

原子炉建屋の3次元有限要素モデルを用いた
地震応答解析手法に関わる標準的解析要領
(受託研究)

Standard Guideline for the Seismic Response Analysis Method Using
3D Finite Element Model of Reactor Buildings
(Contract Research)

崔 炳賢 西田 明美 川田 学 塩見 忠彦
李 銀生

Byunghyun CHOI, Akemi NISHIDA, Manabu KAWATA, Tadahiko SHIOMI
and Yinsheng LI

安全研究・防災支援部門

安全研究センター

材料・構造安全研究ディビジョン

Materials and Structural Integrity Research Division

Nuclear Safety Research Center

Sector of Nuclear Safety Research and Emergency Preparedness

March 2022

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Research

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートはクリエイティブ・コモンズ 表示 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています。
本レポートの成果（データを含む）に著作権が発生しない場合でも、同ライセンスと同様の
条件で利用してください。（<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja>）
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト（<https://www.jaea.go.jp>）
より発信されています。本レポートに関しては下記までお問合せください。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 JAEA イノベーションハブ 研究成果利活用課
〒 319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail: ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>).
Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under
the same terms and conditions as CC-BY.
For inquiries regarding this report, please contact Institutional Repository and Utilization Section,
JAEA Innovation Hub, Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail: ird-support@jaea.go.jp

原子炉建屋の 3 次元有限要素モデルを用いた 地震応答解析手法に関わる標準的解析要領 (受託研究)

日本原子力研究開発機構 安全研究・防災支援部門
安全研究センター 材料・構造安全研究ディビジョン
崔 炳賢、西田 明美、川田 学、塩見 忠彦、李 銀生

(2021 年 12 月 2 日受理)

原子力発電施設における建物・構築物の地震応答解析においては、我が国では、従来より質点系モデルが用いられてきたが、近年の解析技術の発展により、立体的な建物を 3 次元的にモデル化し、建物の 3 次元挙動、建物材料の非線形性、建物及び地盤間の非線形性等を考慮した有限要素法による地震応答解析が実施されるようになってきた。3 次元モデルによる有限要素解析 (3 次元 FEM 解析) は、複雑で高度な技術が用いられる一方、汎用性があるために広く利用され、原子力分野以外では構造物のモデル化、材料物性の非線形特性の信頼性を確保するためのガイドラインの策定や技術認定などがなされるようになってきた。原子力分野においては、IAEA により平成 19 年 (2007 年) 新潟県中越沖地震における質点系モデル、3 次元 FEM モデルによる観測記録の再現解析が KARISMA ベンチマークプロジェクトとして実施され、複数の解析者の解析結果が報告された。その報告によると、解析者により解析結果にばらつきが大きいということが判明し、解析手法の標準化による解析結果の信頼性の確保が急務となっている。また、原子力発電施設の強非線形領域の現実的な挙動の評価が必要となる建物・構築物・機器のフラジリティ評価においても詳細な 3 次元挙動把握の必要性が指摘されている。こうした背景を踏まえ、原子炉建屋を対象とした地震応答解析に用いられる 3 次元 FEM モデルの作成及び解析にあたって必要となる一般的・基本的な手法や考え方を取りまとめて標準的解析要領を整備した。これにより原子炉建屋の 3 次元 FEM モデルによる地震応答解析手法の信頼性向上につながることを期待される。本標準的解析要領は、本文、解説、及び解析事例で構成されており、原子炉建屋の 3 次元 FEM モデルを用いた地震応答解析の実施手順、推奨事項、留意事項、技術的根拠等が含まれている。また、本標準的解析要領は、最新知見を反映し、適宜改訂する。

本報告書は、原子力規制委員会原子力規制庁からの受託事業「原子力施設等防災対策等委託費 (高経年化を考慮した建屋・機器・構造物の耐震安全評価手法の高度化)」の成果の一部である。

原子力科学研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2-4

**Standard Guideline for the Seismic Response Analysis Method Using 3D Finite Element
Model of Reactor Buildings
(Contract Research)**

Byunghyun CHOI, Akemi NISHIDA, Manabu KAWATA, Tadahiko SHIOMI and Yinsheng LI

Materials and Structural Integrity Research Division, Nuclear Safety Research Center
Sector of Nuclear Safety Research and Emergency Preparedness
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received December 2, 2021)

Standard methods such as lumped mass models have been used in the assessment of seismic safety and the design of building structures in nuclear facilities. Recent advances in computer capabilities allow the use of three-dimensional finite element (3D FE) models to account for the 3D behavior of buildings, material nonlinearity, and the nonlinear soil-structure interaction effect. Since the 3D FE model enables more complex and high-level treatment than ever before, it is necessary to ensure the reliability of the analytical results generated by the 3D FE model. Guidelines for assuring the dependability of modeling techniques and the treatment of nonlinear aspects of material properties have already been created and technical certifications have been awarded in domains other than nuclear engineering. The International Atomic Energy Agency performed an international benchmark study in nuclear engineering. Multiple organizations reported on the results of seismic response studies using the 3D FE model based on recordings from the Niigata-ken Chuetsuoki Earthquake in 2007. The variation in their analytical results was significant, indicating an urgent need to improve the reliability of the analytical results by standardization of the analytical methods using 3D FE models. Additionally, it has been pointed out that it is necessary to understand the 3D behavior in the seismic fragility assessment of buildings and equipment, which requires evaluating the realistic nonlinear behavior of building facilities when assessing their seismic fragility. In view of these considerations, a standard guideline for the seismic response analysis method using a 3D FE model was produced by incorporating the latest knowledge and findings in this area. The purpose of the guideline is to improve the reliability of the seismic response analysis method using 3D FE model of reactor buildings. The guideline consists of a main body, commentaries, and appendixes; it also provides standard procedures, recommendations, points of emphasis, and a technological basis for conducting seismic response analysis on reactor buildings using 3D FE models. In addition, this standard guideline will be revised as appropriate to reflect the latest knowledge.

Keywords: 3D FEM, Seismic Response Analysis, Reactor Building, Guideline

This report includes a part of the results obtained in the contract research entrusted from Secretariat of Nuclear Regulation Authority of Japan.

目 次

I. 本解析要領の位置づけ	1
1. 背景及び目的	1
2. 3次元 FEM 解析の適用ガイドの動向	3
3. 本解析要領の基本方針	6
II. 本編	7
1. 一般事項	7
2. 解析の目的及び対象	15
3. 解析領域	19
4. 形状モデルの作成	25
5. 構造モデルの作成	32
6. 質量モデル	40
7. 材料モデル	42
8. 減衰の数理モデル	48
9. 境界接合部モデル	52
10. 入力地震動	56
11. 初期状態モデル	58
12. 数値解析に関する条件設定	59
13. 解析結果の照査と妥当性確認	64
14. 解析結果利用	68
15. 文書化	71
謝辞	72
参考文献	73
付録	76
別紙 1 影響因子の感度解析結果	76
附属書 1 異なるタイプの有限要素によるモデル化の違いによる影響	77
附属書 2 減衰のモデル化の違いによる影響	81
附属書 3 建物地盤連成における水平動－上下動の影響	87
附属書 4 側面剥離・滑りの考慮の有無による影響	94
附属書 5 鉄筋コンクリート非線形の地震応答への影響	105
附属書 6 有限要素の精度の違いによる影響	115
附属書 7 有限要素のメッシュサイズの違いによる影響	118
別紙 2 適用事例	122

Contents

I. Positioning of This Standard Guideline	1
1. Background and Outline	1
2. Trends in 3D FEM Analysis Application Guides.....	3
3. Basic Policy of This Standard Guideline	6
II. Main Body	7
1. General.....	7
2. Objectives and Target	15
3. Scope	19
4. Geometric Model	25
5. Structural Model	32
6. Mass Model	40
7. Material Properties.....	42
8. Damping Model	48
9. Boundary Conditions	52
10. Input Ground Motion	56
11. Initial State.....	58
12. Numerical Analysis Parameters	59
13. Verification and Validation of Analytical Results	64
14. Use of Analytical Results.....	68
15. Documentation.....	71
Acknowledgements.....	72
References	73
Appendix	76
Attachment 1 Sensitivity Analysis Results of the Influential Factors	76
Annex 1 Effect of Different FE Types	77
Annex 2 Effect of Different Damping Modeling.....	81
Annex 3 Effect of Vertical Ground Input Coupling	87
Annex 4 Effect of Nonlinear SSI Consideration	94
Annex 5 Effect of Nonlinear RC Material Property	105
Annex 6 Effect of Accuracy of FE Method.....	115
Annex 7 Effect of Different Mesh Sizes of Fes.....	118
Attachment 2 Analysis Example	122

表リスト

表 II-2-1	地震応答解析で用いられる SI 単位系の組合せ	17
表 II-3-1	平成 19 年（2007 年）新潟県中越沖地震の再現解析で考慮された壁の選定条件	20
表 II-5-1	建屋基礎～B2F 間の梁・シェル構造モデルとソリッド構造モデルの固有振動数の比較（基礎固定）	35
表 II-7-1	材料の粘性減衰定数（ASCE/SEI 4-16）	46
表 II-7-2	材料の粘性減衰定数（JEAG4601-1987）	47
表 II-9-1	ジョイント要素の構成則	53

図リスト

図 I-1-1	KARISMA ベンチマークプロジェクトにおける 3 次元 FEM 解析例	2
図 II-1-1	解析フロー	8
図 II-3-1	耐震壁及び補助壁の例	21
図 II-3-2	建物と周辺地盤の模式図	24
図 II-4-1	形状モデル及び構造モデルの構築例	27
図 II-4-2	屋根の鉛直変形モードと建物の水平変形モードの連成	29
図 II-4-3	ソリッド要素による形状モデルの模式図	30
図 II-4-4	地層を考慮したモデル化のイメージ図	31
図 II-5-1	隅部のモデル化	33
図 II-5-2	面要素と梁要素の部材接合の例	33
図 II-5-3	アイソパラメトリック正方 4 角形要素による片持ち梁解析	37
図 II-5-4	JEAG4601-1987 におけるメッシュ例	38
図 II-7-1	せん断ひずみの大きさと地盤構成則の関係（K. Ishihara に加筆）	45
図 II-7-2	等価線形解析における等価剛性と等価減衰	45
図 II-9-1	ジョイント要素の構成則（軸方向成分）	53
図 II-9-2	ジョイント要素の構成則（せん断方向成分）	53
図 II-9-3	解析地盤領域のモデル化	54
図 II-10-1	入力地震動作成の概要	57
図 II-12-1	周波数応答解析における伝達関数補間の模式図	61
図 II-13-1	警告及びエラーメッセージの例（MSC Nastran 2019）	65
図 II-13-2	入力テキストのエコーバックの例（MSC Nastran 2019）	65
図 II-13-3	データエラーによる異常なモードの例	66

This is a blank page.

I. 本解析要領の位置づけ

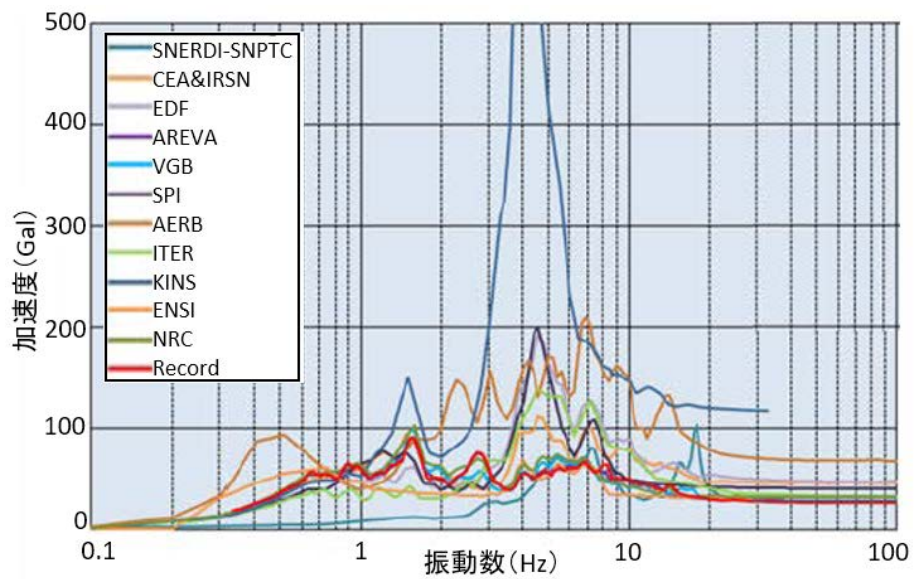
1. 背景及び目的

原子力発電施設における建物・構築物の地震応答解析においては、我が国では従来より質点系モデルが用いられてきたが、近年の解析技術の発展により、立体的な建物を3次元的にモデル化し、建物の3次元挙動、建物材料の非線形性、建物及び地盤間の非線形性等を考慮した有限要素法による地震応答解析が実施されるようになってきた。

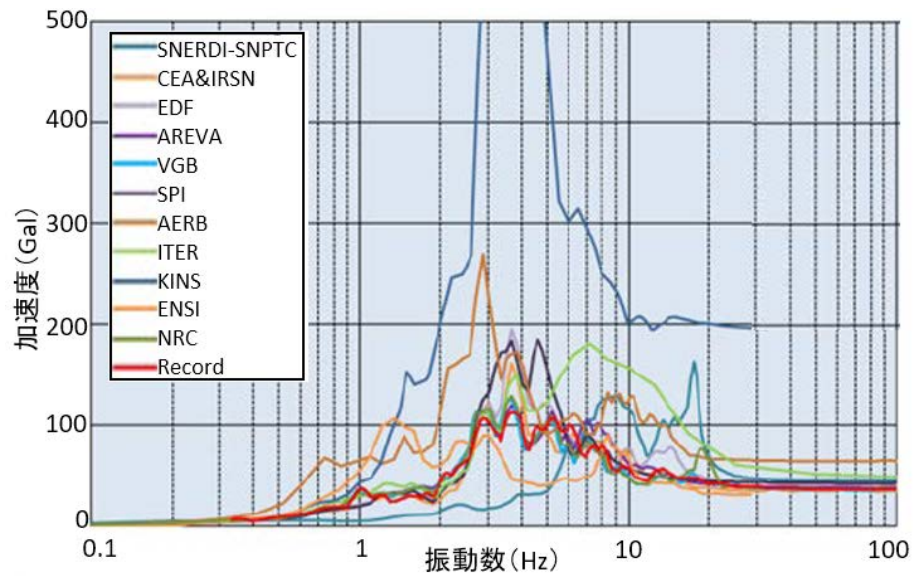
詳細な3次元モデルによる有限要素解析（以下、3次元FEM解析）は、従来よりも複雑で高度な技術が用いられ、原子力分野以外でも構造物のモデル化、材料物性の非線形特性の信頼性を確保するためのガイドラインの策定や技術認定などがなされるようになってきた。これらの例として、土木学会のコンクリート標準示方書、日本計算工学会及び日本原子力学会の **Verification and Validation**（以下、V&V）にかかわるガイドライン、日本機械学会の技術者認定、土木学会の数値解析に関する技術認定などがある。

原子力分野においては、IAEAにより平成19年（2007年）新潟県中越沖地震における質点系モデル、3次元有限要素モデル（以下、3次元FEMモデル）による観測記録の再現解析が **KARISMA** ベンチマークプロジェクトとして実施され、複数の解析者の解析結果が報告された。図 I-1-1 に解析に用いられた3次元FEMモデル図と地震観測位置（基礎上）の加速度応答スペクトルの例を示す¹。太い赤線が観測記録である。解析結果にはかなりのばらつきがあることが判明した。こうした背景から、解析手法の標準化による解析結果の信頼性の確保が急務となっている²。また、原子力発電施設の強非線形領域の現実的な挙動の評価が必要となる建物・構築物・機器のフラジリティ評価においても詳細な3次元挙動把握の必要性が指摘されている。

本解析要領は、原子炉建屋を対象とした地震応答解析に用いられる3次元FEMモデルの作成及び解析にあたって必要となる一般的・基本的な手法や考え方をまとめたものである。これにより原子炉建屋の3次元FEMによる地震応答解析手法の信頼性向上に資するものである。

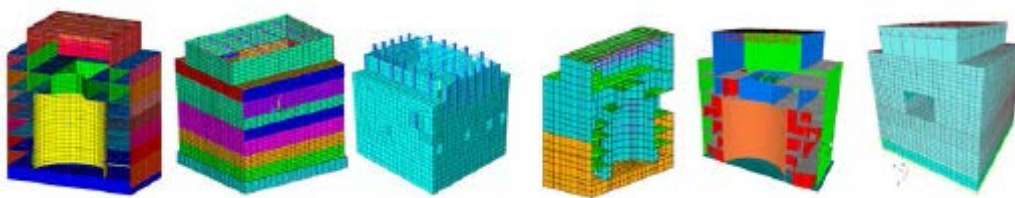


NS (X) 方向



UD (Z) 方向

加速度応答スペクトル ($h = 5\%$) (基礎上)



原子炉建屋の 3 次元 FEM モデルの例

図 I-1-1 KARISMA ベンチマークプロジェクトにおける 3 次元 FEM 解析例¹

2. 3 次元 FEM 解析の適用ガイドの動向

以下に 3 次元 FEM 解析に関する解析方法、解析の妥当性、信頼性確保に関する事項が、主な機関のガイドラインや規準等において、どのように位置づけられているかを示す。

2.1 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」³では、入力地震動の評価において、三次元地下構造モデルにより検討することが記載されている。「耐震設計に係る工認審査ガイド」⁴では、水平方向及び鉛直方向地震力の組合せにおいて、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することが記載されている。「実用発電用原子炉の安全性向上評価に関する運用ガイド」⁵では、フラジリティ評価において、3 次元応答特性（床の変形、ねじれ等）を配慮した損傷限界までの現実的応答の評価に適した 3 次元 FEM 解析による評価が記載されている。また、NTEC-2021-4002⁶によると、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と述べられている。さらに同文献⁶では、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、三次元 FEM モデルによる地震応答解析方法及び影響因子のモデル化の妥当性が検討されている。

2.2 日本電気協会

「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601」^{7,8,9}では、特に建物と地盤の動的相互作用において、基礎の変形、地盤の不整形、建物の深い埋め込み、隣接建屋等について考慮可能な 3 次元 FEM 解析の必要性が述べられている。

2.3 日本原子力学会

2007 年新潟県中越沖地震を踏まえ、日本地震工学会と連携して「地震安全に関するロードマップ」を策定した。また、2011 年東北太平洋沖地震の福島第一原子力発電所事故を踏まえ、「日本原子力学会における軽水炉安全技術・人材ロードマップ ローリング対応 最終報告」¹⁰を 2013 年度にとりまとめ、2017 年に改訂している。これらのロードマップにおいて、建物・構築物の地震応答解析については FEM に基づく応答解析と評価体系化の必要性が指摘されている。

さらに、日本原子力学会標準「原子力発電所に対する地震を起因とした確率論的リスク評価に関する実施基準：2015」¹¹では、建物・構築物の現実的応答評価のための 3 次元 FEM の必要性が強調されている。

また、「シミュレーションの信頼性確保に関するガイドライン：2015」¹²では、標準委員会基盤・応用技術専門部会におけるシミュレーションの信頼性分科会、同専門

部会の審議を経て、原子力にかかわるシミュレーションの信頼性確保のための幅広い技術分野に共通する考え方を示している。

2.4 日本機械学会

発電用原子力設備規格のひとつである日本機械学会の「事例規格 弾塑性有限要素解析に基づく耐震 S クラス配管系の耐震性評価に関する代替規定」¹³では 3 次元 FEM 解析を前提としている。

また、解析技術者の技術レベルを確保するために「計算力学技術者資格認定」を実施している。

2.5 日本建築学会

原子力発電施設については「原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準 同解説」¹⁴がまとめられている。また、「空間構造の数値解析ガイドブック」¹⁵には、空間構造を構造設計する際に用いられる数値解析について、対象となる問題とその解析の基礎理論、モデル化や解析手法の選択の基準となる事項が詳細にまとめられ、3 次元 FEM 解析における基本的な留意事項が示されている。

2.6 土木学会

鉄筋コンクリート構造の 3 次元 FEM による非線形解析法について、土木学会の「コンクリート標準示方書（2017）」¹⁶に詳細に記述するとともに、技術評価制度による数値解析認証を実施している。

また、屋外重要構造物や地中構造物等について、土木学会の「原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル・照査例／技術資料（2018）」¹⁷がまとめられ、原子力発電所屋外重要土木構造物である鉄筋コンクリート製構造物の耐震性能照査手法を高度化するとともに体系化を図っている。

2.7 日本計算工学会

3 次元 FEM 解析を含む数値解析法の工学分野への適用における V&V の指針として、日本計算工学会の「工学シミュレーションの品質マネジメント」²が作成され、解析プロセス管理方法と共に、重要な解析を行う解析者の技量を定めている。

2.8 International Atomic Energy Agency (IAEA)

IAEA Safety Guide¹⁸では、原子力発電施設のモデル化方法には質点系モデルから 3 次元 FEM モデルまでがあるとし、それらの中から、手法による違いが解析結果に及ぼす影響を最小限にするように選択することを提案している。さらに、地盤建物連成問題においては、地盤をばねでモデル化した剛体モデルや質点系モデルは、より詳細な 3 次元 FEM モデル等のモデル化方法により解析することを求めている。非線形 3 次元 FEM モデルによる地盤建物連成問題について言及している¹⁸。

2.9 American Society of Civil Engineers (ASCE)

ASCE/SEI 4-16¹⁹では、3 次元 FEM 解析による検討が求められている。また、地盤建物連成問題においては、2 次元 FEM モデルではなく 3 次元 FEM モデルを用いた解析（3 方向入力及び応答）を求めているが、建物の詳細なモデル化については浮上り現象問題等を含む非線形性を考慮する場合についてのみ必要としている¹⁹。

2.10 The U.S. Nuclear Regulatory Commission (US NRC)

NUREG-0800²⁰では、原子力発電施設の構造モデルは、地震応答解析には 3 次元 FEM モデルを用いるべきとしつつ、振動方向の相互作用が無ければ、より簡易なモデルを用いてもよいとしている²⁰。

3. 本解析要領の基本方針

本解析要領の基本方針を以下に記す。

- (1) 本解析要領では、3 次元 FEM モデルを用いた原子炉建屋の地震応答解析を行うにあたって必要となる、一般的・基本的な手法や考え方をまとめる。基本的な解析方針を本文に、対応するモデル化手法や解析手法の考え方や技術的根拠等を解説に記載する。
- (2) 本解析要領の対象は、BWR 型及び PWR 型双方の原子炉建屋とし、フラジリティ評価における原子炉建屋 3 次元 FEM モデルを用いた地震応答解析に適用するものとする。
- (3) 本解析要領の附属書に解析事例を示す。

II. 本編

1. 一般事項

1.1 はじめに

本解析要領は 3 次元 FEM モデルによる原子炉建屋の地震応答解析において、標準的なモデル化方法、解析手法の選択基準となる事項をまとめたものである。

【解説】

本解析要領は、原子炉建屋の 3 次元 FEM を用いた地震応答解析について、一定の技量ある解析者が同一レベルの精度の解を得られるように標準的なモデル化方法、解析手法（解析条件の設定、設定手順、結果評価方法など）の概要及びその留意点をまとめたものである。

なお、原子炉建屋の 3 次元 FEM モデルによる解析では、モデルの規模が大きくなることにより数値計算上の負荷もが大きくなることから、原子炉建屋及び周辺地盤等の解析範囲などのモデル化方法に加えて、計算方法も解の精度に大きく影響する。したがって本解析要領では、これらについても記述する。

1.2 本解析要領の構成

本解析要領では、図 II-1-1 に示す解析フローに従い、それぞれの段階における標準的な解析手順を示す。

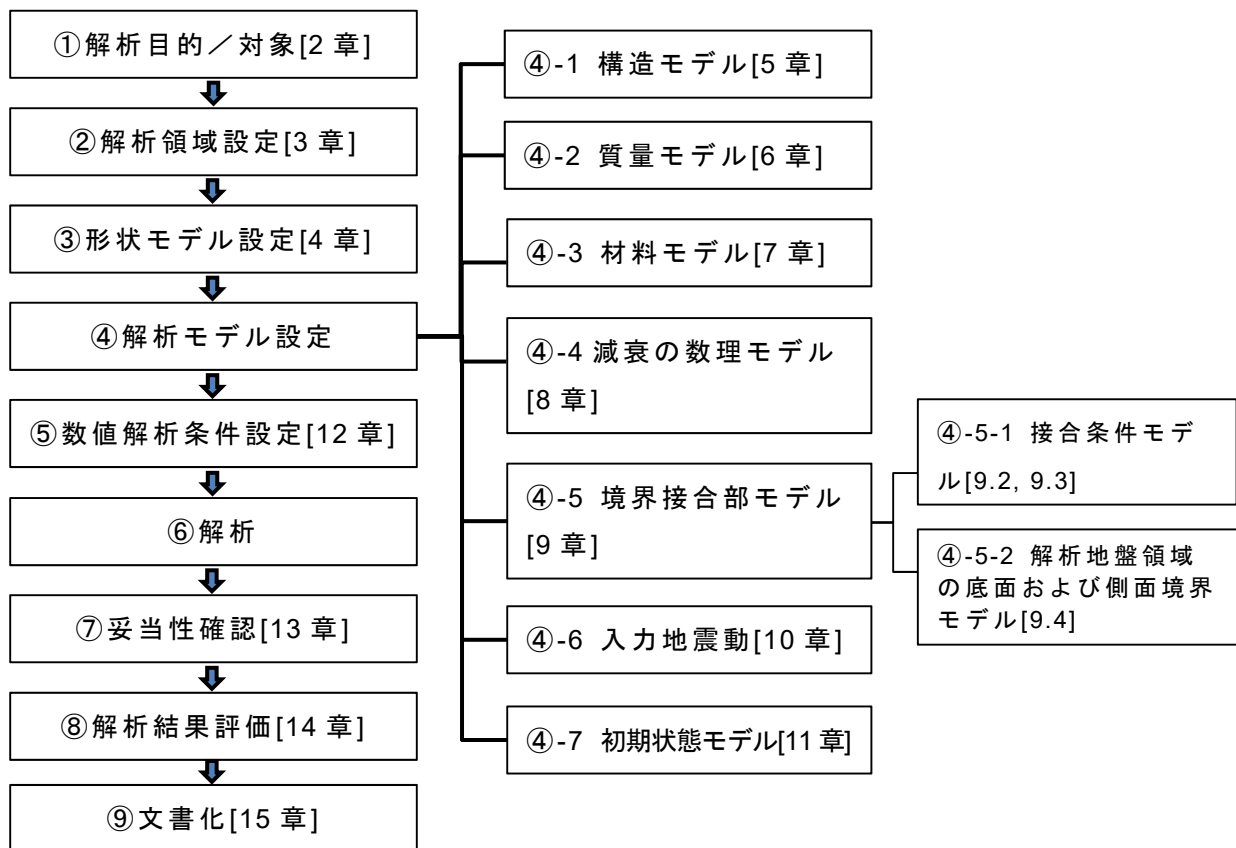


図 II-1-1 解析フロー

1.3 適用範囲

本解析要領は原子炉建屋の 3 次元 FEM モデル解析による耐震安全性評価、実験及び地震観測記録の再現解析等における地震応答解析を対象とする。

【解説】

本解析要領で想定する主な解析対象は原子炉建屋であり、骨組み構造、壁構造、ドーム構造等からなる構造に遮蔽壁や大型機器を有する構造物である。また、解析の適用範囲としては、建物の耐震安全性評価、実験及び地震観測記録の再現解析、建物全体や局所の地震応答予測等を想定している。また、地震に起因する確率論的リスク評価（地震 PRA）における建物・構築物・機器の脆弱性評価を含んでいる。

原子炉建屋の耐震安全性評価において、地震応答解析の目的は地震時応力・ひずみ等の算定であるが、本解析要領では 3 次元地震応答解析による変形・応力・ひずみなど詳細な応答についても考慮対象とする。ここで、本解析要領では、地震時応力・ひずみ等の適用範囲は弾性から弱非線形程度までとする。ただし、建屋の材料非線形やジョイント要素を用いた地盤建物相互作用の非線形は考慮可能である。

原子炉建屋の 3 次元 FEM モデル化のメリットとして、異なる荷重条件下において

も同じモデルを利用し、異なる荷重による発生応力やひずみ等の精度の高い重ね合わせを利用できることがあげられる。ただし、本解析要領は外力として地震動を想定し、温度や衝撃外力等については対象外とするが、自重や積載荷重、常時温度荷重等の常時荷重は考慮する。また、非構造物、機器・配管、溶接、継ぎ手などの接合部等の詳細な部位についても対象外とする。

1.4 主要な用語等

本解析要領で用いる記号、用語を以下解説に示す。

【解説】

1.4.1 記号

E	縦弾性係数
σ	応力
d	変位
v (ヴィ)	速度
V_s	せん断波速度
a	加速度
ρ	質量密度
γ	せん断ひずみ
ε	軸ひずみ
ν (ニュー)	ポアソン比

1.4.2 用語

(あ行)

圧力球根	深さ方向において地盤に発生する鉛直応力の等しい点を結んでできる曲線。
アワーグラス	有限要素法において、変形しているにも関わらずひずみがゼロとなる状態（モード）のことで、物理的には発生しない数学的な安定状態。ゼロエネルギーモードともいう。低減積分を用いた要素で発生する。変形の様子が砂時計（アワーグラス）の形をしていることからアワーグラスモードと言われている。
一次元波動論	伝播方向を鉛直方向に限定した波動理論 ²¹ 。
応答	外乱に対して得られる解析結果の加速度、速度、変位、応力（応力度）、ひずみ等。
応答スペクトル	同一の地震入力を受ける複数の固有振動数の異なる1質点系モデルの最大応答値を振動数軸で結んだもの。
応力	単位面積あたりに作用する力。本解析要領では応力度と同じ意味で用いる。

応力－ひずみ関係 載荷と除荷を繰り返した場合の荷重と変位の関係を応力とひずみの関係で表したもの。

(か行)

解析モデル 本解析要領では、有限要素解析において、形状モデル、構造モデル（メッシュモデル）、構成則、外力を含む境界条件等全体を指す。

解析モデル芯 本解析要領では、梁理論で梁を線とみなして解析する場合の断面の中心線の位置を、シェル要素では中立面を指す。

解析対象物 地震応答解析により応答を求め、その応答値を検討する構造物を指す。

確率論的リスク評価 起こりうる事故等の望ましくない事象の発生確率とその事象による被害の大きさに関する定量的評価。

機器・配管系 原子炉施設のうち、容器、配管ポンプ、電気計装機器等及びそれらの支持構造物の総称。

基礎浮上り 地震等により建物基礎底面が地盤の接触面と離れ浮上ること。
形状モデル 線形状、面形状、立体形状のパーツで構成される形状データ（ジオメトリデータともいう）。

構成則 連続体である物質の力学的性質を数学的に記述したもので、連続体の基礎式の 1 つ。一般には応力とひずみの関係式で表される。

構造モデル 有限要素メッシュに質量、材料、境界条件、減衰、初期条件を設定したモデル（本解析要領では有限要素モデルと同じ意味としている）。

(さ行)

3 次元 FEM 解析 有限要素法による 3 次元モデルを用いた解析。

3 次元 FEM モデル 有限要素法による 3 次元モデル。

3 次元 CAD ソフト 建物の立体モデルの作成に用いられる CAD ソフトを指す。BIM ソフトを兼ねるものが多い。

線形解析 変位と力の関係を比例とする解析。ここでは、材料を弾性、側面剥離や滑りなし、浮上りなしの条件の解析を指す。

線形状要素 形状モデルの要素で、線で表されるもの。

シェル要素 曲面の面内変形、面外曲げ変形を表すことのできる有限要素。

時刻歴応答解析 時刻歴波形を入力として時々刻々の応答を求める応答解析。時間領域で解析する方法と、周波数領域で解析する方法がある。

地震応答解析 地震動に対する時刻歴応答解析。

地震力 地震動により、物体に作用する慣性力。耐震設計において、建

集中質量行列	物に作用させる慣性力をいう。動的地震力と静的地震力がある。対角項のみが値をもつ質量行列を指す。複数の設定方法がある。有限要素が1次要素の場合は節点の支配体積より求める方法のほか、整合質量行列を対角化して求める方法などがある。ランプトマス（lamped mass）行列ともよばれる。
重力加速度	SI 規格の 9.80665 m/s^2 。
ジョイント要素	2つの材料性状の異なる物体の接触や剥離、滑りをモデル化する要素で、岩盤の摂理挙動の解析に Goodman ら ²² が用いたのが初めで、本解析要領では建物地下の外壁や基礎版底面と地盤間の挙動をモデル化した有限要素を指す。
審査ガイド	原子力規制委員会が定めた「耐震設計に係る工認審査ガイド（平成25年）」 ⁴ を指す。
滑り	本解析要領では、建物と地盤の接触面の滑りを指し、建物側面と底面の滑りがある。
整合質量行列	有限要素法における質量行列の一つで、行列の非対角項にも値がある。集中質量行列と組み合わせて用いられることもある。コンシステントマス（consistent mass）行列ともよばれる。
静的解析	時間に依存しない荷重または変位に対する構造物の変位、変形、応力、ひずみ等を求める解析。自重等の常時荷重に対する解析に用いる。
性能照査	構造物が要求性能を満たしているかを基準になるデータや書類と比較して判定する行為。
接地率	基礎底面が地盤に接地している領域の基礎底面全領域に対する比率。
ソリッド形状	3次元 CAD で作成する立体形状データ。
ソリッド要素	有限要素法の固体要素。
（た行）	
建物	建屋と同義。本解析要領では「原子炉建屋」以外では、建物を用いる。
耐震壁、耐力壁	地震力を負担する壁。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」 ¹⁴ では耐震壁、建築基準法では耐力壁が使われている。
建物・構築物	原子炉施設のうち原子炉建屋などの建物及び排気塔などの構築物の総称。
建物損傷	構造部材の損傷。本解析要領では、鉄筋コンクリートのひび割れ、鉄骨の座屈等。
等価線形解析	非線形問題を有効ひずみに対する割線剛性（等価剛性）を用い

透過振動数	建物・構築物及び地盤建物連成の地震応答解析において考慮する最大振動数。
動的解析	運動方程式を解くことにより構造物の応答の変化を求める解析。本解析要領では地震応答解析と同じ意味で用いる。
動的変形特性	土のせん断に対する割線剛性とひずみの関係、減衰とひずみの関係。動的変形試験による。
(な行)	
二次部材	鉛直力と地震力は負担しないが、主架構に力を伝達させる等の目的で配置する部材。小梁、間柱等があり、通常は耐震部材とはみなされない。
(は行)	
剥離	建物地下外壁表面と地盤の間が剥離すること。
梁要素	張力、圧縮、ねじり、曲げの自由度を持つ最も汎用性の高い線要素。
引き戻し波	動的解析に用いる入力地震動。敷地内の地盤構造等を考慮し、解放基盤表面で定義された基準地震動等の地震動を一次元波動論などにに基づき解析モデルの下端まで引き戻しまたは引き上げた地震動のこと。
非構造部材	間仕切り、天井等の構造上の耐力を期待しない部材。
非線形	材料非線形（弾塑性）、幾何学的非線形（構造の寸法に比べて変形が大きい場合の定式化）、境界非線形（側面の剥離・滑り、基礎底面の浮上り）を包括した用語。
非線形解析	非線形性を考慮した解析を指す。
ピアチェック	本解析要領では、専門家による第三者チェックを指す。主旨的には、建築基準法の構造計算適法性判定と同じである。
付着力	建物基礎底面と支持地盤間の引張強度をいう。
フラジリティ評価	建屋・機器の現実的応答及び現実的耐力を用いて、確率論的にそれらの条件付き損傷確率を求めること。
棒要素	張力、圧縮、ねじりの自由度を持つ線要素。
補助壁	耐震壁以外で、地震応答解析で考慮される厚さ 30 cm 程度以上の壁。二次部材の一種。
(ま行)	
メッシュモデル	本解析要領では、有限要素で構成されたモデルを指す。
面形状要素	形状モデルの要素で、面であらわされるもの。

モデル化因子 3次元 FEM 解析のモデル化において、解析結果に影響を及ぼす因子。根拠となる解析理論を含む解析法、解析条件、構成則等を含む。

(や行)

有限要素タイプ 有限要素メッシュの種類。例えば、棒要素、梁要素、シェル要素、4面体要素・5面体要素・6面体要素等のソリッド要素などがある。

有限要素モデル 有限要素メッシュに質量、材料、境界条件、減衰、初期条件を設定したモデル。(本解析要領では構造モデルと同じ意味としている)

有効ひずみ 等価線形解析において、主要な振動の実効的な応答を得るための等価剛性を設定するためのひずみで、最大ひずみを係数倍した値。係数には 0.6~0.7 が用いられる。

誘発上下動 建物の水平応答が大きくなり、基礎の浮上りが生じた時に誘発される建物の上下応答。

床応答スペクトル 地震時の床位置の応答スペクトルで、床位置に設置される機器の設計等に用いられる。Floor response spectrum (FRS) や、In-structure response spectrum (ISRS) とも称される。

要素積分点 ガウス点とも称される。有限要素の剛性行列等を誘導する際の要素積分のための点であり、通常、有限要素内における応力、ひずみの評価点として用いられる。

(ら行)

立体形状要素 形状モデルの要素で、直方体、円筒、円錐等立体的な形状の要素。

1.4.3 略語

BIM	Building Information Modeling
CAD	Computer Aided Design
FEM	Finite Element Method (有限要素法)
FRS	Floor Response Spectrum (床応答スペクトル)
JEAG	Japan Electric Association Guide (電気技術指針)
KARISMA	Kashiwazaki-Kariwa Research Initiative for Seismic Margin Assessment
NAFEMS	National Agency for Finite Element Methods and Standards. The International Association for the Engineering Modelling, Analysis and Simulation Community (工学設計・解析のための国際アソシ

エーション)

PRA	Probabilistic Risk Assessment (確率論的リスク評価)
SSI	Soil-Structure Interaction (地盤建物相互作用)
V&V	Verification and Validation (検証と妥当性確認)

2. 解析の目的及び対象

2.1 はじめに

3次元 FEM モデルによる原子炉建屋の地震応答解析にあたっては、はじめに解析目的と解析対象を明らかにし、目的に対して適切な解析条件設定、解析方法、結果評価方法等を選択する。

【解説】

原子炉建屋の 3 次元 FEM モデルによる地震応答解析においては、解析対象を的確に決める必要がある。このために、解析作業のはじめに、解析目的を明らかにし、その目的に応じて、解析対象及びその範囲を設定する。

なお、本解析要領の基本的考え方は、原子炉建屋以外の原子力発電所の建物の地震応答解析を行う際にも準用することができる。

2.2 解析目的

3次元 FEM モデルによる地震応答解析の目的及びその対象を明らかにする。

【解説】

地震応答解析の目的には、地震による建物の損傷、材料非線形挙動、埋込み効果、建物部材の局所破壊などの把握等がある。具体的には、次のような解析目的及び解析対象が考えられる。

- ① 耐震安全性評価における原子炉建屋の構造部材の性能照査
- ② 配管・機器系への地震入力となる建物各部の応答の算定
- ③ 原子炉建屋、地盤などの観測記録の再現解析
- ④ 建物に関する模型実験の事前解析及び再現解析
- ⑤ 原子炉建屋の構造部材損傷のフラジリティ評価
- ⑥ 配管・機器損傷のフラジリティ評価のための建物応答

解析目的・解析対象に応じて、適切な解析手法、解析条件、解析結果の評価方法等に関して適切な解析計画を作成する。また、計画立案にあたっては、解析モデルの規模、計算時間、解析能力等の考慮も必要である。作成された解析モデルが解析目的に適合しているかを、解析の計画者、実施者及び利用者、レビュアーらによって確認する必要がある。

注意点として、上記のフラジリティ評価を対象にする場合には、各部の応答は非線形の程度が大きくなることが予想され、対応する非線形領域に応じた適切なモデル化、解析手法が必要となる。

2.3 解析方法

解析目的に応じて、適切な解析方法を選択する。選択した解析方法については、類似解析や実験・地震観測の再現解析等で妥当性が示されている必要がある。

【解説】

地震応答解析手法は、時間積分法、有限要素法、構成則など多岐にわたる解析方法からなる。それらを適切に組み合わせた解析手法及びその利用の妥当性が示された解析ソフトを選択して用いる。その他の解析手法や解析ソフトを選択する場合には、それらの妥当性を示した解析と類似の問題との比較や、実験・地震観測記録の再現解析により、妥当性を示すものとする。

なお、解析ソフトの妥当性を示す方法として、実験や地震観測の再現解析のほかに、学会や NAFEMS²³などの信頼のおける機関が提供しているベンチマーク問題の解析によることも考えられる。

地震応答解析における時間積分法には、直接時間積分法と周波数応答解析法があり、質点系のモデルの弾性解析では、履歴減衰（複素減衰）による計算が可能な周波数応答解析法が用いられることも多いが、履歴を追った弾塑性解析ができない等の問題点がある。

有限要素については、耐震壁をシェル要素またはソリッド要素でモデル化するという選択があり、そのシェル要素またはソリッド要素として、複数ある有限要素から適切なものを選択する。

材料の非線形性の考慮が必要な場合には、材料ごとに適切な構成則を選択し、信頼性のある解析ソフトを選択する。これに関して、日本機械学会は発電用原子力設備規格のひとつである事例規格「弾塑性有限要素解析に基づく耐震 S クラス配管系の耐震性評価に関する代替規定」¹³において、解析手法と解析ソフトを定めている。解析手法は解析のモデル化方法を指している。解析ソフトは、Abaqus、Ansys、FINAS、FINAS/STAR、MSC Marc をバージョンも含めて指定している。また SEGP に示されたベンチマーク解析を行うことにより、他の解析ソフトの利用も可能としている。

KARISMA ベンチマークプロジェクトでは、Nastran、Abaqus、Ansys、SAP2000/SUPER、CAST3M、COSMOS/M が用いられた。

ASCE/SEI 4-16¹⁹では、商用解析ソフトとして LS-DYNA、Abaqus、Ansys を、ライセンスソフトとして NRC ESSI Simulatorⁱを、地盤の非線形解析のオープンソースソフトとして OpenSees と Mastodon を紹介している。

ⁱ Real ESSI Simulator のウェブサイト (<http://www.real-essi.us>) 上で、プログラムやマニュアル、例題、ポスト処理ツールなどが公開されている。

2.4 使用する単位

3次元 FEM モデル解析においては、SI 単位を用いる。入力データ単位の組合せについては、その整合性に留意する必要がある。

【解説】

解析モデル及び材料定数等の単位は、SI 単位とする（表 II-2-1）。さらに、各入力データの単位は、その組合せの整合性に留意する。解析条件書や報告書において、材料定数等で解析データと表記単位系列が異なることがあり、このような場合に間違いが生じやすいことに留意する。

表 II-2-1 地震応答解析で用いられる SI 単位系の組合せ

	SI 基本単位（系列 1）	SI 基本単位（系列 2）
長さ（座標、変位）	m	m
質量	kg	Mg（t（トン））
速度	m/s	m/s
加速度	m/s ²	m/s ²
力	N（kg・m/s ² ）	kN
応力	Pa（N/m ² ）	kPa（kN/m ² ）
時間	s	s

注記：t（トン）は、SI 単位と共に公式に使うことができる。Mg も同様。

Gal（cm/s²）は CGS 単位系の非 SI 単位であり、公式には使われない。

材料物性表等では、上記の系列とは関係なく、材料強度では N/mm²、重量密度では kN/m³ が用いられるが、解析ソフトや単位系列によってはデータ入力時に変換が必要となる。間違いが起こりやすいため、注意が必要である。

2.5 解析計画

解析目的に応じて、解析内容の具体的な計画を作成する。

【解説】

解析にあたっては、解析手法の適用範囲の確認、解析結果の妥当性の担保について検討し、解析計画を作成する。また、妥当性が不十分な場合の解析モデル等の改善方法についても解析計画を作成する。

解析フロー（図 II-1-1）に示す②から⑧について、十分な精度があり、かつ計算実施可能な解析計画を作成する。

解析計画は、解析における品質管理の重要なプロセスである。解析方法から、解析評価までについて、選択・設定の計画を立て、それに基づいて解析を実施する。具体的には、解析目的や解析対象、解析すべき現象に応じた適切な解析方法の選択について、支配方程式、モデル形状、有限要素、材料モデル（構成則）の選択を明らかにす

る。また、材料非線形を考慮する場合には適切な構成則を選択し、その妥当性を示す。

適切な解析計画書の作成は V&V において重要な行為である。そこでは、上記の解析目的、解析対象、モデル化方法、解析方法等に関わる事項を文書に示し、解析の計画者、実施者、利用者、レビュアー（解析評価者）など全関係者がその内容を確認することが望ましい。解析実施者は、これらの解析計画における設定根拠を解析報告書に示すものとする。

3. 解析領域

3.1 はじめに

解析目的及び解析対象を考慮して、建物モデルの詳細度、解析領域を適切に設定する。

【解説】

解析対象とする建物及びその構成部材のモデル化詳細度と、その周辺地盤の解析領域について設定する。解析領域の選択の違いが解析結果に影響することがないように留意する。

3.2 建物モデルの詳細度

解析目的を考慮して、建物を構成する部材のモデル化範囲（建物モデルの詳細度）を適切に設定する。

【解説】

建物の構成部材のモデル化の詳細度については、その構成要素である基礎・柱・床・壁・屋根及び二次部材、重量機器や設備等のうち、解析結果に影響する可能性のある範囲を適切に設定する。地震応答に影響する部材として、圧力容器関連、クレーン類、耐震壁以外の二次的な壁、小梁、小開口、屋根スラブ、遮蔽壁、階段等の部材がある。

配管・機器への床応答を求める場合は、機器類の設置位置や支持点を考慮する。また上下動については、床の幅（下層の壁位置に依存）、支持部材の影響を考慮してモデル化を行う。

3次元 FEM 解析では、モデル化を詳細にすればより詳細な応答性状（局所的な床応答、床の面内変形、床や壁の面外変形、建物のねじれ、部材の応答等）を得ることができる。一方、解析には多くの資源を要するため、目的に応じて、モデル化（計算可能な解析モデルを作成すること）を工夫することが求められる。解析目的により、解析方法、解析モデルの詳細度が異なる場合もあることに留意する。

建物に作用する動的地震力を求める場合は、3次元 FEM 解析でも主要な構造部材のみを対象とする解析モデルとすることが考えられるが、観測記録の再現解析や配管・機器への入力地震動の算定においては、建物内の位置による違いを考慮することが必要になり、より詳細なモデル化が求められることも考えられる。

また、建物の部材損傷を検討する場合は、損傷が予想される部位や応力が集中する部位を詳細かつ適切にモデル化する必要がある。

3.2.1 建物の構成部材のモデル化範囲

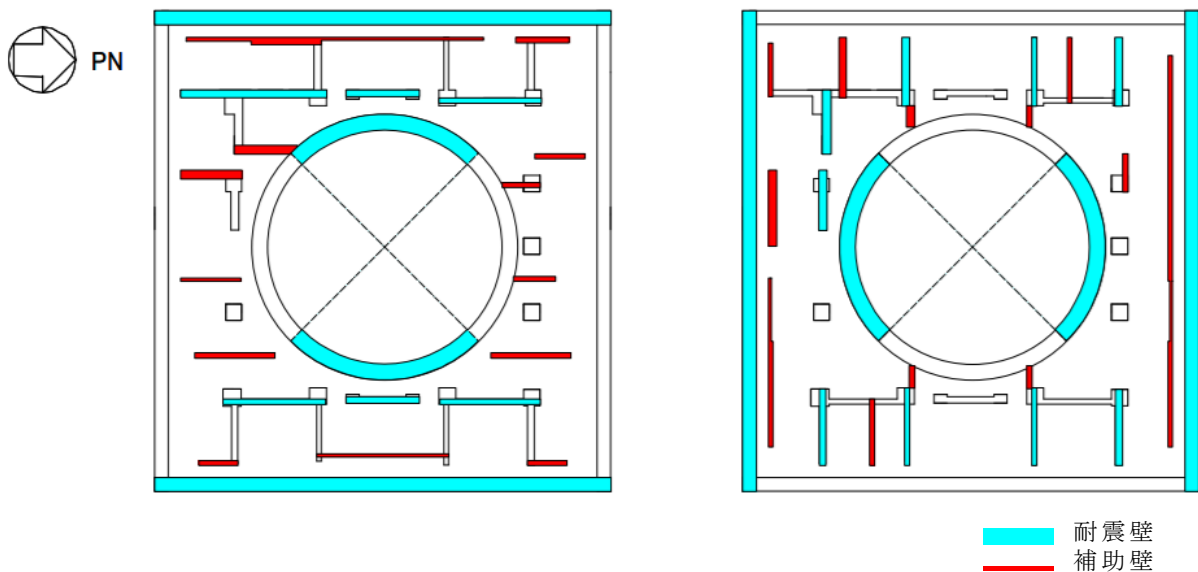
基本的に解析対象と整合した図面に従い構造部材をモデル化するが、構造部材のモデル化には図面通りのモデル化が難しい点があるため、（解析目的に応じた解析結果

を得る上で影響のない部分の) モデル化の簡略化ルールを設定する。たとえば、床の段差、水勾配、小さな開口等、解析目的に対して影響が小さい根拠が説明できるところについては、省略することなどが考えられる。また、非構造部材の階段、出窓、バルコニー、パラペット、増し打ちコンクリート等も解析結果に影響がないものとしてモデル化を省略することが多い。しかし、局所の振動を考慮する必要があるときは、無視できない可能性もある。

審査ガイド⁴では、建物・構築物の鉛直方向の解析モデルにおいて、鉛直方向振動に影響する部材を設定することを求めている。したがって、3次元 FEM モデルでも、床の鉛直振動に影響する二次的な壁の影響、床の重量配分を考慮する必要がある。必要に応じて、2次壁等、機器ごとのモデル化および重量等の詳細なモデル化を図る。また、原子炉建屋の3次元 FEM モデルでは、地震応答解析において耐震壁以外の壁も加えたモデル化が必要になる場合もある。たとえば、平成19年新潟県中越沖地震時の柏崎刈羽原子力発電所建物の観測記録（水平方向）の再現解析では、耐震壁より薄い壁を補助壁としてモデル化し、実際の剛性（実剛性）を用いて応答スペクトルを求めることで、解析結果と観測結果のより良い対応を得ている^{24, 25}（表 II-3-1 および図 II-3-1 参照）。この事例では、上下応答について十分な対応が得られていないが、壁配置、重量分布などの精度に課題がある可能性が指摘されている。

表 II-3-1 平成19年（2007年）新潟県中越沖地震の再現解析で考慮された壁の選定条件²⁴

耐震壁	補助壁
壁の厚さは300mm以上、かつ内法高さの1/30以上	同左
壁のせん断補強筋比は、直交する各方向に関し、それぞれ0.6%以上	壁のせん断補強筋比は、直交する方向に関し、それぞれ0.25%以上
基礎スラブから連続して立ち上がっている壁	階下まで壁が連続している、もしくは床スラブを介して壁に生じるせん断力を階下の耐震壁に伝達できる壁
フレーム構面内（柱、梁間）の壁	フレーム構面外でも上記を満たす壁

図 II-3-1 耐震壁及び補助壁の例²⁴

(左：NS 方向、右：EW 方向)

屋根のモデル化：屋根トラス及び屋根スラブは、屋根階の面内変形・面外変形を考慮するためにモデル化が必要である。屋根トラスは、主材、斜材、束材等をモデル化する。屋根スラブ及び屋根トラスの接合は固有モードの影響を考慮して実情にあったモデル化を行う。

二次部材のモデル化範囲：雑壁、小梁をモデル化しないことにより床を支持するスパンが長くなり、床の鉛直剛性とそれに対応する鉛直固有振動数が建物の上下の固有振動と連成する可能性がある場合は、より実状に沿ったモデルを検討する。

大型機器に関するモデル化範囲：圧力容器及びその支持構造等の大型機器のモデル化は、建物の振動性状への影響を考慮して、その範囲を決定する。上下振動および基礎スラブの変形に影響を与える可能性が指摘されている。

水平振動による壁や床に生じるせん断変形は、主に外壁が負担し、各階床面の面内変位は床の面内剛性で小さく抑えられる。

上下振動における外壁や主要な柱の振動は、各通りごとに壁で拘束され建屋全体で一本棒のように振動する。壁が縦方向に上から下まで通らなければ、柱位置ごとの変位の違いが大きくなることに留意する。

別紙 1 の附属書 3 では、外壁と内壁通り（外壁より 1 つ内側に入った通り）の上下応答が異なる様子が確認できる。解析モデルの内壁通りは、外壁に比べて建物下部で壁がかなり少なく、柱で支持する構造になっている。このために外壁と内通りでの上下剛性が異なる。また、地震観測装置は内壁通りにあるが、解析の外壁に近い上下応

答となっている。これらのことから、内壁通りの上下剛性も実際は外壁と一体になるような状態にあると推測され、解析モデルの範囲が不十分であったことを示唆している。

3.2.2 解析目的による解析対象範囲の選択例

2.2 解析目的の①～⑥と対応して、以下に解析対象範囲の選択例を示す。

- ① 耐震安全性における地震応答解析による建物の構成部材の性能照査においては、部材の重要度に応じてモデル化範囲を設定する。
- ② 配管・機器などへの入力となる床応答算定においては、機器・配管系を考慮して関連部材をモデル化する。たとえば、圧力容器関連の応答を求めるためには、機器と共に支持構造、ダイアフラム、スタビライザ・シアラグなど建物と機器・配管系が連成または干渉する部分のモデル化も必要になる。また、床に設置される機器に注目する場合は、その支持部である床及び階下の壁も考慮する必要がある。これらのモデル化が、建屋の上下応答に影響する可能性もある。
- ③ 観測記録の再現解析においては、地震計位置及び、解析対象の振動特性に影響する部材及び周辺地盤をモデル化する。
- ④ 模型実験の事前解析及び再現解析においては、実験結果に影響する部材をモデル化する。
- ⑤ 建物の地震動に対する fragility 評価においては、多くのケースの解析を行うため、損傷モードを考慮した合理的なモデルを作成することが必要と考えられる。また、材料非線形を考慮した強非線形解析が必要なことから、解析ソフトの適用範囲（性能）の考慮も必要である。さらに、地盤、地盤建物相互作用、建物特性（剛性、減衰、様々な非線形特性）の不確かさを適切にモデル化する必要がある。
- ⑥ 配管・機器の fragility 評価のための建物応答は、上記に加えて、配管・機器の位置・剛性・質量を考慮したモデル化を行う。

3.3 周辺地盤の解析領域

解析目的に応じて、周辺地盤及び建物・構築物等を含む解析領域を適切に設定する。

【解説】

建物の地震応答解析においては、地盤と建物の相互作用を考慮した解析対象範囲を設定する。また、応答に影響を及ぼす可能性があれば、隣接する建物とその周辺地盤も解析対象範囲とする。

地盤の解析領域は、地層形状や特性等を考慮し、解析対象建物の応答結果への影響が十分小さくなる範囲に設定する。

なお、建物振動の深さ方向への 1 次元的な波動伝播だけでなく、支持地盤内で建物地盤の連成 1 次振動モード（水平及び上下）が含まれるように地中の応力分布（ひず

み分布)なども考慮して、地盤の解析領域を設定することが望ましい。

また、解放基盤や地層が傾斜したり不整形である場合は、その影響を考慮するために、地盤のモデル化に対する事前検討を行うのが望ましい。

3.3.1 地盤の解析領域の水平方向の対象範囲

解析領域の水平方向の地盤の長さは、JEAG4601-1987²⁶では、粘性境界を用いる場合、建物幅によらず、注目する波長 $\lambda = V_s/f_L$ を含む長さとしている（ここに、 V_s ：地盤のせん断波速度、 f_L ：解析における最低振動数）。例えば、解析側面境界の大きさは、検討用振動数を 1Hz 以上とすると、せん断波速度 500m/s の地盤では 500m となる。建物幅 B が 80m 程度とすると約 $6B$ となる。

地盤が弾塑性挙動する場合は、建物振動による地盤への逸散波は短い距離で消散するため、狭い領域となる場合がある。

3.3.2 地盤の解析領域の深さ方向の対象範囲

解析領域の底面を粘性境界として入射波を入力する場合は、解析領域底面において、建物による振動の影響が十分に小さくなる深さとする。

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数の影響及び建物振動の地盤への逸散を考慮して、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。

JEAG4601-1987²⁶では、地盤の解析領域底面までの深さ $H = V_s/(a \cdot f_L)$ とし、粘性境界とする場合は 1/10 波長 ($a = 10$)、固定境界の場合は 1/2 波長 ($a = 2$) としている。粘性境界とする場合、 $V_s=500\text{m/s}$ の地盤で 1Hz 以上の振動数領域で精度を確保する場合は、 $H=50\text{m}$ となる。

一方、建物基礎の振動による地盤の振動性状を考慮すると、地盤内の鉛直応力の影響範囲も考慮するのが望ましい。正方形基礎の支持地盤における圧力球根が支持圧力の 1/10 になる範囲を考慮すると、建物基礎幅の 2 倍程度の高さが必要となると考えられる。

なお、支持地盤が非常に固い場合について、NUREG/CR-7230²⁷には、 V_s が 2438 m/s (8000 ft/s) 以上の地盤に設置された建物は、基礎固定モデルとみなせることが示されている。また、NUREG/CR-6896²⁸、ASCE SE 4-16¹⁹も参考になる。

3.4 解析対象範囲としての隣接建物

解析対象の建物と隣接建物が同等（質量が同等か、固有振動数が近接）で、地盤が比較的柔らかい場合は、解析対象の建物への影響が大きいことが予想されるため、解析対象範囲に含めることが望ましい。図 II-3-2 に建物と周辺地盤の模式図を示す。

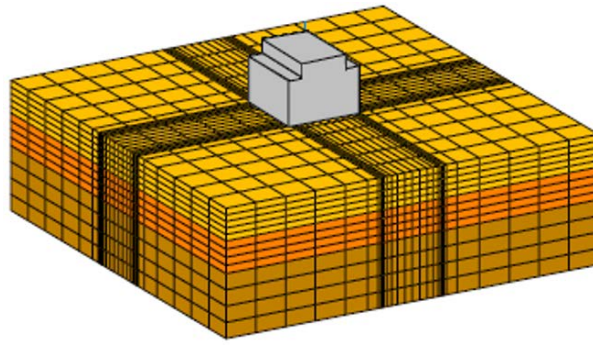


図 II-3-2 建物と周辺地盤の模式図

4. 形状モデルの作成

4.1 はじめに

解析目的に応じて適切に形状モデルを作成する。

【解説】

有限要素解析においては、解析対象の建物・地盤の幾何学形状を有限要素メッシュとして作成する必要がある。このため、はじめに 3 次元 CAD ソフトにより形状モデルデータを作成し、これに基づいて構造モデルデータ (FEM 解析データ) を作成する。ここで、形状モデルデータとは、線形状、面形状、立体形状のパーツで構成される形状データ (ジオメトリデータ) を指し、構造モデルデータとは、この形状データから作成される有限要素メッシュデータに質量、材料、境界条件、減衰、入力地震動、初期条件等を設定したモデルデータを指す。

