

埋込み深さをパラメータとした地震応答解析モデルの適用範囲の検討

14T0225C 庄子 尚也
指導教員：関口 徹

1.研究背景・目的

2007年に発生した新潟県中越沖地震の際、震源地近くにある柏崎刈羽原子力発電所では、1号機原子炉建屋で最大680Galの大きな揺れが観測された¹⁾。地震後、柏崎刈羽原子力発電所原子炉建屋の健全性評価において、埋込みSRモデル（スウェイ・ロッキングモデル）によるシミュレーション解析が行われた。しかし、3・4号機建屋での解析結果において実際の観測記録との整合性が不十分な部分があった²⁾。その原因として、従来の設計時に用いられ、比較的簡易な解析モデルであるSRモデルは、原子炉建屋のような埋込みが深い建物の場合、動的相互作用の影響を正確に考慮できていない可能性が考えられる。

そこで本研究では、埋込みのある建物を対象としたとき、解析手法の差が応答結果に与える影響を、埋込み深さと地上階に対する相対的な埋込み深さの2つをパラメータとし、3つの解析手法で比較検討する。

2.解析の概要

2.1 検討建物

検討建物は地上1階および地上3階の2種類について、地下0~3階の4パターンの計8ケースとする。埋込み深さの検討は、検討建物に付与する地下階の階数を変更することで行う。相対的な埋込み深さの検討は、地上階高を1階と3階とで比較することで行う。図2-1に検討建物の例として地上3階・地下2階建物と地上1階・地下3階建物のモデル概要図を示す。検討に用いる建物は鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説1999³⁾に記載された鉄筋コンクリート3階建事務所建物と同様の柱壁配置および階高とする。地上階の平面図を図2-2に示す。階高については各階のスラブ間の高さとし、仕上げ材は重量のみ考慮する。地下階の階高については参考建物の1階と同じ階高とする。

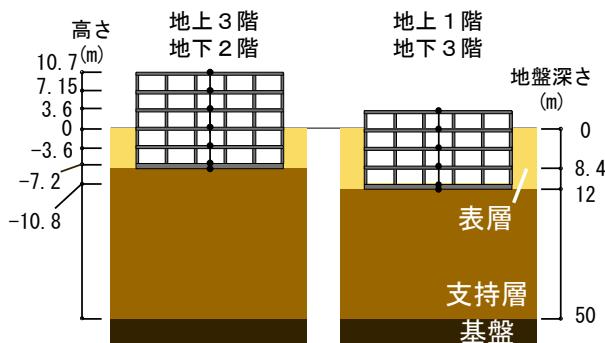


図 2-1 モデル概要図

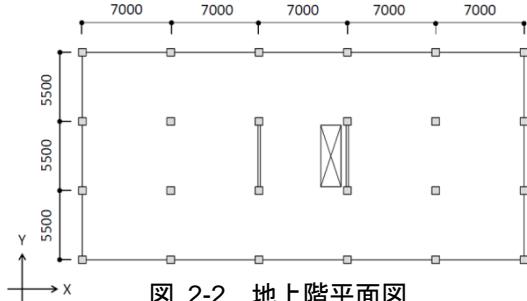


図 2-2 地上階平面図

2.2 建物・地盤モデル

建物を多質点系モデルに置換し、地震応答解析を行う。質点の重量は各階ごとに、床や柱等の荷重要素をもとに求める。梁要素の剛性は各階ごとの断面2次モーメント・せん断面積により算定する。

地盤は、① $V_s=150\text{m/s}$ の表層、② $V_s=400\text{m/s}$ の建物の支持層、③ $V_s=700\text{m/s}$ の工学的基盤から成る3層地盤とする。地表面から工学的基盤まで深さは全ケース統一し50mとする。土質は表層および支持層を粘土層、工学的基盤以深を礫とする。各土質の単位体積重量は、文献⁴⁾にある既往の実測データの平均値を用いる。

