

剛構造物の基礎の浮上り挙動に着目した地震応答解析

日比野憲太¹・難波秀雄²・本橋章平³

¹ 独立行政法人 原子力安全基盤機構 耐震安全部 地震動・津波グループ 主任研究員 博士（工学）
（〒105-0001 東京都港区虎ノ門4-3-20 神谷町MTビル）

² 独立行政法人 原子力安全基盤機構 耐震安全部 地震動・津波グループ長
（〒105-0001 東京都港区虎ノ門4-3-20 神谷町MTビル）

³ 独立行政法人 原子力安全基盤機構 耐震安全部 審議役 博士（工学）
（〒105-0001 東京都港区虎ノ門4-3-20 神谷町MTビル）

1. はじめに

平成18年9月に改訂された原子力施設の耐震設計審査指針¹⁾は、①信頼性の高い地質・地盤調査を前提とし、不確実さを適切に考慮した基準地震動 S_s の策定方法の高度化、② S_s を超える地震動による「残余のリスク（基準地震動より大きな地震動が発生した際のリスク）」の認識とそれを可能な限り小さくする、が明記されたことが大きな特徴といえる。特に、「残余のリスク」を定量化する手法である地震PSAでは、不確実性を含むパラメータに関して、その確率分布に応じた範囲での評価が必要となる。そのため、設計基準地震動を超える地震動に対する施設の地震応答の評価が必要となり、建屋、地盤、建屋の基礎部の浮上り挙動、埋め込み効果などの非線形特性や不確実性を含むパラメータを考慮した詳細な地震応答の評価を可能とする必要がある。

従来までの質点系の解析モデル、いわゆるSRモデルは、耐震壁などの耐震部材を梁要素に置換し、その復元力特性は水平方向のみに与えられてきた。また、水平動モデルはSRバネやNovakバネ、鉛直動モデルは鉛直バネをモデル基部に配置することにより、基礎地盤や表層地盤－建屋間の動的相互作用を考慮している。そのため、これらのモデルは、水平＋鉛直方向の地震動入力時の非線形応答を詳細に評価することができない。また、建屋の基礎部の浮上り挙動や建屋－地盤間の相互作用を考慮する際には、建屋基礎の接地率による適用限界が存在する。

筆者らは、既往の研究において²⁾、基礎部を完全固定したボックス型耐震壁を対象として、水平動および鉛直動が同時に作用した際の非線形応答の評価

を行った。その結果、建屋の水平応答の床応答スペクトルを評価する際には、耐震壁の鉛直剛性が弾性領域であれば、従来までの水平一方向による評価が可能であることを確認した。また、建屋の鉛直剛性が弾性領域を超える場合には、応答スペクトルの最大値の増大や長周期側にシフトする傾向に留意しなくてはならないことを確認した。しかし、これらの結果は、建屋の基礎部を完全固定した解析結果から得られたものであり、建屋の浮上り挙動や建屋－地盤間の相互作用による地震動入力での損失を考慮した詳細な評価が必要である。

本研究は、強震動入力時の原子炉建屋の浮上り挙動に着目し、剛構造物の基礎部と地盤間に離散型の接触面要素を挿入することにより、その浮上り挙動を詳細に評価する解析手法の検討を行ったものである。さらに、検討した解析手法を用いて、基礎部の浮上り挙動や埋め込み効果を考慮した簡易な建屋モデル（ボックス型耐震壁）の地震応答解析を行い、基礎部の浮上り挙動と埋め込み効果の考慮の有無が、建屋の地震応答に与える影響を考察した。

2. 解析方法

図-1に示すように、強震動下の原子炉建屋の三次元非線形地震応答を詳細に評価するには、水平二方向および鉛直方向の地震動を同時入力する必要がある。また、地震時の原子炉建屋の非線形応答には、耐震壁や表層地盤の非線形特性、建屋の基礎部の浮上り挙動や埋め込み効果、建屋－地盤間の相互作用など、様々な要因が影響を及ぼすと考えられる。さらに、建屋の応答を介した評価が必要となる各種機

