
柏崎刈羽原子力発電所1号機 原子炉建屋の耐震安全性評価について

平成21年12月18日

東京電力株式会社

本日のご説明内容

- 建物・構築物の耐震安全性評価結果について
 - 原子炉建屋（耐震壁および屋根トラス）の耐震安全性評価結果についてご報告する。（ご説明項目は下記の通り）
 - ・ 基準地震動 S_s の概要
 - ・ 地震応答解析モデルの条件比較
 - ・ 原子炉建屋の耐震安全性評価
 - ・ 原子炉建屋屋根トラスの耐震安全性評価
 - タービン建屋、海水機器建屋、排気筒の評価結果については追ってご報告予定。

耐震安全性評価結果の概要

- 耐震安全性評価結果の概要

- 原子炉建屋について、基準地震動Ssに対する地震応答解析（弾塑性解析）を実施し、耐震壁のせん断ひずみが 2.0×10^{-3} を下回ることを確認する。
 - 解析の結果、原子炉建屋の耐震壁について、発生ひずみは評価基準値を下回ることを確認した。
- 原子炉建屋屋根トラスについては、3次元モデルを用いて基準地震動Ssに対する地震応答解析を実施し、発生応力比が評価基準値を満足するかについて確認した。なお、原子炉建屋屋根トラスについては、耐震強化工事を実施しており、耐震強化工事を反映したモデルを用いている。
 - 解析の結果、原子炉建屋屋根トラスの発生応力比は評価基準値を下回ることを確認した。
- 以上のことから、原子炉建屋の耐震安全性が確保されているものと評価した。

基準地震動Ssの概要

基準地震動Ssの概要

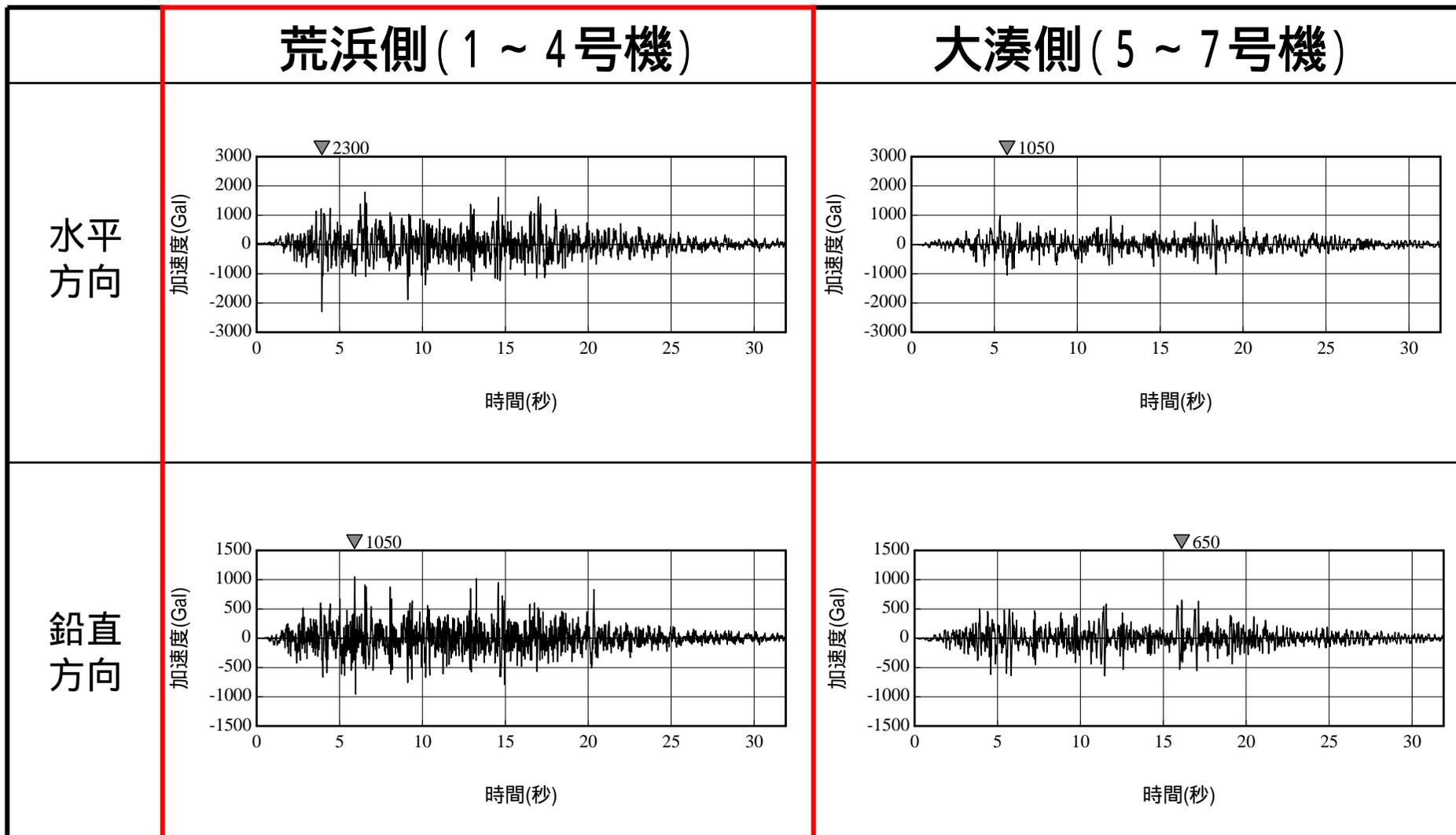
検討用地震の応答スペクトル・断層モデルによる地震動評価結果をそれぞれ基準地震動Ssとして設定。

基準地震動	検討用地震		地震動評価手法
Ss - 1	F - B断層による地震 (M7.0)		応答スペクトル 〔Noda et al. (2002)〕
Ss - 2			断層モデル 〔経験的グリーン関数法〕
Ss - 3	長岡平野 西縁断層帯 による地震 (M8.1)	下記の2つの ケースを包絡	応答スペクトル 〔Noda et al. (2002)〕
Ss - 4		断層傾斜角50° 応力降下量1.5倍	断層モデル 〔経験的グリーン関数法〕
Ss - 5		断層傾斜角35° 応力降下量1.0倍	

