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THREE DIMENSIONAL RESPONSE BEHAVIOR OF UNIT NO.5 REACTOR BUILDING
SUBJECTED TO THE NIIGATAKEN CHUETSU-OKI EARTHQUAKE IN 2007土方 勝一郎^{*1}, 菊地 利喜郎^{*2}, 貫井 泰^{*2}, 今村 晃^{*1}
柳下文雄^{*3}, 間瀬辰也^{*3}, 吉田洋之^{*3}, 塩見忠彦^{*4}
古山田 耕司^{*5}, 吉田 一博^{*6}*Katsuichirou HIJIKATA, Rikiro KIKUCHI, Yasushi NUKUI, Akira IMAMURA,
Fumio YAGISHITA, Tatsuya MASE, Hiroyuki YOSHIDA,
Tadahiko SHIOMI, Kohji KOYAMADA and Kazuhiro YOSHIDA*

This paper presents three dimensional behavior of Unit No.5 reactor building of the Kashiwazaki-Kariwa Nuclear Power Station subjected to the Niigataken Chuetsu-oki Earthquake in 2007, in which acceleration 4.4m/s^2 was recorded at the base mat. The behavior was studied for stress distribution of walls, acceleration distribution on floors and earth pressure distribution of an embedded building. The back ground of this study is increasing attention to safety of nuclear power plants subjected to large earthquakes. The damage anticipated there may be localized failure. To evaluate it, three dimensional analytical method and model were used. They were validated with 25 acceleration records of the Mid Niigata Prefecture Earthquake in 2004 before studying the three dimensional behavior.

Keywords : the Niigataken Chuetsu-oki Earthquake in 2007, reactor building, seismic response analysis, simulation analysis, three dimensional behavior of building

2007年新潟県中越沖地震, 原子炉建屋, 地震応答解析, シミュレーション解析, 建屋3次元挙動

1. はじめに

本研究では、2007年新潟県中越沖地震（以下2007中越沖地震と称す）における柏崎刈羽原子力発電所5号機原子炉建屋（以下5号機原子炉建屋）の3次元挙動を有限要素法によるシミュレーション解析により明らかにした。ここで言う3次元挙動とは、地震応答時の建屋全体のねじれ・回転変形に加えて、個々の床や壁の変形、直交する壁の拘束を考慮した外壁および内壁の応力分布、建屋底面・側面の地盤反力分布などを言い、重量を建屋各階位置に集中させ、その間の剛性を梁要素で評価した質点系モデルや2次元モデルでは扱えない建屋・地盤の挙動をさす。

柏崎刈羽原子力発電所では、1～7号機の各原子炉建屋および周辺地盤において地震観測が実施されており、2007中越沖地震の際にはGL-255mの地中で最大加速度1G近い地震動が観測されるなど貴重な地震記録が観測された¹⁾。また、地震発生後行われた現地調査では、原子炉建屋等の重要建物は無被害か軽微な被害であったことが確認された。2007中越沖地震に対する建屋の健全性検討では、これらの観測記録を用いて地震時応答のシミュレーション解析が行われ、原子炉建屋等の重要建物の健全性は解析面の検討からも確認されている²⁾。この検討で用いられた解析モデルは、原子力発電所の設計で用いられる埋め込みの影響を考慮したスウェイ・ロッキング

グモデルであるが、一部の建屋では、地盤・建屋を3次元有限要素法でモデル化した解析も実施されている³⁾。3次元有限要素法解析は詳細なシミュレーションや応力評価が可能で、今後の原子力発電所の耐震安全性評価をより詳細に行う上で有効な解析方法と考えられ、原子炉建屋の3次元解析事例が徐々に増えつつある^{4) 5)}。実地震による事例解析による検討が望まれていた。ここでは5号機原子炉建屋に注目して2007中越沖地震時の3次元地震応答解析を実施し、観測記録との比較を行い3次元解析モデルの妥当性を確認するとともに、地震時の建屋の3次元挙動について検討した。

2. 検討概要

2.1 検討方針

2007中越沖地震において5号機原子炉建屋で観測記録が得られたのは2箇所であったため、解析モデルの妥当性の確認は、多数箇所の観測記録が得られている2004年新潟県中越地震の余震（以下2004中越地震余震と称す）のシミュレーション解析により行った。この解析により妥当性の確認が得られた3次元解析モデルを用いて2007中越沖地震のシミュレーション解析を行い、3次元挙動の詳細な検討を行った。着目点は、壁の応力分布、3方向入力による応答の影響、周辺地盤との相互作用、地盤非線形性の大きさである。

*1 東京電力(株) 博士(工学)

*2 東京電力(株)

*3 東電設計(株)

*4 (株)竹中工務店 Ph. D.

