

## 第5章 目次

5. 安全上重要な建物・構築物の耐震安全性評価	5-1
5.1 評価方針	5-1
5.2 原子炉建屋の地震応答解析	5-3
5.2.1 原子炉建屋の概要	5-3
5.2.2 原子炉建屋等の地震応答解析モデル	5-5
5.2.2.1 水平方向地震動に対する地震応答解析モデル	5-5
5.2.2.2 鉛直方向地震動に対する地震応答解析モデル	5-12
5.2.3 原子炉建屋の地震応答解析結果	5-15
5.2.3.1 水平方向地震動に対する地震応答解析結果	5-15
5.2.3.2 鉛直方向地震動に対する地震応答解析結果	5-29
5.2.3.3 外周壁の曲げ変形に対する地震応答解析結果	5-39
5.3 生体遮へい体の地震応答解析	5-44
5.3.1 生体遮へい体のモデル	5-44
5.3.2 解析結果	5-46
5.4 使用済み燃料プール室プールの解析結果	5-47
5.5 基礎地盤の地震応答解析	5-52
5.6 評価基準	5-54
5.7 評価結果	5-56
5.7.1 原子炉建屋の評価	5-56
5.7.2 原子炉建屋屋根版の評価	5-61
5.7.3 生体遮へい体の評価	5-64
5.7.4 使用済み燃料プール室プールの評価	5-65
5.7.5 基礎地盤の評価	5-66
5.7.5.1 地盤の許容支持力の算定	5-66
5.7.5.2 基礎地盤の評価	5-69
5.8 参考文献	5-71

## 5 . 安全上重要な建物・構築物の耐震安全性評価

### 5.1 評価方針

安全上重要な建物・構築物の耐震安全性評価は、基準地震動  $S_s$  に対する施設の安全機能を保持する観点から実施する。

耐震安全上重要な機器・配管系(以下、「Sクラスに相当する設備・機器」という。)を内包している建物・構築物としては、原子炉建屋および生体遮へい体がある。これらの内、原子炉建屋に対しては「生体遮へい体等の支持機能」及び「生体遮へい体等への波及的影響の防止機能」の保持等が地震時に要求される。一方、生体遮へい体に対しては「炉心の冠水維持機能」、「炉心の保護機能」、「放射線の遮へい機能」の保持が地震時に要求される。従って、建物・構築物の耐震安全性評価は原子炉建屋及び生体遮へい体を対象とする。一方、原子炉建屋に隣接する原子炉棟には使用済み燃料プール室プールがあり、プールは安全上重要な施設として耐震安全性評価結果を行うが、原子炉棟についてもプールへの波及的影響の観点から検討した。

建物・構築物の耐震安全性評価は「新耐震指針に照らした既設発電用原子炉施設等の耐震安全性の評価及び確認に当たっての基本的な考え方並びに評価手法及び確認基準について」(平成 18 年 9 月 20 日 原子力安全・保安院)を参考に、原子炉建屋については基準地震動  $S_s$  を用いた地震応答解析等により耐震安全上重要な機器・配管系に波及的影響が及ばないこと、生体遮へい体については基準地震動  $S_s$  によって生じる応力等が評価基準を満足することを確認する。

建物・構築物への入力地震動としては、4 章の第 4.3.2-1 表に示した中央構造線断層帯の断層モデルより評価した解放基盤表面の基準地震動  $S_s$ -2 に対する、解放基盤以浅の表層地盤の非線形増幅特性を考慮して得られた建屋基礎底レベル位置(GL-7.3m)での自由表面上での地盤応答波形を用いる。本章以降において、入力地震動と建屋応答解析ケースとの関係を第 5.1-1 表のように定義する。

第 5.1-1 表 入力地震動と建屋応答ケースとの対応

入力地震動成分	表層地盤のモデル	建物応答解析方向	建物応答成分記号
Ss-2 の NS 成分	等価線形	X	CASE1-X
		Y	CASE1-Y
Ss-2 の EW 成分	時刻歴非線形	X	CASE2-X
		Y	CASE2-Y
Ss-2 の UD 成分	線形	Z	CASE3-Z