形状モデルデータの作成とは、立体的なモデルを計算機上に作成することである。一般に、形状モデルデータは、3 次元 CAD ソフトまたは FEM のプリソフトにより作成し、柱、梁、床、壁などを線形状、面形状、立体形状 (立方体、円筒、円錐等) の部品で構成する。これらのデータを交換するためのデータ形式には、ACIS、Parasolid、STEP、dwg、IGES 等が用いられる。

従来は、形状モデルデータを作成せず有限要素メッシュデータを直接作成することもあったが、複雑なモデル作成に多大の労力が必要で、かつ、形状の追加・変更及びモデルの正しさの確認が容易ではないことから、3 次元 CAD や BIM (Building Information Modeling) などにより形状モデルデータを作成し、それを基に有限要素メッシュデータを作成する方法が普及しつつある。

機械系の解析においては、3 次元 CAD ソフトにより作成した形状モデルデータから、構造モデルデータを作成するのが一般的になっている。建築系においても BIM ソフトの発展等により同様の傾向にある。

4.2 建物の形状モデルの作成

建物の形状モデルは、根拠資料を明らかにし、構造モデルの構築方法を考慮しながら適切に作成する。

【解説】

構造図面に基づいて構造部材ごとに形状モデルを作成する。構造部材のモデル化方法は、モデル化に用いる有限要素、部材の種類 (鉄筋コンクリート、鉄骨、鉄骨鉄筋コンクリート等) によって、適切なモデル化ルールを設定し、一定のルールで作成する。

既存建物の地震時の性能照査などにおいては、必要に応じて、形状モデルが図面及び実際と整合しているか実地調査（プラントウォークダウン）等で確認する。また、大地震後の耐震安全性確認における地震応答解析では、観測記録だけでなく、ひび割れなどの建物の損傷度を詳細に確認し、形状モデルに反映することもある。

図面通り（実物通り）の形状モデルを作成することは難しいため、解析結果に影響が小さいと根拠が示せる場合は、柱・梁・壁の通り芯からのずれ、勾配、段違い床等を簡略化することができる。

3次元 FEM モデルは、実在の建物と同等にみられがちであるが、実際の建物と全く同じ形状モデルを作成することは困難で、いくつかの簡略化をせざるを得ない。その簡略化が解析対象の応答に影響を与えることのないように、モデル化を行う必要があり、適切なモデル化ルールが必要である。

形状モデルは、作成する構造モデルのタイプにより作成方法が異なる。以下に 2 つの例を示す。

- ・ 構造モデルに梁・シェル要素モデルを用いる場合（梁・シェル構造モデル）
- ・ 構造モデルにソリッド要素モデルを用いる場合（ソリッド構造モデル）

ソリッド構造モデルの場合、形状モデルの作成は、建物の部材形状を 3 次元 CAD ソフトにより立方体・円筒・球等のソリッド形状でモデル化する。梁・シェル構造モデルの場合は、有限要素メッシュと連携したプリポストなどで、柱・梁については断面情報をもつ線形状で、床・壁については厚さ情報を持つ面形状でモデル化し、それら断面情報を属性データとして付与する。いずれの場合も、形状モデル作成開始時点で、解析者は構造モデルの構築方法を選択する必要がある。

断面設計において応力解析に 3 次元 FEM 解析を用いる場合は、一般的に部材の断面力が直接得られる梁・シェル構造モデルが用いられる。

形状モデルと構造モデルの違いを図 II-4-1 に示す。

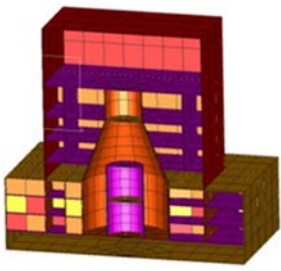
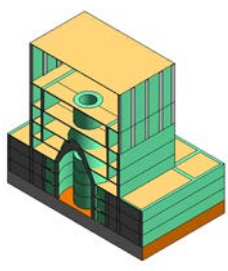
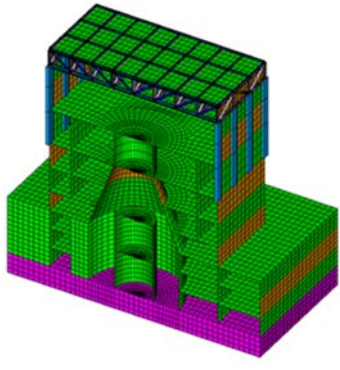
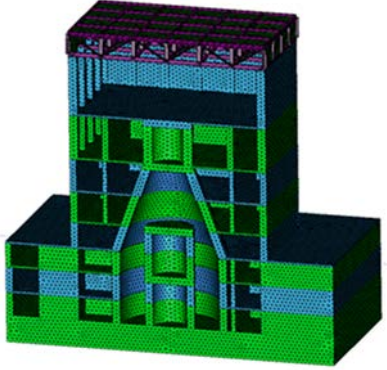
形状モデル		
構造モデル (有限要素メッシュ)		
	梁・シェル構造モデル	ソリッド構造モデル

図 II-4-1 形状モデル及び構造モデルの構築例²⁹

構造モデルを梁・シェル要素で構築する場合は、形状モデルとしては最も粗いメッシュモデルを面形状で作成することになり、構造モデルではそれを適切な大きさに再分割したメッシュを作成することになる。

構造モデルをソリッド要素で構築する場合は、柱・梁・床・壁等を直方体、シェル壁を円筒形状等でモデル化し、メッシュ分割をすることになる。

4.2.1 梁・シェル要素によるモデル化ルール例

構造モデルを梁・シェル要素でモデル化する場合は、部材ごとにモデル化の適切なルールを設定し、一定のルールで作成する。

たとえば、柱、梁、床、壁の解析モデル芯を柱端部、梁・床の解析モデル芯の高さ位置を各階床面、柱・梁の解析モデル芯を平面図上で一致させるように設定する。この場合、部材芯と解析モデル芯にずれが生じるため、正確にモデル化する場合は接合部の領域を剛域等で考慮する必要がある。

以下、代表的な部材、部位について形状モデル作成例を示す。

・鉄筋コンクリート柱・梁

梁芯の高さは基準床上の高さとし、柱芯を通り芯位置とし、梁の端部を柱芯と接合する。梁の平面方向の解析モデル芯は通り芯とする。これが柱芯と大きくずれる場合は、適宜梁が取りつく先に接合するための節点を設ける。

- ・鉄骨鉄筋コンクリート柱・梁

柱、梁の位置や解析モデル芯は鉄筋コンクリート部材と同じである。鉄骨部と鉄筋コンクリート部の弾性定数が異なるので、両者を合成した梁要素としてモデル化するか、それぞれ個別にモデル化し、節点を共有することができる。

- ・鉄筋コンクリート壁

鉄筋コンクリート壁の厚さ方向の位置は壁厚中心位置が原則であるが、これが梁や柱の解析モデル芯とずれている場合、梁芯や柱芯に合わせるが多い。また、外壁については、外壁面に合わせる場合もある。

オペレーションフロア（以下、オペフロ）上部の壁のように大スパンの壁は面外振動に対して精度のよいメッシュ分割をする必要がある。

- ・鉄筋コンクリート床

接合する梁の解析モデル芯位置でモデル化する。段差が大きい場合は、その影響を検討する必要がある。一般の骨組み構造物では梁芯でモデル化されるが、原子力発電施設では基準床の高さでモデル化されることが多い。

- ・鉄骨梁

鉄筋コンクリート梁と同様にモデル化し、適切な断面情報を属性データとして設定する。鉄骨梁はそれを受ける鉄骨柱、または鉄骨鉄筋コンクリート柱などとの接合を考慮する。

- ・鉄骨トラス

原子炉建屋の鉄骨トラスは、部材芯の交点を節点としてモデル化されるが、梁成が大きいために、屋根スラブとモデルの間に隙間ができる。ここで、屋根スラブの解析モデル芯と鉄骨トラスの上弦材の解析モデル芯のずれをオフセット等で解析目的に応じて考慮する。

- ・屋根スラブ

屋根の厚さは薄く面外変形が起こりやすいため、屋根トラスとの接合部を適切にモデル化する。このモデル化が建物の主要固有振動数に影響を及ぼす場合がある。図 II-4-2 の解析モデルの 1 次モードでは、屋根の上下変形とそれを支える外壁の面外変形が連成して、外壁が外側にたわむ箇所では屋根が下にたわんでいる。

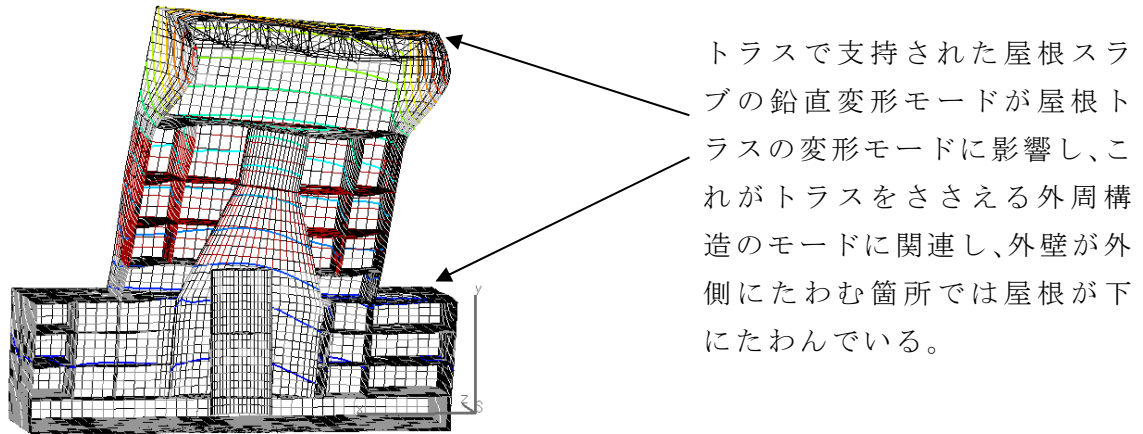


図 II-4-2 屋根の鉛直変形モードと建物の水平変形モードの連成²⁹

- ・ プール水

プール水は一般に付加質量としてモデル化し、構造モデル作成時に考慮する。

- ・ 圧力容器及びその支持部

圧力容器及びその支持部については、梁やシェル要素で簡略化したモデルを作成し、構造モデルとして考慮することが望ましい。質量のみを考慮して周辺部材に負担させる場合は、構造モデル作成時に解析目的に影響を与えないことを十分に確認する。

4.2.2 ソリッド要素によるモデル化ルール例

構造モデルをソリッド要素でモデル化する場合は、部材接合部の境界を一定のルールに基づきモデル化することに留意する。

- ・ 鉄筋コンクリート柱・梁・床・壁・屋根

鉄筋コンクリート造の柱、梁、床、壁は、ソリッド形状（直方体、円筒等）でモデル化する。たとえば、柱、壁は各階ごとに床上面を区切りとし、大梁は柱面で、小梁は大梁の面を、床は柱、梁の面を、壁は柱面、梁底面を区切りとして、立方体等のソリッド形状でモデル化する。図 II-4-3 にソリッド要素による形状モデルの模式図を示す。

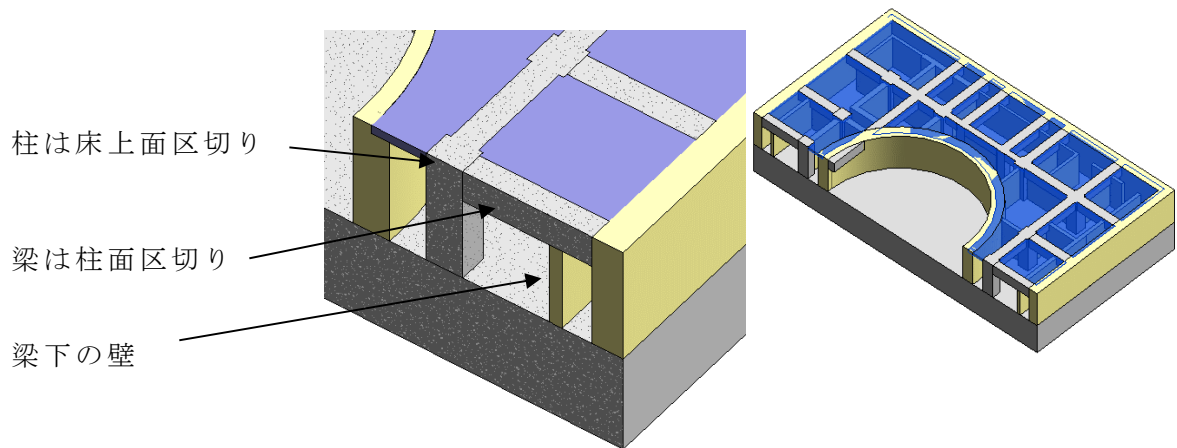


図 II-4-3 ソリッド要素による形状モデルの模式図

- ・鉄骨柱・梁

鉄骨の柱、梁はソリッド形状で作成する。鉄骨と鉄骨の接合部のモデル化においては一定のルールが必要である。実際には接合用のプレートなどを介して接合されるが、これらを簡略化する場合は、事前に簡略化方法の検討を部材レベルで実施するのが望ましい。

- ・鉄骨鉄筋コンクリート柱・梁

鉄骨鉄筋コンクリートの柱・梁はソリッド形状でモデル化し、等価な物性を割り当てるか、個別にモデル化する。

- ・鉄骨トラス

鉄骨トラスは、ソリッド形状でモデル化する。屋根とトラスの接合部も含め実際の構造に即したモデルとする。なお、トラスの部材どうしの接合部を含め、すべてを有限要素のソリッド要素でモデル化すると膨大な要素数になるため、構造モデルでは梁要素、シェル要素を用いる（に変換する）ことを考慮して形状モデルを作成する。

- ・プール水

プール水のモデル化は、動水圧のモデル化方法に依存するが、流体要素で解析する場合は、形状モデルとしてモデル化する。付加質量でモデル化する場合は、構造モデル作成時に考慮する。

- ・圧力容器及びその支持部

圧力容器及びその支持部をすべてソリッド要素でモデル化した研究的事例があるが、一般的な計算環境ではソリッド要素とシェル要素を組み合わせでモデル化する。

4.3 地盤の形状モデルの作成

地盤の形状モデルは、地盤調査資料等にもとづいて、構造モデルを考慮しながら適切に作成する。

【解説】

解析対象領域の地盤のモデル化は、地盤調査資料等に基づいて地層区分（地盤材料）を考慮して、立体形状でモデル化する。図 II-4-4 に地層を考慮したモデル化のイメージ図を示す。

作成したモデルが形状、材料定数ともに調査資料と一致していることを確認する。

有限の限られた地点の地盤情報に基づいて地層モデルを作成する場合には、適切な内挿／外挿方法を用いる。

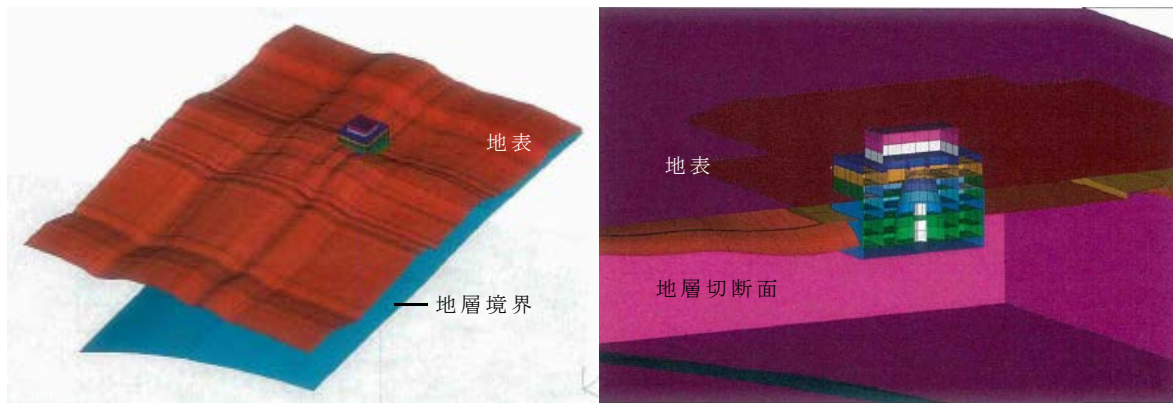


図 II-4-4 地層を考慮したモデル化のイメージ図

入力地震動が水平 1 方向＋鉛直方向の場合は、建物を 3 次元 FEM でモデル化し、地盤をばねでモデル化することがあるが、3 方向同時入力時の地盤ばねの設定は困難である。

5. 構造モデルの作成

5.1 はじめに

形状モデルをもとに、適切な有限要素タイプを用いて適切にメッシュ分割した構造モデルを作成する。

【解説】

有限要素を用いて構造モデル（有限要素モデル）を作成する。要素の設定は解析結果に影響を与えるため、解析目的に応じて適切に設定する。メッシュ作成においては有限要素のタイプ、メッシュの細かさと精度について感度解析等であらかじめ確認する。

メッシュのゆがみ、アスペクト比等のメッシュの品質指標を確認し、メッシュの品質を保つ。

ソリッド要素によるメッシュ作成において部材接合をグルー（接着）要素でモデル化する場合は、解析結果への影響が小さいことを確認する。

5.2 有限要素タイプの違い

形状モデルから、適切な有限要素タイプを用いて適切にメッシュを作成する。部材芯のずれ、メッシュのゆがみ、アスペクト比等メッシュの品質指標に留意する。

【解説】

構造モデルは有限要素で構成されるモデルである。有限要素には、棒要素、梁要素、シェル要素、4面体要素・5面体要素・6面体要素等のソリッド要素などがある。また、それぞれの要素は、精度、非線形の考慮などにより複数の定式がある。

構造モデルには、前節で説明したように、有限要素タイプとして、柱・梁を梁要素で、壁・床をシェル要素でモデル化する場合と、それらをソリッド要素でモデル化する場合がある。前者は各部材の断面力が直接得られるメリットがあり、後者は部材接合部の実物形状に近いモデル化が可能で建物変形、固有モードをより正確に評価できるメリットがある。

5.2.1 梁・シェル構造モデルによるモデル化の例

梁・シェル構造モデルの場合は、各部材を次のようにモデル化することができる。

・柱、梁部材

梁要素でモデル化し、床・壁のシェル要素と節点を共有するようにメッシュを作成する。鉄筋コンクリート造、鉄骨造も同じように梁要素でモデル化し、断面性能で部材の違いを考慮する。鉄骨鉄筋コンクリート造については、鉄筋コンクリートと鉄骨を合成したものとする。

- ・床、壁部材

シェル要素でモデル化し、床、壁部材に接続する柱・梁をモデル化した梁要素と節点を共有するようにメッシュを作成する。

- ・壁同士等、隅部

厚い壁同士の部材接合部については、隅部を適切に評価する。図 II-5-1 に考慮方法の一例を示す。

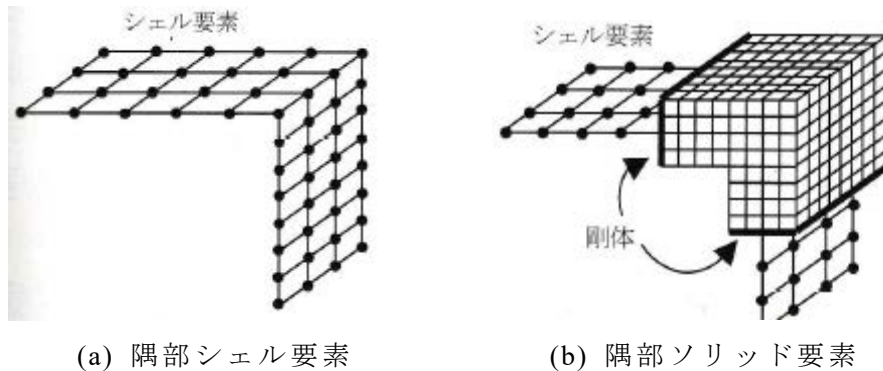


図 II-5-1 隅部のモデル化¹⁵

- ・床と梁（壁と柱）部材

床と梁の解析モデル芯にはずれがある。解析結果に違いが生じる場合は、その距離を考慮してモデル化する。図 II-5-2 に面要素と梁要素の部材接合の一例を示す。

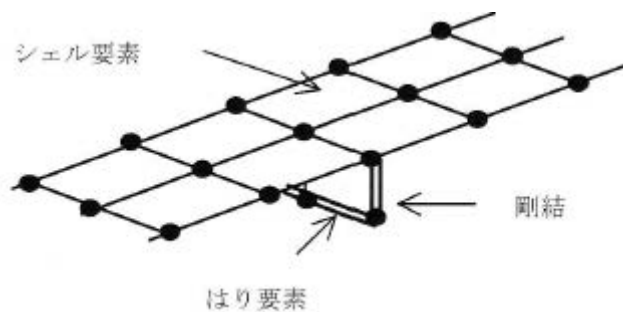


図 II-5-2 面要素と梁要素の部材接合の例¹⁵

- ・屋根スラブ及び屋根トラス部材

屋根スラブのメッシュにその支持部材を適切に接合させるものとする。

- ・鉄骨トラス部材

トラス材の両端接合条件を考慮する。ピン接合と剛接合の部材接合がある。

- ・プール水

付加質量を用いてモデル化を行う場合は、プール水の付加質量を求めプール周囲の節点に加える。

- ・圧力容器及びその支持部

梁要素やシェル要素でモデルを作成する場合には、質量を適切に配分したモデルを作成し、建屋側支持部のメッシュと適切に接合する。付加質量を用いてモデル化を行う場合は、圧力容器及びその支持部の付加質量を求め、各階の支持部に該当する箇所の節点に適切に加える。

5.2.2 ソリッド要素によるモデル化の例

- ・柱、梁、床、壁

柱、梁、床、壁部材は、ソリッド要素（4面体、5面体、6面体等）でモデル化する。四面体1次要素を用いる場合は、2次要素でも解析し、その精度が十分であることを確認したメッシュとする。

- ・プール水

プール水は、構造－流体連成機能を用いて流体要素でモデル化するか、付加質量でモデル化する。また、スロッシング現象を対象とする場合は、それに対応できる要素を用いる。

- ・鉄骨トラス部材

梁要素またはシェル要素でモデル化する。研究目的ではソリッド要素でモデル化された例があるが、一般の計算環境では実施困難である。

本解析要領の別紙1の附属書1に、KARISMAプロジェクトの建物モデルから基礎～B2F間を取り出し、梁・シェル構造モデルとソリッド構造モデルによる解析を行い、その結果の違いを示している（表II-5-1）。NS方向に水平慣性力を作用させた解析では、全体的に梁・シェル構造モデルの方が変形が大きく、最も大きく変形した箇所の変位については約2割大きい。同じ解析モデルでそれぞれの1次～3次の固有振動数を基礎固定条件で比較した結果では、梁・シェル構造モデルが約15%低い結果となっている。これらの違いは梁・シェル構造モデルの接合部の剛域のモデル化の違いによるものと考えられる。

表 II-5-1 建屋基礎～B2F 間の梁・シェル構造モデルとソリッド構造モデルの固有振動数の比較（基礎固定）

	梁・シェル構造モデル	ソリッド構造モデル	ソリッド構造モデルに対する梁・シェル構造モデルの比
1 次	27.8 Hz	33.8 Hz	0.82
2 次	34.7 Hz	40.7 Hz	0.85
3 次	38.9 Hz	44.5 Hz	0.87

また、柱幅、梁せいの大きな 3 階建ての建物について、梁・シェル構造モデルとソリッド構造モデルの比較が報告されており³⁰、その結果でもソリッド構造モデルの固有振動数が高い。一方、壁中心の簡易な原子炉建屋モデルについて両モデルの固有振動数の比較が報告されている²⁹が、その差は小さい。

壁厚に比較して、柱幅・梁幅・梁せいが大きい場合に、両モデルの違いが大きくなることが予想されるため、あらかじめ違いを確認する。

5.3 有限要素メッシュの精度

有限要素のメッシュの大きさは、解析目的に応じた精度を満足するように設定する。また、解析結果がメッシュに依存しないよう十分に小さなメッシュでモデルを作成する。さらに、メッシュの品質が適切であることを確認する。

【解説】

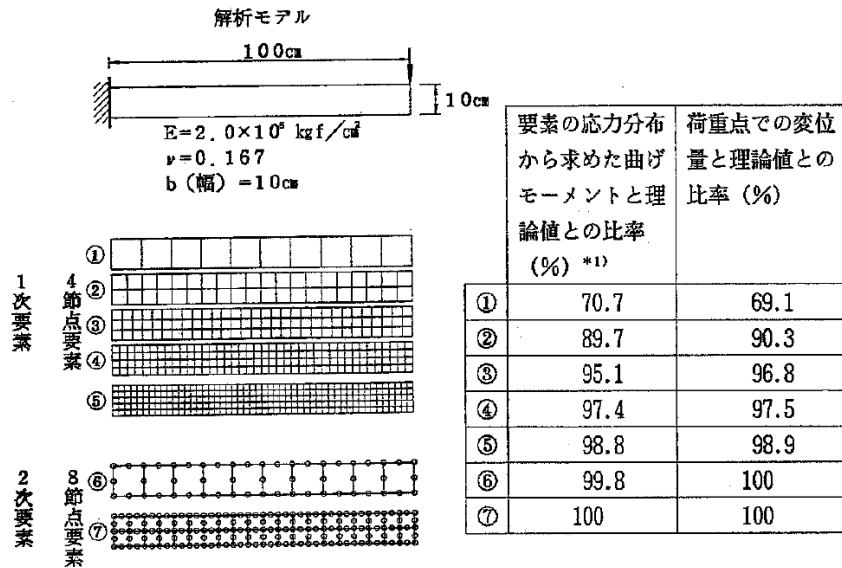
有限要素のメッシュサイズは、静的解析および動的解析において十分な解析精度を得られるように適切なサイズとする。適切なサイズは感度解析や過去の類似の解析事例から求める。

5.3.1 静的解析のメッシュサイズ

静的解析においては、それ以上メッシュサイズを小さくしても、部材のひずみ、応力への影響がほとんどみられないサイズとする。ASCE/SEI 4-16¹⁹では、Martin and Ostadan³¹を参照し、スラブや地下外壁の曲げ評価においては短辺方向に 6 要素以上、その他の壁の曲げ評価に対しては鉛直方向に 4 要素以上とし、開口周りはさらに再分割するなどのルールを示している。

一般に 1 次アイソパラメトリック 4 節点要素で曲げ問題を解くには多くのメッシュを要する。日本コンクリート工学協会の解析事例³²によると、長さが 100 cm、断面が 10 cm×10 cm の長い片持ち梁の解析において、理論解に対して 98.9%の精度を得るためには、2 cm 角の正方メッシュ（長さ方向 50 メッシュ、幅方向 5 メッシュ）が必要である（図 II-5-3）。一方、Nastran の CQUAD4（別紙 1 の附属書 6 参照）では、5

cm 角の正方メッシュ（長さ方向 10 メッシュ、幅方向 2 メッシュ）で、同等の精度が得られる。このように、有限要素タイプによっても精度が異なることにも留意する。

図 II-5-3 アイソパラメトリック正方4角形要素による片持ち梁解析³²

5.3.2 動的解析のメッシュサイズ

動的解析のメッシュサイズは透過振動数 $f_{\max}$ から求まる(5-1)式におけるサイズ以下とする。JEAG4601-1987²⁶では、(5-1)式における係数 a をLysemerの提案³³を参照し8～12としているが、既往の経験値として5が目安とされていることも示している。ASCE/SEI 4-16¹⁹, 5.34 Soil Element Sizeでは、一次元地盤のメッシュサイズについて $a=5$ としている。

$$\Delta h < \frac{V_s}{a \cdot f_{\max}} \quad (5-1)$$

ここで、 Δh は、メッシュ辺の大きい方の長さである。ASCE/SEI 4-16¹⁹では、非線形地盤建物連成解析において、 Δh は波長の1/10を超えない大きさとしている。また、 $f_{\max}$ は、NRC スタッフガイド³⁴では50 Hz以上が求められており、MHIによるUS-APWR標準プラントのSeismic Design Bases³⁵では70Hzを用いて検討している。

上記にかかわらず、地震応答解析の地震動の刻み時間は一般的に0.01秒で、ナイキスト振動数は50Hzである。これは2点で一周期を表した場合であって、物理的には4点程度、すなわち0.04秒(25Hz)程度が必要なことから、弾性解析では構造の透過振動数のみを高くしても意味がない。非線形解析において破壊による高振動数成分に注目する場合は、細かいメッシュが必要になる場合もある。

(1) 建物のメッシュサイズ

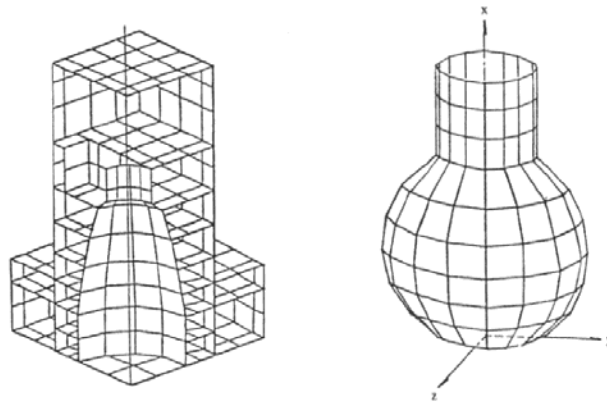
耐力壁のひび割れ、局所的な損傷を評価するための応力を求める場合には、より詳細なメッシュ分割が必要なこともある。例えば、耐震壁の加力試験の再現解析においては、ひび割れ及び損傷の評価を目的として、約2mの試験体高さ(上下を基礎と梁

で拘束されている) を 10 分割程度でモデル化している³⁶。

1990 年頃は、計算機能力の限界もあり、3 次元 FEM 解析で用いられた建物高さ方向のメッシュは 1 メッシュ／階という例もみられる²⁶ (図 II-5-4)。一辺が 2m 程度の壁開口を考慮すると建物高さ方向のメッシュは 4 メッシュ／階程度になる³⁷。コンクリート強度 F_c が 40 程度の鉄筋コンクリート ($V_s \div 2500 \text{ m/s}$) で透過振動数を $f_c=50\text{Hz}$ とし、下記の式からメッシュサイズを求めると $L \div 10\text{m}$ となり、4 メッシュ／階は弾性範囲の建物の変形を求めるために十分な細かさといえる。弾塑性解析を行う場合は、局所に発生する応力を弾性解析により求め、その結果を踏まえて適切にメッシュを細かくする。

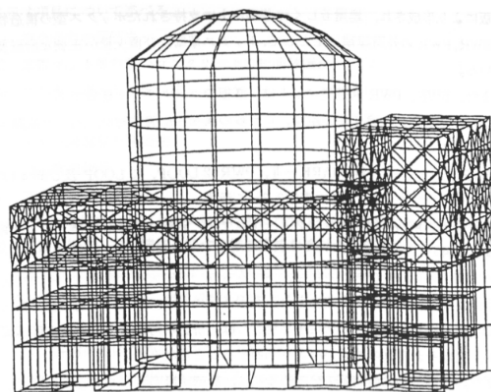
$$L = \frac{V_s}{5 \cdot f_c} \quad (5-2)$$

ここで、 V_s は、鉄筋コンクリート材料のせん断波速度 (m/s) である。



(a) 原子炉建屋の 3 次元モデル
(1/4 部分モデル)

(b) 任意形状シェルの 3 次元モデル



(c) 外部遮蔽建屋、周辺建屋モデル

図 II-5-4 JEAG4601-1987 におけるメッシュ例²⁶

原子炉建屋におけるメッシュの比較例：解析事例（別紙 1 の附属書 7）によると、KARISMA¹ の建物の壁及び床のメッシュサイズを 4 倍（面積で 16 倍）に変えたモデルの固有振動数及び地震応答解析の応答値にほとんど違いはなかった。これは原子炉建屋の主要振動モードが外壁のせん断挙動であり、この挙動に対しては十分に詳細なメッシュサイズであったためと考えられる。

一方、KARISMA のクレーン階の床レベルのスラブ（4F 屋根スラブ）は、MITC（テソル成分）シェル要素でモデル化しているが、四辺固定条件として、固有振動数を求めたところ、短辺方向 4 分割で 12.6 Hz、短辺方向 16 分割で 11.0 Hz となる違いがみられた。これは、MITC シェル要素を用いて面外変形を考慮するためには、4 分割では分割数が少なく精度が不十分であることを示すと考えられる（別紙 1 の附属書 6）。

(2) 地盤のメッシュサイズ

地盤のメッシュは、地層形状及び建物の有限要素メッシュとの整合性の制約からメッシュの品質が悪くなる可能性があるため、面接触要素、接着要素（グルー要素）等を用いることも考えられる。

建物基礎下の地盤のメッシュは、地盤反力を精度よく評価できるものとする。また基礎端部の応力集中を考慮して、詳細なメッシュを用いる。

5.3.3 メッシュの品質

有限要素法のメッシュの品質指標についてはヤコビアン、アスペクト比（要素の辺どうしの比）などがある。市販の多くの有限要素法プリソフトがこれらの指標とガイドを提供していることから、それらのソフトを活用して指標が適切であることを確認する。指標として、ソフトによっては、無効（解析不能）、不良、不十分、良好などの区分を示すものがある。アスペクト比であれば 5 以下が望ましい。

壁・床の開口回りの応力集中状態を把握するためには、さらに詳細なメッシュが必要となる場合もある。応力集中が問題になる場合については、感度解析や過去の類似の解析事例などから十分に小さく適切なメッシュサイズを設定する。

5.4 接着条件

柱・梁・床・壁の部材間の接続を接着要素でモデル化する場合には、それら部材のメッシュサイズについて感度解析を行い、応答値への影響が十分に小さいことを確認する。

6. 質量モデル

6.1 はじめに

建物の総質量における部材質量、機器質量などのモデル化においては、耐震壁などの剛性評価部材との対応も確認して、建物の固有振動数に及ぼす影響が十分小さくなるように質量モデルを作成する。

【解説】

二次部材などを含めて、質量は詳細部もモデル化し、剛性評価は耐震壁だけとすると、固有振動数を低く評価する可能性がある。

6.2 質量を考慮する範囲

解析における質量は、想定する解析状態における質量をすべて考慮する。地震応答解析においては、地震時に作用する重量を考慮する。

【解説】

3次元 FEM モデルの質量のモデル化範囲は解析モデルの範囲と一致することを確認する。目的に応じて、質量のみを追加する場合は、その影響を確認する。これらの質量には、二次部材、非構造部材を含めた建物自身の質量及び設備・機器の質量及び積載荷重を含む。

機器荷重としては、各階の床全体でならした機器荷重や、床ごとにならした機器荷重として提示される場合と、ならした機器荷重とは別途重量機器の重量と位置が配置図上に提示される場合があり、後者の場合は、それぞれの位置で質量をモデル化する。

3次元 FEM 解析では、建物のねじれなどの3次元的挙動を把握するために、機器荷重等は、基本的にそれらの設置位置で考慮するものとし、設置された部屋や部位の床の質量に含むなどのモデル化を行う。

6.3 質量の有限要素モデル

質量の有限要素モデルには、集中質量 (Lumped mass)、分布質量 (Consistent mass) を適切に設定する。

【解説】

建物自身の質量は、ソリッド構造モデルの場合は、形状モデルの質量密度を設定すればよいが、梁・シェル構造モデルの場合は、接合部に要素の重複が生じることを考慮して質量密度を設定し、各階の質量が実際と一致するように設定する。

例として、形状モデル等を用いて各階ごとに求めた質量の値と梁・シェル構造モデルの体積×質量密度を比較し、その違いを床の質量で調整することが考えられる。

梁要素、シェル要素の集中質量の算定においては、3軸方向及び3軸まわりの回転

慣性質量を考慮する。

7. 材料モデル

7.1 はじめに

3次元 FEM 解析に用いる材料モデルは、解析目的に応じて適切に設定し、その妥当性を確認する。材料非線形挙動を考慮する場合は、用いる材料モデル（構成則）の定義を明らかにし、必要な材料パラメータを設定する。

【解説】

材料モデルは、応力とひずみ関係の数理モデル（構成則）を指し、これらを規定するパラメータとして、剛性、強度、減衰、塑性関連の材料パラメータがある。これらの材料パラメータについては、解析目的に応じて材料のばらつきによる変動幅を考慮する必要がある。

耐震設計に係る工認審査ガイド⁴では「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」が求められている。また、IAEA の Safety Guide¹⁸では設計に対するガイド¹⁶や既存施設に対するガイド³⁸が示され、それぞれ目的に応じた設定が求められている。

設計時には構造計算規準等の関連規準・ガイドに従った値を用いた解析がなされ、大きな地震を経験した時、構造変更がされた時などにモデルが更新される。

PRA 検討や材料非線形解析による性能照査においては、材料試験等により必要な材料パラメータを設定する。

原子炉建屋の 3 次元 FEM モデルによる地震応答解析においては、鉄筋コンクリート、鉄骨の弾塑性を考慮した解析が可能となっている。こうした弾塑性解析においては、それぞれの材料または部材の構成則及びそのパラメータが解析精度に影響を及ぼすため、解析に用いている構成則の妥当性の検討が重要である。原子炉建屋の地震応答解析に適用するにあたっては、事前に部材試験等を対象とした再現解析により構成則の妥当性及びその設定方法を確認する必要がある。

また、弾塑性解析については、同じ構成則でも解析ソフトによってパラメータが異なることがある。これらについては、要素試験・部材試験等、既往の再現解析等を参考に設定する。適用した構成側については、具体的なパラメータ等の内容も含めて記録する。

7.2 鉄筋コンクリート

鉄筋コンクリートの構成則及びその材料定数は根拠が明らかなものを用いる。

【解説】

審査ガイド⁴では、機器や配管系の入力地震動として建物の応答が用いられることから、現実的な剛性評価をすることや、設計基準強度と実強度の関係に留意することとしている。

3次元 FEM 解析におけるコンクリート及び鋼材の材料定数及び許容応力度は、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」¹⁴等の発電用原子炉施設に関連する指針によることができる。

弾塑性構成則については、日本建築学会の「空間構造の数値解析ガイドブック」¹⁵、土木学会の「コンクリート標準示方書（2017）」¹⁶等に記載された適用実績がある構成則を用いることができる。

鉄筋コンクリートの構成則については、ひび割れのモデル、ひび割れ発生以降のコンクリートと鉄筋の相互作用モデル、ひび割れ面での応力伝達モデル、鋼材の弾塑性履歴モデル等において、様々な提案がなされており、解析対象に応じて適切に選択することが必要である¹⁴。

原子力施設の構造物の解析においては、前川らの提案モデル³⁹の適用が多くみられるが、解析ソフトにより定式化の詳細が異なることもある。また、部材の解析事例で洪・野口らによる構成則⁴⁰や、3次元構造物の実験への適用で長沼らによる構成則⁴¹の適用例がある。

鉄筋コンクリートの非線形性を考慮した解析を行う場合は、材料試験の再現解析により、用いる構成則の妥当性を事前に確認する。

建屋 3次元 FEM モデルに対する非線形構成則の適用においては、床、壁のみ鉄筋コンクリートの構成則を考慮する場合があるが、終局状態まで検討するためには、建屋のせん断変形に加えて曲げ変形が大きくなるため、柱・梁に対しても鉄筋コンクリートの構成則を考慮する必要がある。

7.3 鉄骨

鋼材の構成則及び材料定数は規格・規準等を含め妥当性が明らかなものを用いる。

【解説】

日本建築学会の「鋼構造設計規準」⁴²、及び日本機械学会の「発電用原子力設備規格 設計・建設規格」⁴³、再現解析ではミルシート等の材料定数を用いることができる。

7.4 鉄骨鉄筋コンクリート

鉄骨・鉄筋コンクリートの構成則は基準を含め妥当性が明らかなものを用いる。

【解説】

鉄骨鉄筋コンクリート部材の材料定数については、日本建築学会の「鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」⁴⁴によることができる。実測値が得られている場合はその値を用いる。

7.5 地盤

地盤の材料定数は地盤調査及び室内試験結果に基づいて設定する。また、材料非線形については、応答ひずみのレベルに応じて適切な構成則と解析方法を用いる。

【解説】

解析で用いる質量密度は規格に基づいた物理試験により、強度、材料非線形物性についてはサンプリング試験体の室内試験により設定する。初期剛性については弾性波速度検層（PS 検層）試験等に基づいて設定する。構成則の種類によっては、その他の材料定数が必要になることがある。

地盤のヤング率 $E(\text{N/m}^2)$ 、せん断弾性係数 $G(\text{N/m}^2)$ 、質量密度 $\rho(\text{kg/m}^3)$ 、ポアソン比 ν と地盤の縦波速度 $V_p(\text{m/s})$ 、せん断波速度 $V_s(\text{m/s})$ と間には以下の関係がある。

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}, \quad V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}}, \quad \lambda = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad (7-1)$$

7.5.1 地盤の弾塑性挙動

地盤のひずみ依存性及び液状化等の弾塑性挙動については、多数の構成則が提案されており、その材料定数は構成則特有のものがある。これらの特有な材料定数は、通常試験によって求めることが困難な場合があり、類似地盤の既往の妥当性解析等を根拠に設定することがある。このような場合には、感度解析などにより、その材料定数の影響を十分に確認する必要がある。

地盤の弾塑性構成則には、古典的な Mohr-Coulomb モデル、Drucker-Prager モデルがあるほか、より高度な構成則として、国内では橋口（下負荷面モデル面モデル）⁴⁵、Asaoka ら（SYS カムクレイモデル）⁴⁶、Oka ら⁴⁷、Iai ら⁴⁸による構成則などがある。ASCE/SEI 4-16¹⁹に紹介されている OpenSees⁴⁹には、複数の構成則が提供されている。

図 II-7-1 にせん断ひずみの大きさと地盤構成則の関係を示す。これらの構成則を用いて実地盤の地震応答解析を行うには、多くの知識及び経験が求められる。

一方、地盤の弾塑性挙動を簡易的に考慮する方法として、有効せん断ひずみ時の割線剛性（等価剛性）で線形解析を行う方法（等価線形化法）があるが（図 II-7-2）、この方法には適用範囲があるので注意が必要である。石原は 0.2%～0.8%程度をその上限とした表を示している⁵⁰。

Shear strain	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻¹
	Small strain	Medium strain		Large strain	Failure strain	
Elastic						
Elasto-plastic						
Failure						
Effect of load-repetition						
Effect of loading rate						
Model	Linear elastic model		Visco-elastic model		Load history tracing type model	
Method of response analysis	Linear method		Equivalent linear method		Step-by-step integration method	

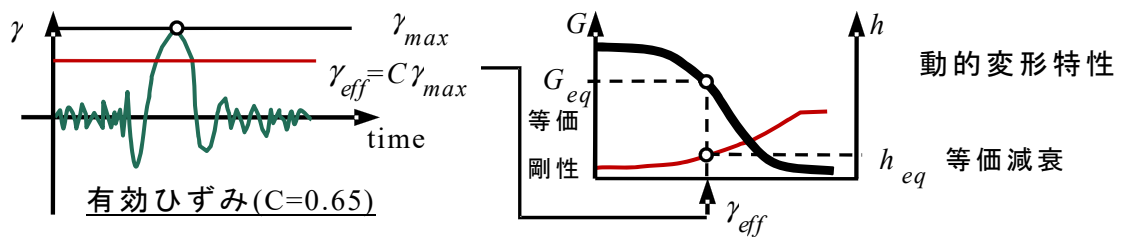
図 II-7-1 セン断ひずみの大きさと地盤構成則の関係（K. Ishihara⁵⁰に加筆）

図 II-7-2 等価線形解析における等価剛性と等価減衰

等価線形解析における有効ひずみ

有効せん断ひずみ γ_{eff} は、Schnabel ら²¹ は実験値から最大せん断ひずみ γ_{max} に対して 0.5~0.7 倍としているが、一般的な表層地盤では 0.65 倍が、原子力施設における解析では 0.7 倍が用いられることが多い。

7.6 材料減衰

材料減衰定数は、材料試験値など根拠ある数値を用いる。

【解説】

減衰の原因としては、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、2次部材・仕上げ材との摩擦等がある。これらの材料減衰定数は、材料固有の減衰を粘性減衰（速度に比例する減衰）として評価している。

材料減衰定数が大きいほど、動的解析の応答値は小さくなる。したがって、減衰定数を小さく見積もることは安全側の設計を行うことになり、過大な減衰を設定することは、建物の応答値を過小評価し危険側の評価となることに留意する。

7.6.1 建物の減衰

耐震設計に関しては、粘性減衰定数がいくつかのガイドで示されている。

表 II-7-1 に弾性応答解析における ASCE 標準の値を示す¹⁹。応答レベルが大きくなるに従い減衰が大きいのは、大きくなる応答では材料非線形の影響が大きくなるためである。

表 II-7-1 材料の粘性減衰定数（ASCE/SEI 4-16）¹⁹

	応答レベル 1	応答レベル 2	応答レベル 3
鉄筋コンクリート	4 %	7 %	10 %
プレストレスコンクリート	2 %	5 %	7 %
溶接または摩擦ボルト接合の鋼製構造物	2 %	4 %	7 %
ベアリングボルト接合の鋼製構造物	4 %	7 %	10 %

ここで、応答レベル 1、2、3 は、それぞれ、鉄筋コンクリートの壁、梁、柱にひび割れが発生していない状態、ひび割れが発生した状態、大きな永久ひずみが発生した状態を指す。

NRC:RG1.61 Revision 1, 2007 にも次のように SSE 地震動（safe shutdown earthquake ground motion）に対する構造物の材料減衰値が示されているが、応答レベルによる区別は示されていない。

- ・鉄筋コンクリート： 7%
- ・プレストレストコンクリート： 5%
- ・鉄骨造における溶接またはせん断摩擦ボルト接合部： 4%
- ・鋼製格納容器： 4%
- ・鉄骨フレーム建物： 4～7%
- ・ボルトまたはリベット接合による構造物： 4～7%

JEAG4601-1987²⁶では弾性応答解析における減衰を次のように規定している（表 II-7-2）。

表 II-7-2 材料の粘性減衰定数（JEAG4601-1987）²⁶

構造形式	減衰定数
RC 構造物	5%
PCCV	3%
鋼製格納容器	1%
鉄骨構造物	2%

中村ら⁵¹はより現実的な減衰定数として振動実験及び地震観測記録の再現解析で用いられた値を整理し、線形領域においては地震応答解析における原子力施設の鉄筋コンクリート耐震壁の減衰定数は3%程度が適切としている。

7.6.2 地盤の減衰

地盤は、微小ひずみから弾塑性挙動を示し、応力－ひずみ関係が履歴ループを描く。この履歴ループにおけるエネルギー消費を減衰として評価する。減衰はひずみ速度ではなく、ひずみの大きさに依存する。減衰とひずみの関係は動的変形試験によって求めるのが一般的である。

8. 減衰の数理モデル

8.1 はじめに

建物、地盤の内部減衰を適切な数理モデルを用いて設定する。

【解説】

減衰の数理モデルは、時間積分法によって2つに分かれ、時間領域において逐次積分する方法では、レーリー減衰、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、要素別レーリー減衰、要素別モード減衰がある。

また、周波数領域の時間積分法では複素減衰がよく用いられるが、上記の減衰を用いることも可能である。

8.2 時間領域における数理モデル

時間領域の応答解析においては、複数の数理モデルがあるため、その違いを考慮して適切なものを用いる。

【解説】

時刻歴応答解析では、剛性比例減衰またはレーリー減衰によって近似されることが多い。その場合には、1点または2点の固有振動数において減衰定数を設定するが、3次元解析では、水平挙動と上下挙動を同時に解析するため、それぞれの固有振動数が異なることを考慮して設定する。

なお、これらの妥当性は観測記録の再現解析等により確認する。感度解析により設定の違いの影響が小さいことを確認したり、線形計算で複素減衰と解析結果が同様の値となることを確認することも必要である。

また、非線形材料については非線形履歴による減衰効果が付加されるが、履歴による減衰効果が付加されない領域でレーリー減衰を用いる場合は、そのパラメータの設定では、非線形領域で過減衰になる可能性があるので注意を要する。また、履歴による減衰効果に加えて、粘性減衰を考慮する場合は、初期剛性または瞬間の接線剛性を用いる方法があるが、その減衰の妥当性を感度解析などで確認する。

さらに、数値解析上の安定性を目的として粘性減衰を用いる場合には、それが構造物の応答に及ぼす影響が十分に小さいことを確認した上で用いる。

以下に代表的な減衰の定式化を示す。この中で、レーリー減衰は、(8-1)式の 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。2つの振動数における減衰定数が設定した減衰定数となるようにモデル化されるため、これらの振動数の間では減衰は小さく評価され、 f_1 より小さい振動数及び f_2 より大きい振動数では大きく評価される。したがって、応答解析で考慮すべき振動数（地盤建物連成の3方向各成分の1次固有振動及び建物の3方向各成分の1次固有振動数）がすべて2つの振動数の間に入るように設定するべきである。

観測記録の再現解析では、主要な振動モードに対する減衰を材料減衰に近くなるように設定することがある。

8.2.1 減衰行列

(1) レーリー減衰

レーリー減衰は速度の係数を(8-1)式とする数理モデルである¹⁹。単一材料の場合に用いられる。解析対象が地盤、コンクリートなど減衰の異なる材料で構成される場合は、(2)複合減衰の要素別減衰が用いられることが多い。

$$\mathbf{C} = \alpha \mathbf{M} + \beta \mathbf{K} \quad (8-1)$$

$$\text{ここで、} \quad \alpha = \frac{2h\omega_1\omega_2}{\omega_1+\omega_2} \quad \beta = \frac{2h}{\omega_1+\omega_2}$$

$\mathbf{M}$ は質量行列、 $\mathbf{K}$ は剛性行列、 h は減衰定数、 ω は角振動数で、 $\omega_1 = f_1/2\pi$ 、 $\omega_2 = f_2/2\pi$ 、ここに、 f_1 と f_2 は主要な固有振動数。

非線形化によって固有振動数が低下した場合には、減衰を過大に評価する場合がある。

レーリー減衰の設定例を解析事例（別紙1の附属書2）に示す。KARISMAの解析モデル・条件でレーリー減衰と複素減衰による地震応答解析結果を比較すると、レーリー減衰による応答が大きい結果となった。（ただし、 f_1 =建物地盤連成の水平1次固有振動数、 $f_2=20\text{Hz}$ （機器の卓越振動数に着目し、JEAC4601の機器・配管系の耐震設計の「1次振動数が20Hz以上の場合は剛構造と見なして差し支えない」の記載より設定））。これは $f_1 \sim f_2$ 間の減衰が複素減衰に比べて小さいためと考えられる。ただし、 f_2 の設定値によってこの傾向が変わることも考えられるため、 f_2 より振動数が大きな振動モードが地震応答に影響する場合には、感度解析などにより確認が必要である。

(2) 複合減衰

有限要素ごとまたは領域ごとに減衰が異なる場合には、有限要素ごとまたは領域ごとに減衰を設定し、それを全体行列に組み込む。このような減衰を複合減衰という¹⁹。

$$\mathbf{C} = \sum_{i=1}^{NS} \mathbf{C}_i \quad (8-2)$$

NS ：要素または領域の数

$\mathbf{C}_i$ ：各要素または各領域の減衰行列

・要素別減衰

要素ごとに減衰が異なる場合には、要素別にレーリー減衰を設定する必要がある。要素別減衰は(8-3)式により求められる。

$$\mathbf{C}_i = \alpha_i \mathbf{M}_i + \beta_i \mathbf{K}_i \quad (8-3)$$

・領域別減衰

領域ごとに減衰が異なる場合には、領域別に減衰を設定する必要がある。領域別減衰は、構造物のある領域ごとに境界フリーの固有モードによるモード減衰を求め、剛体モードを加えた減衰の数理モデルである。

$$\mathbf{C}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_i^{FB} & -\mathbf{C}_i^{FB} \mathbf{T}_i^r \\ -\mathbf{T}_i^{rT} \mathbf{C}_i^{FB} & -\mathbf{T}_i^{rT} \mathbf{C}_i^{FB} \mathbf{T}_i^r \end{bmatrix} \quad (8-4)$$

ここで、

$\mathbf{C}_i^{FB}$ ：各領域の境界面を固定条件で求めた減衰行列

$\mathbf{T}_i^r$ ：各領域の境界面の剛体変形モード行列

8.2.2 複合モード減衰

8.2.1(2)において計算された複合減衰の減衰行列 $\mathbf{C}$ と固有モードを用いて(8-5)式より求めた減衰の数理モデルである¹⁹。

$$h_j = \frac{\{\varphi_j\}^T \mathbf{C} \{\varphi_j\}}{2\omega_j} \quad (8-5)$$

$\{\varphi_j\}$ は、固有モード。

8.3 周波数領域における数理モデル

周波数応答解析では、前節の減衰モデルに加えて、複素減衰を用いることが出来る。

【解説】

周波数応答解析では一般に複素減衰が用いられるが、前節のレーリー減衰などの数理モデルを用いることも可能である。

8.3.1 複素減衰

【解説】

複素減衰は、複素数を用いて表される(8-6)式の h に関わる項である¹⁹。周波数応答解析では、この減衰を用いることが多い。

また、周波数応答解析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、上限値以上の振動数成分の応答をゼロとみなすことになるため、注意が必要である。

$$K^* = K(1 - 2h^2 + 2ih\sqrt{1 - h^2}) \quad \text{または、} \quad K^* = K(1 + 2ih) \quad (8-6)$$

K^* は複素剛性、 K は剛性、 i は虚数単位。 h は減衰定数。

初期の等価線形化法は後者であったが、SHAKE-91⁵²以降は前者が用いられている。
この定式化の違いによる応答への影響は小さい。

9. 境界接合部モデル

9.1 はじめに

建物内外の接合部については、それぞれ適切な構造モデルとしてモデル化を行う。

【解説】

主要な接合部としては、建物基礎底面と支持地盤、建物地下外壁と側面地盤、建物の部材接合部等がある。

9.2 埋め込まれた建物と地盤の接合部のモデル化

建物応答が大振幅となるような場合には、埋め込まれた建物と地盤との接合部を、剥離・再接触、滑りを考慮できるような有限要素、例えばジョイント要素等でモデル化する。

【解説】

地盤に埋め込まれた原子炉建屋の 3 次元 FEM モデルでは、建物と地盤間の相互作用（剥離・再接触、滑り）を考慮したモデル化を行う。モデル化にはジョイント要素（ここではギャップ要素を含む総称）を用いる。ジョイント要素には、建物節点と地盤節点間をばねでモデル化するものと、建物・地盤間を厚みの無いソリッド要素としてモデル化するものがある。前者は節点間の相対変位と応力で、後者は要素ひずみと要素応力で構成則の定式化を行う。

ジョイント要素の初期応力は、その分布が動的解析における反力分布と整合性のとれたものとする。この初期応力が、剥離が生じたときに剥離面に対して解放力として評価されることを確認する。

ジョイント要素における剥離や滑りの構成則は、有限要素タイプにかかわらず、接触面に対して垂直方向と平行方向それぞれについて応力（または力）の軸方向成分及びせん断方向成分として定義される。軸方向成分は剥離・再接触現象をモデル化し、せん断方向成分は滑りをモデル化する。表 II-9-1 と図 II-9-1 及び図 II-9-2(a)にジョイント要素の構成側を示す。

埋め込まれた建物と地盤の接合部のモデル化には、付着力と垂直力に比例する摩擦力が用いられる。両者ともに実際の建設状況に即した材料試験に基づいて設定する。建物地下外壁と側面地盤の間の防水層を考慮した摩擦係数については、地下壁面と地盤の間の動摩擦係数が 0.35 という実験の報告⁵³がある。静摩擦係数はこれよりは大きい、0.5～1.0 とばらつきが大きい。

この知見を考慮して、地下外壁と側面地盤の境界に作用する建物回転振動によるせん断力は、地震動、摩擦係数などについて感度解析によりその影響を確認するのが望ましい。図 II-9-2(b)に接合部の摩擦の付着強度とせん断強度の関係を示す。

表 II-9-1 ジョイント要素の構成則

	軸方向成分	せん断方向成分
圧縮側	弾性	摩擦則
引張側	付着強度まで弾性、以後剥離	付着強度まで、摩擦則、剥離後ゼロ

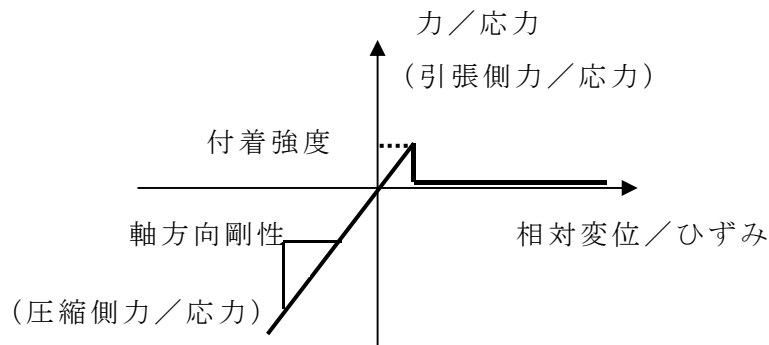
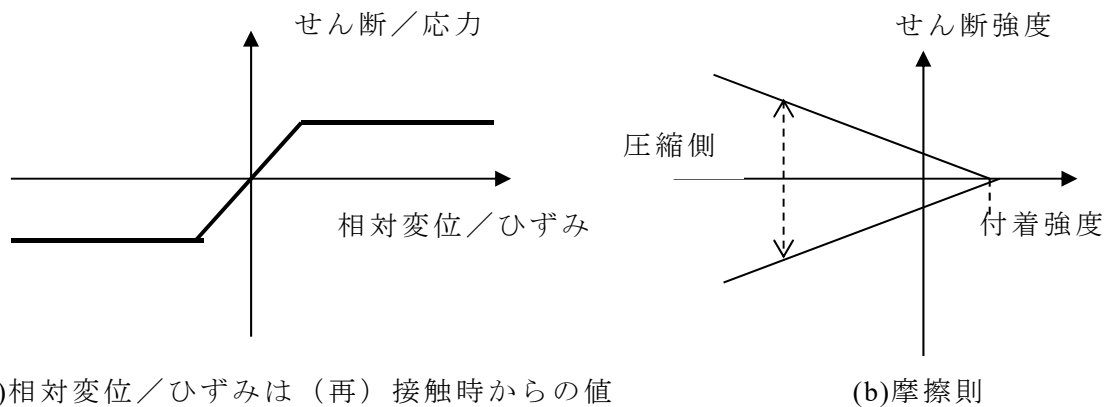


図 II-9-1 ジョイント要素の構成則（軸方向成分）



(a)相対変位／ひずみは（再）接触時からの値

(b)摩擦則

図 II-9-2 ジョイント要素の構成則（せん断方向成分）

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、再接触時に変位や反力が急に変化するために、接触点の加速度（変位の2回微分）が非常に大きくなり、時刻歴ではスパイク状の加速度となる。このスパイク状の加速度を含め、接触点の加速度については、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ことにより、現実的な加速度を求める。

