

京都大学複合原子力科学研究所 研究用原子炉(KUR)
標準応答スペクトルに基づく基準地震動 S_s による
地盤の安定性等の評価

- ・地盤の安定性評価
- ・原子炉建屋入力地震動評価

令和4年7月4日

京都大学複合原子力科学研究所

標準応答スペクトルに基づく基準地震動 S_s の評価の方針

- 2021年4月21日、設置許可基準規則^(※1)及び審査ガイド^(※2)が改正され、「震源を特定せず策定する地震動」のうち、全国共通に考慮すべき地震動の策定に際しては、「標準応答スペクトル」を用いることが規定された。

※1: 試験研究の用に供する原子炉等の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈

※2: 基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド

- 敷地における解放基盤表面は $V_s 1597\text{m/s}$ ($V_s 700\text{m/s}$ 以上)の花崗岩 (GL-181m)に設定している。一方、標準応答スペクトルは地震基盤相当面 ($V_s 2200\text{m/s}$ 以上の地層)で定義されているため、標準応答スペクトルに基づく基準地震動 S_s を評価するため、地震基盤相当面から解放基盤表面までの増幅特性を考慮する。
- 増幅特性は、既承認の一次元地盤モデルに基づき、解放基盤表面の下部 (GL-184m)のS波速度 $V_s 2436\text{m/s}$ 層 (花崗岩)上面を地震基盤相当面として評価する。

標準応答スペクトルに基づく地震基盤相当面での模擬地震波の策定

一次元地盤モデルに基づく増幅特性を考慮

解放基盤表面での基準地震動 S_s の評価

一次元地盤構造モデル(線形計算モデル)

第430回審査会合資料の再掲

1次元地下構造モデル(線形モデル)

地層名	土質	地層記号	層厚 (m)	深度 (GL-m)	P波速度 V_p (m/s)	S波速度 V_s (m/s)	密度 (kN/m^3)
盛土	盛土	B	7	0-7	747	180	16.9
大 阪 層 群	第1粘性土層	Dc1	7	7-14	1593	363	17.5
	第1砂質土層	Ds1	1	14-15	1600	480	16.0
	第2粘性土層	Dc2	8	15-23	1615	400	18.1
	第2砂質土層	Ds2	13	23-36	1185	388	18.4
	第3粘性土層	Dc3	9	36-45	1686	409	18.7
	第3砂質土層	Ds3	2	45-47	1605	490	19.3
	第4粘性土層	Dc4	3	47-50	1293	450	18.6
	第4砂質土層	Ds4	3	50-53	1767	480	18.6
	第5粘性土層	Dc5	3	53-56	1553	497	19.6
	第5砂質土層	Ds5	7	56-63	1816	550	19.6
	第6粘性土層	Dc6	28	63-91	1835	524	19.5
	第6砂質土層	Ds6	16	91-107	1853	566	19.4
	第7粘性土層	Dc7	7	107-114	1816	559	19.5
	第7砂質土層	Ds7	16	114-130	1916	542	19.5
第8粘性土層	Dc8	2	130-132	1816	559	19.6	
第8砂質土層	Ds8	8	132-140	1865	563	19.5	
第1礫質土層	Dg1	3	140-143	2017	570	20.5	
第9砂質土層		3	143-146	1960	600	19.8	
第9粘性土層	Dc9	14	146-160	1896	596	19.1	
第10砂質土層	Ds9	13	160-173	2054	696	20.1	
花 崗 岩	花崗岩	Gr	8	173-181	2629	975	21.3
			3	181-184	3517	1597	23.6
			16	184-200	4898	2436	24.4
			200<		5400	3200	26.5

入力地震動
設定位置

注) 地層記号および地層の深さ方向区間の取り方を、3月4日の審査会合以降、一部見直した。そのため、申請書時とは地層記号と媒質パラメーターが一部変更されている。

P,S波検層が欠測であったため、当該層と同じ粘性土層であるDc7層の値を用いた。

地震基盤相当面

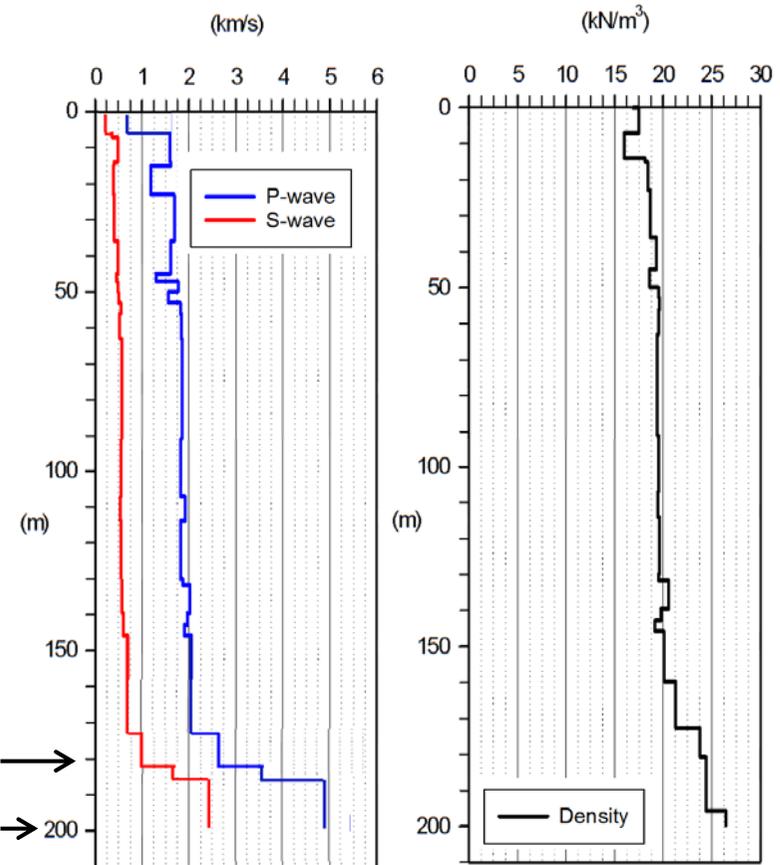
解放基盤面
設定位置

地震基盤上
面設定位置

Kagawa et al.(2004)
による基盤の物性値

ボーリングデータによる土質分布に基づいて、地下構造モデル作成のための地層分割を行い、地層ごとにP波、S波および密度の区間平均値を算出し、それらの値を各層のモデル物性値とした。なお、Q値はP波及びS波速度(m/s)に、それぞれ1/10を乗じた値とした。