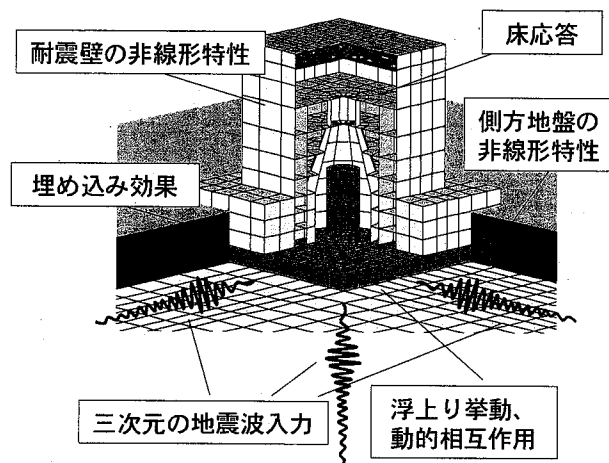


図-1 建屋の三次元応答に影響を及ぼす要因

器の設計には、設置場所を考慮した建屋の床応答を用いる必要がある。

筆者らは、既往の研究において、積層シェル要素を用いた三次元有限要素法解析に基づいた解析コード (SANREF)^{3), 4), 5)}を開発している。本コードは、地震動が水平二方向に入力される際に耐震壁に発生する三方向以上のひび割れを表現するため、軸力、面内せん断力、面外曲げモーメントを考慮できる積層シェル要素、ならびに前川、福浦が提案する擬似直行座標系を二つ取り入れた独立四方向ひび割れモデル^{6), 7), 8)}を採用している。また、建屋の埋め込み土や表層地盤の非線形特性を表現するため、R-Oモデルを三次元に拡張した材料構成則を採用している。さらに、建屋の基礎部の浮上り挙動と建屋-地盤間の相互作用を表現するため、基礎部と地盤間の剥離およびすべり挙動を表現する離散型の接触面要素を採用している。

3. 剛構造物の地震時浮上り挙動を表現する解析手法の検討

(1) 解析概要

(財) 原子力発電技術機構では、原子炉建屋の基礎部の浮上り挙動に着目した、RC造の模型試験体の振動台試験⁹⁾を行っている。本節では、SANREFに導入されている、基礎部と地盤間の剥離およびすべり挙動を離散型の接触面要素で表現する機能の検証を目的として、上述の試験と同様の条件で解析を行い、試験結果の解析結果の比較を行った。

(2) 解析モデルおよび境界条件

解析モデルを図-2に示す。建屋模型は底面1.0m×1.0m、高さ2.0mのI型形状のRC構造であり、模型上部には重錘が取り付けられている。また、地盤模

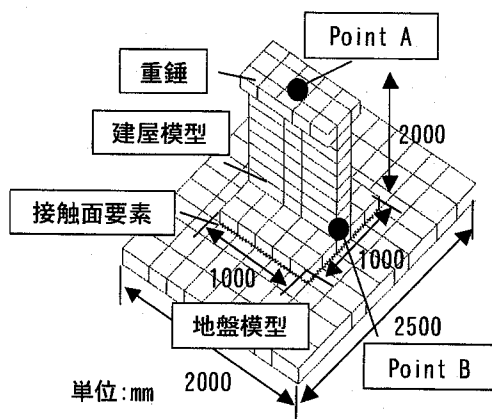


図-2 解析モデル

型は、2.5m×2.0m×0.25mのシリコンゴムであり、振動台上に直接設置されている。解析モデルは、建屋模型のRC部と重錘部、地盤模型のシリコンゴムを六面体要素で表現し、建屋模型の浮上り挙動を表現するため、建屋模型と地盤模型の境界部には離散型の接触面要素を挿入した。

境界条件は、地盤模型の底面を完全固定 (x, y, z) とし、その面に水平動を直接入力した。

試験結果を参考として、コンクリート、重錘およびシリコンゴムは弾性体として扱った。これらの材料特性を表-2、3に示す。また、接触面要素は、閉口時にはシリコンゴムの剛性、開口時は剛性を有さ