軸方向剛性により回避する場合は、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⁵⁴。

9.3 建物の部材同士の接合

建物の部材同士の接合部の力学性状を考慮してモデル化する。

【解説】

梁・シェル構造モデルにおける建物の柱と梁、柱・梁と壁等の部材同士の接合部と部材芯の間の重複部は、解析結果に影響が少ないモデル化方法を採用する。

ソリッド構造モデルにおいては、接合部の部材境界面に作用する応力集中に留意する。

9.4 解析地盤領域の底面及び側面境界

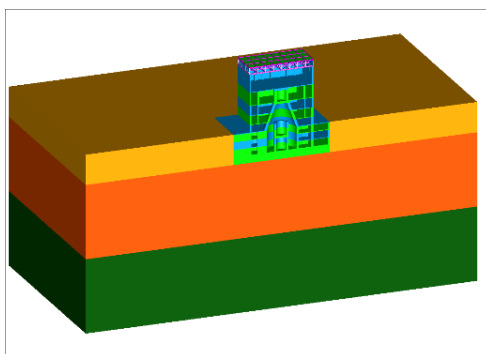
解析地盤領域の側面及び底面境界は、内部加振問題及び外部加振問題の半無限領域への波動の逸散を適切に評価できるモデル化を行う。

【解説】

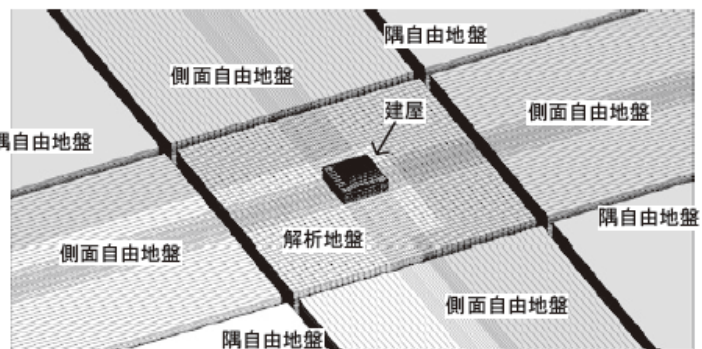
3次元 FEM モデルにおいて地盤の底面、側面は、半無限に続く成層の地盤（以下、半無限地盤）とみなすことになる。実際の地盤に対するモデル化の妥当性は解析対象範囲の節で扱い、ここでは、半無限地盤の解析手法について述べる。

半無限地盤が建物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物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も解析地盤領域内の振動が自由地盤と一致するかという問題である。半無限境界を考慮した地盤建物連成問題の解析手法には、直接法とサブストラクチャ法がある。

これらを考慮できる計算モデルとして、無反射境界[Cundall]⁵⁷、伝達境界[Lysmer]⁵⁵、粘性境界[Lysmer]⁵⁵、切欠き力等のモデル化がある。これらを適切に用いて、半無限地盤を適切にモデル化し、建物の応答を評価する。



(a)底面地盤



(b)側面地盤³⁷

図 II-9-3 解析地盤領域のモデル化

解析地盤領域底面は一般に粘性境界として粘性ダンパーでモデル化される。

解析地盤領域側面は、地盤が成層地盤の場合は、

- ① 周期境界モデル
- ② 遠方地盤を 1 次元の自由地盤とみなした粘性境界⁵⁵、切欠き力モデル
- ③ 周波数領域エネルギー伝達境界⁵⁵
- ④ paraxial モデル⁵⁶
- ⑤ 無反射境界モデル⁵⁷
- ⑥ 無限境界モデル⁵⁸
- ⑦ 時間領域エネルギー伝達境界⁵⁹

等が提案されているが、④から⑦は、実務ではほとんど使われていない。

地盤が成層の場合、図 II-9-3(b)に示される側面自由地盤は①の「周期境界モデル」であらわされることが多い。②の遠方地盤を側面自由地盤及び隅自由地盤で表し「粘性ダンパー」と「切欠き力」で結ぶモデルは、より正確であるが計算負荷が大きくなる課題がある。

周期条件は、地盤が成層地盤の場合に、ある側面地盤とその反対の側面地盤の相対する点の変位が同じとする条件である。

10. 入力地震動

10.1 はじめに

解析目的に応じて、解析地盤領域底面に対して、適切な入力地震動を設定する。

【解説】

地震応答解析に用いる地震動は解析目的に応じて設定されるが、3次元解析では、設定された地震動から解析地盤領域底面への入力地震動に換算して用いる。

耐震安全性評価のための地震応答解析では、基準地震動として設定された地震動と整合する入力地震動とする。観測記録や実験の再現解析では、実際に近い入力地震動を設定する。

10.2 解放基盤で設定された地震動

解放基盤表面で地震動が設定される場合は、解析地盤領域底面に対して、適切な方法でその入力地震動を設定する。

【解説】

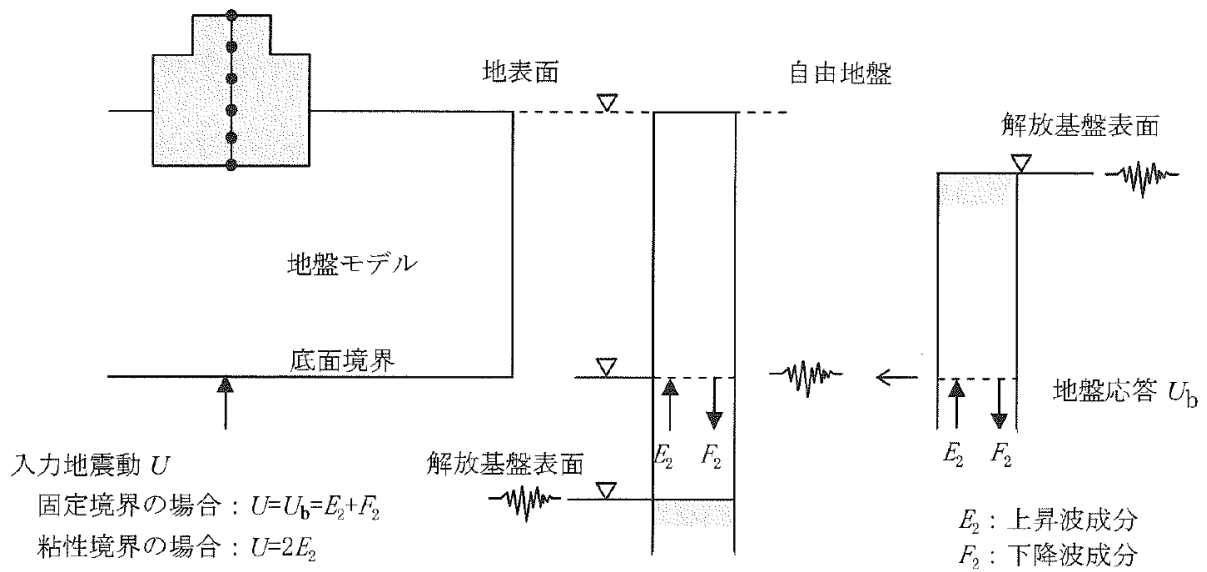
耐震安全性評価における入力地震動は、解放基盤表面で設定される基準地震動より、1次元波動論または2次元解析等で算定される解析地盤領域底面位置の地震応答を用いる。図 II-10-1 に入力地震動作成の概要を示す。この基準地震動は、水平2方向及び鉛直方向について適切に組み合わせたものとする。

3次元FEMの弾性解析においては、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、その解を重ね合わせることが可能であるが、弾塑性解析においては3方向同時に入力する。

3方向成分の入力地震動としては、解析対象サイトにおける地震観測記録を参考に設定することも考えられる。模擬地震動設定については、3方向の相関性や観測された地震動の特性を考慮する必要がある。

3方向の同時入力を想定した入力地震動の作成方法は研究段階であるため、3方向の入力地震動設定や、解析地盤領域底面での入力地震動の位相差等の地震動特性の空間分布について、最新の知見を反映した解析結果の評価を行う。

引き戻し波の作成においては2次元または3次元地盤モデルを用いることができる。



(a) 解放基盤表面が地盤モデル底面より深い場合

(b) 解放基盤表面が地盤モデル底面より浅い場合

図 II-10-1 入力地震動作成の概要

建物の地震観測記録を用いた再現解析においては、基礎位置の観測記録が一致するように解析地盤領域底面への入力波を求め、その地震動を用いた地震応答解析により他の観測位置の記録の再現を試み、解析諸条件の妥当性を検討することがある。

11. 初期状態モデル

11.1 はじめに

自重及び温度分布に対応して、それぞれ適切な応力を初期値として設定する。

【解説】

鉄筋コンクリートの構成則、「建物基礎底面と支持地盤」や「建物地下外壁と側面地盤」の浮上り、剥離や滑りを考慮するジョイント要素に関しては、初期応力の違いが応答結果に影響を及ぼすことがあるため、初期値の設定には注意する。

建物の建設後の変化に対応して、それに応じた初期条件を設定する。

11.2 自重モデル

鉄筋コンクリート部材や地盤の弾塑性、建物基礎の浮上り等を考慮する場合には、それぞれの部材・地盤の初期条件を適切に設定する。

【解説】

自重による初期応力の計算モデルは、鉄筋コンクリートの弾塑性挙動、ジョイント要素による浮上り、剥離や滑りの応答に影響を与える。

動的解析では、質量行列には整合質量行列と集中質量行列の組合せが用いられることがある。これらから計算される自重が静的解析と整合するように考慮する。

初期条件の設定には、3次元 FEM モデルによる自重解析や、静止土圧を用いる。自重解析時には、解析モデルの底面は固定条件、側面は水平拘束が用いられることが多いが、動的解析では周期境界とするなど境界条件が異なることに注意する。

11.3 熱応力モデル

地震時の応答に解析対象の温度による影響の考慮が必要な場合は、それを考慮する。

【解説】

地震時のように短時間の現象では、温度は定常状態と考えられるため、これを初期条件として考慮する。

12. 数値解析に関する条件設定

12.1 はじめに

数値解析手法による誤差が目的とする解析結果に影響しないように、解析手法、解析条件を選択する。

【解説】

有限要素法による解析においては、有限要素、時間積分法、非線形解析アルゴリズム等の解析結果への影響が十分小さいように留意する必要がある。

12.2 有限要素の精度

解析ソフトが用いている有限要素の精度に留意し、解析目的に応じて適切な要素を選択する。

【解説】

有限要素には、梁要素、シェル要素、ソリッド要素それぞれに様々な要素があり、解析ソフトが提供している要素の定式化や妥当性を確認し、解析目的に応じて、適切な要素を選択する。

また、有限要素によって、せん断ロック、アワーグラスモードなど有限要素法特有の変形挙動を示すことがあり、注意を要する。

これらの要素精度は要素を開発した論文で示されたり、NAFEMS²³が提供する例題との比較等で示されることがある。解析者は事前にその精度を確認する必要がある。ただし、既往の検討結果があれば、それを確認してもよい。

12.2.1 梁要素

梁要素は、理論解による梁要素及びアイソパラメトリック要素が代表的な要素である。前者は弾塑性解析に用いることができないため、弾性解析と弾塑性解析を行う場合には、その精度の違い、妥当性を本解析より前に確認しておく必要がある。

12.2.2 シェル要素

空間構造の数値解析ガイドブック¹⁵の「表 3.2.1 板構造の解析に用いられる要素の概念」に示されるように、板構造のための様々な有限要素がある。使用する解析ソフトがどのような定式化を用いているかを把握して用いる必要がある。

12.2.3 ソリッド要素

3次元FEM解析では、メッシュモデルの自動作成が容易であることから、4面体要素がよく使われている。機械系の3次元解析では2次の4面体要素が使われることが多い。なお、1次の4面体要素による解析モデルは一般に精度が悪いため、用いる場

合には注意が必要である。

1 次の 6 面体要素はメッシュの作成が困難なため、従来使われることが少なかったが、最近では解析対象構造をいくつかの部分構造に分けてメッシュを作成し、部分構造間を接着要素で連結したメッシュモデルも利用されている。この場合も定式化やその精度を事前に調査、確認する。

12.3 地震応答解析法

地震応答解析法には、時間領域と周波数領域の方法がある。それぞれに特性を考慮して適切な方法及びパラメータを設定する。

【解説】

地震応答解析法には、線形解析法、非線形解析法、等価線形解析法がある。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領域および周波数領域の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、それぞれ逐次応答解析法と周波数応答解析法に分けられる。逐次応答解析法には、直接時間積分法とモード解析法がある。3次元 FEM 解析ではモード解析法は、ほとんど使われていない。また、スペクトルモード解析法もあるが、3次元 FEM 解析と合わせて用いられることはほとんどない。

非線形解析の場合は、直接時間積分法による逐次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。

12.3.1 直接時間積分法

直接時間積分による応答解析法には計算時間刻みに対して無条件安定の陰解法である Newmark- β 法、Wilson- θ 法がよく用いられるが、ほかに陽解法として中央差分法、条件安定の Runge-Kutta 法、Houbolt 法などがある^{60, 61}。

K.J. Bathe⁶⁰及び O.C. Zienkiewicz⁶¹が指摘するように、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。

3次元 FEM 解析では、最大固有振動数が非常に大きくなる傾向がある。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。積分方法、計算時間刻みによる数値減衰にも留意する。

ASCE/SEI 4-16¹⁹では、時間刻みを $\Delta t \leq \frac{\Delta h}{v_s}$ としている。ここで Δh は、有限要素の最小の長さ、 v_s はせん断波速度である。

また、非線形解析においては、非線形解析アルゴリズムによっては、線形解析より

も計算時間刻みを小さくする必要がある。その度合いは非線形解析アルゴリズムによって異なる。

12.3.2 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、図 II-12-1 に周波数応答解析における伝達関数補間の模式図を示す。周波数応答解析では、伝達関数を飛び飛びの振動数きざみで計算し、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るが、3次元 FEM 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。

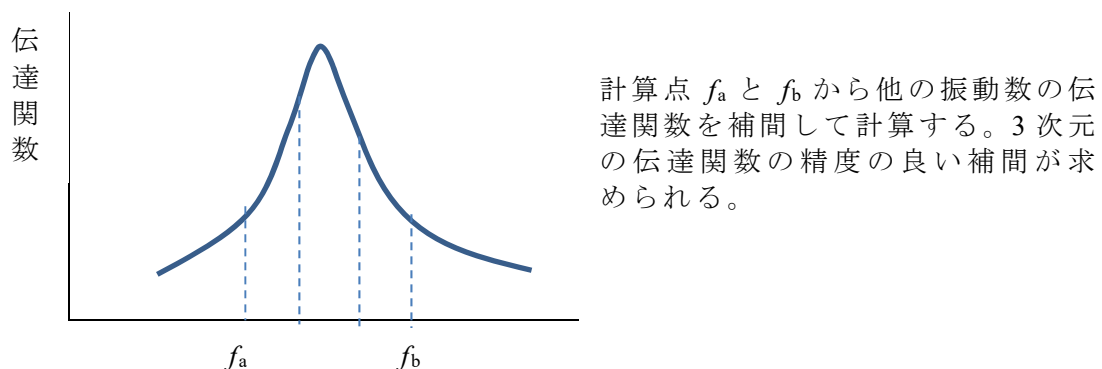


図 II-12-1 周波数応答解析における伝達関数補間の模式図

12.4 非線形解析法

非線形解析の陰解法の解析では、各ステップで行う反復計算の収束性を確認する。

【解説】

非線形解析法においては、陰解法と陽解法がある。地震応答解析では陰解法が、衝突や落下解析では陽解法がよく用いられる。また、陰解法の非線形計算アルゴリズムには、初期剛性法、ニュートン法、修正ニュートン法等が用いられる。これらの方法は計算ステップにおいて反復により解を求める方法である。この時、各ステップで残差が許容値以下に収束する必要がある。

動的解析においては、外力の方向が反転するステップで残差を積み残すと正確な解が得られない可能性がある。このため、計算ステップごとの反復回数、残差、収束性を確認し、解析結果への影響が小さいことを確認する。

多くの非線形解析アルゴリズムでは、あるステップの反復計算において解が収束しない場合に、その残差を次のステップに繰り越す処理を行う。しかし、各反復における解を求める剛性（接線剛性、割線剛性、類推剛性など）によっては、数値振動を起こす可能性があるため、それらの剛性を含む解析アルゴリズムの適用性に留意する。

12.4.1 鉄筋コンクリートの非線形解析の特徴

鉄筋コンクリートの非線形性については2つの特徴がある。鉄筋とコンクリートの複合材でそれぞれに非線形挙動を示すことと、コンクリートのひび割れにより材料の等方性がなくなることである。これらのモデル化方法は多岐にわたるが、あらゆるひび割れや応力状態を表現することは困難である。複数の構成則による感度解析を行い、解析解の妥当性を確認することが望ましい。

また、建屋3次元FEMモデルによる非線形解析では、開口部の存在や壁の配置、SRC構造の接合部のモデル化などの影響で、局部的に強い非線形挙動を示す可能性があることから、事前に部分モデルなどで検討するのが望ましい。

12.4.2 基礎浮上りに係る非線形解析の特徴

基礎底面と支持地盤が剥離後に再接触するときに、衝突が起こる。この時、地盤は建物の回転変形に対応して同様の変形挙動をしており、地盤の変形状態によっては、剥離した基礎底面がほぼ同時に再接触することがある。この場合、建物全体に大きな上下加速度（誘発上下動）が生じることがある。解析では、ぶつかった瞬間の大きな力をジョイント要素で受け止めることになるが、このジョイント要素の剛性が非常に大きい場合、計算刻み時間が十分小さくないと、非現実的なスパイク状の加速度が生じる。一般にこのスパイクのエネルギーは小さく、建物の応答への影響は小さいことが多いが、建物地下壁の応力に影響を与える可能性がある。このため、解析結果を調べ、建物地下壁の応力等に影響がある場合は、計算時間間隔を短くするなど、より精度の高い計算を行う必要がある。

基礎浮上りを考慮した建屋3次元FEMモデルによる非線形解析では、最小接地率50%程度までは基礎浮上りの有無による建屋の最大加速度への影響は10%程度との報告がある⁶²。また、数値解析においてジョイント要素に減衰を考慮する場合、浮上り（剥離）状態を小さく評価する可能性があるので注意する。

12.4.3 建物地下外壁と側面地盤の剥離・再接触の非線形解析の特徴

建物と地盤が剥離後に再接触するときに、衝突による大きな加速度が生じるのは、基礎浮上りと同じであるが、表層地盤が支持地盤より柔らかい場合には、建物の振動と側面地盤が独自に振動するために、再接触時の振動性状の非線形性が強くなる。

12.4.4 建物地下外壁と側面地盤の滑りの非線形解析の特徴

滑り剛性を非常に大きくし、滑り時の剛性をゼロ勾配とし接線剛性法で解くと、滑り勾配に応答値が入るほど計算時間刻みを小さくしなくてはなくなる。これを無視すると数値振動が発生する。このため、滑り剛性は極端に大きくはできないことから、適切な剛性及び減衰を感度解析により求める。

滑り状態においては、数値解析を安定させるための減衰を考慮することも可能であるが、滑り量を左右する可能性があるため、感度解析により影響を確認するのが望ましい。

13. 解析結果の照査と妥当性確認

13.1 はじめに

解析結果の妥当性を確認する前に、解析が正常に終了していることを確認しなければならない。そのうえで、入力データのチェックを行い、次に荷重変位関係、変形図、断面力図等巨視的な視点で解析内容を照査する。ここでの照査とは、材料非線形解析の場合は、解析条件及び解が解析手法の適用範囲にあり、物理的に意味のあるものであることや類似解析の解に対する比較などの確認をいう。必要に応じて、解析モデルの改善、再解析を行った上で解析結果の妥当性の確認を行う。

【解説】

解析が正常に終了していることの確認は、つぎのような項目について行うことができる。

- ・ 計算のエラー記録
- ・ 解析ソフト（バージョン）、計算機（計算環境）：計画との比較
- ・ 計算時間：想定時間との比較
- ・ 入力ファイル名称、出力ファイル名称：ケースの取違い確認
- ・ 日時、担当者：処理ファイルの取り違い確認

入力データのチェックは、次のような項目について行う。

- ・ 要素分割図（構造図）、部材リスト：形状の確認
- ・ 拘束図：拘束条件の確認
- ・ 地震動波形図：入力地震動の確認
- ・ 材料分布図：材料設定の確認
- ・ 固有振動数及び固有モード：予想した振動数や振動モードであるかの確認。
建物及び地盤建物連成モデルの固有振動数、固有モードによる振動モデルの性状のチェックは、形状モデル、構造モデル、材料、境界条件など解析モデルの精度を確認するための効果的な方法である。

解析結果の妥当性の確認は、次のような変量に対して、解析ソフトの適用範囲にあること及び物理的に意味のあるものであり、類似解析等と整合することを確認する。

- ・ 節点変量（加速度、速度、変位）
- ・ 応答スペクトル
- ・ 断面力：強度評価
- ・ 要素変量（応力、ひずみ）：強度評価
- ・ 反力

13.2 解析結果の正常終了確認

解析が正常に終了したことの確認を行う。

【解説】

解析結果にエラーが無いことを確認する。警告（Warning）についても、その内容を確認する。また、計算のログファイルを確認し、経験に照らし合わせて、異常でないかを確認する。図 II-13-1 に警告及びエラーメッセージの例を示す。

さらに、解析の規模、計算時間、計算環境などについて、経験値として類似解析の記録を参考とし、解析が正常に終了したことの確認を行う。

```
*** USER WARNING MESSAGE 8152 (M3DCNT1B)
      BOTH BCTABL1 AND BCONNECT HAVE THE SAME ID=1. BCTABL1 WILL BE USED INSTEAD OF BCONNECT.
      User Information: BCTABL1 and BCONNECT can have the same ID. In this case, BCTABL1 will be used instead of BCONNECT.

*** USER FATAL MESSAGE 8146 (MCN1DATS)
      For BCBODY1 ID = 1044, either no supported elements have been found in the deformable contact body or all elements
      have been
      specified in the contact body of another contact pair.
      User Information: Every deformable contact body must contain some elements, supported by 3D contact capability.
      User Action      : Check contact modeling for errors in the input data entries, such as BCTABL, BCONNECT, BCBODY1
      and so on;
```

図 II-13-1 警告及びエラーメッセージの例（MSC Nastran 2019）

13.3 入力データの確認

入力データについては、解析前に元データとの違いがないことを確認する。

【解説】

メッシュ図（構造図）、部材リスト、拘束図、地震動波形図、材料図など解析データから出力できる入力データについては、元データと比較しチェックする。可能な限り数値で比較する。

エコーバックには、単に入力テキストの文字をそのまま出力したものと、数値として読込んだものを出力したものがあり、後者の入力値が正しいことを確認する。

前者の場合は、固定書式の入力の場合区切りがずれていることの確認が困難である。図 II-13-2 の 6 番目のデータは、18.5 であるが、その前の数字と連続していて、間違いがあっても見落としやすい。

COUNT	.	1	..	2	..	3	..	4	..	5	..	6	..	7	..	8	..	9	..	10	.
660511-	GRID	328594						-27.55		15.8455218.5											
660512-	GRID	328595						-27.55		15.0481818.5											
660513-	GRID	328596						-27.55		14.2508418.5											

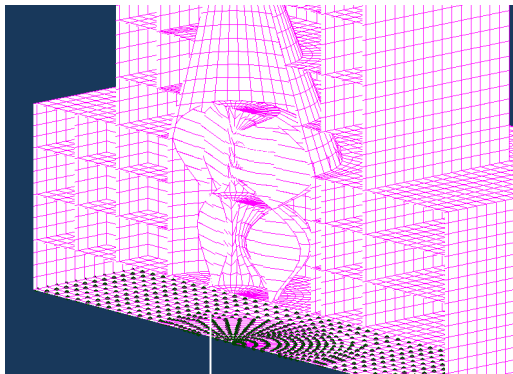
図 II-13-2 入力テキストのエコーバックの例（MSC Nastran 2019）

座標入力データについては、図化することにより、大きな間違いを知ることが出来

る。

構造モデルデータについては、本解析前に固有値解析により、固有振動数、固有モードに異常値がないかを調べ、形状、拘束、接合条件に間違いがないことを確認する。

境界条件、入力地震動、初期状態などについては、それぞれの条件、状態を適切に図化し、間違いがないことを確認する。図 II-13-3 にデータエラーによる異常なモードの例を示す。



右に示すメッシュ図と比較することで、1次振動モードとして格納容器内の円筒部分のみに変形が生じていることがわかる。

図 II-13-3 データエラーによる異常なモードの例⁶³

13.4 解析内容の照査

解析内容については、解析手法の適用範囲にあることを照査する。

【解説】

計算処理情報、計算のエラー、計算時間に問題がないことを確認したうえで、解析内容については、次のような項目について照査する。これらの照査には動画の利用が効果的である。

- ・ 加速度・変形、変位分布と荷重の対応
- ・ 加速度・変位、応力と簡便計算値や理論解との比率
- ・ 加速度・変位の正負、対称性、過大・過小
- ・ 加速度・応力と変位のバランス
- ・ 加速度・変位、応力分布の傾向
- ・ 引張・圧縮の発生場所
- ・ 剛体移動防止位置の反力
- ・ 拘束位置の反力、荷重との整合性
- ・ 接合部のひずみ、応力分布
- ・ 応力と降伏強度

13.5 解析結果の妥当性確認

解析結果の妥当性確認では、対象とする解析モデルや解析手法を用いたシミュレーションの結果と実験、観測や実被害状況との比較により、再現性かつ予測性能が所期の目的に則していることを確認する。

【解説】

解析結果の妥当性は、類似解析や実験・観測記録等と整合することで確認する。そのためには、適切な評価基準を用いた精度の定量評価が必要である。確からしさの評価に用いる評価基準として、ASME⁶⁴の M^{SRQ} （システム応答量の計測基準であり、平均の相対誤差をほぼ正確に表す評価基準。ここで SRQ は System Response Quality の略）及び計算値／実験値の比などの統計的な特性（例えば、平均や変動係数）等が用いられている。

また、解析結果の妥当性確認の一つとして、より簡易なモデルの解析との比較は有用である。より簡易な解析モデルとしては、質点系モデルによる解析がある⁶⁵。質点系モデルによる解析は、3次元解析からするといわゆる「1次元解析」に相当し、主要な挙動を把握、解析結果の妥当性を確認するのに重要な役割を果たすものである。3次元解析結果の平均値を質点系モデルによる解析結果と比較するなどにより、主要な挙動の特性、精度を確認することができる。

14. 解析結果利用

14.1 はじめに

妥当性が確認された解析結果の利用については、その結果処理における誤差に留意する。

【解説】

解析結果には次のような変量がある。解析目的に応じて必要な変量を出力する場合の誤差に留意する。

節点の変量は、有限要素法における直接計算された値で、結果処理による誤差は出力桁数のみである。変量としては、加速度、速度、変位がある。

- 時刻歴：出力する時間刻みに留意する。
- 最大値：最大値を求める時間刻みが計算と異なる場合があることについて留意する。
- 最大値コンター図：節点値を補間して等値線を描くことについて留意する。

要素の変量には、ひずみ、応力がある。非線形計算ではそれに加えて非線形状態の変量がある。要素の変量はガウス点などで計算されるが、出力は、要素の中心位置の平均値の場合もある。

- 時刻歴：出力値が要素内の計算値か平均値か、またその違いに留意する。時刻については計算刻みについて留意する。
- 最大値：最大値を求める時間刻みが、計算時間刻みより大きく設定される場合があることについて留意する。
- コンター図：等高値の計算方法に留意する。
- ひび割れ状態図：閉じたひび割れの出力方法に留意する。
- 接触・剥離：ジョイント要素の応力と相対変位の履歴を確認する。加速度の最大値については、感度解析を参考にして、現実的な値を求める。結果にローパスフィルターを掛けることも考えられる（14.2 参照）。
- 誘発上下動：浮上りにおいては、大きな誘発上下動（加速度）が生じるため、感度解析などを参考に、現実的な値を求める。

14.2 非線形解析における解析結果の利用

非線形解析における解析結果について、後処理については十分な検討が必要である。

【解説】

材料の非線形性、基礎底面の浮上り、建物地下外壁と側面地盤の剥離と再接触の解析においては、材料の非線形性が強くなり、再接触時に急激な外力の変化が生じる。

これにより加速度が大きく変化するが、通常地震応答解析の時間刻みでは、これらの衝撃的な変化を正しく解析できず、非現実的な高次振動を生じることがある。いわゆる「スパイク状の加速度」波形に伴う非現実的な高振動数波形である。この振動数は、1周期あたり4点が必要であることから計算刻み時間の4倍の振動数になることがある。この場合は、この振動数をローパスフィルタで取り除くことが可能である。

別紙1の附属書4に、側面剥離・再接触による高振動数波形を取り除いた例を示す。計算時間刻み1/1000秒で、4/1000秒周期（250 Hz）を中心とした波が解析結果に含まれ、建物地下部の最大応答加速度が非現実的に大きくなっている。これに対して、100 Hz以上の成分をカットすると、最大応答加速度分布は現実的な値に近づくが、剥離・再接触位置の応答スペクトルは高振動数領域の応答が大きい。これは再接触によるものと考えられる。この値の精度についてはさらなる検討が必要であるが、このスパイク状の加速度の建物中央や建物上部に対する影響は小さい結果が得られている。

別紙1の附属書5には鉄筋コンクリートの非線形を考慮した解析においても、ひび割れに起因する高振動数波形が含まれることを示している。

14.3 解析結果のばらつきの考慮

解析目的に応じて構造解析係数などによりばらつきを考慮する。

【解説】

地震応答解析結果を性能照査に用いる場合は、構造解析係数を考慮する。構造解析係数は、解析結果の利用目的に応じて、解析根拠資料及び解析条件の精度や解析者の解法に関する知識や経験を判断して設定するものである。

解析目的が実験や観測記録の再現解析である場合には、材料定数などのばらつきを考慮する。

解析による性能照査を行う場合について、土木学会¹⁶では安全係数の一つとして構造解析係数 γ_A を応答値算定時の構造解析の不確実性等を考慮して定めており、一般には1.0としているが、非線形解析については、部材係数も合わせた構造解析係数を1.1から1.5としている。安全率の考え方については、土木学会の文献⁶⁶を参照している。

また、土木学会⁶⁷では、(14-1)式の γ_A で実構造の応答に対する数値解析の誤差を考慮している。

$$S \leq R_a = \frac{1}{\gamma_A \gamma_B \gamma_i} R \quad (14-1)$$

ここで、

S ：応答値（解析により計算される応力、ひずみ、変位）

R_a ：限界値（材料特性を考慮した応力、ひずみ、変位の限界値）

γ_A ：構造解析係数（1.0～1.1）

γ_B ：部材係数（1.1～1.3）

γ_i : 構造物係数 (構造物の重要度 1.0～1.2)

14.4 ピアチェック

解析結果の妥当性や信頼性を保証するためには第三者による確認が望ましい。

【解説】

解析結果の評価については、ピアチェックを行う。コンクリート標準示方書¹⁶では、鉄筋コンクリート構造の妥当性の保証のために第三者評価を推奨している。また、土木学会では、数値解析認証評価⁶⁸を実施している。

15. 文書化

15.1 はじめに

本解析要領の効果的な運用のため、2 章から 14 章までの各実施プロセスの入出力及び実施内容を文書化することが重要である。

【解説】

適切な文書化は V&V において重要な行為である。そこでは、解析目的、解析対象、モデル化方法、解析方法等に関わる事項を文書に示し、解析の計画者、実施者、利用者、レビュアー（解析評価者）など全関係者がその内容を確認することが望ましい。文書化に当たっては、これらの文書化対象についての実施プロセスへの適合性及び対等状況が追跡可能となるようにする必要がある。

謝 辞

本報告は、原子力規制委員会原子力規制庁からの受託事業「原子力施設等防災対策等委託費（高経年化を考慮した建屋・機器・構造物の耐震安全評価手法の高度化）」で得られた成果の一部である。また、IAEA の許諾を経て、**Review of Seismic Evaluation Methodologies for Nuclear Power Plants Based on a Benchmark Exercise**, IAEA TECDOC No. 1722, IAEA, Vienna (2014) の公開データの一部を参照した。さらに、本要領は、原子炉建屋健全性研究専門部会における議論を踏まえて整備された。関係各位に謝意を表する。

参考文献

- 1 IAEA, Review of Seismic Evaluation Methodologies for Nuclear Power Plants Based on a Benchmark Exercise, IAEA-TECDOC-1722, 2013, 156p.
- 2 日本計算工学会, 工学シミュレーションの品質マネジメント, 第 3 版, JSCE S-HQC001:2017, 2017, 20p.
- 3 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, 平成 25 年 6 月 19 日, 2013.
- 4 原子力規制委員会, 耐震設計に係る工認審査ガイド, 平成 25 年 6 月 19 日, 2013.
- 5 原子力規制委員会, 実用発電用原子炉の安全性向上評価に関する運用ガイド, 平成 29 年 3 月 29 日改定, 2017.
- 6 原子力規制委員会, 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, NTEC-2021-4002, 2021.
- 7 日本電気協会, 原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編, JEAG4601, 補-1984, 1984.
- 8 日本電気協会, 原子力発電所耐震設計技術指針, 追補版, JEAG4601-1991, 1991.
- 9 日本電気協会, 原子力発電所耐震設計技術指針, 第 3 版, JEAG4601-2015, 2015.
- 10 日本原子力学会, 日本原子力学会における軽水炉安全技術・人材ロードマップ ローリング対応 最終報告 2017 年 3 月, https://www.aesj.net/document/com-r_lwrroadmap20170322.pdf (参照: 2021 年 10 月 15 日) .
- 11 日本原子力学会, 原子力発電所に対する地震を起因とした確率論的リスク評価に関する実施基準: 2015, AESJ-SC-P006:2015, 2015, 1012p.
- 12 日本原子力学会, シミュレーションの信頼性確保に関するガイドライン: 2015, AESJ-SC-A008:2015, 2015, 110p.
- 13 日本機械学会, 弾塑性有限要素解析に基づく耐震 S クラス配管系の耐震性評価に関する代替規定, JSME S NC-CC-008, 2019.
- 14 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, 2013, 221p.
- 15 日本建築学会, 空間構造の数値解析ガイドブック, 2017, 407p.
- 16 土木学会, 2017 年制定 コンクリート標準示方書 [設計編], 2018, 679p.
- 17 土木学会, 原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル・照査例/技術資料 2018, 2018.
- 18 IAEA, Safety Guide Seismic Design and Qualification for Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standard Series No. NS-G-1.6, STI/PUB/1158, 2003.
- 19 American Society of Civil Engineering, Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures, ASCE/SEI 4-16, 2017, 171p.
- 20 U.S.NRC, Standard Review Plan for the Review of Safety Analysis Reports for Nuclear Power Plants, NUREG-0800, 2007.
- 21 Schnabel, P. B., et al., SHAKE-A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, Report No. EERC 72-12, 1972.
- 22 Goodman, R. E., et al., A model for the Mechanics of Jointed Rock, Proc. ASCE, 94 SM3, 1968, pp.637-659.
- 23 NAFEMS, The International Association for the Engineering Modelling, Analysis and Simulation Community, <https://www.nafems.org/> (参照: 2021 年 5 月 7 日) .
- 24 東京電力, 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) (改訂 1), 参考資料 2 補助壁の評価について (7 号機原子炉建屋), 2008, https://www.tepco.co.jp/cc/press/betu08_j/images/080925f.pdf (参照: 2021 年 10 月 15 日) .
- 25 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.

- 26 日本電気協会, 原子力発電所耐震設計技術指針, JEAG4601-1987, 1987.
- 27 U.S.NRC, Seismic Design Standards and Calculational Methods in the United States and Japan, NUREG/CR-7230, 2017.
- 28 U.S.NRC, Assessment of Seismic Analysis Methodologies for Deeply Embedded Nuclear Power Plant Structure, NUREG/CR-6896, 2006.
- 29 塩見忠彦, 原子力建屋の地震応答解析における V&V 第一歩, 計算工学講演会論文集, Vol.18, 2013, 4p.
- 30 吉田洋之他, 3DFEM を用いた建物のモデル化に関する研究, 日本建築学会大会学術梗概集, 2019, pp.281-282.
- 31 Martin, D. S. and Ostadan, F., Summary structural report, HLW vitrification building, 24590-WTP-RPT-ST-03-001, Bechtel, 2004.
- 32 日本コンクリート工学協会, コンクリート構造物の設計に FEM 解析を適用するためのガイドライン, 1989, 134p.
- 33 Lysmer, J., et al., Finite dynamic model for infinite media, J. of the Engineering Mechanics Division, Vol.95, No.4, 1969.
- 34 U.S.NRC, NRC Interim Staff Guidance Associated with Combined License Application and Design Certification for New Reactor Applicants, COL/DC-ISG-1, 2008.
- 35 Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., Seismic Design Bases of the US-APWR Standard Plant, 2011, <https://www.nrc.gov/docs/ML1104/ML110470431.pdf> (参照: 2021 年 10 月 15 日) .
- 36 OECD, Seismic shear wall ISP NUPEC's seismic ultimate dynamic response test; comparison report, NEA/CSNI/R(1996)10, 1996.
- 37 土方勝一郎他, 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, Vol.75, No.658, 2010, pp.2179-2187.
- 38 IAEA, Evaluation of Seismic Safety for Existing Nuclear Installations, IAEA Safety Standard Series No. NS-G-2.13, STI/PUB/1379, 2009, 84p.
- 39 前川宏一, 福浦尚之, 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, Vol.634, 1999, pp.157-176.
- 40 洪傑, 3 次元 FEM 解析による RC 造柱梁接合部のせん断強度に関する研究, 千葉大学大学院学位論文, 2009.
- 41 長沼一洋, 繰り返し応力下における鉄筋コンクリート板の解析モデル, 日本建築学会構造系論文集, 第 536 号, 2000, pp.135-142.
- 42 日本建築学会, 鋼構造設計規準, 許容応力度設計法, 2005.
- 43 日本機械学会, 発電用原子力施設規格 設計・建設規格, JSME SNC2-2016, 2016.
- 44 日本建築学会, 鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 2014, 395p.
- 45 橋口公一, 最新弾塑性力学, 朝倉書店, 1990, 205p.
- 46 Asaoka A., et al., AN ELASTO-PLASTIC DESCRIPTION OF TWO DISTINCT VOLUME CHANGE MECHANISMS OF SOILS, Soils and Foundations, Vol.42, No.5, 2002, pp.47-57.
- 47 Oka, F., et al., A cyclic viscoelastic - viscoplastic constitutive model for clay and liquefaction analysis of multi - layered ground, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol.28, No.2, 2004, pp.131-179.
- 48 Iai, S., Ozutsumi, O., Yield and cyclic behaviour of a strain space multiple mechanism model for granular materials, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol.29, No.4, 2005, pp.417-442.
- 49 Mazzoni, S., et al., OpenSees Command Language Manual, 2006, 465p.
- 50 Ishihara, K., Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics, Oxford, Clarendon Press, 2003, 350p.
- 51 中村尚弘他, 原子力発電所建屋のフラジリティ評価における建屋の強非線形領域でのモデル化誤差の検討, 日本建築学会技術報告集, Vol.13, No.26, 2007, pp.499-504.

- 52 Schnabel, P. B., et al., SHAKE-91: Equivalent linear seismic response analysis of horizontally layered soil deposits, the earthquake engineering online archive NISEE e-library, 1992.
- 53 東京電力ホールディングス, 柏崎刈羽原子力発電所 6 号及び 7 号炉, 地震による損傷の防止について (補足説明資料), 2016,
https://www.tepco.co.jp/about/power_station/disaster_prevention/pdf/nuclear_power_161129_03.pdf (参照: 2021 年 10 月 15 日) .
- 54 中村尚弘他, 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, 2008, pp.581-589.
- 55 Lysmer, J., et al., FLUSH- A computer program for approximate 3-D analysis of soil-structure interaction problems, EERC-75-30, 1975.
- 56 Kim, H.S., Finite Element Analysis with Paraxial & Viscous Boundary Conditions for Elastic Wave Propagation, Engineering, Vol.4, No.12, 2012, pp.843-849.
- 57 Cundall, P.A., et al., Solution of infinite dynamic problems by finite modelling in the time domain, Second International Conference on Applied Numerical Modelling, Madrid, Spain, 1978.
- 58 Bettess, P., Infinite elements, Int. J. for Num. Methods in Engineering, Vol.11, 1977, pp.53-64.
- 59 秋田昇道他, 時間領域エネルギー伝達境界の計算効率化と地盤-建物連成系の詳細な地震応答解析への適用性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.689, 2013, pp.1263-1272.
- 60 Bathe, K.J., Finite Element Procedures in Engineering Analysis, Prentice-Hall, 1982, 736p.
- 61 Ziewiewicz, O.C., and Taylor, R., The Finite Element Method, Vol.2, McGraw-Hill Book Company, 1989.
- 62 日本原子力研究開発機構, 令和2年度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) 事業の成果報告書, 2021.
- 63 日本計算工学会標準, 学会標準 (HQWC001&002) 事例集, 2015.
- 64 ASME, An Illustration of the Concepts of Verification and Validation in Computational Solid Mechanics, ASME V&V 10.1-2012, 2012, 32p.
- 65 Abell, J.A., et al., Earthquake soil - structure interaction of nuclear power plants, differences in response to 3-D, 3×1 -D, and 1-D excitations, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.47, No.6, 2018, pp.1478-1495.
- 66 土木学会, 原子力発電所屋外重要構造物の耐震性能照査指針・マニュアル, 2005, 150p.
- 67 土木学会, 2018 年制定 鋼・合成構造標準示方書 耐震設計編, 丸善出版, 2018, 321p.
- 68 土木学会, 技術評価制度, <http://committees.jsce.or.jp/opcet/hyoka> (参照: 2021 年 5 月 7 日) .

付録

別紙 1 影響因子の感度解析結果

本別紙では、原子炉建屋の 3 次元 FEM モデルのモデル化の方法や内容が応答結果に影響を及ぼす要因の影響度合いを定量的に把握するために、以下に示す影響因子の感度解析を実施し、その結果を整理した。

附属書 1 異なるタイプの有限要素によるモデル化の違いによる影響

附属書 2 減衰のモデル化の違いによる影響

附属書 3 建物地盤連成における水平動－上下動の影響

附属書 4 側面剥離・滑りの考慮の有無による影響

附属書 5 鉄筋コンクリート非線形の地震応答への影響

附属書 6 有限要素の精度の違いによる影響

附属書 7 有限要素のメッシュサイズの違いによる影響

参考文献

附属書 1 異なるタイプの有限要素によるモデル化の違いによる影響

異なるタイプの有限要素によるモデル化の違いが建屋応答へ与える影響を確認するため、シェル要素モデルとソリッド要素モデルを用いた感度解析による検討結果を示す。

1.1. 解析モデル及び解析条件

本事例では、原子炉建屋の基礎から B2F の床までを異なるタイプの有限要素であるシェル要素とソリッド要素でモデル化し（以下、それぞれシェルモデル、ソリッドモデル）、固有値解析及び静的解析を行い、有限要素によるモデル化の違いについて評価を行った。静的解析ではモデル全体に一律な物体力を水平一方向に載荷する方法を採用した。図 1-1 に解析対象としたシェルモデルとソリッドモデルを示す。いずれも基礎部分はソリッド要素でモデル化されている。シェルモデルは積層シェル要素、ソリッドモデルは六面体 1 次要素を用いている。載荷方向は+X 方向（NS 方向）である。

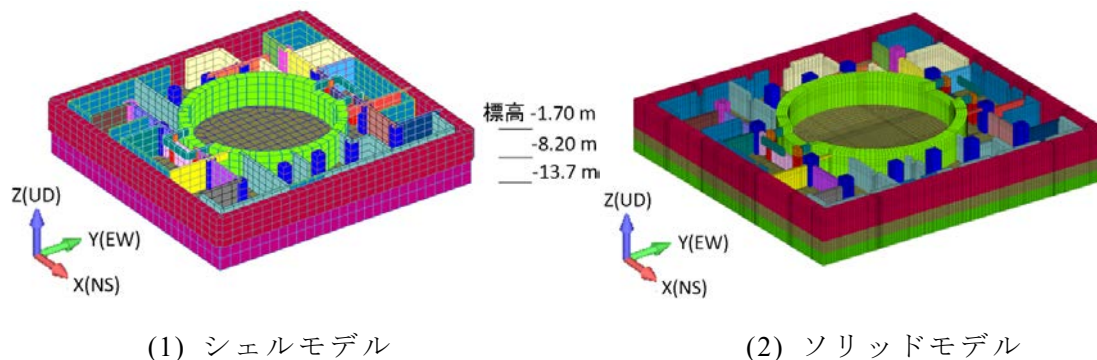


図 1-1 鳥瞰図（B2F 床スラブ非表示）

1.2. 固有値解析結果

1.2.1 固有振動数

まず、それぞれのモデルの固有振動数を確認する。NS 方向 3 次までの固有振動数をまとめて表 1-1 に示す。主要な固有振動数は有効質量比で判断した。シェルモデルでは、NS 方向 1 次の固有振動数は 27.8 Hz（固有周期：0.036 s）、ソリッドモデルでは、同固有振動数は 33.8 Hz（固有周期：0.030 s）であり、シェルモデルの方がソリッドモデルより 2 割程度低めの結果となった。これは、ソリッドモデルでは、モデル化上壁の高さが梁せい分だけ低く、壁の幅が柱幅分だけ狭くなるとともに、これらの部分は壁厚が梁幅、柱幅で評価されることから、壁よりも剛性が高くなっているためと考えられる。

表 1-1 固有振動数（NS 方向）

次数	シェルモデル			ソリッドモデル		
	振動数(Hz)	周期(s)	有効質量比	振動数(Hz)	周期(s)	有効質量比
1 次	27.8	0.036	0.267	33.8	0.030	0.229
2 次	34.7	0.029	0.040	40.7	0.025	0.023
3 次	38.9	0.026	0.022	44.5	0.022	0.030

1.2.2 固有モード

シェルモデルとソリッドモデルの固有モードを図 1-2 に示す。ここで、変位が最大の箇所を赤色、最小の箇所を紺色で示している。最大値の位置は若干ずれがあるものの、全体的なモード形状は概ね一致している。

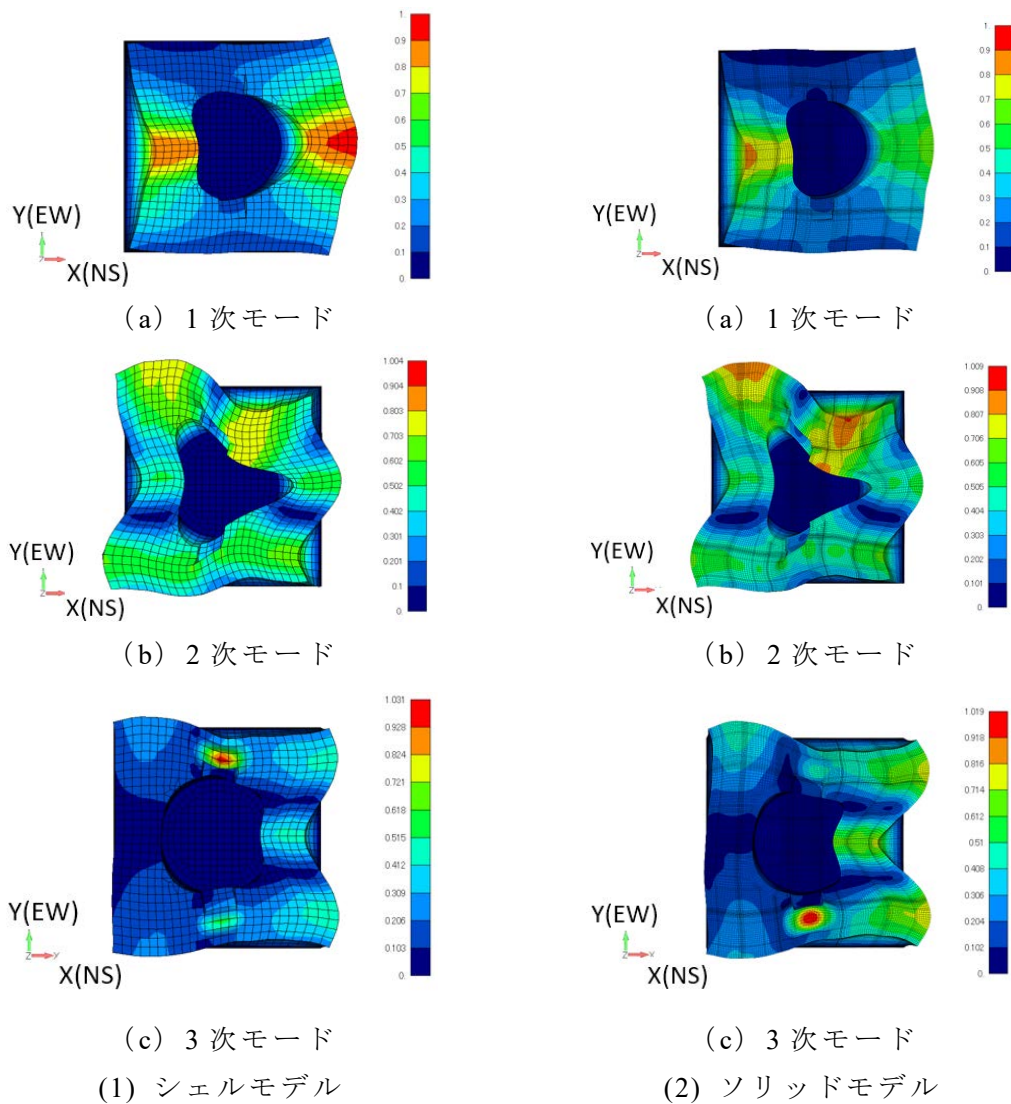


図 1-2 固有モードの比較

1.3. 解析結果

1.3.1 最大変位

全体に一樣な物体力を載荷したシェルモデル、ソリッドモデルの最大変位の高さ方向分布を図 1-3 に示す。全体的に、シェルモデルの結果がソリッドモデルの結果より変位が大きい傾向があり、上端部で 2 割程度大きかった。また、シェルモデル及びソリッドモデルとも基礎部分（標高 -13.7 m から標高 -8.2 m まで）はソリッド要素でモデル化されており、最大変位はほぼ同じ値となっている。変位に差が出ているのは要素タイプが異なる B3F（標高 -8.2 m から標高 -1.7 m）であり、有限要素によるモデル化手法の違いが変位の違いに影響していると考えられる。

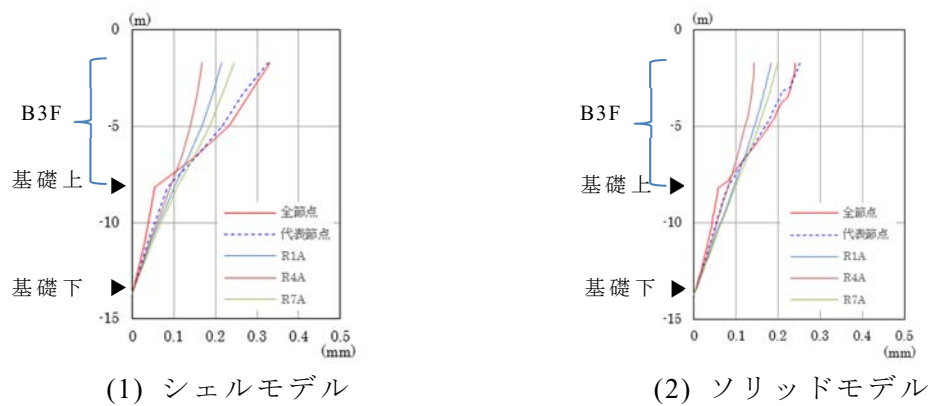


図 1-3 最大変位分布の比較

（RA 通り（R1A,R7A は建屋隅、R4A は外壁中央））

1.3.2 変形及びせん断ひずみ分布

同様に全体に一樣な物体力を载荷したシェルモデル、ソリッドモデルの変形を図 1-4 に、せん断ひずみ分布を図 1-5 に示す。両モデルの変形形状及びせん断ひずみ分布は、全体的によく一致している。最大値では、いずれもシェルモデルの方がソリッドモデルよりも 2 割程度が大きい傾向であり、ソリッドモデルの方が剛性が高めであることを確認できる。

これも同様に、有限要素によるモデル化手法の違いが変位の違いに影響していると考えられる。

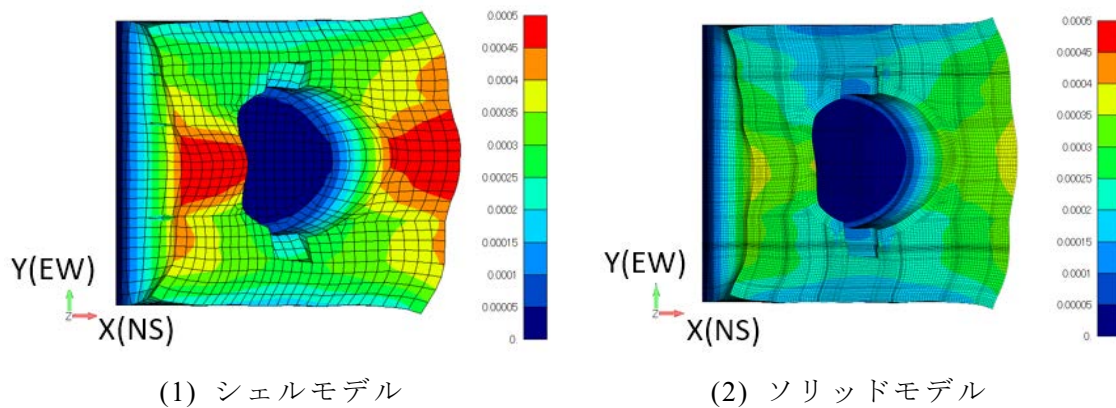


図 1-4 変形の比較 (m)

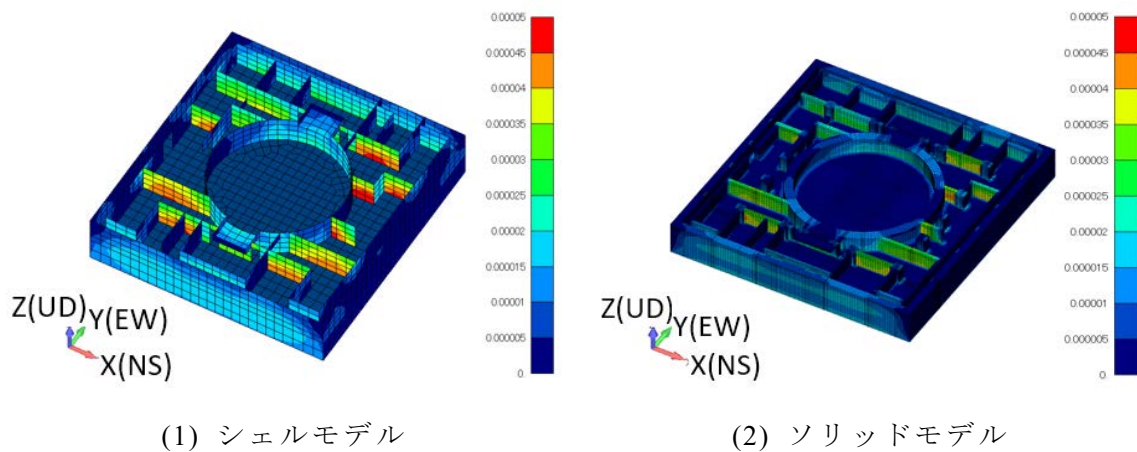


図 1-5 せん断ひずみ分布の比較

附属書 2 減衰のモデル化の違いによる影響

減衰のモデル化の違いによる建屋応答への影響を評価するため、レーリー減衰と複素減衰を用いた感度解析を実施し、検討した結果を示す。感度解析では、建屋・地盤連成モデルを用いて時刻歴応答解析（レーリー減衰）と周波数応答解析（複素減衰）を実施し、建屋応答への影響を評価した。

2.1. 解析モデル及び解析条件

2.1.1 解析条件

原子炉建屋 3 次元 FEM モデルは、KARISMA ベンチマークモデル¹の解析モデルの諸元を基本とした。周辺地盤は 3 次元 FEM モデルとして作成し、表層地盤及び支持地盤を一様物性とした。3 次元 FEM モデルの概要を図 2-1 に示す。

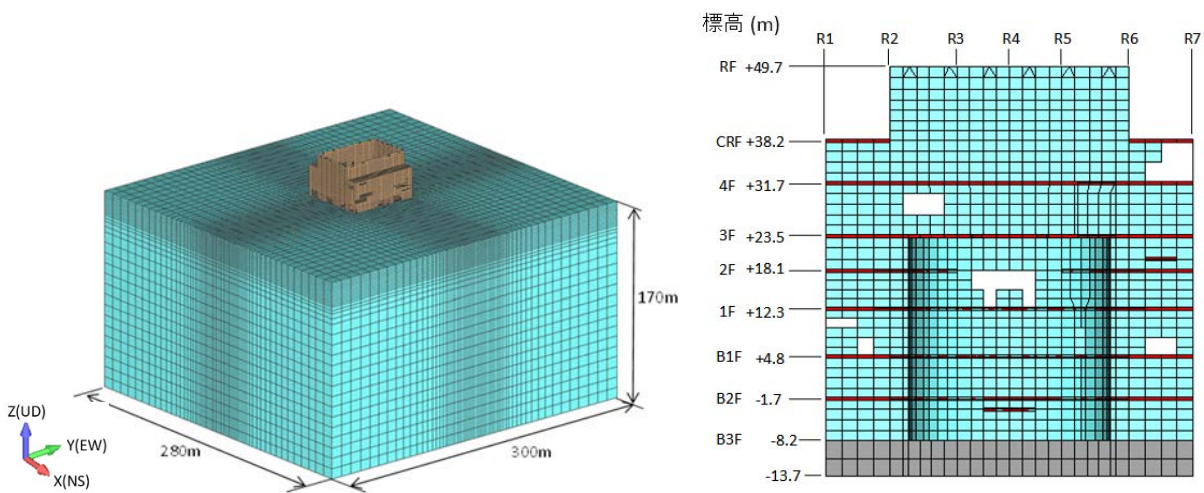


図 2-1 3 次元 FEM モデルの概要

解析で用いる地震波は模擬地震波（水平動 1 波、鉛直動 1 波）とし、水平動の最大加速度は 600 cm/s^2 、鉛直動の最大加速度は 400 cm/s^2 である。水平動を NS 方向及び EW 方向に、鉛直動を UD 方向にそれぞれ入力した。

2.1.2 減衰モデル

2.1.2.1 レーリー減衰

本事例の時刻歴応答解析ではレーリー減衰（要素別レーリー減衰）を使用した。表 2-1 に固有値解析結果を、図 2-2 に基礎固定の建屋の水平 1 次モード図を示す。レーリー減衰を設定するにあたり、主要な固有振動数を決める必要があるが、本検討では

- ・ f_1 : 固有値結果より、水平 1 次モードの固有振動数
- ・ f_2 : 20 Hz

として設定した。減衰比 h は各材料に対する減衰比として、RC は 5.0%、鋼材は 2.0%

を設定した。 f_1 を求めるための固有値解析は基礎固定による建屋単独モデルでの固有値解析を実施し、NS方向の1次モードである3.99 Hzを f_1 とした。 f_2 は機器の卓越振動数に着目し、原子力発電所耐震設計技術規程 JEAC4601²の機器・配管系の耐震設計の「1次振動数が20Hz以上の場合は剛構造と見なして差し支えない」の記載より、 $f_2 = 20$ Hzとした。