地震調査研究推進本部(2008)による強震動レシピに基づく値に対する倍率

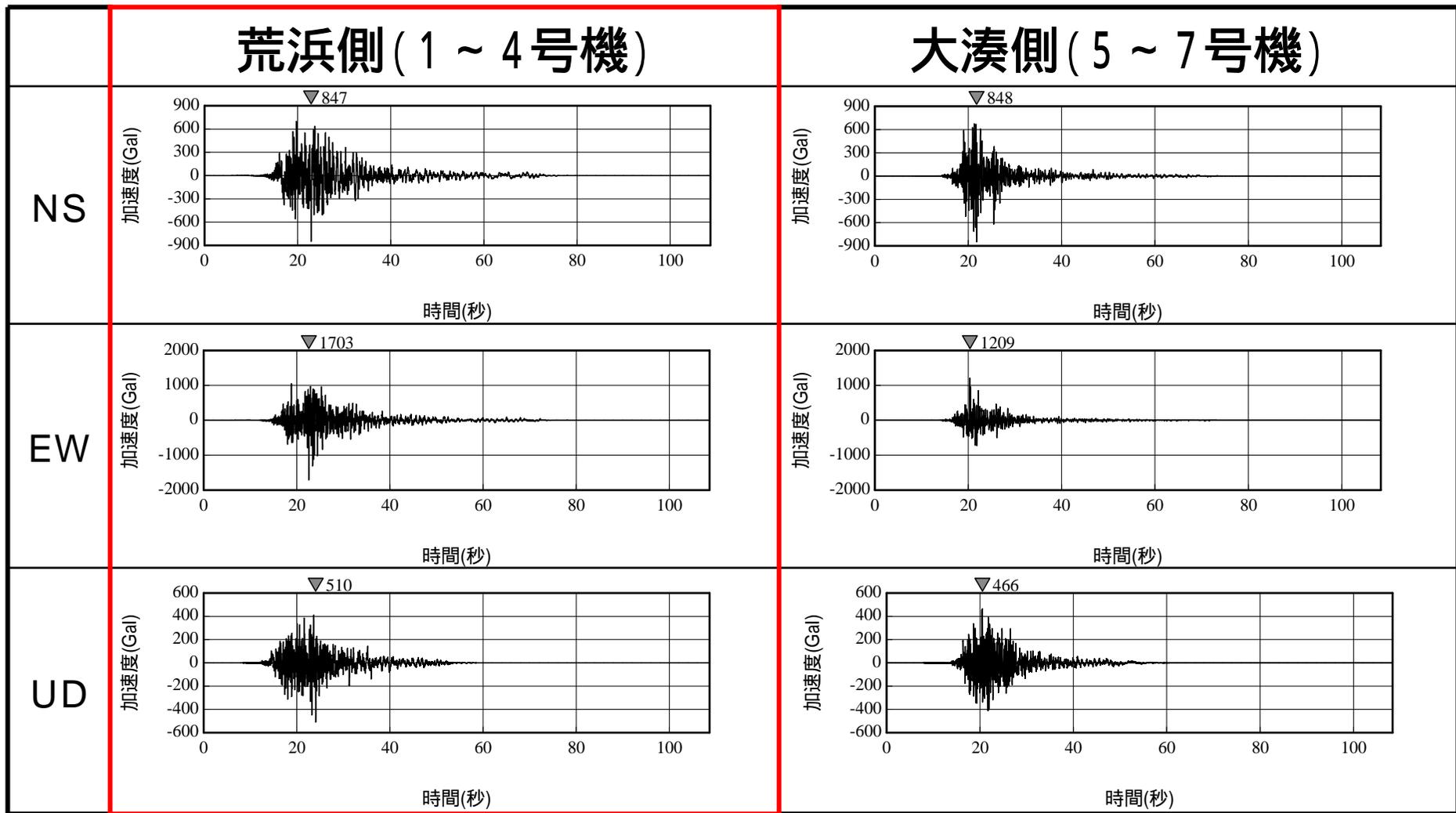
基準地震動Ssの概要

基準地震動Ss - 1の加速度時刻歴波形



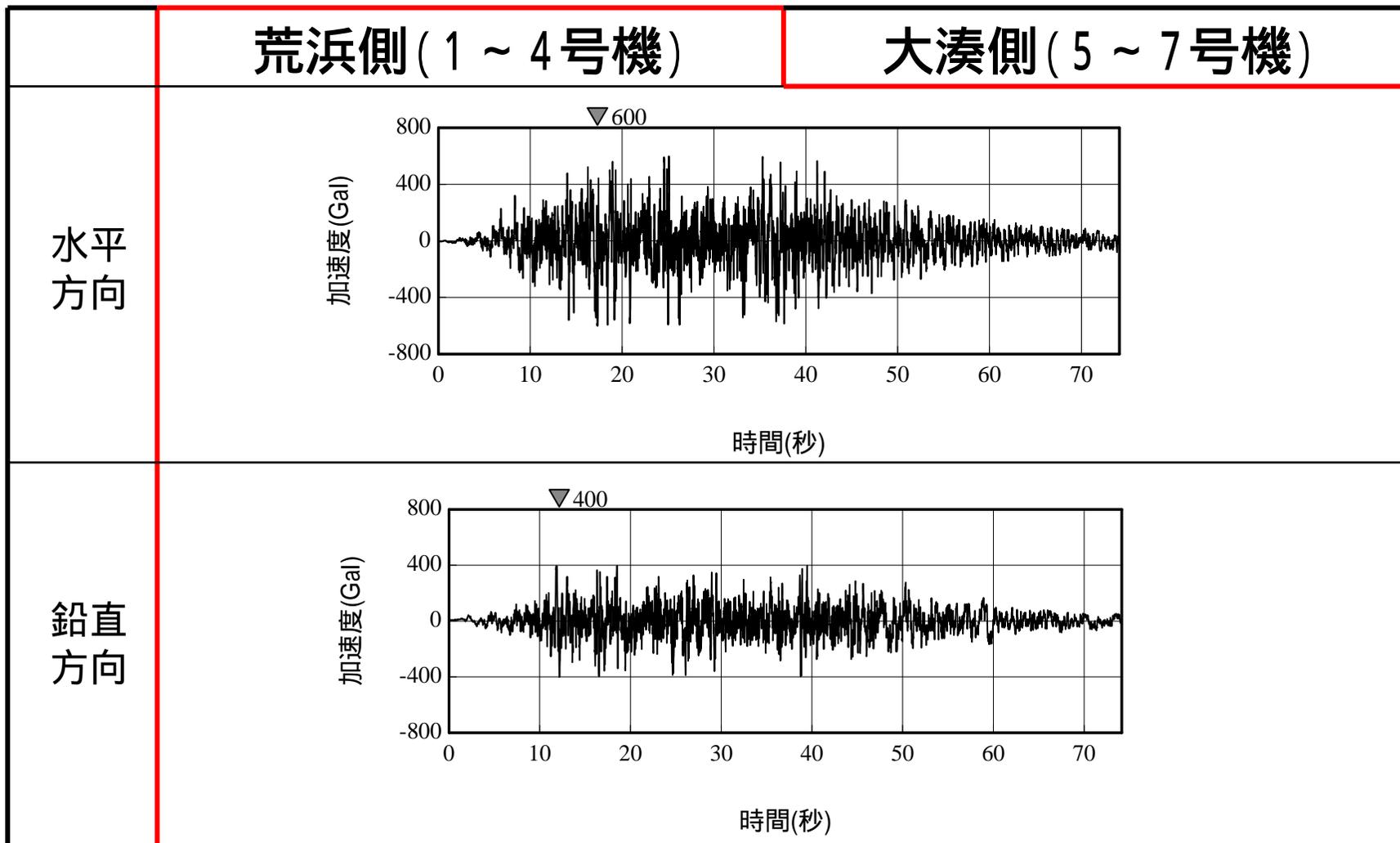
基準地震動Ssの概要

基準地震動Ss - 2の加速度時刻歴波形



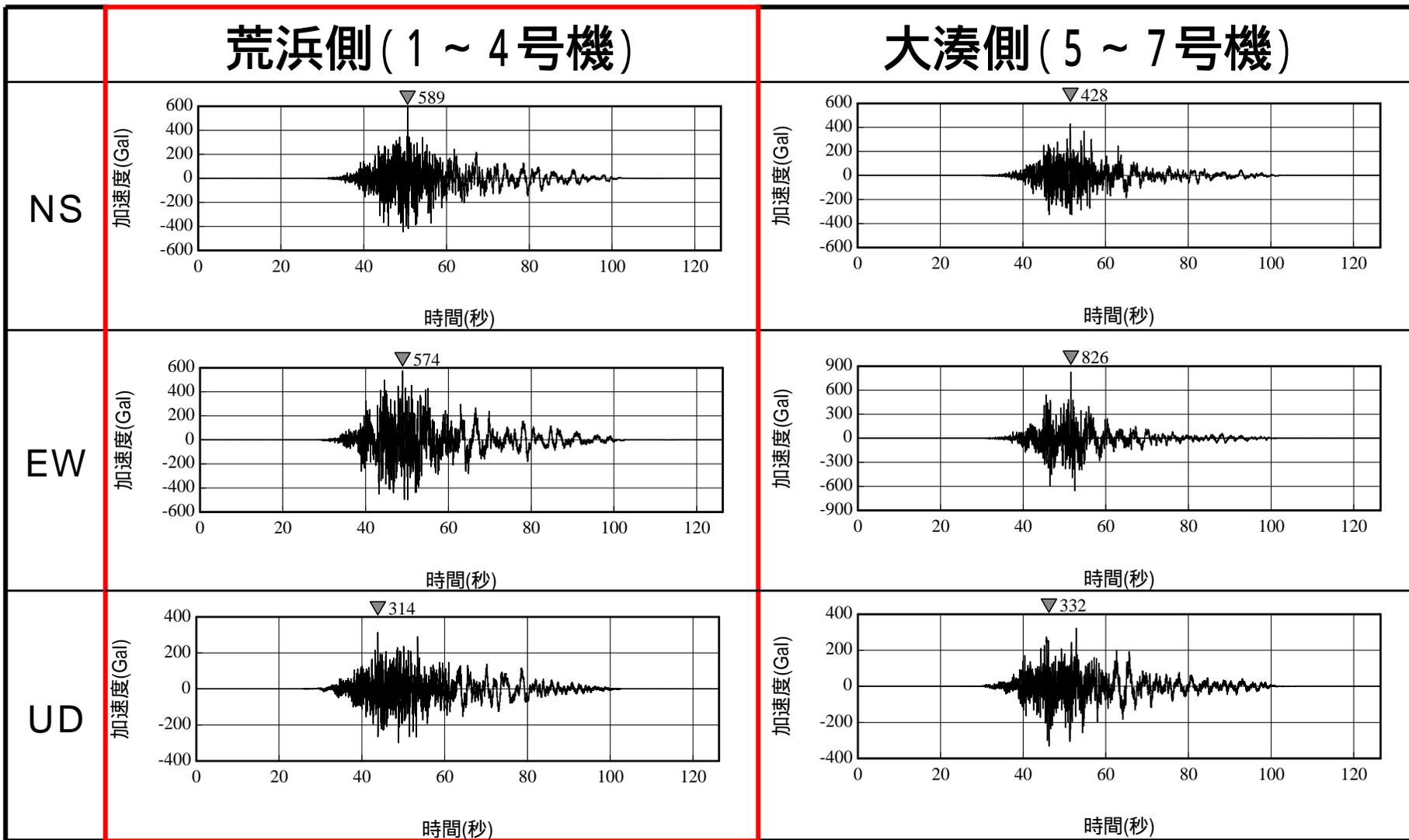
基準地震動Ssの概要

基準地震動Ss - 3の加速度時刻歴波形



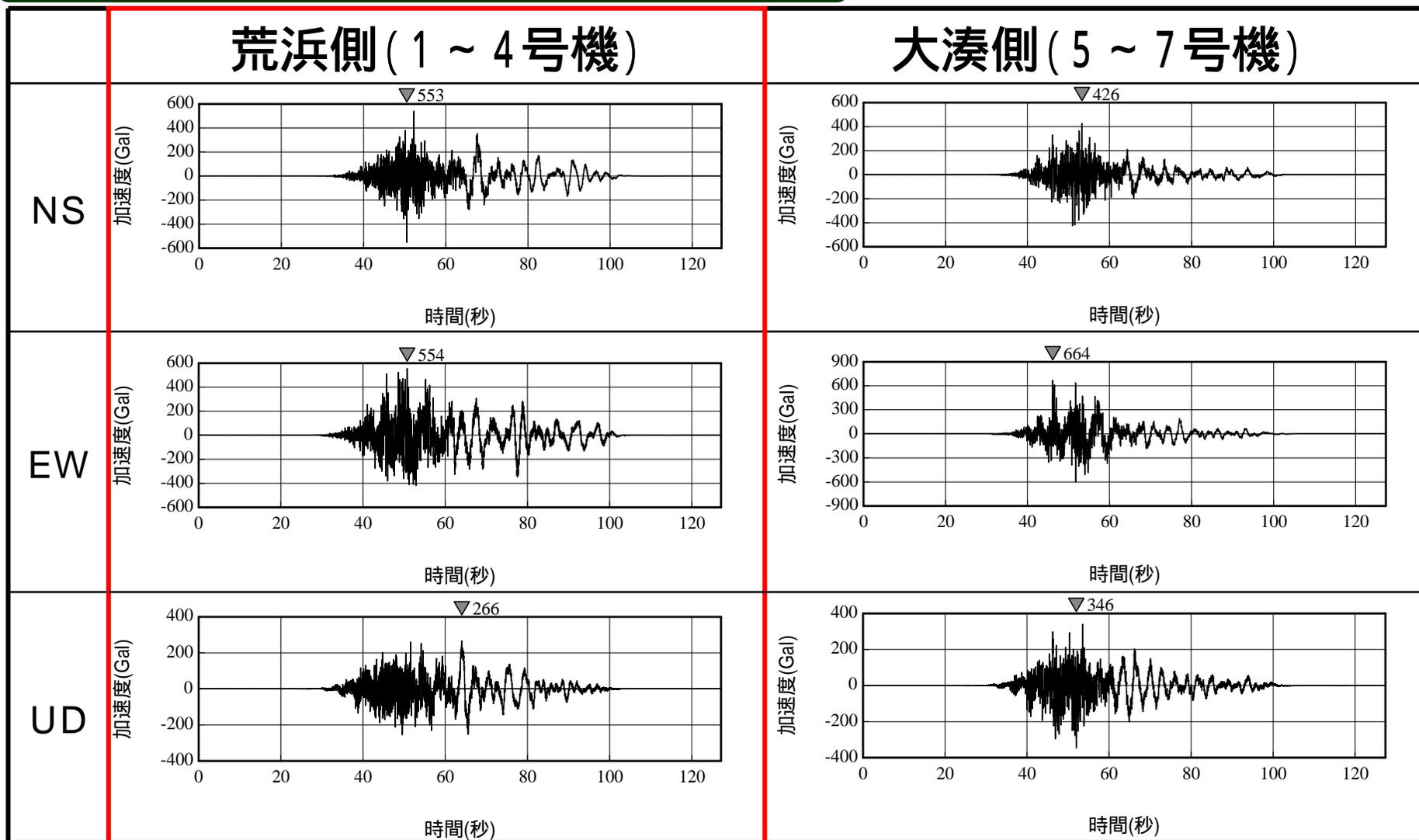
基準地震動Ssの概要

基準地震動Ss - 4 の加速度時刻歴波形



基準地震動Ssの概要

基準地震動Ss - 5の加速度時刻歴波形



・地震応答解析モデルの条件比較

原子炉建屋の地震応答解析の条件比較(解析モデル)

	工認設計	健全性評価	耐震安全性評価
モデル化 条件	<p>考慮する地震動: 3地震波300Gal (GL-133m,E+F) に規準化した地震動(水平)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・エルセントロ(1940.5.18) ・タフト(1952.7.21) ・ゴールデンゲート(1957.3.22) <p>建屋 : 質点系1軸モデル</p> <p>地盤 : 格子型モデル</p> <p>相互作用 : 格子型モデルの軸ばね等及び底面地盤ばね(回転)により考慮</p> <p>入力動 : 格子型モデル下端(固定境界)へ直接入力</p>	<p>考慮する地震動: 基礎版上で観測された地震動(水平・鉛直)</p> <p>建屋 : 質点系1軸モデル</p> <p>地盤 : -</p> <p>相互作用 : 側面及び底面地盤ばね(水平・回転)により考慮 ただし、埋戻土は考慮しない</p> <p>入力動 : (基礎版上の観測波)</p>	<p>考慮する地震動: 基準地震動 Ss-1 ~ Ss-5(水平・鉛直)</p> <p>建屋 : 質点系1軸モデル</p> <p>地盤 : -</p> <p>相互作用 : 側面及び底面地盤ばね(水平・回転)により考慮 ただし、埋戻土は考慮しない</p> <p>入力動 : 解放基盤で定義された地震動を一次元波動論により、建屋側面位置の入力動へ変換</p>
	<p>:地震動入力位置 = 格子型モデル下端(E+F)</p>	<p>:地震動入力位置 = 基礎版上</p>	<p>:地震動入力位置 = 解放基盤(2E)</p>

1号機原子炉建屋の地震応答解析の条件比較(応答評価)

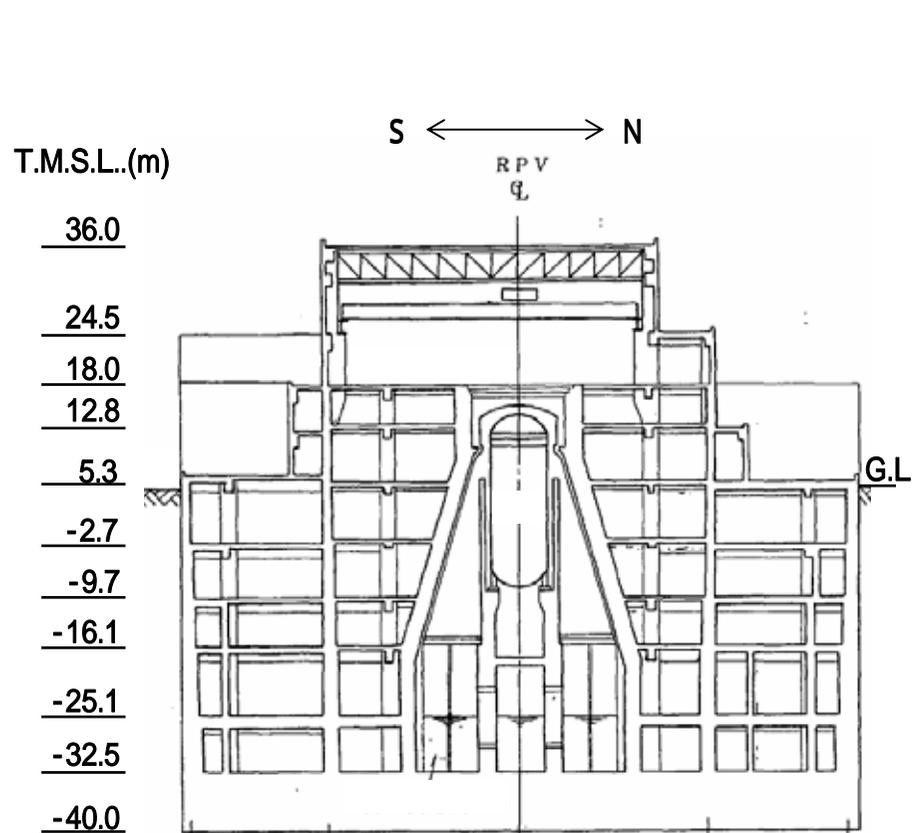
		工認設計	健全性評価	耐震安全性評価
建屋 モデル	モデル重量	通常運転時重量 + 雪荷重	中越沖地震時の状態を 慮した重量*1	通常運転時重量 + 雪荷重
	コンクリートの 材料物性	設計基準強度23.5N/mm ² に基づくヤング係数 (2.06 × 10 ⁴ N/mm ²)*2	実強度44.1N/mm ² に基づくヤング係数 (2.90 × 10 ⁴ N/mm ²)	同左
	剛性評価に 考慮する壁	耐震壁	耐震壁 + 補助壁	耐震壁
	減衰定数	5 %	5 %	5 %
地盤 モデル	底面ばね	水平:格子型モデル 回転:三次元FEM	水平・回転: 振動アドミタンス	水平・回転: 振動アドミタンス
	側面ばね	水平:格子型モデル	水平・回転: NOVAK	水平・回転: NOVAK
応答解析		弾性解析	弾性解析	弾塑性解析

*1 1号機は定検時の機器重量を考慮

*2 設計基準強度及びヤング係数は、工認図書記載の値をSI単位に換算した値

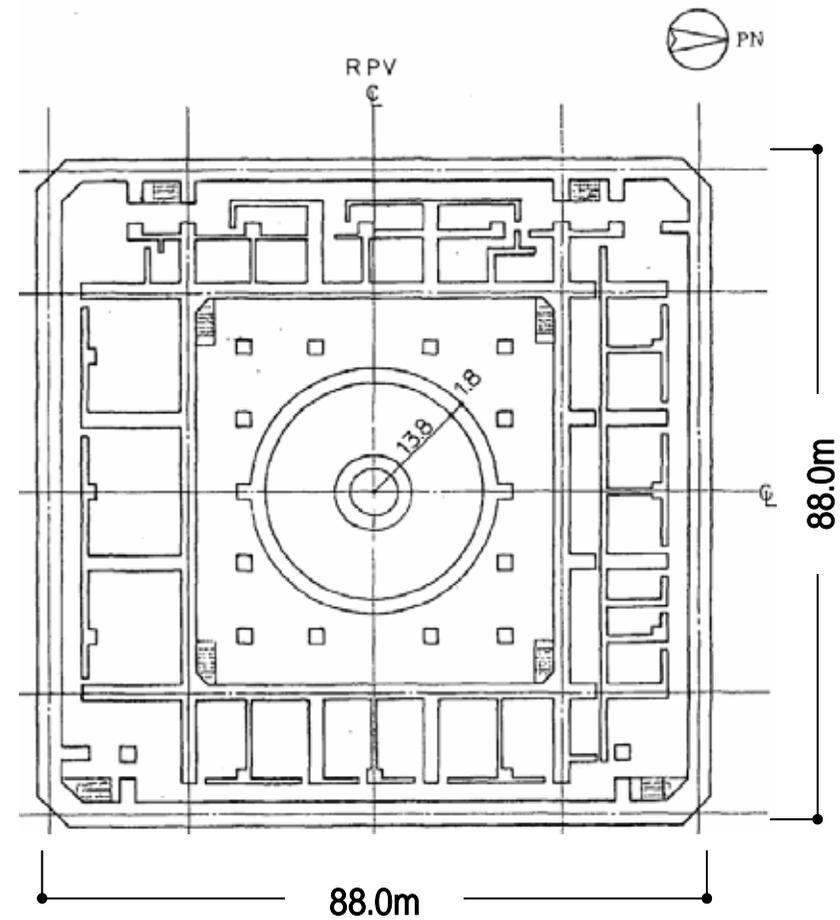
原子炉建屋の耐震安全性評価

原子炉建屋の概要



NS方向断面

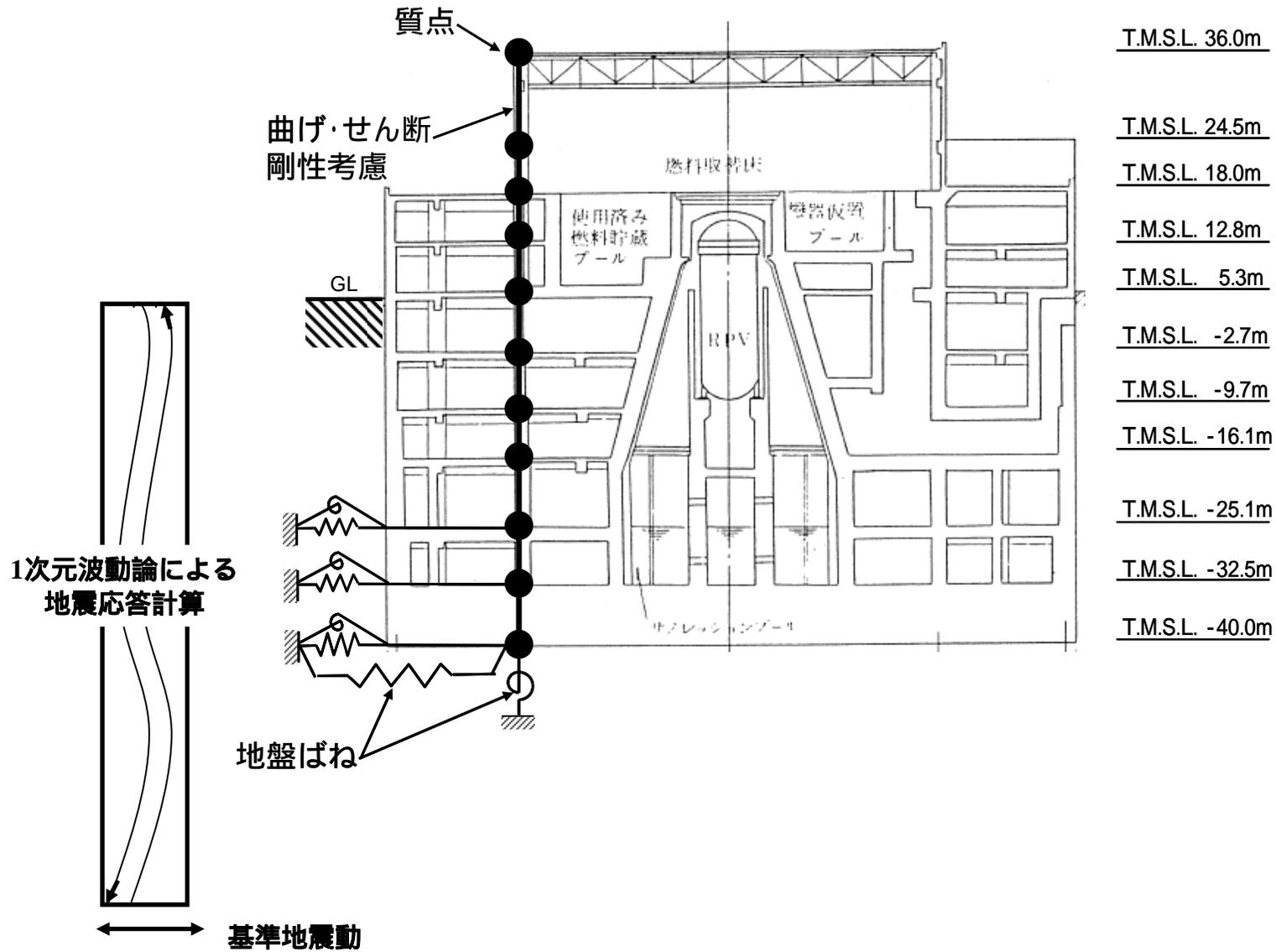
階数 : 地上3階・地下5階
 構造 : RC+SRC+S



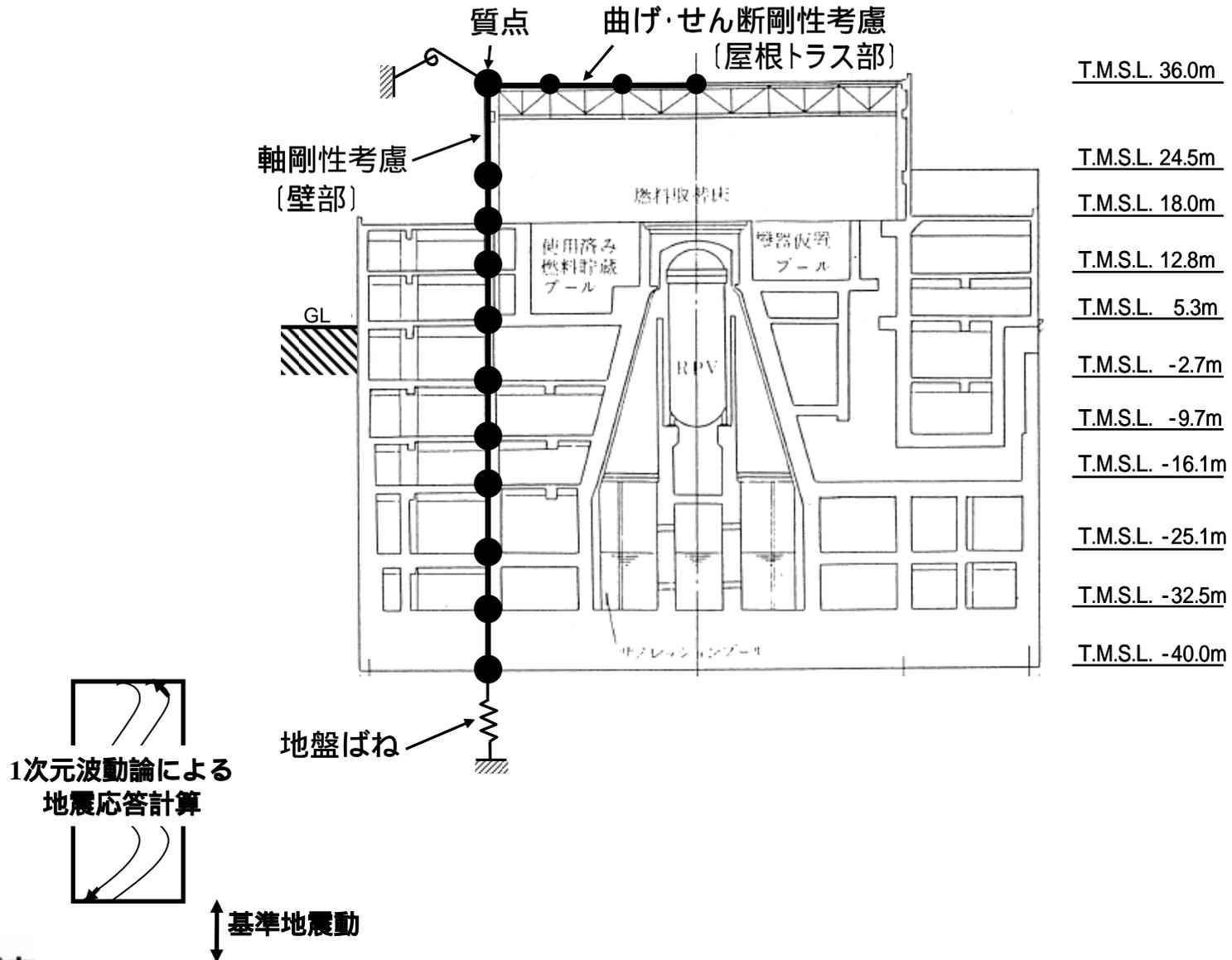
基礎上平面 (T.M.S.L. -32.5m)