表-2 建屋模型の力学的特性

コンクリート		重錘	
E (N/mm^2)	ν	E (N/mm^2)	ν
2.2×10^4	0.17	2.1×10^5	0.30

表-3 地盤模型の力学的特性

シリコンゴム	
E (N/mm^2)	ν
9.3	0.46

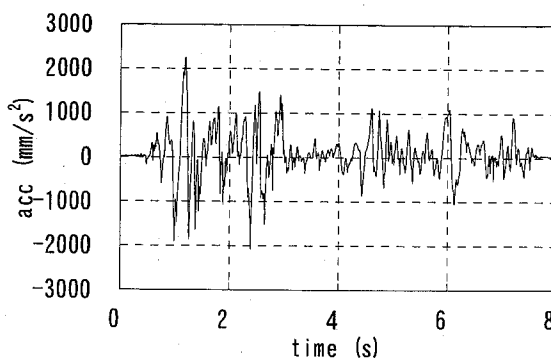


図-3 時刻歴波形 (El Centro地震)

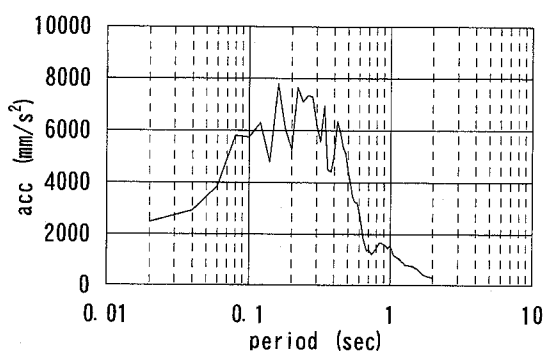


図-4 加速度応答スペクトル (h=0.02)

表-4 動的解析のケース

解析ケース	入力地震波	浮上り挙動の考慮
cal	El Centro 地震波	有
cal fix		無
exp		試験結果

ない特性を設定した。

入力地震動には振動台で計測された加速度時刻歴 (El Centro地震) を採用し、地盤模型の底面に直接入力した。入力地震動の時刻歴波形を図-3、加速度応答スペクトルを図-4 に示す。

(3) 解析ケース

表-4 に、動的解析のケース一覧を示す。本解析では、建屋模型と地盤模型間に挿入する接触面要素の有無をパラメータとし、建屋模型の浮上り挙動の考慮の有無による応答加速度の変化を考察した。

(4) 固有値解析と解析結果の考察

表-5 および表-6 に、建屋模型 (基礎固定) と建屋模型-地盤模型 (連成系) における、試験結果と解析結果から得られた固有値の比較結果を示す。また、図-5 に基礎固定、図-6 に連成系の解析結果から得られた、固有変形モードを示す。

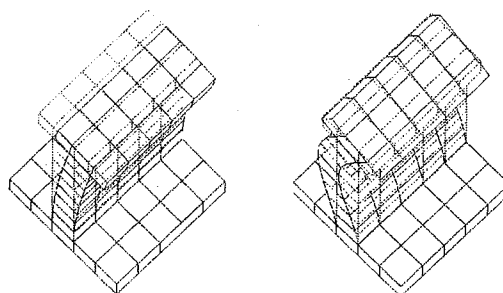
基礎固定および連成系ともに、解析結果から得られた固有値は試験結果と良く一致した。また、連成系の水平1次モードは建屋模型の基部が曲げ変形す

表-5 固有値 (基礎固定)

次数	試験		解析	
	Hz	sec	Hz	sec
水平1次	16.0	0.0625	15.5	0.0645
水平2次	118.0	0.0008	121.0	0.0008

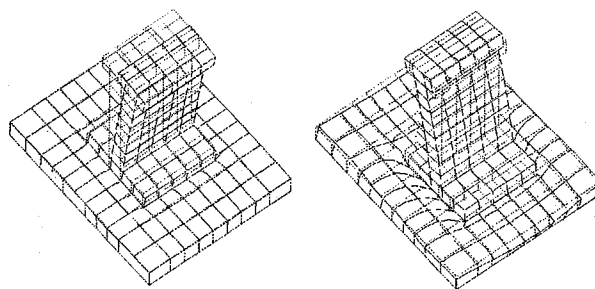
表-6 固有値 (連成系)

次数	試験		解析	
	Hz	sec	Hz	sec
水平1次	6.6	0.1515	7.1	0.1408
水平2次	27.8	0.0360	25.6	0.0391



(a) 水平1次 (15.5 Hz) (b) 水平2次 (121.0 Hz)

図-5 固有変形モード (基礎固定)



(a) 水平1次 (7.1 Hz) (b) 水平2次 (25.6 Hz)

図-6 固有変形モード (連成系)

