東海第二発電所　審査資料	
資 料 番 号	PD-1-14　改 8
提出年月日	平成 29 年 8 月 24 日

東海第二発電所

地震による損傷の防止

平成 29 年 8 月
日本原子力発電株式会社

本資料のうち，□は商業機密又は核物質防護上の観点から公開できません。

第 4 条：地震による損傷の防止

目　　次

第 1 部
1．基本方針
1.1 要求事項の整理　　下線部：今回提出範囲
1.2 追加要求事項に対する適合性
（1）位置，構造及び設備
（2）安全設計方針
（3）適合性説明
1.3 気象等
1.4 設備等
1.5 手順等

第 2 部
1．耐震設計の基本方針
1.1 基本方針
1.2 適用規格
2．耐震設計上の重要度分類
2.1 重要度分類の基本方針
2.2 耐震重要度分類
3．設計用地震力
3.1 地震力の算定法
3.2 設計用地震力
4．荷重の組合せと許容限界
4.1 基本方針
5．地震応答解析の方針
5.1 建物・構築物
5.2 機器・配管系
5.3 屋外重要土木構造物
5.4 津波防護施設，浸水防止設備及び津波監視設備並びに浸水防止設備又は津波監視設備が設置された建物・構築物
6．設計用減衰定数
7．耐震重要施設の安全機能への下位クラス施設の波及的影響
8．水平 2 方向及び鉛直方向の地震力の組合せに関する影響評価方針
9．構造計画と配置計画

（別　添）

別添－1　設計用地震力

別添－2　動的機能維持の評価

別添－3　弾性設計用地震動S_d・静的地震力による評価

別添－4　上位クラス施設の安全機能への下位クラス施設の波及的影響の検討について

別添－5　水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せに関する影響評価方針

別添－6　屋外重要土木構造物の耐震評価における断面選定の考え方

別添－7　主要建屋の構造概要について

（別　紙）

別紙－1　既工認との手法の相違点の整理について（設置変更許可申請段階での整理）

別紙－2　原子炉建屋の地震応答解析モデルについて

別紙－3　応力解析における弾塑性解析の適用

別紙－4　土木構造物の解析手法及び解析モデルの精緻化について

別紙－5　機器・配管系における手法の変更点について

別紙－6　下位クラス施設の波及的影響の検討について

別紙－7　水平 2 方向及び鉛直方向の適切な組合せに関する検討について

別紙－8　屋外重要土木構造物の耐震評価における断面選定について

別紙－9　使用済燃料乾式貯蔵建屋の評価方針について

（別紙－10 液状化影響の検討方針について）

別紙－11 屋外二重管の耐震検討及び基礎構造の改良について

（　）は，今後提出予定の資料

別紙－２

東海第二発電所

原子炉建屋の地震応答解析モデルについて

1. はじめに

本資料は，今後申請する東海第二発電所の補正工認（以下「今回工認」という。）に提出する予定の原子炉建屋の地震応答解析について纏めたものである。

まず，東北地方太平洋沖地震のシミュレーション解析の結果を踏まえて今回工認に用いる地震応答解析モデルを設定し，次に設定したモデルを用いた基準地震動S_sに対する地震応答解析結果を示し，原子炉建屋の耐震健全性を説明するものである。

2. 原子炉建屋の概要

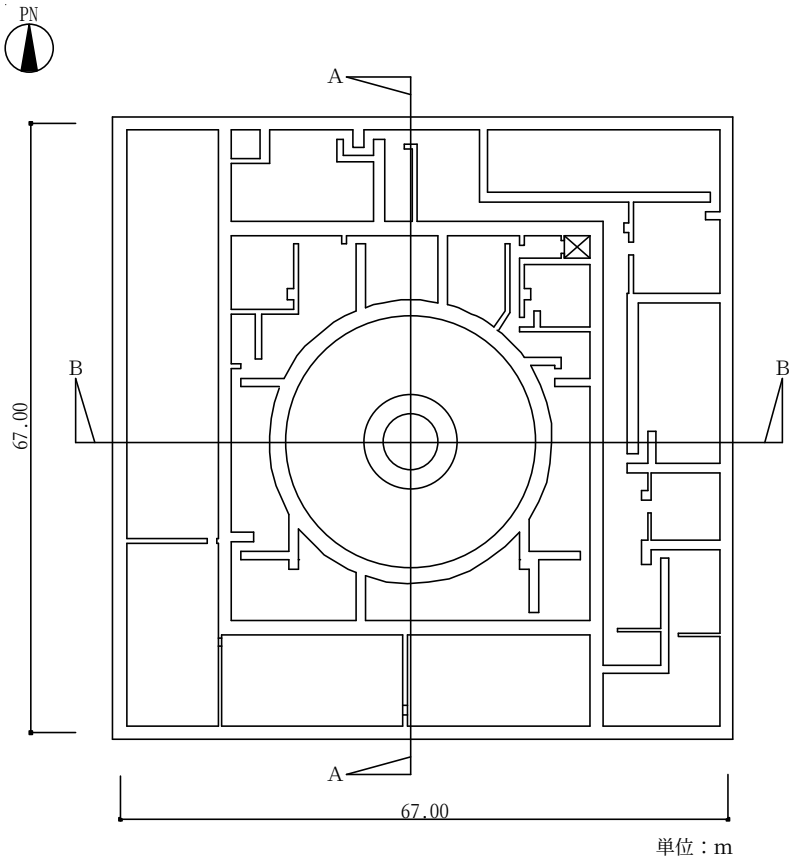
2.1 原子炉建屋の概要

原子炉建屋は，地下 2 階，地上 6 階の鉄筋コンクリート造の建物である。

建物の中央部には原子炉格納容器を収納する原子炉棟があり，その周囲に付属棟を配置している。原子炉建屋の概要を第 2-1 図及び第 2-2 図に，使用材料を第 2-1 表に示す。

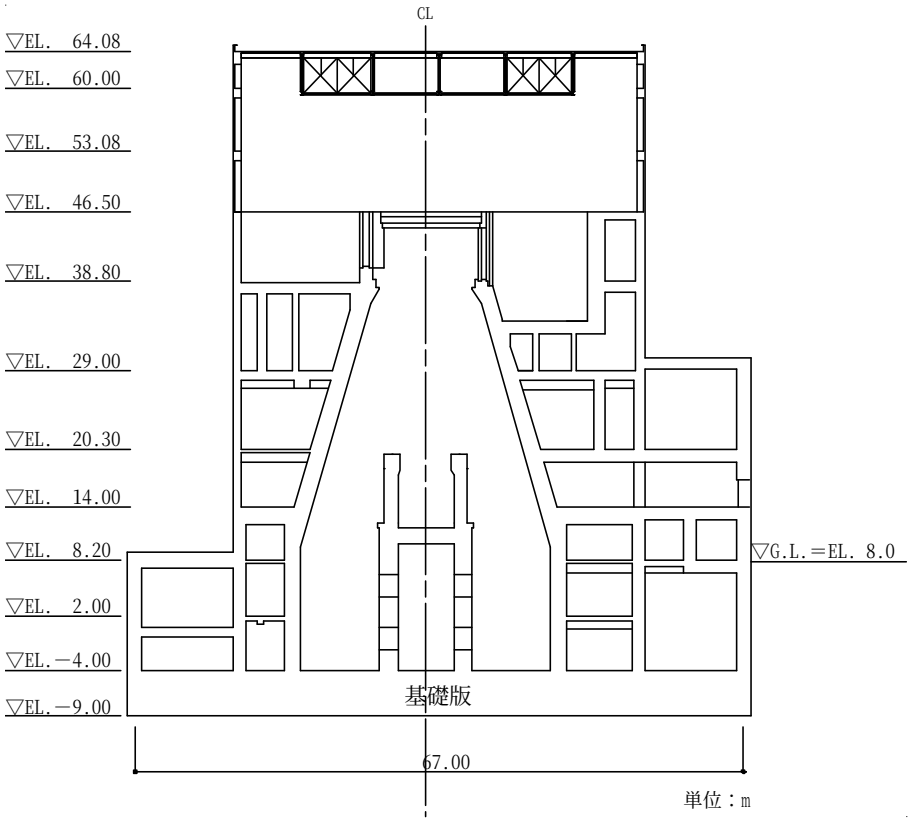
原子炉棟と付属棟とは同一基礎スラブ上に設置した一体構造であり，原子炉建屋の平面は，地下部分は約 67 m×約 67 m，地上部分は一部を除き約 41 m×約 44 m の矩形をしている。基礎底面からの高さは約 73 m であり，地上高さは約 56 m である。

原子炉建屋の基礎は，平面が約 67 m×約 67 m，厚さ 5 m のべた基礎で，人工岩盤を介して，砂質泥岩である久米層に岩着している。

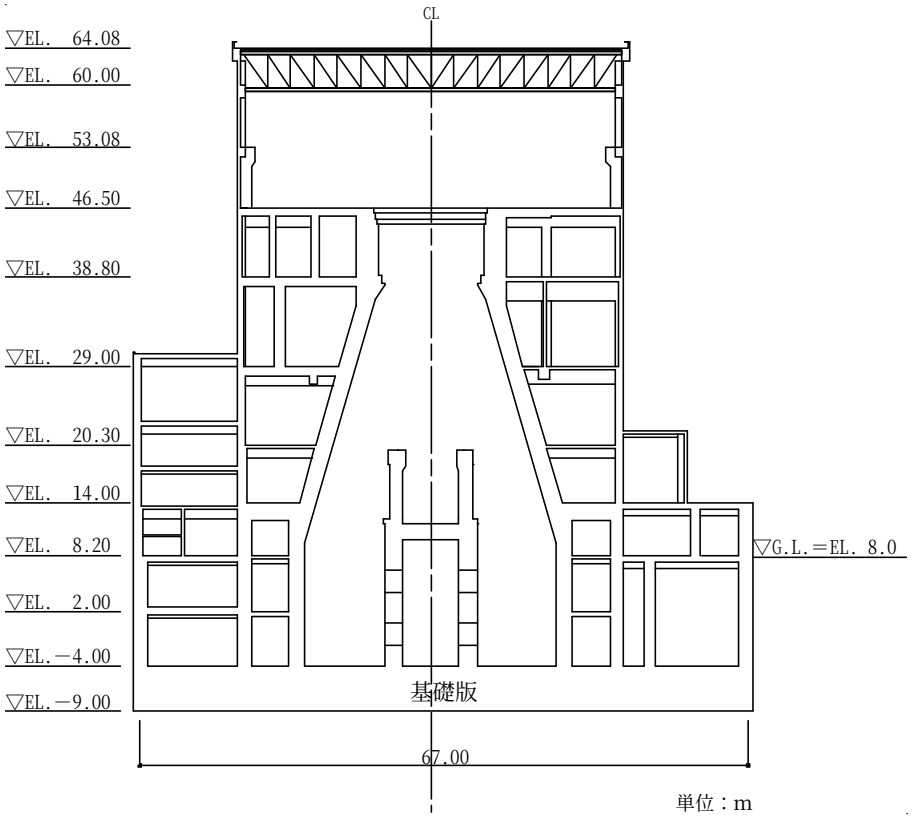


（EL.－4.0 m）

第 2-1 図　原子炉建屋の概要（平面図）



（ＮＳ方向，Ａ－Ａ断面）



（ＥＷ方向，Ｂ－Ｂ断面）

第 2-2 図　原子炉建屋の概要（断面図）

第 2-1 表　原子炉建屋の使用材料※1

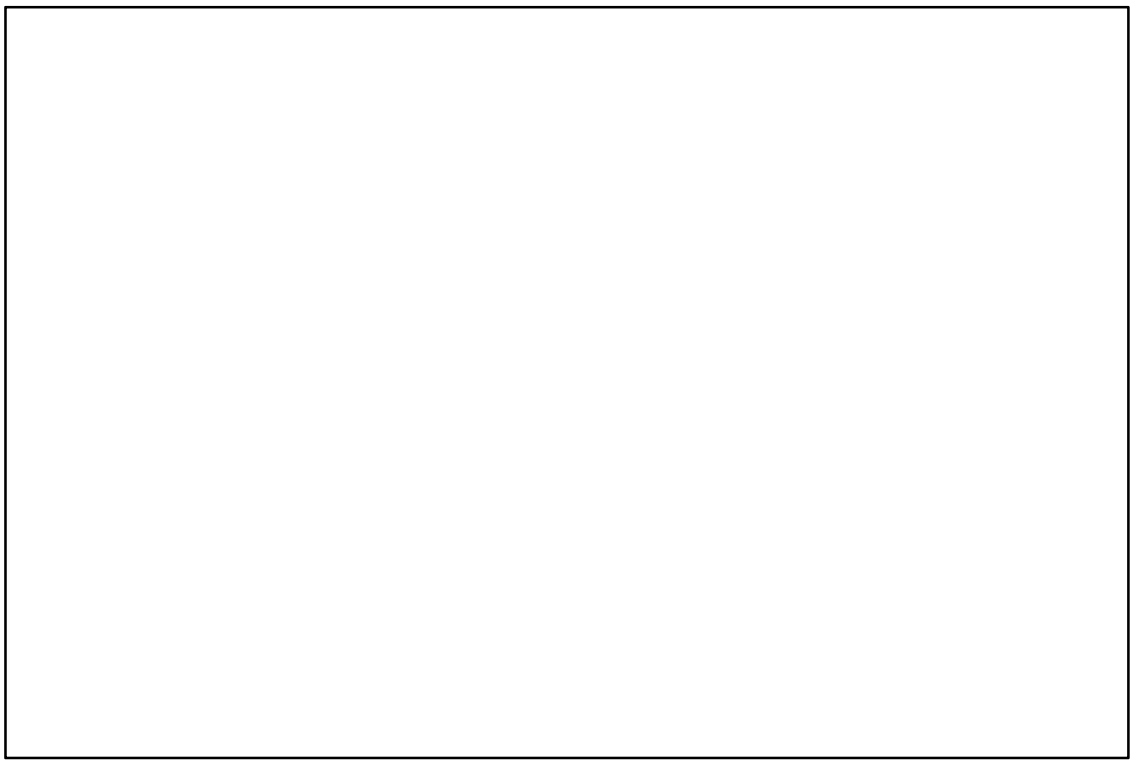
部位	設計基準強度		単位容積重量	ポアソン比	ヤング係数	せん断弾性係数
	Ｆｃ kgf／cm^2	Ｆｃ※2 N／mm^2	γ kN／m^3	ν	E N／mm^2	G N／mm^2
建屋	225	22.1	24.0	0.2	2.21×10^4	9.21×10^3
人工岩盤	140	13.7	23.0	0.2	1.88×10^4	7.83×10^3
鋼材	-	-	77.1	0.3	2.05×10^5	7.9×10^4

※1　使用材料については，「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説－許容応力度設計法－（1999）」，「原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（2005）」及び「鋼構造設計規準－許容応力度設計法－（2005）」に準拠した。

※2　Ｆｃは 9.80665 m／s^2 を用いて換算した。

2.2　原子炉建屋の位置

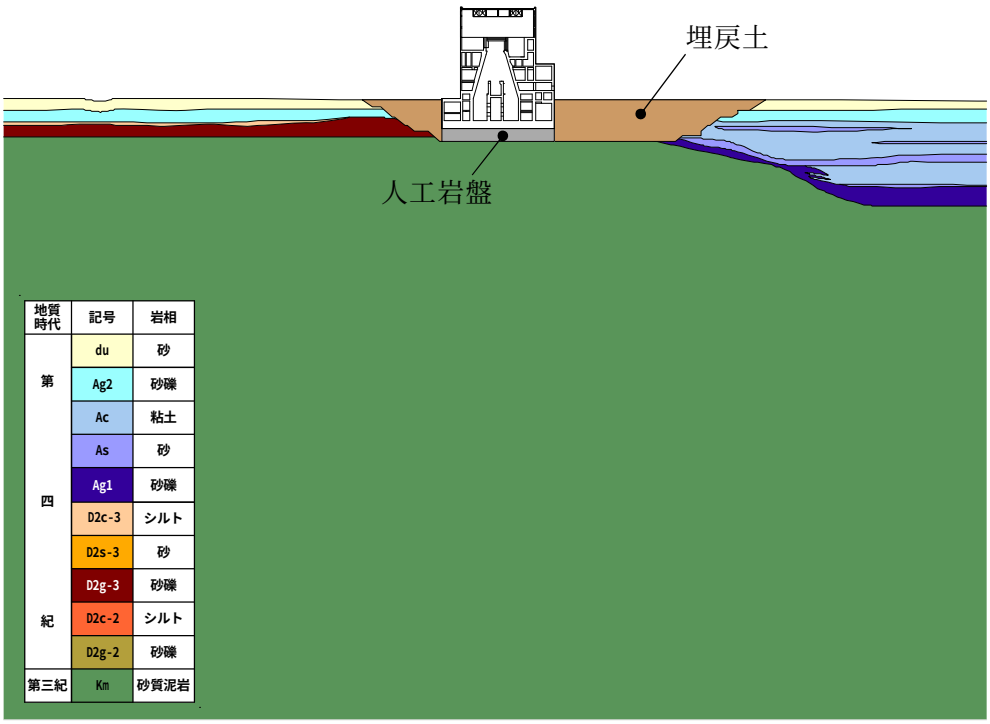
第 2-3 図の構内配置図に原子炉建屋の位置を示す。



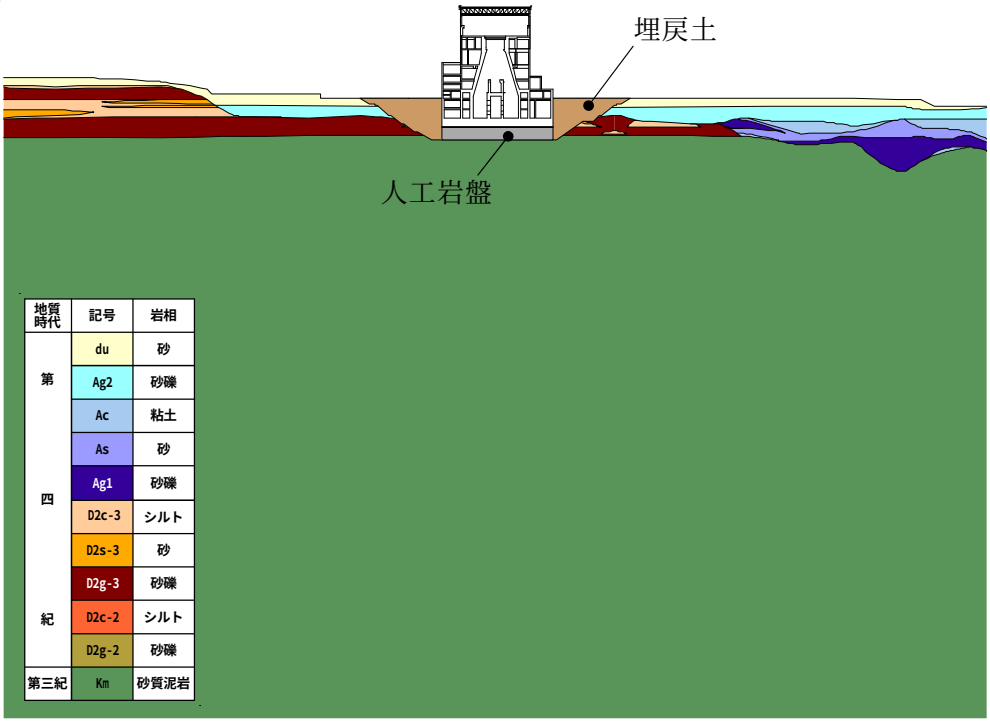
第 2-3 図　構内配置図

2.3　設置地盤の状況

原子炉建屋はコンクリート造の人工岩盤を介して，砂質泥岩である久米層に岩着している。原子炉建屋の設置状況及び埋込み状況を第 2-4 図の原子炉建屋設置地盤断面図に示す。



（ＮＳ方向）



（ＥＷ方向）

第 2-4 図　原子炉建屋設置地盤断面図

3．原子炉建屋の地震応答解析モデルの設定

3.1　目的

今回工認に用いる原子炉建屋の地震応答解析モデルについて検討する。

東海第二発電所原子炉建屋の基礎はコンクリート造の人工岩盤を介して支持地盤である久米層に設置している。また，原子炉建屋の基礎下端は EL.－9 m であり，地表面（EL.＋8 m）から 17 m 地中に埋め込まれている。

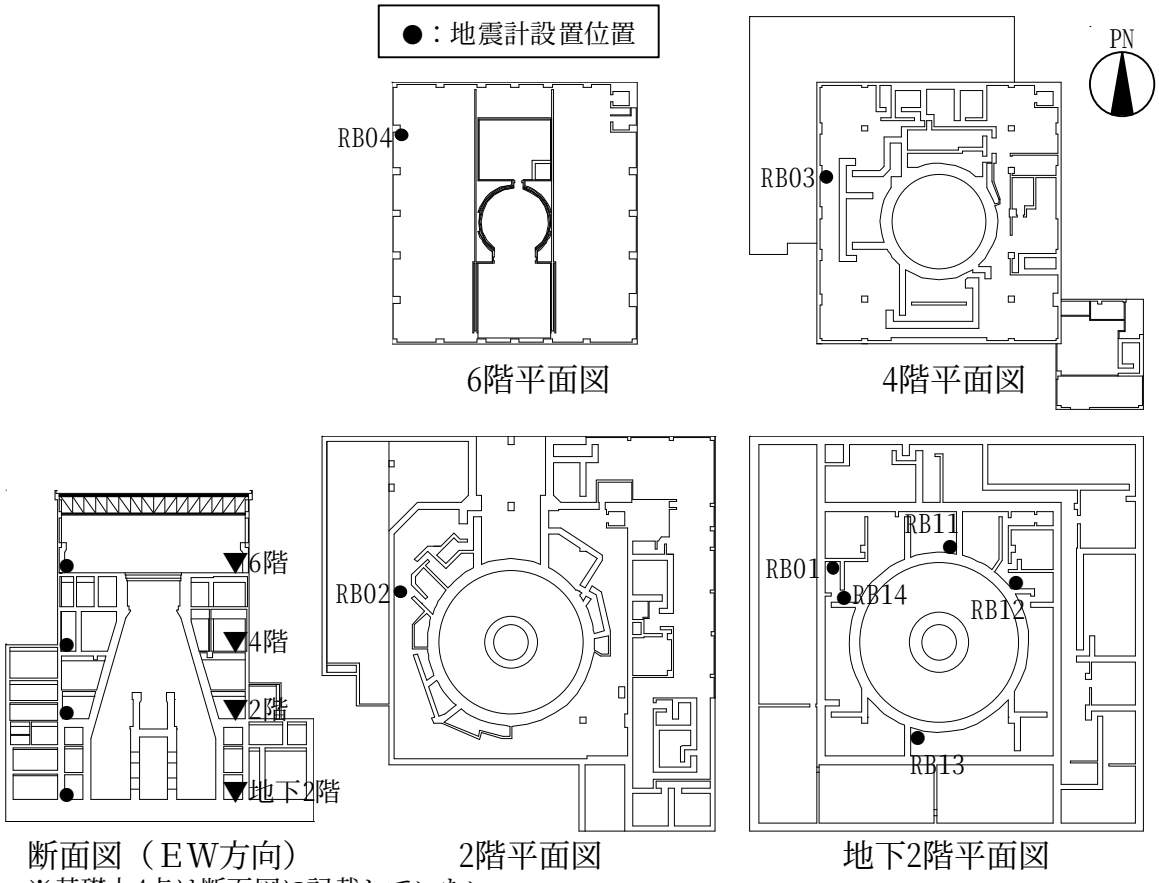
建設当時の工認（以下「既工認」という。）では，原子力発電所耐震設計技術指針ＪＥＡG4601-1987〔社団法人日本電気協会〕（以下「ＪＥＡＧ4601-1987」という。）制定前であったため，解放基盤表面という概念が無く，地盤応答解析を介さずに人工岩盤下端に設計波を直接入力していた。そのため人工岩盤を建屋モデル側にモデル化し，建屋と側面地盤の相互作用は考慮していなかった。

今回工認の地震応答解析モデルを検討するにあたり，「ＪＥＡG4601-1987」及び原子力発電所耐震設計技術指針ＪＥＡG4601-1991 追補版〔社団法人日本電気協会〕（以下「ＪＥＡG4601-1991 追補版」という。）には，基礎底面の人工岩盤のモデル化方法及び側面回転地盤ばねの扱いについて明確に表記されていないため，2011 年 3 月 11 日東北地方太平洋沖地震（以下「東北地方太平洋沖地震」という。）時の観測記録を用いたシミュレーション解析を行い，人工岩盤のモデル化の影響と建屋と側面地盤との相互作用の影響評価を行い，これらの工認上の扱いを検討する。

3.2　原子炉建屋内の地震計設置位置

原子炉建屋には，地震時の基本的な振動性状を把握する目的で偶数階に各階 1 台の地震計を設置している。また，基礎上(地下 2 階)には更に 4 台の地震計を設置している。

原子炉建屋の地震計設置位置を第 3-1 図に示す。



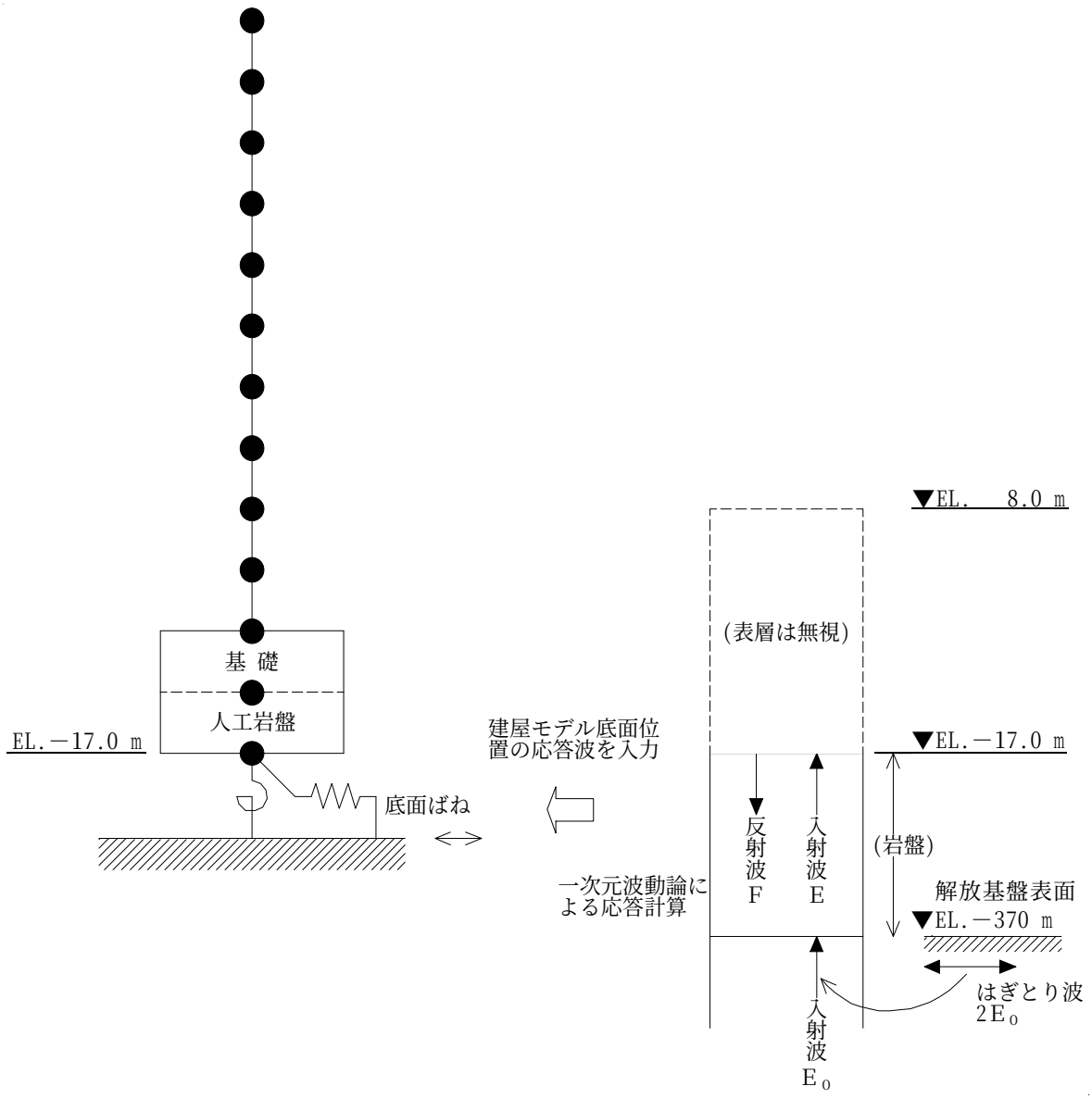
第 3-1 図　原子炉建屋の地震計設置位置

3.3　建屋－地盤動的相互作用の評価法について

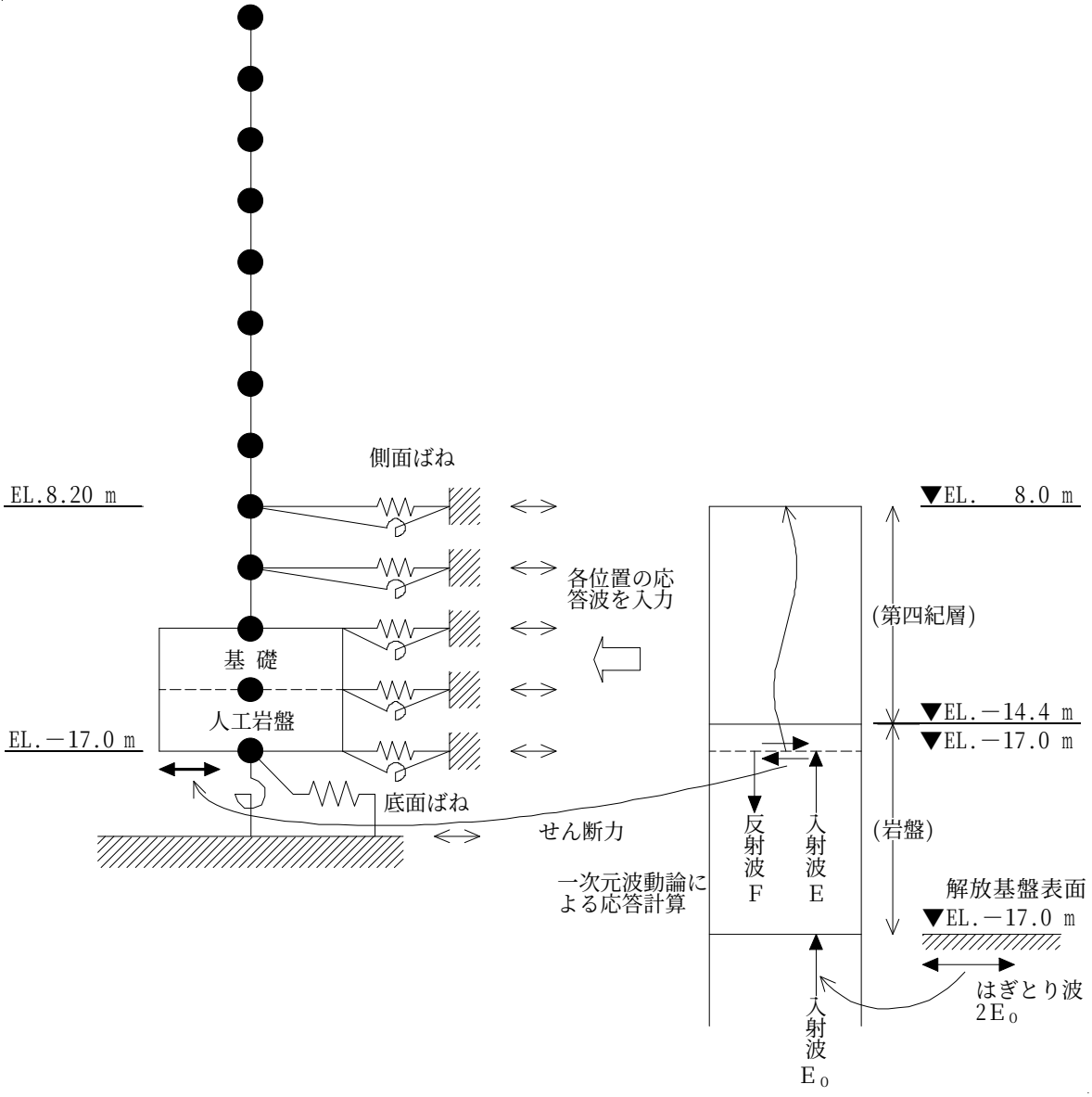
既工認では，埋込み効果を無視した，スウェイ・ロッキングモデル（以下「ＳＲモデル」という。）として，建屋と地盤の相互作用を考慮している。

本資料では，はじめに，既工認に用いたＳＲモデルと側面地盤による回転拘束を含む埋込み効果を考慮した埋込みＳＲモデルを用いて東北地方太平洋沖地震のシミュレーション解析を行い，建屋の振動性状を比較した。解析に用いたＳＲモデルによる地震応答解析の概要を第 3-2 図に，埋込みＳＲモデルによる地震応答解析の概要を第 3-3 図に示す。

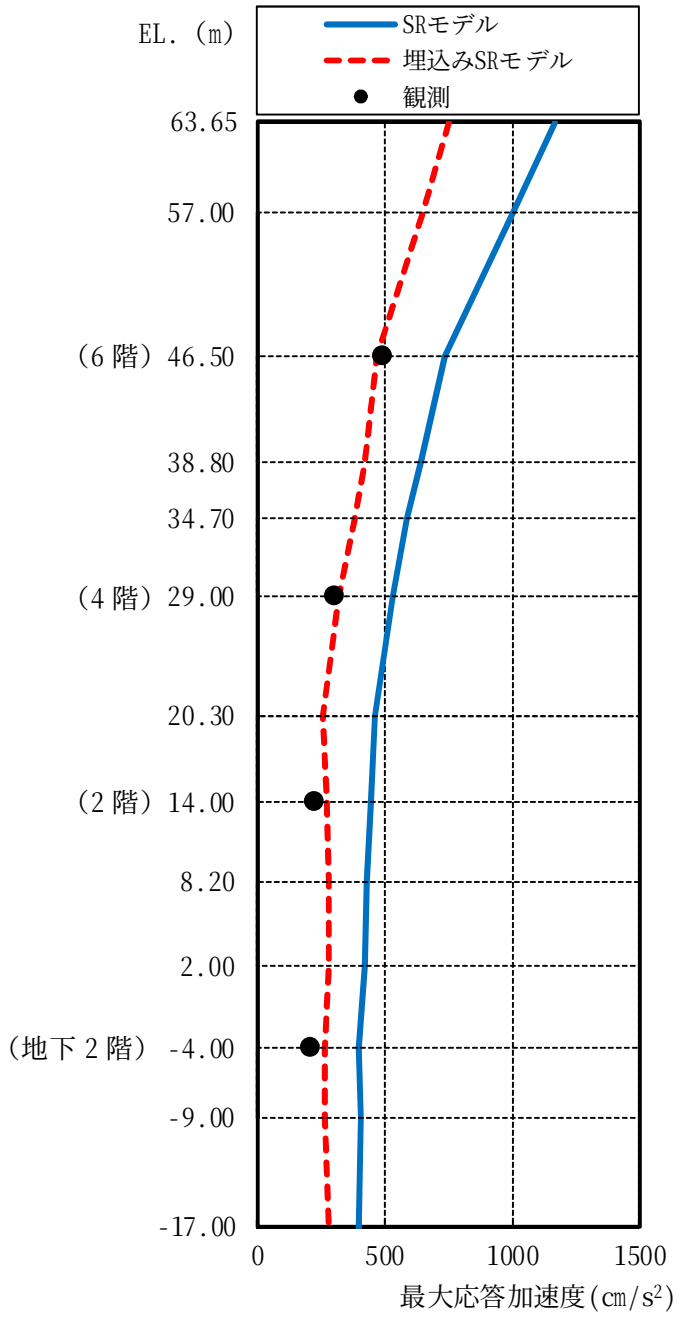
東北地方太平洋沖地震のシミュレーション解析結果として，両者の最大応答加速度分布の比較を第 3-4 図及び第 3-5 図に，床応答スペクトルの比較を第 3-6 図及び第 3-7 図に示す。これらの解析結果より埋込みＳＲモデルを用いた方が，ＳＲモデルを用いた場合に比べ，観測記録との整合が改善しており，より実状に近い建屋の振動性状を評価できているものと考えられる。



第 3-2 図　ＳＲモデルによる地震応答解析の概要

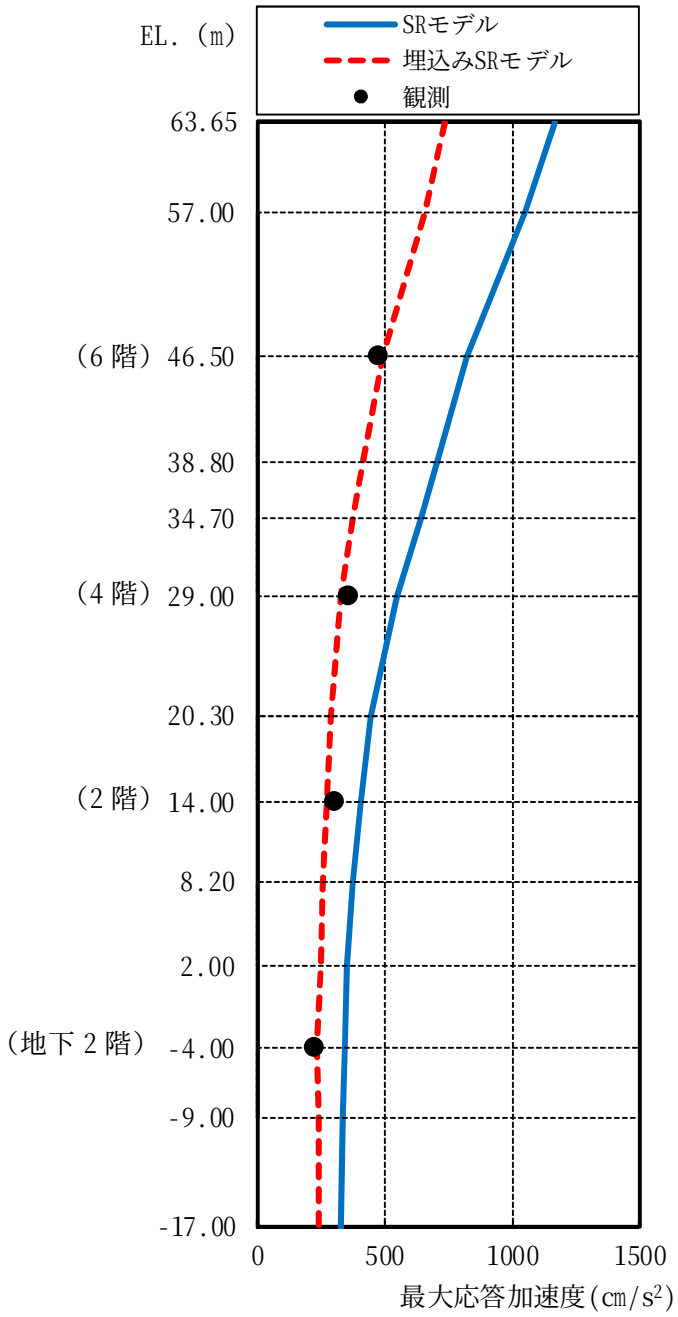


第 3-3 図　埋込みＳＲモデルによる地震応答解析の概要



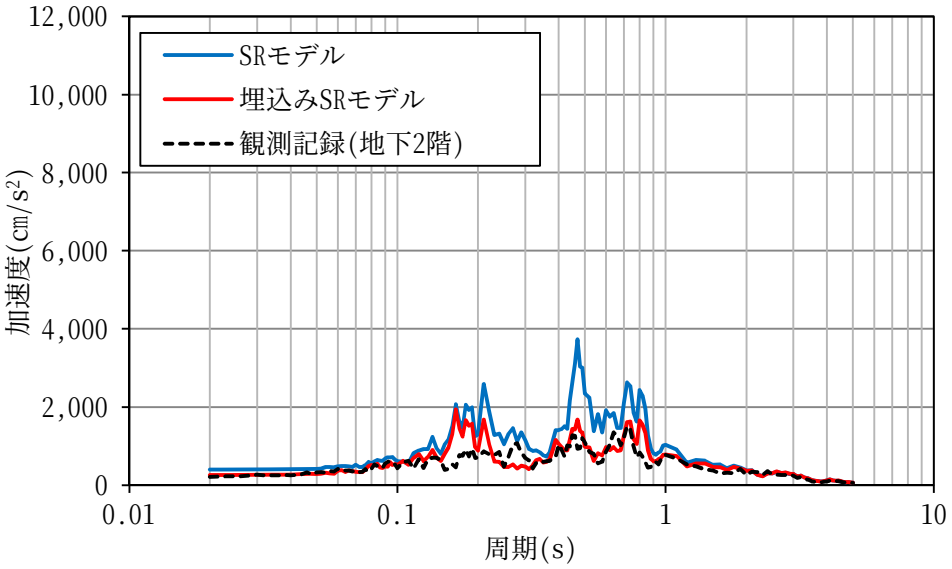
NS方向		
SR	埋込SR	観測
cm/s²	cm/s²	cm/s²
1,167	755	-
1,005	648	-
734	472	492
641	419	-
589	383	-
532	325	301
460	255	-
448	272	225
433	284	-
420	279	-
402	265	214
403	269	-
401	278	-

第 3-4 図　最大応答加速度分布の比較（ＮＳ方向）

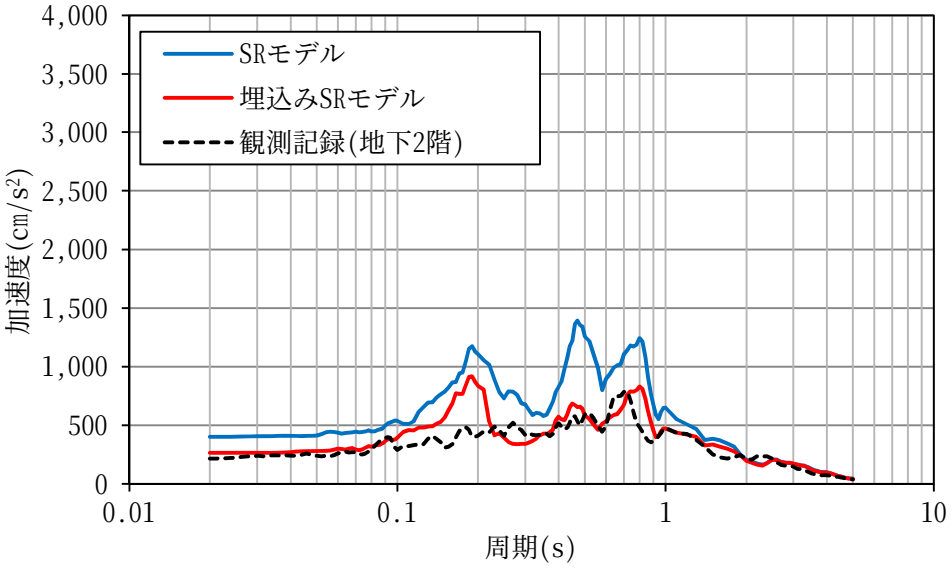


EW方向		
SR	埋込SR	観測
cm/s²	cm/s²	cm/s²
1,170	741	-
1,048	660	-
826	493	481
708	419	-
639	378	-
545	332	361
447	290	-
409	272	306
376	259	-
355	249	-
342	238	225
338	240	-
330	241	-

