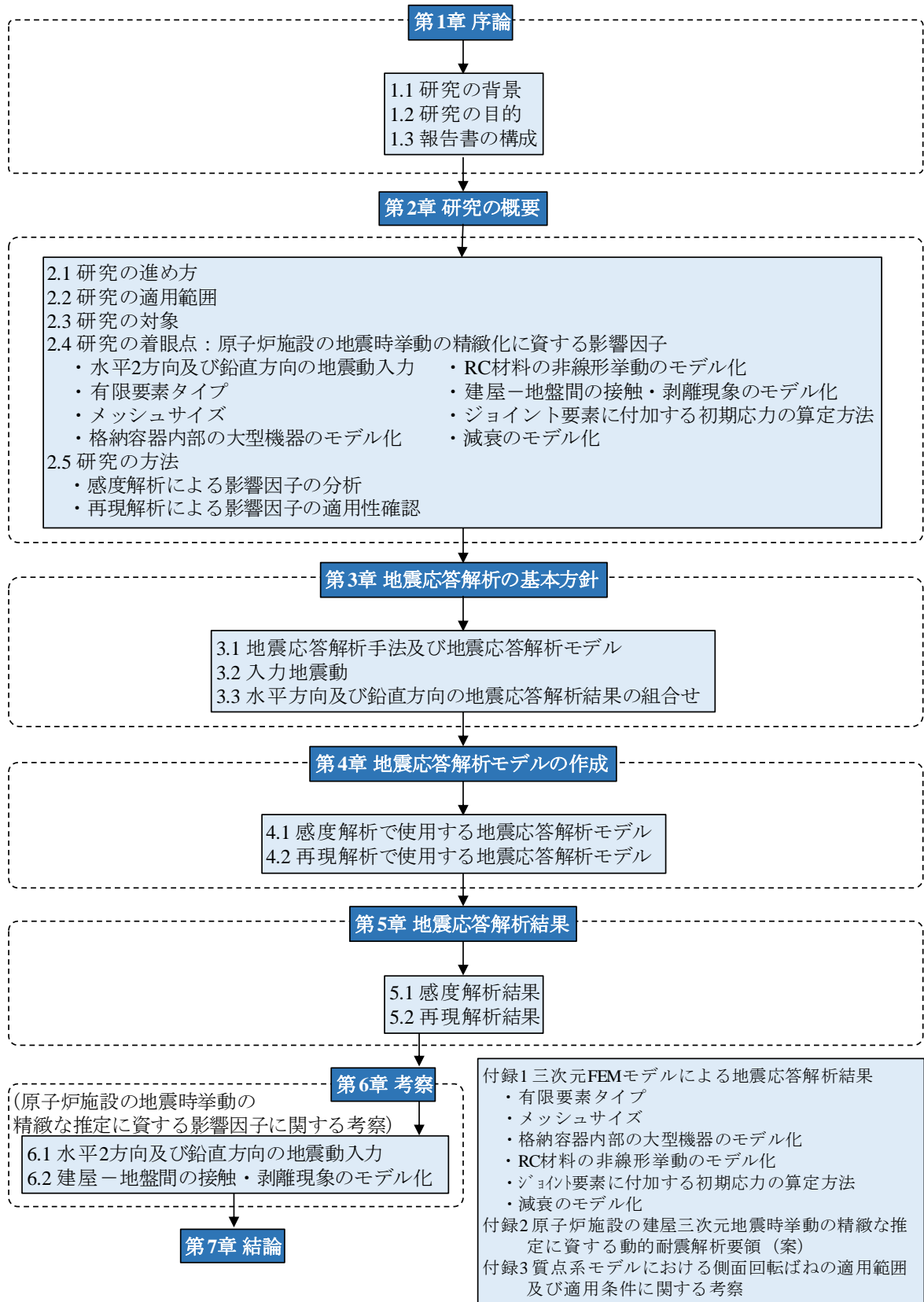


図 1.1 報告書の構成

Fig. 1.1 Overall framework of this report

2. 研究の概要

2.1 研究の進め方

本研究では、三次元 FEM モデルによる原子炉施設の地震応答解析から、建屋地震時挙動の精緻な推定に資する技術的知見を取得するに当たり、平成 29 年度から令和 2 年度までの 4 ヶ年計画で実施している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」を立案し、関連する一部業務を「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）事業」として国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（以下「JAEA」という。）に委託した。本委託事業では、施設・設備のフラジリティ評価手法の精度向上を目的に、原子炉建屋を対象とした三次元 FEM モデルによるモデル化因子の影響評価及びフラジリティ評価手法の整備を実施した。

本研究を進めるに当たって筆者らは、上述の委託事業成果報告書³に記載された解析結果等を引用するとともに、委託事業より得られた三次元 FEM モデルの入力データを基に委託事業とは異なる解析手法の地震応答解析モデルを作成した。これら委託事業より得られた三次元 FEM モデルの入力データ等の知的財産権の利用に関し、筆者らは委託事業契約書に則った利用許諾に係る申請を JAEA に行い、その利用許諾を得た。

上述の委託事業より得られた入力データ³は、伊藤忠テクノソリューションズ社製の FINAS/STAR³¹による時間領域の解析を対象とした地盤有限要素法（以下「地盤 FEM」という。）による三次元 FEM モデルであった。これに対し、筆者らは、委託事業で得られた解析結果³との比較の観点から、委託事業とは異なる解析手法として、一般に市販されている汎用解析プログラムのうち、海外での適用実績が比較的豊富な GP テクノロジー社製の ACS SASSI³²を採用し、周波数領域の解析を対象とした地盤薄層要素法（以下「地盤 TLEM」という。）による三次元 FEM モデルを作成した。

2.2 研究の適用範囲

本研究では、想定する主な解析対象を原子炉施設とし、特に、施設の主たる構造を RC 造とした建屋に限定した。また、解析の適用範囲として、建屋のひずみレベルが弾性範囲をやや上回る範囲までの原子炉施設の地震応答解析を想定しており、建屋地震時挙動の推定の精緻化の観点から建屋応答及び床応答を適切に解析することを念頭に研究を行った。よって、地震動以外の外力を対象とした解析は本研究の適用範囲から除外するものとし、土木構造物、機器・配管系を対象とした地震応答解析についても、本研究の適用範囲から除外した。

2.3 研究の対象

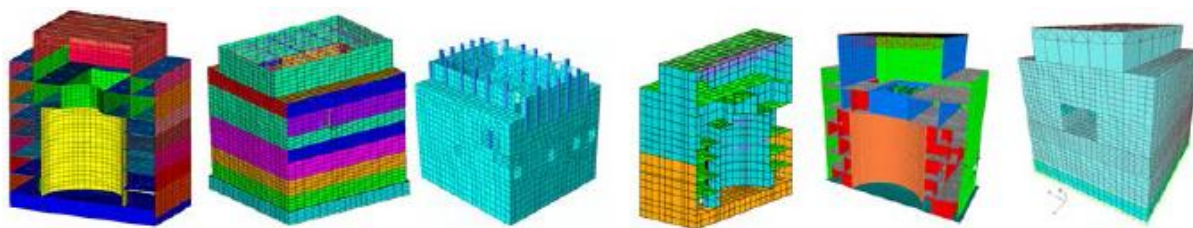
本研究では、原子炉施設を対象にした三次元 FEM モデルによる地震応答解析を行うに当たり、耐震重要度の観点から、耐震 S クラスに分類される原子炉建屋を代表建屋として選定した。また、委託事業で得られた技術的知見³及び公開されている情報量の多さから、過去に IAEA の Kashiwazaki-Kariwa Research Initiative for Seismic Margin Assessment (KARISMA) で国際的なベンチマーク解析³³の対象となった図 2.1 に示す原子炉建屋（以下「KARISMA-RB」という。）を参考に地震応答解析モデルを作成した。このとき、筆者らにおいては、委託事業より得られた時間領域の三次元 FEM モデルの入力データ³を基に第 4 章に示す周波数領域の地震応答解析モデルを作成した。

2009 年から 2012 年にかけて行われた KARISMA ベンチマーク解析³³では、世界中の 10 を超える国と地域からおよそ 20 のチームが参加し、以下に示す 3 段階の評価が行われた。

³⁴

- Phase I : Modeling, static and modal analyses, soil column analyses
- Phase II : Response analyses of the structure and equipment during the NCOE earthquake
- Phase III : Assessment of the seismic margin by multiplying the seismic level

しかし、2 段階目のシミュレーション解析による結果は、参加チーム間のばらつきが大きく、多くの結果が観測記録を過大評価する傾向にあったことが報告されている。³³



出典) IAEA, Review of Seismic Evaluation Methodologies for Nuclear Power Plants Based on a Benchmark Exercise, IAEA TECDOC No. 1722, (2013)³³

図 2.1 IAEA で過去に国際的なベンチマーク解析の対象となった原子炉建屋の三次元 FEM モデルの作成例

Fig. 2. 1 Modeling example of 3D-FEM reactor buildings in the IAEA International Benchmark Exercise

2.4 研究の着眼点：原子炉施設の地震時挙動の精緻な推定に資する影響因子

本研究では、原子炉施設の地震時挙動の精緻な推定に資する影響因子について、これまでの審査の論点も踏まえたより精度の高い技術的根拠を取得するため、委託事業を通して得られた技術的知見³を基に、以下に示す影響因子を同定し、本研究における研究の着眼点としてその方針に従った考察を行った。

2.4.1 水平2方向及び鉛直方向の地震動入力

水平2方向及び鉛直方向の地震動入力については、それら地震力の組合せが原子炉施設の応答特性に影響を与える可能性が指摘されており¹²、工事計画認可申請に係る審査の場でもその影響が確認されている。しかし、これら既往の審査は、川内原子力発電所等の比較的岩盤の硬い硬岩系の敷地に立地するPWRの原子炉建屋で先行しており、軟岩系の敷地に立地するBWRの原子炉建屋を対象にした審査実績は未だ限られているのが現状である。軟岩系の敷地に立地するBWRの原子炉建屋は、硬岩系の敷地に立地する建屋に比して複雑な建屋—地盤連成系の応答性状になっている可能性が高く、水平2方向及び鉛直方向の地震力の組合せが建屋の耐震性に与える影響がPWRの原子炉建屋のそれと比べ大きい場合がありうる。よって、本研究では、水平2方向及び鉛直方向の地震力の組合せがBWRの原子炉建屋の耐震安全性及び床応答に与える影響を検討するため、水平1方向入力時の応答と水平2方向及び鉛直方向入力時の応答の増分比率を計算し、その影響を考察した。また、得られた増分比率から、水平2方向及び鉛直方向の地震力の組合せが床応答加速度スペクトルに与える影響についても併せてその影響を考察した。

鉛直方向の地震動入力による水平方向の振動励起については、東海第二原子力発電所原子炉建屋オペフロにおいて、プールゲート部の鉛直方向地震力による水平方向の振動励起に起因した床応答加速度スペクトルの10Hz付近の増幅が確認されており¹³、同型の原子炉建屋において、同様の振動励起が生じている可能性がある。よって、本研究では、鉛直方向の地震動入力による水平方向の振動励起がBWRの原子炉建屋の応答特性に与える影響を評価するため、鉛直方向入力時の水平2方向の最大応答加速度を抽出し、その影響を考察することとした。また、得られた最大応答加速度から、鉛直方向入力時の水平方向の振動励起が床応答加速度スペクトルに与える影響についても併せてその影響を考察した。

2.4.2 有限要素タイプ

有限要素タイプについては、使用する有限要素タイプによって解析精度が異なることが指摘されており²⁸、また、解析プログラムが提供する要素の定式化によって同じ要素間でも解析精度が異なることから、解析の目的や解析すべき現象に応じた要素が適切に選択されているか感度解析等で確認を行うことが望ましい。よって、本研究では、有限要素タイプの違いがBWRの原子炉建屋の応答特性に与える影響を評価するため、使用する有限要素タイプをシェル要素及びソリッド要素とした場合の固有値解析及び静的解析から、その

影響を考察した。

2.4.3 メッシュサイズ

メッシュサイズについては、使用するメッシュサイズによって解析精度が異なることが指摘されており^{29, 30}、解析の目的や解析すべき現象に応じたメッシュサイズが適切に選択されているか感度解析等で確認を行うことが望ましい。よって、本研究では、メッシュサイズの違いが BWR の原子炉建屋の応答特性に与える影響を評価するため、使用するメッシュサイズをパラメーターとした地震応答解析から、その影響を考察した。

2.4.4 格納容器内部の大型機器のモデル化

格納容器内部の大型機器のモデル化については、多軸質点系モデルにおいて、そのモデル化の影響はほとんどないということが示されている¹¹。しかし、ペDESTALや原子炉圧力容器等の大型機器については、機器接合部付近で局所的に面外方向の応答が卓越し建屋全体の応答に影響を及ぼすことも考えられることから、これら機器の影響が無視できない場合はその影響を感度解析等で確認することが望ましい。よって、本研究では、これらモデル化の違いが BWR の原子炉建屋の応答特性に与える影響を評価するため、大型機器のモデル化方法をパラメーターとした地震応答解析から、その影響を考察した。

2.4.5 RC材料の非線形挙動のモデル化

RC 材料の非線形挙動のモデル化については、RC 造耐震壁を対象とした種々の構成則が提案されている^{15, 16, 17, 18, 19, 20}。これら非線形性を考慮した解析においては、RC 材料や部材の構成則及び剛性の設定方法が解析精度を左右することになるため、適切な構成則やスケルトンカーブが選択されているか感度解析等で確認を行うことが望ましい。よって、本研究では、RC 材料の非線形挙動のモデル化の違いが BWR の原子炉建屋の応答特性に与える影響を評価するため、構成則等をパラメーターとした地震応答解析から、その影響を考察した。

2.4.6 建屋－地盤間の接触・剥離現象のモデル化

建屋－地盤間の接触・剥離現象のモデル化については、地盤沈下による建屋周辺地盤の強非線形状態との関係が指摘されており⁵、Novak の方法による回転ばねの適用性²³と相まって、設置変更許可申請に係る審査の場でその影響が確認されている。よって、本研究では、建屋－地盤間の接触・剥離現象が BWR の原子炉建屋の応答特性に与える影響を評価するため、接触・剥離現象を影響因子とした感度解析の結果から、当該因子が建屋の耐震安全性及び床応答に与える影響を分析した。また、当該因子のモデル化の妥当性を確認するため、地震観測記録の再現解析の結果から、当該因子が建屋の耐震安全性及び床応答に与える影響を分析するとともに、接触・剥離現象のモデル化の適用性を考察した。また、

質点系モデルにおける側面地盤の回転拘束効果と三次元 FEM モデルにおける側面地盤の回転拘束効果との関係性を評価するため、地下外壁に作用する地震時増分土圧と静止土圧の関係から、三次元 FEM モデルにおける接触・剥離範囲を計算し、それらの範囲を質点系モデルの側面地盤の接続範囲に反映・解析することで、当該因子が建屋の耐震安全性及び床応答に与える影響を分析するとともに、その適用性を考察した。

2.4.7 ジョイント要素に付加する初期応力の算定方法

建屋－地盤間にジョイント要素を接続し非線形解析を行う場合、建屋自重等の常時作用する荷重に対して初期応力を算定する必要がある²⁶。このジョイント要素に付加する初期応力の算定方法については、建屋周辺地盤のモデル化の程度によって建屋の応答に影響を及ぼす可能性が栗本ら³⁵によって指摘されており、建屋の埋め込みや地盤状況、周辺建屋の配置等の実状に応じて感度解析等で確認を行うことが望ましい。よって、本研究では、ジョイント要素に付加する初期応力の算定方法の違いが BWR の原子炉建屋の応答特性に与える影響を評価するため、建屋周辺地盤のモデル化をパラメータとした地震応答解析から、その影響を考察した。

2.4.8 減衰のモデル化

減衰のモデル化については、レーリー減衰を使用したことによる大規模構造系の地震応答解析結果への影響が指摘されており²¹、感度解析等によって適切なパラメータが設定されていることを確認しておくことが望ましい。よって、本研究では、減衰のモデル化の違いが BWR の原子炉建屋の応答特性に与える影響を評価するため、減衰モデルをパラメータとした地震応答解析から、その影響を考察した。

2.5 研究の方法

本研究では、三次元 FEM モデルによる原子炉建屋の時間領域及び周波数領域の地震応答解析を行うに当たり、まず、原子炉建屋の応答特性に比較的大きな影響を及ぼす可能性のある影響因子を 2.4 のとおり同定した。これら同定した影響因子に対し、本研究では、基準となる解析ケースを解析ごとに定め、これら因子をパラメーターとした感度解析との比較から、各因子が原子炉建屋の応答特性に与える影響を評価した。また、感度解析で対象とした主要な影響因子に対し、地震観測記録の再現解析を行い、三次元 FEM モデル上でのモデル化手法の妥当性を確認し、その影響を評価した。

本節では、これら感度解析及び再現解析で設定したパラメーターの条件やそれぞれの解析で使用した地震応答解析モデル、また、主要な影響因子と解析ケースの関係、解析結果の評価の方法、筆者らの解析と委託事業で実施した解析の関係について、その概要を説明する。

2.5.1 感度解析による影響因子の分析

感度解析による影響因子の分析では、各因子が原子炉建屋の応答特性に与える影響を一般的な傾向として評価することを念頭に、以下に示す条件下で解析を実施した。

(1) 建屋条件の設定方法

原子炉建屋の建屋形状は、KARISMA-RB と同一の構造図等の図面から作成するものとし、委託事業により得られた三次元 FEM モデルの入力データ³を基にその条件を設定した。

原子炉建屋の剛性評価は、KARISMA-RB と同一の剛性評価範囲図から評価を行うものとし、委託事業により得られた三次元 FEM モデルの入力データ³を基にその条件を設定した。

(2) 地盤条件の設定方法

原子炉建屋の支持地盤は、表層の比較的軟らかい地盤によって建屋に複雑な応答が生じることを極力排除するため、KARISMA-RB で対象とした地盤条件とは異なる標準的な地盤物性を有する岩盤とし、BWR の原子炉建屋のせん断波速度 V_s の調査結果からその条件を筆者ら独自に設定した。地盤内部の構成についても、KARISMA-RB で対象とした地盤条件とは異なる、表層部分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。

(3) 入力地震動の設定方法

入力地震動は、「基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド」³⁶（平成 25 年 6 月 19 日原子力規制委員会決定）の「3.3.1 応答スペクトルに基づく地震動評価」の(1)の①において規定される地震動評価に基づき、距離減衰式に基づく経験的方法によりその条件を筆者

ら独自に設定した。このとき、地震動の入力レベルは、KARISMA-RB で対象とした敷地の基準地震動 S_s 相当となるように設定を行った。

2.5.2 再現解析による影響因子の適用性確認

再現解析による影響因子の適用性確認では、感度解析で対象とした影響因子について、三次元 FEM モデル上での設定方法の妥当性を確認することを念頭に、以下に示す条件下で解析を実施した。

(1) 建屋条件の設定方法

感度解析と同様の設定とし、委託事業により得られた三次元 FEM モデルの入力データ³を基に設定した。

(2) 地盤条件の設定方法

原子炉建屋の支持地盤は、KARISMA-RB で対象とした地盤と同一とし、公開情報を基にその条件を設定した。地盤内部の構成については、KARISMA-RB で対象とした地盤と同一とし、公開情報を基に筆者ら独自に水平成層地盤の設定を行った。

(3) 入力地震動の設定方法

入力地震動は、KARISMA-RB で対象とした敷地の地震観測記録を利用するものとし、公益社団法人日本地震工学会が頒布する強震データ³⁷のうち、2007 年に観測された新潟県中越沖地震本震記録 (M6.8) を用いた。

2.5.3 地震応答解析モデルと解析ケース

地震応答解析モデルは、2.4 で同定した主要な影響因子ごとに作成を行い、それぞれに対して解析ケースを設定した。本項では、これら地震応答解析モデルと主要な影響因子の関係、地震応答解析モデルと解析ケースの関係、筆者らの解析及び委託事業における解析の関係並びに本 NRA 技術報告で対象とした解析ケースについて、その概要を説明する。

本研究では、以下に示す影響因子を感度解析のパラメーターとして同定し、それぞれの因子の特性に合わせた地震応答解析モデルを作成した。表 2.1 に地震応答解析モデルと解析ケースの関係を示す。

(感度解析で対象とする影響因子)

- 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

本研究では、①で使用する地震応答解析モデルを基準モデルとして設定し、その他の影響因子については、①の地震応答解析モデルを基準にその現象に応じたモデルの改良を行った。これら検討から得られた成果の本 NRA 技術報告への取りまとめに当たっては、上記影響因子の中から、過去、設置許可基準規則の解釈¹で新たに評価が求められるようになった①の因子及び土方ら（2011）の論文⁵でその影響が指摘された⑥の因子を本解析条件下における主たる影響因子として抽出し、第 5 章に示す感度解析及び再現解析の対象として筆者らの解析結果及び委託事業により得られた解析結果³を本文にまとめた。また、それ以外の因子については、委託事業より得られた解析結果³を基にその技術的知見を付録 1 にまとめた。

2.5.4 地震応答解析結果の評価

三次元 FEM モデルによる原子炉建屋の地震応答解析結果は、各階に設けられた代表節点からその応答特性を評価した。本項では、地震応答解析結果の評価に使用した節点の位置や得られた解析結果の評価方法について、その概要を説明する。

(1) 地震応答解析結果を評価する代表節点の位置

図 2.2 に地震応答解析結果を評価する代表節点の例を示す。代表節点は、各階の外壁コーナー部の 4 点及びその中間の 4 点並びに中央部の 4 点の計 12 点とし、屋上階を除く全ての階に設定した。ただし、吹き抜けや床開口等により代表節点位置に地震応答解析モデルの節点が存在しない場合は、当該節点を代表節点から除外した。なお、屋上階については、公開情報に当該階の屋根スラブに関する情報が確認できなかったため、本研究の評価対象から除外した。

(2) 観測記録と比較する地震応答解析モデルの節点位置

本研究で用いる観測記録は、地震時に基礎スラブ上及び 3 階床スラブ上で観測した地震観測記録とした。地震観測記録と比較する地震応答解析モデルの節点位置は、それぞれ地震計設置位置近傍の節点とした。ただし、3 階床スラブ上で観測された地震観測記録については、地震応答解析モデルで考慮する建屋剛性に、実際には耐震要素として機能する雑壁等を考慮していない影響も想定されたことから、隣接する外壁直下の節点を用いた。

(3) 地震応答解析結果の評価方法

本研究で対象とする地震応答解析結果の評価項目を以下に示す。

(本研究で対象とする地震応答解析結果の評価項目)

- ① 伝達関数
- ② 最大応答加速度
- ③ 床応答加速度スペクトル (減衰定数 $h = 5\%$)

このとき、伝達関数は、入力地震動に対する応答波形の比率として評価した。

表 2.1 地震応答解析モデルと解析ケースの関係

Table 2.1 Relationship between seismic analysis models and analysis cases

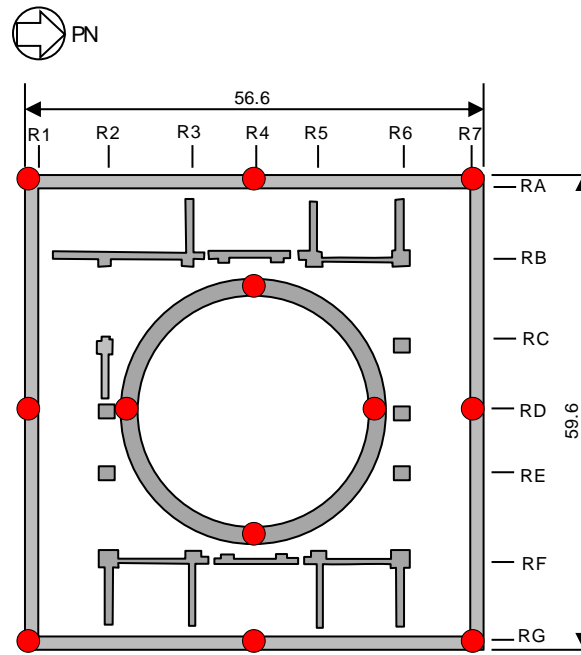
解析の種類	影響因子	解析ケース	解析担当	解析プログラム	地震応答解析手法	建屋のモデル化手法	地盤のモデル化手法	有限要素タイプ	メッシュサイズ	大型機器	非線形材料物性	剥離・接触	ジョイント要素	浮き上り	減衰	境界条件	地盤条件	地震動	入力方向 NS EW UD	評価方法	逐次重ね合せ	備考	
感度解析	水平2方向及び鉛直方向の地震動入力	C1-1	JAEA	FINAS/STAR	時刻歴	三次元	FEM	建屋)シェル基礎)リット	標準	等分布荷重	無視	完全固着	—	無視	レリー減衰	埋込み有(4面埋込み)	標準地盤サイト	耐専スベクトル	○ ○ ○	・伝達関数 ・加速度・FRS	考慮	基準モデル(FINAS)	
		C1-2	SNRAAR	ACS SASSI	周波数	三次元	薄層要素法	建屋)シェル基礎)リット	標準	等分布荷重	無視	完全固着	—	無視	複素減衰	埋込み有(4面埋込み)	標準地盤サイト	耐専スベクトル	○ ○ ○	・伝達関数 ・加速度・FRS	考慮	基準モデル(SASSI)	
	有限要素タイプ	C2-1	JAEA	FINAS/STAR	静的解析 固有値解析	三次元	基礎固定	建屋)シェル基礎)ソリッド	標準	等分布荷重	無視	—	—	—	—	—	—	—	—	○ — —	・固有振動数/モード ・ひずみ	—	部分モデル
		C2-2	JAEA	FINAS/STAR	静的解析 固有値解析	三次元	基礎固定	建屋)リット基礎)リット	標準	等分布荷重	無視	—	—	—	—	—	—	—	—	○ — —	・固有振動数/モード ・ひずみ	—	部分モデル
	メッシュサイズ	C3-1	JAEA	FINAS/STAR	時刻歴	三次元	FEM	建屋)シェル基礎)リット	細かい	等分布荷重	無視	完全固着	—	無視	レリー減衰	埋込み有(4面埋込み)	標準地盤サイト	耐専スベクトル	○ ○ ○	・伝達関数 ・加速度・FRS	考慮		
	格納容器内部の大型機器のモデル化	C4-1	JAEA	FINAS/STAR	時刻歴	三次元	FEM	建屋)シェル基礎)リット	標準	三次元モデル	無視	完全固着	—	無視	レリー減衰	埋込み有(4面埋込み)	標準地盤サイト	耐専スベクトル	○ ○ ○	・伝達関数 ・加速度・FRS	考慮		
	RC材料の非線形挙動のモデル化	C5-1	JAEA	FINAS/STAR	時刻歴	三次元	FEM	建屋)シェル基礎)リット	標準	等分布荷重	考慮(非線形)	完全固着	—	無視	レリー減衰	埋込み有(4面埋込み)	標準地盤サイト	耐専スベクトル	○ ○ ○	・伝達関数 ・加速度・FRS	考慮		
	建屋-地盤間の接触・剥離現象のモデル化	C6-1	JAEA	FINAS/STAR	時刻歴	三次元	FEM	建屋)シェル基礎)リット	標準	等分布荷重	無視	表層剥離(ジョイント要素)	完全固着	初期応力方法①	考慮(ジョイント要素)	レリー減衰	埋込み有(4面埋込み)	標準地盤サイト	耐専スベクトル	○ ○ ○	・伝達関数 ・加速度・FRS	考慮	
		C6-2	SNRAAR	ACS SASSI	周波数	三次元	薄層要素法	建屋)シェル基礎)リット	標準	等分布荷重	無視	表層剥離(ばね要素)	完全固着	—	考慮(ばね要素)	複素減衰	埋込み有(4面埋込み)	標準地盤サイト	耐専スベクトル	○ ○ ○	・伝達関数 ・加速度・FRS	考慮	
	ジョイント要素に付加する初期応力の算定方法	C7-1	JAEA	FINAS/STAR	時刻歴	三次元	FEM	建屋)シェル基礎)リット	標準	等分布荷重	無視	表層剥離(ジョイント要素)	完全固着	初期応力方法②	考慮(ジョイント要素)	レリー減衰	埋込み有(4面埋込み)	標準地盤サイト	耐専スベクトル	○ ○ ○	・伝達関数 ・加速度・FRS	考慮	
減衰のモデル化	C8-1	JAEA	FINAS/STAR	周波数	三次元	FEM	建屋)シェル基礎)リット	標準	等分布荷重	無視	完全固着	—	無視	複素減衰	埋込み有(4面埋込み)	標準地盤サイト	耐専スベクトル	○ ○ ○	・伝達関数 ・加速度・FRS	考慮			
再現解析	水平2方向及び鉛直方向の地震動入力	C9-1	JAEA	FINAS/STAR	時刻歴	三次元	FEM	建屋)シェル基礎)リット	標準	等分布荷重	無視	完全固着	—	無視	レリー減衰	埋込み有(4面埋込み)	実地盤サイト	中越沖地震(観測記録)	○ ○ ○	・伝達関数 ・加速度・FRS	考慮	基準モデル(FINAS)	
		C9-2	SNRAAR	ACS SASSI	周波数	三次元	薄層要素法	建屋)シェル基礎)リット	細かい	等分布荷重	無視	完全固着	—	無視	複素減衰	埋込み有(4面埋込み)	実地盤サイト	中越沖地震(観測記録)	○ ○ ○	・伝達関数 ・加速度・FRS	考慮	基準モデル(SASSI)	
	建屋-地盤間の接触・剥離現象のモデル化	C10-1	JAEA	FINAS/STAR	時刻歴	三次元	FEM	建屋)シェル基礎)リット	標準	等分布荷重	無視	表層剥離(ジョイント要素)	完全固着	初期応力方法①	考慮(ジョイント要素)	レリー減衰	埋込み有(4面埋込み)	実地盤サイト	中越沖地震(観測記録)	○ ○ ○	・伝達関数 ・加速度・FRS	考慮	
		C10-2	SNRAAR	ACS SASSI	周波数	三次元	薄層要素法	建屋)シェル基礎)リット	細かい	等分布荷重	無視	表層剥離(ばね要素)	完全固着	—	考慮(ばね要素)	複素減衰	埋込み有(4面埋込み)	実地盤サイト	中越沖地震(観測記録)	○ ○ ○	・伝達関数 ・加速度・FRS	考慮	

注 1) 赤字は、基準モデルと異なる解析条件を示す。

注 2) 基準モデルは、解析プログラムごと、感度解析・再現解析ごとに設定した。

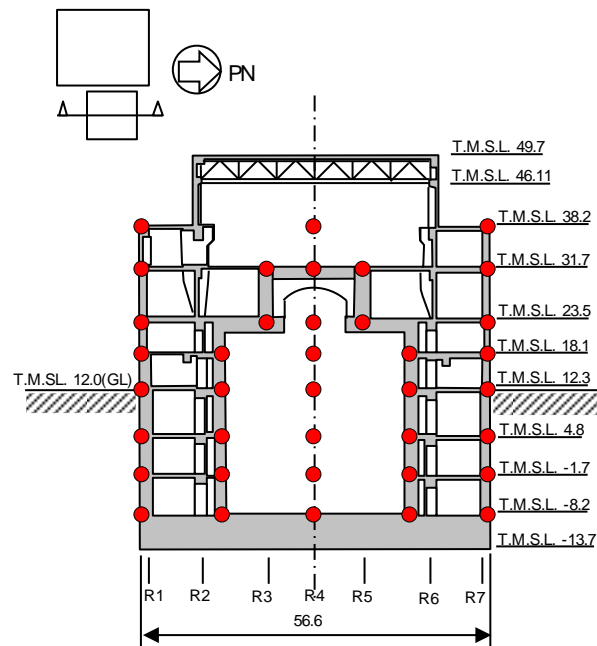
注 3) 赤枠は、本 NRA 技術報告の本文で対象とした解析ケースを示す。

● : 代表節点



(1) 地下3階平面図

● : 代表節点



(2) NS 断面図

注) 本図は、IAEA (2013) ³³ を基に筆者らが一部加筆・修正を加え作成した。

図 2.2 地震応答解析結果を評価する代表節点の例

Fig. 2.2 Typical location of key nodes for seismic analysis results

3. 地震応答解析の基本方針

本章では、まず、三次元 FEM モデルによる地震応答解析を行う上での基本方針を示す。基本方針に基づき作成した地震応答解析モデルの概要については、第 4 章を参照されたい。

3.1 地震応答解析手法及び地震応答解析モデル

三次元 FEM モデルによる地震応答解析では、モデル化の程度に応じて床変形や壁の面外変形、建屋のねじれ挙動等の質点系モデルでは得られないより詳細な応答性状が求められる。一方で、これら解析には多くの時間や労力、コストといった有限の資源を無尽蔵に消費することも懸念され、その適用には留意すべき点が多い。このため、通常の三次元 FEM モデルによる地震応答解析では、解析の目的や解析すべき現象に応じて適切にモデル化を行うことが一般的であり、これらモデル化が解析結果に悪影響を及ぼすことがないよう事前に地震応答解析における要求事項を基本方針として定め、その影響を確認しておくことが重要となる。よって、本節では、三次元 FEM モデルによる地震応答解析を行う上での地震応答解析手法及び地震応答解析モデルの基本方針を示すとともに、以下にその概要を説明する。

3.1.1 地震応答解析手法

地震応答解析手法は、設置許可基準規則の解釈等で定める規制基準の要求事項に留意して、JEAG4601 (1991) ³⁸の規定及び既往の研究等を参考に設定した。また、本研究では、使用する解析プログラムの特性に応じて地震応答解析手法を選択するものとし、時刻歴応答解析及び周波数応答解析の 2 種類の解析手法を用いて解析結果の妥当性を確認した。

3.1.2 建屋－地盤連成系の地震応答解析モデル

建屋－地盤連成系の地震応答解析モデルは、設置許可基準規則の解釈等で定める規制基準の要求事項に留意して、JEAG4601 (1991) ³⁸の規定及び既往の研究等を参考に設定した。また、建屋－地盤連成系の地震応答解析モデルを三次元 FEM モデルで作成するに当たり、本研究では、建屋及び地盤を以下に示す有限要素法等の離散的方法でモデル化することを基本とした。

(1) 建屋の地震応答解析モデル

建屋の地震応答解析モデルは、公表されている KARISMA-RB の構造概要、平面図及び断面図並びに剛性評価範囲を参考に以下に示す設定を行った。

① 構造概要

本研究で対象とする建物は、主たる構造が RC 造（一部鉄骨鉄筋コンクリート造（以下「SRC 造」という。）及び鉄骨造（以下「S 造」という。））で、S 造陸屋根を有する屋根ト

ラスで構成される地上4階、地下3階の原子炉建屋である。平面形状は、56.6m (NS 方向) ×59.6m (EW 方向) であり、原子炉建屋基礎スラブ下端から屋根スラブ上端までの高さは63.4m で、地上からの高さは37.7m である。原子炉建屋中央部には、RC造原子炉格納容器 (以下「RCCV」という。) があり、厚さ5.5m のRC造のベタ基礎の上に設置し、原子炉建屋と一体の構造となっている。

② 代表平面図及び断面図

図3.1及び図3.2にKARISMA-RBの代表的な平面図及び断面図を示す。なお、図中のT.M.S.L.は東京湾平均海面を意味する。

③ 剛性評価範囲

図3.3にKARISMA-RBの代表的な平面における剛性評価範囲を示す。

④ 建屋のモデル化

a 有限要素タイプ

有限要素タイプは、原子炉建屋の振動性状や応答性状を現実的な建屋の応答に即して適切にモデル化することができる有限要素から選択するものとし、同一の有限要素タイプであっても適用する有限要素の種類によって異なる解析精度に留意した設定を行った。

b メッシュサイズ

メッシュサイズは、原子炉建屋の振動性状や応答性状を現実的な建屋の応答に即して適切にモデル化することができる大きさにするものとし、適用する有限要素の種類によって異なる解析精度に留意した設定を行った。

c 部材のモデル化

部材のモデル化は、原子炉建屋の剛性評価範囲に含まれる基礎、柱、大梁、壁 (耐震壁及び補助壁)、床等の主要構造部材とし、屋根トラスも含め、現実的な応答に即して適切に原子炉建屋の振動性状や応答性状を捉えるモデル化を行った。

d 接合部のモデル化

接合部のモデル化は、原子炉建屋の剛性評価範囲に含まれる基礎、柱、大梁、壁 (耐震壁及び補助壁)、床等の主要構造部材の接合部の実状を現実的な応答に即して適切に原子炉建屋の振動性状や応答性状を捉えるモデル化を行った。

e 開口部のモデル化

開口部のモデル化は、原子炉建屋の剛性評価範囲に含まれる床開口及び壁開口の大きさ

に留意するものとし、機器搬入口等の開口部の実状を現実的な応答に即して適切に原子炉建屋の振動性状や応答性状を捉えるモデル化を行った。

f 機器のモデル化

機器のモデル化は、原子炉建屋の剛性評価範囲に含まれる機器の大きさやその重要度に留意するものとし、原子炉格納容器及び原子炉圧力容器等の大型機器の実状を現実的な応答に即して適切に原子炉建屋の振動性状や応答性状を捉えるモデル化を行った。

g RC 材料の非線形挙動のモデル化

RC 材料の非線形挙動のモデル化は、原子炉建屋に作用する入力地震動の大きさやそれによって生じるせん断ひずみ、曲率の大きさに留意するものとした。また、コンクリートのせん断ひび割れや曲げひび割れ、部材のせん断破壊又は曲げ破壊等の実現象に留意するものとし、現実的な応答に即して適切に原子炉建屋の振動性状や応答性状を捉えるモデル化を行った。

h S 材料の非線形挙動のモデル化

S 材料の非線形挙動のモデル化は、原子炉建屋に作用する入力地震動の大きさやそれによって生じるせん断ひずみ、曲率の大きさに留意するものとした。また、トラスの座屈破壊やボルト接合部のせん断破壊等の実現象に留意するものとし、現実的な応答に即して適切に原子炉建屋の振動性状や応答性状を捉えるモデル化を行った。

i 減衰のモデル化

減衰のモデル化は、適用する地震応答解析手法及び大規模構造系の地震応答解析への適用性に留意するものとし、現実的な応答に即して適切に原子炉建屋の振動性状や応答性状を捉えるモデル化を行った。

⑤ 使用材料

a 構造材料

表 3.1 に原子炉建屋の構造材料を示す。本研究では、IAEA の報告書 (2013) ³³ に倣い、設計基準強度 F_c を実強度に読み替えた値を採用した。鉄筋については、設計・施工で用いられた SD35 を現行規格の SD345 と同等であると見なして、SD345 の許容応力度に読み替えた。鉄骨については、IAEA の報告書 (2013) ³³ からその使用材料が読み取れないため、材料物性値のみ記載した。

b 材料物性値

表 3.2 に原子炉建屋の使用材料の物性値を示す。本研究では、設計基準強度 F_c を実強度

に読み替えた値を用いて、日本建築学会（2005）³⁹に基づき、ヤング係数 E 及びせん断弾性係数 G を計算した。鉄筋については、鉄骨と同等の性能を有する材料物性とし、IAEA の報告書（2013）³³ で用いられた S 造屋根トラスの物性値を採用した。

c 減衰定数

表 3.3 に原子炉建屋の減衰定数を示す。

⑥ 建屋重量

表 3.4 に原子炉建屋の重量を示す。本研究では、IAEA の報告書（2013）³³ における質点系モデルの重量分布に倣い、三次元 FEM モデルの重量を設定した。三次元 FEM モデルの重量は、単位体積重量 γ 又は密度 ρ で入力するものとし、質点系モデルとの重量の差分は、各階の床レベルで調整した。このとき、質点系モデルの重量は、上階の中間位置から下階の中間位置までの重量を当該質点が負担しているとし、三次元 FEM モデルの重量の調整を行った。

(2) 地盤の地震応答解析モデル

地盤の地震応答解析モデルは、公表されている BWR の原子炉建屋設置地盤のせん断波速度 V_s の調査結果及び KARISMA-RB が対象とする地盤の調査結果を参考に以下に示す設定を行った。

① 地盤概要

a 感度解析で使用する地盤

感度解析で対象とする地盤は、地表面以深が岩盤で、BWR の原子炉建屋が立地する敷地の平均的なせん断波速度 V_s を有する一様地盤とした。解放基盤面は、地表面（T.M.S.L.+12.0m）であり、原子炉建屋基礎スラブ下端から解析モデル下端（T.M.S.L.-155.0m）までの深さはおよそ 143m である。

原子炉建屋基礎スラブ下端及び地下外壁側面には、岩盤があり、地下外壁側面との境界には防水層等が設けられていると仮定した。

b 再現解析で使用する地盤

再現解析で対象とする地盤は、表層が埋め戻し土で、その下に安田層（粘土層）、西山層（岩盤）を有する成層地盤とした。解放基盤面は、地表面（T.M.S.L.+12.0m）からおよそ 167m（T.M.S.L.-155.0m）の深さであり、 $V_s = 720\text{m/s}$ 相当の岩盤とした。

原子炉建屋基礎スラブ直下には、マンメイドロック（西山モルタル）が設けられている。また、地下外壁側面には、マンメイドロック又は埋め戻し土があり、地下外壁側面との境界には防水層等が設けられている。

② 地盤の離散化手法

地盤の離散化手法は、原子炉建屋の埋め込み形状、埋め戻し土やマンメイドロック等の仕様及びその設置状況、地盤の成層性、地盤の不整形性、周辺地盤の状況、隣接建屋の影響等に留意するものとし、地盤が建屋の応答に与える影響を現実的な応答に即して適切に原子炉建屋の振動性状や応答性状に反映することができるモデル化を行った。

③ 地盤のメッシュサイズ

地盤のメッシュサイズは、建屋－地盤連成系の振動性状や応答性状を現実的な地盤の応答に即して適切にモデル化することができるものとし、適用する矩形要素の要素辺長が耐震設計において必要とする最小波長の 1/5 以下となるようメッシュサイズに留意した設定を行った。

④ 遠方地盤の半無限境界のモデル化

遠方地盤の半無限境界のモデル化は、地盤に作用する入力地震動の波動エネルギーの無限遠方への逸散を現実的な地盤の応答に即して適切にモデル化することができるものとし、適用する地盤の離散化手法に留意した設定を行った。

⑤ 地盤物性の不均一性を考慮したモデル化

地盤物性の不均一性のモデル化は、**KARISMA-RB** が対象とする敷地の地盤調査結果及び室内調査結果に基づき現実的な地盤の応答に即して適切にモデル化することができるものとし、適用する地盤の成層性や地盤物性のばらつきに留意した設定を行った。

⑥ 地盤物性

a 感度解析で使用する地盤

表 3.5 に感度解析で使用する地盤物性を示す。感度解析で使用する地盤は、日本建築学会構造委員会 (2001) ⁴⁰が調査した **BWR** の原子炉建屋の立地する敷地の地盤条件より定めた。表 3.6 に地盤のせん断波速度 V_s の決定に用いた原子炉施設の地盤条件一覧を示す。なお、当該調査結果のうち、福島第一原子力発電所 1 号機原子炉建屋の地盤条件については、比較一覧表におけるせん断波速度 V_s の単位が他と明らかに異なることから、本研究の地盤条件の計算から除外した。また、せん断波速度 V_s 以外の地盤物性は、**KARISMA-RB** が対象とする地盤条件を参考に、その値を設定した。

b 再現解析で使用する地盤

表 3.7 に再現解析で使用する地盤物性を示す。再現解析で使用する地盤は、IAEA の報告書 (2013) ³³に基づき地盤物性を設定した。

(3) 建屋と地盤との相互作用モデル

建屋と地盤との相互作用モデルは、(1)及び(2)の方針で定めた設定及び公表されているKARISMA-RBの建屋、地盤情報を参考に以下に示す設定を行った。

① 埋め込み形状のモデル化

建屋の地盤への埋め込み形状のモデル化は、原子炉建屋の埋め込み状況や周辺建屋及び原子炉建屋にアクセスする土木構造物の配置等の実状に留意するものとし、埋め込みを考慮する範囲が建屋の応答に与える影響を現実的な応答に即して適切に原子炉建屋の振動性状や応答性状に反映することができるモデル化を行った。

② 埋め戻し土、マンメイドロック等のモデル化

埋め戻し土、マンメイドロック等のモデル化は、原子炉建屋の埋め込み状況や周辺地盤等の実状に留意するものとし、支持地盤上の表層地盤が建屋の応答に与える影響を現実的な応答に即して適切に原子炉建屋の振動性状や応答性状に反映することができるモデル化を行った。

③ 周辺地盤の不整形性のモデル化

周辺地盤の不整形性のモデル化は、原子炉建屋の埋め込み状況や周辺建屋及び地盤の配置等の実状に留意するものとし、不整形地盤が建屋の応答に与える影響を現実的な応答に即して適切に原子炉建屋の振動性状や応答性状に反映することができるモデル化を行った。

④ 周辺建屋の隣接効果のモデル化

周辺建屋の隣接効果のモデル化は、原子炉建屋の埋め込み状況や地盤状況、周辺建屋の配置等の実状に留意するものとし、周辺建屋の隣接効果等が建屋の応答に与える影響を現実的な応答に即して適切に原子炉建屋の振動性状や応答性状に反映することができるモデル化を行った。

⑤ 建屋と地盤の接触・剥離のモデル化

建屋と地盤の接触・剥離のモデル化は、原子炉建屋の埋め込み状況や地盤状況、周辺建屋の配置等の実状に留意するものとし、表層地盤の剥離・滑りが建屋の応答に与える影響を現実的な応答に即して適切に原子炉建屋の振動性状や応答性状に反映することができるモデル化を行った。

⑥ 地震時の建屋－地盤間の摩擦特性のモデル化

地震時の建屋－地盤間の摩擦特性のモデル化は、原子炉建屋埋め込み部の施工状況や地

盤状況、周辺建屋の配置等の実状に留意するものとし、また、地下外壁側面には防水層等の保護層が設けられていることを踏まえ、建屋－地盤間の摩擦特性が建屋の応答に与える影響を現実的な応答に即して適切に原子炉建屋の振動性状や応答性状に反映することができるモデル化を行った。

(4) 基礎浮き上がりを考慮した相互作用モデル

基礎浮き上がりを考慮した相互作用モデルは、(1)、(2)及び(3)で定めた設定及び公表されている **KARISMA-RB** の建屋、地盤情報を参考に以下に示す設定を行った。

① 基礎浮き上がりのモデル化

建屋の基礎浮き上がりのモデル化は、原子炉建屋の埋め込み状況や地盤状況等の実状に留意するものとし、建屋の基礎浮き上がり・滑りが建屋の応答に与える影響を現実的な応答に即して適切に原子炉建屋の振動性状や応答性状に反映することができるモデル化を行った。

② 基礎底面の付着効果のモデル化

基礎底面の付着効果のモデル化は、原子炉建屋埋め込み部の施工状況や地盤状況等の実状に留意するものとした。また、基礎と底面地盤間に均しコンクリートが設けられる等、基礎底面の付着効果を考慮する場合には、建屋の応答に与える影響を現実的な応答に即して適切に原子炉建屋の振動性状や応答性状に反映することができるモデル化を行った。

表 3.1 構造材料

Table 3.1 Structural materials

種類	部位	設計基準強度 F_c SI 単位 : N/mm^2 [工学単位 : kg/cm^2]
コンクリート	基礎スラブ	44.1 [450]
	上部構造	49.0 [500]
鉄筋	SD345 [SD35]	

注 1) コンクリートは、設計基準強度 F_c を実強度に読み替えた値を採用した。

注 2) 鉄筋は、設計・施工で用いられた SD35 を現行規格の SD345 と同等であると見なした。

表 3.2 使用材料の物性値

Table 3.2 Structural material properties

	ヤング係数 E (N/mm^2)	せん断弾性係数 G (N/mm^2)	ポアソン比 ν	単位体積重量 γ (kN/m^3)
基礎スラブ $F_c = 44.1N/mm^2$	2.90×10^4	1.21×10^4	0.20	23.5
上部構造 $F_c = 49.0N/mm^2$	3.13×10^4	1.31×10^4	0.20	24.0
鉄筋	2.05×10^5	—	—	77.0
鉄骨	2.05×10^5	7.90×10^4	0.30	77.0

注) 基礎スラブ及び上部構造の単位体積重量 γ は、RC の単位体積重量から 1.0 を減じた値とした。

表 3.3 原子炉建屋の減衰定数

Table 3.3 S Structural damping values for reactor buildings

構造種別	減衰定数 h
RC 造	5%
鉄骨造	2%

表 3.4 三次元 FEM モデルの重量分布

Table 3.4 Weight distribution for 3D-FEM models

(原子炉建屋)				(原子炉格納容器)					
階	支配高さ T.M.S.L. (m)			重量 (kN)	階	支配高さ T.M.S.L. (m)			重量 (kN)
	質点系	三次元FEM				質点系	三次元FEM		
RF	49.70	49.70	~ 43.95	39,760					
CF	38.20	43.95	~ 34.95	80,820					
4F	31.70	34.95	~ 27.60	86,110	4F	31.70	34.95	~ 27.60	93,200
3F	23.50	27.60	~ 20.80	86,400	3F	23.50	27.60	~ 20.80	158,100
2F	18.10	20.80	~ 15.20	56,460	2F	18.10	20.80	~ 15.20	104,900
1F	12.30	15.20	~ 8.55	82,650	1F	12.30	15.20	~ 8.55	203,200
B1F	4.80	8.55	~ 1.55	81,700	B1F	4.80	8.55	~ 1.55	126,500
B2F	-1.70	1.55	~ -4.95	82,900	B2F	-1.70	1.55	~ -4.95	139,500
B3F	-8.20	-4.95	~ -10.95	349,200					
基礎下	-13.70	-10.95	~ -13.70	220,300					

合計 1,991,700 kN

表 3.5 感度解析で使用する地盤物性値

Table 3.5 Soil properties for sensitivity analyses

せん断波速度 (Vs)	880 m/s
ポアソン比	0.416
単位体積重量 (γ)	19.9 kN/m ³
減衰 (h)	3 %

注) せん断波速度 Vs は、表 3.6 に示す調査結果からその値を決定した。

表 3.6 原子炉施設の振動試験と解析評価一覧 (BWR)

Table 3.6 Vibration tests and analysis results in nuclear facilities (BWR)

サイト	女川 1	福島 1-1	福島 2-1	東海 2	柏崎 6	浜岡 2(1)	浜岡 3	浜岡 4	島根 1
建屋 [炉型]	RB [BWR- Mark-I]	RB [BWR- Mark-I]	RB [BWR- Mark-II]	RB [BWR- Mark-II]	RB [ABWR]	RB [BWR- Mark-II]	RB [BWR- Mark-1 改]	RB [BWR- Mark-1 改]	RB [BWR- Mark-I]
地盤 条件	$V_s=$ 1620m/s	$E=$ 45t/cm ²	$V_s=$ 550m/s	$V_s=$ 470m/s	$V_s\approx$ 500m/s	$V_s\approx$ 700m/s	$V_s\approx$ 700m/s	$V_s\approx$ 700m/s	$V_s=$ 1800m/s

注 1) 本表は、日本建築学会構造委員会 (2001) ⁴⁰ を基に筆者らが建屋及び地盤条件を抜粋し作成した。

注 2) 福島第一原子力発電所 1 号機原子炉建屋の地盤条件については、比較一覧表におけるせん断波速度 V_s の単位が他と明らかに異なることから、本研究の地盤条件の計算から除外した。

注 3) 表中の地盤条件は、各原子炉建屋直下の支持地盤の剛性 (V_s) を表す。

表 3.7 再現解析で使用する地盤物性値

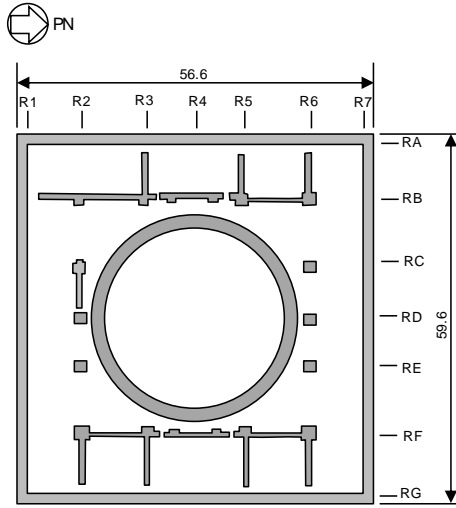
Table 3.7 Soil properties for simulation analyses

Attitude T.M.S.L. (m)	Geological Layer	Soil type (Sand, clay or rock)	Shear Wave Velocity Vs (m/s)	Shear wave damping (%)	Primary Wave Velocity Vp (m/s)	Primary wave damping (%)	Unit Weight γ (kN/m ³)	Poisson's Ratio ν	Initial Shear Modulus G0 (kN/m ²)
Grade Level (+12.0)	Sand	Sand	150		310		16.1	0.347	36,000
+8.0		Sand	200		380		16.1	0.308	65,700
+4.0	Yasuda	Clay	330		1240		17.3	0.462	192,000
-6.0									
-33.0	Nishiyama	Rock	490		1640		17.0	0.451	416,000
		Rock	530		1700		16.6	0.446	475,000
		Rock	590		1710		17.3	0.432	614,000
		Rock	650		1790		19.3	0.424	832,000
-136.0	Nishiyama	Rock	720		1900		19.9	0.416	1,050,000
-155.0									
The free surface of the ∞									

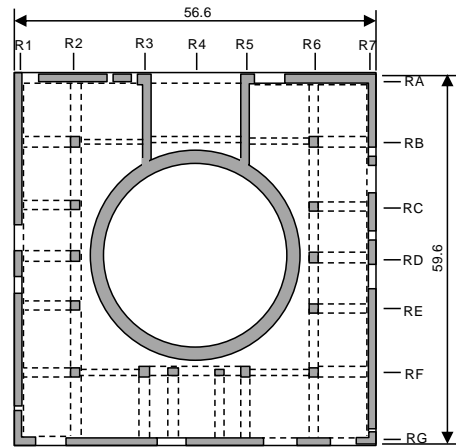
注 1) “Rock” designation is coming from Japanese terminology and is not consistent with IAEA safety standard.

注 2) “Yasuda” (安田層) は、敷地内の安田層の堆積時期が中期更新世であることが確認されたことから、現在、その名称が「古安田層」に変更されている。

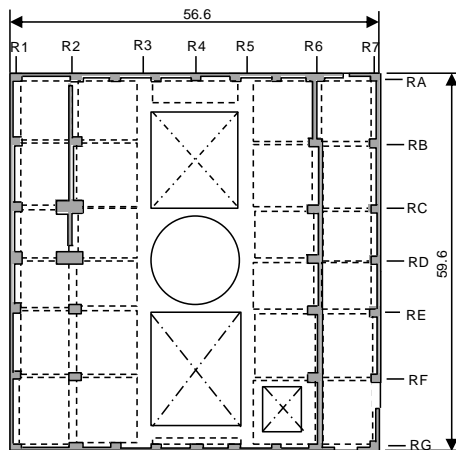
出典) IAEA, “Review of Seismic Evaluation Methodologies for Nuclear Power Plants Based on a Benchmark Exercise”, IAEA TECDOC No. 1722, (2013).³³



(1) 地下3階平面図



(2) 1階平面図

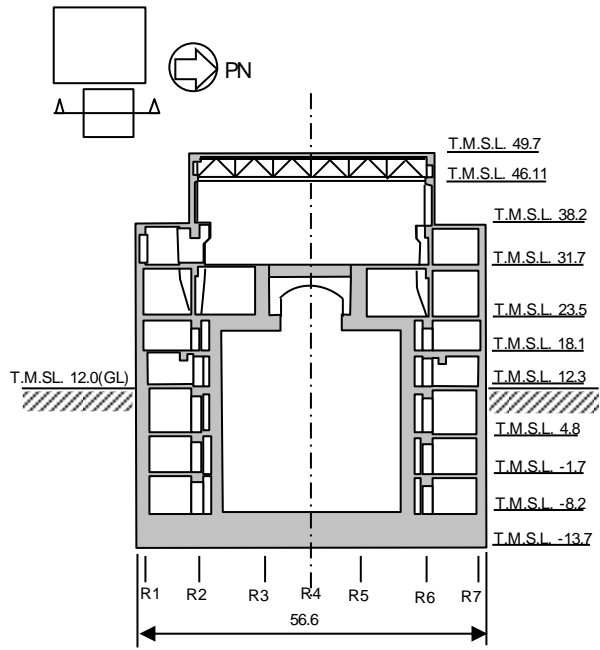


(3) 4階平面図

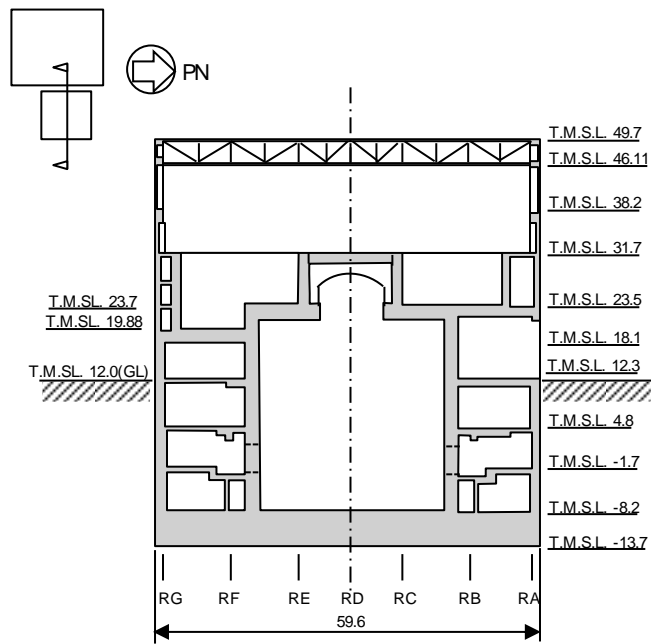
注) 本図は、IAEA (2013) ³³を基に筆者らが一部加筆・修正を加え作成した。

図 3.1 代表的な平面図

Fig. 3.1 Concrete outline of typical floors



(1) NS 断面図




(2) EW 断面図

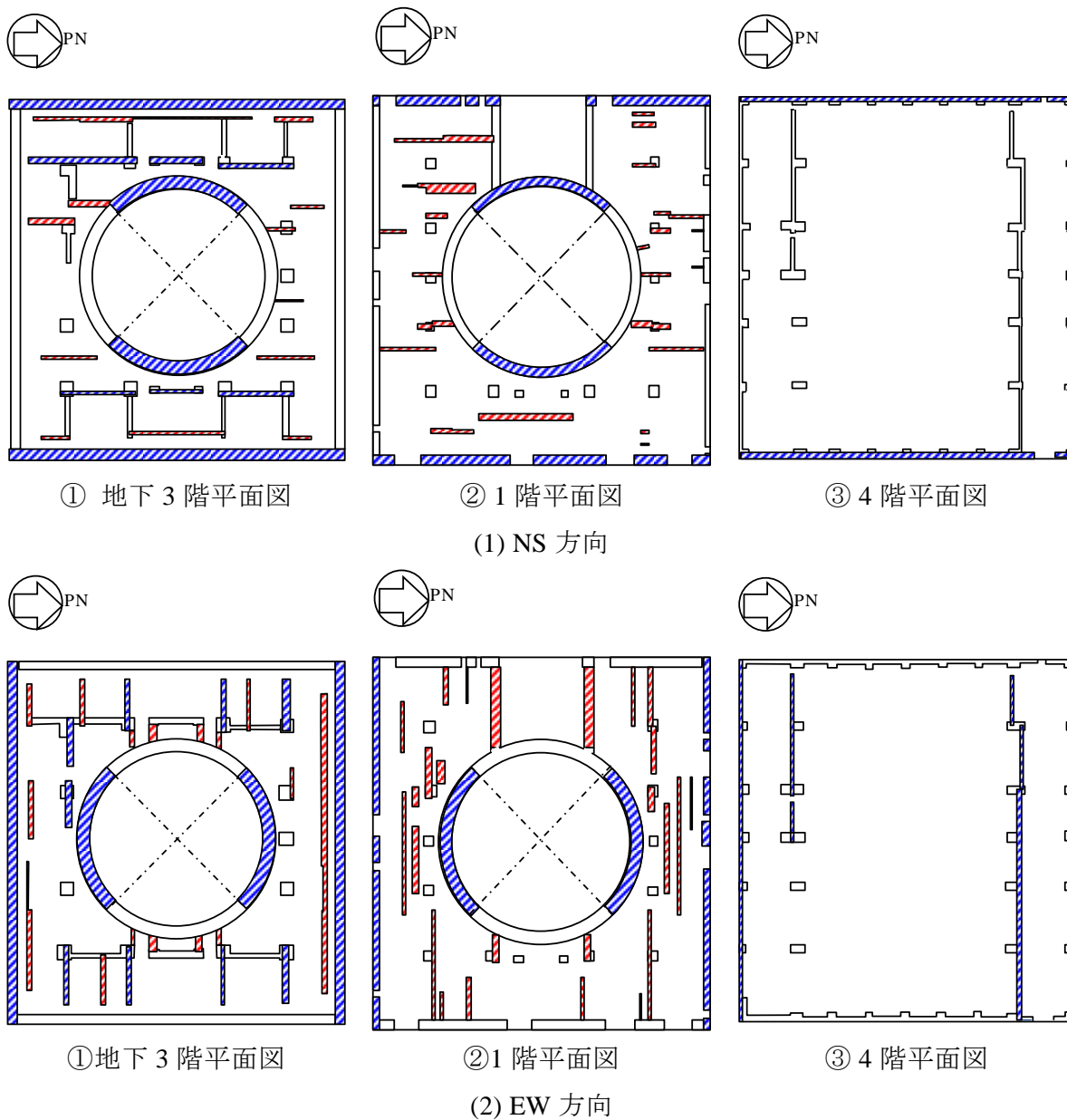
注) 本図は、IAEA (2013) ³³を基に筆者らが一部加筆・修正を加え作成した。

図 3.2 代表的な断面図

Fig. 3.2 Concrete outline for typical sections

 : 耐震壁として剛性を評価する範囲(設計時と同じ)

 : 補助壁として剛性を評価する範囲



注) 本図は、IAEA (2013) ³³を基に筆者らが一部加筆・修正を加え作成した。

図 3.3 代表的な平面図における剛性評価範囲

Fig. 3.3 Seismic wall and auxiliary wall layouts of 3D-FEM model at typical floors

3.2 入力地震動

三次元 FEM モデルによる地震応答解析で使用する入力地震動は、解放基盤表面のレベルと建屋基礎の位置関係及び埋め込み状況を考慮し、JEAG4601 (1991) ³⁸ の規定及び既往の研究等を参考に設定した。また、地震時に表層地盤や解放基盤以浅の支持地盤の剛性低下が懸念される場合には、地震動の大きさに応じて地盤の非線形性を考慮した。本節では、三次元 FEM モデルによる地震応答解析で使用する入力地震動について、その基本方針を示すとともに、感度解析、再現解析ごとにその概要を説明する。

3.2.1 感度解析で使用する入力地震動

感度解析で使用する入力地震動は、各因子が原子炉建屋の応答特性に与える影響を一般的な傾向として評価することを念頭に、応答スペクトルに基づく地震動評価により、以下に示す設定を行った。

(1) 応答スペクトルに基づく地震動評価

応答スペクトルに基づく地震動評価は、日本電気協会 (2008) ⁴¹によると、敷地ごとに震源を特定して策定する地震動のうち応答スペクトルに基づく地震動評価の方法として、経験的な方法 (以下「耐専スペクトルによる方法」という。) が定められている。本研究では、この耐専スペクトルによる方法に基づき、一様乱数の位相を持つ正弦波の重ね合わせによって、水平動 1 波、鉛直動 1 波の地震動を筆者ら独自に作成した。このとき、応答スペクトルの振幅包絡線の経時的变化は、Noda らの方法 (2002) ⁴²に基づき、マグニチュード M と等価震源距離 X_{eq} から決定した。マグニチュード M と等価震源距離 X_{eq} は、標準的な基準地震動 S_s 相当の値として、表 3.8 に示す調査結果から、各原子炉建屋が立地する敷地の平均値 ($M = 7.4$ 、 $X_{eq} = 41.0\text{km}$) を採用した。

(2) 入力波形の作成方法

図 3.4 に耐専スペクトルによる方法に基づき得られた加速度時刻歴波形を示す。地震動は、耐専スペクトルによる方法に基づき得られた水平動及び鉛直動の波形を水平 2 方向及び鉛直方向の計 3 方向から入力した。このとき、水平動については、NS 方向、EW 方向同位相の条件で入力した。水平動及び鉛直動の最大応答加速度は、東電 (2016) ⁴³ の長岡平野西縁層帯による地震の地震動評価 (応答スペクトル) で求まる最大加速度に倣い、基準地震動 S_s 相当の地震動として、それぞれ地表面最大加速度 PGA が $PGA = 600\text{gal}$ 、 $PGA = 400\text{gal}$ となるよう時刻歴波形及びターゲットスペクトルを設定した。このとき、地震動の定義位置は解放基盤表面とし、地表面に設定した。

3.2.2 再現解析で使用する入力地震動

再現解析で使用する入力地震動は、感度解析で対象とした影響因子の三次元 FEM モデ

ル上の設定方法の妥当性を確認することを念頭に、KARISMA-RB が対象とする敷地の地震観測記録により、以下に示す設定を行った。

(1) 地震諸元

図 3.5 に再現解析で使用する地震諸元を示す。再現解析で使用する入力地震動は、2007 年 7 月 16 日 10 時 13 分に発生した新潟県中越沖地震 (M6.8) の本震から設定した。

(2) 地震計設置位置

図 3.6 に再現解析で使用する地震計の設置位置を示す。再現解析では、地震時に基礎スラブ上で観測した水平方向及び鉛直方向の地震観測記録を使用した。

(3) 基礎スラブ上での観測記録

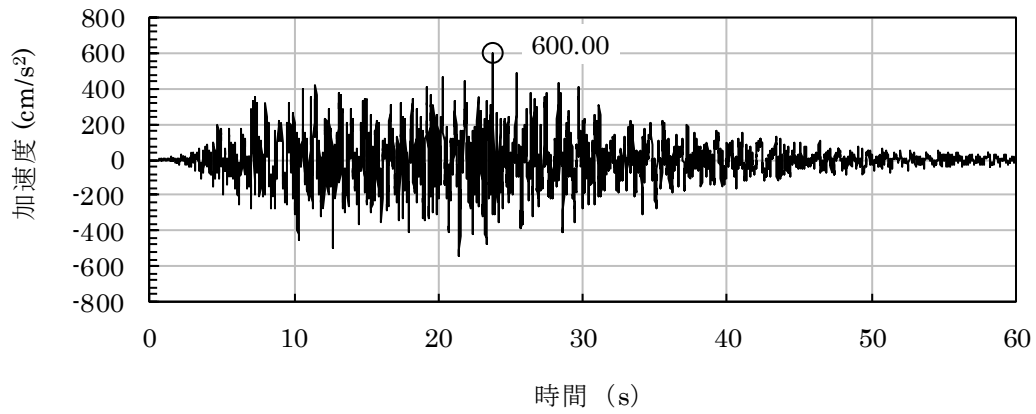
図 3.7 及び図 3.8 に再現解析で使用する基礎スラブ上での観測記録とその加速度応答スペクトルを示す。本研究では、基礎スラブ上で得られた観測記録を基に三次元 FEM モデルに入力する波形を計算した。

(4) 入力波形の作成方法

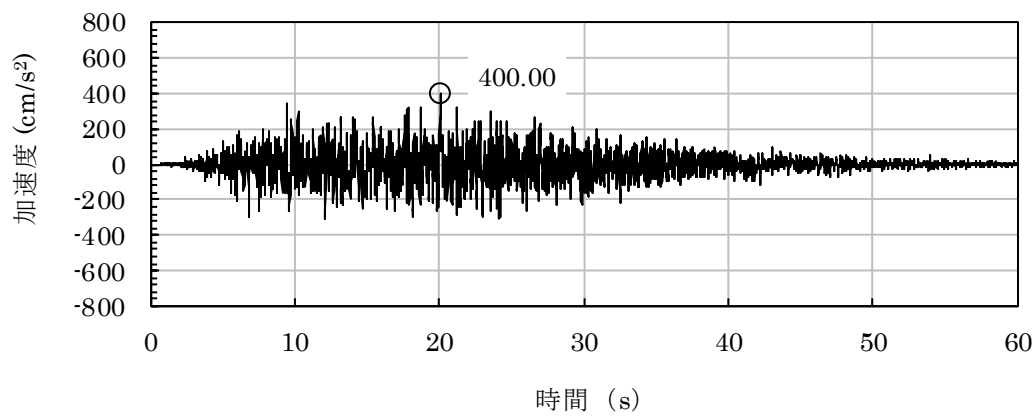
本研究では、三次元 FEM モデルに入力する地震動について、図 3.7 及び図 3.8 に示す基礎スラブ上の観測記録を基に使用する解析プログラムの特性に応じた入力波形の作成を行った。このとき、委託事業においては、基礎スラブ上での応答波形と観測波形が加速度波形と応答スペクトルで適合するよう繰り返し計算を行い、解析モデル下端に入力する波形を作成した。筆者らにおいては、委託事業と同様の繰り返し計算から、基礎スラブ下端に入力する波形を作成した。このとき、地震動の定義位置は、筆者らが使用した解析プログラム ACS SASSI の特性 (周波数軸に沿ったサブストラクチャー法による地震応答解析) も踏まえ、委託事業とは異なる観測記録付近の基礎スラブ下端に設定した。

表 3.8 原子炉建屋が立地する敷地のマグニチュード M と等価震源距離 X_{eq} の調査結果
 Table 3.8 Results of technical report review of magnitude and equivalent hypocentral distance at the site of reactor buildings

サイト名	マグニチュード M	等価震源距離 X_{eq} (km)	備考
泊	8.2	107.0	
東通1号機	6.8	17.5	横浜断層
女川2号機	8.0	81.6	Ss-D1 神田ほか(2012)による震度インバージョンを参照して設定
	7.5	72.0	Ss-D2 海洋プレート内地震(基本ケース)の断層モデルに基づき設定
	7.5	65.0	Ss-D3 海洋プレート内地震(不確かさケース2)の断層モデルに基づき設定
東海第二	7.8	28.0	基準地震動 S s - D 1 に対して概ね全周期帯で支配的な震源となる F 1 断層, 北方陸域の断層, 塩ノ平地震断層の運動による地震を考慮
柏崎刈羽67号機		荒浜 大湊	
	6.8	55.0	53.0 佐渡島棚東縁断層37
	6.8	17.0	16.0 F-B断層36
	7.0	13.0	13.0 F-B断層36(中越沖地震の余震分布(地震本部(2007,2008))を参考に35°のケースを考慮)
	6.8	26.0	25.0 佐渡島南方断層29
	6.8	38.0	39.0 F-D断層30
	6.8	59.0	60.0 高田沖断層25
	6.8	25.0	26.0 米山沖断層21
	7.5	25.0	25.0 長岡平野西縁断層帯91
	6.8	32.0	33.0 十日町断層帯西部33
6.8	51.0	52.0 高田平野西縁断層帯30	
浜岡	9.0	130.0	
志賀	—	—	H30/7/6現在 地質・地質構造について審議中
大飯	7.4	10.5	FO-A~FO-B断層
	7.1	15.4	熊川断層
	7.5	30.2	上林川断層
美浜	7.8	68.0	
島根	7.7	17.3	
伊方	8.5	43.0	
玄海	6.9	17.9	竹木場断層
	7.0	25.6	城山南断層
	8.2	87.8	西山断層帯(長大な活断層)
川内	7.2	22.5	市来断層帯市来区間
	7.5	36.5	甌断層帯甌区間
	7.5	38.4	市来断層帯甌海峡中央区間
平均	7.4	41.0	