解放基盤面は風化花崗岩(S波速度約1.0km/s)とその下に存在するS波速度約1.6km/sの地層の境界とした



検層結果から求めた1次元地下構造モデルのS波・P波・密度分布

標準応答スペクトルに基づく模擬地震波の策定

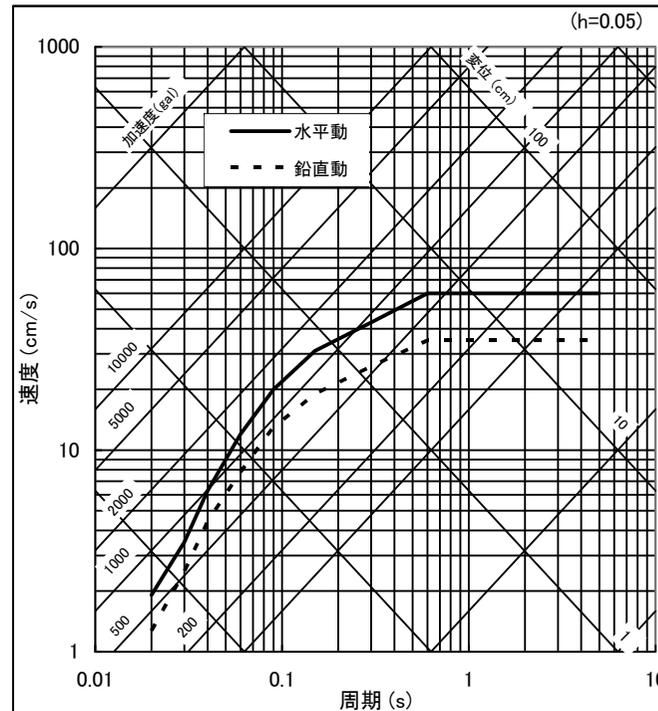
- ・乱数位相を持つ正弦波の重ね合わせによって策定。なお、模擬地震波作成手法としての観測記録の実位相を用いた方法については、地震基盤相当面と解放基盤面との深さの差は3m程度であり、地震波の増幅は小さく、位相への影響も小さいと考えられることから、乱数位相を持つ正弦波の重ね合わせ手法で代表させる。
- ・振幅包絡線の経時変化は、Noda et al.(2002)による。
- ・策定された模擬地震波の適合性は、応答スペクトル比(標準応答スペクトル/模擬地震波の応答スペクトル)が全周期帯で0.85以上、応答スペクトル強度比(SI比)が1.0以上。

コントロールポイント

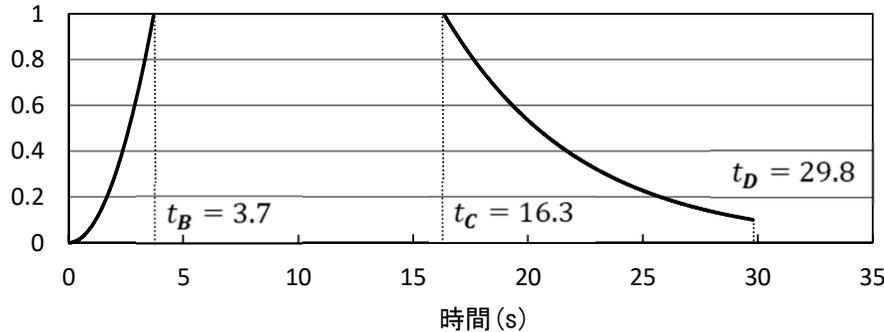
周期 (s)	水平動	鉛直動
	擬似速度 (cm/s)	擬似速度 (cm/s)
0.02	1.910	1.273
0.03	3.500	2.500
0.04	6.300	4.400
0.06	12.000	7.800
0.09	20.000	13.000
0.15	31.000	19.000
0.30	43.000	26.000
0.60	60.000	35.000
5.00	60.000	35.000

標準応答スペクトル

擬似速度応答スペクトル



模擬地震波策定のためのNoda et al.(2002)の振幅包絡線の経時特性 (M7、Xeq10km)と模擬地震波の適合性の判定基準



$$t_B = 10^{0.5M-2.93}$$

$$t_C - t_B = 10^{0.3M-1.0}$$

$$t_D - t_C = 10^{0.17M+0.54\log X_{eq}-0.6}$$

$$E(t) = \begin{cases} (t/t_B)^2 & 0 \leq t < t_B \\ 1 & t_B \leq t < t_C \\ \exp[(\ln 0.1)(t - t_C)(t_D - t_C)] & t_C \leq t \leq t_D \end{cases}$$

M=7.0、Xeq = 10km

	継続時間 (s)	振幅包絡線の経時変化(s)		
		t _B	t _C	t _D
水平	29.8	3.7	16.3	29.8
鉛直	29.8	3.7	16.3	29.8

振幅包絡形の経時特性 (M=7.0、Xeq=10km)

$$\textcircled{1} R(T) = \frac{S_{v1}(T)}{S_{v2}(T)} \geq 0.85 \quad (0.02 \leq T)$$

T : 周期 (s)
 S_{v1}(T) : 模擬地震波の応答スペクトル値
 S_{v2}(T) : 目標とする応答スペクトル値

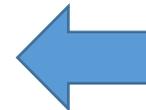
$$\textcircled{2} \text{SI比} = \frac{\int_{0.1}^{2.5} S_v(T) dt}{\int_{0.1}^{2.5} \bar{S}_v(T) dt} \geq 1.0$$

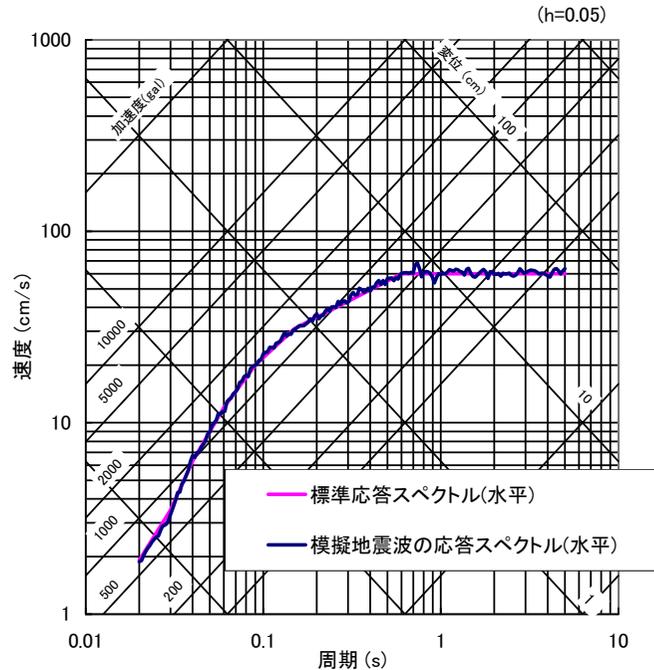
SI : 応答スペクトル強さ
 S_v(T) : 模擬地震波の応答スペクトル (cm/s)
 $\bar{S}_v(T)$: 目標とする応答スペクトル (cm/s)
 T : 固有周期 (s)