第 3-5 図　最大応答加速度分布の比較（ＥＷ方向）



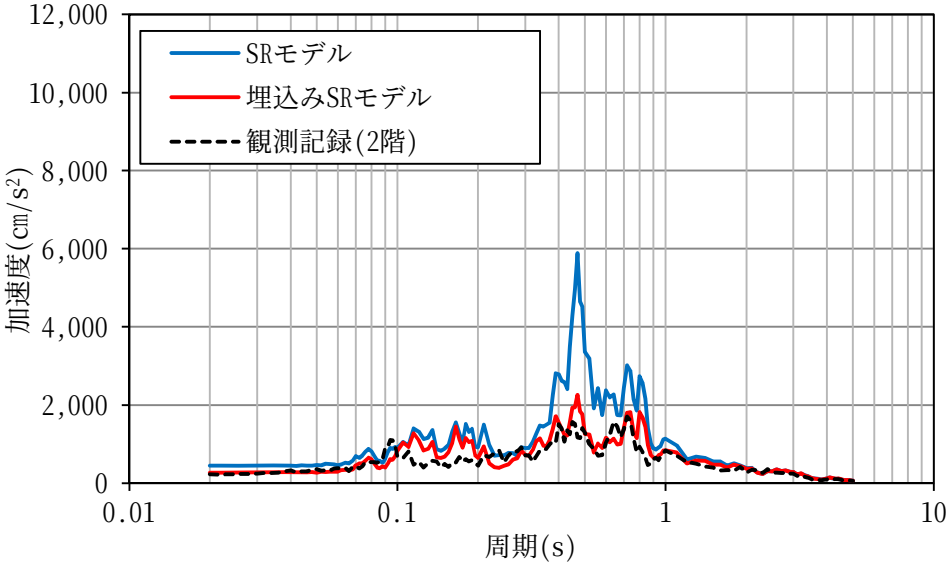
h＝1%



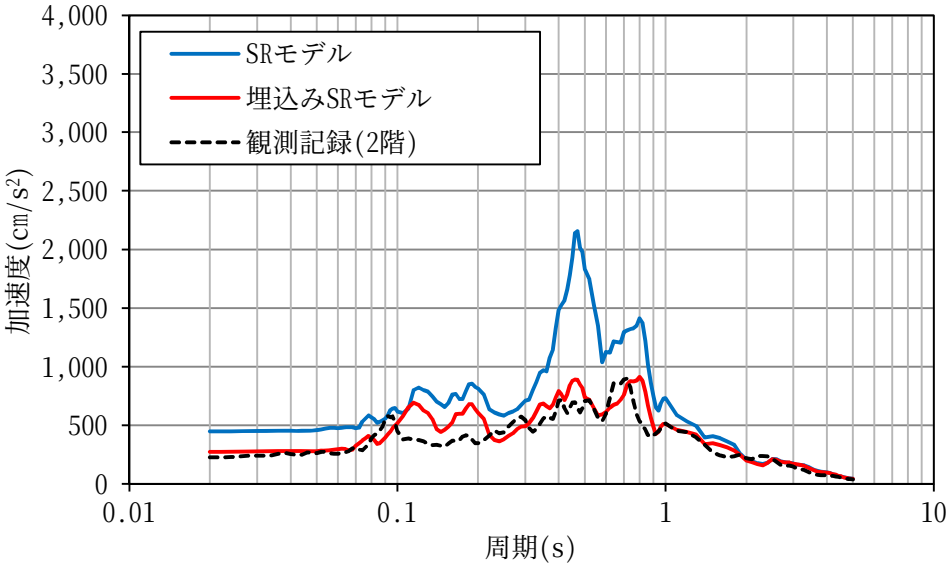
h＝5%

地下２階

第 3-6 図（1／4）　床応答スペクトルの比較（ＮＳ方向）



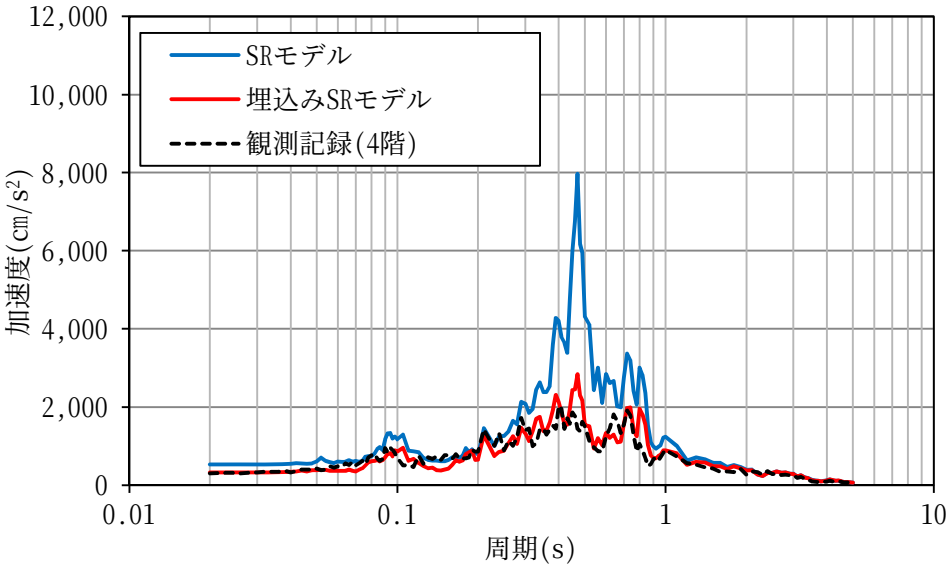
h＝1%



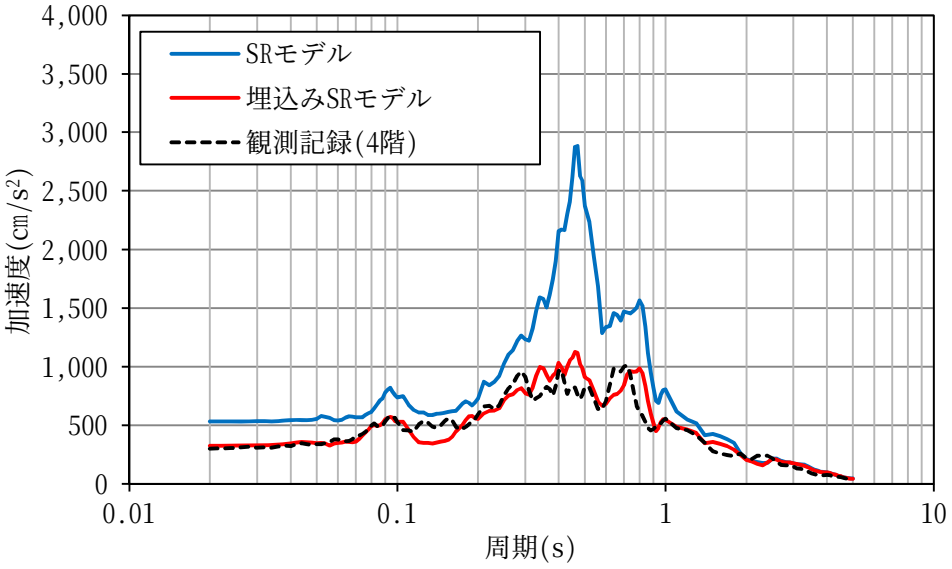
h＝5%

2 階

第 3-6 図（2／4）　床応答スペクトルの比較（ＮＳ方向）



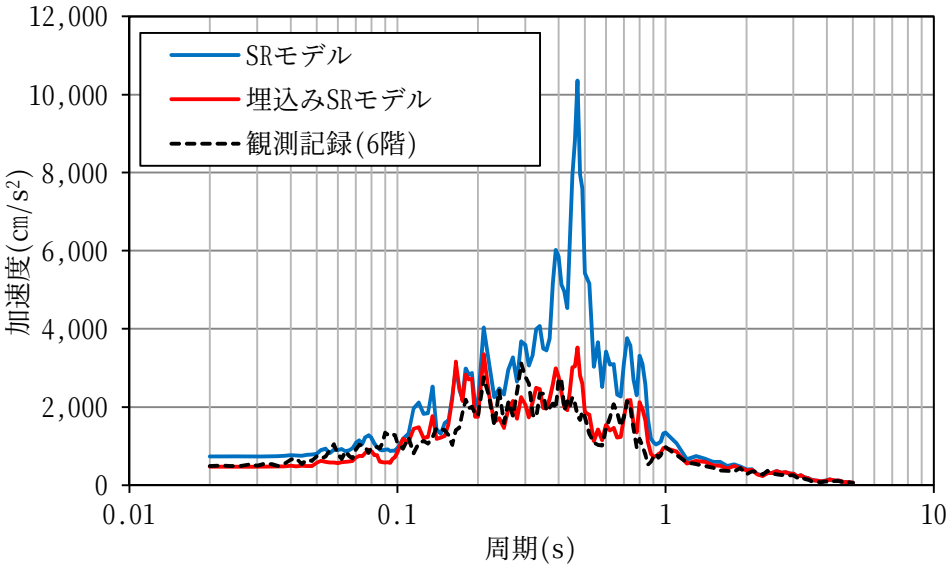
h＝1%



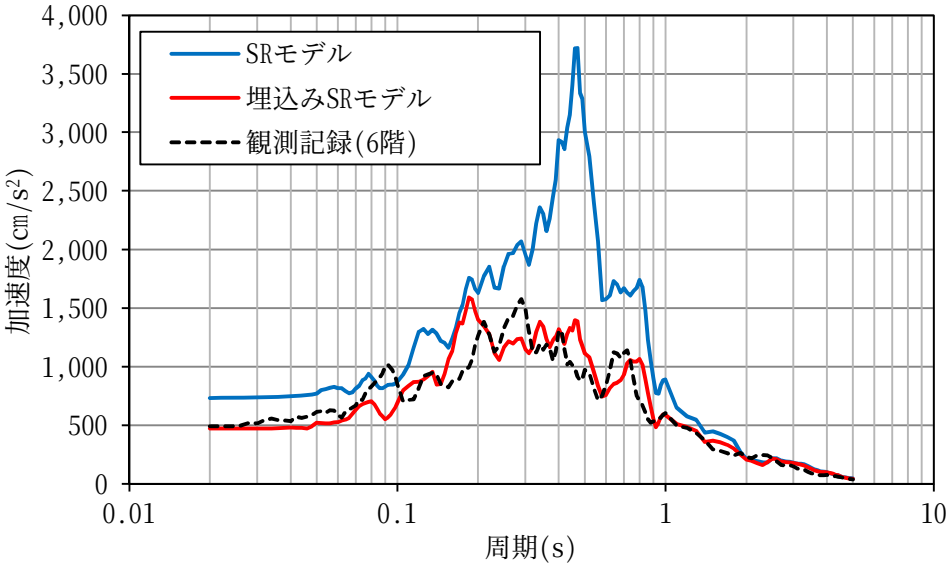
h＝5%

4 階

第 3-6 図（3／4）　床応答スペクトルの比較（ＮＳ方向）



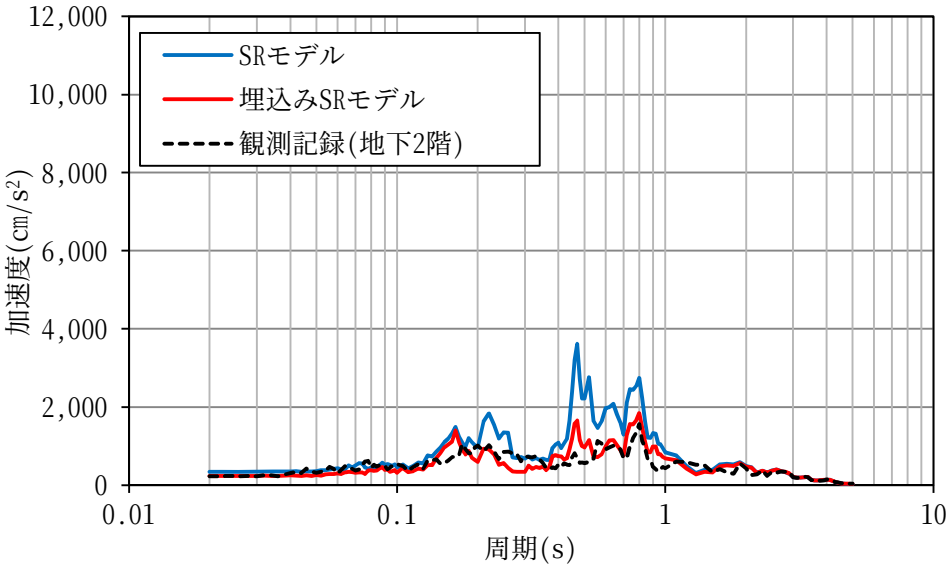
h＝1%



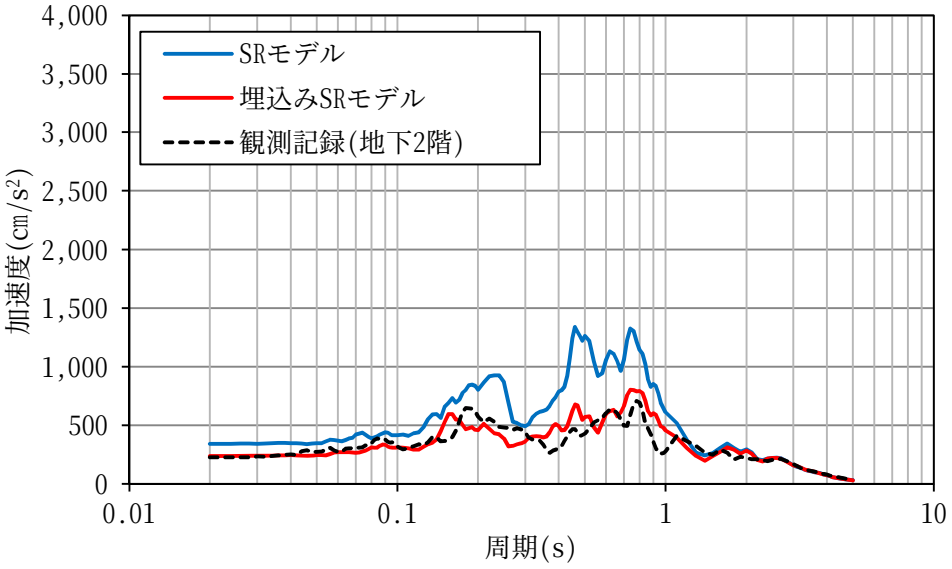
h＝5%

6 階

第 3-6 図（4／4）　床応答スペクトルの比較（ＮＳ方向）



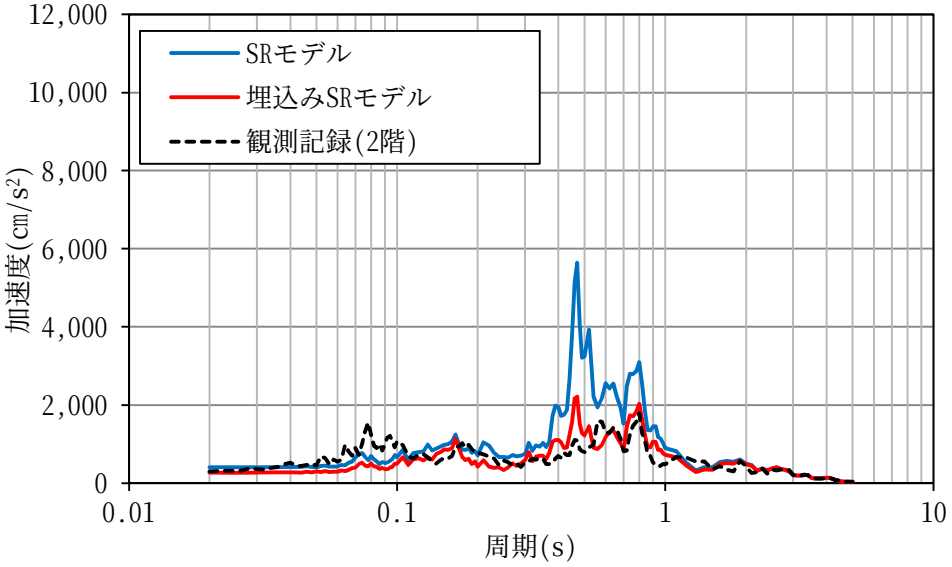
h＝1%



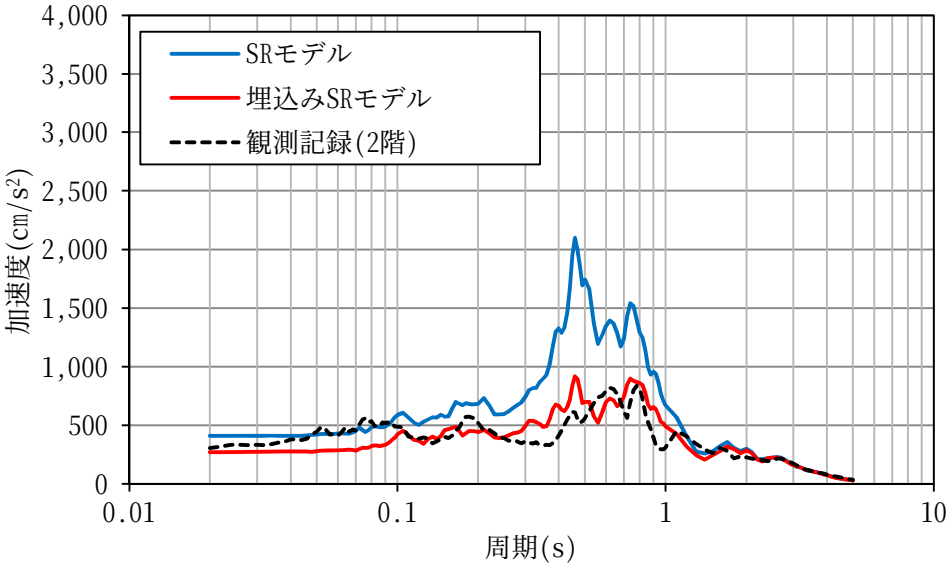
h＝5%

地下２階

第 3-7 図（1／4）　床応答スペクトルの比較（ＥＷ方向）



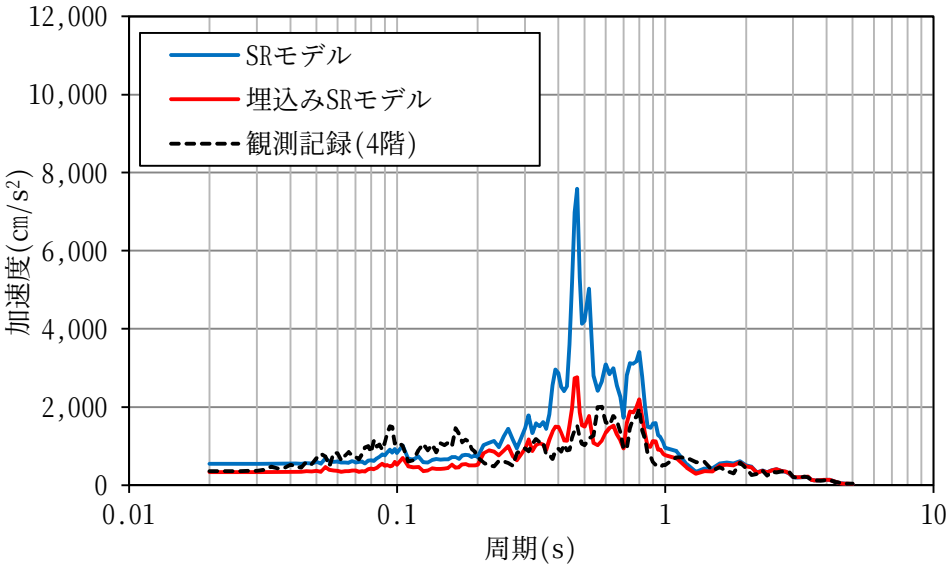
h＝1%



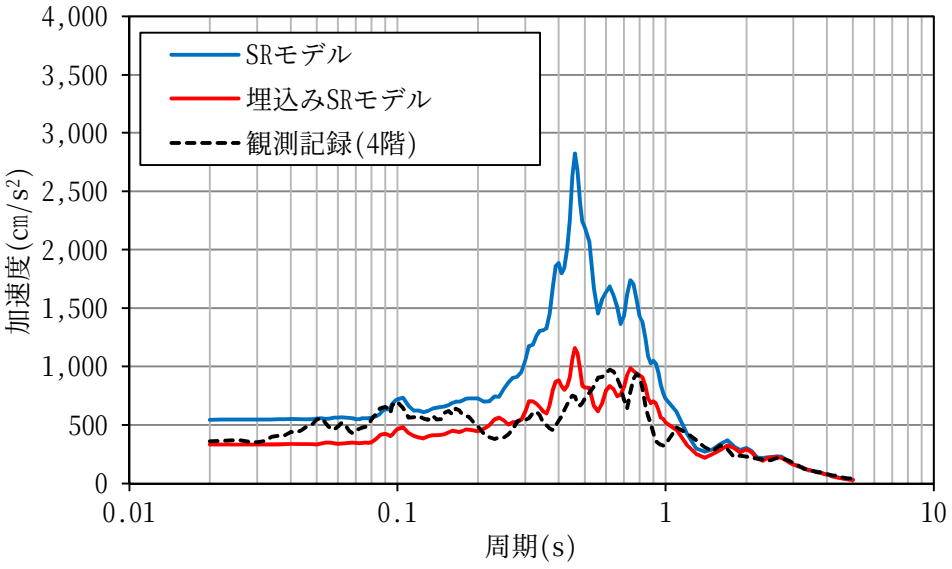
h＝5%

2 階

第 3-7 図（2／4）　床応答スペクトルの比較（ＥＷ方向）



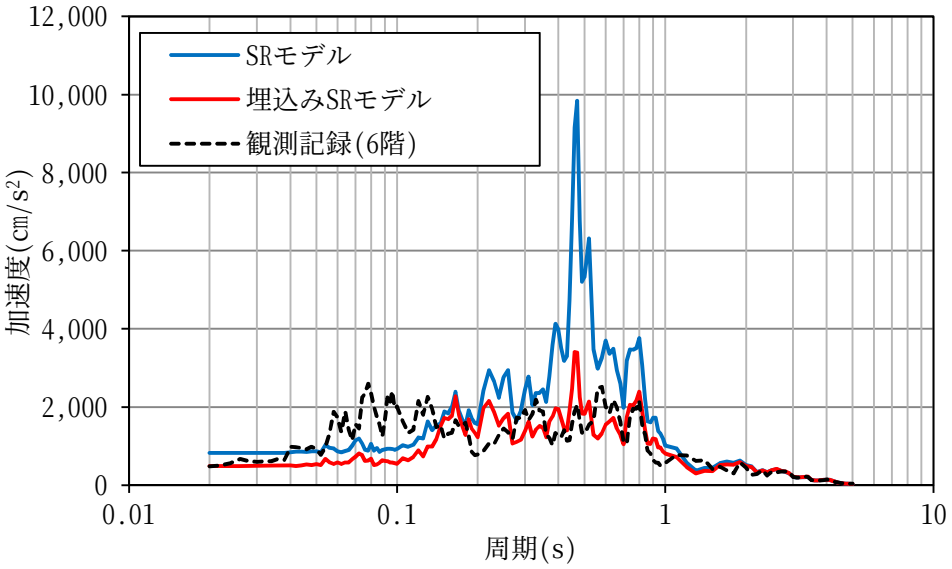
h＝1%



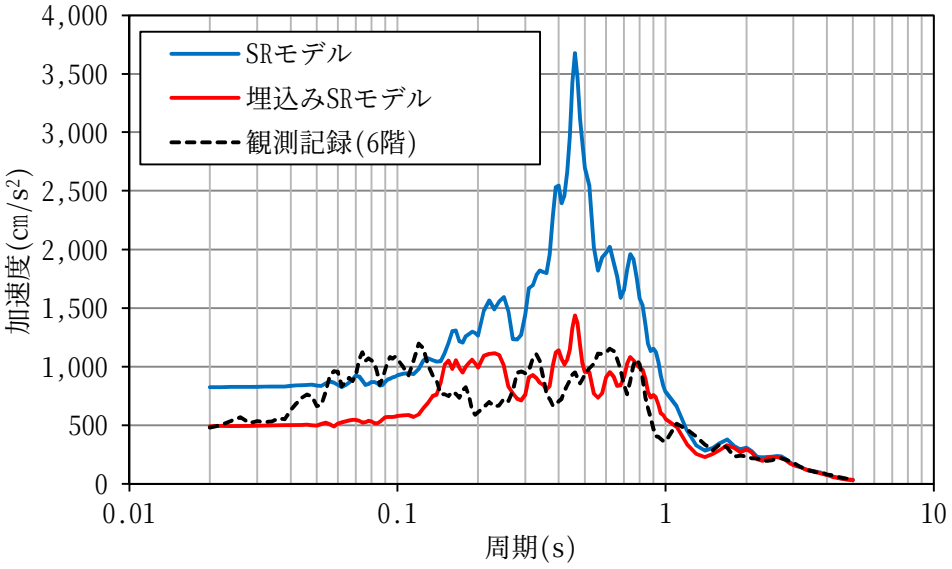
h＝5%

4 階

第 3-7 図（3／4）　床応答スペクトルの比較（ＥＷ方向）



h＝1%



h＝5%

6 階

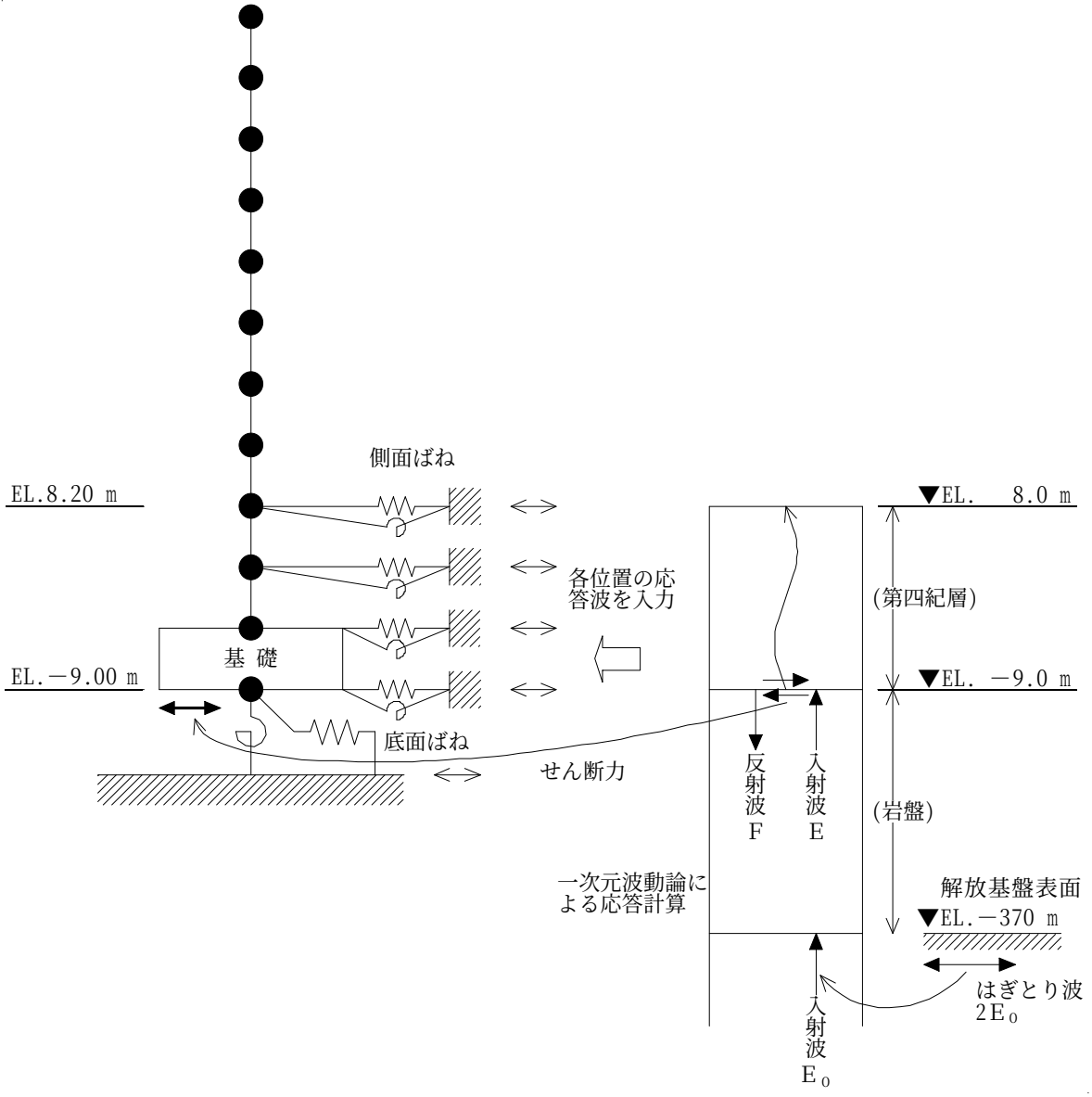
第 3-7 図（4／4）　床応答スペクトルの比較（ＥＷ方向）

3.4　工認上の人工岩盤のモデル化について

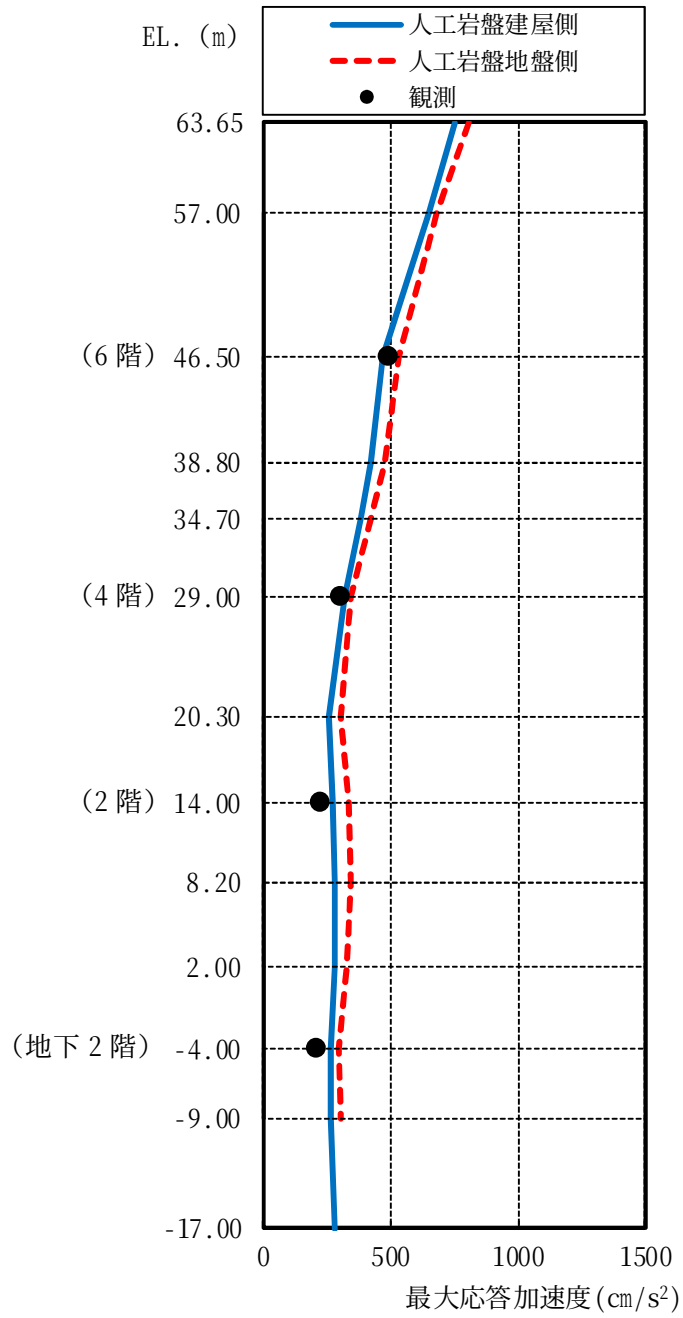
既工認では，人工岩盤を建屋モデル側にモデル化し，地震応答解析を行っていたが，ここでは，人工岩盤を地盤モデル側に岩盤としてモデル化した場合の建屋応答への影響について検討した。

人工岩盤を岩盤としてモデル化した場合の地震応答解析の概要を第 3-8 図に示す。ここで，基礎底面の地盤ばね及び入力動の算定に用いる地盤モデルは，基礎底面レベルである EL.－9.0 m まで砂質泥岩である久米層の物性と同等として設定した。また，比較検討には，前章にも用いた実状に近い建屋の振動性状を評価できている埋込みＳＲモデルを用いた。

東北地方太平洋沖地震のシミュレーション解析結果として最大応答加速度分布の比較を第 3-9 図及び第 3-10 図に，床応答スペクトルの比較を第 3-11 図及び第 3-12 図に示す。人工岩盤を地盤モデル側に岩盤としてモデル化した場合は，建屋モデル側にモデル化した場合の応答に比べ，概ね同程度であるか一部の周期帯では若干大きくなることが確認できた。そのため今回の工認では，保守的に人工岩盤を地盤モデル側に岩盤としてモデル化する方針とした。

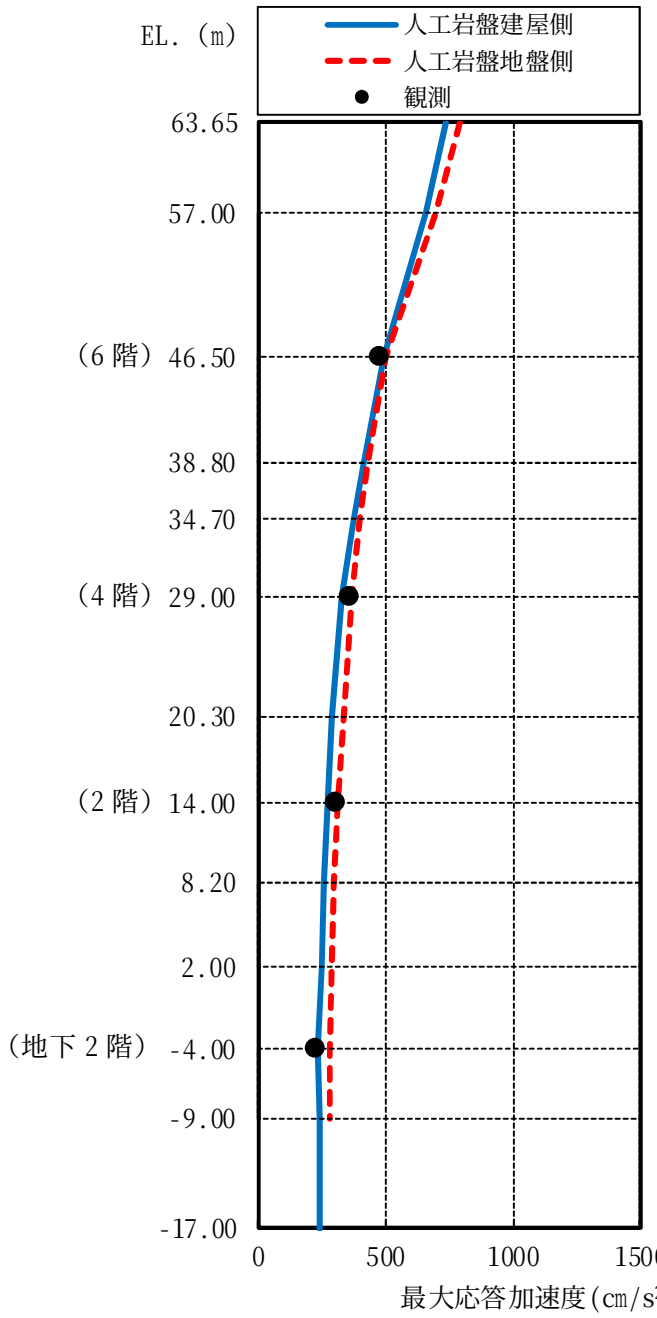


第 3-8 図　人工岩盤を岩盤としてモデル化した場合の地震応答解析の概要



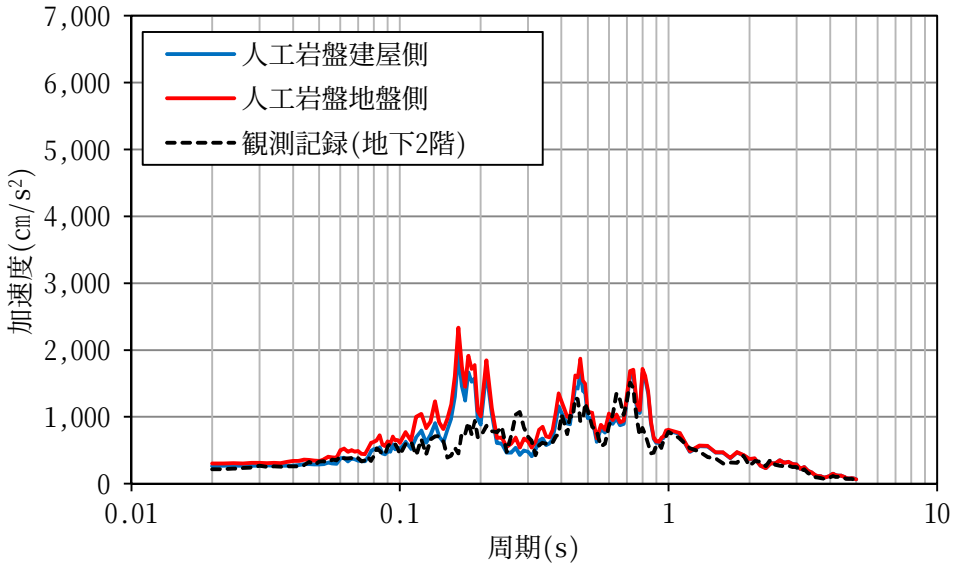
NS方向		
人工岩盤		観測
建屋側	地盤側	
cm/s²	cm/s²	cm/s²
755	811	-
648	686	-
472	532	492
419	476	-
383	421	-
325	343	301
255	306	-
272	338	225
284	344	-
279	329	-
265	301	214
269	307	-
278	-	-

第 3-9 図　最大応答加速度分布の比較（ＮＳ方向）

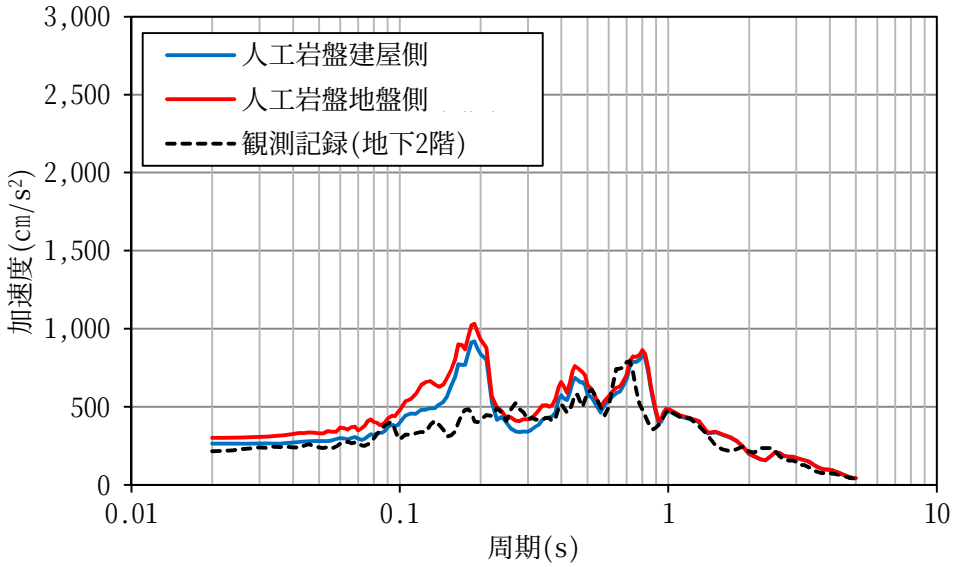


EW方向		
人工岩盤		観測
建屋側	地盤側	
cm/s²	cm/s²	cm/s²
741	794	-
660	695	-
493	500	481
419	430	-
378	399	-
332	366	361
290	334	-
272	312	306
259	299	-
249	292	-
238	281	225
240	283	-
241	-	-

第 3-10 図　最大応答加速度分布の比較（ＥＷ方向）



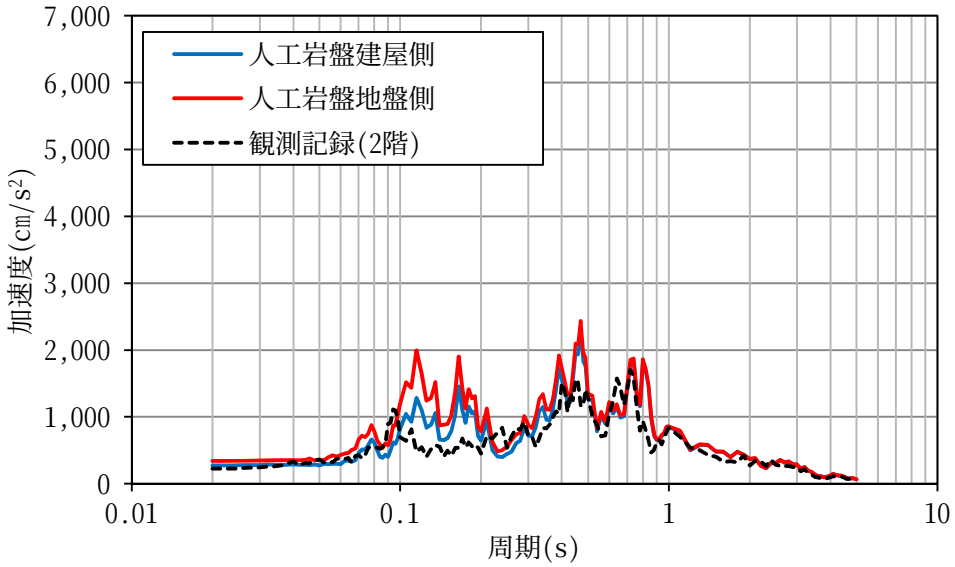
h＝1%



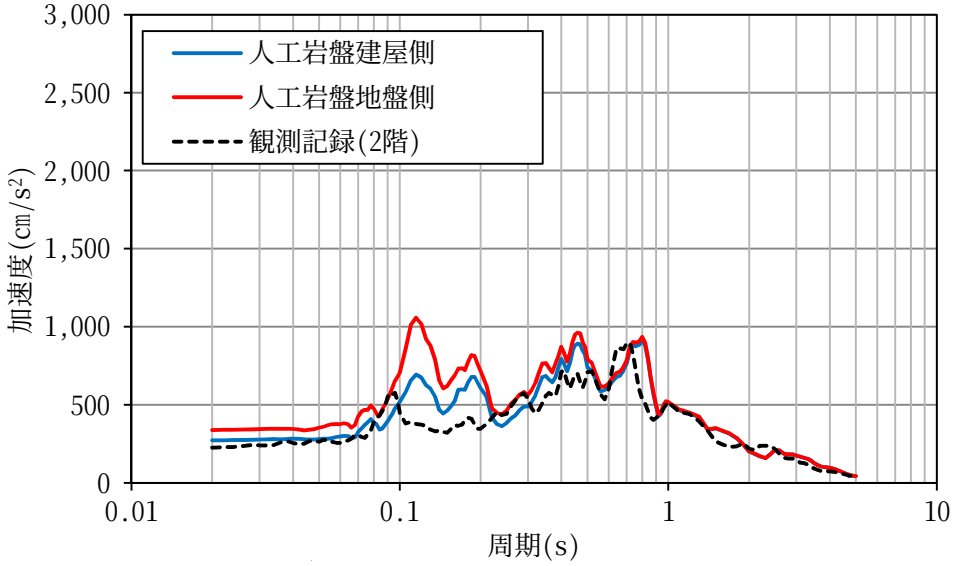
h＝5%

地下２階

第 3-11 図（1／4）　床応答スペクトルの比較（ＮＳ方向）



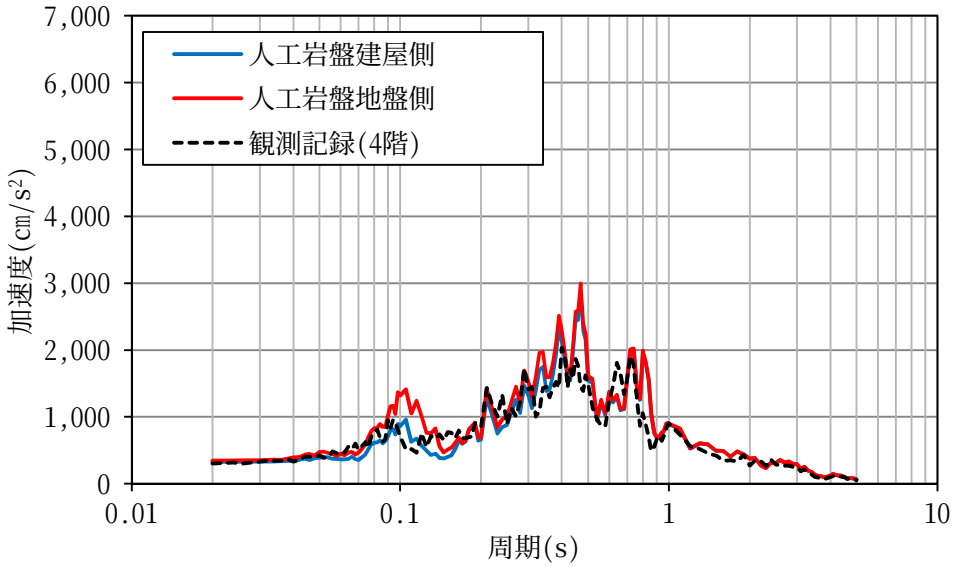
h＝1%



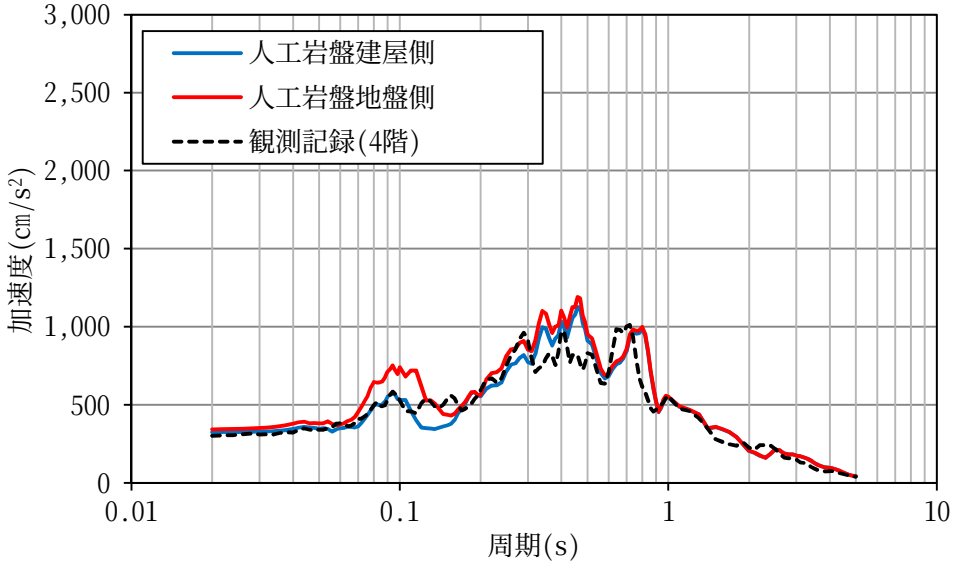
h＝5%

2 階

第 3-11 図（2／4）　床応答スペクトルの比較（ＮＳ方向）



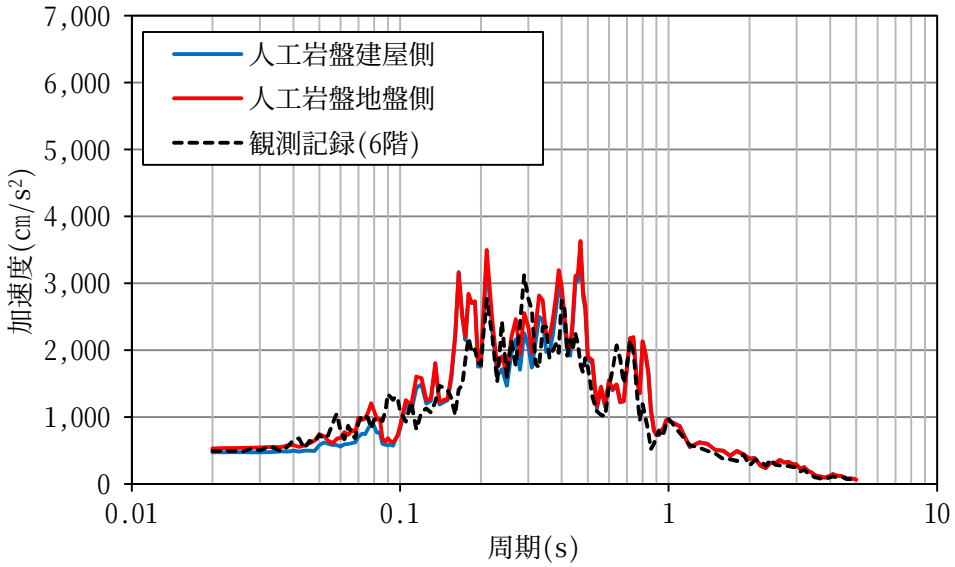
h＝1%



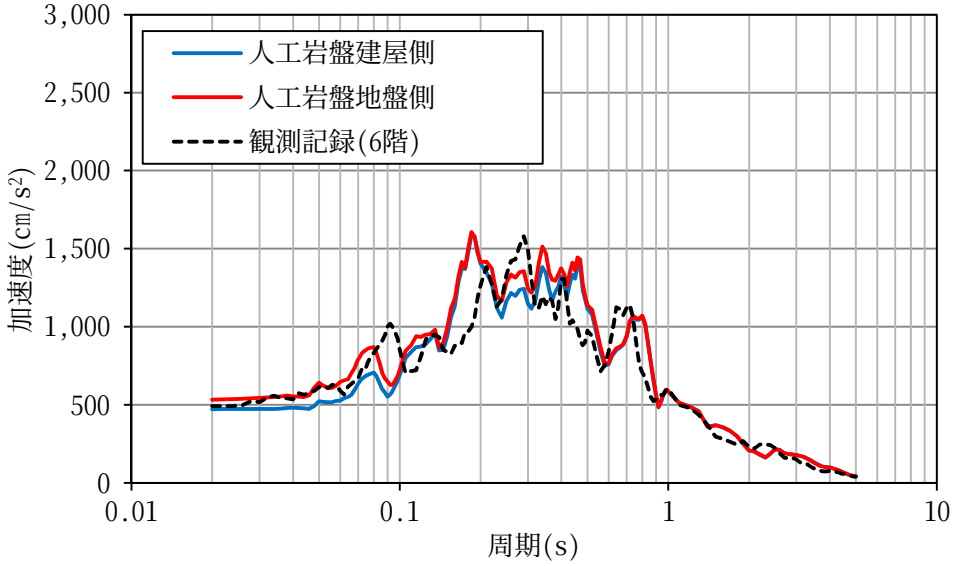
h＝5%

4 階

第 3-11 図（3／4）　床応答スペクトルの比較（ＮＳ方向）



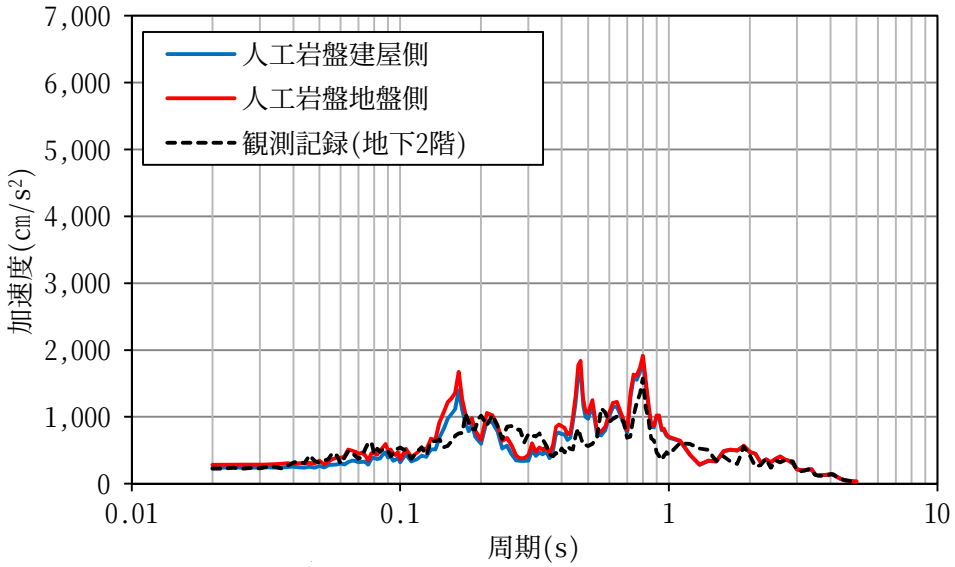
h＝1%



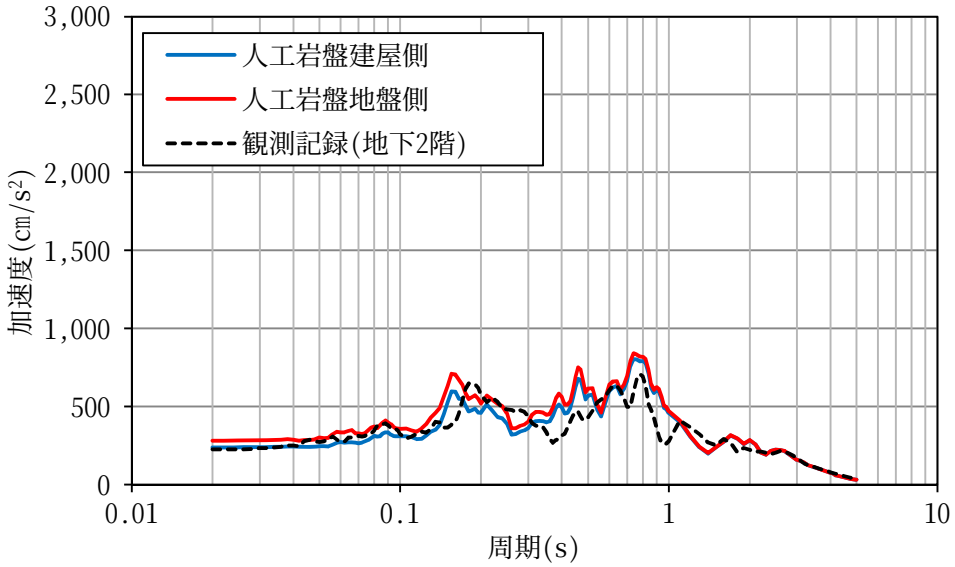
h＝5%

6 階

第 3-11 図（4／4）　床応答スペクトルの比較（ＮＳ方向）



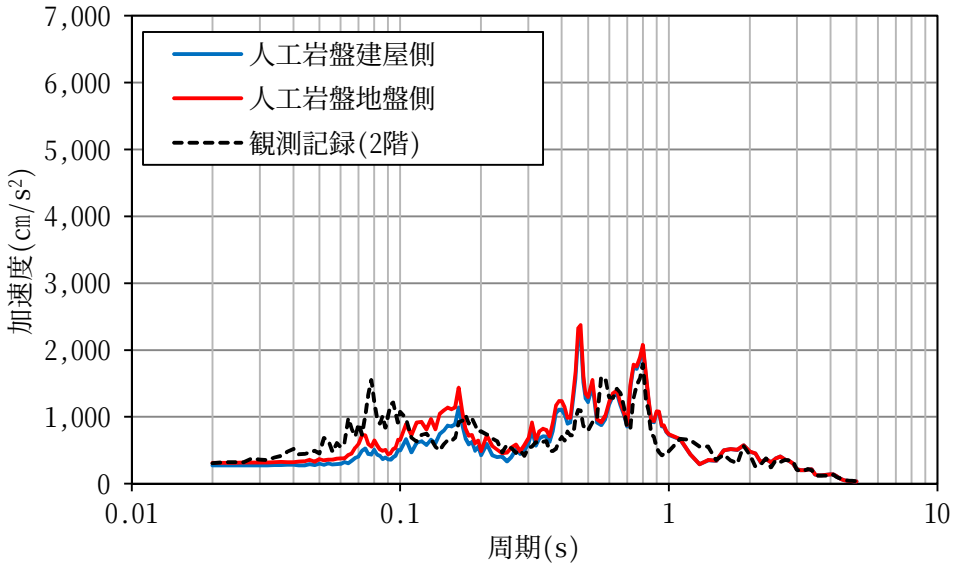
h＝1%



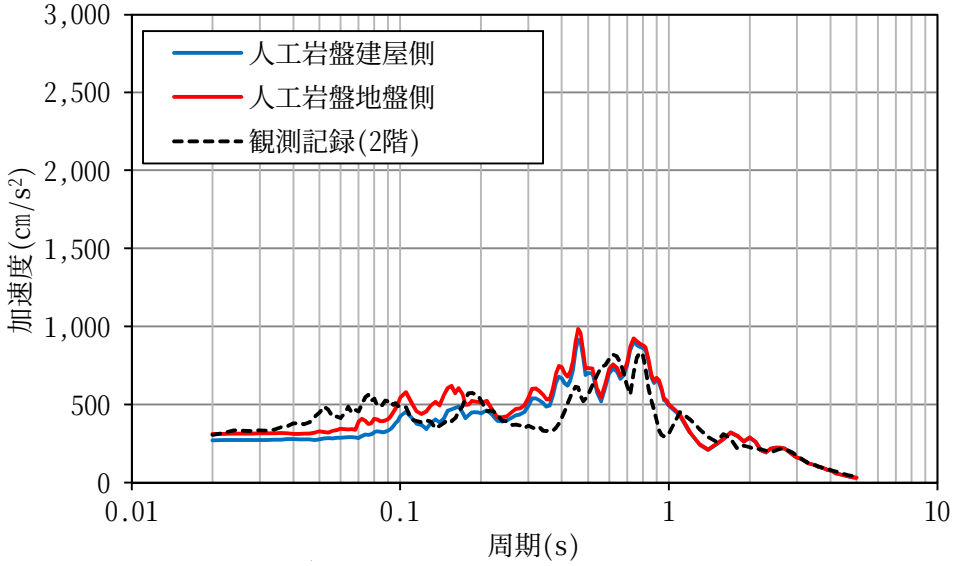
h＝5%

地下 2 階

第 3-12 図（1／4）　床応答スペクトルの比較（ＥＷ方向）



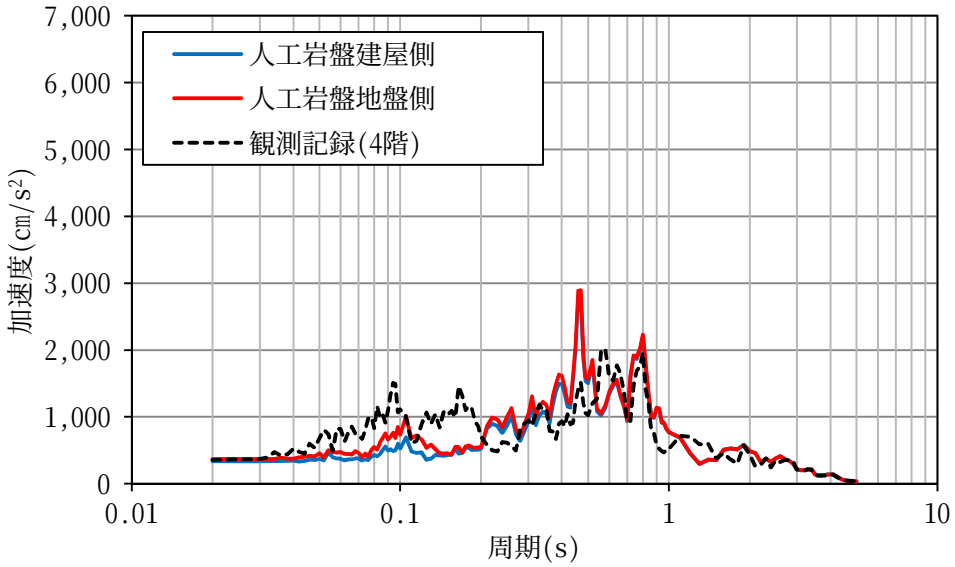
h＝1%



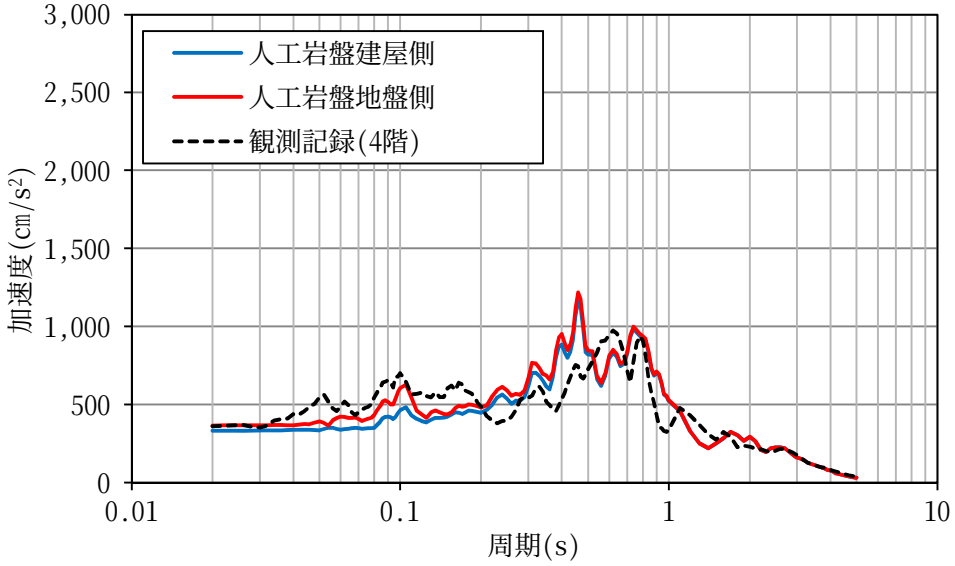
h＝5%

2 階

第 3-12 図（2／4）　床応答スペクトルの比較（ＥＷ方向）



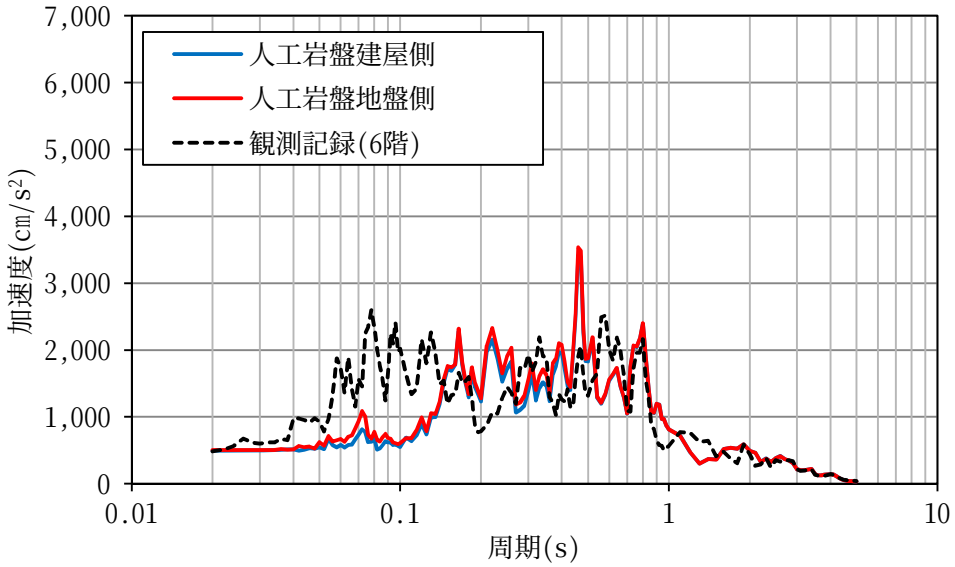
h＝1%



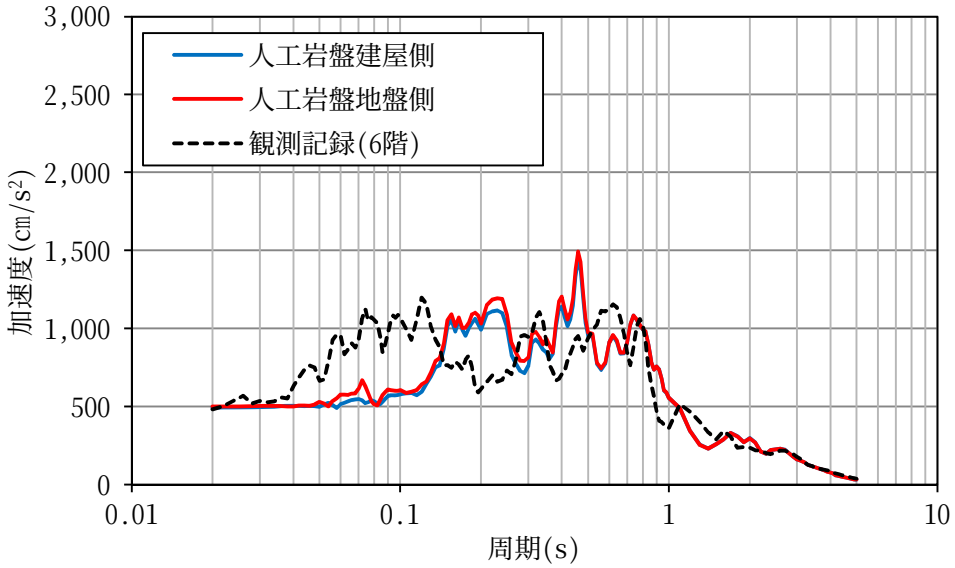
h＝5%

4 階

第 3-12 図（3／4）　床応答スペクトルの比較（ＥＷ方向）



h＝1%



h＝5%

6 階

第 3-12 図（4／4）　床応答スペクトルの比較（ＥＷ方向）

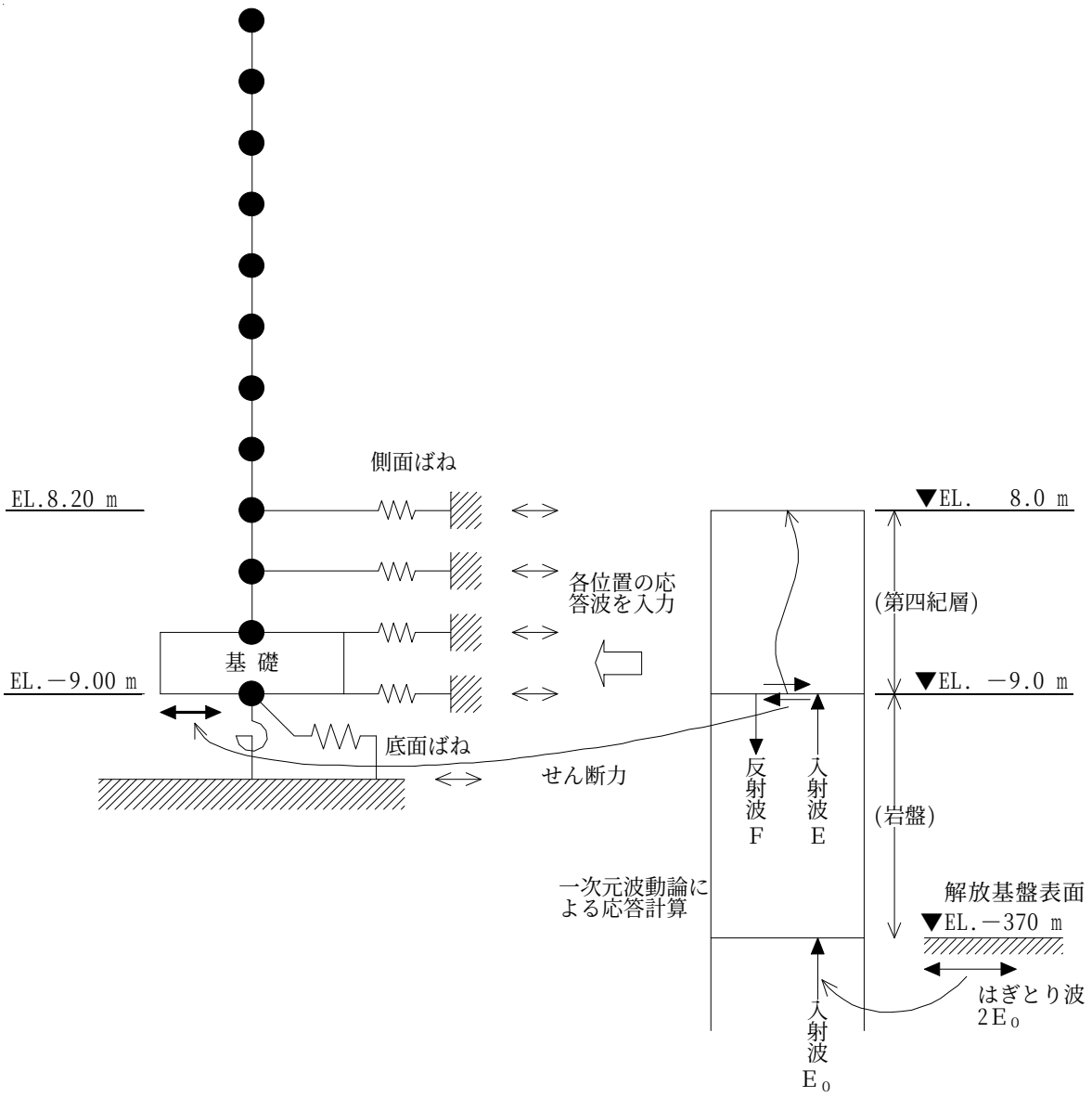
3.5　工認上の側面回転ばねの扱いについて

建屋側面地盤の埋込み効果を考慮するにあたり，側面地盤を水平ばね及び回転ばねとして評価してきた。ここでは，側面回転ばねを考慮しない場合の建屋応答への影響について検討した。