延床面積 : 約53,000m²

建屋解析モデル(水平方向)



建屋解析モデル(鉛直方向)

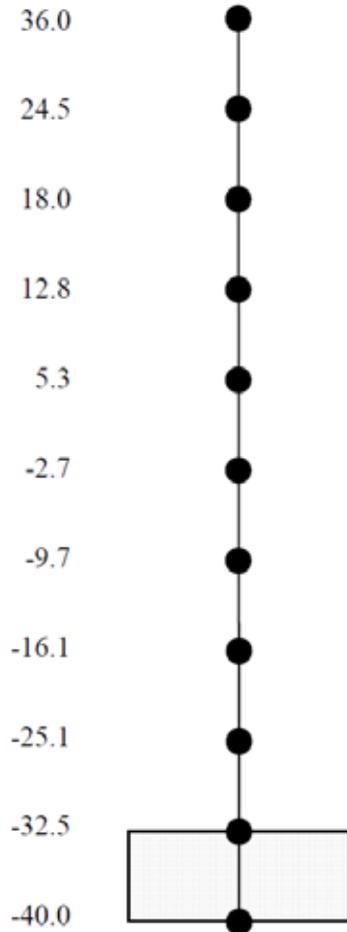


建屋モデル(NS方向)

T.M.S.L.(m)	質点 番号	質点重量 W(kN)	回転慣性重量 $I_R(\times 10^6 \text{kN}\cdot\text{m}^2)$	部材 番号	せん断断面積 $A_s(\text{m}^2)$	断面 2 次モーメント $I_B(\times 10^3 \text{m}^4)$
36.0	①	38,560	6.01			
24.5	②	70,930	15.39	1	48	31
18.0	③	231,770	149.61	2	104	70
12.8	④	312,150	201.53	3	423	482
5.3	⑤	433,240	279.76	4	399	438
-2.7	⑥	448,910	289.85	5	439	525
-9.7	⑦	497,920	321.66	6	611	685
-16.1	⑧	643,620	416.04	7	775	830
-25.1	⑨	764,230	494.36	8	958	973
-32.5	⑩	980,850	635.26	9	1015	1087
-40.0	⑪	684,460	442.47	10	7744	4997
	計	5,106,640	$E_c=2.90 \times 10^7(\text{kN}/\text{m}^2)$ $G=1.21 \times 10^7(\text{kN}/\text{m}^2)$ $\nu=0.2$ $h=5\%$ 基礎底面積 $88.0\text{m}(\text{NS}) \times 88.0\text{m}(\text{EW})=7744\text{m}^2$			

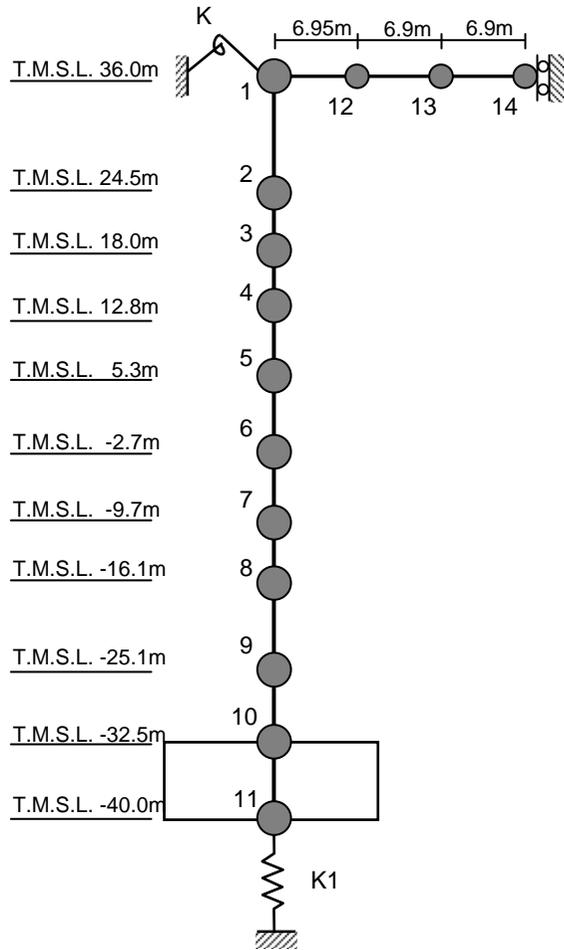
建屋モデル(EW方向)

T.M.S.L.(m)



質点番号	質点重量 W(kN)	回転慣性重量 $I_R(\times 10^6 \text{kN} \cdot \text{m}^2)$	部材番号	せん断断面積 $A_s(\text{m}^2)$	断面 2 次モーメント $I_B(\times 10^3 \text{m}^4)$
①	38,560	9.66			
②	70,930	17.95	1	58	43
③	231,770	149.61	2	101	86
④	312,150	201.53	3	361	279
⑤	433,240	279.76	4	367	260
⑥	448,910	289.85	5	459	564
⑦	497,920	321.66	6	620	686
⑧	643,620	416.04	7	760	859
⑨	764,230	494.36	8	907	998
⑩	980,850	635.26	9	1011	1119
⑪	684,460	442.47	10	7744	4997
計	5,106,640	$E_c=2.90 \times 10^7(\text{kN}/\text{m}^2)$ $G=1.21 \times 10^7(\text{kN}/\text{m}^2)$ $\nu=0.2$ $h=5\%$ 基礎底面積 $88.0\text{m(NS)} \times 88.0\text{m(EW)}=7744\text{m}^2$			

建屋モデル(UD方向)



建屋		
質点番号	質点重量 W (kN)	軸断面積 A_N (m ²)
1	29,140	
2	70,930	97
3	231,770	213
4	312,150	792
5	433,240	797
6	448,910	903
7	497,920	1140
8	643,620	1397
9	764,230	1604
10	980,850	1832
11	684,460	7744
合計	5,097,220	

屋根			
質点番号	質点重量 W (kN)	せん断面積 A_s ($\times 10^{-2}$ m ²)	断面2次モーメント I (m ⁴)
1	—		
12	3,780	20.7	2.876
13	3,760	12.4	2.876
14	1,880	8.5	2.876

①コンクリート部 建屋

ヤング係数 E_c 2.90×10^4 (N/mm²)
 せん断弾性係数 G 1.21×10^4 (N/mm²)
 ポアソン比 ν 0.20
 減衰 h 5%

②鉄骨部

ヤング係数 E_s 2.05×10^5 (N/mm²)
 せん断弾性係数 G 7.90×10^4 (N/mm²)
 ポアソン比 ν 0.30
 減衰 h 2%

基礎形状 88.0m(NS方向)×88.0m(EW方向)
 トラス端部回転拘束ばね K_θ 7.03×10^7 (kNm/rad)

地盤モデルおよび地盤定数(Ss-1)

標高 T.M.S.L. (m)	地層	せん断波 速度 Vs (m/s)	単位体積 重量 (kN/m ³)	ポアソン比	せん断 弾性係数 G ($\times 10^2$ N/mm ²)	初期せん断 弾性係数 G ₀ ($\times 10^2$ N/mm ²)	剛性 低下率 G/G ₀	ヤング 係数 E ($\times 10^2$ N/mm ²)	減衰 定数 h (%)	層厚 H (m)
+5.0	〔砂層〕	107	18.6	0.33	0.130	0.217	0.60	0.346	10	3.8
+1.2		154	18.6	0.33	0.202	0.450	0.45	0.537	13	3.9
-2.7		182	18.6	0.33	0.251	0.628	0.40	0.668	14	3.5
-6.2		201	18.6	0.33	0.283	0.766	0.37	0.753	15	3.5
-9.7		217	18.6	0.33	0.321	0.893	0.36	0.854	15	3.2
-12.9		230	18.6	0.33	0.340	1.00	0.34	0.904	16	3.2
-16.1		246	18.6	0.33	0.264	1.15	0.23	0.702	48	5.1
-21.2	西山層	540	16.9	0.43	4.37	5.03	0.87	12.50	3	40.8
-62.0		590	16.9	0.43	4.98	6.00	0.83	14.24	3	15.0
-77.0		620	16.9	0.43	5.42	6.62	0.82	15.50	3	26.0
-103.0		650	16.9	0.43	5.82	7.28	0.80	16.65	3	25.0
-128.0		670	16.9	0.43	5.88	7.74	0.76	16.82	3	64.0
-192.0		690	16.9	0.43	6.39	8.20	0.78	18.28	3	92.0
-284.0	〔解放 基盤〕	730	16.9	0.43	9.18	9.18	-	26.25	-	-

地盤モデルおよび地盤定数(Ss-2)

標高 T.M.S.L. (m)	地層	せん断波 速度 Vs (m/s)	単位体積 重量 (kN/m ³)	ポアソン比	せん断 弾性係数 G ($\times 10^2$ N/mm ²)	初期せん断 弾性係数 G ₀ ($\times 10^2$ N/mm ²)	剛性 低下率 G/G ₀	ヤング 係数 E ($\times 10^2$ N/mm ²)	減衰 定数 h (%)	層厚 H (m)
+5.0	〔砂層〕	107	18.6	0.33	0.101	0.217	0.47	0.269	20	3.8
+1.2		154	18.6	0.33	0.121	0.450	0.27	0.322	21	3.9
-2.7		182	18.6	0.33	0.125	0.628	0.20	0.333	21	3.5
-6.2		201	18.6	0.33	0.153	0.766	0.20	0.407	20	3.5
-9.7		217	18.6	0.33	0.196	0.893	0.22	0.521	19	3.2
-12.9		230	18.6	0.33	0.240	1.00	0.24	0.638	19	3.2
-16.1		246	18.6	0.33	0.299	1.15	0.26	0.795	19	5.1
-21.2	西山層	540	16.9	0.43	4.52	5.03	0.90	12.93	3	40.8
-62.0		590	16.9	0.43	5.34	6.00	0.89	15.27	3	15.0
-77.0		620	16.9	0.43	5.95	6.62	0.90	17.02	3	26.0
-103.0		650	16.9	0.43	6.47	7.28	0.89	18.50	3	25.0
-128.0		670	16.9	0.43	6.88	7.74	0.89	19.68	3	64.0
-192.0		690	16.9	0.43	7.21	8.20	0.88	20.62	3	92.0
-284.0	〔解放 基盤〕	730	16.9	0.43	9.18	9.18	-	26.25	-	-

地盤モデルおよび地盤定数(Ss-3)

標高 T.M.S.L. (m)	地層	せん断波 速度 Vs (m/s)	単位体積 重量 (kN/m ³)	ポアソン比	せん断 弾性係数 G ($\times 10^2$ N/mm ²)	初期せん断 弾性係数 G ₀ ($\times 10^2$ N/mm ²)	剛性 低下率 G/G ₀	ヤング 係数 E ($\times 10^2$ N/mm ²)	減衰 定数 h (%)	層厚 H (m)
+5.0	〔砂層〕	107	18.6	0.33	0.119	0.217	0.55	0.317	12	3.8
+1.2		154	18.6	0.33	0.171	0.450	0.38	0.455	16	3.9
-2.7		182	18.6	0.33	0.163	0.628	0.26	0.434	21	3.5
-6.2		201	18.6	0.33	0.130	0.766	0.17	0.346	28	3.5
-9.7		217	18.6	0.33	0.107	0.893	0.12	0.285	31	3.2
-12.9		230	18.6	0.33	0.110	1.00	0.11	0.293	34	3.2
-16.1		246	18.6	0.33	0.138	1.15	0.12	0.367	32	5.1
-21.2	西山層	540	16.9	0.43	4.57	5.03	0.91	13.07	3	40.8
-62.0		590	16.9	0.43	5.40	6.00	0.90	15.44	3	15.0
-77.0		620	16.9	0.43	5.89	6.62	0.89	16.85	3	26.0
-103.0		650	16.9	0.43	6.40	7.28	0.88	18.30	3	25.0
-128.0		670	16.9	0.43	6.65	7.74	0.86	19.02	3	64.0
-192.0		690	16.9	0.43	6.97	8.20	0.85	19.93	3	92.0
-284.0	〔解放 基盤〕	730	16.9	0.43	9.18	9.18	-	26.25	-	-

地盤モデルおよび地盤定数(Ss-4)

標高 T.M.S.L. (m)	地層	せん断波 速度 Vs (m/s)	単位体積 重量 (kN/m ³)	ポアソン比	せん断 弾性係数 G ($\times 10^2$ N/mm ²)	初期せん断 弾性係数 G ₀ ($\times 10^2$ N/mm ²)	剛性 低下率 G/G ₀	ヤング 係数 E ($\times 10^2$ N/mm ²)	減衰 定数 h (%)	層厚 H (m)
+5.0	〔砂層〕	107	18.6	0.33	0.0998	0.217	0.46	0.265	10	3.8
+1.2		154	18.6	0.33	0.126	0.450	0.28	0.335	12	3.9
-2.7		182	18.6	0.33	0.163	0.628	0.26	0.434	13	3.5
-6.2		201	18.6	0.33	0.222	0.766	0.29	0.591	14	3.5
-9.7		217	18.6	0.33	0.276	0.893	0.31	0.734	14	3.2
-12.9		230	18.6	0.33	0.310	1.00	0.31	0.825	14	3.2
-16.1		246	18.6	0.33	0.356	1.15	0.31	0.947	14	5.1
-21.2	西山層	540	16.9	0.43	4.67	5.03	0.93	13.36	3	40.8
-62.0		590	16.9	0.43	5.52	6.00	0.92	15.79	3	15.0
-77.0		620	16.9	0.43	6.02	6.62	0.91	17.22	3	26.0
-103.0		650	16.9	0.43	6.55	7.28	0.90	18.73	3	25.0
-128.0		670	16.9	0.43	6.88	7.74	0.89	19.68	3	64.0
-192.0		690	16.9	0.43	7.05	8.20	0.86	20.16	3	92.0
-284.0	〔解放 基盤〕	730	16.9	0.43	9.18	9.18	-	26.25	-	-

地盤モデルおよび地盤定数(Ss-5)

標高 T.M.S.L (m)	地層	せん断波 速度 Vs (m/s)	単位体積 重量 (kN/m ³)	ポアソン比	せん断 弾性係数 G ($\times 10^2$ N/mm ²)	初期せん断 弾性係数 G ₀ ($\times 10^2$ N/mm ²)	剛性 低下率 G/G ₀	ヤング 係数 E ($\times 10^2$ N/mm ²)	減衰 定数 h (%)	層厚 H (m)
+5.0	〔砂層〕	107	18.6	0.33	0.125	0.217	0.58	0.333	10	3.8
+1.2		154	18.6	0.33	0.171	0.450	0.38	0.455	14	3.9
-2.7		182	18.6	0.33	0.169	0.628	0.27	0.450	17	3.5
-6.2		201	18.6	0.33	0.130	0.766	0.17	0.346	19	3.5
-9.7		217	18.6	0.33	0.107	0.893	0.12	0.285	20	3.2
-12.9		230	18.6	0.33	0.090	1.00	0.09	0.239	21	3.2
-16.1		246	18.6	0.33	0.081	1.15	0.07	0.214	21	5.1
-21.2		西山層	540	16.9	0.43	4.57	5.03	0.91	13.07	3
-62.0	590		16.9	0.43	5.34	6.00	0.89	15.27	3	15.0
-77.0	620		16.9	0.43	5.75	6.62	0.87	16.45	3	26.0
-103.0	650		16.9	0.43	6.26	7.28	0.86	17.90	3	25.0
-128.0	670		16.9	0.43	6.42	7.74	0.83	18.36	3	64.0
-192.0	〔解放 基盤〕	690	16.9	0.43	6.47	8.20	0.79	18.50	3	92.0
-284.0		730	16.9	0.43	9.18	9.18	-	26.25	-	-

地盤ばね定数(Ss-1)

