

5.2.3.2 鉛直方向地震動に対する地震応答解析結果

原子炉建屋の鉛直方向地震応答解析(CASE3-Z)は、基準地震動 S_s-2 の鉛直成分に対する原子炉建屋底面レベル(GL.-7.3m)での P 波一次元重複反射理論による応答波を用いる。鉛直方向の基礎-地盤ばねは地盤の時刻歴非線形地震応答解析(CASE2)と同様の地盤モデルを用いて求める。原子炉建屋の鉛直方向地震応答解析モデルの固有周期を第 5.2.3-5 表に、主要な固有モードを第 5.2.3-16 図に示す。

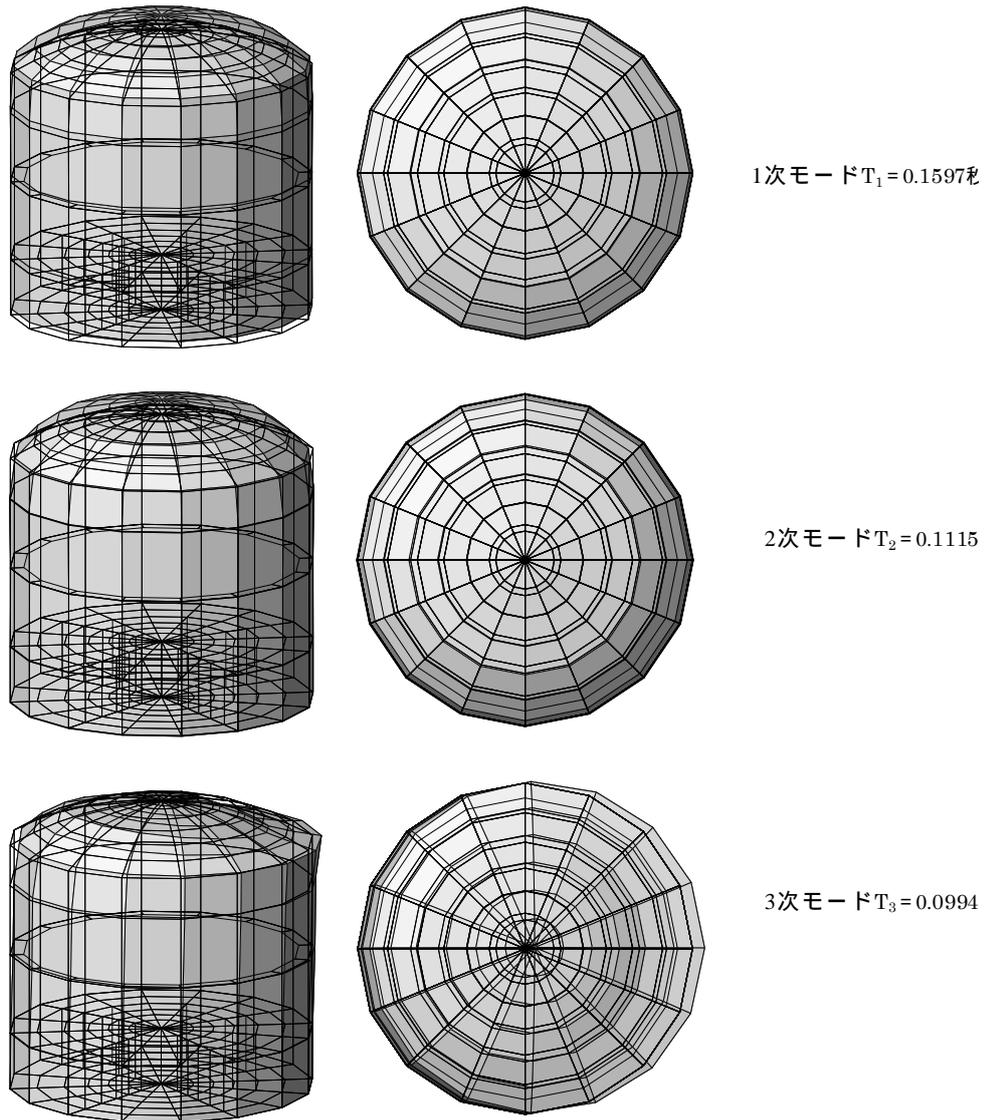
原子炉建屋の鉛直方向地震応答解析に対する建屋 1 階床と屋根版の最大絶対応答加速度の値を第 5.2.3-17 図に示す。

原子炉建屋の鉛直方向地震応答解析による安全性の評価は主として屋根版を対象とするので、屋根版に生じる断面力の最大値の分布を示す。屋根版の最大曲げモーメントの分布を第 5.2.3-18 図、最大圧縮軸力の分布を第 5.2.3-19 図、最大引張軸力の分布を第 5.2.3-20 図にそれぞれ法線方向と円周方向の 2 成分に対して示す。最大曲げモーメント及び最大軸力が比較的大きくなる屋根版中央部付近の断面力の最大値を第 5.2.3-6 表に示す。なお、この表の節点番号の位置は前掲の第 5.2.3-15 図に対応している。

屋根版に作用する短期荷重は地震応答解析による水平及び鉛直の 2 方向入力地震動による荷重に長期荷重が加わったものとなるので、長期荷重による屋根版に作用する断面力も計算する。長期荷重による屋根版の曲げモーメント分布を第 5.2.3-21 図に示し、軸力分布を第 5.2.3-22 図に示す。これら断面力が比較的大きくなる主な節点の最大断面力を第 5.2.3-7 表に示す。

第 5.2.3-5 表 原子炉建屋の鉛直方向地震応答解析モデルの固有周期(秒)