模擬地震波の策定のための判定基準

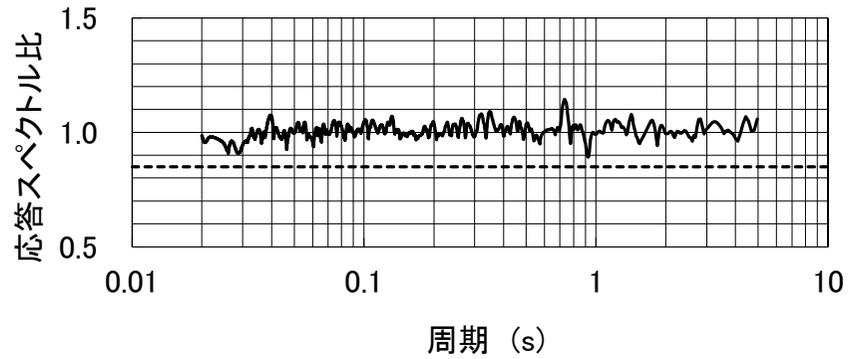
	継続時間 (s)	振幅包絡線の経時変化 (s)		
		t _B	t _C	t _D
水平	28.0	3.3	15.1	28.0
鉛直	28.0	3.3	15.1	28.0

振幅包絡形の経時特性 (M=6.9、Xeq=10km)



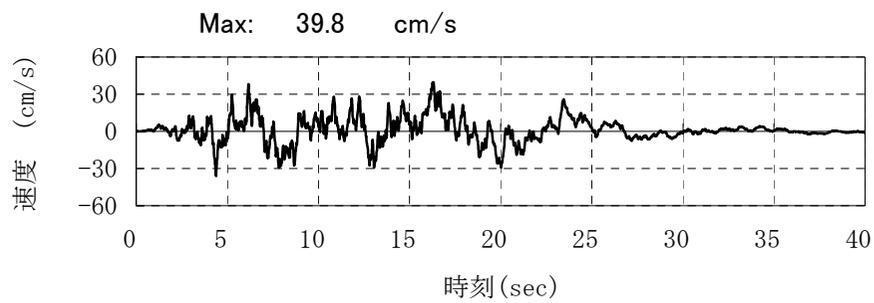
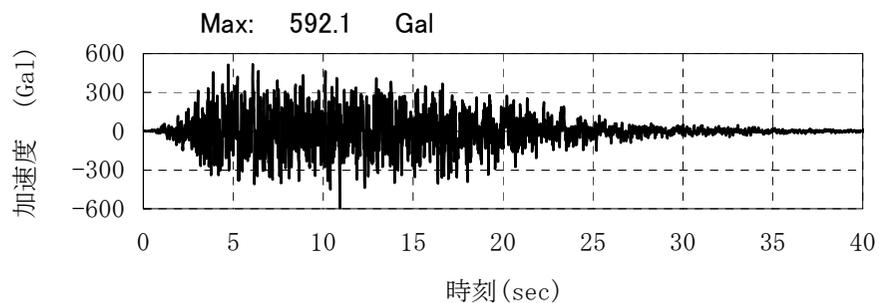


標準応答スペクトル(水平)と模擬地震波の
応答スペクトルの比較(減衰定数5%)



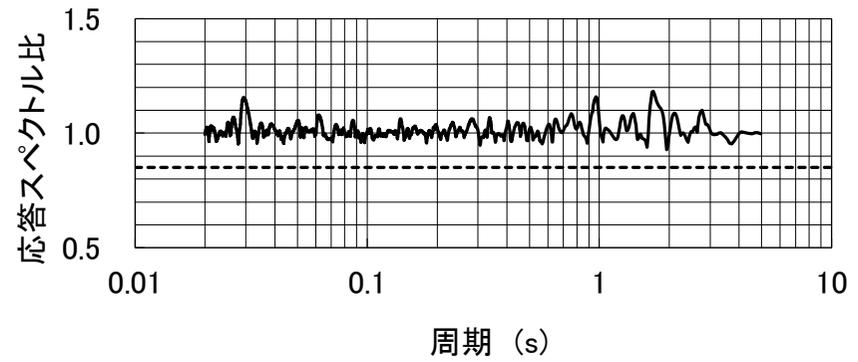
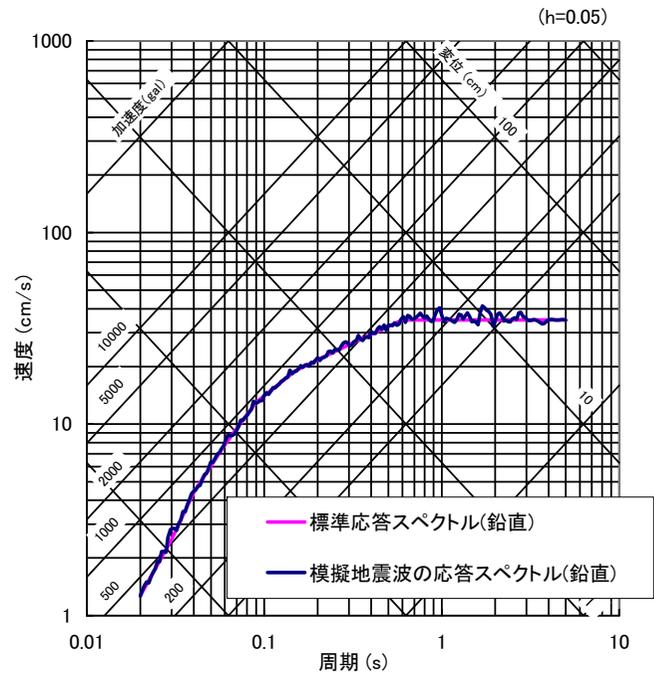
標準応答スペクトル(水平)と模擬地震波の
応答スペクトルの比 (最低=0.89 \geq 0.85)