NS方向

T. M. S. L. (m)	ばね 番号	地盤ばね 成分	ばね	減衰
			ばね定数 ^{(*)1} K_c	減衰係数 ^{(*)2} C_c
-25.1	Ks1	側面・並進	1.41×10^7	3.67×10^6
	Kr1	側面・回転	2.57×10^{10}	2.21×10^9
-32.5	Ks2	側面・並進	1.38×10^7	3.60×10^6
	Kr2	側面・回転	2.52×10^{10}	2.16×10^9
-40.0	Ks3	側面・並進	6.96×10^6	1.81×10^6
	Kr3	側面・回転	1.27×10^{10}	1.09×10^9
	Ks4	底面・並進	1.29×10^8	7.10×10^6
	Kr4	底面・回転	3.03×10^{11}	4.98×10^9

- (*1) Ks1~Ks4 は kN/m Kr1~Kr4 は kNm/rad
 (*2) Ks1~Ks4 は kNs/m Kr1~Kr4 は kNsm/rad

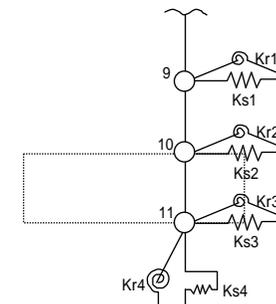
EW方向

T. M. S. L. (m)	ばね 番号	地盤ばね 成分	ばね	減衰
			ばね定数 ^{(*)1} K_c	減衰係数 ^{(*)2} C_c
-25.1	Ks1	側面・並進	1.41×10^7	3.67×10^6
	Kr1	側面・回転	2.57×10^{10}	2.21×10^9
-32.5	Ks2	側面・並進	1.38×10^7	3.60×10^6
	Kr2	側面・回転	2.52×10^{10}	2.16×10^9
-40.0	Ks3	側面・並進	6.96×10^6	1.81×10^6
	Kr3	側面・回転	1.27×10^{10}	1.09×10^9
	Ks4	底面・並進	1.29×10^8	7.10×10^6
	Kr4	底面・回転	3.03×10^{11}	4.98×10^9

- (*1) Ks1~Ks4 は kN/m Kr1~Kr4 は kNm/rad
 (*2) Ks1~Ks4 は kNs/m Kr1~Kr4 は kNsm/rad

UD方向

T. M. S. L. (m)	ばね 番号	地盤ばね 成分	ばね	減衰
			ばね定数 K_c (kN/m)	減衰係数 C_c (kNs/m)
-40.0	K1	底面・鉛直	2.06×10^8	1.58×10^7



NS方向及びEW方向

地盤ばね定数(Ss-2)

NS方向

T. M. S. L. (m)	ばね 番号	地盤ばね 成分	ばね	減衰
			ばね定数 ^(*) K_c	減衰係数 ^(**) C_c
-25.1	Ks1	側面・並進	1.46×10^7	3.74×10^6
	Kr1	側面・回転	2.66×10^{10}	2.25×10^9
-32.5	Ks2	側面・並進	1.43×10^7	3.66×10^6
	Kr2	側面・回転	2.61×10^{10}	2.20×10^9
-40.0	Ks3	側面・並進	7.21×10^6	1.84×10^6
	Kr3	側面・回転	1.31×10^{10}	1.11×10^9
	Ks4	底面・並進	1.37×10^8	7.33×10^6
	Kr4	底面・回転	3.26×10^{11}	5.14×10^9

(*1) Ks1~Ks4はkN/m Kr1~Kr4はkNm/rad
 (*2) Ks1~Ks4はkNs/m Kr1~Kr4はkNsm/rad

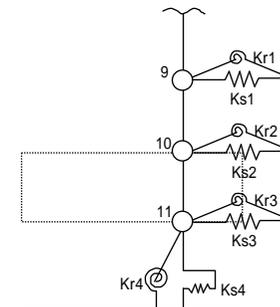
EW方向

T. M. S. L. (m)	ばね 番号	地盤ばね 成分	ばね	減衰
			ばね定数 ^(*) K_c	減衰係数 ^(**) C_c
-25.1	Ks1	側面・並進	1.46×10^7	3.73×10^6
	Kr1	側面・回転	2.66×10^{10}	2.25×10^9
-32.5	Ks2	側面・並進	1.43×10^7	3.66×10^6
	Kr2	側面・回転	2.61×10^{10}	2.20×10^9
-40.0	Ks3	側面・並進	7.21×10^6	1.84×10^6
	Kr3	側面・回転	1.31×10^{10}	1.11×10^9
	Ks4	底面・並進	1.37×10^8	7.33×10^6
	Kr4	底面・回転	3.26×10^{11}	5.12×10^9

(*1) Ks1~Ks4はkN/m Kr1~Kr4はkNm/rad
 (*2) Ks1~Ks4はkNs/m Kr1~Kr4はkNsm/rad

UD方向

T. M. S. L. (m)	ばね 番号	地盤ばね 成分	ばね	減衰
			ばね定数 K_c (kN/m)	減衰係数 C_c (kNs/m)
-40.0	K1	底面・鉛直	2.24×10^8	1.65×10^7



NS方向及びEW方向

地盤ばね定数(Ss-3)

NS方向

T. M. S. L. (m)	ばね 番号	地盤ばね 成分	ばね	減衰
			ばね定数 ^(*) K_c	減衰係数 ^(*) C_c
-25.1	Ks1	側面・並進	1.47×10^7	3.75×10^6
	Kr1	側面・回転	2.68×10^{10}	2.26×10^9
-32.5	Ks2	側面・並進	1.44×10^7	3.68×10^6
	Kr2	側面・回転	2.63×10^{10}	2.21×10^9
-40.0	Ks3	側面・並進	7.27×10^6	1.85×10^6
	Kr3	側面・回転	1.32×10^{10}	1.11×10^9
	Ks4	底面・並進	1.38×10^8	7.33×10^6
	Kr4	底面・回転	3.27×10^{11}	5.13×10^9

(*1) Ks1~Ks4はkN/m Kr1~Kr4はkNm/rad

(*2) Ks1~Ks4はkNs/m Kr1~Kr4はkNsm/rad

EW方向

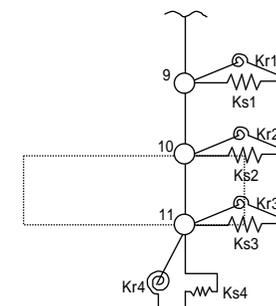
T. M. S. L. (m)	ばね 番号	地盤ばね 成分	ばね	減衰
			ばね定数 ^(*) K_c	減衰係数 ^(*) C_c
-25.1	Ks1	側面・並進	1.47×10^7	3.75×10^6
	Kr1	側面・回転	2.68×10^{10}	2.26×10^9
-32.5	Ks2	側面・並進	1.44×10^7	3.68×10^6
	Kr2	側面・回転	2.63×10^{10}	2.21×10^9
-40.0	Ks3	側面・並進	7.27×10^6	1.85×10^6
	Kr3	側面・回転	1.32×10^{10}	1.11×10^9
	Ks4	底面・並進	1.38×10^8	7.33×10^6
	Kr4	底面・回転	3.27×10^{11}	5.13×10^9

(*1) Ks1~Ks4はkN/m Kr1~Kr4はkNm/rad

(*2) Ks1~Ks4はkNs/m Kr1~Kr4はkNsm/rad

UD方向

T. M. S. L. (m)	ばね 番号	地盤ばね 成分	ばね	減衰
			ばね定数 K_c (kN/m)	減衰係数 C_c (kNs/m)
-40.0	K1	底面・鉛直	2.22×10^8	1.64×10^7



NS方向及びEW方向

地盤ばね定数(Ss-4)

NS方向

T. M. S. L. (m)	ばね 番号	地盤ばね 成分	ばね	減衰
			ばね定数 ^(*) K_c	減衰係数 ^(**) C_c
-25.1	Ks1 Kr1	側面・並進	1.51×10^7	3.79×10^6
		側面・回転	2.74×10^{10}	2.28×10^9
-32.5	Ks2 Kr2	側面・並進	1.48×10^7	3.72×10^6
		側面・回転	2.69×10^{10}	2.24×10^9
-40.0	Ks3 Kr3	側面・並進	7.44×10^6	1.87×10^6
		側面・回転	1.35×10^{10}	1.13×10^9
	Ks4 Kr4	底面・並進	1.41×10^8	7.41×10^6
		底面・回転	3.34×10^{11}	5.18×10^9

(*) Ks1~Ks4 は kN/m Kr1~Kr4 は kNm/rad

(**) Ks1~Ks4 は kNs/m Kr1~Kr4 は kNsm/rad

EW方向

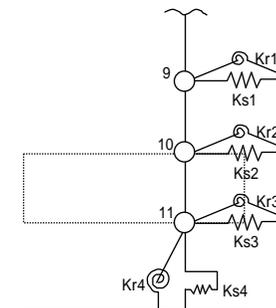
T. M. S. L. (m)	ばね 番号	地盤ばね 成分	ばね	減衰
			ばね定数 ^(*) K_c	減衰係数 ^(**) C_c
-25.1	Ks1 Kr1	側面・並進	1.51×10^7	3.79×10^6
		側面・回転	2.74×10^{10}	2.28×10^9
-32.5	Ks2 Kr2	側面・並進	1.48×10^7	3.72×10^6
		側面・回転	2.69×10^{10}	2.24×10^9
-40.0	Ks3 Kr3	側面・並進	7.44×10^6	1.87×10^6
		側面・回転	1.35×10^{10}	1.13×10^9
	Ks4 Kr4	底面・並進	1.41×10^8	7.41×10^6
		底面・回転	3.34×10^{11}	5.18×10^9

(*) Ks1~Ks4 は kN/m Kr1~Kr4 は kNm/rad

(**) Ks1~Ks4 は kNs/m Kr1~Kr4 は kNsm/rad

UD方向

T. M. S. L. (m)	ばね 番号	地盤ばね 成分	ばね	減衰
			ばね定数 K_c (kN/m)	減衰係数 C_c (kNs/m)
-40.0	K1	底面・鉛直	2.27×10^8	1.65×10^7



NS方向及びEW方向

地盤ばね定数(Ss-5)

NS方向

T. M. S. L. (m)	ばね 番号	地盤ばね 成分	ばね	減衰
			ばね定数 ^{(*)1} K_c	減衰係数 ^{(*)2} C_c
-25.1	Ks1 Kr1	側面・並進	1.47×10^7	3.75×10^6
		側面・回転	2.68×10^{10}	2.25×10^9
-32.5	Ks2 Kr2	側面・並進	1.44×10^7	3.68×10^6
		側面・回転	2.63×10^{10}	2.21×10^9
-40.0	Ks3 Kr3	側面・並進	7.27×10^6	1.85×10^6
		側面・回転	1.32×10^{10}	1.11×10^9
	Ks4 Kr4	底面・並進	1.36×10^8	7.30×10^6
		底面・回転	3.22×10^{11}	5.10×10^9

(*)1 Ks1~Ks4 は kN/m Kr1~Kr4 は kNm/rad

(*)2 Ks1~Ks4 は kNs/m Kr1~Kr4 は kNsm/rad

EW方向

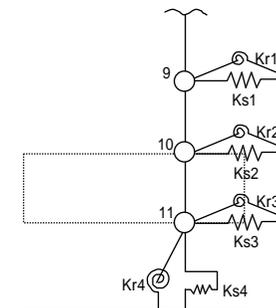
T. M. S. L. (m)	ばね 番号	地盤ばね 成分	ばね	減衰
			ばね定数 ^{(*)1} K_c	減衰係数 ^{(*)2} C_c
-25.1	Ks1 Kr1	側面・並進	1.47×10^7	3.75×10^6
		側面・回転	2.68×10^{10}	2.25×10^9
-32.5	Ks2 Kr2	側面・並進	1.44×10^7	3.68×10^6
		側面・回転	2.63×10^{10}	2.21×10^9
-40.0	Ks3 Kr3	側面・並進	7.27×10^6	1.85×10^6
		側面・回転	1.32×10^{10}	1.11×10^9
	Ks4 Kr4	底面・並進	1.36×10^8	7.30×10^6
		底面・回転	3.22×10^{11}	5.10×10^9

(*)1 Ks1~Ks4 は kN/m Kr1~Kr4 は kNm/rad

(*)2 Ks1~Ks4 は kNs/m Kr1~Kr4 は kNsm/rad

UD方向

T. M. S. L. (m)	ばね 番号	地盤ばね 成分	ばね	減衰
			ばね定数 K_c (kN/m)	減衰係数 C_c (kNs/m)
-40.0	K1	底面・鉛直	2.17×10^8	1.62×10^7



NS方向及びEW方向

固有値解析結果(Ss-1)

NS方向

次数	固有周期 (秒)	固有振動数 (Hz)	刺激係数*	備考
1	0.439	2.28	1.574	地盤建屋連成一次
2	0.217	4.61	-0.611	
3	0.098	10.22	-0.075	
4	0.076	13.23	0.203	
5	0.059	16.83	-0.104	

EW方向

次数	固有周期 (秒)	固有振動数 (Hz)	刺激係数*	備考
1	0.439	2.28	1.573	地盤建屋連成一次
2	0.217	4.60	-0.611	
3	0.098	10.17	-0.072	
4	0.077	13.00	0.181	
5	0.057	17.48	-0.090	

UD方向

次数	固有周期 (秒)	固有振動数 (Hz)	刺激係数*	備考
1	0.324	3.09	5.253	地盤建屋連成一次
2	0.281	3.56	-4.304	屋根トラス一次
3	0.082	12.19	0.098	
4	0.059	16.82	0.363	
5	0.058	17.19	0.372	

注*:各モードごとに固有ベクトルの最大値を1に基準化して得られる刺激係数を示す。

固有値解析結果(Ss-2)

NS方向

次数	固有周期 (秒)	固有振動数 (Hz)	刺激係数*	備考
1	0.428	2.34	1.581	地盤建屋連成一次
2	0.211	4.73	-0.622	
3	0.097	10.27	-0.077	
4	0.076	13.24	0.215	
5	0.059	16.84	-0.111	

EW方向

次数	固有周期 (秒)	固有振動数 (Hz)	刺激係数*	備考
1	0.428	2.33	1.580	地盤建屋連成一次
2	0.211	4.73	-0.623	
3	0.098	10.22	-0.074	
4	0.077	13.01	0.193	
5	0.057	17.49	-0.096	

UD方向

次数	固有周期 (秒)	固有振動数 (Hz)	刺激係数*	備考
1	0.311	3.21	7.019	地盤建屋連成一次
2	0.280	3.57	-6.075	屋根トラス一次
3	0.082	12.19	0.106	
4	0.059	16.83	0.383	
5	0.058	17.21	0.393	

注*: 各モードごとに固有ベクトルの最大値を1に基準化して得られる刺激係数を示す。

固有値解析結果(Ss-3)

NS方向

次数	固有周期 (秒)	固有振動数 (Hz)	刺激係数*	備考
1	0.427	2.34	1.582	地盤建屋連成一次
2	0.211	4.74	-0.624	
3	0.097	10.27	-0.077	
4	0.076	13.24	0.217	
5	0.059	16.84	-0.112	

EW方向

次数	固有周期 (秒)	固有振動数 (Hz)	刺激係数*	備考
1	0.427	2.34	1.581	地盤建屋連成一次
2	0.211	4.74	-0.624	
3	0.098	10.23	-0.075	
4	0.077	13.01	0.194	
5	0.057	17.49	-0.097	

UD方向

次数	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)	刺激係数*	備考
1	0.313	3.20	6.777	地盤建屋連成一次
2	0.280	3.57	-5.833	屋根トラス一次
3	0.082	12.2	0.105	
4	0.059	16.8	0.381	
5	0.058	17.2	0.391	

注*:各モードごとに固有ベクトルの最大値を1に基準化して得られる刺激係数を示す。

固有値解析結果(Ss-4)

NS方向

次数	固有周期 (秒)	固有振動数 (Hz)	刺激係数*	備考
1	0.423	2.36	1.586	地盤建屋連成一次
2	0.209	4.79	-0.629	
3	0.097	10.29	-0.078	
4	0.076	13.25	0.222	
5	0.059	16.85	-0.114	

EW方向

次数	固有周期 (秒)	固有振動数 (Hz)	刺激係数*	備考
1	0.423	2.36	1.584	地盤建屋連成一次
2	0.209	4.78	-0.629	
3	0.098	10.24	-0.076	
4	0.077	13.02	0.199	
5	0.057	17.49	-0.099	

UD方向

次数	固有周期 (秒)	固有振動数 (Hz)	刺激係数*	備考
1	0.310	3.23	7.409	地盤建屋連成一次
2	0.280	3.57	-6.466	屋根トラス一次
3	0.082	12.19	0.108	
4	0.059	16.83	0.386	
5	0.058	17.21	0.396	

注*:各モードごとに固有ベクトルの最大値を1に基準化して得られる刺激係数を示す。

固有値解析結果(Ss-5)

NS方向

次数	固有周期 (秒)	固有振動数 (Hz)	刺激係数*	備考
1	0.429	2.33	1.581	地盤建屋連成一次
2	0.212	4.72	-0.622	
3	0.097	10.26	-0.077	
4	0.076	13.24	0.214	
5	0.059	16.84	-0.110	

EW方向

次数	固有周期 (秒)	固有振動数 (Hz)	刺激係数*	備考
1	0.429	2.33	1.580	地盤建屋連成一次
2	0.212	4.71	-0.622	
3	0.098	10.22	-0.074	
4	0.077	13.01	0.192	
5	0.057	17.49	-0.095	