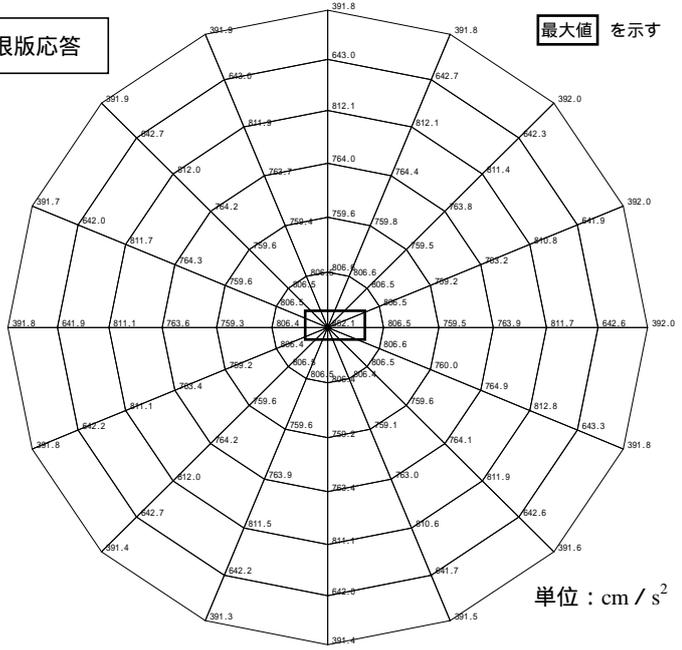
1次	2次	3次	4次
0.1597	0.1115	0.0994	0.0985



第 5.2.3-16 図 原子炉建屋の鉛直方向地震応答解析モデルの主要な固有モード

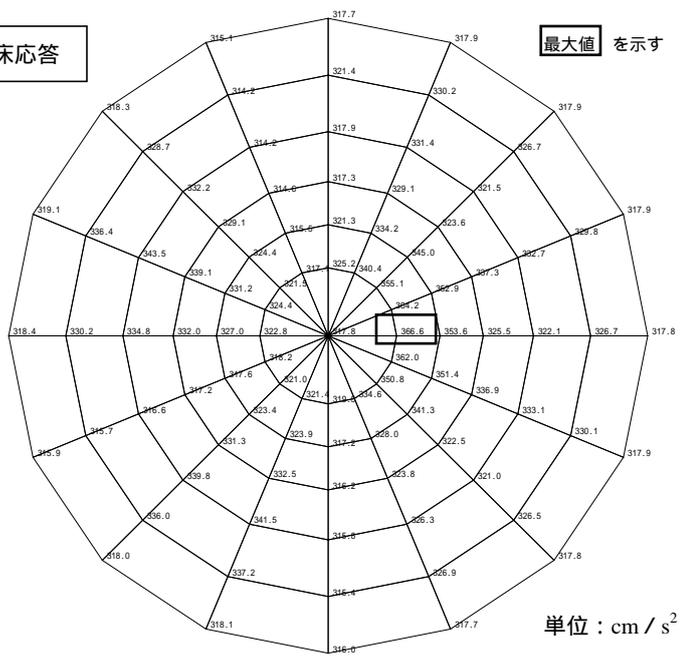
屋根版応答

最大値 を示す

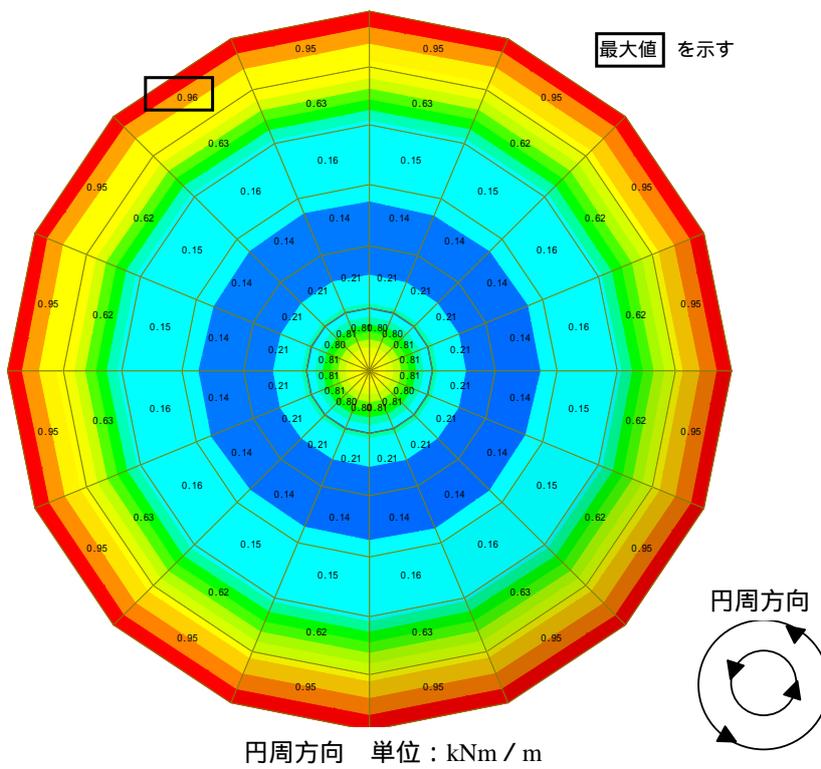
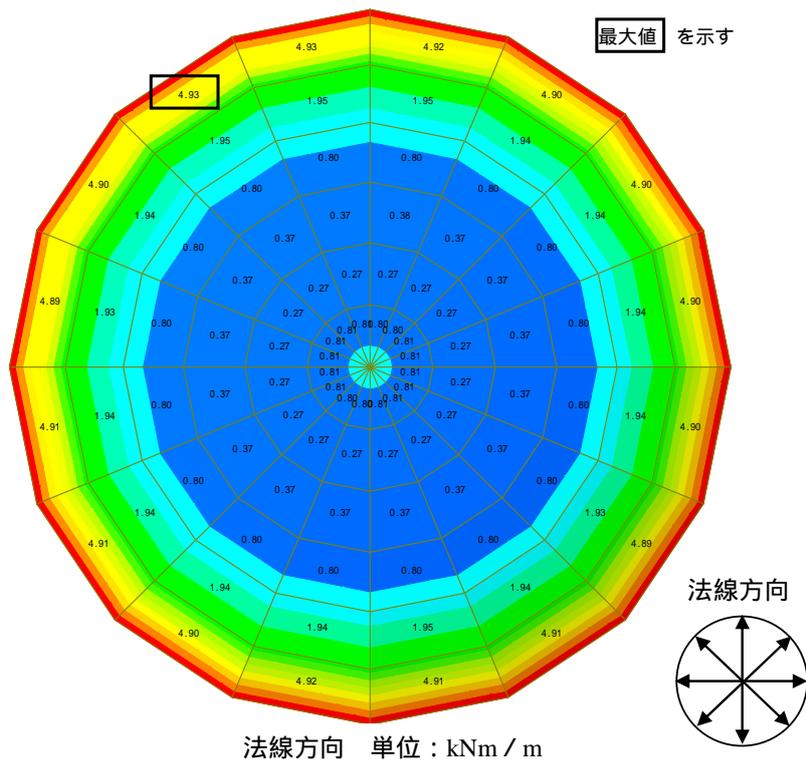


1階床応答

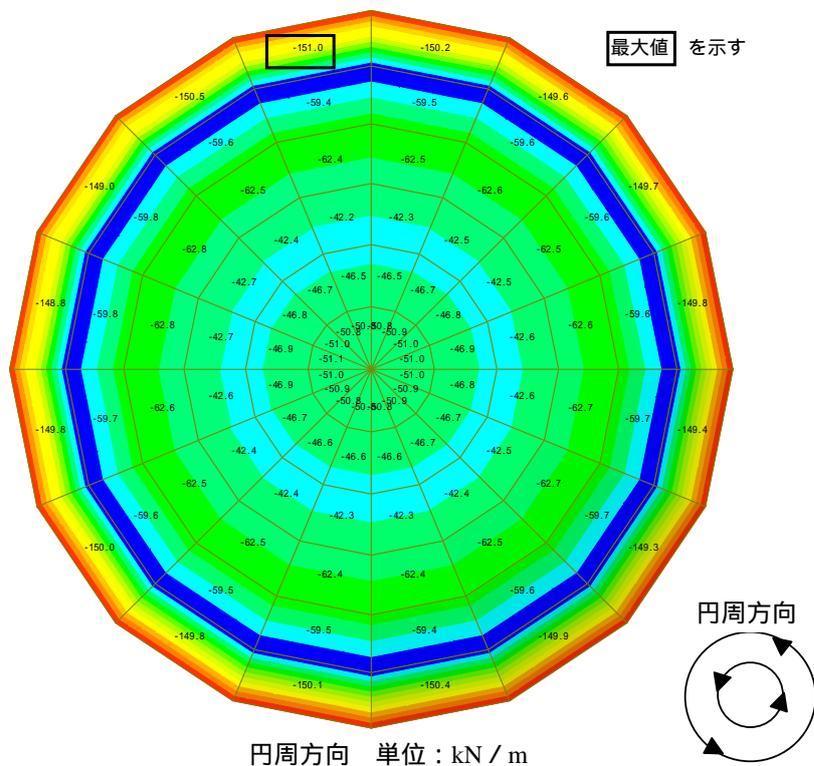
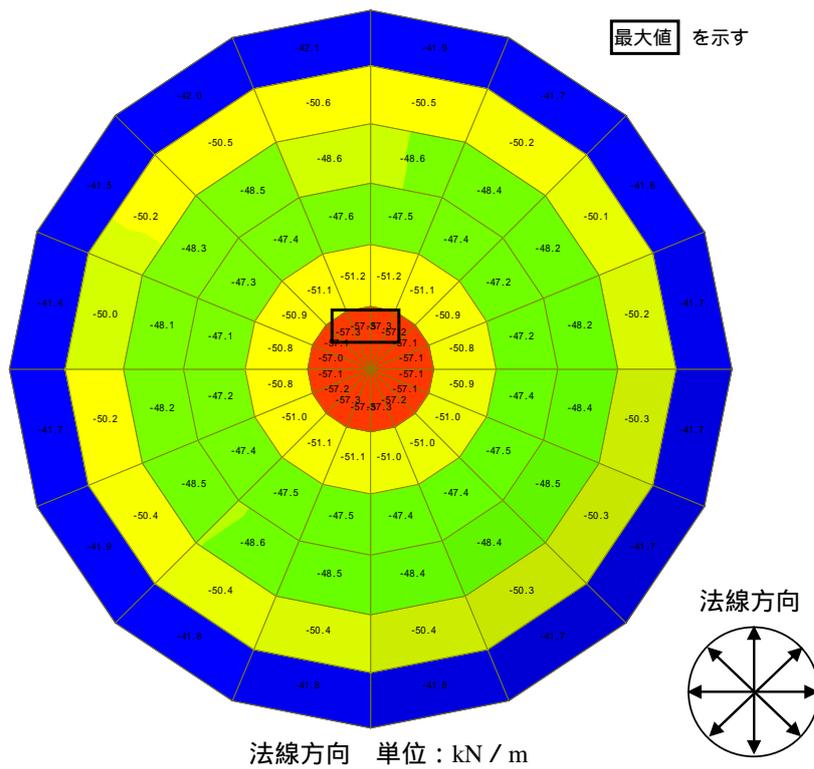
最大値 を示す