応答スペクトル強度(SI)比=1.01 \geq 1.0



模擬地震波(水平)の加速度波形(左)と速度波形(右)

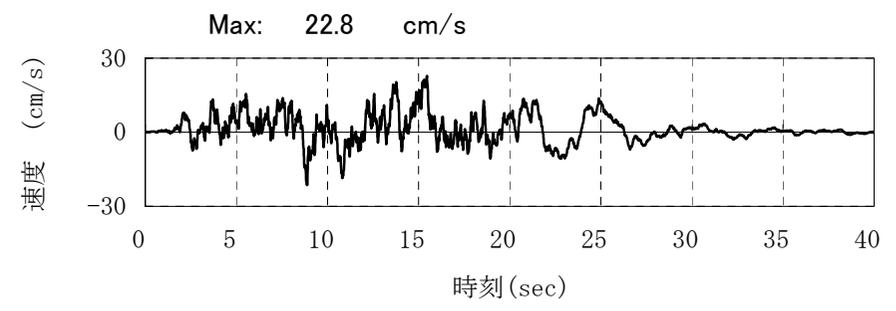
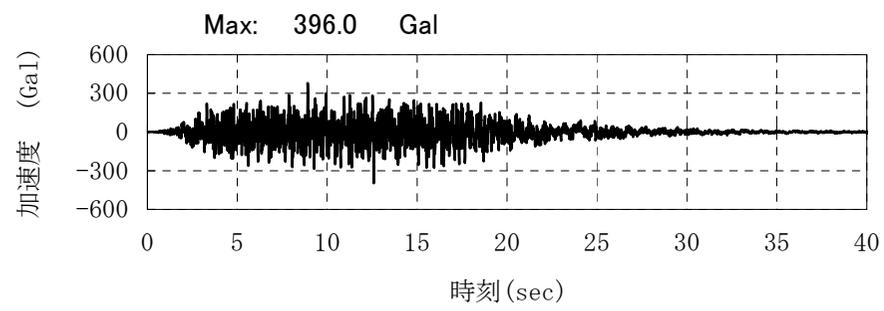
地震基盤相当面における標準応答スペクトルに基づく模擬地震波(水平)



標準応答スペクトル(鉛直)と模擬地震波の
応答スペクトルの比 (最低=0.92 \geq 0.85)

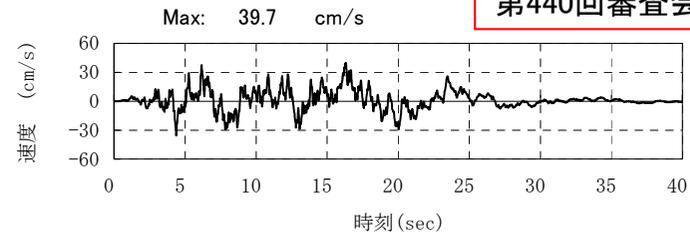
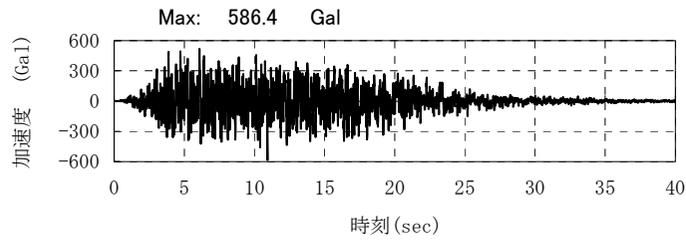
応答スペクトル強度(SI)比=1.02 \geq 1.0

標準応答スペクトル(鉛直)と模擬地震波の
応答スペクトルの比較(減衰定数5%)

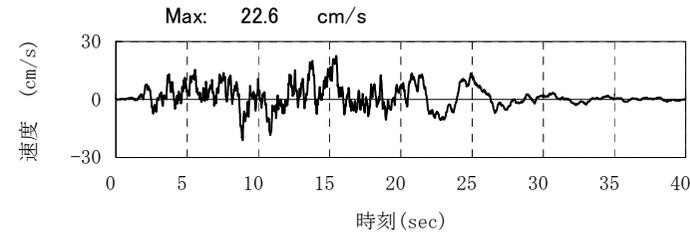
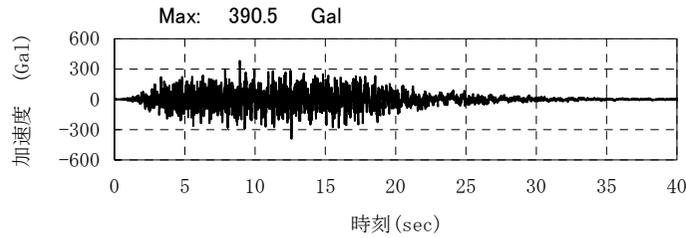


模擬地震波(鉛直)の加速度波形(左)と速度波形(右)

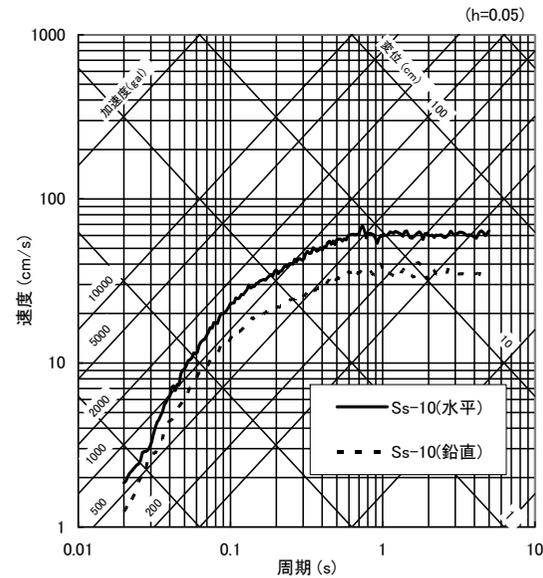
地震基盤相当面における標準応答スペクトルに基づく模擬地震波(鉛直)



水平動の加速度波形(左)と速度波形(右)