レーリー減衰と振動数の関係を図2-3に示す。今回の設定では建屋モデルの主要な固有振動数に対する減衰比は（RCを例にすると）5.0%以下となり減衰が一番小さくなる9.0 Hz付近では4.0%程度と、モード減衰のような振動数一定の減衰モデルに対し小さな減衰モデルを用いることとなるが、過大な減衰を設定することによる応答値の過小評価をしないよう本設定を用いることとした。

地盤も建屋と同様の考え方でレーリー減衰のパラメータを設定した。

2.1.2.2 複素減衰

周波数応答解析では、複素減衰を用いるものとする。減衰定数 h は各材料に対する減衰定数として、RC=5.0%、鋼材=2.0%を設定する。本事例では上限振動数は30 Hzとした。

表 2-1 固有値解析結果

モード	振動数	周期	刺激係数			有効質量比			備考
	Hz	s	X(NS)	Y(EW)	Z(UD)	X(NS)	Y(EW)	Z(UD)	
1	3.99	0.25	4.01	-0.03	-0.05	0.44	0.00	0.00	NS1次
2	4.75	0.21	0.06	3.87	-0.01	0.00	0.54	0.00	EW1次
3	5.60	0.18	-4.23	0.14	-0.02	0.15	0.00	0.00	NS2次
4	6.47	0.15	0.37	1.76	0.55	0.00	0.01	0.00	
5	6.57	0.15	-0.62	-0.67	0.37	0.00	0.00	0.00	
6	6.64	0.15	0.25	-3.34	0.08	0.00	0.07	0.00	EW2次
7	7.34	0.14	0.01	-0.14	0.38	0.00	0.00	0.00	
8	7.52	0.13	0.13	0.13	0.17	0.00	0.00	0.00	
9	7.86	0.13	-0.14	-0.13	4.50	0.00	0.00	0.01	
10	8.15	0.12	1.64	-0.11	0.24	0.04	0.00	0.00	

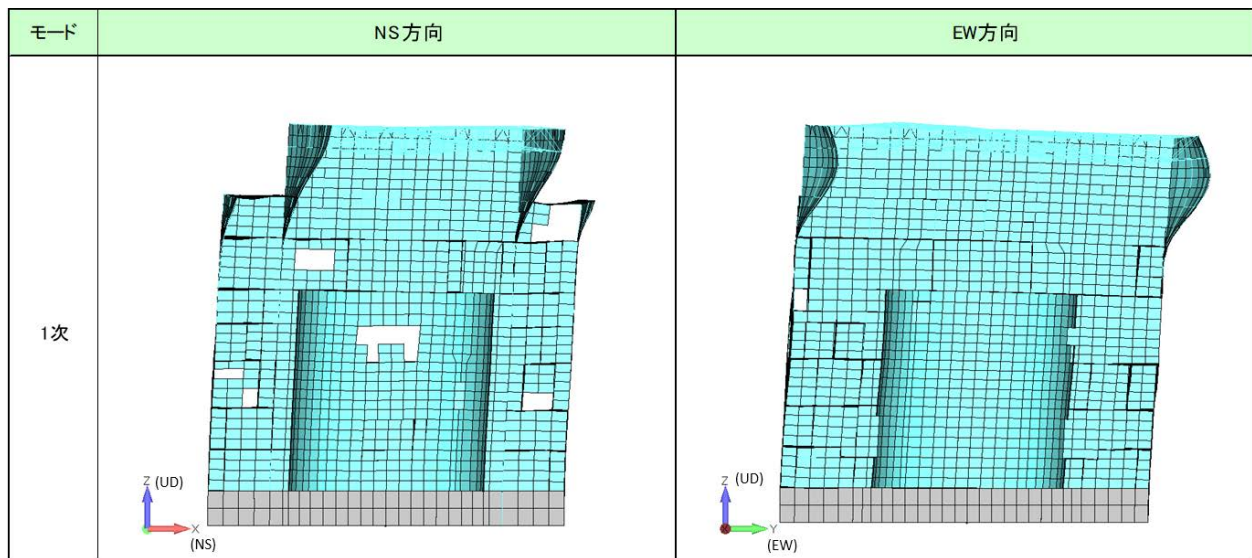


図 2-2 建屋の水平 1 次モード（基礎固定）

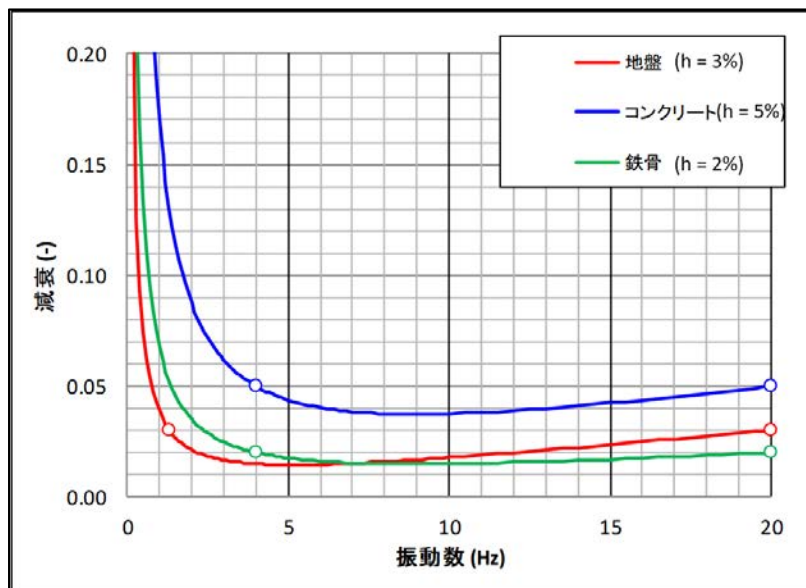


図 2-3 レーリー減衰と振動数の関係

2.2. 解析結果

2.2.1 最大応答加速度及び最大応答変位

本解析における各フロアの代表節点を図 2-4 に示す。

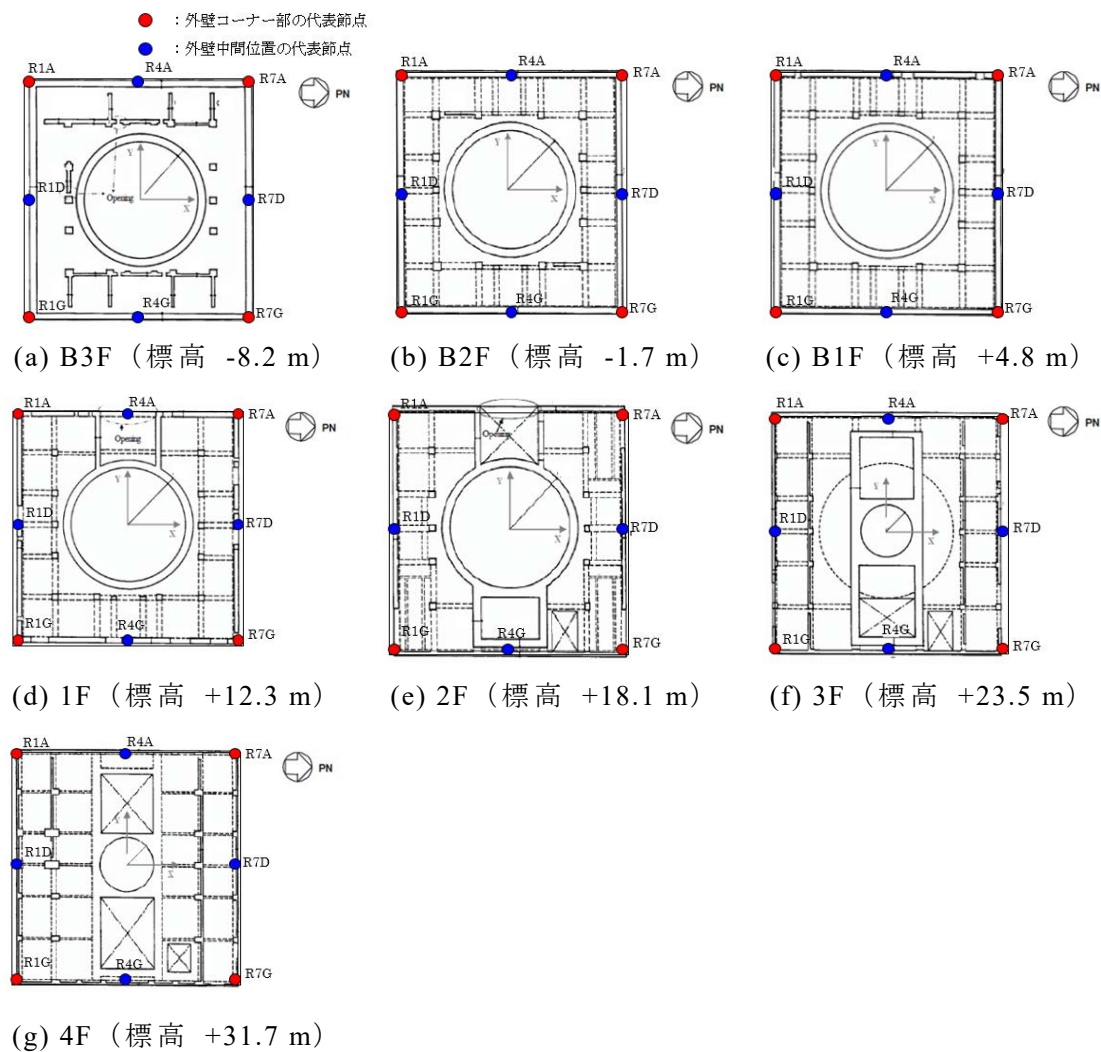


図 2-4 本解析における代表節点の位置 (平面図)

図 2-5 及び図 2-6 に、時刻歴応答解析と周波数応答解析による最大応答加速度及び最大応答変位の高さ方向分布の比較図を示す。図中の実線は建屋モデル各階の全節点の平均値、点線は建屋モデル代表節点（図 2-4 参照）の平均値を示し、黒線は時刻歴応答解析、赤線は周波数応答解析の結果を示す。本事例では、周波数応答解析の結果は時刻歴応答解析の結果と比べ、いずれも 1 割程度小さい結果となった。

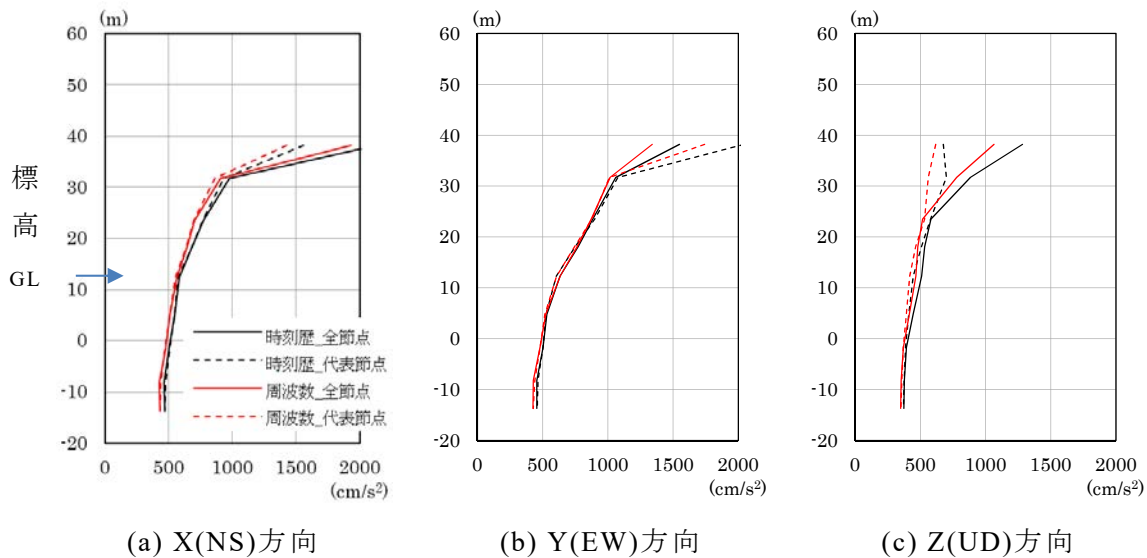


図 2-5 最大応答加速度分布の比較（平均値）

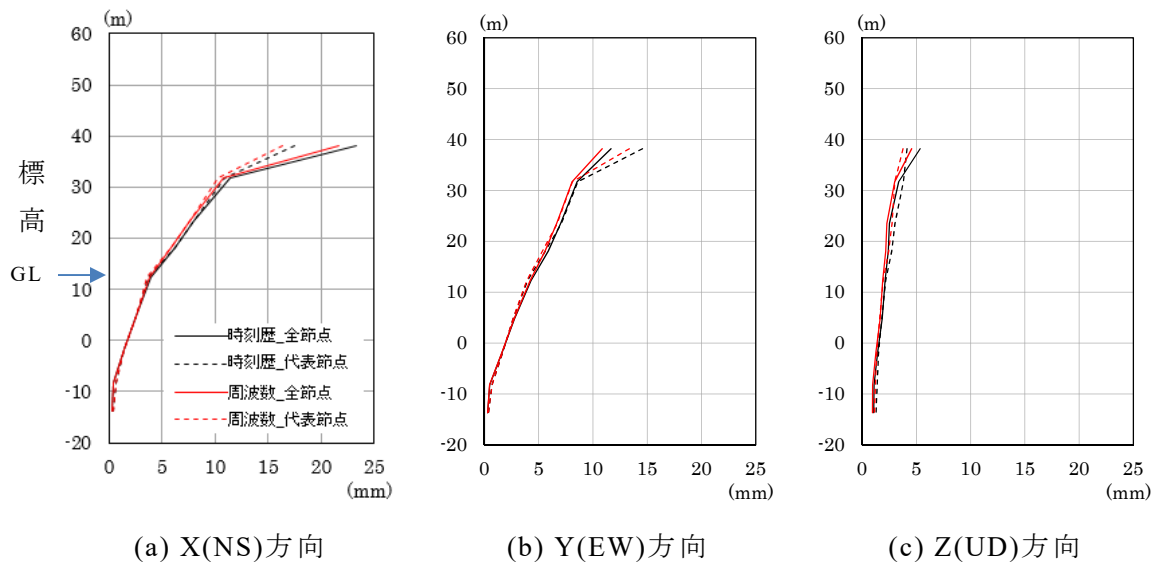


図 2-6 最大応答変位分布の比較（平均値）

2.2.2 床応答スペクトル

図 2-7 及び図 2-8 に時刻歴応答解析と周波数応答解析による B3F、3F の床応答スペクトルの比較図を示す。周波数応答解析の結果は時刻歴応答解析の結果と比べ、全体的に若干小さい傾向であり、最大 1 割程度小さいことを確認した。

図 2-5～図 2-8 によると、時刻歴応答解析よりも周波数応答解析のほうが応答が小さめとなる傾向を確認した。理由としては、1 次の固有振動数においては同じ減衰であるが、2 次や 3 次の固有モードに対する減衰が過小評価となるためと考えられる。

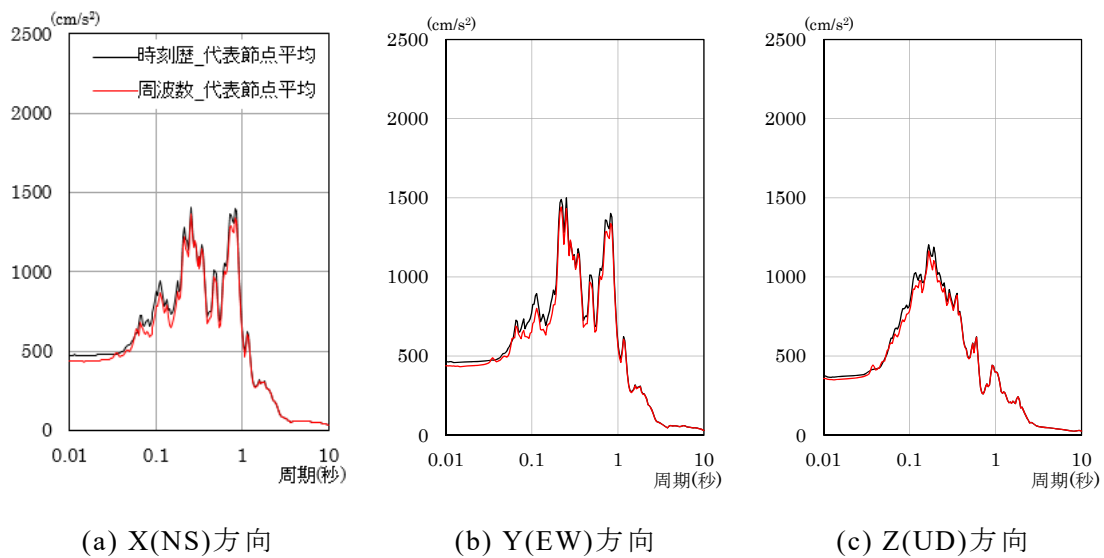


図 2-7 B3F 床応答スペクトル $h = 5\%$ (標高 -8.2 m) の比較

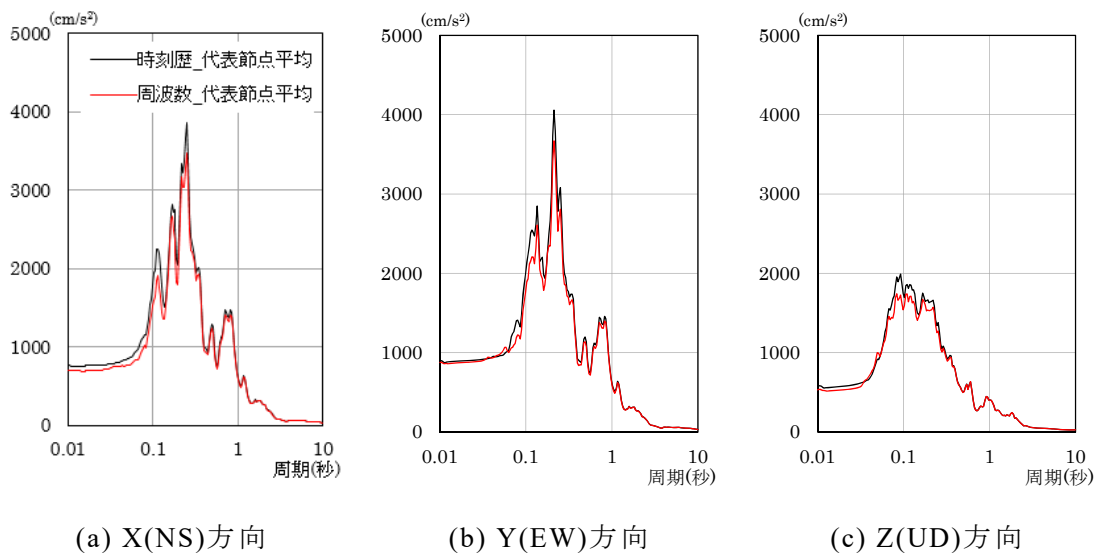


図 2-8 3F 床応答スペクトル $h = 5\%$ (標高 +23.5 m) の比較

附属書 3 建物地盤連成における水平動－上下動の影響

「耐震設計に係る工認審査ガイド」では、「水平 2 方向及び鉛直方向の地震力による応力の組合せを適切に行っていることを確認する」ことを求めている。この時に「各方向の入力地震動位相特性や建物・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する」としている。

ここでは、地震観測記録の再現解析における、水平動と上下動の地盤連成による応答への影響を検討した結果を示す。再現解析は、平成 19 年（2007 年）新潟県中越沖地震の東京電力柏崎刈羽 7 号機原子炉建屋の本震記録に対して実施した。

3.1. 解析モデル及び解析条件

別紙 1 の 2.1.1 解析条件を元に時刻歴応答解析による地震応答解析を実施した。解析モデル概要を図 3-1 に示す。

建屋基礎上で観測された地震観測記録を図 3-2 に示す。この観測記録を図 3-1 の解析モデル底面から入力するために基礎位置から解析モデル底面まで引き下げて入力地震動を作成した。

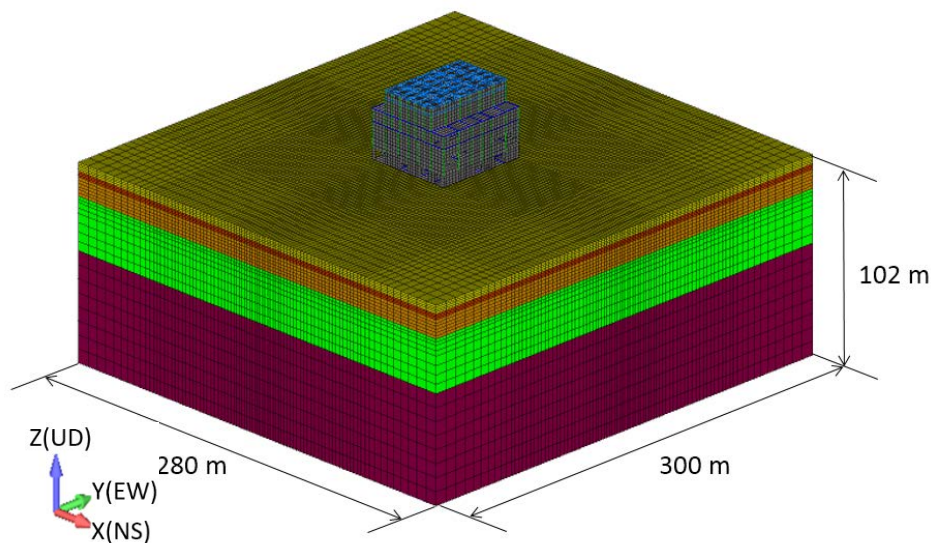


図 3-1 解析モデル概要

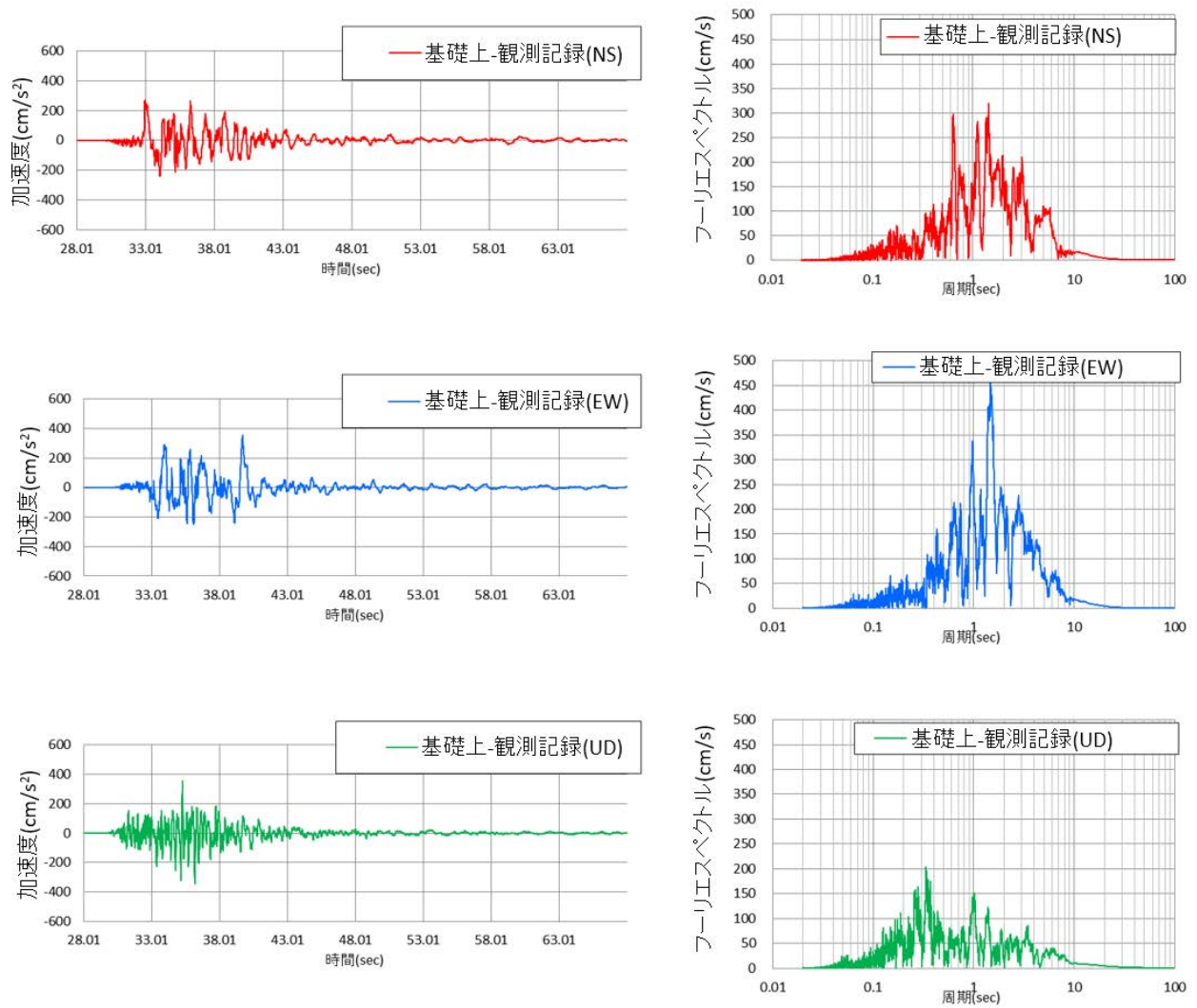


図 3-2 基礎上の地震観測記録（左：加速度波形、右：フーリエスペクトル）

3.2. 入力地震動の特性

図 3-3 に解析モデルへの入力地震動を示す。EW 方向と UD 方向の入力地震動には 11-12Hz 近傍に大きなピークが発生している。NS 方向にも小さいが同様のピークがみられる。建物基礎の観測記録にはこの振動数近傍にピークが見られないことから、地盤中ではこの振動数の波が大きく減衰するか、建物の水平運動に伴う回転運動による基礎観測点位置の上下動が打ち消し合っているのか、建物基礎を振動モードの節とする振動モードがあるかなどが推定される。いずれにしても、EW 方向の建物振動には 11-12Hz 近傍において水平動と上下動の連成の影響が現れる可能性が示唆される。

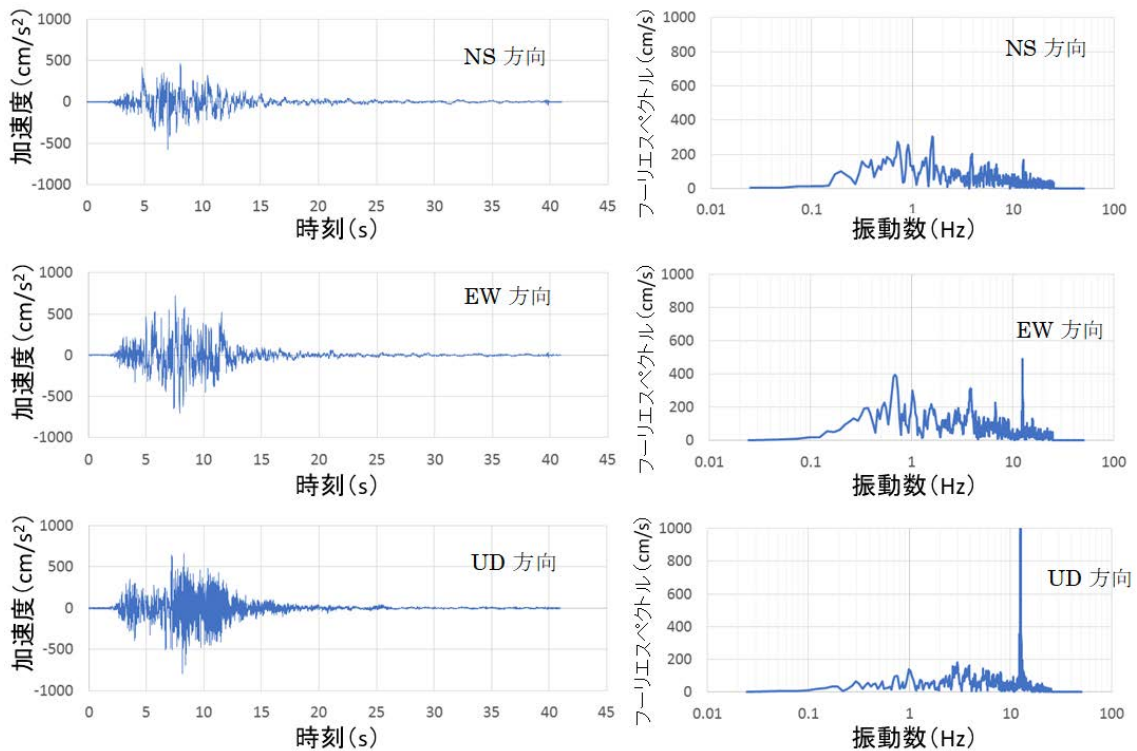


図 3-3 解析モデルへの入力地震動（左：加速度波形、右：フーリエスペクトル）

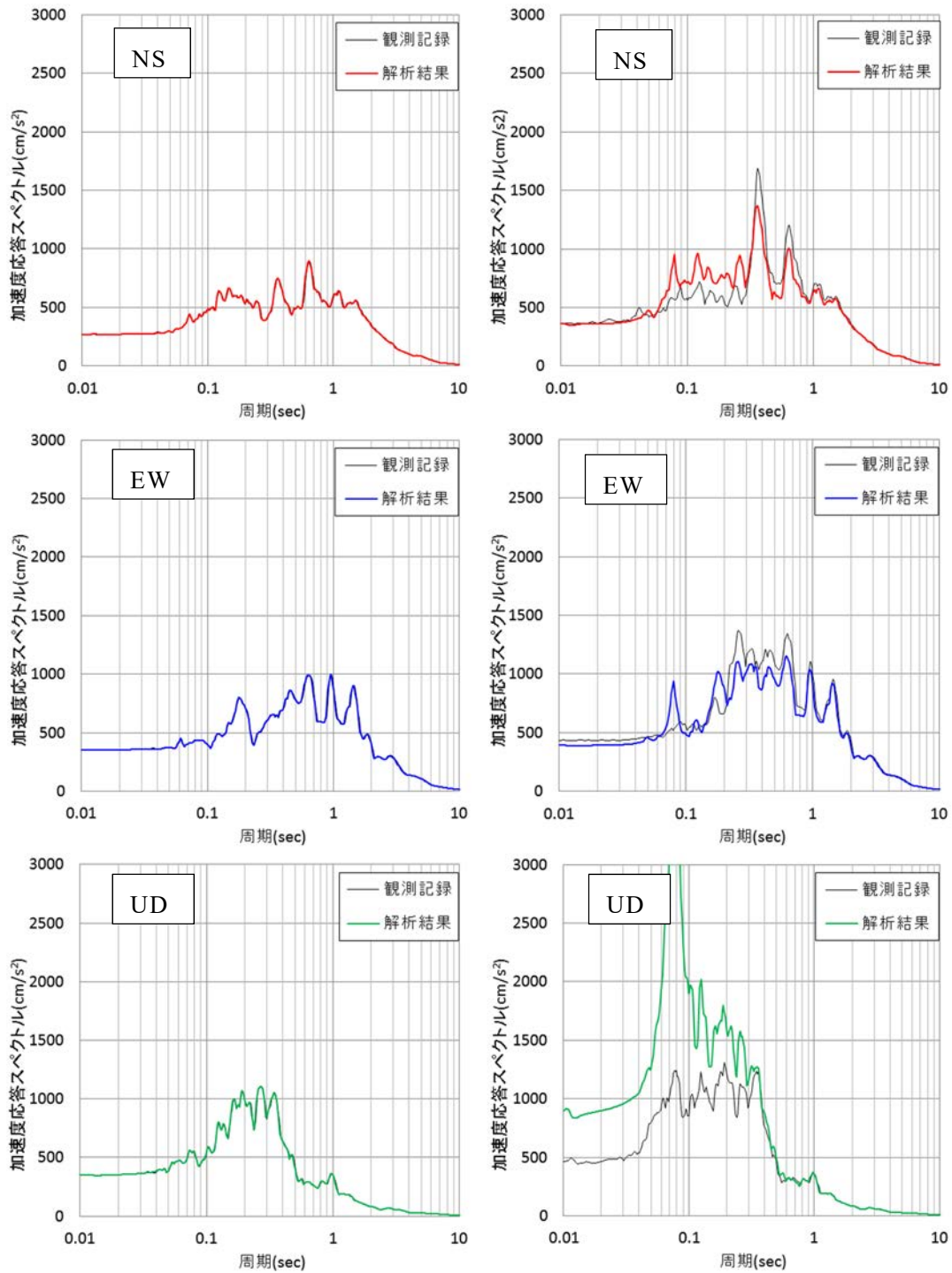
3.3. 応答結果の考察

3.3.1 床応答スペクトルによる考察

基礎上及び 3F における観測記録と弾性解析結果の加速度応答スペクトルの比較図を図 3-4 に示す。基礎上の応答スペクトルはほぼ一致しているが、3F の応答スペクトルでは周期 0.08 秒 (12.5Hz) のピークにより上下応答が大きくなり、水平応答もその影響を受けていることがわかる。観測記録ではこのピークは確認されていないことから、数値計算上発生したピークの可能性が考えられる。原因として、図 3-5 に示すように、地盤と建屋の上下方向の固有振動数 11~12.5 Hz 近傍の連成モードによる影響が考えられる。

また、3F の観測記録と解析結果の違いが大きいその他の原因として、耐震壁以外の間仕切り壁等がモデル化されていない影響、小梁等の二次部材がモデル化されていな

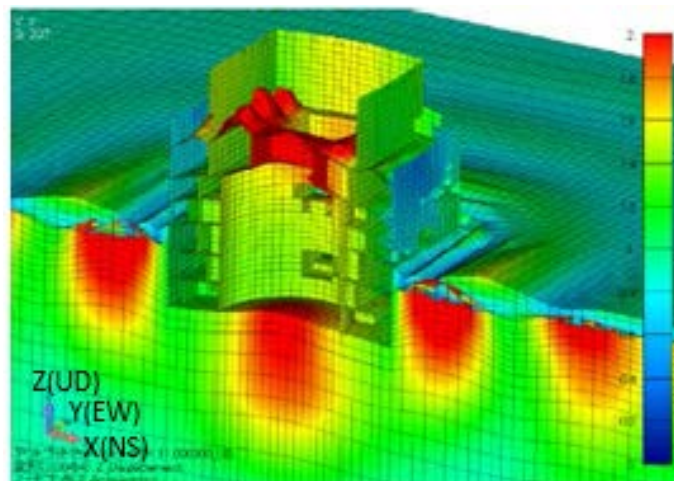
い影響など、解析モデルと実構造物との違いがあるほか、地盤の非線形挙動を考慮していない影響等が考えられる。上下応答の再現性を向上させるためには、これらの影響を確認し、より現実に近いモデルとする必要があると考えられる。しかしながら、今回は公開情報に基づきモデルを作成していることから、これ以上の詳細化は困難である。そこで、床面の上下方向の剛性が高いと思われる 3F の観測点近傍の外壁部の加速度時刻歴波形についても同様に比較を行った。3F の外壁部における床応答スペクトルを図 3-6 に示す。水平応答は観測位置の結果と概ね一致し、上下応答についてはまだ観測記録よりやや大きくなっているが、周期 0.08 秒近傍のピークが観測位置の結果よりかなり低減されていることがわかる。これらのことから、内壁通りの上下剛性も実際は外壁と一体になるような状態にあると推測される。



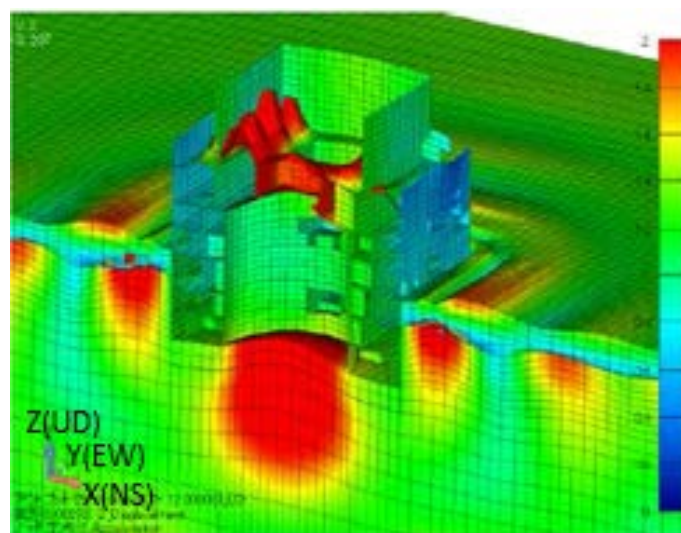
(1) 基礎上

(2) 3F (観測点)

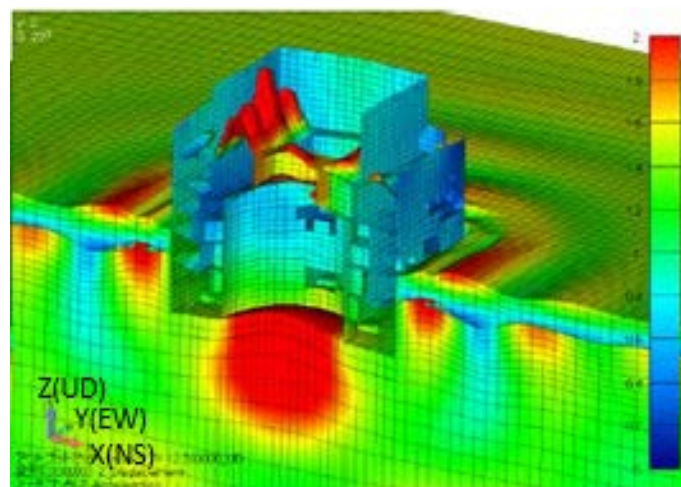
図 3-4 床応答スペクトル ($h = 5\%$) の比較



11Hz



12Hz



12.5Hz

図 3-5 地盤と建屋の連成モード

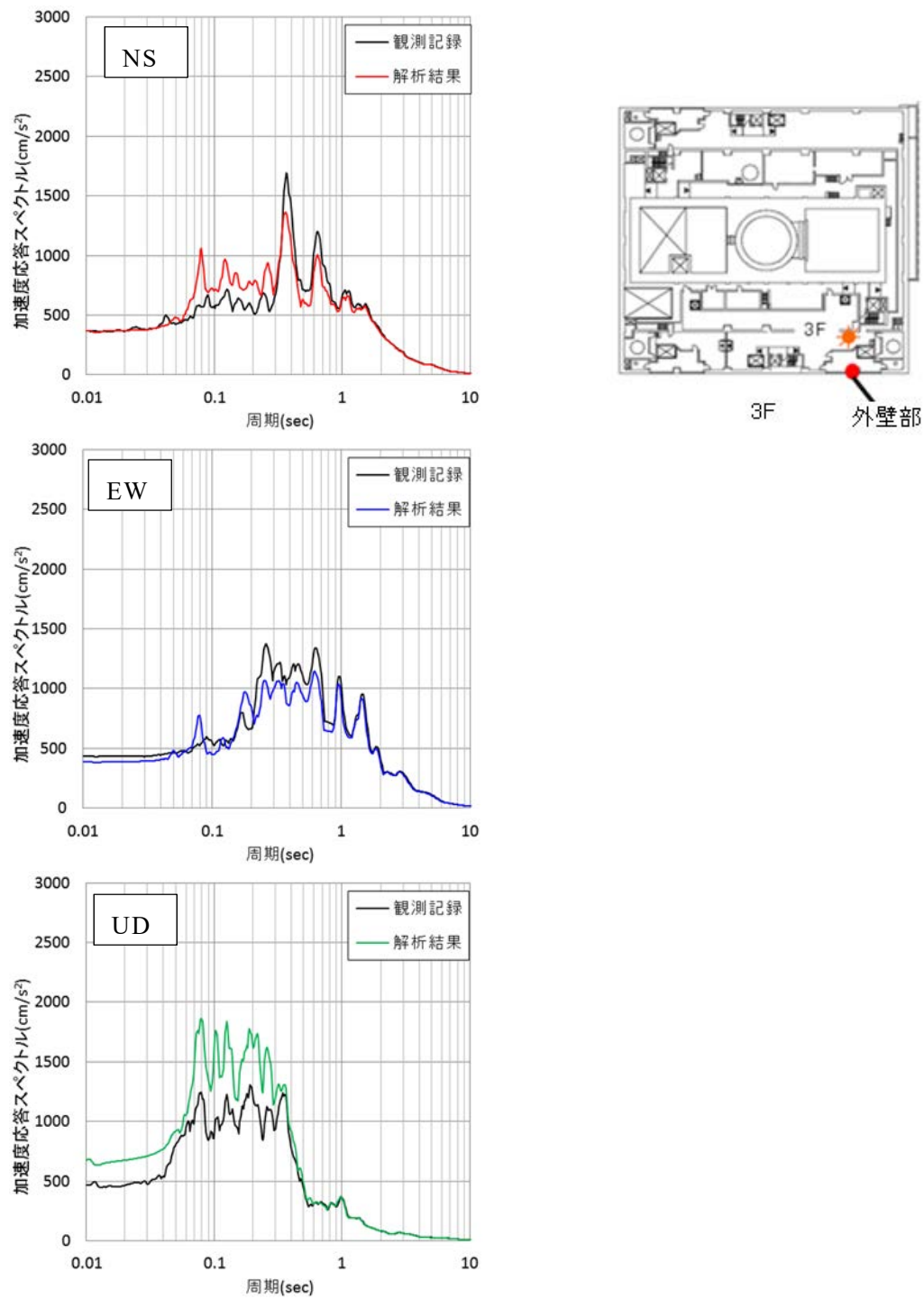


図 3-6 床応答スペクトル ($h = 5\%$) の比較 (3F の外壁部)

附属書 4 側面剥離・滑りの考慮の有無による影響

本事例では、平成 19 年（2007 年）新潟県中越沖地震の柏崎刈羽原子力発電所 7 号機原子炉建屋の本震記録を用いて、側面剥離・滑りを考慮（底面浮上りは無視）した原子炉建屋の弾性時刻歴応答解析を実施し、側面剥離・滑りの考慮の有無による影響を検討した結果を示す。

4.1. 解析モデル及び解析条件

別紙 1 の 2.1.1 解析条件を元に地震応答解析を実施した。解析モデル概要を図 4-1 に示す。以下に 2.1.1 解析条件と異なる部分を示す。側面剥離・滑りは、建屋と地盤の接合面に非線形ジョイントを挿入することで考慮する。本事例では、非線形ジョイントの圧縮時の剛性は建屋側面と接触する地盤の剛性の 1000 倍とした。側面の滑りに対し、動摩擦係数 0.35 を採用した。非線形解析のため、時刻歴応答解析の積分時間間隔は 1/1000 秒とした。

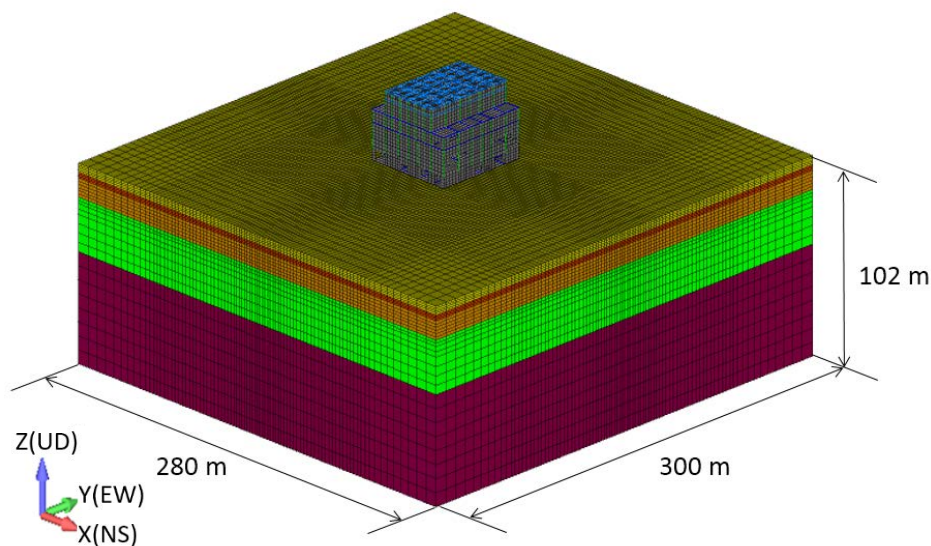


図 4-1 解析モデル概要

4.2. 解析結果

側面剥離・滑りの考慮の有無による違いを中心に説明する。代表点及び建屋の各通りは図 2-4 と同様である。RA 通りは、西面の外壁に沿った通りであり、R4A は中央、R1A、R7A はそれぞれ端部の節点に相当する（図 2-4 参照）。

4.2.1 観測記録と解析結果の比較

4.2.1.1 最大応答加速度の比較

最大応答加速度を図 4-2 に示す。側面剥離・滑りを考慮した解析結果では、非考慮の結果と異なり、地表面（標高+12 m）以下において最大加速度のばらつきが非常に大きくなった。これは、側面剥離・滑りの考慮により、地下での建屋と地盤の再接触

現象が発生し、スパイク状の加速度が生じたためと考えられる。そこで、100 Hz を超える高振動数については数値解析上の振動であると考え、100 Hz のローパスフィルターを掛けた結果を図 4-3 に示す。その結果、弾性解析とほぼ同様な最大応答加速度分布になったことが確認できる。

図 4-4 に代表節点の加速度時刻歴とフーリエスペクトルの例を示す。ナイキスト振動数は 500Hz である。側面剥離・滑りを考慮した解析結果では 250Hz にピークが発生しており、ローパスフィルターの適用によりピークが除外されていることを確認できる。フィルター処理後の加速度時刻歴及びフーリエスペクトルは、側面剥離・滑りの非考慮の場合とほぼ同じ結果となっており、本事例では側面剥離・滑りの考慮の有無による建屋応答への影響はあまり見られない結果となった。

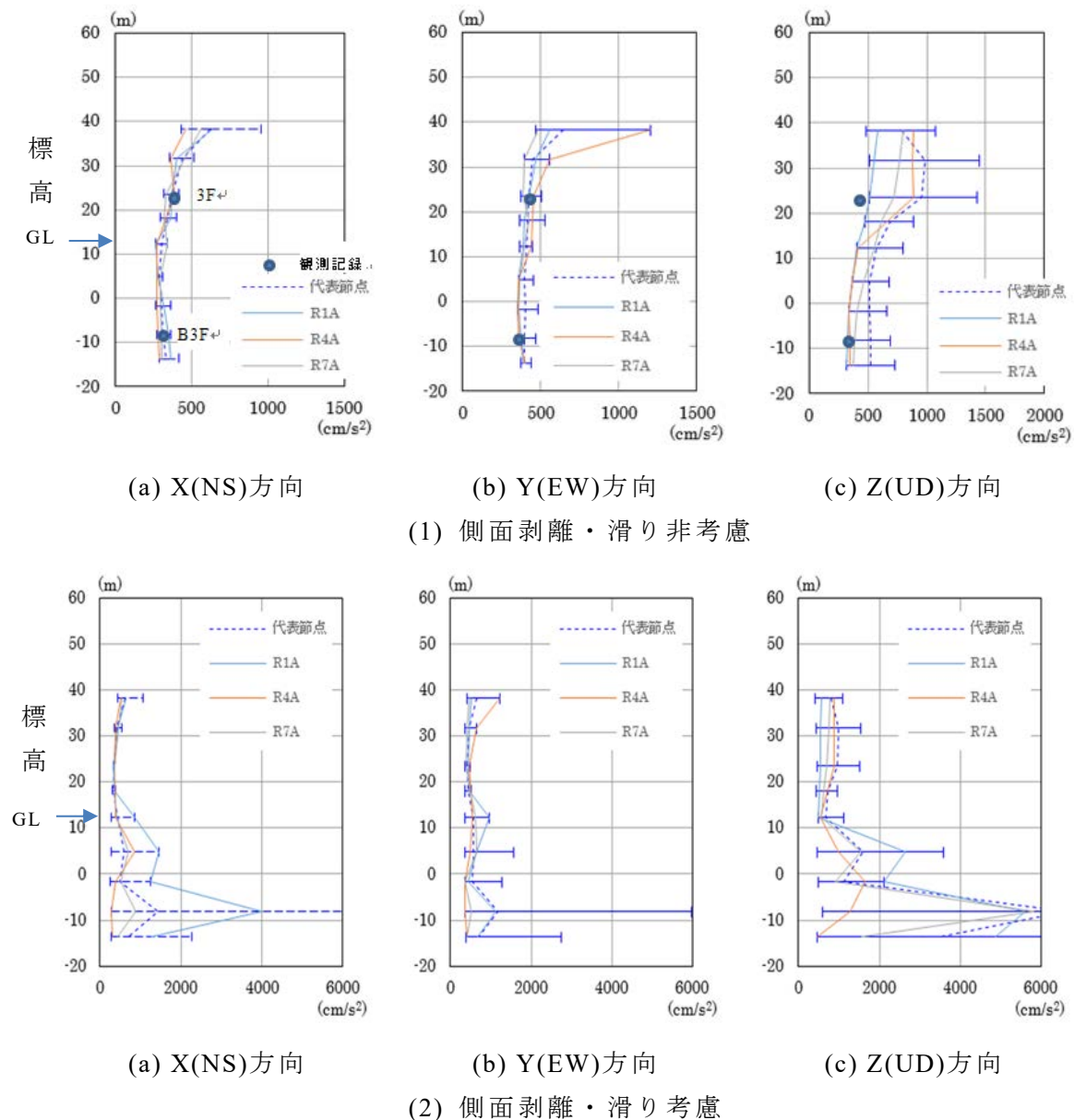
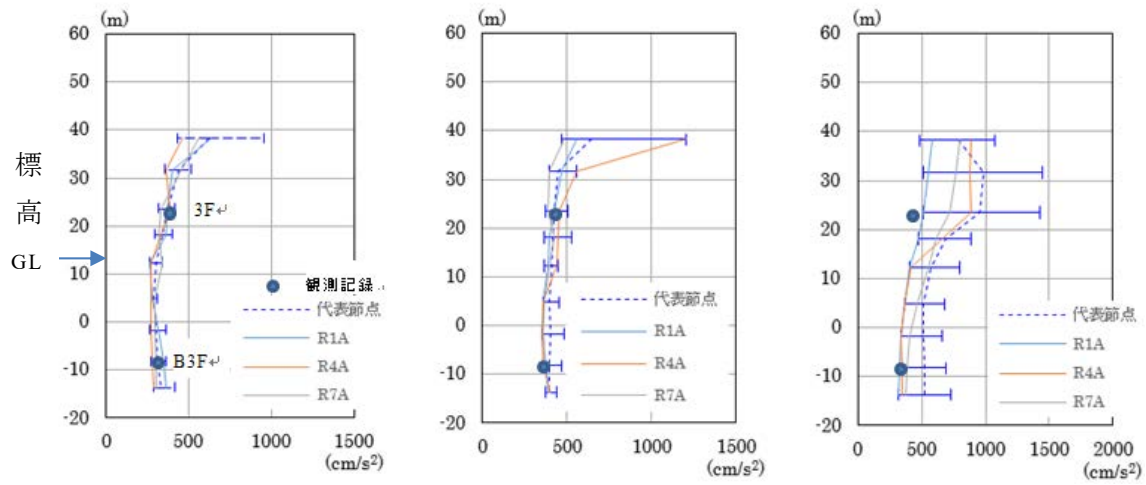


図 4-2 最大応答加速度分布 (RA 通り)

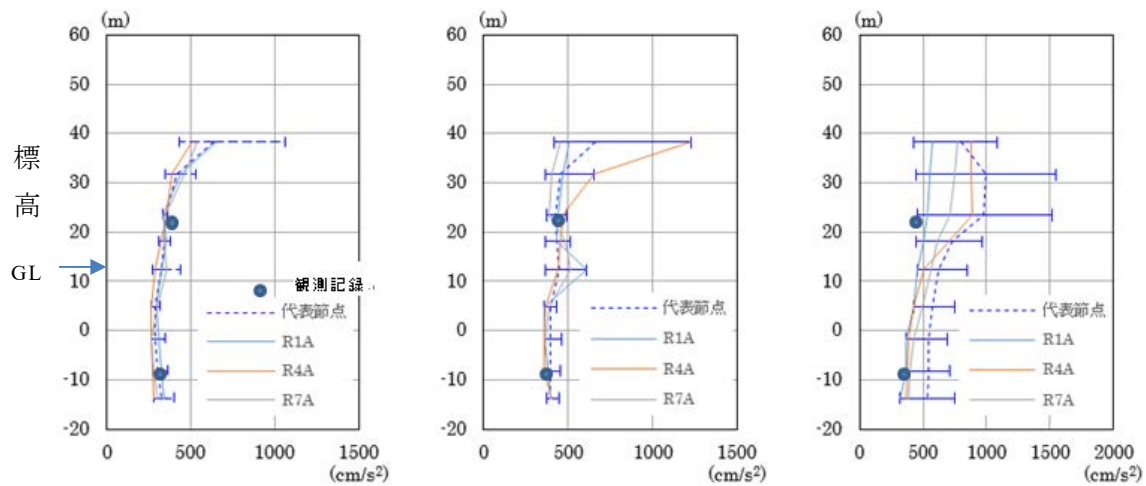


(a) X(NS)方向

(b) Y(EW)方向

(c) Z(UD)方向

(1) 側面剥離・滑り非考慮



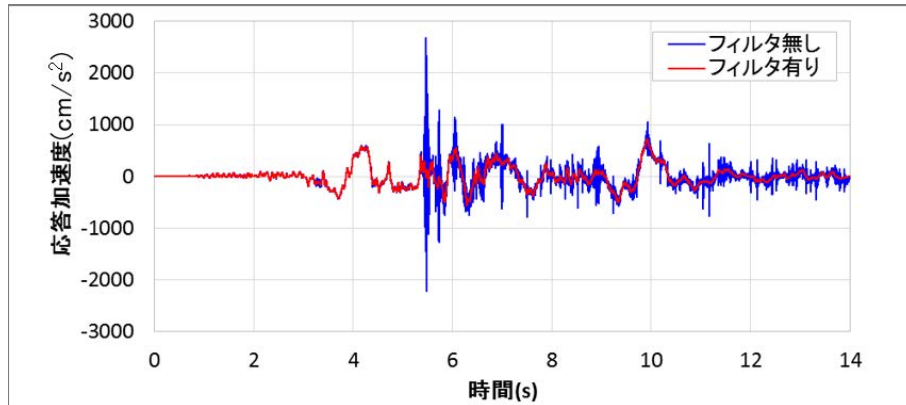
(a) X(NS)方向

(b) Y(EW)方向

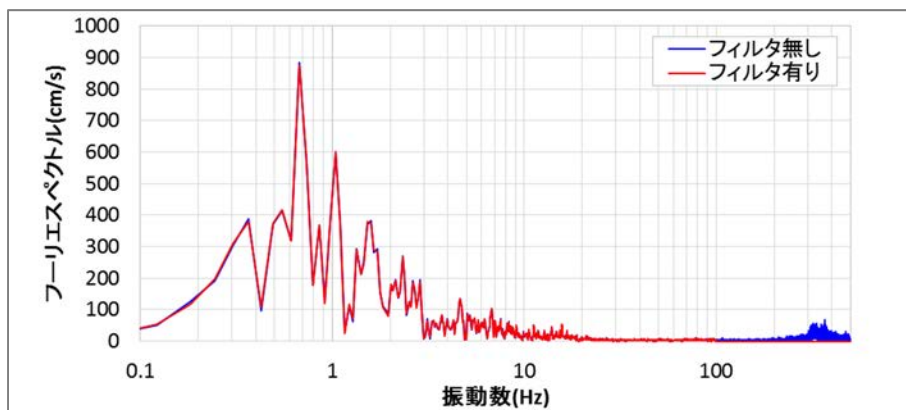
(c) Z(UD)方向

(2) 側面剥離・滑り考慮 (100Hz ローパスフィルター適用)

図 4-3 最大応答加速度分布 (RA 通り)



(1) 代表節点の加速度時刻歴



(2) 代表点のフーリエスペクトル

図 4-4 100 Hz ローパスフィルターの適用有無の比較例

4.2.1.2 床応答スペクトルの比較

基礎上及び 3F における観測記録と解析結果の加速度応答スペクトルの比較図を図 4-5 及び図 4-6 に示す。基礎上における側面剥離・滑り考慮の応答スペクトルでは、周期 0.1 秒より長周期側においては、観測記録とほぼ一致している。しかし、スパイク状の加速度の影響により周期 0.1 秒より短周期側において、上下方向の振幅が大きくなっている。周期 0.1 秒近傍のピークの原因は、側面剥離・滑りを考慮したことによる影響と考えられる。

一方、3F の応答スペクトルは、側面剥離・滑り非考慮の解析結果とほぼ同様であり、水平応答は観測記録と概ね一致しているが、上下応答は観測記録よりも全体的に大きくなっている。

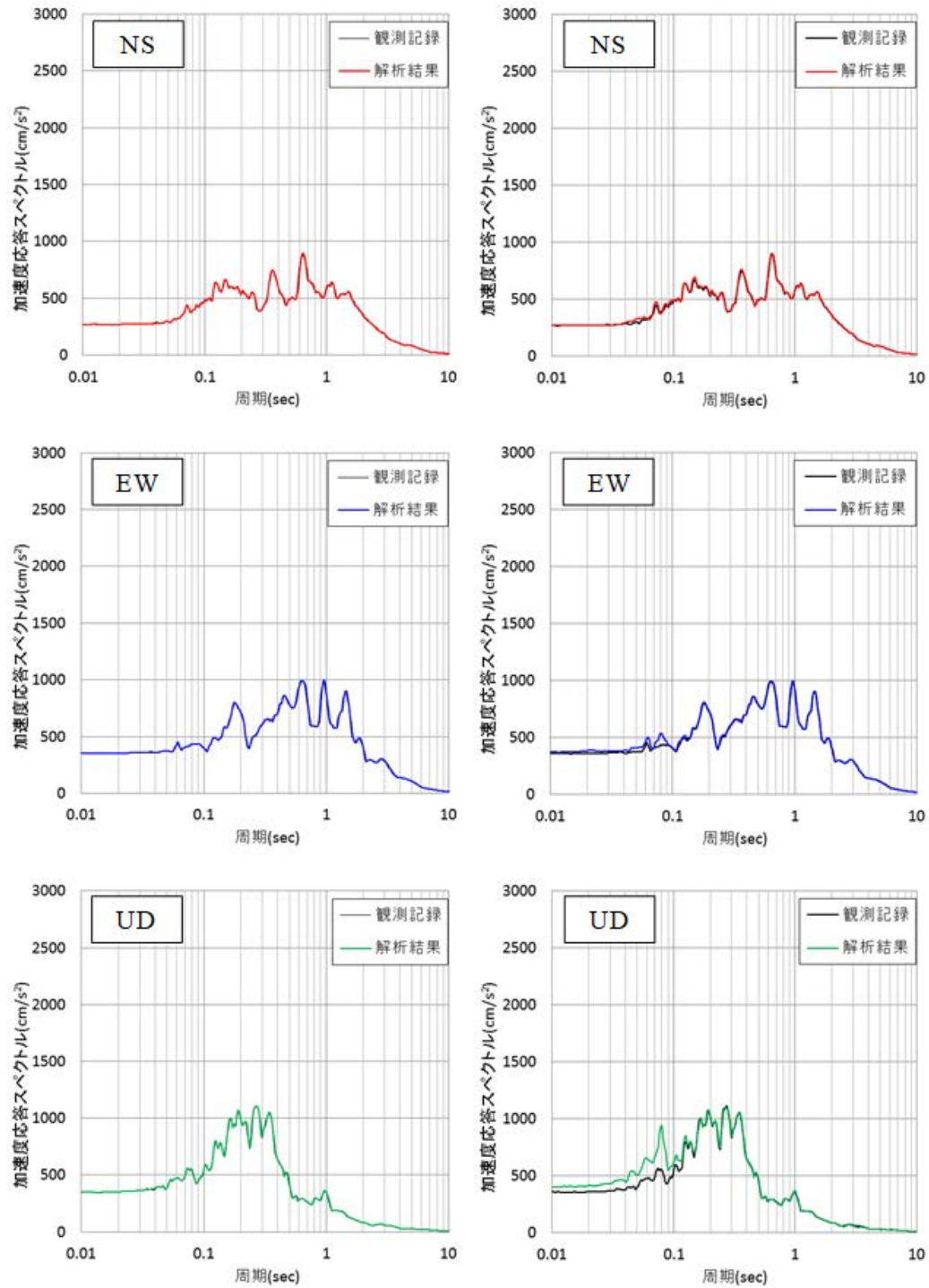


図 4-5 床応答スペクトル ($h = 5\%$) の比較 (基礎上)
 (左: 側面剥離・滑り非考慮、右: 側面剥離・滑り考慮)