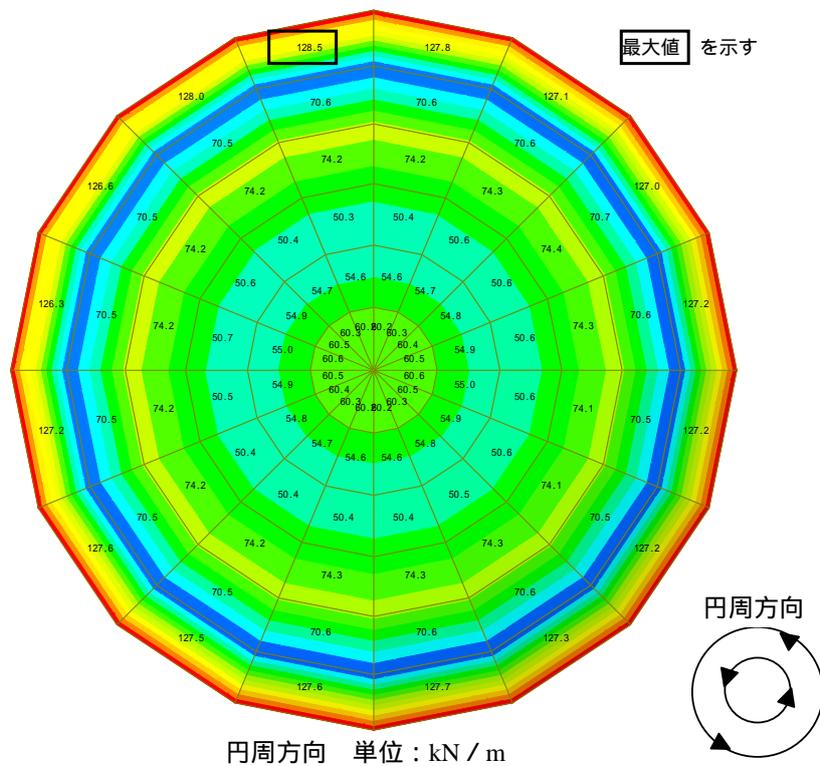
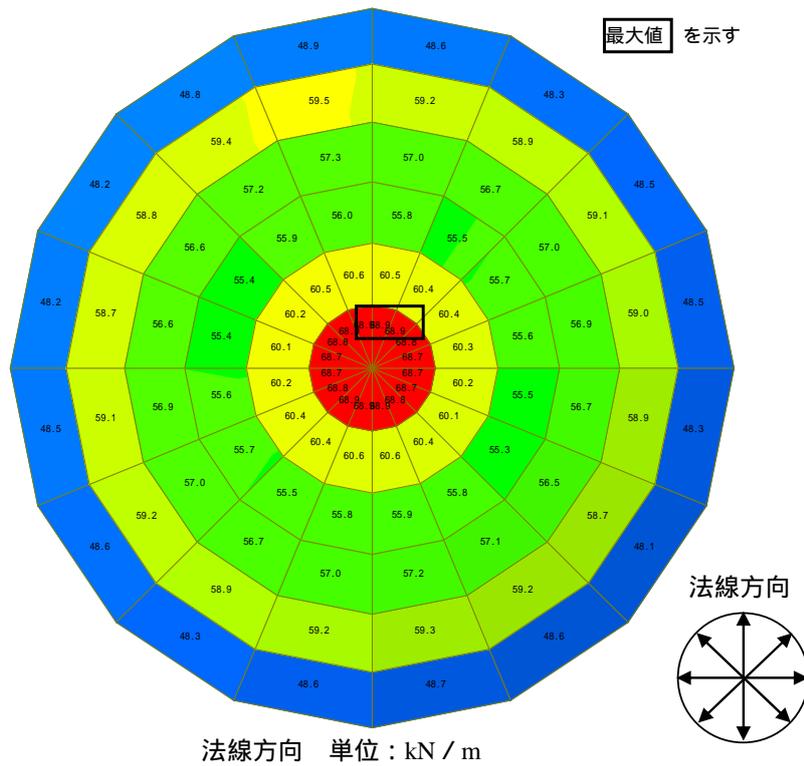
第 5.2.3-17 図 屋根版と 1 階床の鉛直方向の最大絶対加速度応答値の分布



第 5.2.3-18 図 原子炉建屋屋根版の最大曲げモーメントの分布
 (図中の値は各要素に属する節点の値の内，最大値を示す)



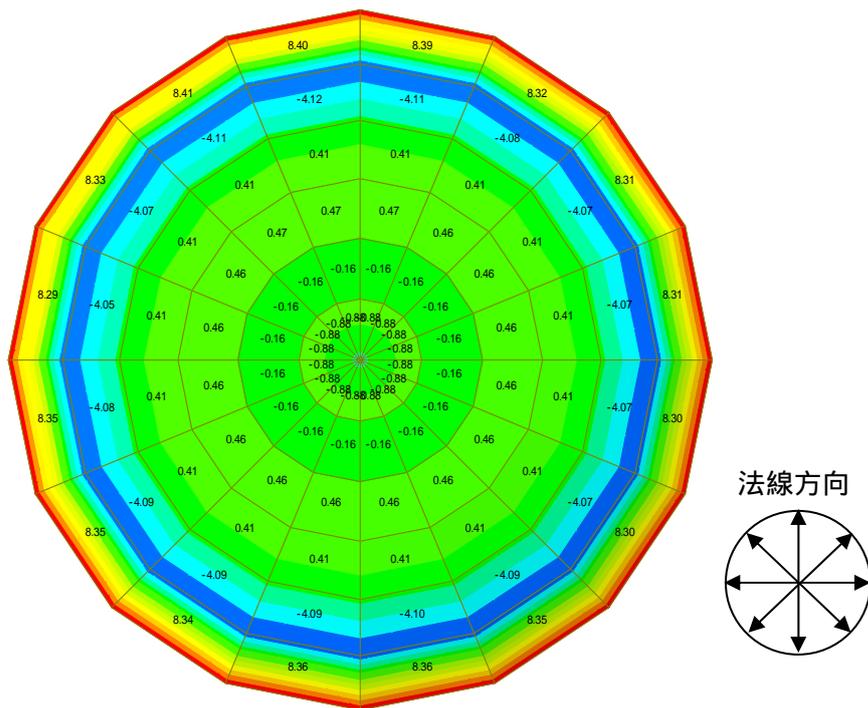
第 5.2.3-19 図 原子炉建屋屋根版の圧縮力の分布
(図中の値は各要素に属する節点の値の内，最大値を示す)



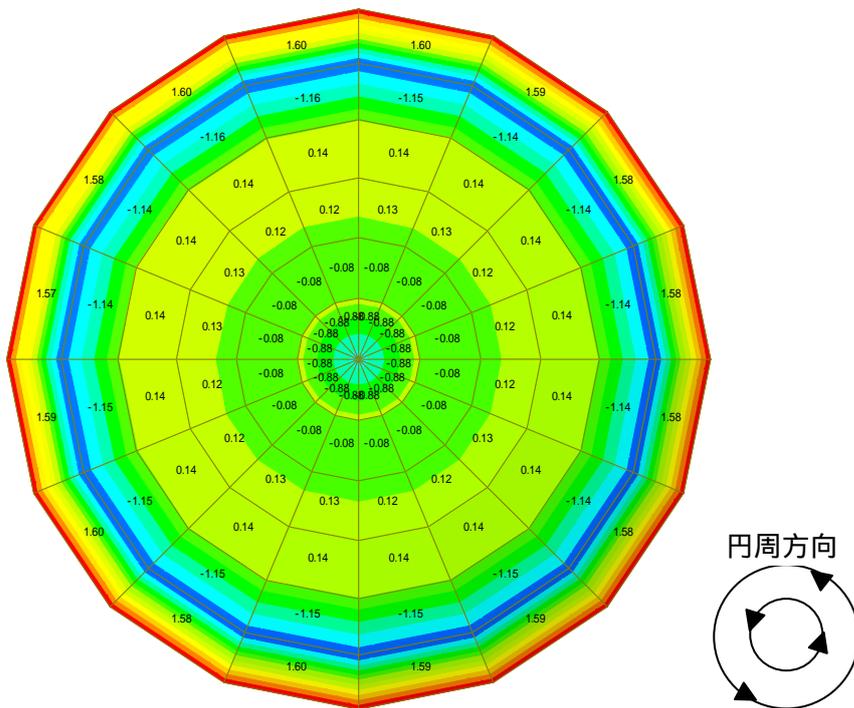
第 5.2.3-20 図 原子炉建屋屋根版の引張力の分布
(図中の値は各要素に属する節点の値の内，最大値を示す)

第 5.2.3-6 表 シェル要素節点での最大断面力の値

要素	節点	軸力(正:引張)		曲げモーメント(正:下端引張)		軸力(負:圧縮)		曲げモーメント(負:上端引張)	
		円周方向	法線方向	円周方向	法線方向	円周方向	法線方向	円周方向	法線方向
		Fxx (kN/m)	Fyy (kN/m)	Mxx (kN*m/m)	Myy (kN*m/m)	Fxx (kN/m)	Fyy (kN/m)	Mxx (kN*m/m)	Myy (kN*m/m)
467	1306	75.88	85.39	0.09	0.42	-74.70	-83.08	-0.11	-0.42
467	1307	75.88	85.39	0.09	0.42	-74.70	-83.08	-0.11	-0.42
467	1305	75.88	85.39	0.95	0.94	-74.70	-83.08	-0.86	-0.86
468	1307	69.11	75.52	0.23	0.26	-68.94	-74.45	-0.22	-0.25
468	1306	69.11	75.59	0.23	0.26	-68.94	-74.35	-0.22	-0.25
468	1311	52.28	75.57	0.03	0.30	-54.22	-74.38	-0.03	-0.29
468	1310	52.28	75.54	0.03	0.30	-54.22	-74.42	-0.03	-0.29
469	1310	53.35	69.77	0.03	0.27	-55.02	-69.44	-0.03	-0.26
469	1311	53.35	69.90	0.03	0.26	-55.02	-69.31	-0.02	-0.26
469	1315	63.37	69.88	0.16	0.46	-62.21	-69.33	-0.16	-0.47
469	1314	63.37	69.79	0.16	0.46	-62.21	-69.42	-0.17	-0.47
470	1314	64.66	71.32	0.17	0.40	-63.60	-70.91	-0.18	-0.40
470	1315	64.66	71.50	0.17	0.40	-63.60	-70.76	-0.18	-0.40
470	1319	93.15	71.48	0.17	0.89	-91.56	-70.78	-0.18	-0.85
470	1318	93.15	71.34	0.17	0.89	-91.56	-70.89	-0.17	-0.84
471	1318	88.61	74.04	0.18	0.88	-87.35	-73.79	-0.18	-0.82
471	1319	88.61	74.23	0.18	0.89	-87.35	-73.66	-0.19	-0.82
471	1323	18.26	74.21	0.79	2.49	-16.01	-73.67	-0.82	-2.66
471	1322	18.26	74.06	0.79	2.48	-16.01	-73.78	-0.82	-2.67
472	1322	20.56	61.02	0.85	2.22	-18.34	-61.60	-0.89	-2.38
472	1323	20.56	61.13	0.85	2.22	-18.34	-61.52	-0.88	-2.38
472	794	186.73	61.13	1.22	6.31	-188.23	-61.53	-1.20	-6.20
472	793	186.73	61.03	1.22	6.31	-188.23	-61.59	-1.20	-6.19