るモード、2次モードは地盤模型がせん断変形するモードであった。これらの変形モードに関しても、おおよそ試験結果と一致した。

(5) 動的解析と解析結果の考察

浮上り挙動を考慮しないケース (cal fix) と浮上り挙動を考慮したケース (cal) の動的解析結果と試験結果の比較として、図-7 に建屋模型の上部 (図-2 のPoint A)、図-8 に下部 (図-2 のPoint B) の加速度応答スペクトル (h=0.02) を示す。また、図-9 に建屋模型の高さ方向の応答加速度分布の比較を示す。

建屋模型の上部および下部の加速度応答スペクトルともに、浮上り挙動を考慮しないケース (cal fix) に比べ、浮上り挙動を考慮したケース (cal) の方が、応答スペクトルが卓越する領域を大きく、

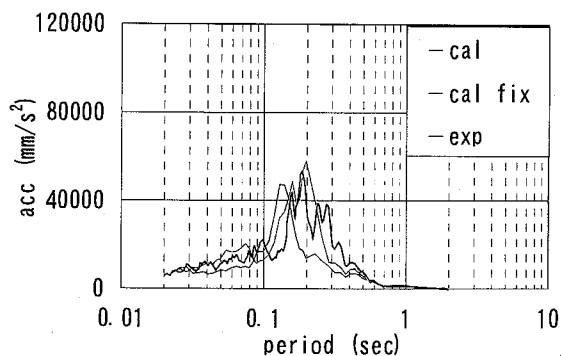


図-7 加速度応答スペクトルの比較 (上部)

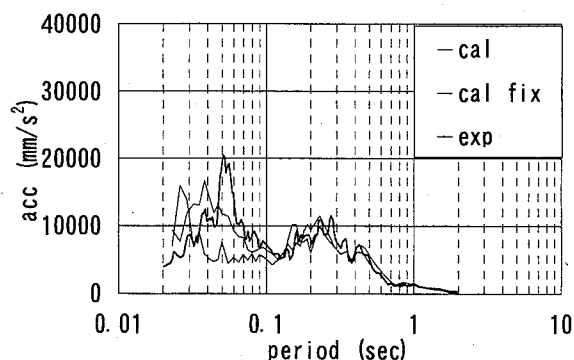


図-8 加速度応答スペクトルの比較 (下部)

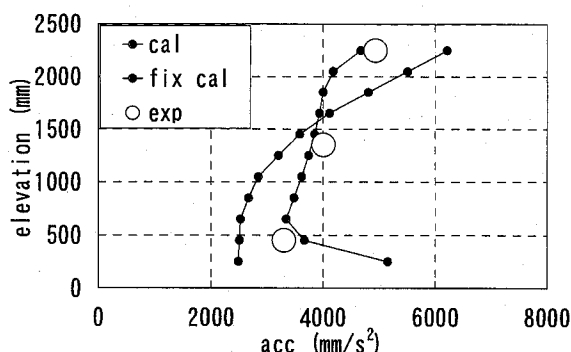


図-9 応答加速度分布の比較

長周期側に算定した。また、この様な傾向は、およそ試験結果とも一致した。

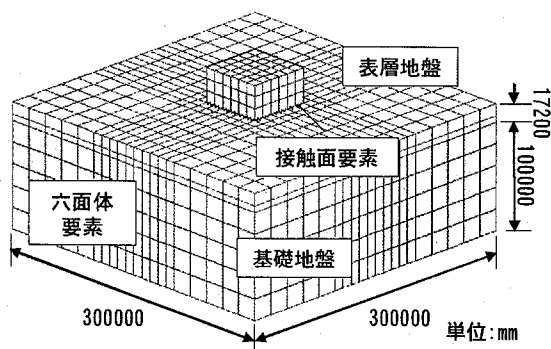
建屋模型の高さ方向の応答加速度分布は、浮上り挙動を考慮しないケース (cal fix) では、入力地震動の最大加速度を下部で、高さ方向に増幅し、上部で最大加速度を算定した。一方、浮上り挙動を考慮したケース (cal) は、下部で浮上り挙動に起因する大きな応答加速度、高さ方向に応答加速度が増幅されていく傾向を算定した。この様な応答加速度の増幅傾向は、試験結果と良く一致した。

