

3次元 FEM モデルを用いた非線形地震応答解析における 減衰モデルの検討

(株)四国総合研究所 土木技術部 西内 佑太
(株)四国総合研究所 土木技術部 増田 博雄
四国電力(株) 土木建築部 日根居亮佑
四国電力(株) 土木建築部 坂本 潤哉

キーワード : Rayleigh 減衰
拡張 Rayleigh 減衰
因果的履歴減衰
非線形解析
時刻歴応答解析
3次元 FEM モデル

Key Words : Rayleigh Damping
Extended Rayleigh Damping
Causal Hysteretic Damping
Nonlinear Analysis
Time History Response Analysis
3D FEM Model

Study of Damping Models with 3D FEM Model in Nonlinear Seismic Response Analysis

Shikoku Research Institute, Inc., Civil Engineering Department

Yuta Nishiuchi, Hirotaka Masuda

Shikoku Electric Power Co., Inc., Civil & Architectural Engineering Department

Ryosuke Hinei, Jyunya Sakamoto

Abstract

The Rayleigh damping model is often used in nonlinear seismic response analysis with 3D FEM models for nuclear power plants. The Rayleigh damping has the problem that the damping ratio depends on frequency. In the recent study, extended Rayleigh damping was suggested as a model with low dependency of the damping ratio on frequency over a wide range of frequencies. However, extended Rayleigh damping has never been used in actual building model. In this paper, comparative study of these damping models is conducted using a 3D FEM model of an actual nuclear power plant building in nonlinear seismic response analysis.

1. はじめに

四国電力グループの建築部門では、近年の研究において、鉄筋コンクリートの材料構成則や基礎底面の浮上りに非線形特性を考慮した原子力建屋の3次元 FEM モデルを用いた地震応答解析を実施している。

3次元 FEM モデルは数万程度の膨大な節点を有しているため、解析に多くの計算時間を要する。また、振動特性としては、構造全体が変形するモードだけでなく、床や壁などの局所的な変形モードも含まれるため、多数の固有モードが存在する。一方、従来の質点系モデルでは、節点数が数十～数百程度であるため、全モードで一定の減衰比が考慮できるひずみエネルギー比例型減衰（以下「モード減衰」という。）が設定されている。しかしながら前述の通り、3次元 FEM モデルにモード減衰を導入することは、計算負荷の観点から困難であるため、一般的には Rayleigh 減衰が使用される。Rayleigh 減衰は、減衰比が振動数に依存する課題があり、図 1 に示すように基準振動数 $f_1 \sim f_2$ 間の振動数の減衰比は過小に評価され、建屋に生じる応答が大きくなる傾向にある。これらの課題を解決するため、近年、中村¹⁾によって提案された因果性に基づく減衰モデル（因果的履歴減衰及び拡張 Rayleigh 減衰）（図 2）では、幅広い振動数において一定の減衰比で評価でき、計算負荷も従来の Rayleigh 減衰とほぼ同程度とされている。また、太田²⁾は、実規模モデルを想定した仮想の原子力発電所の FEM モデルを用いて、この減衰モデルが、図 3 のように減衰比を一定で計算できるモード減衰の結果と同程度で、高速に計算可能であることを示し、さらに、コンクリート非線形モデルに対しても適用可能と示しているが、実機適用には至っていない。

本報では、鉄筋コンクリートの材料構成則や基礎底面の浮上りに非線形特性を考慮した原子力建屋の3次元 FEM モデルに対して、3方向の地震動を同時入力する地震応答解析において、新たな試みとして拡張 Rayleigh 減衰を実機モデルに適用し、従来の減衰モデルと比較検討を行い、適用性を検証した。

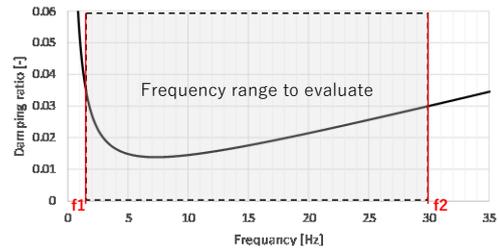
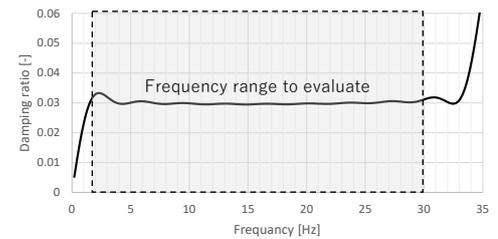
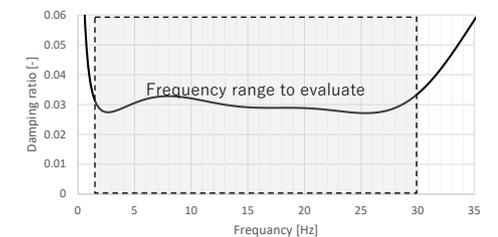


図 1 Rayleigh 減衰(二点間の振動数が広い例)

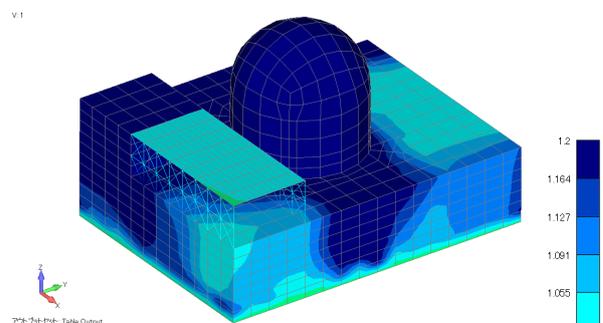


(a) 因果的履歴減衰

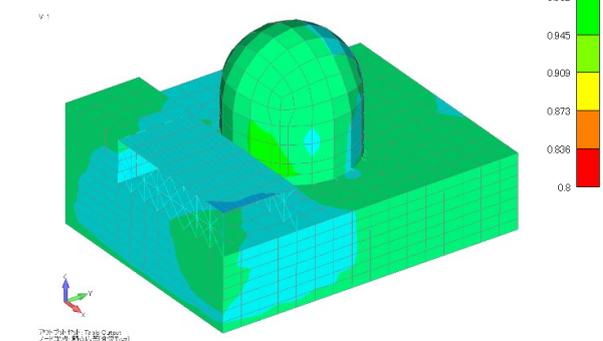


(b) 拡張 Rayleigh 減衰

図 2 因果性に基づく減衰モデル



(a) Rayleigh 減衰



(b) 拡張 Rayleigh 減衰

※モード減衰の合成加速度に対する比を取っており 1.0 (緑) であるほど精度が良いことを示している

図 3 Rayleigh 減衰と拡張 Rayleigh 減衰の比較²⁾

2. 解析モデルの概要

2.1 モデル化の基本事項

地震応答解析モデルを図 4 に示す。解析モデルは、原子炉格納容器 (C/V)、外周コンクリート壁 (O/S)、内部コンクリート (I/C)、原子炉周辺補機棟 (RE/B)、燃料取扱棟 (FH/B)、基礎及び地盤を一体化したモデルとし、建屋の耐震壁及び床を積層シェル要素、鉄骨部を梁要素、基礎をソリッド要素、基礎底面の地盤をソリッド要素とした。コンクリート及び鉄筋の物性値を表 1 に、地盤の物性値を表 2 に示す。解析コードは、3 方向の地震動を同時入力することを踏まえ、コンクリートの多方向ひび割れが実装されている TDAPⅢ とした。