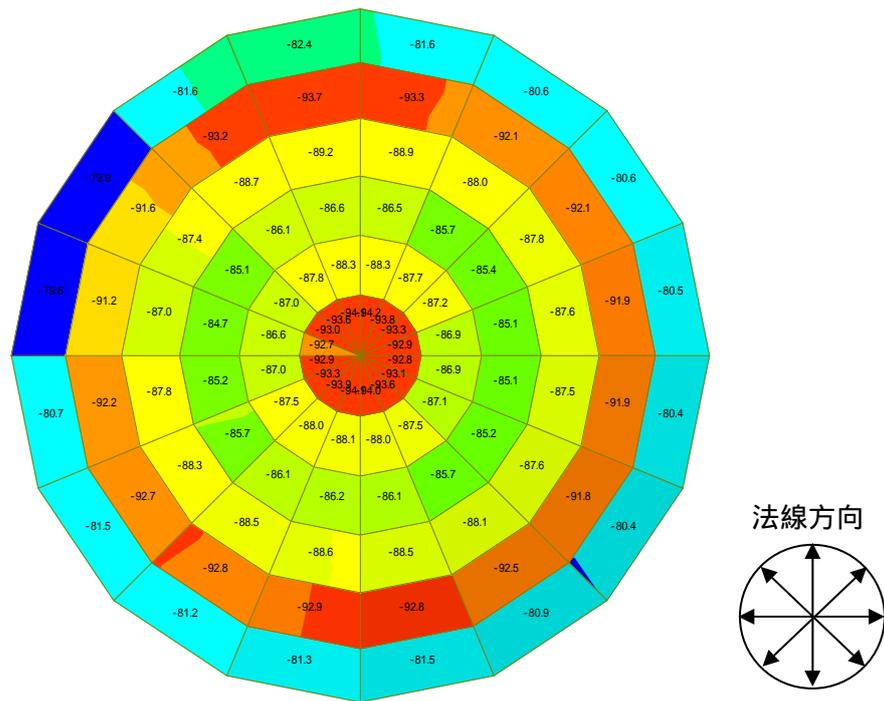


法線方向 単位：kNm / m

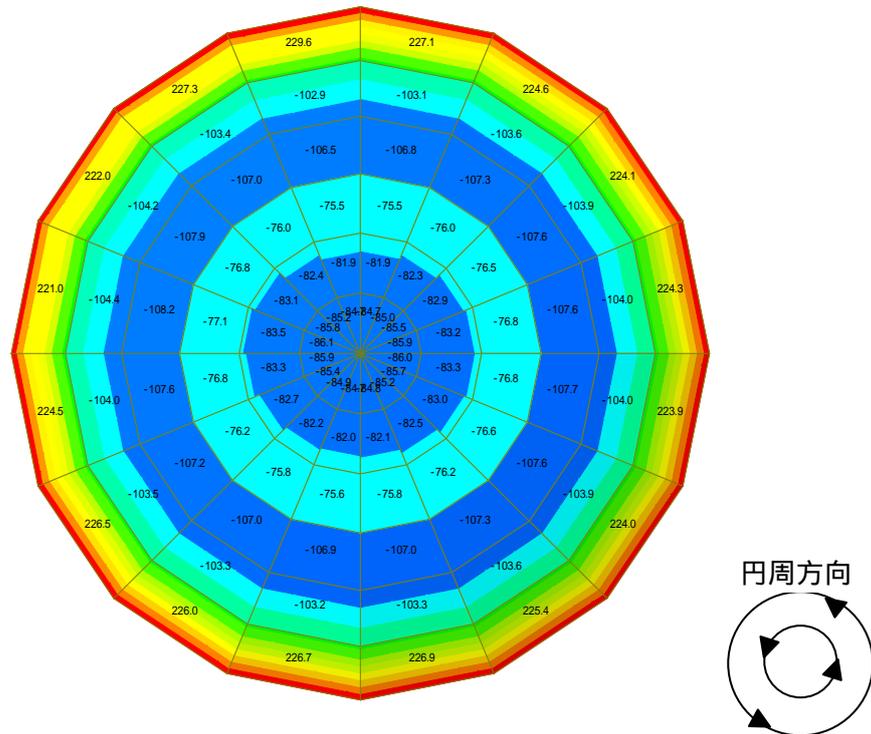


円周方向 単位：kNm / m

第 5.2.3-21 図 原子炉建屋屋根版の曲げモーメント分布（長期荷重時）
（図中の値は各要素に属する節点の値の内，最大値を示す）



法線方向 単位：kNm / m



円周方向 単位：kNm / m

第 5.2.3-22 図 原子炉建屋屋根版の軸力分布（長期荷重時）
 (図中の値は各要素に属する節点の値の内，最大値を示す)

第 5.2.3-7 表 シェル要素節点での最大断面力の値（長期荷重時）

要素	節点	軸力（正：引張）		曲げモーメント（正：下端引張）	
		円周方向	法線方向	円周方向	法線方向
		Fxx (kN/m)	Fyy (kN/m)	Mxx (kN*m/m)	Myy (kN*m/m)
467	1306	-85.90	-92.86	0.10	0.66
467	1307	-85.90	-92.86	0.10	0.66
467	1305	-85.90	-92.86	-0.88	-0.88
468	1307	-83.24	-86.93	-0.08	-0.16
468	1306	-83.24	-86.86	-0.08	-0.16
468	1311	-76.63	-86.88	-0.07	-0.02
468	1310	-76.63	-86.91	-0.07	-0.02
469	1310	-76.77	-85.13	-0.06	0.00
469	1311	-76.77	-85.06	-0.06	0.00
469	1315	-76.19	-85.07	0.12	0.46
469	1314	-76.19	-85.12	0.12	0.46
470	1314	-78.28	-87.57	0.14	0.41
470	1315	-78.28	-87.51	0.14	0.41
470	1319	-107.63	-87.52	0.00	-0.28
470	1318	-107.63	-87.56	0.00	-0.28
471	1318	-103.95	-91.90	0.02	-0.37
471	1319	-103.95	-91.86	0.02	-0.37
471	1323	-18.60	-91.86	-1.14	-4.07
471	1322	-18.60	-91.89	-1.14	-4.07
472	1322	-11.83	-80.50	-1.25	-3.65
472	1323	-11.83	-80.47	-1.25	-3.65
472	794	224.32	-80.48	1.58	8.31
472	793	224.31	-80.50	1.58	8.30

5.2.3.3 外周壁の曲げ変形に対する地震応答解析結果

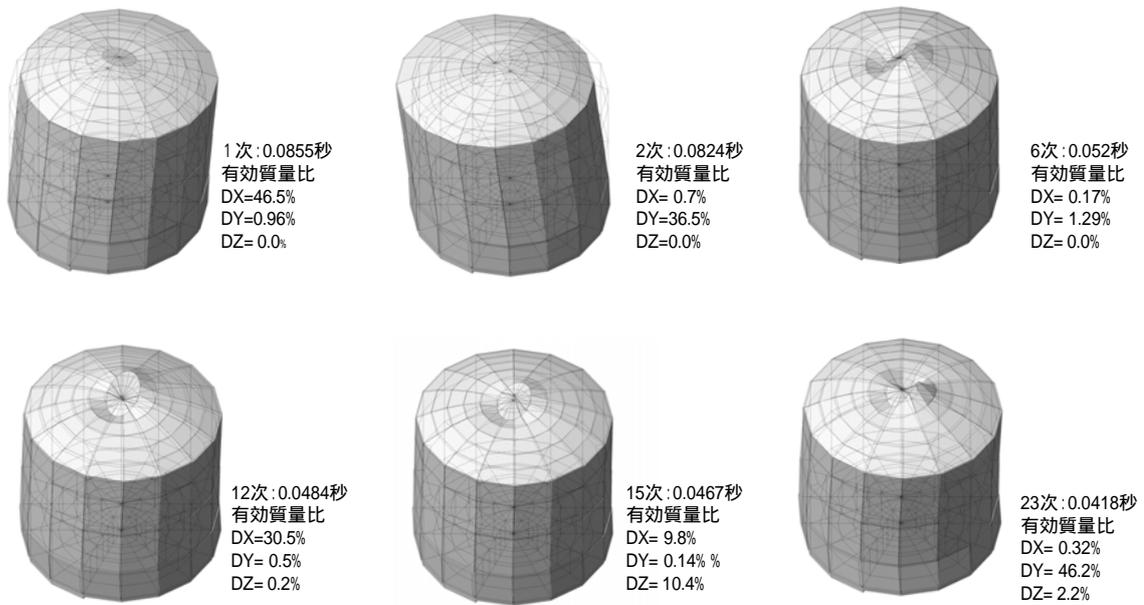
原子炉建屋の質点系モデルにおいて、床面が存在しない2階および3階床にも質点を配置し、剛床仮定の下で荷重増分解析による復元力特性を設定している。円筒壁には剛床仮定時に比べて非剛床仮定時には、より大きな面外曲げモーメントが作用すると考えられる。剛床モデルと非剛床モデルの違いによって、この付加的な曲げモーメントが円筒壁の鉛直方向と水平方向に沿って伝わる。ここでは、質点系モデルの地震応答解析では表現することができない水平方向(円周方向)へ伝わる曲げモーメントの割合(鉛直方向に対する)について考察する。

