

**女川原子力発電所2号炉
埋め込まれた建屋の周辺地盤による影響について
(コメント回答)**

**平成30年7月5日
東北電力株式会社**

審査会合における指摘事項

No	審査会合日	項目	説明資料
52	2月20日 第550回審査会合	地盤モデルについて、O. P. -200mまでモデル化していることの妥当性を原子炉建屋の下部が成層構造であることも含めて提示すること。	2.3(2) 敷地地盤の成層性 2.5 基準地震動Ssに対する適用性検討
53	2月20日 第550回審査会合	地盤モデルの設定について、表層地盤を2層に分けていること、地層レベルの設定及び表層地盤下部のせん断波速度の設定の妥当性を提示すること。	2.3 入力地震動評価用地盤モデルの設定 2.4 入力地震動評価用地盤モデルの検証
54	2月20日 第550回審査会合	表層地盤の層境界に関する検討について、伝達関数及び応答スペクトルの比較に対する考察を提示すること。	2.3 入力地震動評価用地盤モデルの設定
55	2月20日 第550回審査会合	入力地震動の算定を表層地盤の影響を考慮した手法に変更したことについて、基準地震動に対する耐震性評価への適用性を提示すること。その際、3. 11地震等による検討結果を基準地震動による評価に外挿する際に適用する手法の妥当性、条件設定等の不確かさを考慮した保守性確保の考え方も含めて提示すること。	2.3 入力地震動評価用地盤モデルの設定 2.4 入力地震動評価用地盤モデルの検証 2.5 基準地震動Ssに対する適用性検討
56	2月20日 第550回審査会合	表層地盤上部の非線形特性における地盤物性を含むH-D(Hardin-Drnevich)モデル、Rayleigh 減衰等の解析条件及び手法について、地盤調査結果等に基づく設定根拠の妥当性、地盤安定性評価との整合性、建屋及び機器・配管への影響、解析プログラムの信頼性を含めて、妥当性を提示すること。	2.3 入力地震動評価用地盤モデルの設定 2.4 入力地震動評価用地盤モデルの検証 2.5 基準地震動Ssに対する適用性検討
57	2月20日 第550回審査会合	建屋の埋め込み効果について、基準地震動の違い及びフロアレベルの違いによる影響に対する考察を提示すること。	3.2 原子炉建屋の埋め込み効果に関する検討
58	2月20日 第550回審査会合	入力地震動の算定において既工認から手法を変更することによる応答低減効果について、設備への影響も含めて提示すること。	1. 全体概要
59	2月20日 第550回審査会合	各検討における解析について、モデル、条件、方法、プロセス、結果及び適用するプログラムの名称、仕様等を具体的に提示すること。	2.3 入力地震動評価用地盤モデルの設定
60	2月20日 第550回審査会合	建屋の埋め込み効果について、女川原子力発電所2号炉の建屋で適用する場合は、その妥当性を提示すること。	4. E+F入力を考慮する既設建屋 5. 検討結果の概要と今後の検討について

審査会合における指摘事項

No	審査会合日	項目	説明資料
61	4月17日 第565回審査会合	Ssに対する地盤モデルの適用性について、表層地盤上部におけるSs7波それぞれのひずみレベルを踏まえた詳細検討を行うこと。	2.5 基準地震動Ssに対する適用性検討 添付⑤ 基準地震動Ssに対する適用性検討
62	4月17日 第565回審査会合	各検討内容(全体)の関係性を整理し、必要な検討が網羅的に行われていることを示すこと。(特に地盤モデルのSsに対する適用性を確認するための方針と関係性を示すこと。)	1. 全体概要 2.5 基準地震動Ssに対する適用性検討
63	4月17日 第565回審査会合	埋込み効果に関する検討についてトータルの保守性の確認方針について具体的に示すこと。	1. 全体概要 3.1 検討のポイント
64	4月17日 第565回審査会合	Hx/Bの解析モデルの条件について違いを整理すること。(第565回資料1-2-3, P.40, 49)	3. 埋込み効果に関する検討(原子炉建屋) 添付⑥ 埋込み効果に関する検討
65	4月17日 第565回審査会合	R/Bの応答スペクトルについて、2EからE+F入力に変更することによる違いについて考察を追記すること。	P65 参考検討
66	4月17日 第565回審査会合	敷地内の建屋構築物に対する埋込み効果、側面ばねの採用検討について規模、振動性状、埋込み状況等を踏まえ、プロセスと妥当性を示すこと。	1. 全体概要 4. E+F入力を考慮する既設建屋
67	4月17日 第565回審査会合	各検討項目の目的を達成するための方針、論理構成を明確にし、整理すること。	2. 入力地震動に関する検討(原子炉建屋) 3. 埋込み効果に関する検討(原子炉建屋)

目次

1. 全体概要
2. 入力地震動に関する検討(原子炉建屋)
 - 2.1 検討のポイント
 - 2.2 東北地方太平洋沖地震における入力地震動の傾向
 - 2.3 入力地震動評価用地盤モデルの設定
 - (1)設定概要
 - (2)敷地地盤の成層性
 - (3)地盤モデルの仮設定
 - (4)仮設定した地盤モデルに対する観測記録を用いた検討
 - (5)表層地盤上部の非線形性を考慮したモデル
 - 2.4 入力地震動評価用地盤モデルの検証
 - 2.5 基準地震動Ssに対する適用性検討
 - (1)検討概要
 - (2)地盤モデルの適用性検討
 - (3)評価手法の適用性検討
 - 2.6 弾性設計用Sdに対する適用性検討
 - 2.7 まとめ
3. 埋込み効果に関する検討(原子炉建屋)
 - 3.1 検討のポイント
 - 3.2 原子炉建屋の埋込み効果に関する検討
 - 3.3 まとめ
4. E+F入力を考慮する既設建屋
5. 検討結果の概要と今後の検討について

1. 全体概要

2. 入力地震動に関する検討(原子炉建屋)

2.1 検討のポイント

2.2 東北地方太平洋沖地震における入力地震動の傾向

2.3 入力地震動評価用地盤モデルの設定

(1)設定概要

(2)敷地地盤の成層性

(3)地盤モデルの仮設定

(4)仮設定した地盤モデルに対する観測記録を用いた検討

(5)表層地盤上部の非線形性を考慮したモデル

2.4 入力地震動評価用地盤モデルの検証

2.5 基準地震動Ssに対する適用性検討

(1)検討概要

(2)地盤モデルの適用性検討

(3)評価手法の適用性検討

2.6 弾性設計用Sdに対する適用性検討

2.7 まとめ

3. 埋込み効果に関する検討(原子炉建屋)

3.1 検討のポイント

3.2 原子炉建屋の埋込み効果に関する検討

3.3 まとめ

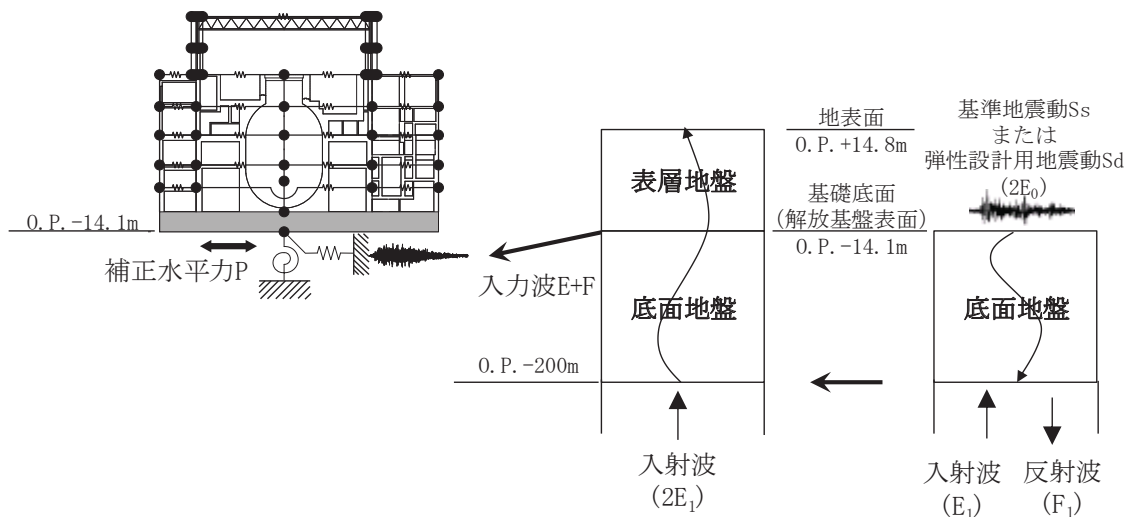
4. E+F入力を考慮する既設建屋

5. 検討結果の概要と今後の検討について

1. 全体概要

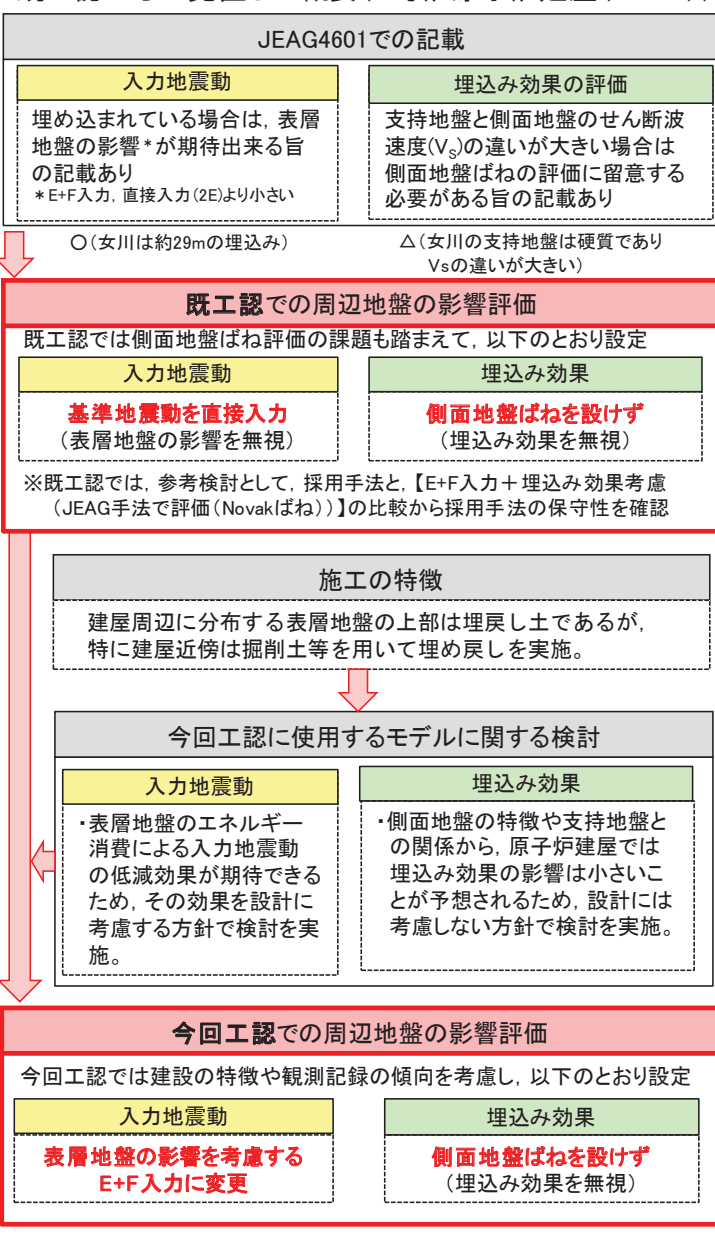
埋め込まれた建屋の既工認からの見直し概要

- 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(E+F入力、表層地盤のエネルギー消費による入力地震動の低減効果)**と**埋込み効果(建屋と側面地盤の相互作用)**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JEAGによる側面地盤ばね(Novakばね)の評価に課題があることを踏まえ、保守的な評価としていたものである。
- 建屋周辺の表層地盤は埋戻し土であるが、既工認において埋込み効果を考慮していないため、特に建屋周辺は、工事においてはオープン掘削を行い、また、埋戻し土には掘削土を使用した施工としており、埋込みによる拘束効果は期待出来ない状態となっている。また、実際、東北地方太平洋沖地震(3.11地震)時には、建屋近傍で揺すり込み沈下が発生している。このことから、今回工認においては、表層地盤の影響として入力地震動に与える影響を考慮する一方で、埋込み効果は無視する方針で、適用性について検討を行った。検討に当たっては、3.11地震等の観測記録を用いた検討や基準地震動 S_s に対する検討を実施した。
- 検討結果を踏まえ、今回工認では、**表層地盤が入力地震動に与える影響が確認された建屋について入力地震動の評価方法を見直す一方、埋込み効果については既工認通り、その影響を無視する解析を採用する。**



今回工認における地震応答解析モデルへの入力概要

既工認からの見直しの概要(2号炉原子炉建屋(R/B))



JEAG4601による入力地震動の評価の扱い

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)

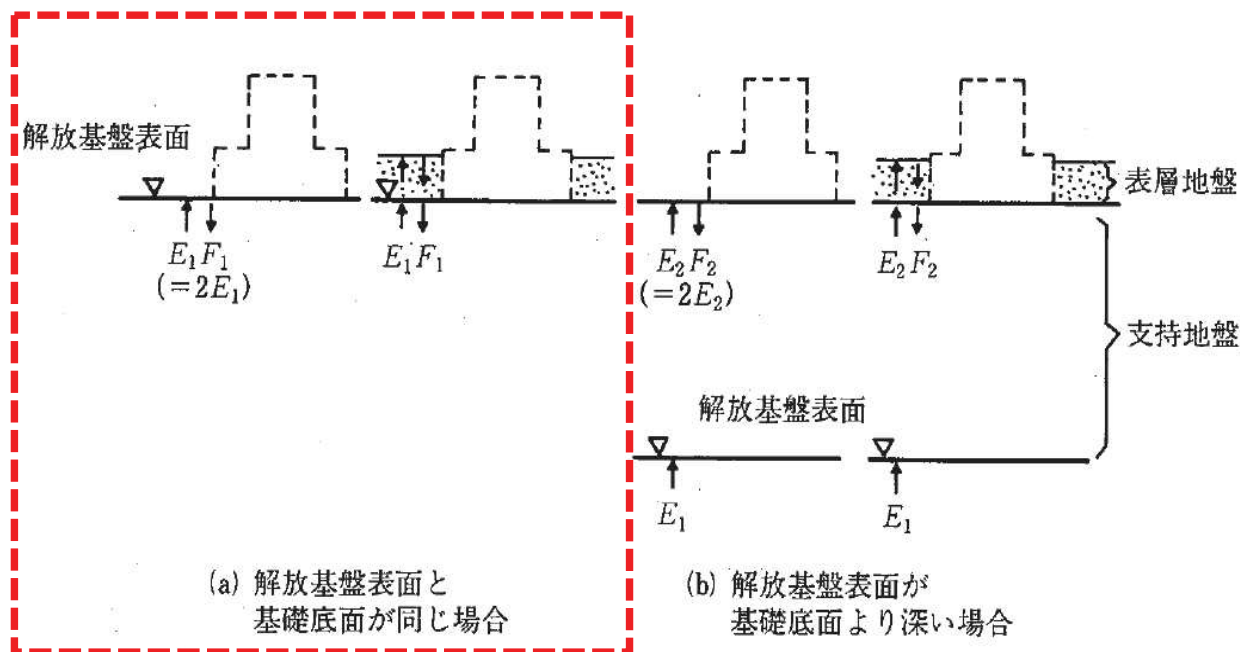


図 5. 2. 4 - 2 SR モデルの入力地震動の算定

JEAG4601による側面地盤ばねの評価の扱い

支持地盤が硬質岩盤の場合の建屋埋込み効果の評価に当たっての課題

- JEAG4601-1991(追補版)では、建屋埋込み効果の評価に当たっては、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インピーダンスが大きく、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ため、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。

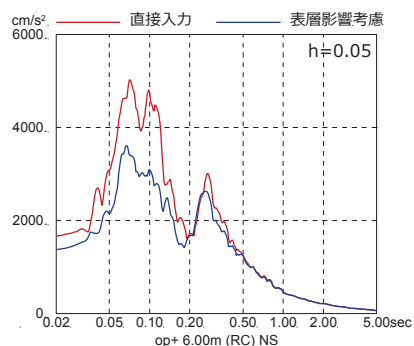
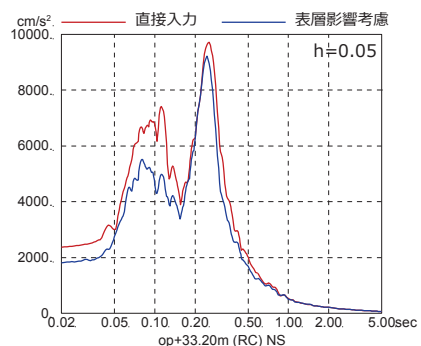
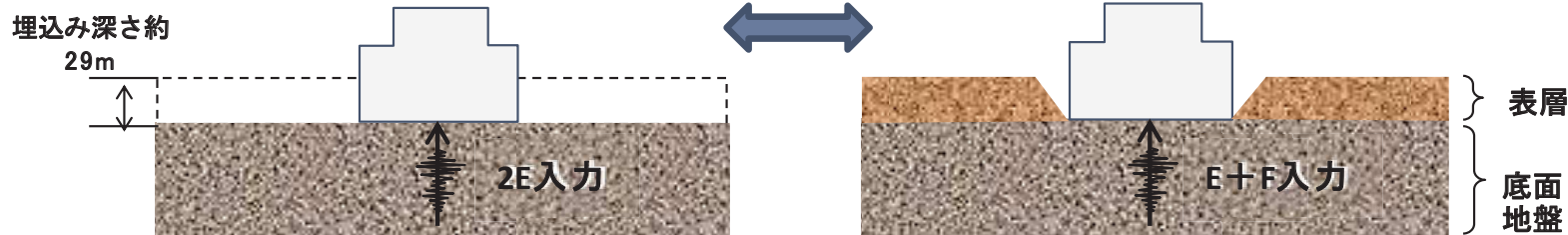
入力地震動の評価方法見直しによる施設影響

詳細については添付①参照

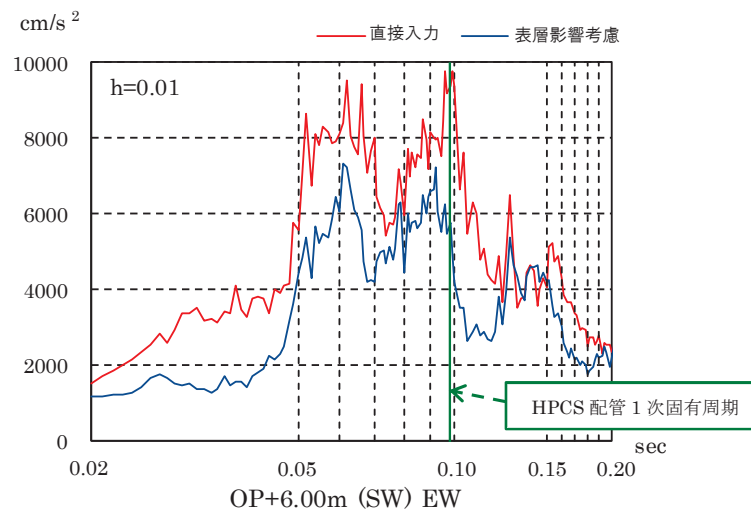
➤ 女川の既工認で採用した基準地震動の直接入力(2E入力)を表層地盤の影響を考慮したE+F入力に変更することにより、特に短期側の応答が低減される効果がある。なお、簡易的分析では、基準地震動S_sを直接入力(2E入力)した場合、一部の配管類※において発生値が許容値を超過する見込みとなる。

※耐震評価の結果、評価基準地に対する余裕が少なく、床応答スペクトルの応答比が大きい周期帯に固有周期がある設備として、高圧炉心スプレイ系配管を選定した。

建屋応答(床応答スペクトル)を比較



建屋応答の比較(床応答スペクトル)



ZPA【直接入力／表層影響考慮】：1.46／1.12 = 1.31
スペクトル応答比【直接入力／表層影響考慮】の平均：1.58 (高圧炉心スプレイ系配管の固有周期から0.098s以下を対象)

建屋応答の比較(床応答スペクトル)

1. 全体概要

検討対象建屋

➤ 今回工認で基準地震動 S_s の地震応答解析を行う建屋のうち、表層地盤の影響検討は以下の手順で実施する。

建屋の周辺状況から検討対象建屋を選定 ⇒ 3.11地震等によるシミュレーション解析からE+F効果を確認、また、埋込み効果の影響を確認

➤ 検討対象建屋は、JEAG4601の建屋埋込み効果の評価法(E+F入力、側面地盤ばね)を参照し、埋込み深さがある程度深く、かつ2~3面程度周辺地盤と接している建屋を選定する。その結果、建屋シミュレーション解析の対象建屋として、2号炉原子炉建屋、2号炉タービン建屋、3号炉海水熱交換器建屋を選定した。

➤ これらの建屋の内、埋込みが深く、特に重要な施設である**2号炉原子炉建屋**を代表として**3.11地震のシミュレーション**並びに**入力地震動評価用地盤モデルの策定及び埋込み効果の影響について検討**を行う。他の建屋については、3.11地震によるシミュレーション解析について検討し、2号炉原子炉建屋と同様の評価が適用可能かどうかについて確認する。

今回工認における対象建屋

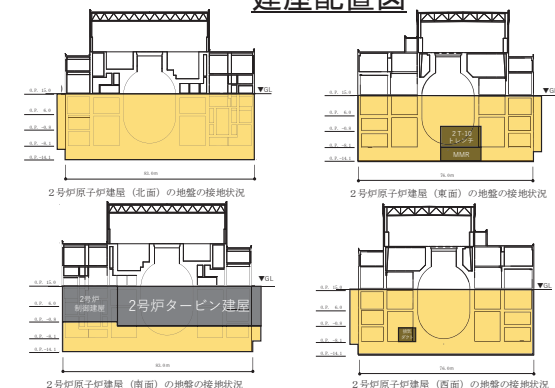
建屋	埋込み深さ (基礎底面位置)	建屋周辺の 地盤状況	(参考) 建屋に要求される機能 (2号炉用)
原子炉建屋	約29m (O.P.-14.1m)	3面接地	Sクラス(原子炉建屋原子炉棟) Sクラス設備の間接支持機能
制御建屋	約16m (O.P.-1.5m)	1~2面接地	Sクラス(中央制御室しゃへい壁) Sクラス設備の間接支持機能
タービン建屋	約17m (O.P.-2.2m)	2~3面接地	Bクラス(補助しゃへい壁) Bクラス設備(Sd機能維持設備含む)の間接支持機能 原子炉建屋、制御建屋へ波及的影響を与えないこと
補助ボイラー建屋	約7m (O.P.+8.0m)	2面接地	Cクラス設備の間接支持機能 制御建屋へ波及的影響を与えないこと
3号炉 海水熱交換器建屋	約27m (O.P.-12.5m)	4面接地	2号炉浸水防護施設の間接支持機能
1号炉 制御建屋	約15m (O.P.0m)	2面接地	2号炉制御建屋へ波及的影響を与えないこと

注: 黒字の建屋は2号炉

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。



建屋配置図



建屋周辺地盤の接地状況
(2号炉原子炉建屋)

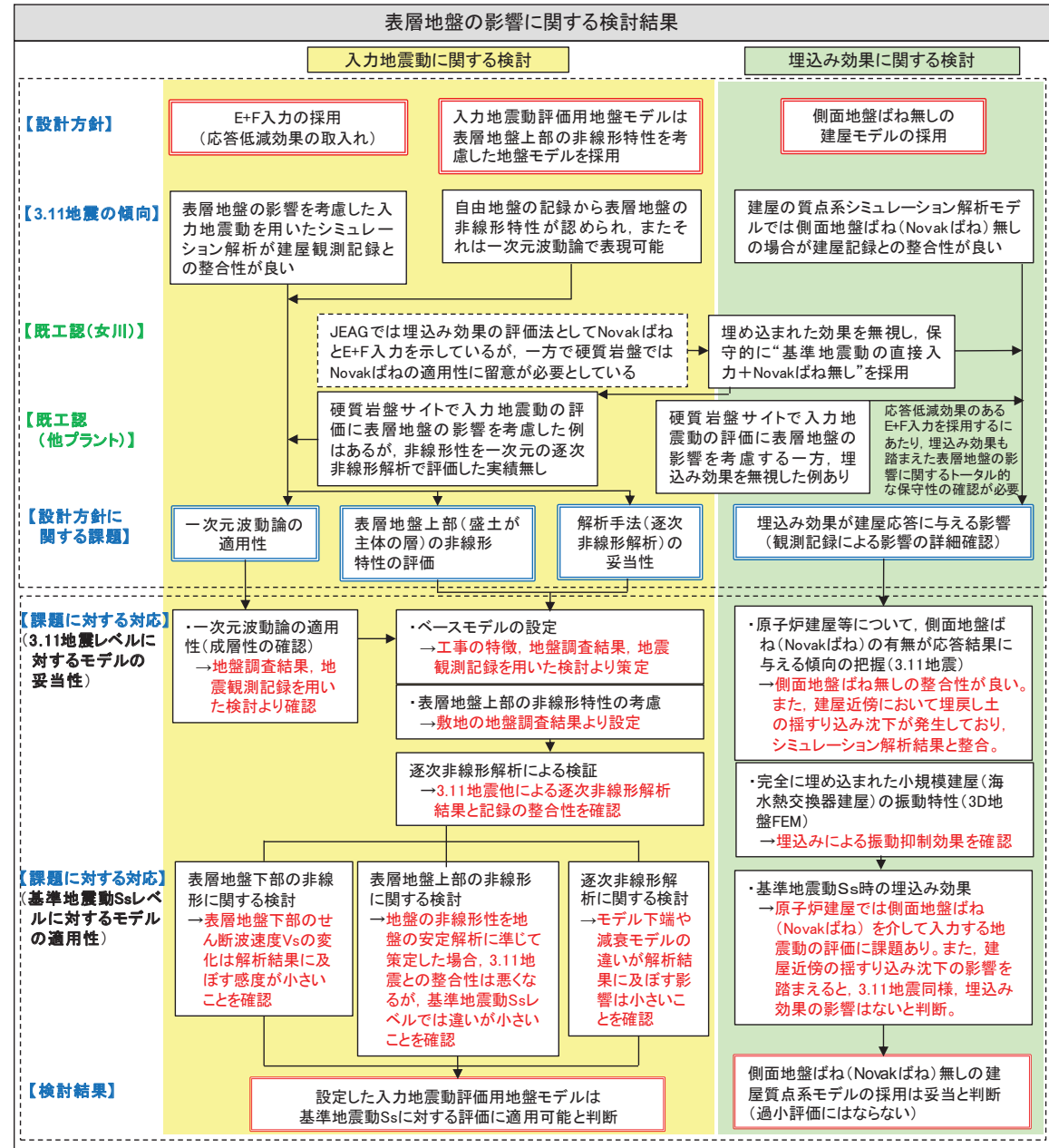
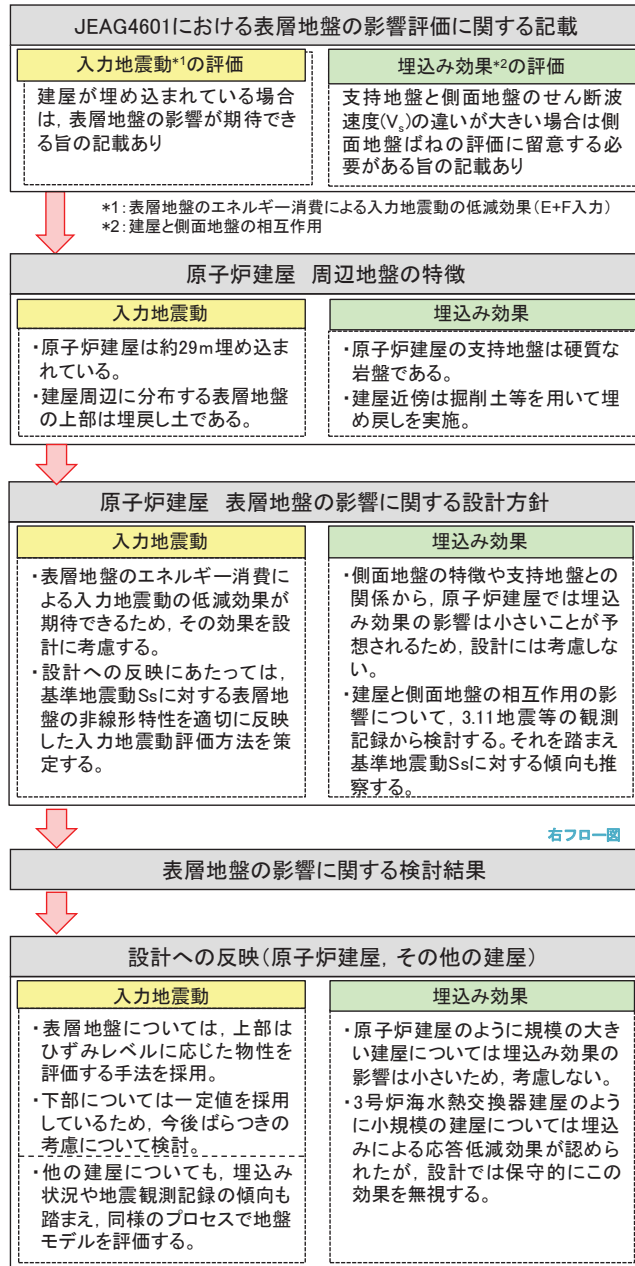
評価の特徴(手法の特徴, 施設評価への影響)

- 硬質岩盤における他サイトでの既工認で、支持地盤の特徴が入力地震動に与える影響を評価するために、表層地盤も含めた2次元地盤モデルにより算定した入力地震動を採用する一方、埋込み効果は考慮していない例がある。女川では、支持地盤については不整形等の顕著な影響は無いため、表層の影響を評価することのみを目的として入力地震動の評価を行う。埋込み効果(側面地盤ばね)については、施工の特徴等も踏まえ考慮しない方針である。
- 女川の既工認で採用した基準地震動の直接入力(2E入力)を表層地盤の影響を考慮したE+F入力に変更することによる応答低減効果が施設評価に与える影響は大きい。
- 入力地震動の算定方法として、表層地盤上部の非線形性を考慮した一次元地盤応答解析モデル(逐次非線形解析)を採用するが、他サイトも含め既工認で同手法を採用して入力地震動を評価した実績は無く、今回工認で初めてのケースとなる。

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	女川の今回工認と同じく 側面地盤ばねは「非考慮」、 入力地震動評価時の 表層地盤の影響は 「考慮」のケース有り	大 (応答低減効果)
入力地震動評価時 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	—	表層地盤上部の 非線形性を考慮した一次元地盤応答解析モデル(逐次非線形解析)	地震観測記録で 妥当性を検証	無 (他サイトは2次元FEMモデル(等価線形解析))	小

原子炉建屋 埋め込まれた建屋の周辺地盤の影響検討 検討概要



原子炉建屋 埋め込まれた建屋の周辺地盤の影響検討 検討のポイント

1. 入力地震動の評価(E+F入力)

(1) 一次元波動論の適用性

他プラントを含め、硬質岩盤における表層地盤の影響を考慮した入力地震動の算定に、一次元波動論を適用する例は女川が初めてのケースとなる。一方、女川では3.11地震を始め多くの地震の記録が得られており、地盤調査結果に加え、過去の記録を用いた検討からも一次元波動論の適用性について確認する。

(2) 表層地盤上部の非線形特性の評価、解析手法(逐次非線形解析)の妥当性

地盤調査結果に加え、過去の記録を用いた検討から入力地震動評価用地盤モデルの設定を行う。また、過去の様々な地震の記録を用いて設定した地盤モデルの妥当性の検証を行うと共に、3.11地震より更に表層地盤の非線形性が著しい基準地震動 S_s に対して感度解析等を行い、設定した表層地盤の地盤物性や解析手法(逐次非線形解析)の基準地震動 S_s に対する適用性について確認する。

2. 埋込み効果

(1) 埋込み効果が建屋応答に与える影響(観測記録による影響の詳細確認)

JEAGでは硬質岩盤ではNovakばねの適用性に留意が必要とされている。そのため、既工認では表層地盤の影響、すなわち入力地震動に与える影響と埋込み効果を見直し、 $“E+F入力 + Novakばね有り”$ の応答に比べ、 $“基準地震動の直接入力 + Novakばね無し”$ の応答が大きいことを確認した上で後者を採用している。この比較検討では、Novakばねが硬質岩盤に適用可能とみなすことが前提となっている。

今回工認では、E+F入力を採用するため、既工認において直接入力としていた裕度が減少する。従って硬質岩盤サイトにおける埋込み効果に関し、建屋応答に与える影響について、より詳細に確認する必要がある。具体的には、入力地震動評価の見直しが過小評価にならないことを確認するため、埋込み効果について3.11地震による影響や基準地震動 S_s 時の影響について確認する。

1. 全体概要

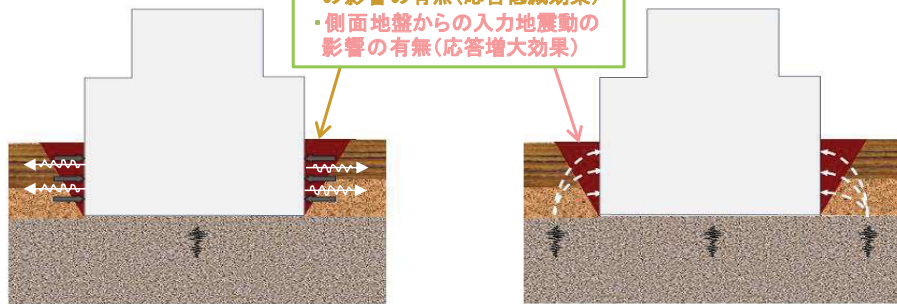
埋込み効果の影響(原子炉建屋)

- 既工認において基準地震動の直接入力を採用していたものを、今回工認では表層地盤の影響を考慮したE+F入力を採用するため、観測記録等を用い埋込み効果(建屋と側面地盤の相互作用)が建屋応答に与える影響についてより詳細に確認した。
 - 3.11地震による2号炉原子炉建屋のシミュレーション解析ではE+F入力を行い、かつ、側面地盤ばねによる埋込み効果を考慮しないモデルが、観測記録との整合性の良い結果を与えた。これはタービン建屋のシミュレーション解析でも同様の結果が得られており、**規模の大きい建屋においては、埋込み効果の影響は小さいと考えられる。**3.11地震時には、建屋の近傍において埋戻し土の揺すり込み沈下が発生しており、この事象は解析結果と整合するものである。
 - 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の質点系モデルによるシミュレーション解析では側面地盤ばね(Novakばね)を考慮した解析結果は観測記録よりもかなり過大な結果を与えるが、**観測記録からは埋込み効果による建屋の応答低減効果が確認された。**また、埋込み効果による建屋の応答低減効果は3次元地盤FEM解析でも確認された。
 - 基準地震動 S_s では3.11地震よりも更に建屋近傍の埋戻し土の非線形化が進むことになるため、3.11地震同様、埋込み効果の影響は小さいものになると判断される。
 - なお、原子炉建屋のモデルに側面地盤ばね(Novakばね)を設け基準地震動 S_s を入力した地震応答解析を実施したところ、側面地盤ばね無しモデルに比べ大きい応答結果を与える階が生じたため、その要因について分析した。その結果、モード図の違いや表層地盤から入力される地震動の大きさ等から、**硬質岩盤ではNovakばねを介して入力する地震動の評価に課題がある**ことが確認された。
- ⇒以上の結果を踏まえ、**今回工認では入力地震動の評価は見直すものの、埋込み効果については既工認同様、考慮しない。**

埋込み評価の課題

【課題②】強非線形時の

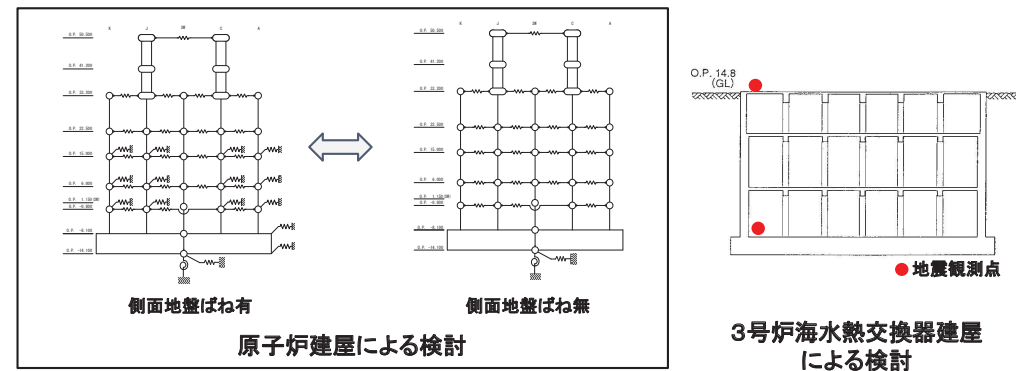
- ・側面地盤の拘束効果、逸散効果の影響の有無(応答低減効果)
- ・側面地盤からの入力地震動の影響の有無(応答増大効果)



【埋込み効果(拘束効果と逸散効果)】

【埋込み効果(側面地盤からの地震動入力)】

埋込み効果の影響因子



原子炉建屋による検討 (Novakばね有無の影響検討) (Novakばね有無, 3次元地盤FEM)

3号炉海水熱交換器建屋

3号炉海水熱交換器建屋による検討

E+F入力を考慮する既設建屋

- 2号炉原子炉建屋以外で、表層地盤の影響の有無を検討する対象建屋として選定した2号炉タービン建屋、3号炉海水熱交換器建屋について、3.11地震によるシミュレーション解析を行い、表層地盤の影響について2号炉原子炉建屋と同様の評価が適用可能かどうかについて確認した。
- その結果、2号炉タービン建屋、3号炉海水熱交換器建屋とも、2号炉原子炉建屋と同様に、“E+F入力 + 側面地盤ばね無し”モデルによるシミュレーション解析が、はざとり波を直接入力するよりも建屋の観測記録と整合することを確認した。なお、3号炉海水熱交換器建屋については埋込みによる建屋の振動抑制効果が顕著に認められたが、今回工認ではその影響を保守的に無視する。
- 以上のことから、2号炉原子炉建屋の他に、**2号炉タービン建屋、3号炉海水熱交換器建屋について、今回工認では表層地盤の入力低減効果を考慮**する一方で、埋込み効果は無視する。なお、入力地震動評価用の地盤モデルは、2号炉原子炉建屋の検討プロセスと同様の検討を踏まえ策定していく。

今回工認におけるE+F入力を考慮する既設建屋の選定

建屋	埋込み深さ (基礎底面位置)	建屋周辺の 地盤状況	はざとり波を用いた シミュレーション解析	入力地震動評価における 表層地盤の影響考慮 (E+F入力)	(参考) 建屋に要求される機能 (2号炉用)
原子炉建屋	約29m (O.P.-14.1m)	3面接地	2Eに比べ E+F入力がより整合	考慮 (既工認から変更)	Sクラス(原子炉建屋原子炉棟) Sクラス設備の間接支持機能
制御建屋	約16m (O.P.-1.5m)	1~2面接地	—	非考慮 (既工認と同じ)	Sクラス(中央制御室しゃへい壁) Sクラス設備の間接支持機能
タービン建屋	約17m (O.P.-2.2m)	2~3面接地	2Eに比べ E+F入力がより整合	考慮 (既工認から変更)	Bクラス(補助しゃへい壁) Bクラス設備(Sd機能維持設備含む)の間接支持 機能 原子炉建屋、制御建屋へ波及的影響を与えない こと
補助ボイラー建屋	約7m (O.P.+8.0m)	2面接地	—	非考慮 (既工認と同じ)	Cクラス設備の間接支持機能 制御建屋へ波及的影響を与えないこと
3号炉 海水熱交換器建屋	約27m (O.P.-12.5m)	4面接地	2Eに比べ E+F入力がより整合	考慮 (既工認から変更)	2号炉浸水防護施設の間接支持機能
1号炉 制御建屋	約15m (O.P.0m)	2面接地	—	非考慮 (既工認と同じ)	2号炉制御建屋へ波及的影響を与えないこと

注: 黒字の建屋は2号炉

1. 全体概要

2. 入力地震動に関する検討(原子炉建屋)

2.1 検討のポイント

2.2 東北地方太平洋沖地震における入力地震動の傾向

2.3 入力地震動評価用地盤モデルの設定

(1)設定概要

(2)敷地地盤の成層性

(3)地盤モデルの仮設定

(4)仮設定した地盤モデルに対する観測記録を用いた検討

(5)表層地盤上部の非線形性を考慮したモデル

2.4 入力地震動評価用地盤モデルの検証

2.5 基準地震動 S_s に対する適用性検討

(1)検討概要

(2)地盤モデルの適用性検討

(3)評価手法の適用性検討

2.6 弾性設計用 S_d に対する適用性検討

2.7 まとめ

3. 埋込み効果に関する検討(原子炉建屋)

3.1 検討のポイント

3.2 原子炉建屋の埋込み効果に関する検討

3.3 まとめ

4. E+F入力を考慮する既設建屋

5. 検討結果の概要と今後の検討について

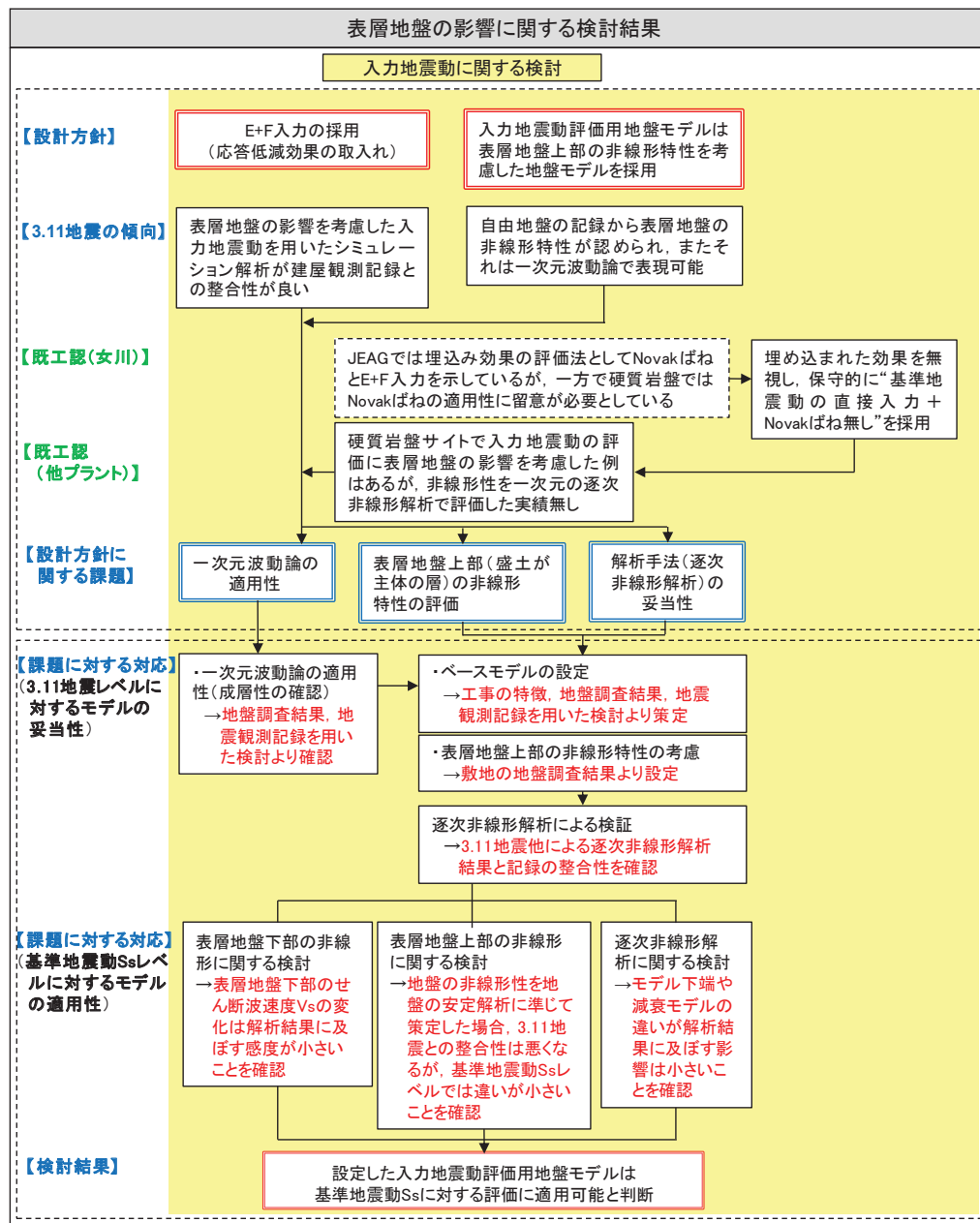
2.1 検討のポイント

1. 一次元波動論の適用性

他プラントを含め、硬質岩盤における表層地盤の影響を考慮した入力地震動の算定に、一次元波動論を適用する例は女川が初めてのケースとなる。一方、女川では3.11地震を始め多くの地震の記録が得られており、地盤調査結果に加え、過去の記録を用いた検討からも一次元波動論の適用性について確認する。

2. 表層地盤上部の非線形特性の評価、解析手法(逐次非線形解析)の妥当性

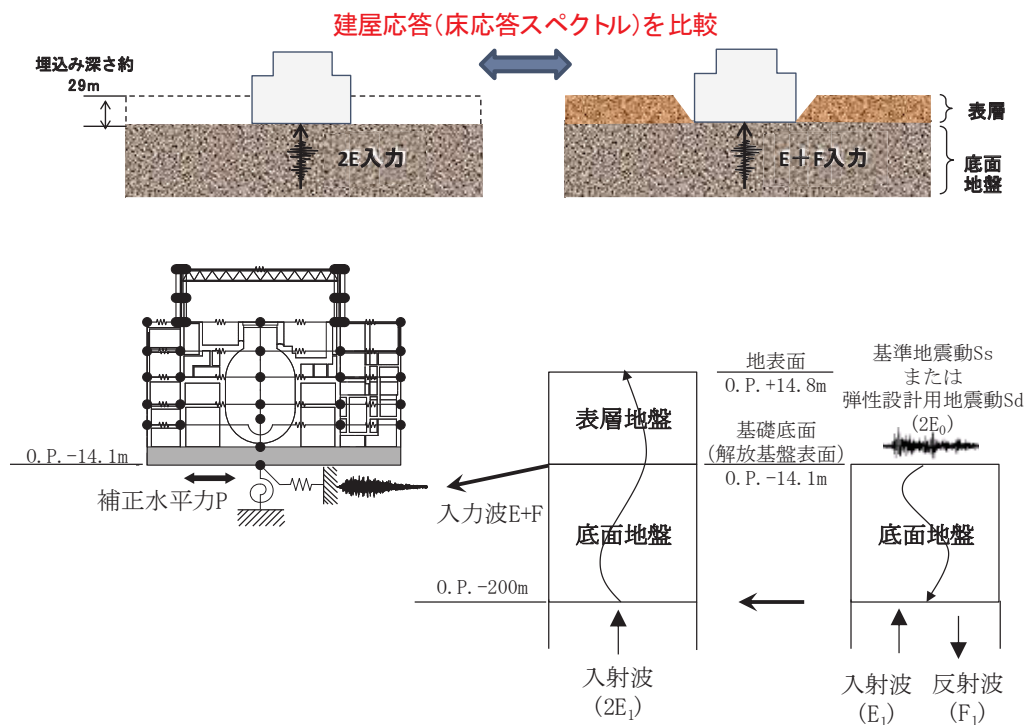
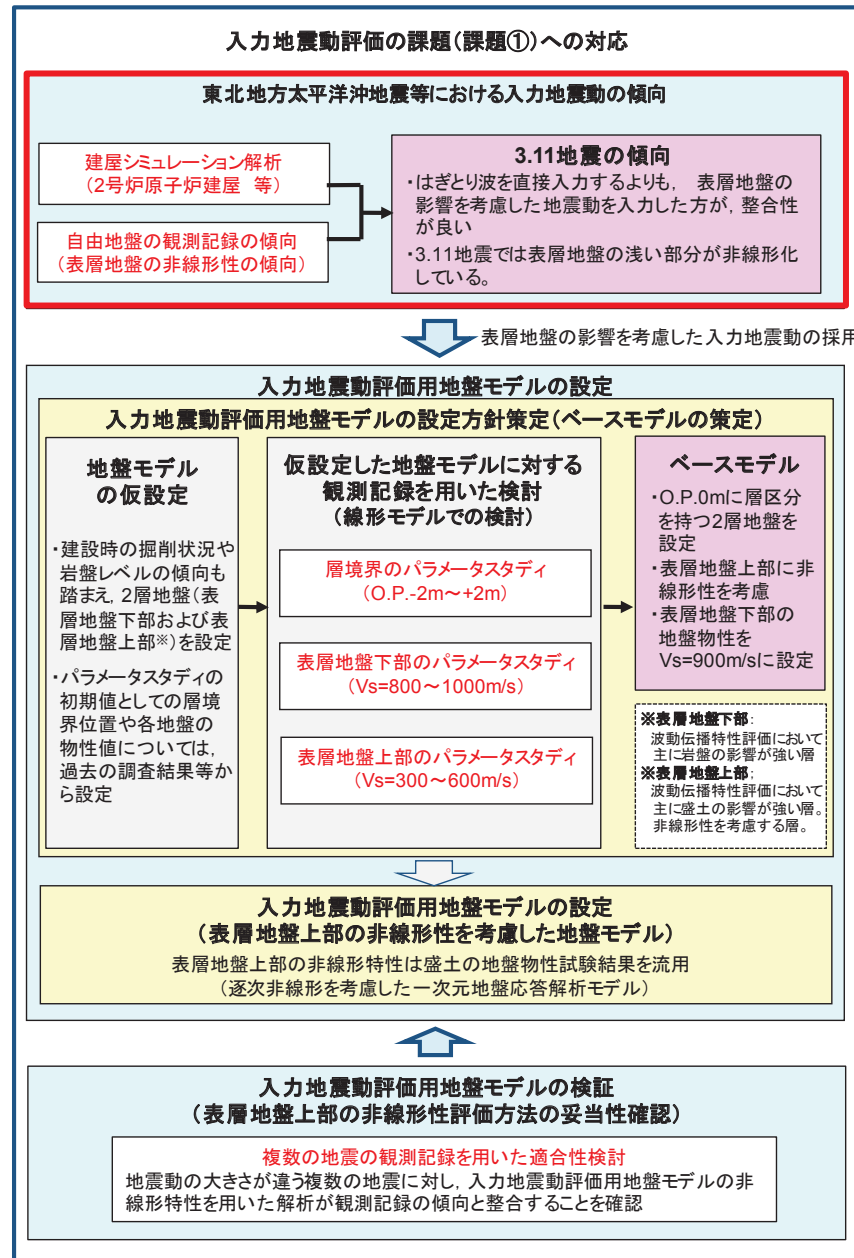
地盤調査結果に加え、過去の記録を用いた検討から入力地震動評価用地盤モデルの設定を行う。また、過去の様々な地震の記録を用いて設定した地盤モデルの妥当性の検証を行うと共に、3.11地震より更に表層地盤の非線形性が著しい基準地震動 S_s に対して感度解析等を行い、設定した表層地盤の地盤物性や解析手法(逐次非線形解析)の S_s に対する適用性について確認する。



