

女川原子力発電所 2 号炉

設計基準対象施設について

(第 4 条 地震による損傷の防止)

平成 3 0 年 2 月
東北電力株式会社

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
- 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 弾性設計用地震力 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及び解析モデルについて
- 別添－ 8 入力地震動について

(別 紙)

- 別紙－ 1 東北地方太平洋沖地震等による影響を踏まえた建屋耐震設計方法への反映について
- 別紙－ 2 応力解析モデルへの弾塑性解析の適用
- 別紙－ 3 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－ 4 使用済燃料貯蔵ラックの減衰定数について
- 別紙－ 5 原子炉建屋屋根トラスの解析モデルへの弾塑性解析の適用
- 別紙－ 6 機器・配管系設備に関するその他手法の相違点について
- 別紙－ 7 機器・配管系設備の既工認からの構造変更について
- 別紙－ 8 下位クラス施設の波及的影響の検討について
- 別紙－ 9 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－ 10 後施工せん断補強筋による耐震補強
- 別紙－ 11 地盤の液状化
- 別紙－ 12 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－ 13 埋め込まれた建屋の周辺地盤による影響について
- 別紙－ 14 原子炉本体の基礎の復元力特性

下線部：今回提出資料

埋め込まれた建屋の周辺地盤による
影響について

目 次

1. 検討にあたっての基本的考え方
 2. 既工認における周辺地盤による影響の反映状況
 - 2.1 JEAG4601による周辺地盤の扱い
 - 2.2 既工認における周辺地盤の扱い
 3. 地震観測記録を用いた表層地盤の影響検討
 - 3.1 入力地震動評価に関する表層地盤の影響の検討
 - 3.2 自由地盤における表層地盤の非線形化の傾向について
 - 3.3 埋込み効果（側面地盤ばね）に関する検討
 4. 今回工認における周辺地盤による影響の解析モデルへの反映（原子炉建屋）
 - 4.1 基準地震動 S_s の地震応答解析に用いる地盤モデルの設定概要
 - 4.2 観測記録を用いた地盤モデルの検証
 - 4.3 設定した地盤モデルの概要
 5. 各要因が基準地震動 S_s による地震応答解析結果へ与える影響（原子炉建屋）
 6. まとめ
-
- 添付 1 2号炉原子炉建屋の炉心ボーリングのPS 検層および密度検層結果
 - 添付 2 3.11地震のはざとり波を用いたシミュレーション解析による
表層地盤の影響確認
 - 添付 3 自由地盤のはざとり解析用地下構造モデルによる傾向について
 - 添付 4 表層地盤による埋め込み効果の影響
 - 添付 5 表層地盤の層境界の設定について
 - 添付 6 表層地盤の層境界に関する検討
 - 添付 7 表層地盤下部の地盤物性の検討
 - 添付 8 線形地盤モデルを用いた表層地盤の非線形化による影響確認
 - 添付 9 表層地盤上部（O. P. 14. 8m～O. P. 0m）の地盤物性値の設定
 - 添付 10 観測記録を用いた地盤モデルの検証
 - 添付 11 表層地盤の影響を考慮した入力地震動が建屋応答へ与える影響
 - 添付 12 建屋側面ばねの有無が建屋応答に与える影響
-
- 参考 1 逐次非線形モデルと等価線形モデルによる比較
- 付録 1 女川 2号炉原子炉建屋 地震計配置図

1. 検討にあたっての基本的考え方

女川2号炉の各建屋の既工認においては、深く埋め込まれている建屋であっても表層地盤の影響、すなわち入力地震動に与える影響と埋込み効果（側面地盤ばね）は考慮しない地震応答解析モデルを採用していた。これは、硬質岩盤では側面地盤ばねの評価に課題があること、また、2号炉原子炉建屋について、基準地震動を直接入力する手法による解析結果は JEAG4601 に基づき表層地盤の影響を考慮した解析結果に比べ概ね保守的であったためである。

建設に当たっては、埋込み効果を考慮しないことから、建屋周囲の埋め戻しは掘削土等を使用しており、特に拘束効果は期待出来ない状況となっている。そのような中、女川では2011年東北地方太平洋沖地震（以下、「3.11地震」という）や2011年4月7日宮城県沖地震（以下、「4.7地震」という）等の観測記録が複数の建屋で得られており、記録を用いた検討から、以下の傾向を確認している。

- ① 2号炉原子炉建屋等のシミュレーション解析では、表層地盤の影響を考慮した入力地震動を用いた方が、解放基盤相当の観測記録（自由地盤のはぎとり波）を直接入力するケースに比べより観測記録との整合性が良く、表層地盤が入力地震動に与える影響が確認された。
- ② 一方、埋込み効果については、2号原子炉建屋のような重量構造物のシミュレーション解析では埋込み効果を考慮しないモデルが観測記録との整合性が良いことが確認された。また、比較的小規模で建屋全体が埋め込まれている3号炉海水熱交換器建屋について、3.11地震の観測記録を用い、表層地盤が建屋応答に及ぼす影響や観測記録との整合性について確認した結果、側面地盤ばね（Novak バネ）を考慮した解析結果は観測記録よりも過大な結果を与えること、一方で埋込み効果による建屋の応答低減傾向が確認された。

以上の検討を踏まえ、原子炉建屋の地震応答解析モデルについて、今回工認では、JEAG4601による手法に基づき、解放基盤表面で定義される基準地震動 S_s および弾性設計用地震動 S_d を基に地盤条件を適切に考慮したうえで、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ことに見直した。一方、埋込み効果については既工認と同じく、その効果を見捨てることとした。

なお、地盤モデルの物性値は、地盤調査結果、建設時の掘削状況および地震観測記録の分析により設定し、建屋シミュレーション解析で妥当性を確認している。第1-1表に埋め込まれた建屋の周辺地盤の扱いに関する既工認からの変更点を示す。

ここでは、既工認から変更した表層地盤の影響を考慮した入力地震動の算定および表層地盤モデルの設定の妥当性、また、埋込み効果の影響について検討する。

第 1-1 表 埋め込まれた建屋の周辺地盤の扱いに関する既工認からの変更点

	既工認	今回工認	変更の適用性	他サイト 既工認実績	変更による効果
側面地盤ばね の扱い	非考慮	非考慮	変更無し	両者組み合わせ ケース有 (ただし、入力地震動の 算定目的はサイト固有事 象を踏まえたもの)	大 (応答低減効果)
入力地震動算定時 の表層地盤 の影響考慮	非考慮 (2E入力)	考慮 (E+F入力)	地震観測記録の 傾向を反映		
	既工認	今回工認	変更の適用性	他サイト 既工認実績	変更による効果
入力地震動の 算定方法	—	上部表層地盤の 非線 形性を考慮した一次元 地盤応答解析モデル (逐次非線形)	地震観測記録で 妥当性を検証	無 (他サイトは二次元FEM モデル(等価線形解析))	小

2. 既工認における周辺地盤による影響の反映状況

2.1 JEAG4601による周辺地盤の扱い

(1) 表層地盤の影響を考慮する場合の入力地震動の評価

JEAG4601-1987では、表層地盤の影響が無視できる場合には基準地震動がそのまま入力地震動として用いられるが、表層地盤の影響を考慮する場合には、基礎マット底面における地震動を算定して用いる、としている。

【JEAG4601-1987の記載抜粋（下線加筆）】

第5章 建物・構築物の耐震設計

5.2 地震応答解析 / 5.2.4 線形地震応答解析

(2) 設計用入力地震動

(略)・・・。対象とする建屋が解放基盤表面に設置され、表層地盤の影響が無視できる場合には基準地震動がそのまま入力地震動として用いられるが、表層地盤の影響を考慮する場合や解放基盤表面が建屋の基礎マット底面より深い場合には、上記の基準地震動より基礎マット底面及び解析モデル底面における地震動を算定して用いる。・・・ (略)

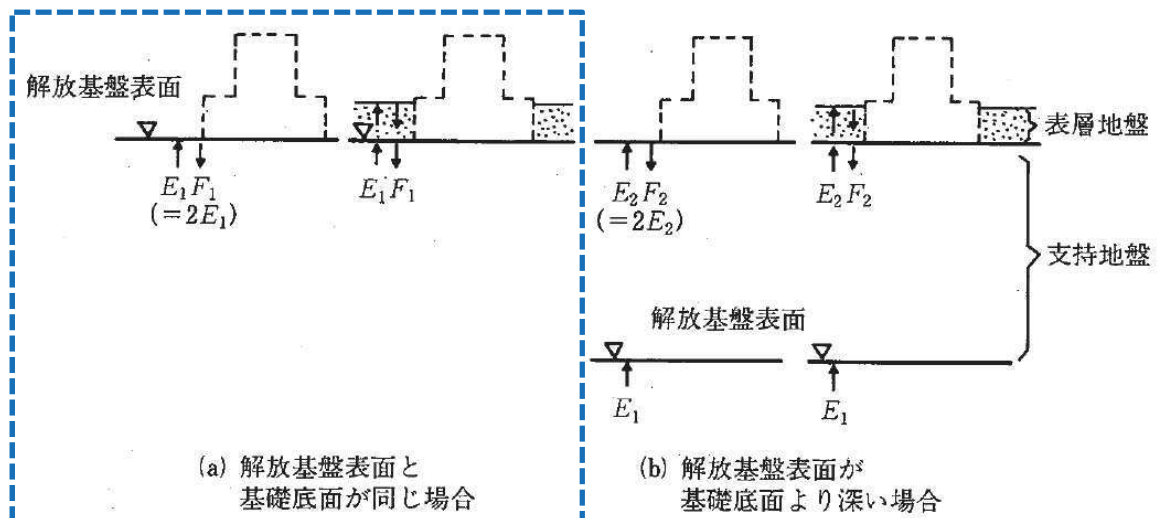


図5.2.4-2 SRモデルの入力地震動の算定

(2) 支持地盤が硬質岩盤の場合の建屋埋込み効果の評価にあたっての課題

JEAG4601-1991（追補版）では、建屋埋込み効果の評価にあたっては、埋戻し土等が材料非線形になると想定される場合には、その歪みに対応するせん断弾性係数等の採用を求めている。

特に、支持地盤と埋戻し土のせん断波速度の違いが大きく、表層地盤の卓越振動数が顕著に励起される場合は、側面地盤ばねの評価に留意する必要があるとされている。

【JEAG4601-1991（追補版）の記載抜粋（下線加筆）】

3. 建屋埋込み効果の評価法 / 3.2.5 留意事項

(1) 地震応答解析に用いる土質定数は、土質試験の結果に基づいた値を採用する。埋戻し土等が材料非線形になると想定される場合には、その歪みに対応するせん断弾性係数Gと減衰定数hを土質定数として採用することができる。

3.3 解説 / 3.3.1 スウェイ・ロッキングモデル

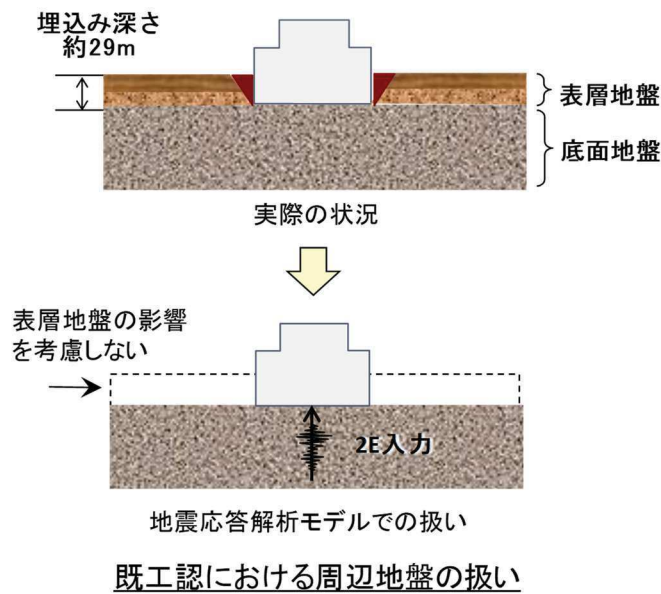
(5) 本モデルの適用上の留意点

ここで述べたスウェイ・ロッキングモデルは、実用性を考慮して各々独立な建屋底面地盤ばねと地下部外壁地盤ばねによってモデル化した簡便な解析モデルである。地下部外壁地盤ばねの評価には、平面的に切り出した二次元弾性地盤の地盤ばねを近似的に採用しているので、地下部外壁地盤ばねには地盤の深さ方向の振動特性が考慮されていない。地下部外壁に接する地盤（表層地盤）のS波速度に比べ支持岩盤のそれが著しく大きな地盤系の場合には、表層地盤の卓越振動数が顕著に励起されるが、この卓越振動数の影響は地盤ばねに反映されない。このようなことから、この種の地盤系に埋め込まれた原子炉建屋の地震応答解析をここで述べたスウェイ・ロッキングモデルで行うと他の解析法との差異が生ずることもあり、留意する必要がある。

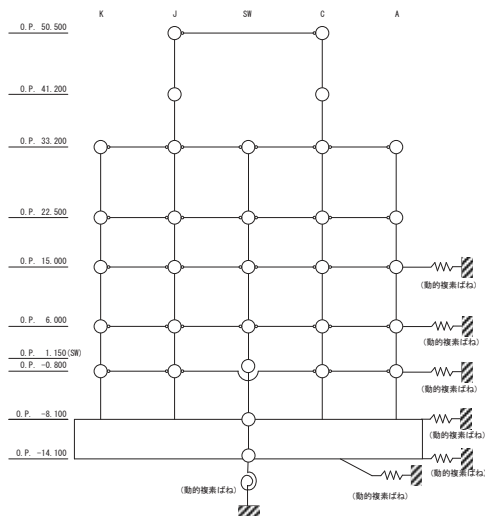
2.2 既工認における周辺地盤の扱い

女川2号炉の各建屋の既工認においては、深く埋め込まれている建屋であっても表層地盤の影響、すなわち入力地震動に与える影響と埋込み効果（側面地盤ばね）は考慮しない地震応答解析モデルを採用していた。これは、硬質岩盤では側面地盤ばねの評価に課題があること、また、2号炉原子炉建屋について、基準地震動を直接入力する手法による解析結果はJEAG4601に基づき表層地盤の影響を考慮した解析結果に比べ概ね保守的であったためである。第2.2-1図に既工認における周辺地盤の扱いを、第2.2-2図に表層地盤の影響を考慮した地震応答解析モデルを、第2.2-3図に解析結果の比較（最大応答加速度）を示す。

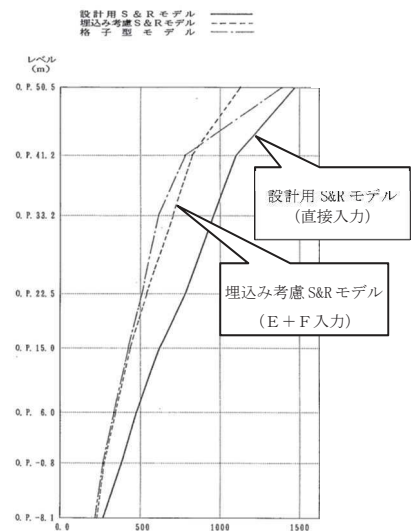
なお、実際の施工では側面地盤には掘削土を埋め戻すなどして、拘束効果の少ない施工を実施した。



第2.2-1図 既工認における周辺地盤の扱い



第2.2-2図 表層地盤の影響を考慮した地震応答解析モデル



第2.2-3図 解析結果の比較
(最大応答加速度)

3. 地震観測記録を用いた表層地盤の影響検討

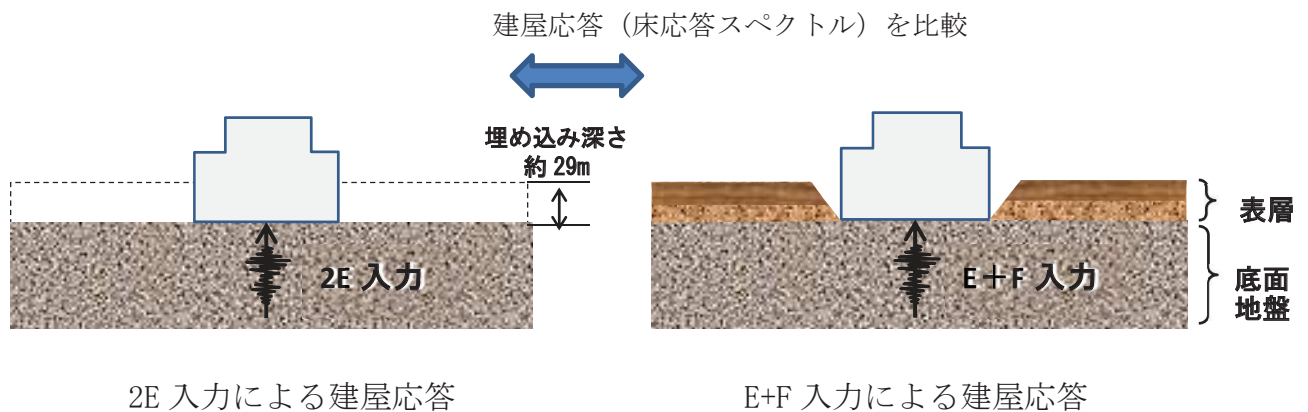
3.1 入力地震動評価に関する表層地盤の影響の検討（詳細は添付2参照）

（1）検討概要

既工認の入力地震動は、表層地盤の影響を考慮せず、保守的に基準地震動を直接入力する手法を採用していた。本検討では、3.11 地震に対し、

- ・既工認と同じく解放基盤相当面における地震観測記録（はぎとり波）を建屋に直接入力する解析
- ・今回工認で採用を予定している解析，すなわちはぎとり波から建屋周辺の表層地盤の影響を考慮して入力地震動を算定し，これを入力する解析

を行い，解析結果と観測記録の比較を行うことで，表層地盤が入力地震動に与える影響の有無について確認した。入力地震動評価に関する表層地盤の影響検討の概念図を第 3.1-1 図に示す。



第 3.1-1 図 入力地震動評価に関する表層地盤の影響検討の概念図

(2) 検討方法

3.11地震のはざとり波は自由地盤で観測された岩盤上部の地中記録から表層地盤からの反射の影響を解析的に除去した地震動を用いた。はざとり波の算定に当たっては、自由地盤の岩盤中観測点（3点）に加え、表層地盤における観測点それぞれ記録の伝達関数と整合する地盤モデルを策定した上で、はざとり波を算定した（詳細は添付3参照）。

建屋の入力側の地盤モデルは、初期モデルは地盤調査結果に基づき設定した（地盤調査結果については添付1参照）。

入力地震動評価に関する表層地盤の影響検討における解析条件を第3.1-1表に、地盤調査結果に基づき設定した初期地盤モデルの地盤物性値を第3.1-2表に示す。

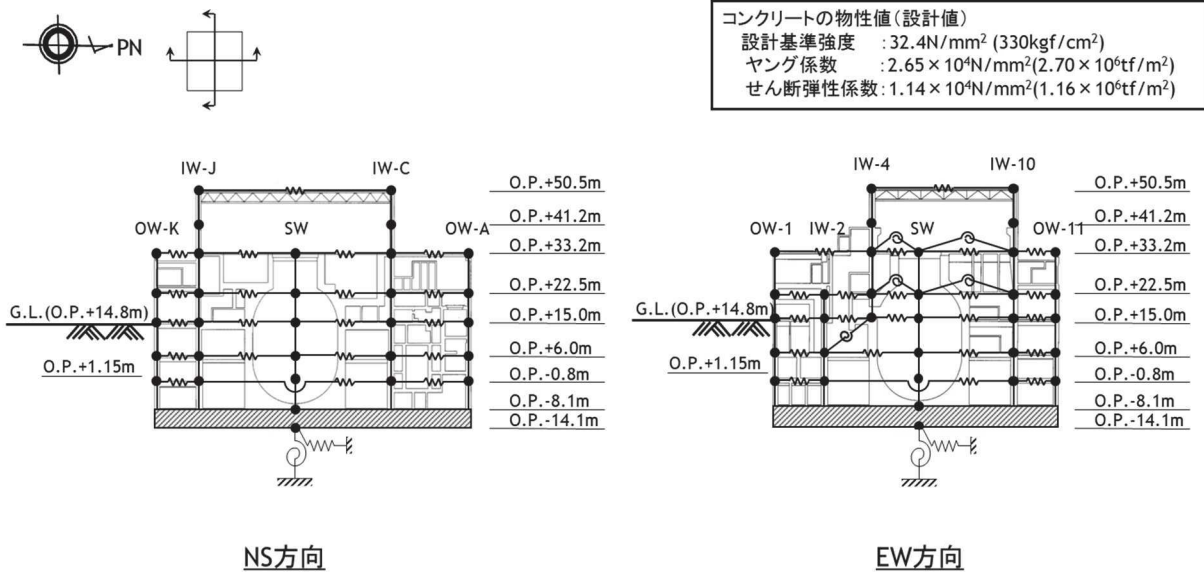
また、地震応答解析モデルは、基礎版上で得られた観測記録を用いたシミュレーション解析で観測記録との整合を確認したモデルを採用しており、3.11地震による建屋の初期剛性低下や建屋減衰7%を用いている。（第3.1-2図参照）。

第3.1-1表 入力地震動評価に関する表層地盤の影響検討における解析条件

ケース	直接入力(2E入力)したケース	E+F入力としたケース
建屋	2号炉原子炉建屋	
地震動	3.11地震はざとり波	
入力地震動	直接入力(2E入力)	建屋底面位置の地震動(E+F)を算定し入力
建屋モデル	3.11地震シミュレーションモデル (初期剛性低下考慮, 建屋減衰7%, 側面ばね無し)	
地盤モデル	—	地盤調査結果に基づき設定した初期地盤モデル (表層地盤:Vs=740m/s一層)

第 3.1-2 表 地盤調査結果に基づき設定した初期地盤モデルの地盤物性値

	地層レベル O.P. (m)	単位体積重量 γ (kN/m ³)	せん断波速度 V_s (m/sec)	減衰定数 h (%)
表層地盤	14.80	23.3	740	3
底面地盤	-14.10	23.8	1300	3
	-25.00	24.6	2150	3
	-80.00	25.0	2440	3
	-200.0	25.0	2440	3



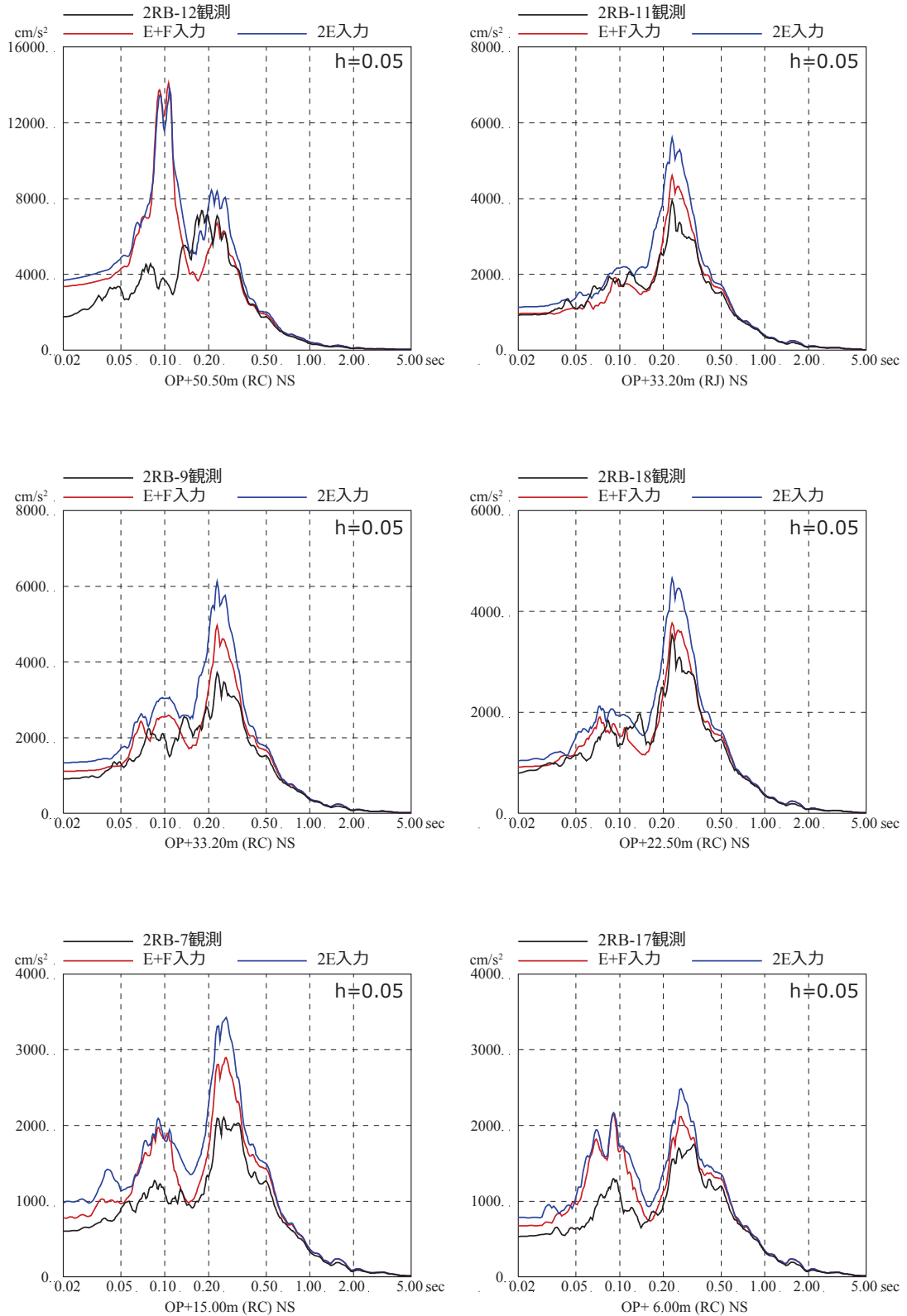
号機 建屋	地震	方向	コンクリート壁剛性の設計値に対する補正係数 (観測記録と整合する等価な剛性)		減衰
			オペフロ階(3階)・クレーン階	地下3階~2階	
2号機 原子炉 建屋	3.11	NS	0.3	0.75	0.07
		EW	0.5	0.80	0.07
	4.7	NS	0.3	0.75	0.07
		EW	0.5	0.80	0.07

第 3.1-2 図 地震応答解析モデル (基礎版上で得られた観測記録を用いたシミュレーション解析で観測記録との整合を確認したモデル)

(3) 検討結果

3.11 地震のはぎとり波を用いた 2E 入力と E+F 入力によるシミュレーション解析結果の比較を第 3.1-3 図に示す。検討の結果、各階の床応答スペクトルは、はぎとり波を直接入力（2E 入力）した場合より表層地盤の影響を考慮して算定した地震動を入力（E+F 入力）した方が、より観測記録の振幅に近く、床応答スペクトルの形状も傾向を捉えている。

この結果から、建屋に入力する地震動については表層地盤の影響が現れていると考えられる。



第 3.1-3 図 3.11 地震のはぎとり波を用いた 2E 入力と E+F 入力による
シミュレーション解析結果の比較
(2号炉原子炉建屋, NS 方向) ※地震計位置は, 付録 1 参照

3.2 自由地盤における表層地盤の非線形化の傾向について（詳細は添付3参照）

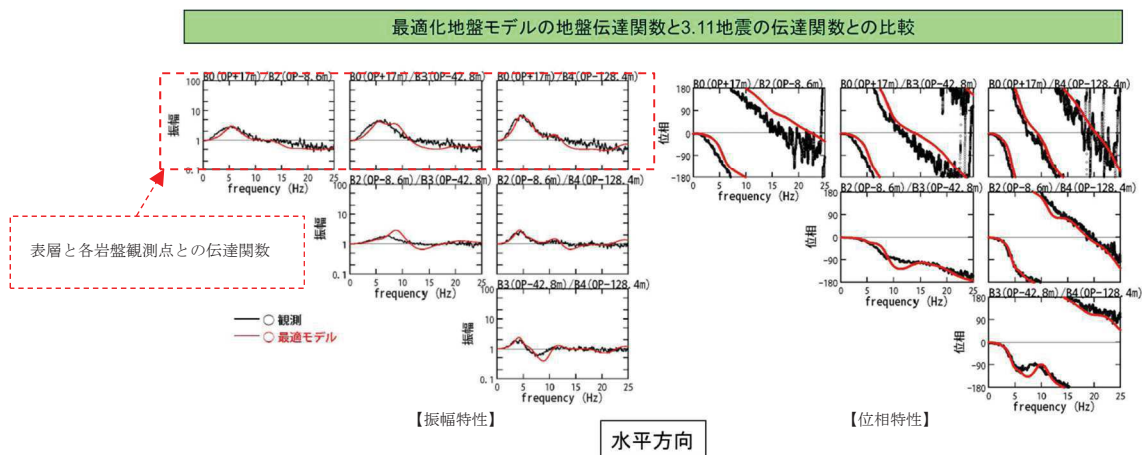
女川原子力発電所の自由地盤観測点では岩盤中3か所、表層地盤1か所の計4か所に地震計を設置しており、はぎとり解析用地下構造モデルは、過去の中小地震の観測記録を用いてこれら4か所の記録の伝達関数から同定している。

3.11地震では、岩盤上部と表層地盤の記録の伝達関数が長周期化しており、改めてはぎとり地盤モデルの再設定を行ったが、モデルは中小地震の記録を用いて設定した解析用地下構造モデルをベースに、最表層の地盤物性値のみを最適化することで表層も含めた観測記録の再現性が図られた（はぎとり地盤の最適化地盤モデルと3.11地震の伝達関数の比較を第3.2-1図に示す）。

このことから、基盤と表層地盤の波動伝搬特性については表層地盤の非線形化を適切に評価することで評価可能と考えられる。

3.2 水平動のはぎとり解析用地下構造モデル(最適化地盤モデル) (5)

最適化地盤モデルの理論伝達関数と2011年3月11日東北地方太平洋沖地震の観測記録の伝達関数
地盤モデルの最適化の検討



最適化地盤モデルの地盤伝達関数と3.11地震の地盤伝達関数との比較

※原子力安全・保安院 地震・津波6-4-2より抜粋



※「第128回原子力発電所の新規規制基準適合性に係る審査会合

資料2-2 女川原子力発電所 敷地の地質・地質構造及び地盤の振動特性について（補足説明資料）」より抜粋・加筆

第3.2-1図 はぎとり地盤の最適化地盤モデルと3.11地震の伝達関数の比較

3.3 埋込み効果（側面地盤ばね）に関する検討（詳細は添付4参照）

（1）検討概要

2号炉原子炉建屋の当初設計では、側面地盤による埋込み効果を期待していないため、実際の施工では側面地盤には掘削土を埋め戻すなどして、拘束効果の少ない施工を実施している。従って、2号炉原子炉建屋のように重量の大きい建屋については、特に埋め戻し土が建屋の振動特性に及ぼす影響は小さいと考えられる。

一方、支持岩盤と側方地盤のせん断波速度の違いが大きい場合は、側方地盤ばね（Novak ばね）を用いた解析方法には課題があることが指摘されている。

以上を踏まえ、地盤の非線形性が大きい3.11地震の観測記録を用いて以下の2つの検討を実施する。

- ① 建屋重量の重い2号炉原子炉建屋を対象とした建屋シミュレーション解析において、側方地盤ばね（Novak ばね）の有無が建屋応答に与える影響や観測記録との整合性について確認する。
- ② 比較的小規模で建屋全体が埋め込まれている3号炉海水熱交換器建屋を対象とした建屋シミュレーション解析において、表層地盤が建屋応答に及ぼす影響や観測記録との整合性について確認する。

(2) 側面地盤ばねの有無が建屋応答に及ぼす影響検討 (2号炉原子炉建屋)

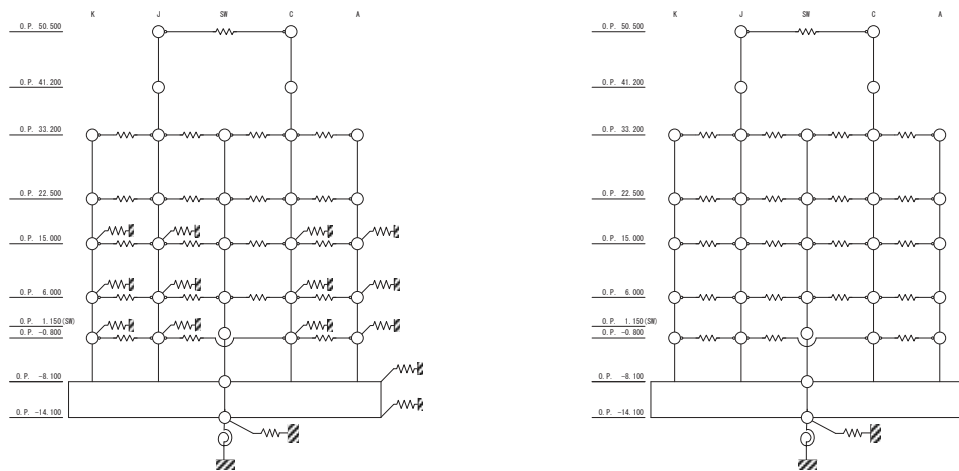
a. 検討方法

側面地盤が原子炉建屋の地震応答解析結果に及ぼす影響を確認するため、側面ばねを考慮したモデルと考慮しないモデルを用いて、3.11地震のはぎとり波によるシミュレーション解析を実施した。

側面地盤モデルは、建屋側面の埋戻し土の断面形状が深さ方向に三角形分布をしていると仮定し、地盤を地中の質点位置ごとに、単位厚さで平面的に切り出したモデルを設定し、建屋を面積が等価な円形平面に置換して、側面地盤ばねをNovakの方法(JEAG4601-1991〔追補版〕による方法)により算定する。

側面ばねの理論解 $T(\omega)$ の算定に用いる地盤定数は、埋め戻し部分の形状を考慮し、第3.3-1表に示す側面地盤ばねの設定に用いる埋戻し土および等価地盤の物性値を用いる。建屋の地震応答解析モデルは、3.11地震による建屋の初期剛性低下や建屋減衰7%を考慮したシミュレーションモデルをベースとし、側面ばねの有無の2つのモデルを設定する(側面地盤ばねの有無の検討に用いる地震応答解析モデルを第3.3-1図に示す)。

解析モデルへの入力地震動は、3.11地震のはぎとり波を第3.1-1表に示す地盤モデルを用いて算定して建屋基礎下位置の地震動とし、建屋各部の応答を評価する。



側面地盤ばね考慮

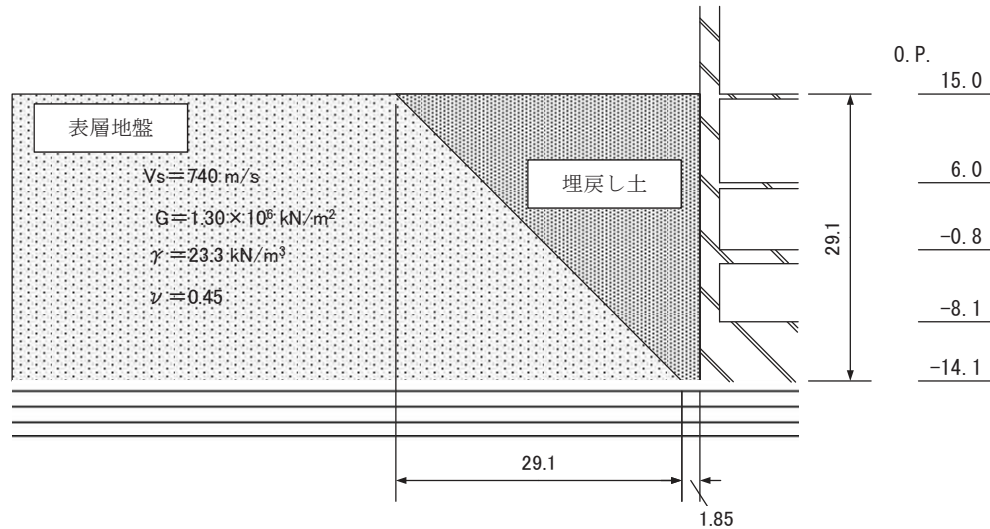
側面地盤ばね非考慮

	側面ばねを考慮するケース	側面ばねを考慮しないケース
建屋	2号炉原子炉建屋	
地震動	3.11地震はぎとり波	
入力地震動	建屋底面位置および側面地盤ばね位置の地震動(E+F)を算定し入力	建屋底面位置の地震動(E+F)を算定し入力
建屋モデル (建屋剛性, 建屋減衰)	3.11地震シミュレーションモデル (初期剛性低下考慮, 建屋減衰7%)	
建屋モデル (側面地盤ばね)	有り (側面地盤ばねの地盤定数は 等価地盤の値から算定)	無し
地盤モデル	地盤調査結果に基づき設定した初期地盤モデル (表層地盤:Vs740m/s一層)	

第3.3-1図 側面地盤ばねの有無の検討に用いる地震応答解析モデル

第 3.3-1 表 側面地盤ばねの設定に用いる埋戻し土および等価地盤の物性値

建屋質点 レベル O. P. (m)	深さ (m)	埋戻し土				等価地盤				
		せん断波速度 V_s (m/s)	せん断 弾性係数 G ($\times 10^4$ kN/m 2)	単位体積重量 γ (kN/m 3)	ポアソン比 ν	せん断波速度 V_s (m/s)	せん断 弾性係数 G ($\times 10^5$ kN/m 2)	単位体積重量 γ (kN/m 3)	ポアソン比 ν	減衰定数 h_e (%)
15.0	0	88	1.48	18.6	0.45	242	1.25	21.0	0.45	4
6.0	9.0	113	2.42	18.6	0.45	336	2.42	21.0	0.45	4
-0.8	15.8	138	3.61	18.6	0.45	443	4.20	21.0	0.45	4
-8.1	23.1	158	4.73	18.6	0.45	536	6.15	21.0	0.45	4
-14.1	29.1	171	5.57	18.6	0.45	653	9.13	21.0	0.45	4

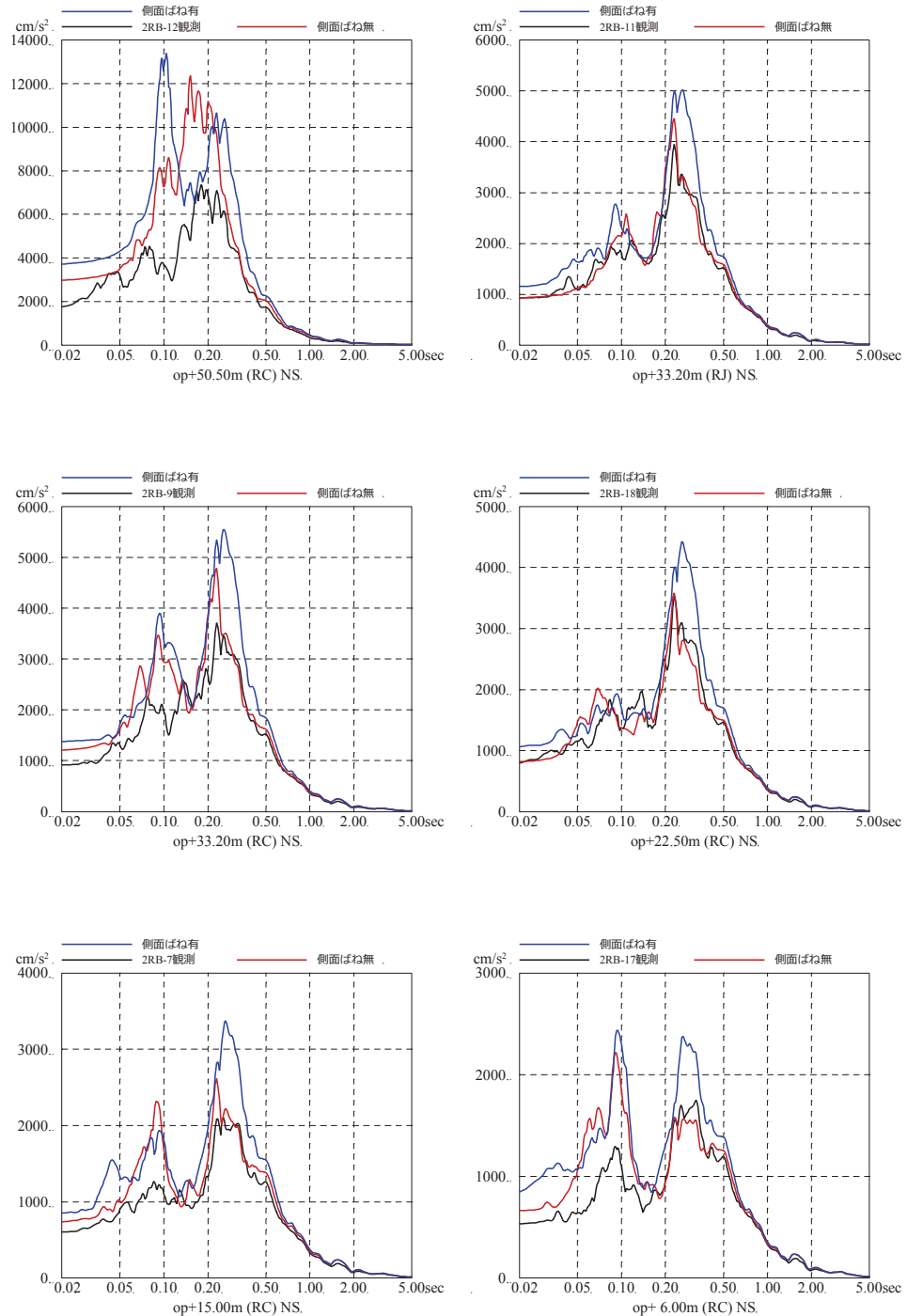


※表層地盤と埋戻し土の物性値より等価地盤の物性値を算定

埋戻し土の形状 (単位 : m)

b. 検討結果

検討結果として 3.11 地震のはぎとり波を用いた側面地盤ばねの有無によるシミュレーション解析結果の比較を第 3.3-2 図に示す。どちらの結果も観測記録に比べて大きな解析結果となっているが、側面地盤ばねがない場合の方が観測記録との適合性が良い。



第 3.3-2 図 3.11 地震のはぎとり波を用いた側面地盤ばねの有無によるシミュレーション解析結果の比較
(2号炉原子炉建屋, NS 方向) ※地震計位置は, 付録 1 参照

(3) 表層地盤が建屋応答に及ぼす影響検討（3号炉海水熱交換器建屋）

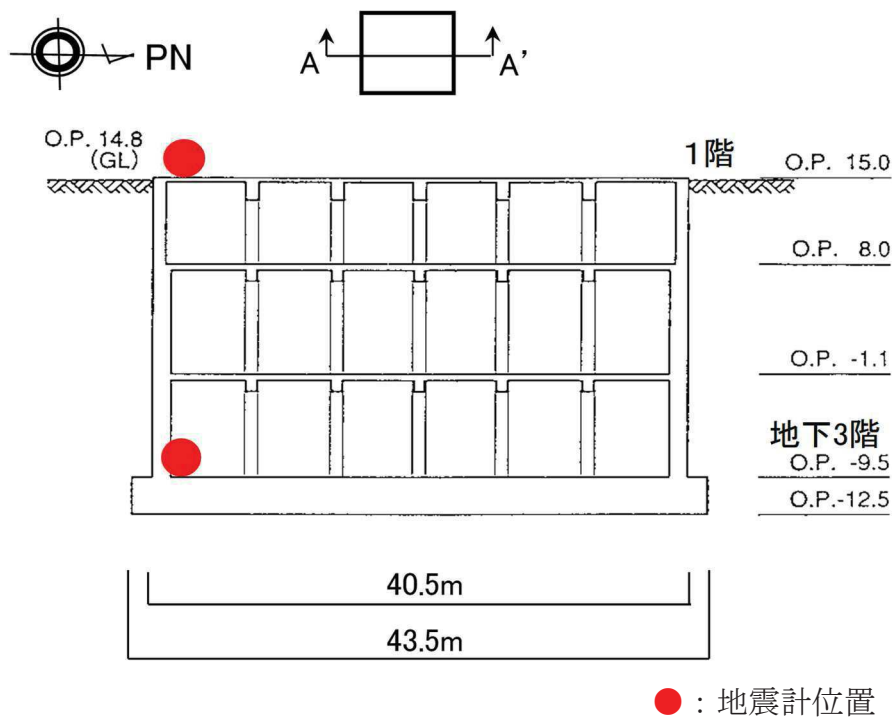
a. 検討方法

表層地盤が建屋応答に及ぼす影響を確認するために、比較的小規模で建屋全体が埋め込まれている3号炉海水熱交換器建屋を対象に、地盤の非線形性が大きい3.11地震の観測記録による建屋地震応答解析を実施した。地震応答解析モデルは以下の2種類を用いた

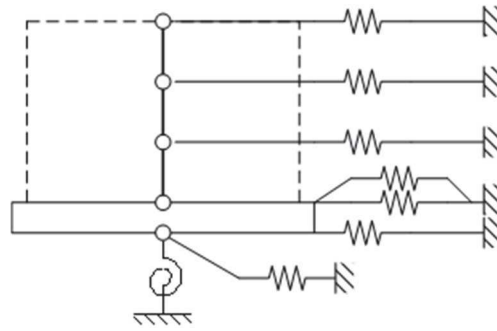
- ① 側面地盤ばね（Novakばね）を考慮したモデル（はぎとり波入力）
- ② 建屋減衰を変動させたモデル（基礎版上観測記録入力）

建屋の地震応答解析モデルは、側面ばね（Novakばね）を考慮するモデルおよび建屋減衰を変動させたモデルともに既工認モデル（側面地盤ばねを考慮していないS&Rモデル）をベースとしたモデルを用いた。

第3.3-3図に3号炉海水熱交換器建屋の概要を示す。側面地盤ばね（Novakばね）を考慮したケースの地震応答解析モデルを第3.3-4図に、地盤調査結果に基づき設定した初期地盤モデルの地盤物性値を第3.3-2表に示す。



第3.3-3図 3号炉海水熱交換器建屋の概要（A-A'）



側面地盤ばね考慮

	側面地盤ばね(Novakばね)を考慮したケース	建屋減衰を変動させたケース
建屋	海水熱交換器建屋	
地震動	3.11地震はざとり波	3.11地震の基礎版上観測記録
入力地震動	建屋底面位置および側面地盤ばね位置の地震動(E+F)を算定し入力	3.11地震の基礎版上観測記録から建屋底面位置の地震動を逆算
建屋モデル (建屋剛性, 建屋減衰)	既工認モデル	既工認モデルをベースとして建屋減衰を変動(建屋減衰20%)
建屋モデル (側面地盤ばね)	有り	無し
地盤モデル	地盤調査結果に基づき設定した初期地盤モデル (表層地盤:盛土物性値)	—

第 3.3-4 図 側面地盤ばね (Novak ばね) を考慮したケースの地震応答解析モデル

第 3.3-2 表 地盤調査結果に基づき設定した初期地盤モデルの地盤物性値

	地層レベル O. P. (m)	単位体積重量 γ (kN/m ³)	せん断波速度 V_s (m/s)	減衰定数 h (%)
表層地盤	14.80	18.6	※1	3※2
底面地盤	-12.5	26.1	1360	3
	-27.00	26.4	2040	3
	-50.00	26.5	2520	3
	-200.00	26.5	2520	3

※1 O. P. 14.8m～O. P. -12.5m は、上載圧依存を考慮してせん断波速度と相関のある初期剛性 G_0 を設定する。また、ひずみ依存による非線形特性を考慮する。

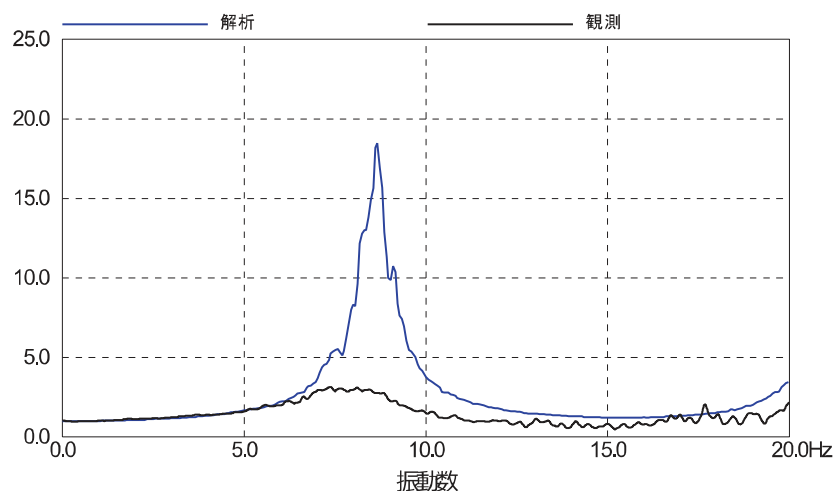
※2 Rayleigh 減衰。また、ひずみ依存による非線形特性を考慮する。

b. 検討結果

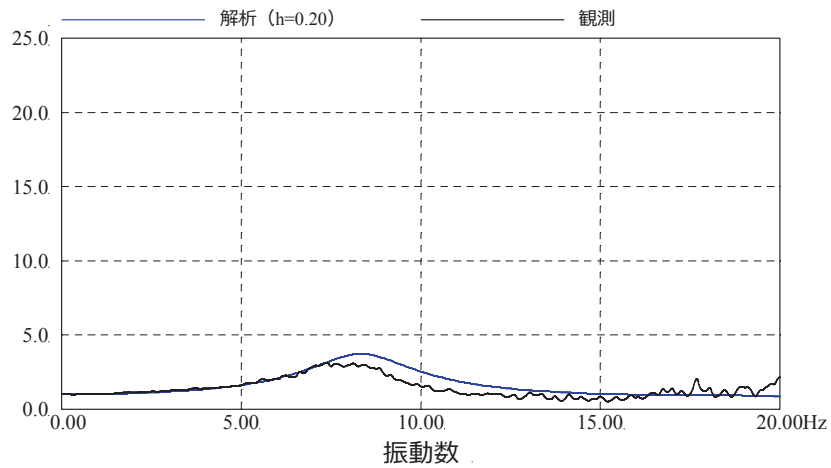
2種類のモデルによる検討結果は以下の通り。

- ① 側面地盤ばね (Novak ばね) 考慮モデルによる検討結果として、建屋基礎 (地下3階) に対する建屋上部 (1階) の伝達関数を第3.3-5図 (3.11地震のはぎとり波を用いた側面地盤ばねの有無によるシミュレーション解析結果の比較) に示す。解析結果は観測記録よりも過大な結果となった。
- ② 建屋減衰を変動させたモデルによる検討結果として、建屋上部 (1階) の観測記録と解析による伝達関数および応答スペクトルの比較を第3.3-6図 (3.11地震の基礎版上観測記録を用いた建屋減衰を変動 ($h=20\%$) させたシミュレーション解析結果の比較) に示す。この検討では建屋減衰を20%に設定したモデルによる検討結果が観測記録と概ね整合する結果を与えた。このRC減衰20%は建屋全体の減衰効果をRC減衰で代替させた結果であるが、一般的なRC減衰は5%であることを考慮すると、埋込まれていることによる建屋応答低減効果が認められることを示している。一方で、建屋の固有周期自体はあまりその影響を受けていない。

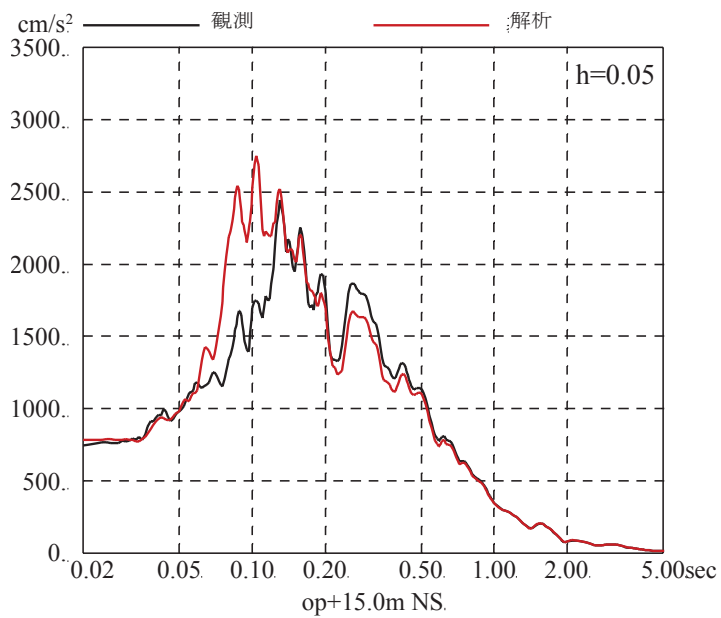
以上の検討から、比較的小規模で建屋全体が埋め込まれている3号炉海水熱交換器建屋においては、側面地盤ばね (Novak ばね) を考慮したモデルは過大な応答を与えること、一方、埋込まれていることによる建屋応答低減効果が認められることを確認した。



第3.3-5図 3.11地震のはぎとり波を用いた側面地盤ばねの有無によるシミュレーション解析結果の比較 伝達関数 (1階/地下3階)
(3号炉海水熱交換器建屋, NS方向)



伝達関数の比較 (1階/地下3階, NS方向)



応答スペクトルの比較 (1階, NS方向)

第 3.3-6 図 3.11 地震の基礎版上観測記録を用いた建屋減衰 20%とした場合の
シミュレーション解析結果の比較
(3号炉海水熱交換器建屋, NS方向)

(4) 検討結果のまとめ

2号炉原子炉建屋及び3号炉海水熱交換器建屋について、側面地盤ばね(Novakばね)の有無が建屋応答に与える影響等を、地震観測記録を用いた建屋応答解析で確認した。その結果、

- ① 建屋重量の重い2号炉原子炉建屋を対象とした建屋シミュレーション解析、また、比較的小規模で建屋全体が埋め込まれている3号炉海水熱交換器建屋を対象とした建屋シミュレーション解析の両方で、側方地盤ばね(Novakばね)を考慮した応答結果は観測記録より過大な応答結果を与えた。
- ② 3号炉海水熱交換器建屋を対象とした建屋シミュレーション解析において、埋め込まれていることによる建屋応答低減効果が認められることを確認した。

JEAG4601では、側面地盤ばね(Novakばね)は、支持地盤と表層地盤のインピーダンス比が大きい場合、その適合性に留意する必要があることが記載されているが、特に女川のように支持地盤が硬質岩盤で、埋め戻し土に掘削土等用いて施工した場合には、Novakばねは過大な応答結果を与えるおそれがあるため、今回工認の原子炉建屋の地震応答解析モデルには側面地盤ばねは適用しないこととする。

なお、海水熱交換器建屋については、Novakばねによる埋込み効果は実際の応答を現しにくい一方で、観測記録によるシミュレーション解析から埋め込まれていることによる建屋応答低減効果が認められることから、そのメカニズムについて引き続き検討を行う。

4. 今回工認における周辺地盤による影響の解析モデルへの反映（原子炉建屋）

4.1 基準地震動 S_s の地震応答解析に用いる地盤モデルの設定概要

(1) 地盤モデル設定の流れ（詳細は添付4参照）

3章での3.11地震における表層地盤が入力地震動に与える影響の検討結果から、表層地盤の非線形性を適切に考慮することで基盤と表層地盤の伝達特性を考慮した入力地震動の算定が可能と考えられる。

ここでは、第4.1-1図に示す基準地震動 S_s の地震応答解析に用いる地盤モデル設定フローに従い地震動の振幅に応じた非線形特性を考慮した地盤モデルを設定する。

設定の基本的考え方は以下のとおり。

① 地盤モデルの仮設定

- ・建設時の掘削状況や岩盤レベルの傾向も踏まえ2層地盤（表層地盤下部及び表層地盤上部）を設定
- ・パラメータスタディの初期値としての層境界位置や各地盤の物性値については、過去の調査結果等から設定

② 仮設定した地盤モデルに対する観測記録を用いた検討（線形モデルでの検討）

- ・以下のパラメータスタディにより、表層地盤の層境界、表層地盤の V_s について検討する。
 - a. 層境界のパラメータスタディ（O.P. -2m～+2m）
 - b. 表層地盤下部のパラメータスタディ（ $V_s=800\sim 1000\text{m/s}$ ）
 - c. 表層地盤上部のパラメータスタディ（ $V_s=300\sim 600\text{m/s}$ ）

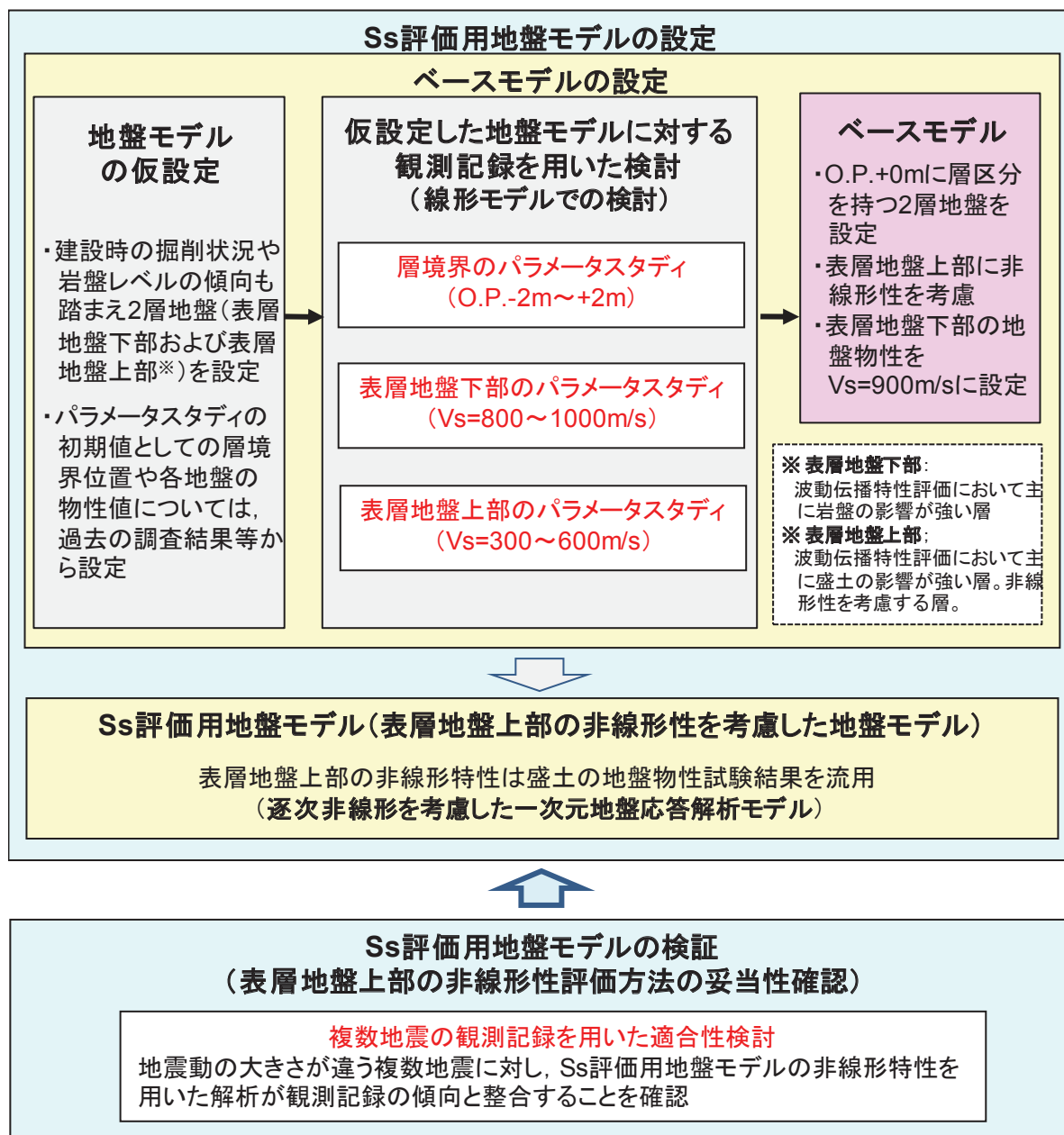
③ ベースモデルの決定

- ・O.P. +0mに層区分を持つ2層地盤を設定
- ・表層地盤下部の地盤物性を900m/sに設定
- ・上部地盤に非線形性を考慮

④ S_s 評価用地盤モデルの設定（表層地盤上部の非線形性を考慮した地盤モデル）

- ・2層の表層地盤の内、上層については、非線形化の影響が大きいと考えられること、また、自由地盤のはぎとり解析においては表層部のみの非線形性を考慮することにより表層地盤で得られた観測記録の傾向が再現できたこと、パラメータスタディにより上層部の V_s を変えることで適切な伝達特性を概ね評価できることから、非線形特性は地盤調査結果に基づき設定する。

以上の検討によって策定した非線形地盤モデルに対し、様々な地震動レベルの複数の地震観測記録を用いて適合性を検証する。



第 4.1-1 図 基準地震動 Ss の地震応答解析に用いる地盤モデル設定フロー

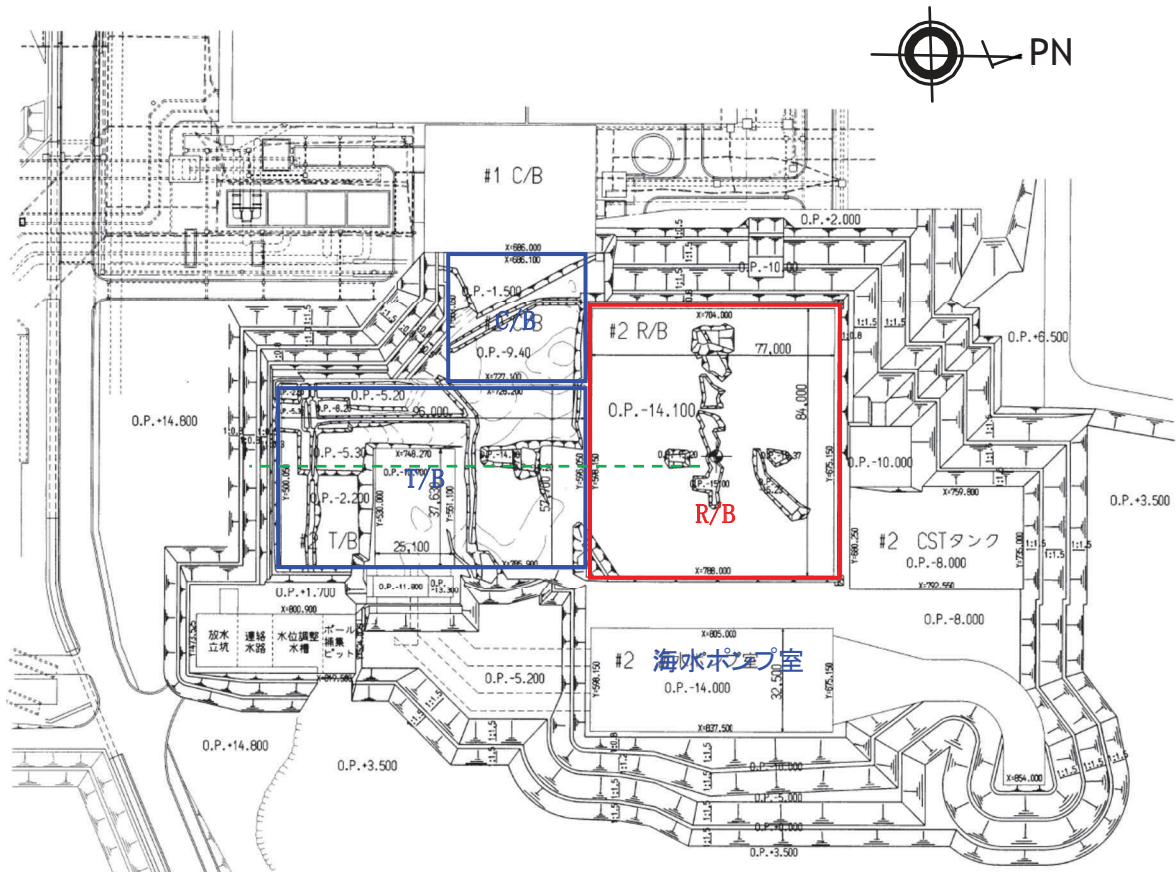
(2) 地盤モデルの仮設定

a. 表層地盤の層境界の仮設定

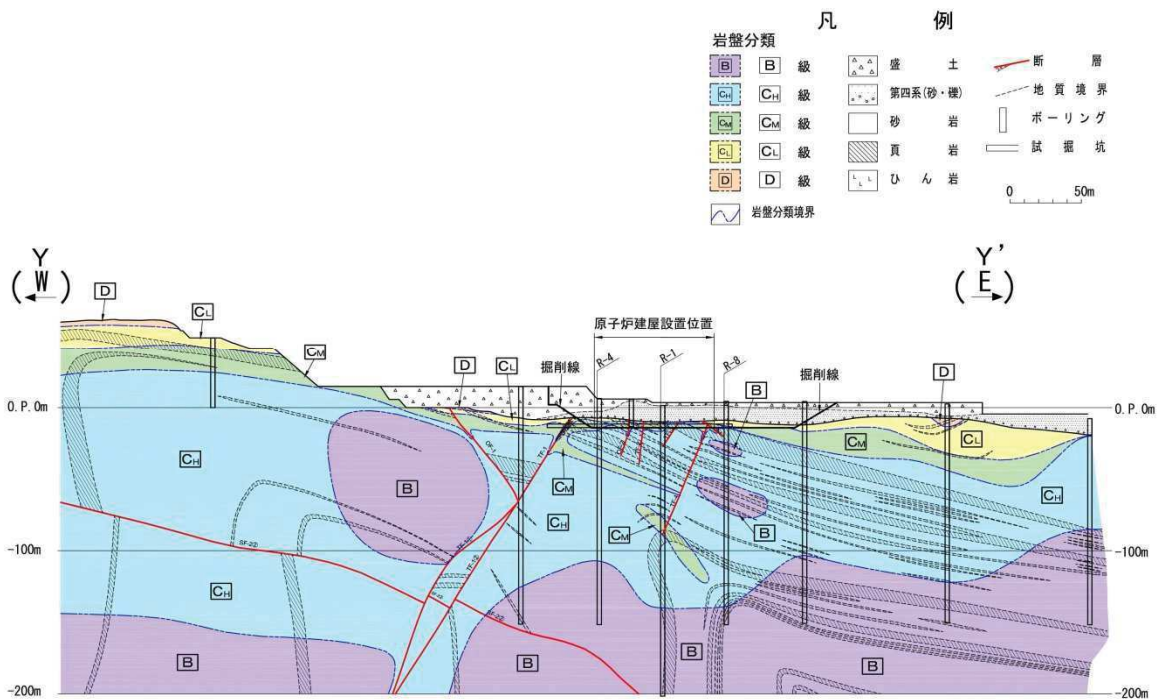
女川2号炉建設時の地盤の掘削状況に基づき、1次元地盤モデルの表層地盤と岩盤の境界面の深さを設定する。

第4.1-2図に2号炉建設時の地盤の掘削状況（平面図）を、第4.1-3図に2号炉建設時の地盤の掘削状況（東西断面）を示す。女川2号炉原子炉建屋周辺の地盤の大部分はO.P. +0mまで表層地盤の掘削が行われており、竣工後は現在のG.L.面であるO.P. +14.8mまで埋め戻されている。

建設時の掘削状況としてO.P. +0m付近が岩盤と盛土の境界付近であること、建屋周辺ではO.P. +0mより浅部地盤では埋戻し土となることから女川2号炉原子炉建屋近傍の岩盤と表層地盤の境界面をO.P. +0mとして1次元地盤モデルを仮設定する。



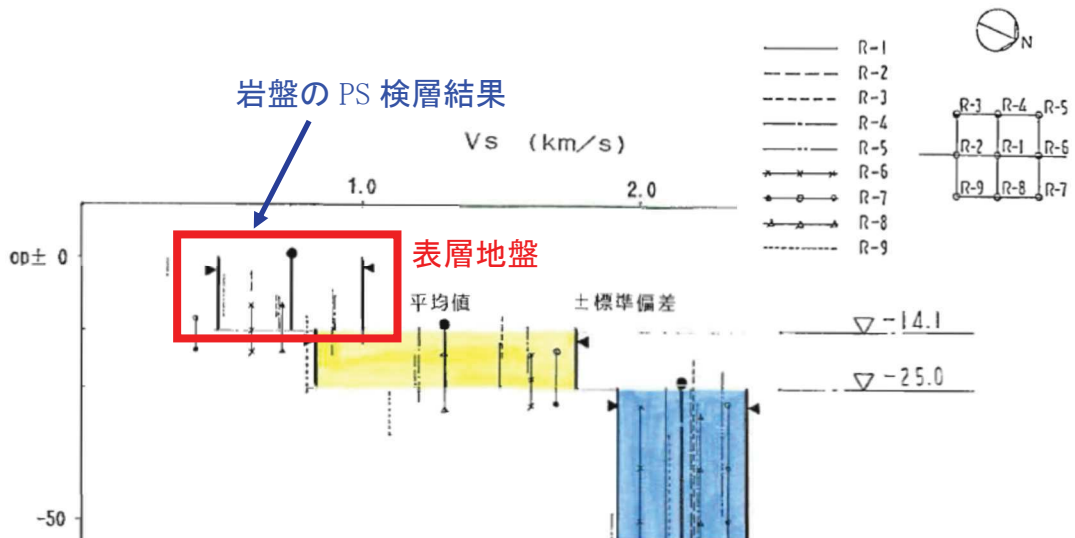
第 4.1-2 図 2号炉建設時の地盤の掘削状況（平面図）



第 4.1-3 図 2号炉建設時の地盤の掘削状況（東西断面）

b. 表層地盤下部 (O.P. 0m~O.P. -14.1m) の地盤物性の仮設定

PS 検層結果では, O.P. 0m~O.P. -14.1m 付近までの表層地盤のせん断波速度 V_s はおよそ 500~1000m/s に分布していること, 3.11 地震の観測記録の分析, 自由地盤のはぎとり地盤モデルでは 1000m/s 程度であったことから, せん断波速度 V_s を 900m/s 程度に仮設定する。女川 2 号炉原子炉建屋位置の PS 検層結果を第 4.1-4 図に, 3.11 地震時の最適化はぎとり地盤モデルを第 4.1-1 表に示す。



第 4.1-4 図 女川 2 号炉原子炉建屋位置の PS 検層結果

第 4.1-1 表 3.11 地震時の最適化はぎとり地盤モデル

深さ		層厚 (m)	密度 (t/m ³)	V_s (m/s)	減衰定数 $h(f)$	
G.L. (m)	O.P. (m)				水平	
					h_0	α
0	18.7					
-1.7	17.0	1.7	2.10	112	0.44	0.38
-5.0	13.7	3.3	2.10	112	0.44	0.38
-21.6	-2.9	16.6	2.10	1001	0.51	0.19
-27.3	-8.6	5.7	2.55	1500	0.20	1.00
-34.5	-15.8	7.2	2.55	1500	0.20	1.00
-61.5	-42.8	27.0	2.66	2000	1.00	0.87
-81.8	-63.1	20.3	2.68	2200	0.77	1.00
-147.1	-128.4	65.3	2.68	2600	0.77	1.00

解放基盤表面相当

(3) 仮設定した地盤モデルに関する観測記録を用いた検討

a. 表層地盤の層境界に関する検討 (詳細は添付 6 参照)

(a) 検討概要

3.2 項の自由地盤のはざとり地盤モデルの検討では、表層を分割すること、最表層の物性値を同定することで、小振幅から大振幅までの観測記録を再現できていることがわかっている。

建設時の掘削状況から仮設定した O.P. +0m の表層地盤の層境界について、観測記録を用いたパラメータスタディを実施し、ベースとなる地盤モデルの層境界の最適値について検討する。

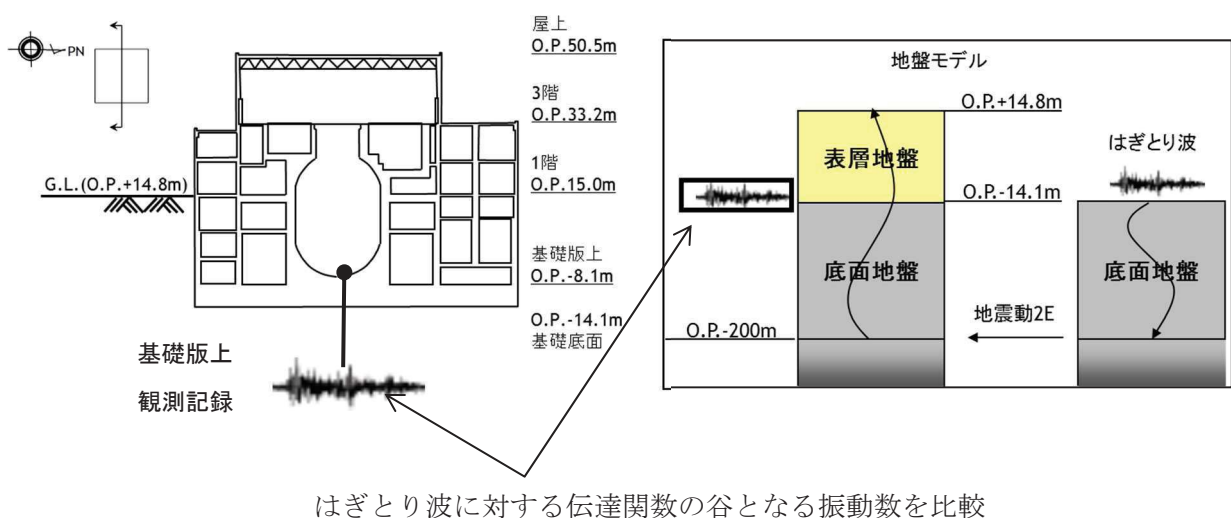
(b) 検討方法

表層地盤の層境界 O.P. +0m の検証として仮設定した地盤モデルを用いて感度解析を実施する。

仮設定した地盤モデルは、表層下部のせん断波速度 V_s を 900m/s、表層上部のせん断波速度 V_s を 350m/s とし、表層地盤の層境界を O.P. -2m ~O.P. +2m の間で変動させて検討を実施する。表層地盤の層境界に関する検討用に仮定した地盤モデルの諸元を第 4.1-2 表に示す。

検討は、自由地盤の観測記録から算定したはざとり波に対する基礎版上観測記録と検討用に仮定した地盤モデルにより算定した基礎版底面レベル (O.P. -14.1m) の入力地震動 (E+F+P 波, P は切欠き力の時刻歴波形) の伝達関数に表れる表層地盤の 1 次周期に対応する 4~6Hz 付近の谷の再現性およびはざとり波を用いた建屋のシミュレーション解析結果と観測記録の適合性を確認することにより行う。対象とする地震は、3.11 地震および 4.7 地震とした。

表層地盤物性の検討方法の概念図を第 4.1-5 図に示す。



第 4.1-5 図 表層地盤物性の検討方法の概念

第 4.1-2 表 表層地盤の層境界に関する検討用に仮定した地盤モデル
(赤文字部分が仮定した値)