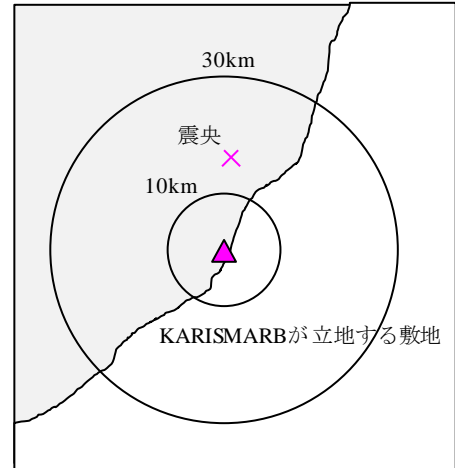
(1) NS 方向及び EW 方向



(2) UD 方向

図 3.4 Noda らの経験的な方法に基づき得られた加速度時刻歴波形
 Fig. 3.4 Seismic input motions based on an empirical method by Noda et.al

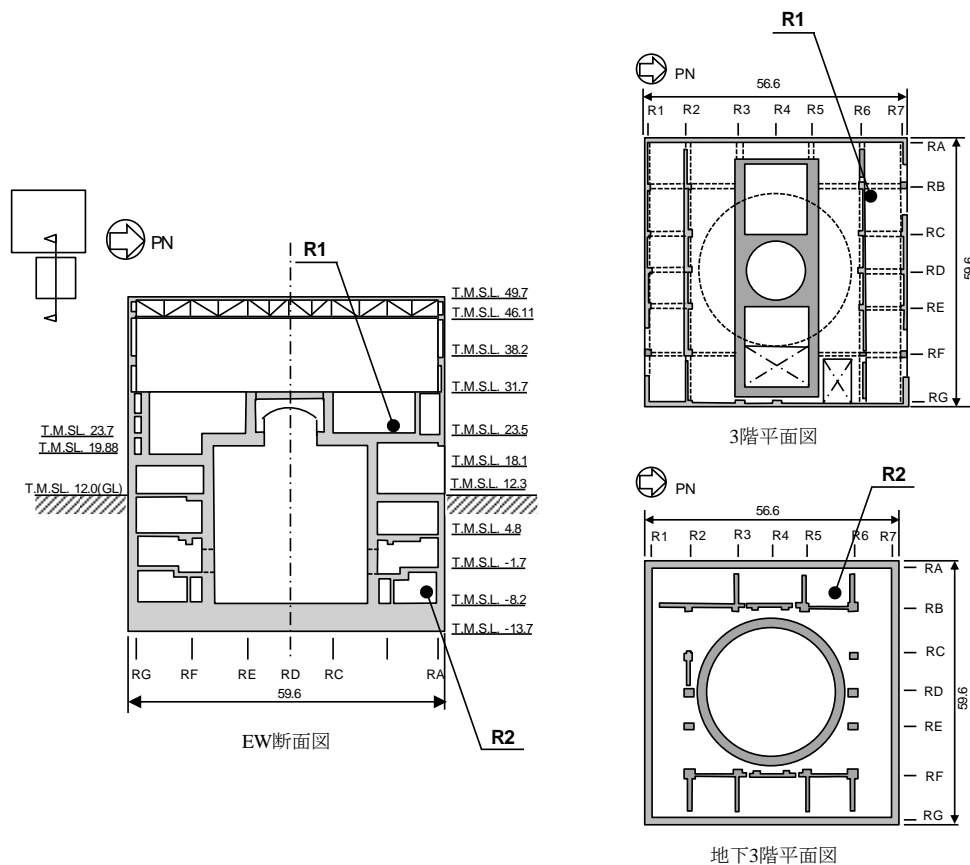
地震名	新潟県中越沖地震
発生日時	2007年7月16日 午前10時13分頃
マグニチュード	6.8
震源深さ	17km
震央距離	16km
震源距離	23km



注) 本図は東電 (2016) ²³ を基に筆者らが一部加筆・修正を加え作成した。

図 3.5 再現解析で使用する地震諸元 (2007 新潟県中越沖地震本震)

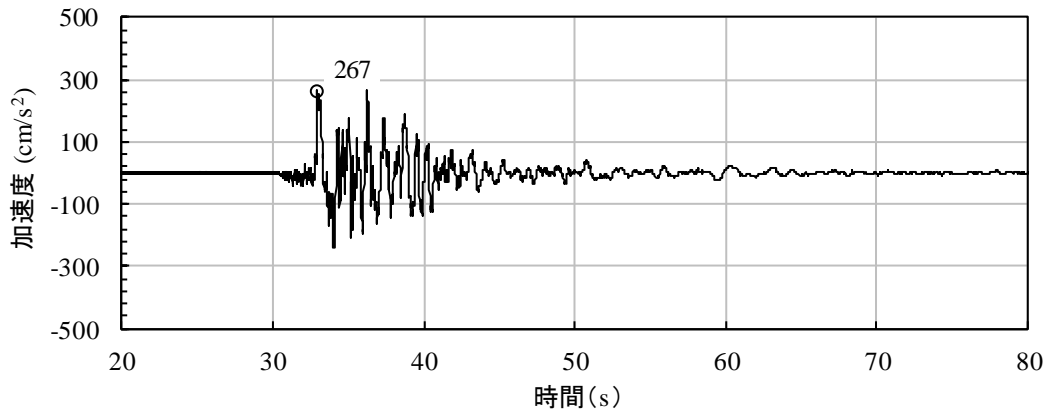
Fig. 3.5 Earthquake record specifications for simulation analyses (The Niigataken Chuetsu-oki Earthquake in 2007)



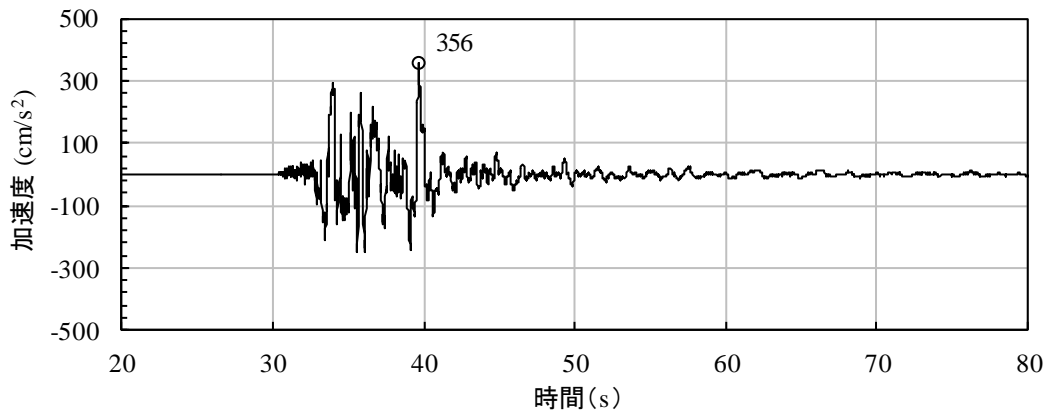
注) 本図は東電 (2016) ²³ を基に筆者らが一部加筆・修正を加え作成した。

図 3.6 地震計の設置位置

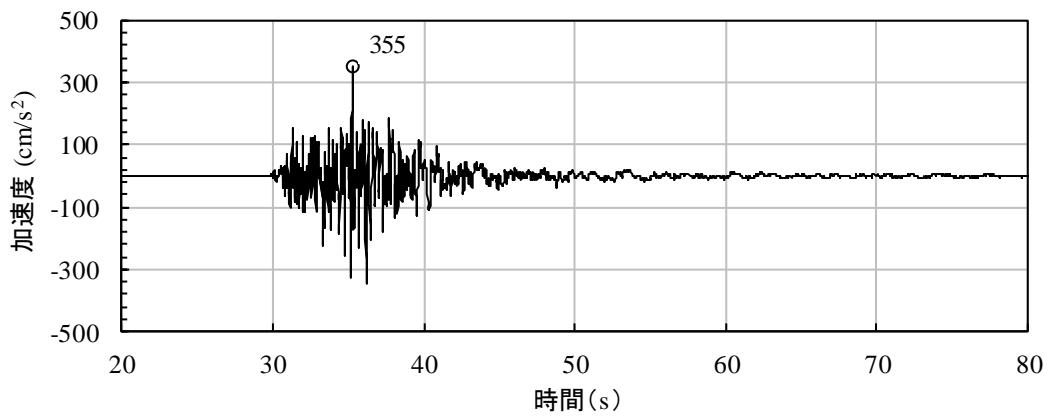
Fig. 3.6 Location of seismographs



(1) NS 方向



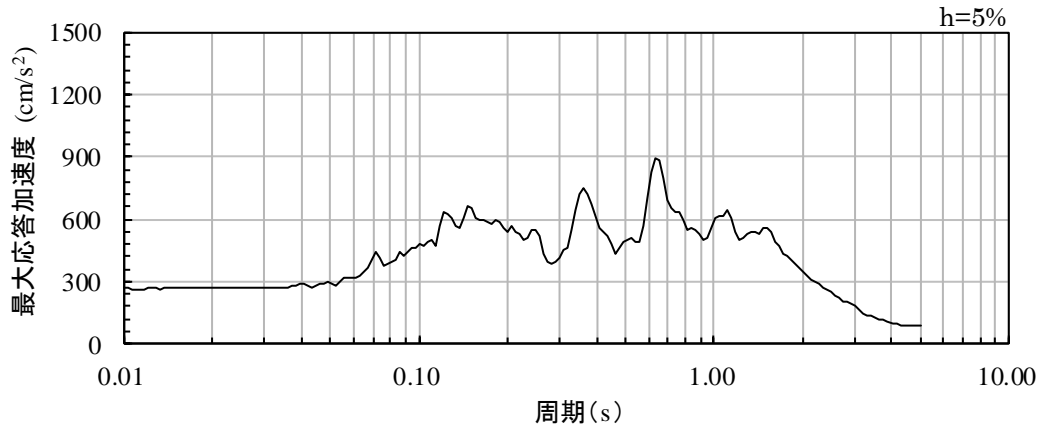
(2) EW 方向



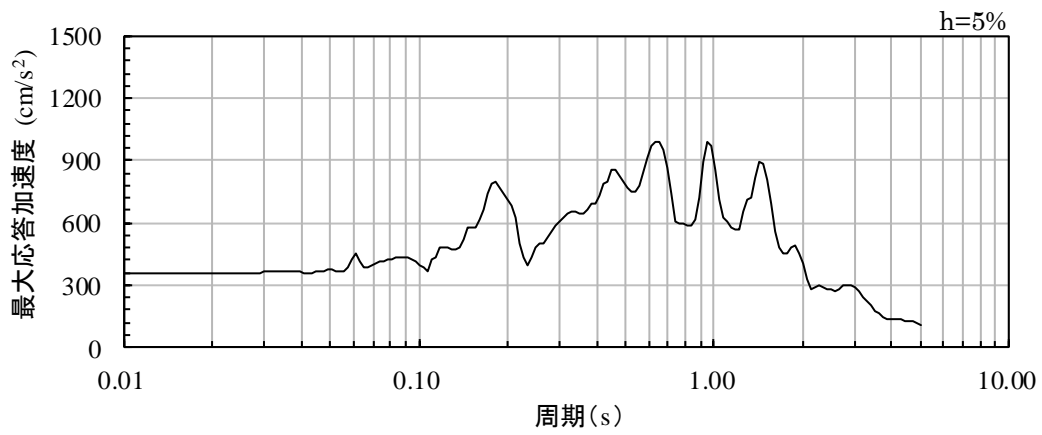
(3) UD 方向

図 3.7 基礎スラブ上での観測記録（加速度時刻歴波形）

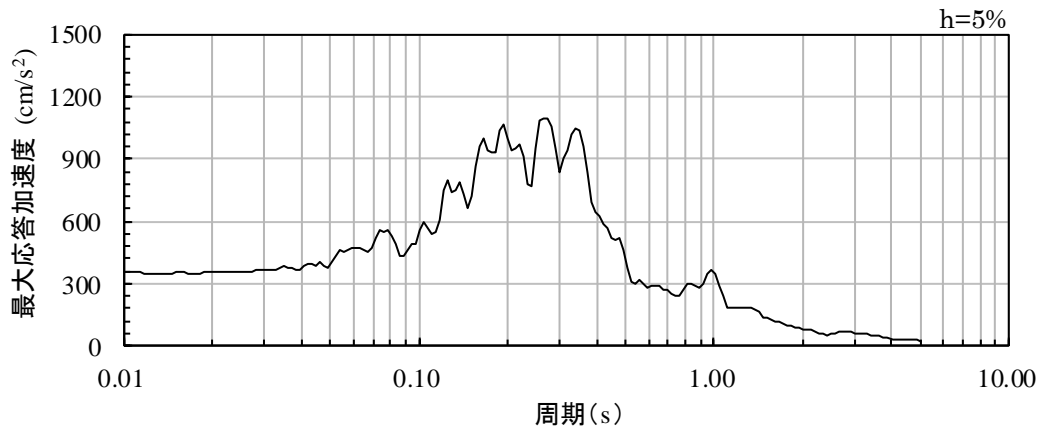
Fig. 3. 7 Acceleration time histories of the earthquake record at slab base for simulation analyses



(1) NS 方向



(2) EW 方向



(3) UD 方向

図 3.8 基礎スラブ上での観測記録 (加速度応答スペクトル)

Fig. 3. 8 FRS of the earthquake record at slab base for simulation analyses

3.3 水平方向及び鉛直方向の地震応答解析結果の組合せ

三次元 FEM モデルによる地震応答解析で得られる水平方向及び鉛直方向の地震応答解析結果の組合せは、3.2 に定める入力地震動を用いて、水平 2 方向及び鉛直方向について、各方向の各時刻歴での応答値を逐次重ね合わせる等の方法により、応答の同時性を考慮した。このとき、三次元 FEM モデルの非線形性を考慮した地震応答解析においては、建屋及び地盤のひずみレベルに留意して、その非線形性の程度に応じた設定を行った。

4. 地震応答解析モデルの作成

本章では、第3章に基づき作成した地盤 FEM (時間領域) 及び地盤 TLEM (周波数領域) の2種類の地震応答解析モデルの概要を示す。このとき、時間領域を対象とした地盤 FEM による地震応答解析モデルは、委託事業より得られた三次元 FEM モデルの入力データ³を基に概要を作成した。また、筆者らによる周波数領域を対象とした地盤 TLEM による地震応答解析モデルは、委託事業より得られた地盤 FEM による三次元 FEM モデルの入力データ³を基に使用する解析プログラムの特性に合ったモデル化を行った。

4.1 感度解析で使用する地震応答解析モデル

感度解析で使用する地震応答解析モデルのモデル化方法の概要を以下に示す。

4.1.1 水平2方向及び鉛直方向の地震動入力を影響因子とした地震応答解析モデル

水平2方向及び鉛直方向の地震動入力を影響因子とした地震応答解析モデル (以下「基準モデル (感度解析)」という。) のモデル図を図4.1及び図4.2に、地震応答解析モデルと解析条件の関係を表2.1に示す。このとき、図4.1は解析プログラム FINAS/STAR で使用する時間領域の地震応答解析モデルを、図4.2は解析プログラム ACS SASSI で使用する周波数領域の地震応答解析モデルを示す。基準モデル (感度解析) は、KARISMA-RB の建屋及び地盤の地震時挙動を三次元的に予測可能なフルモデル (三次元 FEM モデル) により以下に示すモデル化を行った。

建屋は、図3.3の剛性評価範囲に基づき主要な構造部材及び接合部についてモデル化を行うものとし、基礎スラブをソリッド要素、床スラブ・壁をシェル要素、柱・梁をビーム要素、斜材・束材・水平ブレースを一次元のビーム要素でモデル化した。なお、屋上階の屋根スラブについては、公開情報に当該階の屋根スラブに関する情報が含まれていなかったため、モデル化対象から除外した。

壁と基礎スラブの接合部は、シェル要素とソリッド要素との回転変形の連続性を図るため、壁のシェル要素を基礎スラブ下端まで埋め込んだ。

建屋のメッシュサイズは、2.0mを目安として平面の通り芯間及び立面のフロア間が4～5分割となるように設定した。

壁・床の開口部は、開口の大きさがおおむね 2.0m² 以上となる主要な開口部のみを対象に建屋モデルに反映した。

格納容器内部の大型機器は、重量のみを建屋モデルで考慮するものとし、機器が取り付けられている当該階の床スラブに等分布荷重としてその重量を作用させた。

建屋を構成する RC 材料及び S 材料は弾性状態であると仮定した。

図4.3に本項で対象とする基準モデル (感度解析) の RC 造の減衰定数と振動数の関係を示す。減衰は、使用する解析プログラム、選択する地震応答解析手法に応じて定めるものとし、時刻歴応答解析においてはレーリー減衰を、周波数応答解析においては複素減衰

を用いることとした。レーリー減衰の設定に用いる f_1 及び f_2 の振動数は、基礎固定時の建屋単独モデルによる固有値解析結果から、NS 方向の一次モードの固有振動数 (3.99Hz) を f_1 、解析上限振動数である透過振動数 (20Hz) を f_2 と定めた。減衰定数は、表 3.3 及び表 3.5 に基づき、RC 造を 5%、S 造を 2%、地盤を 3% とした。

地盤は、使用する解析プログラムの特性に合わせ、FEM のソリッド要素及び薄層要素法の薄層を用い、離散的にモデル化を行った。このとき、時間領域の地盤 FEM による解析では、水平方向及び鉛直方向の解析領域を有限なものとしてモデル化する必要があるため、モデル底面を粘性境界、側面を周期境界として遠方地盤の半無限性を考慮した。一方、周波数領域の地盤 TLEM による解析では、鉛直方向の解析領域のみを有限なものとしてモデル化する必要があるため、モデル底面を粘性境界として遠方地盤の半無限性を考慮した。

地盤を構成する地層は一様であり、その材質は均質、弾性状態と仮定した。

地盤のメッシュサイズは、対象とする高振動数側の解析振動数を 10 数 Hz 程度と定め、地盤の透過振動数が 20Hz を超えるよう寸法を設定した。

建屋と地盤の相互作用は、上記の建屋及び地盤で定めた設定を基に以下に示すモデル化を行った。建屋の地盤への埋め込み形状は 4 面埋め込みとし、周辺地盤は整形、隣接建屋の影響は無いものと仮定した。なお、対象とする地盤は、側面地盤、底面地盤を含め全て岩盤と設定しており、埋め戻し土及びマンメイドロック等はモデル化していない。このとき、建屋と地盤間の埋め込み状態は完全に固着しているものと仮定し、剥離・滑り現象に伴う非線形化は考慮しない。

建屋基礎と底面地盤間の浮き上がり状態についても、同様に完全に固着しているものと仮定し、基礎浮き上がりに伴う非線形化は考慮しない。

4.1.2 建屋－地盤間の接触・剥離現象のモデル化を影響因子とした地震応答解析モデル

建屋－地盤間の接触・剥離現象のモデル化を影響因子とした地震応答解析モデルのモデル図を図 4.4 及び図 4.5 に、地震応答解析モデルと解析条件の関係を表 2.1 に示す。使用する解析プログラムは、FINAS/STAR 及び ACS SASSI の 2 種類とした。このとき、図 4.4 は解析プログラム FINAS/STAR で使用する時間領域の地震応答解析モデルを、図 4.5 は解析プログラム ACS SASSI で使用する周波数領域の地震応答解析モデルを示す。

本項で対象とする解析モデルは、4.1.1 の基準モデル（感度解析）に対し、建屋－地盤間の接触・剥離現象（地下外壁－側面地盤間の剥離・滑り及び基礎－底面地盤間の基礎浮き上がり）を以下に示す方法により三次元的にモデル化した地震応答解析モデル（以下「接触・剥離モデル（感度解析）」という。）である。

図 4.6 及び図 4.7 に建屋－地盤間の接触・剥離現象のモデル化概念図を示す。建屋－地盤間の接触・剥離現象は、使用する解析プログラムの特性に応じて、以下の有限要素によりモデル化を行った。

- ・ 地盤 FEM による解析モデル（時間領域）：ジョイント要素
- ・ 地盤 TLEM による解析モデル（周波数領域）：ばね要素

ジョイント要素及びばね要素は建屋－地盤間の FEM メッシュの各節点に設定した。

ジョイント要素による接触・剥離現象のモデル化は、図 4.8 に示す応力－変位関係を剥離方向及び滑り方向に設定することで、時刻歴応答解析による剥離・滑り・基礎浮き上がりに伴う非線形挙動を考慮した。このとき、剥離が生じた際の剛性は $K=0$ 、接触が生じた際の剛性は、中村ら（2008）⁴⁴を参考に感度解析を行い、Novak による方法から求まる側面地盤のばね定数の 50 倍となるように設定を行った。また、浮き上がりが生じた際の剛性は $K=0$ 、接触が生じた際の剛性は、同様の感度解析により、田治見の振動アドミタンス理論に基づく方法⁴⁵から求まる底面地盤のばね定数の 50 倍となるように設定した。

地下外壁－側面地盤間のジョイント要素に付加する初期応力は、解析モデルに静止土圧を作用させた静的解析から設定した。なお、側面地盤を考慮した解析モデルによる初期応力の算定方法については、付録 1.5 を参照されたい。このとき、基礎－底面地盤間のジョイント要素に付加する初期応力は、図 4.9 に示す側面地盤を取り除いた解析モデルに鉛直震度 1.0 の慣性力を作用させた静的解析から設定した。建屋－地盤間の剥離・滑り・基礎浮き上がり現象は、上述の初期応力と地震時増分土圧（底面地盤においては地震時の垂直圧）との差分から時刻歴非線形解析により求めた。なお、建屋－地盤間の滑り現象で使用する動摩擦係数 μ_d は、東電（2016）²³を参考に $\mu_d=0.35$ を用いた。このとき、収束計算時の反復方法は接線剛性法とし、収束回数は 1 回とした。1 回の計算により収束が得られない場合は、残差力を次の解析ステップに持ち越した。また、解析の時間刻みは 0.001 秒とし、解析の継続時間は、図 3.4 に示す地震動のうち、主要動である最大加速度前後の 9 秒から 29 秒の 20 秒間を対象とした。

一方、ばね要素は、周波数応答解析により建屋－地盤間の非線形挙動を近似的に推測するため、その非線形特性のモデル化に際しては、剛 ($K \equiv \infty$) 又は柔 ($K \equiv 0$) なばね要素を接触・非接触が生じている範囲に適切に反映することで、等価線形的にこれら非線形挙動を考慮した。よって、ここで用いる等価線形化手法は、建屋－地盤間の非線形性状のうち、時間変化に応じた剥離・滑り・基礎浮き上がり現象を無視したものと解釈することができる。このとき、建屋－地盤間の非線形化に伴う剥離・滑り・基礎浮き上がり範囲（柔なばね要素を接続する範囲）は、周波数応答解析においてその値が未知数となるため、まず、線形地震応答解析からその範囲を推定し、柔なばね要素の設定を行った。剥離・滑り・基礎浮き上がり範囲のモデル化に当たっては、科学的・技術的に保守的な範囲の設定となるよう、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。このとき、建屋－地盤間の剥離現象に伴う柔なばね要素の設定範囲は、側面地盤から地下外壁に作用する静止土圧と地震応答解析時に求まる剥離方向の最大地震

時増分土圧との差分により求めた。また、建屋－地盤間の滑り現象に伴う柔なばね要素の設定範囲は、上述で求まる静止土圧に東電（2016）²³に基づく動摩擦係数（ $\mu_d=0.35$ ）を掛け合わせた動摩擦力と滑り方向の地震荷重による最大せん断応力との差分により求めた。また、建屋－地盤間の基礎浮き上がり現象に伴う柔なばね要素の設定範囲は、田治見の振動アドミタンス理論に基づく方法から求まる底面地盤ばねを取り付けた解析モデルに鉛直震度 1.0 の慣性力を作用させた静的解析により求まる垂直圧と地震時の最大垂直圧との差分により求めた。

なお、基礎底面の付着効果は小さく、基礎浮き上がり現象に与える影響はないものと仮定した。

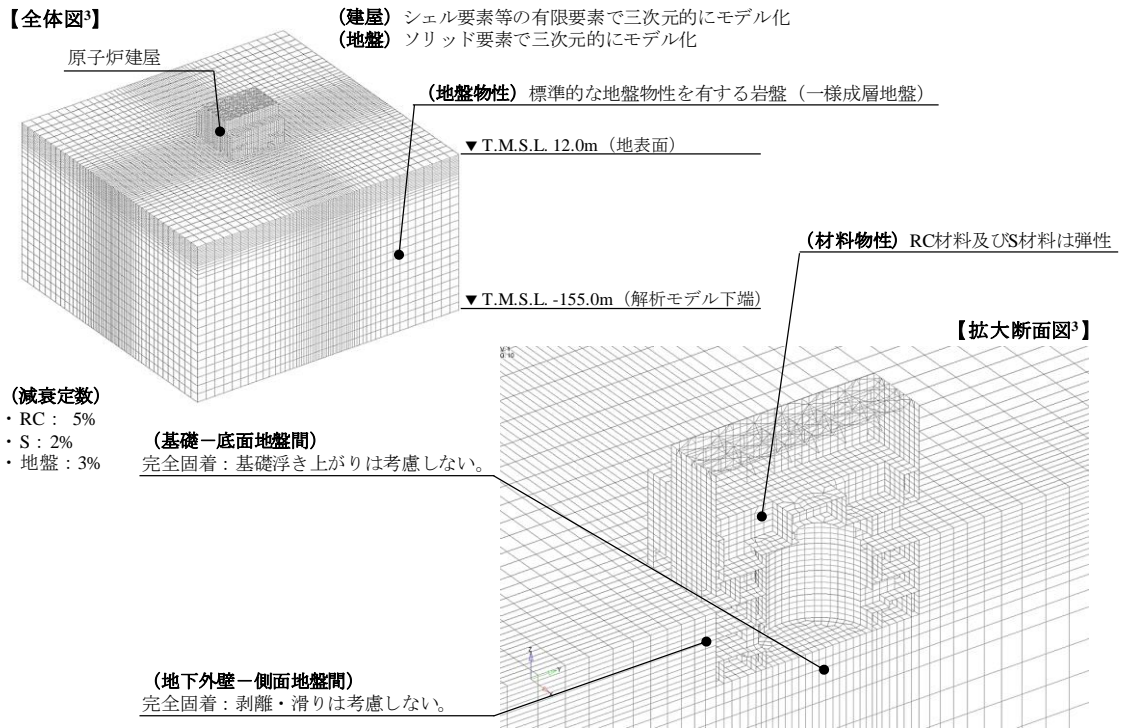


図 4.1 時間領域の基準モデル (C1-1) (感度解析 : 地盤 FEM によるモデル化)

Fig. 4.1 Reference model in time domain (C1-1): FEM modeling of soil for sensitivity analyses

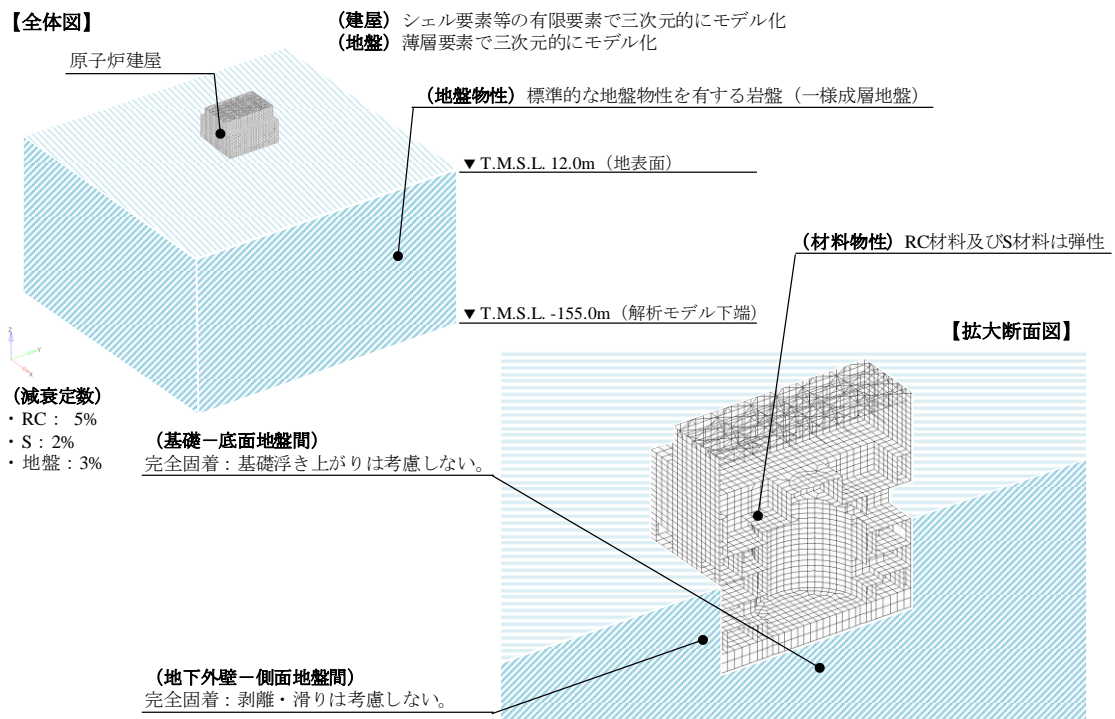


図 4.2 周波数領域の基準モデル (C1-2) (感度解析 : 地盤 TLEM によるモデル化)

Fig. 4.2 Reference model in frequency domain (C1-2): TLEM modeling of soil for sensitivity analyses

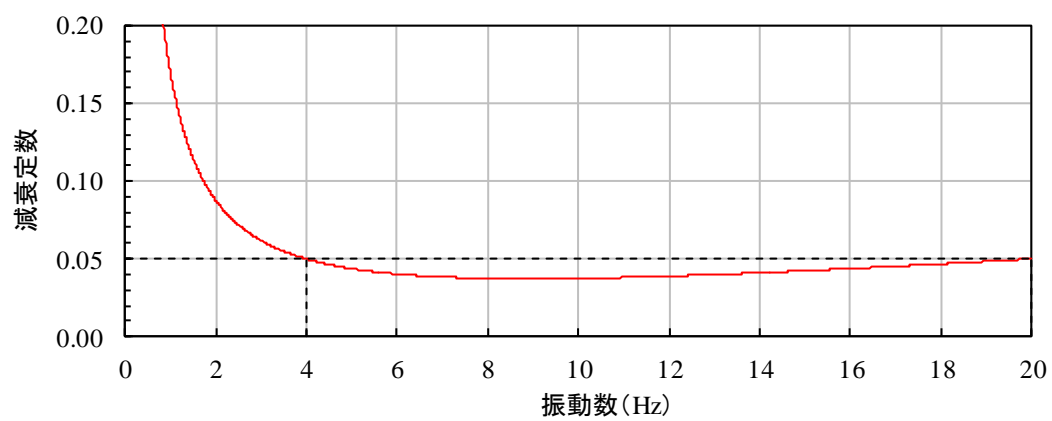


図 4.3 感度解析で使用する RC 造のレーリー減衰の特性

Fig. 4. 3 Rayleigh damping properties for RC structures in sensitivity analyses

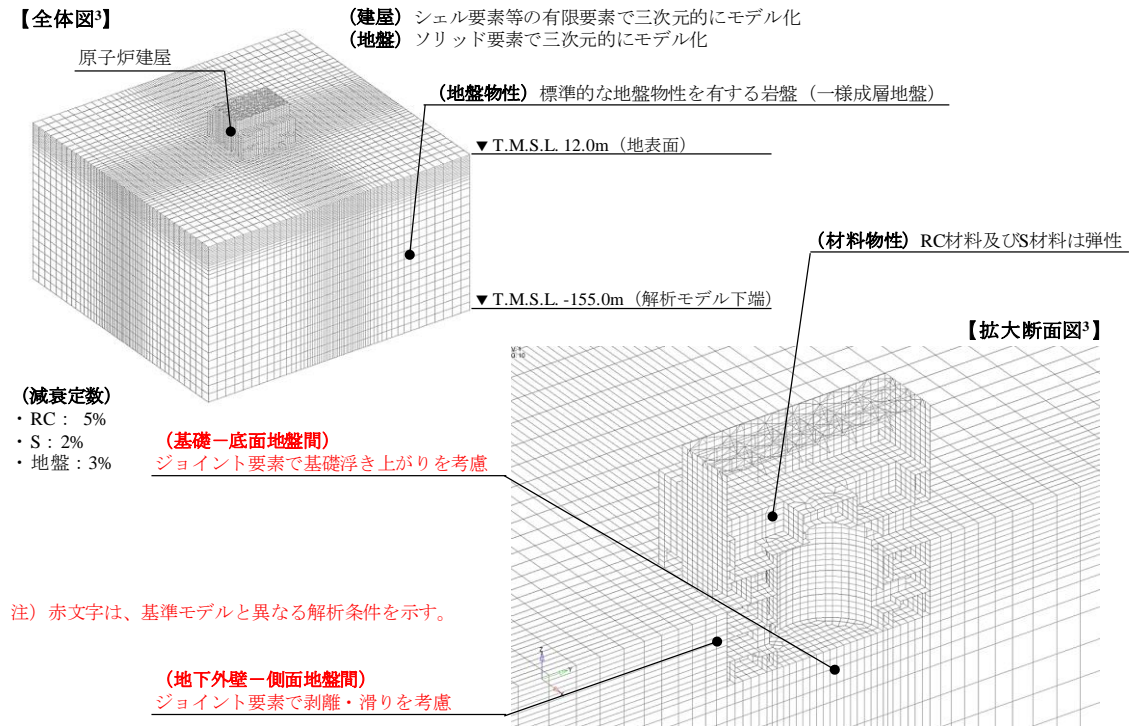


図 4.4 時間領域の接触・剥離モデル (C6-1) (感度解析：地盤 FEM によるモデル化)
 Fig. 4.4 Contact-separation model in time domain (C6-1): FEM modeling of soil for sensitivity analyses

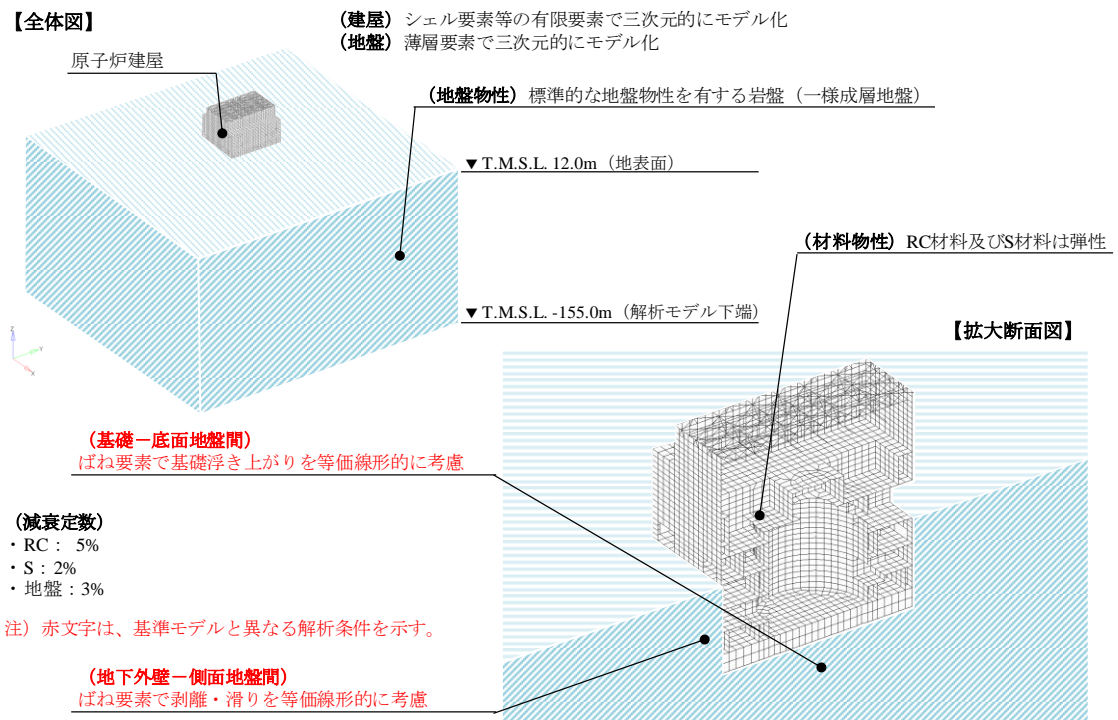


図 4.5 周波数領域の接触・剥離モデル (C6-2) (感度解析：地盤 TLEM によるモデル化)
 Fig. 4.5 Contact-separation model in frequency domain (C6-2): TLEM modeling of soil for sensitivity analyses

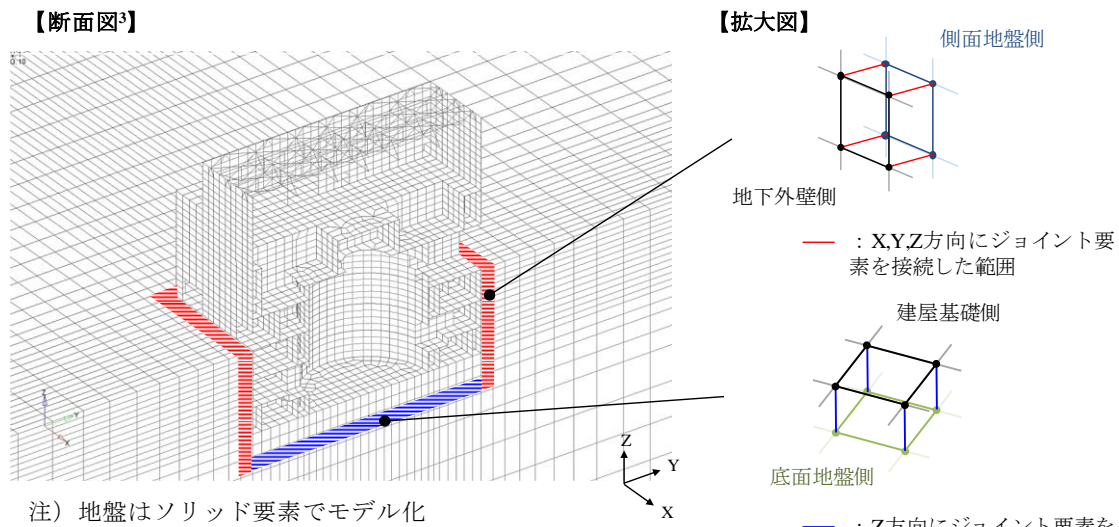


図 4. 6 時間領域の剥離・滑り・浮き上がりのモデル化概念図 (C6-1) (感度解析：地盤 FEM によるモデル化)

Fig. 4. 6 Conceptual diagram of 3D-FEM model including separating, sliding, and uplifting in time domain (C6-1): FEM modeling of soil for sensitivity analyses

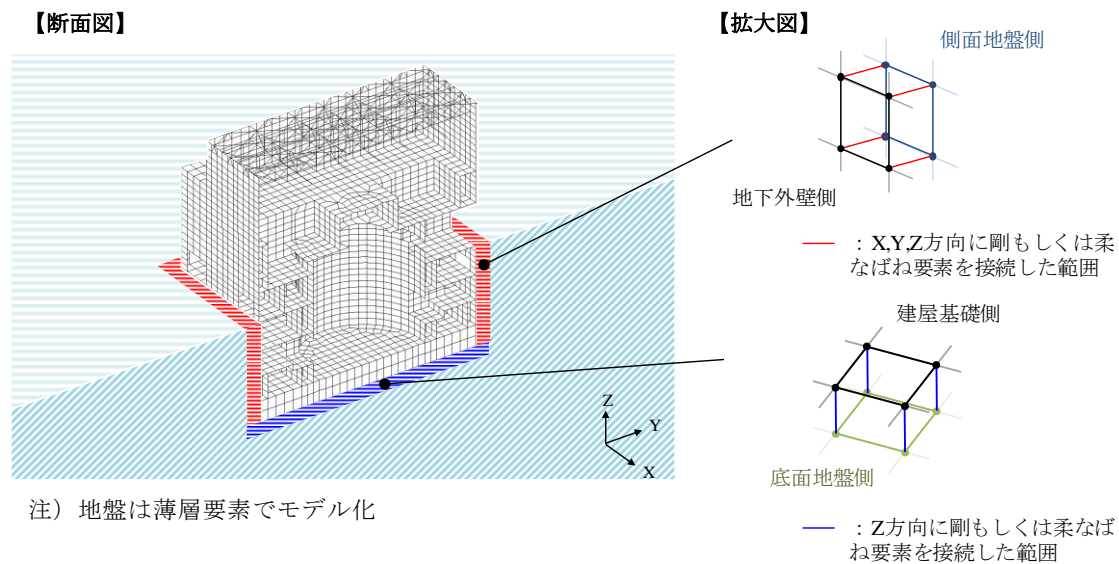
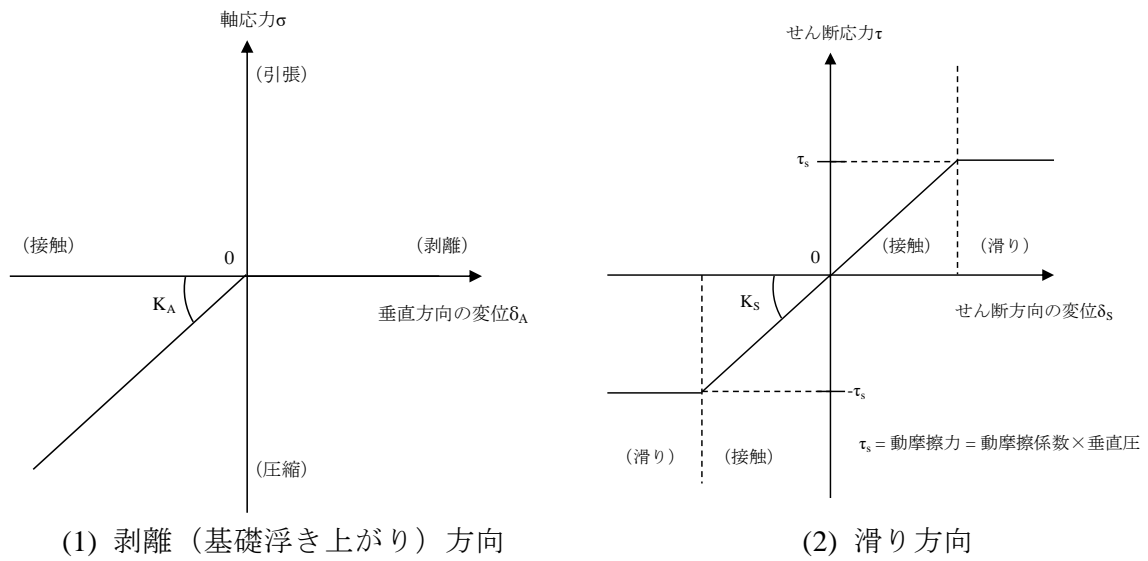


図 4. 7 周波数領域の剥離・滑り・浮き上がりのモデル化概念図 (C6-2) (感度解析：地盤 TLEM によるモデル化)

Fig. 4. 7 Conceptual diagram of 3D-FEM model including separating, sliding, and uplifting in frequency domain (C6-2): TLEM modeling of soil for sensitivity analyses



注) 動摩擦係数は、東電 (2016) ²³ を参考に設定した。

図 4.8 ジョイント要素に適用する応力-変位関係

Fig. 4.8 Stress-strain relationship for joint elements

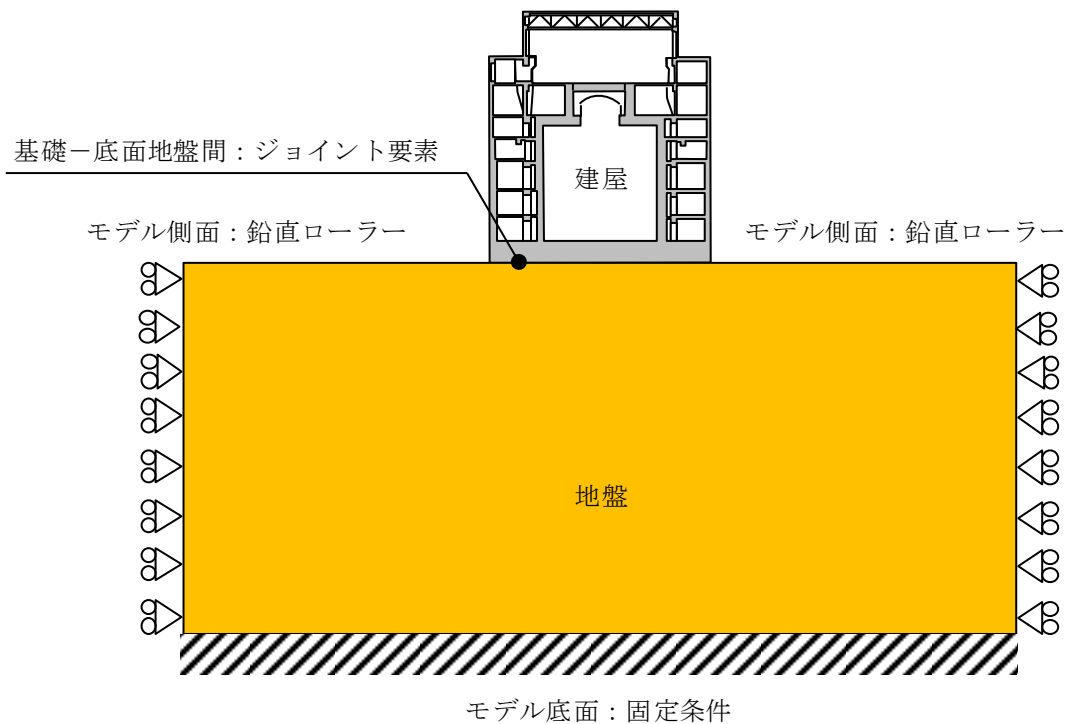


図 4.9 基礎-底面地盤間のジョイント要素に付加する初期応力の算定方法のモデル化概念図 (地盤 FEM によるモデル化)

Fig. 4.9 Conceptual diagram of the calculation method for initial stress added in joint elements at the bottom of the slab base

4.2 再現解析で使用する地震応答解析モデル

再現解析で使用する地震応答解析モデルのモデル化方法の概要を以下に示す。なお、再現解析で使用する地震応答解析モデルは、4.1 を基に作成を行った。よって、本節では、4.1 の設定と異なるモデル化方法について、その概要を説明する。

4.2.1 水平2方向及び鉛直方向の地震動入力を影響因子とした地震応答解析モデル

水平2方向及び鉛直方向の地震動入力を影響因子とした地震応答解析モデル（以下「基準モデル（再現解析）」という。）のモデル図を図4.10及び図4.11に、地震応答解析モデルと解析条件の関係を表2.1に示す。このとき、図4.10は解析プログラム FINAS/STAR で使用する時間領域の地震応答解析モデルを、図4.11は解析プログラム ACS SASSI で使用する周波数領域の地震応答解析モデルを示す。再現解析で使用する基準モデル（再現解析）は、4.1.1の基準モデル（感度解析）を基に以下に示すモデル化を行った。

建屋のモデル化のうち屋上階の屋根スラブについては、厚さを150mmと仮定しモデル化を行った。

建屋のメッシュサイズは、解析時の計算機への過度な負担を避けるため、FINAS/STAR で使用する時間領域の地震応答解析モデルにおいては4.1.1の基準モデル（感度解析）と同一の設定とした。一方、ACS SASSI で使用する周波数領域の地震応答解析モデルについては、表層地盤の地盤物性とのバランスに配慮し、また、要素の辺長比がおおむね1:2の関係になるよう平面に対して通り間を4~10分割（全体で34×33分割）、階高方向は地表面から上部に対して2.0mを目安に4~5分割、地表面から下部のうち地下1階に対してのみ1.0mを目安に7分割、その他地下2階~基礎下に対して2.0mを目安に4分割に設定した。

図4.12に本項で対象とする基準モデル（再現解析）のRC造の減衰定数と振動数の関係を示す。減衰は、使用する解析プログラム、選択する地震応答解析手法に応じて定めるものとし、時刻歴応答解析においてはレーリー減衰を、周波数応答解析においては複素減衰を用いることとした。レーリー減衰の設定に用いる f_1 及び f_2 の振動数は、基礎固定時の建屋単独モデルによる固有値解析結果から、NS方向及びEW方向の一次モードの固有振動数の平均値（4.33Hz）を f_1 、UD方向の一次モードの固有振動数（11.74Hz）を f_2 と定めた。

地盤のUD方向のモデル化は、地表面から102m（T.M.S.L.-90.0m）までの範囲を対象に層方向のせん断波速度 V_s に応じてメッシュサイズを分割した。ここで解放基盤面は、地表面から167m（T.M.S.L.-155m）の深さにあるものの、三次元FEMモデルの計算負荷低減のため、既往の土方ら（2011）⁵を参考に地表面から102m（T.M.S.L.-90.0m）までの設定とした。

地盤の非線形挙動は、一次元波動論による等価線形解析から近似的に評価した。このとき、地盤の等価線形解析では、図4.13に示す動的ひずみ依存特性等を参考に地盤の等価剛性及び等価減衰定数の設定を行った。ここで図中のOriginalは設計時の動的ひずみ依存特

性を、Modified は地盤の拘束圧の効果を考慮した動的ひずみ依存特性を表す。

建屋と地盤の相互作用は、上記の建屋及び地盤で定めた設定を基に以下に示すモデル化を行った。建屋の地盤への埋め込み形状は4面埋め込みとし、周辺地盤は整形、隣接建屋の影響は小さいと仮定した。同様に、原子炉建屋基礎スラブ下端のマンメイドロック及び地下外壁側面のマンメイドロック（西山モルタル）についても、その影響は小さいと仮定した。このとき、建屋と地盤間の埋め込み状態は完全に固着しているものと仮定し、剥離・滑り現象に伴う非線形化は考慮しない。

4.2.2 建屋－地盤間の接触・剥離現象のモデル化を影響因子とした地震応答解析モデル

建屋－地盤間の接触・剥離現象のモデル化を影響因子とした地震応答解析モデルのモデル図を図 4.14 及び図 4.15 に、地震応答解析モデルと解析条件の関係を表 2.1 に示す。使用する解析プログラムは、FINAS/STAR 及び ACS SASSI の 2 種類とした。このとき、図 4.14 は解析プログラム FINAS/STAR で使用する時間領域の地震応答解析モデルを、図 4.15 は解析プログラム ACS SASSI で使用する周波数領域の地震応答解析モデルを示す。

本項で対象とする解析モデルは、4.2.1 の基準モデル（再現解析）に対し、建屋－地盤間の接触・剥離現象（地下外壁－側面地盤間の剥離・滑り及び基礎－底面地盤間の浮き上がり）を以下に示す方法により三次元的にモデル化した地震応答解析モデル（以下「接触・剥離モデル（再現解析）」という。）である。

図 4.16 及び図 4.17 に建屋－地盤間の接触・剥離現象のモデル化概念図を示す。ジョイント要素による接触・剥離現象のモデル化は、図 4.8 に示す応力－変位関係を剥離方向及び滑り方向に設定することで、時刻歴応答解析による剥離・滑り・基礎浮き上がりに伴う非線形挙動を考慮した。このとき、剥離が生じた際の剛性は $K=0$ 、接触が生じた際の剛性は、中村ら（2008）⁴⁴ を参考に感度解析を行い、Novak による方法から求まる側面地盤のばね定数の 1000 倍となるように設定した。また、浮き上がりが生じた際の剛性は、同様の感度解析より、 $K=0$ 、接触が生じた際の剛性は、同様の感度解析より、田治見の振動アドミッタンス理論に基づく方法から求まる底面地盤のばね定数の 1000 倍となるように設定した。これらばね定数に対する設定値は、感度解析の 50 倍より増加しているが、これは対象とする地盤条件が感度解析と再現解析で大きく異なるためである。

建屋－地盤間の剥離・滑り・基礎浮き上がり現象は、ジョイント要素に付加する初期応力と地震時増分土圧との差分から時刻歴非線形解析により求めた。このとき、収束計算時の反復方法は接線剛性法とし、収束回数は 3 回とした。収束回数を感度解析の 1 回から 3 回に変更した理由は、後述する非線形計算に伴うノイズの発生を抑制するためである。3 回の計算により収束が得られない場合は、残差力を次の解析ステップに持ち越した。また、解析の時間刻みは 0.001 秒とし、解析の継続時間は、図 3.7 に示す地震動のうち、主要動である 29.78 秒から 43.77 秒の 14 秒間とした。

一方、ばね要素については、4.1 と同様の設定とした。

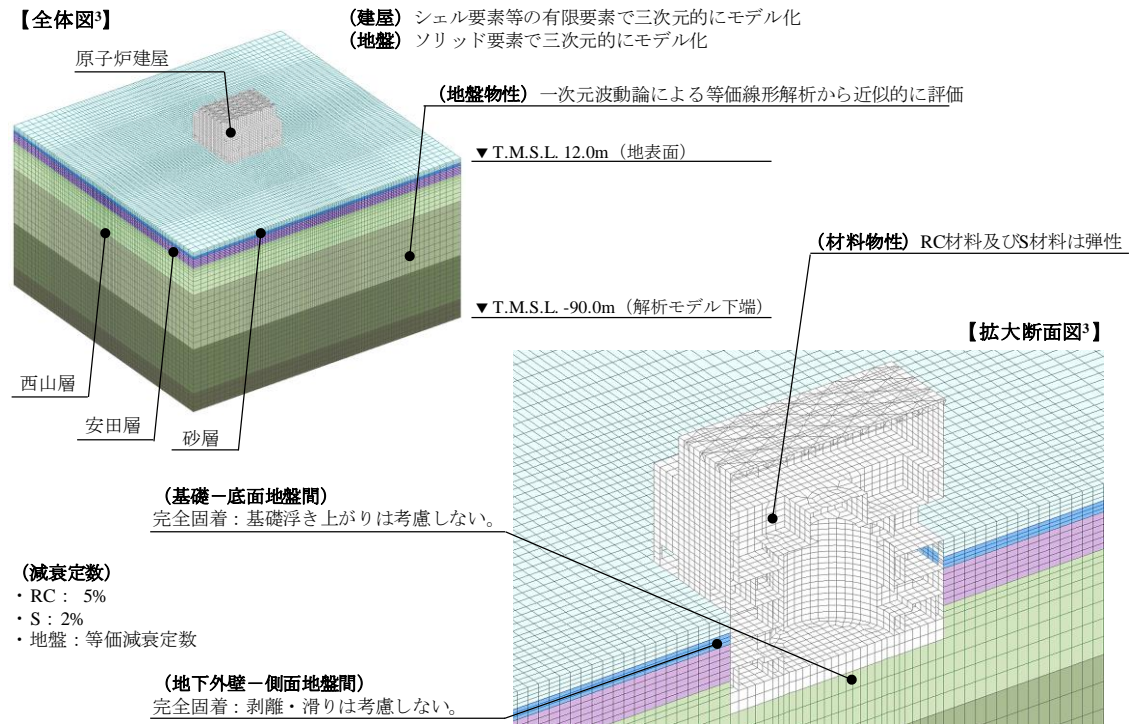


図 4.10 時間領域の基準モデル (C9-1) (再現解析：地盤 FEM によるモデル化)
Fig. 4.10 Reference model in time domain (C9-1): FEM modeling of soil for simulation analyses

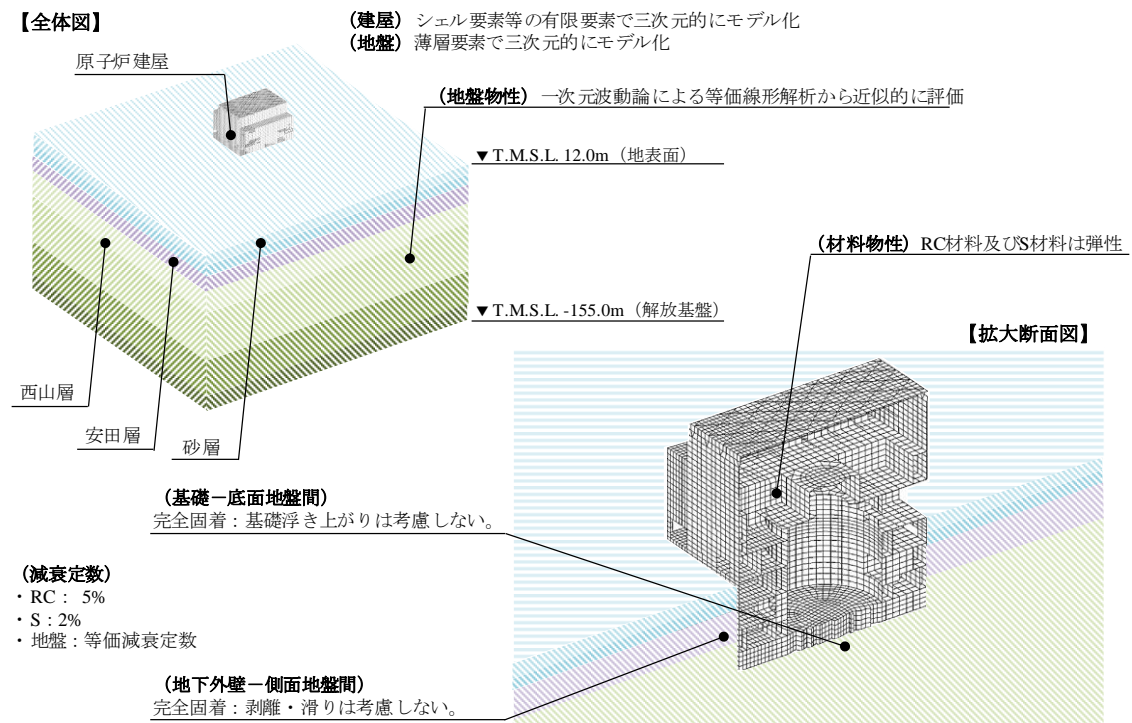


図 4.11 周波数領域の基準モデル (C9-2) (再現解析：地盤 TLEM によるモデル化)
Fig. 4.11 Reference model in frequency domain (C9-2): TLEM modeling of soil for simulation analyses

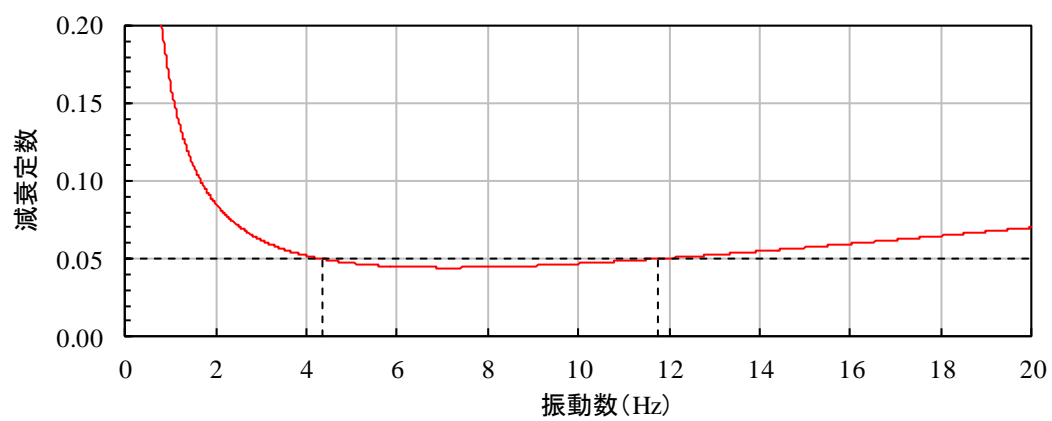
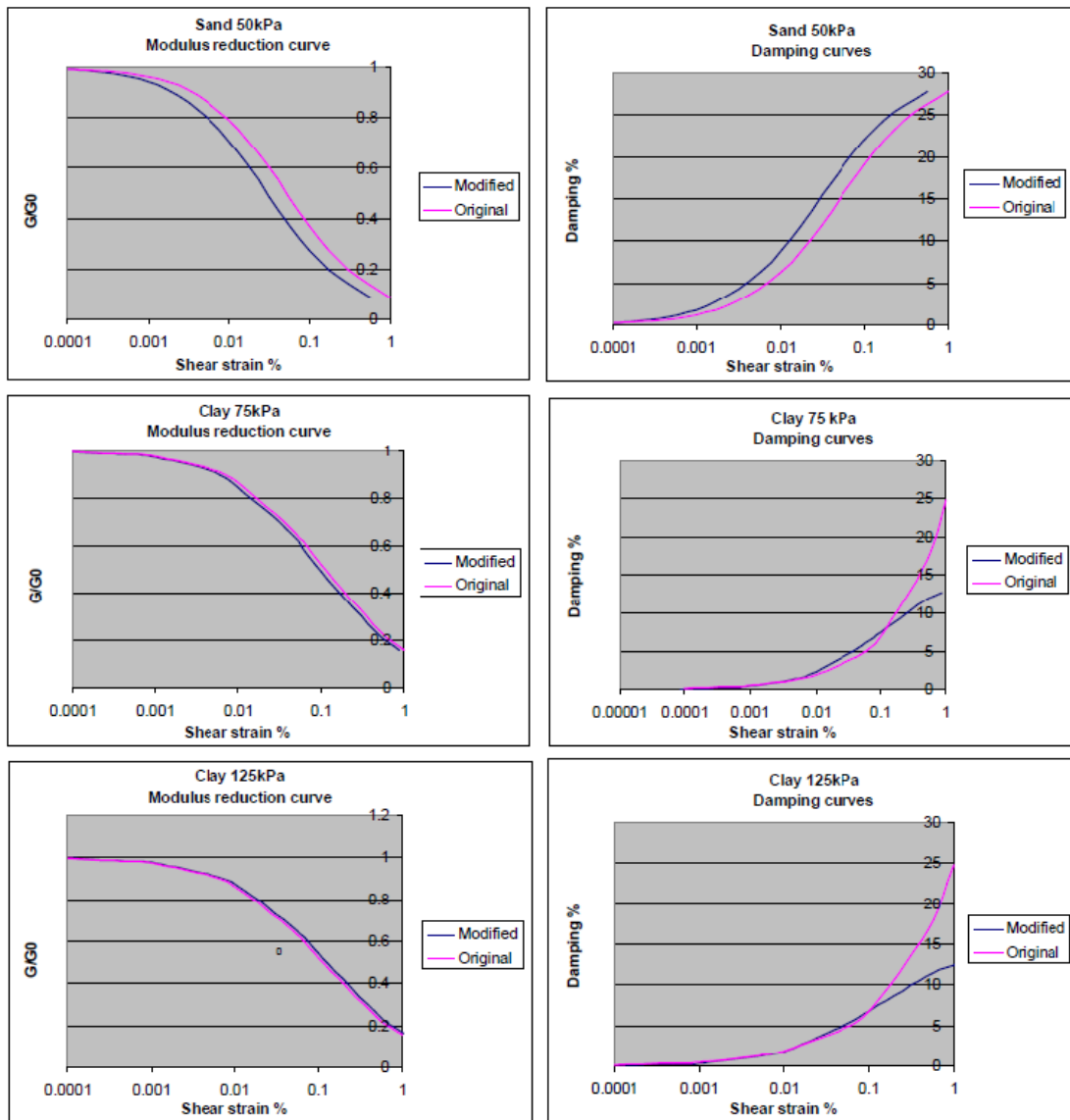


図 4.12 再現解析で使用する RC 造のレーリー減衰の特性

Fig. 4.12 Rayleigh damping properties for RC structures in simulation analyses



出典) IAEA, Review of Seismic Evaluation Methodologies for Nuclear Power Plants Based on a Benchmark Exercise, IAEA TECDOC No. 1722, 2013³³

図 4.13 地盤の動的ひずみ依存特性
 Fig. 4.13 Nonlinear curves of sand and clay

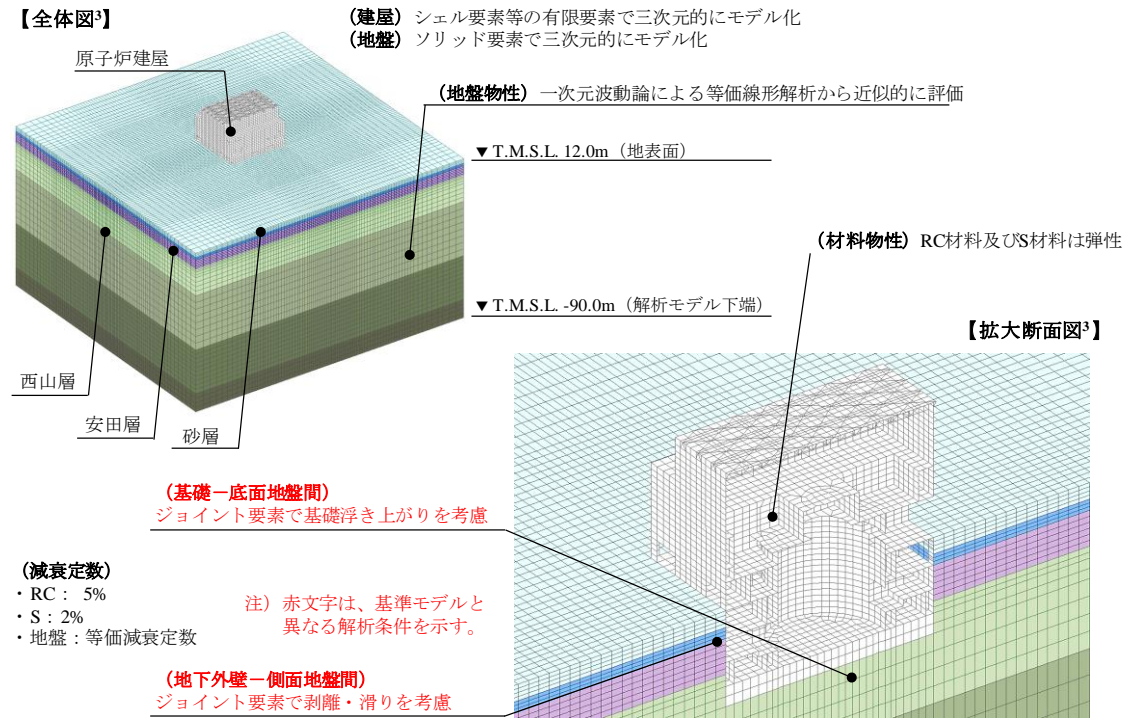


図 4.14 時間領域の接触・剥離モデル(C10-1)(再現解析：地盤 FEM によるモデル化)
Fig. 4.14 Contact-separation model in time domain (C10-1): FEM modeling of soil for simulation analyses

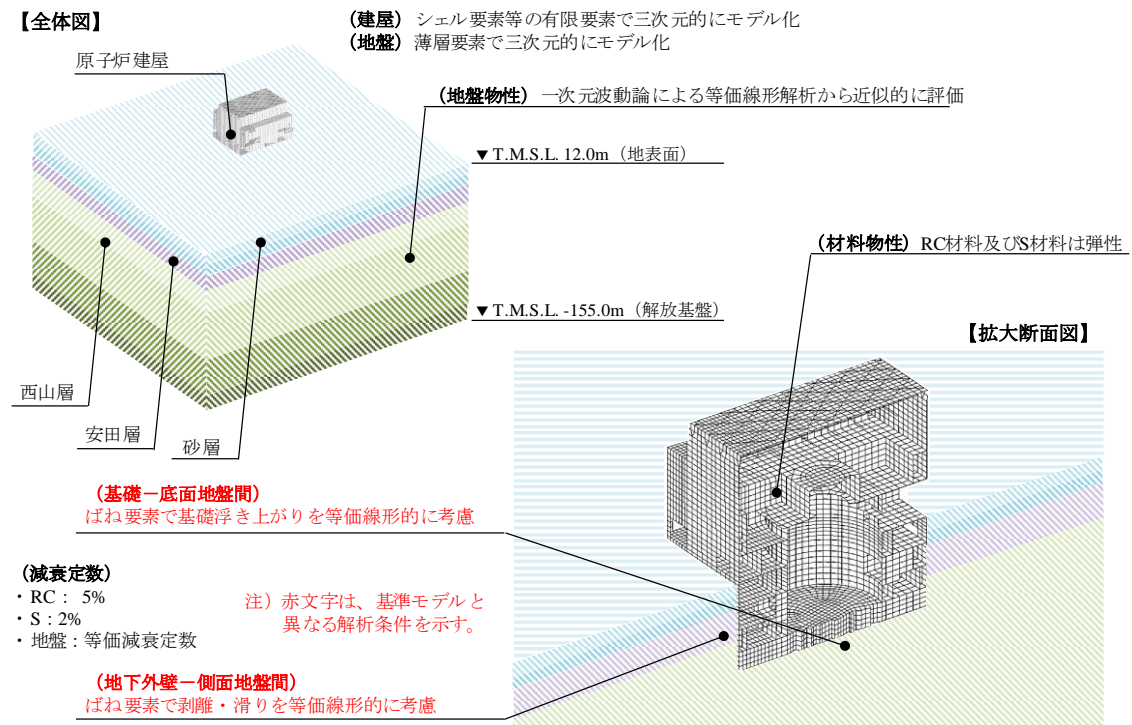


図 4.15 周波数領域の接触・剥離モデル(C10-2)(再現解析：地盤 TLEM によるモデル化)
Fig. 4.15 Contact-separation model in frequency domain (C10-2): TLEM modeling of soil for simulation analyses

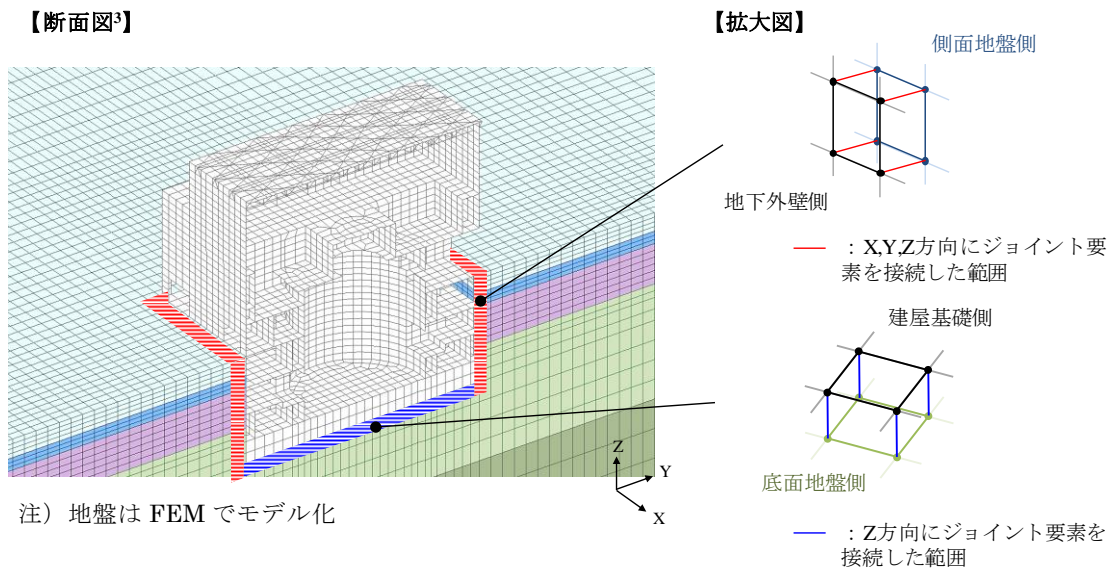


図 4.16 時間領域の剥離・滑り・浮き上がりのモデル化概念図 (C10-1) (再現解析:地盤 FEM によるモデル化)