*5 鹿島建設(株) 博士(工学)

*6 清水建設(株) 博士(工学)

Tokyo Electric Power Company, Dr. Eng.

Tokyo Electric Power Company

Tokyo Electric Power Services Co., Ltd.

Takenaka Corporation, Ph. D.

Kajima Corporation, Dr. Eng.

Shimizu Corporation, Dr. Eng.

2.2 対象建屋と周辺地盤の概要

解析対象とした5号機原子炉建屋は、図1に示すように柏崎刈羽原子力発電所の最も北に位置する。図1には、敷地全体の地層構成と設計用地震動を与える解放基盤（概ねせん断波速度が700m/s以上の硬質地盤）表面の位置も示した。なお、T.M.S.L.は東京湾平均海面を意味する。

原子炉建屋は、高さ約75m、幅・奥行き約80mの大きさである。断面図と平面図を図2に示す。建屋は主に鉄筋コンクリート造の壁と床および基礎版から構成される。建屋の主な耐震要素は外壁、内壁、シェル壁である。これらの耐震壁の厚さは地下下部で1.8m～2.5m程度、基礎版の厚さは6.5mである。設計用地震動を与える解放基盤表面はT.M.S.L.-134mで、建屋基礎底面（T.M.S.L.-24m）まで横波伝播速度Vsが410m/s～610m/sの西山層からなる。地表レベルは、T.M.S.L.+12mで建屋は36m埋め込まれている。

2.3 観測記録の概要

地震観測は既設地震計と新設地震計の2系統の計測システムで行われているが、2004中越地震余震は既設地震計で、2007中越沖地震は新設地震計で記録されている。これは、2004中越地震余震が観測されたときには新設地震計は未設置であり、一方の2007中越沖地震時には既設地震計の本震記録が余震記録で上書きされ残っていないためである。それぞれの地震計の位置を図3に示す。代表点における最大加速度を表1に示すが、2004中越地震余震における基礎版上の観測点の最大加速度は31.3cm/s²（R54，EW）で、2007中越沖地震の441.8cm/s²（5-R2，EW）に対して約1/20である。

3. 建屋3次元モデルによるシミュレーション解析

シミュレーション解析を以下の手順で実施した。はじめに5号機地盤・原子炉建屋の3次元の連成解析モデルを構築した。この解析モデルの妥当性を材料物性が弾性範囲と考えられる2004中越地震の余震のシミュレーション解析（初期剛性による線形解析）により確

図1 敷地全体の地層構成と解放基盤表面の深さ

(a) 断面図 (NS方向)

(b) 平面図 (B4F)

図2 5号機原子炉建屋

表1 検討に用いた地震動の最大加速度

(a) 2004中越地震余震（10.27，10：40，M_j6.1）

自由地盤系列					原子炉建屋系列				
名称	T. M. S. L. (m)	NS (cm/s ²)	EW (cm/s ²)	UD (cm/s ²)	名称	T. M. S. L. (m)	NS (cm/s ²)	EW (cm/s ²)	UD (cm/s ²)
G51	9.3	52.5	55.3	21.9	R51	47.2	43.2	87.4	33.4
G52	-24.0	23.9	25.0	19.2	R52	33.0	31.3	48.2	25.7
G53	-100.0	15.3	27.2	9.7	R53	12.3	25.7	43.9	16.6
G54	-180.0	13.9	31.5	7.4	R54	-18.0	16.0	31.3	18.4
G55	-300.0	16.2	22.9	9.9	R55	-25.0	15.3	31.6	17.0
					R56	-100.0	23.6	35.8	12.3