	地層レベル O. P. (m)	単位体積重量 γ (kN/m ³)	せん断波速度 Vs (m/s)	減衰定数 h (%)
表層地盤	14.8	23.3 (2.38tf/m ³)	350	3
	2.0 ~ -2.0	23.3 (2.38tf/m ³)	900	3
底面地盤	-14.1	23.8 (2.43tf/m ³)	1300	3
	-25.0	24.6 (2.51tf/m ³)	2150	3
	-80.0	25.0 (2.55tf/m ³)	2440	3
	-200 ~ ∞	25.0 (2.55tf/m ³)	2440	3

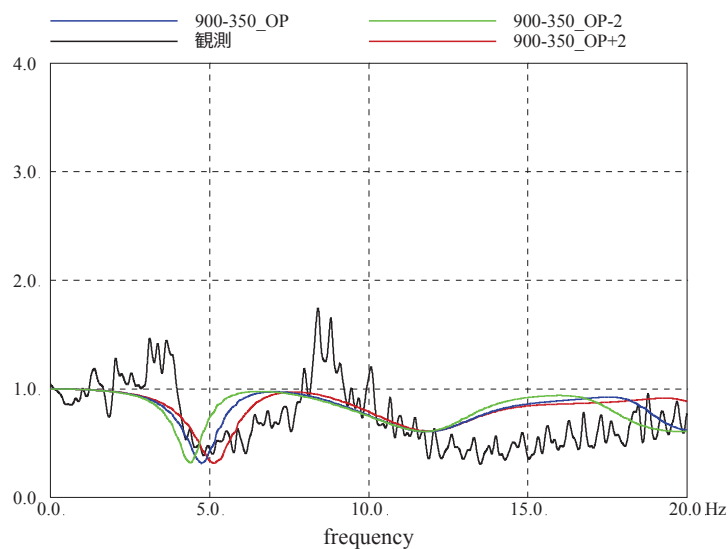
(c) 検討結果

表層地盤の層境界に関する検討結果の伝達関数比較を第 4. 1-6 図に示す。また、床応答スペクトルの比較を第 4. 1-7 図に示す。

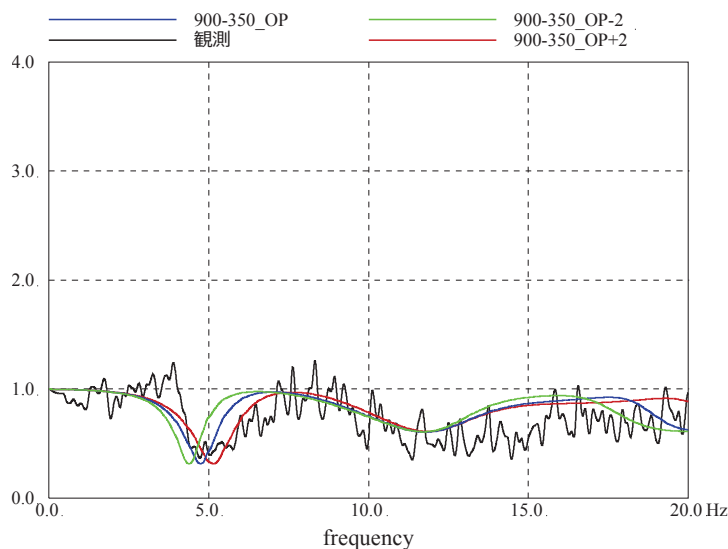
0. P. +2m~0. P. -2m の間で変動させた結果、表層地盤の層境界を 0. P. +0m と設定した場合に観測記録との適合が良い結果となった。

床応答スペクトルの比較においては、伝達関数による検討程の大きな差異は見られなかった。

上記より、表層地盤の層境界を 0. P. +0m に設定することは妥当であると考えられる。

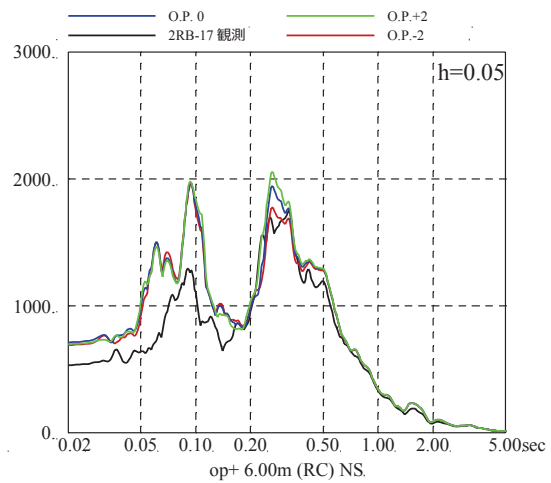
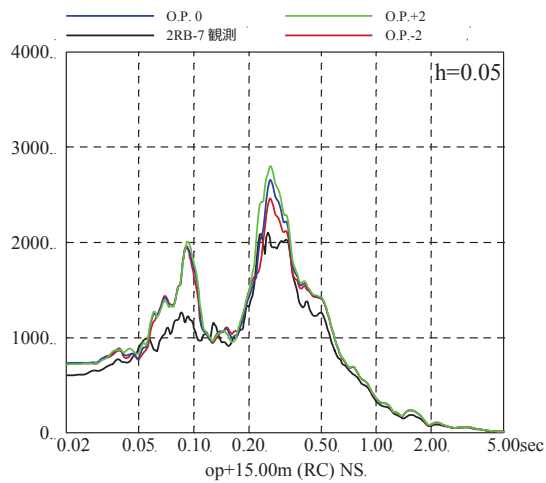
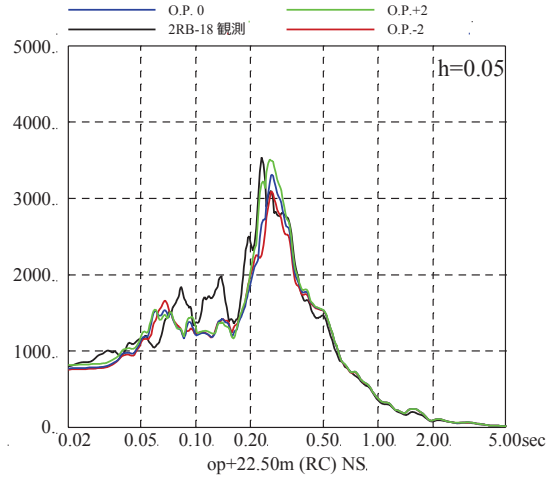
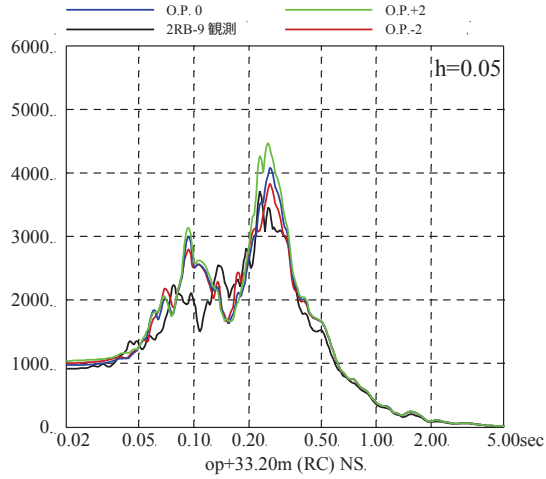
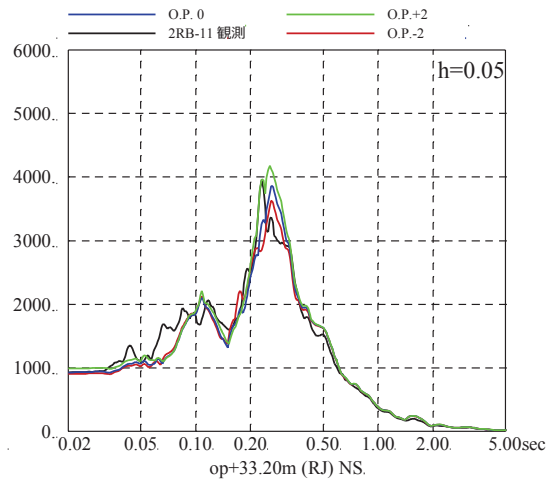
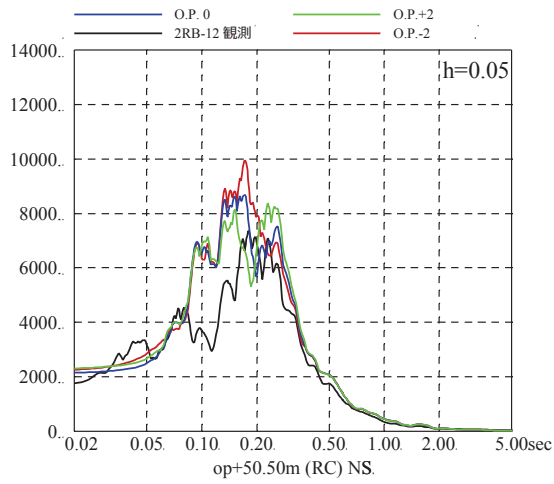


2011. 3. 11 NS 伝達特性比較



2011. 3. 11 EW 伝達特性比較

第 4. 1-6 図 表層地盤の層境界に関する検討結果 (伝達関数)
(2011/3/11 東北地方太平洋沖地震)



第 4.1-7 図 表層地盤の層境界に関する検討結果 (床応答スペクトル)
(2011/3/11 東北地方太平洋沖地震, NS 方向, 減衰 5%)

b. 表層地盤下部の地盤物性の検討（詳細は添付 7 参照）

(a) 検討概要

自由地盤のはざとり地盤モデルの傾向と PS 検層結果から表層地盤下部（O.P. +0m ～ O.P. -14.1m）のせん断波速度 V_s は 900 m/s に仮設定しているが、観測記録を用いたパラメータスタディを実施し、ベースとなる地盤モデルの表層地盤下部のせん断波速度の最適値について検討する。

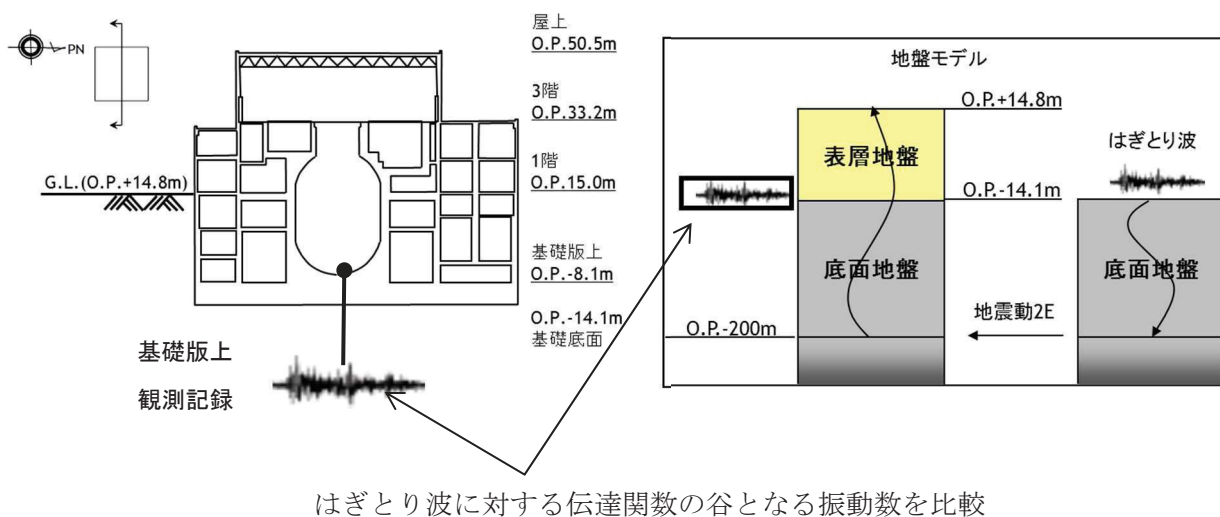
(b) 検討方法

表層地盤下部（O.P. +14.8m～O.P. +0m）のせん断波速度 V_s の検証として、仮設定した地盤モデルを用いて感度解析を実施した。

仮設定した地盤モデルは、表層地盤の層境界を O.P. +0m、表層上部のせん断波速度 V_s を 350m/s とし、表層地盤下部のせん断波速度 V_s を 800～1000m/s の間で変動を考慮して検討を実施する。表層地盤下部の地盤物性の検討用に仮定した地盤モデルの諸元を第 4.1-3 表に示す。

検討は、自由地盤の観測記録から算定したはざとり波に対する基礎版上観測記録と検討用に仮定した地盤モデルにより算定した基礎版底面レベル（O.P. -14.1m）の入力地震動（E+F+P 波，P は切欠き力の時刻歴波形）の伝達関数に表れる表層地盤の 1 次周期に対応する 4～6Hz 付近の谷の再現性およびはざとり波を用いた建屋のシミュレーション解析結果と観測記録の適合性を確認することにより行う。対象とする地震は、3.11 地震および 4.7 地震とした。

表層地盤物性の検討方法の概念図を第 4.1-8 図に示す。



第 4.1-8 図 表層地盤物性の検討方法の概念

第 4.1-3 表 表層地盤下部の地盤物性の検討用に仮定した地盤モデル
(赤文字部分が仮定した値)

	地層レベル O.P. (m)	単位体積重量 γ (kN/m ³)	せん断波速度 Vs (m/s)	減衰定数 h (%)
表層地盤	14.8	23.3(2.38tf/m ³)	350	3
	0.0	23.3(2.38tf/m ³)	800~1000	3
底面地盤	-14.1	23. 8(2.43tf/m ³)	1300	3
	-25.0	24.6(2.51tf/m ³)	2150	3
	-80.0	25.0(2.55tf/m ³)	2440	3
	-200 ~ ∞	25.0(2.55tf/m ³)	2440	3

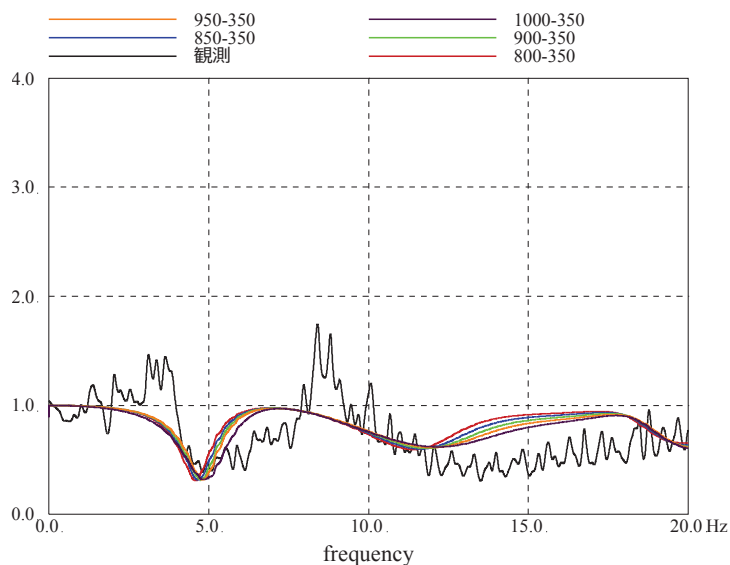
(c) 検討結果

表層地盤下部の地盤物性の検討結果の伝達関数の比較を第 4. 1-9 図に示す。また、床応答スペクトルの比較を第 4. 1-10 図に示す。

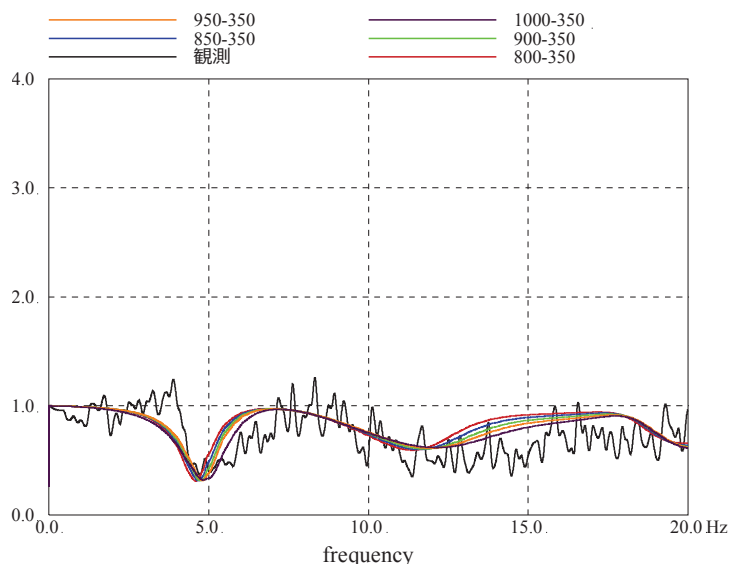
検討結果から、表層地盤下部のせん断波速度 V_s を 900m/s 程度に設定した場合に観測記録との適合が良い結果となった。

床応答スペクトルの比較においては、伝達関数による検討程の大きな差異は見られなかった。

上記より、表層下部のせん断波速度 V_s を 900m/s に設定することが妥当であると考えられる。

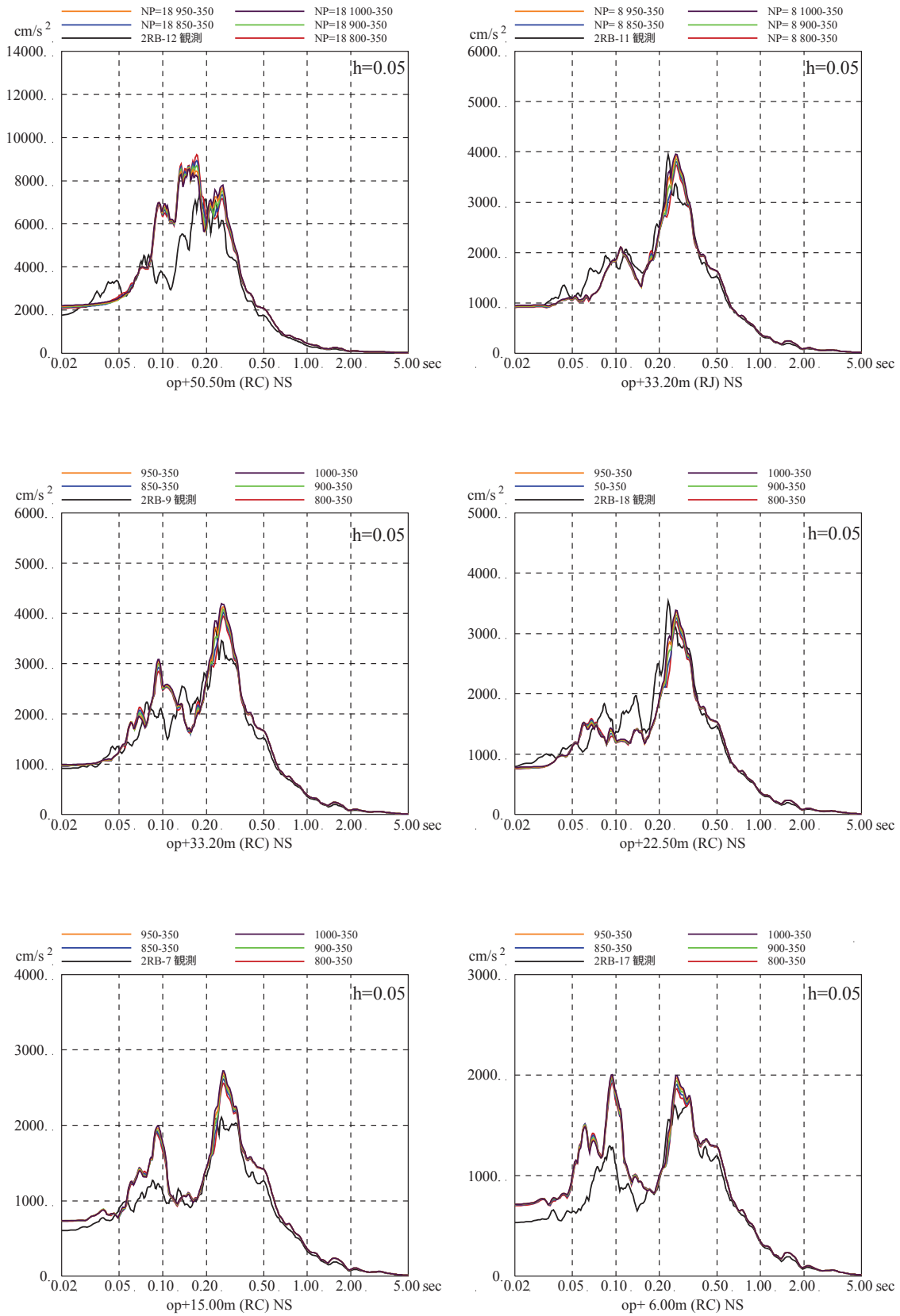


2011. 3. 11 NS 伝達特性比較



2011. 3. 11 EW 伝達特性比較

第 4. 1-9 図 表層地盤下部の地盤物性の検討結果 (伝達関数)
(2011/3/11 東北地方太平洋沖地震)



第 4. 1-10 図 表層地盤下部の地盤物性の検討結果 (床応答スペクトル)
 (2011/3/11 東北地方太平洋沖地震, NS 方向, 減衰 5%)

c. 表層地盤上部の地盤物性の検討 (非線形化による影響検討) (詳細は添付 8 参照)

(a) 検討概要

自由地盤のはぎとり地盤モデルの検討では、表層地盤を分割すること、表層地盤上部の物性値を同定することで、小振幅から大振幅までの観測記録を再現できることがわかっている。

表層地盤は、3.11 地震等による非線形化の影響が大きいと考えられることから、2号炉原子炉建屋の観測記録の分析からも表層地盤上部に非線形化の影響が現れているか検討する。

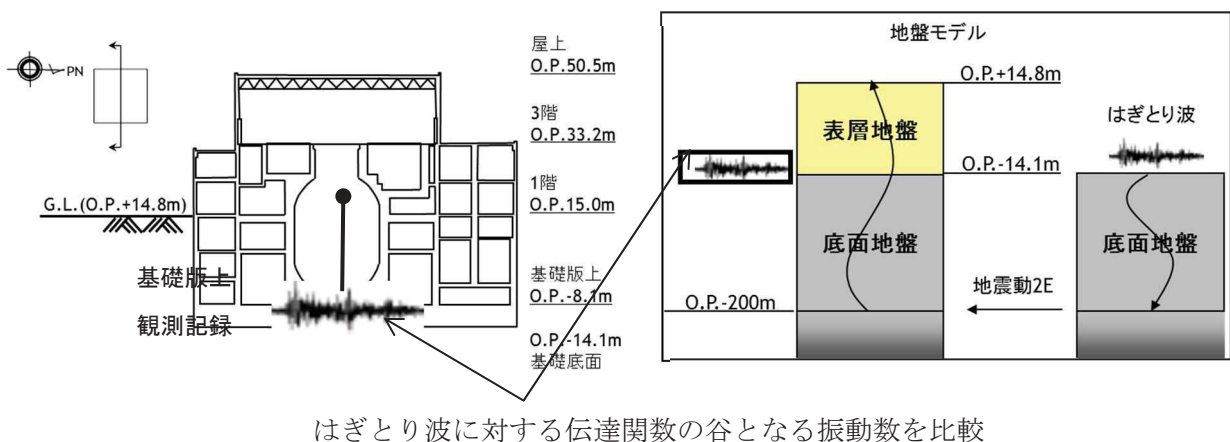
(b) 検討方法

表層地盤上部 (O. P. +14.8m~O. P. +0m) の非線形化の有無を確認するため、仮設定した地盤モデルを用いて感度解析を実施した。

仮設定した地盤モデルは、表層地盤の層境界を O. P. +0m, 表層地盤下部のせん断波速度 V_s を 900m/s とし、表層地盤上部のせん断波速度 V_s を 300~600m/s の間で変動させるモデルとする。表層地盤上部の地盤物性の検討用に仮定した地盤モデルの諸元を第 4.1-4 表に示す。

検討は、自由地盤の観測記録から算定したはぎとり波に対する基礎版上観測記録と検討用に仮定した地盤モデルにより算定した基礎版底面レベル (O. P. -14.1m) の入力地震動 (E+F+P 波, P は切欠き力の時刻歴波形) の伝達関数に表れる表層地盤の 1 次周期に対応する 4~6Hz 付近の谷の再現性およびはぎとり波を用いた建屋のシミュレーション解析結果と観測記録の適合性を確認することにより行う。検討に用いた地震は、過去に観測された加速度振幅の大きい地震と 3.11 地震直前の 2011 年 3 月 9 日の地震としその諸元を第 4.1-5 表 (検討に用いた地震諸元) に示す。

表層地盤物性の検討方法の概念図を第 4.1-11 図に示す。



第 4.1-11 図 表層地盤物性の検討方法の概念

第 4.1-4 表 表層地盤上部の地盤物性の検討用に仮定した地盤モデル
(赤文字部分が仮定した値)

	地層レベル O.P. (m)	単位体積重量 γ (kN/m ³)	せん断波速度 Vs (m/s)	減衰定数 h (%)
表層地盤	14.80	23.3 (2.38tf/m ³)	300~600	3
	0.00	23.3 (2.38tf/m ³)	900	3
底面地盤	-14.10	23.8 (2.43tf/m ³)	1300	3
	-25.00	24.6 (2.51tf/m ³)	2150	3
	-80.00	25.0 (2.55tf/m ³)	2440	3
	-200.0	25.0 (2.55tf/m ³)	2440	3

第 4.1-5 表 検討に用いた地震諸元

地震	M	震源地	自由地盤 B2 地点(地中記録) 最大加速度 (PN 基準に方位補正) (cm/s ²)		
			NS 方向	EW 方向	
1	2005/8/16 11:46	7.2	宮城県東方沖	233	221
2	2011/3/9 11:45	7.3	宮城県東方はるか沖	30	12
3	2011/3/11 14:46	9.0	宮城県東方はるか沖	467	421
4	2011/4/7 23:32	7.2	宮城県東方沖	321	396

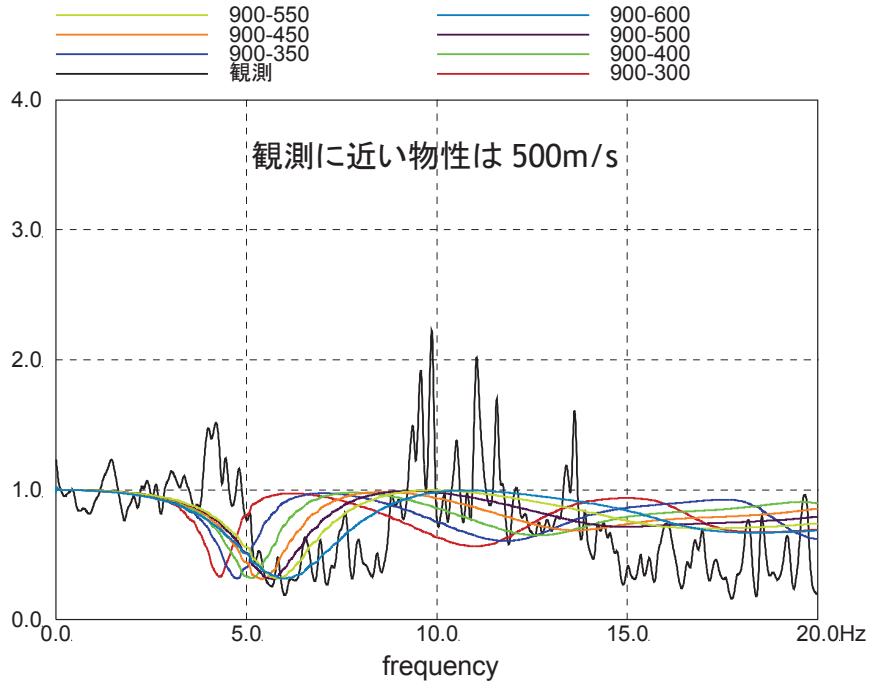
(c) 検討結果

はぎとり波に対する基礎版上観測記録の伝達関数とはぎとり波に対する入力変換波 (E+F+P) の伝達関数の比較を第 4. 1-12 図～4. 1-15 図に、はぎとり波入力 of シミュレーション解析の床応答スペクトルの比較を第 4. 1-16 図に示す。

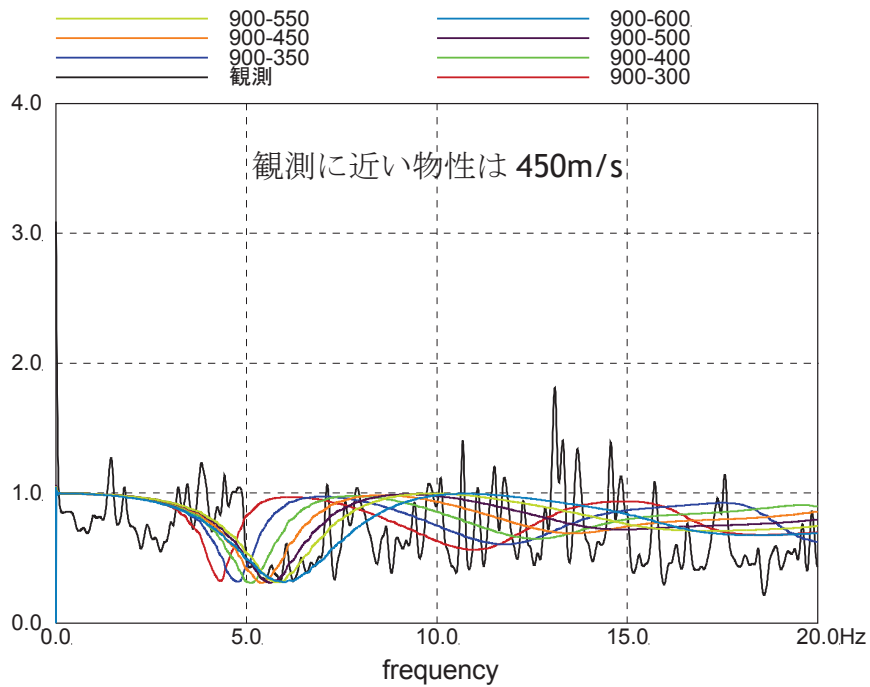
伝達関数の比較においては、2005/8/16 の宮城県沖の地震と 2011/3/9 の地震では、表層地盤上部のせん断波速度 V_s が 450m/s～500m/s の場合に観測記録に対応するが、3. 11 地震と 4. 7 地震では、350m/s の場合が観測記録と良い対応を示している。

地震動の振幅レベルにより表層地盤上部の最適となるせん断波速度がことなることから、表層地盤上部では非線形化の影響が確認された。応答スペクトルの比較においては、伝達関数による検討程の大きな差異は見られなかった。

このことから、表層地盤上部には入力地震動の大きさにより地盤の剛性低下等を考慮できる非線形地盤モデルを設定する必要があることが確認された。

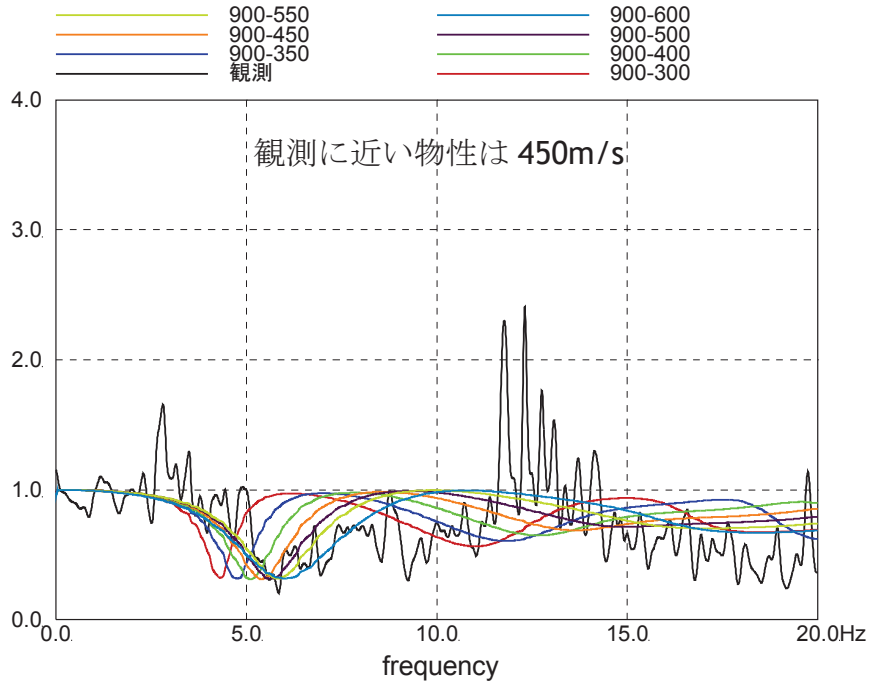


2005. 8. 16 NS 伝達特性比較

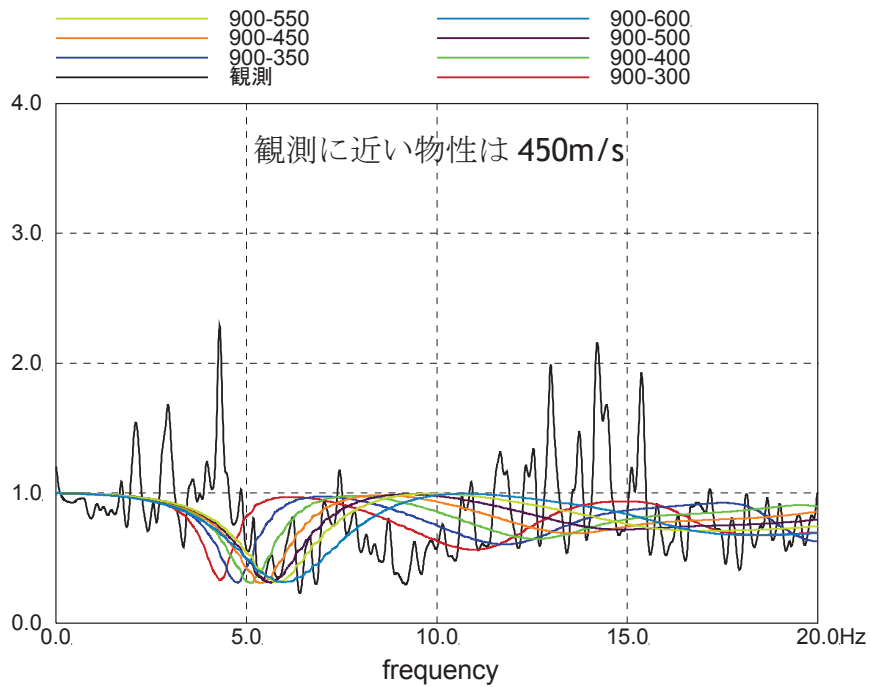


2005. 8. 16 EW 伝達特性比較

第 4.1-12 図 はぎとり波に対する基礎版上観測記録の伝達関数とはぎとり波に対する入力変換波 (E+F+P) の伝達関数の比較 (2005/8/16 地震)

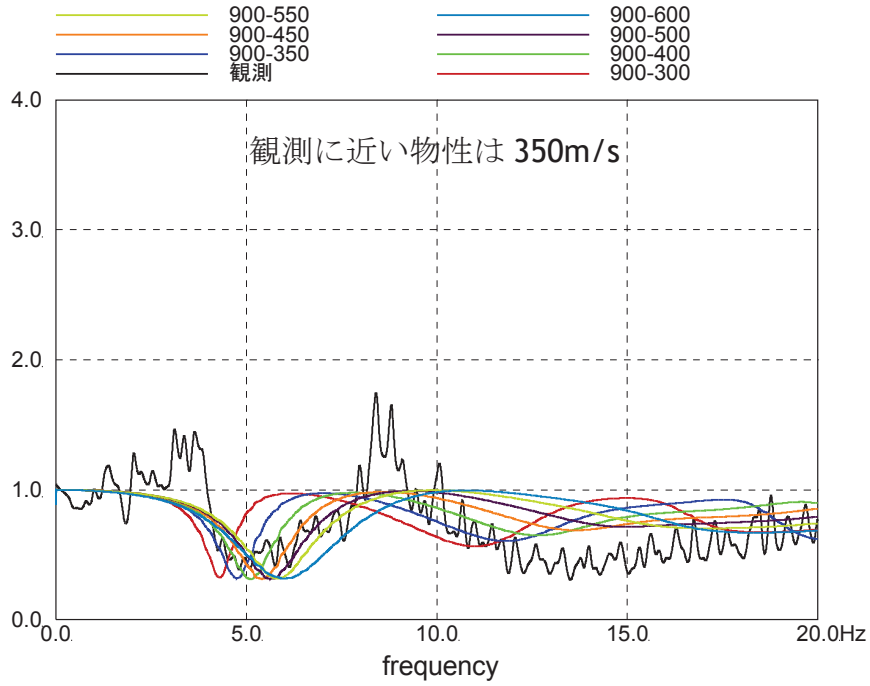


2011. 3. 9 NS 伝達特性比較

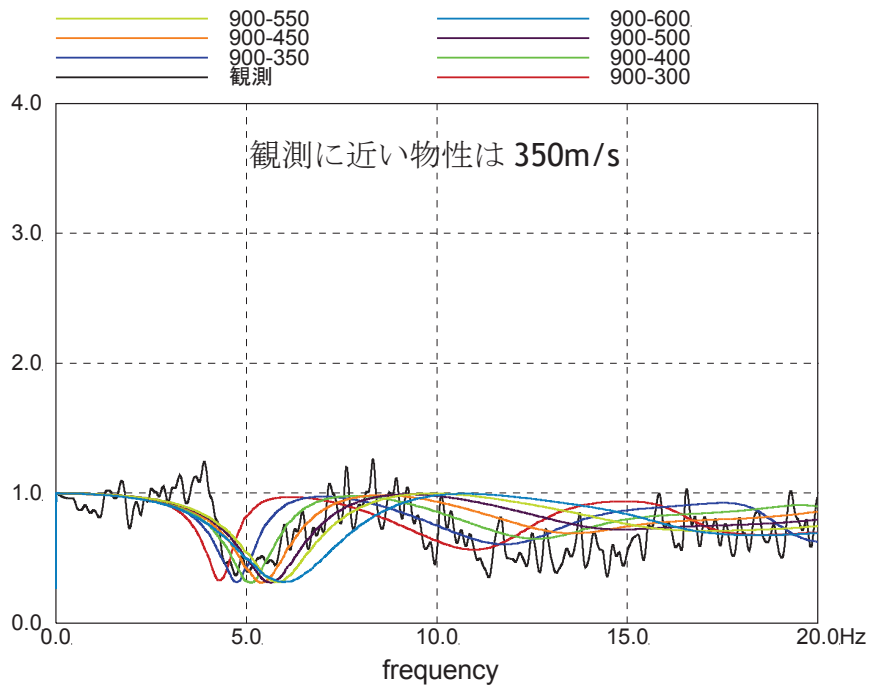


2011. 3. 9 EW 伝達特性比較

第 4.1-13 図 はぎとり波に対する基礎版上観測記録の伝達関数とはぎとり波に対する入力変換波 (E+F+P) の伝達関数の比較 (2011/3/9 地震)

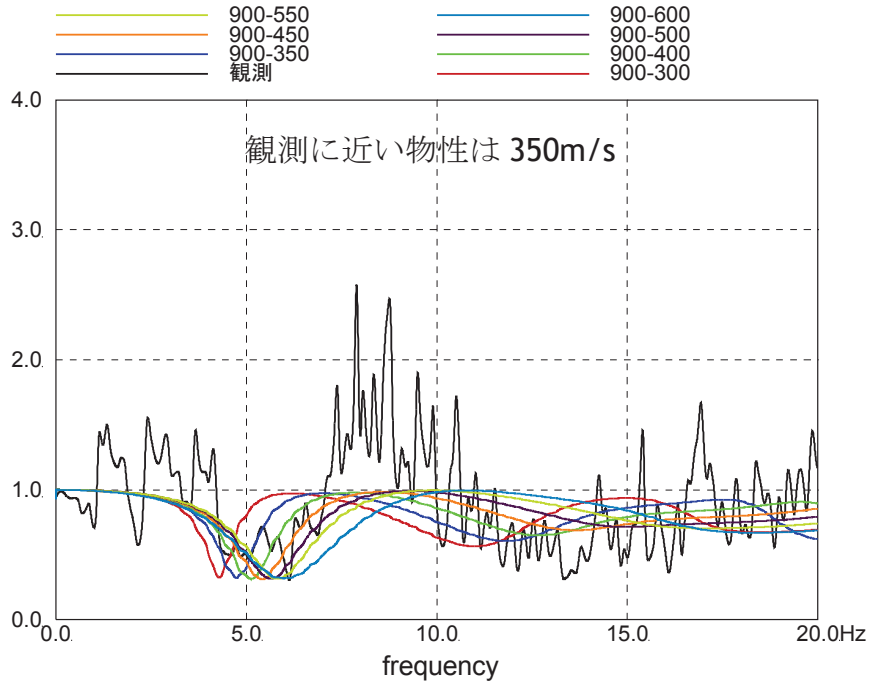


2011. 3. 11 NS 伝達特性比較

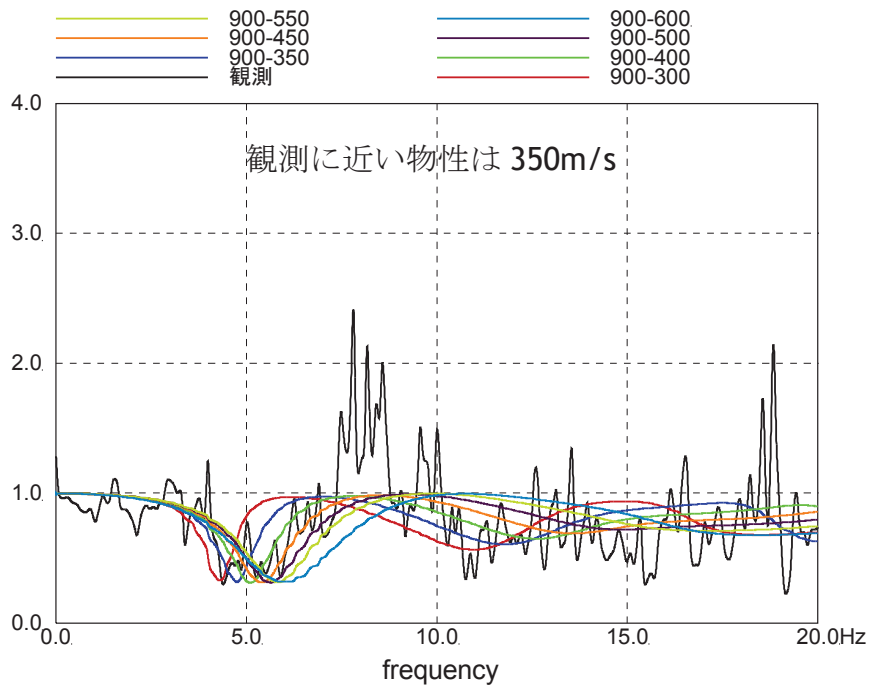


2011. 3. 11 EW 伝達特性比較

第 4.1-14 図 はぎとり波に対する基礎版上観測記録の伝達関数とはぎとり波に対する入力変換波 (E+F+P) の伝達関数の比較 (2011/3/11 東北地方太平洋沖地震)

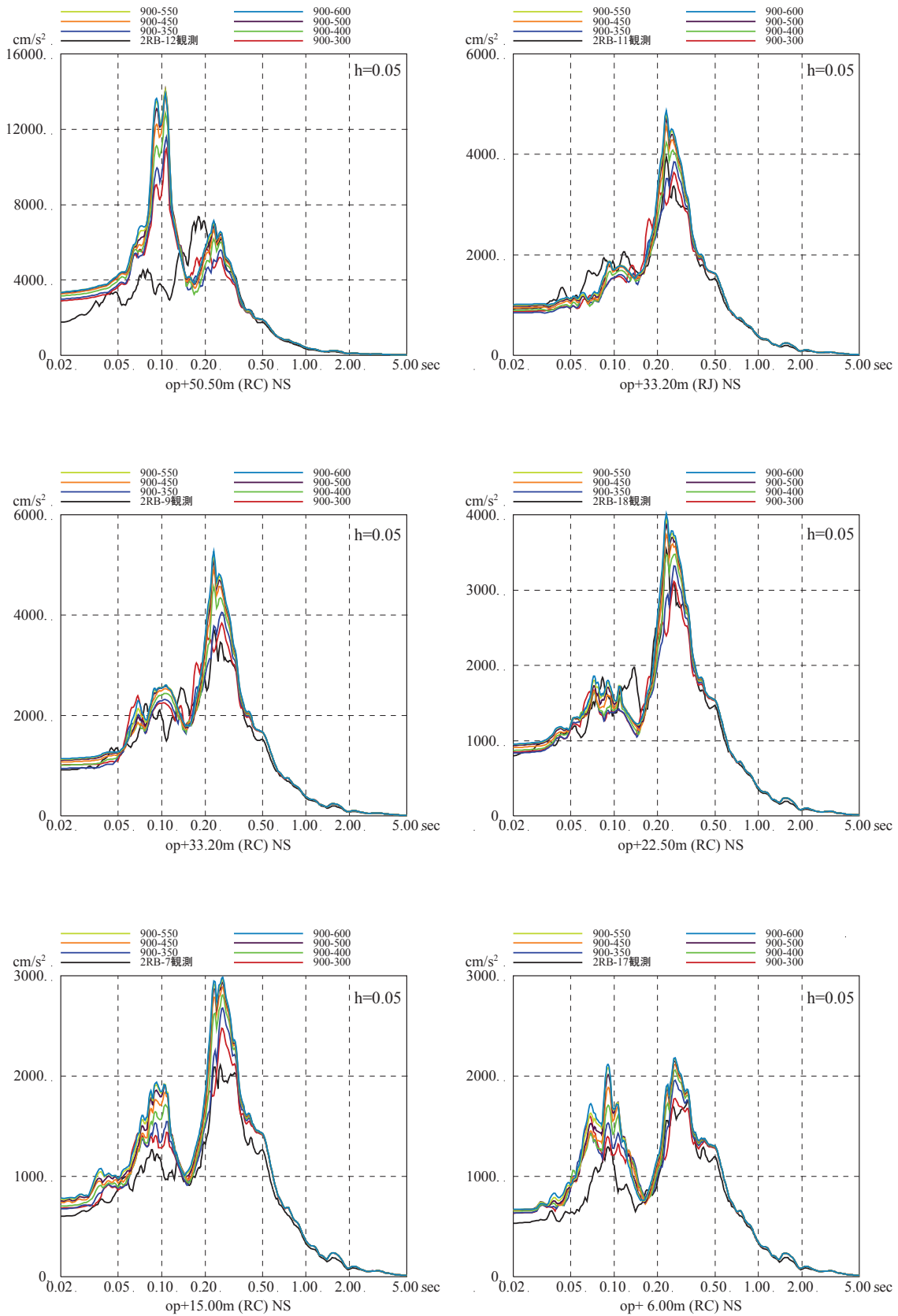


2011. 4. 7 NS 伝達特性比較



2011. 4. 7 EW 伝達特性比較

第 4.1-15 図 はぎとり波に対する基礎版上観測記録の伝達関数と
はぎとり波に対する入力変換波 (E+F+P) の伝達関数の比較
(2011/4/7 地震)



第 4.1-16 図 はざとり波入力のシミュレーション解析の床応答スペクトルの比較
(2011/3/11 東北地方太平洋沖地震, NS 方向, 減衰 5%)

d. ベースとなる地盤モデルの設定（詳細は添付9参照）

これまでの仮地盤モデルの検討結果から以下のことが確認されたことから、基準地震動 S_s を評価にあたり、女川2号炉原子炉建屋のベースとなる地盤モデルは第4.1-6表に示す地盤モデルとする。

- ① 表層地盤は2層地盤とし、層境界をO.P.+0mに設定すると観測記録との適合が良いこと。
- ② 表層地盤の内、下部については、せん断は速度 V_s を900m/sに設定すると観測記録との適合が良いこと。
- ③ 表層地盤の内、上部については、地震動レベルにより最適となるせん断波速度が異なることから非線形性を考慮する必要があること。

第4.1-6表 女川2号炉原子炉建屋 ベースとなる地盤モデル

	地層レベル O.P. (m)	単位体積重量 γ (kN/m ³)	せん断波速度 V_s (m/s)	減衰定数 h (%)
表層地盤	14.80	地震動レベルに応じた非線形性を考慮した地盤物性とする		
	0.00	23.3	900	3
底面地盤	-14.10	23.8	1300	3
	-25.00	24.6	2150	3
	-80.00	25.0	2440	3
	-200.0	25.0	2440	3

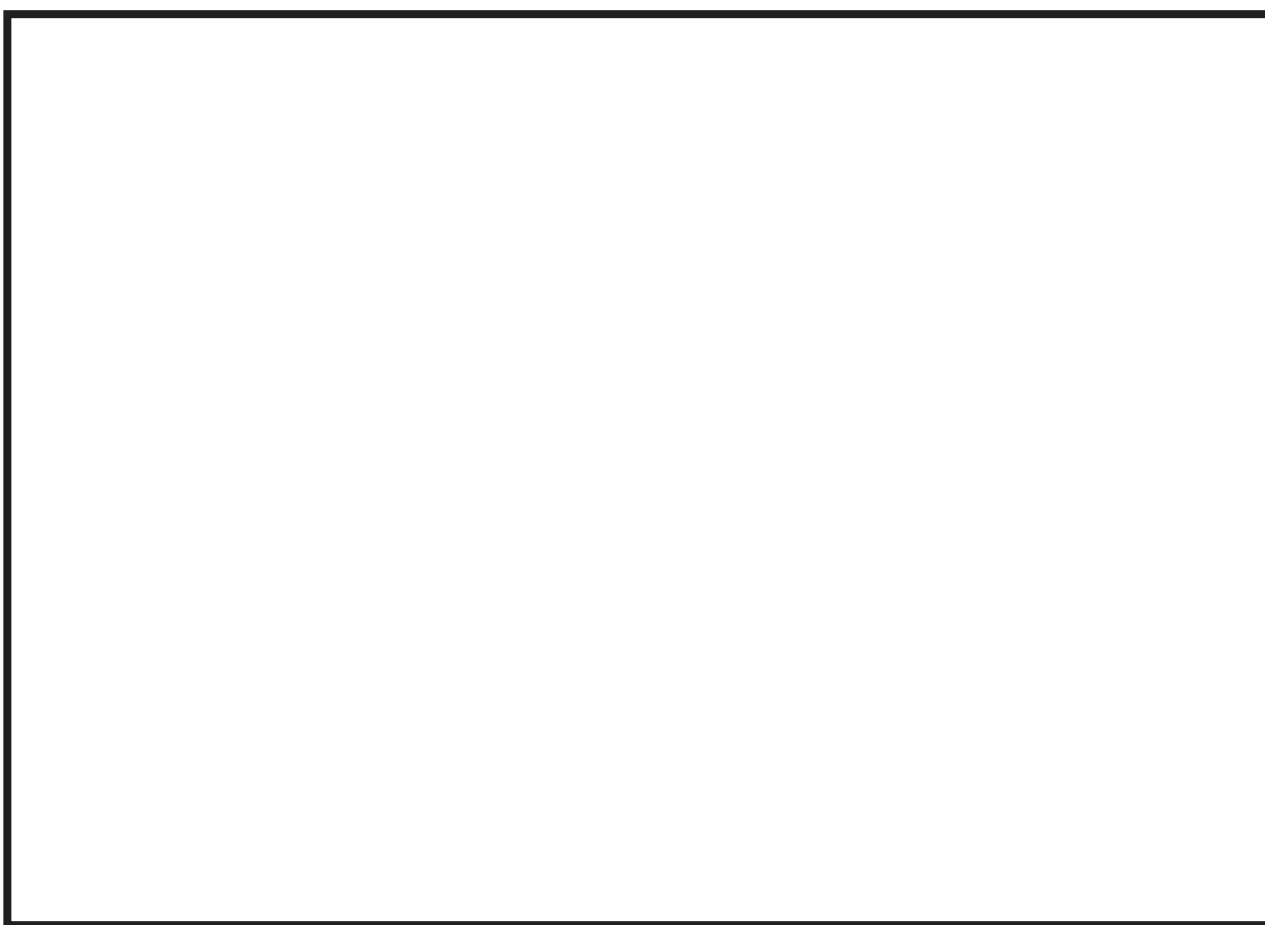
(4) 表層地盤の非線形化を考慮した基準地震動 Ss 評価用地盤モデルの設定

前項までの検討において、表層地盤上部 (O. P. 14. 8m~O. P. 0m) については、地震動レベルに応じた非線形特性を考慮する必要があることが確認された。

表層地盤上部の地盤物性値は、波動伝播特性評価において主に盛土の影響が強い層であることから盛土の物性値を流用することとして、非線形特性を設定する。

盛土の物性値は、地盤調査結果を基に初期剛性 G_0 、 $G/G_0 - \gamma$ 曲線および $h - \gamma$ 曲線の非線形特性を設定する。盛土物性値の調査位置を第 4. 1-17 図に示す。また、各試験結果から設定した盛土物性値を第 4. 1-7 表に示す。

表層地盤上部に非線形特性を考慮した地盤モデルを第 4. 1-8 表 (女川 2 号炉原子炉建屋地盤物性) に示す。



第 4. 1-17 図 盛土物性値の調査位置図

本資料のうち、枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。

第 4.1-7 表 各試験結果から設定した盛土物性値

地盤	強度定数		初期せん断剛性 G_0 (MN/m^2)	減衰
	粘着力 C (MN/m^2)	内部摩擦角 ϕ ($^\circ$)		
盛土 地下水 位以浅	0.1	33.9	$1787 \sigma_c^{0.84}$	$h=0.183 \gamma / (\gamma + 0.000261)$

第 4.1-8 表 女川 2 号炉原子炉建屋地盤物性

	地層レベル O. P. (m)	単位体積重量 γ (kN/m^3)	せん断波速度 V_s (m/s)	減衰定数 h (%)
表層地盤	14.80	18.6	※1	3※2
	0.00	23.3	900※3	3
底面地盤	-14.10	23.8	1300	3
	-25.00	24.6	2150	3
	-80.00	25.0	2440	3
	-200.0	25.0	2440	3

※1 O. P. 14.8m~O. P. 0m は、上載圧依存を考慮してせん断波速度と相関のある初期剛性 G_0 を設定する。また、ひずみ依存による非線形特性を考慮する。

※2 Rayleigh 減衰。また、ひずみ依存による非線形特性を考慮する。

※3 PS 検層結果と観測記録の分析より設定

初期剛性 G_0 は、PS 検層結果により (4.1-1) 式で設定する。

$$G_0 = 1787\sigma_c^{0.84} \quad (4.1-1)$$

$$\text{ここで, } \sigma_c [\text{MN/m}^2] = Z \times \rho_t \times \frac{2}{3} \quad Z: \text{深度}$$

$$\rho_t = 18.6 [\text{kN/m}^3]$$

$G/G_0 - \gamma$ 曲線は、原位置せん断試験結果による強度定数と拘束圧から求めたせん断強度 τ_m と初期剛性 G_0 から、基準ひずみ γ_m を算定し (4.1-2) 式により求める。

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_m}} \quad (4.1-2)$$

$$\text{ここで, } \gamma_m = \frac{\tau_m}{G_0}$$

$$\tau_m = \tau_0 + \sigma_{md} \tan \phi$$

$$\tau_0 [\text{N/mm}^2] = 0.1$$

$$\phi [^\circ] = 33.9$$

$$\sigma_{md} = 3/4 \times Z \times \rho_t (\text{N/mm}^2)$$

$h - \gamma$ 曲線は、繰返し三軸試験結果に基づき (4.1-3) 式により求める。

$$h = 0.183\gamma / (\gamma + 0.000261) \quad (4.1-3)$$

4.2 観測記録を用いた地盤モデルの検証(詳細は添付10参照)

a. 検討概要

設定した地盤モデルの妥当性を確認することを目的として、はぎとり波を用いた 3.11 地震等のシミュレーション解析を実施し、地震観測記録との整合性を確認した。

b. 検討方法

自由地盤の観測記録から算定したはぎとり波に対する基礎版上観測記録と検討用に仮定した地盤モデルにより算定した基礎版底面レベル (0.P. -14.1m) の入力地震動 (E+F+P 波, P は切欠き力の時刻歴波形) の伝達関数に表れる表層地盤の 1 次周期に対応する 4~6Hz 付近の谷の再現性を確認することにより検討する (第 4.2-1 図 表層地盤物性の検討方法の概念参照)。検討に用いた地震緒元を表 4.2-1 に示す。

3.11 地震については、はぎとり波を用いて 4.1 項で設定した地盤モデルにより入力地震動を算定し、建屋のシミュレーション解析を実施する。解析結果と地震観測記録を比較することにより地盤モデルの検討を行う。また、参考に基礎版上の観測記録を用いたシミュレーション解析の結果も合わせて示す。シミュレーション解析の概要を第 4.2-2 図~第 4.2-4 図に、解析条件を第 4.2-2 表に示す。

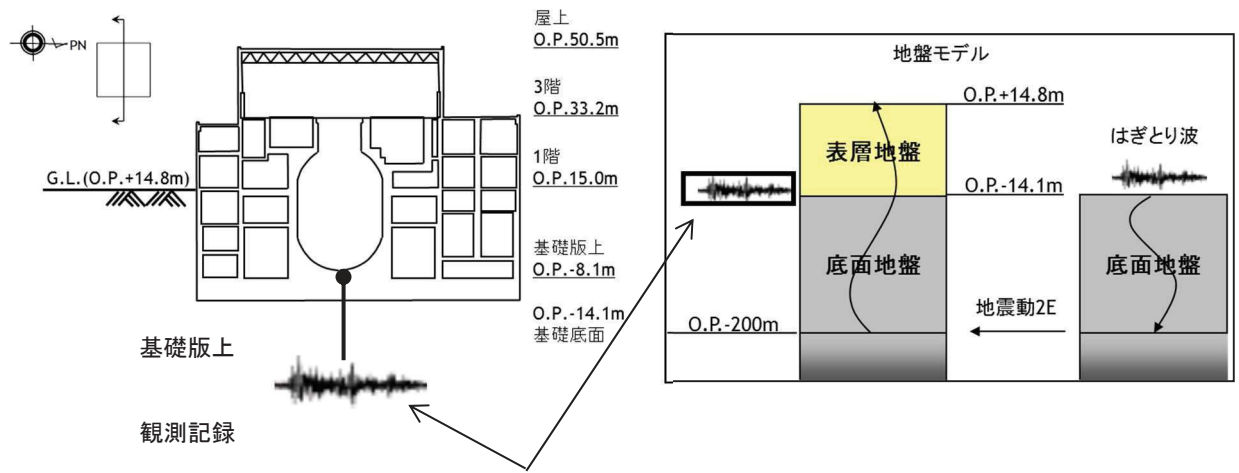
c. 検討結果

検討に用いた代表地震に対する伝達関数を比較して第 4.2-5 図に示す。いずれの地震についても伝達関数の谷の位置を概ね再現している。

3.11 地震のシミュレーション解析結果の床応答スペクトルを観測記録と比較して第 4.2-6 図および第 4.2-7 図に示す。

EW 方向の周期 0.1 秒より短周期側で観測記録より過大評価になる傾向があるが、それ以外のシミュレーション解析結果は、観測記録をやや上回るもののよく整合する結果となっている。基礎版上観測記録入力によるシミュレーション解析とも同等の適合度となっている。

上記の結果から設定した地盤モデルは、観測記録とも整合しており妥当であると考えられる。また、設定した表層地盤上部のひずみ依存の非線形特性を考慮していることから基準地震動 S_s 時にもこの地盤モデルを用いて応答解析をすることが可能である。

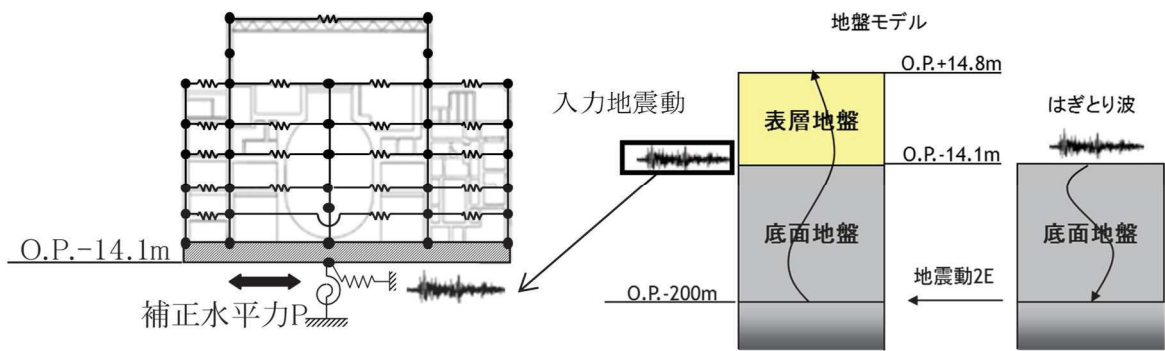


はざとり波に対する伝達関数の谷となる振動数を比較

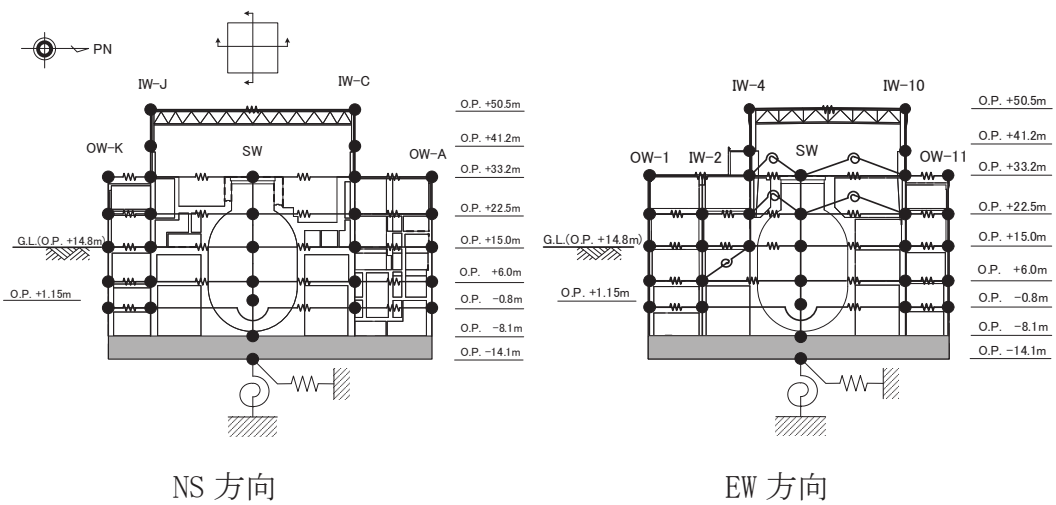
第 4. 2-1 図 表層地盤物性の検討方法の概念

第 4. 2-1 表 検討に用いた地震諸元

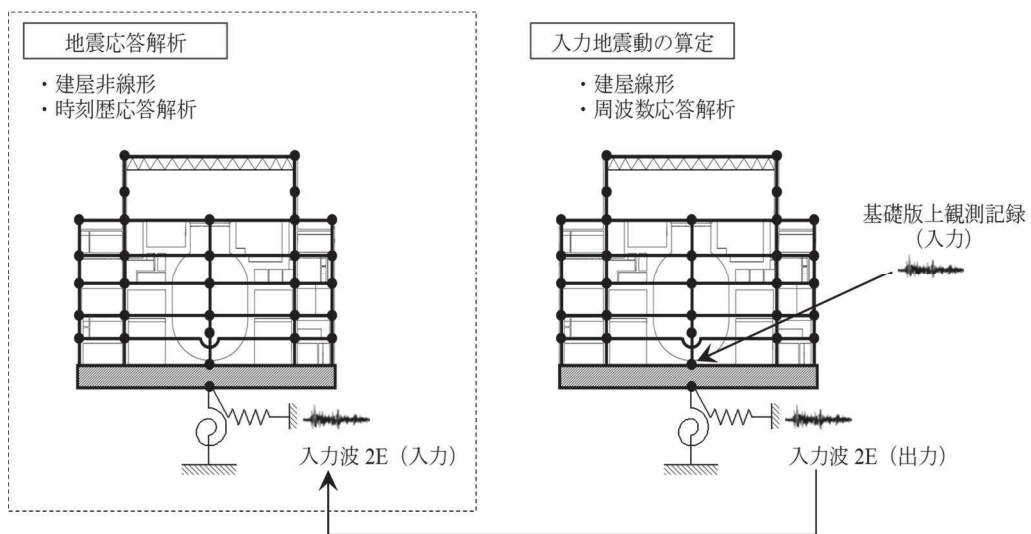
地震	M	震源地	自由地盤 B2 地点(地中記録) 最大加速度 (PN 基準に方位補正) (cm/s^2)	
			NS 方向	EW 方向
1 2005/8/16 11:46	7.2	宮城県東方沖	233	221
2 2011/3/9 11:45	7.3	宮城県東方はるか沖	30	12
3 2011/3/11 14:46	9.0	宮城県東方はるか沖	467	421
4 2011/4/7 23:32	7.2	宮城県東方沖	321	396



第 4.2-2 図 シミュレーション解析手法の概念図



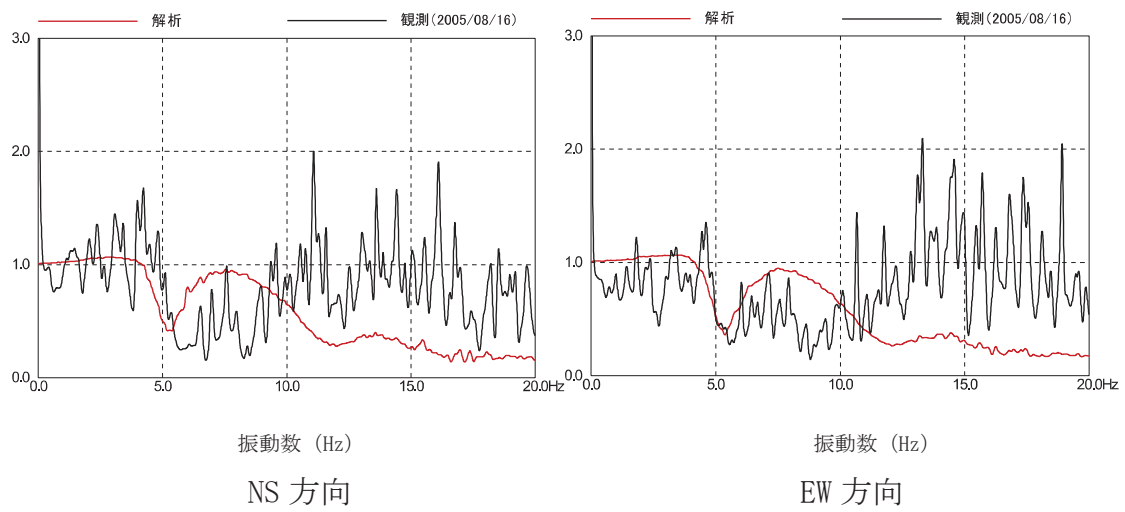
第 4.2-3 図 建屋シミュレーション解析モデル



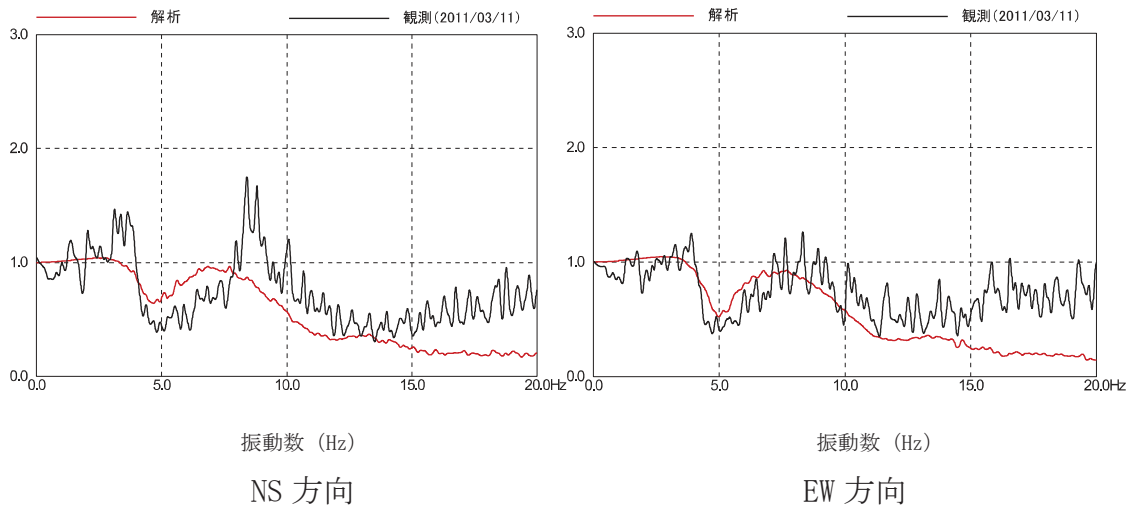
第 4.2-4 図 基礎版上観測記録を用いた建屋シミュレーション解析

第 4.2-2 表 解析条件

ケース	はぎとり波を用いた シミュレーション解析	(参考) 基礎版上観測記録入力
建屋	2号炉原子炉建屋	
地震動	3.11 はぎとり波	基礎版上観測記録
入力地震動	建屋底面位置の 地震動 (E+F) を算定し入力	基礎版上観測記録から 算定し入力
建屋モデル	3.11 地震シミュレーションモデル (初期剛性低下考慮, 建屋減衰 7%, 側面ばね無し)	
地盤モデル	Ss 評価用地盤モデル (表層地盤: 2層モデル)	—

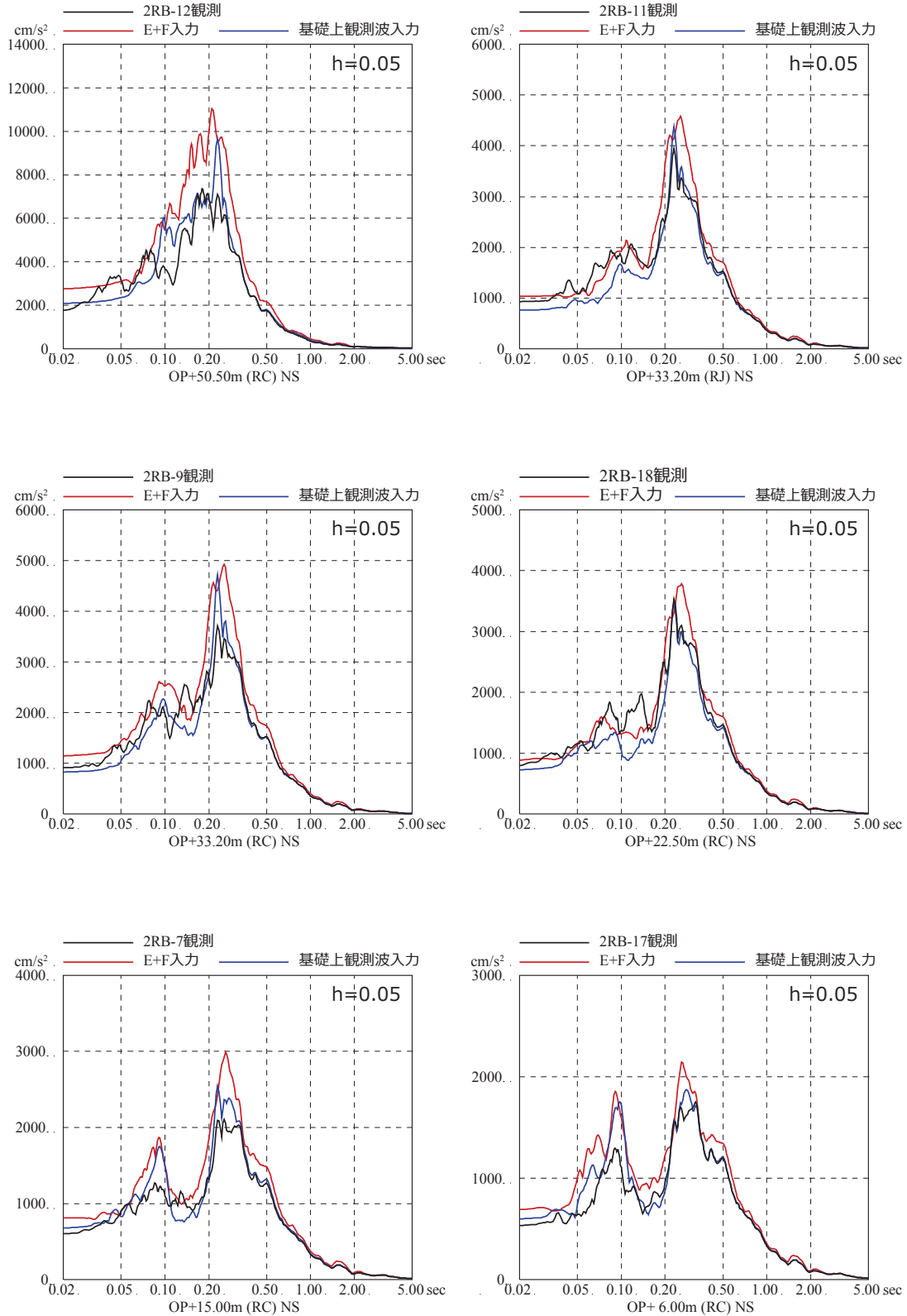


2005/8/16 地震

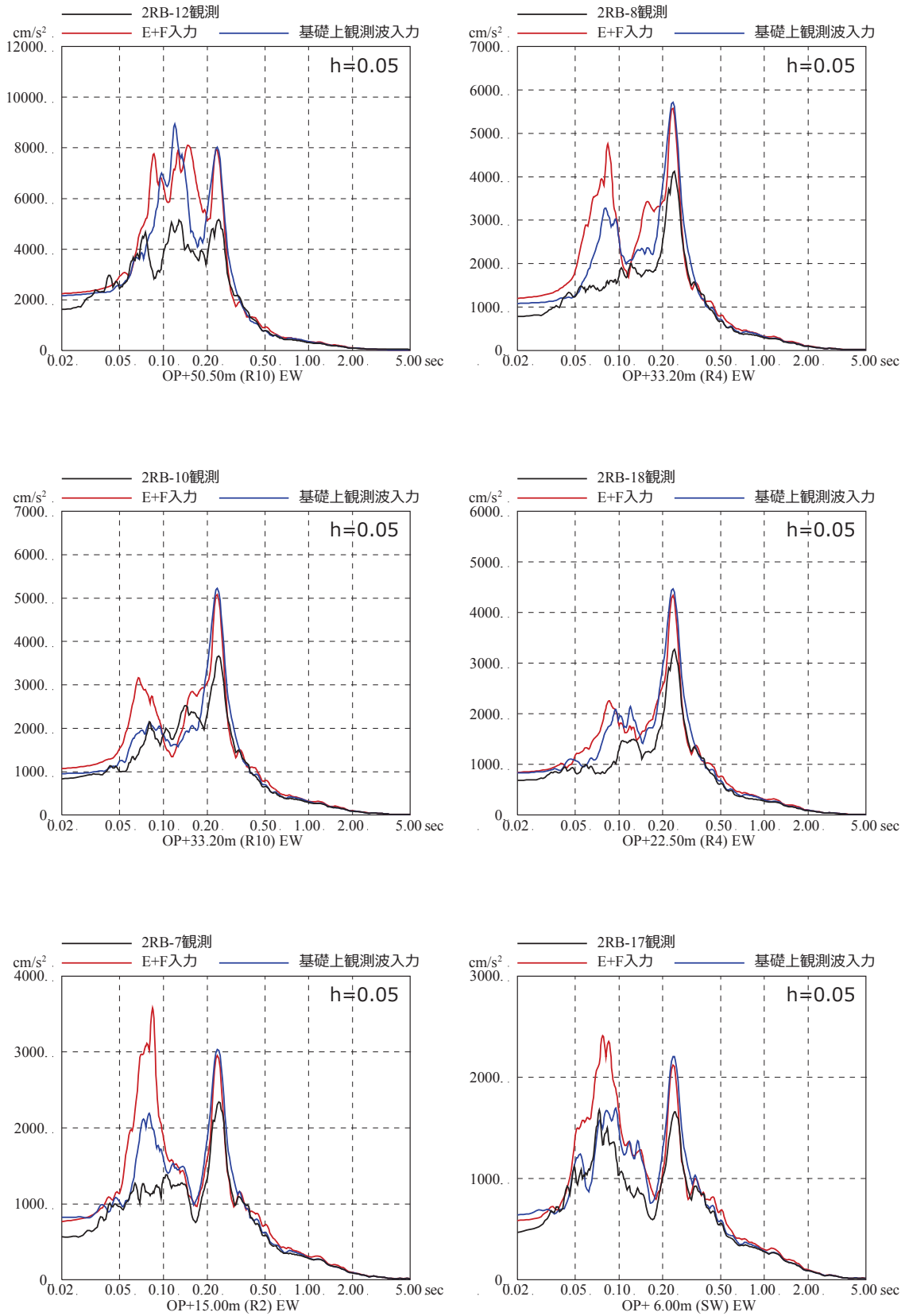


東北地方太平洋沖地震

第 4.2-5 図 伝達関数の比較
 (基礎版上観測記録／はざとり波)
 (仮定した地盤モデルにより算定した入力変換波 (E+F+P) ／はざとり波)