2.2 東北地方太平洋沖地震における入力地震動の傾向

詳細については添付③参照

検討目的	①3.11地震における原子炉建屋の入力地震動の特徴の確認 ②表層地盤の非線形化の確認
検討方法	①はぎとり波を用いたシミュレーション解析(2E⇔E+F入力の比較) ②自由地盤の表層地盤観測点の記録の傾向(非線形化の確認)
検討結果	①2E入力よりもE+F入力の方が観測記録との整合性が良い。従って、入力地震動に対する表層地盤の影響が確認された。 ②表層地盤の非線形化を考慮することにより、大振幅レベルの地盤の伝達関数が評価可能であることを確認。 以上より、一次元波動論を用いた入力地震動地震動評価用地盤モデルを策定する。



はぎとり波を用いたシミュレーション解析(2EとE+F入力の比較)

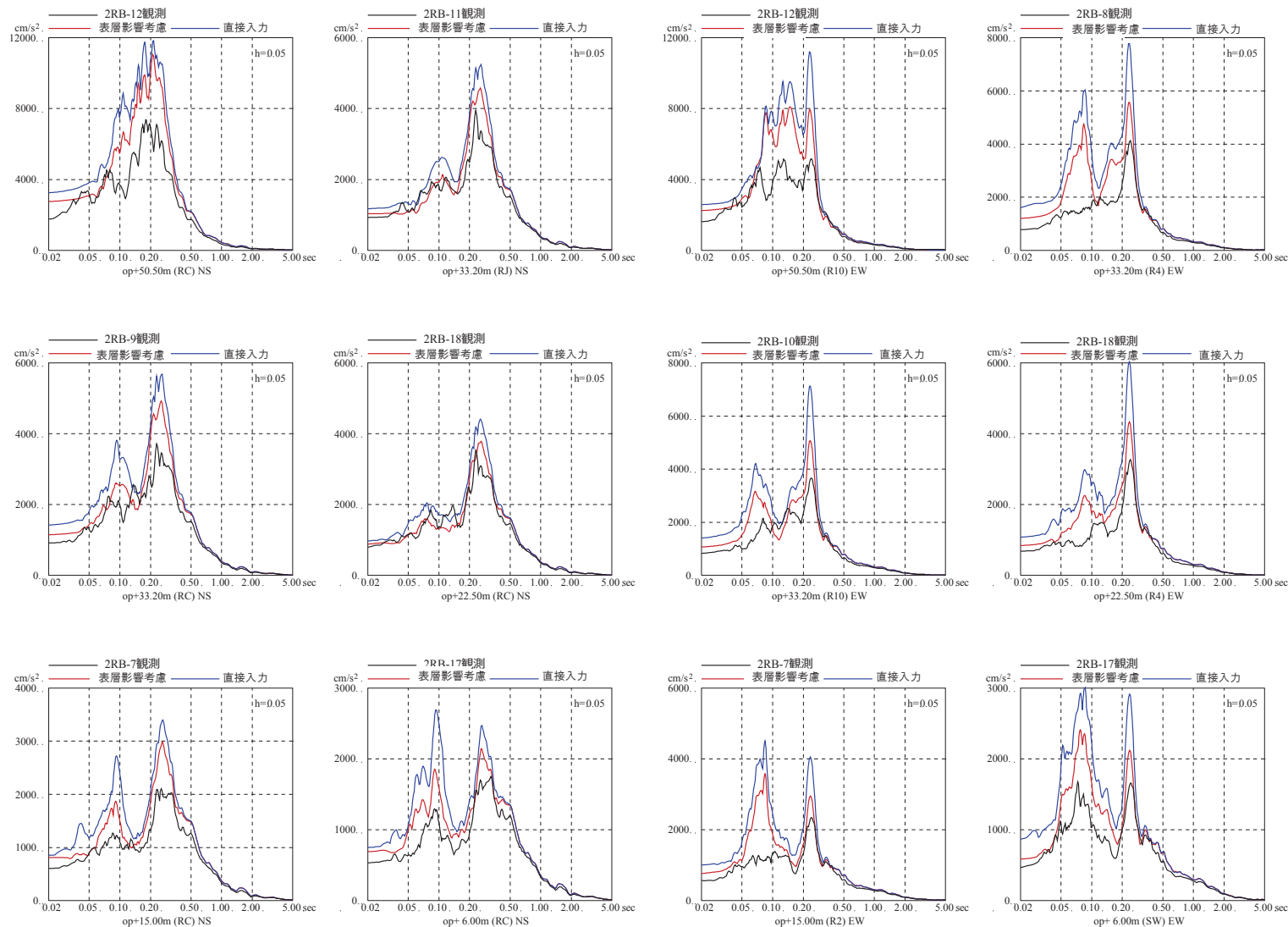
2.2 東北地方太平洋沖地震における入力地震動の傾向

2EとE+F応答の比較(3.11地震)

- 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した方(E+F入力、側面地盤ばね無し)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。



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



NS方向

EW方向

3.11地震のはぎとり波を用いた2E入力とE+F入力(側面地盤ばね無し)によるシミュレーション解析結果の比較

※E+F入力に用いた地盤モデルは今回工認用地盤モデルとしたもの

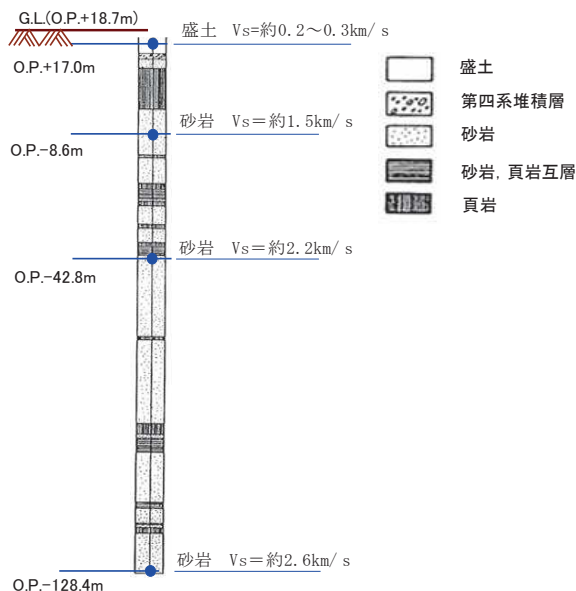
2.2 東北地方太平洋沖地震における入力地震動の傾向

3.11地震における自由地盤の伝達関数

・3.11地震の観測記録では、表層と各岩盤観測点と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。



岩盤と表層地盤の波動伝播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

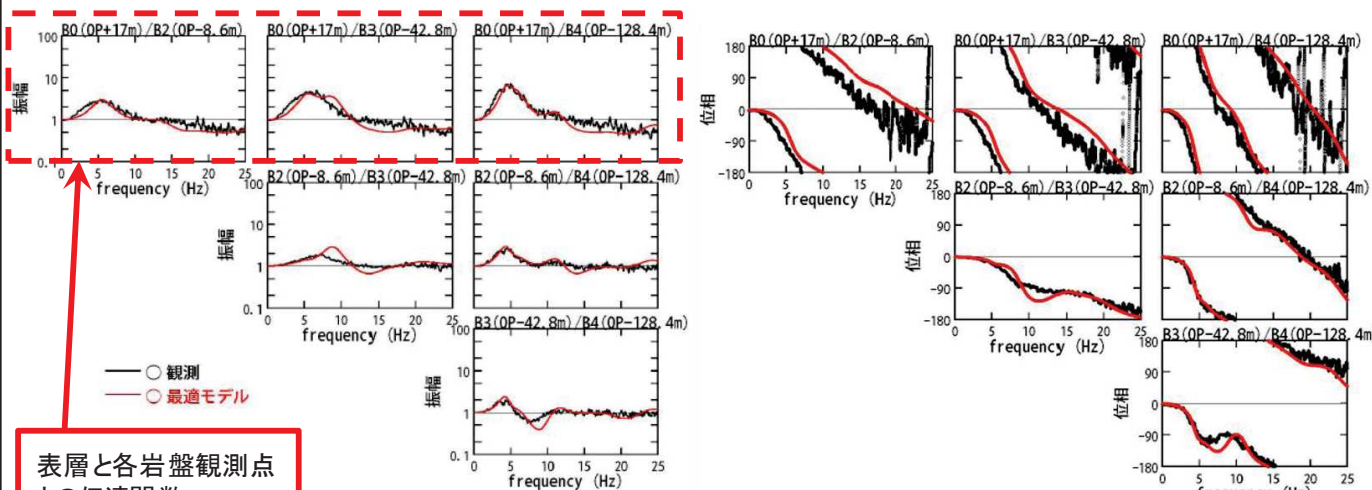


自由地盤地震観測点配置断面図

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地震の伝達関数との比較



水平方向

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

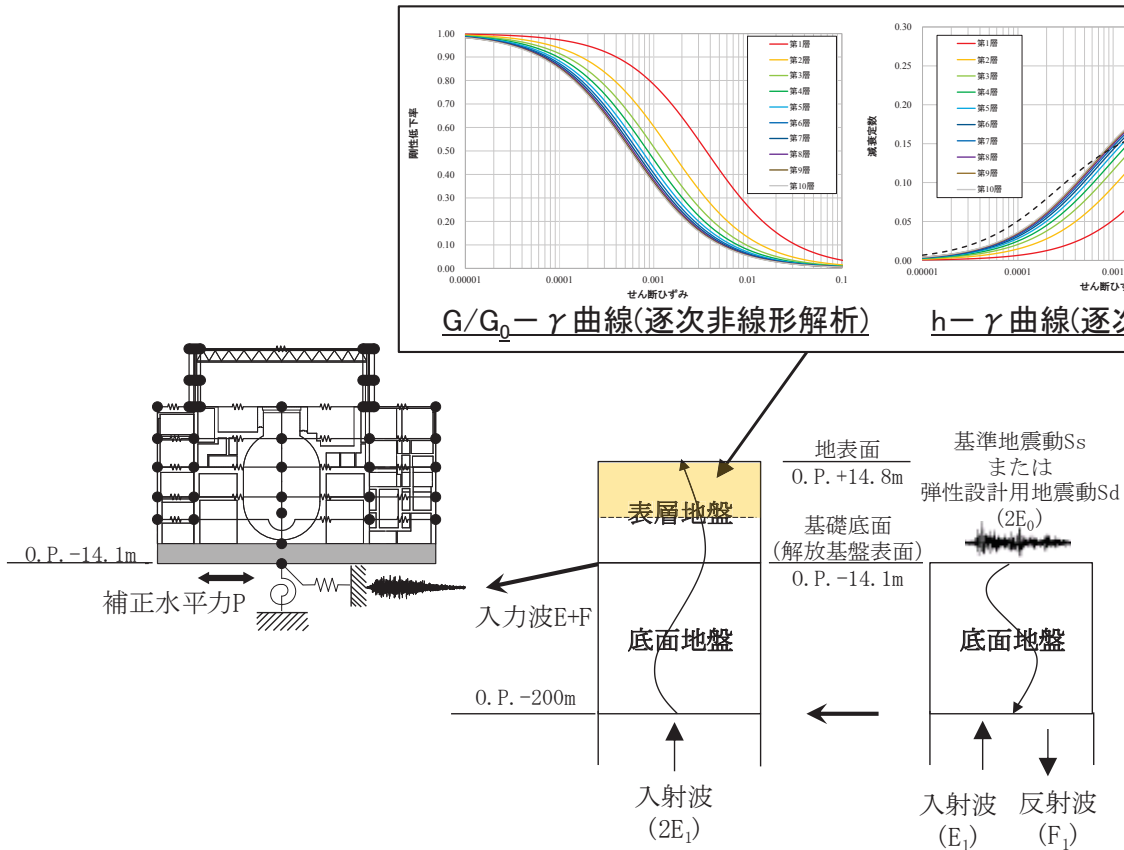


※「第128回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合資料2-2女川原子力発電所 敷地の地質・地質構造及び地盤の振動特性について(補足説明資料)」より抜粋・加筆

2.3 入力地震動評価用地盤モデルの設定

(1) 設定概要

- 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**することに見直す。
- 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、**表層地盤にはひずみレベルに応じた非線形特性を考慮**する。



今回工認での周辺地盤の影響評価

今回工認では建設の特徴や観測記録の傾向を考慮し、以下のとおり設定

入力地震動

表層地盤の影響を考慮する
E+F入力に変更

【参考検討】基準地震動 S_s を用いた感度解析(R/B)

- ・入力の違い(直接入力⇔E+F入力)が建屋応答に与える影響
- ・側面地盤ばね(Novakばね)の有無が建屋応答に与える影響

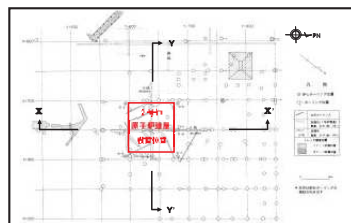
今回工認における地震応答解析モデルへの入力概要

2.3 入力地震動評価用地盤モデルの設定

詳細については添付②参照

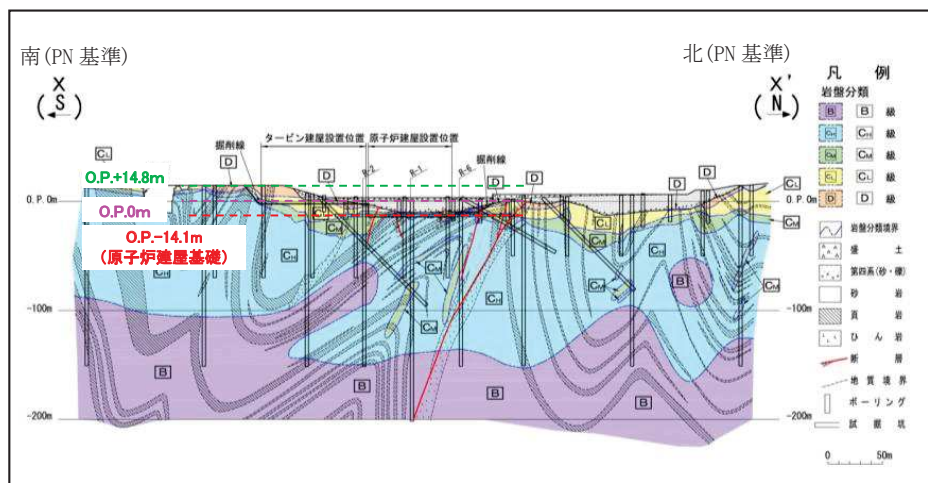
(2)敷地地盤の成層性

検討目的	地震基盤相当レベルから上部の地盤の振動特性評価では、一次元波動論で適切に評価可能かどうか確認する。
検討方法	敷地の地質調査結果から地盤の速度構造の傾向を確認する。また、敷地で得られた強震動記録によるシミュレーションから、一次元波動論の適用性等について検討する。さらに、中小地震のアレイ観測記録から、不整形性の有無について確認する。
検討結果	<ul style="list-style-type: none"> 敷地の地質構造を用いた検討では、速度構造が概ね水平成層と評価出来ることを確認した。 地下構造モデルを用いた検討では、強震動シミュレーション解析等から地震基盤相当レベルが適切に評価され、その上部地盤については、一次元波動論による評価結果が観測記録との整合が良いことを確認した。 敷地の複数の鉛直アレイで得られた地震観測記録により、到来方向の違いによる特異な増幅が無いこと(不整形性の影響が無いこと)を確認した。 以上の検討結果から、敷地地盤の振動特性は一次元波動論で評価可能と判断した。

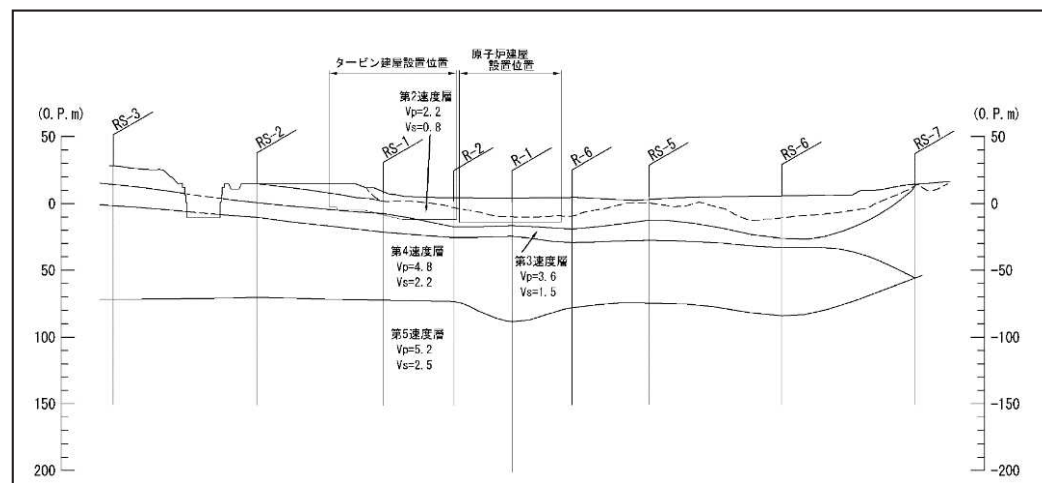


敷地の地質調査結果の概要

敷地地盤には中生界ジュラ系の砂岩、頁岩等が広く分布しており、ジュラ系の地質構造は褶曲構造が発達しているが、建屋を設置している岩盤上部は $V_s=1.5\text{km/s}$ 程度の岩であり、その下部は、 $V_s=2.2\text{km/s}$ 以上のほぼ一様な層が広く分布し、概ね水平成層である。



岩盤分類図 南北断面(X-X')



敷地の速度構造図 南北断面(X-X')

2. 入力地震動に関する検討(原子炉建屋)

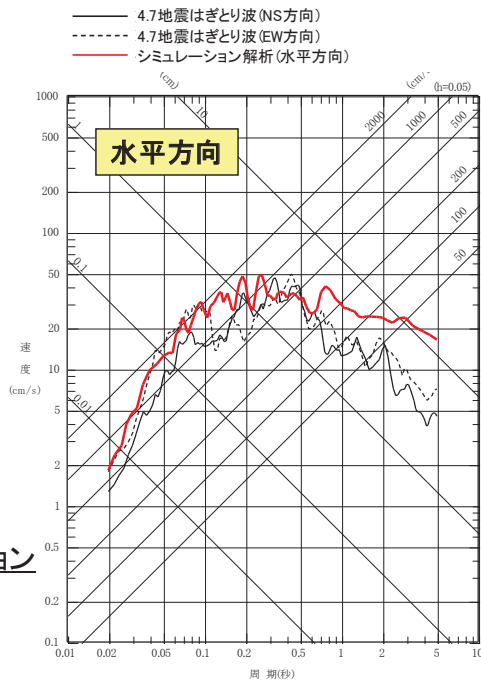
2.3 入力地震動評価用地盤モデルの設定

(2) 敷地地盤の成層性

強震動シミュレーション解析による検討

女川では過去に大きな地震による観測記録が得られており、解放基盤表面における基準地震動評価に資するために、これらの記録を用いた強震動シミュレーション解析を実施している。解析にあたっては、地震基盤相当位置から上部の岩盤部については全て共通した次元の地下構造モデルを用いている。これらの検討を通じ、地震基盤相当レベルの妥当性及び地震基盤から解放基盤表面レベルまでの地下構造モデルの妥当性を確認している。

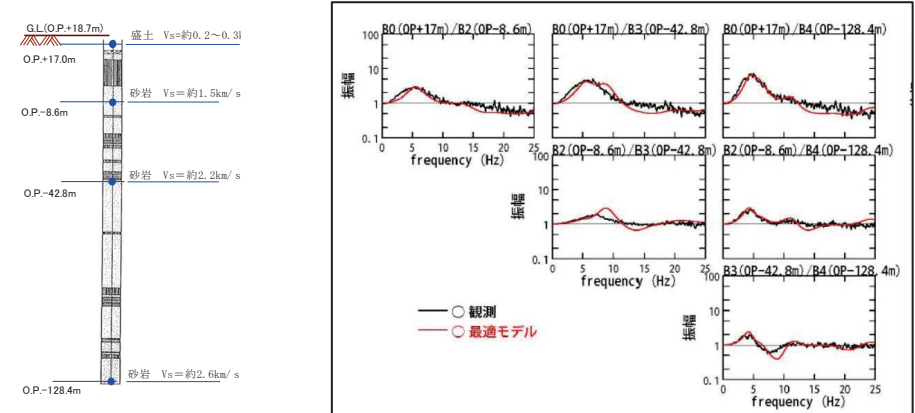
	地震名	地震規模
1	2003年宮城県沖の地震	M7.1
2	2005年宮城県沖の地震	M7.2
3	2011年東北地方太平洋沖地震	M9.0
4	2011年4月7日宮城県沖の地震	M7.2



強震動シミュレーション解析結果の例 (4.7地震)

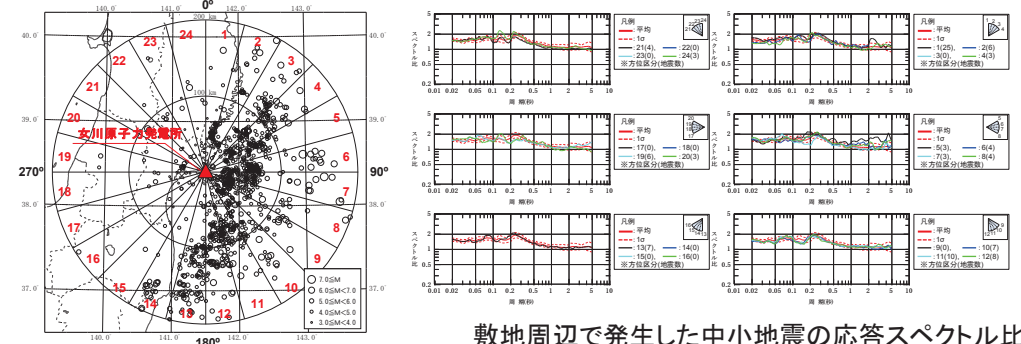
自由地盤鉛直アレイ記録の伝達関数

自由地盤では深さ方向4か所で地震観測を行っているが、観測記録から算定される伝達関数は次元波動論による伝達関数と整合する。



2号炉原子炉建屋直下鉛直アレイ記録の到来方向別のスペクトル比

中小地震の到来方向毎に評価した応答スペクトル比(岩盤上部/岩盤深部)が、到来方向によらず一定の傾向を示すことを確認し、不整形性の影響が無いことを確認している。



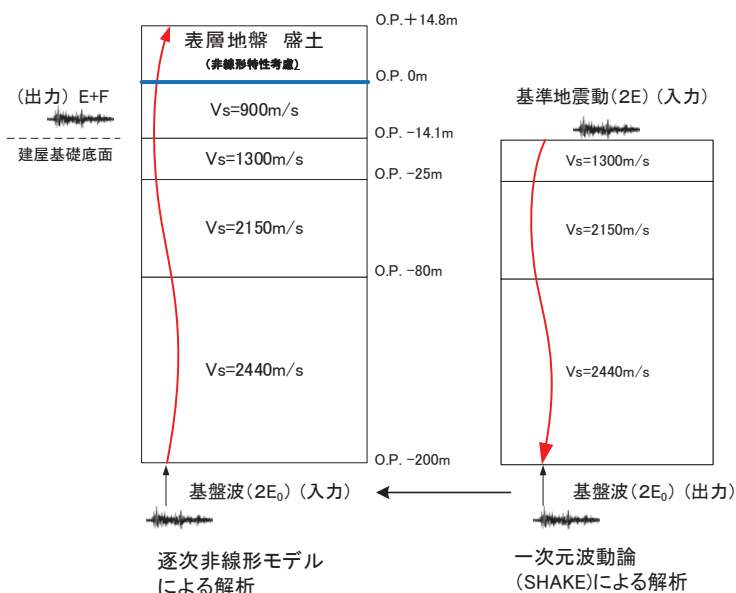
検討対象とした地震の震央分布図

敷地周辺で発生した中小地震の応答スペクトル比 (2号炉原子炉建屋直下)

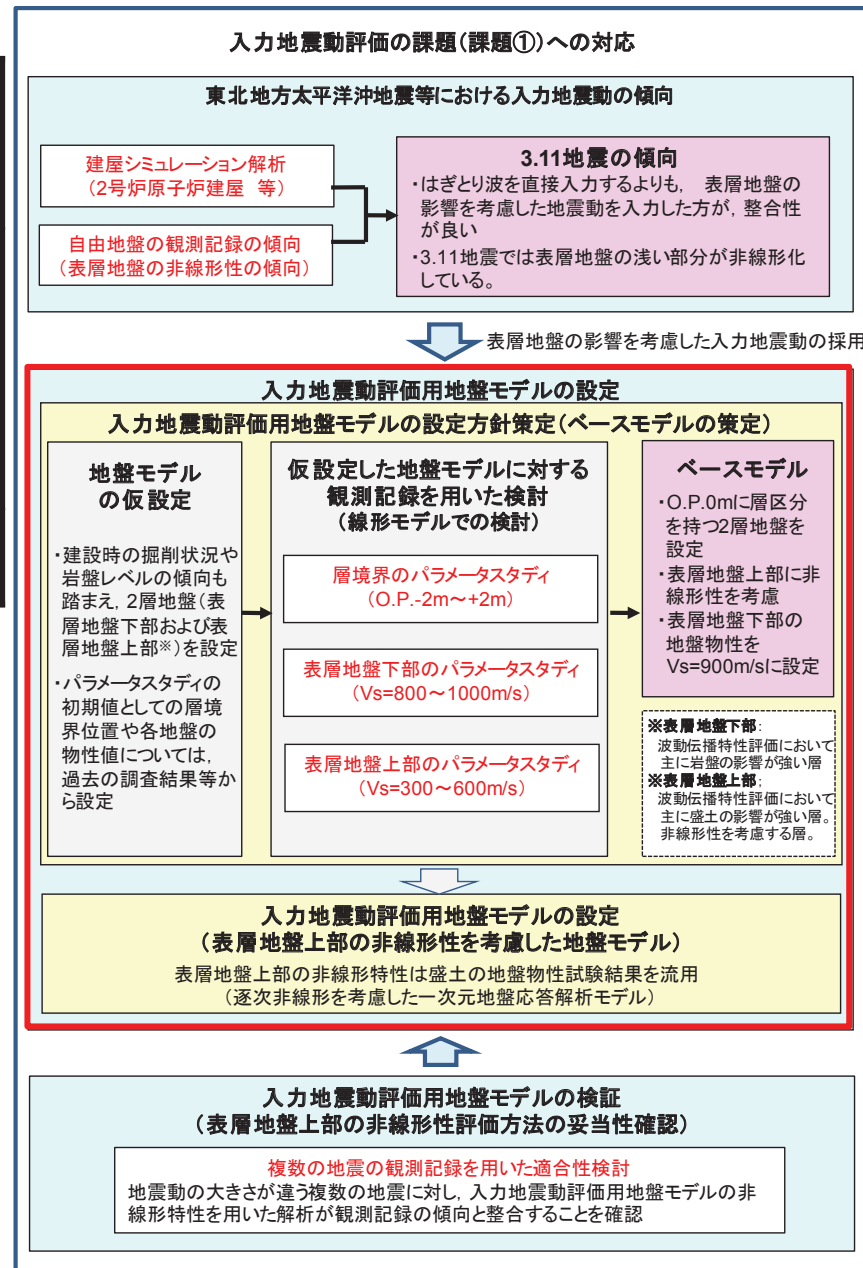
2.3 入力地震動評価用地盤モデルの設定

(3) 地盤モデルの仮設定

検討目的	<ul style="list-style-type: none"> 表層地盤の非線形特性を反映した地盤モデルの策定を行う。 なお、基準地震動Ssによる建屋への入力地震動の算定にあたっては、表層地盤上部の非線形化の程度が等価線形解析の適用範囲の目安値を超えるため、逐次非線形解析に適用する。
検討方法	<ul style="list-style-type: none"> 入力地震動評価用の地盤モデル策定にあたっては、建設時の掘削状況や岩盤レベルの傾向、各地盤の物性試験結果から地盤モデルの仮設定を行い、敷地で得られた観測記録を用いた等価線形解析によるパラメータスタディを行った上で、ベースモデル(初期モデル)を策定する。 ベースモデルの表層地盤上部の非線形特性については、盛土の地盤物性試験結果に基づき評価する。
検討結果	以上の手順で検討を行い、入力地震動評価用地盤モデル(表層地盤上部の非線形性を考慮した逐次非線形解析モデル)を策定した。



入力地震動評価用地盤モデルの概要



2.3 入力地震動評価用地盤モデルの設定

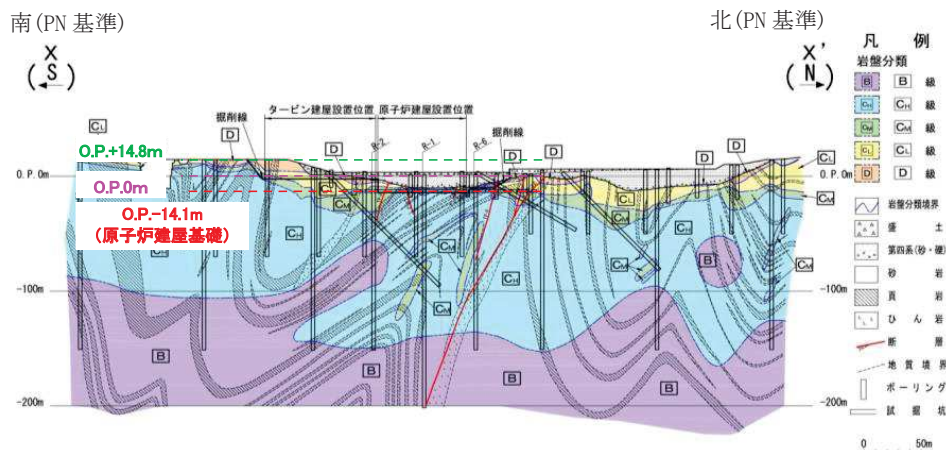
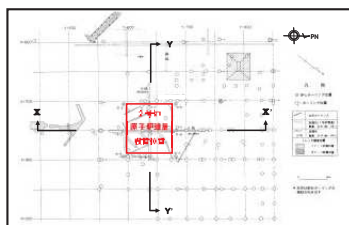
(3)地盤モデルの仮設定

【表層地盤上部と下部の層境界】

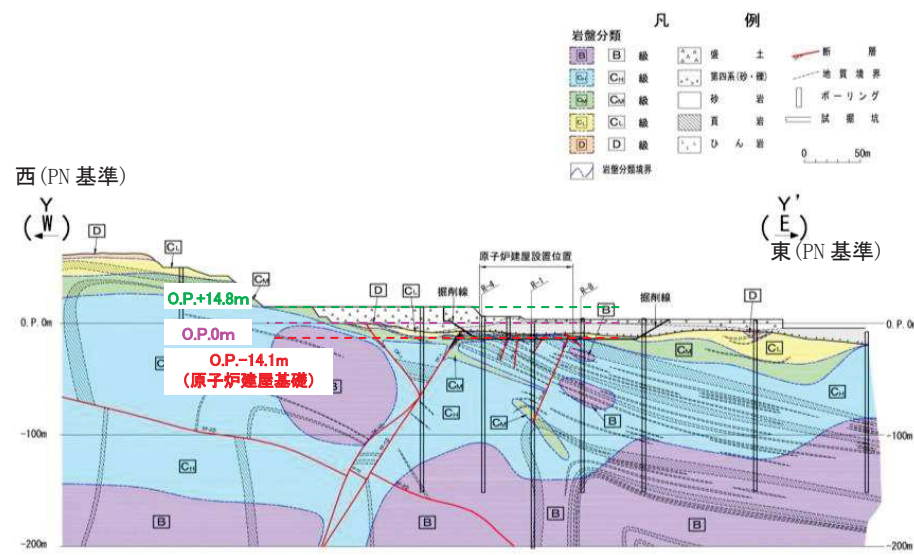
- ・2号炉建設時の地盤の掘削状況から、女川2号炉原子炉建屋周辺の地盤の大部分はO.P.0mまで表層地盤の掘削が行われており、竣工後は現在のG.L.面であるO.P.+14.8mまで埋め戻されている。
- ・O.P.0mより浅部地盤の建屋周辺状況は、北と東西が地質調査時とほぼ同じ状況で埋戻し土が分布している。一方、南は硬い岩盤となっている。
- 表層地盤については、波動伝播特性において主に岩盤の影響が支配的な「表層地盤下部」と、主に盛土の影響が支配的な「表層地盤上部」(非線形性を考慮する層)の2層に分割し、その層境界は、建設時の掘削状況および地質調査時のPS検層範囲と対応するO.P.0mに仮設定する。

【地盤物性】

- ・表層地盤下部のせん断波速度Vsは、自由地盤のはぎとり地盤モデルの傾向とPS検層結果から900 m/sに仮設定する。
- ・表層地盤上部は非線形性を考慮する層となるが、3.11地震検討用の値として、せん断波速度350m/sに仮設定する。



岩盤分類図 南北断面(X-X')



岩盤分類図 東西断面(Y-Y')

2. 入力地震動に関する検討(原子炉建屋)

2.3 入力地震動評価用地盤モデルの設定

(4) 仮設定した地盤モデルに対する観測記録を用いた検討

【3.11 地震に対するパラメータスタディ】

・仮設定した地盤モデルを基に、3.11地震記録を用いたパラメータスタディを実施。パラメータは以下の3要素。

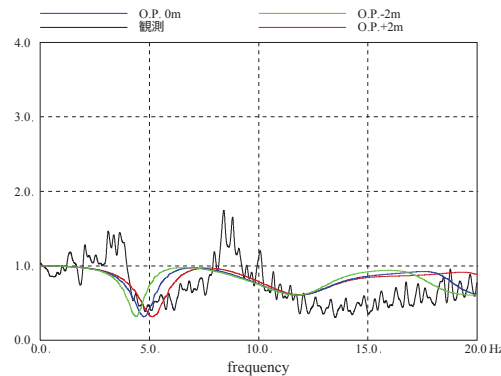
a. 層境界(O.P.-2m~+2m) b. 表層地盤下部の物性($V_s=800\sim 1000\text{m/s}$) c. 表層地盤上部の物性($V_s=300\sim 600\text{m/s}$)

・その結果、ベースモデルとして以下を設定。

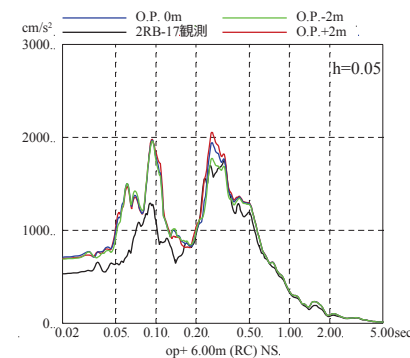
- ①表層地盤は、O.P.0mに層境界を持つ2層の地盤(表層地盤上部と表層地盤下部)。
- ②表層地盤下部の地盤物性を $V_s=900\text{m/s}$ に設定
- ③表層地盤上部には、別途非線形特性を考慮

層境界(O.P.-2m~+2m)の パラメータスタディ結果

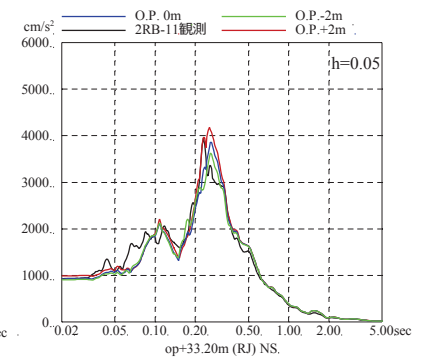
- ・伝達関数を比較した結果、表層地盤の1次周期(4~6Hz付近)の再現性は、**表層地盤の層境界をO.P.0mと設定した場合に観測記録との適合が良い。**
- ・床応答スペクトルの比較においては、伝達関数による検討程の大きな差異は見られないものの、建屋の1次周期(0.2~0.3秒)付近のピークに着目するとO.P.-2mの結果は観測記録に比べて小さい傾向にあり、O.P.+2mの結果は観測記録に比べて過大に評価する傾向となっている。O.P.0mが観測を平均的に表している。



はざとり波と地盤モデルにより算定した基礎版底面レベル(O.P.-14.1m)の地震動(E+F+P波、Pは補正水平力の時刻歴波形)の伝達関数(NS方向)



床応答スペクトルの例(NS方向)



【3.11 地震に対するパラメータスタディ】

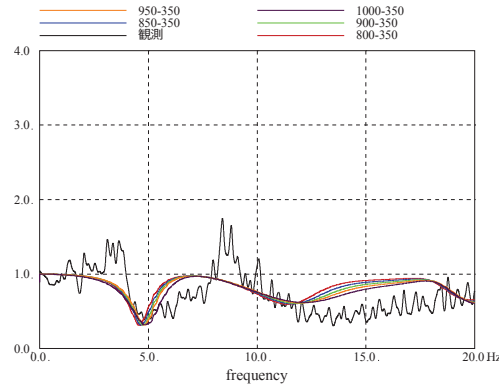
2. 入力地震動に関する検討(原子炉建屋)

2.3 入力地震動評価用地盤モデルの設定

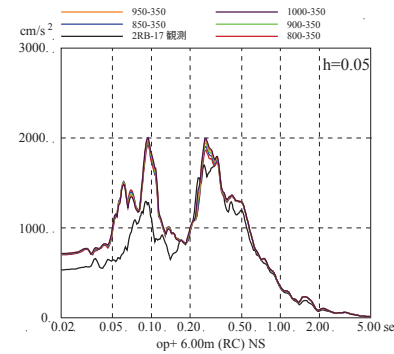
(4) 仮設定した地盤モデルに対する観測記録を用いた検討

表層地盤下部の物性 ($V_s=800\sim 1000\text{m/s}$)の パラメータスタディ結果

- ・伝達関数の検討結果から、伝達関数の谷の振動数(4~6Hz)は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。
- ・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い。



はざとり波と地盤モデルにより算定した基礎版底面レベル(O.P.-14.1m)の地震動(E+F+P波, Pは補正水平力の時刻歴波形)の伝達関数(NS方向)



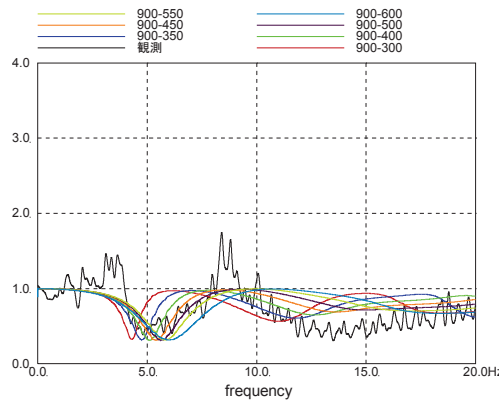
床応答スペクトルの例(NS方向)

【3.11 地震に対するパラメータスタディ】

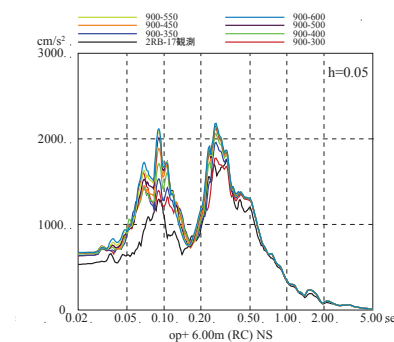
表層地盤上部の物性 ($V_s=300\sim 600\text{m/s}$)の パラメータスタディ結果

- ・伝達関数の検討結果から、3.11地震では、350m/sの場合が観測記録と良い対応を示す。また、感度が大きい。
- ・床応答スペクトルの比較においても、他の検討に比べ、その違いが大きい。

↓
表層地盤上部の非線形性評価は重要



はざとり波と地盤モデルにより算定した基礎版底面レベル(O.P.-14.1m)の地震動(E+F+P波, Pは補正水平力の時刻歴波形)の伝達関数(NS方向)



床応答スペクトルの例(NS方向)

【3.11 地震に対するパラメータスタディ】

2. 入力地震動に関する検討(原子炉建屋)

2.3 入力地震動評価用地盤モデルの設定

(5) 表層地盤上部の非線形性を考慮したモデル

表層地盤上部の非線形性を考慮したモデル

・女川2号炉原子炉建屋への入力地震動評価に用いる地盤モデルには、表層地盤上部にひずみ依存による非線形特性を考慮する。非線形特性については、盛土の地盤物性試験結果に基づき評価する。

女川2号炉原子炉建屋の入力地震動評価用地盤モデル

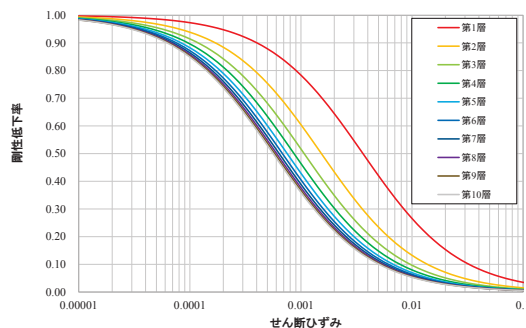
		地層レベル O.P.(m)	単位体積重量 γ (kN/m ³)	せん断波速度 Vs(m/s)	減衰定数 ^{※2} h(%)
表層地盤	上部	14.80	18.6	※1	3 ^{※3}
	下部	0.00	23.3	900 ^{※4}	3
底面地盤		-14.10	23.8	1300	3
		-25.00	24.6	2150	3
		-80.00	25.0	2440	3
		-200.0	25.0	2440	3

※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せん断剛性 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。

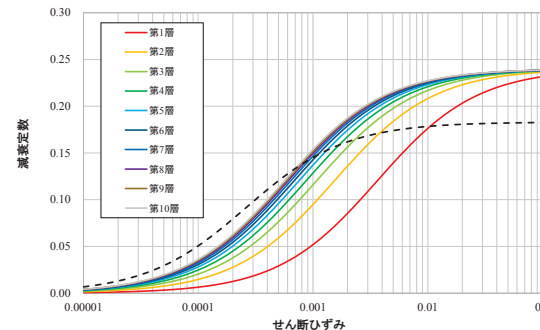
※2 レーリー減衰(4Hz, 12Hz)

※3 ひずみ依存による非線形特性を考慮する。

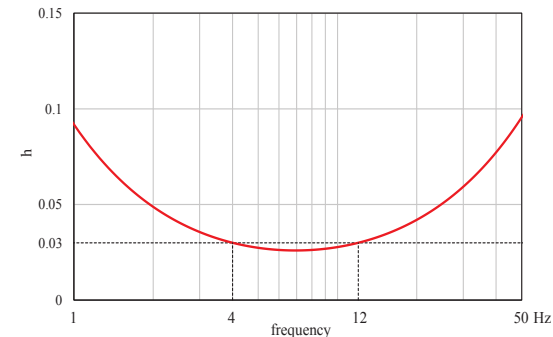
※4 PS検層結果と観測記録の分析より設定



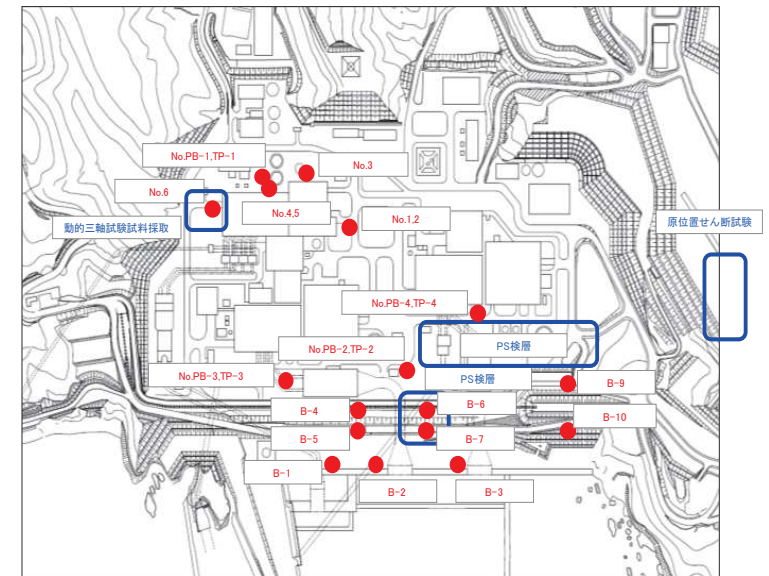
$G/G_0 - \gamma$ 曲線(逐次非線形解析)



$h - \gamma$ 曲線(逐次非線形解析)



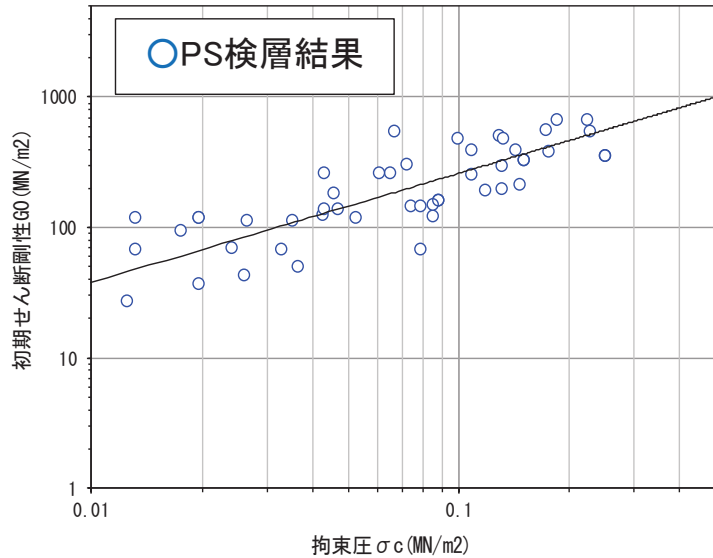
レーリー減衰(4Hz, 12Hz)



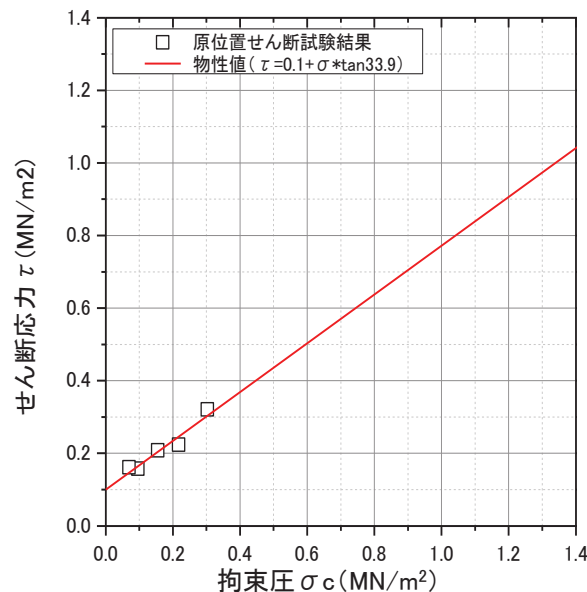
表層地盤上部(盛土)の物性値の調査位置図

2.3 入力地震動評価用地盤モデルの設定

(5) 表層地盤上部の非線形性を考慮したモデル



初期せん断剛性G₀と拘束圧σ_cの関係



せん断応力τと拘束圧σ_cの関係(地下水位以浅)

O.P.14.8m～O.P.0mの表層地盤上部には地盤調査結果に基づき、初期せん断剛性G₀、G/G₀－γ曲線およびh－γ曲線の非線形特性を設定した。

初期せん断剛性G₀は、PS検層結果により(1)式で設定する。

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

ここで、 σ_c [MN/m²] = $Z \times \rho_t \times \frac{2}{3}$ Z: 深度

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

G/G₀－γ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と初期せん断剛性G₀から、基準ひずみγ_mを算定し(2)式により求める。

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

ここで、 $\gamma_m = \frac{\tau_m}{G_0}$ $\tau_m = \tau_0 + \sigma_{md} \tan \phi$ τ_0 [N/mm²] = 0.1

