

島根原子力発電所第2号機 審査資料	
資料番号	NS2-補-023-09 改 07
提出年月日	2023年6月7日

建物・構築物の地震応答解析における入力地震動の
評価について

2023年6月

中国電力株式会社

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

目 次

1. 概要	1
2. 入力地震動の評価方針	2
2.1 評価手法の選定	4
2.2 地盤モデル及び地盤物性値の設定	5
3. 評価手法及び地盤の物性値	10
3.1 評価手法	10
3.2 地盤の物性値	16
4. 入力地震動に関する検討	20
4.1 表層地盤の物性値に関する検討	20
4.2 一次元波動論による入力地震動評価の保守性に関する検討	32
4.3 D級岩盤の非線形性による影響に関する検討	45
4.4 2次元FEMのメッシュ分割高さに関する検討	53
4.5 観測記録を用いたシミュレーション解析による入力地震動評価に関する検証	81
4.6 隣接構造物及び地盤改良による影響に関する検討	86
4.7 安全対策工事に伴う掘削による影響に関する検討	92
5. まとめ	94
6. 参考文献	94

別紙-1 表層地盤の等価物性値の設定について

別紙-2 側面地盤からの地震動の入力に対する影響について

添付資料-1 主要建物における一次元波動論及び2次元FEMによる入力地震動の比較

添付資料-2 既工認モデルと今回工認のモデルによる入力地震動の比較

添付資料-3 D級岩盤の速度層区分の設定について

参考資料-1 2次元FEM解析モデル側面の境界条件

1. 概要

島根原子力発電所の建設時の工事計画認可申請書（以下「既工認」という。）では、原子炉建物等の地震応答解析における入力地震動は一次元波動論、2次元FEM解析又は直接入力（以下「一次元波動論又は2次元FEM解析等」という。）により評価を実施している。

今回の工事計画認可申請（以下「今回工認」という。）では、既工認において採用実績のある一次元波動論又は2次元FEM解析等を採用しており、解放基盤表面で定義される基準地震動 S_s 及び弾性設計用地震動 S_d を基に、対象建物・構築物の地盤条件を適切に考慮したうえで、一次元波動論又は2次元FEM解析等により、地震応答解析モデルの入力位置で評価した入力地震動を設定する。

本資料は、解析モデルに建設時以降の敷地内の追加地質調査結果の反映等を行っていることも踏まえて、今回工認で評価を行う建物・構築物について、入力地震動の評価方針、解析モデルの設定方法及びその妥当性を示すものである。

また、本資料は、以下の添付書類の補足説明をするもので、使用する計算機プログラムについても以下の資料に準ずる。

- ・ VI-2-2-2 「原子炉建物の地震応答計算書」
- ・ VI-2-2-5 「制御室建物の地震応答計算書」
- ・ VI-2-2-7 「タービン建物の地震応答計算書」
- ・ VI-2-2-9 「廃棄物処理建物の地震応答計算書」
- ・ VI-2-2-11 「緊急時対策所の地震応答計算書」
- ・ VI-2-2-13 「排気筒の地震応答計算書」
- ・ VI-2-2-16 「ガスタービン発電機建物の地震応答計算書」
- ・ VI-2-2-39 「屋外配管ダクト（排気筒）の耐震性についての計算書」
- ・ VI-2-11-2-1-1 「1号機原子炉建物の耐震性についての計算書」
- ・ VI-2-11-2-1-2 「1号機タービン建物の耐震性についての計算書」
- ・ VI-2-11-2-1-3 「1号機廃棄物処理建物の耐震性についての計算書」
- ・ VI-2-11-2-1-4 「サイトバンカ建物の耐震性についての計算書」
- ・ VI-2-11-2-1-5 「サイトバンカ建物（増築部）の耐震性についての計算書」
- ・ VI-2-11-2-2 「1号機排気筒の耐震性についての計算書」
- ・ VI-2-11-2-15 「ディーゼル燃料貯蔵タンク室の耐震性についての計算書」
- ・ VI-2-別添 7-1 「安全対策工事に伴う掘削前の状態における耐震計算の方針」

2. 入力地震動の評価方針

入力地震動は、「2.1 評価手法の選定」にて、各建物・構築物の評価手法を選定し、「2.2 地盤モデル及び地盤物性値の設定」にて、設定した地盤モデルを用いた線形解析により評価する。

また、「3. 評価手法及び地盤の物性値」にて、今回工認で入力地震動評価に採用している評価手法及び地盤の物性値を既工認と比較して示す。

なお、「4. 入力地震動に関する検討」にて、入力地震動に影響を及ぼす可能性のある各種検討及び今回工認に用いる原子炉建物の地盤モデルの妥当性確認を実施する。

入力地震動の評価及び妥当性・保守性の確認に関する検討フローを図2-1に示す。

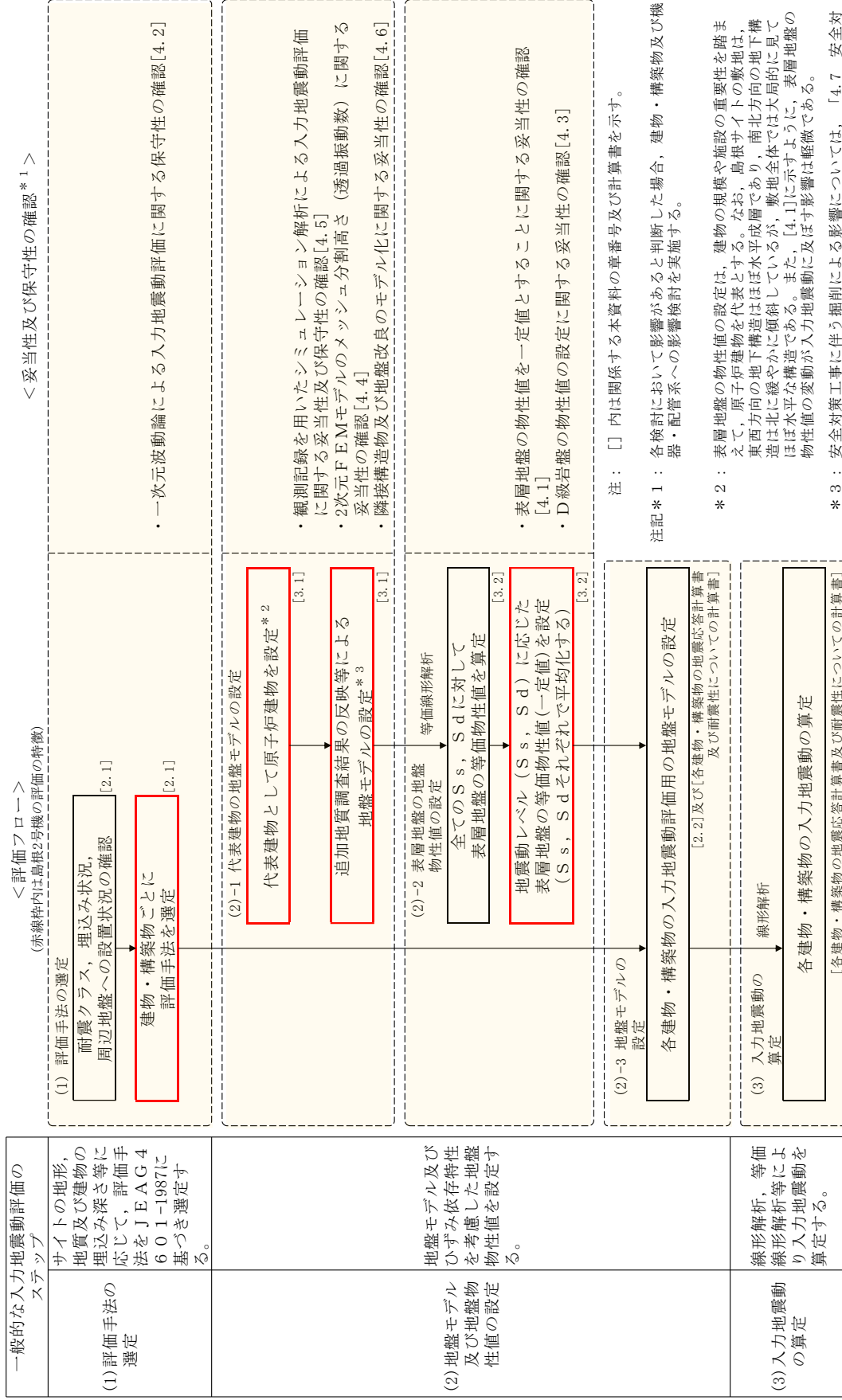


図 2-1 入力地震動の評価及び妥当性・保守性の確認に関する検討フロー

2.1 評価手法の選定

建物・構築物の入力地震動の評価手法は、耐震クラス、建物・構築物の埋込み状況及び周辺地盤への設置状況を踏まえて、以下のとおり使い分けを行う。なお、埋込み及び切欠きの影響については適切に評価する。

(1) 水平方向

「耐震Sクラス施設」の建物については、原子炉建物の既工認の考え方と同様に、速度層の傾斜及び建物周辺の地形等の影響を考慮するため、それらをより詳細にモデル化した「2次元FEM解析」を基本とする。

「耐震Sクラス施設以外」の建物については、タービン建物等の既工認の考え方と同様に、「一次元波動論」による評価を基本とする。

(2) 鉛直方向

入力地震動に対して建物直下地盤による影響が大きく、速度層の傾斜等の影響は小さいことから「一次元波動論」による評価を基本とする。(添付資料-1において、2次元FEM解析との比較により速度層の傾斜等の入力地震動への影響が小さいことを確認している。)

構内配置図を図2-2に、建物・構築物の入力地震動の評価手法の選定フローを図2-3に、建物・構築物の入力地震動の評価手法の一覧を表2-1に示す。

2.2 地盤モデル及び地盤物性値の設定

(1) 地盤モデル

土木構造物を含めた入力地震動の評価手法の概念図を図 2-4 に示す。また、各建物・構築物の入力地震動評価用の地盤モデルは、「1. 概要」に示す各建物・構築物の地震応答計算書又は耐震性についての計算書に示す。

(2) 地盤物性値

地盤物性値設定の基本方針を以下に示す。表層地盤の等価物性値の詳細な設定方法については、「3.2 地盤の物性値」及び「別紙-1 表層地盤の等価物性値の設定について」に示す。

1) 表層地盤

表層地盤の物性値は、原子炉建物を対象に、既工認から追加地質調査結果の反映等を行った今回工認モデルを用いて、基準地震動 S_s 及び弾性設計用地震動 S_d の全波に対して等価線形解析を実施し、等価物性値を設定する。原子炉建物で算定した等価物性値を各建物・構築物に適用する。

2) 表層地盤を除く岩盤

表層地盤を除く岩盤の地盤物性値については、既工認で設定した値を用いる。

- : 耐震Sクラス施設 (埋込みあり)
- : 耐震Sクラス施設以外 (埋込みあり)
- : 耐震Sクラス施設以外
(高台に設置された埋込みを有しない建物)
- : 耐震Sクラス施設以外
(解放基盤相当の岩盤に設置された埋込みを有しない建物)

(注) 破線は波及的影響を及ぼすおそれのある建物・構築物を示す。

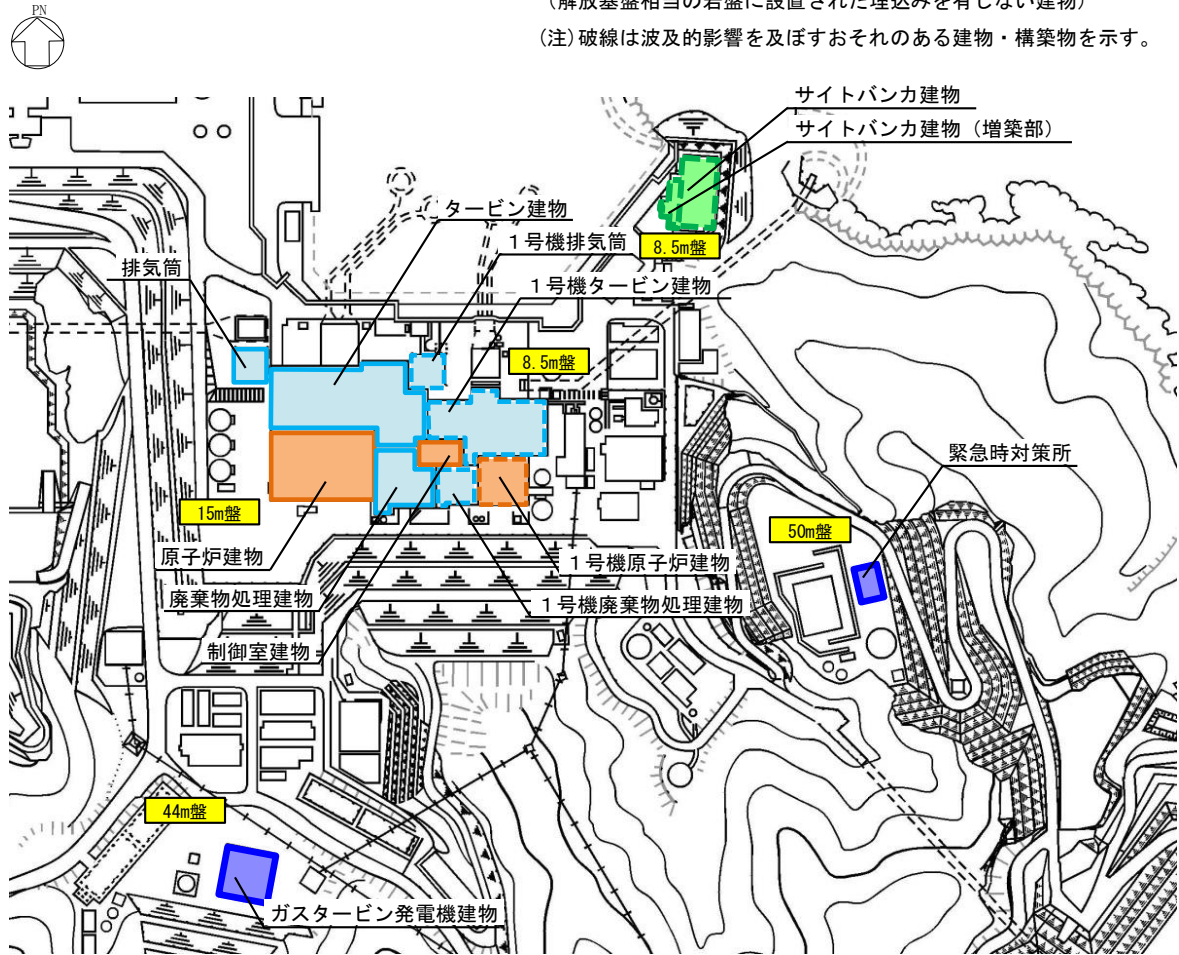


図 2-2 構内配置図

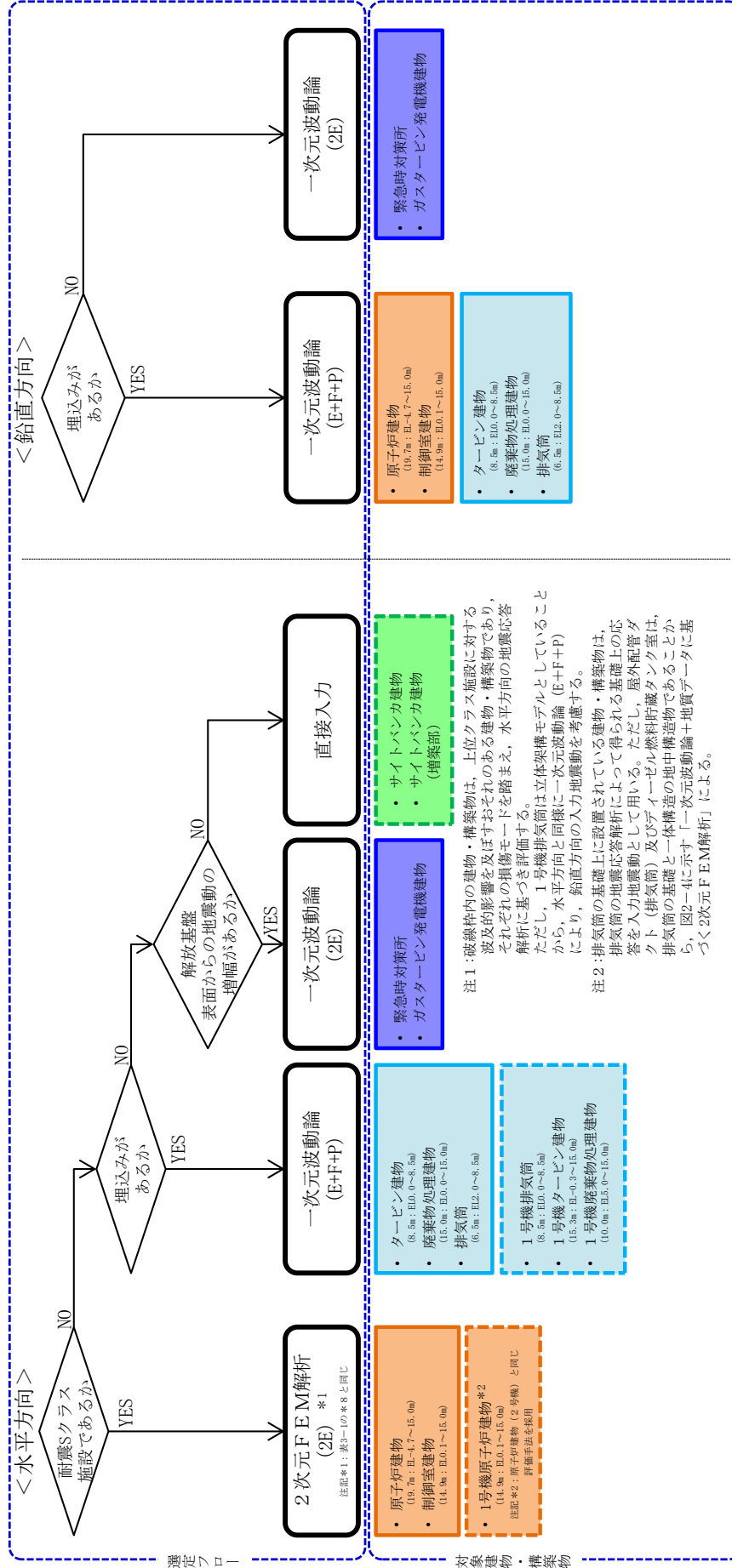


図2-3 建物・構築物の入力地震動の評価手法の選定フロー

表 2-1 建物・構築物の入力地震動の評価手法の一覧

耐震クラス	建物・構築物の設置状況	建物・構築物	入力地震動の評価手法		選定理由等
			水平	鉛直	
S クラス施設	埋込みあり	<ul style="list-style-type: none"> 原子炉建物 制御室建物 1号機原子炉建物*1 	2次元FEM(2E)*2	一次元波動論(E+F+P)	<p>【水平方向】</p> <ul style="list-style-type: none"> 「Sクラス施設」として、既工認と同様に2次元FEMモデルを採用 「Sクラス施設」として、原子炉建物と同様に2次元FEMモデルを採用 原子炉建物であることを踏まえ、原子炉建物(2号機)と同じ評価手法を採用 <p>【鉛直方向】</p> <ul style="list-style-type: none"> 建物の設置状況が「埋込みあり」のため、埋込みを考慮した一次元波動論(E+F+P)を採用
					<p>【水平方向】</p> <ul style="list-style-type: none"> タービン建物 廃棄物処理建物 排気筒 1号機タービン建物 1号機廃棄物処理建物 1号機排気筒 <p>【鉛直方向】</p> <ul style="list-style-type: none"> 建物の設置状況が「埋込みあり」として、埋込みを考慮した一次元波動論を採用 「Sクラス施設以外」、埋込みありとして、埋込みを考慮した一次元波動論を採用 同上 「Sクラス施設以外」、埋込みありとして、タービン建物(2号機)と同じ評価手法を採用 「Sクラス施設以外」、埋込みありとして、廃棄物処理建物(2号機)と同じ評価手法を採用 「Sクラス施設以外」、埋込みありとして、排気筒(2号機)と同じ評価手法を採用
S クラス施設以外	埋込みあり	<ul style="list-style-type: none"> タービン建物 廃棄物処理建物 排気筒 1号機タービン建物*1 1号機廃棄物処理建物*1 1号機排気筒*1 	一次元波動論(E+F+P)	一次元波動論(E+F+P)	<p>【水平方向】</p> <ul style="list-style-type: none"> 「Sクラス施設以外」の建物で、「埋込みを有しない」、高台のEL50m盤に設置された「解放基盤表面からの地震動の増幅がある」ことから、一次元波動論(2E)を採用 「Sクラス施設以外」の建物で、「埋込みを有しない」、高台のEL44m盤に設置された「解放基盤表面からの地震動の増幅がある」ことから、埋込みを有しない、一次元波動論(2E)を採用 <p>【鉛直方向】</p> <ul style="list-style-type: none"> 建物の設置状況が「埋込みあり」のため、埋込みを考慮した一次元波動論(E+F+P)を採用
					<p>【水平方向】</p> <ul style="list-style-type: none"> 緊急時対策所 ガスタタービン発電機建物 <p>【鉛直方向】</p> <ul style="list-style-type: none"> 「Sクラス施設以外」の建物で、「埋込みを有しない」、高台のEL50m盤に設置された「解放基盤表面からの地震動の増幅がない」、解放基盤相当(Vs=1600m/s)の岩盤に支持された建物で「解放基盤表面からの地震動の増幅がある」ことから、埋込みを有しない、一次元波動論(2E)を採用 「Sクラス施設以外」の建物で、「埋込みを有しない」、高台のEL44m盤に設置された「解放基盤表面からの地震動の増幅がない」、解放基盤相当(Vs=1600m/s)の岩盤に支持された建物であることから、サイトバンカ建物(増築部)と同じ評価手法を採用
S クラス施設以外	埋込みなし	<ul style="list-style-type: none"> サイトバンカ建物*1 サイトバンカ建物(増築部)*1 	直接入力	-	<p>【水平方向】</p> <ul style="list-style-type: none"> 「Sクラス施設以外」の建物で、「埋込みを有しない」、EL8.5m盤に設置された「解放基盤表面からの地震動の増幅がない」、解放基盤相当(Vs=1600m/s)の岩盤に支持された建物であることから、既工認と同様に直接入力を採用 「Sクラス施設以外」の建物で、「埋込みを有しない」、EL8.5m盤に設置された「解放基盤表面からの地震動の増幅がない」、解放基盤相当(Vs=1600m/s)の岩盤に支持された建物であることから、サイトバンカ建物と同じ評価手法を採用
					<p>【水平方向】</p> <ul style="list-style-type: none"> 排気筒モニタ室 ディーゼル燃料移送ポンプエリア防護対策設備 <p>【鉛直方向】</p> <ul style="list-style-type: none"> 排気筒の基礎上に配置されているため、排気筒の地震応答解析によって得られる基礎上の応答を入力地震動として採用 ディーゼル燃料移送ポンプエリア防護対策設備：同上

注記*1：上位クラス施設に対する波及的影響を及ぼすおそれのある建物・構築物については、それぞれの損傷モードに基づき評価する。ただし、1号機排気筒は立体構架モデルとしていることから、水平方向と同様に一次元波動論(E+F+P)により、鉛直方向の入力地震動を考慮する。

*2：2次元FEMモデルの切欠き地盤の表面応答であるため「2E」と表記しているが、建物の埋込みによる切欠き地盤を詳細にモデル化しているため、埋込みと切欠きの影響は入力地震動に考慮されている。

注：屋外配管ダクト(排気筒)及びディーゼル燃料貯蔵タンク室の入力地震動の評価手法は、排気筒の基礎と一体構造の地中構築物であることから、図2-4に示す「一次元波動論+地質データに基づく2次元FEM解析」による。

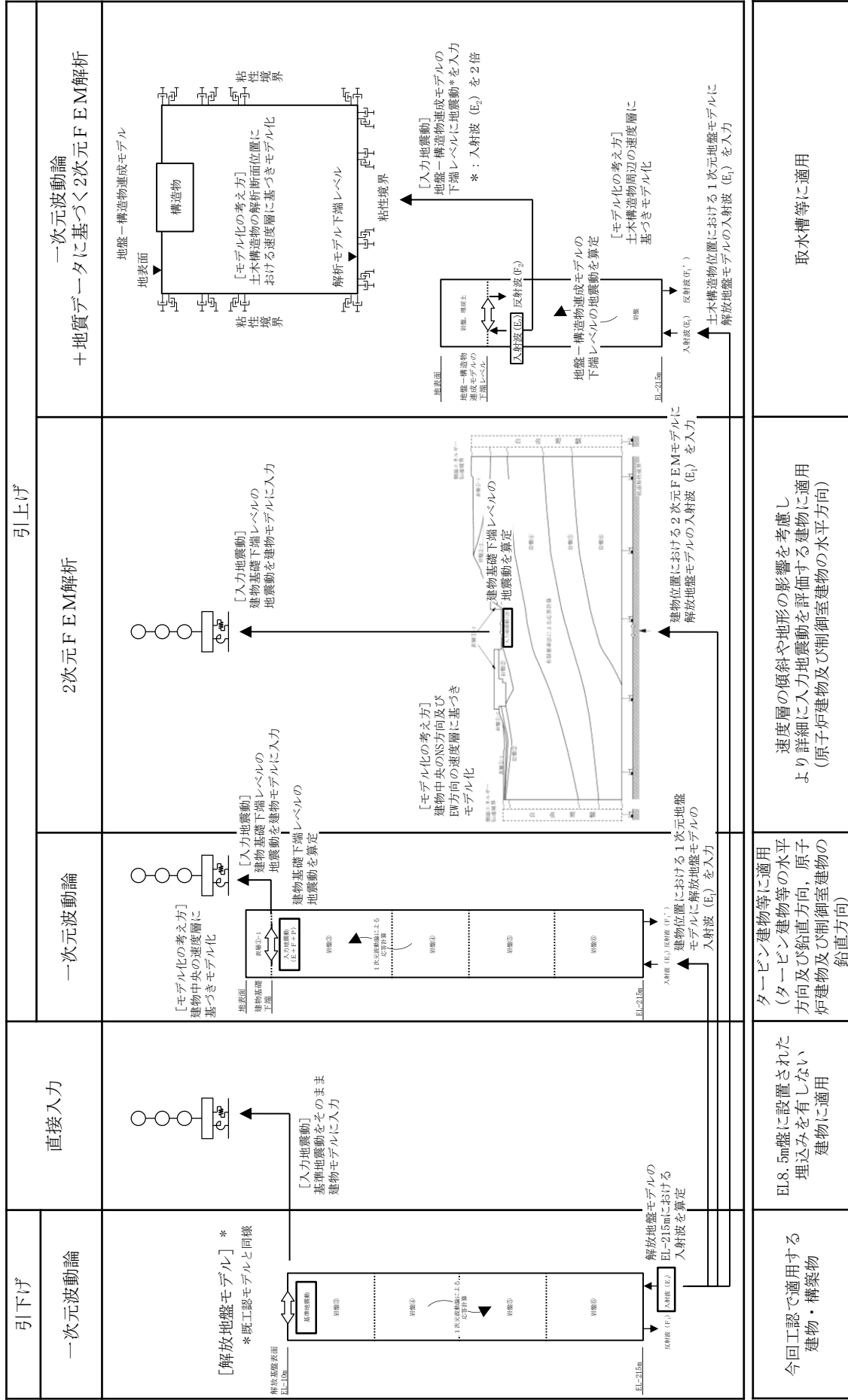


図2-4 入力地震動の評価手法の概念図

3. 評価手法及び地盤の物性値

3.1 評価手法

建物・構築物及び土木構造物における、既工認と今回工認の入力地震動の評価手法の比較を表3-1及び表3-2に示す。

建物・構築物の入力地震動は建物基礎底面位置で評価する。なお、今回工認の建物・構築物の地震応答解析モデルは、既工認と同様に質点系モデルを採用する。

土木構造物の入力地震動は構造物の基礎底面又はFEMモデルの下端位置で評価する。なお、今回工認の取水槽及び屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）の地震応答解析モデルは、既工認から変更し、地盤-構造物連成系の2次元FEMモデルを採用する。

建物・構築物を代表して原子炉建物の既工認と今回工認の入力地震動の評価手法の比較を表3-3及び表3-4に示す。なお、原子炉建物については、既工認と同様に、側面地盤が埋戻土であることを踏まえ、地震応答解析モデルにおいて側面地盤ばねは考慮しないこととするが、入力地震動評価においては、建物の埋込みによる切欠き地盤の影響を考慮した評価を行っていることから、側面地盤からの地震動の入力に対する影響について検討し、その結果を「別紙-2 側面地盤からの地震動の入力に対する影響について」に示す。

入力地震動評価のための解析モデルについては、建設時以降の敷地内の追加地質調査結果の反映等により、最新のデータを基に、より詳細にモデル化したものである。なお、安全対策工事に伴う掘削による影響については、「4.7 安全対策工事に伴う掘削による影響に関する検討」に示す。

表層地盤の物性値については、建物の規模や施設の重要性を踏まえて、原子炉建物を代表として、等価物性値を設定する。原子炉建物で算定した等価物性値を各建物・構築物に適用する。なお、島根サイトの敷地は、東西方向の地下構造はほぼ水平成層であり、南北方向の地下構造は北に緩やかに傾斜しているが、敷地全体では大局的に見てほぼ水平な構造である。また、「4.1 表層地盤の物性値に関する検討」に示すように、表層地盤の物性値の変動が入力地震動に及ぼす影響は軽微である。以上のことから、表層地盤の物性値の設定において、原子炉建物を代表することは妥当であるといえる。

表 3-1 入力地震動の評価手法の比較 (建物・構築物)

建物・構築物		入力地震動の評価手法						建物・構築物の地震応答解析モデル			
		既工認		今回工認		変更理由		入力地震動出力位置	相互作用モデル		建物・構築物の設置レベル*5
		水平	鉛直	水平	鉛直	水平	鉛直		水平*4	鉛直	
S ク ラ ス 施 設 の 間 接 支 持 構 造 物	原子炉建物	(引下げ) 一次元波動論 (引上げ) 2次元FEM解析 2E*8	—	(引下げ) 一次元波動論 (引上げ) 2次元FEM解析 2E*8	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 E+F+P	—	—	EL -4.7m	地盤ばねモデル (SRモデル)	地盤ばねモデル (底面鉛直ばね モデル)	EL -4.7m
	制御室建物	直接入力	—	(引下げ) 一次元波動論 (引上げ) 2次元FEM解析 2E*8	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 E+F+P	Sクラス施設を含む 建物・構築物である ため、原子炉建物の 評価手法と合わせる	—	EL 0.1m	地盤ばねモデル (SRモデル)	地盤ばねモデル (底面鉛直ばね モデル)	EL 0.1m
	タービン建物	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 E+F	—	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 E+F+P	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 E+F+P	埋込みによる影響を 詳細に評価するため、 J E A G 4 6 0 1 - 1991 追補版に基づき、切欠 き力を考慮する	—	EL 0.0m	地盤ばねモデル (SRモデル)	地盤ばねモデル (底面鉛直ばね モデル)	EL 0.0m
	廃棄物処理建物	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 E+F	—	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 E+F+P	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 E+F+P	埋込みによる影響を 詳細に評価するため、 J E A G 4 6 0 1 - 1991 追補版に基づき、切欠 き力を考慮する	—	EL 0.0m	ジョイント要素を用いた 3次元FEMモデル		EL 0.0m
	排気筒	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論*1 E+F+P	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論*1 E+F+P	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 E+F+P	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 E+F+P	—	—	EL 2.0m	地盤ばねモデル (立体架構モデル)		EL 2.0m
	屋外配管ダクト (排気筒)	—	—	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 2E	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 2E	—	—	EL -55.0m	地盤-構築物連成系の 2次元FEMモデル		EL 5.345m
重 要 S A 施 設	ガスタービン 発電機建物	—	—	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 2E*2	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 2E*2	—	—	EL 44.0m	地盤ばねモデル (SRモデル)	地盤ばねモデル (底面鉛直ばね モデル)	EL 44.0m
	緊急時 対策所	—	—	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 2E*3	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 2E*3	—	—	EL 48.25m	地盤ばねモデル (SRモデル)	地盤ばねモデル (底面鉛直ばね モデル)	EL 48.25m
波 的 影 響 を 及 ぼ す お そ れ の あ る 施 設	1号機 原子炉建物	直接入力	—	(引下げ) 一次元波動論 (引上げ) 2次元FEM解析 2E*8	—	2号機原子炉 建物の評価手法と 合わせる	—	EL 0.1m	ジョイント要素を 用いた 3次元FEM モデル	—	EL 0.1m
	1号機 タービン建物	—	—	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 E+F+P	—	—	—	EL -0.3m	地盤ばねモデル (SRモデル)	—	EL -0.3m
	1号機 廃棄物 処理建物	—	—	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 E+F+P	—	—	—	EL 5.0m	地盤ばねモデル (SRモデル)	—	EL 5.0m
	1号機 排気筒	直接入力	—	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 E+F+P	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 E+F+P	2号機排気筒の 評価手法と 合わせる	—	EL 0.0m	地盤ばねモデル (立体架構モデル)		EL 0.0m
	サイトバンカ 建物	直接入力	—	直接入力*6	—	—	—	—	地盤ばねモデル (SRモデル)	—	EL 7.3m
	サイトバンカ 建物 (増築部)	—	—	直接入力*6	—	—	—	—	地盤ばねモデル (SRモデル)	—	EL 7.3m
	排気筒モニタ室	—	—	排気筒の基礎上の 地震応答解析 結果を用いる*7	—	—	—	—	基礎固定モデル	—	EL 8.8m (排気筒基礎上)
	ディーゼル燃料 移送ポンプエ リア防護対策 設備	—	—	排気筒の基礎上の 地震応答解析 結果を用いる*7	—	—	—	—	基礎固定モデル	—	EL 8.7m (排気筒基礎上)
ディーゼル燃料 貯蔵タンク室	—	—	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 2E	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 2E	—	—	EL -55.0m	地盤-構築物連成系の 2次元FEMモデル		EL 2.75m	

注記 * 1 : 排気筒の既工認は、改造工認 (平成 25 年) を示す。

* 2 : 高台の EL 44m 盤に設置された埋込みを有しない建物であることから、「2E」とする。

* 3 : 高台の EL 50m 盤に設置された埋込みを有しない建物であることから、「2E」とする。

* 4 : 水平方向の相互作用モデルにおいて、側面地盤ばねは考慮しない。

* 5 : 代表的な設置レベルを示す。

* 6 : EL 8.5m 盤に設置された埋込みを有しない建物であり、解放基盤相当 ($V_s=1600\text{m/s}$) に支持されていることから、既工認 (サイトバンカ建物 (増築部) においてはサイトバンカ建物) と同様に直接入力とする。

* 7 : 排気筒の基礎上に設置されている建物・構築物であるため、排気筒の地震応答解析によって得られる基礎上の応答を入力地震動として用いる。

* 8 : 2次元FEMモデルの切欠き地盤の表面応答であるため「2E」と表記しているが、建物の埋込みによる切欠き地盤を詳細にモデル化しているため、埋込みと切欠きの影響は入力地震動に考慮されている。

注 1 : 「E+F+P」は地盤の切欠き力の影響を考慮した建物基礎底面位置の地震動を表す。

注 2 : 「2E」は地盤表面の地震動を表す。ただし、地震応答解析モデルを地盤-構築物連成系の2次元FEMモデルとする屋外配管ダクト (排気筒) 及びディーゼル燃料貯蔵タンク室においては、地盤-構築物連成モデルに入力する、地盤の入射波の2倍の地震動を示す。

表 3-2(1) 入力地震動の評価手法の比較 (土木構造物)

土木構造物		入力地震動の評価手法				土木構造物の地震応答解析モデル			
		既工認		今回工認		入力地震動出力位置*1	相互作用モデル		土木構造物の設置レベル*2
		水平	鉛直	水平	鉛直		水平	鉛直	
屋外重要土木構造物	取水槽	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 2E	—	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 2E	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 2E	EL-65.0m EL-120.0m	地盤-構造物連成系の 2次元FEMモデル		EL-10.75m
	屋外配管ダクト (タービン建物 ~排気筒)	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 2E	—	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 2E	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 2E	EL-50.0m	地盤-構造物連成系の 2次元FEMモデル		EL 5.2m
	B-ディーゼル燃料貯蔵 タンク格納槽	—	—	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 2E	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 2E	EL-35.0m	地盤-構造物連成系の 2次元FEMモデル		EL 8.85m
	屋外配管ダクト (B-ディーゼル燃料 貯蔵タンク~原子炉建物)	—	—	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 2E	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 2E	EL-140.0m EL-8.0m	地盤-構造物連成系の 2次元FEMモデル		EL 11.011m
	屋外配管ダクト (タービン建物~放水槽)	—	—	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 2E	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 2E	EL-30.0m	地盤-構造物連成系の 2次元FEMモデル		EL 1.60m
	取水管	—	—	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 2E	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 2E	EL-100.0m	地盤-構造物連成系の 2次元FEMモデル		EL-17.812m
	取水口	—	—	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 2E	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 2E	EL-100.0m	地盤-構造物連成系の 2次元FEMモデル		EL-22.0m
津波防護施設	防波壁 (多重鋼管杭式擁壁)	—	—	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 2E	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 2E	EL-50.0m	地盤-構造物連成系の 2次元FEMモデル		EL-19.1m
	防波壁 (逆T擁壁)	—	—	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 2E	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 2E	EL-50.0m	地盤-構造物連成系の 2次元FEMモデル		EL 8.0m
	防波壁 (波返重力擁壁)	—	—	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 2E	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 2E	EL-50.0m EL-25.0m	地盤-構造物連成系の 2次元FEMモデル		EL-13.0m
	1号機取水槽流路縮小工 (北側壁含む)	—	—	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 2E	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 2E	EL-85.0m	地盤-構造物連成系の 2次元FEMモデル		EL-6.575m (北側壁:EL-8.2m)
	防波壁通路防波扉 (荷揚場南)	—	—	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 2E	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 2E	EL-50.0m	地盤-構造物連成系の 2次元FEMモデル		EL 8.5m
	防波壁通路防波扉 (3号機東側)	—	—	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 2E	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 2E	EL-50.0m	地盤-構造物連成系の 2次元FEMモデル		EL 8.5m
重要SA施設	第1ベントフィルタ 格納槽	—	—	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 2E	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 2E	EL-35.0m EL-130.0m	地盤-構造物連成系の 2次元FEMモデル		EL 1.7m
	低圧原子炉代替注水 ポンプ格納槽	—	—	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 2E	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 2E	EL-35.0m EL-130.0m	地盤-構造物連成系の 2次元FEMモデル		EL-0.3m
	緊急時対策所用 燃料地下タンク	—	—	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 2E	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 2E	EL 35.0m	地盤-構造物連成系の 2次元FEMモデル		EL 46.8m
	ガスタービン発電機用 軽油タンク基礎	—	—	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 2E*3	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 2E*3	EL 45.8m	地盤ばねモデル (SRモデル)	地盤ばねモデル (底面鉛直ばね モデル)	EL 45.8m
	屋外配管ダクト (ガスタービン発電機用軽油 タンク~ガスタービン 発電機)	—	—	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 2E	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 2E	EL 40.0m	地盤-構造物連成系の 2次元FEMモデル		EL 45.7m

注記*1: 地震応答解析モデル (2次元FEMモデル又は地盤ばねモデル) のモデル下端位置を示す。

*2: 代表的な設置レベルを示す。

*3: 高台のEL 44m 盤に設置された埋込みを有しない土木構造物であることから、「2E」とする。

注: 「2E」は、地盤-構造物連成モデルに入力する、地盤の入射波の2倍の地震動を示す。

表 3-2(2) 入力地震動の評価手法の比較 (土木構造物)

土木構造物		入力地震動の評価手法				土木構造物の地震応答解析モデル			
		既工認		今回工認		入力地震動 出力位置*1	相互作用モデル		土木構造物の 設置レベル*2
		水平	鉛直	水平	鉛直		水平	鉛直	
波 及 的 影 響 を 及 ぼ す お そ れ の あ る 施 設	免震重要棟遮蔽壁	—	—	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 2E	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 2E	EL 30.0m	地盤-構造物連成系の 2次元FEMモデル		EL 43.85m (杭下端レベル)
	復水貯蔵タンク遮蔽壁	—	—	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 2E	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 2E	EL-100.0m	地盤-構造物連成系の 2次元FEMモデル		EL 15.3m
	取水槽循環水ポンプエリア防 護対策設備	—	—	取水槽の地震応答 解析結果を 用いる*3	取水槽の地震応答 解析結果を 用いる*3	—	—		EL 8.8m (取水槽上)
	取水槽海水ポンプエリア防護 対策設備	—	—	取水槽の地震応答 解析結果を 用いる*3	取水槽の地震応答 解析結果を 用いる*3	—	—		EL 8.8m (取水槽上)
	1号機取水槽ピット部及び1 号機取水槽漸拉ダクト部底版	—	—	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 2E	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 2E	EL-85.0m	地盤-構造物連成系の 2次元FEMモデル		EL-0.3m
	仮設耐震構台	—	—	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 2E	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 2E	EL-130.0m	地盤-構造物連成系の 2次元FEMモデル		EL-2.02m (支持杭下端レベ ル)
	土留め工(親杭)	—	—	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 2E	(引下げ, 引上げ) 一次元波動論 2E	EL-130.0m	地盤-構造物連成系の 2次元FEMモデル		EL 0.72m (親杭下端レベ ル)