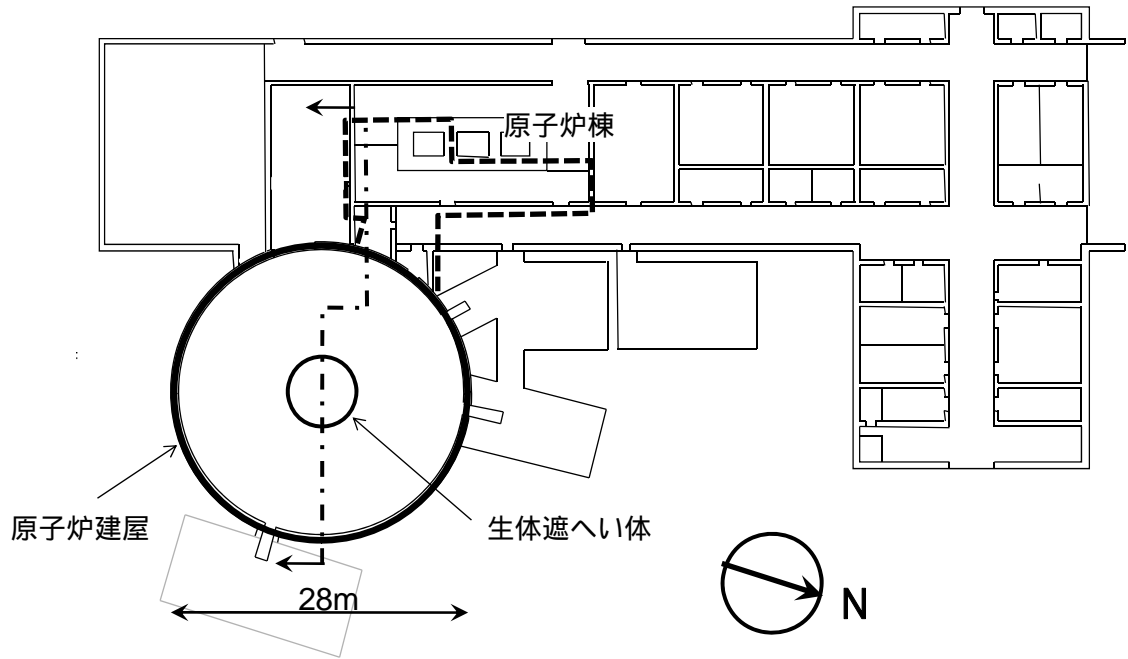
## 5.2 原子炉建屋の地震応答解析

### 5.2.1 原子炉建屋の概要

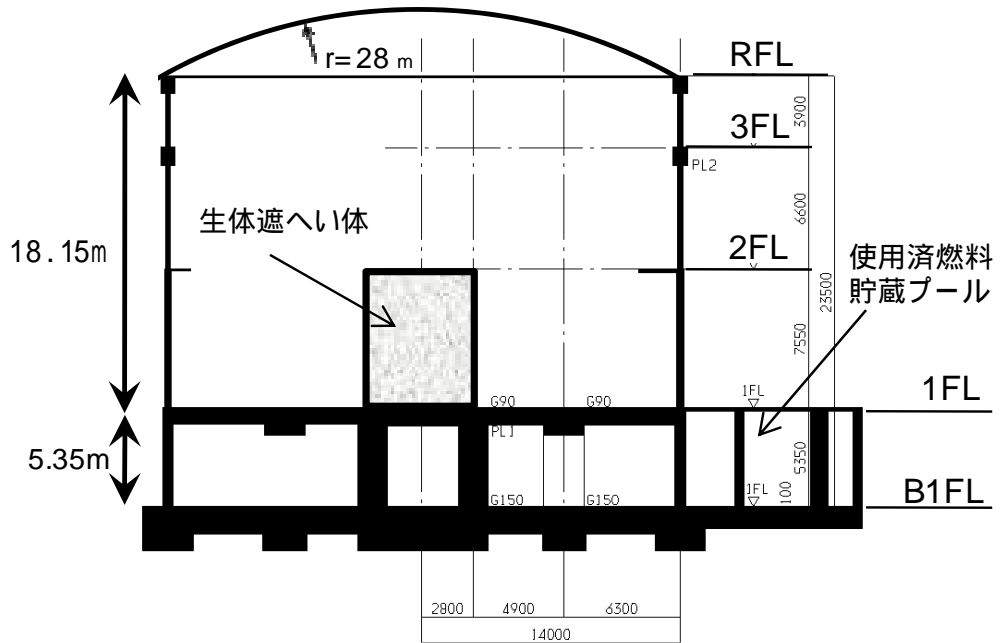
原子炉建屋は軒高さ 18.15m ( 屋根部分を含まず ) , 直径 28m の鉄筋コンクリート構造の円筒型のシェル構造物である。屋根は鉄筋コンクリート構造の球殻型のシェル構造物である。建屋外周壁の厚さは 300mm ~ 1000mm , 屋根スラブの厚さは 120mm ~ 200mm の厚さとなっている。基礎は地階床を兼ねた厚さ 1,500mm ~ 2,400mm のマットスラブであり , 1 階床面より -5,350mm の位置に地階床面がある。1 階床の中央部に生体遮へい体が据えられ , 生体遮へい体は生体遮へい体支持壁を介して基礎マットスラブにより支持されている。生体遮へい体の高さは 1 階床面から 7.3m , 重量は約 10,000kN となっている。

原子炉建屋に隣接する原子炉棟の地下部分には使用済み燃料プール室プール等があり , プールの基礎は原子炉建屋基礎と一体化した構造となっている。原子炉棟の地上構造は伸縮継手によって原子炉建屋とは構造的に切り離されている。

原子炉建屋の 1 階平面図と原子炉建屋断面図をそれぞれ , 第 5.2.1-1 図及び第 5.2.1-2 図に示す。



第 5.2.1-1 図 原子炉建屋及び原子炉棟の 1 階平面図



第 5.2.1-2 図 原子炉建屋及び原子炉棟地下部分の断面図

## 5.2.2 原子炉建屋等の地震応答解析モデル

### 5.2.2.1 水平方向地震動に対する地震応答解析モデル

#### (1) 原子炉建屋の弾塑性解析モデル

水平方向の地震応答解析モデルは、原子炉建屋基礎と地盤の動的相互作用を考慮した質点系モデルとする。基礎を1つの質点に集約し、基礎の並進動と回転動の復元力はスウェイ及びロッキングばね（以下「地盤ばね」という。）によりモデル化する。上部構造を4つの質点系に集約し、応答解析は基礎を含めた直列多質点の等価せん断型弾塑性地震応答解析モデル（以下「SRモデル」という。）として実施する。上部構造物の弾性域における減衰定数は3%とする。原子炉建屋の水平方向の地震応答解析モデルを第5.2.2-1図に示す。

原子炉建屋は円筒シェル構造であるため弾塑性応答性状を求めるにあたって、円筒壁を等価な正16角形の耐震壁(面外曲げ剛性を無視)付ラーメン構造モデルに置換し、せん断耐力式として(社)日本建築学会「建築耐震設計における保有耐力と変形性能(1990)」<sup>1)</sup>を適用する。このモデルに基づいて、原子炉建屋の各階の復元力特性がX方向(NS方向)、Y方向(EW方向)それぞれについて静的弾塑性立体解析モデルによる荷重増分解析結果から求める。各層のQ- $\delta$ 曲線(層せん断力-層間変形曲線)を、トリリニア型の骨格曲線に近似置換して与える。なお、履歴法則は、原子力発電所耐震設計技術指針JEAG4601-1991<sup>2)</sup>(以下、技術指針という)に基づき、最大点指向型の復元力特性とし、骨格曲線の設定において、荷重増分解析の接線剛性が初期剛性の85%に至る履歴曲線上の点(Q<sub>1</sub>,  $\delta_1$ )を第一折れ点とし、予備地震応答解析により想定した最大応答に至る同点(Q<sub>3</sub>,  $\delta_3$ )の接線剛性を第3勾配とする。第2折れ点は荷重増分解析の履歴曲線と骨格曲線が原点(0,0)～点(Q<sub>3</sub>,  $\delta_3$ )の定義域において履歴消費エネルギーが等価となるように決める。なお、後述する今回の入力地震動による最大応答値に至る履歴消費エネルギーにおいて、荷重増分解析による履歴曲線と骨格曲線とでは差が小さかったので、第3勾配として予備地震応答解析の値を用いる。

減衰は、上部構造については歪エネルギー比例減衰(減衰定数3%)をモードに関係なく一定としており、モード依存型減衰定数に比べて諸応答値が大きくなることを確認している。原子炉建屋の水平方向地震応答解析モデルの諸定数の値を第5.2.2-1表に示す。

地盤ばねは Lysmer 他<sup>3)</sup>による，地盤-建物動的相互作用解析系<sup>1)</sup>に基づいて基礎の根入れ効果を考慮するため，容積法を用いた動的サブストラクチャー法<sup>4),5)</sup>により精算した複素地盤ばねの実数部と虚数部から技術指針<sup>2)</sup>に基づき求める。指針によれば，地盤ばねの剛性は振動数ゼロの静的状態における実数部の値となり，減衰係数は SR モデルの 1 次固有振動数に対する虚数部の値と原点を結んだ直線の勾配となる。等価減衰定数はこれら地盤ばねの実数部と虚数部の値から求める。原子炉建屋の地震応答解析に用いる地盤ばねの設定を第 5.2.2-2 図に示し，各値を第 5.2.2-2 表に示す。地盤ばねは，第 4.2.2-4 表に示す地盤パラメーターに基づいて設定する。

#### (2) 原子炉建屋外周壁の弾性曲げ変形検討用モデル

円筒壁の面外曲げ変形および軸力による応力検討は第 5.2.2-3 図に示す弾性有限要素(FEM)モデルを用いて実施する。壁に曲率は設けずに平板を(1)と同様、16 角形に置換する。壁要素に生じる 2 方向(水平方向の断面と鉛直方向断面)の曲げモーメント - 軸力の評価は、それぞれの検討事項に応じて動的解析と静的解析を使い分ける。いずれも、基礎底版で固定境界を設ける。動的解析時の固定境界に与える入力地震動として、(1)の質点系モデルにおける B1F 階の質点の応答波形を用いる。静的解析時の外力として、(1)の質点モデル系の各質点に作用する最大応答水平力を算定し、同等の層レベルの FEM モデル各節点に各 FEM 要素の質量分布を考慮して分布させる。