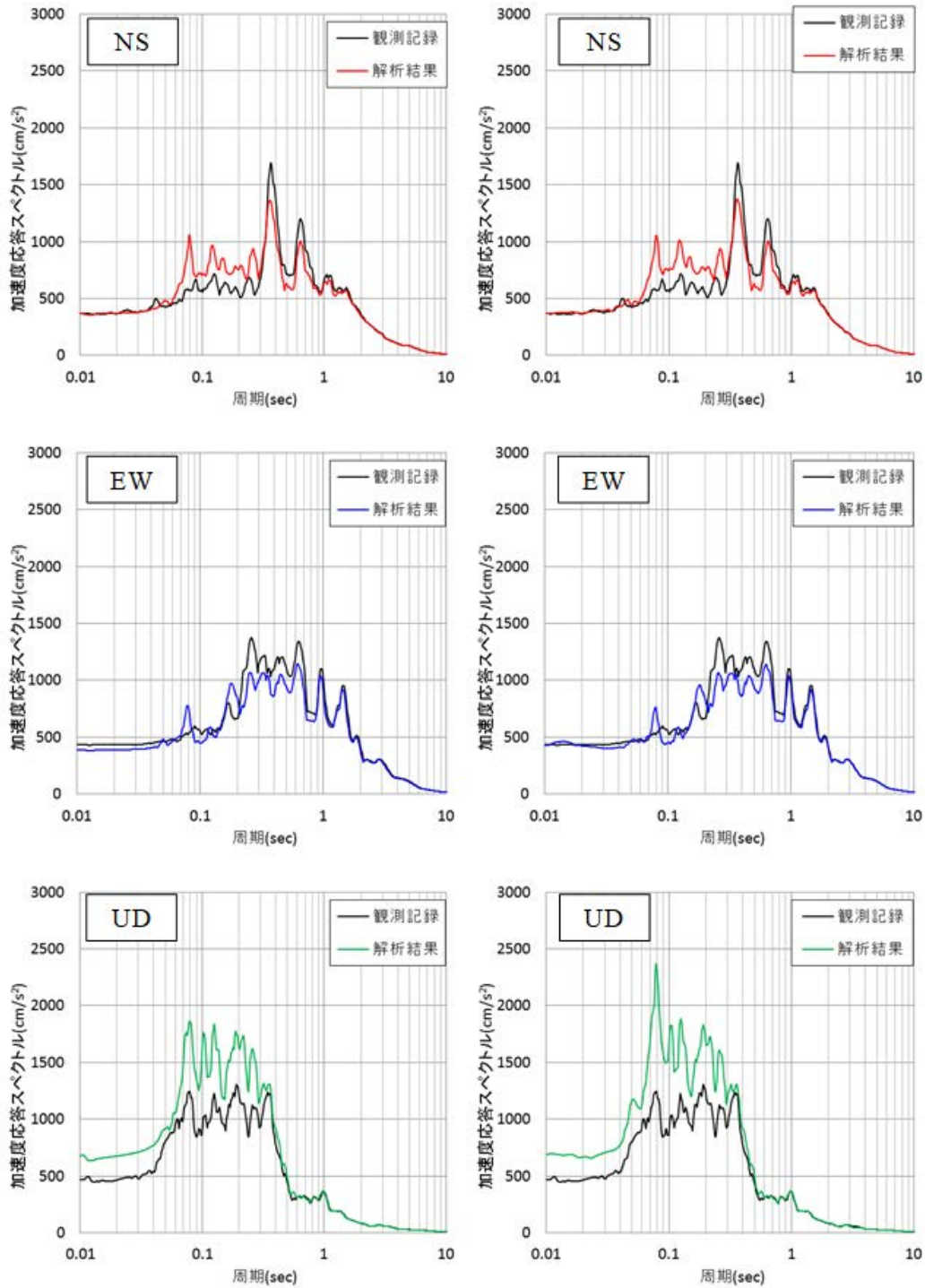
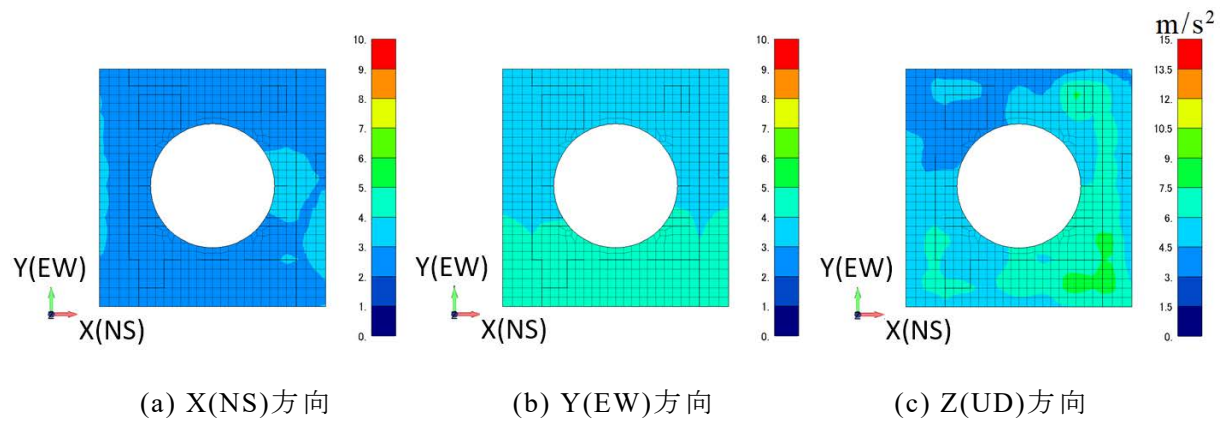


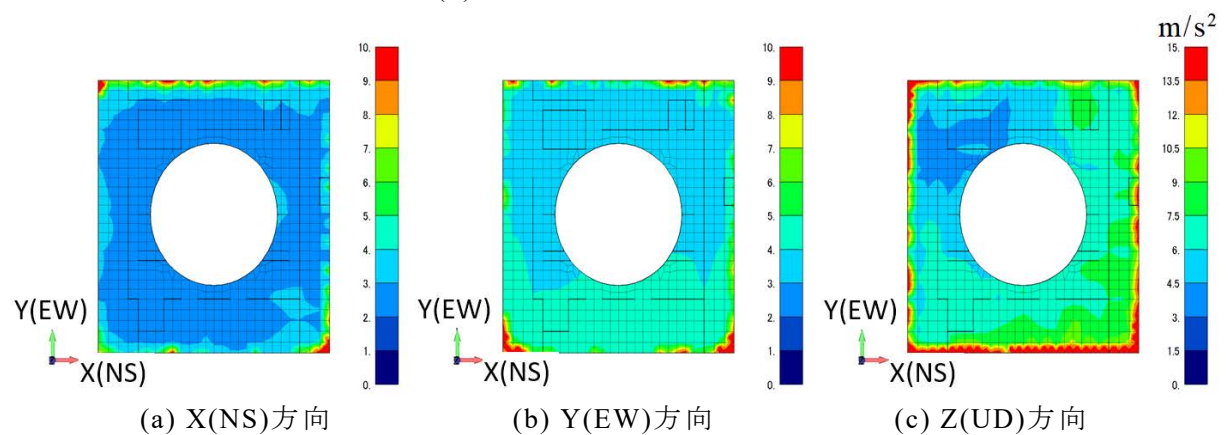
図 4-6 床応答スペクトル ($h = 5\%$) の比較 (3F の外壁部)
 (左: 側面剥離・滑り非考慮、右: 側面剥離・滑り考慮)

4.2.2 最大応答加速度分布図

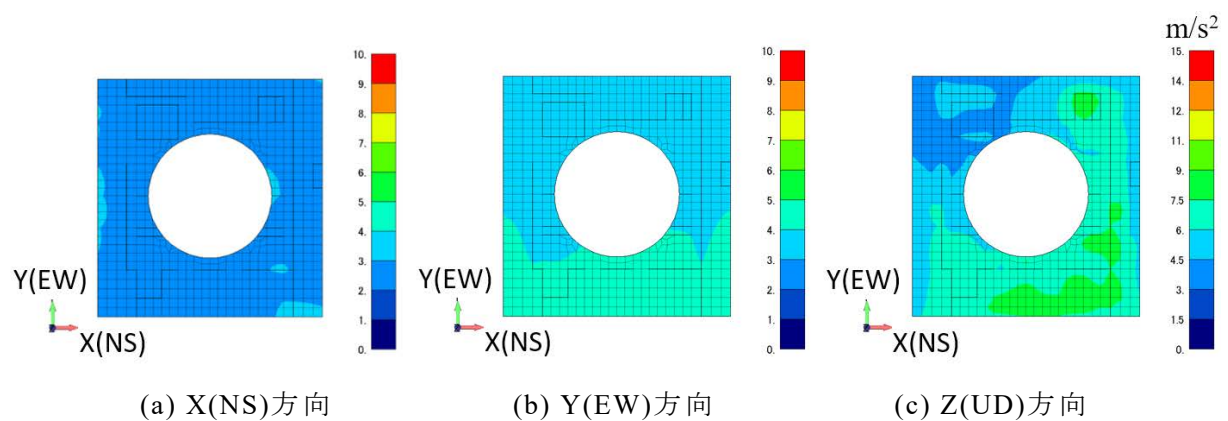
図 4-7 及び図 4-8 に最大応答加速度の分布図を示す。側面剥離・滑りによる地下での建屋と地盤の再接触現象から、ローパスフィルターを適用していないコンターにおいては、B1Fの外周部に非常に大きな最大応答加速度が確認されたが、100 Hz ローパスフィルターを適用した結果では、ほぼ側面剥離・滑り非考慮の結果と同様な結果となっている。一方、3Fの結果はローパスフィルターの適用と関係なく側面剥離・滑り非考慮の結果とほぼ同じ結果となっている。



(1) 側面剥離・滑り非考慮

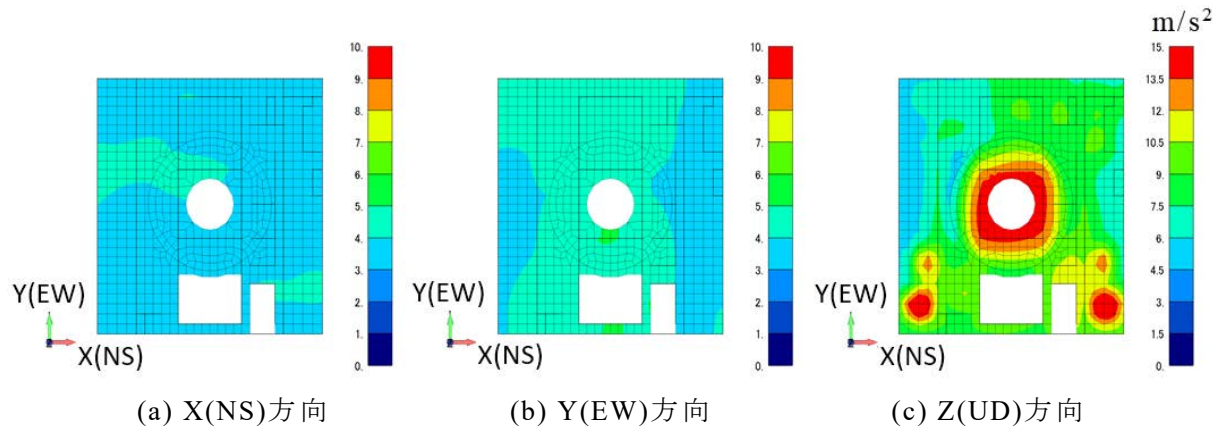


(2) 側面剥離・滑り考慮（フィルター無）

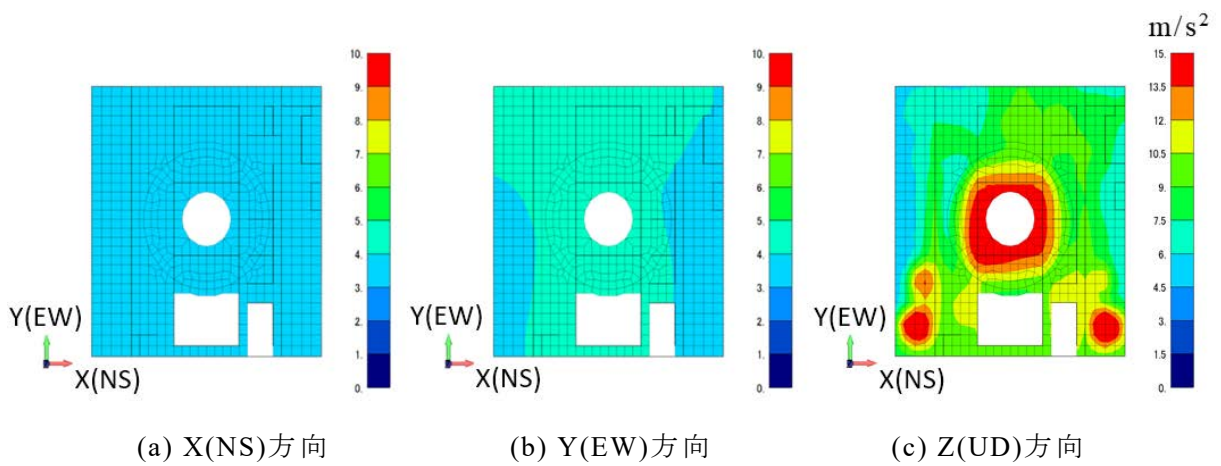


(3) 側面剥離・滑り考慮（100 Hz ローパスフィルター適用）

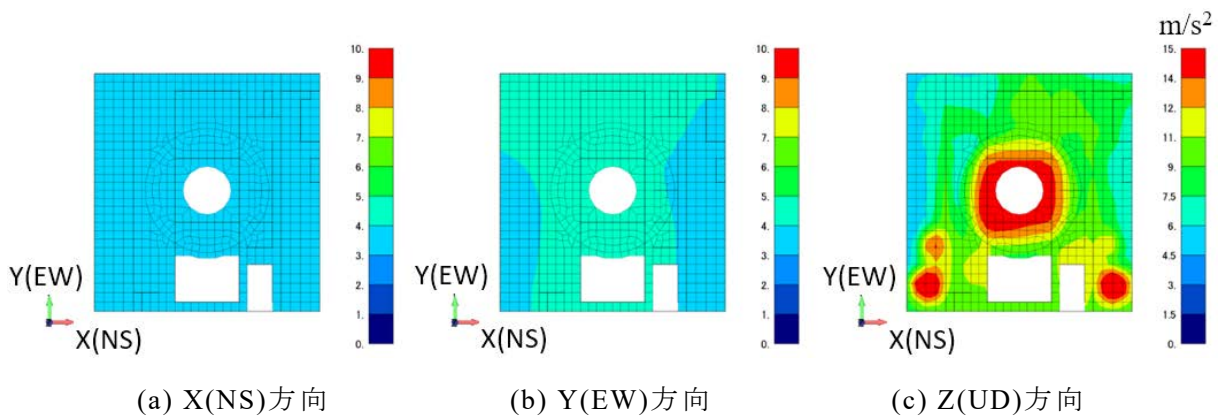
図 4-7 最大応答加速度分布図：B1F（標高 +4.8 m）



(1) 側面剥離・滑り非考慮



(2) 側面剥離・滑り考慮（フィルター無）



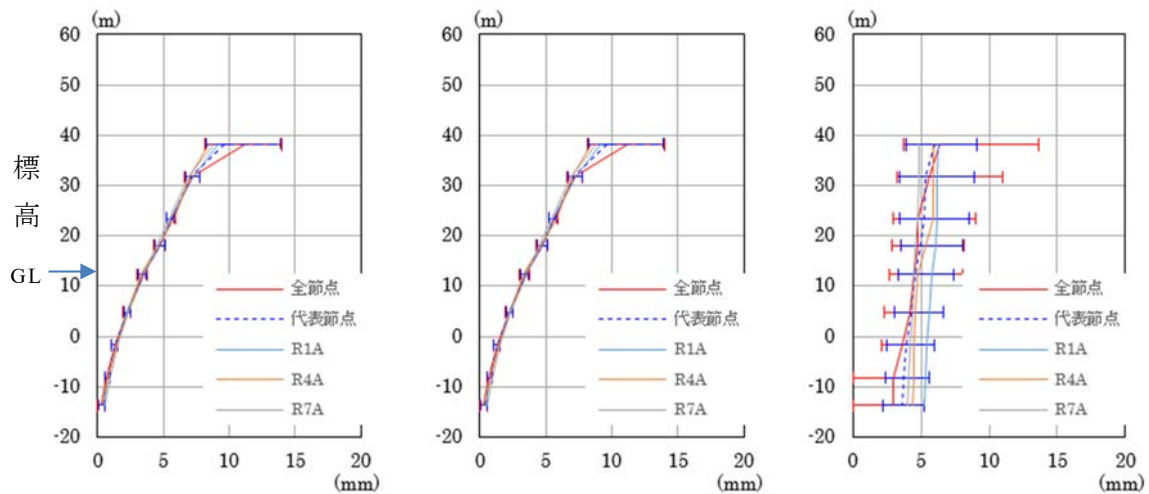
(3) 側面剥離・滑り考慮（100 Hz ローパスフィルター適用）

図 4-8 最大応答加速度分布図：3F（標高 +23.5 m）

4.2.3 最大応答変位

4.2.3.1 高さ方向分布図

最大応答変位の高さ方向分布図を図 4-9 に示す。ここで、代表節点（12 点）の平均、全節点の平均を示すとともに、各階における代表節点及び全節点の最大値と最小値をそれぞれ青線及び赤線のバーで示す。側面剥離・滑り非考慮の解析結果とほぼ同様な結果となり、側面剥離・滑りの影響が見られなかった。

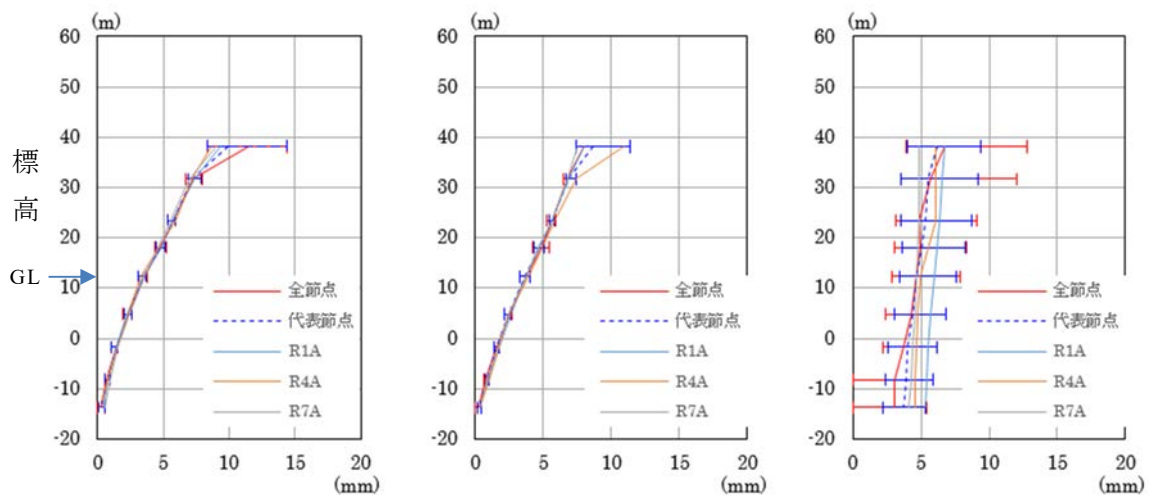


(a) X(NS)方向

(b) Y(EW)方向

(c) Z(UD)方向

(1) 側面剥離・滑り非考慮



(a) X(NS)方向

(b) Y(EW)方向

(c) Z(UD)方向

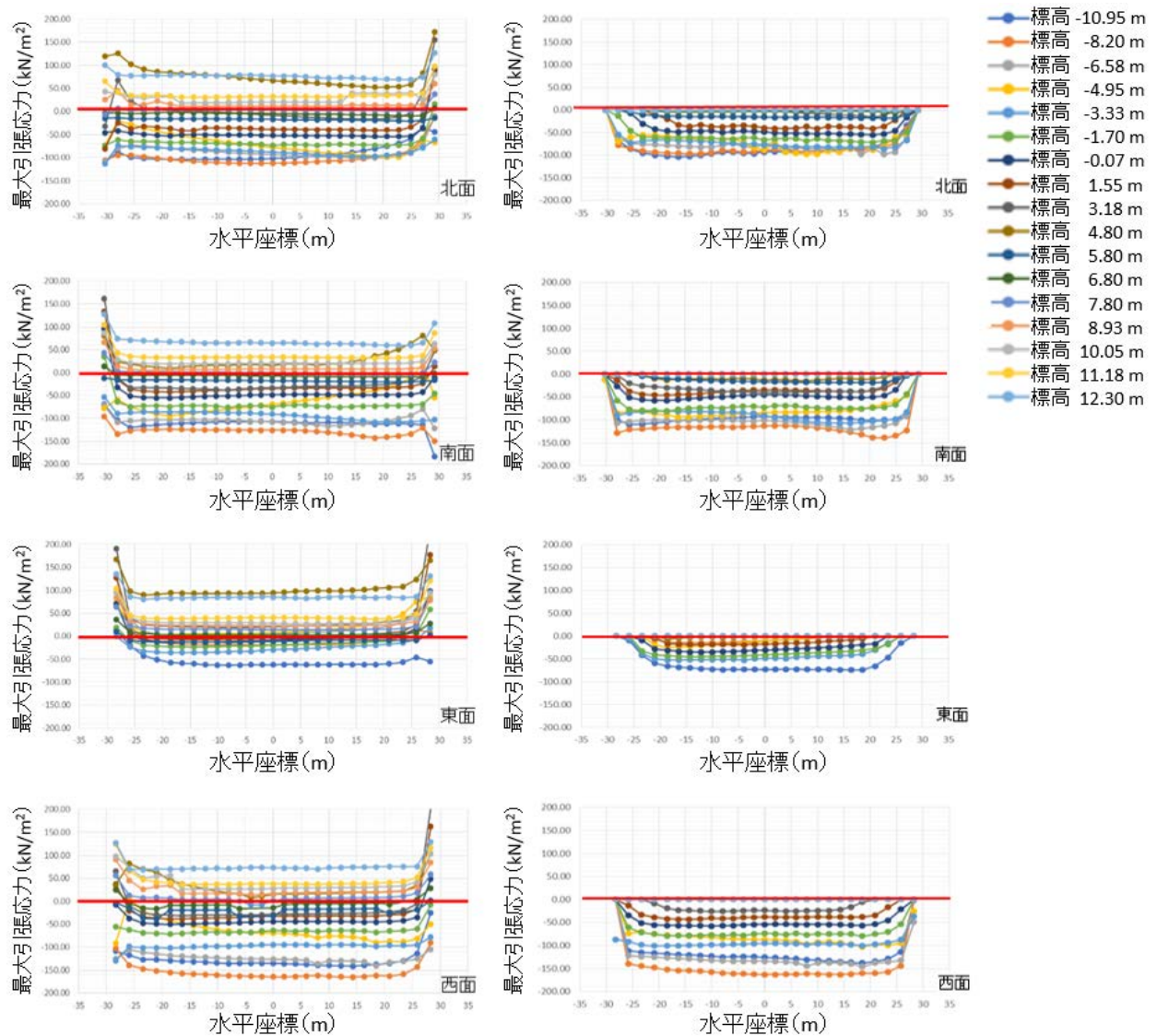
(2) 側面剥離・滑り考慮

図 4-9 最大応答変位分布 (RA 通り)

4.2.4 建屋地下側面と地盤の剥離とすべり

側面の軸方向の最大応力分布及び鉛直せん断最大応力比をそれぞれ図 4-10 及び図 4-11 に示す。側面剥離・滑り考慮の側面の軸方向最大応力分布の結果によると、標高 6.8 m から地表面（標高 12.3 m）までの最大引張応力がほぼ 0 となっており、剥離が発生していると考えられる。側面剥離の鉛直せん断最大応力比はすべての位置において 0.35 となっており、すべりが発生することがわかる。

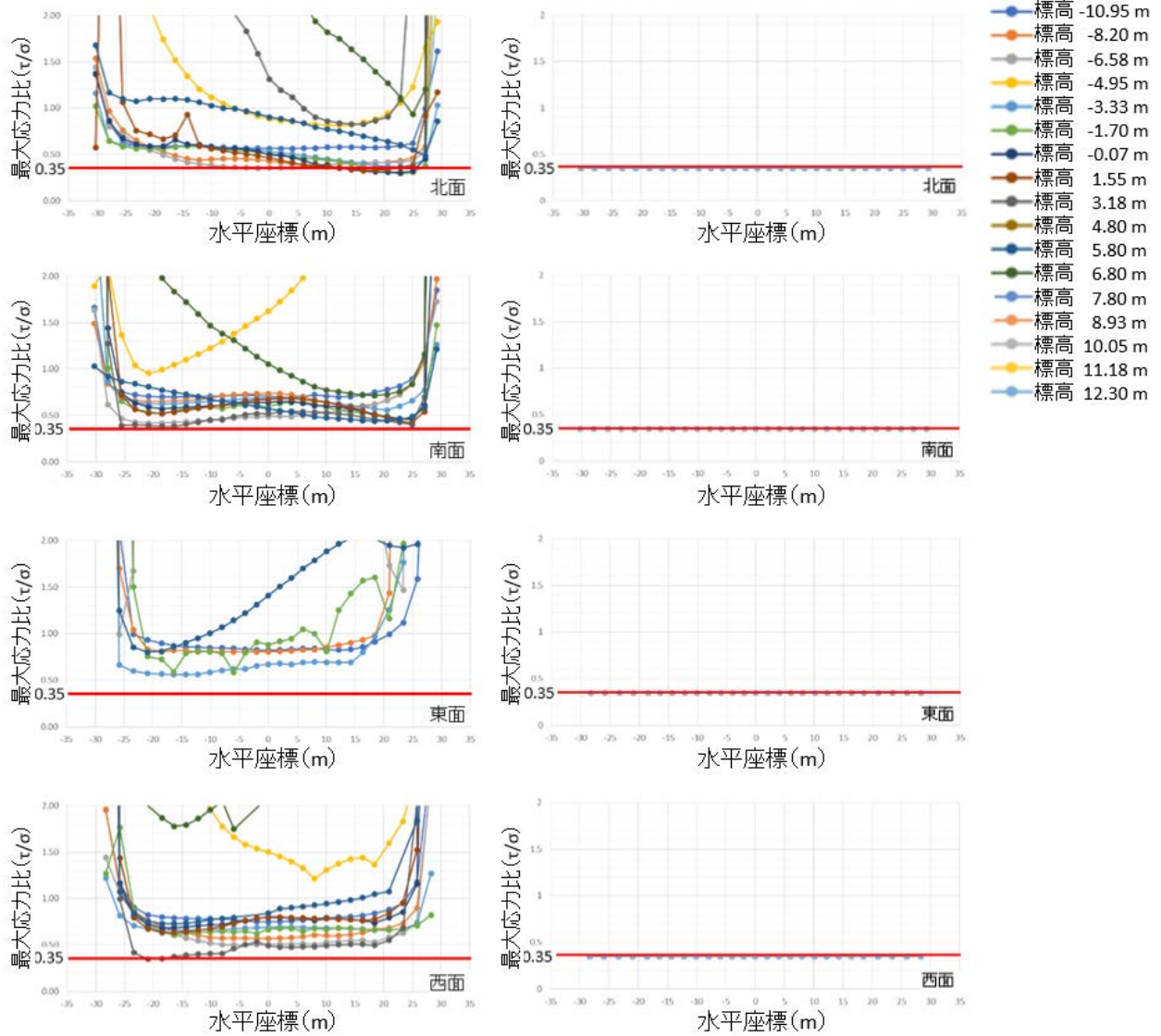
以上のように、側面の剥離・滑り考慮の有無による建屋応答への影響を分析し、本事例の場合には側面の剥離・滑りを考慮しても建屋全体の応答は非考慮の場合と大きく変わらないことを確認した。ただし、地下階においては側面剥離・滑りによる再接触現象によるスパイク状の加速度が発生することが確認された。現実的な応答を得るために、適切なローパスフィルターを適用する等の注意が必要となる。



(1) 側面剥離・滑り非考慮

(2) 側面剥離・滑り考慮

図 4-10 側面の軸方向の最大応力分布



(1) 側面剥離・滑り非考慮

(2) 側面剥離・滑り考慮

図 4-11 側面の鉛直せん断の最大応力比分布

附属書 5 鉄筋コンクリート非線形の地震応答への影響

本事例では鉄筋コンクリート耐震壁の振動台実験（NUPEC）³を対象としたシミュレーション解析の結果の概要を示す。解析は有限要素解析コードである FINAS/STAR（F/S）及び FINAL を用いて実施した。

5.1. 解析モデル

実験は耐震壁の動的弾塑性性状を確認するために実施されたものである。試験体はウェブ壁及びフランジ壁からなっている。ウェブ壁及びフランジ壁はシェル要素でモデル化し、壁の材料である鉄筋コンクリートは非線形性を考慮した。上部スラブ、基礎スラブは、ソリッド要素でモデル化し弾性体とした。FINAS/STAR はフルモデル、FINAL はハーフモデルで解析を行った。

FINAS/STAR 及び FINAL の解析モデルをそれぞれ図 5-1 及び図 5-2 に示す。

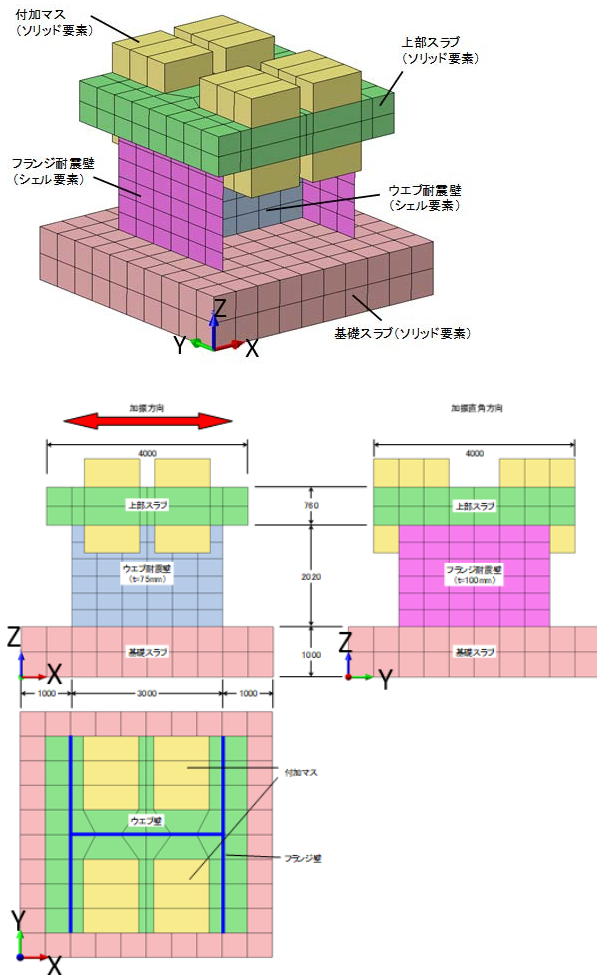


図 5-1 解析モデル FINAS/STAR

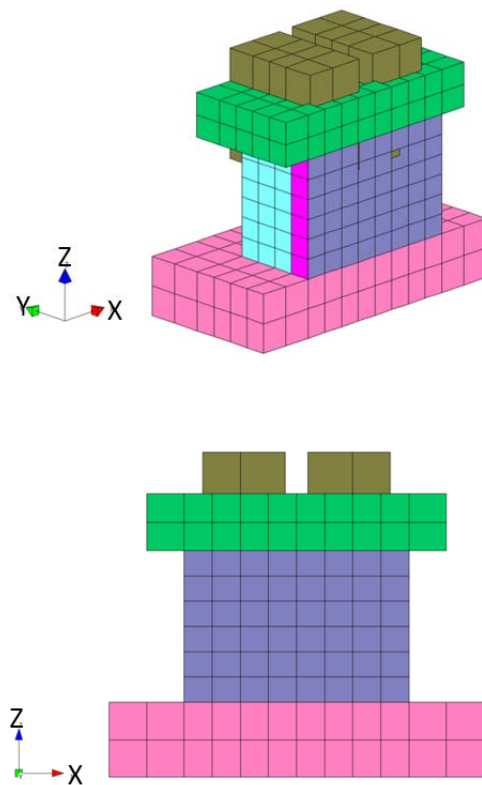


図 5-2 解析モデル FINAL

5.2. 解析条件

5.2.1 解析緒元

FINAS/STAR 及び FINAL の解析に用いた材料諸元を表 5-1 に示す。解析に用いた応力－ひずみ関係を図 5-3 に、試験結果の応力－ひずみ関係を図 5-4 に示す。

表 5-1 材料諸元

解析コード	コンクリート						鉄筋	
	圧縮強度	引張強度	ピークひずみ	ポアソン比	ヤング係数	単位体積重量	降伏点	ヤング係数
	F_c N/mm ²	σ_{cr} N/mm ²	ε_c	ν	E_c N/mm ²	γ kN/m ³	σ_y N/mm ²	E_s N/mm ²
FINAS/STAR	28.6	2.24	0.0022	0.2	2.60E+04	24.0	383.4	1.85E+05
FINAL	28.6	2.23	0.0025	0.2	2.29E+04	23.0	383.2	1.84E+05

※引張特性 F/S：出雲らモデル⁴ $C=2.0$ 、FINAL：長沼・山口モデル⁵

圧縮特性 F/S：前川モデル^{6,7}、FINAL：修正 Ahmad モデル⁸

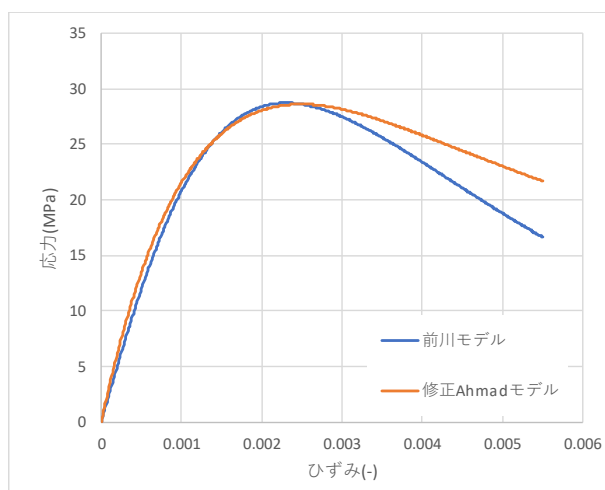
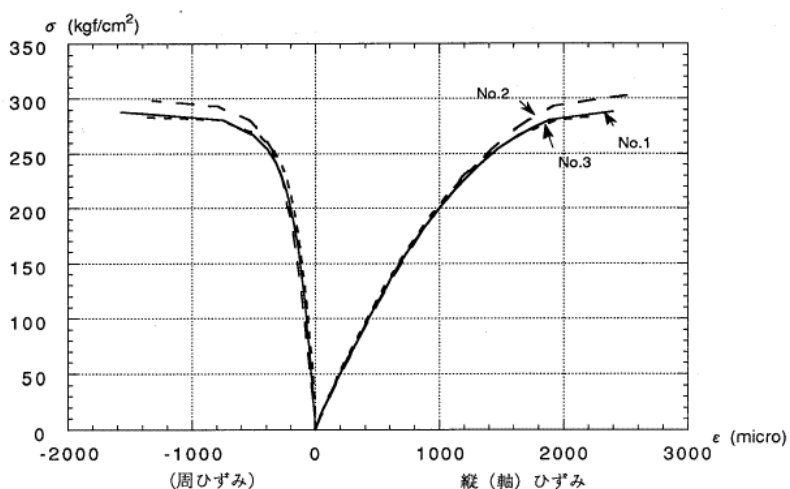


図 5-3 解析に用いた応力－ひずみ関係

図 5-4 試験結果の応力－ひずみ関係³

5.2.2 地震応答解析の解析条件

FINAS/STAR 及び FINAL の動的解析条件を表 5-2 に示す。

表 5-2 解析条件

	FINAS／STAR	FINAL
解析手法	直接積分法	直接積分法
数値積分法	Newmark- β 法 ($\beta=1/4$ 、 $\gamma=1/2$)	Newmark- β 法 ($\beta=1/4$ 、 $\gamma=1/2$)
非線形解析法	接線剛性法（構成則内で一部 割線剛性法を使用）	接線剛性法
反復回数	最大 3 回	なし
残差処理	残差は次ステップの 荷重項に加える	残差は次ステップの 荷重項に加える
積分時間間隔	解析ケース表参照	解析ケース表参照
減衰	初期剛性比例型減衰 $\beta=0.000193$ (一次振動数 13.2Hz に対し $h=0.8\%$)	初期剛性比例型減衰 $\beta=0.000261$ (一次振動数 13.4Hz に対し $h=1.1\%$)

5.2.3 解析ケース

解析は、表 5-3 の右列の形式で行う。自重解析を行ったのちに RUN2d～RUN5 まで順に入力する一体解析を行う。（RUN1 は弾性挙動の為、別途解析を行う。）

積分時間間隔は入力動の大きさに合わせ、表 5-4 のように入力ごとに変更している。

表 5-3 解析ケース

RUN1	自重→RUN1
RUN2d	自重 →RUN2d →RUN3 →RUN4 →RUN5
RUN3	
RUN4	
RUN5	
RUN5	

表 5-4 積分時間間隔

	FINAS/STAR	FINAL
RUN1	0.002s	0.005s
RUN2d	0.0005s	0.005s
RUN3	0.0005s	0.005s
RUN4	0.0002s	0.005～0.0001s ※
RUN5	0.0002s	0.005～0.0001s ※

※FINAL は入力加速度の 1 ステップの増分が 10Gal 以下になるようプログラムで自動調整。最小値は 0.0001s。

5.2.4 入力地震動

解析モデルへの入力地震動及び慣性力-水平変位関係図を図 5-5 に示す。入力地震動は試験結果より得られた基礎スラブの応答加速度をモデル底面へ入力する。モデル底面の境界条件は固定とする。

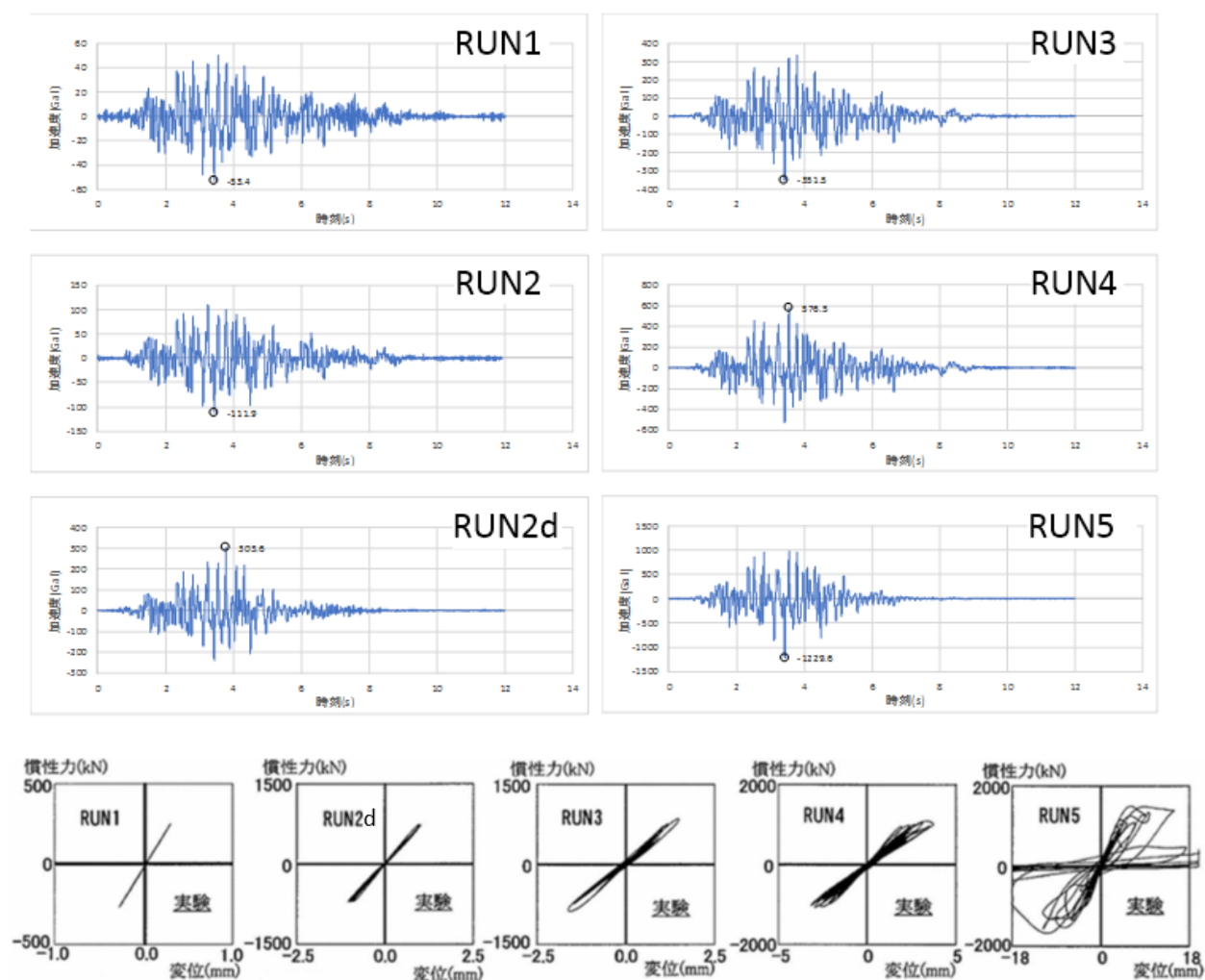


図 5-5 入力地震動波形及び慣性力-水平変位関係の比較

5.3. 解析結果

5.3.1 各ケースの解析結果

図 5-6 に示す上部スラブの時刻歴加速度波形、加速度応答スペクトル ($h=5\%$)、加速度-変位関係を求め、実験結果と比較した。結果を図 5-7～図 5-11 に示す。

- ・時刻歴加速度波形

RUN1～RUN3 までの FINAS/STAR 及び FINAL の結果は実験結果と整合がとれている。RUN4 では 4～5 秒付近から周期及び振幅量が実験結果と若干差異が現れてくるが概ね傾向は一致している。RUN5 では、試験体が破壊する 4 秒付近までは概ね再現できている。

- ・加速度応答スペクトル ($h=5\%$)

RUN1～3 の結果は実験結果と良く整合が取れている。RUN4 以降は FINAS/STAR は周期 0.1 秒が大きく、周期 0.13 秒が実験結果より小さくなっており、剛性低下が実験より小さいと考えられる。RUN5 はほぼ再現できた結果となっている。以上より、両プログラムの結果は概ね整合し、実験とも良好に対応している。

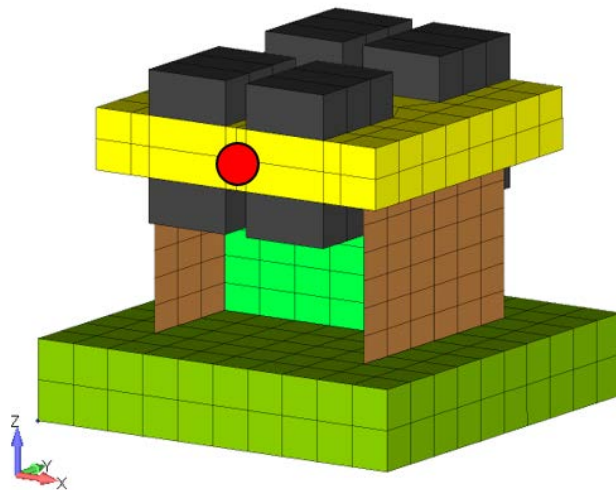
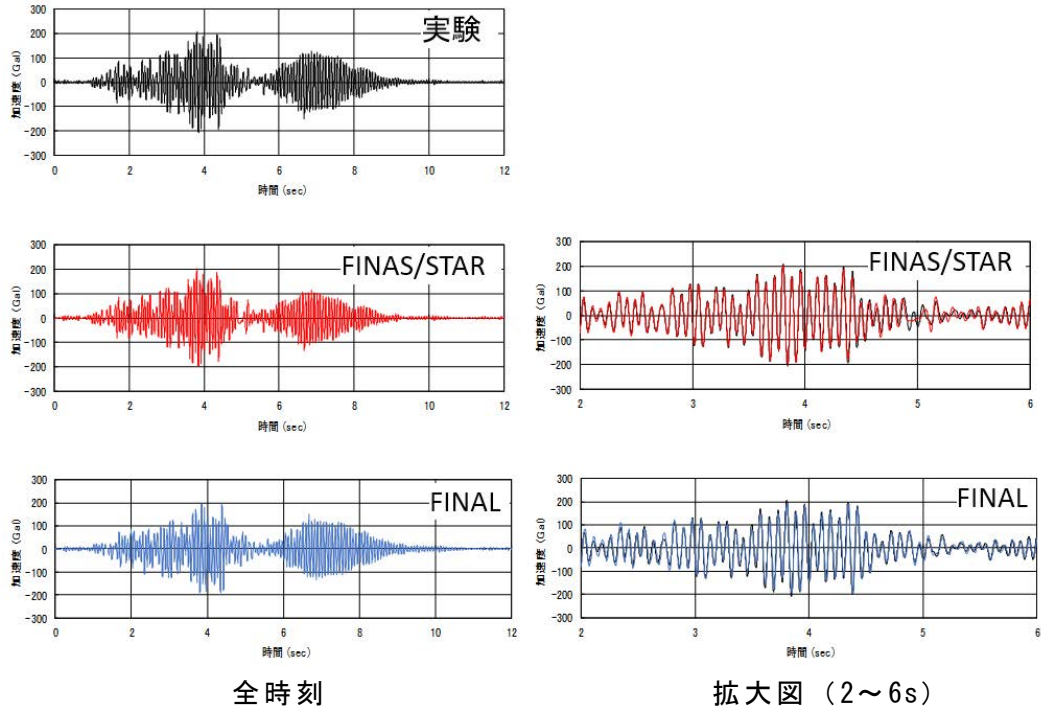


図 5-6 入力地震動出力位置



応答加速度波形

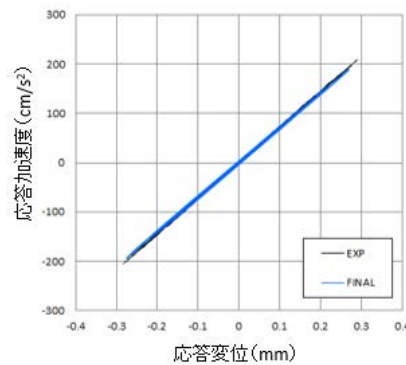
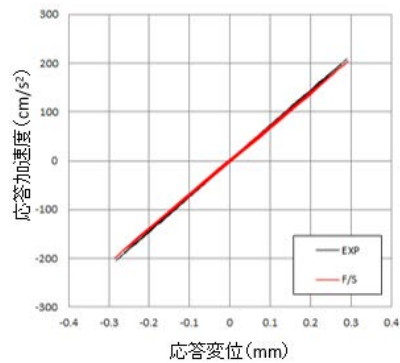
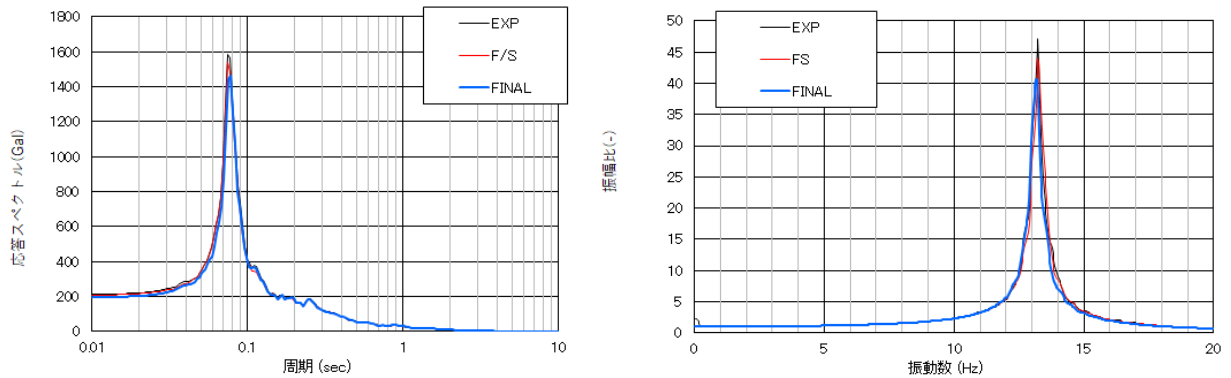
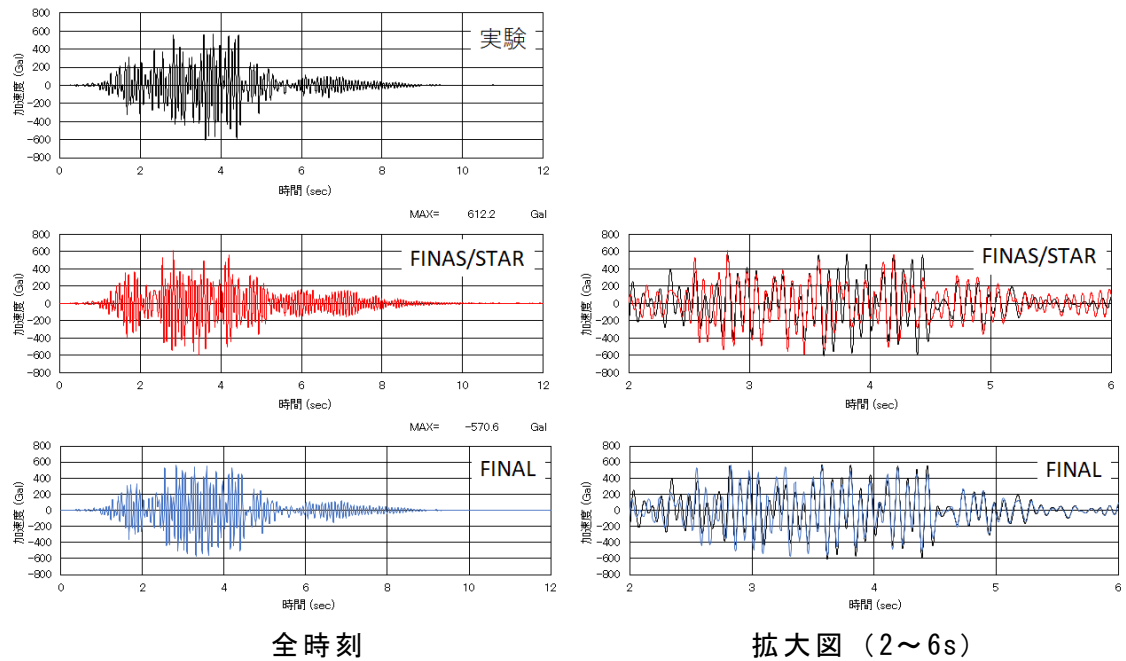


図 5-7 RUN1 の結果 (上部スラブ)



応答加速度波形

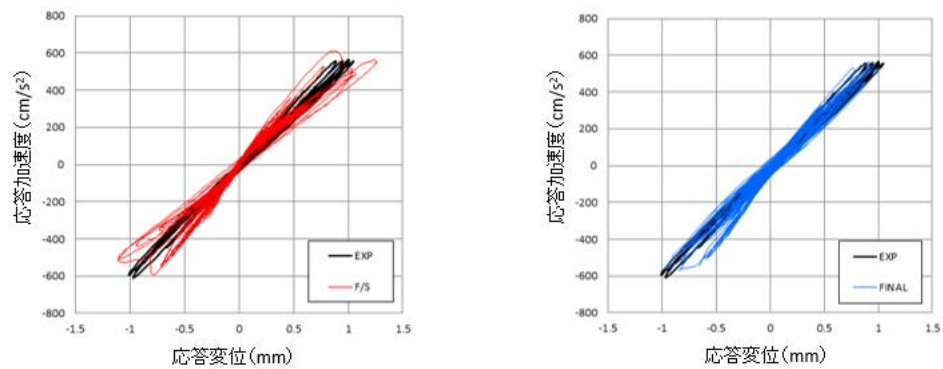
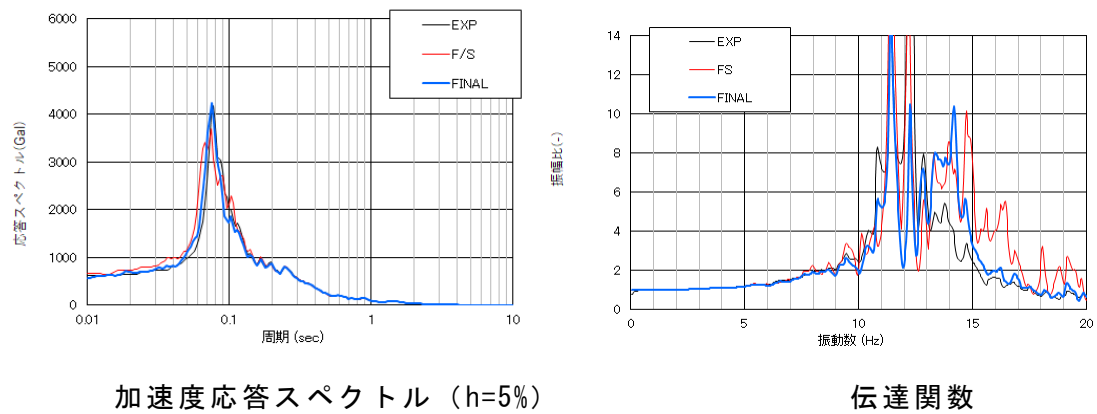
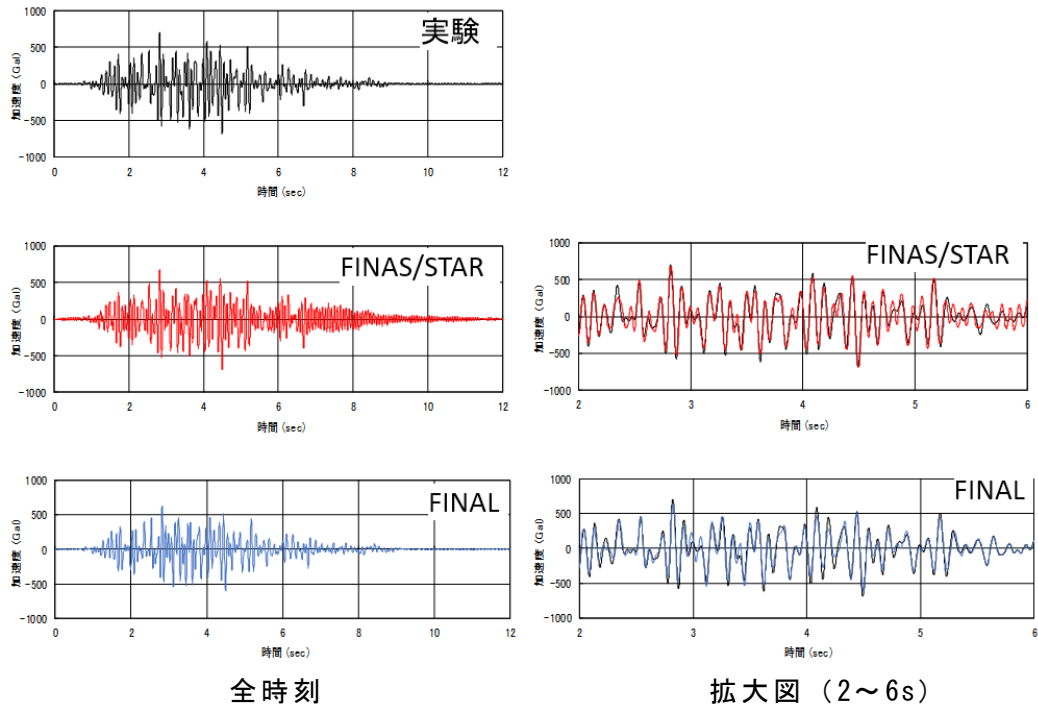
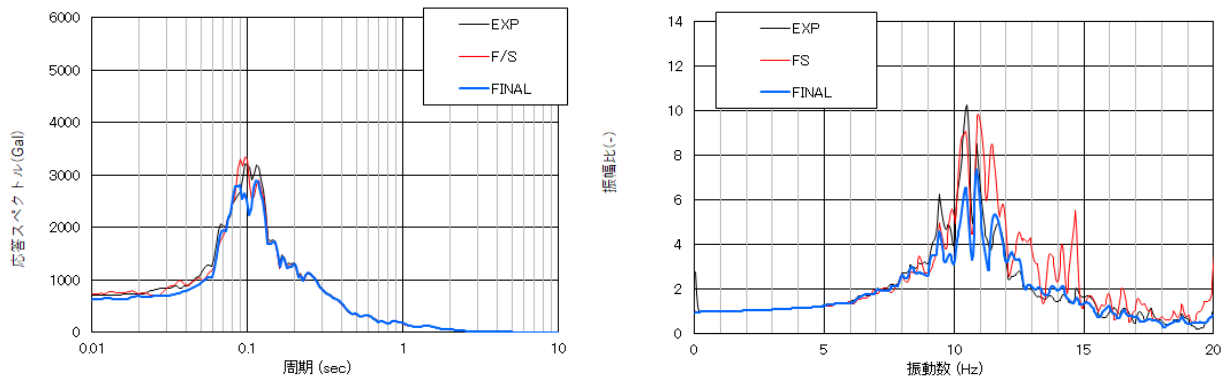