2.3 入力地震動

入力波は建築基準法の告示で定められた解放工学的基盤の加速度応答スペクトルに適合する模擬地震動のうちレベル2（極めてまれに発生する地震動）相当で、位相はEl Centro、JMA神戸、Taftのものを用いる。

2.4 解析手法

SRモデル、擬似3次元有限要素法（擬似3次元FEM）および3次元FEMの3種類について、建物ケース8種、建物のX方向・Y方向に対しての計48パターン行う。

(1) SRモデル

地盤の剛性を水平ばねと回転ばねで表現する。ばね値 K は埋込み深さと地盤条件により決定する。ばね減衰 C は質点系にした建物の固有値を計算し、その値から算出する。底面ばねの決定条件として、地盤を一次固有周期が等価な一様地盤として扱い、基礎底面を地表面とした半無限地盤モデルとする。側面ばねの設定では等価な円形基礎と仮定する。

(2) 擬似3次元FEM

FEM部分の地盤と1次元モデルの自由地盤を面外ダンパーでつなぐことで地盤の面外方向の厚さを考慮し、建物周辺の3次元地盤を2次元モデルで再現する。面外ダンパーの減衰定数は、FEM地盤の1節点の支配

面積A、土質の密度 ρ 、地盤のS波速度 V_s から決定する。

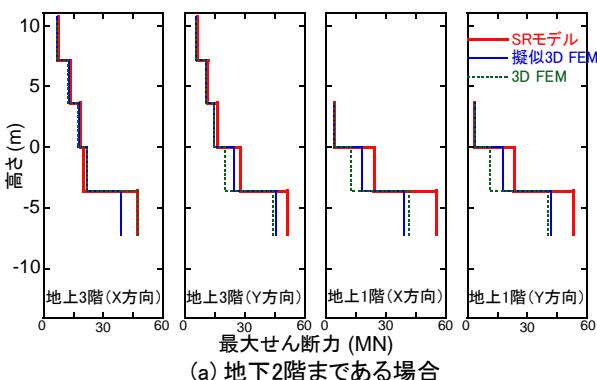
(3) 3次元FEM

構造物を質点と梁ばねで、その近傍地盤を有限要素でそれぞれモデル化した構造物・地盤系と、さらに外側の遠方地盤を薄層でモデル化した地盤系の2つのサブストラクチャーに分ける弾性領域サブストラクチャー法に基づく解析を行う。

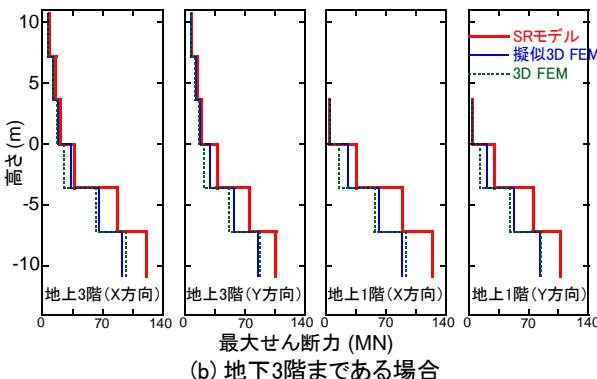
3. 解析結果

各階のせん断力から求めた最大せん断力の分布図を図3-1に示す。最大せん断力について、擬似3次元FEMは地上・地下ともに3次元FEMと大きな違いは見られない。一方、SRモデルは地上3階建物において平均16%、地上1階建物において平均32%程度3次元モデルより大きくなり、差異は地上1階建物の方が大きい。