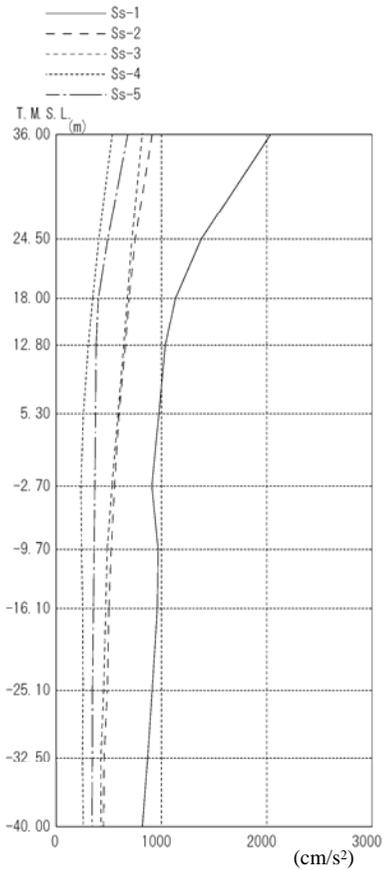
UD方向

次数	固有周期 (秒)	固有振動数 (Hz)	刺激係数*	備考
1	0.316	3.17	6.229	地盤建屋連成一次
2	0.281	3.56	-5.283	屋根トラス一次
3	0.082	12.19	0.103	
4	0.059	16.83	0.375	
5	0.058	17.20	0.385	

注*:各モードごとに固有ベクトルの最大値を1に基準化して得られる刺激係数を示す。

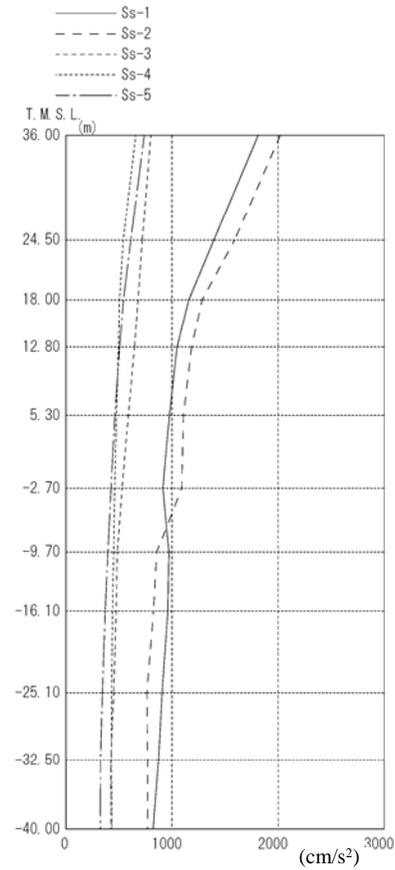
解析結果(最大応答加速度)

NS方向



(cm/s ²)				
Ss-1	Ss-2	Ss-3	Ss-4	Ss-5
2036	911	817	532	679
1378	750	719	405	490
1133	692	675	347	400
1036	658	642	305	379
975	597	587	258	373
909	554	530	235	367
968	522	484	240	360
960	501	471	251	353
912	486	450	255	344
869	454	424	248	343
819	451	426	258	341

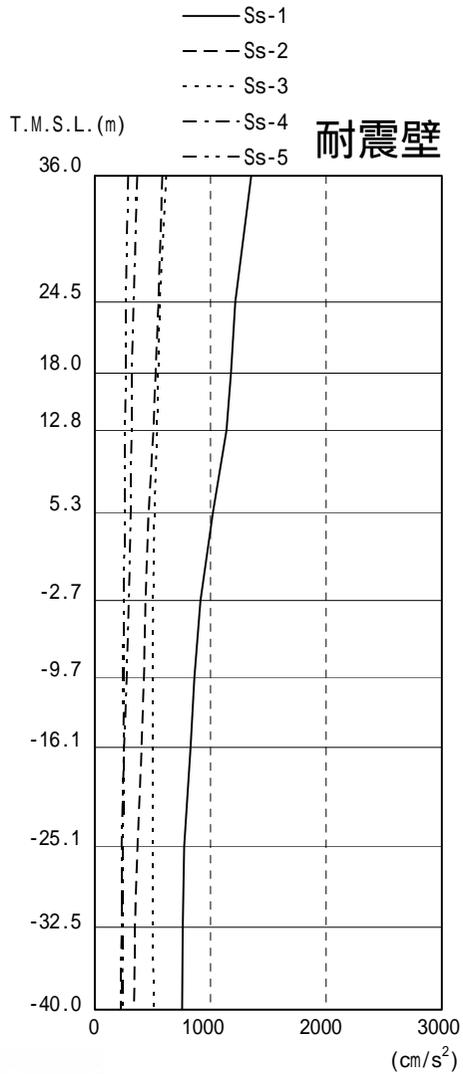
EW方向



(cm/s ²)				
Ss-1	Ss-2	Ss-3	Ss-4	Ss-5
1811	2020	800	658	738
1395	1590	719	540	611
1158	1284	680	504	542
1047	1184	646	495	506
975	1107	588	476	461
913	1091	529	459	425
970	855	484	449	395
960	825	472	439	370
906	762	450	430	343
873	769	423	427	325
821	771	426	431	323

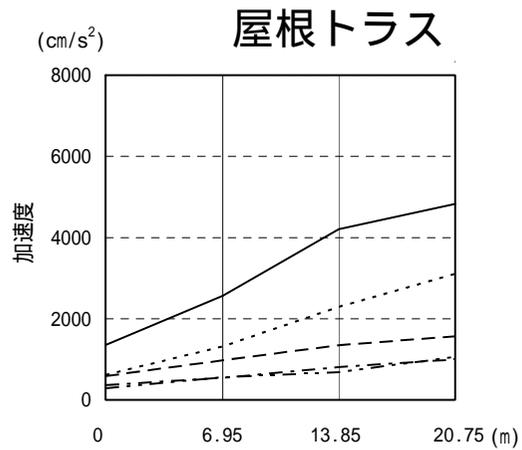
解析結果(最大応答加速度)

UD方向



耐震壁 (cm/s²)

Ss-1	Ss-2	Ss-3	Ss-4	Ss-5
1353	584	616	367	288
1215	551	561	335	267
1178	524	547	318	265
1138	507	537	316	262
1020	465	515	310	255
912	438	505	293	253
861	424	500	274	251
828	405	502	253	248
772	368	503	231	243
760	346	505	231	239
754	339	506	228	238



屋根トラス (cm/s²)

Ss-1	Ss-2	Ss-3	Ss-4	Ss-5
1353	2567	4204	4830	
584	978	1348	1568	
616	1314	2290	3108	
367	545	809	1000	
288	558	685	1060	

解析結果(最大応答せん断ひずみ)

NS方向

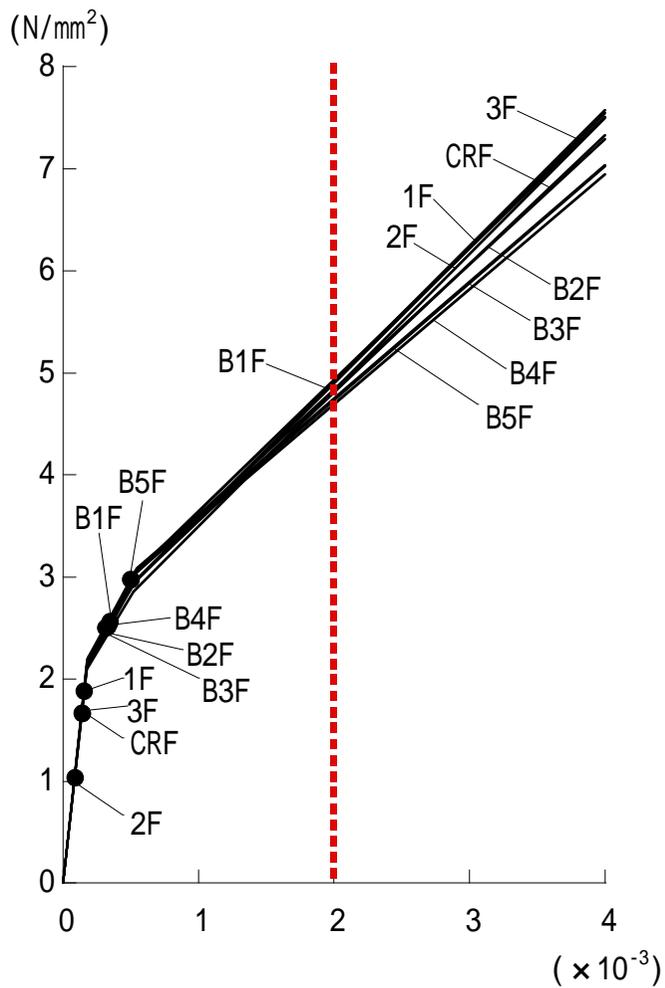
T.M.S.L	階	Ss-1	Ss-2	Ss-3	Ss-4	Ss-5	($\times 10^{-3}$) 評価基準値
36.0	CRF	0.14	0.06	0.06	0.04	0.05	2.0以下
24.5	3F	0.14	0.07	0.07	0.04	0.05	
18.0	2F	0.09	0.05	0.05	0.03	0.03	
12.8	1F	0.16	0.10	0.09	0.05	0.06	
5.3	B1F	0.35	0.14	0.13	0.06	0.08	
-2.7	B2F	0.32	0.13	0.13	0.06	0.08	
-9.7	B3F	0.32	0.13	0.13	0.06	0.08	
-16.1	B4F	0.33	0.13	0.13	0.06	0.09	
-25.1	B5F	0.50	0.14	0.13	0.07	0.11	
-32.5							

解析結果(最大応答せん断ひずみ)

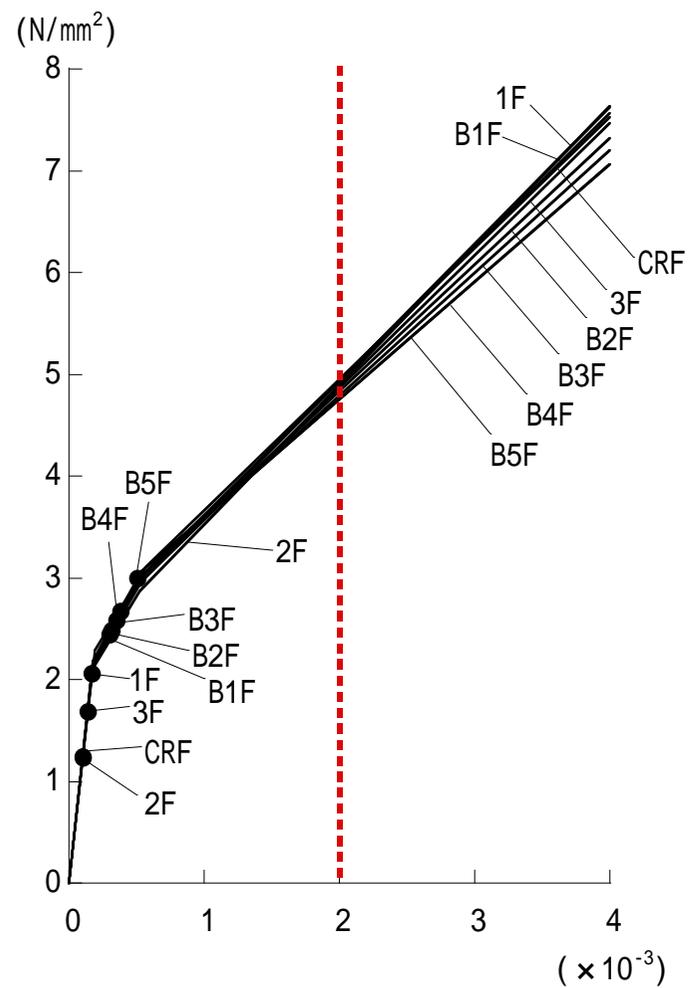
EW方向

T.M.S.L	階	Ss-1	Ss-2	Ss-3	Ss-4	Ss-5	($\times 10^{-3}$) 評価基準値
36.0	CRF	0.10	0.11	0.05	0.04	0.04	2.0以下
24.5	3F	0.14	0.16	0.07	0.05	0.06	
18.0	2F	0.10	0.11	0.06	0.04	0.05	
12.8	1F	0.17	0.25	0.10	0.08	0.08	
5.3	B1F	0.30	0.46	0.13	0.10	0.10	
-2.7	B2F	0.31	0.43	0.13	0.10	0.10	
-9.7	B3F	0.35	0.45	0.13	0.11	0.10	
-16.1	B4F	0.38	0.42	0.13	0.11	0.10	
-25.1	B5F	0.51	0.27	0.13	0.13	0.11	
-32.5							

解析結果(スケルトン曲線上へのプロット - 1)



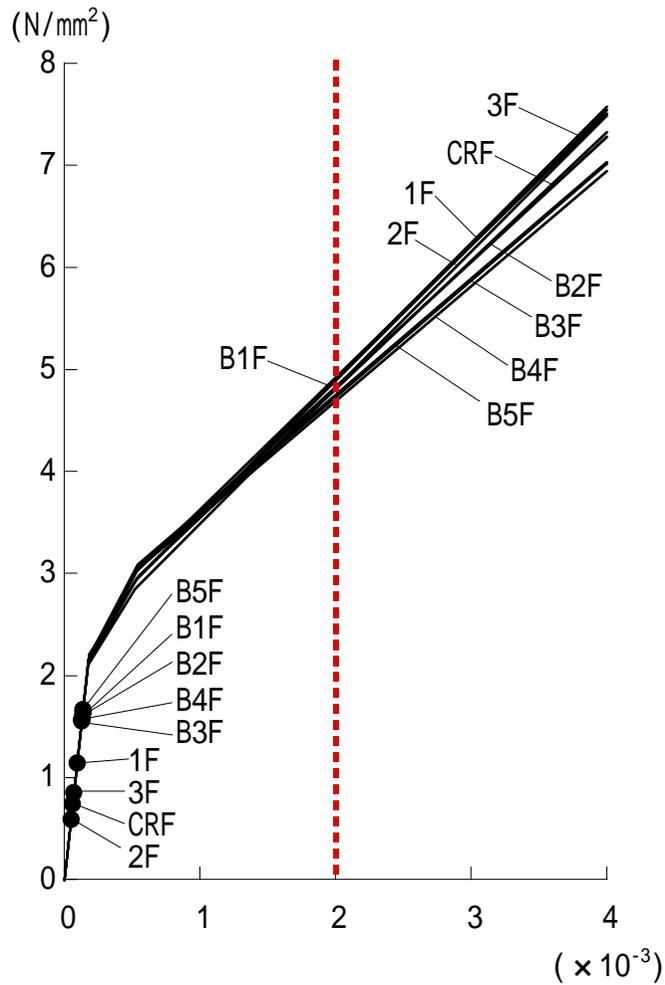
NS方向



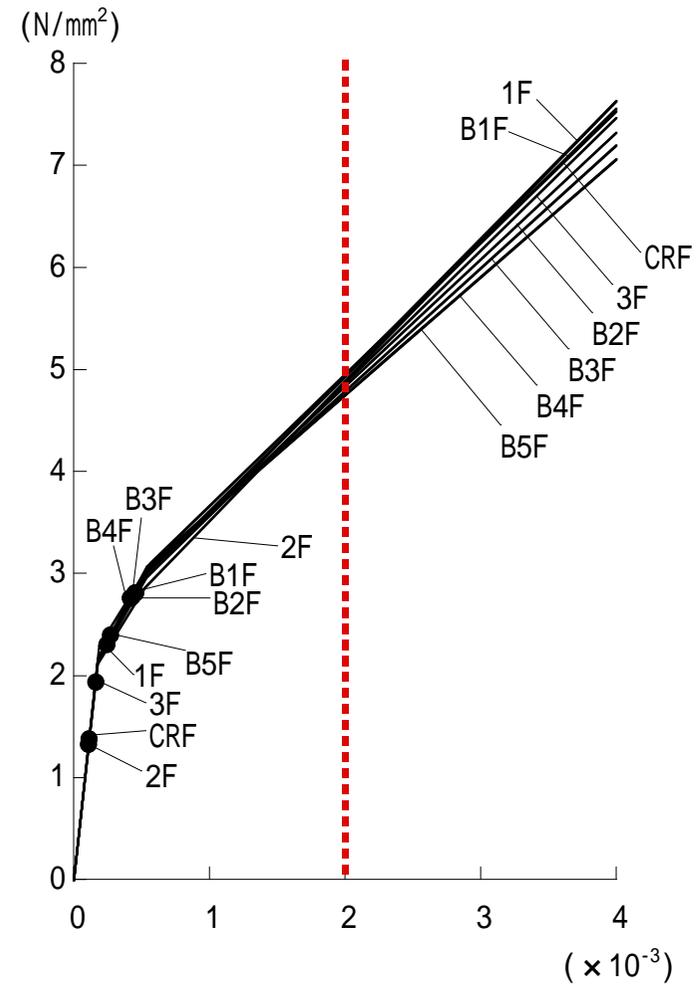
EW方向

Ss- 1

解析結果(スケルトン曲線上へのプロット - 2)