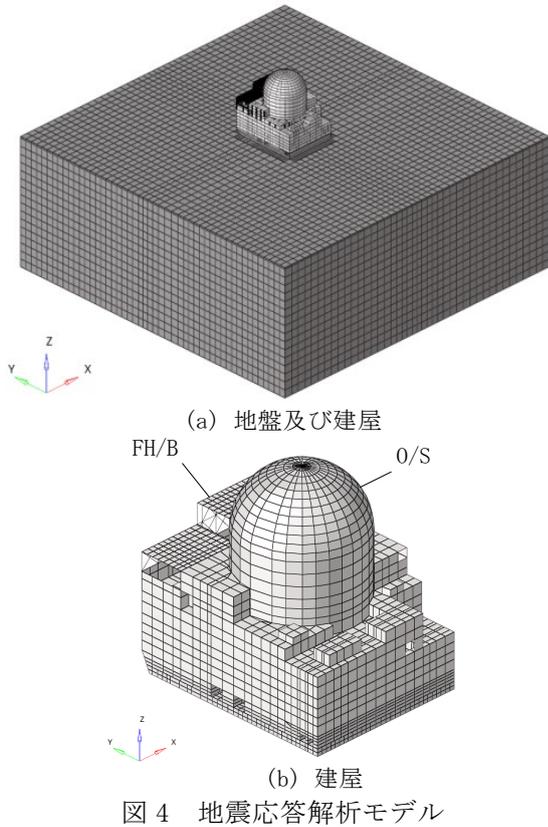


図 4 地震応答解析モデル

表 1 コンクリート及び鉄筋の物性値

材料	ヤング係数 (kN/m ²)	せん断弾性係数 (kN/m ²)	ポアソン比
コンクリート	2.61×10 ⁷	1.09×10 ⁷	0.20
鉄筋	2.05×10 ⁸	7.88×10 ⁷	0.30

表 2 地盤の物性値

V _s (m/s)	ヤング係数 (kN/m ²)	せん断弾性係数 (kN/m ²)	ポアソン比	質量密度 (ton/m ³)
2587	5.38×10 ⁷	2.01×10 ⁷	0.34	3.0

2.2 材料構成則

鉄筋コンクリートの材料構成則には、TDAPⅢ³⁾ で実装されている材料構成則を用いた。コンクリート及び鉄筋の材料構成則を図 5 に示す。コンクリートの材料構成則は、長沼モデル⁴⁾ をもとに設定されており、非直交固定ひび割れモデル (直交 2 方向×2 組の 4 方向ひび割れモデル) が考慮されている。破壊基準は、Kupfer-Gerstle の提案式である。また、圧縮特性としてひび割れ後の圧縮低減を、引張特性として圧縮損傷による引張強度低減を考慮しているとともに、ひび割れ後のせん断伝達特性についても考慮している。鉄筋の材料構成則は、修正 Menegotto-Pinto モデルをもとに設定されている。用いたモデルは、実験の再現解析で検証⁵⁾ されている。

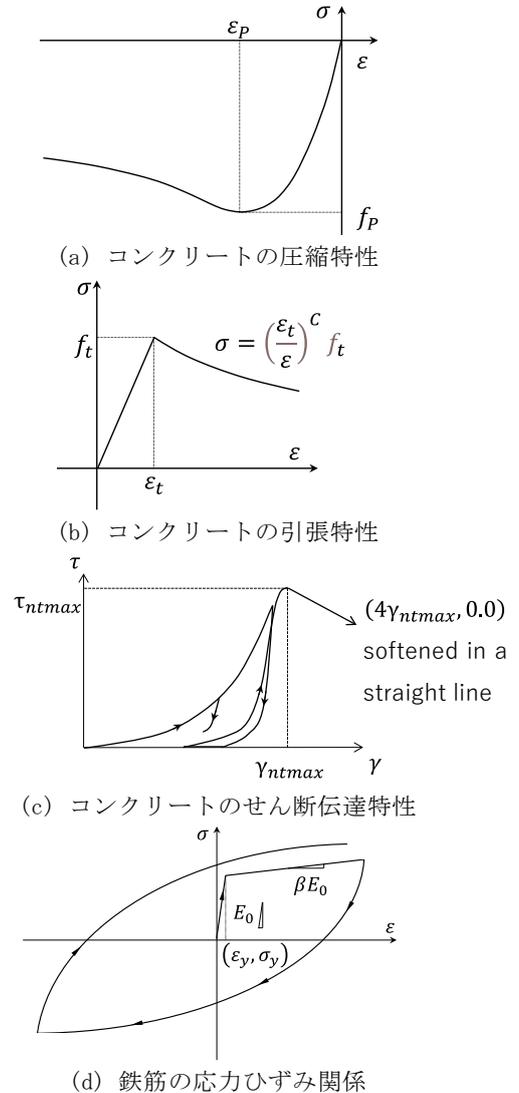
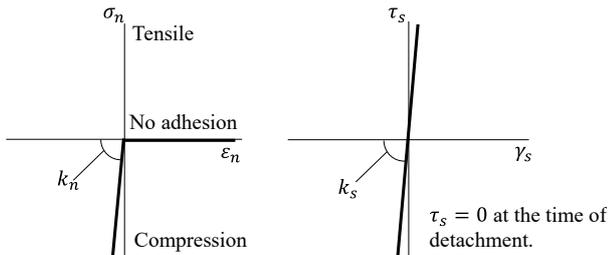