注記*1：地震応答解析モデル(2次元FEMモデル又は地盤ばねモデル)のモデル下端位置を示す。

*2：代表的な設置レベルを示す。

*3：取水槽に設置される土木構造物であるため、取水槽の地震応答解析による応答値を基に算定した静的震度を用いる。

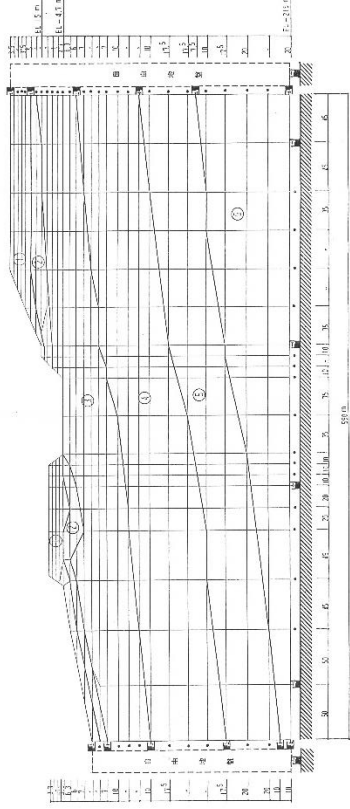
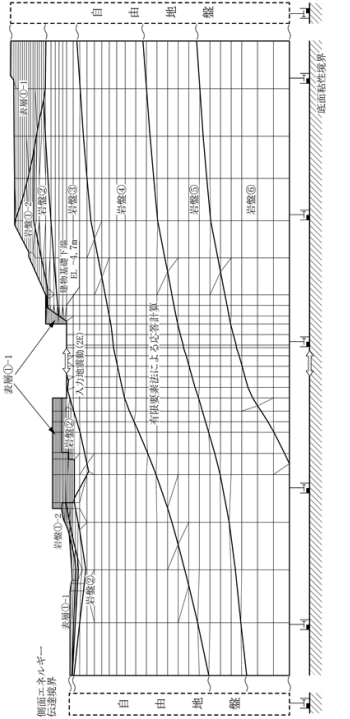
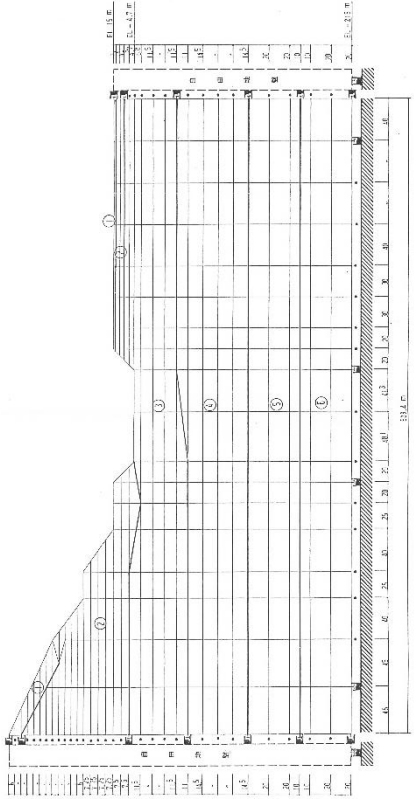
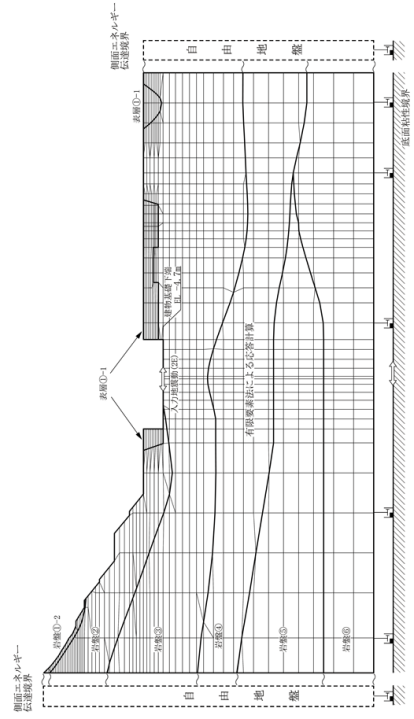
注：「2E」は、地盤-構造物連成モデルに入力する、地盤の入射波の2倍の地震動を示す。

表 3-3 原子炉建物の地震応答解析に用いる入力地震動の評価手法の比較（主な解析条件）

	既工認	今回工認
入力地震動の評価（概要）	<p>(N S方向)</p>	<p>(N S方向)</p> <p>※解放基盤表面から EL -215m までの 1次元モデルは既工認と同じ。</p>
評価手法		
解析方法	周波数応答解析	同左
入力地震動の算定方法 [計算機コード]	<ul style="list-style-type: none"> 引下げ：一次元波動論[SHAKE] 引上げ：2次元FEM解析 [VESL-DYN] 	<ul style="list-style-type: none"> 引下げ：一次元波動論[SHAKE] 引上げ：2次元FEM解析 [SuperFLUSH]
入力地震動の解析モデル		
モデル化範囲	<ul style="list-style-type: none"> 引下げ：解放基盤表面(EL -10m)から EL -215m までをモデル化 引上げ：幅は約 600m の範囲とし、高さは EL -215m 以浅をモデル化 	<ul style="list-style-type: none"> 引下げ：同左 引上げ：同左
速度層区分	建設時の地質調査結果に基づき設定	建設時の地質調査結果に加えて、建設時以降の敷地内の追加地質調査結果（ボーリング、PS検層）に基づき設定
地盤物性値*1	<ul style="list-style-type: none"> 岩盤については、建設時の地質調査結果に基づき設定 表層地盤については、文献⁽¹⁾に基づく標準的な砂質土のひずみ依存性を考慮した等価物性値を設定 	<ul style="list-style-type: none"> 同左 表層地盤については、地震動レベル及び試験結果に基づく埋戻土のひずみ依存性を考慮した等価物性値を設定
境界条件*2 (2次元FEM)	<ul style="list-style-type: none"> 底面：粘性境界 側面：粘性境界 	<ul style="list-style-type: none"> 底面：粘性境界 側面：エネルギー伝達境界※ <p>※側方地盤への波動の逸散をより詳細に評価する境界条件に変更</p>
入力地震動出力位置	EL -4.7m	同左
備考	建設工認 第1回 添付書類IV-2-4-1 「原子炉建物の地震応答計算書」による	今回工認 添付書類VI-2-2-2 「原子炉建物の地震応答計算書」による
地震応答解析モデル		
相互作用モデル	水平：地盤ばねモデル (SR モデル) 鉛直：—	水平：地盤ばねモデル (SR モデル) 鉛直：地盤ばねモデル (底面鉛直ばねモデル)
建物設置レベル	EL -4.7m	同左

注記*1：今回工認の入力地震動評価で用いる地盤物性値を表 3-5 に示す。
 *2：2次元FEM解析モデル側面の境界条件を参考資料-1 に示す。

表 3-4 原子炉建物の地震応答解析に用いる入力地震動の解析モデルの比較 (2次元 FEM 解析モデル)

	既工認	今回工認
NS		
EW		

注1：今回工認モデルでは建物基礎底面レベルの振動を同一とするため、建物基礎底面レベルの平面を保持する拘束条件を設けている。
また、建物床レベルの水平変位を同一とするため、切欠き地盤側面には水平変位を保持する拘束条件を設けている。

注2：既工認モデルと今回工認モデルによる入力地震動の比較を添付資料-2に示す。

3.2 地盤の物性値

今回工認の入力地震動評価で用いる地盤物性値を表 3-5 に、地盤物性の不確かさを考慮した解析用地盤物性値を表 3-6 に、表層地盤 (①-1 : 埋戻土) のせん断剛性及び減衰定数のひずみ依存性と等価物性値の設定の考え方を、既工認と比較して表 3-7 に示す。

埋戻土の剛性と減衰のひずみ依存性は、既工認では文献⁽¹⁾に基づく標準的な砂質土のひずみ依存性としていたが、今回工認では試験結果に基づくひずみ依存性に変更する。表層地盤を除く岩盤 (①-2~⑥) の地盤物性値は、既工認で設定した値を用いる。

なお、島根原子力発電所の建物・構築物の支持地盤は硬質岩盤であるため、既工認において、表層地盤のみ地震動レベルに応じた非線形性を考慮することとし、表層地盤の物性値の変動による入力地震動に対する影響は小さいと判断していたことを踏まえ、剛性及び減衰定数はそれぞれの地震動レベル (S_s, S_d) に対してモデルの要素の大きさを考慮した等価物性値 (一定値) を設定する。

また、地震応答解析においては、表 3-5 に示す物性値を基本ケースとし、地盤物性の不確かさを考慮する。地盤物性の不確かさ (岩盤) については、「NS2-補-023-01 地盤の支持性能について」に示すとおり、地盤調査結果の平均値を基に設定した基本ケースの S 波速度及び P 波速度に対して標準偏差に相当するばらつき ($\pm\sigma$) を考慮して設定する。なお、表層地盤①-1 の地盤物性値の不確かさについては、P S 検層の結果により設定した岩盤①-2~⑥の変動係数 (岩盤①-2~② : $\pm 20\%$, 岩盤③~⑥ : $\pm 10\%$) に基づき、 $\pm 20\%$ を変動係数として設定する。

表 3-5 今回工認の入力地震動評価で用いる地盤物性値

層番号*1		S波速度 V _s (m/s)	P波速度 V _p (m/s)	単位体積 重量*2 γ (kN/m ³)	ポアソン比 ν	せん断 弾性係数*2 G (×10 ⁵ kN/m ²)	減衰定数 h (%)
表層①-1	S s	127*3	422*3	20.7	0.45	0.341*3	8*3
	S d	156*3	516*3	20.7	0.45	0.512*3	7*3
岩盤①-2		250	800	20.6	0.446	1.31	3*4
岩盤②		900	2100	23.0	0.388	19.0	3*4
岩盤③		1600	3600	24.5	0.377	64.0	3
岩盤④		1950	4000	24.5	0.344	95.1	3
岩盤⑤		2000	4050	26.0	0.339	105.9	3
岩盤⑥		2350	4950	27.9	0.355	157.9	3

注記*1：層番号は解析モデル図(表3-4)を参照

*2：単位体積重量及びせん断弾性係数については、今回工認では既工認の値（MKS単位系）を単位換算（SI単位系）した値を示す。

*3：地震動レベル及び試験結果に基づく埋戻土のひずみ依存性を考慮した等価物性値

*4：既工認では、慣用値として5%としていたが、今回工認では他の岩盤（③～⑥）と同様に3%とする。

表 3-6 地盤物性の不確かさを考慮した解析用地盤物性値

(a) S波速度

層番号		地盤のS波速度 V_s (m/s)		
		基本ケース	+ σ 相当	- σ 相当
表層①-1	S s	127	153	102
	S d	156	187	125
岩盤①-2		250	300	200
岩盤②		900	1080	720
岩盤③		1600	1760	1440
岩盤④		1950	2145	1755
岩盤⑤		2000	2200	1800
岩盤⑥		2350	2585	2115

(b) P波速度

層番号		地盤のP波速度 V_p (m/s)		
		基本ケース	+ σ 相当	- σ 相当
表層①-1	S s	422	506	338
	S d	516	620	413
岩盤①-2		800	960	640
岩盤②		2100	2520	1680
岩盤③		3600	3960	3240
岩盤④		4000	4400	3600
岩盤⑤		4050	4455	3645
岩盤⑥		4950	5445	4455

表 3-7 表層地盤のせん断剛性及び減衰定数のひずみ依存性と等価物性値の設定の考え方

	既工認	今回工認		
埋戻土のせん断剛性及び減衰定数のひずみ依存性		<p>VI-2-1-3「地盤の支持性能に係る基本方針」より引用</p>		
設定根拠	文献 ⁽¹⁾ に基づく標準的な砂質土のひずみ依存性	埋戻土における動的変形試験結果により設定したひずみ依存性		
評価フロー	<p>2号機原子炉建物の一次元モデルに基づき設定</p> <p>表層地盤の初期せん断弾性係数(G_0), ひずみ依存性($G/G_0-\gamma, h-\gamma$)を設定</p> <p>等価線形解析の概念図</p> <p>基準地震動 S1, S2</p> <p>等価線形解析による収束計算</p> <p>S1, S2による収束値から算定した平均的な剛性低下率に基づき, 等価せん断弾性係数(G)を設定</p> <p>各建物の表層地盤の物性値に設定</p> <p>表層地盤の有効ひずみ, 剛性及び減衰</p> <p>$G(\text{平均}) = \Sigma H_i G_i / \Sigma H_i$ 剛性低下率 = $G(\text{平均}) / G_0$ ※剛性低下率は S1, S2 共通とし, 表層地盤の3層の平均値に基づき設定</p>	<p>2号機原子炉建物のNS方向及びEW方向の2次元FEMモデルに基づき設定</p> <p>表層地盤の拘束圧依存性を考慮した初期せん断弾性係数(G_0), ひずみ依存性($G/G_0-\gamma, h-\gamma$)を設定</p> <p>等価線形解析の概念図</p> <p>基準地震動 S s, 弾性設計用地震動 S d</p> <p>等価線形解析による収束計算</p> <p>各要素の収束値を要素面積の重み付け平均することにより地震動ごとの剛性低下率及び減衰定数を算定し, S s及びS dそれぞれで平均化することにより, 地震動レベルに応じた等価物性値を設定</p> <p>2号機原子炉建物の2次元FEMで算定した等価物性値を各建物の表層地盤の物性値にも設定</p>		
等価物性値	基準地震動 S1, S2		基準地震動 S s, 弾性設計用地震動 S d	
	せん断剛性 (G)	減衰定数 (h)	せん断剛性 (G)	減衰定数 (h)
	0.65 (t/cm ²) (剛性低下率 G/G_0 0.485)	5% (慣用値)	表 3-5 参照 (等価物性値の設定方法については, 別紙-1 参照)	

4. 入力地震動に関する検討

4.1 表層地盤の物性値に関する検討

(1) 検討概要

入力地震動を算定する際の表層地盤①-1の物性値については、既工認において表層地盤の物性値の変動による入力地震動に対する影響は小さいと判断していたことを踏まえ、基準地震動 S_s 及び弾性設計用地震動 S_d それぞれの地震動レベルに応じた一定値を設定することとしている。

本検討では、建物の規模や施設の重要性を踏まえて原子炉建物を代表として、表層地盤①-1のひずみ依存特性を考慮した等価線形解析（以下「等価線形解析ケース」という。）より得られた水平方向の入力地震動と表層地盤①-1を等価物性値とした線形解析（以下「今回工認ケース」という。）より得られた水平方向の入力地震動を比較し、今回工認ケースにおける表層地盤の物性値に関する設定方法の妥当性を確認する。

今回工認ケースと等価線形解析ケースの入力地震動を比較し、地震動レベルに応じた一定値を設定することによる入力地震動評価への影響があると判断された場合は、等価線形解析ケースによる入力地震動を用いた地震応答解析により、建物・構築物及び機器・配管系への影響検討を実施する。

なお、本検討は、地震動により収束物性値が異なることから、基準地震動 S_s 及び弾性設計用地震動 S_d の全波に対して影響を確認することとする。

(2) 検討条件

a. 表層地盤①-1の物性値の設定

(a) 今回工認ケース

今回工認ケースに用いる等価物性値を以下に示す。等価物性値の設定については、「別紙-1 表層地盤の等価物性値の設定について」に示す。

イ. 初期せん断弾性係数 G_0

初期せん断弾性係数は、拘束圧依存性を考慮した各要素の初期せん断弾性係数を要素面積に応じて重み付け平均した値とする。

$$G_0 = 1.707 \times 10^2 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

ロ. 剛性低下率 G/G_0

今回工認ケースで設定している剛性低下率 G/G_0 を表4-1に示す。

表4-1 剛性低下率 G/G_0

基準地震動 S_s	弾性設計用地震動 S_d
0.2	0.3

ハ. 減衰定数 h

今回工認ケースで設定している減衰定数 h を表4-2に示す。

表4-2 減衰定数 h

基準地震動 S_s	弾性設計用地震動 S_d
0.08	0.07

(b) 等価線形解析ケース

等価線形解析ケースに用いる物性値を以下に示す。物性値については、VI-2-1-3「地盤の支持性能に係る基本方針」に記載の解析用物性値の算定式を用いることとする。

イ. 初期せん断弾性係数 G_0

初期せん断弾性係数は、拘束圧依存性を考慮して、以下の式により要素ごとに算定する。

$$G_0 = 749 \times \sigma_m'{}^{0.66} \quad (\text{N/mm}^2)$$

ここで、

$$\sigma_m' = (1+2K) \cdot \sigma_v' / 3 : \text{平均拘束圧 (N/mm}^2)$$

$$\sigma_v' = \gamma \cdot H / 10^6 : \text{上載荷重 (N/mm}^2)$$

K : 静止土圧係数 (=0.5 : 慣用値)

γ : 単位体積重量 (=20.7×10³N/m³)

H : 各要素の中心深さ (m)

ν : 動ポアソン比 (=0.45)

ロ. 剛性低下率 G/G_0

剛性低下率 G/G_0 のひずみ依存特性は、以下の式により算定する。

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + \gamma / 0.00027}$$

ここで、 γ : せん断ひずみ

ハ. 減衰定数 h

減衰定数 h のひずみ依存特性は、以下の式により算定する。

$$h = \frac{0.0958 \gamma}{\gamma + 0.00020}$$

ここで、 γ : せん断ひずみ

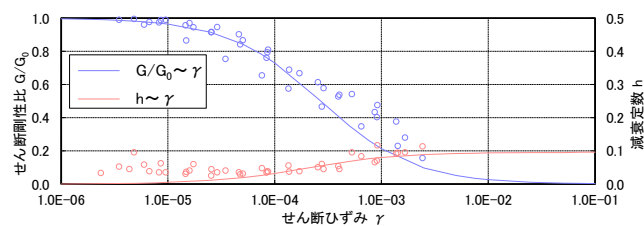


図 4-1 $G/G_0 - \gamma$ 関係及び $h - \gamma$ 関係

b. 解析モデル

本検討に用いる2次元FEMモデルを図4-2に、地盤物性値を表4-3に示す。

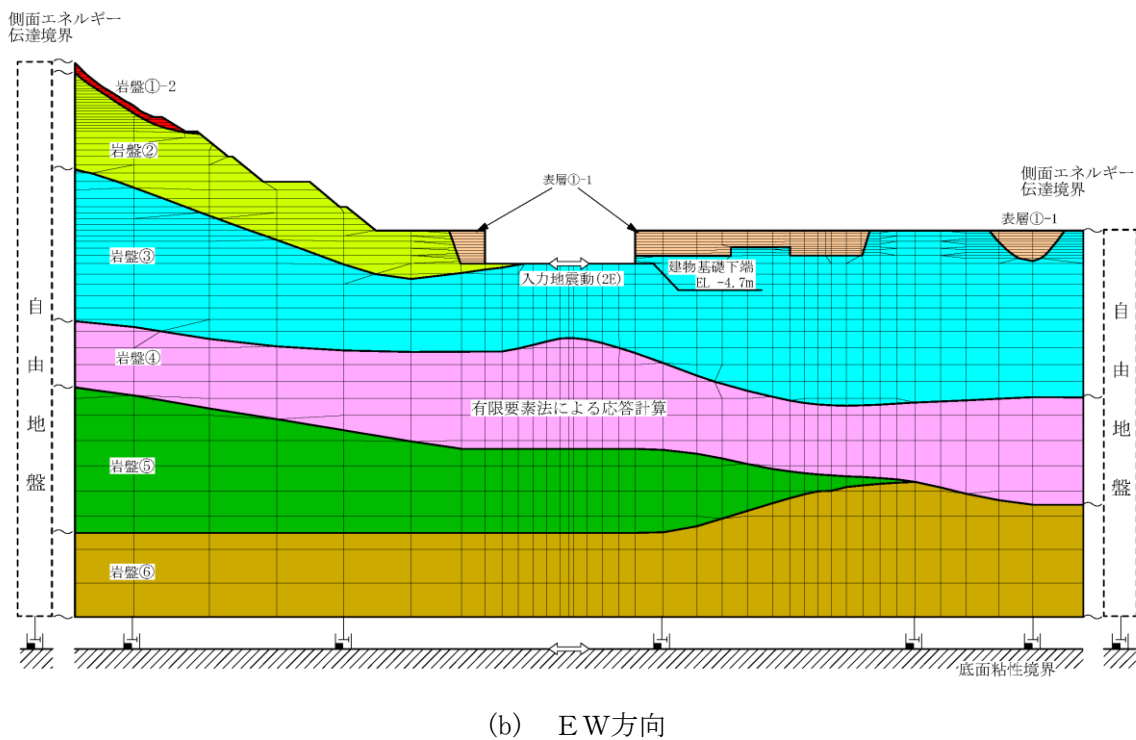
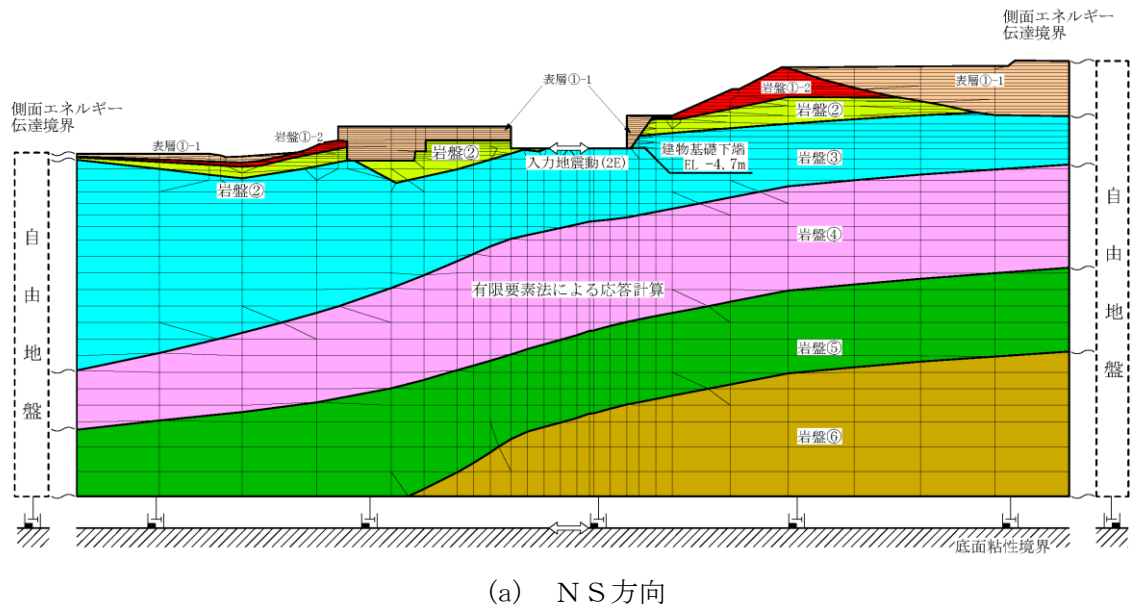


図4-2 2次元FEMモデル(原子炉建物)

表 4-3 地盤物性値

(a) 今回工認ケース

層番号		S波速度 V _s (m/s)	P波速度 V _p (m/s)	単位体積重量 γ (kN/m ³)	ポアソン比 ν	せん断弾性係数 G (×10 ⁵ kN/m ²)	減衰定数 h (%)
表層 ①-1	S s	127*	422*	20.7	0.45	0.341*	8*
	S d	156*	516*	20.7	0.45	0.512*	7*
岩盤①-2		250	800	20.6	0.446	1.31	3
岩盤②		900	2100	23.0	0.388	19.0	3
岩盤③		1600	3600	24.5	0.377	64.0	3
岩盤④		1950	4000	24.5	0.344	95.1	3
岩盤⑤		2000	4050	26.0	0.339	105.9	3
岩盤⑥		2350	4950	27.9	0.355	157.9	3

注記*：地震動レベル及び試験結果に基づく埋戻土のひずみ依存性を考慮した等価物性値
(4.1(2)a. (a)参照)

(b) 等価線形解析ケース

層番号		S波速度 V _s (m/s)	P波速度 V _p (m/s)	単位体積重量 γ (kN/m ³)	ポアソン比 ν	せん断弾性係数 G (×10 ⁵ kN/m ²)	減衰定数 h (%)
表層 ①-1	S s	*	*	20.7	0.45	*	*
	S d	*	*	20.7	0.45	*	*
岩盤①-2		250	800	20.6	0.446	1.31	3
岩盤②		900	2100	23.0	0.388	19.0	3
岩盤③		1600	3600	24.5	0.377	64.0	3
岩盤④		1950	4000	24.5	0.344	95.1	3
岩盤⑤		2000	4050	26.0	0.339	105.9	3
岩盤⑥		2350	4950	27.9	0.355	157.9	3

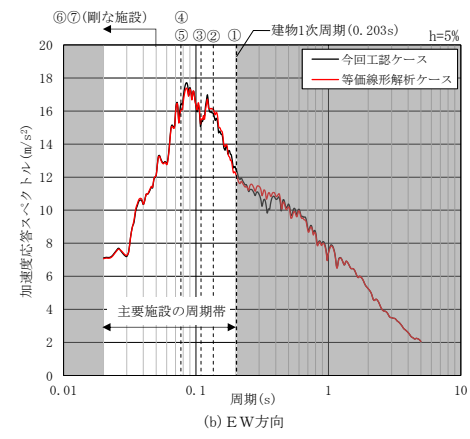
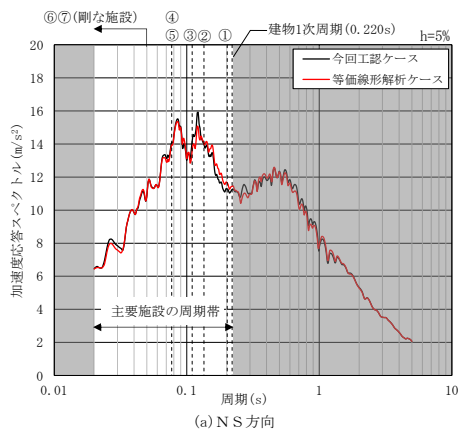
注記*：ひずみ依存性を要素ごとに考慮した物性値 (4.1(2)a. (b)参照)

(3) 検討結果

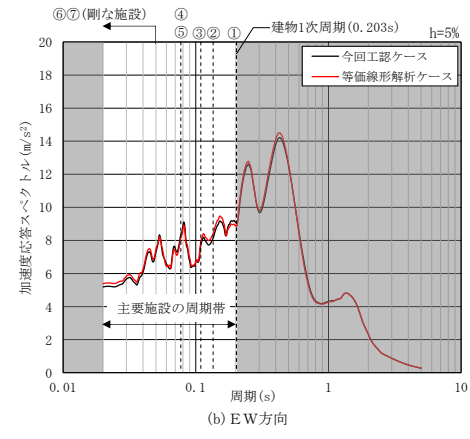
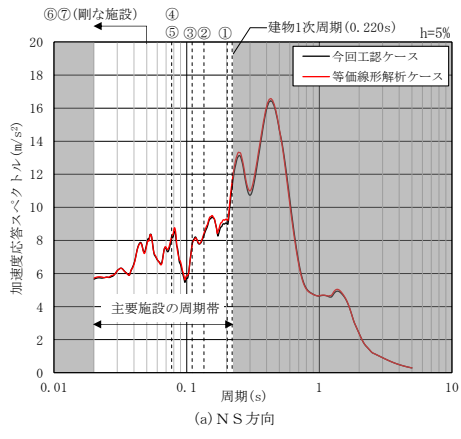
図 4-3 及び図 4-4 に入力地震動の加速度応答スペクトルの比較及び主要施設の固有周期を示す。今回工認ケースの入力地震動は等価線形解析による入力地震動の加速度応答スペクトルと比較すると、主要施設の周期帯（図中のグレーハッチング以外の部分）で概ね一致しており、有意な差がないことから、表層地盤①-1 の地盤物性値の変動が入力地震動に及ぼす影響は小さいと判断できるため、今回工認ケースにおいて、表層地盤①-1 の物性値を一定値とする設定方法は妥当である。

表層地盤①-1 の地盤物性値の変動が入力地震動に及ぼす影響が小さい要因として、島根原子力発電所の建物・構築物が硬質岩盤に支持されており、表層地盤①-1 の分布する領域が地盤全体に対して限定的であること及び建物直下地盤である岩盤③と比較して、表層地盤①-1 の地盤剛性は 10^{-2} 倍程度と小さいことから、表層地盤①-1 の剛性の変動が地盤全体の剛性に寄与する割合は小さく、建物直下地盤に与える影響が軽微であると考えられる。

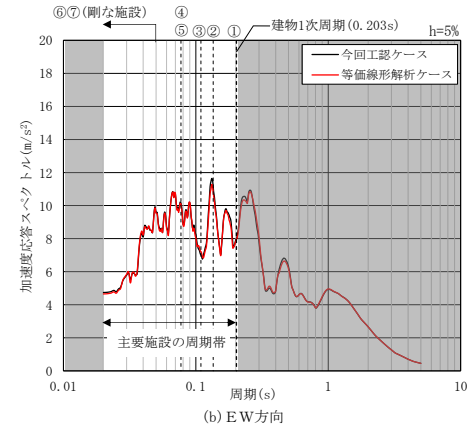
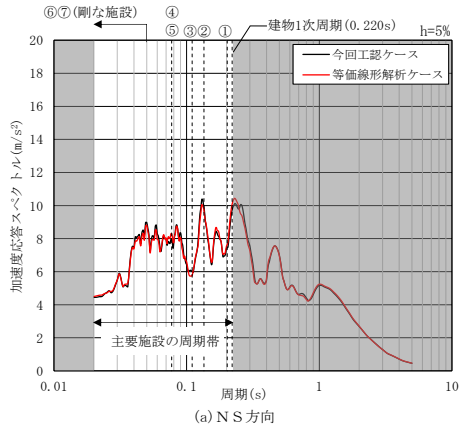
- 主要施設の名称
- ① 制御棒の挿入性 (燃料集合体)
 - ② 炉心支持構造物 (炉心シュラウド)
 - ③ 原子炉圧力容器
 - ④ 残留熱除去系配管
 - ⑤ 主蒸気系配管
 - ⑥ 残留熱除去ポンプ
 - ⑦ 原子炉格納容器



(1) S s - D



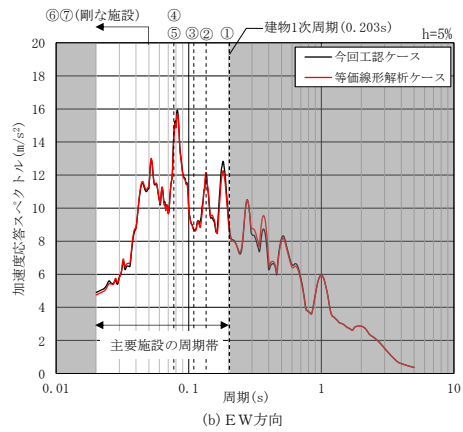
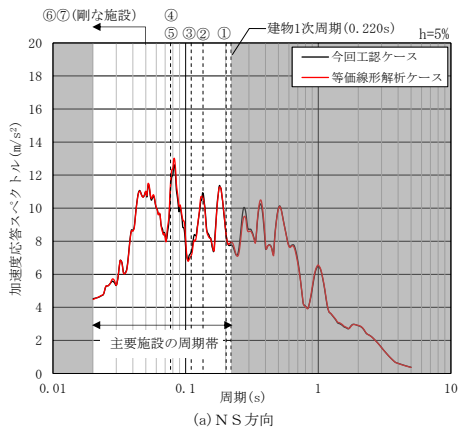
(2) S s - N 1



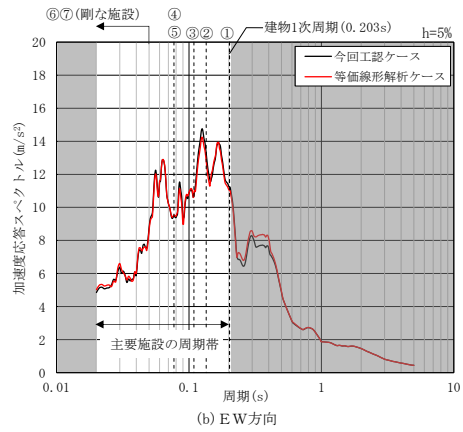
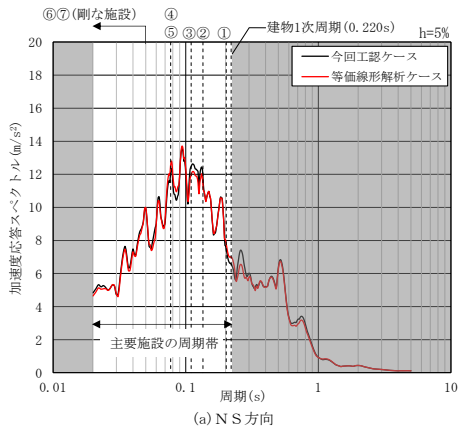
(3) S s - N 2 NS

図 4-3 (1) 入力地震動の加速度応答スペクトルの比較
(原子炉建物, 基準地震動 S s)

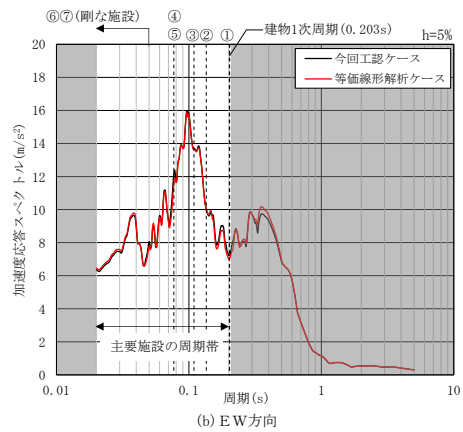
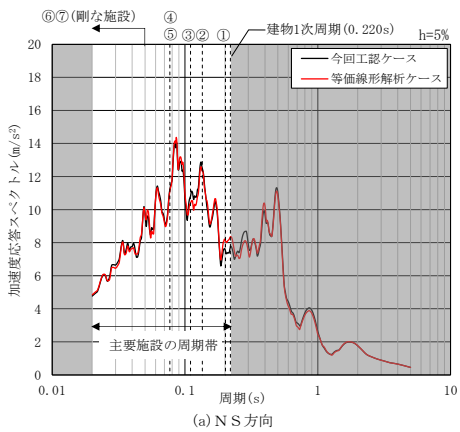
- 主要施設の名称
- ① 制御棒の挿入性 (燃料集合体)
 - ② 炉心支持構造物 (炉心シュラウド)
 - ③ 原子炉圧力容器
 - ④ 残留熱除去系配管
 - ⑤ 主蒸気系配管
 - ⑥ 残留熱除去ポンプ
 - ⑦ 原子炉格納容器



(4) S s - N 2 EW



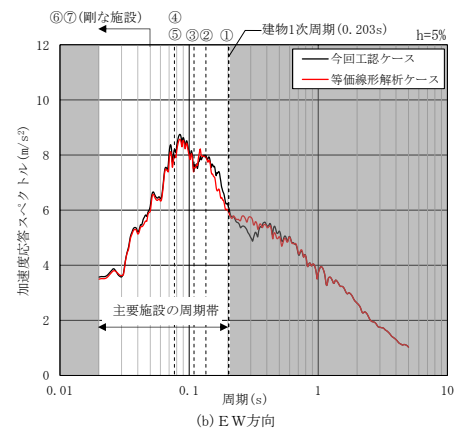
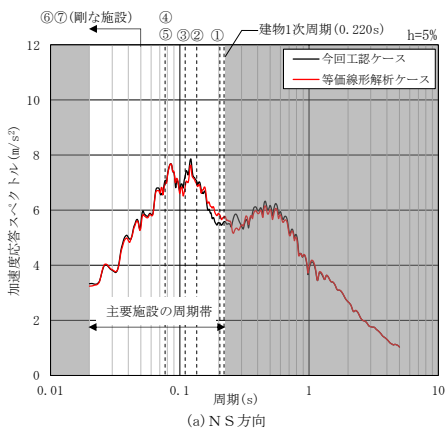
(5) S s - F 1



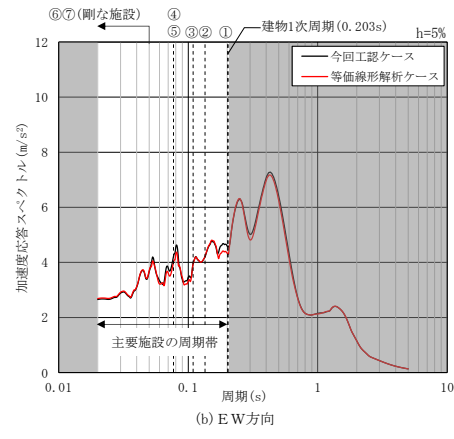
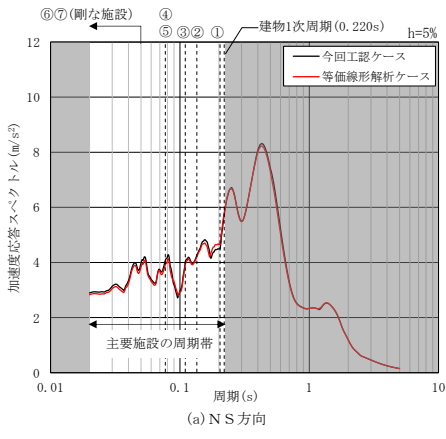
(6) S s - F 2

図 4-3 (2) 入力地震動の加速度応答スペクトルの比較
(原子炉建物, 基準地震動 S s)

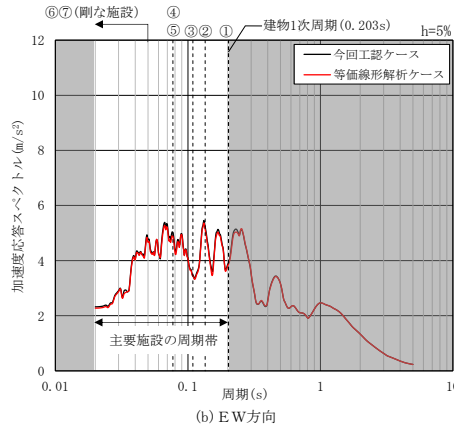
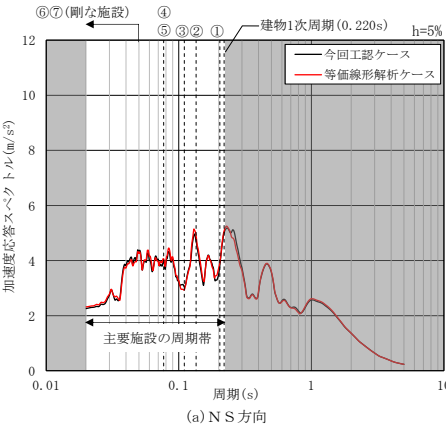
- 主要施設の名称
- ① 制御棒の挿入性 (燃料集合体)
 - ② 炉心支持構造物 (炉心シュラウド)
 - ③ 原子炉圧力容器
 - ④ 残留熱除去系配管
 - ⑤ 主蒸気系配管
 - ⑥ 残留熱除去ポンプ
 - ⑦ 原子炉格納容器



(1) S d - D



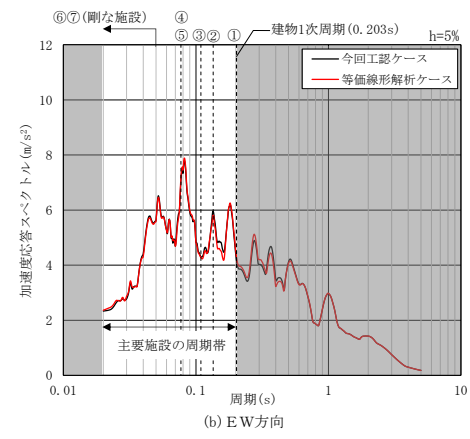
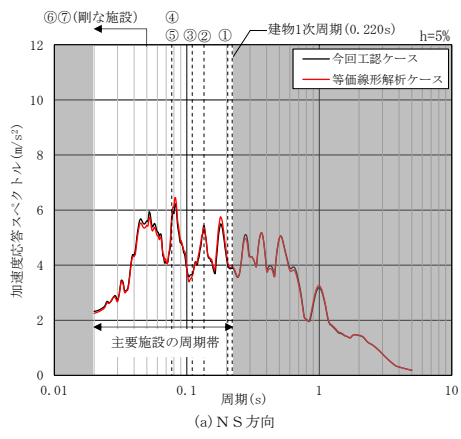
(2) S d - N 1



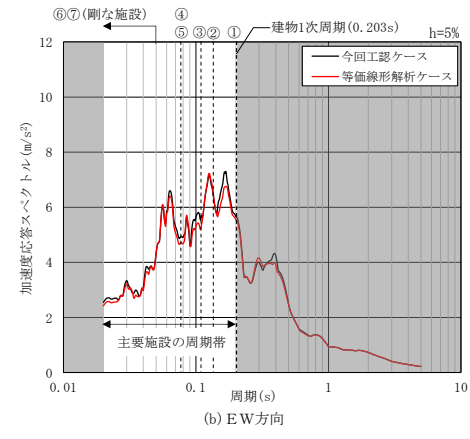
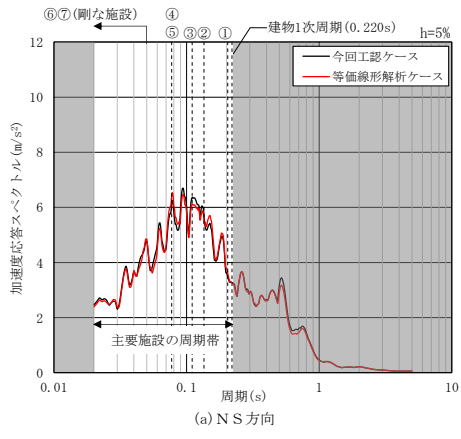
(3) S d - N 2 NS