(b) 2007中越沖地震（7.16, 10:13, M_j6.8）

名称	T.M.S.L. (m)	NS (cm/s ²)	EW (cm/s ²)	UD (cm/s ²)
5-R1	27.8	471.6	697.2	331.2
5-R2	-18.0	277.4	441.8	204.9

図3 地震計の配置図

認し、次に地盤が弾塑性領域に入ったと考えられる2007中越沖地震のシミュレーション解析を地盤の剛性低下を考慮して行い、この場合にも応答結果が観測記録と良い対応をしていることを確認した。

3.1 解析モデルおよび解析条件

本検討で用いる3次元解析モデルは、有限要素数が多く計算機能力の制限を受けるために、既往の検討例⁵⁾を参考に以下のことを考慮して構築した。

- ・各階の機器の重量は、機器毎や部屋毎ではなく、階毎の平均値とする。
- ・地盤は、基盤以浅の不整形は無視できると判断し、水平成層地盤としてモデル化する。
- ・隣接建屋の影響は小さいと考え、隣接建屋はモデル化しない。

建屋の解析モデルを図4に示す。建屋は各部位の応答性状を詳細に検討するために、屋根トラスをトラス要素により、柱、梁を梁要素、床および壁を板要素により、基礎版を3次元ソリッド要素によりモデル化した。壁は厚さ50cm以上の壁をモデル化し、主な開口を考慮した⁵⁾。メッシュサイズは、壁の応力分担を知ることが目的なので、やや粗く階高に対して2分割、平面に対して20×20分割を目安とした。

地盤の解析モデルは、図5の解析地盤に示すように、横幅は建屋幅の5倍、深さは解放基盤まで（幅440m×奥行き440m×深さ146m）をソリッド要素によりモデル化した。メッシュサイズは、高振動数側の解析対象振動数を10数HzとするためVsとメッシュサイズから得られる固有振動数が20Hzを越えるように約5mとした。解析地盤の側面は、擬似3次元モデルで用いられるダンパーと自由地盤による手法⁵⁾を拡張し、建屋側面に遠方地盤の挙動を表す

側面自由地盤（解析地盤の側面に沿った2次元モデル）を設け、この側面自由地盤と解析地盤の間を粘性ダンパーで接続した。さらに、4つの側面自由地盤の交点（4隅）に隅自由地盤を設け、この隅自由地盤と側面自由地盤を粘性ダンパーで接続した。各地盤底面の半無限条件は粘性ダンパーによりモデル化した。地盤・建屋全体の要素数および節点数はそれぞれ約13万である。

建屋と側面地盤の境界条件については、2004中越地震余震の解析時は連続条件を用いた。2007中越沖地震時は、建屋近傍の埋戻土で大きな沈下が生じていることから、文献2)などの解析結果を参考に埋戻土は滑り条件、それ以深の層は連続条件とした。滑り条件とは、図6に示すように建屋と側面地盤の水平成分は同一変位で、鉛直方向のせん断抵抗が無く、建屋と側面地盤が剥離によりせん断抵抗を無くした状態を表す条件である。

建屋は弾性状態であると仮定する。鉄筋コンクリート部の剛性は実強度から求めた値 $2.9 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ ²⁾とし、ポアソン比0.2とした。また、トラス、鉄骨柱は剛性を $2.1 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ とし、ポアソン比を0.3とした。質量は設計時の各階の質量と一致するように、床の質量密度を調整した。

本研究では地盤の初期物性として表2に示す値を用いたが、2007中越沖地震の解析時には、図7に示す動的ひずみ依存特性から等価剛性と減衰定数を設定して用いた。入力動については、解放基盤表面である解析モデル底面に設定した。設定の詳細は、解析ごとに説明する。