Fig. 4.16 Conceptual diagram of 3D-FEM Model including separating, sliding, and uplifting in time domain (C10-1): FEM modeling of soil for simulation analyses

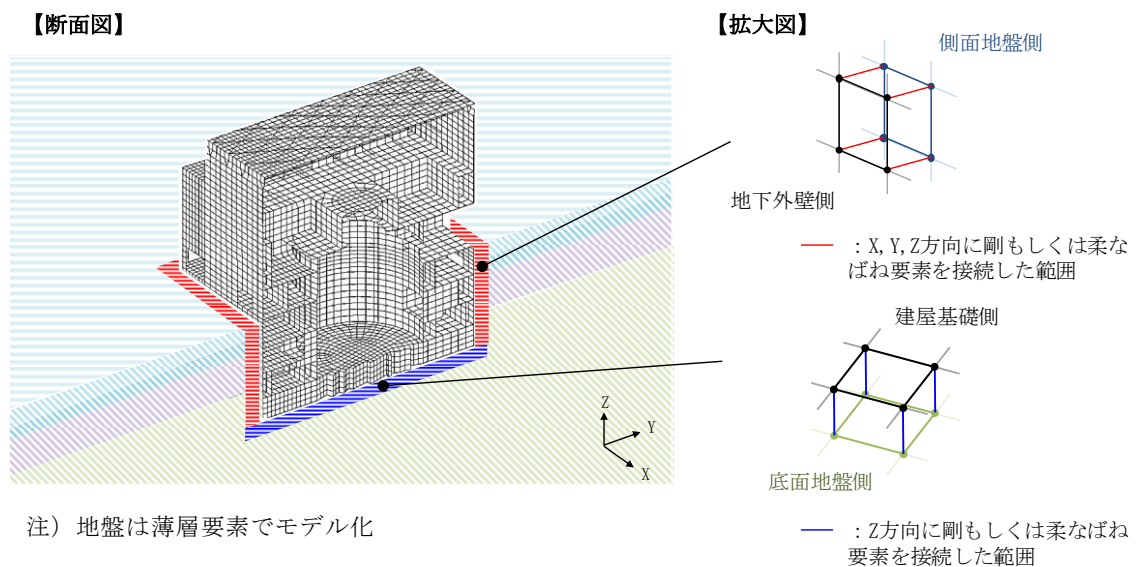


図 4.17 周波数領域の剥離・滑り・浮き上がりのモデル化概念図 (C10-2) (再現解析:地盤 TLEM によるモデル化)

Fig. 4.17 Conceptual diagram of 3D-FEM model including separating, sliding, and uplifting in frequency domain (C10-2): TLEM modeling of soil for simulation analyses

5. 地震応答解析結果

本章では、第4章に基づき作成した地盤 FEM (時間領域) 及び地盤 TLEM (周波数領域) の2種類の地震応答解析モデルによる解析結果を相互に比較した。このとき、時間領域を対象とした地盤 FEM による地震応答解析結果は、委託事業より得られた解析結果³を基に概要を作成した。

5.1 感度解析結果

感度解析で使用した地震応答解析モデルによる解析結果の概要を以下に示す。

5.1.1 水平2方向及び鉛直方向の地震動入力を影響因子とした地震応答解析モデル

本項では、2.5.4に基づき、水平2方向及び鉛直方向の地震動入力を影響因子とした場合の建屋の伝達関数、最大応答加速度、床応答加速度スペクトルについて、感度解析の結果から建屋の耐震安全性及び床応答に与える影響を検討した。

(1) 伝達関数

図 5.1 にクレーン階の伝達関数を示す。図 5.1 は、地盤 FEM によってモデル化された時間領域の基準モデル (感度解析) の伝達関数及び地盤 TLEM によってモデル化された周波数領域の基準モデル (感度解析) の伝達関数である。このとき、伝達関数はクレーン階の代表節点の平均とした。なお、伝達関数は、解放基盤面に入力される地震動のフーリエ振幅に対する代表節点の応答のフーリエ振幅の比として評価した。また、伝達関数は、使用する解析プログラムの特性により、地盤 FEM によってモデル化された時間領域の基準モデル (感度解析) においては、水平2方向及び鉛直方向の3方向同時入力による応答値に対して評価したのに対し、地盤 TLEM によってモデル化された周波数領域の基準モデル (感度解析) においては、1方向単独入力による応答値に対して評価した。

地盤 FEM によってモデル化された時間領域の基準モデル (感度解析) の伝達関数は、図 5.1 が示すように、NS 方向の卓越振動数で 4.4Hz 程度である。伝達関数の曲線は 10Hz 以下の振動数帯で2つのピークを有しており、その形状は 5.0Hz 近傍に存在する1つのピークを2つに割ったようにも見られる。また、10Hz 以降の振動数帯で伝達関数の曲線に細かな振動が見られ、15Hz 以降で比較的大きな振幅を伴うピークが現れている。

EW 方向の卓越振動数は、5.2Hz 程度である。伝達関数の曲線は 10Hz 以下の振動数帯で2つのピークを有しており、その形状は 5.0Hz から 7.0Hz 近傍に存在する1つピークを2つに割ったようにも見られる。また、10Hz 以降の振動数帯で伝達関数の曲線に細かな振動が見られ、15Hz 以降で比較的大きな振幅を伴うピークが現れている。

UD 方向の卓越振動数は 4.7Hz 程度である。伝達関数の曲線は、全体的に細かな振動を含んでおり、卓越振動数以降も 13Hz 程度まで一定の振幅を有している。

地盤 TLEM によってモデル化された周波数領域の基準モデル (感度解析) の伝達関数は、

図 5.1 が示すように、NS 方向の卓越振動数で 4.2Hz 程度である。伝達関数の曲線は 2 つのピークを有しており、その形状は 5.0Hz 近傍に存在する 1 つのピークを 2 つに割ったようにも見られる。

EW 方向の卓越振動数は、5.3Hz 程度である。伝達関数の曲線は 2 つのピークを有しており、その形状は 6.0Hz 近傍に存在する 1 つピークを 2 つに割ったようにも見られる。

UD 方向の卓越振動数は、11.7Hz 程度である。

(2) 最大応答加速度

図 5.2 に最大応答加速度分布を示す。図 5.2 は、地盤 FEM によってモデル化された時間領域の基準モデル（感度解析）の最大応答加速度分布及び地盤 TLEM によってモデル化された周波数領域の基準モデル（感度解析）の最大応答加速度分布である。このとき、最大応答加速度分布は各階の代表節点の最大応答加速度の平均とした。

地盤 FEM によってモデル化された時間領域の基準モデル（感度解析）の最大応答加速度は、図 5.2 に示すように、NS 方向において、最下階である地下 3 階で 480cm/s²程度を示し、上階に行くに従って値が大きくなる。埋め込みを有する地下部では、地盤の拘束効果により、最大応答加速度は緩やかな増幅を示しており、地上部である 1 階で 580cm/s²程度まで増幅した。一方で、地上部から上の階では、地盤の拘束効果が無くなるため、地下部と比べて最大応答加速度に比較的大きな増幅が見られ、オペフロレベルである 4 階で 930cm/s²程度の値を示した。

EW 方向の最大応答加速度は、地下 3 階で 460cm/s²程度であり、上階に行くに従って NS 方向と同様に大きな値を示した。その値は、1 階で 600cm/s²程度を示した後、4 階で 1080cm/s²程度まで増幅した。

UD 方向の最大応答加速度は、地下 3 階で 380cm/s²程度であり、上階に行くに従って NS 方向及び EW 方向と同様に大きな値を示した。その値は、1 階で 440cm/s²を示した後、4 階で 610cm/s²程度まで増幅した。

地盤 TLEM によってモデル化された周波数領域の基準モデル（感度解析）の最大応答加速度分布は、図 5.2 が示すように、NS 方向において、最下階である地下 3 階で 420cm/s²程度を示し、上階に行くに従って値が大きくなる。埋め込みを有する地下部では、地盤の拘束効果により、最大応答加速度は緩やかな増幅を示しており、地上部である 1 階で 540cm/s²程度まで増幅した。一方で、地上部から上の階では、地盤の拘束効果が無くなるため、地上部と比べ最大応答加速度に比較的大きな増幅が見られ、オペフロレベルである 4 階で 870cm/s²程度の値を示した。

EW 方向の最大応答加速度は、地下 3 階で 430 cm/s²程度であり、上階に行くに従って NS 方向と同様に大きな値を示した。その値は、1 階で 610 cm/s²程度まで増幅した後、4 階で 1020cm/s²程度まで増幅した。

UD 方向の最大応答加速度は、地下 3 階で 330cm/s²程度であり、上階に行くに従って NS

方向及びEW方向と同様に大きな値を示した。その値は、1階で 400cm/s^2 まで増幅し、4階で 550cm/s^2 程度まで増幅した。

(3) 床応答加速度スペクトル

図 5.3 に床応答加速度スペクトルを示す。図 5.3 は、地盤 FEM によってモデル化された時間領域の基準モデル（感度解析）の床応答加速度スペクトル及び地盤 TLEM によってモデル化された周波数領域の基準モデル（感度解析）の床応答加速度スペクトルである。このとき、床応答加速度スペクトルは各階の代表節点の平均とした。

地盤 FEM によってモデル化された時間領域の基準モデル（感度解析）の床応答加速度スペクトルは、図 5.3 が示すように、NS 方向において、最下階である地下 3 階で 0.2~0.3 秒付近と 0.7~0.9 秒付近に 1400cm/s^2 程度の卓越する周期帯を有しており、上階に行くに従って短周期側の最大応答加速度に明らかな増幅が見られた。その値は、地上部である 1 階で最大応答加速度が 2400cm/s^2 程度、オペフロレベルである 4 階で $4800\text{cm/s}^2\sim 4900\text{cm/s}^2$ 程度まで増幅した。

EW 方向の床応答加速度スペクトルは、NS 方向と同様、地下 3 階で 0.2~0.3 秒付近と 0.7~0.9 秒付近に $1400\text{cm/s}^2\sim 1500\text{cm/s}^2$ 程度の卓越する周期帯を有しており、上階に行くに従って短周期側の最大応答加速度に明らかな増幅が見られた。その値は、地上部である 1 階で最大応答加速度が 2800cm/s^2 程度、オペフロレベルである 4 階で 4900cm/s^2 程度まで増幅した。

UD 方向の床応答加速度スペクトルは、0.1~0.2 秒付近に卓越する周期帯を有しており、地下部、地上部共にほぼ同じ範囲に最大応答加速度の増幅が見られた。その値は、地下 3 階で 1200cm/s^2 程度であり、地上部である 1 階で 1400cm/s^2 程度、オペフロレベルである 4 階で 2100cm/s^2 程度まで増幅した。

地盤 TLEM によってモデル化された周波数領域の基準モデル（感度解析）の床応答加速度スペクトルは、図 5.3 が示すように、NS 方向において、最下階である地下 3 階で 0.2~0.3 秒付近と 0.7~0.9 秒付近に 1200cm/s^2 程度の卓越する周期帯を有しており、上階に行くに従って短周期側の最大応答加速度に明らかな増幅が見られた。その値は、地上部である 1 階で最大応答加速度が 2200cm/s^2 程度、オペフロレベルである 4 階で 4600cm/s^2 程度まで増幅した。

EW 方向の床応答加速度スペクトルは、NS 方向と同様、地下 3 階で 0.2~0.3 秒付近と 0.7~0.9 秒付近に $1300\text{cm/s}^2\sim 1400\text{cm/s}^2$ 程度の卓越する周期帯を有しており、上階に行くに従って短周期側の最大応答加速度に明らかな増幅が見られた。その値は、地上部である 1 階で最大応答加速度が 2500cm/s^2 程度、オペフロレベルである 4 階で 4500cm/s^2 程度まで増幅した。

UD 方向の床応答加速度スペクトルは、0.1~0.2 秒付近に卓越する周期帯を有しており、地下部、地上部共にほぼ同じ範囲に最大応答加速度の増幅が見られた。その値は、地下 3

階で 1100cm/s^2 程度であり、地上部である 1 階で 1300cm/s^2 程度、オペフロレベルである 4 階で 1800cm/s^2 程度まで増幅した。

5.1.2 建屋－地盤間の接触・剥離現象のモデル化を影響因子とした地震応答解析モデル

本項では、2.5.4に基づき、建屋－地盤間の接触・剥離現象のモデル化を影響因子とした場合の建屋の伝達関数、最大応答加速度、床応答加速度スペクトルについて、感度解析の結果から建屋の耐震安全性及び床応答に与える影響を検討した。

(1) 伝達関数

図 5.4 にクレーン階の伝達関数を示す。図 5.4 は、地盤 FEM によってモデル化された時間領域の接触・剥離モデル（感度解析）の伝達関数及び地盤 TLEM によってモデル化された周波数領域の接触・剥離モデル（感度解析）の伝達関数である。

地盤 FEM によってモデル化された時間領域の接触・剥離モデル（感度解析）の伝達関数は、図 5.4 が示すように、NS 方向の卓越振動数で 4.0Hz 程度である。伝達関数の曲線は 10Hz 以下の振動数帯で 2 つのピークを有しており、その形状は 5.0Hz 近傍に存在する 1 つのピークを 2 つに割ったようにも見られる。また、10Hz 以降の振動数帯で伝達関数の曲線に細かな振動が見られ、15Hz 以降で極端に大きな振幅を伴うピークが現れている。

EW 方向の卓越振動数は、5.0Hz 程度である。伝達関数の曲線は 2 つのピークを有しており、その形状は 5.0Hz から 7.0Hz 近傍に存在する 1 つピークを 2 つに割ったようにも見られる。また、10Hz 以降の振動数帯で伝達関数の曲線に細かな振動が見られ、15Hz 以降で比較的大きな振幅を伴うピークが現れている。

UD 方向の卓越振動数は 4.7Hz 程度である。伝達関数の曲線は、全体的に細かな振動を含んでおり、卓越振動数以降も 13Hz 程度まで一定の振幅を有している。

地盤 TLEM によってモデル化された周波数領域の接触・剥離モデル（感度解析）の伝達関数は、図 5.4 が示すように、NS 方向の卓越振動数で 3.8Hz 程度である。伝達関数の曲線は 2 つのピークを有しており、その形状は 5.0Hz 近傍に存在する 1 つのピークを 2 つに割ったようにも見られる。

EW 方向の卓越振動数は、4.4Hz 程度である。伝達関数の曲線は 2 つのピークを有しており、その形状は 6.0Hz 近傍に存在する 1 つピークを 2 つに割ったようにも見られる。

UD 方向の卓越振動数は、11.6Hz 程度である

(2) 最大応答加速度

図 5.5 に最大応答加速度分布を示す。図 5.5 は、地盤 FEM によってモデル化された時間領域の接触・剥離モデル（感度解析）の最大応答加速度分布及び地盤 TLEM によってモデル化された周波数領域の接触・剥離モデル（感度解析）の最大応答加速度分布である。なお、図中の地盤 FEM に見られる地下部の一時的な最大応答加速度の増幅については、その理由を 6.2.1 (2) で考察する。

地盤 FEM によってモデル化された時間領域の接触・剥離モデル（感度解析）の最大応答

加速度分布は、図 5.5 が示すように、NS 方向において、最下階である地下 3 階で 550cm/s^2 程度であり、上階に行くに従って値が大きくなる。埋め込みを有する地下部では、地盤の拘束効果により、最大応答加速度は一旦緩やかな増幅を示すものの、地盤との境界部付近で 1000cm/s^2 程度の急激な値の増幅が見られた。地盤の拘束効果が無くなる上階では、使用済燃料プールを構成する極厚の壁の影響もあり、一時的に最大応答加速度の谷が現れるものの、その増幅傾向に変わりはなく、オペフロレベルである 4 階で 860cm/s^2 程度まで値が回復した。

EW 方向の最大応答加速度は、地下 3 階で 540cm/s^2 程度であり、上階に行くに従って NS 方向と同様に大きな値を示した。その値は、1 階で 980cm/s^2 程度を示した後、4 階で 990cm/s^2 程度まで値が回復した。

UD 方向の最大応答加速度は、地下 3 階で 1040cm/s^2 程度の極端に大きなピークを迎えており、NS 方向及び EW 方向とはやや異なる傾向を示しているものの、埋め込みを有する地下部とその上階で分布傾向に違いがあるようにも見られる。その値は、1 階で 830cm/s^2 程度を示した後、4 階で 580cm/s^2 程度に低下した。

地盤 TLEM によってモデル化された周波数領域の接触・剥離モデル（感度解析）の最大応答加速度分布は、図 5.5 が示すように、NS 方向において、最下階である地下 3 階で 410cm/s^2 程度を示し、上階に行くに従って値が大きくなる。埋め込みを有する地下部では、剥離・滑り・浮き上がりを保守的に考慮したことにより、地盤の拘束効果がやや低下した傾向が見られ、最大応答加速度に比較的大きな増幅が現れた。その値は、地上部である 1 階で 590cm/s^2 程度まで増幅した後、オペフロレベルである 4 階で 940cm/s^2 程度まで増幅した。

EW 方向の最大応答加速度は、地下 3 階で 420cm/s^2 程度であり、上階に行くに従って NS 方向と同様に大きな値を示した。その値は、1 階で 570cm/s^2 程度まで増幅した後、4 階で 940cm/s^2 程度まで増幅した。

UD 方向の最大応答加速度は、地下 3 階で 410cm/s^2 程度であり、上階に行くに従って NS 方向及び EW 方向と同様に大きな値を示した。その値は、1 階で 510cm/s^2 まで増幅し、4 階で 660cm/s^2 程度まで増幅した。

(3) 床応答加速度スペクトル

図 5.6 に床応答加速度スペクトルを示す。図 5.6 は、地盤 FEM によってモデル化された時間領域の接触・剥離モデル（感度解析）の床応答加速度スペクトル及び地盤 TLEM によってモデル化された周波数領域の接触・剥離モデル（感度解析）の床応答加速度スペクトルである。なお、図中の地盤 FEM に見られる短周期側の最大応答加速度の傾向の違いについては、その理由を 6.2.1 (3) で考察する。

地盤 FEM によってモデル化された時間領域の接触・剥離モデル（感度解析）の床応答加速度スペクトルは、図 5.6 が示すように、NS 方向において、最下階である地下 3 階で 0.2

～0.3 秒付近と 0.7～0.9 秒付近に 1300cm/s^2 程度の卓越する周期帯を有しており、上階に行くに従って短周期側の最大応答加速度に明らかな増幅が見られた。その値は、地上部である 1 階で最大応答加速度が 2300cm/s^2 程度、オペフロレベルである 4 階で 4600cm/s^2 程度まで増幅した。

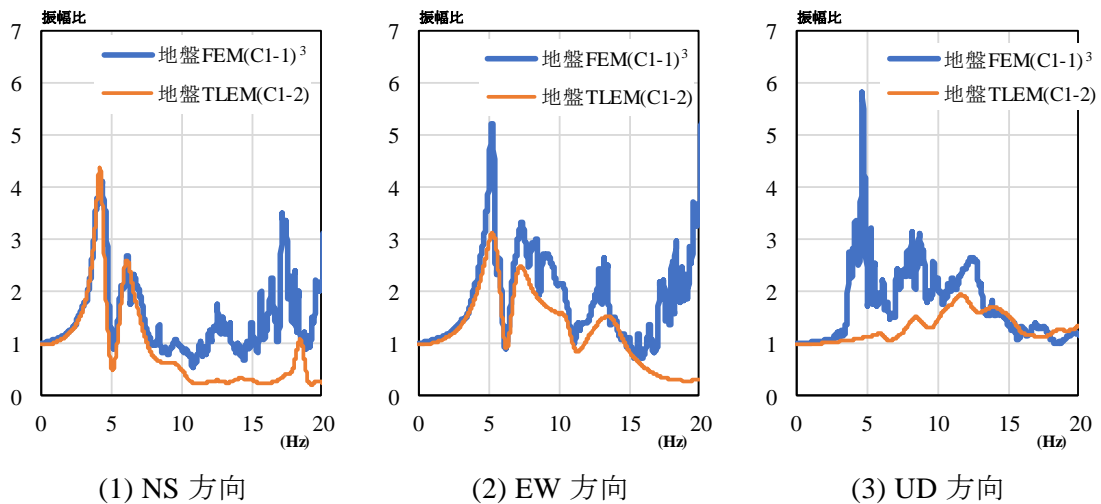
EW 方向の床応答加速度スペクトルは、NS 方向と同様、地下 3 階で 0.2～0.3 秒付近と 0.7～0.9 秒付近に 1400cm/s^2 程度の卓越する周期帯を有しており、上階に行くに従って短周期側の最大応答加速度に明らかな増幅が見られた。その値は、地上部である 1 階で最大応答加速度が 2700cm/s^2 程度、オペフロレベルである 4 階で 4600cm/s^2 程度まで増幅した。

UD 方向の床応答加速度スペクトルは、0.1～0.2 秒付近に卓越する周期帯を有しており、地下部、地上部共にほぼ同じ範囲に最大応答加速度の増幅が見られた。その値は、地下 3 階で 1200cm/s^2 程度であり、地上部である 1 階で最大応答加速度が 1400cm/s^2 程度、オペフロレベルである 4 階で 2000cm/s^2 程度まで増幅した。

地盤 TLEM によってモデル化された周波数領域の接触・剥離モデル（感度解析）の床応答加速度スペクトルは、図 5.6 が示すように、NS 方向において、最下階である地下 3 階で 0.2～0.3 秒付近と 0.7～0.9 秒付近に $1200\text{cm/s}^2\sim 1300\text{cm/s}^2$ 程度の卓越する周期帯を有しており、上階に行くに従って短周期側の最大応答加速度に明らかな増幅が見られた。その値は、地上部である 1 階で最大応答加速度が 2400cm/s^2 程度、オペフロレベルである 4 階で 5500cm/s^2 程度まで増幅した。

EW 方向の床応答加速度スペクトルは、NS 方向と同様、地下 3 階で 0.2～0.3 秒付近と 0.7～0.9 秒付近に $1200\text{cm/s}^2\sim 1300\text{cm/s}^2$ 程度の卓越する周期帯を有しており、上階に行くに従って短周期側の最大応答加速度に明らかな増幅が見られた。その値は、地上部である 1 階で最大応答加速度が 2900cm/s^2 程度、オペフロレベルである 4 階で 6100cm/s^2 程度まで増幅した。

UD 方向の床応答加速度スペクトルは、0.2～0.3 秒付近に卓越する周期帯を有しており、NS 方向及び EW 方向と同一であることから、水平方向の地震動入力によって誘発された応答（誘発上下動）の影響と見られ、地下部、地上部共にほぼ同じ範囲に最大応答加速度の増幅が現れた。その値は、地下 3 階で 1600cm/s^2 程度であり、地上部である 1 階で 2100cm/s^2 程度、オペフロレベルである 4 階で 2500cm/s^2 程度まで増幅した。



注) 解析プログラムの特性により、地盤 FEM による伝達関数は水平 2 方向及び鉛直方向の 3 方向同時入力による応答値に対して、地盤 TLEM による伝達関数は 1 方向単独入力による応答値に対して評価を行った。

図 5.1 クレーン階 伝達関数 [基準モデル (感度解析)]

Fig. 5. 1 Transfer functions at crane floor: reference model for sensitivity analyses

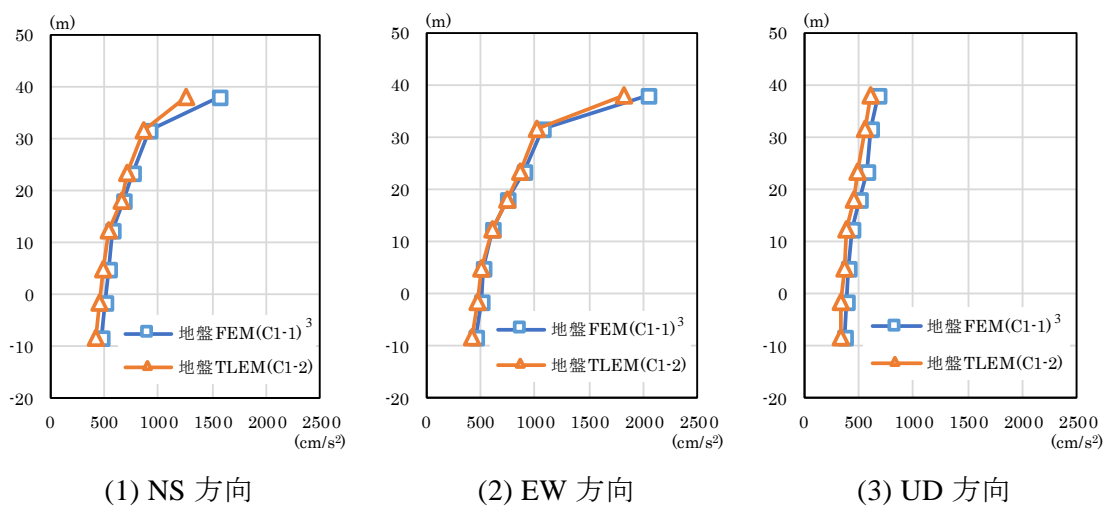
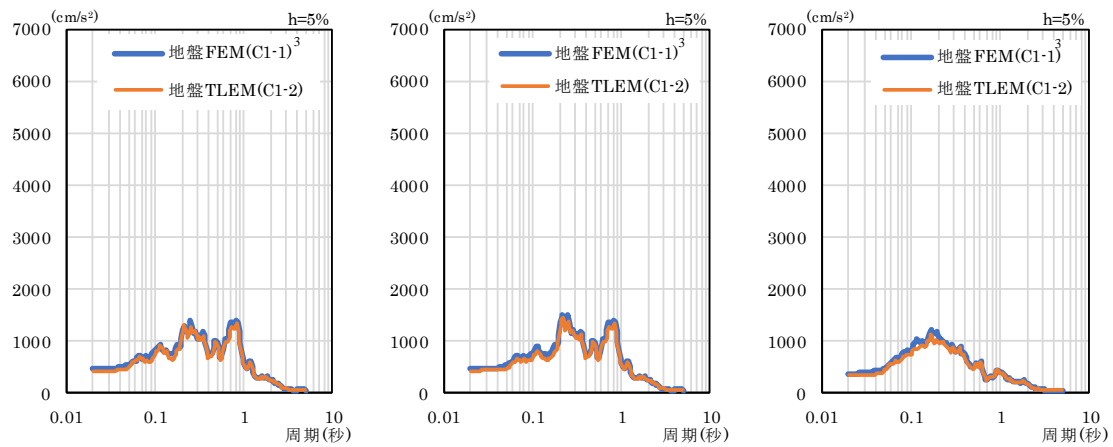


図 5.2 最大応答加速度分布 [基準モデル (感度解析)]

Fig. 5. 2 Maximum accelerations: reference model for sensitivity analyses

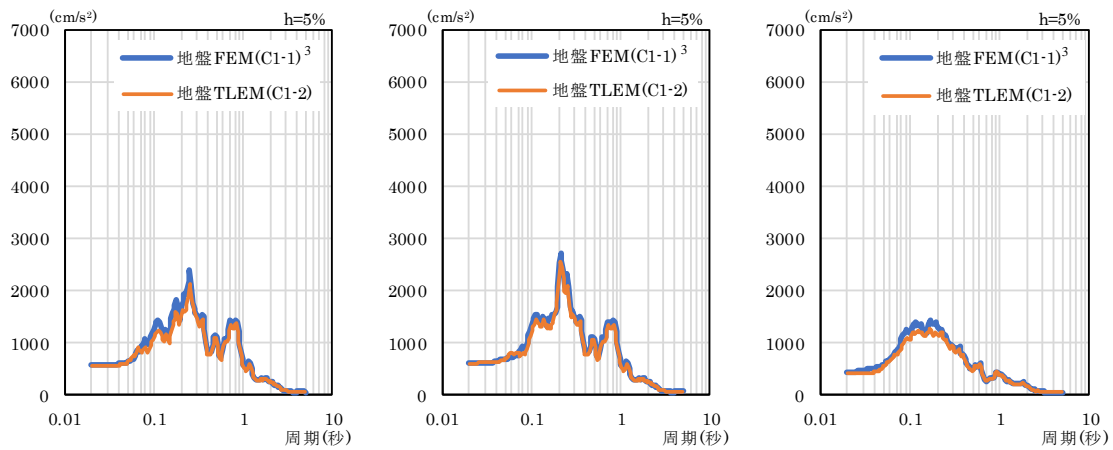


① NS 方向

② EW 方向

③ UD 方向

(1) 地下 3 階

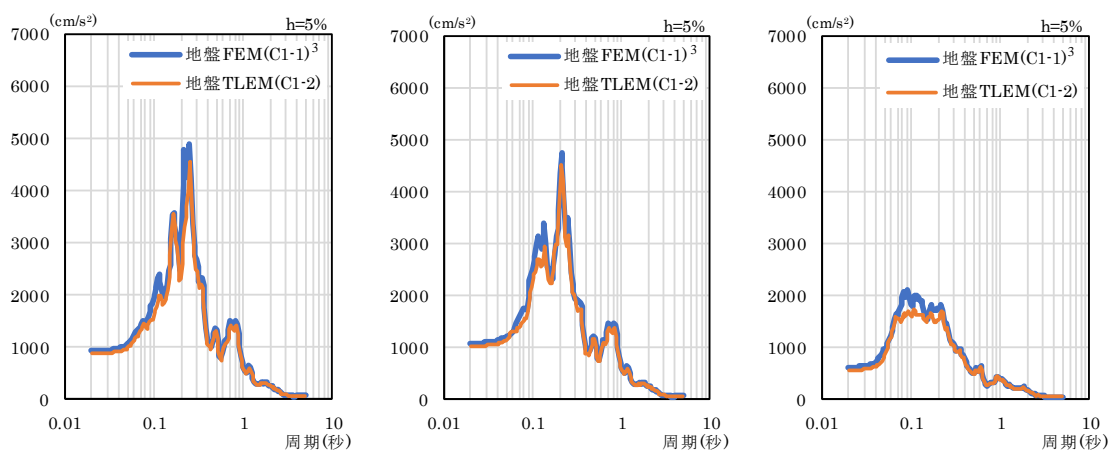


① NS 方向

② EW 方向

③ UD 方向

(2) 1 階



① NS 方向

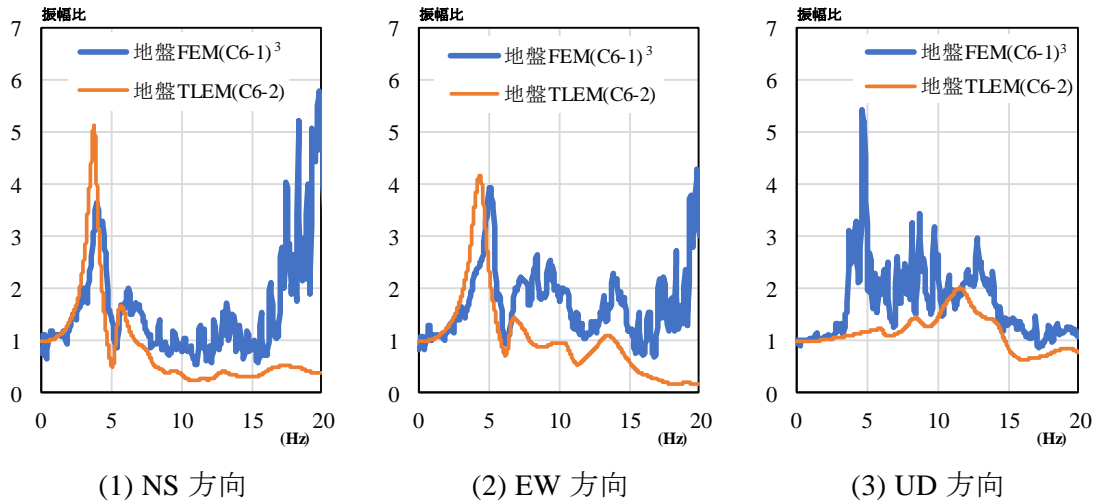
② EW 方向

③ UD 方向

(3) 4 階

図 5.3 床応答加速度スペクトル [基準モデル (感度解析)]

Fig. 5.3 FRS: reference model for sensitivity analyses



注) 解析プログラムの特性により、地盤 FEM による伝達関数は水平 2 方向及び鉛直方向の 3 方向同時入力による応答値に対して、地盤 TLEM による伝達関数は 1 方向単独入力による応答値に対して評価を行った。

図 5.4 クレーン階 伝達関数 [接触・剥離モデル (感度解析)]

Fig. 5.4 Transfer functions at crane floor: contact-separation model for sensitivity analyses

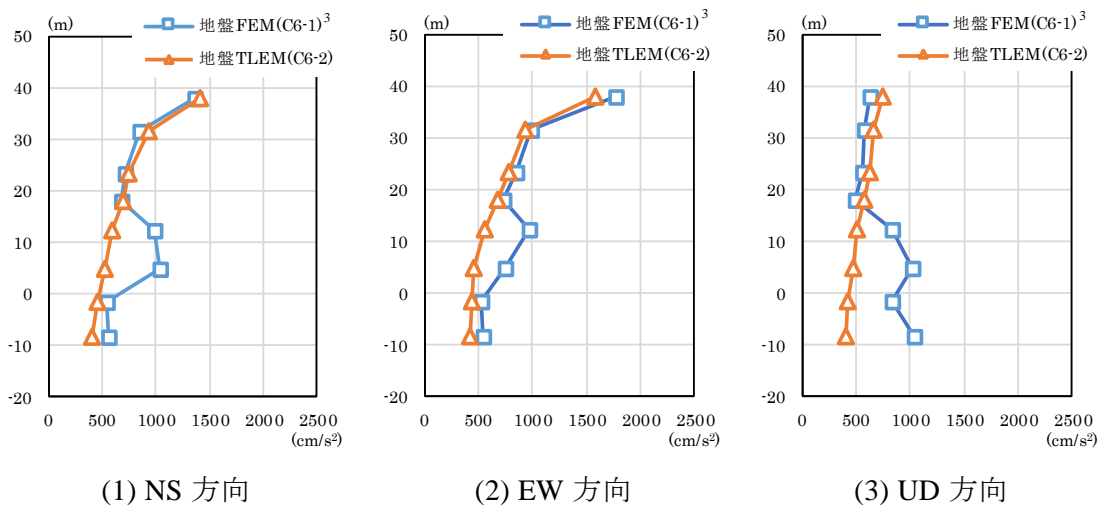
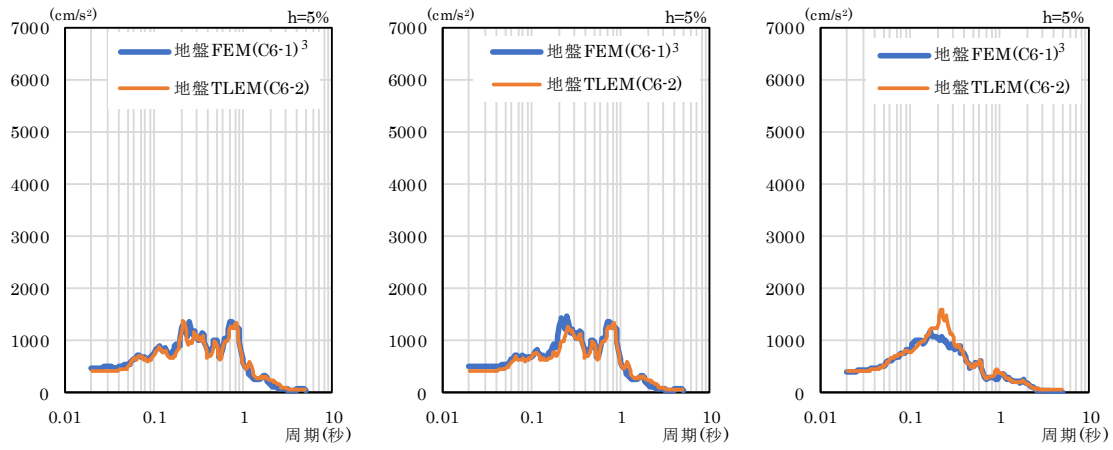


図 5.5 最大応答加速度分布 [接触・剥離モデル (感度解析)]

Fig. 5.5 Maximum accelerations: contact-separation model for sensitivity analyses

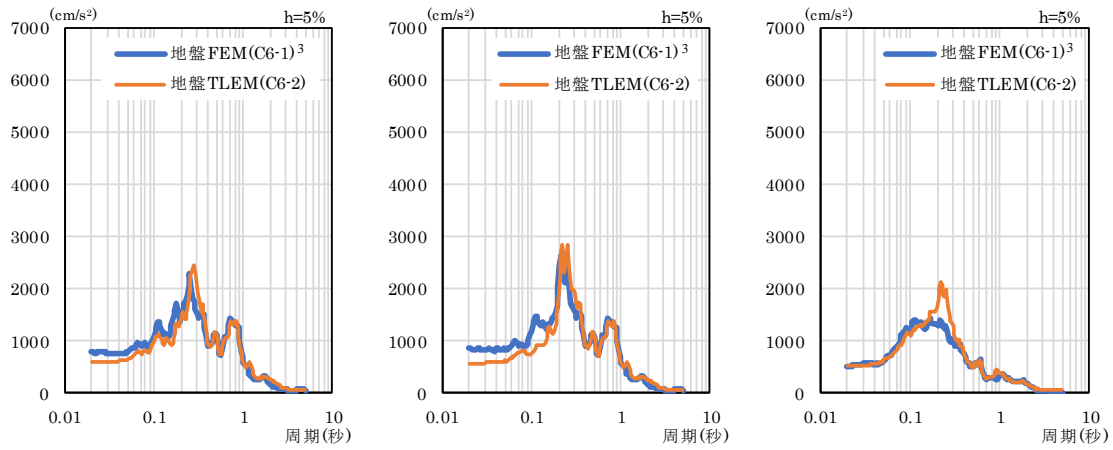


① NS 方向

② EW 方向

③ UD 方向

(1) 地下 3 階

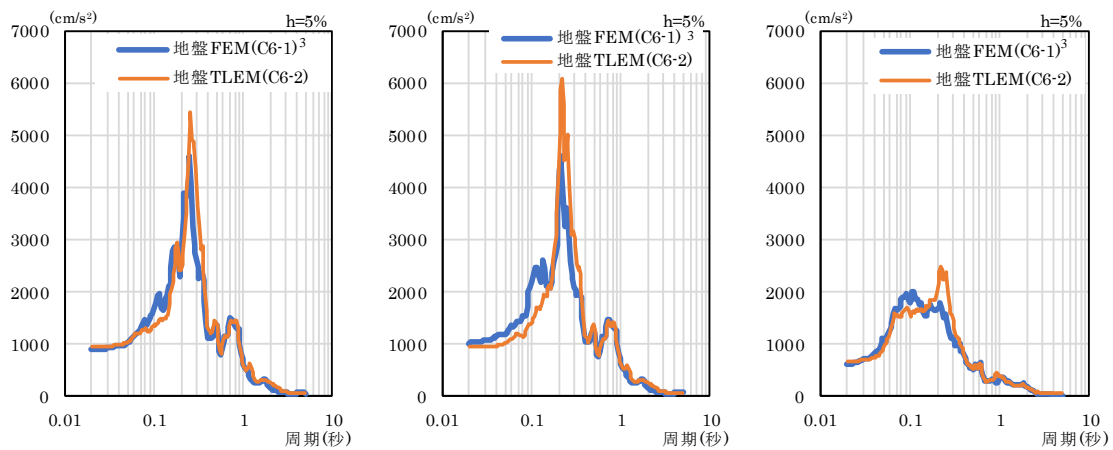


① NS 方向

② EW 方向

③ UD 方向

(2) 1 階



① NS 方向

② EW 方向

③ UD 方向

(3) 4 階

図 5.6 床応答加速度スペクトル [接触・剥離モデル (感度解析)]

Fig. 5. 6 FRS: contact-separation model for sensitivity analyses

5.2 再現解析結果

再現解析で使用した地震応答解析モデルによる解析結果の概要を以下に示す。

5.2.1 水平2方向及び鉛直方向の地震動入力を影響因子とした地震応答解析モデル

本項では、2.5.4に基づき、水平2方向及び鉛直方向の地震動入力を影響因子とした場合の観測点の応答（加速度時刻歴波形、床応答加速度スペクトル）と建屋の応答（伝達関数、最大応答加速度、床応答加速度スペクトル）について、再現解析の結果から建屋の耐震安全性及び床応答に与える影響を検討した。このとき、地盤 FEM（時間領域）によってモデル化された解析モデルから求まる加速度時刻歴波形及びその波形から求まる最大値並びに床応答加速度スペクトルについては、一部の節点の応答加速度において、波形がノイズ的に細かく振動する現象が現れており、これは非線形解析時の力の不釣り合いに起因した数値計算上のノイズの可能性が考えられることから、100Hz 以上の高振動数帯を対象にその振動数成分を除去するフィルター処理が行われた。この高振動数成分を対象にしたフィルター処理の詳細については、委託研究事業成果報告書³の 3.2.3 を参照されたい。

(1) 観測点の応答

① 加速度時刻歴波形

図 5.7 に観測点位置における加速度時刻歴波形を示す。図 5.7 は、地盤 FEM によってモデル化された時間領域の基準モデル（再現解析）の加速度時刻歴波形及び地盤 TLEM によってモデル化された周波数領域の基準モデル（再現解析）の加速度時刻歴波形である。このとき、3 階観測点の応答波形は隣接する外壁直下の節点を用いることとした。

地盤 FEM 及び地盤 TLEM によってモデル化された時間領域及び周波数領域の基準モデル（再現解析）の加速度時刻歴波形は、図 5.7 に示すように、基礎スラブ上で NS、EW、UD 方向によらず観測記録とおおむね一致した傾向を示した。一方、3 階観測点においては、NS、EW 方向の加速度時刻歴波形は解析モデルによらずおおむね一致した傾向を示すものの、UD 方向の一部波形で観測記録とは異なる細かな振動が現れた。

② 床応答加速度スペクトル

図 5.8 に観測点位置における床応答加速度スペクトルを示す。図 5.8 は、地盤 FEM によってモデル化された時間領域の基準モデル（再現解析）の床応答加速度スペクトル及び地盤 TLEM によってモデル化された周波数領域の基準モデル（再現解析）の床応答加速度スペクトルである。

地盤 FEM 及び地盤 TLEM によってモデル化された時間領域及び周波数領域の基準モデル（再現解析）の床応答加速度スペクトルは、図 5.8 に示すように、基礎スラブ上で NS、EW、UD 方向によらず観測記録とおおむね一致した傾向を示した。また、3 階観測点においては、NS、EW 方向の床応答加速度スペクトルのうち NS 方向において、地盤 TLEM による最大応答加速度が観測記録をやや上回るピークを示すものの、全体としておおむね一

致した傾向が見られた。一方で、UD 方向の床応答加速度スペクトルは、建屋に影響を及ぼす主要な周期帯において、地盤 FEM 及び地盤 TLEM による解析モデルの最大応答加速度が観測記録を上回る傾向が見られ、観測記録に対して解析モデルの応答が大きく評価されていることが確認された。

(2) 建屋の応答

① 伝達関数

図 5.9 に 3 階観測点における伝達関数を示す。図 5.9 は、観測記録の伝達関数及び地盤 FEM によってモデル化された時間領域の基準モデル（再現解析）の伝達関数、地盤 TLEM によってモデル化された周波数領域の基準モデル（再現解析）の伝達関数である。これら伝達関数は、地下 3 階（基礎スラブ上）の観測点における応答のフーリエ振幅に対する 3 階の観測点における応答のフーリエ振幅の比として評価した。このとき、地盤 FEM では、解析プログラムの特性により、水平 2 方向及び鉛直方向の 3 方向同時入力による入力波形の補正を行った地下 3 階（基礎スラブ上）の観測点における応答波形に対して伝達関数を求めた。一方、地盤 TLEM では、1 方向単独入力による入力波形の補正を行った地下 3 階（基礎スラブ上）の観測点における応答波形に対して伝達関数を求めた。このため、地盤 FEM 及び地盤 TLEM による伝達関数の間には、入力波形の作成方法の違い等による差が見られる。なお、観測記録については、地下 3 階（基礎スラブ上）の観測記録のフーリエ振幅に対する 3 階の観測記録のフーリエ振幅の比として評価した。

観測記録による伝達関数は、図 5.9 が示すように、NS 方向の卓越振動数で 3.4Hz 程度である。伝達関数の曲線には細かな振動が見られ、15Hz 前後に比較的大きな振幅を伴うピークが現れている。

EW 方向の卓越振動数は、3.8Hz 程度である。伝達関数の曲線には、卓越振動数以降細かな振動が見られるものの、卓越振動数を上回る振幅は見られない。

UD 方向の卓越振動数は、15.5Hz 程度である。伝達関数の曲線は、全体的に細かな振動を含んでいるものの、卓越振動数付近に明らかなピークが見られる。

地盤 FEM によってモデル化された時間領域の基準モデル（再現解析）の伝達関数は、図 5.9 が示すように、NS 方向の卓越振動数で 3.1Hz 程度である。伝達関数の曲線は 10Hz 以降に大きな振幅を伴うピークを迎えた後、細かな振動が見られるようになり、15Hz 以降に卓越振動数の振幅と同程度のピークが現れる。

EW 方向の卓越振動数は、3.8Hz 程度である。伝達関数の曲線は NS 方向と同様に、10Hz 以降に大きな振幅を伴うピークを迎えるものの、その後、大きな振幅は見られない。

UD 方向の卓越振動数は 12.5Hz 程度である。伝達関数の曲線は、全体的に細かな振動を含んでいるものの、卓越振動数付近に明らかなピークを有している。

地盤 TLEM によってモデル化された周波数領域の基準モデル（再現解析）の伝達関数は、図 5.9 が示すように、NS 方向の卓越振動数で 2.6Hz 程度である。

EW 方向の卓越振動数は、2.6Hz 程度である。

UD 方向の卓越振動数は、19.1Hz 程度である。伝達関数の曲線は、10Hz 程度の振動数帯にもピークを有しているものの、15Hz 以降の高振動数帯で明らかなピークが現れている。

② 最大応答加速度

図 5.10 に最大応答加速度分布を示す。図 5.10 は、地下 3 階（基礎スラブ上）及び 3 階の観測点の最大応答加速度及び地盤 FEM によってモデル化された時間領域の基準モデル（再現解析）の最大応答加速度分布、地盤 TLEM によってモデル化された周波数領域の基準モデル（再現解析）の最大応答加速度分布である。

地盤 FEM によってモデル化された時間領域の基準モデル（再現解析）の最大応答加速度は、図 5.10 が示すように、NS 方向において、観測記録とおおむね一致した傾向が見られ、最下階である地下 3 階で 310cm/s^2 程度を示す。埋め込みを有する地下部では、地盤の拘束効果からほぼ一定の最大応答加速度が得られており、地上部である 1 階で 300cm/s^2 程度の値を示した。一方で、地上部から上の階では、地盤の拘束効果が無くなるため、地下部と比べて最大応答加速度に比較的大きな増幅が見られ、観測点のある 3 階で 370cm/s^2 程度の値を示した。

EW 方向の最大応答加速度は、NS 方向と同様に観測記録とおおむね一致した傾向を示しており、地下 3 階で 400cm/s^2 程度、上階に行くに従って徐々に大きな値を示した。その値は、1 階で 410cm/s^2 程度を示した後、3 階で 430cm/s^2 程度まで増幅した。

UD 方向の最大応答加速度は、観測記録と比較して明らかに大きな値が現れており、地下 3 階で 520cm/s^2 程度、上階に行くに従って大きな値を示した。その値は、1 階で 570cm/s^2 を示した後、3 階で 960cm/s^2 程度まで増幅したものの、クレーン階で最大応答加速度の谷が見られた。

地盤 TLEM によってモデル化された周波数領域の基準モデル（再現解析）の最大応答加速度分布は、図 5.10 が示すように、NS 方向において、観測記録をやや上回る傾向が見られ、最下階である地下 3 階で 270cm/s^2 程度を示し、上階に行くに従って値が大きくなる。埋め込みを有する地下部では、地盤の拘束効果により、最大応答加速度は緩やかな増幅を示しており、地上部である 1 階で 340cm/s^2 程度まで増幅した。一方で、地上部から上の階では、地盤の拘束効果が無くなるため、地上部と比べ最大応答加速度に比較的大きな増幅が見られ、観測点のある 3 階で 420cm/s^2 程度の値を示した。

EW 方向の最大応答加速度は、観測記録をやや上回る傾向が見られ、地下 3 階で 380cm/s^2 程度であり、上階に行くに従って NS 方向と同様に大きな値を示した。その値は、1 階で 460cm/s^2 程度まで増幅した後、3 階で 470cm/s^2 程度まで増幅した。

UD 方向の最大応答加速度は、観測記録と比較して大きな値が現れており、地下 3 階で 420cm/s^2 程度、上階に行くに従って大きな値を示した。その値は、1 階で 470cm/s^2 まで増幅し、3 階で 670cm/s^2 程度まで増幅したものの、クレーン階で最大応答加速度の谷が見ら

れた。

③ 床応答加速度スペクトル

図 5. 11 に床応答加速度スペクトルを示す。図 5. 11 は、地盤 FEM によってモデル化された時間領域の基準モデル（再現解析）の床応答加速度スペクトル及び地盤 TLEM によってモデル化された周波数領域の基準モデル（再現解析）の床応答加速度スペクトルである。

地盤 FEM によってモデル化された時間領域の基準モデル（再現解析）の床応答加速度スペクトルは、図 5. 11 が示すように、NS 方向において、最下階である地下 3 階で 0.08 秒付近と 0.3～0.4 秒付近、0.6～0.7 秒付近に 800～900cm/s² 程度の卓越する周期帯を有しており、上階に行くに従って 0.3～0.4 秒付近の周期帯に最大応答加速度の明らかな増幅が見られた。0.3～0.4 秒付近の最大応答加速度は、地上部である 1 階で 1000cm/s² 程度、観測点のある 3 階で 1400cm/s² 程度に増幅した。

EW 方向の床応答加速度スペクトルは、地下 3 階で 0.08 秒付近の周期帯に 1200cm/s² 程度の卓越する周期帯が見られ、上階においても同様のピークが現れた。また、0.2 秒付近の周期帯で最大応答加速度が上階に行くに従って増幅する傾向があり、地下 3 階及び 1 階で 800 cm/s² 程度、観測点のある 3 階で 1200～1300cm/s² 程度の値を示した。

UD 方向の床応答加速度スペクトルは、NS 方向及び EW 方向と同様に 0.08 秒付近に大きく卓越する周期帯を有しており、上階に行くに従って最大応答加速度の明らかな増幅が見られた。その値は、地下 3 階で 1700cm/s² 程度であり、地上部である 1 階で最大応答加速度が 2200cm/s² 程度、観測点のある 3 階で 5200cm/s² 程度まで増幅した。

地盤 TLEM によってモデル化された周波数領域の基準モデル（再現解析）の床応答加速度スペクトルは、図 5. 11 が示すように、NS 方向において、最下階である地下 3 階で 0.3～0.4 秒付近と 0.6～0.7 秒付近に 800～900cm/s² 程度の卓越する周期帯を有しており、上階に行くに従って短周期側の最大応答加速度に明らかな増幅が見られた。0.3～0.4 秒付近の最大応答加速度は、地上部である 1 階で 1400cm/s² 程度、観測点のある 3 階で 2000cm/s² 程度の増幅を示した。

EW 方向の床応答加速度スペクトルは、地下 3 階で 0.6～0.7 秒付近と 0.9～1.0 秒付近に 1000cm/s² 程度の卓越する周期帯を有しているものの、上階に行くに従って NS 方向と同じ 0.3～0.4 秒付近に明らかな最大応答加速度の増幅が見られた。0.3～0.4 秒付近の最大応答加速度は、地上部である 1 階で最大応答加速度が 1200cm/s² 程度、観測点のある 3 階で 1400cm/s² 程度の増幅を示した。

UD 方向の床応答加速度スペクトルは、地下 3 階で 0.2～0.4 秒付近に 1200 cm/s² 程度の卓越する周期帯を有しているものの、上階に行くに従って 0.08 秒付近の最大応答加速度に明らかな増幅が見られた。0.08 秒付近の最大応答加速度は、地下 3 階で 1000cm/s² 程度であり、地上部である 1 階で 1400cm/s² 程度、観測点のある 3 階で 2800cm/s² 程度の増幅を示した。

5.2.2 建屋－地盤間の接触・剥離現象のモデル化を影響因子とした地震応答解析モデル

本項では、2.5.4に基づき、建屋－地盤間の接触・剥離現象のモデル化を影響因子とした場合の観測点の応答と建屋の応答について、再現解析の結果から建屋の耐震安全性及び床応答に与える影響を検討した。

(1) 観測点の応答

① 加速度時刻歴波形

図 5.12 に観測点位置における加速度時刻歴波形を示す。図 5.12 は、地盤 FEM によってモデル化された時間領域の接触・剥離モデル（再現解析）の加速度時刻歴波形及び地盤 TLEM によってモデル化された周波数領域の接触・剥離モデル（再現解析）の加速度時刻歴波形である。

地盤 FEM 及び地盤 TLEM によってモデル化された時間領域及び周波数領域の接触・剥離モデル（再現解析）の加速度時刻歴波形は、図 5.12 に示すように、基礎スラブ上で NS、EW、UD 方向によらず観測記録とおおむね一致した傾向を示すものの、地盤 FEM の UD 方向の一部波形で観測記録とはやや異なる細かな振動が見られた。同様に、3 階観測点においては、NS、EW 方向の加速度時刻歴波形は解析モデルによらずおおむね一致した傾向を示すものの、UD 方向の一部波形で観測記録とは異なる細かな振動が現れた。

② 床応答加速度スペクトル

図 5.13 に観測点位置における床応答加速度スペクトルを示す。図 5.13 は、地盤 FEM によってモデル化された時間領域の接触・剥離モデル（再現解析）の床応答加速度スペクトル及び地盤 TLEM によってモデル化された周波数領域の接触・剥離モデル（再現解析）の床応答加速度スペクトルである。

地盤 FEM 及び地盤 TLEM によってモデル化された時間領域及び周波数領域の接触・剥離モデル（再現解析）の床応答加速度スペクトルは、図 5.13 に示すように、基礎スラブ上の主要な周期帯で NS、EW、UD 方向によらず観測記録とおおむね一致した傾向を示したものの、地盤 FEM の 0.09 秒以下の周期帯で観測記録を上回る最大応答加速度が見られた。また、3 階観測点においては、NS、EW 方向の床応答加速度スペクトルのうち NS 方向において、地盤 TLEM による最大応答加速度が観測記録を比較的大きく上回るピークを示すものの、全体としておおむね一致した傾向が見られた。一方で、UD 方向の床応答加速度スペクトルは、ほぼ全ての周期帯において、地盤 FEM 及び地盤 TLEM による解析モデルの最大応答加速度が観測記録を上回る傾向が見られ、観測記録に対して解析モデルの応答が大きく評価されていることが確認された。

(2) 建屋の応答

① 伝達関数

図 5.14 に 3 階観測点における伝達関数を示す。図 5.14 は、観測記録の伝達関数及び地盤 FEM によってモデル化された時間領域の接触・剥離モデルの伝達関数、地盤 TLEM によってモデル化された周波数領域の接触・剥離モデル（再現解析）の伝達関数である。

地盤 FEM によってモデル化された時間領域の接触・剥離モデル（再現解析）の伝達関数は、図 5.14 が示すように、10Hz 以下の振動数帯において、NS 方向の卓越振動数は 3.2Hz 程度である。伝達関数の曲線は 10Hz 以降に大きな振幅を伴うピークを迎えた後、細かな振動が見られるようになり、20Hz 付近に比較的大きな振幅を有するピークが現れる。

EW 方向の卓越振動数は、10Hz 以下の振動数帯において 3.8Hz 程度である。伝達関数の曲線は NS 方向と同様に、10Hz 以降に卓越振動数と同程度の振幅を伴うピークを迎えるものの、その後、大きな振幅は見られない。

UD 方向の卓越振動数は 13.2Hz 程度である。伝達関数の曲線は、全体的に細かな振動を含んでいるものの、卓越振動数付近に明らかなピークが見られる。

地盤 TLEM によってモデル化された周波数領域の接触・剥離モデル（再現解析）の伝達関数は、図 5.14 が示すように、NS 方向の卓越振動数で 2.5Hz 程度である。

EW 方向の卓越振動数は、2.5Hz 程度である。

UD 方向の卓越振動数は、8.1Hz 程度である。伝達関数の曲線は、当該振動数以外にも 15Hz 以降の高振動数帯において同程度の振幅を有するピークが見られる。

② 最大応答加速度

図 5.15 に最大応答加速度分布を示す。図 5.15 は、地下 3 階（基礎スラブ上）及び 3 階の観測点の最大応答加速度及び地盤 FEM によってモデル化された時間領域の接触・剥離モデル（再現解析）の最大応答加速度分布、地盤 TLEM によってモデル化された周波数領域の接触・剥離モデル（再現解析）の最大応答加速度分布である。

地盤 FEM によってモデル化された時間領域の接触・剥離モデル（再現解析）の最大応答加速度は、図 5.15 が示すように、NS 方向において、観測記録とおおむね一致した傾向が見られ、最下階である地下 3 階で 300cm/s²程度を示す。埋め込みを有する地下部では、地盤の拘束効果からほぼ一定の最大応答加速度が得られ、地上部である 1 階で 330cm/s²程度の値を示した。一方で、地上部から上の階では、地盤の拘束効果が無くなるため、地下部と比べて最大応答加速度に比較的大きな増幅が見られ、観測点のある 3 階で 350cm/s²程度の値を示した。

EW 方向の最大応答加速度は、NS 方向と同様に観測記録とおおむね一致した傾向を示しており、地下 3 階で 390cm/s²程度、上階に行くに従って徐々に大きな値を示すものの、地盤との境界部で一時的にピークが現れた。最大応答加速度は、1 階で 450cm/s²程度を示した後、一旦緩やかな低下を示すものの、3 階で 420cm/s²程度まで値が回復した。

UD 方向の最大応答加速度は、観測記録と比較して明らかに大きな値が現れており、地

下3階で 540cm/s^2 程度、上階に行くに従って大きな値を示した。その値は、1階で 620cm/s^2 程度を示した後、3階で 980cm/s^2 程度まで増幅するものの、クレーン階で最大応答加速度の谷が見られた。

地盤 TLEM によってモデル化された周波数領域の接触・剥離モデル（再現解析）の最大応答加速度分布は、図 5.15 が示すように、NS 方向において、観測記録をやや大きく上回る傾向が見られ、最下階である地下3階で 260cm/s^2 程度を示し、上階に行くに従って値が大きくなる。埋め込みを有する地下部では、地盤の拘束効果により、最大応答加速度は緩やかな増幅を示しており、地上部である1階で 340cm/s^2 程度まで増幅した。一方で、地上部から上の階では、地盤の拘束効果が無くなるため、地上部と比べ最大応答加速度に比較的大きな増幅が見られ、観測点のある3階で 450cm/s^2 程度の値を示した。

EW 方向の最大応答加速度は、観測記録をやや大きく上回る傾向が見られ、地下3階で 370cm/s^2 程度であり、上階に行くに従って NS 方向と同様に大きな値を示した。その値は、1階で 470cm/s^2 程度まで増幅した後、3階で 510cm/s^2 程度まで増幅した。

UD 方向の最大応答加速度は、観測記録を比較的大きく上回る傾向が見られ、地下3階で 410cm/s^2 程度、上階に行くに従って大きな値を示した。その値は、1階で 470cm/s^2 まで増幅し、3階で 630cm/s^2 程度まで増幅したものの、クレーン階で最大応答加速度の緩やかな谷が見られた。

③ 床応答加速度スペクトル

図 5.16 に床応答加速度スペクトルを示す。図 5.16 は、地盤 FEM によってモデル化された時間領域の接触・剥離モデル（再現解析）の床応答加速度スペクトル及び地盤 TLEM によってモデル化された周波数領域の基準モデル（再現解析）の床応答加速度スペクトルである。

地盤 FEM によってモデル化された時間領域の接触・剥離モデル（再現解析）の床応答加速度スペクトルは、図 5.16 が示すように、NS 方向において、最下階である地下3階で 0.08 秒付近と 0.3~0.4 秒付近、0.6~0.7 秒付近に $800\sim 900\text{cm/s}^2$ 程度の卓越する周期帯を有しており、上階に行くに従って 0.3~0.4 秒付近の周期帯に最大応答加速度の明らかな増幅が見られた。0.3~0.4 秒付近の最大応答加速度は、地上部である1階で 1000cm/s^2 程度、観測点のある3階で 1400cm/s^2 程度に増幅した。

EW 方向の床応答加速度スペクトルは、地下3階で 0.08 秒付近の周期帯に 1200cm/s^2 程度の卓越する周期帯が見られ、上階においても同様のピークが現れていることが確認できる。また、0.2 秒付近の周期帯で最大応答加速度が上階に行くに従って増幅する傾向があり、地下3階及び1階で 800cm/s^2 程度、観測点のある3階で $1200\sim 1300\text{cm/s}^2$ 程度の値を示した。

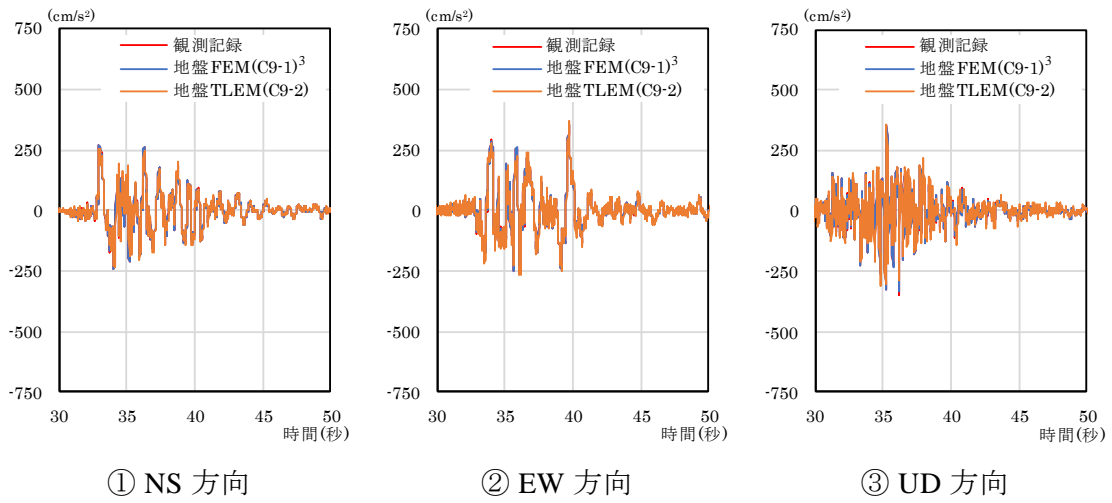
UD 方向の床応答加速度スペクトルは、NS 方向及び EW 方向と同様に 0.08 秒付近に大きく卓越する周期帯を有しており、上階に行くに従って最大応答加速度の明らかな増幅が

見られた。その値は、地下 3 階で 1800cm/s^2 程度であり、地上部である 1 階で最大応答加速度が 2800cm/s^2 程度、観測点のある 3 階で 6000cm/s^2 程度まで増幅した。

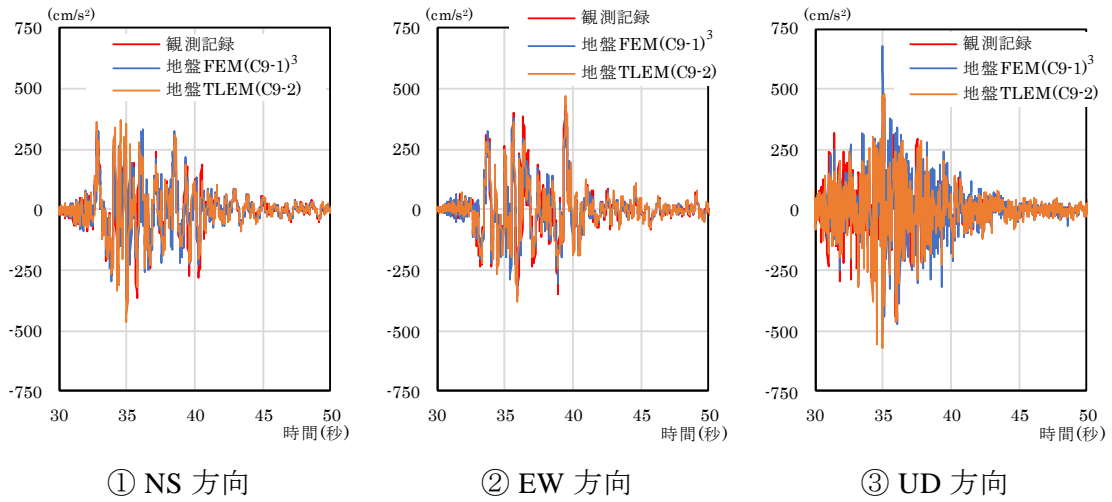
地盤 TLEM によってモデル化された周波数領域の接触・剥離モデル（再現解析）の床応答加速度スペクトルは、図 5.16 が示すように、NS 方向において、最下階である地下 3 階で $0.3\sim 0.4$ 秒付近と $0.6\sim 0.7$ 秒付近に $800\sim 900\text{cm/s}^2$ 程度の卓越する周期帯を有しており、上階に行くに従って短周期側の最大応答加速度に明らかな増幅が見られた。 $0.3\sim 0.4$ 秒付近の最大応答加速度は、地上部である 1 階で 1600cm/s^2 程度、観測点のある 3 階で 2400cm/s^2 程度の増幅を示した。

EW 方向の床応答加速度スペクトルは、地下 3 階で $0.6\sim 0.7$ 秒付近と $0.9\sim 1.0$ 秒付近に 1000cm/s^2 程度の卓越する周期帯を有しているものの、上階に行くに従って NS 方向と同じ $0.3\sim 0.4$ 秒付近に明らかな最大応答加速度の増幅が見られた。 $0.3\sim 0.4$ 秒付近の最大応答加速度は、地上部である 1 階で最大応答加速度が 1200cm/s^2 程度、観測点のある 3 階で 1600cm/s^2 程度の増幅を示した。

UD 方向の床応答加速度スペクトルは、地下 3 階で $0.2\sim 0.4$ 秒付近に $1200\sim 1400\text{cm/s}^2$ 程度の卓越する周期帯を有しているものの、上階に行くに従って 0.08 秒付近の最大応答加速度に比較的大きな増幅が見られた。 0.08 秒付近の最大応答加速度は、地下 3 階で 800cm/s^2 程度であり、地上部である 1 階で 1100cm/s^2 程度、観測点のある 3 階で 2100cm/s^2 程度の増幅を示した。



(1) 地下3階（基礎スラブ上）



(2) 3階

図 5.7 観測点の加速度時刻歴波形の比較 [基準モデル (再現解析)]

Fig. 5.7 Comparison of acceleration time histories on observation points: reference models for simulation analyses

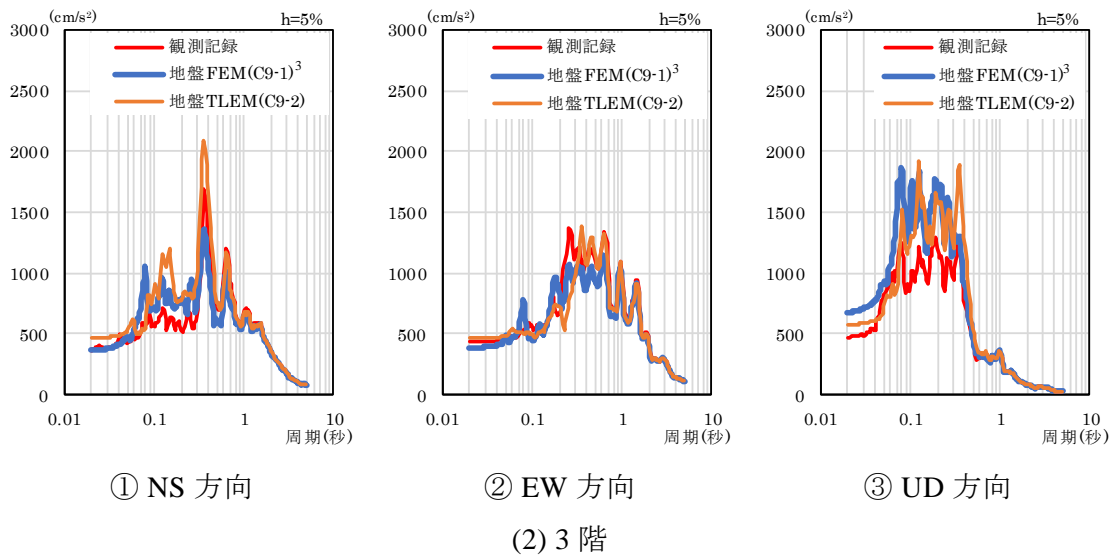
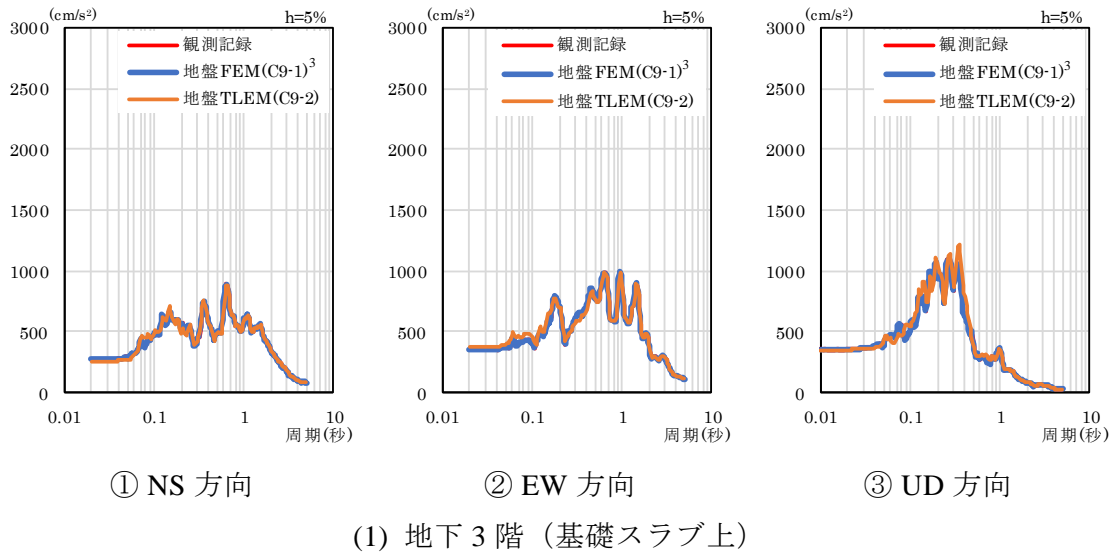
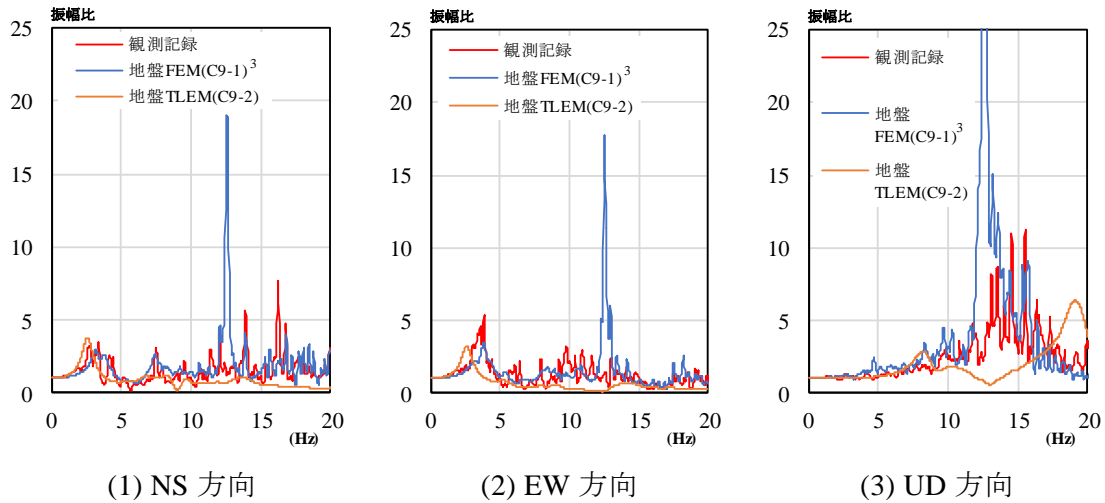