図 5-8 RUN2d の結果 (上部スラブ)

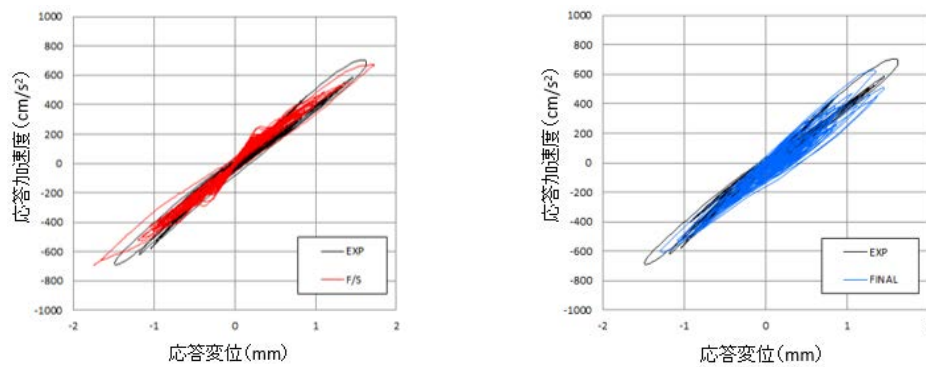


応答加速度波形



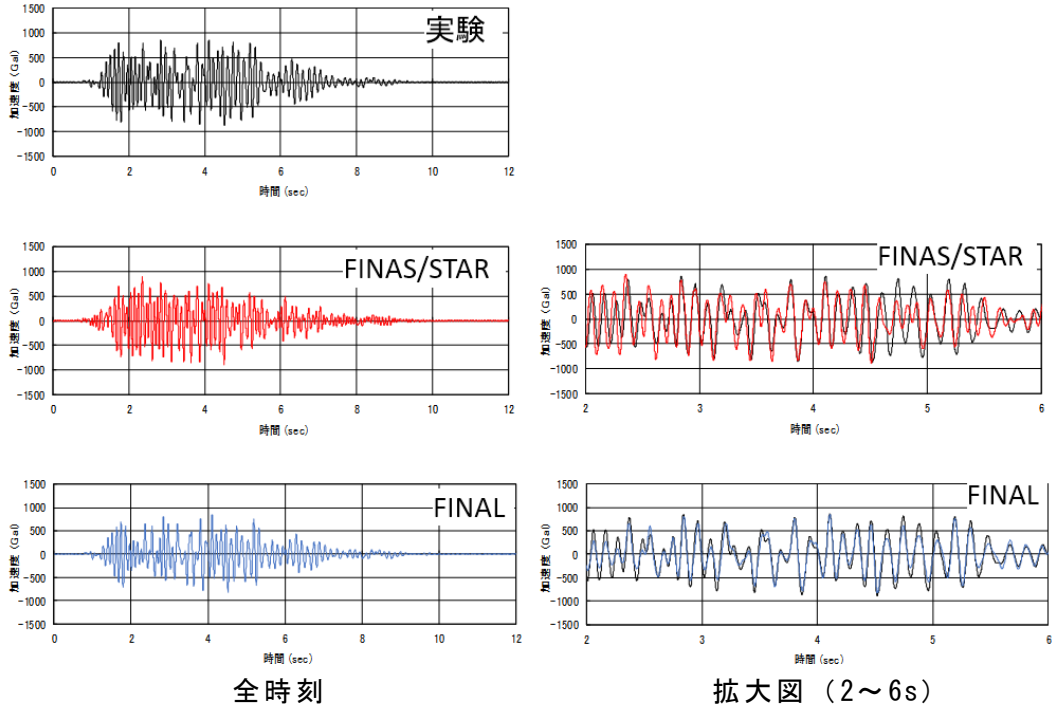
加速度応答スペクトル (h=5%)

伝達関数

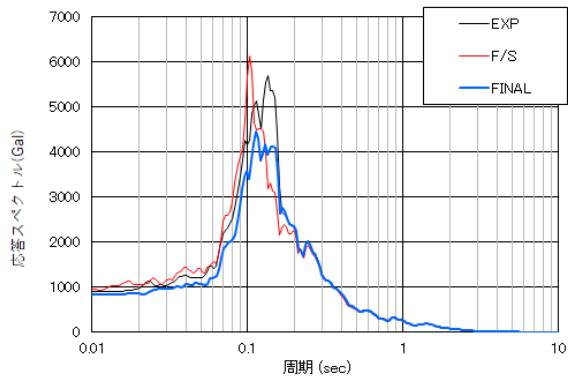


加速度－変位関係

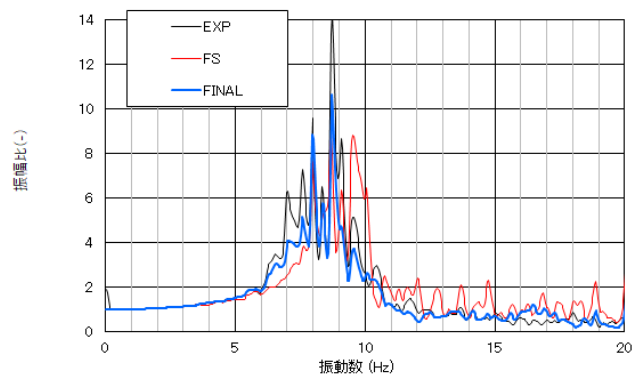
図 5-9 RUN3 の結果 (上部スラブ)



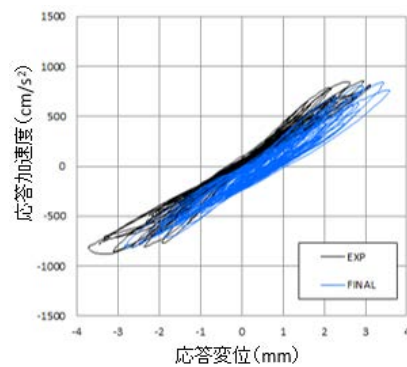
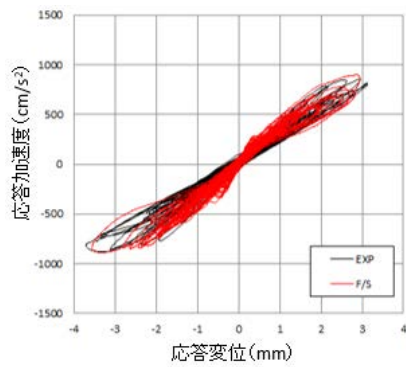
応答加速度波形



加速度応答スペクトル (h=5%)

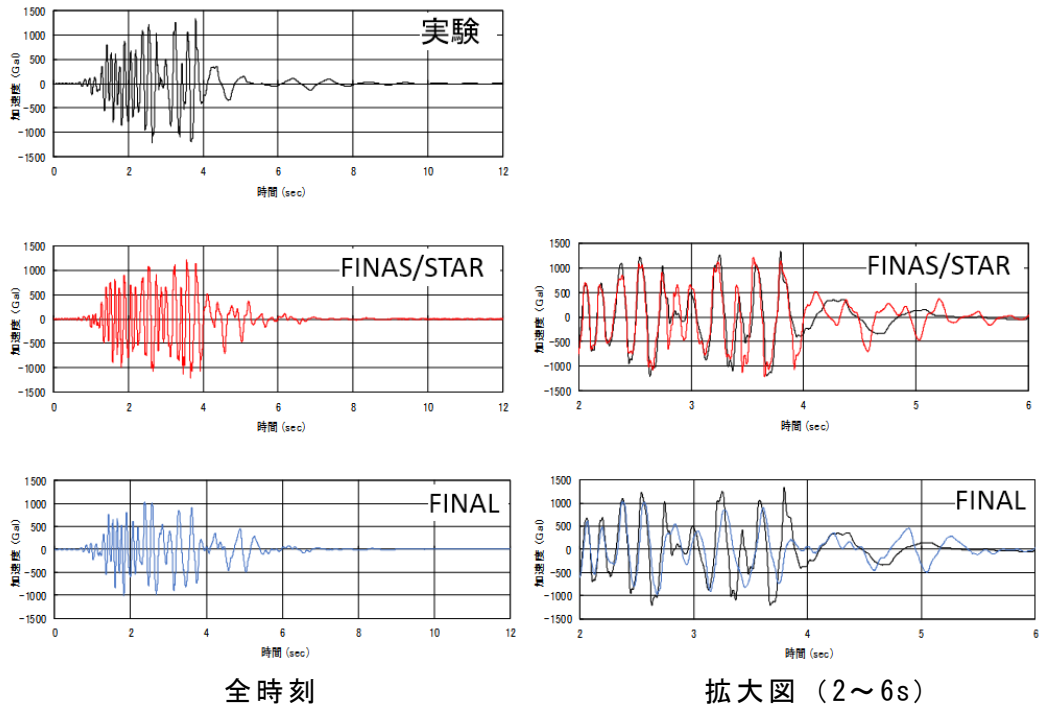


伝達関数

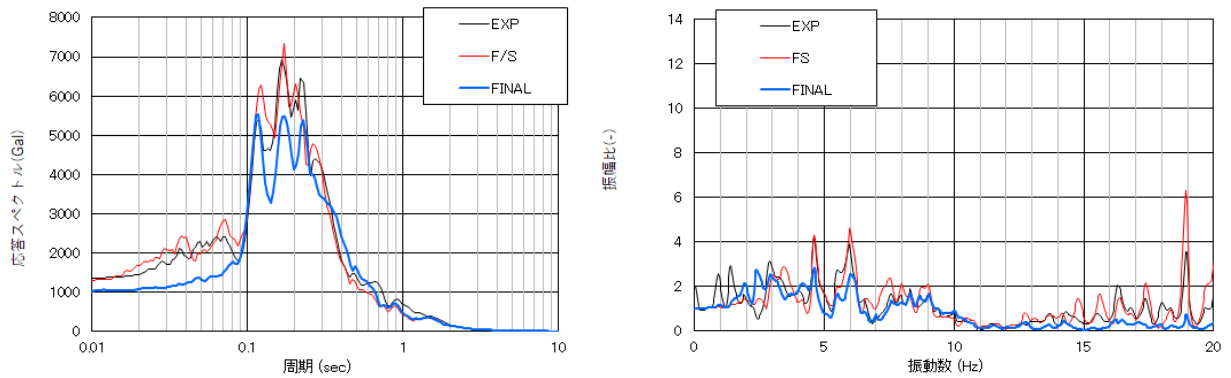


加速度－変位関係

図 5-10 RUN4 の結果 (上部スラブ)

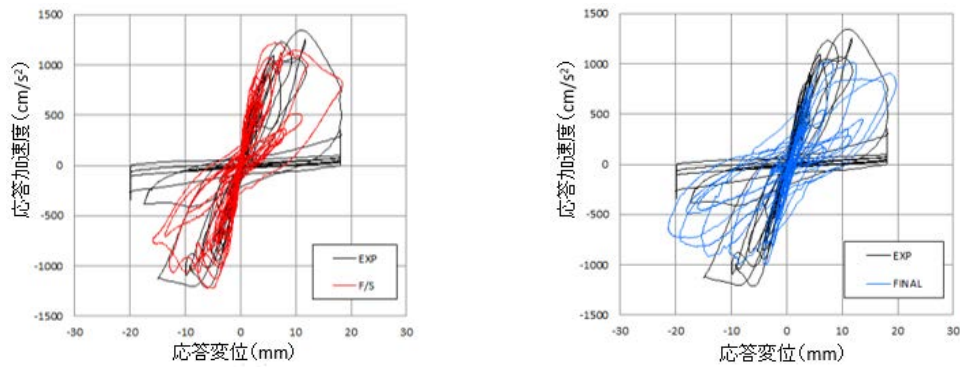


応答加速度波形



加速度応答スペクトル (h=5%)

伝達関数



加速度－変位関係

図 5-11 RUN5 の結果 (上部スラブ)

附属書 6 有限要素の精度の違いによる影響

有限要素の精度の違いによる建屋応答への影響を確認するため、本事例では面形状要素のタイプによる精度の違いを検討した結果を示す。ここでは、FINAS/STAR と MSC Nastran の二つの解析コードを使用した。

6.1. 解析モデル及び解析条件

有限要素には梁要素、シェル要素、ソリッド要素など様々な要素種類があるが、同じ要素種類でも要素の定式化によってそれぞれ特徴があり精度も異なる。精度については、メッシュを詳細にすることにより正解に近づくことがわかっている。ここでは面形状要素の精度の違いを検討した事例を示す。

異なる定式化による2種類の要素タイプ(4辺形1次(MITC)と4辺形1次(CQUAD4))について検討した。解析ケース一覧を表 6-1 に、解析モデルの概要を図 6-1 に示す。

表 6-1 解析ケース一覧

No	要素タイプ	ソルバー	解析モデル	境界条件
case01	4辺形1次 (MITC)	FINAS/STAR	メッシュ分割1	外周節点を拘束
case02	4辺形1次 (CQUAD4)	MSC.NASTRAN	メッシュ分割1	外周節点を拘束
case03	4辺形1次 (MITC)	FINAS/STAR	メッシュ分割2	外周節点を拘束

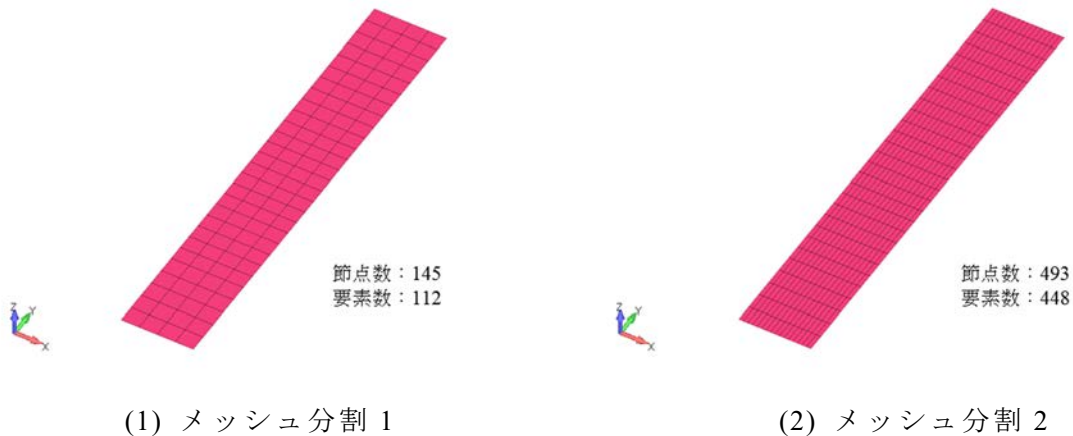


図 6-1 解析モデルの概要

6.2. 解析結果

6.2.1 有限要素の定式化の違いによる固有値解析結果への影響

有限要素の定式化の違いによる固有値解析結果への影響を確認するため、MITC 要素（分割 1）と CQUAD4 要素（分割 1）による固有モードの比較図を図 6-2 に、1 次振動数の比較を表 6-2 に示す。図 6-2 によると MITC 要素（分割 1）と CQUAD4 要素（分割 1）の固有モードはほぼ同様であった。表 6-2 の 1 次振動数の比較によると、MITC 要素（分割 1）と CQUAD4 要素（分割 1）の 1 次振動数は約 15%程度違いがあった。

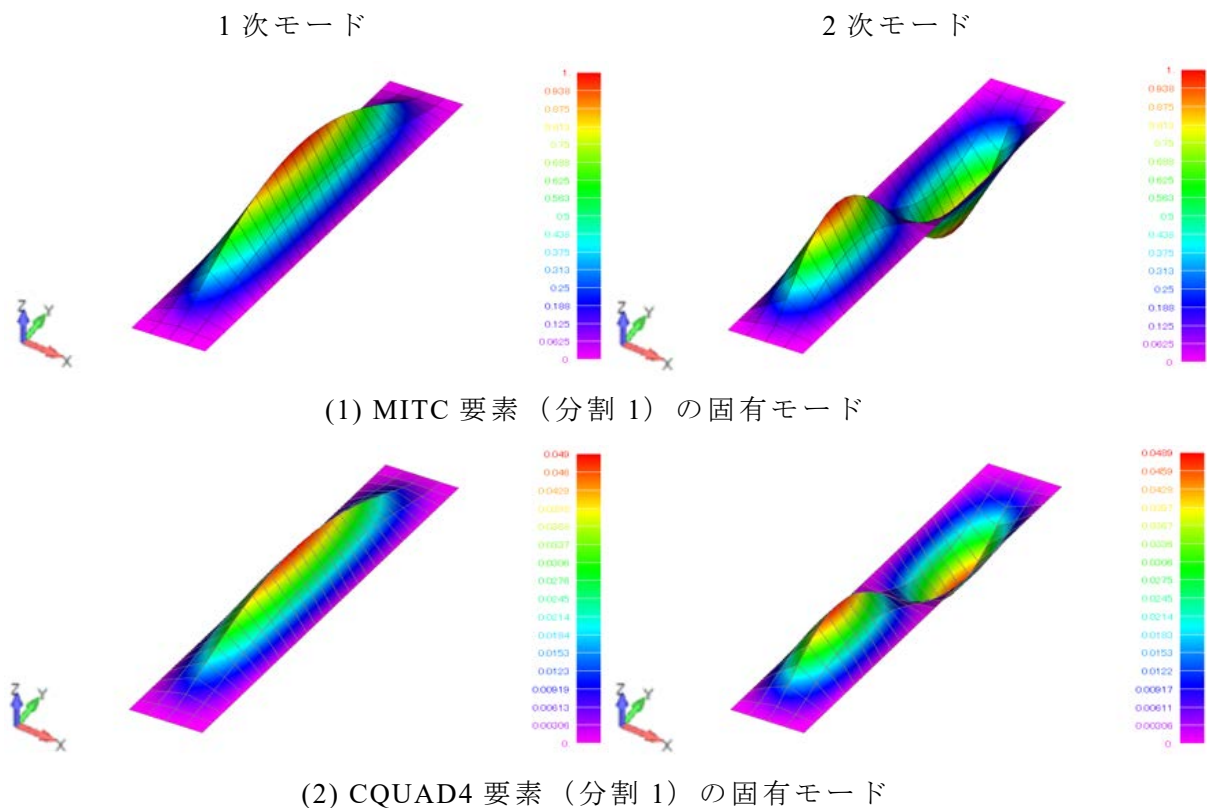


図 6-2 有限要素の定式化の違いによる固有モードの比較

表 6-2 有限要素の定式化の違いによる 1 次固有振動数の比較

No.	振動数 Hz	周期 s	刺激係数			有効質量比		
			X	Y	Z	X	Y	Z
case01	12.634	0.079	0.000	0.000	33.689	0.000	0.000	0.704
case02	10.881	0.092	0.000	0.000	-34.153	0.000	0.000	0.723

6.2.2 メッシュ分割による固有値解析結果への影響

メッシュ分割による固有値解析結果への影響を確認するため、要素タイプは4辺形1次（MITC）とし、メッシュ分割1の短辺方向を4分割したメッシュ分割2（MITC要素（分割2））を用いた固有値解析を実施した。図6-3に固有モードの比較を、表6-3に1次固有振動数の比較を示す。図6-3の固有モードの比較より、MITC要素（分割1）とMITC要素（分割2）の固有モードはほぼ同様であった。表6-3の1次固有振動数の比較によると、より細かいメッシュであるMITC要素（分割2）の結果は、MITC要素（分割1）の結果と比べ、1次固有振動数が約13%低下し、CQUAD4要素（分割1）の1次固有振動数である10.881 Hzとの違いは1%程度となることを確認した。さらに収束性を確認する必要があるが、本検討より、面外曲げに対する精度についてはCQUAD4がMITCよりも良いことが確認された。

有限要素解析においては、用いる要素ごとに適切なメッシュを感度解析により把握して用いることが必要となる。

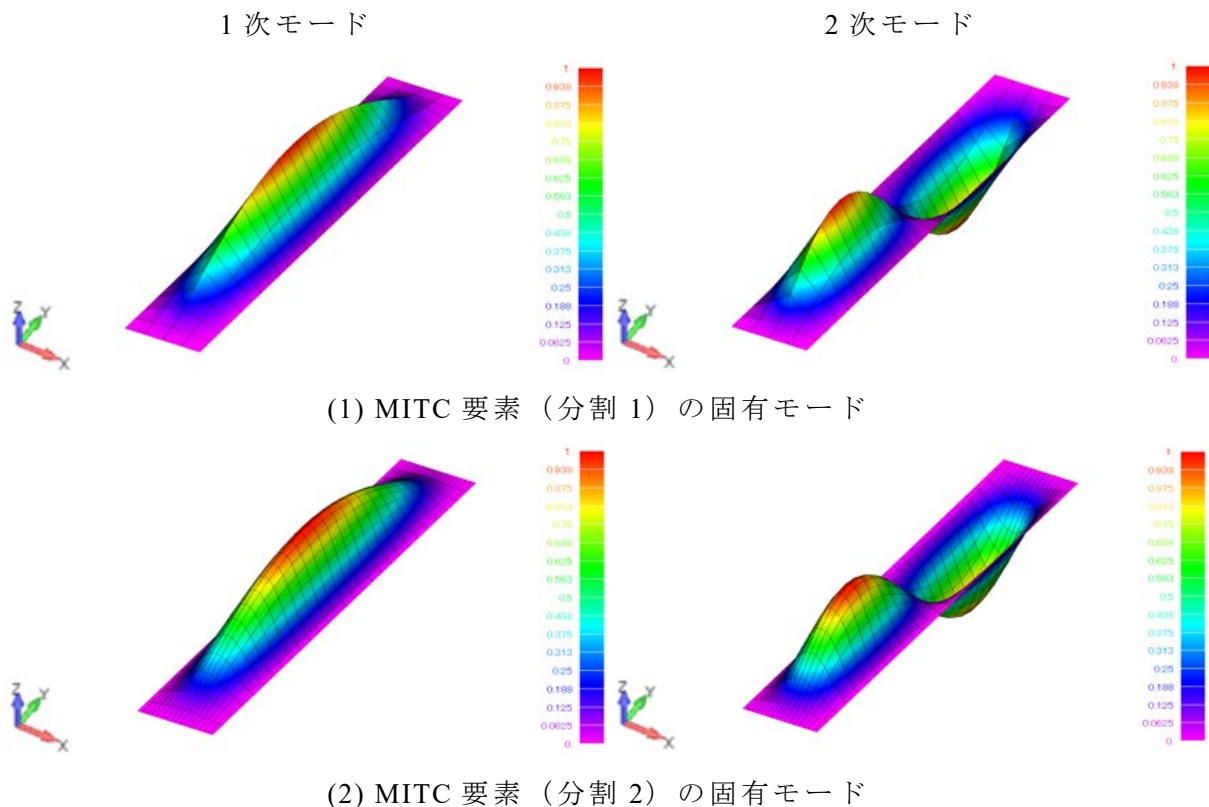


図 6-3 メッシュ分割の違いによる固有モードの比較

表 6-3 メッシュ分割の違いによる1次固有振動数の比較

No.	振動数 Hz	周期 s	刺激係数			有効質量比		
			X	Y	Z	X	Y	Z
case01	12.634	0.079	0.000	0.000	33.689	0.000	0.000	0.704
case03	11.011	0.091	0.000	0.000	34.289	0.000	0.000	0.583

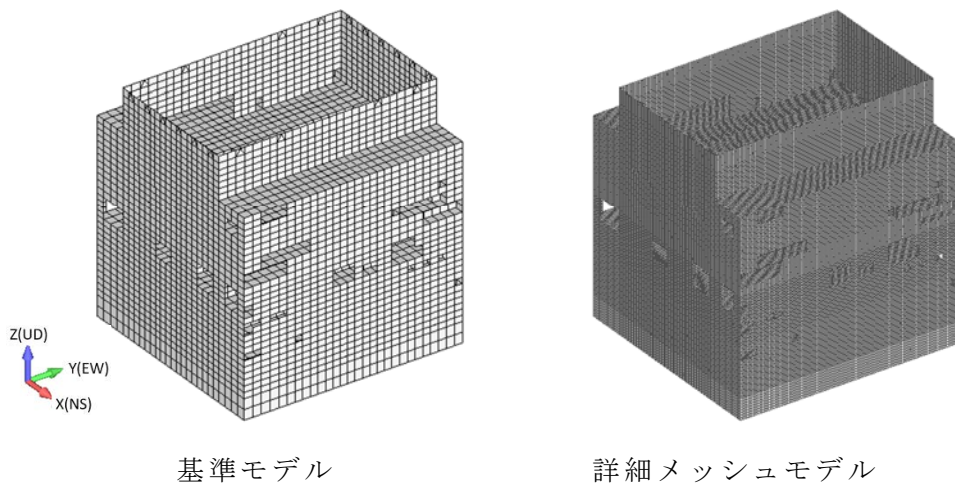
附属書 7 有限要素のメッシュサイズの違いによる影響

有限要素のメッシュサイズの違いによる建屋応答への影響を評価するため、柏崎刈羽原子力発電所 7 号機原子炉建屋モデルを対象にメッシュサイズの異なる 2 種類のモデルを用いて時刻歴応答解析を実施し、建屋応答への影響を評価した。

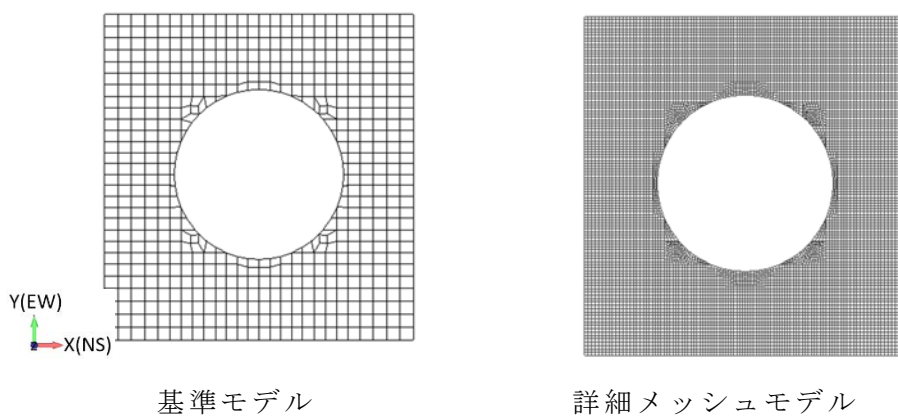
7.1. 解析モデル及び解析条件

図 7-1 に基準モデルと詳細メッシュモデルの 2 種類の解析モデルを示す。

基準モデルは通り間を 4 から 5 分割、階高方向は 2 m を目安に 4 から 5 分割としているが、詳細メッシュモデルは、要素 1 辺をさらに 4 分割（縦横で 4×4 分割）した解析モデルとした。その他の解析条件は別紙 1 の 2.1.1 解析条件と同じとした。



(1) 鳥瞰図



(2) 1F 平面図

図 7-1 解析モデル図

7.2. 解析結果

7.2.1 最大応答加速度及び最大応答変位

図 7-2 及び図 7-3 に、最大応答加速度及び最大応答変位の高さ方向分布の比較図を示す。図中の実線は建屋モデル全節点の平均値、点線は建屋モデル代表節点の平均値を示し、黒線は基準モデル、赤線は詳細メッシュモデルによる解析結果を示す。全体としては良好に対応しているが、4F（標高 +31.7 m）以上においては、基準モデルとの若干の差異がみられる。これは、メッシュが細くなることで壁面外の固有振動数が変わり、応答特性が変わったことなどが原因として考えられる。

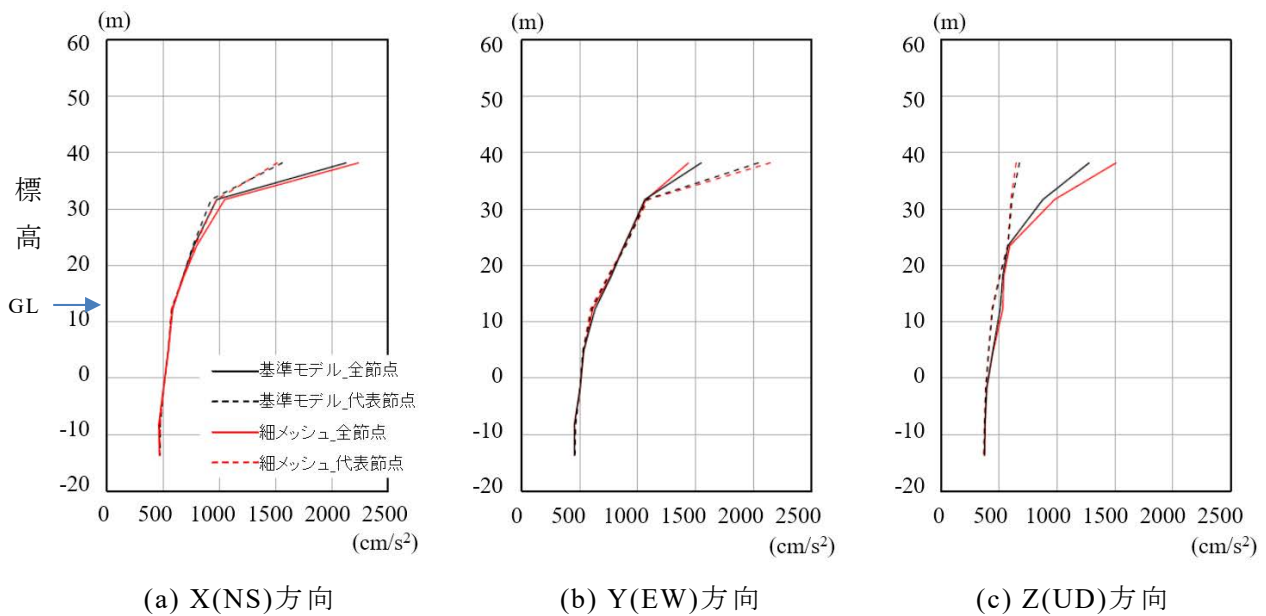


図 7-2 最大応答加速度分布の比較

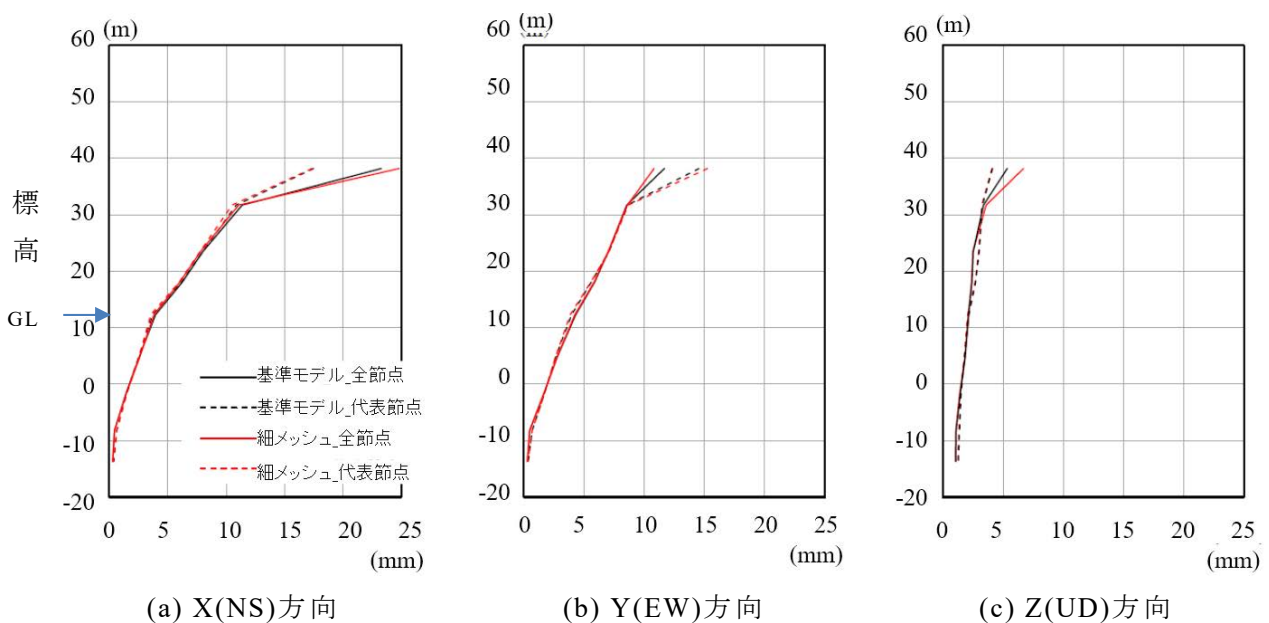
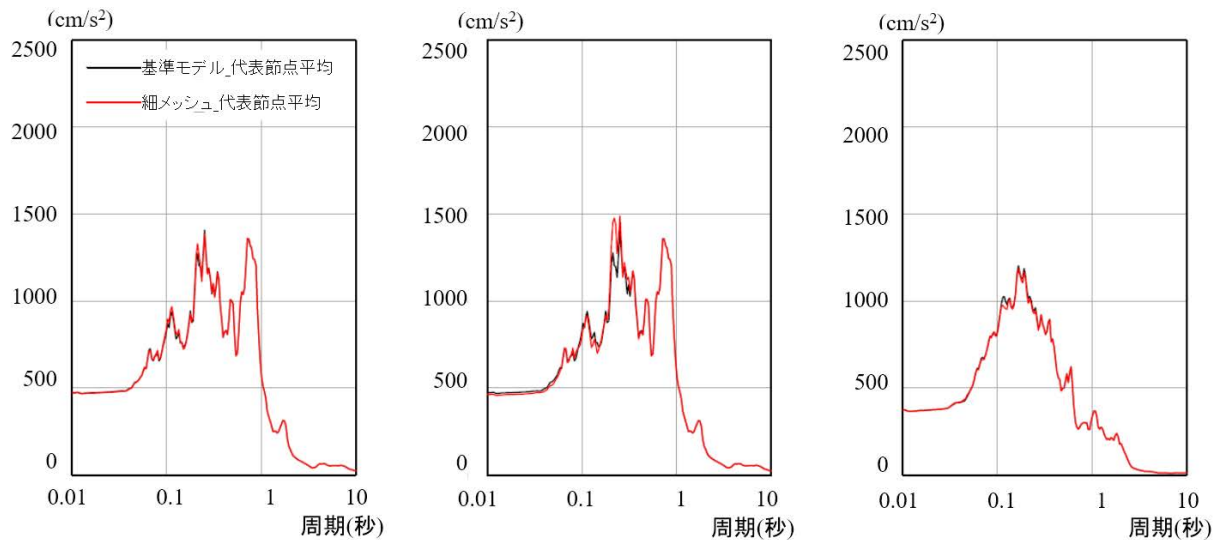


図 7-3 最大応答変位分布の比較

7.2.2 床応答スペクトル

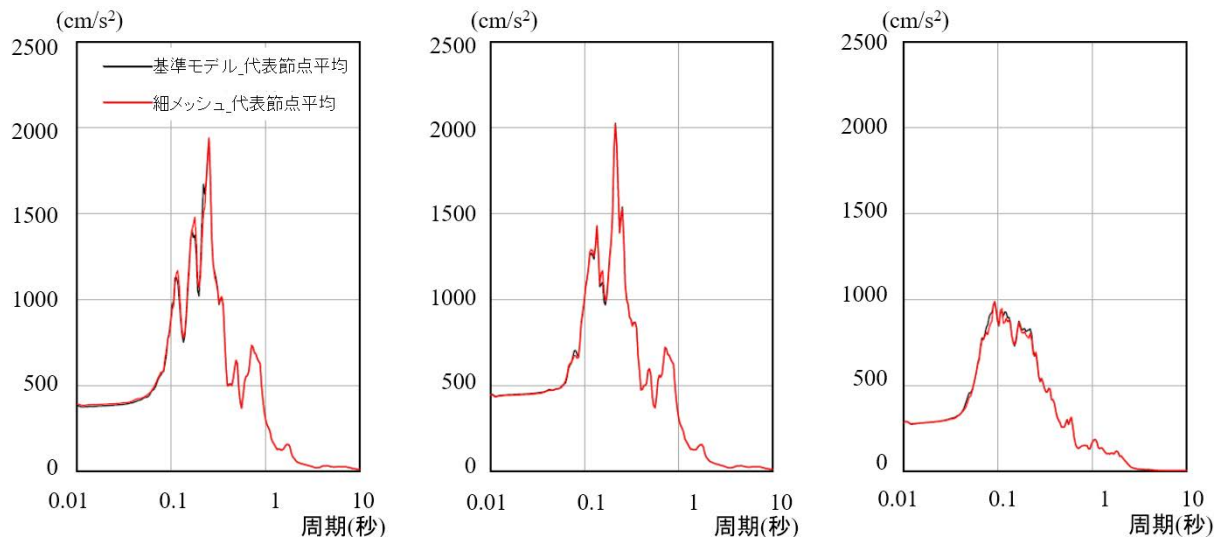
図 7-4 及び図 7-5 に基準モデルと詳細メッシュモデルによる B3F、3F の床応答スペクトルの比較図を示す。基準モデルと詳細メッシュモデルは結果があまり変わらないことから、この程度のメッシュサイズの違いでは、3F の床応答スペクトルへの影響は小さいことがわかる。



(a) X(NS)方向

(b) Y(EW)方向

(c) Z(UD)方向

図 7-4 B3F 床応答スペクトル $h = 5\%$ (標高 -8.2 m) の比較

(a) X(NS)方向

(b) Y(EW)方向

(c) Z(UD)方向

図 7-5 3F 床応答スペクトル $h = 5\%$ (標高 +23.5 m) の比較

参考文献

- 1 IAEA, Review of Seismic Evaluation Methodologies for Nuclear Power Plants Based on a Benchmark Exercise, IAEA-TECDOC-1722, 2013.
- 2 日本電気協会, 原子力発電所耐震設計技術規程, JEAC4601-2008, 2009.
- 3 原子力工学試験センター, 原子炉建屋の弾塑性試験, 動的復元力に係わる試験, 平成3年度, 1992, 385p.
- 4 出雲淳一他, 面内力を受ける鉄筋コンクリート板要素の解析モデル, コンクリート工学論文, Vol.25, No.9, 1987, pp.107-120.
- 5 長沼一洋, 山口恒雄, 面内せん断応力下におけるテンションスティフニング特性のモデル化, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造II, 1990, pp.649-650.
- 6 前川宏一, 福浦尚之, 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, 1999, pp.157-176.
- 7 福浦尚之, 前川宏一, 非直交する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, 土木学会論文集 No.634/V-45, 1999, pp.177-195.
- 8 長沼一洋, 三軸圧縮下のコンクリートの応力～ひずみ関係, 日本建築学会構造系論文集, Vol.474, 1995, pp.163-170.

別紙 2 適用事例

本別紙は、標準的解析要領の適用事例として、柏崎刈羽原子力発電所の原子炉建屋の観測記録の再現解析に適用した事例を示す。

本事例は、以下に示す標準的解析要領の項目に沿って記載する。

1. 解析目的及び対象
2. 解析領域
3. 形状モデルの作成
4. 構造モデルの作成
5. 質量モデル
6. 材料モデル
7. 減衰の数理モデル
8. 境界接合部モデル
9. 入力地震動
10. 初期状態モデル
11. 数値解析に関する条件設定
12. 解析結果の妥当性確認
13. 文書化

1. 解析の目的及び対象

1.1 解析目的

本解析事例の解析目的は、観測記録の再現解析により、原子炉建屋の 3 次元 FEM モデル（地盤建屋連成モデル）を用いた地震応答解析の妥当性を確認することにある。平成 19 年（2007 年）新潟県中越沖地震の柏崎刈羽原子力発電所の 7 号機原子炉建屋の本震記録（基礎上及び 3F）を用いた。

1.2 解析方法

解析は、直接時間積分法によって実施した。ここで、解析コードは有限要素法による構造解析コードの一つである FINAS/STAR, 2019r190925¹を用いた。

1.3 使用する単位

解析に用いる単位系は、長さ m、質量 ton、力 kN、時間 s、加速度 m/s^2 、速度 m/s とした。重力加速度は $g=9.80665\text{m/s}^2$ を用いた。

1.4 解析計画

解析に当たっては、解析手法の適用範囲の確認、解析結果の妥当性の担保について検討し、解析計画を作成した。本事例は解析計画書に沿う形で示されている。

以下に本解析事例で用いた観測記録の概要について示す。

1.4.1 観測記録の概要

(1) 地震計配置図

地震計配置図を図 1-1 に示す。

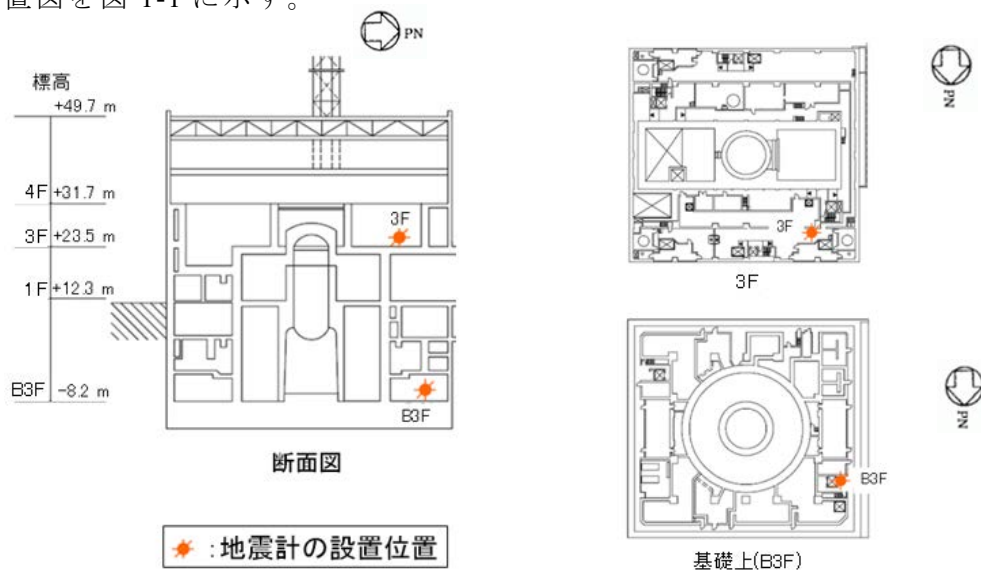
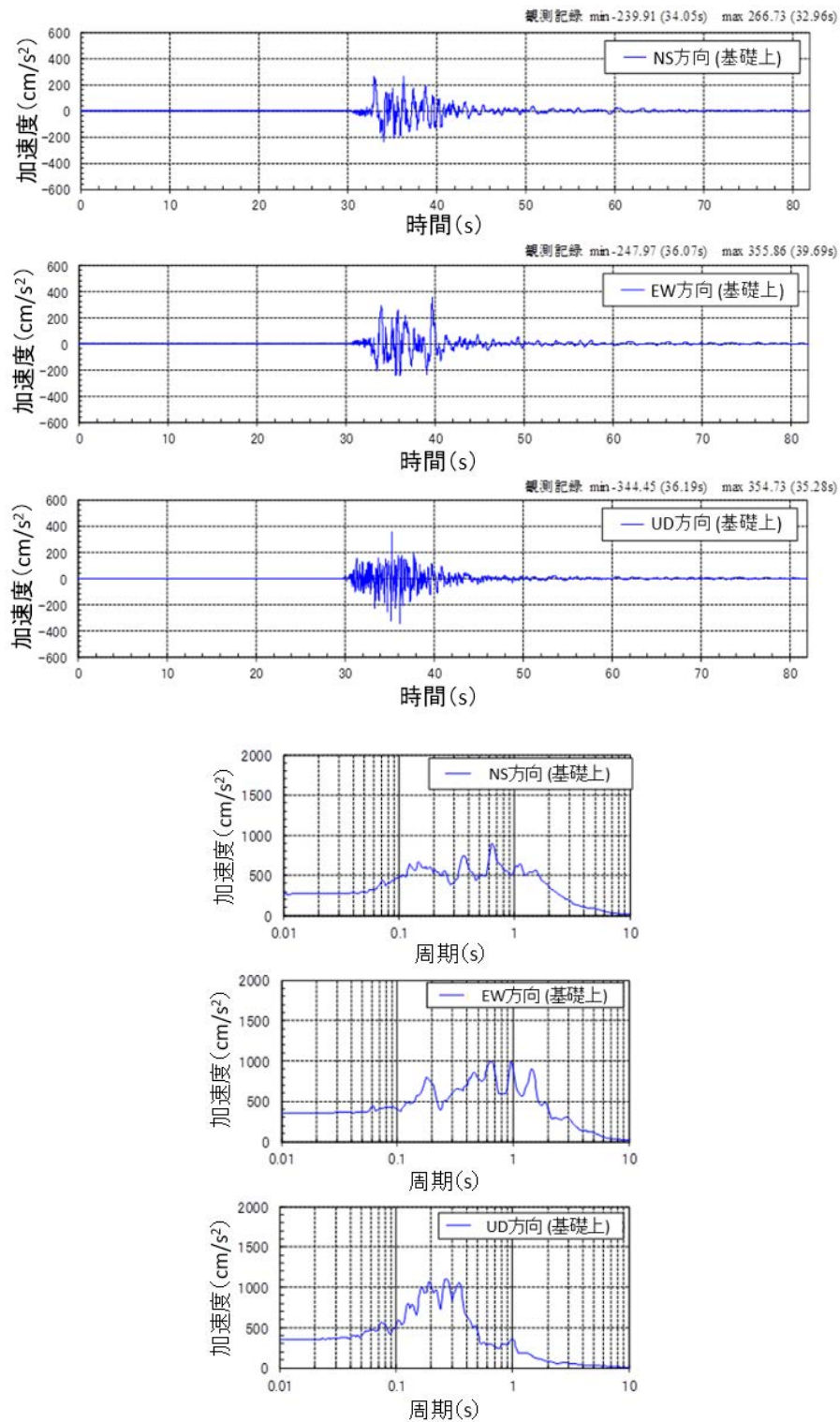


図 1-1 地震計配置図²

(2) 観測記録

基礎上（B3F）及び 3F の観測記録を図 1-2 及び図 1-3 に示す。



（上：加速度時刻歴、下：加速度応答スペクトル（ $h = 5\%$ ））

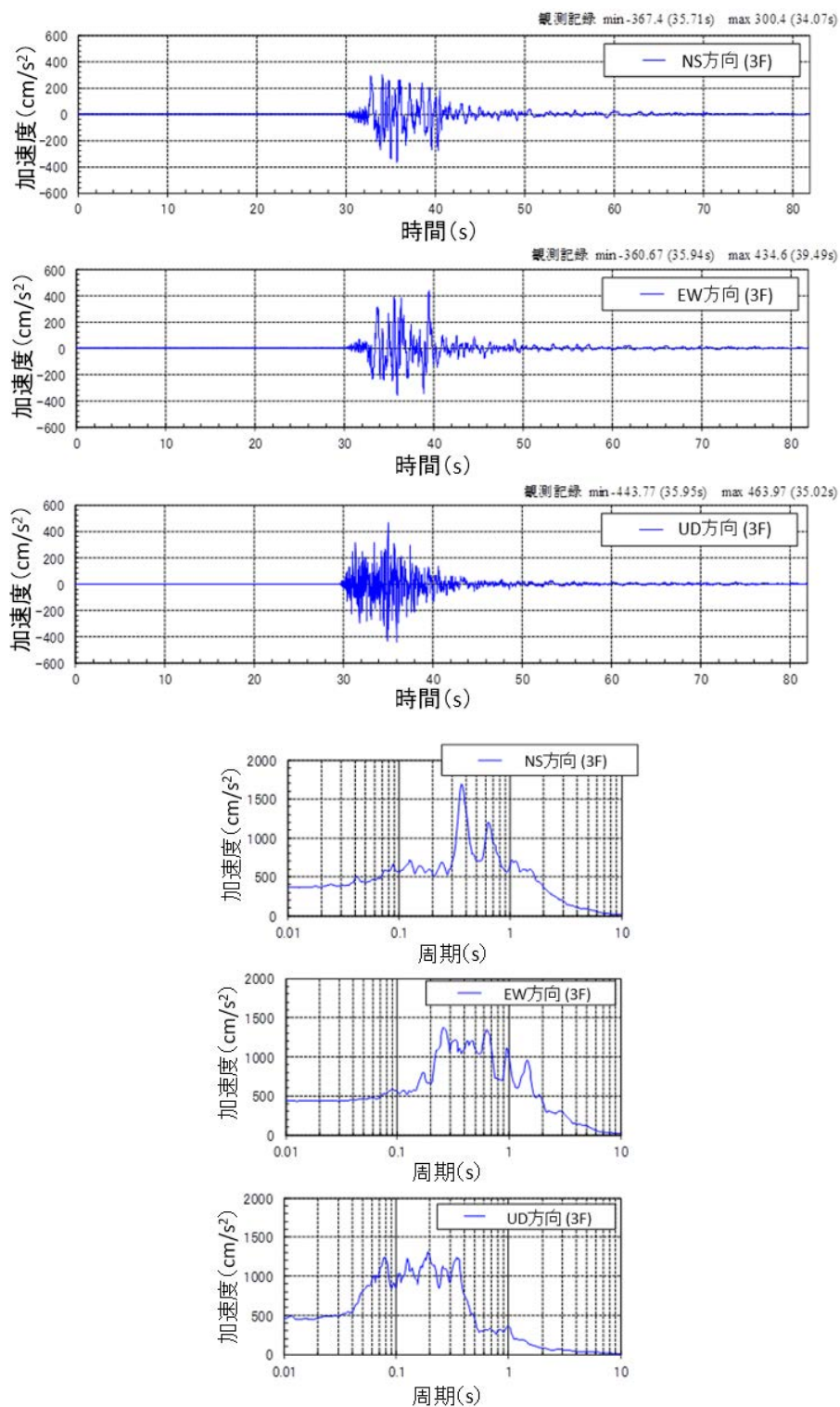


図 1-3 3F の観測記録

(上：加速度時刻歴、下：加速度応答スペクトル ($h = 5\%$))

1.5 根拠資料

IAEA の国際ベンチマークプロジェクト KARISMA 報告書 (IAEA-TECDOC-1722) ² を根拠資料とした。

2. 解析領域

2.1 建屋

柏崎刈羽原子力発電所の7号機原子炉建屋を解析対象とし、平成19年（2007年）新潟県中越沖地震時の観測記録をもとにした入力地震波を用いて、時刻歴地震応答解析を行った。解析の諸元は原則、地盤、建屋ともにIAEAのKARISMA報告書²で用いられたデータを用いた。

柏崎刈羽原子力発電所の7号機原子炉建屋は56.6m(NS)×59.6m(EW)、高さは63.4m、地上高さ37.7mの建屋である。基礎は厚さ5.5mで、隣接する周辺の建屋とは構造的に分離されている。断面図及び平面図を図2-1及び図2-2に示す。平面図はB3F及びB1Fを代表平面として示し、通り名についても記載した。

その他の設定上の特徴を以下に示す。

- ・ 壁：補助壁および耐震壁（これ以上の部材は資料がない）
- ・ 柱、梁、床：資料にある部材リストのすべて
- ・ 開口：地震直後のひび割れ調査資料図面でわかる範囲
- ・ 屋根スラブ：厚さおよび仕様詳細が不明なため予想値として100cmの平板とした。
- ・ 圧力容器など：ペデスタルを含め、質量を接合床に分担させた。（床振動によって適切でない可能性はある。）

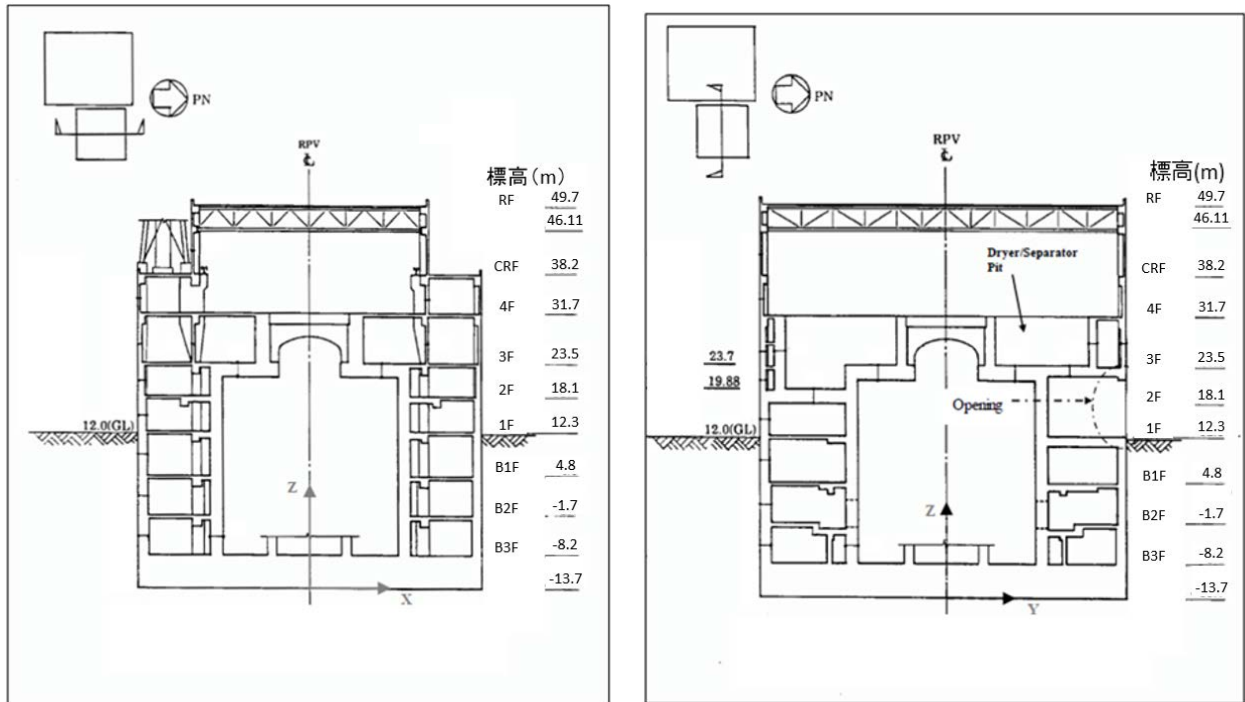


図 2-1 建屋断面図（左：NS 断面、右：EW 断面）²

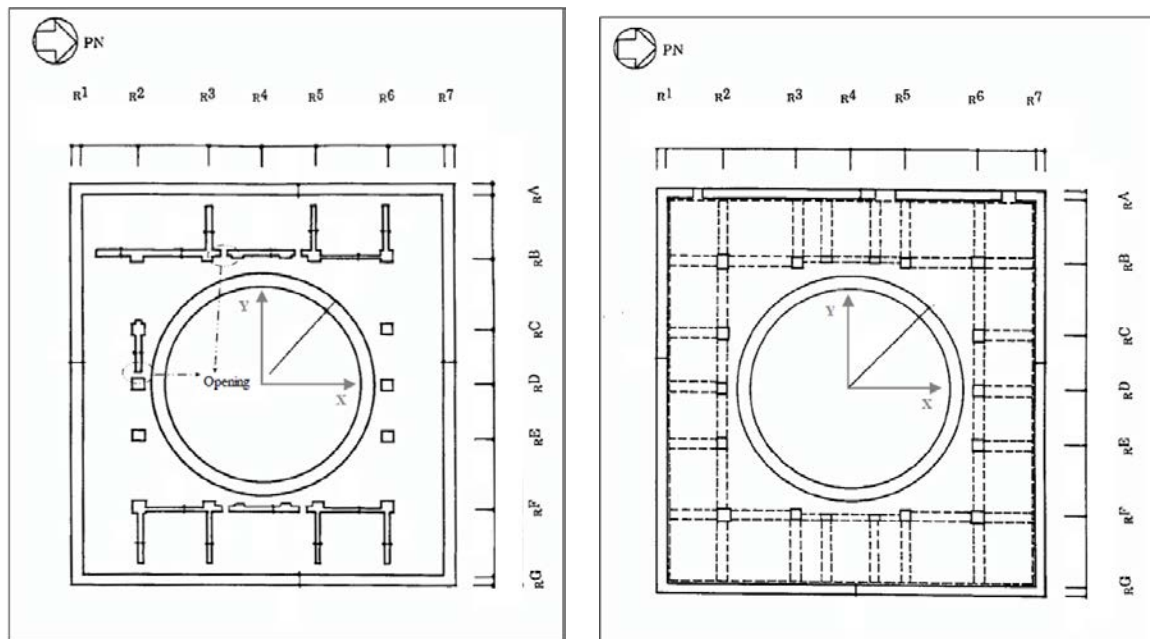


図 2-2 建屋平面図（左：B3F、右：B1F）²

2.2 地盤

地盤の初期物性は KARISMA 報告書²のデータを用いる。土方らの柏崎刈羽原子力発電所の 7 号機原子炉建屋の再現解析³では、支持地盤および側面地盤に MMR (Man Made Rock) をモデル化しているが、本解析では西山層に支持されているものとした。

本解析では、水平方向の地盤モデルの大きさは、過去の解析例を参考に建屋幅の約 6 倍とした。また、解析モデル底面境界面を $V_s=720$ m の西山層下層の標高-155 m とした。なお、土方らは地表から -90m を解析底面としている。

3. 形状モデルの作成

3.1 建屋

解析対象とする構造部材（柱、梁、床、壁）の詳細を以下に示す。ここで、部材寸法については、柱、梁は KARISMA 報告書²の部材リストを、床、壁は KARISMA 報告書²の平面図に示された値を参照した。また、座標については、各階のレベルは床天端、柱は原則通り芯の交点、外壁は外面、内壁で通り芯にあるものは通り芯を基準とした。

3.1.1 柱、梁

柱、梁は KARISMA 報告書の位置および形状を用いる。

各階ごとの柱及び梁の解析モデル化範囲を平面図（図 3-1～図 3-7）の中列下段に示す。クレーン階の鉄骨梁のフランジの長さは 525 mm（600 と 450 の平均）とする。

3.1.2 床、壁

床、壁は KARISMA 報告書の耐震壁および補助壁を解析対象とする。

各階ごとの壁および床の解析モデル化範囲を平面図（図 3-1～図 3-7）に示す。左図は各フロアの耐震壁を、右図は耐震壁と補助壁を示し、中央図はこれらをモデル化した図である。壁はシェル要素でモデル化し、厚さを表示している。

また、建屋モデルの断面図を図 3-8 に示す。

・B3F(標高 -8.2 ~ -1.7 m)