3.2 2004中越地震余震観測記録のシミュレーション解析

本節では、多数箇所の観測記録が得られた2004中越地震余震のシミュレーション解析により、地盤および建屋モデルの妥当性を検証

図4 建屋の解析モデル

図5 5号機原子炉建屋の解析モデル

図6 滑り条件

表2 地盤物性					
標高 T. M. S. L. (m)	地層	層厚 H (m)	せん断波速度 Vs (m/s)	密度 ρ (g/cm ³)	ポアソン比 ν
12.0 ▽					
0.0	埋戻土	12.0	170	2.00	0.48
-9.0	安田層	9.0	310	1.80	0.48
-60.0	西山層	51.0	490	1.70	0.45
-100.0		40.0	560	1.80	0.44
-134.0		34.0	610	1.80	0.43
	解放基盤		710	2.03	0.42

図7 地盤の動的ひずみ依存特性

した。まず解析モデル底面（解放基盤表面）の入力動の設定手順と解析結果について述べる。入力動は、複数の観測点の応答加速度が観測記録と一致するように設定した。具体的には、観測点 R52 および R54 をそれぞれターゲット観測点として解放基盤表面との伝達関数を求め、これらの伝達関数を用いて R52 位置および R54 位置の観測記録に一致する入力波を求め、これらを平均した波形を入力動とした（図 8）。伝達関数は、地中位置の R56 における観測記録を入力動とした予備解析結果から算定した。

図 8 2004中越地震余震の入力動

図10 建屋列 EW 方向の加速度応答スペクトル（減衰 5%）

図11 建屋列 EW 方向の加速度時刻歴波形

建屋と建屋直下地盤の観測点（建屋列：R51～R56 列）の最大加速度分布について、観測記録と解析結果を比較した結果を図 9 に示す。観測記録と解析結果は EW 方向、UD 方向ともに良い対応をしている。

次に、建屋内の観測点 R52、R54 とその直下の地中観測点 R56 で、応答スペクトルと時刻歴波形について、観測記録と解析結果を比較した結果を、EW 方向は図10と図11に、UD 応答方向は図12と図13にそれぞれ示す。EW 方向の応答スペクトルにおける卓越周期

図 9 建屋列（R51-R56）の最大加速度分布（観測と解析）

図12 建屋列 UD 方向の加速度応答スペクトル（減衰 5%）

図13 建屋列 UD 方向の加速度時刻歴波形

は観測記録と良い対応をしている。振幅もおおよそ対応している。時刻歴波形についても地震全時間にわたって良い対応をしている。

一方、UD 方向の建屋の応答スペクトルについても解析と観測はよく対応している。とくに4階（R52）の応答スペクトルは、B4階（R54）には無い0.1秒近傍のピーク振動について解析結果と観測結果が一致しており、3次元解析モデルが鉛直動をよく表現しているといえる。しかし、応答スペクトルの地中（R56）の解析結果は観測記録と比べると0.5秒付近のピークにおける周期、振幅の対

図14 解放基盤表面での入力動

応がやや悪い。これは解析モデルの建屋支持層のモデル化においてポアソン比から得られる縦波速度の整合性が悪い可能性が考えられる。時刻歴応答結果については、地中部R56の4秒付近の時刻歴を除けば観測記録とよく一致しており、本解析モデルは、建屋の地震時挙動検討には十分な精度をもつと考えられる。