図 5 コンクリート及び鉄筋の材料構成則

2.3 基礎浮上り非線形

基礎底面と地盤との間には、図 6 に示す非線形特性を考慮したジョイント要素を設ける。垂直方向は基本的な浮き上がり現象を把握するために付着力は 0 とし、せん断方向は底面の粘着力を大きくすることで滑動現象が生じない設定とした。

また、解析の精度と安定性を考慮し、ジョイント要素の剛性と減衰を設定⁶⁾している。



(a) 垂直方向の特性 (b) せん断方向の特性 (接触時)
図 6 ジョイント要素の非線形特性

2.4 建屋の減衰

建屋の減衰は、表 3 に示す 4 ケースの解析を行った。目標 (精解) とする減衰モデルは、文献²⁾によりモード減衰とほぼ等価な結果 (図 3) が得られている拡張 Rayleigh 減衰とした。各ケース共通として、減衰比は、鉄筋コンクリート造 (RC 造) は 3%、鉄骨造 (S 造) は 2% とする。また、減衰マトリクス of 剛性項は、瞬間剛性比例型とする。

評価する振動数帯については、低次側は O/S の一次モード振動数の 1.6 [Hz] 程度と FH/B の一次モード振動数の 5.3 [Hz] 程度とし、高次側では、累積の有効質量比と機器評価で考慮すべき振動数 30.0 [Hz] 程度とした。

表 3 減衰モデルの解析ケース

ケース名	減衰モデル	設定する振動数
ERay	拡張 Rayleigh 減衰	ALL: flim=35.0 [Hz]
Ray0	要素別 Rayleigh 減衰	Gr1: f1=5.25 [Hz], f2=30.0 [Hz] Gr2: f1=1.61 [Hz], f2=30.0 [Hz]
Ray1	全体 Rayleigh 減衰	ALL: f1=5.25 [Hz], f2=30.0 [Hz]
Ray2	全体 Rayleigh 減衰	ALL: f1=1.61 [Hz], f2=30.0 [Hz]

(1) 拡張 Rayleigh 減衰

拡張 Rayleigh 減衰については、減衰比が一定と

みなせる範囲で、誤差を極力抑えた (5%程度) 高精度版と、誤差はある程度許容 (10%程度) しつつ一定の範囲を広げた中精度版が提案⁷⁾されている。今回の検討では、減衰比が一定となる振動数の範囲を広く設定したいため、中精度版を採用することとした。中精度版の減衰モデルで設定する振動数としては、0.04flim~0.86flim 程度が一定の減衰比 (10%程度の誤差を許容) で提案⁷⁾されていることから、35.0 [Hz] (1.4Hz~30.1Hz 程度が一定) とした (図 7)。

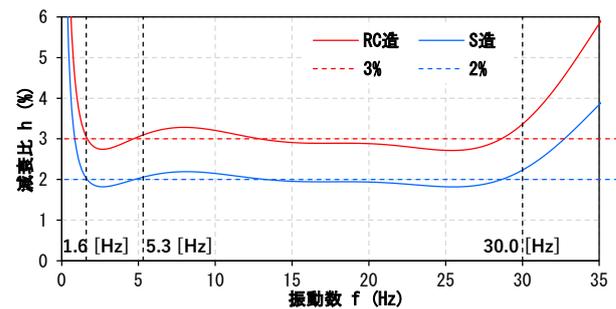
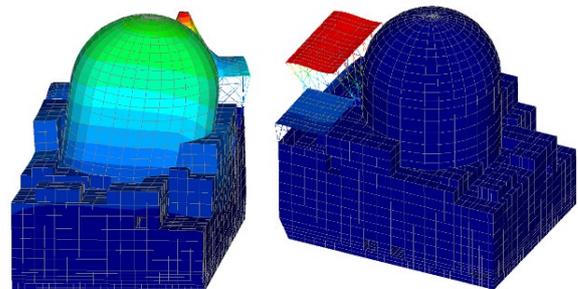


図 7 拡張 Rayleigh 減衰 [ERay]

(2) 要素別 Rayleigh 減衰

本報では、3 方向の地震動を同時入力することとしており、図 8 に示すように鉄筋コンクリート造 (RC 造) と鉄骨造 (S 造) では一次モードの特徴が異なることから、RC 造である O/S、RE/B 及び I/C のグループ (Gr. 1) と、S 造である FH/B のグループ (Gr. 2) に分けた要素別 Rayleigh 減衰を設定する。Rayleigh 減衰に与える基準振動数 (f1 及び f2) は、Gr. 1 では、f1 は最も低次モードである O/S の一次モードである 5.25 [Hz] とし、f2 は 30 [Hz] とした。Gr. 2 では、f1 は FH/B の一次モードである 1.61 [Hz] とし、f2 は 30 [Hz] とした。設定した要素別 Rayleigh 減衰を図 9 に示す。



(左) O/S 一次モード (5.3 [Hz] 程度)
(右) FH/B 一次モード (1.6 [Hz] 程度)

図 8 固有値解析結果の一例

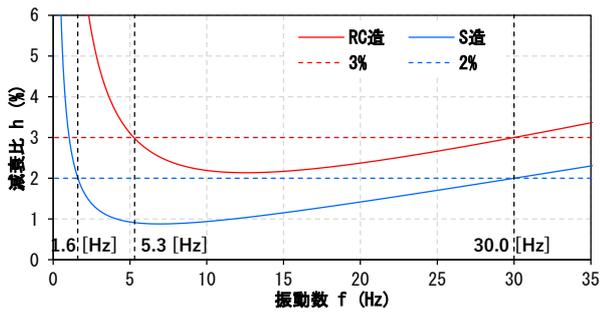


図9 要素別 Rayleigh 減衰 [Ray0]

(3) 全体 Rayleigh 減衰

モデル全体に同一の振動数で与えて設定し、Ray1 の f1 は 0/S の一次モードである 5.25 [Hz] とする。FH/B の部分で危険側の設定である。Ray2 の f1 は FH/B の一次モードである 1.61 [Hz] とする。これは最も保守的な設定である。また f2 は要素別 Rayleigh 減衰と同様に 30 [Hz] とした。それぞれの設定した Rayleigh 減衰を図 10、図 11 に示す。

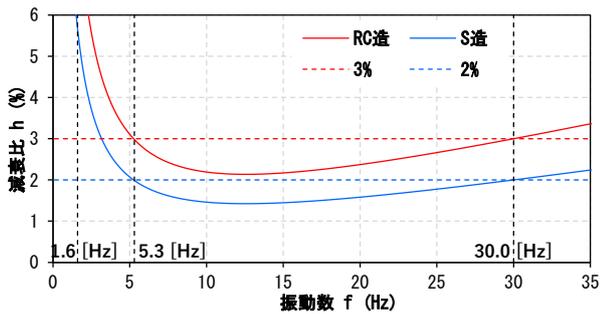


図10 全体 Rayleigh 減衰 [Ray1]