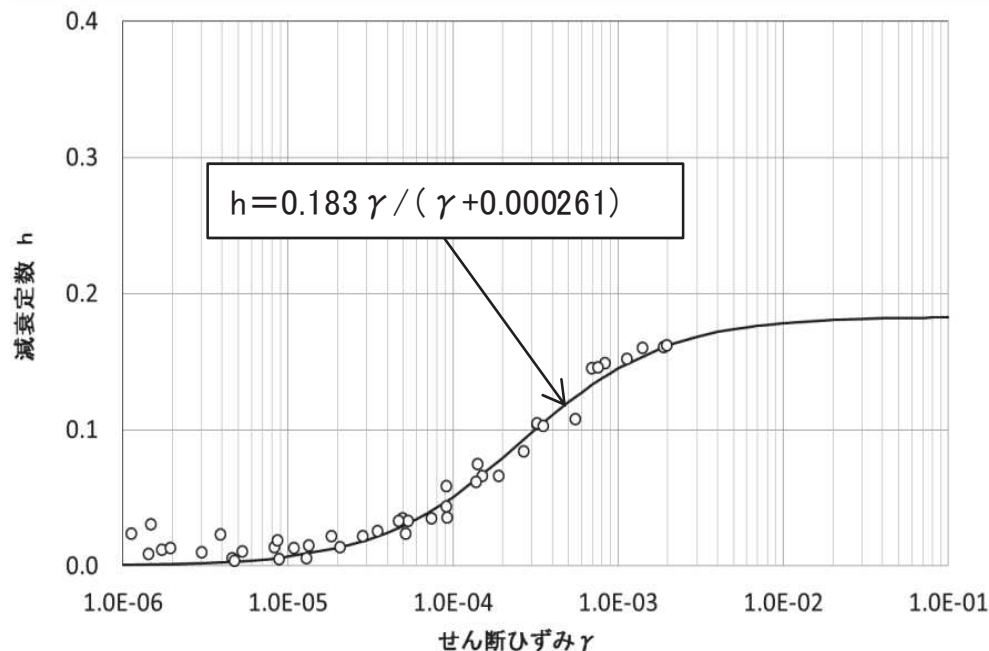
$$\phi [^\circ] = 33.9 \quad \sigma_{md} = 3/4 \times Z \times \rho_t \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

2.3 入力地震動評価用地盤モデルの設定

(5) 表層地盤上部の非線形性を考慮したモデル

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

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



$h-\gamma$ 曲線(繰返し三軸試験結果)

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 (°)		
盛土 地下水位以浅	0.1	33.9	$1787 \sigma_c^{0.84}$	$h=0.183 \gamma / (\gamma + 0.000261)$

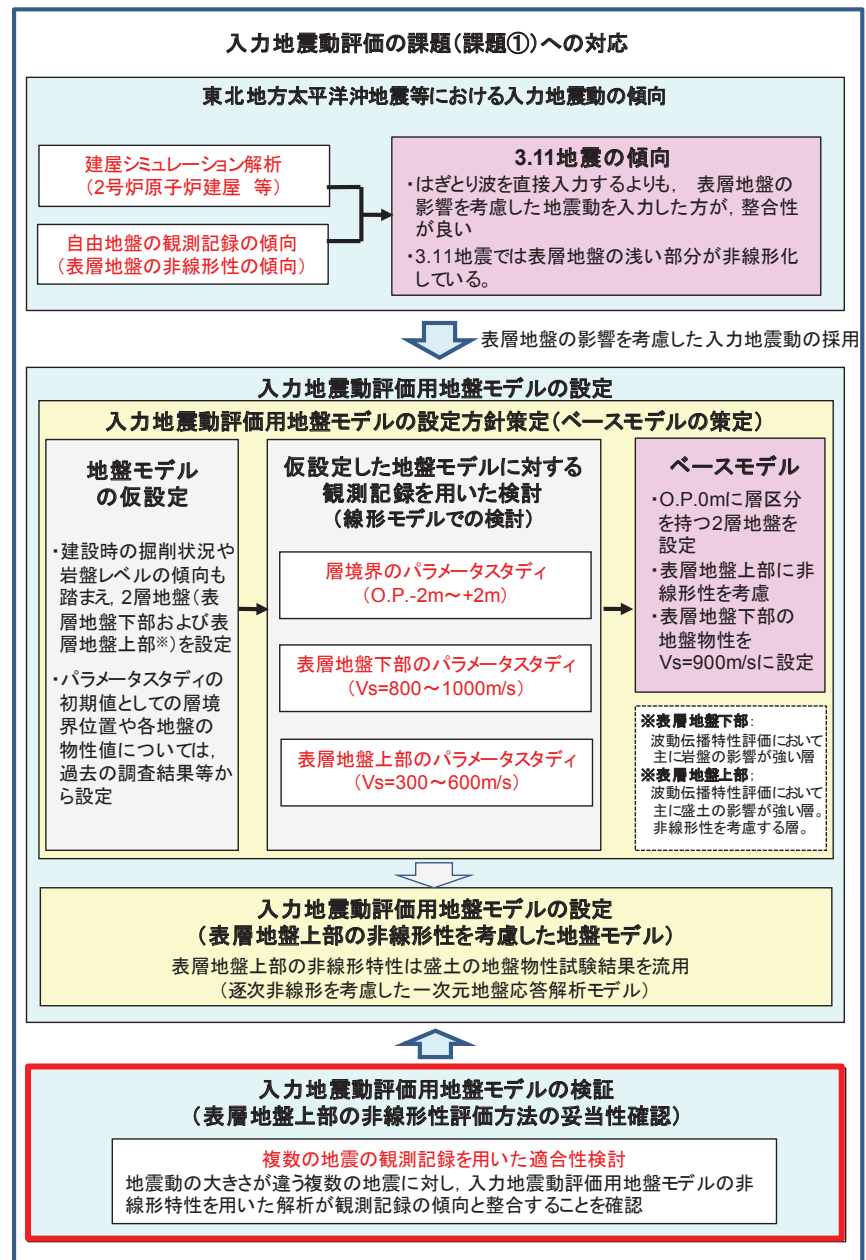
2.4 入力地震動評価用地盤モデルの検証

詳細については添付④参照

検討目的	<ul style="list-style-type: none"> 入力地震動評価用地盤モデルの表層地盤上部の非線形特性は地盤物性試験に基づき設定しているが、この非線形特性が過去の様々な地震動レベルの地震の観測記録と整合する結果を与えるかどうかを逐次非線形解析を用いて確認する。
検討方法	<ul style="list-style-type: none"> 地震動レベルの違う4地震を対象に、はぎとり波(2E)と基礎版底面レベルの入力地震動(E+F+P)の伝達関数について計算と記録の比較を行う。また、地震動の大きい3.11地震等については建屋の床応答スペクトルの比較を行う。
検討結果	<ul style="list-style-type: none"> 伝達関数については、いずれの地震に対しても、観測記録と整合した結果を与えている。 3.11地震等に対し、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、観測記録に対して基礎版上観測記録入力によるシミュレーション解析と同等の適合度となっている。 <p>以上のことから、策定した入力地震動評価用地盤モデルは3.11地震等の過去の地震に対し、適用可能であることを確認した。</p>

検討対象地震

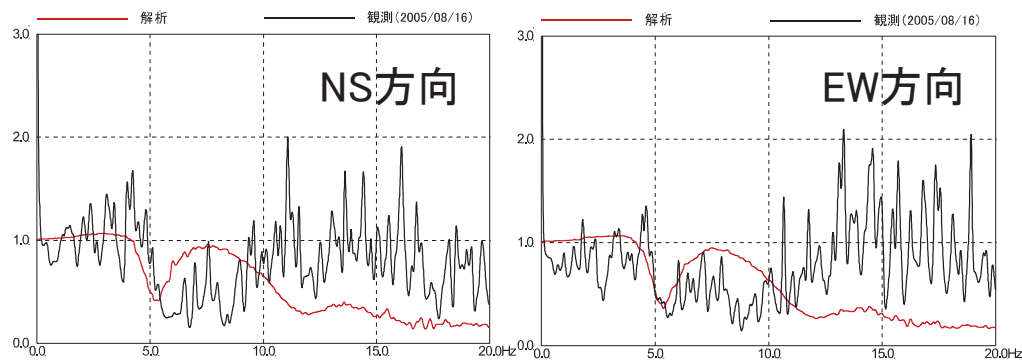
地震	M	震源地	自由地盤岩盤上部観測点の最大加速度 (cm/s ²)		
			NS方向	EW方向	
1	2005/8/16 11:46	7.2	宮城県東方沖	233	221
2	2011/3/9 11:45	7.3	宮城県東方はるか沖	30	12
3	2011/3/11 14:46	9.0	宮城県東方はるか沖	467	421
4	2011/4/7 23:32	7.2	宮城県東方沖	321	396



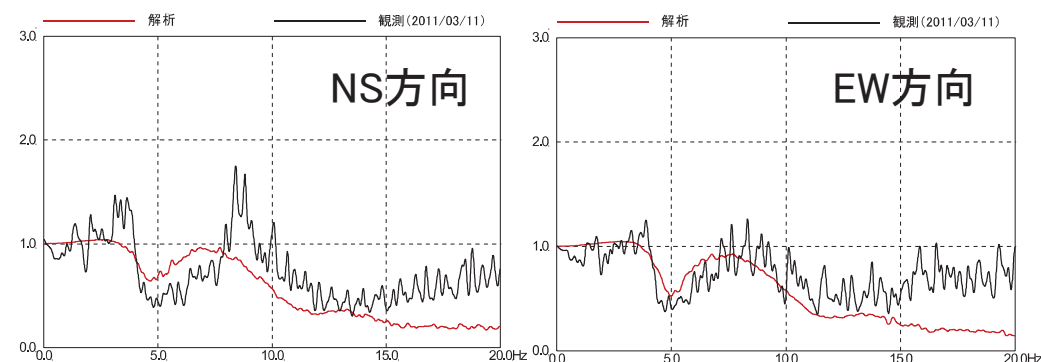
2.4 入力地震動評価用地盤モデルの検証

4地震の伝達関数の比較

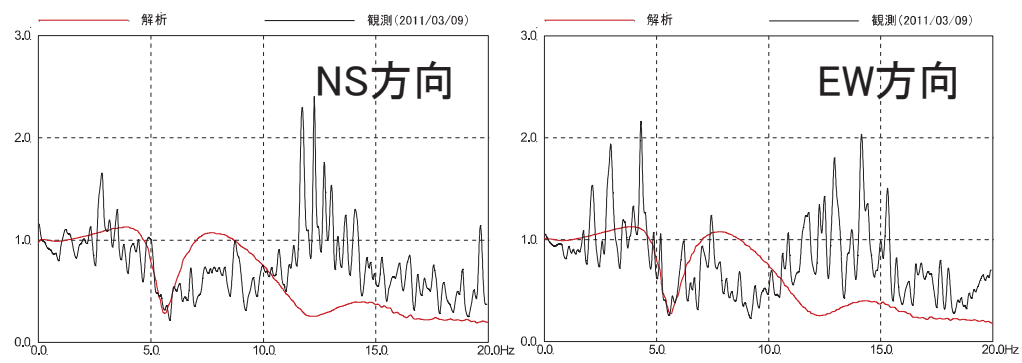
検討に用いた代表地震に対する伝達関数の比較の結果、いずれの地震についても伝達関数を概ね再現している。



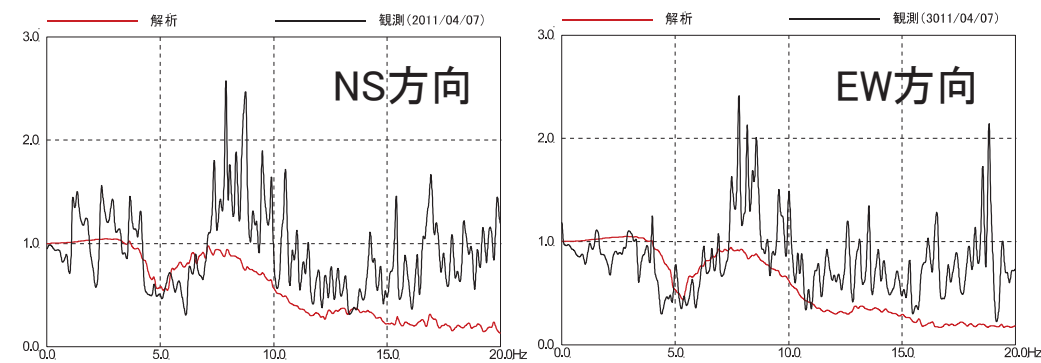
2005/8/16 地震



東北地方太平洋沖地震



2011/3/9 地震



2011/4/7 地震

伝達関数の比較

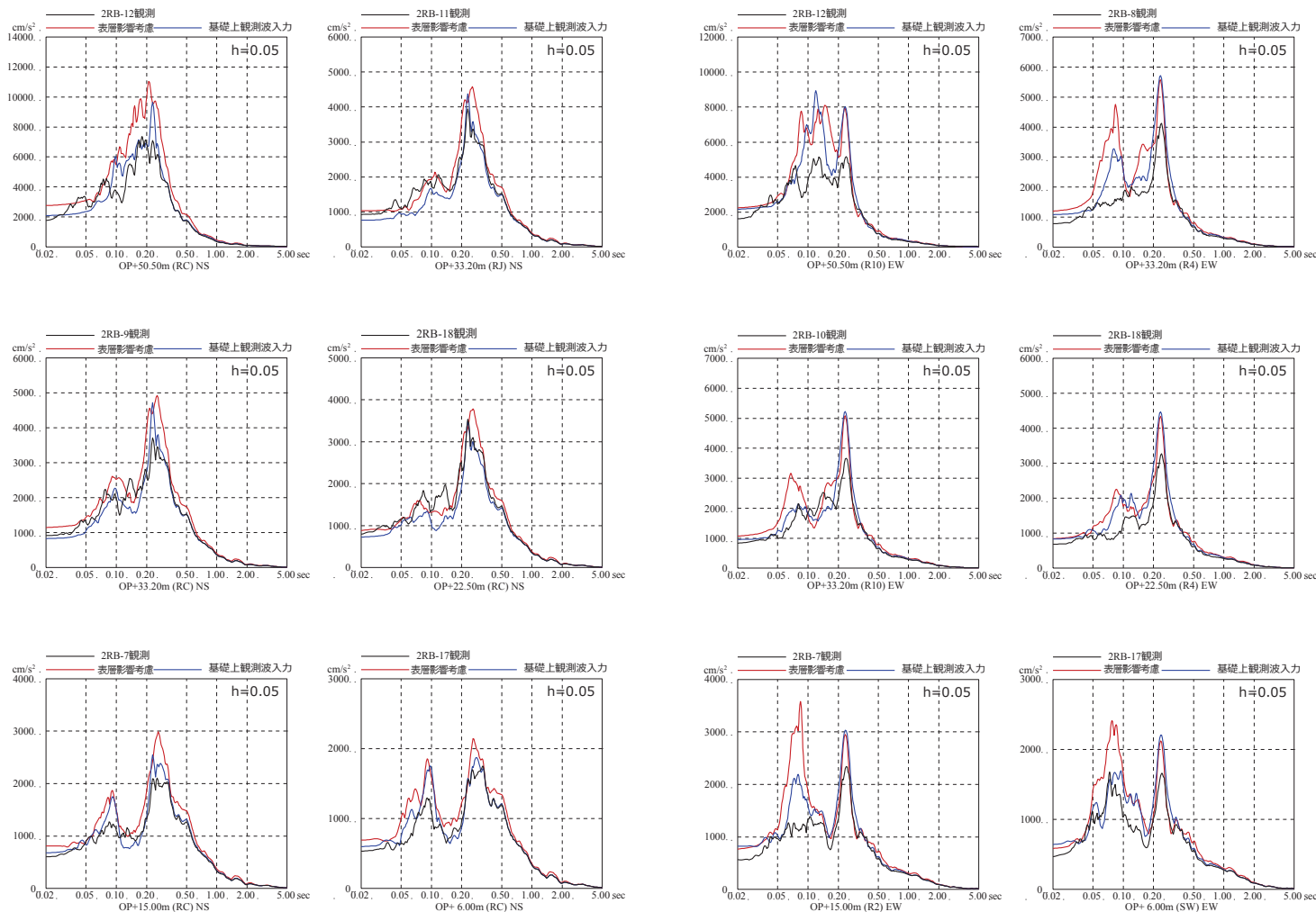
(基礎版上観測記録／はぎとり波)

(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)

2.4 入力地震動評価用地盤モデルの検証

3.11地震での床応答スペクトルの比較

3.11地震に対し、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、観測記録に対して基礎版上観測記録入力によるシミュレーション解析と同等の適合度となっている。



3.11地震NS方向(減衰5%)

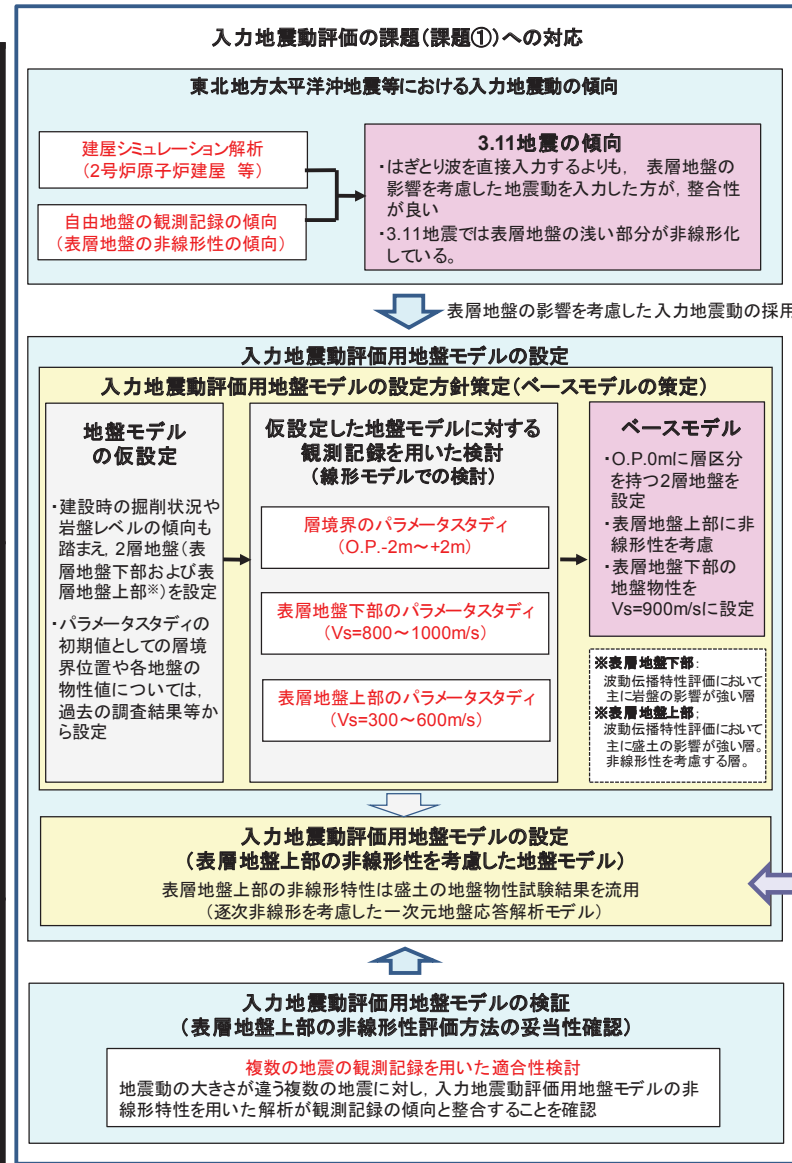
3.11地震EW方向(減衰5%)

2.5 基準地震動Ssに対する適用性検討

詳細については添付⑤参照

(1) 検討概要

<p>検討目的</p>	<p>【地盤モデルに関する検討】</p> <ul style="list-style-type: none"> 表層地盤上部の非線形特性は地盤の物性試験結果を基に評価しているが、それに加え、3.11地震等の様々な記録を用い、手法の妥当性の検証を行っている。しかし、基準地震動Ssでは過去の地震よりもさらにひずみが進んだ状態となることから、ひずみの影響を受ける表層地盤の非線形特性について、基準地震動Ssによる感度解析を実施し、基準地震動Ssに対する地盤モデルの適用性について確認する。 <p>【評価手法に関する検討】</p> <ul style="list-style-type: none"> 既往プラントでは、入力地震動評価に逐次非線形解析を採用した実績が無いことも踏まえ、評価手法の設定条件等の違いが基準地震動Ssの応答結果に与える感度解析を実施し、影響について確認する。
<p>検討方法</p>	<p>【地盤モデルに関する検討】</p> <ul style="list-style-type: none"> 設定した地盤モデルにおいて振幅の影響を受けるパラメータは、表層地盤下部のせん断波速度Vsおよび表層地盤上部の非線形特性であることから、表層地盤下部のせん断波速度Vsの低下、表層地盤上部の非線形特性の評価方法の違いによるさらなる低下が応答結果に与える影響を確認する。 <p>【評価手法に関する検討】</p> <ul style="list-style-type: none"> 地盤減衰モデルの違い、地盤モデルの下端深さの違いが応答結果に与える影響を確認する。
<p>検討結果</p>	<p>【地盤モデルに関する検討】</p> <ul style="list-style-type: none"> 表層地盤下部の物性の違いの感度は小さいこと、また、表層地盤上部の物性に関し、3.11地震に対しては採用した非線形特性を用いた結果の方が整合性が良いこと、一方非線形レベルの大きい基準地震動Ssではあまり違いが生じないことを確認した。 <p>【評価手法に関する検討】</p> <ul style="list-style-type: none"> 地盤減衰モデルの検討では、3.11地震シミュレーション解析に用いた手法が保守的な結果を与えることを確認。地盤モデルの下端深さの違いの影響については感度が小さいことを確認した。以上のことから、ひずみレベルの進んだ状態となる基準地震動Ssに対しても、本手法は適用可能である。



基準地震動Ssに対する適用性検討

【地盤モデルに関する検証】

- ①表層地盤下部のせん断波速度を低下させた場合の影響
- ②表層地盤上部の初期物性に地盤の安定性解析と同様の評価を採用した場合の影響

【評価手法に関する検討】

- ③地盤減衰モデル(レーリー減衰)を内部粘性減衰に変えた場合の影響
- ④地盤モデルの下端深さの違いの影響

2.5 基準地震動Ssに対する適用性検討

(1) 検討概要

【地盤モデルに関する検討】

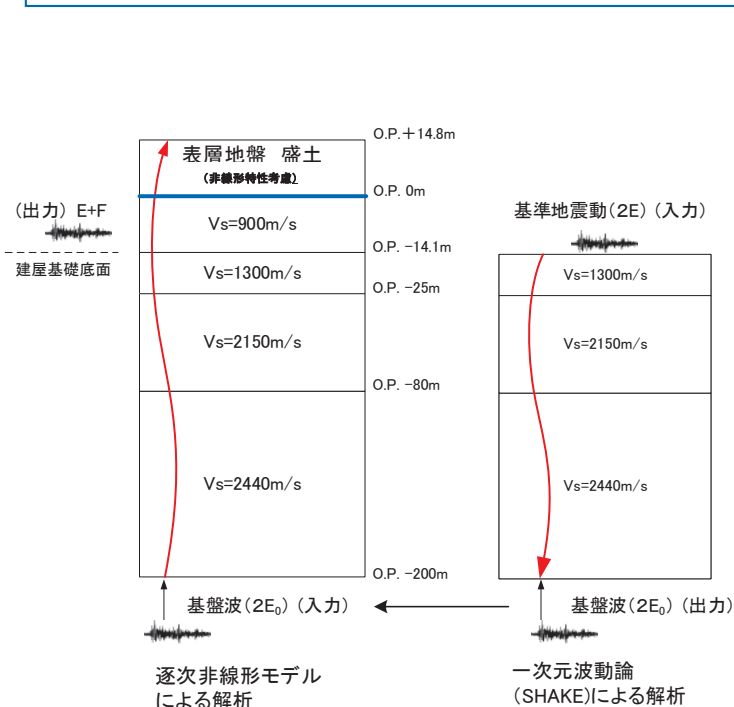
➢ 入力地震動評価用地盤モデルは、3.11地震等の様々な記録を用い、手法の妥当性の検証を行っているが、**基準地震動Ssでは過去の地震よりもさらにひずみが進んだ状態となる**ことから、基準地震動Ssに対する地盤モデルの適用性について確認する。

➢ 3.11地震等よりひずみが進んだ状態では、表層地盤下部(岩盤の影響が強いが一部盛土)のせん断波速度Vsがさらに低下することが考えられることから感度解析を実施し影響について確認する。また、参考に表層地盤上部に設定している非線形特性の評価方法の違いにより生じる影響についても感度を検証する。

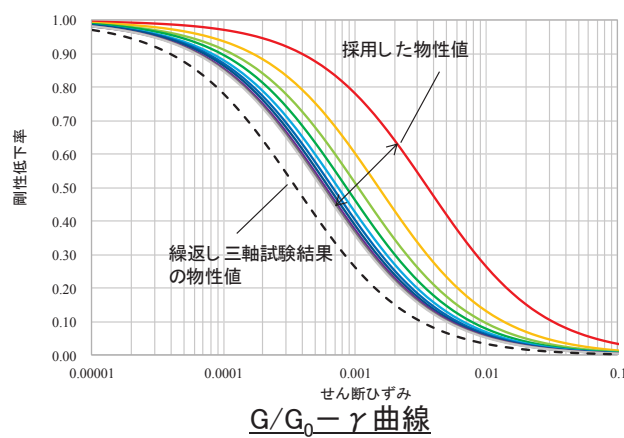
【評価手法に関する検討】

➢ 入力地震動評価に逐次非線形解析を採用した実績が無いことも踏まえ、評価手法の設定条件の違いが建屋応答に与える影響を感度解析を実施し、基準地震動Ssの入力地震動評価への適用性を確認する。

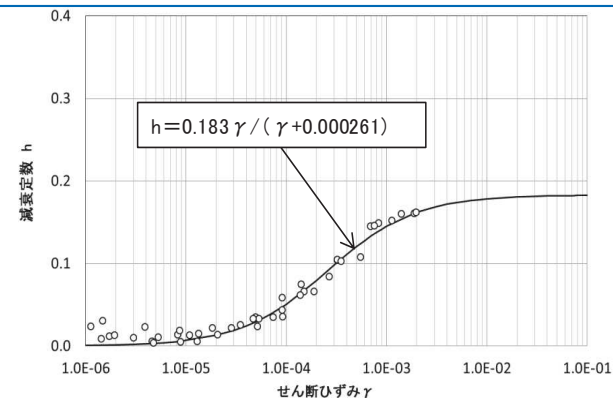
➢ 評価手法の設定条件として、地盤減衰モデルの違いや地盤モデルの下端深さの設定は、建屋応答へ影響を与える可能性があることから応答結果に与える影響を確認し、基準地震動Ssの入力地震動評価への適用性を確認する。



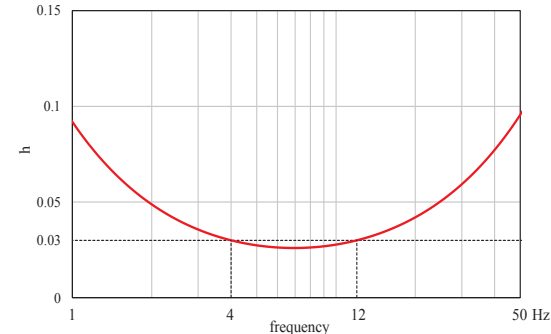
入力地震動評価用地盤モデルの概要



G/G₀-γ 曲線



h-γ 曲線 (繰返し三軸試験結果)



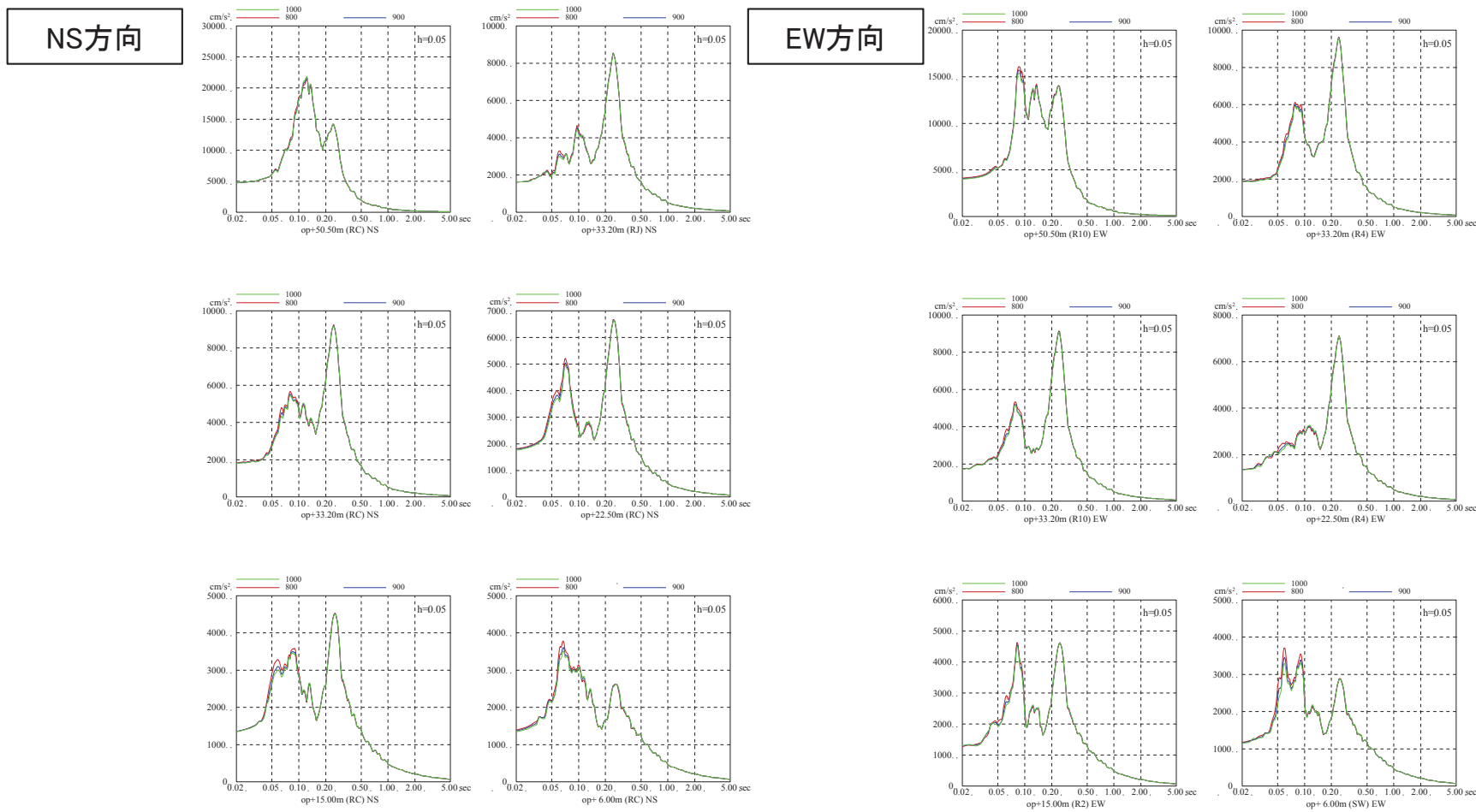
レーリー減衰(4Hz, 12Hz)

2.5 基準地震動Ssに対する適用性検討

(2) 地盤モデルの適用性検討 検討項目①表層地盤下部のせん断波速度Vsを低下させた場合の影響

- 表層地盤下部の波動伝播特性評価においては、岩盤以外の地質構造もあるものの全体として岩盤の影響が支配的な層として設定しており、せん断波速度Vsは岩盤相当の値(Vs=900m/s)を採用し特に非線形性は考慮していないが、岩盤以外の表層地盤の非線形化の影響の可能性も考慮し、地盤物性の変化(せん断波速度Vsを800 m/sから1000m/sの範囲で変化)が基準地震動Ssに対する応答に与える影響を確認した。
- その結果、**表層地盤下部の地盤物性の違いが応答結果に与える影響は小さい**ことを確認した。この傾向は3.11地震に対しても同様であることも確認している。

⇒ 以上のことから、表層地盤下部のせん断波速度Vs=900m/sは、基準地震動Ssに対する評価に適用可能と判断した。

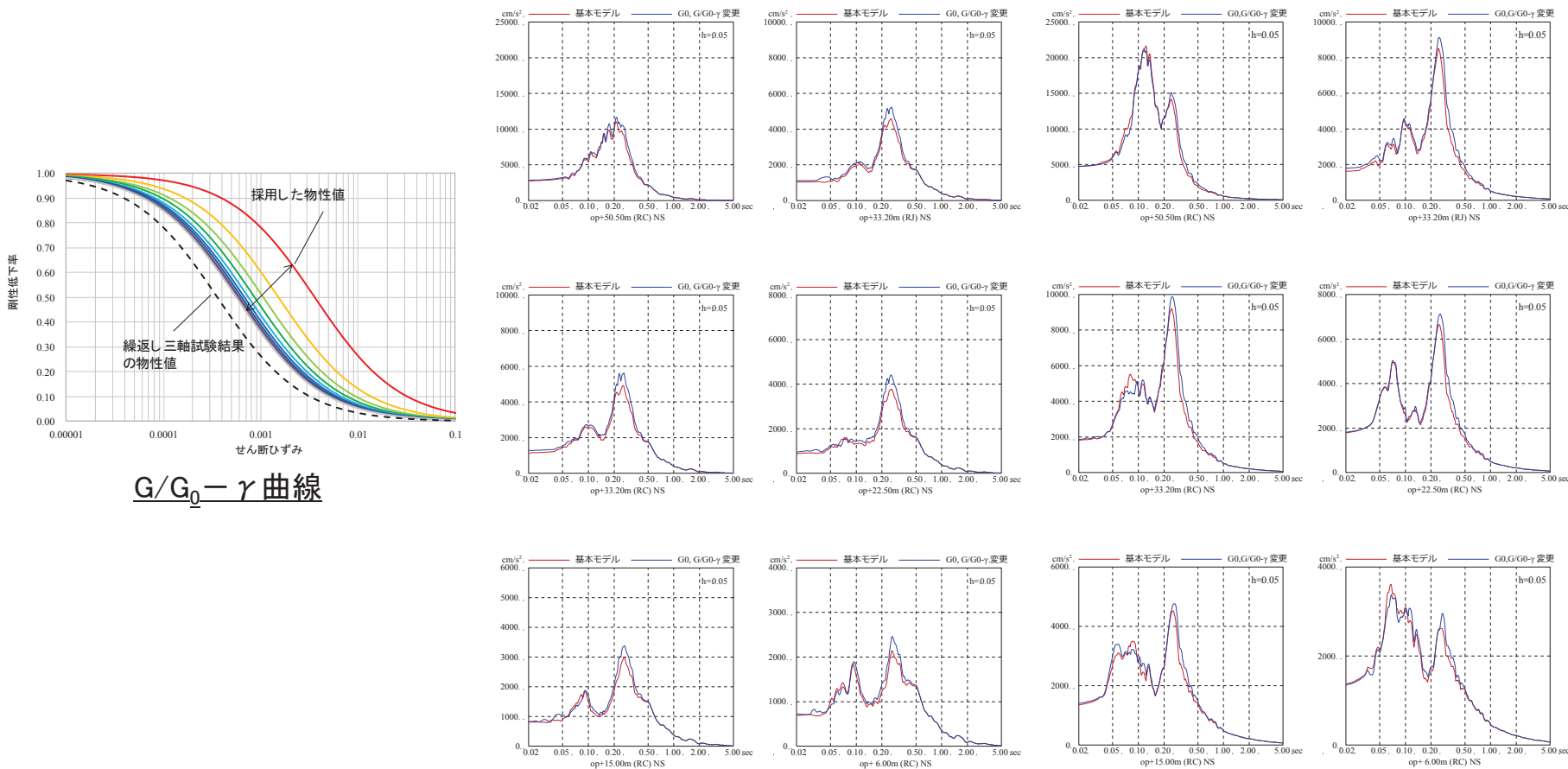


表層地盤下部のせん断波速度Vsを変化させた場合の床応答スペクトルの比較
(Vs=800m/s~1000m/s, 基準地震動Ss-D2)

2.5 基準地震動Ssに対する適用性検討

(2)地盤モデルの適用性検討 検討項目②表層地盤上部のせん断剛性に繰り返し三軸試験結果の値を採用した場合の影響

- 表層地盤の非線形特性は、PS検層結果から初期せん断剛性 G_0 を、原位置せん断試験結果から双曲線モデルとして $G/G_0-\gamma$ 曲線を、繰返し三軸試験結果から $h-\gamma$ 曲線を設定し、地震観測記録のシミュレーション解析により検証している。一方、初期せん断剛性 G_0 および $G/G_0-\gamma$ 曲線については、地盤安定解析では繰返し三軸試験による結果も考慮していることから、この結果を反映した地盤モデルを採用した場合の3.11地震に対するシミュレーション解析を行い、観測記録との整合性について検討した。その結果、策定した入力地震動評価用地盤モデルの方が整合性の良い結果となった。
- さらにモデルの違いが基準地震動Ssの応答に与える影響について確認したところ、**ひずみの大きい基準地震動Ssの場合、両者の違いは小さい結果となった。**



$G/G_0-\gamma$ 曲線

3.11地震 NS方向

基準地震動Ss-D2 NS方向

表層地盤の非線形特性を変えた場合※の床応答スペクトルの比較

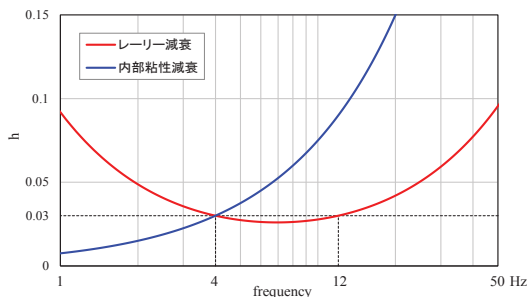
※初期せん断弾性係数 G_0 と $G/G_0-\gamma$ 曲線を変更した場合

2.5 基準地震動Ssに対する適用性検討

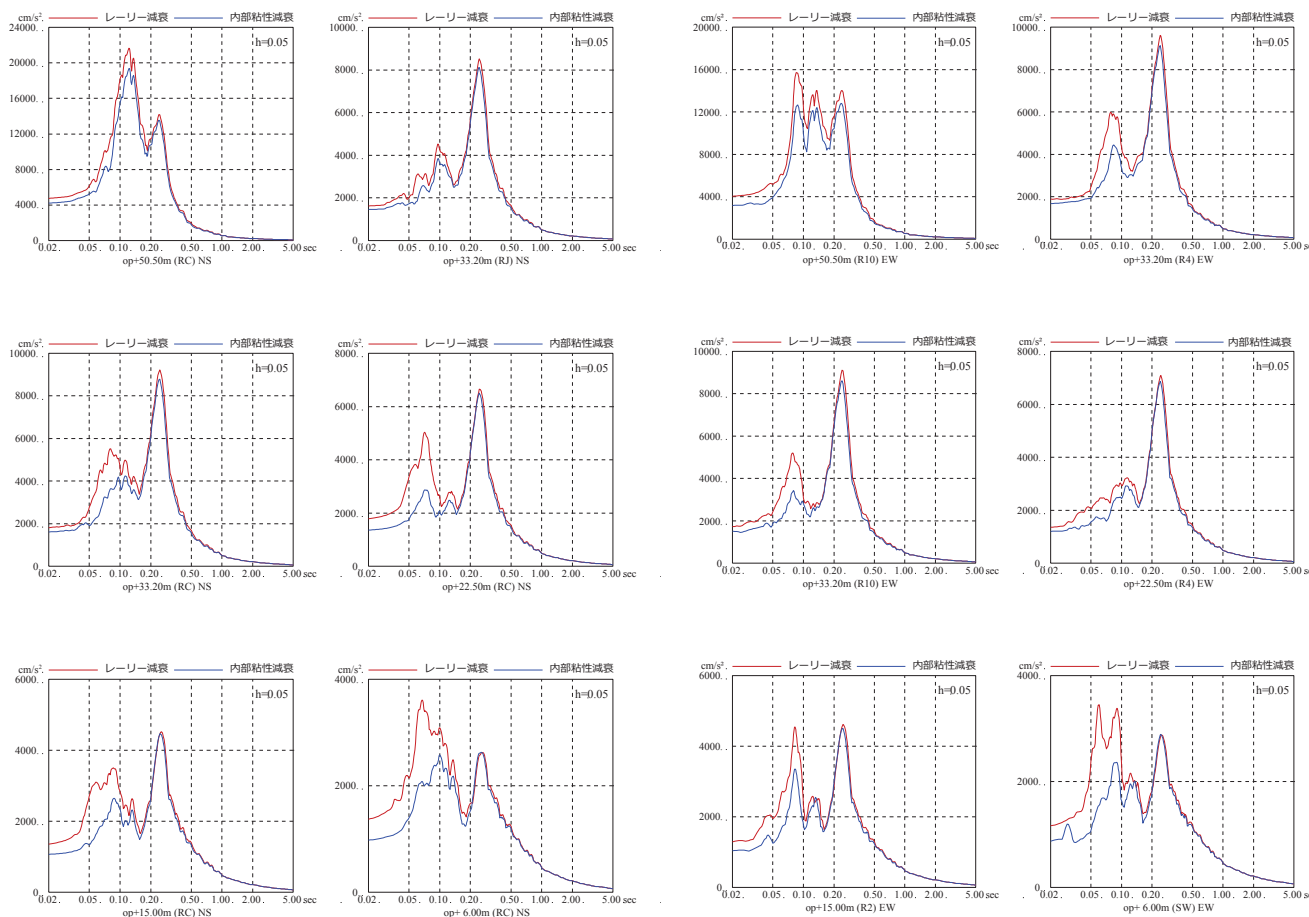
(3) 評価手法の適用性検討 検討項目③地盤減衰モデル(レーリー減衰)を内部粘性減衰に変えた場合の影響

・逐次非線形解析では、減衰モデルは内部粘性減衰またはレーリー減衰の2つを適用できるが、3.11地震のシミュレーション解析ではレーリー減衰(3%)を採用し観測記録との整合性が確認されたため、基準地震動Ssの入力地震動評価においてもレーリー減衰を採用している。

・レーリー減衰は2つの固有振動数に対し減衰が設定可能だが、内部粘性減衰は一つの固有振動数に減衰を設定するとそれより高次の振動数領域では減衰が大きく評価されることから、レーリー減衰の方が表層地盤の反射波(F波)の高振動数側については大きく算定する結果を与える。参考にレーリー減衰と内部粘性減衰の違いが基準地震動Ssに対する応答に及ぼす影響を比較すると、短周期側(高振動数側)でレーリー減衰の方が入力地震動を大きめに評価する結果となっている。



レーリー減衰と内部粘性減衰の比較



基準地震動Ss-D2 NS方向

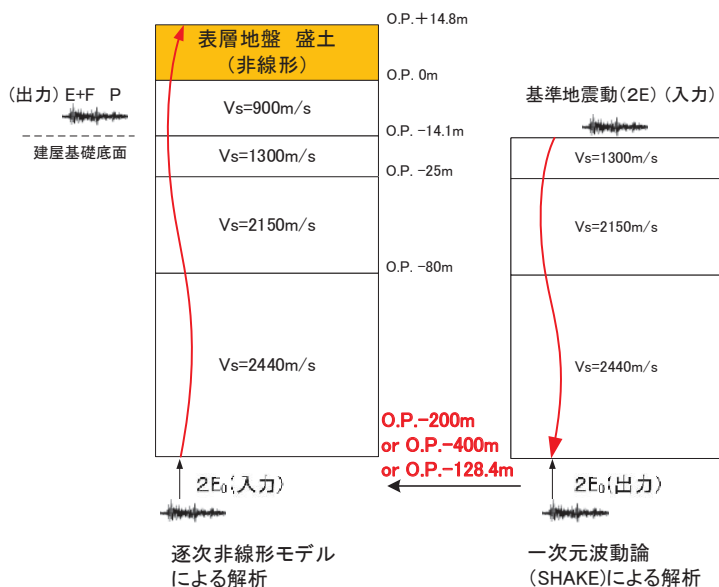
基準地震動Ss-D2 EW方向

地盤減衰モデルを変えた場合の床応答スペクトルの比較

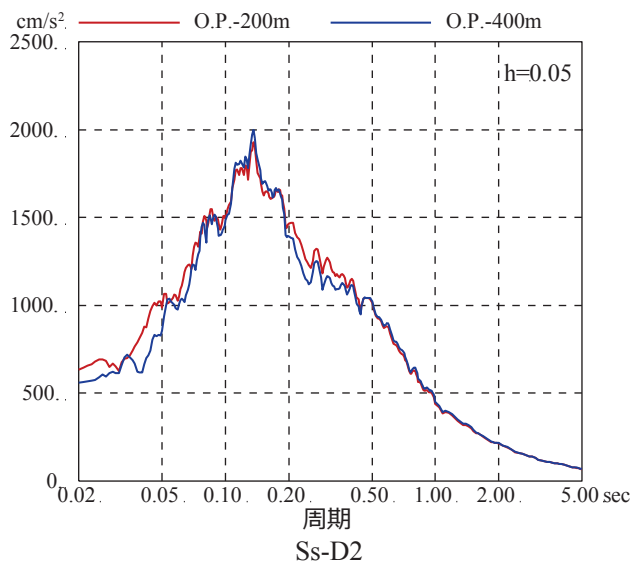
2.5 基準地震動Ssに対する適用性検討

(3) 評価手法の適用性検討 検討項目④地盤モデルの下端深さの違いの影響

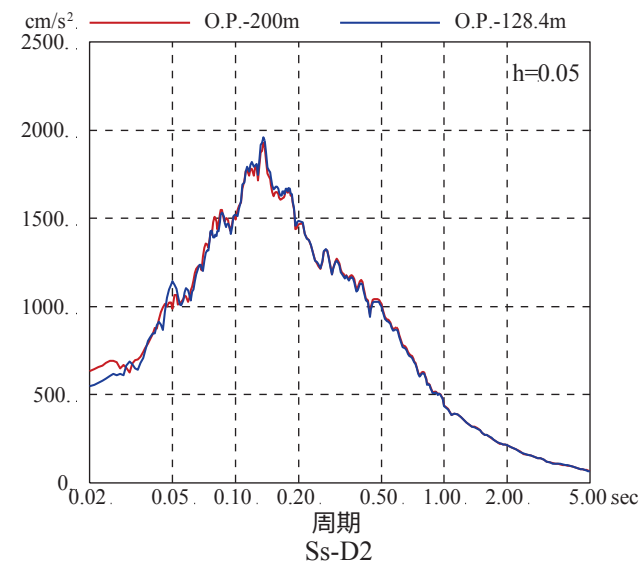
- ・入力地震動の算定の際には、建屋基礎底面レベルに設定した解放基盤表面の地震動(2E)から地盤モデルの下端における地震動(2E₀)を算定し、表層地盤を考慮した地盤モデルに算定した地震動を入力して建屋基礎底面レベルの入力地震動(E+F)を算定している。算定にあたっては、下降計算、上昇計算とも基本的には同じ地盤モデルを用いた一次元波動論を採用していることから、地盤モデルの下端深さの違いが解析結果に与える影響は大きいものではないと考えられること、また、地震基盤相当レベル(O.P.-128.4m)よりも上部の波動伝播特性については観測記録との整合性が確認されていることを考慮し、地盤モデルの下端深さは地震基盤の地盤物性がさらに深部に延長するモデルとしてO.P.-200mに設定している。
- ・また、3.11地震に対するシミュレーション解析においても地盤モデルの下端深さはO.P.-200mとしており、記録との整合性が確認されている。
- ・ここでは、地盤モデルの下端深さの違いが解析結果に与える影響を基準地震動Ssを用いて評価した。その結果、地盤モデルの下端深さの違いが応答結果に与える影響は小さいことを確認した。この結果を踏まえても、地盤モデルの下端深さをO.P.-200mに設定することは妥当と判断した。



検討の概念図



O.P.-400mとの比較



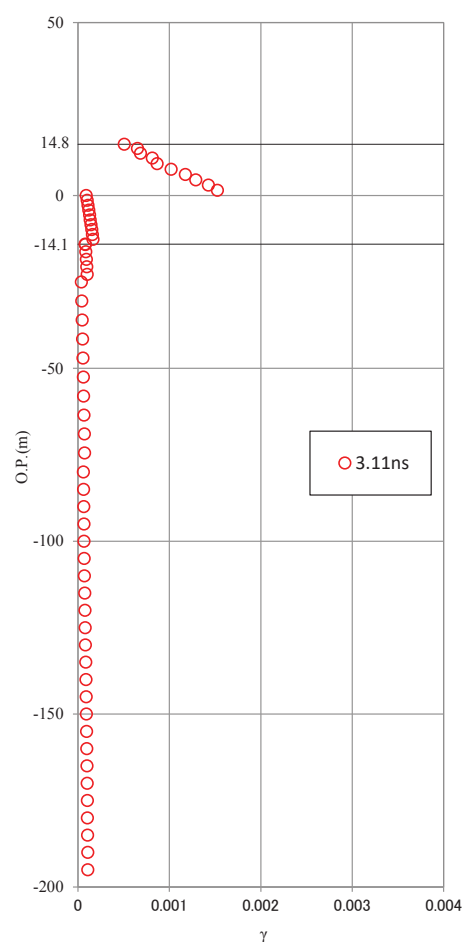
O.P.-128.4mとの比較

地盤モデルの下端深さの違いによる入力地震動(E+F)の比較(基準地震動Ss-D2)