3.3 2007中越沖地震観測記録のシミュレーション解析

本節では地盤が弾塑性挙動をしたと考えられる2007中越沖地震に

図15 地盤の最大せん断ひずみ分布

図16 基礎版上（5-R2）の加速度応答スペクトルの比較 減衰 5%

図18 中間階（5-R1）の加速度応答スペクトルの比較 減衰 5%

図17 基礎版上（5-R2）の加速度時刻歴波形の比較

図19 中間階（5-R1）の加速度時刻歴波形の比較

対するシミュレーション解析を行い観測記録と比較を行った。はじめに地盤の非線形材料物性の設定手順について述べ、つぎに解析結果の妥当性について述べる。

地盤の弾塑性挙動は、等価線形解析により評価した。ひずみに応じた地盤の等価剛性や減衰定数は以下に示す手順で求めた。原子炉建屋の解析モデル下端（解放基盤表面）に線形解析で得られている初期入力動を設定した時刻歴応答解析を行い、建屋周辺地盤（東西南北、建屋側面の中心位置で建屋から20m離れた地点）における深さ毎の有効せん断ひずみの平均値を求め、このひずみより求めた等価剛性と減衰定数により再度地震応答解析を行い、この結果の基礎版上（5-R2）の応答加速度が観測記録と一致するかを確認する。一致しない場合は、この結果より得られる伝達関数を用いて再度入力動を計算し、この入力動を用いた地震応答解析を行い、基礎版上の応答加速度が観測記録と適合するまで繰返し計算を行った。繰返し計算の際の等価剛性と減衰定数は、前回地震応答解析結果の有効ひずみを参照して、図7に示すひずみ依存特性より設定した。ここで、有効ひずみは最大せん断ひずみの0.65倍とした。なお、西山層の減衰定数は、設計時と同様に3%の下限値を設けた。

繰返し計算によって得られた入力動を用いた解析結果における上記建屋周辺地盤（東西南北壁）の最大せん断ひずみ分布を、図15に示す。支持岩盤の西山層では最大せん断ひずみが0.1%程度であったが、埋戻土や表層では一部で1.0%近かったことが分かる。埋戻土の等価剛性の低下率は0.2程度になるが、このときの埋戻土層の固有周期は1sを超え、建屋と地盤の相互作用は小さく（建屋と地盤は同じ動きをし）、埋戻土の非線形性が建屋振動に与える影響は小さいと考えられる。解放基盤表面の入力動も、繰返し計算により得られ、入力動の最大値は、EW方向で800cm/s²近い値となった（図14）。

上記で得られた解析結果の精度を観測記録との比較により確認した。まず、図16と図17に示すターゲット点である基礎版上での加速度応答スペクトルと時刻歴波形は、観測記録と比較し十分な精度が得られていることを確認した。

中間階での加速度時刻歴波形と応答スペクトルの比較を、図18と図19に示す。解析結果は応答スペクトルのピーク振動数をほぼ捉えており、その振幅についても観測記録と良く対応している。鉛直振動に対しては、建屋側面地盤の抵抗を無視した質点系モデルによる応答評価²⁾では、やや整合性が低かった鉛直加速度についても良く整合した。これは、3次元解析では鉛直振動の主な剛性を構成する壁に対して質量を構成する床が立体的に適切に評価されていること、建屋側面地盤の抵抗を考慮していることなどによるものと思われる。

4. 原子炉建屋の3次元挙動分析

本章では、前章の2007中越沖地震シミュレーション解析の結果を分析し、壁の応力分布、同一床上の応答加速度の違い、基礎版剛性の影響、建屋側面に作用する土圧などの3次元挙動について報告する。

4.1 壁応力分布

はじめに3次元有限要素モデルにより求めた有限要素毎のせん断

応力度分布を、建屋各階の外壁、内壁およびシェル壁について図20に示す。外壁、内壁については応答が大きかったEW方向（北壁と南壁）の値を図20（a）および（b）に、シェル壁は全体の値を図20（c）に示す。これらの壁の応力度にはかなりのばらつきがあったので、高さごとに中央値をあわせて示した。これらの応力度には、内壁 T.M.S.L.+0m 付近のようにかなり大きな値が見受けられたが、これらの大きな値についても設計配筋により負担できるせん断応力度（耐震壁の設計鉄筋比×鉄筋の短期許容引張応力度）より十

図20 せん断応力度分布

図21 南側の内壁と外壁のせん断応力度（図中単位はPa）

分小さかった。また内壁、外壁、シェル壁の応力度を比較すると、内壁の応力度が全体的に大きかった。一方、それらのばらつきの大きさはほぼ同じであった。

大きな値のせん断応力度の位置とばらつきの空間分布を把握するために、壁の各要素におけるせん断応力度の最大値の分布をせん断応力度の大きかった南側の内壁および外壁について図21に示した。Eの等高線で示す 1.6N/mm^2 の応力度が内壁の分布図には多く見られるが外壁の分布図には少なく、この図からも外壁に比べて内壁の応力度が大きい箇所が多いことが分かる。