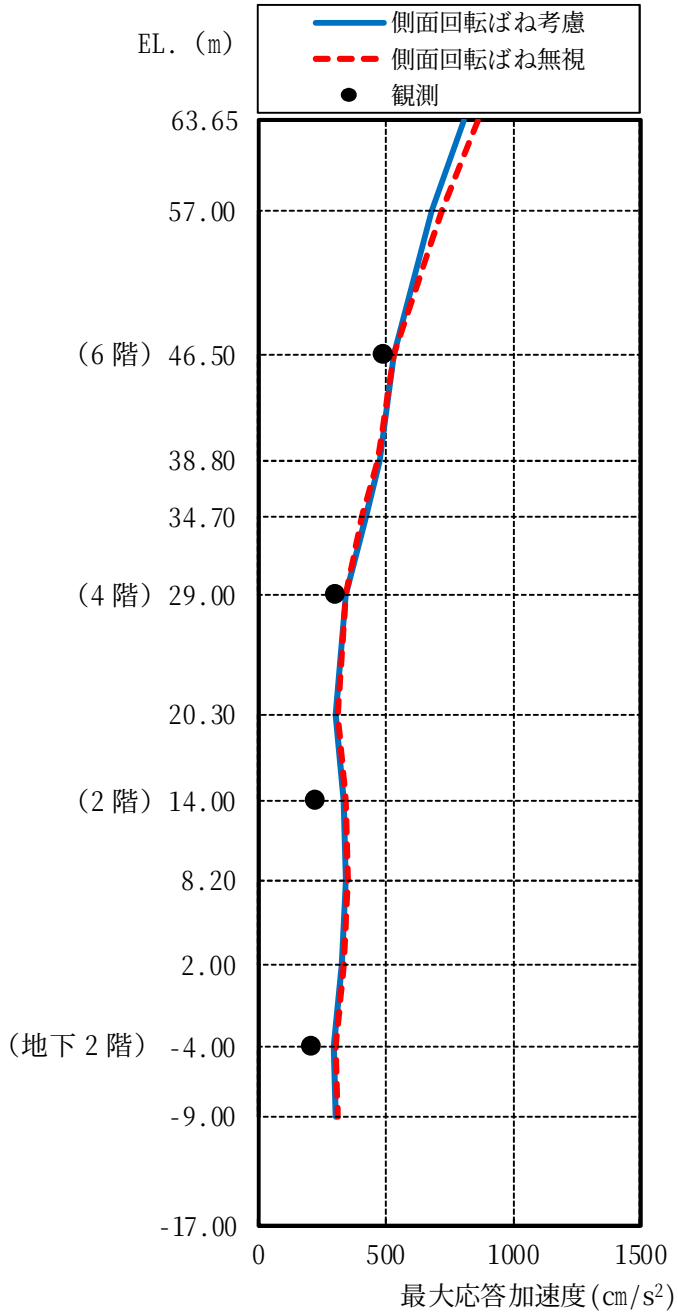
側面回転ばねを考慮しない場合の地震応答解析の概要を第 3-13 図に示す。

東北地方太平洋沖地震のシミュレーション解析結果として最大応答加速度分布の比較を第 3-14 図及び第 3-15 図に，床応答スペクトルの比較を第 3-16 図及び第 3-17 図に示す。側面回転ばねを考慮しない場合の解析結果は，側面回転ばねを考慮する場合の応答に比べ，概ね同程度であるか一部の周期帯では若干大きくなることが確認できた。

「3.3　建屋－地盤動的相互作用の評価法について」において示したように，埋込み効果として，側面地盤の水平ばね及び回転ばねを考慮した場合に，より実状に近い建屋の振動性状を評価できているものと考えられるが，今回工認において，当プラントでは保守的に側面回転ばねを採用しない方針とした。

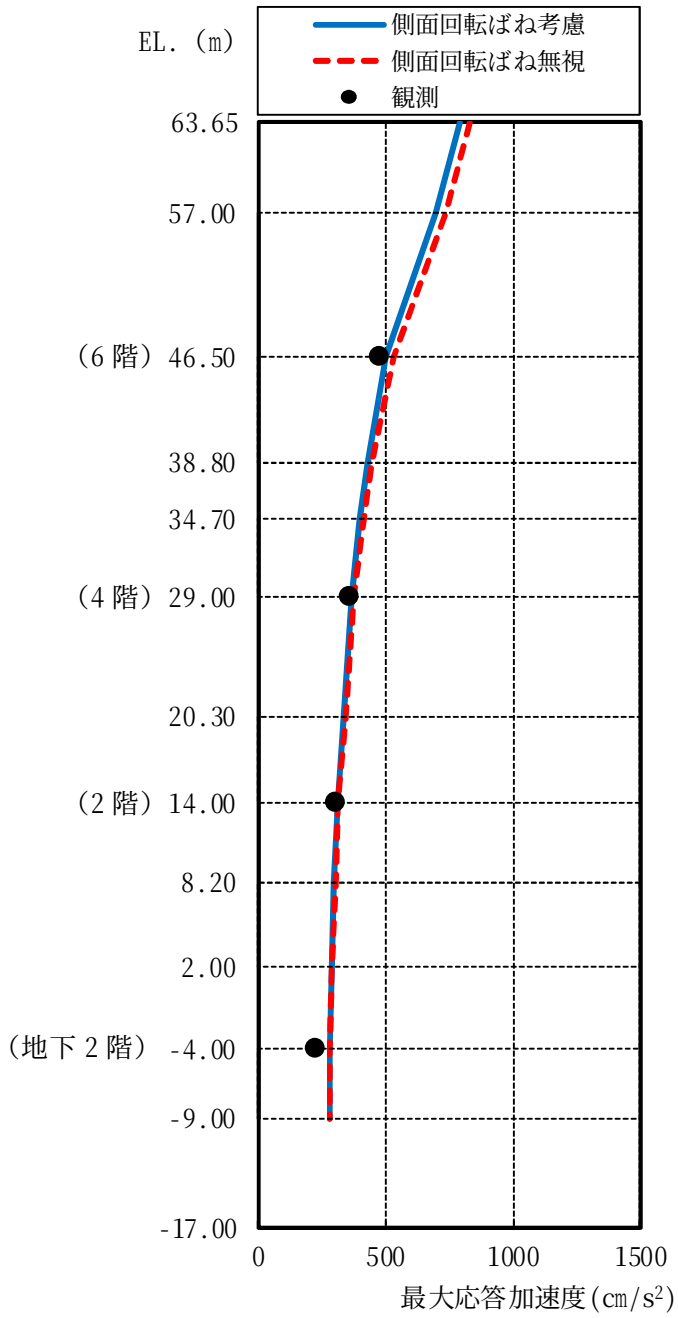


第 3-13 図　側面回転ばねを考慮しない場合の地震応答解析の概要



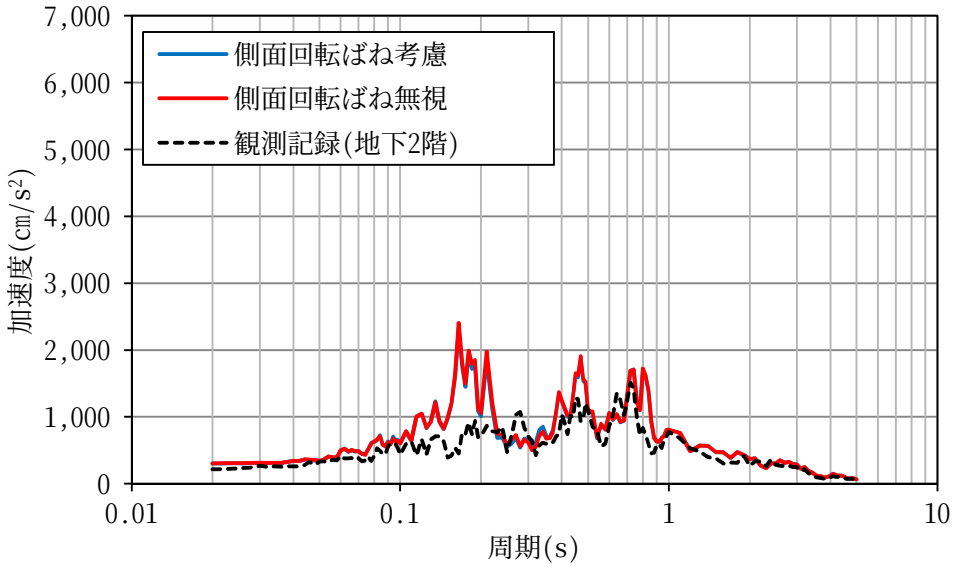
NS方向		
側面回転ばね		観測
考慮	無視	
cm/s²	cm/s²	cm/s²
811	859	-
686	723	-
532	530	492
476	466	-
421	411	-
343	346	301
306	310	-
338	343	225
344	349	-
329	334	-
301	303	214
307	310	-
-	-	-

第 3-14 図　最大応答加速度分布の比較（ＮＳ方向）

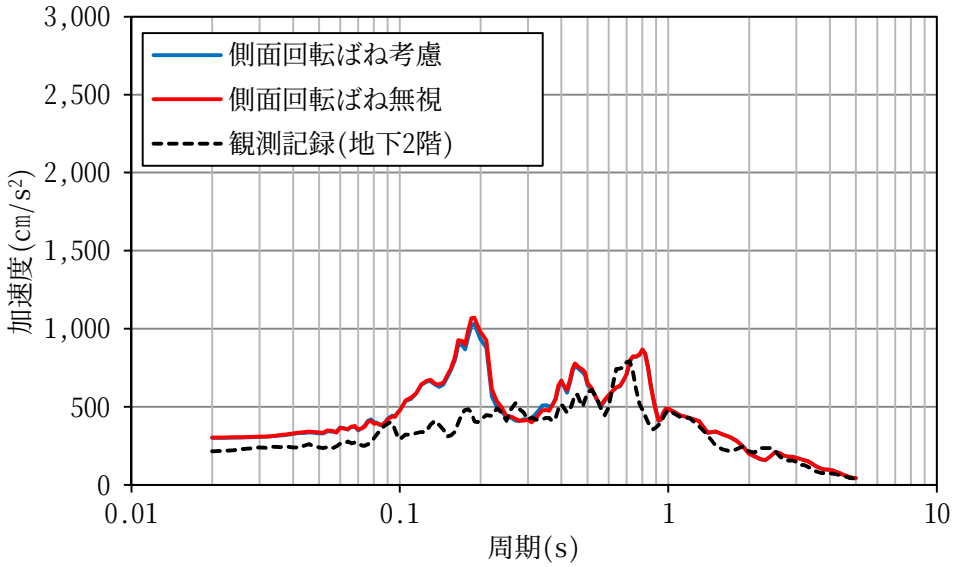


EW方向		
側面回転ばね		観測
考慮	無視	
cm/s²	cm/s²	cm/s²
794	834	-
695	735	-
500	532	481
430	449	-
399	411	-
366	374	361
334	340	-
312	317	306
299	302	-
292	292	-
281	279	225
283	282	-
-	-	-

第 3-15 図　最大応答加速度分布の比較（ＥＷ方向）



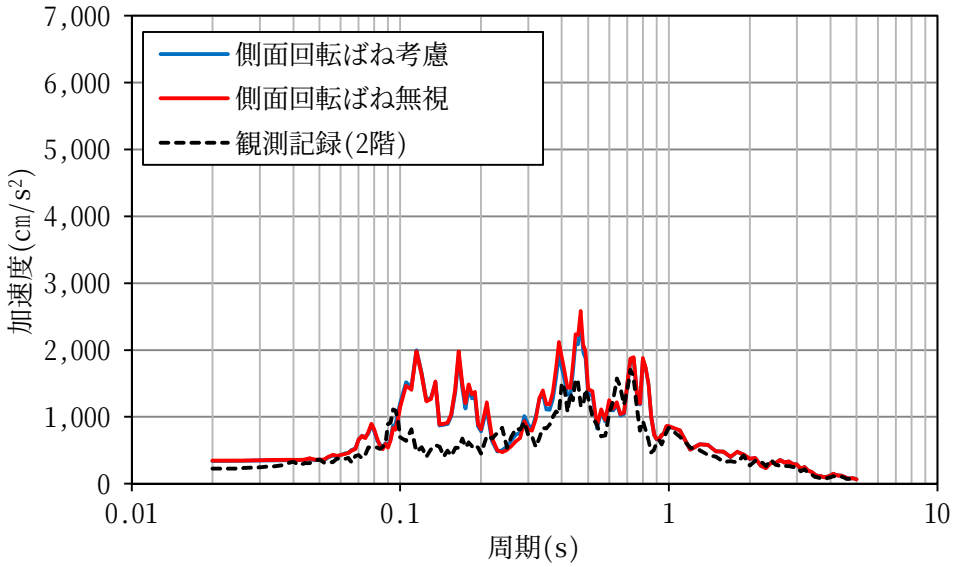
h＝1%



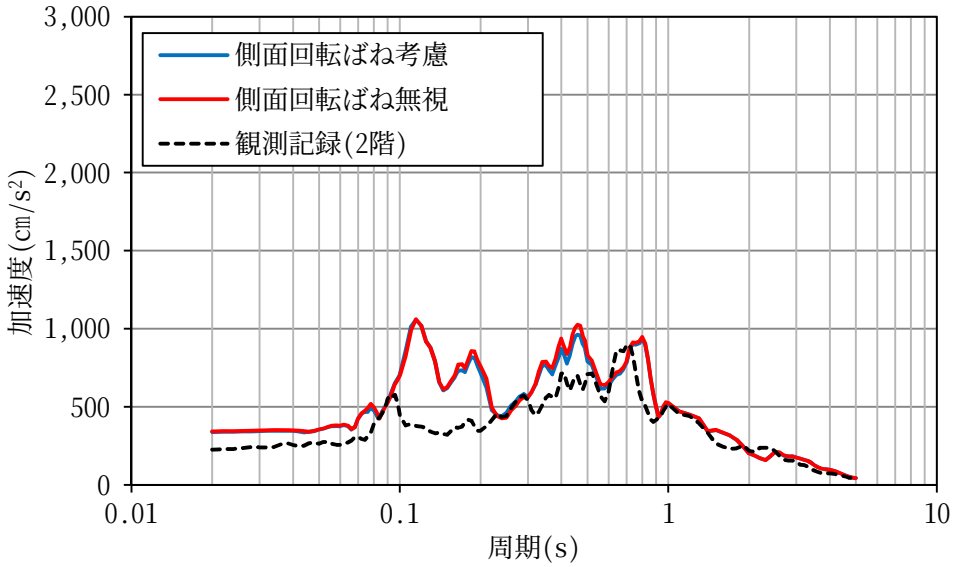
h＝5%

地下 2 階

第 3-16 図（1／4）　床応答スペクトルの比較（ＮＳ方向）



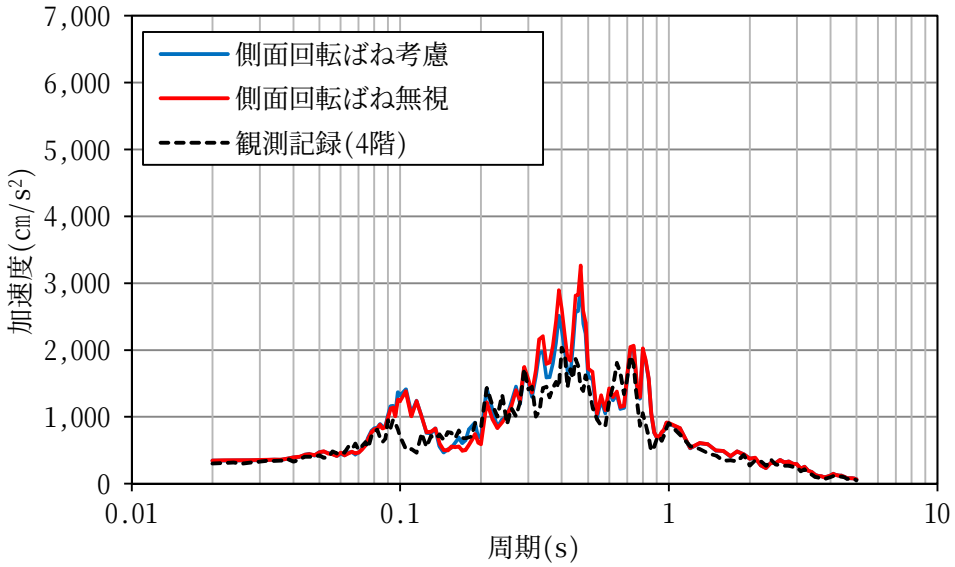
h＝1%



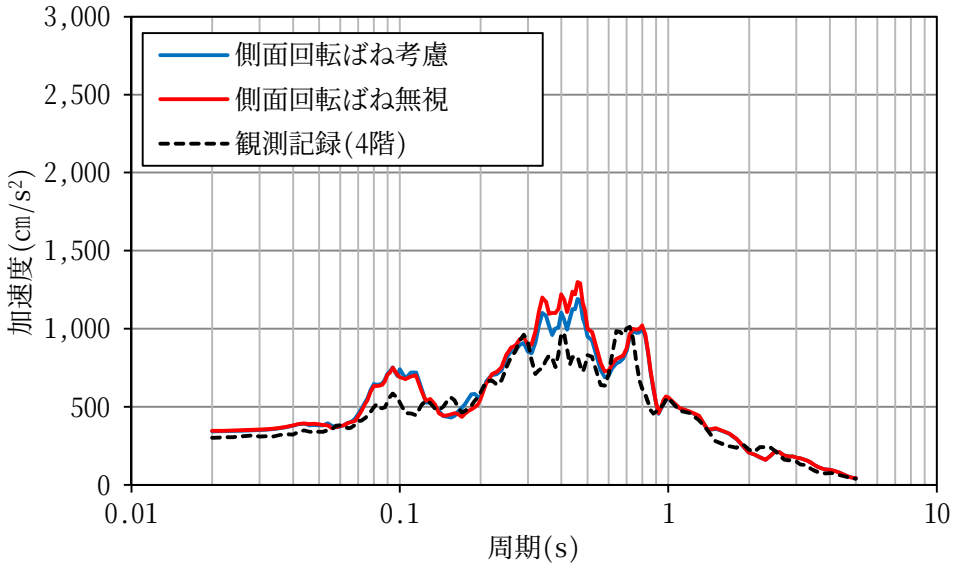
h＝5%

2 階

第 3-16 図（2／4）　床応答スペクトルの比較（ＮＳ方向）



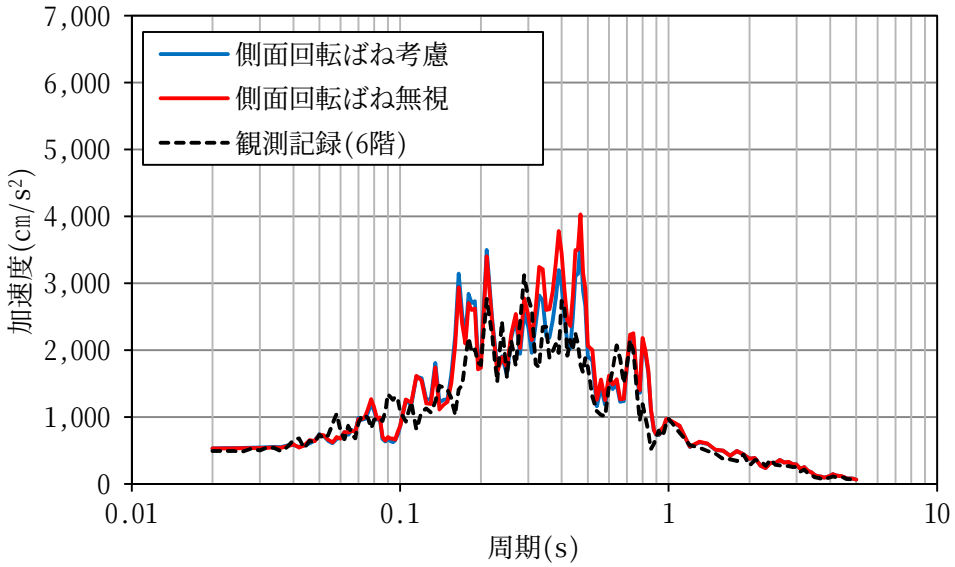
h＝1%



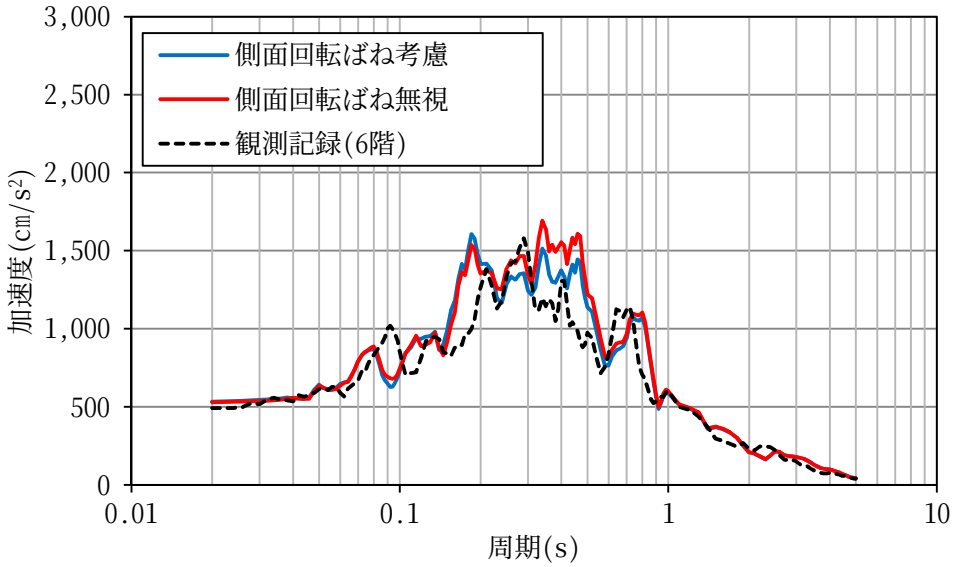
h＝5%

4 階

第 3-16 図（3／4）　床応答スペクトルの比較（ＮＳ方向）



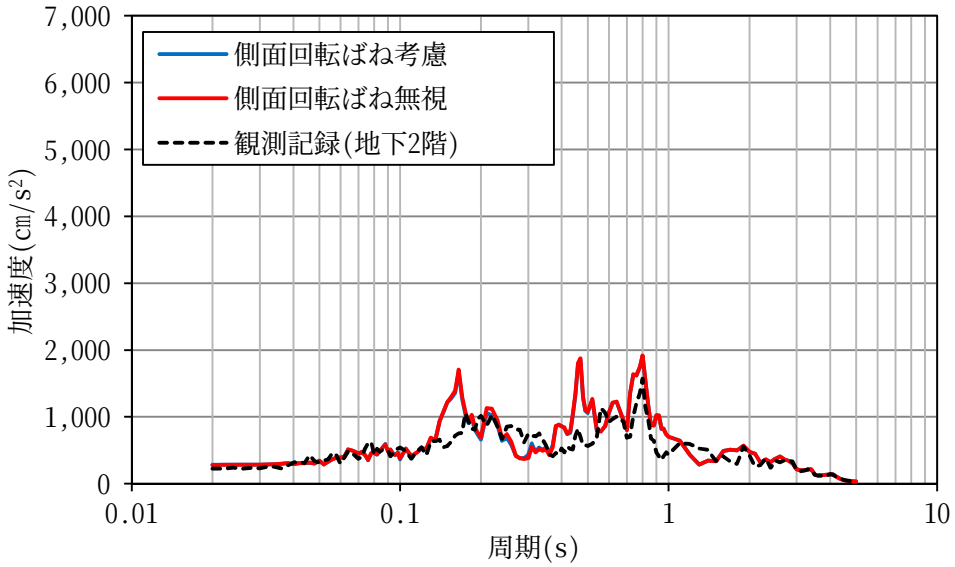
h＝1%



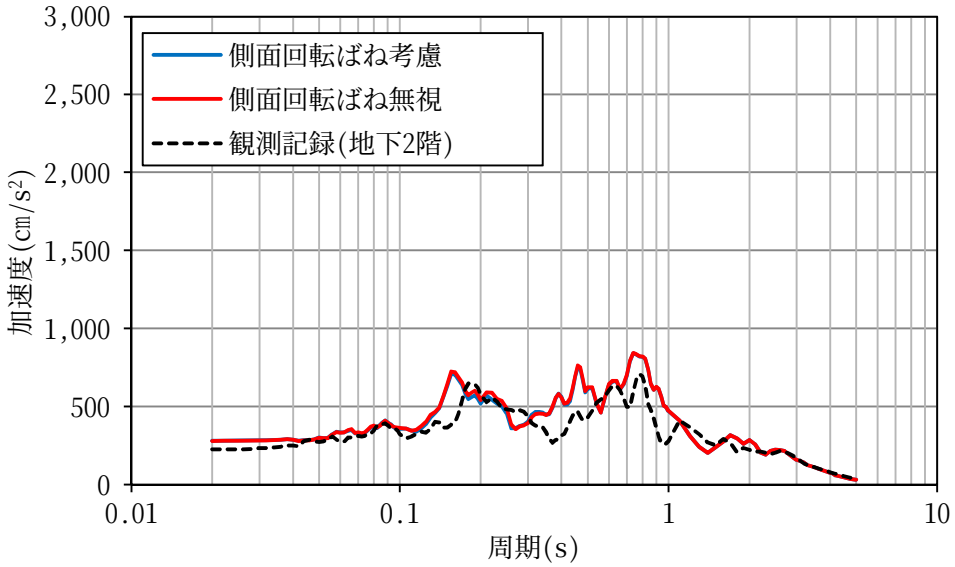
h＝5%

6 階

第 3-16 図（4／4）　床応答スペクトルの比較（ＮＳ方向）



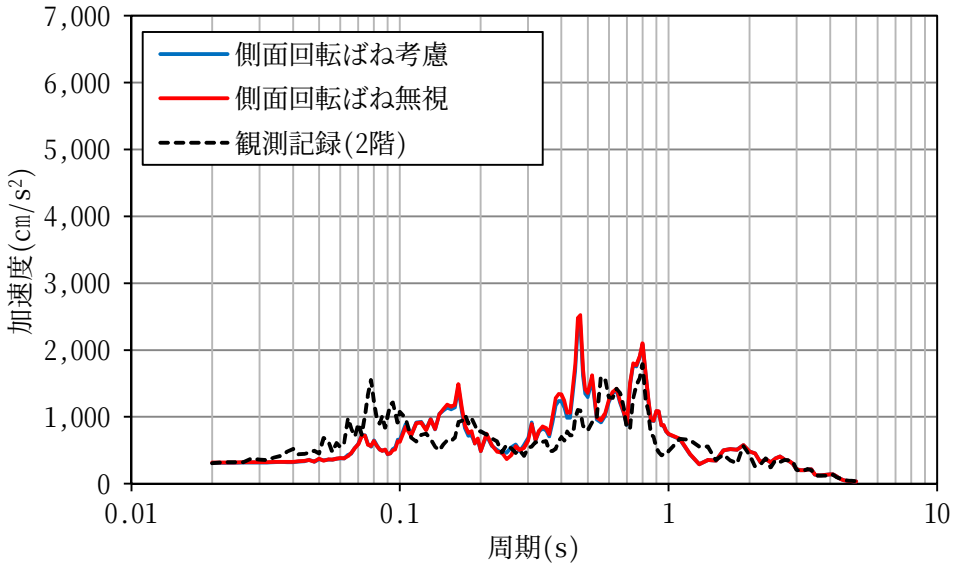
h＝1%



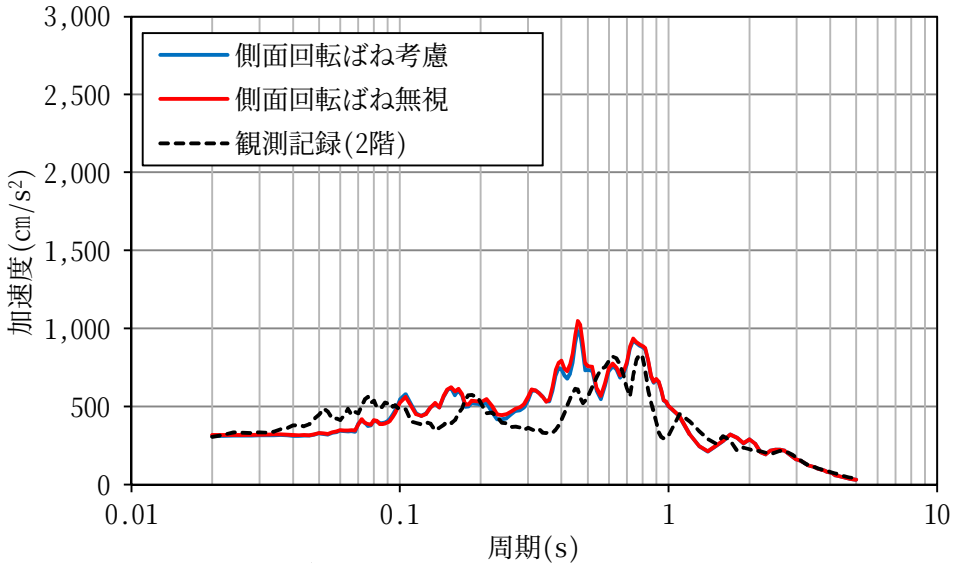
h＝5%

地下 2 階

第 3-17 図（1／4）　床応答スペクトルの比較（ＥＷ方向）



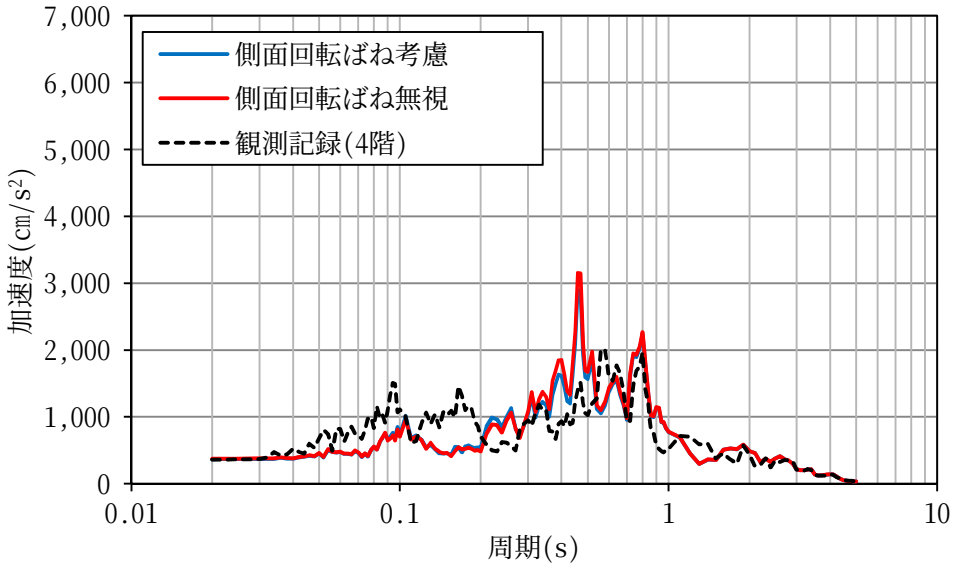
h＝1%



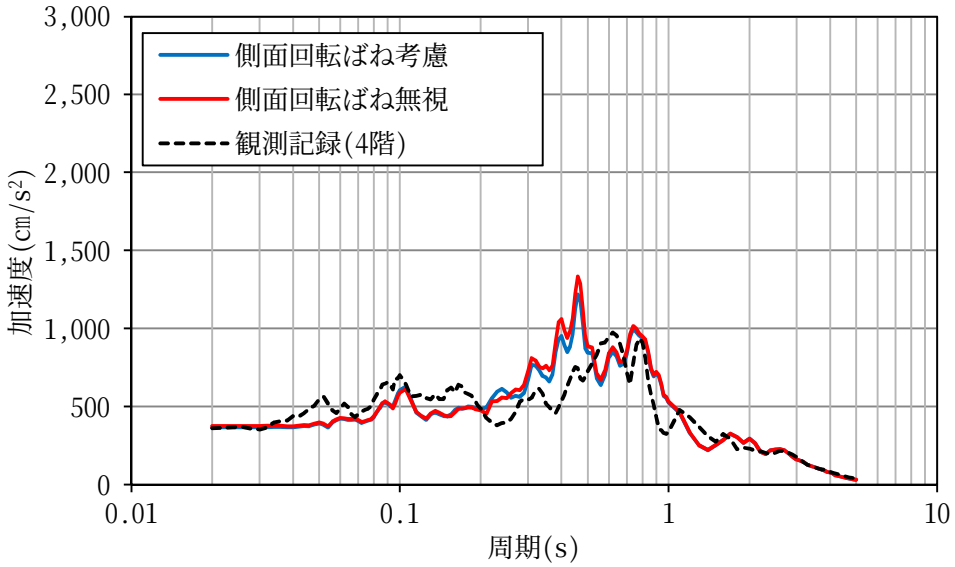
h＝5%

2 階

第 3-17 図（2／4）　床応答スペクトルの比較（ＥＷ方向）



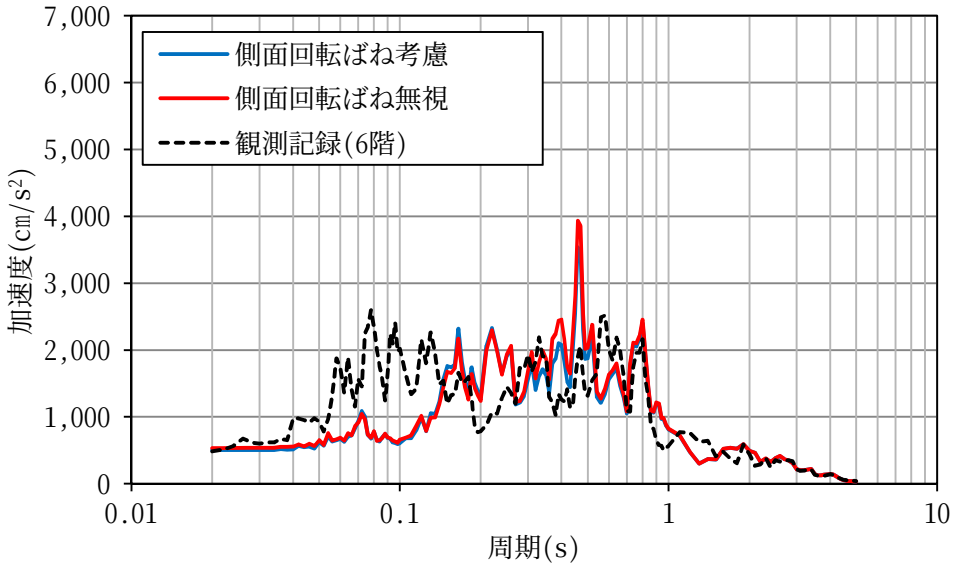
h＝1%



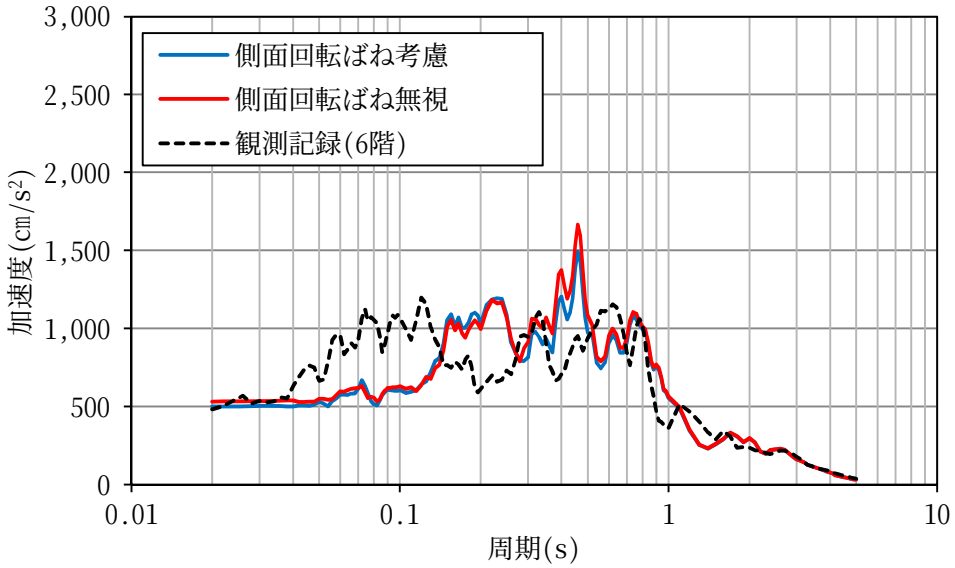
h＝5%

4 階

第 3-17 図（3／4）　床応答スペクトルの比較（ＥＷ方向）



h＝1%



h＝5%

6 階

第 3-17 図（4／4）　床応答スペクトルの比較（ＥＷ方向）

3.6　工認に用いる地震応答解析モデルについて

東海第二発電所原子炉建屋の地震応答解析モデルについて，東北地方太平洋沖地震のシミュレーション解析結果の比較から，人工岩盤のモデル化及び側面回転ばねの工認上の扱いについて検討した。

既工認ではＳＲモデルとしていたが，側面地盤の埋込み効果を考慮した埋込みＳＲモデルとした場合，より実状に近い建屋の振動性状を評価できることを確認した。また，人工岩盤は岩盤として地盤モデル側にモデル化し，側面回転ばねを考慮しないモデルとする方が，応答を保守側に評価することを確認した。

以上の結果から，今回工認に用いる地震応答解析モデルは，人工岩盤を地盤モデル側に岩盤としてモデル化し，側面回転ばねを考慮しない埋込みＳＲモデルとする。

4．　既工認との比較

「3．　原子炉建屋の地震応答解析モデルの設定」で示したように，今回工認において，地震応答解析モデルを一部見直している。地震応答解析モデルの主要な変更点を第 4-1 表に示す。

第 4-1 表　地震応答解析モデルの主要な変更点

項　目	既工認	今回工認
相互作用	ＳＲモデル 地盤ばねは Timoshenko, Barkan 等の式に基づき評価	埋込みＳＲモデル 地盤ばねは NOVAK の方法及び振動アドミッタンス理論に基づき評価
建屋モデル	線形としてモデル化	せん断及び曲げの非線形性を考慮
入力地震動	設計用地震動を直接入力	基準地震動S_sを一次元波動論により算定

5. 基準地震動S_Sに対する耐震安全性評価

5.1 評価方針

原子炉建屋の耐震安全性評価は，地震応答解析結果を基に実施する。建屋の耐震安全性については，基準地震動S_Sにより耐震壁に生じるせん断ひずみが評価基準値（2.0×10^{-3}）を超えないことを確認する。

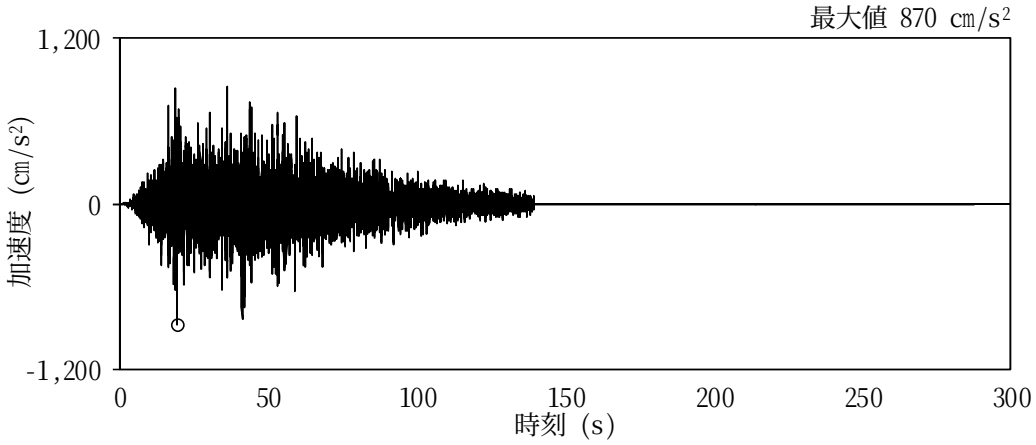
5.2 基準地震動S_S

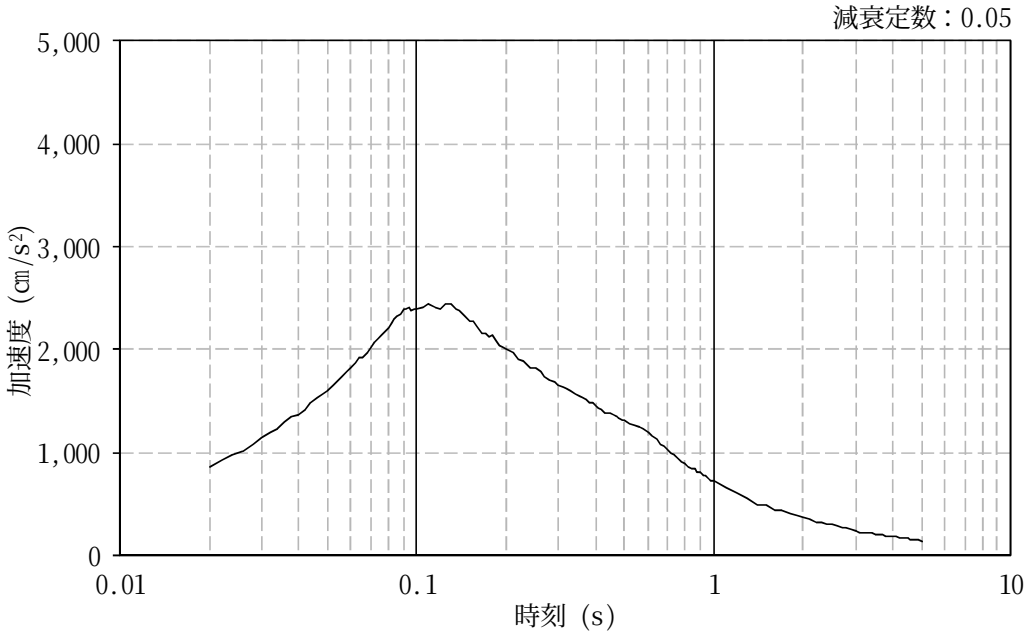
原子炉建屋の耐震安全性評価に用いる地震動は解放基盤表面で定義された基準地震動S_Sとする。基準地震動S_Sの一覧を第 5-1 表に示し，加速度波形及び加速度応答スペクトルを第 5-1 図～第 5-8 図に示す。

第 5-1 表　基準地震動Ｓ$_S$の一覧

No.	名　称	継続時間 (s)	方　向	加速度最大値 (cm／s^2)
1	Ｓ$_S$－Ｄ１	139.28	水平	870
			鉛直	560
2	Ｓ$_S$－１１	194.03	ＮＳ	717
			ＥＷ	619
			ＵＤ	579
3	Ｓ$_S$－１２	173.18	ＮＳ	871
			ＥＷ	626
			ＵＤ	602
4	Ｓ$_S$－１３	179.22	ＮＳ	903
			ＥＷ	617
			ＵＤ	599
5	Ｓ$_S$－１４	174.46	ＮＳ	586
			ＥＷ	482
			ＵＤ	451
6	Ｓ$_S$－２１	287.83	ＮＳ	901
			ＥＷ	887
			ＵＤ	620
7	Ｓ$_S$－２２	287.59	ＮＳ	1,009
			ＥＷ	874
			ＵＤ	736
8	Ｓ$_S$－３１	20.00	水平	610
			鉛直	280

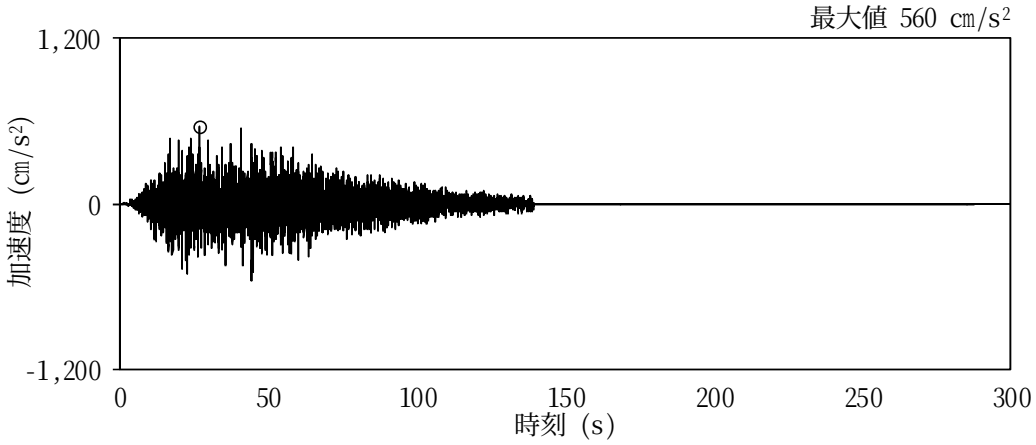
注：いずれも時間刻みは 0.01 s

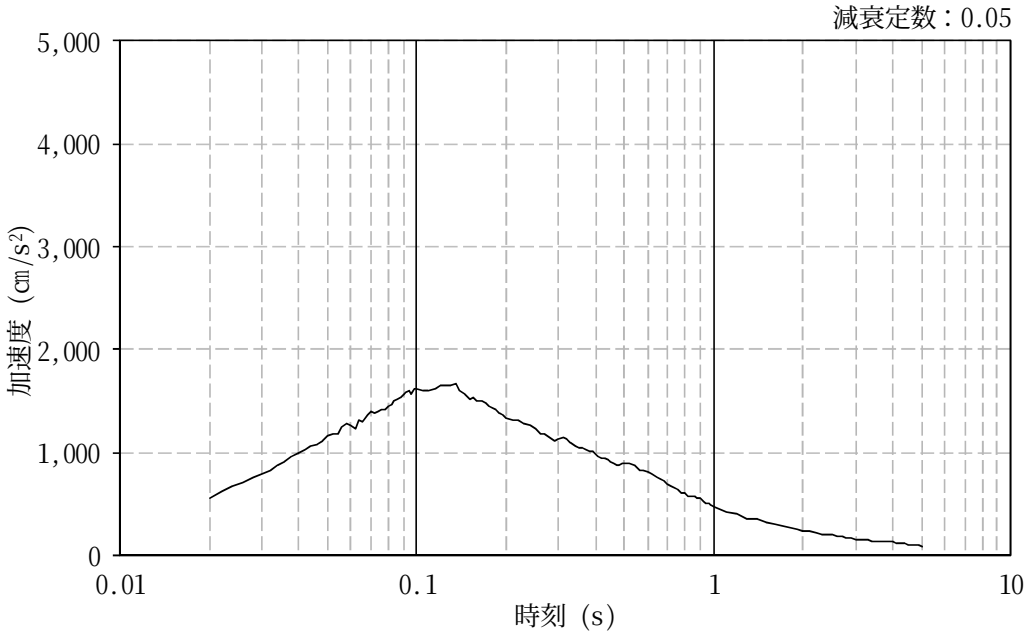




(a)　水平方向

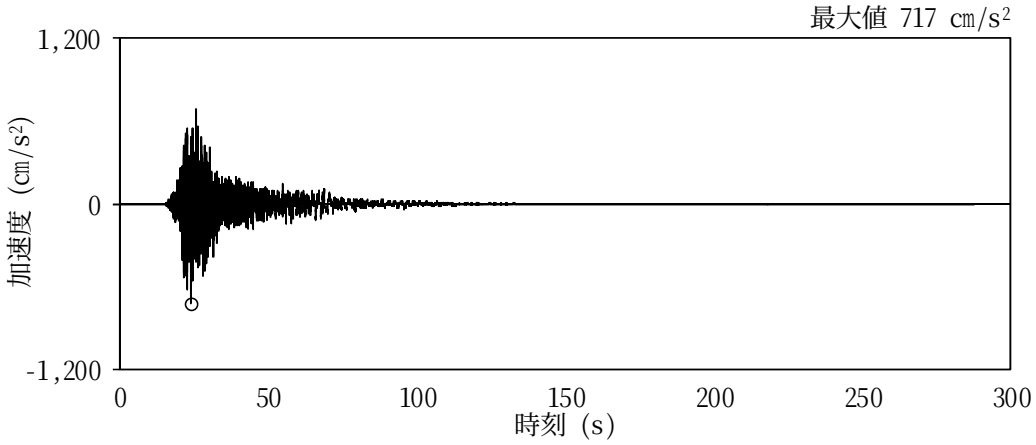
第 5-1 図（1／2）　加速度波形及び加速度応答スペクトル（S_S－Ｄ１）

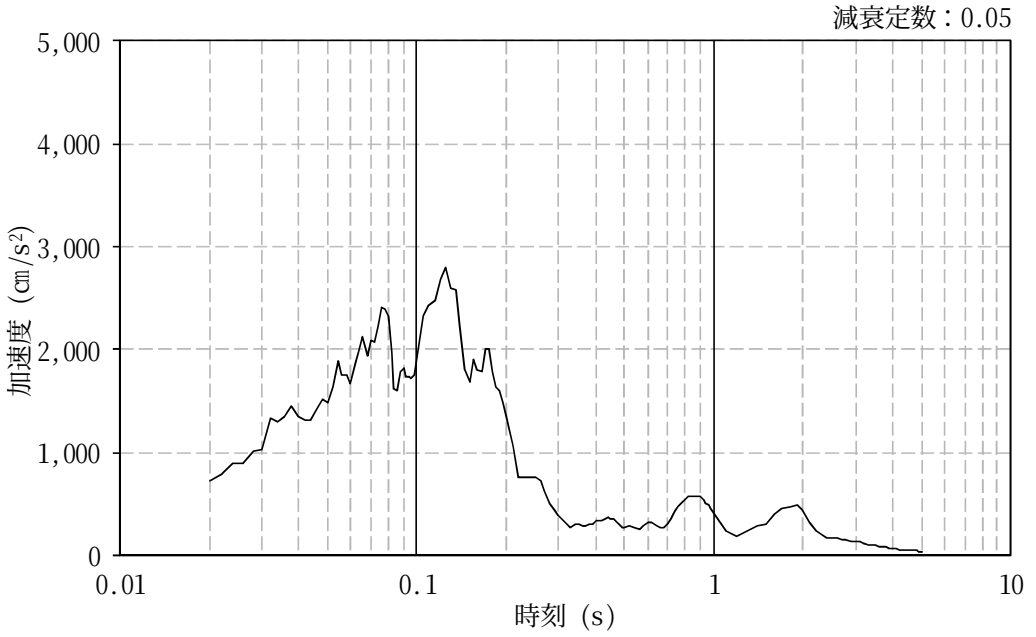




(b)　鉛直方向

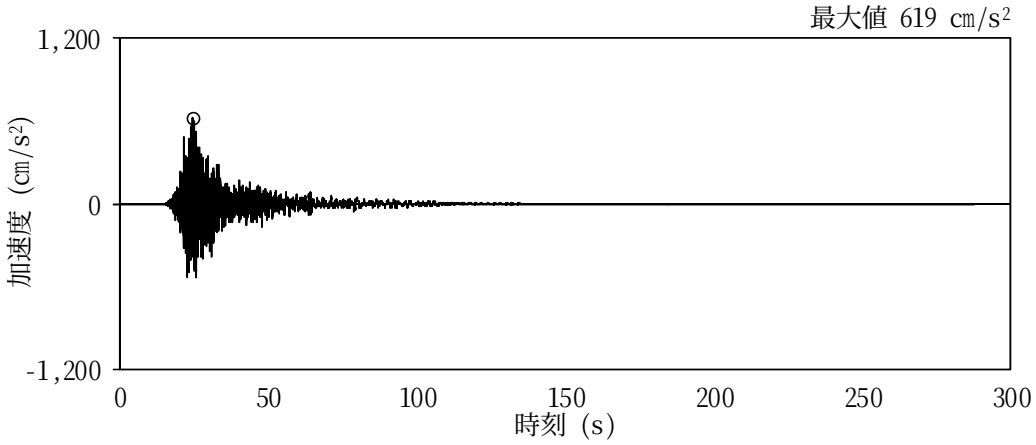
第 5-1 図（2／2）　加速度波形及び加速度応答スペクトル（S_S－Ｄ１）

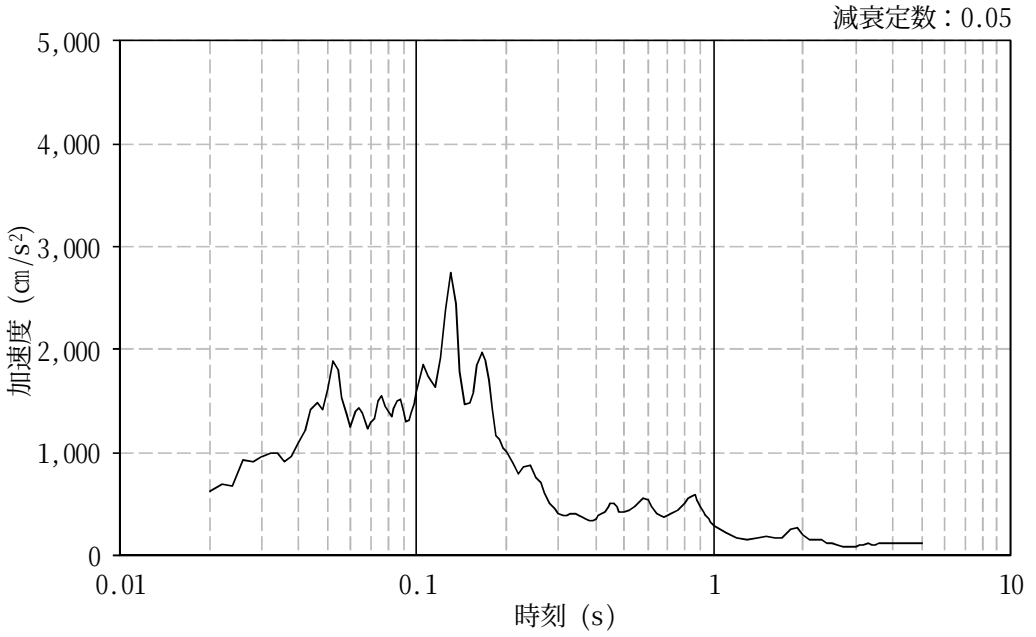




(a)　ＮＳ方向

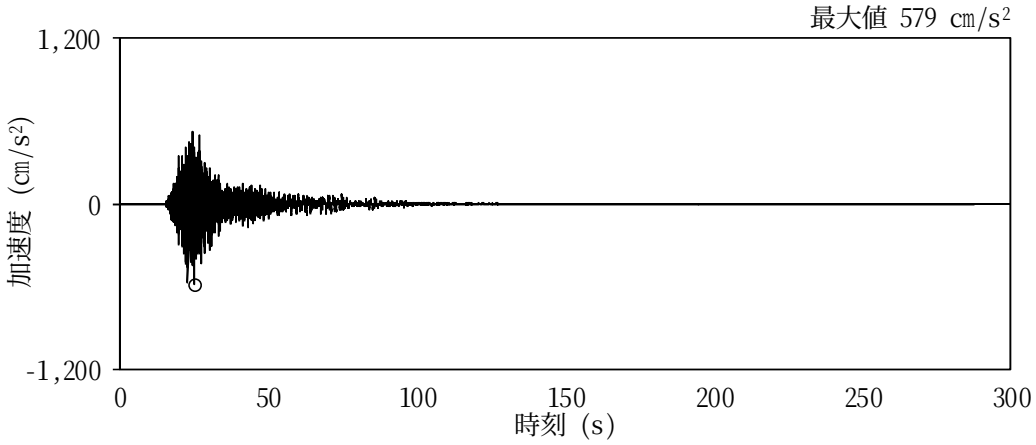
第 5-2 図（1／3）　加速度波形及び加速度応答スペクトル（S_S－１１）

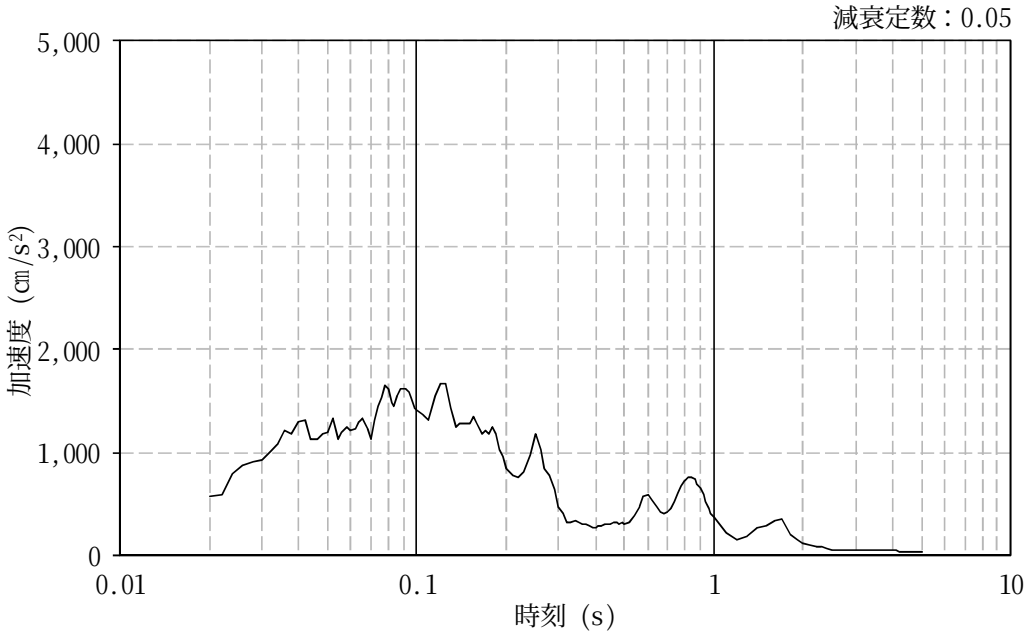




(b)　ＥＷ方向

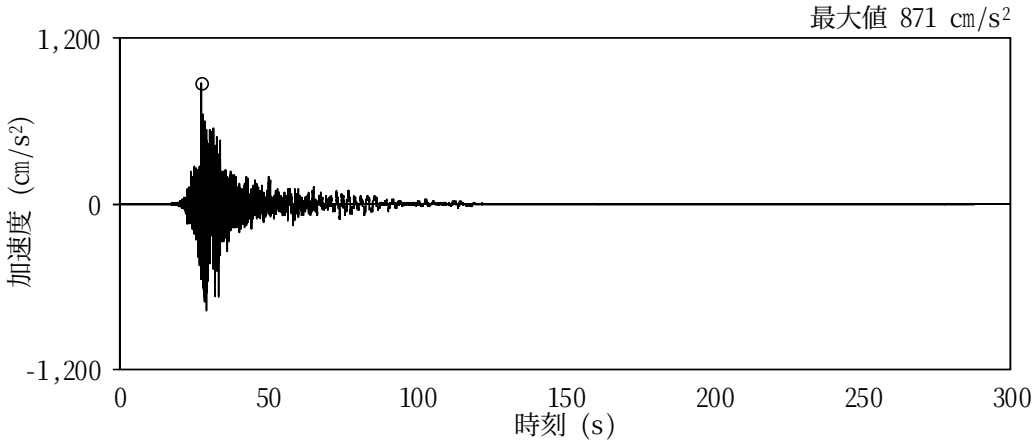
第 5-2 図（2／3）　加速度波形及び加速度応答スペクトル（Ｓ$_S$－１１）