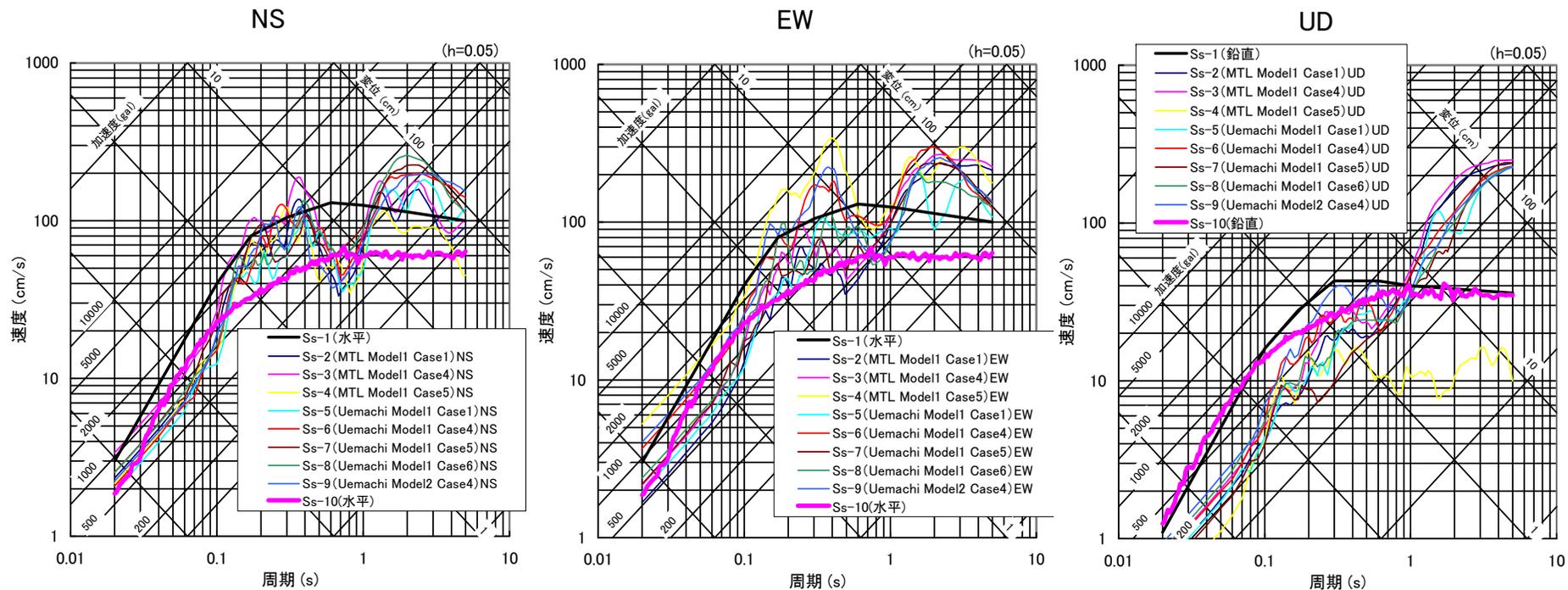


鉛直動の加速度波形(左)と速度波形(右)



応答スペクトル(減衰定数5%)

解放基盤表面における基準地震動Ss-10の時刻歴波形と応答スペクトル



基準地震動 (Ss-1 ~ Ss-10) の応答スペクトル

基準地震動Ssの最大加速度

(cm/s²)

基準地震動				NS方向	EW方向	UD方向
震源を特定して策定する地震動	応答スペクトル法	Ss-1	模擬地震波	944		358
	断層モデルを用いた手法	Ss-2	中央構造線断層帯 (モデル1、ケース1)	729	520	215
		Ss-3	中央構造線断層帯 (モデル1、ケース4)	1053	672	252
		Ss-4	中央構造線断層帯 (モデル1、ケース5)	673	1644	133
		Ss-5	上町断層帯 (モデル1、ケース1)	767	756	194
		Ss-6	上町断層帯 (モデル1、ケース4)	709	1184	213
		Ss-7	上町断層帯 (モデル1、ケース5)	649	674	170
		Ss-8	上町断層帯 (モデル1、ケース6)	566	683	196
		Ss-9	上町断層帯 (モデル2、ケース4)	699	1260	293
震源を特定せず策定する地震動(標準応答スペクトルによる)	応答スペクトル法	Ss-10	模擬地震波	586		391

支持地盤の安定性評価

1) 支持地盤のすべり

基準地震動 S_s-10 を用いた動的解析の結果に基づき、基礎地盤の想定すべり線上のせん断抵抗力の和を想定すべり線上のせん断力の和で除して求めたすべり安全率が、評価基準値1.5を上回ることを確認する。

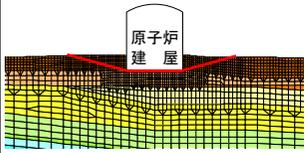
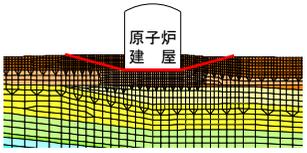
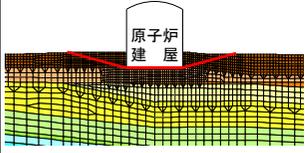
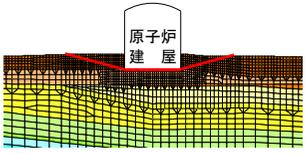
2) 支持地盤の支持力

地震時における地盤の許容支持応力度が、1)による動的解析で得られた最大鉛直応力度を上回ることを確認する。

3) 基礎底面の傾斜

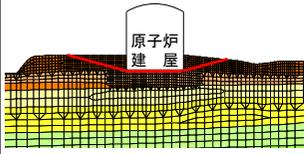
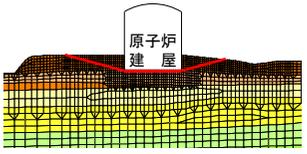
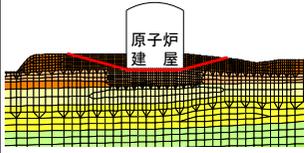
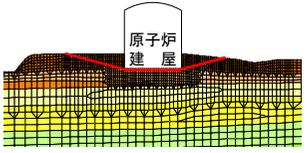
基準地震動 S_s-10 を用いた動的解析の結果に基づき基礎底面両端それぞれの鉛直方向の変位の差を底面幅で除して求めた原子炉建屋基礎底面の傾斜が評価の目安である $1/2,000$ 以下であることを確認する。

南北断面 評価結果 すべり安全率 — : 想定すべり面 []は発生時刻(秒)