また、図21中には壁の両側に直交壁・床がある位置を黒色の太線で、片側だけにある位置を灰色の太線で示しているが、せん断応力度の大きい領域（等高線Eなど）は、直交壁・床で囲まれた壁中心あるいは開口部隅近傍であることがわかる。逆に、直交壁・床で囲まれた領域に比べ、直交壁・床の位置ではせん断応力度は小さくなっており、等高線図として谷形状を示している。このことから壁のせん断応力度は、直交壁と床による拘束の影響を強く受けていることが分かる。なお、図21（b）によると、直交壁と床が片側だけにある場合には等高線図における谷形状が明確に見えにくくなっており、直交壁・床による拘束の影響が小さいためと考えられる。ま

た、外壁の応力に等高線の谷形状が少ないのは、直交壁が少ないためと考えられる。

つぎに、図22に JEAC4601-2008⁶⁾ に示される方法により算定した地下最下階と中間階のEW方向のスケルトン（ τ - γ 関係）上に得られた応力度の中央値を示す。ここで、 τ - γ 関係はコンクリートの強度を実強度とし得られている耐震壁全体の耐力を耐震壁の面積で割って求めたものである。解析により得られた各階でのせん断応力度 τ の中央値は、第一折れ点（コンクリートのひび割れ）より低くなっており、建屋を弾性状態と仮定したことが適切であったことが分かる。

4.2 同一床上的応答加速度

次に3階（中間階）床上の4点の加速度応答スペクトル（図23）より面内床変形の可能性について検討した。東西南北の各壁の中心位置の4点におけるEW成分の応答スペクトルの卓越周期は同じであるが、周期によって3割程度のピーク振幅の違いがある。詳細に見ると、振幅の違いは建屋振動の特徴を表していると考えられる。すなわち、0.11秒付近のピークでは、東壁と西壁の振幅が南壁と北壁の振幅よりも大きくなっているのに対し、0.27秒と0.48秒付近で

図22 地下最下階と中間階での τ - γ 関係（EW 方向）

図23 東西南北壁の応答スペクトル（3階，EW成分）

(a) 0.11秒（50000倍） (b) 0.27秒（5000倍） (c) 0.48秒（500倍）

図24 卓越周期における変形モード（周期（変形倍率））

図25 基礎版剛と基礎版柔における解放基盤表面からの応答倍率

図26 中間階の基礎版上に対するフーリエスペクトル比（UD）

図27 卓越振動数（10Hz 近傍）の鉛直方向の振動モード

はそれぞれ北壁だけ南壁だけが小さい。これらの卓越振動モードを把握するために、建屋四隅とその中間点の8点の変位から求めた各卓越周期の振動モードを調べ図24に示した。それぞれの変形は短周期になるほど小さくなるため、図24では変形倍率を変えて示した。

0.11秒付近の振動モードでは、建屋全体のねじり回転変位が小さく、床の面内変形と水平変位が混在するモードである。0.27秒付近の振動モードは、建屋全体のねじり回転変位と水平変位がほぼ同じ程度に混在するモードであり、回転中心は建屋中心より南側にある。0.48秒付近の振動モードは、建屋のねじり回転変位もあるが、水平変位が主となるモードである。これらの振動性状から、長周期振動成分では、床の面内変形による成分は小さく、水平変位が主となる。一方、短周期振動成分になると水平変位が小さくなるのに対して、ねじり回転変位や床の面内変形による成分が大きくなる。

床面内の変位は水平振動を中心とする長周期成分に支配されると考えられるが、上記のように卓越周期により振動モードに違いがあり、床に設置される構造物の固有周期によっては、ねじり回転や床面変形による床位置による振動性状の違いを考慮する必要があるかもしれない。

4.3 基礎版剛性が床応答におよぼす影響

先に示した観測記録 UD 方向の加速度応答スペクトルにおいて、中間階（5-R1、図18）には 10Hz 近傍に卓越振動が見られたが、基礎版上（5-R2、図16）には見られなかった。この振幅値には基礎版の剛性が関係することが文献³⁾に示されている。そこで5号機原子炉建屋についてもこの現象を検討するため、基礎版の剛性を実剛性とした3章の解析結果（基礎版柔）と実剛性の1000倍とした場合（基礎版剛）について比較した。