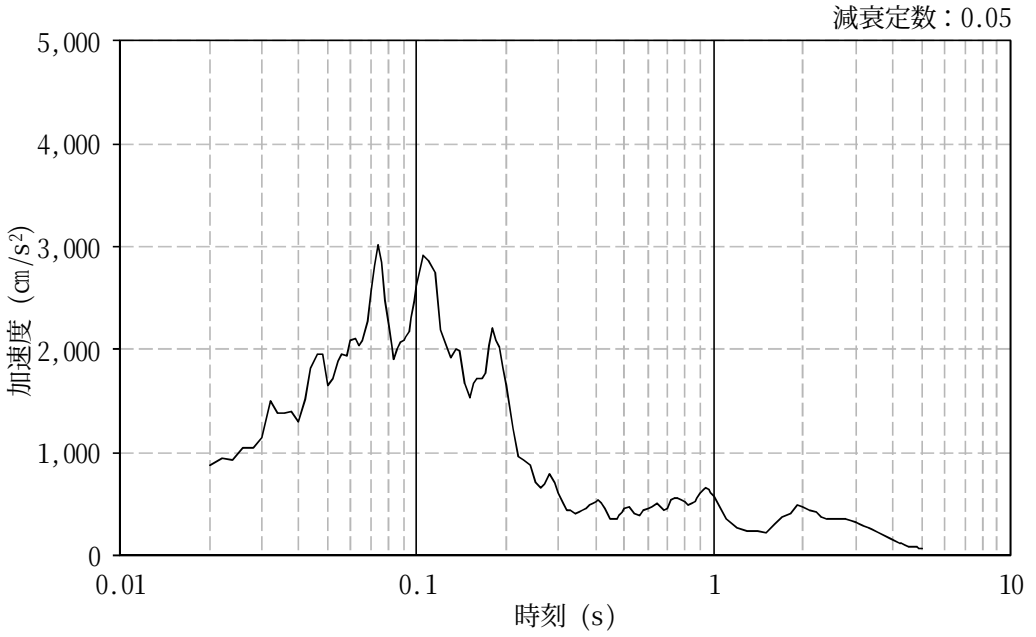




(c)　ＵＤ方向

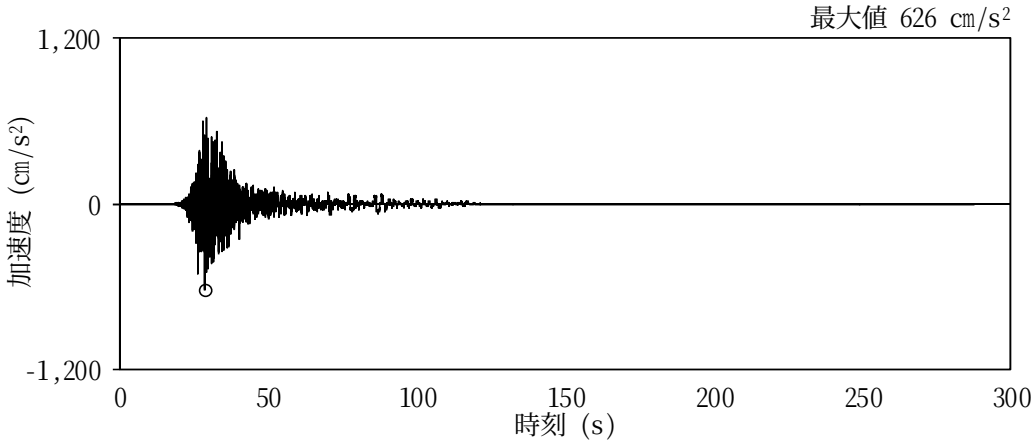
第 5-2 図（3／3）　加速度波形及び加速度応答スペクトル（S_S－１１）

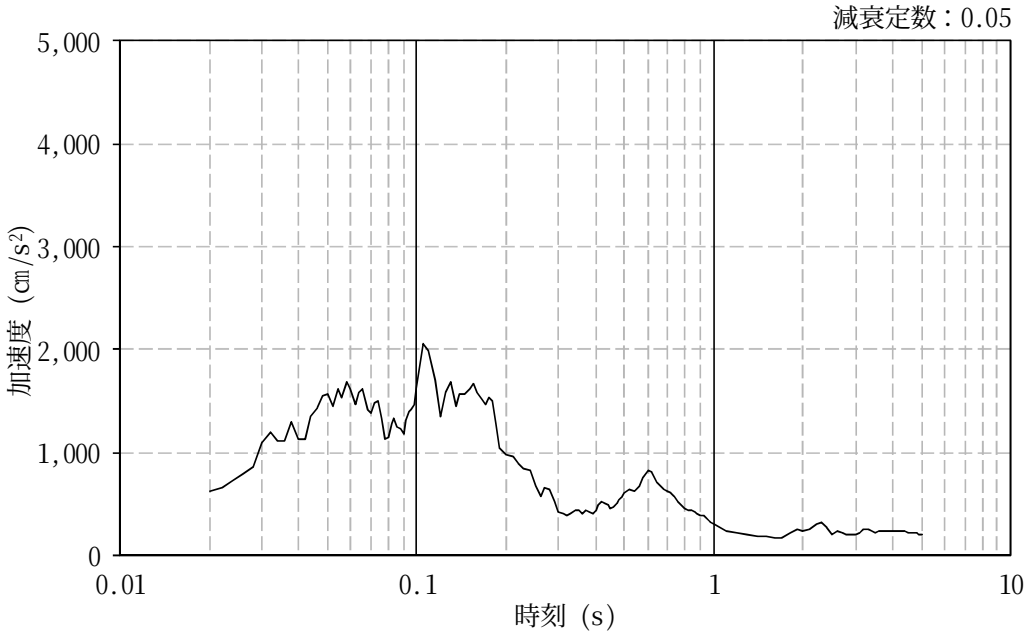




(a)　ＮＳ方向

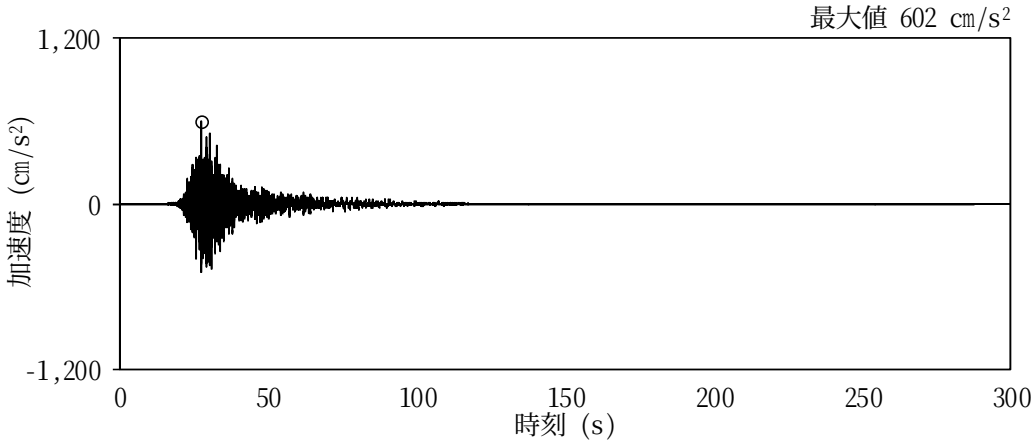
第 5-3 図（1／3）　加速度波形及び加速度応答スペクトル（S_S－１２）

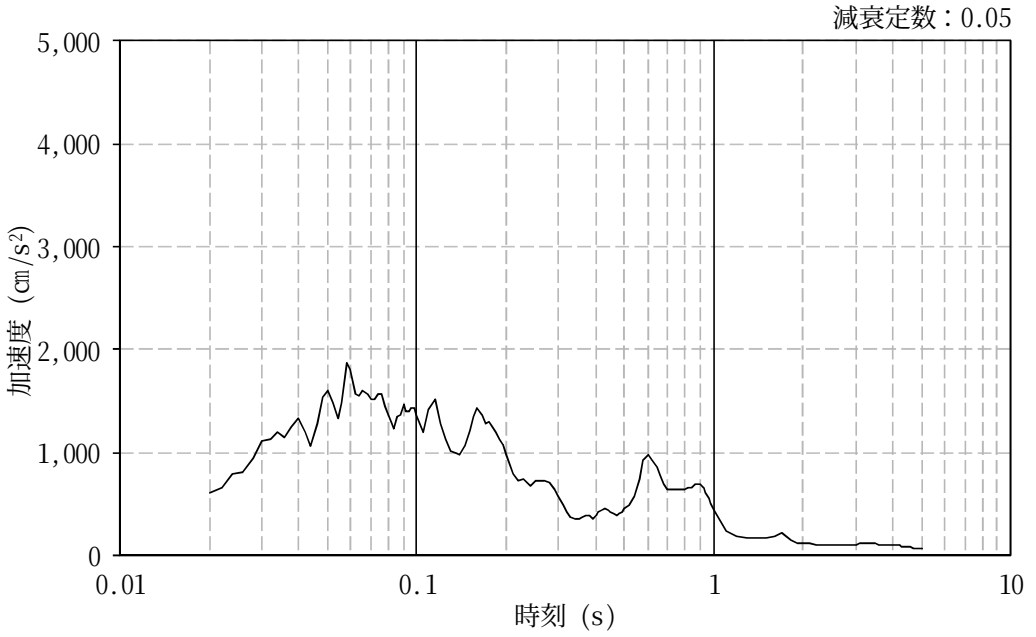




(b)　ＥＷ方向

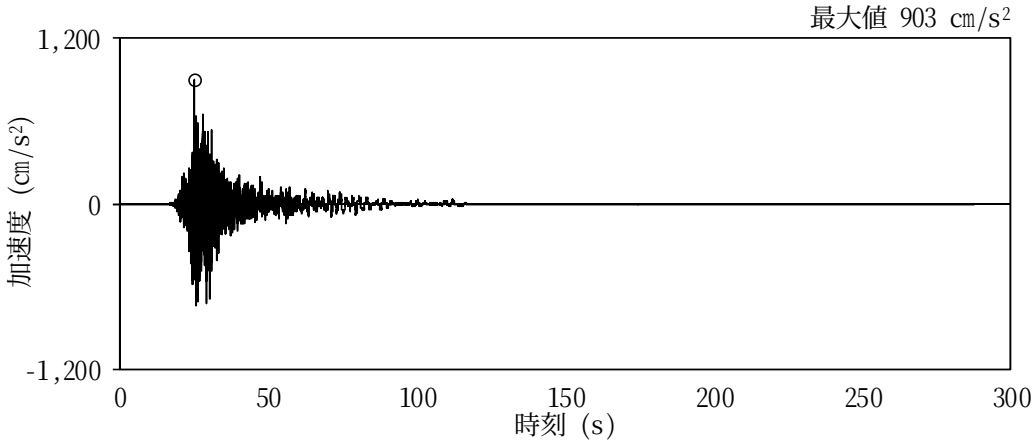
第 5-3 図（2／3）　加速度波形及び加速度応答スペクトル（Ｓ$_S$－１２）

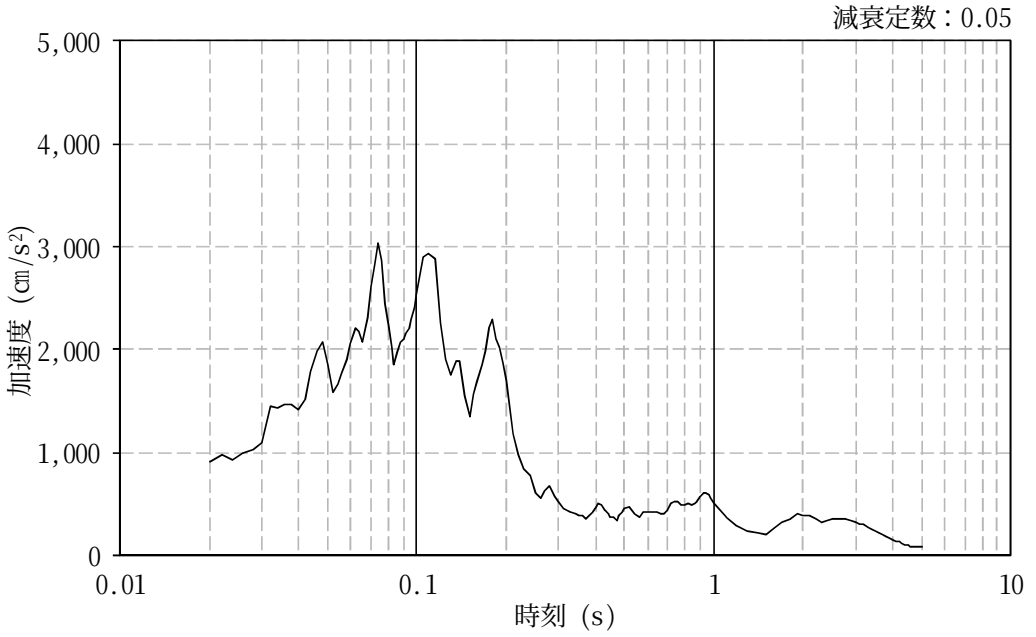




(c)　ＵＤ方向

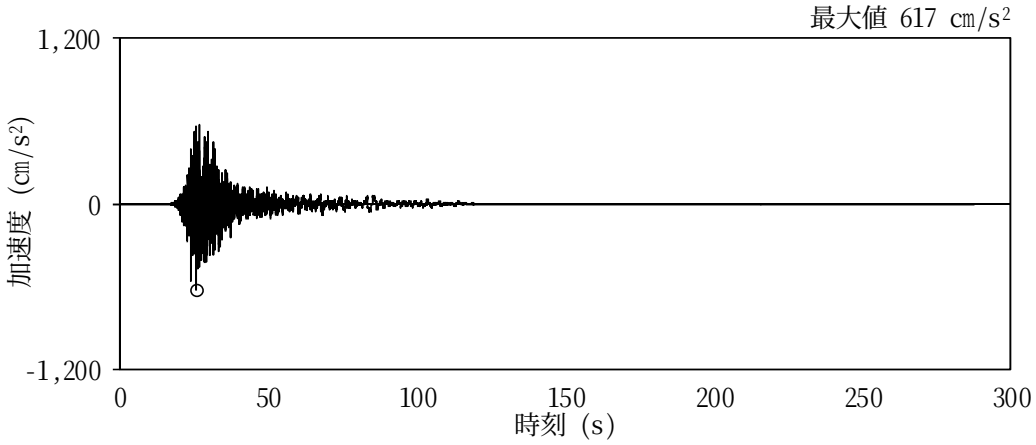
第 5-3 図（3／3）　加速度波形及び加速度応答スペクトル（Ｓ$_S$－１２）

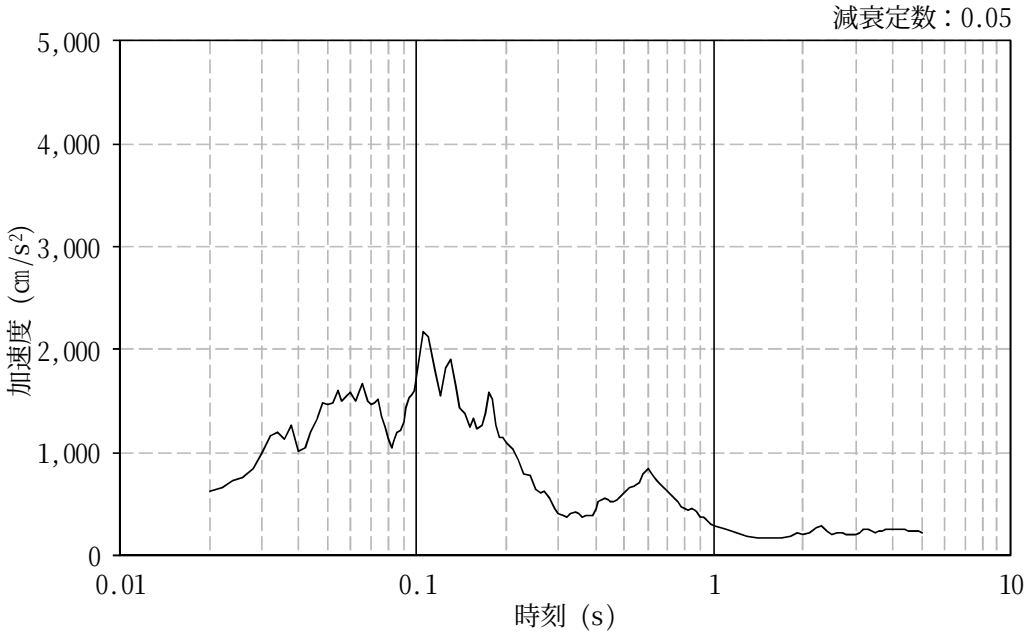




(a)　ＮＳ方向

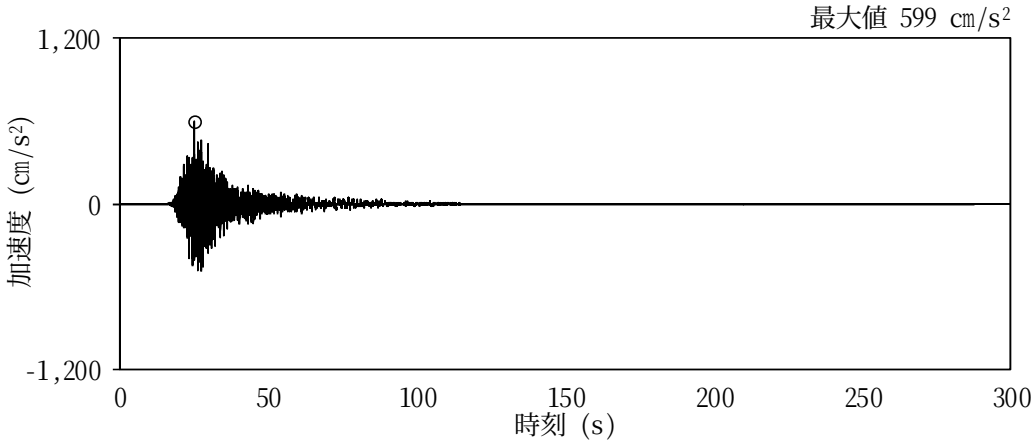
第 5-4 図（1／3）　加速度波形及び加速度応答スペクトル（S_S－１３）

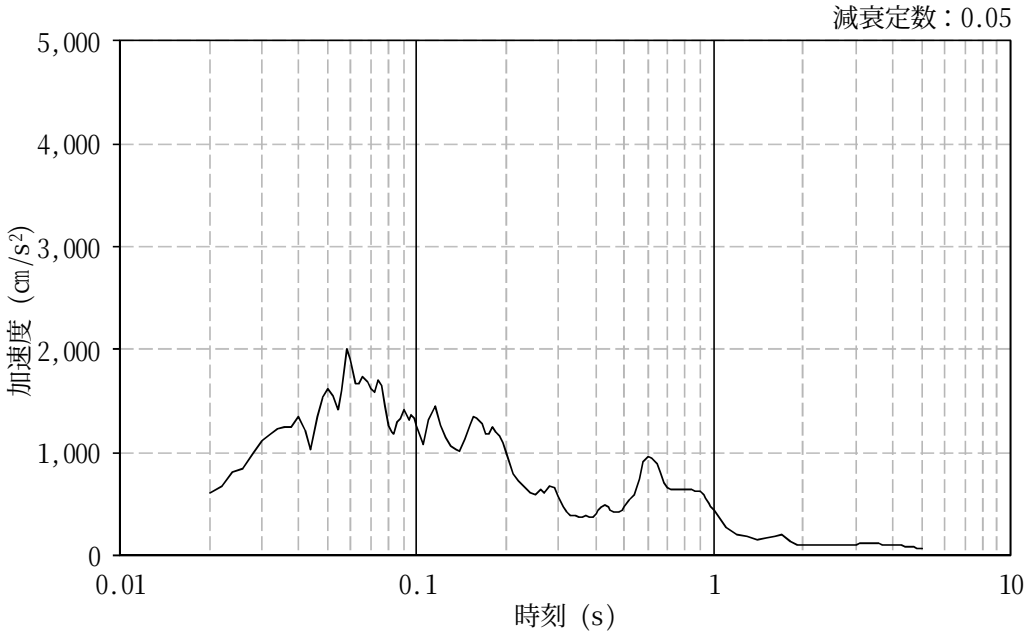




(b)　ＥＷ方向

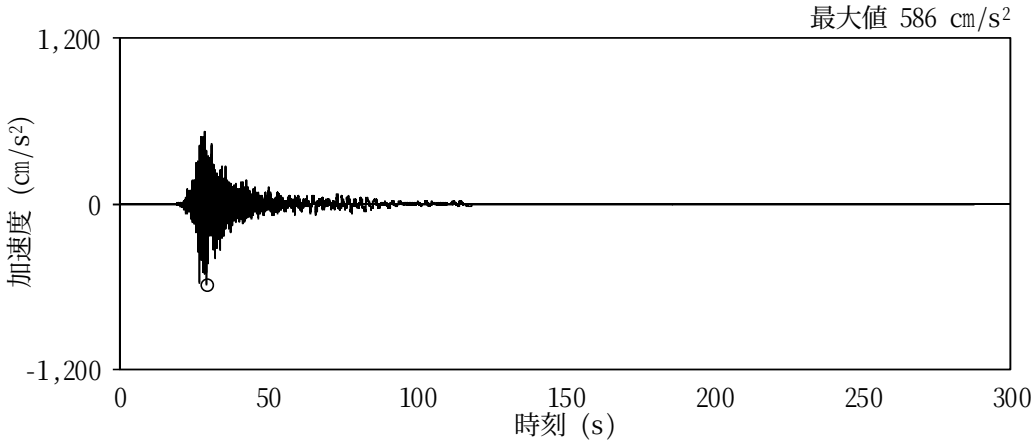
第 5-4 図（2／3）　加速度波形及び加速度応答スペクトル（S_S－１３）

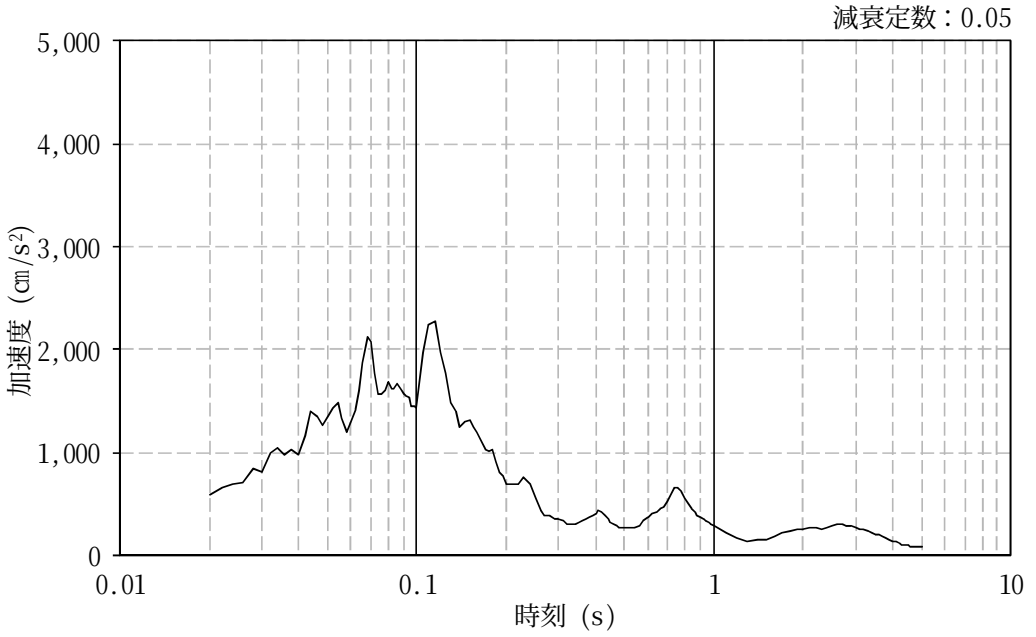




(c)　ＵＤ方向

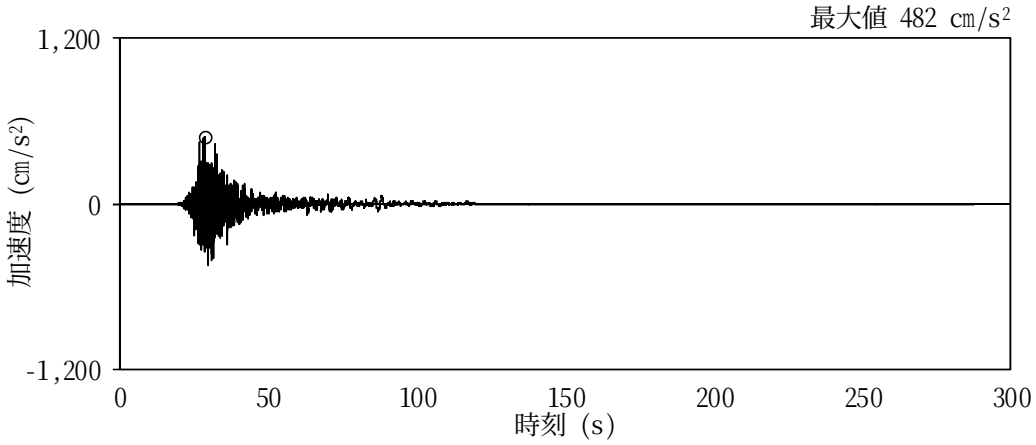
第 5-4 図（3／3）　加速度波形及び加速度応答スペクトル（S_S－１３）

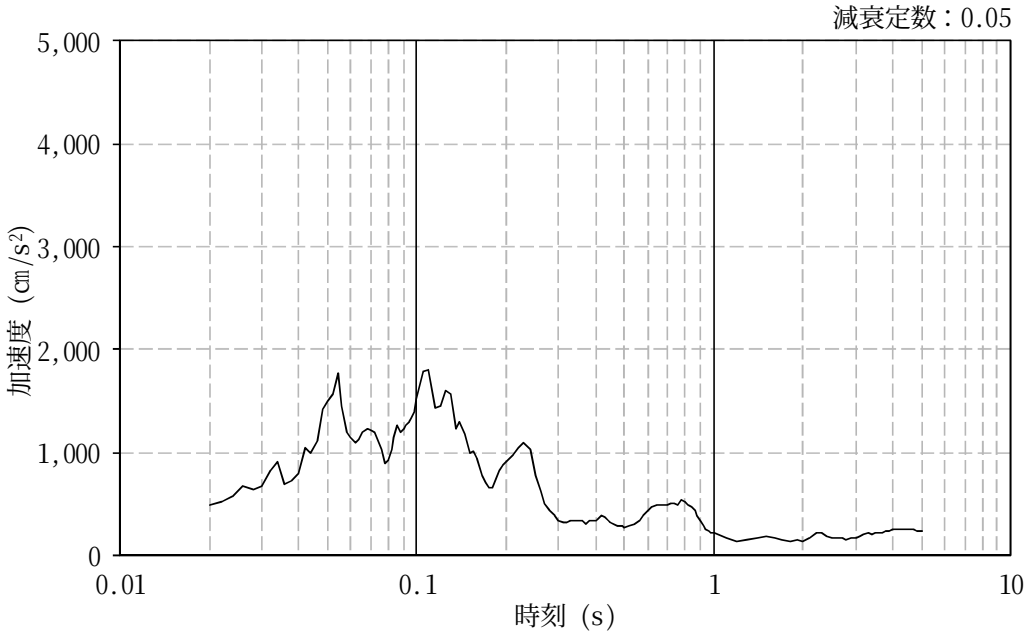




(a)　ＮＳ方向

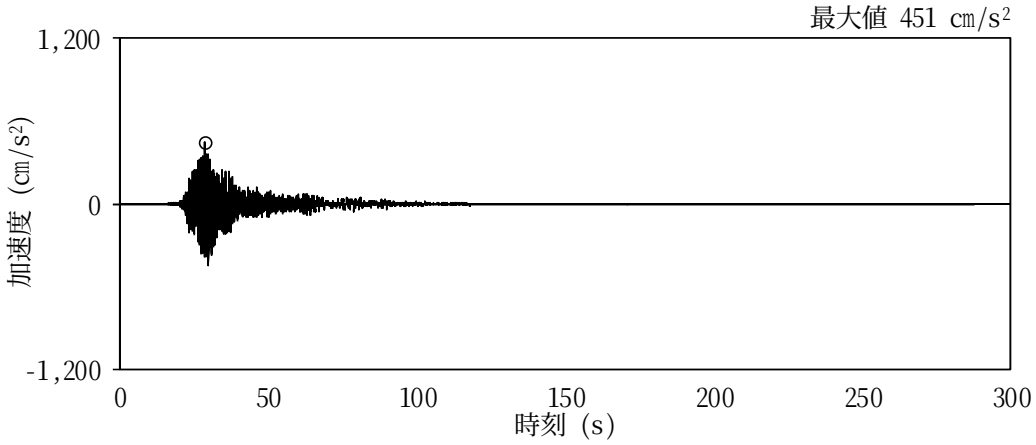
第 5-5 図（1／3）　加速度波形及び加速度応答スペクトル（S_S－１４）

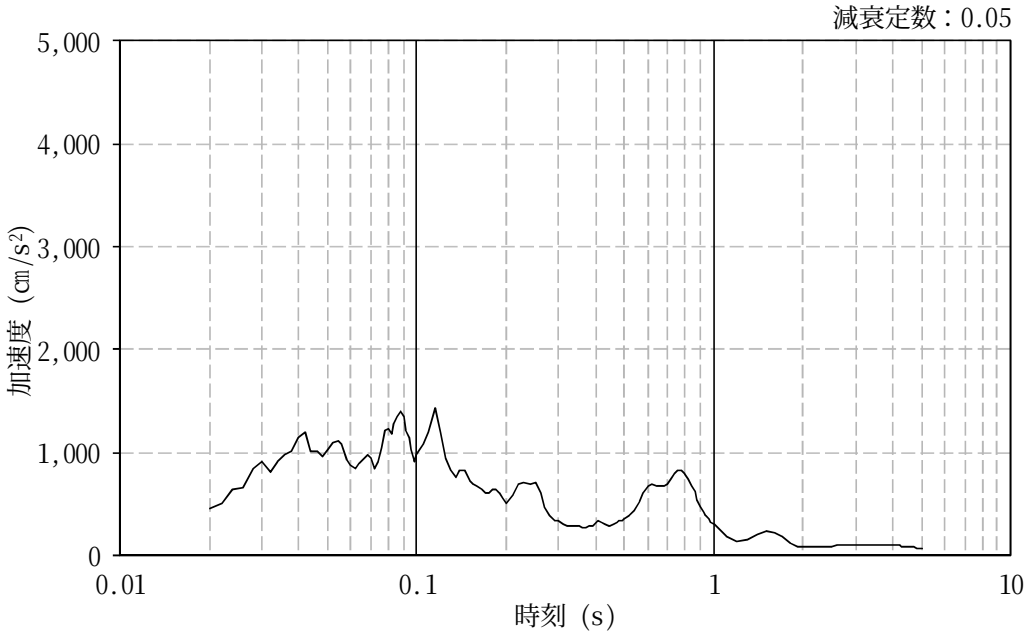




(b)　ＥＷ方向

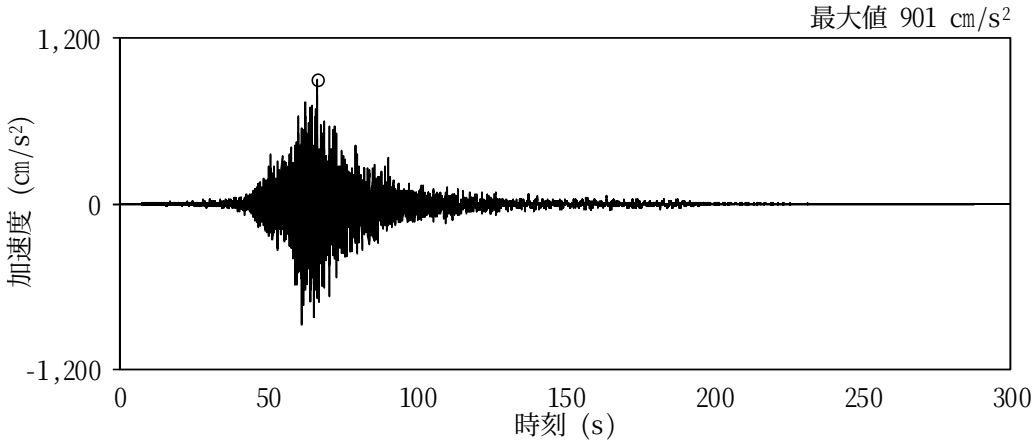
第 5-5 図（2／3）　加速度波形及び加速度応答スペクトル（S_S－１４）

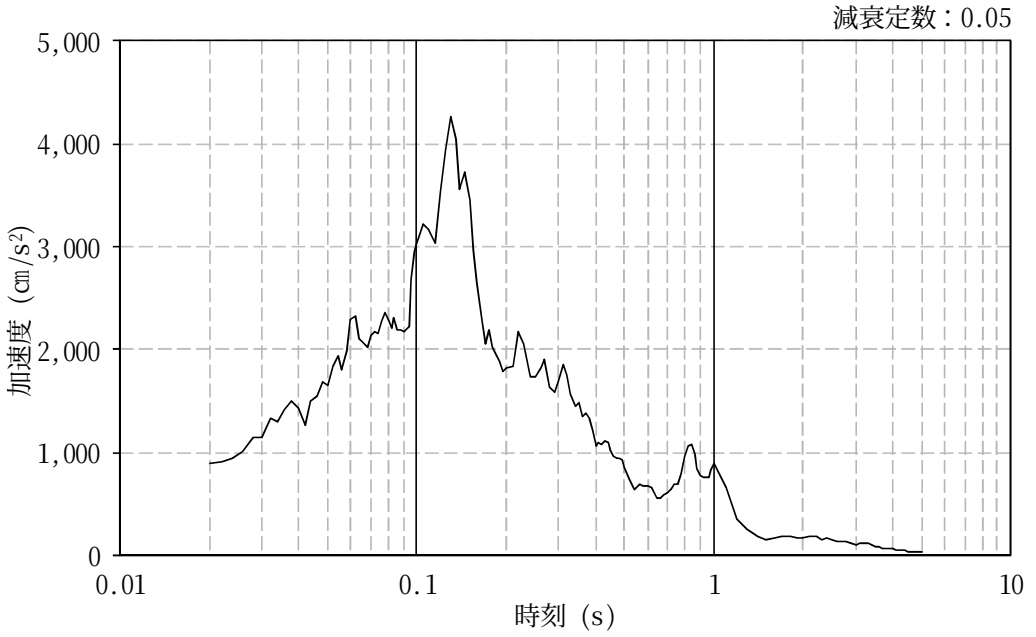




(c)　ＵＤ方向

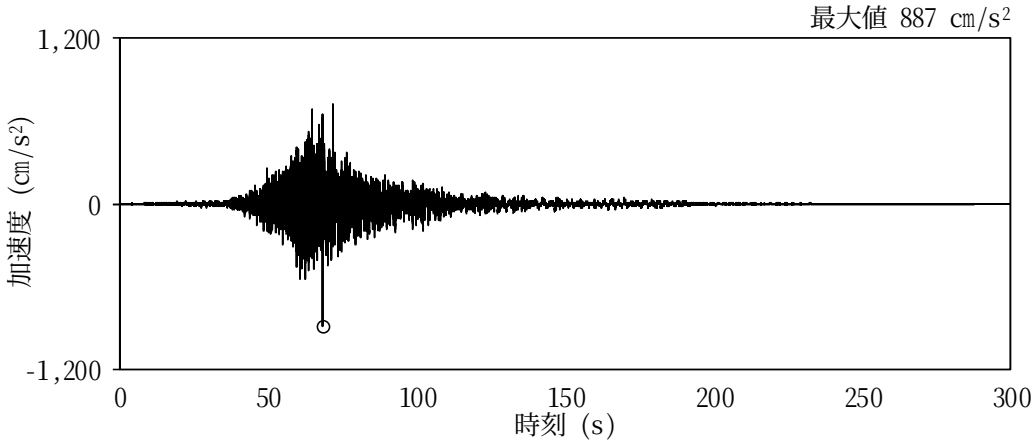
第 5-5 図（3／3）　加速度波形及び加速度応答スペクトル（Ｓ$_S$－１４）

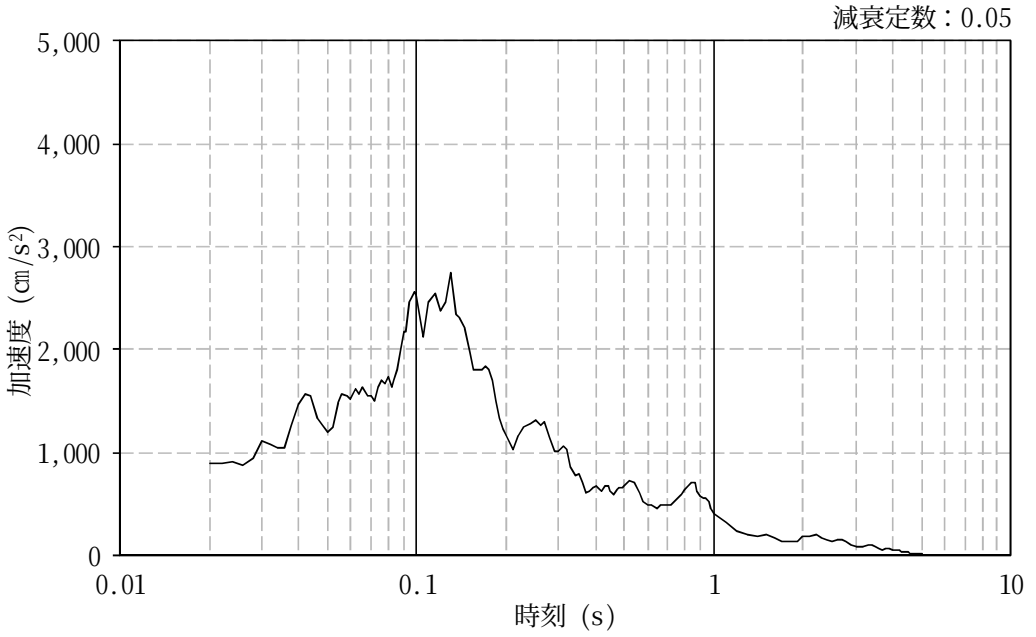




(a)　ＮＳ方向

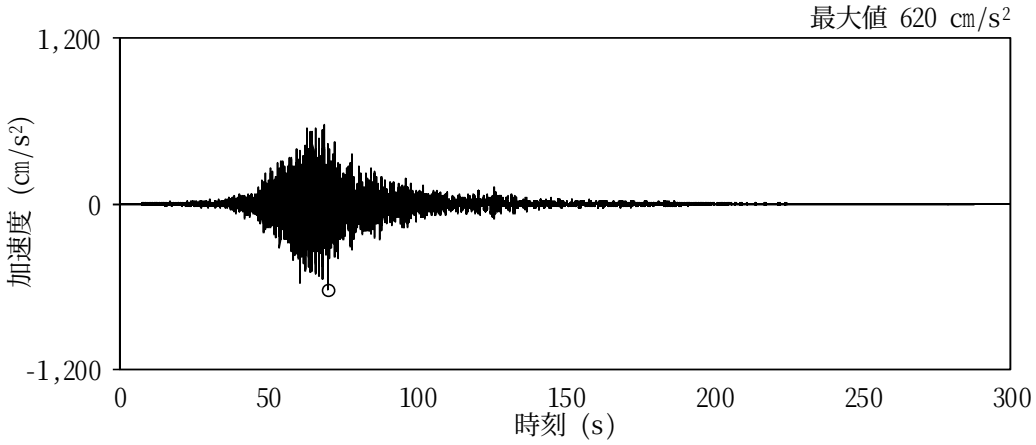
第 5-6 図（1／3）　加速度波形及び加速度応答スペクトル（S_S－２１）

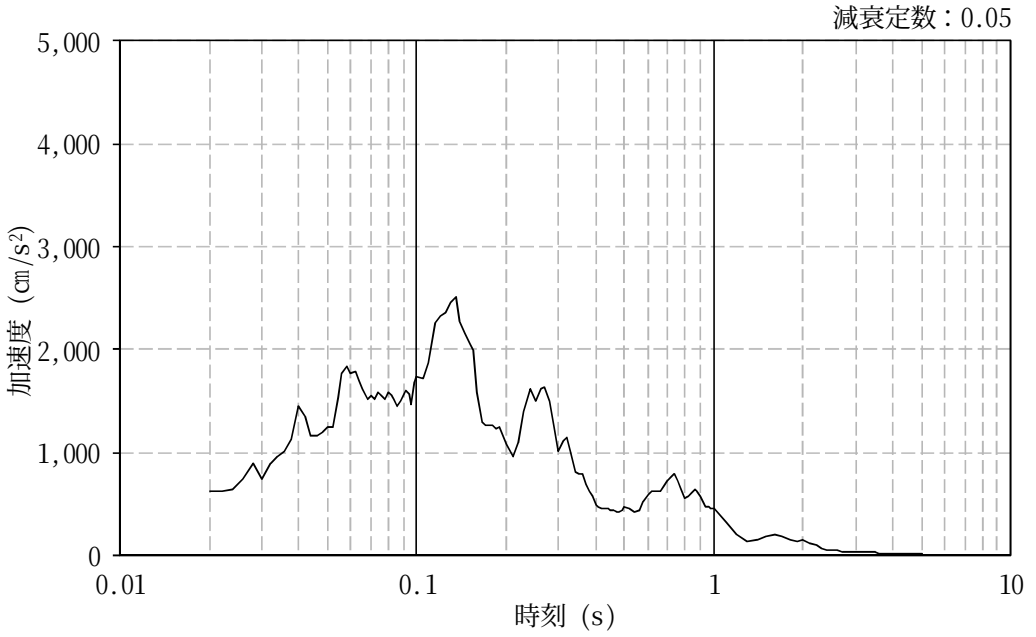




(b)　ＥＷ方向

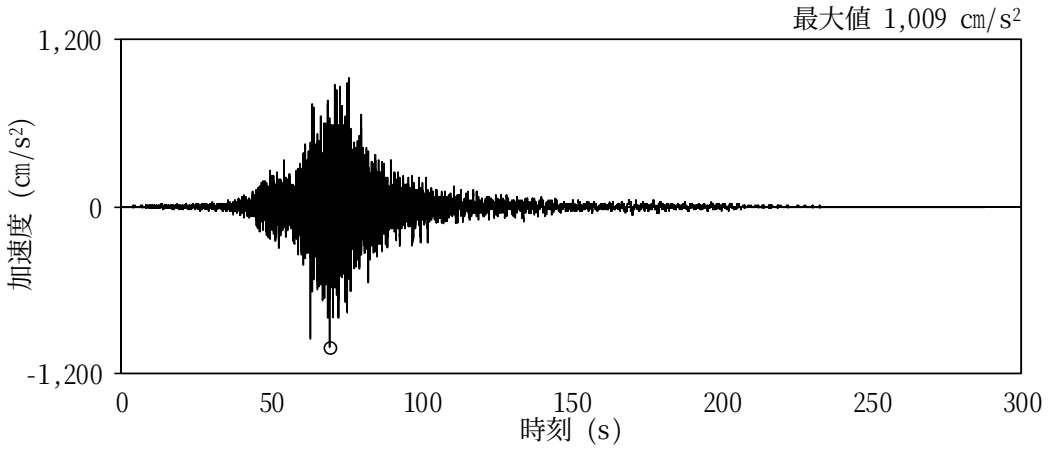
第 5-6 図（2／3）　加速度波形及び加速度応答スペクトル（Ｓ$_S$－２１）

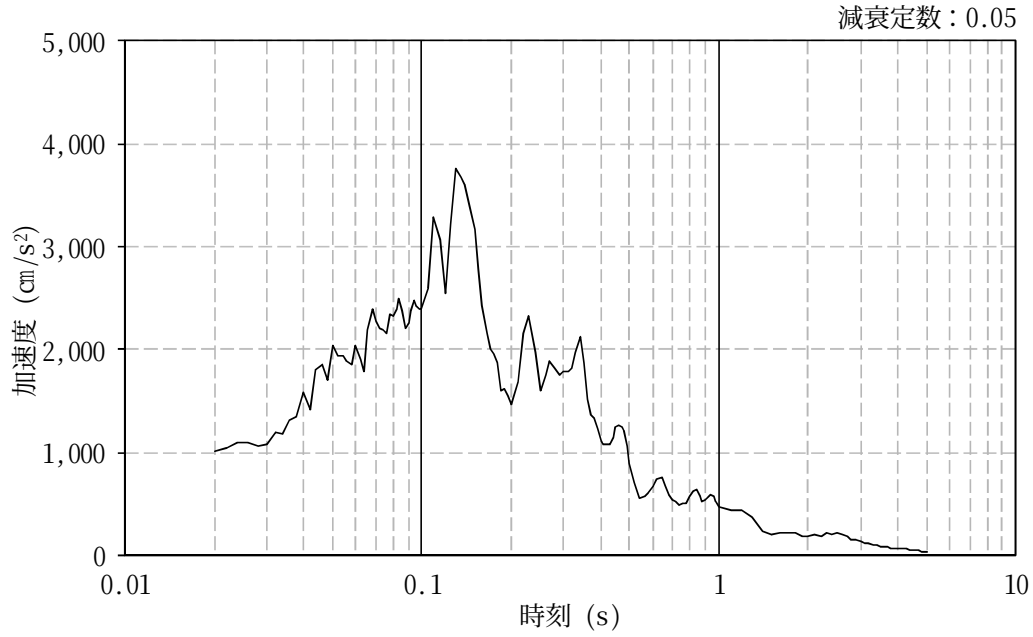




(c)　ＵＤ方向

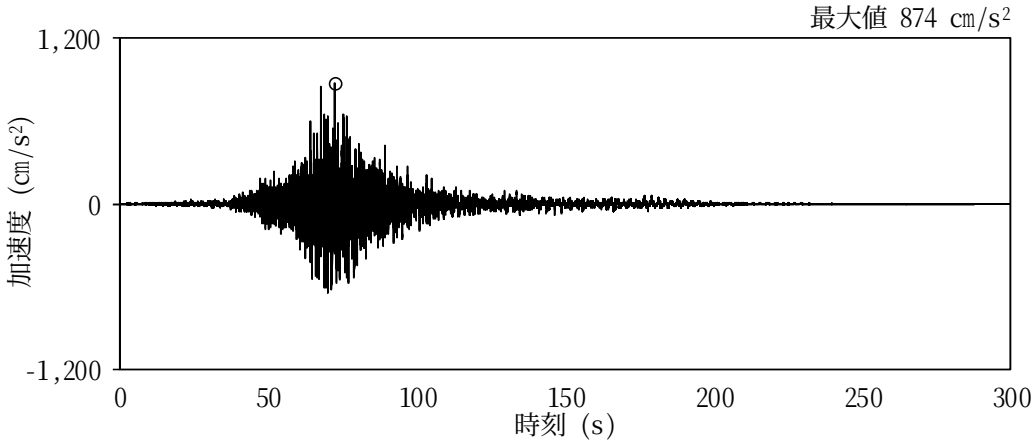
第 5-6 図（3／3）　加速度波形及び加速度応答スペクトル（Ｓ$_S$－２１）

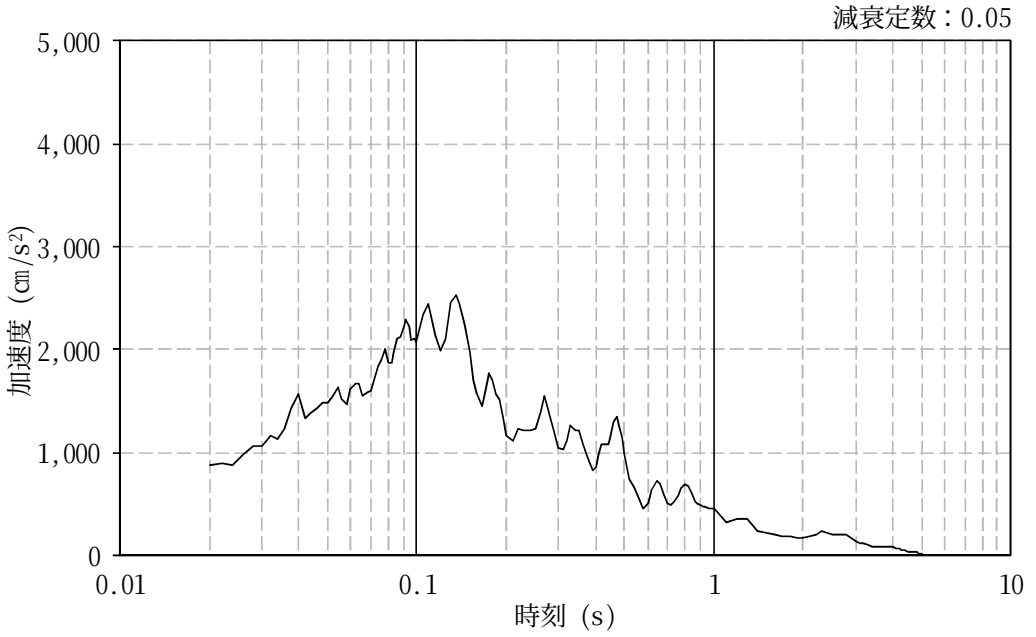




(a)　ＮＳ方向

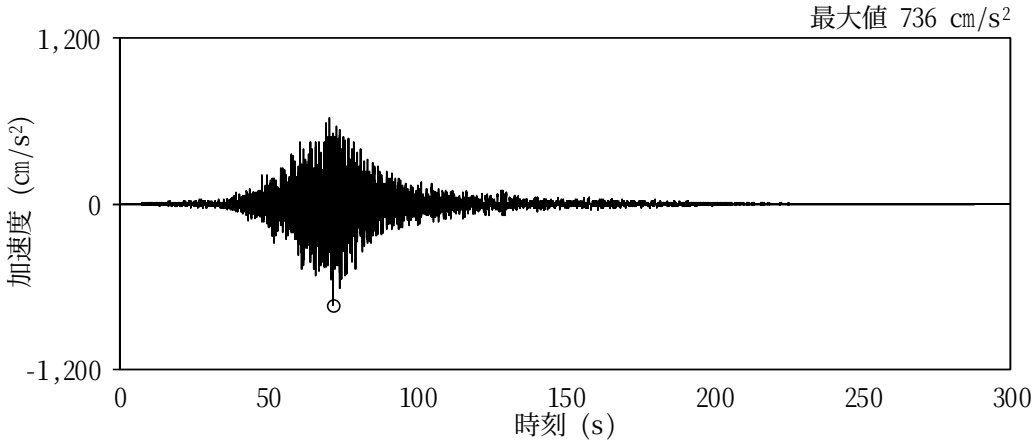
第 5-7 図（1／3）　加速度波形及び加速度応答スペクトル（Ｓ$_S$－２２）

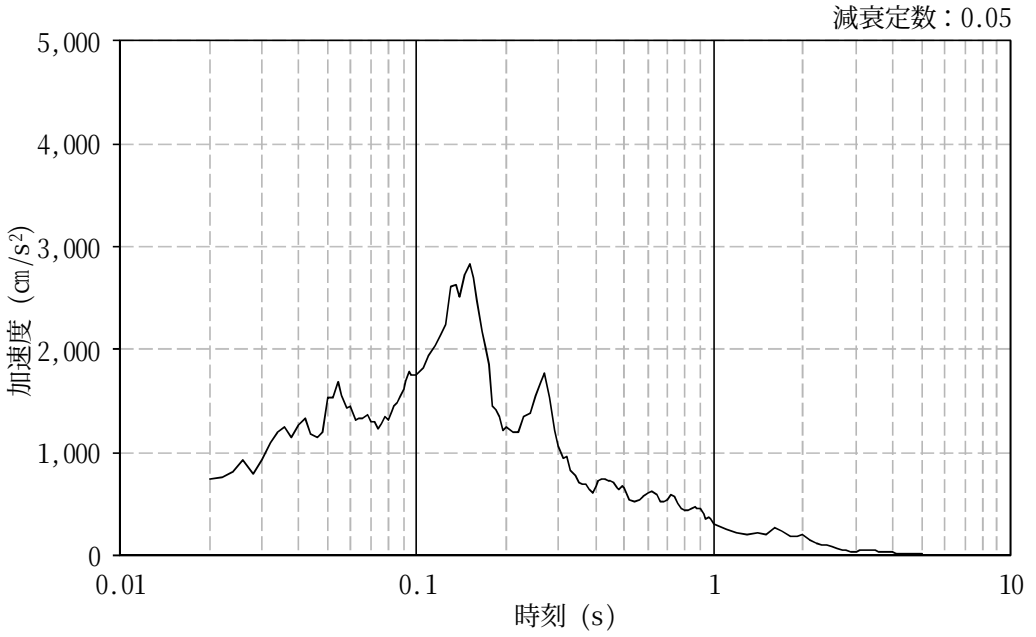




(b)　ＥＷ方向

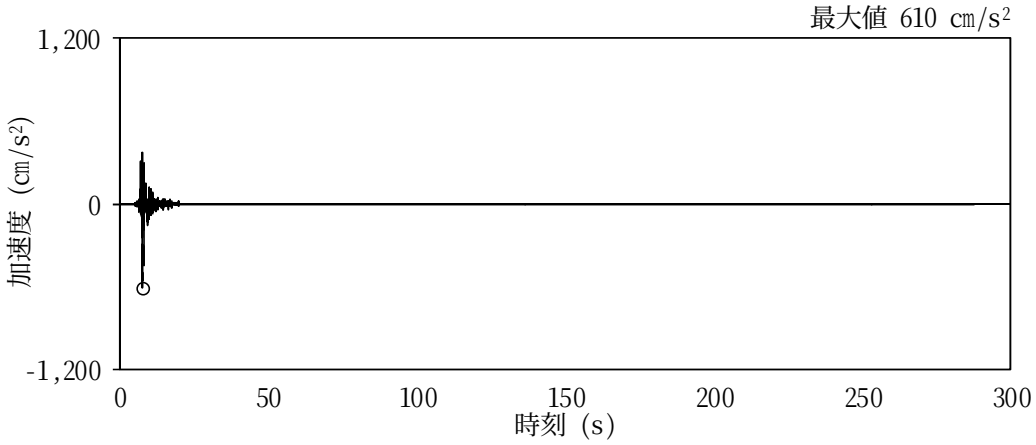
第 5-7 図（2／3）　加速度波形及び加速度応答スペクトル（Ｓ$_S$－２２）

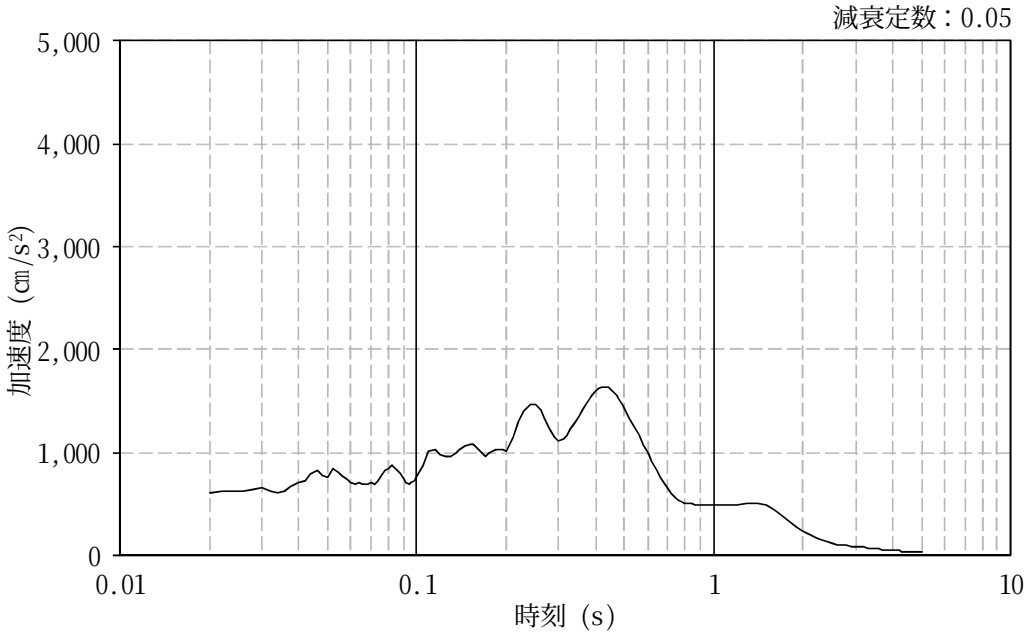




(c)　ＵＤ方向

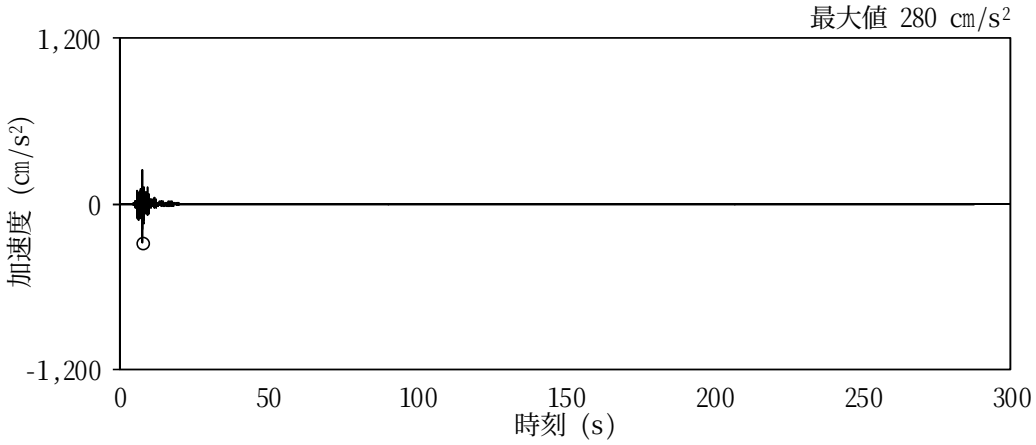
第 5-7 図（3／3）　加速度波形及び加速度応答スペクトル（Ｓ$_S$－２２）