基準地震動	すべり面形状	すべり面 番号	最小すべり 安全率	基準地震動	すべり面形状	すべり面 番号	最小すべり 安全率
Ss-10(+, +)		⑤	3.7 [14.41]	Ss-10(-, +)		⑤	3.6 [9.31]
Ss-10(+, -)		⑤	3.5 [5.78]	Ss-10(-, -)		⑤	3.7 [6.54]

※ 基準地震動Ss-10の(+, +)は位相反転なし、(-, +)は水平反転、(+, -)は鉛直反転、(-, -)は水平反転かつ鉛直反転を示す

東西断面 評価結果 すべり安全率 — : 想定すべり面 []は発生時刻(秒)

基準地震動	すべり面形状	すべり面 番号	最小すべり 安全率	基準地震動	すべり面形状	すべり面 番号	最小すべり 安全率
Ss-10(+, +)		⑤	3.2 [6.55]	Ss-10(-, +)		⑤	3.0 [9.32]
Ss-10(+, -)		⑤	3.0 [9.32]	Ss-10(-, -)		⑤	3.1 [6.55]

※ 基準地震動Ss-10の(+, +)は位相反転なし、(-, +)は水平反転、(+, -)は鉛直反転、(-, -)は水平反転かつ鉛直反転を示す

評価結果 原子炉建屋基礎地盤の地震時最大鉛直応力度

対象断面	基準地震動	地震時最大鉛直応力度 (kN/m ²)
南北断面	Ss-1(+, +)	657 [T=13.69秒]
	Ss-1(+, -)	606 [T=13.57秒]
	Ss-1(-, +)	774 [T=18.67秒]
	Ss-1(-, -)	624 [T=18.01秒]
	Ss-2	429 [T=19.40秒]
	Ss-3	505 [T=19.41秒]
	Ss-4	536 [T= 7.98秒]
	Ss-5	596 [T=22.08秒]
	Ss-6	551 [T= 8.08秒]
	Ss-7	409 [T= 8.00秒]
	Ss-8	436 [T= 8.44秒]
	Ss-9	454 [T= 7.00秒]
	Ss-10(+, +)	527 [T=11.38秒]
	Ss-10(+, -)	536 [T=13.31秒]
Ss-10(-, +)	532 [T=12.63秒]	
Ss-10(-, -)	508 [T=14.06秒]	

対象断面	基準地震動	地震時最大鉛直応力度 (kN/m ²)
東西断面	Ss-1(+, +)	573 [T=14.79秒]
	Ss-1(+, -)	535 [T=22.08秒]
	Ss-1(-, +)	543 [T=22.45秒]
	Ss-1(-, -)	579 [T=13.57秒]
	Ss-2	396 [T=16.84秒]
	Ss-3	407 [T=16.82秒]
	Ss-4	481 [T= 7.95秒]
	Ss-5	414 [T=24.88秒]
	Ss-6	471 [T= 7.03秒]
	Ss-7	379 [T= 7.98秒]
	Ss-8	402 [T= 8.00秒]
	Ss-9	458 [T= 7.03秒]
	Ss-10(+, +)	493 [T= 9.49秒]
	Ss-10(+, -)	498 [T=17.21秒]
Ss-10(-, +)	488 [T= 9.06秒]	
Ss-10(-, -)	491 [T=13.31秒]	

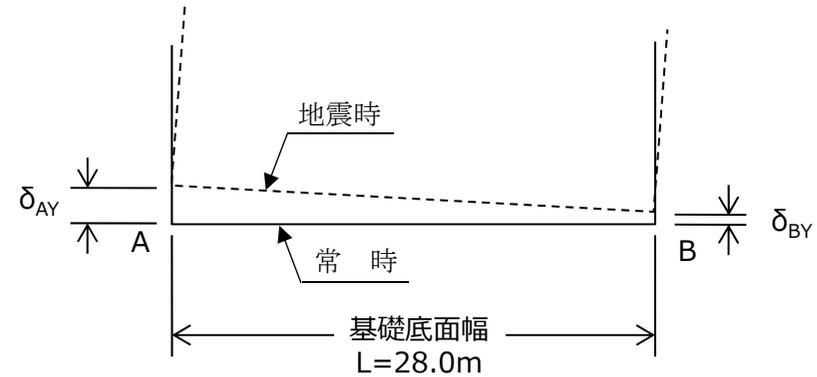
※ 基準地震動Ss-10の(+, +)は位相反転なし、(-, +)は水平反転、(+, -)は鉛直反転、(-, -)は水平反転かつ鉛直反転を示す

最大鉛直応力はすべて短期許容応力度(1500kN/m²)以下

T=発生時刻

評価結果 原子炉建屋基礎の傾斜(1)

対象断面	基準地震動	最大相対変位量 $ \delta_{AY}-\delta_{BY} $	最大傾斜 $ \delta_{AY}-\delta_{BY} /L$
南北断面	Ss-1(+, +)	1.09cm [T=18.68秒]	1/2500
	Ss-1(+, -)	1.34cm [T=18.68秒]	1/2000
	Ss-1(-, +)	1.34cm [T=18.68秒]	1/2000
	Ss-1(-, -)	1.09cm [T=18.68秒]	1/2500
	Ss-2	0.64cm [T=19.90秒]	1/4300
	Ss-3	0.89cm [T=19.92秒]	1/3100
	Ss-4	0.82cm [T= 8.01秒]	1/3400
	Ss-5	0.63cm [T=25.32秒]	1/4400
	Ss-6	0.63cm [T=8.58秒]	1/4400
	Ss-7	0.61cm [T= 6.40秒]	1/4500
	Ss-8	0.60cm [T=5.43秒]	1/4600
	Ss-9	0.80cm [T= 7.31秒]	1/3400
	Ss-10(+, +)	0.61cm [T= 6.89秒]	1/4600
	Ss-10(+, -)	0.61cm [T= 6.89秒]	1/4500
Ss-10(-, +)	0.61cm [T= 6.89秒]	1/4500	
Ss-10(-, -)	0.61cm [T= 6.89秒]	1/4600	