第 4.2-6 図 3.11 地震のはざとり波を入力に用いた場合と
 基礎版上観測記録を用いたシミュレーション解析結果の比較
 (2号炉原子炉建屋, NS 方向) ※地震計位置は, 付録 1 参照



第 4.2-7 図 3.11 地震のはざとり波を入力に用いた場合と基礎版上観測記録を用いたシミュレーション解析結果の比較 (2号炉原子炉建屋, EW 方向) ※地震計位置は, 付録 1 参照

4.3 設定した地盤モデルの概要

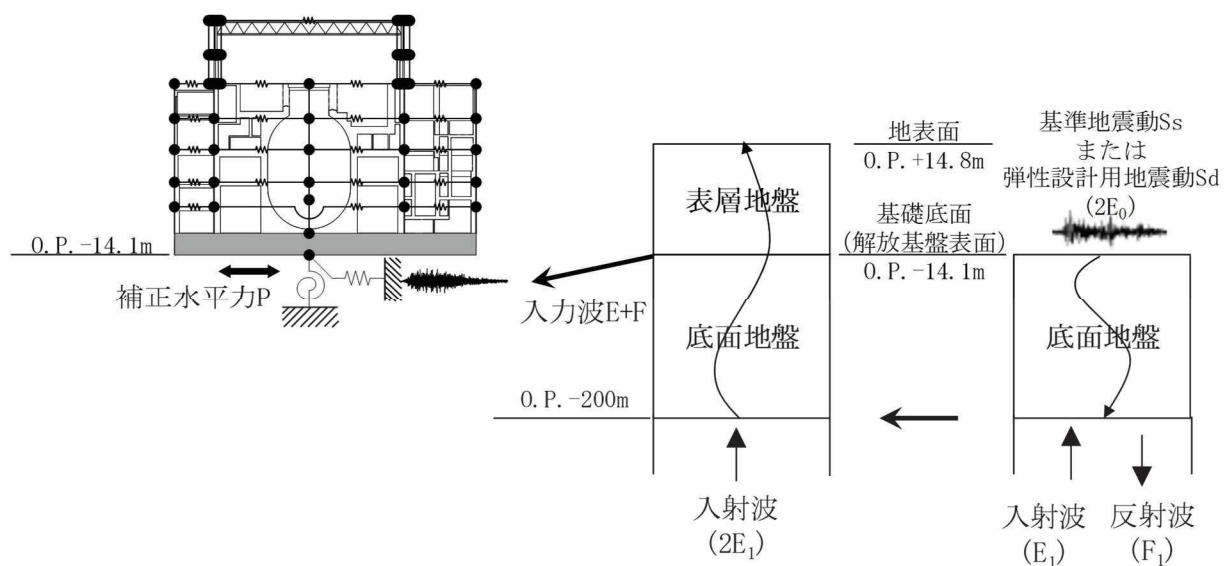
(1) 地震応答解析モデルへの入力概要

3.1 項の検討から 3.11 地震の入力地震動レベルの強震動において、原子炉建屋のような埋め込まれた建屋では表層地盤の影響を入力地震動に考慮することができることが確認された。

これを踏まえて基準地震動 S_s の入力に際しては、表層地盤の影響を考慮した地震動 (E+F) を入力することに加えて、表層地盤について、地震動の振幅に応じた非線形特性を考慮する地盤モデルを採用する。なお、埋込み効果は無視する。

地震応答解析モデルへの入力は、水平方向は解放基盤表面で定義された基準地震動 S_s 及び弾性設計用地震動 S_d から、建屋底面位置 (O. P. -14.1m) より上部の地盤の振動特性を考慮して算定した地震動を入力する。

地震応答解析モデルへの入力概要 (水平方向) を第 4.3-1 図に示す。



第 4.3-1 図 地震応答解析モデルへの入力概要(水平方向)

(2) 地盤モデル

今回工認における女川2号炉原子炉建屋への入力地震動算定に用いる地盤モデルの地盤物性値は第4.3-1表に示す地盤物性値とした。

第4.3-1表 女川2号炉原子炉建屋への入力地震動算定に用いる地盤モデルの地盤物性値

	地層レベル O. P. (m)	単位体積重量 γ (kN/m ³)	せん断波速度 V_s (m/s)	減衰定数 h (%)
表層地盤	14.80	18.6	※1	3 ^{※2}
	0.00	23.3	900 ^{※3}	3
底面地盤	-14.10	23.8	1300	3
	-25.00	24.6	2150	3
	-80.00	25.0	2440	3
	-200.0	25.0	2440	3

※1 O. P. 14.8m~O. P. 0m は、上載圧依存を考慮してせん断波速度と相関のある初期剛性 G_0 を設定する。また、ひずみ依存による非線形特性を考慮する。

※2 Rayleigh 減衰。また、ひずみ依存による非線形特性を考慮する。

※3 PS 検層結果を観測記録の分析より補間して設定

0. P. 14. 8m～0. P. 0m の表層地盤には地盤調査結果に基づき，初期剛性 G_0 ， $G/G_0-\gamma$ 曲線および $h-\gamma$ 曲線の非線形特性を第 4. 3-2 図 ($G/G_0-\gamma$ 曲線) および第 4. 3-3 図 ($h-\gamma$ 曲線) のとおり設定した。

初期剛性 G_0 は，PS 検層結果により (4. 1-1) 式で設定する。

$$G_0 = 1787\sigma_c^{0.84} \quad (4. 1-1)$$

$$\text{ここで， } \sigma_c [\text{MN/m}^2] = Z \times \rho_t \times \frac{2}{3} \quad Z: \text{深度}$$

$$\rho_t = 18.6 [\text{kN/m}^3]$$

$G/G_0-\gamma$ 曲線は，原位置せん断試験結果による強度定数と拘束圧から求めたせん断強度 τ_m と初期剛性 G_0 から，基準ひずみ γ_m を算定し (4. 1-2) 式により求める。

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_m}} \quad (4. 1-2)$$

$$\text{ここで， } \gamma_m = \frac{\tau_m}{G_0}$$

$$\tau_m = \tau_0 + \sigma_{md} \tan \phi$$

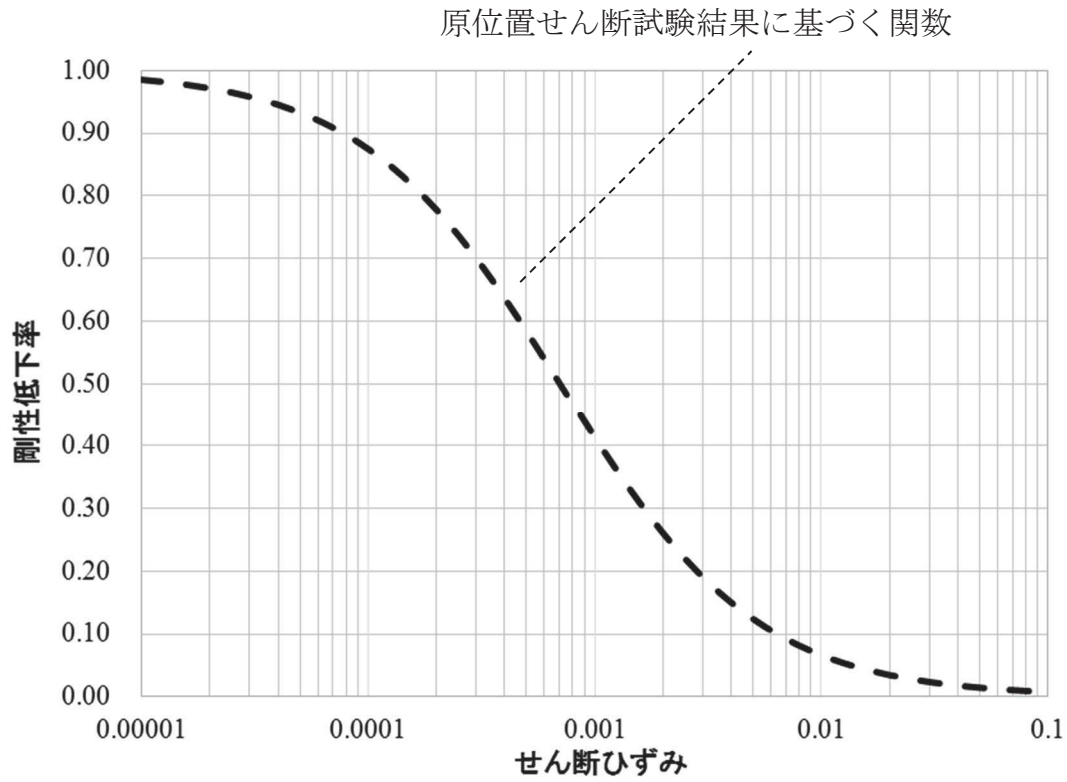
$$\tau_0 [\text{N/mm}^2] = 0.1$$

$$\phi [^\circ] = 33.9$$

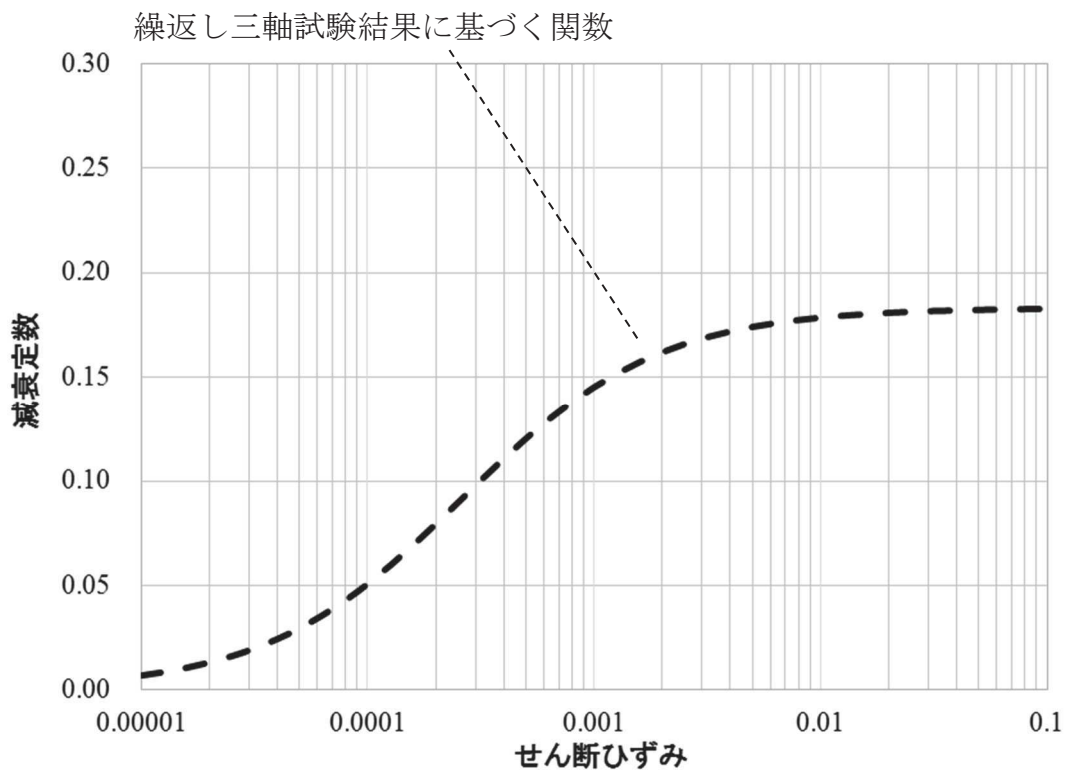
$$\sigma_{md} = 3/4 \times Z \times \rho_t (\text{N/mm}^2)$$

$h-\gamma$ 曲線は，繰返し三軸試験結果に基づき (4. 1-3) 式により求める。

$$h = 0.183\gamma / (\gamma + 0.000261) \quad (4. 1-3)$$



第 4.3-2 図 $G/G_0 - \gamma$ 曲線



第 4.3-3 図 $h - \gamma$ 曲線

5. 各要因が基準地震動 S_s による地震応答解析結果へ与える影響の検討（原子炉建屋）

(1) 表層地盤の影響を考慮した入力地震動の算定が建屋応答へ与える影響

(詳細は添付11参照)

a. 検討目的

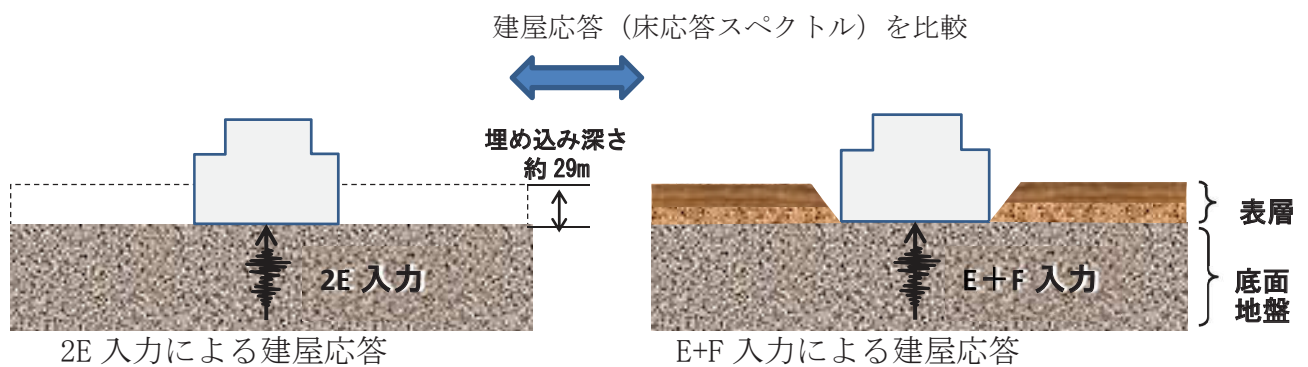
女川2号炉原子炉建屋の今回工認では、建屋への入力地震動を表層地盤の影響を考慮して算定するE+F入力としている。

ここでは、基準地震動 S_s を建屋へ直接入力した場合(2E入力)との建屋応答の差異を確認する。

b. 検討方法

検討は、基準地震動 S_s -D2を女川2号炉原子炉建屋の解析モデルに直接入力した場合(2E入力)と表層地盤の影響を考慮して算定した建屋底面位置の地震動を入力した場合(E+F入力)の建屋の解析結果を比較することにより行う。

検討に用いた地盤モデルは、「4.3設定した地盤モデルの概要」において示したモデルとする。検討概要を第5-1図に、解析条件を第5-1表に示す。



第5-1図 検討概要

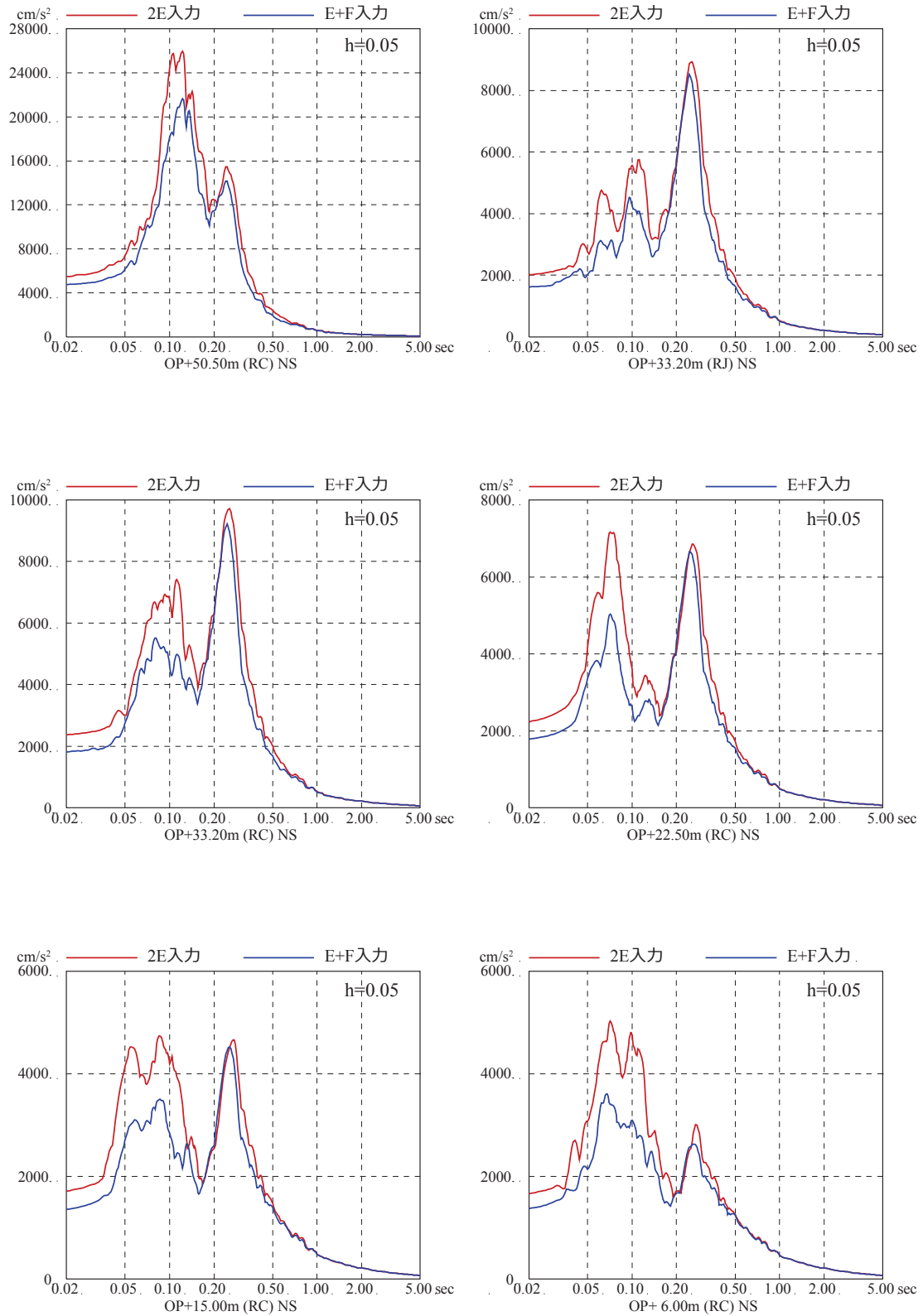
第5-1表 解析条件

	直接入力(2E入力)したケース	E+F入力としたケース
地震動	基準地震動 S_s -D2	
入力地震動	直接入力(2E入力)	建屋底面位置の地震動(E+F)を算定し入力
建屋モデル	今回工認モデル (初期剛性低下考慮, 建屋減衰5%, 側面ばね無し, 耐震補強考慮)	
地盤モデル	S_s 評価用地盤モデル (表層地盤:2層モデル)	

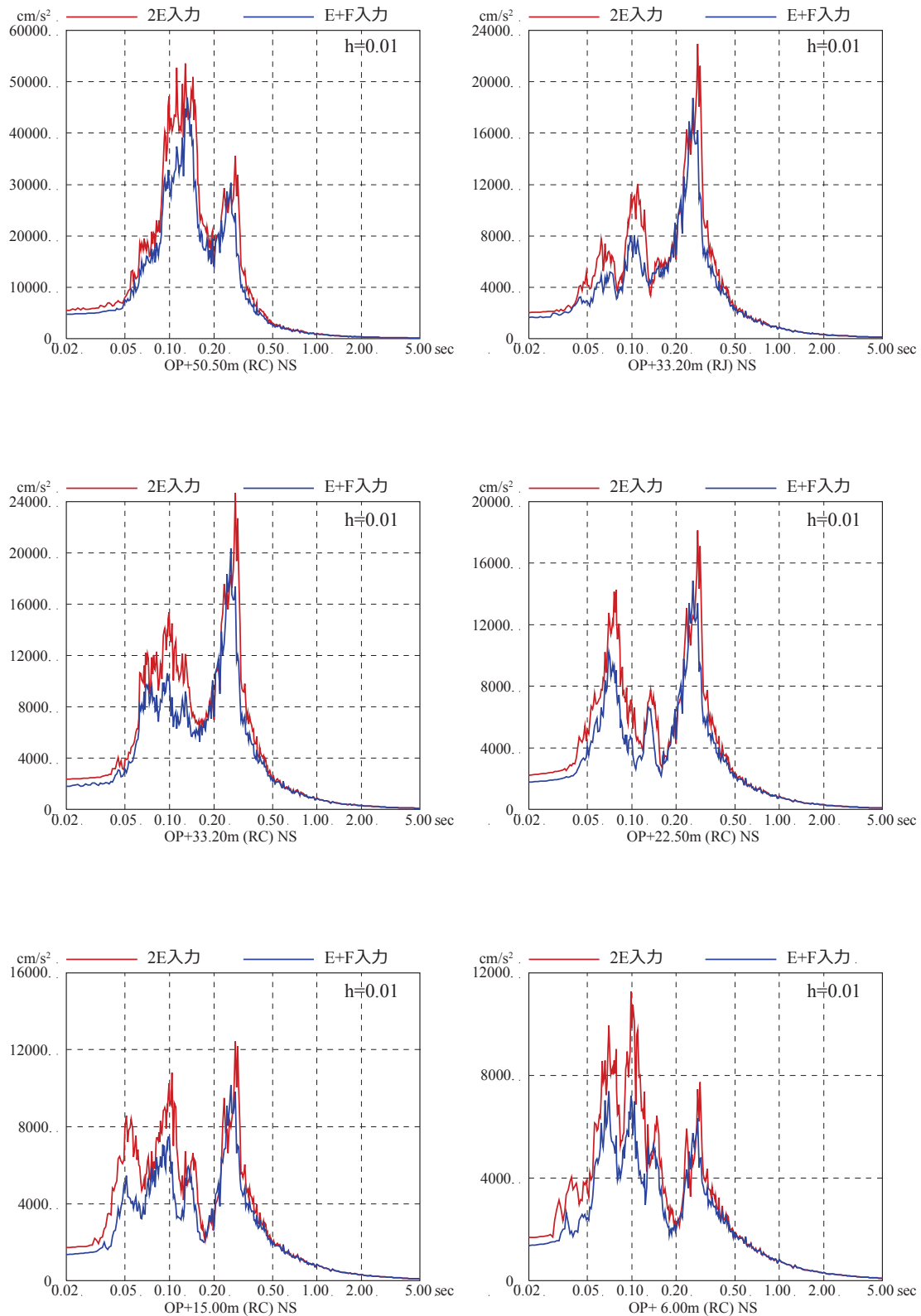
c. 検討結果

基準地震動 S_s -D2 を用いた直接入力と表層地盤の影響を考慮した場合の建屋応答への影響を第 5-2 図～第 5-5 図に示す。

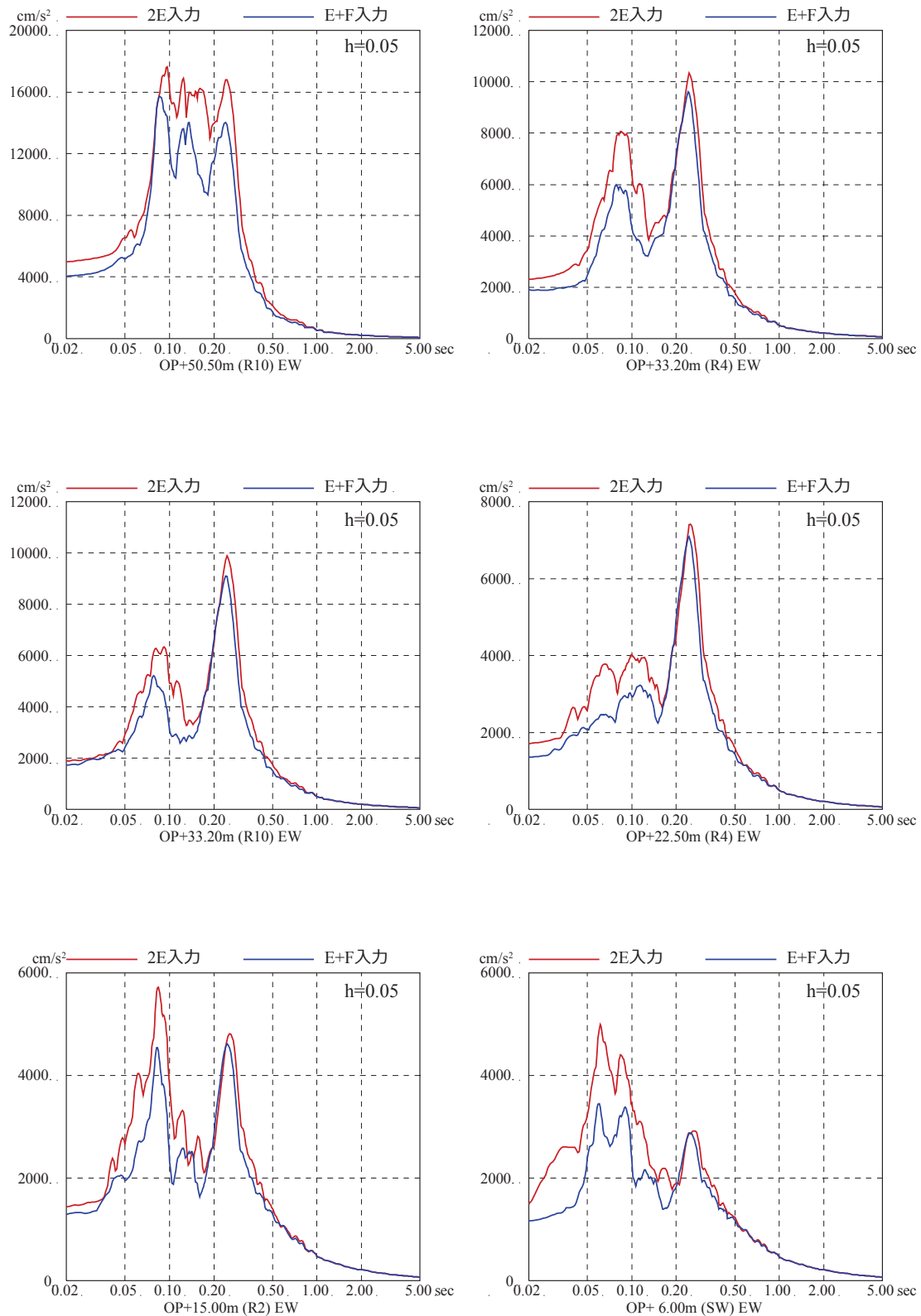
検討の結果、各階の床応答スペクトルは、基準地震動 S_s を直接入力した場合 (2E 入力) より表層地盤の影響を考慮して算定した地震動を入力した場合 (E+F 入力) の応答値は、小さくなる傾向があり、短周期においてその傾向が顕著に見られる結果となっている。



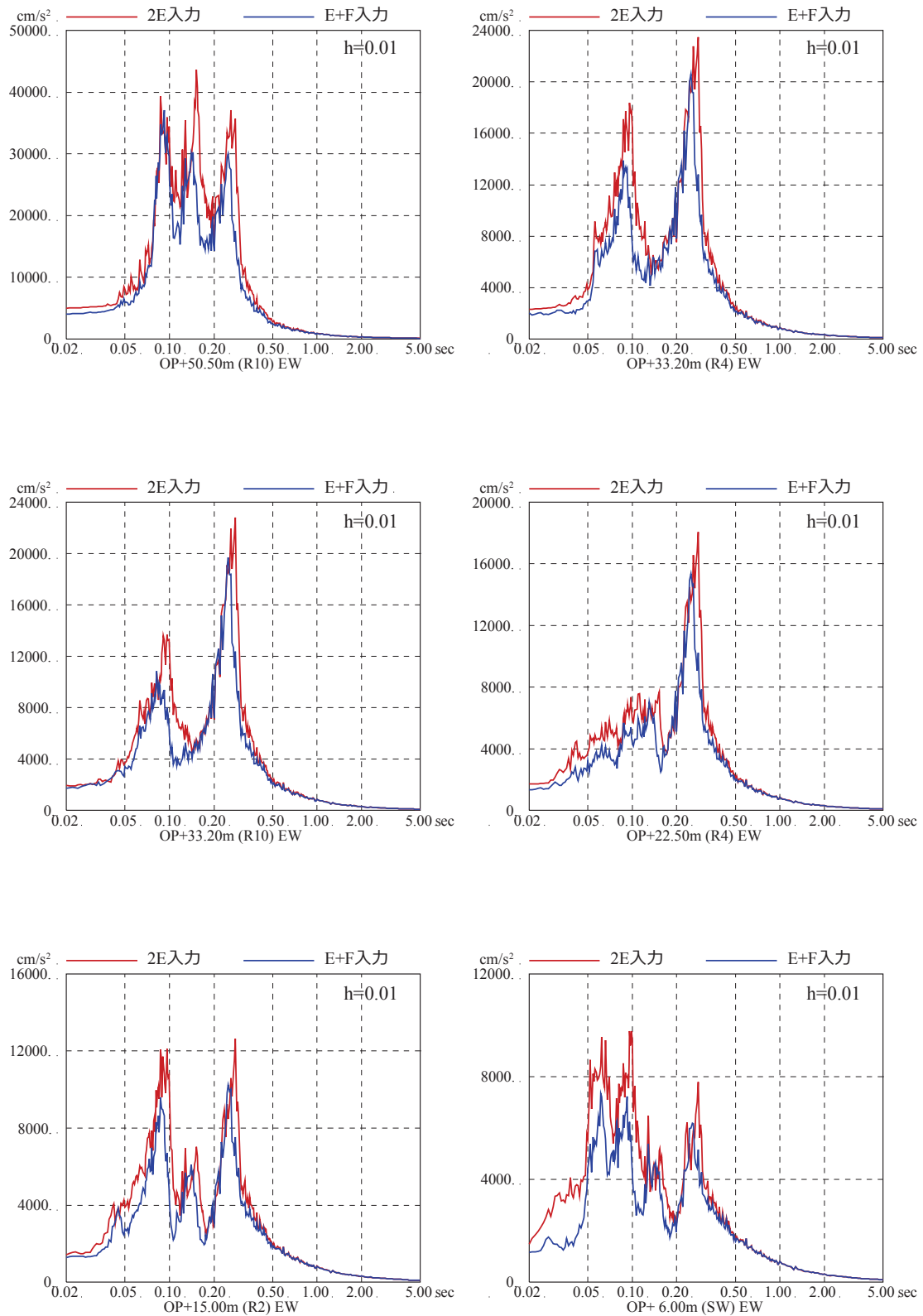
第 5-2 図 基準地震動 S_s-D2 を用いた直接入力と
 表層地盤の影響を考慮した場合の建屋応答への影響
 (2号炉原子炉建屋, NS 方向, 減衰 5%)



第 5-3 図 基準地震動 Ss-D2 を用いた直接入力と表層地盤の影響を考慮した場合の建屋応答への影響
(2号炉原子炉建屋, NS 方向, 減衰 1%)



第 5-4 図 基準地震動 S_S-D2 を用いた直接入力と
 表層地盤の影響を考慮した場合の建屋応答への影響
 (2号炉原子炉建屋, EW 方向, 減衰 5%)



第 5-5 図 基準地震動 S_s-D2 を用いた直接入力と
 表層地盤の影響を考慮した場合の建屋応答への影響
 (2号炉原子炉建屋, EW方向, 減衰 1%)

(2) 埋込み効果が建屋応答に与える影響（詳細は添付12参照）

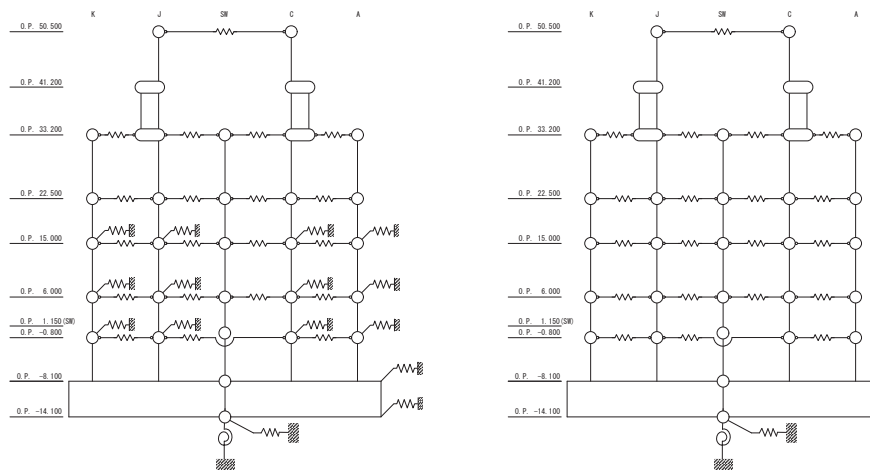
a. 検討概要

女川2号炉原子炉建屋の今回工認では、表層地盤の影響を考慮して建屋への入力地震動を算定することとしているが、側面ばねはモデル化していない。そこで、基準地震動 S_s を入力した場合の側面地盤が建屋の振動特性に与える影響を確認する。

b. 検討方法

検討は、側面地盤ばねを考慮したモデルと考慮しないモデルを用いて基準地震動 S_s -D2 による地震応答解析を行う。

側面地盤は、4.1 項にて設定した地盤を用いて等価線形解析を実施した際の収束物性値を用いて、地盤を地中の質点位置ごとに、単位厚さで平面的に切り出したモデルを設定し、建屋を面積が等価な円形平面に置換して、側面地盤ばねを Novak の方法（JEAG4601-1991〔追補版〕による方法）により算定する。側面地盤ばねの有無の検討に用いる地震応答解析モデルを第5-6図に、側面地盤ばねの設定に用いる等価地盤の物性値を第5-2表に示す。



側面地盤有

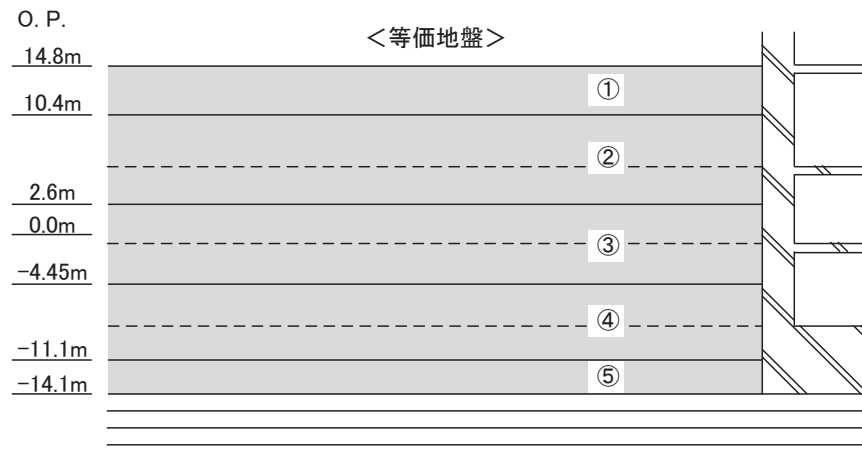
側面地盤無

	側面ばねを考慮するケース	側面ばねを考慮しないケース
地震動	基準地震動 S_s -D2	
入力地震動	建屋底面位置および側面地盤ばね位置の地震動(E+F)を算定し入力	建屋底面位置の地震動(E+F)を算定し入力
建屋モデル (建屋剛性, 建屋減衰)	今回工認モデル (初期剛性低下考慮, 建屋減衰5%, 耐震補強考慮)	
建屋モデル (側面地盤ばね)	有り	無し
地盤モデル	S_s 評価用地盤モデル (表層地盤:2層モデル)	

第5-6図 側面地盤ばねの有無の検討に用いる地震応答解析モデル

第5-2表 側面地盤ばねの設定に用いる等価地盤の物性値

建屋質点 レベル O.P. (m)	層 No.	等価地盤				
		せん断波速度 Vs (m/s)	せん断弾性係数 G ($\times 10^4$ kN/m ²)	単位体積重量 γ (kN/m ³)	ポアソン比 ν	減衰定数 he (%)
15.0	①	157	4.69	18.6	0.45	3
6.0	②	204	7.94	18.6	0.45	3
-0.8	③	755	12.6	21.6	0.45	3
-8.1	④	900	193	23.3	0.45	3
-14.1	⑤	900	193	23.3	0.45	3

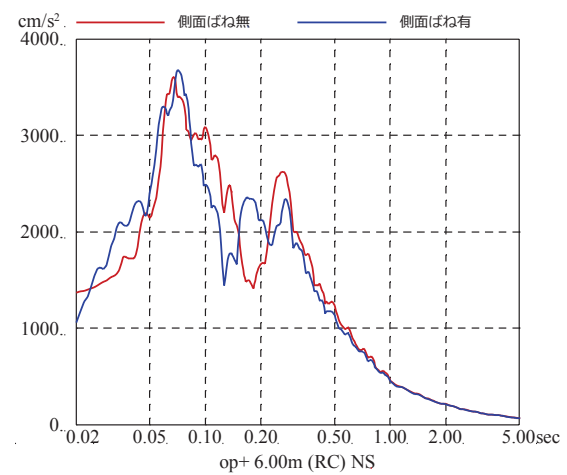
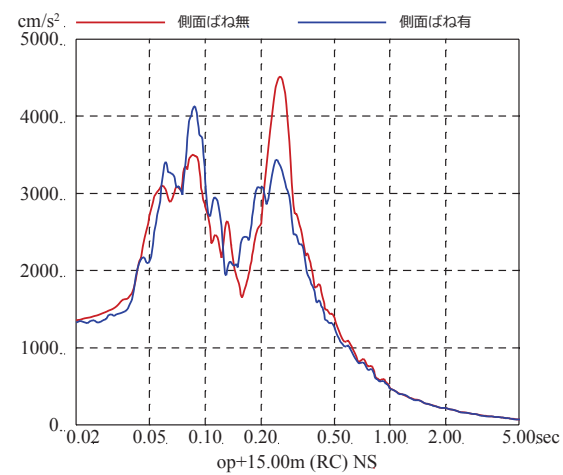
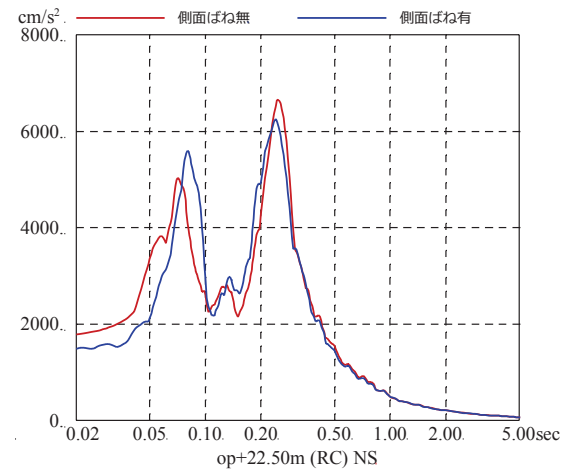
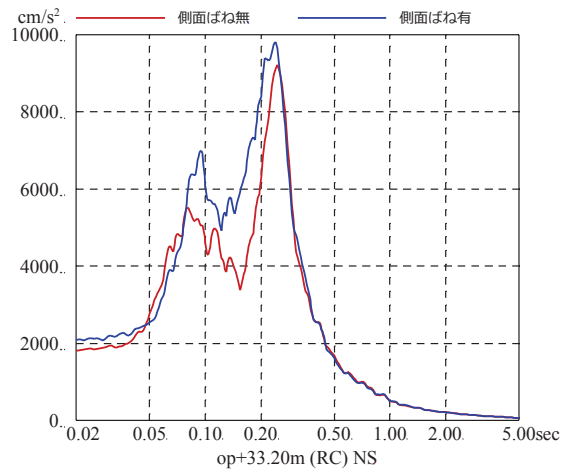
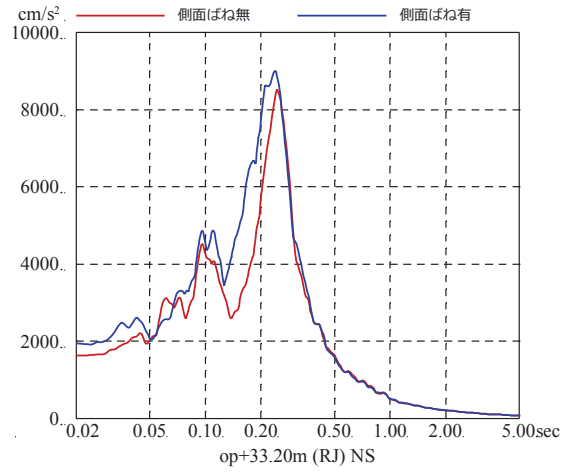
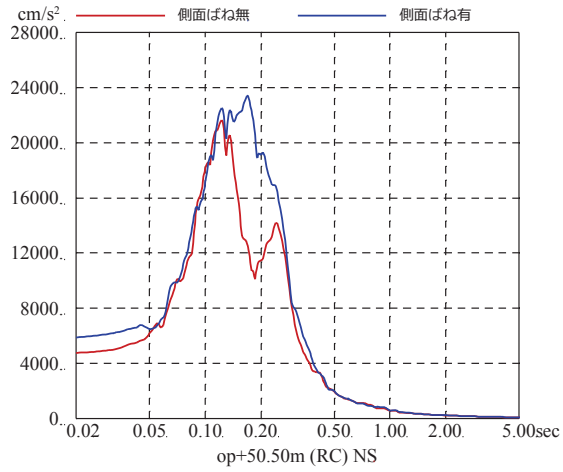


埋戻土の形状 (単位 : m)

c. 検討結果

側面地盤ばねの有無をパラメータとした地震応答解析結果の加速度応答スペクトルの比較を第 5-7 図（基準地震動 Ss-D2 を用いた側面地盤ばねの有無による地震応答解析結果の比較）に示す。

側面地盤ばねが有る場合の方が，無い場合に比べ，地震応答解析結果（加速度応答スペクトル）が大きくなる階が生じている。



第 5-7 図 基準地震動 S_s-D2 を用いた側面地盤ばねの有無による地震応答解析結果の比較 (2号炉原子炉建屋 , NS 方向)

6. まとめ

女川2号炉原子炉建屋の入力地震動算定に用いる地盤モデルを、地盤調査結果および既往の地震観測記録の分析に基づいて設定した。設定した地盤モデルは、入力地震動の加速度振幅に応じて、表層地盤の非線形特性を考慮できるモデルとした。

3.11地震および4.7地震の自由地盤の観測記録から算定されたはざとり波に対して、設定した地盤モデルを用いたシミュレーション解析を実施し、解析結果が観測記録および基礎版上観測記録を用いたシミュレーション解析と整合することを確認した。

以上のことから、設定した地盤モデルは基準地震動 S_s による地震応答解析に適用できると判断した。

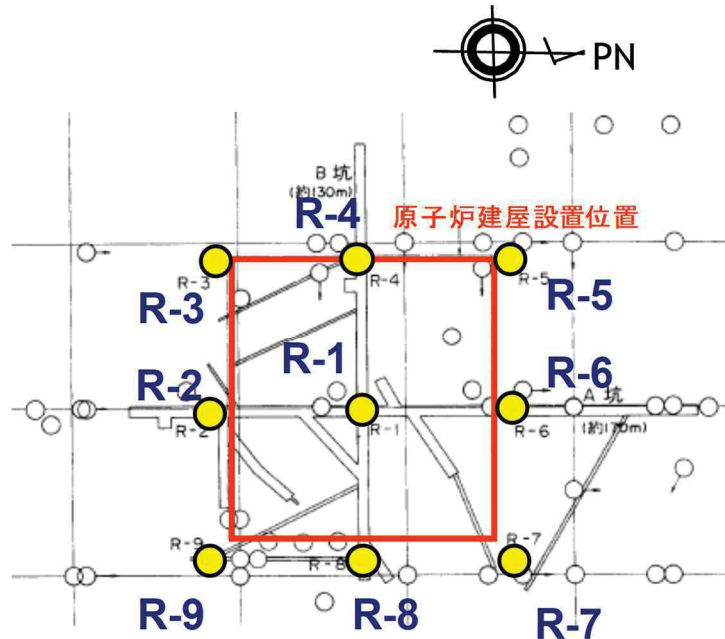
引き続き、他の建屋の地震応答解析に適用する入力地震動の設定の基本的考え方を整理するとともに、表層地盤の物性の違いが応答結果に与える影響の確認等を行い、不確かさへの反映について検討を行う。

また、埋込み効果について、その効果の大きい3号炉海水熱交換器建屋について、そのメカニズムについて引き続き検討を行う。

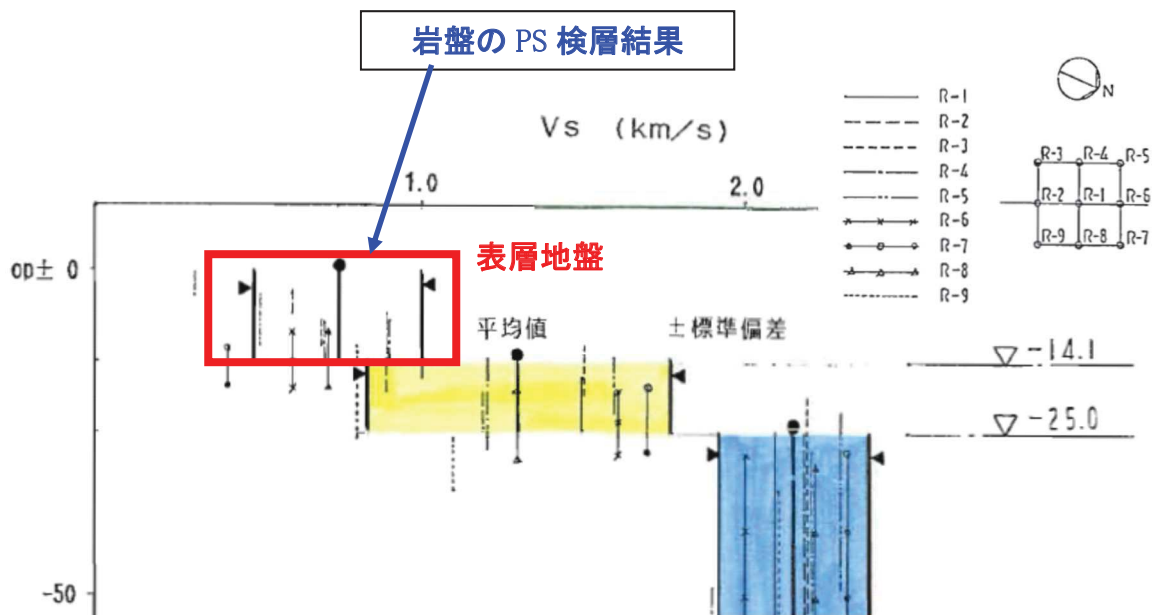
添付1 2号炉原子炉建屋の炉心ボーリングのPS検層および密度検層結果

2号炉原子炉建屋の炉心ボーリングのPS検層および密度検層を実施した位置を第1-1図に、PS検層結果を第2-2図に示す。また、速度層が変化する深さで各検層結果を平均した結果を第1-1表に示す。

PS検層結果では、O.P. -14.1m~O.P. 0m付近までの表層地盤のせん断波速度 V_s はおよそ 500~1000m/s に分布しており、平均は 740m/s であった。



第1-1図 地盤調査位置



第2-2図 女川2号炉原子炉建屋位置のPS検層結果

第 1-1 表 PS 検層および密度検層結果

	地層レベル O.P. (m)	単位体積重量 γ (kN/m ³)	せん断波速度 Vs (m/sec)
表層地盤	14.80	23.3	740
底面地盤	-14.10	23.8	1300
	-25.00	24.6	2150
	-80.00	25.0	2440
	-200.0	25.0	2440

添付2 3.11地震のはぎとり波を用いたシミュレーション解析による

表層地盤の影響確認

1. 検討目的および検討方法

既工認の入力地震動は、表層地盤の影響は考慮せず、保守的に基準地震動を直接入力する手法を採用していたが、3.11地震の観測記録を用いて表層地盤の影響が現れているか検討する。

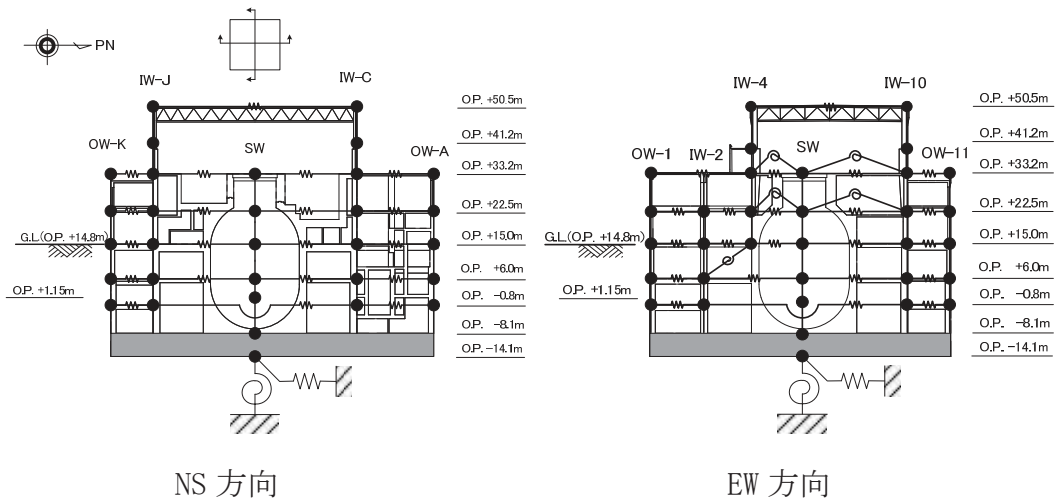
2. 検討方法

検討は、はぎとり波を用いたシミュレーション解析を実施し、はぎとり波を建屋モデルに直接入力（2E入力）した場合と添付1の地盤調査結果に基づき設定した初期地盤モデルを用いて表層地盤の影響を考慮して算定した建屋底面位置の地震動（E+F入力）を入力した場合の観測記録の再現性を確認した。

検討に用いた初期地盤モデルの地盤物性を第2-1表に、建屋シミュレーションモデルを第2-1図に示す。建屋シミュレーションモデルは、3.11地震等による建屋の初期剛性低下を考慮しており、建屋減衰は7%としている。

第2-1表 地盤調査結果に基づき設定した初期地盤モデルの地盤物性値

	地層レベル O. P. (m)	単位体積重量 γ (kN/m ³)	せん断波速度 V_s (m/sec)	減衰定数 h (%)
表層地盤	14.80	23.3	740	3
底面地盤	-14.10	23.8	1300	3
	-25.00	24.6	2150	3
	-80.00	25.0	2440	3
	-200.0	25.0	2440	3



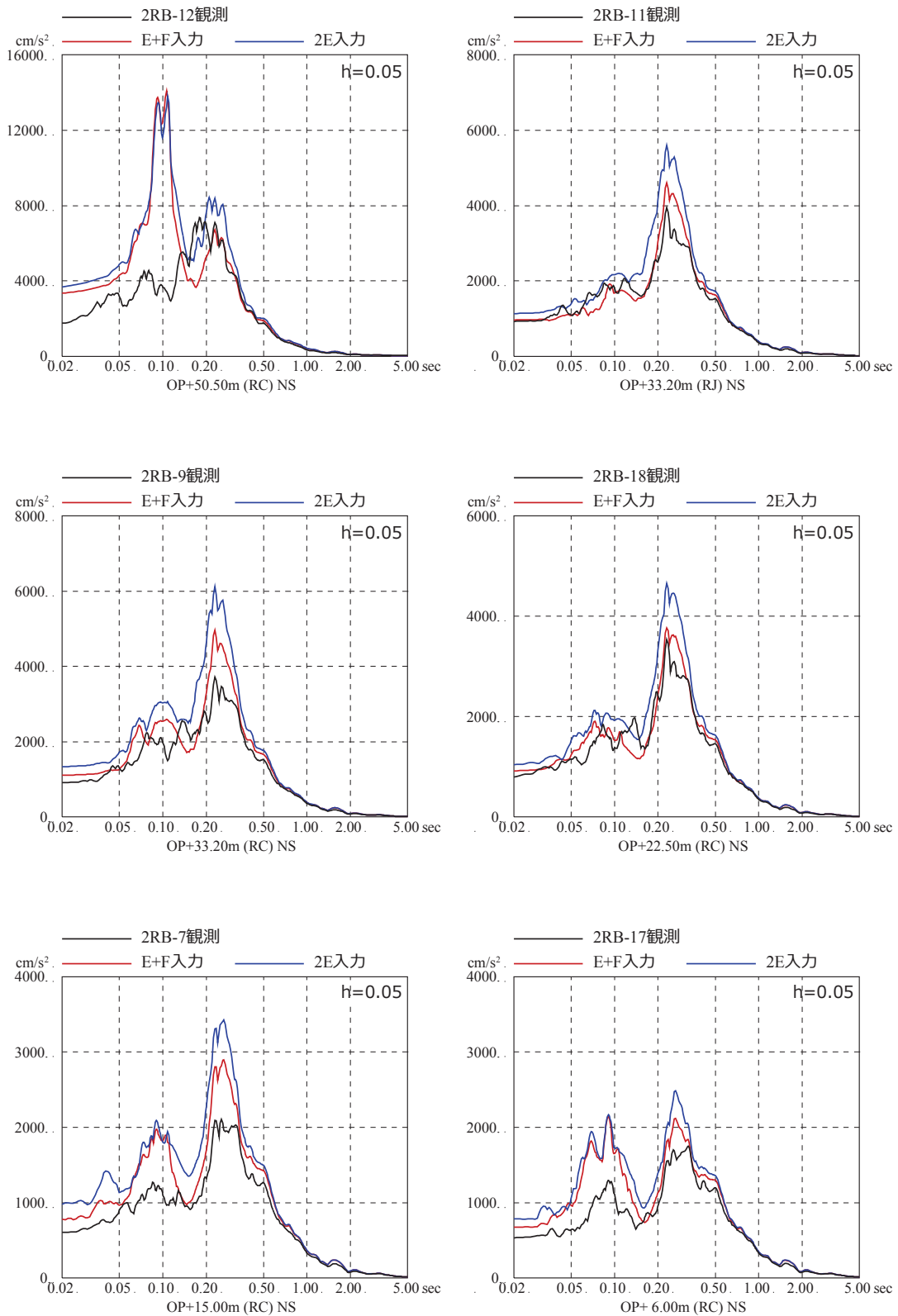
第 2-1 図 建屋シミュレーション解析モデル

3. 検討結果

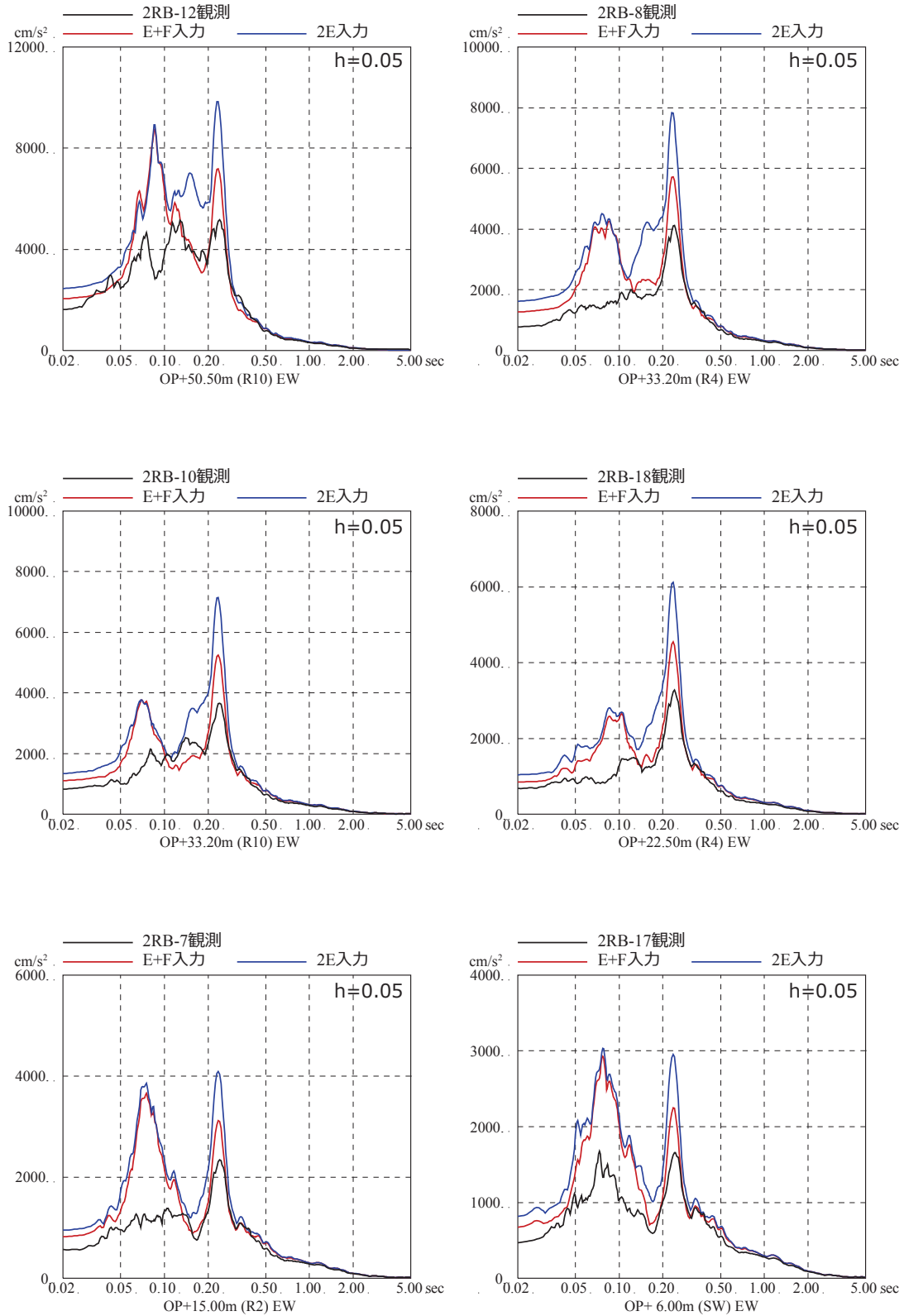
3.11 地震のはざとり波を用いたシミュレーション解析結果と観測記録の床応答スペクトルの比較を第 3-1 図～第 3-2 図に示す。

各階の床応答スペクトルは、はざとり波を直接入力 (2E 入力) した場合より表層地盤の影響を考慮して算定した地震動を入力 (E+F 入力) した方が、より観測記録の振幅に近く、床応答スペクトルの形状も傾向を捉えていることを確認した。

上記の結果から、建屋に入力する地震動については表層地盤の影響が現れていると考えられる。



第3-1図 3.11地震のはざとり波を用いた2E入力とE+F入力によるシミュレーション解析結果の比較
(2号炉原子炉建屋, NS方向)



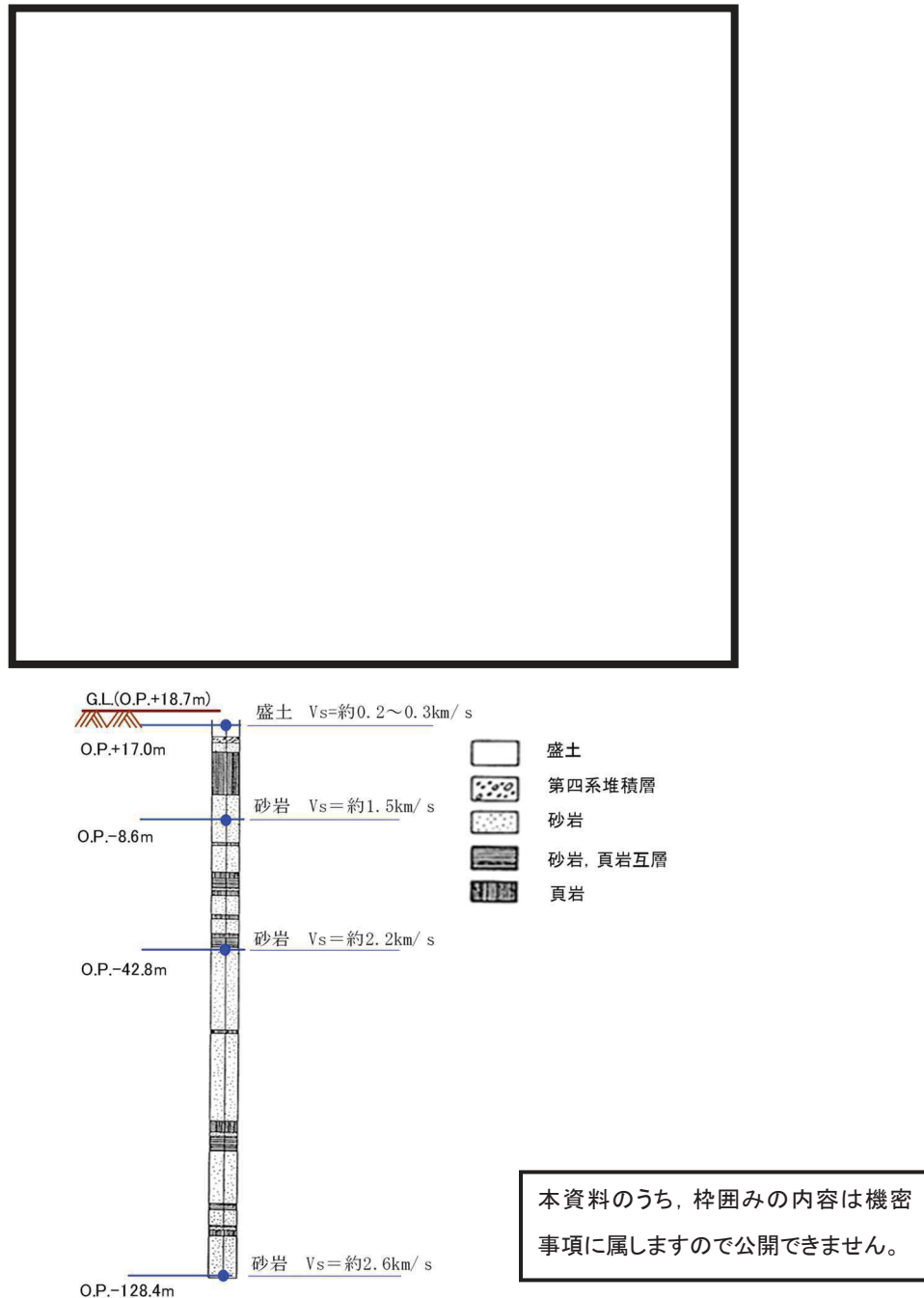
第3-2図 3.11地震のはざとり波を用いた2E入力とE+F入力によるシミュレーション解析結果の比較
(2号炉原子炉建屋, EW方向)

添付3 自由地盤のはぎとり解析用地下構造モデルによる傾向について

1. 検討目的

女川原子力発電所では、自由地盤での地震観測においてこれまで多くの地震観測記録が得られており、これらの地震観測記録を用いて、自由地盤地震観測点のはぎとり解析用地下構造モデルを最適化している。この地下構造モデルより、表層地盤の影響を検討し、地盤モデル設定における振動特性上変動を考慮すべきパラメータを確認することを目的とする。

自由地盤地震観測点の位置および深さ方向の配置を第 1-1 図に示す。



2. 自由地盤のはぎとり解析用地下構造モデルの検討の整理

自由地盤地震観測点のはぎとり解析用地下構造モデルは、過去の中小地震の観測記録を用いて、遺伝的アルゴリズムにより最適化解析を実施して同定している。2003年5月26日宮城県沖の地震、2005年8月16日宮城県沖の地震（M7.2）に適用している地下構造モデルを第2-1表に示す。

3.11地震に対するはぎとり解析用地下構造モデルは、既往検討による大振幅時の地盤モデル（第2-2表）をベースに見直しを行っている。見直しの際は、3層目以深の地盤モデルを固定とし、同定範囲は最表層2層部分（第2-2表 赤網掛部）とした。この2層は同一媒質と扱って、そのS波速度 V_s と減衰定数 $h(f)$ を遺伝的アルゴリズムを用いて最適化解析を実施した。3.11地震時の最適化地盤モデルを第2-3表に示す。

第2-1表 既往検討による小振幅時のはぎとり地盤モデル

深さ		層厚 (m)	密度 (t/m ³)	Vs (m/s)	減衰定数 $h(f)$	
G.L. (m)	O.P. (m)				水平	
					H_0	α
0	18.7	1.7	2.10	253	0.05	0.62
-1.7	17.0	3.3	2.10	253	0.05	0.62
-5.0	13.7	16.6	2.10	1001	0.51	0.19
-21.6	-2.9	5.7	2.55	1500	0.20	1.00
-27.3	-8.6	7.2	2.55	1500	0.20	1.00
-34.5	-15.8	27.0	2.66	2000	1.00	0.87
-61.5	-42.8	20.3	2.68	2200	0.77	1.00
-81.8	-63.1	65.3	2.68	2600	0.77	1.00
-147.1	-128.4					

$$h(f) = h_0 f^\alpha, 0 \leq h(f) \leq 0.3$$

解放基盤
表面相当

第 2-2 表 既往検討による大振幅時のはぎとり地盤モデル

深さ		層厚 (m)	密度 (t/m ³)	Vs (m/s)	減衰定数h(f)	
G.L. (m)	O.P. (m)				水平	
					h ₀	α
0	18.7	1.7	2.10	204	0.10	0.00
-1.7	17.0	3.3	2.10	204	0.10	0.00
-5.0	13.7	16.6	2.10	1001	0.51	0.19
-21.6	-2.9	5.7	2.55	1500	0.20	1.00
-27.3	-8.6	7.2	2.55	1500	0.20	1.00
-34.5	-15.8	27.0	2.66	2000	1.00	0.87
-61.5	-42.8	20.3	2.68	2200	0.77	1.00
-81.8	-63.1	65.3	2.68	2600	0.77	1.00
-147.1	-128.4					

解放基盤
表面相当

$$h(f) = h_0 f^\alpha, 0 \leq h(f) \leq 0.3$$

第 2-3 表 3.11 地震時のはぎとり地盤モデル

深さ		層厚 (m)	密度 (t/m ³)	Vs (m/s)	減衰定数h(f)	
G.L. (m)	O.P. (m)				水平	
					h ₀	α
0	18.7	1.7	2.10	112	0.44	0.38
-1.7	17.0	3.3	2.10	112	0.44	0.38
-5.0	13.7	16.6	2.10	1001	0.51	0.19
-21.6	-2.9	5.7	2.55	1500	0.20	1.00
-27.3	-8.6	7.2	2.55	1500	0.20	1.00
-34.5	-15.8	27.0	2.66	2000	1.00	0.87
-61.5	-42.8	20.3	2.68	2200	0.77	1.00
-81.8	-63.1	65.3	2.68	2600	0.77	1.00
-147.1	-128.4					

解放基盤
表面相当

$$h(f) = h_0 f^\alpha, 0 \leq h(f) \leq 0.3$$

3. 地盤モデル設定における振動特性上変動を考慮すべきパラメータ

最適化地盤モデルと 3. 11 地震の伝達関数の比較を第 3-1 図に示す。

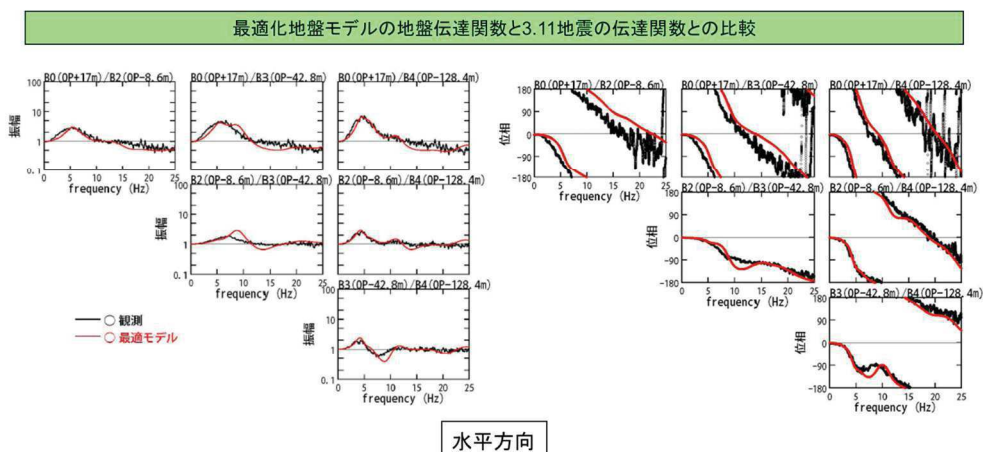
自由地盤のはぎとり解析用地下構造モデルの検討結果から、最表層の地盤物性値を最適化することで、3. 11 地震の様な大振幅時の伝達関数も再現できることを確認している。

これらの状況から、基準地震動 Ss に採用する入力地震動算定用の地盤モデルについても最表層の物性値を非線形化を含めた最適化することにより、地盤モデルを設定できると考えられる。

87

3. 2 水平動のはぎとり解析用地下構造モデル(最適化地盤モデル) (5)

最適化地盤モデルの理論伝達関数と2011年3月11日東北地方太平洋沖地震の観測記録の伝達関数
地盤モデルの最適化の検討



※原子力安全・保安院 地震・津波6-4-2より抜粋



※「第 128 回原子力発電所の新規規制基準適合性に係る審査会合

資料 2-2 女川原子力発電所 敷地の地質・地質構造及び地盤の振動特性について (補足説明資料)」より抜粋

第 3-1 図 はぎとり地盤の最適化地盤モデルと 3. 11 地震の伝達関数の比較

添付 4 表層地盤による埋め込み効果の影響

1. 検討概要

2号炉原子炉建屋の当初設計では、側面地盤による埋込み効果を期待していないため、実際の施工では側面地盤には掘削土を埋め戻すなどして、拘束効果の少ない施工を実施している。従って、2号炉原子炉建屋のように重量の大きい建屋については、特に埋め戻し土が建屋の振動特性に及ぼす影響は小さいと考えられる。

一方、支持岩盤と側方地盤のインピーダンス比が大きい場合は、側方地盤ばね (Novak ばね) を用いた解析方法には課題があることが指摘されている。

2号炉原子炉建屋のように重量の大きい建屋については、特に埋め戻し土による振動特性に及ぼす影響は小さいと考えられるが、それを解析により確認することを目的として検討を実施した。

以上を踏まえ、3.11地震の観測記録を用いて以下の2つの検討を実施する。

- ① 建屋重量の重い2号炉原子炉建屋を対象とした建屋シミュレーション解析において、側面地盤ばね (Novak ばね) の有無が建屋応答に与える影響や観測記録との整合性について確認する。
- ② 比較的小規模で建屋全体が埋め込まれている3号炉海水熱交換器を対象とした建屋シミュレーション解析において、側方地盤ばね (Novak ばね) の有無が建屋応答に与える影響や観測記録との整合性について確認する。

2. 側方地盤ばねの有無が建屋応答に及ぼす影響検討（2号炉原子炉建屋）

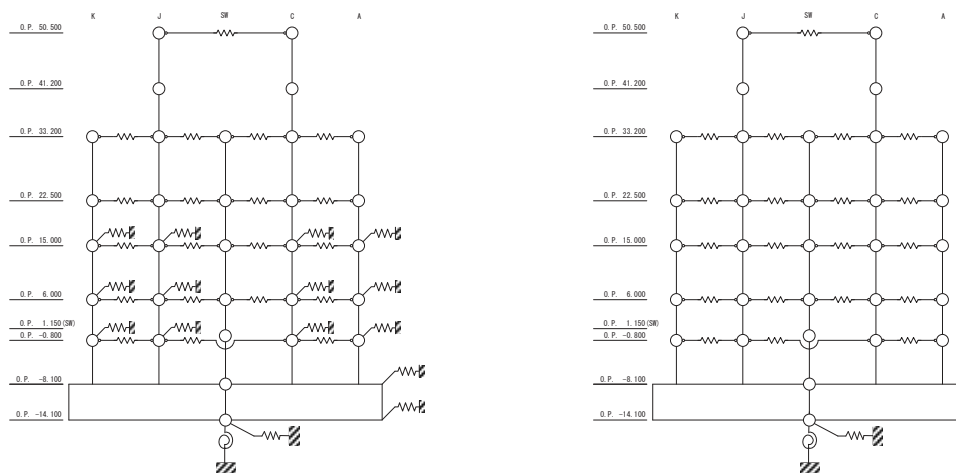
（1）検討方法

側面地盤が原子炉建屋の地震応答解析結果に及ぼす影響を確認するため、側面ばねを考慮したモデルと考慮しないモデルを用いて、3.11地震のはざとり波によるシミュレーション解析を実施した。

側面地盤モデルは、建屋側面の埋戻し土の断面形状が深さ方向に三角形分布をしていると仮定し、地盤を地中の質点位置ごとに、単位厚さで平面的に切り出したモデルを設定し、建屋を面積が等価な円形平面に置換して、側面地盤ばねを Novak の方法（JEAG4601-1991〔追補版〕による方法）により算定する。

側面ばねの理論解 $T(\omega)$ の算定に用いる地盤定数は、埋め戻し部分の形状を考慮し、第 2-1 表に示す等価地盤の値を用いる。シミュレーション解析モデルを第 2-1 図に示す。