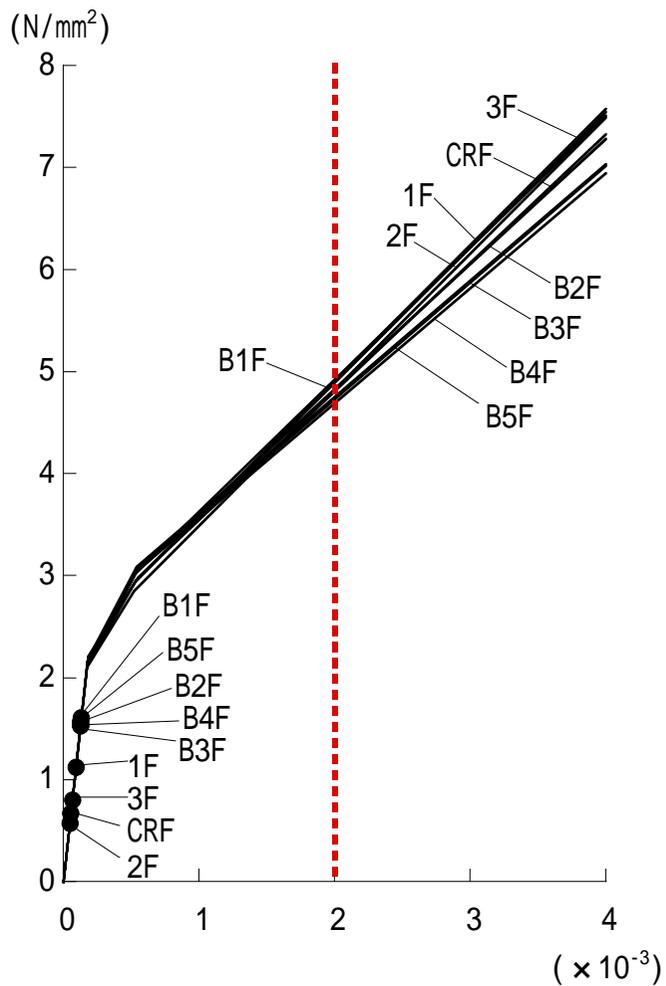
NS方向



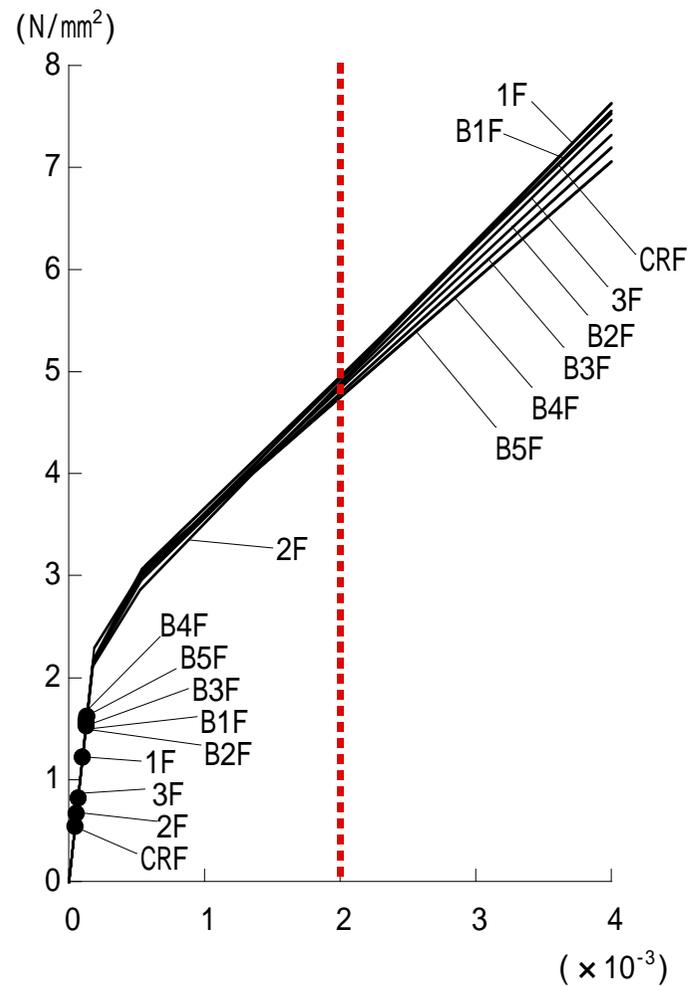
EW方向

Ss-2

解析結果(スケルトン曲線上へのプロット - 3)



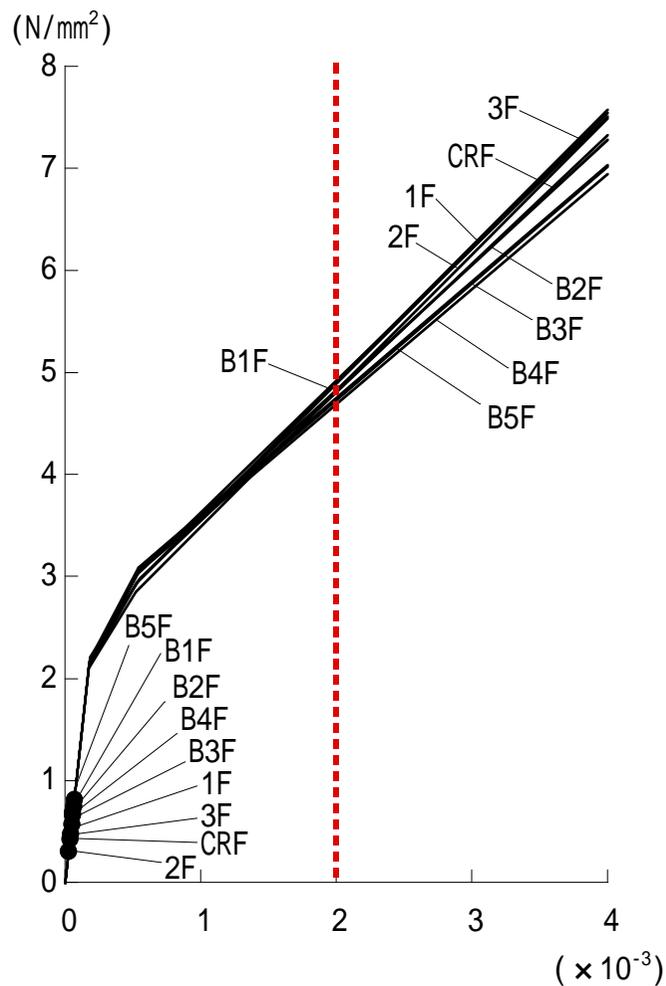
NS方向



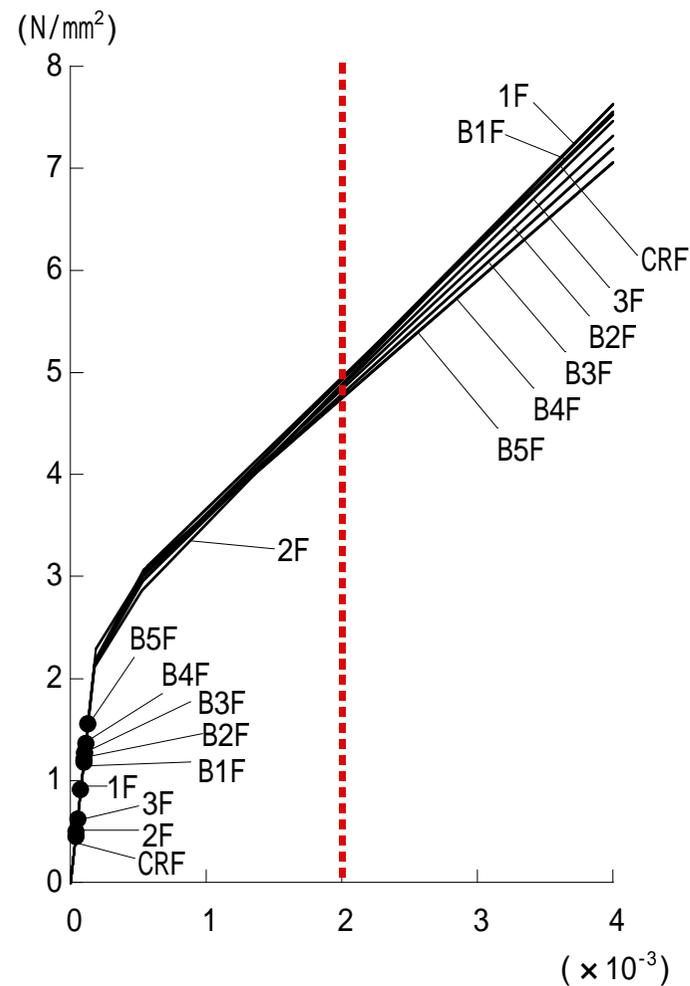
EW方向

Ss-3

解析結果(スケルトン曲線上へのプロット - 4)



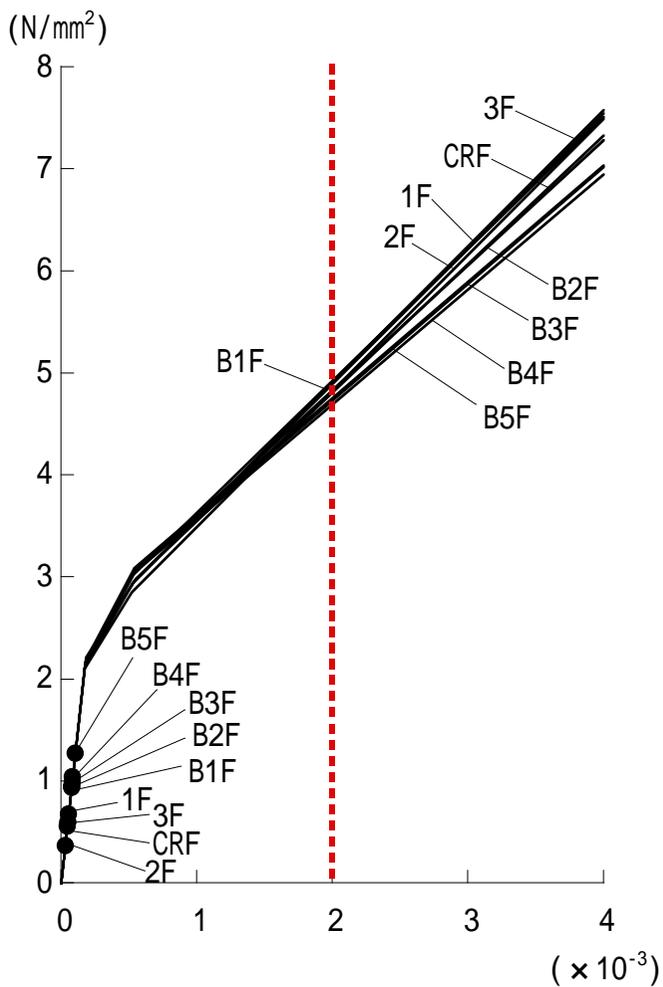
NS方向



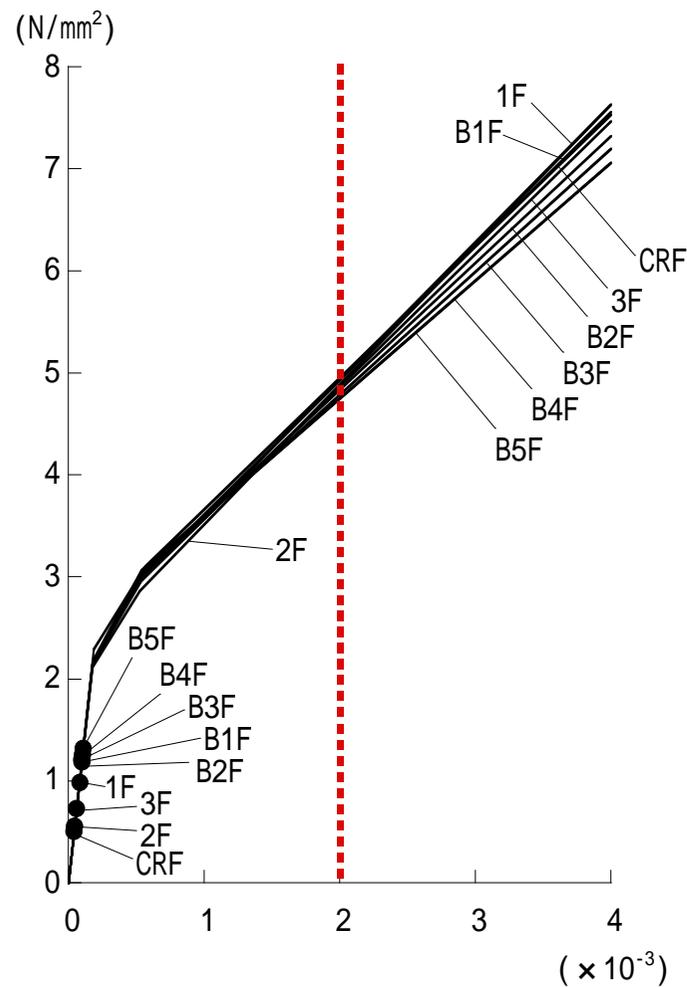
EW方向

Ss-4

解析結果(スケルトン曲線上へのプロット - 5)



NS方向



EW方向

Ss - 5

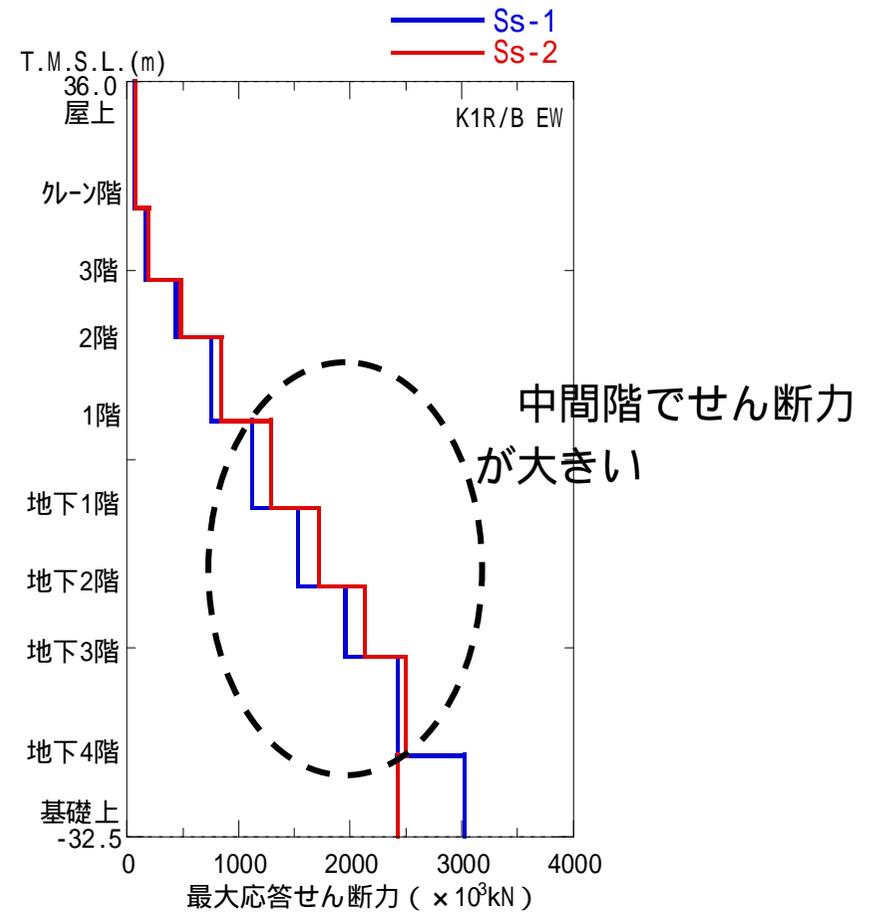
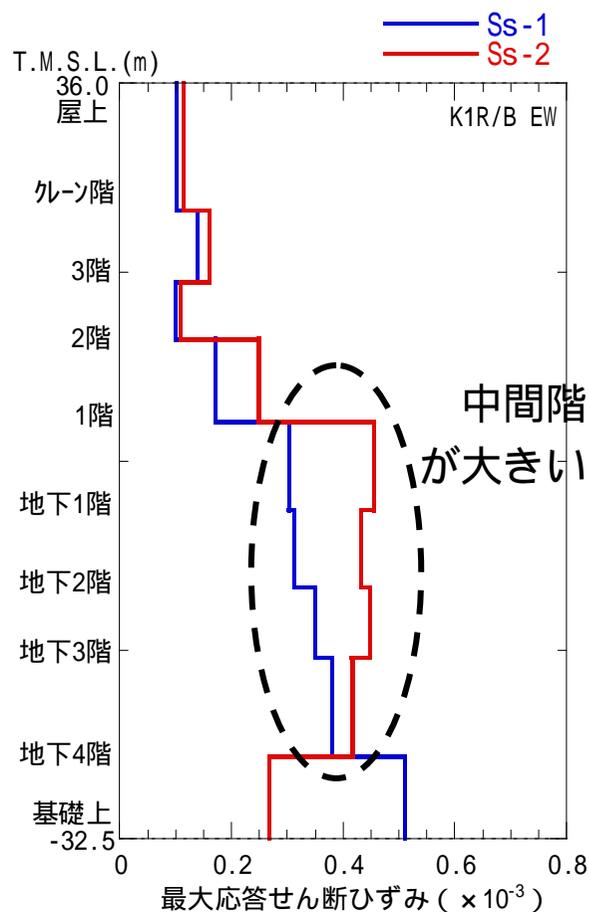
まとめ(原子炉建屋)

- 耐震安全性評価に当たっては、建物が構造物全体として変形能力（終局耐力時の変形）について十分な余裕を有し、建物の終局耐力に対し、妥当な安全余裕を有していることを確認する観点から、原子炉建屋の主たる耐震要素である耐震壁の安全性について評価する。
- 基準地震動 S_s による各層の鉄筋コンクリート耐震壁のせん断ひずみは最大で 0.51×10^{-3} （ S_s-1 、EW方向、B5F）であり、評価基準値（ 2.0×10^{-3} ）を満足している。