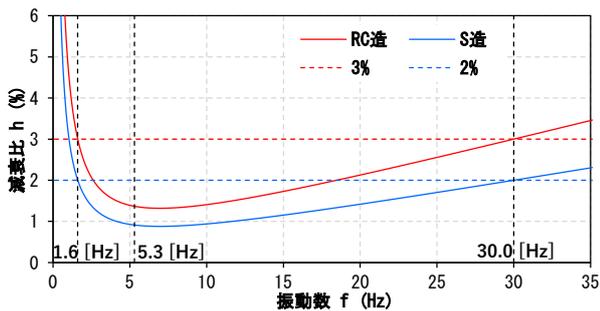


図11 全体 Rayleigh 減衰 [Ray2]

3. 解析条件の概要

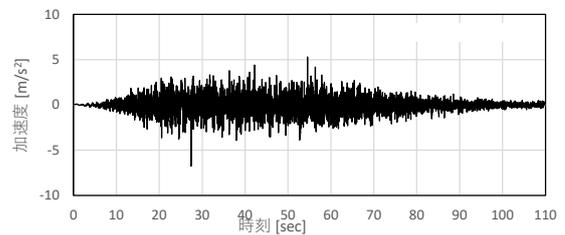
3.1 地震応答解析方法

2章で構築した建屋と地盤を一体化し非線形特性を考慮した解析モデルを用いて、時刻歴応答解析を実施する。数値積分法は、Newmark- β 法 ($\beta = 0.25$, $\gamma = 0.5$) とする。

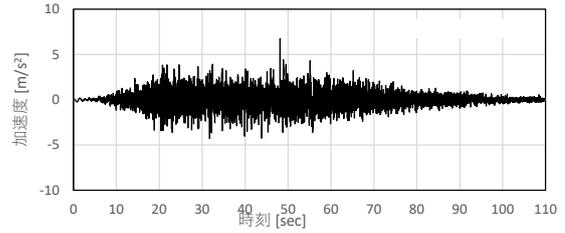
3.2 入力地震動

入力地震動は、水平方向入力用に 2 波（水平 1 及び水平 2）、鉛直方向入力用に 1 波（鉛直）を作成することとし、3 方向の地震動を同時入力することを踏まえ、それぞれの地震動の位相が異なるように設定した。

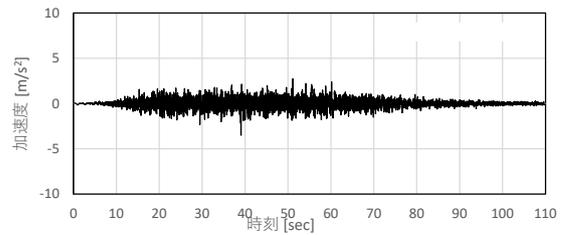
地震動は、地盤モデルの底面位置に入力することとし、建屋基礎底面位置の応答が図 12 に示す地震動の加速度応答スペクトルと概ね一致するように補正した地震動とした。図 12 に示す基礎底面位置における地震動の最大加速度は、水平 1 と水平 2 で $6.8 [m/s^2]$ 及び鉛直で $3.5 [m/s^2]$ である。



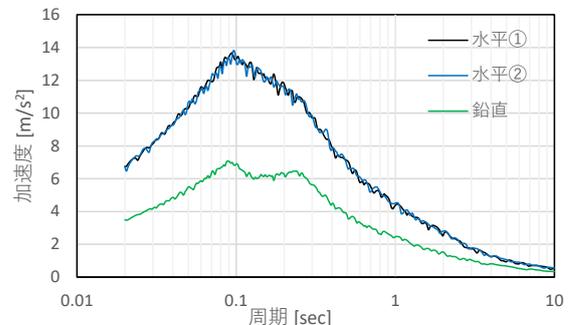
(a) 水平 1



(b) 水平 2



(c) 鉛直



(d) 加速度応答スペクトル

図 12 基礎底面位置における地震動

4. 解析結果

解析結果の考察に当たっては、2.4 節に示した通り、モード減衰とほぼ等価な結果が得られている拡張 Rayleigh 減衰 (ERay) を目標 (精解) とするモデルとし、主に結果に差が見られた O/S の部分と FH/B の部分に着目して結果を分析する。なお、拡張 Rayleigh 減衰を実機モデルに適用する解析は著者の知る限り初めての試みであったが、以降に示すように妥当な解析結果が得られた。

4.1 接地率

接地率を図 13 に示す。いずれの減衰モデルにおいても大きな差異はなかったが、最も接地率が低い Ray2 (最も保守的な減衰) では、接地率が 100% を下回る時間帯が、他のケースに比べると多い傾向であった。

4.2 合成変位の最大値分布

合成変位の最大値分布を図 14 に示す。ERay (目標とする減衰) と Ray0 はほぼ同じような分布であることが確認できる。Ray1 (FH/B が危険側になる減衰) については、O/S 部については ERay と同じような分布であるが、FH/B については減衰比が大きくなるため、応答が小さくなっている。Ray2 については、O/S 部の頂部応答が大きくなっていることが確認できる。

4.3 合成加速度の最大値分布

合成加速度の最大値分布を図 15 に示す。ERay と Ray0 については、O/S の部分はほぼ同じような傾向であるが、FH/B の部分では Ray0 の方が大きい傾向となった。これは FH/B の減衰設定 (1.6Hz から 30Hz の間は減衰比が小さくなる) が、ERay に比べ保守的な設定であるためである。Ray1 については、ERay と同じような傾向であった。この合成加速度は、FH/B の X 方向の一次モード (7.0Hz 付近に存在) の影響が支配的であるため、合成変位とは異なり Ray1 の応答値が大きくなった。Ray2 については、全体的に応答が大きくなっている。