図 4-4(1) 入力地震動の加速度応答スペクトルの比較
(原子炉建物, 弾性設計用地震動 S d)

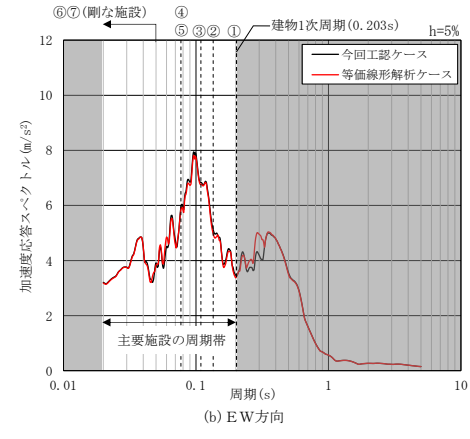
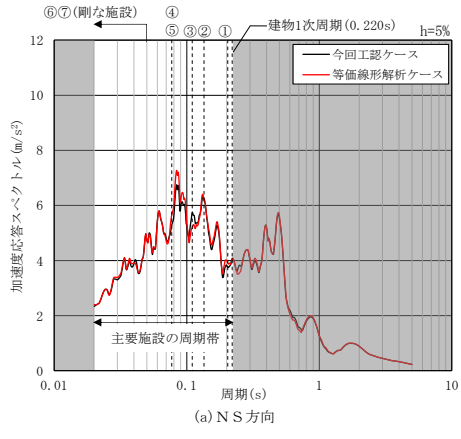
- 主要施設の名称
- ① 制御棒の挿入性 (燃料集合体)
 - ② 炉心支持構造物 (炉心シュラウド)
 - ③ 原子炉圧力容器
 - ④ 残留熱除去系配管
 - ⑤ 主蒸気系配管
 - ⑥ 残留熱除去ポンプ
 - ⑦ 原子炉格納容器



(4) S d - N 2 EW



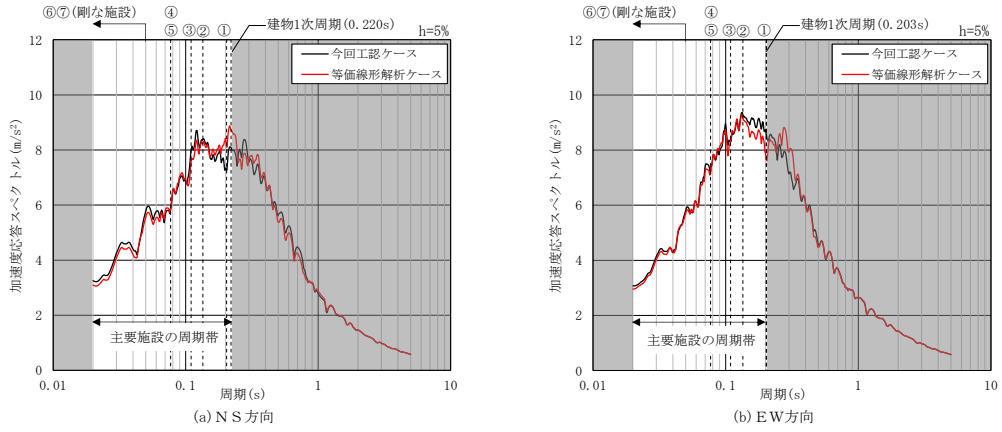
(5) S d - F 1



(6) S d - F 2

図 4-4(2) 入力地震動の加速度応答スペクトルの比較
(原子炉建物, 弾性設計用地震動 S d)

- 主要施設の名称
- ① 制御棒の挿入性 (燃料集合体)
 - ② 炉心支持構造物 (炉心シュラウド)
 - ③ 原子炉圧力容器
 - ④ 残留熱除去系配管
 - ⑤ 主蒸気系配管
 - ⑥ 残留熱除去ポンプ
 - ⑦ 原子炉格納容器



(7) S d - 1

図 4-4(3) 入力地震動の加速度応答スペクトルの比較
(原子炉建物, 弾性設計用地震動 S d)

(4) 保守性に関する詳細検討

本検討において、表層地盤①-1の地盤物性値の変動が入力地震動に及ぼす影響は小さいことを示したが、一部のケースにおいて、今回工認ケースよりも等価線形解析ケースの応答が大きくなる周期帯があることを確認した。

ここでは、主要施設の周期帯において、今回工認ケースに対する等価線形解析ケースの応答比率が最も大きくなったケース（弾性設計用地震動Sd-1, NS方向）に対して、後述する「4.5 観測記録を用いたシミュレーション解析による入力地震動評価に関する検証」にて示す入力地震動評価用の地盤モデルが有する保守性の観点から、表層地盤①-1の地盤物性値の変動が入力地震動評価に及ぼす影響について、設計上の配慮の必要性を検討する。

表4-4に、弾性設計用地震動Sd-1（NS方向）における本検討（今回工認ケース及び等価線形解析ケース）及びシミュレーション解析（観測記録及びシミュレーション解析結果）における応答比率の比較を示す。

表4-4に示すように、等価線形解析ケースが今回工認ケースの応答を上回る周期において、本検討において確認した影響（応答比率②/①=1.15）は、シミュレーション解析により確認した保守性（応答比率④/③=1.35）より小さいことから、今回工認の入力地震動評価に用いている地盤モデルが有する保守性に対して表層地盤①-1の地盤物性値の変動が入力地震動評価に及ぼす影響は軽微であり、設計上の配慮は必要ないと判断できる。

表4-4 本検討及びシミュレーション解析における応答比率の比較

周期*1 (s)	本検討 (弾性設計用地震動Sd-1, NS方向) (図4-4(3))			シミュレーション解析*2 (2000年鳥取県西部地震, NS方向) (図4-29(a))		
	① 今回工認 ケース (m/s ²)	② 等価線形解析 ケース (m/s ²)	応答比率 (②/①)	③ 観測記録 (m/s ²)	④ 解析結果 (m/s ²)	応答比率 (④/③)
0.198	7.26	8.32	1.15	0.63	0.85	1.35

注記*1：応答比率（②/①）が最大となるときの周期

*2：「4.5 観測記録を用いたシミュレーション解析による入力地震動評価に関する検証」の「(3) 検討結果」参照

4.2 一次元波動論による入力地震動評価の保守性に関する検討

(1) 検討概要

一次元波動論により水平方向の入力地震動を算定している建物・構築物について、2次元FEM解析による入力地震動を算定し、一次元波動論による入力地震動の加速度応答スペクトルと比較することで、一次元波動論による入力地震動評価の保守性を確認する。

対象とする建物・構築物は、一次元波動論により入力地震動を算定している建物・構築物のうち、Sクラスの間接支持構造物であるタービン建物及び廃棄物処理建物を代表とする。

タービン建物及び廃棄物処理建物の入力地震動を算定するための2次元FEMモデルは、表3-4に示す今回工認の原子炉建物の2次元FEMモデルを基に、各建物位置での表層の掘削形状及び速度層境界レベルを反映することにより作成する。

今回工認では、対象建物・構築物に隣接する建物・構築物等地下部分は、埋戻土でモデル化することを基本としているが、本検討においては、対象建物・構築物の基礎底面が隣接する建物・構築物等の基礎底面よりも浅い位置にある場合、隣接する建物・構築物等の剛性をより詳細にモデル化するために、隣接する建物・構築物等を等価な物性値としてモデル化する。

一次元波動論と2次元FEM解析による入力地震動の加速度応答スペクトルを比較し、影響があると判断された場合は、2次元FEM解析による入力地震動を用いた地震応答解析により、建物・構築物及び機器・配管系への影響検討を実施する。

なお、本検討は、評価手法の違いによる入力地震動への影響について検討することから、位相特性の偏りがなく、全周期帯において安定した応答を生じさせる基準地震動S_s-Dに対して実施することとする。

(2) 検討条件

a. 隣接する建物・構築物等のモデル化

タービン建物のNS方向及び廃棄物処理建物のEW方向は、表4-5、図4-5及び図4-6に示すように、基礎底面が隣接する建物・構築物等の基礎底面よりも浅い位置にあることから、隣接する建物・構築物等の剛性をより詳細にモデル化するために、タービン建物のNS方向については南側に隣接する原子炉建物及び北側に隣接する取水槽の地下部分を、廃棄物処理建物のEW方向については東側に隣接する1号機廃棄物処理建物及び西側に隣接する原子炉建物の地下部分を等価な物性値としてモデル化する。

表4-5 隣接する建物・構築物等の基礎底面位置

(a) タービン建物

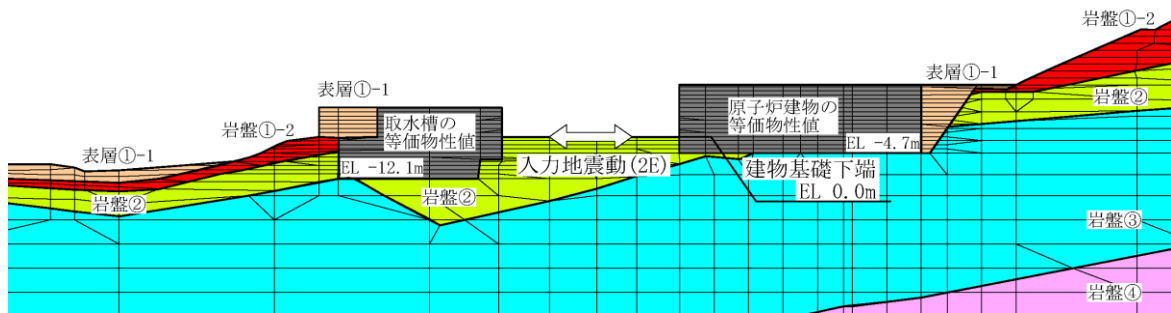
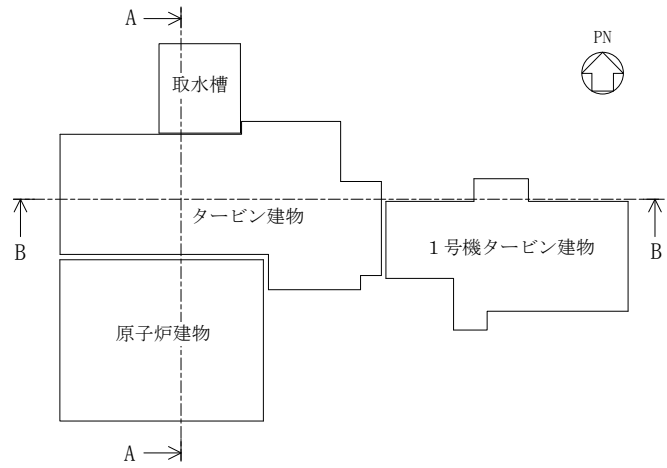
タービン 建物	隣接する建物・構築物等			
	東側 1号機タービン 建物*	西側 なし（埋戻土）	南側 原子炉建物	北側 取水槽
EL 0.0m	EL -0.3m	—	EL -4.7m	EL -12.1m

注記*：タービン建物の基礎底面より僅かに深い位置にあるが、概ね同じ高さにあることから、1号機タービン建物の地下部分は埋戻土でモデル化する。

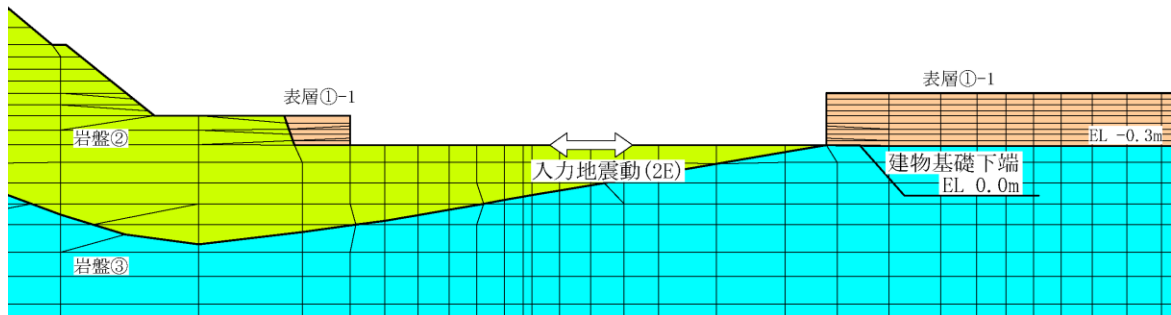
(b) 廃棄物処理建物

廃棄物 処理建物	隣接する建物・構築物等			
	東側 1号機廃棄物 処理建物*	西側 原子炉建物	南側 なし（埋戻土）	北側 タービン建物
EL 0.0m	EL 5.0m	EL -4.7m	—	EL 0.0m

注記*：廃棄物処理建物の基礎底面より浅い位置にあるが、西側にある原子炉建物の地下部分を等価な物性値でモデル化するため、東側についても西側に合わせて等価な物性値でモデル化する。

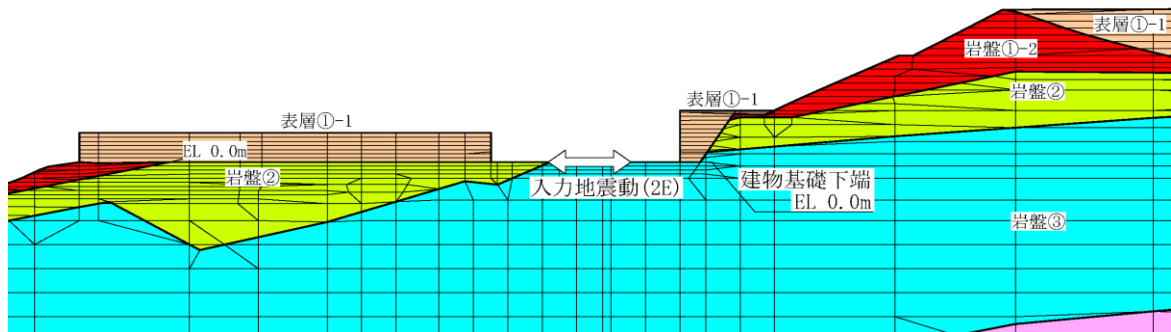
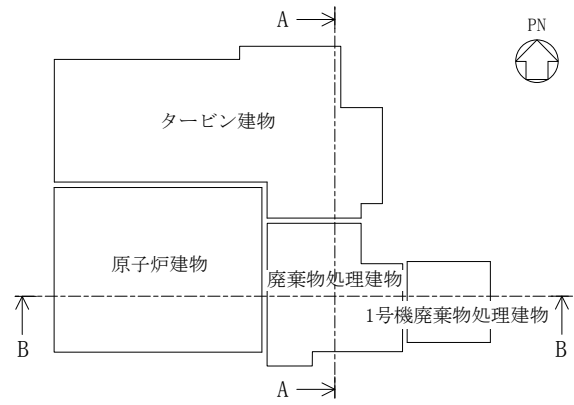


(a) NS方向 (A-A断面)

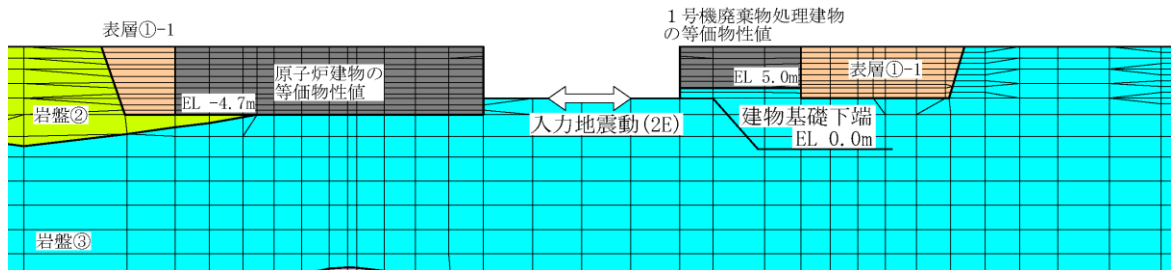


(b) EW方向 (B-B断面)

図 4-5 2次元FEMモデル詳細図 (タービン建物)



(a) NS方向 (A-A断面)



(b) EW方向 (B-B断面)

図 4-6 2次元FEMモデル詳細図 (廃棄物処理建物)

b. 隣接する建物・構築物等の等価剛性及び等価単位体積重量の算定

隣接する建物・構築物等の等価剛性及び等価単位体積重量の算定方法を以下に示す。

(a) 建物（原子炉建物及び1号機廃棄物処理建物）

隣接する建物の等価物性値は各建物の質点系地震応答解析モデル（以下「SRモデル」という。）に基づき設定する。

イ. 等価せん断弾性係数

隣接する建物モデルの等価せん断剛性は、SRモデルのせん断剛性に基づき設定する。i層の等価せん断弾性係数 G_i' は以下の式により算出する。

$$G_i' = \frac{A_{S_i}}{A} \times G$$

ここで、

G : 建物のせん断弾性係数

A_{S_i} : i層のせん断断面積(SRモデルのi層のせん断断面積の和)

A : 建物面積

i層の等価せん断弾性係数 G_i' を高さ方向に重み付け平均することにより、等価せん断弾性係数 ${}_{eq}G$ を以下の式により設定する。

$${}_{eq}G = \frac{\sum (h_i \times G_i')}{\sum h_i}$$

ここで、 h_i : i層支配高さ

ロ. 等価単位体積重量

隣接する建物モデルの等価単位体積重量は、SRモデルの質点重量に基づき設定する。i層の単位体積重量 γ_i は以下の式により算出する。

$$\gamma_i = \frac{w_i}{A \times H_i}$$

ここで、

w_i : i層の質点重量(SRモデルのi層の質点重量の和)

A : 建物面積

H_i : i層の支配高さ

i 層の単位体積重量を高さ方向に重み付け平均することにより, 等価単位体積重量 ${}_{eq}\gamma$ を以下の式により設定する。

$${}_{eq}\gamma = \frac{\sum(\gamma_i \times H_i)}{\sum H_i}$$

(b) 取水槽

取水槽の等価物性値は取水槽の 2 次元 FEM モデル (以下「取水槽 FEM モデル」という。) に基づき設定する。取水槽の構造モデルを図 4-7 に, 物性値を表 4-6 に示す。

イ. 等価せん断弾性係数

取水槽の等価せん断剛性は, 取水槽 FEM モデルのヤング係数及びポアソン比に基づき設定する。等価せん断弾性係数 ${}_{eq}G$ は以下の式により算出する。

$${}_{eq}G = \frac{\sum(A_i \times G_i)}{\sum A_i}$$

$$G_i = \frac{E_i}{2(1 + \nu)}$$

ここで,

- G_i : 区分 i のせん断弾性係数
- A_i : 区分 i の面積
- E_i : 区分 i のヤング係数
- ν : ポアソン比

ロ. 等価単位体積重量

取水槽の等価単位体積重量は, 取水槽 FEM モデルの単位体積重量に基づき設定する。等価単位体積重量 ${}_{eq}\gamma$ は以下の式により算出する。

$${}_{eq}\gamma = \frac{\sum(A_i \times \gamma_i)}{\sum A_i}$$

ここで,

- γ_i : 区分 i の単位体積重量
- A_i : 区分 i の面積

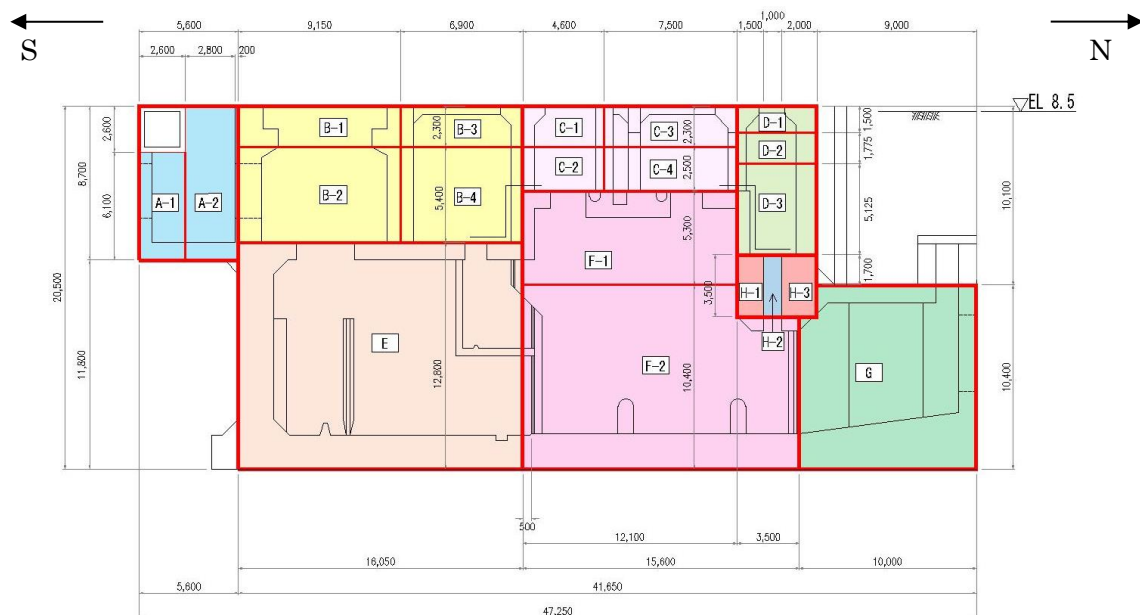


図 4-7 取水槽の構造モデル

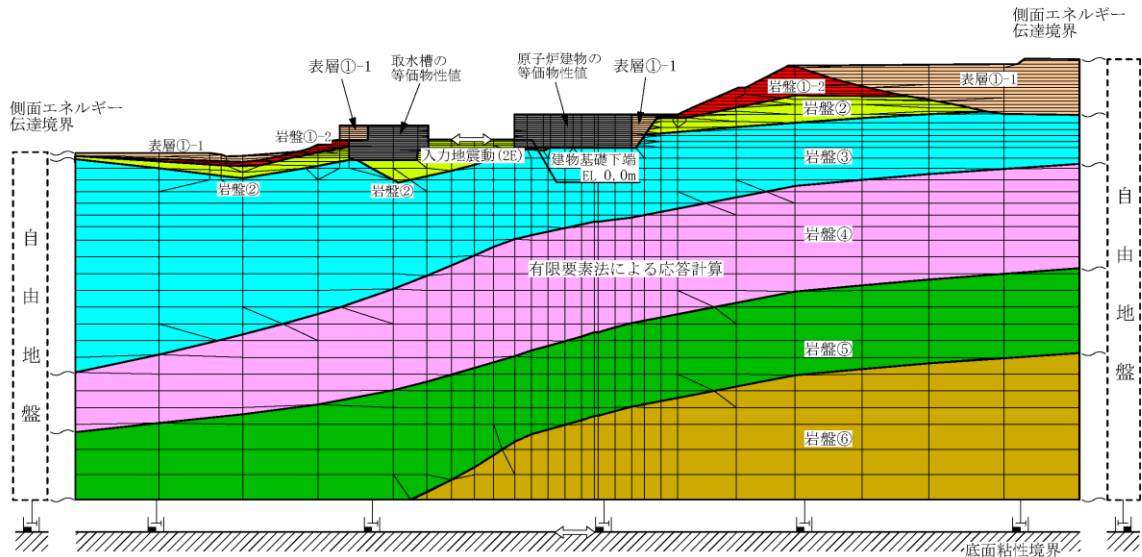
表 4-6 取水槽の物性値*

区分	ヤング係数 E (N/m ²)	せん断弾性係数 G (N/m ²)	ポアソン比 ν	単位体積重量 γ (N/m ³)	面積 A (m ²)	
A	A-1	1.983E+09	8.263E+08	0.200	1.194E+03	41.96
	A-2	9.914E+08	4.131E+08	0.200		
B	B-1	1.204E+09	5.017E+08	0.200	1.213E+03	123.59
	B-2	1.416E+09	5.900E+08	0.200		
	B-3	1.204E+09	5.017E+08	0.200		
	B-4	1.416E+09	5.900E+08	0.200		
C	C-1	4.780E+09	1.992E+09	0.200	3.993E+03	22.08
	C-2	4.868E+09	2.028E+09	0.200		
	C-3	1.204E+09	5.017E+08	0.200	1.959E+03	36.00
	C-4	1.416E+09	5.900E+08	0.200		
D	D-1	1.204E+09	5.017E+08	0.200	1.565E+03	37.80
	D-2	1.416E+09	5.900E+08	0.200		
	D-3	2.124E+09	8.850E+08	0.200		
E	E	4.874E+09	2.031E+09	0.200	4.054E+03	205.44
F	F-1	7.615E+09	3.173E+09	0.200	5.991E+03	220.07
	F-2	6.836E+09	2.848E+09	0.200		
G	G	5.232E+09	2.180E+09	0.200	3.606E+03	102.20
H	H-1	2.475E+10	1.031E+10	0.200	2.788E+04	12.25
	H-3					
	H-2	4.874E+09	2.031E+09	0.200	5.806E+03	3.50

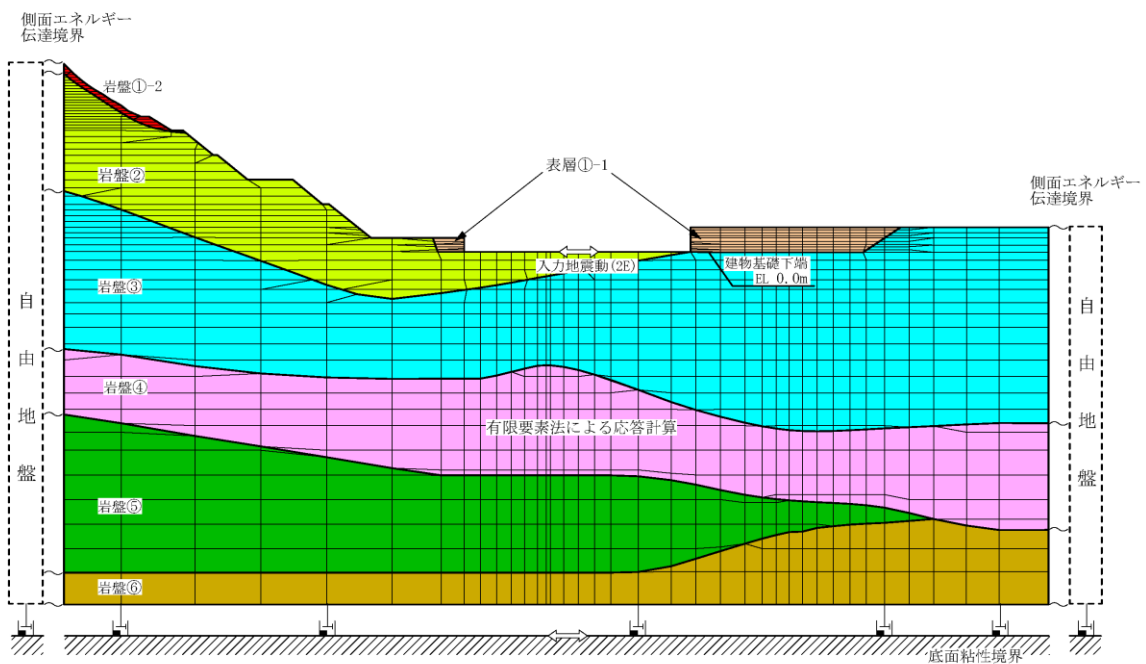
注記* : NS2-補-026-02「取水槽の地震応答計算書及び耐震性についての計算書に関する補足説明資料」参照

c. 解析モデル

本検討に用いる解析モデルを図 4-8 及び図 4-9 に、解析モデルの地盤物性値を表 4-7 に、隣接する建物・構築物等の物性値を表 4-8 に示す。

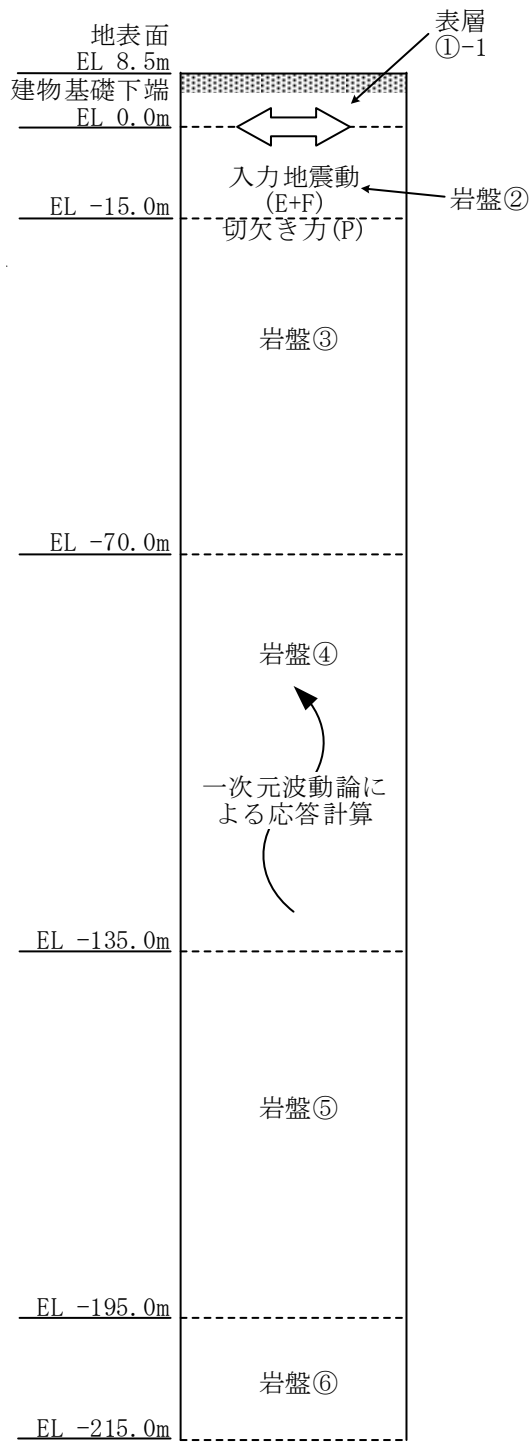


(a) 2次元FEM (NS方向)



(b) 2次元FEM (EW方向)

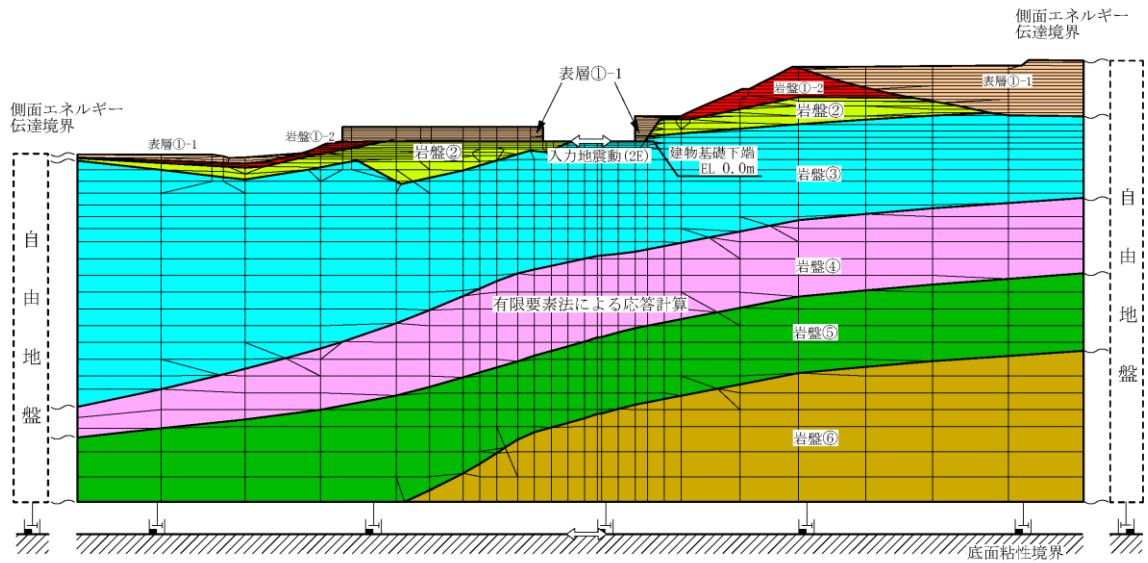
図 4-8(1) 解析モデル (タービン建物)



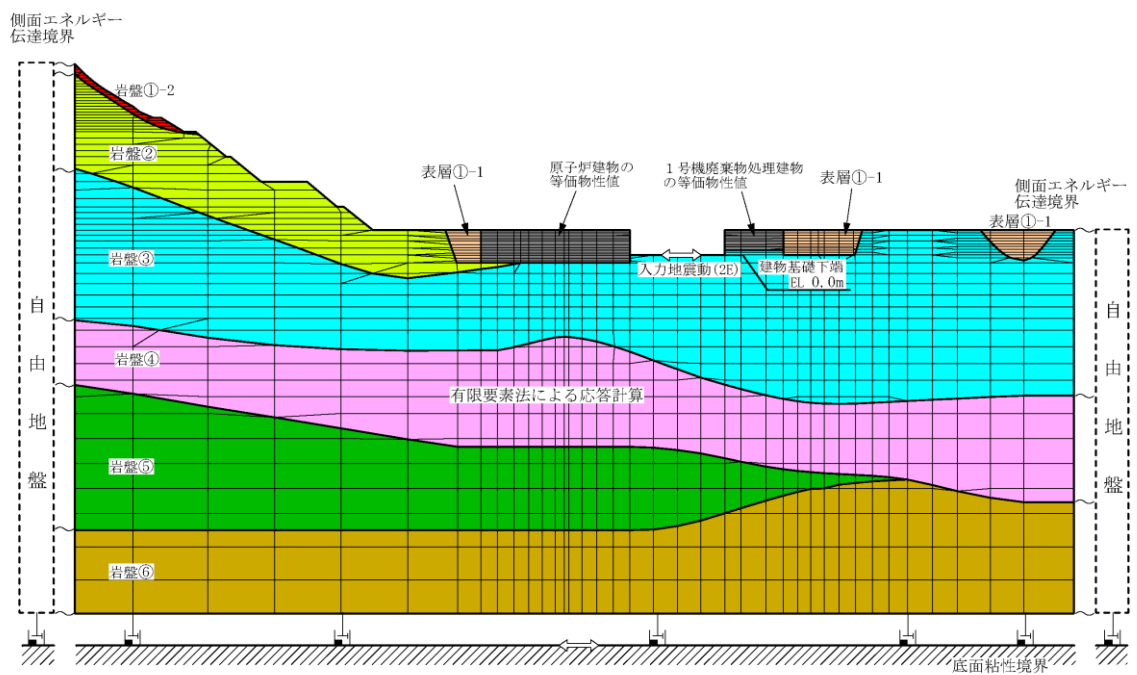
注：建物中央の速度層に基づきモデル化

(c) 一次元波動論

図 4-8(2) 解析モデル (タービン建物)

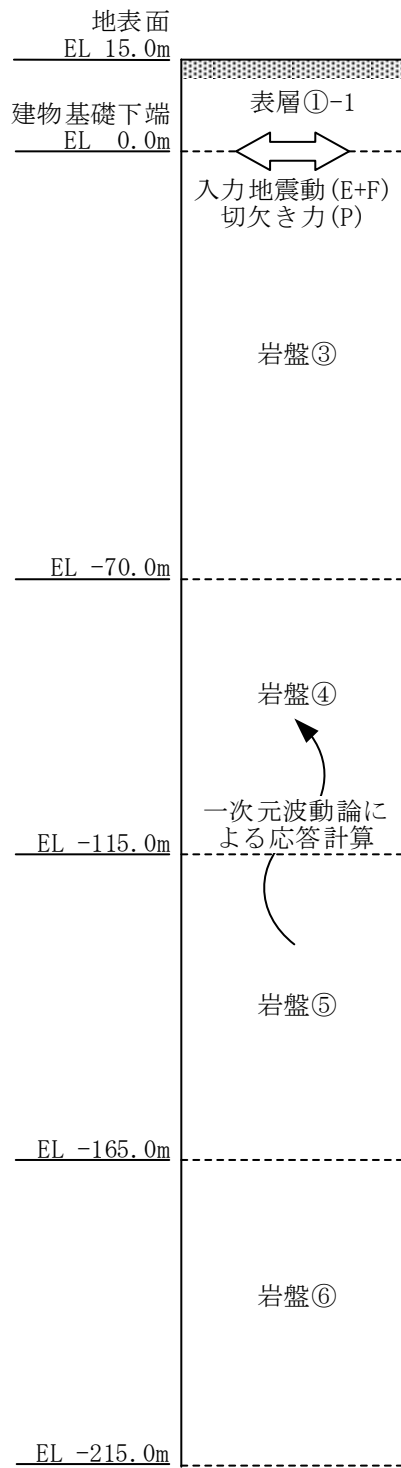


(a) 2次元FEM (NS方向)



(b) 2次元FEM (EW方向)

図 4-9(1) 解析モデル (廃棄物処理建物)



注：建物中央の速度層に基づきモデル化

(c) 一次元波動論

図 4-9(2) 解析モデル (廃棄物処理建物)

表 4-7 解析モデルの地盤物性値（タービン建物及び廃棄物処理建物）

層番号	S波速度 V _s (m/s)	P波速度 V _p (m/s)	単位体積重量 γ (kN/m ³)	ポアソン比 ν	せん断弾性係数 G (×10 ⁵ kN/m ²)	減衰定数 h (%)
表層①-1	127*	422*	20.7	0.45	0.341*	8*
岩盤①-2	250	800	20.6	0.446	1.31	3
岩盤②	900	2100	23.0	0.388	19.0	3
岩盤③	1600	3600	24.5	0.377	64.0	3
岩盤④	1950	4000	24.5	0.344	95.1	3
岩盤⑤	2000	4050	26.0	0.339	105.9	3
岩盤⑥	2350	4950	27.9	0.355	157.9	3

注記*：地震動レベル（S_s）及び試験結果に基づく埋戻土のひずみ依存性を考慮した等価物性値

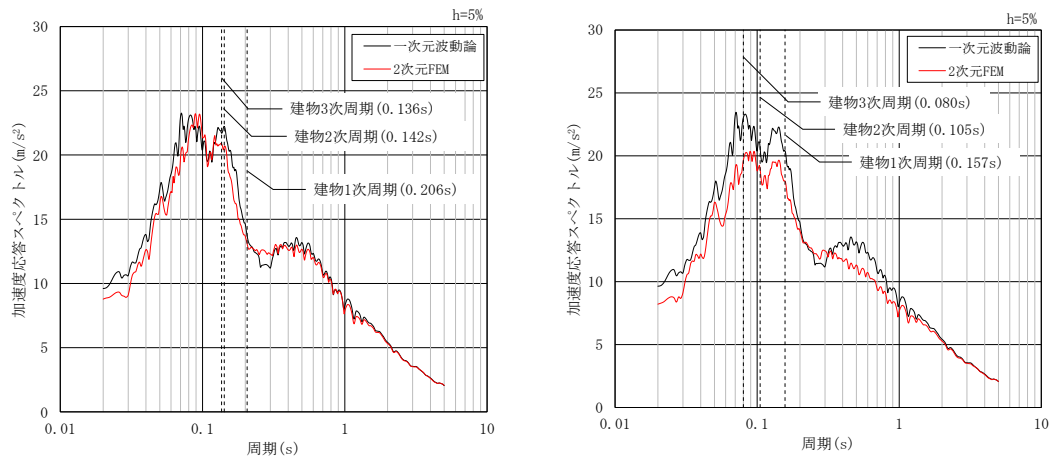
表 4-8 隣接する建物・構築物等の等価物性値

建物・構築物等	方向	単位体積重量 eq γ (kN/m ³)	ポアソン比 ν	せん断弾性係数 eq G (×10 ⁵ kN/m ²)	減衰定数 h (%)
取水槽	N S	4.10	0.2	20.0	5
原子炉建物	N S	14.4	0.2	35.8	5
	E W	14.4	0.2	37.3	5
1号機廃棄物処理建物	E W	12.0	0.2	21.4	5

(3) 検討結果

図 4-10 及び図 4-11 に入力地震動の加速度応答スペクトルの比較及び各建物の主要な固有周期*を示す。一次元波動論による入力地震動と 2 次元 FEM 解析による入力地震動の加速度応答スペクトルは全周期帯にわたって概ね同等若しくは一次元波動論による入力地震動の方が保守的である。また、建物の主要な固有周期に対して、一次元波動論による入力地震動は 2 次元 FEM 解析による入力地震動を上回っている、若しくは、概ね同等の応答を示していることから、機器・配管系への影響の観点を含めて、入力地震動の算定に一次元波動論を採用することの保守性を確認することができた。