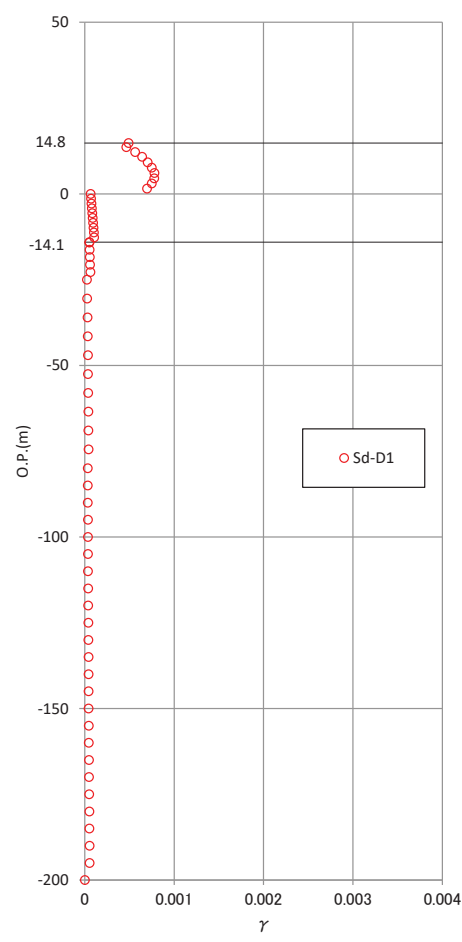
2.6 弾性設計用地震動Sdに対する適用性検討

弾性設計用地震動Sdに対する適用性

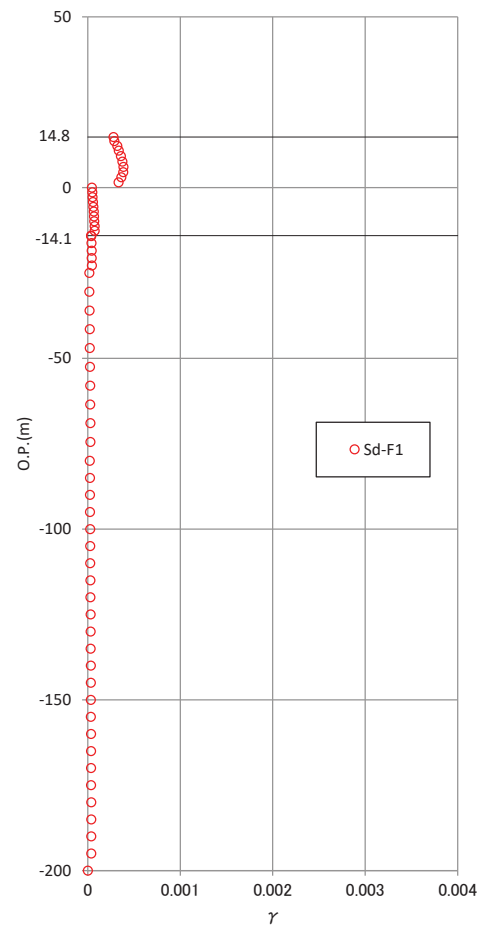
・弾性設計用地震動Sdを入力した際の地盤のひずみは0.1%未満であり、地盤モデルの検証を行った3.11地震等の過去の地震と同レベル以下の範囲である。
 ⇒弾性設計用地震動Sdを用いた評価においても、今回策定した地盤モデルは適用可能である。



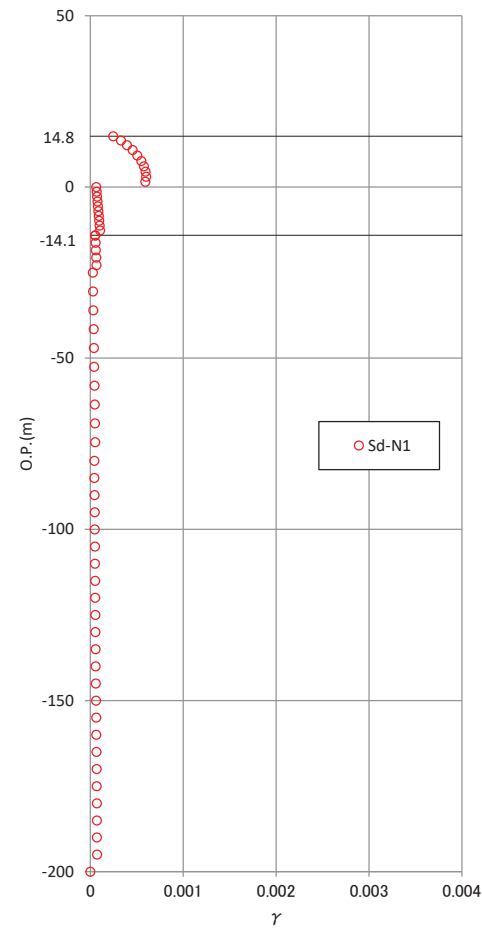
3.11地震



基準地震動Sd-D1



基準地震動Sd-F1



基準地震動Sd-N1

入力地震動算定における地盤のひずみ(逐次非線形解析)

2.7 まとめ

【検討結果のまとめ】

- 3.11地震等の記録を用いた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、解放基盤表面相当の観測記録(自由地盤のはざとり波)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。このことから、今回工認では、表層地盤が入力地震動に与える影響が確認された建屋について入力地震動の評価方法を見直した。
- 入力地震動評価用の地盤モデルは以下の手順で策定した。
 - ①建設時の掘削状況や岩盤レベルの傾向、各地盤の物性試験結果から地盤モデルの仮設定を行い、敷地で得られた観測記録を用いたパラメータスタディを行った上で、ベースモデル(初期モデル)を設定。
 - ②基準地震動 S_s による表層地盤上部のさらなる非線形化を反映するために、地盤物性試験で得られた非線形特性を考慮。なお、基準地震動 S_s による建屋への入力地震動の算定にあたっては、表層地盤上部の非線形化の程度が等価線形解析の適用範囲の目安値を超えるため、逐次非線形解析を採用。
- 策定した入力地震動評価用地盤モデルを用い、女川で得られた過去の様々な地震動レベルの地震に適用した場合、観測記録と整合した結果を与えることを確認した。
- 基準地震動 S_s では過去の地震よりもさらにひずみが進んだ状態となることから、ひずみの影響を受ける表層地盤の非線形特性について、基準地震動 S_s による感度解析を実施し、影響について確認した。その結果、応答結果に与える影響は小さいことを確認した。また逐次非線形解析に関し、評価手法の設定条件等の違いが基準地震動 S_s の応答に与える影響について感度解析を行い、その影響は小さいことを確認した。
- 弾性設計用地震動 S_d に対しては、表層地盤上部のひずみレベルが3.11地震と同程度であることを確認した。
 - ⇒ 以上のことから、**設定した入力地震動評価用地盤モデルは基準地震動 S_s 並びに弾性設計用地震動 S_d に対する評価に適用可能と判断した。**

【今後の検討】

- 策定した地盤モデルは3.11地震に対してその適用性を確認しているが、基準地震動 S_s ではさらに地震動レベルが大きくなることから、今回検討した表層地盤の非線形特性など地震動レベルの影響を受ける因子について、ばらつき程度とばらつきが応答結果に与える影響について精査し、設計に反映すべき不確かさの具体的内容を抽出・整理していく。

1. 全体概要
2. 入力地震動に関する検討(原子炉建屋)
 - 2.1 検討のポイント
 - 2.2 東北地方太平洋沖地震における入力地震動の傾向
 - 2.3 入力地震動評価用地盤モデルの設定
 - (1)設定概要
 - (2)敷地地盤の成層性
 - (3)地盤モデルの仮設定
 - (4)仮設定した地盤モデルに対する観測記録を用いた検討
 - (5)表層地盤上部の非線形性を考慮したモデル
 - 2.4 入力地震動評価用地盤モデルの検証
 - 2.5 基準地震動Ssに対する適用性検討
 - (1)検討概要
 - (2)地盤モデルの適用性検討
 - (3)評価手法の適用性検討
 - 2.6 弾性設計用Sdに対する適用性検討
 - 2.7 まとめ
3. 埋込み効果に関する検討(原子炉建屋)
 - 3.1 検討のポイント
 - 3.2 原子炉建屋の埋込み効果に関する検討
 - 3.3 まとめ
4. E+F入力を考慮する既設建屋
5. 検討結果の概要と今後の検討について

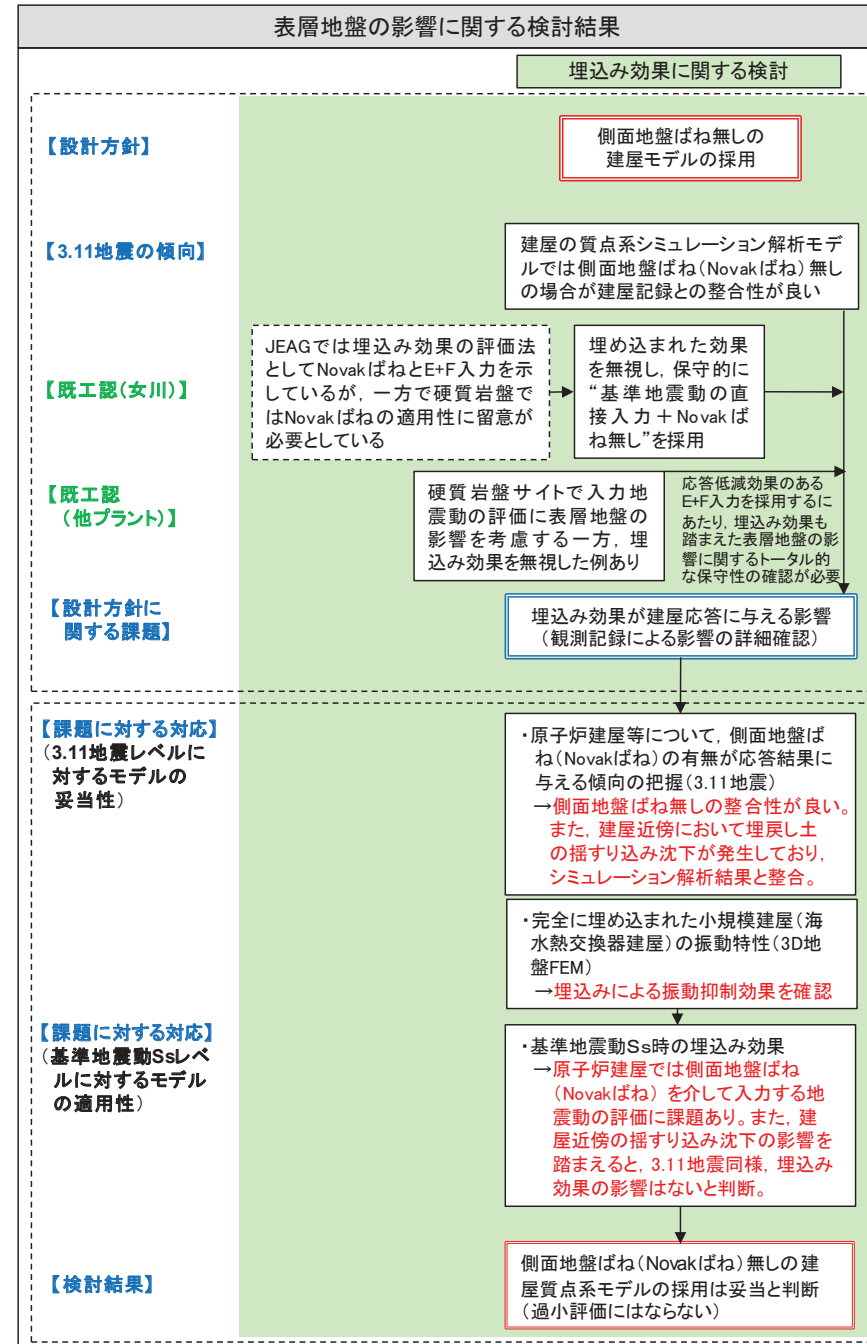
3. 埋込み効果に関する検討

3.1 検討のポイント

埋込み効果が建屋応答に与える影響 (観測記録による影響の詳細確認)

・JEAGでは硬質岩盤ではNovakばねの適用性に留意が必要とされている。そのため、既工認では表層地盤の影響、すなわち入力地震動に与える影響(E+F入力、表層地盤のエネルギー消費による入力地震動の低減効果)と埋込み効果(建屋と側面地盤の相互作用)を無視し、“E+F入力 + Novakばね有り”の応答に比べ、“基準地震動の直接入力 + Novakばね無し”の応答が大きいことを確認した上で後者を採用している。この比較検討では、Novakばねが硬質岩盤に適用可能とみなすことが前提となっている。

・今回工認では、E+F入力を採用するため、既工認において直接入力としていた裕度が減少する。従って硬質岩盤サイトにおける埋込み効果に関し、建屋応答に与える影響について、より詳細に確認する必要がある。具体的には、入力地震動評価の見直しが過小評価にならないことを確認するため、埋込み効果について3.11地震による影響や基準地震動Ss時の影響について確認する。



3. 埋込み効果に関する検討

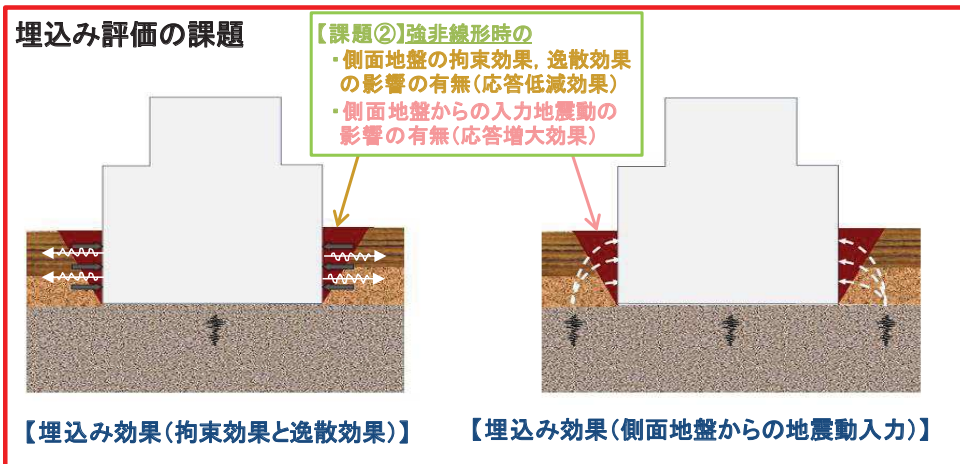
3.2 原子炉建屋の埋込み効果に関する検討

【検討の概要】

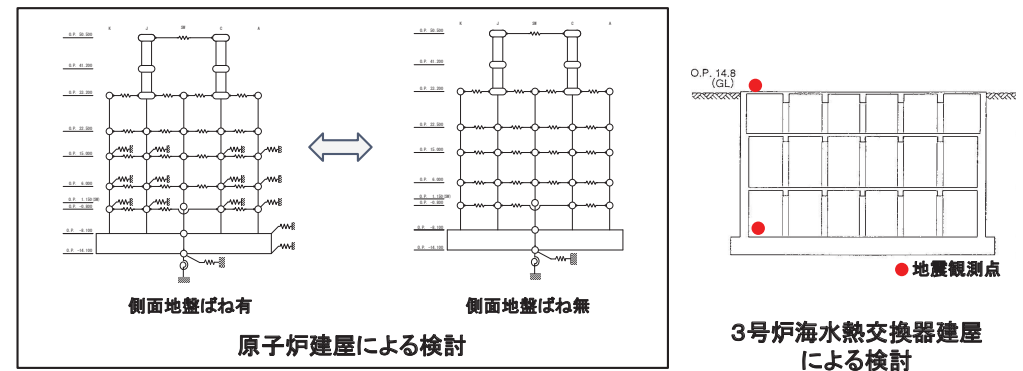
既工認において基準地震動の直接入力を採用していたものを、今回工認では表層地盤の影響を考慮したE+F入力を採用するため、観測記録等を用い埋込み効果が建屋応答に与える影響についてより詳細に確認する。具体的には、以下の項目について検討を実施する。

- (検討①) 3.11地震による2号炉原子炉建屋のシミュレーション解析ではE+F入力を行い、かつ、側面地盤ばねによる埋込み効果を考慮しないモデルが、観測記録との整合性の良い結果を与えた。確認のために、“E+F入力 + 側面地盤ばね有り”によるシミュレーション解析結果と観測記録との乖離について検討する。
- (検討②) 埋め込まれていることの効果を検討するため、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3.11地震によるシミュレーション解析を実施する。具体的には、質点系モデルによるシミュレーション解析と3次元地盤FEM解析によるシミュレーション解析を実施する。質点系モデルによるシミュレーション解析では、側面地盤ばね有無の影響や建屋減衰の最適化による検討を行い、埋込み効果について確認する。
- (検討③) 3.11地震では、建屋近傍において揺すり込み沈下が発生している。表層地盤は、基準地震動 S_s では3.11地震に比べより非線形化が進むため、卓越周期はより長周期化し、埋込み効果は更に期待できない状態になるものと考えられる。表層地盤の長周期化について確認する。
- (検討④) 基準地震動 S_s レベルの地震動に対し、硬質岩盤における側面地盤ばね(Novakばね)の適用性について検討するために、側面地盤ばねの有無が建屋応答に与える影響について、原子炉建屋を対象に分析する。具体的には、側面地盤による拘束効果や入力効果について分析する。

⇒以上の検討から、硬質岩盤における埋込み効果が建屋応答に与える影響について確認する。



埋込み効果の影響因子



原子炉建屋(Novakばね有無の影響検討) 3号炉海水熱交換器建屋(Novakばね有無, 3次元地盤FEM)

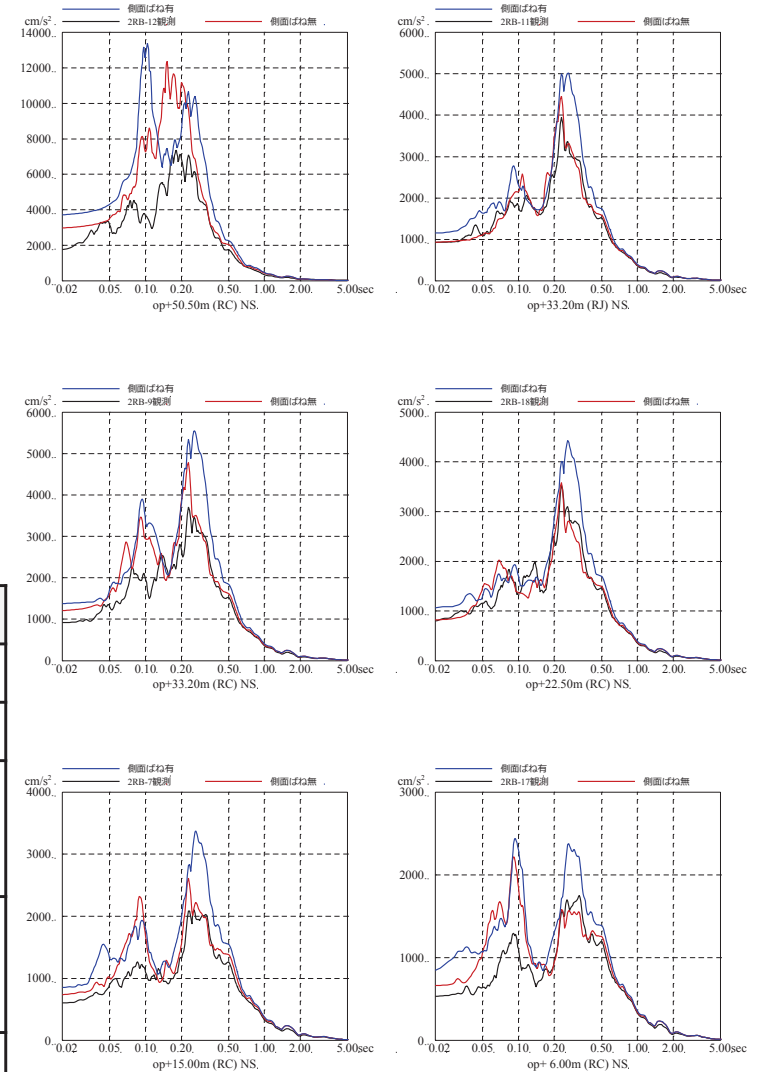
3. 埋込み効果に関する検討

3.2 原子炉建屋の埋込み効果に関する検討

・検討① 3.11地震による2号炉原子炉建屋を対象とした埋込み効果に関する検討(側面地盤ばね有無の影響検討)

検討① 目的	・建屋が埋め込まれていることの影響を検証するため、表層地盤が建屋応答に及ぼす影響を確認する。
検討 方法	<ul style="list-style-type: none"> ・地盤の非線形性が大きい3.11地震の観測記録について、質点系モデルによるシミュレーション解析を実施し、側面地盤ばね(Novakばね)の有り・無しモデルの応答結果と観測記録を比較する。 ・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。
検討 結果	・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。

	側面地盤ばねを考慮するケース	側面地盤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地震はざとり波	
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(補正水平力考慮)
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)	



NS方向

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

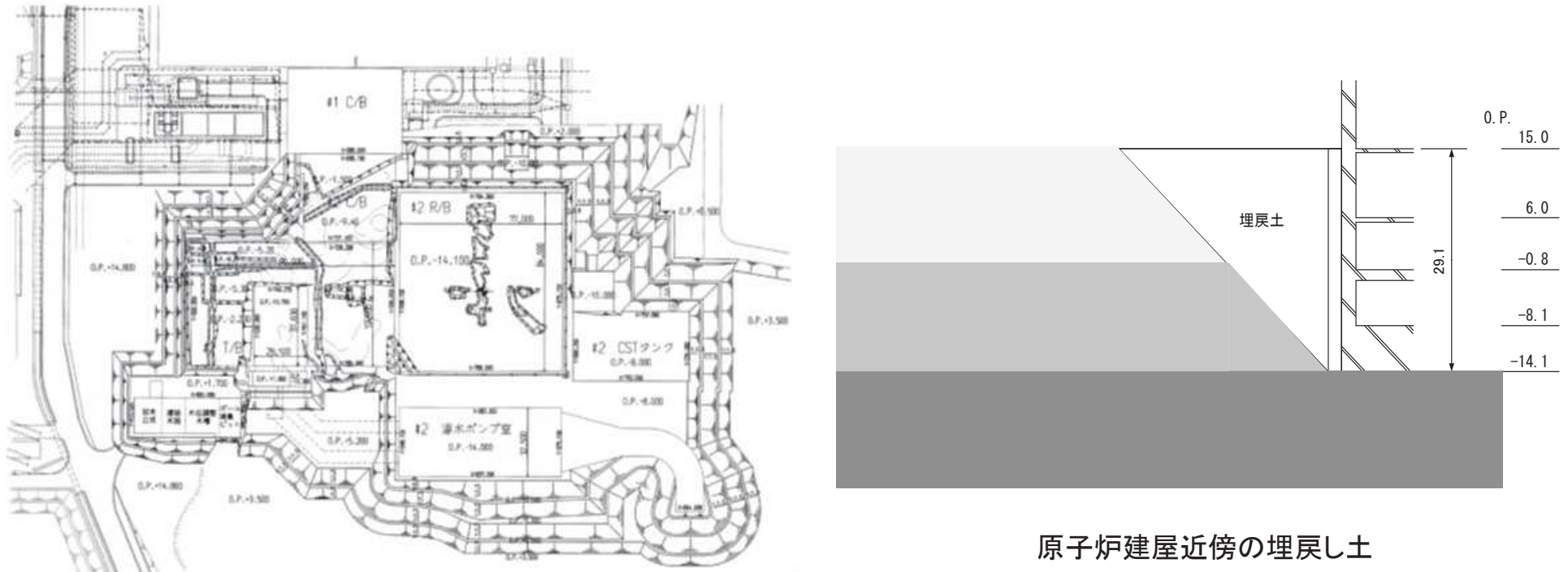
3. 埋込み効果に関する検討

3.2 原子炉建屋の埋込み効果に関する検討

・検討① 3.11地震による2号炉原子炉建屋を対象とした埋込み効果に関する検討(側面地盤ばね有無の影響検討)

女川2号炉の建設に当たっては、広くオープン掘削が行われ、また、埋戻し工事は掘削土を利用している。そのため、3.11地震時には揺すり込み沈下が発生した箇所もある。過去の調査結果から算定される建屋近傍のせん断波速度は地震時の剛性低下率(3.11地震0.3~0.7)も考慮すると、 $V_s=100\sim 250\text{m/s}$ 程度以下と評価される。

建屋近傍の埋戻し土の著しい剛性低下によって、埋込み効果が期待できない状況になっていたものと考えられる。



2号炉建設時の地盤の掘削状況

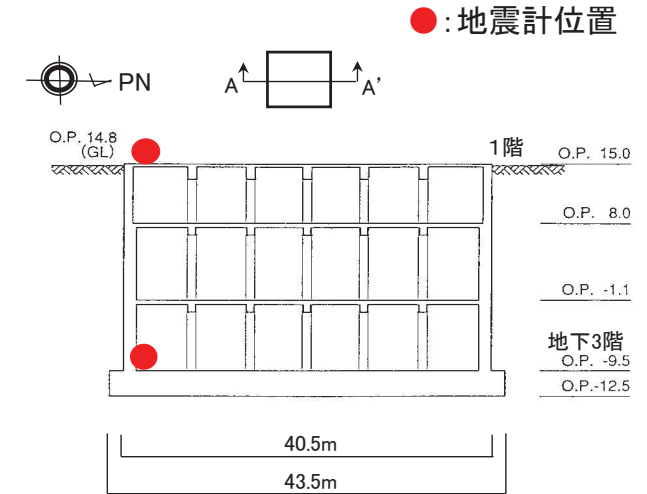
原子炉建屋近傍の埋戻し土

3. 埋込み効果に関する検討

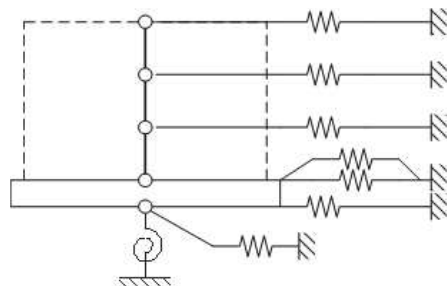
3.2 原子炉建屋の埋込み効果に関する検討

・検討② 3号炉海水熱交換器建屋を対象とした埋込み効果に関する検討

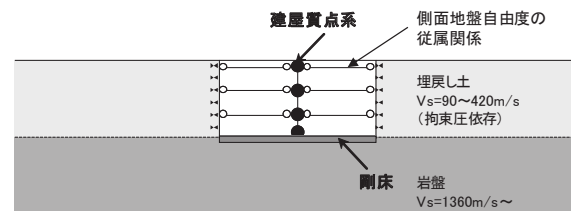
<p>検討② 目的</p>	<p>・建屋が埋め込まれていることの効果を検討するため、比較的小規模で建屋全体が埋め込まれている3号炉海水熱交換器建屋を対象に表層地盤が建屋応答に及ぼす影響を確認する。</p>
<p>検討方法</p>	<p>地盤の非線形性が大きい3.11地震の観測記録を用い、以下の建屋地震応答解析を実施する。また3次元地盤FEMの検討においては、小振幅の地震についても検討を実施する。</p> <p>【質点系モデルによる検討】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・側面地盤ばね(Novakばね)の適用性を確認するために、Novakばね有り・無しモデルの応答結果と観測記録を比較 ・埋込み効果による応答低減効果を定量的に表すために、Novakばね無しモデルについて、観測記録と整合する建屋減衰(RC減衰)を同定 (埋込み効果による応答低減効果を仮にRC減衰に置き換えた場合の検討) <p>【3次元地盤FEMモデルによる検討】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・側面地盤と建屋の相互作用をより詳細に把握可能な3次元地盤FEMモデルを用いた検討
<p>検討結果</p>	<p>【質点系モデルによる検討】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・側面地盤ばね(Novakばね)を考慮した解析結果は観測記録と整合せずかなり過大な結果となった。 ・側面地盤ばね(Novakばね)無しモデルについて、建屋減衰(RC減衰)を20%にすることにより観測記録との整合性が図られた。このことは、埋込まれていることにより建屋の応答低減効果があることを示している。 <p>【3次元地盤FEMモデルによる検討】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・3次元地盤FEM解析でも埋込まれていることによる建屋の応答低減効果が確認された。



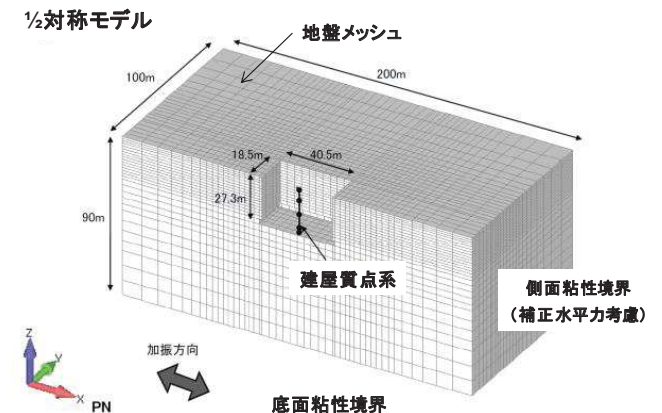
3号炉海水熱交換器建屋の概要



質点系モデル(側面地盤ばね有り)



3次元地盤FEMモデル



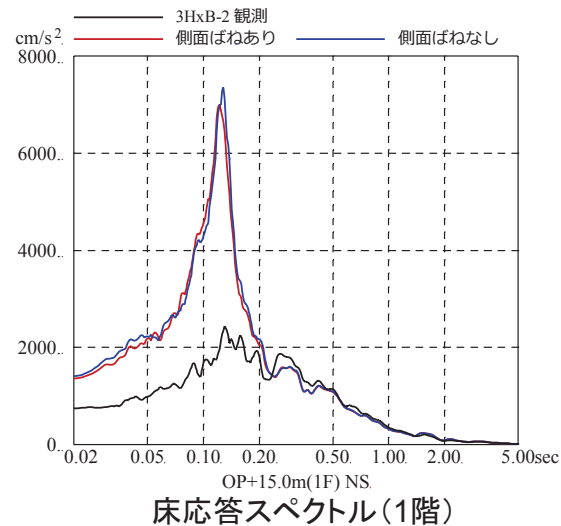
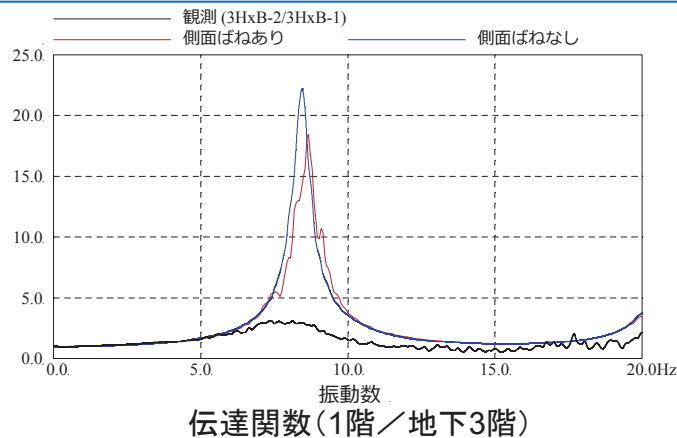
3. 埋込み効果に関する検討

3.2 原子炉建屋の埋込み効果に関する検討

・検討② 3号炉海水熱交換器建屋を対象とした埋込み効果に関する検討 ～質点系モデルによる検討～

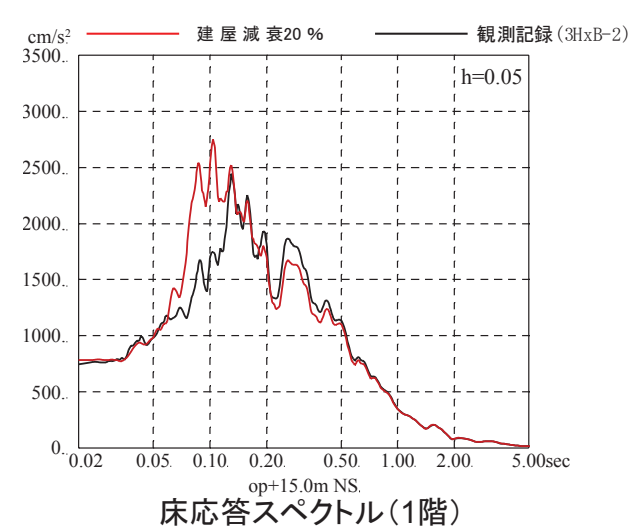
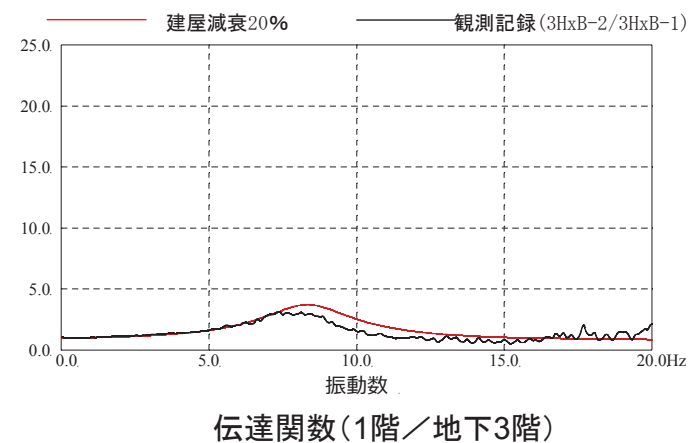
側面地盤ばね(Novakばね)有り・無しモデルの応答結果

- ・側面地盤ばね(Novakばね)無し(減衰5%)の解析結果は観測記録に対しかなり過大であり、埋込みの効果を確認される。
- ・また、側面地盤ばね(Novakばね)有り(減衰5%)も観測に比べ過大になっている。これは、建屋固有振動数(約8Hz)と表層地盤の卓越振動数(約2Hz)の乖離が大きく、Novakばねから入力される地震動による影響が小さいためと考えられる。



建屋減衰の検討(側面地盤ばね無しモデル)

- ・埋込み効果による応答低減効果を定量的に表すために、観測記録と整合する建屋減衰(RC減衰)を同定した。その結果、減衰を**20%**にすることにより解析と観測記録は整合するため、概ねこの減衰の差分(一般的な減衰5%に対して20%相当の応答分)が埋込みによる低減効果相当量と考えられる。



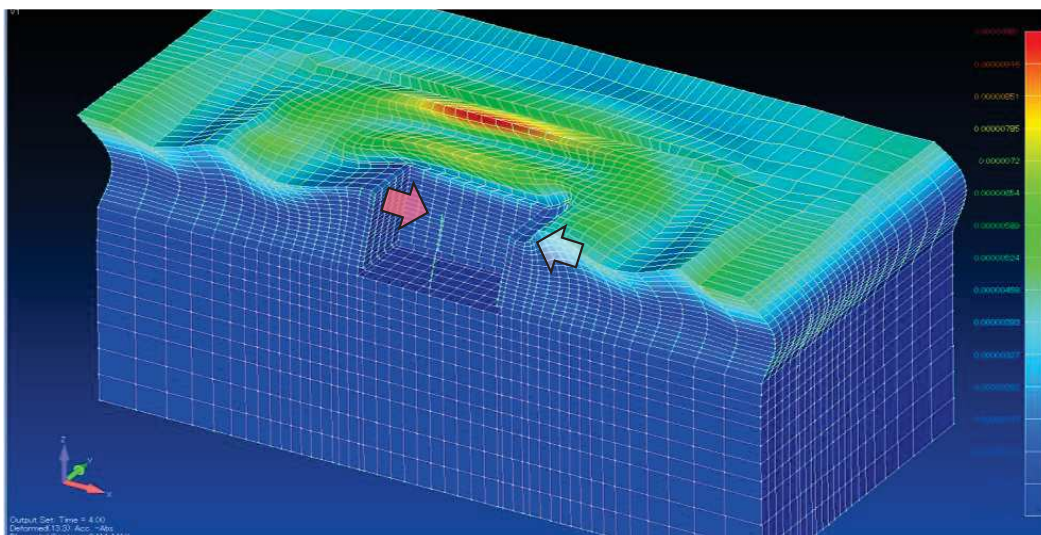
埋込みによる
応答低減効果
について、3次
元地盤FEMモ
デルによりさ
らに検討する。

3.2 原子炉建屋の埋込み効果に関する検討

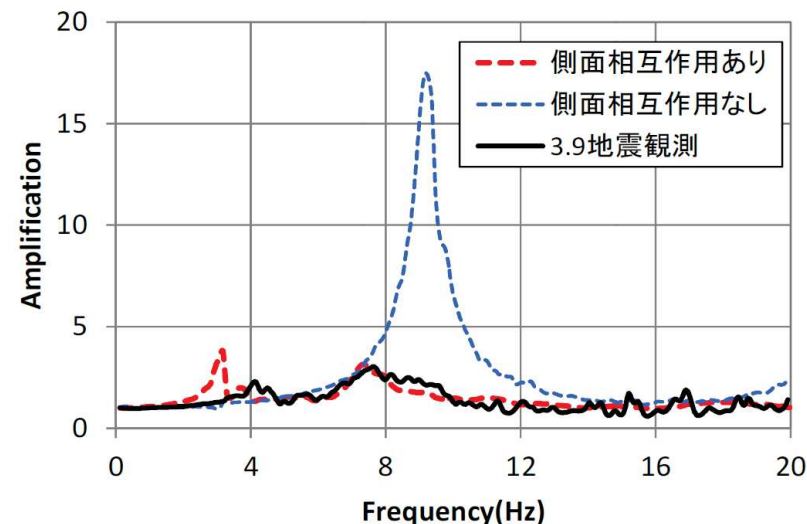
・検討② 3号炉海水熱交換器建屋を対象とした埋込み効果に関する検討 ～3次元地盤FEMモデルによる検討(小地震による検討)～

3次元地盤FEMモデルによる解析結果(主な特徴)

- ・小地震の場合、建屋1次振動数に相当する8Hzの定常sin波を入力した場合の変形図より、地盤の2次モードと建屋の1次モードが概ね逆位相で連成していることから、地盤振動が建屋の応答の増幅を抑制していると考えられる。
- ・建屋側面の地盤の相互作用が建屋応答に及ぼす影響は、地盤と建屋側面の従属関係を解除した場合としない場合の建屋基礎版に対する建屋上部の伝達関数を比較した結果から、相互作用がない場合には、建屋の応答は20倍程度に増幅しており、相互作用の有無が応答に大きく影響することを示している。したがって、実際の応答では建屋側面の地盤の相互作用により応答が低減されていると考えられる。



定常sin波(8Hz:建屋1次振動数に相当)を入力した場合の変形図
(スナップショット)



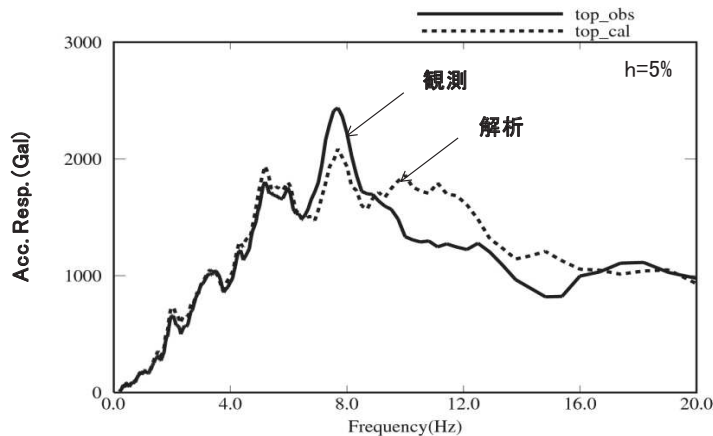
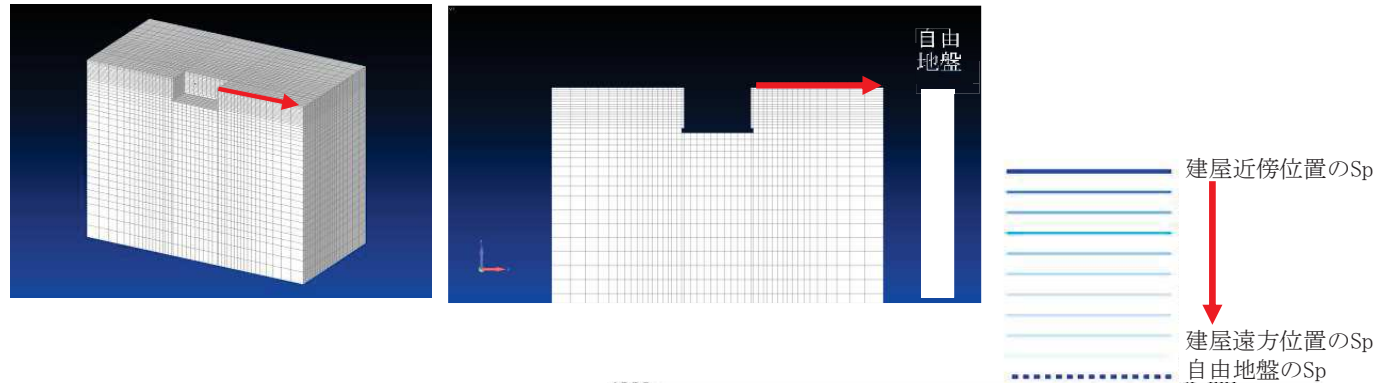
建屋の伝達関数(上部/基礎版) 3.9地震(NS方向)

3.2 原子炉建屋の埋込み効果に関する検討

・検討② 3号炉海水熱交換器建屋を対象とした埋込み効果に関する検討 ～3次元地盤FEMモデルによる検討(3.11地震による検討)～

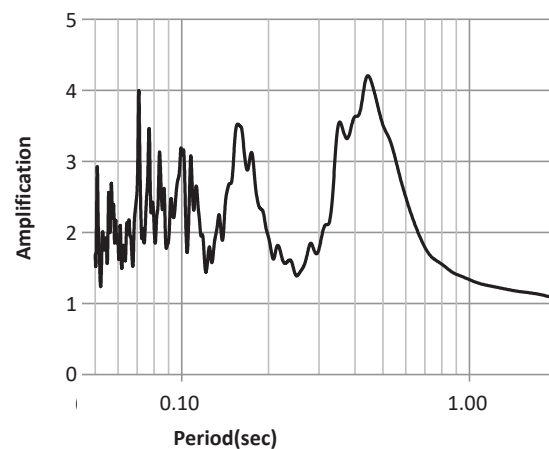
3次元地盤FEMモデルによる解析結果(主な特徴)

- ・埋込み効果を3次元地盤FEMモデルにより評価した解析では、建屋上部の応答値は観測記録と整合する結果となった。
- ・地表面の地震動は、建屋から遠くなると自由地盤の揺れに近づく傾向となっている。周期0.5秒付近のピークは自由地盤の1次卓越周期であり、建屋近傍位置では建屋と側面地盤の相互作用により地盤の揺れは小さく、遠方位置では自由地盤の応答に近づいている。建屋の固有周期付近の0.2秒付近のピークは建屋側面に対して中間位置で増大し、遠方位置では減少して自由地盤の応答に近づいている。
- ・地表面の地震動は、建屋近傍位置では自由地盤よりも全体的に小さな揺れとなっており、側面からの入力も小さいと考えられる。

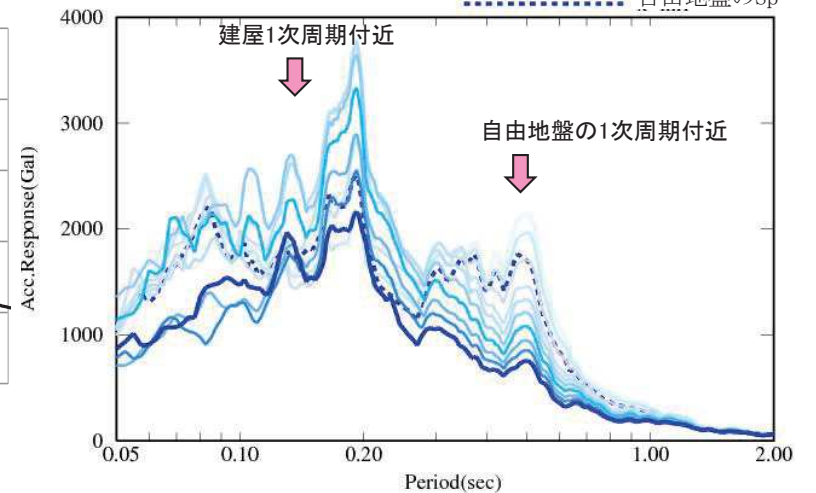


建屋上部(1F)加速度応答スペクトル 3.11

応答スペクトルの比較(建屋上部)
(3.11地震)



自由地盤の増幅率(地表/基盤)



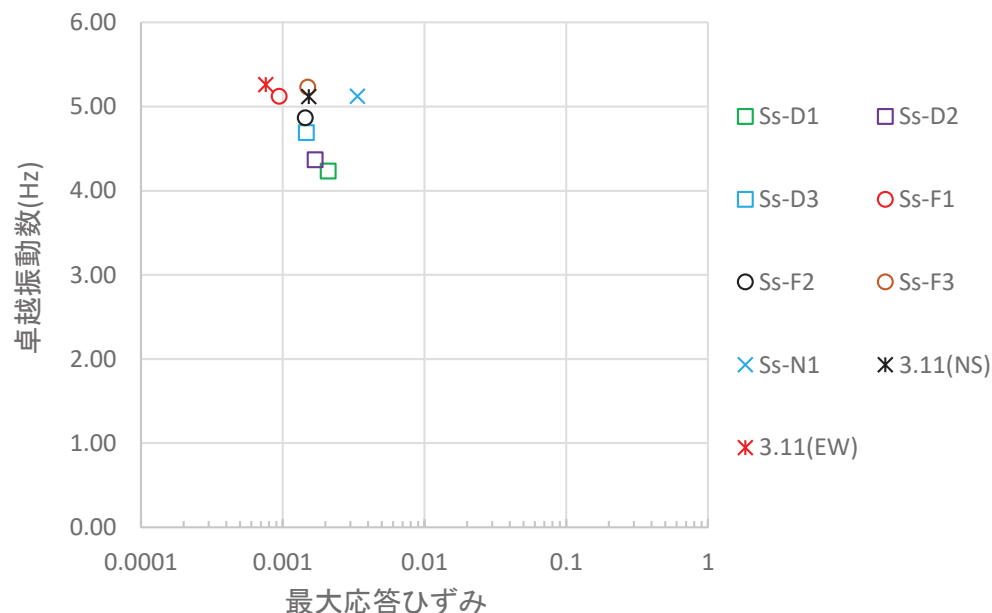
加速度応答スペクトル(減衰:5%)

地表面の地震動(建屋からの距離との関係)
(3.11地震)

3.2 原子炉建屋の埋込み効果に関する検討

・検討③ 基準地震動Ss時の表層地盤の卓越周期と建屋固有周期との関係

検討③ 目的	・基準地震動Ss時の表層地盤上部の非線形化について確認する。
検討 方法	・基準地震動Ssを入力した際の地盤の最大ひずみと表層地盤の卓越振動数の関係を整理する。
検討 結果	<p>・基準地震動Ssでは、3.11地震に比べ表層地盤の非線形化が進み、卓越周期がより長周期化する。特に建屋近傍の埋戻し部分については、過去の調査結果から算定される3.11地震時の剛性低下率(3.11地震約0.3~0.7)も考慮すると、$V_s=100\sim 250\text{m/s}$程度以下と評価され、基準地震動Ssでは更に低下することになる。</p> <p>→従って、埋込み効果が建屋応答に与える影響は3.11地震による影響よりも基準地震動Ss時は小さいと考えられる。</p>



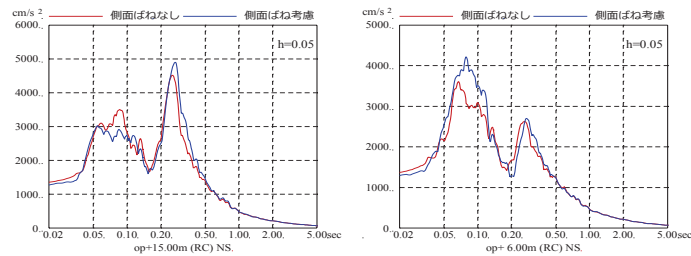
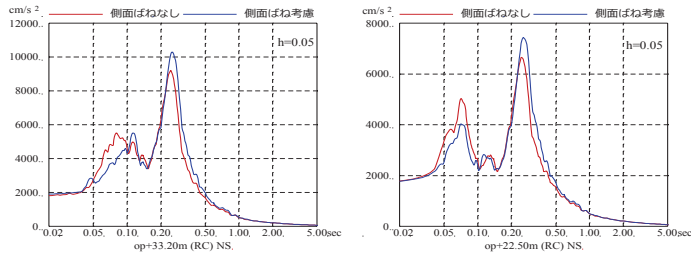
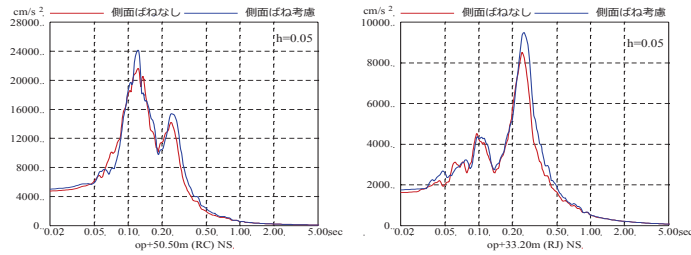
地盤の最大応答ひずみと表層地盤の卓越振動数の関係