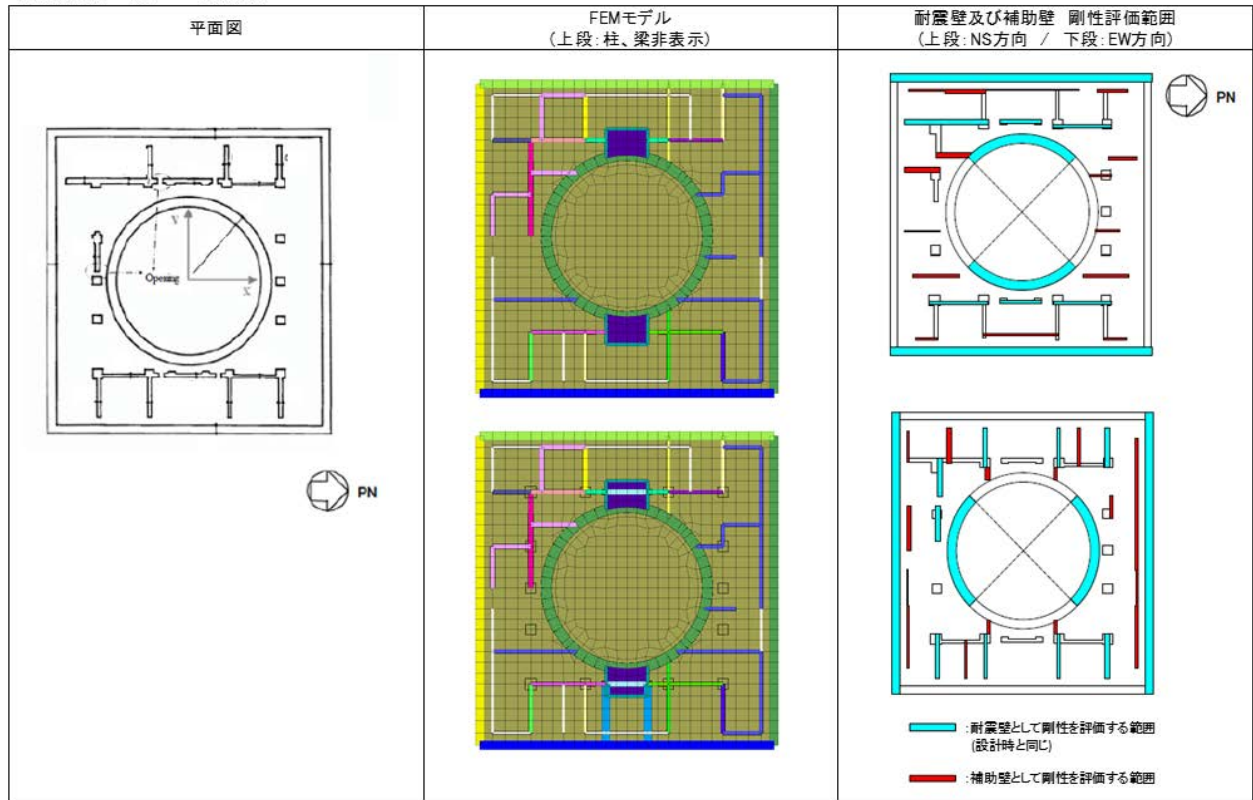


図 3-1 平面図² B3F

・B2F(標高 -1.7 ~ 4.8 m)

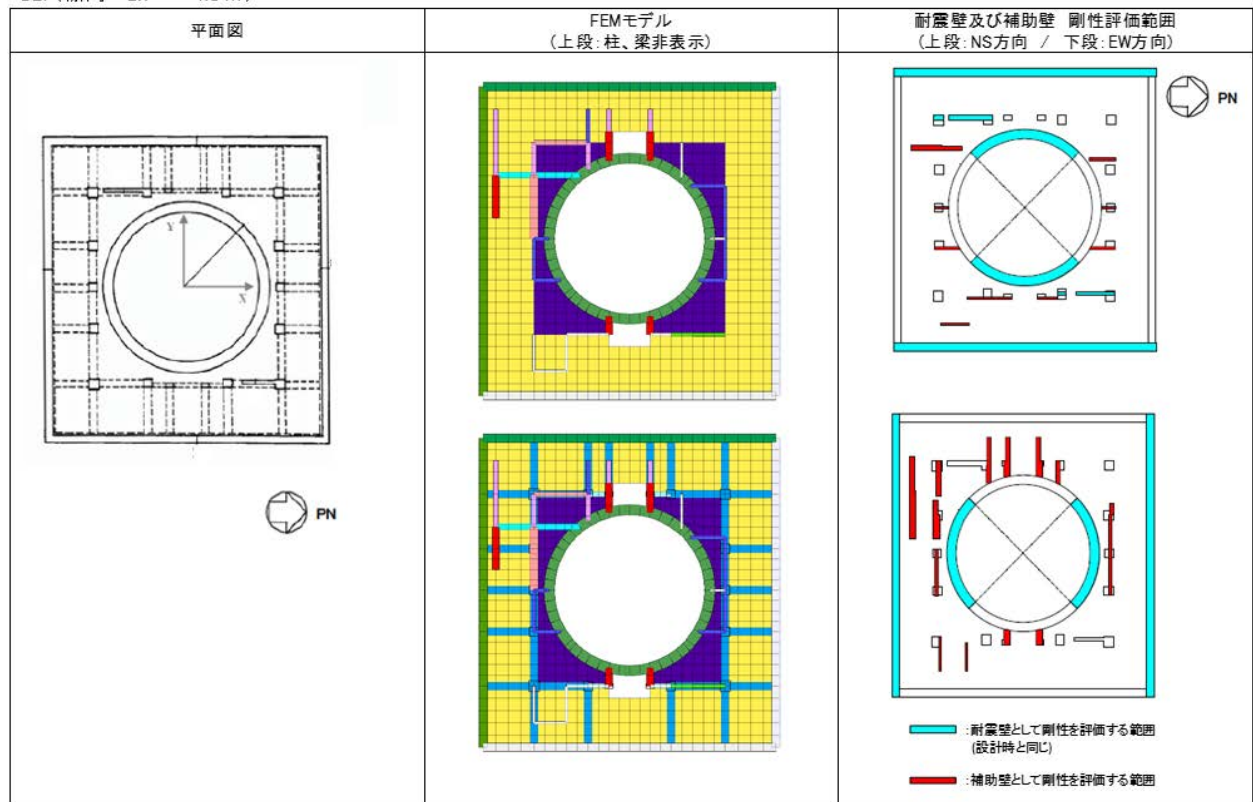


図 3-2 平面図² B2F

・B1F(標高 4.8 ～ 12.3 m)

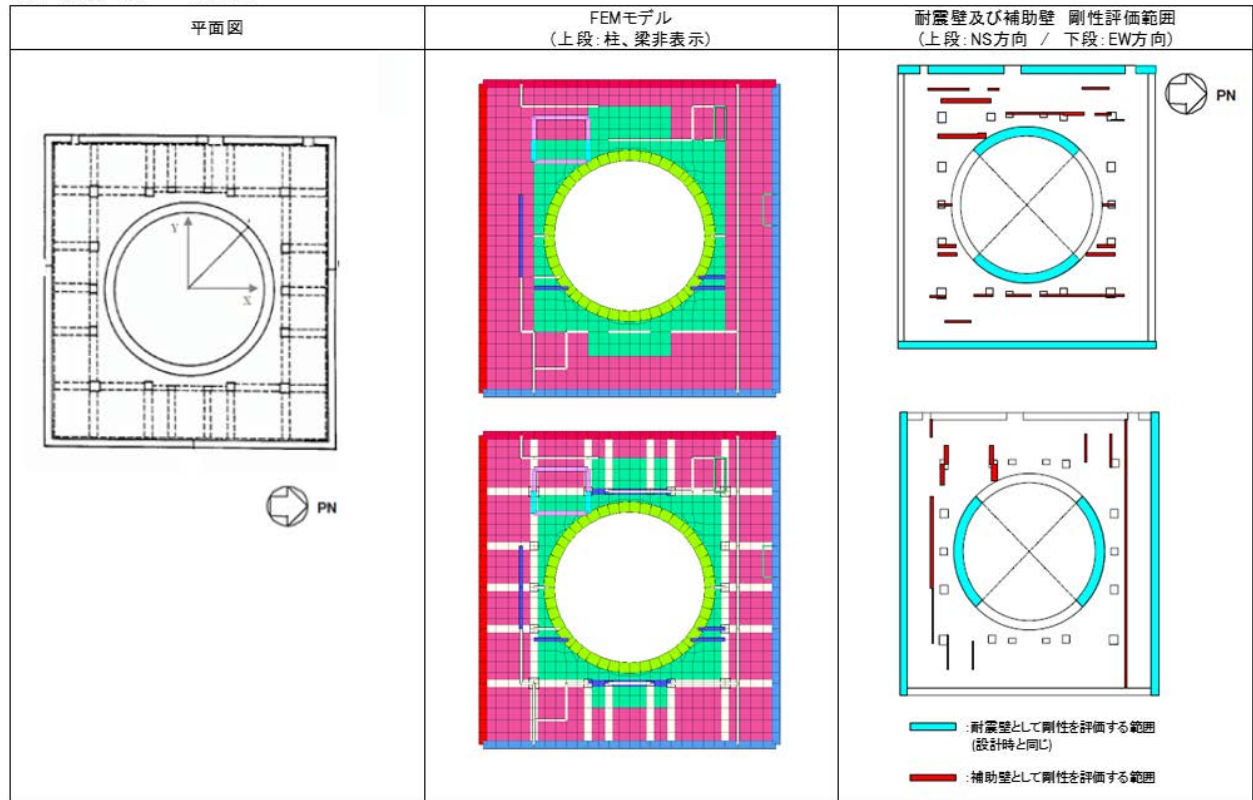


図 3-3 平面図² B1F

・1F(標高 12.3 ～ 18.1 m)

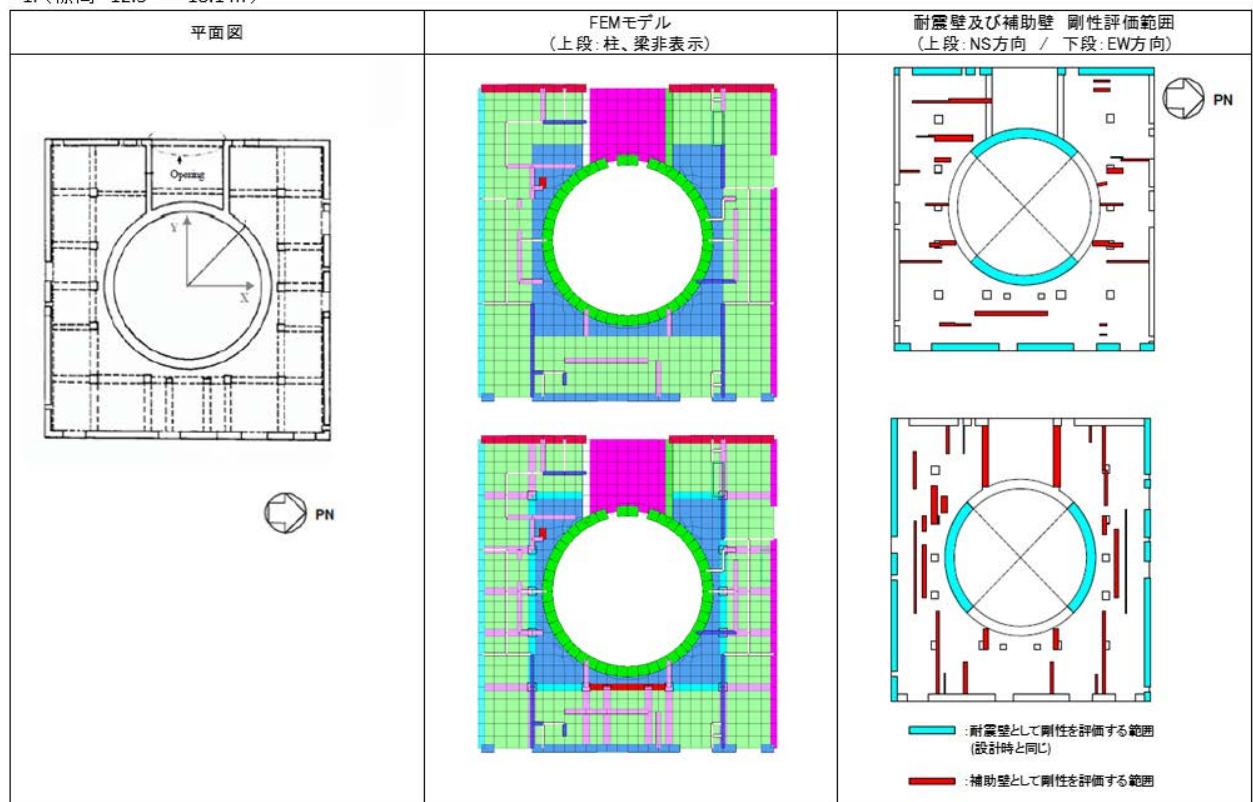


図 3-4 平面図² 1F

・2F(標高 18.1 ～ 23.5 m)

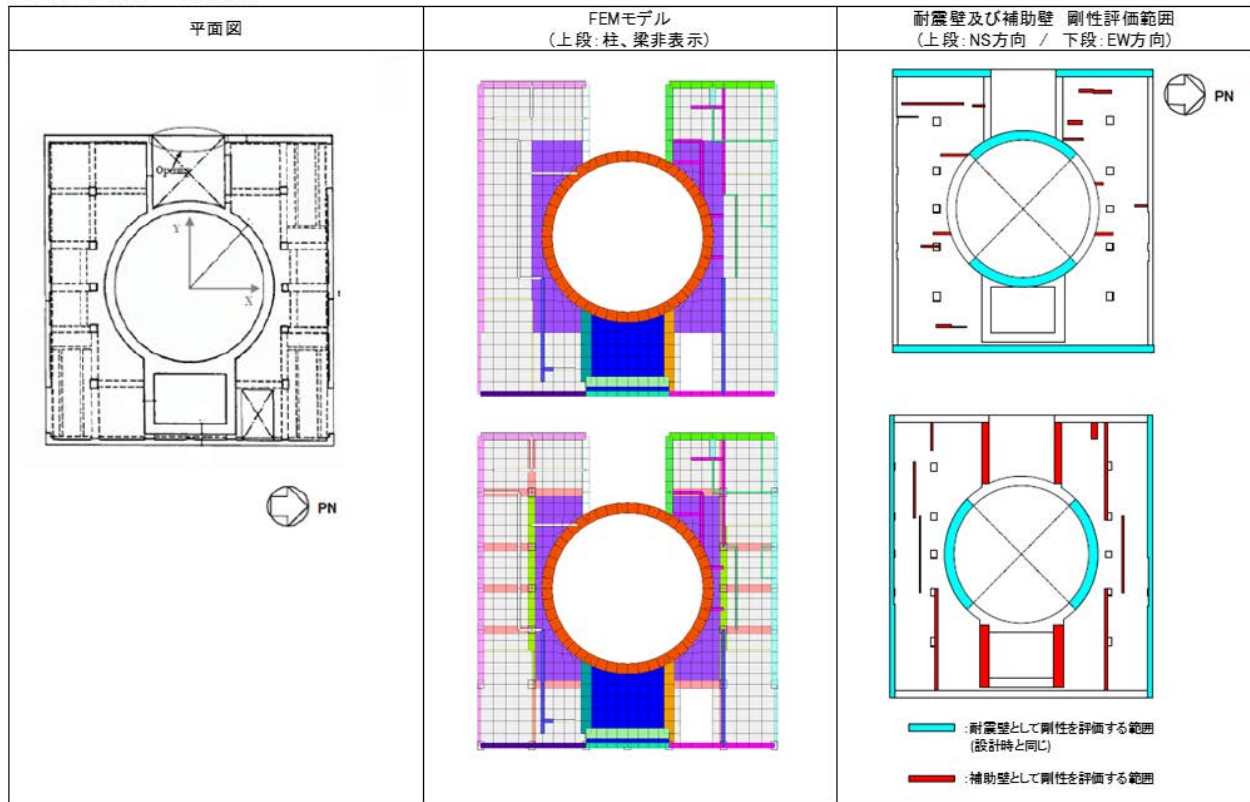


図 3-5 平面図² 2F

・3F(標高 23.5 ～ 31.7 m)

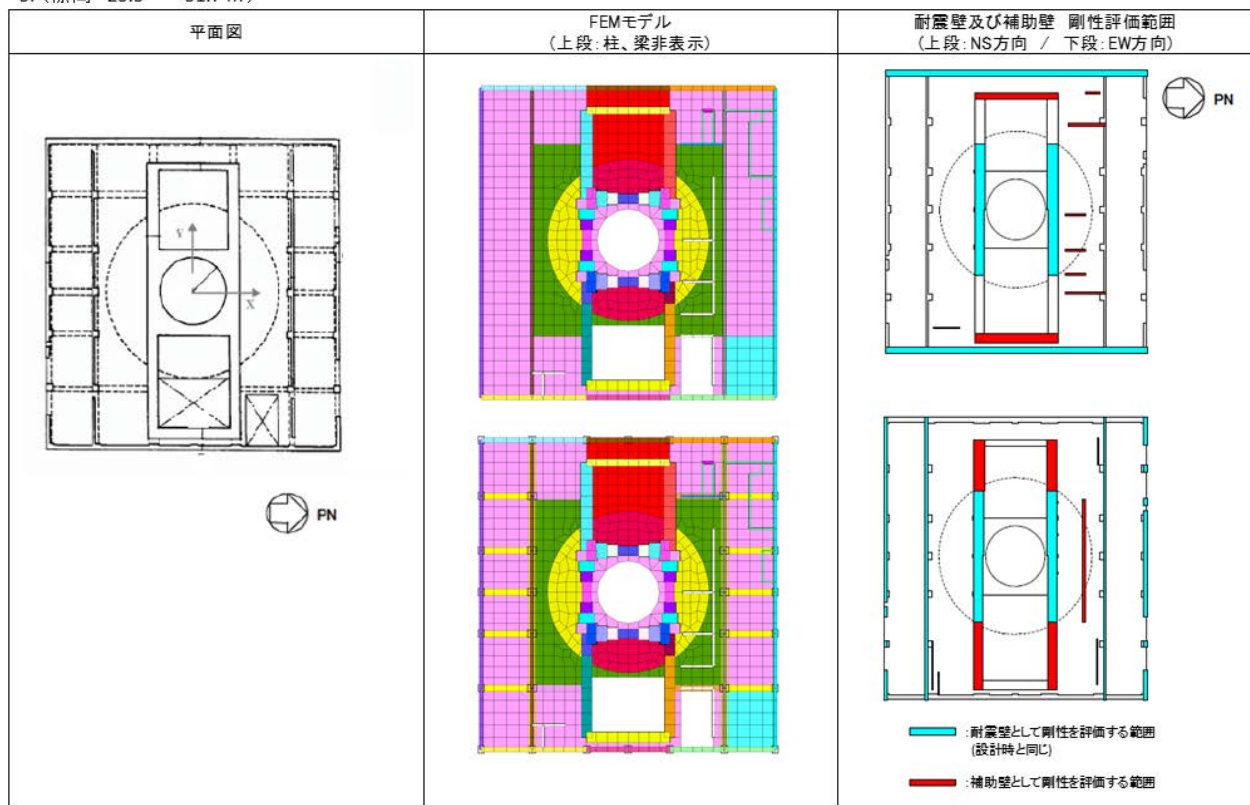


図 3-6 平面図² 3F

・4F(標高 31.7 ~ 38.2 m)

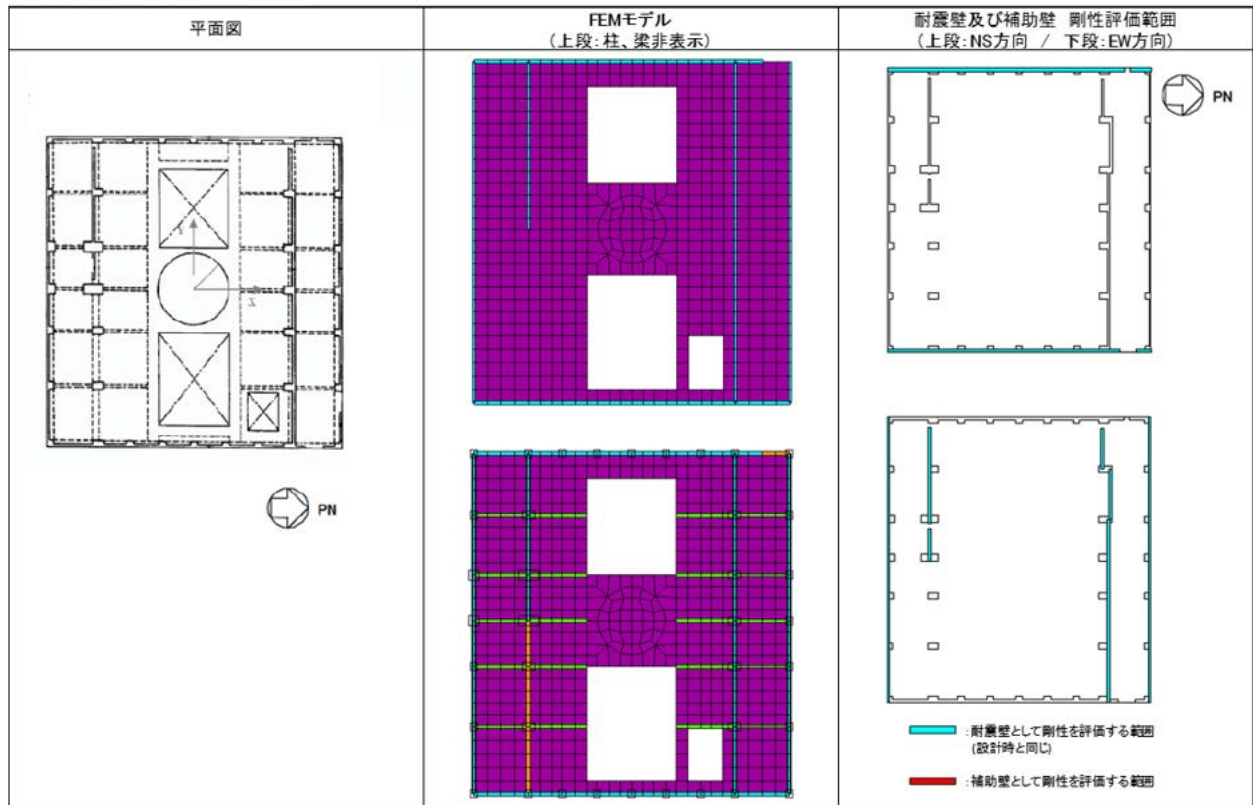


図 3-7 平面図² 4F

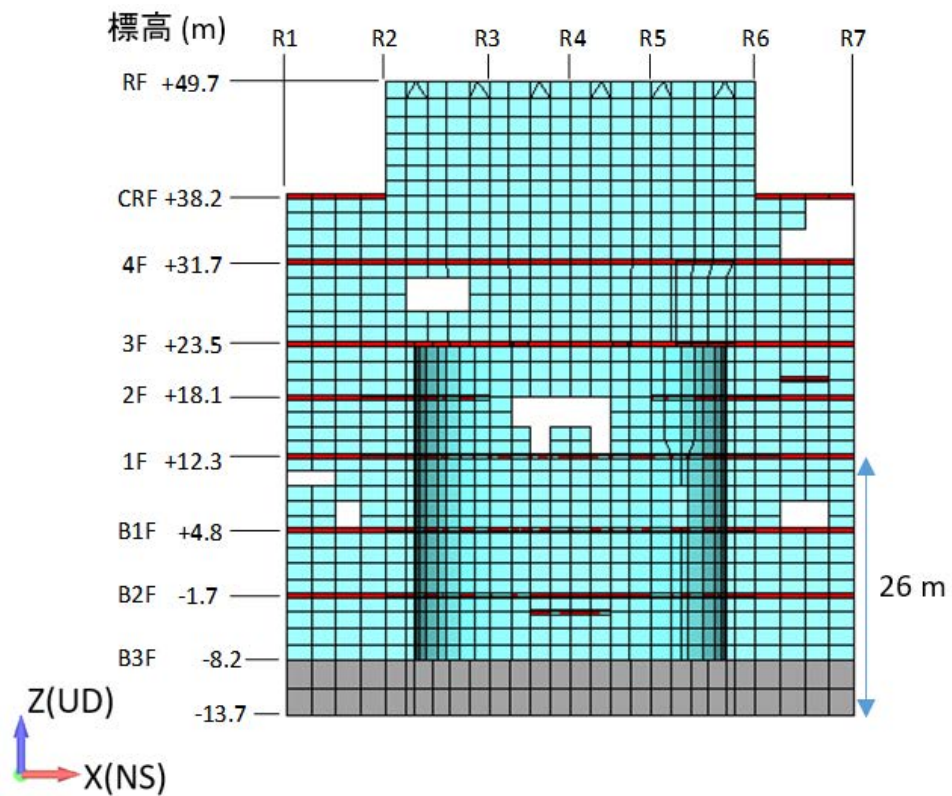


図 3-8 解析モデル断面図 (NS 断面)

3.1.3 屋根部

屋根トラスは、KARISMA 報告書のデータを用いる。図 3-9 に屋根トラスの平面図を示す。

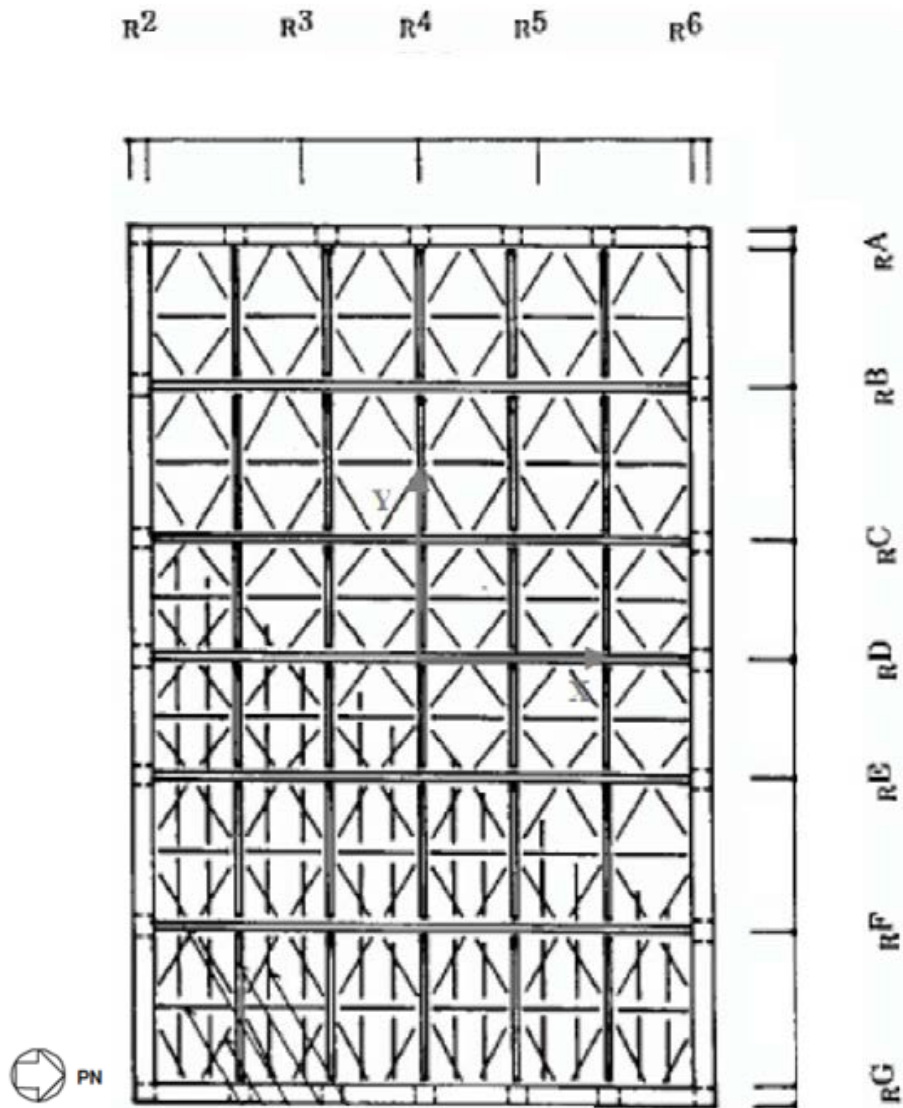


図 3-9 屋根トラスの平面図（屋根、標高 +49.7m）

屋根スラブは KARISMA 報告書のデータがなかったため、一般的な軽水炉の屋根スラブ板厚にデッキプレート等を考慮し、厚さ 100mm の RC でモデル化した。図 3-10 に屋根モデルの概要を示す。

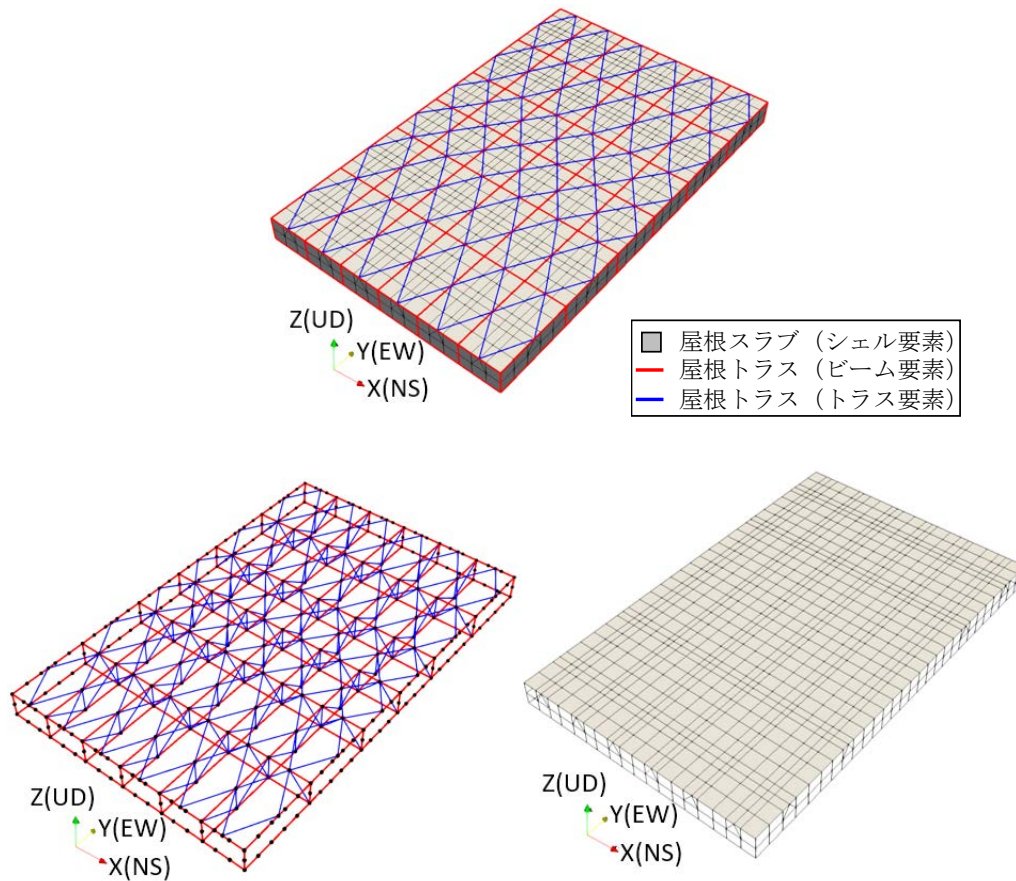


図 3-10 屋根モデル（上：屋根全体、左下：屋根トラス、右下：屋根スラブ）

3.2 地盤

地盤範囲は KARISMA 報告書²と同様とする。地盤範囲を表 3-1 に示す。

表 3-1 地盤範囲

標高 (m)	GL (m)	区分	地質
12.0	0.0		
8.0	-4.0	Sand	Sand
4.0	-8.0		Sand
-6.0	-18.0	Yasuda	Clay
-33.0	-45.0	Nishiyama	Rock
-90.0	-102.0		Rock
-136.0	-148.0		Rock
-155.0	-167.0	Nishiyama	

4. 構造モデルの作成

3次元 FEM モデル（地盤建屋連成）を図 4-1、図 4-2 に示す。詳細は 4.1 建屋、4.2 地盤にそれぞれに示す。

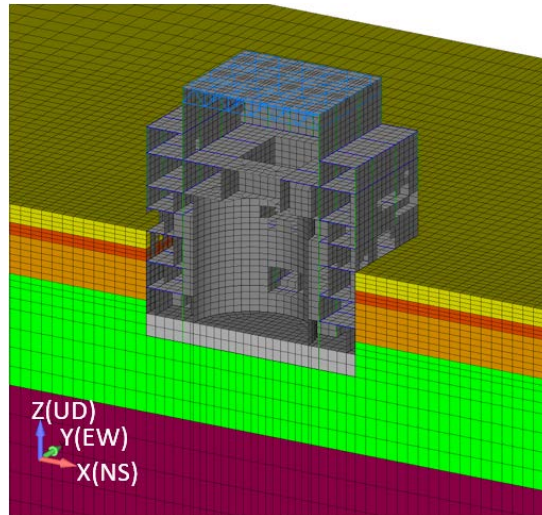


図 4-1 地盤に埋め込まれた建屋の様子

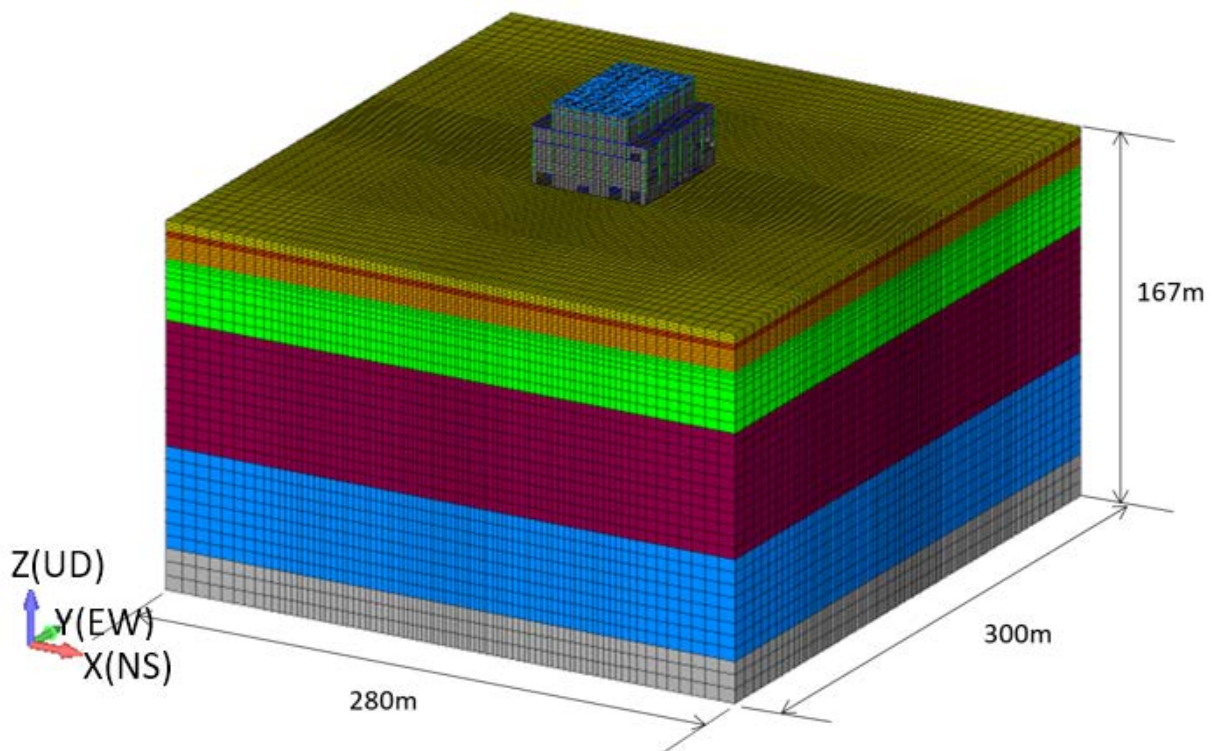


図 4-2 3次元 FEM モデル（地盤建屋連成）全体図

4.1 建屋

基礎版はソリッド要素、建屋壁及び床はシェル要素、柱、梁及び屋根トラスはビーム要素でモデル化する。ペデスタル、圧力容器は重量のみ考慮し各フロアに単位体積重量として考慮する。

本解析では、弾性範囲の建屋応答を求めるため、メッシュサイズは階高を4分割程度と設定した。

解析モデルの概要を図 4-3 に、平面図を図 4-4～図 4-12 に示す。平面図において、壁は灰色、梁は青、柱は白抜きで示している。3F～4F の燃料プールの壁や RF の外壁は東西方向に配置されている。

節点数：14540

要素数：18493

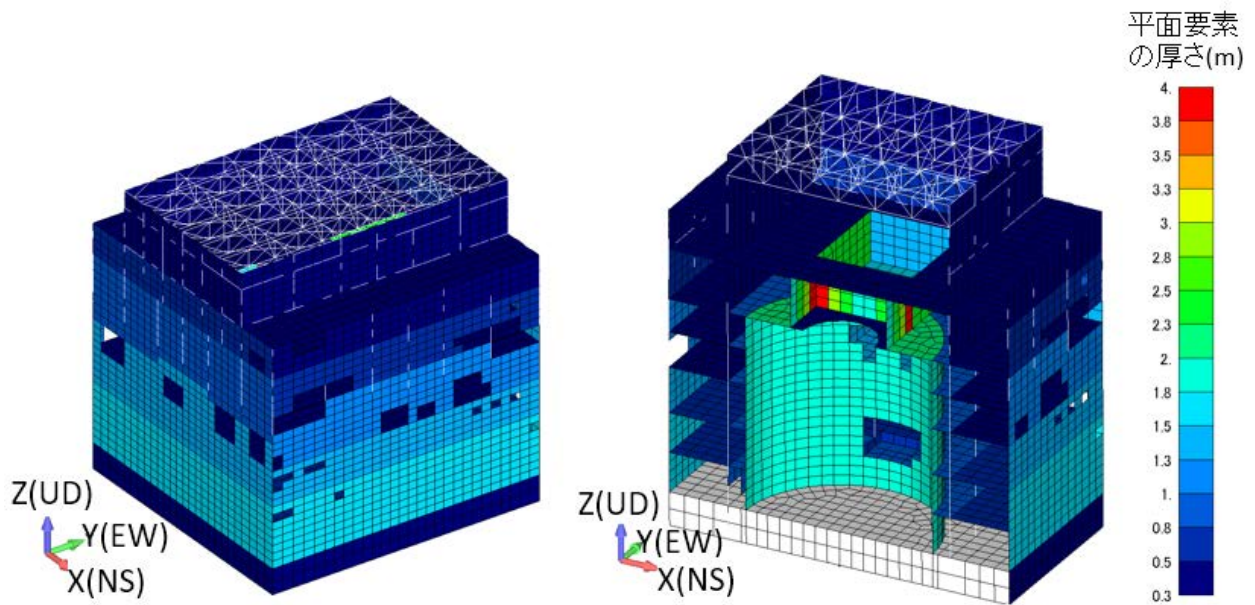


図 4-3 建屋の 3 次元 FEM モデル

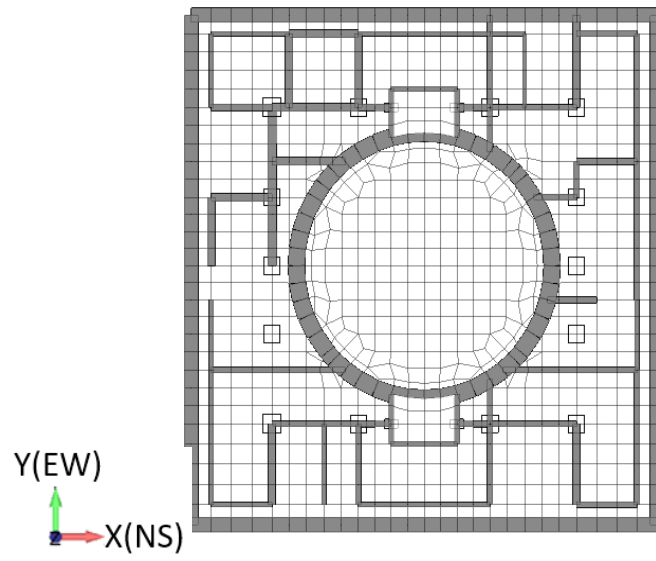


図 4-4 平面図 B3F

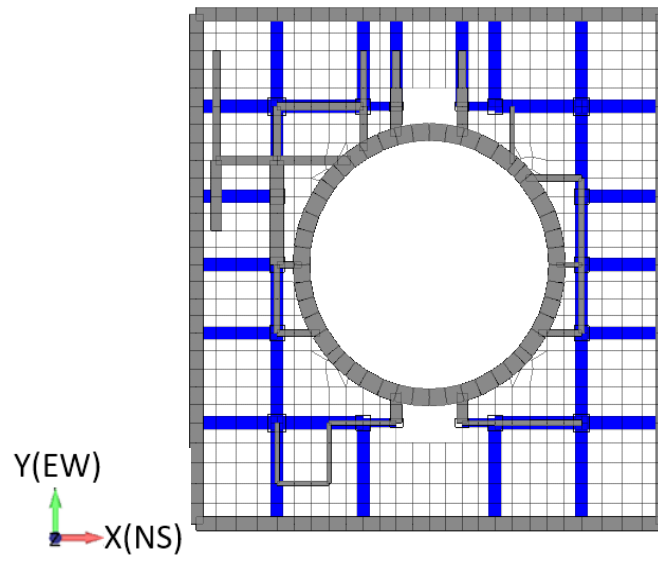


図 4-5 平面図 B2F

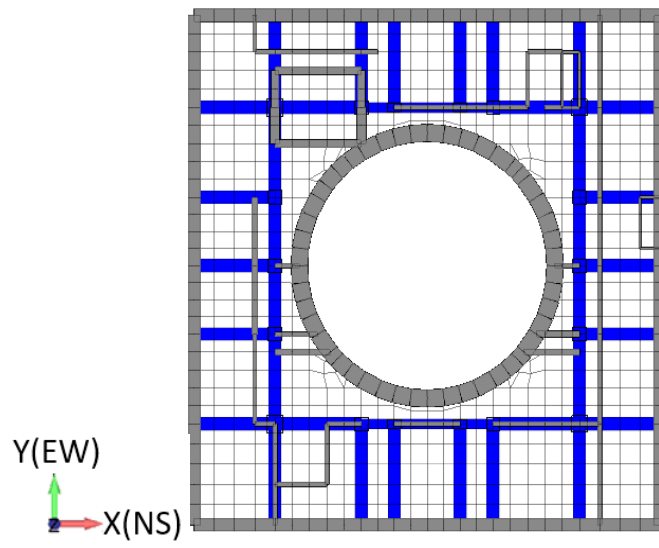


図 4-6 平面図 B1F

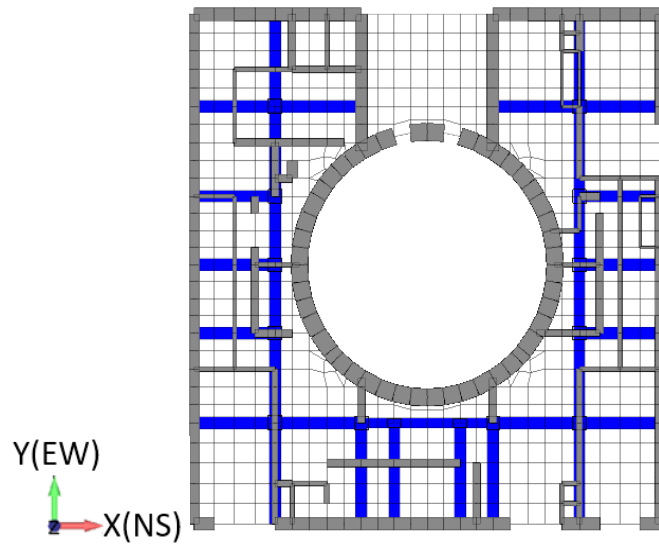


図 4-7 平面図 1F

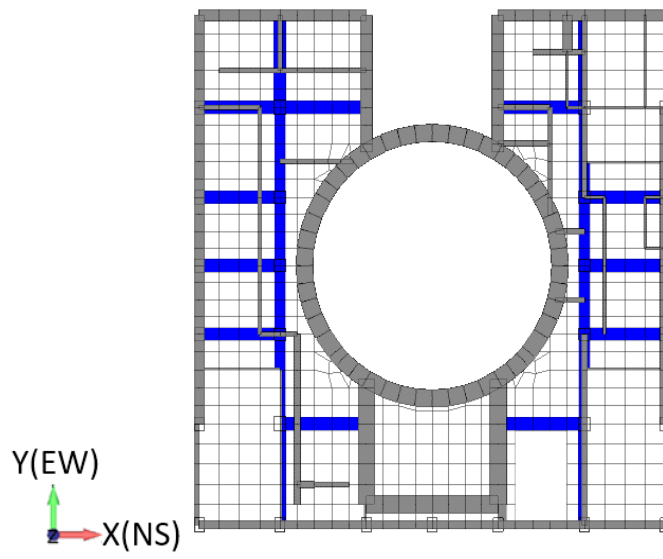


図 4-8 平面図 2F

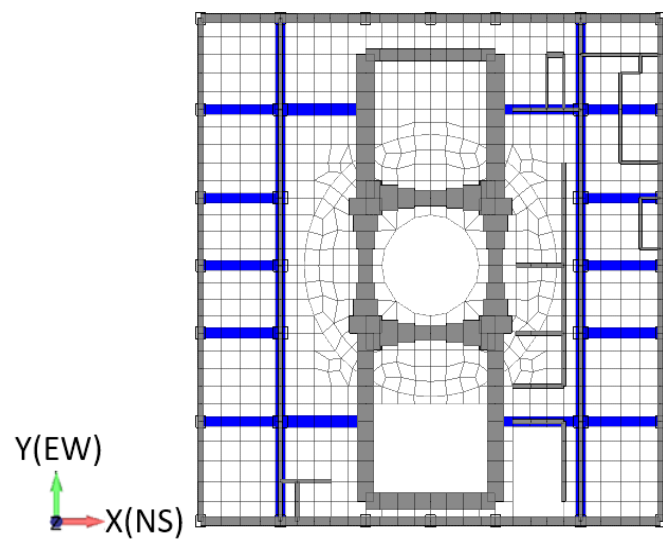


図 4-9 平面図 3F

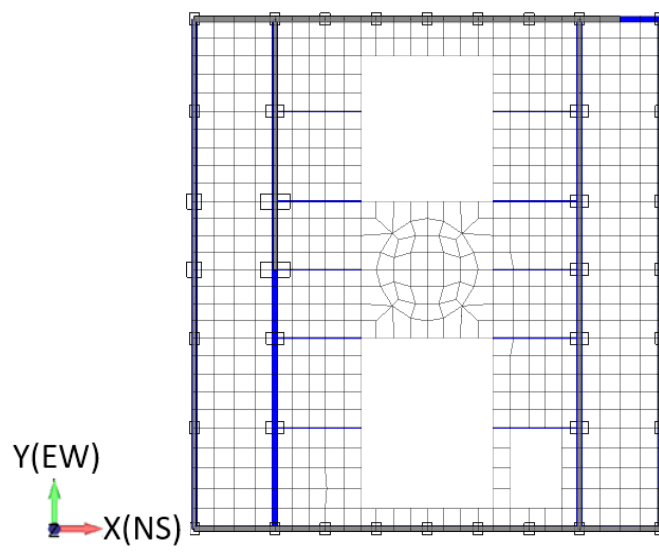


図 4-10 平面図 4F

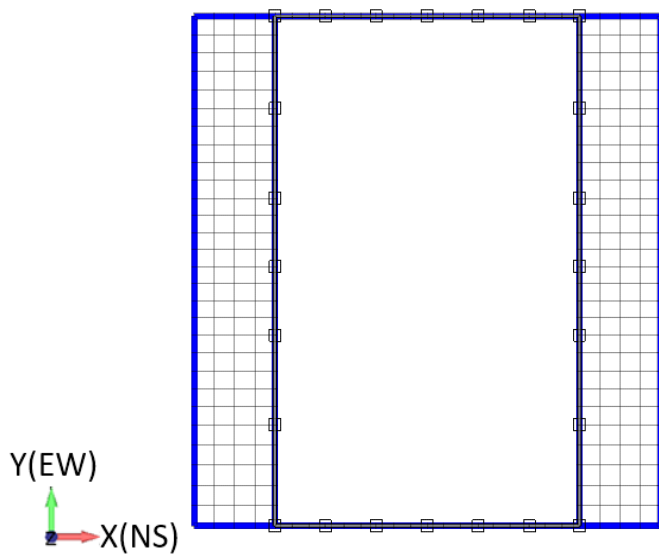


図 4-11 平面図 CRF

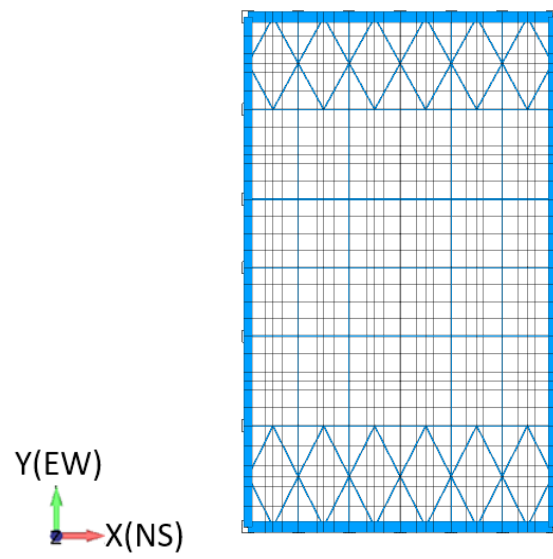


図 4-12 平面図 屋根スラブ

ここで、屋根トラス、屋根トラスと外壁及び屋根トラスと屋根スラブの接合条件を以下に示す。

(1) 屋根トラス

上弦材と下弦材の端部はそれぞれ全自由度について隣接梁と同変位・同回転（剛接合）とする。斜材、束材の端部はピン接合とする。

(2) 屋根トラスと外壁

屋根トラス上弦材と下弦材の支持部の節点は、外周柱、梁の節点の自由度と同変位・同回転（剛接合）とする。水平ブレースの端部はピン接合とする。

(3) 屋根トラスと屋根スラブ

屋根トラスの上弦材、水平ブレースと屋根スラブとの接合は、図 4-13 の赤丸位置で示すようにピン接合とする。

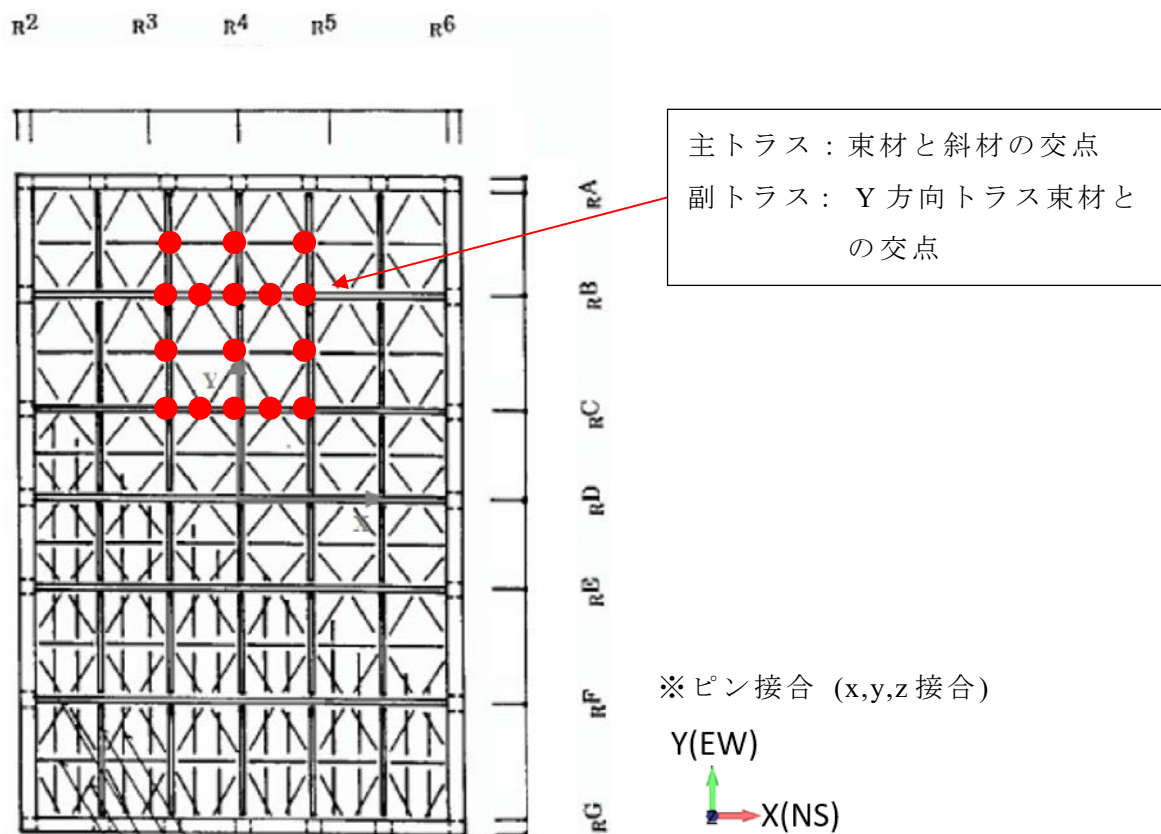


図 4-13 屋根スラブと屋根トラスの接合位置（赤丸）の例

4.2 地盤

解析モデルは、土方ら³と同様に、建屋の上下の卓越振動数 10Hz を超える 17Hz 程度を透過振動数とした。また、地表から基礎底面位置までの地盤メッシュについては、建屋モデルのメッシュとの整合を考慮して設定した。等価振動数は 17Hz 以下となるが、表層地盤の高振動数挙動が建物応答に及ぼす影響は小さいと判断した。なお、等価物性は KARISMA 報告書で求められた等価物性の値を各層毎に平均したものであり、材料モデルの項で後述する。

5. 質量モデル

建屋モデルの質量は、建屋各階の質量が表 5-1 に示す KARISMA 報告書による質点系モデルの重量と一致するように設定した。質点系モデルの重量を建屋 3 次元 FEM モデルの床質量密度に調整する際の方針の例を以下に示す。

- ・ 柱、壁の質量はフロア間の全体質量を求め 1/2 ずつ上下階に振り分ける。
- ・ 梁の質量は各階に振り分ける。
- ・ 床の質量に質点との差分を上乗せした質量密度を設定する。

表 5-1 質点系モデル諸元²

NS									
No.	Weight W (kN)	Rotational inertia I_θ ($\times 10^6 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$)	Shear cross-sectional area A_s (m^2)	Geometrical moment of inertia I (m^4)	No.	Weight W (kN)	Rotational inertia I_θ ($\times 10^6 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$)	Shear cross-sectional area A_s (m^2)	Geometrical moment of inertia I (m^4)
1	39,760	71.0							
2	80,820	413.0	41.0	13,700					
3	86,110	483.0	83.0	51,100					
4	86,400	299.0	188.0	70,600					
5	56,460	202.0	132.5	69,000					
6	82,650	295.0	149.4	84,700					
7	81,700	302.0	180.5	105,000					
8	82,900	304.0	183.2	112,800					
9	349,200	964.0	223.5	119,000	11	93,200	33.0	119.6	7,200
10	220,300	593.0	3373.4	900,600	12	158,100	379.0	113.0	23,300
Total	1,991,700				13	104,900	311.0	137.6	23,500
					14	203,200	417.0	139.2	23,400
					15	126,500	395.0	132.4	23,600
					16	139,500	377.0	186.4	29,600

1. Building					2. base mat				
Young's modulus E_c 3.13×10^7 (kN/m ²)					Young's modulus E_c 3.13×10^7 (kN/m ²)				
Shear modulus of elasticity G 1.31×10^7 (kN/m ²)					Shear modulus of elasticity G 1.31×10^7 (kN/m ²)				
Poisson's ratio ν 0.20					Poisson's ratio ν 0.20				
Damping factor h 5%					Damping factor h 5%				
foundation shape 56.6m(NS) x 59.6m(EW)									

6. 材料モデル

6.1 建屋物性

コンクリートの剛性は実強度を基に算定した値を用いている。KARISMA 報告書によるコンクリートの実強度を表 6-1 に示す。この値を用いて、式(6.1)よりヤング係数を求める。鉄筋は表 6-2 に、鉄骨は表 6-3 に示されている値を用いている。これらをまとめて表 6-4 に示す。また、本適用事例では、平成 19 年（2007 年）新潟県中越沖地震の実地調査結果から RC 非線形性の考慮は不要と判断した。

$$E = 3.35 \times 10^4 \times \left(\frac{\gamma}{24}\right)^2 \times \left(\frac{F_c}{60}\right)^{\frac{1}{3}}, (\text{普通コンクリートの場合：} 18 \leq F_c \leq 60) \quad (6.1)$$

ここで、 E ：ヤング係数（N/mm²）、 F_c ：設計基準強度（N/mm²）、 γ ：コンクリートの気乾単位体積重量（kN/m³）。

表 6-1 KARISMA 報告書による実強度²

	Compressive strength (MPa)
R/B Structure	50
Basemat	45
RCCV structure	50

表 6-2 鉄筋の材料定数²

Reinforcement strength			
Designation	Diameter (mm)	Tensile strength (MPa)	Young's modulus, Es (MPa)
SD35	< Ø 25	350	205 000
SD35	≥ Ø 29	350	205 000

表 6-3 鋼材の材料定数²

Material properties of structural steel				
Density (t/m ³)	Poisson's ratio ν	Young's modulus, Ec (MPa)	Shear modulus of elasticity, G (MPa)	Tensile strength (MPa)
7.8 (assumed)	0.3	205 000	79 000	240

表 6-4 鉄筋コンクリート強度と弾性剛性

	ヤング係数 $E(\text{N/mm}^2)$	せん断弾性係数 $G(\text{N/mm}^2)$	ポアソン比 ν	単位体積重量 $\gamma (\text{kN/m}^3)$
コンクリート	3.13×10^4	1.21×10^4	0.20	24.0※
鉄筋	2.05×10^5	—	0.30	77.0
鉄骨	2.05×10^5	7.90×10^4	0.30	77.0

※ γ は、鉄筋コンクリートの単位体積重量から 1.0 を減じた値とする。

6.2 地盤物性

本適用事例の地盤物性は、KARISMA 報告書の新潟県中越沖地震の再現解析で用いられた等価物性（地層ごと平均）として設定した。地盤等価物性は、一次元波動論により、初期剛性と G - γ 曲線を用いて水平 2 方向を考慮して算定した。

KARISMA 報告書による初期剛性地盤物性を表 6-5 に、1 次元波動論による詳細地盤と平均地盤の地盤等価物性（解析結果と地層ごとの平均）をそれぞれ表 6-6、表 6-7 に示す。

表 6-5 初期剛性地盤物性²

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	Nishiyama	Rock	490		1640		17.0	0.451	416,000
-33.0		Rock	530		1700		16.6	0.446	475,000
-90.0		Rock	590		1710		17.3	0.432	614,000
-136.0		Rock	650		1790		19.3	0.424	832,000
-155.0		Rock	720		1900		19.9	0.416	1,050,000
The free surface of the ∞	Nishiyama	Rock	720		1900		19.9	0.416	1,050,000