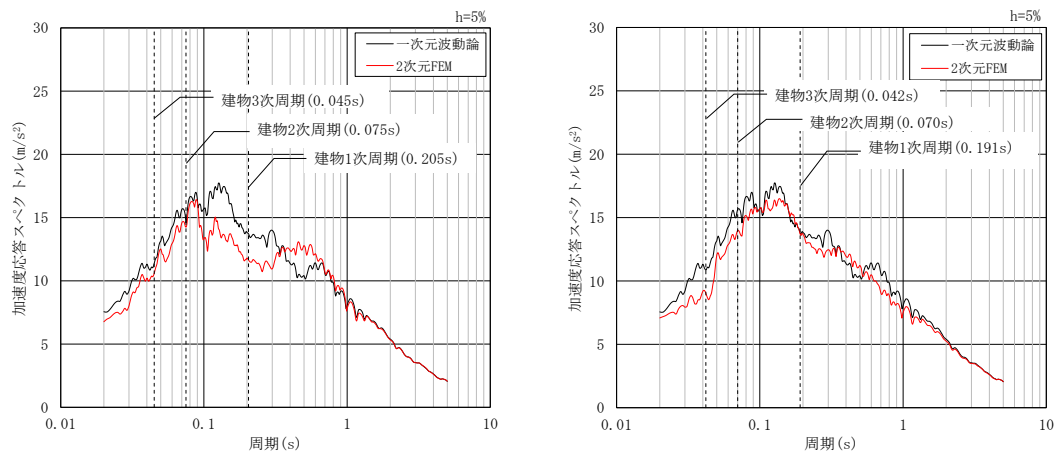
注記*：建物-地盤連成の固有周期のうち、刺激係数が概ね 1.0 を超えるものとして、1 次～3 次固有周期を示す。



(a) NS 方向

(b) EW 方向

図 4-10 入力地震動の加速度応答スペクトルの比較
(タービン建物, 基準地震動 S s - D)



(a) NS 方向

(b) EW 方向

図 4-11 入力地震動の加速度応答スペクトルの比較
(廃棄物処理建物, 基準地震動 S s - D)

4.3 D級岩盤の非線形性による影響に関する検討

(1) 検討概要

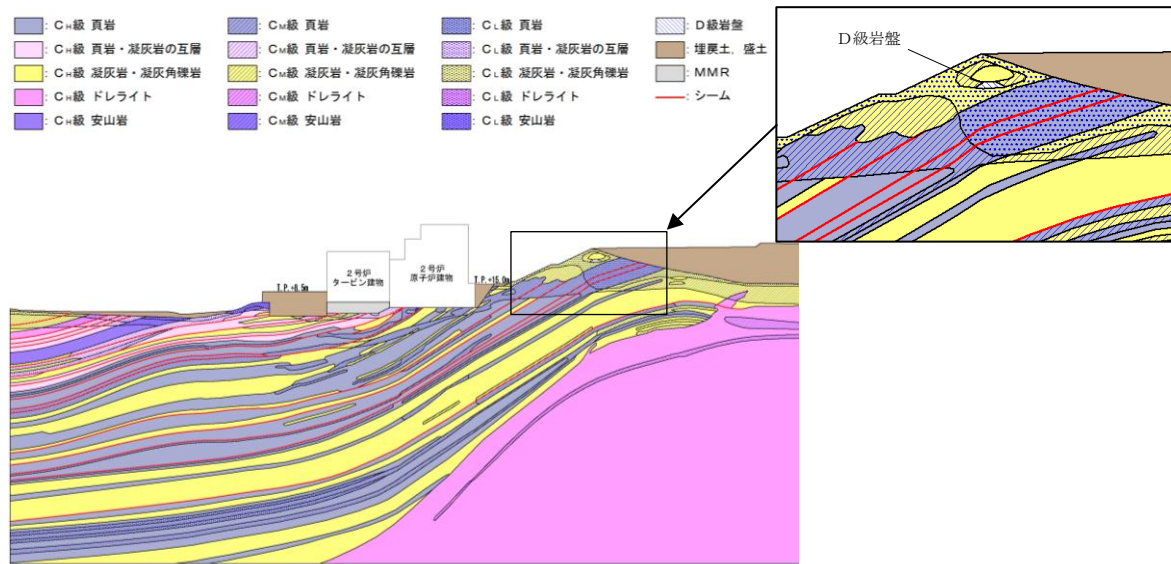
建物・構築物の入力地震動評価において、表層地盤①-1 については、地震動レベルに応じて定めた等価物性値を設定することで地盤のひずみ依存特性を考慮しているが、D級岩盤を含む岩盤①-2 については、S波速度は小さいものの、検討建物から離れたわずかな領域に分布しており、大部分がC_L級以上の岩盤で構成されていることから、地震時の非線形性が建物の入力に与える影響は小さいと判断し、地質調査結果に基づく地盤物性値を用い、線形として扱っている。なお、地質調査結果に基づくD級岩盤の速度層区分の設定については、添付資料-3 に示す。

一方で、原子炉建物の基礎地盤及び周辺斜面の安定性評価においては、図4-12 に示す岩盤①-2 のうちD級岩盤に対しては、地盤のひずみ依存特性を考慮して、地震応答解析を実施している。

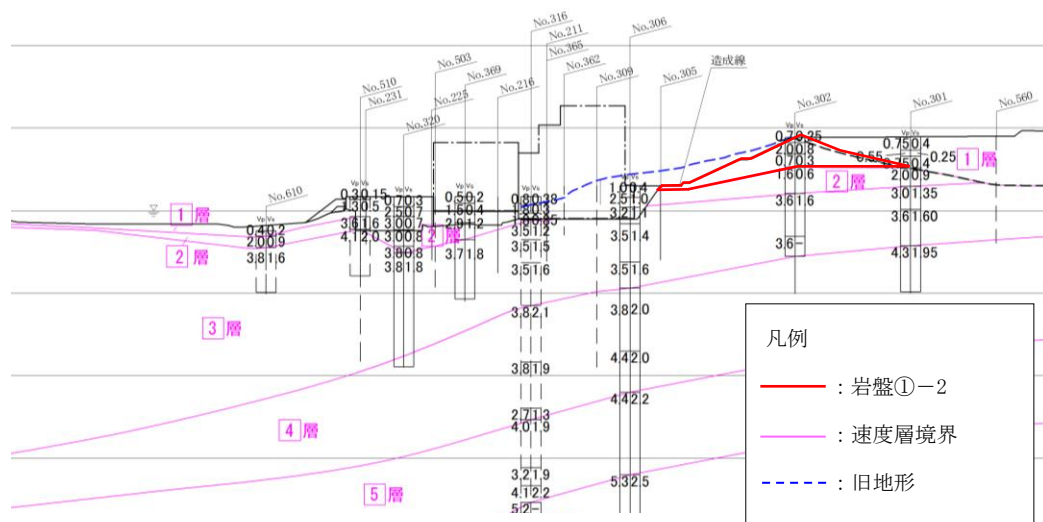
本検討では、原子炉建物を代表として、表4-9 に示すモデルにより算定した入力地震動の比較を行うことで、D級岩盤のひずみ依存特性の影響を確認する。

D級岩盤のひずみ依存特性の影響があると判断された場合は、D級岩盤のひずみ依存特性を考慮した2次元FEM解析による入力地震動を用いた地震応答解析により、建物・構築物及び機器・配管系への影響検討を実施する。

なお、D級岩盤はNS方向モデルのみに含まれるため、本資料ではNS方向を対象として検討を行う。また、本検討は、モデル化の違いによる入力地震動への影響について検討することから、位相特性の偏りがなく、全周期帯において安定した応答を生じさせる基準地震動S_{s-D}に対して検討を行う。



(a) 基礎地盤及び周辺斜面の安定性評価に用いた岩盤分類図



(b) 速度層区分図

図 4-12 岩盤分類図及び速度層区分図

表 4-9 比較検討ケース

検討ケース	物性値の設定		備考
	表層地盤①-1 (埋戻土)	岩盤①-2のうち D級岩盤	
ケース 1 (今回工認モデル)	線形 (等価物性値)	線形	
ケース 2 (等価線形モデル)	等価線形 (ひずみ依存特性考慮)	線形	表層地盤①-1 を等価線形としたケース
ケース 3 (等価線形モデル)	等価線形 (ひずみ依存特性考慮)	等価線形 (ひずみ依存特性考慮)	表層地盤①-1 及び岩盤①-2 のD級岩盤を等価線形としたケース

(2) 検討条件

a. 地盤物性値の設定

ケース 2 及びケース 3 に用いる物性値を以下に示す。物性値については、VI-2-1-3「地盤の支持性能に係る基本方針」に記載の解析用物性値を用いることとする。

(a) 表層地盤①-1 (4.1(2) a. (b)に記載の物性値の設定方法と同じ)

イ. 初期せん断弾性係数 G_0

初期せん断弾性係数は、拘束圧依存性を考慮して、以下の式により算定する。

$$G_0 = 749 \times \sigma_m' ^{0.66} \quad (\text{N/mm}^2)$$

ここで、

$$\sigma_m' = (1+2K) \cdot \sigma_v' / 3 : \text{平均拘束圧 (N/mm}^2)$$

$$\sigma_v' = \gamma \cdot H / 10^6 : \text{上載荷重 (N/mm}^2)$$

K : 静止土圧係数 (=0.5 : 慣用値)

γ : 単位体積重量 (=20.7×10³N/m³)

H : 各要素の中心深さ (m)

ν : 動ポアソン比 (=0.45)

ロ. 剛性低下率 G/G_0

剛性低下率 G/G_0 のひずみ依存特性は、以下の式により算定する。

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + \gamma / 0.00027}$$

ここで、 γ : せん断ひずみ

ハ. 減衰定数 h

減衰定数 h のひずみ依存特性は、以下の式により算定する。

$$h = \frac{0.0958 \gamma}{\gamma + 0.00020}$$

ここで、 γ : せん断ひずみ

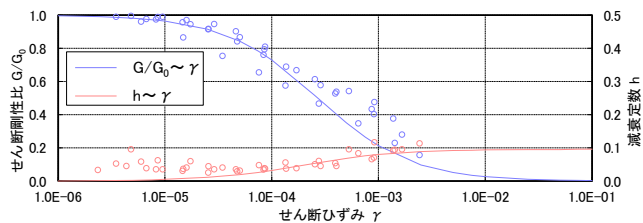


図 4-13 $G/G_0 - \gamma$ 関係及び $h - \gamma$ 関係 (表層地盤①-1)

(b) D級岩盤

イ. 初期せん断弾性係数 G_0

初期せん断弾性係数は、拘束圧依存性を考慮して、以下の式により算定する。

$$G_0 = 148 \times \sigma_m'{}^{0.49} \quad (\text{N/mm}^2)$$

ここで、

$$\sigma_m' = (1+2K) \cdot \sigma_v' / 3 : \text{平均拘束圧 (N/mm}^2)$$

$$\sigma_v' = \gamma \cdot H / 10^6 : \text{上載荷重 (N/mm}^2)$$

K : 静止土圧係数 (=0.5 : 慣用値)

γ : 単位体積重量 (=22.4×10³N/m³)

H : 各要素の中心深さ (m)

ν : 動ポアソン比 (=0.45)

ロ. 剛性低下率 G/G_0

剛性低下率 G/G_0 のひずみ依存特性は、以下の式により算定する。

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + \gamma / 0.00062}$$

ここで、 γ : せん断ひずみ

ハ. 減衰定数 h

減衰定数 h のひずみ依存特性は、以下の式により算定する。

$$h = 0.023 \quad (\gamma \leq 1 \times 10^{-4})$$

$$h = 0.023 + 0.071 \times \log(\gamma / 0.0001) \quad (\gamma > 1 \times 10^{-4})$$

ここで、 γ : せん断ひずみ

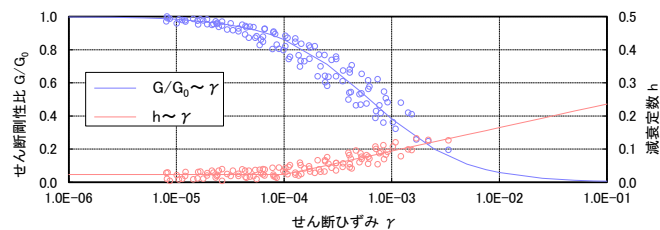
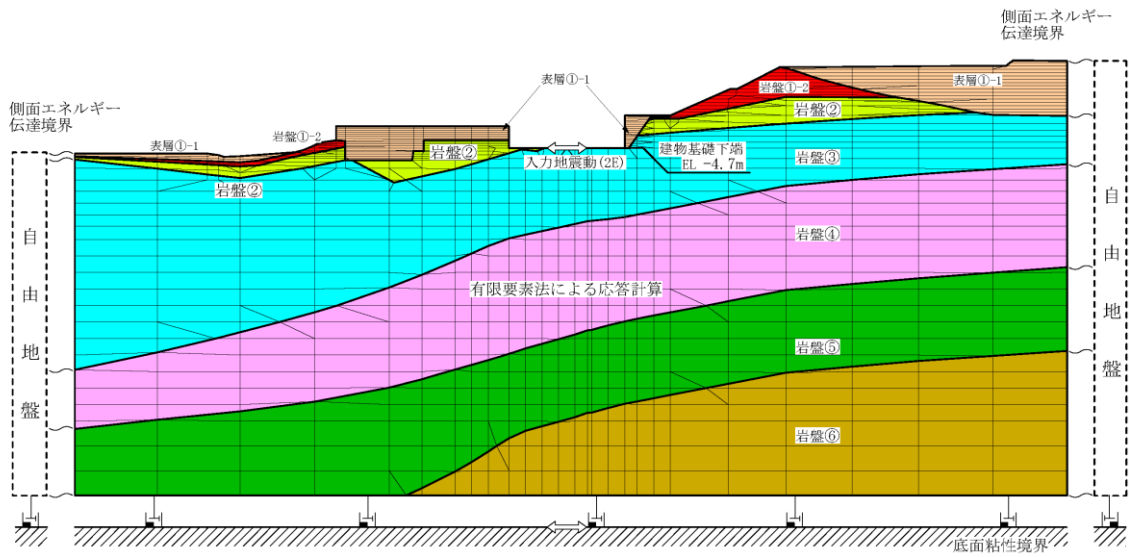


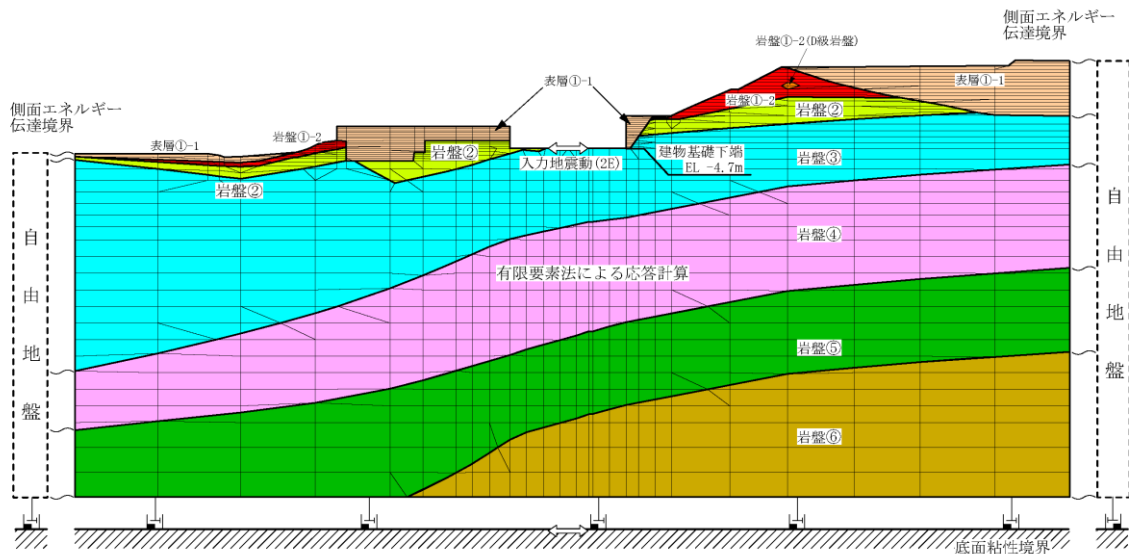
図 4-14 $G/G_0 - \gamma$ 関係及び $h - \gamma$ 関係 (D級岩盤)

b. 解析モデル

本検討に用いる 2 次元 F E M モデルを図 4-15 に、地盤物性値を表 4-10 に示す。



(a) ケース 1 及びケース 2



(b) ケース 3

図 4-15 2 次元 F E M モデル (原子炉建物)

表 4-10(1) 地盤物性値

(a) ケース 1

層番号	S波速度 V _s (m/s)	P波速度 V _p (m/s)	単位体積重量 γ (kN/m ³)	ポアソン比 ν	せん断弾性係数 G (×10 ⁵ kN/m ²)	減衰定数 h (%)
表層①-1	127*	422*	20.7	0.45	0.341*	8*
岩盤①-2	250	800	20.6	0.446	1.31	3
岩盤②	900	2100	23.0	0.388	19.0	3
岩盤③	1600	3600	24.5	0.377	64.0	3
岩盤④	1950	4000	24.5	0.344	95.1	3
岩盤⑤	2000	4050	26.0	0.339	105.9	3
岩盤⑥	2350	4950	27.9	0.355	157.9	3

注記* : 地震動レベル (S_s) 及び試験結果に基づく埋戻土のひずみ依存性を考慮した等価物性値

(b) ケース 2

層番号	S波速度 V _s (m/s)	P波速度 V _p (m/s)	単位体積重量 γ (kN/m ³)	ポアソン比 ν	せん断弾性係数 G (×10 ⁵ kN/m ²)	減衰定数 h (%)
表層①-1	*	*	20.7	0.45	*	*
岩盤①-2	250	800	20.6	0.446	1.31	3
岩盤②	900	2100	23.0	0.388	19.0	3
岩盤③	1600	3600	24.5	0.377	64.0	3
岩盤④	1950	4000	24.5	0.344	95.1	3
岩盤⑤	2000	4050	26.0	0.339	105.9	3
岩盤⑥	2350	4950	27.9	0.355	157.9	3

注記* : ひずみ依存性を考慮した物性値

表 4-10(2) 地盤物性値

(c) ケース 3

層番号	S波速度 V _s (m/s)	P波速度 V _p (m/s)	単位体積重量 γ (kN/m ³)	ポアソン比 ν	せん断弾性係数 G ($\times 10^5$ kN/m ²)	減衰定数 h (%)
表層①-1	*	*	20.7	0.45	*	*
岩盤①-2 (D級岩盤)	*	*	22.4	0.45	*	*
岩盤①-2	250	800	20.6	0.446	1.31	3
岩盤②	900	2100	23.0	0.388	19.0	3
岩盤③	1600	3600	24.5	0.377	64.0	3
岩盤④	1950	4000	24.5	0.344	95.1	3
岩盤⑤	2000	4050	26.0	0.339	105.9	3
岩盤⑥	2350	4950	27.9	0.355	157.9	3

注記* : ひずみ依存性を考慮した物性値

(3) 検討結果

図 4-16 に入力地震動の加速度応答スペクトルの比較及び主要施設の固有周期を示す。

ケース 2 とケース 3 を比較すると、全周期帯において、加速度応答スペクトルに大きな差がないことから、D級岩盤のひずみ依存特性の考慮が入力地震動評価に及ぼす影響は小さいことが確認できた。また、ケース 1 とケース 3 を比較すると、主要な施設の周期帯において、大きな差がないことから、今回工認の入力地震動の評価において、D級岩盤のひずみ依存特性を考慮しないことの妥当性を確認した。

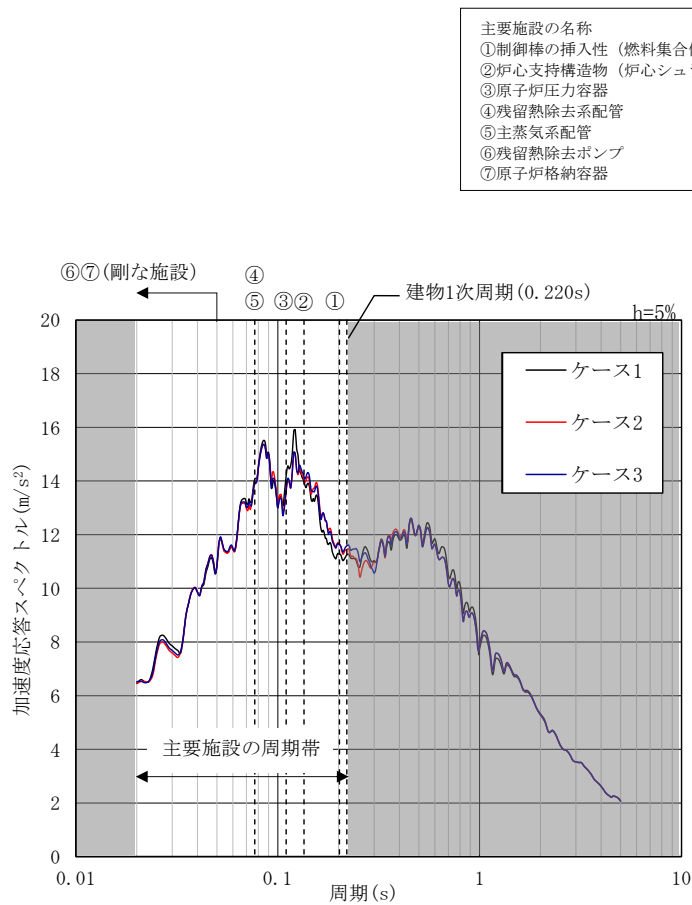


図 4-16 入力地震動の加速度応答スペクトルの比較
(原子炉建物, 基準地震動 S s - D)

4.4 2次元FEMのメッシュ分割高さに関する検討

(1) 検討概要

2次元FEMモデルのメッシュ分割高さは、設備の耐震設計で考慮する振動数を踏まえて設定することとし、今回工認は既工認と同様に最高透過振動数（20Hz）に対して設定している。

メッシュ分割高さHは、「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版（社）日本電気協会」に示された以下の基準を満足するように設定している。

$$H \leq \frac{1}{5} \frac{V_s}{f_{max}}$$

ここで、

V_s : S波速度 (m/s)

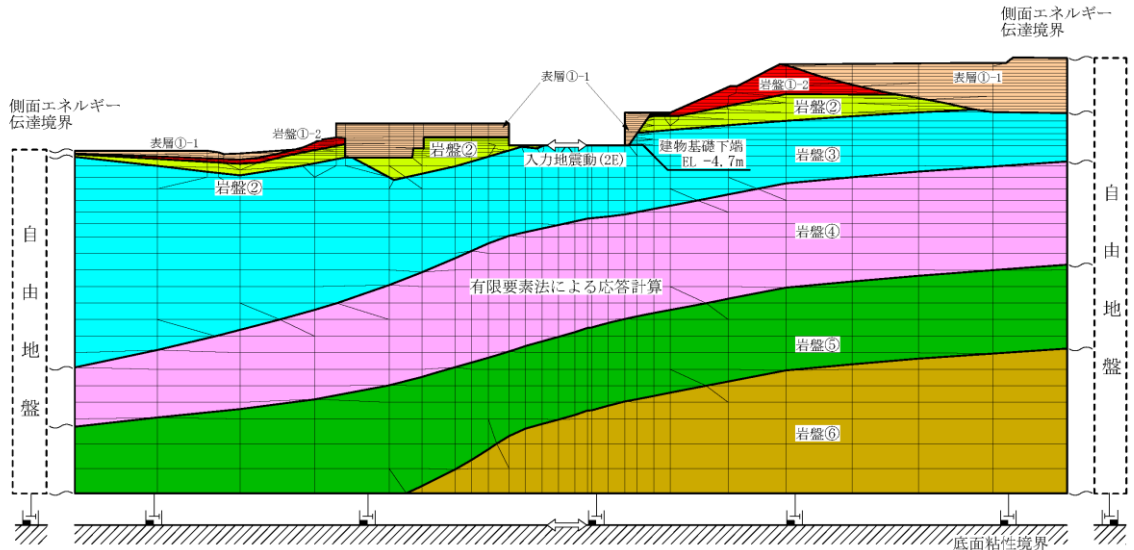
f_{max} : 最高透過振動数 (Hz)

本検討では、メッシュ分割高さの妥当性を確認するため、建物の規模や施設の重要性を踏まえて原子炉建物を代表として、最高透過振動数（50Hz）に対して設定した比較用のモデル（以下「50Hz 透過モデル」という。）による解析を実施し、入力地震動への影響を評価する。影響があると判断された場合には、高振動数領域の応答による影響が考えられる機器・配管系に対して、影響検討を実施する。

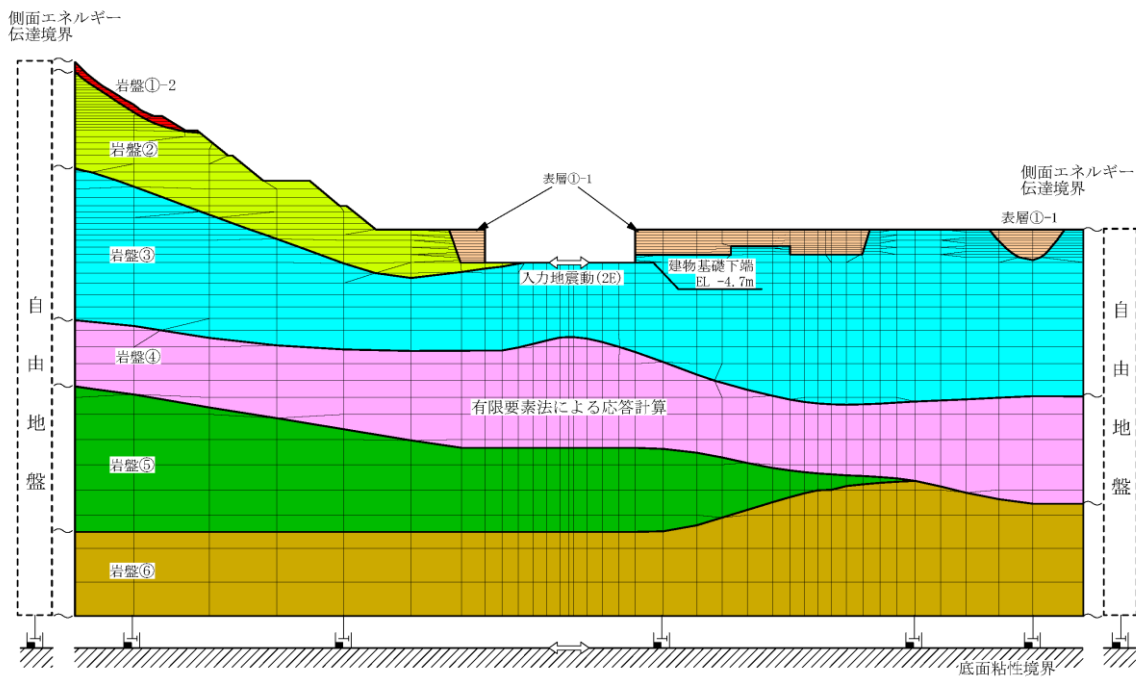
なお、本検討は、モデル化の違いによる入力地震動への影響について検討することから、位相特性の偏りがなく、全周期帯において安定した応答を生じさせる基準地震動 $S_s - D$ に対して実施することとする。

(2) 検討条件

本検討に用いる2次元FEMモデルを図4-17及び図4-18に、地盤物性値を表4-11に示す。

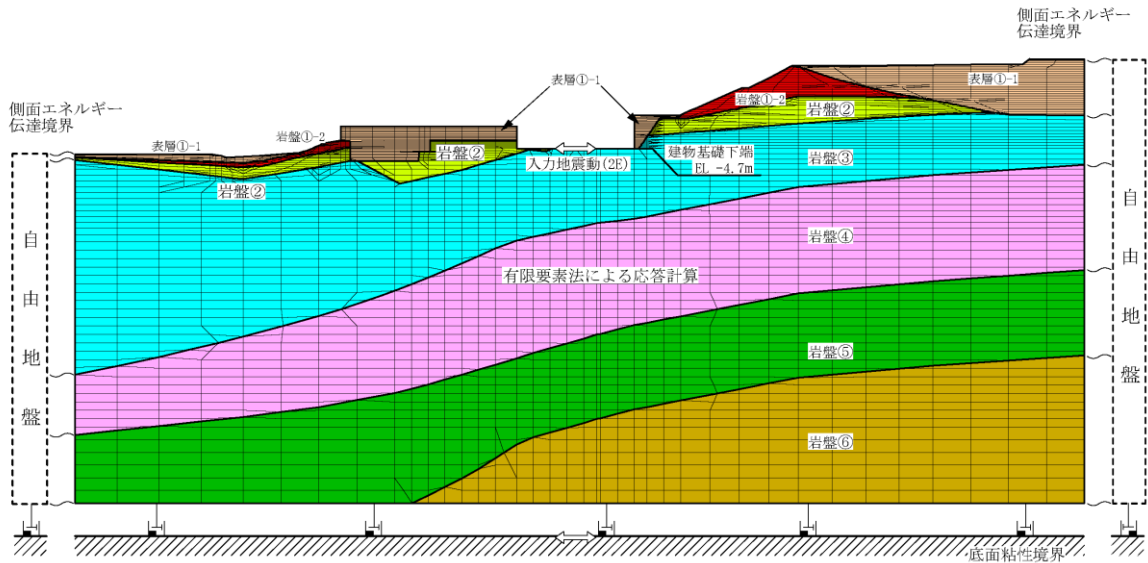


(a) NS方向

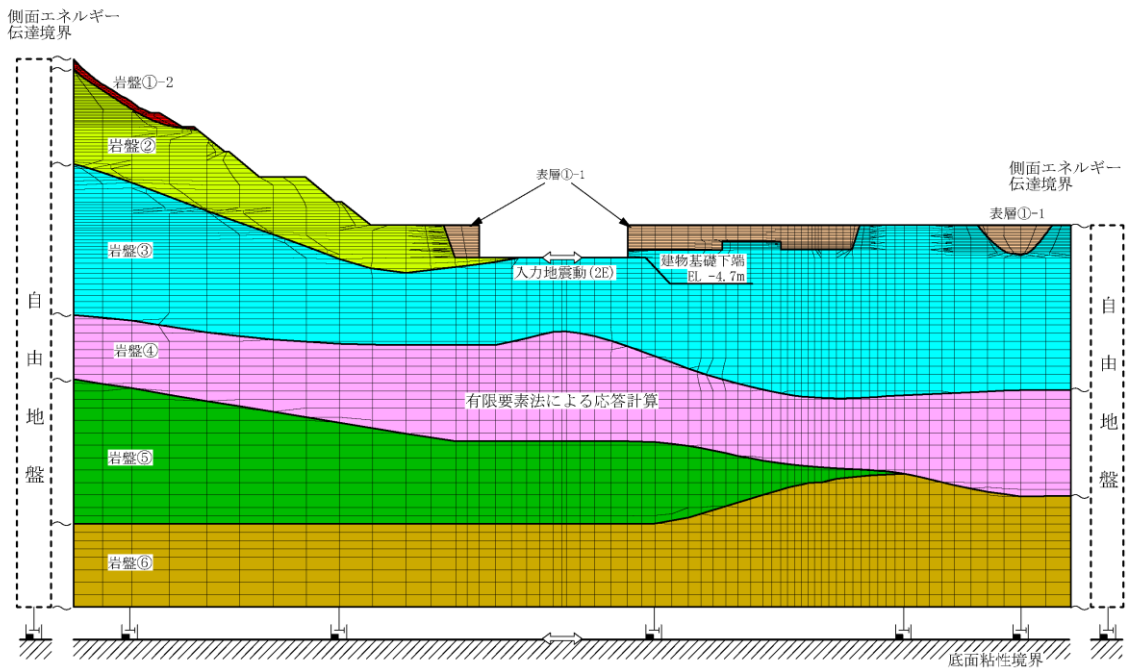


(b) EW方向

図4-17 2次元FEMモデル(今回工認モデル)



(a) NS方向



(b) EW方向

図 4-18 2次元FEMモデル (50Hz 透過モデル)

表 4-11 地盤物性値

層番号	S波速度 V _s (m/s)	P波速度 V _p (m/s)	単位体積重量 γ (kN/m ³)	ポアソン比 ν	せん断弾性係数 G (×10 ⁵ kN/m ²)	減衰定数 h (%)
表層①-1	127*	422*	20.7	0.45	0.341*	8*
岩盤①-2	250	800	20.6	0.446	1.31	3
岩盤②	900	2100	23.0	0.388	19.0	3
岩盤③	1600	3600	24.5	0.377	64.0	3
岩盤④	1950	4000	24.5	0.344	95.1	3
岩盤⑤	2000	4050	26.0	0.339	105.9	3
岩盤⑥	2350	4950	27.9	0.355	157.9	3

注記*：地震動レベル（S_s）及び試験結果に基づく埋戻土のひずみ依存性を考慮した等価物性値

注：今回工認モデルと 50Hz 透過モデルで地盤物性値は共通

(3) 検討結果

図 4-19 に入力地震動の加速度応答スペクトルの比較及び主要施設の固有周期を示す。

今回工認モデル及び 50Hz 透過モデルを比較すると、主要施設の周期帯において、両モデルの加速度応答スペクトルは概ね一致していることから、今回工認においても既工認と同様に最高透過振動数が 20Hz となるようにメッシュ分割高さを設定する。なお、先行サイトの審査実績においても、建物・構築物の入力地震動の算定に用いる 2 次元 FEMモデルにおけるメッシュ分割高さは 20Hz を考慮して作成されている。

ただし、EW方向については、両モデルの加速度応答スペクトルは概ね一致しているが、25Hz～30Hz より高振動数領域で 50Hz 透過モデルを用いた入力地震動の方が今回工認モデルを用いた入力地震動よりも大きいため、機器・配管系への影響検討を実施する。

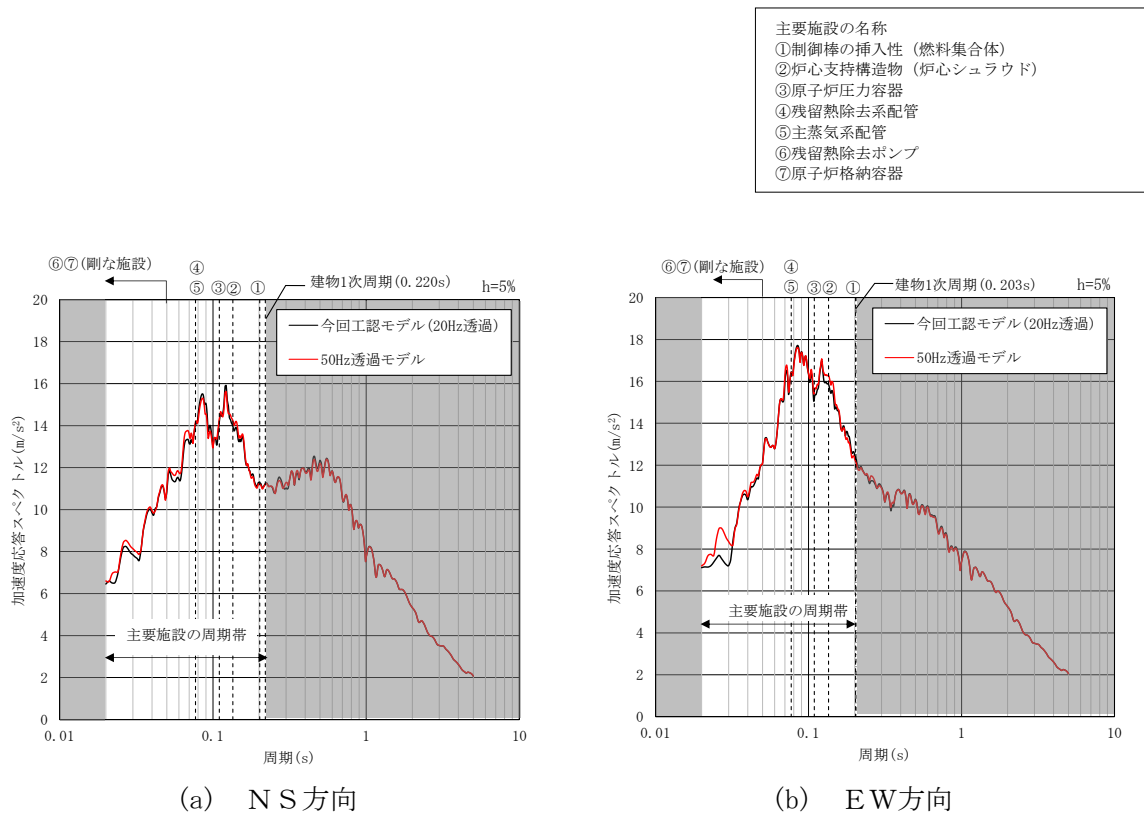


図 4-19 入力地震動の加速度応答スペクトルの比較 (原子炉建物, 基準地震動 S s-D)

(4) 機器・配管系への影響評価

機器・配管系の評価（後述する弁の動的機能維持評価を除く）においては、動的解析において加速度応答スペクトルを考慮する固有振動数の閾値を 20Hz として評価を実施しており、高振動数領域の応答が設備の構造健全性に与える影響は小さいことを確認している（NS2-補-027-01「設計用床応答スペクトルの作成方法及び適用方法について」参照）。

一方で、弁の動的機能維持評価においては、機能確認済加速度と応答加速度の比較により健全性を確認する加速度評価であり、弁を支持する配管系の 20Hz 以上の領域の振動モードの影響を無視できないことから、20Hz を超える振動数領域まで考慮した地震応答解析により、弁駆動部の応答加速度を算定している（NS2-補-027-05「弁の動的機能維持評価について」参照）。

(3)に示すとおり、今回工認モデル及び 50Hz 透過モデルの応答を比較すると、20Hz 以下の周期帯において、両モデルの加速度応答スペクトルは概ね一致している。そのため、弁の動的機能維持評価を除く機器・配管系の評価においては、50Hz 透過モデルの応答を考慮しても影響は小さいといえる。一方で、E W方向の 25Hz～30Hz より高振動数側の領域で 50Hz 透過モデルを用いた入力地震動の方が今回工認モデルを用いた入力地震動よりも大きいことから、高振動数領域の応答による影響が考えられる弁の動的機能維持評価に対し影響検討を実施する。

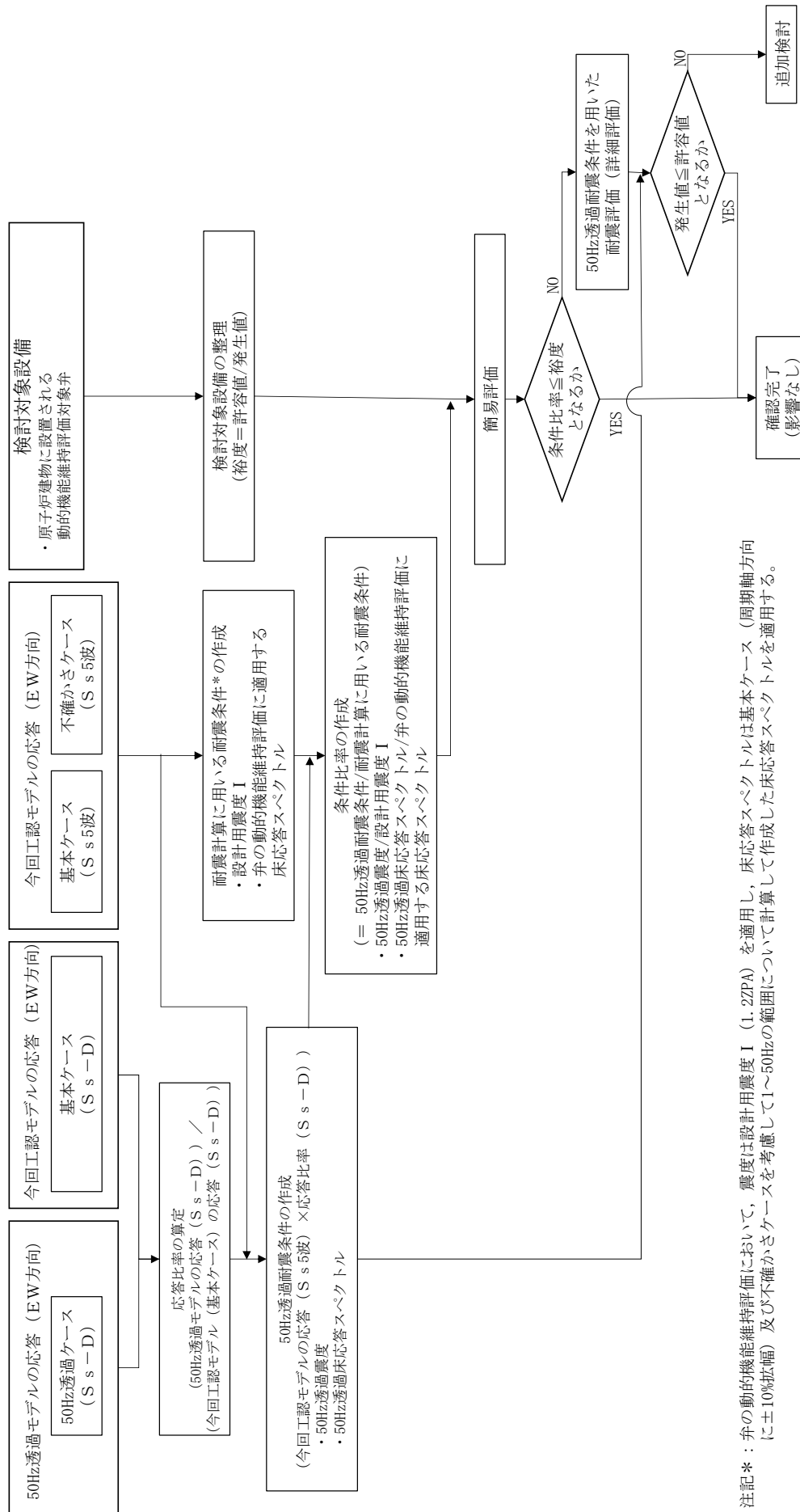
a. 検討方針

影響検討フローを図 4-20 に示し、以下のとおり、2次元 F E Mモデルのメッシュ分割高さによる影響検討を行う。

(a) 検討対象設備

原子炉建物に設置される以下の機器・配管系を影響検討の対象とする。

- ・原子炉建物に設置される動的機能維持評価対象弁
(NS2-補-027-05「弁の動的機能維持評価について」参照)