【参考】Ss-2EW方向のせん断ひずみの傾向分析

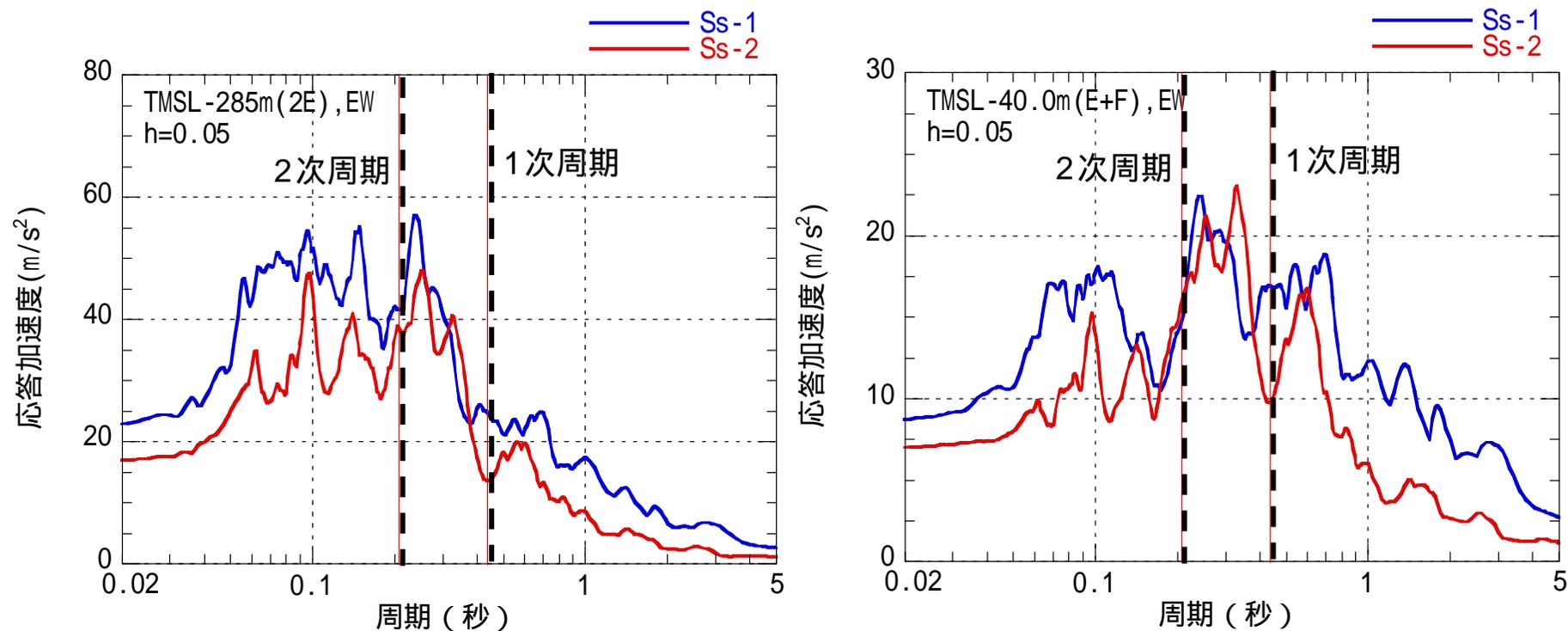
最大応答せん断力及びせん断ひずみ分布 (EW)

Ss-2EWによる最大応答せん断ひずみ分布は、Ss-1と比べて中間階で大きくなる傾向を示している。同様に、Ss-2による最大応答せん断力分布も、Ss-1と比べて中間階で大きくなる傾向が見られる。



地震動のスペクトル特性(EW)

中間階でひずみが大きくなる要因として、Ss-2EWでは、Ss-1と比べると、1次モードで谷となり、中間階の応答が大きくなる2次モードが励起されやすい地震動（特に入力地震動で顕著）であったことが挙げられる。



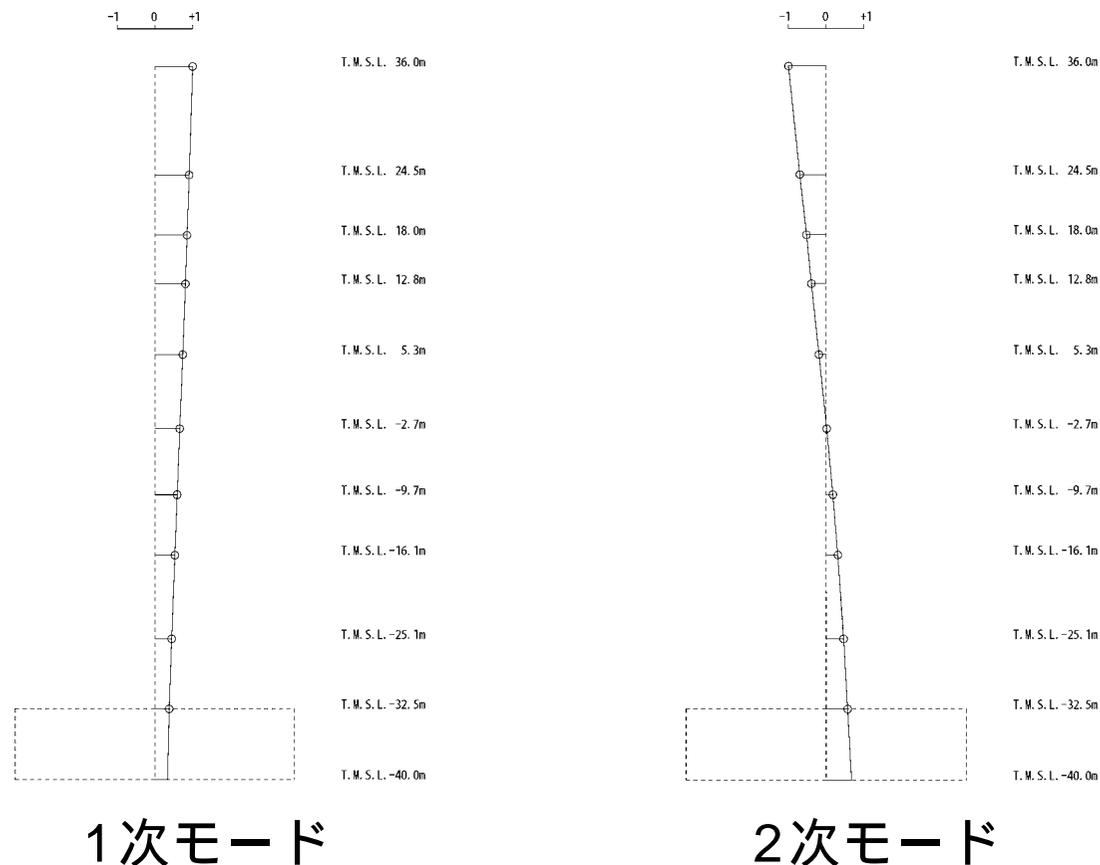
(a) 基準地震動(TMSL-285m,2E)

(b) 入力地震動(TMSL-40m,E+F)

加速度応答スペクトルの比較

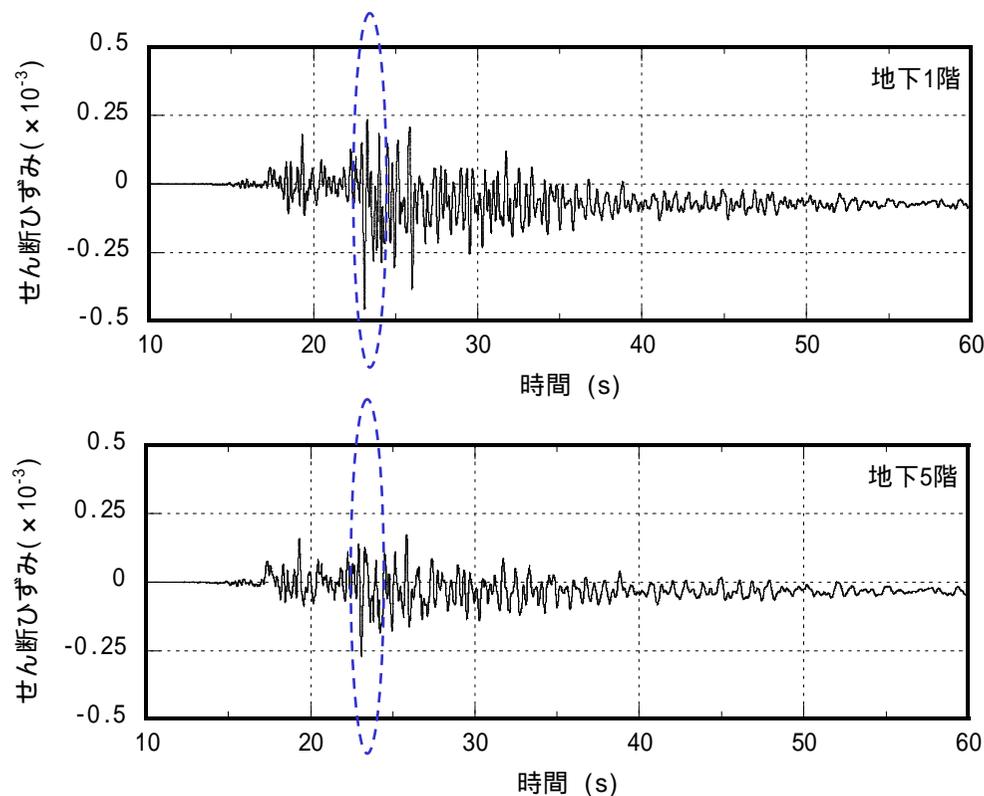
1次及び2次の固有モード

1次モードは全ての階が同位相で振動する固有モードであるのに対して、2次モードは中間階より下層と上層が逆位相で振動する固有モードである。従って、2次モードが励起されると中間階から下層の応答分布の傾向が1次モードと比べて逆転する可能性がある。



最大応答せん断ひずみの発生時刻 (Ss-2EW)

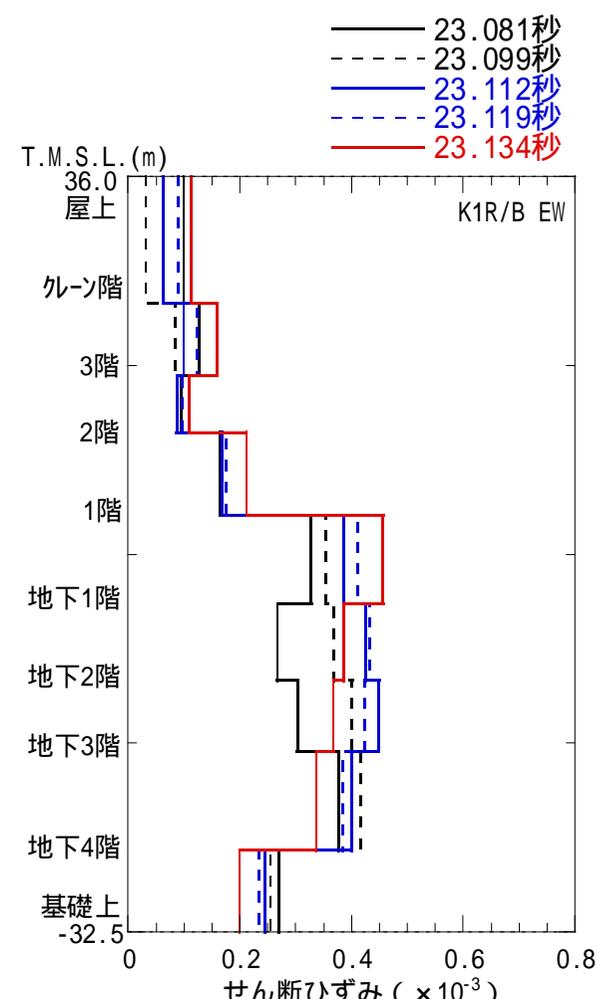
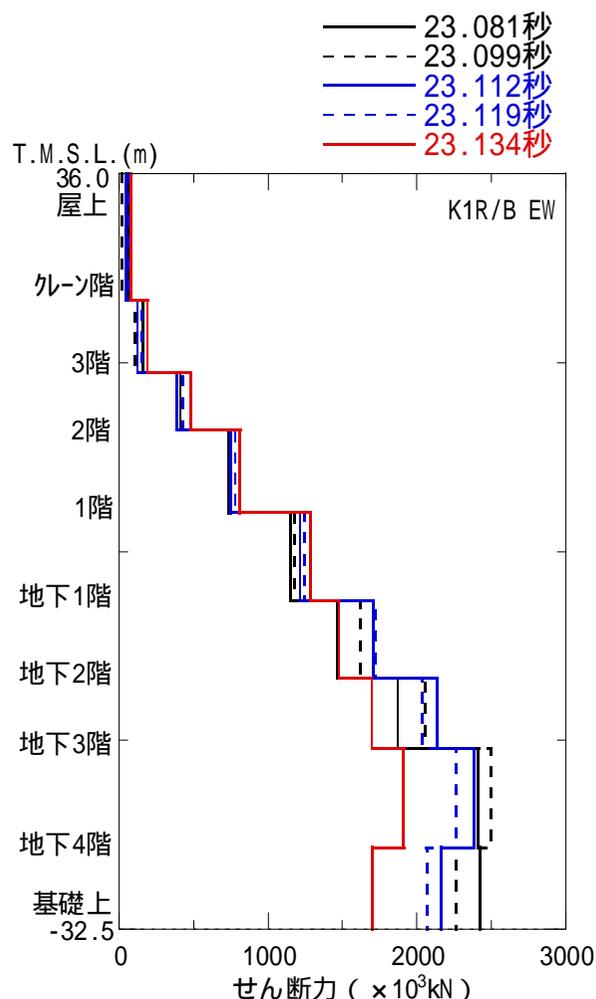
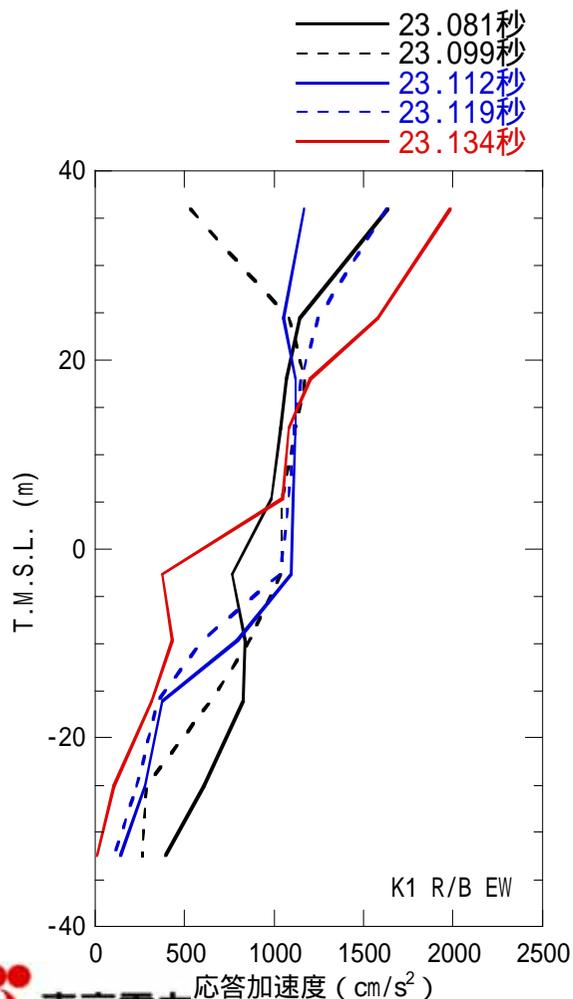
応答せん断ひずみの発生時刻はいずれの階においても23.1秒付近であるが、より詳細にみると、最下階から上層になるに従って、0.05秒程度遅れて最大値が発生していくことが分かる。



部材	最大値発生時刻
地下1階	23.134秒
地下2階	23.119秒
地下3階	23.112秒
地下4階	23.099秒
地下5階	23.081秒

23.1秒付近での応答値の推移 (Ss-2EW)

23.081秒で観察される2次モードの傾向が、最下層から地下1階にかけて徐々に塑性化が進展することで、中間階が大きくなる傾向が増幅されたと考えられる。



まとめ

Ss-2EWによる最大応答せん断ひずみ分布は、Ss-1と比べて中間階で大きくなる傾向を示している。

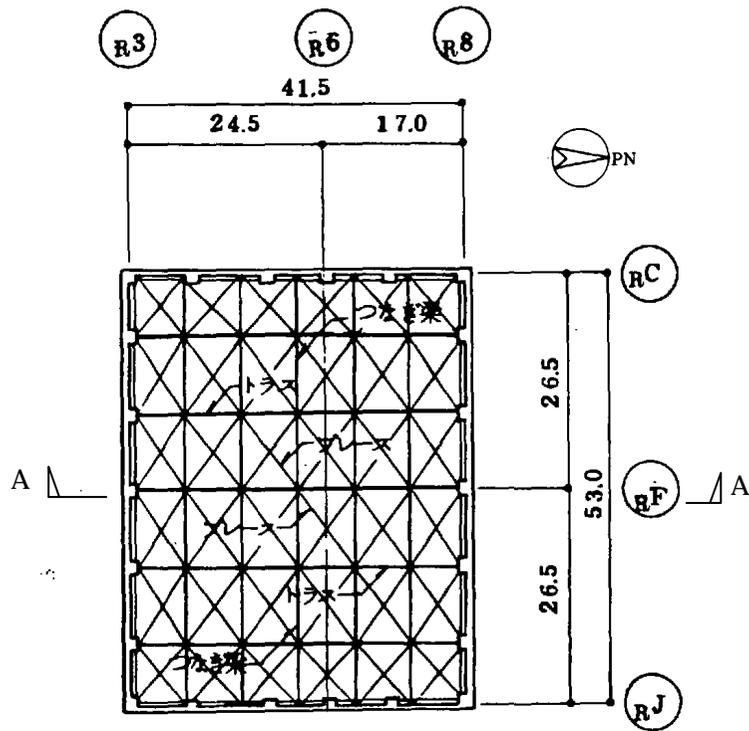
Ss-2EWの加速度応答スペクトル（解放基盤表面、入力地震動）には、（特に入力地震動で）2次モードが励起されやすいという特性があることと、2次モードは中間階より下層と上層が逆位相で振動する固有モードであることの影響により、中間階のひずみが大きくなったものと考えられる。