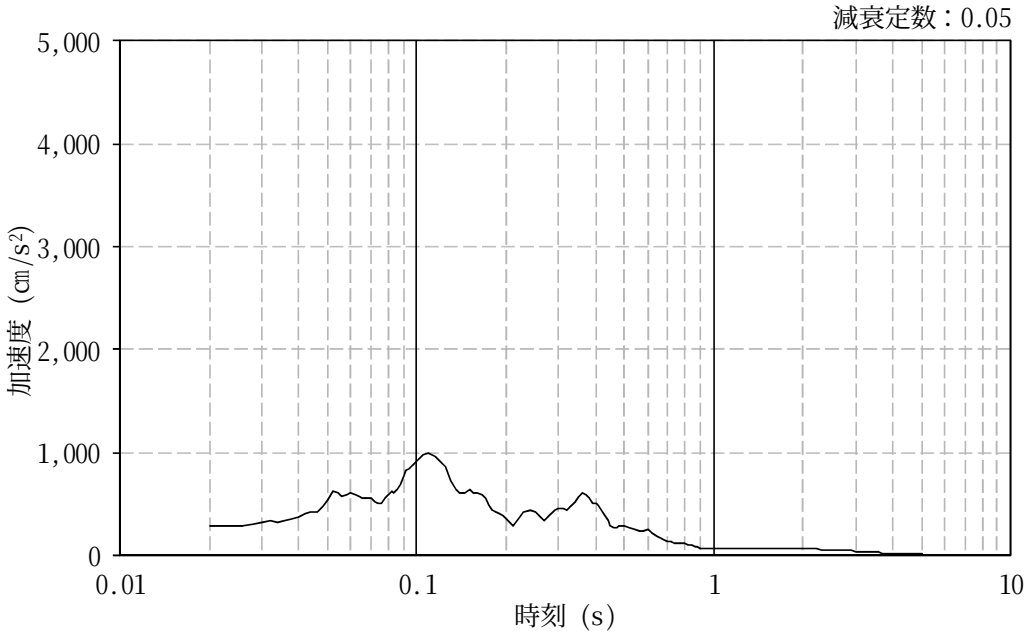




(a)　水平方向

第 5-8 図（1／2）　加速度波形及び加速度応答スペクトル（S_S－３１）





(b)　鉛直方向

第 5-8 図（2／2）　加速度波形及び加速度応答スペクトル（S_S－３１）

5.3　地盤応答解析による入力地震動の算定

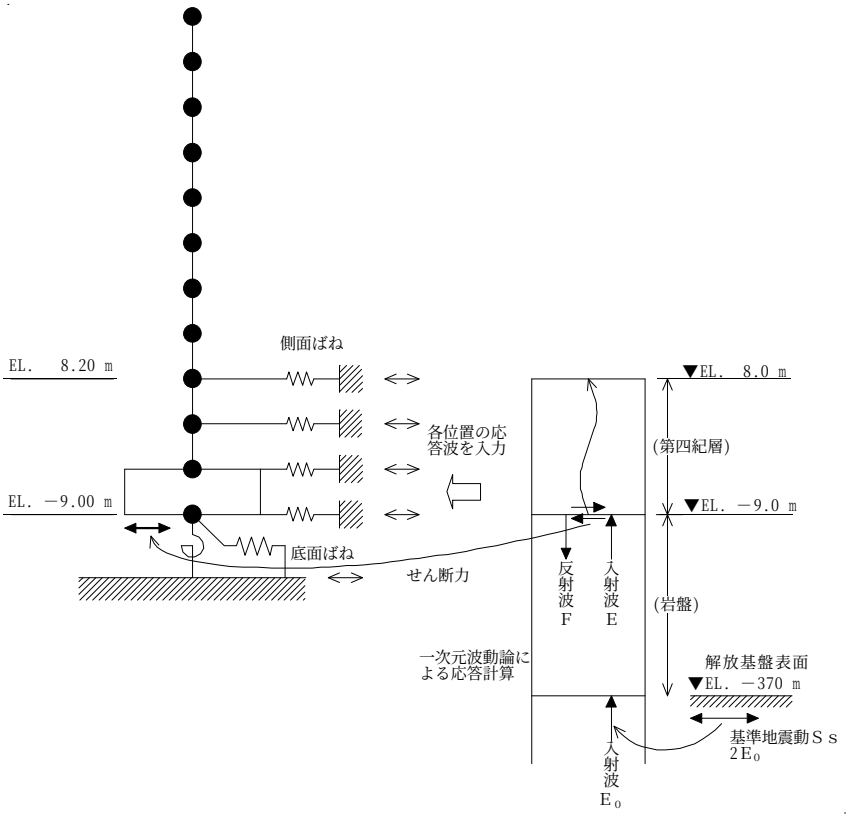
水平方向及び鉛直方向の解析概要を第 5-9 図及び第 5-10 図に示す。

水平方向の入力地震動は，解放基盤表面（EL.－370m，Vs　700 m／s）で定義される基準地震動S_s（$2E_0$）を用いて，一次元波動論により算定した基礎版下端及び側面地盤ばね位置での応答波（Ｅ＋Ｆ）とする。

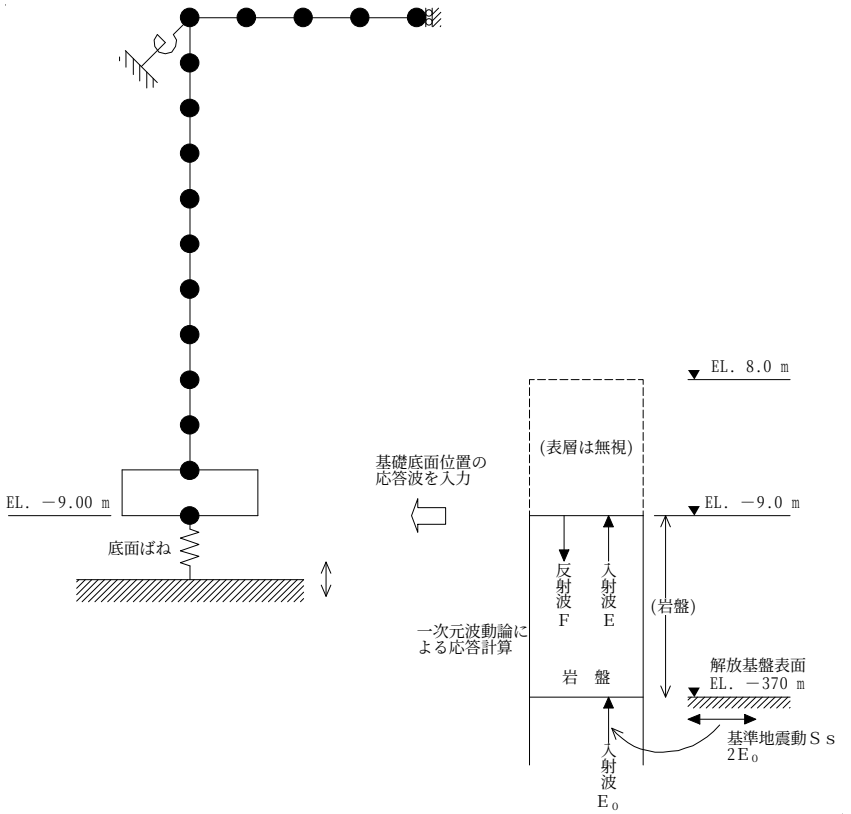
算定に用いる地盤モデルは，当該敷地の地層等を考慮して設定された水平成層地盤とし，等価線形化法により地盤の非線形を考慮した物性値を用いる。

鉛直方向の入力地震動は，解放基盤表面（EL.－370m，Vs　700 m／s）で定義される基準地震動S_s（$2E_0$）を用いて，一次元波動論により算定した基礎版下端位置での応答波（2Ｅ）とする。

算定に用いる地盤モデルには，水平方向の入力地震動算定に用いた地盤モデルの等価せん断波速度と体積弾性係数より求めた疎密波速度を用い，基礎版下端位置より上部を剥ぎ取った地盤モデルを用いる。



第 5-9 図　水平方向解析概要



第 5-10 図　鉛直方向解析概要

5.4　地震応答解析モデル

水平方向の地震応答解析に用いる建屋解析モデル及びその振動諸元を第5-2表に示す。また，鉛直方向地震応答解析に用いる建屋解析モデル及びその振動諸元を第5-3表に示す。

水平方向の地震応答解析モデルは，耐震壁を曲げせん断要素でモデル化し，建屋－地盤の相互作用を考慮するため基礎版下端に水平及び回転地盤ばねを設けている。また，建屋埋め込み部分にも側面地盤ばねを設け，地盤への埋め込み効果を考慮している。基礎版下端の底面地盤ばねは，振動アドミッタンス理論に基づき求め，建屋埋め込み部の側面地盤ばねは，ＮＯＶＡＫの方法により算定している。これら振動数依存の複素ばねを「ＪＥＡＧ4601-1991追補版」に基づき近似したものを解析に用いており，底面地盤ばねの剛性は静的理論解を用いて振動数に対して一定値とし，底面地盤ばねの減衰は円振動数ωの一次式の形で示し，地盤－建屋連成系の一次固有円振動数ω_1で虚部の値と一致するように設定している。側面地盤ばねの剛性については理論解の極大値を用いて振動数に対して一定値とし，側面地盤ばねの減衰は底面地盤ばねと同様に近似設定している。地盤ばねの近似法を第5-11図に示す。

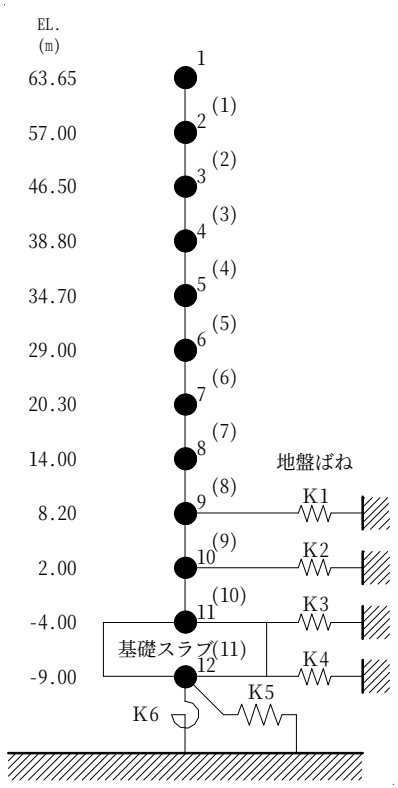
鉛直方向の地震応答解析モデルは，耐震壁の軸剛性を考慮した質点系モデルとし，建屋－地盤の相互作用を考慮するため，基礎版下端に鉛直地盤ばねを設けている。

建屋の減衰定数は，鉄筋コンクリート部を5%，鉄骨部を2%とし，モード減衰として与えている。各次のモ-ド減衰定数は，建屋各部のひずみエネルギに比例した値として算定している。

地震波ごとの地盤ばね算定結果は，第5-4表～第5-11表に示す通りである。

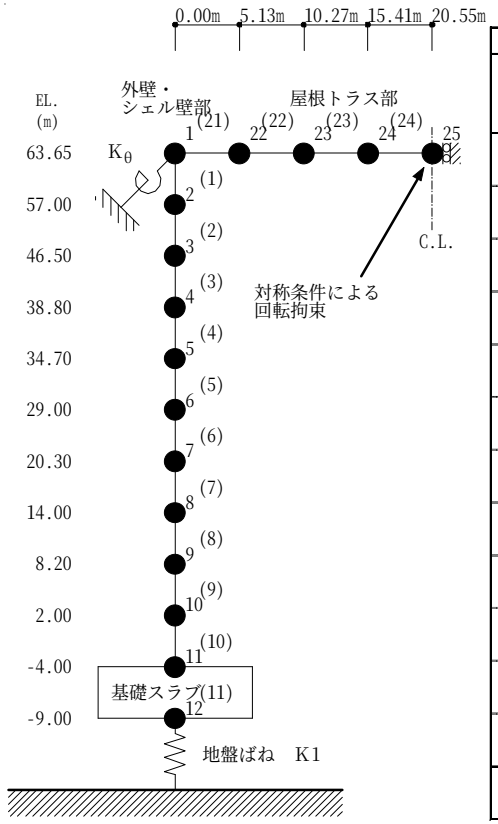
建物の非線形性については，耐震壁について設定しており，「ＪＥＡＧ4601-1991 追補版」に基づき，トリリニア形スケルトン曲線としている。また，せん断力の履歴特性は最大点指向型としている。曲げモーメントの履歴特性は第２折点までは最大点指向型，それ以上ではディグレイディングトリリニア型としている。復元力特性のスケルトン曲線を第 5-12 図に，履歴特性を第 5-13 図に示す。原子炉建屋について算定したせん断及び曲げスケルトン曲線の諸数値を第 5-12 表及び第 5-13 表に示す。

第 5-2 表　水平方向解析モデル及び振動諸元



高さ m _EL.	質点番号	質点重量 kN W	回転慣性重量 ×10^{5}kN・m^2 I_{gNS}	 I_{gEW}	要素番号	せん断断面積 m^2 A_{sNS}	 A_{sEW}	断面2次ﾓｰﾒﾝﾄ ×10^{3}m^4 I_{NS}	 I_{EW}
63.65	1	15,870	35.7	31.5					
57.00	2	16,160	51.2	44.7	(1)	27.3	25.5	20.4	18.4
46.50	3	67,320	120.3	104.7	(2)	27.3	25.5	20.4	18.4
38.80	4	97,130	161.6	99.8	(3)	212	154	64.4	34.7
34.70	5	83,270	113.0	68.7	(4)	133	141	45.0	37.3
29.00	6	122,370	348.8	250.5	(5)	143	156	45.4	38.7
20.30	7	161,820	488.7	543.9	(6)	218	237	77.6	72.9
14.00	8	234,650	720.8	779.6	(7)	242	224	86.3	77.6
8.20	9	199,260	893.0	886.8	(8)	394	345	178.5	147.4
2.00	10	220,710	832.4	830.7	(9)	464	454	218.4	208.5
-4.00	11	439,290	1,724.6	1,712.1	(10)	464	454	218.8	208.9
-9.00	12	275,090	1,081.4	1,073.5	(11)	4,675	4,675	1,828.1	1,814.8
総重量		1,932,940							

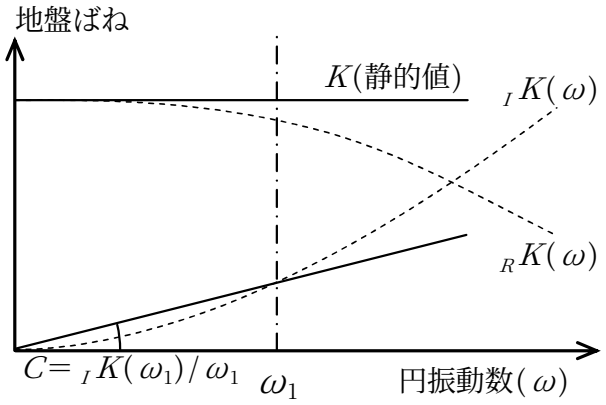
第 5-3 表　鉛直方向解析モデル及び振動諸元



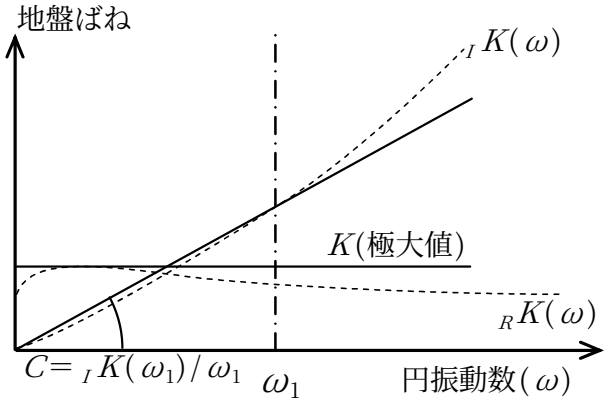
外壁・シェル壁部				
高さ m EL.	質点番号	質点重量 kN W	要素番号	軸断面積 m^2 A_n
63.65	1	8,030		
57.00	2	16,160	(1)	52.4
46.50	3	67,320	(2)	58.8
38.80	4	97,130	(3)	331
34.70	5	83,270	(4)	243
29.00	6	122,370	(5)	297
20.30	7	161,820	(6)	451
14.00	8	234,650	(7)	461
8.20	9	199,260	(8)	727
2.00	10	220,710	(9)	900
-4.00	11	439,290	(10)	900
-9.00	12	275,090	(11)	4,675
総重量		1,932,940		

屋根トラス部					
高さ m EL.	ｽﾊﾟﾝ方向 m	質点番号	質点重量 kN W	要素番号	せん断断面積 $\times 10^{-2} m^2$ A_s	断面2次ﾓｰﾒﾝﾄ m^4 I
63.65	20.55	25	1,120			
				(24)	5.68	1.76
	15.41	24	2,240			
				(23)	5.68	1.76
	10.27	23	2,240			
				(22)	8.50	1.76
	5.13	22	2,240			
				(21)	11.49	1.76
	0.00	1	—			

トラス端部回転拘束ばね
$K_\theta = 5.62 \times 10^6$ kN･m/rad



(a)　底面地盤ばね



(b)　側面地盤ばね

第 5-11 図　地盤ばねの近似法

第 5-4 表　地盤のばね定数と減衰係数（S_S－Ｄ１）

(a)　ＮＳ方向

ばね番号	質点番号	地盤ばね成　分	ばね定数*1 K_C	減衰係数*2 C_C
K1	9	側面・並進	5.46×10^{5}	2.50×10^{5}
K2	10	側面・並進	1.22×10^{6}	4.18×10^{5}
K3	11	側面・並進	6.64×10^{6}	9.11×10^{5}
K4	12	側面・並進	1.92×10^{7}	8.70×10^{5}
K5	12	底面・並進	6.41×10^{7}	3.45×10^{6}
K6	12	底面・回転	9.26×10^{10}	1.59×10^{9}

*1：K1～K5 は kN／m，K6 は kN･m／rad
*2：K1～K5 は kN･s／m，K6 は kN･m･s／rad

(b)　ＥＷ方向

ばね番号	質点番号	地盤ばね成　分	ばね定数*1 K_C	減衰係数*2 C_C
K1	9	側面・並進	5.46×10^{5}	2.49×10^{5}
K2	10	側面・並進	1.22×10^{6}	4.19×10^{5}
K3	11	側面・並進	6.64×10^{6}	9.09×10^{5}
K4	12	側面・並進	1.92×10^{7}	8.69×10^{5}
K5	12	底面・並進	6.42×10^{7}	3.45×10^{6}
K6	12	底面・回転	9.17×10^{10}	1.57×10^{9}

*1：K1～K5 は kN／m，K6 は kN･m／rad
*2：K1～K5 は kN･s／m，K6 は kN･m･s／rad

(c)　ＵＤ方向

ばね番号	質点番号	地盤ばね成　分	ばね定数 K_C kN／m	減衰係数 C_C kN･s／m
K1	12	底面・鉛直	1.08×10^{8}	8.21×10^{6}

第 5-5 表　地盤のばね定数と減衰係数（S_S－１１）

(a)　ＮＳ方向

ばね番号	質点番号	地盤ばね成　分	ばね定数*1 K_C	減衰係数*2 C_C
K1	9	側面・並進	6.46×10^{5}	2.88×10^{5}
K2	10	側面・並進	1.75×10^{6}	6.72×10^{5}
K3	11	側面・並進	8.96×10^{6}	9.99×10^{5}
K4	12	側面・並進	2.20×10^{7}	9.69×10^{5}
K5	12	底面・並進	7.04×10^{7}	3.61×10^{6}
K6	12	底面・回転	1.01×10^{11}	1.65×10^{9}

*1：K1～K5 は kN／m，K6 は kN･m／rad
*2：K1～K5 は kN･s／m，K6 は kN･m･s／rad

(b)　ＥＷ方向

ばね番号	質点番号	地盤ばね成　分	ばね定数*1 K_C	減衰係数*2 C_C
K1	9	側面・並進	6.46×10^{5}	2.90×10^{5}
K2	10	側面・並進	1.75×10^{6}	6.64×10^{5}
K3	11	側面・並進	8.96×10^{6}	1.00×10^{6}
K4	12	側面・並進	2.20×10^{7}	9.69×10^{5}
K5	12	底面・並進	7.05×10^{7}	3.61×10^{6}
K6	12	底面・回転	1.00×10^{11}	1.63×10^{9}

*1：K1～K5 は kN／m，K6 は kN･m／rad
*2：K1～K5 は kN･s／m，K6 は kN･m･s／rad

(c)　ＵＤ方向

ばね番号	質点番号	地盤ばね成　分	ばね定数 K_C kN／m	減衰係数 C_C kN･s／m
K1	12	底面・鉛直	1.16×10^{8}	8.50×10^{6}

第 5-6 表　地盤のばね定数と減衰係数（S_S－１２）

(a)　ＮＳ方向

ばね番号	質点番号	地盤ばね成　分	ばね定数*1 K_C	減衰係数*2 C_C
K1	9	側面・並進	6.46×10^{5}	2.93×10^{5}
K2	10	側面・並進	1.74×10^{6}	6.59×10^{5}
K3	11	側面・並進	8.66×10^{6}	9.81×10^{5}
K4	12	側面・並進	2.16×10^{7}	9.56×10^{5}
K5	12	底面・並進	6.80×10^{7}	3.54×10^{6}
K6	12	底面・回転	9.69×10^{10}	1.62×10^{9}

*1：K1～K5 は kN／m，K6 は kN･m／rad
*2：K1～K5 は kN･s／m，K6 は kN･m･s／rad

(b)　ＥＷ方向

ばね番号	質点番号	地盤ばね成　分	ばね定数*1 K_C	減衰係数*2 C_C
K1	9	側面・並進	6.46×10^{5}	2.95×10^{5}
K2	10	側面・並進	1.74×10^{6}	6.54×10^{5}
K3	11	側面・並進	8.66×10^{6}	9.83×10^{5}
K4	12	側面・並進	2.16×10^{7}	9.55×10^{5}
K5	12	底面・並進	6.80×10^{7}	3.55×10^{6}
K6	12	底面・回転	9.64×10^{10}	1.60×10^{9}

*1：K1～K5 は kN／m，K6 は kN･m／rad
*2：K1～K5 は kN･s／m，K6 は kN･m･s／rad

(c)　ＵＤ方向

ばね番号	質点番号	地盤ばね成　分	ばね定数 K_C kN／m	減衰係数 C_C kN･s／m
K1	12	底面・鉛直	1.11×10^{8}	8.31×10^{6}

第 5-7 表　地盤のばね定数と減衰係数（S_S－１３）

(a)　ＮＳ方向

ばね番号	質点番号	地盤ばね成　分	ばね定数*1 K_C	減衰係数*2 C_C
K1	9	側面・並進	6.39×10^{5}	2.85×10^{5}
K2	10	側面・並進	1.71×10^{6}	6.67×10^{5}
K3	11	側面・並進	8.60×10^{6}	9.78×10^{5}
K4	12	側面・並進	2.16×10^{7}	9.56×10^{5}
K5	12	底面・並進	6.83×10^{7}	3.55×10^{6}
K6	12	底面・回転	9.78×10^{10}	1.63×10^{9}

*1：K1～K5 は kN／m，K6 は kN･m／rad
*2：K1～K5 は kN･s／m，K6 は kN･m･s／rad

(b)　ＥＷ方向

ばね番号	質点番号	地盤ばね成　分	ばね定数*1 K_C	減衰係数*2 C_C
K1	9	側面・並進	6.39×10^{5}	2.87×10^{5}
K2	10	側面・並進	1.71×10^{6}	6.64×10^{5}
K3	11	側面・並進	8.60×10^{6}	9.80×10^{5}
K4	12	側面・並進	2.16×10^{7}	9.56×10^{5}
K5	12	底面・並進	6.83×10^{7}	3.55×10^{6}
K6	12	底面・回転	9.73×10^{10}	1.61×10^{9}

*1：K1～K5 は kN／m，K6 は kN･m／rad
*2：K1～K5 は kN･s／m，K6 は kN･m･s／rad

(c)　ＵＤ方向

ばね番号	質点番号	地盤ばね成　分	ばね定数 K_C kN／m	減衰係数 C_C kN･s／m
K1	12	底面・鉛直	1.12×10^{8}	8.35×10^{6}

第 5-8 表　地盤のばね定数と減衰係数（S_S－１４）

(a)　ＮＳ方向

ばね番号	質点番号	地盤ばね成　分	ばね定数*1 K_C	減衰係数*2 C_C
K1	9	側面・並進	6.78×10^{5}	3.18×10^{5}
K2	10	側面・並進	1.83×10^{6}	6.42×10^{5}
K3	11	側面・並進	9.11×10^{6}	1.00×10^{6}
K4	12	側面・並進	2.22×10^{7}	9.68×10^{5}
K5	12	底面・並進	6.92×10^{7}	3.58×10^{6}
K6	12	底面・回転	9.92×10^{10}	1.64×10^{9}

*1：K1～K5 は kN／m，K6 は kN･m／rad
*2：K1～K5 は kN･s／m，K6 は kN･m･s／rad

(b)　ＥＷ方向

ばね番号	質点番号	地盤ばね成　分	ばね定数*1 K_C	減衰係数*2 C_C
K1	9	側面・並進	6.78×10^{5}	3.21×10^{5}
K2	10	側面・並進	1.83×10^{6}	6.36×10^{5}
K3	11	側面・並進	9.11×10^{6}	1.01×10^{6}
K4	12	側面・並進	2.22×10^{7}	9.68×10^{5}
K5	12	底面・並進	6.92×10^{7}	3.58×10^{6}
K6	12	底面・回転	9.87×10^{10}	1.62×10^{9}

*1：K1～K5 は kN／m，K6 は kN･m／rad
*2：K1～K5 は kN･s／m，K6 は kN･m･s／rad

(c)　ＵＤ方向

ばね番号	質点番号	地盤ばね成　分	ばね定数 K_C kN／m	減衰係数 C_C kN･s／m
K1	12	底面・鉛直	1.13×10^{8}	8.40×10^{6}

第 5-9 表　地盤のばね定数と減衰係数（S_S－２１）

(a)　ＮＳ方向

ばね番号	質点番号	地盤ばね成　分	ばね定数*1 K_C	減衰係数*2 C_C
K1	9	側面・並進	5.54×10^{5}	2.58×10^{5}
K2	10	側面・並進	1.38×10^{6}	4.38×10^{5}
K3	11	側面・並進	7.62×10^{6}	9.47×10^{5}
K4	12	側面・並進	2.08×10^{7}	9.30×10^{5}
K5	12	底面・並進	6.80×10^{7}	3.55×10^{6}
K6	12	底面・回転	9.76×10^{10}	1.62×10^{9}

*1：K1～K5 は kN／m，K6 は kN･m／rad
*2：K1～K5 は kN･s／m，K6 は kN･m･s／rad

(b)　ＥＷ方向

ばね番号	質点番号	地盤ばね成　分	ばね定数*1 K_C	減衰係数*2 C_C
K1	9	側面・並進	5.54×10^{5}	2.57×10^{5}
K2	10	側面・並進	1.38×10^{6}	4.42×10^{5}
K3	11	側面・並進	7.62×10^{6}	9.43×10^{5}
K4	12	側面・並進	2.08×10^{7}	9.29×10^{5}
K5	12	底面・並進	6.80×10^{7}	3.55×10^{6}
K6	12	底面・回転	9.70×10^{10}	1.60×10^{9}

*1：K1～K5 は kN／m，K6 は kN･m／rad
*2：K1～K5 は kN･s／m，K6 は kN･m･s／rad

(c)　ＵＤ方向

ばね番号	質点番号	地盤ばね成　分	ばね定数 K_C kN／m	減衰係数 C_C kN･s／m
K1	12	底面・鉛直	1.14×10^{8}	8.42×10^{6}

第 5-10 表　地盤のばね定数と減衰係数（S_S－２２）

(a)　ＮＳ方向

ばね番号	質点番号	地盤ばね成　分	ばね定数*1 K_C	減衰係数*2 C_C
K1	9	側面・並進	5.39×10^{5}	2.61×10^{5}
K2	10	側面・並進	1.28×10^{6}	4.08×10^{5}
K3	11	側面・並進	7.22×10^{6}	9.49×10^{5}
K4	12	側面・並進	2.03×10^{7}	9.10×10^{5}
K5	12	底面・並進	6.80×10^{7}	3.55×10^{6}
K6	12	底面・回転	9.80×10^{10}	1.62×10^{9}

*1：K1～K5 は kN／m，K6 は kN･m／rad
*2：K1～K5 は kN･s／m，K6 は kN･m･s／rad

(b)　ＥＷ方向

ばね番号	質点番号	地盤ばね成　分	ばね定数*1 K_C	減衰係数*2 C_C
K1	9	側面・並進	5.39×10^{5}	2.59×10^{5}
K2	10	側面・並進	1.28×10^{6}	4.10×10^{5}
K3	11	側面・並進	7.22×10^{6}	9.46×10^{5}
K4	12	側面・並進	2.03×10^{7}	9.09×10^{5}
K5	12	底面・並進	6.80×10^{7}	3.55×10^{6}
K6	12	底面・回転	9.75×10^{10}	1.60×10^{9}

*1：K1～K5 は kN／m，K6 は kN･m／rad
*2：K1～K5 は kN･s／m，K6 は kN･m･s／rad

(c)　ＵＤ方向

ばね番号	質点番号	地盤ばね成　分	ばね定数 K_C kN／m	減衰係数 C_C kN･s／m
K1	12	底面・鉛直	1.14×10^{8}	8.43×10^{6}

第 5-11 表　地盤のばね定数と減衰係数（S_S－３１）

(a)　ＮＳ方向

ばね番号	質点番号	地盤ばね成　分	ばね定数*1 K_C	減衰係数*2 C_C
K1	9	側面・並進	5.39×10^{5}	2.46×10^{5}
K2	10	側面・並進	1.18×10^{6}	4.01×10^{5}
K3	11	側面・並進	5.24×10^{6}	8.98×10^{5}
K4	12	側面・並進	1.86×10^{7}	8.58×10^{5}
K5	12	底面・並進	6.26×10^{7}	3.41×10^{6}
K6	12	底面・回転	8.96×10^{10}	1.57×10^{9}

*1：K1～K5 は kN／m，K6 は kN･m／rad
*2：K1～K5 は kN･s／m，K6 は kN･m･s／rad

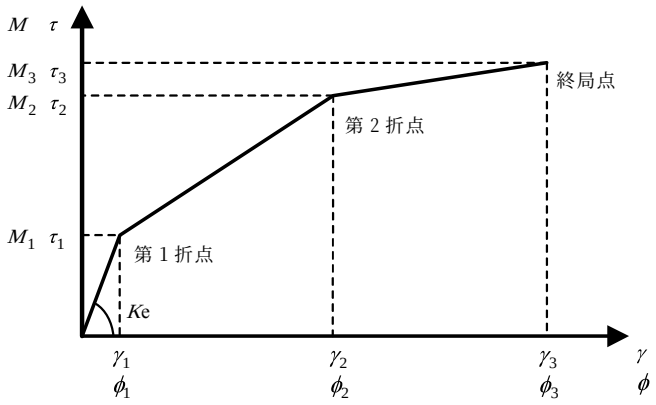
(b)　ＥＷ方向

ばね番号	質点番号	地盤ばね成　分	ばね定数*1 K_C	減衰係数*2 C_C
K1	9	側面・並進	5.39×10^{5}	2.45×10^{5}
K2	10	側面・並進	1.18×10^{6}	4.00×10^{5}
K3	11	側面・並進	5.24×10^{6}	8.97×10^{5}
K4	12	側面・並進	1.86×10^{7}	8.57×10^{5}
K5	12	底面・並進	6.27×10^{7}	3.41×10^{6}
K6	12	底面・回転	8.91×10^{10}	1.55×10^{9}

*1：K1～K5 は kN／m，K6 は kN･m／rad
*2：K1～K5 は kN･s／m，K6 は kN･m･s／rad

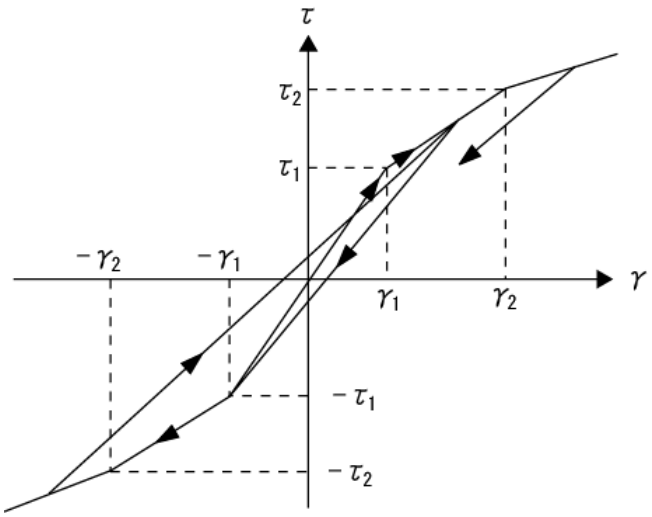
(c)　ＵＤ方向

ばね番号	質点番号	地盤ばね成　分	ばね定数 K_C kN／m	減衰係数 C_C kN･s／m
K1	12	底面・鉛直	1.06×10^{8}	8.14×10^{6}

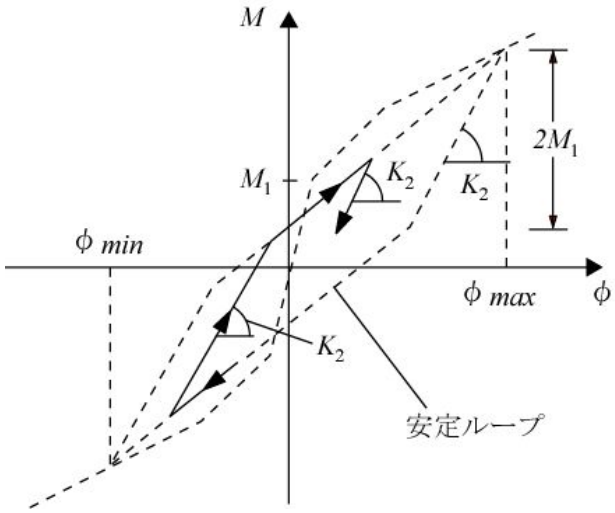


τ 1：第 1 折れ点のせん断応力度
τ 2：第 2 折れ点のせん断応力度
τ 3：終局点のせん断応力度
γ 1：第 1 折れ点のせん断ひずみ
γ 2：第 2 折れ点のせん断ひずみ
γ 3：終局点のせん断ひずみ
M 1：第 1 折れ点の曲げモーメント
M 2：第 2 折れ点の曲げモーメント
M 3：終局点の曲げモーメント
φ 1：第 1 折れ点の曲率
φ 2：第 2 折れ点の曲率
φ 3：終局点の曲率

第 5-12 図　復元力特性のスケルトン曲線



(a)　最大点指向型



(b)　ディグレイディングトリリニア型

第 5-13 図　復元力特性の履歴特性

第 5-12　せん断スケルトン数値表

(a)　ＮＳ方向

EL. m	要素 番号	τ_1 N／mm^2	τ_2 N／mm^2	τ_3 N／mm^2	γ_1 $\times 10^{-3}$	γ_2 $\times 10^{-3}$	γ_3 $\times 10^{-3}$
63.65 ～ 57.00	1	1.60	2.16	4.54	0.174	0.522	4.0
57.00 ～ 46.50	2	1.71	2.31	4.63	0.185	0.555	4.0
46.50 ～ 38.80	3	1.59	2.15	4.38	0.173	0.519	4.0
38.80 ～ 34.70	4	1.34	1.81	4.17	0.145	0.435	4.0
34.70 ～ 29.00	5	1.28	1.73	3.91	0.139	0.417	4.0
29.00 ～ 20.30	6	1.47	1.98	4.26	0.159	0.477	4.0
20.30 ～ 14.00	7	1.61	2.17	4.87	0.174	0.522	4.0
14.00 ～ 8.20	8	1.68	2.27	4.27	0.183	0.549	4.0
8.20 ～ 2.00	9	1.77	2.39	5.02	0.192	0.576	4.0
2.00 ～ -4.00	10	1.85	2.50	5.84	0.201	0.603	4.0

(b)　ＥW方向

EL. m	要素 番号	τ_1 N／mm^2	τ_2 N／mm^2	τ_3 N／mm^2	γ_1 $\times 10^{-3}$	γ_2 $\times 10^{-3}$	γ_3 $\times 10^{-3}$
63.65 ～ 57.00	1	1.60	2.16	4.54	0.174	0.522	4.0
57.00 ～ 46.50	2	1.71	2.31	4.63	0.185	0.555	4.0
46.50 ～ 38.80	3	1.60	2.16	4.63	0.173	0.519	4.0
38.80 ～ 34.70	4	1.49	2.01	4.40	0.162	0.486	4.0
34.70 ～ 29.00	5	1.39	1.88	4.01	0.151	0.453	4.0
29.00 ～ 20.30	6	1.31	1.77	3.72	0.143	0.429	4.0
20.30 ～ 14.00	7	1.59	2.15	4.57	0.172	0.516	4.0
14.00 ～ 8.20	8	1.68	2.27	4.52	0.182	0.546	4.0
8.20 ～ 2.00	9	1.77	2.39	5.02	0.192	0.576	4.0
2.00 ～ -4.00	10	1.85	2.50	5.77	0.201	0.603	4.0

第 5-13　曲げスケルトン数値表

(a)　ＮＳ方向

EL. m	要素 番号	M_1 $\times 10^6$kN･m	M_2 $\times 10^6$kN･m	M_3 $\times 10^6$kN･m	Φ_1 $\times 10^{-5}$1/m	Φ_2 $\times 10^{-5}$1/m	Φ_3 $\times 10^{-5}$1/m
63.65 ～ 57.00	1	1.85	3.23	4.18	0.410	4.87	97.4
57.00 ～ 46.50	2	2.06	3.49	4.48	0.457	4.97	99.4
46.50 ～ 38.80	3	5.75	12.6	18.7	0.404	5.28	57.1
38.80 ～ 34.70	4	4.87	12.7	16.1	0.490	8.14	102
34.70 ～ 29.00	5	5.12	13.0	16.5	0.510	8.12	102
29.00 ～ 20.30	6	7.47	19.5	22.5	0.436	5.90	33.9
20.30 ～ 14.00	7	10.3	27.0	31.1	0.540	6.02	36.6
14.00 ～ 8.20	8	14.5	42.2	50.3	0.368	4.81	47.5
8.20 ～ 2.00	9	21.7	62.6	79.2	0.450	5.46	41.8
2.00 ～ -4.00	10	24.7	80.9	101	0.511	6.35	36.9

(b)　ＥＷ方向

EL. m	要素 番号	M_1 $\times 10^6$kN･m	M_2 $\times 10^6$kN･m	M_3 $\times 10^6$kN･m	Φ_1 $\times 10^{-5}$1/m	Φ_2 $\times 10^{-5}$1/m	Φ_3 $\times 10^{-5}$1/m
63.65 ～ 57.00	1	1.77	3.03	3.86	0.435	5.15	103
57.00 ～ 46.50	2	2.23	3.35	4.19	0.548	5.83	116
46.50 ～ 38.80	3	3.57	6.61	8.98	0.466	8.83	108
38.80 ～ 34.70	4	4.87	12.5	16.1	0.591	9.58	123
34.70 ～ 29.00	5	5.12	12.8	16.6	0.599	9.28	120
29.00 ～ 20.30	6	6.80	17.6	21.1	0.422	5.67	53.5
20.30 ～ 14.00	7	8.95	22.4	26.0	0.522	5.80	47.3
14.00 ～ 8.20	8	12.7	38.2	46.2	0.390	5.23	53.0
8.20 ～ 2.00	9	20.9	61.2	77.3	0.454	5.56	42.0
2.00 ～ -4.00	10	23.7	77.8	96.5	0.513	6.48	39.8

5.5　地震応答解析結果

（1）地震応答解析法

地震応答解析は，水平方向については耐震壁の非線形性を考慮した弾塑性時刻歴応答解析によるものとし，鉛直方向は弾性時刻歴解析によるものとする。

地震応答解析モデルについて運動方程式は次のとおりである。なお，地盤ばねを考慮する質点を添字Ｃで，それ以外の質点を添字Ｓで表す。

$$\begin{bmatrix} M_s & 0 \\ 0 & M_c \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \ddot{u}_s \\ \ddot{u}_c \end{Bmatrix}+\begin{bmatrix} C_{ss} & C_{sc} \\ C_{cs} & C_{cc}+C_c \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \dot{u}_s \\ \dot{u}_c \end{Bmatrix}+\begin{bmatrix} K_{ss} & K_{sc} \\ K_{cs} & K_{cc}+K_c \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} u_s \\ u_c \end{Bmatrix} = -\begin{bmatrix} M_s & 0 \\ 0 & M_c \end{bmatrix}\{\alpha\}\ddot{u}_0+\begin{Bmatrix} 0 \\ f_c \end{Bmatrix} \quad (5\text{-}1)$$

ここで，

$\begin{bmatrix} M_s & 0 \\ 0 & M_c \end{bmatrix}$　：質量マトリクス

$\begin{bmatrix} C_{ss} & C_{sc} \\ C_{cs} & C_{cc}+C_c \end{bmatrix}$：減衰マトリクス

$\begin{bmatrix} K_{ss} & K_{sc} \\ K_{cs} & K_{cc}+K_c \end{bmatrix}$：剛性マトリクス

$[K_c]$，$[C_c]$　：地盤の剛性及び減衰マトリクス

$\begin{Bmatrix} u_s \\ u_c \end{Bmatrix}$　：変位ベクトル

$\{\alpha\}$　：入力ベクトル

$\ddot{u}_0$　：入力加速度

（基礎版下端位置における自由地盤の応答加速度）

また，地盤からの力$\{f_c\}$は下式で表される。なお，鉛直方向では埋込みを考慮しないので，$\{f_c\}=0$である。

$$\{f_c\}=[K_c]\{\tilde{u}_c\}+[C_c]\{\dot{\tilde{u}}_c\}+\{\tilde{p}_c\} \qquad (5\text{-}2)$$

ここで，

$\{\tilde{u}_c\},\{\dot{\tilde{u}}_c\}$ ：一次元波動解析における基礎版下端位置に対する地盤の相対変位及び相対速度ベクトル

$\tilde{p}_c$ ：一次元波動解析における基礎版下端位置におけるせん断力（切り欠き力）

固有円振動数と固有モードベクトルは，（5-1）式の外力項を0とし，減衰項を無視すれば，次式より求まる。

$$\left(\begin{bmatrix} K_{ss} & K_{sc} \\ K_{cs} & K_{cc}+K_c \end{bmatrix}-\omega_i^2\begin{bmatrix} M_s & 0 \\ 0 & M_c \end{bmatrix}\right)\{\phi_i\}=\{0\} \qquad (5\text{-}3)$$

ここで，

ω_i：ｉ次の固有円振動数

$\{\phi_i\}$：ｉ次の固有モードベクトル

時刻歴解析では，（5-1）式をその各項の積分刻み時間における増分についての方程式に変換し，これに対し直接積分法(Newmark-β法)を適用して時刻歴応答を求める。

このときの減衰マトリックスは以下の方法により求める。

地盤ばねに与える減衰を除いた建屋のモ-ド減衰定数は，ｉ次振動モードにおける各部材のひずみエネルギに比例するものとして次式により求める。

$$h_i=\frac{\sum_j h_0^j E_i^j}{\sum_j E_i^j} \qquad (5\text{-}4)$$

ここで，

h_0^j ： j 部材の減衰定数

$$E_i^j = \frac{1}{2}\{\phi_i^j\}^T [k^j]\{\phi_i^j\}$$

ただし，

$[k^j]$ ： j 部材の剛性マトリクス

$\{\phi_i^j\}$ ： i 次振動モ-ドにおける j 部材の材端変位ベクトル

したがって，構造物の減衰マトリクスは，(5-4)式による各次モード減衰定数と固有モードベクトルにより次式で求める。

$$\begin{bmatrix} C_{ss} & C_{sc} \\ C_{cs} & C_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_s & 0 \\ 0 & M_c \end{bmatrix} \left(\sum_i \{\phi_i\}\eta_i \{\phi_i\}^T \right) \begin{bmatrix} M_s & 0 \\ 0 & M_c \end{bmatrix} \qquad (5\text{-}5)$$

ここで，

$$\eta_i = \frac{2h_i\omega_i}{\{\phi_i\}^T \begin{bmatrix} M_s & 0 \\ 0 & M_c \end{bmatrix} \{\phi_i\}}$$

なお，地盤ばねの減衰はC_cで表される内部粘性減衰として与えられるので，建屋－地盤連成モデルの減衰マトリクスは，次式で求められる。

$$[c] = \begin{bmatrix} C_{ss} & C_{sc} \\ C_{cs} & C_{cc} + C_c \end{bmatrix} \qquad (5\text{-}6)$$

また，弾塑性解析は，各部材の復元力特性上の状態を判定しつつ，その状態での剛性勾配を用いた剛性マトリクスを作成する方法により行う。

(2) 固有値

固有値解析結果として，主要な固有値を第 5-14 表～第 5-21 表に，刺激関数を第 5-14 図～第 5-21 図に示す。

なお，刺激係数は，次数ごとに固有ベクトルの最大値を 1 に規準化して得られた値としている。

第 5-14 表　固有値（S_S－Ｄ１）

(a)　ＮＳ方向

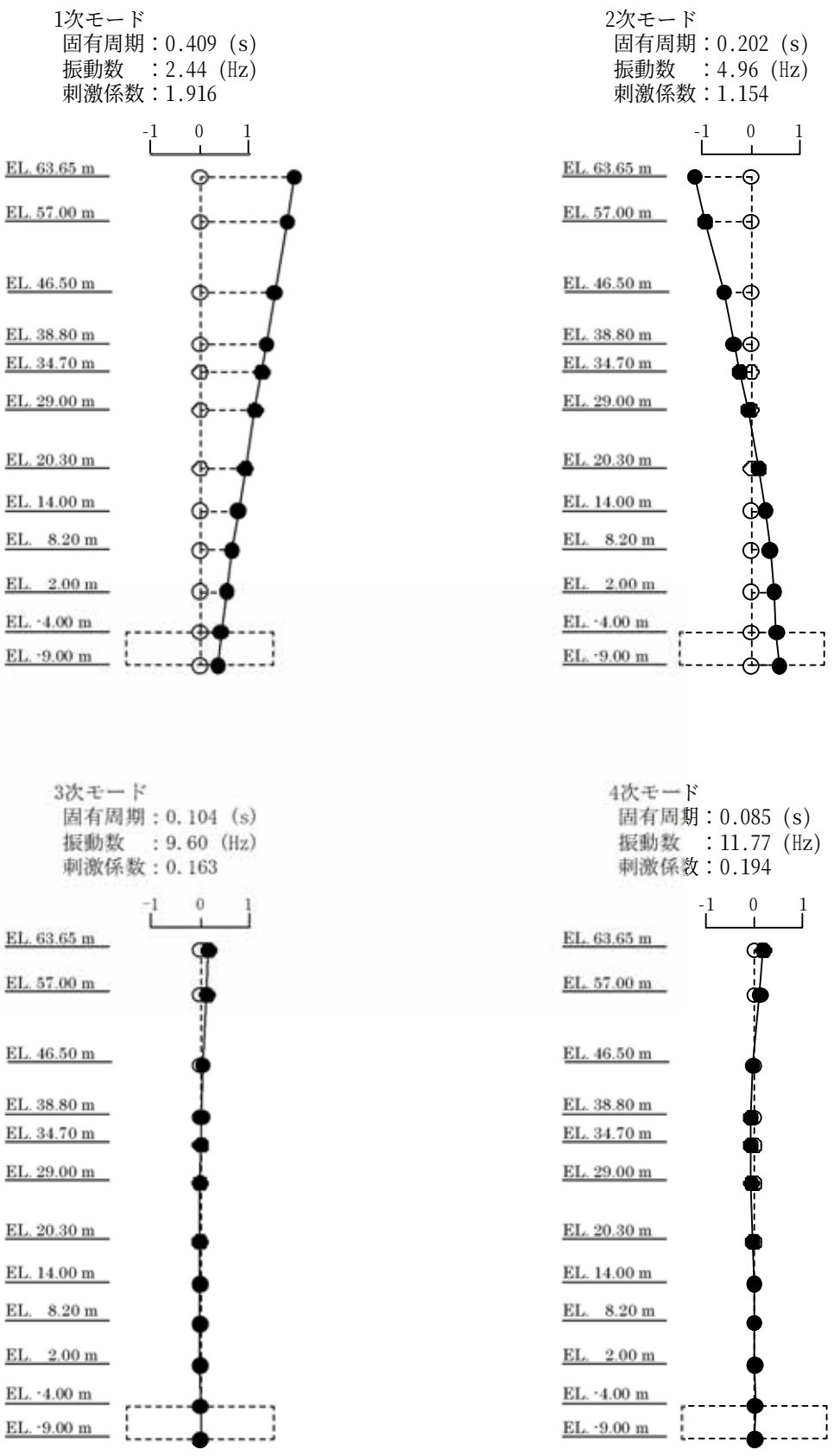
次　数	固有周期(s)	振動数(Hz)	刺激係数
1	0.409	2.44	1.916
2	0.202	4.96	-1.154
3	0.104	9.60	0.163
4	0.085	11.77	0.194
5	0.064	15.65	-0.145
6	0.052	19.15	0.016

(b)　ＥＷ方向

次　数	固有周期(s)	振動数(Hz)	刺激係数
1	0.411	2.43	1.941
2	0.202	4.96	-1.213
3	0.107	9.32	0.216
4	0.086	11.59	0.172
5	0.064	15.53	-0.140
6	0.051	19.76	0.013

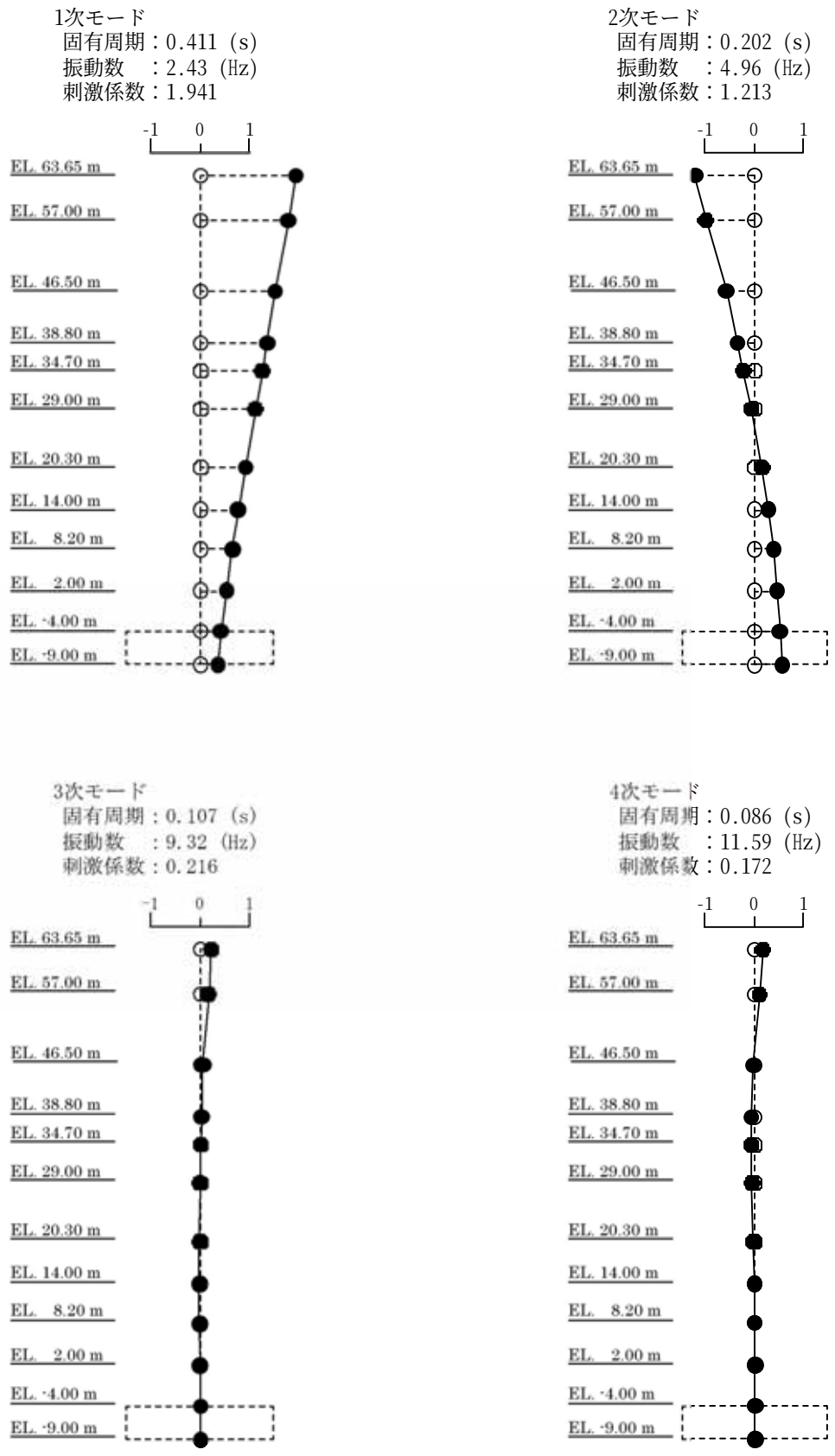
(c)　ＵＤ方向

次　数	固有周期(s)	振動数(Hz)	刺激係数
1	0.399	2.50	2.516
2	0.274	3.65	-1.596
3	0.093	10.79	0.129
4	0.060	16.72	-0.251
5	0.057	17.64	0.220
6	0.048	20.70	0.043