解析モデルへの入力地震動は、3.11 地震のはざとり波を第 2-2 表に示す地盤モデルを用いて算定して建屋基礎下位置の地震動とし、建屋各部の応答を評価する。



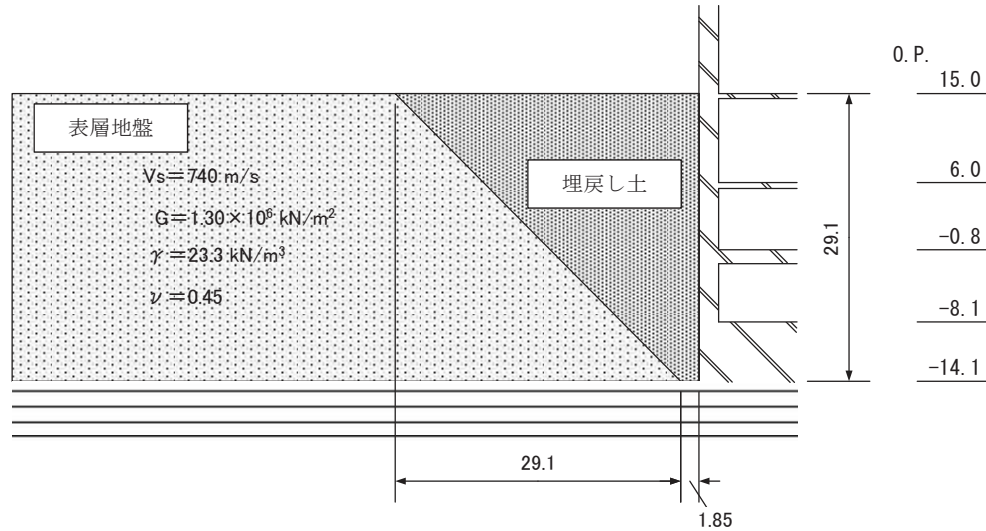
側面地盤ばね考慮

側面地盤ばね非考慮

第 2-1 図 側面地盤ばねの有無の検討に用いる地震応答解析モデル

第 2-1 表 側面地盤ばねの設定に用いる埋戻し土および等価地盤の物性値

建屋質点 レベル O. P. (m)	深さ (m)	埋戻し土				等価地盤				
		せん断波速度 V_s (m/s)	せん断 弾性係数 G ($\times 10^4$ kN/m ²)	単位体積重量 γ (kN/m ³)	ポアソン比 ν	せん断波速度 V_s (m/s)	せん断 弾性係数 G ($\times 10^5$ kN/m ²)	単位体積重量 γ (kN/m ³)	ポアソン比 ν	減衰定数 h_e (%)
15.0	0	88	1.48	18.6	0.45	242	1.25	21.0	0.45	4
6.0	9.0	113	2.42	18.6	0.45	336	2.42	21.0	0.45	4
-0.8	15.8	138	3.61	18.6	0.45	443	4.20	21.0	0.45	4
-8.1	23.1	158	4.73	18.6	0.45	536	6.15	21.0	0.45	4
-14.1	29.1	171	5.57	18.6	0.45	653	9.13	21.0	0.45	4



※表層地盤と埋戻し土の物性値より等価地盤の物性値を算定

埋戻し土の形状 (単位 : m)

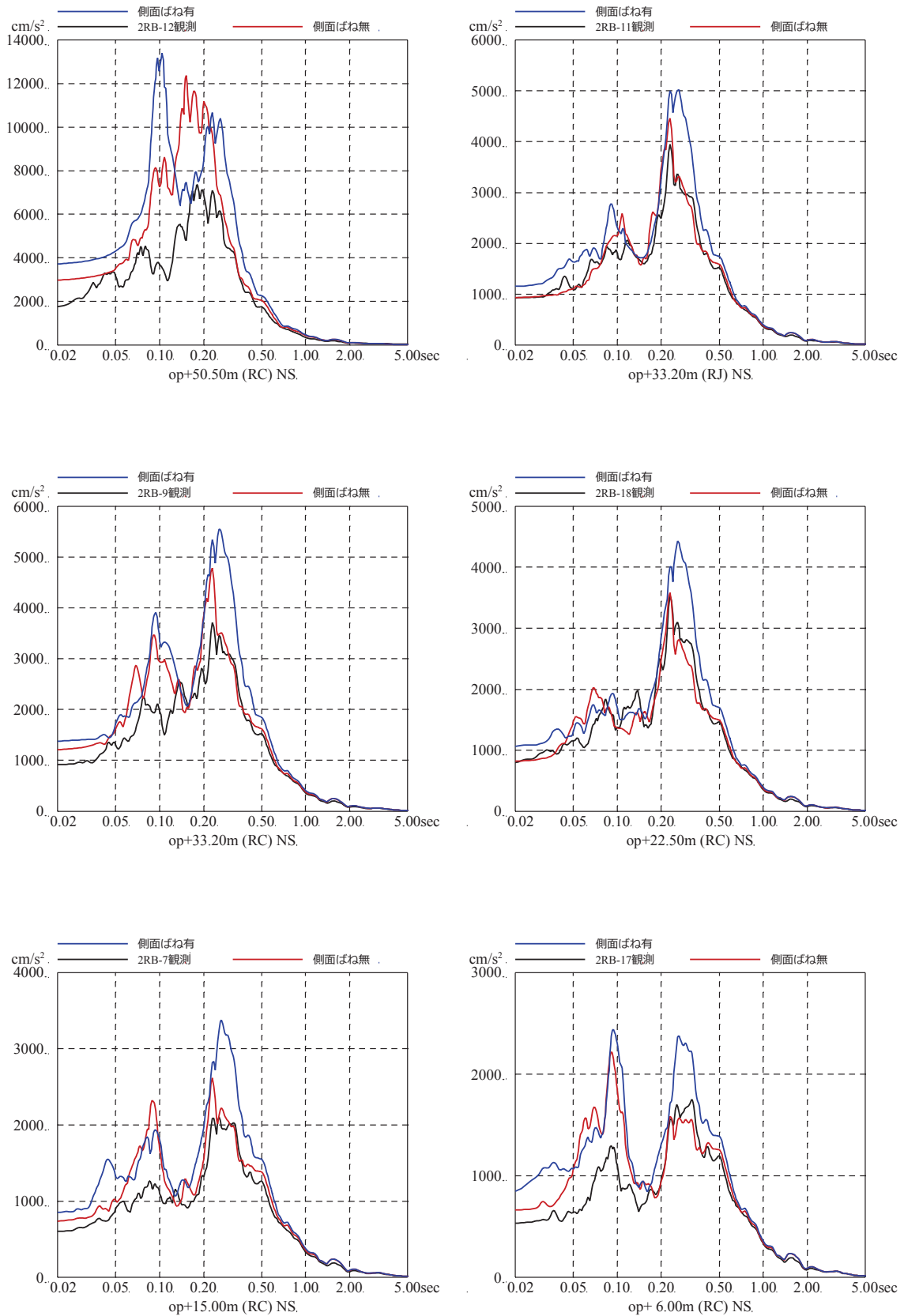
第 2-2 表 地盤調査結果に基づき設定した初期地盤モデルの地盤物性値

	地層レベル O. P. (m)	単位体積重量 γ (kN/m ³)	せん断波速度 V_s (m/sec)	減衰定数 h (%)
表層地盤	14.80	23.3	740	3
底面地盤	-14.10	23.8	1300	3
	-25.00	24.6	2150	3
	-80.00	25.0	2440	3
	-200.0	25.0	2440	3

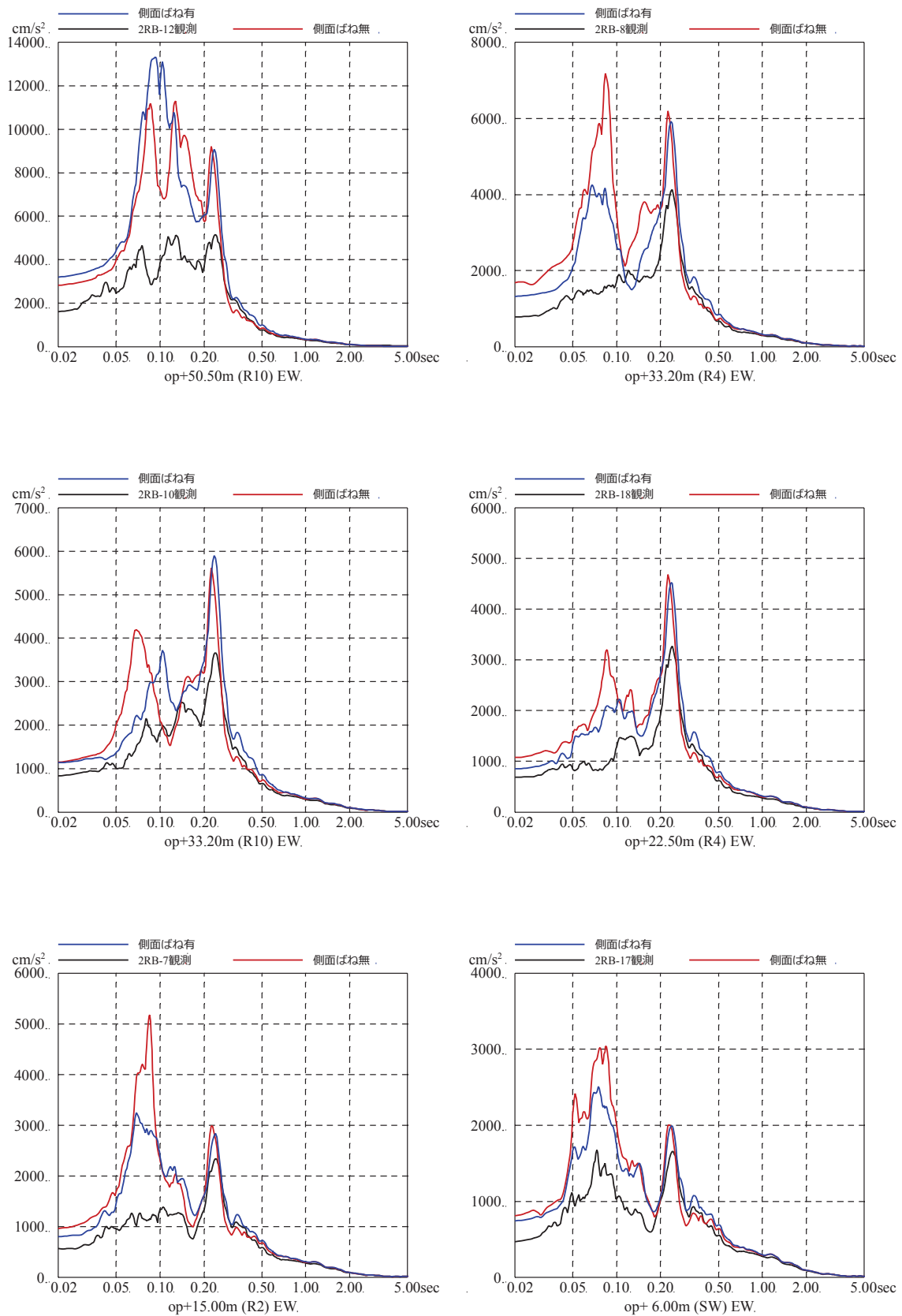
(2) 検討結果

側面地盤ばねの有無をパラメータとした地震応答解析結果の加速度応答スペクトルの比較を第 2-2 図および第 2-3 図に示す。

どちらの結果も観測記録に比べて大きな解析結果となっているが、側面ばねがない場合の方が観測記録との適合性が良い。



第 2-2 図 3.11 地震のはぎとり波を用いた側面地盤ばねの有無によるシミュレーション解析結果の比較 (2号炉原子炉建屋, NS 方向) ※地震計位置は、付録 1 参照



第 2-3 図 3.11 地震のはざとり波を用いた側面地盤ばねの有無によるシミュレーション解析結果の比較 (2号炉原子炉建屋, EW方向) ※地震計位置は, 付録1 参照

3. 側面地盤ばねの有無が建屋応答に及ぼす影響検討（3号炉海水熱交換器建屋）

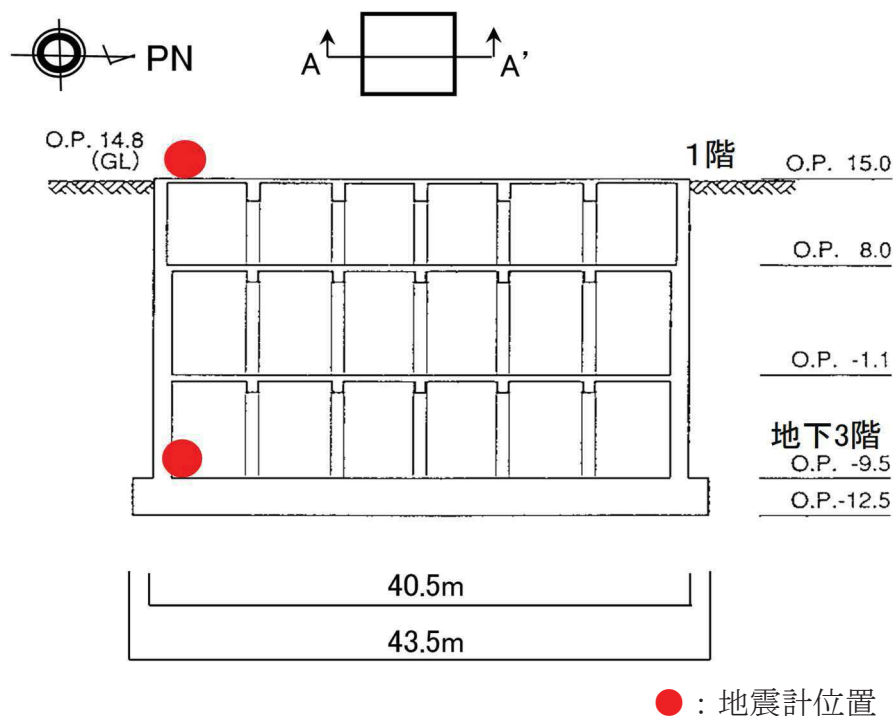
（1）検討方法

表層地盤が建屋応答に及ぼす影響を確認するために、比較的小規模で建屋全体が埋め込まれている3号炉海水熱交換器建屋を対象に、地盤の非線形性が大きい3.11地震の観測記録による建屋地震応答解析を実施した。地震応答解析モデルは以下の2種類を用いた

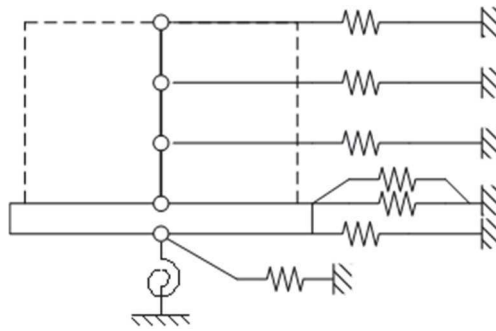
- ① 側面ばね(Novak ばね)を考慮したモデル(はぎとり波入力)
- ② 建屋減衰を変動させたモデル(基礎マット上記録入力)

建屋の地震応答解析モデルは、側面ばね(Novak ばね)を考慮するモデルおよび建屋減衰を変動させたモデルともに既工認モデルをベースとしたモデル(側面地盤バネを考慮していないS&Rモデル)を用いた。

第3-1図に3号炉海水熱交換器建屋の概要を示す。側面地盤ばね(Novak ばね)を考慮したケースの地震応答解析モデル、地盤調査結果に基づき設定した初期地盤モデルの地盤物性値を第3-2図, 第3-1表に示す。



第3-1図 3号炉海水熱交換器建屋の概要 (A-A')



	側面地盤ばね (Novak ばね) を考慮したケース
地震動	3.11 地震はぎとり波
入力地震動	建屋底面位置および側面地盤ばね位置の地震動 (E+F) を算定し入力
建屋モデル (建屋剛性, 建屋減衰)	既工認モデル
建屋モデル (側面地盤ばね)	有り
地盤モデル	地盤調査結果に基づき設定した初期地盤モデル (表層地盤: 盛土物性値)

第 3-2 図 側面地盤ばね (Novak ばね) を考慮したケースの地震応答解析モデル

第3-1表 地盤調査結果に基づき設定した初期地盤モデルの地盤物性値

	地層レベル O.P. (m)	単位体積重量 γ (kN/m ³)	せん断波速度 V_s (m/s)	減衰定数 h (%)
表層地盤	14.80	18.6	※1	3※2
底面地盤	-12.5	26.1	1360	3
	-27.00	26.4	2040	3
	-50.00	26.5	2520	3
	-200.00	26.5	2520	3

※1 O.P. 14.8m～O.P. -12.5m は、上載圧依存を考慮してせん断波速度と相関のある初期剛性 G_0 を設定する。また、ひずみ依存による非線形特性を考慮する。

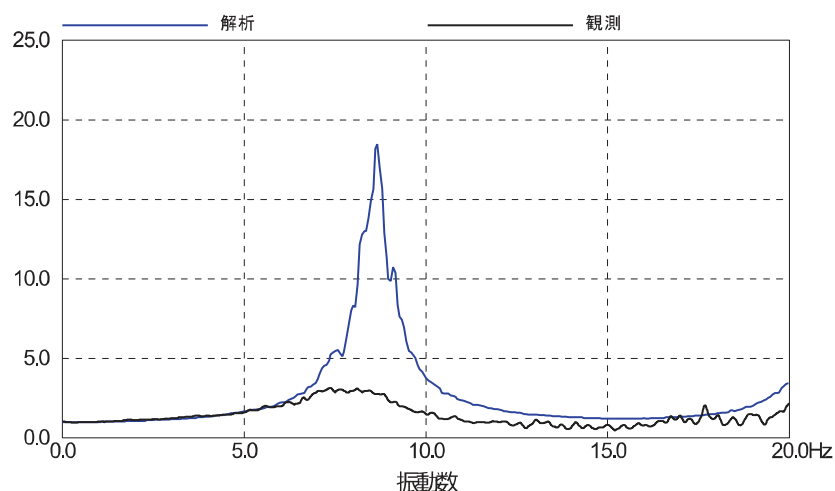
※2 Rayleigh 減衰。また、ひずみ依存による非線形特性を考慮する。

b. 検討結果

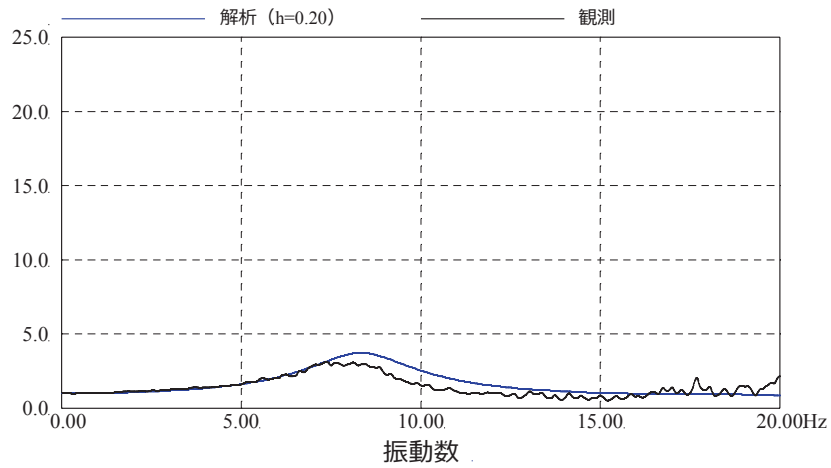
2種類のモデルによる検討結果は以下の通り。

- ① 側面地盤ばね(Novak ばね)考慮モデルによる検討結果として、建屋基礎(地下3階)に対する建屋上部(1階)の伝達関数を第3-3図に示す。解析結果は観測記録よりも過大な結果となった。
- ② 建屋減衰を変動させたモデルによる検討結果として、建屋上部(1階)の観測記録と解析による応答スペクトルとの比較を第3-4図に示す。この検討では建屋減衰を20%に設定したモデルによる検討結果が観測記録と概ね整合する結果を与えた。このRC減衰20%は建屋全体の減衰効果をRC減衰で代替させた結果であるが、一般的なRC減衰は5%であることを考慮すると、埋込まれていることによる建屋応答低減効果が認められることを示している。一方で、建屋の固有周期自体はあまりその影響を受けていない。

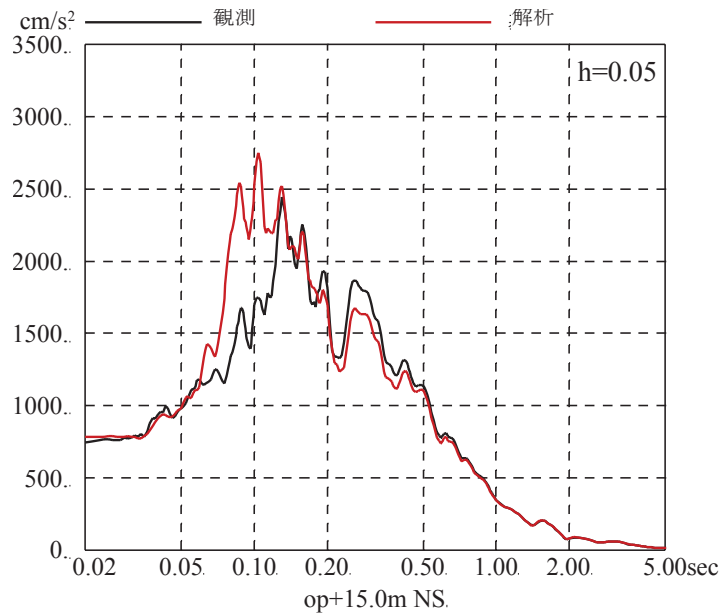
以上の検討から、比較的小規模で建屋全体が埋め込まれている3号炉海水熱交換器建屋においては、側面地盤ばね(Novak ばね)を考慮したモデルは過大な応答を与えること、一方、埋込まれていることによる建屋応答低減効果が認められることを確認した。



第3-3図 3.11地震のはざとり波を用いた側面地盤ばねの有無によるシミュレーション解析結果の比較 伝達関数(1階/地下3階)
(3号炉海水熱交換器建屋, NS方向)



伝達関数の比較 (1階/地下3階, NS方向)



応答スペクトルの比較 (1階, NS方向)

第 3-4 図 3.11 地震の基礎版上観測記録を用いた建屋減衰 20%とした場合の
シミュレーション解析結果の比較
(3号炉海水熱交換器建屋)

4. まとめ

2号炉原子炉建屋及び3号炉海水熱交換器建屋について、側面地盤ばね (Novak ばね) の有無が建屋応答に与える影響等を、地震観測記録を用いた建屋応答解析で確認した。その結果、

- ① 建屋重量の重い2号炉原子炉建屋を対象とした建屋シミュレーション解析、また、比較的小規模で建屋全体が埋め込まれている3号炉海水熱交換器建屋を対象とした建屋シミュレーション解析の両方で、側方地盤ばね (Novak ばね) を考慮した応答結果は観測記録より過大な応答結果を与えた。
- ② 3号炉海水熱交換器建屋を対象とした建屋シミュレーション解析において、埋め込まれていることによる建屋応答低減効果が認められることを確認した。

JEAG4601では、側面地盤ばね (Novak ばね) は、支持地盤と表層地盤のインピーダンス比が大きい場合、その適合性に留意する必要があることが記載されているが、特に女川のように支持地盤が硬質岩盤で、埋め戻し土に掘削土等用いて施工した場合には、Novak ばねは過大な応答結果を与えるおそれがあるため、今回工認の原子炉建屋の地震応答解析モデルには側面地盤ばねは適用しないこととする。

なお、海水熱交換器建屋については、Novak ばねによる埋込み効果は実際の応答を現しにくい一方で、観測記録によるシミュレーション解析から埋め込まれていることによる建屋応答低減効果が認められることから、そのメカニズムについて引き続き検討を行う。

添付5 表層地盤の層境界の設定について

女川2号炉建設時の地盤の掘削状況に基づき、1次元地盤モデルの表層地盤と岩盤の境界面の深さを設定する。

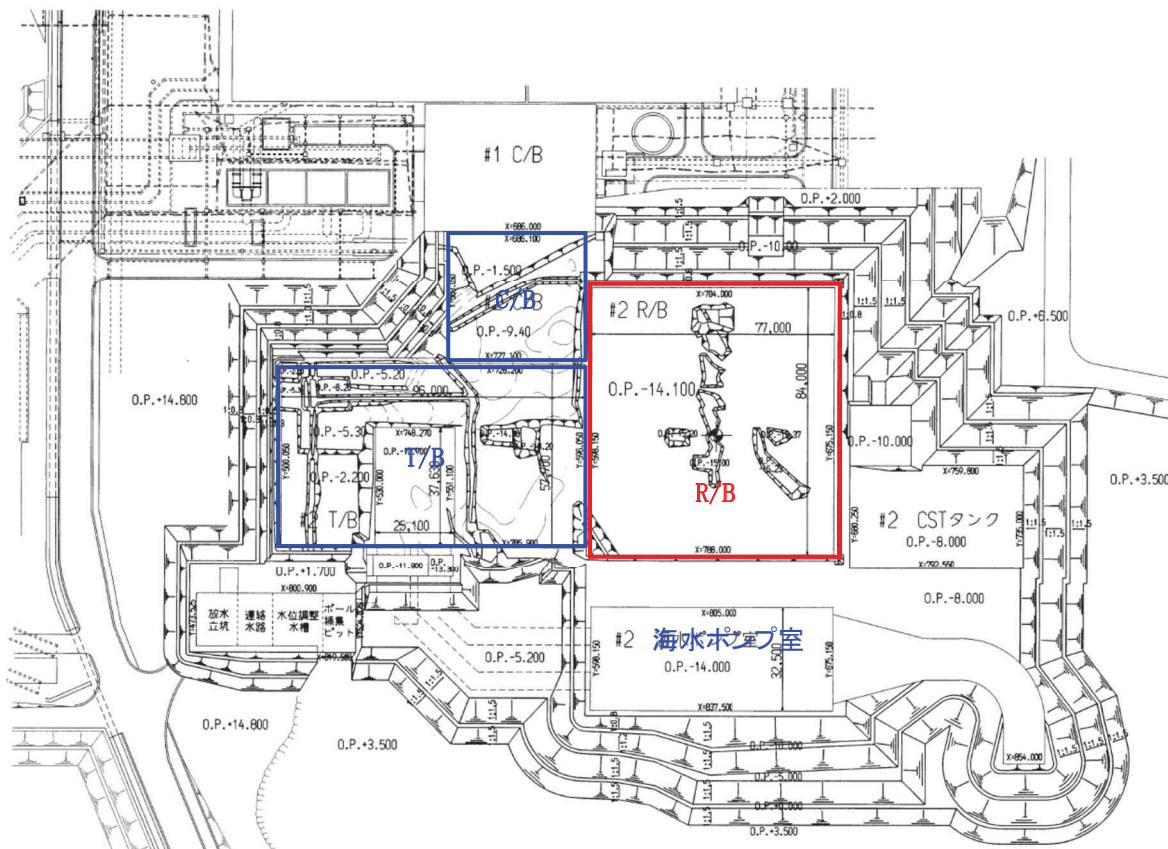
第1-1図に2号炉建設時の地盤の掘削状況の平面図を、第1-2図に断面位置を、第1-3図および第1-4図に女川2号炉原子炉建屋の炉心を通る南北方向および東西方向の断面図を示す。女川2号炉原子炉建屋周辺の地盤の大部分はO.P. 0mまで表層地盤の掘削が行われており、竣工後は現在のG.L.面であるO.P. +14.8mまで埋め戻されている。

第1-1図の平面図によると、原子炉建屋の北と西は、建屋近傍の掘削が主であり、北の一部でO.P. -8m程度まで掘削しCSTタンク基礎を設置している。原子炉建屋の東は、O.P. -8m（およそ岩盤レベル）まで掘削し海水ポンプ室位置はO.P. -14mまで掘削している。原子炉建屋の南は、タービン建屋が位置するが、掘削レベルからO.P. -2.2mのタービン建屋基礎下までの地盤はマンメイドロックによって置換している。

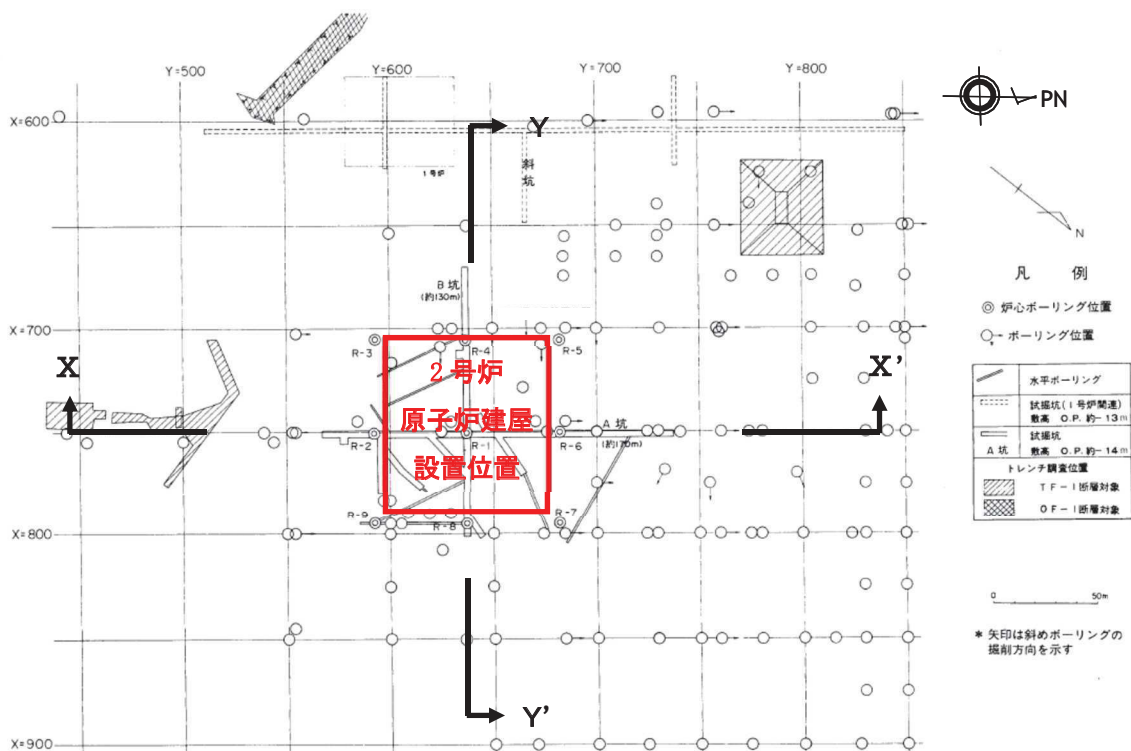
第1-3図の南北断面によると、女川2号炉原子炉建屋の北側は、O.P. 0mまでは岩盤と第四系地盤（砂・礫）であり、O.P. 0mより表層は第四系地盤（砂・礫）となる。女川2号炉原子炉建屋の南側近傍はO.P. 0mまで岩盤、その表層は第四系地盤（砂・礫）と盛土であるが、さらに南では表層まで岩盤が分布している。

第1-4図の東西断面によると、女川2号炉原子炉建屋の東側（海側）は、O.P. 0m付近までは主に第四系地盤（砂・礫）と岩盤であり、その表層は盛土である。女川2号炉原子炉建屋の西側（山側）は、O.P. 0m以深まで盛土が見られ、第四系地盤（砂・礫）と岩盤もあるが、O.P. 0mより表層は盛土である。

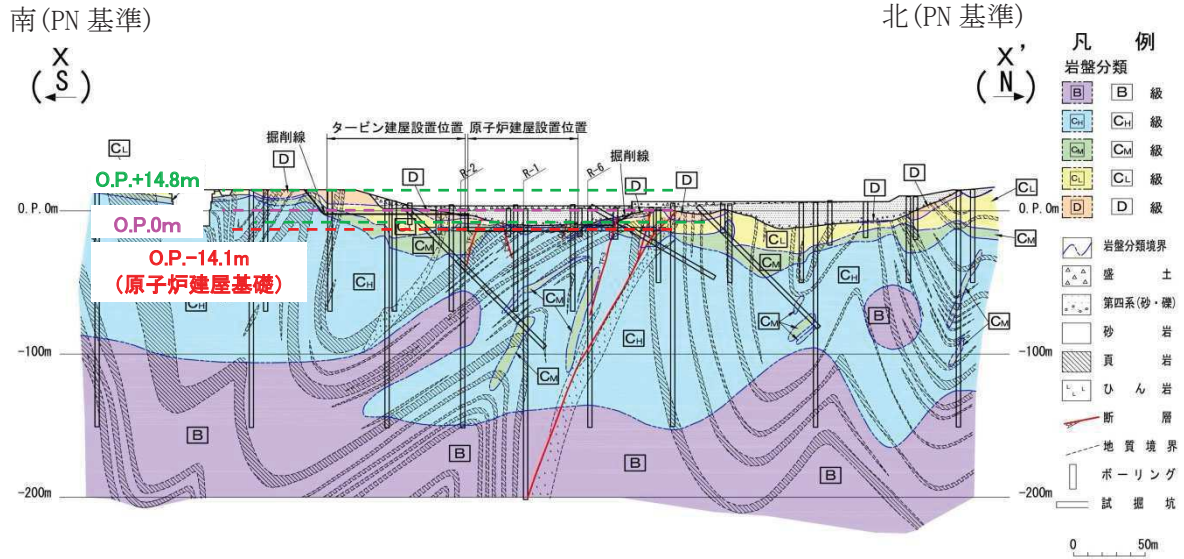
以上から、建設時の掘削状況としてO.P. 0m付近が岩盤と盛土の境界付近であること、建屋周辺ではO.P. +0mより浅部地盤では埋戻し土となることから女川2号炉原子炉建屋近傍の岩盤と表層地盤の境界面をO.P. 0mとして1次元地盤モデルを設定する。



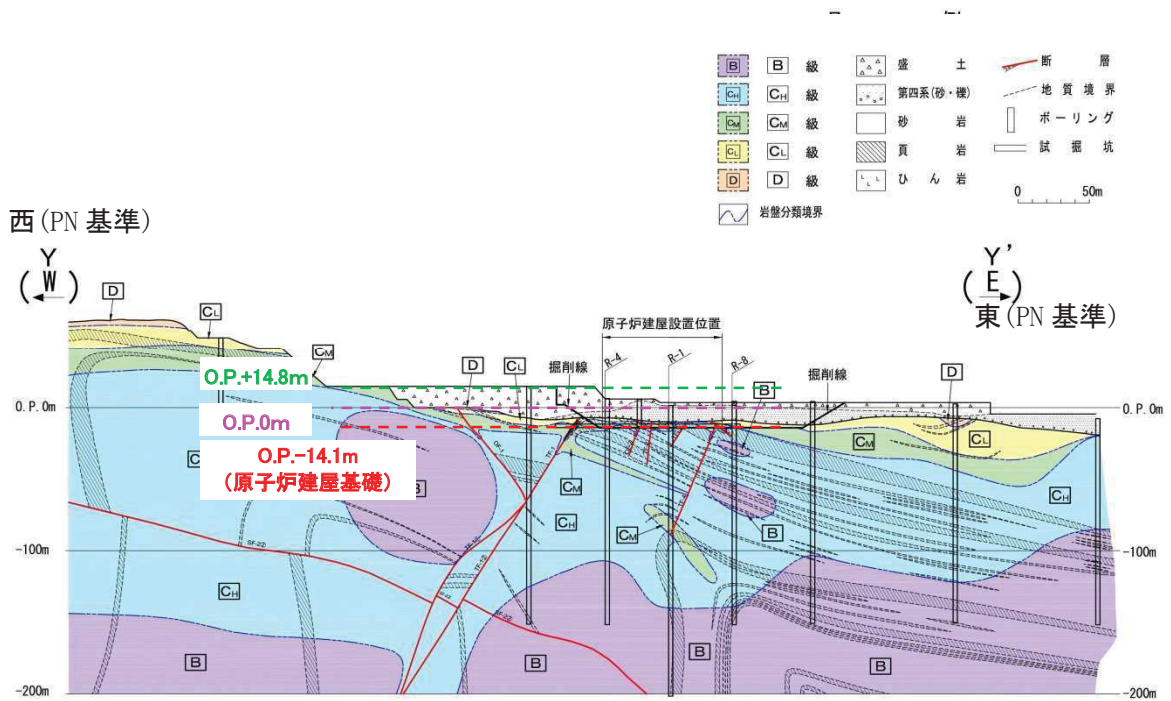
第 1-1 図 2 号炉建設時の地盤の掘削状況 (平面図)



第 1-2 図 2 号炉建設時の地盤の掘削状況断面図の断面位置



第 1-3 図 2 号炉建設時の地盤の掘削状況（南北断面）X - X'



第 1-4 図 2 号炉建設時の地盤の掘削状況（東西断面）Y - Y'

添付6 表層地盤の層境界に関する検討

(1) 検討概要

自由地盤のはぎとり地盤モデルの検討では、表層を分割すること、最表層の物性を同定することで、小振幅から大振幅までの観測記録を再現できることがわかっている。

建設時の掘削状況から仮設定した O.P. +0m の表層地盤の層境界について、観測記録を用いたパラメータスタディを実施し、ベースとなる地盤モデルの層境界の最適値について検討する。

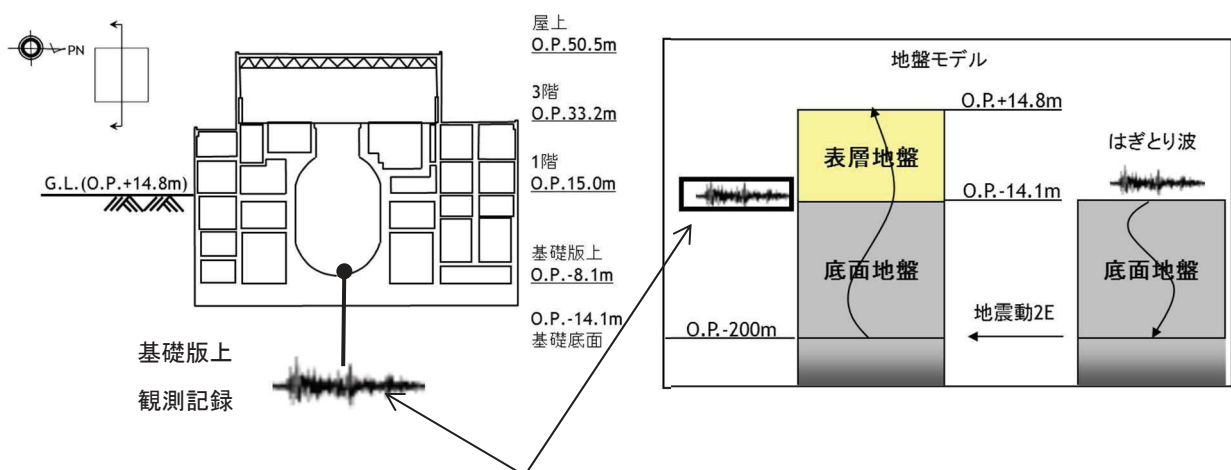
(2) 検討方法

表層地盤の層境界 O.P. +0m の検証として仮設定した地盤モデルを用いて感度解析を実施した。

仮設定した地盤モデルは、表層下部のせん断波速度 V_s を 900m/s、表層上部のせん断波速度 V_s を 350m/s とし、表層地盤の層境界を O.P. -2m ~ O.P. +2m の間で変動させて検討を実施する。仮設定地盤モデルの諸元を第 1-1 表に示す。

検討は、自由地盤の観測記録から算定したはぎとり波に対する基礎版上観測記録と検討用に仮定した地盤モデルにより算定した基礎版底面レベル (O.P. -14.1m) の入力地震動 (E+F+P 波, P は切欠き力の時刻歴波形) の伝達関数に表れる表層地盤の 1 次周期に対応する 4~6Hz 付近の谷の再現性およびはぎとり波を用いた建屋のシミュレーション解析結果と観測記録の適合性を確認することにより行う。対象とする地震は、3.11 地震および 4.7 地震とした。対象とする地震は、3.11 地震および 4.7 地震とした。

検討方法の概念図を第 1-1 図に示す。



はぎとり波に対する伝達関数の谷となる振動数を比較

第 1-1 図 表層地盤物性の検討方法の概念

第 1-1 表 検討用に仮定した地盤モデルケース 2 (赤文字部分が仮定した値)

	地層レベル O. P. (m)	単位体積重量 γ (kN/m ³)	せん断波速度 Vs (m/s)	減衰定数 h (%)
表層地盤	14.8	23.3(2.38tf/m ³)	350	3
	2.0~-2.0	23.3(2.38tf/m ³)	900	3
底面地盤	-14.1	23.8(2.43tf/m ³)	1300	3
	-25.0	24.6(2.51tf/m ³)	2150	3
	-80.0	25.0(2.55tf/m ³)	2440	3
	-200 ~ ∞	25.0(2.55tf/m ³)	2440	3

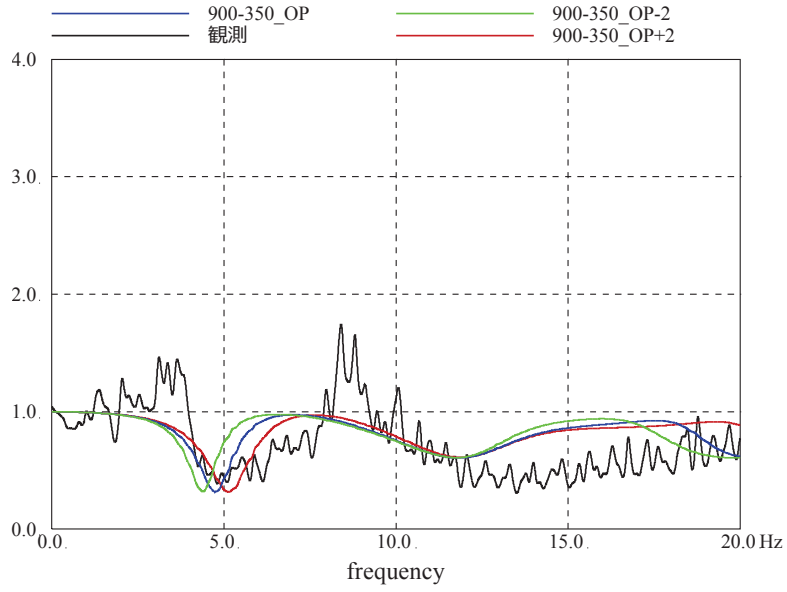
(3) 検討結果

検討結果の伝達関数を第 1-2 図～第 1-3 図に示す。また、床応答スペクトルの比較を第 1-4 図～第 1-11 図に示す。

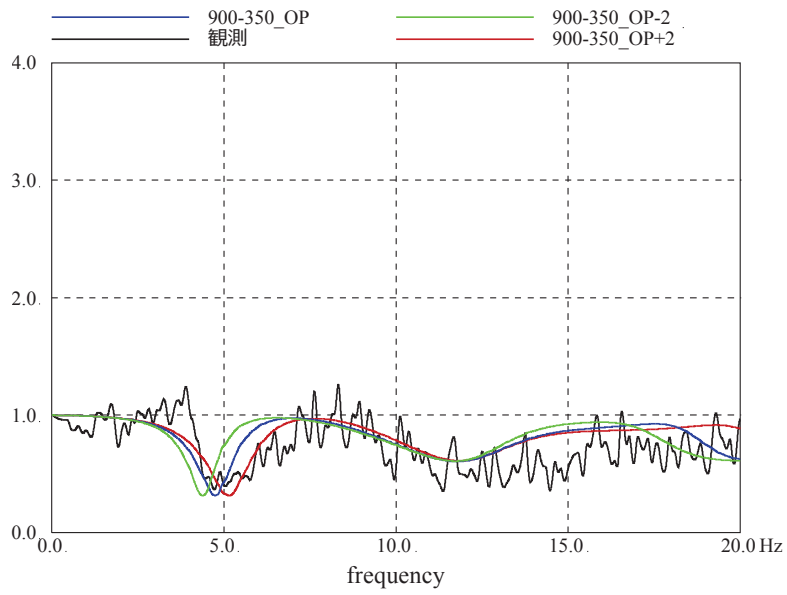
0. P. +2m～0. P. -2m の間で変動させた結果、表層地盤の層境界を 0. P. +0m と設定した場合に観測記録との適合が良い結果となった。

床応答スペクトルの比較においては、伝達関数による検討程の大きな差異は見られなかった。

上記より、表層地盤の層境界を 0. P. +0m に設定することは妥当であると考えられる。

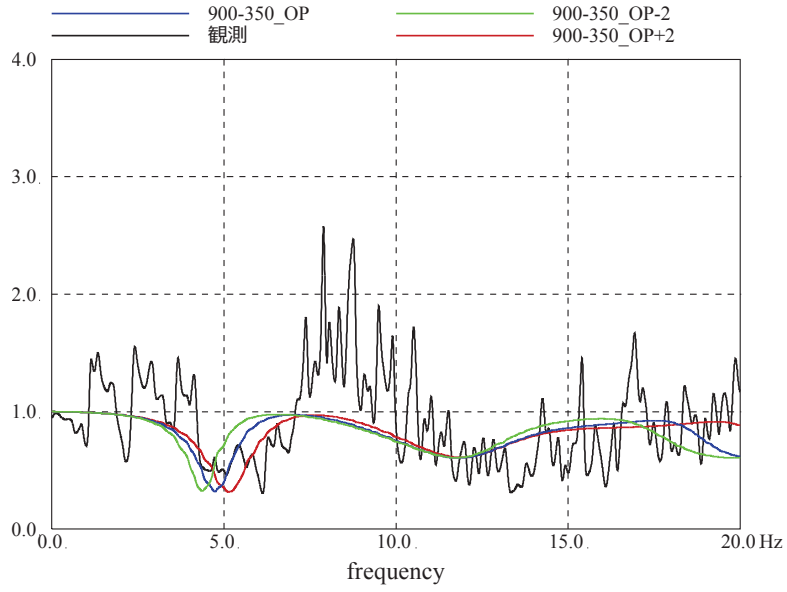


2011. 3. 11 NS 伝達特性比較

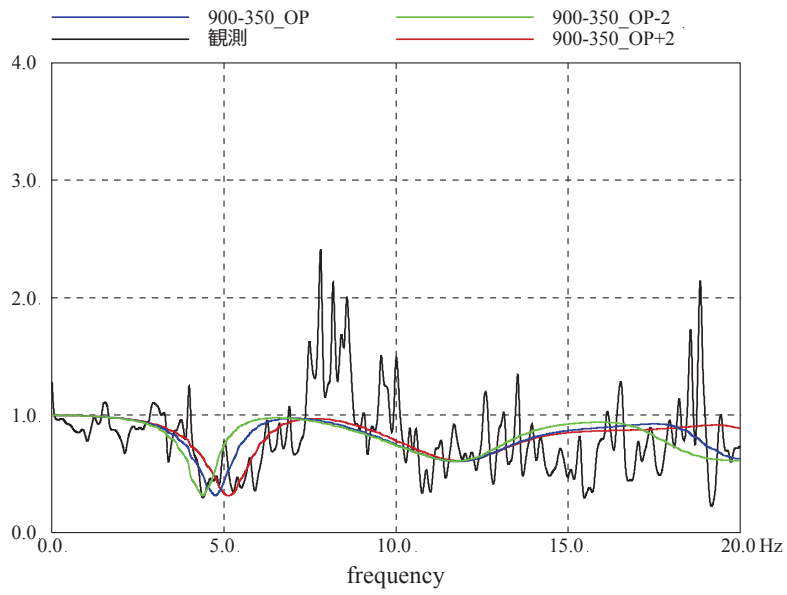


2011. 3. 11 EW 伝達特性比較

第 1-2 図 ケース 2 の伝達関数比較
 (2011/3/11 東北地方太平洋沖地震)

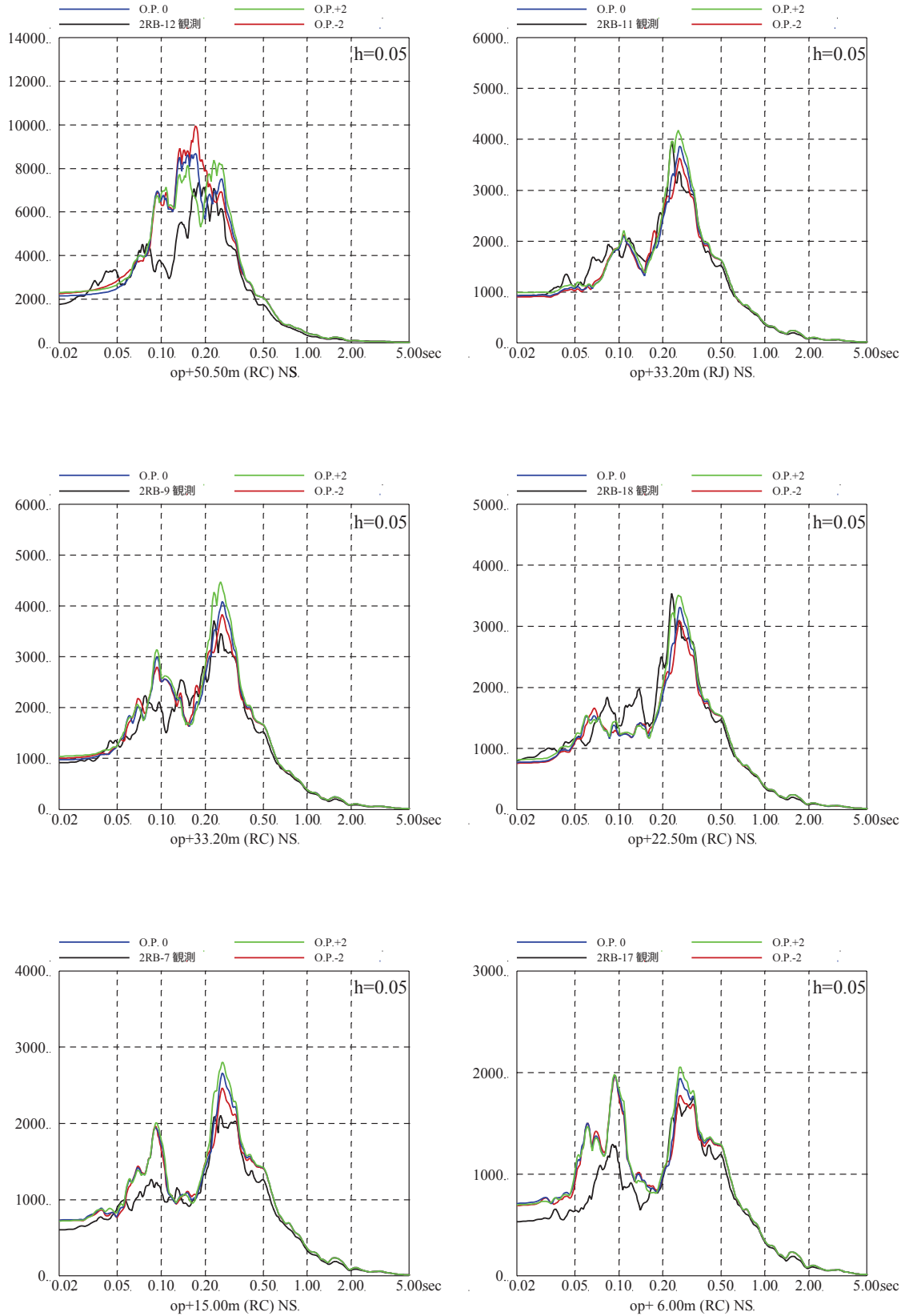


2011. 4. 7 NS 伝達特性比較

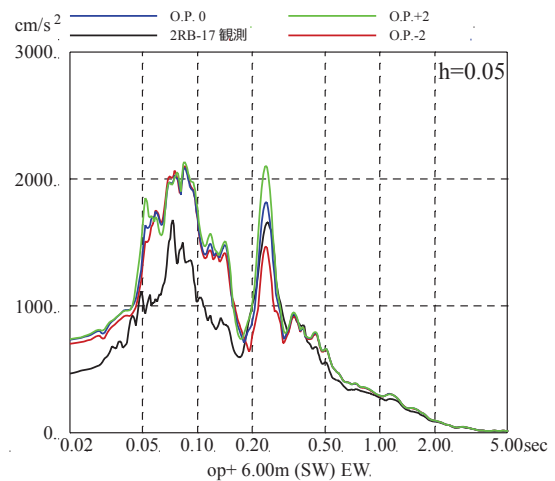
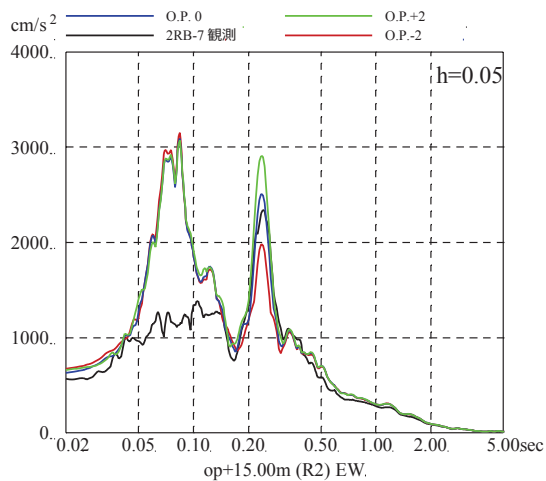
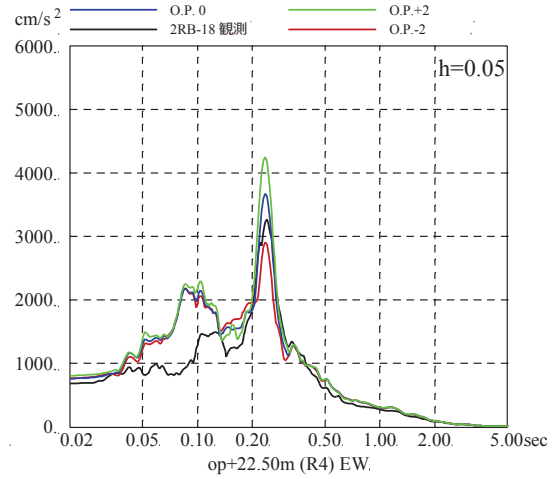
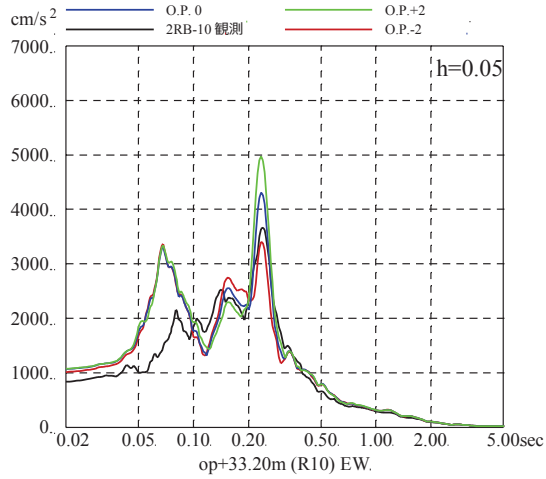
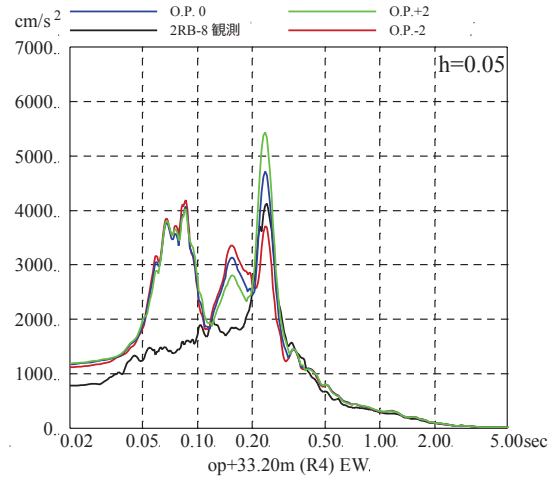
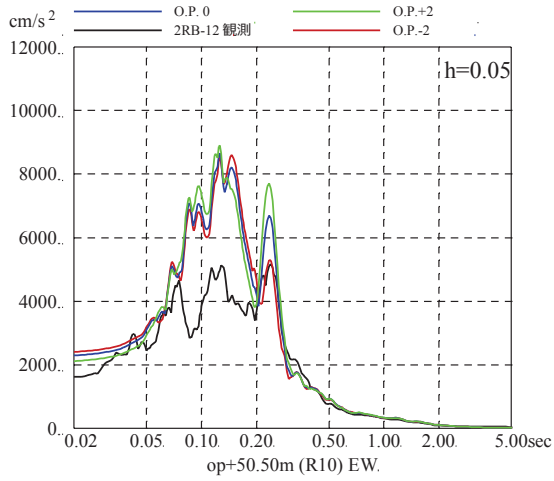


2011. 4. 7 EW 伝達特性比較

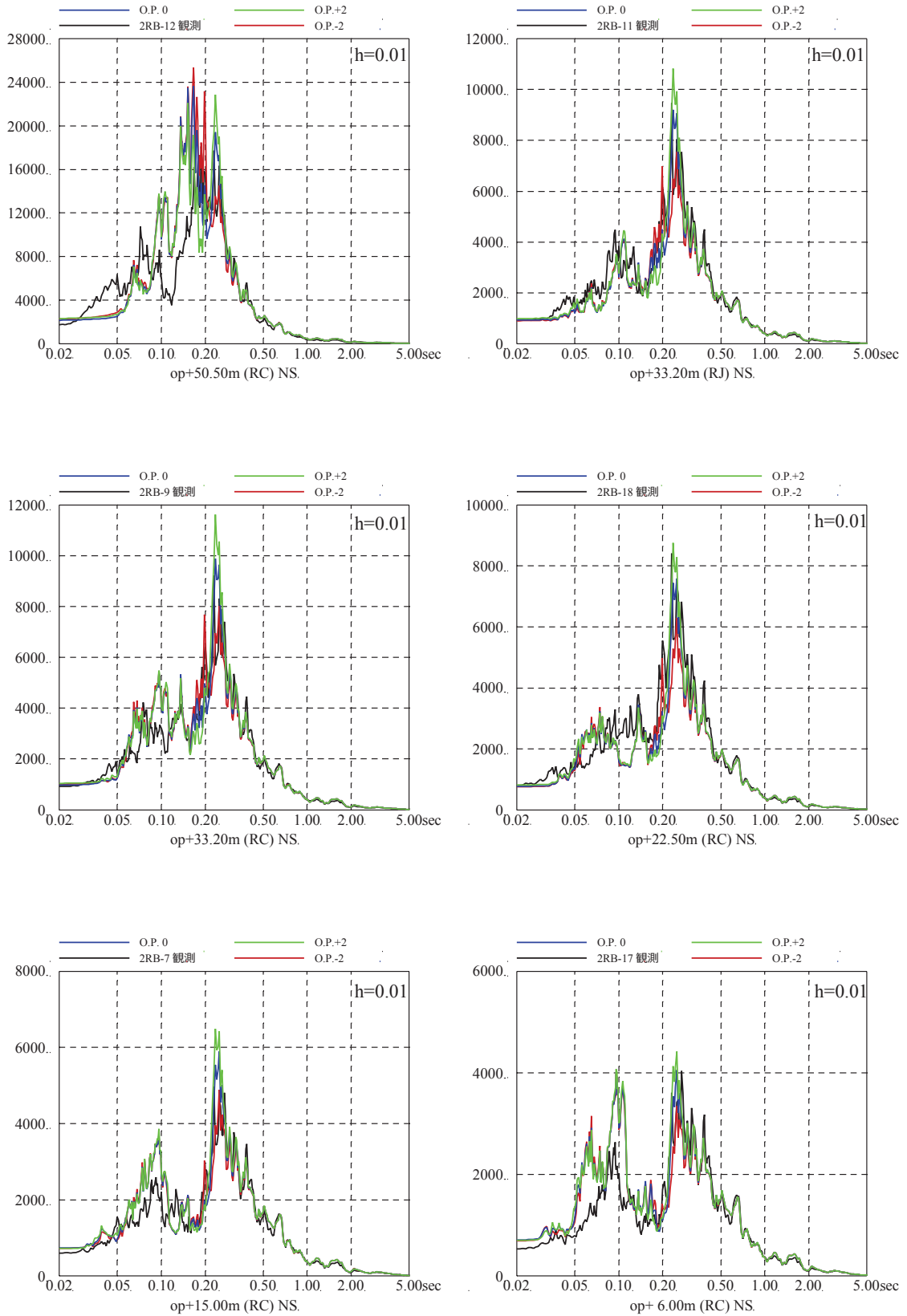
第 1-3 図 ケース 2 の伝達関数比較
(2011/4/7 地震)



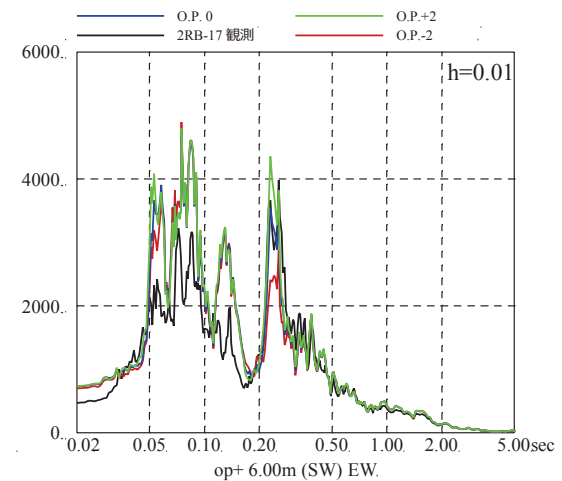
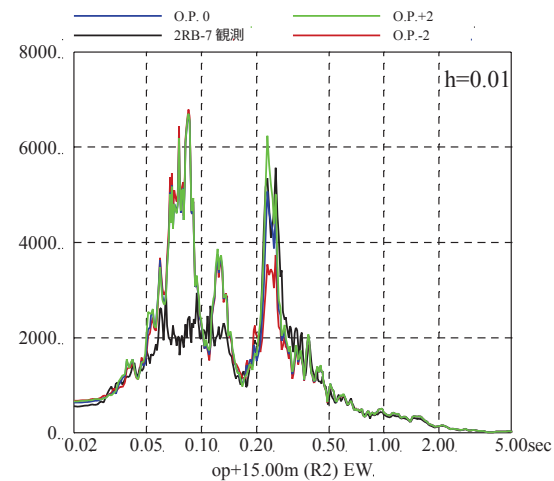
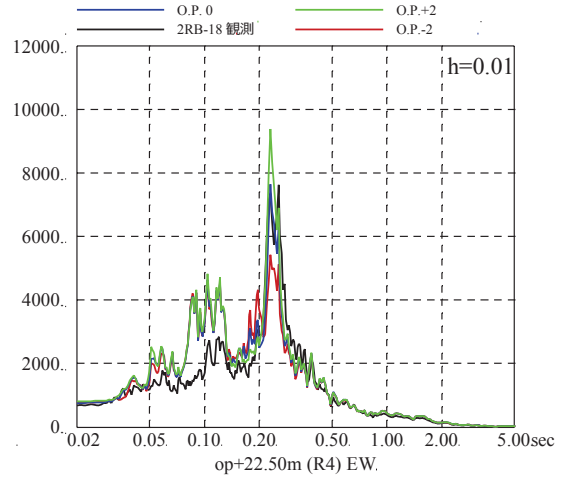
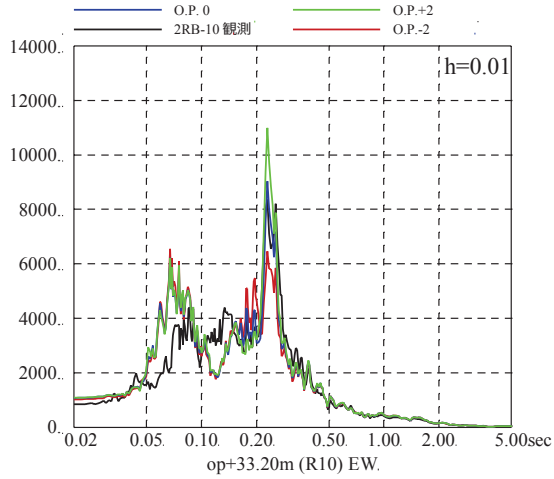
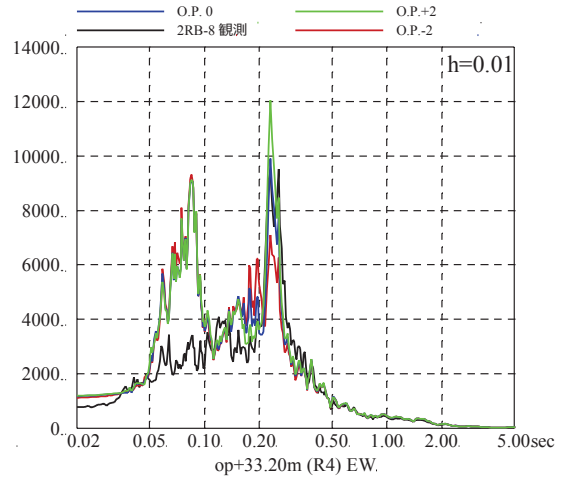
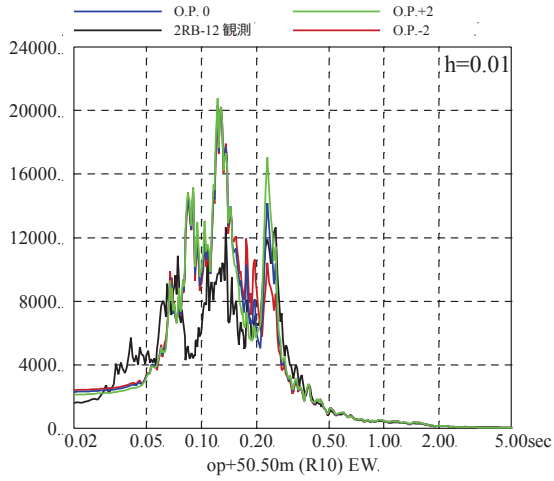
第1-4図 ケース2の床応答スペクトルの比較
 (2011/3/11 東北地方太平洋沖地震, NS方向, 減衰5%)



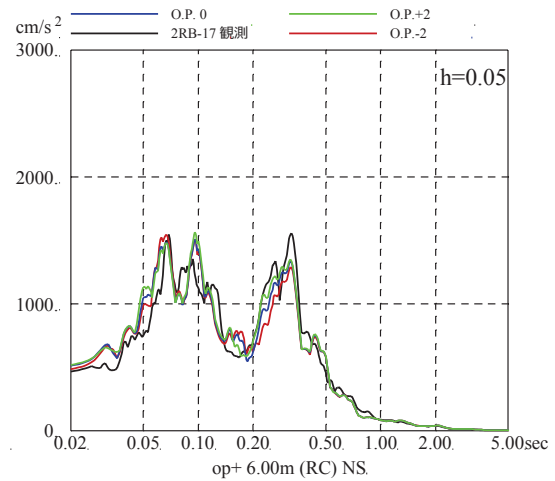
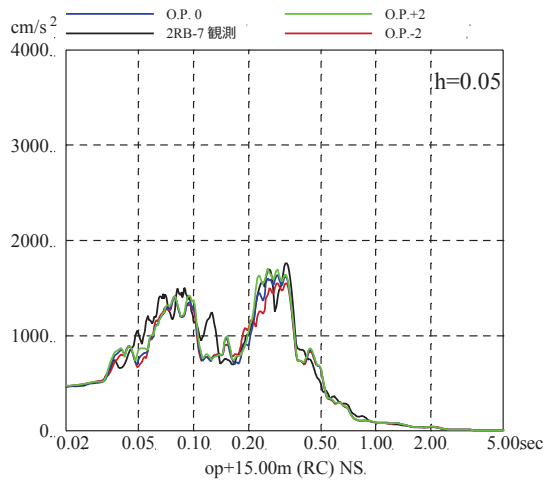
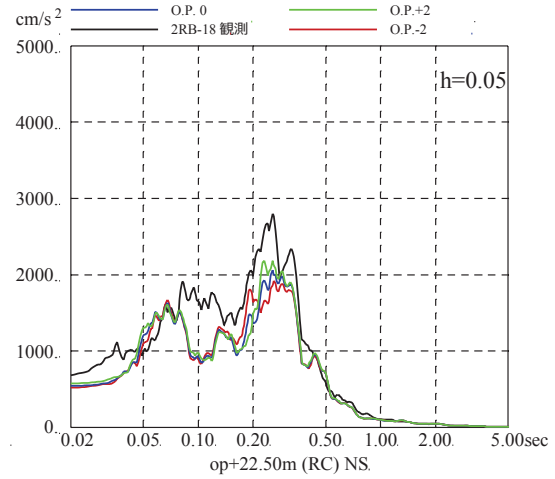
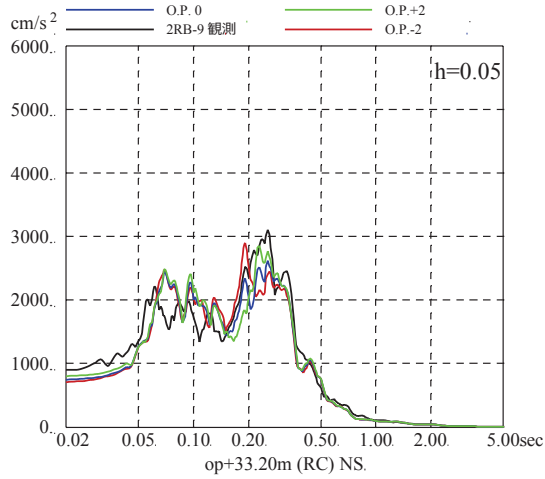
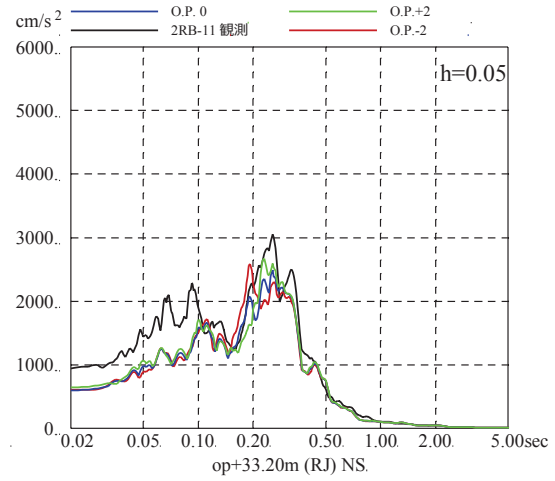
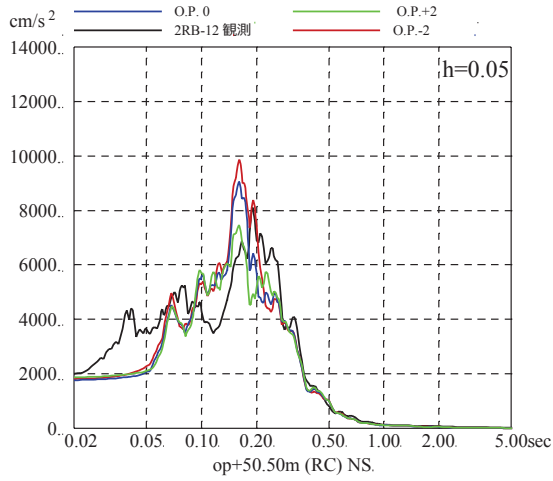
第1-5図 ケース2の床応答スペクトルの比較
(2011/3/11 東北地方太平洋沖地震, EW方向, 減衰5%)



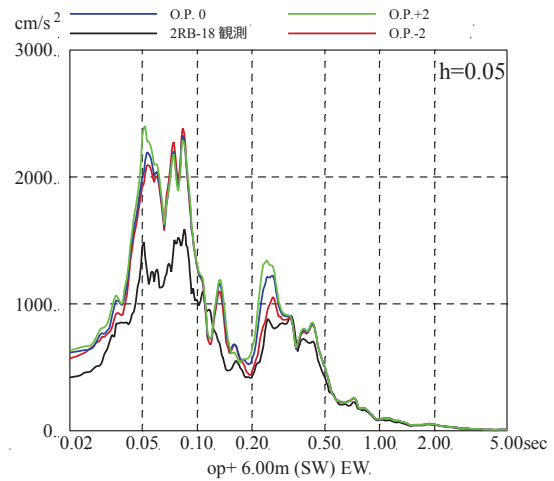
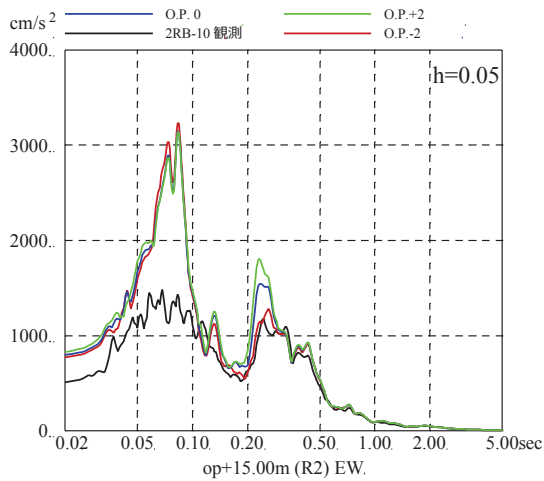
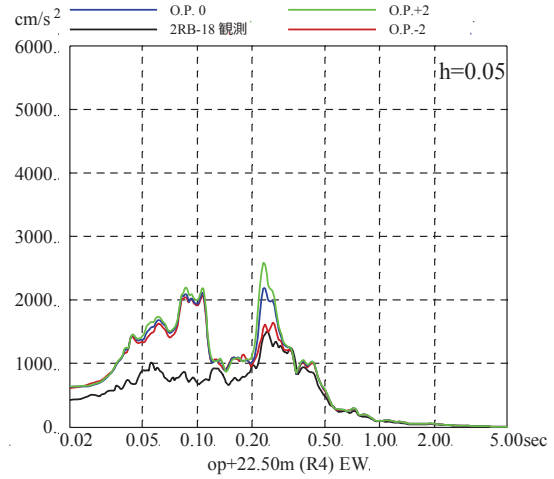
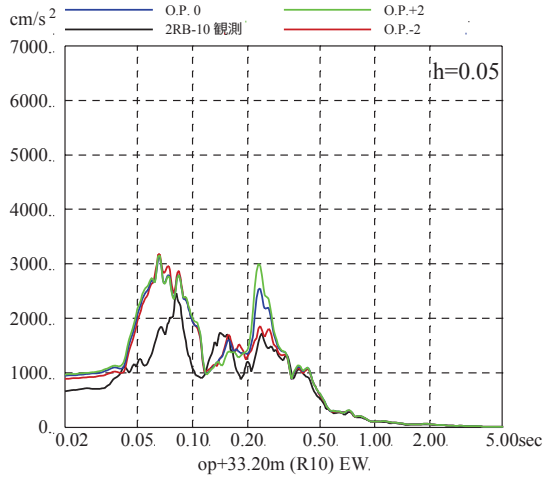
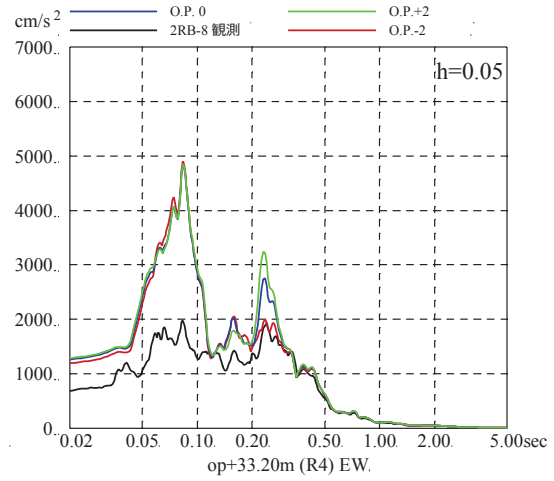
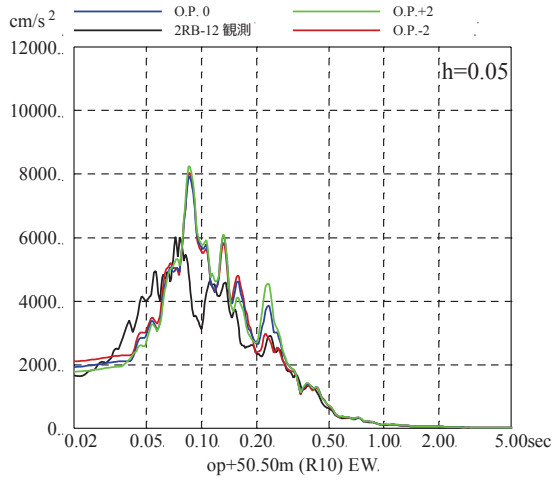
第1-6図 ケース2の床応答スペクトルの比較
 (2011/3/11 東北地方太平洋沖地震, NS方向, 減衰1%)