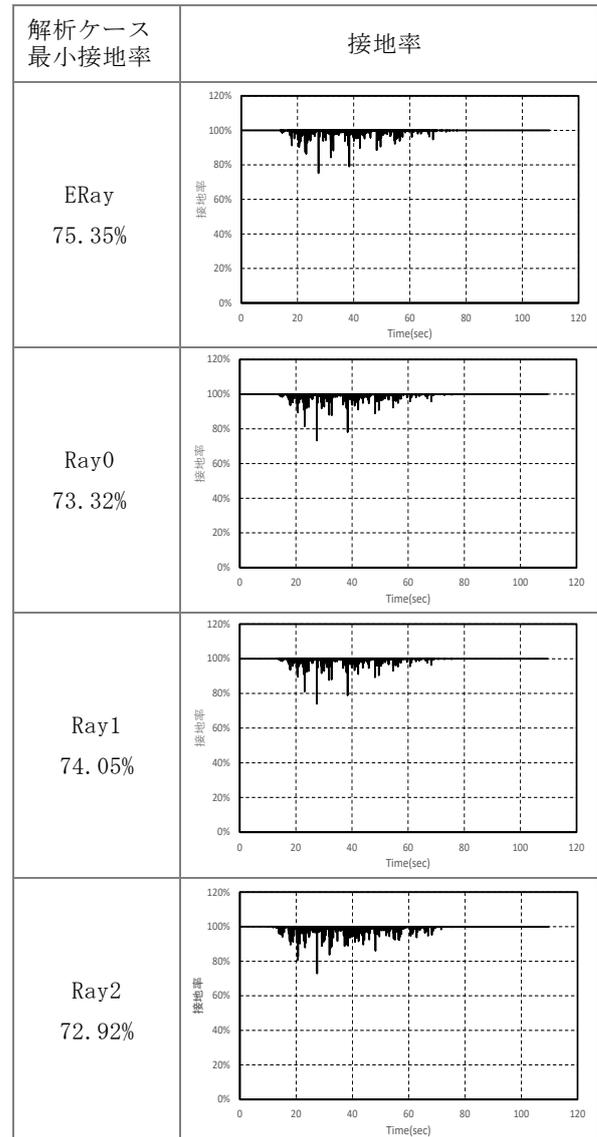
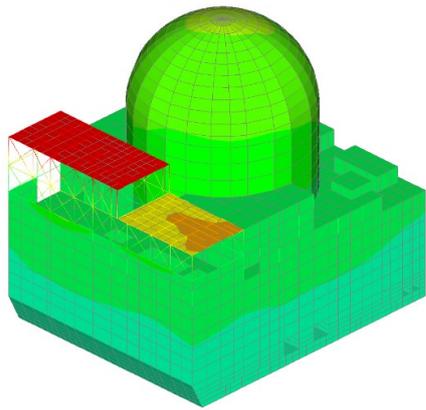
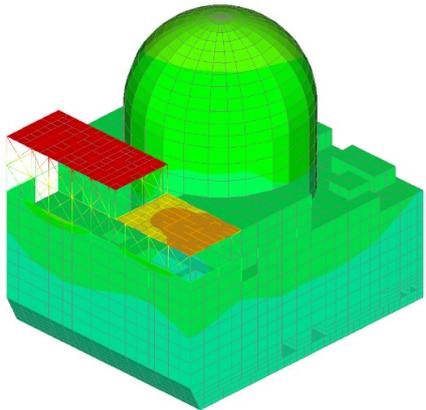


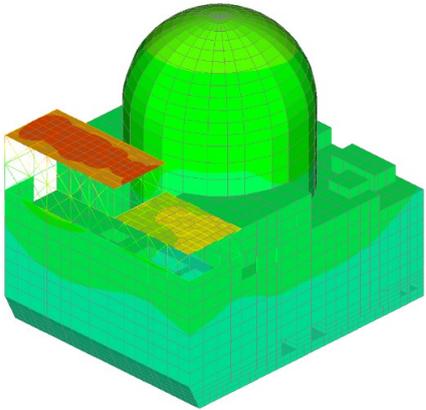
図 13 接地率



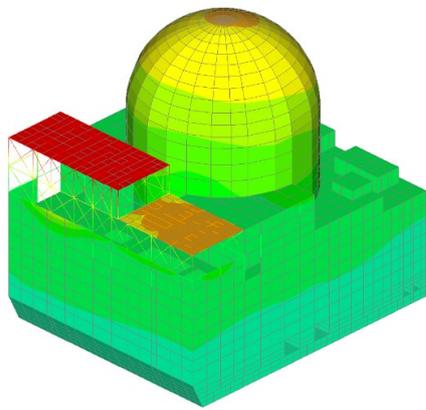
(ERay)



(Ray0)



(Ray1)



(Ray2)

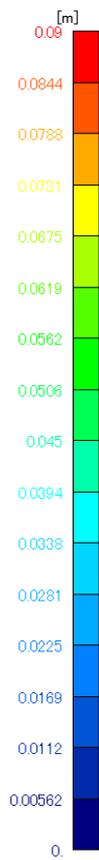
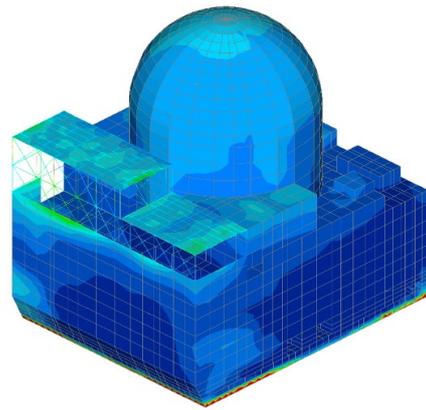
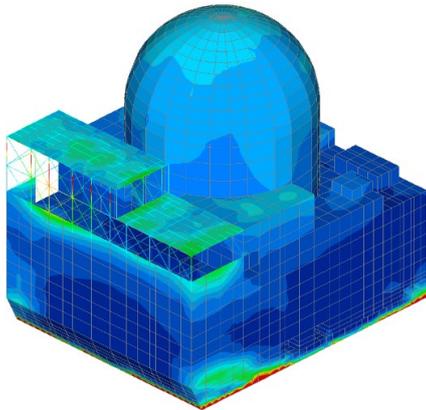


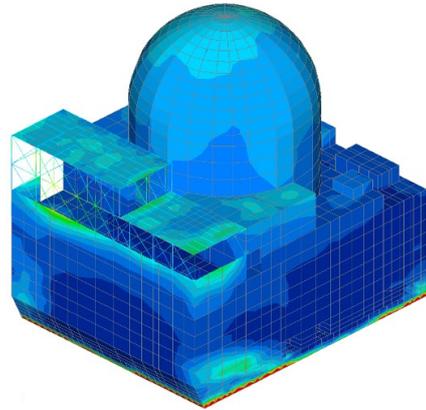
図 14 合成変位の最大値分布



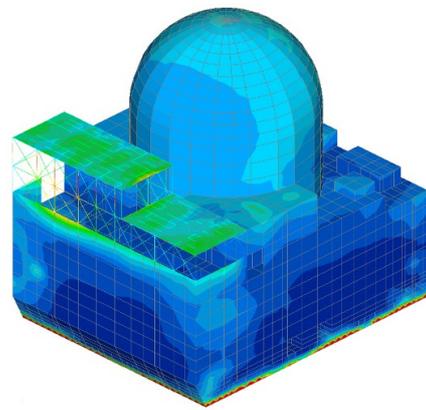
(ERay)