次に、建物1階床応答と自由地盤地表面のフーリエスペクトル比である入力損失を求める。自由地盤の地表面加速度は別途、1次元地盤地震応答解析により求める。地上3階と1階の建物で、地下1階および3階がある場合の入力損失をそれぞれ図3-2、図3-3に示す。埋込みが深くなるほど、高振動数においてSRモデルの結果は他の解析手法と差が顕著に現れる。X、Y方向で比較した場合、SRモデルはY方向の方が他2つの解析手法の結果との差が大きい。これは図2-2よりY方向には壁が2枚配置されていることで建物全体の剛性が高く、地盤の剛性との差が大きくなり、より動的相互作用の影響が大きくなつたためと考えられる。



(a) 地下2階まである場合



(b) 地下3階まである場合

図 3-1 最大せん断力のフロア分布

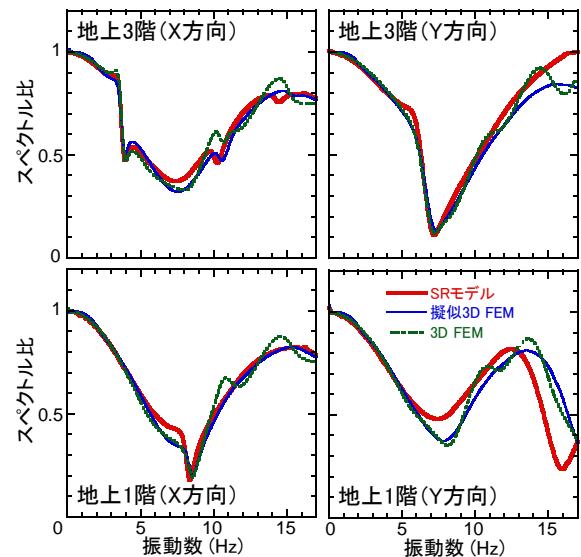


図 3-2 地下1階ケースの入力損失

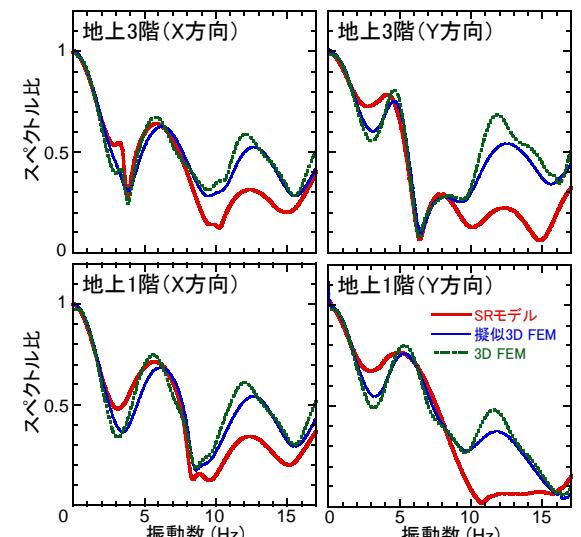


図 3-3 地下3階ケースの入力損失

4.まとめ

本研究では埋込み深さと、地上部との相対的な埋込み深さの2つをパラメータとしたとき、解析手法の違いが応答結果に与える影響の検討を行った。その結果、せん断力について3次元FEMの結果と比較すると、擬似3次元FEMでは大きな違いが見られず、SRモデルでは最大3割以上値が大きくなつた。地上部との相対的な埋込みが深くなる場合は、SRモデルと3次元FEMの結果の差はさらに大きくなっていく。入力損失については埋込みが深いほどSRモデルの結果が他2つの結果と差が生じる。以上のことから、建物の大部分が地盤に埋込まれた原子炉建屋におけるSRモデルによるシミュレーション解析では地震観測記録との整合性が不十分であったと考えられる。

参考文献

- 1) 東京電力株式会社, 新潟県中越沖地震における柏崎刈羽原子力発電所の地震観測記録, H19.7
- 2) 東京電力株式会社, 柏崎刈羽原子力発電所3/4号機 原子炉建屋の解析モデルに関する検討, H22.10
- 3) 日本建築学会, 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説1999, p289
- 4) 大崎順彦, 新・地震動のスペクトル解析入門, 1994, p167