#### (3) 原子炉建屋屋根版の弾性解析モデル

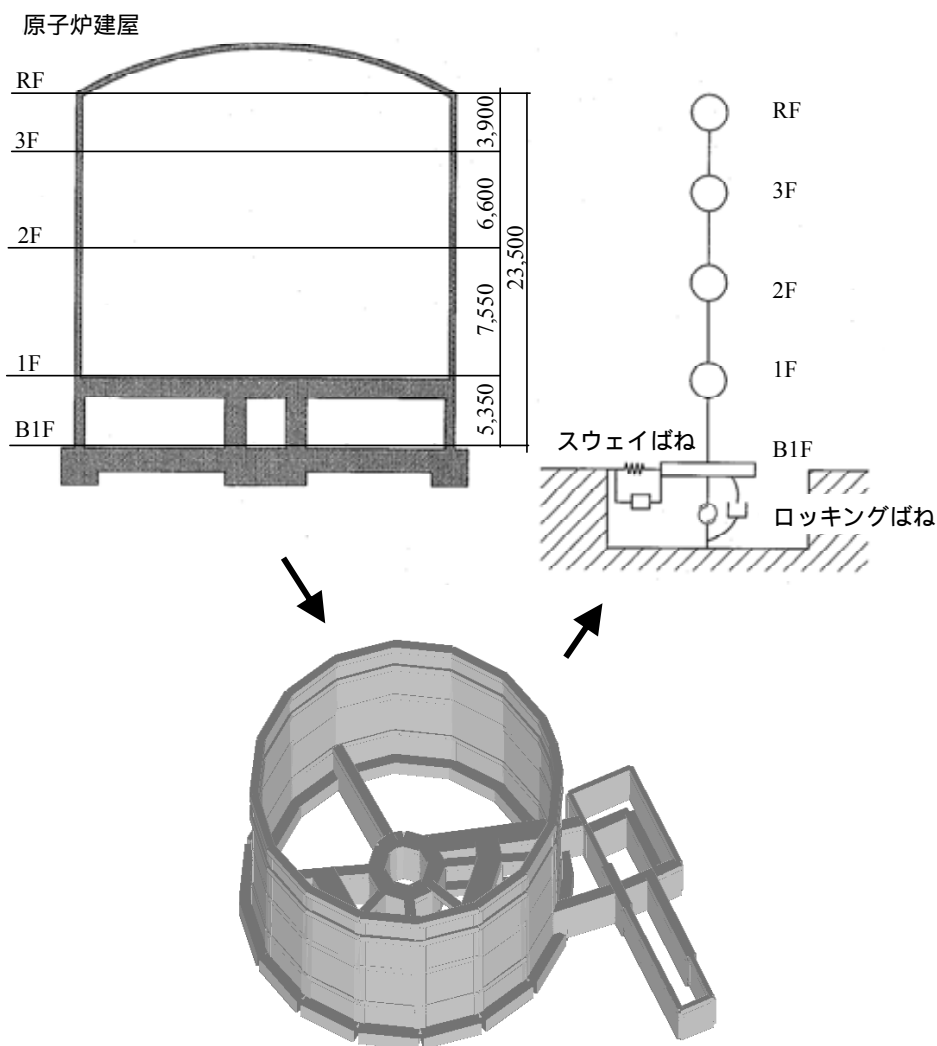
屋根版の水平方向地震応答解析モデルは，球殻型の屋根部分を円周方向と法線方向をそれぞれ均等に分割した FEM モデルとし，周辺を固定境界条件とする。地震応答解析は，モード重ね合わせ法に基づく線形時刻歴応答解析として行う。減衰は，歪エネルギー比例減衰(減衰定数 3%)とする。屋根版の水平方向地震応答解析モデルを第 5.2.2-4 図に示し，屋根版の固定荷重と積載荷重を第 5.2.2-3 表に示す。

#### (4) 原子炉棟の弾塑性解析モデル

プールを覆う原子炉棟の応答解析は，基礎固定による 3 質点の等

価せん断弾塑性地震応答解析モデルとして実施する。復元力特性はトリリニア原点指向型、減衰は剛性比例型（減衰乗数 3%）とした。原子炉建屋と原子炉棟が地上部において伸縮継手によって分離されているので振動の連成効果は無視する。一方、プール側壁を含む原子炉棟の一部基礎部分（第 5.2.1-1 図の破線部分）が原子炉建屋基礎と一体となっているため、原子炉棟からの地震力の一部を原子炉建屋基礎への付加荷重として考慮する。付加荷重としては地震応答解析から得られた 1 階床レベルのせん断力（ベースシェア）に原子炉棟全体の建築面積に対する上記の基礎一体化部分の面積の比率を乗じることにより求める。原子炉棟の地震応答解析モデルを第 5.2.2-5 図に示す。

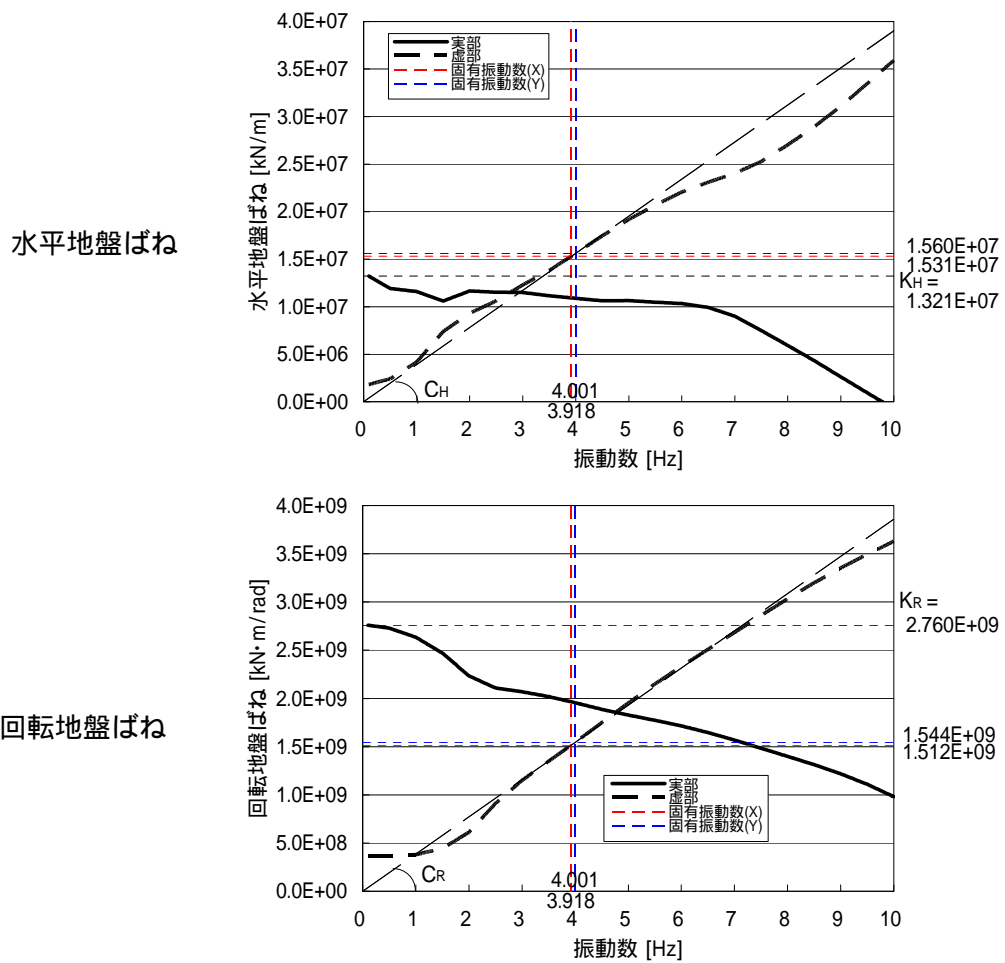




第 5.2.2-1 図 原子炉建屋の水平方向地震応答解析のモデル化

第 5.2.2-1 表 原子炉建屋の水平方向地震応答解析モデルの諸定数の値

階	重量 (kN)	階高 (m)	X方向					Y方向				
			$K_1$ (kN/cm)	$Q_1$ (kN)	$K_2$ (kN/cm)	$Q_2$ (kN)	$K_3$ (kN/cm)	$K_1$ (kN/cm)	$Q_1$ (kN)	$K_2$ (kN/cm)	$Q_2$ (kN)	$K_3$ (kN/cm)
R	5,840	3.900	132,060	4,462	87,933	8,388	53,338	137,460	5,730	87,098	9,113	72,591
3	5,046	6.600	70,889	7,282	42,772	13,492	16,431	81,843	8,679	48,468	13,321	47,869
2	6,239	7.550	56,126	6,973	32,296	17,666	9,899	87,352	8,017	35,954	17,882	26,451
1	57,043	5.350	528,770	33,694	298,115	57,967	111,042	838,420	63,204	301,029	87,857	212,100
B1	99,335											
回転慣性(kN・m <sup>2</sup> )			8,033,930					8,033,930				