(Ray0)



(Ray1)



(Ray2)

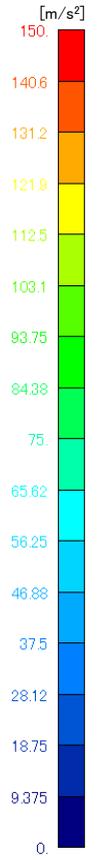
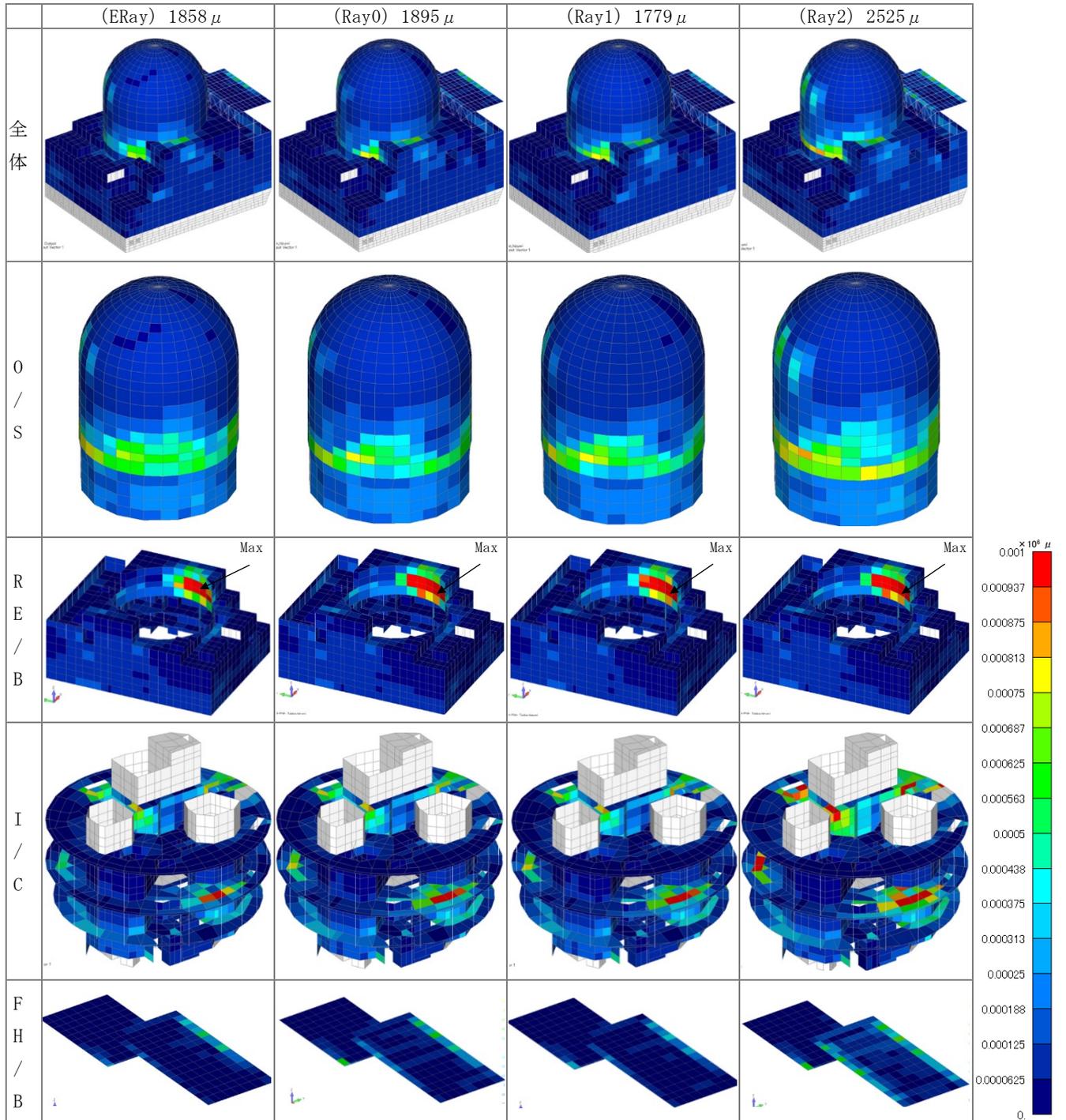


図 15 合成加速度の最大値分布

4.4 鉄筋の最大軸ひずみ分布

鉄筋の軸ひずみの最大値分布を図 16 に示す。
ERay と Ray0 についてはほぼ同じような分布であ

ることが確認できる。Ray1 も ERay と同じような
結果であるが、Ray2 についてはひずみの値も大き
く生じている。



※先頭行は解析ケースと最大値を示す
図 16 鉄筋の最大軸ひずみ分布

4.5 加速度応答スペクトル

加速度応答スペクトルの結果を図 17 に示す。加速度応答スペクトルの結果も概ね減衰比と関係しており、減衰比が同程度となる振動数では同じような応答となっており、1.6Hz～5.3Hz の範囲の応答では、Ray2 > Ray0 > ERay > Ray1 で、5.3Hz

～30Hz の範囲では、Ray2 > Ray0 > Ray1 > ERay となるような傾向である。ただし、前述の傾向と相違している O/S (Node:2241415) の Y 方向及び FH/B (Node:2222232) の Z 方向について、以降で分析した。