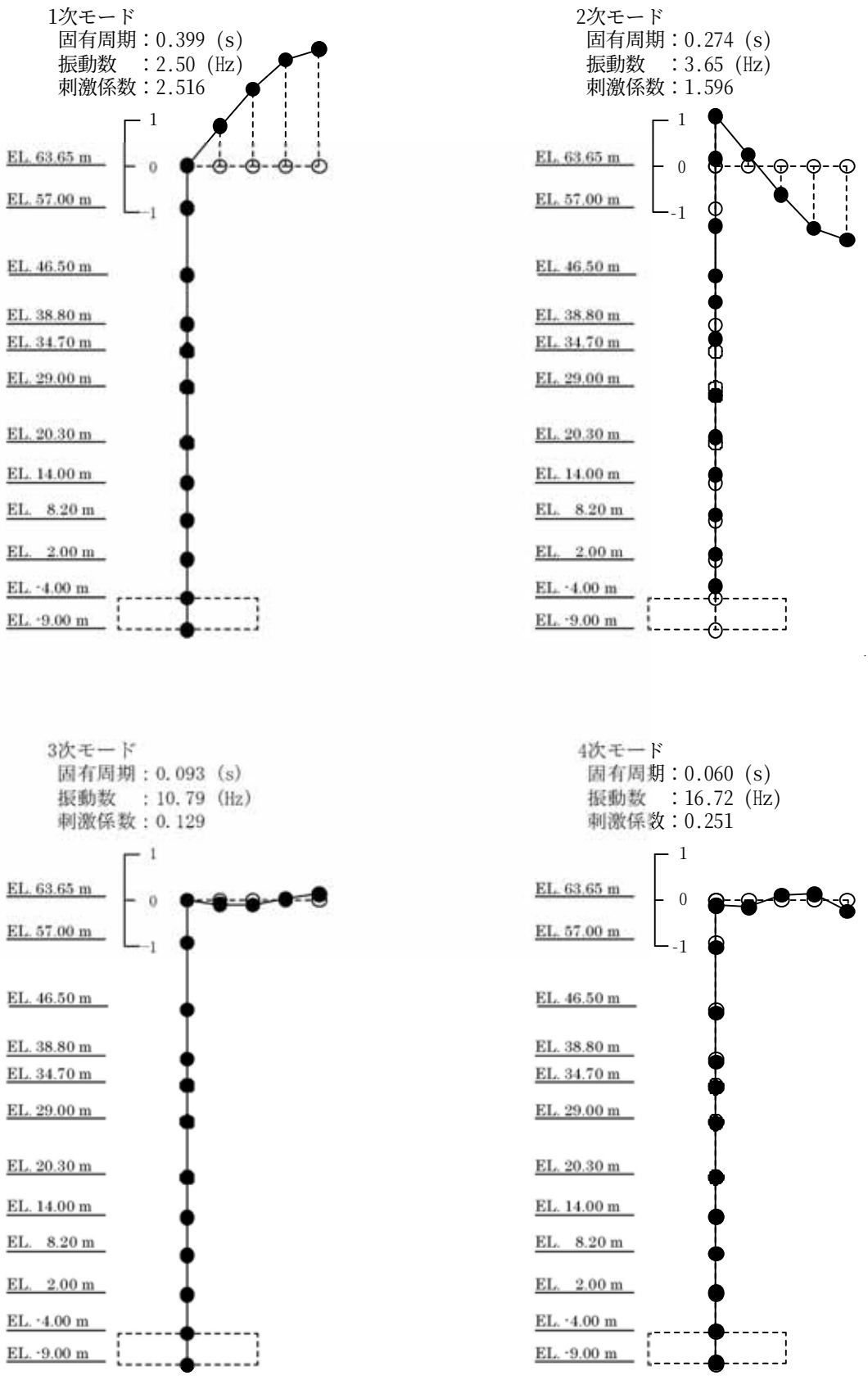
(a)　ＮＳ方向

第 5-14 図（1／3）　刺激関数（S_S－Ｄ１）



(b)　ＥＷ方向

第 5-14 図（2／3）　刺激関数（S_S－Ｄ１）



(c)　ＵＤ方向

第 5-14 図（3／3）　刺激関数（S_S－Ｄ１）

第 5-15 表　固有値（S_S－１１）

(a)　ＮＳ方向

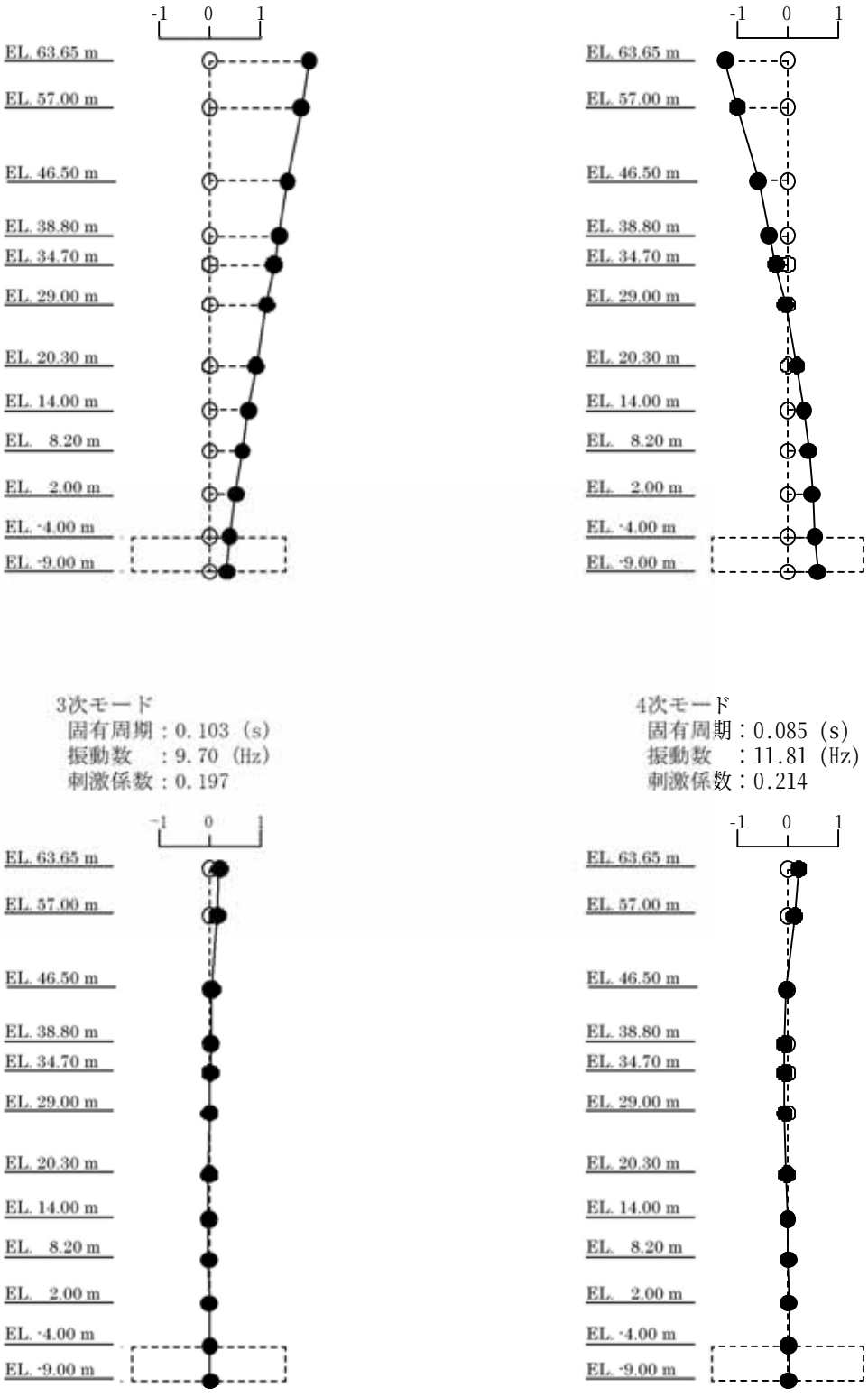
次　数	固有周期(s)	振動数(Hz)	刺激係数
1	0.392	2.55	1.938
2	0.193	5.18	-1.213
3	0.103	9.70	0.197
4	0.085	11.81	0.214
5	0.064	15.67	-0.164
6	0.052	19.18	0.018

(b)　ＥＷ方向

次　数	固有周期(s)	振動数(Hz)	刺激係数
1	0.395	2.53	1.964
2	0.193	5.18	-1.281
3	0.106	9.42	0.261
4	0.086	11.64	0.187
5	0.064	15.55	-0.158
6	0.051	19.79	0.014

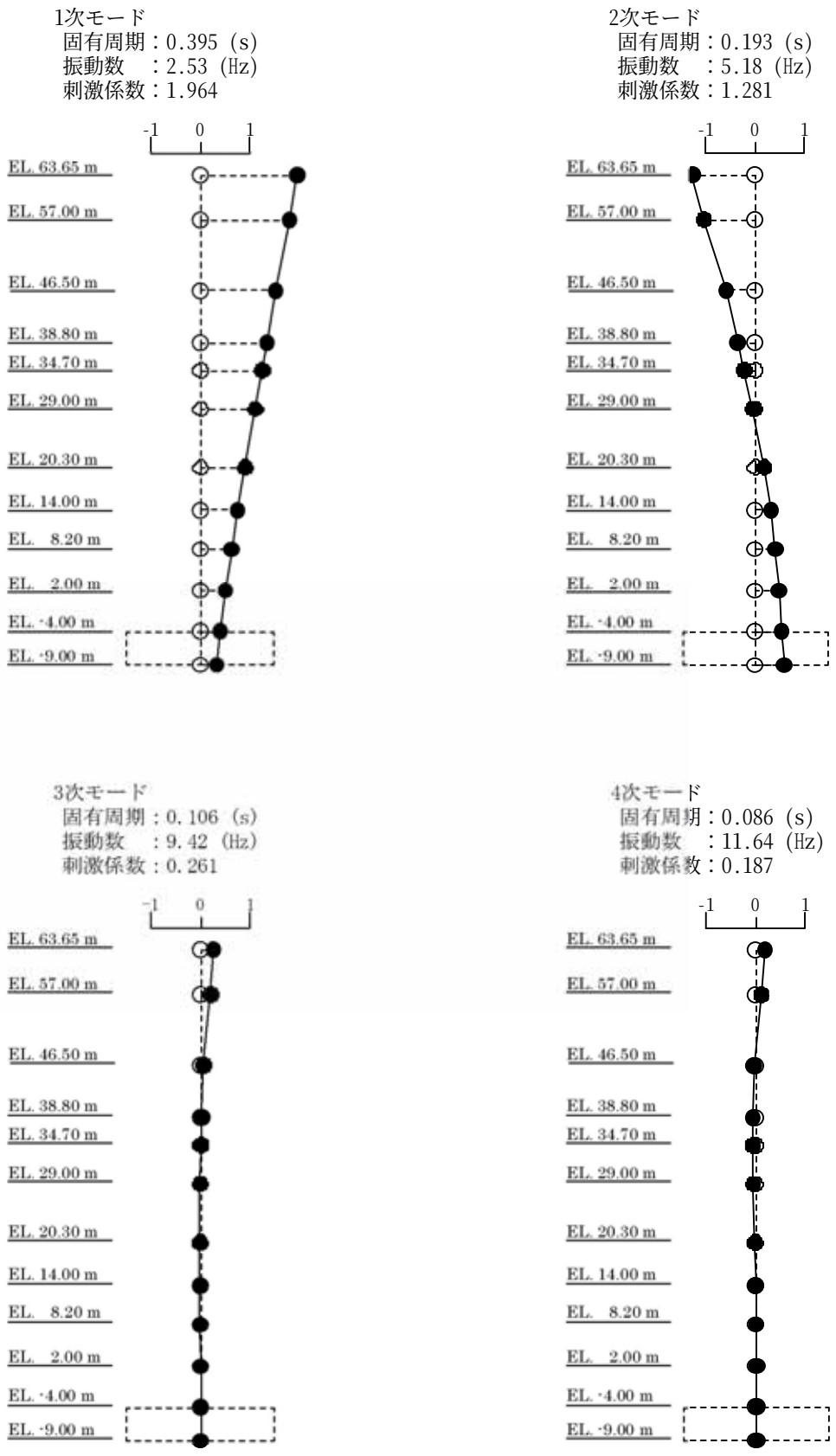
(c)　ＵＤ方向

次　数	固有周期(s)	振動数(Hz)	刺激係数
1	0.399	2.51	2.379
2	0.265	3.78	-1.465
3	0.093	10.79	0.139
4	0.060	16.74	-0.274
5	0.057	17.65	0.241
6	0.048	20.70	0.046



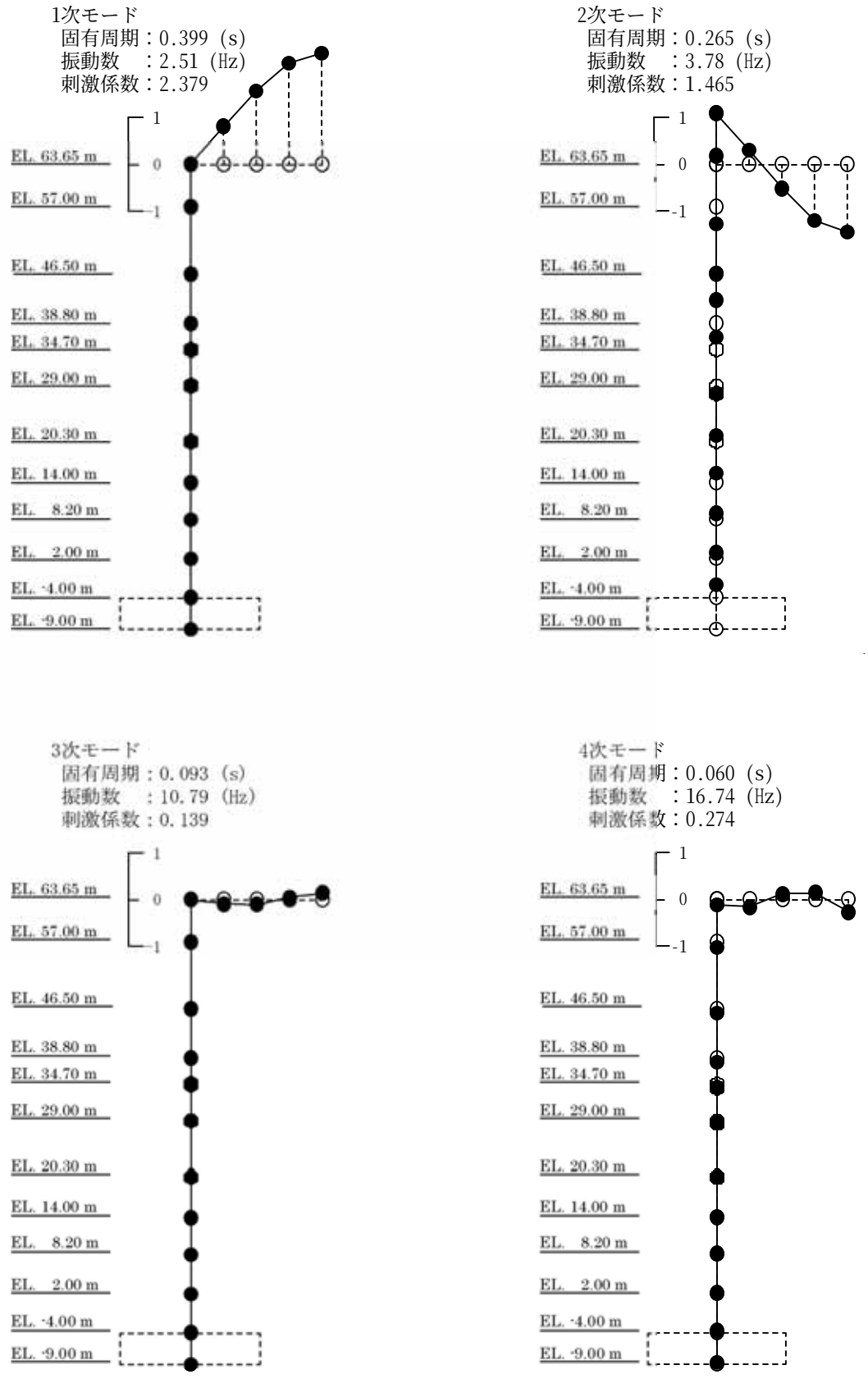
(a)　ＮＳ方向

第 5-15 図（1／3）　刺激関数（S_S－１１）



(b)　EW方向

第 5-15 図（2／3）　刺激関数（S_S－１１）



(c)　ＵＤ方向

第 5-15 図（3／3）　刺激関数（S_S－１１）

第 5-16 表　固有値（S_S－１２）

(a)　ＮＳ方向

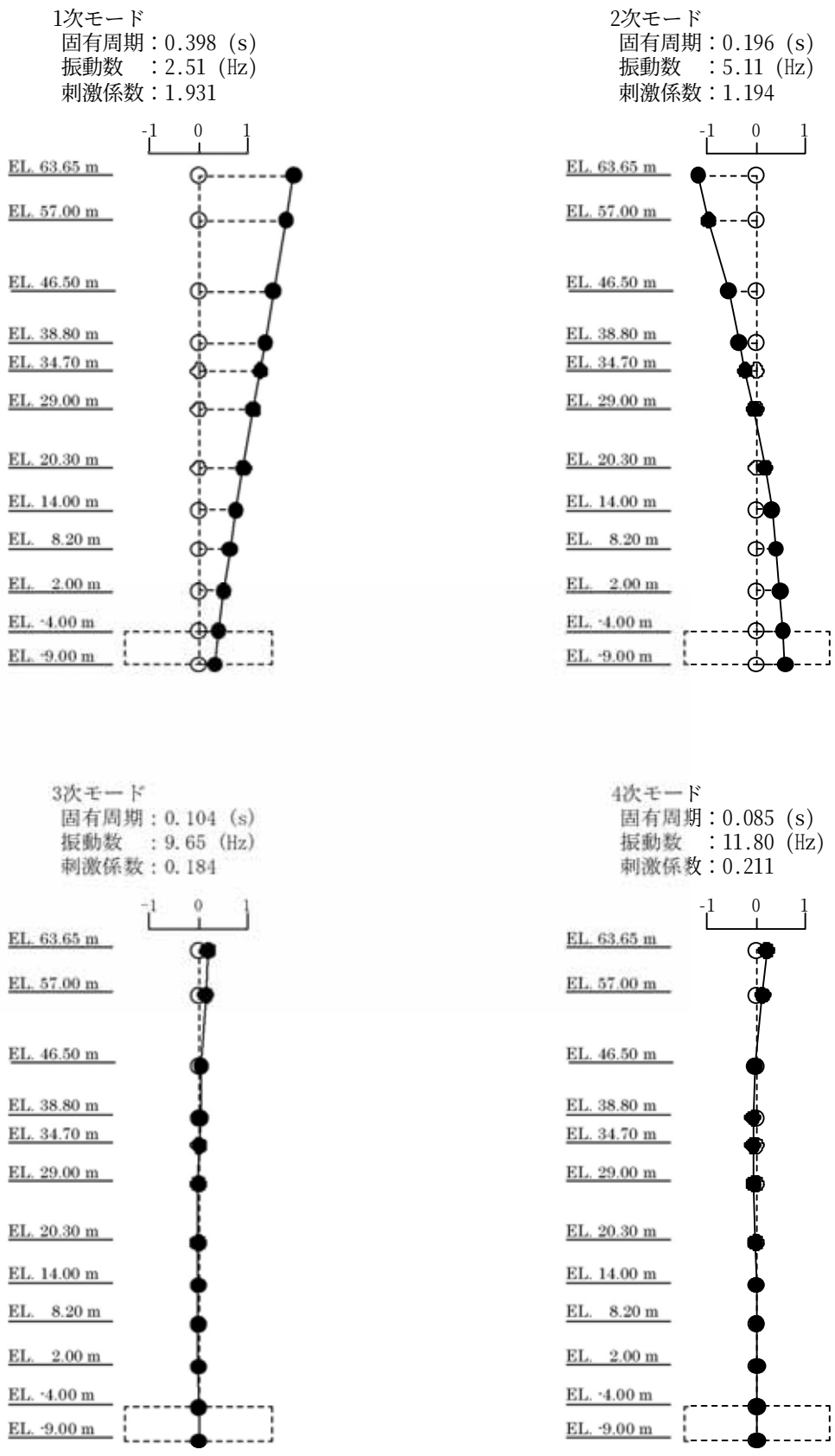
次　数	固有周期(s)	振動数(Hz)	刺激係数
1	0.398	2.51	1.931
2	0.196	5.11	-1.194
3	0.104	9.65	0.184
4	0.085	11.80	0.211
5	0.064	15.67	-0.159
6	0.052	19.17	0.018

(b)　ＥＷ方向

次　数	固有周期(s)	振動数(Hz)	刺激係数
1	0.400	2.50	1.957
2	0.195	5.12	-1.260
3	0.107	9.38	0.245
4	0.086	11.62	0.185
5	0.064	15.54	-0.153
6	0.051	19.77	0.014

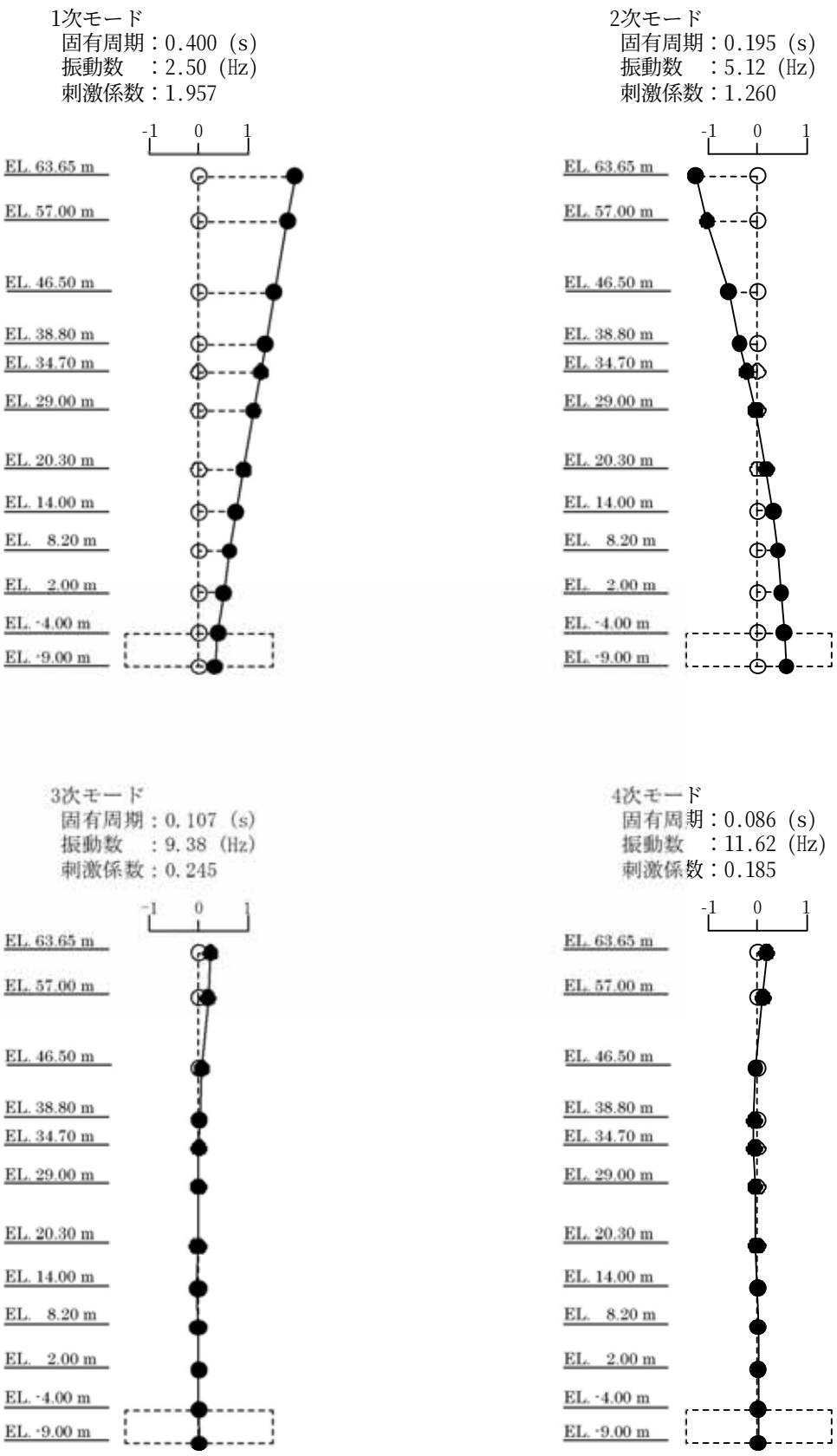
(c)　ＵＤ方向

次　数	固有周期(s)	振動数(Hz)	刺激係数
1	0.399	2.51	2.461
2	0.270	3.70	-1.543
3	0.093	10.79	0.133
4	0.060	16.72	-0.259
5	0.057	17.65	0.228
6	0.048	20.70	0.044



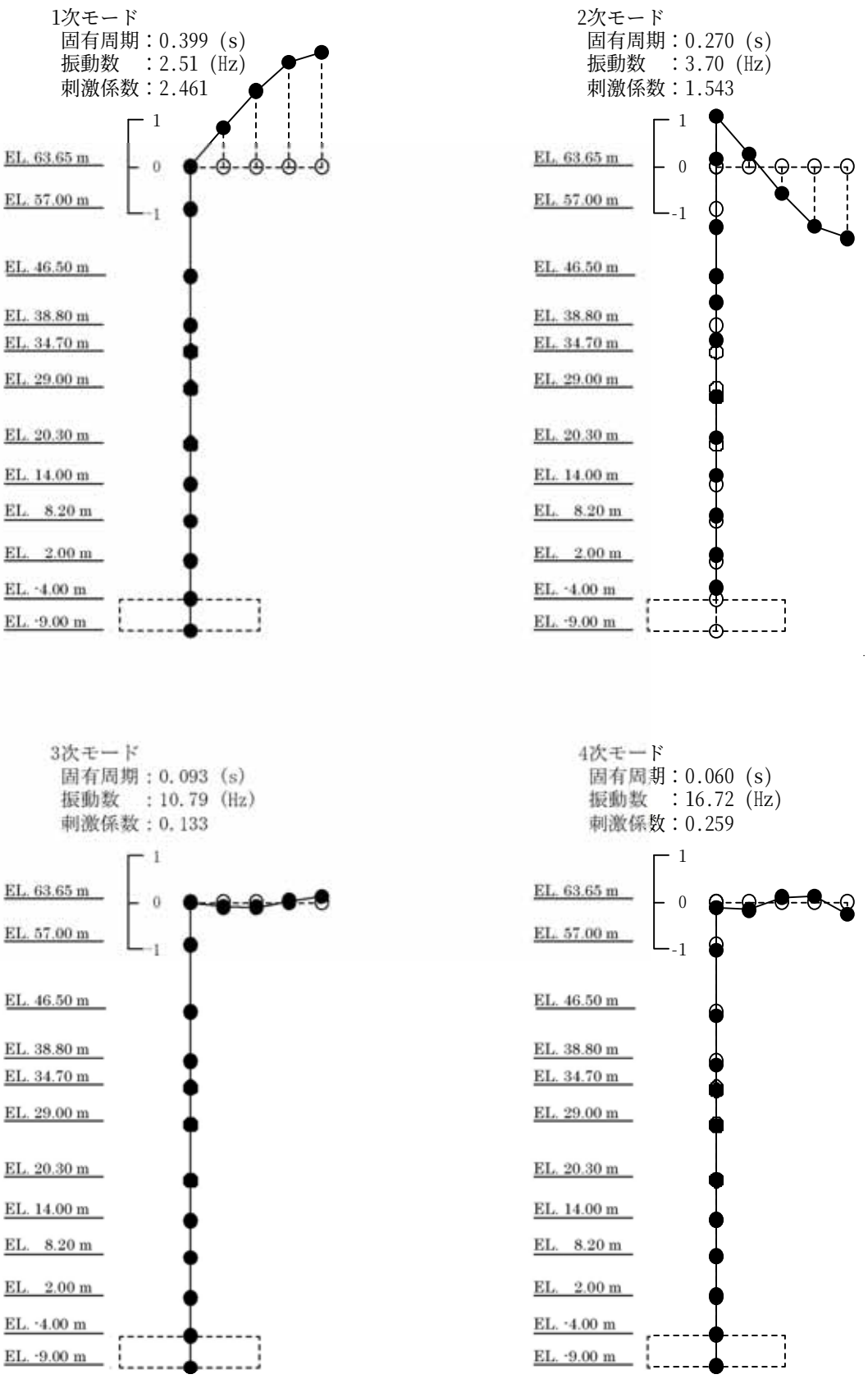
(a)　ＮＳ方向

第 5-16 図（1／3）　刺激関数（S_S－１２）



(b)　EW方向

第 5-16 図（2／3）　刺激関数（S_S－１２）



(c)　ＵＤ方向

第 5-16 図（3／3）　刺激関数（S_S－１２）

第 5-17 表　固有値（S_S－１３）

(a)　ＮＳ方向

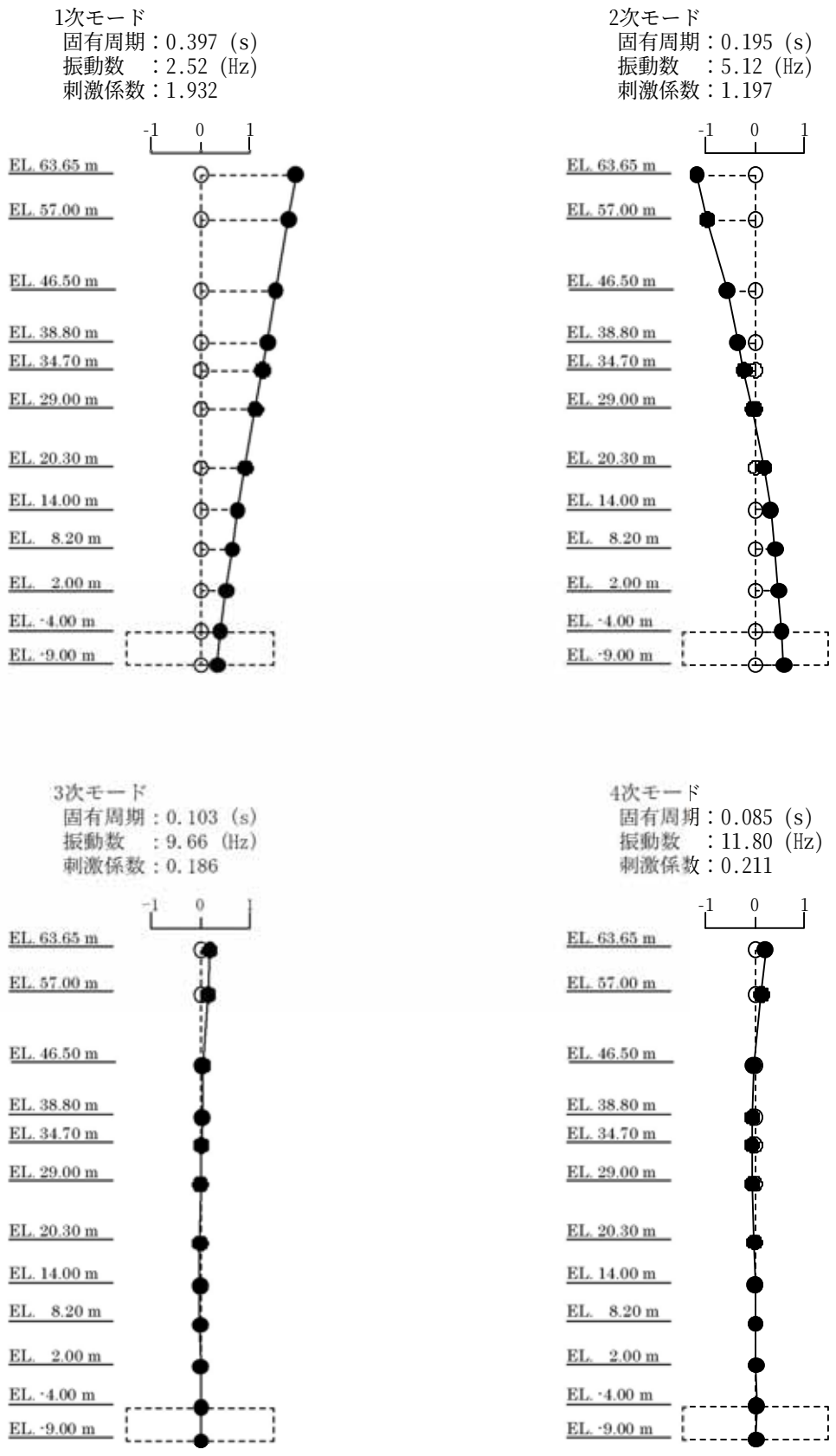
次　数	固有周期(s)	振動数(Hz)	刺激係数
1	0.397	2.52	1.932
2	0.195	5.12	-1.197
3	0.103	9.66	0.186
4	0.085	11.80	0.211
5	0.064	15.67	-0.159
6	0.052	19.17	0.018

(b)　ＥＷ方向

次　数	固有周期(s)	振動数(Hz)	刺激係数
1	0.399	2.51	1.958
2	0.195	5.12	-1.263
3	0.107	9.39	0.248
4	0.086	11.62	0.184
5	0.064	15.54	-0.154
6	0.051	19.78	0.014

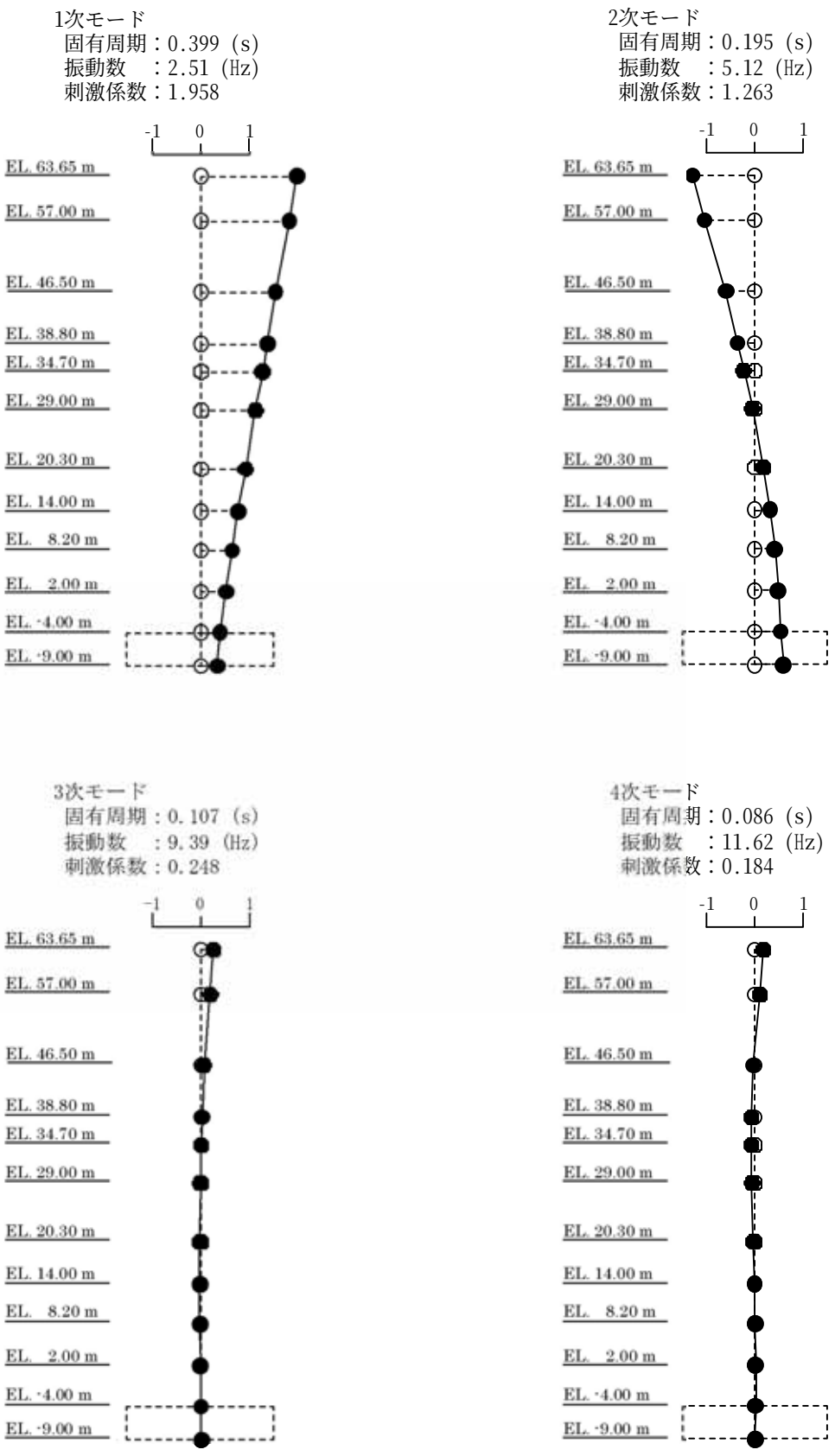
(c)　ＵＤ方向

次　数	固有周期(s)	振動数(Hz)	刺激係数
1	0.399	2.51	2.444
2	0.269	3.72	-1.526
3	0.093	10.79	0.134
4	0.060	16.73	-0.262
5	0.057	17.65	0.231
6	0.048	20.70	0.045



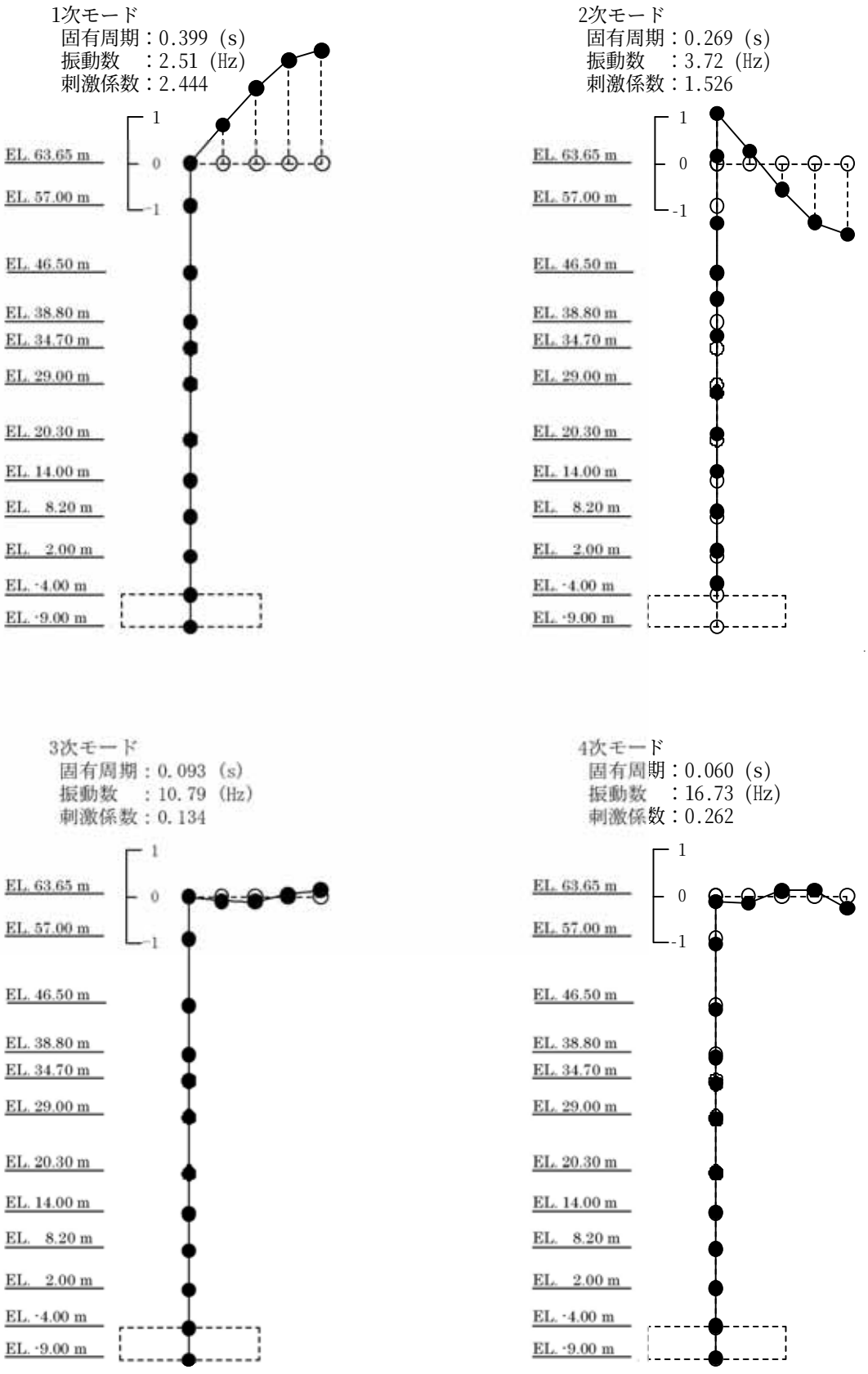
(a)　ＮＳ方向

第 5-17 図（1／3）　刺激関数（S_S－１３）



(b)　EW方向

第 5-17 図（2／3）　刺激関数（S_S－１３）



(c)　ＵＤ方向

第 5-17 図（3／3）　刺激関数（S_S－１３）

第 5-18 表　固有値（S_S－１４）

(a)　ＮＳ方向

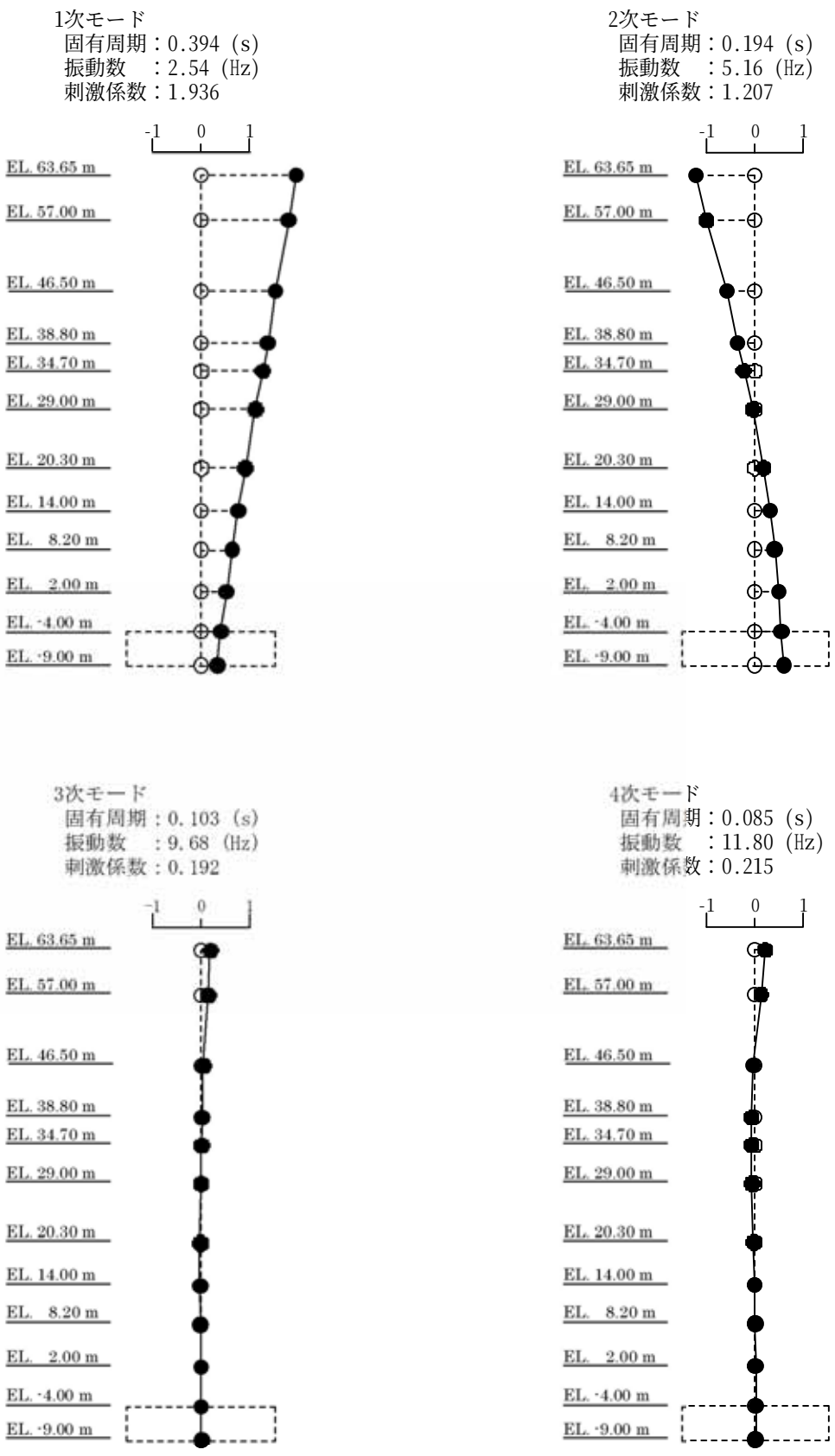
次　数	固有周期(s)	振動数(Hz)	刺激係数
1	0.394	2.54	1.936
2	0.194	5.16	-1.207
3	0.103	9.68	0.192
4	0.085	11.80	0.215
5	0.064	15.67	-0.163
6	0.052	19.18	0.018

(b)　ＥＷ方向

次　数	固有周期(s)	振動数(Hz)	刺激係数
1	0.396	2.53	1.962
2	0.194	5.16	-1.274
3	0.106	9.41	0.255
4	0.086	11.63	0.187
5	0.064	15.55	-0.157
6	0.051	19.78	0.014

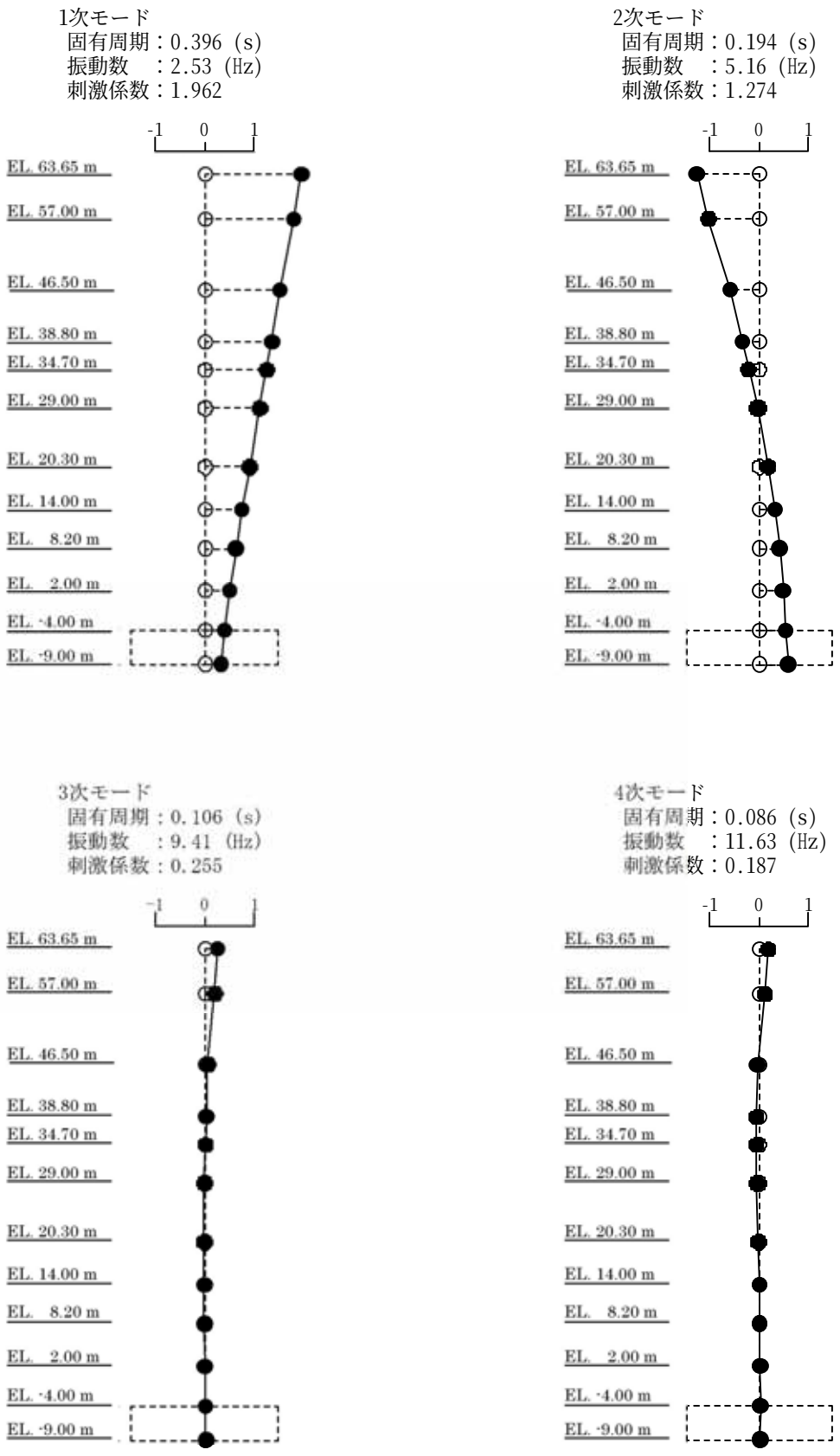
(c)　ＵＤ方向

次　数	固有周期(s)	振動数(Hz)	刺激係数
1	0.399	2.51	2.427
2	0.268	3.73	-1.510
3	0.093	10.79	0.136
4	0.060	16.73	-0.265
5	0.057	17.65	0.233
6	0.048	20.70	0.045



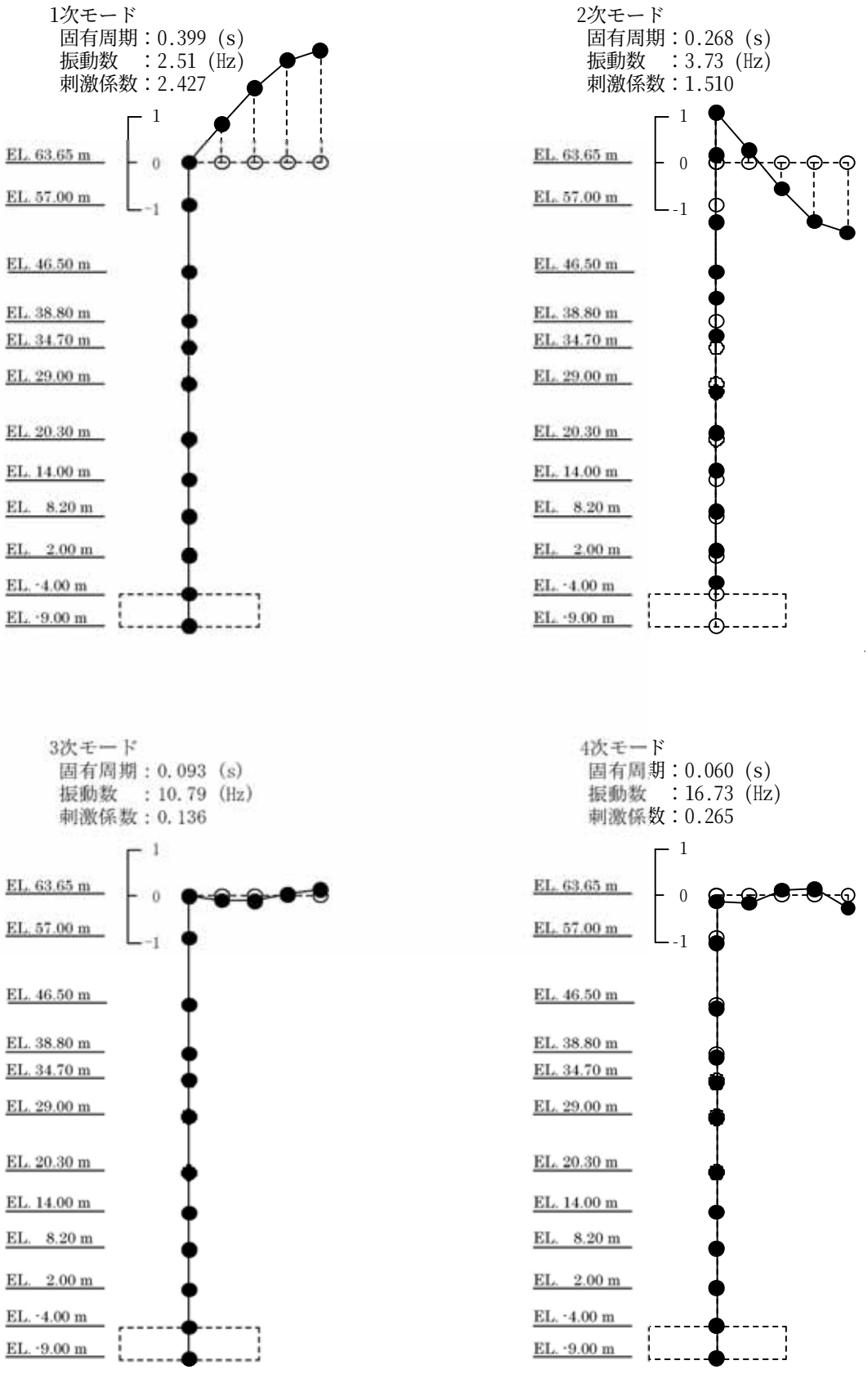
(a)　ＮＳ方向

第 5-18 図（1／3）　刺激関数（S_S－１４）



(b)　EW方向

第 5-18 図（2／3）　刺激関数（S_S－１４）



(c)　ＵＤ方向

第 5-18 図（3／3）　刺激関数（S_S－１４）

第 5-19 表　固有値（S_S－２１）

(a)　ＮＳ方向

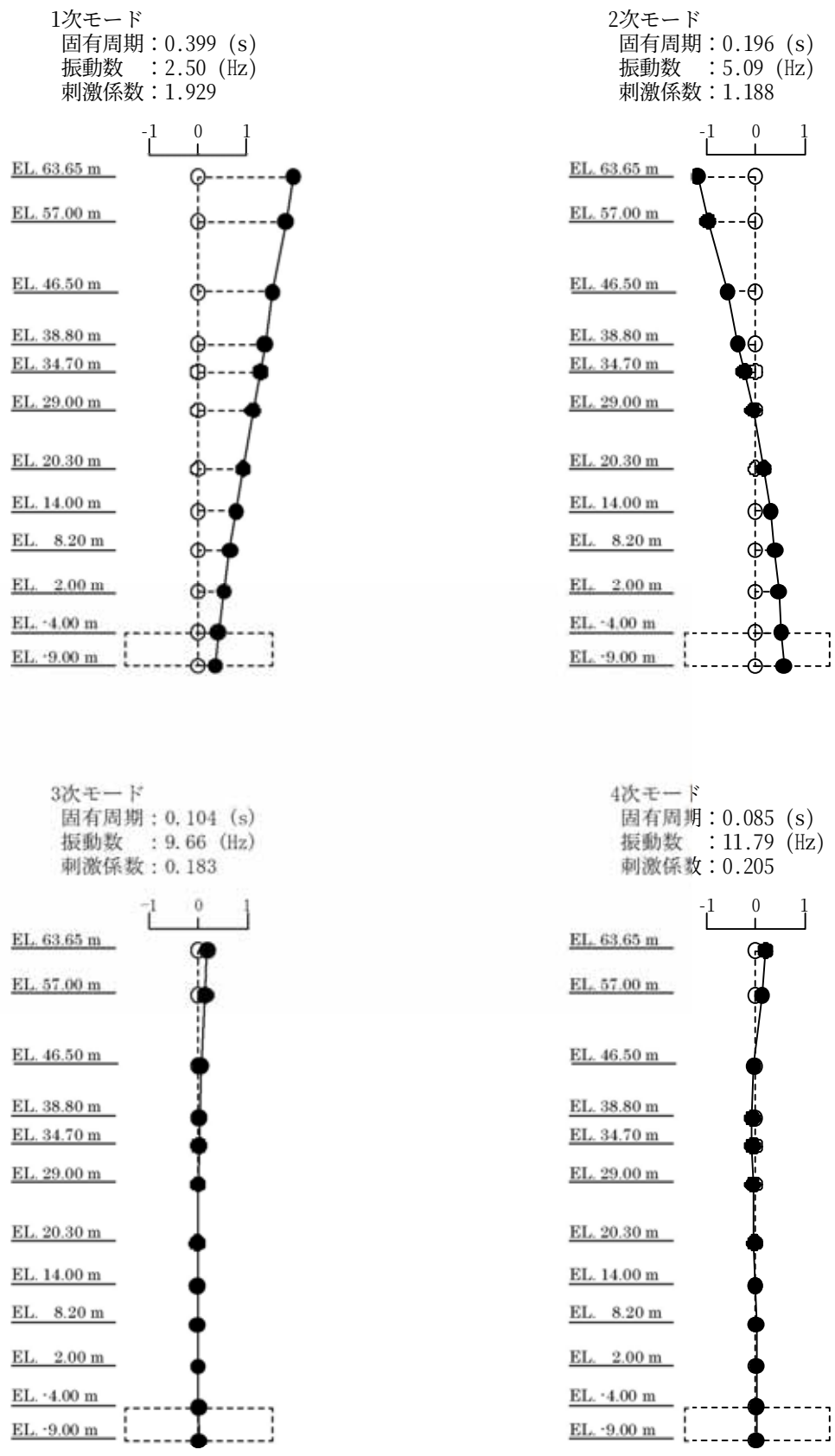
次　数	固有周期(s)	振動数(Hz)	刺激係数
1	0.399	2.50	1.929
2	0.196	5.09	-1.188
3	0.104	9.66	0.183
4	0.085	11.79	0.205
5	0.064	15.67	-0.156
6	0.052	19.17	0.017

(b)　ＥＷ方向

次　数	固有周期(s)	振動数(Hz)	刺激係数
1	0.401	2.49	1.954
2	0.196	5.09	-1.252
3	0.107	9.38	0.243
4	0.086	11.62	0.179
5	0.064	15.54	-0.150
6	0.051	19.78	0.014