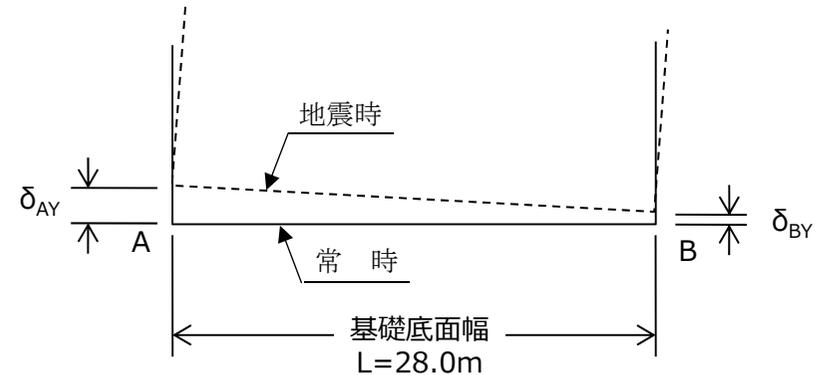
※ 基準地震動Ss-1の(+, +)は位相反転なし、(-, +)は水平反転、(+, -)は鉛直反転、(-, -)は水平反転かつ鉛直反転を示す。

※ 最大相対変位量、最大傾斜は各基準地震動における最大値で、[]はその発生時刻を示す。

傾斜はすべて目安である1/2000以下

評価結果 原子炉建屋基礎の傾斜(2)

対象断面	基準地震動	最大相対変位量 $ \delta_{AY}-\delta_{BY} $	最大傾斜 $ \delta_{AY}-\delta_{BY} /L$
東西断面	Ss-1(+, +)	0.89cm [T=18.67秒]	1/3100
	Ss-1(+, -)	0.91cm [T=17.14秒]	1/3000
	Ss-1(-, +)	0.91cm [T=17.14秒]	1/3000
	Ss-1(-, -)	0.89cm [T=18.67秒]	1/3100
	Ss-2	0.37cm [T=18.53秒]	1/7500
	Ss-3	0.10cm [T=18.38秒]	1/26700
	Ss-4	0.40cm [T= 7.94秒]	1/7000
	Ss-5	0.43cm [T=24.90秒]	1/6500
	Ss-6	0.63cm [T=7.07秒]	1/4400
	Ss-7	0.34cm [T= 7.30秒]	1/8100
	Ss-8	0.26cm [T=7.33秒]	1/10900
	Ss-9	0.54cm [T= 7.46秒]	1/5100
	Ss-10(+, +)	0.59cm [T=12.81秒]	1/4700
	Ss-10(+, -)	0.62cm [T= 7.50秒]	1/4500
Ss-10(-, +)	0.62cm [T= 7.50秒]	1/4500	
Ss-10(-, -)	0.59cm [T=12.81秒]	1/4700	



※ 基準地震動Ss-1の(+, +)は位相反転なし、(-, +)は水平反転、(+, -)は鉛直反転、(-, -)は水平反転かつ鉛直反転を示す。

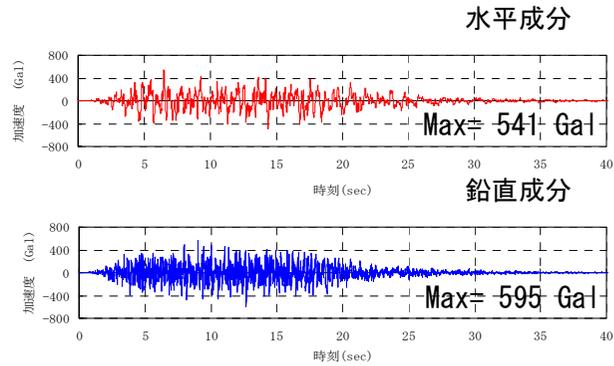
※ 最大相対変位量、最大傾斜は各基準地震動における最大値で、[]はその発生時刻を示す。

傾斜はすべて目安である1/2000以下

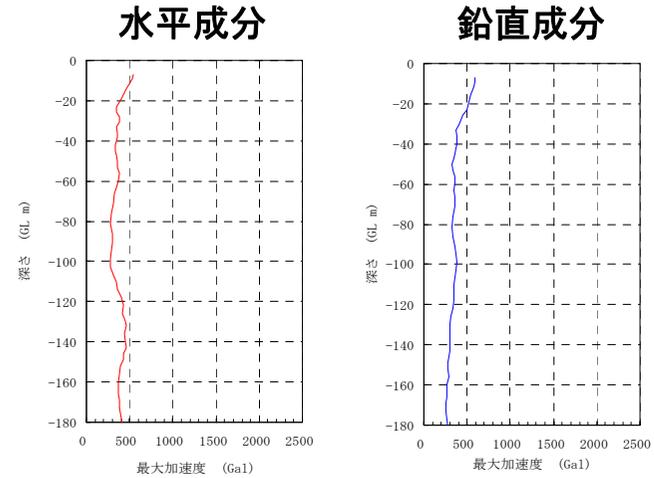
原子炉建屋入力地震動評価

- 1) 解放基盤表面(GL-181m)で設定された基準地震動Ss-10を一次元地盤構造モデルを用いて原子炉建屋基礎盤位置(GL-7.3m)での入力地震動を評価する。
- 2) 解析方法としては、水平動に対しては地盤の非線形特性を考慮した非線形地震応答解析(等価線形解析と時刻歴非線形解析)を用い、鉛直動については線形地震応答解析を用いた。
- 3) 入力地震動としては、Ss-10については歪みレベルや結果の保守性から等価線形解析による結果を採用した。

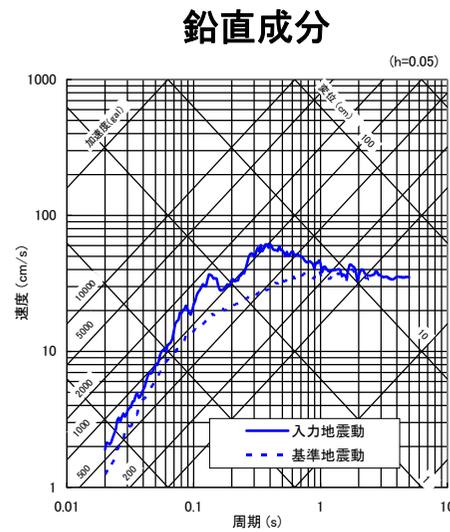
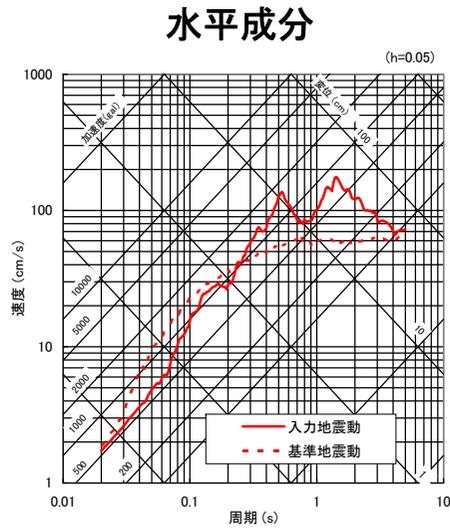
Ss-10 入力地震動 (基礎底GL-7m;自由表面)