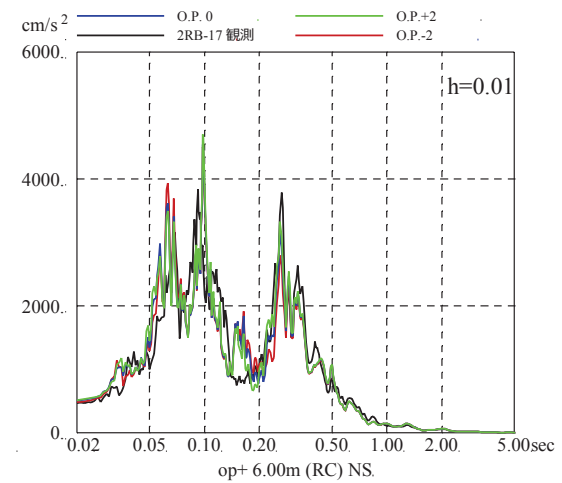
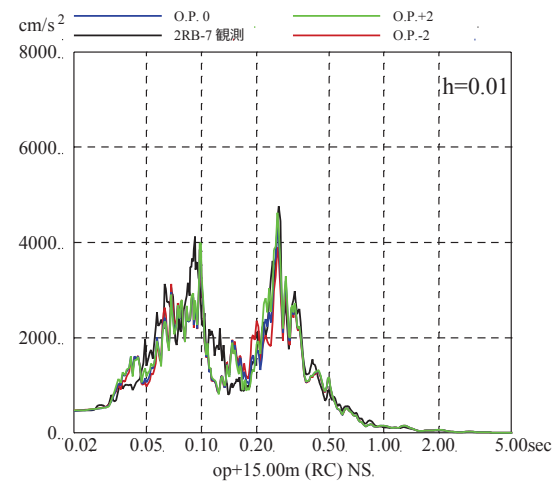
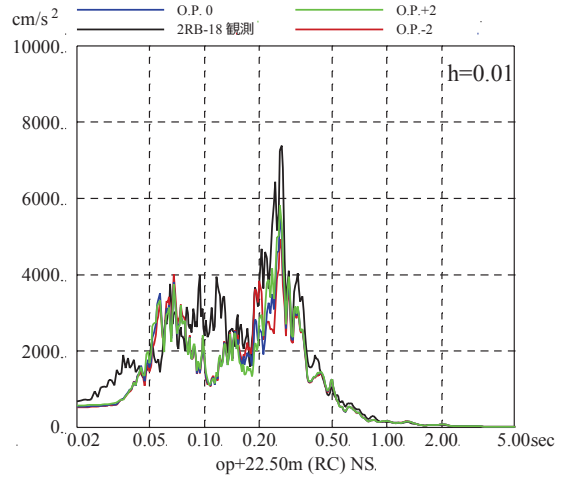
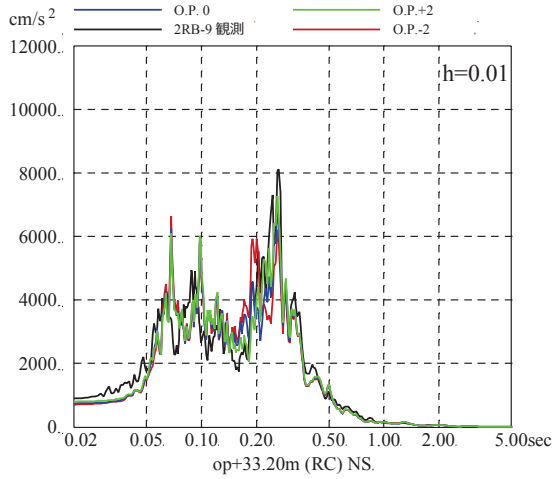
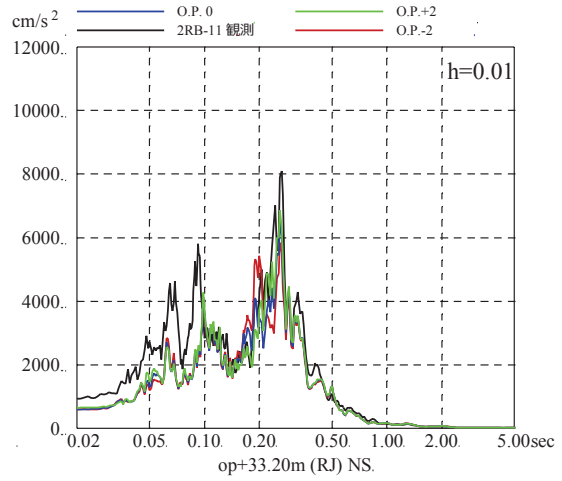
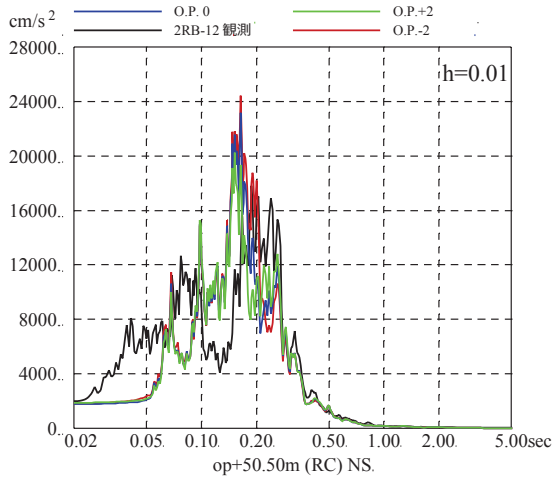
第1-7図 ケース2の床応答スペクトルの比較
 (2011/3/11 東北地方太平洋沖地震, EW方向, 減衰1%)



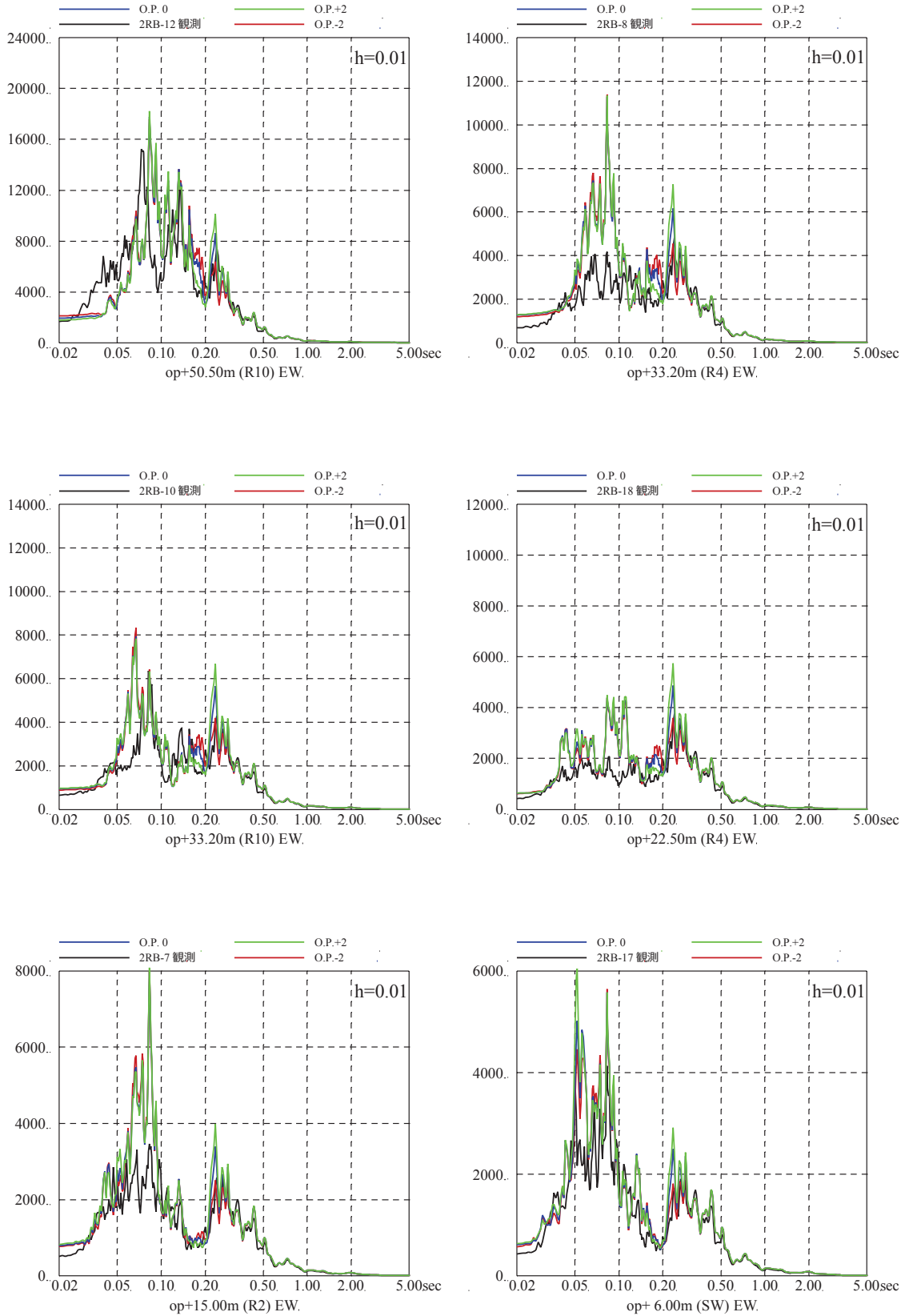
第1-8図 ケース2の床応答スペクトルの比較
(2011/4/7 地震, NS方向, 減衰5%)



第1-9図 ケース2の床応答スペクトルの比較
(2011/4/7 地震, EW方向, 減衰5%)



第 1-10 図 ケース 2 の床応答スペクトルの比較
(2011/4/7 地震, NS 方向, 減衰 1%)



第 1-11 図 ケース 2 の床応答スペクトルの比較
(2011/4/7 地震, EW 方向, 減衰 1%)

添付 7 表層地盤下部の地盤物性の検討

1. 検討概要

自由地盤のはざとり地盤モデルの傾向と PS 検層結果から表層地盤下部 (O.P. +0m ~ O.P. -14.1m) のせん断波速度 V_s は 900 m/s に仮設定しているが、観測記録を用いたパラメータスタディを実施し、ベースとなる地盤モデルの表層地盤下部のせん断波速度の最適値について検討する。

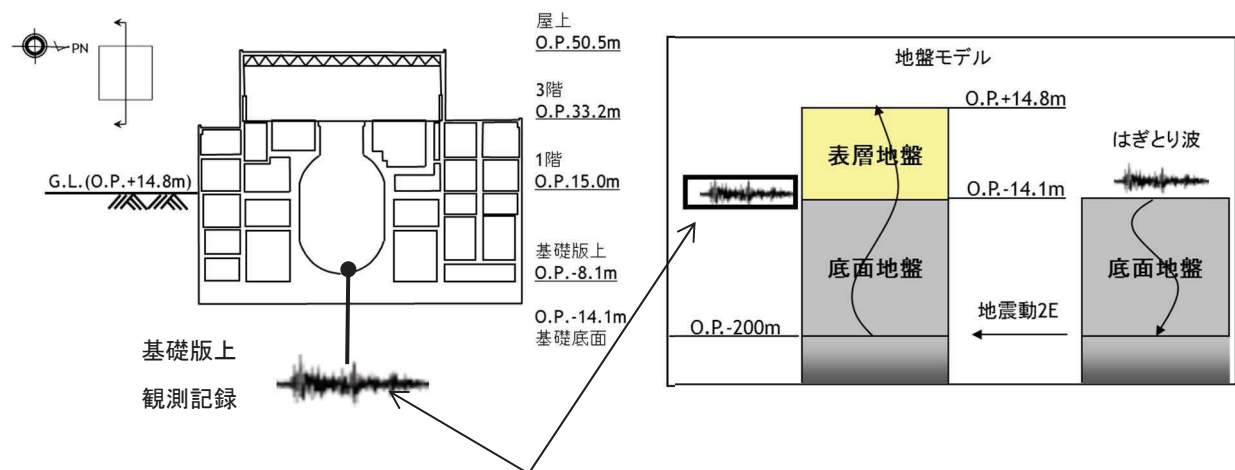
2. 検討方法

表層地盤下部 (O.P. +14.8m ~ O.P. +0m) のせん断波速度 V_s の検証として、仮設定した地盤モデルを用いて感度解析を実施した。

仮設定した地盤モデルは、表層地盤の層境界を O.P. +0m, 表層上部のせん断波速度 V_s を 350m/s とし、表層地盤下部のせん断波速度 V_s を 800~1000m/s の間で変動を考慮して検討を実施する。仮設定地盤モデルの諸元を第 2-1 表に示す。

検討は、自由地盤の観測記録から算定したはざとり波に対する基礎版上観測記録と検討用に仮定した地盤モデルにより算定した基礎版底面レベル (O.P. -14.1m) の入力地震動 (E+F+P 波, P は切欠き力の時刻歴波形) の伝達関数に表れる表層地盤の 1 次周期に対応する 4~6Hz 付近の谷の再現性およびはざとり波を用いた建屋のシミュレーション解析結果と観測記録の適合性を確認することにより行う。対象とする地震は、3.11 地震および 4.7 地震とした。

検討方法の概念図を第 2-1 図に示す。



はざとり波に対する伝達関数の谷となる振動数を比較

第 2-1 図 表層地盤物性の検討方法の概念

第 2-1 表 検討用に仮定した地盤モデルケース 1 (赤文字部分が仮定した値)

	地層レベル O. P. (m)	単位体積重量 γ (kN/m ³)	せん断波速度 Vs (m/s)	減衰定数 h (%)
表層地盤	14.8	23.3 (2.38tf/m ³)	350	3
	0.0	23.3 (2.38tf/m ³)	800~1000	3
底面地盤	-14.1	23. 8 (2.43tf/m ³)	1300	3
	-25.0	24.6 (2.51tf/m ³)	2150	3
	-80.0	25.0 (2.55tf/m ³)	2440	3
	-200 ~ ∞	25.0 (2.55tf/m ³)	2440	3

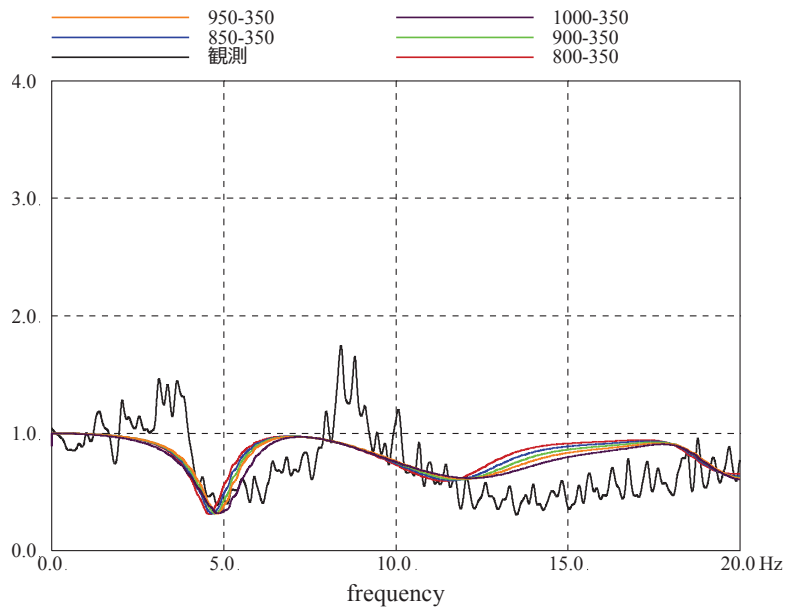
(3) 検討結果

検討結果の伝達関数を第 2-2 図～第 2-3 図に示す。また、床応答スペクトルの比較を第 2-4 図～第 2-11 図に示す。

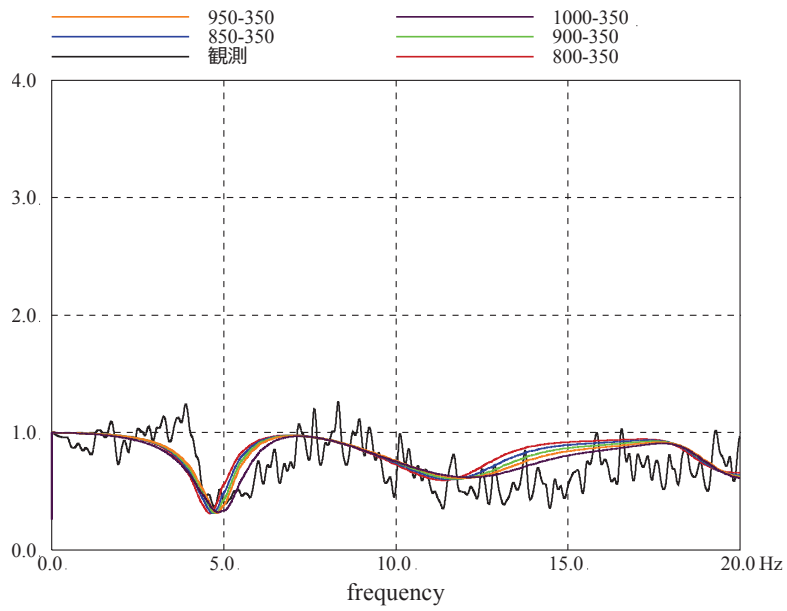
検討結果から、表層地盤下部のせん断波速度 V_s を 900m/s 程度に設定した場合に観測記録との適合が良い結果となった。

床応答スペクトルの比較においては、伝達関数による検討程の大きな差異は見られなかった。

上記より、表層下部のせん断波速度 V_s を 900m/s に設定することが妥当であると考えられる。

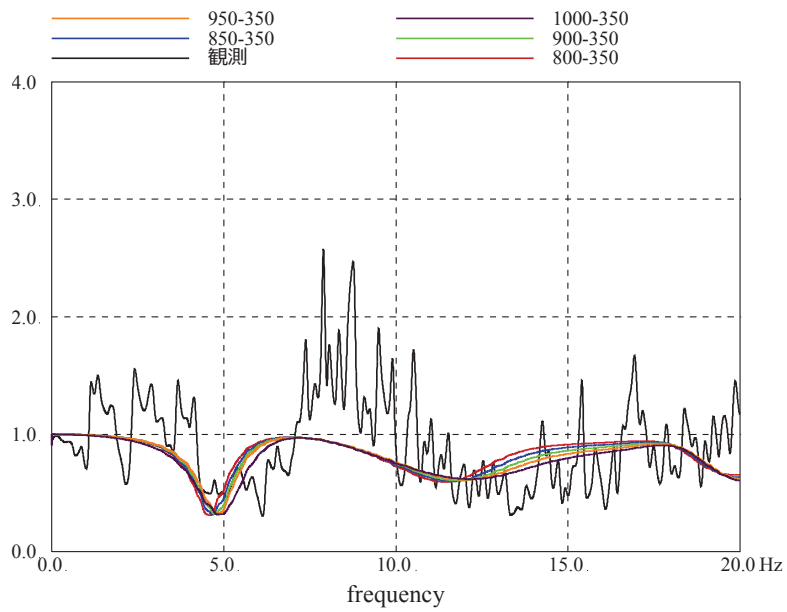


2011. 3. 11 NS 伝達特性比較

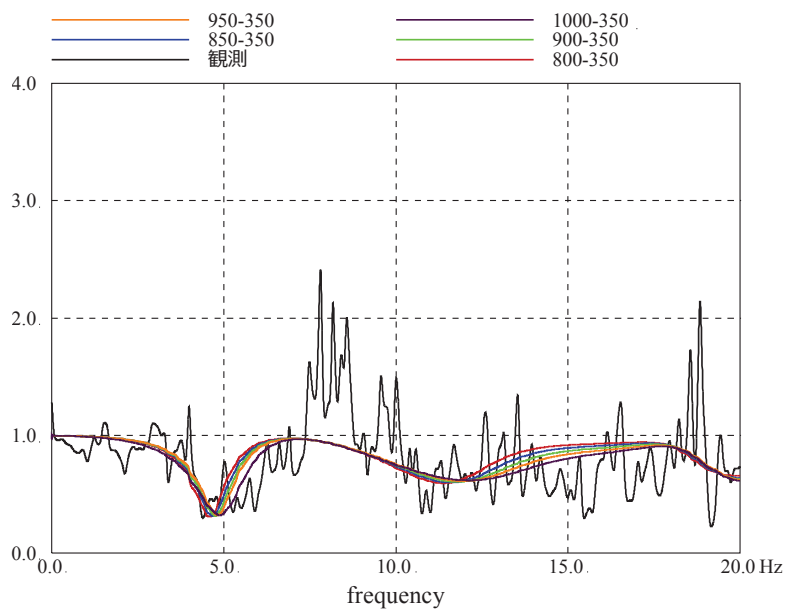


2011. 3. 11 EW 伝達特性比較

第 2-2 図 ケース 1 の伝達関数の比較
(2011/3/11 東北地方太平洋沖地震)

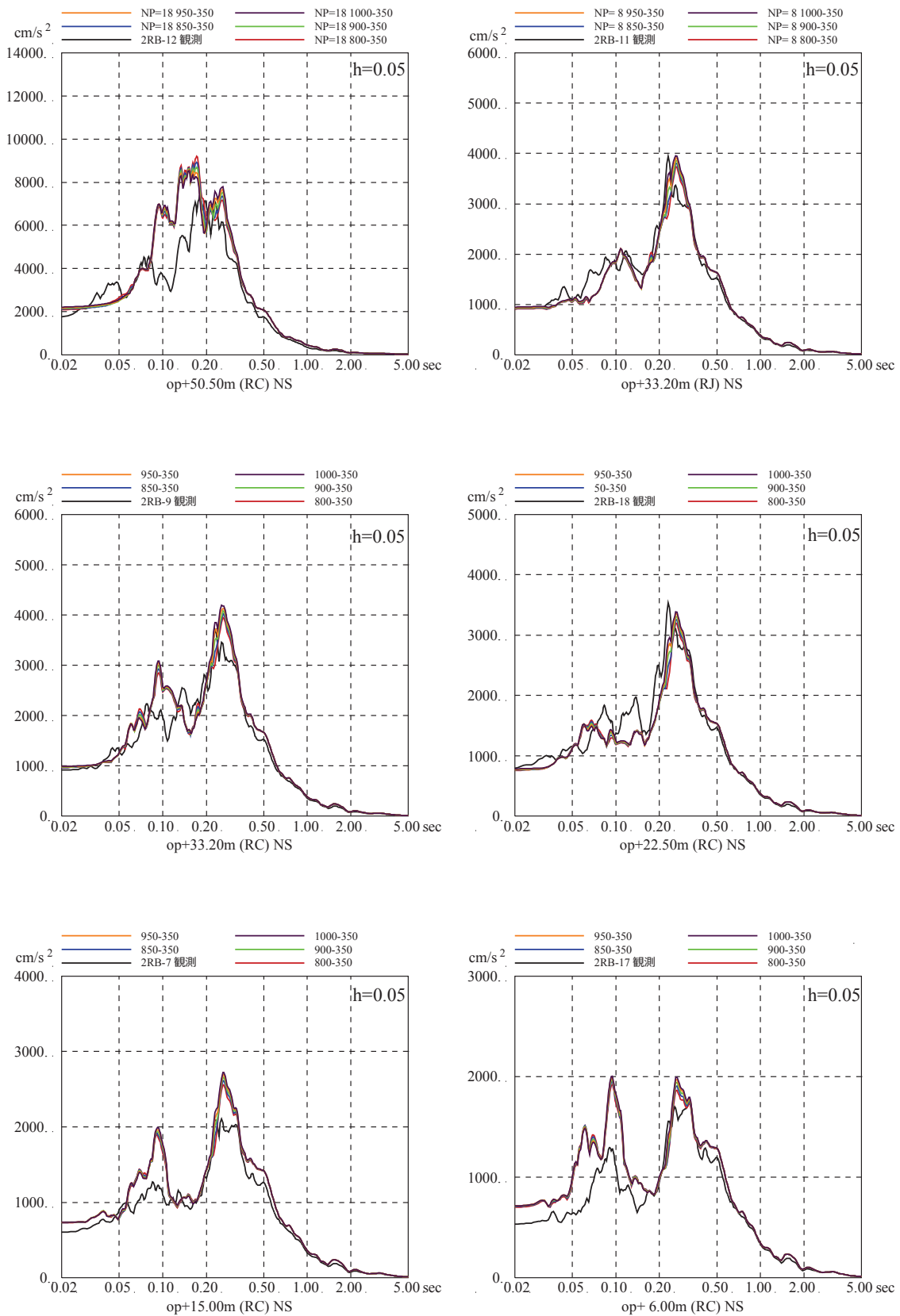


2011. 4. 7 NS 伝達特性比較

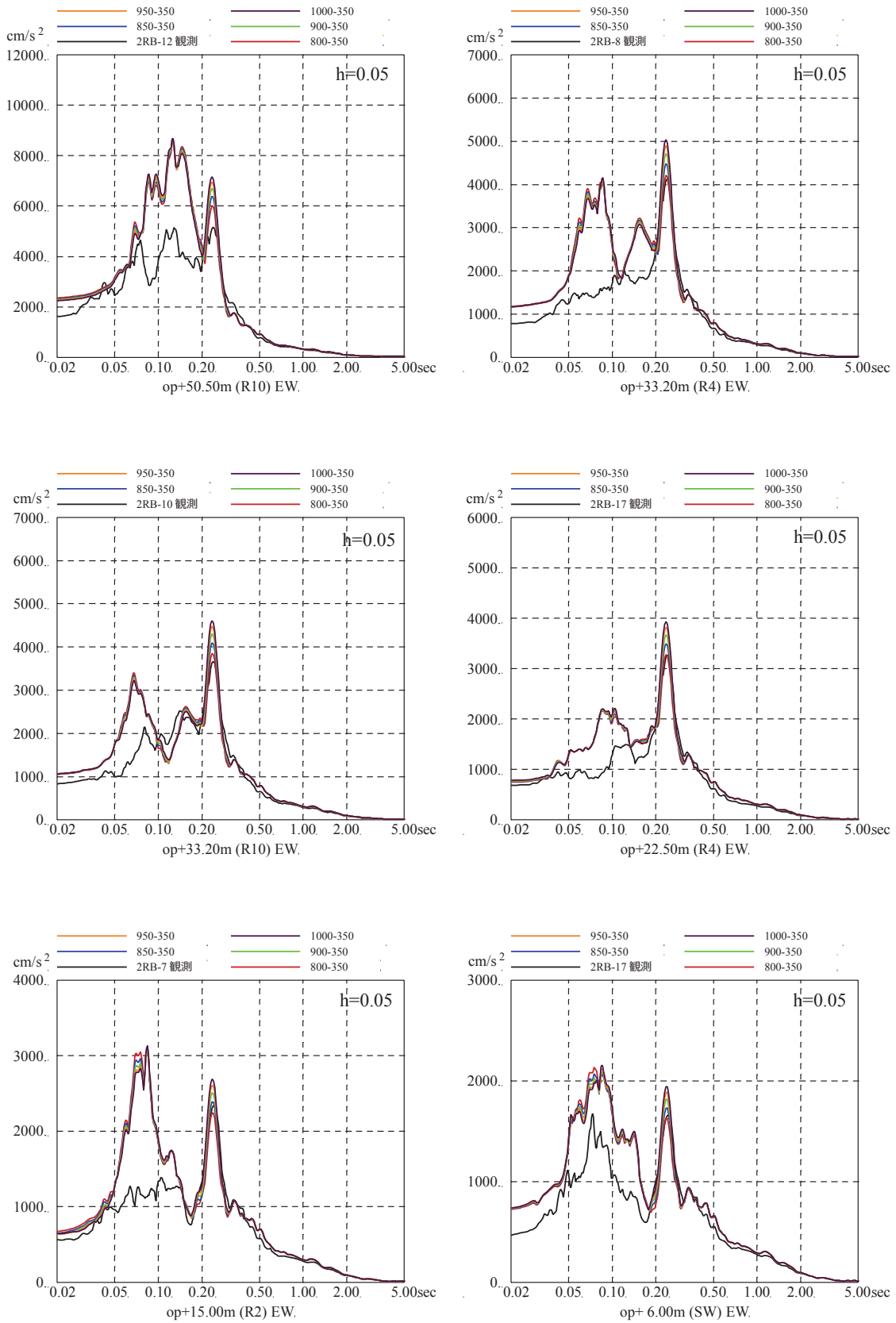


2011. 4. 7 EW 伝達特性比較

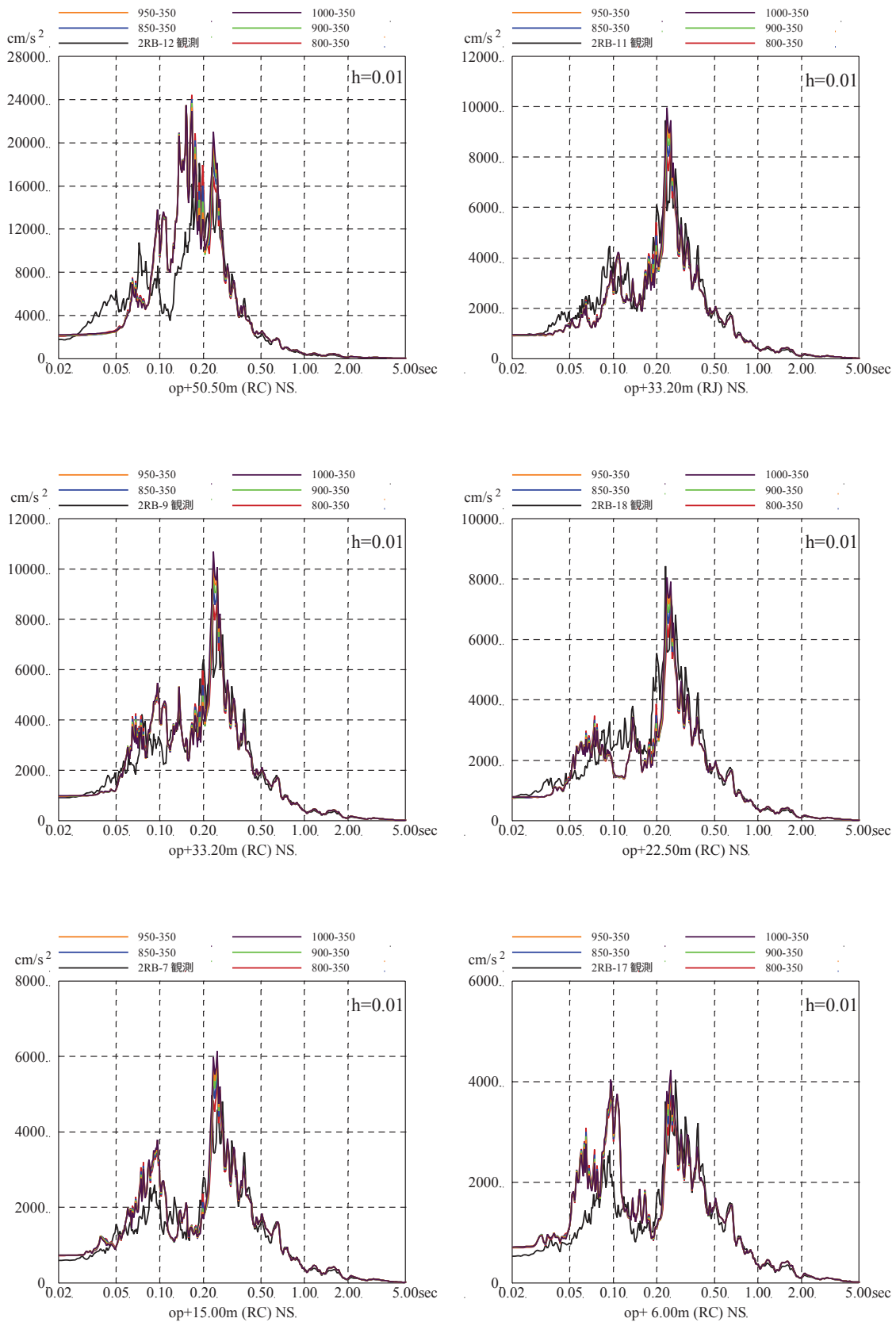
第 2-3 図 ケース 1 の伝達関数の比較
(2011/4/7 地震)



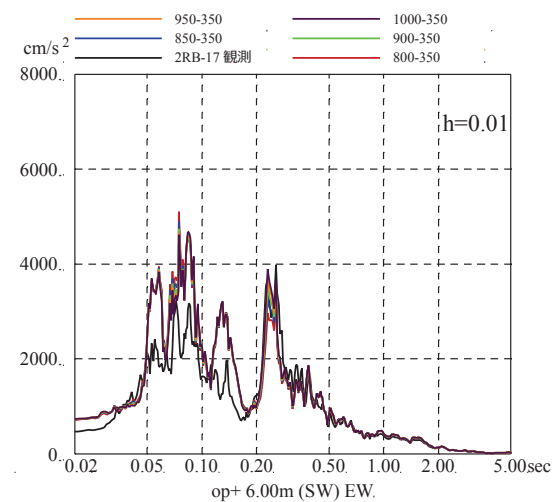
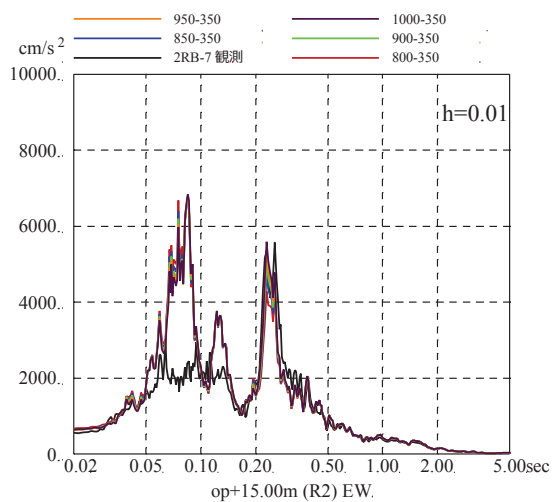
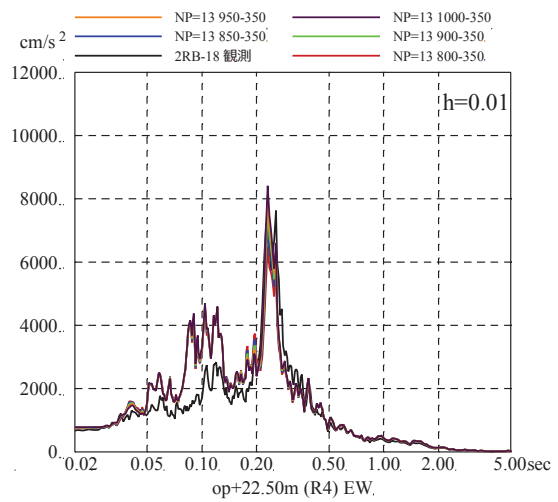
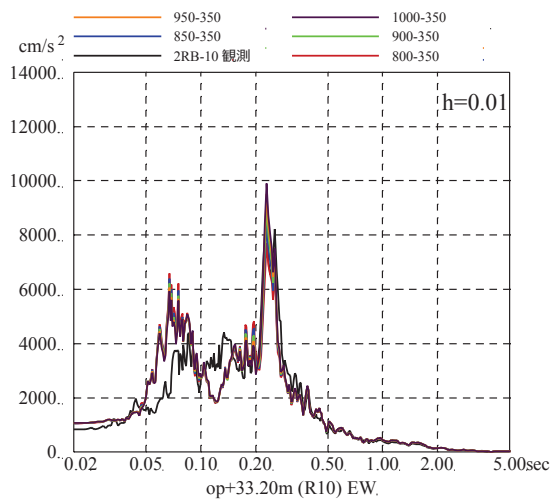
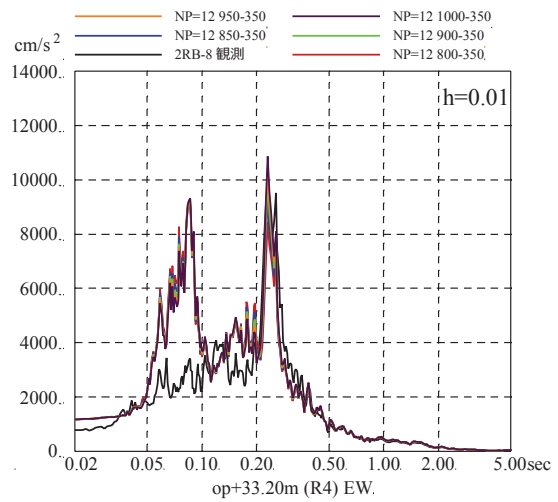
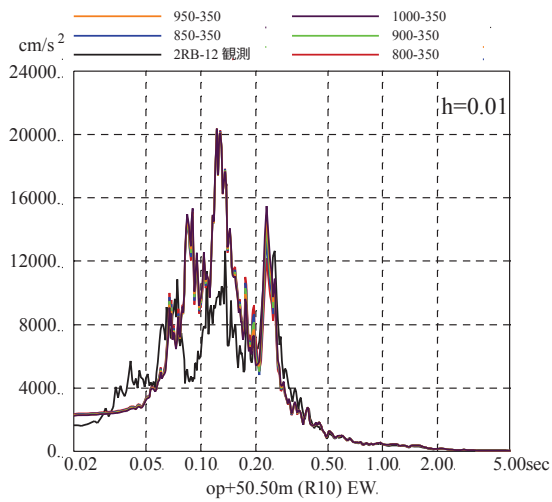
第2-4図 ケース1の床応答スペクトルの比較
 (2011/3/11 東北地方太平洋沖地震, NS方向, 減衰5%)



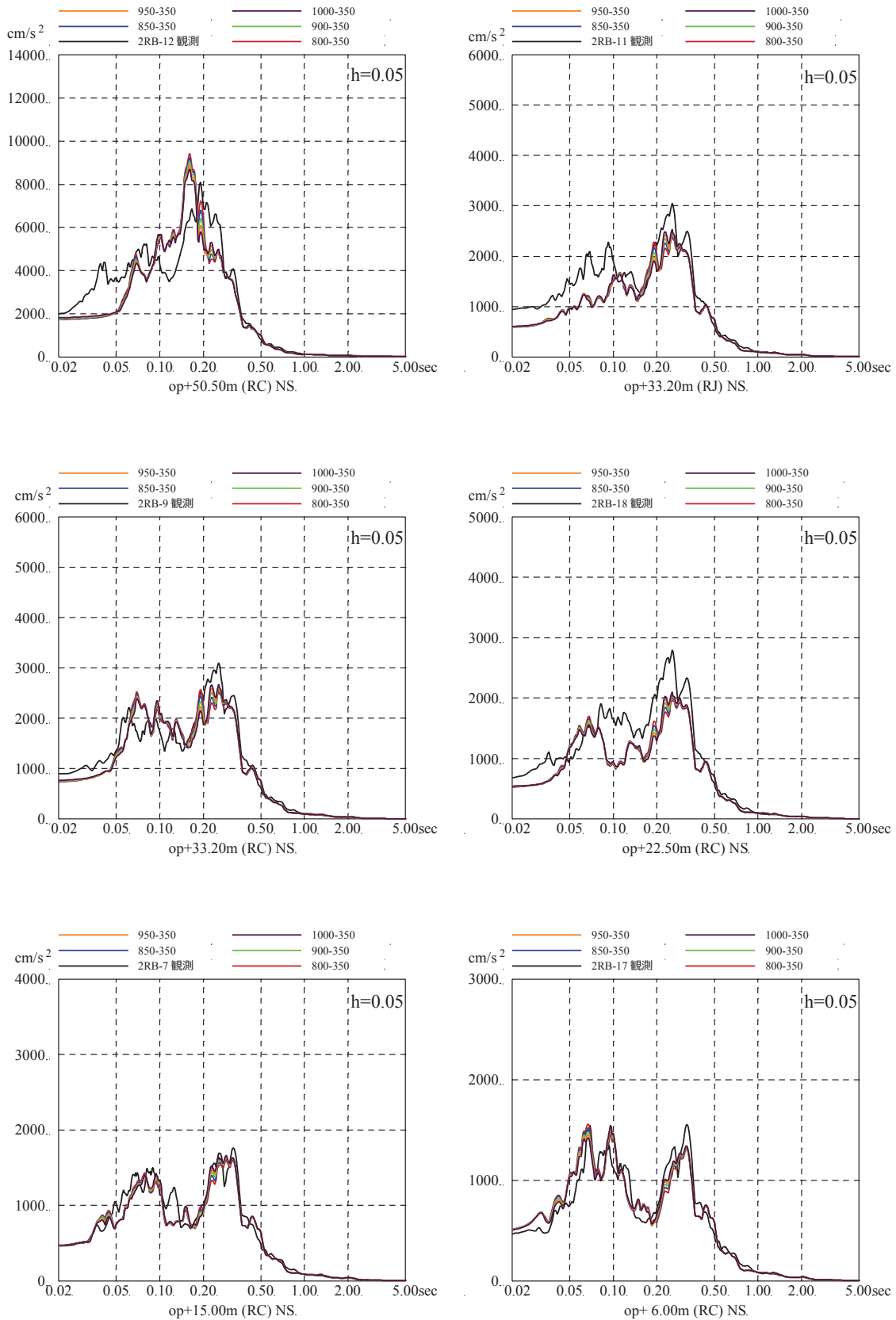
第2-5図 ケース1の床応答スペクトルの比較
(2011/3/11 東北地方太平洋沖地震, EW方向, 減衰5%)



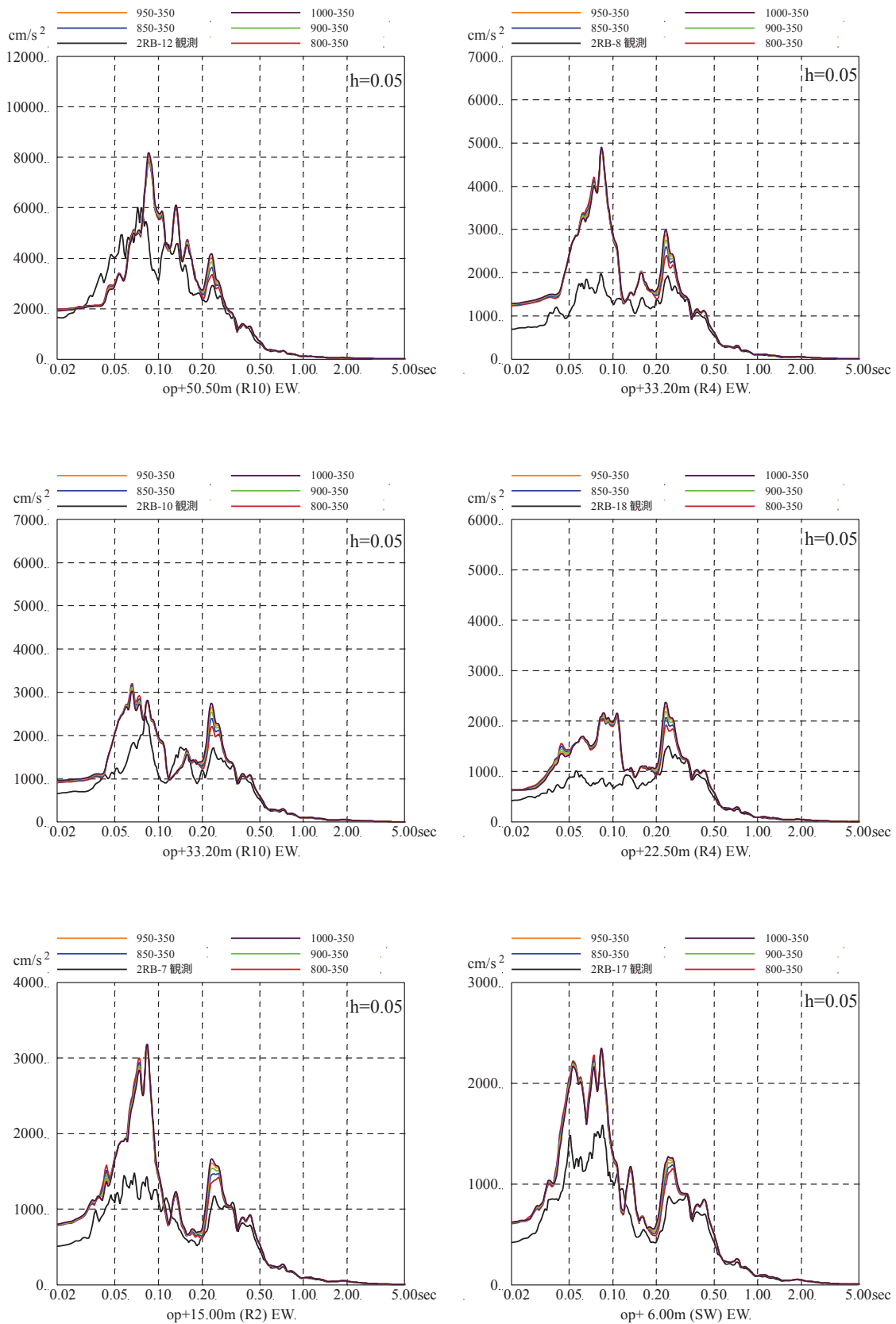
第2-6図 ケース1の床応答スペクトルの比較
(2011/3/11 東北地方太平洋沖地震, NS方向, 減衰1%)



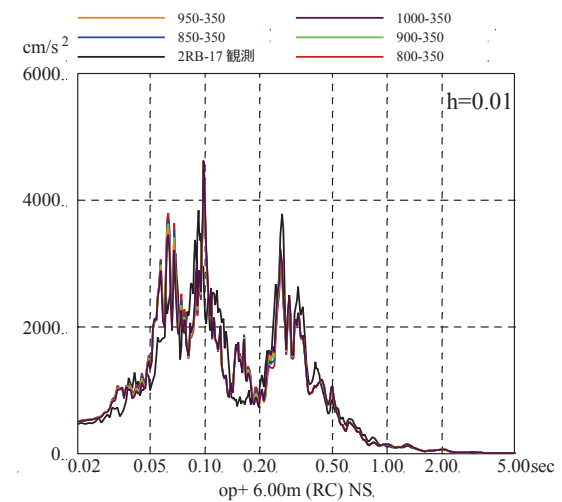
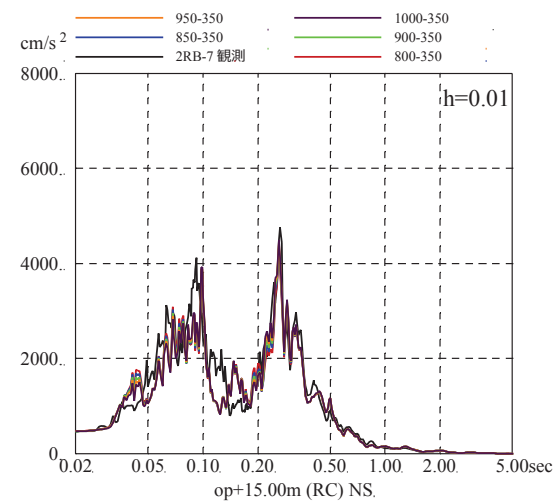
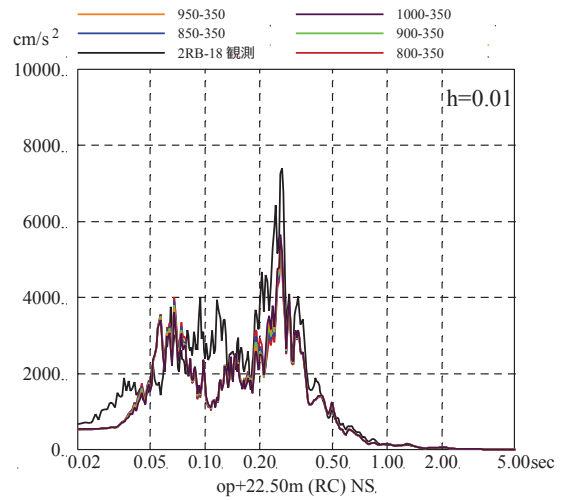
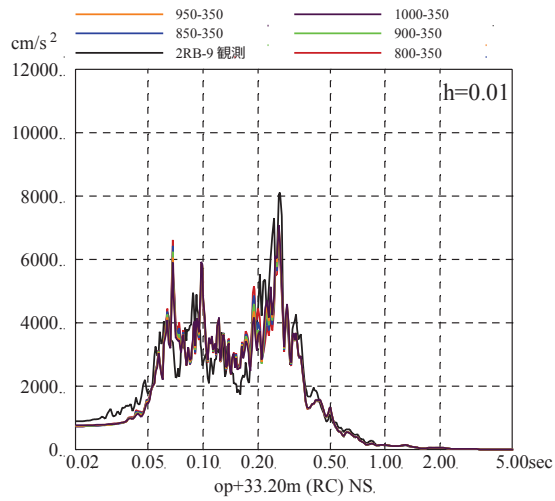
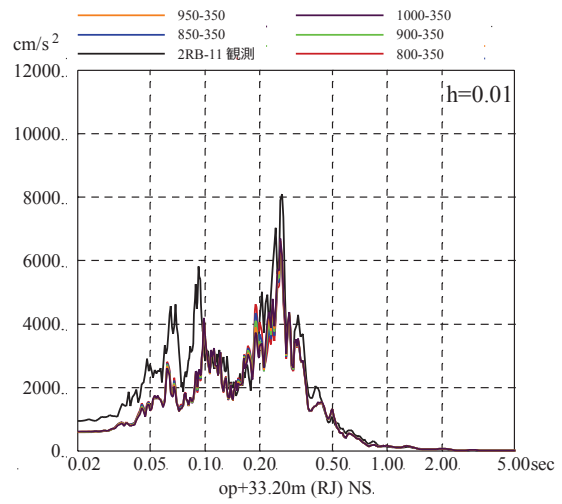
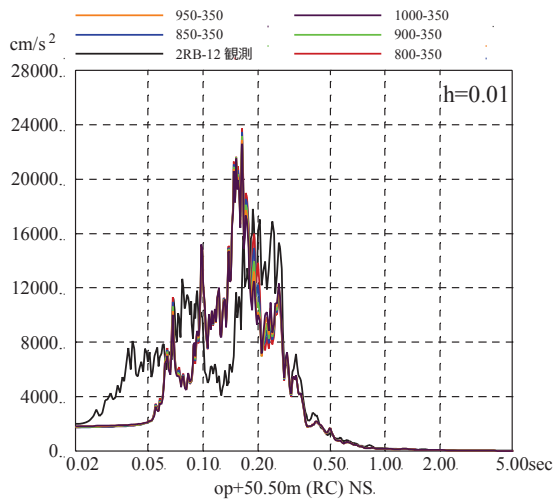
第2-7図 ケース1の床応答スペクトルの比較
(2011/3/11 東北地方太平洋沖地震, EW方向, 減衰1%)



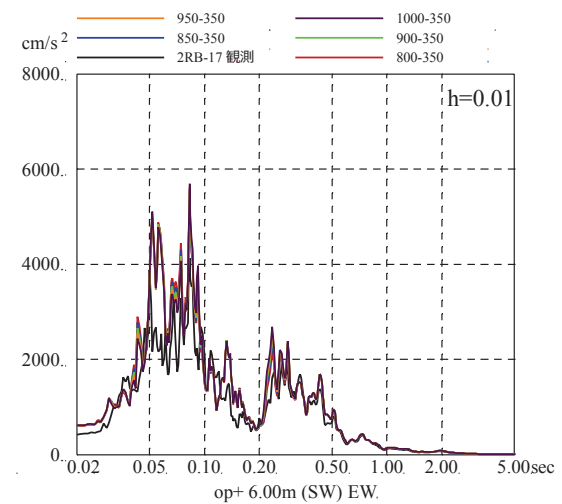
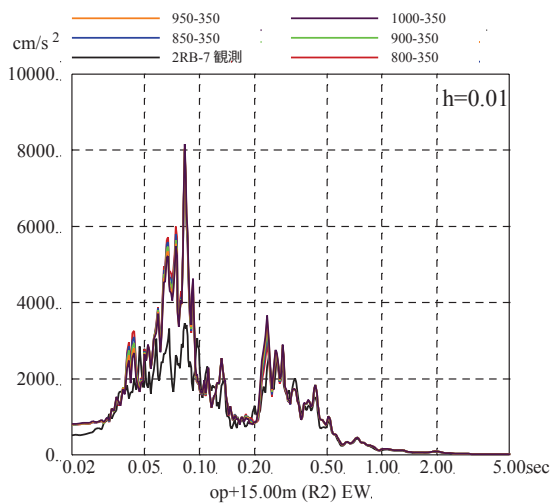
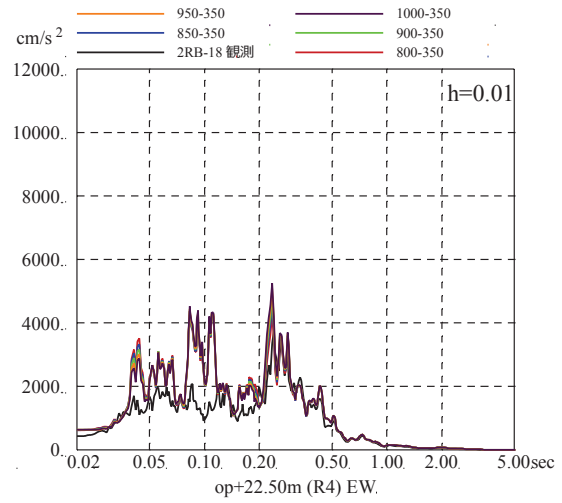
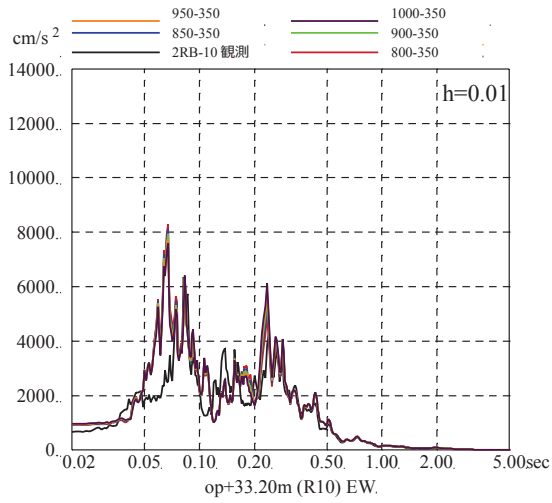
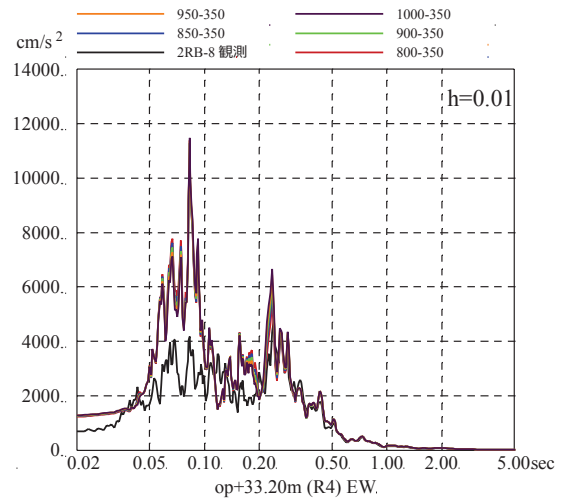
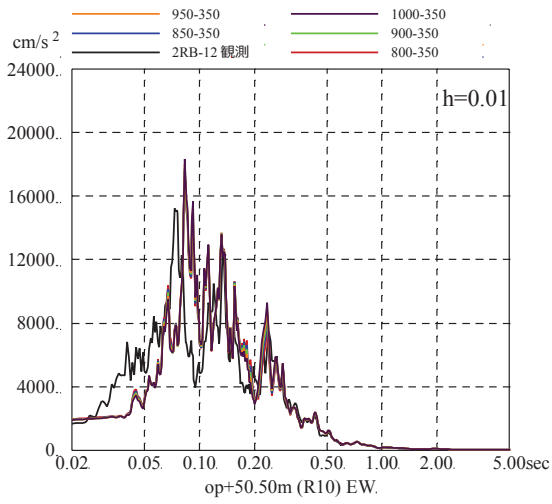
第2-8図 ケース1の床応答スペクトルの比較
(2011/4/7 地震, NS方向, 減衰5%)



第 2-9 図 ケース 1 の床応答スペクトルの比較
(2011/4/7 地震, EW 方向, 減衰 5%)



第 2-10 図 ケース 1 の床応答スペクトルの比較
(2011/4/7 地震, NS 方向, 減衰 1%)



第 2-11 図 ケース 1 の床応答スペクトルの比較
(2011/4/7 地震, EW 方向, 減衰 1%)

添付 8 線形地盤モデルを用いた表層地盤の非線形化による影響確認

1. 検討概要

自由地盤のはぎとり地盤モデルの検討では、表層地盤を分割すること、表層地盤上部の物性値を同定することで、小振幅から大振幅までの観測記録を再現できることがわかっている。

表層地盤は、3.11 地震等による非線形化の影響が大きいと考えられることから、2号炉原子炉建屋の観測記録の分析からも表層地盤上部に非線形化の影響が現れているか検討する。

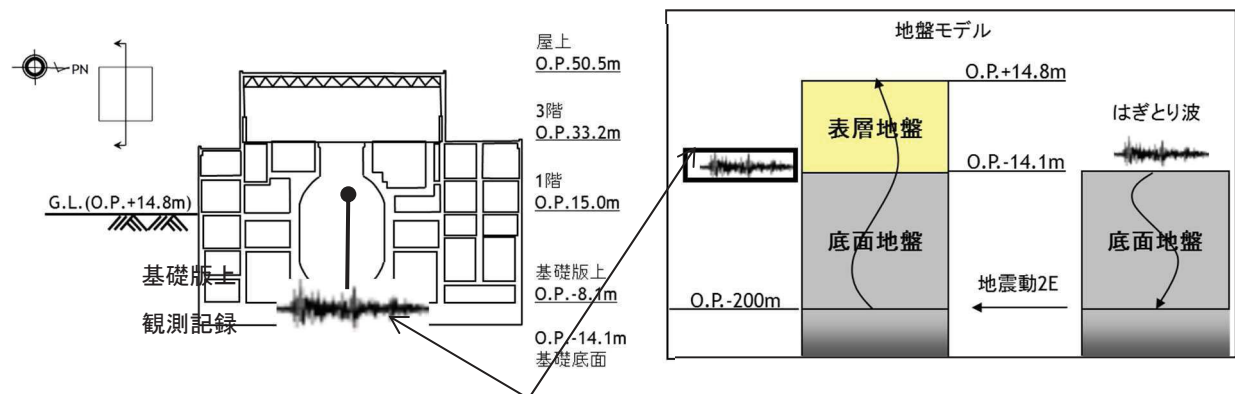
2. 検討方法

表層地盤上部 (O.P. +14.8m~O.P. +0m) の非線形化の有無を確認するため、仮設定した地盤モデルを用いて感度解析を実施した。

仮設定した地盤モデルは、表層地盤の層境界を O.P. +0m, 表層地盤下部のせん断波速度 V_s を 900m/s とし、表層地盤上部のせん断波速度 V_s を 300~600m/s の間で変動させるモデルとする。仮設定した地盤モデルの諸元を第 2-1 表に示す。

検討は、自由地盤の観測記録から算定したはぎとり波に対する基礎版上観測記録と検討用に仮定した地盤モデルにより算定した基礎版底面レベル (O.P. -14.1m) の入力地震動 (E+F+P 波, P は切欠き力の時刻歴波形) の伝達関数に表れる表層地盤の 1 次周期に対応する 4~6Hz 付近の谷の再現性およびはぎとり波を用いた建屋のシミュレーション解析結果と観測記録の適合性を確認することにより行う。検討に用いた地震は、過去に観測された加速度振幅の大きい地震と 3.11 地震直前の 2011 年 3 月 9 日の地震としその諸元を第 2-2 表に示す。

検討方法の概念図を第 2-1 図に示す。



はぎとり波に対する伝達関数の谷となる振動数を比較

第 2-1 図 表層地盤物性の検討方法の概念

第 2-1 表 検討用に仮定した地盤モデル (赤文字部分が仮定した値)

	地層レベル O.P. (m)	単位体積重量 γ (kN/m ³)	せん断波速度 Vs (m/s)	減衰定数 h (%)
表層地盤	14.80	23.3 (2.38tf/m ³)	300~600	3
	0.00	23.3 (2.38tf/m ³)	900	3
底面地盤	-14.10	23.8 (2.43tf/m ³)	1300	3
	-25.00	24.6 (2.51tf/m ³)	2150	3
	-80.00	25.0 (2.55tf/m ³)	2440	3
	-200.0	25.0 (2.55tf/m ³)	2440	3

第 2-2 表 検討に用いた地震諸元

地震	M	震源地	自由地盤 B2 地点 (地中記録) 最大加速度 (PN 基準に方位補正) (cm/s ²)		
			NS 方向	EW 方向	
1	2005/8/16 11:46	7.2	宮城県東方沖	233	221
2	2011/3/9 11:45	7.3	宮城県東方はるか沖	30	12
3	2011/3/11 14:46	9.0	宮城県東方はるか沖	467	421
4	2011/4/7 23:32	7.2	宮城県東方沖	321	396

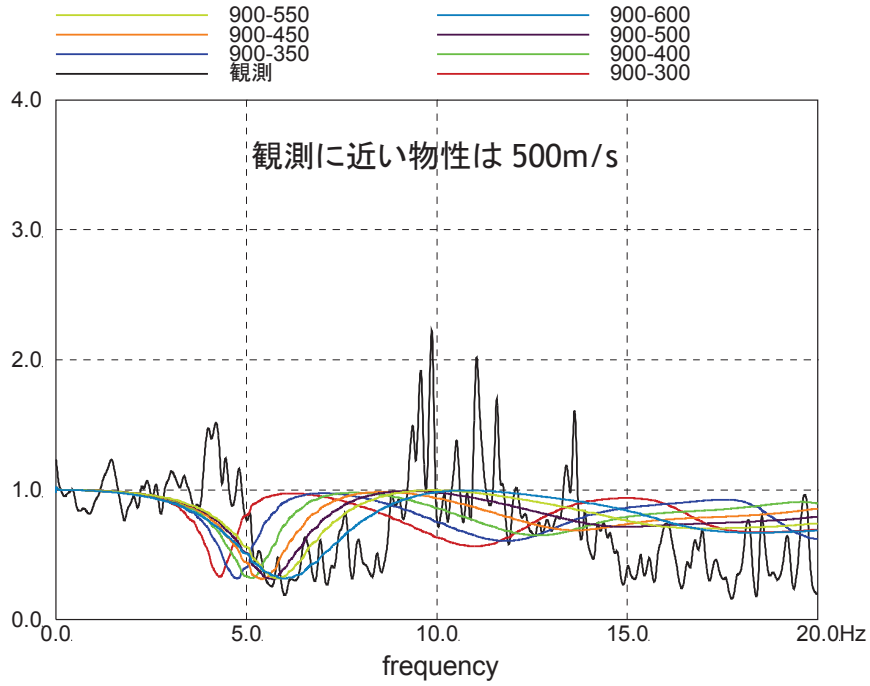
3. 検討結果

検討に用いた代表地震に対する伝達関数を比較して第 3-1 図～第 3-4 図，応答スペクトルの比較を第 3-5 図～第 3-12 図に示す。

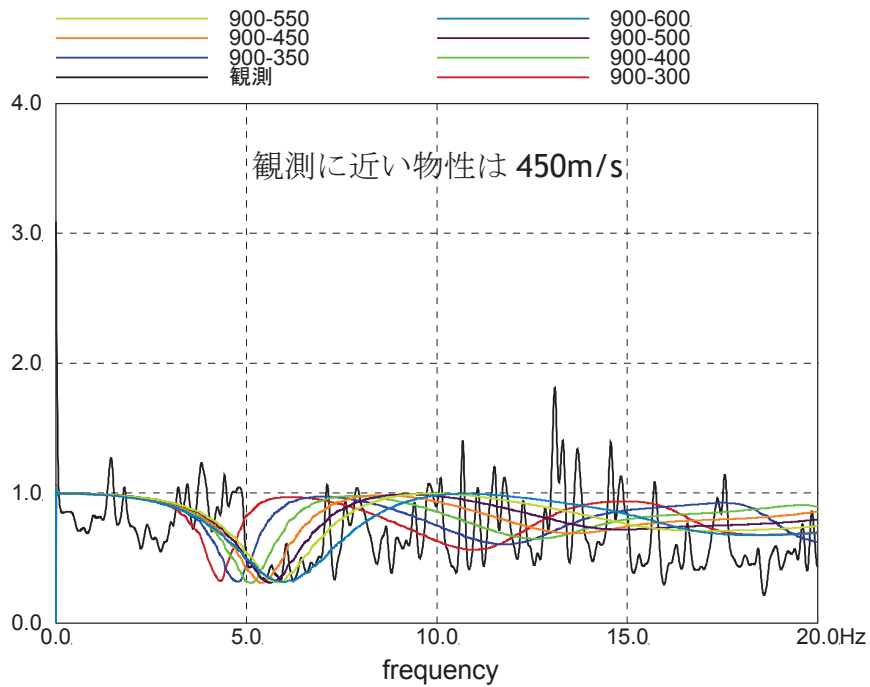
伝達関数の比較においては，2005/8/16 の宮城県沖の地震と 2011/3/9 の地震では，表層地盤上部のせん断波速度 V_s が 450m/s～500m/s の場合に観測記録に対応するが，3.11 地震と 4.7 地震では，350m/s の場合が観測記録と良い対応を示している。

地震動の振幅レベルにより表層地盤上部の最適となるせん断波速度がことなることから，表層地盤上部では非線形化の影響が確認された。応答スペクトルの比較においては，伝達関数による検討程の大きな差異は見られなかった。

このことから，表層地盤上部には入力地震動の大きさにより地盤の剛性低下等を考慮できる非線形地盤モデルを設定する必要があることが確認された。

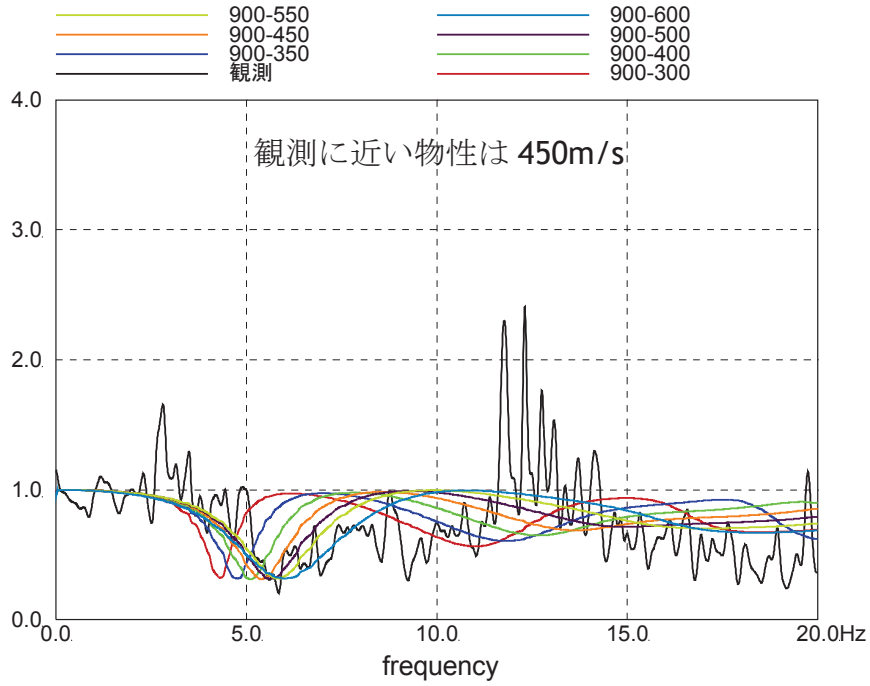


2005. 8. 16 NS 伝達特性比較

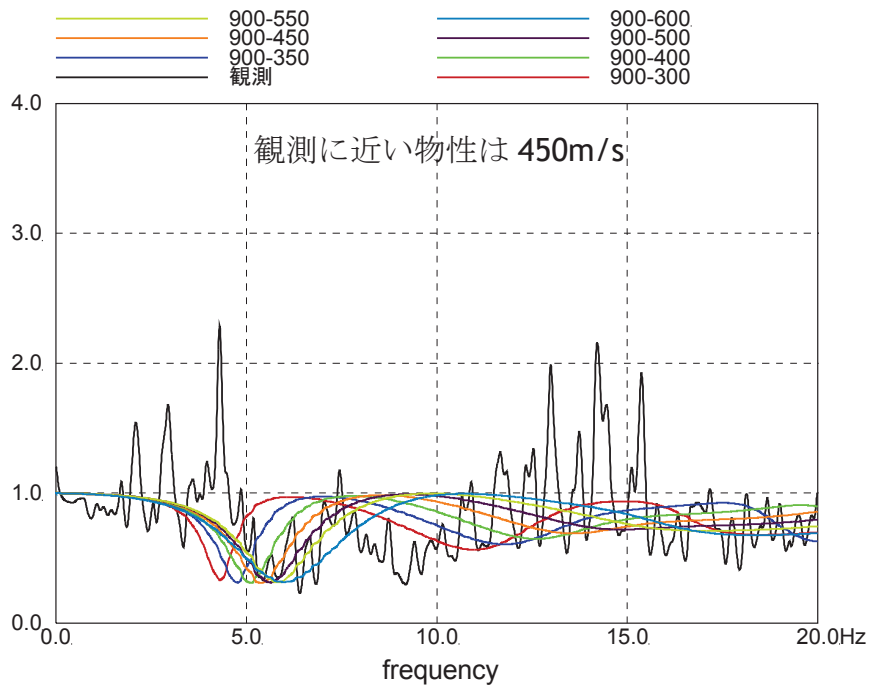


2005. 8. 16 EW 伝達特性比較

第 3-1 図 はぎとり波に対する基礎版上観測記録の伝達関数とはぎとり波に対する入力変換波 (E+F+P) の伝達関数の比較 (2005/8/16 地震)

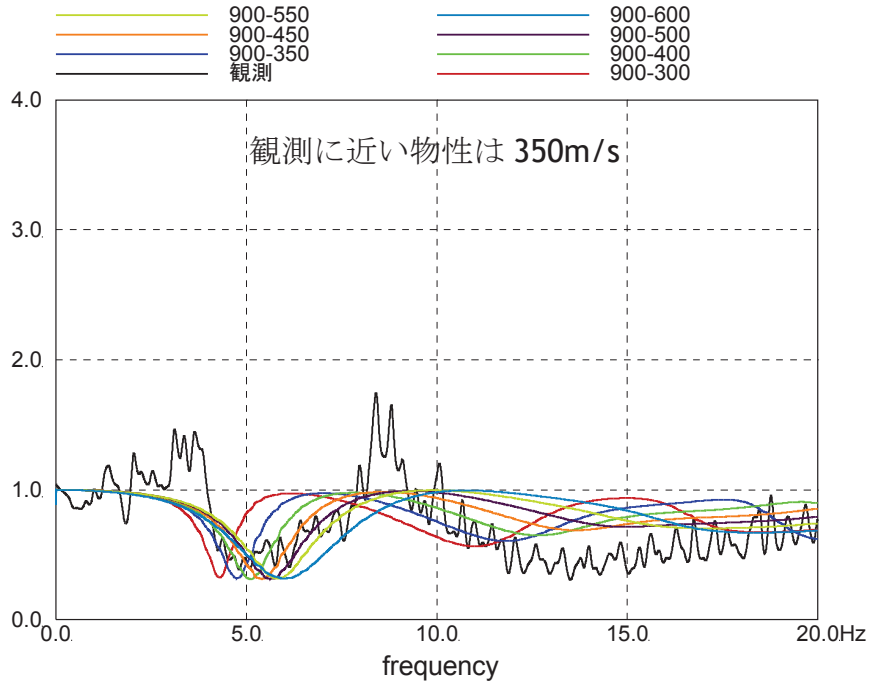


2011. 3. 9 NS 伝達特性比較

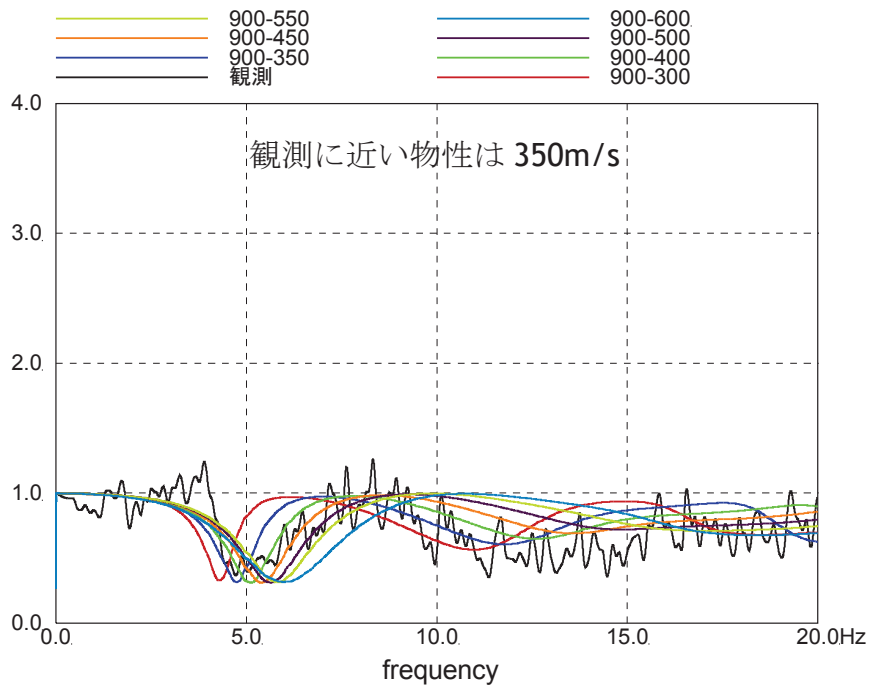


2011. 3. 9 EW 伝達特性比較

第 3-2 図 はぎとり波に対する基礎版上観測記録の伝達関数と
はぎとり波に対する入力変換波 (E+F+P) の伝達関数の比較
(2011/3/9 地震)