図 5.8 観測点の床応答加速度スペクトルの比較 [基準モデル (再現解析)]
 Fig. 5.8 Comparison of FRS on observation points: reference models for simulation analyses



注) 解析プログラムの特性により、地盤 FEM による伝達関数は水平 2 方向及び鉛直方向の 3 方向同時入力による応答値に対して、地盤 TLEM による伝達関数は 1 方向単独入力による応答値に対して評価を行った。

図 5.9 3 階観測点の伝達関数 [基準モデル (再現解析)]

Fig. 5.9 Transfer functions on the third floor observation point: reference models for simulation analyses

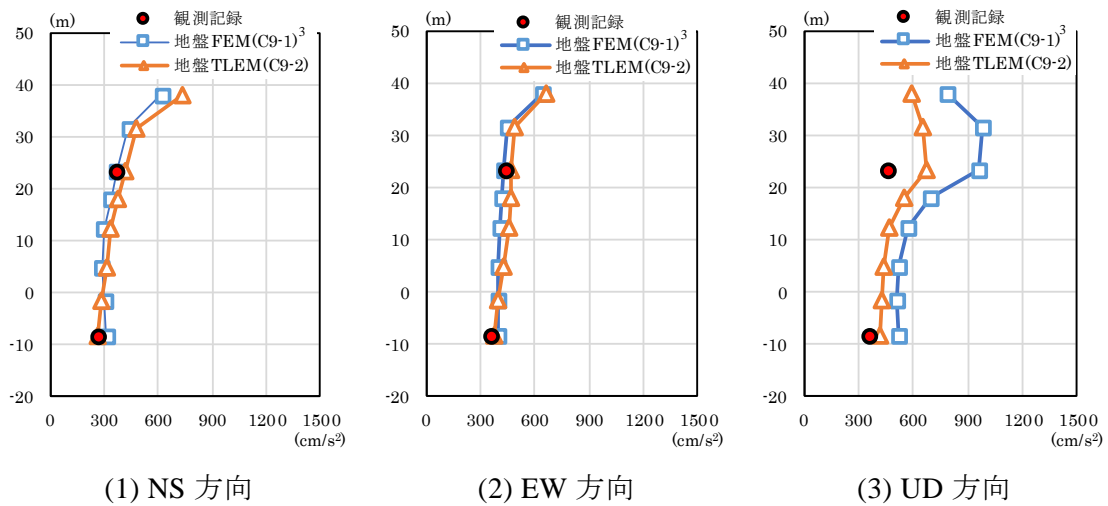
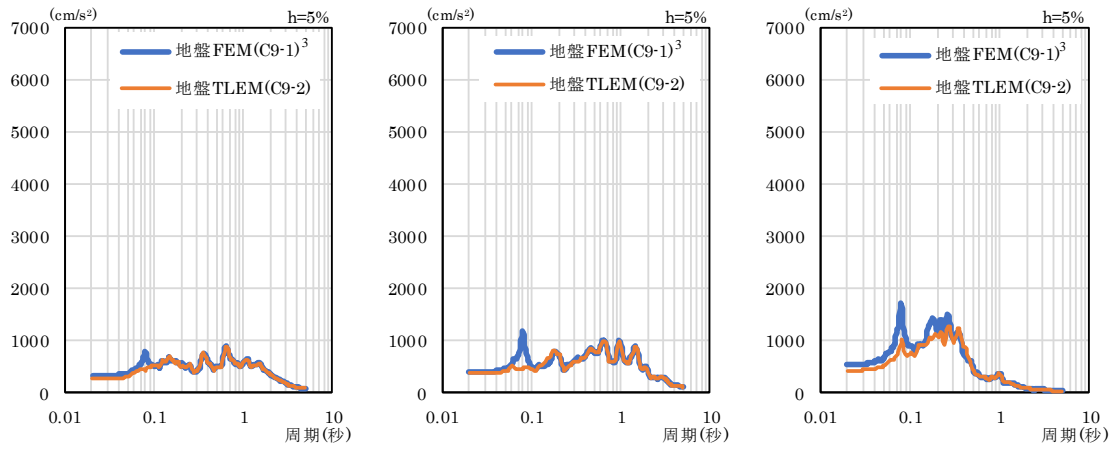


図 5.10 最大応答加速度分布 [基準モデル (再現解析)]

Fig. 5.10 Maximum accelerations: reference models for simulation analyses

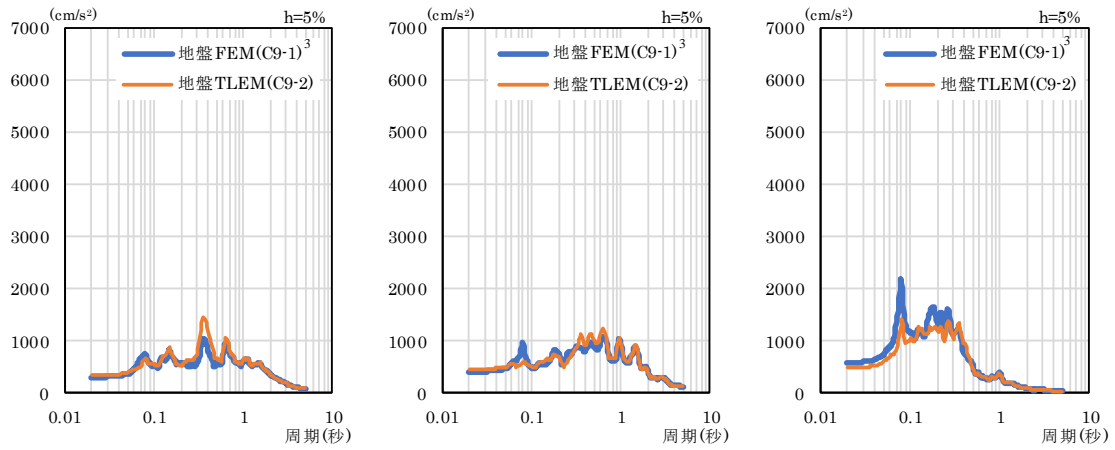


① NS 方向

② EW 方向

③ UD 方向

(1) 地下3階

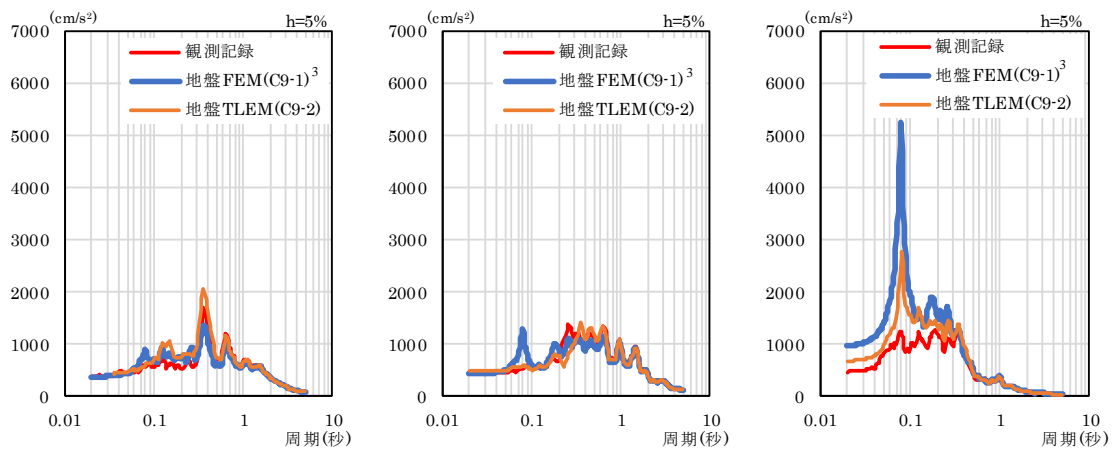


① NS 方向

② EW 方向

③ UD 方向

(2) 1階



① NS 方向

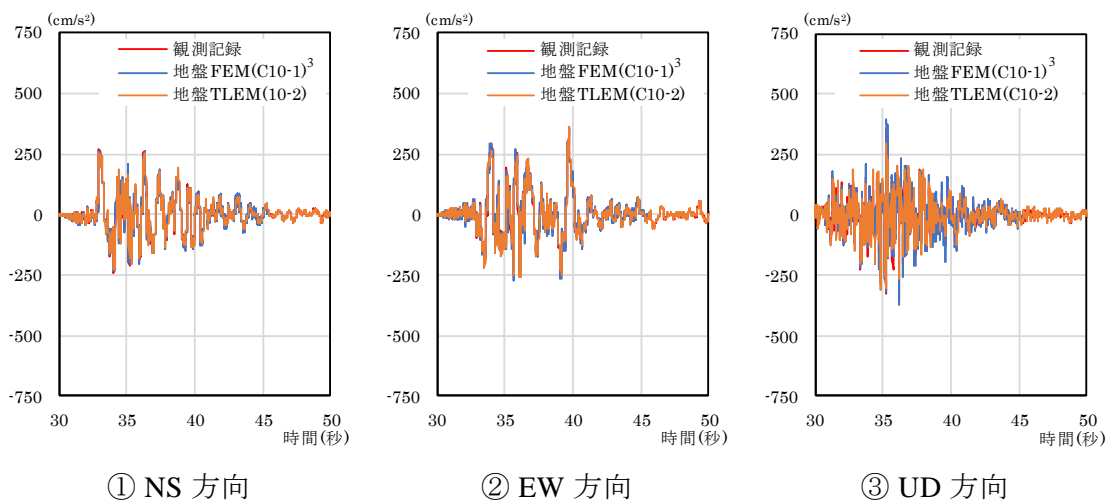
② EW 方向

③ UD 方向

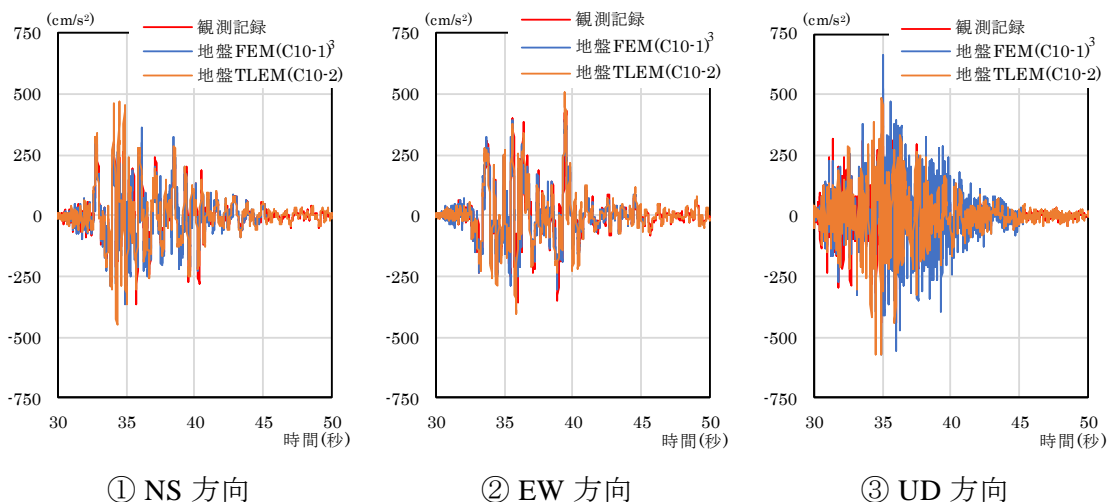
(3) 3階

図 5.11 床応答加速度スペクトル [基準モデル (再現解析)]

Fig. 5.11 FRS: reference models for simulation analyses



(1) 地下3階（基礎スラブ上）



(2) 3階

図 5.12 観測点の加速度時刻歴波形の比較 [接触・剥離モデル（再現解析）]

Fig. 5.12 Comparison of acceleration time histories on observation points: contact-separation models for simulation analyses

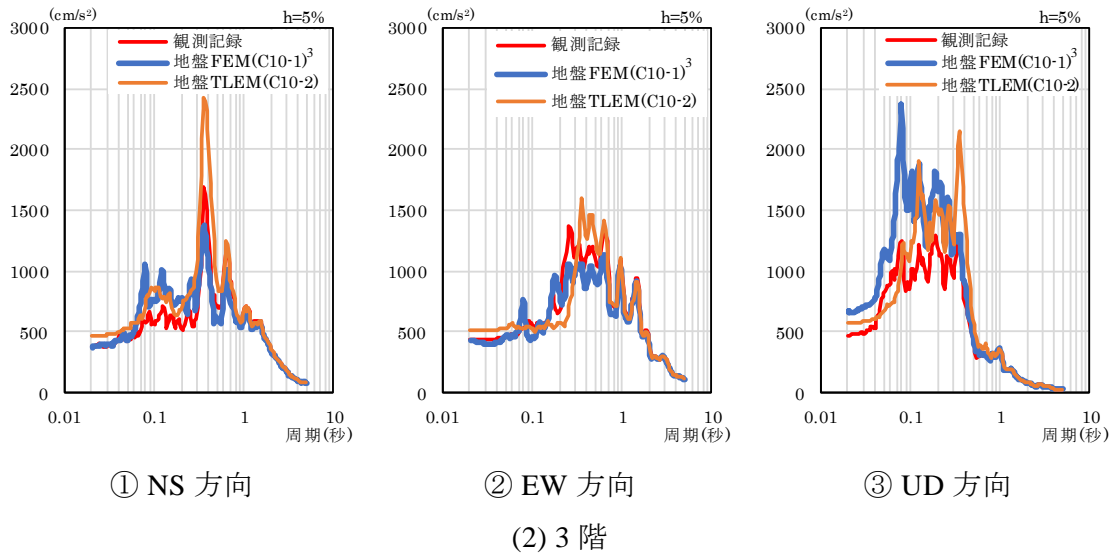
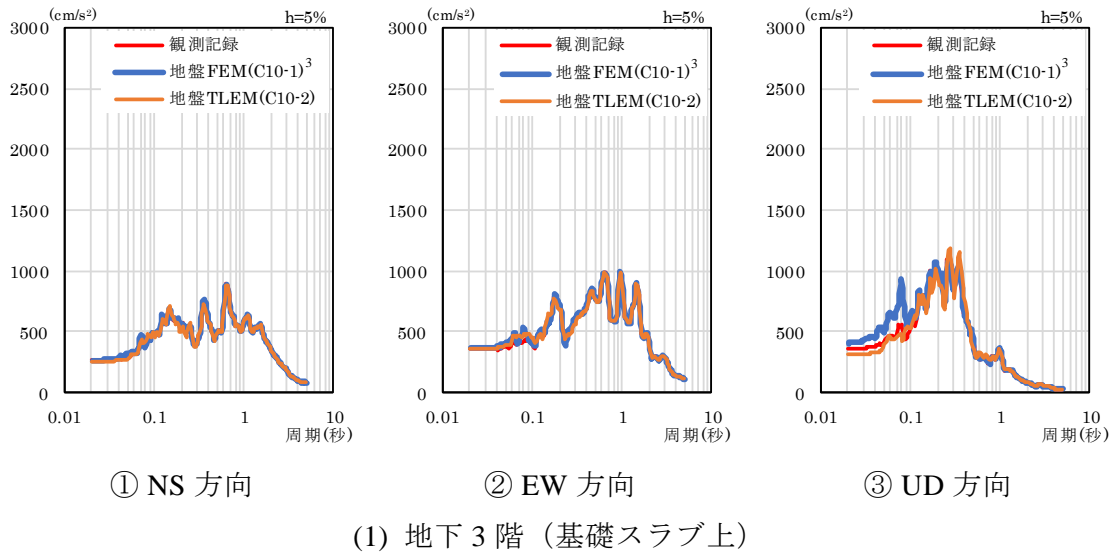
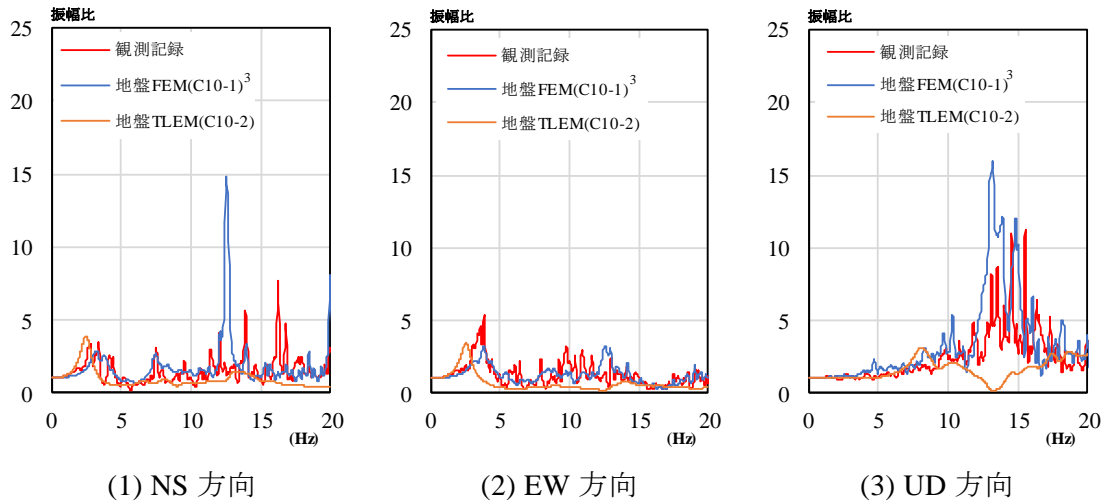


図 5.13 観測点の床応答スペクトルの比較 [接触・剥離モデル (再現解析)]
 Fig. 5.13 Comparison of FRS on observation points: contact-separation models for simulation analyses



注) 解析プログラムの特性により、地盤 FEM による伝達関数は水平 2 方向及び鉛直方向の 3 方向同時入力による応答値に対して、地盤 TLEM による伝達関数は 1 方向単独入力による応答値に対して評価を行った。

図 5.14 3 階観測点の伝達関数 [接触・剥離モデル (再現解析)]

Fig. 5.14 Transfer functions on the third floor observation point: contact-separation models for simulation analyses

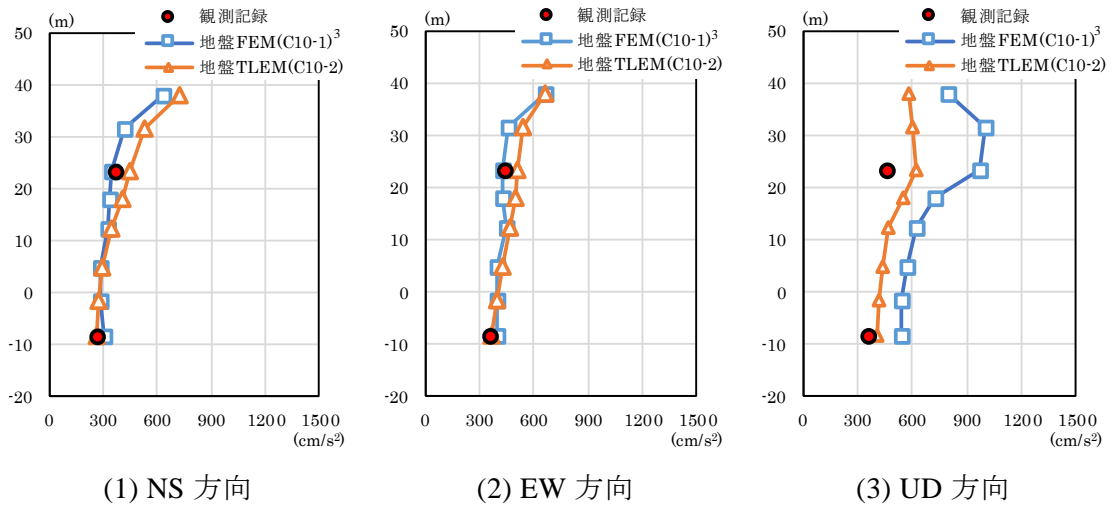


図 5.15 最大応答加速度分布 [接触・剥離モデル (再現解析)]

Fig. 5.15 Maximum accelerations: contact-separation models for simulation analyses

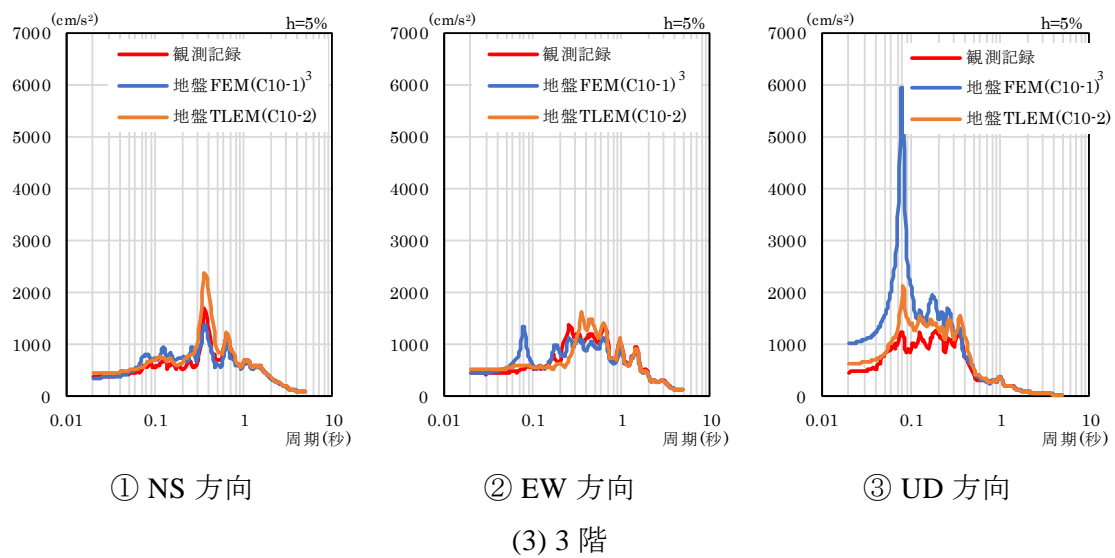
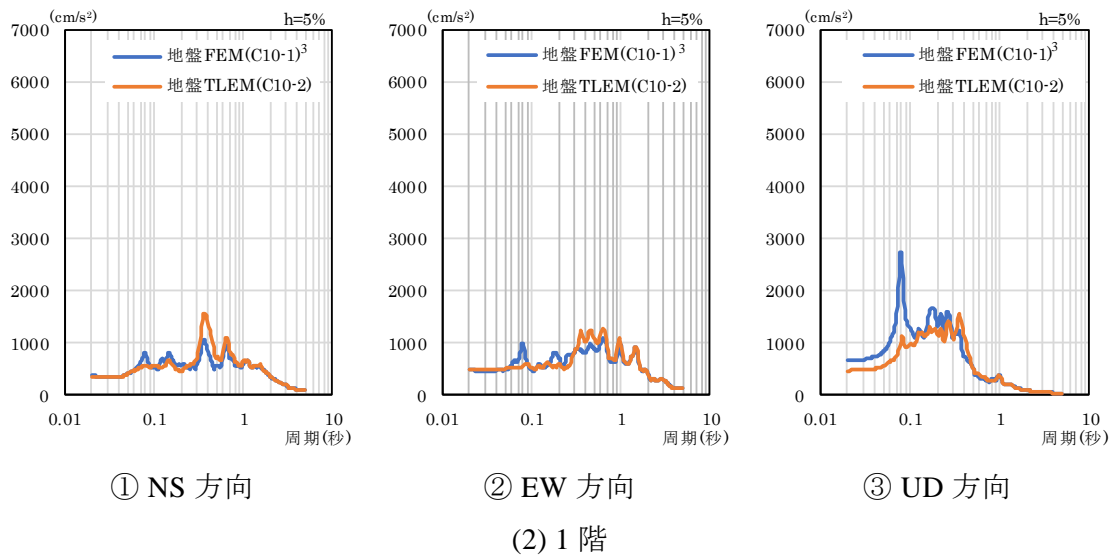
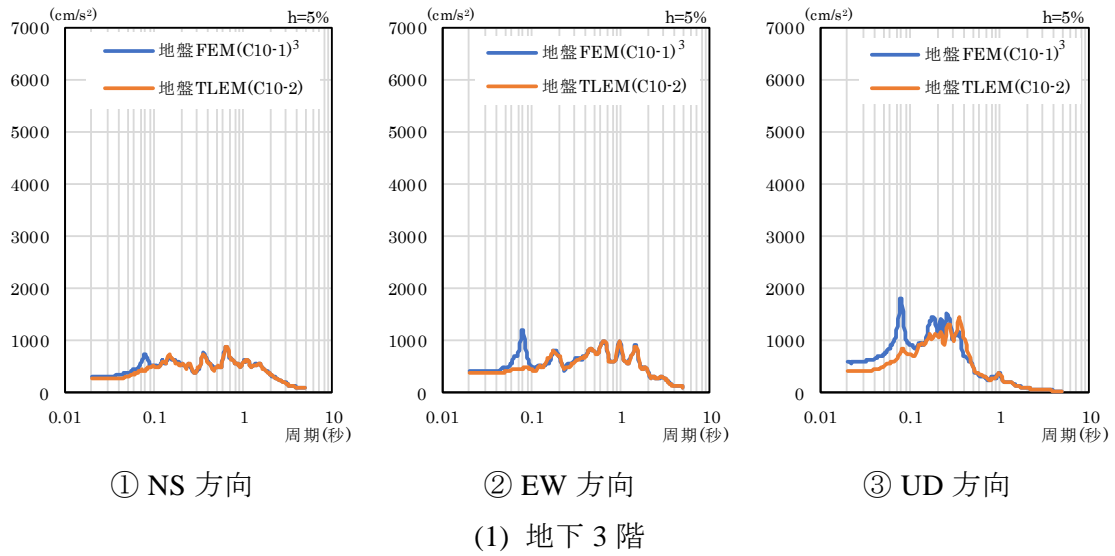


図 5.16 床応答加速度スペクトル [接触・剥離モデル (再現解析)]

Fig. 5.16 FRS: contact-separation models for simulation analyses

6. 考察

前章では、三次元 FEM モデルによる地震応答解析として、地盤及び建屋を有限要素法等の離散的な手法で詳細にモデル化した時間領域及び周波数領域の解析モデルによる感度解析及び再現解析の結果を述べた。これら解析結果は、地盤を線形（感度解析）又は等価線形（再現解析）、建屋を弾性、建屋－地盤間にジョイント要素（地盤 FEM：時間領域）又はばね要素（地盤 TLEM：周波数領域）を配した近似モデルによる結果ではあるものの、建屋及び地盤を有限要素法等により詳細にモデル化しており、ここで、第 2 章の研究の着眼点で述べた影響因子について、第 5 章で得られた地震応答解析結果から建屋の耐震安全性及び床応答に与える影響を考察することは意味があるものと考えられる。なお、本章は 6.1 及び 6.2 で構成されており、このうち 6.1 については、筆者らが実施した 5.1.1 の地盤 TLEM による解析結果を基に 2.4.1 で同定した影響因子に関する考察を行った。また、6.2 については、筆者らの地盤 TLEM による解析結果（5.1 及び 5.2）の他に委託事業より得られた地盤 FEM による解析結果³（5.1 及び 5.2）を組合せ、2.4.6 で同定した影響因子に関する考察を行った。

6.1 水平 2 方向及び鉛直方向の地震動入力が原子炉建屋の地震時挙動に与える影響

6.1.1 水平 2 方向及び鉛直方向の地震力の組合せが原子炉建屋の応答特性に与える影響

本項では、2.4 に基づき、水平 2 方向及び鉛直方向の地震力の組合せを影響因子とした場合の BWR の原子炉建屋の応答について、5.1.1 の地盤 TLEM による周波数領域の感度解析の結果からその影響を考察する。

(1) 考察の方針

6.1.1 では、水平 2 方向及び鉛直方向の地震力の組合せが BWR の原子炉建屋の耐震安全性及び床応答に与える影響を評価するため、5.1.1 の標準的な条件下における地盤 TLEM による周波数領域の三次元 FEM モデルを用いて、水平 1 方向入力時の最大応答加速度と水平 2 方向及び鉛直方向入力時の最大応答加速度の増分比率を計算し、水平 2 方向及び鉛直方向の地震力の組合せが BWR の原子炉建屋の三次元的な応答特性に与える影響を考察する。また、得られた増分比率から、水平 2 方向及び鉛直方向の地震力の組合せの影響が大きい節点を抽出し、水平 1 方向入力時の床応答加速度スペクトルと水平 2 方向及び鉛直方向入力時の床応答加速度スペクトルの比較から、それら地震力の組合せが床応答に与える影響を考察する。

(2) 建屋耐震評価への影響検討

図 6.1 に 5.1.1 の地盤 TLEM による周波数領域の三次元 FEM モデルから求まる水平方向の最大応答加速度の増分比率コンター図を示す。

水平方向の最大応答加速度の増分比率は、図 6.1 に示すように、全体的に 1.0 程度か 1.0

をやや上回る程度の値を示し、上階に行くに従って比率が大きくなる傾向が見られる。増分比率の平面的な分布形状も、上述と同様に、上階に行くにつれややばらつきが大きくなるものの、水平 2 方向及び鉛直方向の地震力の組合せの影響は全体的に小さい。各階の最大値は、地下 3 階で 1.05、1 階で 1.06、オペフロレベルである 4 階で 1.11 である。4 階で増分比率の最大値が現れた理由として、耐震壁の平面的なレイアウトの影響が考えられ、当該部付近の耐震壁の配置が EW 方向に対し非対称となっているため、平面的に剛性が低い南方向に対して水平 2 方向及び鉛直方向の地震力の組合せの影響が現れているものと推定される。

(3)では、各階で最大値を記録した代表節点に対し、水平 2 方向及び鉛直方向の地震力の組合せが BWR の原子炉建屋の床応答に与える影響を考察する。

(3) 床応答への影響検討

図 6.2 に 5.1.1 の地盤 TLEM による周波数領域の三次元 FEM モデルから求まる水平方向の床応答加速度スペクトルを示す。最大増分比率を記録した各階の代表節点の床応答加速度スペクトルは、図 6.2 に示すように、水平 1 方向入力時と水平 2 方向及び鉛直方向入力時で顕著な差はなく、4 階の一部周期帯で水平 1 方向入力時の最大応答加速度が水平 2 方向及び鉛直方向入力時の最大応答加速度を若干下回る程度である。よって、本感度解析で対象とした標準的な条件下における BWR の原子炉建屋では、水平 2 方向及び鉛直方向の地震力の組合せがその床応答に与える影響は小さいものと推定される。

(4) まとめ

水平 2 方向及び鉛直方向の地震力の組合せが BWR の原子炉建屋の耐震安全性及び床応答に与える影響について、5.1.1 の標準的な解析条件下における三次元 FEM モデルによる周波数領域の地震応答解析結果からその影響を考察した。

三次元 FEM モデルを用いた水平 1 方向入力時の最大応答加速度と水平 2 方向及び鉛直方向入力時の最大応答加速度の増分比率の計算から、水平 2 方向及び鉛直方向の地震力の組合せが BWR の原子炉建屋の三次元的な応答特性に与える影響を分析し、4 階の南側で最大増分比率を記録する節点が現れることを確認した。また、各階で最大増分比率を記録した代表節点に対し、水平 1 方向入力時の床応答加速度スペクトルと水平 2 方向及び鉛直方向入力時の床応答加速度スペクトルの比較を行い、全体的におおむね一致した傾向を示すことを確認した。これら基本的な応答性状は、既往の報告¹³と比べ検討する部位や影響の大きさに違いはあるものの、床応答加速度スペクトルのピーク位置等の傾向は良く対応した結果である。この水平 2 方向及び鉛直方向の地震力の組合せが BWR の原子炉建屋の耐震安全性及び床応答に与える影響が小さかった要因について、筆者らは、本研究で対象とした建屋の形状、耐震壁等の剛性要素のバランス及び開口等のレイアウトに大きな偏りが見られなかったためと考え、本感度解析における標準的な条件下では、建屋全体挙動に

与える影響は小さいものと推定した。

6.1.2 鉛直方向の地震動入力による水平方向の振動励起が原子炉建屋の地震時挙動に与える影響

本項では、2.4に基づき、鉛直方向の地震動入力による水平方向の振動励起を影響因子とした場合のBWRの原子炉建屋の応答について、5.1.1の地盤TLEMによる周波数領域の感度解析の結果からその影響を考察する。

(1) 考察の方針

6.1.2では、鉛直方向の地震動入力による水平方向の振動励起がBWRの原子炉建屋の耐震安全性及び床応答に与える影響を検討するため、5.1.1の標準的な条件下における地盤TLEMによる周波数領域の三次元FEMモデルを用いて、鉛直方向入力時の水平2方向の最大応答加速度コンター図を作成し、鉛直方向の地震動入力がBWRの原子炉建屋の三次元的な応答特性に与える影響を考察する。また、得られた加速度コンターから、鉛直方向の地震動入力の影響が大きい節点を抽出し、鉛直方向の地震動入力による水平2方向の床応答加速度スペクトルと水平2方向及び鉛直方向入力時の床応答加速度スペクトルの比較から、鉛直方向の地震動入力が水平方向の床応答に与える影響を考察する。このとき、鉛直方向の地震動入力が水平2方向及び鉛直方向の床応答加速度スペクトルに及ぼす影響を考察するため、水平2方向入力による床応答加速度スペクトルについても比較を行う。

(2) 建屋耐震評価への影響検討

図6.3に5.1.1の地盤TLEMによる周波数領域の三次元FEMモデルから求まる鉛直方向入力時の水平方向の最大応答加速度コンター図を示す。

水平方向の最大応答加速度は、図6.3に示すように、地下3階で $15\text{cm/s}^2\sim 20\text{cm/s}^2$ 程度、1階で $25\text{cm/s}^2\sim 35\text{cm/s}^2$ 程度、オペフロレベルである4階で $40\text{cm/s}^2\sim 90\text{cm/s}^2$ 程度の平均値を示し、上階に行くに従って値が大きくなる傾向が見られる。最大応答加速度の平面的な分布形状は、端部に比べ中央部で値が大きくなる傾向がある。各階の最大値は、地下3階で 35cm/s^2 、1階で 80cm/s^2 、4階で 159cm/s^2 である。4階の北側で最大値が現れる理由として、使用済燃料プールに隣接する床開口の影響が考えられ、床開口周辺で局所的に面内剛性が低下しているため、鉛直方向入力時に水平方向の振動が励起されているものと推定される。

(3)では、各階で最大値を記録した代表節点に対し、鉛直方向の地震動入力が水平方向の床応答加速度スペクトルに与える影響を考察する。

(3) 床応答への影響検討

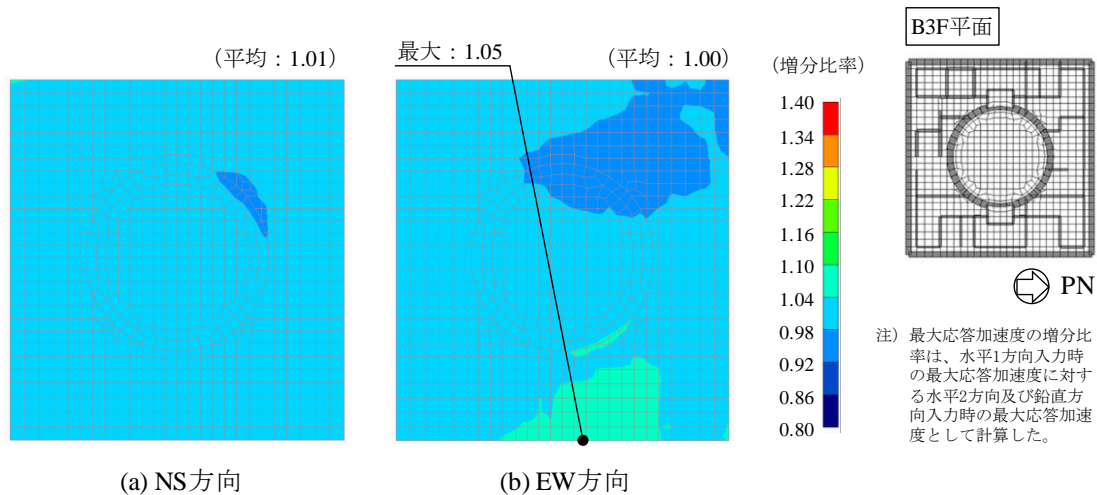
図6.4に5.1.1の地盤TLEMによる周波数領域の三次元FEMモデルから求まる水平方向

の床応答加速度スペクトルを示す。鉛直方向入力時に水平方向で最大応答加速度を記録した各階の代表節点の床応答加速度スペクトルは、図 6.4 に示すように、全体的に 0.05 秒～0.08 秒付近に最大応答加速度が卓越する周期帯を有しているものの、水平 2 方向入力時と水平 2 方向及び鉛直方向入力時の床応答加速度スペクトルを見る限り、両者に顕著な差は見られない。よって、本感度解析で対象とした標準的な条件下における BWR の原子炉建屋では、鉛直方向の地震動入力による水平方向の振動励起がその床応答に与える影響は小さいものと推定される。

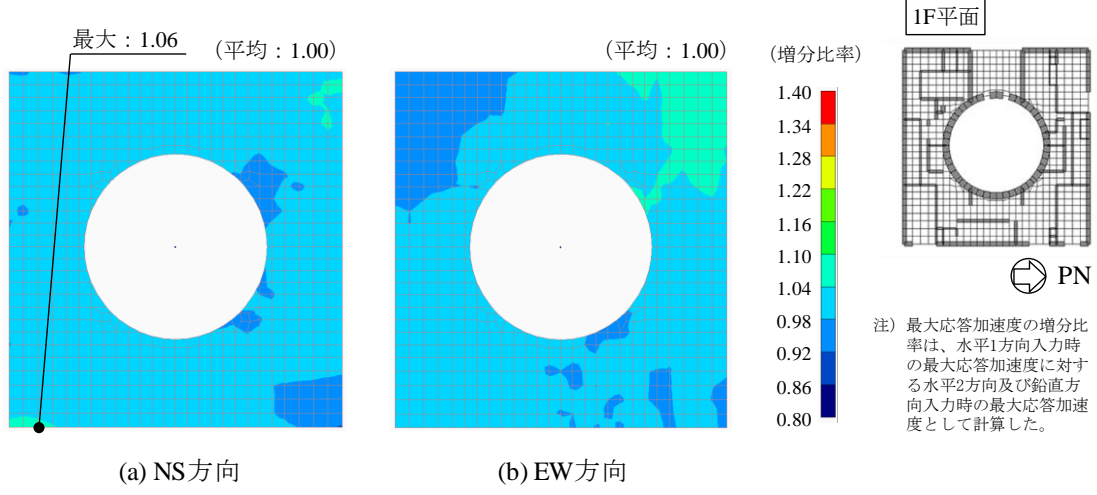
(4) まとめ

鉛直方向の地震動入力による水平方向の振動励起が BWR の原子炉建屋の耐震安全性及び床応答に与える影響について、5.1.1 の標準的な解析条件下における三次元 FEM モデルによる周波数領域の地震応答解析結果からその影響を考察した。

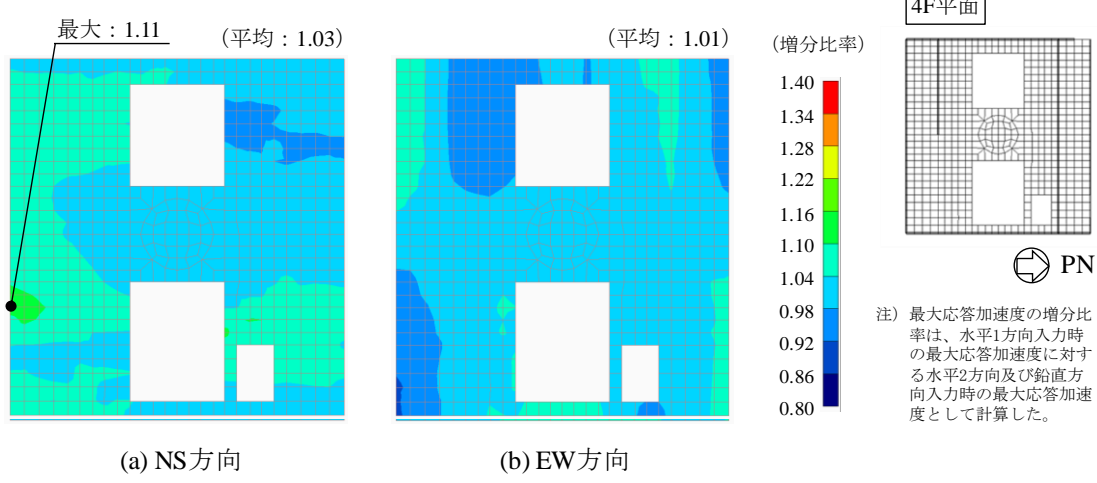
三次元 FEM モデルを用いた鉛直方向入力時の水平方向の最大応答加速度コンター図から、鉛直方向の地震動入力による水平方向の振動励起が BWR の原子炉建屋の三次元的な応答特性に与える影響を分析し、4 階の北側で最大応答加速度を記録する節点が現れることを確認した。また、各階で最大応答加速度を記録した代表節点に対し、鉛直方向入力時の水平方向の床応答加速度スペクトルと水平 2 方向入力時の水平方向の床応答加速度スペクトル、水平 2 方向及び鉛直方向入力時の水平方向の床応答加速度スペクトルの比較を行い、全体的におおむね一致した傾向を示すことを確認した。これら基本的な応答性状は、既往の報告¹³と比べ検討する部位や影響の大きさに違いはあるものの、床応答加速度スペクトルの短周期側に差が現れる等の傾向は良く対応した結果である。この鉛直方向の地震動入力による水平方向の振動励起が BWR の原子炉建屋の耐震安全性及び床応答に与える影響が小さかった要因について、筆者らは、本研究で対象とした建屋の形状、耐震壁等の剛性要素のバランス及び開口等のレイアウトに大きな偏りが見られなかったためと考え、本感度解析における標準的な条件下では、建屋全体挙動に与える影響は小さいものと推定した。



(1) 地下3階



(2) 1階



(3) 4階

図 6.1 最大応答加速度の増分比率コンター図 (C1-2) (感度解析: 周波数領域)
 Fig. 6.1 Contour plots of maximum acceleration incremental ratio for sensitivity analyses in frequency domain (C1-2)

● : 出力点

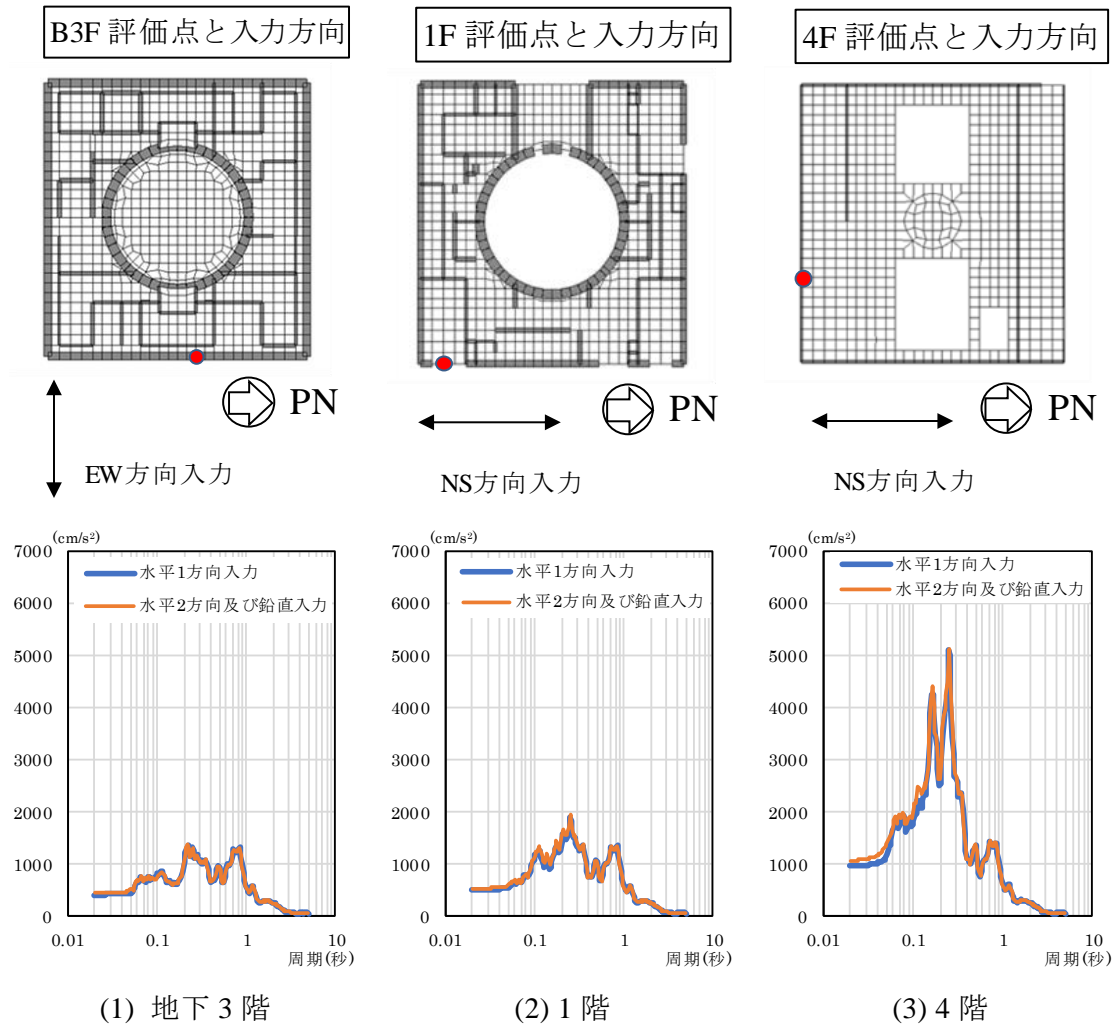


図 6.2 床応答スペクトルの比較 (C1-2) (水平 1 方向 vs 水平 2 方向及び鉛直方向 : 感度解析 : 周波数領域)

Fig. 6. 2 Comparison of FRS in a single direction and three directions seismic inputs for sensitivity analyses in frequency domain (C1-2)

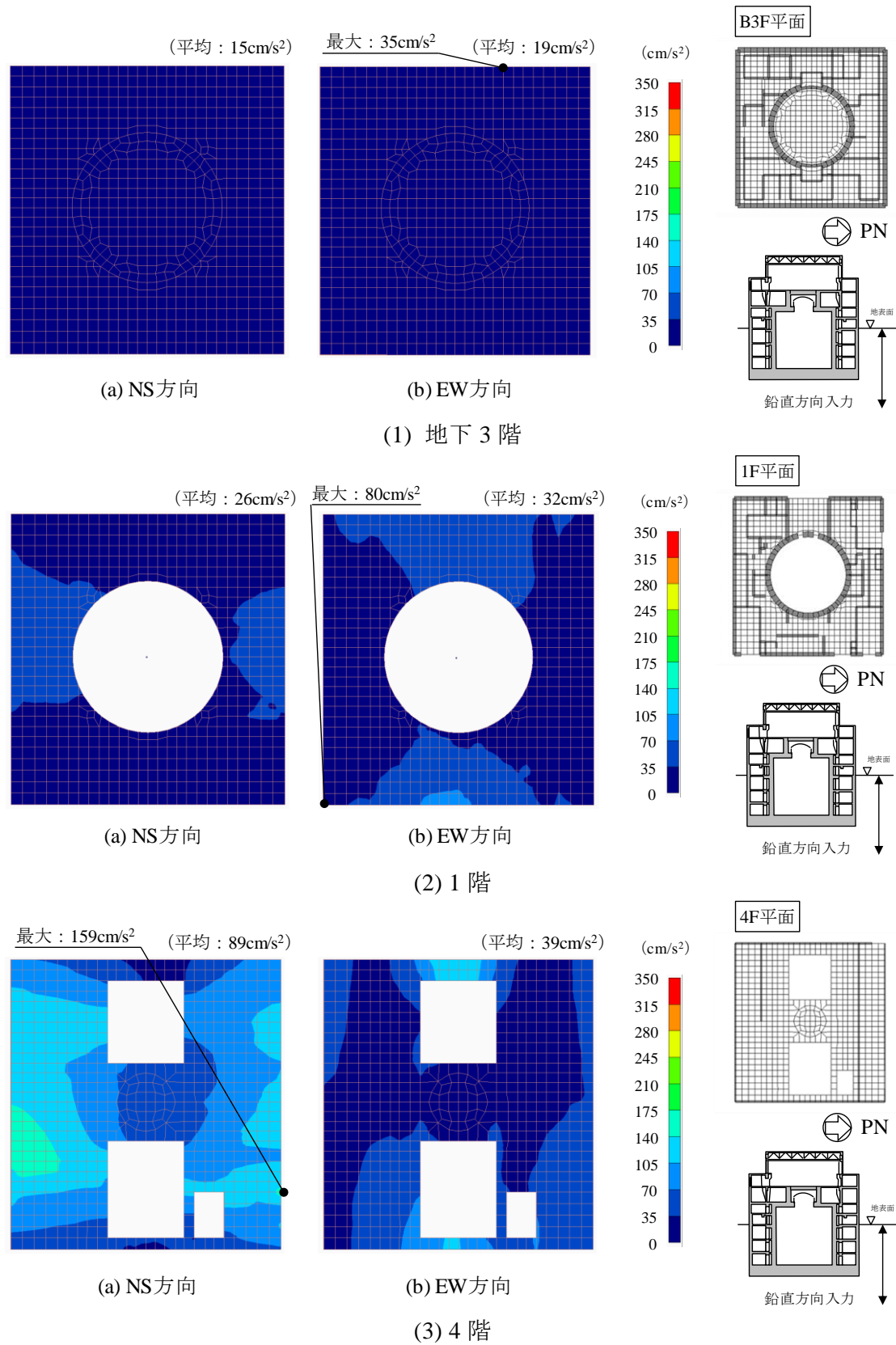


図 6.3 鉛直方向入力時の水平方向の最大応答加速度コンター図 (C1-2) (感度解析: 周波数領域)

Fig. 6.3 Contour plots of maximum horizontal accelerations in a vertical direction seismic input for sensitivity analyses in frequency domain (C1-2)

● : 出力点

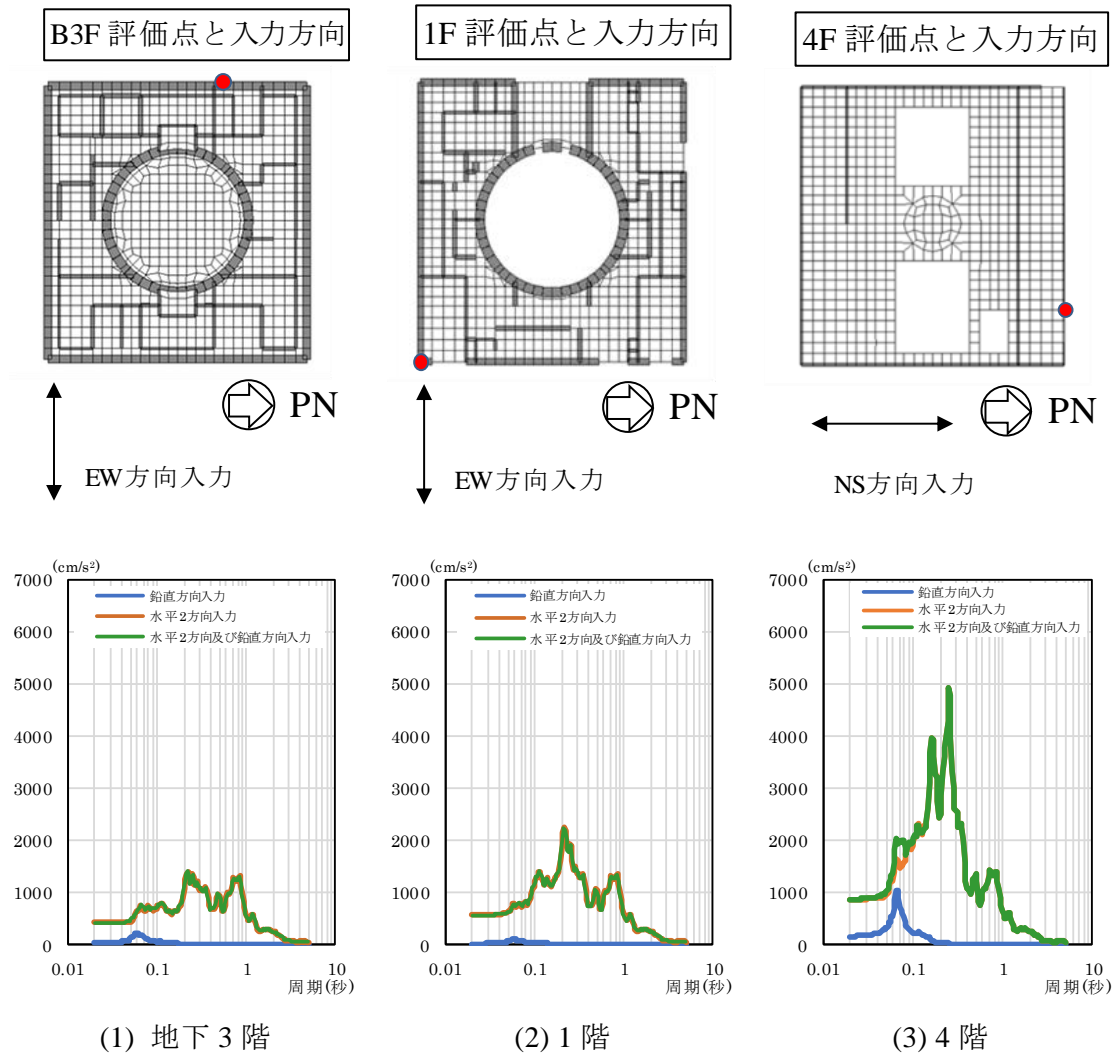


図 6.4 床応答スペクトルの比較 (C1-2) (鉛直 vs 水平 2 方向 vs 水平 2 方向+鉛直方向 : 感度解析 : 周波数領域)

Fig. 6. 4 Comparison of FRS (C1-2): vertical vs. horizontal vs. horizontal + vertical direction seismic inputs for sensitivity analyses in frequency domain

6.2 建屋—地盤間の接触・剥離現象のモデル化が原子炉建屋の地震時挙動に与える影響

6.2.1 感度解析結果に基づく影響因子の分析

本項では、2.4に基づき、建屋—地盤間の接触・剥離現象のモデル化を影響因子とした場合の建屋の伝達関数、最大応答加速度、床応答加速度スペクトルについて、5.1の感度解析の結果から当該因子が建屋の耐震安全性及び床応答に与える影響を分析する。

(1) 伝達関数

図 6.5 及び図 6.6 にクレーン階の伝達関数の比較を示す。図 6.5 は、地盤 FEM によってモデル化された基準モデル（感度解析）と接触・剥離モデル（感度解析）の時間領域における伝達関数の比較、図 6.6 は地盤 TLEM によってモデル化された基準モデル（感度解析）と接触・剥離モデル（感度解析）の周波数領域における伝達関数の比較である。

地盤 FEM によってモデル化された時間領域における接触・剥離モデル（感度解析）の伝達関数は、図 6.5 が示すように、基準モデル（感度解析）と比較して、NS 方向及び EW 方向で卓越振動数が低振動数側に移行する傾向が見られる。この理由として、地下外壁—側面地盤間に生じる剥離・滑り現象及び基礎—底面地盤間で生じる基礎浮き上がり現象をジョイント要素でモデル化している影響が考えられ、これらの現象を三次元 FEM モデル上で考慮することで地盤の拘束効果が弱まり、建屋—地盤連成系の卓越振動数が低振動数側に移行するものと推定される。

地盤 TLEM によってモデル化された周波数領域における接触・剥離モデル（感度解析）の伝達関数は、図 6.6 が示すように、基準モデル（感度解析）と比較して、NS 方向及び EW 方向で低振動数側への卓越振動数の移行と最大振幅の増幅が見られる。その変化の程度は、時間領域である地盤 FEM によるモデルと比較しても大きい。この理由として、地下外壁—側面地盤間に生じる剥離・滑り現象及び基礎—底面地盤間で生じる基礎浮き上がり現象をばね要素でモデル化している影響が考えられ、建屋—地盤間の非線形挙動を近似的に剛又は柔なばね要素を使って簡易にモデル化しているためと推定される。すなわち、ばね要素による接触・剥離のモデル化は、時間変化に応じた地下外壁—側面地盤間の剥離・滑り現象及び基礎—底面地盤間の基礎浮き上がり現象を厳密に評価することが難しく、また、これら現象のモデル化に際しては科学的・技術的に保守的な範囲に柔なばね要素を配し解析を行うため、ジョイント要素による解析モデルと比較して地盤の拘束効果が弱く、低振動数側に卓越振動数が移行してしまうことが影響しているものと推定される。

(2) 最大応答加速度

図 6.7 及び図 6.8 に最大応答加速度分布の比較を示す。図 6.7 は、地盤 FEM によってモデル化された基準モデル（感度解析）と接触・剥離モデル（感度解析）の時間領域における最大応答加速度分布の比較、図 6.8 は地盤 TLEM によってモデル化された基準モデル（感度解析）と接触・剥離モデル（感度解析）の周波数領域における最大応答加速度分布

の比較である。

地盤 FEM によってモデル化された時間領域における接触・剥離モデル（感度解析）の最大応答加速度分布は、図 6.7 が示すように、時間領域の基準モデル（感度解析）と比較して、NS、EW、UD 方向すべての地下部で最大応答加速度が大きく、地上部で最大応答加速度が小さくなる傾向が見られる。また、地下部では最大応答加速度に一時的な増幅が現れており、明らかに時間領域の基準モデル（感度解析）と異なる。これについて、委託研究事業成果報告書³によると、ジョイント要素を配した地下外壁－側面地盤間及び基礎－底面地盤間において、その出力値である加速度時刻歴波形に細かな振動現象が現れており、図 4.8 で定めたジョイント要素の応力－変位関係との間で力の不釣り合いが生じたことによる数値計算上のノイズが最大応答加速度として出力された可能性があることを指摘している。また、これらスパイク上のノイズは、建屋－地盤間が再接触するタイミングで発生する傾向があり、非常に高い振動数帯で数値振動として現れることから、ローパスフィルター等の方法でこの数値振動を除去することを提案している。

本感度解析においては、このローパスフィルター等の方法によってこれら加速度時刻歴波形に含まれるスパイク上の細かな振動を除去していない。よって、筆者らは、ジョイント要素を配した地下外壁－側面地盤間及び基礎－底面地盤間の代表節点に数値計算上のノイズを含む過大な応答が出力されているものと考え、結果として、地下部の最大応答加速度が時間領域の基準モデル（感度解析）と比較して著しく大きくなったものと推定した。なお、この数値計算上のノイズを含む応答の信頼性については、後述する 6.2.2 の再現解析の結果を踏まえ考察を行うものとする。

地盤 TLEM によってモデル化された周波数領域における接触・剥離モデル（感度解析）の最大応答加速度分布は、図 6.8 が示すように、周波数領域の基準モデル（感度解析）と比較して、NS 方向及び UD 方向において最大応答加速度が大きく、また、EW 方向において最大応答加速度が小さくなる傾向が見られる。この理由として、6.2.1 (1) で述べたとおり、地下外壁－側面地盤間に生じる剥離・滑り現象及び基礎－底面地盤間で生じる基礎浮き上がり現象の範囲が科学的・技術的に保守的に設定されている影響が考えられ、周波数領域の基準モデル（感度解析）と比較して地盤の拘束効果が弱まるため、建屋－地盤連成系の卓越振動数が低振動数側に移行しているものと推定される。すなわち、建屋－地盤連成系の固有振動数が建屋－地盤間を完全固着とした周波数領域の基準モデル（感度解析）と比較して明らかな変化を示したことにより、建屋の応答特性と入力地震動の応答スペクトルとの関係において NS 方向では応答が増幅する方向に、EW 方向では応答が低下する方向に働いているものと考えられる。このとき、UD 方向については、地盤の拘束効果が大きく低下したことにより、NS 方向及び EW 方向の地震動入力による建屋回転挙動の影響が現れ、結果として、UD 方向の応答にこれら水平方向の入力によって誘発される応答（誘発上下動）が加算されたことが影響しているものと推定される。

(3) 床応答加速度スペクトル

図 6.9 及び図 6.10 に床応答加速度スペクトルの比較を示す。図 6.9 は、地盤 FEM によってモデル化された基準モデル（感度解析）と接触・剥離モデル（感度解析）の時間領域における床応答加速度スペクトルの比較、図 6.10 は地盤 TLEM によってモデル化された基準モデル（感度解析）と接触・剥離モデル（感度解析）の周波数領域における床応答加速度スペクトルの比較である。

地盤 FEM によってモデル化された時間領域における接触・剥離モデル（感度解析）の床応答加速度スペクトルは、図 6.9 が示すように、時間領域の基準モデル（感度解析）と比較して、1 階の短周期側の最大応答加速度及び 4 階の NS、EW 方向の一部周期帯の最大応答加速度でその傾向に違いが見られる。この 1 階の短周期側の最大応答加速度については、6.2.1 (2) で述べたとおり、ジョイント要素による数値計算上のノイズの影響が考えられる。このジョイント要素による影響は、図 6.7 と比較すると小さいように見えるものの、これは、入力地震動の時間刻み 0.01 秒に合わせ応答加速度スペクトルを求めたためであり、これより短い周期の波形を除去したことで、数値計算上のノイズの多くが図中の床応答加速度スペクトルに含まれていないことが関係しているものと推定される。また、4 階の NS、EW 方向の 0.1 秒～0.3 秒付近に見られる最大応答加速度の差については、(2) で述べた建屋－地盤連成系の固有振動数の変化が影響を及ぼしているものと考えられ、建屋の応答特性と入力地震動の応答スペクトルの関係において、それら変化が応答を低減する方向に働いたものと推定される。

地盤 TLEM によってモデル化された周波数領域における接触・剥離モデル（感度解析）の床応答加速度スペクトルは、図 6.10 が示すように、周波数領域の基準モデル（感度解析）と比較して、地下 3 階の UD 方向及び 1 階並びに 4 階の一部周期帯の最大応答加速度でその傾向に違いが見られる。地下 3 階の UD 方向の最大応答加速度については、(2) で述べたとおり、地盤の拘束効果が大きく低下したことにより、NS 方向及び EW 方向の地震動入力によって引き起こされる建屋回転挙動による応答（誘発上下動）が影響しているものと推定される。なお、この建屋回転挙動については、上階の 1 階及び 4 階の当該周期帯に対しても影響があるものと考えられる。一方で、1 階及び 4 階の NS 方向及び EW 方向の 0.1 秒～0.3 秒付近に見られる最大応答加速度の顕著な差については、(2) で述べた建屋－地盤連成系の固有振動数の変化が影響しているものと考えられる。これは、建屋－地盤間の接触・剥離現象をばね要素で考慮したことにより、当該振動数が低振動数側に移行した影響で、建屋の床変形や壁の面外変形、ねじれ挙動等の三次元的な応答がやや誘発され、結果として、当該周期帯の最大応答加速度に影響が現れたものと推定される。

(4) まとめ

建屋－地盤間の接触・剥離現象のモデル化が建屋の地震時挙動に与える影響について、三次元 FEM モデルによる地震応答解析結果から建屋の耐震安全性及び床応答に与える影

響を分析した。

建屋－地盤間の接触・剥離現象を 5.1.2 の標準的な解析条件下のもと地下外壁－側面地盤間及び基礎－底面地盤間でジョイント要素及びばね要素を使いモデル化した時間領域及び周波数領域における地震応答解析結果から、地下外壁－側面地盤間の剥離・滑り挙動及び基礎－底面地盤間の基礎浮き上がり挙動が建屋の応答特性に与える影響を分析した。その結果、クレーン階の伝達関数については、卓越振動数が建屋の柔性を示す低振動数側に移行する現象が見られ、その変化の程度は、当該因子をばね要素でモデル化した地盤 TLEM によるモデル（周波数領域）の方が大きいことを確認した。これら結果について、筆者らは、建屋－地盤間の非線形挙動を近似的にばね要素を使って簡易にモデル化した影響と考え、時間変化に応じた地震時挙動を評価するジョイント要素によるモデル化と比較して、地盤の拘束効果を弱く評価するため、建屋－地盤連成系の卓越振動数に影響が現れたものと推定した。

地盤 TLEM による周波数領域から求まる UD 方向の最大応答加速度分布及び床応答加速度スペクトルにおいては、地盤の拘束効果の弱まりにより、水平方向の地震動入力による建屋回転挙動が上下方向で誘発される傾向にあることを確認した。また、水平方向の最大応答加速度分布及び床応答加速度スペクトルにおいて、建屋－地盤連成系の卓越振動数が低振動数側に移行したことにより建屋の床変形や壁の面外変形、ねじれ挙動等の応答が大きくなる傾向にあることを確認した。これら建屋の応答性状の変化に伴う三次元的な地震時挙動の増幅については、建屋の耐震安全性評価上、適切に検討が行われているか留意して評価する必要があるものと推定した。

当該因子をジョイント要素でモデル化した地盤 FEM による時間領域のモデルでは、地下部において、地上部の最大応答加速度を上回る一時的な応答の増幅が現れることを確認した。これら結果については、委託研究事業成果報告書³を参考に、図 4.8 で定めたジョイント要素の応力－変位関係との間で力の不釣り合いが生じているものと考え、ジョイント要素を配した地下外壁－側面地盤間及び基礎－底面地盤間の代表節点の加速度時刻歴波形に含まれる数値計算上のノイズが最大応答加速度として出力されたものと推定した。なお、ジョイント要素に生じる力の不釣り合いの詳細については、委託研究事業成果報告書³の 3.2.3 を参照されたい。

6.2.2 再現解析結果に基づく適用性の確認

本項では、2.4 に基づき、建屋－地盤間の接触・剥離現象のモデル化を影響因子とした場合の建屋の伝達関数、最大応答加速度、床応答加速度スペクトルについて、5.2 の再現解析の結果から当該因子の設定の妥当性を確認し、その適用性を考察する。

(1) 伝達関数

図 6.11 及び図 6.12 に 3 階観測点における伝達関数を示す。図 6.11 は、観測記録と地

盤 FEM によってモデル化された基準モデル（再現解析）及び接触・剥離モデル（再現解析）の時間領域から求まる伝達関数の比較、図 6. 12 は、観測記録と地盤 TLEM によってモデル化された基準モデル（再現解析）及び接触・剥離モデル（再現解析）の周波数領域から求まる伝達関数の比較である。

地盤 FEM によってモデル化された時間領域における接触・剥離モデル（再現解析）の伝達関数は、図 6. 11 が示すように、時間領域の基準モデル（再現解析）と比較して、NS 方向及び EW 方向で卓越振動数に顕著な差は見られなかったものの、10Hz 以降で振幅が小さくなる現象が見られる。また、UD 方向については、10Hz 以降の振動数帯において、卓越振動数が高振動数側に移行する現象が見られ、一部振動数帯で時間領域の基準モデル（再現解析）を上回る振幅が現れている。これら伝達関数の曲線は、基準モデル（再現解析）と比較して観測記録にやや近づいているように見られるものの、依然として観測記録との間に明らかな差が存在している。

これについて、委託研究事業成果報告書³によると、入力地震動の加速度フーリエ振幅を分析した結果から、当該地震動に含まれる 12.5Hz 付近の卓越する最大応答加速度の影響を指摘している。本再現解析においては、基礎スラブ上の観測記録を基に入力波形を設定しており、また、時間領域である地盤 FEM によるモデルに関しては、当該観測記録を解析モデル下端に一旦引き下ろした上で地震波を引き上げているため、その波形を作成する過程で建屋と地盤の上下動の固有振動数 11Hz～12Hz 近傍の連成モードの影響を受けたために、当該振動数付近で観測記録には見られない振幅が現れた可能性を考察している。

地盤 TLEM によってモデル化された周波数領域における接触・剥離モデル（再現解析）の伝達関数は、図 6. 12 が示すように、周波数領域の基準モデル（再現解析）と比較して、NS 方向及び EW 方向において卓越振動数が若干低振動数側に移行しており、6.2.1 と同様の現象が見られるものの、その変化の程度は小さい。また、UD 方向については、地下外壁―側面地盤間の剥離・滑り現象及び基礎―底面地盤間で生じる基礎浮き上がり現象をモデル化したことにより、周波数領域における基準モデル（再現解析）において高振動数側に最大応答加速度のピークが現れている。この理由として、6.2.1 と同様に地下外壁―側面地盤間で生じる剥離・滑り現象及び基礎―底面地盤間で生じる基礎浮き上がり現象をばね要素でモデル化した影響の他に入力波形の作成方法の違いによる影響が考えられ、基礎スラブ上の応答波形と観測波形の繰り返し計算によって求まる入力波形に原因があるものと推定される。

(2) 最大応答加速度

図 6. 13 及び図 6. 14 に最大応答加速度分布の比較を示す。図 6. 13 は、観測記録と地盤 FEM によってモデル化された基準モデル（再現解析）及び接触・剥離モデル（再現解析）の時間領域から求まる最大応答加速度分布の比較、図 6. 14 は、観測記録と地盤 TLEM によってモデル化された基準モデル（再現解析）及び接触・剥離モデル（再現解析）の周波