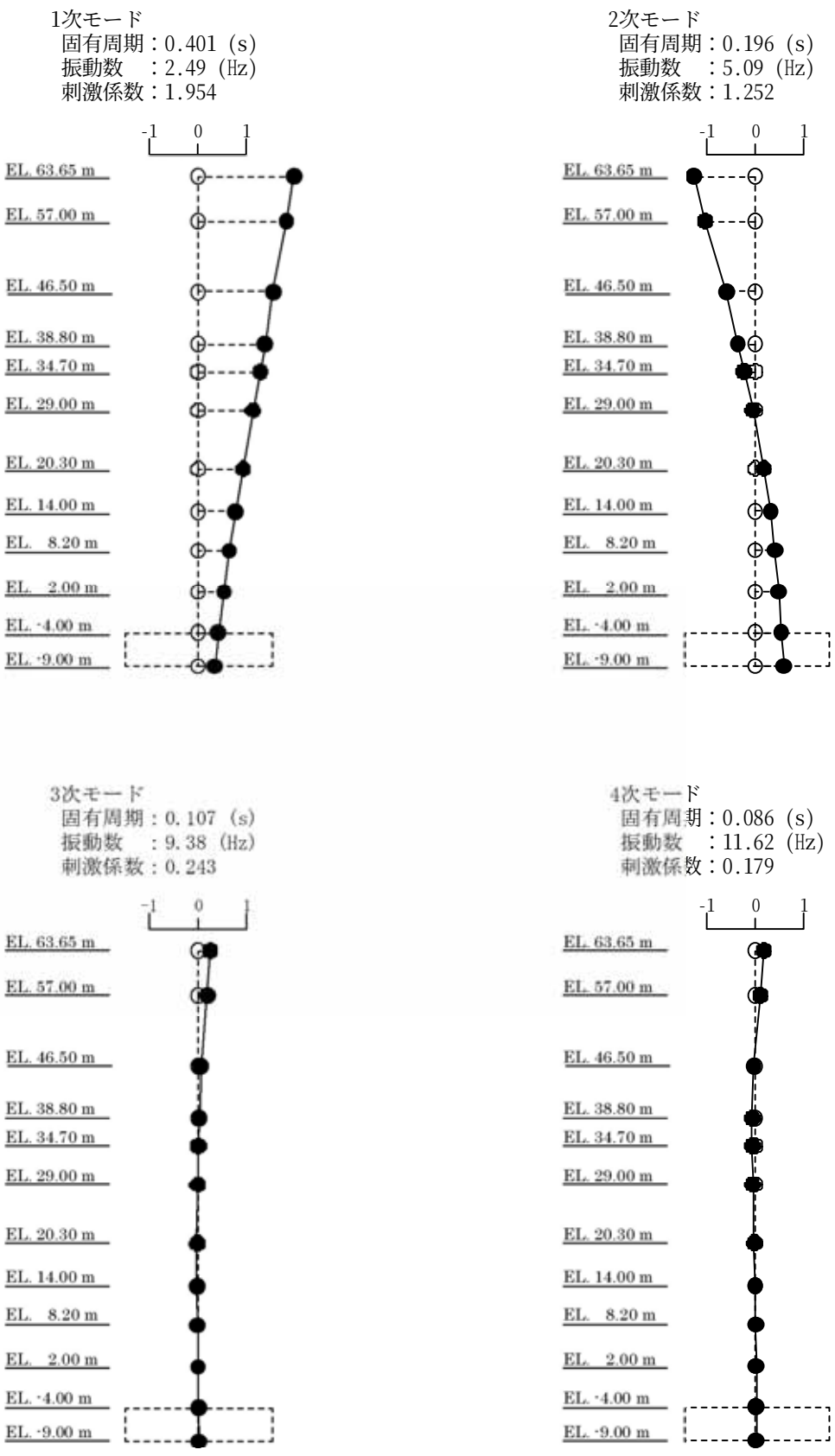
(c)　ＵＤ方向

次　数	固有周期(s)	振動数(Hz)	刺激係数
1	0.399	2.51	2.410
2	0.267	3.75	-1.495
3	0.093	10.79	0.137
4	0.060	16.73	-0.268
5	0.057	17.65	0.236
6	0.048	20.70	0.046



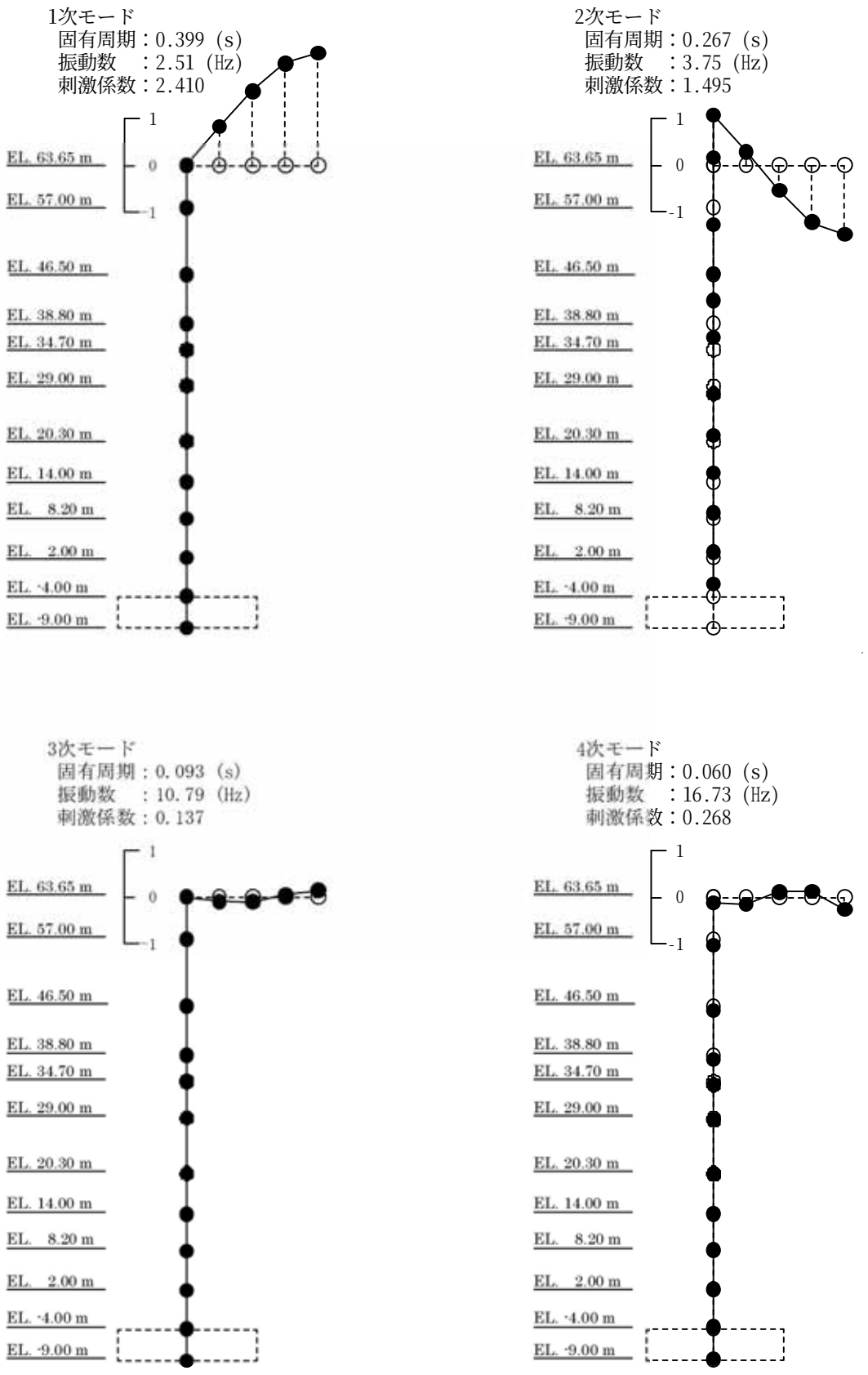
(a)　ＮＳ方向

第 5-19 図（1／3）　刺激関数（S_S－２１）



(b)　EW方向

第 5-19 図（2／3）　刺激関数（S_s－２１）



(c)　ＵＤ方向

第 5-19 図（3／3）　刺激関数（S_S－２１）

第 5-20 表　固有値（S_S－２２）

(a)　ＮＳ方向

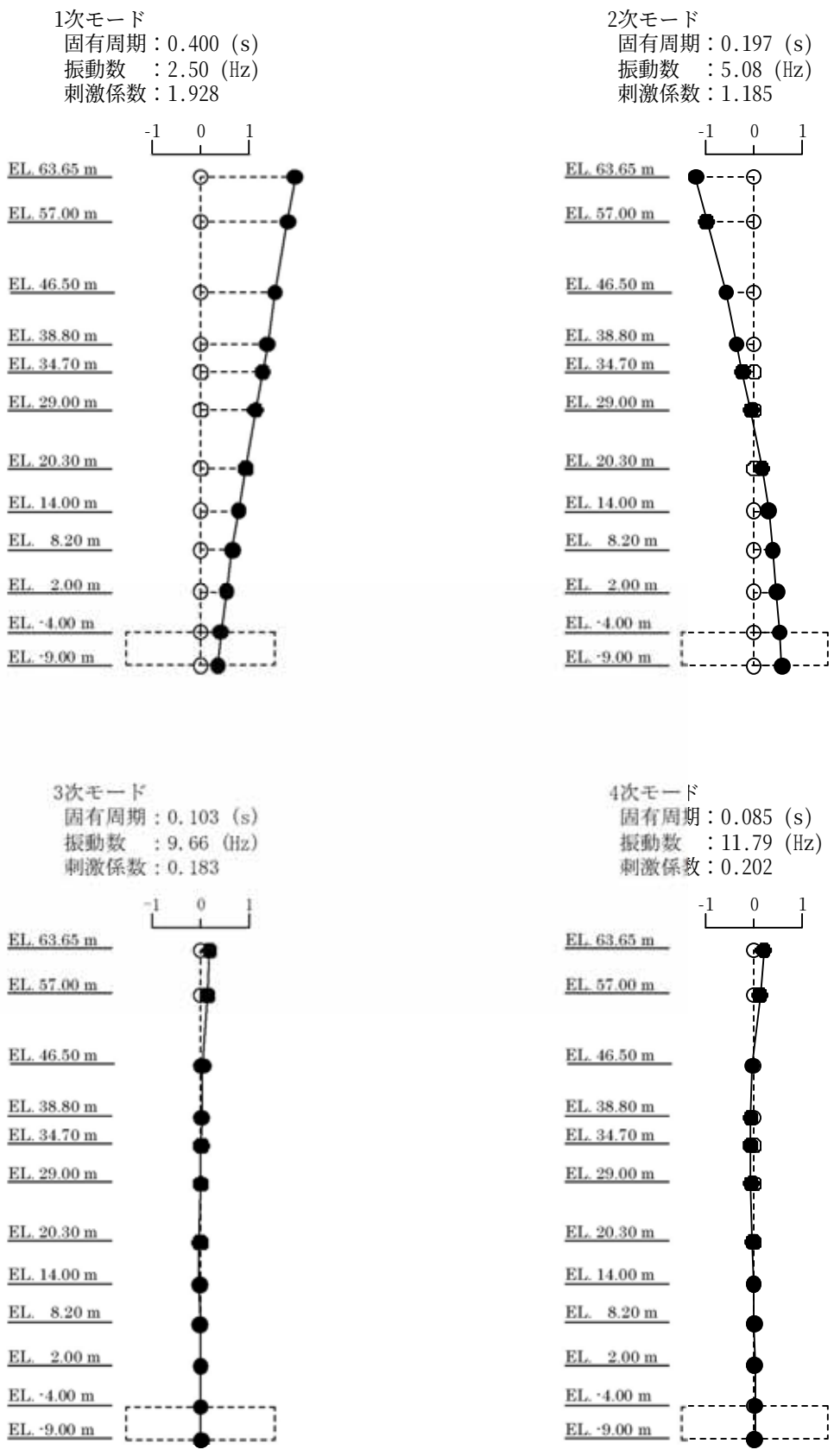
次　数	固有周期(s)	振動数(Hz)	刺激係数
1	0.400	2.50	1.928
2	0.197	5.08	-1.185
3	0.103	9.66	0.183
4	0.085	11.79	0.202
5	0.064	15.66	-0.155
6	0.052	19.17	0.017

(b)　ＥＷ方向

次　数	固有周期(s)	振動数(Hz)	刺激係数
1	0.402	2.49	1.953
2	0.197	5.08	-1.249
3	0.107	9.39	0.243
4	0.086	11.62	0.176
5	0.064	15.54	-0.149
6	0.051	19.78	0.013

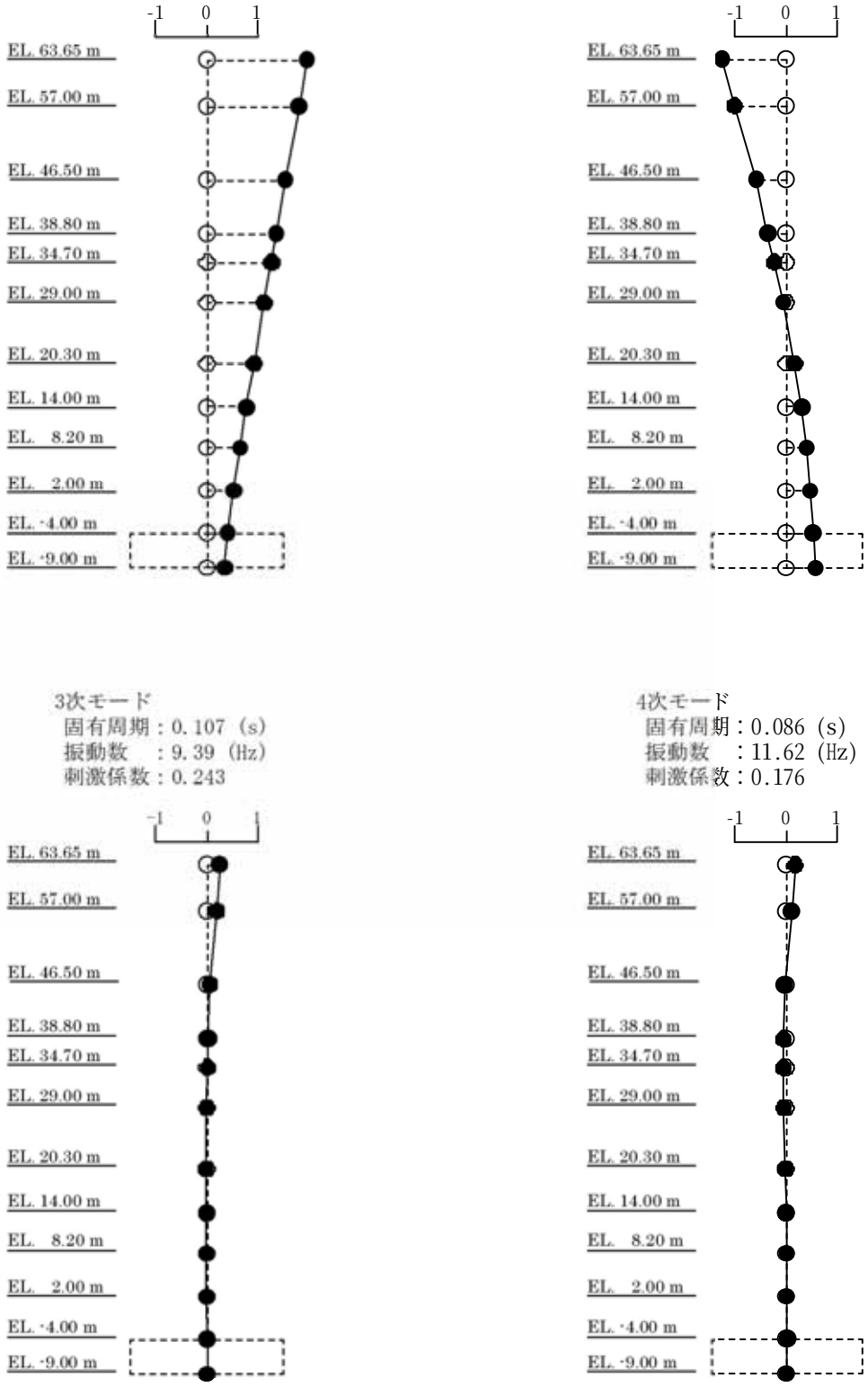
(c)　ＵＤ方向

次　数	固有周期(s)	振動数(Hz)	刺激係数
1	0.399	2.51	2.410
2	0.267	3.75	-1.495
3	0.093	10.79	0.137
4	0.060	16.73	-0.268
5	0.057	17.65	0.236
6	0.048	20.70	0.046



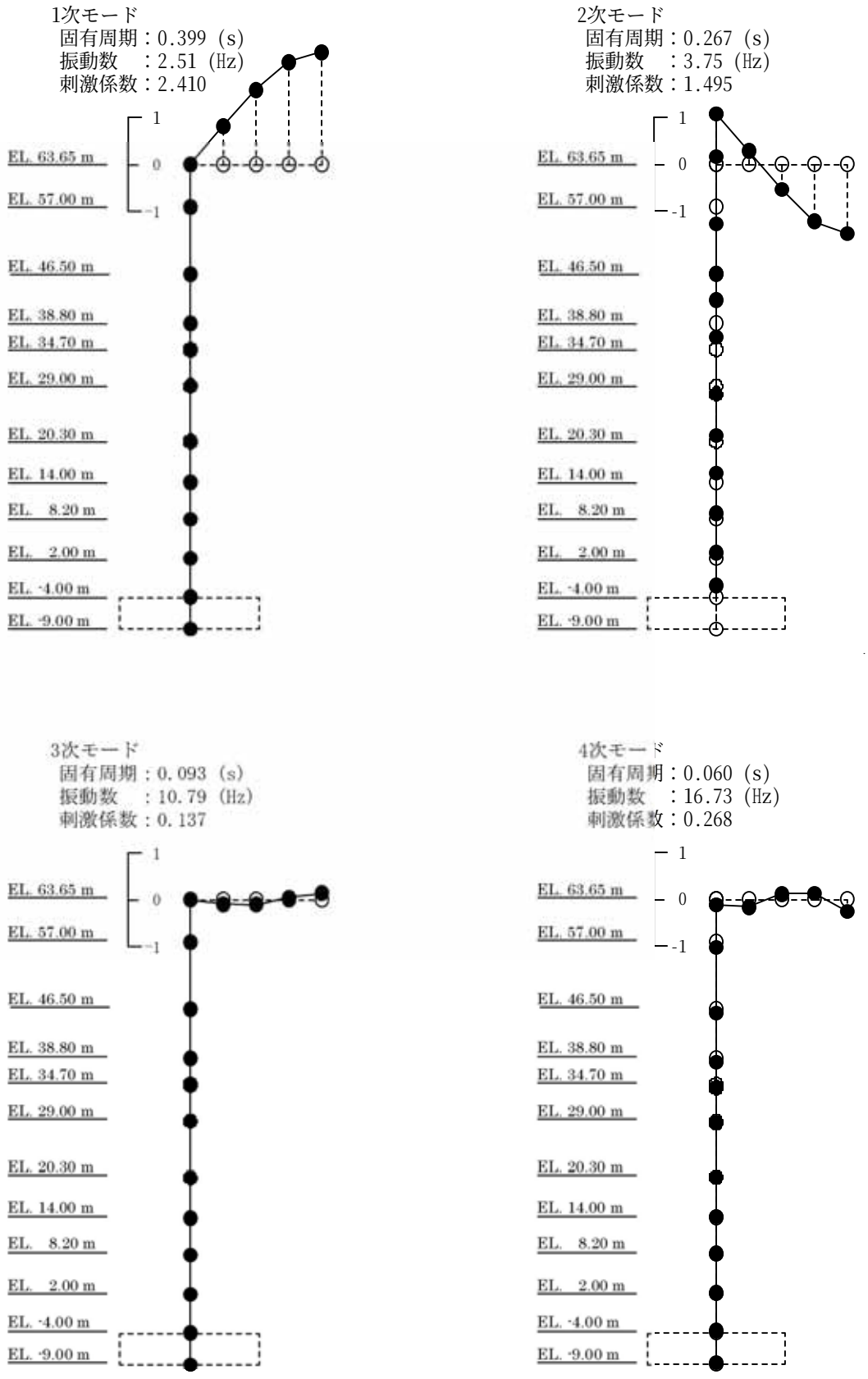
(a)　ＮＳ方向

第 5-20 図（1／3）　刺激関数（S_S－２２）



(b)　EW方向

第 5-20 図（2／3）　刺激関数（S_S－２２）



(c)　ＵＤ方向

第 5-20 図（3／3）　刺激関数（S_S－２２）

第 5-21 表　固有値（S_S－３１）

(a)　ＮＳ方向

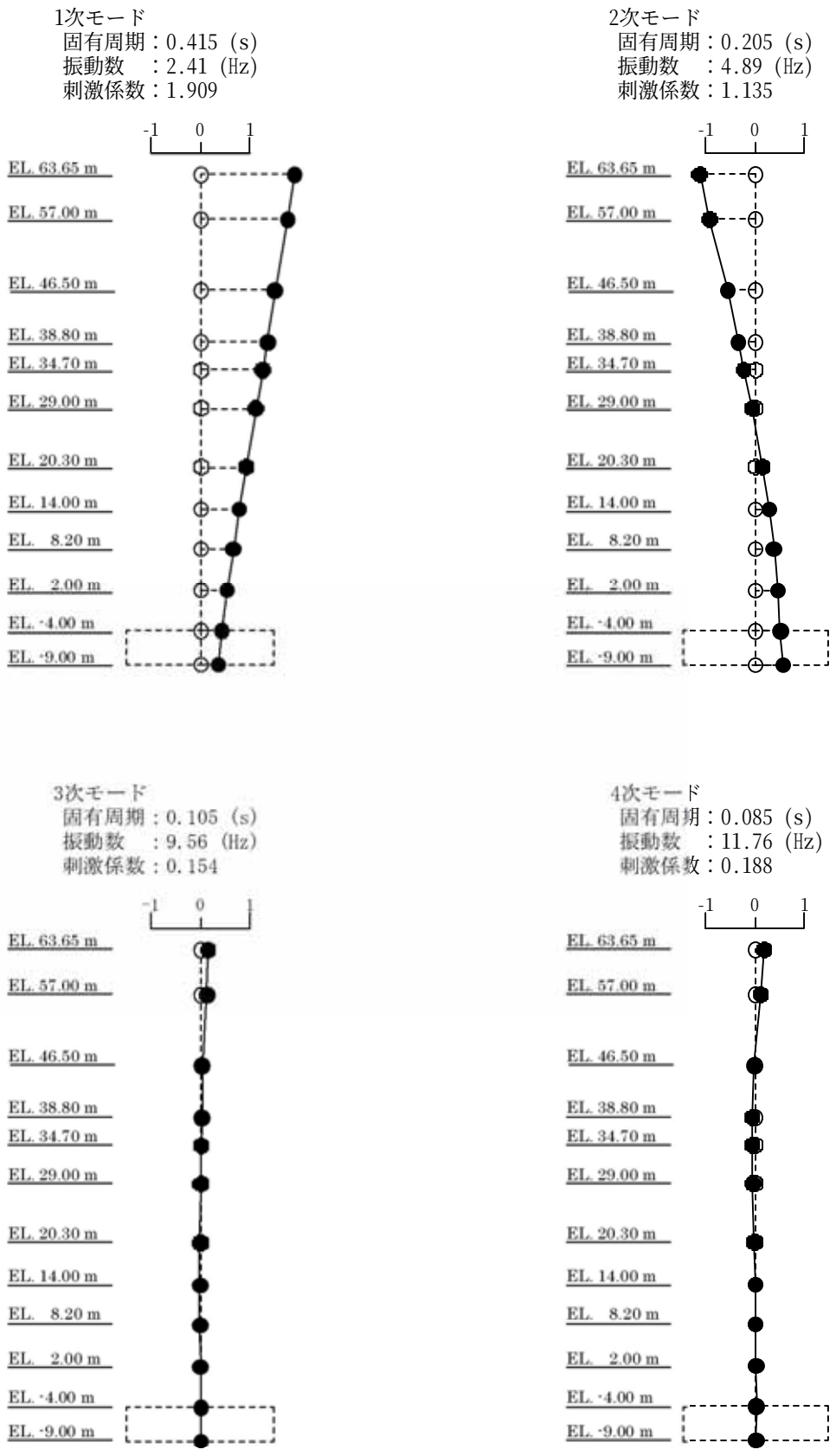
次　数	固有周期(s)	振動数(Hz)	刺激係数
1	0.415	2.41	1.909
2	0.205	4.89	-1.135
3	0.105	9.56	0.154
4	0.085	11.76	0.188
5	0.064	15.65	-0.139
6	0.052	19.13	0.015

(b)　ＥＷ方向

次　数	固有周期(s)	振動数(Hz)	刺激係数
1	0.417	2.40	1.933
2	0.205	4.89	-1.193
3	0.108	9.29	0.204
4	0.086	11.57	0.167
5	0.064	15.52	-0.134
6	0.051	19.75	0.012

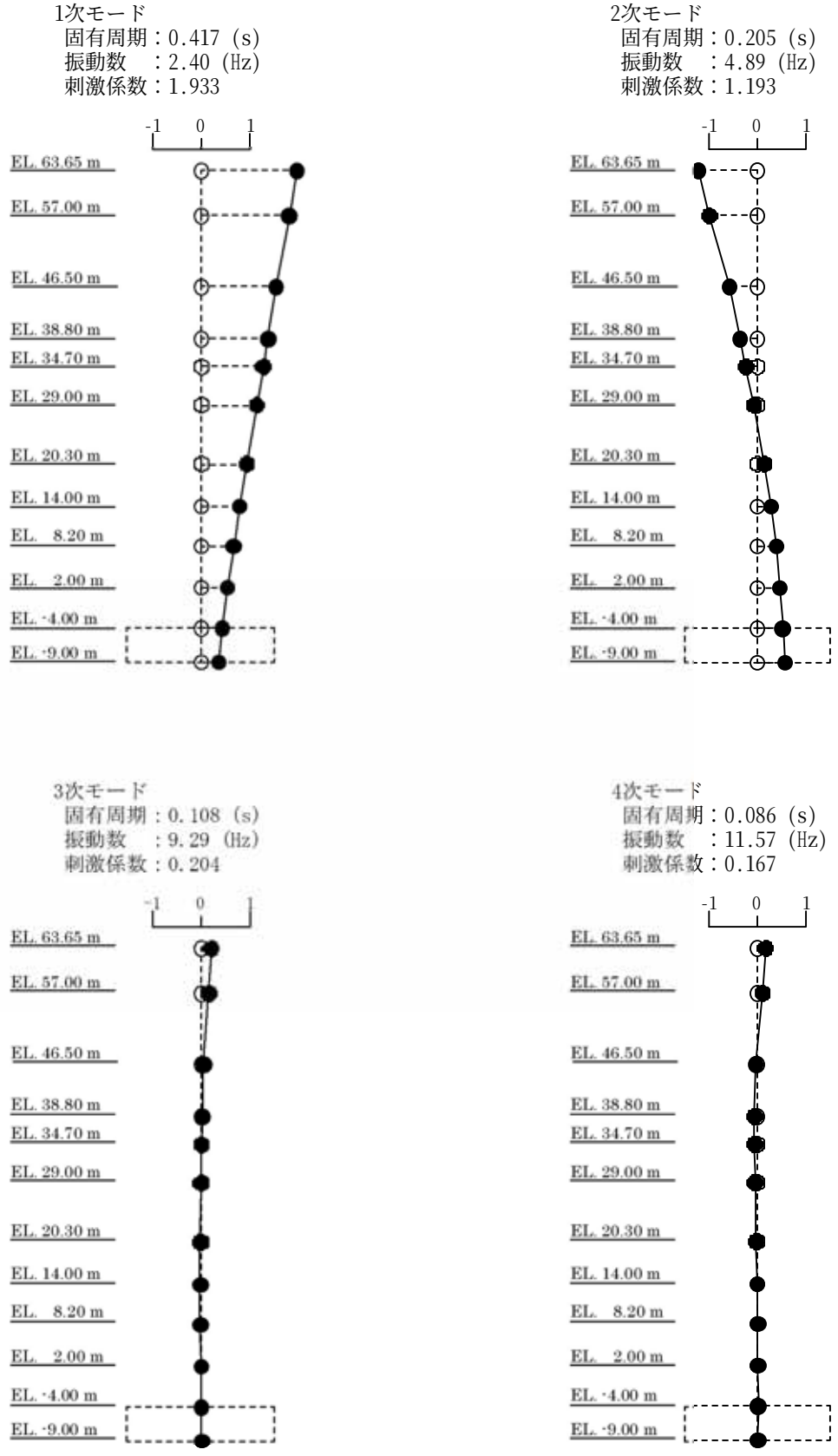
(c)　ＵＤ方向

次　数	固有周期(s)	振動数(Hz)	刺激係数
1	0.399	2.50	2.557
2	0.276	3.62	-1.635
3	0.093	10.79	0.127
4	0.060	16.71	-0.245
5	0.057	17.64	0.215
6	0.048	20.70	0.042



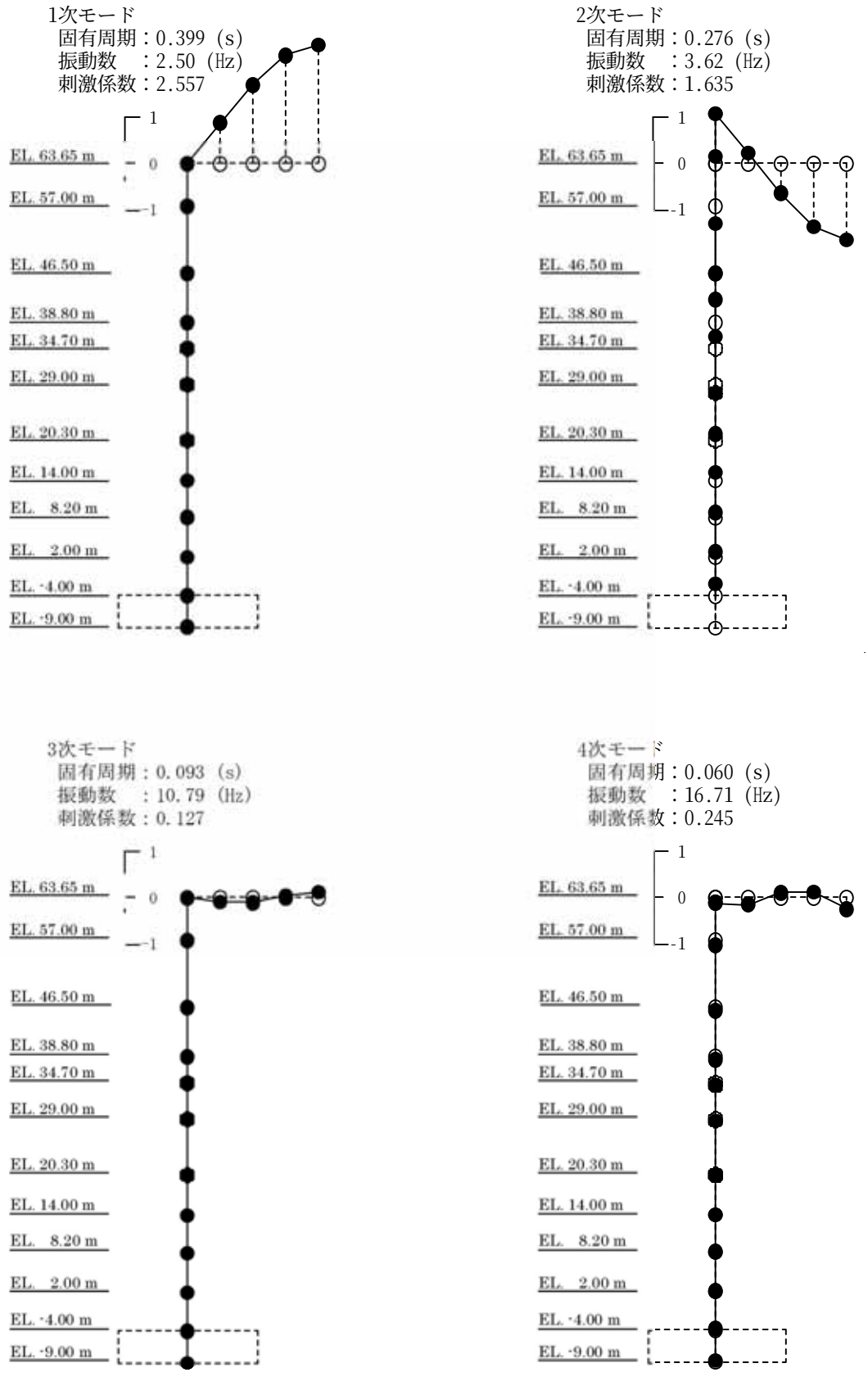
(a)　ＮＳ方向

第 5-21 図（1／3）　刺激関数（S_S－３１）



(b)　ＥＷ方向

第 5-21 図（2／3）　刺激関数（S_S－３１）

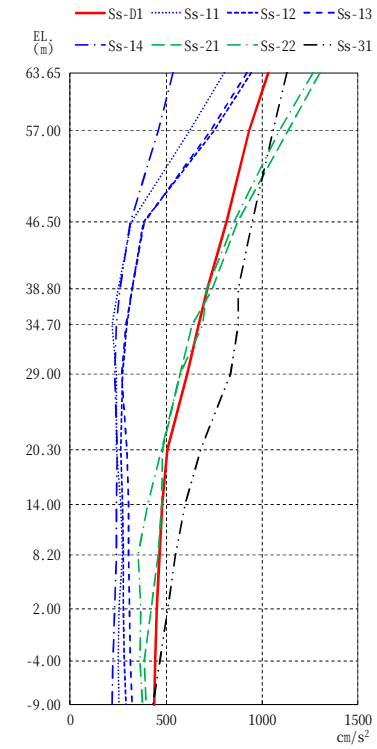


(c)　ＵＤ方向

第 5-21 図（3／3）　刺激関数（S_S－３１）

(3) 最大応答値

地震応答解析結果として，各質点位置の最大応答を第 5-22 図～第 5-29 図に示す。

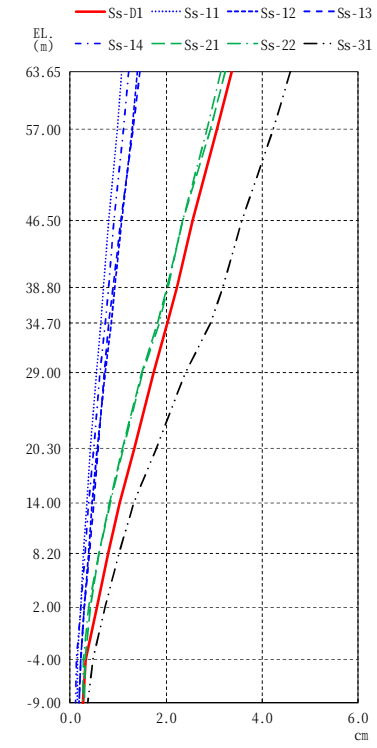


NS方向

（単位：cm/s²）

Ss-D1	Ss-11	Ss-12	Ss-13	Ss-14	Ss-21	Ss-22	Ss-31
1,033	803	942	920	535	1,303	1,268	1,129
933	622	749	729	459	1,134	1,091	1,059
813	318	382	386	314	872	853	948
715	250	321	321	260	740	714	877
669	220	295	289	241	637	688	877
611	243	274	269	233	572	573	836
508	243	265	294	245	481	477	680
481	265	275	304	243	477	403	597
467	275	279	303	242	459	353	550
454	257	278	311	234	423	367	508
441	250	283	313	221	386	362	468
437	257	292	323	217	393	378	429

第 5-22 図　最大応答加速度（ＮＳ方向）

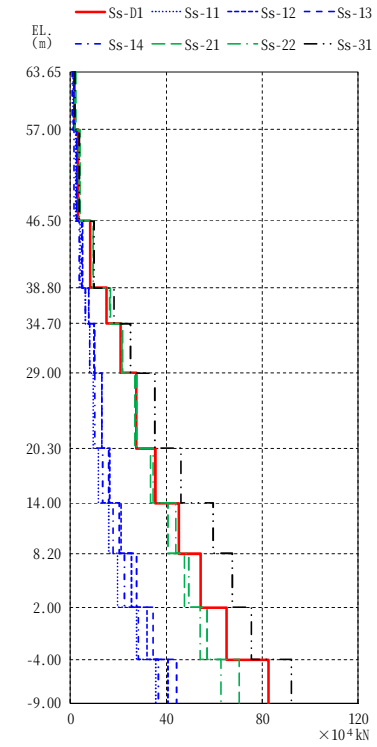


NS方向

（単位：cm）

Ss-D1	Ss-11	Ss-12	Ss-13	Ss-14	Ss-21	Ss-22	Ss-31
3.36	1.07	1.41	1.46	1.22	3.23	3.15	4.59
3.06	0.97	1.29	1.31	1.11	2.92	2.86	4.22
2.55	0.80	1.07	1.05	0.91	2.35	2.35	3.58
2.23	0.70	0.94	0.90	0.80	2.02	2.04	3.18
2.03	0.63	0.85	0.80	0.73	1.82	1.85	2.92
1.73	0.54	0.74	0.72	0.62	1.49	1.51	2.41
1.33	0.42	0.57	0.59	0.48	1.09	1.12	1.81
1.04	0.34	0.45	0.48	0.39	0.82	0.84	1.32
0.80	0.27	0.38	0.40	0.31	0.60	0.61	1.02
0.55	0.22	0.30	0.30	0.22	0.42	0.39	0.73
0.33	0.15	0.21	0.22	0.14	0.31	0.28	0.48
0.26	0.14	0.19	0.19	0.10	0.30	0.27	0.36

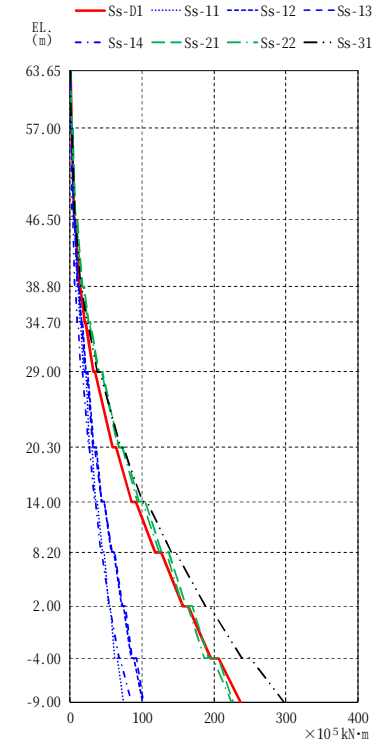
第 5-23 図　最大応答水平変位（ＮＳ方向）



(単位：×10⁴kN)

Ss-D1	Ss-11	Ss-12	Ss-13	Ss-14	Ss-21	Ss-22	Ss-31
1.66	1.31	1.54	1.51	0.871	2.12	2.05	1.84
3.13	2.31	2.78	2.72	1.63	3.96	3.85	3.52
8.21	4.05	5.11	4.92	3.75	9.54	9.36	9.89
15.2	6.16	7.69	7.81	6.17	16.7	16.3	18.3
20.9	7.89	10.0	10.2	7.90	22.0	21.4	25.0
27.5	9.58	13.0	13.1	10.3	26.8	27.5	35.4
35.3	11.6	16.3	16.0	13.4	33.4	34.6	46.3
45.4	16.2	21.0	20.4	17.7	40.6	44.1	59.6
54.2	19.5	25.4	27.7	22.6	47.7	49.3	67.7
65.3	27.5	32.0	34.7	28.5	57.1	54.2	75.7
82.7	35.7	40.8	44.5	36.6	70.3	62.7	92.3

第 5-24 図　最大応答せん断力（ＮＳ方向）

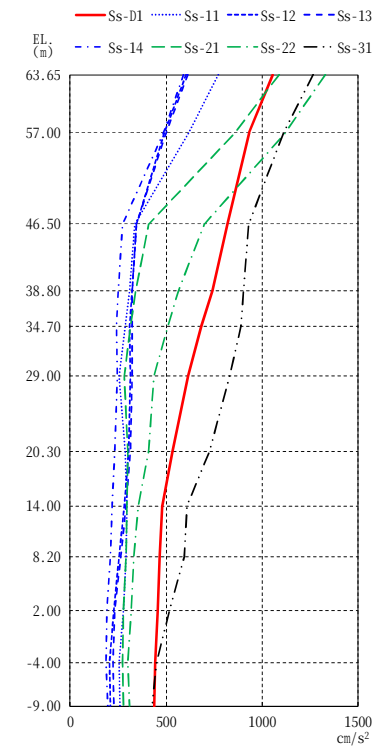


(単位：×10⁵kN･m)

Ss-D1	Ss-11	Ss-12	Ss-13	Ss-14	Ss-21	Ss-22	Ss-31
0.572	0.586	0.537	0.516	0.299	0.806	0.714	0.512
1.48	1.46	1.56	1.52	0.858	2.22	2.08	1.70
2.29	2.27	2.31	2.24	1.25	3.34	3.08	2.38
5.24	4.69	5.23	5.10	2.96	7.50	7.11	5.90
6.77	6.35	6.78	6.57	3.80	9.79	9.20	7.23
12.5	9.44	10.7	10.4	6.68	16.8	16.0	14.4
14.3	11.5	12.6	12.2	7.73	19.7	18.7	16.1
19.9	13.7	15.6	15.0	10.2	26.0	24.9	23.3
21.0	15.1	16.8	16.2	10.9	28.0	26.7	24.4
32.1	18.4	21.6	20.7	15.3	39.8	38.6	38.1
35.0	21.9	24.8	23.7	17.1	45.2	43.5	41.4
58.9	26.9	32.6	31.9	25.3	68.5	66.4	69.8
63.3	30.6	36.0	34.3	27.0	75.4	73.0	73.7
85.5	35.0	43.8	44.3	33.9	95.8	93.2	101
92.1	37.9	46.9	47.3	35.6	104	101	107
118	44.4	57.4	58.3	42.6	127	124	141
126	47.4	61.0	61.7	44.3	137	133	147
157	53.6	71.4	73.2	54.4	161	156	188
164	56.0	74.3	76.1	55.0	169	164	194
195	61.6	84.9	86.4	68.4	192	187	239
207	66.0	88.9	91.6	69.5	206	198	250
237	73.5	101	102	84.3	226	224	296
235	72.7	100	101	84.1	224	223	296

（欄外の値は、底面地盤回転ばねの反力を示す。）

第 5-25 図　最大応答曲げモーメント（ＮＳ方向）

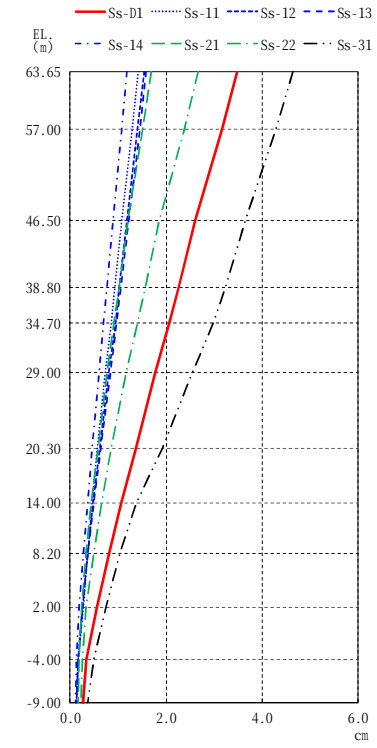


EW方向

（単位：cm/s²）

Ss-D1	Ss-11	Ss-12	Ss-13	Ss-14	Ss-21	Ss-22	Ss-31
1,054	770	604	614	592	1,089	1,328	1,264
931	619	491	499	486	858	1,119	1,112
818	336	347	347	272	410	699	932
744	309	322	323	250	340	564	904
685	289	311	323	243	315	511	889
615	257	314	324	245	281	437	833
535	285	306	314	230	301	407	726
482	295	282	290	218	297	355	610
466	290	256	264	209	293	331	596
455	275	227	234	192	280	320	516
442	256	207	223	188	272	302	450
438	258	210	228	196	278	308	425

第 5-26 図　最大応答加速度（ＥＷ方向）

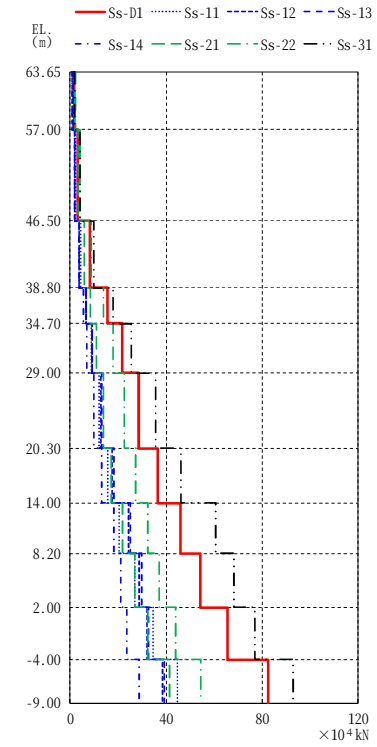


EW方向

（単位：cm）

Ss-D1	Ss-11	Ss-12	Ss-13	Ss-14	Ss-21	Ss-22	Ss-31
3.47	1.42	1.54	1.59	1.18	1.69	2.66	4.66
3.16	1.30	1.40	1.45	1.07	1.52	2.38	4.28
2.61	1.08	1.18	1.21	0.88	1.20	1.85	3.65
2.27	0.94	1.03	1.06	0.77	1.02	1.57	3.23
2.07	0.85	0.94	0.97	0.70	0.92	1.40	2.98
1.78	0.73	0.81	0.83	0.60	0.77	1.16	2.54
1.37	0.56	0.63	0.64	0.46	0.58	0.86	1.94
1.06	0.45	0.48	0.50	0.36	0.45	0.65	1.38
0.81	0.36	0.36	0.37	0.27	0.33	0.49	1.03
0.56	0.27	0.25	0.26	0.19	0.24	0.34	0.74
0.34	0.17	0.16	0.16	0.12	0.19	0.25	0.49
0.27	0.13	0.14	0.13	0.10	0.17	0.21	0.37

第 5-27 図　最大応答水平変位（ＥＷ方向）

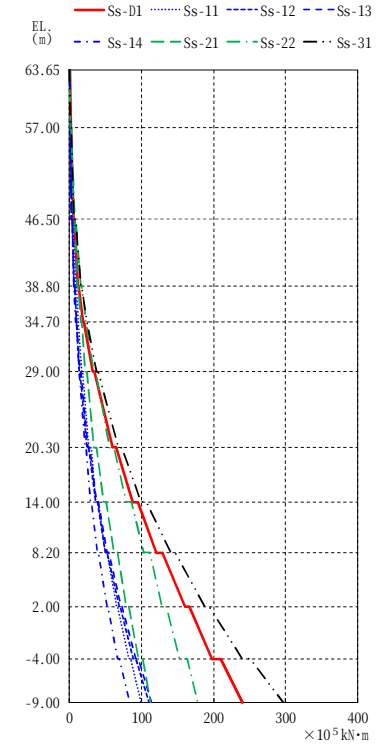


EW方向

(単位：×10⁴kN)

Ss-D1	Ss-11	Ss-12	Ss-13	Ss-14	Ss-21	Ss-22	Ss-31
1.72	1.26	0.969	0.987	0.966	1.76	2.14	2.05
3.26	2.28	1.77	1.80	1.77	3.17	3.98	3.88
8.30	4.33	3.70	3.80	3.52	5.81	8.74	9.89
15.6	6.69	6.72	6.68	5.41	8.47	14.0	17.9
21.5	8.85	9.29	9.17	7.03	10.8	17.9	25.3
28.7	12.1	12.7	13.0	9.69	13.9	22.6	35.6
36.6	15.7	17.5	18.2	13.3	17.3	27.2	46.3
46.1	20.5	24.3	25.1	18.3	21.8	32.5	60.7
54.4	26.8	28.9	29.8	21.2	26.8	36.9	68.3
65.4	34.7	32.0	32.9	23.7	32.2	43.9	77.1
82.6	44.6	38.4	39.4	28.7	41.3	54.5	93.0

第 5-28 図　最大応答せん断力（ＥＷ方向）



EW方向

(単位：×10⁵kN･m)

Ss-D1	Ss-11	Ss-12	Ss-13	Ss-14	Ss-21	Ss-22	Ss-31
0.529	0.421	0.298	0.284	0.264	0.546	0.606	0.622
1.47	1.20	0.909	0.919	0.871	1.71	2.02	1.98
2.22	1.77	1.28	1.28	1.19	2.47	2.85	2.81
5.32	4.11	3.14	3.18	3.05	5.79	7.03	6.84
6.63	5.20	3.87	3.91	3.66	7.28	8.81	8.31
12.3	8.40	6.60	6.65	6.37	11.7	15.5	15.7
13.4	9.36	7.21	7.26	6.87	12.9	17.1	16.9
19.5	11.8	9.44	9.48	9.09	16.2	22.8	23.9
20.2	12.4	9.82	9.86	9.39	17.0	23.8	24.7
32.2	17.0	14.1	14.4	13.3	22.6	33.9	37.9
34.9	18.8	15.0	15.5	14.1	24.7	37.1	40.6
59.8	27.1	24.9	25.8	21.5	34.5	56.3	67.8
65.2	30.1	26.8	27.7	22.9	37.9	62.2	72.9
87.9	36.5	36.3	37.6	29.3	46.8	78.3	99.8
94.8	39.9	38.5	40.1	31.0	51.1	85.7	107
121	49.5	50.4	52.4	38.8	62.4	103	140
129	51.7	52.7	54.9	40.1	66.8	111	147
160	65.5	68.6	71.4	52.4	79.4	129	188
166	67.3	70.5	73.3	53.6	82.9	135	194
198	81.9	88.7	92.0	67.2	95.9	152	240
210	84.9	92.0	95.5	69.4	102	164	251
240	99.2	110	114	83.4	113	178	297
237	98.8	109	113	83.0	112	177	297

（欄外の値は、底面地盤回転ばねの反力を示す。）

第 5-29 図　最大応答曲げモーメント（ＥＷ方向）

（4）接地率

建物の接地率を地震応答解析結果から得られた底面地盤回転ばねの回転角最大時の転倒モーメントより算出し，第 5-22 表に示す。

接地率は，基礎浮き上がりを線形とした地震応答解析結果を用いることができる 75%以上である。

第 5-22 表　接地率（原子炉建屋，基準地震動Ｓ$_S$）

		ＮＳ方向	ＥＷ方向
総重量 Ｗ（kN）		1,932,940	
基礎幅Ｌ（m）		68.50	68.25
浮き上がり限界転倒ﾓｰﾒﾝﾄ M_0（$\times 10^6$kN･m）		22.0	21.9
最大転倒ﾓｰﾒﾝﾄ M_{max} （$\times 10^6$ kN･m）	Ｓ$_S$－Ｄ１	23.5	23.7
	Ｓ$_S$－１１	7.27	9.88
	Ｓ$_S$－１２	10.0	10.9
	Ｓ$_S$－１３	10.1	11.3
	Ｓ$_S$－１４	8.41	8.30
	Ｓ$_S$－２１	22.4	11.2
	Ｓ$_S$－２２	22.3	17.7
	Ｓ$_S$－３１	29.6	29.7
接地率 η（%）	Ｓ$_S$－Ｄ１	96.8	96.1
	Ｓ$_S$－１１	100.0	100.0
	Ｓ$_S$－１２	100.0	100.0
	Ｓ$_S$－１３	100.0	100.0
	Ｓ$_S$－１４	100.0	100.0
	Ｓ$_S$－２１	99.2	100.0
	Ｓ$_S$－２２	99.5	100.0
	Ｓ$_S$－３１	82.9	82.5

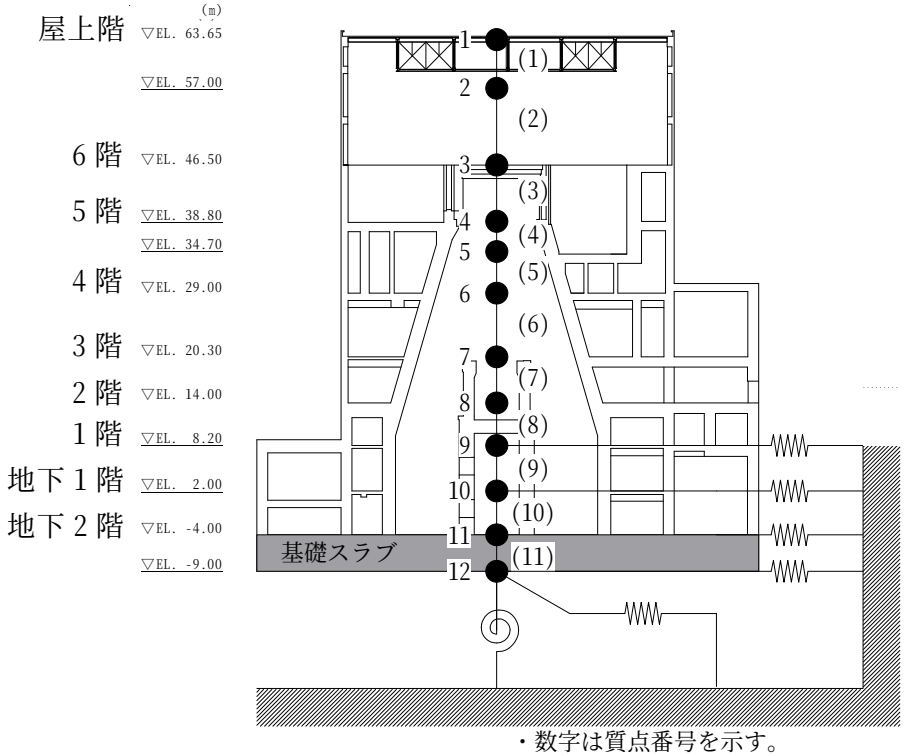
5.6　評価結果

基準地震動S_sによる耐震壁の最大応答せん断ひずみを評価基準値と比較して第 5-23 表に，最大応答値をせん断スケルトン曲線上にプロットして第 5-30 図～第 5-37 図に示す。

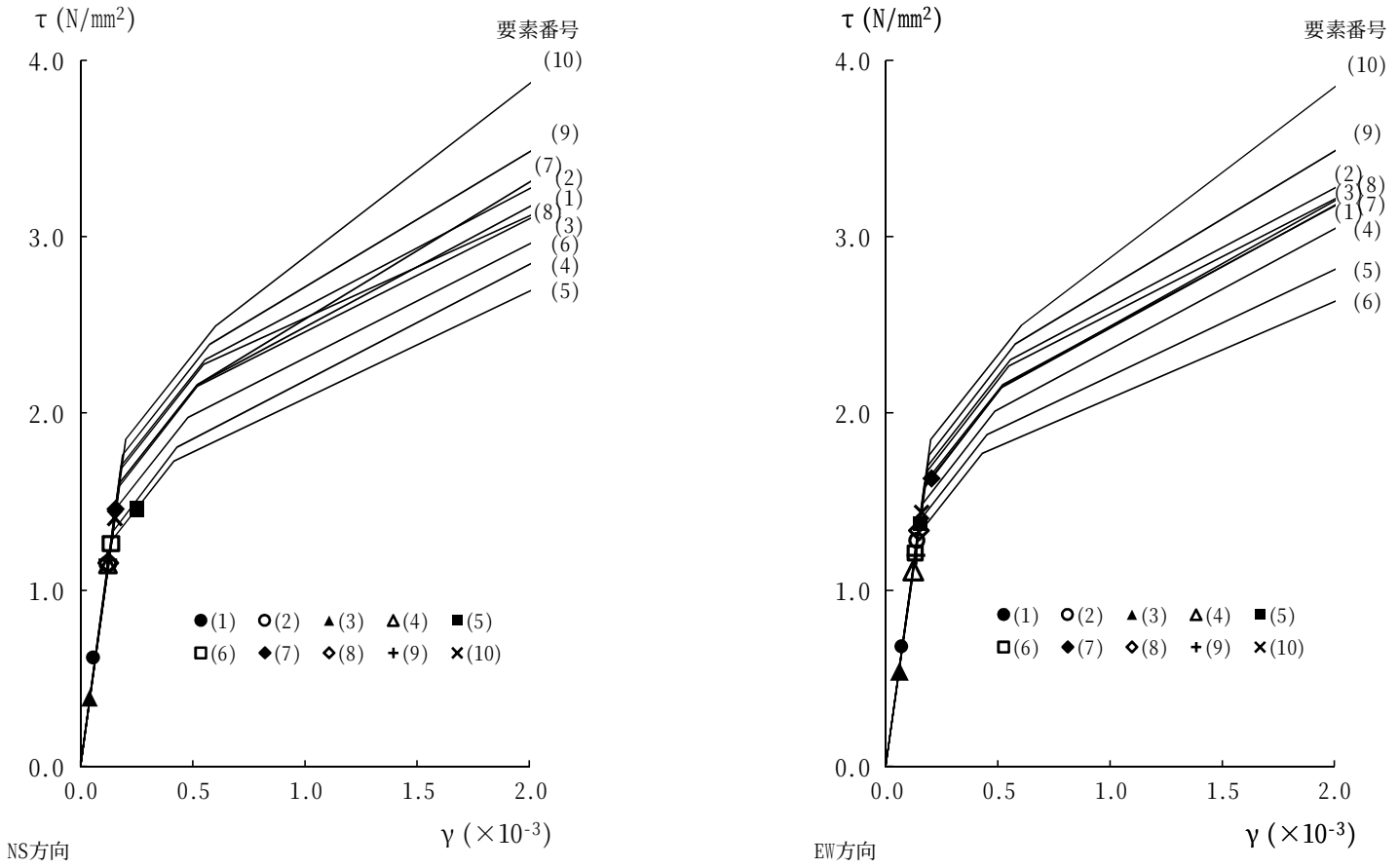
耐震壁のせん断ひずみは最大で 0.47×10^{-3}（S_s－３１，ＥＷ方向，2 階）であり，評価基準値（2.0×10^{-3}）に対して十分な余裕がある。

第 5-23 表　基準地震動Ｓ$_S$による耐震壁の最大応答せん断ひずみ

基準地震動Ｓ$_S$	方向	発生部位	発生値	評価基準値
Ｓ$_S$－Ｄ１	ＮＳ	4 階 要素番号(5)	0.25×10^{-3}	2.0×10^{-3}
Ｓ$_S$－１１	ＥＷ	6 階 要素番号(2)	0.10×10^{-3}	
Ｓ$_S$－１２	ＮＳ	6 階 要素番号(2)	0.11×10^{-3}	
Ｓ$_S$－１３	ＮＳ	6 階 要素番号(2)	0.11×10^{-3}	
Ｓ$_S$－１４	ＥＷ	6 階 要素番号(2)	0.08×10^{-3}	
Ｓ$_S$－２１	ＮＳ	4 階 要素番号(5)	0.30×10^{-3}	
Ｓ$_S$－２２	ＮＳ	4 階 要素番号(5)	0.27×10^{-3}	
Ｓ$_S$－３１	ＥＷ	2 階 要素番号(7)	0.47×10^{-3}	