まず、基礎版剛性の違いが解放基盤波に対する応答に与える影響を調べた。解放基盤表面応答に対する中間階（5-R1）および基礎版上（5-R2）のフーリエスペクトル比を図25に示す。両者を比べると基礎版剛性による中間階のフーリエスペクトル比の違いは小さい。しかし、基礎版上の 10Hz 近傍のフーリエスペクトル比は基礎版剛の場合も基礎版柔の場合も 0.1 以下で非常に小さく、基礎版剛モデルは基礎版柔モデルの6割程度となっている。従って基礎版上に対する中間階のフーリエスペクトル比を求めると分母の変化が大きいいため、10Hz 近傍の基礎版剛のモデルでは基礎版柔モデルの約2倍となる（図26）。これより、基礎版剛性は、解放基盤波に対する建屋の応答を求める場合にはあまり大きな影響を与えないが、基礎版の振動を規定した解析を行う場合には影響が大きいことが分かる。

なお、基礎版上端位置のフーリエスペクトル比が小さい理由は、基礎版上端位置が鉛直振動モードの節となっているためである。図27は基礎版を剛とした場合について応答変位にフィルターをかけ 10Hz 近傍の振動成分を取り出して描いた建屋～地盤の最大変形図で、基礎位置近傍で変位ゼロのラインと交差し節になっていることが分かる。

4.4 建屋に作用する土圧分布

本節では、建屋底面と側面に作用する土圧分布性状を検討した。内壁位置に当たる NS 方向断面（RC 通り、RJ 通り）と EW 方向断面（R3 通り、R9 通り）の基礎版底面における土圧の最大値・

最小値分布を、図28に示す。これらの土圧は負側が圧縮で、図では下側になるほど土圧が大きくなることになる。土圧が正になると引張りが生じ、剥離の可能性のあることを意味する。ここで、図28に示す底面土圧は底面全域で圧縮側にあり、基礎浮上りの可能性はないと考えられる。EW 方向断面に関しては、建屋中心は土圧が小さく端部に行くに従い土圧が大きくなる剛版分布に対応した分布である。しかし、NS 方向断面に関しては、RC 通りは北側、RJ 通りは南側の土圧が小さく、傾いた分布形状になっている。このような形状は、水平動と鉛直動の位相差によって生じるものと考えられる。

また、2007中越沖地震では原子炉建屋周りの剥離、沈下が顕著であった⁷⁾。この現象を本解析で検討するために、建屋側面に作用する土圧の最大値分布（引張側）を調べた。図29に示す東西南北、各建屋側面の土圧の最大値分布は、ほぼ同じ形状をしている。埋戻土層では、これらの土圧分布が正になることから剥離をした可能性が大きく、安田層および西山層では、土圧分布が負となっており剥離は無かったと考えられる。さらに、建屋底面、側面ともに通り位置による土圧分布形状の違いは小さかった。

図28 基礎版底面土圧の最大値・最小値分布（通り芯沿い）

図29 側面土圧の最大値分布（EW 方向）

5. まとめ

2007年新潟県中越沖地震における柏崎刈羽原子力発電所5号機について、建屋各壁の応力、床の面内変形、基礎の面外変形の3次元挙動を検討した。検討は解析モデルの精度を多数の箇所に観測記録がある2004年新潟県中越地震の余震のシミュレーション解析により確認し、2007中越沖地震に対しては地盤のひずみによる剛性低下を考慮した等価剛性を用いた解析を行った。

2004中越地震余震のシミュレーションでは、建屋だけでなく地中の応答加速度も観測記録と良く対応し、地盤と建屋の連成解析モデルが適切に構築されていることを確認した。次に、2007中越沖地震のシミュレーション解析では、地盤のひずみ依存性を考慮するとともに、建屋側面と埋戻土の境界を滑り条件とした解析を行った。基礎版上の応答加速度が観測記録と一致するように入力動を設定して求めた中間階の応答加速度が、観測記録と良く整合することを確認した。