剛床仮定と非剛床仮定に基づく FEM モデル(第 5.2.2-3 図)に対する地震応答解析を実施する。両仮定に対する原子炉建屋モデルの固有モードにおいて、励起されやすいモードを第 5.2.3-23 図と第 5.2.3-24 図に示す。CASE2-X に対して 16 角形の壁面要素中、面外曲げモーメントが最大となる板要素(第 5.2.3-25 図)に対して検討を行う。各板要素の隅角部の 4 点と中央点について、2 方向(水平 M_{xx} , 鉛直 M_{yy})の曲げモーメントを求め、剛床仮定時と非剛床仮定時における曲げモーメントの差をそれぞれ求める。次にこれらの差の比(M_{xx}/M_{yy})を求める。1FL, BFL は実際に床面が存在し剛床となっていると考えられるため、ここでは板要素 375,373 および 369 の上半分について検討する。

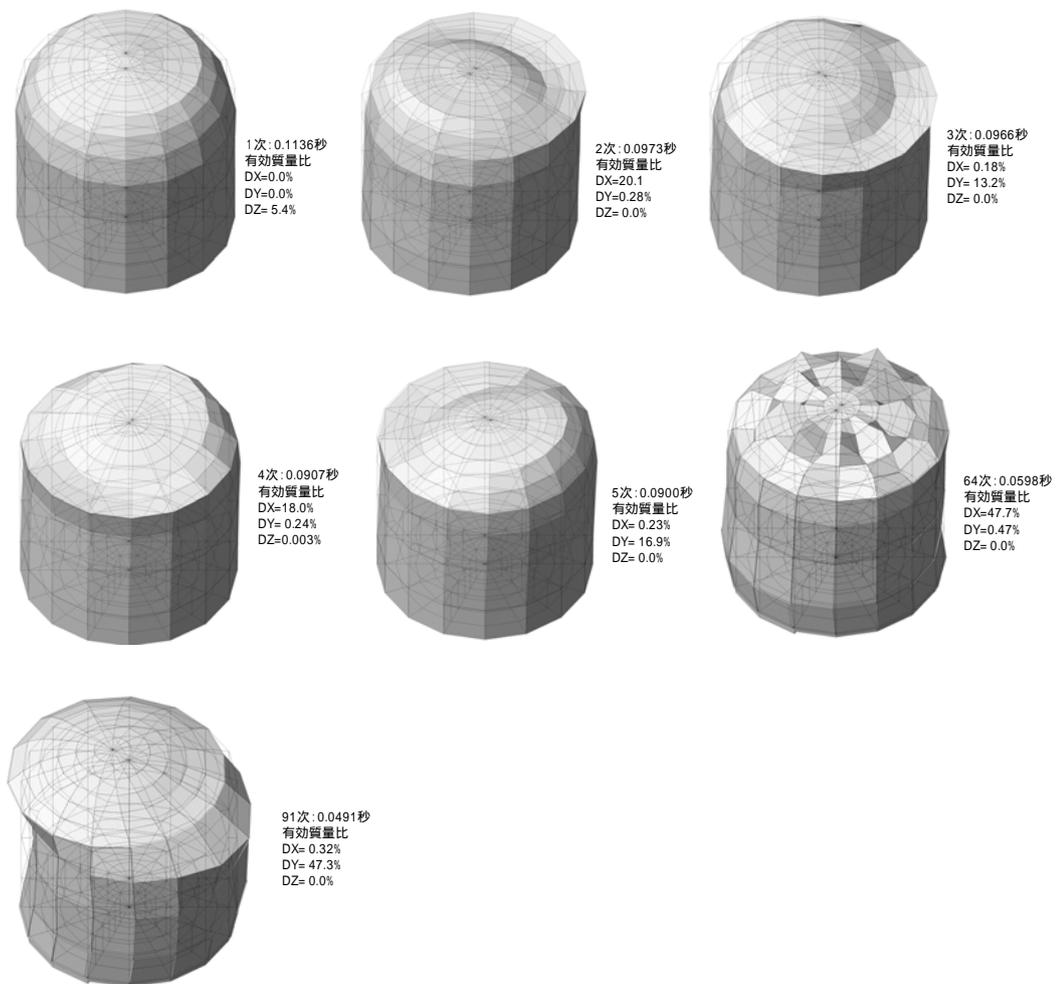
結果として、第 5.2.3-8 表に示すように非剛床化によって付加的に生じる曲げモーメントの鉛直方向伝播に対する水平方向伝播の比(M_{xx}/M_{yy})は 1.00 以下の値となっている。従って、剛床化に伴う壁面外に生じる付加的な曲げモーメントは質点系モデルの復元力特性に(荷重増分解析モデルとして)反映されている鉛直方向の曲げモーメントの伝播の割合の方が水平方向よりも多くなっている。

原子炉建屋円筒壁に生じる鉛直方向に伝播する曲げモーメント(M_{yy})と軸力(F_{yy})による検討を行うため、FEM モデル(第 5.2.2-3 図)の各節点に強制水平力を加える。質点系モデルの地震応答解析結果から壁のせん断変形は塑性域に達しているが、壁の曲げ変形については弾性域と仮定して軸力と曲げモーメントを求める。弾性変形と仮定したことで、弾塑性時より発生応力を大きめに見積もることになる。第 5.2.3-26 図に強制力作用時における FEM モデルの各節点変位を示す。

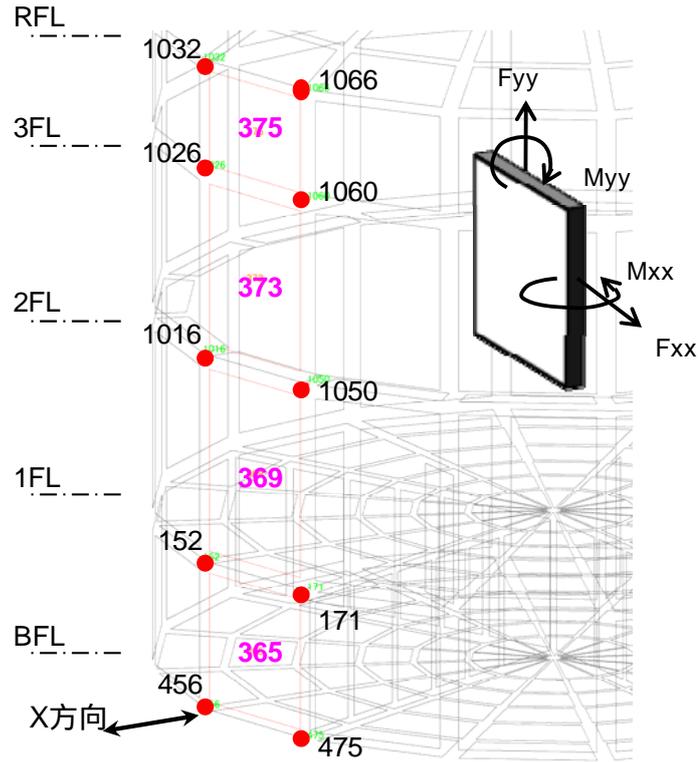
上層階の壁要素(375,373)の短期荷重時の発生応力は第 5.2.3-9 表に示すように、軸力が圧縮となっており曲げモーメントも比較的小さいことから、コンクリートの短期許容圧縮応力度の範囲内となっている。一方、下層階の壁要素(369,365)の短期荷重時の発生応力は引張となるため、別途後節において軸力と曲げモーメントとの相関図を用いて検討する。



第 5.2.3-23 図 原子炉建屋 FEM モデルの剛床仮定時における主要固有モード



第 5.2.3-24 図 原子炉建屋 FEM モデルの非剛床仮定時における主要固有モード

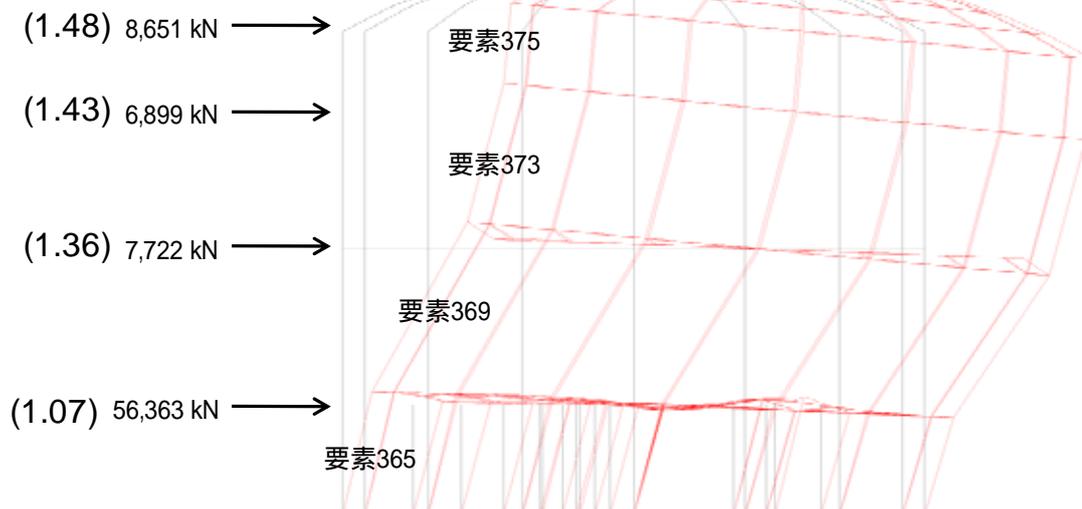


第 5.2.3-25 図 原子炉建屋 FEM モデルの建屋-屋根一体モデルの主要
 節点・要素の番号と断面力記号(各壁要素間にはリング状の
 梁要素が存在する)