注記* : 弁の動的機能維持評価において、震度は設計用震度 I (1.2ZPA) を適用し、床応答スペクトルは基本ケース (周期軸方向に±10%拡幅) 及び不確かさケースを考慮して1~50Hzの範囲について計算して作成した床応答スペクトルを適用する。

図 4-20 2次元 FEMモデルのメッシュ分割高さによる影響検討フロー

(b) 検討に用いる耐震条件

今回工認モデル（基本ケース）の地震応答解析結果と 50Hz 透過モデルの地震応答解析結果から、応答比率を以下のように算出する。

$$\text{応答比率} = \frac{\text{50Hz 透過モデルの応答 (S s - D)}}{\text{今回工認モデル (基本ケース) の応答 (S s - D)}}$$

応答比率算出のための 50Hz 透過モデルを用いた地震応答解析は、原子炉建物における検討方針と同様に基準地震動 S s のうち位相特性の偏りがなく、全周期帯において安定した応答を生じさせ、機器・配管系の耐震性評価において支配的な基準地震動 S s - D を代表として用いる。

50Hz 透過モデルによる基準地震動 S s 5 波（以下「S s 5 波」という。）の震度（以下「50Hz 透過震度」という。）及び床応答スペクトル（以下「50Hz 透過床応答スペクトル」という。）（以下、50Hz 透過震度及び 50Hz 透過床応答スペクトルを総称して「50Hz 透過耐震条件」という。）は、今回工認モデル（基本ケース及び不確かさケース*）の S s 5 波を用いた地震応答解析結果と応答比率を用いてそれぞれ以下のとおり設定する。

注記*：「不確かさケース」は VI-2-2-2 「原子炉建物の地震応答計算書」に示すケース 2（地盤物性 + σ ）及びケース 3（地盤物性 - σ ）を示す。

イ. 50Hz 透過震度

各標高について、工認モデル（基本ケース）を用いた地震応答解析から得られる応答波の最大応答加速度に上記で算出した応答比率を乗じて作成したものと、工認モデル（不確かさケース）を用いた地震応答解析から得られる応答波の最大応答加速度に上記で算出した応答比率を乗じて作成したものを包絡させて作成する。50Hz 透過震度の作成フローを図 4-21 に示す。

ロ. 50Hz 透過床応答スペクトル

各標高・各減衰について、工認モデル（基本ケース）を用いた地震応答解析から得られる応答波を用いて作成した床応答スペクトルに上記で算出した周期ごとの応答比率を乗じ ±10% 拡幅したものと、工認モデル（不確かさケース）を用いた地震応答解析から得られる応答波を用いて作成した床応答スペクトルに上記で算出した周期ごとの応答比率を乗じたものを包絡させて作成する。50Hz 透過床応答スペクトルの作成フローを図 4-22 に示す。また、50Hz 透過床応答スペクトルの作成例を図 4-23 に示す。

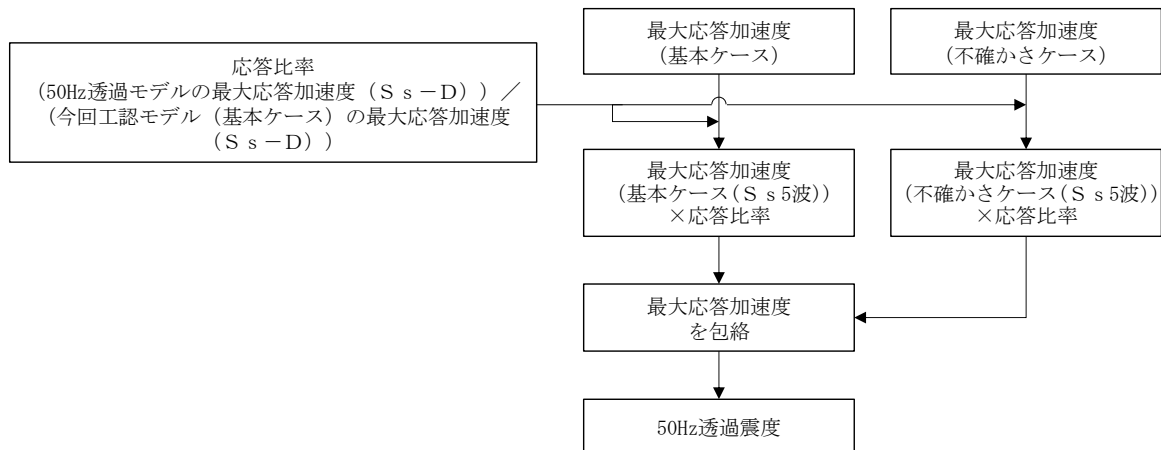


図 4-21 50Hz 透過震度の作成フロー

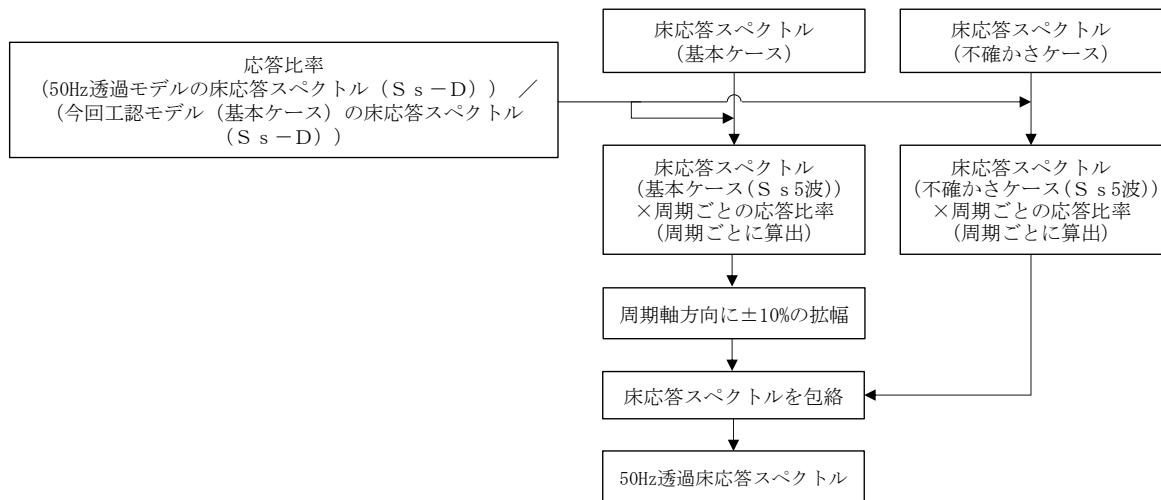


図 4-22 50Hz 透過床応答スペクトルの作成フロー

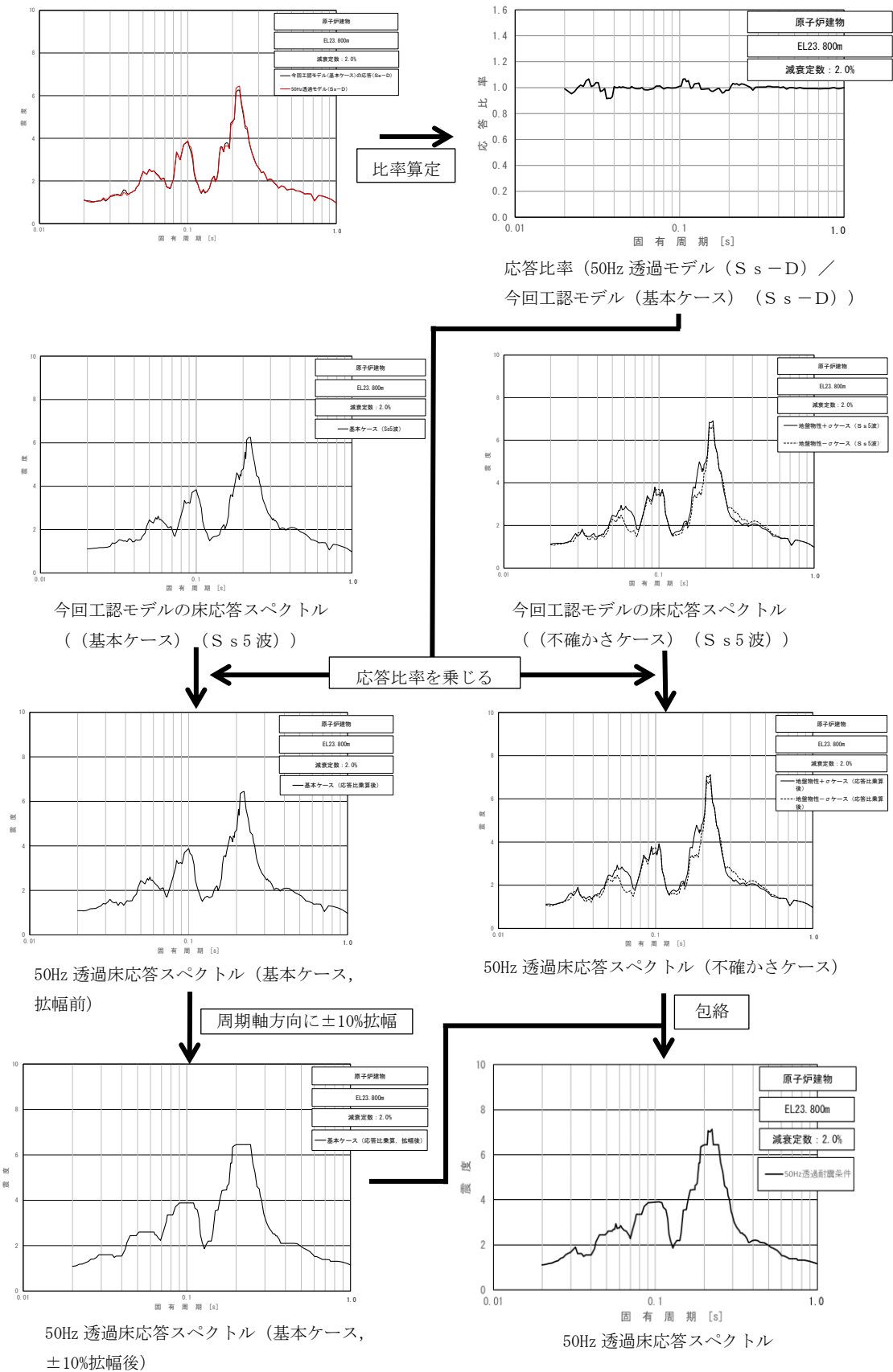


図 4-23 50Hz 透過床応答スペクトルの作成例
 (水平方向 (E W), 原子炉建物 EL 23.800m, 基準地震動 S s, 減衰 2.0%)

(c) 条件比率の作成

(b)で作成した 50Hz 透過耐震条件と耐震計算に用いる耐震条件との条件比率について、以下のように作成する。

イ. 震度

$$\text{条件比率} = \frac{50\text{Hz 透過震度}}{\text{設計用震度 I (弁の動的機能維持評価に適用する震度)}}$$

ロ. 床応答スペクトル

$$\text{条件比率} = \frac{50\text{Hz 透過床応答スペクトル}}{\text{弁の動的機能維持評価に適用する床応答スペクトル}}$$

(d) 簡易評価

(a)の検討対象設備に対する裕度（許容値/発生値）を整理の上、(c)で作成した条件比率と設備の裕度との比較（以下「簡易評価」という。）を行い、簡易評価により条件比率が設備の裕度を下回ることを確認する。

条件比率の適用方法を以下に示す。なお、条件比率の適用方法及び簡易評価方法を以下に示す。

イ. 震度

各対象弁を支持する配管系の評価用震度（1.2ZPA）における条件比率を簡易評価に適用する。

ロ. 床応答スペクトル

各対象弁を支持する配管系の評価用床応答スペクトルにおける 0.02～1.0s 間の条件比率の最大値を簡易評価に適用する。床応答スペクトルの条件比率の適用方法を図 4-24 に示す。

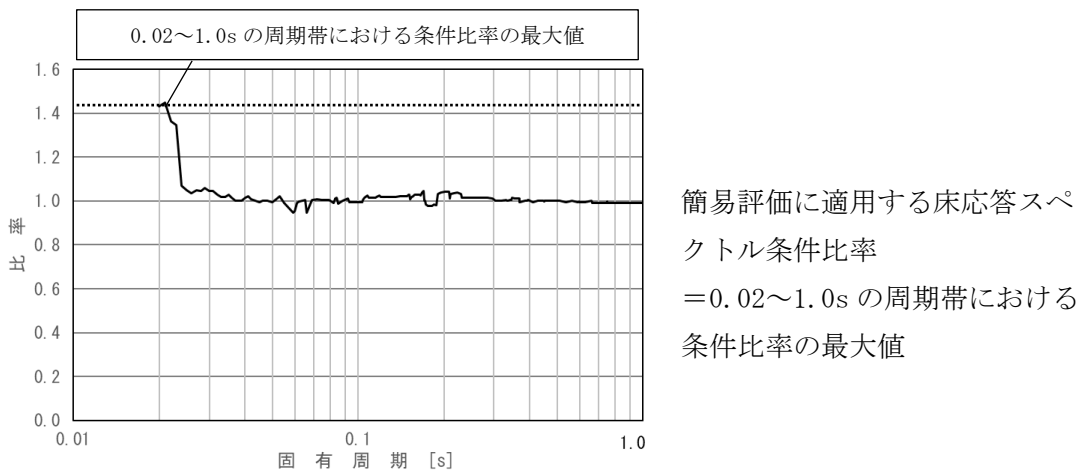


図 4-24 床応答スペクトルの条件比率の適用方法

b. 検討結果

(a) 50Hz 透過耐震条件（E W方向）の作成結果

弁の動的機能維持評価においては、震度（1.2ZPA）及び1～50Hzの周期範囲において計算して作成した床応答スペクトルを適用して評価する。原子炉建物に設置される動的機能維持評価対象弁の評価用の50Hz透過震度を表4-12及び表4-13に、50Hz透過床応答スペクトルを図4-25～図4-27に示す。また、同図にはNS2-補-027-05「弁の動的機能維持評価について」に示される弁の動的機能維持評価に適用する床応答スペクトルを併記して示す。

50Hz透過床応答スペクトルと弁の動的機能維持評価に適用する床応答スペクトルを比較し、各標高・各減衰について、50Hz透過床応答スペクトル／弁の動的機能維持評価に適用する床応答スペクトルにより周期ごとの条件比率を算定する。

50Hz透過震度及び50Hz透過床応答スペクトルの条件比率の最大値は1.45であった。

表 4-12 震度（原子炉建物）

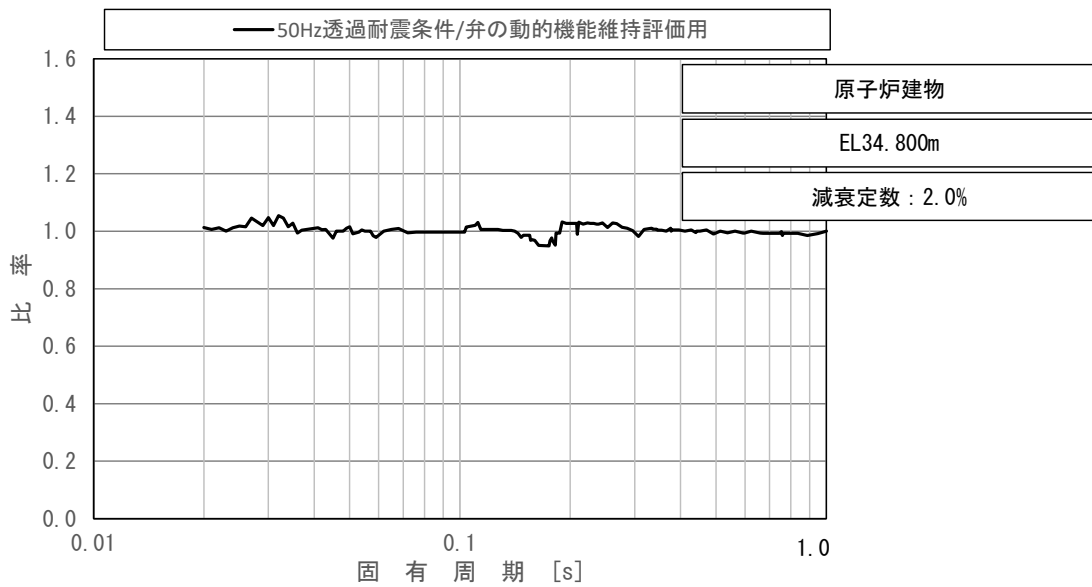
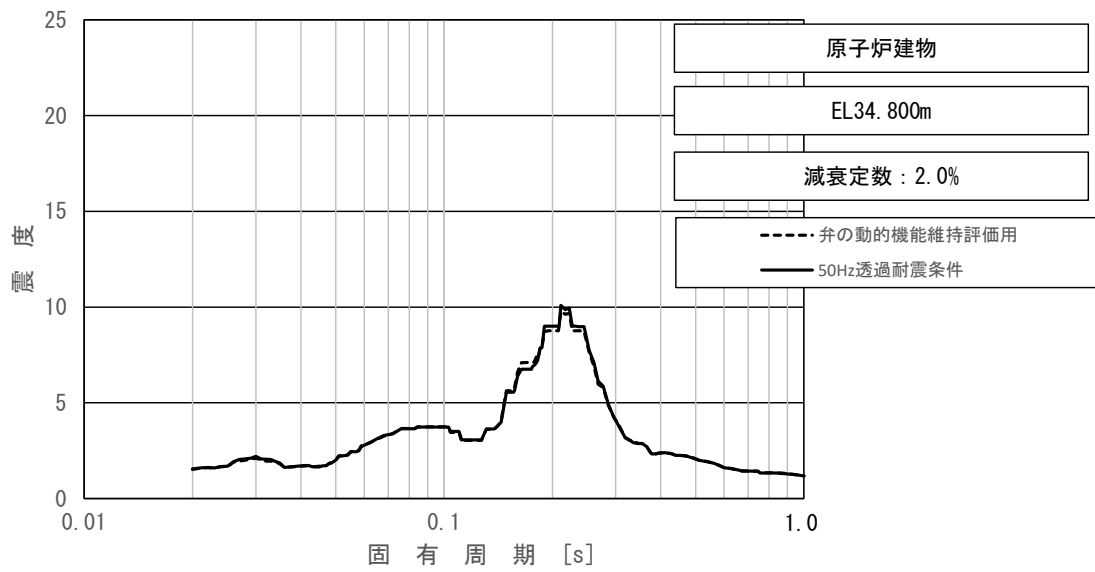
基準地震動 S_s , 1.2ZPA, 水平方向（EW）

構造物名	質点番号	標高 EL(m)	震度×1.2		条件比率
	EW方向		① 設計用 I	② 50Hz 透過 耐震条件	②/①
原子炉 建物	6, 12, 20, 24, 29	34.800	1.41	1.41	1.00
	7, 13, 21, 25, 30	30.500	1.75	1.75	1.00
	8, 14, 26, 31	23.800	1.17	1.17	1.00
	1, 9, 15, 27, 32	15.300	1.04	1.05	1.01
	2, 10, 28, 33	8.800	1.06	1.07	1.01

表 4-13 震度（ガンマ線遮蔽壁及び原子炉圧力容器ペDESTAL）

基準地震動 S_s , 1.2ZPA, 水平方向（EW）

構造物名	質点番号	標高 EL(m)	震度×1.2		条件比率
	EW方向		① 設計用 I	② 50Hz 透過 耐震条件	②/①
ガンマ線遮蔽壁	55	26.981	2.60	2.68	1.04
	56	24.000	2.33	2.40	1.04
	57	21.500	1.98	2.02	1.03
原子炉圧力容器 ペDESTAL	59	15.944	1.37	1.39	1.02
	60	13.022	1.24	1.26	1.02

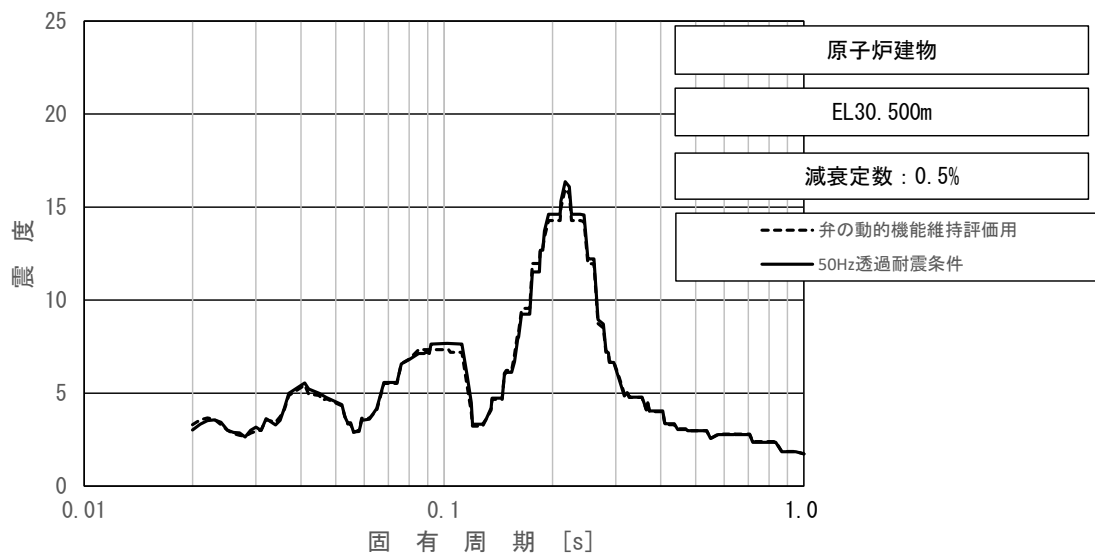


上段：床応答スペクトル

下段：床応答スペクトル条件比率

図 4-25 (1/8) 弁の動的機能維持評価適用条件と 50Hz 透過耐震条件の
床応答スペクトル及び条件比率

(基準地震動 S_s , 水平方向 (E W) : 原子炉建物 EL 34.800m)

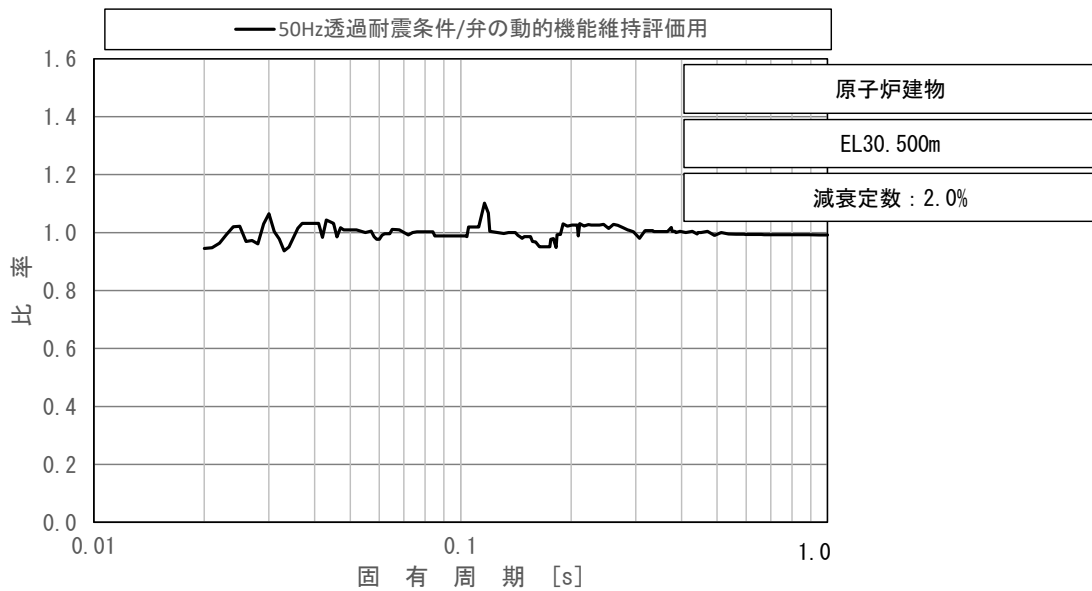
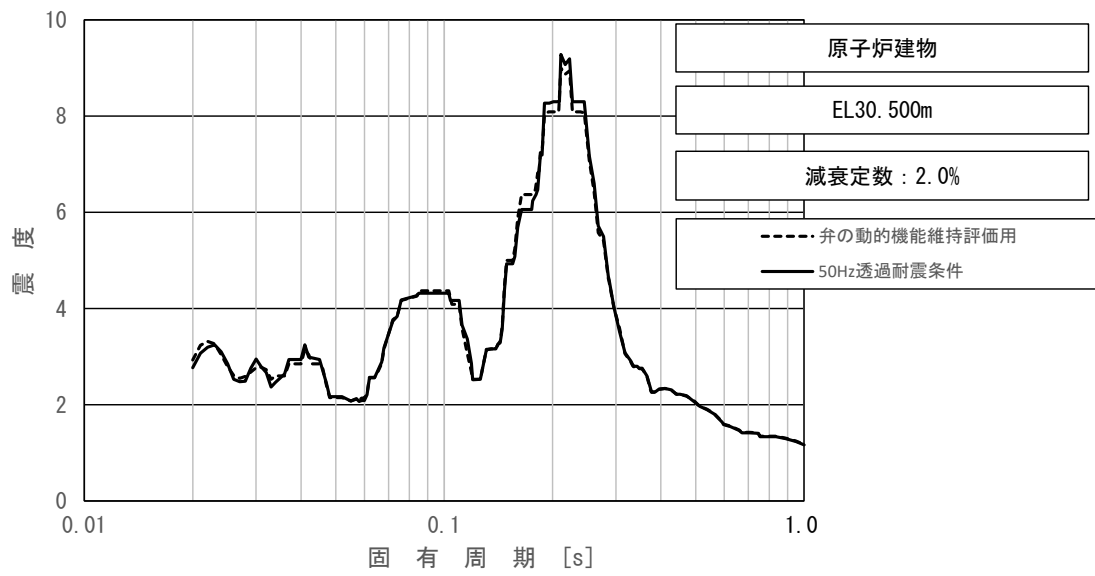


上段：床応答スペクトル

下段：床応答スペクトル条件比率

図 4-25 (2/8) 弁の動的機能維持評価適用条件と 50Hz 透過耐震条件の
床応答スペクトル及び条件比率

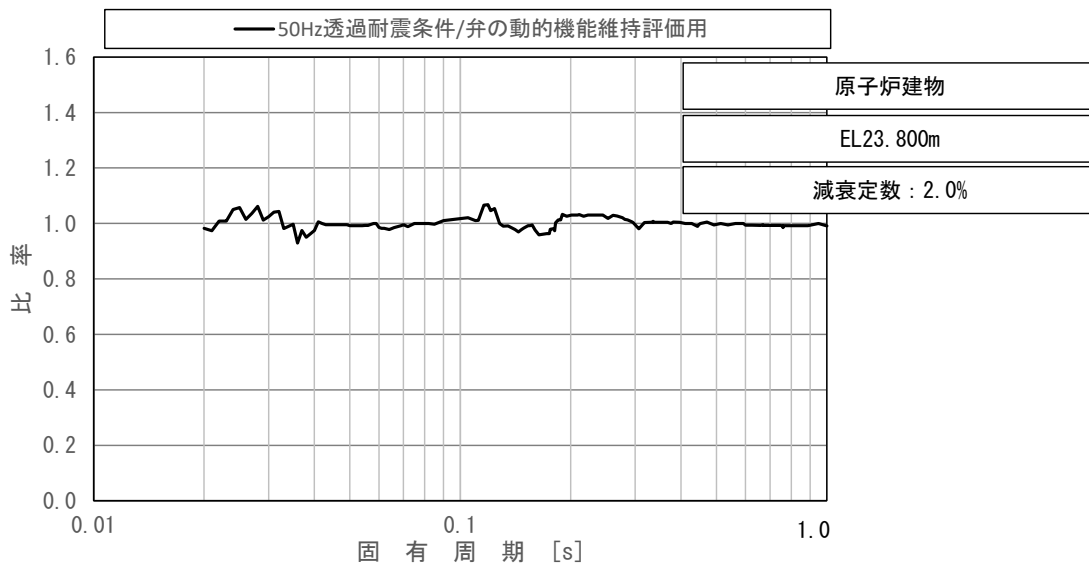
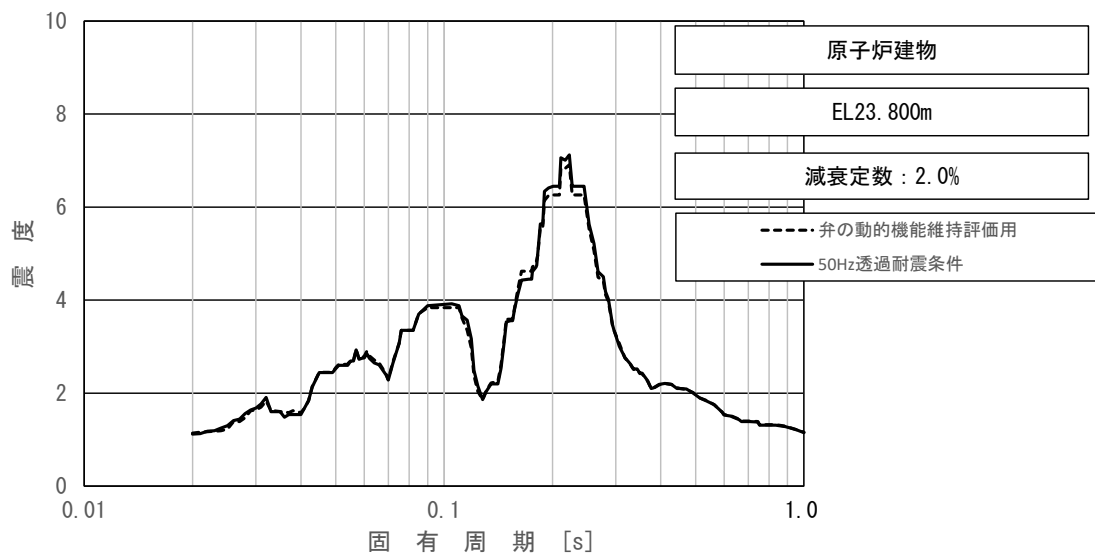
(基準地震動 S_s , 水平方向 (E W) : 原子炉建物 EL 30.500m)



上段：床応答スペクトル
 下段：床応答スペクトル条件比率

図 4-25 (3/8) 弁の動的機能維持評価適用条件と 50Hz 透過耐震条件の
 床応答スペクトル及び条件比率

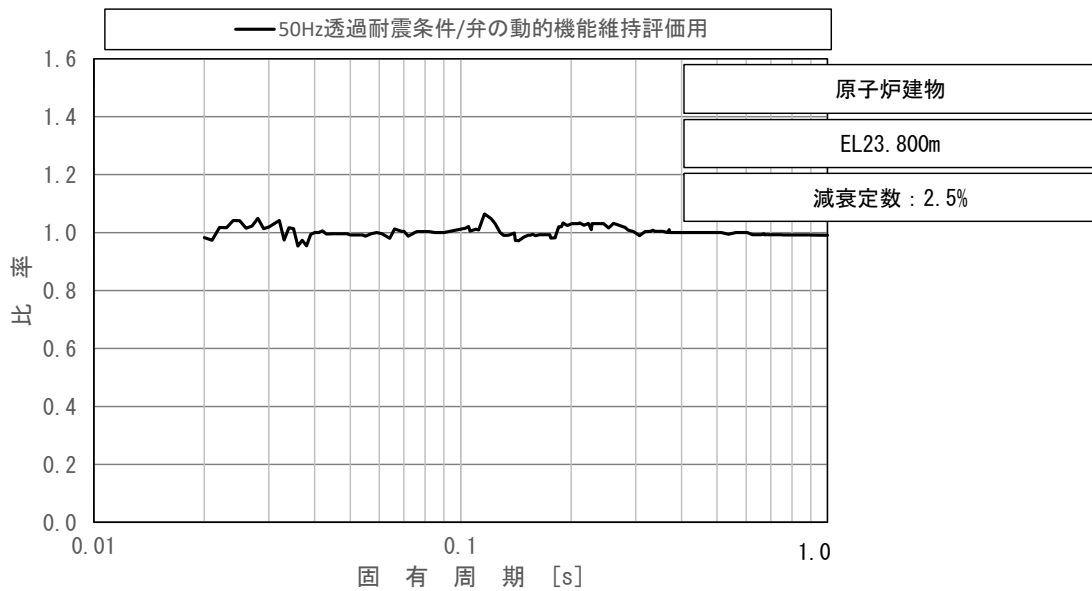
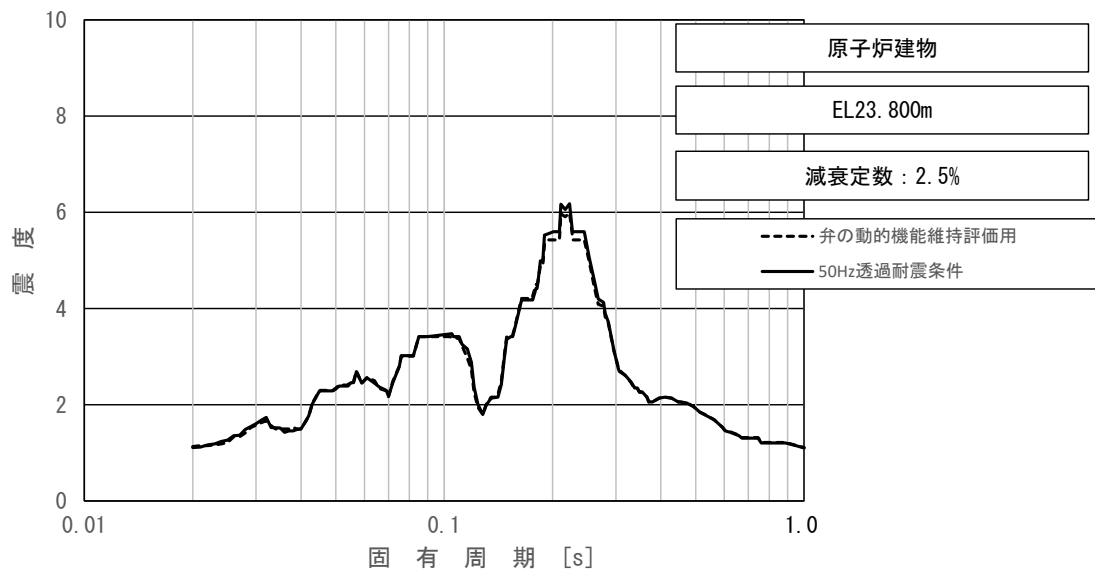
(基準地震動 S_s , 水平方向 (E W) : 原子炉建物 EL 30.500m)



上段：床応答スペクトル
 下段：床応答スペクトル条件比率

図 4-25 (4/8) 弁の動的機能維持評価適用条件と 50Hz 透過耐震条件の
 床応答スペクトル及び条件比率

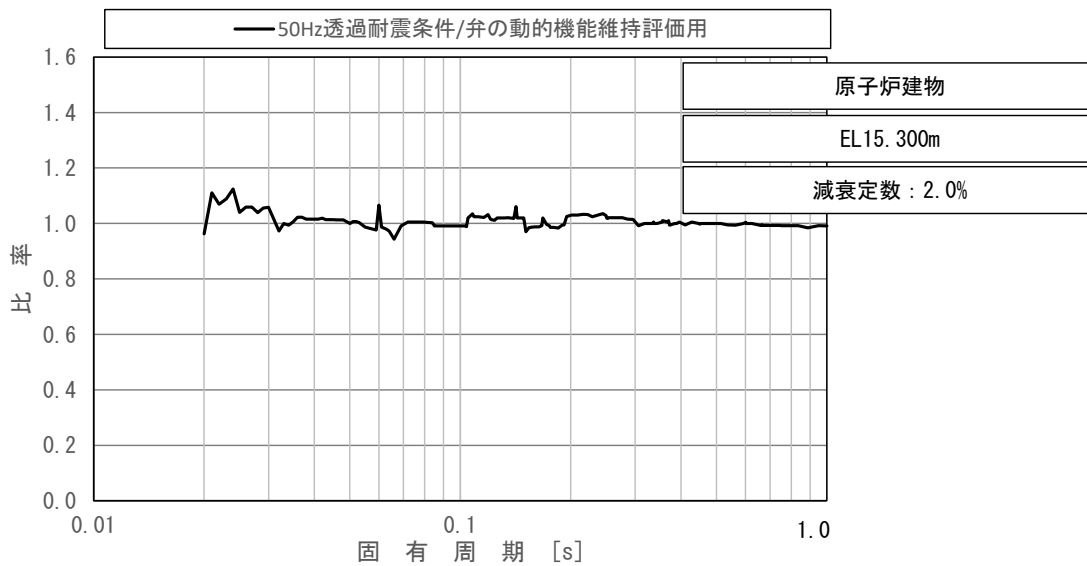
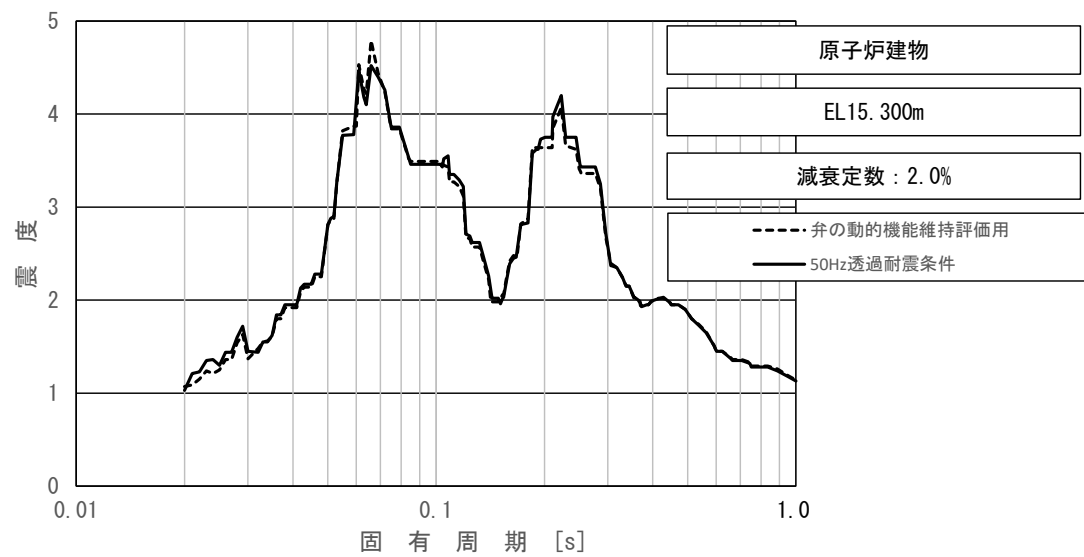
(基準地震動 S_s , 水平方向 (EW) : 原子炉建物 EL 23.800m)



上段：床応答スペクトル
 下段：床応答スペクトル条件比率

図 4-25 (5/8) 弁の動的機能維持評価適用条件と 50Hz 透過耐震条件の
 床応答スペクトル及び条件比率

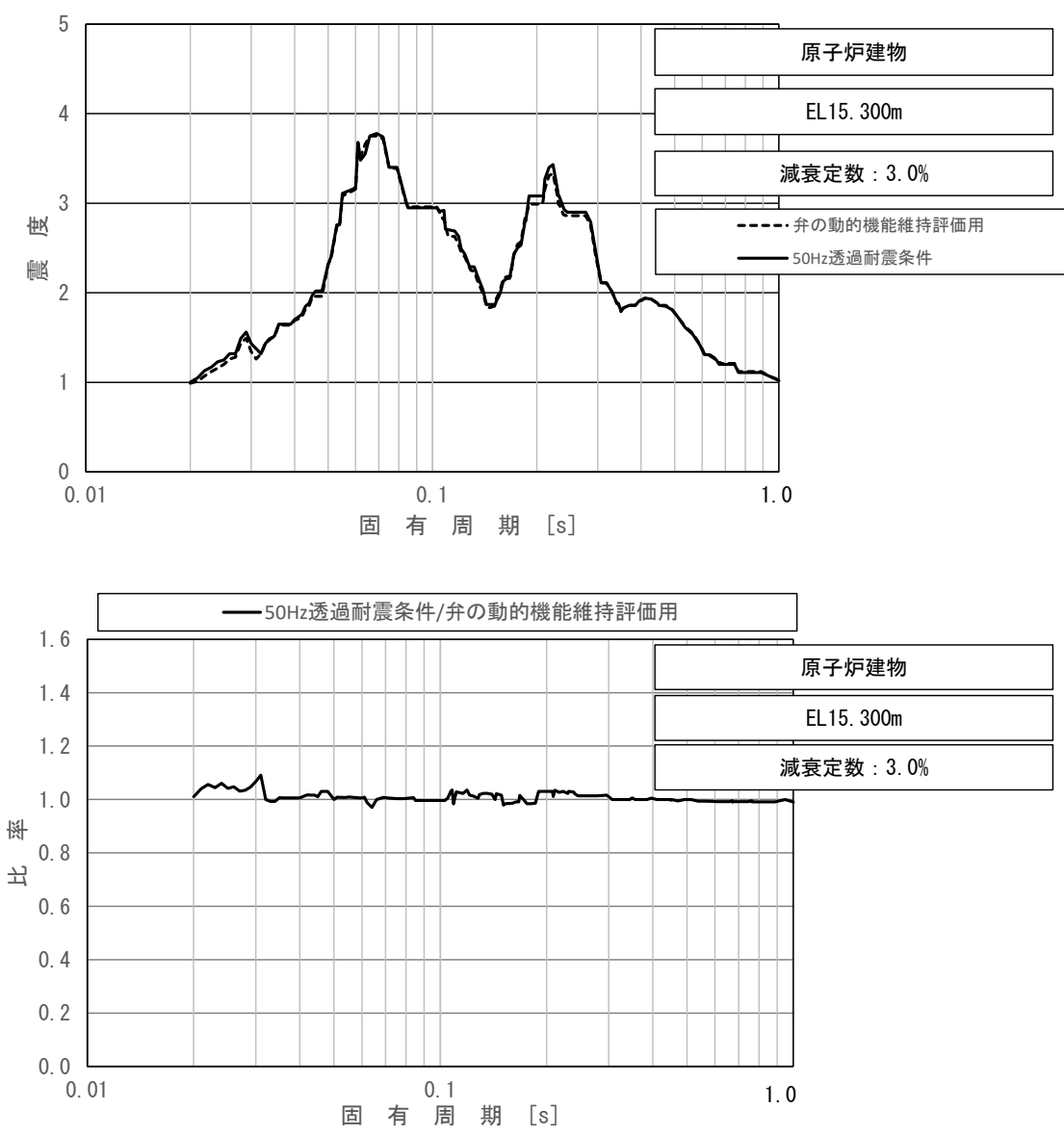
(基準地震動 S_s , 水平方向 (E W) : 原子炉建物 EL 23.800m)