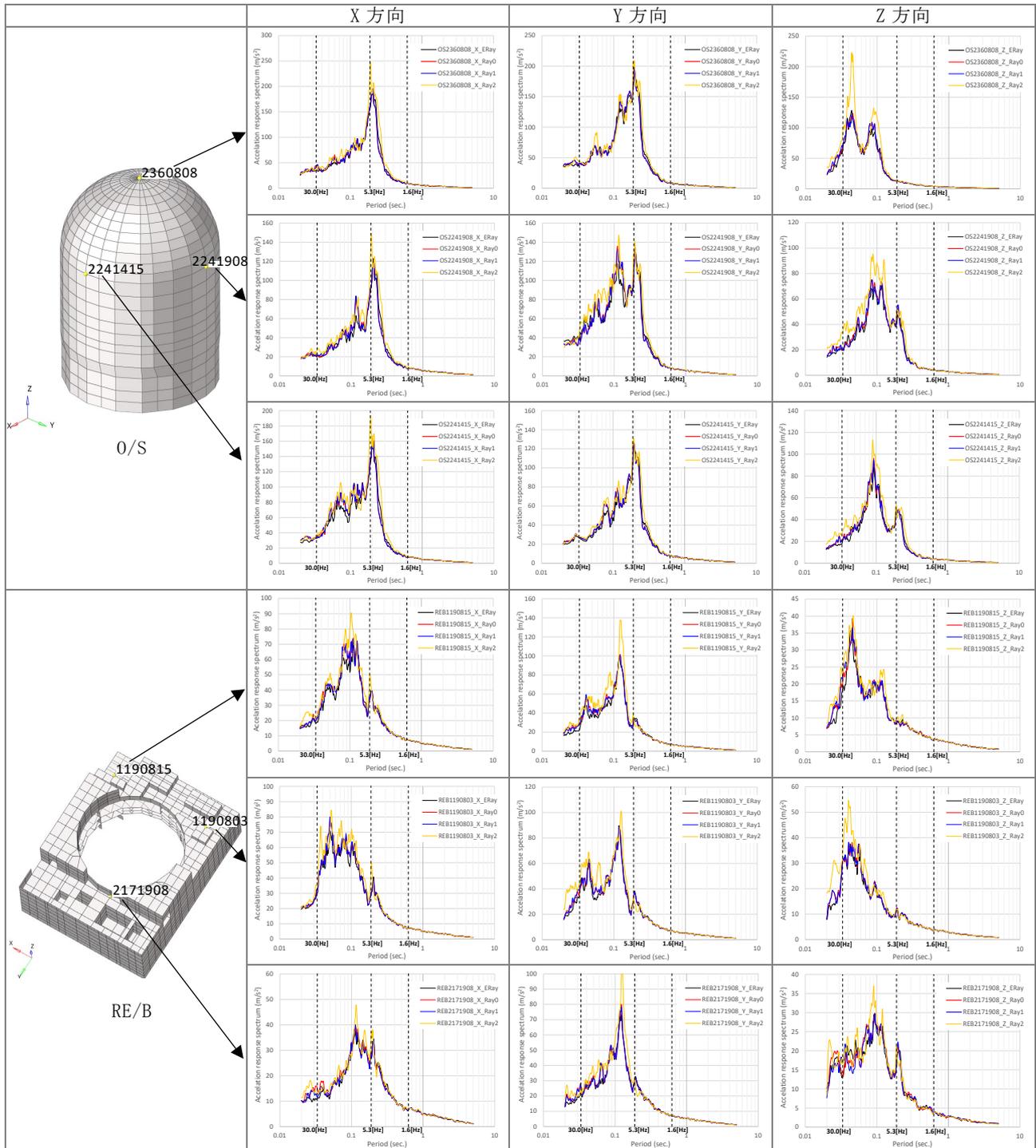


図 17 加速度応答スペクトル (1/2)

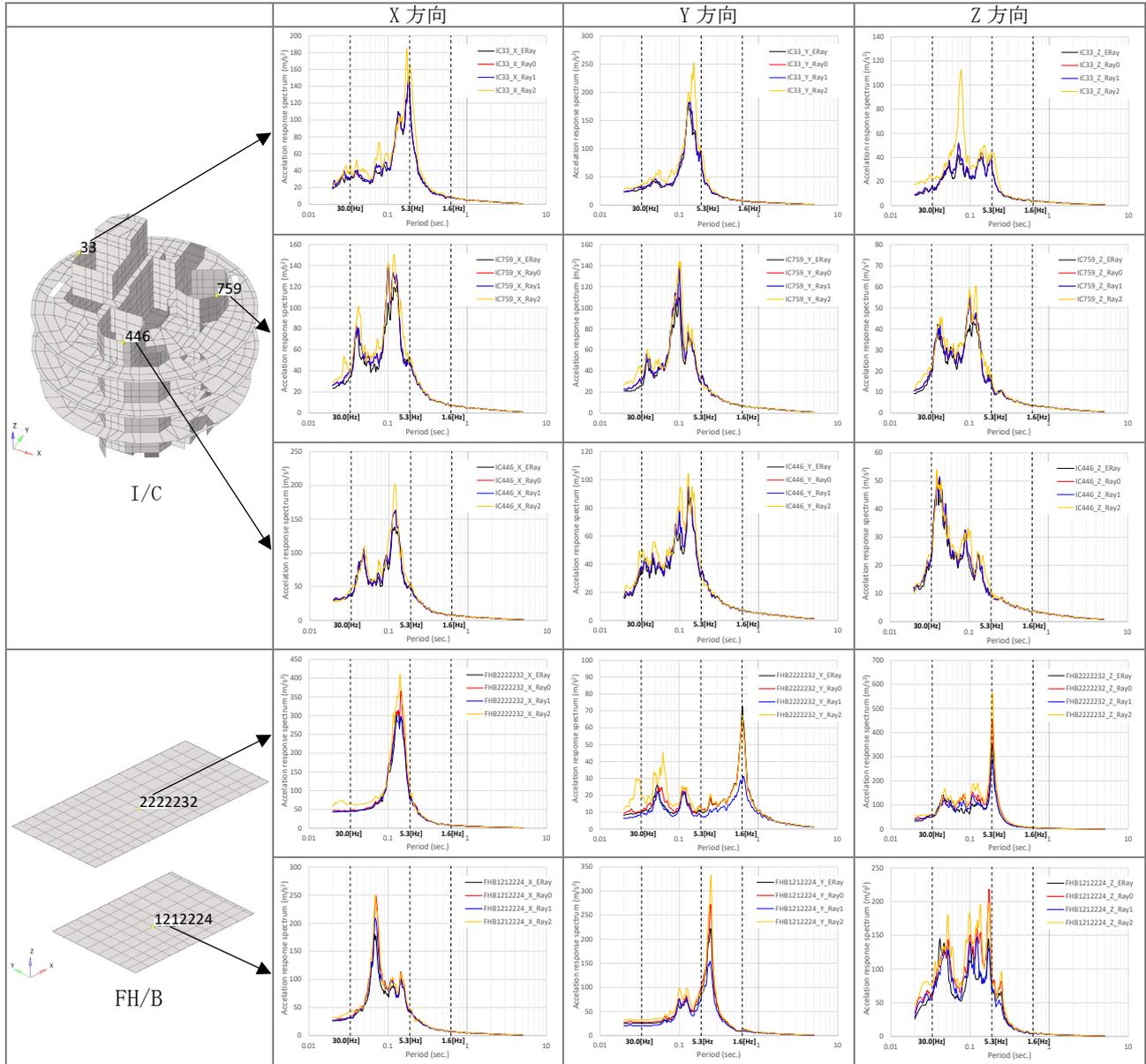
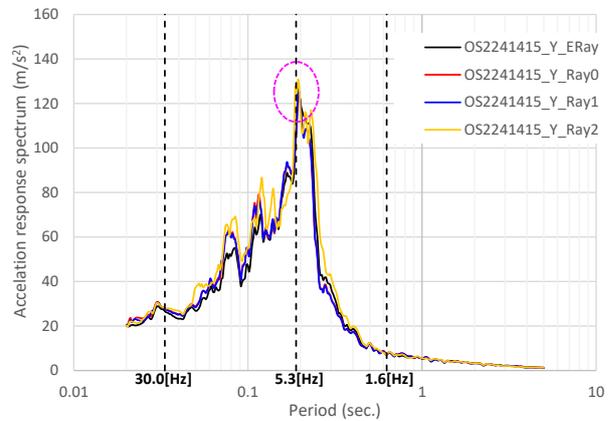