第 5.2.3-8 表 非剛床モデルと剛床モデルによる曲げモーメントおよびモーメント比

	Mxx (kN*m/m)					Myy (kN*m/m)				節点	Mxx/Myy
	節点	非剛床	剛床	差		節点	非剛床	剛床	差		
Mxx (kN*m/m)	中央	0.01	0.06	-0.05	中央	-0.57	0.32	-0.89	中央	0.06	
	1066	-0.35	0.08	-0.43	1066	0.94	0.4	0.54	1066	-0.80	
	1032	-0.33	0.07	-0.4	1032	0.97	0.35	0.62	1032	-0.65	
	1026	0.33	0.04	0.29	1026	-2.1	0.22	-2.32	1026	-0.13	
	1060	0.37	0.06	0.31	1060	-2.09	0.3	-2.39	1060	-0.13	
	中央	0.09	0.06	0.03	中央	-0.1	0.28	-0.38	中央	-0.08	
	1060	-0.34	0.07	-0.41	1060	-2.14	0.35	-2.49	1060	0.16	
	1026	-0.34	0.03	-0.37	1026	-2.05	0.16	-2.21	1026	0.17	
	1016	0.25	0.11	0.14	1016	1.67	0.56	1.11	1016	0.13	
	1050	0.8	0.01	0.79	1050	2.12	0.06	2.06	1050	0.38	
	中央	-0.14	-0.19	0.05	中央	-1.03	-0.94	-0.09	中央	-0.56	
	1050	1.35	-0.01	1.36	1050	2.27	-0.07	2.34	1050	0.58	
	1016	0.18	0.19	-0.01	1016	1.83	0.95	0.88	1016	-0.01	
	152	0.13	-0.84	0.97	152	-4.69	-4.21	-0.48	152	-2.02	
	171	-2.19	-0.09	-2.1	171	-3.52	-0.44	-3.08	171	0.68	
	中央	-1.43	-1.09	-0.34	中央	-5.39	-5.42	0.03	中央	-11.33	
171	-14.56	7.37	-21.93	171	33	36.84	-3.84	171	5.71		
152	-9.94	11.27	-21.21	152	67.93	56.37	11.56	152	-1.83		
456	1.66	-12.4	14.06	456	-72.79	-62.02	-10.77	456	-1.31		
475	17.1	-10.58	27.68	475	-49.68	-52.89	3.21	475	8.62		

各節点に作用する水平力の各層での合力と()内は水平震度



第 5.2.3-26 図 強制力による建屋-屋根一体弾性モデルの変形図

第 5.2.3-9 表 各壁要素における軸力とモーメント
(軸力の正は引張力,負は圧縮力)

要素番号	長期荷重時①		水平荷重時②		短期荷重時①+②	
	F _{yy} (kN/m)	M _{yy} (kNm/m)	F _{yy} (kN/m) (引張時)	M _{yy} (kNm/m)	F _{yy} (kN/m)	M _{yy} (kNm/m)
375	-62.2	8.1	15.2	0.4	-47.0	8.5
373	-109.7	7.8	63.6	7.9	-46.1	15.7
369	-215.4	10.9	591.8	21.9	376.4	32.8
365	-388.6	36.7	1150.7	70.8	762.1	107.5

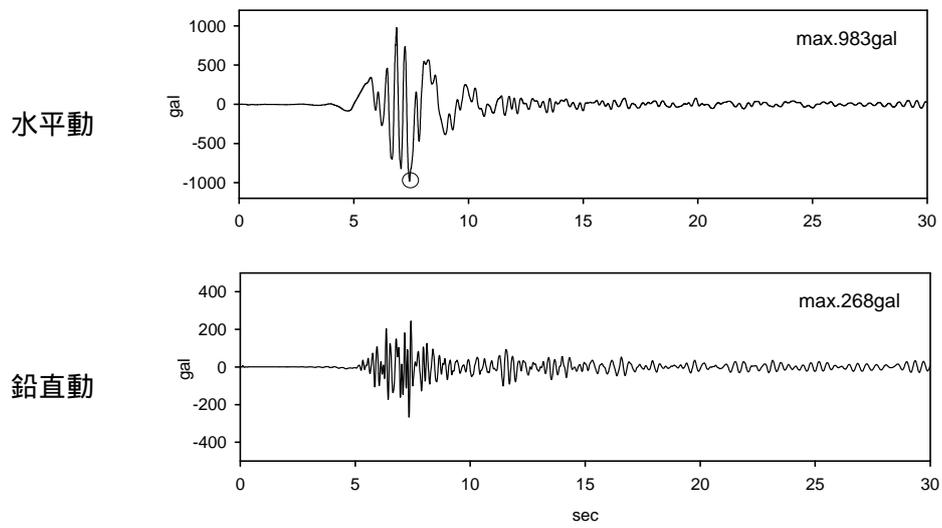
5.3 生体遮へい体の地震応答解析

5.3.1 生体遮へい体のモデル

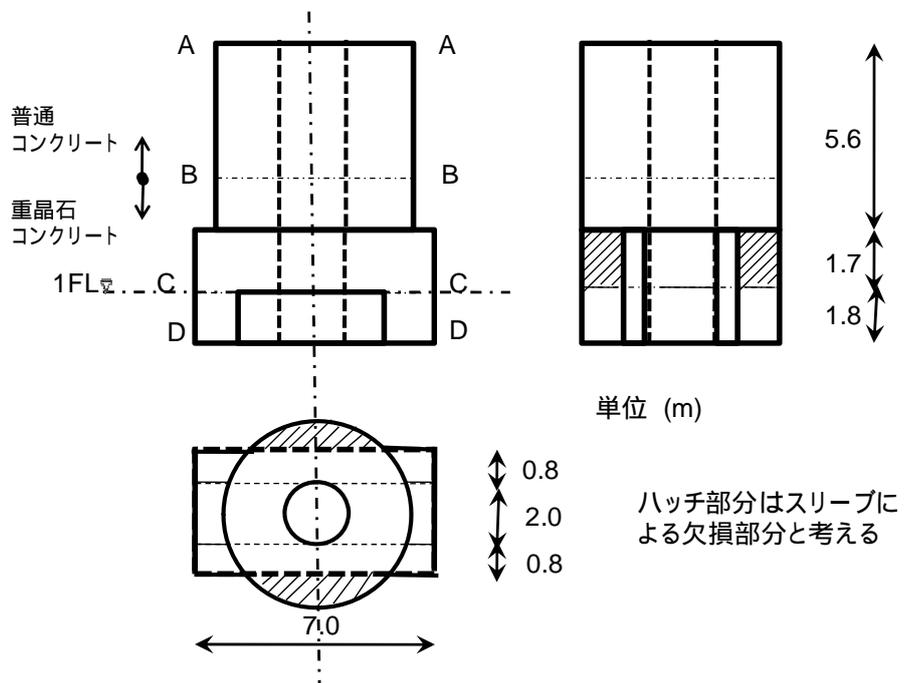
原子炉建屋質点系モデルによる地震応答解析の結果、原子炉建屋 1 階床レベルの応答加速度(絶対値)の最大値は水平方向(CASE2-X)が 983gal、鉛直方向(CASE3-Z)が 268gal となる。第 5.3.1-1 図に原子炉建屋 1 階床レベルの応答波形を示す。

生体遮へい体は中空円形断面形の鉄筋コンクリート製構築物である。生体遮へい体は原子炉建屋 1 階床で固定支持され水平方向の固有周期は 0.025 秒であり、鉛直方向はそれ以下の値である。従って、剛体として考え、床応答加速度から水平震度を $C_H=1.0$ 、鉛直震度を $C_V=0.4$ に設定する。

生体遮へい体の平面及び断面図を第 5.3.1-2 図に示す。



第 5.3.1-1 図 原子炉建屋 1 階床レベルの応答波形



第 5.3.1-2 図 生体遮へい体の平面図と立面図

5.3.2 解析結果

生体遮へい体へ水平荷重と鉛直荷重が作用した場合の組み合わせ応力の最大値は A ~ D の断面の内、D 断面で生じている。この断面での断面力は以下となる。

$$\text{最小圧縮力: } N_1 = (1.0 - C_v) \times W = 4,440 \text{ kN}$$

$$\text{最大圧縮力: } N_2 = (1.0 + C_v) \times W = 10,360 \text{ kN}$$

$$\text{せん断力: } Q = CH \times W = 7,400 \text{ kN}$$

$$\text{曲げモーメント: } M = (CH \times W) \times H = 29,230 \text{ kNm}$$

5.4. 使用済み燃料プール室プールの解析結果

原子炉棟の一部に設置されている使用済み燃料プール室プールは周辺をコンクリート壁で囲まれた非常に剛な構築物であるので、剛体としてモデル化を行い、建屋1階床(1FL)レベルの応答最大加速度(第5.3.1-1図)から水平震度を $C_H=1.0$ 、鉛直震度を $C_V=0.4$ に設定する。