上段：床応答スペクトル
 下段：床応答スペクトル条件比率

図 4-25 (6/8) 弁の動的機能維持評価適用条件と 50Hz 透過耐震条件の
 床応答スペクトル及び条件比率

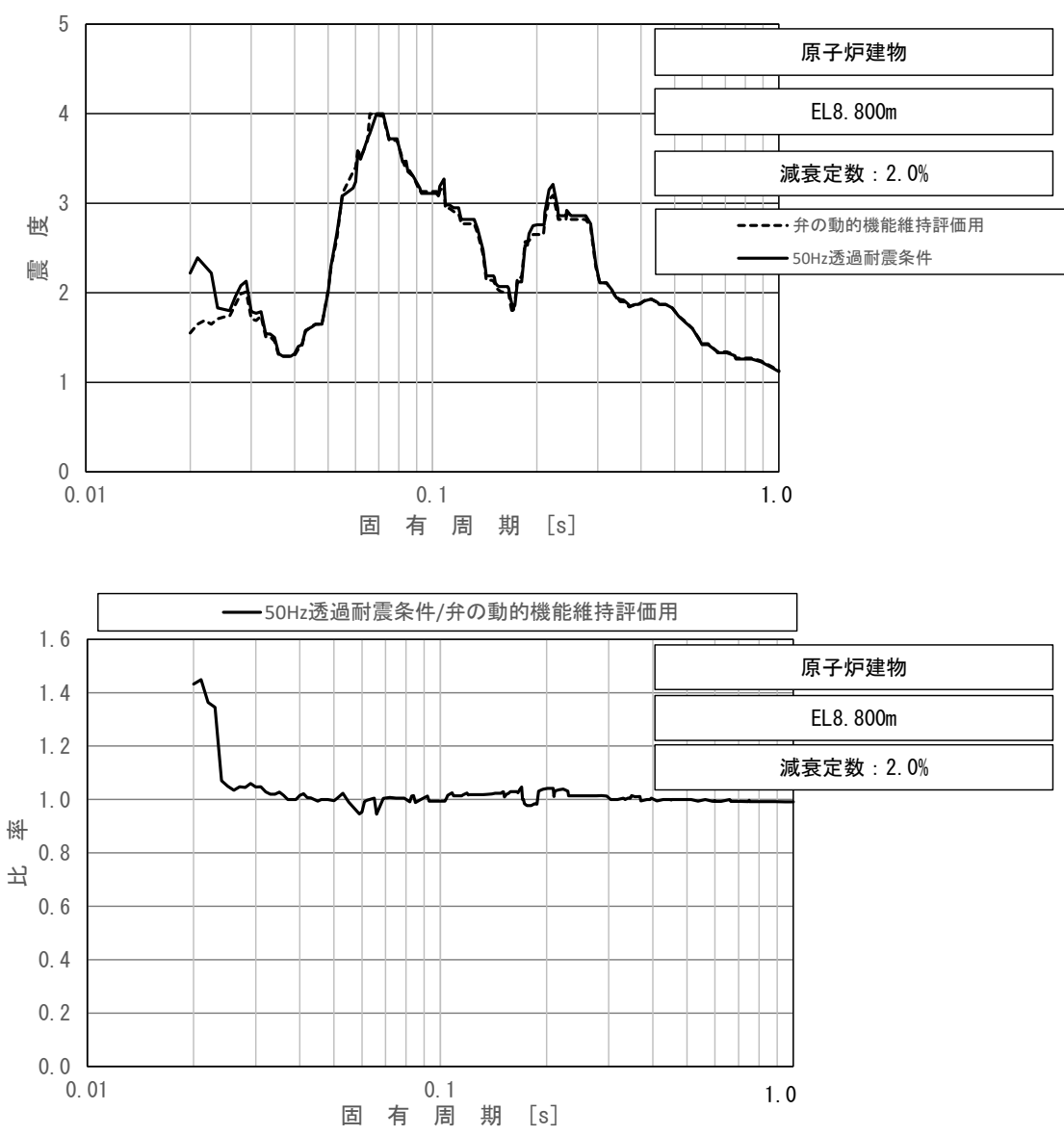
(基準地震動 S_s , 水平方向 (EW) : 原子炉建物 EL 15.300m)



上段：床応答スペクトル
 下段：床応答スペクトル条件比率

図 4-25 (7/8) 弁の動的機能維持評価適用条件と 50Hz 透過耐震条件の
 床応答スペクトル及び条件比率

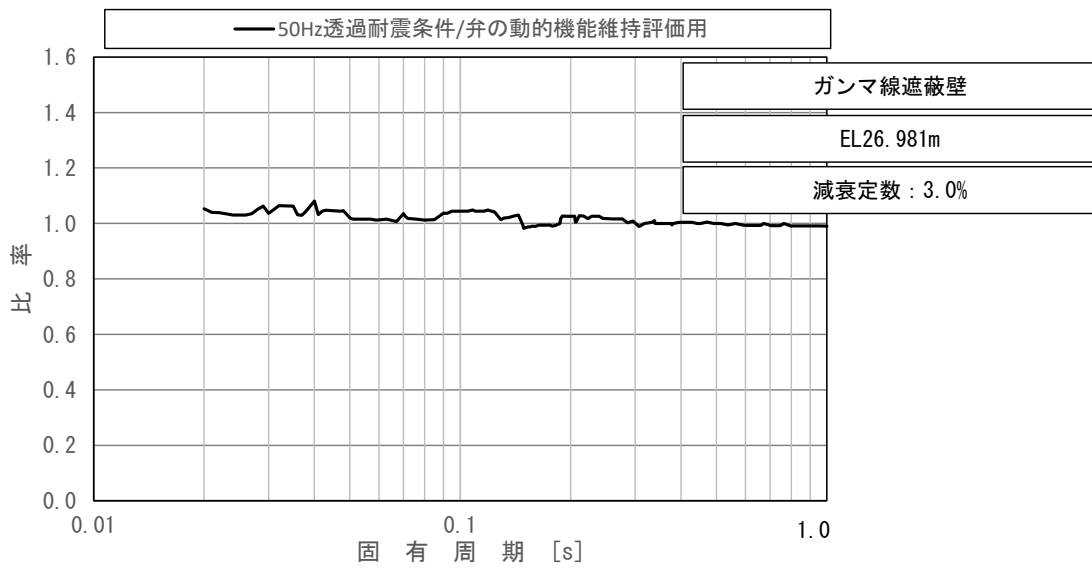
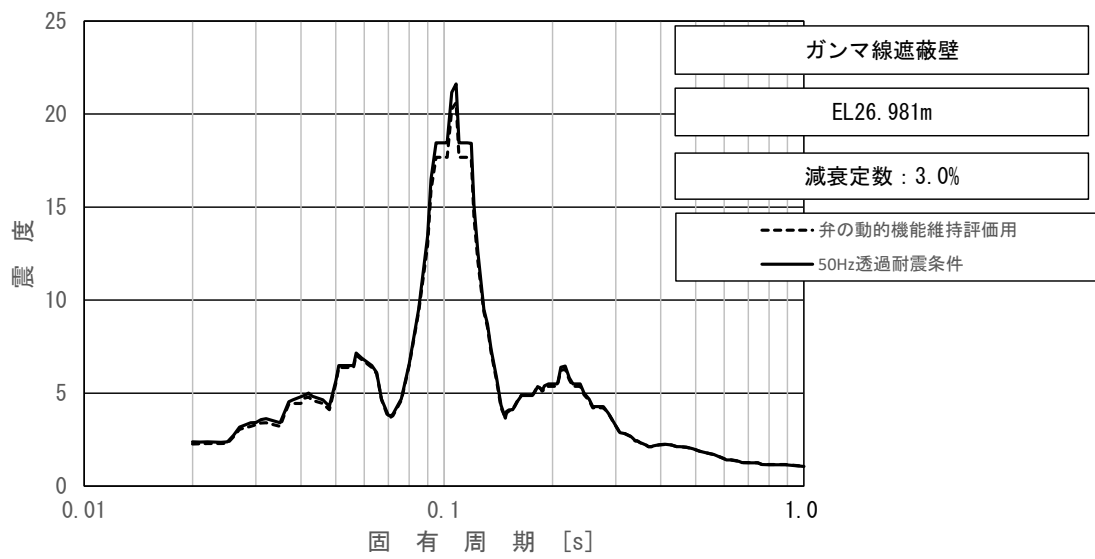
(基準地震動 S_s , 水平方向 (E W) : 原子炉建物 EL 15.300m)



上段：床応答スペクトル
 下段：床応答スペクトル条件比率

図 4-25 (8/8) 弁の動的機能維持評価適用条件と 50Hz 透過耐震条件の
 床応答スペクトル及び条件比率

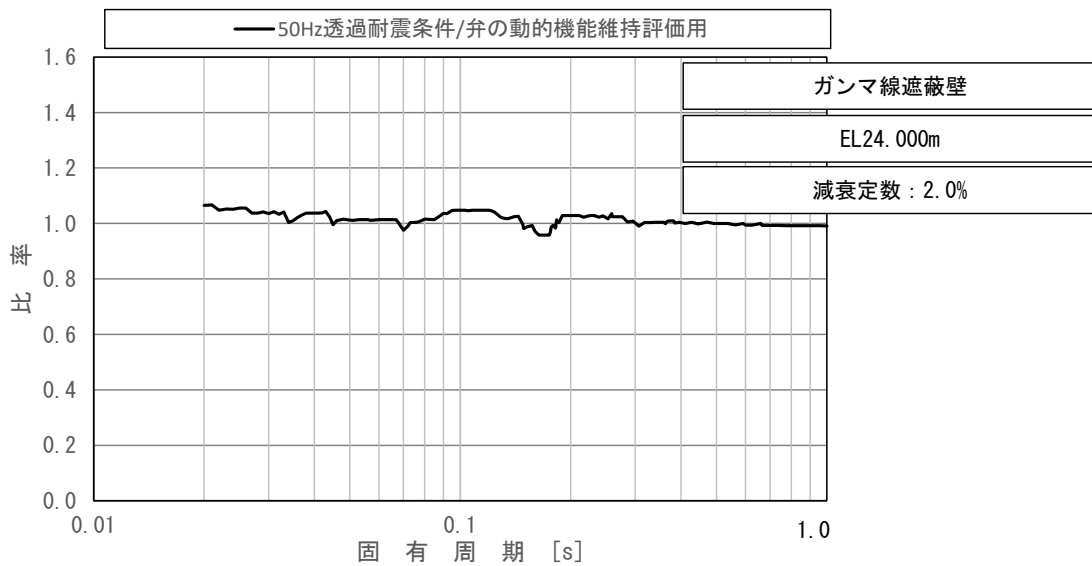
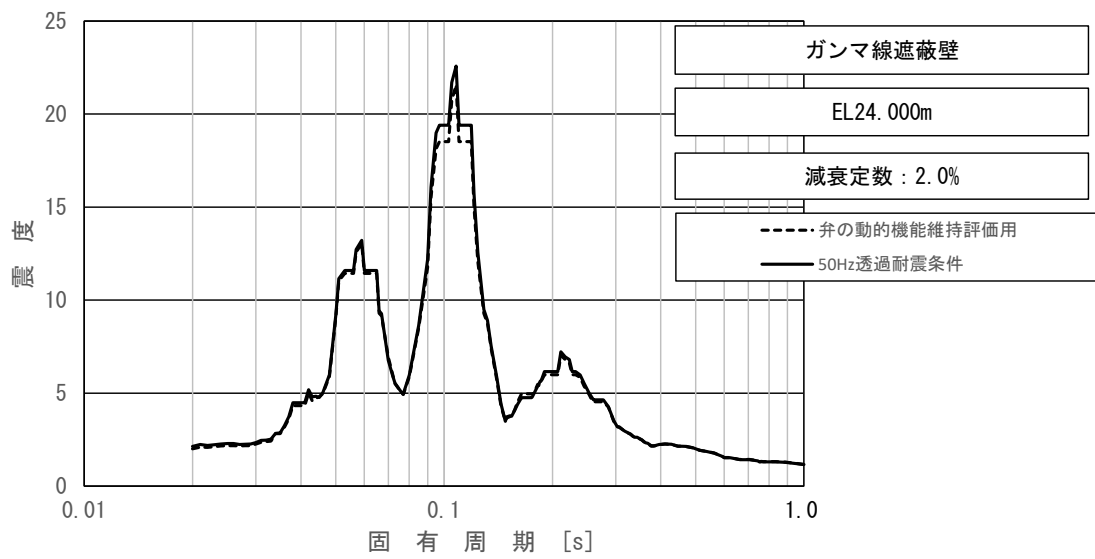
(基準地震動 S_s ，水平方向 (EW)：原子炉建物 EL 8.800m)



上段：床応答スペクトル
 下段：床応答スペクトル条件比率

図 4-26 (1/3) 弁の動的機能維持評価適用条件と 50Hz 透過耐震条件の
 床応答スペクトル及び条件比率

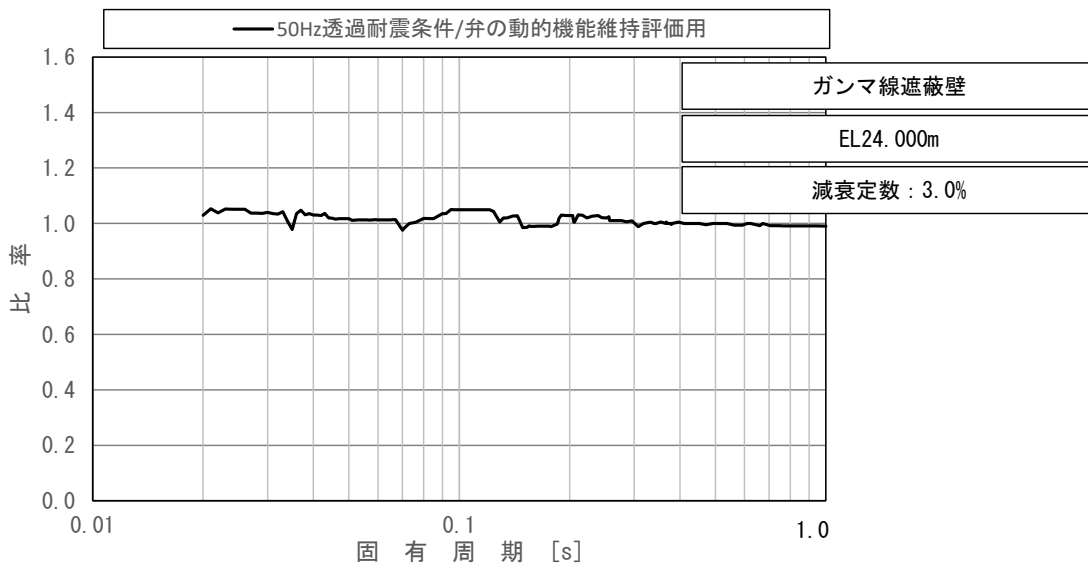
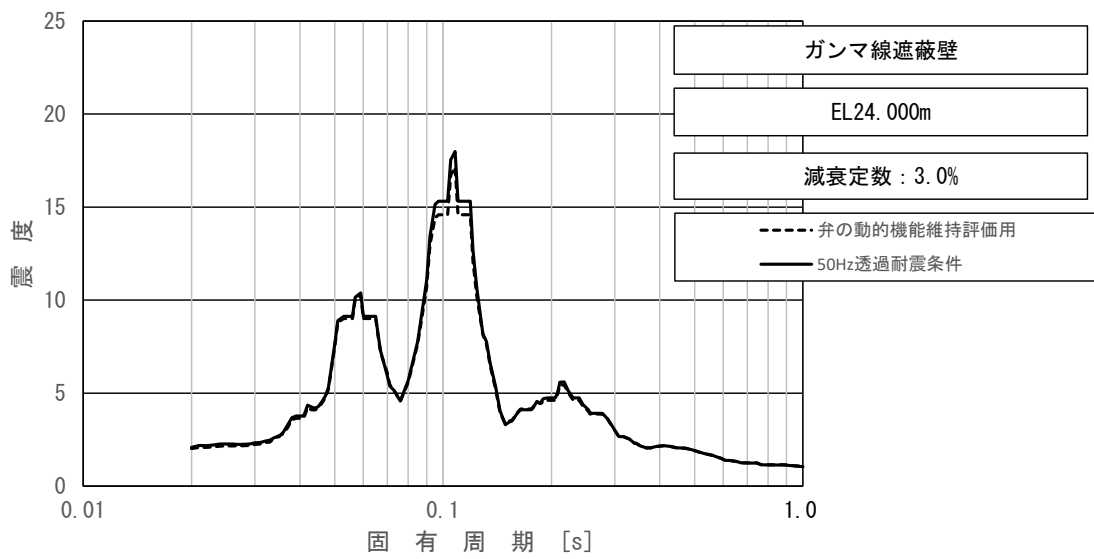
(基準地震動 S_s , 水平方向 (EW) : ガンマ線遮蔽壁 EL 26.981m)



上段：床応答スペクトル
 下段：床応答スペクトル条件比率

図 4-26 (2/3) 弁の動的機能維持評価適用条件と 50Hz 透過耐震条件の
 床応答スペクトル及び条件比率

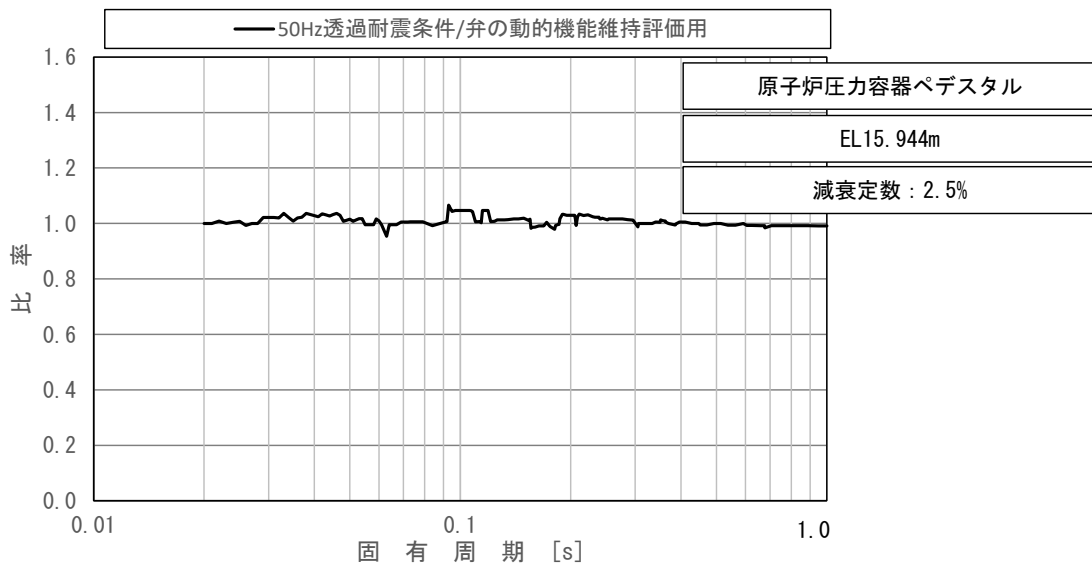
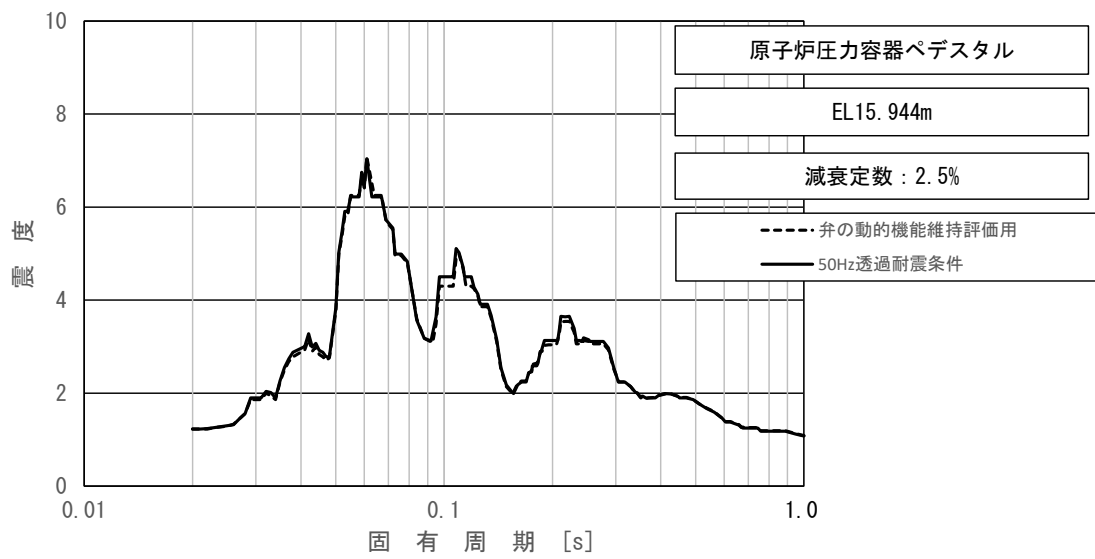
(基準地震動 S_s , 水平方向 (EW) : ガンマ線遮蔽壁 EL 24.000m)



上段：床応答スペクトル
 下段：床応答スペクトル条件比率

図 4-26 (3/3) 弁の動的機能維持評価適用条件と 50Hz 透過耐震条件の
 床応答スペクトル及び条件比率

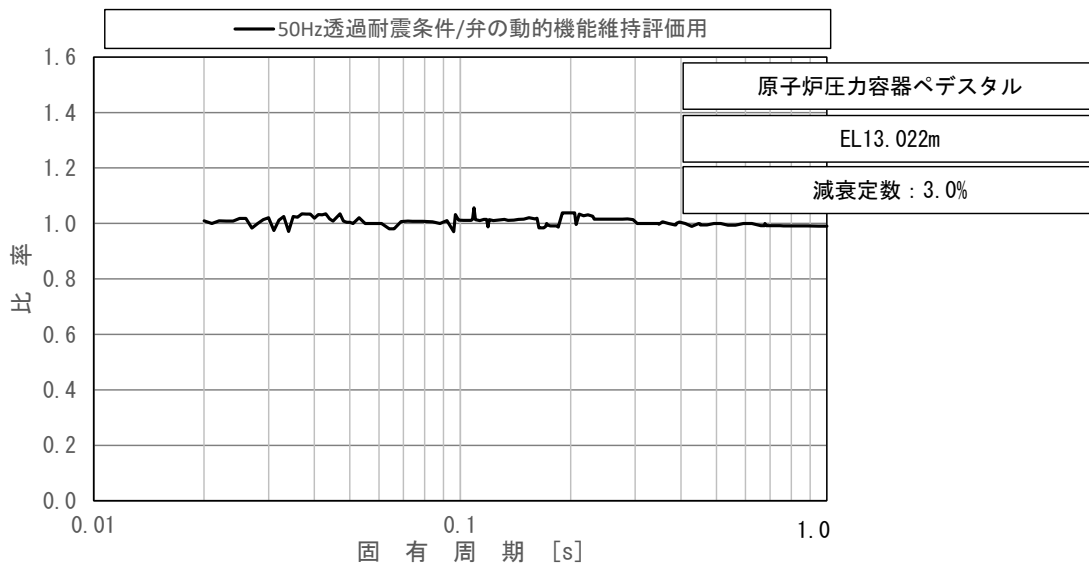
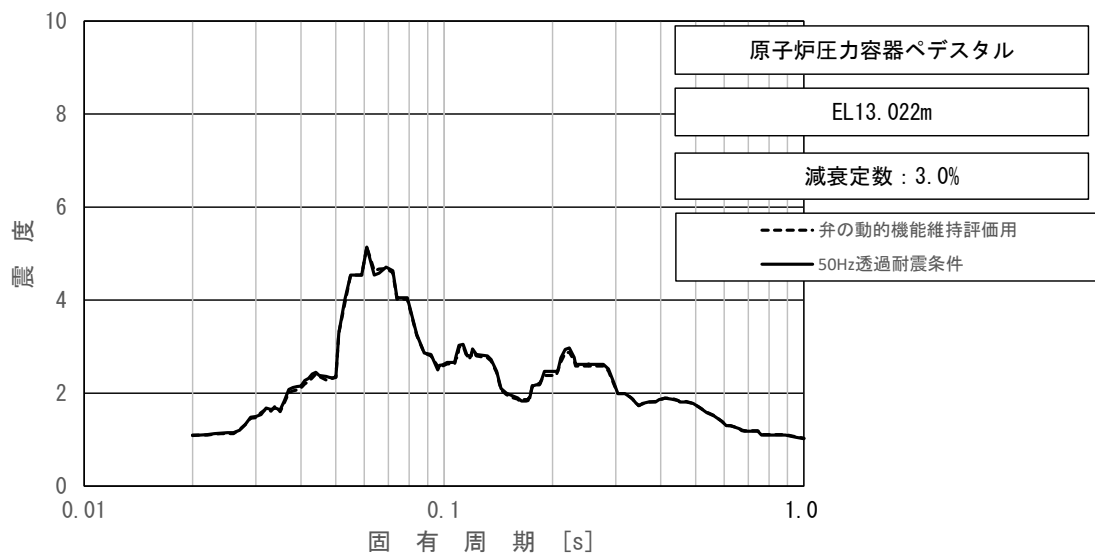
(基準地震動 S_s , 水平方向 (EW) : ガンマ線遮蔽壁 EL 24.000m)



上段：床応答スペクトル
 下段：床応答スペクトル条件比率

図 4-27(1/2) 弁の動的機能維持評価適用条件と 50Hz 透過耐震条件の
 床応答スペクトル及び条件比率

(基準地震動 S_s , 水平方向 (EW) : 原子炉圧力容器ペDESTAL EL 15.944m)



上段：床応答スペクトル
 下段：床応答スペクトル条件比率

図 4-27(2/2) 弁の動的機能維持評価適用条件と 50Hz 透過耐震条件の
 床応答スペクトル及び条件比率

(基準地震動 S_s , 水平方向 (EW) : 原子炉压力容器ペDESTAL EL 13.022m)

(b) 影響検討結果

原子炉建物に設置される動的機能維持評価対象弁に対して簡易評価を実施した。条件比率の最大値が 1.45 であるため、動的機能維持評価対象弁のうち、裕度 1.45 以下の弁 (No. 1~10) 及び条件比率が最大比率である 1.45 となる弁 (No. 11, 12) を選定し、簡易評価を実施した。ここで、No. 6~10 の弁の動的機能維持評価においては、動作機能確認済加速度に対する評価と構造強度評価を実施していることから、両方の評価に対して簡易評価を実施した。機能確認済加速度に対する簡易評価の結果を表 4-14 に、構造強度評価結果に対する簡易評価の結果を表 4-15 に示す。簡易評価の結果、No. 1, 3 以外の動的機能維持評価対象弁については条件比率が設備の裕度以下となっていることを確認した。

条件比率が設備の裕度を上回る No. 1, 3 の弁について 50Hz 透過耐震条件を用いて詳細評価を実施した結果を表 4-16 に示す。詳細評価の結果、どちらの弁についても構造強度評価上の最弱部位である操作部本体取付ボルト部における発生応力が許容応力を下回ることを確認した。

以上より、50Hz 透過モデルの応答を考慮しても動的機能維持評価対象弁の耐震性への影響がないことを確認した。

表 4-14 代表弁の動的機能維持評価に対する簡易評価結果 (機能確認済加速度)

No.	系統	弁番号	弁名称	弁型式	方向	機能維持評価用 加速度 ($\times 9.8\text{m/s}^2$)	機能確認済 加速度 ($\times 9.8\text{m/s}^2$)	裕度	条件比率	簡易評価 結果
1	RHR	AV222-1A	A-試験可能逆止弁	空気作動逆止弁	水平	5.92	6.0	1.01	1.06	×
2	RHR	AV222-1C	C-試験可能逆止弁	空気作動逆止弁	水平	4.90	6.0	1.22	1.06	○
3	RHR	AV222-3A	A-炉水戻り試験可能 逆止弁	空気作動逆止弁	水平	5.82	6.0	1.03	1.07	×
4	LPCS	AV223-1	試験可能逆止弁	空気作動逆止弁	水平	5.52	6.0	1.08	1.08	○
5	HPCS	AV224-1	試験可能逆止弁	空気作動逆止弁	水平	4.70	6.0	1.27	1.08	○
6	MS	RV202-1B	B-主蒸気逃がし 安全弁	安全弁	合成	14.31	20.0*	1.39	1.07	○
7	MS	RV202-1E	E-主蒸気逃がし 安全弁	安全弁	合成	14.20	20.0*	1.40	1.07	○
8	MS	RV202-1F	F-主蒸気逃がし 安全弁	安全弁	合成	17.54	20.0*	1.14	1.07	○
9	MS	RV202-1H	H-主蒸気逃がし 安全弁	安全弁	合成	15.30	20.0*	1.30	1.07	○
10	MS	RV202-1J	J-主蒸気逃がし 安全弁	安全弁	合成	14.19	20.0*	1.40	1.07	○
11	RHR	MV222-7	RHR 炉水入口外側 隔離弁	電動ゲート弁	水平	2.45	6.0	2.44	1.45	○
12	HPCS	MV224-2	HPCS ポンプトラス 入口弁	電動ゲート弁	水平	1.48	6.0	4.05	1.45	○

注記* : 動作機能確認済加速度を示す。

表 4-15 代表弁の動的機能維持評価に対する簡易評価結果（構造強度評価）

No.	系統	弁番号	弁名称	弁型式	評価部位	応力分類	耐震評価結果 (基準地震動 S s)			条件比率	簡易評価 結果
							発生値 (MPa)	許容値 (MPa)	裕度		
6	MS	RV202-1B	B-主蒸気逃がし 安全弁	安全弁	クーリング スプール	組合せ	202	305	1.50	1.07	○
7	MS	RV202-1E	E-主蒸気逃がし 安全弁	安全弁	クーリング スプール	組合せ	201	305	1.51	1.07	○
8	MS	RV202-1F	F-主蒸気逃がし 安全弁	安全弁	クーリング スプール	組合せ	246	305	1.23	1.07	○
9	MS	RV202-1H	H-主蒸気逃がし 安全弁	安全弁	クーリング スプール	組合せ	211	305	1.44	1.07	○
10	MS	RV202-1J	J-主蒸気逃がし 安全弁	安全弁	クーリング スプール	組合せ	202	305	1.50	1.07	○

表 4-16 50Hz 透過耐震条件を用いた詳細評価結果

No.	系統	弁番号	弁名称	評価部位	応力分類	詳細評価条件			50Hz透過耐震条件を 用いた評価		詳細評価 結果
						建物	EL(m)	減衰定数(%)	発生値(MPa)	許容値(MPa)	
1	RHR	AV222-1A	A-試験可能逆止弁	操作部本体取付 ボルト部	組合せ	ガンマ線遮蔽壁	24.000	3.0	31	886	○
3	RHR	AV222-3A	A-炉水戻り試験可能 逆止弁	操作部本体取付 ボルト部	組合せ	原子炉圧力容器 ペDESTAL	15.944	2.5	27	886	○

4.5 観測記録を用いたシミュレーション解析による入力地震動評価に関する検証

(1) 検討概要

本検討は、2000年10月6日鳥取県西部地震（以下「2000年鳥取県西部地震」という。）の観測記録を用いた水平方向及び鉛直方向の入力地震動に関する地盤のシミュレーション解析により、入力地震動評価に用いている地盤モデルの妥当性を示すものである。

(2) 検討条件

本検討では、建物の基礎直下において地震観測を行っている原子炉建物を対象に、2000年鳥取県西部地震時に観測されたEL-135mにおける鉛直アレイ観測記録を用いて評価した建物基礎直下での入力地震動と原子炉建物の基礎直下で観測された地震動の加速度応答スペクトルを比較し、今回工認で入力地震動評価に用いている地盤モデルの妥当性を確認する。

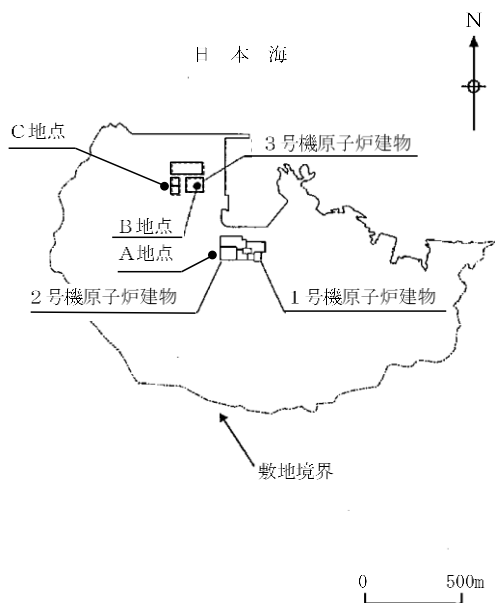
鉛直アレイの地震計配置図を図4-28に、本検討の検討概要を表4-17に、地盤物性値を表4-18に示す。シミュレーション解析に用いている観測記録は、原子炉建物近傍のA地点の記録とし、浅部地盤の影響の少ないEL-135mの記録を用いる。

地震動の引き下げについては、解放地盤モデルを用いて、鉛直アレイ観測記録をEL-135mに入力し、一次元波動論によりEL-215mにおける入射波を算定する。

地震動の引き上げについては、今回工認の評価手法と同様に、地盤モデル（水平方向は2次元FEMモデル、鉛直方向は1次元モデル）の底部EL-215mに地震動の引き下げにより算定した入射波を入力することで、原子炉建物の基礎直下での入力地震動を算定する。

なお、地震動の引き下げ及び引き上げに用いる解放地盤モデル、2次元FEMモデル及び1次元モデルは、今回工認の入力地震動評価に用いるモデルと同じであるが、表層地盤①-1の地盤剛性及び減衰定数については、2000年鳥取県西部地震による地震動レベルを踏まえて、ひずみ依存性を考慮せず、表4-18に示すとおり岩盤①-2と同じ値*とする。

注記*：今回工認モデルの表層地盤①-1の初期剛性については、 $G_0 = 1.707 \times 10^2 \text{ (N/mm}^2\text{)}$ に設定しており、その直下の岩盤①-2（ $G = 1.31 \times 10^2 \text{ (N/mm}^2\text{)}$ ）と概ね同程度であることから、本検討では、表層地盤①-1の地盤剛性及び減衰定数を直下の岩盤①-2と同じ値とする。



地点名	A地点	B地点	C地点
地震計 設置位置 (数値は標高 を表す。)	※1 +15m G. L. +15m	G. L. +46m	
	+10m	+8m	G. L. +8.5m
	※2 -6m (-5m)	-13m	-10m
	-135m	-100m	-135m
		-215m	-215m
		-221m	
観測期間	1988年9月 ↙ 現在	1998年6月 ↙ 2004年3月	2011年2月 ↙ 現在

○：地震計位置
 ※1：2007年6月から観測開始
 ※2：2013年10月から設置深度を-5mから-6mに変更

図4-28 鉛直アレイの地震計配置図

表 4-17 検討概要

観測記録		2000年鳥取県西部地震 (EL-135m)における鉛直アレイ観測記録
地盤	引下げ	解放地盤モデル
条件	引上げ	水平方向: 2次元FEMモデル 鉛直方向: 1次元モデル
概念図	水平方向	<p>[2次元FEMモデル]</p>
	鉛直方向	<p>[1次元モデル]</p>

表 4-18 地盤物性値

層番号*	S波速度 V _s (m/s)	P波速度 V _p (m/s)	単位体積 重量 γ (kN/m ³)	ポアソン比 ν	せん断 弾性係数 G (×10 ⁵ kN/m ²)	減衰定数 h (%)
表層①-1	250	800	20.7	0.45	1.31	3
岩盤①-2	250	800	20.6	0.446	1.31	3
岩盤②	900	2100	23.0	0.388	19.0	3
岩盤③	1600	3600	24.5	0.377	64.0	3
岩盤④	1950	4000	24.5	0.344	95.1	3
岩盤⑤	2000	4050	26.0	0.339	105.9	3
岩盤⑥	2350	4950	27.9	0.355	157.9	3

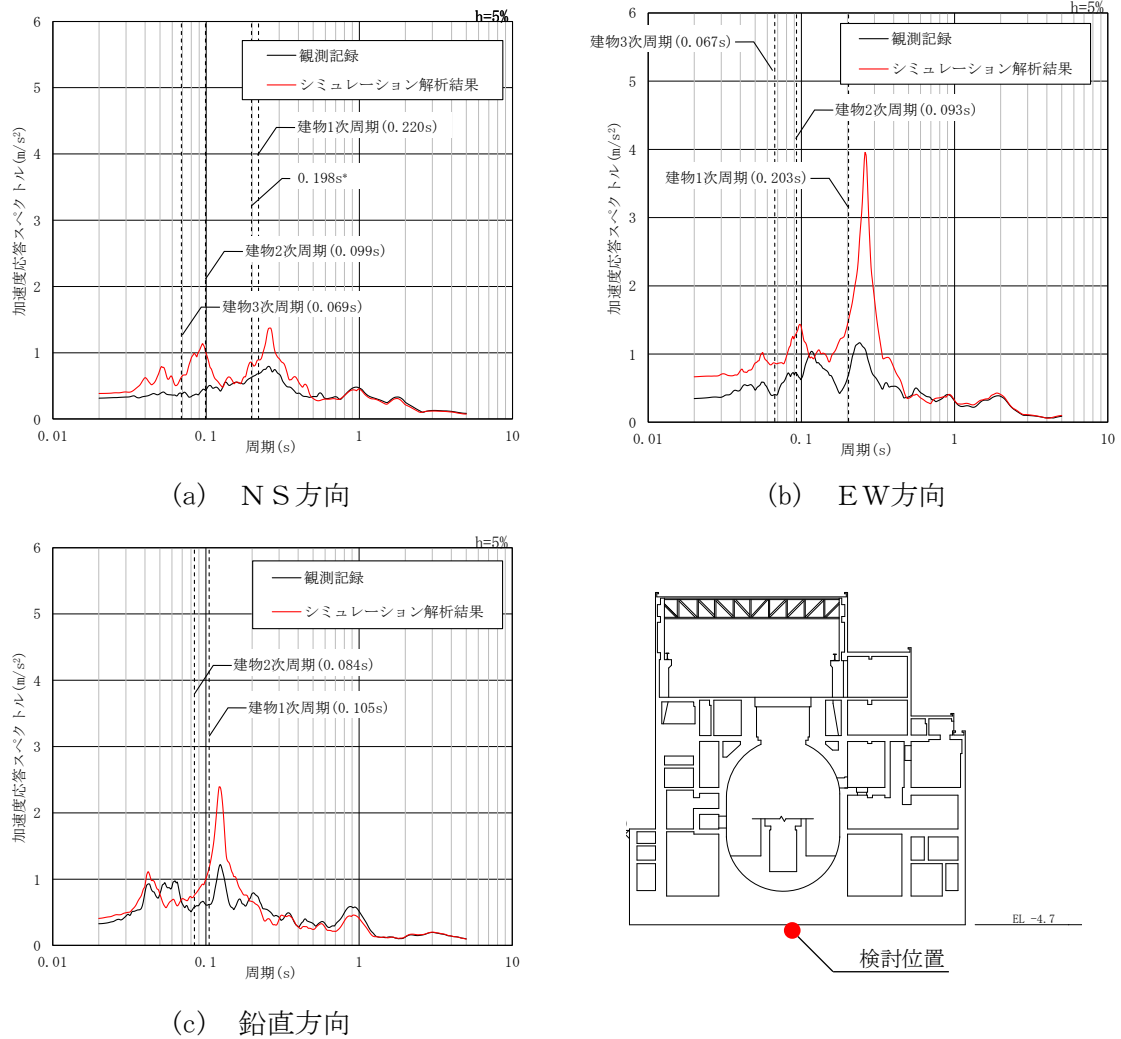
注記*：層番号は解析モデル図(表 4-17)を参照

(3) 検討結果

シミュレーション解析による建物基礎直下の入力地震動と建物基礎直下における観測記録の加速度応答スペクトルの比較及び建物の主要な固有周期*を図 4-29 に示す。

シミュレーション解析結果は、観測記録の1次ピークを捉えており、全周期帯において概ね保守的な評価となっていることから、今回工認に用いる地盤モデルは妥当である。

注記*：建物-地盤連成の固有周期のうち、刺激係数が概ね 1.0 を超えるものとして、水平方向は1次～3次固有周期、鉛直方向は1次及び2次固有周期を示す。



	NS方向				EW方向			鉛直方向	
	1次	2次	3次	0.198s*	1次	2次	3次	1次	2次
①観測記録 (m/s ²)	0.68	0.43	0.39	0.63	0.70	0.71	0.41	0.62	0.58
②解析結果 (m/s ²)	0.89	1.02	0.63	0.85	1.50	1.31	0.87	1.17	0.76
応答比率 (②/①)	1.31	2.38	1.64	1.35	2.15	1.84	2.13	1.89	1.31