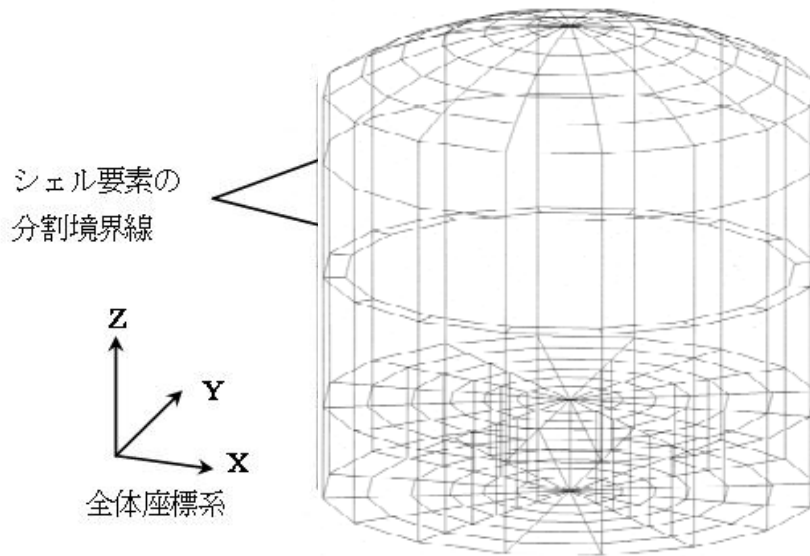


第 5.2.2-2 図 動的ウ\*ストラクチャ法を用いた地盤ばねの剛性及び減衰係数の精算値と地震応答解析モデルで用いる地盤ばねの剛性及び減衰係数の値

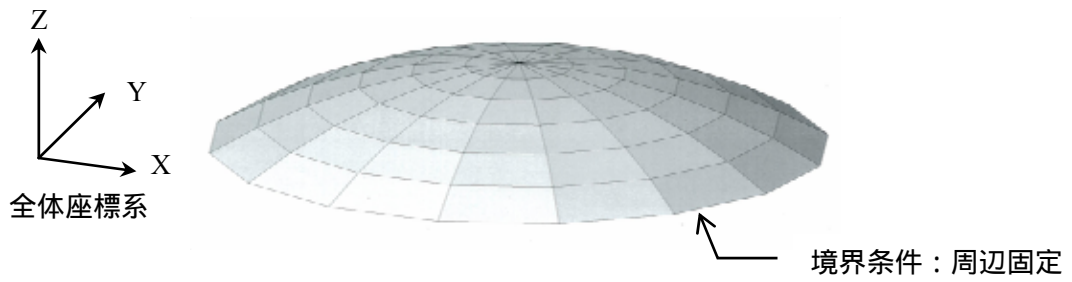
第 5.2.2-2 表 SR モデルの地盤ばねの定数

CASE-H1	X方向	Y方向
水平地盤ばね定数 $K_H$ (kN/m)	1.32E+07	1.32E+07
水平地盤減衰定数 $C_H$ (kN·s/m)	6.22E+05 (42%)	6.21E+05 (42%)
回転地盤ばね定数 $K_R$ (kN·m/rad)	2.76E+09	2.76E+09
回転地盤減衰定数 $C_R$ (kN·m·s/rad)	6.14E+07 (25%)	6.14E+07 (25%)

( ) 内は等価減衰定数



第 5.2.2-3 図 原子炉建屋の動的弾性解析用 FEM モデル  
(基礎底版で固定条件となっている)

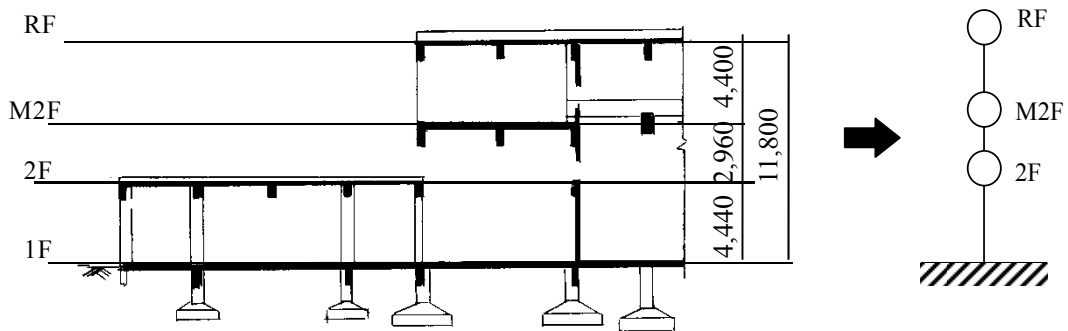


第 5.2.2-4 図 原子炉建屋屋根版の水平方向地震応答解析モデル

第 5.2.2-3 表 水平方向地震応答解析モデル用の屋根版の固定荷重

固定荷重(N/m <sup>2</sup> )		固定+積載荷重(N/m <sup>2</sup> )			
材料			床用	架構用	地震用
コンクリートスラブ t = 130	3,120	D.L.	6,020	6,020	6,020
仕上げ	2,900	L.L.	900	650	300
TOTAL	6,020	T.L.	6,920	6,670	6,320

ここで、屋根版のコンクリートスラブ厚は端部(幅約2.8m)200mm、中央部120mmと厚さが異なっているが、ここでは一律平均値(厚さ130mm)を用いている。



第 5.2.2-5 図 原子炉棟の水平方向地震応答解析のモデル化

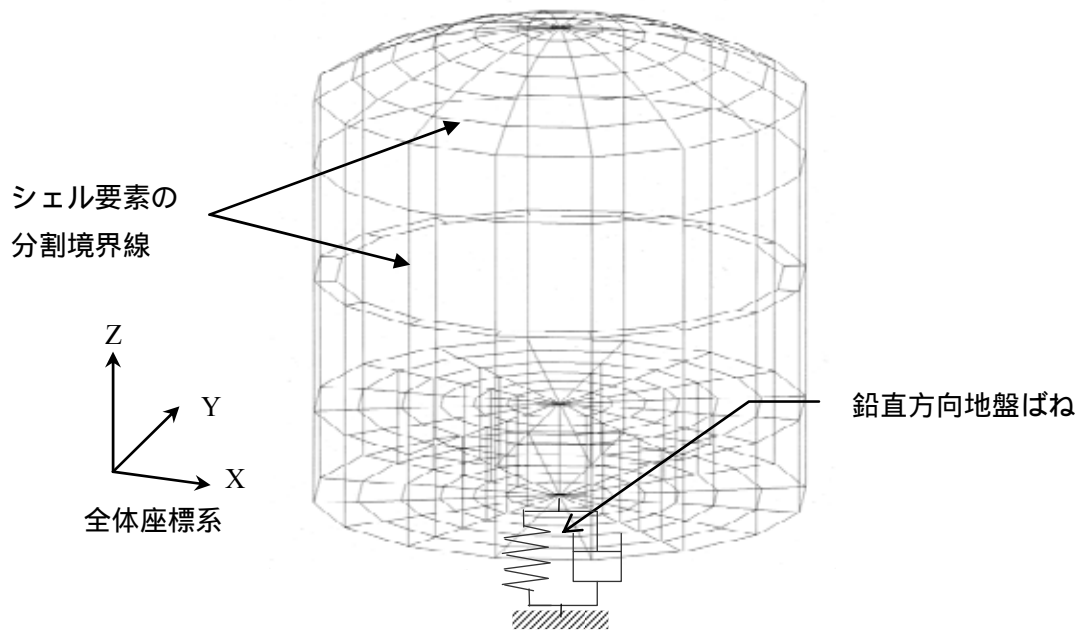
(断面図は一部のみを示しており、モデル化は原子炉棟全体として行っている)