床スラブ、プール側壁、水の各重量による水平荷重を以下に算定する。第5.4.-1図に使用済み燃料プール室プールの鳥瞰図を示す。

単位幅床重量(幅 1.5m の床重量が壁に地震荷重として作用すると考える)

- ・スラブ . . . 4320 N/m²
 - ・仕上げ . . . 200 N/m²
 - ・積載 . . . 2100 N/m² 計 6620 N/m²
- 6.62kN/m² × 1.5m = **9.93kN/m**

単位幅側壁重量

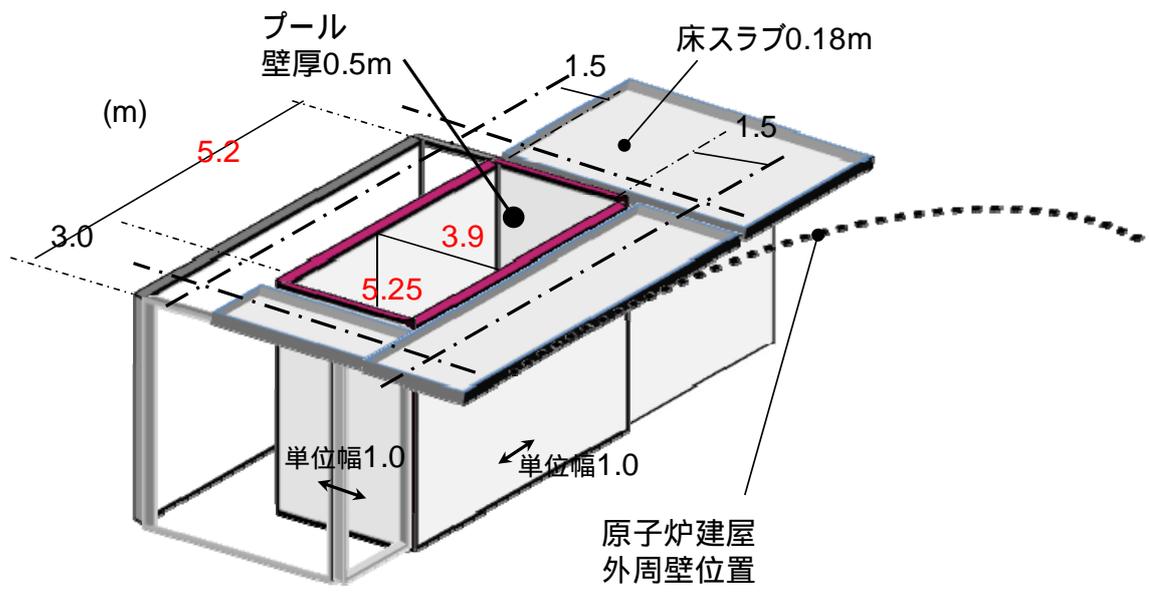
- ・壁 . . . 12000 N/m²
 - ・仕上げ . . . 1000 N/m² 計 13000 N/m²
- 13kN/m² × 5.25m = **68.25 kN/m**

単位幅プール水重量

$$10\text{kN/m}^3 \times 5.25\text{m} \times 5.2\text{m} / 2 = \mathbf{136.5\text{ kN/m}}$$

合計: $W=9.93+68.25+136.5=214.7\text{kN/m}$

→ 水平荷重: $P=216.0\text{kN/m}$



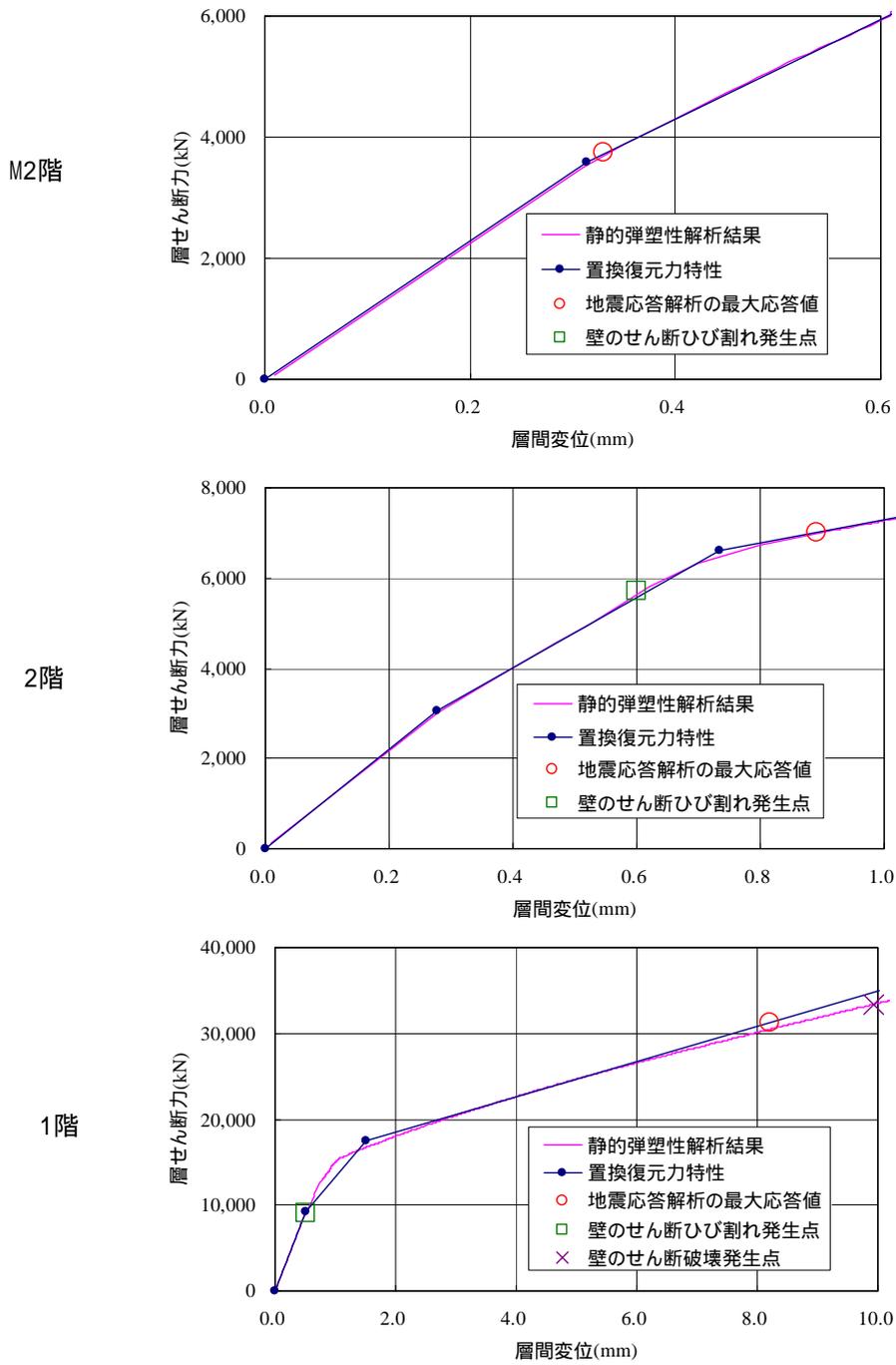
第5.4.-1図 使用済み燃料プール室プール

以前の節 5.2.2.1(4)で述べたように、使用済み燃料プール室プールを含む建物（原子炉棟）の地震荷重の一部が基礎を介して隣接原子炉建屋へ伝わると仮定している。この荷重を原子炉棟の地震応答解析結果から評価する。一方、この解析結果から原子炉棟自体の耐震安全性を評価することにより、使用済み燃料プール室プールへの地震時の波及的影響も後節において確認する。原子炉棟の地震応答解析モデル（第 5.2.2-5 図）の固有周期は以下となる。