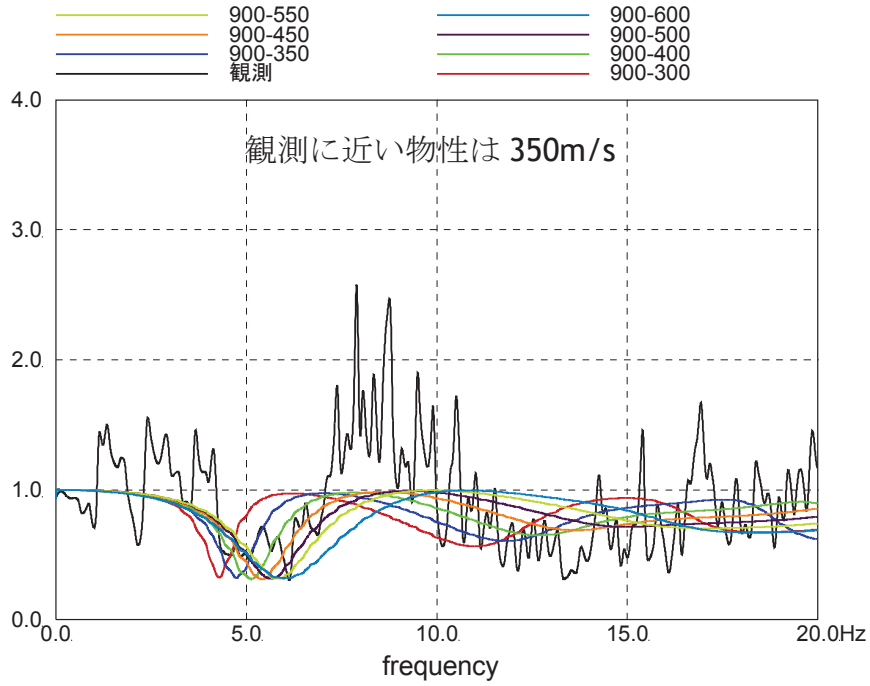


2011. 3. 11 NS 伝達特性比較

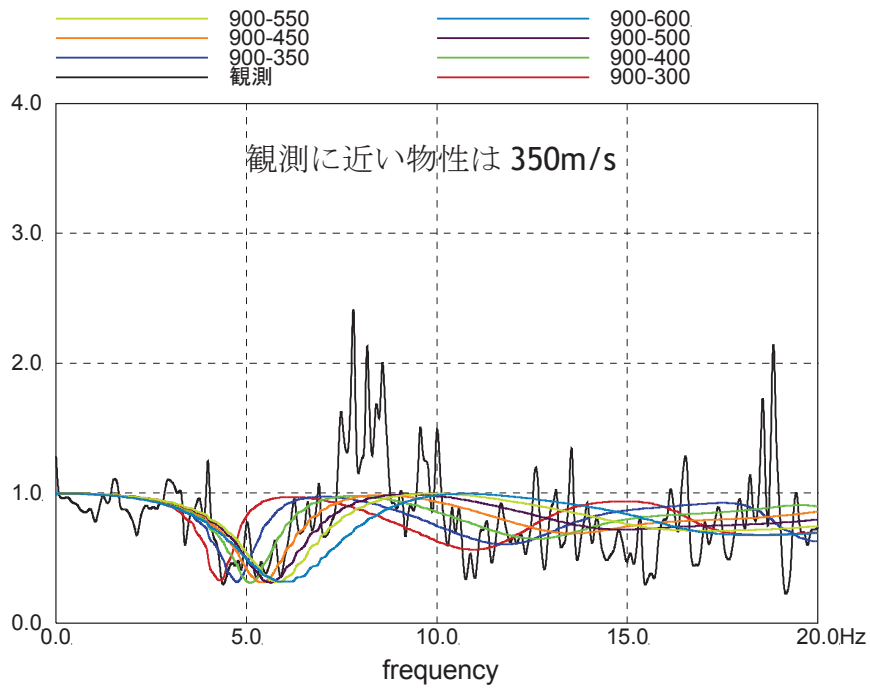


2011. 3. 11 EW 伝達特性比較

第3-3図 はぎとり波に対する基礎版上観測記録の伝達関数とはぎとり波に対する入力変換波 (E+F+P) の伝達関数の比較
(2011/3/11 東北地方太平洋沖地震)

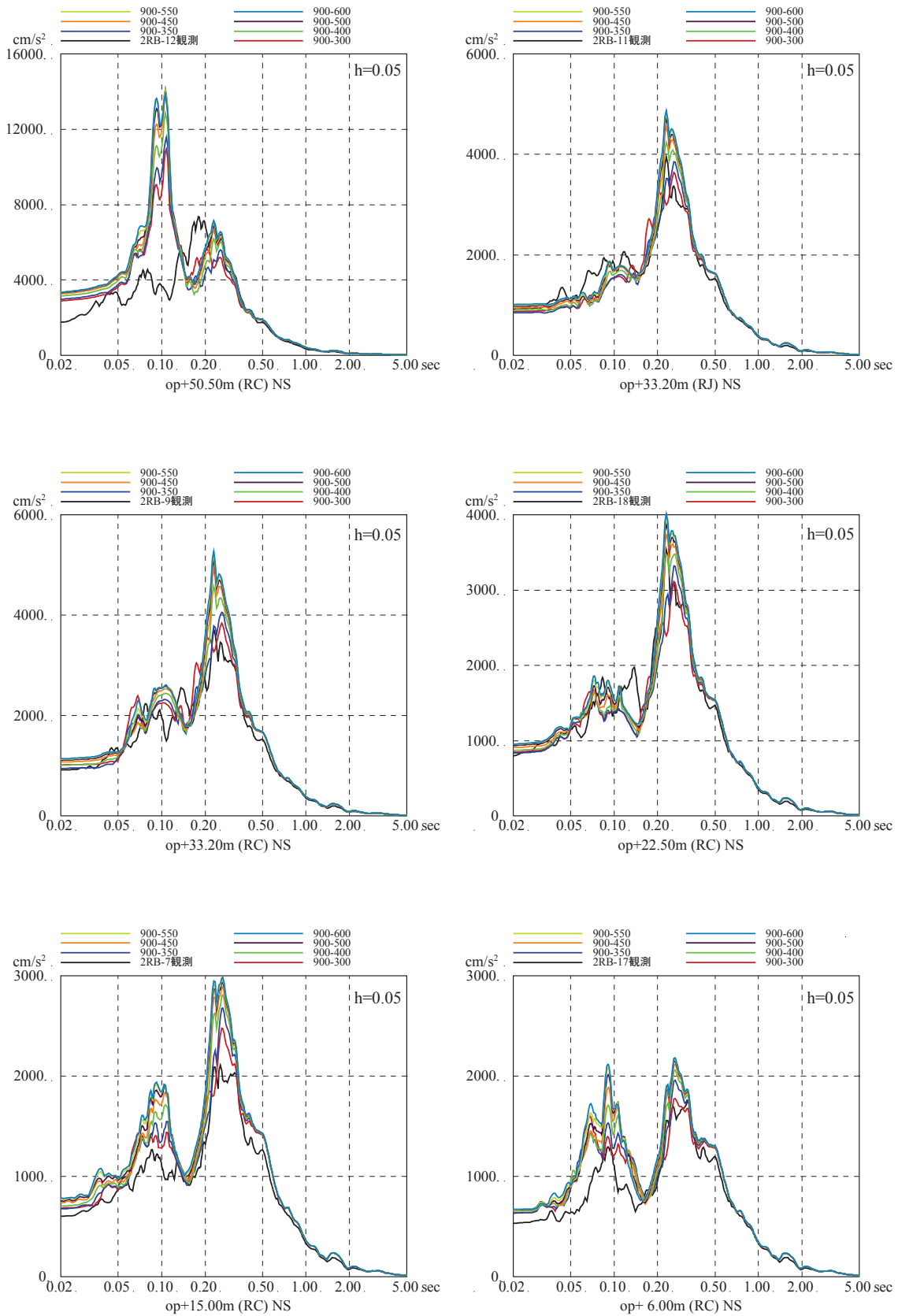


2011. 4. 7 NS 伝達特性比較

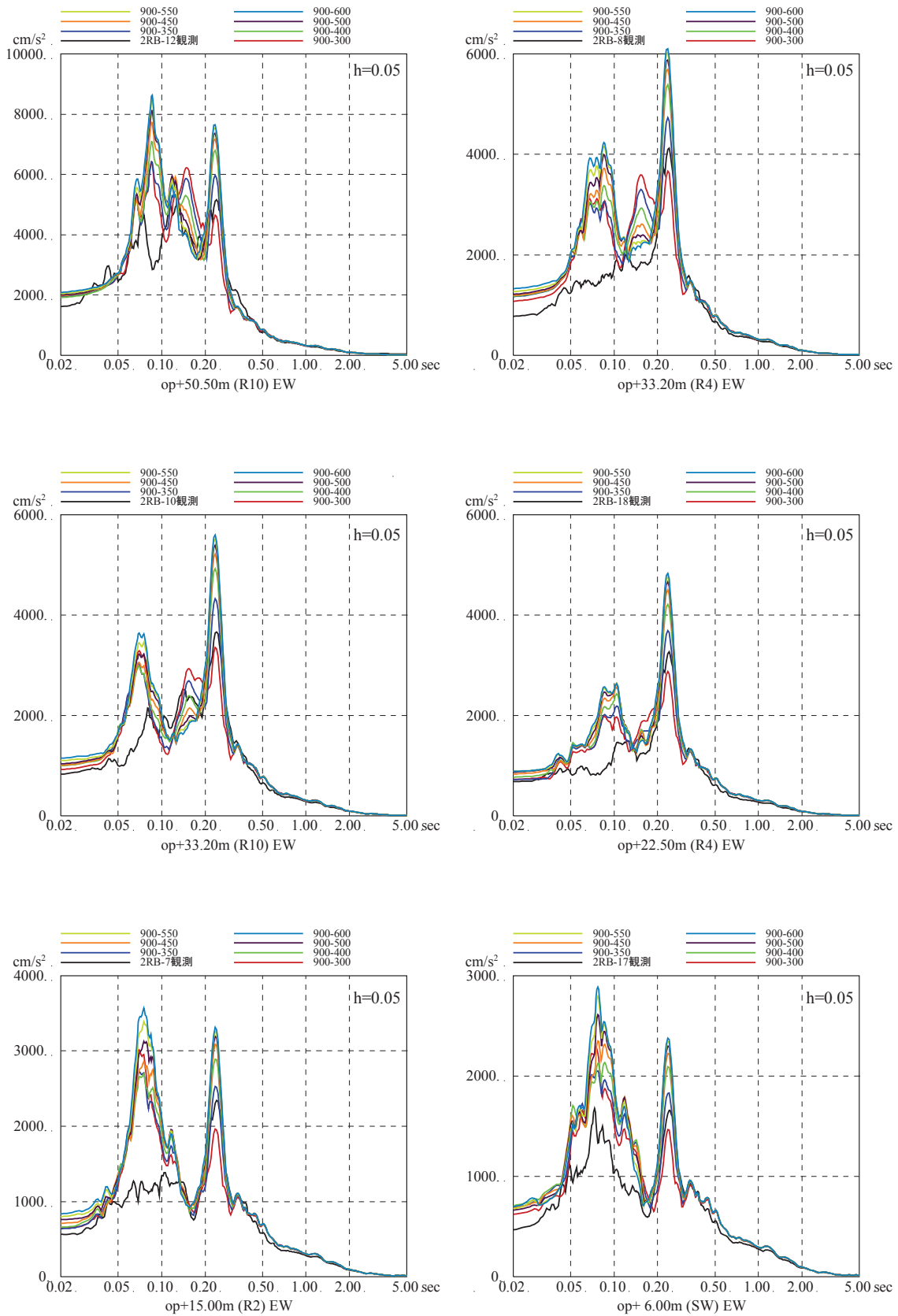


2011. 4. 7 EW 伝達特性比較

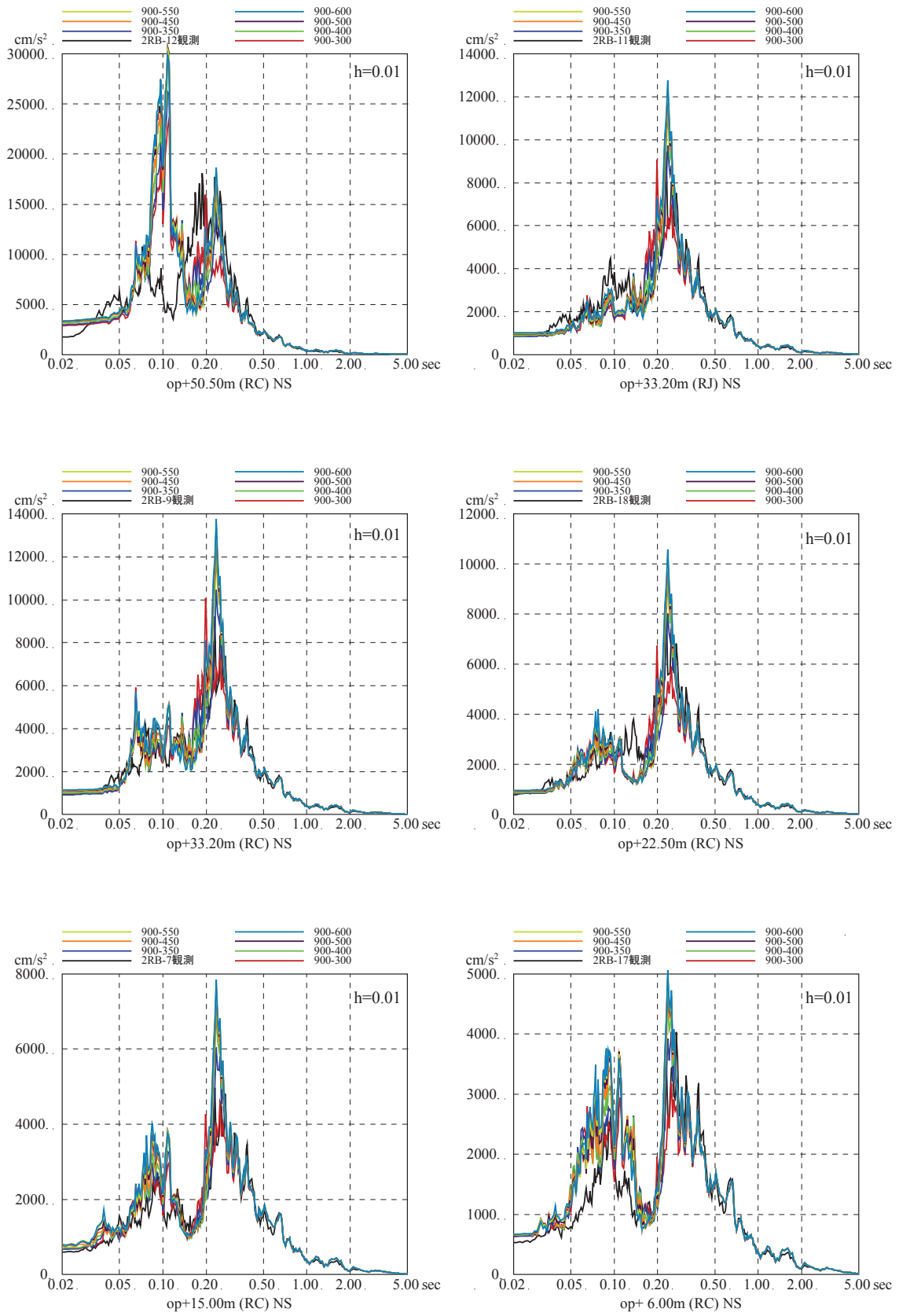
第3-4図 はぎとり波に対する基礎版上観測記録の伝達関数とはぎとり波に対する入力変換波 (E+F+P) の伝達関数の比較 (2011/4/7 地震)



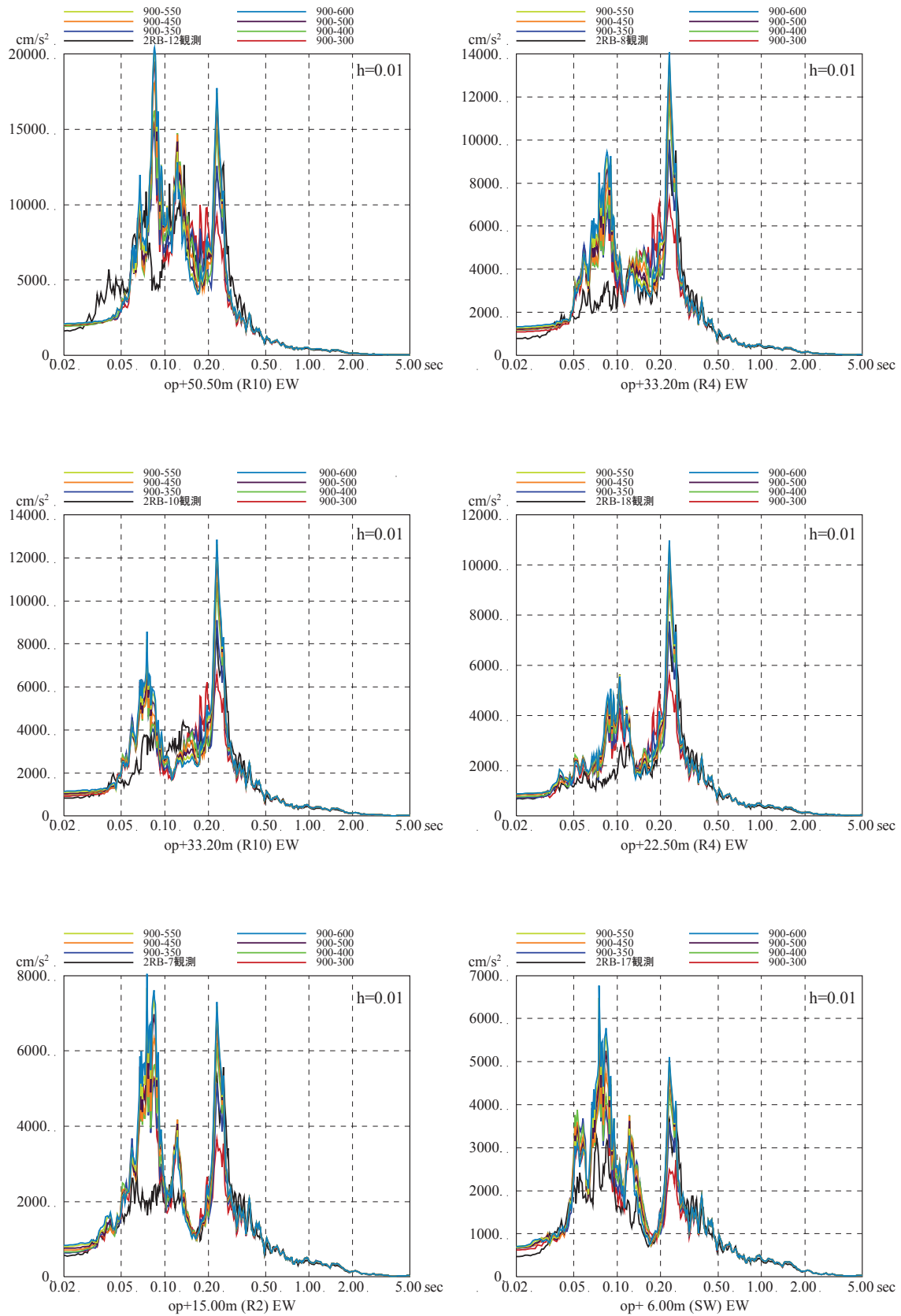
第3-5図 はぎとり波入力のシミュレーション解析の床応答スペクトルの比較
 (2011/3/11 東北地方太平洋沖地震, NS方向, 減衰5%)



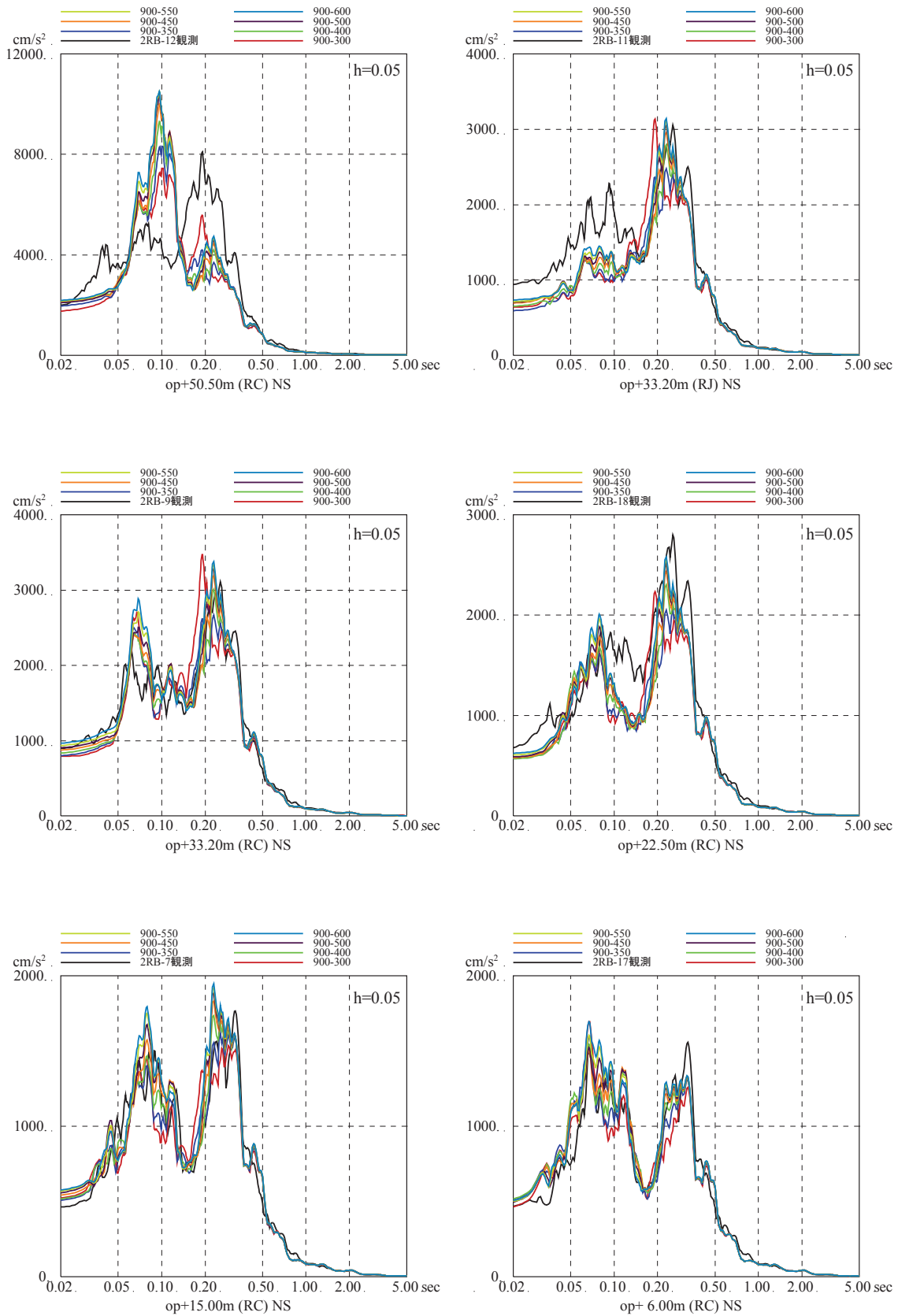
第3-6図 はぎとり波入力のシミュレーション解析の床応答スペクトルの比較
(2011/3/11 東北地方太平洋沖地震, EW方向, 減衰5%)



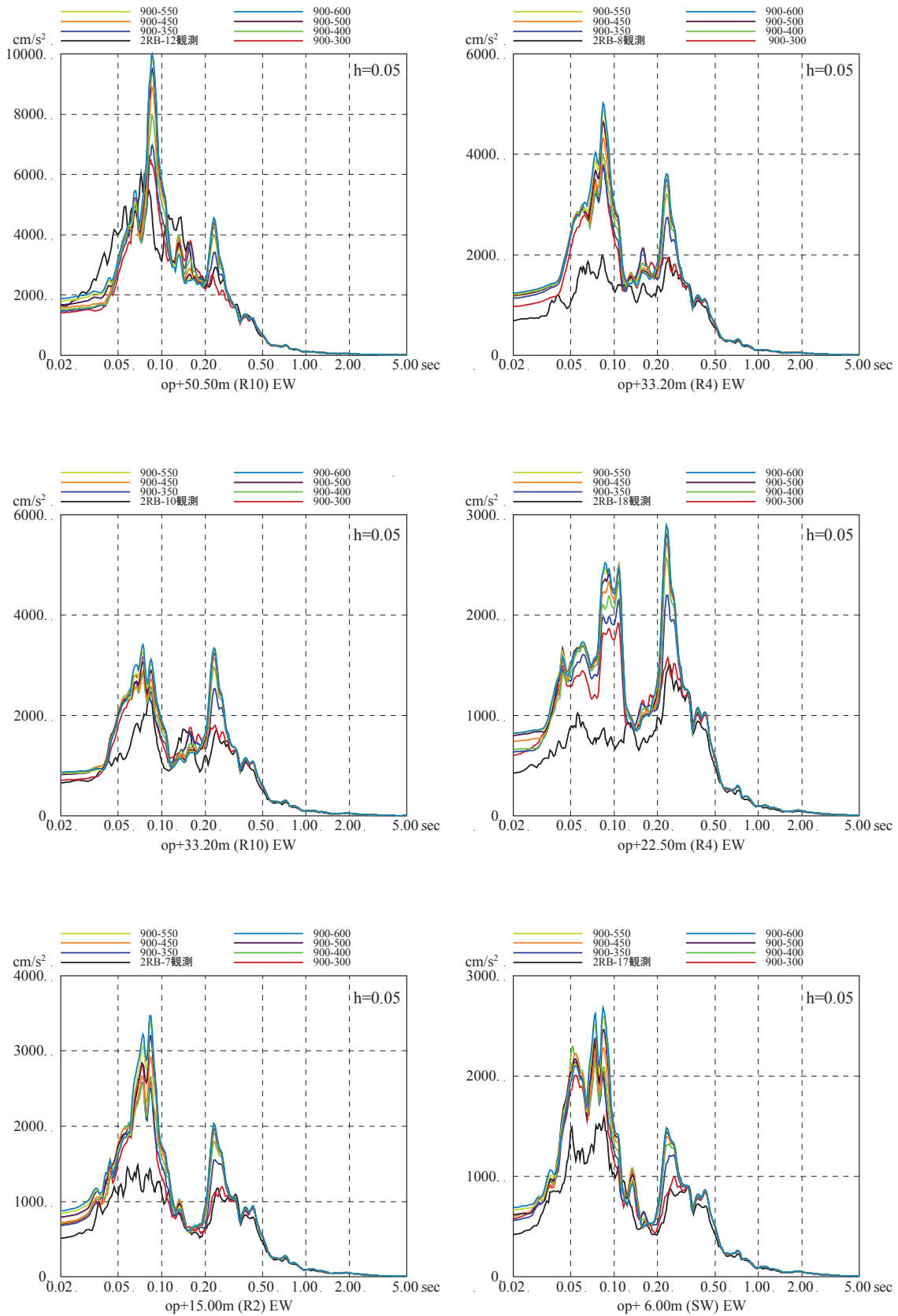
第3-7図 はぎとり波入力のシミュレーション解析の床応答スペクトルの比較
 (2011/3/11 東北地方太平洋沖地震, NS 方向, 減衰 1%)



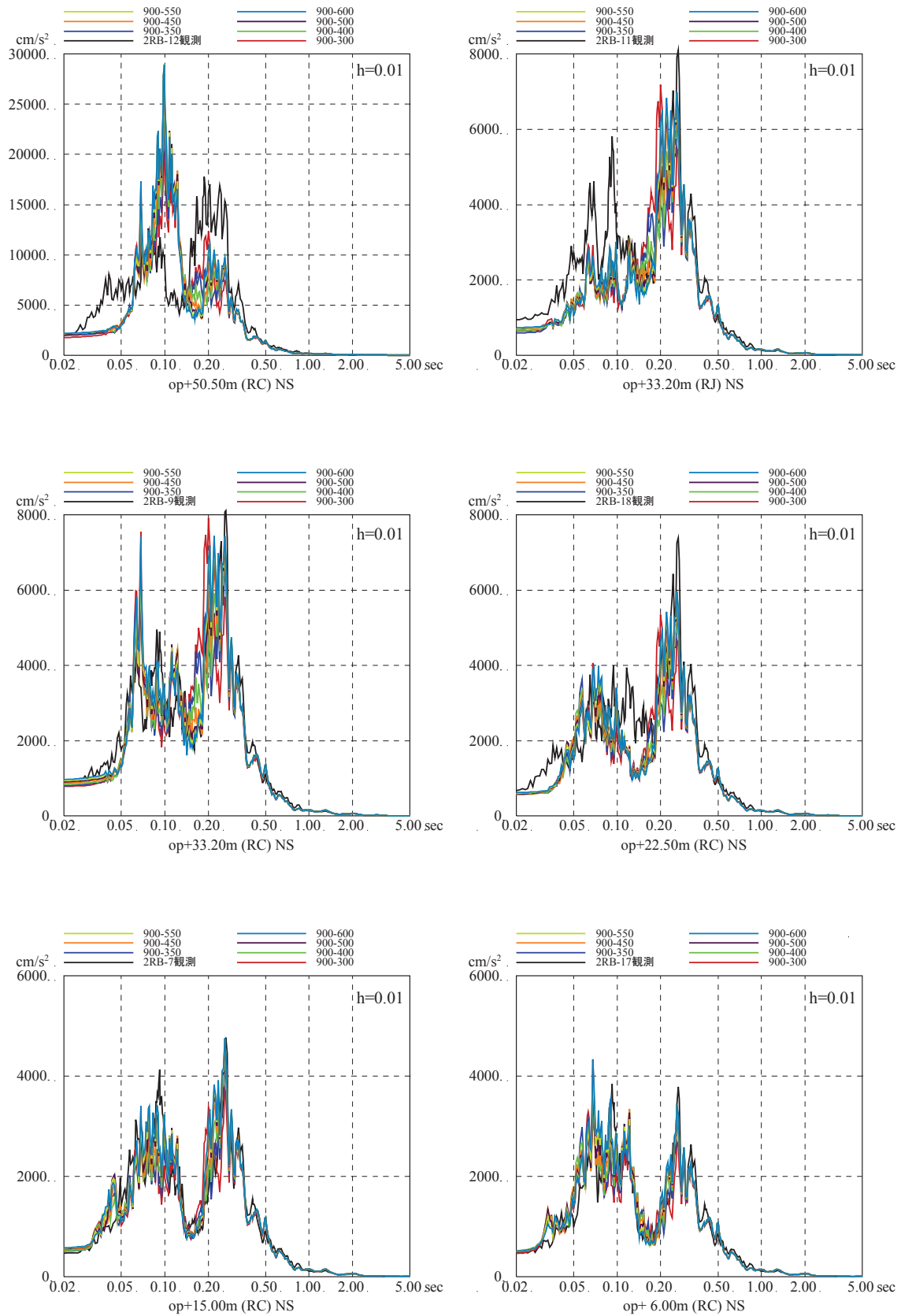
第3-8図 はぎとり波入力のシミュレーション解析の床応答スペクトルの比較
 (2011/3/11 東北地方太平洋沖地震, EW方向, 減衰1%)



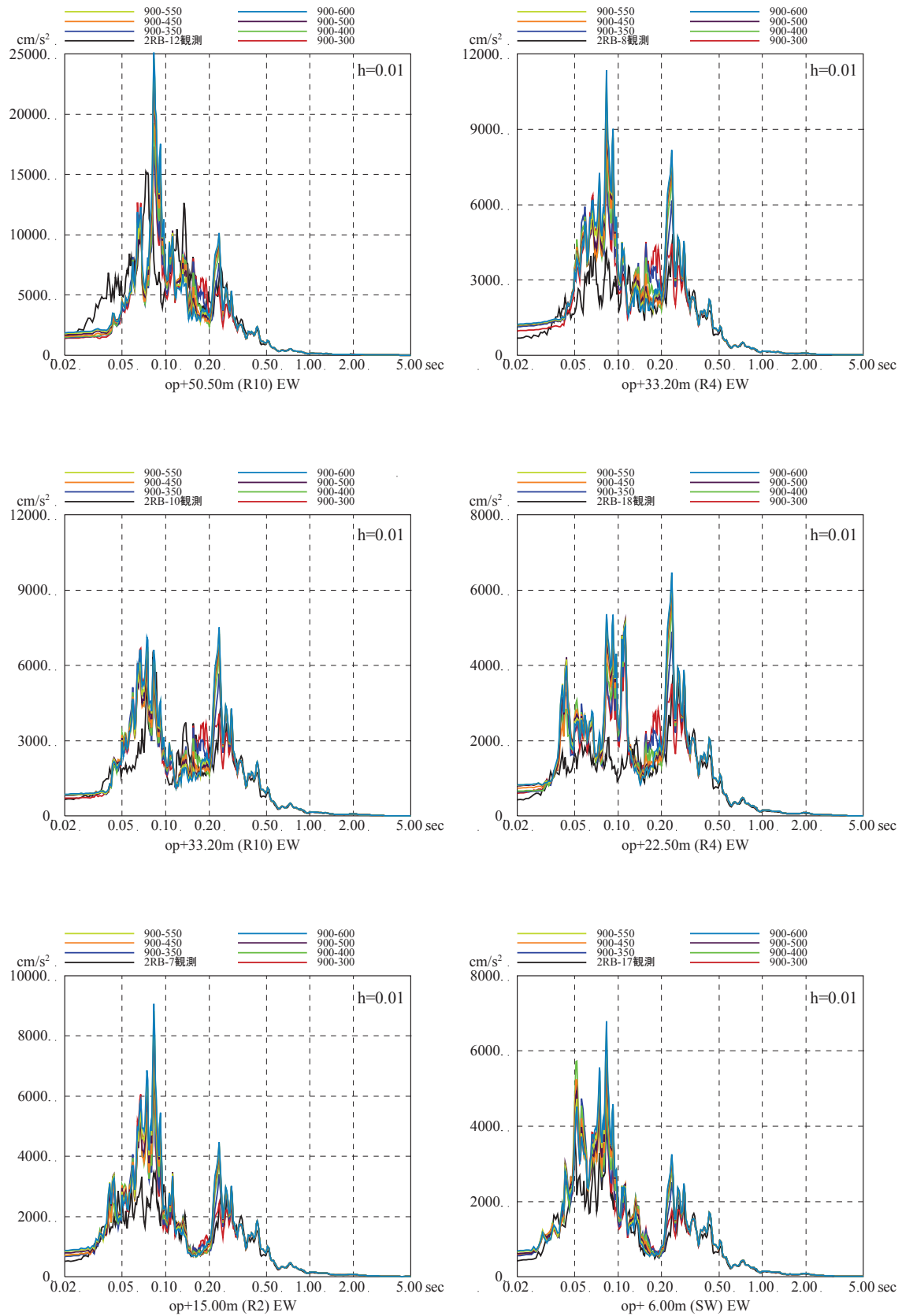
第3-9図 はぎとり波入力のシミュレーション解析の床応答スペクトルの比較
(2011/4/7 地震, NS方向, 減衰5%)



第 3-10 図 はぎとり波入力のシミュレーション解析の床応答スペクトルの比較
(2011/4/7 地震, EW 方向, 減衰 5%)



第 3-11 図 はぎとり波入力のシミュレーション解析の床応答スペクトルの比較
(2011/4/7 地震, NS 方向, 減衰 1%)



第 3-12 図 はざとり波入力のシミュレーション解析の床応答スペクトルの比較
(2011/4/7 地震, EW 方向, 減衰 1%)

添付9 表層地盤上部 (O. P. 14. 8m~O. P. 0m) の地盤物性値の設定

表層地盤上部 (O. P. 14. 8m~O. P. 0m) については、地震動レベルに応じた非線形特性を考慮する必要があることが確認されている。

表層地盤上部の地盤物性値は、波動伝播特性評価において主に盛土の影響が強い層であることから盛土の物性値を流用することとして、非線形特性を設定する。

盛土の物性値は、地盤調査結果を基に初期剛性 G_0 、 $G/G_0-\gamma$ 曲線および $h-\gamma$ 曲線の非線形特性を設定する。各試験の調査位置、試料採取位置を第 1-1 図に示す。

初期剛性 G_0 は、PS 検層結果により (4-1) 式で設定する。PS 検層結果における初期せん断剛性 G_0 と拘束圧 σ_c の関係を第 1-2 図に示す。

$$G_0 = 1787\sigma_c^{0.84} \quad (1-1)$$

$$\text{ここで, } \sigma_c [\text{MN/m}^2] = Z \times \rho_t \times \frac{2}{3} \quad Z: \text{深度}$$

$$\rho_t = 18.6 [\text{kN/m}^3]$$

$G/G_0-\gamma$ 曲線は、原位置せん断試験結果による強度定数と拘束圧から求めたせん断強度 τ_m と初期剛性 G_0 から、基準ひずみ γ_m を算定 (第 1-3 図, 第 1-4 図) し (1-2) 式により求める。

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_m}} \quad (1-2)$$

$$\text{ここで, } \gamma_m = \frac{\tau_m}{G_0}$$

$$\tau_m = \tau_0 + \sigma_{md} \tan \phi$$

$$\tau_0 [\text{N/mm}^2] = 0.1$$

$$\phi [^\circ] = 33.9$$

$$\sigma_{md} = 3/4 \times Z \times \rho_t (\text{N/mm}^2)$$

$h-\gamma$ 曲線は、敷地内で採取した試料を用いた繰返し三軸試験結果 (第 1-5 図) に基づき (1-3) 式により求める。

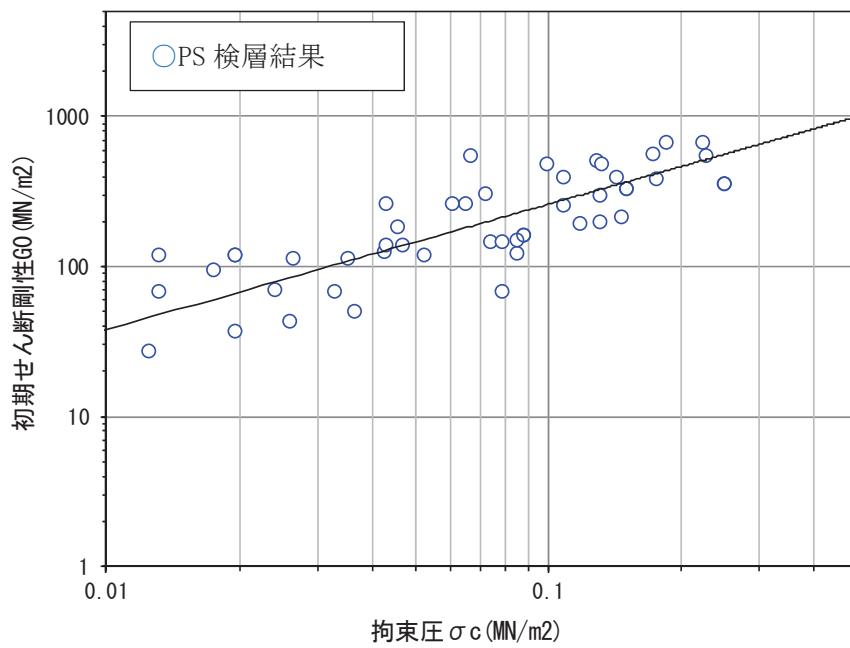
$$h = 0.183\gamma / (\gamma + 0.000261) \quad (1-3)$$

各試験結果から設定した盛土物性値を第 1-1 表に示す。

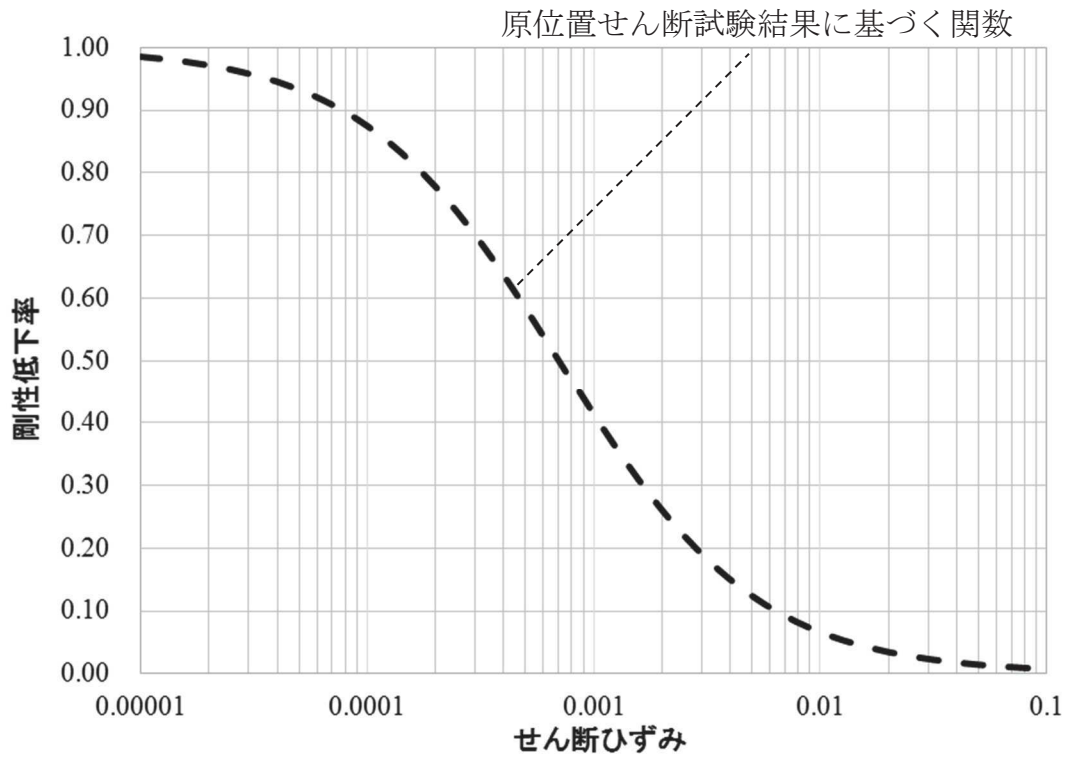


第 1-1 図 調査位置図

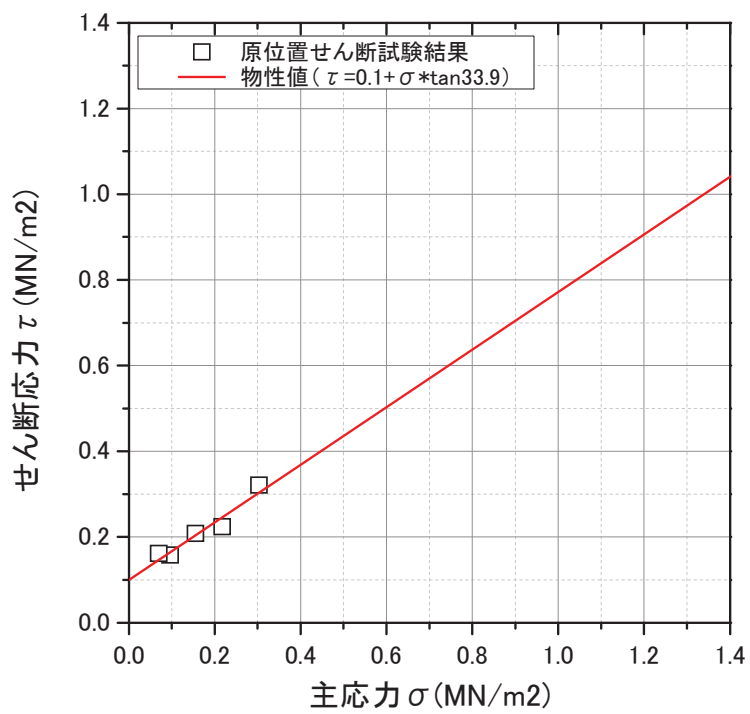
本資料のうち、枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。



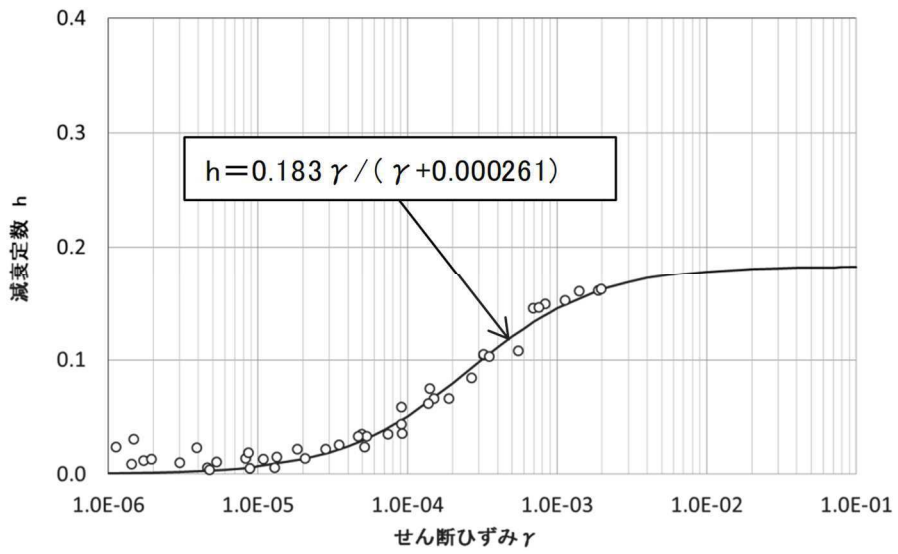
第 1-2 図 初期せん断剛性 G_0 と拘束圧 σ_c の関係



第 1-3 図 $G/G_0 - \gamma$ 曲線



第 1-4 図 せん断応力 τ と拘束圧 σ の関係 (地下水位以浅)



第 1-5 図 h- γ 曲線

第 1-1 表 盛土物性値

地盤	強度定数		初期せん断剛性 G_0 (MN/m^2)	減衰
	粘着力 C (MN/m^2)	内部摩擦角 ϕ ($^\circ$)		
盛土 地下水 位以浅	0.1	33.9	$1787 \sigma_c^{0.84}$	$h=0.183 \gamma / (\gamma + 0.000261)$

添付10 観測記録を用いた地盤モデルの検証

1. 検討概要

4.1項で設定した地盤モデル（第1-1表、第1-1図、第1-2図）の妥当性を確認することを目的として、はぎとり波を用いた3.11地震等のシミュレーション解析を実施し、地震観測記録との整合性を確認した。

2. 検討方法

自由地盤の観測記録から算定したはぎとり波に対する基礎版上観測記録と検討用に仮定した地盤モデルにより算定した基礎版底面レベル（O.P. -14.1m）の入力地震動（E+F+P波、Pは切欠き力の時刻歴波形）の伝達関数に表れる表層地盤の1次周期に対応する4~6Hz付近の谷の再現性を確認することにより検討する。検討方法の概念図を第2-1図に示す。

検討に用いた地震は、過去に観測された加速度振幅の大きい地震と3.11地震直前の2011年3月9日の地震としその諸元を第2-1表に示す。

また、3.11地震、4.7地震については、はぎとり波を用いて4.1項で設定した地盤モデルにより入力地震動を算定し、建屋のシミュレーション解析を実施する。解析結果と地震観測記録を比較することにより地盤モデルの検討を行う。また、参考に基礎版上の観測記録を用いたシミュレーション解析の結果も合わせて示す。3.11地震および4.7地震のシミュレーション解析手法の概念図を第2-2図~第2-4図に示す。解析条件を第2-2表に示す。

第1-1表 女川2号炉原子炉建屋地盤物性

	地層レベル O.P. (m)	単位体積重量 γ (kN/m ³)	せん断波速度 V_s (m/s)	減衰定数 h (%)
表層地盤	14.80	18.6	※1	3 ^{※2}
	0.00	23.3	900 ^{※3}	3
底面地盤	-14.10	23.8	1300	3
	-25.00	24.6	2150	3
	-80.00	25.0	2440	3
	-200.0	25.0	2440	3

※1 O.P. 14.8m~O.P. 0mは、上載圧依存を考慮してせん断波速度と相関のある初期剛性 G_0 を設定する。また、ひずみ依存による非線形特性を考慮する。

※2 Rayleigh 減衰。また、ひずみ依存による非線形特性を考慮する。

※3 PS 検層結果を観測記録の分析より補間して設定

O. P. 14. 8m~O. P. 0m の表層地盤には初期剛性 G_0 , $G/G_0-\gamma$ 曲線および $h-\gamma$ 曲線の非線形特性を設定した。

初期剛性 G_0 は, PS 検層結果により (1-1) 式で設定する。

$$G_0 = 1787\sigma_c^{0.84} \quad (1-1)$$

$$\text{ここで, } \sigma_c [\text{MN/m}^2] = Z \times \rho_t \times \frac{2}{3} \quad Z: \text{深度}$$

$$\rho_t = 18.6 [\text{kN/m}^3]$$

$G/G_0-\gamma$ 曲線は, (1-2) 式により求める。

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_m}} \quad (1-2)$$

$$\text{ここで, } \gamma_m = \frac{\tau_m}{G_0}$$

$$\tau_m = \tau_0 + \sigma_{md} \tan \phi$$

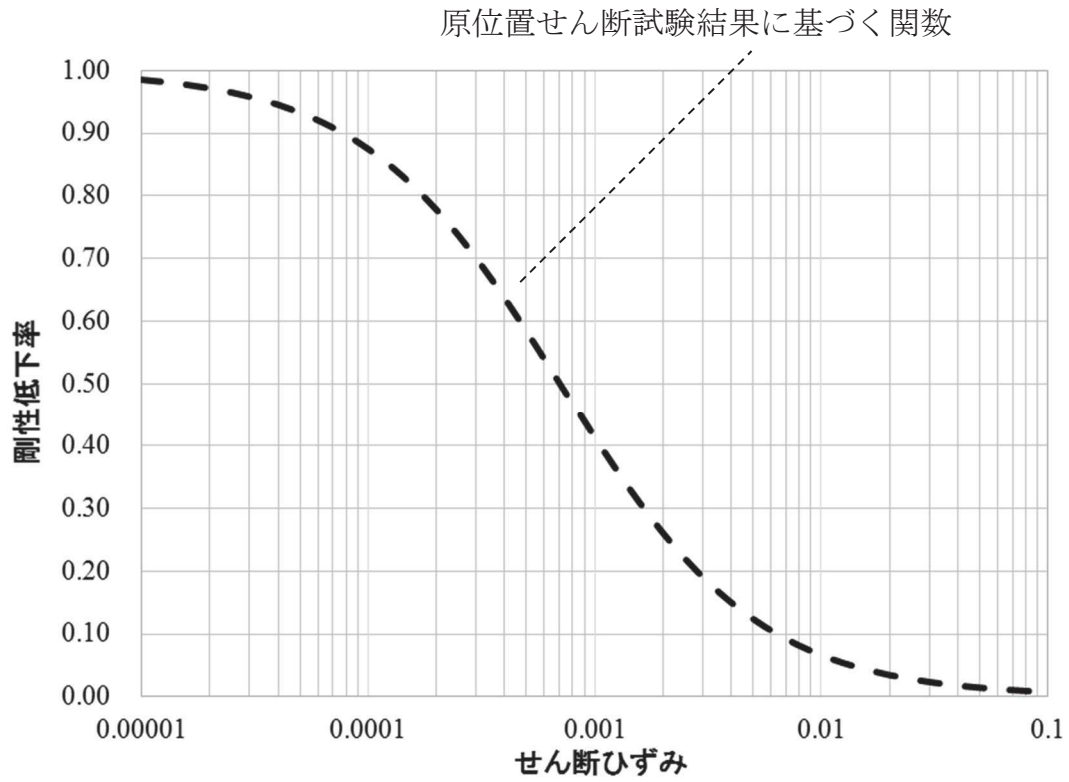
$$\tau_0 [\text{N/mm}^2] = 0.1$$

$$\phi [^\circ] = 33.9$$

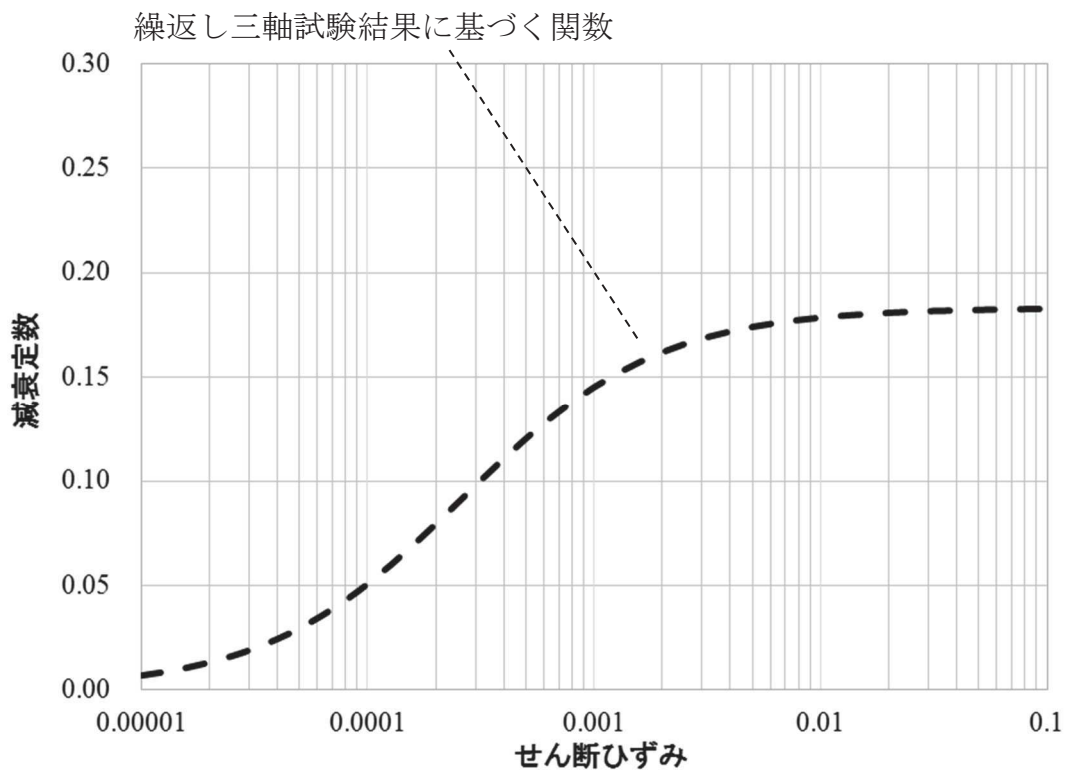
$$\sigma_{md} = 3/4 \times Z \times \rho_t (\text{N/mm}^2)$$

$h-\gamma$ 曲線は, (1-3) 式により求める。

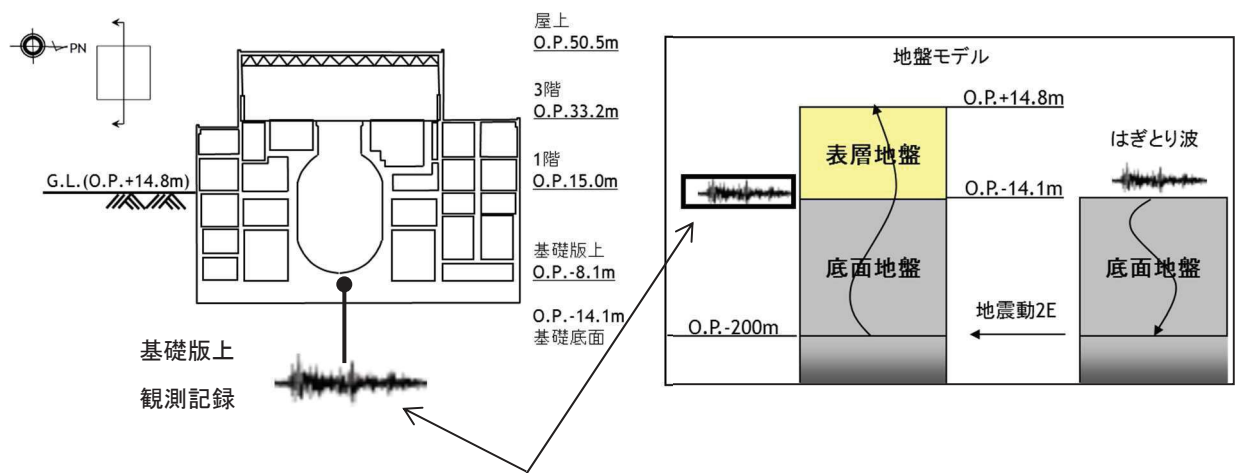
$$h = 0.183\gamma/(\gamma + 0.000261) \quad (1-3)$$



第 1-1 図 $G/G_0 - \gamma$ 曲線



第 1-2 図 $h - \gamma$ 曲線

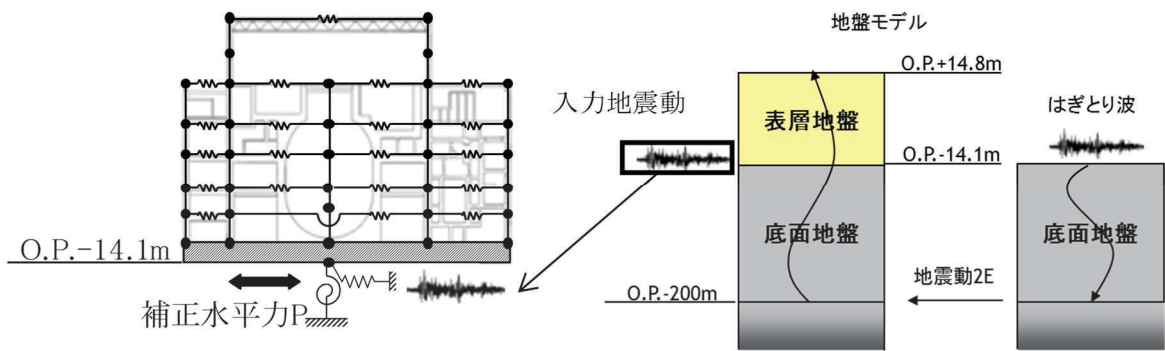


はぎとり波に対する伝達関数の谷となる振動数を比較

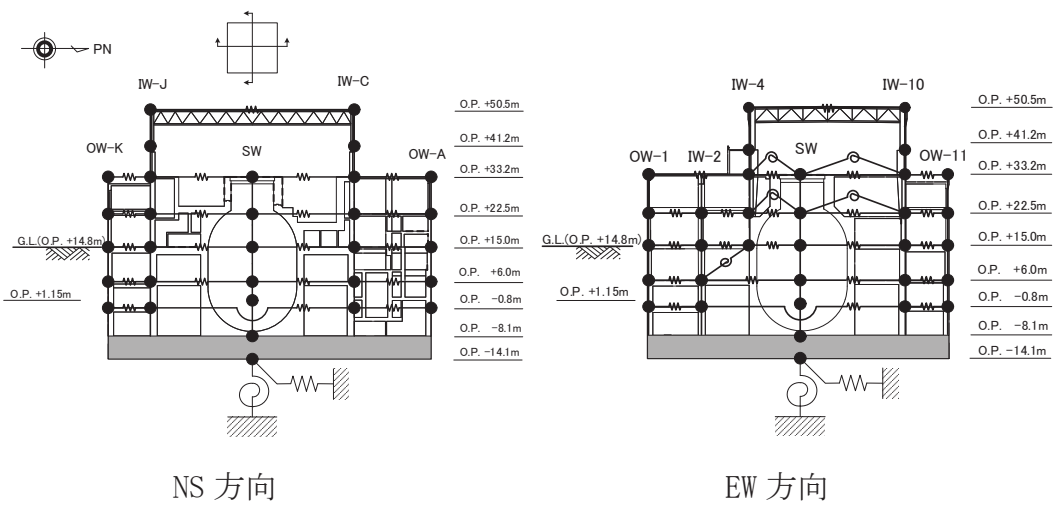
第 2-1 図 表層地盤物性の検討方法の概念

第 2-1 表 検討に用いた地震諸元

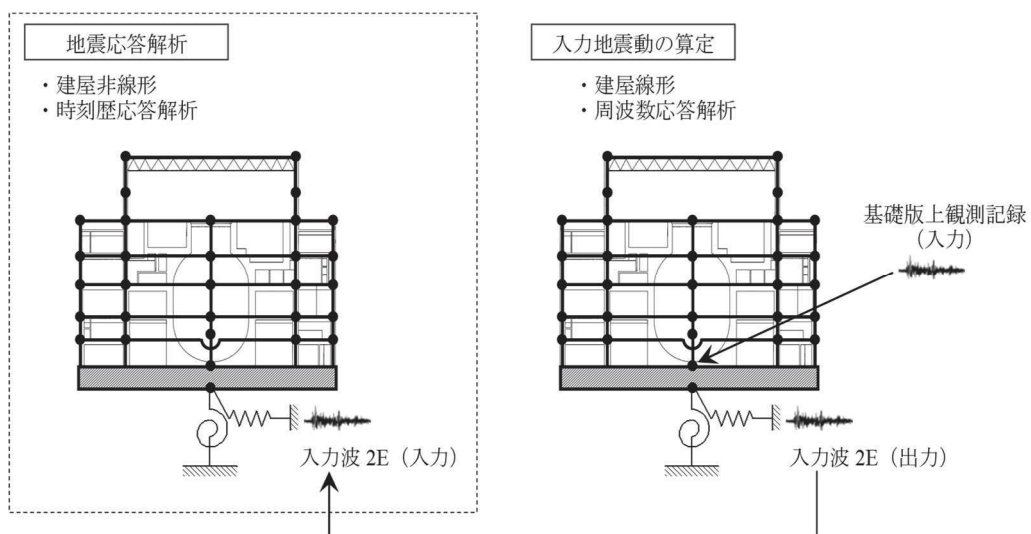
地震	M	震源地	自由地盤 B2 地点(地中記録) 最大加速度 (PN 基準に方位補正) (cm/s^2)		
			NS 方向	EW 方向	
1	2005/8/16 11:46	7.2	宮城県東方沖	233	221
2	2011/3/9 11:45	7.3	宮城県東方はるか沖	30	12
3	2011/3/11 14:46	9.0	宮城県東方はるか沖	467	421
4	2011/4/7 23:32	7.2	宮城県東方沖	321	396



第 2-2 図 シミュレーション解析手法の概念図



第 2-3 図 建屋シミュレーション解析モデル



第 2-4 図 基礎版上観測記録を用いた建屋シミュレーション解析

第 2-2 表 解析条件

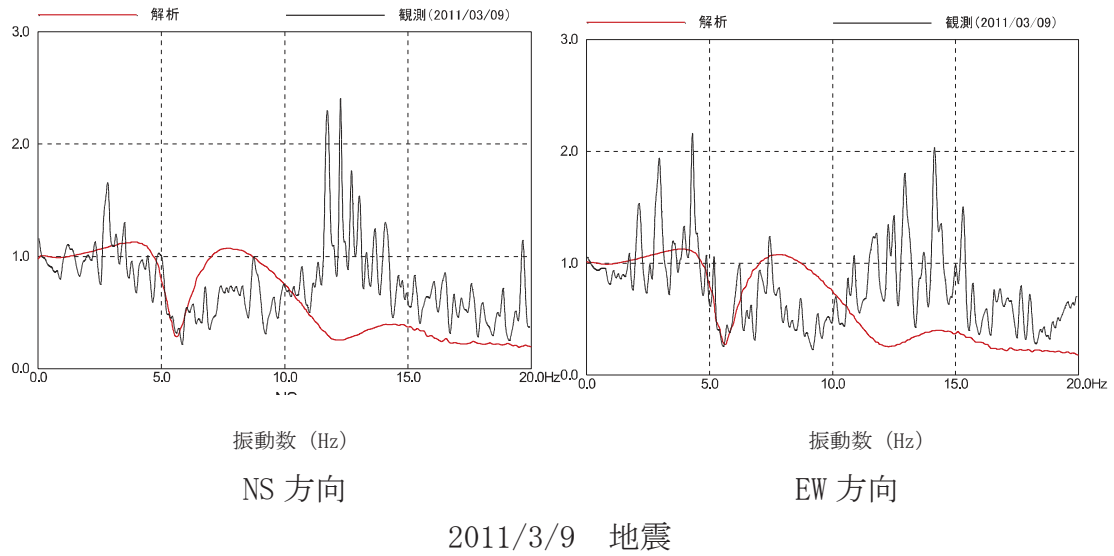
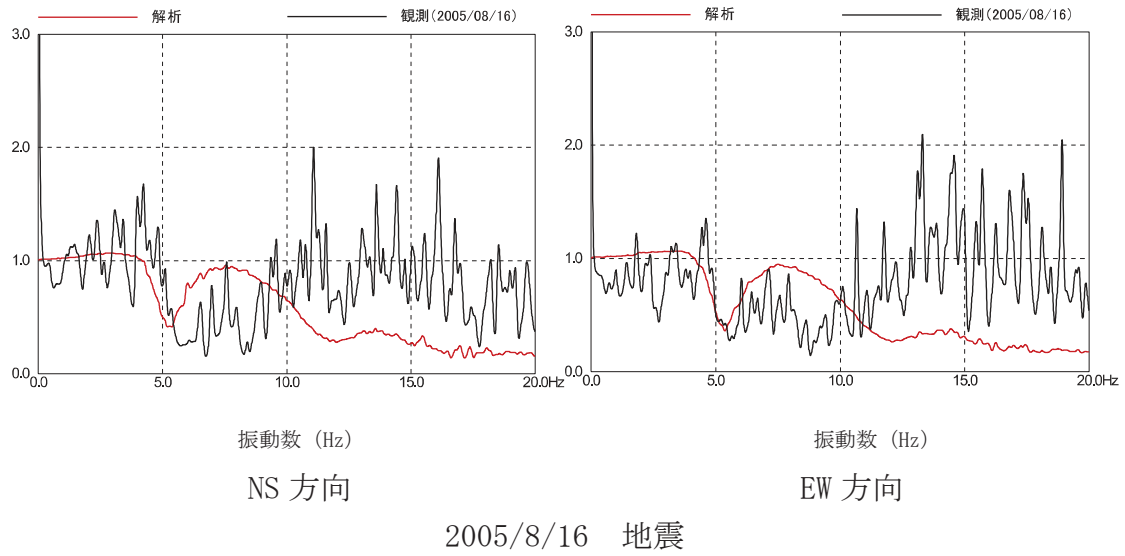
ケース	はぎとり波を用いた シミュレーション解析	(参考) 基礎版上観測記録入力
建屋	2号炉原子炉建屋	
地震動	3.11 はぎとり波	基礎版上観測記録
入力地震動	建屋底面位置の 地震動 (E+F) を算定し入力	基礎版上観測記録から 算定し入力
建屋モデル	3.11 地震シミュレーションモデル (初期剛性低下考慮, 建屋減衰 7%, 側面ばね無し)	
地盤モデル	Ss 評価用地盤モデル (表層地盤: 2層モデル)	—

3. 検討結果

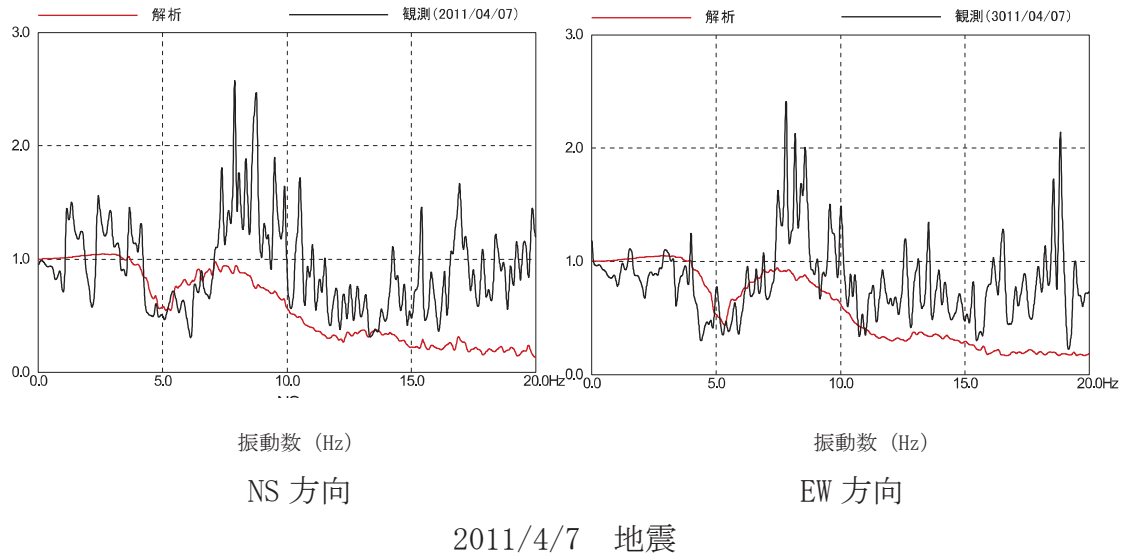
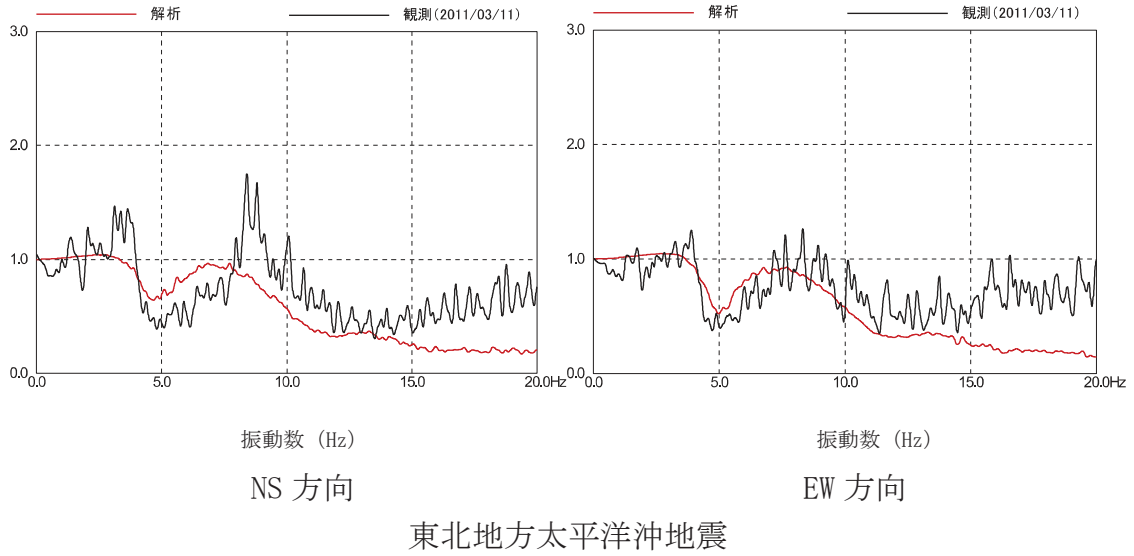
検討に用いた代表地震に対する伝達関数を比較して第 3-1 図および第 3-2 図に示す。いずれの地震についても伝達関数の谷の位置を概ね再現している。

3.11 地震および 4.7 地震のシミュレーション解析結果の床応答スペクトルを観測記録と比較して第 3-3 図～第 3-10 図に示す。これらの図には基礎版上観測記録を入力したシミュレーション解析による床応答スペクトルもあわせて示す。EW 方向の周期 0.1 秒より短周期側で観測記録より過大評価になる傾向があるが、それ以外のシミュレーション解析結果は、観測記録をやや上回るもののよく整合する結果となっている。基礎版上観測記録入力によるシミュレーション解析とも同等の適合度となっている。

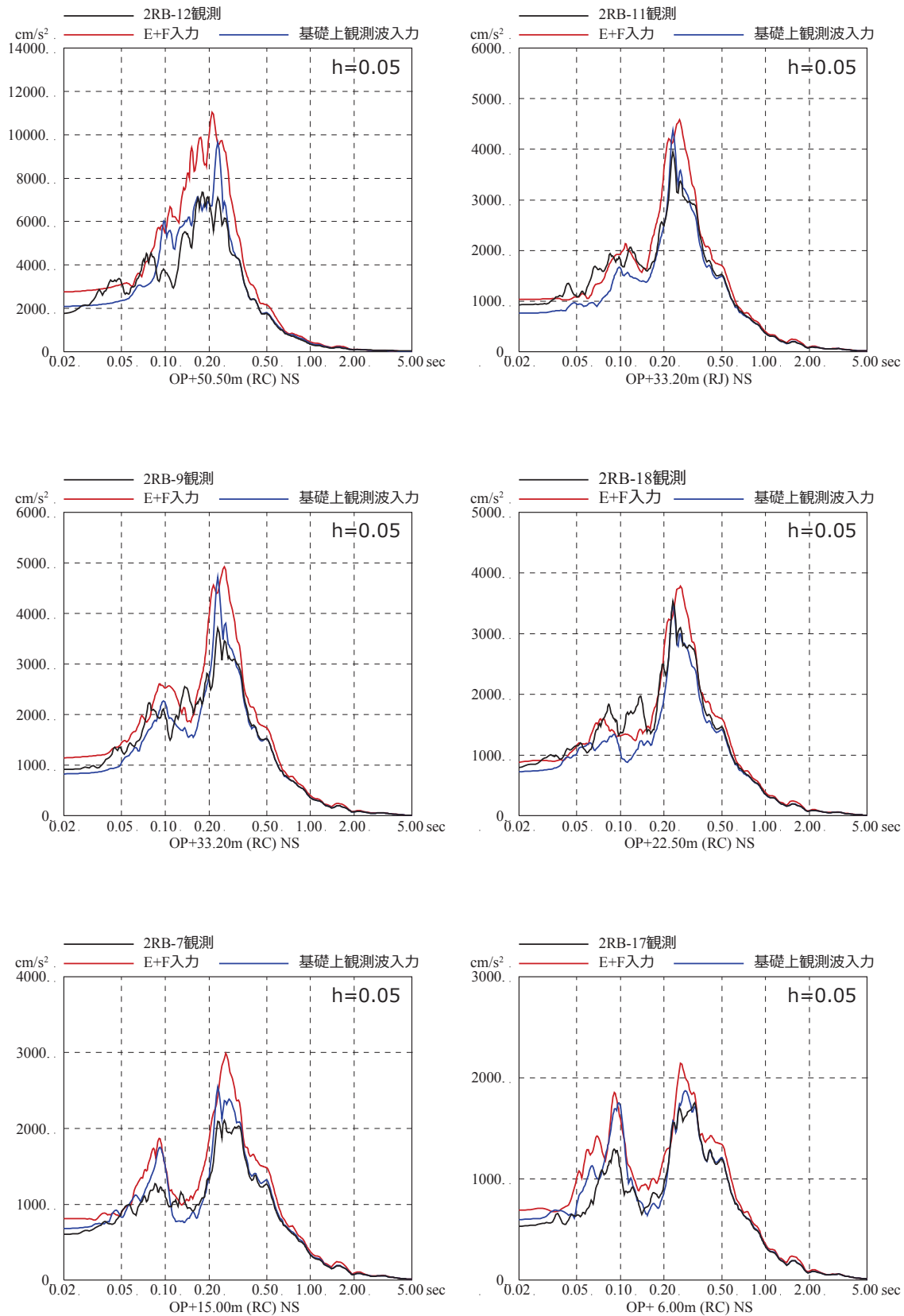
上記の結果から設定した地盤モデルは、観測記録とも整合しており妥当であると考えられる。また、表層地盤上部にはひずみ依存の非線形特性を考慮していることから基準地震動 Ss 時にもこの地盤モデルを用いて応答解析をすることが可能である。