表 6-6 1次元波動論による地盤等価物性（詳細地盤）

G.L. (m)	G/Go		h(%)		Max. shear strain	
	X-DIR	Y-DIR	X-DIR	Y-DIR	X-DIR	Y-DIR
0.5	0.647	0.58	10.7	12.7	0.01368	0.01988
1.5	0.283	0.19	21.7	24.6	0.09769	0.18264
2.5	0.141	0.084	26	27.8	0.31049	0.63103
3.5	0.084	0.084	27.8	27.8	0.64808	0.72121
4.5	0.19	0.178	24.5	24.9	0.18012	0.20184
5.5	0.159	0.149	25.5	25.8	0.25317	0.27989
6.5	0.132	0.112	26.3	26.9	0.34429	0.42885
7.5	0.11	0.084	27	27.8	0.44387	0.62914
9.0	0.742	0.724	3.9	4.1	0.0281	0.03224
11.0	0.682	0.669	4.8	5	0.04408	0.04851
13.0	0.642	0.619	5.4	5.7	0.05865	0.06596
15.0	0.606	0.573	5.9	6.4	0.07101	0.08442
17.0	0.586	0.549	6.2	6.8	0.07928	0.09644
19.5	0.964	0.959	1.6	1.8	0.02303	0.027
22.5	0.961	0.957	1.7	1.8	0.02538	0.02867
25.5	0.957	0.953	1.8	1.9	0.02842	0.03183
28.5	0.954	0.951	1.9	1.9	0.03141	0.03462
31.5	0.952	0.948	1.9	2	0.03347	0.037
34.5	0.95	0.947	1.9	2	0.03515	0.03889
37.5	0.95	0.946	2	2	0.03552	0.03979
40.5	0.949	0.946	2	2	0.03592	0.03967
43.5	0.95	0.946	1.9	2	0.03525	0.03896
47.0	0.956	0.952	1.8	1.9	0.02965	0.03276
51.0	0.958	0.953	1.8	1.9	0.02775	0.03219
55.0	0.958	0.953	1.8	1.9	0.02769	0.03252
59.0	0.956	0.953	1.8	1.9	0.02974	0.03253
63.0	0.954	0.95	1.9	2	0.03126	0.03557
67.0	0.953	0.946	1.9	2	0.03222	0.03907
71.0	0.952	0.944	1.9	2.1	0.03285	0.04246
75.0	0.952	0.941	1.9	2.1	0.03343	0.04553
79.0	0.951	0.939	1.9	2.2	0.0341	0.04807
83.0	0.95	0.938	1.9	2.2	0.03475	0.05005
87.0	0.948	0.934	2	2.3	0.03697	0.05163
91.0	0.947	0.933	2	2.3	0.03835	0.0523
95.0	0.946	0.931	2	2.3	0.03949	0.05277
99.5	0.945	0.932	2	2.3	0.04019	0.05275
104.5	0.954	0.946	1.9	2	0.03149	0.03979
109.5	0.953	0.946	1.9	2	0.03228	0.03916
114.5	0.952	0.946	1.9	2	0.03287	0.03903
119.5	0.951	0.946	1.9	2	0.03393	0.04003
124.5	0.95	0.943	1.9	2.1	0.03469	0.04276
129.5	0.95	0.941	1.9	2.1	0.03525	0.04624
134.5	0.949	0.938	2	2.2	0.03599	0.04955
139.5	0.948	0.932	2	2.3	0.03679	0.05251
145.0	0.948	0.926	2	2.4	0.03729	0.05539
150.5	0.959	0.944	1.8	2.1	0.02743	0.04182
155.5	0.958	0.943	1.8	2.1	0.02786	0.04332
160.5	0.957	0.942	1.8	2.1	0.02839	0.0446
167.0	0.957	0.941	1.8	2.1	0.02888	0.04545

表 6-7 1次元波動論による地盤等価物性（平均地盤）

G.L. (m)	Vs (m/s)	G/Go	h(%)
0.0			
-4.0	150	0.262	22.39
-8.0	200	0.139	26.09
-18.0	330	0.639	5.42
-45.0	490	0.952	1.89
-102.0	530	0.947	2.00
-148.0	590	0.946	2.03
-167.0	650	0.950	1.95

6.3 材料減衰

各部材の材料減衰は、KARISMA 報告書と同じ値を用いることとし、表 6-8 に示す値とした。また、時刻歴応答解析においてはレーリー減衰を用いる。

表 6-8 材料減衰

材料種類	減衰定数
鉄筋コンクリート	5%
鉄骨トラス	2%
地盤	等価減衰 (表 6-7 参照)

7. 減衰の数理モデル

7.1 レーリー減衰

3次元 FEM モデルの時刻歴応答解析ではレーリー減衰（要素別レーリー減衰）を使用する。レーリー減衰を設定するにあたり、主要な固有振動数を決める必要があるが、本検討では固有値解析結果より、

- ・ f_1 : NS、EW 方向の 1 次モードの固有振動数の平均
- ・ f_2 : UD 方向の 1 次モードの固有振動数

として設定した。

建屋に用いるレーリー減衰の f_1 、 f_2 は建屋基礎固定条件による建屋単独モデルでの固有値解析より設定した。ただし、地盤に用いるレーリー減衰の f_1 は地盤建屋連成モデルでの固有値解析より設定した。レーリー減衰設定に用いる振動数を表 7-1 に示す。建屋基礎固定条件の建屋単独モデルの固有値解析結果と建屋 1 次モード図を表 7-2 及び図 7-1 に、3 次元 FEM モデル（地盤建屋連成）の固有値解析結果と建屋地盤連成の 1 次モード図を表 7-3 及び図 7-2 に示す。また、建屋及び地盤のレーリー減衰と振動数の関係をそれぞれ表 7-4、図 7-3 及び表 7-5、図 7-4 に示す。

表 7-1 レーリー減衰設定に用いる振動数

		f_1	f_2
建屋	鉄筋コンクリート (RC)	建屋基礎固定 NS 方向及び EW 方向の 1 次固有振動数の平均	建屋基礎固定 UD 方向 1 次固有振動数
	鉄骨トラス	RC に同じ	RC に同じ
地盤		地盤建屋連成 NS 方向及び EW 方向の 1 次固有振動数の平均	建屋基礎固定 UD 方向 1 次固有振動数

（参考）鉄骨トラスの f_2 は屋根スラブの 1 次固有振動数とすることも考えられるが、建屋基礎固定の UD 方向 1 次の固有振動数と違いが小さかったため、RC と同じとした。

表 7-2 建屋基礎固定条件の建屋単独モデルの固有値解析結果

モード 次数	振動数 Hz	周期 sec	刺激係数			有効質量比			備考
			NS(X)	EW(Y)	UD(Z)	NS(X)	EW(Y)	UD(Z)	
1	4.187	0.239	318.138	-1.278	-3.409	0.538	0.000	0.000	NS1次
2	4.791	0.209	-2.756	-329.092	1.687	0.000	0.576	0.000	EW1次
3	5.080	0.197	-1.064	5.740	31.756	0.000	0.000	0.005	屋根トラス
6	7.109	0.141	126.755	-8.574	4.846	0.085	0.000	0.000	NS2次
9	7.661	0.131	2.324	-63.656	-2.863	0.000	0.022	0.000	EW2次
36	10.517	0.095	-10.248	-69.891	-23.860	0.001	0.026	0.003	EW3次
43	11.001	0.091	0.251	1.449	278.942	0.000	0.000	0.414	UD1次
47	11.397	0.088	-78.172	9.830	-14.563	0.032	0.001	0.001	NS3次

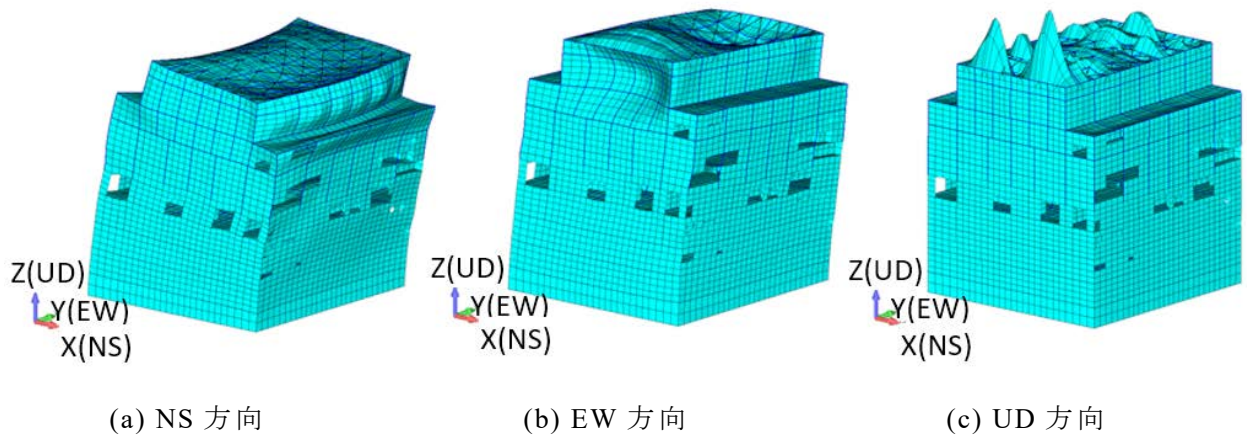


図 7-1 建屋単独モデルの 1 次モード図（基礎固定）

表 7-3 KARISMA 報告書²の等価物性による 3 次元 FEM モデル（地盤建屋連成）の
固有値解析結果

モード 次数	振動数 Hz	周期 Sec	刺激係数			有効質量比			備考
			NS(X)	EW(Y)	UD(Z)	NS(X)	EW(Y)	UD(Z)	
1	0.846	1.183	-4293.6	-66.2	0.0	0.768	0.000	0.000	NS 方向 1 次
2	0.846	1.182	68.2	-4293.7	0.0	0.000	0.768	0.000	EW 方向 1 次

※再現解析の主要モード抜粋

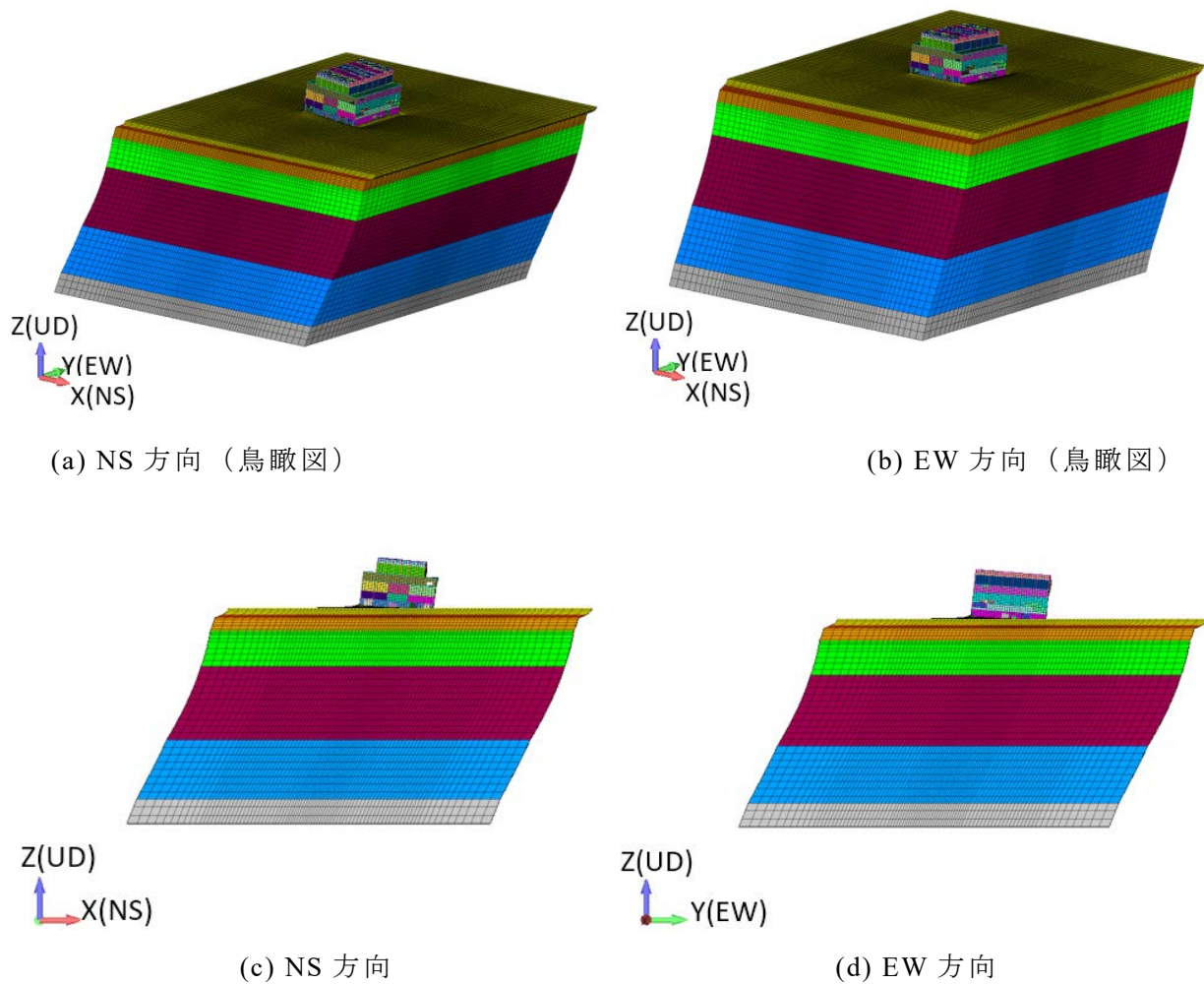
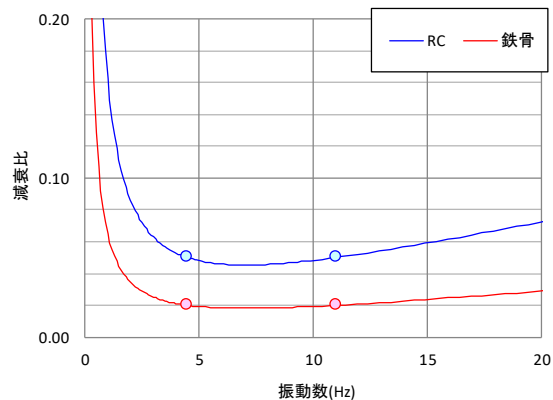


図 7-2 3 次元 FEM モデル（地盤建屋連成）の 1 次モード図

表 7-4 建屋のレーリー減衰と振動数の関係

	振動数		減衰比		レーリー減衰	
	f ₁ (Hz)	f ₂ (Hz)	h ₁ (-)	h ₂ (-)	α (-)	β (-)
RC	4.49	11.00	0.050	0.050	2.003	1.028E-03
鉄骨	4.49	11.00	0.020	0.020	0.801	4.110E-04

ターゲット2点をプロット



RC： 壁、床スラブ及び屋根スラブはシェル要素、
柱及び梁は梁要素、
基礎スラブはソリッド要素
鉄骨： 屋根トラスは梁要素、トラス要素
鋼材ガーダーは梁要素

図 7-3 建屋のレーリー減衰と振動数の関係

表 7-5 地盤のレーリー減衰と振動数の関係

	振動数		減衰比		レーリー減衰	
	f ₁ (Hz)	f ₂ (Hz)	h ₁ (-)	h ₂ (-)	α (-)	β (-)
砂層1	0.846	11.001	0.206	0.206	2.034	5.535E-03
砂層2	0.846	11.001	0.254	0.254	2.507	6.825E-03
安田層	0.846	11.001	0.047	0.047	0.464	1.263E-03
西山層1	0.846	11.001	0.018	0.018	0.178	4.837E-04
西山層2	0.846	11.001	0.022	0.022	0.217	5.911E-04
西山層3	0.846	11.001	0.021	0.021	0.207	5.643E-04
西山層4	0.846	11.001	0.018	0.018	0.178	4.837E-04

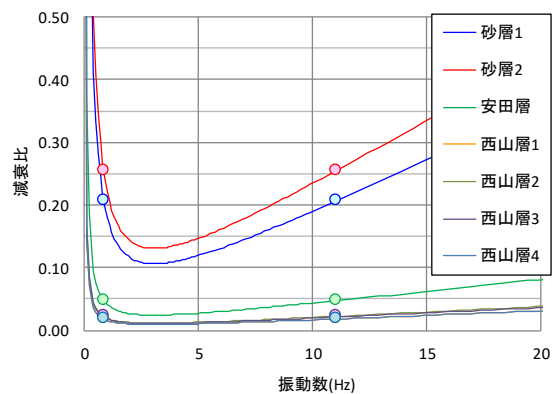


図 7-4 地盤のレーリー減衰と振動数の関係

8. 境界接合部モデル

8.1 埋め込まれた建屋と地盤の接合部のモデル化

平成 19 年（2007 年）新潟県中越沖地震の地震後の報告では建屋と表層地盤の間に数十 cm の隙間が観測されているが、建屋応答への影響は小さいと考え、建屋と地盤の剥離・接触は非考慮とした。

8.2 建物部材同士の接合

梁・シェル構造モデルには柱と梁、柱・梁及び壁等の部材同士の接合部と部材芯の間に重複部が生じるが無視した。これは、地下部には影響があるが 3 階を含む建屋全体に及ぼす影響は小さいと判断したためである。

8.3 解析地盤領域の底面及び側面境界

底面境界は、粘性境界 ($V_s = 720 \text{ m/s}$ 、 $V_p = 1898 \text{ m/s}$) とした。

側面境界は、相対する側面の節点の並進変位が同じとする周期境界（繰り返し境界）とした。

9. 入力地震動

入力地震動は、原子炉建屋基礎上の観測位置において、地震応答解析結果と観測記録が一致するように設定した解放基盤波（引き戻し波）とした。

9.1 引き戻し波

観測記録より求めた解析モデル底面での 2E 波 3 方向成分を解析モデル底面に入力した。解析モデル底面の入力地震動（引き戻し波）は、原子炉建屋基礎上の観測位置の応答加速度が観測記録と一致するように、基礎上の観測位置と解析モデル底面の伝達関数を用いて下記手順より作成する。

- ・ 3 次元 FEM モデルによる地震応答解析を実施した。入力地震動には基礎上の観測記録を用いた。
- ・ 上記地震応答解析の基礎上の時刻歴応答解析結果と解析モデル底面の入力波（基礎上の観測記録）より求めた伝達関数を用いて、基礎上の加速度応答スペクトルが観測記録と一致するように解析モデル底面への入力地震動を算定した。但し、各方向の入力動は方向毎個別に算定している。

基礎上の観測位置を図 9-1 に、算定手順を図 9-2 に示す。

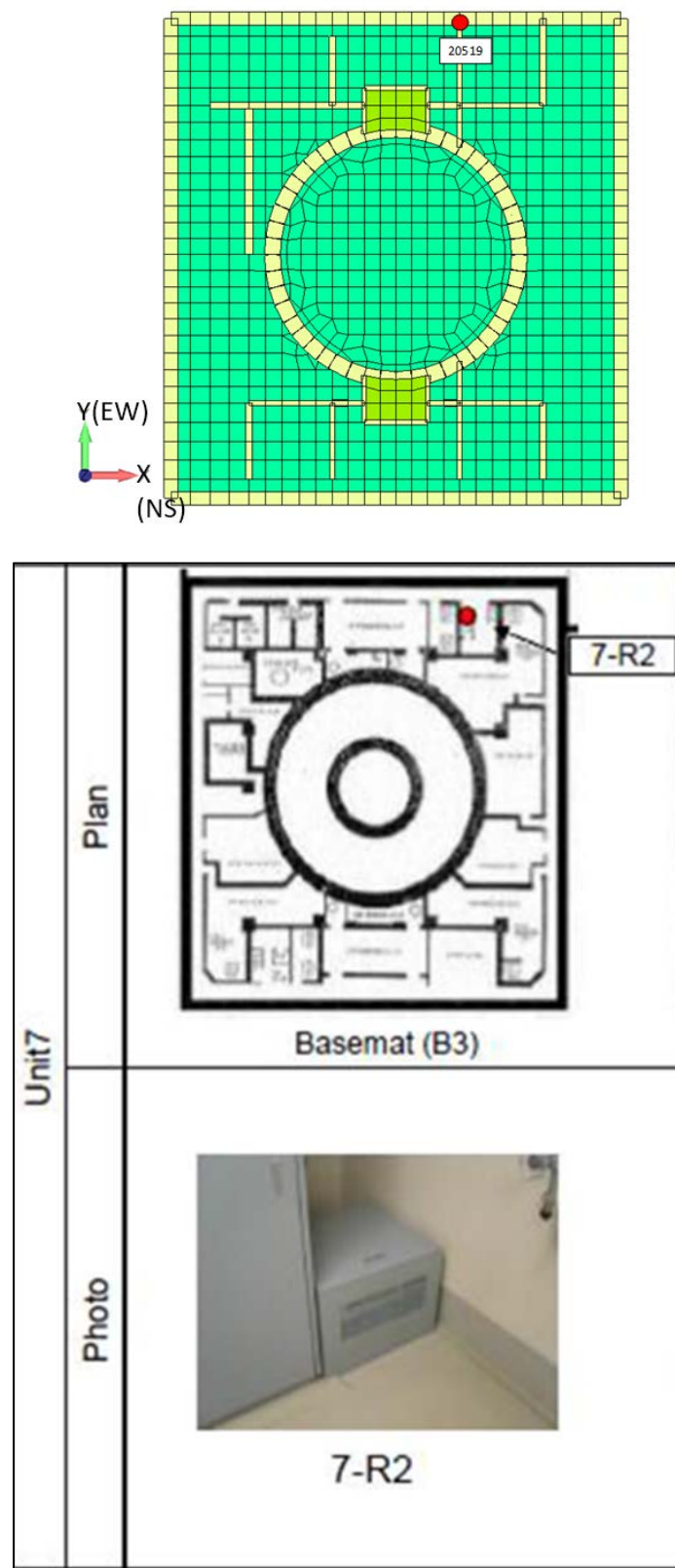


図 9-1 基礎上の観測位置と 3 次元 FEM モデルとの対応

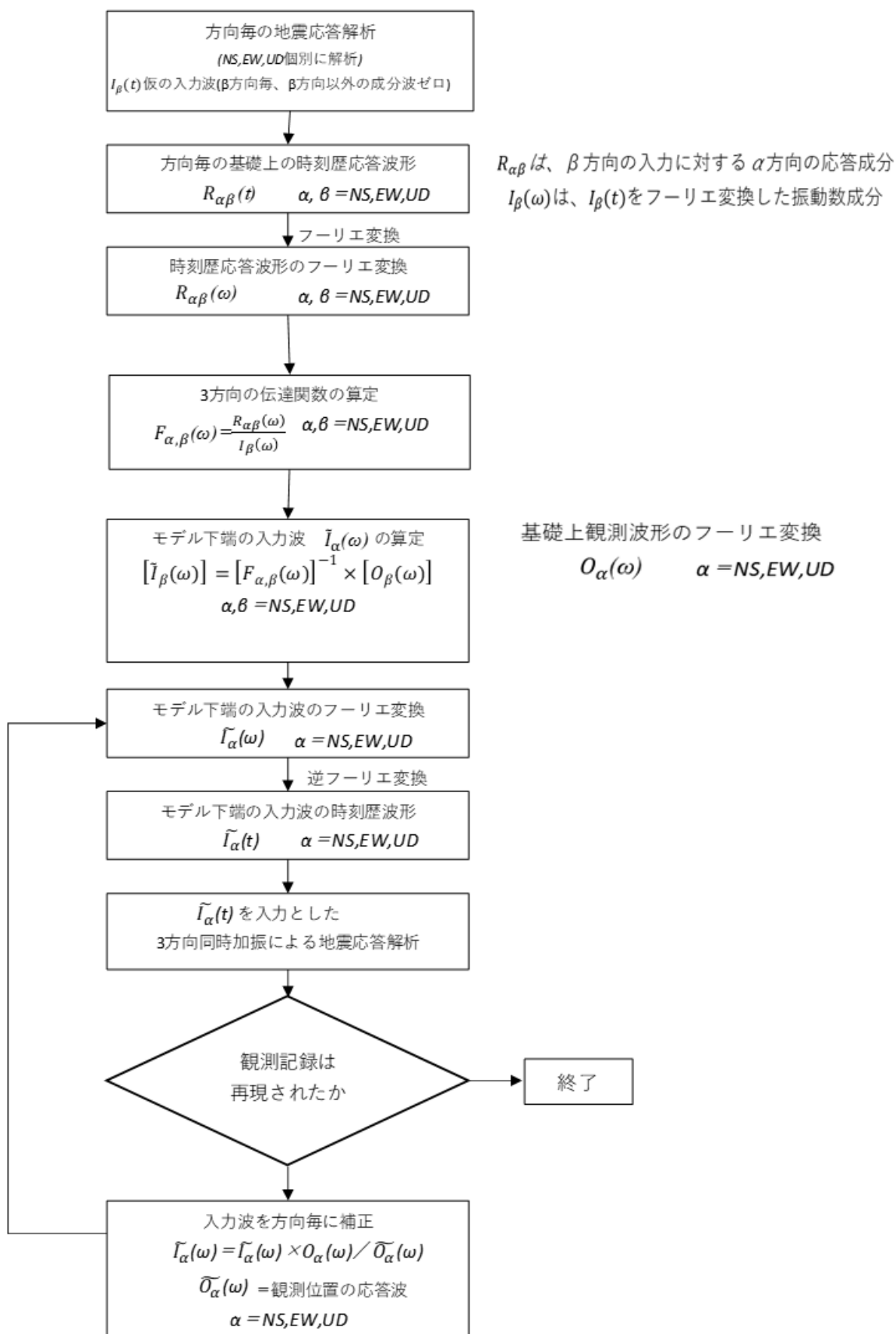
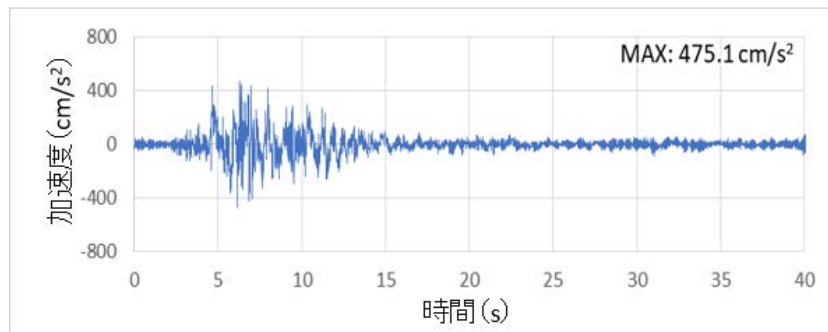
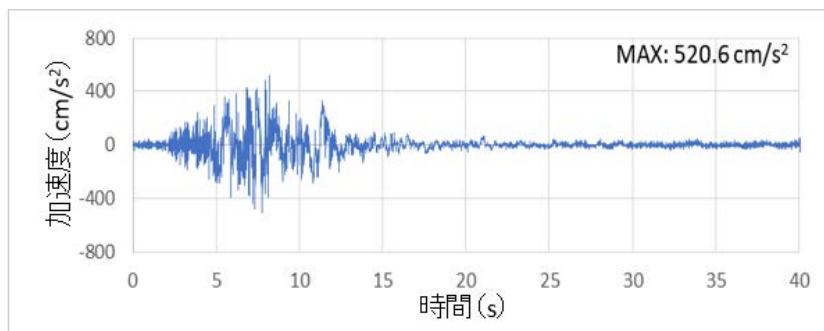


図 9-2 入力地震動算定手順（引き戻し波）

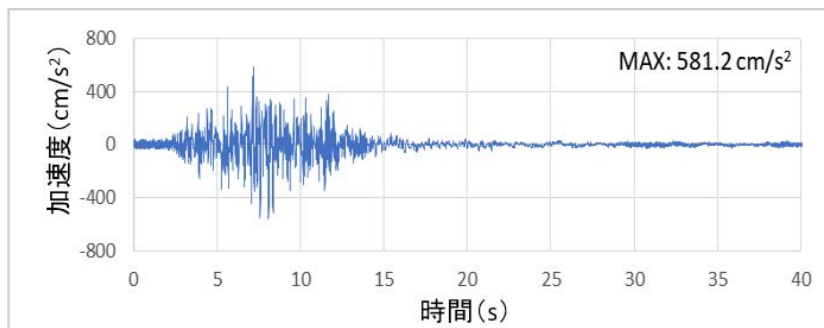
作成した入力地震動（引き戻し波）の加速度時刻歴波形を図 9-3 に示す。



(a) NS 方向



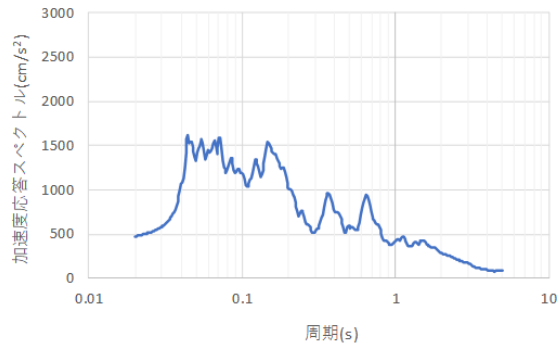
(b) EW 方向



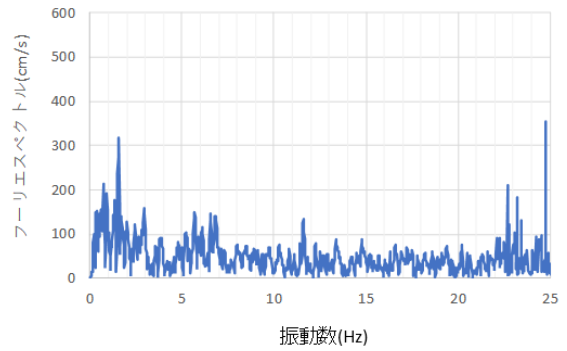
(c) UD 方向

図 9-3 引き戻し波の加速度時刻歴波形（25Hz 以上の振動数はカット）

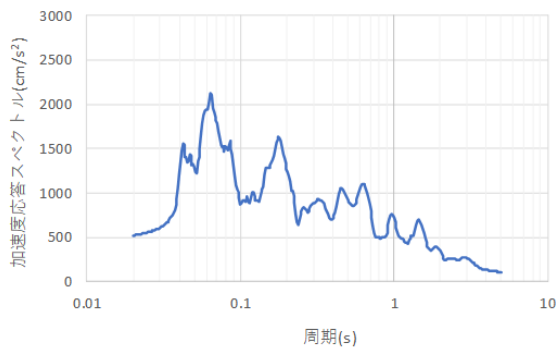
引き戻し波の加速度応答スペクトルとフーリエスペクトルを図 9-4 に示す。UD 方向の 11-12Hz 近傍の振幅が大きくなった理由として、基礎底面から下の解析領域の上下方向の 1 次元縦波振動モードが約 10.76Hz であり、建屋自身も近傍の固有振動数を持つために、解析モデル底面が固有モードの節になったこと等の可能性が考えられる。



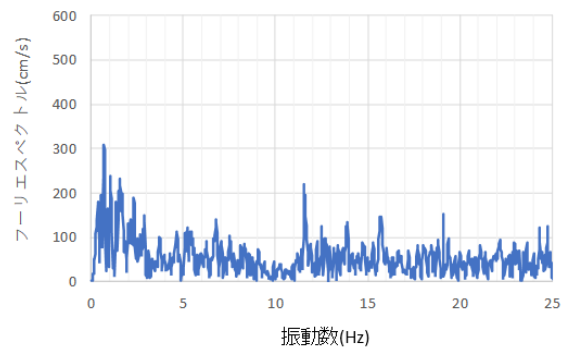
(a) NS 方向



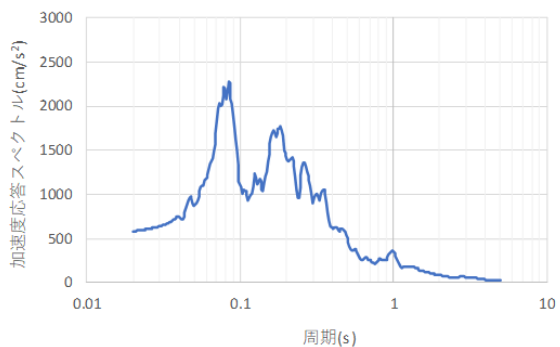
(d) NS 方向



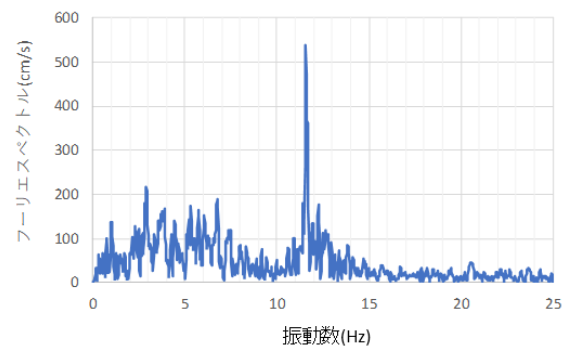
(b) EW 方向



(e) EW 方向



(c) UD 方向



(f) UD 方向

加速度応答スペクトル

フーリエスペクトル

図 9-4 引き戻し波の加速度応答スペクトル ($h = 5\%$) とフーリエスペクトル
(25Hz 以上の振動数はカット)

10. 初期状態モデル

本適用事例は弾性解析であるため、非考慮とした。

11. 数値解析に関する条件設定

11.1 質量行列に関するパラメータ

質量行列は、分布質量行列とする。

11.2 時間積分に関するパラメータ

- ・ 時間積分法 : Newmark- β ($\beta = 1/4$ 、 $\gamma = 1/2$)
- ・ 継続時間 : 40.96 秒
- ・ 積分時間間隔 : 弾性解析 0.01 秒
- ・ 並列計算

並列数 : 27

本解析は領域分割法 (Domain Decomposition Method, DDM) による解析を行う。

- ・ 反復法の収束判定値 : $1.0\text{E-}8$

ここでいう収束判定値は 2 次ノルムと初期の 2 次ノルムとの比である。

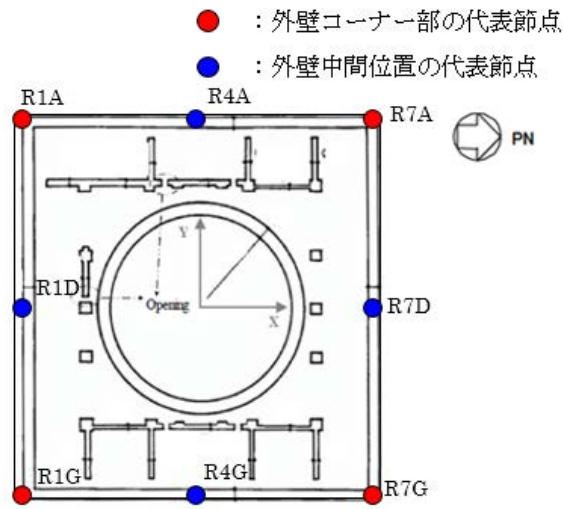
11.3 解析環境

- ・ プロセッサ : Intel(R)Xeon(R) Platinum 8168 CPU @ 2.70GHz
- ・ RAM : 256GB
- ・ OS : Windows Server 2012 R2 Standard

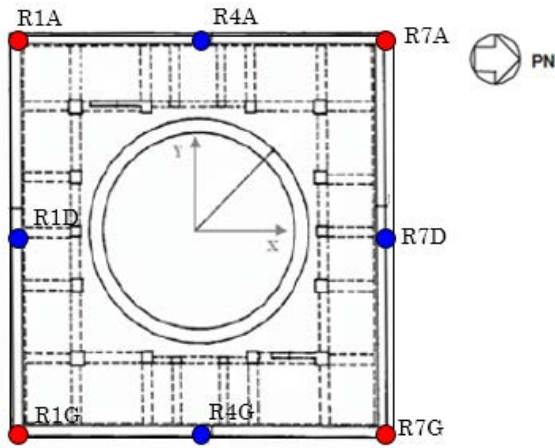
11.4 参考

- ・ 代表節点

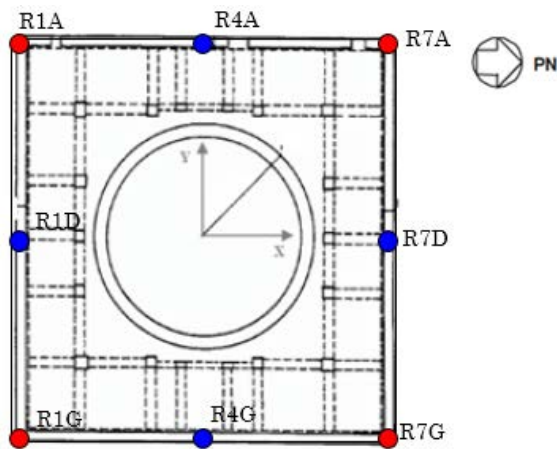
本解析における各フロアの代表節点を図 11-1 から図 11-3 に示す。



(a) B3F 平面図 (標高 -8.2 m)

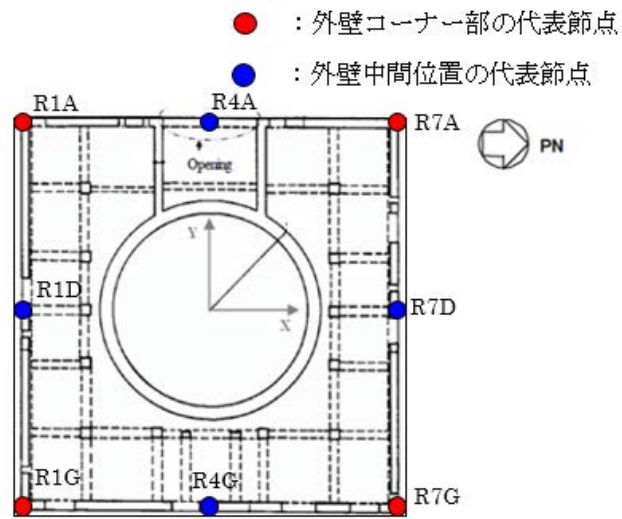


(b) B2F 平面図 (標高 -1.7 m)

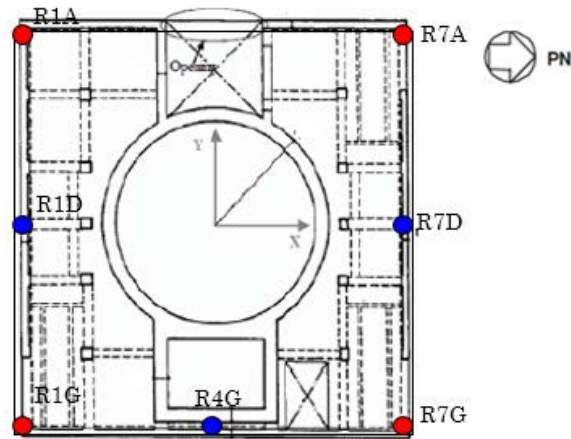


(c) B1F 平面図 (標高 +4.8 m)

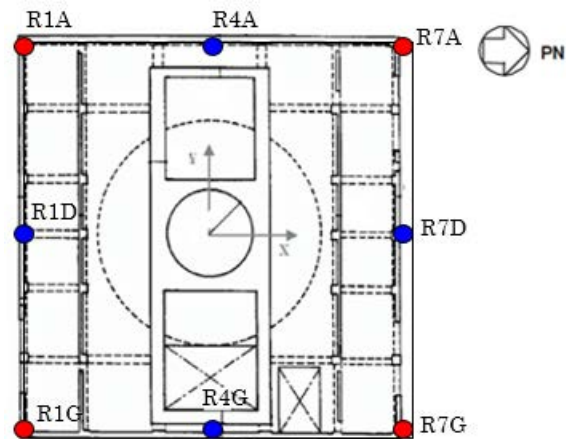
図 11-1 本解析における代表節点の位置 (上から B3F、B2F、B1F)



(a) 1F 平面図 (標高 +12.3 m)



(b) 2F 平面図 (標高 +18.1 m)



(c) 3F 平面図 (標高 +23.5 m)

図 11-2 本解析における代表節点の位置 (上から 1F、2F、3F)

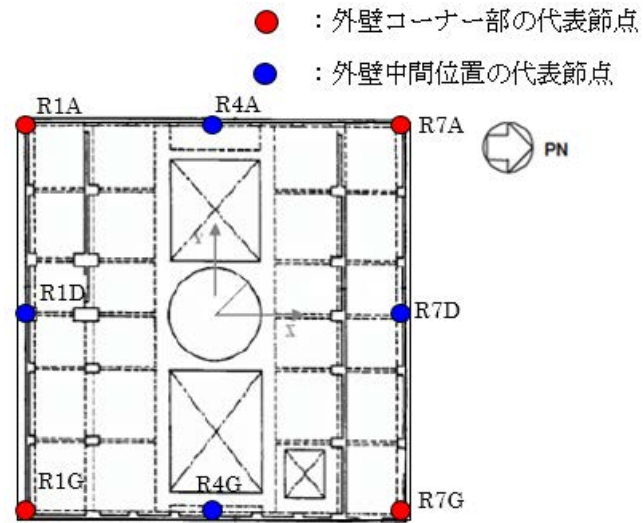


図 11-3 本解析における代表節点の位置 (4F)

12. 解析結果の妥当性確認

12.1 解析の正常終了確認

解析コードのログファイルを確認し、解析が正常に終了したことを確認した。

12.2 入力データのチェック

メッシュ図（構造図）、部材リスト、拘束図、地震動波形図、材料図等、解析データから出力できるものについては元データと比較チェックした。可能な限り数値で比較した。

構造モデルデータについては、本解析前に固有値解析を実施し、固有振動数、固有モードに異常値がないかを調べ、形状、拘束、接合条件に間違いがないことを確認した。

境界条件、入力地震動、初期状態などについては、それぞれの条件、状態を適切に図化し、間違いがないことを確認した。

12.3 解析内容の照査

計算処理情報、計算のエラー、計算時間に問題がないことを確認したうえで、解析内容については、次のような項目について確認した。

- ・ 加速度・変形、変位分布と荷重の対応
- ・ 加速度・変位、応力と簡便計算値や理論解との比率
- ・ 加速度・変位の正負、対称性、過大・過小
- ・ 加速度・応力と変位のバランス
- ・ 加速度・変位、応力分布の傾向
- ・ 引張・圧縮の発生場所
- ・ 剛体移動防止位置の反力
- ・ 拘束位置の反力、荷重との整合性
- ・ 接合部のひずみ、応力分布
- ・ 応力と降伏強度

12.4 解析結果の妥当性確認

観測記録との比較により解析結果の妥当性を確認した。

12.4.1 観測位置における時刻歴加速度波形

観測位置（B3F、3F）における観測記録と解析結果の加速度時刻歴波形の比較図を図 12-1～図 12-6 に示す。

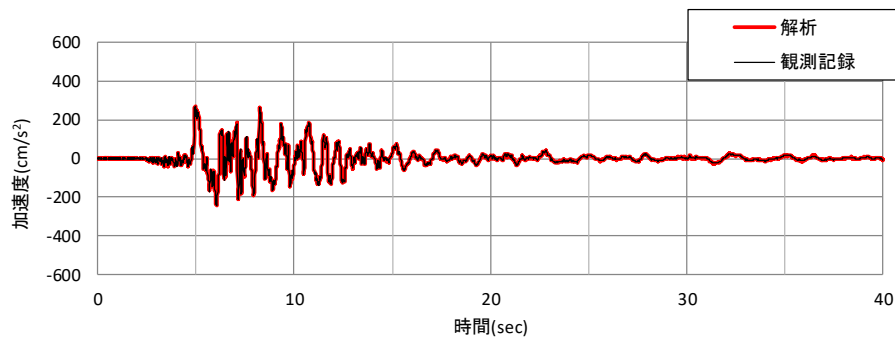


図 12-1 加速度時刻歴波形（基礎上（B3F）、NS 方向）

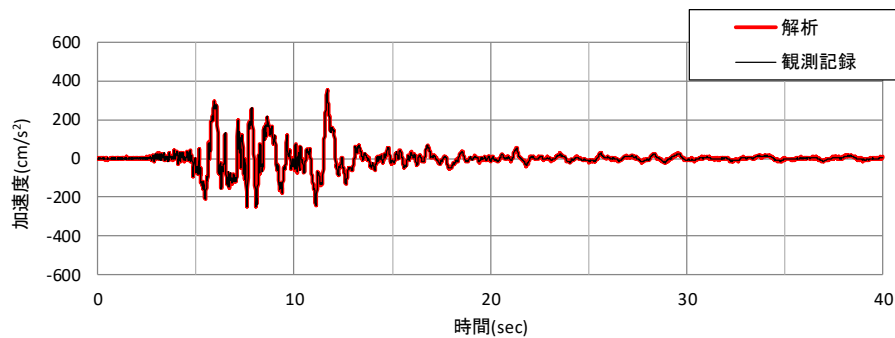


図 12-2 加速度時刻歴波形（基礎上（B3F）、EW 方向）

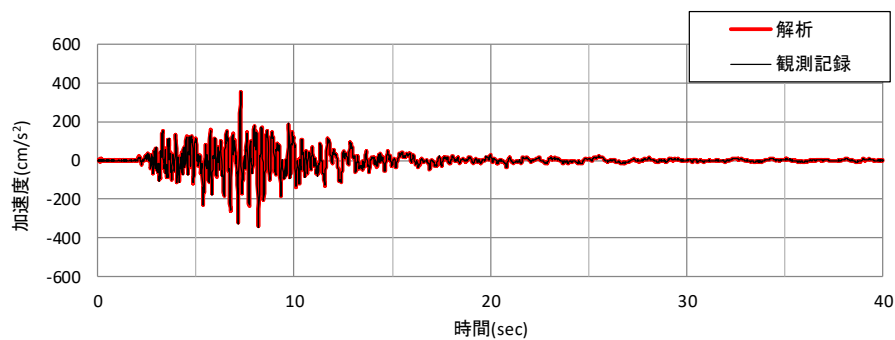


図 12-3 加速度時刻歴波形（基礎上（B3F）、UD 方向）

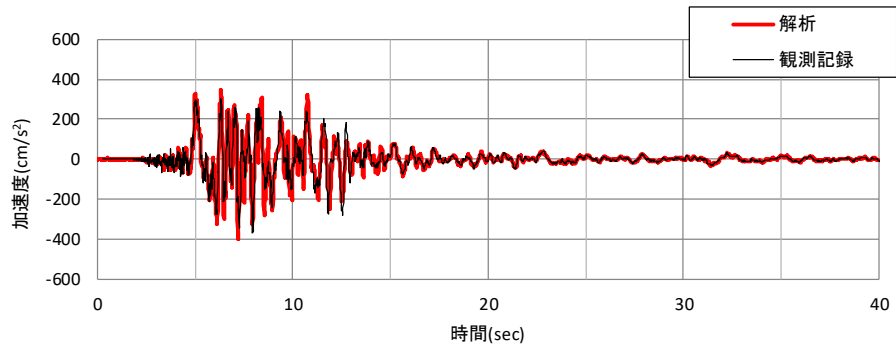


図 12-4 加速度時刻歴波形（3F、NS 方向）

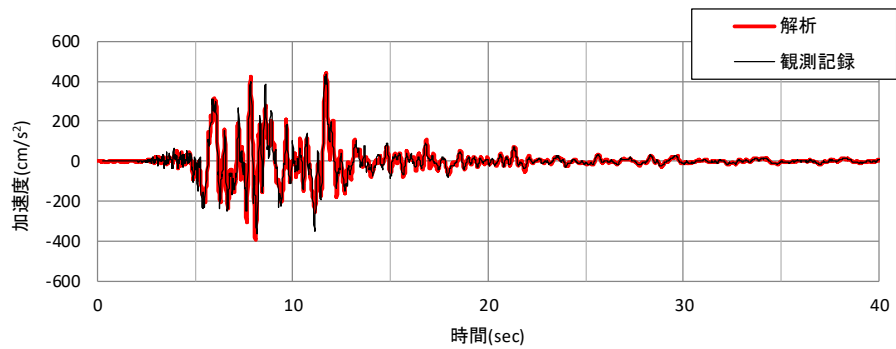


図 12-5 加速度時刻歴波形（3F、EW 方向）

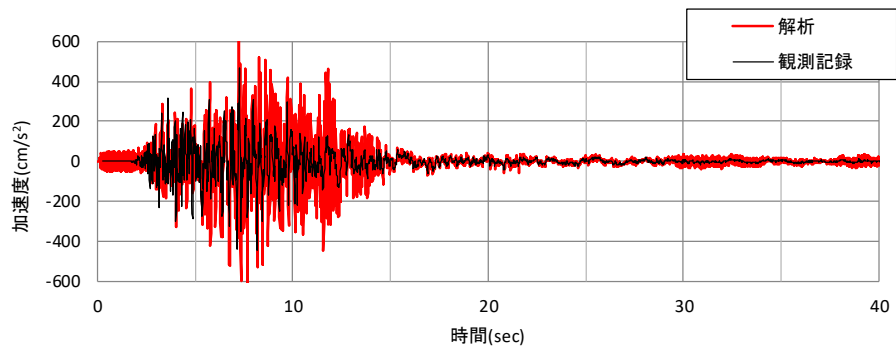
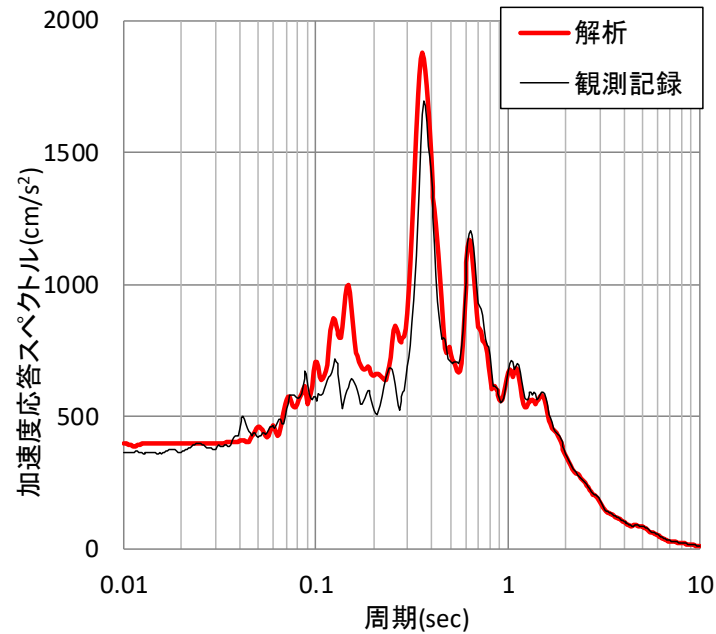


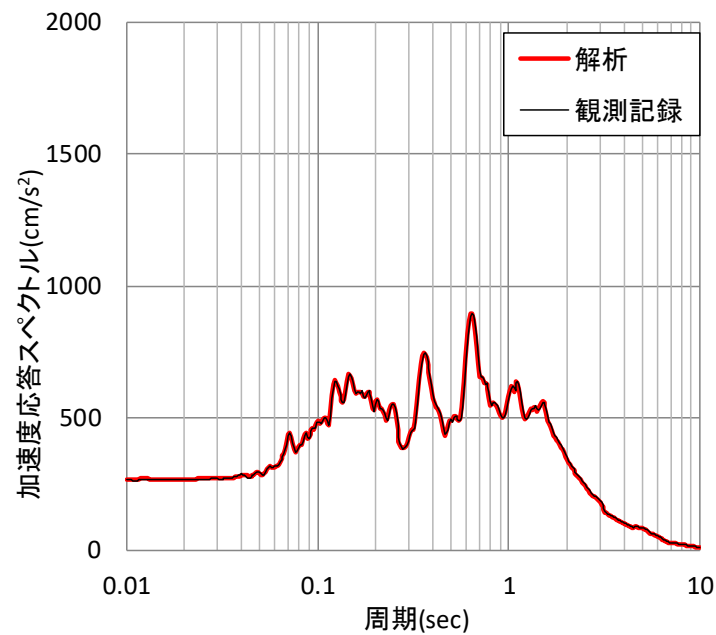
図 12-6 加速度時刻歴波形（3F、UD 方向）

12.4.2 観測位置（B3F、3F）における加速度応答スペクトル（ $h=5.0\%$ ）

観測位置（B3F、3F）における観測記録と解析結果の加速度応答スペクトル（ $h=5.0\%$ ）の比較図を図 12-7～図 12-9 に示す。

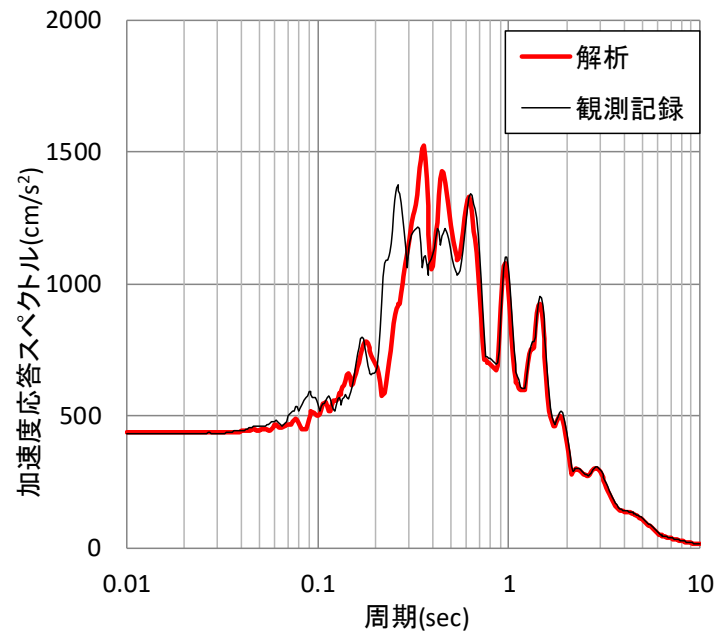


(a) 3F

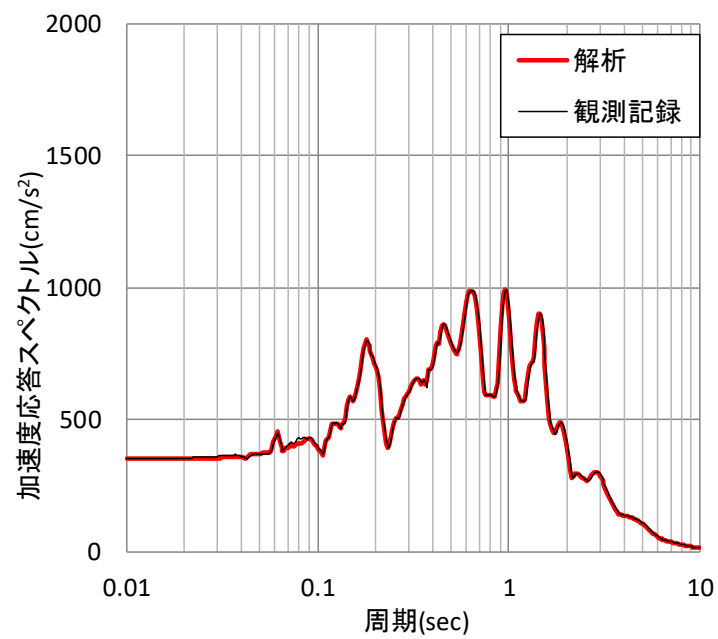


(b) 基 礎 上（B3F）

図 12-7 加速度応答スペクトル（ $h = 5\%$ ）（NS 方向）

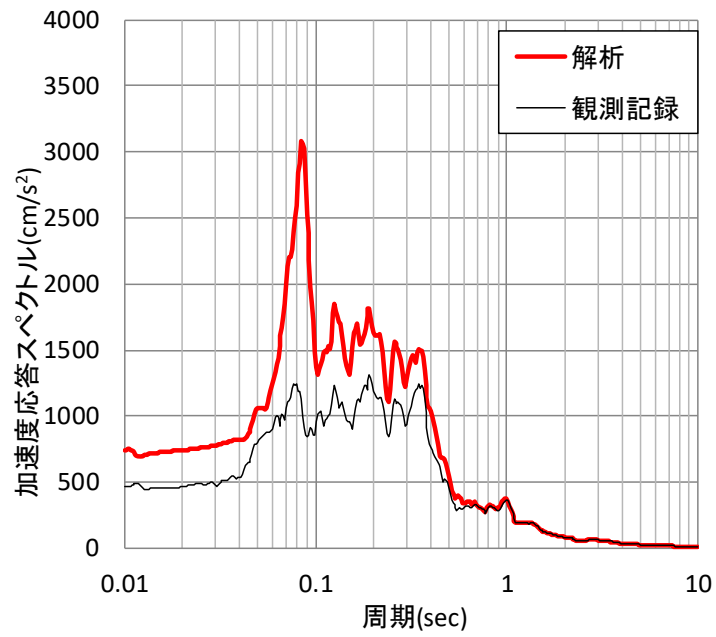


(a) 3F

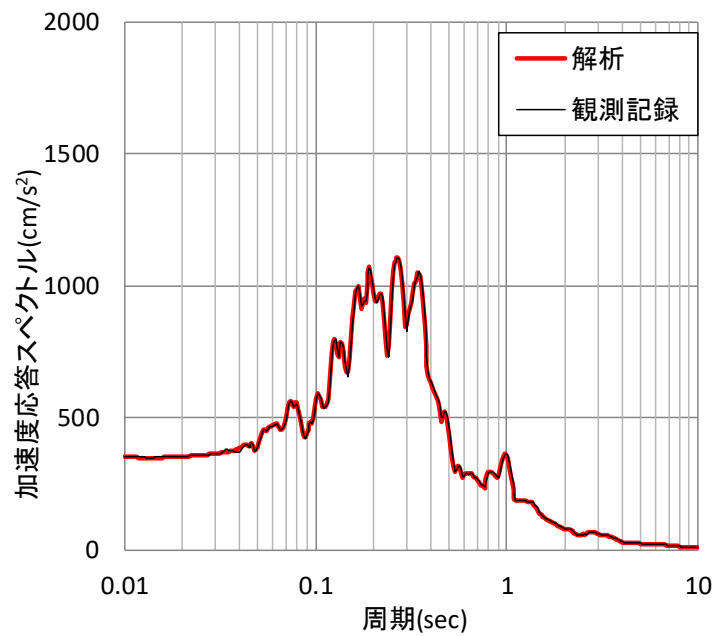


(b) 基 礎 上 (B3F)

図 12-8 加速度応答スペクトル ($h = 5\%$) (EW 方向)



(a) 3F



(b) 基 礎 上 (B3F)

図 12-9 加速度応答スペクトル ($h = 5\%$) (UD 方向)

13. 文書化

柏崎刈羽原子力発電所の原子炉建屋の観測記録の再現解析の実施プロセスを文書化し、適合性及び対応状況が追跡できるようにした。

参考文献

- 1 ITOCHU Techno-Solutions Corporation, FINAS/STAR Version2015r170210, User Manual, Tokyo, Japan, 2017.
- 2 IAEA, Review of Seismic Evaluation Methodologies for Nuclear Power Plants Base on a Benchmark Exercise, IAEA-TECDOC-1722, 2013.
- 3 土方勝一郎他, 新潟県中越沖地震における地盤非線形に着目した柏崎刈羽原子力発電所 7 号機原子炉建屋の応答性状, 日本建築学会構造系論文集, Vol.76, No.660, 2011, pp.319-327.