数領域から求まる最大応答加速度分布の比較である。

地盤 FEM によってモデル化された時間領域における接触・剥離モデル（再現解析）の最大応答加速度分布は、図 6.13 が示すように、基準モデル（再現解析）と比較して、NS 方向及び EW 方向において最大応答加速度に顕著な差は見られず、また、観測記録とも良く整合している。一方で、UD 方向については、最大応答加速度が基準モデル（再現解析）を上回る傾向が見られ、また、観測記録と比較して、明らかな最大応答加速度分布の差が見られる。これについて、委託研究事業成果報告書³によると、6.2.2 (1)と同様に 12.5Hz 付近に存在する入力地震動のピークと建屋と地盤の上下方向における 11Hz~12Hz 近傍の連成モードの影響から、当該振動数帯における上下の応答が増幅されたことを指摘している。また、観測記録において当該振動数に同様のピークが見られないことから、地盤 FEM で見られるこれらピークは、数値計算上発生したピークと考え、耐震壁や補助壁以外の間仕切り壁等を図面情報に基づいて詳細にモデル化することで、より観測記録に近い応答が得られた可能性を述べている。

なお、感度解析で見られた加速度時刻歴波形に含まれるスパイク上の細かな振動については、100Hz を超える高振動数成分が建屋の損傷に与える影響は小さいと仮定した上で、得られた加速度時刻歴波形にローパスフィルターを掛け、その影響を除外している。この数値計算上のノイズを含む応答の信頼性について、筆者らは、水平方向の最大応答加速度分布で観測記録との高い整合性が見られることから、本解析の条件下においては、一定程度の適用性を有しているものと推定した。

地盤 TLEM によってモデル化された周波数領域における接触・剥離モデル（再現解析）の最大応答加速度分布は、図 6.14 が示すように、周波数領域の基準モデル（再現解析）と比較して、上階において NS 方向及び EW 方向の最大応答加速度が大きくなっており、また、UD 方向で最大応答加速度が小さくなる傾向が見られる。この理由として、6.2.1 で述べたとおり、地下外壁一側面地盤間に生じる剥離・滑り現象及び基礎一底面地盤間に生じる基礎浮き上がり現象をばね要素で簡易にモデル化した影響が考えられ、建屋の応答特性と入力地震動の応答スペクトルの関係から NS 方向及び EW 方向では応答が増幅する方向に、UD 方向では応答が低下する方向に働いたことが影響しているものと推定される。

(3) 床応答加速度スペクトル

図 6.15 及び図 6.16 に床応答加速度スペクトルの比較を示す。図 6.15 は、地盤 FEM によってモデル化された基準モデル（再現解析）と接触・剥離モデル（再現解析）の時間領域から求まる床応答加速度スペクトルの比較、図 6.16 は地盤 TLEM によってモデル化された基準モデル（再現解析）と接触・剥離モデル（再現解析）の周波数領域から求まる床応答加速度スペクトルの比較である。

地盤 FEM によってモデル化された時間領域における接触・剥離モデル（再現解析）の床応答加速度スペクトルは、図 6.15 が示すように、時間領域の基準モデル（再現解析）と比

較して、1 階の短周期側の最大応答加速度及び 1 階並びに 3 階の UD 方向の 0.08 秒付近の周期帯の最大応答加速度でその傾向に違いが見られる。1 階の短周期側の最大応答加速度については、6.2.1 (2)で述べたとおり、ジョイント要素から出力される波形に含まれる数値計算上のノイズが影響しているものと推定される。一方で、1 階及び 3 階の UD 方向の 0.08 秒付近で見られる最大応答加速度の違いについては、6.2.2 (1)及び(2)で述べたとおり、12.5Hz 近傍に存在する入力地震動のピークが影響を及ぼしているものと考えられ、この入力地震動のピークと建屋と地盤の上下方向における当該振動数の連成が最大応答加速度の増幅に影響を及ぼしているものと推定される。

地盤 TLEM によってモデル化された周波数領域における接触・剥離モデル（再現解析）の床応答加速度スペクトルは、図 6.16 が示すように、周波数領域の基準モデル（再現解析）と比較して、1 階の一部周期帯及び 3 階の卓越周期付近の最大応答加速度でその傾向に違いが見られる。これについては、6.2.1 (2)で述べたとおり、建屋－地盤連成系の固有振動数の変化が影響したものと考えられ、建屋－地盤間の接触・剥離現象をばね要素で考慮することにより、当該振動数が低振動数側に移行し、NS 方向及び EW 方向では、当該周期帯の最大応答加速度を増幅させる方向に、UD 方向では低下させる方向に働いているものと推定される。

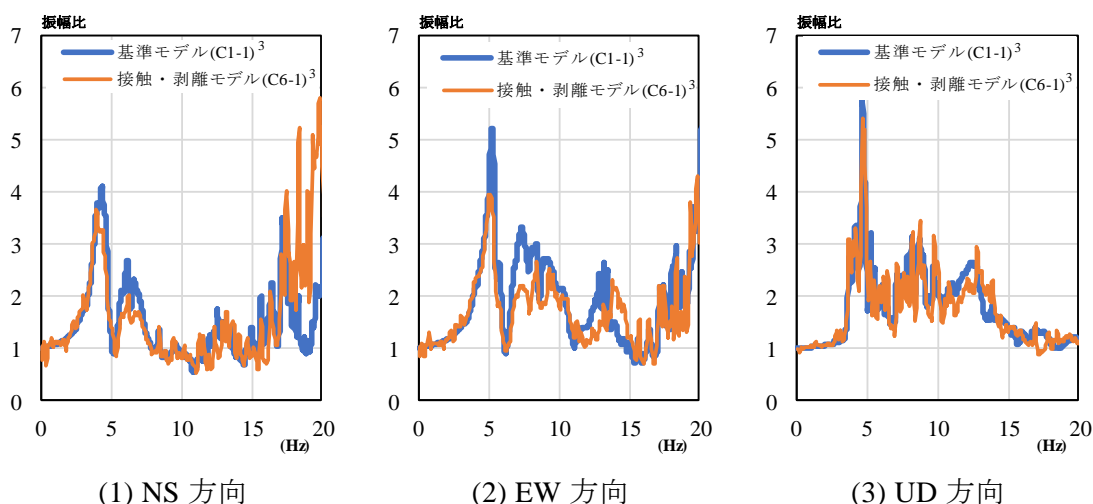
(4) まとめ

建屋－地盤間の接触・剥離現象のモデル化が建屋の地震時挙動に与える影響について、三次元 FEM モデルによる地震応答解析結果から当該因子の設定の妥当性を確認し、その適用性を考察した。

建屋－地盤間の接触・剥離現象を現実的な解析条件のもと 6.2.1 と同様にジョイント要素及びばね要素を使いモデル化を行うことで、これら因子の設定が妥当であるか観測記録との比較から確認を行った。その結果、NS 方向及び EW 方向の建屋応答については、建屋－地盤間の接触・剥離をジョイント要素及びばね要素でモデル化することで、観測記録とおおむね整合性の取れた時間領域及び周波数領域の再現解析結果が得られることを確認した。また、これら再現解析結果から、当該因子の設定に当たっては、ジョイント要素でモデル化した場合に比べばね要素でモデル化した場合に建屋の応答がやや大きく評価される傾向にあることを確認した。これら結果について、筆者らは、6.2.1 と同様に、建屋－地盤間の非線形挙動に対するモデル化の違いが影響を及ぼしているものと考え、本解析の条件下においては、周波数領域で用いたばね要素によるモデル化の方が地盤の拘束効果を弱く評価しているため、建屋－地盤連成系の卓越振動数が低振動数側に移行しているものと推定した。一方で、UD 方向については、観測記録との間に明らかな応答の差が見られ、また、床応答加速度スペクトルにおいても 0.08 秒付近の周期帯に観測記録には見られない最大応答加速度のピークが現れており、その整合性を確認することができなかった。これら結果については、委託研究事業成果報告書³を参考に、入力地震動を作成する過程で現れた

当該周期帯における数値計算上のピークと建屋と地盤の上下動の固有振動数が重なりあった影響と考え、これら観測記録には見られないピークが建屋応答に大きな影響を及ぼしたものと推定した。

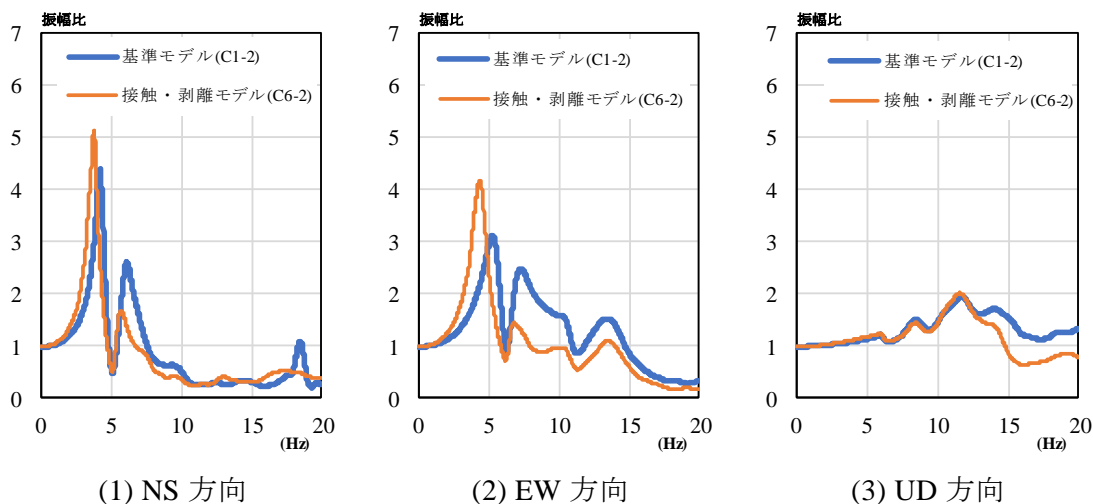
以上の結果より、筆者らは、水平 2 方向及び鉛直方向の地震動入力及び建屋－地盤間の接触・剥離現象をジョイント要素又はばね要素を配してモデル化する本研究の方法について、NS 方向及び EW 方向の建屋応答に観測記録との比較的高い整合性が見られることから、水平方向については一定程度の精度を有する適切なモデル化が行われているものと考え、本解析条件下においては、適用性を有しているものと推定した。一方で、UD 方向については、観測記録との間に入力波形の設定方法や壁等のモデル化方法等に起因する応答への影響が見られ、その応答性状を十分に表しきれていない可能性もあるため、本手法の適用には留意が必要であるものと推定した。



注) 解析プログラムの特性により、地盤 FEM による伝達関数は水平 2 方向及び鉛直方向の 3 方向同時入力による応答値に対して評価を行った。

図 6.5 クレーン階 地盤 FEM による伝達関数の比較 (感度解析：時間領域)

Fig. 6. 5 Comparison of transfer functions at crane floor: FEM modeling of soil for sensitivity analyses in time domain



注) 解析プログラムの特性により、地盤 TLEM による伝達関数は 1 方向単独入力による応答値に対して評価を行った。

図 6.6 クレーン階 地盤 TLEM による伝達関数の比較 (感度解析：周波数領域)

Fig. 6. 6 Comparison of transfer functions at crane floor: TLEM modeling of soil for sensitivity analyses in frequency domain

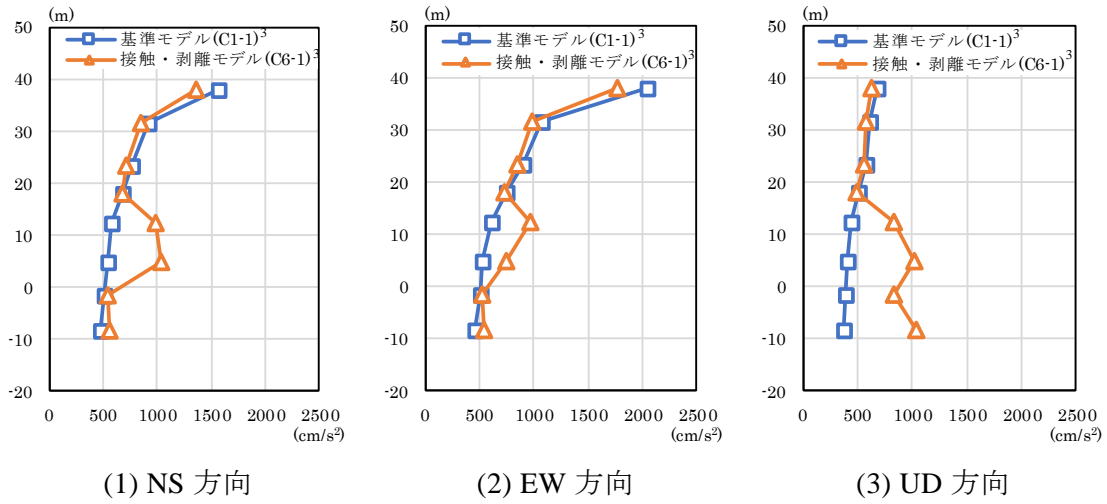


図 6.7 地盤 FEM による最大応答加速度分布の比較（感度解析：時間領域）
 Fig. 6.7 Comparison of maximum accelerations: FEM modeling of soil for sensitivity analyses in time domain

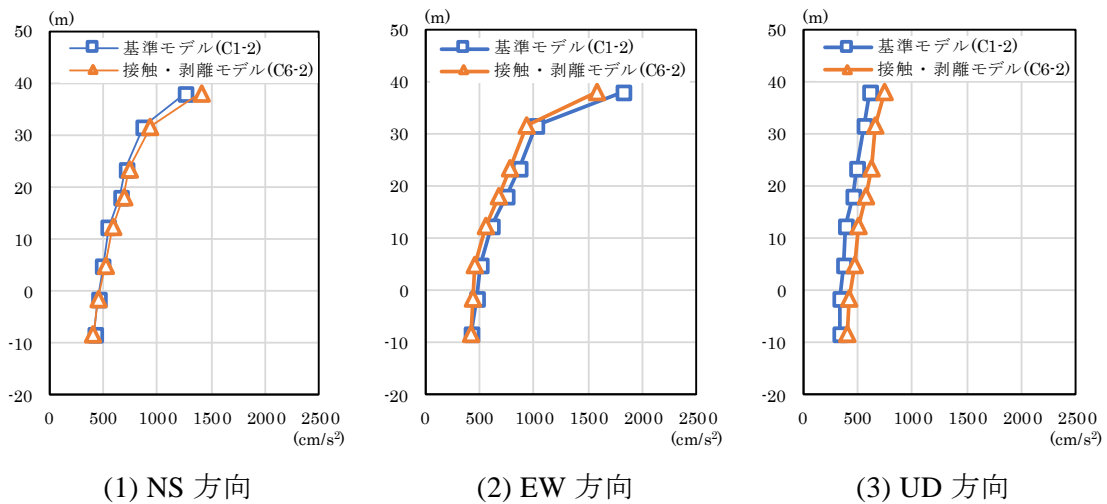
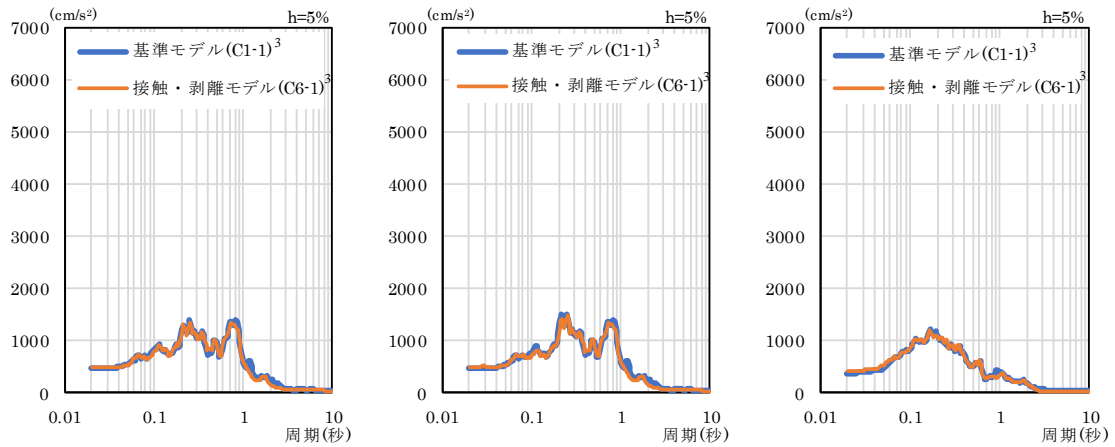


図 6.8 地盤 TLEM による最大応答加速度分布の比較（感度解析：周波数領域）
 Fig. 6.8 Comparison of maximum accelerations: TLEM modeling of soil for sensitivity analyses in frequency domain

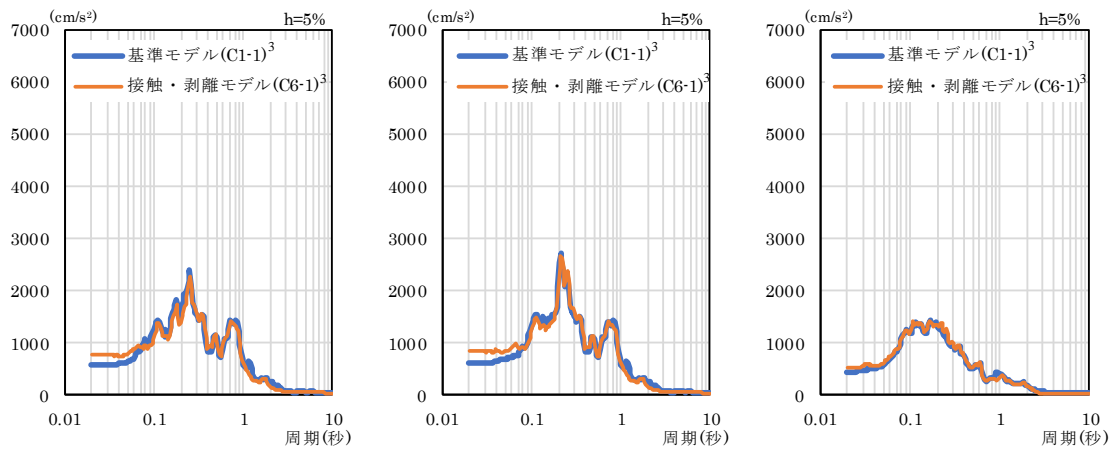


① NS 方向

② EW 方向

③ UD 方向

(1) 地下 3 階

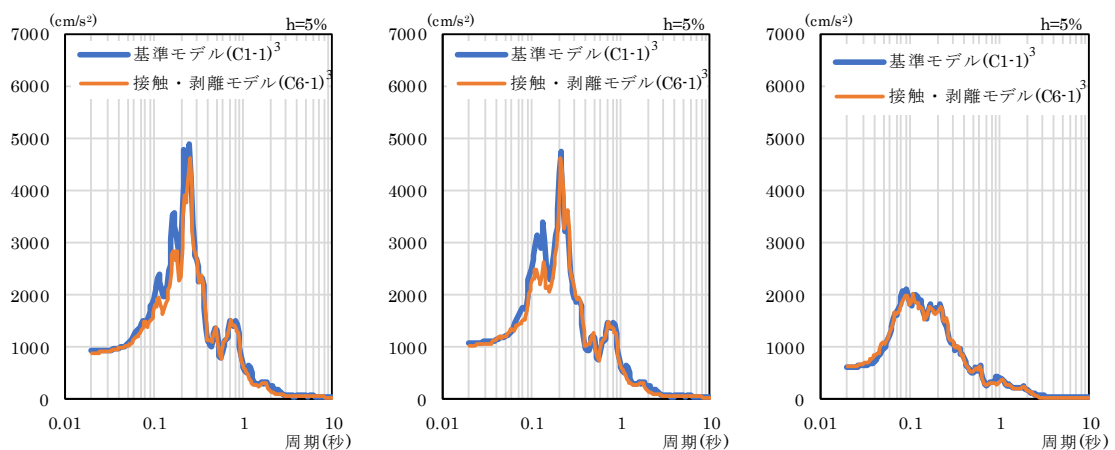


① NS 方向

② EW 方向

③ UD 方向

(2) 1 階



① NS 方向

② EW 方向

③ UD 方向

(3) 4 階

図 6.9 地盤 FEM による床応答加速度スペクトルの比較 (感度解析: 時間領域)
 Fig. 6.9 Comparison of FRS: FEM modeling of soil for sensitivity analyses in time domain

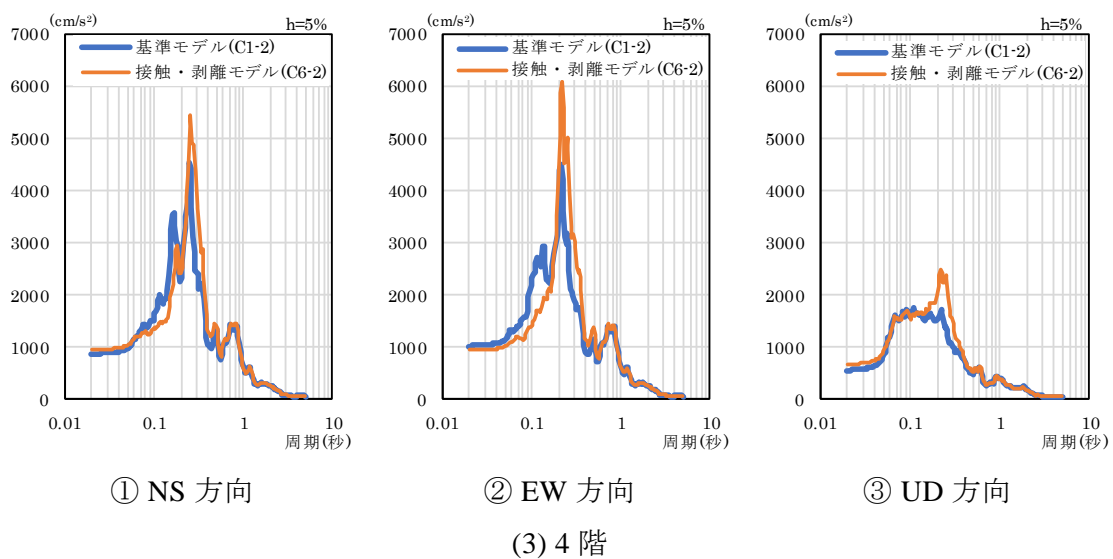
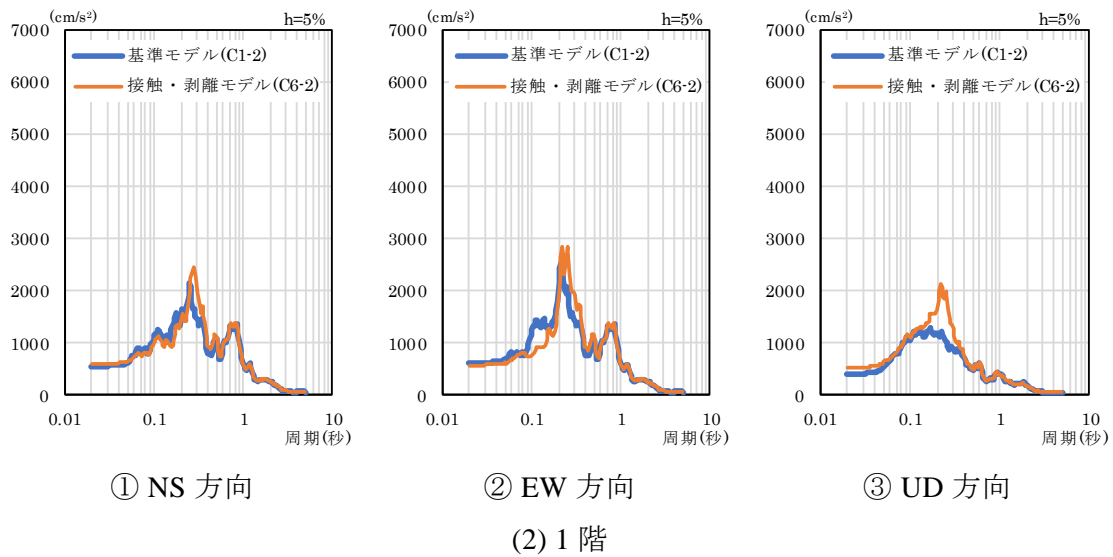
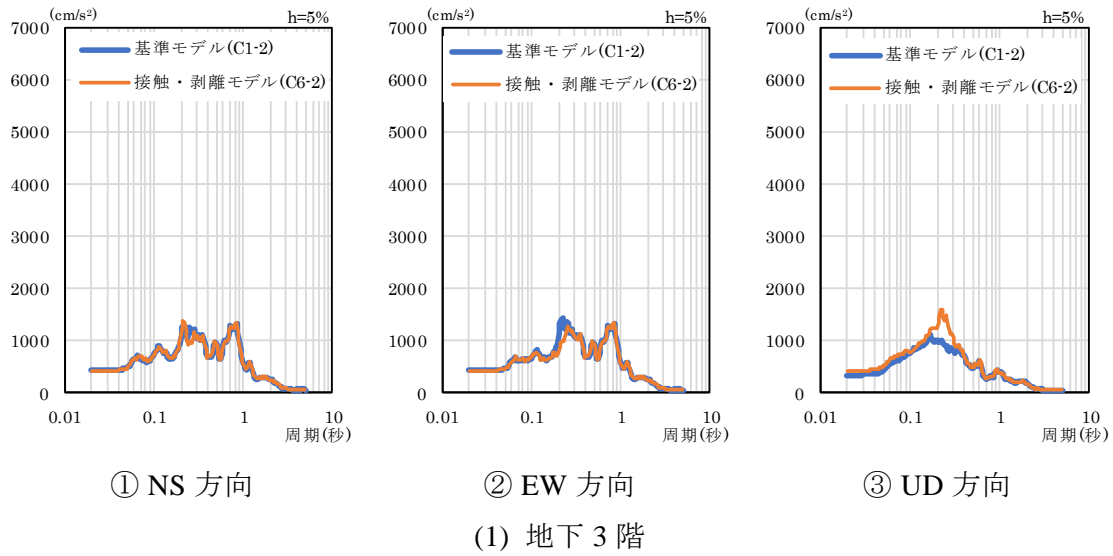
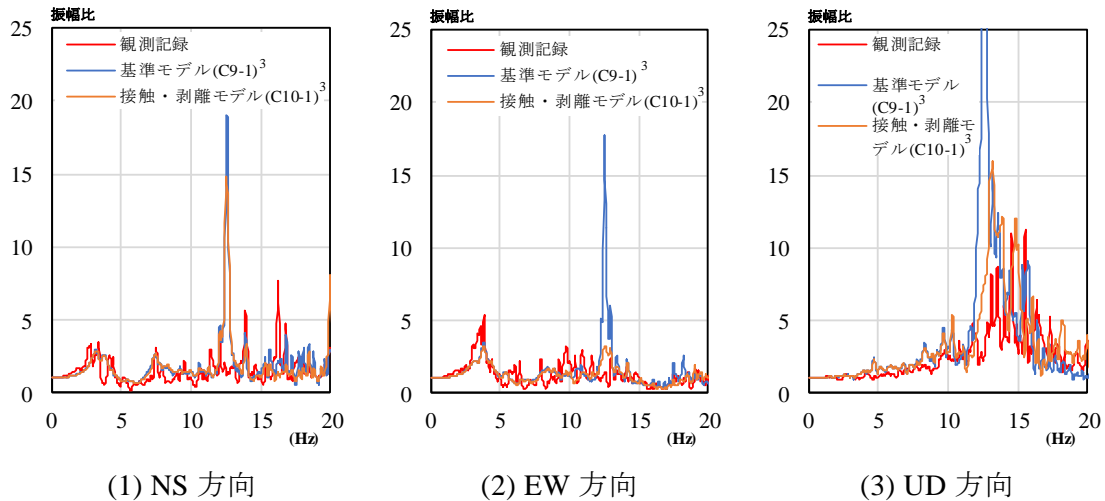


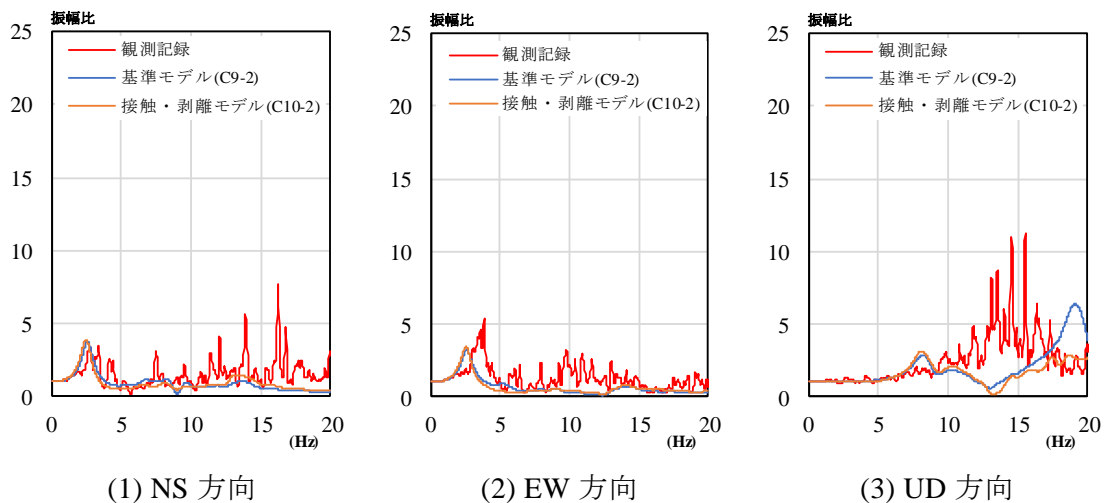
図 6.10 地盤 TLEM による床応答加速度スペクトルの比較 (感度解析：周波数領域)
 Fig. 6.10 Comparison of FRS: TLEM modeling of soil for sensitivity analyses in frequency domain



注) 解析プログラムの特性により、地盤 FEM による伝達関数は水平 2 方向及び鉛直方向の 3 方向同時入力による応答値に対して評価を行った。

図 6.11 3 階 地盤 FEM による伝達関数の比較 (再現解析：時間領域)

Fig. 6.11 Transfer functions on the third floor: FEM modeling of soil for simulation analyses in time domain



注) 解析プログラムの特性により、地盤 TLEM による伝達関数は 1 方向単独入力による応答値に対して評価を行った。

図 6.12 3 階 地盤 TLEM による伝達関数の比較 (再現解析：周波数領域)

Fig. 6.12 Transfer functions on the third floor: TLEM modeling of soil for simulation analyses in frequency domain

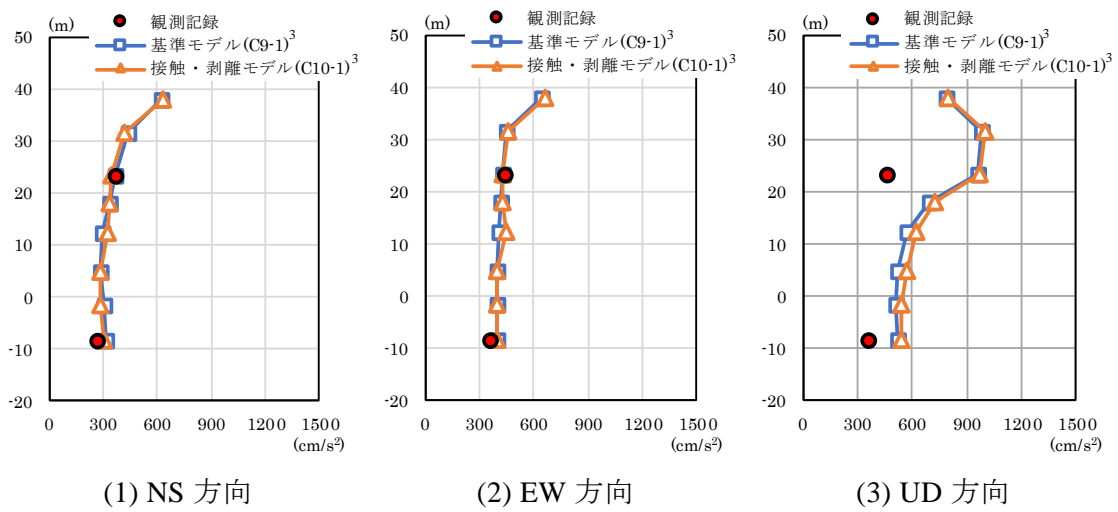


図 6.13 地盤 FEM による最大応答加速度分布の比較（再現解析：時間領域）
 Fig. 6.13 Comparison of maximum accelerations: FEM modeling of soil for simulation analyses in time domain

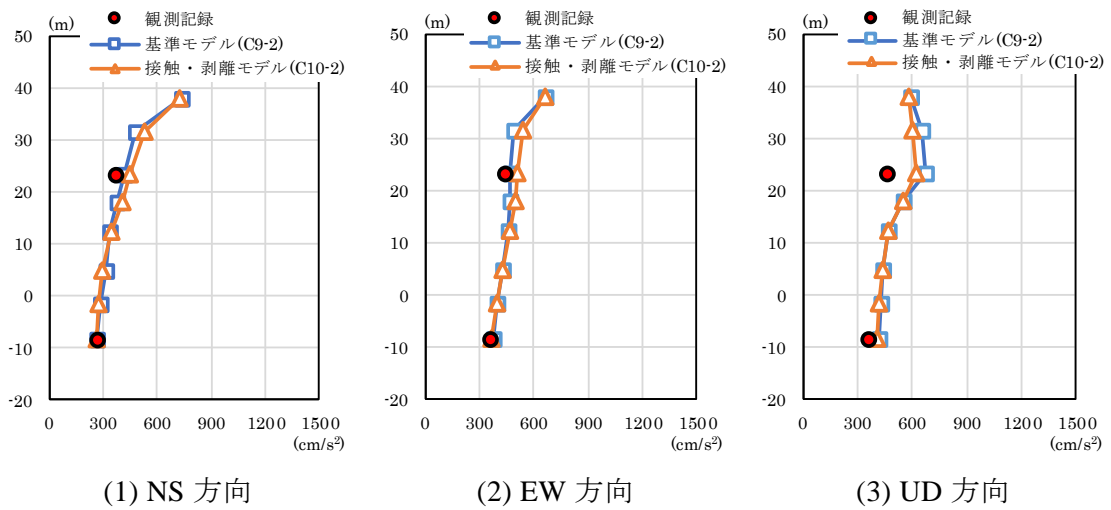
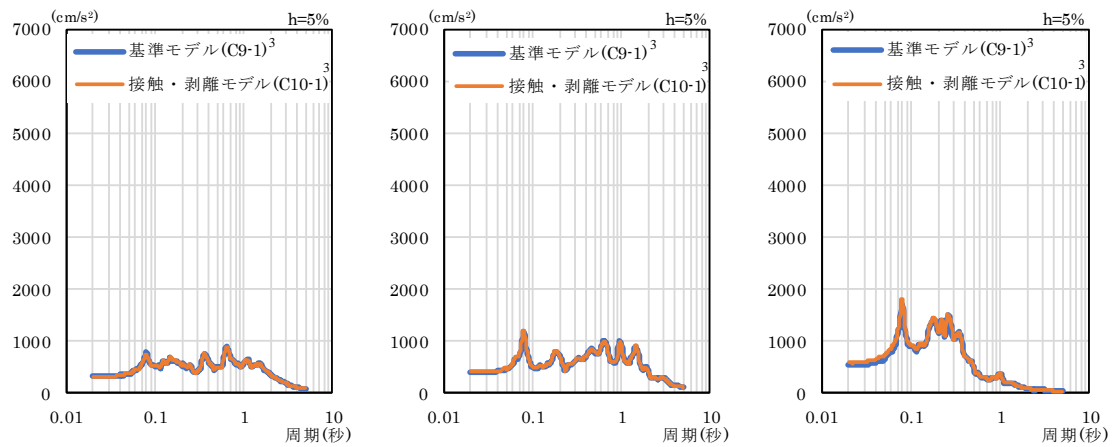


図 6.14 地盤 TLEM による最大応答加速度分布の比較（再現解析：周波数領域）
 Fig. 6.14 Comparison of maximum accelerations: TLEM modeling of soil for simulation analyses in frequency domain

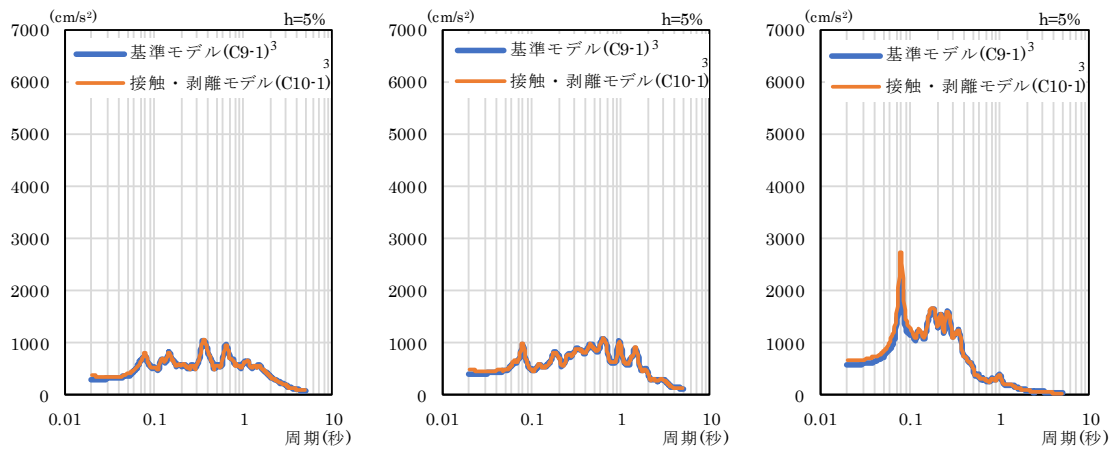


① NS 方向

② EW 方向

③ UD 方向

(1) 地下 3 階

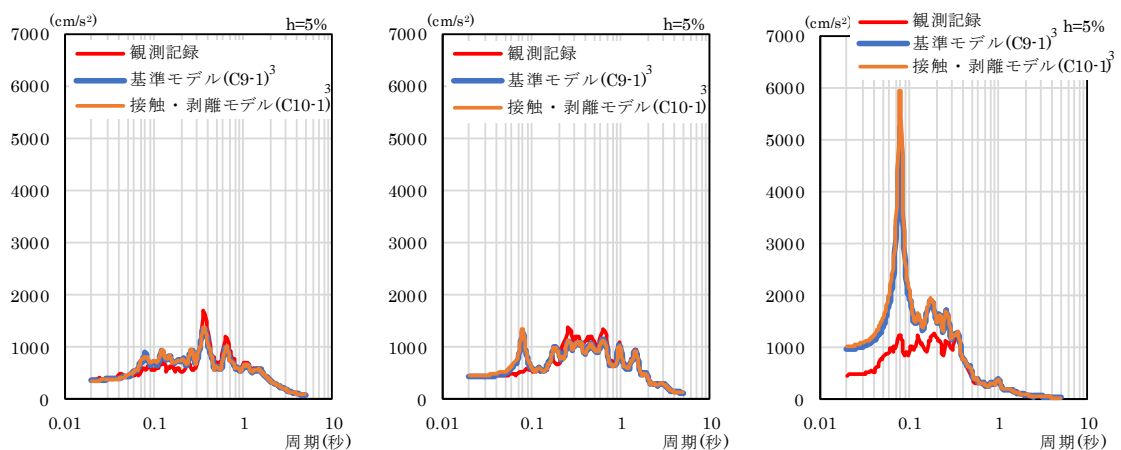


① NS 方向

② EW 方向

③ UD 方向

(2) 1 階



① NS 方向

② EW 方向

③ UD 方向

(3) 3 階

図 6.15 地盤 FEM による床応答加速度スペクトルの比較 (再現解析：時間領域)
 Fig. 6.15 Comparison of FRS: FEM modeling of soil for simulation analyses in time domain

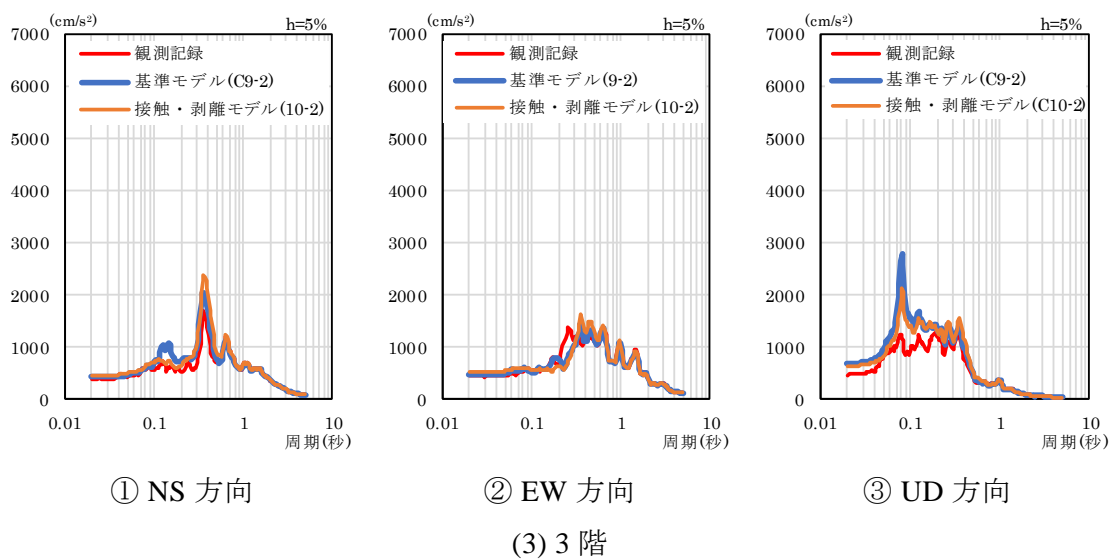
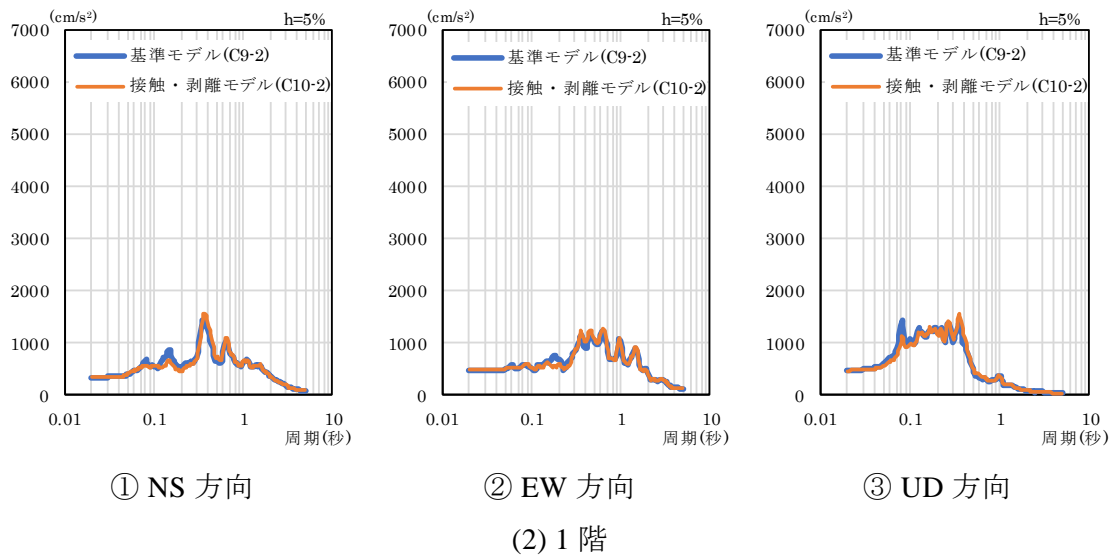
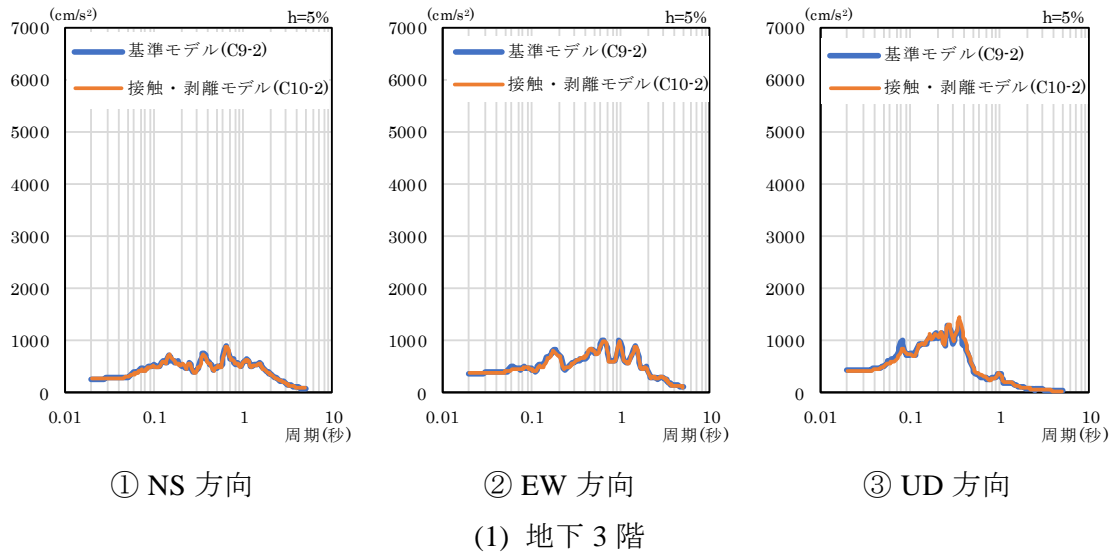


図 6.16 地盤 TLEM による床応答加速度スペクトルの比較 (再現解析：周波数領域)
 Fig. 6.16 Comparison of FRS: TLEM modeling of soil for simulation analyses in frequency domain

7. 結論

本研究では、これまでの審査の論点も踏まえ、建屋地震時挙動の精緻な推定に資する技術的知見を取得することを目的に、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影響因子について文献調査を行い、これら影響因子を同定した。さらに、同定した影響因子をパラメーターとして 5.1 の感度解析（時間領域及び周波数領域）を行い、その影響を分析した。また、上記感度解析で得られた技術的知見に対し、5.2 の地震観測記録の再現解析（時間領域及び周波数領域）から当該影響因子のモデル化の妥当性を確認した。

その結果、建屋ひずみレベルで弾性範囲をやや上回るまでの地震動を対象とした地震応答解析から、以下に示す主要な影響因子に対し、(1)～(10)に示す成果が得られた。

① 水平 2 方向及び鉛直方向の地震動入力

② 建屋－地盤間の接触・剥離現象のモデル化

- (1) 水平 2 方向及び鉛直方向の地震力の組合せが BWR の原子炉建屋の耐震安全性及び床応答に与える影響について、三次元 FEM モデルによる地震応答解析結果からその影響を 6.1.1 で分析した。その結果、本感度解析で対象とした 5.1 の標準的な条件下における BWR の原子炉建屋については、水平 1 方向入力時の最大応答加速度と水平 2 方向及び鉛直方向入力時の最大応答加速度の増分比率コンター図及び最大増分比率を記録した代表節点に対する床応答加速度スペクトルの分析から、その影響は小さいことを確認した。
- (2) 鉛直方向の地震動入力による水平方向の振動励起が BWR の原子炉建屋の耐震安全性及び床応答に与える影響について、三次元 FEM モデルによる地震応答解析結果からその影響を 6.1.2 で分析した。その結果、本感度解析で対象とした 5.1 の標準的な条件下における BWR の原子炉建屋については、鉛直方向入力時の水平方向の最大応答加速度コンター図及び最大応答加速度を記録した代表節点に対する床応答加速度スペクトルの分析から、その影響は小さいことを確認した。
- (3) 建屋－地盤間の接触・剥離現象のモデル化が建屋の地震時挙動に与える影響について、三次元 FEM モデルによる地震応答解析結果からその影響を 6.2 で分析した。その結果、本感度解析で対象とした 5.1 の標準的な条件下における BWR の原子炉建屋においては、建屋－地盤間の接触・剥離現象を考慮していない場合と比較して、当該影響因子をジョイント要素又はばね要素でモデル化することにより、剥離や滑りが生じることで地盤の拘束効果が弱まること、建屋－地盤連成系の卓越振動数が低振動数側に移行することを確認した。また、その変化の程度に応じて建屋の回転挙動や回転挙動による鉛直方向の誘発上下動、床変形、ねじれ挙動、壁の面外変形等の応答が増幅される可能性があり、建屋の耐震安全性評価上、これら三次元的な挙動が適切に検討されて

- いるか留意して評価する必要があることを確認した。
- (4) このうち、建屋回転挙動に伴う鉛直方向の誘発上下動については、剥離や滑りが生じ地盤の拘束効果が弱まることで、鉛直方向の応答が一部周期帯で増幅される傾向にあり、その評価には留意が必要であることを確認した。
- (5) (3)の感度解析から得られた成果と同様に、5.2 の再現解析で対象とした現実的な条件下においても、地盤の拘束効果の低下と建屋－地盤連成系の卓越振動数の移行を確認しており、また、水平方向について観測記録とおおむね整合した再現解析結果が得られていることから、本解析条件下におけるジョイント要素又はばね要素による当該影響因子のモデル化はおおむね適切な精度を有しており、その手法は①の水平 2 方向及び鉛直方向の地震動入力も含め、一定程度の適用性を有しているものと推定した。
- (6) 一方で、鉛直方向については、観測記録との間に入力波形の設定方法、壁のモデル化方法等に起因する応答への影響が見られることから、その応答性状を十分に表しきれていない可能性もあるため、本手法の適用には留意が必要であることを確認した。
- (7) なお、建屋－地盤間の接触・剥離現象をジョイント要素によりモデル化する際には、以下の点に留意する必要があることを確認した。
- ・ ジョイント要素によるモデル化は、時間変化に応じた接触・剥離現象の評価が可能であるものの、一部節点の応答加速度で波形が細かく振動する現象が現れた。
 - ・ これら振動について、筆者らは、ジョイント要素で定めた応力－変位関係と応答値の間に力の不釣り合いが生じたことによる数値計算上のノイズが現れた可能性を指摘し、適切なモデル化やデータ処理によりその影響を回避することが望ましいことを示した。
- (8) また、建屋－地盤間の接触・剥離現象をばね要素によりモデル化する際には、以下の点に留意する必要があることを確認した。
- ・ ばね要素によるモデル化は、接触・剥離現象に伴う非線形挙動を等価線形的に考慮するため、ジョイント要素のような数値計算上のノイズに起因した応答は現れないものの、その範囲の設定が妥当なものであるか確認を行う必要がある。
 - ・ このため、モデル化の際には、現実的な応答に即して適切な科学的・技術的判断が行われているか確認を行う必要がある。
- (9) 本研究では、三次元 FEM モデルによる建屋－地盤連成系の地震応答解析を行うに当たり、計算機への過度な負担を低減するため、5.1 の感度解析においては地盤を線形モデル、また、5.2 の再現解析においては地盤を等価線形モデルと定め、諸条件の設定を行った。このため、原子炉建屋の応答性状の推定の精緻化という観点では、今後、地盤の非線形性について、地盤を非線形モデルとした逐次非線形解析によるより詳細な検討を行うことが期待される。
- (10) 本研究では、三次元 FEM モデルによる建屋－地盤連成系の地震応答解析を行うに当たり、入力地震動を 3.2.1 の耐専スペクトルに基づく方法の 1 波（水平 2 方向及び鉛直方

向)、3.2.2 の地震観測記録に基づく方法の 1 波（水平 2 方向及び鉛直方向）のみとした。このため、原子炉建屋の応答性状の推定の精緻化という観点では、今後、応答特性の異なる複数の入力地震動を対象に、より定量的な検討を行うことが期待される。

謝辞

本研究を実施するに当たり、International Atomic Energy Agency が公開する報告書 IAEA, Review of Seismic Evaluation Methodologies for Nuclear Power Plants Based on a Benchmark Exercise, IAEA TECDOC No. 1722, 2013 の検討成果を参照させていただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献一覧

- 1 原子力規制委員会、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、原規技発第 1306193 号、平成 25 年 6 月 19 日
- 2 原子力規制委員会、耐震設計に係る工認審査ガイド、原管地発第 1306195 号、平成 25 年 6 月 19 日
- 3 日本原子力研究開発機構、平成 31 年度原子力施設等防災対策委託費（高経年化を考慮した建屋・機器・構造物の耐震安全性評価手法の高度化）事業報告書、2020
- 4 原子力規制委員会、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、原子力規制委員会規則第 5 号、平成 25 年 6 月 28 日
- 5 土方他、新潟県中越沖地震における地盤非線形性に着目した柏崎刈羽原子力発電所 7 号機原子力建屋の応答性状、日本建築学会構造系論文集、2011
- 6 E. Miyasaka et al., Dynamic Characteristics of a SC Building in Kashiwazaki NPP site using Vibration Test -Part2: Simulation Analysis, SMiRT19, 2007
- 7 J. Moore et al., Earthquake Response Analysis in the Context of the KARISMA Benchmark Project, SMiRT22, 2013
- 8 羽場崎他、弾塑性 FEM モデルを用いた断面照査手法の検討 その 1 検討概要および検討モデル、日本建築学会大会学術講演梗概集、2014
- 9 田邊他、3次元 FEM モデルを用いた断面検討におけるクライテリアの設定、日本建築学会大会学術講演梗概集、2017
- 10 東京電力 HD 株式会社、柏崎刈羽原子力発電所 7 号機 新潟県中越沖地震後の設備健全性に係る点検・評価報告書(建物・構築物編)、2008.
- 11 原子力安全基盤機構、新潟県中越沖地震における地盤－建屋解析モデルの分析（今回の観測記録及び地震応答解析モデルの分析）、2008
- 12 九州電力株式会社、川内原子力発電所 1 号機 工事計画認可申請（補正）の概要について 補足説明資料、第 150 回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合、資料 3-2、2014、
<https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11126546/www.nsr.go.jp/data/000036063.pdf> (2020 年 4 月 20 日確認)
- 13 日本原子力発電株式会社、東海第二発電所 耐震性に関する説明書に係る補足説明資料 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の適切な組合せに関する検討について、新規制基準適合性審査に関する事業者ヒアリング（東海第二（1228））、資料 2、2018、
<https://www2.nsr.go.jp/data/000247720.pdf> (2020 年 4 月 20 日確認)
- 14 美原他、3次元モデルを用いた耐震設計手法の高度化に関する研究 その 3 水平 2 方向入力円筒型壁モデルの応答結果に与える影響検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、2015
- 15 OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY, SEISMIC SHEAR WALL ISP NUPEC'S SEISMIC ULTIMATE DYNAMIC RESPONSE TEST, OECD/GD(96)188, 1996
- 16 前川他、疑似直交 2 方向ひび割れを有する平面 RC 要素の空間平均化構成モデルの再構築、土木学会論文集 No.634 V-45 pp.157-176、1999
- 17 福浦他、非直交する独立 4 方向ひび割れ群を有する平面 RC 要素の空間平均化構成則再構築、土木学会論文集 No.634 V-45 pp.177-195、1999
- 18 長沼他、鉄筋コンクリート立体耐震壁の動的 FEM 解析 その 1 解析概要、日本建築学

会講演梗概集、2000

- 19 栗本他、鉄筋コンクリート立体耐震壁の動的 FEM 解析 その 2 時刻歴応答解析結果、日本建築学会講演梗概集、2000
- 20 梅木他、3次元モデルを用いた耐震設計手法の高度化に関する研究 その 1 非線形応答解析手法の検討、日本建築学会学術講演梗概集、2014
- 21 鬼塚他、異なる減衰特性を有する構造物群からなる系に対する要素別 Rayleigh 減衰モデル化方法の提案、日本地震工学会論文集、2015
- 22 鈴木他、側面回転地盤ばねの簡易評価法に関する検討、第 63 回理論応用力学講演会、2014
- 23 東京電力 HD 株式会社、柏崎刈羽原子力発電所 6 号および 7 号炉、地震による損傷の防止について（補足説明資料）建屋側面地盤回転を考慮することの妥当性について、第 399 回原子力発電所の新規規制基準適合性に係る審査会合、資料 4-3-1、pp.176-314、2016、<https://www2.nsr.go.jp/data/000163604.pdf>（2020 年 4 月 20 日確認）
- 24 H. Inoue, et al., Investigation on Causes of the Difference between Simulation Result by Using Simplified Lumped Mass Model and NCO-Earthquake Record Observed at BWR Reactor Building, SMiRT21, 2011
- 25 猪田他、非線形 3 次元 FEM モデルによる原子炉発電所建屋の応答性状に与える不整形地盤及び隣接建屋の影響検討 その 1 基礎入力動の評価、日本建築学会大会学術講演梗概集、2011
- 26 中村他、非線形 3 次元 FEM モデルによる原子炉発電所建屋の応答性状に与える不整形地盤及び隣接建屋の影響検討 その 2 建屋応答評価、日本建築学会大会学術講演梗概集、2011
- 27 Novak, M. et al., Dynamic Soil Structure Stiffness of Embedded Reactor Building, Proc.9th SMiRT conference, Paper KI, 1987
- 28 崔他、原子力施設の地震応答解析におけるばらつき評価に関する検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、2017
- 29 土方他、新潟県中越沖地震における柏崎刈羽原子力発電所 5 号機原子炉建屋の 3 次元挙動の分析、日本建築学会構造系論文集、2010
- 30 Mitsubishi Heavy Industries, Seismic Design Bases of the US-APWR Standard Plant, MUAP-10001 (R3), 2011
- 31 ITOCHU Techno-Solutions Corporation, FINAS/STAR Version2015r170210, User Manual, ITOCHU Techno-Solutions Corporation, Tokyo, Japan, 2017
- 32 Ghiocel Predictive Technologies, Inc., ACS SASSI – An Advanced Computational Software for 3D Dynamic Analysis Including SSI Effects, ACS SASSI Version 3.0 User manuals, 2016
- 33 International Atomic Energy Agency (IAEA), Review of Seismic Evaluation Methodologies for Nuclear Power Plants Based on a Benchmark Exercise, IAEA TECDOC No. 1722, 2013
- 34 Wang F., Contribution to the IAEA soil-structure interaction KARISMA benchmark, SMiRT22, 2013
- 35 栗本他、3次元 FEM を用いた地盤－建屋の基礎浮き上がり評価に関する研究、大林組技術研究所報 No.78、2004
- 36 原子力規制委員会、基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド、原管地発第 1306192 号、平成 25 年 6 月 19 日
- 37 日本地震工学会、東京電力(株)柏崎刈羽原子力発電所における強震データ全記録 (DVD) <改訂版>

- 38 日本電気協会、原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG 4601-1991 追補版、平成 3 年 12 月 20 日
- 39 日本建築学会、原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、2005
- 40 日本建築学会構造委員会、「原子炉施設の実機試験・観測と評価」に関する調査報告書、2001
- 41 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
- 42 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
- 43 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）
- 44 中村他、基礎浮上りを考慮した 3 次元 FEM モデルによる原子力施設建屋の水平・鉛直同時入力時の応答性状に関する検討、構造工学論文集、Vol.54B、pp.581-589、2008
- 45 田治見他、地震工学 建築構造学大系 1、1977、彰国社

付録1 三次元FEMモデルによる地震応答解析結果

本付録では、本文 2.4 に基づき、以下に示す原子炉施設の地震時挙動の精緻な推定に資する影響因子のうち、本文で対象とした①と⑥を除く因子について、本文 5.1.1 の地盤 FEM による感度解析（時間領域）の結果からその影響を考察した。このとき、地盤 FEM による感度解析については、委託事業より得られた三次元 FEM モデルの入力データ及びその解析結果^{付 1-1}を基にその結果を整理した。

（原子炉施設の地震時挙動の精緻な推定に資する影響因子）

①水平 2 方向及び鉛直方向の地震動入力	【本文】
②有限要素タイプ	【付録 1.1】
③メッシュサイズ	【付録 1.2】
④格納容器内部の大型機器のモデル化	【付録 1.3】
⑤RC 材料の非線形挙動のモデル化	【付録 1.4】
⑥建屋－地盤間の接触・剥離現象のモデル化	【本文】
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	【付録 1.5】
⑧減衰のモデル化	【付録 1.6】

注) 本付録では、本文で対象とした①と⑥を除く因子から得られた成果をまとめるものとした。

付録1.1. 有限要素タイプを影響因子とした部分解析モデル

1. 考察の方針

有限要素タイプについては、本文 1.1.3 で述べたとおり、使用する有限要素タイプによって解析精度が異なることが指摘されており、また、解析プログラムが提供する要素の定式化によって同じ要素間でも解析精度が異なることから、解析の目的や解析すべき現象に応じた要素が適切に選択されているか感度解析等で確認を行うことが望ましい。よって、本付録では、有限要素タイプの違いが BWR の原子炉建屋の応答特性に与える影響を評価するため、使用する有限要素タイプをシェル要素及びソリッド要素とした場合の固有値解析及び静的解析から、その影響を考察した。

2. 部分解析モデルの作成

有限要素タイプを影響因子とした部分解析モデルのモデル図を付録図 1.1 及び付録図 1.2 に示す。使用する解析プログラムは、FINAS/STAR とした。部分解析モデルと解析条件の関係については、本文表 2.1 を参照されたい。

本付録で対象とする解析モデルは、本文 4.1.1 の時間領域における基準モデルに対し、三次元 FEM モデルの基礎下端から地下 2 階床スラブまでの有限要素を取り出し、壁（耐震壁及び補助壁）に使用する有限要素タイプをシェル要素からソリッド要素に変更した部分解析モデル（以下「ソリッドモデル」という。）とした。また、ソリッドモデルの比較用として、本文 4.1.1 の時間領域における基準モデルと同じ、壁に使用する有限要素タイプをシェル要素とした部分解析モデル（以下「シェルモデル」という。）を新たに作成した。

ソリッドモデルのメッシュサイズは、耐震壁について、その厚さの 4 分割以上、補助壁について、その厚さの 2 分割以上の分割を行うものとし、立面のフロア間がおよそ 12～16 分割程度、アスペクト比で 1：4 以内に収まるように設定した。

地盤の境界条件は、シェルモデル、ソリッドモデルともに基礎固定とした。

3. 荷重の入力方法

静的解析に用いる荷重は、(a) 水平震度 1.0 の静的な慣性力、(b) (a)と等価な地下 2 階床スラブに作用する節点力、の 2 種類とした。荷重の入力方向は、NS 方向（南→北方向に載荷）のみである。このとき、シェル要素及びソリッド要素でモデル化した部分解析モデルに作用する荷重が両者で一致するよう、(a)に対しては質量密度を、(b)に対しては節点力を調整した。

4. 固有値解析結果の比較

4.1 固有振動数

付録表 1.1 及び付録表 1.2 に固有値解析結果を示す。NS 方向の 1 次の固有振動数は、シェルモデルで 27.8Hz、ソリッドモデルで 33.8Hz でありソリッドモデルの方が高い。同

様に、2次及び3次の固有振動数についても、ソリッドモデルの方がシェルモデルより高い傾向が見られる。

4.2 固有モード

付録図 1.3 に固有モード図の比較を示す。主要な固有モードである NS 方向の 1 次、2 次及び 3 次のモード図は、シェルモデルとソリッドモデルでおおむね一致しており、その応答特性に違いは見られない。

5. 静的解析結果の比較

付録図 1.4 に最大応答変位分布の比較を示す。

(a) 水平震度 1.0 による静的な慣性力による最大応答変位は、シェルモデルにおいて、最下層である基礎下の 0.00mm を基準に、相対的に剛性の高い基礎スラブで緩やかな増幅を示した後（地下 3 階で 0.08mm 程度）、地下 2 階の床スラブ位置で 0.33mm 程度まで増加する。ソリッドモデルにおいて、NS 方向の最大応答変位は、最下層である基礎下の 0.00mm を基準に、シェルモデルと同様、相対的に剛性の高い基礎スラブで緩やかな増幅を示した後（地下 3 階で 0.08mm 程度）、地下 2 階の床スラブ位置で 0.25mm 程度まで増加する。

(b) (a) と等価な地下 2 階床スラブに作用する節点力による最大応答変位は、シェルモデルにおいて、最下層である基礎下の 0.00mm を基準に、相対的に剛性の高い基礎スラブで緩やかな増幅を示した後（地下 3 階で 0.04mm 程度）、地下 2 階の床スラブ位置で 0.28mm 程度まで増加する。ソリッドモデルにおいて、NS 方向の最大応答変位は、最下層である基礎下の 0.00mm を基準に、シェルモデルと同様、相対的に剛性の高い基礎スラブで緩やかな増幅を示した後（地下 3 階で 0.04mm 程度）、地下 2 階の床スラブ位置で 0.24mm 程度まで増加する。

6. まとめ

本付録では、有限要素タイプの違いが BWR の原子炉建屋の応答特性に与える影響を評価するため、使用する有限要素タイプをシェル要素及びソリッド要素とした場合の固有値解析及び静的解析から、その影響を考察した。その結果、以下に示す成果が得られた。

シェルモデル及びソリッドモデルの NS 方向の固有振動数は、使用する有限要素タイプの違いにより、ソリッドモデルの方がシェルモデルより高い傾向にあることを確認した。これについて、筆者らは、ソリッドモデルを構成する節点の自由度が関係しているものと考え、並進 3 方向の自由度のみを考慮したソリッドモデルより、部分的に並進 3 方向及び回転 3 方向の自由度を考慮したシェルモデルの方が、曲げ変形を板理論により定式化して求めることができるため、全体的に柔らかく評価されたことが影響しているものと推定した。

シェルモデル及びソリッドモデルの NS 方向の固有モード図は、使用する有限要素タイ

プの違いによらず、主要な固有モードにおいておおむね一致する傾向にあることを確認した。これについて、筆者らは、ソリッドモデルにおいて、シェルモデルと同程度の曲げ変形を解析的に再現することを念頭に、メッシュサイズをシェルモデルに比べより細かく設定したことが影響しているものと推定した。

シェルモデル及びソリッドモデルの NS 方向の最大応答変位は、荷重の載荷方法によらず、使用する有限要素タイプの違いにより、ソリッドモデルがシェルモデルを下回る傾向にあることを確認した。これについて、筆者らは、固有振動数で述べたとおり、ソリッドモデルで使用するソリッド要素の節点の自由度が関係しているものと考え、部分的に並進 3 方向及び回転 3 方向の自由度を考慮したシェルモデルの方が全体的に柔らかく評価されていることが影響しているものと推定した。

付録表 1.1 シェルモデルの固有値解析結果

Appendix Table 1.1 Results of eigenvalue analysis for the shell model

モード	振動数 (Hz)	周期 (s)	刺激係数			有効質量比			備考
			X	Y	Z	X	Y	Z	
1	26.750	0.037	-0.070	0.489	-0.032	0.000	0.014	0.000	
2	27.797	0.036	2.381	-0.048	-0.008	0.267	0.000	0.000	NS方向1次
3	27.929	0.036	0.067	2.448	0.011	0.000	0.267	0.000	
4	29.372	0.034	-0.105	0.048	1.713	0.000	0.000	0.002	
5	30.872	0.032	0.038	0.245	-0.098	0.000	0.004	0.001	
6	31.140	0.032	0.021	0.117	-0.040	0.000	0.001	0.000	
7	34.156	0.029	0.054	0.322	0.013	0.000	0.007	0.000	
8	34.662	0.029	0.795	-0.027	0.002	0.040	0.000	0.000	NS方向2次
9	35.483	0.028	0.456	-0.286	0.049	0.004	0.002	0.000	
10	36.663	0.027	-0.630	0.791	2.134	0.000	0.000	0.002	
11	38.470	0.026	0.230	2.542	1.760	0.000	0.012	0.006	
12	38.943	0.026	1.170	0.018	0.045	0.022	0.000	0.000	NS方向3次
13	39.495	0.025	-2.491	0.880	0.868	0.021	0.003	0.003	

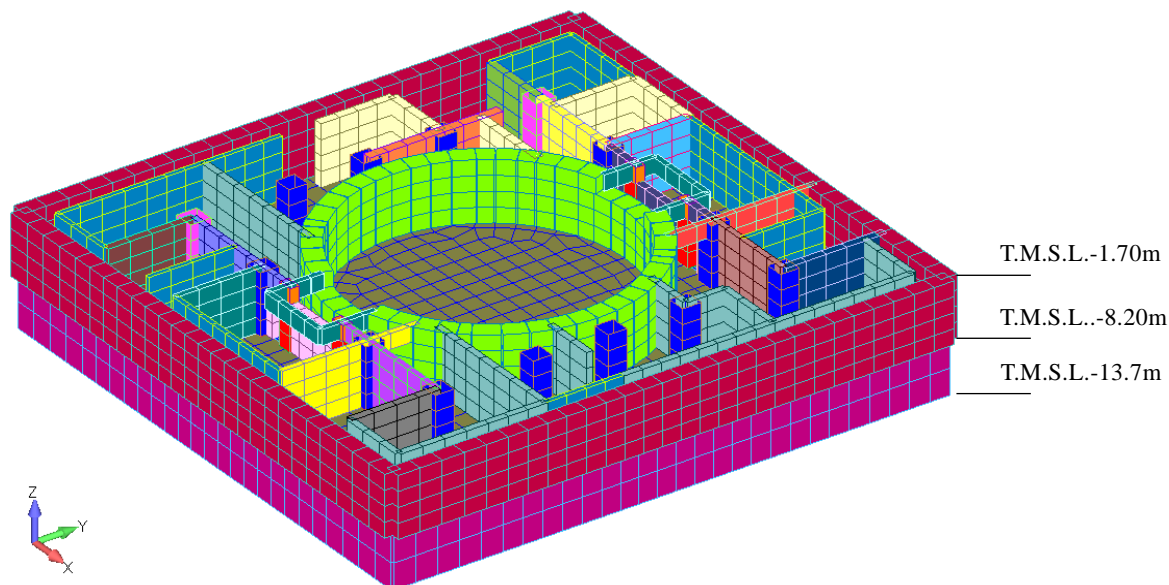
出典) 日本原子力研究開発機構、平成 31 年度原子力施設等防災対策委託費（高経年化を考慮した建屋・機器・構造物の耐震安全性評価手法の高度化）事業報告書、2020

付録表 1.2 ソリッドモデルの固有値解析結果

Appendix Table 1.2 Results of eigenvalue analysis for the solid model

モード	振動数 (Hz)	周期 (s)	刺激係数			有効質量比			備考
			X	Y	Z	X	Y	Z	
1	33.164	0.030	0.412	0.513	-0.029	0.007	0.010	0.000	
2	33.803	0.030	3.073	-0.284	-0.010	0.229	0.002	0.000	NS方向1次
3	34.461	0.029	0.147	2.619	0.046	0.001	0.234	0.000	
4	36.898	0.027	0.033	0.486	-0.254	0.000	0.007	0.002	
5	37.256	0.027	-0.231	0.462	-0.079	0.000	0.001	0.000	
6	37.480	0.027	0.347	-0.177	1.958	0.000	0.000	0.002	
7	39.850	0.025	-0.012	0.218	-0.005	0.000	0.003	0.000	
8	40.681	0.025	-0.695	-0.034	0.006	0.023	0.000	0.000	NS方向2次
9	41.209	0.024	-0.412	0.166	-0.068	0.005	0.001	0.000	
10	44.517	0.022	1.081	-0.029	0.092	0.030	0.000	0.000	NS方向3次
11	45.229	0.022	1.485	-1.267	-0.173	0.018	0.013	0.000	
12	45.389	0.022	-0.789	-3.902	1.359	0.001	0.028	0.003	
13	46.674	0.021	0.728	1.992	0.532	0.004	0.031	0.002	