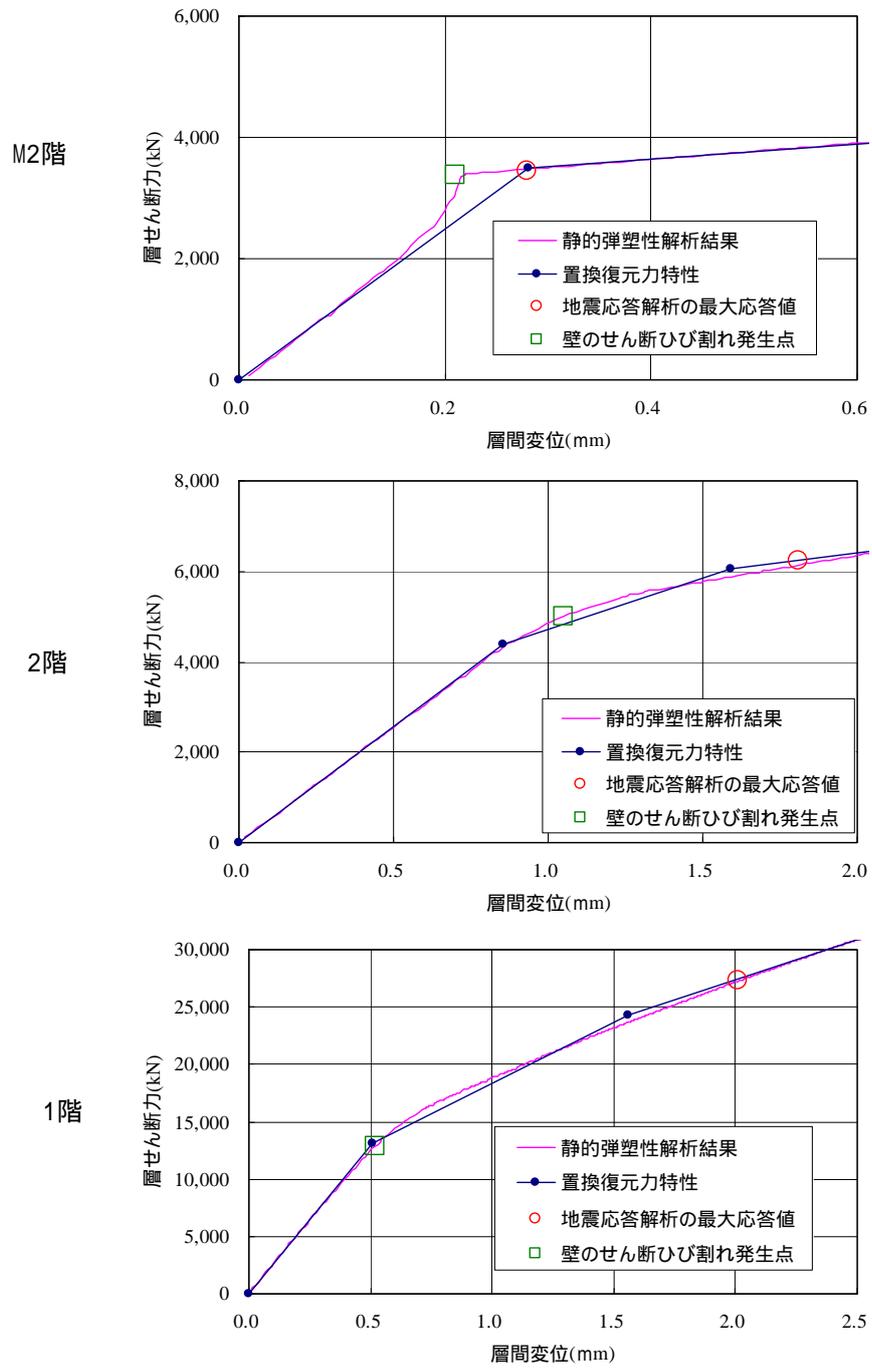
X方向 1次：0.0908 秒， 2次：0.0487 秒， 3次：0.0214 秒

Y方向 1次：0.0912 秒， 2次：0.0544 秒， 3次：0.0225 秒

静的荷重増分解析における荷重変形曲線、設定した復元力および最大応答発生値をあわせて第 5.4-2 図および第 5.4-3 図に示す。1階に生じる最大層せん断力は、X方向が 32,000kN、Y方向が 28,000kN となる。これら値に前述（節 5.2.2.(4)）の面積比率を乗じ、原子炉建屋基礎へ付加するせん断力を求めると、X方向が 3,200kN、Y方向が 2,800kN となる。



第 5.4-2 図 原子炉棟の最大応答値 (X 方向)



第 5.4-3 図 原子炉棟の最大応答値 (Y 方向)

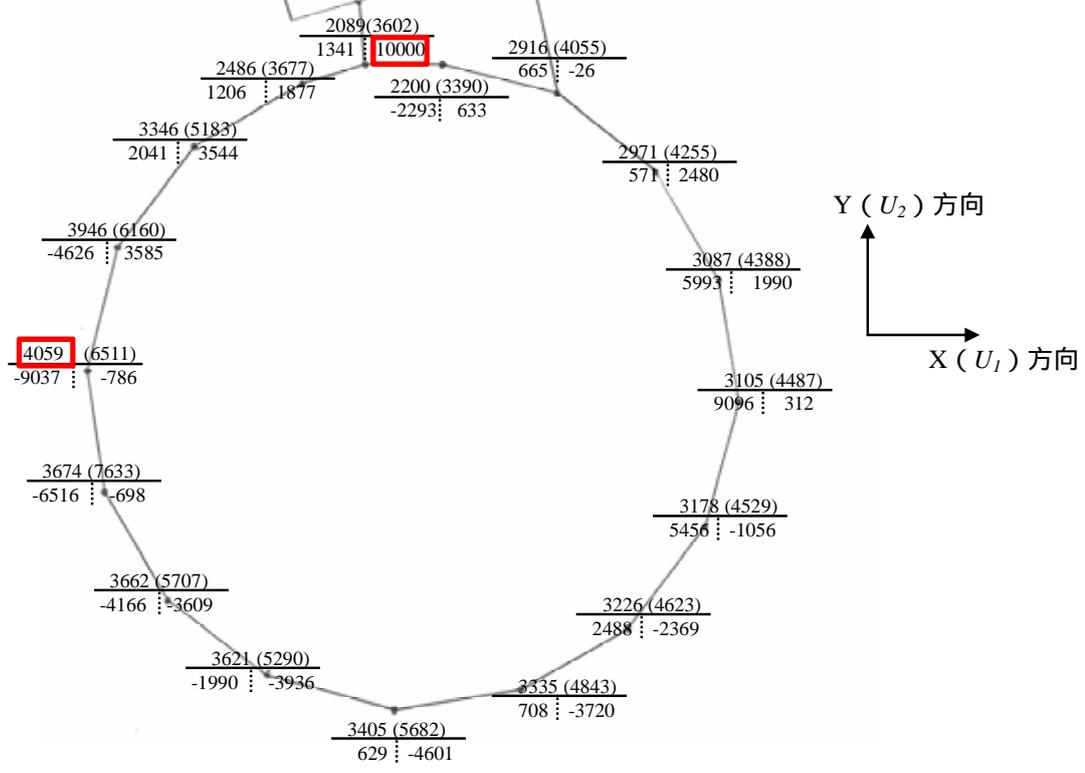
5.5 基礎地盤の地震応答解析

地下 1 階の基礎地盤の支持力の検討は外周壁直下部分における基礎版（フーチング部分）の接地圧により検討する。円筒状の外周壁は正 16 角形に置換し増分解析されているので、各辺交点の節点反力（第 5.5-11 図）について検討する。長期荷重時の節点反力の最大値は 4059kN、地震水平動時の節点反力の最大値は 10000kN となっている。

長期荷重検討用支配面積（ $A=L \times B$ ）に関しては、幅（ B ）は底版が外周壁から伝わる鉛直力を直接地盤に伝えられる様に、傾きが 30 度以内となる幅として 2.2m、長さ（ L ）は分割した節点間隔として 5.5m とした（第 5.5-2 図）。短期荷重検討用支配面積に関しては、幅（ B ）は長期と同様に 2.2m とし、長さ（ L ）は壁があるため第 5.5-2 図に示す範囲が一緒に抵抗すると考え 27.5m としている。

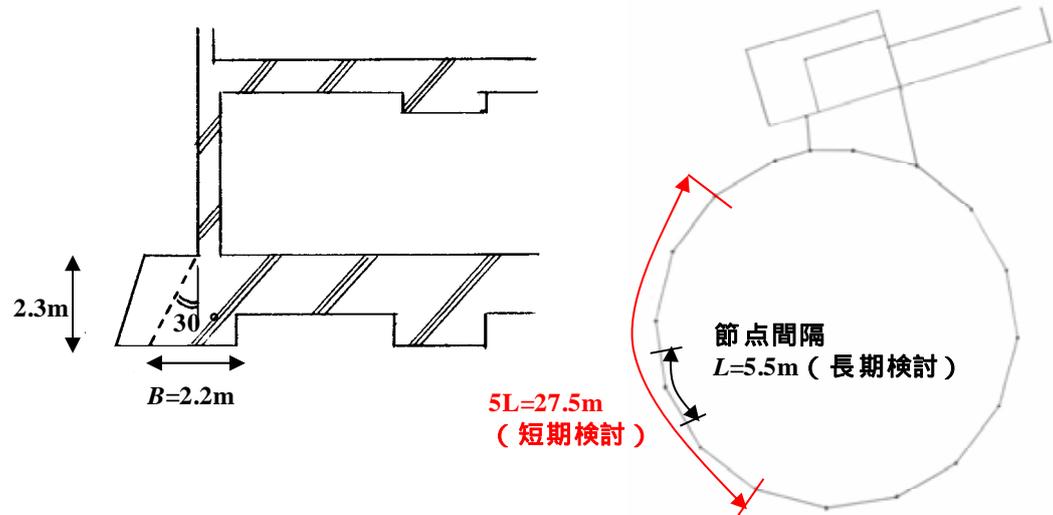
短期荷重時の接地圧は、長期荷重時節点反力、水平動時節点反力、および上下動時節点反力を足し合わせて求める。上下動による接地圧算定用の静的震度（ K_v ）は生体遮へい体や使用済み燃料プール室プールの鉛直震度と同じ 0.4 とする。

VL; 長期荷重に対して 外周フーチング部分が 負担する節点反力 (基礎底版の重量を除く)	(VL); VLに基礎底版の 重量を加えた反力
U1; 地震力をX方向に 作用させたときの地震 時節点反力	U2; 地震力をY方向に 作用させたときの地震 時節点反力



単位kN は最大値を表す

第 5.5-1 図 基礎底版の接地圧



第 5.5-2 図 基礎底版の検討用支配面積