3. 埋込み効果に関する検討

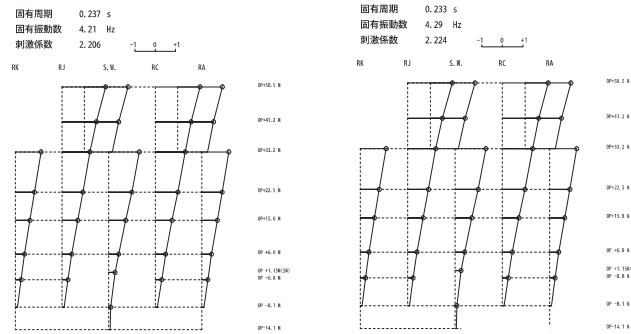
3.2 原子炉建屋の埋込み効果に関する検討

・検討④ 硬質岩盤における側面地盤ばね(Novakばね)の適用性検討

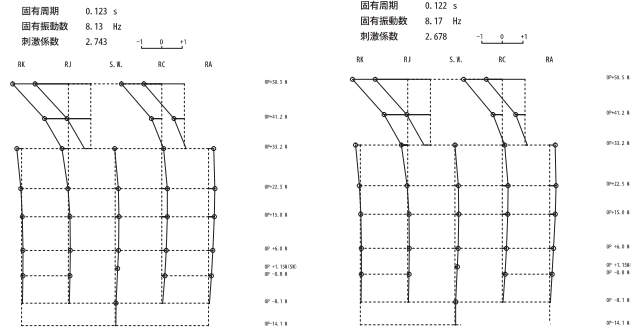
<p>検討④ 目的</p>	<p>・支持地盤と表層地盤のインピーダンス比が顕著な場合の側面地盤ばね(Novakばね)の適用性について検討するために、側面地盤ばねの有無が建屋応答に与える影響について、原子炉建屋を対象に分析する。</p>
<p>検討 方法</p>	<p>・基準地震動Ssを入力した場合の側面地盤ばね(Novakばね)の有無が建屋の応答結果に与える影響を確認する。 ・側面地盤ばねの有無による固有モードの違い(拘束効果)や側面地盤ばねに入力される地震動の傾向(入力効果)を確認する。</p>
<p>検討 結果</p>	<p>・地震応答解析の結果では、側面地盤ばね(Novakばね)有りモデルの方が大きい応答結果を与える階が生じた。 ・側面地盤ばねの有無が固有モードに与える影響は小さい。従って、側面地盤ばねによる拘束効果は小さい傾向にある。 ・側面地盤の揺れは最上層で2000Galを超える大きさになっており、これは建屋の同一レベルの揺れに比べ2倍程度の大きさとなる。表層地盤の1次、2次モードに相当する周期帯で特に大きい傾向にある。また、地盤のひずみレベル(前頁参照)は、3.11地震、基準地震動Ssで同等であることから両者ともに側面地盤ばね(Novakばね)有の場合は過大な応答を与えていると考えられる。 ・支持地盤と側面地盤のせん断波速度Vsの違いが大きい場合、側面地盤からの入力が大きくなるため、側面地盤ばねの精度によって誤差の大きい結果を与えるおそれがある。</p>



床応答スペクトルの比較例(NS方向)



1次モード図

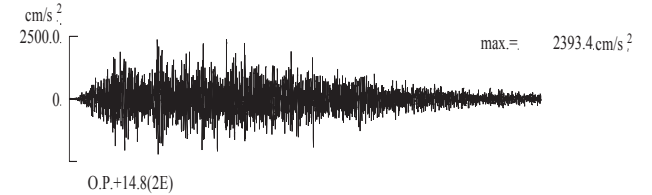


1次モード図

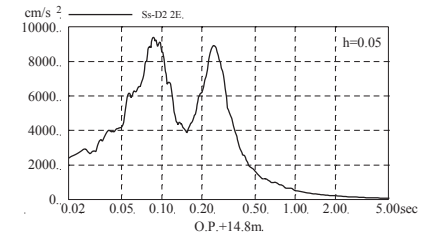
側面地盤ばね無し(Ss-D2)

側面地盤ばね有り(Ss-D2)

固有モードの比較例(NS方向)



加速度時刻歴波形



加速度応答スペクトル

側面地盤最上層の揺れ

3.3 まとめ

【検討結果のまとめ】

- 3.11地震による2号炉原子炉建屋の質点系モデルによる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。この傾向は後に示すタービン建屋の質点系モデルによるシミュレーション解析でも同様の傾向が得られており、**規模の大きい建屋においては、埋込み効果の影響は小さいと考えられる。**
- 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の3.11地震による質点系シミュレーション解析では、側面地盤ばね(Novakばね)を考慮した解析結果は観測記録よりもかなり過大な結果を与える一方、**観測記録からは埋込み効果による建屋の応答低減効果が確認された。**埋込み効果による建屋の応答低減効果は3号炉海水熱交換器建屋の3次元地盤FEM解析でも確認された。また、3次元地盤FEM解析では、建屋近傍において建屋と表層地盤の相互作用の影響も確認された。
- 3.11地震時は建屋近傍で揺すり込み沈下が発生しているが、基準地震動 S_s では、3.11地震に比べ表層地盤の非線形化が進むため、**埋込み効果が建屋応答に与える影響は3.11地震による影響よりも基準地震動 S_s 時は小さいと考えられる。**
- なお、原子炉建屋のモデルに側面地盤ばね(Novakばね)を設け基準地震動 S_s を入力した地震応答解析を実施したところ、側面地盤ばね無しのモデルに比べ大きい応答結果を与える階が生じたため、その要因について分析した。その結果、原子炉建屋のモード図の違いや表層地盤から入力される地震動の大きさ等から、**硬質岩盤ではNovakばねを介して入力する地震動の評価に課題があることが確認された。**

【設計への反映】

- 以上の結果を踏まえ、入力地震動評価の見直しに際して、側面地盤ばねを設けない場合においても建屋応答が過小評価にならないことを確認したことから2号炉原子炉建屋の**今回工認では、既工認と同様、側面地盤ばねを設けない質点系モデルを採用する。**

【今後の検討】

- 3号炉海水熱交換器建屋の3次元地盤FEM解析では、建屋近傍における建屋と表層地盤の相互作用の影響が認められたことから、**建屋の周辺の小規模施設(土木構造物等)について、相互作用の影響を受けた表層地盤の揺れが施設の安全性に及ぼす影響について確認する。**

1. 全体概要
2. 入力地震動に関する検討(原子炉建屋)
 - 2.1 検討のポイント
 - 2.2 東北地方太平洋沖地震における入力地震動の傾向
 - 2.3 入力地震動評価用地盤モデルの設定
 - (1)設定概要
 - (2)敷地地盤の成層性
 - (3)地盤モデルの仮設定
 - (4)仮設定した地盤モデルに対する観測記録を用いた検討
 - (5)表層地盤上部の非線形性を考慮したモデル
 - 2.4 入力地震動評価用地盤モデルの検証
 - 2.5 基準地震動Ssに対する適用性検討
 - (1)検討概要
 - (2)地盤モデルの適用性検討
 - (3)評価手法の適用性検討
 - 2.6 弾性設計用Sdに対する適用性検討
 - 2.7 まとめ
3. 埋込み効果に関する検討(原子炉建屋)
 - 3.1 検討のポイント
 - 3.2 原子炉建屋の埋込み効果に関する検討
 - 3.3 まとめ
4. E+F入力を考慮する既設建屋
5. 検討結果の概要と今後の検討について

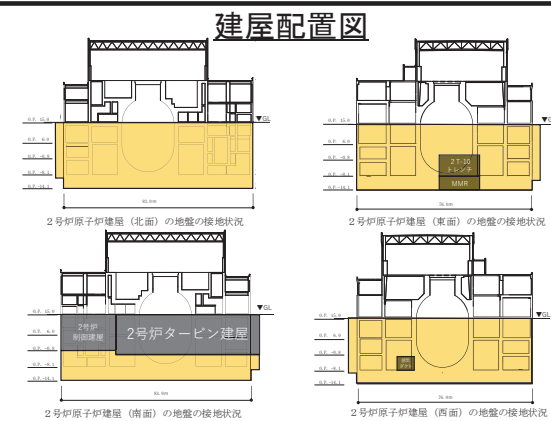
検討対象建屋

- 今回工認で基準地震動Ssの地震応答解析を行う建屋のうち、表層地盤の影響検討は以下の手順で実施する。
 建屋の周辺状況等から検討対象建屋を選定 ⇒ 3.11地震等によるシミュレーション解析からE+F効果を確認、また埋込み効果の影響を確認
- 検討対象建屋は、JEAG4601の建屋埋込み効果の評価法(E+F入力、側面地盤ばね)を参照し、埋込み深さがある程度深く、かつ2~3面程度周辺地盤と接している建屋を選定する。また、建屋の規模や周辺地盤の埋戻し状況により、側面地盤による建屋の振動特性への影響が異なってくると考えられることからそれらの項目についても整理する。

今回工認における対象建屋

建屋	埋込み深さ (基礎底面位置)	建屋周辺の 地盤状況	(参考) 建屋に要求される機能 (2号炉用)
原子炉建屋	約29m (O.P.-14.1m)	3面接地	Sクラス(原子炉建屋原子炉棟) Sクラス設備の間接支持機能
制御建屋	約16m (O.P.-1.5m)	1~2面接地	Sクラス(中央制御室しゃへい壁) Sクラス設備の間接支持機能
タービン建屋	約17m (O.P.-2.2m)	2~3面接地	Bクラス(補助しゃへい壁) Bクラス設備(Sd機能維持設備含む)の間接支持機能 原子炉建屋、制御建屋へ波及的影響を与えないこと
補助ボイラー建屋	約7m (O.P.+8.0m)	2面接地	Cクラス設備の間接支持機能 制御建屋へ波及的影響を与えないこと
3号炉 海水熱交換器建屋	約27m (O.P.-12.5m)	4面接地	2号炉浸水防護施設の間接支持機能
1号炉 制御建屋	約15m (O.P.0m)	2面接地	2号炉制御建屋へ波及的影響を与えないこと

注: 黒字の建屋は2号炉



建屋周辺地盤の接地状況
(2号炉原子炉建屋)

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。

検討対象建屋

- 埋込み深さ、建屋周辺の地盤状況、建屋規模、建屋周辺の埋戻し状況を整理して下表に示す。
- 埋込み深さがある程度深い建屋については、表層地盤の影響を考慮した入力地震動の算定が可能と考えられるが、採用に当たっては側面地盤による埋込み効果による影響についても検討する必要があると考えられることから2～3面程度周辺地盤と接している建屋を検討対象建屋とする。
- また、建屋規模が大きい場合には側面地盤の影響は小さく、建屋規模が小さい場合には側面地盤の影響が大きいとされるため、それぞれの建屋について側面地盤の影響検討を実施する。
- なお、女川2号炉の建設に当たっては、広くオープン掘削が行われ、また、埋戻し工事は掘削土を利用している。そのため、3.11地震時には揺すり込み沈下が発生した箇所もある。建屋近傍の埋戻し土の著しい剛性低下によって、埋込み効果は期待できない状況になっていたものと考えられる。
- 以上より、検討対象建屋は、2号炉原子炉建屋の他に、**2号炉タービン建屋**、**3号炉海水熱交換器建屋**を選定する。
- この2建屋について、3.11地震によるシミュレーション解析について検討し、2号炉原子炉建屋と同様の評価が適用可能かどうかについて確認する。

今回工認におけるE+F入力を考慮する既設建屋の選定

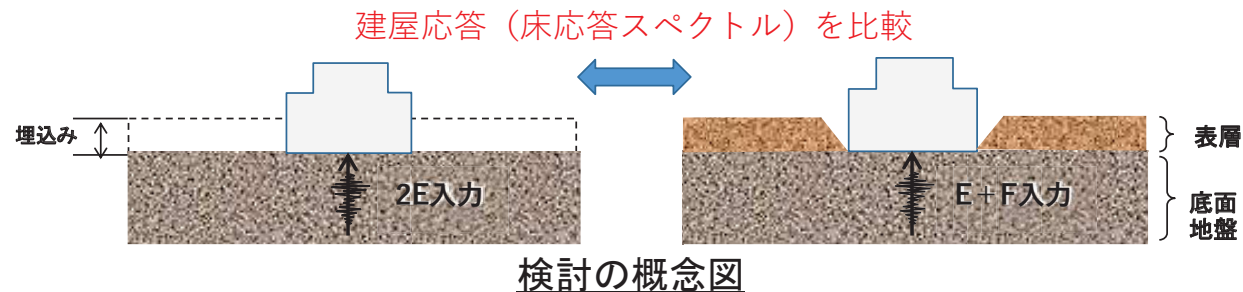
建屋	埋込み深さ (基礎底面位置)	建屋周辺の 地盤状況	建屋規模	建屋周辺の 埋戻し状況	周辺地盤による 埋込み効果の影響	検討対象建屋
原子炉建屋	約29m (O.P.-14.1m)	3面接地	大規模	掘削土	小 (Novakばね適用には課題有)	対象 (前章までに検討済)
制御建屋	約16m (O.P.-1.5m)	1～2面接地	小規模	掘削土	小 (地盤状況よりNovakばね適用外)	対象外
タービン建屋	約17m (O.P.-2.2m)	2～3面接地	大規模	掘削土	小 (Novakばね適用には課題有)	対象
補助ボイラー建屋	約7m (O.P.+8.0m)	2面接地	小規模	掘削土	小 (地盤状況よりNovakばね適用外)	対象外
3号炉 海水熱交換器建屋	約27m (O.P.-12.5m)	4面接地	小規模	掘削土	大 (Novakばね適用には課題有)	対象
1号炉 制御建屋	約15m (O.P.0m)	2面接地	小規模	掘削土	小 (地盤状況よりNovakばね適用外)	対象外

注：黒字の建屋は2号炉

観測記録を用いた表層地盤の影響確認(E+F入力)

■検討目的および方法

- 選定した建屋のうち、既に検討を示した原子炉建屋以外のタービン建屋および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て表層地盤の影響が現れているか確認する。
- 検討方法は、はぎとり波を用いたシミュレーション解析を実施し、3.11地震のはぎとり波を建屋モデルに直接入力(2E入力)した場合と地盤調査結果に基づき設定した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基礎版底面位置の地震動を入力(E+F入力)した場合の観測記録の再現性を確認する。



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号炉タービン建屋, 3号炉海水熱交換器建屋	
地震動	3.11地震はぎとり波	
入力地震動	直接入力(2E入力)	基礎版底面位置の地震動(E+F) を算定し入力 (補正水平力考慮)
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5%, 側面地盤ばね無し)	
地盤モデル	—	地盤調査結果に基づき 設定した地盤モデル (表層非線形考慮)

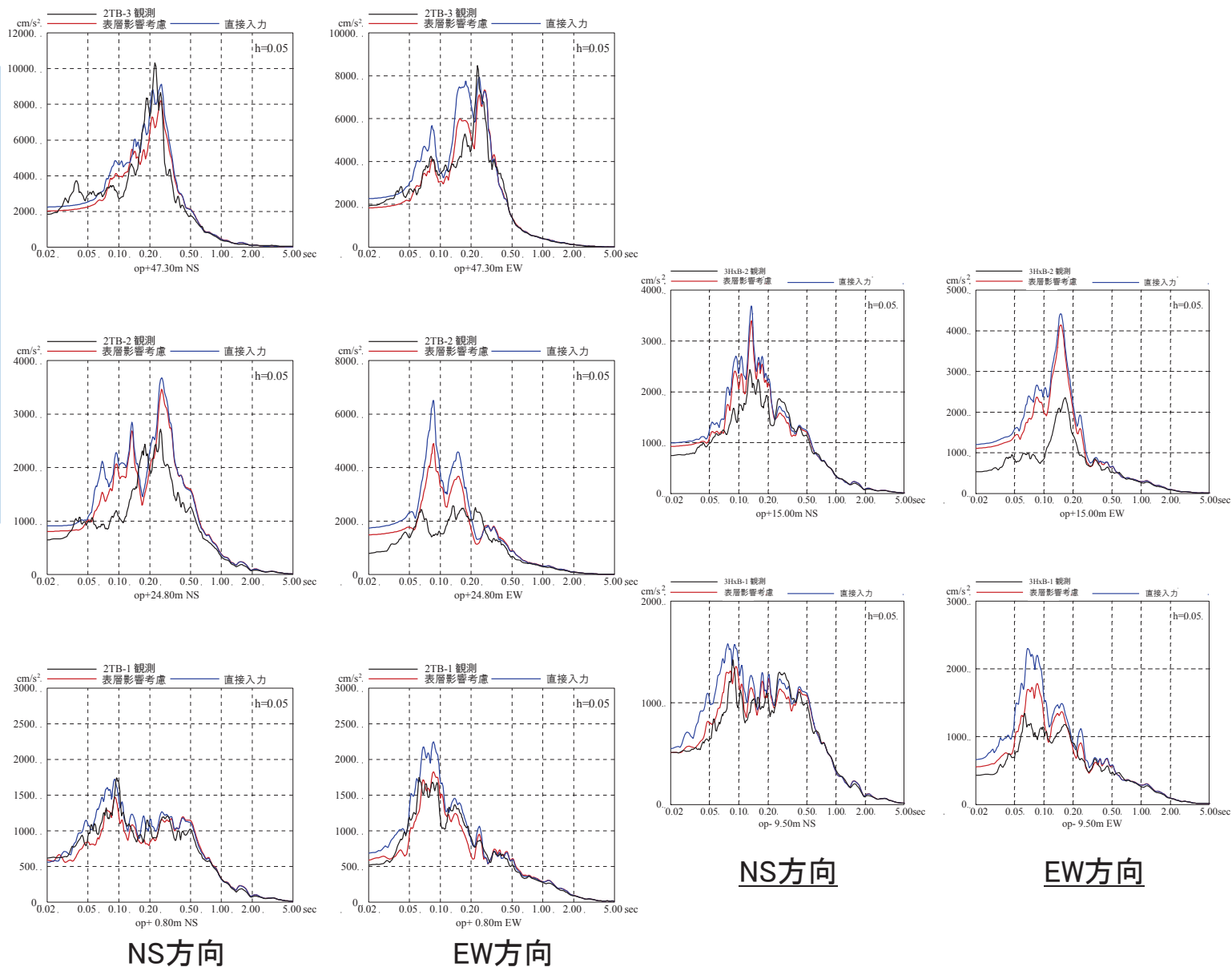
観測記録を用いた表層地盤の影響確認(E+F入力)

■検討結果

➤ どちらの建屋についても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調和的である。



両建屋とも、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。



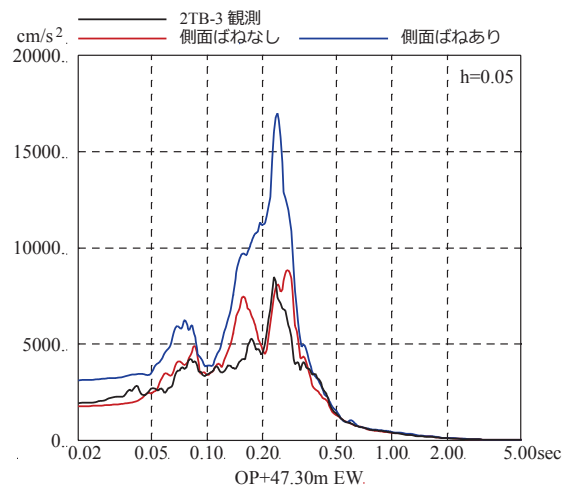
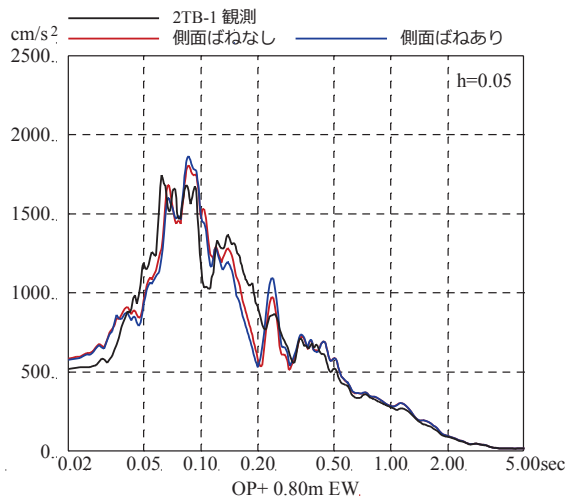
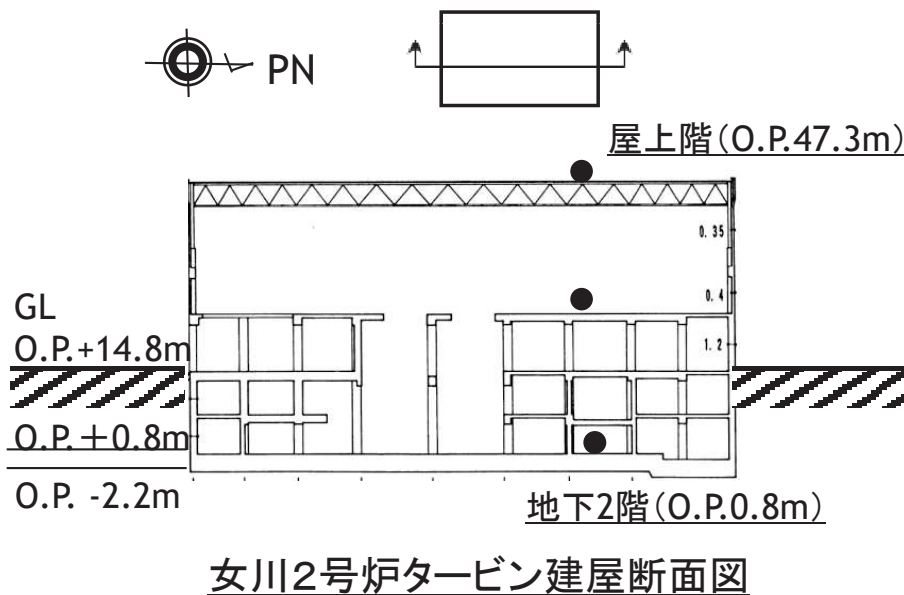
NS方向 EW方向 女川2号炉タービン建屋 女川3号炉海水熱交換器建屋

3.11地震のはぎとり波を用いたシミュレーション解析結果の比較

観測記録を用いた埋込み効果の影響確認

タービン建屋の埋込み効果に関する検討

検討目的	<ul style="list-style-type: none"> ・2号炉タービン建屋も原子炉建屋と同様に、はぎとり波を用いた3.11地震のシミュレーション解析では、側面地盤ばね (Novakばね) の無いモデルが観測記録と調和的であることを確認している(「4.E+F入力考慮する既設建屋」参照)。このことから、タービン建屋でも今回工認ではE+F入力を採用する予定である。 ・E+F入力を採用するため、側面地盤ばね (Novakばね) の有無が建屋の振動特性に与える影響を確認する。
検討方法	<ul style="list-style-type: none"> ・側面地盤ばね (Novakばね) の有り・無しモデルについて、応答結果の違いを確認する。
検討結果	<ul style="list-style-type: none"> ・側面地盤ばね (Novakばね) 有りモデルの方が大きい応答結果を与える階が生じた。 ・原子炉建屋の検討と同様に側面地盤からの入力の影響が大きいと考えられる。



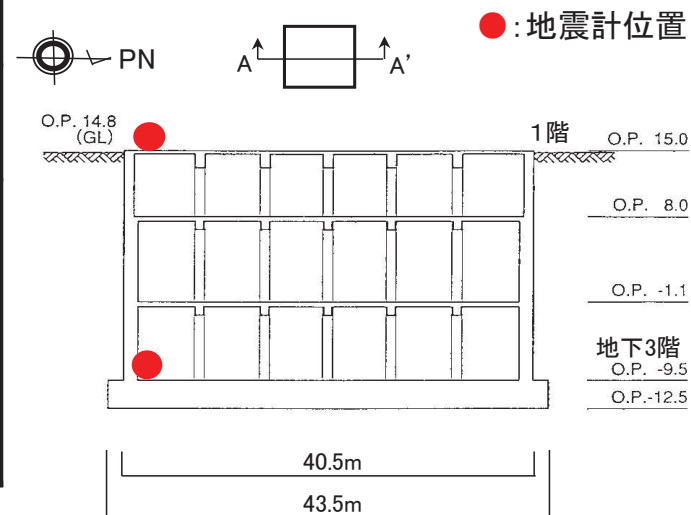
床応答スペクトルの比較例 (EW方向)

➤ この検討結果を踏まえて、今回工認では側面地盤ばね (Novakばね) を設けないモデルを採用することとする。

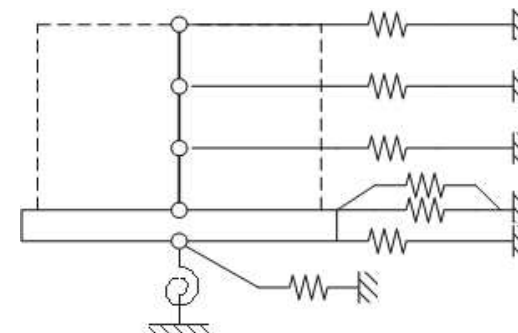
観測記録を用いた側面地盤ばねの影響確認

■3号炉海水熱交換器建屋の埋込み効果に関する検討

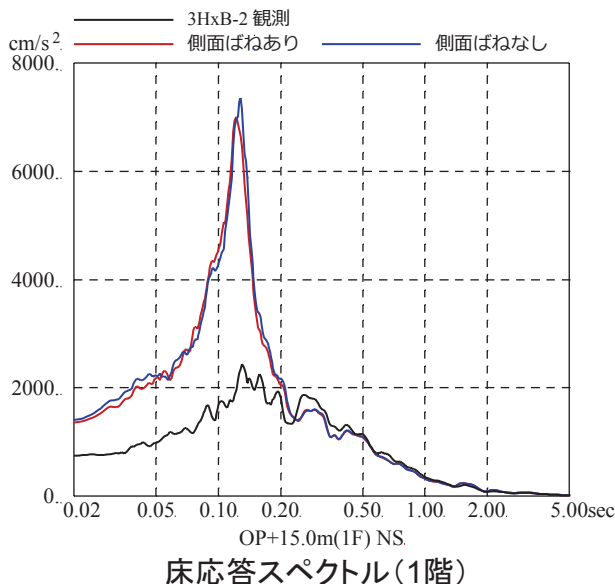
検討目的	・E+F入力を採用するにあたり、側面地盤ばね(Novakばね)の有無が建屋の振動特性に与える影響を確認する。
検討方法	・側面地盤ばね(Novakばね)の有り・無しモデルについて、応答結果の違いを観測記録と比較、確認する。
検討結果	<ul style="list-style-type: none"> ・側面地盤ばね(Novakばね)有り、無し(建屋減衰5%)の場合ともに解析結果は観測記録に対し過大となり保守的な結果を与えるものとなっている。観測記録に見られる埋込みの効果(低減効果)をどちらも再現できない結果となった。 ・側面地盤ばね(Novakばね)有り、無しにあまり差がないのは、建屋固有振動数(約8Hz)と表層地盤の卓越振動数(約2Hz)の乖離が大きく、Novakばねから入力される地震動による影響が小さいためと考えられる。



3号炉海水熱交換器建屋の概要



質点系モデル(側面地盤ばね有り)



➤ この検討結果を踏まえて、保守的であるが今回工認では側面地盤ばね(Novakばね)を設けないモデルを採用することとする。

まとめ

- 2号炉原子炉建屋以外で、表層地盤の影響の有無を検討する対象建屋として選定した2号炉タービン建屋、3号炉海水熱交換器建屋について、3.11地震によるシミュレーション解析を行い、表層地盤の影響について2号炉原子炉建屋と同様の評価が適用可能かどうかについて確認した。
- その結果、2号炉タービン建屋、3号炉海水熱交換器建屋とも、2号炉原子炉建屋と同様に、“E+F入力 + 側面地盤ばね無し”モデルによるシミュレーション解析が、はぎとり波を直接入力するよりも建屋の観測記録と整合することを確認した。なお、3号炉海水熱交換器建屋については埋込みによる建屋の振動抑制効果が顕著に認められたが、今回工認ではその影響を保守的に無視する。
- 以上のことから、2号炉原子炉建屋の他に、2号炉タービン建屋、3号炉海水熱交換器建屋について、今回工認では表層地盤の入力低減効果を考慮する。なお、入力地震動評価用の地盤モデルは、2号炉原子炉建屋の検討プロセスと同様の検討を踏まえ策定していく。

今回工認におけるE+F入力を考慮する既設建屋の選定

建屋	埋込み深さ (基礎底面位置)	建屋周辺の 地盤状況	はぎとり波を用いた シミュレーション解析	入力地震動評価における 表層地盤の影響考慮 (E+F入力)	(参考) 建屋に要求される機能 (2号炉用)
原子炉建屋	約29m (O.P.-14.1m)	3面接地	2Eに比べ E+F入力がより整合	考慮 (既工認から変更)	Sクラス(原子炉建屋原子炉棟) Sクラス設備の間接支持機能
制御建屋	約16m (O.P.-1.5m)	1~2面接地	—	非考慮 (既工認と同じ)	Sクラス(中央制御室遮蔽壁) Sクラス設備の間接支持機能
タービン建屋	約17m (O.P.-2.2m)	2~3面接地	2Eに比べ E+F入力がより整合	考慮 (既工認から変更)	Bクラス(補助遮蔽壁) Bクラス設備(Sd機能維持設備含む)の間接支持 機能 原子炉建屋、制御建屋へ波及的影響を与えない こと
補助ボイラー建屋	約7m (O.P.+8.0m)	2面接地	—	非考慮 (既工認と同じ)	Cクラス設備の間接支持機能 制御建屋へ波及的影響を与えないこと
3号炉 海水熱交換器建屋	約27m (O.P.-12.5m)	4面接地	2Eに比べ E+F入力がより整合	考慮 (既工認から変更)	2号炉浸水防護施設の間接支持機能
1号炉 制御建屋	約15m (O.P.0m)	2面接地	—	非考慮 (既工認と同じ)	2号炉制御建屋へ波及的影響を与えないこと

注: 黒字の建屋は2号炉

1. 全体概要
2. 入力地震動に関する検討(原子炉建屋)
 - 2.1 検討のポイント
 - 2.2 東北地方太平洋沖地震における入力地震動の傾向
 - 2.3 入力地震動評価用地盤モデルの設定
 - (1)設定概要
 - (2)敷地地盤の成層性
 - (3)地盤モデルの仮設定
 - (4)仮設定した地盤モデルに対する観測記録を用いた検討
 - (5)表層地盤上部の非線形性を考慮したモデル
 - 2.4 入力地震動評価用地盤モデルの検証
 - 2.5 基準地震動Ssに対する適用性検討
 - (1)検討概要
 - (2)地盤モデルの適用性検討
 - (3)評価手法の適用性検討
 - 2.6 弾性設計用Sdに対する適用性検討
 - 2.7 まとめ
3. 埋込み効果に関する検討(原子炉建屋)
 - 3.1 検討のポイント
 - 3.2 原子炉建屋の埋込み効果に関する検討
 - 3.3 まとめ
4. E+F入力を考慮する既設建屋
5. 検討結果の概要と今後の検討について

5. 検討結果の概要と今後の検討について

	入力地震動(E+F入力)	埋込み効果
検討結果の概要 (2号炉原子炉建屋)	<ul style="list-style-type: none"> 3.11地震等の記録を用いた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、解放基盤表面相当の観測記録(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。 	<ul style="list-style-type: none"> 3.11地震による2号炉原子炉建屋の質点系モデルによる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。この傾向は後に示すタービン建屋の質点系モデルによるシミュレーション解析でも同様の傾向が得られており、規模の大きい建屋においては、埋込み効果の影響は小さいと考えられる。 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の3.11地震による質点系シミュレーション解析では、側面地盤ばね(Novakばね)を考慮した解析結果は観測記録よりもかなり過大な結果を与える一方、観測記録からは埋込み効果による建屋の応答低減効果が確認された。埋込み効果による建屋の応答低減効果は3号炉海水熱交換器建屋の3次元地盤FEM解析でも確認された。また、3次元地盤FEM解析では、建屋近傍において建屋と表層地盤の相互作用の影響も確認された。 基準地震動Ssでは、3.11地震に比べ表層地盤の非線形化が進み、埋込み効果が建屋応答に与える影響は3.11地震による影響よりも基準地震動Ss時は小さいと考えられる。 なお、原子炉建屋のモデルに側面地盤ばね(Novakばね)を設け基準地震動Ssを入力した地震応答解析を実施したところ、側面地盤ばね無しモデルに比べ大きい応答結果を与える階が生じたため、その要因について分析した。その結果、原子炉建屋のモード図の違いや表層地盤から入力される地震動の大きさ等から、硬質岩盤ではNovakばねを介して入力する地震動の評価に課題があることが確認された。 <p>⇒以上の結果を踏まえ、2号炉原子炉建屋の今回工認では、既工認と同様、側面地盤ばねを設けない質点系モデルを採用する。</p>
E+F入力を考慮する既設建屋	<ul style="list-style-type: none"> 3.11地震によるシミュレーション解析を行った結果、“E+F入力 + 側面地盤ばね無し”モデルによるシミュレーション解析が、はぎとり波を直接入力するよりも建屋の観測記録と整合することを確認した2号炉タービン建屋、3号炉海水熱交換器建屋について、E+F入力を適用する。 	<ul style="list-style-type: none"> 埋込み効果については、特に3号炉海水熱交換器建屋について振動抑制効果が確認されたが、今回工認については、安全側にそれを無視したモデルを採用する。

5. 検討結果の概要と今後の検討について

	入力地震動(E+F入力)	埋込み効果
今後の検討について	<p>➤ 策定した地盤モデルは3.11地震に対してその適用性を確認しているが、基準地震動S_sではさらに地震動レベルが大きくなることから、今回検討した表層地盤の非線形特性など地震動レベルの影響を受ける因子について、ばらつき程度とばらつきが応答結果に与える影響について精査し、設計に反映すべき不確かさの具体的内容を抽出・整理していく。</p>	<p>➤ 3号炉海水熱交換器建屋の3次元地盤FEM解析では、建屋近傍における建屋と表層地盤の相互作用の影響が認められたことから、建屋の周辺の小規模施設(土木構造物等)について、相互作用の影響を受けた表層地盤の揺れが施設の安全性に及ぼす影響について確認する。</p>

【参考検討】地盤モデルの違いによる建屋応答への影響について

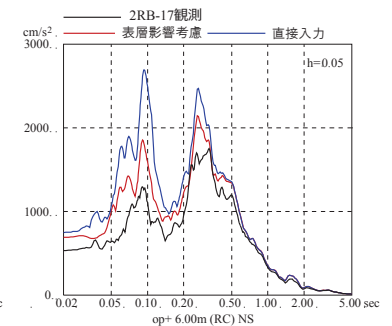
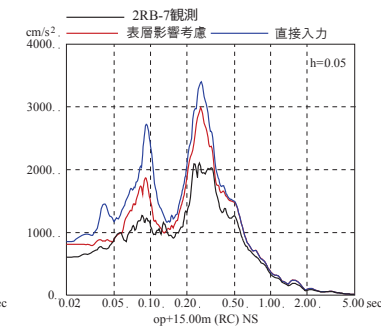
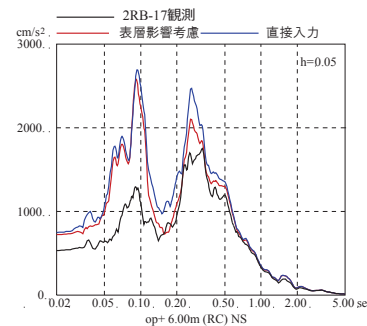
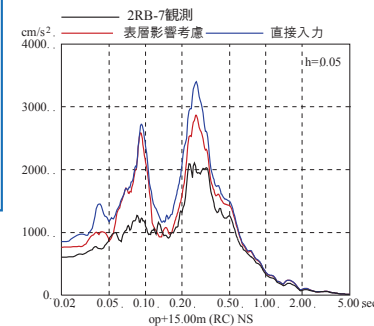
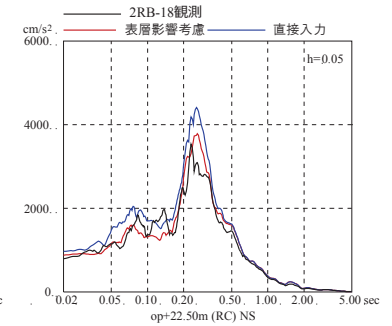
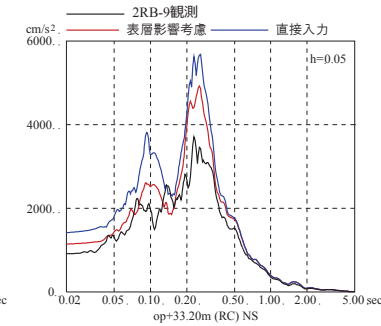
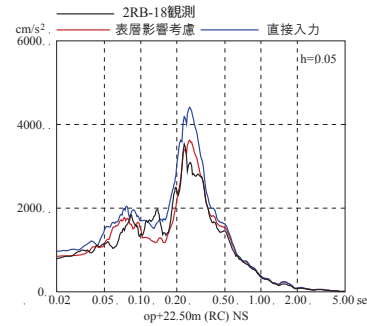
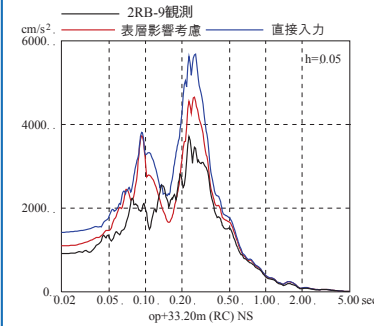
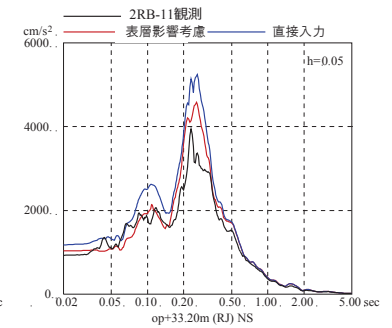
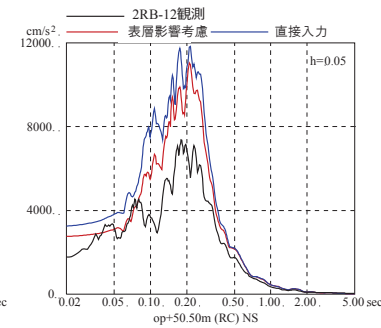
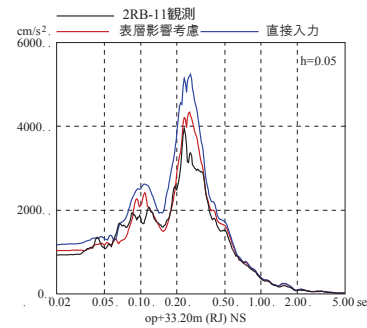
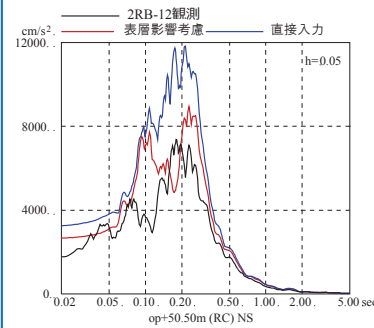
建屋応答の比較(3.11地震)

今回工認用地盤モデルと前回審査会合で3.11地震の検討に用いていたPS検層結果より表層地盤を一律740m/sと設定した地盤モデルによる建屋応答への影響について確認した。

表層地盤のせん断波速度Vsを一律740m/sとした場合と、今回工認用地盤モデルを用いた場合では、0.2秒付近の低減効果は同程度であるが、0.1秒付近では、今回工認用地盤モデルの方が低減効果が大きい。

これは、表層地盤を一律740m/sとした場合と今回工認用地盤モデルでは地盤の卓越振動数が異なることによる影響であると考えられる。

また、効果の現れる周期帯は入力地震動自体の特性に因っても異なると考えられる。



NS方向

(表層地盤のVsを一律740m/sとしたもの)

NS方向

(今回工認用地盤モデル)

3.11地震のはざとり波を用いた2E入力とE+F入力(側面地盤ばね無し)による
シミュレーション解析結果の比較

添付資料

添付① 入力地震動の評価方法見直しによる施設影響

添付② 敷地地盤の成層性

添付③ 入力地震動評価用地盤モデルの設定

添付④ 入力地震動評価用地盤モデルの検証

添付⑤ 基準地震動 S_s に対する適用性検討

添付⑥ 埋込み効果に関する検討

別紙① 地震観測位置

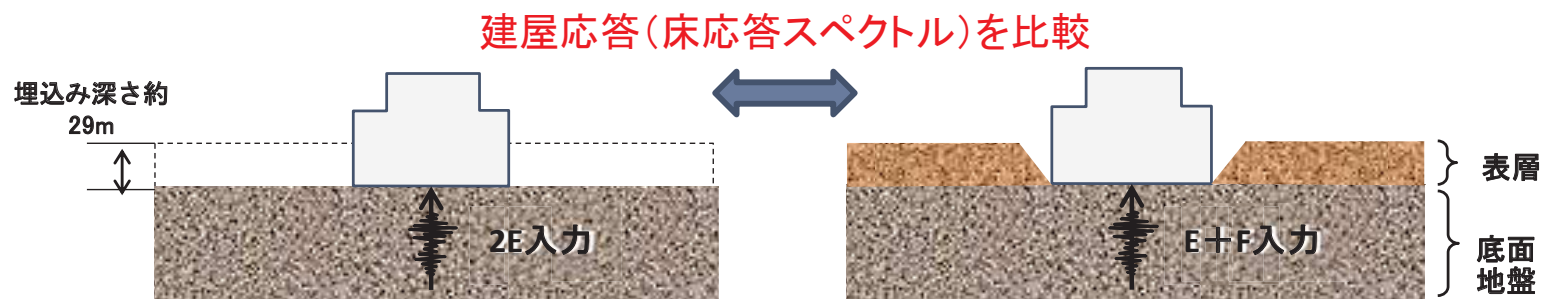
別紙② 建屋と地盤との接地状況

入力地震動の評価方法見直しによる施設影響

入力地震動の評価方法見直しによる施設影響

■検討目的および検討方法

- 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。
- 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基礎版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、今回工認用の入力地震動評価用地盤モデルとする。

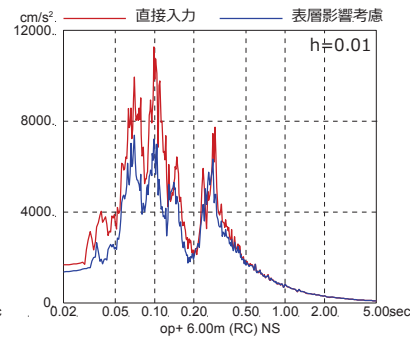
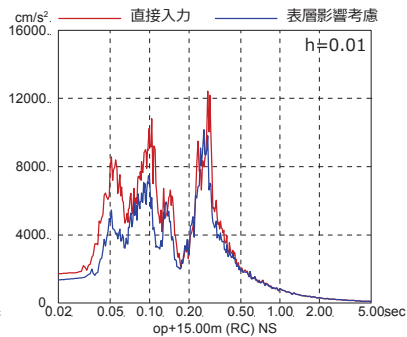
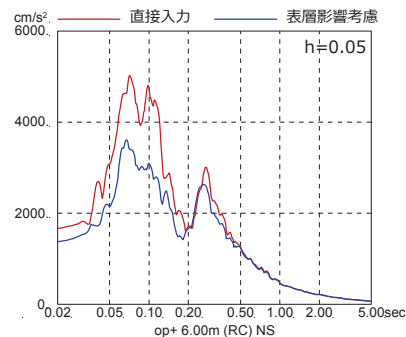
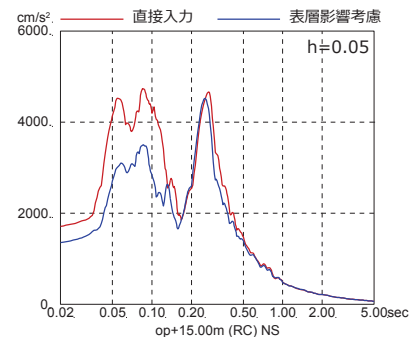
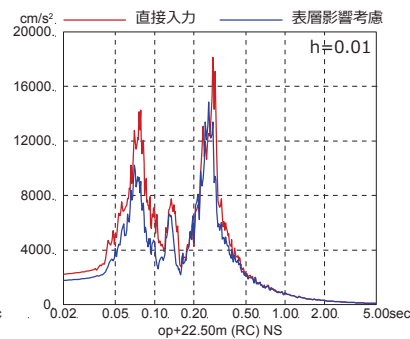
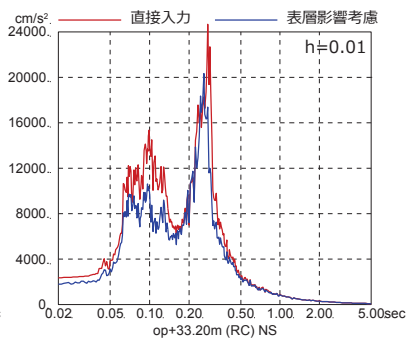
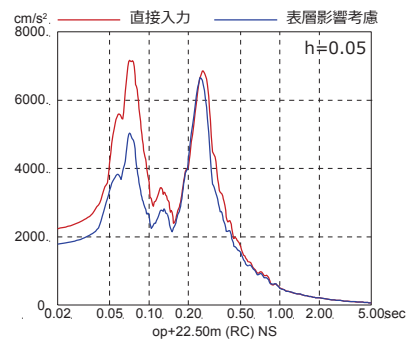
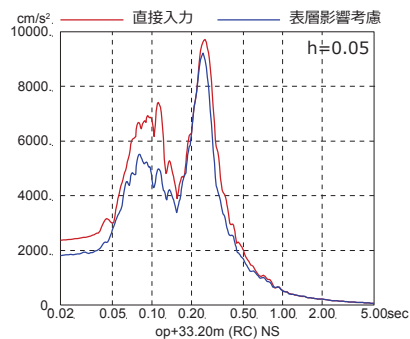
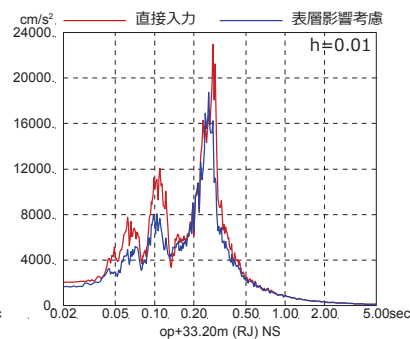
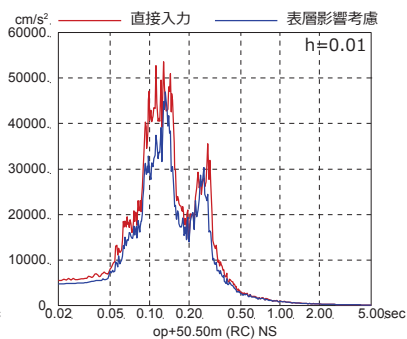
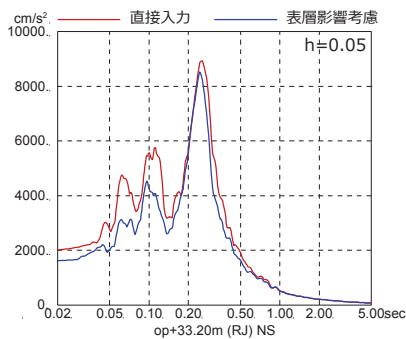
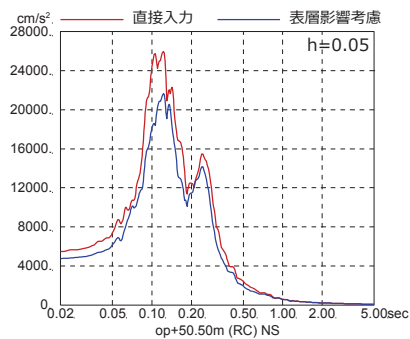


	直接入力(2E入力)したケース	E+F入力としたケース
建屋	2号炉原子炉建屋	
地震動	基準地震動 S_s -D2	
入力地震動	直接入力(2E入力)	基礎版底面位置の地震動(E+F)を算定し入力(補正水平力考慮)
建屋モデル	今回工認モデル (初期剛性低下考慮, 建屋減衰5%, 側面地盤ばね無し, 耐震補強考慮)	
地盤モデル	—	入力地震動評価用地盤モデル (表層地盤:2層モデル)

入力地震動の評価方法見直しによる施設影響

■検討結果(NS方向)

➤ 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)よりも，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)のほうが小さい。