以上の検討結果から、SANREFに導入されている、基礎部と地盤間の剥離および浮上り挙動を離散型の接触面要素で表現する機能を用いることにより、建屋の基礎部の地震時浮上り挙動を適切にモデル化できることを確認した。

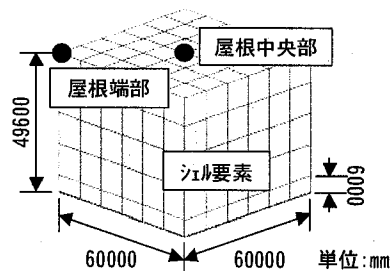
4. 基礎の埋め込み効果と基礎浮上りを考慮した地震応答解析

(1) 解析概要

前節までの検討結果から、建屋の基礎部と地盤間に接触要素を挿入することにより、建屋の地震時浮上り挙動を適切にモデル化できることを確認した。本節では、この解析手法を用いて、基礎部の浮上り



(a) 建屋基礎部の埋め込みを考慮したモデル



(b) 建屋の詳細

図-10 解析モデル

表-7 建屋の力学的特性

コンクリート	
E (N/mm ²)	ν
2.8×10^4	0.17

表-8 地盤の力学的特性

基礎地盤		表層地盤	
G (N/mm ²)	ν	G (N/mm ²)	ν
2.0×10^3	0.40	8.0×10^1	0.33

挙動や埋め込み効果を考慮した簡易な建屋モデル (ボックス型耐震壁) の地震応答解析を行い、基礎部の浮上り挙動と埋め込み効果の考慮の有無が、建屋の地震応答に与える影響を考察した。

(2) 解析対象および境界条件

解析対象には、原子炉建屋を模擬し簡略化した、底面60m×60m、高さ33.6m、壁厚2.5mのボックス型耐震壁を想定した。また、建屋が立地する地盤として、300m×300m×100mの基礎地盤、その上に17mの表層地盤を想定した。解析モデルを図-10に示す。解析モデルは、壁部および屋根部ともにシェル要素で表現した。また、基礎地盤および表層地盤は、六面体要素で表現した。さらに、建屋の基礎部と地盤間には建屋の埋め込み効果や浮上り挙動を表現するため、離散型の接触要素を挿入した。

解析結果の考察を簡単にするため、シェル要素と

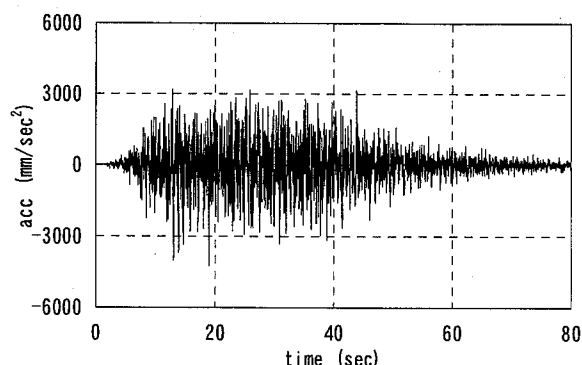


図-11 時刻歴波形

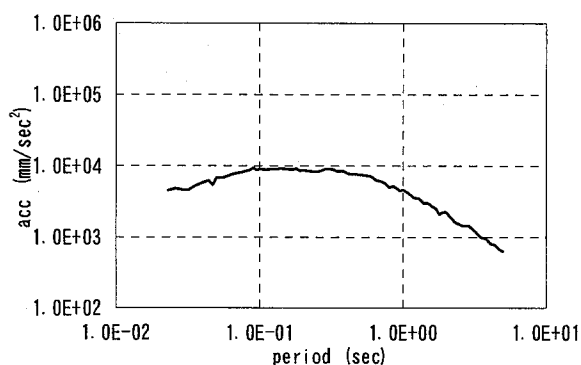


図-12 加速度応答スペクトル ($h=0.05$)

六面体要素は弾性体を仮定した。これらの材料特性を表-7, 8 に示す。また、接触面要素は、閉口時には地盤の剛性、開口時は剛性を有さない特性を設定した。

境界条件は、半無限地盤をモデル化するために底面、側面ともに粘性ダンパーとした。また、入力地震動には、耐専スペクトル¹⁰⁾ ($M=8.0$, $X_{eq}=35\text{km}$) を採用した。時刻歴波形を図-11、加速度応答スペクトルを図-12 に示す。