#### 5.2.2.2 鉛直方向地震動に対する地震応答解析モデル

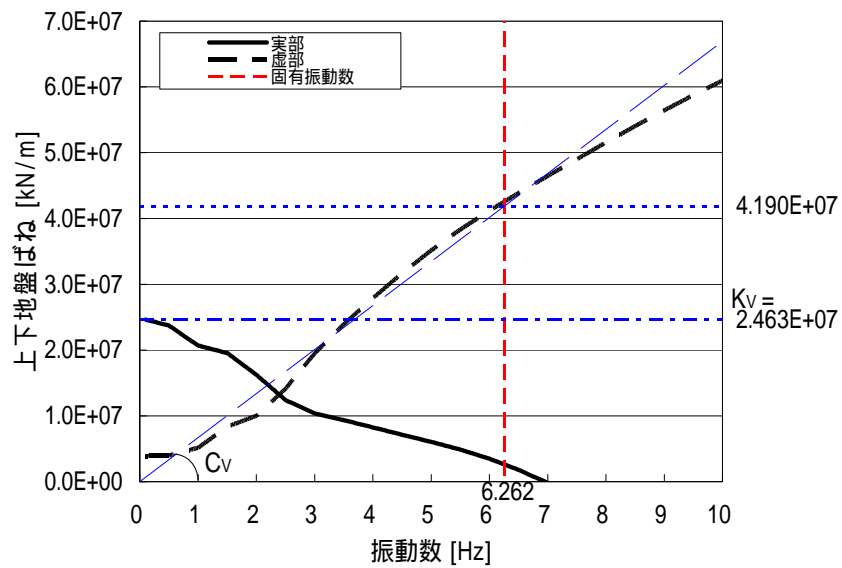
鉛直方向の地震応答解析は、原子炉建屋基礎と地盤の動的相互作用を考慮した鉛直地盤ばねに原子炉建屋の建屋外周壁，床スラブ及び屋根版を一体とする FEM モデルにより行う。1 階床スラブ，地下 1 階底版及び屋根版は，円周方向と半径方向をそれぞれ均等に要素分割し，建屋外周壁は，円周方向を均等に，高さ方向を各階床レベルに合わせて，それぞれ要素分割する。地震応答解析は，モード重ね合わせ法に基づく線形時刻歴応答解析として行う。原子炉建屋の鉛直方向の地震応答解析モデルを第 5.2.2-6 図に示す。

地盤ばねは，前節「5.2.2.1 (1)」と同様に技術指針<sup>2)</sup>に基づき求める。ただし，地盤ばねは鉛直方向にのみ自由度を持ち，減衰係数は鉛直の 1 次固有振動数における値を用いる。地盤ばねの算定の際に用いた地盤定数としても，前述「5.2.2.1 (1)」と同じ値を用いる。減衰は歪エネルギー比例減衰として与える。上部構造の減衰定数は 3%とする。

鉛直方向の地盤ばねの剛性及び減衰係数の精算値と地震応答解析モデルで用いる地盤ばねの剛性及び減衰係数の近似値の設定を第 5.2.2-7 図に示し，各値を第 5.2.2-4 表に示す。鉛直方向地震応答解析モデル用の建屋外周壁，床スラブ及び屋根版の各部材の固定荷重と積載荷重を第 5.2.2-5 表に示す。



第 5.2.2-6 図 原子炉建屋の鉛直方向地震応答解析のモデル



第 5.2.2-7 図 鉛直方向の地盤ばねの剛性及び減衰係数の精算値と地震応答解析モデルで用いる地盤ばねの剛性及び減衰係数の近似値

第 5.2.2-4 表 鉛直方向の地盤ばねの定数

	Z方向
上下地盤ばね定数 Kv(kN/m)	2.463E+07
上下地盤減衰定数 Cv(kN・s/m)	1.065E+06 (50%)

( ) 内は等価減衰定数

第 5.2.2-5 表 鉛直方向地震応答解析モデル用の部材の固定荷重と積載荷重

階名	固定荷重(N/m <sup>2</sup> )		固定+積載荷重(N/m <sup>2</sup> )				備考
	材料			床用	架構用	地震用	
RF	コンクリートスラブ t = 130	3,120	D.L.	6,020	6,020	6,020	
	仕上げ	2,900	L.L.	900	650	300	
	TOTAL	6,020	T.L.	6,920	6,670	6,320	
3F	クレーン荷重	600 KN					外周壁の各節点に付加する
2F	コンクリートスラブ t = 150	3,600	D.L.	3,600	3,600	3,600	
	仕上げ	0	L.L.	2,900	1,800	1,300	
	TOTAL	3,600	T.L.	6,500	5,400	4,900	
1Fa	コンクリートスラブ t = 1,350	32,400	D.L.	37,300	37,300	37,300	
	仕上げ	4,900	L.L.	25,500	25,500	25,500	
	TOTAL	37,300	T.L.	62,800	62,800	62,800	
1Fb	コンクリートスラブ t = 900	21,600	D.L.	26,500	26,500	26,500	
	仕上げ	4,900	L.L.	25,500	25,500	25,500	
	TOTAL	26,500	T.L.	52,000	52,000	52,000	
1F	炉体荷重	10,000 KN					中心付近の節点に付加する
B1Fa	コンクリートスラブ t = 2,400	57,600	D.L.	65,600	65,600	65,600	
	仕上げ	8,000	L.L.	68,600	68,600	68,600	
	TOTAL	65,600	T.L.	134,200	134,200	134,200	
B1Fb	コンクリートスラブ t = 1,500	36,000	D.L.	44,000	44,000	44,000	
	仕上げ	8,000	L.L.	68,600	68,600	68,600	
	TOTAL	44,000	T.L.	112,600	112,600	112,600	

ここで、屋根版のコンクリートスラブ厚は端部(幅約2.8m)200mm、中央部120mmと厚さが異なっているが、ここでは一律平均値(厚さ130mm)を用いている。

## 5.2.3 原子炉建屋の地震応答解析結果

### 5.2.3.1 水平方向地震動に対する地震応答解析結果

#### (1) 原子炉建屋の応答解析結果

原子炉建屋の水平方向地震応答解析においては、第 5.1-1 表に示したように、2 種類の入力地震動に対して、建屋の非対称性を考慮した 2 方向 (X 及び Y 方向) 入力を考え、合成 4 ケースの評価を行った。また、安全性の評価については、これらケースの応答の中から最も大きい値に対して行う。

原子炉建屋質点系モデルの固有周期を第 5.2.3-1 表に示す。なお、固有周期は SR モデルに加えて、基礎固定時のモデルによる値も参考のため併記した。SR モデルの刺激関数を第 5.2.3-1 図に示す。