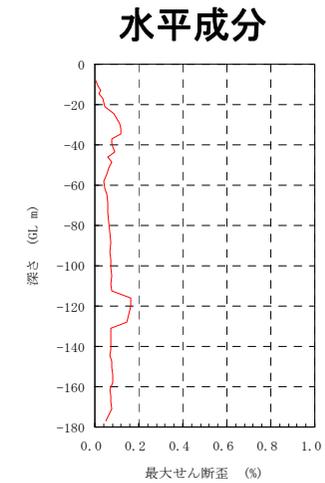
加速度波形



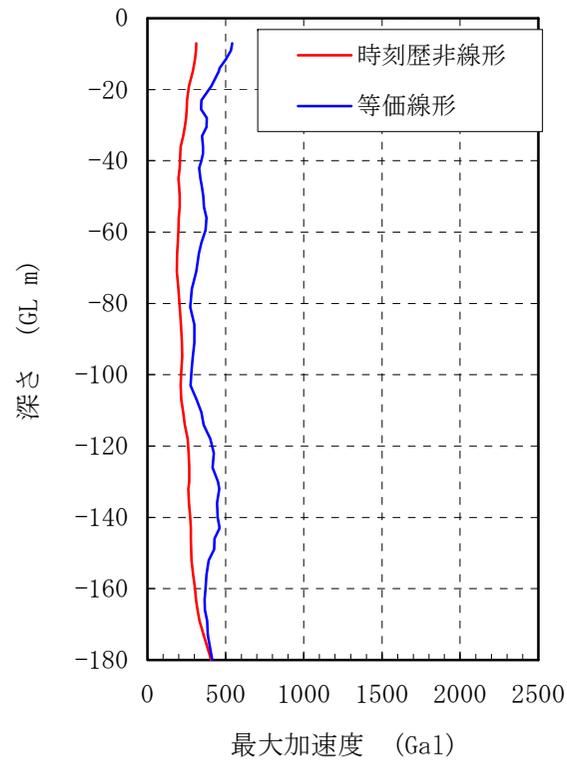
最大加速度分布



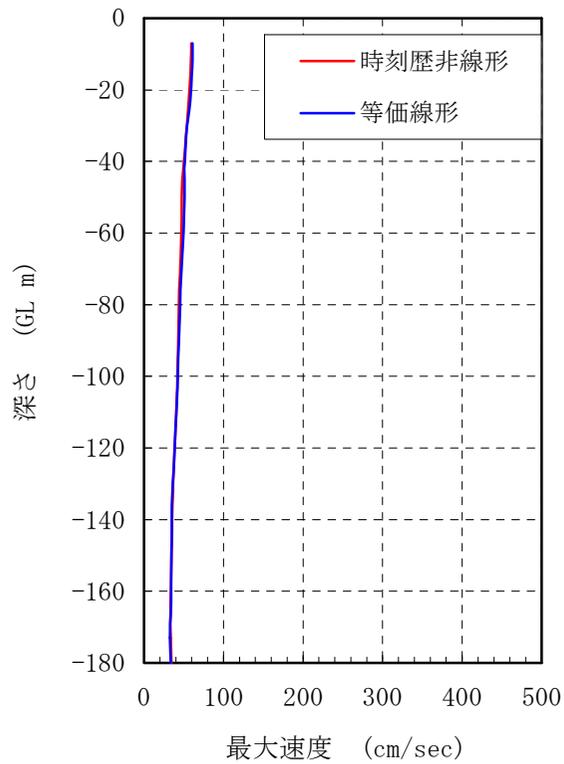
応答スペクトル(減衰5%)



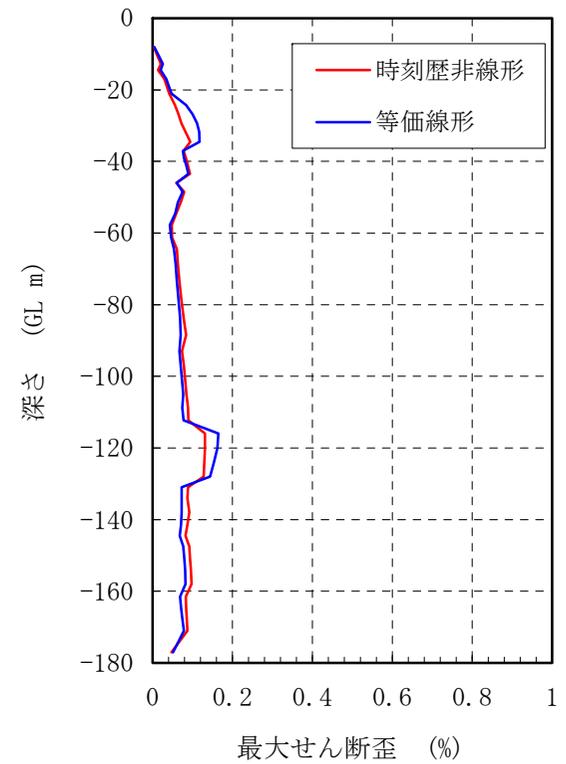
最大せん断歪み分布



最大加速度分布



最大速度分布



最大せん断歪分布

等価線形解析と時刻歴非線形解析結果の比較(水平動)

引用文献

Kagawa, T., Zhao, B., Miyakoshi, K. & Irikura, K., (2004) : Modeling of 3D basin structures for seismic wave simulations based on available information on the target area: case study of the Osaka basin, Bull. Seism. Soc. Am., 94, 1353–1368.

Noda, S., K. Yashiro, K. Takahashi, M. Takenura, S. Ohno, M. Tohdo and T. Watanabe (2002), RESPONSE SPECTRA FOR DESIGN PURPOSE OF STIFF STRUCTURES ON ROCK SITES, OECD–NEA Workshop on the Relations between Seismological DATA and Seismic Engineering, Istanbul, 399–408, Oct. 16–18.