(3) 解析ケース

表-9 に、解析ケースの一覧を示す。まず、建屋の埋め込み効果を考慮しないモデル (case 1) に関して、浮上り挙動の考慮の有無と入力地震動の倍率 ($\times 1, 2$) をパラメータとした解析を行った。続いて、建屋基礎の埋め込み効果を考慮したモデル (case 2) に関して、入力地震動の倍率 ($\times 1, 2$) をパラメータとした解析を行った。

(4) 建屋の埋め込み効果を考慮しないモデル

建屋の埋め込み効果を考慮しないモデル (case 1) の解析結果から得られた、屋根中央部の水平応答の床応答スペクトルを図-13、屋根端部の鉛直応答の床応答スペクトルを図-14 に示す。

水平応答の床応答スペクトルは、地震動の入力倍率 ($\times 1, 2$) に比例して大きくなった。また、入力

表-9 解析ケース

解析ケース	入力地震倍率	浮上り挙動の考慮	埋め込み効果の考慮
case 1	1	有り	無し
	2	無し	
	3	有り	
	4	無し	
case 2	1	有り	有り
	2		

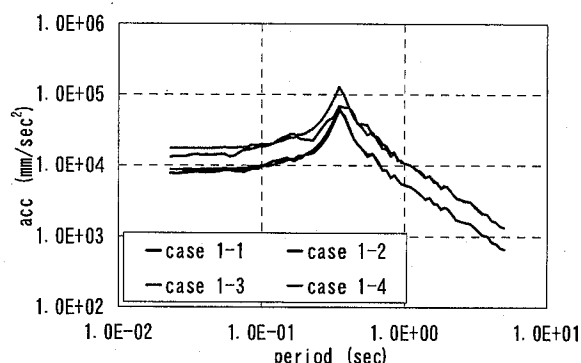


図-13 床応答スペクトル (中央部、水平応答)

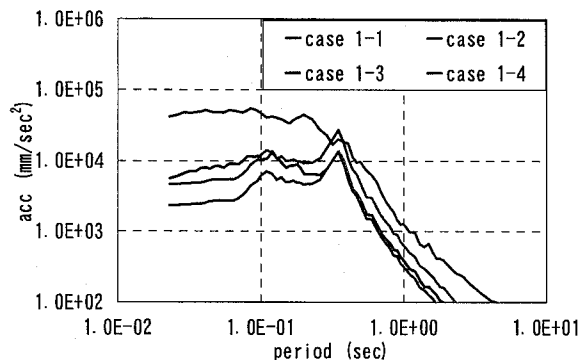


図-14 床応答スペクトル (端部、鉛直応答)

倍率が $\times 1$ のケース (case 1-1, 2) では大きな差異は見られないものの、 $\times 2$ のケース (case 1-3, 4) では建屋の基礎部の浮上り挙動を考慮することにより、応答スペクトルのピークから短周期側の応答が小さくなった。

鉛直応答の床応答スペクトルは、建屋の水平応答の際に生じる鉛直応答 (浮上り挙動や床の鉛直振動により発生する鉛直応答) を表したものであるが、建屋の基礎部の浮上り挙動を考慮する (case 1-1, 3) ことにより、短周期側の応答が大きくなった。

(5) 建屋の埋め込み効果を考慮したモデル

建屋の埋め込み効果を考慮したモデル (case 2) の解析結果から得られた、屋根中央部の水平応答の床応答スペクトルを図-15、屋根端部の鉛直応答の床応答スペクトルを図-16 に示す。ただし、これらの結果には比較のため、上述の建屋の埋め込み効果