また、各層の最大ひずみが発生している時刻ごとのせん断力分布やせん断ひずみの変化状況を見ると、下層から上層に順に塑性化が進行していったことが推測される。

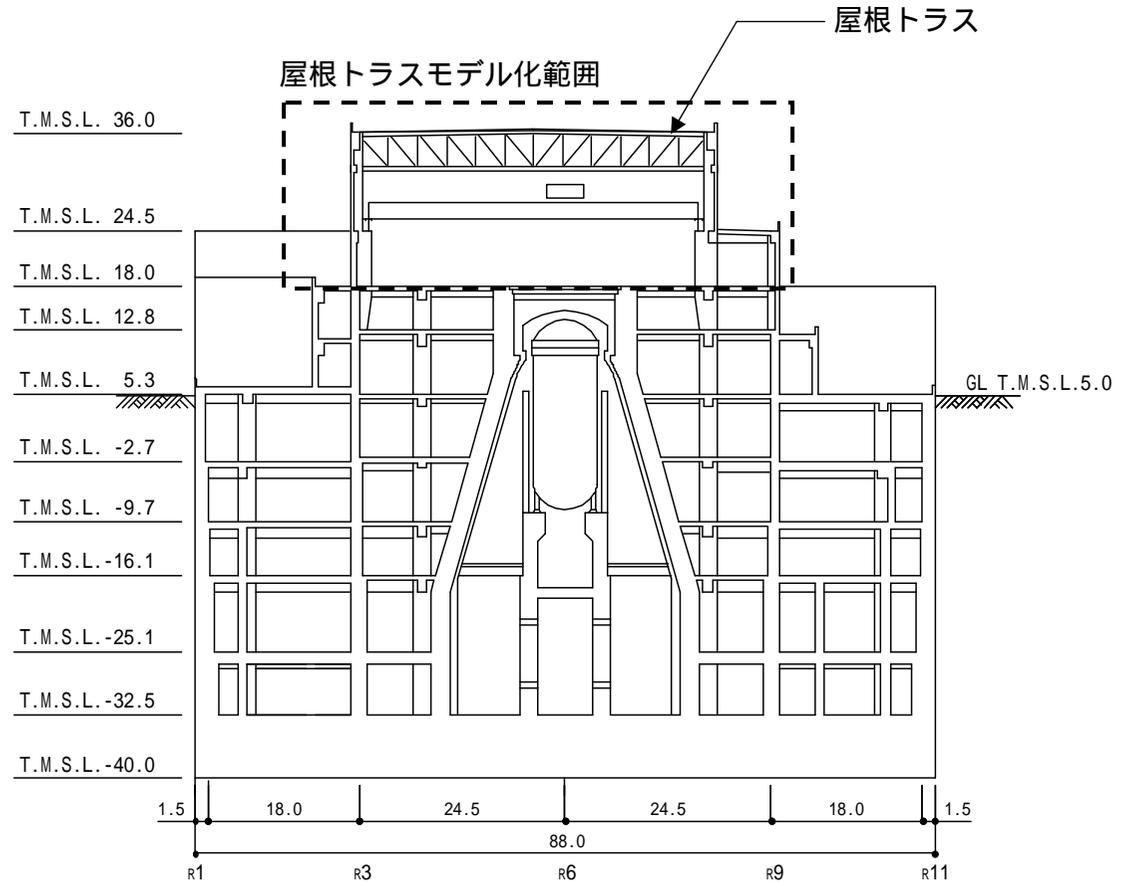
原子炉建屋屋根トラスの耐震安全性評価

屋根トラスの概要

原子炉建屋の上部構造は、鉄骨造陸屋根をもつ屋根トラスで構成されている。



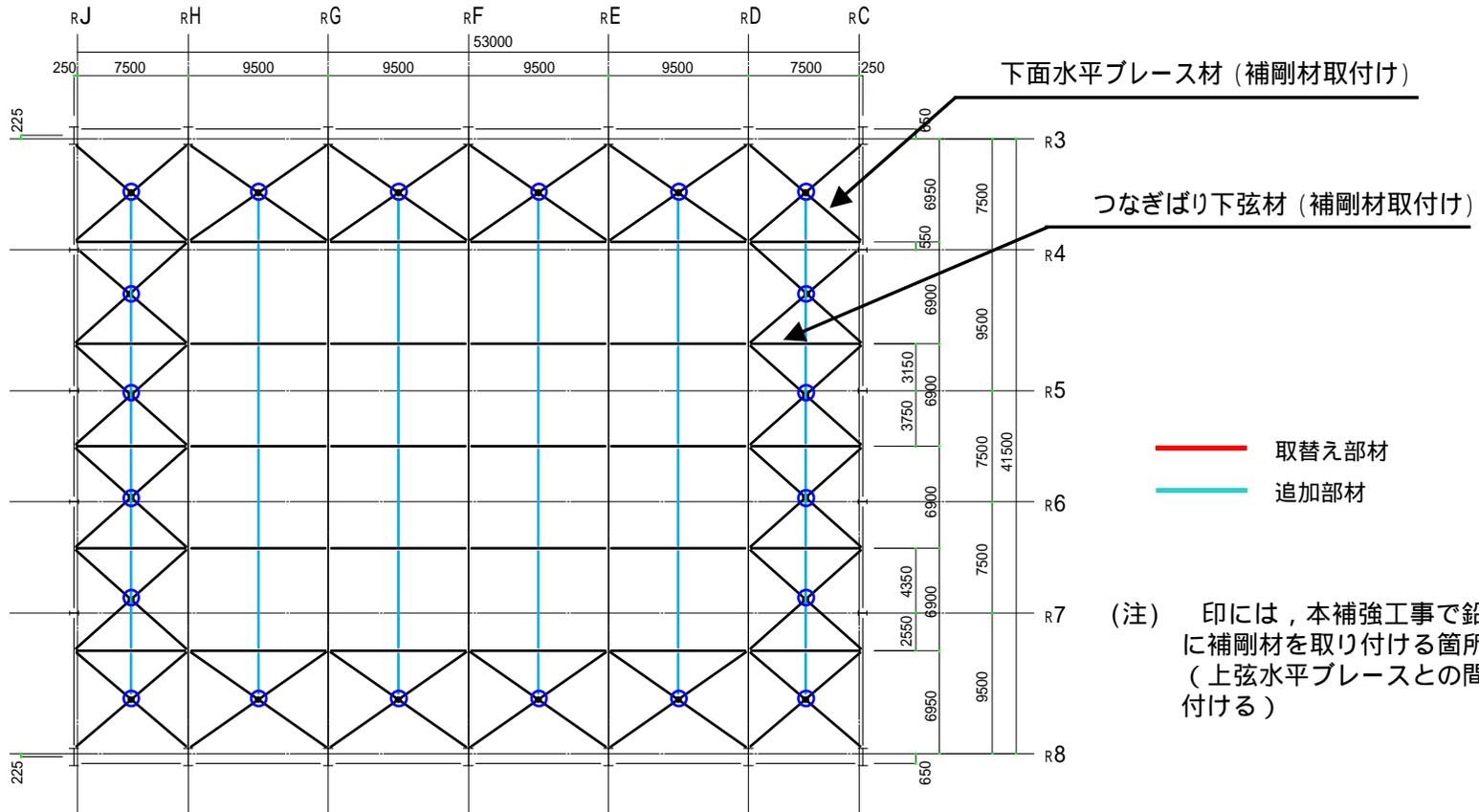
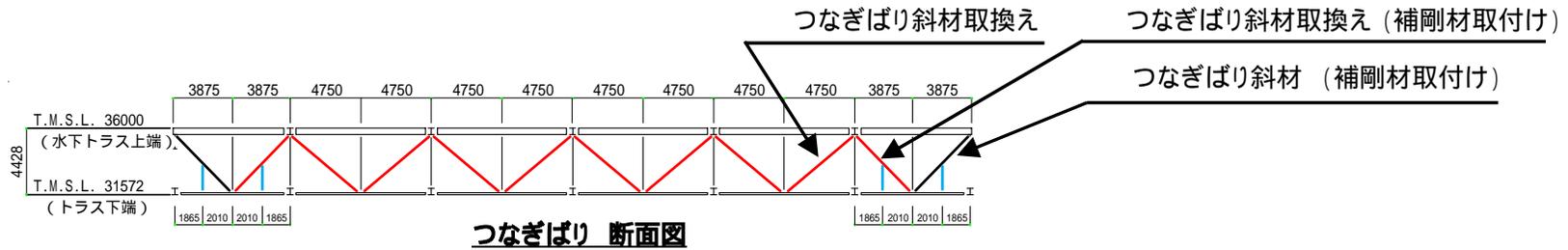
屋根伏図 (T.M.S.L.36.0m)



断面図(A-A断面)

(単位：m)

屋根トラスの補強概要



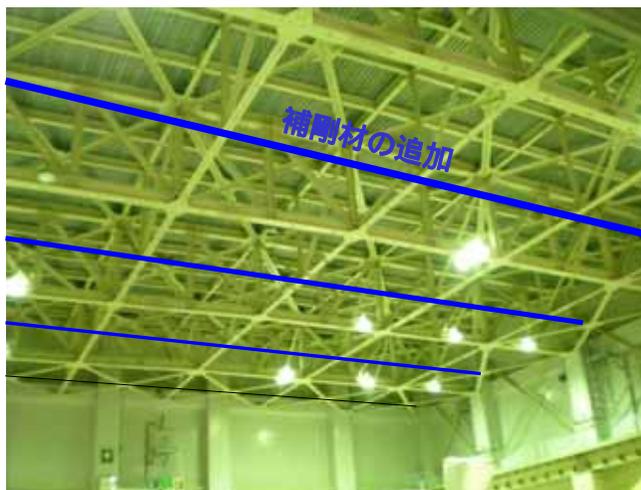
— 取替え部材
— 追加部材

(注) 印には、本補強工事で鉛直方向に補剛材を取り付ける箇所を示す。(上弦水平ブレースとの間に取り付ける)

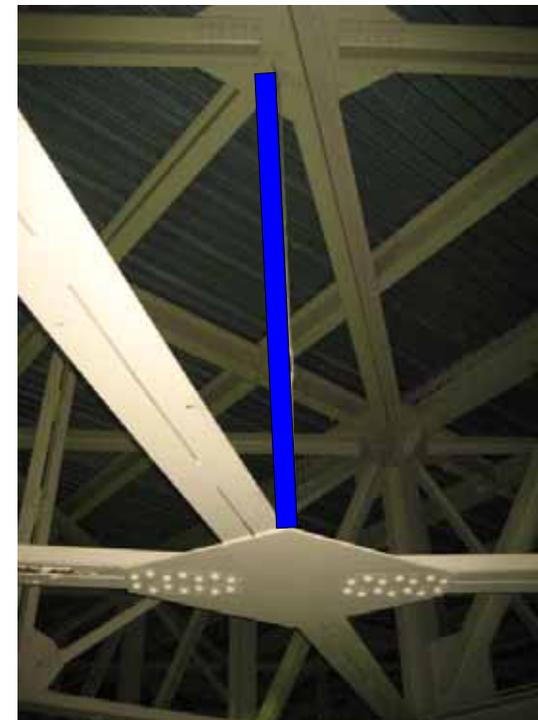
補強方法の概要



つなぎばり斜材の取替と補剛材の追加

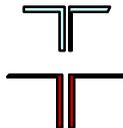
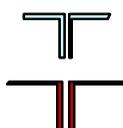


つなぎ梁下弦材への補剛材の追加



下面水平ブレース補剛材の追加

補強箇所と補強方法

No	箇所及び補強方法					座屈耐力 (kN)	引張耐力 (kN)
				補強前	補強後	補強前	補強後
	つなぎばり斜材 (補剛材取付け)	補強前 2Ls-100×100×10		補強前	402	980	
		補強後 (補剛材取付け)		補強後	615	980	
	つなぎばり斜材取換え (補剛材取付け)	補強前 2Ls-100×100×10		補強前	402	980	
		補強後 ↓ 2Ls-130×130×9 (補剛材取付け)		補強後	891	1173	
	つなぎばり斜材取換え	補強前 2Ls-100×100×10		補強前	323	980	
		補強後 ↓ 2Ls-130×130×9		補強後	668	1173	
	下面水平ブレース材 (補剛材取付け)	補強前 2Ls-130×130×12		補強前	172	1535	
		補強後 (補剛材取付け)		補強後	690	1535	
	つなぎばり下弦材 (補剛材取付け)	補強前 2Ls-130×130×12		補強前	791	1535	
		補強後 (補剛材取付け)		補強後	1226	1535	

評価基準

屋根トラスを構成する各構面の上下弦材・斜材・束材を対象として、地震時に生じる軸力および曲げモーメントより短期許容応力度に対する断面検定について、下式を用いて行う。

【圧縮】

$$\frac{{}_S\sigma_N}{{}_Sf_c} + \frac{{}_S\sigma_b}{{}_Sf_b} \leq 1.0$$

${}_S\sigma_N$: 地震時における部材の軸応力
 ${}_S\sigma_b$: 地震時における部材の曲げ応力
 ${}_Sf_c$: 圧縮応力に対する許容値¹
(座屈の影響を考慮して細長比等により求めた数値)
 ${}_Sf_b$: 曲げ応力に対する許容値¹

【引張】

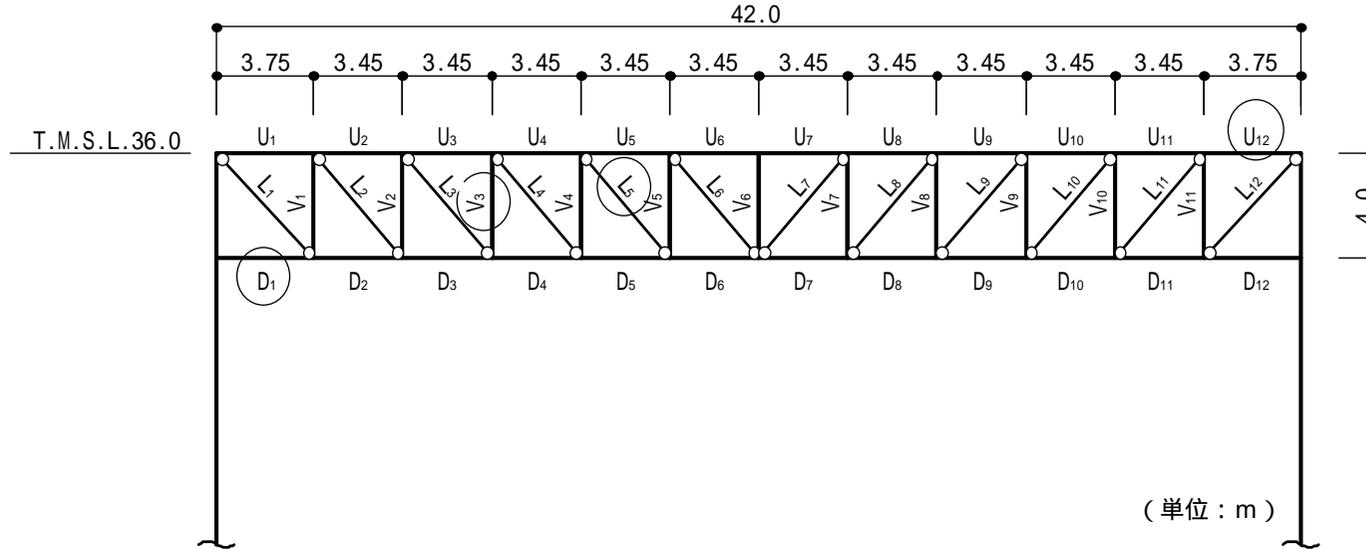
$$\frac{{}_S\sigma_N}{{}_Sf_t} + \frac{{}_S\sigma_b}{{}_Sf_b} \leq 1.0$$

${}_S\sigma_N$: 地震時における部材の軸応力
 ${}_S\sigma_b$: 地震時における部材の曲げ応力
 ${}_Sf_t$: 引張応力に対する許容値¹
 ${}_Sf_b$: 曲げ応力に対する許容値¹

¹ : 評価基準値は、建築基準法に基づく鋼材の材料強度（F値の1.1倍）による許容値を示す。

評価結果

: 最大応力発生位置を示す。



評価部位 (RF通り)

部材	発生応力 (N/mm ²)	評価基準値 (N/mm ²)	発生応力 / 評価基準値	位置	使用部材
上弦材	(引張)	125.5	0.76	U ₁₂	H-428 × 407 × 20 × 35
	(曲げ)	144.1			
下弦材	(圧縮)	186.7	0.90	D ₁	H-428 × 407 × 20 × 35
	(曲げ)	115.9			
斜材	(引張)	250.6	0.98	L ₅	2Cs-250 × 90 × 9 × 13
束材	(圧縮)	237.5	0.95	V ₃	H-300 × 300 × 10 × 15
	(曲げ)	92.6			

注: 評価基準値は、建築基準法に基づく鋼材の材料強度 (F値の1.1倍) による許容値を示す。

まとめ(原子炉建屋屋根トラス)

○基準地震動 S_s により局所的に発生する応答の影響評価として、鉛直地震動の影響が大きい部位である屋根トラスの耐震安全性について評価する。

屋根トラスについては耐震強化工事を実施しており、耐震強化工事後の状況を反映した解析モデルを使用している。

原子炉建屋の屋根トラスを構成する各部材の発生応力は評価基準値を下回っており、耐震安全性は確保されているものと評価した。