基準地震動 S_s -D2, NS方向, 減衰5%

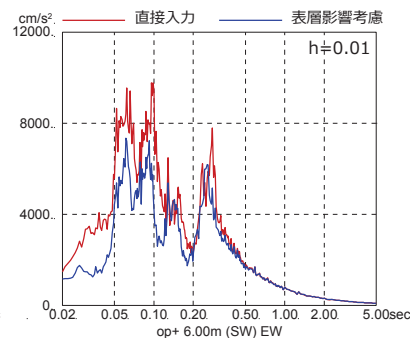
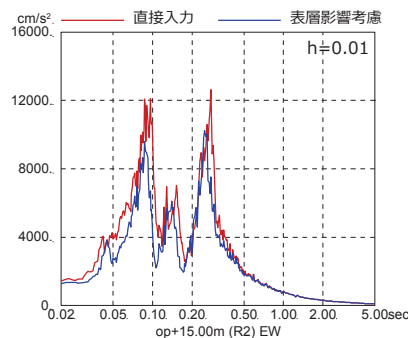
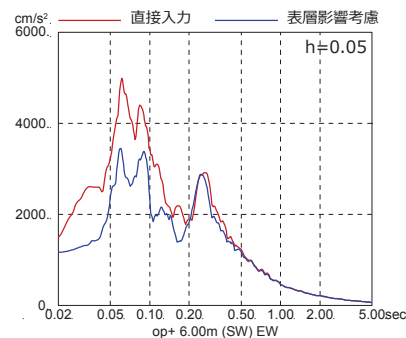
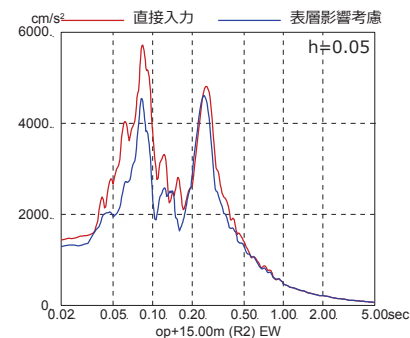
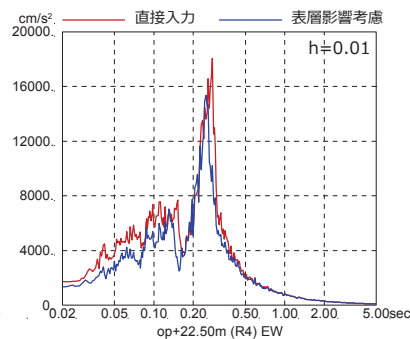
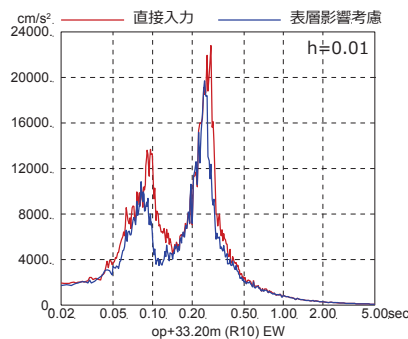
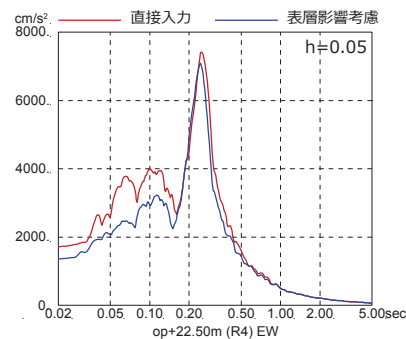
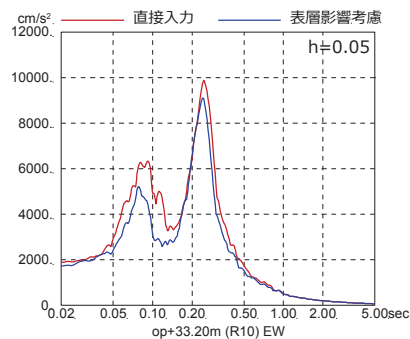
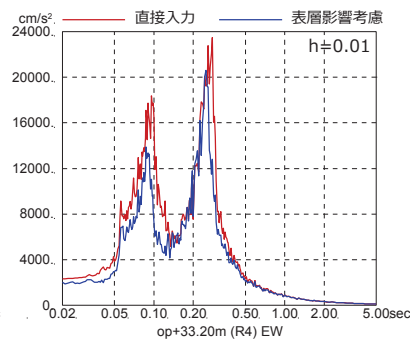
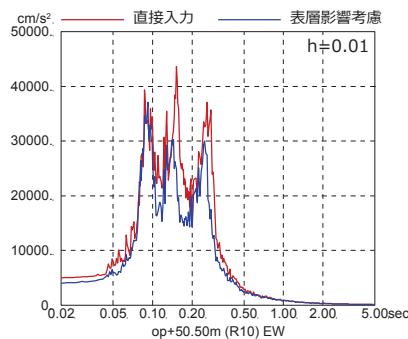
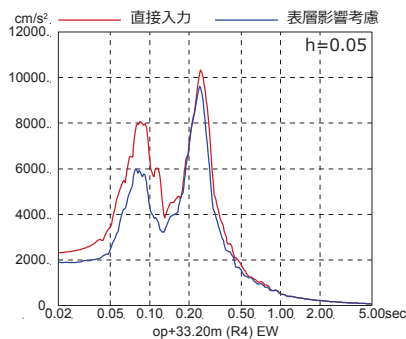
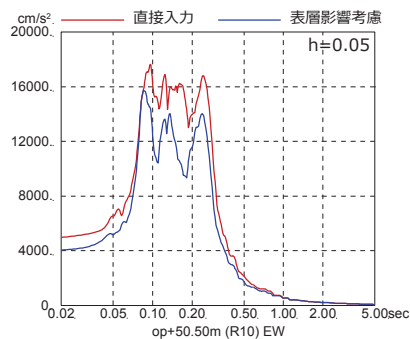
基準地震動 S_s -D2, NS方向, 減衰1%

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

入力地震動の評価方法見直しによる施設影響

■検討結果(EW方向)

➤ 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)よりも，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)のほうが小さい。



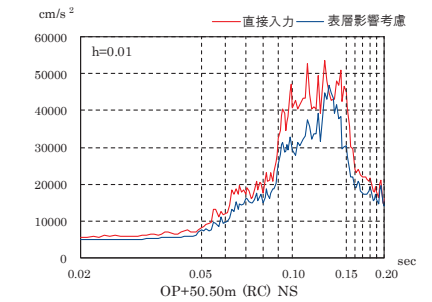
基準地震動 S_s -D2, EW方向, 減衰5%

基準地震動 S_s -D2, EW方向, 減衰1%

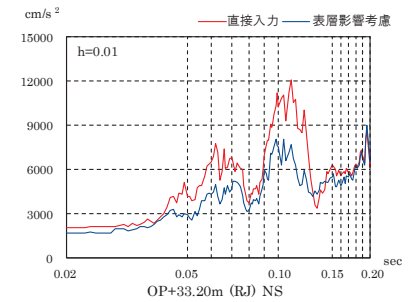
基準地震動 S_s -D2を用いた直接入力と表層地盤の影響を考慮した場合の建屋応答への影響

入力地震動の評価方法見直しによる施設影響

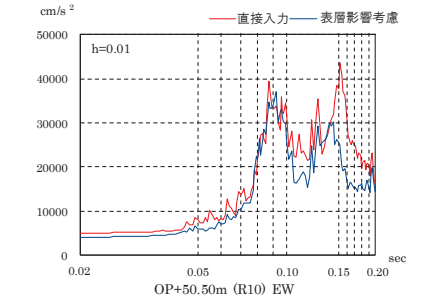
■検討結果(機電設備への影響)



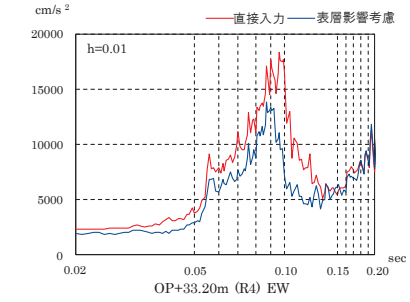
ZPA【直接入力/表層影響考慮】 : 5.42/4.71 = 1.15
 スペクトル応答比【直接入力/表層影響考慮】の平均 : 1.23
 (高圧炉心スプレイス配管の固有周期から0.098s以下を対象)



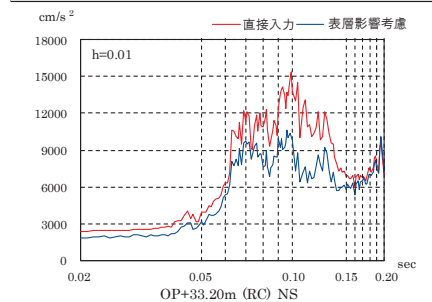
ZPA【直接入力/表層影響考慮】 : 1.93/1.62 = 1.20
 スペクトル応答比【直接入力/表層影響考慮】の平均 : 1.31
 (高圧炉心スプレイス配管の固有周期から0.098s以下を対象)



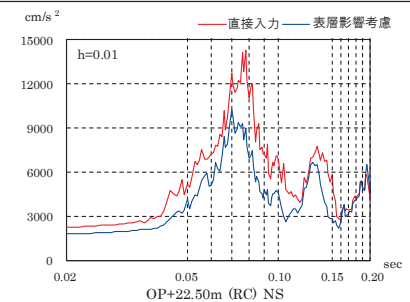
ZPA【直接入力/表層影響考慮】 : 4.90/3.98 = 1.23
 スペクトル応答比【直接入力/表層影響考慮】の平均 : 1.18
 (高圧炉心スプレイス配管の固有周期から0.098s以下を対象)



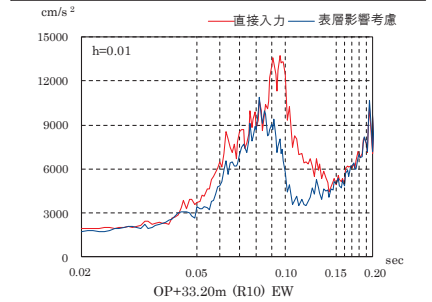
ZPA【直接入力/表層影響考慮】 : 2.23/1.80 = 1.24
 スペクトル応答比【直接入力/表層影響考慮】の平均 : 1.32
 (高圧炉心スプレイス配管の固有周期から0.098s以下を対象)



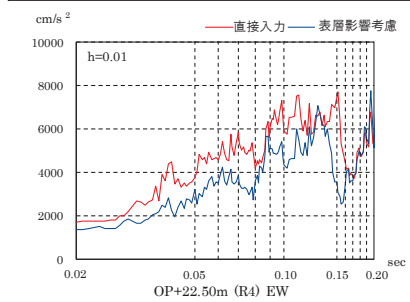
ZPA【直接入力/表層影響考慮】 : 2.36/1.82 = 1.30
 スペクトル応答比【直接入力/表層影響考慮】の平均 : 1.29
 (高圧炉心スプレイス配管の固有周期から0.098s以下を対象)



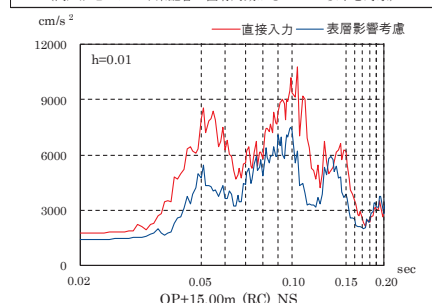
ZPA【直接入力/表層影響考慮】 : 2.09/1.74 = 1.21
 スペクトル応答比【直接入力/表層影響考慮】の平均 : 1.39
 (高圧炉心スプレイス配管の固有周期から0.098s以下を対象)



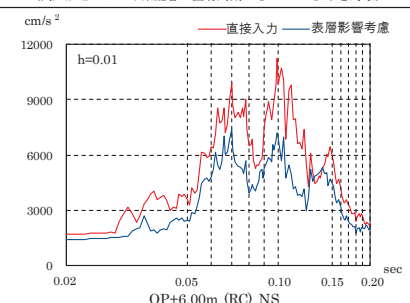
ZPA【直接入力/表層影響考慮】 : 1.89/1.74 = 1.09
 スペクトル応答比【直接入力/表層影響考慮】の平均 : 1.20
 (高圧炉心スプレイス配管の固有周期から0.098s以下を対象)



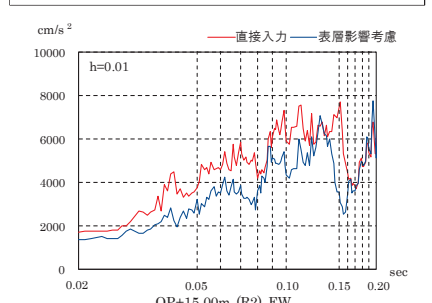
ZPA【直接入力/表層影響考慮】 : 1.66/1.34 = 1.24
 スペクトル応答比【直接入力/表層影響考慮】の平均 : 1.37
 (高圧炉心スプレイス配管の固有周期から0.098s以下を対象)



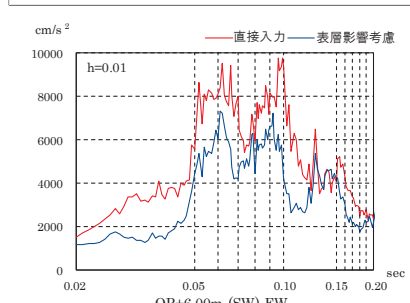
ZPA【直接入力/表層影響考慮】 : 1.65/1.31 = 1.26
 スペクトル応答比【直接入力/表層影響考慮】の平均 : 1.44
 (高圧炉心スプレイス配管の固有周期から0.098s以下を対象)



ZPA【直接入力/表層影響考慮】 : 1.57/1.29 = 1.22
 スペクトル応答比【直接入力/表層影響考慮】の平均 : 1.43
 (高圧炉心スプレイス配管の固有周期から0.098s以下を対象)



ZPA【直接入力/表層影響考慮】 : 1.42/1.29 = 1.10
 スペクトル応答比【直接入力/表層影響考慮】の平均 : 1.33
 (高圧炉心スプレイス配管の固有周期から0.098s以下を対象)



ZPA【直接入力/表層影響考慮】 : 1.46/1.12 = 1.31
 スペクトル応答比【直接入力/表層影響考慮】の平均 : 1.58
 (高圧炉心スプレイス配管の固有周期から0.098s以下を対象)

基準地震動S_s-D2, NS方向, 減衰1%

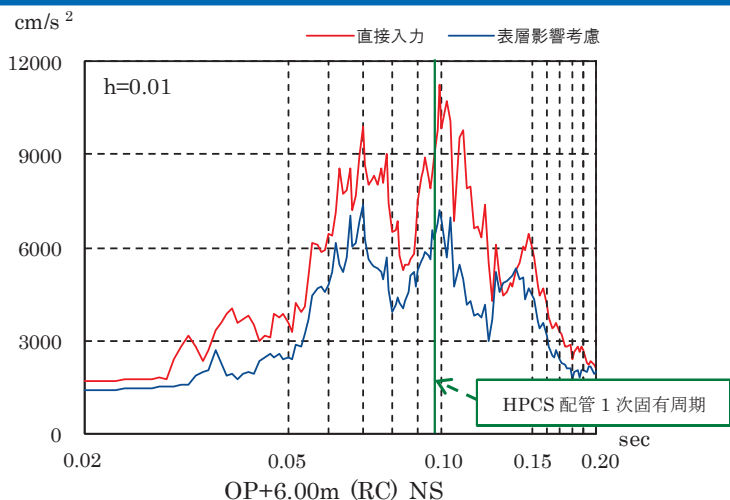
基準地震動S_s-D2, EW方向, 減衰1%

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機電設備への影響

入力地震動の評価方法見直しによる施設影響

■検討結果(機電設備への影響)

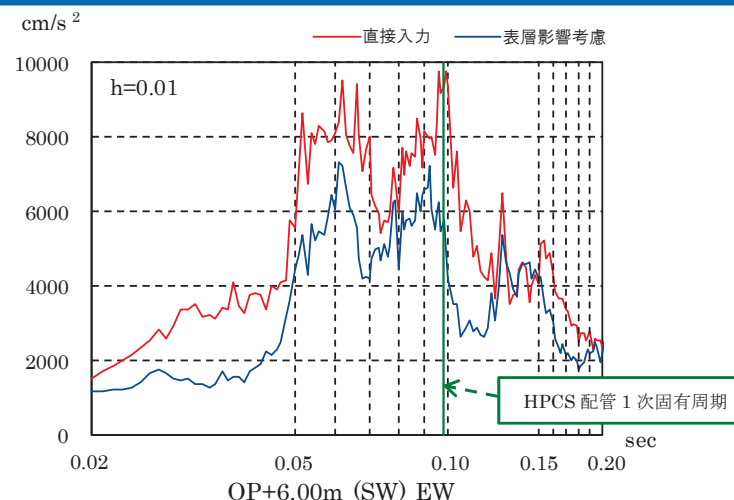
- 最大応答加速度比の最大値(1.31)を用いた影響分析(剛な床置設備)
2E入力では床の応答加速度がE+F入力より3割程度大きくなり裕度が減少するが、耐震評価の発生値が評価基準値を超過する設備はない見込み。
- 床応答スペクトルの応答比(1.58)を用いた影響分析(柔な設備)
高圧炉心スプレイ系配管(HPCS配管)※の固有周期0.098s以下に着目して2E入力とE+F入力とのスペクトルを比較した結果、応答比の平均値最大で1.58倍となる。この数値を用いて簡易的に分析した結果、一次応力の発生値(389MPa)は評価基準値(324MPa)を超過する見込み。
[246MPa × 1.58 = 389MPa]



ZPA【直接入力/表層影響考慮】 : 1.57/1.29 = 1.22

スペクトル応答比【直接入力/表層影響考慮】の平均 : 1.43
(高圧炉心スプレイ系配管の固有周期から0.098s以下を対象)

基準地震動S_s-D2, NS方向, 減衰1%



ZPA【直接入力/表層影響考慮】 : 1.46/1.12 = 1.31

スペクトル応答比【直接入力/表層影響考慮】の平均 : 1.58
(高圧炉心スプレイ系配管の固有周期から0.098s以下を対象)

基準地震動S_s-D2, EW方向, 減衰1%

高圧炉心スプレイ系配管の耐震評価結果 (H26.7.2申請の女川2号炉補正工認より抜粋)

評価対象設備		評価結果				備考
		応力分類	評価部位	発生値 (MPa)	評価基準値 (MPa)	
高圧炉心スプレイ系	高圧炉心スプレイ系配管本体	一次応力	本体	246	324	
		一次+二次応力	本体	435	398	※1
	疲労評価	本体	0.176	1	単位: なし	
	高圧炉心スプレイ系配管支持構造物	スナック耐荷重	サポート部材	97.1	129.4	単位: kN

※耐震評価の結果、評価基準値に対する余裕が少なく、床応答スペクトルの応答比が大きい周期帯に固有周期がある設備として、高圧炉心スプレイ系配管を選定した。

敷地地盤の成層性

1. 検討方針
2. 敷地の地質構造を用いた検討
3. 地下構造モデルを用いた検討
 - (1) 強震動シミュレーション解析
 - (2) 自由地盤のはぎとり解析用地下構造モデルによる分析
 - (3) はぎとり波を用いた建屋シミュレーション解析
4. 敷地の鉛直アレイで得られた地震観測記録を用いた検討
5. まとめ

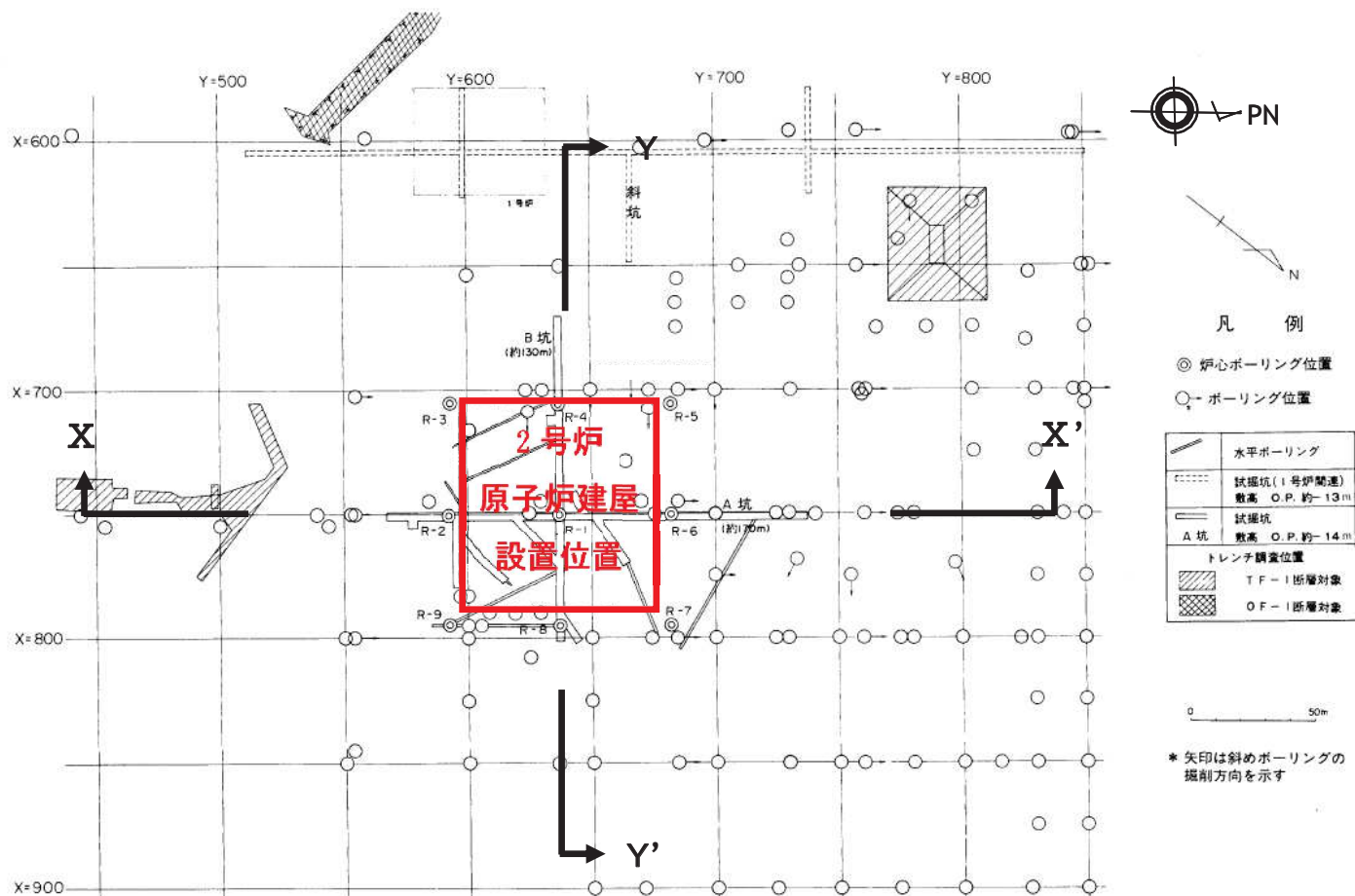
1. 検討方針

- ▶ 表層地盤の影響を考慮した入力地震動(E+F波)の算定では、3.11地震の建屋シミュレーション解析と同様に一次元波動論を適用するが、入力地震動評価用地盤モデル下端レベルから上部の地盤の振動特性評価では一次元波動論で適切に評価可能であることを敷地の地質構造、地下構造モデルおよび敷地の鉛直アレイで得られた地震観測記録を用いて検討を実施する。

- ▶ 検討にあたっては、以下の項目について確認し、敷地の地下構造を水平成層でモデル化し一次元波動論を適用することの妥当性について検討する。
 - ① 敷地の地質構造を用いた検討では、速度構造が概ね水平成層と評価出来ること
 - ② 地下構造モデルを用いた検討では、強震動シミュレーション解析等から入力地震動評価用地盤モデル下端レベルが適切に評価されていること、また、その上部地盤については、一次元波動論による評価結果が観測記録との整合が良いこと
 - ③ 敷地の複数の鉛直アレイで得られた地震観測記録により、到来方向の違いによる特異な増幅がないこと(不整形性の影響が無いこと)

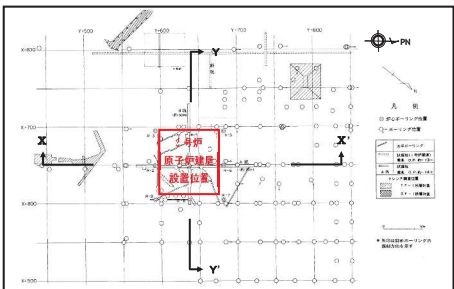
2. 敷地の地質構造を用いた検討

➤ 女川原子力発電所の敷地の岩盤分類図に示す通り、敷地には中生界ジュラ系の砂岩、頁岩等が広く分布しており、ジュラ系の地質構造は褶曲構造が発達している。しかし、速度構造図では、建屋を設置している岩盤上部は $V_s=1.5\text{km/s}$ 程度の岩であり、層厚は建屋直下付近で約10m程度と薄いものとなっているが、その下部は、 $V_s=2.2\text{km/s}$ 以上のほぼ一様な層が広く分布し、概ね水平成層となっている。



敷地の岩盤分類図および速度構造図の断面位置

2. 敷地の地質構造を用いた検討



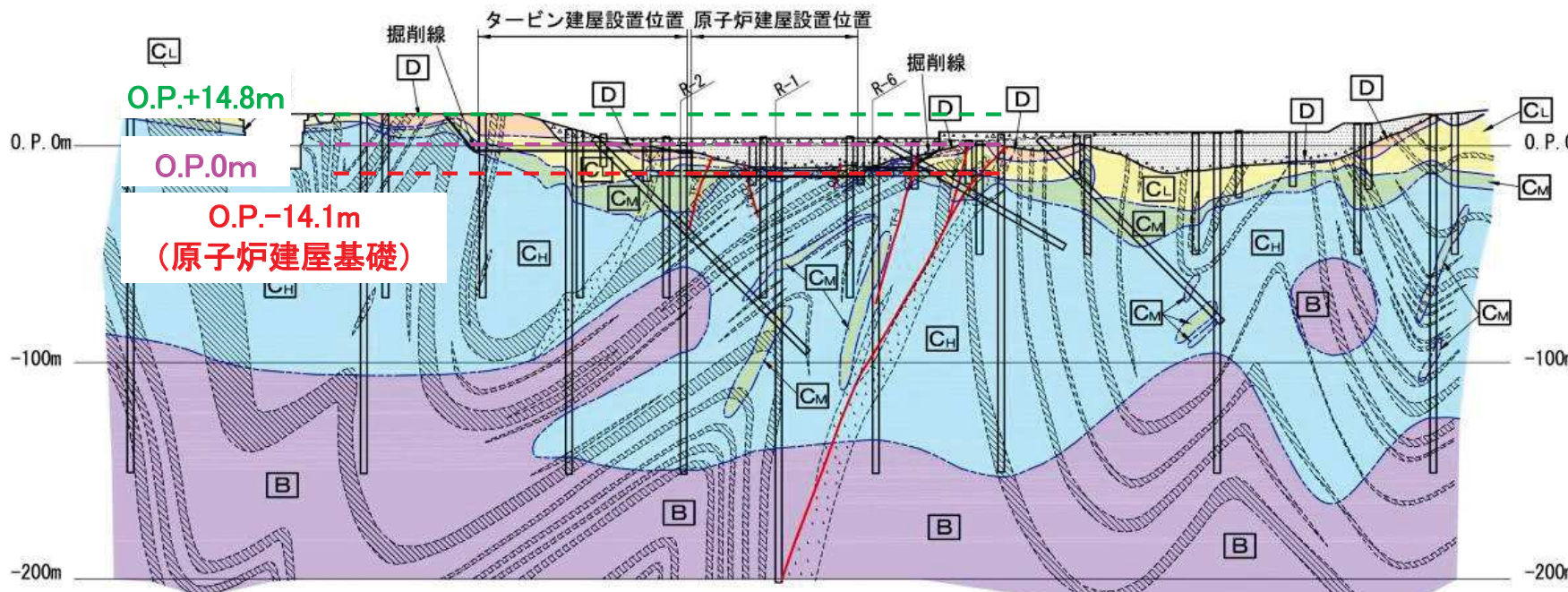
➤ 中生界ジュラ系の砂岩, 頁岩等が広く分布しており, ジュラ系の地質構造は褶曲構造が発達している。

南 (PN 基準)

X
(S)

北 (PN 基準)

X'
(N)

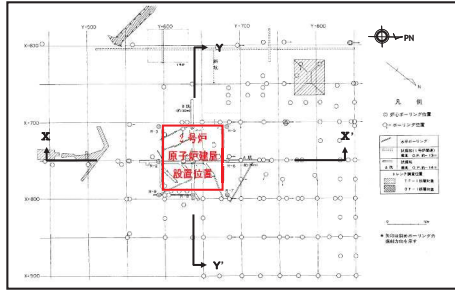


凡 例	
	B 級
	CH 級
	CM 級
	CL 級
	D 級
	岩盤分類境界
	盛 土
	第四系 (砂・礫)
	砂 岩
	頁 岩
	ひ ん 岩
	断 層
	地 質 境 界
	ボ ー リ ン グ
	試 掘 坑

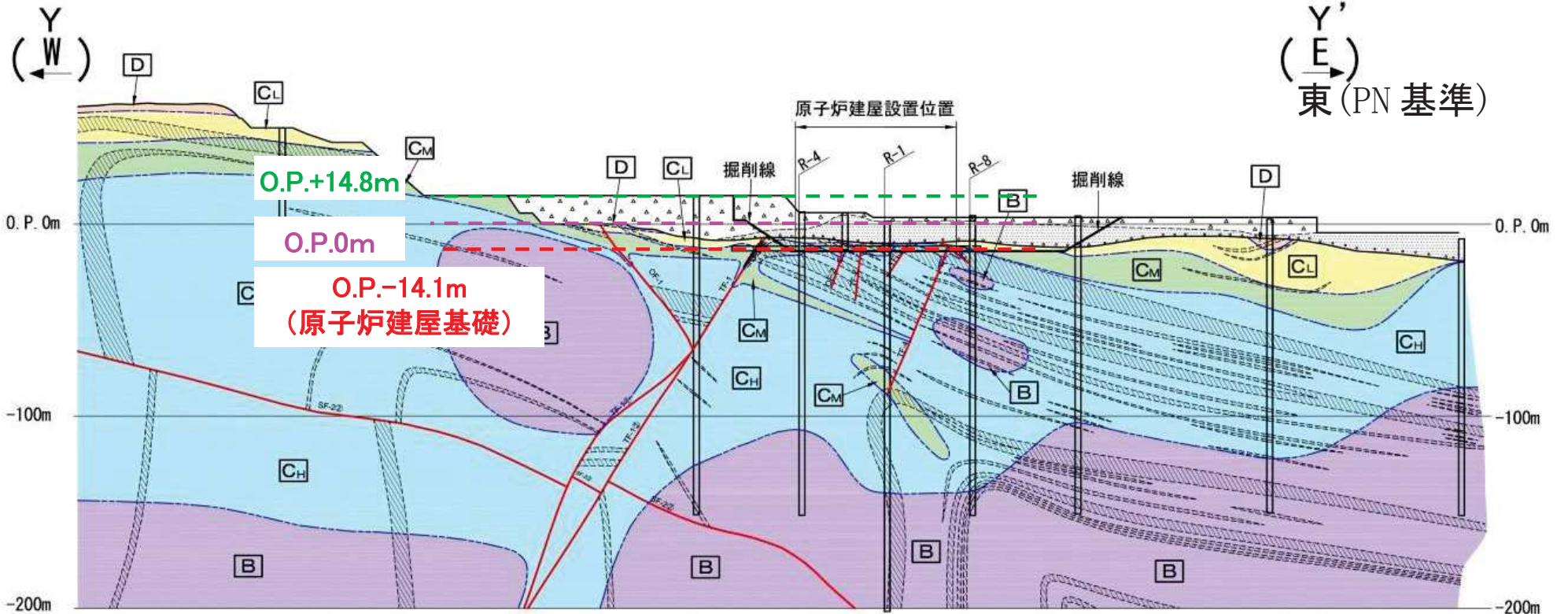
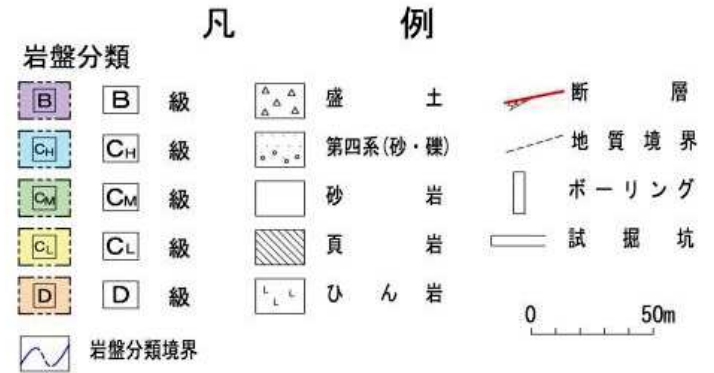
岩盤分類図 南北断面 (X-X')



2. 敷地の地質構造を用いた検討

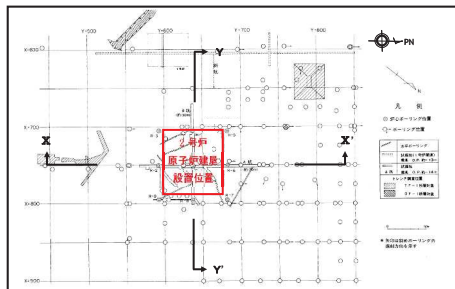


西 (PN 基準)

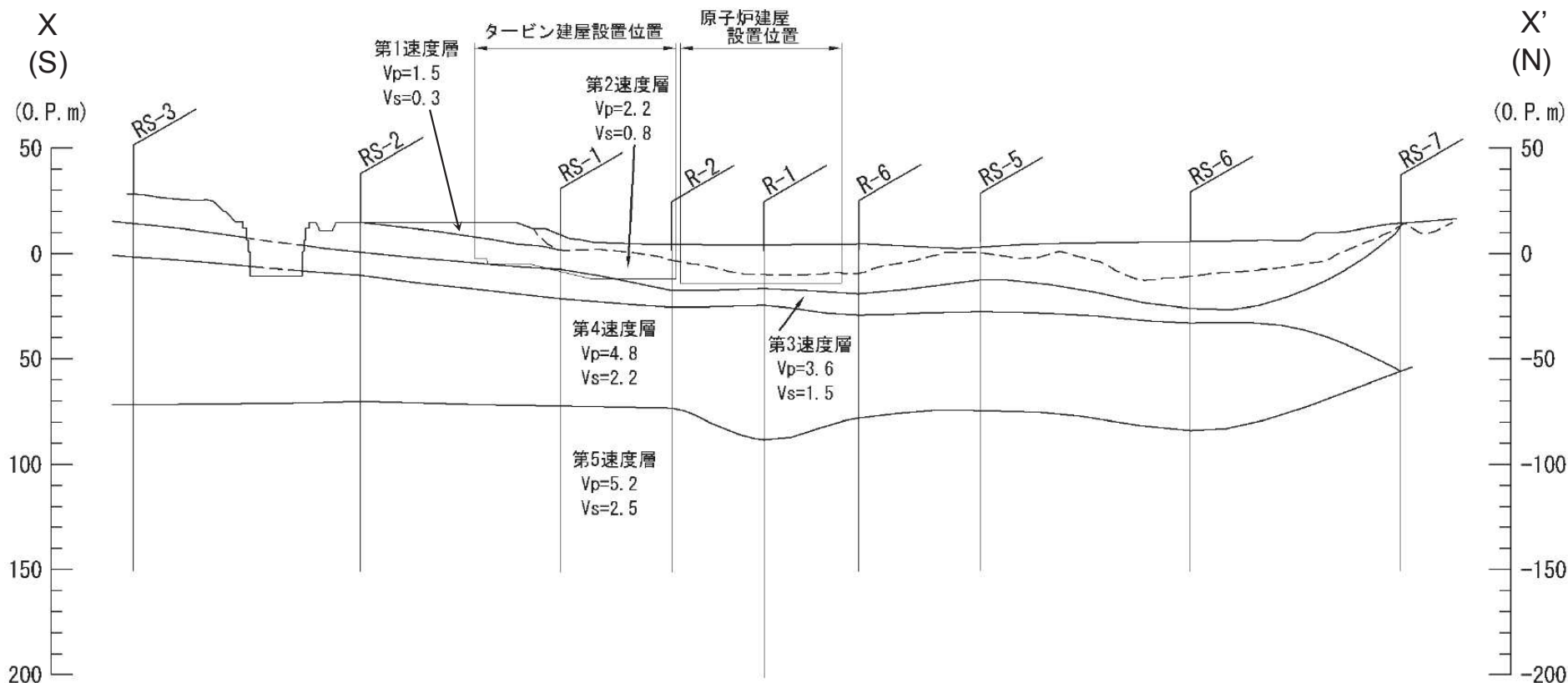


岩盤分類図 東西断面(Y-Y')

2. 敷地の地質構造を用いた検討

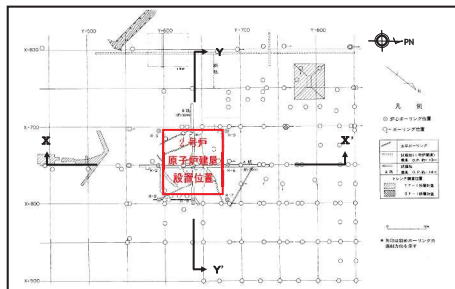


➤ 建屋を設置している岩盤上部は $V_s=1.5\text{km/s}$ 程度の岩であり、層厚は建屋直下付近で約10m程度と薄いものとなっているが、その下部は、 $V_s=2.2\text{km/s}$ 以上のほぼ一様な層が広く分布し、概ね水平成層である。

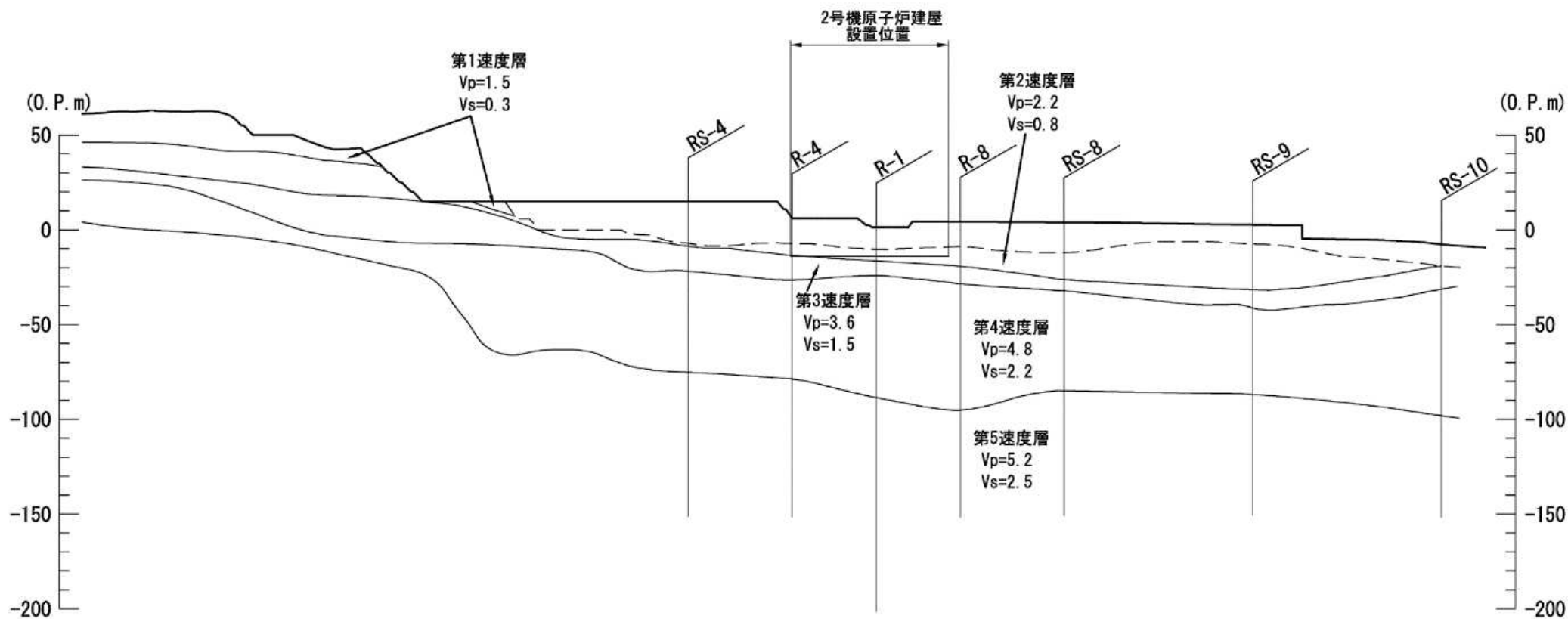


敷地の速度構造図 南北断面(X-X')

2. 敷地の地質構造を用いた検討



▶ 建屋を設置している岩盤上部は $V_s=1.5\text{km/s}$ 程度の岩であり、層厚は建屋直下付近で約10m程度と薄いものとなっているが、その下部は、 $V_s=2.2\text{km/s}$ 以上のほぼ一様な層が広く分布し、概ね水平成層である。



敷地の速度構造図 東西断面(Y-Y')

3. 地下構造モデルを用いた検討 (1) 強震動シミュレーション解析

- ▶ 女川では過去に3.11地震や4.7地震の他に、比較的大きな地震による観測記録が得られており、解放基盤表面における基準地震動評価に資するために、これらの記録を用いた強震動シミュレーション解析を実施している。解析にあたっては、地震基盤相当位置から上部の岩盤部については全て共通した次元の地下構造モデルを用いている。
- ▶ これらの検討を通じ、地震基盤相当レベルの妥当性および地震基盤から解放基盤表面レベルまでの地下構造モデルの妥当性を確認している。以下に、検討概要(4.7地震[プレート内地震]の例)を示す。

■ 強震動シミュレーション解析対象地震

	地震名	地震規模
1	2003年宮城県沖の地震	M7.1
2	2005年宮城県沖の地震	M7.2
3	2011年東北地方太平洋沖地震	M9.0
4	2011年4月7日宮城県沖の地震	M7.2

■ 強震動シミュレーション解析に用いた地盤モデル

強震動シミュレーション解析では、地震基盤相当位置から解放基盤表面までの地下構造モデル(自由地盤)を次元地盤でモデル化したものを、共通して使用している。

4.6 理論的手法に用いる深部地下構造モデルの設定(5)

理論的手法に用いる地下構造モデル

上端深さ		層厚 (m)	密度 (t/m ³)	V _s (m/s)	V _p (m/s)	Q _s	Q _p	
G.L.(m)	O.P.(m)							
-27.3	-8.6							▽岩盤上部 (解放基盤表面相当)
-34.5	-15.8	7.2	2.55	1500	2882	45	86	
-61.5	-42.8	27.0	2.66	2000	4101	60	123	
-81.8	-63.1	20.3	2.68	2200	4503	66	135	
-147.1	-128.4	65.3		2600	5300	78	159	▽地震基盤相当
-12,017.1	-11,998.4	1,1870.0	2.80	3470	6150	104	185	
-32,017.1	-31,998.4	20,000.0		3700	6400	300	600	
		∞	2.90	4200	7500	300	600	

※ O.P.-128.4m以深の密度およびV_pは、Luding et al.(1970)による。また、Q_sはCervený and Pšencik(1984)、Q_pはVassilow et al.(1982)を用いて設定した。



強震動シミュレーション解析に用いた地下構造モデル(自由地盤)



3. 地下構造モデルを用いた検討 (1) 強震動シミュレーション解析

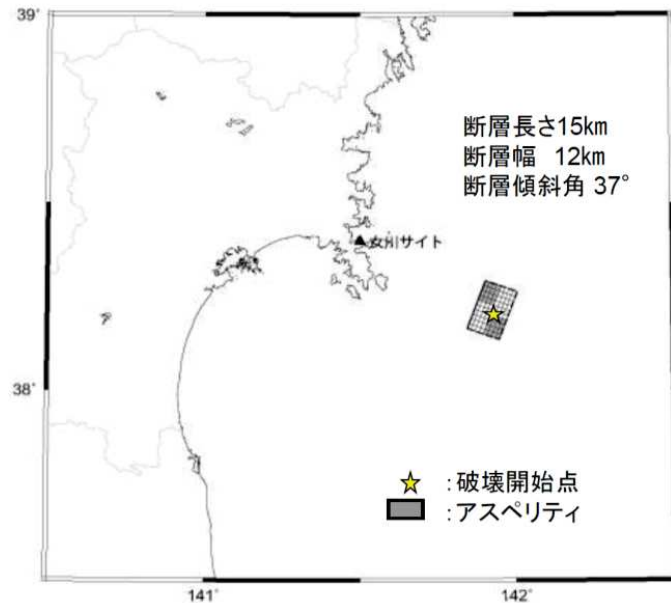
➤4.7地震の強震動シミュレーション解析では、震源モデルは各地の観測記録との整合性検討を踏まえて設定された原田・釜江のモデルをベースに設定。

5.5 2011年4月7日宮城県沖の地震の強震動シミュレーション(1)

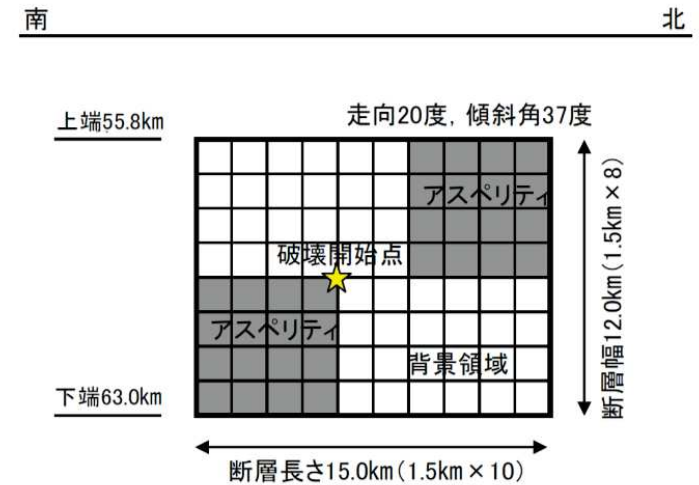
4.7地震の地震動シミュレーション解析のアスペリティモデル

- ◇モデルはアスペリティモデルとして新たに策定。
- ・短周期レベルは、原田・釜江(2011)※1のクラックモデルや佐藤(2011)を参考に設定。地震モーメントはF-netの値を採用。破壊開始点は、原田・釜江(2011)のクラックモデルを参考に設定。

※1:地震・津波6-3-1「平成23年4月7日宮城県沖の地震における地震動のシミュレーション結果について(東北電力女川原子力発電所)」参照



(a)断層モデルの平面位置



(b)展開図

※原子力安全・保安院 地震・津波6-4-2より抜粋



2011年4月7日宮城県沖の地震の強振動シミュレーション解析結果



3. 地下構造モデルを用いた検討 (1) 強震動シミュレーション解析

➤ 強震動シミュレーション解析は以下の手順で実施。

① 地震基盤相当位置での地震動を算定(波形合成法(統計的グリーン関数法))



② 地震基盤相当位置の地震動を、一次元地盤モデルで岩盤上部(解放基盤表面相当位置)の観測点位置まで引き上げ

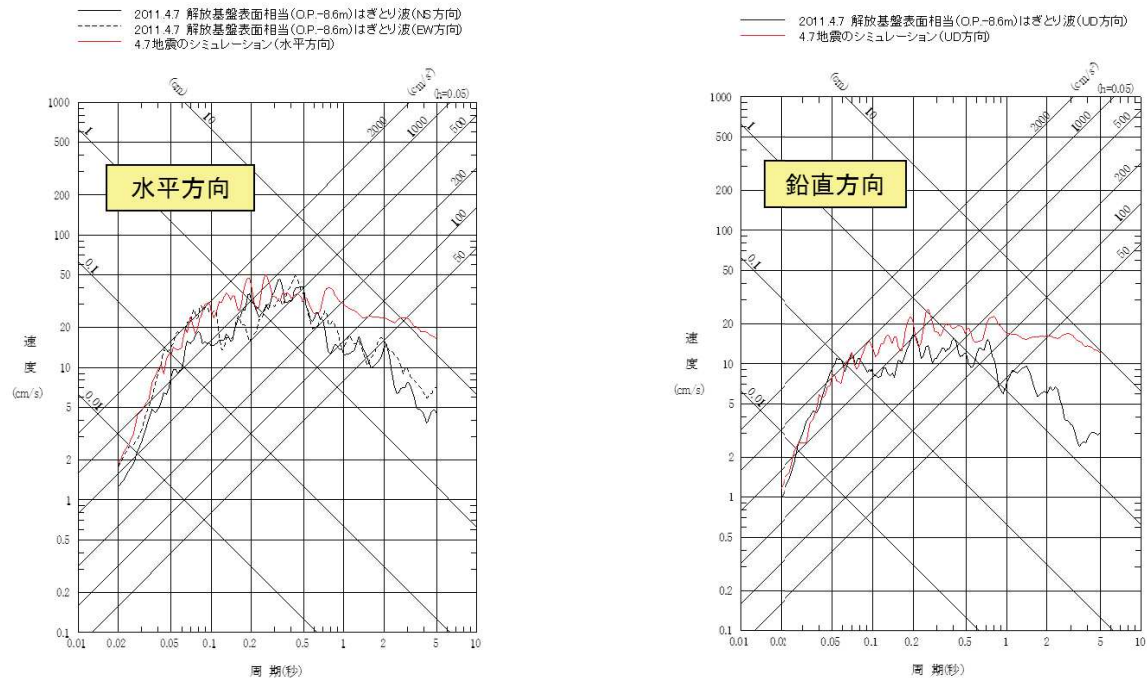
➤ 算定結果は観測記録と整合したものとなっている。また、他の3地震も同様の結果であり、地震基盤相当位置のレベル及びそれ以浅の地盤モデルは妥当と判断。なお、地震基盤より以浅の地盤モデルの妥当性については、更に他の岩盤中の観測記録との整合性検討も実施(次頁)。

5.5 2011年4月7日宮城県沖の地震の強震動シミュレーション(4)

4.7地震の地震動シミュレーション解析結果

◇ 地震動の算定結果(観測記録との比較) 応答スペクトル

・ 応答スペクトルの比較では、基準地震動 S_s を超えている周期0.1秒より短周期側では解析結果と観測記録(はぎとり波)は良く整合しているが、長周期側では解析結果がかなり大きめの結果となった。



事業者は、地震動シミュレーション結果は長周期が大きい等の課題は残るものの、特に問題となる短周期における適合性が良いことから、施設に与える影響検討という観点からは、妥当な結果と評価。