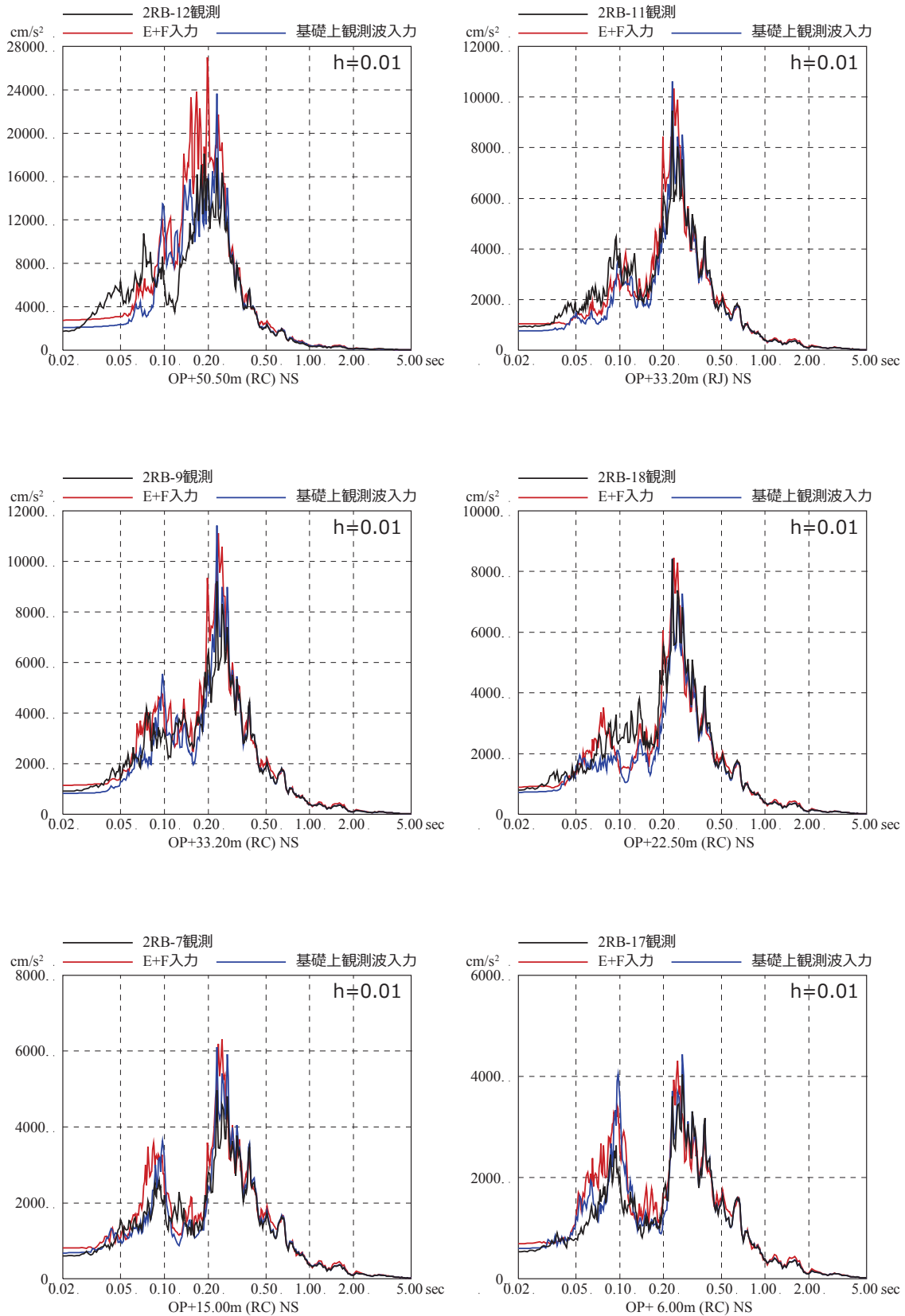
第 3-1 図 伝達関数の比較 (基礎版上観測記録／はぎとり波)
 (仮定した地盤モデルにより算定した入力変換波 (E+F+P) ／はぎとり波)



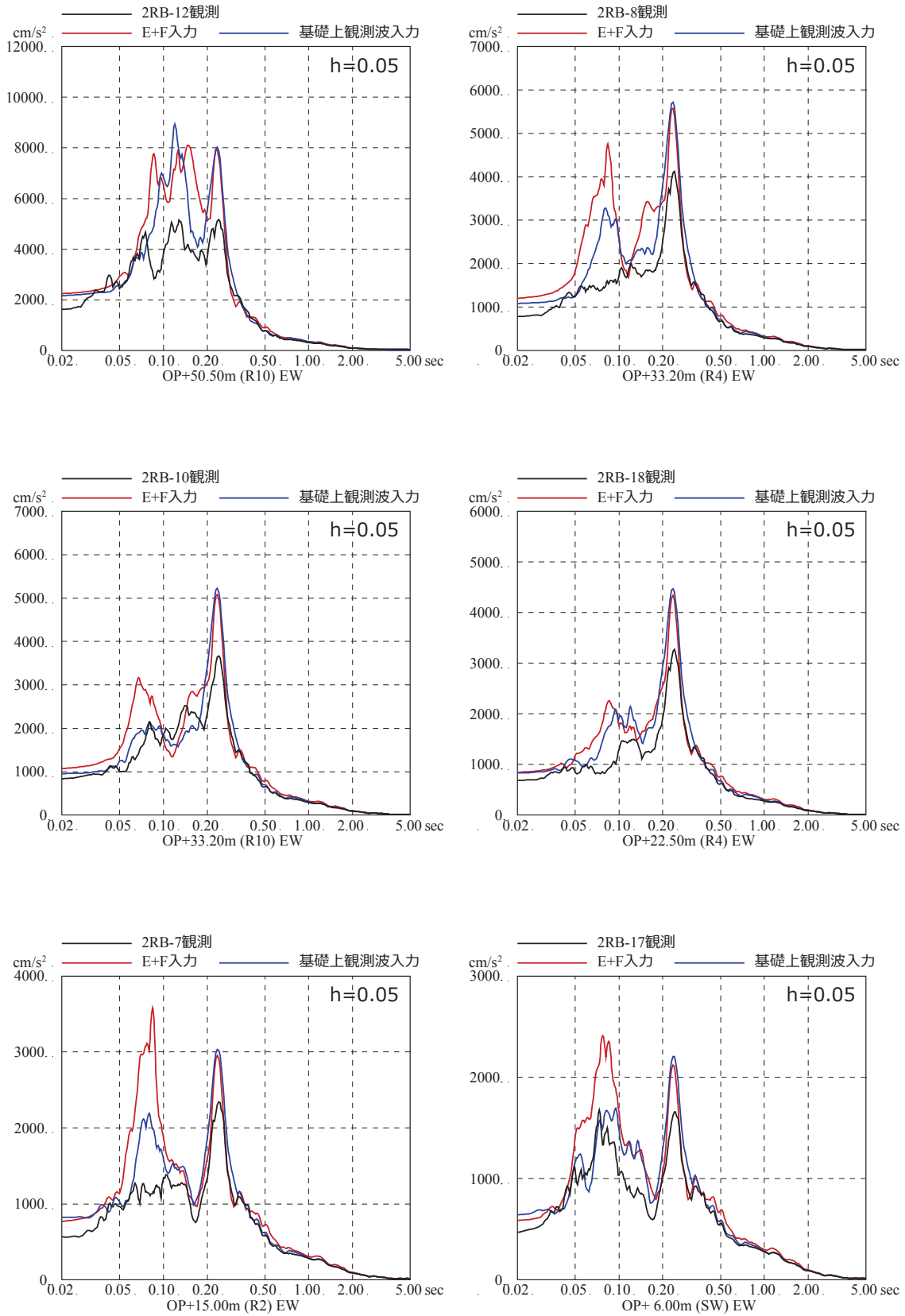
第 3-2 図 伝達関数の比較 (基礎版上観測記録／はぎとり波)
 (仮定した地盤モデルにより算定した入力変換波 (E+F+P) ／はぎとり波)



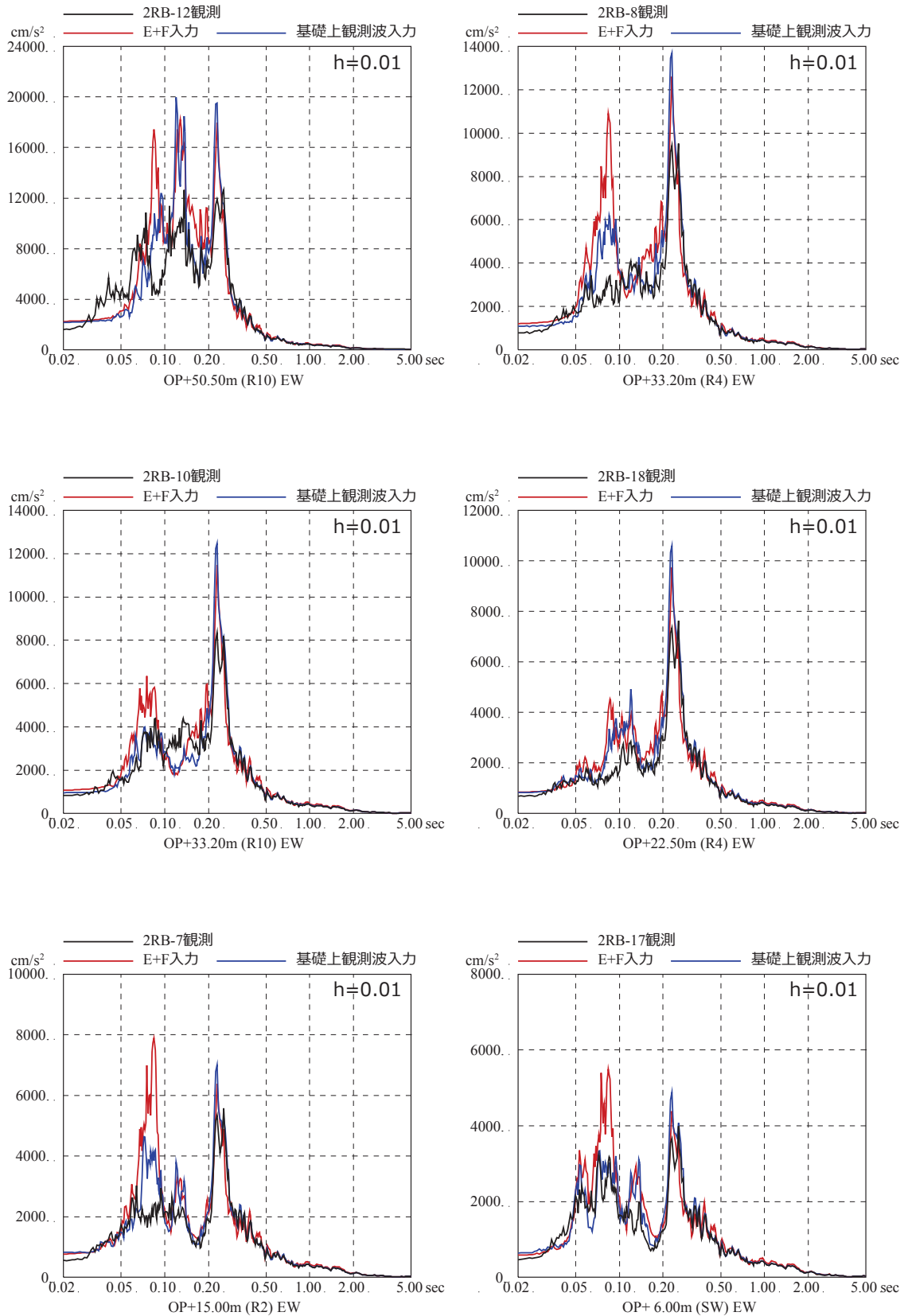
第 3-3 図 3.11 地震のはざとり波を入力に用いた場合と基礎版上観測記録を用いたシミュレーション解析結果の比較
 (2号炉原子炉建屋, NS 方向) ※地震計位置は, 付録 1 参照



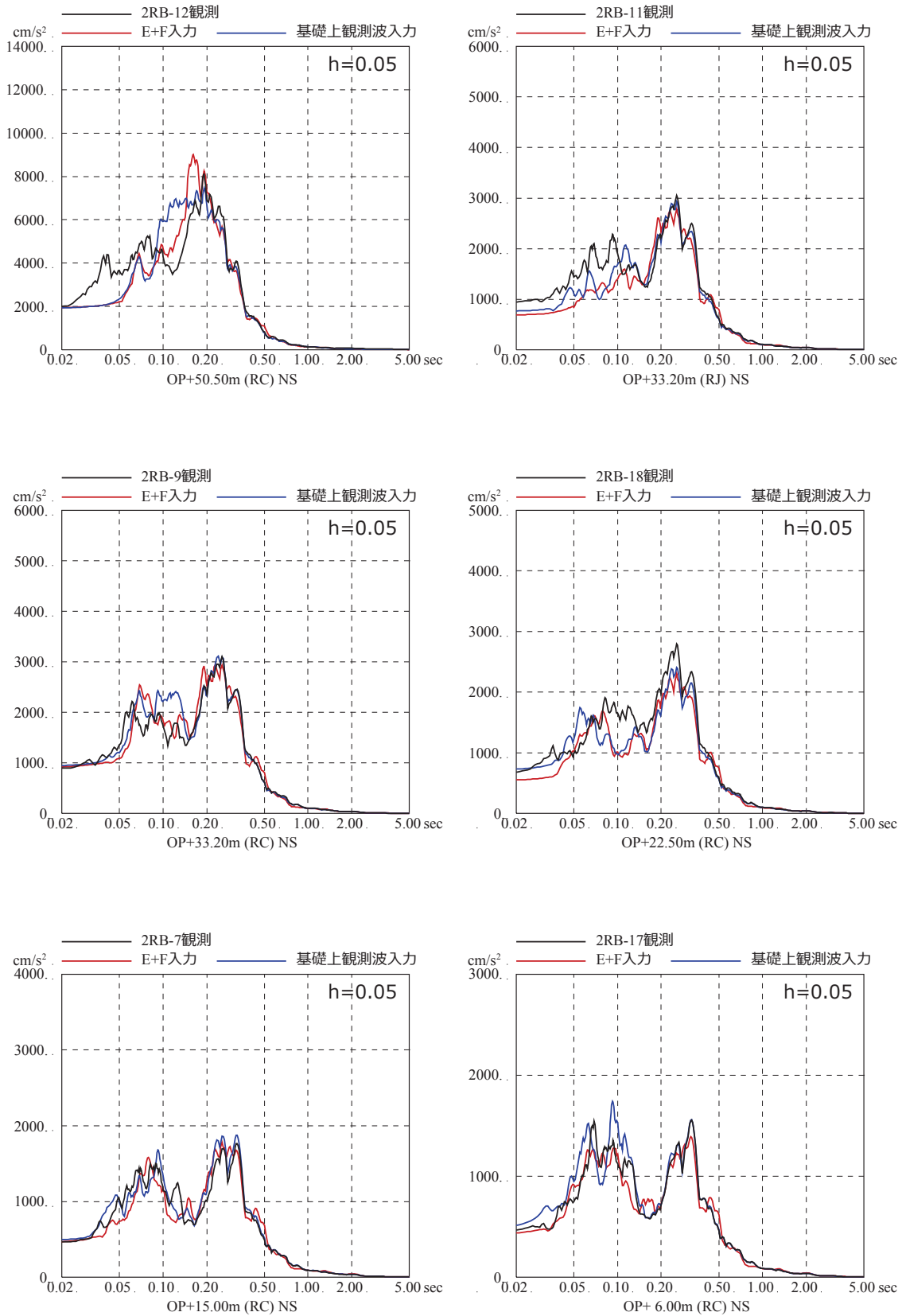
第3-4図 3.11地震のはざとり波を入力に用いた場合と基礎版上観測記録を用いたシミュレーション解析結果の比較 (2号炉原子炉建屋, NS方向) ※地震計位置は, 付録1参照



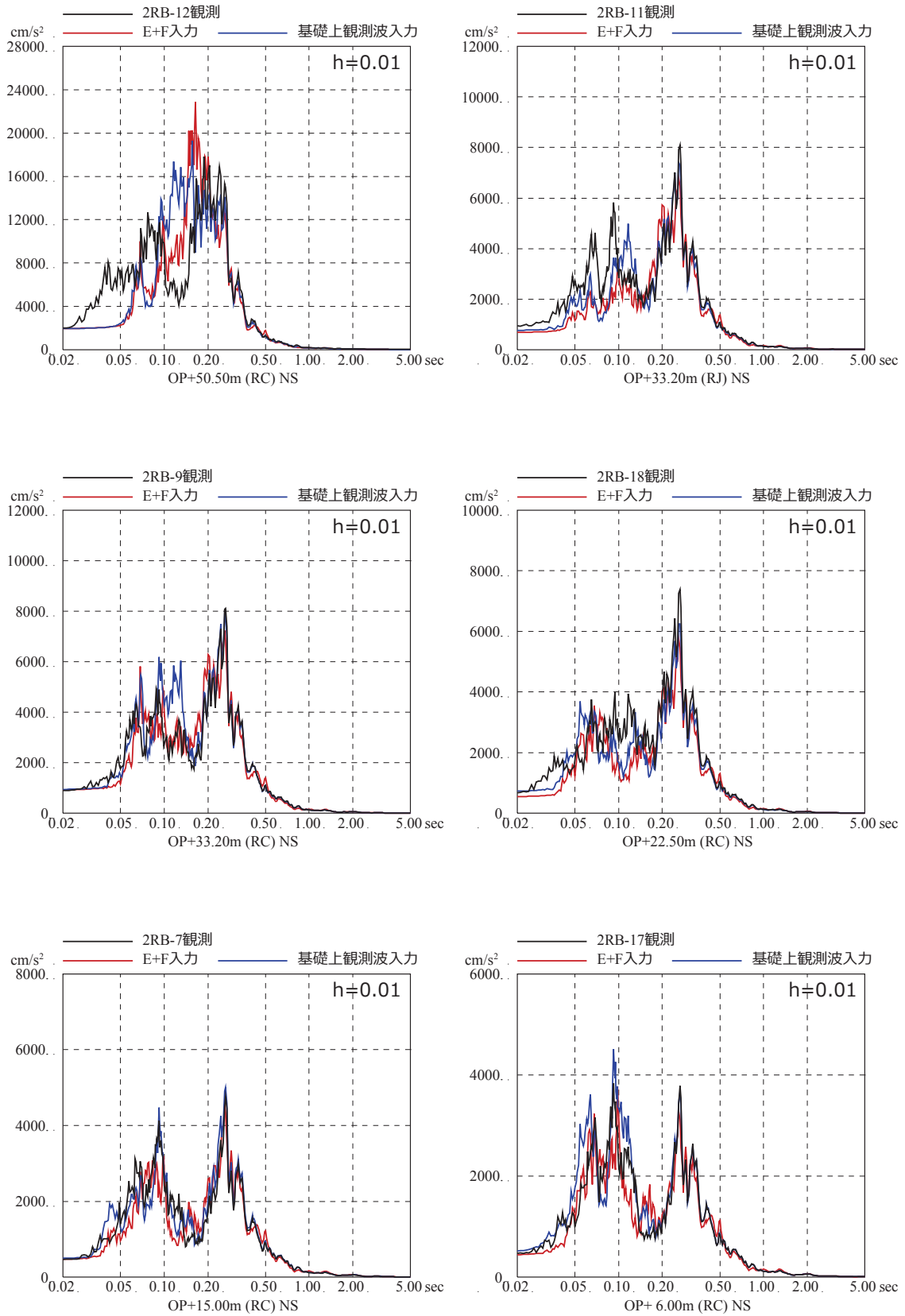
第 3-5 図 3.11 地震のはざとり波を入力に用いた場合と基礎版上観測記録を用いたシミュレーション解析結果の比較 (2号炉原子炉建屋, EW 方向) ※地震計位置は, 付録 1 参照



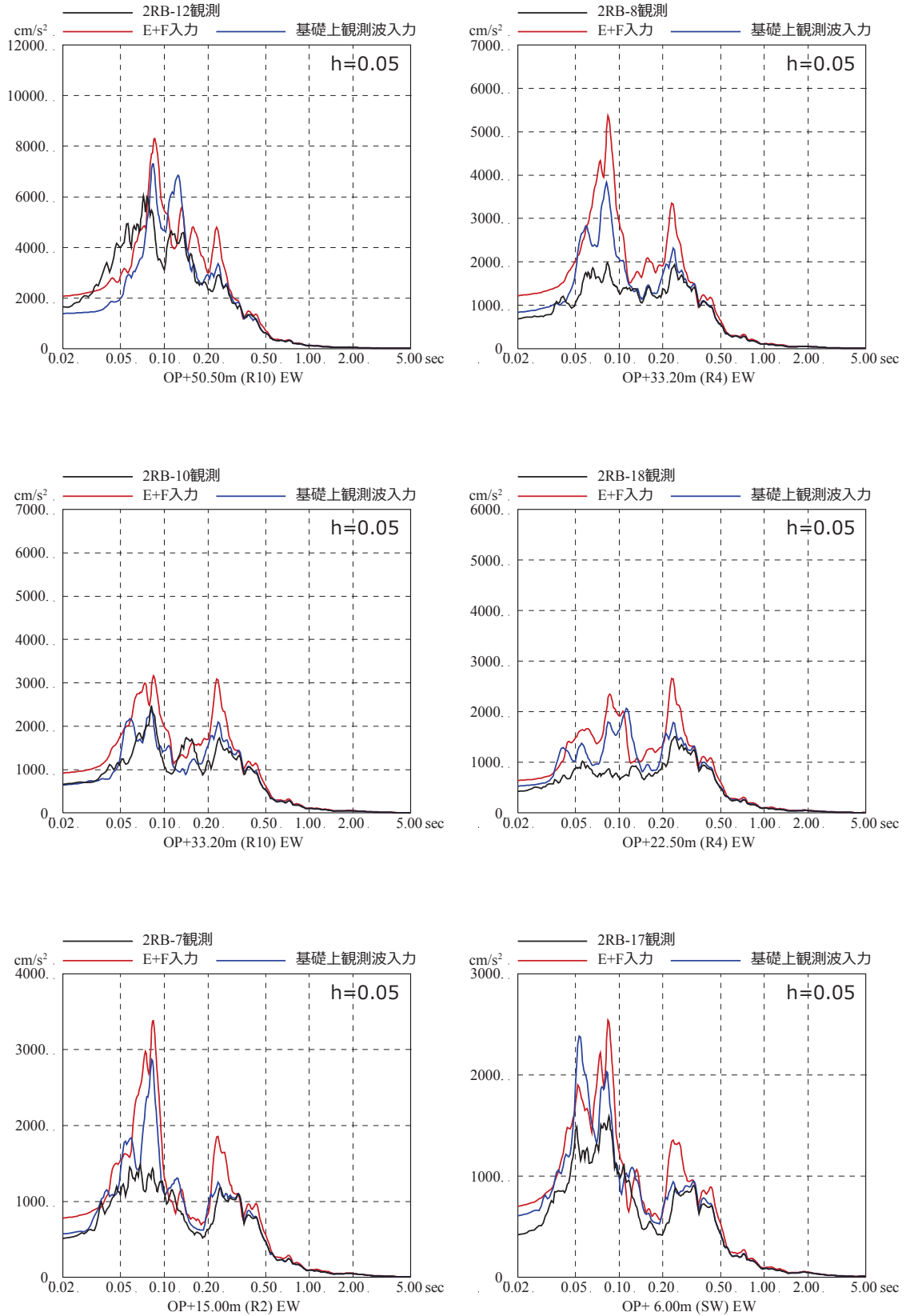
第3-6図 3.11地震のはざとり波を入力に用いた場合と基礎版上観測記録を用いたシミュレーション解析結果の比較 (2号炉原子炉建屋, EW方向) ※地震計位置は, 付録1参照



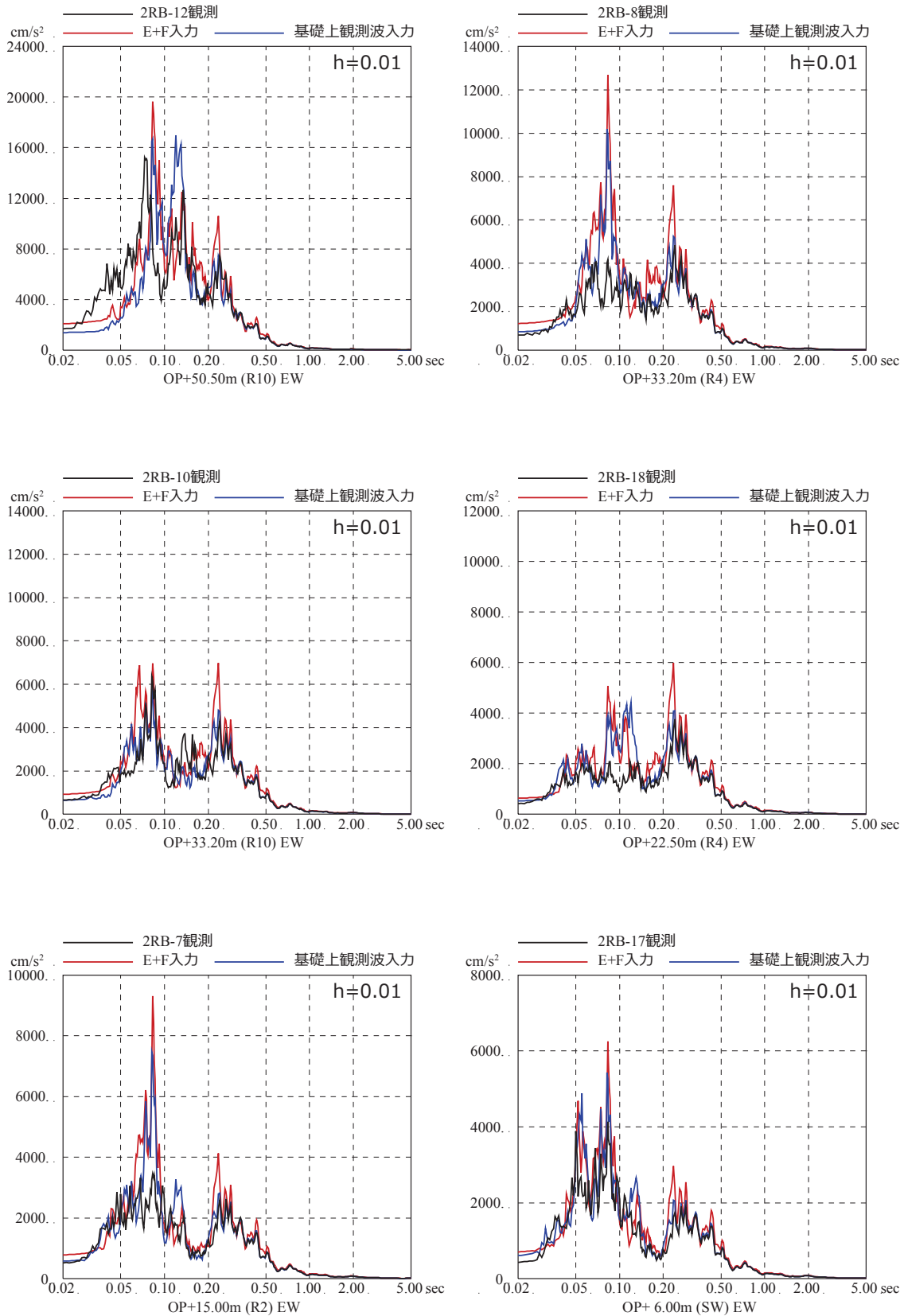
第3-7図 4.7地震のはざとり波を入力に用いた場合と基礎版上観測記録を用いたシミュレーション解析結果の比較 (2号炉原子炉建屋, NS方向) ※地震計位置は, 付録1参照



第3-8図 4.7地震のはざとり波を入力に用いた場合と
 基礎版上観測記録を用いたシミュレーション解析結果の比較
 (2号炉原子炉建屋, NS方向) ※地震計位置は, 付録1参照



第3-9図 4.7地震のはざとり波を入力に用いた場合と基礎版上観測記録を用いたシミュレーション解析結果の比較 (2号炉原子炉建屋, EW方向) ※地震計位置は, 付録1参照



第 3-10 図 4.7 地震のはざとり波を入力に用いた場合と
 基礎版上観測記録を用いたシミュレーション解析結果の比較
 (2号炉原子炉建屋, EW 方向) ※地震計位置は, 付録 1 参照

添付 11 表層地盤の影響を考慮した入力地震動が建屋応答へ与える影響

1. 表層地盤の影響を考慮した場合の建屋応答への影響

(1) 検討目的

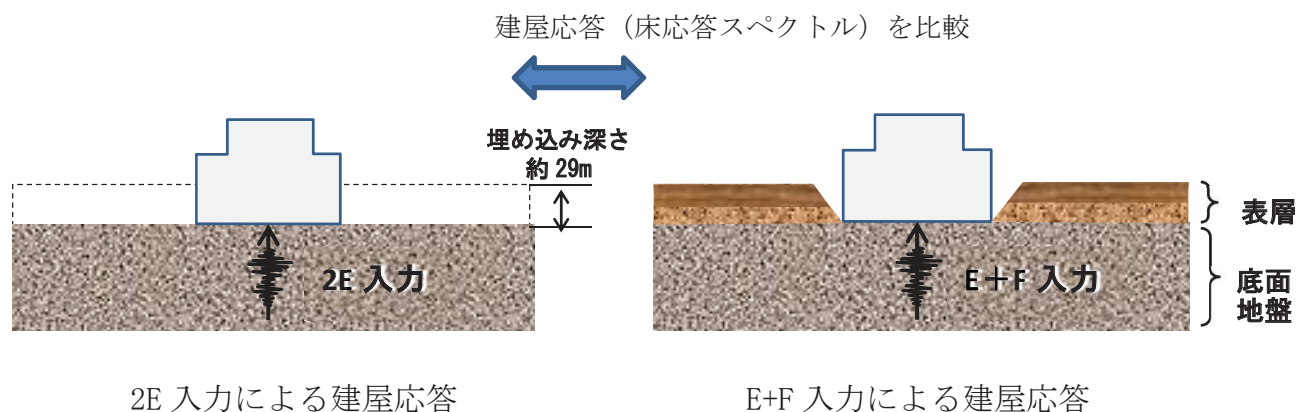
女川2号炉原子炉建屋の今回工認では、建屋への入力地震動を表層地盤の影響を考慮して算定するE+F入力としている。

ここでは、基準地震動 S_s を建屋へ直接入力した場合(2E入力)との建屋応答の差異を確認する。

(2) 検討方法

検討は、基準地震動 S_s -D2 および基準地震動 S_s -D1 を女川2号炉原子炉建屋の解析モデルに直接入力した場合(2E入力)と表層地盤の影響を考慮して算定した建屋底面位置の地震動を入力した場合(E+F入力)の建屋の解析結果を比較することにより行う。検討概要を第1-1図に示す。

検討に用いた地盤モデルは、4.1項において示したモデルとし、第1-1表、第1-2図、第1-3図に示す。



	直接入力(2E入力)したケース	E+F入力としたケース
建屋	2号炉原子炉建屋	
地震動	基準地震動 S_s -D2および基準地震動 S_s -D1	
入力地震動	直接入力(2E入力)	建屋底面位置の地震動(E+F)を算定し入力
建屋モデル	今回工認モデル (初期剛性低下考慮, 建屋減衰5%, 側面ばね無し, 耐震補強考慮)	
地盤モデル	—	S_s 評価用地盤モデル (表層地盤:2層モデル)

第1-1図 入力地震動評価に関する表層地盤の影響検討の概念図

第 1-1 表 女川 2 号炉原子炉建屋地盤物性

	地層レベル O. P. (m)	単位体積重量 γ (kN/m ³)	せん断波速度 V_s (m/s)	減衰定数 h (%)
表層地盤	14.80	18.6	※1	3 ^{※2}
	0.00	23.3	900 ^{※3}	3
底面地盤	-14.10	23.8	1300	3
	-25.00	24.6	2150	3
	-80.00	25.0	2440	3
	-200.0	25.0	2440	3

※1 O. P. 14.8m～O. P. 0m は，上載圧依存を考慮してせん断波速度と相関のある初期剛性 G_0 を設定する。また，ひずみ依存による非線形特性を考慮する。

※2 Rayleigh 減衰。また，ひずみ依存による非線形特性を考慮する。

※3 PS 検層結果を観測記録の分析より補間して設定

0. P. 14. 8m～0. P. 0m の表層地盤には地盤調査結果に基づき、初期剛性 G_0 、 $G/G_0-\gamma$ 曲線および $h-\gamma$ 曲線の非線形特性を設定した。

初期剛性 G_0 は、PS 検層結果により (1-1) 式で設定する。

$$G_0 = 1787\sigma_c^{0.84} \quad (1-1)$$

$$\text{ここで、 } \sigma_c [\text{MN/m}^2] = Z \times \rho_t \times \frac{2}{3} \quad Z: \text{深度}$$

$$\rho_t = 18.6 [\text{kN/m}^3]$$

$G/G_0-\gamma$ 曲線は、原位置せん断試験結果による強度定数と拘束圧から求めたせん断強度 τ_m と初期剛性 G_0 から、基準ひずみ γ_m を算定し (1-2) 式により求める。

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_m}} \quad (1-2)$$

$$\text{ここで、 } \gamma_m = \frac{\tau_m}{G_0}$$

$$\tau_m = \tau_0 + \sigma_{md} \tan \phi$$

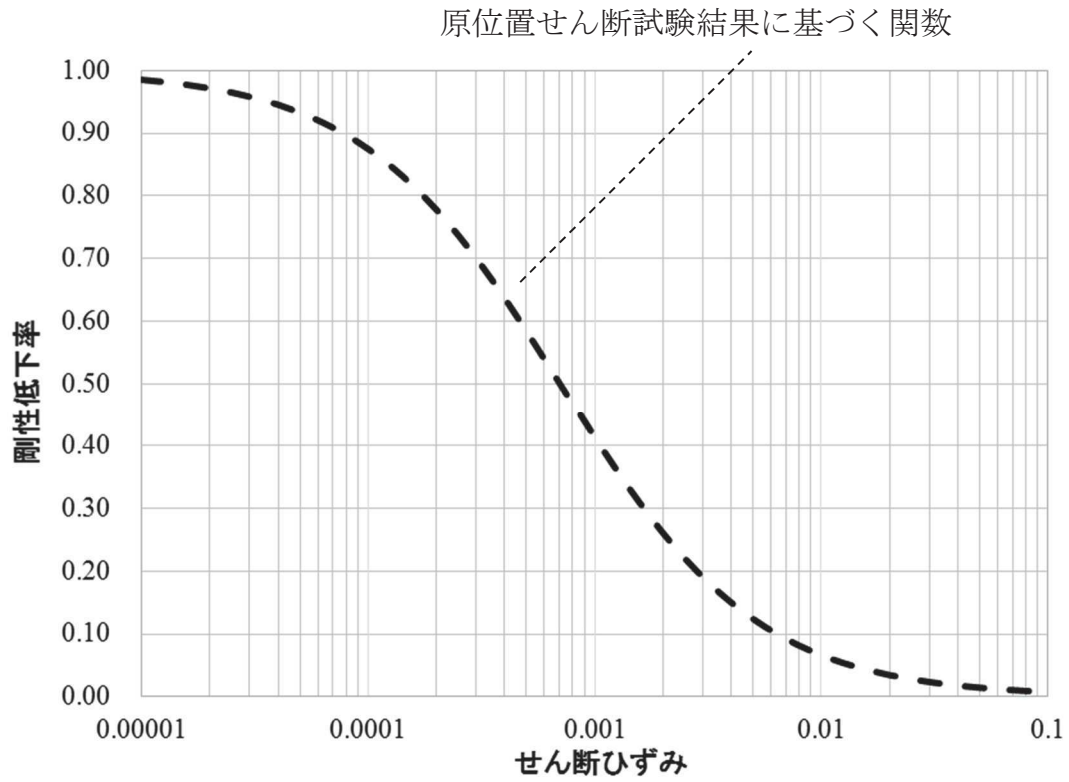
$$\tau_0 [\text{N/mm}^2] = 0.1$$

$$\phi [^\circ] = 33.9$$

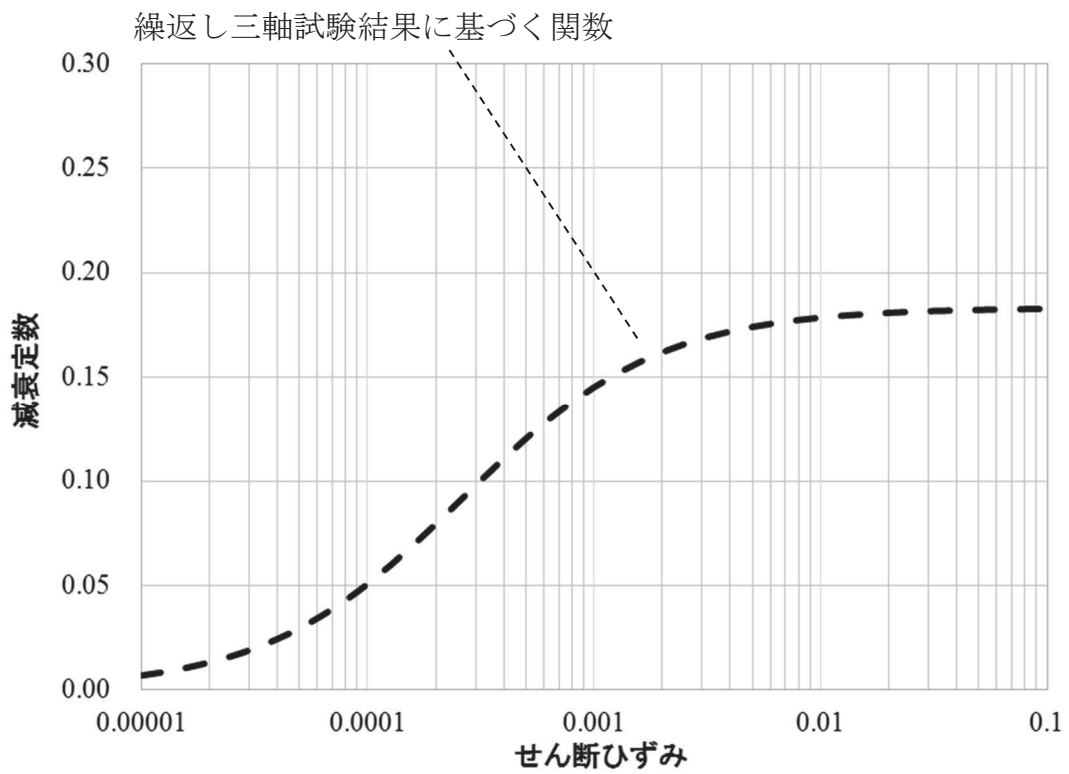
$$\sigma_{md} = 3/4 \times Z \times \rho_t (\text{N/mm}^2)$$

$h-\gamma$ 曲線は、繰返し三軸試験結果に基づき (1-3) 式により求める。

$$h = 0.183\gamma / (\gamma + 0.000261) \quad (1-3)$$



第 1-2 図 $G/G_0 - \gamma$ 曲線

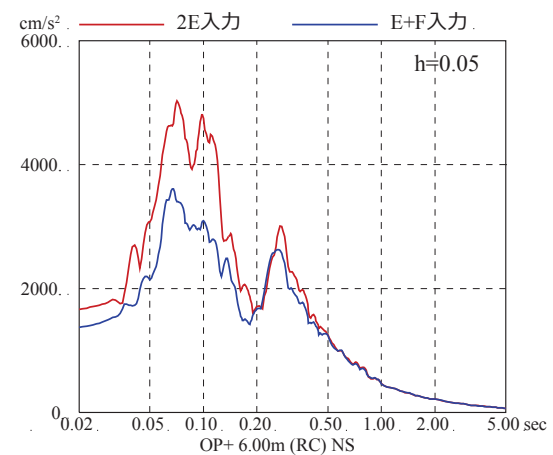
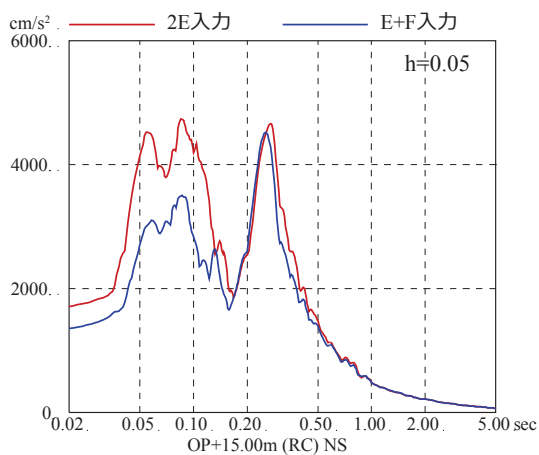
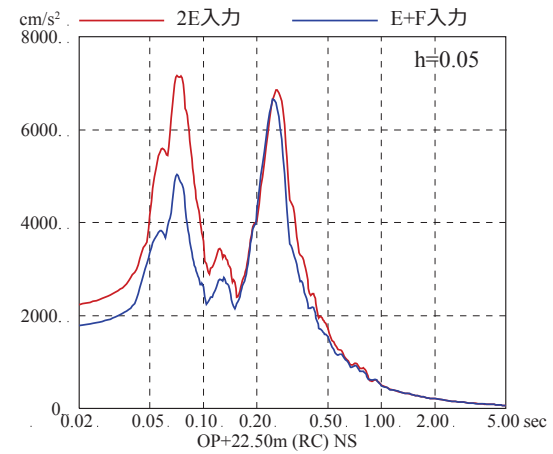
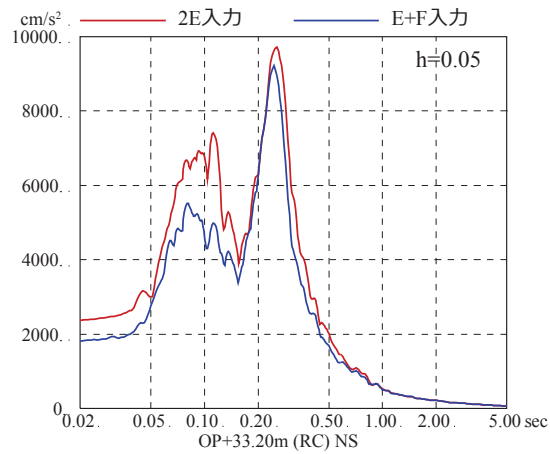
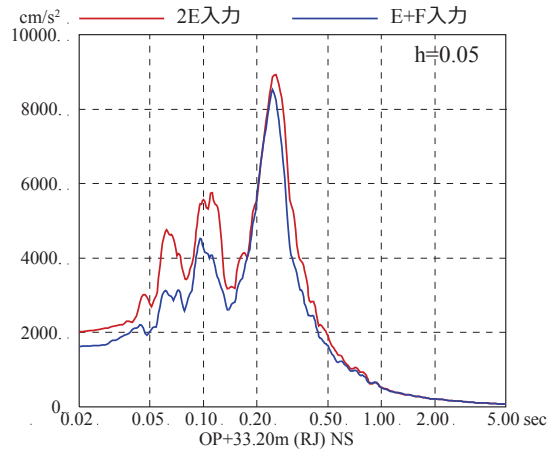
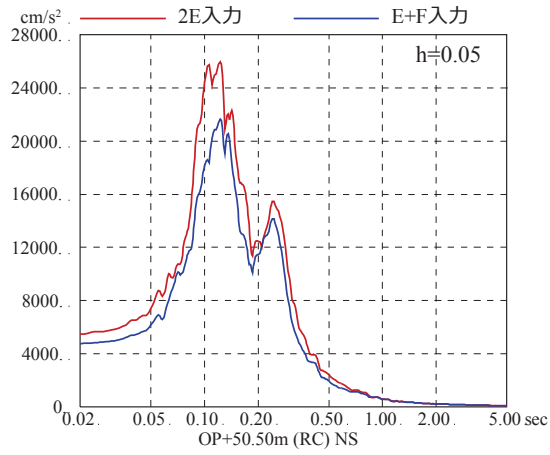


第 1-3 図 $h - \gamma$ 曲線

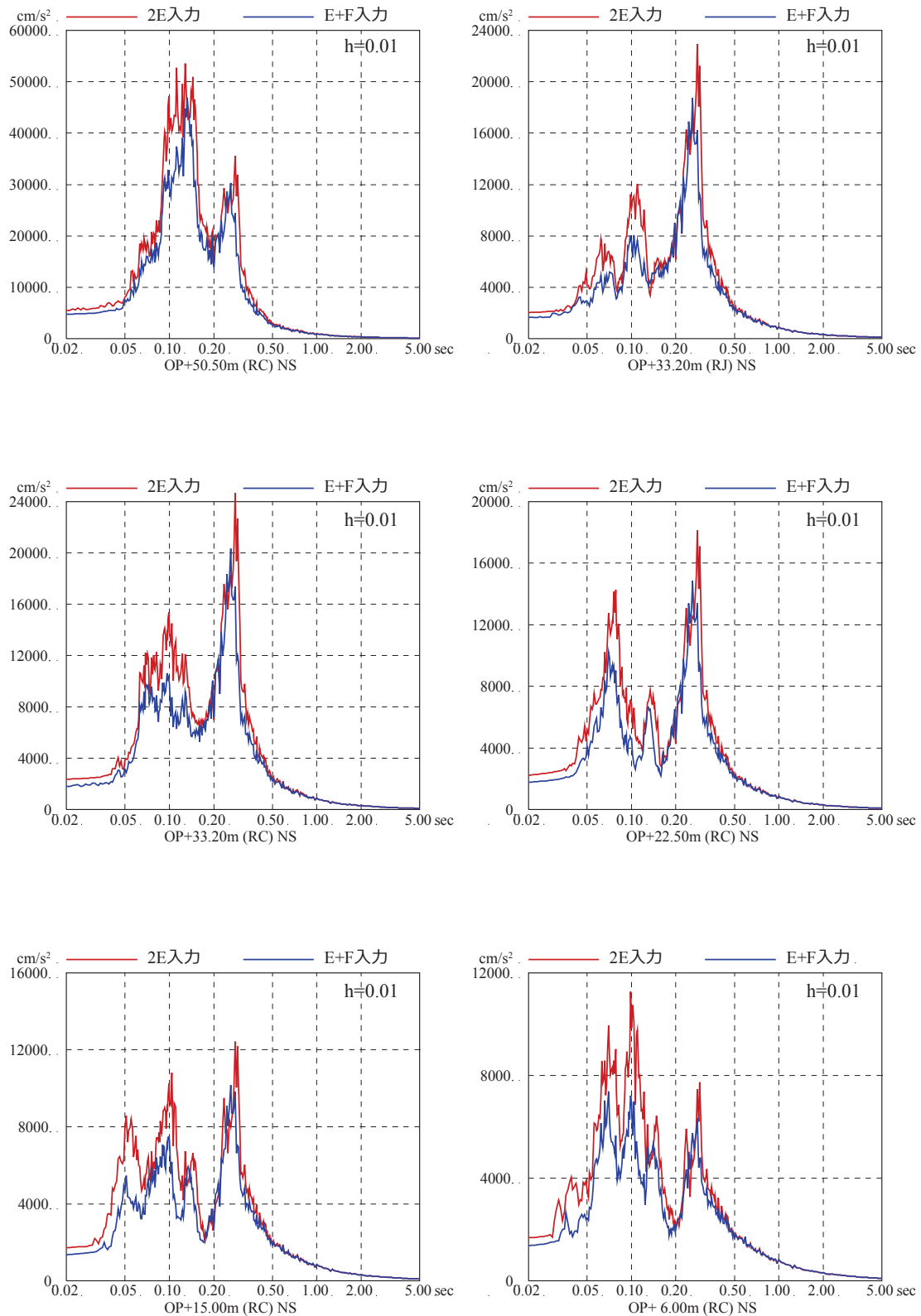
(3) 検討結果

基準地震動 S_s による原子炉建屋の解析結果の床応答スペクトルの比較を第 1-4 図～第 1-11 図に示す。

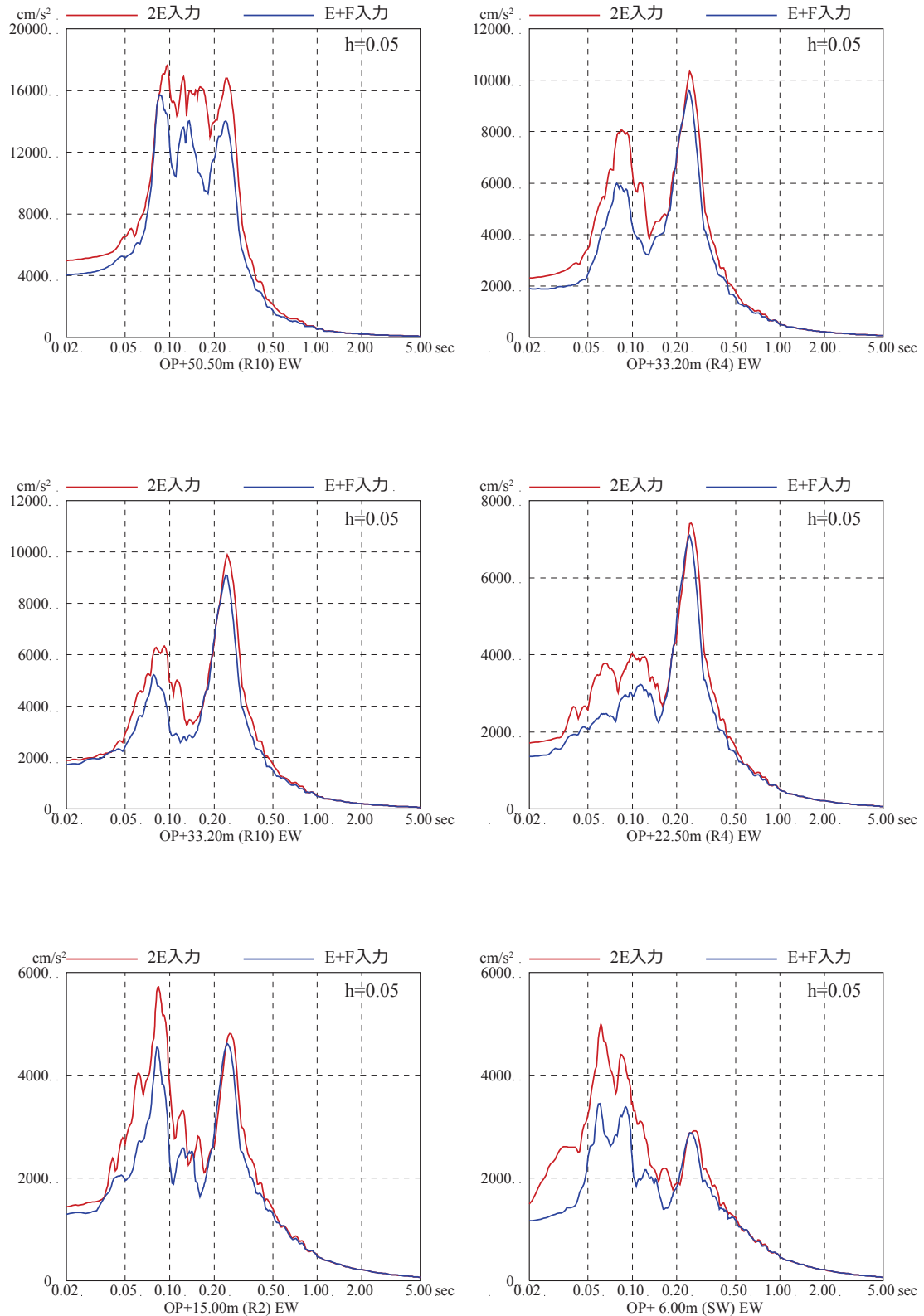
検討の結果、各階の床応答スペクトルは、基準地震動 S_s を直接入力した場合 (2E 入力) より表層地盤の影響を考慮して算定した地震動を入力した場合 (E+F 入力) の応答値は、小さくなる傾向があり、短周期においてその傾向が顕著に見られる結果となっている。



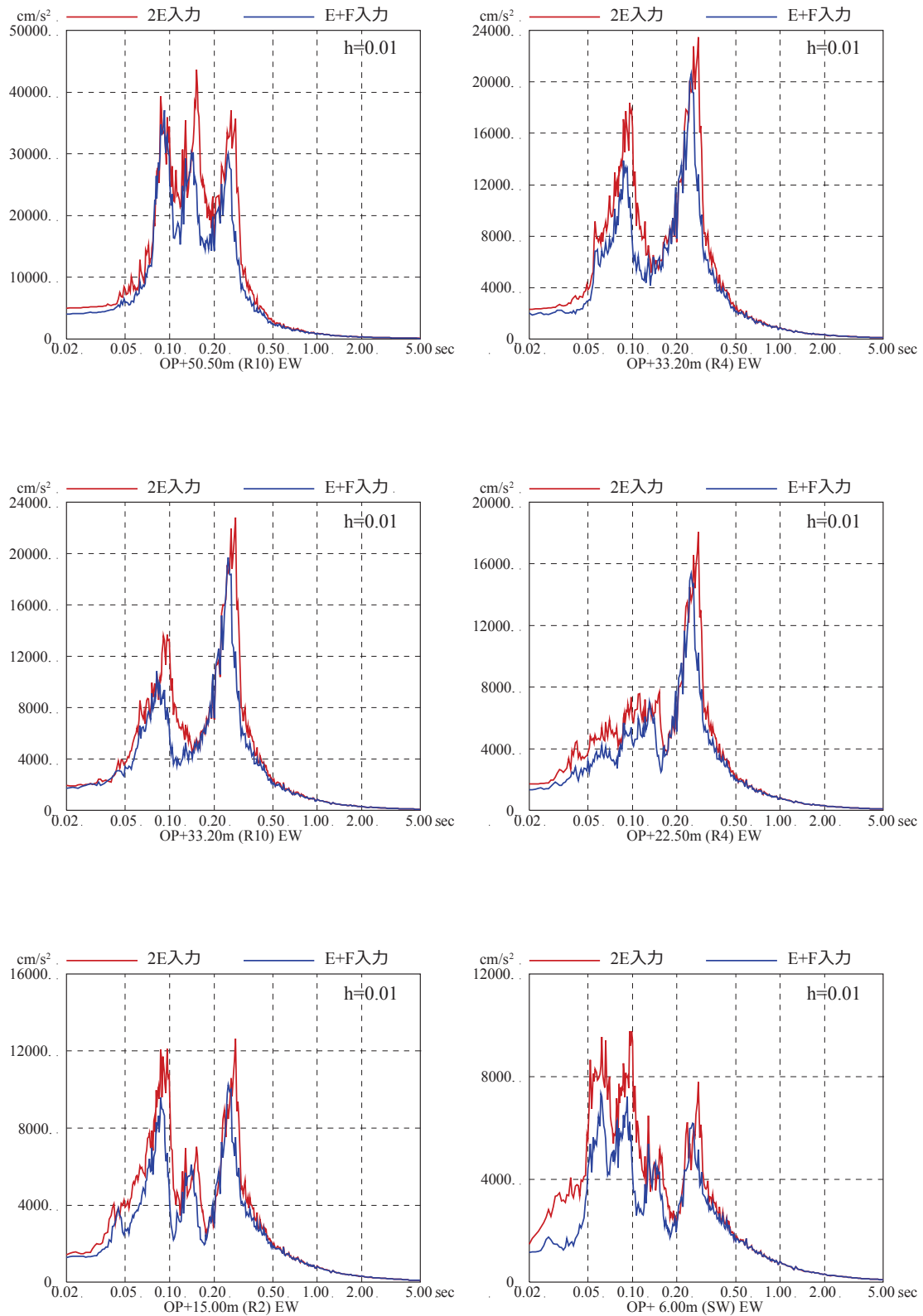
第 1-4 図 基準地震動 Ss-D2 を用いた直接入力と
 表層地盤の影響を考慮した場合の建屋応答への影響
 (2号炉原子炉建屋, NS 方向, 減衰 5%)



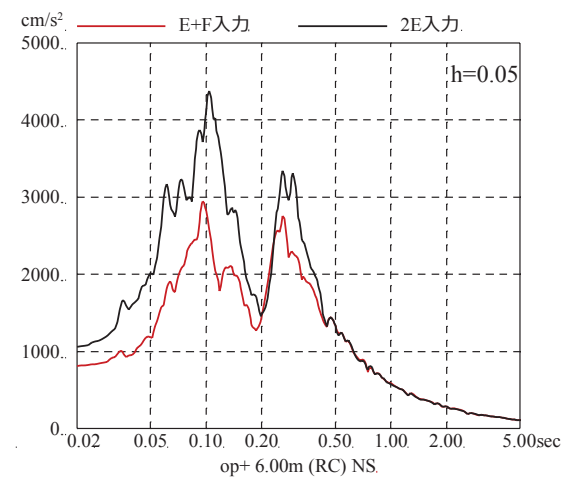
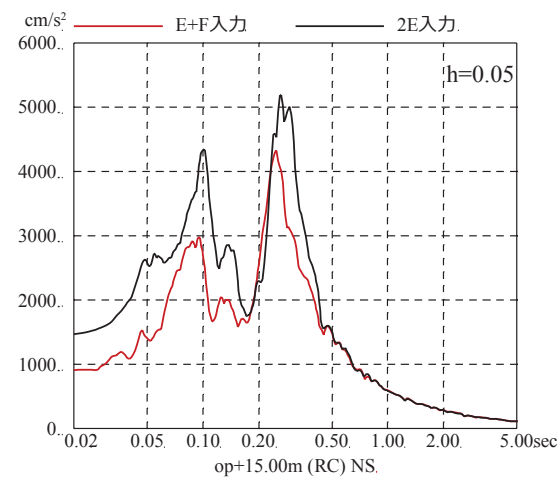
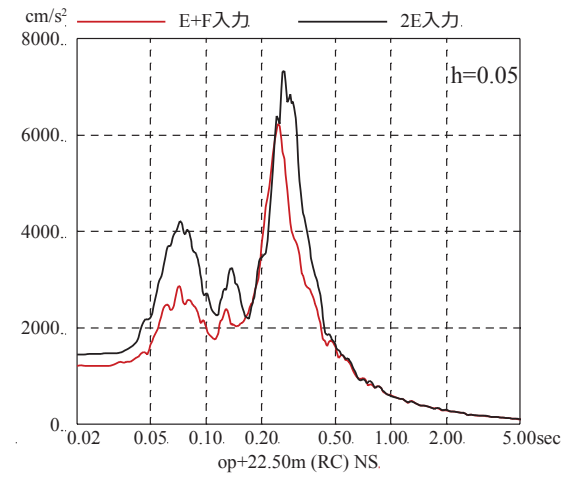
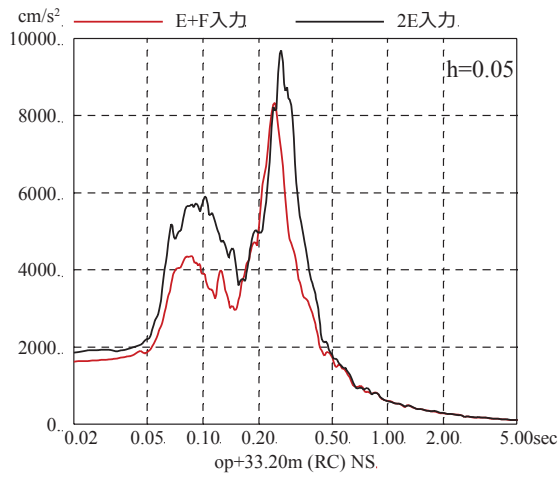
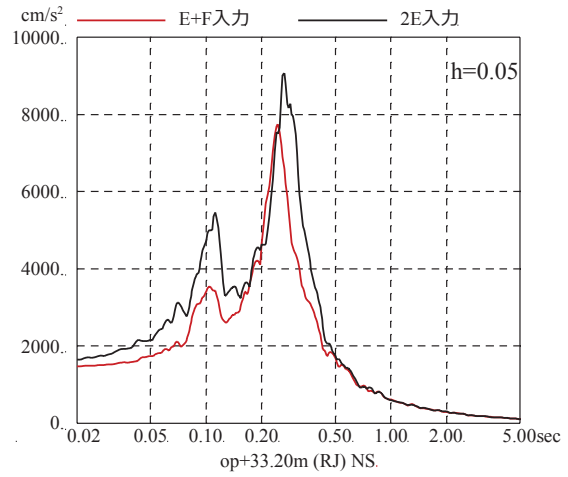
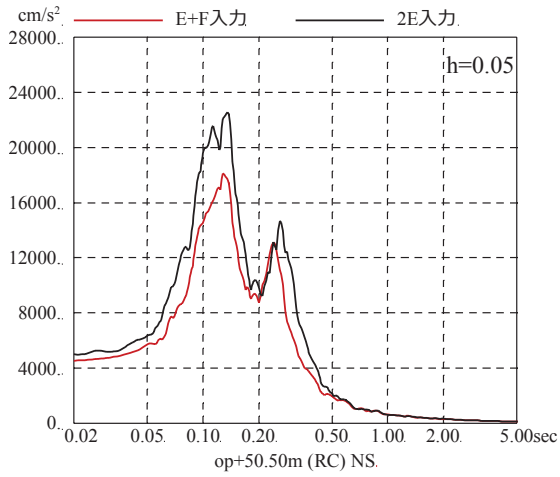
第 1-5 図 基準地震動 S_s-D2 を用いた直接入力と
 表層地盤の影響を考慮した場合の建屋応答への影響
 (2号炉原子炉建屋, NS 方向, 減衰 1%)



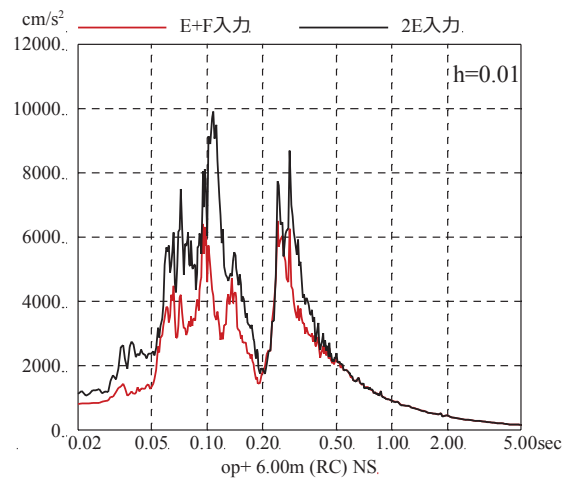
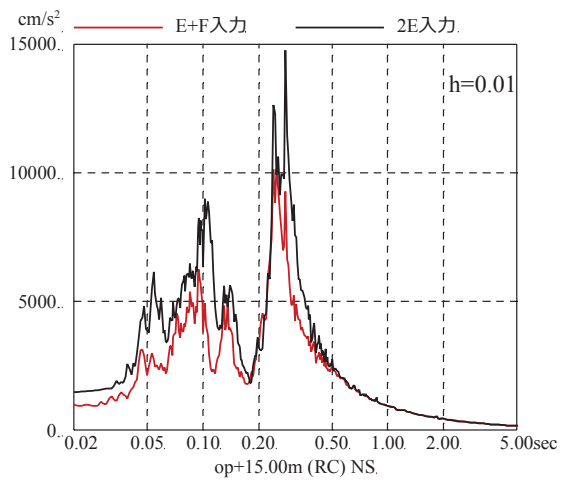
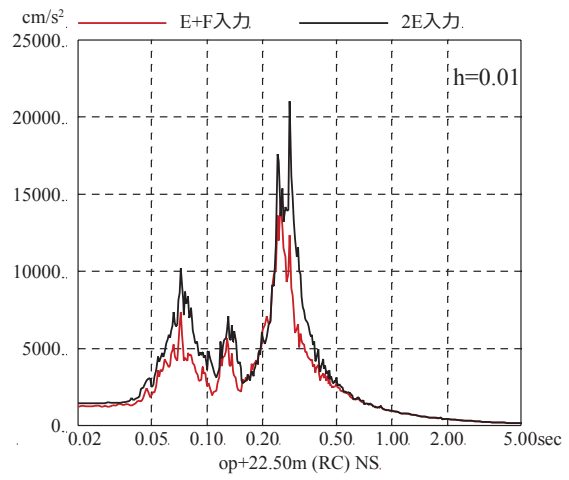
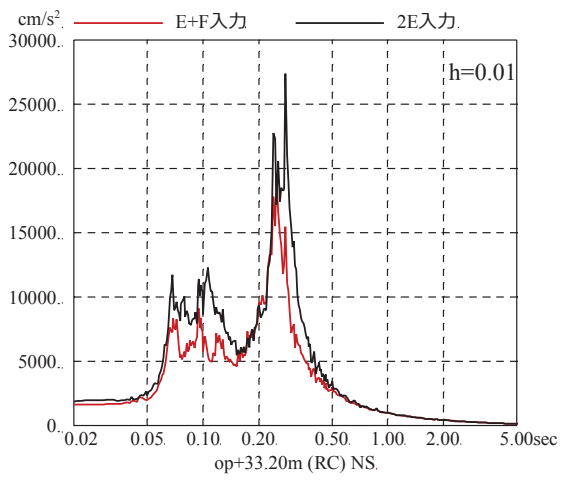
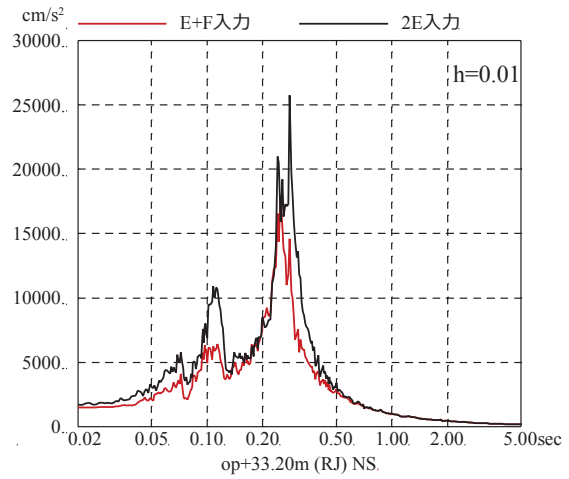
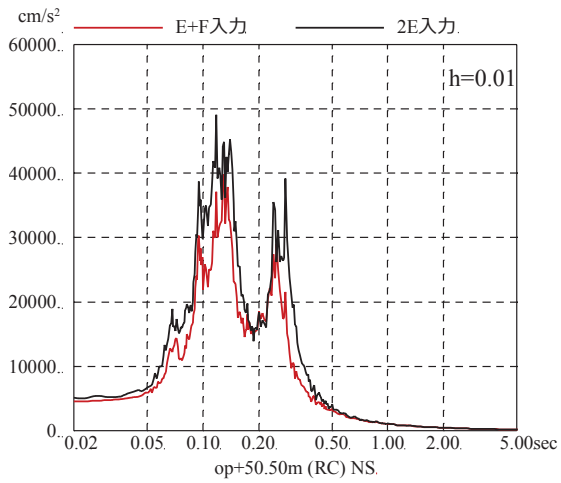
第 1-6 図 基準地震動 S_s-D2 を用いた直接入力と
 表層地盤の影響を考慮した場合の建屋応答への影響
 (2号炉原子炉建屋, EW 方向, 減衰 5%)



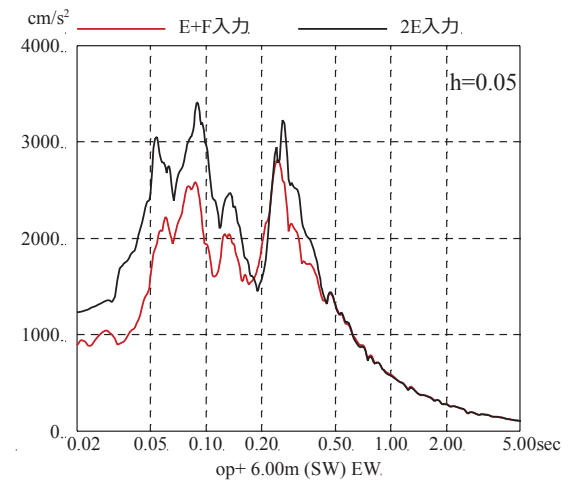
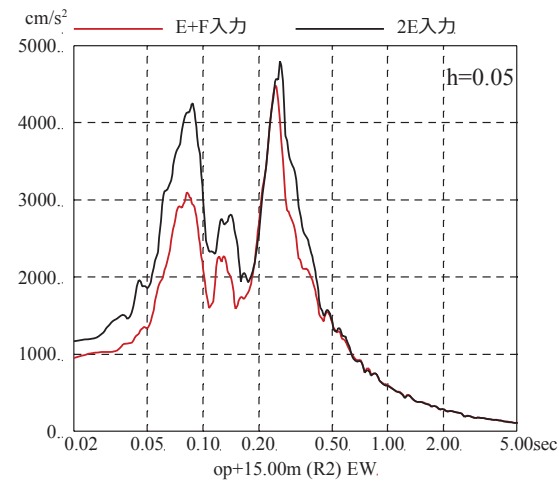
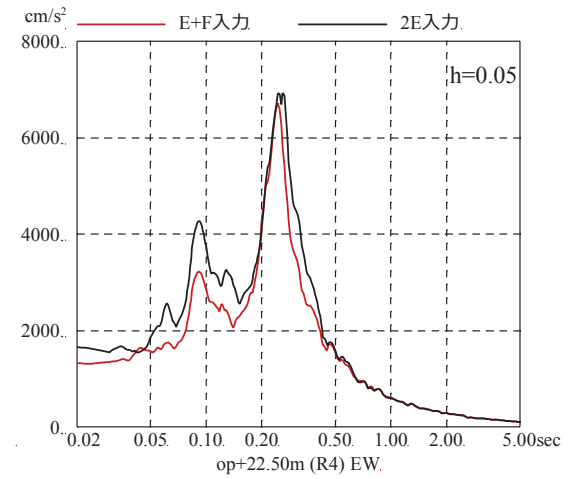
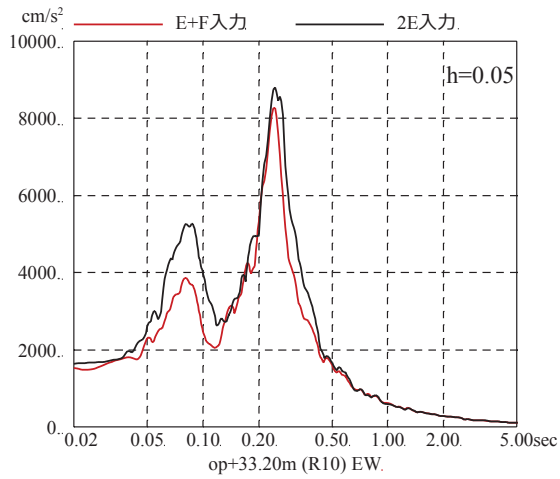
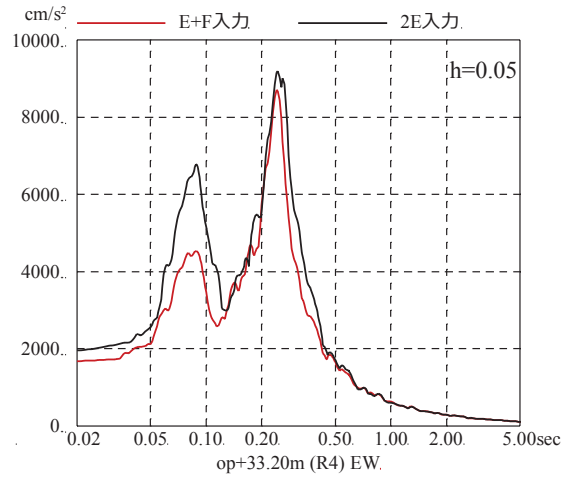
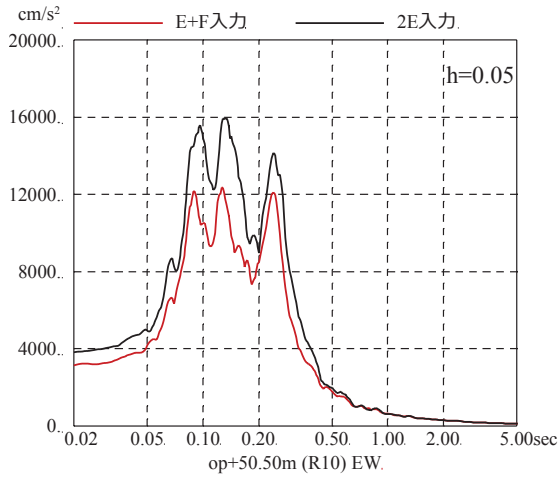
第 1-7 図 基準地震動 Ss-D2 を用いた直接入力と
 表層地盤の影響を考慮した場合の建屋応答への影響
 (2号炉原子炉建屋, EW 方向, 減衰 1%)