出典) 日本原子力研究開発機構、平成 31 年度原子力施設等防災対策委託費（高経年化を考慮した建屋・機器・構造物の耐震安全性評価手法の高度化）事業報告書、2020

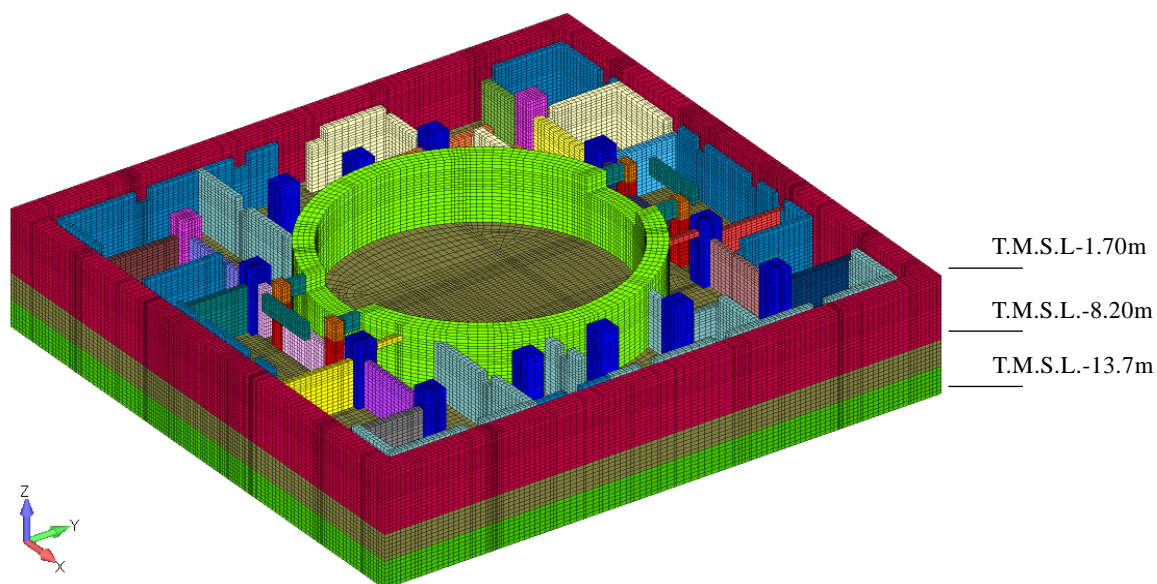


注) 本図は、シェル要素の壁厚を表示した状態で作成した。

出典) 日本原子力研究開発機構、平成 31 年度原子力施設等防災対策委託費（高経年化を考慮した建屋・機器・構造物の耐震安全性評価手法の高度化）事業報告書、2020

付録図 1.1 シェルモデル（壁をシェル要素でモデル化）

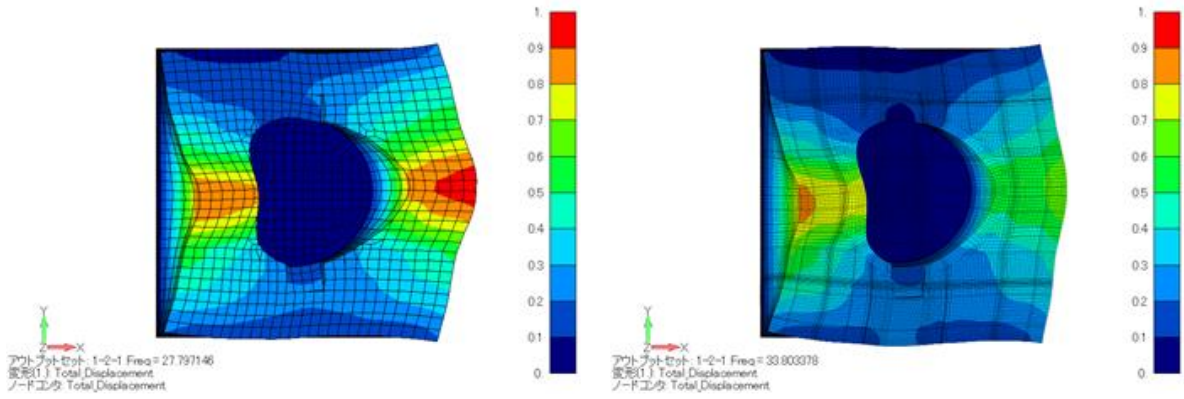
Appendix Fig. 1.1 Shell model: modeling walls as shell element with a view of wall thickness



出典) 日本原子力研究開発機構、平成 31 年度原子力施設等防災対策委託費（高経年化を考慮した建屋・機器・構造物の耐震安全性評価手法の高度化）事業報告書、2020

付録図 1.2 ソリッドモデル（壁をソリッド要素でモデル化）

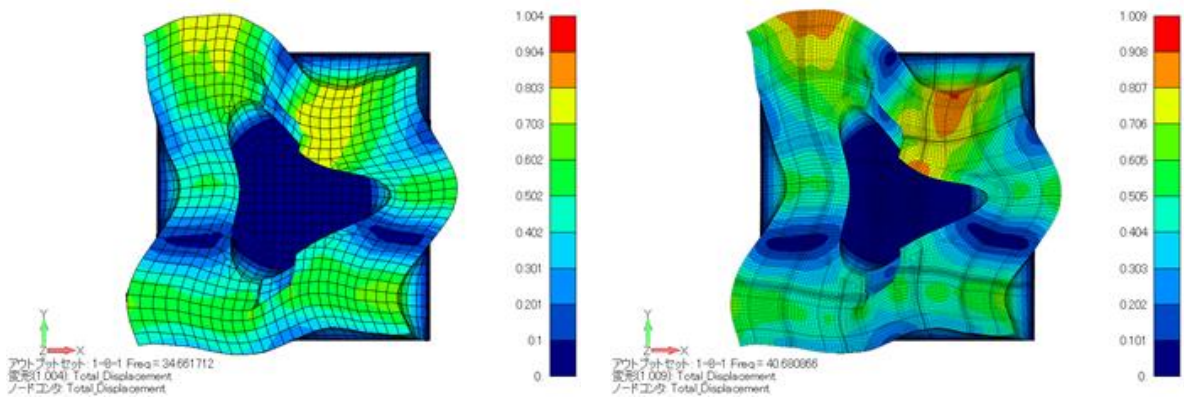
Appendix Fig. 1.2 Solid model: modeling walls as solid elements



① シェルモデル

② ソリッドモデル

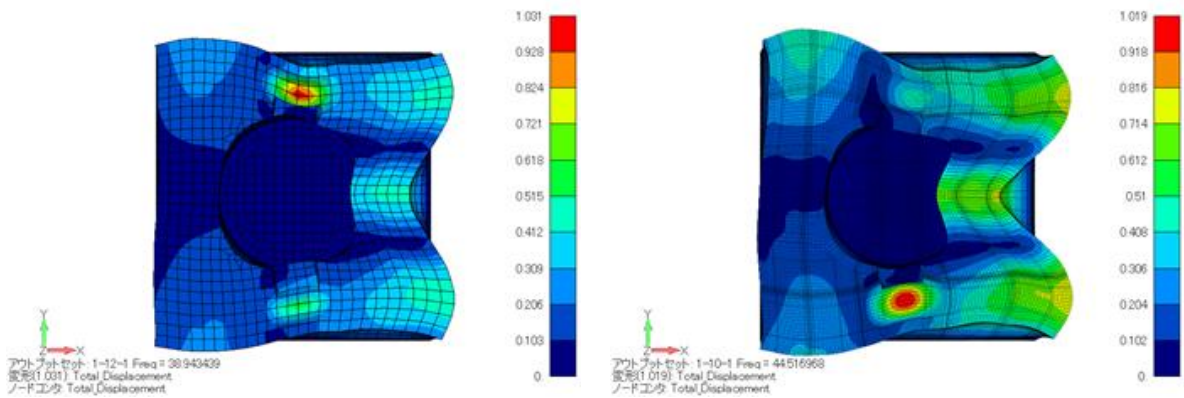
(1) NS 方向 1 次モード



① シェルモデル

② ソリッドモデル

(2) NS 方向 2 次モード



① シェルモデル

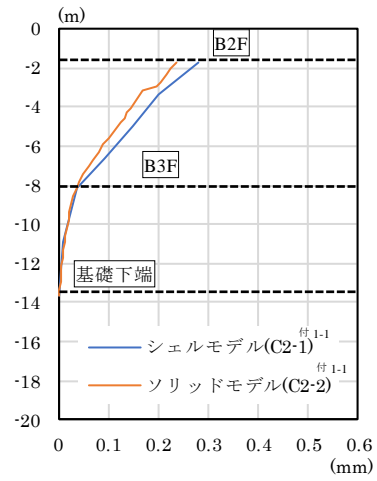
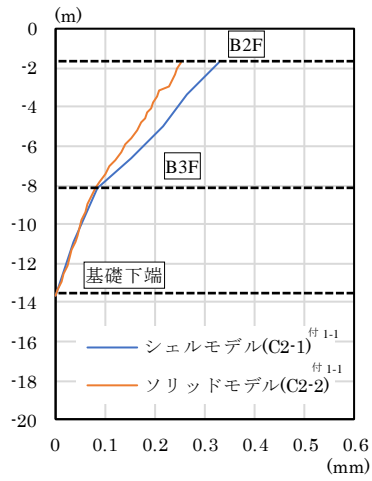
② ソリッドモデル

(3) NS 方向 3 次モード

出典) 日本原子力研究開発機構、平成 31 年度原子力施設等防災対策委託費 (高経年化を考慮した建屋・機器・構造物の耐震安全性評価手法の高度化) 事業報告書、2020

付録図 1.3 固有モード図の比較

Appendix Fig. 1.3 Comparison of natural mode shape in the NS direction



(1) 水平震度 1.0 による静的な慣性力

(2) (1) と等価な節点力

付録図 1.4 最大応答変位分布図

Appendix Fig. 1.4 Maximum accelerations

付録1.2. メッシュサイズを影響因子とした三次元 FEM モデル

1. 考察の方針

メッシュサイズについては、本文 1.1.3 で述べたとおり、使用するメッシュサイズによって解析精度が異なることが指摘されており、解析の目的や解析すべき現象に応じたメッシュサイズが適切に選択されているか感度解析等で確認を行うことが望ましい。よって、本付録では、メッシュサイズの違いが BWR の原子炉建屋の応答特性に与える影響を評価するため、使用するメッシュサイズをパラメーターとした時間領域における地震応答解析から、その影響を考察した。

2. 三次元FEMモデルの作成

メッシュサイズを影響因子とした三次元 FEM モデルのモデル図を付録図 1.5 に示す。使用する解析プログラムは、FINAS/STAR とした。三次元 FEM モデルと解析条件の関係については、本文表 2.1 を参照されたい。

本付録で対象とする解析モデルは、本文 4.1.1 の地盤 FEM による時間領域における基準モデルに対し、三次元 FEM モデルの建屋を構成する要素 1 辺のメッシュサイズを基準モデルのメッシュサイズからさらに 4 分割（縦横で 4×4）した地震応答解析モデル（以下「細メッシュモデル」という。）である。このとき、分割対象とする有限要素はシェル要素のみとし、ソリッド要素で作成した基礎及び地盤は時間領域の基準モデルと同一の設定を行った。

3. 地震応答解析結果の比較

3.1 伝達関数

付録図 1.6 にクレーン階の伝達関数の比較を示す。NS 方向、EW 方向及び UD 方向の伝達関数は、高振動数側の一部領域でその形状に若干の違いが現れているものの、その傾向は時間領域における基準モデルと細メッシュモデルでおおむね一致しており、大きな違いは見られない。

3.2 最大応答加速度

付録図 1.7 に最大応答加速度分布の比較を示す。NS 方向、EW 方向及び UD 方向の最大応答加速度分布は、4 階やクレーン階といった上部構造の一部領域でその形状に若干の違いが現れているものの、その傾向は時間領域における基準モデルと細メッシュモデルでおおむね一致しており、大きな違いは見られない。

3.3 床応答加速度スペクトル

付録図 1.8 に床応答加速度スペクトルの比較を示す。NS 方向、EW 方向及び UD 方向の床応答加速度スペクトルは、時間領域における基準モデルと細メッシュモデルでおおむね

一致しており、その傾向に大きな違いは見られない。

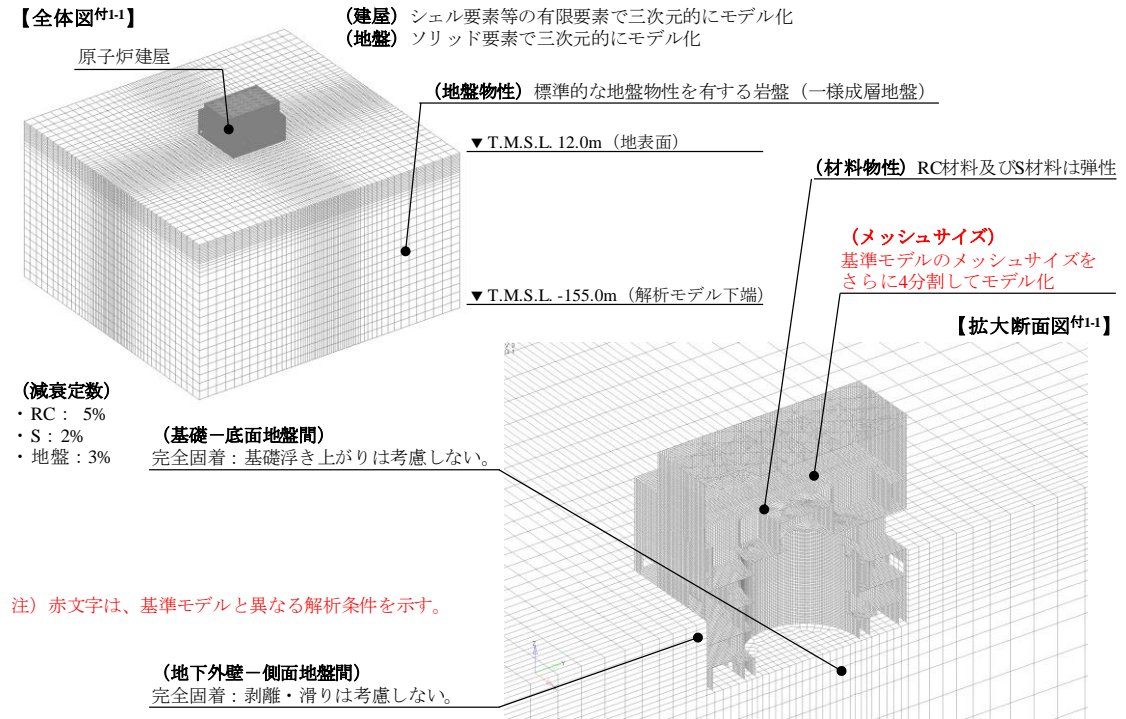
4. まとめ

本付録では、メッシュサイズの違いが BWR の原子炉建屋の応答特性に与える影響を評価するため、使用するメッシュサイズを細分化した解析モデル（細メッシュモデル：時間領域）による地震応答解析から、その影響を考察した。その結果、本文 5.1.1 の標準的な解析条件下における基準モデル（時間領域）との比較から、以下に示す成果が得られた。

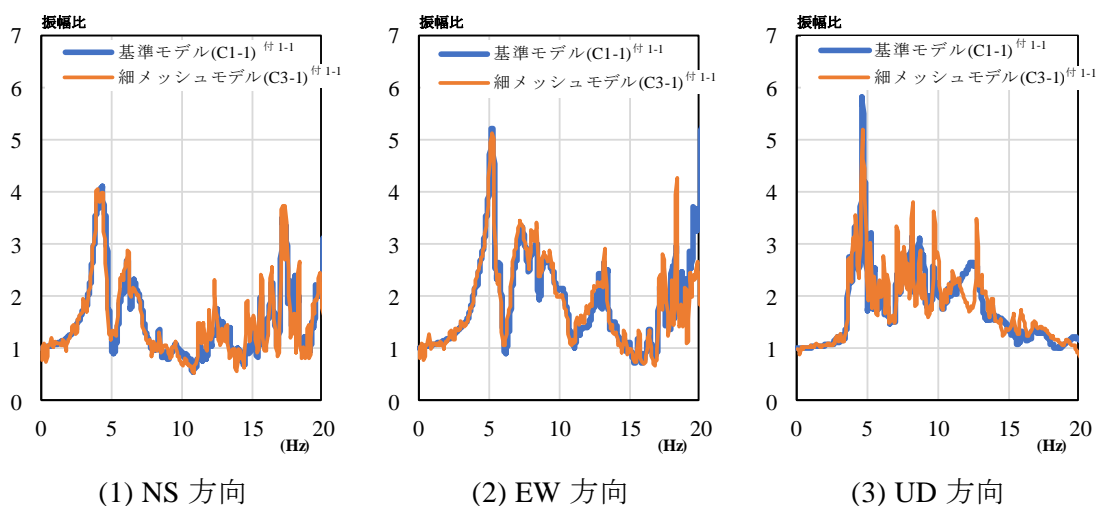
細メッシュモデルの伝達関数は、NS 方向、EW 方向、UD 方向ともに主要な振動数帯においてメッシュサイズの違いによらずおおむね一致した傾向を示しており、その違いは高振動数側の一部領域に限られることを確認した。これについて、筆者らは、メッシュサイズを細分化したことにより高振動数側のより細かな挙動を解析的に再現できるようになった影響と考え、これら局所的な応答が細メッシュモデルの高振動数側の一部領域の振動を励起しているものと推定した。

細メッシュモデルの最大応答加速度は、NS 方向、EW 方向、UD 方向ともにメッシュサイズの違いによらずおおむね一致した傾向を示しており、その違いは 4 階やクレーン階といった一部上部構造に限られることを確認した。これについて、筆者らは、伝達関数で述べたとおり、高振動数側のより細かな挙動を解析的に再現できるようになった影響と考え、これら局所的な応答が細メッシュモデルの上部構造の一部応答を励起しているものと推定した。

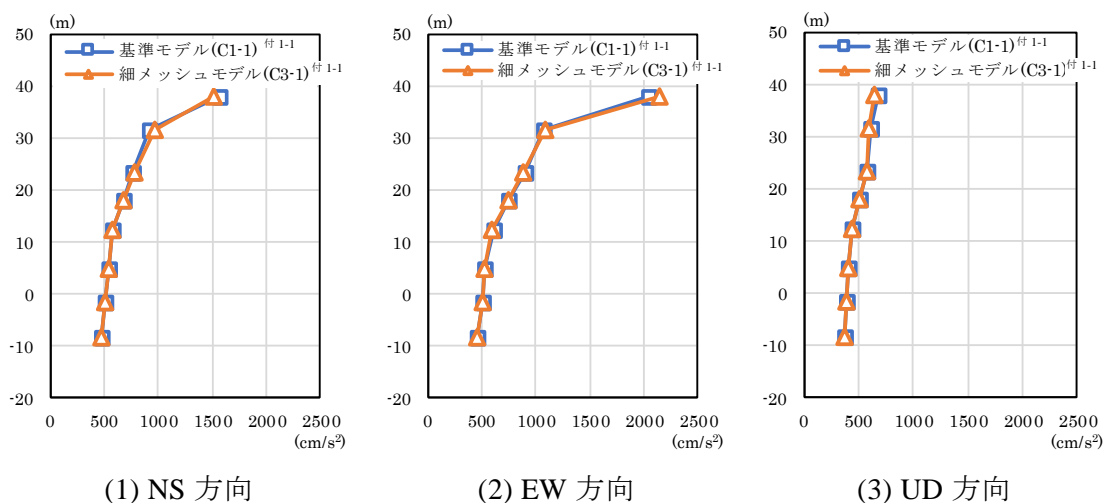
細メッシュモデルの床応答加速度スペクトルは、NS 方向、EW 方向、UD 方向ともにメッシュサイズの違いによらずおおむね一致した傾向を示しており、その違いはほぼ見られないことを確認した。これについて、筆者らは、本解析条件下においては、メッシュサイズの違いが建屋全体応答に与える影響は小さく、結果として、床応答加速度スペクトルに与える影響は小さかったものと推定した。



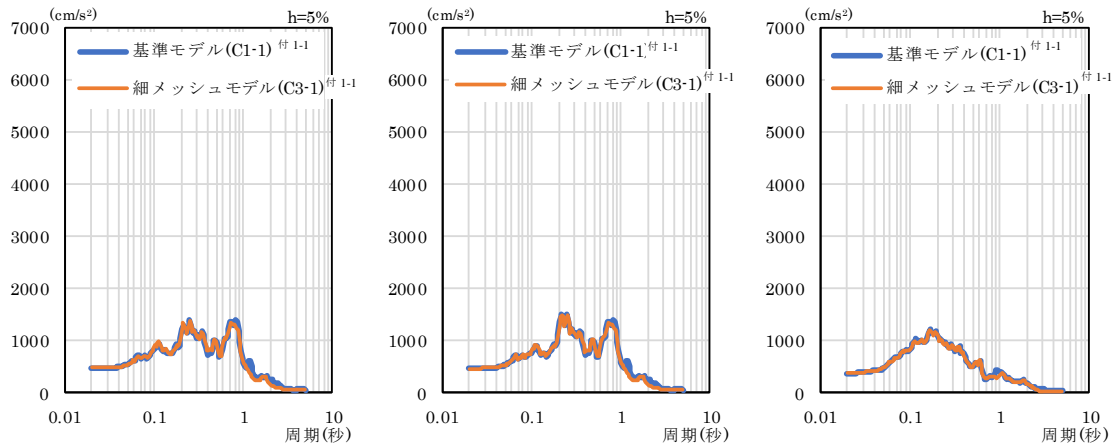
付録図 1.5 時間領域の細メッシュモデル (感度解析 : 地盤 FEM によるモデル化)
 Appendix Fig. 1.5 Fine-mesh model in time domain: FEM modeling soil for sensitivity analyses



付録図 1.6 基準モデルと細メッシュモデルの伝達関数の比較(感度解析：時間領域)
 Appendix Fig. 1. 6 Comparison of transfer functions between the reference model and the fine-mesh model for sensitivity analyses in time domain



付録図 1.7 基準モデルと細メッシュモデルの最大応答加速度分布の比較(感度解析：時間領域)
 Appendix Fig. 1. 7 Comparison of maximum accelerations between the reference model and the fine-mesh model for sensitivity analyses in time domain

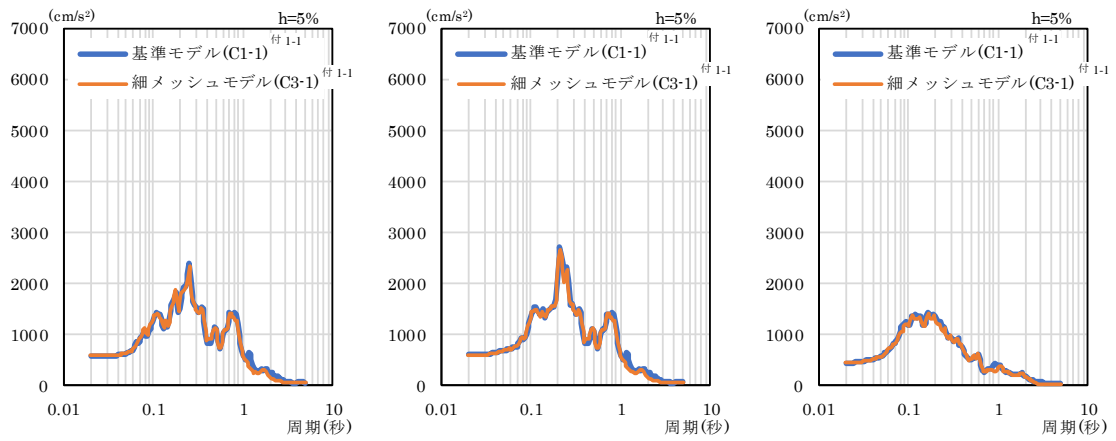


① NS 方向

② EW 方向

③ UD 方向

(1) 地下3階

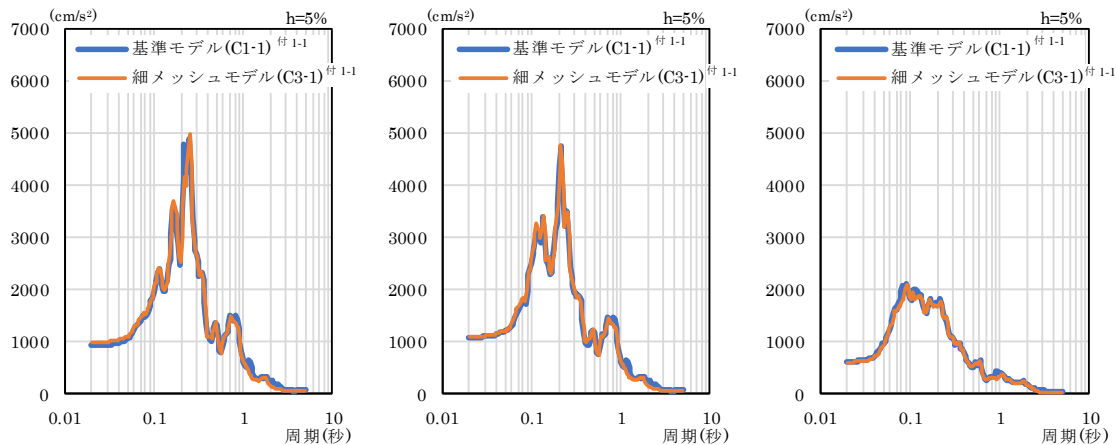


① NS 方向

② EW 方向

③ UD 方向

(2) 1階



① NS 方向

② EW 方向

③ UD 方向

(3) 4階

付録図 1.8 基準モデルと細メッシュモデルの床応答スペクトルの比較(感度解析：時間領域)

Appendix Fig. 1. 8 Comparison of FRS between the reference model and the fine-mesh model for sensitivity analyses in time domain

付録1.3. 格納容器内部の大型機器のモデル化を影響因子とした三次元 FEM モデル

1. 考察の方針

格納容器内部の大型機器のモデル化については、既に述べたように、多軸質点系モデルにおいて、そのモデル化の影響はほとんどないということが示されている。しかし、ペDESTALや原子炉圧力容器等の大型機器については、機器接合部付近で局所的に面外方向の応答が卓越することも考えられることから、これら機器の影響が無視できない場合はその影響を感度解析等で確認することが望ましい。よって、本付録では、これらモデル化の違いが BWR の原子炉建屋の応答特性に与える影響を評価するため、大型機器のモデル化方法をパラメーターとした時間領域における地震応答解析から、その影響を考察した。

2. 三次元FEMモデルの作成

格納容器内部の大型機器のモデル化を影響因子とした三次元 FEM モデルのモデル図を付録図 1.9 に示す。使用する解析プログラムは、FINAS/STAR とした。三次元 FEM モデルと解析条件の関係については、本文表 2.1 を参照されたい。

本付録で対象とする解析モデルは、本文 4.1.1 の地盤 FEM による時間領域の基準モデルに対し、格納容器内部の大型機器（原子炉本体基礎及び原子炉遮へい壁、原子炉圧力容器、ダイヤフラムフロア、原子炉圧力容器スタビライザ、燃料交換ベローズ）を建屋と連成させた三次元 FEM による地震応答解析モデル（以下「大型機器内蔵モデル」という。）である。

大型機器のモデル化に使用する有限要素タイプ及びメッシュサイズを以下に示す。

原子炉本体基礎及び原子炉遮へい壁、原子炉圧力容器、ダイヤフラムフロアは、シェル要素でモデル化を行うものとし、周囲の建屋モデルのメッシュサイズに合わせてメッシュ分割を行った。このとき、原子炉圧力容器については、その部材厚が IAEA の報告書^{付 1-2}から読み取れないため、質点系による炉内構造物解析モデルの諸元から軸断面積が等価となるよう数値を設定した。

原子炉圧力容器スタビライザ及び燃料交換ベローズは、ばね要素でモデル化を行った。このとき、原子炉圧力容器スタビライザについては、原子炉遮へい壁と原子炉圧力容器間を 45°ピッチに周方向にばね要素の取り付けを行うものとし、また、燃料交換ベローズについては、原子炉圧力容器と 3 階床スラブ間を 90°ピッチで半径方向にばね要素を取り付けた。

格納容器内部の大型機器の重量は、炉内構造物を対象とした質点系モデルの重量と等しいものと仮定し、その重量分を大型機器の接合部と節点を共有する三次元 FEM モデルの基礎及び 1 階床スラブから差し引いた。その後、上述の大型機器のモデル化を行い、本文 4.1.1 の地盤 FEM による時間領域の基準モデルと重量が一致するよう大型機器内蔵モデルの基礎及び 1 階床スラブの重量を再調整した。

3. 地震応答解析結果の比較

3.1 伝達関数

付録図 1. 10 にクレーン階の伝達関数の比較を示す。NS 方向、EW 方向及び UD 方向の伝達関数は、高振動数側の一部領域でその形状に違いが現れているものの、その傾向は時間領域の基準モデルと大型機器内蔵モデルでおおむね一致しており、大きな違いは見られない。

3.2 最大応答加速度

付録図 1. 11 に最大応答加速度分布の比較を示す。NS 方向、EW 方向及び UD 方向の最大応答加速度分布は、時間領域の基準モデルと大型機器内蔵モデルでおおむね一致しており、その傾向に大きな違いは見られない。

3.3 床応答加速度スペクトル

付録図 1. 12 に床応答加速度スペクトルの比較を示す。NS 方向、EW 方向及び UD 方向の床応答加速度スペクトルは、時間領域の基準モデルと大型機器内蔵モデルでおおむね一致しており、その傾向に大きな違いは見られない。

4. まとめ

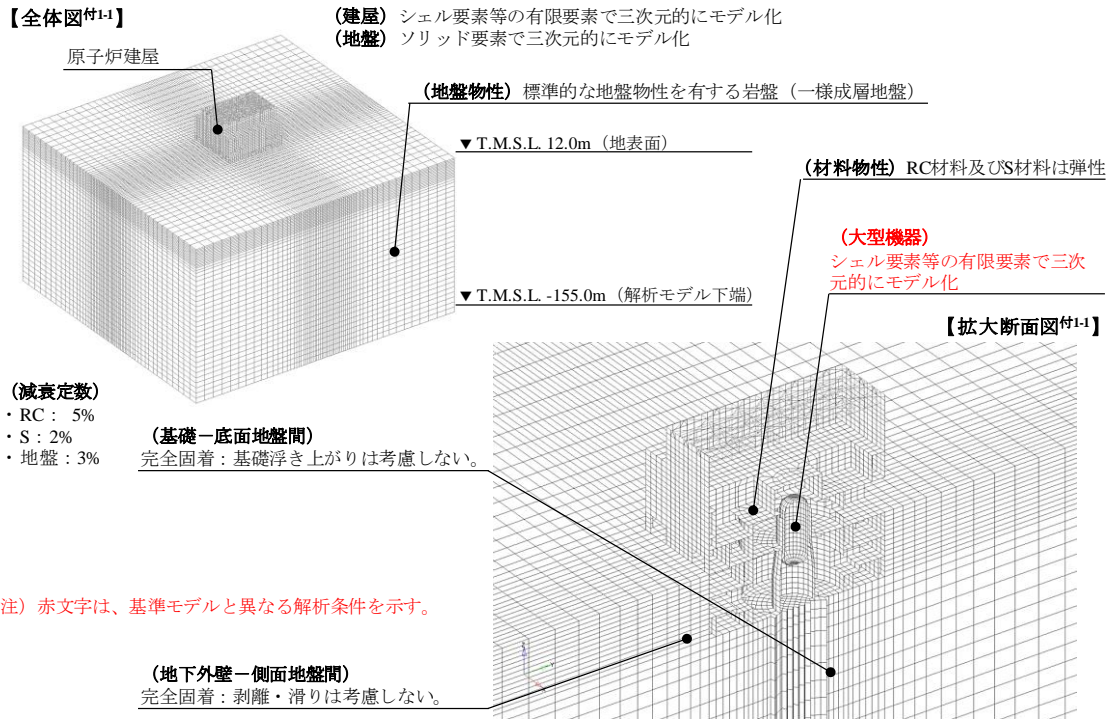
本付録では、格納容器内部の大型機器のモデル化の違いが BWR の原子炉建屋の応答特性に与える影響を評価するため、内包する原子炉圧力容器等の大型機器をシェル要素等の有限要素でモデル化した解析モデル（大型機器内蔵モデル）による時間領域の地震応答解析から、その影響を考察した。その結果、本文 5.1.1 の標準的な解析条件下における基準モデル（時間領域）との比較から、以下に示す成果が得られた。

大型機器内蔵モデルの伝達関数は、NS 方向、EW 方向、UD 方向ともに主要な振動数帯において大型機器のモデル化の違いによらずおおむね一致した傾向を示しており、その違いは UD 方向の高振動数側の一部領域に限られることを確認した。これについて、筆者らは、大型機器をシェル要素等の有限要素でモデル化したことにより高振動数側のより複雑な挙動を解析的に再現できるようになった影響と考え、これら局所的な応答が大型機器内蔵モデルの高振動数側の一部領域の振動を励起しているものと推定した。

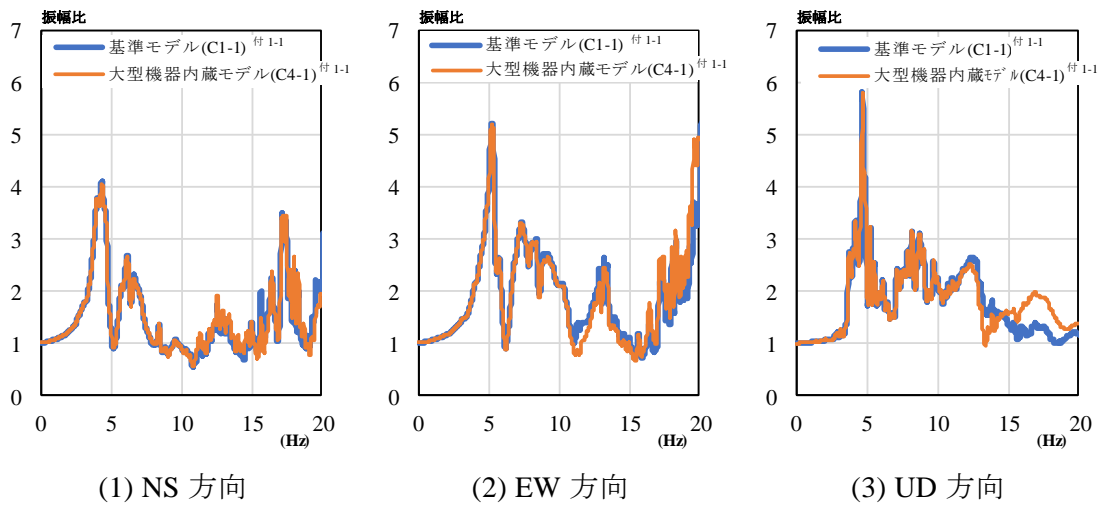
大型機器内蔵モデルの最大応答加速度は、NS 方向、EW 方向、UD 方向ともに大型機器のモデル化の違いによらずおおむね一致した傾向を示しており、その違いはほぼ見られないことを確認した。これについて、筆者らは、本解析条件下においては、大型機器のモデル化の違いが建屋全体応答に与える影響は小さく、結果として、最大応答加速度に与える影響は小さかったものと推定した。

大型機器内蔵モデルの床応答加速度スペクトルは、NS 方向、EW 方向、UD 方向ともに

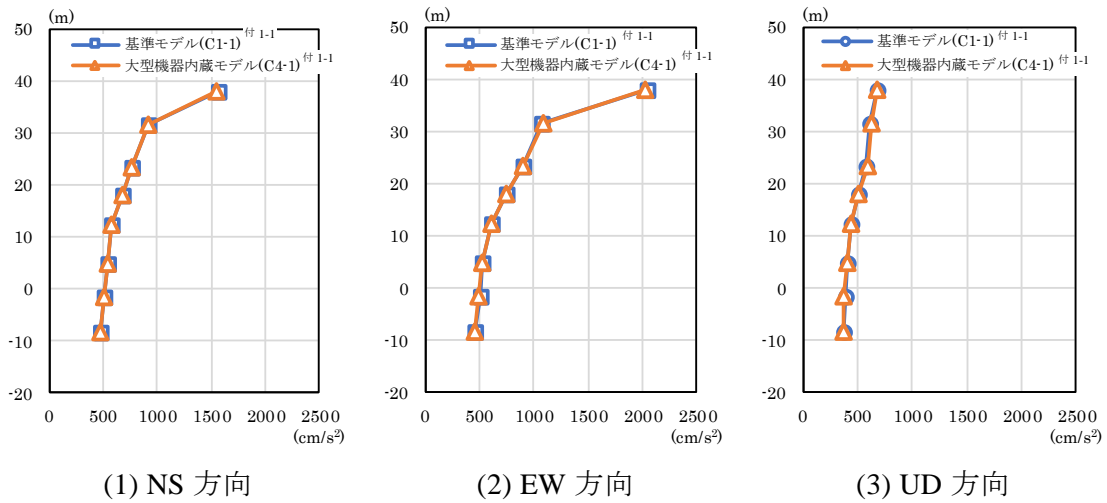
大型機器のモデル化の違いによらずおおむね一致した傾向を示しており、その違いはほぼ見られないことを確認した。これについて、筆者らは、本解析条件下においては、大型機器のモデル化の違いが建屋全体応答に与える影響は小さく、結果として、床応答加速度スペクトルに与える影響は小さかったものと推定した。



付録図 1.9 時間領域の大型機器内蔵モデル (感度解析 : 地盤 FEM によるモデル化)
 Appendix Fig. 1.9 RPV-installed model in time domain: FEM modeling of soil for sensitivity analyses

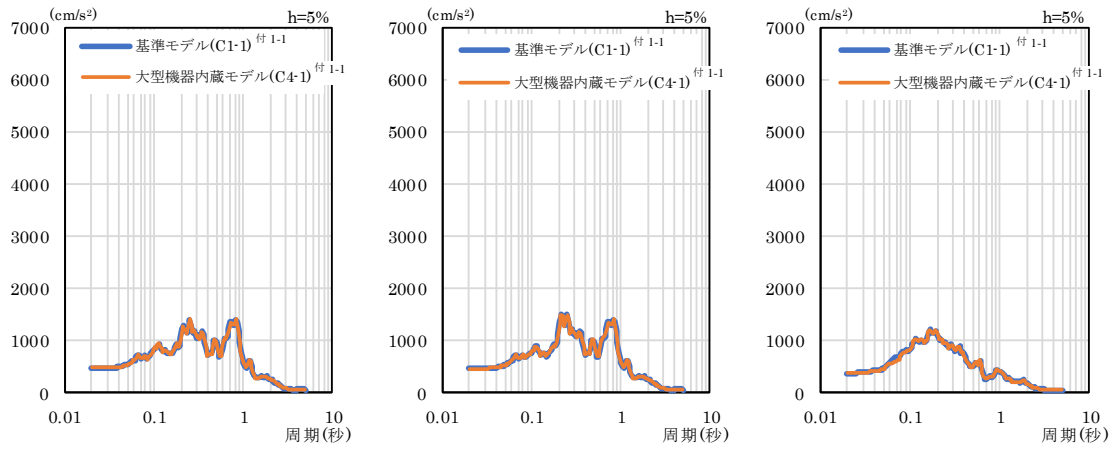


付録図 1.10 基準モデルと大型機器内蔵モデルの伝達関数の比較(感度解析：時間領域)
 Appendix Fig. 1.10 Comparison of transfer functions between the reference model and the RPV-
 installed model for sensitivity analyses in time domain



付録図 1.11 基準モデルと大型機器内蔵モデルの最大応答加速度分布の比較(感度解析：
 時間領域)

Appendix Fig. 1.11 Comparison of maximum accelerations between the reference model and the
 RPV-installed model for sensitivity analyses in time domain

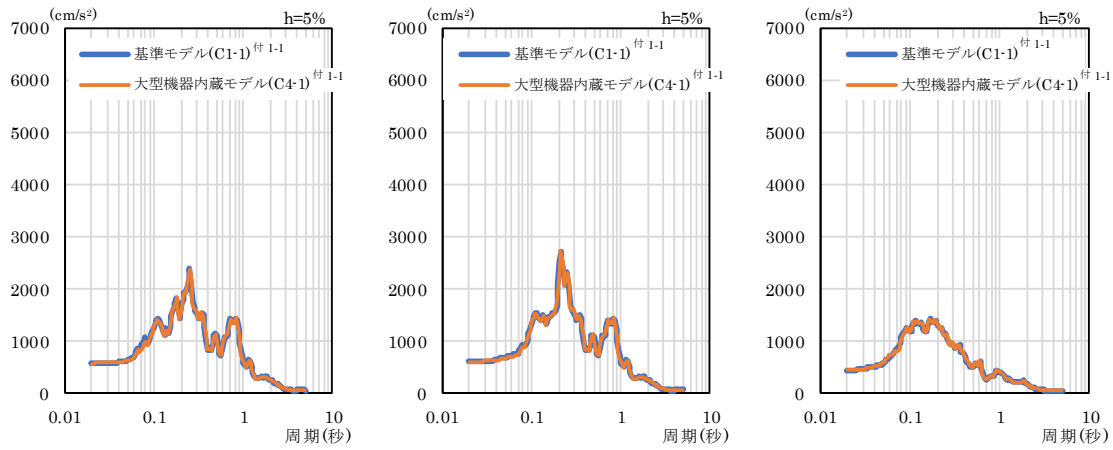


① NS 方向

② EW 方向

③ UD 方向

(1) 地下 3 階

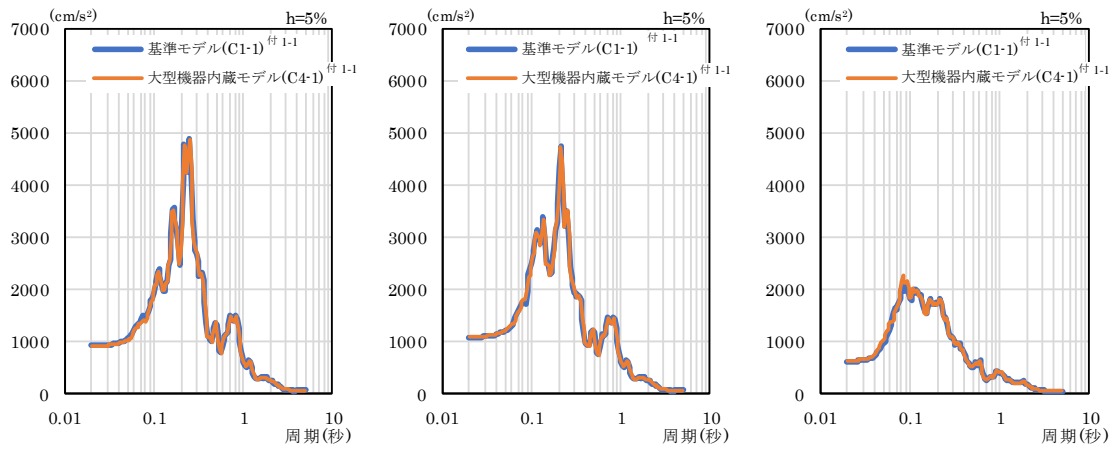


① NS 方向

② EW 方向

③ UD 方向

(2) 1 階



① NS 方向

② EW 方向

③ UD 方向

(3) 4 階

付録図 1.12 基準モデルと大型機器内蔵モデルの床応答スペクトルの比較(感度解析：時間領域)

Appendix Fig. 1.12 Comparison of FRS between the reference model and the RPV-installed Model for sensitivity analyses in time domain

付録1.4. RC材料の非線形挙動のモデル化を影響因子とした三次元FEMモデル

1. 考察の方針

RC材料の非線形挙動のモデル化については、既に述べたように、RC造耐震壁を対象とした種々の構成則が提案されている。これら非線形性を考慮した解析においては、RC材料や部材の構成則及び剛性の設定方法が解析精度を左右することになるため、適切な構成則やスケルトンカーブが選択されているか感度解析等で確認を行うことが望ましい。よって、本付録では、RC材料の非線形挙動のモデル化の違いがBWRの原子炉建屋の応答特性に与える影響を評価するため、構成則をパラメーターとした時間領域における地震応答解析から、その影響を考察した。

2. 三次元FEMモデルの作成

RC材料の非線形挙動のモデル化を影響因子とした三次元FEMモデルのモデル図を付録図1.13に示す。使用する解析プログラムは、FINAS/STARとした。三次元FEMモデルと解析条件の関係については、本文表2.1を参照されたい。

本付録で対象とする解析モデルは、本文4.1.1の地盤FEMによる時間領域の基準モデルに対し、RC材料の非線形挙動を以下に示す構成則で考慮した三次元FEMによる地震応答解析モデル（以下「建屋非線形モデル」という。）である。

RC材料の非線形挙動のモデル化に使用する有限要素タイプは積層シェル要素とし、4.1.1の基準モデルの壁及び床で使用するシェル要素を当該要素に置き換えることでモデル化を行った。付録図1.14に積層シェル要素の概念図を示す。積層シェル要素は、付録図1.14に示すようにシェルの板曲げによる厚さ方向の材料非線形性に対応できるよう、RC部材をコンクリートと鉄筋の層に置換したものである。

積層シェル要素で設定する板厚方向の分割数は10層程度とし、シェルの外側及び内側の第1層目にかぶり厚を、第2層目に鉄筋比を入力した。このとき、多段配筋されている壁及び床に入力する鉄筋比についても、第2層目にまとめて（1段配筋として）モデル化を行った。第1層目のかぶり厚は、IAEA（2013）^{付1-2}で公開されている情報を基にその数値を設定したものの、D51の太径鉄筋で配筋された部材に対しては、同情報に従った場合、鉄筋径とかぶり厚の比が極端に小さくなるため、社団法人日本建設業連合会設計委員会を参考に鉄筋径×1.5のかぶり厚を設定した。

コンクリート及び鉄筋の応力-ひずみ関係を付録図1.15に示す。コンクリート及び鉄筋の応力-ひずみ関係は、IAEA（2013）^{付1-2}で公開されている情報を参考に、解析プログラムFINAS/STARに実装されている4方向のひび割れ軸を有する多方向固定分散ひび割れモデルである前川モデルを引張側、圧縮側及びせん断ひび割れ後のせん断伝達特性に適用した。このとき、引張側のコンクリートの応力-ひずみ関係については、使用する解析プログラムにIAEA（2013）^{付1-2}と同様の構成則が実装されていないことから、付着係数 $C=0.4$ の前川モデルで代用した。

建屋の応答は、Newmark- β 法 ($\beta=1/4$) による時刻歴非線形解析により得られる加速度応答を数値積分することにより求めた。このとき、収束計算時の反復方法は接線剛性法とし、収束回数は1回とした。1回の計算により収束が得られない場合は、残差力を次の解析ステップに持ち越した。また、解析の時間刻みは0.001秒とし、解析の継続時間は、本文3.2.1に示す地震動のうち、主要動である最大加速度前後の9秒から29秒の20秒間を対象とした。

3. 地震応答解析結果の比較

3.1 伝達関数

付録図1.16にクレーン階の伝達関数の比較を示す。NS方向、EW方向及びUD方向の伝達関数は、主要な振動数帯である卓越振動数付近でおおむね一致した傾向を示すものの、それ以外の振動数帯で建屋非線形モデルの振幅が時間領域における基準モデルの振幅を大きく上回っている。これについて、委託研究事業成果報告書^{付1-1}によると、RCの非線形材料物性を壁及び床で考慮したことにより、当該部でコンクリートのひび割れが発生し、スパイク上の加速度を引き起こした可能性を指摘している。これに対し、筆者らは、委託研究事業成果報告書^{付1-1}の検討成果等も踏まえ、非線形解析時の収束回数の設定方法等、不釣り合い力の処理方法に技術的な課題が残されていることから、本付録で設定した構成則で定める履歴ループと応答加速度の間に力の不釣り合いに起因した数値計算上のノイズが発生し、結果として、出力される最大応答加速度に一定程度のノイズが含まれた可能性を推定した。

3.2 最大応答加速度

付録図1.17に最大応答加速度分布の比較を示す。NS方向、EW方向及びUD方向の最大応答加速度分布は、埋め込みを有する地下部の水平方向で基準モデル（時間領域）と同程度の最大応答加速度分布を示すものの、それ以外では建屋非線形モデルの最大応答加速度が基準モデルを大きく上回っている。これについて、委託研究事業成果報告書^{付1-1}では、伝達関数と同様にコンクリートのひび割れの影響によりスパイク上の加速度が発生した可能性を指摘している。一方で、筆者らは、伝達関数で述べたとおり、コンクリートのひび割れの影響の他に非線形解析時の収束回数等の設定に起因した数値計算上のノイズが影響を及ぼしており、このために基準モデルと比較して過大な最大応答加速度が出力された可能性を推定した。

3.3 床応答加速度スペクトル

付録図1.18に床応答加速度スペクトルの比較を示す。NS方向、EW方向及びUD方向の床応答加速度スペクトルは、地下3階及び主要な周期帯でおおむね一致しているものの、1階及び4階の短周期側で建屋非線形モデルの最大応答加速度が時間領域における基準モ

デルを大きく上回っている。これについて、委託研究事業成果報告書^{付 1-1}では、伝達関数と同様にコンクリートのひび割れの影響によりスパイク上の加速度が当該周期帯で発生した可能性を指摘している。一方で、筆者らは、伝達関数で述べたとおり、コンクリートのひび割れの影響の他に非線形解析時の収束回数の設定に起因した数値計算上のノイズが影響を及ぼしており、このために基準モデルと比較して過大な最大応答加速度が当該周期帯で出力された可能性を推定した。

4. まとめ

本付録では、RC 材料の非線形挙動のモデル化の違いが BWR の原子炉建屋の応答特性に与える影響を評価するため、当該建屋の壁及び床の非線形材料物性を前川モデルにより考慮した地震応答解析から、その影響を考察した。その結果、本文 5.1.1 の標準的な解析条件下における基準モデル（時間領域）との比較から、以下に示す成果が得られた。

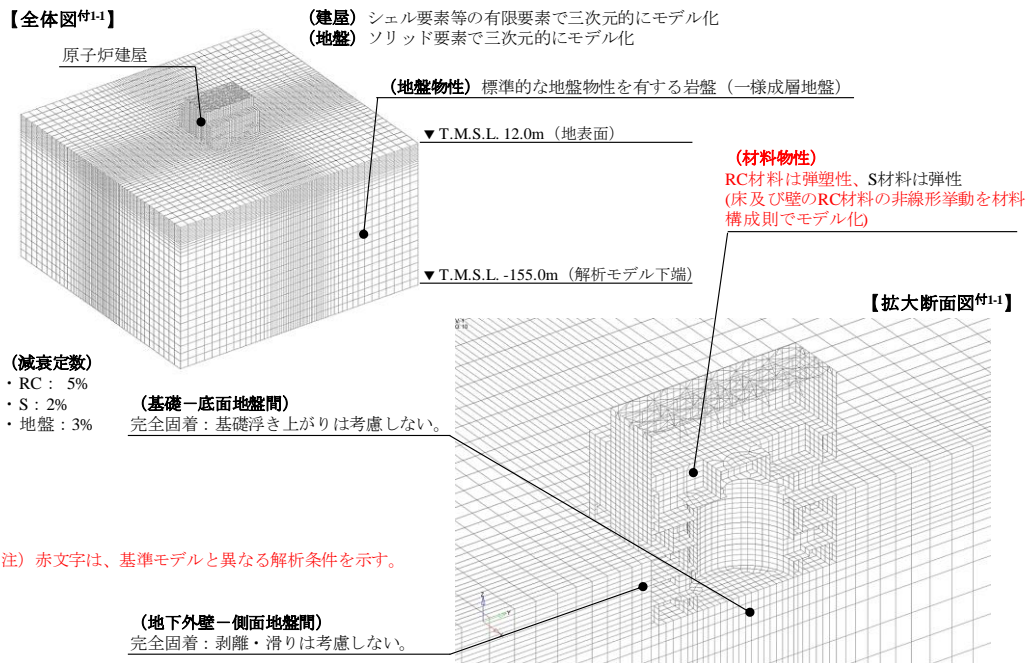
建屋非線形モデルの伝達関数は、NS 方向、EW 方向、UD 方向ともに主要な振動数帯を除き、建屋非線形モデルの振幅が時間領域における基準モデルの振幅を大きく上回ることを確認した。これについて、筆者らは、建屋の壁及び床の非線形材料物性を考慮したことに伴うコンクリートのひび割れ等の非線形挙動の影響の他に、構成則で定める履歴ループと応答との間に収束回数等の設定に関連した力の不釣り合いに起因する数値計算上のノイズの影響と考え、これらスパイク上の応答が建屋非線形モデルの一部領域の振動を一定程度励起しているものと推定した。

建屋非線形モデルの最大応答加速度は、NS 方向、EW 方向、UD 方向ともに埋め込み部の一部最大応答加速度を除き、建屋非線形モデルの最大応答加速度が時間領域における基準モデルの最大応答加速度を大きく上回ることを確認した。これについて、筆者らは、伝達関数で述べたとおり、コンクリートのひび割れ等の非線形挙動の影響の他に、収束回数等の設定に関連した力の不釣り合いに起因する数値計算上のノイズの影響と考え、これらスパイク上の応答が建屋非線形モデルの一部領域の応答を一定程度励起しているものと推定した。

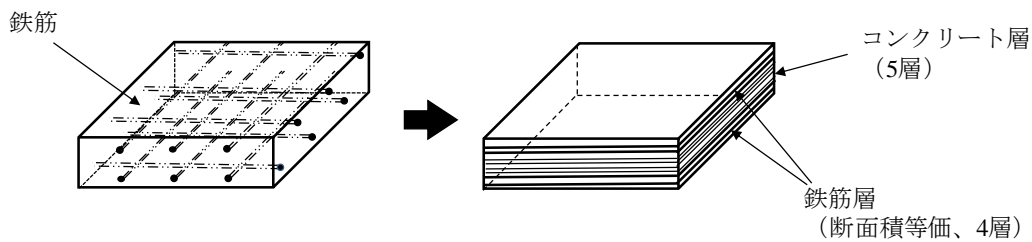
建屋非線形モデルの床応答加速度スペクトルは、NS 方向、EW 方向、UD 方向ともに地下 3 階及び主要な周期帯において RC 材料の非線形挙動のモデル化の違いによらずおおむね一致した傾向を示すものの、それ以外の周期帯において、建屋非線形モデルの最大応答加速度が時間領域における基準モデルを大きく上回ることを確認した。これについて、筆者らは、伝達関数で述べたとおり、コンクリートのひび割れ等の非線形挙動の影響の他に、収束回数等の設定に関連した力の不釣り合いに起因する数値計算上のノイズの影響と考え、これらスパイク上の応答が建屋非線形モデルの一部領域の応答を一定程度励起しているものと推定した。

以上の結果より、本付録では、RC 材料の非線形挙動を構成則で考慮した三次元 FEM モデルによる非線形の地震応答解析においては、使用する収束計算方法等の設定に留意する

とともに、これら力の不釣り合いに起因した数値計算上のノイズの取扱いや解析の安定性・精度についても留意する必要があることを確認した。

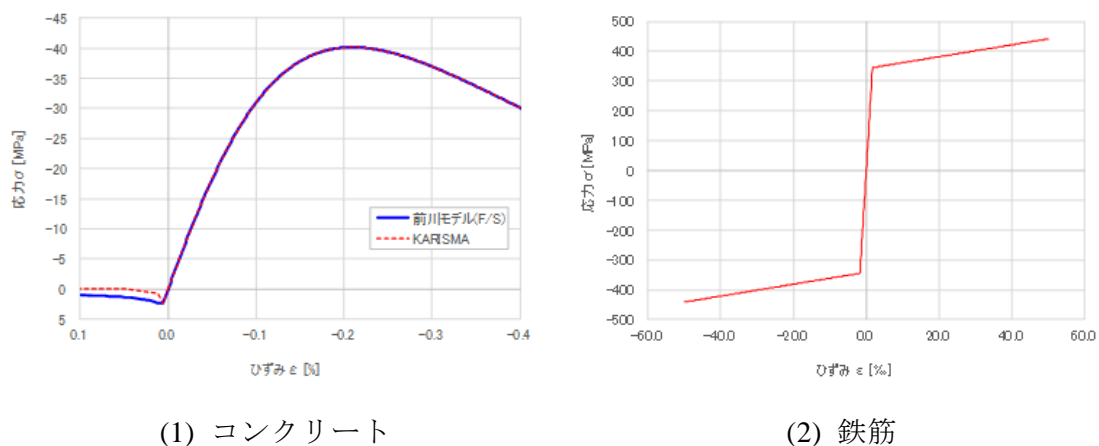


付録図 1.13 時間領域の建屋非線形モデル (感度解析: 地盤 FEM によるモデル化)
 Appendix Fig. 1.13 Nonlinear model in time domain: FEM modeling of soil for sensitivity analyses



付録図 1.14 積層シェル要素の概念図

Appendix Fig. 1.14 Conceptual diagram of laminated composite shell elements



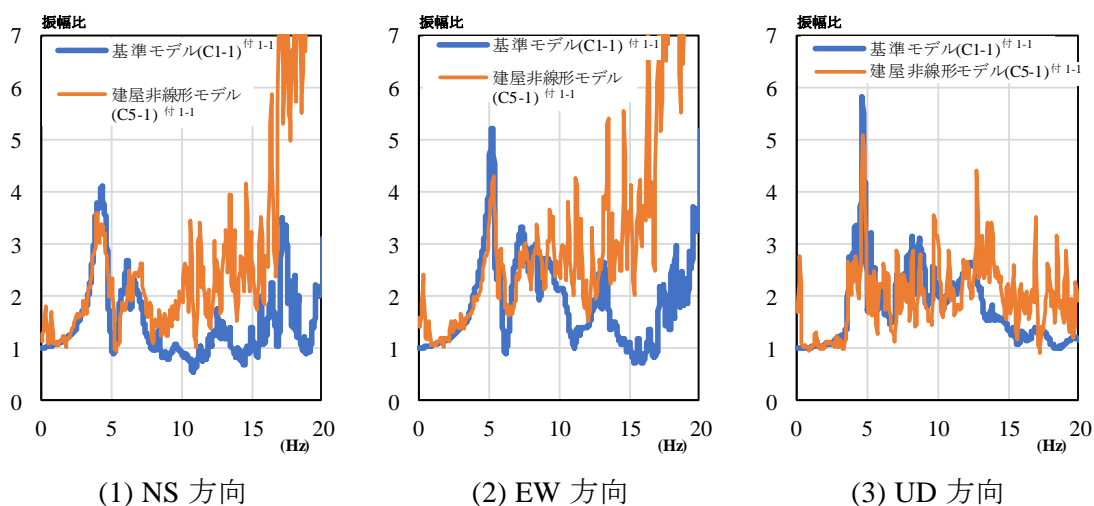
(1) コンクリート

(2) 鉄筋

出典) 日本原子力研究開発機構、平成 31 年度原子力施設等防災対策委託費 (高経年化を考慮した建屋・機器・構造物の耐震安全性評価手法の高度化) 事業報告書、2020

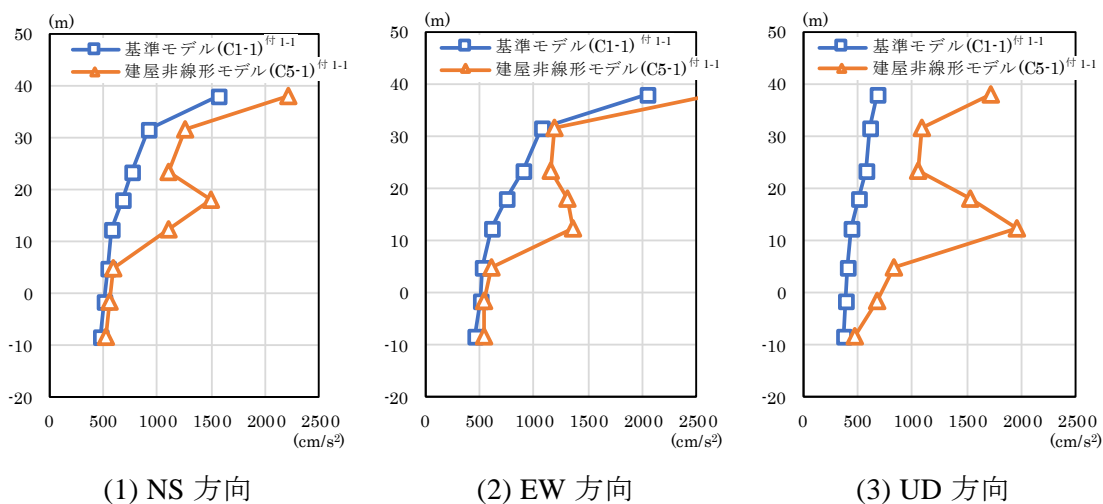
付録図 1.15 応力-ひずみ関係 (圧縮側: 負、引張側: 正)

Appendix Fig. 1.15 Stress-strain relationship (for compression: negative; for tensile: positive)



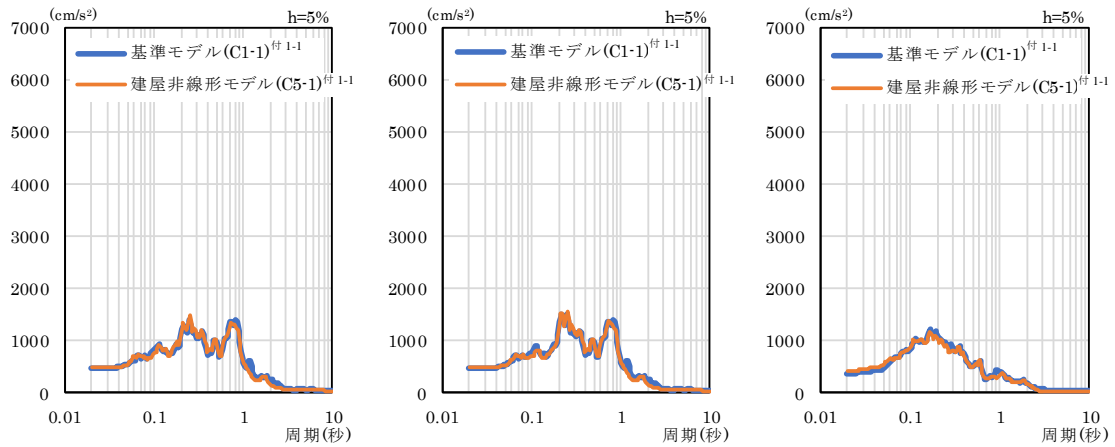
付録図 1. 16 基準モデルと建屋非線形モデルの伝達関数の比較(感度解析：時間領域)

Appendix Fig. 1. 16 Comparison of transfer functions between the reference model and the nonlinear model for sensitivity analyses in time domain



付録図 1. 17 基準モデルと建屋非線形モデルの最大応答加速度分布の比較(感度解析：時間領域)

Appendix Fig. 1. 17 Comparison of maximum accelerations between the reference model and the nonlinear model for sensitivity analyses in time domain

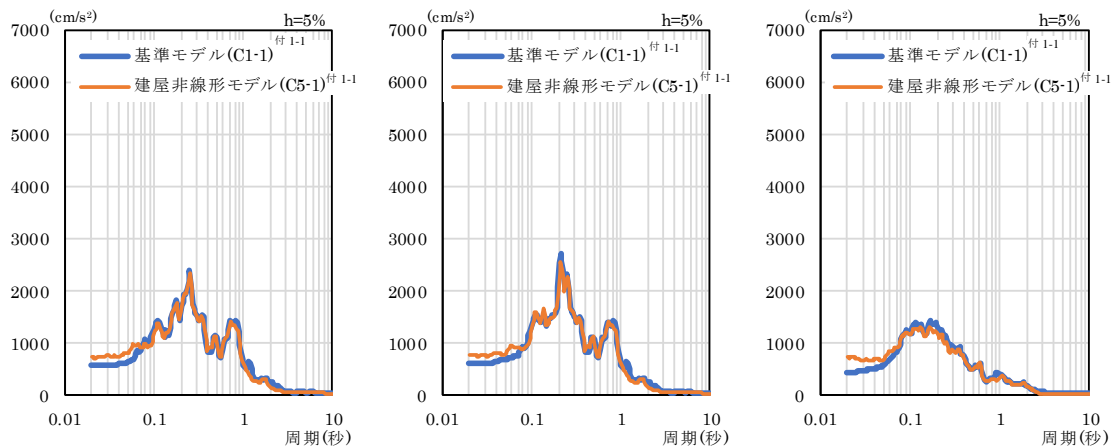


① NS 方向

② EW 方向

③ UD 方向

(1) 地下3階

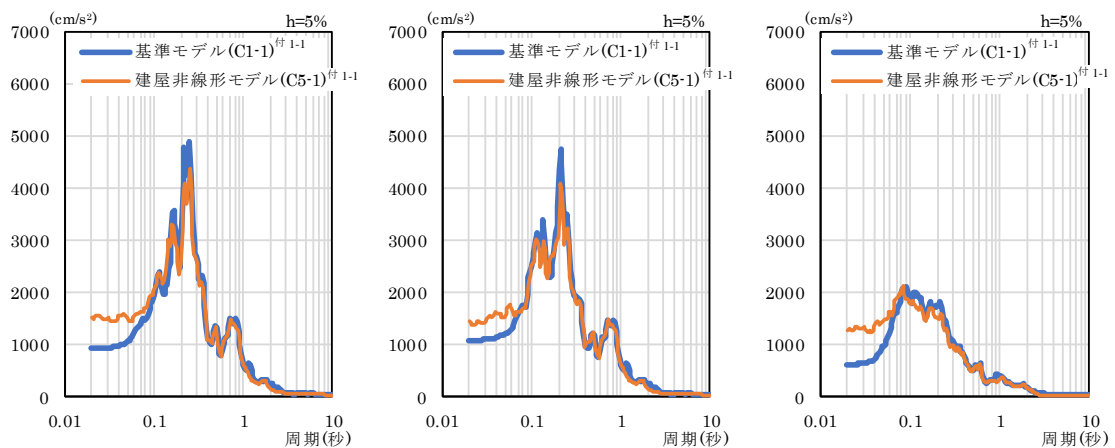


① NS 方向

② EW 方向

③ UD 方向

(2) 1階



① NS 方向

② EW 方向

③ UD 方向

(3) 4階

付録図 1.18 基準モデルと建屋非線形モデルの床応答スペクトルの比較(感度解析：時間領域)

Appendix Fig. 1.18 Comparison of FRS between the reference model and the nonlinear model for sensitivity analyses in time domain

付録1.5. ジョイント要素に付加する初期応答の算定方法を影響因子とした三次元 FEM モデル

1. 考察の方針

建屋－地盤間にジョイント要素を接続し非線形解析を行う場合、建屋自重等の常時作用する荷重に対して初期応力を算定する必要がある。このジョイント要素に付加する初期応力の算定方法については、建屋周辺地盤のモデル化の程度によって建屋の応答に影響を及ぼす可能性が指摘されており、建屋の埋め込みや地盤状況、周辺建屋の配置等の実状に応じて感度解析等で確認を行うことが望ましい。よって、本研究では、ジョイント要素に付加する初期応力の算定方法の違いが BWR の原子炉建屋の応答特性に与える影響を評価するため、建屋周辺地盤のモデル化をパラメーターとした時間領域における地震応答解析から、その影響を考察した。

2. 三次元FEMモデルの作成

ジョイント要素に付加する初期応力の算定方法を影響因子とした三次元 FEM モデルのモデル図を付録図 1. 19 に示す。使用する解析プログラムは、FINAS/STAR とした。三次元 FEM モデルと解析条件の関係については、本文表 2.1 を参照されたい。

本付録で対象とする解析モデルは、本文 4.1.2 の地盤 FEM による時間領域の接触・剥離モデル（算定方法①）に対し、基礎－底面地盤間及び地下外壁－側面地盤間のジョイント要素に付加する初期応力を以下に示す方法で算定した三次元 FEM による地震応答解析モデル（以下「接触・剥離モデル（算定方法②）」という。）である。

基礎－底面地盤間及び地下外壁－側面地盤間のジョイント要素に付加する初期応力は、付録図 1. 20 に示す側面地盤を取り付けた解析モデルに鉛直震度 1.0 の慣性力を作用させた静的解析から設定した。

3. 地震応答解析結果の比較

3.1 伝達関数

付録図 1. 21 にクレーン階の伝達関数の比較を示す。NS 方向、EW 方向及び UD 方向の伝達関数は、時間領域における接触・剥離モデル（算定方法①）と接触・剥離モデル（算定方法②）でおおむね一致しており、その傾向に大きな違いは見られない。

3.2 最大応答加速度

付録図 1. 22 に最大応答加速度分布の比較を示す。NS 方向、EW 方向及び UD 方向の最大応答加速度分布は、埋め込みを有する地下部の水平方向で時間領域における接触・剥離モデル（算定方法①）と若干の違いを示すものの、それ以外ではその傾向に大きな違いは見られない。

3.3 床応答加速度スペクトル

付録図 1. 23 に床応答加速度スペクトルの比較を示す。NS 方向、EW 方向及び UD 方向の床応答加速度スペクトルは、時間領域における接触・剥離モデル（算定方法①）と接触・剥離モデル（算定方法②）でおおむね一致しており、その傾向に大きな違いは見られない。