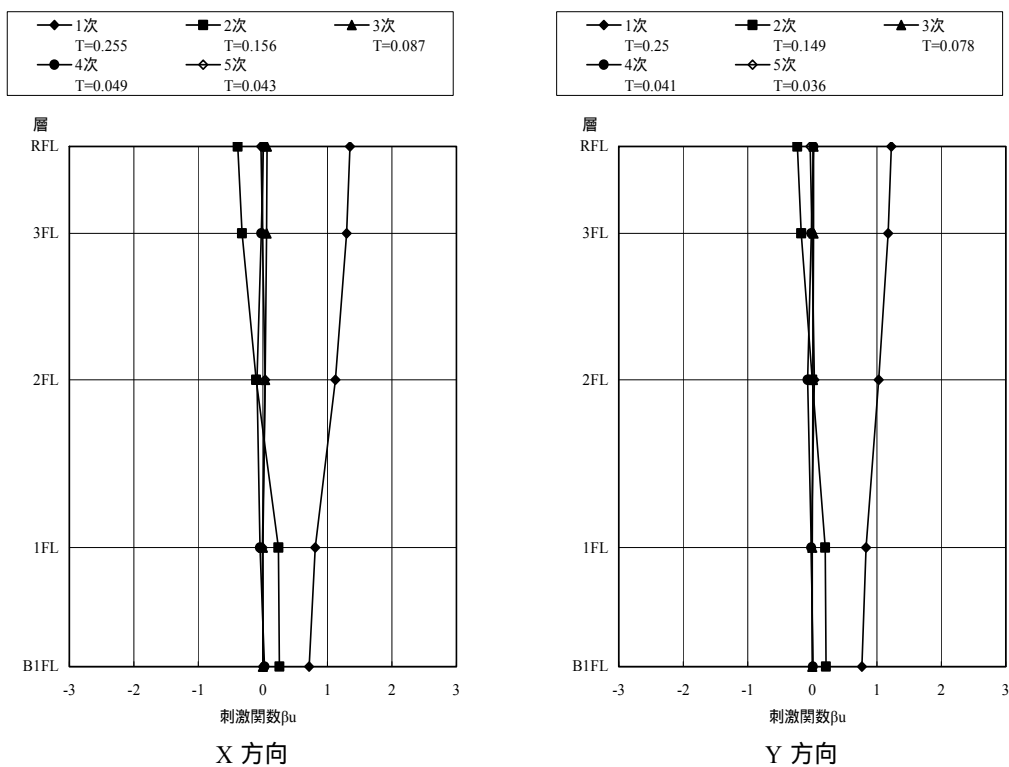
地震応答解析による最大応答値の一覧表を第 5.2.3-2 表に示し、最大応答値の建物高さ方向の分布形を第 5.2.3-2 図 ~ 第 5.2.3-8 図に示す。結果として、X 及び Y 方向の応答は、両方向とも表層地盤のモデル化として時刻歴非線形 (CASE2) を用いた結果の方が等価線形 (CASE1) を用いた結果より大きくなっている。



第 5.2.3-1 表 原子炉建屋の水平方向地震応答解析モデルの固有周期

モデル	方向	1次 (s)	2次 (s)	3次 (s)	4次 (s)
		T1	T2	T3	T4
基礎固定モデル	X	0.139 (7.205)	0.064	0.043	0.026
	Y	0.117 (8.524)	0.052	0.038	0.025
SRモデル	X	0.255 (3.918)	0.156	0.087	0.049
	Y	0.250 (4.001)	0.149	0.078	0.041

( ) 内は固有振動数 (Hz)

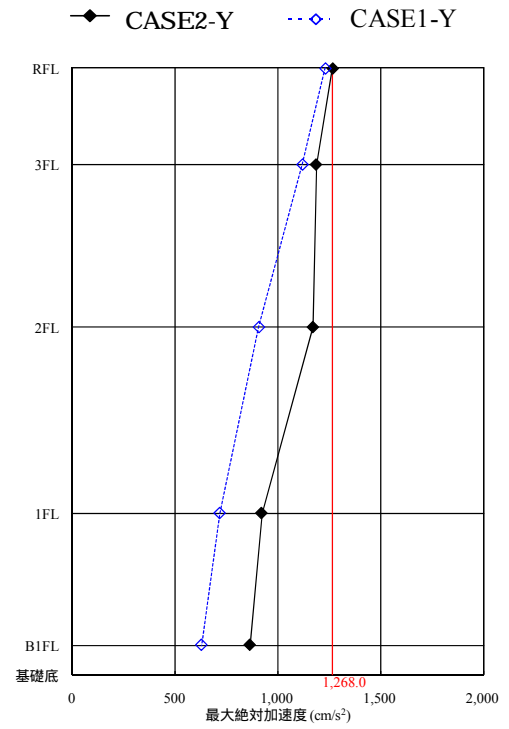
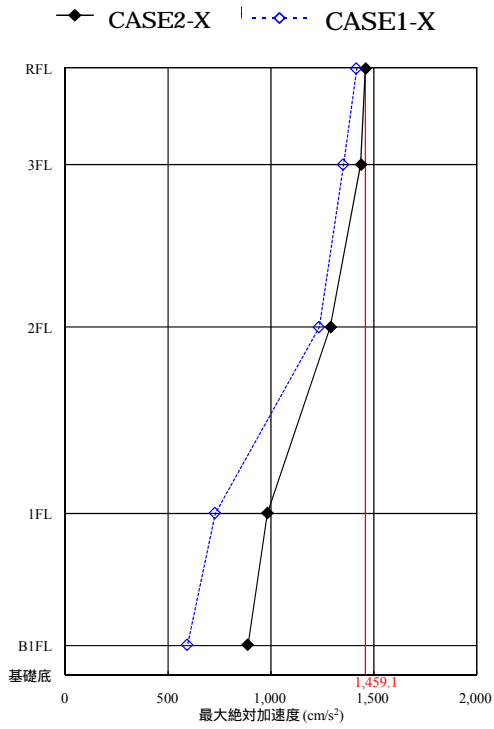


第 5.2.3-1 図 水平方向地震応答解析モデルの刺激関数(SRモデル)

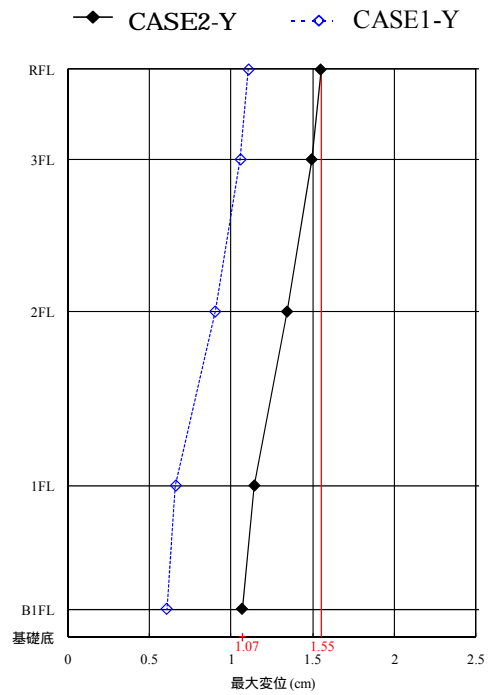
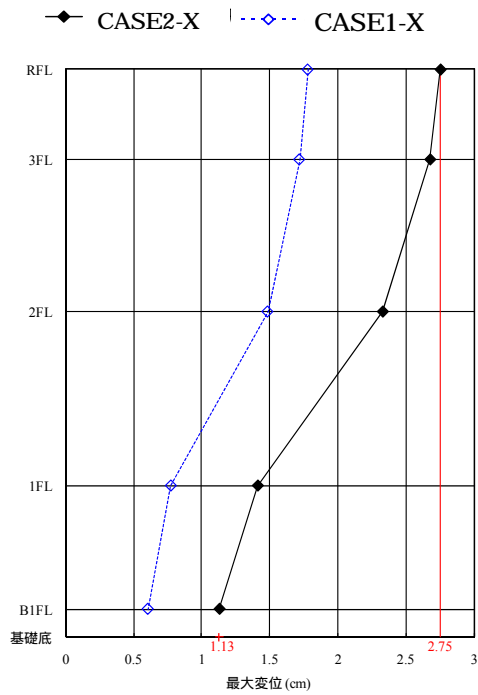
第 5.2.3-2 表 原子炉建屋の水平方向地震応答解析モデルの最大応答値