さらに、後者の2007中越沖地震のシミュレーション解析結果について3次元挙動の検討を行い以下の事が分かった。

- ・3次元解析により、外壁と内壁の違い、それぞれの壁内部の応力分布を把握できた。解析により得られた壁のせん断応力度は壁の位置によりバラツキがあり、最大値には中央値との比が2倍を超えるものがあるが、これらは開口部隅や直交壁と床で囲まれた部分であった。2007中越沖地震の解析ではこれらを含めた応力度の中央値はいずれも弾性範囲であった。
- ・一般に床の面内剛性は完全剛として取り扱われることが多いが、特定の高振動数では、床に大きな開口が有るときは、同一床上においても応答加速度が異なった。具体的には3階床の加速度応答スペクトルに10Hz近傍の卓越振動が見られ、その振動モードは加振方向に対して建屋中央線に沿った部分の応答振幅が建屋両側の壁に沿った部分に比べて大きかった。
- ・鉛直方向の振動については、基礎版を剛とした場合と柔性を考慮した場合の違いが、基礎版上に対する中間階のフーリエスペクトル比の10Hz近傍の値を大きく変えることが分かった。しかし、解放基盤表面に対する基礎版上のフーリエスペクトル比、および中間階のフーリエスペクトル比は基礎版の剛柔で大きく変わることは無く、解放基盤表面を入力とする応答解析では、基礎の剛柔が建屋の鉛直応答に及ぼす影響は小さいことがわかった。
- ・線形解析ではあるが、側面土圧および底面土圧分布を検討し、埋戻土で剥離・滑りが生じた可能性があることと、埋戻土下層の安田層や西山層ではその可能性は低いことが予想された。また、基礎浮上りの可能性はないと考えられる。

以上、3次元解析モデルによる原子炉建屋の3次元挙動について検討を行い、質点系モデルでは得られない知見を得た。また、3次元解析モデルを用いることにより局所的な被害想定が可能であることを示した。

近い将来、建屋と機器の連成振動といったさらに詳細な挙動評価や、地盤および建屋の弾塑性を考慮した大地震動に対する応答および耐力評価も3次元モデルで行うことが可能であると考えられる。

謝辞

本研究成果は、東京電力株式会社の社内委員会である「中越沖地震建物検討委員会」の検討成果を取り纏めたものである。委員各位には検討・取り纏めの過程で貴重なご意見を頂きました。記して謝意を表します。

[中越沖地震建物検討委員会の委員構成] ◎委員長、○副委員長
◎和田 章（東京工業大学）、○中井正一（千葉大学）、市之瀬敏勝（名古屋工業大学）、井上範夫（東北大学）、北村春幸（東京理科大学）、林 康裕（京都大学）、福和伸夫（名古屋大学）

参考文献

- 1) 東京電力(株)：柏崎刈羽原子力発電所における2007年新潟県中越沖地震など時刻歴データ(改訂版)、DVD TD-046、(財)震災予防協会、2007
- 2) 東京電力(株)：新潟県中越沖地震による柏崎刈羽原子力発電所原子炉建屋の応答評価について、総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会耐震・構造設計小委員会構造ワーキンググループ（第9回）及び中越沖地震における原子力施設に関する調査・対策委員会運営管理・設備健全性評価ワーキンググループ設備健全性評価サブワーキンググループ（第3回）合同会合配布資料 構造W09-2、2008.1.11
- 3) (独)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）、総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会耐震・構造設計小委員会構造ワーキンググループ 第16回会合配布資料 構造W16-1、2008.7.14
- 4) 西田明美、塩見忠彦：CAD データを活用した原子力施設の大規模3次元地震応答解析、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2、pp.1071-1072、2007
- 5) (独)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、4章埋込み効果の解析、pp.4.2-4.15、2006
- 6) (社)日本電気協会：原子力発電所耐震設計技術規程 JEAC4601-2008、2009.12.
- 7) 東京電力(株)：新潟県中越沖地震に対する柏崎刈羽原子力発電所の耐震安全性の検討状況について、総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会耐震・構造設計小委員会地震・津波、地質・地盤合同ワーキンググループ、第3回会合配布資料 合同W3-1、2007.12.25

(2010年6月10日原稿受理、2010年9月13日採用決定)