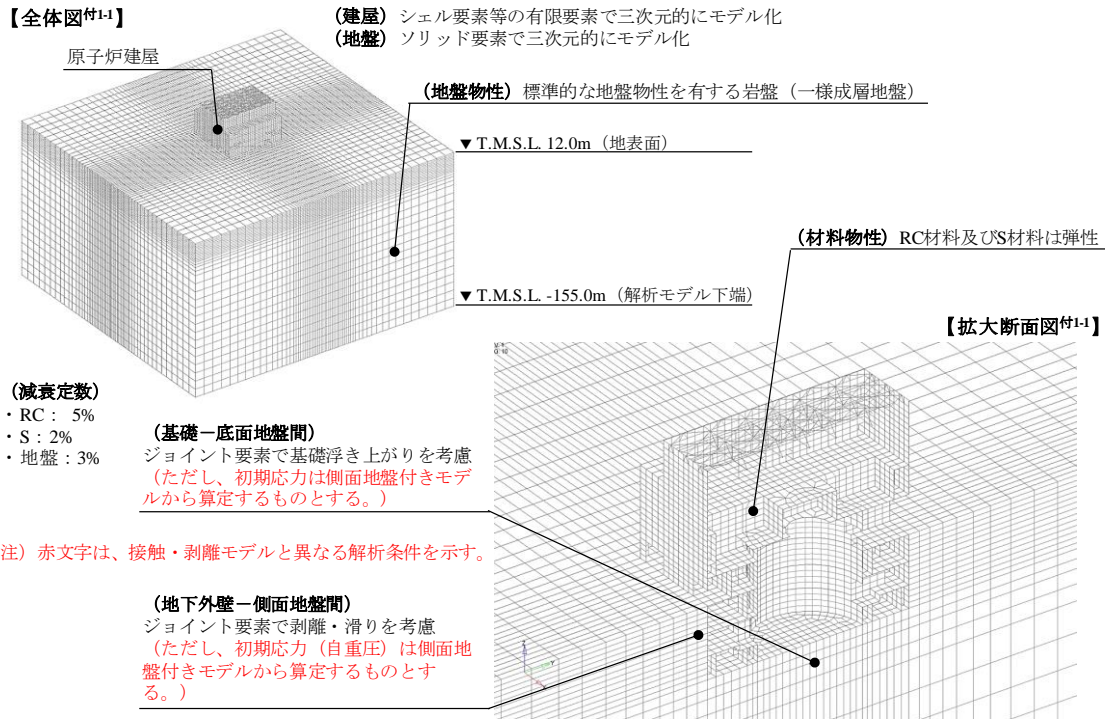
4. まとめ

本付録では、ジョイント要素に付加する初期応力の算定方法の違いが BWR の原子炉建屋の応答特性に与える影響を評価するため、側面地盤を考慮した三次元 FEM モデルにより基礎－底面地盤間及び地下外壁－側面地盤間のジョイント要素に作用する初期応力を求め、当該応力を付加した解析モデル（接触・剥離モデル（算定方法②））による地震応答解析から、その影響を考察した。その結果、本文 5.1.2 の標準的な解析条件下における接触・剥離モデル（算定方法①：時間領域）との比較から、以下に示す成果が得られた。

接触・剥離モデル（算定方法②：時間領域）の伝達関数は、NS 方向、EW 方向、UD 方向ともに初期応力の算定方法の違いによらずおおむね一致した傾向を示しており、その違いはほぼ見られないことを確認した。これについて、筆者らは、本解析条件下においては、初期応力の算定方法の違いが建屋全体応答に与える影響は小さく、結果として、伝達関数に与える影響は小さかったものと推定した。

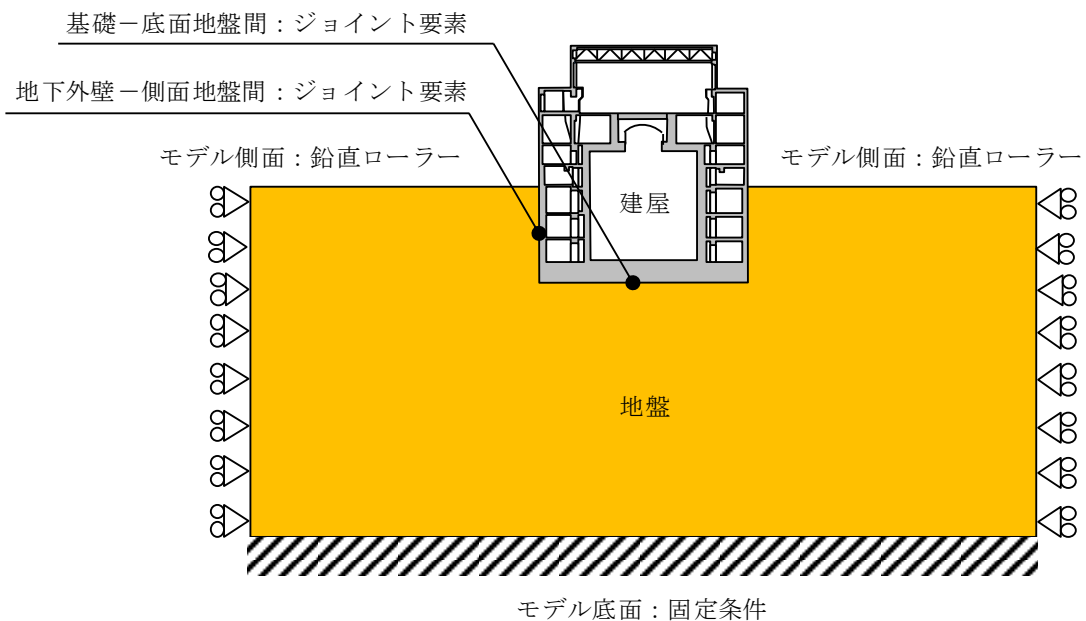
接触・剥離モデル（算定方法②：時間領域）の最大応答加速度は、NS 方向、EW 方向、UD 方向ともに初期応力の算定方法の違いによらずおおむね一致した傾向を示しており、その違いは埋め込み部の一部最大応答加速度に限られることを確認した。これについて、筆者らは、伝達関数で述べたとおり、初期応力の算定方法の違いが建屋全体応答に与える影響は小さく、結果として、最大応答加速度分布に与える影響は小さかったものと推定した。

接触・剥離モデル（算定方法②：時間領域）の床応答加速度スペクトルは、NS 方向、EW 方向、UD 方向ともに初期応力の算定方法の違いによらずおおむね一致した傾向を示しており、その違いはほぼ見られないことを確認した。これについて、筆者らは、本解析条件下においては、初期応力の算定方法の違いが建屋全体応答に与える影響は小さく、結果として、床応答加速度スペクトルに与える影響は小さかったものと推定した。



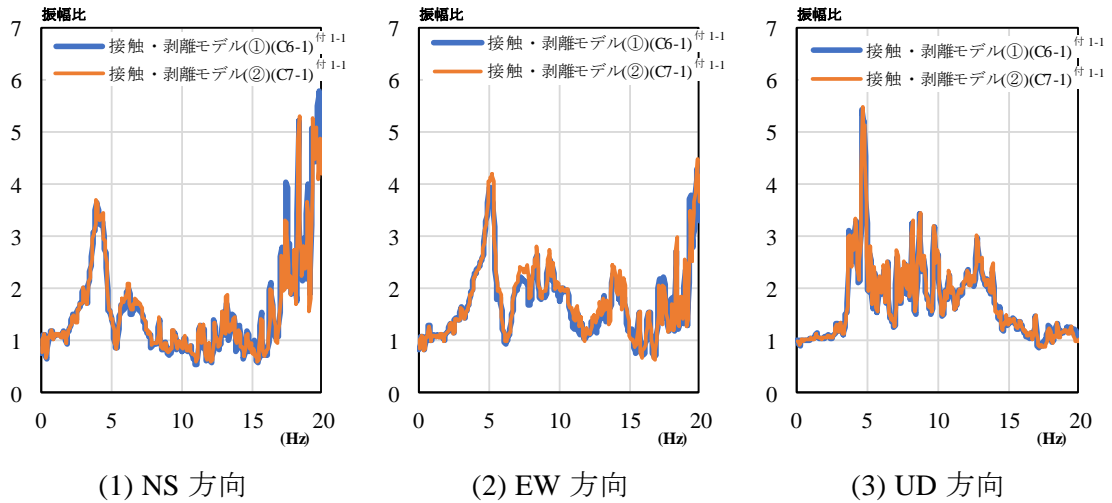
付録図 1.19 時間領域の接触・剥離モデル (算定方法②) (感度解析：地盤 FEM によるモデル化)

Appendix Fig. 1.19 Contact-separation model in time domain (calculation method for the modeling factor ②): FEM modeling of soil for sensitivity analyses



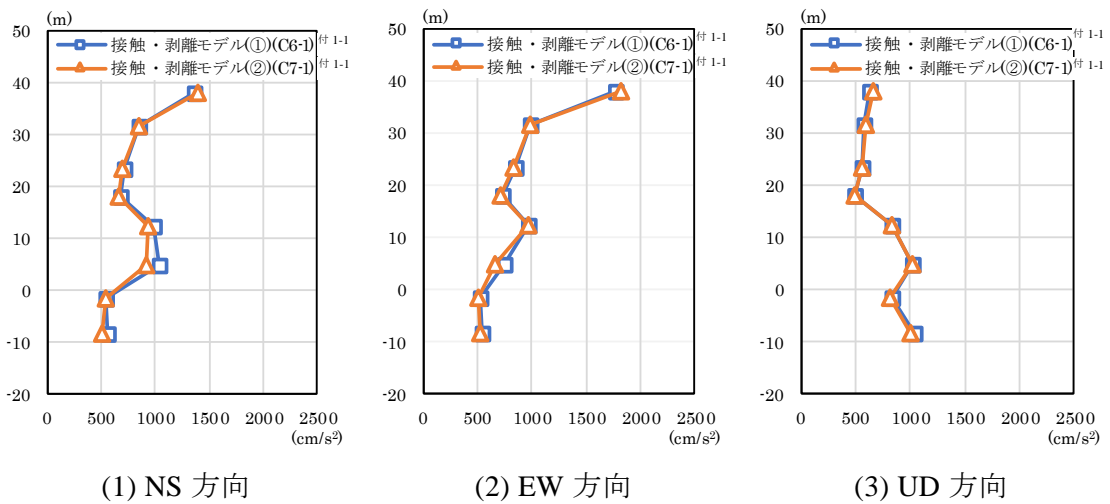
付録図 1.20 基礎-底面地盤間及び地下外壁-側面地盤間のジョイント要素に付加する初期応力の算定方法のモデル化概念図 (地盤 FEM によるモデル化)

Appendix Fig. 1.20 Conceptual diagram of the calculation method for initial stress added in joint elements at the bottom of the slab base and the side of underground walls



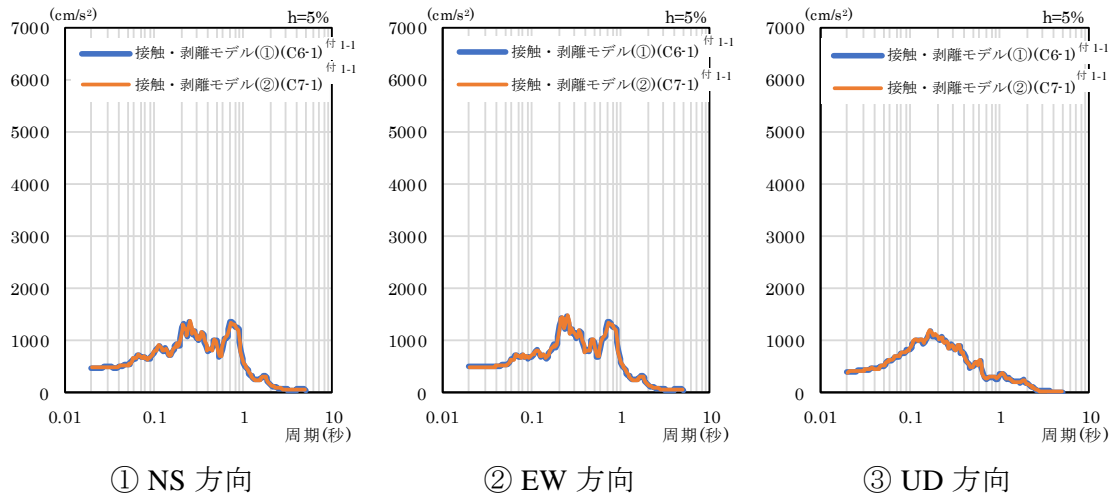
付録図 1. 21 接触・剥離モデル(算定方法①)と接触・剥離モデル(算定方法②)の伝達関数の比較(感度解析：時間領域)

Appendix Fig. 1. 21 Comparison of transfer functions between contact-separation models ① and ② for sensitivity analyses in time domain

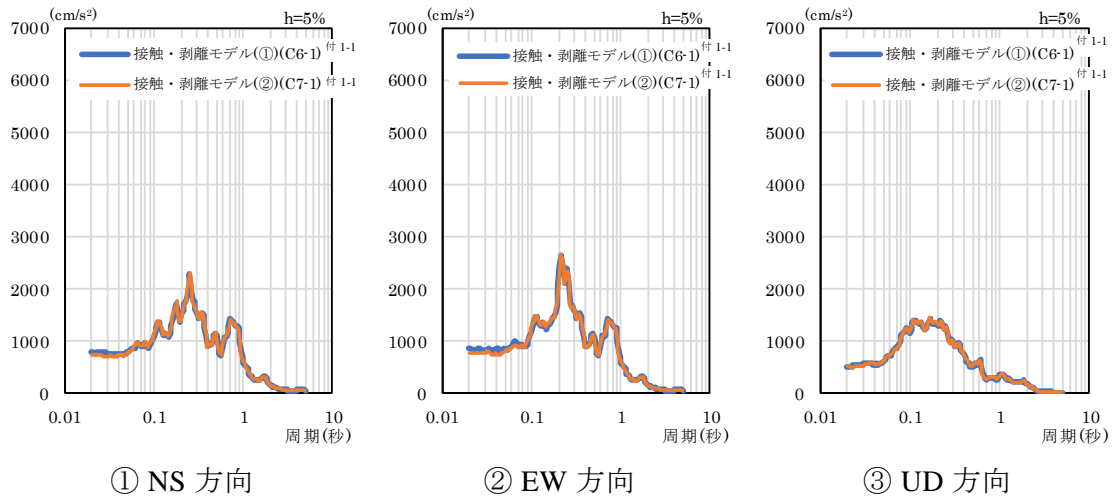


付録図 1. 22 接触・剥離モデル(算定方法①)と接触・剥離モデル(算定方法②)の最大応答加速度分布の比較(感度解析：時間領域)

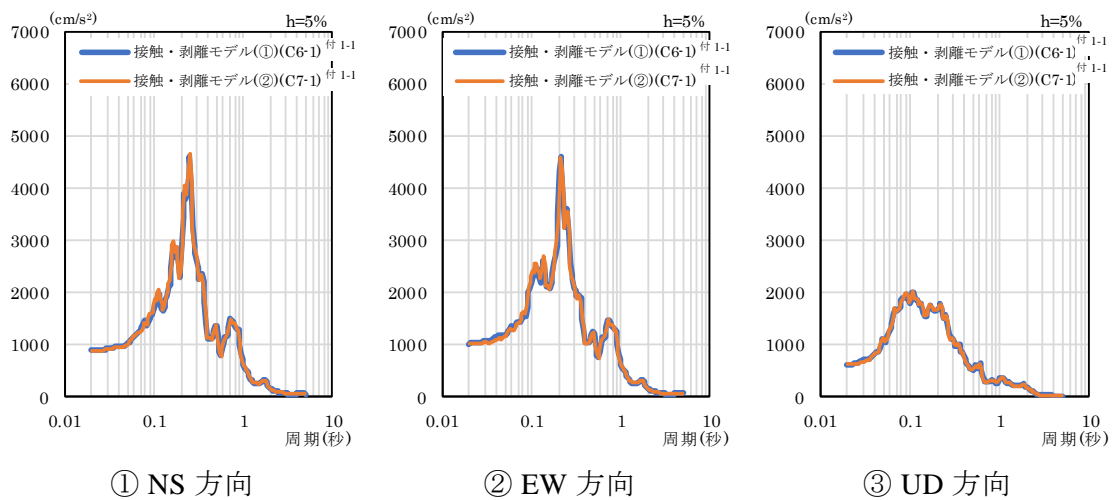
Appendix Fig. 1. 22 Comparison of maximum accelerations between contact-separation models ① and ② for sensitivity analyses in time domain



(1) 地下3階



(2) 1階



(3) 4階

付録図 1.23 接触・剥離モデル(方法①)と接触・剥離モデル(方法②)の比較(感度解析：時間領域)

Appendix Fig. 1.23 Comparison of FRS between contact-separation models ① and ② for sensitivity analyses in time domain

付録1.6. 減衰のモデル化を影響因子とした三次元 FEM モデル

1. 考察の方針

減衰のモデル化については、既に述べたように、レーリー減衰を使用したことによる大規模構造系の地震応答解析結果への影響が指摘されており、感度解析等によって適切なパラメーターが設定されていることを確認しておくことが望ましい。よって、本研究では、減衰のモデル化の違いが BWR の原子炉建屋の応答特性に与える影響を評価するため、減衰モデルをパラメーターとした時間領域における地震応答解析から、その影響を考察した。

2. 三次元FEMモデルの作成

減衰のモデル化を影響因子とした三次元 FEM モデルのモデル図を付録図 1. 24 に示す。使用する解析プログラムは、FINAS/STAR とした。三次元 FEM モデルと解析条件の関係については、本文表 2.1 を参照されたい。

本付録で対象とする解析モデルは、本文 4.1.1 の時間領域の基準モデルに対し、適用する減衰を複素減衰としてモデル化した三次元 FEM による周波数領域の地震応答解析モデル（以下「複素減衰モデル」という。）である。

3. 地震応答解析結果の比較

3.1 伝達関数

付録図 1. 25 にクレーン階の伝達関数の比較を示す。NS 方向、EW 方向及び UD 方向の伝達関数は、主要な振動数帯でおおむね一致した傾向を示すものの、一部振動帯でその傾向に違いが見られる。これについて、筆者らは、図 4.3 が示すとおり、基準モデル（基準モデル）におけるレーリー減衰の振動数依存性が影響を及ぼしているものと考え、レーリー減衰で設定した f_1 及び f_2 間の振動数帯で基準モデルの減衰が複素減衰モデル（周波数領域）の減衰を下回っていることが影響しているものと推定した。

3.2 最大応答加速度

付録図 1. 26 に最大応答加速度分布の比較を示す。NS 方向、EW 方向及び UD 方向の最大応答加速度分布は、高さ方向によらずおおむね複素減衰モデル（周波数領域）の最大応答加速度が基準モデルの最大応答加速度を下回っている。これについて、筆者らは、伝達関数で述べたとおり、レーリー減衰の振動数依存性と f_1 及び f_2 の設定方法が影響を及ぼしているものと考え、 f_1 及び f_2 間の振動数帯で基準モデルの減衰が複素減衰モデルの減衰を下回っていることが影響しているものと推定した。

3.3 床応答加速度スペクトル

付録図 1. 27 に床応答加速度スペクトルの比較を示す。NS 方向、EW 方向及び UD 方向の床応答加速度スペクトルは、全ての階の主要な周期帯でおおむね一致しているものの、

全体的に複素減衰モデル（周波数領域）の最大応答加速度が基準モデル（時間領域）の最大応答加速度を若干下回っている。これについて、筆者らは、伝達関数で述べたとおり、レーリー減衰の振動数依存性と $f1$ 及び $f2$ の設定方法が影響を及ぼしているものと考え、 $f1$ 及び $f2$ 間の振動数帯で基準モデルの減衰が複素減衰モデルの減衰を下回っていることが影響しているものと推定した。

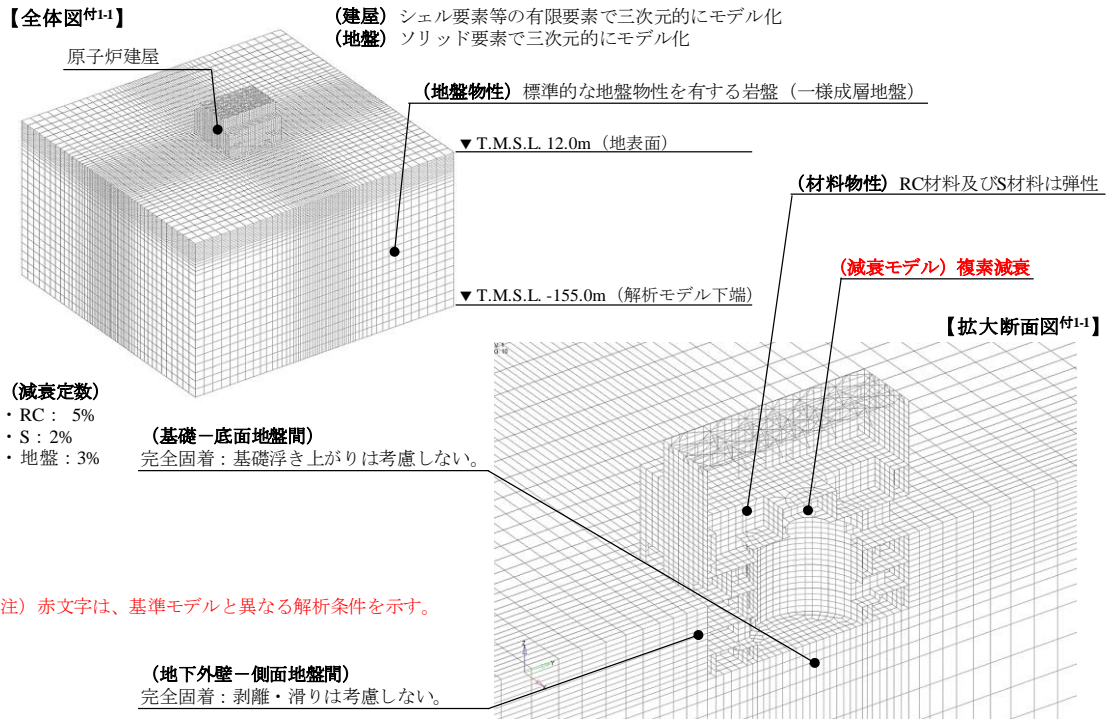
4. まとめ

本付録では、減衰のモデル化の違いが BWR の原子炉建屋の応答特性に与える影響を評価するため、適用する減衰を複素減衰とした解析モデル（複素減衰モデル）による周波数領域における地震応答解析から、その影響を考察した。その結果、5.1.1 の標準的な解析条件下における時間領域の基準モデルとの比較から、以下に示す成果が得られた。

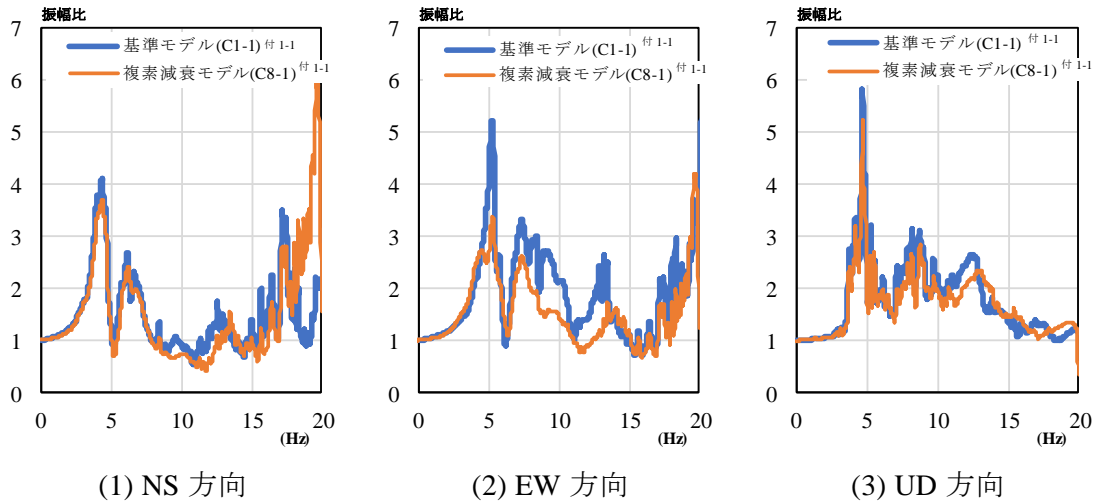
複素減衰モデルの伝達関数は、NS 方向、EW 方向、UD 方向ともに主要な振動数帯において減衰モデルの違いによらずおおむね一致した傾向を示しており、その違いは一部振動数帯に限られることを確認した。これについて、筆者らは、レーリー減衰の振動数依存性と $f1$ 及び $f2$ の設定方法が影響を及ぼしているものと考え、 $f1$ 及び $f2$ 間の振動数帯で基準モデルの減衰が周波数領域における複素減衰モデルの減衰を下回っていることで一部領域の振動が励起されたものと推定した。

複素減衰モデル（周波数領域）の最大応答加速度は、NS 方向、EW 方向、UD 方向ともに高さ方向によらずおおむね複素減衰モデルの最大応答加速度が周波数領域における基準モデルの最大応答加速度を下回ることを確認した。これについて、筆者らは、伝達関数で述べたとおり、レーリー減衰の振動数依存性と本解析で定めた $f1$ と $f2$ の設定方法が影響を及ぼしているものと考え、 $f1$ 及び $f2$ 間の振動数帯で周波数領域における基準モデルの減衰が複素減衰モデルの減衰を下回っていることで一部領域の応答が励起されたものと推定した。

複素減衰モデル（周波数領域）の床応答加速度スペクトルは、NS 方向、EW 方向、UD 方向ともに全ての階の主要な周期帯でおおむね一致しているものの、全体的に複素減衰モデルの最大応答加速度が周波数領域における基準モデルの最大応答加速度を若干下回ることを確認した。これについて、筆者らは、伝達関数で述べたとおり、レーリー減衰の振動数依存性と本解析で定めた $f1$ と $f2$ の設定方法が影響を及ぼしているものと考え、 $f1$ 及び $f2$ 間の振動数帯で周波数領域における基準モデルの減衰が複素減衰モデルの減衰を下回っていることで一部領域の応答が励起されたものと推定した。

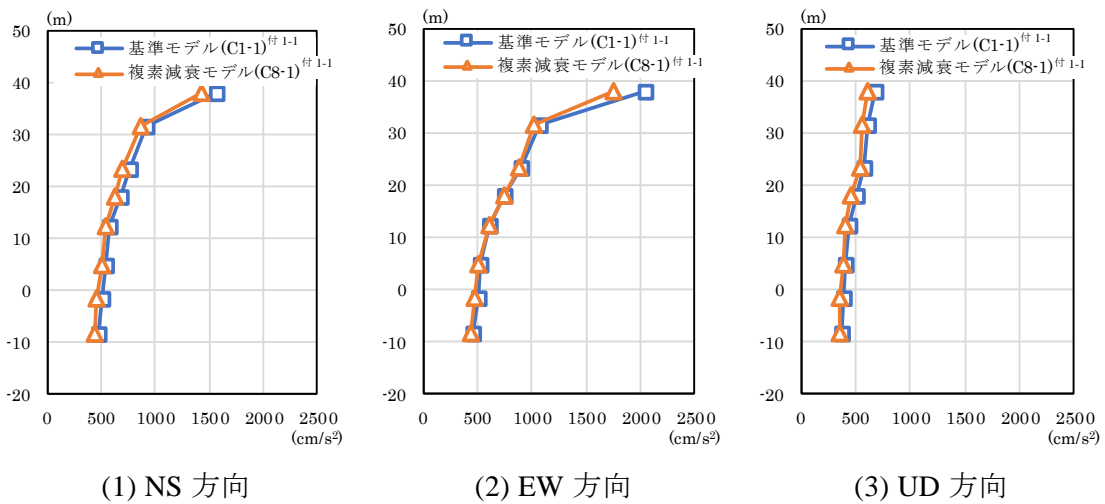


付録図 1. 24 周波数領域の複素減衰モデル (感度解析: 地盤 FEM によるモデル化)
 Appendix Fig. 1. 24 Complex damping model: FEM modeling of soil for sensitivity analyses in frequency domain



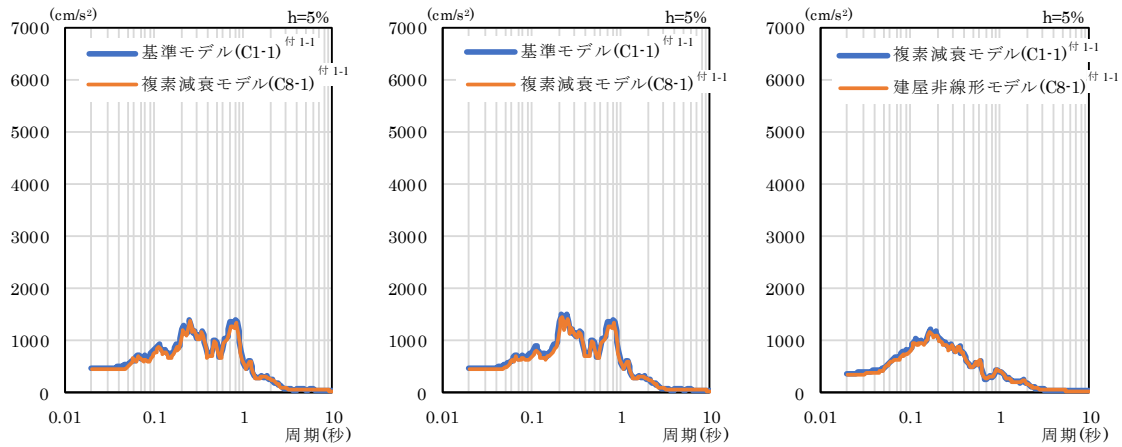
付録図 1.25 基準モデル(時間領域)と複素減衰モデル(周波数領域)の伝達関数の比較(感度解析)

Appendix Fig. 1.25 Comparison of transfer functions between the reference model (time domain) and the complex damping model (frequency model) for sensitivity analyses



付録図 1.26 基準モデル(時間領域)と複素減衰モデル(周波数領域)の最大応答加速度分布の比較(感度解析)

Appendix Fig. 1.26 Comparison of maximum accelerations between the reference model (time domain) and the complex damping model (frequency domain) for sensitivity analyses

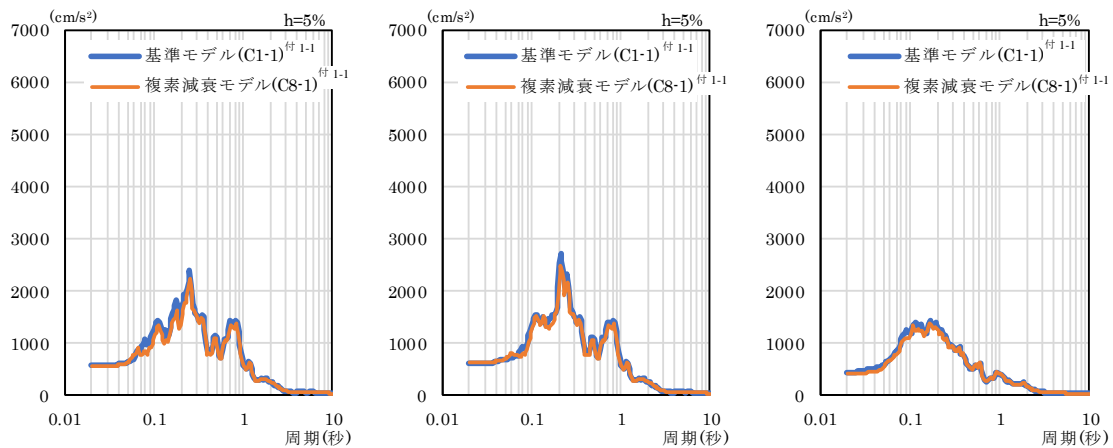


① NS 方向

② EW 方向

③ UD 方向

(1) 地下3階

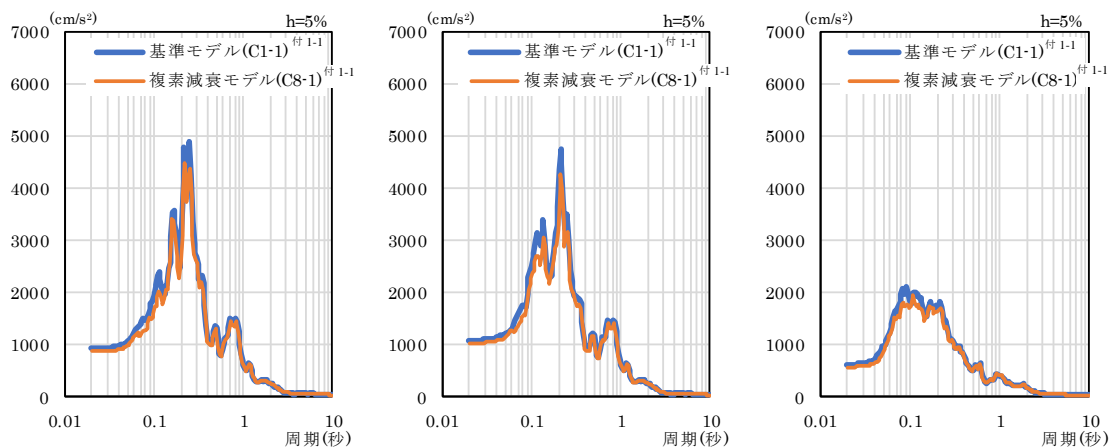


① NS 方向

② EW 方向

③ UD 方向

(2) 1階



① NS 方向

② EW 方向

③ UD 方向

(3) 4階

付録図 1.27 基準モデル(時間領域)と複素減衰モデル(周波数領域)の床応答スペクトルの比較(感度解析)

Appendix Fig. 1.27 Comparison of FRS between the reference model (time domain) and the complex damping model (frequency model) for sensitivity analyses

付録 1 の参考文献一覧

- 付 1-1 日本原子力研究開発機構、平成 31 年度原子力施設等防災対策委託費（高経年化を考慮した建屋・機器・構造物の耐震安全性評価手法の高度化）事業報告書、2020
- 付 1-2 IAEA, Review of Seismic Evaluation Methodologies for Nuclear Power Plants Based on a Benchmark Exercise, IAEA TECDOC No. 1722, 2013

付録 2 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）

本付録では、本研究で得られた技術的知見を踏まえ、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、水平 2 方向及び鉛直方向の地震力の組合せによって引き起こされる建屋の三次元的な応答特性について、本文第 3 章で定めた地震応答解析の基本方針を参考に三次元 FEM モデルの作成及び解析に係る留意点を整理した。なお、これら留意点の整理に当たって、本付録では、平成 25 年 6 月に制定された「耐震設計に係る工認審査ガイド」(2013)^{付 2-1}（平成 25 年 6 月 19 日原子力規制委員会決定）（以下「耐震審査ガイド」という。）の規定を参照した。また、付録解説の作成に当たっては、委託事業より得られた三次元 FEM モデルの入力データ及び解析結果^{付 2-2}等を基に、筆者らの解析モデルの作成、解析、考察、評価等の過程で得られた新たな情報を加え、規制への活用の観点から三次元 FEM モデルによる地震応答解析の基本的な知識や考え方、技術的根拠を筆者らの考えとして整理した。

1. 総則

1.1 目的

本要領は、発電用軽水型原子炉施設の地震時挙動評価に関わる審査において、審査官等が三次元 FEM モデルによる審査の妥当性を確認する際の技術文書として活用することを目的とする。

【付録解説】

本要領は、耐震審査ガイドに規定される施設の耐震設計のうち、建屋と地盤を FEM 等の離散化手法を使って三次元的にモデル化した地震応答解析モデル（以下「三次元 FEM モデル」という。）による地震時挙動評価の審査に対し、審査官等がその地震応答解析の妥当性を審査する際の技術文書として活用することを目的とする。

1.2 適用範囲

本要領は、発電用軽水型原子炉施設に適用される。なお、本要領の基本的な考え方は、原子力関係施設及びその他の原子炉施設にも参考となるものである。

【付録解説】

本要領は、発電用軽水型原子炉施設のうち、建屋－地盤の相互作用を考慮した三次元 FEM モデルの地震応答解析に適用する。適用する発電用軽水型原子炉施設は、BWR タイプの原子力発電所と PWR タイプの原子力発電所の 2 種類とする。なお、本要領の地震応答解析の基本的な考え方は、原子力関係施設及びその他原子炉施設の三次元 FEM モデルにも参考となるものである。

1.3 本要領の適用に当たっての留意事項

(1) 基本方針

本要領は、「付録本文」と「付録解説」で構成する。

(2) 用語

本要領において使用する用語は、本文において使用する用語の定義による。

(3) 略語

本要領において使用する略語は、本文において使用する略語表による。

(4) 単位系

本要領においては、国際単位系（SI）を使用する。ただし、国際単位系以外であってもある分野で広く使用され、本要領で使用を認めている慣用単位は使用してもよい。

(5) 基本事項

本要領は、建屋は原則として剛構造としていること、及び重要な建屋は地震力に対し十分な支持性能を有する地盤に支持されていることを耐震設計の前提条件としている発電用原子力施設に適用する。

(6) 規格及び基準等

本要領においては、要領作成時点で適用実績のある耐震解析に関わる規格及び基準の規定、並びに既往の研究成果等について適用可能なものを示した。なお、耐震解析に関わる新たな規格及び基準等、並びに新たな知見に常に注視し、審査においてそれらを必要に応じて速やかに考慮することとする。

【付録解説】

(1) 基本方針

本要領では、発電用軽水型原子炉施設のうち、建屋－地盤の相互作用を考慮した三次元 FEM モデルの地震応答解析の妥当性を確認するに当たって必要となる解析手法及びモデル化並びに地震時挙動評価の基本的な知識や考え方、技術的根拠、解析事例、文献調査の結果について、本文及び付録で得られた技術的知見を基にまとめる。

本要領では、三次元 FEM モデルによる地震応答解析に関わる基本的な要求事項を「付録本文」にまとめ、関連する三次元 FEM モデルの応答に影響を及ぼす主要な因子に対する解析事例を「本文」及び「付録」から参照する。「付録本文」の内容に対応する基本的な知識や考え方、技術的根拠は「付録解説」に記載する。

(2) 用語

本要領において使用する用語は、本文において使用する用語の定義による。

(3) 略語

本要領において使用する略語は、本文において使用する略語表による。

(4) 単位系

国際単位系は、1960年の国際度量衡総会で勧告されたメートル法単位系である。本要領で

は、原則、全ての単位を国際単位系で統一しているが、既往の文献に国際単位系以外の単位が使用されている場合は、例外的に慣用単位系を使用してもよいものとした。

(5) 基本事項

本要領で対象とする建屋は、原則、地震力を主に耐震壁で負担させる剛構造とし、十分な支持性能をもつ地盤に設置される鉄筋コンクリート造の発電用軽水型原子炉施設とする。

日本建築学会（2005）^{付2-3}によると、地震力を主に耐震壁で負担させる剛構造に適合するかどうかの判断基準としては、必要保有水平耐力を耐震壁のみの保有水平耐力で負担できるといったことが考えられるとされている。また、十分な支持性能を有する地盤に支持されていることについては、施設の耐震設計上の重要度に応じて評価することとし、設計荷重により生じる接地圧に対して地盤が十分な支持力を有していること、地震時に建屋の基礎底面に生じる力がその地盤部分のすべり抵抗以下であること、施設の安全機能に重大な影響を及ぼすような建屋基礎の沈下及び傾斜が生じないこと等を評価することとされている。

(6) 規格及び基準等

本要領においては、要領作成時点で三次元 FEM モデルによる地震時挙動評価に適用実績のある規格及び基準の規定、並びに既往の研究成果等（以下「規格及び基準等」という。）について適用可能なものを示した。なお、耐震解析に関わる新たな規格及び基準等、並びに新たな知見についてはその動向を常に注視するとともに、審査においてそれら最新の知見を必要に応じて速やかに考慮していくことが望ましい。

2. 地震応答解析

2.1 地震応答解析手法及び地震応答解析モデル

建屋－地盤連成系の地震応答解析においては、適切な地震応答解析手法及び地震応答解析モデルを設定していることを確認する。

【付録解説】

建屋－地盤の相互作用を考慮した発電用軽水型原子炉施設の三次元 FEM モデルによる地震応答解析においては、解析の目的や解析すべき現象に応じた適切な地震応答解析手法及び地震応答解析モデルが設定されていることを確認する。三次元 FEM モデルによる地震応答解析は、選択する地震応答解析手法及び解析対象のモデル化程度によって解析結果の精度に大きな影響を及ぼすため、審査官等は、2.1.1 から 2.1.3 に示す各項目について、適用する地震応答解析手法及び地震応答解析モデルが審査の目的に応じて適切に定められているか確認を行うことが望ましい。

2.1.1 地震応答解析手法

(1) 基本事項

地震応答解析手法は、規制基準の要求事項に留意して、JEAG4601（1991）^{付2-4}の規定及び既往の研究等を参考に設定していること。

(2) 留意点

地震時の基礎浮き上がりの影響や地盤の非線形性については、規制基準の要求事項に留意して、JEAG4601（1991）^{付2-4}の規定及び既往の研究等を参考に、考慮していること。

(3) 地震応答解析手法及び地震応答解析モデルの検証と妥当性確認

地震応答解析手法の設定に当たっては、手法の適用性、適用限界等を考慮のうえ、適切な手法を選定すること。ここで、地震応答解析手法及び地震応答解析モデルの妥当性の検討においては、地震観測記録や精緻・詳細な解析に基づく検討結果等に基づいて妥当性の検討及び評価を行っていること。

【付録解説】

(1) 基本事項

本要領で対象とする地震応答解析手法には、線形解析法、等価線形解析法、非線形解析法がある。いずれも、入力地震動に対する時々刻々の解析対象の応答を時間積分によって求める。線形解析の場合は、時間積分法として、時間領域の積分法と周波数領域の積分法があり、それぞれ時刻歴応答解析法、周波数応答解析法と分けられる。

非線形解析の場合は、時刻歴応答解析法に非線形解析法を組み入れた解法が用いられる。

等価線形解析法は、非線形挙動を応答ひずみに応じた割線剛性による線形解析で求める方法で、周波数応答解析法と組み合わせられることが多い。

・時刻歴応答解析法

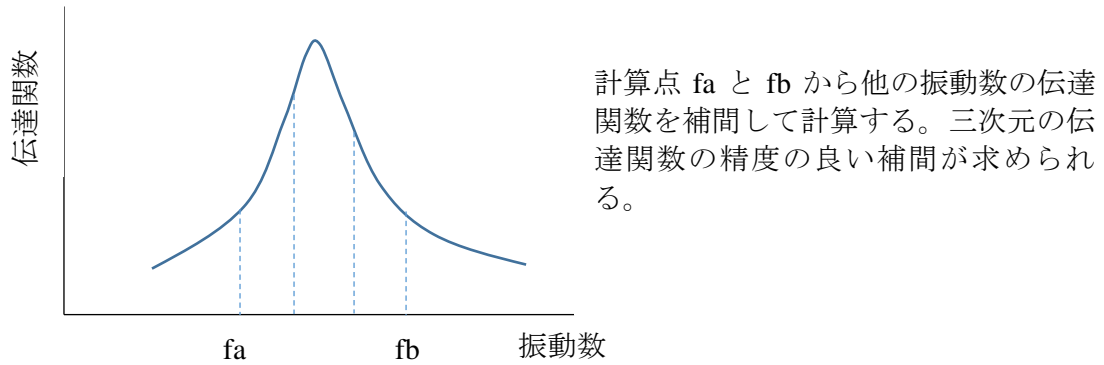
Bathe（1982）^{付2-5}及びZiewiewiczら（1989）^{付2-6}によると、逐次積分の時間積分を用いる場合は、数値安定と数値減衰について留意する必要がある。

三次元 FEM モデルによる地震応答解析では、最大固有振動数が非常に大きくなる。一方、時間積分法は刻み時間により、高振動数に対する応答の精度が悪くなる。一般に線形計算に用いられる 0.01 秒の場合、10Hz を超えると精度が悪くなる。このため、積分方法、計算時間刻みによる数値減衰にも留意する必要がある。

・周波数応答解析法

周波数領域の時間積分法を用いる場合は、周波数刻み（伝達関数の補間）、打ち切り振動数が、解析目的とする結果に影響しないように留意する。

具体的には、周波数応答解析では、伝達関数を飛び飛びの振動数刻みで計算し、その他の振動数については補間した伝達関数を用いる場合があり、三次元 FEM モデルによる地震応答解析では、多くの振動モードを含むために、適切な計算振動数刻みを用いる必要がある。（付録図 2.1）



出典) 日本原子力研究開発機構、平成 31 年度原子力施設等防災対策委託費 (高経年化を考慮した建屋・機器・構造物の耐震安全性評価手法の高度化) 事業報告書、2020

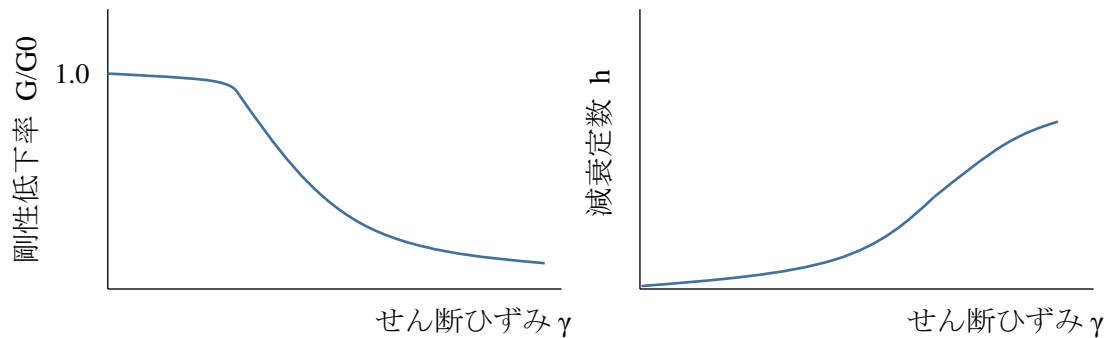
付録図 2.1 周波数応答解析における伝達関数補間の模式図

Appendix Fig. 2.1 Conceptual diagram of transfer function interpolation for frequency response analyses

(2) 留意点

地震時において基礎に作用する転倒モーメントや支持地盤に入力される地震動が大きい場合には、建屋の基礎と地盤が離れる現象 (以下「基礎浮き上がり」という。) や解放基盤表面以浅の支持地盤や表層地盤の非線形化が生じる。このうち、基礎浮き上りを考慮した三次元 FEM モデルによる地震応答解析については、後述する「2.1.2. (6) 基礎浮き上りを考慮した相互作用モデル」にその詳細を示す。

地盤の非線形性を考慮するに当たっては、地盤のひずみ度に応じて等価線形解析法若しくは非線形解析法のいずれかが用いられる。等価線形解析法の場合、地盤の地震応答解析を行う解析プログラムとして「SHAKE」^{付 2-7}が用いられることが多い。「SHAKE」では、地盤のひずみ度に応じたせん断弾性係数及び減衰定数を地盤の非線形性を考慮したせん断弾性係数及び減衰定数として用いることができる。(付録図 2.2) 日本電気協会 (2017) ^{付 2-8}によると、等価線形解析法の適用範囲は、支持地盤の剛性低下率の平均値が 0.7 を下回らない範囲と定められており、0.7 を下回る場合には材料非線形性を考慮した非線形解析による検討が別途必要とされている。



付録図 2.2 SHAKE による地盤のひずみ依存特性の模式図

Appendix Fig. 2. 2 Conceptual diagram of soil strain-dependent properties in the SHAKE

(3) 地震応答解析手法及び地震応答解析モデルの検証と妥当性確認

三次元 FEM モデルによる地震応答解析手法の設定に当たっては、解析の目的や解析すべき現象、入力地震動の大きさに応じて適切な手法を選択しなければならない。このとき、建屋の非線形性が無視し得ない場合には、材料非線形性を考慮した非線形解析若しくは等価線形解析による検討を行う必要がある。

地震応答解析手法及び地震応答解析モデルの妥当性確認の検討においては、立地する敷地ごとに観測された地震観測記録を使った再現解析によってその手法及びモデルの妥当性を確認することが望ましい。しかし、敷地の立地条件や建設時期によっては、地震観測記録を使った再現解析が難しい場合がある。また、再現解析によって妥当性が確認できる範囲は、地震計の設置位置や性能、観測波の大きさ等によって制約を受けるため、解析の目的や解析すべき現象によっては妥当性確認の方法として不十分な場合も考えられる。このため、地震応答解析手法及び地震応答解析モデルの妥当性確認の検討に当たっては、精緻・詳細な解析に基づく検討結果等の妥当性確認を別途考慮する必要がある。このような場合、他の敷地における観測記録を用いた再現解析等により、その妥当性を確認することが望ましい。

2.1.2 建屋—地盤の連成系の地震応答解析モデル

(1) 基本事項

建屋—地盤の連成系の地震応答解析モデルは、規制基準の要求事項に留意して、JEAG4601（1991）^{付24}の規定を参考に設定していること。

(2) 留意点

① 建屋の剛性評価

建屋の地震応答解析モデルの現実的な剛性評価が振動性状及び応答性状に及ぼす影響を把握し、必要に応じて、建屋の設計地震力や機器・配管系の入力地震力について検討していること。なお、剛性算定対象における遮蔽壁等の取扱い、コンクリート剛性の評価における設計基準強度と実強度の関係等に留意する。

② 建屋と地盤の相互作用

建屋と地盤との水平方向についての相互作用は、規制基準の要求事項に留意して、JEAG4601（1991）^{付24}の規定を参考に考慮していること。

建屋と地盤との鉛直方向についての相互作用は、規制基準の要求事項に留意して、水平方向についての相互作用に関する JEAG4601（1991）^{付24}の規定及び既往の研究等を参考に適切に設定していること。

(3) 建屋の地震応答解析モデル

建屋の地震応答解析モデルの設定に当たっては、解析目的、解析すべき現象等に留意して、適切にモデル化されていることを確認する。

① 有限要素タイプ

有限要素タイプは、建屋の振動性状や応答性状を現実的な建屋の応答に即して適切にモデル化することができる有限要素から選択するものとし、同一の有限要素タイプであっても適用する有限要素の種類によって異なる解析精度に留意した設定を行うこと。

② メッシュサイズ

メッシュサイズは、建屋の振動性状や応答性状を現実的な建屋の応答に即して適切にモデル化することができる大きさにするものとし、適用する有限要素の種類によって異なる解析精度に留意した設定を行うこと。

③ 部材のモデル化

部材のモデル化は、建屋の剛性評価範囲に含まれる基礎、柱、大梁、壁、床等の主要構造部材とし、屋根トラスも含め、現実的な応答に即して適切に建屋の振動性状や応答性状を捉えるモデル化を行うこと。

④ 接合部のモデル化

接合部のモデル化は、建屋の剛性評価範囲に含まれる基礎、柱、大梁、壁、床等の主要な構造部材の接合部の実状を現実的な応答に即して適切に建屋の振動性状や応答性状を捉えるモデル化を行うこと。

⑤ 開口部のモデル化

開口部のモデル化は、建屋の剛性評価範囲に含まれる床開口及び壁開口の大きさに

留意するものとし、機器搬入口等の開口部の実状を現実的な応答に即して適切に建屋の振動性状や応答性状を捉えるモデル化を行うこと。

⑥ 機器のモデル化

機器のモデル化は、建屋の剛性評価範囲に含まれる機器の大きさやその重要度に留意するものとし、原子炉格納容器及び原子炉圧力容器等の大型機器の実状を現実的な応答に即して適切に建屋の振動性状や応答性状を捉えるモデル化を行うこと。

⑦ RC材料の非線形挙動のモデル化

RC材料の非線形挙動のモデル化は、建屋に作用する入力地震動の大きさやそれによって生じるせん断ひずみ、曲率に留意する。また、コンクリートのせん断ひび割れや曲げひび割れ、部材のせん断破壊若しくは曲げ破壊等の実現象に留意するものとし、現実的な応答に即して適切に建屋の振動性状や応答性状を捉えるモデル化を行うこと。

⑧ S材料の非線形挙動のモデル化

S材料の非線形挙動のモデル化は、建屋に作用する入力地震動の大きさやそれによって生じるせん断ひずみ、曲率の大きさに留意する。また、トラスの座屈破壊やボルト接合部のせん断破壊等の実現象に留意するものとし、現実的な応答に即して適切に建屋の振動性状や応答性状を捉えるモデル化を行うこと。

⑨ 減衰のモデル化

減衰のモデル化は、適用する地震応答解析手法及び大規模構造系の地震応答解析への適用性に留意するものとし、現実的な応答に即して適切に建屋の振動性状や応答性状を捉えるモデル化を行うこと。

(4) 地盤の地震応答解析モデル

地盤の地震応答解析モデルの設定に当たっては、解析の目的や解析すべき現象等に留意して、適切にモデル化されていることを確認する。

① 地盤の離散化手法

地盤の離散化手法は、建屋の埋め込み形状、埋め戻し土やマンメイドロック等の仕様及びその設置状況、地盤の成層性、地盤の不整形性、周辺地盤の状況、隣接建屋の影響等に留意するものとし、地盤が建屋の応答に与える影響を現実的な応答に即して適切に建屋の振動性状や応答性状に反映することができるモデル化を行うこと。

② 地盤のメッシュサイズ

地盤のメッシュサイズは、建屋-地盤連成系の振動性状や応答性状を現実的な地盤の応答に即して適切にモデル化することができるものとし、適用する矩形要素の要素辺長が耐震設計において必要とする最小波長の1/5以下となるようメッシュサイズに留意した設定を行うこと。

③ 遠方地盤の半無限境界のモデル化

遠方地盤の半無限境界のモデル化は、地盤に作用する入力地震動の波動エネルギーの無限遠方への逸散を現実的な地盤の応答に即して適切にモデル化することができるものとし、適用する地盤の離散化手法に留意した設定を行うこと。

④ 地盤物性の不均一性を考慮したモデル化

地盤物性の不均一性のモデル化は、対象とする敷地の地盤調査結果及び室内調査結果に基づき現実的な地盤の応答に即して適切にモデル化することができるものとし、適用する地盤の成層性や地盤物性のばらつきに留意した設定を行うこと。

(5) 建屋と地盤との相互作用モデル

建屋と地盤との相互作用モデルの設定に当たっては、建屋の埋め込み状況や配置の実状を考慮して、相互作用効果による影響が適切に評価されていることを確認する。なお、建屋の埋め込み形状や埋め戻し部（埋め戻し土、マンメイドロック等）の仕様、隣接建屋、建屋と地盤間の接触・剥離、基礎底面での支持地盤との付着効果等が相互作用の算定及び建屋の応答結果に及ぼす影響等に留意する。

① 埋め込み形状のモデル化

建屋の地盤への埋め込み形状のモデル化は、建屋の埋め込み状況や周辺建屋及び建屋にアクセスする土木構造物の配置等の実状に留意するものとし、埋め込みを考慮する範囲が建屋の応答に与える影響を現実的な応答に即して適切に建屋の振動性状や応答性状に反映することができるモデル化を行うこと。

② 埋め戻し土、マンメイドロック等のモデル化

埋め戻し土、マンメイドロック等のモデル化は、建屋の埋め込み状況や周辺地盤等の実状に留意するものとし、支持地盤上の表層地盤が地盤の応答に与える影響を現実的な応答に即して適切に建屋の振動性状や応答性状に反映することができるモデル化を行うこと。

③ 周辺地盤の不整形性のモデル化

周辺地盤の不整形性のモデル化は、建屋の埋め込み状況や周辺建屋及び地盤の配置等の実状に留意するものとし、不整形地盤が建屋の応答に与える影響を現実的な応答に即して適切に建屋の振動性状や応答性状に反映することができるモデル化を行うこと。

④ 周辺建屋の隣接効果のモデル化

周辺建屋の隣接効果のモデル化は、建屋の埋め込み状況や地盤状況、周辺建屋の配置等の実状に留意するものとし、周辺建屋の隣接効果等が建屋の応答に与える影響を現実的な応答に即して適切に建屋の振動性状や応答性状に反映することができるモデル化を行うこと。

⑤ 建屋と地盤の接触・剥離のモデル化

建屋と地盤の接触・剥離のモデル化は、建屋埋め込み部の施工状況や地盤状況、周辺建屋の配置等の実状に留意するものとし、また、地下外壁側面には防水層等の保護層が設けられていることを踏まえ、建屋－地盤間の摩擦特性が建屋の応答に与える影響を現実的な応答に即して適切に建屋の振動性状や応答性状に反映することができるモデル化を行うこと。

⑥ 地震時の建屋－地盤間の摩擦特性のモデル化

建屋－地盤間の摩擦特性のモデル化は、建屋埋め込み部の施工状況や地盤状況、周辺建屋の配置等の実状に留意するものとし、また、地下外壁側面には防水層等の保護

層が設けられていることを踏まえ、建屋—地盤間の摩擦特性が建屋の応答に与える影響を現実的な応答に即して適切に建屋の振動性状や応答性状に反映することができるモデル化を行うこと。

(6) 基礎浮き上がりを考慮した相互作用モデル

基礎浮き上がりを考慮した相互作用モデルの設定に当たっては、基礎に作用する転倒モーメントや入力地震動の大きさ、建屋の埋め込み状況や配置等の実状を考慮して、相互作用効果による影響が適切に評価されていることを確認する。なお、基礎浮き上がり挙動を含まない解析によりその影響を評価する場合には、基礎浮き上がりが建屋の振動性状及び応答性状に及ぼす影響を十分に把握し、必要に応じて、基礎浮き上がりによる影響について評価を行っていること。

① 基礎浮き上がりのモデル化

基礎浮き上がりのモデル化は、建屋の埋め込み状況や地盤状況等の実状に留意するものとし、建屋の基礎浮き上がり・滑りが建屋の応答に与える影響を現実的な応答に即して適切に建屋の振動性状や応答性状に反映することができるモデル化を行うこと。

② 基礎底面の付着効果のモデル化

基礎底面の付着効果のモデル化は、建屋の埋め込み部の施工状況や地盤状況等の実状に留意するものとし、また、考慮する場合は、基礎と底面地盤間に均しコンクリート等が設けられていることを踏まえ、基礎底面の付着効果が建屋の応答に与える影響を現実的な応答に即して適切に建屋の振動性状や応答性状に反映することができるモデル化を行うこと。

【付録解説】

(1) 基本事項

建屋—地盤の連成系の地震応答解析モデルには、離散的手法として地盤を FEM でモデル化した方法、境界要素法 (以下「BEM」という。) でモデル化した方法、薄層要素法 (以下「TLEM」という。) でモデル化した方法がある。また、これら地盤を離散的にモデル化した方法以外にも、簡易な手法として、田治見の振動アドミッタンス理論に基づく方法から求まる底面地盤ばねや Novak による方法から求まる側面地盤ばねを取り付けた方法がある。これら地盤の効果を検討した三次元 FEM モデルによる地震応答解析では、建屋—地盤の相互作用における波動エネルギーの無限遠方への逸散をどのように設定するかが重要になる。いずれのモデル化方法も固有の特性があり、対象とする問題に応じた使い分けが必要となるため、その適用に当たっては、解析の目的や解析すべき現象等に応じたモデル化方法が適切に選択されているか確認を行う必要がある。

(2) 留意点

① 建屋の剛性評価

三次元 FEM モデルによる地震応答解析では、建屋への設計用地震力や機器・配管系の入力地震動として建屋の応答が用いられるため、現実的な剛性評価に基づく振動性状及び応答性状の把握が重要になる。現実的な剛性評価としては、地震観測記録による再現

解析結果との比較から、初期の地震応答解析モデルでは考慮されていなかった遮蔽壁等の補助壁を新たに剛性算定対象として追加する場合やコンクリートの剛性を設計基準強度に基づく評価から実強度に基づく評価に変更する場合等^{付2-9}が考えられ、その妥当性に留意する必要がある。

② 建屋の相互作用

三次元 FEM モデルによる地震応答解析では、FEM ソリッド要素等の離散的手法でモデル化された地盤を介して地中内部に埋め込まれた基礎や地下外壁等に地震動が入射し、入射した一部の地震動が透過波として上部構造に伝播される。また、上部構造に入射した地震動は内部で反射を繰り返すと共に、一部は基礎や地下外壁等を介して再び周辺地盤に逸散される。日本建築学会(1996)^{付2-10}によると、これら現象は「入力 of 相互作用」、
「慣性の相互作用」と呼ばれており、建屋と地盤の相互作用は、これら異なる効果を持つ2つの現象から成り立っている。

建屋と地盤の相互作用を三次元 FEM モデルで考慮する場合、水平方向、鉛直方向それぞれについて建屋の基礎と底面地盤間で生じる浮き上がり・すべり現象、地下外壁と側面地盤間で生じる剥離・すべり現象のモデル化に留意する。これら現象は一般に非線形であり、解析的に再現する場合には、等価線形解析若しくは非線形解析が選択されるため、科学的・技術的な判断や仮定に基づき設定される種々の条件に対して、その妥当性を確認する必要がある。これら具体的な留意点については、「2.1.2.(5) 建屋と地盤との相互作用モデル」にその詳細を示す。

(3) 建屋の地震応答解析モデル

三次元 FEM モデルによる地震応答解析では、モデル化の程度に応じて床変形や壁の面外変形、建屋のねじれ挙動等のより詳細な応答性状が得られるが、同時に解析には多くの資源や労力を要する。このため、これら地震応答解析モデルの設定においては、解析の目的や解析すべき現象に応じて科学的・技術的判断が行われるのが一般的であり、これら判断が解析結果に悪影響を及ぼすことがないように確認を行う必要がある。よって、本項では、三次元 FEM モデルの設定のうち建屋のモデル化に関わる範囲について、留意すべき点を以下に示す。

① 有限要素タイプ

建屋のモデル化には有限要素が用いられる。有限要素には、梁要素、板要素、シェル要素、4面体要素や6面体要素等のソリッド要素等があり、それぞれ解析精度が異なる。また、解析プログラムが提供する要素の定式化によって同じ要素間でも解析精度が異なるため、解析の目的や解析すべき現象に応じて適切に要素が選択されているか確認を行う必要がある。

三次元 FEM モデルのモデル化では、柱・梁部材を梁要素、壁・床部材をシェル要素、基礎をソリッド要素でモデル化する場合が多いが、変断面部材を多く有する建屋の場合、梁要素及びシェル要素では地震時応力を精緻に伝達することが難しくなるため、全ての部材をソリッド要素でモデル化する等の方法も考えられる。ソリッド要素で部材をモデ

ル化する場合、ソリッド要素の節点の自由度は並進 3 方向のみとなるため、回転方向の自由度による曲げ変形が無視できない場合は、感度解析等によってその影響を確認することが望ましい。これら有限要素タイプの違いによる解析結果への影響については、付録 1.1 にその解析事例を示す。

② メッシュサイズ

FEM による解析の精度は、適用する有限要素タイプやメッシュサイズに依存するため、メッシュサイズの設定に当たっては解析の目的や解析すべき現象、選択した解析プログラムや有限要素に応じて適切にメッシュサイズが定められているか確認を行う必要がある。日本電気協会（1991）^{付2-4}によると、矩形要素を用いる場合の要素辺長（ b, h ）は、耐震設計において必要とする最小波長の 1/5 以下とするとされている。また、ASCE（2017）^{付2-11}によると、メッシュサイズは必要となる最大振動数 f_{\max} から求まるサイズ以下とされ、下式が提案されている。

$$\Delta h < \frac{f_{\max}}{5 \cdot v_s} \quad (\text{付録 2.1})$$

ここで、 Δh は、要素辺長の大きい方の長さである。また、 f_{\max} は、50 Hz 以上（NRC スタッガイド）又は 70 Hz 以上（ASCE/SEI4-16）が望ましいとされている。さらに、Jeremic ら（2009）^{付2-12}は、メッシュサイズの最大値は波長の 1/10 を超えないようにする式を提案している。

これらメッシュサイズの違いによる解析結果への影響については、付録 1.2 にその解析事例を示す。

③ 部材のモデル化

部材のモデル化においては、構造設計図書に納められている柱リストや大梁リスト、壁リスト等の主要構造部材がモデル化範囲に含まれていることが基本となる。また、三次元 FEM モデルでは、水平 2 方向及び鉛直方向の地震力の組合せを 3 方向同時入力若しくは各方向の各時刻歴の逐次重ね合わせて考慮することができるため、床の鉛直振動に影響を及ぼす二次的な壁についても、必要に応じて、モデル化範囲に含める場合がある。屋根トラスについては、地震応答解析時に屋根スラブがモデル化されない場合があるが、屋根スラブの面内剛性は水平ブレースを含む鉄骨トラスよりも大きく、面内の拘束効果が大きくなる可能性があることから、その影響を適切に評価した上でそのモデル化の妥当性を判断することが望ましい。

④ 接合部のモデル化

柱、梁、床、壁等の部材のモデル化には、梁要素やシェル要素等が用いられる。このとき、各要素を構成する節点は剛節点と考えられ、一様な断面諸元が割り当てられる。しかし、実際の接合部には、ハンチがあつたり、また、ハンチがなくとも、柱や梁、壁等の部

材は幅を持っており、節点近くでは剛性が無限大近くになる。このような剛性が無限大と考えるとよい範囲を剛域と呼び、必要に応じて、モデル化に反映する場合がある。また、柱梁接合部や床壁接合部等の接合部では、解析プログラム内で計算される解析芯と実際の部材芯が一致しない場合がある。剛域の設定は、これら解析芯の不一致によって生じる誤差を補正する方法として選択される場合もある。また、実際に厚みや幅がある部材を梁要素、シェル要素でモデル化するとその接合部で厚みや幅分だけ要素が重複することになり、これを正確にモデル化する方法として剛域を設定する場合もある。

これら部材接合部の剛域の設定に関するモデル化は、一般に応力解析モデルで適用される場合が多いが、地震応答解析用の三次元 FEM モデルのモデル化においても、解析の目的や解析すべき現象に応じて適切なモデル化が行われていることが望ましい。

⑤ 開口部のモデル化

開口部のモデル化は、図面通りに行われることが望ましいが、図面通りに全ての開口をモデル化することは一般に困難であり、ある程度の大きさを下回る小開口については、解析結果に影響を及ぼさない範囲で省略化することが一般的である。このとき省略する開口については、一定のルールを設けた上で感度解析等によって影響確認をしておくことが望ましい。通常、発電用軽水型原子炉施設の壁や床には、機器搬入口等の大きな開口から配管貫通孔等の小さな開口までさまざまな開口が設けられているため、これら開口のモデル化ルールの設定に当たっては、解析の目的や解析すべき現象に応じて適切なモデル化が行われているか確認を行う必要がある。

⑥ 機器のモデル化

機器のモデル化では、一般に機器を連成させたことによる建屋への影響は少ないことから、機器荷重等を床位置に等分布荷重として作用させる方法や機器の設置位置に集中荷重として作用させる方法等が取られている。一方で、ペDESTALや原子炉圧力容器等の大型機器については、機器接合部付近で局所的に面外方向の応答が卓越することも考えられるため、これら機器の影響が無視できない場合には、その影響を感度解析等で確認する必要がある。これら大型機器のモデル化の違いによる解析結果への影響については、付録 1.3 にその解析事例を示す。

⑦ RC 材料の非線形挙動のモデル化

三次元 FEM モデルによる地震応答解析では、入力地震動の大きさに応じたコンクリートのひび割れや壁、床等の局所的なせん断破壊若しくは曲げ破壊等の RC の非線形性を考慮した解析が可能である。このような非線形性を考慮した解析においては、RC 材料や部材の構成則及び剛性の設定が解析精度に影響を及ぼすため、解析に用いる構成則やスケルトンカーブの妥当性を確認することが重要になる。発電用軽水型原子炉施設の地震応答解析に適用するに当たっては、部材試験等を対象とした再現解析によって構成則やスケルトンカーブの妥当性及びその設定方法を検証するとともに、簡易モデル等を用いた感度解析によって動的解析への適用性を確認する必要がある。

発電用軽水型原子炉施設の地震応答解析においては、前川らの提案モデルが用いられることが多く、また、部材の解析事例では野口、長沼らの構成則がよく用いられている。これら構成則を三次元 FEM モデルに適用する際は、使用する数値積分法、収束計算方法、収束計算回数、解析時間刻み等の設定によって応力-ひずみ関係に力の不釣り合いが生じ、その残差力が数値計算上のノイズとして解析結果に現れる場合があり、留意が必要である。非線形材料物性のモデル化の違いによる解析結果への影響については、付録 1.4 にその解析事例を示す。

⑧ S 材料の非線形挙動のモデル化

三次元 FEM モデルによる地震応答解析では、入力地震動の大きさに応じたトラスの座屈破壊やボルト接合部のせん断破壊等の鉄骨の非線形性を考慮した解析が可能である。このような非線形性を考慮した解析においては、S 材料や部材の構成則及び剛性の設定が解析精度に影響を及ぼすため、解析に用いる構成則やスケルトンカーブの妥当性を確認することが重要になる。構成則やスケルトンカーブの適用性検討に当たっては、RC と同様、部材試験等を対象とした再現解析によって構成則やスケルトンカーブの妥当性及びその設定方法を検証するとともに、簡易モデル等を用いた感度解析によって動的解析への適用性を確認する必要がある。

⑨ 減衰のモデル化

減衰は、微小ひずみ時の部材材料の粘性、接合部での摩擦、地盤への逸散、二次部材・仕上げ材との摩擦等によって生じる。また、非線形挙動を等価剛性で評価する場合にはその履歴を減衰で評価することが行われる。よって、動的解析においてこれら減衰を過大に設定することは、建屋の応答値を過小評価することにつながり、危険側の評価となるため、その設定には留意が必要となる。

しかし、これら減衰を数値解析モデルとして定式化することは一般に困難であり、減衰モデルには、レーリー減衰、複素減衰、複合減衰、複合モード減衰等複数のモデルが提案されている。複合減衰には、要素ごとのレーリー減衰、要素ごとのモード減衰がある。

時刻歴応答解析では、剛性比例減衰又はレーリー減衰によって減衰を近似することが多い。その場合には、1 点又は 2 点の固有振動数において減衰定数を設定するが、三次元 FEM モデルによる地震応答解析では、水平挙動と上下挙動を同時に解析するので、それぞれの固有振動数が異なることを考慮して固有振動数が設定されている必要がある。例えば、式(付録 2.2)の f_1 を水平動の固有振動数とし、 f_2 を上下動の固有振動数とすることが考えられる。こうして設定したレーリー減衰は、 f_1 から f_2 間の減衰を小さく、その外側の振動数領域の減衰を大きく評価することになる。

一方、周波数応答では解析振動数の上限値をナイキスト振動数以下に設定することがある。これはそれ以上の振動数成分の応答をゼロとみなすことになる。

なお、これら設定の妥当性は観測記録の再現等により確認することが望ましい。また、感度解析により減衰モデルの違いが解析結果に与える影響が小さいことを確認する、若しくは、線形計算で複素減衰と解析結果が同じになることを確認する等の手法を取るこ

とも考えられる。これら減衰のモデル化の違いによる解析結果への影響については、付録 1.6 にその解析事例を示す。

非線形材料では履歴減衰を考慮することができる一方、それ以外の領域でレーリー減衰を用いるため、そのパラメータの設定には注意を要する。特に数値解析上の安定を目的として粘性減衰を考慮する場合には、それが建屋の応答に及ぼす影響が十分に小さいことを確認したうえで用いられていることを確認する必要がある。

【付録参考】

以下に代表的な減衰の定式化を示す。^{付 2-2}

レーリー減衰

$$\mathbf{C} = \alpha \mathbf{M} + \beta \mathbf{K} \quad (\text{付録 2.2})$$

ここで、 $\alpha = \frac{2hf_1f_2}{f_1+f_2}$ $\beta = \frac{2h}{f_1+f_2}$

\mathbf{M} は質量行列、 \mathbf{K} は剛性行列、 h は減衰係数、 f_1 と f_2 は主要な固有振動数

複素減衰

$$\mathbf{K}^* = \mathbf{K}(1 - 2h^2 + 2ih\sqrt{1 - h^2}) \quad \text{又は、} \quad \mathbf{K}^* = \mathbf{K}(1 + 2ih) \quad (\text{付録 2.3})$$