地震波	位置	CASE2-X	CASE2-Y	CASE1-X	CASE1-Y
最大応答 加速度 [cm/s <sup>2</sup> ]	階	X方向	Y方向	X方向	Y方向
	RFL	1459	1268	1416	1230
	3FL	1437	1186	1353	1119
	2FL	1290	1171	1235	908
	1FL	983	921	728	718
	B1FL	887	864	592	629
最大変位 [cm]	階	X方向	Y方向	X方向	Y方向
	RFL	2.75	1.55	1.78	1.11
	3FL	2.68	1.50	1.72	1.06
	2FL	2.33	1.35	1.49	0.90
	1FL	1.41	1.15	0.78	0.66
	B1FL	1.13	1.07	0.61	0.61
層間変位 [cm]	階	X方向	Y方向	X方向	Y方向
	3F	0.08	0.06	0.08	0.06
	2F	0.37	0.19	0.31	0.18
	1F	1.02	0.32	0.75	0.28
	B1F	0.34	0.10	0.18	0.07
層間変形 角[rad]	階	X方向	Y方向	X方向	Y方向
	3F	1/4678	1/6351	1/5047	1/6549
	2F	1/1768	1/3520	1/2115	1/3595
	1F	1/738	1/2371	1/1010	1/2696
	B1F	1/1572	1/5549	1/2908	1/7579
層せん断 力[kN]	階	X方向	Y方向	X方向	Y方向
	3F	8,651	7,518	8,286	7,350
	2F	15,550	13,234	14,543	13,017
	1F	23,272	19,950	20,553	18,373
	B1F	79,635	73,241	62,276	59,182
層せん断 力係数	階	X方向	Y方向	X方向	Y方向
	3F	1.48	1.29	1.42	1.26
	2F	1.43	1.22	1.34	1.20
	1F	1.36	1.17	1.20	1.07
	B1F	1.07	0.99	0.84	0.80
転倒モー メント [kN・m]	階	X方向	Y方向	X方向	Y方向
	3FL	33,738	29,319	32,314	28,663
	2FL	136,340	116,450	126,940	114,490
	1FL	311,870	262,770	280,330	253,180
	B1FL	731,720	654,340	595,320	550,880
	基礎底	835,246	749,553	676,279	627,817

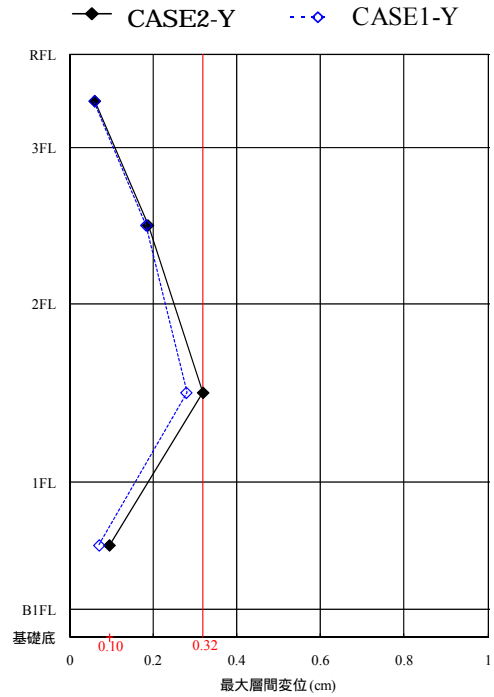
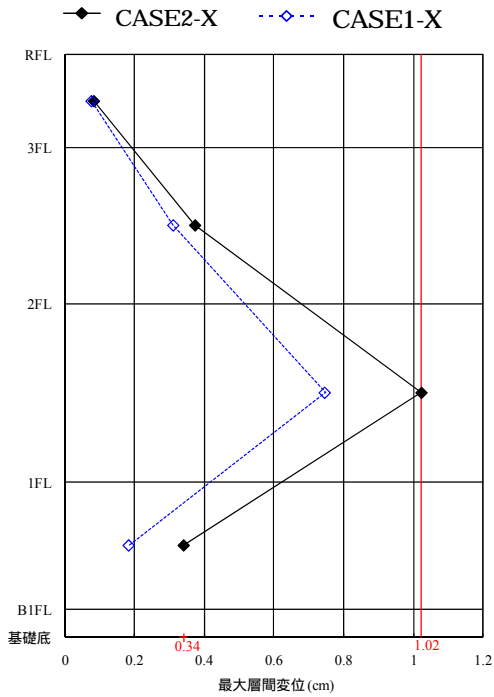
は最大応答値を示す



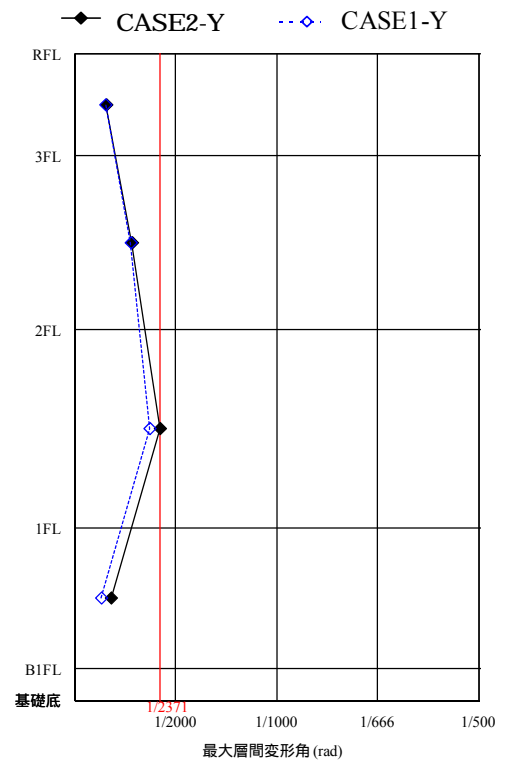
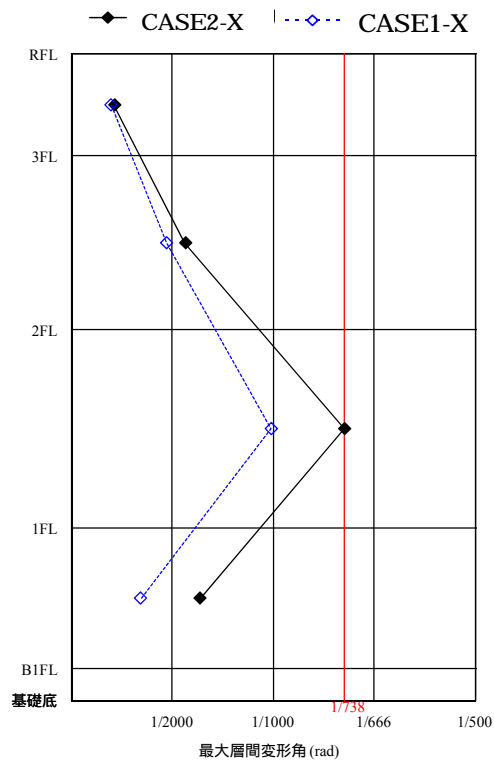
第 5.2.3-2 図 原子炉建屋の水平方向地震応答解析による最大加速度の分布 (朱書の値はすべてのケースにおける最大値)