※原子力安全・保安院 地震・津波6-4-2より抜粋

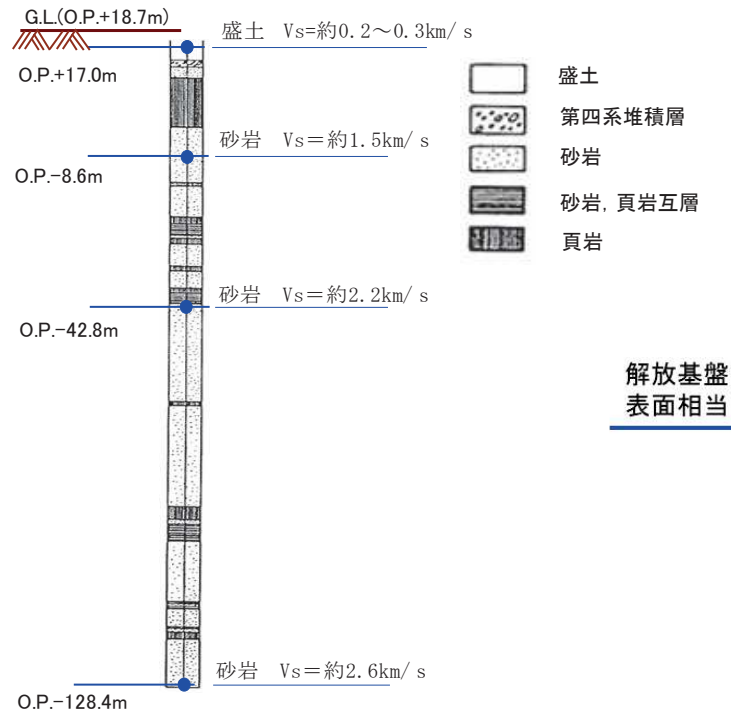
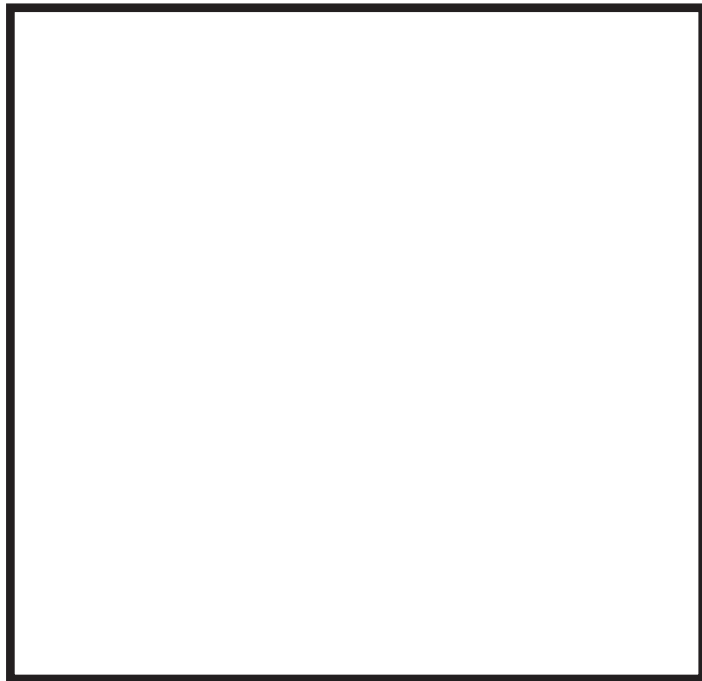


2011年4月7日宮城県沖の地震の強振動シミュレーション解析結果



3. 地下構造モデルを用いた検討 (2)自由地盤のはぎとり解析用地下構造モデルによる分析

- ▶ 地震基盤相当より浅部の地盤モデル(はぎとり解析用地下構造モデル)は、自由地盤観測点における地震基盤から地表までを水平成層でモデル化している。
- ▶ 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。



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						

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

自由地盤地震観測点配置平面図

自由地盤地震観測点配置断面図

はぎとり地盤の最適化地盤モデル

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。

3. 地下構造モデルを用いた検討 (2)自由地盤のはざとり解析用地下構造モデルによる分析

- 3.11地震では、岩盤上部と表層地盤の観測記録の伝達関数が長周期化しているため、改めてはざとり解析用地盤モデルの再設定を行った。
- はざとり解析用地盤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。

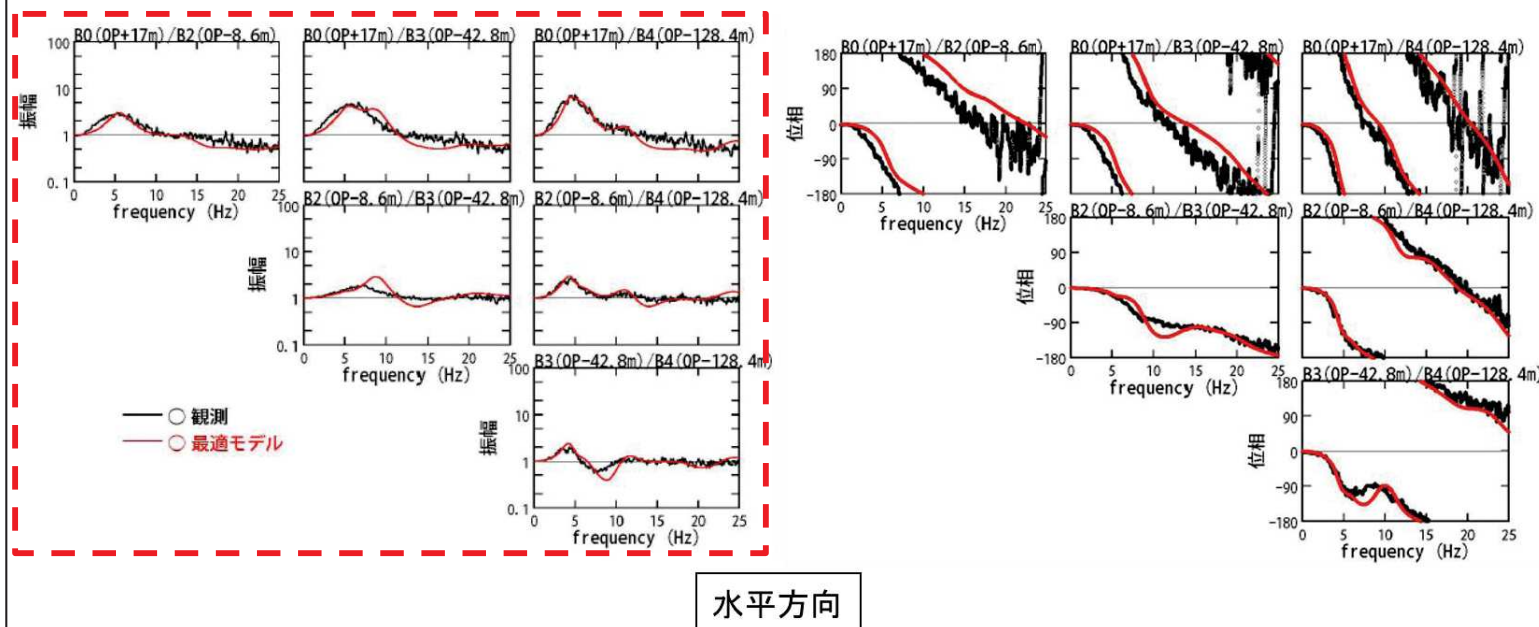


- 観測記録との整合が確認されたことから、**地下構造モデルを水平成層としてモデル化**することは妥当である。

3.2 水平動のはざ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地震の伝達関数との比較



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

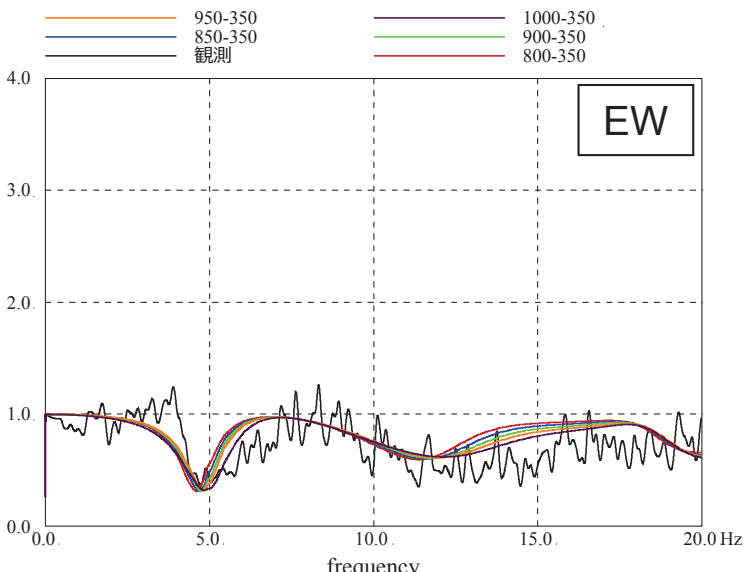
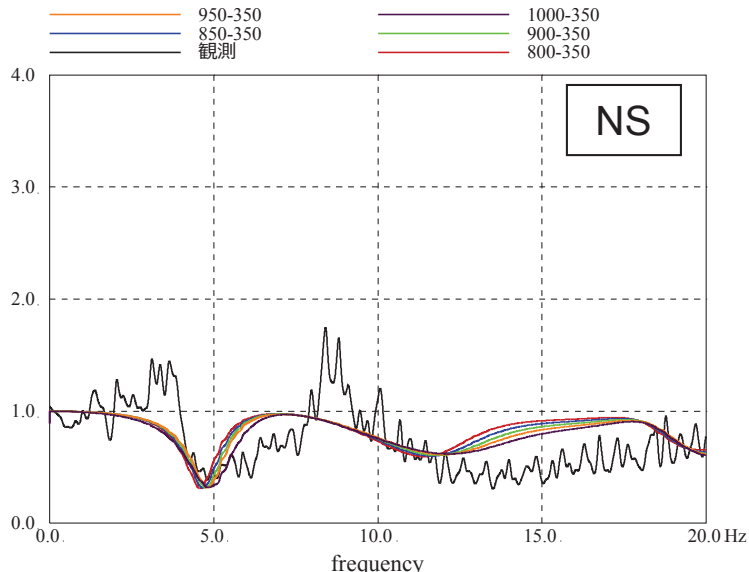
資料2-2女川原子力発電所 敷地の地質・地質構造及び地盤の振動特性について(補足説明資料)」より抜粋・加筆

3. 地下構造モデルを用いた検討 (3)はぎとり波を用いた建屋シミュレーション解析

➤3.11地震のはぎとり波を用いた2号炉原子炉建屋のシミュレーション解析では、入力波(E+F波)を一次元波動論で算定しているが、その結果は建屋の観測記録と整合したものとなっている。
 (例1)観測記録の伝達関数(建屋基礎マット上／はぎとり波)は、一次元波動論による伝達関数(E+F+P／2E)と同様の傾向を示している。
 P:補正水平力

	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

表層地盤下部の地盤物性の検討に用いた地下構造モデル

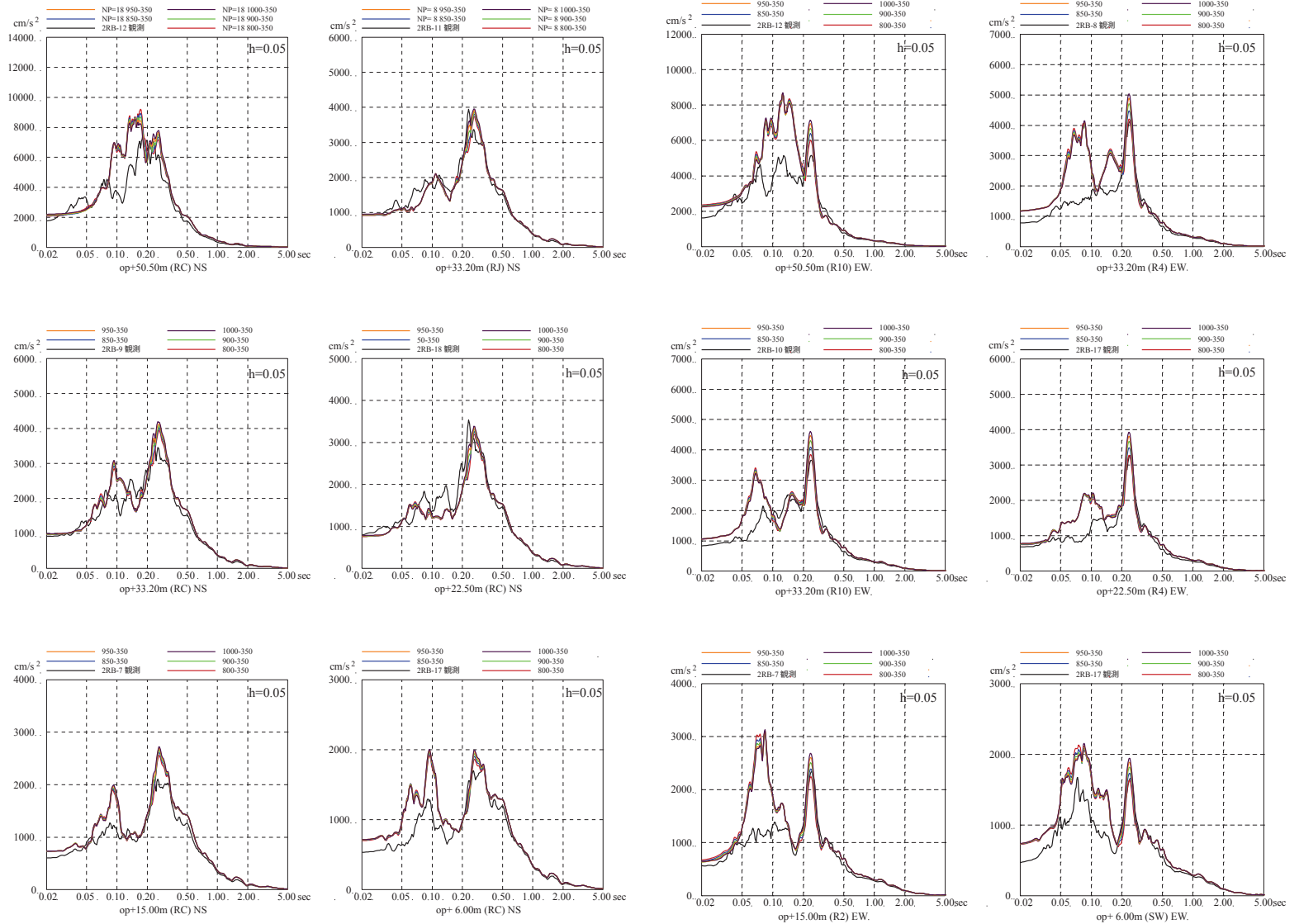


表層地盤下部の地盤物性の検討結果(伝達関数の比較) (3.11地震)

3. 地下構造モデルを用いた検討 (3)はぎとり波を用いた建屋シミュレーション解析

➤3.11地震のはぎとり波を用いた2号炉原子炉建屋のシミュレーション解析では、入力波(E+F波)を一次元波動論で算定しているが、その結果は建屋の観測記録と整合したものととなっている。

(例2)建屋の各フロアで観測された記録の応答スペクトルは、シミュレーション解析結果と整合する。



表層地盤下部の地盤物性の検討結果(床応答スペクトルの比較)

(3.11地震)

※地震計位置は別紙①参照。

4. 敷地の鉛直アレイで得られた地震観測記録を用いた検討

- 女川原子力発電所では、自由地盤の他に、1, 2及び3号炉の原子炉建屋直下で水平・鉛直アレイ観測を実施している。基準地震動 S_s の評価に際し、敷地地盤の振動特性の分析の一環として、各観測点間の応答スペクトル比が地震の到来方向の違いによらず一定の傾向を示すことを確認し、特に顕著な不整形の影響は無いことを確認している。
- 本資料では、自由地盤及び2号炉原子炉建屋直下の鉛直アレイ記録の分析結果を示す。スペクトル比は、以下について算定。
岩盤上部(解放基盤相当位置)の観測点／岩盤深部(地震基盤相当位置)の観測点



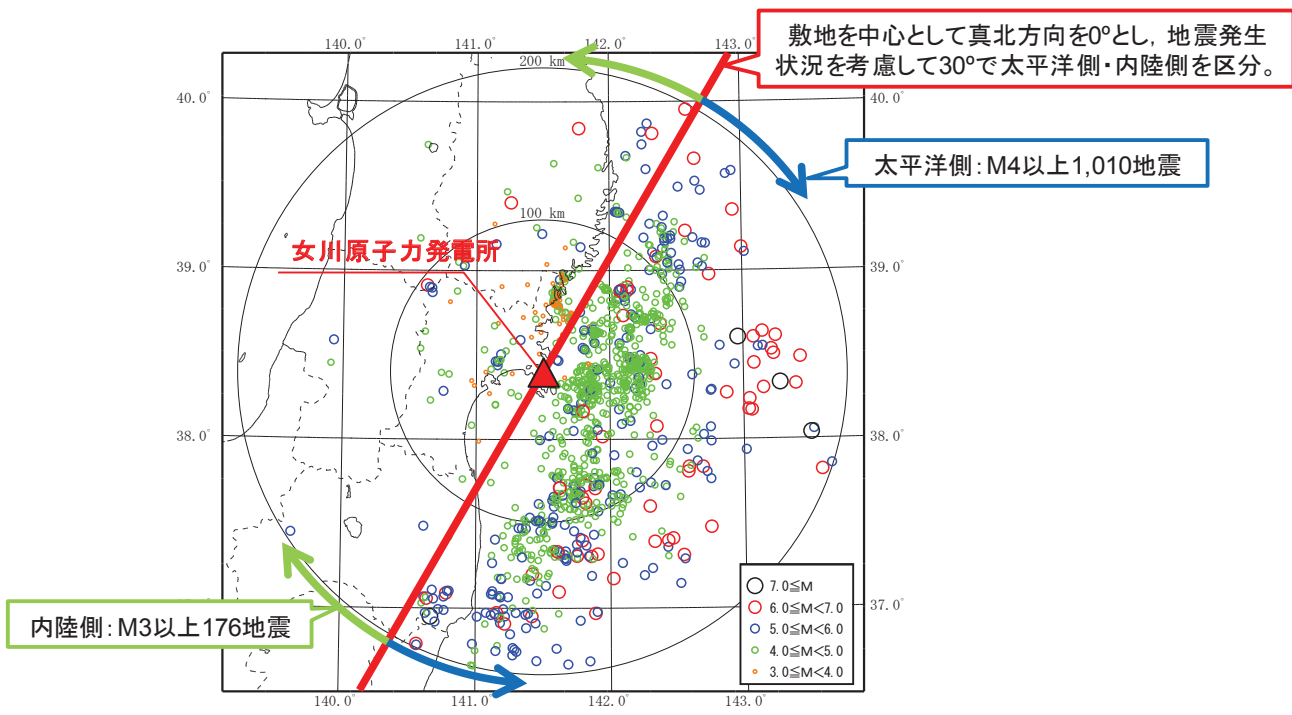
本資料のうち、枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。

敷地における地震観測点

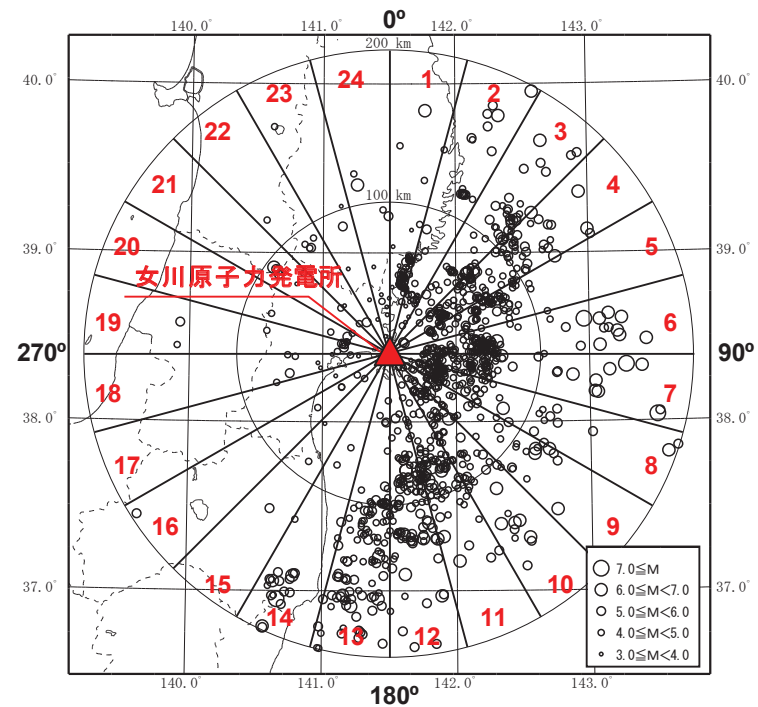
4. 敷地の鉛直アレイで得られた地震観測記録を用いた検討

➤ 敷地周辺で発生した地震を到来方向別に24方位に分類し、方向別に観測記録の応答スペクトル比を算定し、それぞれを比較した。

- 【選定条件】
- ・震央距離200m以内
 - ・地震数の多い太平洋側はM4以上、地震数の少ない内陸側はM3以上（諸元は気象庁カタログによる）
 - ・ノイズが混入していない（長周期側でSN比が悪い周期は計算から除外）



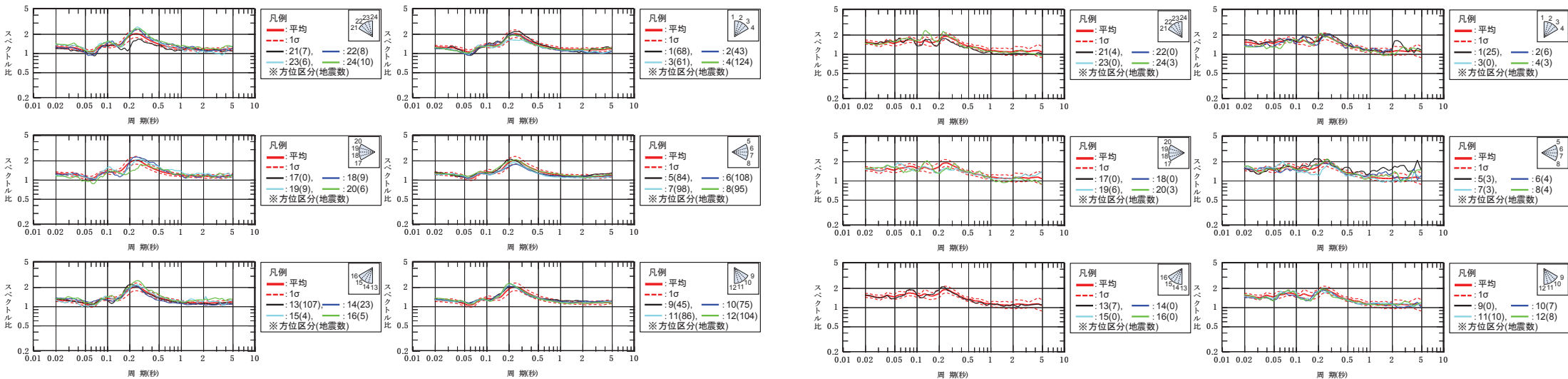
検討対象とした地震の震央分布図



検討対象とした地震の方位区分

4. 敷地の鉛直アレイで得られた地震観測記録を用いた検討

▶ 検討対象とした敷地周辺で発生した中小地震の応答スペクトル比(解放基盤相当位置の観測点 / 地震基盤相当位置の観測点)より, 敷地の地震基盤相当位置以浅においては, 自由地盤及び2号炉鉛直アレイの両者について, 到来方向の違いによる地震動増幅特性の特異な差異は確認されない。



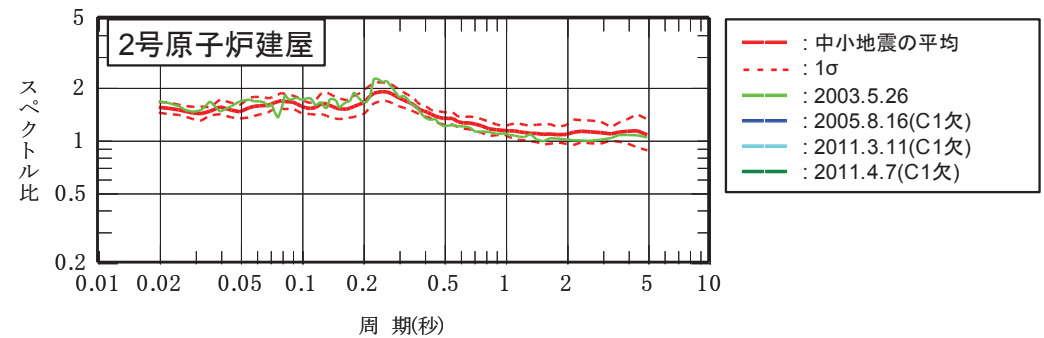
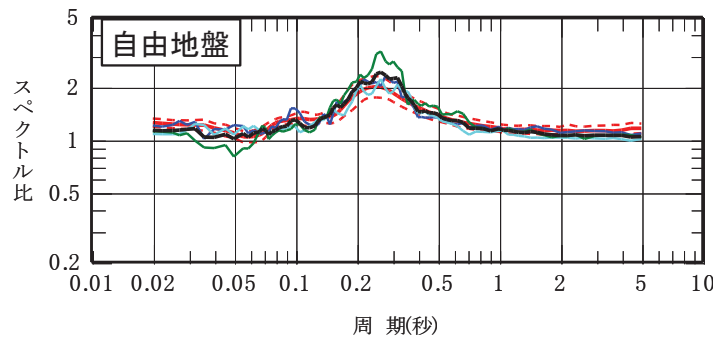
自由地盤鉛直アレイ

2号炉鉛直アレイ

敷地周辺で発生した中小地震の応答スペクトル比
(解放基盤相当位置の観測点 / 地震基盤相当位置の観測点)

4. 敷地の鉛直アレイで得られた地震観測記録を用いた検討

- 敷地においては、3.11地震のほか、2003年5月26日、2005年8月16日、4.7地震の強震記録が得られている。
- そこで、下図に示すとおり、敷地周辺で発生した中小地震の応答スペクトル比の平均と強震記録の応答スペクトル比の比較を行った。
- 同図より、中小地震と強震記録の応答スペクトル比は整合することから、強震記録においても、到来方向の違いによる地震動増幅特性の特異な差異は確認されない。



中小地震と強震記録の応答スペクトル比の比較
(解放基盤相当位置の観測点 / 地震基盤相当位置の観測点)

- 以上から、敷地の地震基盤相当位置以浅においては、地下構造の不整形性等の影響は確認されないため、敷地地盤においては、一次元波動論により地震動の増幅特性を評価可能と考えられる。

5. まとめ

➤ 敷地における一次元波動論の適用性について、敷地の地質構造、地下構造モデルおよび敷地の鉛直アレイで得られた地震観測記録を用いて検討を行い以下の事項を確認した。

- ① 敷地の地質構造を用いた検討では、速度構造が概ね水平成層と評価出来ること
- ② 地下構造モデルを用いた検討では、強震動シミュレーション解析等から地震基盤相当レベルが適切に評価されていること、また、その上部地盤については、一次元波動論による評価結果が観測記録との整合が良いこと
- ③ 敷地の複数の鉛直アレイで得られた地震観測記録により、到来方向の違いによる特異な増幅がないこと（不整形性の影響が無いこと）



➤ 以上のことから、敷地の地下構造を水平成層でモデル化し一次元波動論を適用することは妥当である。

入力地震動評価用地盤モデルの設定

1. 地盤モデル設定の流れ
2. 表層地盤の層境界に関する検討
3. 表層地盤下部の速度構造に関する検討
4. 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)
5. ベースとなる非線形地盤モデルの設定

1. 地盤モデル設定の流れ

- 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表層と岩盤と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、次頁に示す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入力地震動評価用地盤モデルを設定する。

＜設定の基本的考え方＞

①入力地震動評価用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(表層地盤下部および表層地盤上部)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

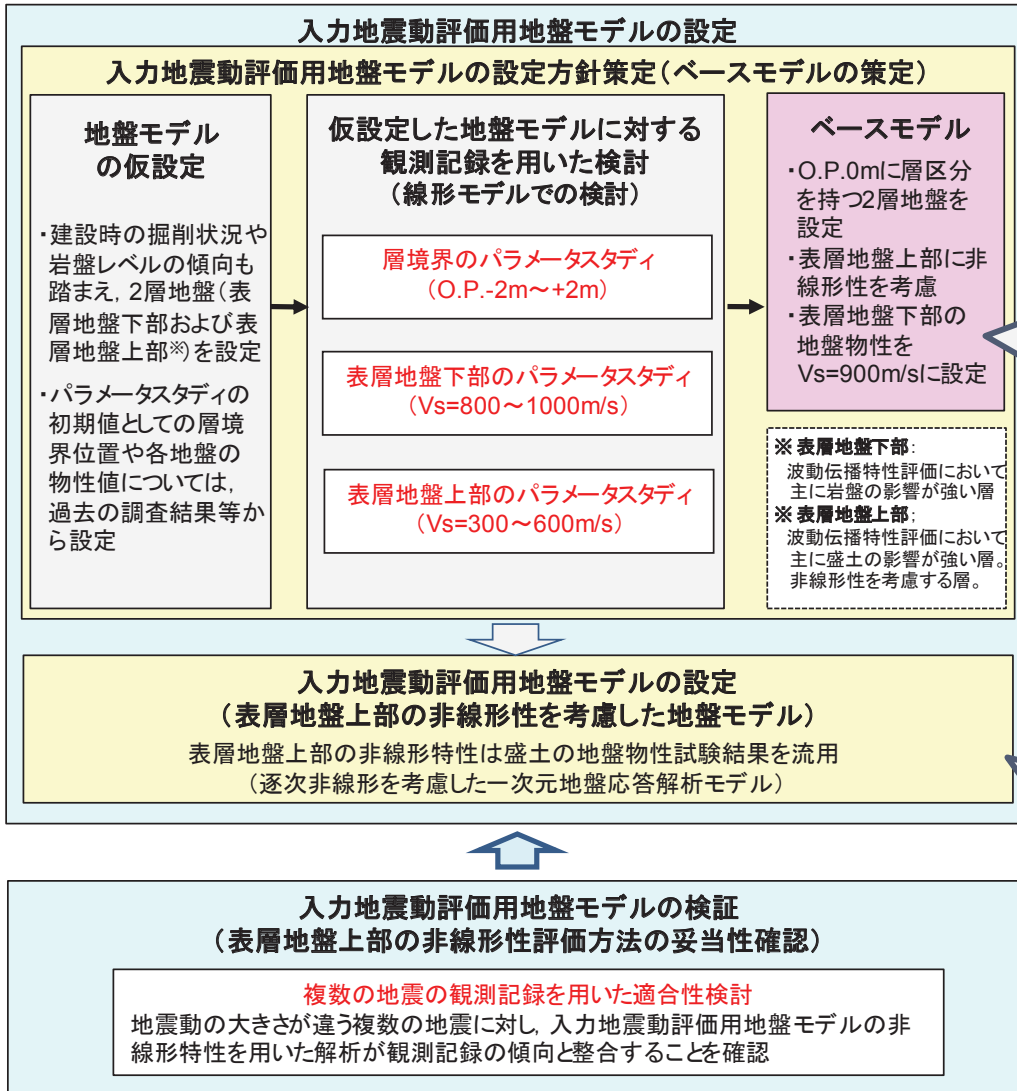
④入力地震動評価用地盤モデルの設定(表層地盤上部の非線形性を考慮した地盤モデル)

- ・2層の表層地盤の内、表層地盤上部については、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入力地震動評価用地盤モデル(表層地盤上部の非線形性を考慮した地盤モデル)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。

1. 地盤モデル設定の流れ

入力地震動の算定に用いる地盤モデルの設定の考え方について、地盤物性の違いが基準地震動 S_s による地震応答解析結果に及ぼす影響も踏まえ、再整理した。



No53(地盤モデルの設定の考え方の整理)
⇒建屋周辺の表層地盤状況の詳細を追記。

No54(地盤モデルのパラメータスタディの考察)
⇒地盤モデルのパラメータスタディについて、適合性等、より詳細に考察を記載。

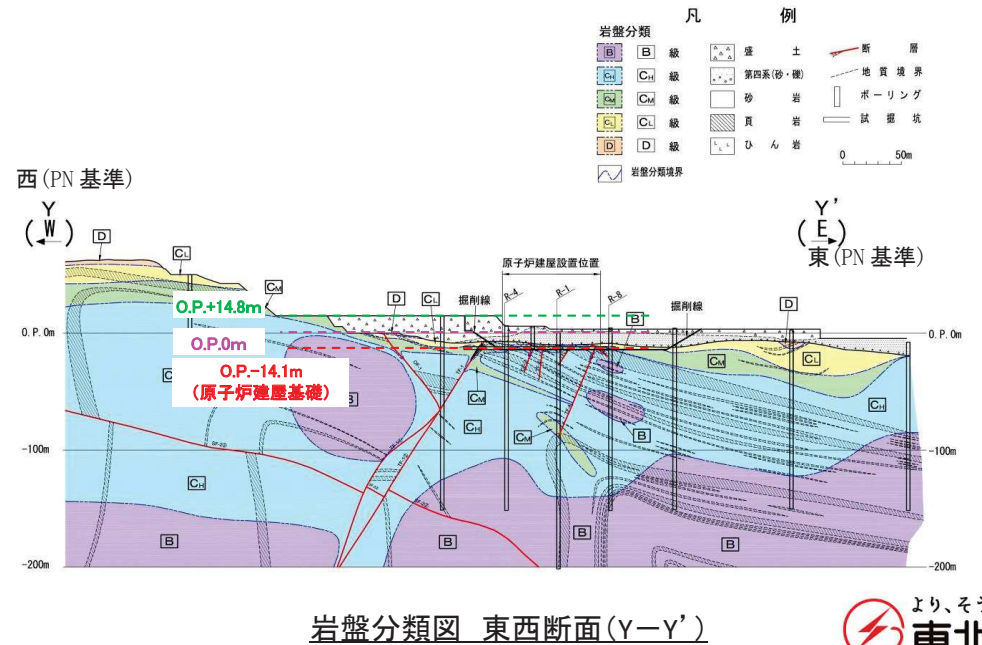
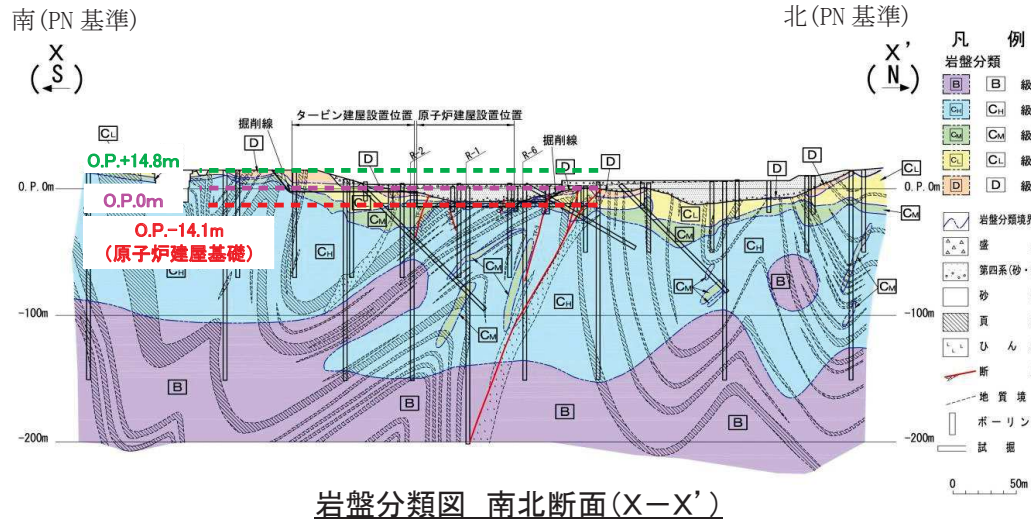
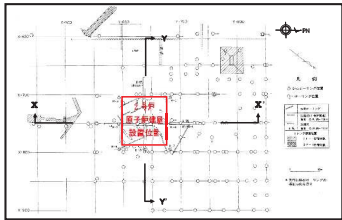
No.55,56(表層地盤の物性が S_s の応答結果に与える影響)
⇒3.11地震のシミュレーションで求めた表層地盤下部の初期物性の基準地震動 S_s への適用性確認として、初期物性を更に低下させた場合の解析を実施し、感度を確認。

⇒地盤物性を地盤の安定解析と同様に評価した場合の解析を実施し、感度を確認。

2. 表層地盤の層境界に関する検討

■表層地盤の層境界の仮設定

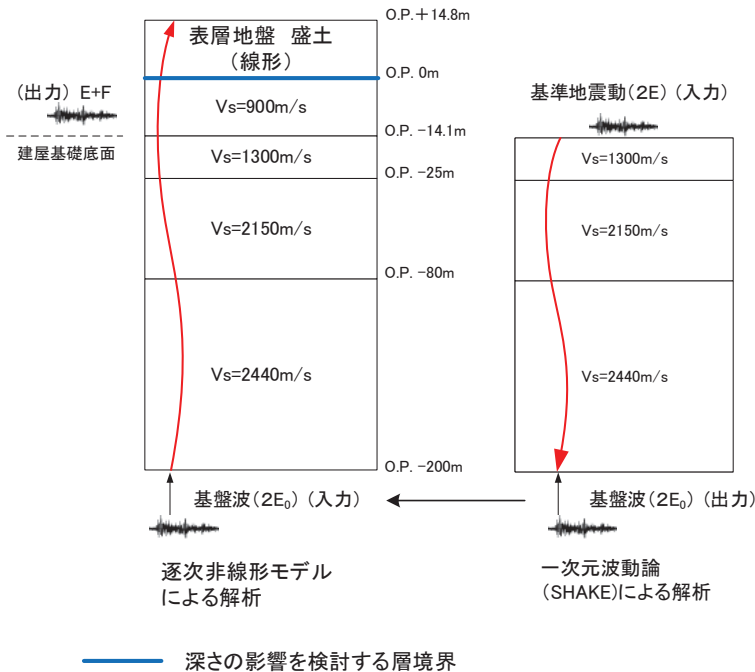
- 女川2号炉建設時の地盤の掘削状況に基づき、一次元地盤モデルの表層地盤と岩盤の境界面の深さを設定する。
- 2号炉建設時の地盤の掘削状況から、女川2号炉原子炉建屋周辺の地盤の大部分はO.P.0mまで表層地盤の掘削が行われており、竣工後は現在のG.L.面であるO.P.+14.8mまで埋め戻されている。
- O.P.0mより浅部地盤の建屋周辺状況は、北と東西が地質調査時とほぼ同じ状況で埋め戻し土が分布している。一方、南は硬い岩盤となっている。
- 表層地盤は建設時の掘削状況および地質調査時のPS検層範囲と対応するO.P.0mを岩盤と表層地盤の層境界とする2層の一次元地盤モデルとして仮設定している。



2. 表層地盤の層境界に関する検討

■仮設定した地盤モデルに関する観測記録を用いた検討

- 建設時の掘削状況から表層地盤の層境界をO.P.0m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層境界の最適値について検討**する。
- 検討は、表層地盤下部のせん断波速度Vsを900m/s、表層地盤上部のせん断波速度Vs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**させる。
- 検討は、3.11地震に対して、以下の伝達関数の比較として実施した。
 - ①自由地盤の観測記録から算定したはぎとり波と建屋基礎版上観測記録の伝達関数
 - ②はぎとり波と、地盤モデルにより算定した基礎版底面レベル(O.P.-14.1m)の地震動(E+F+P波, Pは補正水平力の時刻歴波形)の伝達関数
 比較にあたっては、**表層地盤の1次周期に対応する4~6Hz付近の谷の適合性について確認**した。また、参考に、算定した地震力による建屋応答解析を実施し、建屋内観測記録との比較を実施した。
- また、建屋応答の感度について検討するため、**表層地盤の層境界を変化させた場合の建屋の最大応答せん断ひずみへの影響**について3.11地震のはぎとり波を用いた検討を実施した。



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)

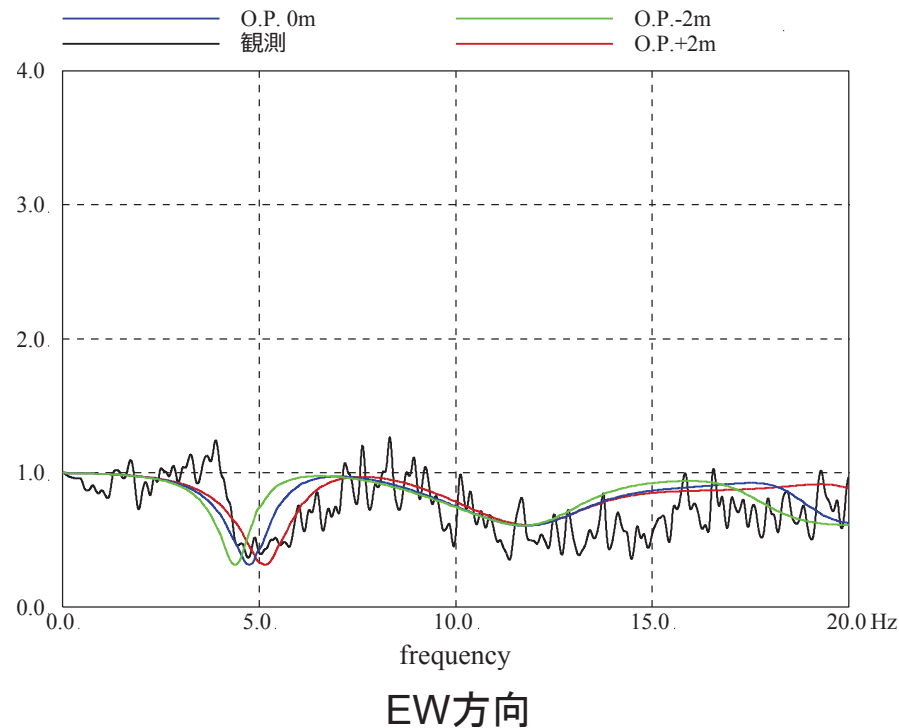
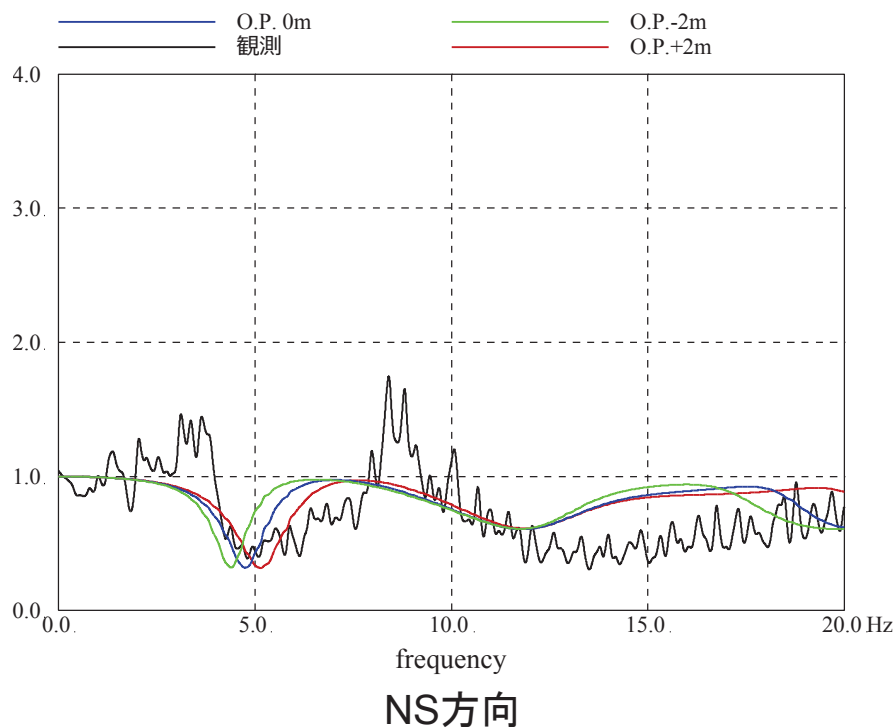
	地層レベル O.P.(m)	単位体積重量 γ (kN/m ³)	せん断波速度 Vs(m/s)	減衰定数 h(%)
表層地盤	14.8	23.3(2.38tf/m ³)	350	3
	2.0~-2.0	23.3(2.38tf/m ³)	900	3
底面地盤	-14.1	23.8(2.43tf/m ³)	1300	3
	-25.0	24.6(2.51tf/m ³)	2150	3
	-80.0	25.0(2.55tf/m ³)	2440	3
	-200 ~ ∞	25.0(2.55tf/m ³)	2440	3

入力地震動評価の概念図

2. 表層地盤の層境界に関する検討

■ 仮設定した地盤モデルに関する観測記録を用いた検討（伝達関数の比較）

➤ 伝達関数を比較した結果、表層地盤の1次周期(4~6Hz付近)の再現性は、表層地盤の層境界をO.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。

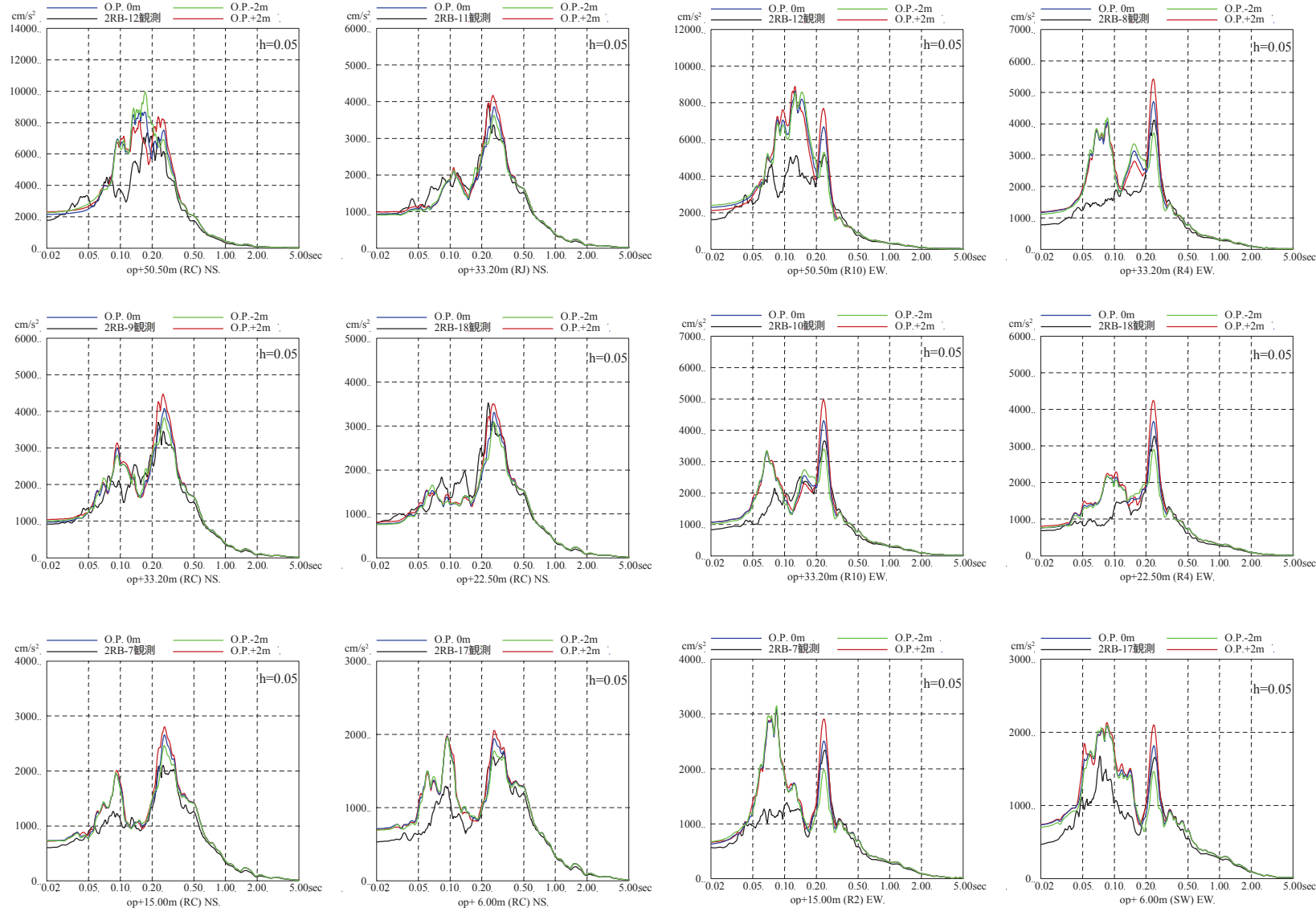


表層地盤の層境界に関する検討結果(伝達関数の比較)
(2011/3/11 東北地方太平洋沖地震)

2. 表層地盤の層境界に関する検討

■仮設定した地盤モデルに関する観測記録を用いた検討（床応答スペクトルの比較）

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ほどの大きな差異は見られないものの、建屋の1次周期(0.2~0.3秒)付近のピークに着目するとO.P.-2mの結果は観測記録に比べて小さい傾向にあり、O.P.+2mの結果は観測記録に比べて過大に評価する傾向となっている。これらより、O.P.0mが観測を平均的に表していると考えられる。



