

# 論文の要旨

題目 等価線形化手法に基づく原子炉建屋の三次元 FEM 動的耐震解析法に関する研究  
(Study on Three-Dimensional FEM Dynamic Seismic Analysis Method for Nuclear Reactor Building Based on Equivalent Linearization Method)

氏名 市原 義孝

本研究では、地震時の原子炉建屋の三次元挙動評価における建屋及び内包する耐震重要設備の精度向上を目的に、基準地震動  $S_s$  を含む幅広い入力地震動レベルを対象に地盤-建物連成系の三次元 FEM モデルによる動的耐震解析法の提案に向けた基礎的な知見の蓄積を行った。さらに、地盤及び建屋の非線形性については、地盤-建物連成系の建屋が塑性化する関係を概略的かつ合理的な形で三次元 FEM モデルに組み込むことが可能な等価線形化手法に着目し、既往の試験結果、実観測記録、非線形解析結果との比較からその適用性を論じた。

本研究で得られた知見を各章ごとに以下に示す。

1 章では、本研究の概要として、研究の背景、研究の目的及び本論文の構成を示した。また、原子炉建屋の動的耐震解析手法としてこれまでの設計体系の変遷を示すとともに、国内外の規基準の比較から、基準地震動  $S_s$  を含む幅広い入力地震動に対して等価線形化手法による三次元 FEM 地盤-建物相互作用解析が有効になり得る可能性を述べた。

2 章では、等価線形化手法に基づく原子炉建屋の三次元 FEM 動的耐震解析法に関して、地盤の非線形性、建屋の非線形性、地盤-建物境界部の非線形性に着目した既往研究の調査を行うとともに、同手法に関する基礎的な知見の拡充及び考察を行った。

その結果、SHAKE に代表される地盤の等価線形解析については、既にその手法は概ね確立されており、発電用原子炉施設の建物・構築物の耐震設計を定めた JEAC4601 においても、同手法の適用範囲が明確に定められていることを確認した。

一方で、建屋の非線形性及び地盤-建物境界部の非線形性については、RC 造耐震壁の試験結果や実サイトの強震記録等の実データもしくは原子炉建屋等の地盤-建物相互作用の影響が無視できない複雑な構造物を対象とした非線形解析結果との照合を通じた検証等、等価線形化手法の適用性に係る基礎的な検討の実施が強く望まれることを示した。

3 章では、Ghiocel et al. が提案する RC の等価線形化手法の RC 造耐震壁に対する基礎的な適用性検討として、OECD/NEA による NUPEC 振動台試験を対象に、弾性から終局に至るまでの試験結果 (RUN1 から RUN5) に対する非線形及び等価線形三次元 FEM によるシミュレーション解析を行い、同試験結果との比較から当該手法の解析精度について考察を行った。

その結果、NL モデルによる非線形解析は、既往のシミュレーション解析結果と同程度の精度で最大応答加速度及び最大応答変位を再現できるとともに、RUN1 から RUN5 までの弾性から終局に至るまで (せん断ひずみ度  $\gamma = 4.0 \times 10^{-3}$ ) の卓越振動数、最大応答加速度及び最大応答変位の試験結果と良く一致することを確認した。

また、EQモデルによる等価線形解析は、RC造耐震壁の復元力特性にJEAG4601の骨格曲線、履歴曲線にCMSモデルを用い、せん断ひずみ度調整係数に0.7を採用することで、RUN4（せん断ひずみ度 $\gamma = 2.0 \times 10^{-3}$ ）までの卓越振動数、応答加速度及び応答変位の波形形状、慣性力-変位関係、加速度応答スペクトルにおいて、NLモデルと同等の試験結果を再現できることを明らかにした。

一方で、終局時であるRUN5については、試験結果に含まれる破壊直前の急激な応答特性の変化に伴う変位の増大までは再現できず、NLモデルよりも応答変位が過小評価となることを示した。

4章では、3章で述べたRCの等価線形化手法の原子炉施設に対する基礎的な適用性検討として、IAEAによるKARISMAベンチマーク解析で対象となった柏崎刈羽原子力発電所7号機原子炉建屋に着目し、ある理想的な地盤条件下（ $V_s = 880 \text{ m/s}$ の一樣地盤）での基準地震動 $S_s$ 相当の地震動による地盤-建物連成系の非線形及び等価線形三次元FEM解析から、当該手法の解析精度について比較検討及び考察を行った。

その結果、EQモデルによる等価線形解析は、ひずみレベルの増大に伴い、塑性化の程度の大きい上層階の壁の最大せん断ひずみ度でNLモデルによる非線形解析と概ね同等もしくはそれより大きい、保守的な最大せん断ひずみ度となることを明らかにした。同様に、最大せん断応力度に対しても、建屋の塑性化が進む範囲でNLモデルと同等もしくはそれを上回るより大きな結果が得られることを示した。