注記*：「4.1 表層地盤の物性値に関する検討」の「(4) 保守性に関する詳細検討」にて着目した周期

図 4-29 加速度応答スペクトルの比較（原子炉建物の基礎直下，2000年鳥取県西部地震）

4.6 隣接構造物及び地盤改良による影響に関する検討

(1) 検討概要

今回工認において、2次元FEMモデルにより入力地震動を評価している場合、対象建物の周辺にある建物・構築物等地下部分は、表層地盤と同様に、埋戻土でモデル化することを基本としている。一方、実際の建物・構築物等地下部分は埋戻土よりも剛性が高く、また、一部の埋戻土は地盤改良を施しているため、埋戻土よりも剛性の高い地盤となっている。

本検討は、建物規模や施設の重要性を踏まえて原子炉建物を代表して、対象建物・構築物の周辺にある建物・構築物等地下部分及び改良地盤部分(以下「周辺地盤」という。)をより詳細にモデル化したモデル(以下「等価剛性モデル」という。)と今回工認モデルによる入力地震動の加速度応答スペクトルを比較し、周辺地盤を埋戻土でモデル化する妥当性を確認する。

なお、本検討は、モデル化の違いによる入力地震動への影響について検討することから、位相特性の偏りがなく、全周期帯において安定した応答を生じさせる基準地震動S_s-Dに対して実施することとする。

(2) 検討条件

今回工認は、NS方向においては、タービン建物、取水槽及び改良地盤を、EW方向においては、廃棄物処理建物、1号機廃棄物処理建物及び1号機原子炉建物を表層地盤と同様に埋戻土でモデル化している。本検討で用いる等価剛性モデルは、埋戻土でモデル化している周辺地盤を建物・構築物等及び改良地盤と等価な剛性でモデル化することとする。

a. 等価物性値の設定

(a) 建物・構築物等のモデル化

建物・構築物及び取水槽の等価剛性の算定方針は、「4.2 一次元波動論による入力地震動評価の保守性に関する検討」に示す「b. 隣接する建物・構築物等の等価剛性及び等価単位体積重量の算定」と同様とする。

(b) 改良地盤のモデル化

改良地盤の物性値を以下に示す。物性値の設定については、NS2-補-023-01「地盤の支持性能について」に記載の改良地盤の解析用物性値を用いることとする。

イ. 初期せん断弾性係数 G_0

$$G_0 = G_{ma} \cdot (\sigma_m' / \sigma_{ma}')^{0.5}$$

ここで、 G_{ma} : 基準せん断弾性係数 (=1135000kN/m²)

σ_{ma}' : 基準平均有効拘束圧 (=98kN/m²)

σ_m' : 平均有効拘束圧 (= $(1 + K_0) \cdot \sigma_v' / 2$, $K_0 = 0.5$) (kN/m²)

σ_v' : 上載荷重 (kN/m²)

ロ. 剛性低下率 G/G_0

剛性低下率 G/G_0 のひずみ依存特性は、以下の式により算定する。

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + \gamma / 0.00110}$$

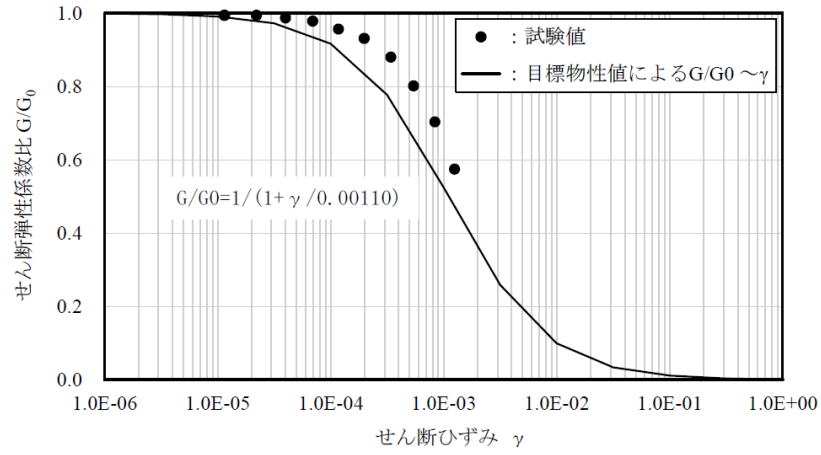
ここで、 γ : せん断ひずみ

ハ. 減衰定数 h

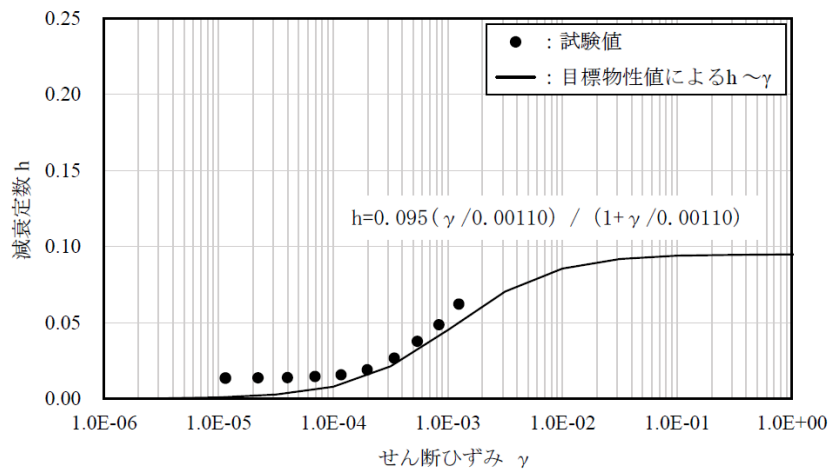
減衰定数 h のひずみ依存特性は、以下の式により算定する。

$$h = \frac{0.095 \gamma}{\gamma + 0.00110}$$

ここで、 γ : せん断ひずみ



(a) $G/G_0 - \gamma$ 曲線

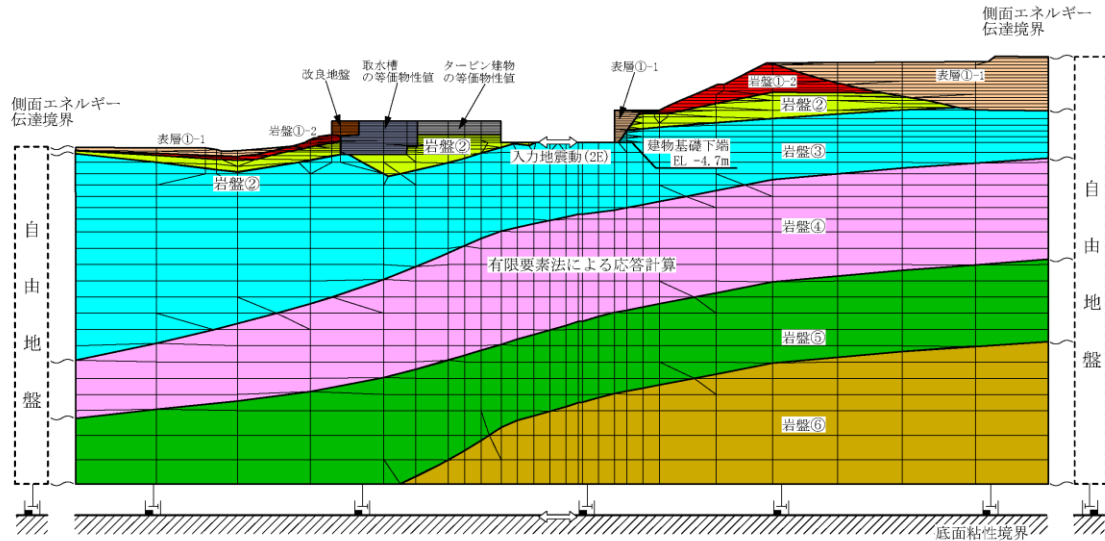


(b) $h - \gamma$ 曲線

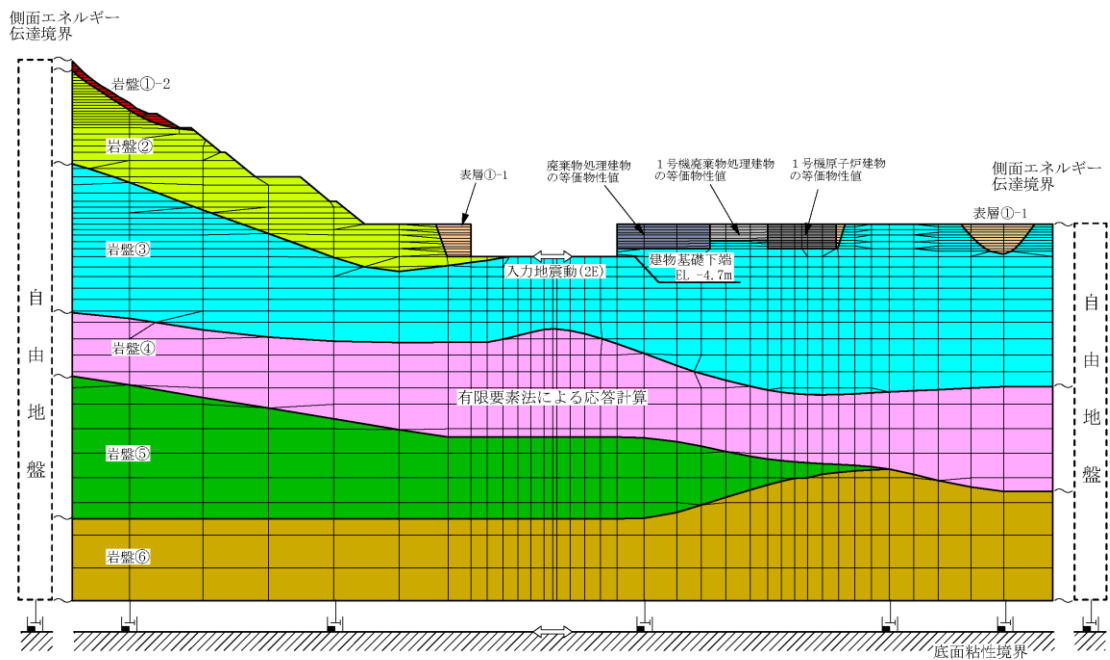
図 4-30 $G/G_0 - \gamma$ 関係及び $h - \gamma$ 関係 (改良地盤)

b. 解析モデル

本検討に用いる 2 次元 F E Mモデルを図 4-31 に、地盤物性値を表 4-19 に、建
物・構築物等の物性値を表 4-20 に示す。



(a) N S方向



(b) E W方向

図 4-31 2次元 F E Mモデル (原子炉建物)

表 4-19 2次元FEMモデルの地盤物性値

層番号	S波速度 V _s (m/s)	P波速度 V _p (m/s)	単位体積重量 γ (kN/m ³)	ポアソン比 ν	せん断弾性係数 G (×10 ⁵ kN/m ²)	減衰定数 h (%)
改良地盤	* 1	* 1	20.7	0.33	* 1	* 1
表層①-1	127* ²	422* ²	20.7	0.45	0.341* ²	8* ²
岩盤①-2	250	800	20.6	0.446	1.31	3
岩盤②	900	2100	23.0	0.388	19.0	3
岩盤③	1600	3600	24.5	0.377	64.0	3
岩盤④	1950	4000	24.5	0.344	95.1	3
岩盤⑤	2000	4050	26.0	0.339	105.9	3
岩盤⑥	2350	4950	27.9	0.355	157.9	3

注記* 1 : ひずみ依存性を考慮した物性値

注記* 2 : 地震動レベル (S_s) 及び試験結果に基づく埋戻土のひずみ依存性を考慮した等価物性値

表 4-20 建物・構築物等の物性値

建物・構築物等	方向	単位体積重量 _{eq} γ (kN/m ³)	ポアソン比 ν	せん断弾性係数 _{eq} G (×10 ⁵ kN/m ²)	減衰定数 h (%)
タービン建物	N S	16.8	0.2	26.8	5
取水槽	N S	4.10	0.2	20.0	5
廃棄物処理建物	E W	12.9	0.2	28.6	5
1号機廃棄物処理建物	E W	12.0	0.2	21.4	5
1号機原子炉建物	E W	12.3	0.2	31.7	5

(3) 検討結果

図 4-32 に入力地震動の加速度応答スペクトルの比較及び主要施設の固有周期を示す。主要施設の周期帯（図中のグレーハッチング以外の部分）において、等価剛性モデルの応答は今回工認モデルの応答と比較して、概ね同等以下であることから、周辺地盤等を埋戻土でモデル化することの妥当性を確認した。

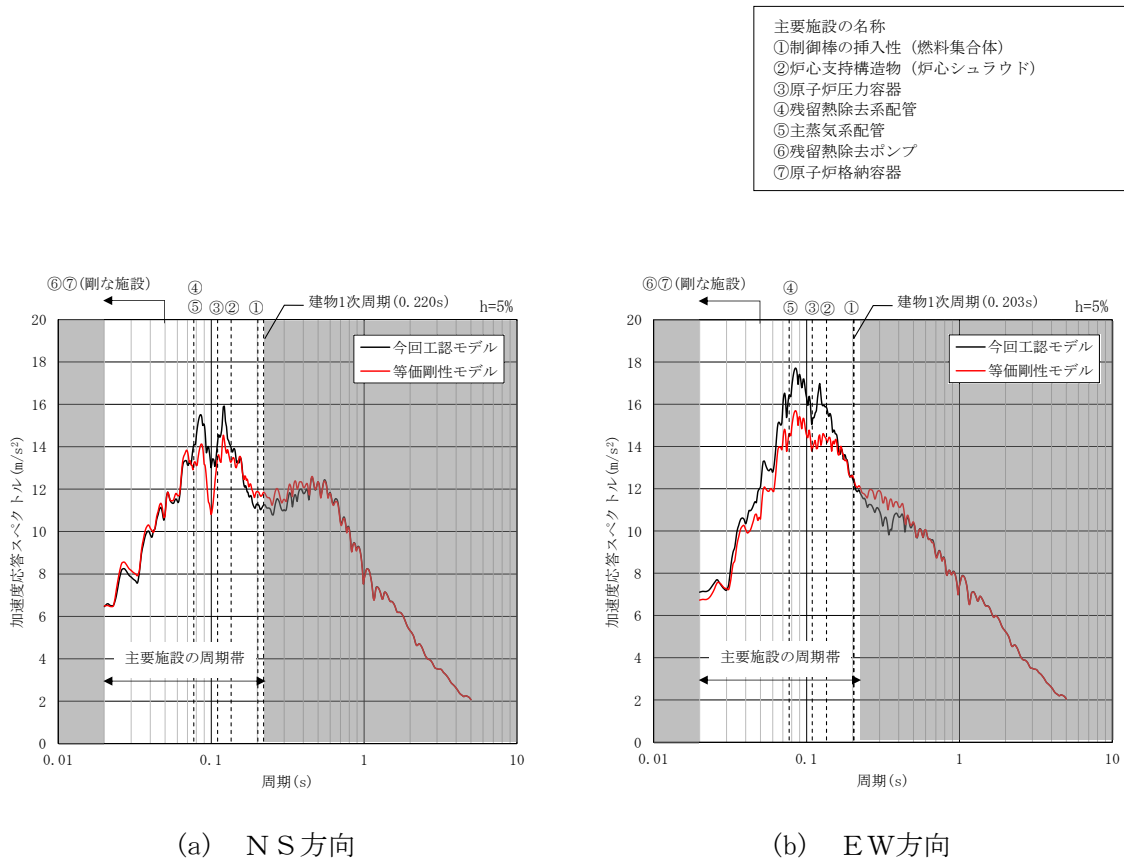


図 4-32 入力地震動の加速度応答スペクトルの比較（原子炉建物，基準地震動S s-D）

4.7 安全対策工事に伴う掘削による影響に関する検討

(1) 検討概要

本検討は、VI-2-別添 7-1「安全対策工事に伴う掘削前の状態における耐震計算の方針」に基づき、原子炉建物等の入力地震動の評価に対する安全対策工事に伴う掘削による影響について整理するものである。

なお、原子炉建物の今回工認の入力地震動評価に用いる2次元FEMモデルは、建設時以降の敷地内の追加地質調査結果の反映等により、最新のデータを基に、より詳細にモデル化したものであり、評価手法等の詳細は「3. 評価手法及び地盤の物性値」に示す。

(2) 検討条件

a. 掘削後の状態

安全対策工事に伴う掘削範囲を図4-33に示す。

(3) 検討結果

安全対策工事に伴う掘削による影響については、掘削範囲は解析モデルにおける表層地盤の局所的な範囲であり、解析モデル全体に対して限定的となっている。

また、建物・構築物（原子炉建物等）の耐震評価では、建物側方地盤による拘束効果を考慮していないこと、及び「4.1 表層地盤の物性値に関する検討」の原子炉建物の入力地震動の評価において表層地盤の地盤物性値の変動が入力地震動に与える影響は小さいことを確認していることから、入力地震動評価に用いる2次元FEMモデルには掘削による影響を考慮しないこととする。

さらに、「4.5 観測記録を用いたシミュレーション解析による入力地震動評価に関する検証」において、入力地震動評価に用いている2次元FEMモデルを用いた観測記録によるシミュレーション解析により今回工認で用いている地盤モデルに十分な保守性を有していることを確認していることから、建物側方地盤の一部を掘削した場合の耐震評価は不要と整理する。

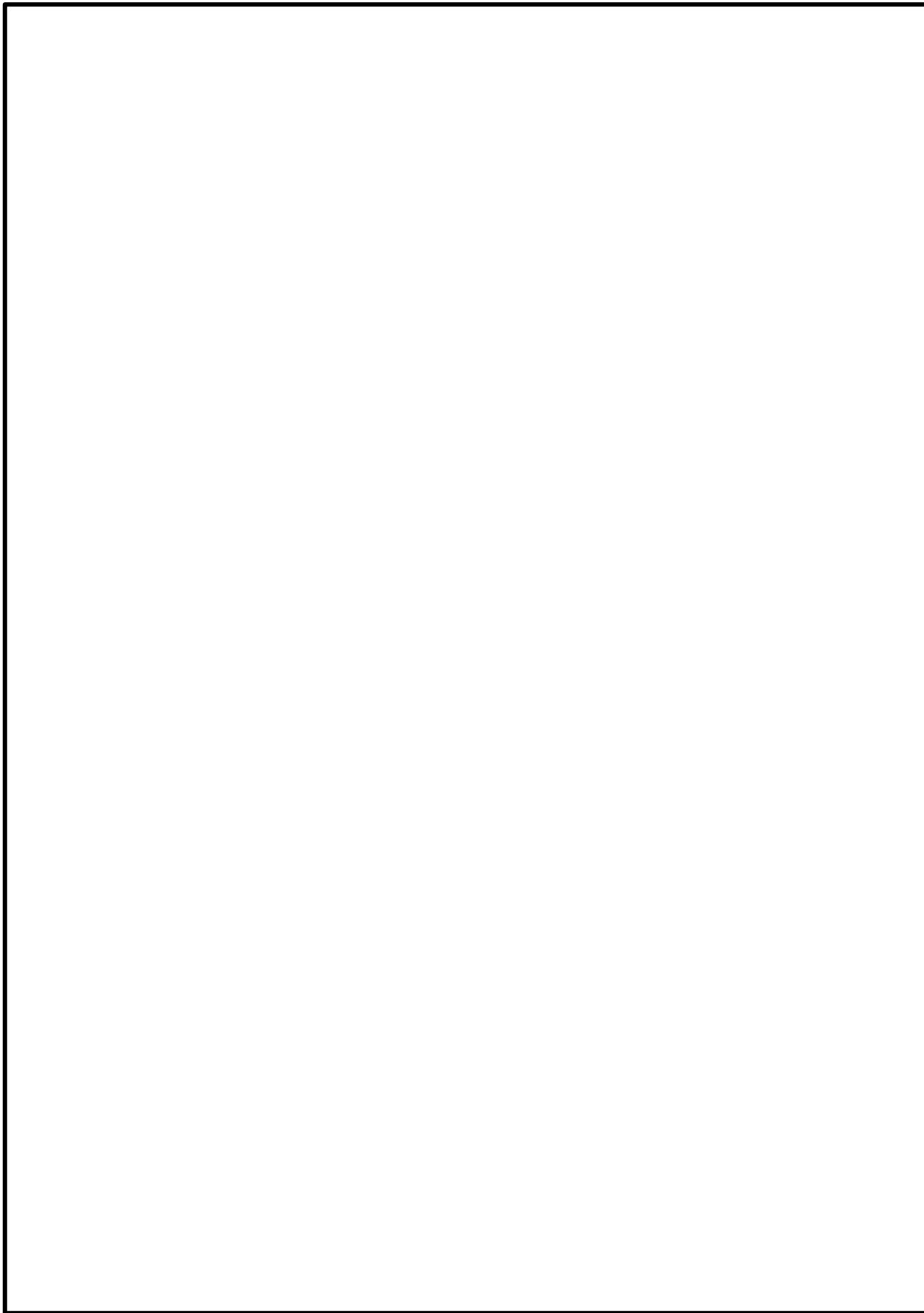


図 4-33 安全対策工事に伴う掘削範囲

5. まとめ

今回工認で評価を行う建物・構築物について、入力地震動の評価手法及び解析モデルの妥当性を確認した。

6. 参考文献

(1) 大崎他, 地盤振動解析のための土の動力学モデルの提案と解析例, 第5回 日本地震工学シンポジウム, 1978

表層地盤の等価物性値の設定について

1. はじめに

入力地震動を算定する際の表層地盤①-1の物性値については、既工認において表層地盤の物性値の変動による入力地震動に対する影響は小さいと判断していたことを踏まえ、基準地震動 S_s 及び弾性設計用地震動 S_d それぞれの地震動レベルに応じた一定値として物性値を設定している。

このような設定方法を採用するメリット及びデメリットを表1-1に示す。

本資料は、地震動レベルに応じた一定値として設定している等価物性値についての設定根拠を示すものである。

表1-1 表層地盤物性値の設定方法のメリット及びデメリット

	内容	備考
メリット	<ul style="list-style-type: none"> 等価物性値を設定することにより、地震動によって地盤物性値を変更する必要がないため、数多くある入力地震動評価の解析を効率的に実施できる。 等価線形解析において局所的にせん断ひずみが大きくなる要素があるが、平均化し等価物性値とすることで、表層地盤のひずみ依存特性を設定した試験範囲内に収まり、解析用物性値の妥当性が確保される。 	—
デメリット	<ul style="list-style-type: none"> 地盤物性値の変動が入力地震動に及ぼす影響を確認する必要がある。 	本文の「4.1 表層地盤の物性値に関する検討」にて、表層地盤①-1の地盤物性値の変動が入力地震動に及ぼす影響は小さいことを確認している。

2. 剛性低下率 G/G_0 及び減衰定数 h の設定

剛性低下率 G/G_0 及び減衰定数 h については、原子炉建物の地盤 2 次元 FEMモデルを用いて、基準地震動 S_s 及び弾性設計用地震動 S_d の全波を対象に、表層地盤①-1 のひずみ依存性を考慮した等価線形解析により算定する。

具体的な剛性低下率 G/G_0 及び減衰定数 h の算定方法を以下に示す。

- ① 表層地盤①-1 のひずみ依存性を考慮した等価線形解析より得られた各要素の収束物性値を要素面積に応じた重み付け平均をすることで、地震動ごとに表層地盤①-1 の剛性低下率 G/G_0 及び減衰定数 h を算定する。地震動ごとの剛性低下率 G/G_0 及び減衰定数 h は、NS方向とEW方向のそれぞれで算定し、それらを平均した値とする。
- ② ①で算定した地震動ごとの剛性低下率 G/G_0 及び減衰定数 h を基準地震動 S_s 及び弾性設計用地震動 S_d のそれぞれで平均化することで、地震動レベルに応じた剛性低下率 G/G_0 及び減衰定数 h を算定する。

表 2-1 及び表 2-2 に地震動ごとの剛性低下率 G/G_0 及び減衰定数 h 並びにその平均値を示す。これらの結果を踏まえ、今回工認の入力地震動評価の際に用いる地震動レベルに応じた剛性低下率 G/G_0 及び減衰定数 h を表 2-3 のとおり設定する。

なお、入力地震動を算定する際の地盤物性値の設定について、等価線形解析の結果から求めた収束物性値の平均値を採用する等、等価な地盤物性値を設定している事例を調査した結果、先行審査プラントの事例として、以下の事例を確認した。

- (a) 一次元波動論による入力地震動の算定において、1 つの層を細分化した各層の収束物性値を等価線形解析により算定し、それを各層の高さに応じた重み付け平均をすることで、1 つの層としての物性値を設定している事例がある。これは、上記①の各要素の収束物性値を要素面積に応じた重み付け平均をする手法に類似した手法であるといえる。
- (b) NS方向とEW方向のそれぞれで地震動が定義される断層モデルに基づく地震動に対する地盤物性値の設定について、等価線形解析により各方向の収束物性値を算定し、それを単純平均する等、断層モデルに基づく地震動の物性値を方向によらず 1 つの物性値として設定している事例がある。これは、上記②の地震動レベルで 1 つの物性値を設定する手法に類似した手法であるといえる。

表 2-1 剛性低下率 G/G_0 及び減衰定数 h (基準地震動 S_s)

(a) 剛性低下率 G/G_0

S_s-D	S_s-N1	S_s-N2 NS	S_s-N2 EW	S_s-F1	S_s-F2	平均
0.099	0.144	0.175	0.180	0.236	0.204	0.173

(b) 減衰定数 h

S_s-D	S_s-N1	S_s-N2 NS	S_s-N2 EW	S_s-F1	S_s-F2	平均
0.088	0.085	0.082	0.082	0.077	0.080	0.082

表 2-2 剛性低下率 G/G_0 及び減衰定数 h (弾性設計用地震動 S_d)

(a) 剛性低下率 G/G_0

S_d-D	S_d-N1	S_d-N2 NS	S_d-N2 EW	S_d-F1	S_d-F2	S_d-1	平均
0.245	0.271	0.406	0.332	0.383	0.345	0.256	0.320

(b) 減衰定数 h

S_d-D	S_d-N1	S_d-N2 NS	S_d-N2 EW	S_d-F1	S_d-F2	S_d-1	平均
0.076	0.074	0.063	0.069	0.065	0.068	0.075	0.070

表 2-3 地震動レベルに応じた剛性低下率 G/G_0 及び減衰定数 h

剛性低下率 G/G_0		減衰定数 h	
基準地震動 S_s	弾性設計用地震動 S_d	基準地震動 S_s	弾性設計用地震動 S_d
0.2	0.3	0.08	0.07

3. 等価物性値の設定

等価線形解析に基づき設定した地震動レベルごとの剛性低下率 G/G_0 を基に、入力地震動の算定に用いる等価物性値を以下に示す。なお、初期せん断弾性係数 G_0 は、拘束圧依存性を考慮した各要素の初期せん断弾性係数を要素面積に応じて重み付け平均した 1.707×10^5 (kN/m²) とする。

(1) S_s地震時

S_s地震時のせん断弾性係数 G 、S波速度 V_S 及びP波速度 V_P の設定根拠を以下に示す。

剛性低下率 $G/G_0=0.2$ より

$$\bullet G = G_0 \times 0.2 = 0.341 \times 10^5 \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

$$\bullet V_S = \sqrt{G / \rho} = 127 \text{ (m/s)}$$

$$\bullet V_P = V_S \times \sqrt{2(1-\nu) / (1-2\nu)} = 422 \text{ (m/s)}$$

ただし、

$$\rho : \text{密度 (} = 2.11 \times 10^3 \text{ kg/m}^3\text{)}$$

$$\nu : \text{ポアソン比 (} = 0.45\text{)}$$

(2) S_d地震時

S_d地震時のせん断弾性係数 G 、S波速度 V_S 及びP波速度 V_P の設定根拠を以下に示す。

剛性低下率 $G/G_0=0.3$ より

$$\bullet G = G_0 \times 0.3 = 0.512 \times 10^5 \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

$$\bullet V_S = \sqrt{G / \rho} = 156 \text{ (m/s)}$$

$$\bullet V_P = V_S \times \sqrt{2(1-\nu) / (1-2\nu)} = 516 \text{ (m/s)}$$

ただし、

$$\rho : \text{密度 (} = 2.11 \times 10^3 \text{ kg/m}^3\text{)}$$

$$\nu : \text{ポアソン比 (} = 0.45\text{)}$$

側面地盤からの地震動の入力に対する影響について

1. はじめに

入力地震動の評価においては、埋込みによる影響を考慮しているが、建物の地震応答解析においては、側面地盤ばねを設けていないため、側面地盤からの入力には考慮していない。

一般的に、側面地盤と建物を連成することで建物の拘束効果が得られることから、側面入力を考慮しても建物の応答は低減されるため、今回工認モデルのように側面に地盤ばねを設けないことは保守的な設定である。参考として、先行審査プラントにおける入力地震動の評価手法及び側面地盤ばねの考え方について、原子炉建物を代表として、表 1-1 に示す。

本資料は、建物の地震応答解析において、側面地盤と建物を連成しないことが保守的であることを示すため、原子炉建物のNS方向を代表して、地盤2次元FEMモデルと質点系地震応答解析モデル（以下「SRモデル」という。）を連成したモデル（以下「地盤-建物一体モデル」という。）を用いて、側面地盤からの地震動の入力を考慮することが建物応答に与える影響を検討するものである。なお、側面地盤からの地震動の入力を検討するにあたり、地盤-建物一体モデルの方が側面地盤ばねを設けたSRモデルよりも側面地盤の分布状況等をより詳細にモデル化しており、側面地盤からの地震動の入力の影響及び側面地盤の拘束をより精緻に評価できることから、本検討では、地盤-建物一体モデルと今回工認モデルを比較することとする。

表 1-1 入力地震動の評価手法及び側面地盤ばねの設定の考え方の比較
(原子炉建物)

		島根 2 号機	女川 2 号機
入力地震動	評価手法	2次元FEMモデルによる 周波数応答解析	一次元地盤モデルによる 逐次非線形解析
	表層地盤	モデル化	モデル化
側面地盤ばね		考慮しない	考慮しない

2. 検討条件

本検討では、地盤－建物一体モデルと今回工認で用いているSRモデルの床応答スペクトルを比較することで、側面地盤からの地震動の入力を考慮することが建物応答に与える影響を検討する。

検討条件を表2-1に、解析モデルを図2-1に示す。地盤物性値及び建物の解析諸元は工認モデルと同じである。

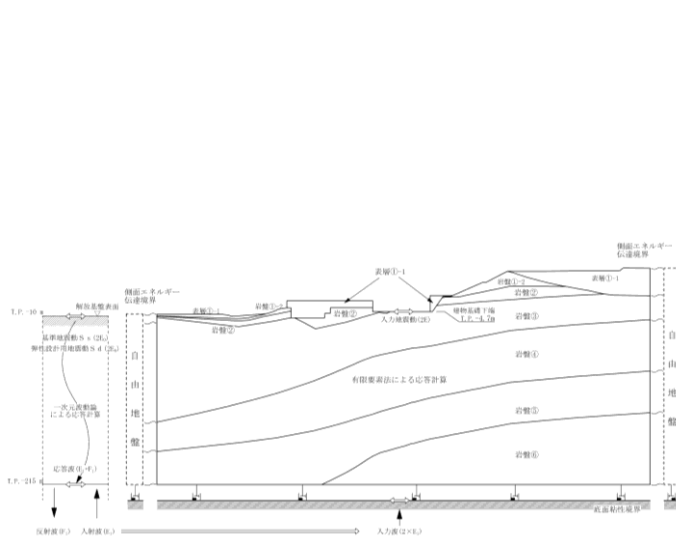
地盤－建物一体モデルは、質点5 (EL 8.8m)、質点33 (EL 8.8m) 及び質点34 (EL 1.3m) を側面地盤と剛なはり要素で、質点35 (EL -4.7m) を底面地盤と節点共有させることで、地盤と建物を一体化させる。

ケース2の検討は周波数応答解析を用いることから、地盤－建物一体モデル及びSRモデルは線形とし、弾性設計用地震動S_dを対象とする。また、モデル化の違いによる入力地震動への影響についての検討を実施することから、位相特性の偏りがなく、全周期帯において安定した応答を生じさせる弾性設計用地震動S_d-Dに対して検討を行う。

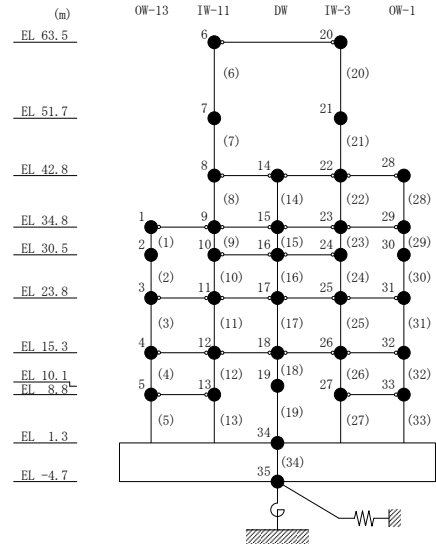
表2-1 検討条件

	ケース1	ケース2
解析モデル	今回工認モデル (SRモデル (線形*))	地盤－建物一体モデル (線形)
側面地盤	考慮しない	考慮する (剛なはり要素により連成する)
対象地震動	弾性設計用地震動S _d -D	

注記*：今回工認モデルは非線形特性を考慮しているが、弾性設計用地震動S_d-Dにおいては、建物応答が線形領域に収まっていることを確認している。

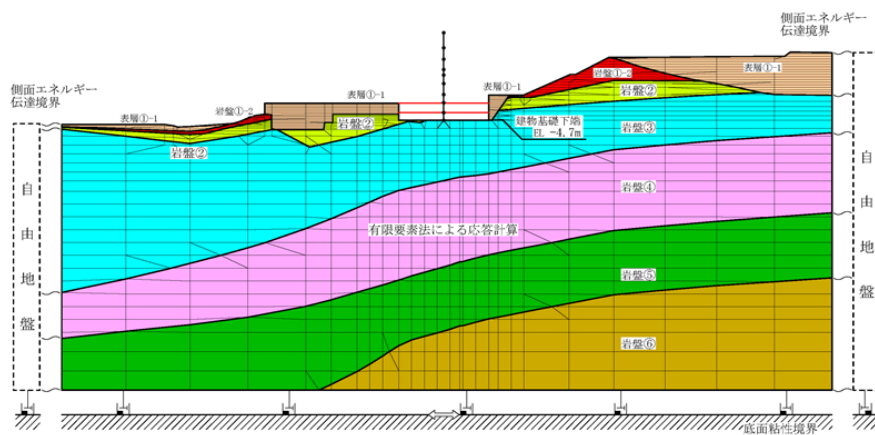


(入力地震動評価用の地盤モデル)

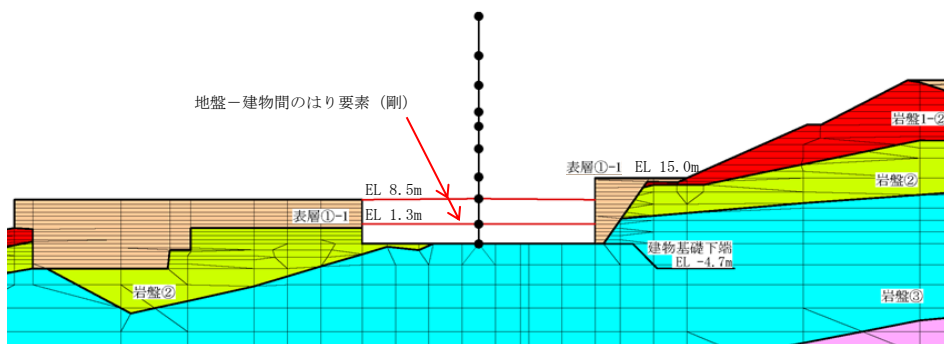


(SRモデル)

(a) 今回工認モデル



(全体)



(詳細)

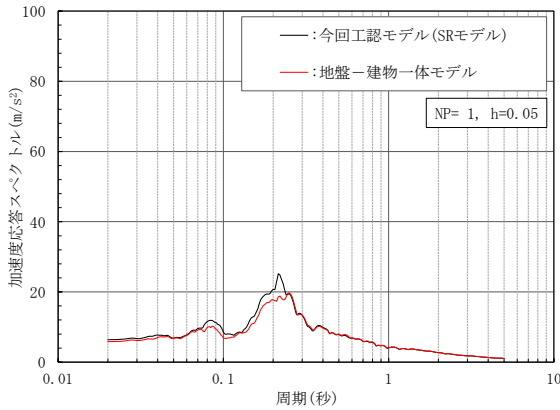
(b) 地盤-建物一体モデル

図 2-1 解析モデル (NS方向)

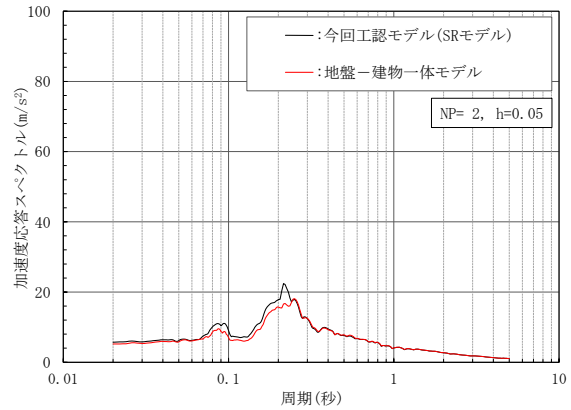
3. 検討結果

床応答スペクトルの比較を図3-1に示す。

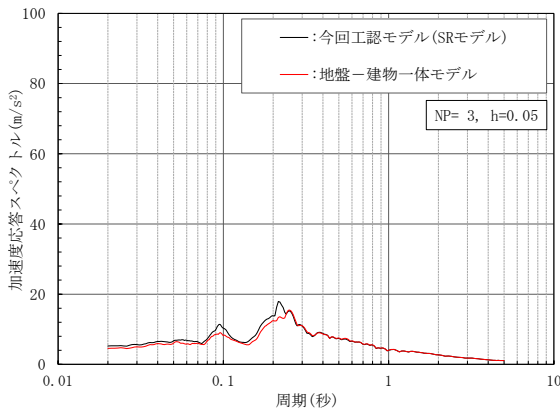
今回工認モデルの床応答スペクトルは、地盤-建物一体モデルの床応答スペクトルよりも全周期帯で概ね大きな応答を示しており、今回工認モデルの保守性を確認することができた。