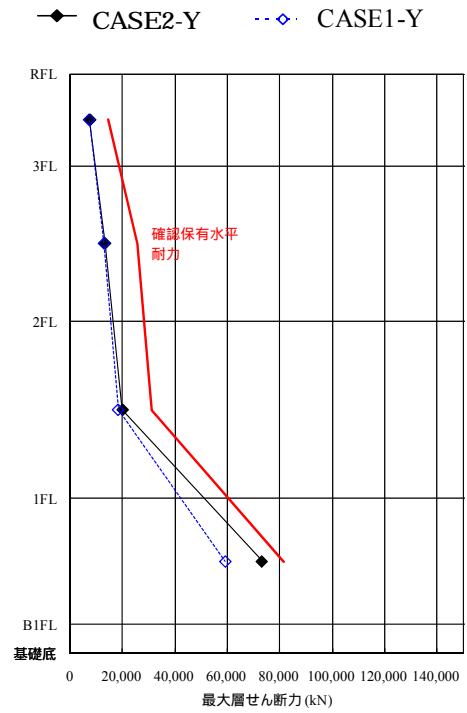
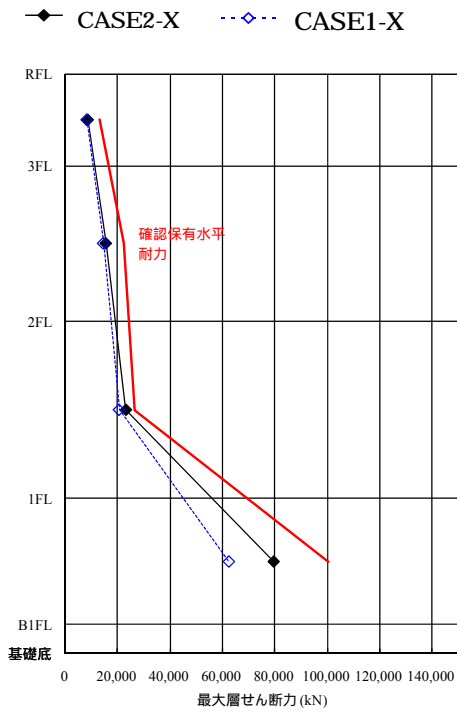
第 5.2.3-3 図 原子炉建屋の水平方向地震応答解析による最大変位の分布 (朱書の値はすべてのケースにおける最大値)



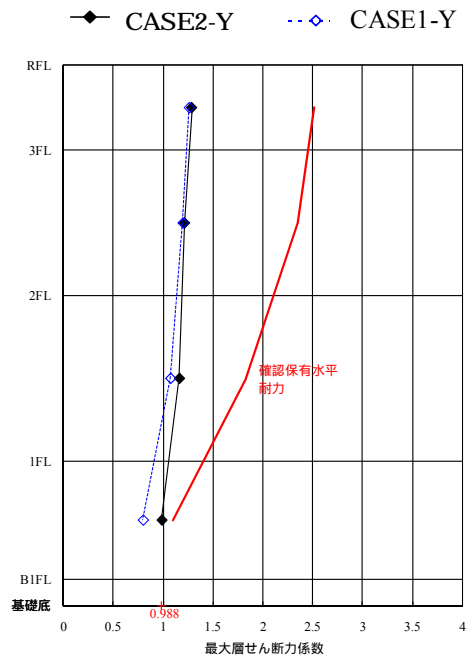
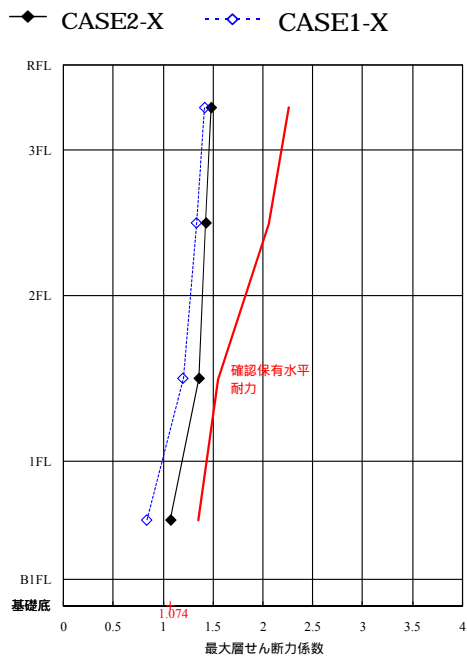
第 5.2.3-4 図 原子炉建屋の水平方向地震応答解析による最大層間変位の分布 (朱書きの値はすべてのケースにおける最大値)



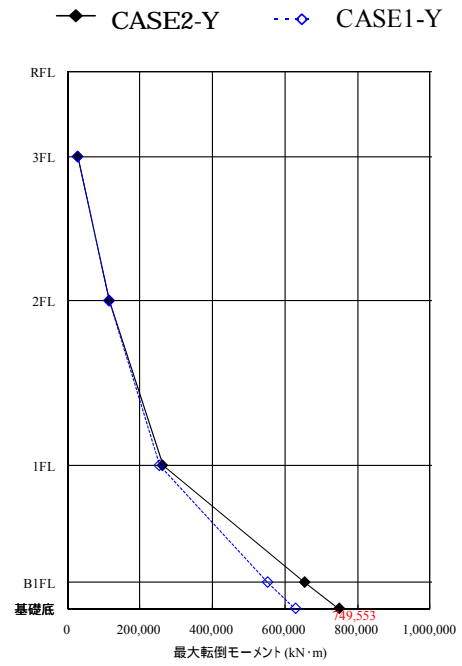
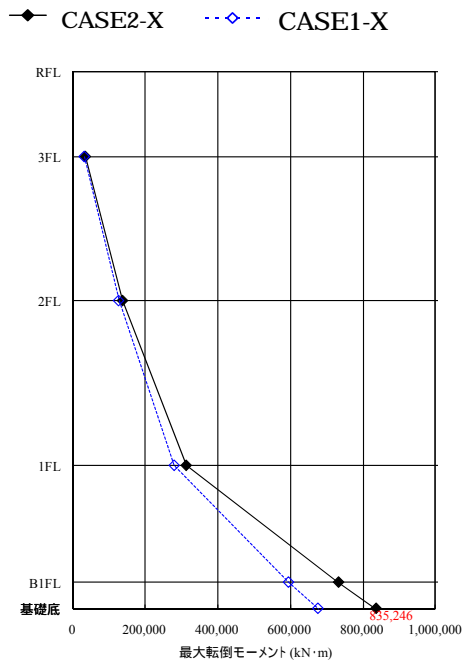
第 5.2.3-5 図 原子炉建屋の水平方向地震応答解析による最大層間変形角の分布 (朱書きの値はすべてのケースにおける最大値)



第 5.2.3-6 図 原子炉建屋の水平方向地震応答解析による最大層せん断力の分布



第 5.2.3-7 図 原子炉建屋の水平方向地震応答解析による最大層せん断力係数の分布



第 5.2.3-8 図 原子炉建屋の水平方向地震応答解析による最大転倒モーメントの分布 (朱書きの値はすべてのケースにおける最大値)