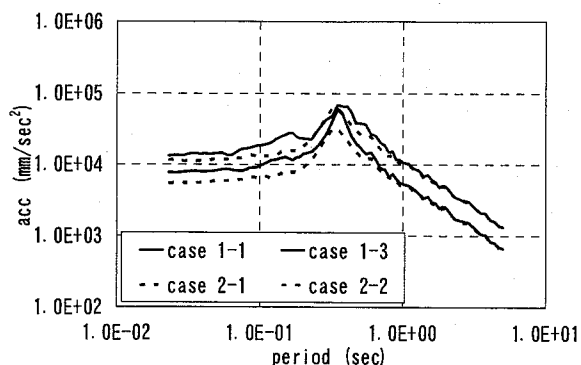


図-15 床応答スペクトル（中央部、水平応答）

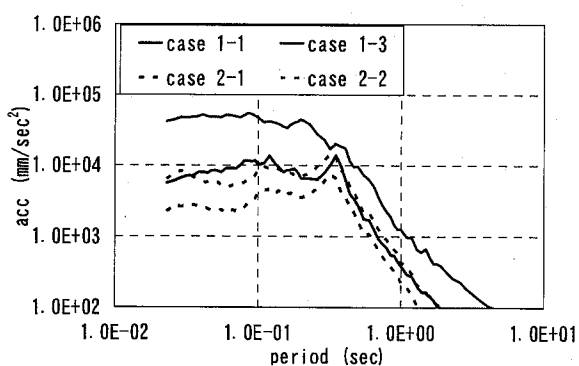


図-16 床応答スペクトル（端部、鉛直応答）

を考慮しないモデル（case 1）の解析結果を合わせて示している。

水平応答の床応答スペクトルは、地震動の入力倍率（×1, 2）に比例して大きくなった。また、入力倍率に係わらずどちらのケースにおいても、建屋の埋め込み効果を考慮（case 2）することにより、応答スペクトルのピーク周辺から短周期側の応答が小さくなった。

鉛直応答の床応答スペクトルは、建屋の埋め込み効果を考慮（case 2）することにより、その浮上り挙動が抑制され、応答スペクトルのピークから短周期側の応答が小さくなった。

4. まとめ

本研究は、強震動入力時の原子炉建屋の浮上り挙動を詳細に評価する解析手法の検討を行い、建屋の基礎部の埋め込み効果と浮上り挙動の考慮の有無が、建屋の地震応答に与える影響を考察したものである。

本研究結果から、以下の結論が得られた。

- ・ 建屋の基礎部と地盤間に離散型の接触面要素を挿入した解析モデルを用いて、既往の試験と同様の条件で解析を行った結果、その動的解析結果から得られた加速度応答スペクトル

や応答加速度分布は、試験結果とおおよそ一致する結果となった。

- ・ 接触面要素を用いることにより、剛構造物の地震時浮上り挙動による応答の変化と埋め込み効果の影響を評価できることが分かった。また、浮上り挙動を詳細に表現することにより、水平地震応答の際に生じる鉛直応答が評価できることが分かった。
- ・ 建屋と地盤の詳細な諸元、非線形特性を考慮した検討が必要である。特に、表層地盤の非線形化に着目した検討を行い、観測データや試験結果との比較、検証が必要である。

参考文献

- 1) 原子力安全委員会：発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針，平成18年9月19日
- 2) 日比野憲太，難波秀雄：水平動および鉛直動が同時に作用する原子炉建屋の非線形応答の評価，第10回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.363-368，2007.2
- 3) 独立行政法人 原子力安全基盤機構：三次元FEM解析コードSANREFの改良・整備に関する報告書，JNES/SAE05-074，2005.12
- 4) 独立行政法人 原子力安全基盤機構：三次元FEM解析コードSANREFの改良・整備に関する報告書，JNES/SAE06-043，2006.6
- 5) 独立行政法人 原子力安全基盤機構：三次元FEM解析コードSANREFの改良・整備＝三次元地震動入力時の耐震安全解析機能の追加＝に関する報告書【概要版】，JNES/SAE06-077，2007.3
- 6) 前川宏一，福浦尚之：擬似直交ひび割れ2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，pp.157-176，1999.
- 7) 前川宏一，福浦尚之：非直交する独立4方向ひび割れ群を有する平面RC要素の空間平均化構成則，土木会論文集，No.634，pp.177-195，1999.
- 8) 前川宏一，福浦尚之：多方向ひび割れを考慮したRC構成則の部材・構造挙動からの検証，土木会論文集，No.634，pp.209-225，1999.
- 9) 財団法人 原子力発電技術機構 原子力安全解析書：質点系モデル解析コードSANLUMの保守に関する報告書，INS/M95-30，1996.3
- 10) Nishimura, I., et al.: Response spectra for design purpose of stiff structures on rock sites, 16th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, K1133, 1-8, 2001