図 17 加速度応答スペクトル (2/2)

(1) O/S 部分

Node:2241415 で Y 方向の応答に着目すると (図 18), 5.3Hz 付近の応答について Ray2 の応答が他の減衰モデルの結果と同じような値となっているが, 減衰比の関係のみ考えれば応答が大きくなることが予測される。O/S 部脚部のひずみ分布を確認すると, Ray2 は他の減衰モデルに比べて大きくなっており非線形化が進んでいる。部材が損傷し, ピーク位置が長周期側 (右) にシフトするとともに, 履歴による減衰効果が生じ応答が同程度になったものと考えられる。

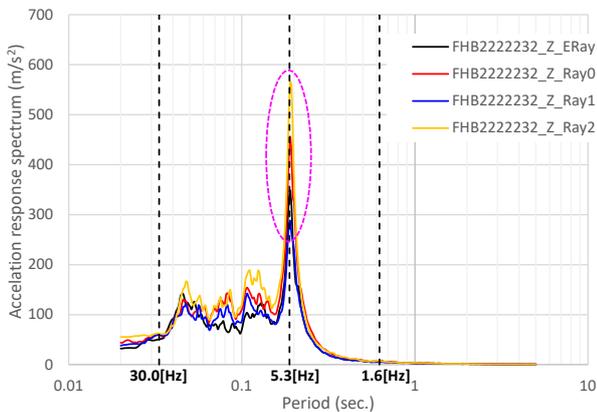


(Node:2241415, Y 方向, O/S)

図 18 加速度応答スペクトル (再掲)

(2) FH/B 部分

Node:2222232 で Z 方向の応答に着目した (図 19)。これも 5.3Hz 付近 (正確には若干低次側で 5.15 Hz) の応答であるが、特に Ray0 と Ray2 について応答の差が生じている。FH/B 部分の減衰については両モデルに違いは無いが、RE/B 部分については Ray0 に比べ Ray2 では減衰比が小さくなるため、応答に違いが生じたものと考えられる。もし分析通りであれば連成による影響と言えるが、この応答のように顕著に確認できる場合や、できない場合 (例えば Y 方向の一次モード) もある。また、ERay と Ray1 について差があるが、この理由を明らかにすることは困難であるものの、減衰比は Ray1 の方が僅かであるが大きいのでその差が一因であるといえる。



(Node:2222232, Z 方向, FH/B)

図 19 加速度応答スペクトル (再掲)

5. まとめ

近年提案されている拡張 Rayleigh 減衰について、新たな試みとして実機モデルに適用した。解析結果から、全体 Rayleigh 減衰 (Ray1, Ray2) では、基準振動数の設定次第で応答が過小もしくは過大な結果となることが示された。要素別 Rayleigh 減衰 (Ray0) は、モード減衰とほぼ等価な拡張 Rayleigh 減衰 (ERay) と同等か、あるいは保守性のある結果であることが示されたため、妥当性を有するモデルであるといえる。

また、連成による影響が顕著に表れる場合では、むやみに Rayleigh 減衰の振動数を変えて、連成同士の方の減衰比を過大評価することは危険側の設定につながるため慎重であるべきと考えられる。そういったケースでは、拡張 Rayleigh 減衰モデル

(ERay) は、幅広い振動数において一定の減衰比で評価でき、実用性を有しかつ合理的な応答を得ることが可能であるため、将来的に期待できる減衰モデルであるといえる。

現状の許認可実績を考慮し、当面は従来の Rayleigh 減衰モデル (Ray0) を基に検討することが現実的な判断と考えられるが、必要に応じて新たな減衰モデル (ERay) による妥当性の確認を併せて検討することも有用と考えられる。

【謝辞】

本研究は、四国電力(株)土木建築部殿より委託を受け実施したもので、検討に際してご協力いただいた大成建設(株)殿はじめ関係各位に深く感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 中村尚弘:「因果的履歴減衰の実用的評価法」, 日本建築学会構造系論文集,第 70 巻,第 596 号,pp.33-39,2005.10
- 2) 太田成:「因果性に基づく減衰モデルの 3 次元有限要素モデルによる RC 非線形地震応答解析への適用に関する研究」,広島大学博士論文,2024.3
- 3) アーク情報システム:TDAPIII 理論説明書バージョン 3.15, 2024.1
- 4) 長沼ら:「鉄筋コンクリート壁体の FEM による正負繰返し及び動的解析」,日本建築学会構造系論文集,第 544 号,pp.125-132,2001.6
- 5) 太田ら:鉄筋コンクリートの壁式構造を対象とした非線形解析の精度検証,日本建築学会大会学術梗概集,構造 I, pp.209-210, 2023.9
- 6) Ito et al.:「Nonlinear Dynamic Analysis by Three-Dimensional Finite Elements Model Considering Uplift of Foundation」, SMiRT-27,Division 5,2024.3
- 7) 中村尚弘:「Rayleigh 減衰の高度化に関する研究- Rayleigh 減衰の高度化に関する研究:因果的履歴減衰モデルの付加による精度向上の試み-」,日本建築学会構造系論文集,第 79 巻,第 706 号,pp.1751-1761,2014.12