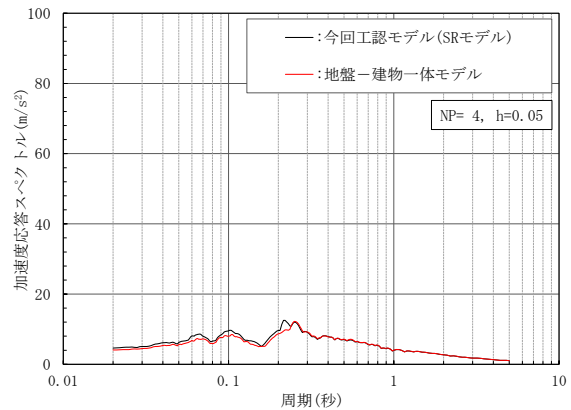
(a) 質点 1, 9, 15, 23, 29



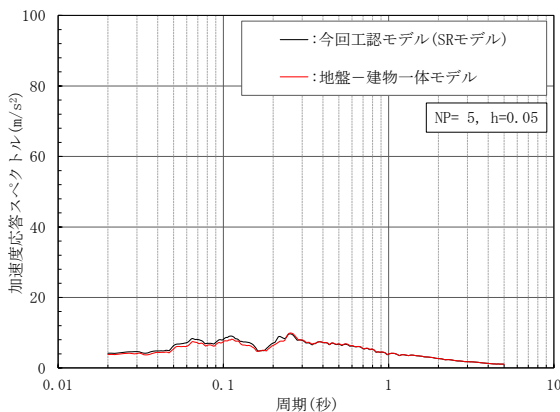
(b) 質点 2



(c) 質点 3, 11, 17, 25, 31



(d) 質点 4, 12, 18, 26, 32



(e) 質点 5, 13

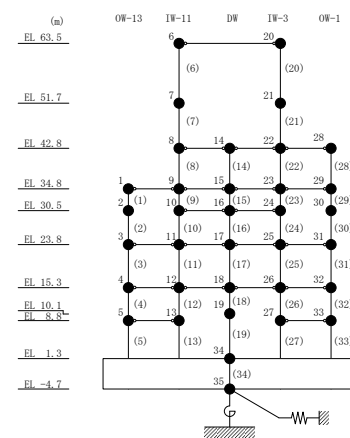
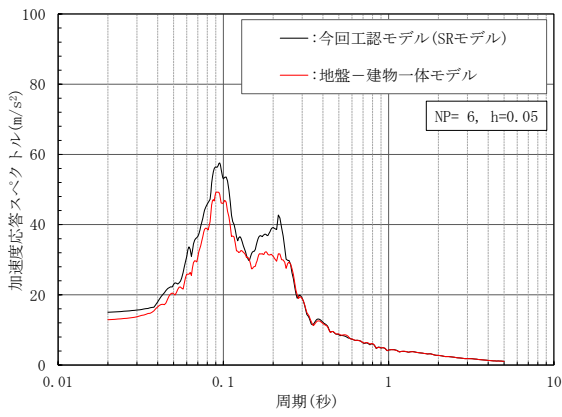
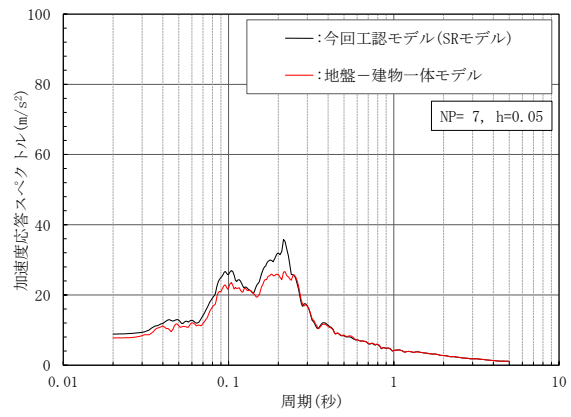


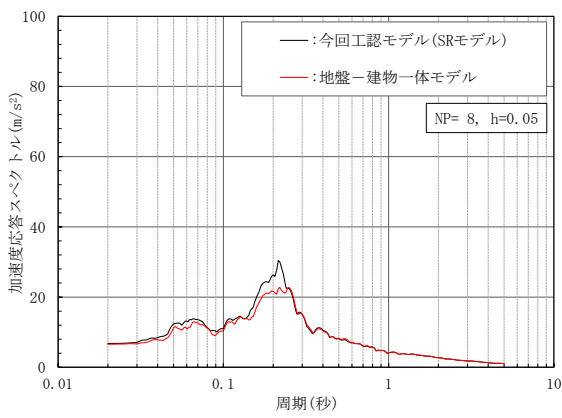
図3-1(1) 床応答スペクトルの比較 (N S方向)



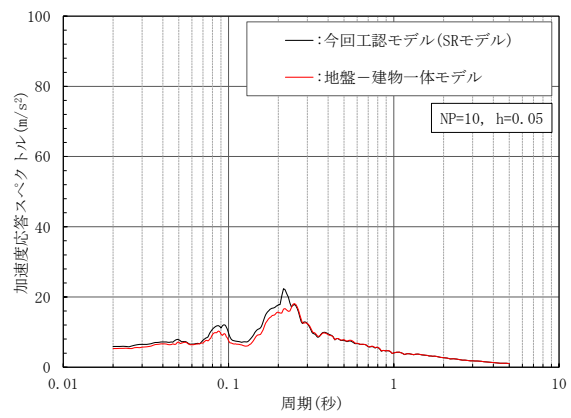
(f) 質点 6, 20



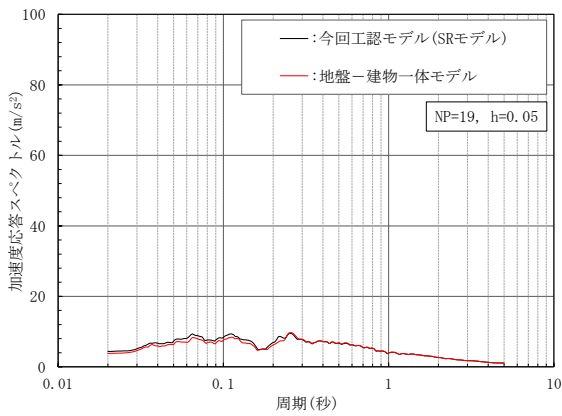
(g) 質点 7



(h) 質点 8, 14, 22, 28



(i) 質点 10, 16, 24



(j) 質点 19

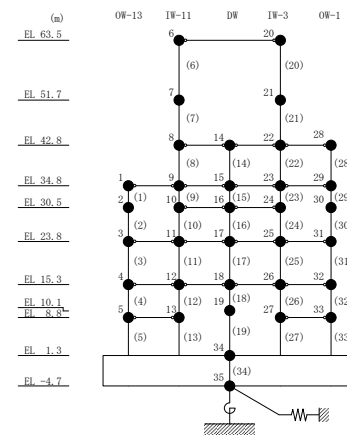
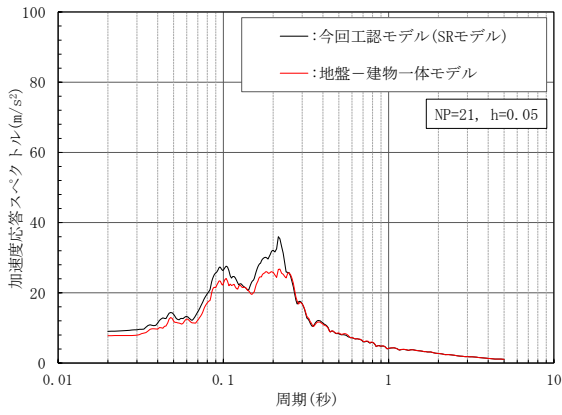
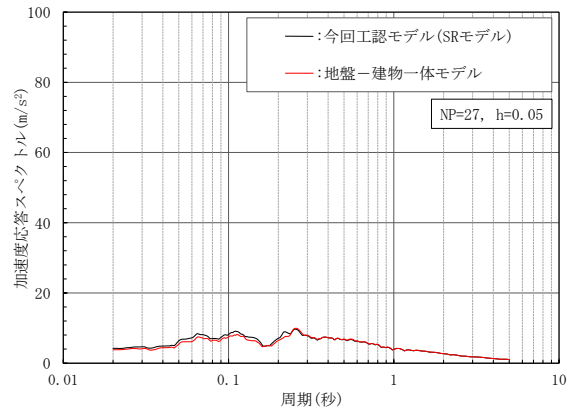


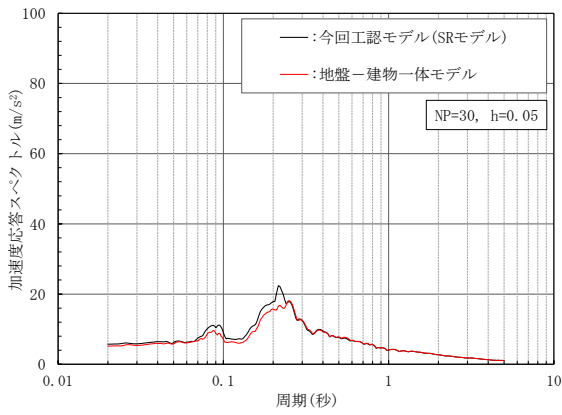
図 3-1(2) 床応答スペクトルの比較 (NS方向)



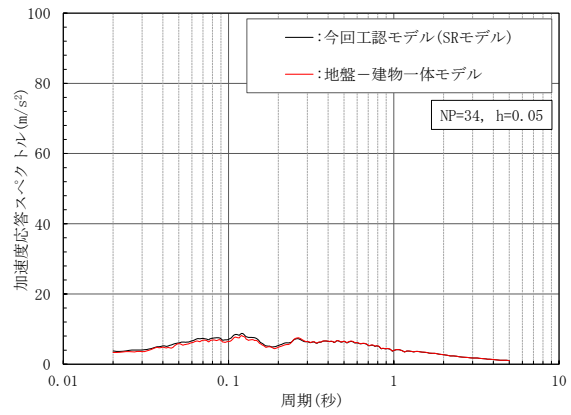
(k) 質点 21



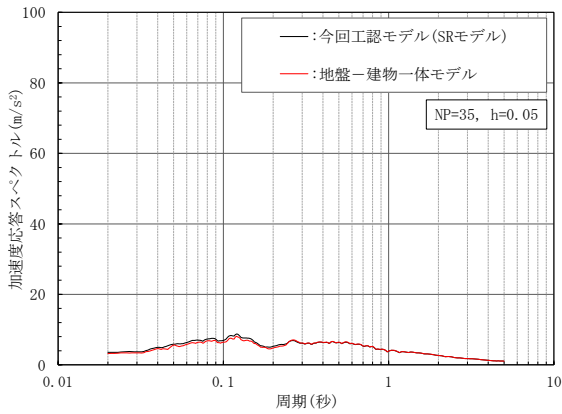
(l) 質点 27, 33



(m) 質点 30



(n) 質点 34



(o) 質点 35

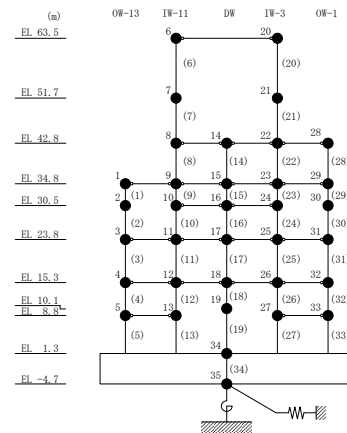


図 3-1 (3) 床応答スペクトルの比較 (NS 方向)

主要建物における一次元波動論及び2次元FEMによる入力地震動の比較

1. はじめに

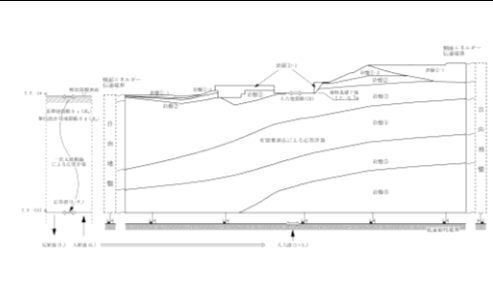
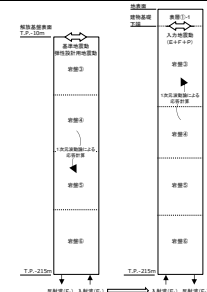
今回工認におけるSクラス施設を含む2号機の主要な建物・構築物である原子炉建物及び制御室建物の入力地震動は、以下のとおり算定することとする。

水平方向は、原子炉建物の既工認と同様に、速度層の傾斜及び建物周辺の地形等の影響を考慮するため、2次元FEMモデルを採用する。鉛直方向は、入力地震動に対する建物直下地盤による影響が大きく、速度層の傾斜等の影響は小さいと考えられることから、一次元波動論モデルを採用する。

原子炉建物及び制御室建物の入力地震動の算定方法について、今回工認の評価手法及び解析モデルを表1-1に示す。

本資料は、原子炉建物及び制御室建物の入力地震動評価に用いる解析モデルの妥当性を示すものである。

表1-1 今回工認の原子炉建物及び制御室建物の入力地震動の算定方法

	水平方向	鉛直方向
入力地震動の評価(概念図)		
評価手法		
入力地震動の算定方法 [計算機コード]	<ul style="list-style-type: none"> 引下げ：一次元波動論[SHAKE] 引上げ：2次元FEM解析[SuperFLUSH] 	<ul style="list-style-type: none"> 引下げ：一次元波動論[SHAKE] 引上げ：一次元波動論[SHAKE]
解析モデル		
モデル化範囲	<ul style="list-style-type: none"> 引下げ：解放基盤表面(EL -10m)からEL -215mまでをモデル化 引上げ：幅は約600mの範囲とし、高さはEL -215m以浅をモデル化 	<ul style="list-style-type: none"> 引下げ：解放基盤表面(EL -10m)からEL -215mまでをモデル化 引上げ：EL -215m以浅の地盤を水平成層にモデル化
速度層区分	建設時の地質調査結果に加えて、建設時以降の敷地内の追加地質調査結果(ボーリング、PS検層)に基づき設定	同左
地盤物性値	岩盤については、建設時の地質調査結果に基づき設定 表層地盤については、地震動レベル及び試験結果に基づく埋戻土のひずみ依存性を考慮した等価物性値を設定	同左

2. 検討条件

原子炉建物及び制御室建物について、解析モデルの違いによる入力地震動への影響を確認するため、基準地震動 $S_s - D$ を用いて、表 2-1 に示す比較検討を実施した。

表 2-1 主要建物の入力地震動の解析モデルの比較
(引上げモデル)

	今回工認モデル	比較用モデル
水平方向	2次元FEMモデル	一次元波動論モデル
鉛直方向	一次元波動論モデル	2次元FEMモデル

3. 検討結果

入力地震動の加速度応答スペクトルの比較を図 3-1 に示す。また、原子炉建物については主要施設の固有周期、制御室建物については建物の主要な固有周期*を併せて図 3-1 に示す。

注記*：建物-地盤連成の固有周期のうち、刺激係数が概ね 1.0 を超えるものとして、1 次固有周期を示す。

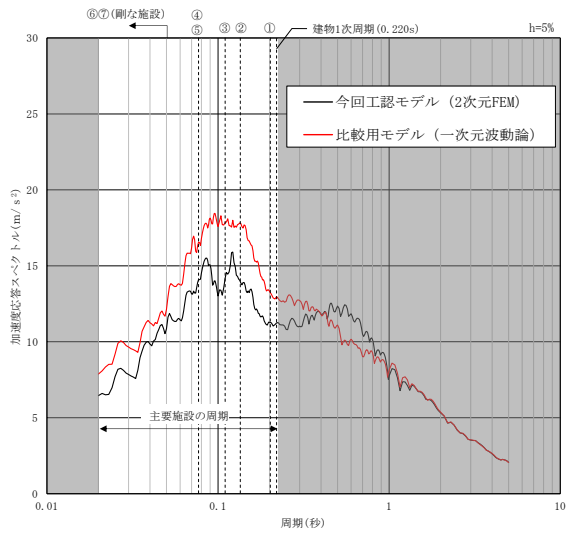
3.1 水平方向

水平方向は、2次元FEMモデル及び一次元波動論モデルで多少の差異が認められ、また、地盤の傾斜をモデル化しているNS方向においてその差が大きくなっているが、2次元FEMモデルでは地盤の速度層の傾斜及び建物周辺の地形の影響等をより詳細に評価できると考えられることから、原子炉建物の既工認と同様に、水平方向の解析において2次元FEMモデルによって求められる入力地震動を用いることは適切である。

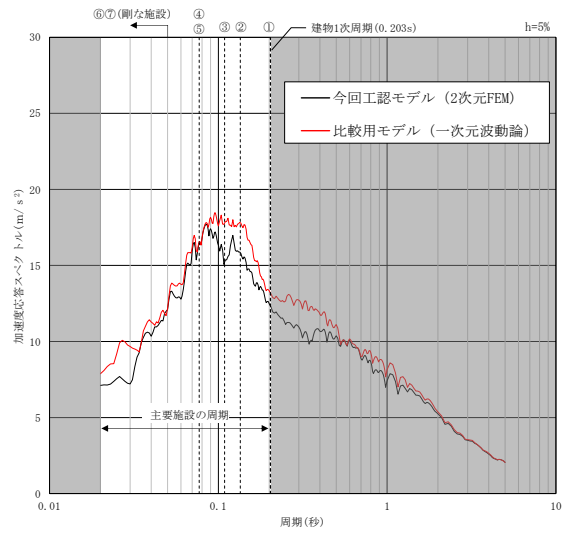
2次元FEMモデルによる入力地震動の方が小さくなる要因については、2次元FEMモデルは地盤の速度層の傾斜及び山地形を詳細にモデル化していることに加え、建物が地盤に埋込まれている効果を詳細に評価しているためであると考えられる。

3.2 鉛直方向

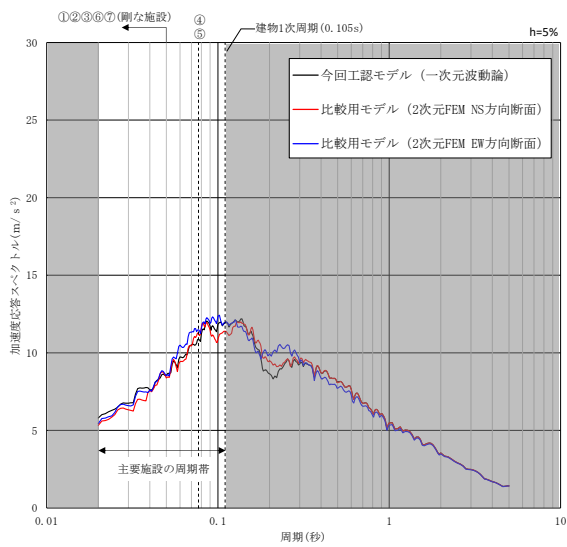
鉛直方向は、建物直下地盤による影響が大きく、主要な施設の固有周期帯において、一次元波動論モデルと2次元FEMモデルの加速度応答スペクトルは概ね一致している。また、それぞれの建物の1次固有周期における加速度応答スペクトルの値に大きな差はない。よって、モデルの違いによる入力地震動への影響は軽微であり、鉛直方向の解析において一次元波動論モデルによって求められる入力地震動を用いることは適切である。



(a) NS方向



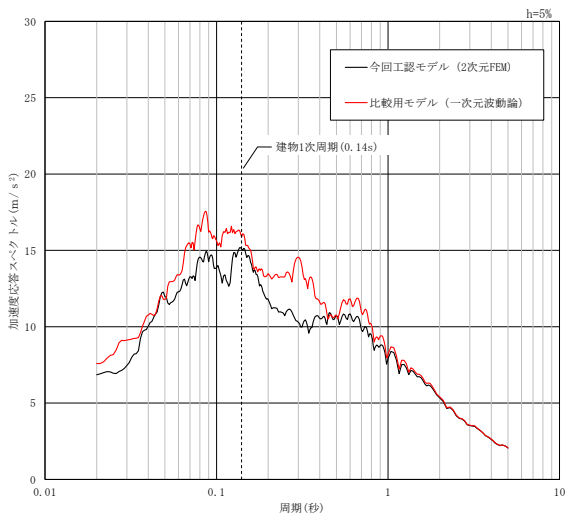
(b) EW方向



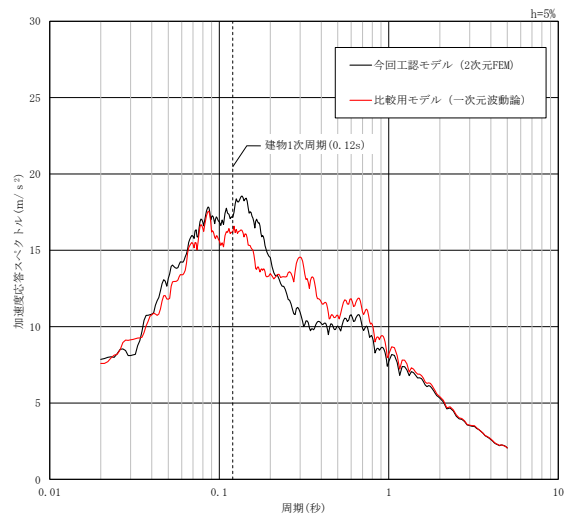
(c) 鉛直方向

- | |
|--|
| <p>主要施設の名称</p> <p>①制御棒の挿入性 (燃料集合体)</p> <p>②炉心支持構造物 (炉心シールド)</p> <p>③原子炉圧力容器</p> <p>④残留熱除去系配管</p> <p>⑤主蒸気系配管</p> <p>⑥残留熱除去ポンプ</p> <p>⑦原子炉格納容器</p> |
|--|

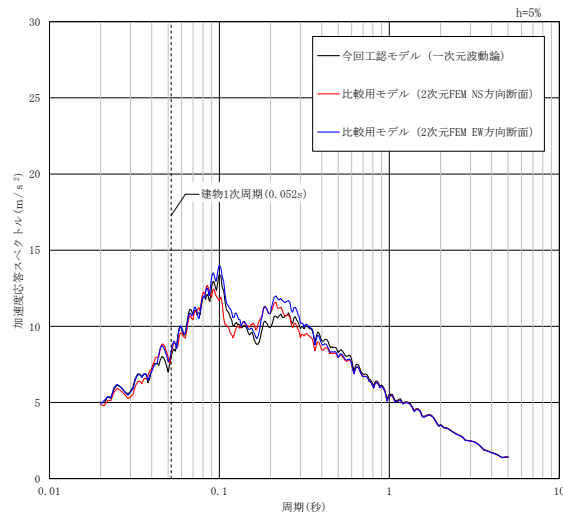
図3-1(1) 一次元波動論及び2次元FEMによる入力地震動の比較
(原子炉建物, 基準地震動S_s-D)



(a) NS方向



(b) EW方向



(c) 鉛直方向

図 3-1(2) 一次元波動論及び 2 次元 F E M による入力地震動の比較
(制御室建物, 基準地震動 S s - D)

既工認モデルと今回工認モデルによる入力地震動の比較

1. はじめに

原子炉建物の入力地震動を評価に用いる地盤 2 次元 F E Mモデルは、建設時以降の敷地内の追加地質調査結果の反映等を行い、より詳細にモデル化している。

本資料は、既工認のモデルにより評価した入力地震動と今回工認のモデルにより評価した入力地震動の加速度応答スペクトルを比較することで、既工認からの変更点が入力地震動に及ぼす影響を示すものである。

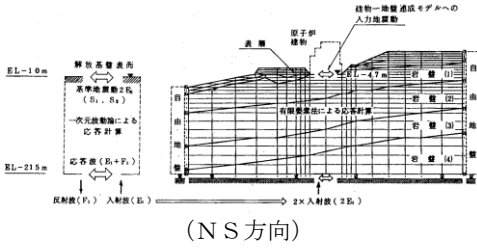
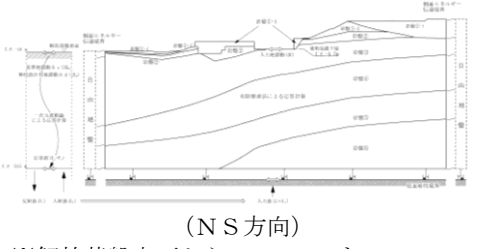
2. 検討条件

原子炉建物の入力地震動の評価に用いる 2 次元 F E Mモデルについて、既工認と今回工認の比較を表 2-1～表 2-3 に示す。

本検討は、表 2-1～表 2-3 に示す既工認モデルと今回工認モデルを用いて、基準地震動 $S_s - D$ による入力地震動を比較する。なお、既工認モデルの表層地盤の物性値及び減衰定数については既工認の値を用い、今回工認モデルの表層地盤の物性値及び減衰定数については、 $G/G_0=0.2$ 及び $h=8\%$ と設定した。

解析プログラムは、既工認モデル及び今回工認モデルともに「SuperFLUSH」を用いる。

表 2-1 原子炉建物の地震応答解析に用いる入力地震動の評価手法の比較（主な解析条件）

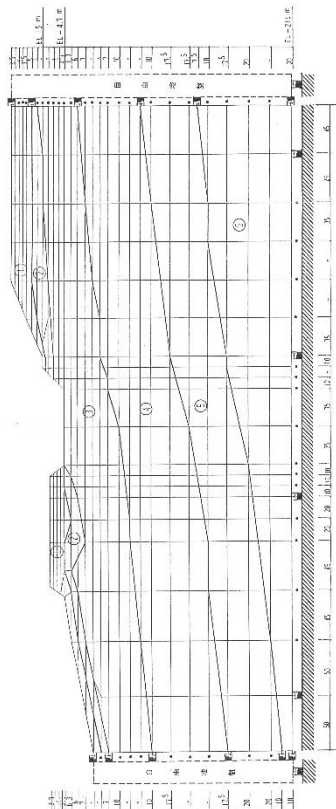
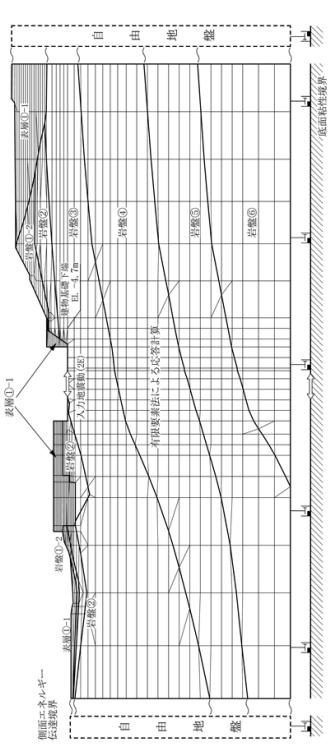
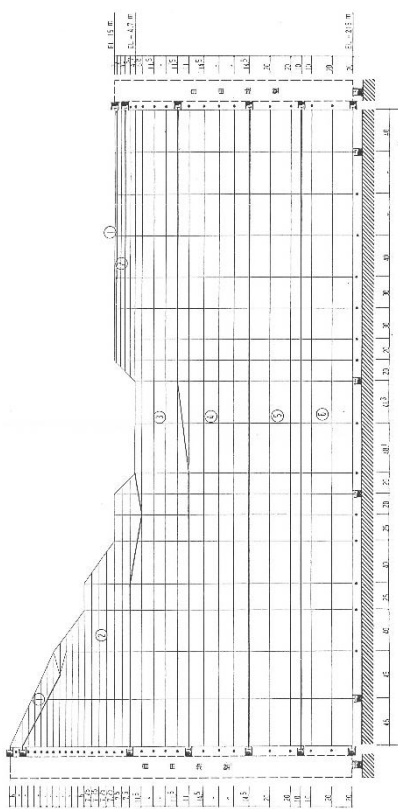
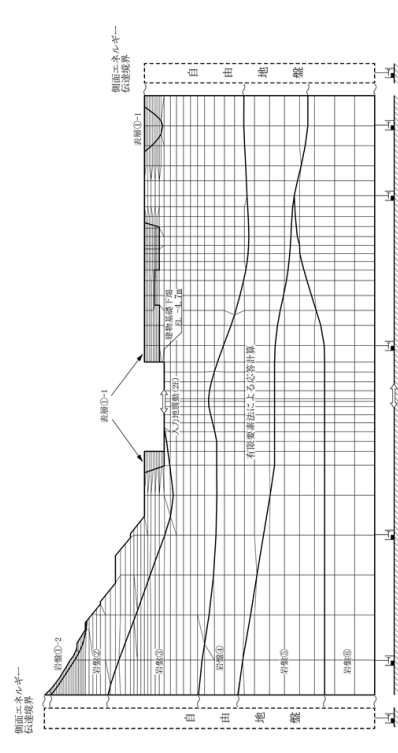
	既工認	今回工認
入力地震動の評価（概要）	 <p>(N S 方向)</p>	 <p>(N S 方向) ※解放基盤表面から EL -215m までの 1 次元モデルは既工認と同じ。</p>
評価手法		
解析方法	周波数応答解析	同左
入力地震動の算定方法 〔計算機コード〕	<ul style="list-style-type: none"> 引下げ：一次元波動論 [SHAKE] 引上げ：2 次元 F E M 解析 [VESL-DYN] <p>※本検討では [SuperFLUSH] を用いる。</p>	<ul style="list-style-type: none"> 引下げ：一次元波動論 [SHAKE] 引上げ：2 次元 F E M 解析 [SuperFLUSH]
入力地震動の解析モデル		
モデル化範囲	<ul style="list-style-type: none"> 引下げ：解放基盤表面 (EL -10m) から EL -215m までをモデル化 引上げ：幅は約 600m の範囲とし、高さは EL -215m 以浅をモデル化 	<ul style="list-style-type: none"> 引下げ：同左 引上げ：同左
速度層区分	建設時の地質調査結果に基づき設定	建設時の地質調査結果に加えて、建設時以降の敷地内の追加地質調査結果（ボーリング、P S 検層）に基づき設定
地盤物性値*1	<ul style="list-style-type: none"> 岩盤については、建設時の地質調査結果に基づき設定 表層地盤については、文献⁽¹⁾に基づく標準的な砂質土のひずみ依存性を考慮した等価物性値を設定 	<ul style="list-style-type: none"> 同左 表層地盤については、地震動レベル及び試験結果に基づく埋戻土のひずみ依存性を考慮した等価物性値を設定
境界条件*2 (2 次元 F E M)	<ul style="list-style-type: none"> 底面：粘性境界 側面：粘性境界 	<ul style="list-style-type: none"> 底面：粘性境界 側面：エネルギー伝達境界* <p>※側方地盤への波動の逸散をより詳細に評価する境界条件に変更</p>
入力地震動出力位置	EL -4.7m	同左
備考	建設工認 第 1 回 添付書類 IV-2-4-1 「原子炉建物の地震応答計算書」による	今回工認 添付書類 VI-2-2-2 「原子炉建物の地震応答計算書」による
地震応答解析モデル		
相互作用モデル	水平：地盤ばねモデル (SR モデル) 鉛直：—	水平：地盤ばねモデル (SR モデル) 鉛直：地盤ばねモデル (底面鉛直ばねモデル)
建物設置レベル	EL -4.7m	同左

____ 箇所：主な相違点

注記*1：今回工認の入力地震動評価で用いる地盤物性値を表 2-3 に示す。

*2：2 次元 F E M 解析モデル側面の境界条件を参考資料-1 に示す。

表 2-2 原子炉建物の地震応答解析に用いる入力地震動の解析モデルの比較 (2次元FEM解析モデル)

	既工認	今回工認
NS		
EW		

注：今回工認モデルでは建物基礎底面レベルの振動を同一とするため、建物基礎底面レベルの平面を保持する拘束条件を設けている。
また、建物床レベルの水平変位を同一とするため、切欠き地盤側面には水平変位を保持する拘束条件を設けている。

表 2-3 入力地震動評価で用いる地盤物性値

(a) 既工認

層番号*1	S波速度 V _s (m/s)	P波速度 V _p (m/s)	単位体積 重量 γ (kN/m ³)	ポアソン比 ν	せん断 弾性係数 G (×10 ⁵ kN/m ²)	減衰定数 h (%)
表層①	174*2	558*2	20.6	0.446	0.637*2	5
岩盤②	900	2100	23.0	0.388	19.0	5
岩盤③	1600	3600	24.5	0.377	64.0	3
岩盤④	1950	4000	24.5	0.344	95.1	3
岩盤⑤	2000	4050	26.0	0.339	105.9	3
岩盤⑥	2350	4950	27.9	0.355	157.9	3

(b) 今回工認

層番号*1	S波速度 V _s (m/s)	P波速度 V _p (m/s)	単位体積 重量 γ (kN/m ³)	ポアソン比 ν	せん断 弾性係数 G (×10 ⁵ kN/m ²)	減衰定数 h (%)
表層①-1	127*2	422*2	20.7	0.45	0.341*2	8*2
岩盤①-2	250	800	20.6	0.446	1.31	3
岩盤②	900	2100	23.0	0.388	19.0	3
岩盤③	1600	3600	24.5	0.377	64.0	3
岩盤④	1950	4000	24.5	0.344	95.1	3
岩盤⑤	2000	4050	26.0	0.339	105.9	3
岩盤⑥	2350	4950	27.9	0.355	157.9	3

注記*1：層番号は解析モデル図(表 2-2)を参照

*2：埋戻土のひずみ依存性を考慮した等価物性値

3. 検討結果

既工認モデルと今回工認モデルによる入力地震動の加速度応答スペクトルの比較を図 3-1 に示す。

既工認モデルと今回工認モデルによる入力地震動を比較すると、加速度応答スペクトルの形状傾向は概ね同等であるが、一部の周期帯において差が認められる。これは、表層地盤の物性値の違いに加え、地盤モデル側面の境界条件や速度層区分の相違が複合的に影響していることが要因であると考えられる。

なお、今回工認モデルは、建設時の地質調査結果に加えて、建設時以降の追加地質調査結果に基づき設定していることから、より精緻なモデルである。

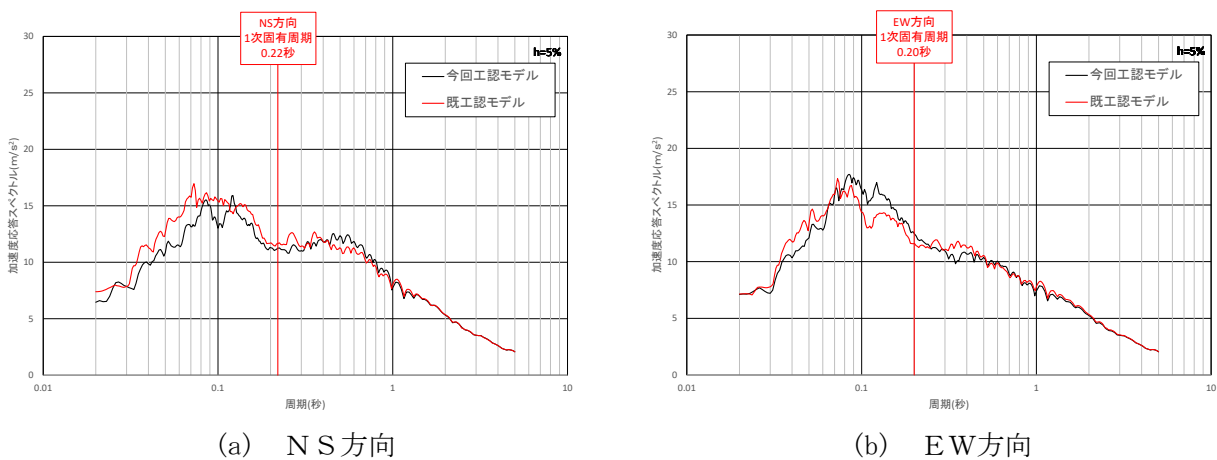


図 3-1 既工認モデルと今回工認モデルによる入力地震動の加速度応答スペクトルの比較
(原子炉建物、基準地震動 S s - D)

4. 参考文献

- (1) 大崎他，地盤振動解析のための土の動力学モデルの提案と解析例，第 5 回 日本地震工学シンポジウム，1978

D級岩盤の速度層区分の設定について

1. はじめに

本資料は、原子炉建物のNS方向の入力地震動評価に用いている2次元FEMモデルにおいて、岩盤①-2に含まれるD級岩盤をC_L級岩盤と同じ速度層として設定する根拠を示すものである。

2. PS検層結果

2号機基礎地盤（NS方向）の鉛直断面図（岩級区分図及び速度層区分図）を図2-1に、D級岩盤を含む地盤のPS検層結果を図2-2に示す。

図2-2に示すとおり、D級岩盤を含む区間の速度値は、 $V_P=0.7\text{km/s}$ 、 $V_S=0.3\text{km/s}$ を示しており、岩盤①-2の速度値（ $V_P=0.8\text{km/s}$ 、 $V_S=0.25\text{km/s}$ ）相当の速度値であることから、D級岩盤を含む区間を岩盤①-2に区分している。

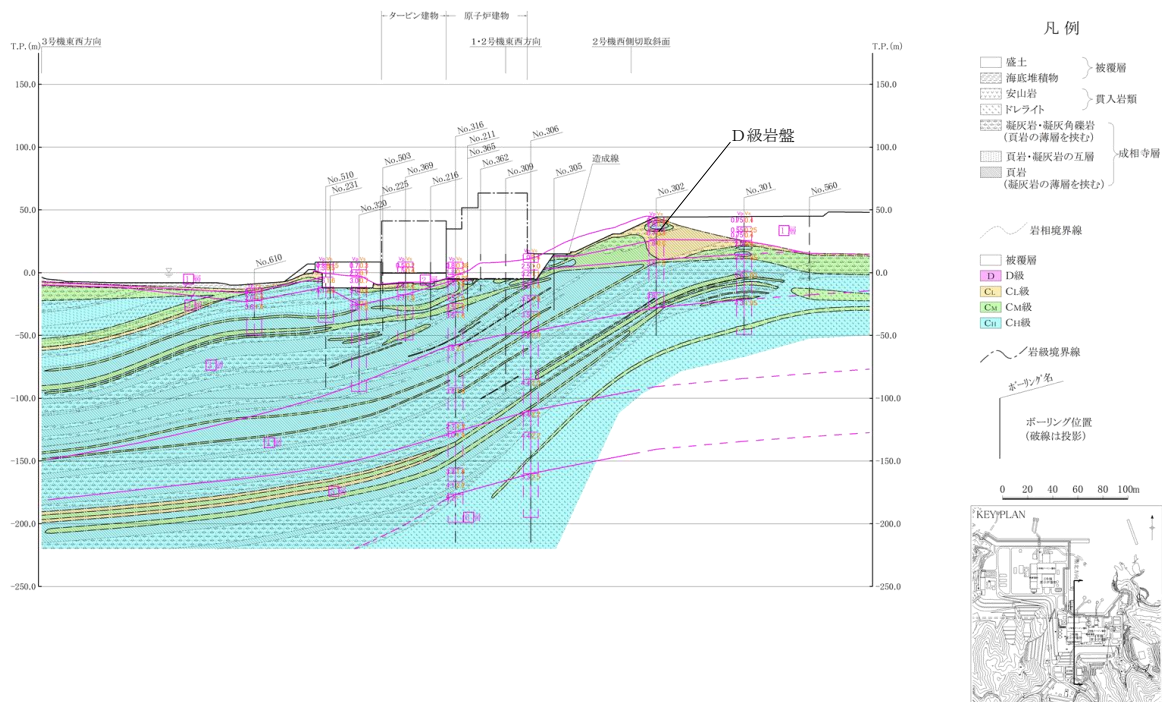


図2-1 2号機基礎地盤（NS方向）の鉛直断面図（岩級区分図及び速度層区分図）

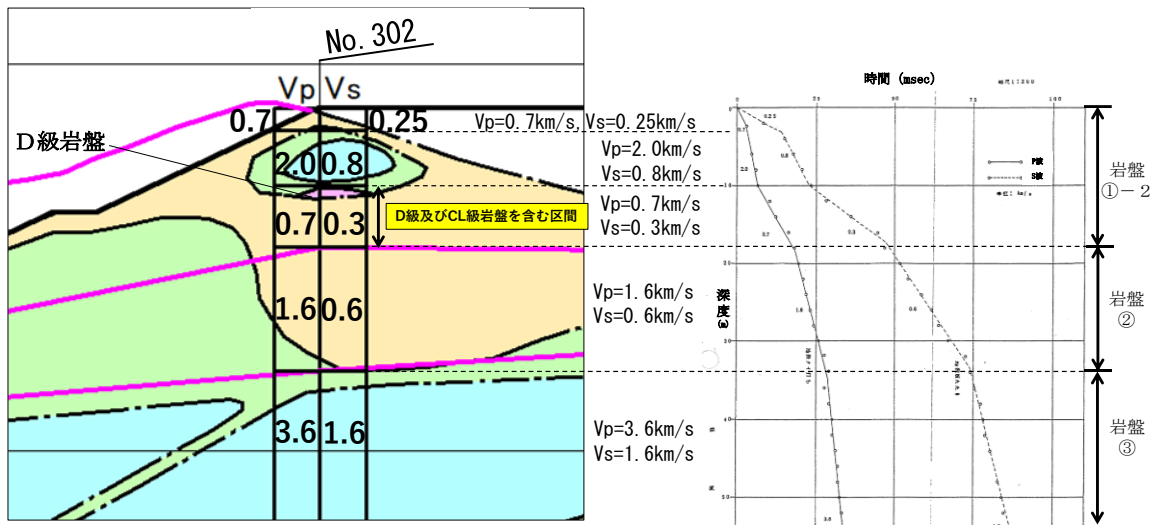


図 2-2 P S 検層結果

2次元FEM解析モデル側面の境界条件

1. 2次元FEM解析モデル側面の境界条件

2次元FEM解析モデルの側面の境界条件については、既工認では粘性境界を用いていたが、今回工認ではエネルギー伝達境界に変更する。

側面の境界条件はFEM部分から側方地盤への波動の逸散を考慮したものであり、粘性境界は隣接する側方地盤との変位の関係から、エネルギー伝達境界はFEM部分と側方地盤全体の変位分布の関係からこの逸散を考慮している。

粘性境界とエネルギー伝達境界の比較を表1-1に示す。

粘性境界はダッシュポットを用いた速度比例型の減衰力により、側方地盤への波動の逸散を考慮する。解の精度が良く、計算も容易である。

一方、エネルギー伝達境界はFEM部分の境界節点と側方地盤との変位分布の差から、側方地盤への波動の逸散を考慮する。解の精度がとても良く、より現実に即した解析結果を得ることができる。なお、先行プラントの工認において適用実績がある。

表1-1 側面の境界条件⁽¹⁾

境界処理法	概念図	説明	定式化の難易度	計算上の特徴	解の精度	その他
粘性境界		速度比例型の減衰力により波動逸散波を吸収	容易	計算は容易 [K*]は対角またはバンドマトリクス	○	手間と精度のバランスが良い 周波数応答/時刻歴解析の双方に適用可能 1~3次元で適用可能
エネルギー伝達境界		一般化表面波の固有モードを合成し、側方の水平成層地盤と結合	難解	計算は煩雑、かつ固有値解析に計算時間を要する 側方の[K*]はフルマトリクス	◎	2次元および軸対称の周波数応答のみ適用可能

(参考文献(1)より引用)

2. 参考文献

- (1) 日本建築学会：入門・建物と地盤との動的相互作用，1996