外壁の最大加速度及び最大応答変位については、一部局部的に塑性化が進むCF上部の加速度でNLモデルを下回る傾向が見られるものの、全体的にNLモデルの分布形状を良く捉えられた結果が得られることを明らかにした。

また、4F及びRF東西南北の壁中央の床上の加速度応答スペクトルについても、NLモデルとEQモデルの間でせん断ひびわれの影響と見られる短周期側の形状の差異が見られるものの、主要なピークやその幅、振幅等でNLモデルと良好な対応関係にあることを示した。

5章では、地下外壁側面の地盤の剥離・滑りによる非線形挙動が原子炉建屋の応答に与える影響に着目し、4章と同様、柏崎刈羽原子力発電所7号機原子炉建屋を対象に、実地盤、実建屋及び実観測記録による剥離・滑りの有無をパラメータとした地盤-建物連成系の線形及び非線形三次元FEM解析を行い、同現象が建屋応答に与える影響について基礎的な検討及び考察を行った。

その結果、地盤モデル下端の入力波形をB3Fの基礎版上の観測記録と適合するよう繰り返し計算を行うことで、3F観測点の水平方向の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトルは実際の観測記録と比較して良好な対応関係を示すことを確認した。

また、地下外壁側面の地盤の剥離・滑りの有無による最大応答加速度への影響は、北側外壁の地下部及び西側外壁の1F付近を除きその影響がほぼ見られないことを示した。

一方で、建屋の側面土圧の分布性状は、剥離・滑りを考慮することで、同現象が東西南北の全ての側面に影響を与えるわけではなく、局部的な基礎浮き上がりの影響により東側の側面土圧に集中的に応答の差異となって現れることを明らかにした。

同様に、建屋の底面土圧性状についても、剥離・滑りを考慮したことにより全体としてUD方向にやや浮き上がる傾向が見られ、特にEW方向の基礎版端部で底面土圧の明確な差異と基礎浮き上がりが生じることを明らかにした。

以上のように、本研究では、建屋の非線形性、地盤－建物境界部の非線形性に着目し、既往のRC造耐震壁に対する試験結果、IAEAのKARISMAベンチマーク解析、実サイトの観測記録を活用した地盤－建物連成系の三次元FEMモデルによる動的耐震解析法の提案に資する基礎的な検討結果を提示した。

これら1章から5章の知見に基づき得られた本研究の結論を以下に示す。

3章及び4章で対象としたRCの等価線形化手法について、非線形及び等価線形三次元FEM解析による解析結果及び試験結果との比較から、RC造耐震壁単独での評価においては、RUN4（せん断ひずみ度 $\gamma = 2.0 \times 10^{-3}$ 程度）までの非線形域に対して、RC構成則による精緻な非線形解析と概ね同等、もしくは最大せん断ひずみ度の評価においてより保守的な結果が得られることを明らかにした。また、ある理想的な地盤条件下での地盤－建物連成系の原子炉建屋の非線形挙動においても、基準地震動 $S_s$ 相当の地震動に対して同様の知見が得られることを明らかにした。

原子炉施設建屋の耐震安全性評価では、基準地震動 $S_s$ に対する検討としてRC造耐震壁に対し $\gamma = 2.0 \times 10^{-3}$ 以下の許容限界が定められており、3章及び4章に示す解析精度があれば、本手法は十分有用であるといえる。

5章で対象とした地下外壁側面の地盤の剥離・滑りによる地盤－建物境界部の非線形性について、今回検討で用いた条件においては、同現象が原子炉建屋の最大応答加速度、地下外壁側面及び基礎版底面の土圧性状に与える影響は比較的小さかった。

しかし、今後、さらに大きな地震動が想定される場合には、剥離・滑りによる建屋の埋め込み効果のさらなる低下が予想される。この建屋の埋め込み効果の低下は、建屋全体のUD方向の浮き上がり及び基礎浮き上がりの増大を引き起こすため、これら大地震を想定した非線形三次元FEM解析においては、地盤の非線形性だけではなく剥離・滑りの影響も考慮した応答評価が必要になる。

以上、本研究では、建屋の非線形性、地盤－建物境界部の非線形性に関し、等価線形化手法の原子炉施設への適用性及び地下外壁側面の剥離・滑りの建屋応答への影響評価に係る基礎的な検討を実施した。

一方で、本研究は、等価線形解析及び非線形解析に関する条件設定が限定的であり、限られた入力地震動及び地盤条件での基礎的な検討であることから、1つの知見として捉えるこ

とはできるものの、原子炉建屋等の実建屋に適用するためには、より複雑な地盤の影響を考慮した十分な知見の蓄積が必要であると考え。これについては、今後の課題としたい。