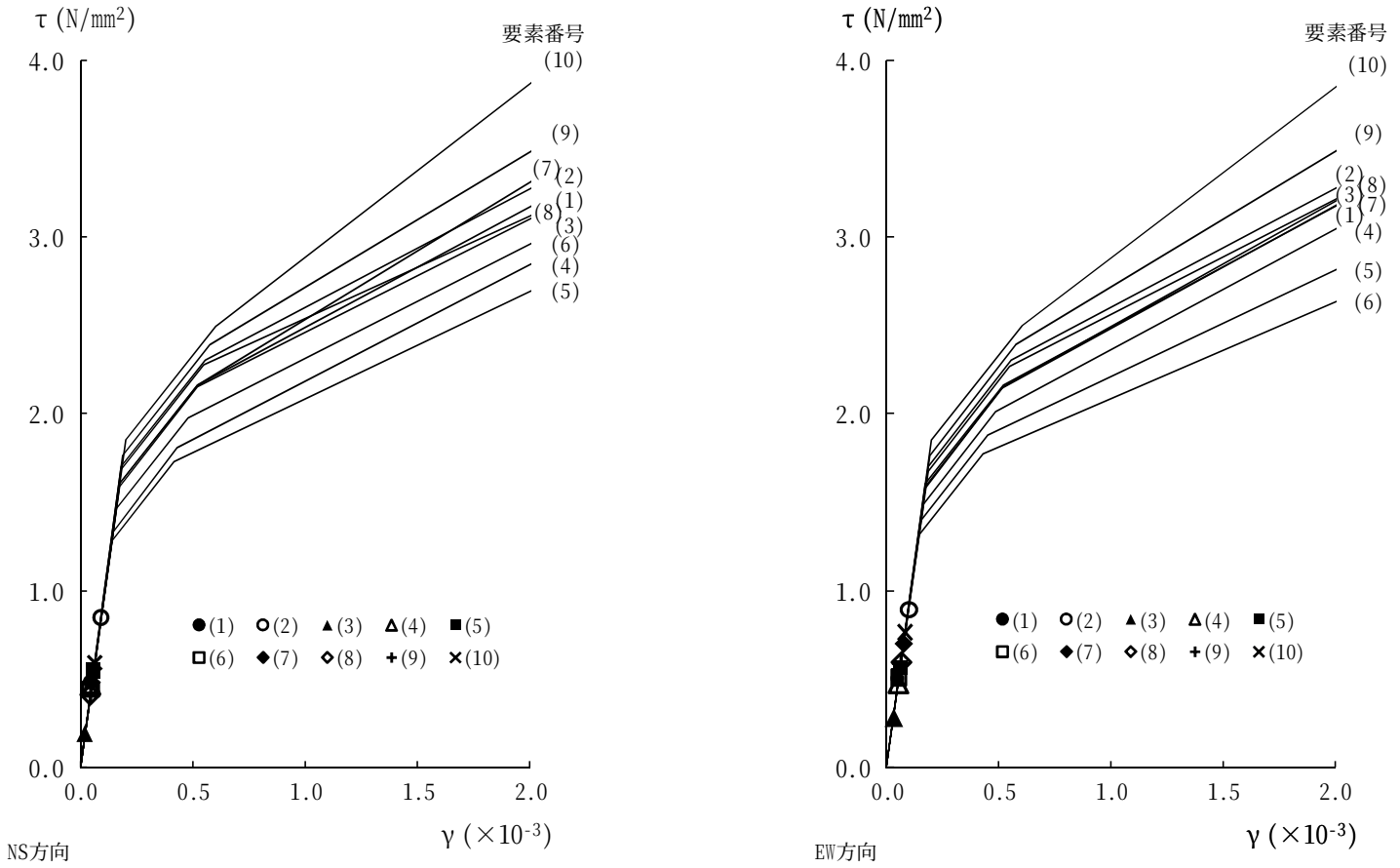


・数字は質点番号を示す。
・( )内は要素番号を示す。



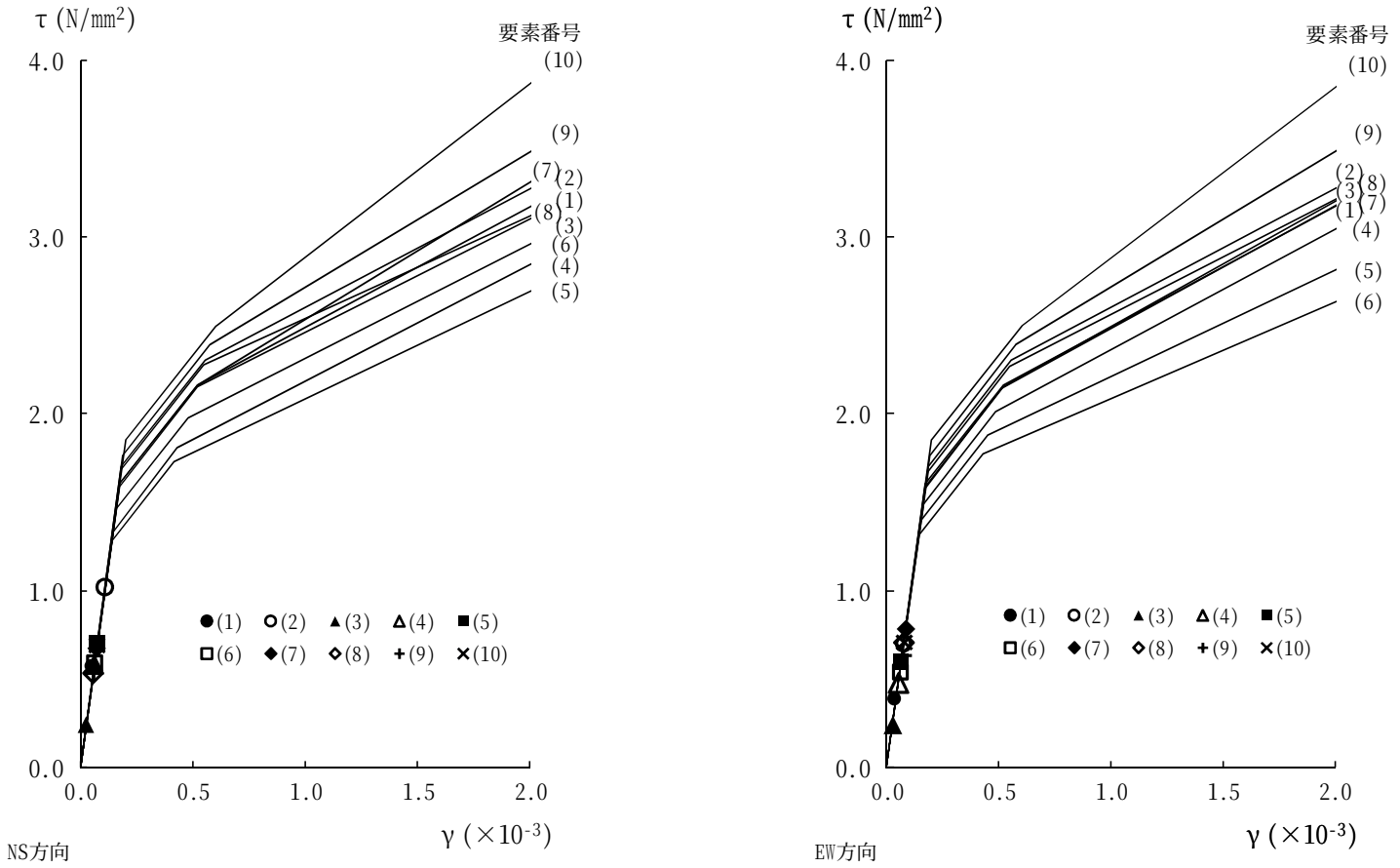
(a)　ＮＳ方向　　(b)　ＥＷ方向

第 5-30 図　せん断スケルトン曲線上の最大応答値（S_S－Ｄ１）



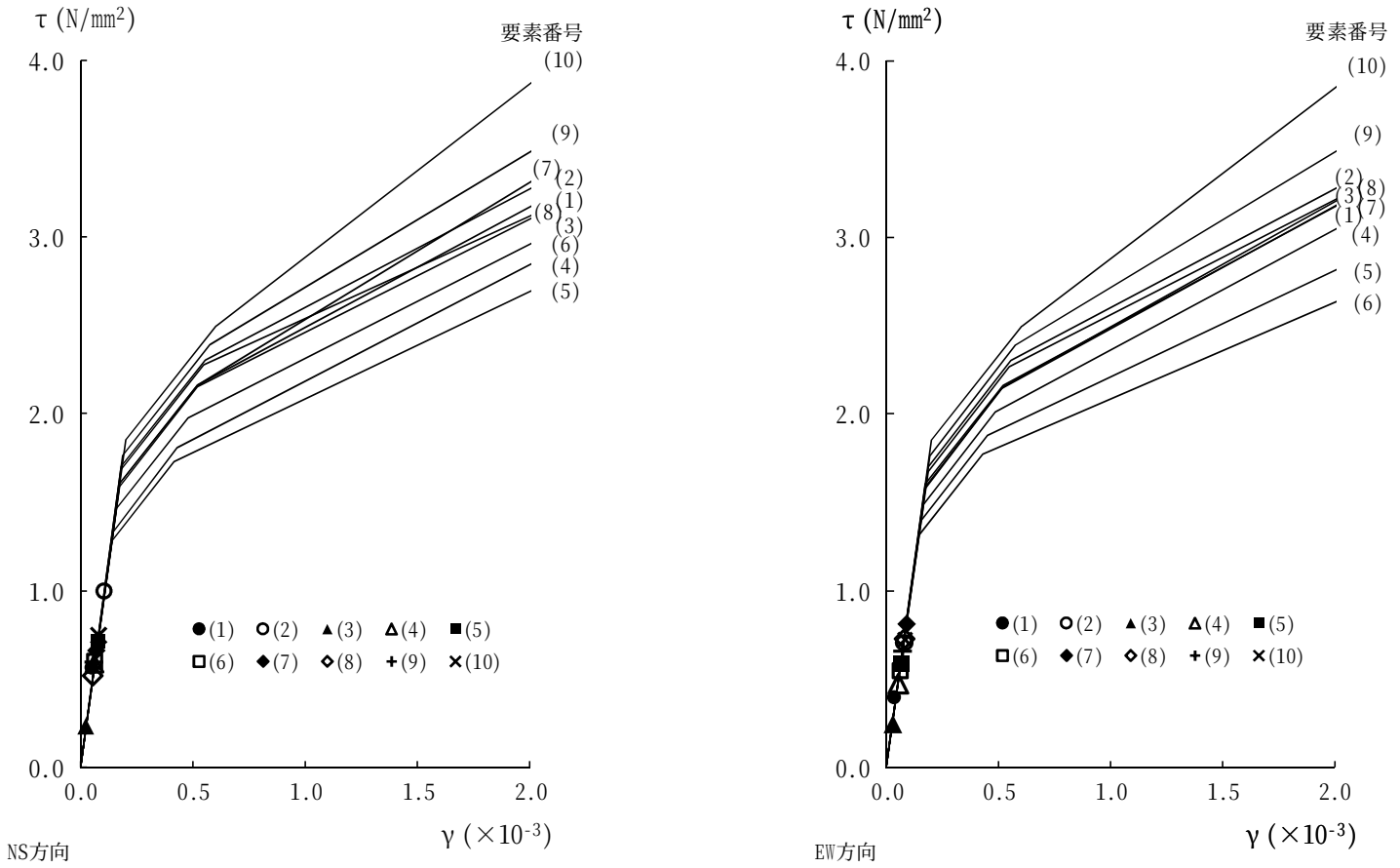
(a)　ＮＳ方向　　(b)　ＥＷ方向

第 5-31 図　せん断スケルトン曲線上の最大応答値（Ｓｓ－１１）



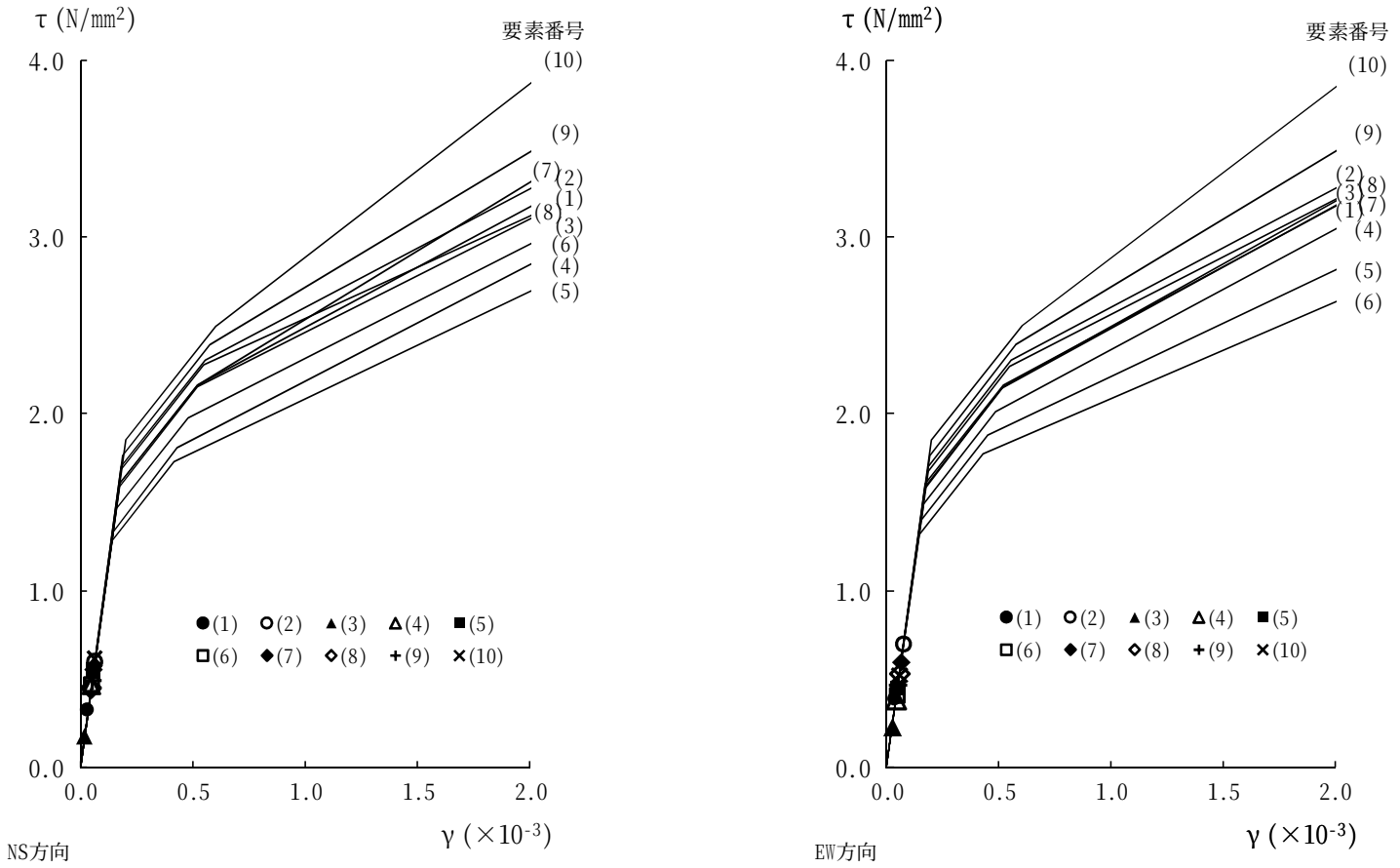
(a)　ＮＳ方向　　(b)　ＥＷ方向

第 5-32 図　せん断スケルトン曲線上の最大応答値（S_S－１２）



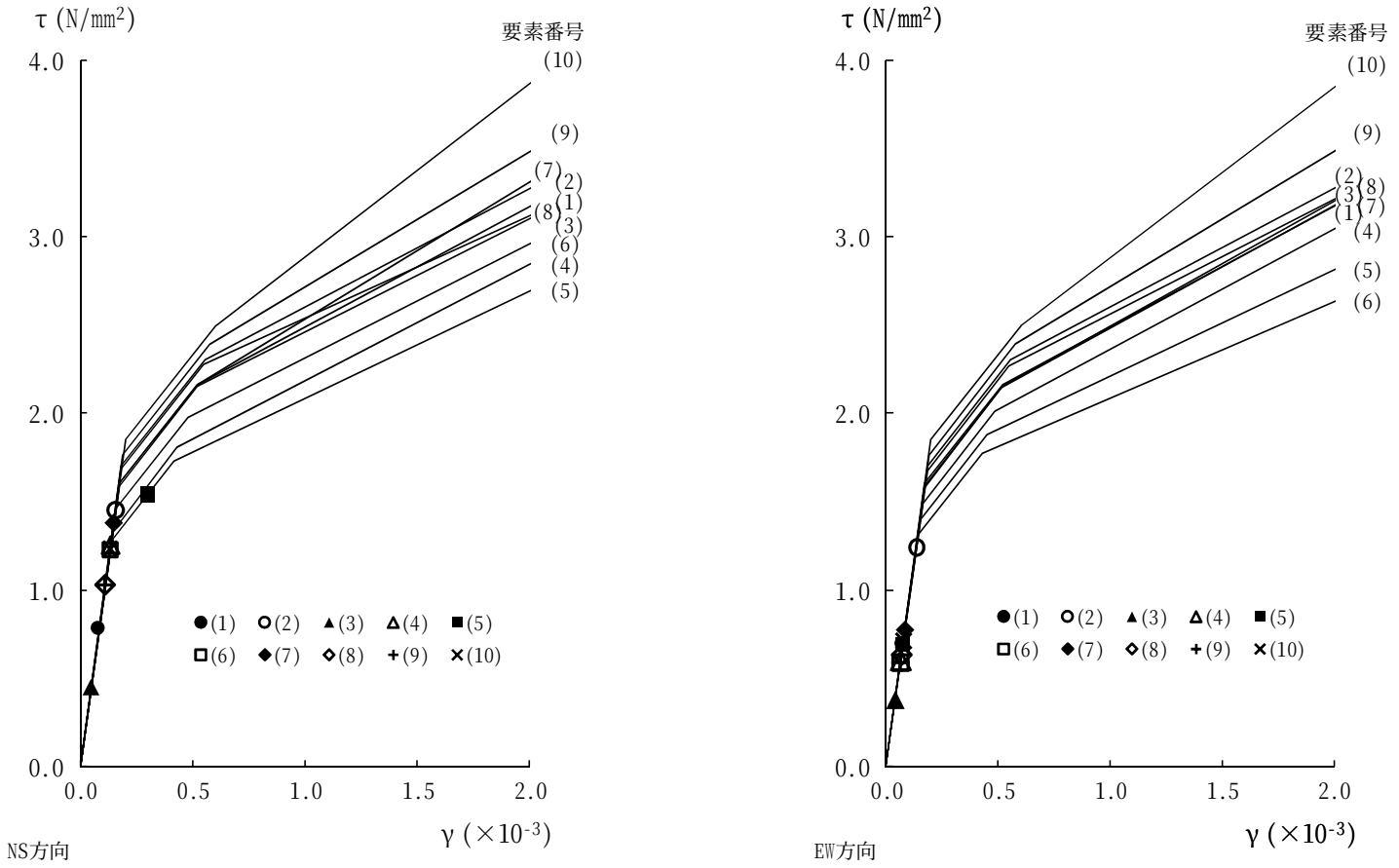
(a)　ＮＳ方向　　(b)　ＥＷ方向

第 5-33 図　せん断スケルトン曲線上の最大応答値（S_S－１３）



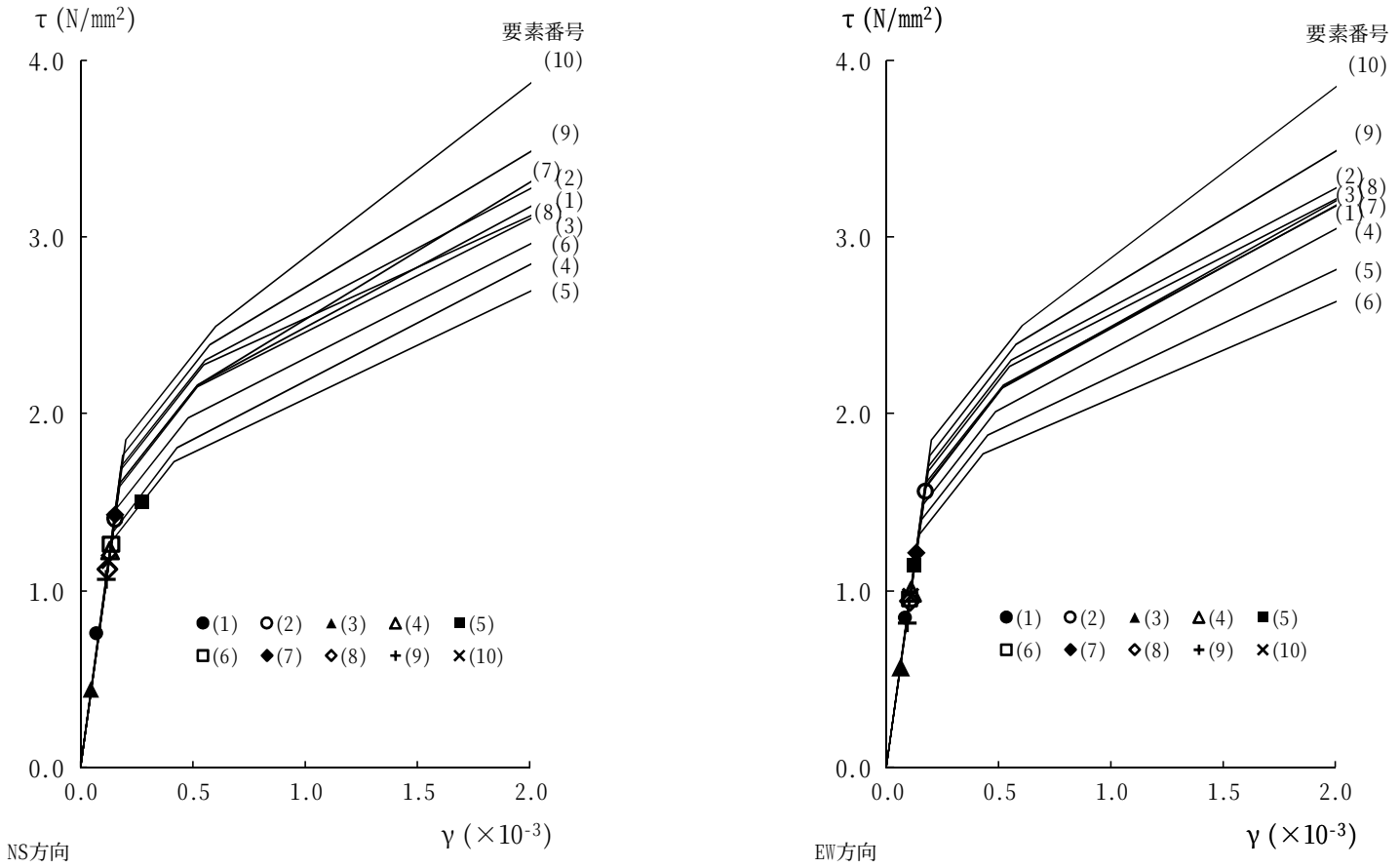
(a)　ＮＳ方向　　(b)　ＥＷ方向

第 5-34 図　せん断スケルトン曲線上の最大応答値（S_S－１４）



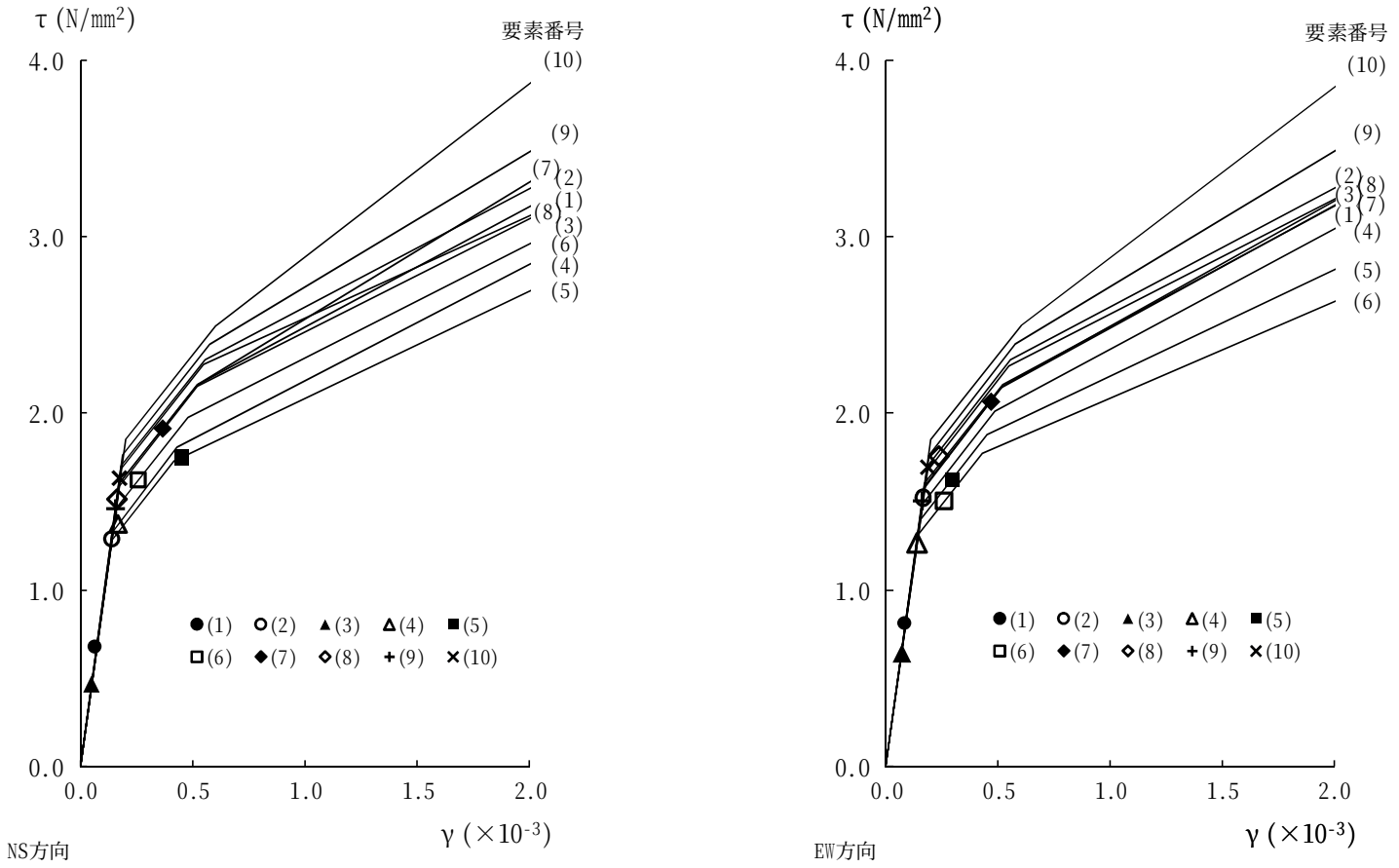
(a)　ＮＳ方向　　(b)　ＥＷ方向

第 5-35 図　せん断スケルトン曲線上の最大応答値（S_S－２１）



(a)　ＮＳ方向　　(b)　ＥＷ方向

第 5-36 図　せん断スケルトン曲線上の最大応答値（S_S－２２）



(a)　ＮＳ方向　　(b)　ＥＷ方向

第 5-37 図　せん断スケルトン曲線上の最大応答値（S_S－３１）

6. まとめ

原子炉建屋耐震壁のせん断ひずみは最大で 0.47×10^{-3} であり，評価基準値である 2.0×10^{-3} に対して十分な余裕がある。

今後，地盤等の不確かさを考慮した地震応答解析を実施する予定である。本検討結果から不確かさを考慮した場合においても評価基準値を超える可能性は小さいと考察される。

別紙－１１

東海第二発電所

屋外二重管の基礎構造の設計方針について

目次

1.　屋外二重管の概要

2.　基礎構造形式について

3.　基礎構造の設計方針

4.　鋼管杭の仕様設定

5.　コンクリート梁の仕様設定

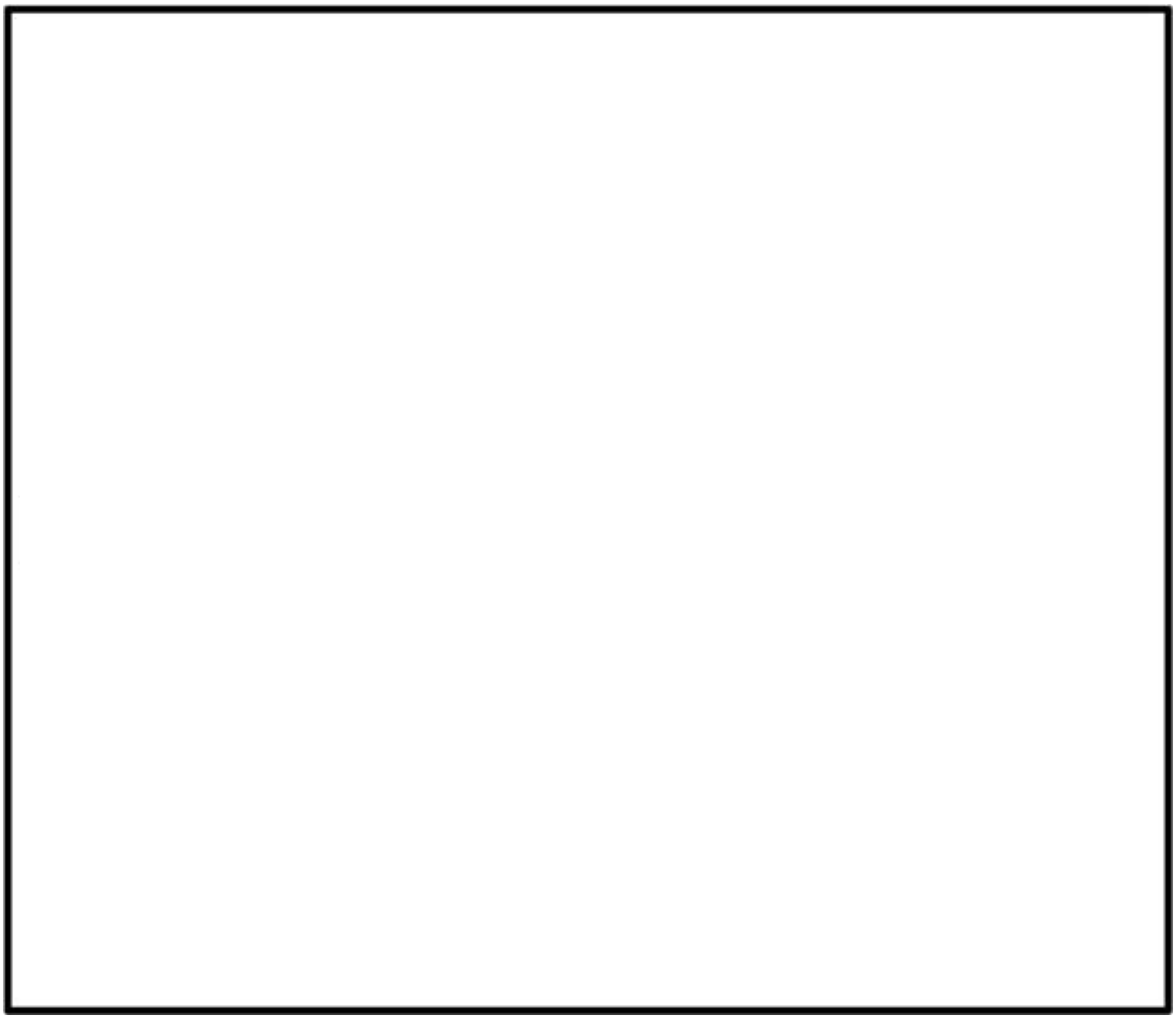
6.　基礎構造の耐震設計方針（有効応力解析）

1．屋外二重管の概要

残留熱除去海水系配管及びディーゼル発電機海水系配管をポンプ室から原子炉建屋まで配置するため，屋外海水配管二重管（以下「屋外二重管」という。）を設置している。

屋外二重管は，設置許可基準規則第 3 条及び第 4 条の対象となる「耐震重要施設を支持する建物・構築物」及び設置許可基準規則第 38 条及び第 39 条の対象となる「常設耐震重要重大事故防止設備又は常設重大事故緩和設備が設置される重大事故等対処施設（特定重大事故等対処施設を除く）」（以下「常設重大事故等対処施設」という。）に該当する。

「耐震重要施設」及び「常設重大事故等対処施設」の平面配置図を第１図に示す。



耐震重要施設
【使用済燃料乾式貯蔵建屋】
防潮堤
鉄筋コンクリート防潮壁（放水路部）

耐震重要施設及び常設重大事故等対処施設
【原子炉建屋】
常設代替高圧電源装置電路，燃料移送配管
軽油貯蔵タンク
非常用海水系配管【屋外二重管】
【取水構造物（取水路，海水ポンプ室）】
貯留堰
非常用ガス処理系排気筒【排気筒】

常設重大事故等対処施設
緊急時対策所
緊急時対策所用発電機燃料油貯蔵タンク
常設代替高圧電源装置
緊急用海水ポンプピット
緊急用海水取水管
SA用海水ピット取水塔
海水引込み管
SA用海水ピット
格納容器圧力逃がし装置格納槽
常設低圧代替注水系格納槽
可搬型設備用軽油タンク

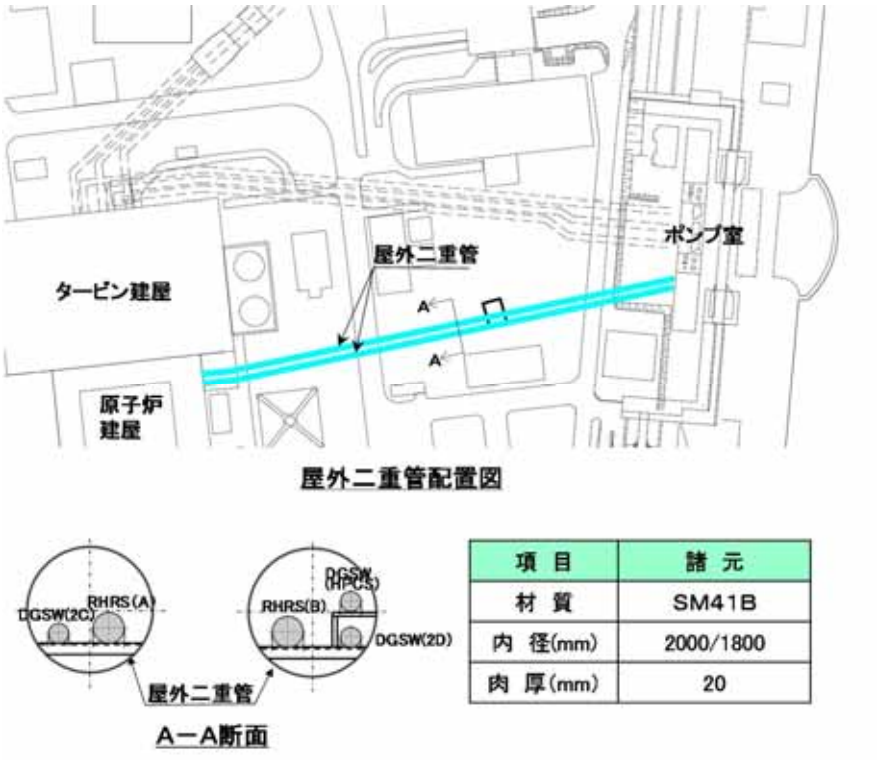
【　　】は，耐震重要施設を支持する建物・構築物を示す。

第１図　「耐震重要施設」及び「常設重大事故等対処施設」の平面配置図

屋外二重管は，第四系地盤に直接支持している施設であり，施設直下には液状化検討対象層である As 層，Ag1 層及び Ag2 層が分布している。なお，指針改訂に伴う耐震裕度向上工事として，平成 21 年に Ag2 層を対象とした地盤改良を実施している。

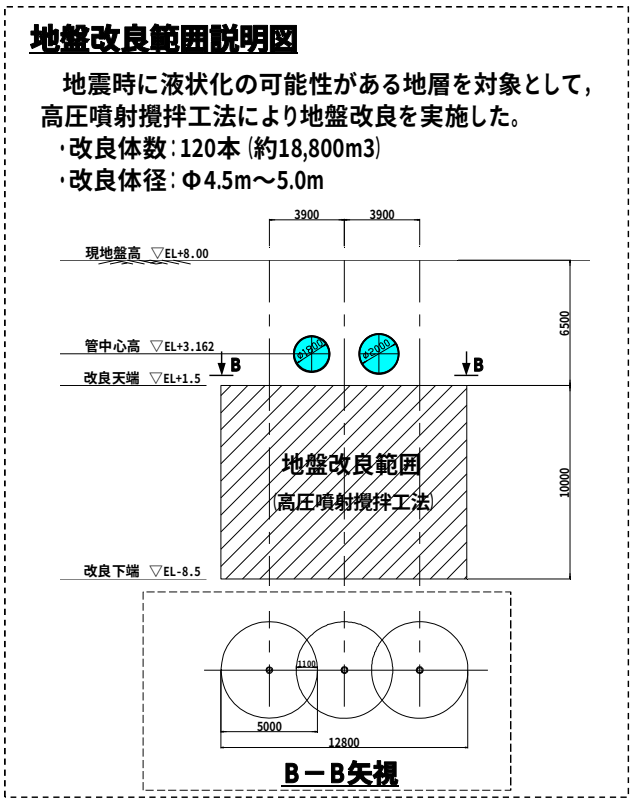
設置許可基準規則第 3 条第 1 項への適合性の観点から，当該施設については杭等を介して岩盤（久米層）で支持する構造とする。

第 2 図に屋外二重管の平面図及び断面図，第 3 図に既施工の地盤改良範囲の説明図，第 4 図に地質縦断図及び横断図を示す。



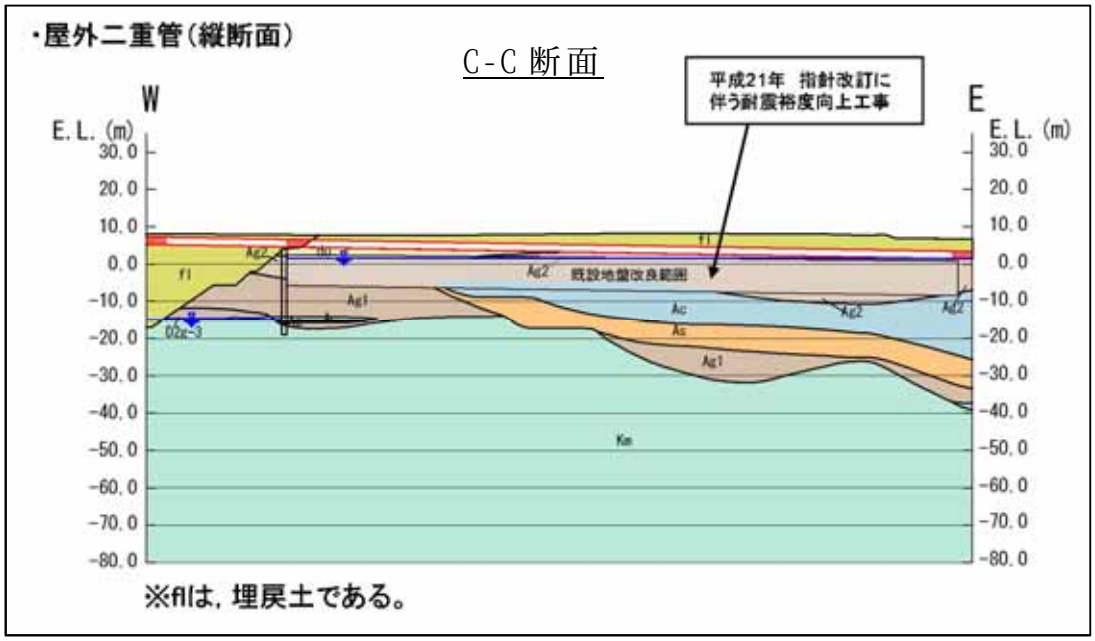
項 目	諸 元
材 質	SM41B
内 径(mm)	2000/1800
肉 厚(mm)	20

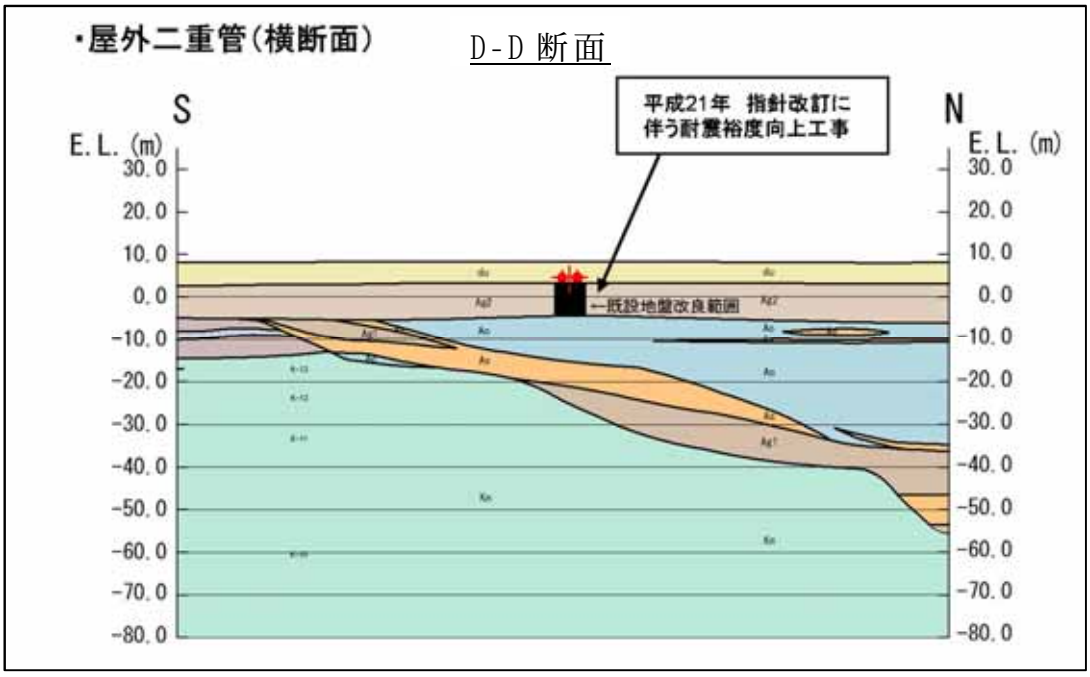
第 2 図　屋外二重管の平面位置図及び断面図



第３図　地盤改良範囲（既施工）説明図

（断面位置図）





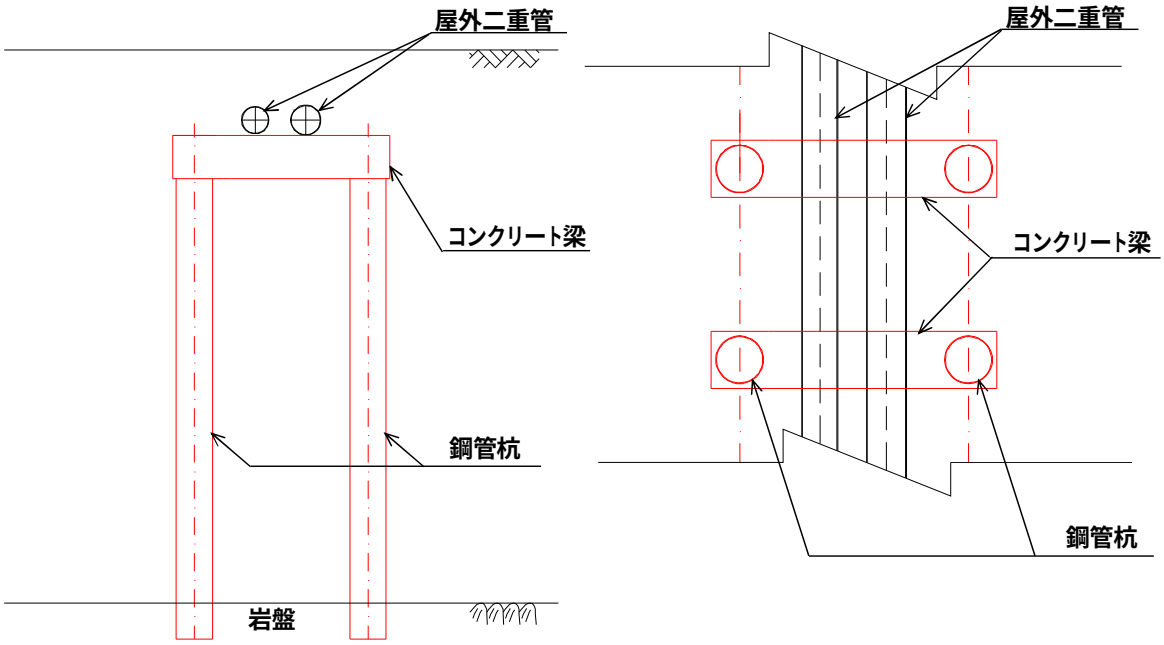
第 4 図　地質縦断図及び横断図

2．基礎構造形式について

地震に伴う周辺地盤の沈下に伴って屋外二重管が沈下することを防止するため，屋外二重管の直下に沈下防止を目的としたコンクリート梁を設置して，鋼管杭を介して岩盤で支持する構造とする。

原子炉建屋近傍等，既設構造物や埋設物との干渉によって鋼管杭の打設が困難な箇所については，屋外二重管直下を地盤改良（セメント固化工法等）することにより補強する地盤に支持させる検討を行う。

屋外二重管の基礎構造概要図を第5図に示す。



第5図　屋外二重管の基礎構造概要図

3．基礎構造の設計方針

屋外二重管の基礎構造の耐震評価は，第 1 表に示す屋外二重管の基礎構造の評価項目に基づき，各構造部材の構造健全性評価及び基礎地盤の支持性能評価を行う。

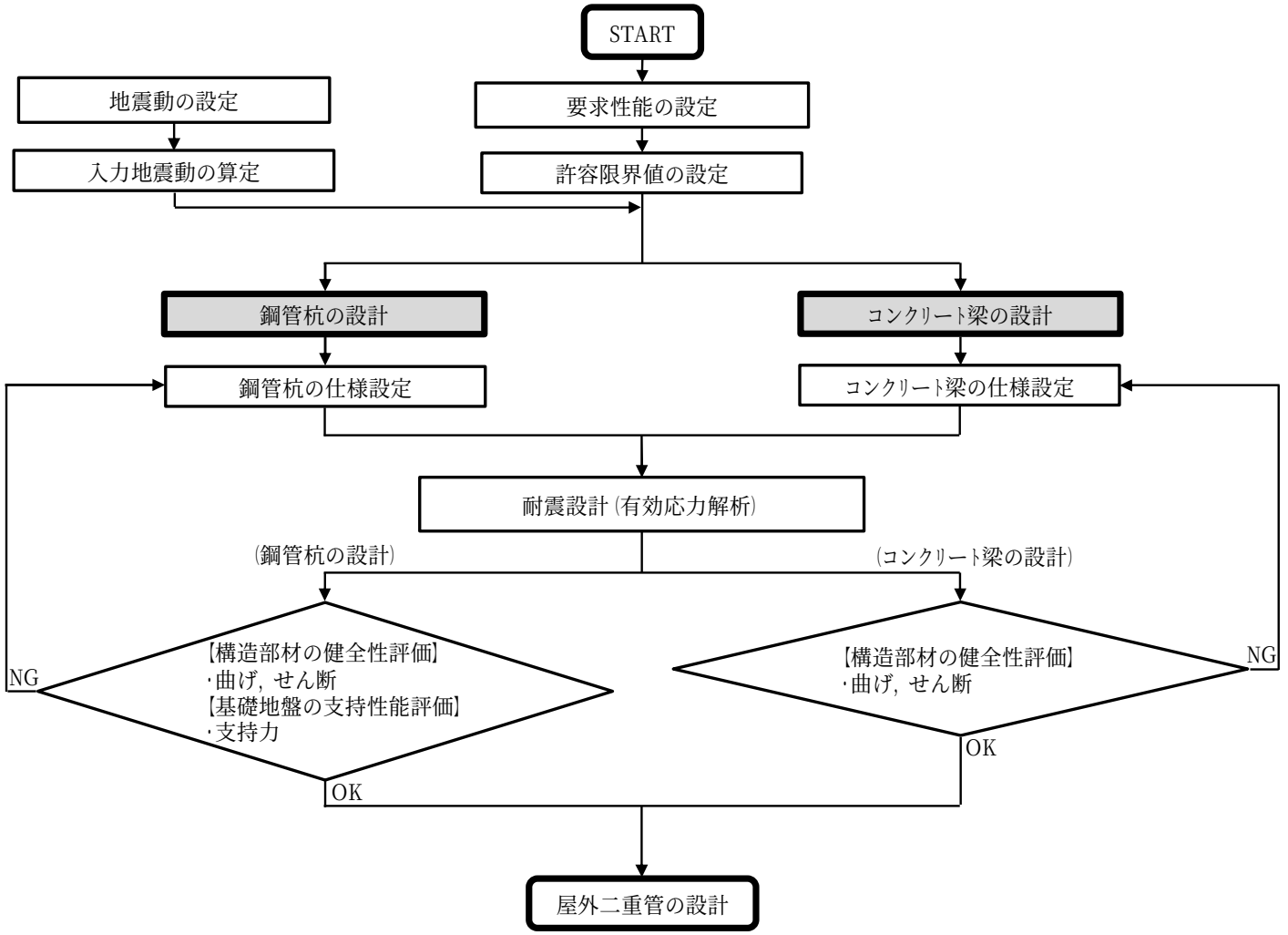
地震動は，Ss-D1（水平動及び上下動の位相反転考慮），Ss-11，Ss-12，Ss-13，Ss-14，Ss-21，Ss-22，Ss-31（水平動の位相反転考慮）を対象とする。

また，上記の地震波のうち，屋外二重管に対して最も厳しい地震波を用いて，液状化検討対象層を強制的に液状化させるケースとして，豊浦標準砂の剛性及び液状化強度特性を仮定し，その影響を確認する。

屋外二重管の基礎構造の構造健全性及び支持性能評価の検討フローを第 6 図に示す。

第 1 表　屋外二重管の基礎構造の評価項目

評価方針	評価項目	部位	評価方法	許容限界
構造強度を有すること	構造部材の健全性	鋼管杭	発生応力が許容限界を超えないことを確認	短期許容応力度
		コンクリート梁	発生応力が許容限界を超えないことを確認	短期許容応力度
	基礎地盤の支持性能	基礎地盤	支持力が許容限界を超えないことを確認	極限支持力以下



（注記）鋼管杭の打設が不可能な箇所については，別途地盤改良等の検討を行う。

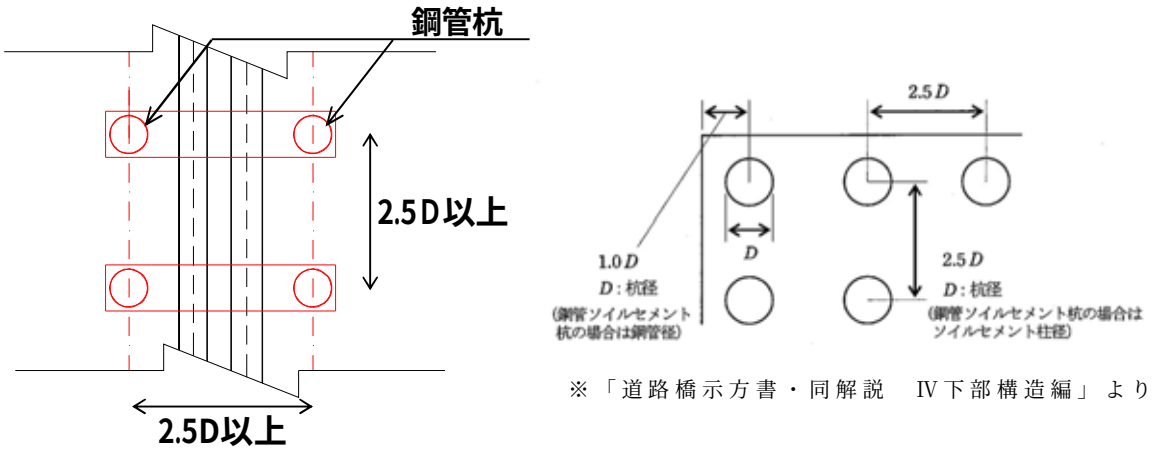
第6図　屋外二重管の基礎構造の構造健全性及び支持性能評価の検討フロー

4．鋼管杭の仕様設定

屋外二重管の基礎構造の鋼管杭は，岩盤で支持する構造（支持杭）とし，その支持力を確保するために杭径程度以上を岩盤に根入れする。

杭の配列については，屋外二重管の形状や寸法，杭の寸法や本数，群杭の影響，施工条件等を考慮し決定する。

杭の最小中心間隔が杭径の 2.5 倍未満である場合においては，道路橋示方書に準拠して群杭効果を考慮する。第 7 図に杭の最小中心間隔の考え方を示す。



※「道路橋示方書・同解説　Ⅳ下部構造編」より

第 7 図　杭の最小中心間隔

屋外二重管の基礎構造の設計においては，基準地震動 S_s 等による荷重及びこれらに耐え得る大口径，高強度の鋼管杭の仕様を考慮した上で，適切な杭配置を検討する。

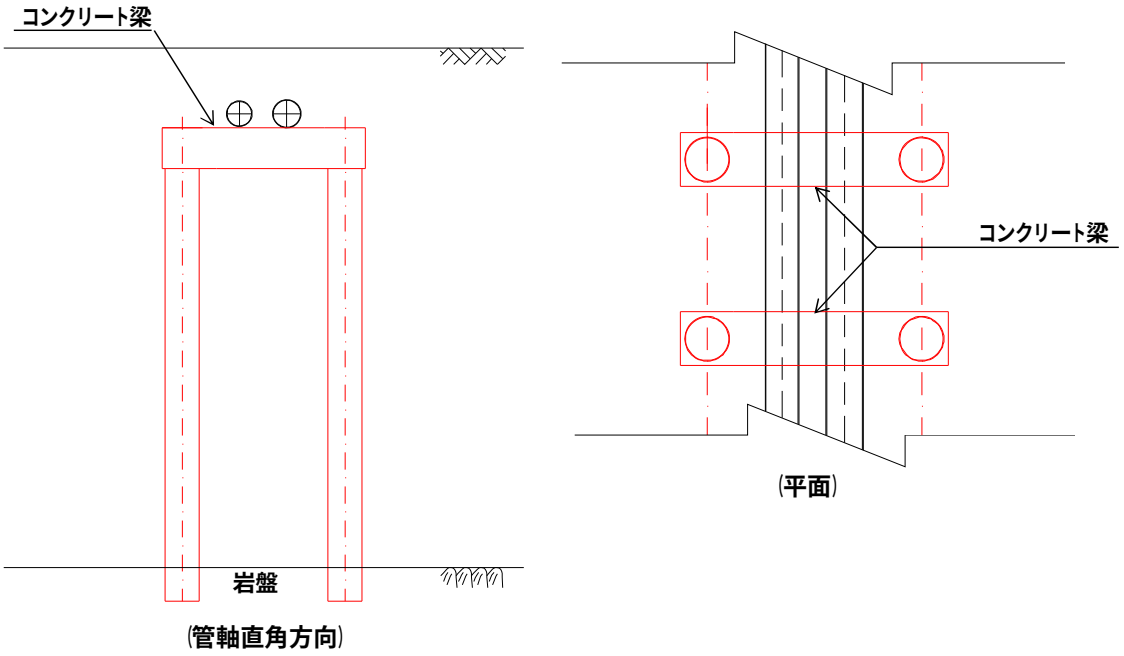
荷重ケースは地震時を想定し，長期荷重として死荷重を，短期荷重として基準地震動 S_s による地震荷重を考慮する。

5．コンクリート梁の仕様設定

屋外二重管の基礎構造のコンクリート梁は，屋外二重管を受け，その荷重を鋼管杭で支持する構造とする。

荷重ケースは地震時を想定し，長期荷重として死荷重を，短期荷重として基準地震動S_sによる地震荷重を考慮する。

また，コンクリート梁には発生応力度が短期許容応力度に十分収まる鉄筋を配置する。



第 8 図　コンクリート梁イメージ図

6．基礎構造の耐震設計方針（有効応力解析）

屋外二重管の基礎構造（鋼管杭，コンクリート梁，基礎地盤）の耐震設計は，二次元地震応答解析を行い，地震時の鋼管杭及びコンクリート梁の構造部材の健全性及び基礎地盤の支持性能について検討する。

地震時応答解析は，有効応力の変化に伴う地盤の挙動の変化を考慮することができる有効応力解析を用いる。

鋼管杭及びコンクリート梁については，地震応答解析により算定された断面力を用いて，曲げモーメント，軸力及びせん断力に対する照査を行い，許容限界以下であることを確認することで健全性評価とする。

基礎地盤については，地震応答解析より算定された支持力が許容限界以下であることを確認することで支持性能評価とする。