\mathbf{K}^* は複素剛性、 \mathbf{K} は剛性、 i は虚数単位

初期の等価線形法は後者であったが、SHAKE91 以降は前者が用いられている。この違いの応答への影響は小さい。

複合減衰（要素別モード減衰）

ある領域ごと（例えば質点系建物）について境界フリーの固有モードによるモード減衰を求め、剛体モードを加えて、全体行列にアセンブルした減衰。

複合減衰（要素別レーリー減衰）

有限要素ごとにレーリー減衰（上記の α 、 β による減衰行列 \mathbf{C} ）を設定し、それを全体行列にアセンブルした減衰。

複合モード減衰

モード解析に用いる減衰。要素別減衰より求めた減衰行列から、固有モードを用いて求めたモード減衰。

$$h_j = \frac{\{\varphi_j\}^T \mathbf{C} \{\varphi_j\}}{2h_j} \quad (\text{付録 2.4})$$

$\{\varphi_j\}$ は、固有モード。

モード減衰

要素剛性にモードの重みをかけて求めたモード減衰。

$$h_j = \frac{\{\varphi_j\}^T \sum_{k=1}^N [hK]_k \{\varphi_j\}}{\omega_j^2} \quad (\text{付録 2.5})$$

ここで、 $[hK]_k$ は、 h の重みづけをした要素剛性。

(4) 地盤の地震応答解析モデル

「2.1.2 (3) 建屋の地震応答解析モデル」に示すように、三次元 FEM モデルによる地震応答解析では、解析の目的や解析すべき現象に応じた科学的・技術的判断が行われており、これら判断が解析結果に悪影響を及ぼすことがないように確認を行う必要がある。よって、本項では、三次元 FEM モデルの設定のうち地盤のモデル化に関わる範囲について、留意すべき点を以下に示す。

① 地盤の離散化手法

三次元 FEM モデルにおける地盤の離散化手法には、「2.1.2 (3) 建屋の地震応答解析モデル」に示すように、地盤を FEM でモデル化した方法、BEM でモデル化した方法、TLEM でモデル化した方法がある。また、三次元 FEM モデルでは、地盤を離散的にモデル化する方法以外に、簡易な手法として、田治見の振動アドミタンス理論に基づく方法や Novak による方法から求まる地盤ばねを取り付け、モデル化を行う方法もある。このうち、地盤を FEM でモデル化した場合と TLEM でモデル化した場合の応答の違いについて、本文 5.1.1 にその解析事例を示す。

地盤の離散化手法は、解析対象となる建屋の埋め込み状況や埋め込み形状、埋め戻し土やマンメイドロック等の仕様及びその設置状況、地盤の成層性、地盤の不整形性、周辺地盤の状況、隣接建屋の影響等に留意して適切な手法が選択されていることを確認する。また、FEM 等の離散的な手法で地盤をモデル化する場合、建屋の基礎幅を基準に適切な解析領域が設定されていることを確認する。このとき鉛直方向については、解放基盤表面が建物基礎より十分に深い場合は解放基盤表面、解放基盤表面が建物基礎より浅い場合は支持地盤の卓越振動の影響及び建物振動の逸散のモデル化精度を考慮して、解析領域の深さを決定する。基礎と解放基盤表面の途中に解析モデルの底面を設定する場合もある。

建屋基礎底面からの解析領域の深さは、一般に基礎幅の 3 倍程度必要と考えられている。また、支持地盤の固有振動数が建屋の 2 倍以上の場合は、境界条件を基礎固定とする解析モデルも考えられる。

② 地盤のメッシュサイズ

三次元 FEM モデルにおける地盤のモデル化では、建屋－地盤の相互作用の影響を十分に捉えることができるメッシュサイズ等に留意して適切なモデル化が行われていることを確認する。具体的には、「2.1.2 (3) ② メッシュサイズ」に示すように、矩形要素の要

素辺長 (b, h) が耐震設計において必要とする最小波長の 1/5 以下となるように設定されていることを確認する。

③ 遠方地盤の半無限境界のモデル化

三次元 FEM モデルにおける地盤の底面及び側面は、半無限に続く成層の地盤（以下「半無限地盤」という。）とみなすことになる。この半無限地盤が建屋の応答におよぼす影響には、内部加振問題と外部加振問題がある。内部加振問題とは建屋の応答により地盤に生じる波動が半無限地盤に逸散する問題である。外部加振問題とは、側方の自由地盤からの入力を考慮しても解析領域内の運動が自由地盤と一致するかという問題である。三次元 FEM モデルにおける遠方地盤の半無限境界のモデル化では、地盤に作用するこれら波動エネルギーの逸散が適切に考慮されているかが重要になる。半無限境界を考慮した建屋－地盤の連成系に対する解析法として、地盤を離散的手法によりモデル化して解く直接法と地盤ばねでモデル化して解くサブストラクチャ法がある。これら解析法を考慮できる計算モデルには、無反射境界、伝達境界、粘性境界、切欠き力等のモデル化があり、これら境界条件を用いて、建屋の応答が適切に評価されているか確認を行う必要がある。

④ 地盤の不均一性を考慮したモデル化

地震応答解析で用いる地盤物性は、立地する敷地ごとの地盤調査結果及び室内試験結果に基づいて設定される。このとき、地盤物性は地層毎に一様の成層地盤とし、地盤調査結果及び室内試験結果に基づく地層内部のばらつきや不均一性（インコヒーレンス）は考慮されないことが多い。これについて EPRI (2006)^{付2-13}や Ostadan (2007)^{付2-14}によると、平面的な広がりを持つ建屋・基礎では、地震動の空間変動によるインコヒーレンスに起因した高周波入力動の低減効果が期待できるとされている。また、米国 NRC (2013)^{付2-15}では、建屋と地盤の相互作用のなかで、インコヒーレンスによる高周波入力動の低減効果を認めており、その際は DC/COL-ISG-01 に基づくインコヒーレンス関数の潜在的なばらつきに地盤深さを考慮した評価を行うこととしている。本要領では、これら海外の動向を踏まえ、地盤物性の不均一性（インコヒーレンス）を考慮したモデル化を行う場合は、地盤の成層性や地盤物性のばらつきに留意して、既往の研究等を参考に適切にパラメータ等の諸元を設定していることとした。

(5) 建屋と地盤との相互作用モデル

発電用軽水型原子炉施設における重要な建屋は、十分な支持性能を有する岩盤等の地盤に直接設置されているものの、建屋の地下の大部分が埋まっている場合やその周辺地盤が埋め戻し土やマンメイドロック等で構成されている場合、また、建屋同士が隣接して建設されている場合や傾斜等の影響で周辺地盤が不整形になっている場合等、立地する敷地の条件によって考慮すべき相互作用効果が異なる。また、「2.1.2 (3) 建屋の地震応答解析モデル」に示すように、三次元 FEM モデルによる地震応答解析では、解析の目的や解析すべき現象に応じた科学的・技術的判断が行われており、これら判断が解析結果に悪影響を及ぼすことがないよ

う確認を行う必要もある。よって、本項では、三次元 FEM モデルの設定のうち建屋と地盤との相互作用モデルに関わる範囲について、留意すべき点を以下に示す。

① 埋め込み形状のモデル化

発電用軽水型原子炉施設における原子炉建屋等の主要な建屋は、通常、タービン建屋や海水熱交換器建屋等の周辺建屋、また、海水管ダクト等の RC 製地中構造物と近接して設置される。このとき埋め込み形状は、建屋側面の内 3 面若しくは 2 面が地盤に接している状況となり、必ずしも 4 面全てが地盤に接している訳ではない。このため、三次元 FEM モデルの埋め込み形状のモデル化においては、これら隣接する建屋や建屋にアクセスする土木構造物の配置等の実状に応じて、建屋の側面と地盤の接触状況を現実的な応答に即してモデル化しておくことが望ましい。埋め込み形状が建屋の応答に及ぼす影響を確認する方法としては、隣接する建屋及び建屋側の拘束効果を無視した 2 面埋め込みや 3 面埋め込みによるモデル化等が考えられる。

② 埋め戻し土、マンメイドロック等のモデル化

建屋の周辺地盤は、実際には一様な物性を有した成層地盤が平面的に広がっている訳ではなく、支持地盤上の表層地盤には埋め戻し土が、また、支持岩盤部ではマンメイドロック等の人工岩盤が埋め込まれている場合がある。このため、三次元 FEM モデルの埋め戻し土、マンメイドロック等のモデル化においては、これら周辺地盤等の実状に応じて、建屋の側面と埋め戻し土、マンメイドロック等の接触状況を現実的な応答に即してモデル化しておくことが望ましい。埋め戻し土、マンメイドロック等が建屋の応答に及ぼす影響を確認する方法としては、隣接する埋め戻し土、マンメイドロック等を FEM ソリッド要素でモデル化する方法等が考えられる。

③ 周辺地盤の不整形性のモデル化

建屋の周辺地盤は、「2.1.2 (5) ②埋め戻し土、マンメイドロック等のモデル化」で示したように、一様な物性を有した成層地盤が平面的に広がっている訳ではなく、実際には、敷地内の傾斜等の影響により地盤形状が複雑であったり、建屋同士が近接していたりするため、不整形である場合が多い。このため、三次元 FEM モデルの周辺地盤のモデル化においては、これら周辺地盤の不整形性等の実状に応じて、建屋周辺の複雑な地盤形状や隣接する建屋等の影響を現実的な応答に即してモデル化しておくことが望ましい。周辺地盤の不整形性が建屋の応答に及ぼす影響を確認する方法としては、複雑な地盤形状や隣接する建屋を FEM でモデル化する方法等が考えられる。

④ 周辺建屋の隣接効果のモデル化

発電用軽水型原子炉施設における原子炉建屋等の主要建屋は、「2.1.2 (5) ①埋め込み形状のモデル化」で示したように、通常、タービン建屋や海水熱交換器建屋等の周辺建屋、また、海水管ダクト等の RC 製地中構造物と近接して設置される。このため、三次元 FEM モデルの周辺建屋のモデル化においては、これら近接する建屋の配置等の実状に応じて、

周囲の複雑な地盤形状、隣接建屋等の影響を現実的な応答に即してモデル化しておくことが望ましい。周辺建屋が建屋の応答に及ぼす影響を確認する方法としては、複雑な地盤形状や隣接建屋を FEM でモデル化する方法等が考えられる。

⑤ 建屋と地盤の接触・剥離のモデル化

建屋と地盤の接触・剥離は、基礎と底面地盤間の接触・剥離（基礎浮き上がり）と地下外壁と側面地盤間の接触・剥離の 2 つの現象に分かれる。このうち、基礎と底面地盤間の接触・剥離（基礎浮き上がり）については、「2.1.2 (6) ①基礎浮き上がりのモデル化」で扱うこととし、ここでは地下外壁と側面地盤間の接触・剥離について述べる。

地下外壁と側面地盤間の接触・剥離は、解析的には地震時に作用する軸方向の地震時増分土圧と静止土圧の関係から求められ、現象としては表層地盤の沈下等に起因したせん断方向を含む三次元的な非線形挙動が原因となって生じているものと考えられる。このため、地下外壁と側面地盤間の接触・剥離のモデル化では、軸方向の剥離現象だけでなく、せん断方向の滑り現象についても、その影響を考慮しておくことが望ましい。また、建屋の埋め込み状況や地盤状況、周辺建屋の配置等の実状に応じて、地下外壁と側面地盤間の接触・剥離状況を現実的な応答に即して適切にモデル化しておくことが望ましい。

地下外壁と側面地盤間の接触・剥離が建屋の応答に及ぼす影響を確認する方法としては、剥離・滑り現象を考慮したジョイント要素による非線形解析やばね要素による等価線形解析等の方法が考えられる。このとき、ジョイント要素による非線形解析を行う場合には、使用する数値積分法、収束計算法、収束計算回数、解析時間刻み等の設定によって応力ひずみ関係に力の不釣り合いが生じ、その残差力が数値計算上のノイズとして解析結果に現れる場合があり、留意が必要である。また、ばね要素による等価線形解析を行う場合には、剥離・滑り範囲の設定方法が現実的な応答に即して適切なものであるか確認を行う必要がある、その評価には留意が必要である。これら剥離・滑り現象のモデル化の違いによる解析結果への影響については、本文 5.1.2 にその解析事例を示す。また、付録表 2.1、付録図 2.2、付録図 2.3 及び付録図 2.4 にジョイント要素の構成則の設定例を示す。

【付録参考】

剥離を考慮したジョイント要素による地震応答解析では、再接触時に変位（反力も）が急激に変化するために、接触点の加速度（変位の 2 回微分）が非常に大きくなり、時刻歴波形上でスパイク状の加速度が発生する。このスパイク状の加速度を精度よく計算することは困難であるが、非線形解析アルゴリズムの工夫や、ジョイント要素の軸方向剛性の値に適切な値を用いる、ジョイント要素の減衰として適切な値を用いる、若しくは特定の高振動数成分を対象にフィルター処理を行うことにより適切な加速度を求める必要がある。

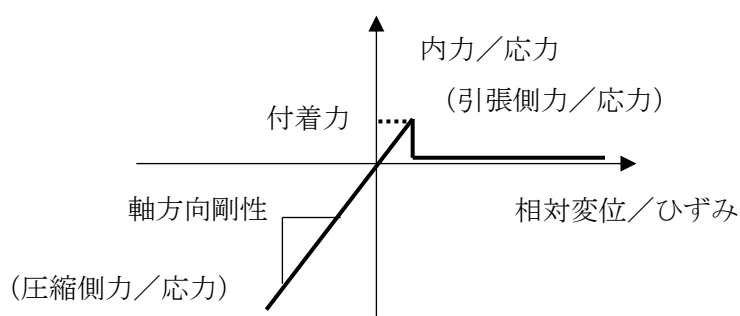
軸方向剛性で回避する場合は、感度解析により解析結果が変わらない適切な剛性値を用いる必要がある。一般的には振動アドミッタンス理論等から得られる鉛直地盤ばねから得た単位面積当たりの剛性を 50~1000 倍した値が用いられている^{付 2-16}。

付録表 2.1 ジョイント要素の構成則

Appendix Table 2.1 Constitutive laws for joint elements

	軸方向成分	せん断方向成分
圧縮側力/応力	弾性	摩擦則
引張側力/応力	付着力まで弾性、 以後剥離	付着力まで、摩擦 則、 剥離後ゼロ

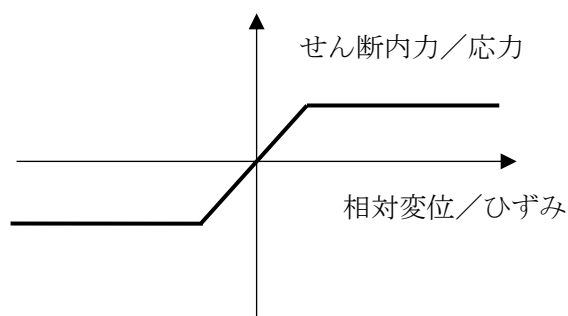
出典) 日本原子力研究開発機構、平成 31 年度原子力施設等防災対策委託費 (高経年化を考慮した建屋・機器・構造物の耐震安全性評価手法の高度化) 事業報告書、2020



出典) 日本原子力研究開発機構、平成 31 年度原子力施設等防災対策委託費 (高経年化を考慮した建屋・機器・構造物の耐震安全性評価手法の高度化) 事業報告書、2020

付録図 2.3 ジョイント要素の構成則 (軸方向成分)

Appendix Fig. 2.3 Constitutive laws for joint elements (axial direction)



相対変位/ひずみは (再) 接触時からの値

出典) 日本原子力研究開発機構、平成 31 年度原子力施設等防災対策委託費 (高経年化を考慮した建屋・機器・構造物の耐震安全性評価手法の高度化) 事業報告書、2020

付録図 2.4 ジョイント要素の構成則 (せん断方向成分)

Appendix Fig. 2.4 Constitutive laws for joint elements (shear direction)

(6) 建屋基礎浮き上がりを考慮した相互作用モデル

建屋の基礎浮き上がりは、鉛直動やロッキングの影響により基礎が底面地盤から離れる現象であり、基礎に作用する転倒モーメントや入力地震動の大きさ、建屋の埋め込み状況や配置等の実状が相互作用効果に与える影響を適切に考慮する必要がある。また、基礎浮き上がりがある程度以上に大きくなると、鉛直動やロッキングの影響により建屋の三次元的な応答が誘発されることになるため、モデル化の際には留意が必要である。

「2.1.2(3) 建屋の地震応答解析モデル」に示すように、三次元 FEM モデルによる地震応答解析では、解析の目的や解析すべき現象に応じた科学的・技術的判断が行われており、これら判断が解析結果に影響を及ぼすことがないよう確認を行う必要がある。よって、本項では、三次元 FEM モデルの設定のうち、基礎浮き上がりのモデル化に関わる範囲について、留意すべき点を以下に示す。

① 基礎浮き上がりのモデル化

建屋の基礎浮き上がりは、「2.1.2 (5) ⑤建屋と地盤の接触・剥離のモデル化」で示したように基礎と底面地盤間の接触・剥離現象のことであり、解析的には地震時に作用する軸方向の地震時の垂直圧と建屋の自重圧の関係から求められる。建屋基礎浮き上がり時には、この軸方向の剥離現象だけではなく、周辺地盤の状況によってはせん断方向の滑り現象も起こりうることから、その設定に当たってはモデル化の妥当性を確認することが望ましい。また、入力地震動の大きさや周辺地盤の拘束効果によっては、基礎浮き上がりが建屋の応答に及ぼす影響が十分小さいために、その影響を無視した場合と比較して応答値に差が生じない場合も考えられる。このような場合、実用的な手法として基礎浮き上がりを見逃した線形解析手法によるモデル化も考えられる。

基礎浮き上がりが建屋の応答に及ぼす影響を確認する方法としては、基礎浮き上がり現象を考慮したジョイント要素による非線形解析やばね要素による等価線形解析等が考えられる。これら解析法の留意点については、「2.1.2 (5) ⑤建屋と地盤の接触・剥離のモデル化」を参照されたい。また、基礎浮き上がり現象のモデル化の違いによる解析結果への影響については、本文 5.1.2 にその解析事例を示す。加えて、基礎浮き上がり現象が接地率に与える影響については、付録 3 にその解析事例を示す。

② 基礎底面の付着効果のモデル化

岩盤上に建設された建屋基礎と底面地盤間には、コンクリートを打設したことによる何らかの付着力が生じていると考えられ、付着力試験、調査研究等に基づき設定された値が基礎浮き上がりの閾値として用いられる場合がある。この基礎と底面地盤間に作用する付着力は、立地する敷地の地盤物性、均しコンクリートや基礎コンクリートの材料物性、現地での施工方法、施工時の環境等、様々な条件が複雑に影響し合うため、付着効果を考慮するに当たってはその設定の妥当性に留意する必要がある。具体的には、事業者が実施する付着力試験、調査研究等に基づき設定された値の妥当性を確認するとともに、妥当と判断した場合においても、建屋の埋め込みや地盤状況、周辺建屋の配置等の実状に応じて、適切な安全率が取られていることを確認しておくことが望ましい。

2.1.3 建屋—地盤の連成系の地震応答解析モデルの諸定数

(1) 材料定数

建屋の地震応答解析モデルの材料定数は、耐震審査ガイド「3. 建物・構築物に関する事項 3.1 使用材料及び材料定数」によること。

(2) 減衰定数

建屋の水平方向の減衰定数は、JEAG4601 (1991) 付^{2.4}の規定及び既往の研究等を参考に、RC造やS造等の構造形式等に応じた値を適切に設定していること。

建屋の鉛直方向の減衰定数は、水平方向の減衰定数に関する JEAG4601 (1991) 付^{2.4}の規定及び既往の研究等を参考に、適切に設定していること。

(3) 地盤物性値

地盤の諸定数は、JEAG4601 (1991) 付^{2.4}の規定を参考に設定していること。また、変動幅については耐震審査ガイド「3. 建物・構築物に関する事項 3.1 使用材料及び材料定数」によること。

【付録解説】

(1) 材料定数

三次元 FEM モデルにおける地震応答解析モデルの材料定数の設定に当たっては、耐震審査ガイド「3. 建物・構築物に関する事項 3.1 使用材料及び材料定数」(2013) 付^{2.1}によることを基本とする。具体的には、コンクリート及び鋼材の材料定数及び許容応力度の設定については、日本建築学会の「原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」(2005) 付^{2.3}、鉄骨の材料定数及び許容応力度の設定については、同学会の「鋼構造設計規準 同解説」(2005) 付^{2.17}や日本機械学会の「JSME S NC1 規格」(2017) 付^{2.18}等の発電用軽水型原子炉施設に関連する指針が参考になる。

(2) 減衰定数

三次元 FEM モデルにおける地震応答解析モデルの減衰定数の設定に当たっては、JEAG4601 (1991) 付^{2.4}の規定及び既往の研究等を参考に、水平方向及び鉛直方向について構造材料や構造形式に応じた値が適切に設定されていることを確認する。また、「2.1.2(3)⑦ RC材料の非線形挙動のモデル化」で示すコンクリートのひび割れ等の RC の非線形性を等価線形解析等の手法によって考慮する場合は、構造部材の非線形化に伴う履歴減衰への影響に留意する必要がある。

(3) 地盤物性値

三次元 FEM モデルにおける地震応答解析モデルの地盤物性値の設定に当たっては、JEAG4601 (1991) 付^{2.4}の規定を参考に、立地する敷地の地盤調査結果及び室内試験結果に基づいた値が適切に設定されていることを確認する。また、これら調査結果及び試験結果のばらつきについては、耐震審査ガイド「3. 建物・構築物に関する事項 3.1 使用材料及び材料定数」 付^{2.1}に基づいて適切な変動幅が設定されていることを確認する。

2.2 入力地震動

建屋の地震応答解析モデルへの入力地震動を適切に算定していることを確認する。

(1) 基本事項

水平方向及び鉛直方向の入力地震動は、解放基盤表面のレベルと建屋の基礎の位置関係及び埋め込みの状況を考慮し、JEAG4601（1991）^{付2-4}の規定を参考に、適切に算定していること。

(2) 基本方針

解放基盤表面からの地震波の伝播特性を適切に考慮するとともに、必要に応じて地盤の非線形応答に関する動的変形特性を考慮すること。また、敷地における観測記録に基づき、入力地震動の算定の妥当性を示すこと。

(3) 留意点

地盤の地震応答解析モデルの設定及び入力地震動の算定に当たっては、地盤の安定性評価との整合性に留意していること。

(4) 地盤物性値

入力地震動の算定に用いる地盤の地震応答解析モデルの物性値は、JEAG4601（1991）^{付2-4}の規定を参考に設定していること。また、変動幅については耐震審査ガイド「3.1 建物・構築物に関する事項 3.1 使用材料及び材料定数」（2013）^{付2-1}によること。

【付録解説】

(1) 基本事項

三次元 FEM モデルにおける地震応答解析モデルへの水平方向及び鉛直方向の入力地震動の設定に当たっては、解放基盤表面のレベルと建屋の基礎の位置関係及び埋め込みの状況を考慮し、JEAG4601（1991）^{付2-4}の規定を参考に、適切に算定されていることを確認する。具体的には、解放基盤表面で設定される基準地震動により、一次元波動論で算定される基礎底面位置の地震応答を用いる方法や解放基盤表面に基準地震動を定義し、FEM 等の離散的手法による地盤モデルを介して求まる基礎底面位置の地震応答を用いる方法等が考えられ、解析の目的や解析すべき現象に応じて適切な手法が選択されていることを確認する。

(2) 基本方針

三次元 FEM モデルでは、解放基盤以浅の支持地盤を FEM 等の離散的手法でモデル化し、地震波の伝播特性を地震応答解析モデル上で適切に考慮していることを確認する。また、立地する敷地の地盤構造（地層の傾斜等の地質構造の不整形性）によっては同じ敷地内でも観測される地震動強さが大きくなる可能性があるため^{付2-19}、建屋直下の地質構造が建屋の応答特性に与える影響が想定される場合には、地震観測記録等を基にその影響が適切に評価されているか確認を行う。加えて、地震時に表層地盤や解放基盤以浅の支持地盤の剛性低下が懸念される場合には、地震動の大きさに応じて「2.1.2(2) 留意点」に示す地盤のひずみ度に応じたせん断弾性係数及び減衰定数の非線形性が動的変形特性として考慮されていることを確認する。また、地震観測記録による再現解析等の手法により、これら手法に基づく入力地震動の算定の妥当性を確認する。

(3) 留意点

FEM ソリッド要素等の離散的手法による地盤モデルの設定及び入力地震動の算定に当たっては、別途実施される地盤の安定性評価との結果と整合していることを確認する。

(4) 地盤物性値

三次元 FEM モデルにおける入力地震動の算定に用いる地震応答解析モデルの地盤物性値の設定に当たっては、JEAG4601 (1991) ^{付2-4}の規定を参考に、立地する敷地の地盤調査結果及び室内試験結果に基づいた値が適切に設定されていることを確認する。また、これら調査結果及び試験結果のばらつきについては、耐震審査ガイド「3. 建物・構築物に関する事項 3.1 使用材料及び材料定数」(2013) ^{付2-1}に基づいて適切な変動幅が設定されていることを確認する。

2.3 水平方向及び鉛直方向地震応答解析結果の組合せ

各方向の入力地震動の位相特性や建屋の三次元応答特性により応答の同時性を考慮する必要がある場合は、各方向の各時刻歴での応答値を逐次重ね合わせる等の方法により、応答の同時性を考慮していること。

【付録解説】

三次元 FEM モデルによる地震応答解析結果に大きな影響を与える要因の一つとして水平 2 方向及び鉛直方向の地震動の組合せがある。質点系モデルの解析では各方向成分に対して地震応答解析を行い、重ね合わせにより三次元応答の効果を評価しているが、三次元 FEM モデルによる解析では水平 2 方向及び鉛直方向の同時入力が可能となるため、これら入力の設定方法に留意する必要がある。また、三次元 FEM モデルによる地震応答解析においては、3 方向成分の入力地震動を独立に作用させた解析を行い、各方向の各時刻歴での応答値を逐次重ね合わせる等の方法を用いることも考えられるが、非線形解析においては 3 方向同時入力が基本となるため、その組合せ方法には留意する必要がある。

【付録参考】

原子力規制委員会における「発電用軽水型原子炉施設の地震・津波に関わる規制基準に関する検討チーム」会合^{付 2-20}では、水平 2 方向の挙動による建築物の損傷の可能性について議論され、同検討チームの会合では、埋め込まれた建屋地下外壁に作用する地盤の水平 2 方向挙動の影響が指摘されている。この時、熊本地震の被害例や、一般的なラーメン構造の損傷が水平 2 方向の地震動入力により早まることが紹介された。これらはいずれも、建屋や地盤の弾塑性挙動は水平 2 方向及び鉛直方向の地震動の同時入力による影響を受けるという指摘である。

ASCE/SEI4-16 (2017) ^{付 2-11}では、線形範囲の地震応答解析に対し、三次元応答の効果を評価する手法として、水平 2 方向及び鉛直方向の応答の二乗和平方根 (Square Root Sum of Squares、以下「SRSS」という。) により評価する方法を用いるか、各方向の各時刻歴での応答値の逐次重ね合わせによる方法を用いるか、各方向の絶対値の最大値の 100-40-40 組合せルールを用いるか、の 3 つの手法で検討するとしている。

原子力規制委員会による原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査のために提出された工事計画認可申請においては、水平 2 方向及び鉛直方向の地震力の組合せに関する検討が行われている。具体的には川内原子力発電所 1 号機 (2014) ^{付 2-21}をはじめとして、PWR の原子炉建屋については、水平 2 方向及び鉛直方向の地震力が影響する部位を以下のように抽出し、それぞれの方向の応答の組合せを考慮した検討に係る影響評価の事例が示されている。

- ・ 軸力の集中する隅柱など
- ・ 土圧を負担する地下耐震壁、水圧を負担するピットなど
- ・ 面内方向の荷重に加え、面外慣性力が大きい壁
- ・ ねじれ挙動が想定される建屋・構築物

2.4 地震応答解析結果の評価

(1) 基本事項

建屋の地震応答解析結果の評価は、規制基準の要求事項に留意して、JEAG4601（1991）付2.4等の規定を参考に設定していること。

(2) 留意点

建屋や支持地盤の剛性低下、建屋と地盤間の剥離や基礎浮き上がりによる相互作用効果等に留意して、現実的な応答に即した評価が建屋の振動性状及び応答性状に及ぼす影響を適切に把握し、必要に応じて、その評価の妥当性について検討していること。非線形解析においては、地震応答解析で考慮する荷重の載荷順序によって得られる結果が異なるため、これら影響を適切に把握し、現実的な応答に即して検討が行われているか確認する。

(3) 建屋の評価

建屋の評価に当たっては、解析の目的や解析すべき現象等に留意して、建屋の地震時挙動が適切に評価されていることを確認する。

① 全体評価

建屋の全体評価では、施設の構造形式、壁や床部材の支点間隔、機器搬入口や吹き抜け等の壁又は床開口、各層の壁部材の配置等の実状に留意して、コンクリートのひび割れに伴う RC 材料及び部材の塑性変形並びにねじれ挙動が建屋の地震時挙動に及ぼす影響を適切に把握し、現実的な応答に即して検討していること。また、入力地震動による地震力に対して、建屋全体としての変形能力を確認していること。

② 局所評価

建屋の局所評価では、施設の構造形式、壁や床部材の支点間隔、機器搬入口や吹き抜け等の壁又は床開口、各層の壁部材の配置等の実状に留意して、大スパンの壁や床、機器搬入口及び吹き抜けに隣接する壁又は床の面外方向にはらみだす挙動等が構造体や機器・配管系の地震時挙動に及ぼす影響を適切に把握し、現実的な応答に即して検討していること。

(4) 地盤の評価

地盤の評価に当たっては、解析の目的や解析すべき現象等に留意して、建屋の基礎地盤の支持性能が適切に評価されていることを確認する。

① 基礎地盤の接地圧の評価

基礎地盤の接地圧の評価では、建屋基礎上面に配置される断面の大きい壁部材や柱部材の配置等の実状に留意して、入力地震動により生じる基礎底面の鉛直方向の地震力が基礎全体の地震時挙動に及ぼす影響を適切に把握し、現実的な応答に即して検討していること。

② 建屋基礎のすべり安定性評価

建屋基礎のすべり安定性評価では、建屋の埋め込み状況や周辺建屋等の実状に留意して、入力地震動により生じる建屋基礎底面に作用する水平方向の地震力が基礎全体の地震時挙動に及ぼす影響を適切に把握し、現実的な応答に即して検討していること。

(5) 建屋と地盤との相互作用を考慮した評価

建屋と地盤との相互作用を考慮した評価の設定に当たっては、建屋の埋め込み状況や配置等の実状を考慮して、相互作用効果による影響が適切に評価されていることを確認する。

① 周辺建屋の隣接効果の評価

周辺建屋の隣接効果の評価では、建屋の埋め込み状況や地盤状況、周辺建屋の配置等の実状に留意して、隣接建屋と地盤間及び地盤と建屋間の相互作用による影響を適切に把握し、現実的な応答に即して検討していること。また、Sクラスの建屋やSクラスの機器配管系の間接支持機能を要求される構造体が隣接する場合には、構造物全体及び構造物としての変形能力についても確認を行っていること。

② 建屋に作用する浮力の評価

建屋に作用する浮力の評価では、建屋周囲の地盤調査結果及び室内試験結果に基づく地下水位の実状に留意して、地中内部の建屋に作用する浮力の効果を適切に検討していること。

(6) 基礎浮き上がりを考慮した評価

基礎浮き上がりを考慮した評価の設定に当たっては、基礎に作用する転倒モーメントや入力地震動の大きさ、建屋の埋め込み状況や配置等の実状を考慮して、相互作用効果による影響が適切に評価されていることを確認する。

① 基礎に作用する転倒モーメントの評価

基礎に作用する転倒モーメントの評価では、「2.1.2 (6) ① 基礎浮き上がりのモデル化」に示すモデル化手法に留意して、地震応答解析手法の違いによる影響を把握し、現実的な応答に即して適切に検討していること。

② 基礎の接地率の評価

基礎の接地率の評価では、「2.1.2 (6) ① 基礎浮き上がりのモデル化」に示すモデル化手法に留意して、地震応答解析手法の違いによる影響を把握し、現実的な応答に即して適切に検討していること。また、建屋基礎底面に作用する地震力及び地下水による浮力等の荷重の影響が無視できない場合は、その影響を適切に考慮していること。

【付録解説】

(1) 基本事項

建屋－地盤連成系の三次元 FEM モデルによる地震応答解析では、既往の規制基準の要求事項に留意して、JEAG4601 (1991) ^{付2.4}等の規定を参考にその解析結果が適切に評価されていることを確認する。また、「2.3 水平方向及び鉛直方向地震応答解析結果の組合せ」で定める水平 2 方向及び鉛直方向の地震力の組合せによって引き起こされる建屋の三次元的な応答特性が建屋及び耐震重要設備の耐震安全性に与える影響について、適切に評価が行われているか留意が必要である。

(2) 留意点

三次元 FEM モデルによる地震応答解析結果の評価では、入力地震動の大きさや周辺地盤の拘束の程度によって、建屋や支持地盤の剛性低下、地下外壁と側面地盤間の剥離・滑りや基礎と底面地盤間の基礎浮き上がりが誘発され、構造物や機器・配管系の応答に大きな影響を及ぼす可能性がある。一方で、「2.1.2 (3) 建屋の地震応答解析モデル」に示すように、三次元

FEM モデルによる地震応答解析では、解析の目的や解析すべき現象に応じた科学的・技術的判断が行われており、これら判断が解析結果に悪影響を及ぼさないことを確認した上で、現実的な応答に即して建屋の振動性状及び応答性状を適切に評価することが重要になる。また、「2.1.1 (3) 地震応答解析手法及び地震応答解析モデルの検証と妥当性」に示すように、三次元 FEM モデルによる地震応答解析結果の評価においても、事業者が選択する地震応答解析手法及び地震応答解析モデルの妥当性が地震観測記録等の再現解析によって十分に検証された上で、評価が行われていることが望ましい。

三次元 FEM モデルによる非線形地震応答解析では、地震荷重以外の荷重（温度荷重、圧力荷重等）も組合せて地震応答解析を行うことが可能であるため、これら荷重を組合せて地震応答解析を行う場合には、その載荷順序に留意した検討が行われているか確認する。このため、非線形地震応答解析で得られた結果を評価する場合には、想定される荷重組合せと荷重載荷順序が現実的な応答に即して適切に考慮されているか確認を行うことが望ましい。

(3) 建屋の評価

発電用軽水型原子炉施設における建屋の評価では、解析の目的、解析すべき現象等に応じて三次元 FEM モデルによる地震時挙動を適切に評価することが重要になる。よって、本項では、三次元 FEM モデルによる地震応答解析結果の評価のうち、建屋の評価に関わる範囲について、留意すべき点を以下に示す。

① 全体評価

建屋の全体評価では、施設の構造形式、壁や床部材の支点間隔、機器搬入口や吹き抜け等の壁又は床開口、各層の壁部材の配置等の実状に応じてモデル化された三次元 FEM モデルを用いて、その動的な応答特性を固有値解析や伝達関数等によって評価することが望ましい。また、建屋の全体的な振動性状及び応答性状を把握するため、各層の床ごとに最大応答加速度や最大応答変位等の応答値を評価し、高さ方向の分布傾向を評価することも考えられる。応力解析モデルへの地震力の受け渡しを力で行う場合には、最大応答せん断力分布や最大応答曲げモーメント分布についても評価を行う必要がある。このとき、平面内の応答値のばらつきはコンタープロット等で確認するとともに、ヒストグラム等で図示するとわかりやすい。ヒストグラムのような統計的に得られる頻度図と理論的な度数分布を比較することでそのばらつき具合を評価することも考えられる。

三次元 FEM モデルによる地震応答解析では、「2.1.2 (3) ⑦ RC 材料の非線形挙動のモデル化」に示す RC の非線形性を考慮した三次元的な応答特性の評価が可能である。入力地震動の大きさによっては、コンクリートのひび割れによる剛性低下が建屋の地震時挙動に大きな影響を及ぼすため、上述の評価の際には留意が必要になる。評価に当たっては、コンクリートのひび割れに伴う RC 材料及び部材の非線形化、また、ねじれ挙動による建屋全体の応答が、隣接する建屋に衝突する等の波及的影響を及ぼさないことを上述の評価と併せて確認することが望ましい。

② 局所評価

建屋の局所評価では、「2.4(3)① 全体評価」に示す全体系の評価とは別に、大スパンの壁や床、機器搬入口及び吹き抜けに隣接する壁又は床の面外方向にはらみだす挙動が構造体や機器・配管系の地震時挙動に及ぼす影響を確認する。構造体については、その局所的な面外方向へのはらみだし挙動やねじれ挙動を把握するため、プール壁や吹き抜け、コーナー部等の周辺部位を、機器・配管系については、その局所的な振動性状及び応答性状を把握するためペDESTALやRPV等の重要機器が取り付く接合部の周辺部位を、その重要度に応じて個別に評価することが望ましい。

(4) 地盤の評価

発電用軽水型原子炉施設における地盤の評価では、解析の目的、解析すべき現象等に応じて三次元 FEM モデルによる地震時挙動が基礎地盤の支持性能に与える影響を適切に評価することが重要になる。よって、本項では、三次元 FEM モデルによる地震応答解析結果の評価のうち、地盤の評価に関わる範囲について、留意すべき点を以下に示す。

① 基礎地盤の接地圧の評価

基礎地盤の接地圧の評価では、建屋基礎上面に配置される断面の大きい壁部材や柱部材の配置等の実状に応じてモデル化された三次元 FEM モデルを用いて、入力地震動によって生じる基礎浮き上がり挙動を適切に把握することが重要になる。このとき、基礎底面に作用する接地圧の平面的なばらつきを把握するため、コンタープロット等で応答値を整理するとわかりやすい。

② 建屋基礎のすべり安定性評価

建屋基礎のすべり安定性評価では、「2.1.2(5) 建屋と地盤との相互作用モデル」に示す建屋の埋め込み状況や周辺建屋等の実状に応じてモデル化された三次元 FEM モデルを用いて、入力地震動により生じる建屋基礎底面の水平方向の地震力が基礎全体のすべり挙動に及ぼす影響を適切に把握した上で、現実的な応答に即してすべり安定性を評価することが望ましい。このとき、基礎底面に作用する水平方向の地震力の平面的なばらつきを把握するため、コンタープロット等で応答値を整理するとわかりやすい。また、建屋の埋め込み形状や周辺地盤の不整形性、周辺建屋の隣接効果等によっては、地下外壁に作用する地震時土圧（静止土圧＋地震時増分土圧）が建屋のすべり安定性評価に大きな影響を及ぼす可能性があるため、その影響には留意が必要である。また、立地する敷地条件によっては、基礎底面以浅に地下水が湧出している場合があり、その影響が無視できない場合には、その影響が適切に考慮されているか確認する必要がある。

(5) 建屋と地盤との相互作用を考慮した評価

発電用軽水型原子炉施設における建屋と地盤との相互作用を考慮した評価では、建屋の埋め込み状況や配置等の実状に応じて三次元 FEM モデルによる地震時挙動がこれら相互作用効果に与える影響を適切に評価する必要がある。よって、本項では、三次元 FEM モデルによる地震応答解析結果の評価のうち、建屋と地盤との相互作用の評価に関わる範囲について、

留意すべき点を以下に示す。

① 周辺建屋の隣接効果の評価

周辺建屋の隣接効果の評価では、建屋の埋め込み状況や地盤状況、周辺建屋の配置等の実状に応じてモデル化された三次元 FEM モデルを用いて、隣接建屋と地盤間及び地盤と建屋間の相互作用が地震時挙動に及ぼす影響を適切に把握する必要がある。また、立地する敷地条件によっては、周辺建屋の隣接効果が建屋周辺の埋め戻し土やマンメイドロック等の地盤に作用する地震時増分土圧に大きな影響を及ぼす可能性があるため、その評価には留意が必要である。

S クラスの建屋や S クラスの機器・配管系の間接支持機能を要求される構造体が隣接する場合には、衝突等による波及的影響がこれら構造体に与える影響がないことを確認する。

② 建屋に作用する浮力の評価

建屋に作用する浮力の評価では、建屋周囲の地盤調査結果及び室内試験結果に基づく地下水位の実状に応じて、地中内部の建屋に作用する浮力を評価する。立地する敷地条件によっては、基礎底面以浅に地下水が湧出している場合があり、その影響が無視できない場合には、その影響を適切に考慮する。

(6) 基礎浮き上がりを考慮した評価

発電用軽水型原子炉施設における基礎浮き上がりを考慮した評価では、基礎に作用する転倒モーメントや入力地震動の大きさ、建屋の埋め込み状況や配置等の実状に応じて三次元 FEM モデルによる地震時挙動が基礎浮き上がりに与える影響を適切に評価することが重要になる。よって、本項では、三次元 FEM モデルによる地震応答解析結果の評価のうち、基礎浮き上がりの評価に関わる範囲について、留意すべき点を以下に示す。

① 基礎に作用する転倒モーメントの評価

基礎に作用する転倒モーメントの評価では、「2.1.2 (6) ① 基礎浮き上がりのモデル化」に示すモデル化手法に留意して、適用する地震応答解析手法の違いによる影響を適切に把握した上で、現実的な応答に即して転倒モーメントを評価する。建屋の埋め込み形状や周辺地盤の不整形性、周辺建屋の隣接効果等によっては、基礎底面に作用する地震時増分土圧が建屋の転倒モーメントに大きな影響を及ぼす可能性があるため、その影響には留意が必要である。

② 基礎の接地率の評価

基礎に作用する接地率の評価では、「2.1.2 (6) ① 基礎浮き上がりのモデル化」に示すモデル化手法に留意して、適用する地震応答解析手法の違いによる影響を適切に把握した上で、現実的な応答に即して接地率を評価する。このとき、建屋の埋め込み形状や周辺地盤の不整形性、周辺建屋の隣接効果等によっては、基礎底面に作用する地震時の垂直圧に大きな影響を及ぼす可能性があるため、その影響には留意が必要である。また、立地す

る敷地条件によっては、基礎底面以浅に地下水が湧出している場合があり、その影響が無視できない場合には、その影響が適切に考慮されているか確認を行う。

付録2の参考文献一覧

- 付 2-1 原子力規制委員会、耐震設計に係る工認審査ガイド、原管地発第 1306195 号、平成 25 年 6 月 19 日
- 付 2-2 日本原子力研究開発機構、平成 31 年度原子力施設等防災対策委託費（高経年化を考慮した建屋・機器・構造物の耐震安全性評価手法の高度化）事業報告書、2020
- 付 2-3 日本建築学会、原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、2005
- 付 2-4 日本電気協会、原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG 4601-1991 追補版、平成 3 年 12 月 20 日
- 付 2-5 K.J. Bathe, Finite Element Procedures in Engineering Analysis, Prentice-Hall, 1982
- 付 2-6 O.C. Ziewiewicz, et al., The Finite Element Method”, Vol. 2, McGraw-Hill Book Company, 1989
- 付 2-7 Schnabel, et al., SHAKE-A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites, Report No. EERC72-12, EERC, 1972
- 付 2-8 日本電気協会、原子力発電所耐震設計技術規程 JEAC 4601-2015、平成 29 年 3 月 30 日
- 付 2-9 東京電力株式会社、柏崎刈羽原子力発電所 7 号機「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」の改訂に伴う耐震安全性評価結果報告書（改訂 1）のうち 6.2.3.2 局所に発生する応力の影響、2009)
- 付 2-10 日本建築学会、入門・建物と地盤との動的相互作用、1996
- 付 2-11 ASCE, Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures / American Society of Civil Engineers, ASCE/SEI 4-16, 2017
- 付 2-12 B. Jeremić, et al., Time domain simulation of soil-foundation-structure interaction in non - uniform soils, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 38(5), pp. 699-718, 2009
- 付 2-13 EPRI, Program on Technology Innovation. Effect of Seismic Wave Incoherence on Foundation and Building Response, Technical Report, 2006.12
- 付 2-14 Ostadan, F, et al., Soil-Structure Interaction Analysis Including Ground Motion Incoherence Effects, 18th International Conf. on Structural Mechanics in Reactor Technology, 2007.5
- 付 2-15 U.S. NRC, NUREG-800, Standard Review Plan 3.7.2 SEISMIC SYSTEM ANALYSIS, 2013.9, Revision 4
- 付 2-16 中村他、基礎浮上りを考慮した 3 次元 FEM モデルによる原子力施設建屋の水平・鉛直同時入力時の応答性状に関する検討、構造工学論文集、Vol.54B、pp.581-589、2008
- 付 2-17 日本建築学会、鋼構造設計規準・同解説、2005
- 付 2-18 日本機械学会、発電用原子力設備規格 設計・建設規格（2017 追補）
- 付 2-19 植竹他、柏崎刈羽原子力発電所の褶曲構造が新潟県中越沖地震の地震動特性に与えた影響ー地下構造のモデル化と差分法による波動伝播評価ー、日本建築学会構造系論文集、2011
- 付 2-20 原子力規制委員会、発電用軽水型原子炉施設の地震・津波に関わる規制基準に関する検討チーム 第 7 回会合、議事録、2013、
<https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/10953979/www.nsr.go.jp/data/000050769.pdf> (2020 年 4 月 28 日確認)
- 付 2-21 九州電力株式会社、川内原子力発電所 1 号機 工事計画認可申請（補正）の概要について 補足説明資料、第 150 回原子力発電所の新規規制基準適合性に係る審査会

合、資料 3-2、2014、
<https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11126546/www.nsr.go.jp/data/000036063.pdf> (2020
年 4 月 20 日確認)

付録3 質点系モデルにおける側面回転ばねの適用範囲及び適用条件に関する考察

本付録では、本文 2.4 に基づき、建屋－地盤間の接触・剥離現象のモデル化を影響因子とした場合の質点系モデルにおける側面地盤の回転拘束効果と三次元 FEM モデルにおける側面地盤の回転拘束効果との関係性について、本文 5.1.1 の筆者らによる地盤 TLEM の周波数領域の感度解析の結果からその影響を考察した。

1. 考察の方針

質点系モデルにおける側面回転ばねの適用範囲及び適用条件については、本文 1.1.3 で述べたとおり、Novak の方法による側面水平ばねの適用性に関する比較等が行われている一方で、側面回転ばねの適用性に関する知見が少ないことが指摘されている。よって、本付録では、この質点系モデルにおける側面回転ばねの適用範囲及び適用条件の判断目安となる手法について、以下に示す方法によりその適用性を試行的に確認した。

付録図 3.1 に Novak の側面地盤ばねを算定する際の概念図を示す。図より、Novak の側面回転ばねは、建屋に回転挙動が生じた際に地下外壁－側面地盤間に作用する上下方向の外力に対するせん断抵抗であることがわかる。このせん断抵抗は、三次元 FEM モデル上では、地下外壁－側面地盤間の上下方向の境界条件を完全固着と仮定することで生じる力であり、実現象に照らすと、当該方向の滑り現象を抑える効果を期待した仮定条件と解釈することができる。一般に、地下外壁－側面地盤間には建屋埋め込み部の施工状況や地盤状況等に応じた摩擦抵抗力が作用しているものと考えられ、この摩擦抵抗力が上下方向の外力を上回ることによって滑り現象の発生は抑えられるものと推定される。すなわち、Novak の側面回転ばねの適用範囲及び適用条件を判断する上では、この地下外壁－側面地盤間に生じる上下方向の外力と摩擦抵抗力の関係を明らかにすることが重要になると考えられる。よって、筆者らは、この上下方向に生じる外力を三次元 FEM モデルの地下外壁－側面地盤間に配したばね要素から出力するとともに、摩擦抵抗力を側面地盤から作用する静止土圧と動摩擦係数から求めることで、剥離・滑り範囲を三次元 FEM モデルから評価した。また、三次元 FEM モデルから求まる地下外壁－側面地盤間の剥離・滑り範囲を質点系モデルの側面地盤ばねの接続範囲に反映することで、三次元 FEM モデルの剥離・滑り範囲に相当する質点系モデルの応答を評価した。また、質点系モデルから得られた応答と三次元 FEM モデルから得られた応答を比較することで、質点系モデルにおける側面回転ばねの適用性について考察を行った。

本付録で使用する地震動は、本文 3.2.1 で定める耐専スペクトルによる方法に基づき得られた水平動及び鉛直動とし、三次元 FEM モデルに対しては水平 2 方向及び鉛直方向の 3 方向入力、質点系モデルに対しては水平 1 方向入力として地震応答解析を行った。

2. 質点系モデルの作成

本項で使用する質点系モデルの概要を以下に示す。なお、本項では、本文 5.1.1 の標準的な地盤及び入力地震動の条件下における地盤 TLEM による基準モデル（周波数領域）に対して得られた感度解析の結果を基に質点系モデルの作成を行った。

2.1 三次元FEMモデルから求まる地下外壁－側面地盤間の剥離・滑り範囲

付録図 3.2 に三次元 FEM モデルから求まる地下外壁－側面地盤間の剥離・滑り範囲を

示す。地下外壁－側面地盤間の剥離範囲は、三次元 FEM モデルの地下外壁に作用する水平方向の最大地震時増分土圧と静止土圧の差分から評価した。また、地下外壁－側面地盤間の滑り範囲については、上述の静止土圧に東電 (2016) 付 3-1 に基づく動摩擦係数 ($\mu_d=0.35$) を掛け合わせた動摩擦力と上下方向の地震荷重による最大せん断応力の差分から評価した。これら剥離・滑り範囲の設定に当たっては、科学的・技術的に保守的なレベルで剥離・滑り範囲を判定するため、地下外壁毎に剥離・滑り範囲が最大となるよう発生時刻に依らずその範囲を設定した。

2.2 側面地盤ばね及び側面回転ばねの設定

付録図 3.3 に①の剥離・滑り範囲を反映した質点系モデルを示す。付録図 3.3 では、付録図 3.2 の結果に基づき、地下外壁－側面地盤間の剥離範囲を地表面からおよそ 10m の深さに、滑り範囲を地表面からおよそ 18m の深さに設定した。

3. 地震応答解析結果の比較

3.1 伝達関数

付録図 3.4 にクレーン階の伝達関数の比較を示す。付録図 3.4 は、地盤 TLEM によってモデル化された周波数領域の三次元 FEM モデルと付録図 3.3 の時間領域の質点系モデルによる伝達関数の比較である。

三次元 FEM モデルによる剥離・滑り範囲を反映した質点系モデルの伝達関数は、付録図 3.4 が示すように、三次元 FEM モデルと比較して、NS 方向の卓越振動数ではほぼ一致する傾向が見られた。EW 方向の卓越振動数については、三次元 FEM モデルの卓越振動数に対し、やや低振動側にピークが現れているものの、全体的に良く一致した傾向を示した。これら結果より、筆者らは、本質点系モデルと三次元 FEM モデルの主要な振動特性はおおむね一致しているものと推定した。

3.2 最大応答加速度

付録図 3.5 に最大応答加速度分布の比較を示す。付録図 3.5 は、地盤 TLEM によってモデル化された周波数領域の三次元 FEM モデルと付録図 3.3 の時間領域の質点系モデルによる最大応答加速度分布の比較である。

三次元 FEM モデルによる剥離・滑り範囲を反映した質点系モデルの最大応答加速度分布は、付録図 3.5 が示すように、三次元 FEM モデルと比較して、NS 方向でクレーン階の最大応答加速度を除き、おおむね一致した傾向が見られた。また、EW 方向の最大応答加速度については、2 階までで比較的良い一致傾向が見られたものの、それより上階で三次元 FEM モデルの応答が質点系モデルの応答をやや上回り、また、クレーン階でその差が顕著に現れた。これについて、筆者らは、三次元 FEM モデルの屋上階の屋根スラブがモデル化されていない影響及び当該階他で小梁等の二次部材がモデル化されていない影響を考え、

実建屋と比較した場合に、屋上階及びクレーン階の面内剛性が著しく低く評価されている可能性を推定した。また、EW 方向の最大応答加速度について、筆者らは、2 階より上階に配置されている使用済燃料プールの影響と考え、このプールを構成する極厚の壁のモデル化が実建屋のそれと比較して、剛域の設定方法や考え方等に差があったため、結果として、三次元 FEM モデルの最大応答加速度に影響を及ぼしたものと推定した。

3.3 床応答加速度スペクトル

付録図 3.6 に床応答加速度スペクトルの比較を示す。付録図 3.6 は、地盤 TLEM によってモデル化された周波数領域の三次元 FEM モデルと付録図 3.3 の時間領域の質点系モデルによる床応答加速度スペクトルの比較である。

三次元 FEM モデルによる剥離・滑り範囲を反映した質点系モデルの床応答加速度スペクトルは、付録図 3.6 が示すように、三次元 FEM モデルと比較して、NS 方向及び EW 方向共に 0.1~0.2 秒付近の周期帯で最大応答加速度がやや小さくなる傾向が見られたものの、両者は比較的良く一致する傾向を示した。これについて、筆者らは、②と同様に、屋上階や使用済燃料プール周りの壁のモデル化が当該周期帯に影響を及ぼしているものと推定した。

3.4 接地率

付録図 3.7 に接地率の比較を示す。このとき、質点系モデル（時間領域）による接地率は、JEAG4601（1991）^{付 3-2}に基づき、地震応答解析結果の最大転倒モーメントを用いて算定を行った。また、三次元 FEM モデルによる接地率は、地震時の最大垂直圧と鉛直震度 1.0 の慣性力から求まる自重圧との差分が負（引張）になる領域を基礎浮き上がり範囲と定義し、基礎浮き上がり範囲が最大となる時刻に対して接地率を算定した。

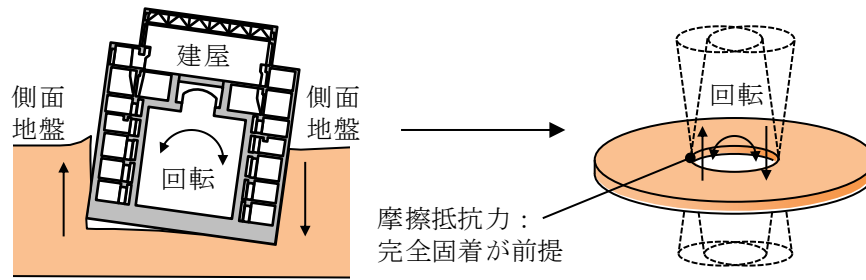
付録図 3.7 によると、基礎浮き上がり範囲が最大となる時刻は、質点系モデルが 19.51 秒であり、そのときの接地率は 80.1% となった。このとき、質点系モデルの接地率は、NS 方向（80.1%）及び EW 方向（83.0%）のうち、値の小さい NS 方向を採用した。一方、三次元 FEM モデルについては、基礎浮き上がり範囲が最大となる時刻が 23.32 秒、そのときの接地率が 83.7% となった。基礎浮き上がりが生じている範囲は、NS 方向の地震動を南→北方向、EW 方向の地震動を東→西方向に同位相で入力した関係で、南東面にその広がりが見られた。

これら結果より、筆者らは、本質点系モデルと三次元 FEM モデルによる基礎浮き上がり挙動は全体的にはおおむね一致しているものと推定した。

4. まとめ

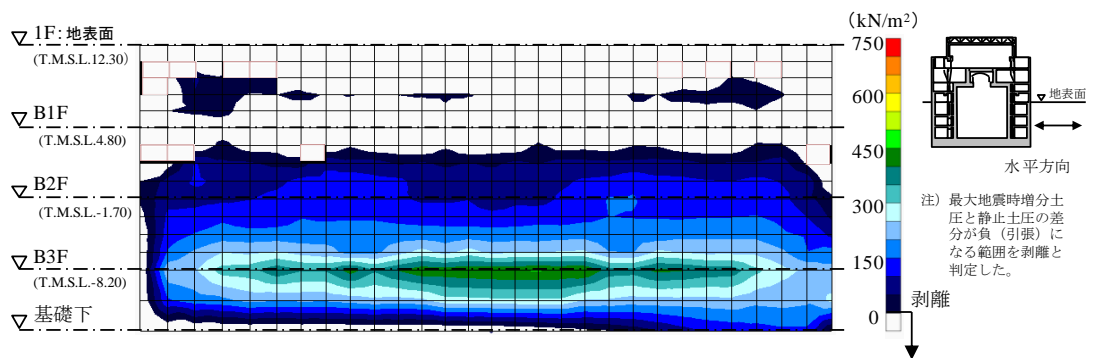
質点系モデルにおける側面回転ばねの適用範囲及び適用条件の判断目安となる手法について、三次元 FEM による周波数領域の地震応答解析結果からその適用性を試行的に考察し

た。三次元 FEM モデルとその剥離・滑り範囲を考慮した質点系モデル（時間領域）の伝達関数、最大応答加速度、床応答スペクトル、接地率の比較を行い、それら応答には、クレーン階及び EW 方向の一部で三次元 FEM モデルのモデル化に起因すると考えられる応答の違いが見られるものの、全体的におおむね一致した結果にあることを確認した。これら結果より、質点系モデルにおける側面地盤の回転拘束効果と三次元 FEM モデルにおける側面地盤の回転拘束効果には一定の関係があり、剥離・滑りの影響を三次元 FEM モデルによる周波数領域の地震応答解析結果から本付録 1. に示す方針に従ってその範囲を評価することで、両モデルは同等の結果となることを確認した。これにより筆者らは、質点系モデルにおける側面回転ばねの適用性を確認する 1 つの方法として、時刻歴非線形解析によらない、予め剥離・滑りの影響を適切に考慮した三次元 FEM モデルによる周波数領域の地震応答解析が有効になりうる可能性があることを確認した。

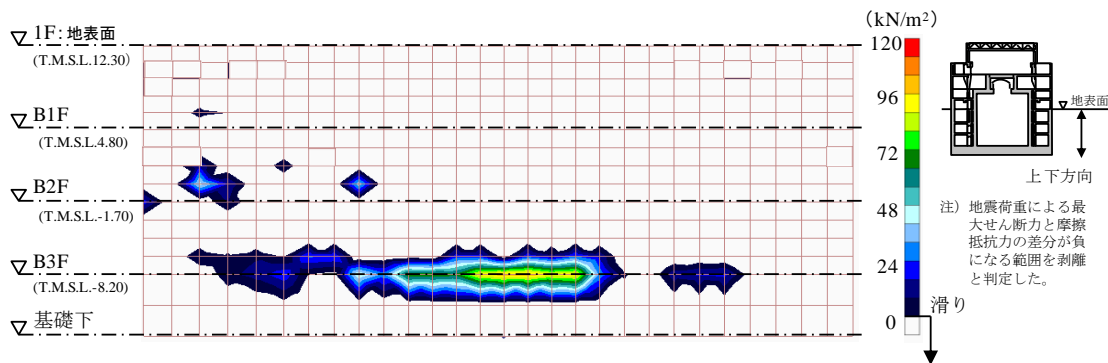


付録図 3.1 Novak の側面地盤ばねの算定概念図

Appendix Fig. 3.1 Conceptual diagram of the calculation method for soil springs based on NOVAK



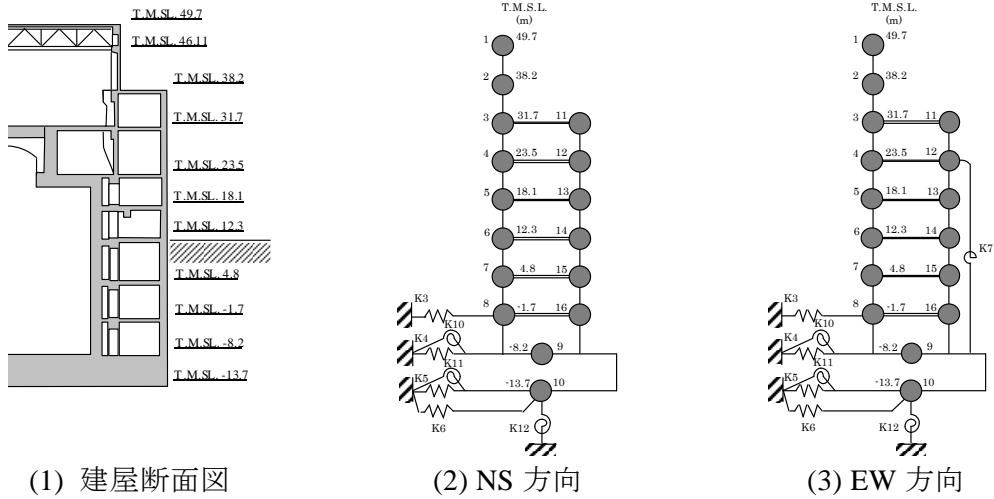
(1) 剥離範囲



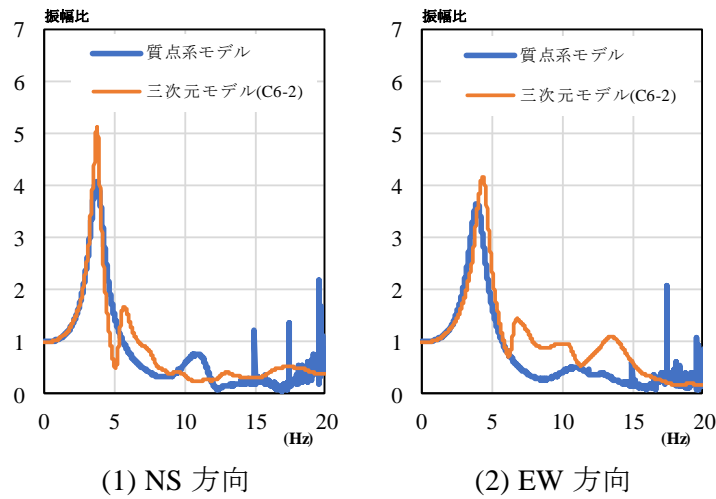
(2) 滑り範囲

付録図 3.2 周波数領域における三次元 FEM モデルから求まる地下外壁－側面地盤間の剥離・滑り範囲（北面）

Appendix Fig. 3.2 Soil separation and sliding areas between underground walls and side soils obtained from 3D-FEM model in frequency domain (north side)

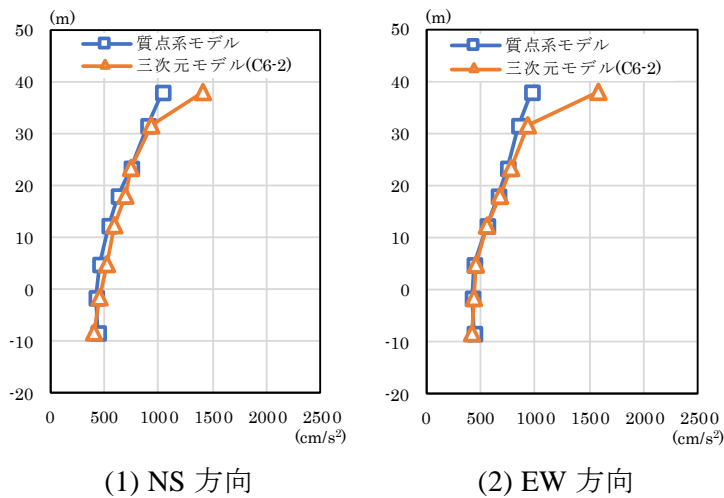


付録図 3.3 三次元 FEM モデルの剥離・滑り範囲に基づく時間領域における質点系モデル
 Appendix Fig. 3.3 Lumped mass stick models based on the 3D-FEM model in time domain



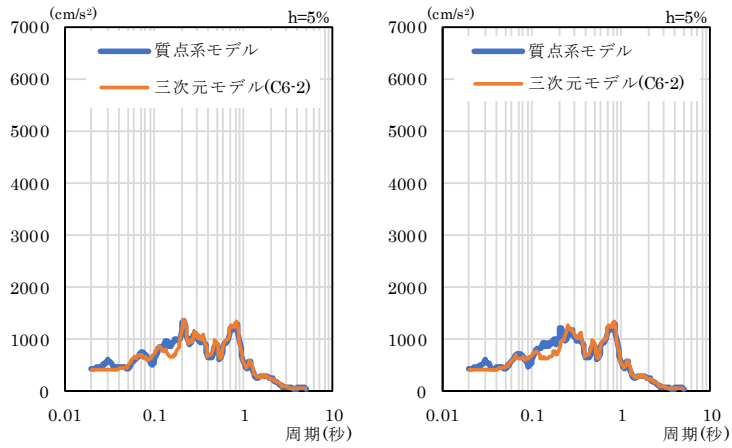
付録図 3.4 クレーン階 伝達関数の比較 (感度解析)

Appendix Fig. 3.4 Comparison of transfer functions at crane floor (sensitivity analyses)



付録図 3.5 最大応答加速度分布の比較 (感度解析)

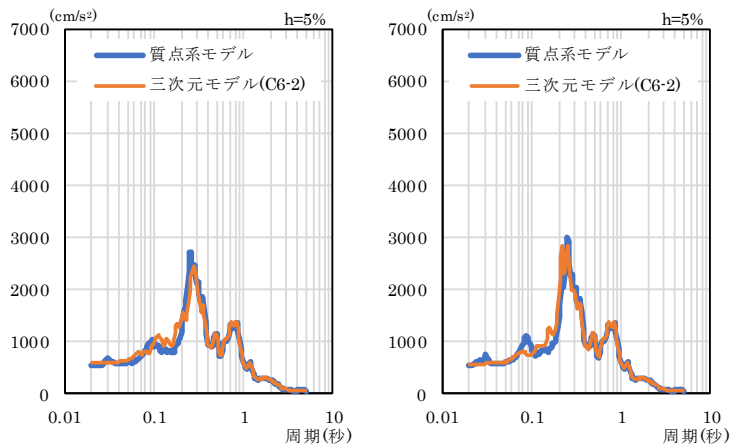
Appendix Fig. 3.5 Comparison of maximum accelerations (sensitivity analyses)



① NS 方向

② EW 方向

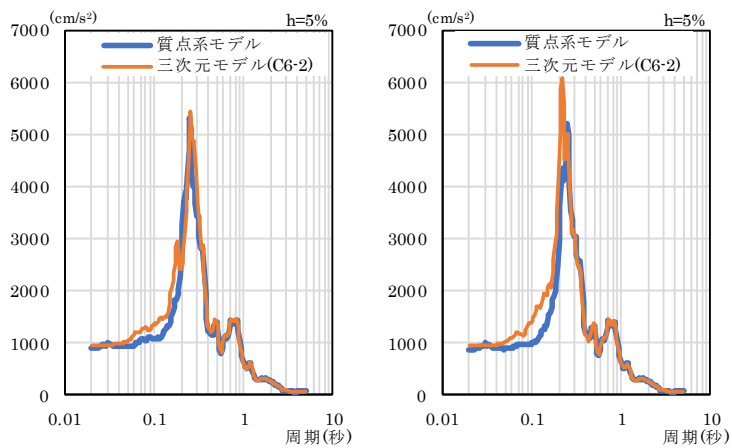
(1) 地下 3 階



① NS 方向

② EW 方向

(2) 1 階



① NS 方向

② EW 方向

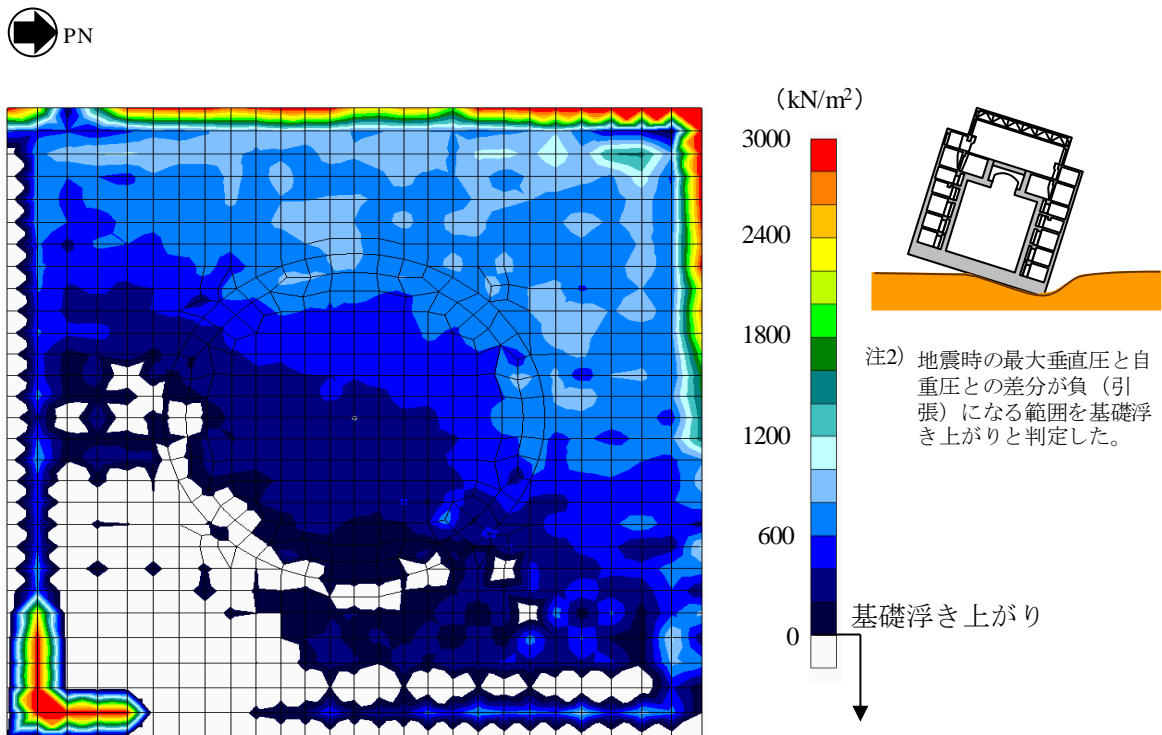
(3) 4 階

付録図 3.6 床応答加速度スペクトルの比較 (感度解析)

Appendix Fig. 3.6 Comparison of FRS (sensitivity analyses)

No.	発生時刻(s)	接地率(%)	備考
1	19.51	80.1	質点系モデル (NS 方向)
2	23.32	83.7	三次元 FEM モデル

注 1) 質点系モデル (時間領域) の接地率は、JEAG4601-1991 追補版に基づき、地震応答解析結果の最大転倒モーメントから算定した。また、上記接地率は、NS 方向 (80.1%) 及び EW 方向 (83.0%) の接地率のうち、値の小さい NS 方向を採用した。



付録図 3.7 接地率の比較と三次元 FEM モデルによる基礎浮き上がり範囲 (感度解析：周波数領域)

Appendix Fig. 3.7 Comparison of contact ratios and uplift area obtained from 3D-FEM model (sensitivity analyses in frequency domain)

付録3の参考文献一覧

- 付 3-1 東京電力 HD 株式会社、柏崎刈羽原子力発電所 6 号および 7 号炉、地震による損傷の防止について（補足説明資料）建屋側面地盤回転を考慮することの妥当性について、第 399 回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、pp.176-314、2016、<https://www2.nsr.go.jp/data/000163604.pdf>（2020 年 4 月 20 日確認）
- 付 3-2 日本電気協会、原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG 4601-1991 追補版、平成 3 年 12 月 20 日

執筆者一覧

原子力規制庁	長官官房	技術基盤グループ	地震・津波研究部門
市原 義孝		技術研究調査官	
森谷 寛		技術研究調査官	
小林 恒一		主任技術研究調査官	
山崎 宏晃		統括技術研究調査官	
大橋 守人		首席技術研究調査官	