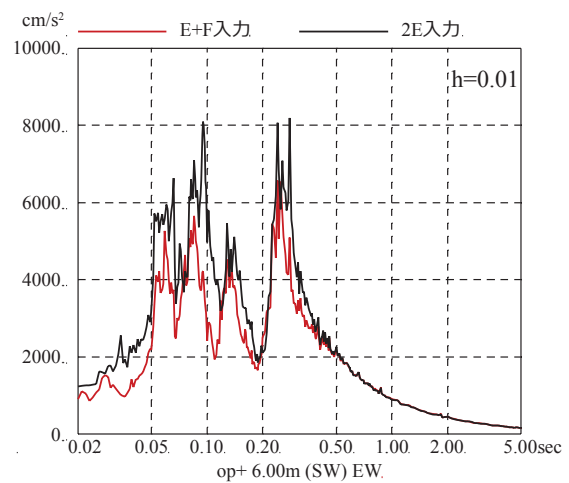
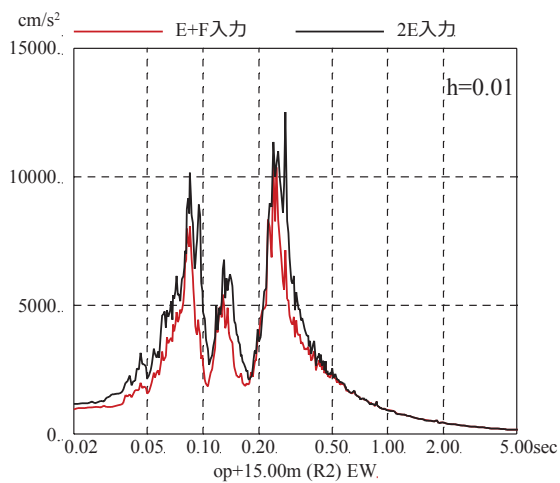
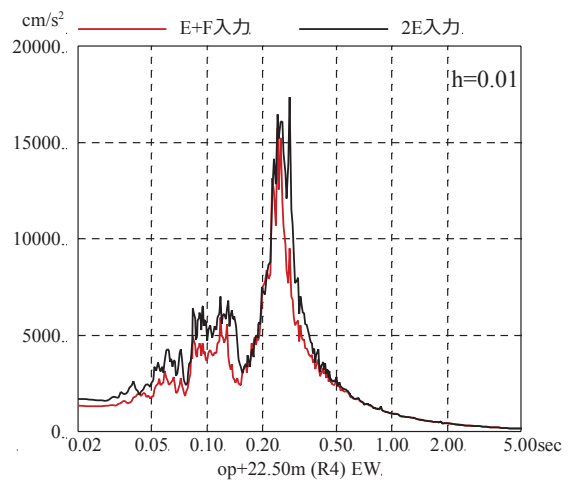
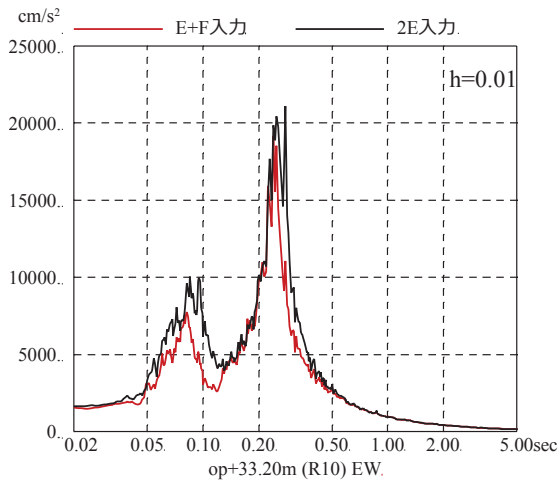
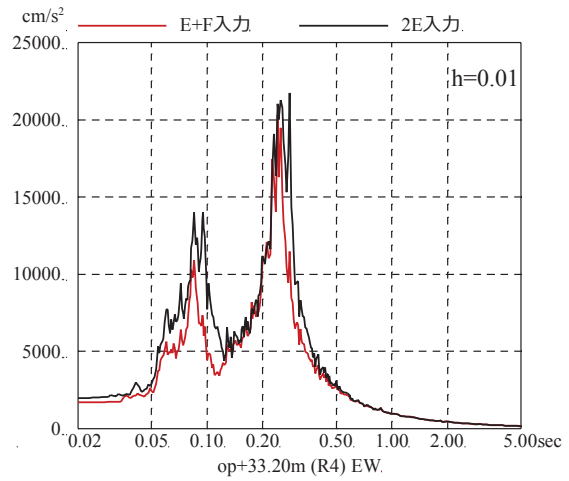
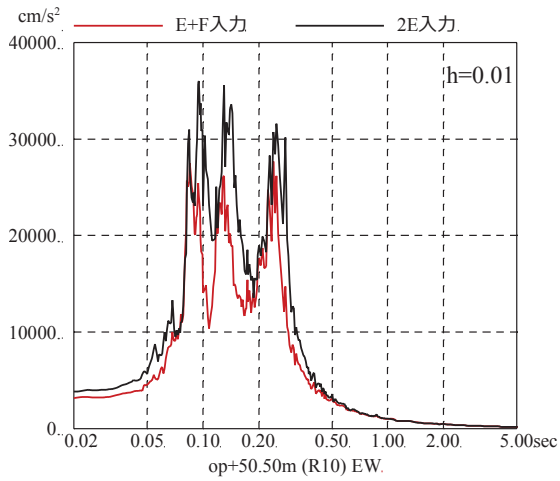
第 1-8 図 基準地震動 S_s-D1 を用いた直接入力と
表層地盤の影響を考慮した場合の建屋応答への影響
(2号炉原子炉建屋, NS 方向, 減衰 5%)



第 1-9 図 基準地震動 Ss-D1 を用いた直接入力と
 表層地盤の影響を考慮した場合の建屋応答への影響
 (2号炉原子炉建屋, NS 方向, 減衰 1%)



第 1-10 図 基準地震動 Ss-D1 を用いた直接入力と
表層地盤の影響を考慮した場合の建屋応答への影響
(2号炉原子炉建屋, EW 方向, 減衰 5%)



第 1-11 図 基準地震動 Ss-D1 を用いた直接入力と表層地盤の影響を考慮した場合の建屋応答への影響
(2号炉原子炉建屋, EW 方向, 減衰 1%)

参考検討 地盤物性の違いによる 3.11 地震のシミュレーション結果への影響

使用する地盤モデルの差異が建屋応答へ与える影響を確認することを目的として、3.11 地震のシミュレーション解析に用いる地盤モデルの差異による建屋応答と観測記録との関係を検討する。検討に用いた地盤モデルは、第 1 表に示す表層に非線形を考慮した地盤と、第 1 表に示す地盤の表層地盤のせん断波速度を一律 740m/s に変更した線形地盤を用いた。建屋モデルは 3.11 地震のシミュレーション解析モデルとした。

建屋における床応答スペクトルの比較を第 1 図および第 2 図に示す。

検討の結果、地盤モデルによる若干の差異はあるもののどちらのモデルでも解析結果は観測記録より大きめに評価する結果となった。また、表層地盤に非線形性を考慮した地盤モデルによる解析結果はより観測記録と整合する結果となった。

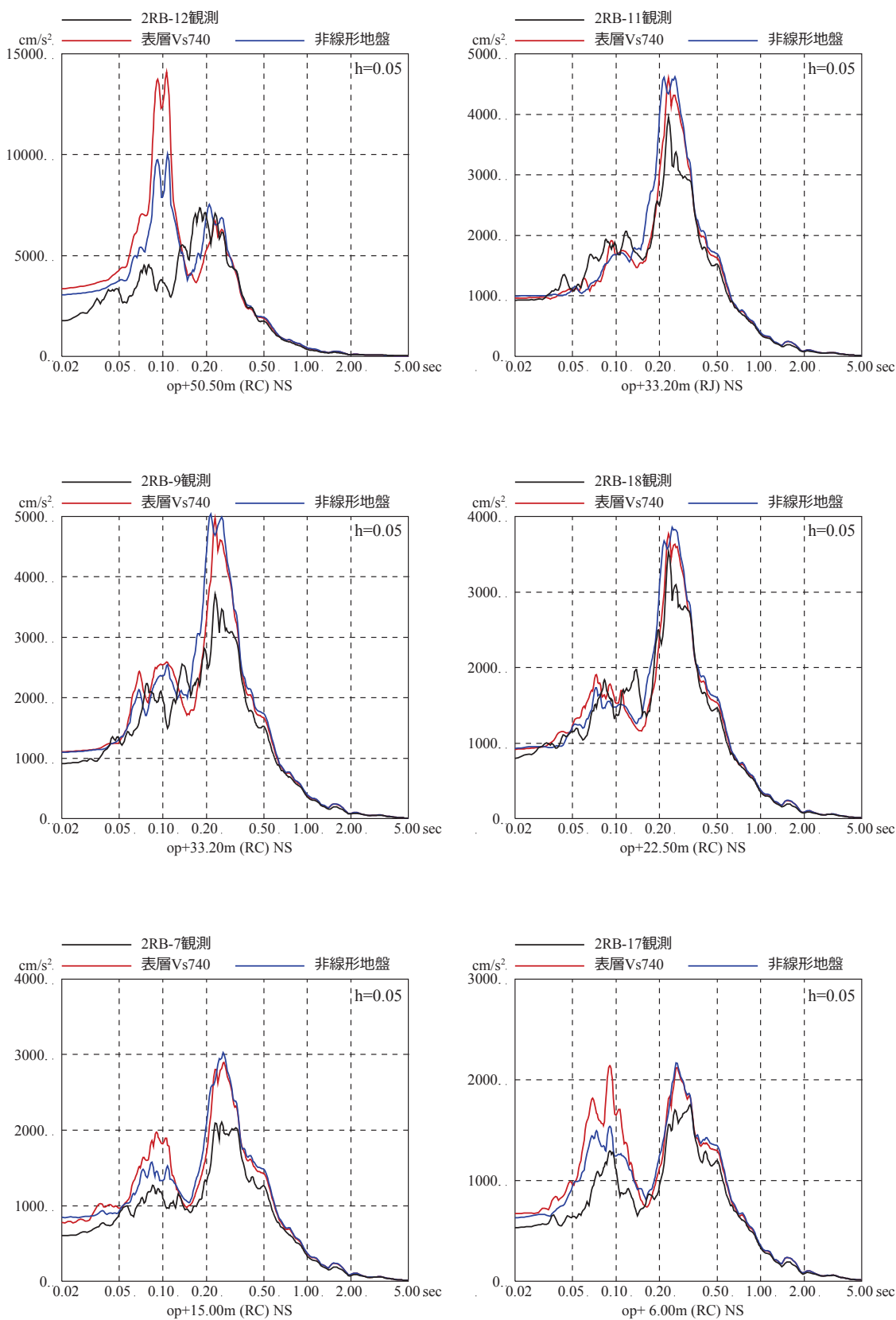
第 1 表 女川 2 号炉原子炉建屋地盤物性

	地層レベル O. P. (m)	単位体積重量 γ (kN/m ³)	せん断波速度 V_s (m/s)	減衰定数 h (%)
表層地盤	14.80	18.6	※1	3※2
	0.00	23.3	900※3	3
底面地盤	-14.10	23.8	1300	3
	-25.00	24.6	2150	3
	-80.00	25.0	2440	3
	-200.0	25.0	2440	3

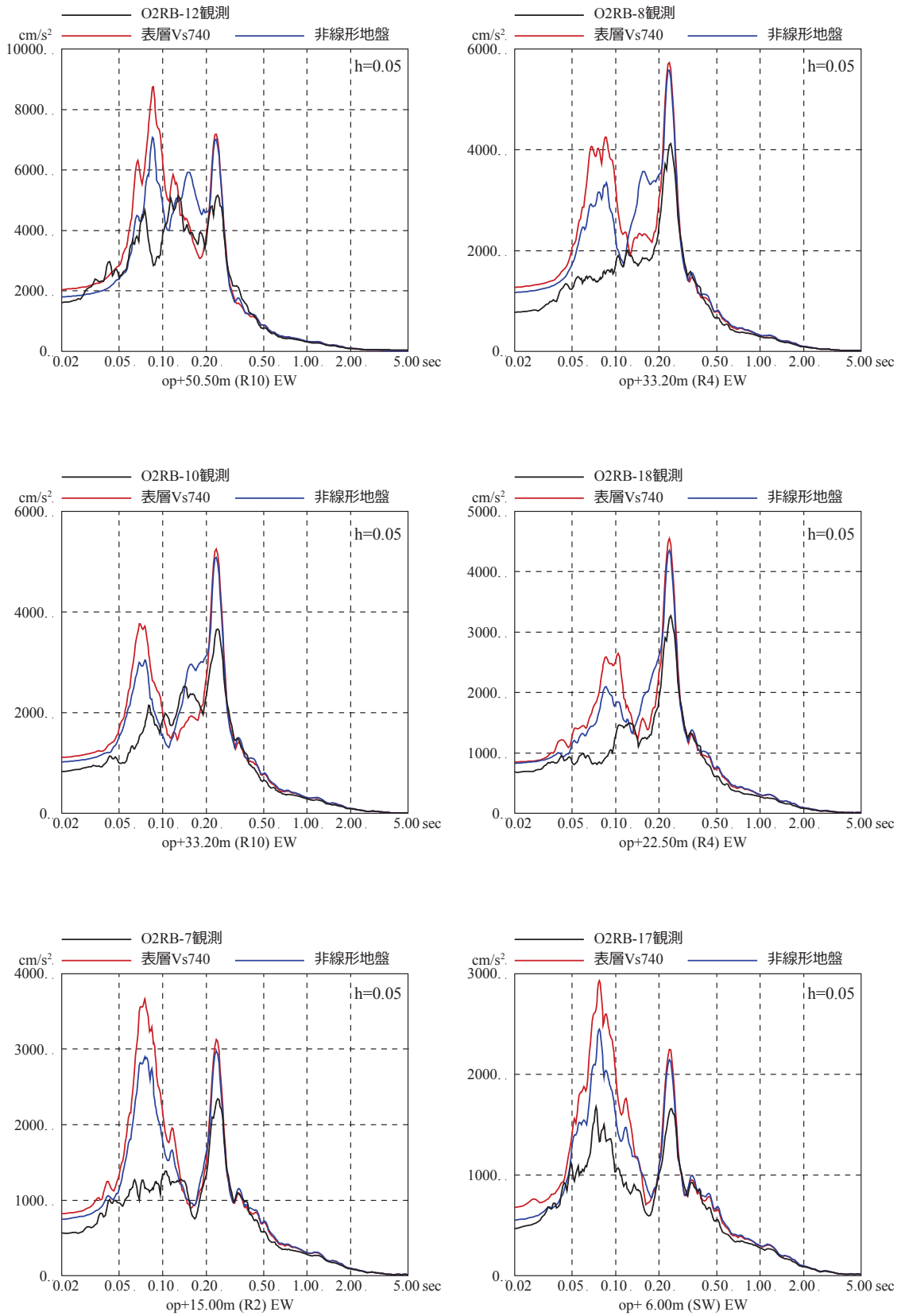
※1 O. P. 14.8m～O. P. 0m は、上載圧依存を考慮してせん断波速度と相関のある初期剛性 G_0 を設定する。また、ひずみ依存による非線形特性を考慮する。

※2 Rayleigh 減衰。また、ひずみ依存による非線形特性を考慮する。

※3 PS 検層結果を観測記録の分析より補間して設定



第1図 加速度応答スペクトルの比較 (3.11地震, NS方向)



第 2 図 加速度応答スペクトルの比較 (3.11 地震, EW 方向)

添付12 建屋側面ばねの有無が建屋応答に与える影響

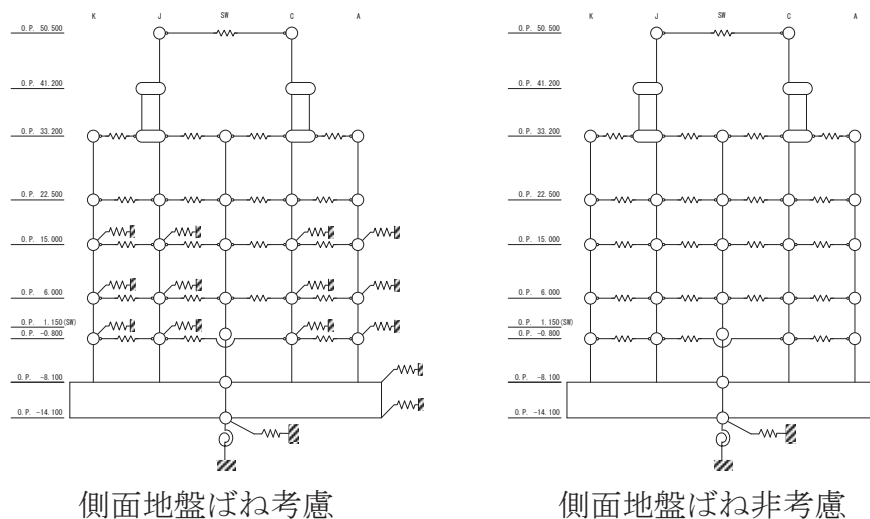
1. 検討概要

女川2号炉原子炉建屋の今回工認では、表層地盤の影響を考慮して建屋への入力地震動を算定することとしているが、側面ばねはモデル化していない。そこで、基準地震動 S_s を入力した場合の側面地盤が建屋の振動特性に与える影響を確認する。

2. 検討方法

検討は、側面地盤ばねを考慮したモデルと考慮しないモデルを用いて基準地震動 S_s -D1, S_s -D2 による地震応答解析を行う。

側面地盤は、4.1 項にて設定した地盤を用いて等価線形解析を実施した際の収束物性値を用いて、地盤を地中の質点位置ごとに、単位厚さで平面的に切り出したモデルを設定し、建屋を面積が等価な円形平面に置換して、側面地盤ばねを Novak の方法 (JEAG4601-1991 [追補版] による方法) により算定する。シミュレーション解析モデルを第 2-1 図に、側面地盤ばねの設定に用いる物性値を第 2-1 表に示す。

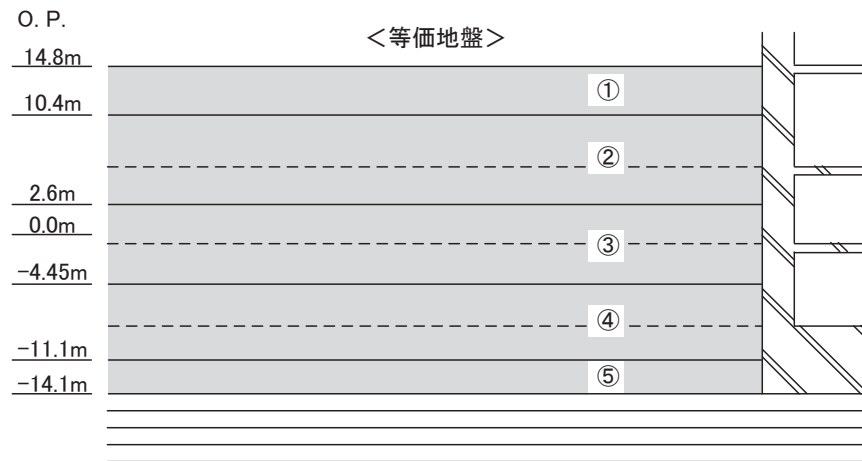


	側面ばねを考慮するケース	側面ばねを考慮しないケース
建屋	2号炉原子炉建屋	
地震動	基準地震動 S_s -D2 および 基準地震動 S_s -D1	
入力地震動	建屋底面位置および側面地盤ばね位置の地震動 (E+F) を算定し入力 (補正水平力考慮)	建屋底面位置の地震動 (E+F) を算定し入力
建屋モデル (建屋剛性, 建屋減衰)	今回工認モデル (初期剛性低下考慮, 建屋減衰5%, 耐震補強考慮)	
建屋モデル (側面地盤ばね)	有り	無し
地盤モデル	S_s 評価用地盤モデル (表層地盤: 2層モデル)	

第 2-1 図 側面地盤ばねの有無の検討に用いる地震応答解析モデル

第 2-1 表 側面地盤ばねの設定に用いる等価地盤の物性値

建屋質点 レベル O. P. (m)	層 No.	等価地盤				
		せん断波速度 Vs (m/s)	せん断弾性係数 G ($\times 10^4$ kN/m ²)	単位体積重量 γ (kN/m ³)	ポアソン比 ν	減衰定数 he (%)
15.0	①	157	4.69	18.6	0.45	3
6.0	②	204	7.94	18.6	0.45	3
-0.8	③	755	12.6	21.6	0.45	3
-8.1	④	900	193	23.3	0.45	3
-14.1	⑤	900	193	23.3	0.45	3

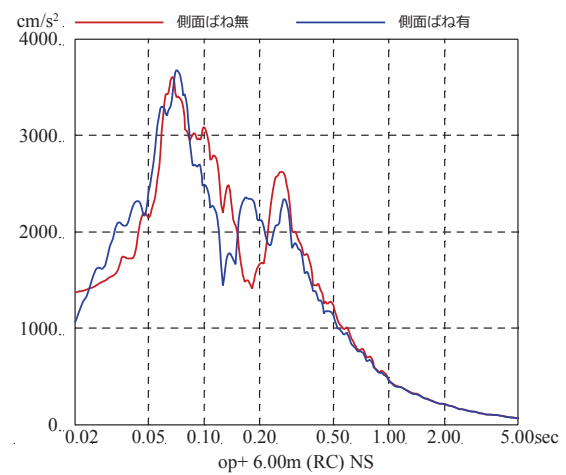
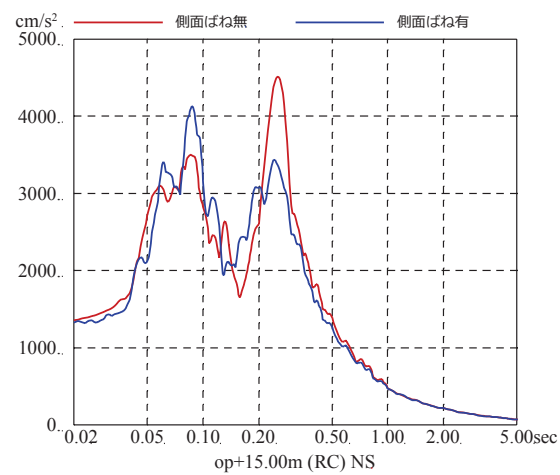
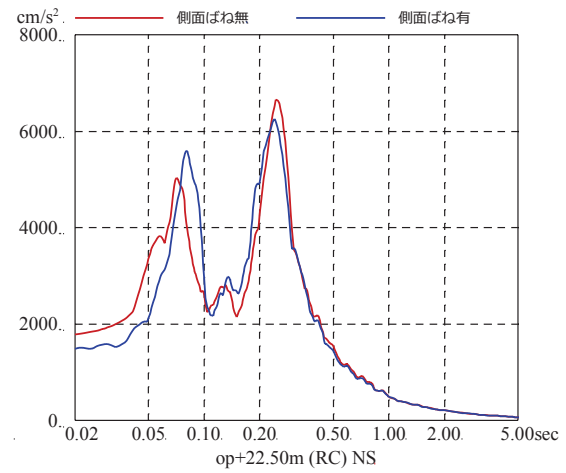
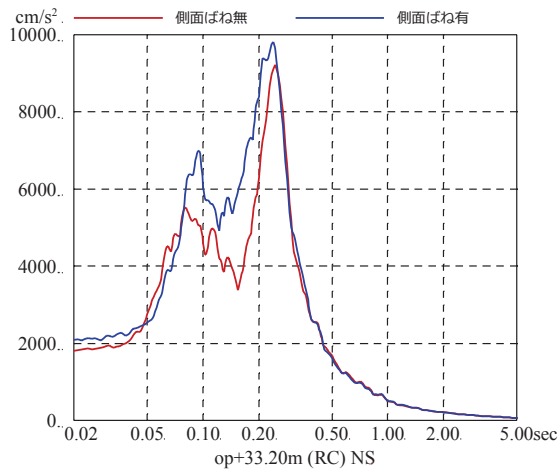
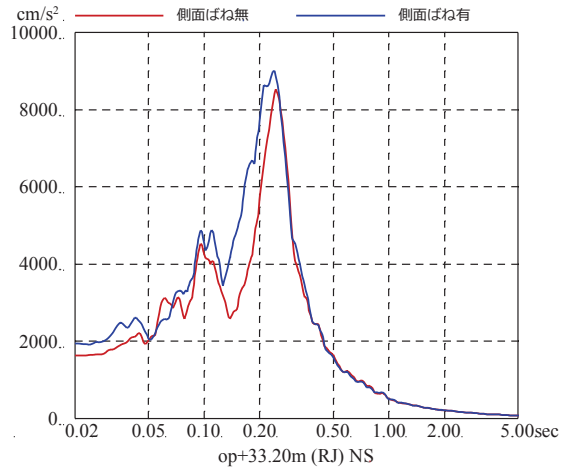
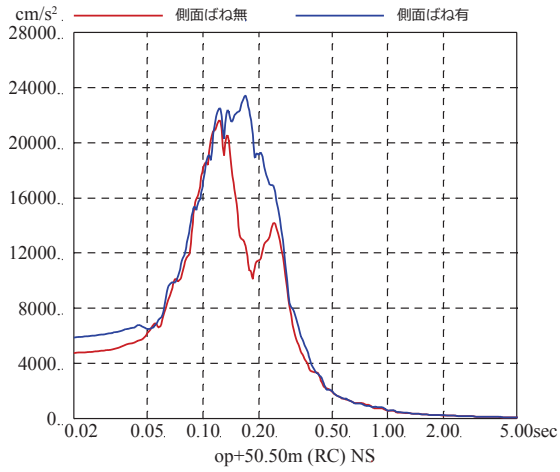


埋戻土の形状 (単位 : m)

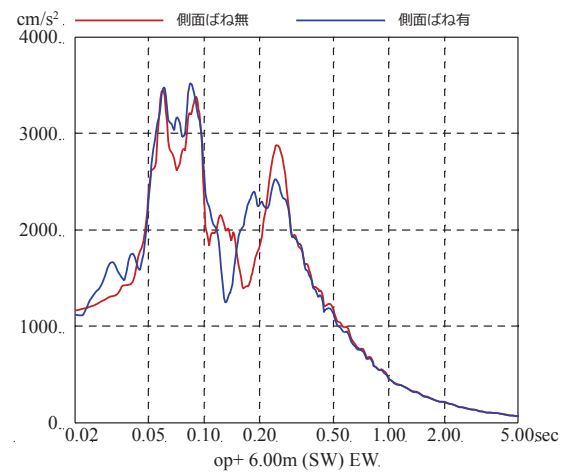
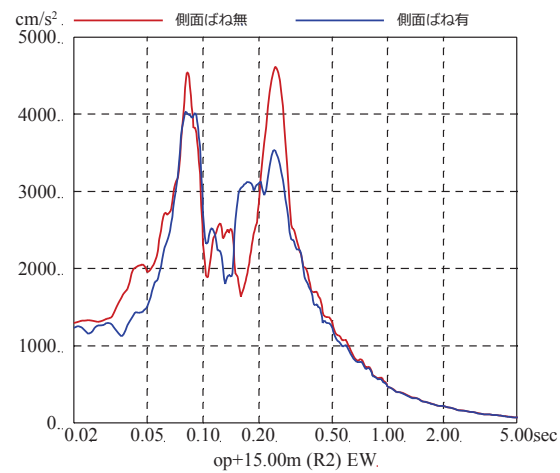
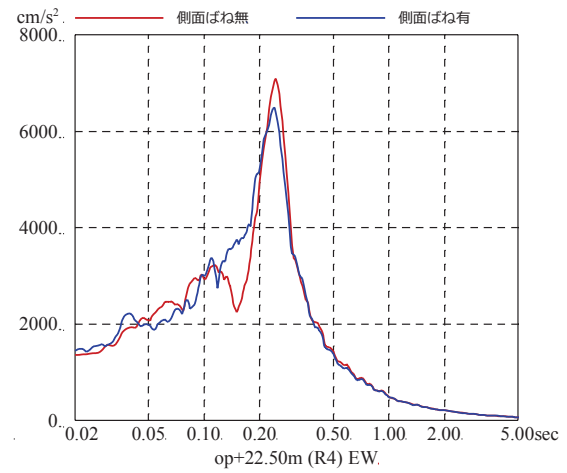
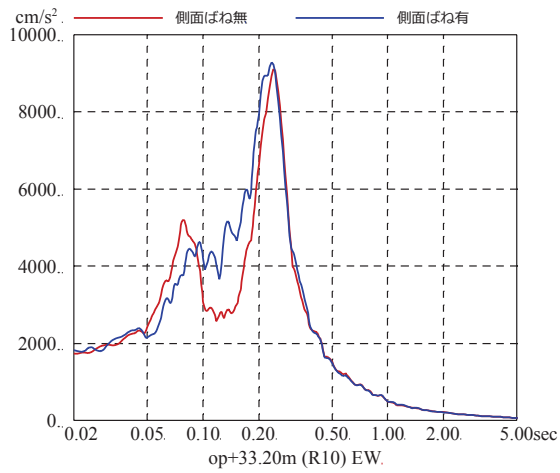
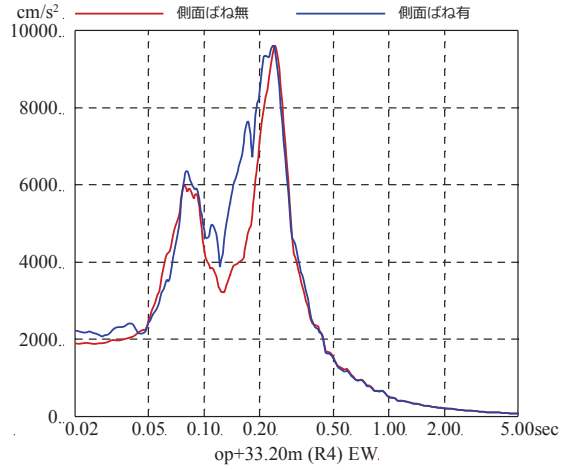
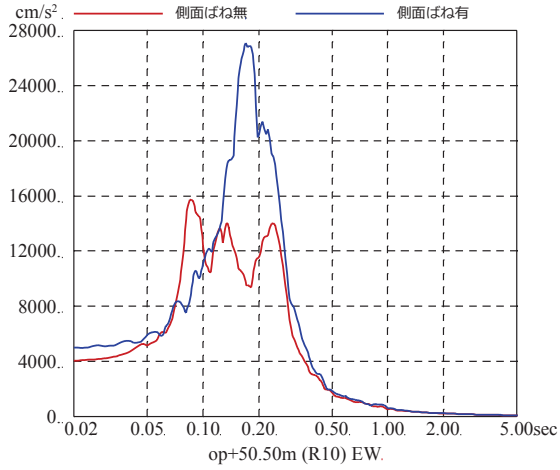
3. 検討結果

側面地盤ばねの有無をパラメータとした地震応答解析結果の加速度応答スペクトルの比較を第 3-1 図～第 3-6 図に示す。

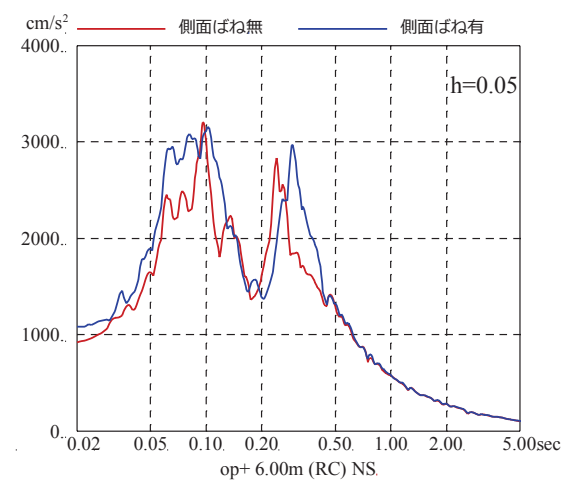
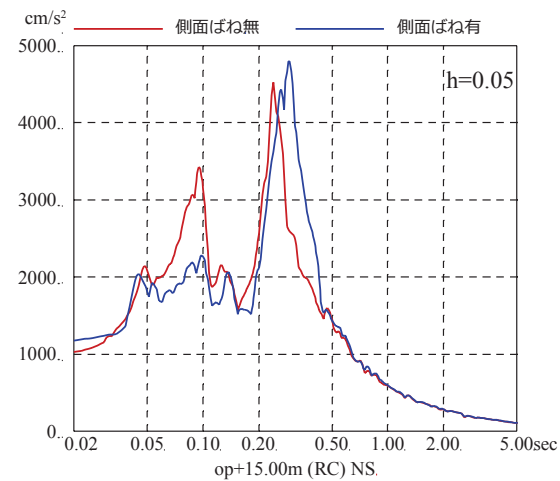
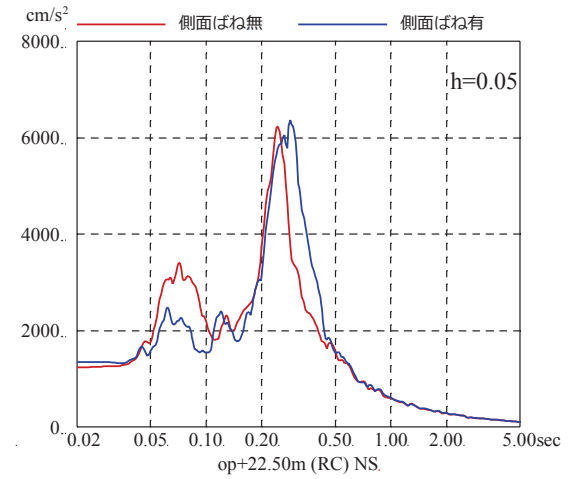
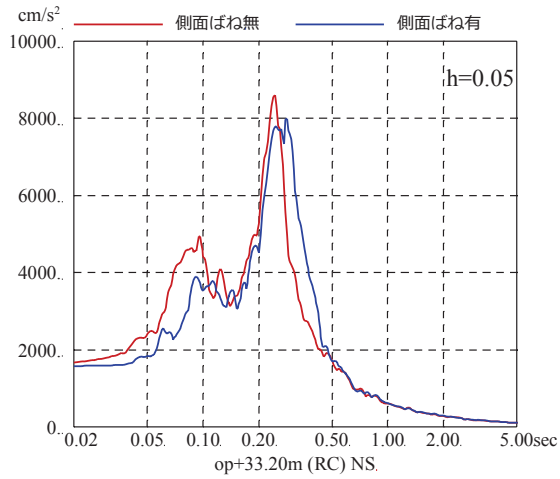
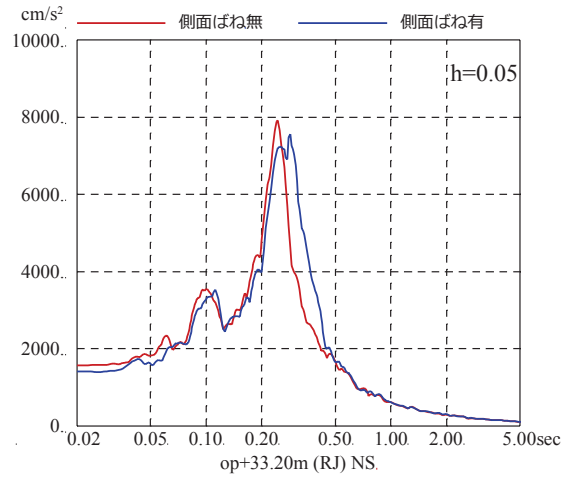
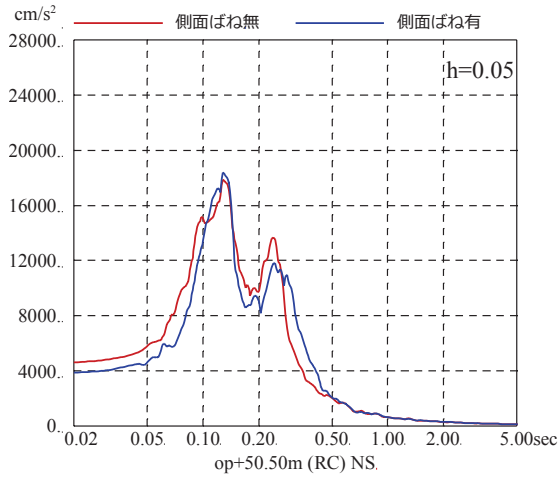
側面地盤ばねが有る場合の方が，無い場合に比べ，地震応答解析結果（加速度応答スペクトル）が大きくなる階が生じている。



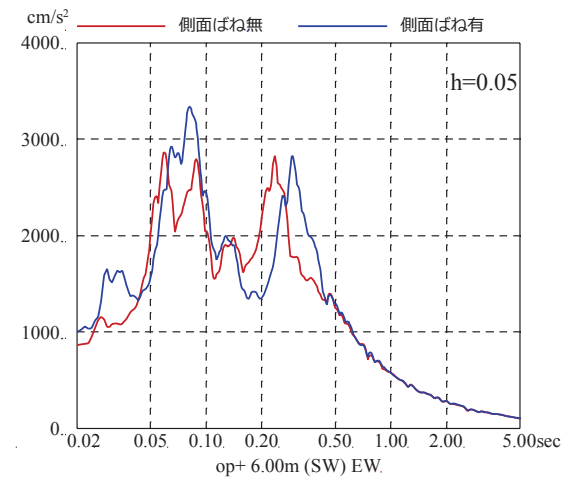
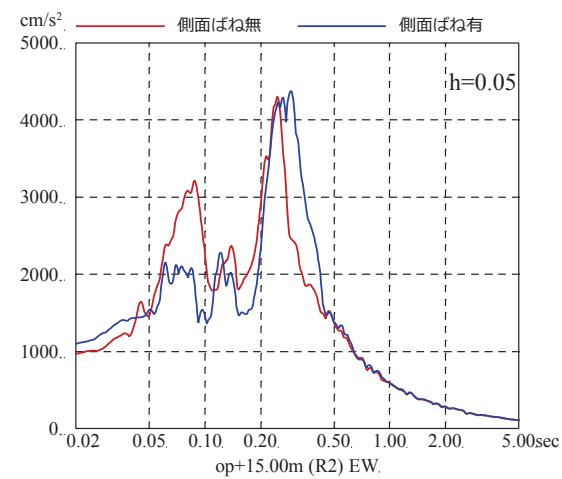
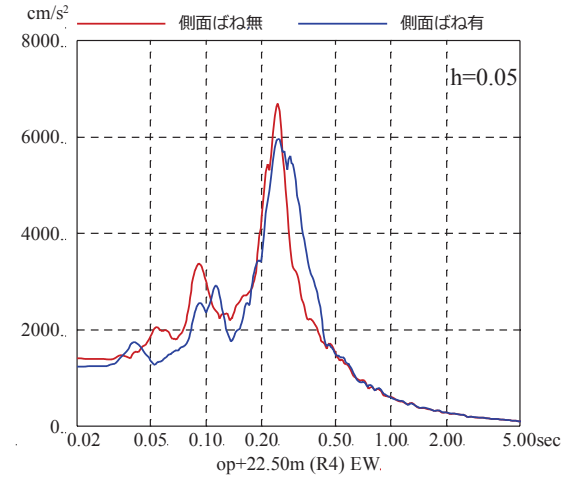
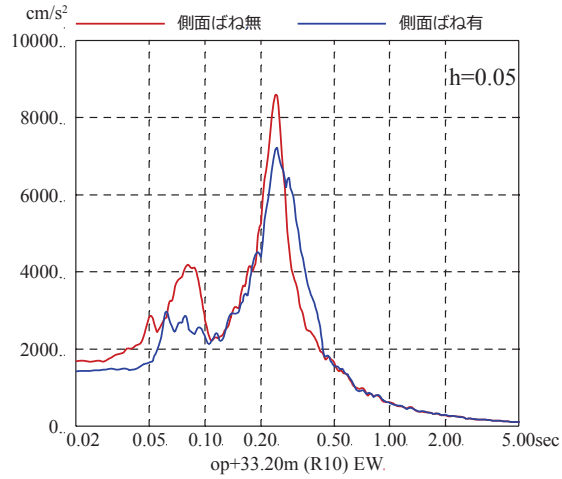
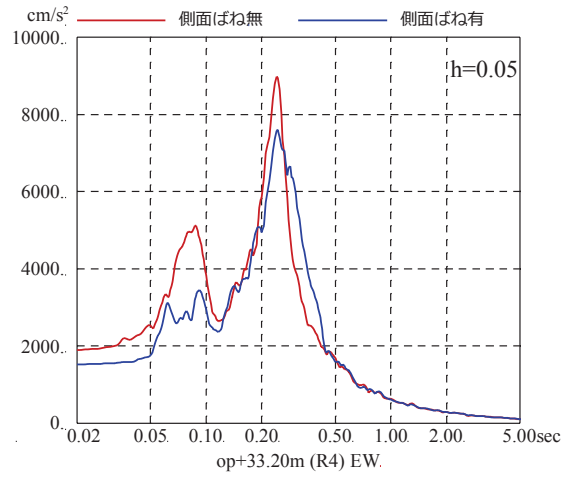
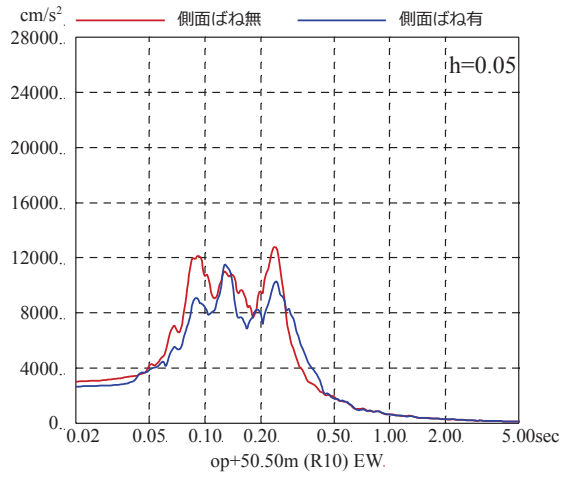
第 3-1 図 基準地震動 S_s-D2 を用いた側面地盤ばねの有無による地震応答解析結果の比較 (2号炉原子炉建屋, NS 方向, 減衰 5%)



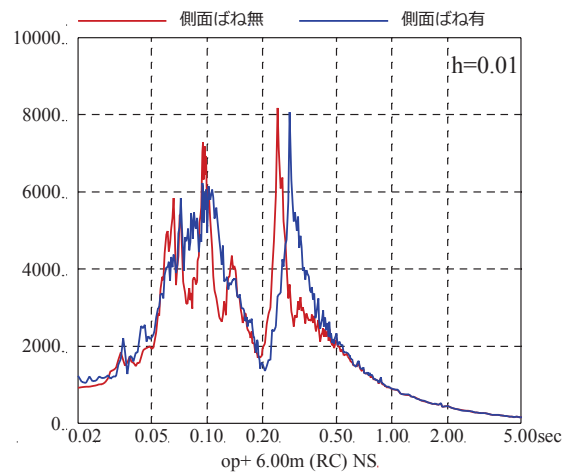
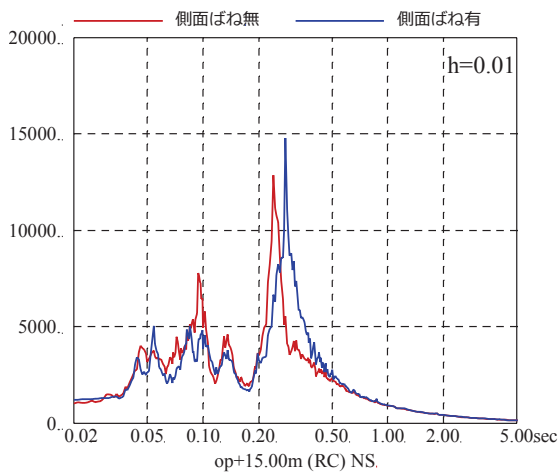
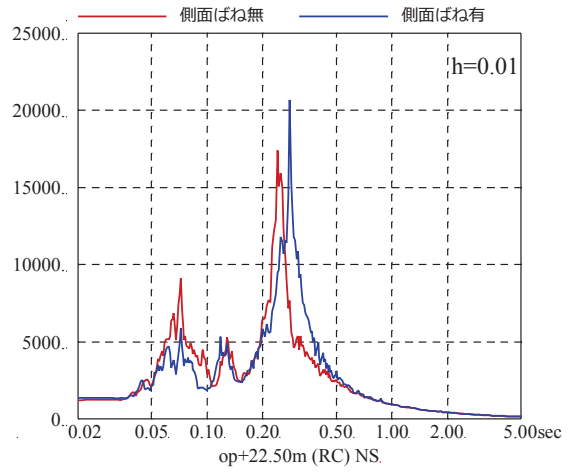
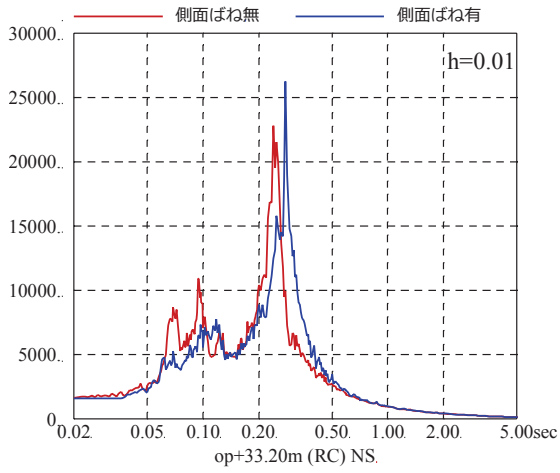
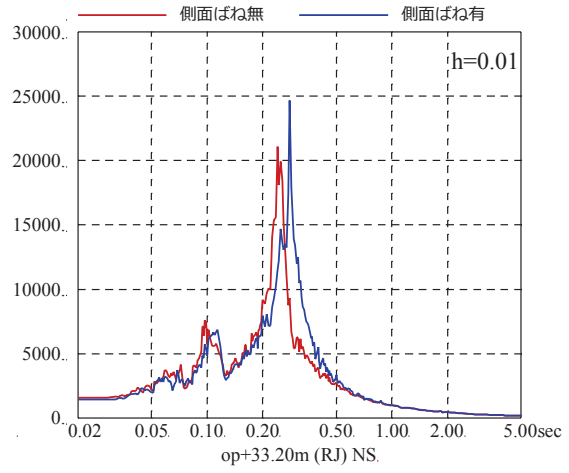
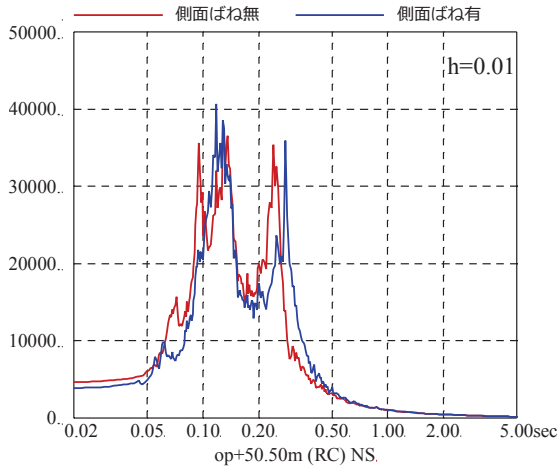
第 3-2 図 基準地震動 S_s-D2 を用いた側面地盤ばねの有無による地震応答解析結果の比較 (2号炉原子炉建屋, EW 方向, 減衰 5%)



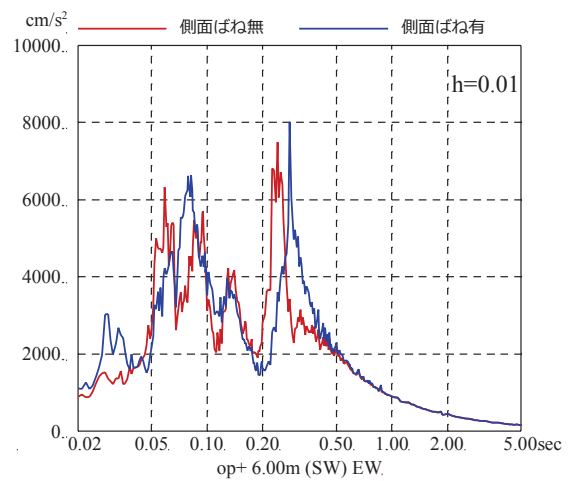
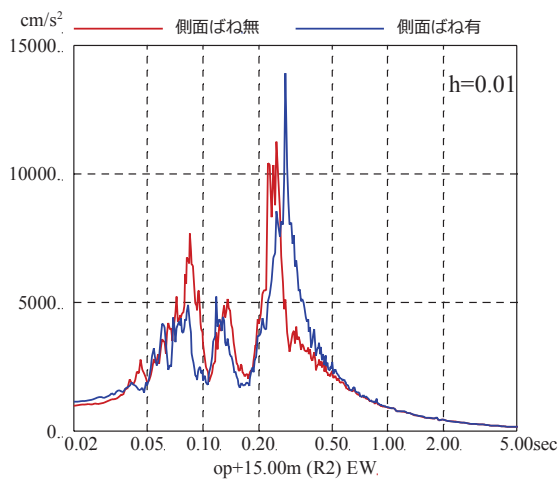
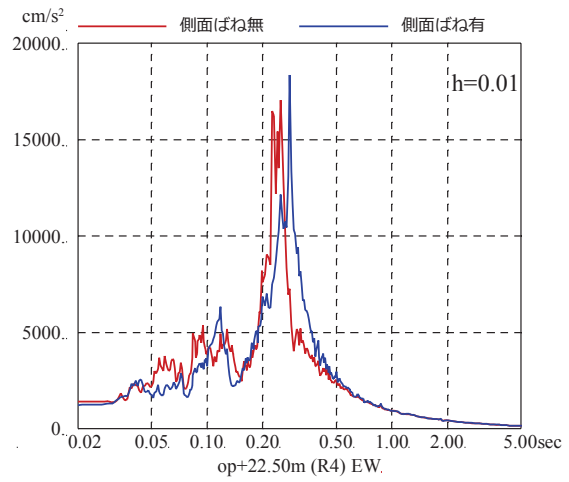
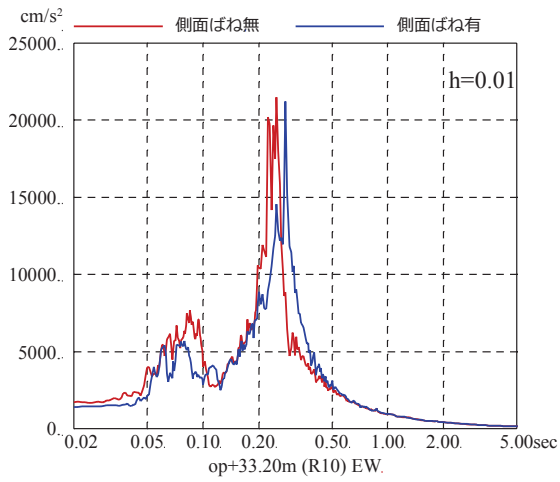
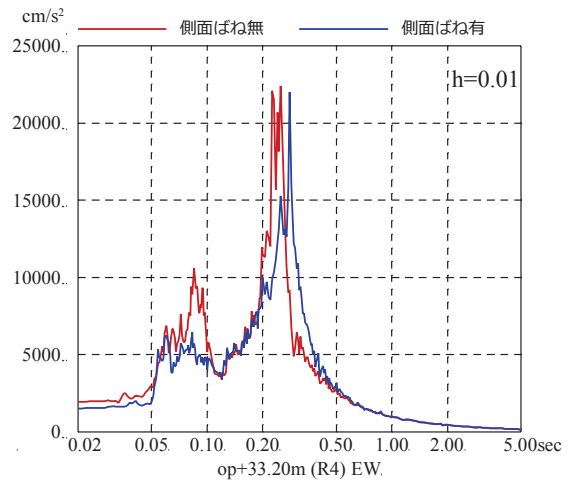
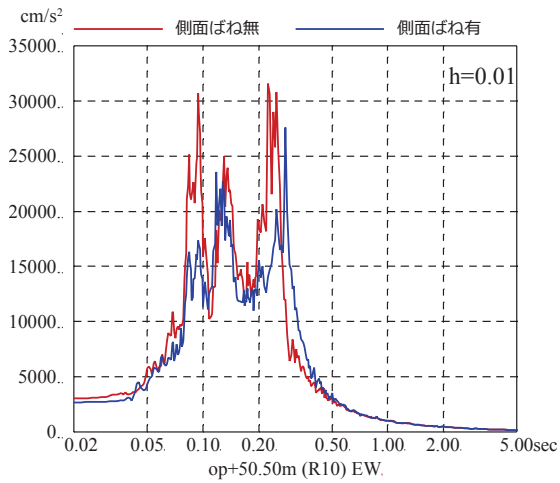
第 3-3 図 基準地震動 S_s-D1 を用いた側面地盤ばねの有無による地震応答解析結果の比較 (2号炉原子炉建屋, NS 方向, 減衰 5%)



第 3-4 図 基準地震動 Ss-D1 を用いた側面地盤ばねの有無による地震応答解析結果の比較 (2号炉原子炉建屋, EW 方向, 減衰 5%)



第 3-5 図 基準地震動 S_s-D1 を用いた側面地盤ばねの有無による地震応答解析結果の比較 (2号炉原子炉建屋, NS 方向, 減衰 1%)



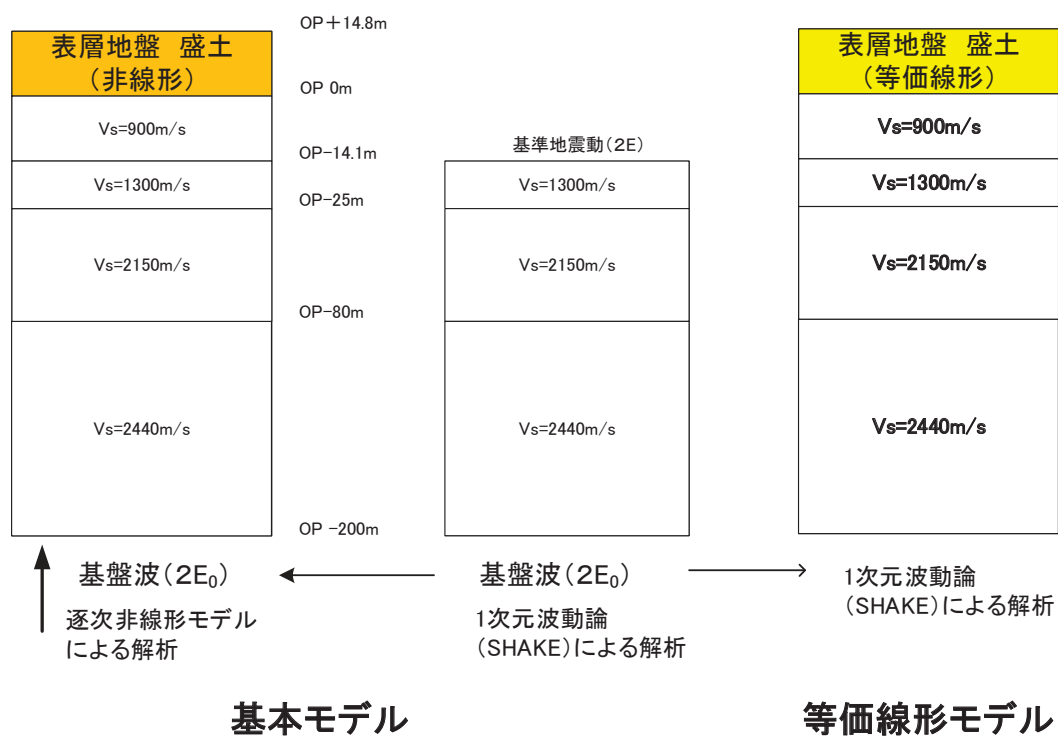
第 3-6 図 基準地震動 S_s-D1 を用いた側面地盤ばねの有無による地震応答解析結果の比較 (2号炉原子炉建屋, EW 方向, 減衰 1%)

参考1 逐次非線形モデルと等価線形モデルによる比較

1. 検討目的および検討方法

今回工認では、建屋への入力地震動を算定する際に等価線形解析の適用範囲を超えるため逐次非線形解析を用いているが、手法の違いによる応答への影響について参考に確認する。

検討は、一次元波動論を用いて、モデル基盤までの引き下げは、線形解析とし、モデル基盤から解放基盤相当位置までの引き上げを、等価線形解析とした場合と逐次非線形解析とした場合の建屋応答結果を比較することにより行う。検討の概念図を第1-1図に示す。検討対象とした地震動は基準地震動 Ss-D2、建屋は原子炉建屋とする。

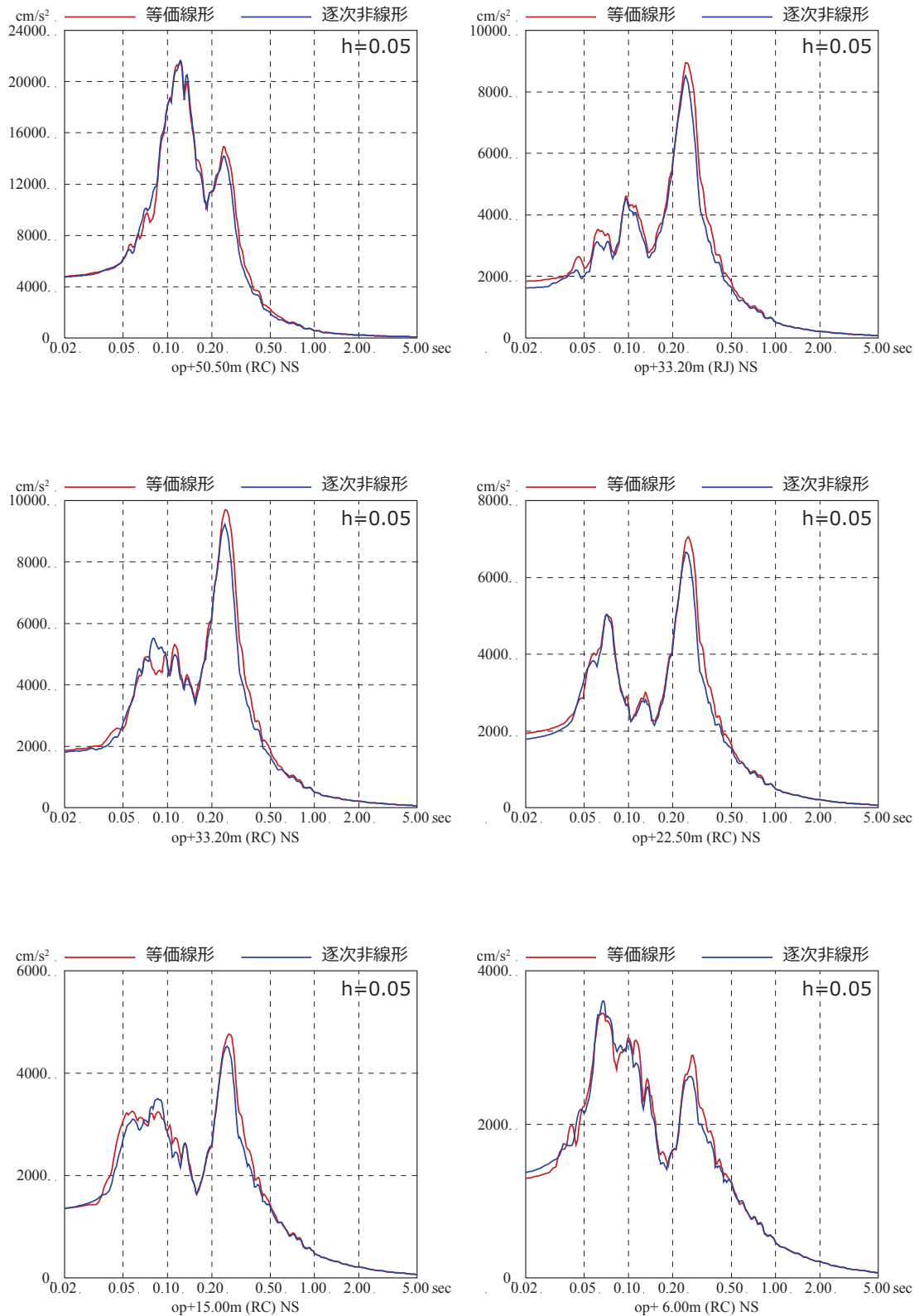


第1-1図 検討概念図

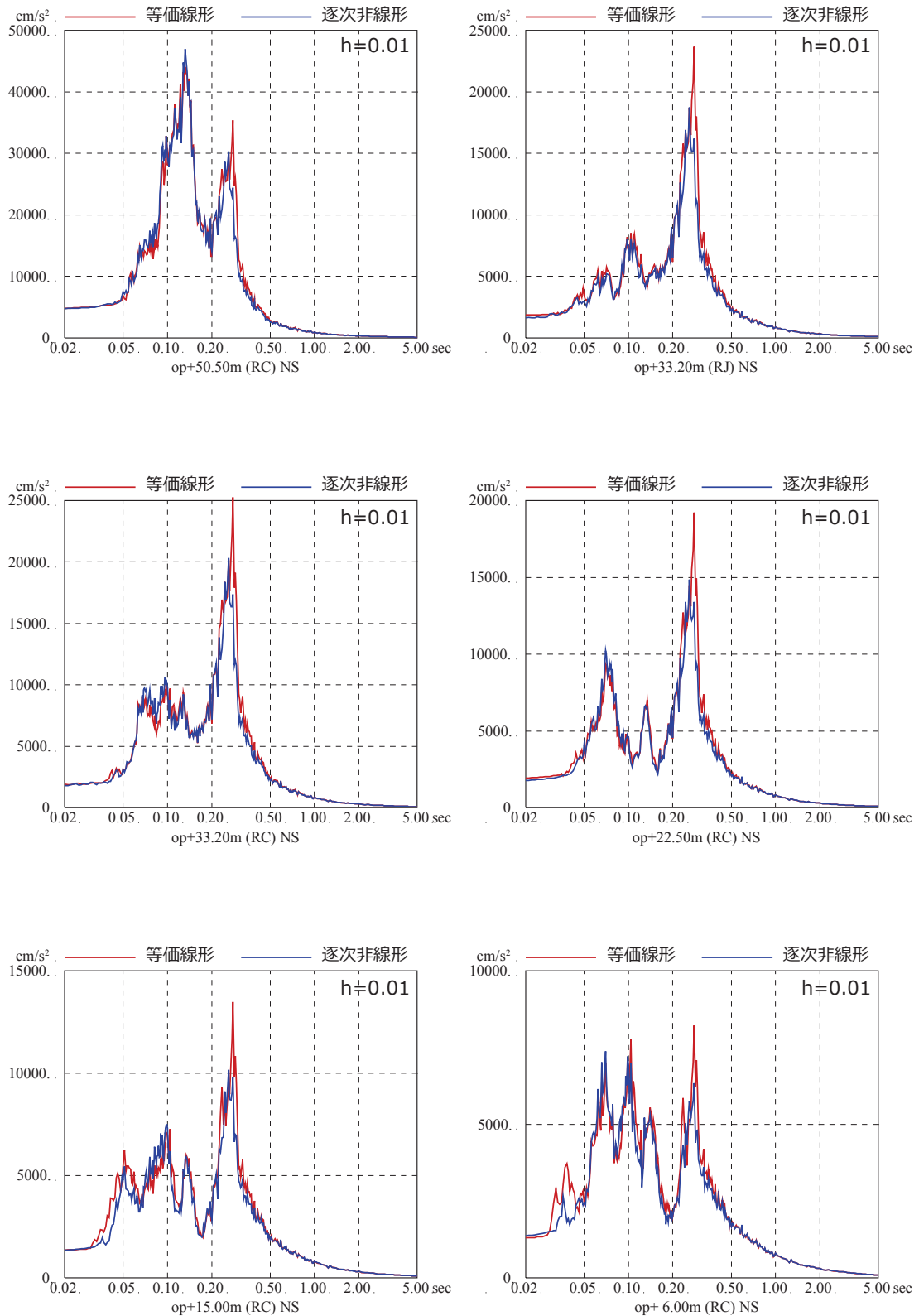
2. 検討結果

等価線形解析とした場合と逐次非線形解析とした場合の結果の比較を第 2-1 図～第 2-4 図に示す。

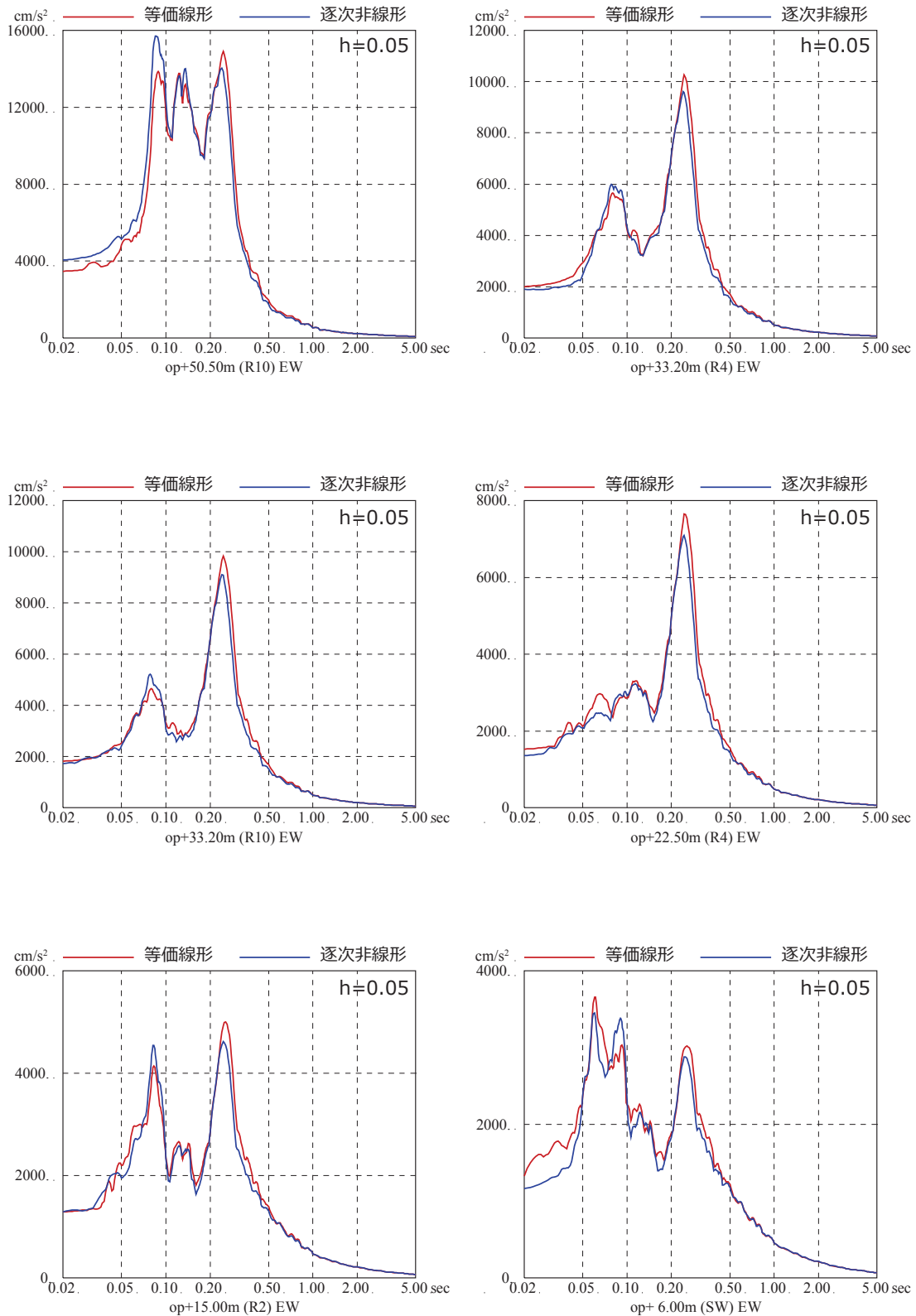
応答スペクトルの比較結果より、解析手法による建屋応答への影響は小さいことが確認された。しかし、基準地震動 S_s の評価時には、等価線形解析の適用範囲を超える地盤のひずみが生じる可能性があることから逐次非線形解析を採用することとする。



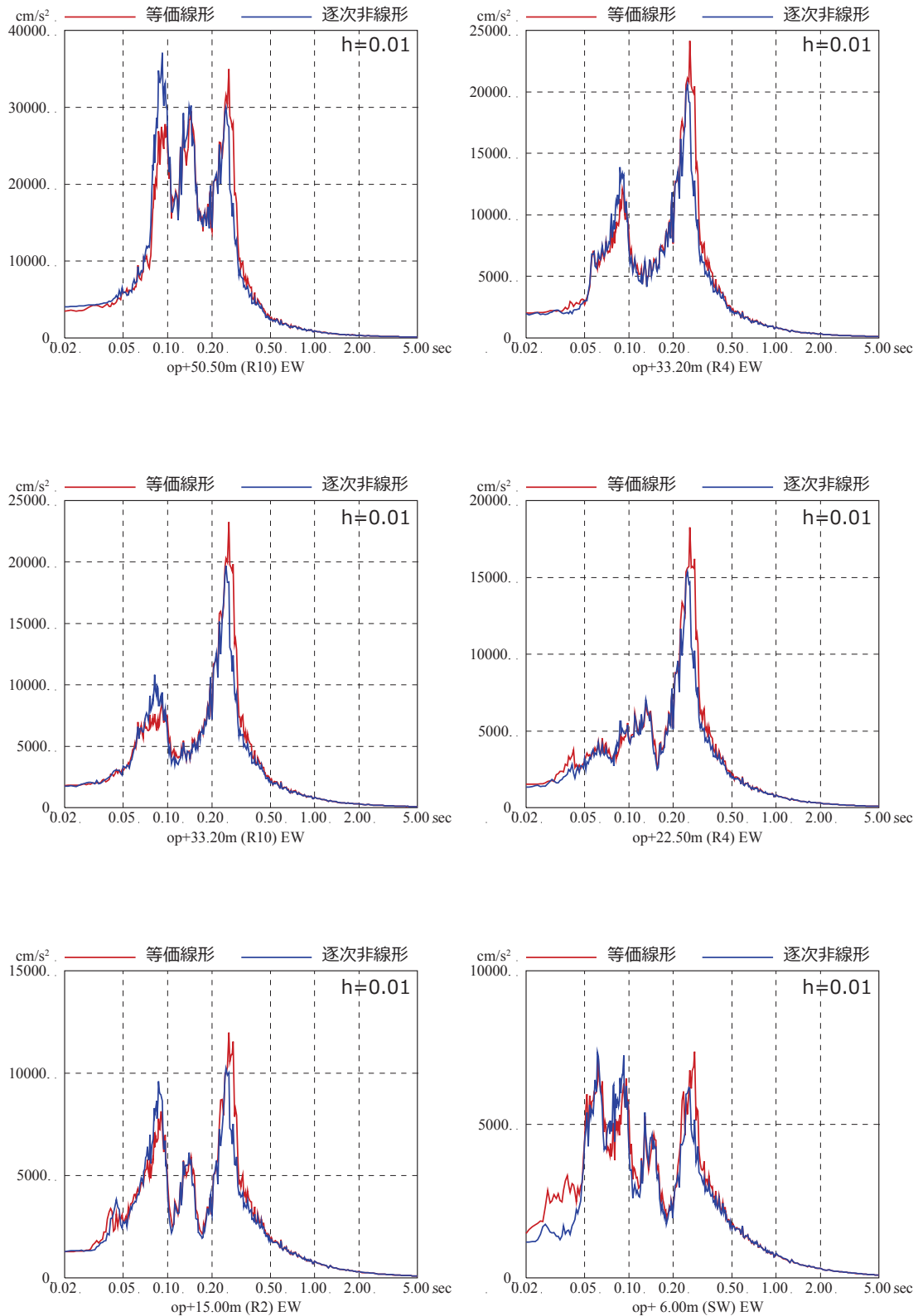
第 2-1 図 等価線形解析と逐次非線形解析による結果の比較
 (基準地震動 S_s-D2, NS 方向, 減衰 5%)



第 2-2 図 等価線形解析と逐次非線形解析による結果の比較
(基準地震動 S_s-D2, NS 方向, 減衰 1%)

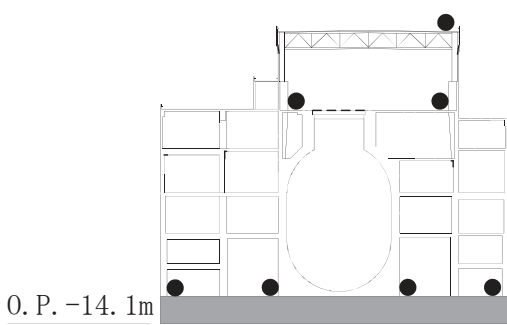
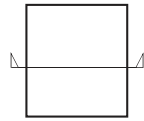


第 2-3 図 等価線形解析と逐次非線形解析による結果の比較
 (基準地震動 S_s-D2, EW 方向, 減衰 5%)

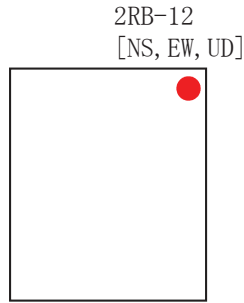


第 2-4 図 等価線形解析と逐次非線形解析による結果の比較
 (基準地震動 S_s-D2, EW 方向, 減衰 1%)

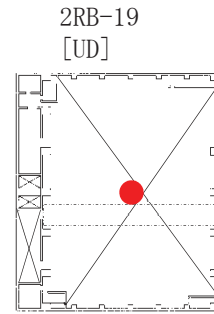
付録1 2号炉原子炉建屋 地震計配置図



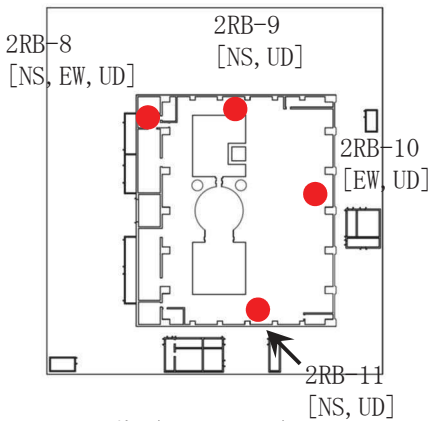
断面図



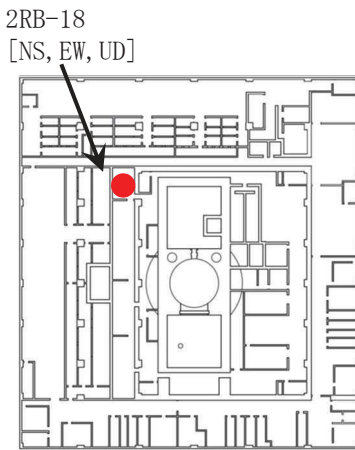
R階 (O.P. 50.67m)



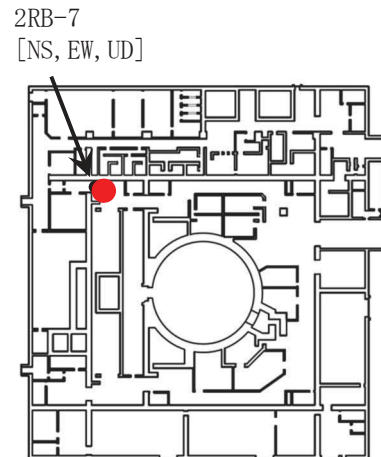
屋根トラス (O.P. 46.95m)



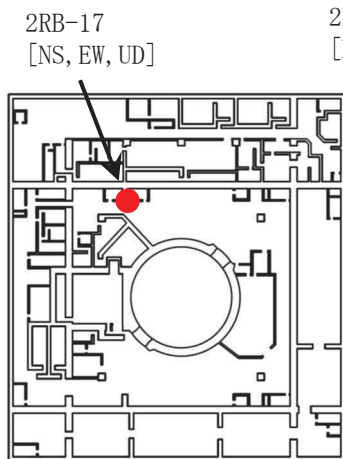
3階 (O.P. 33.2m)



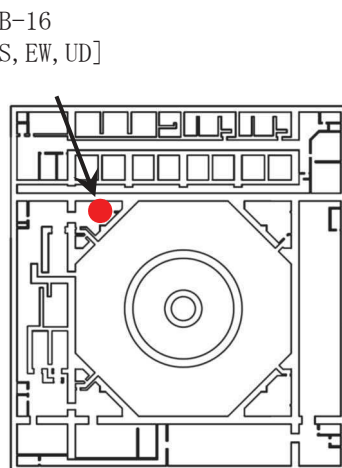
2階 (O.P. 22.5m)



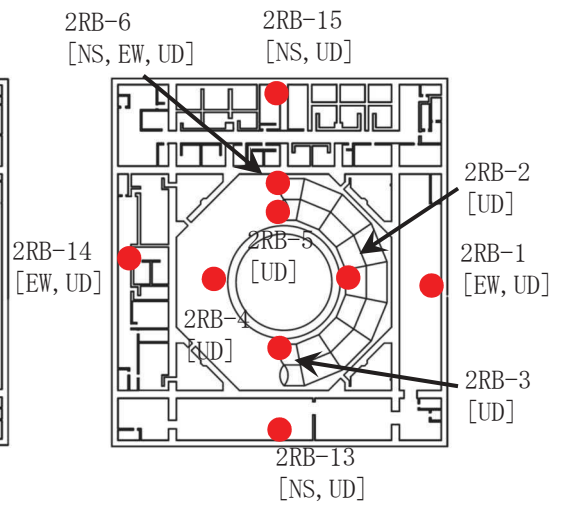
1階 (O.P. 15.0m)



地下1階 (O.P. 6.0m)



地下2階 (O.P. -0.8m)



基礎版上 (O.P. -8.1m)