NS方向

EW方向

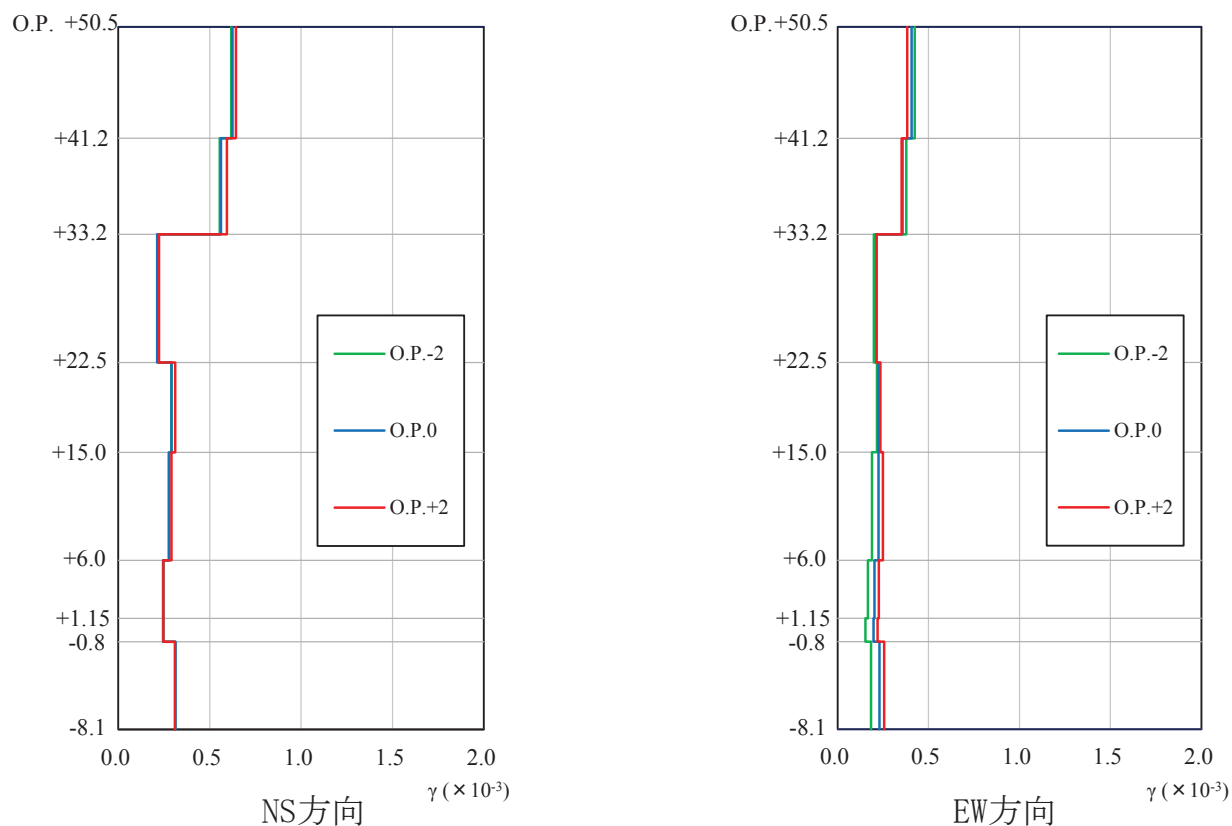
※地震計位置は別紙①参照。

表層地盤の層境界に関する検討結果(床応答スペクトルの比較)
(2011/3/11 東北地方太平洋沖地震)

2. 表層地盤の層境界に関する検討

■仮設定した地盤モデルに関する観測記録を用いた検討（最大応答せん断ひずみの比較）

➤ 3.11地震の応答最大せん断ひずみは、表層地盤の層境界を変化させても大きな差異は確認されなかった。



表層地盤の層境界に関する検討結果(最大応答せん断ひずみの比較)
(3.11地震はざとり波)

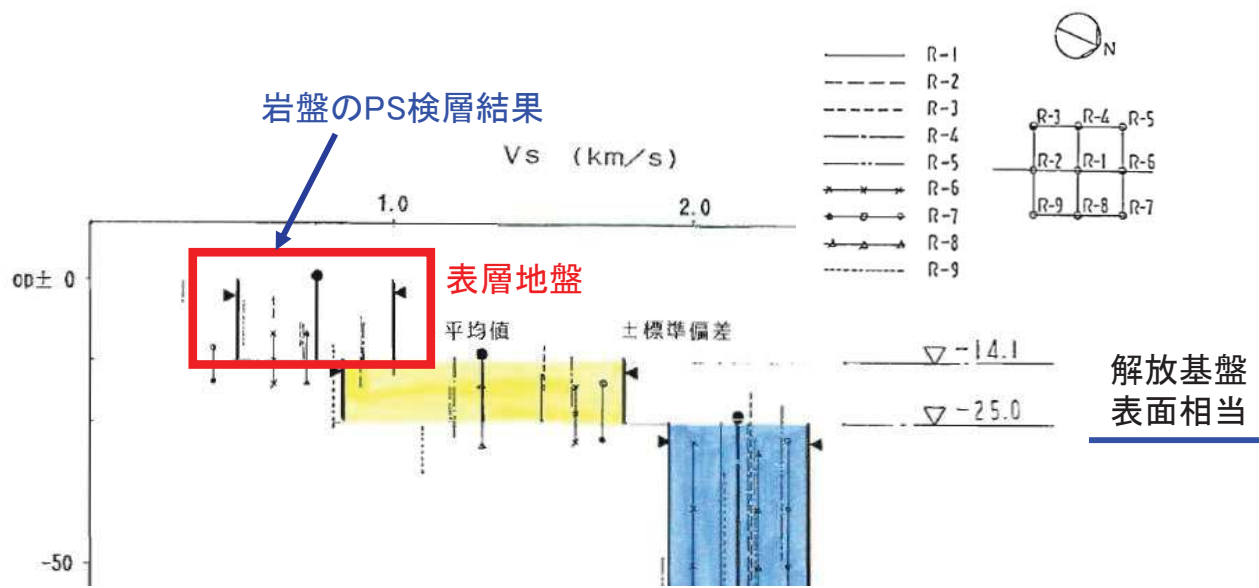
➤ 以上の結果から、表層地盤の層境界をO.P.0mに設定する。

3. 表層地盤下部の速度構造に関する検討

■表層地盤下部(0.P.0m~0.P.-14.1m)の地盤物性の仮設定

➤ PS検層結果では、0.P.0m~0.P.-14.1m付近までの表層地盤のせん断波速度Vs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、自由地盤のはざ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Vsを表層地盤のPS検層結果の上限値に近い900m/s程度に仮設定する。

3.11地震時の最適化はざとり地盤モデル



女川2号炉原子炉建屋位置のPS検層結果

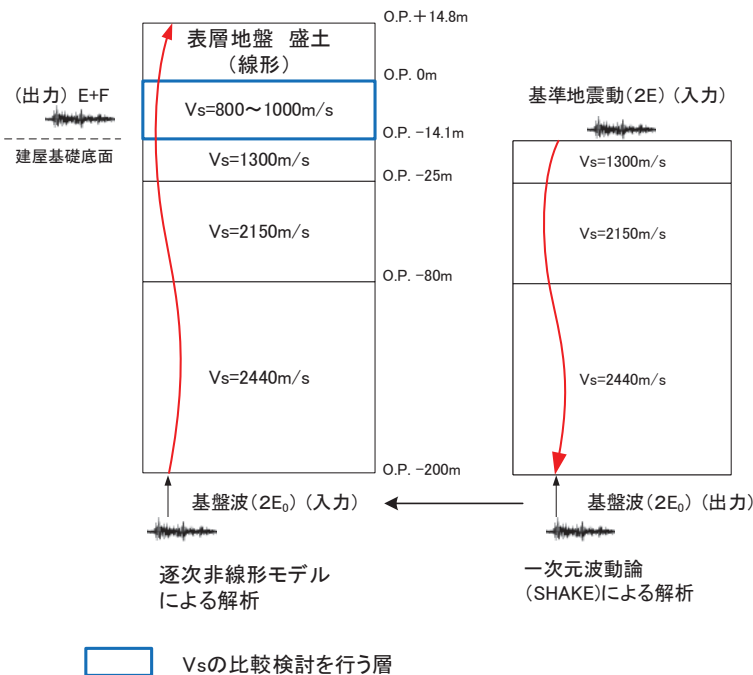
深さ		層厚 (m)	密度 (t/m ³)	Vs (m/s)	減衰定数h(f)	
G.L. (m)	O.P. (m)				水平	
					h ₀	α
0	18.7	1.7	2.10	112	0.44	0.38
-1.7	17.0	3.3	2.10	112	0.44	0.38
-5.0	13.7	16.6	2.10	1001	0.51	0.19
-21.6	-2.9	5.7	2.55	1500	0.20	1.00
-27.3	-8.6	7.2	2.55	1500	0.20	1.00
-34.5	-15.8	27.0	2.66	2000	1.00	0.87
-61.5	-42.8	20.3	2.68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

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

3. 表層地盤下部の速度構造に関する検討

■仮設定した地盤モデルに関する観測記録を用いた検討

- 自由地盤のはぎ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 V_s の最適値について検討**する。
- 検討は、表層地盤の層境界をO.P.0m, 表層地盤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の間で変動させる**。
- 3.11地震等に対し“自由地盤の観測記録から算定したはぎとり波と建屋基礎版上観測記録の伝達関数”と“はぎとり波と、地盤モデルにより算定した基礎版底面レベル(O.P.-14.1m)の地震動(E+F+P波, Pは補正水平力の時刻歴波形)の伝達関数”の比較を実施する。



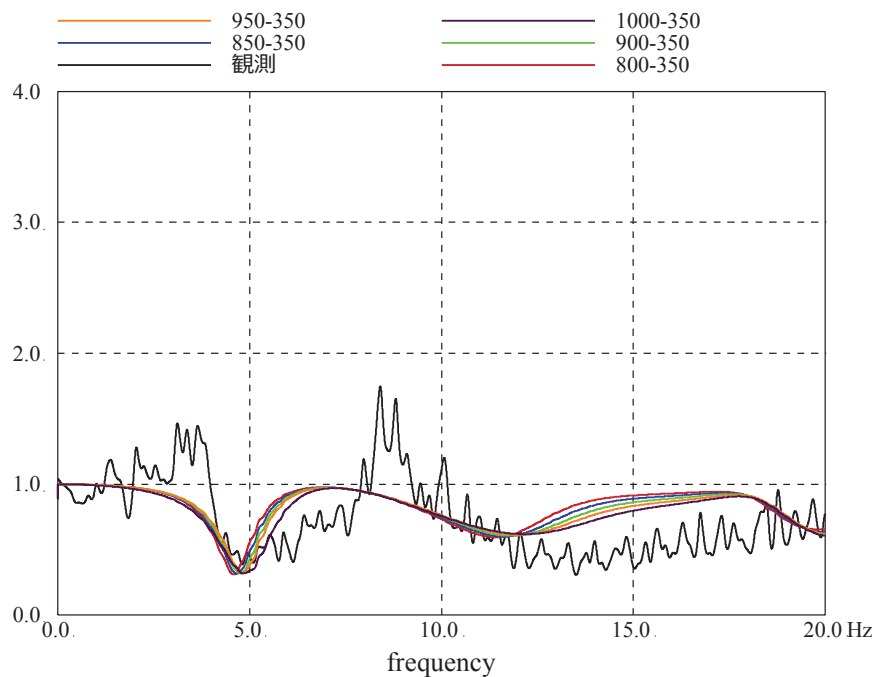
表層地盤下部の地盤物性の検討用に仮定した地盤モデル
(赤文字部分が仮定した値)

	地層レベル O.P.(m)	単位体積重量 γ (kN/m ³)	せん断波速度 V_s (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

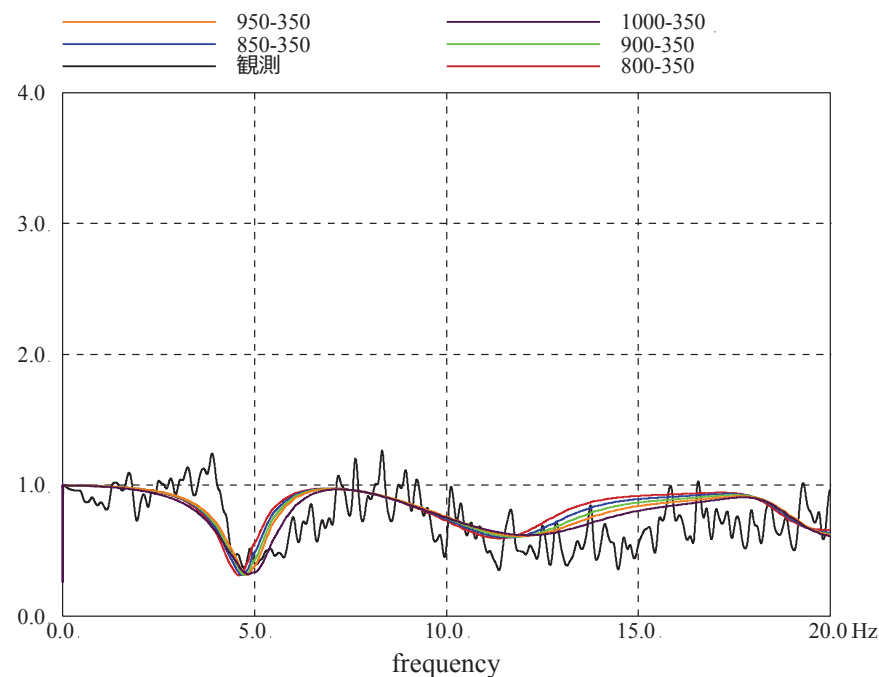
3. 表層地盤下部の速度構造に関する検討

■仮設定した地盤モデルに関する観測記録を用いた検討（伝達関数の比較）

➤ 伝達関数の検討結果から、伝達関数の谷の振動数(4~6Hz)は表層地盤下部のせん断波速度Vs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。



NS方向



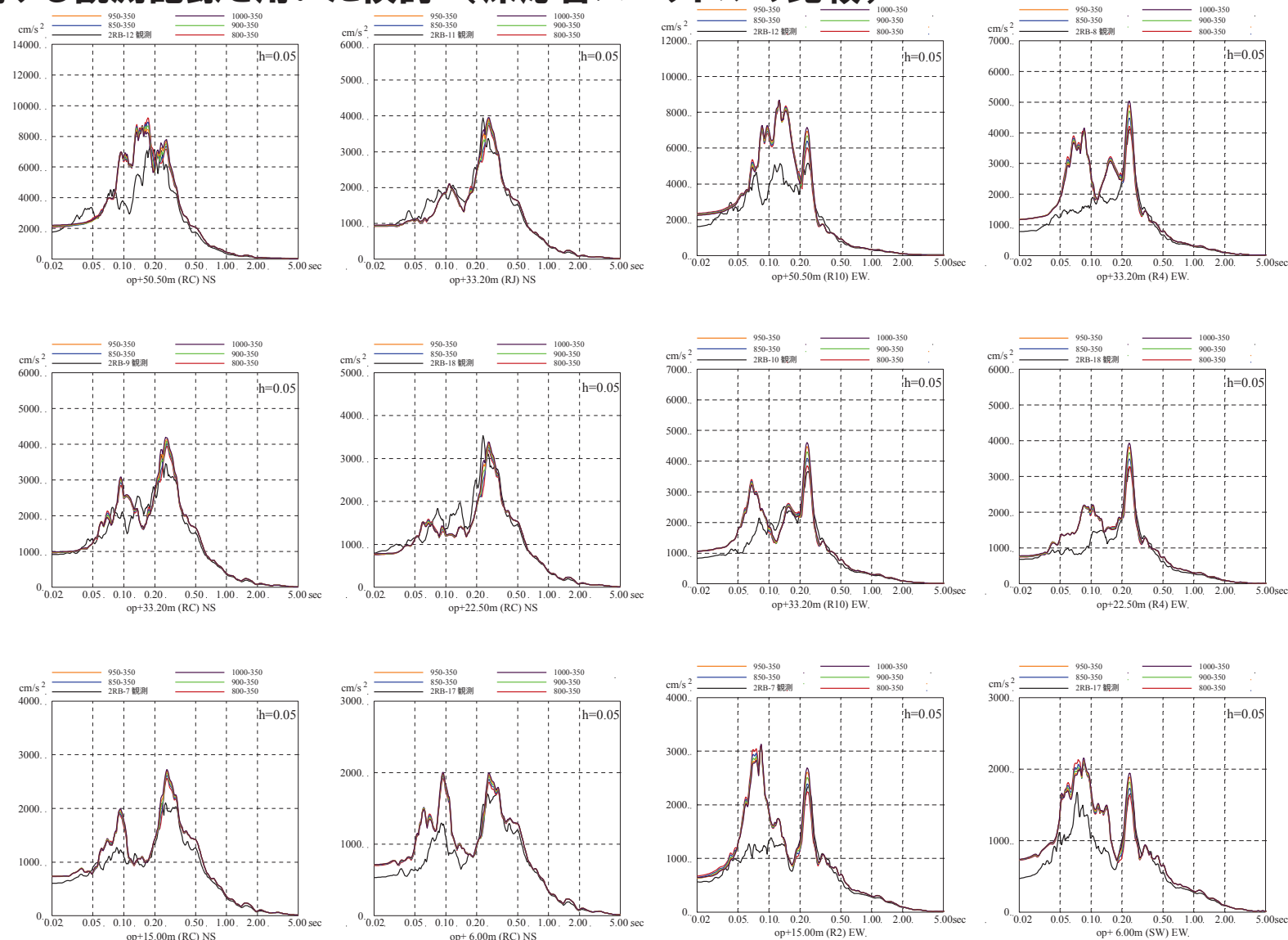
EW方向

表層地盤下部の地盤物性の検討結果(伝達関数の比較)
(2011/3/11 東北地方太平洋沖地震)

3. 表層地盤下部の速度構造に関する検討

■仮設定した地盤モデルに関する観測記録を用いた検討（床応答スペクトルの比較）

➤ 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ほどの大きな差異は見られなかった。



NS方向

EW方向

※地震計位置は別紙①参照。

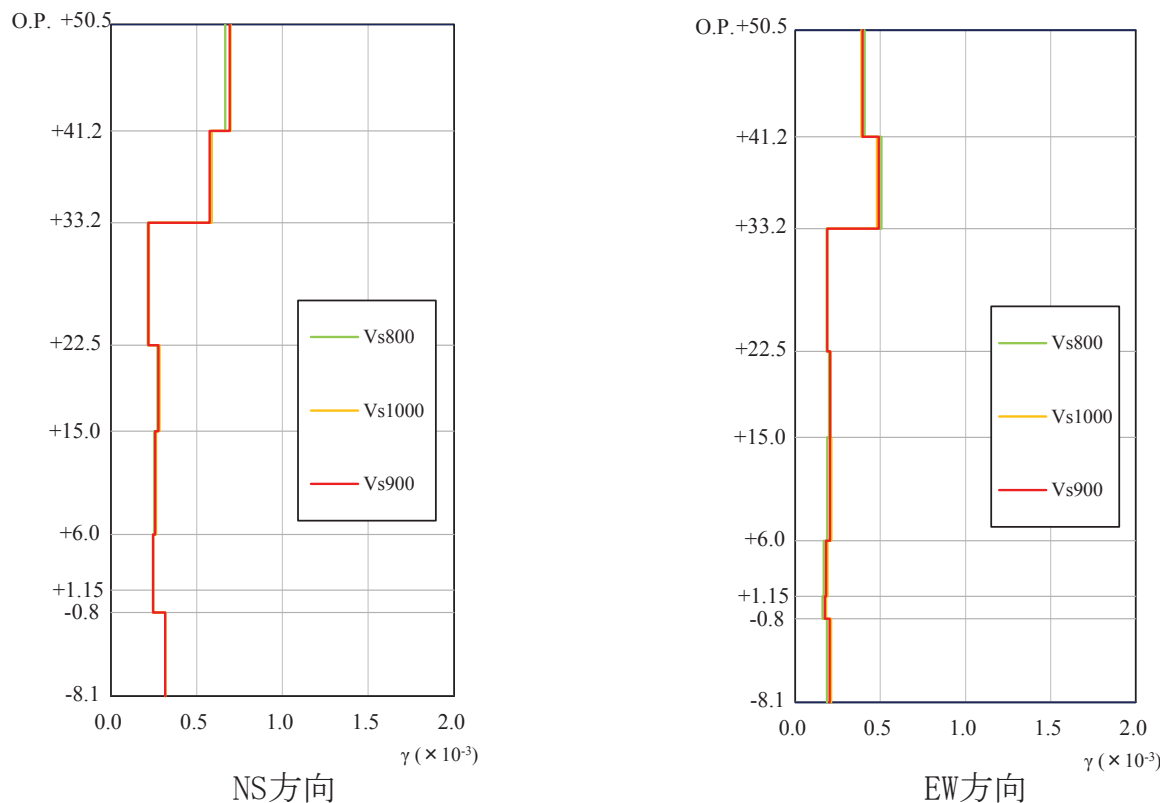
表層地盤下部の地盤物性の検討結果(床応答スペクトルの比較)

(2011/3/11 東北地方太平洋沖地震)

3. 表層地盤下部の速度構造に関する検討

■仮設定した地盤モデルに関する観測記録を用いた検討（最大応答せん断ひずみの比較）

➤ 3.11地震の最大応答せん断ひずみは、表層地盤下部のせん断波速度 V_s を800m/sから1000m/sの範囲で変化させても大きな差異は確認されなかった。



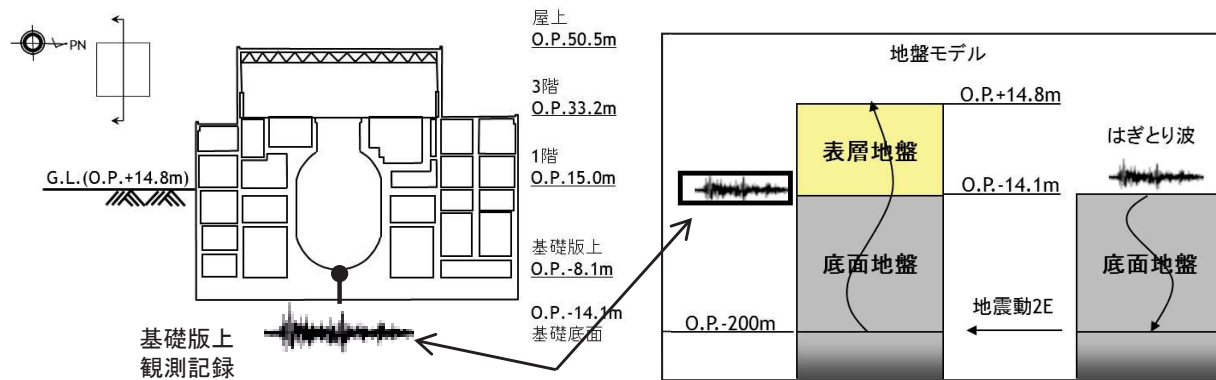
表層地盤下部のせん断波速度 V_s を変化させた場合の最大応答せん断ひずみの比較
($V_s=800$ m/s~1000m/s, 3.11地震)

➤ 以上の結果から、表層地盤下部のせん断波速度 V_s を900m/sに設定する。

4. 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)

■仮設定した地盤モデルに関する観測記録を用いた検討

- 自由地盤のはぎとり地盤モデルの検討では、最上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おり、大地震ではせん断波速度 V_s は低下している。同様の表層地盤上部の非線形性が認められるかどうかについて、2号炉原子炉建屋の観測記録の分析からも確認する。
- 検討は、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、仮設定した地盤モデルに対して**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。
- 検討は「2. 表層地盤の層境界に関する検討」と同じである(3.11地震等に対し“自由地盤の観測記録から算定したはぎとり波と建屋基礎版上観測記録の伝達関数”と“はぎとり波と、地盤モデルにより算定した基礎版底面レベル(O.P.-14.1m)の地震動(E+F+P波, Pは補正水平力の時刻歴波形)の伝達関数”の比較を実施)。



はぎとり波に対する伝達関数の谷となる振動数を比較
表層地盤物性の検討方法の概念

表層地盤上部の地盤物性の検討に用いた地震諸元

地震	M	震源地	自由地盤(地中記録)最大加速度 (cm/s ²)		
			NS方向(PN基準)	EW方向(PN基準)	
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

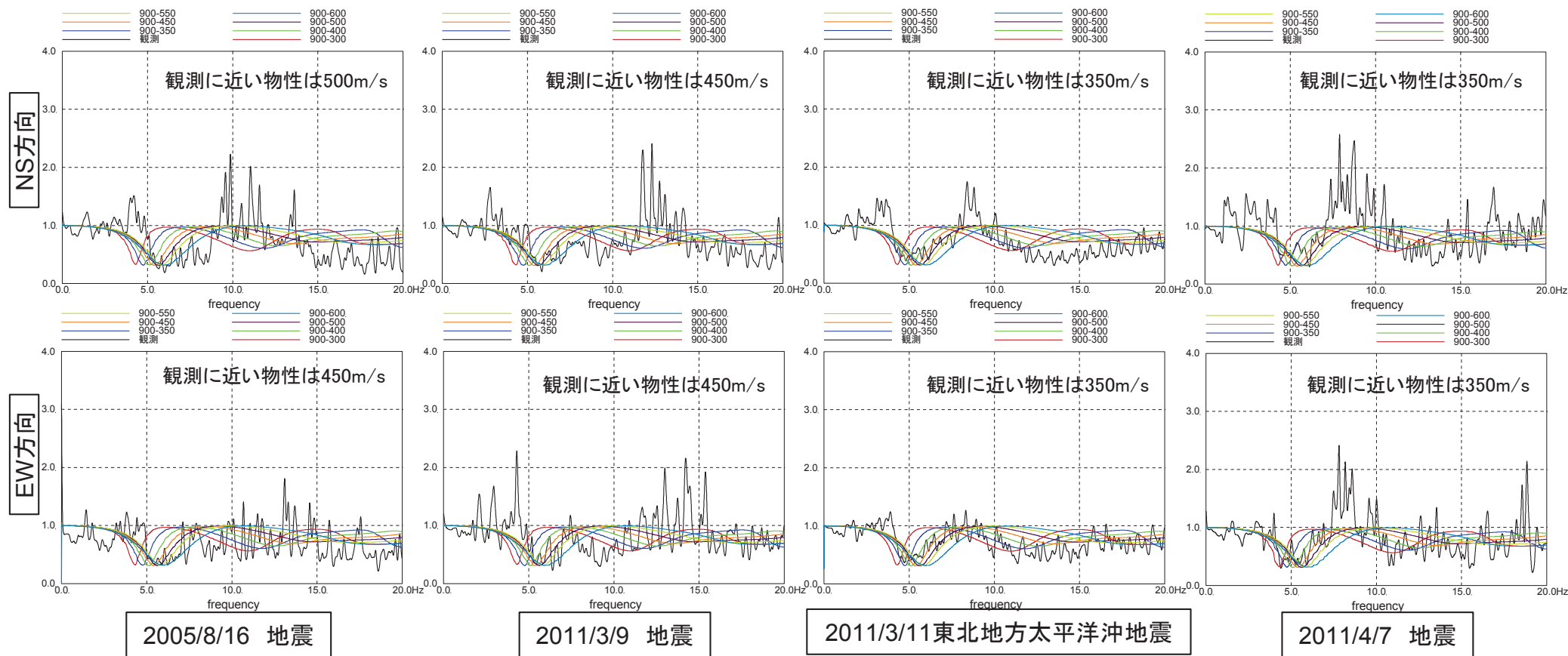
表層地盤上部の地盤物性の検討用に仮定した地盤モデル (赤文字部分が仮定した値)

	地層レベル O.P.(m)	単位体積重量 γ (kN/m ³)	せん断波速度 V_s (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

4. 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)

■仮設定した地盤モデルに関する観測記録を用いた検討

- 伝達関数の比較の結果, 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 V_s が異なることから, 表層地盤上部では非線形化の影響が認められる。このことから, 表層地盤上部には入力的大小に応じた非線形性を考慮する必要があることが確認された。

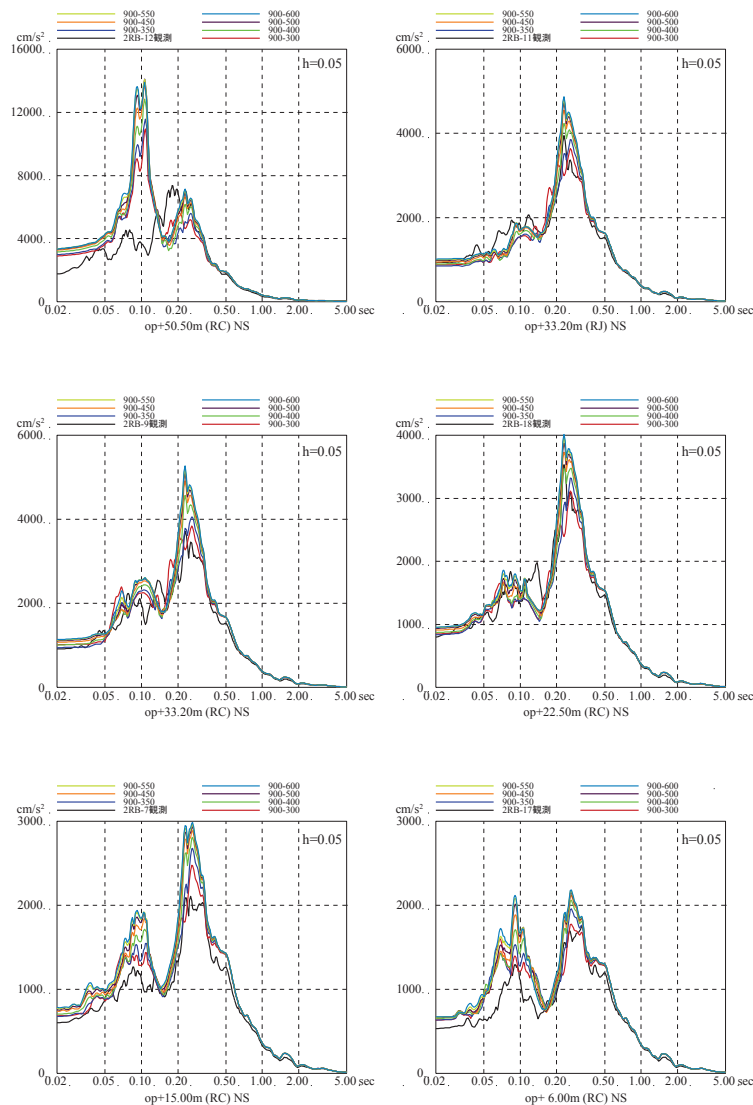


表層地盤上部の地盤物性の検討結果(はぎとり波に対する基礎版上観測記録の伝達関数とはぎとり波に対する入力変換波(E+F+P)の伝達関数の比較)

4. 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)

■仮設定した地盤モデルに関する観測記録を用いた検討

➤ 床応答スペクトルの比較においては、先の検討(層境界位置に関するパラメータスタディ, 表層地盤下部のせん断波速度Vsに関するパラメータスタディ)に比べ、その違いが大きい傾向にある。従って、表層地盤上部の非線形性評価は重要である。



表層地盤上部の地盤物性の検討結果(はぎとり波入力力のシミュレーション解析の床応答スペクトルの比較)
(3.11地震, NS方向, 減衰5%)

5. ベースとなる非線形地盤モデルの設定

➤ これまでの仮地盤モデルの検討結果より以下のことが確認されたことから、基準地震動 S_s の評価にあたりベースとする女川2号炉原子炉建屋の地盤モデルは下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 表層地盤下部については、せん断波速度 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 V_s が異なることから非線形性を考慮する必要があること。

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	18.6	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		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

5. ベースとなる非線形地盤モデルの設定

➤ 女川2号炉原子炉建屋への入力地震動評価に用いる地盤モデルは、敷地地盤の調査結果、工事の状況、地震観測記録を用いたパラメータスタディを踏まえ、以下に示す地盤物性(初期物性)を用い、また、表層地盤上部にはひずみ依存による非線形特性を考慮する。

女川2号炉原子炉建屋地盤物性

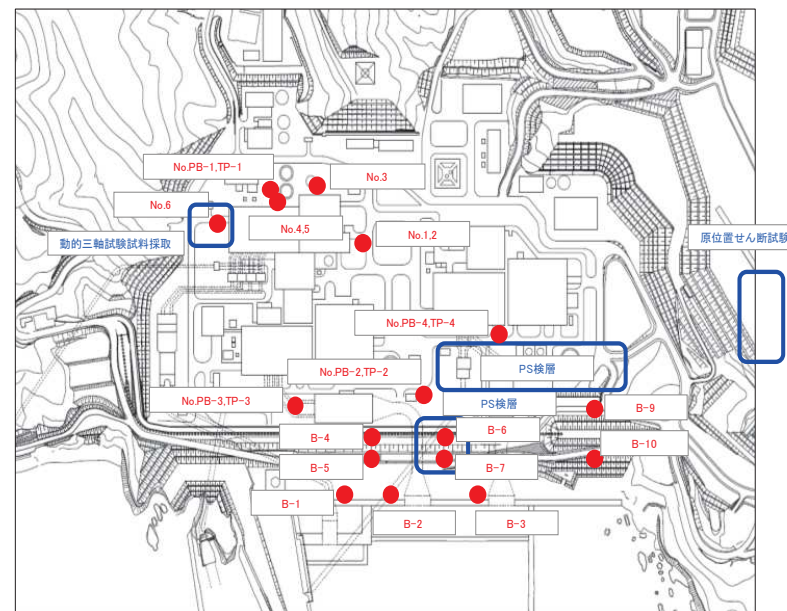
		地層レベル O.P.(m)	単位体積重量 γ (kN/m ³)	せん断波速度 Vs(m/s)	減衰定数 ^{※2} h(%)
表層地盤	上部	14.80	18.6	※1	3 ^{※3}
	下部	0.00	23.3	900 ^{※4}	3
底面地盤		-14.10	23.8	1300	3
		-25.00	24.6	2150	3
		-80.00	25.0	2440	3
		-200.0	25.0	2440	3

※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Vsと相関のある初期せん断剛性G₀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。

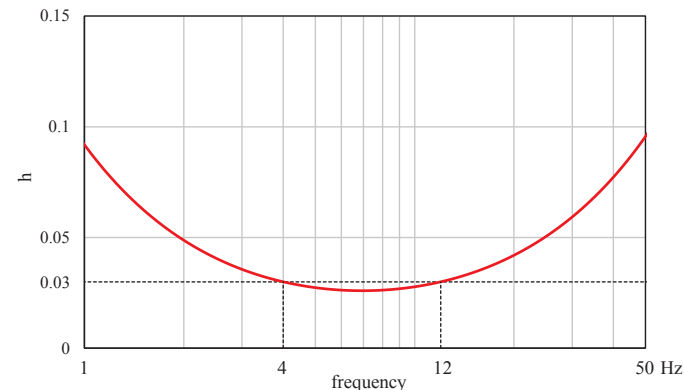
※2 レーリー減衰(4Hz, 12Hz)

※3 ひずみ依存による非線形特性を考慮する。

※4 PS検層結果と観測記録の分析より設定

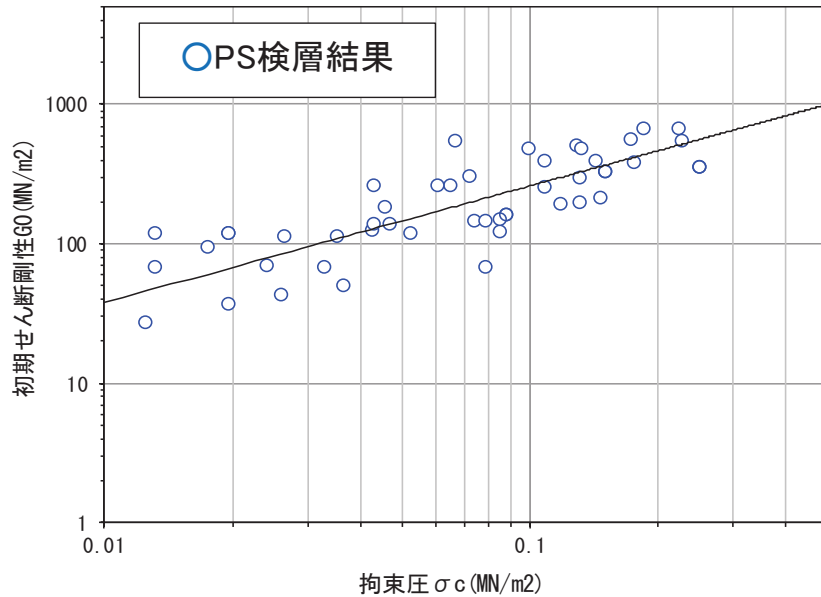


表層地盤上部(盛土)の物性値の調査位置図

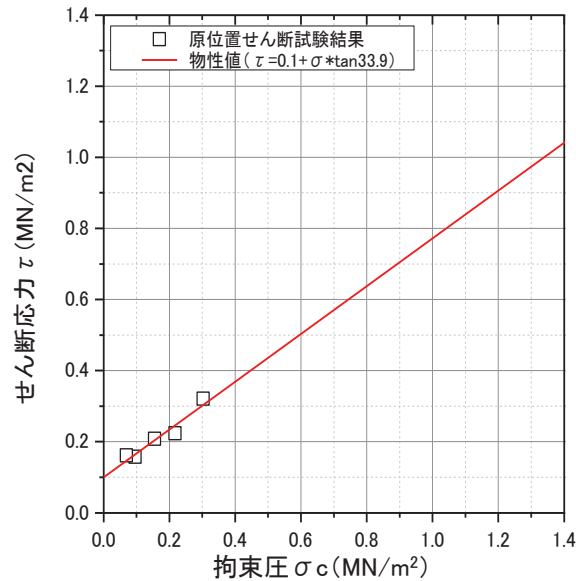


レーリー減衰(4Hz, 12Hz)

5. ベースとなる非線形地盤モデルの設定



初期せん断剛性G0と拘束圧σcの関係



せん断応力τと拘束圧σの関係(地下水位以浅)

O.P.14.8m～O.P.0mの表層地盤上部には地盤調査結果に基づき、初期せん断剛性 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。

初期せん断剛性 G_0 は、PS検層結果により(1)式で設定する。

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

ここで、 σ_c [MN/m²] = $Z \times \rho_t \times \frac{2}{3}$ Z : 深度

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

$G/G_0-\gamma$ 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 と初期せん断剛性 G_0 から、基準ひずみ γ_m を算定し(2)式により求める。

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

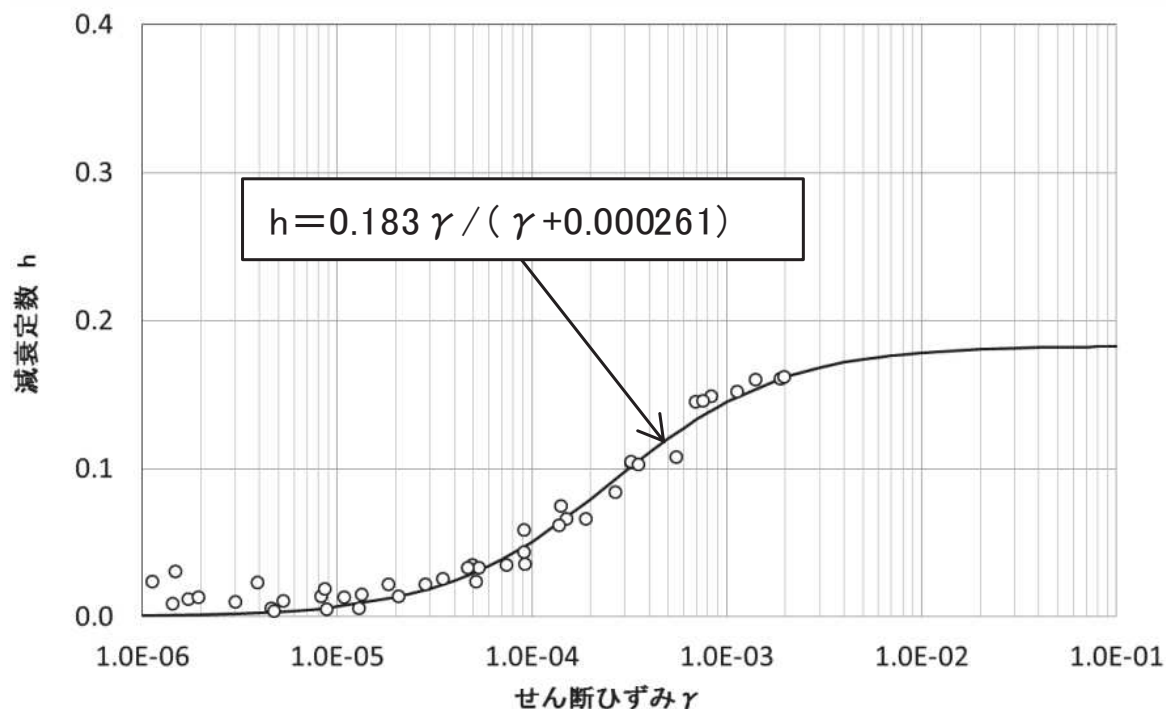
ここで、 $\gamma_m = \frac{\tau_m}{G_0}$ $\tau_m = \tau_0 + \sigma_{md} \tan \phi$ τ_0 [N/mm²] = 0.1

$$\phi [^\circ] = 33.9 \quad \sigma_{md} = 3/4 \times Z \times \rho_t \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

5. ベースとなる非線形地盤モデルの設定

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

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



$h-\gamma$ 曲線(繰返し三軸試験結果)

盛土物性値

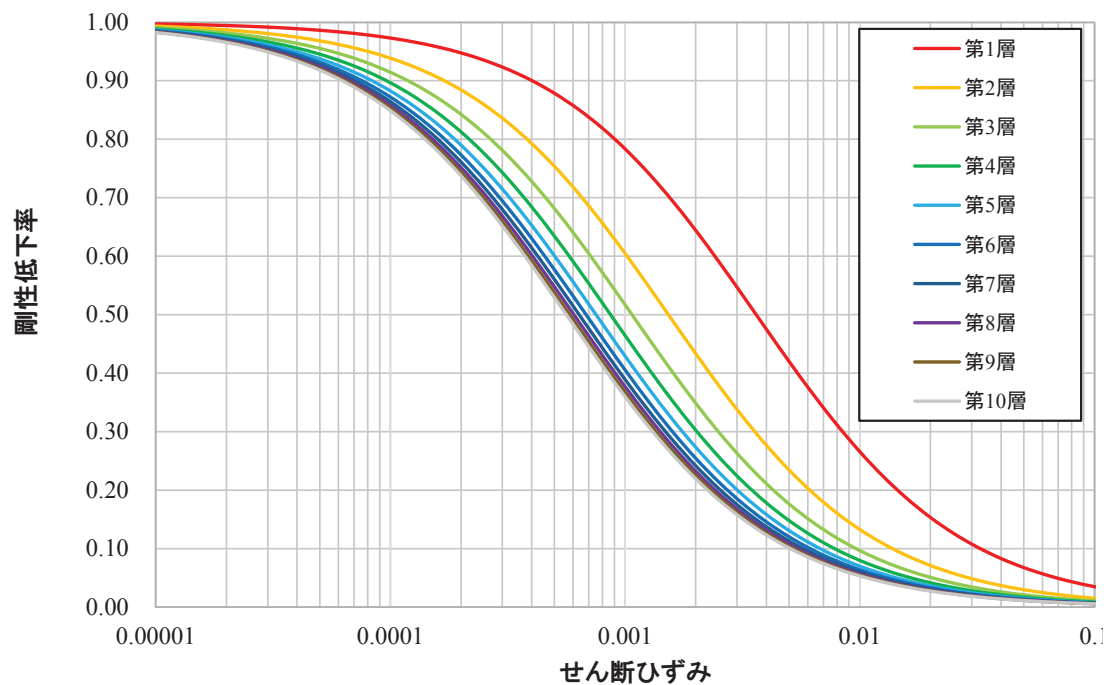
地盤	強度定数		初期せん断剛性 G_0 (MN/m ²)	減衰
	粘着力 C(MN/m ²)	内部摩擦角 ϕ (°)		
盛土 地下水位以浅	0.1	33.9	$1787 \sigma_c^{0.84}$	$h=0.183 \gamma / (\gamma + 0.000261)$

5. ベースとなる非線形地盤モデルの設定

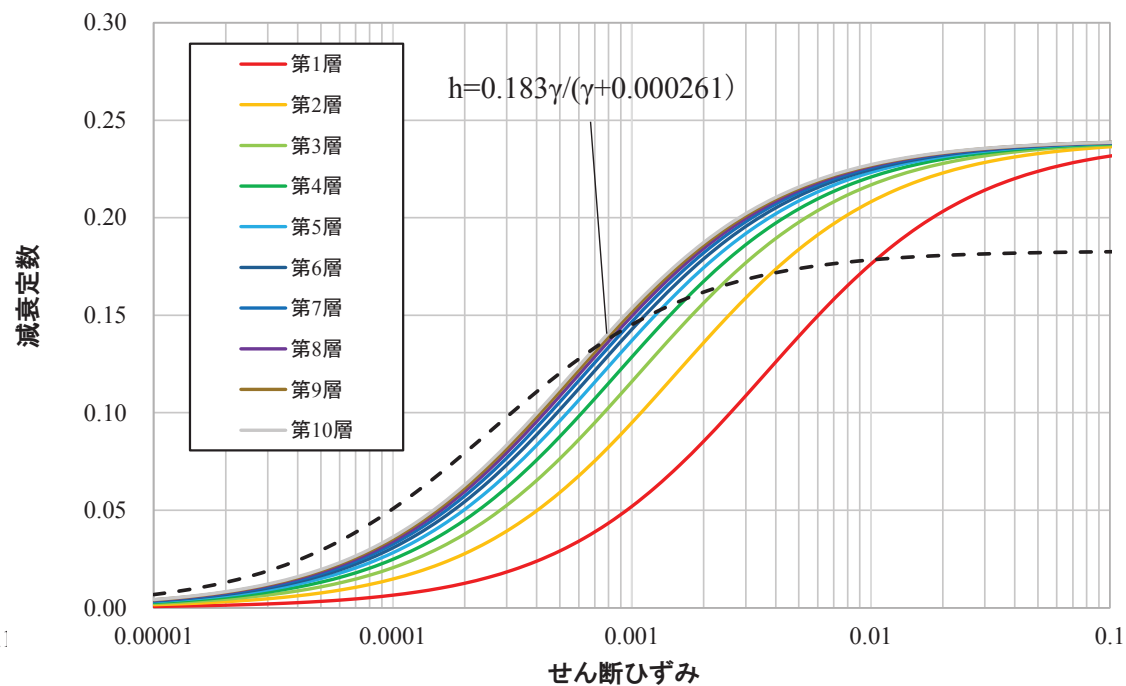
地盤調査結果より設定した物性値から，逐次非線形解析に用いる表層地盤上部各層*の $G/G_0 - \gamma$ 曲線および $h - \gamma$ 曲線を下図に示す。

$h - \gamma$ 曲線は，繰返し三軸試験結果と0.1%~0.3%のひずみレベルにおいて整合するように設定している。

* : 逐次非線形解析においては，表層地盤上部を10層に分割して計算を実施している。



$G/G_0 - \gamma$ 曲線(逐次非線形解析)



$h - \gamma$ 曲線(逐次非線形解析)

入力地震動評価用地盤モデルの検証

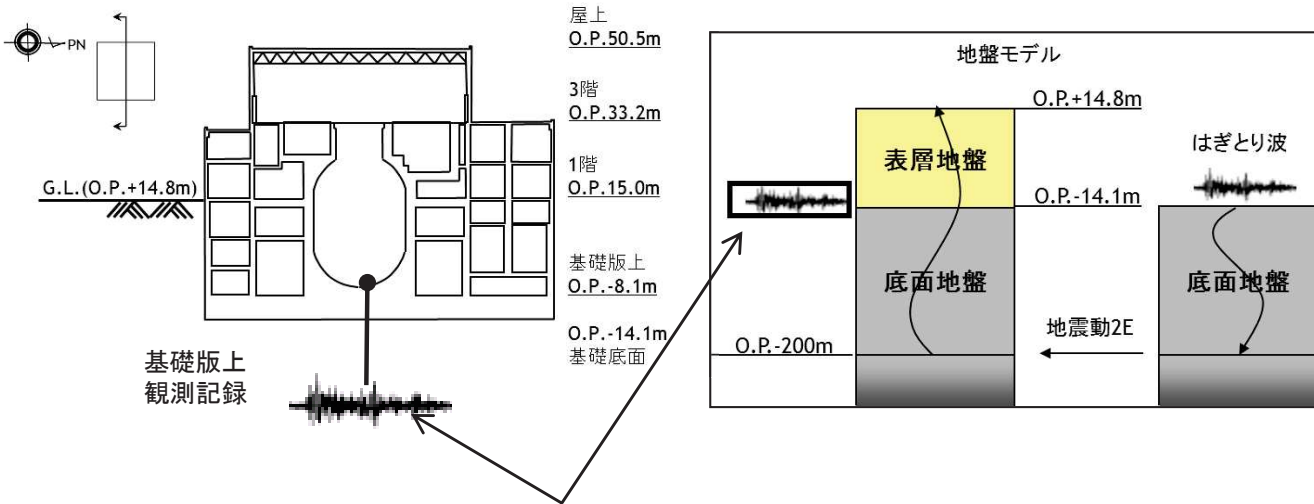
1. 検討概要と検討方法
2. 検討結果
 - (1)4地震の伝達関数の比較
 - (2)3.11地震での床応答スペクトルの比較
 - (3)4.7地震での床応答スペクトルの比較

1. 検討概要と検討方法

➤ 入力地震動評価用地盤モデルの表層地盤上部の非線形特性は地盤物性試験に基づき設定しているが、この非線形特性が過去の様々な地震動レベルの地震の観測記録と整合する結果を与えるかどうかを確認する。

■伝達関数の比較

➤ 地震動レベルの違う4地震を対象に、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は補正水平力の時刻歴波形)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。



はぎとり波に対する伝達関数の谷となる振動数を比較

表層地盤物性の検討方法の概念

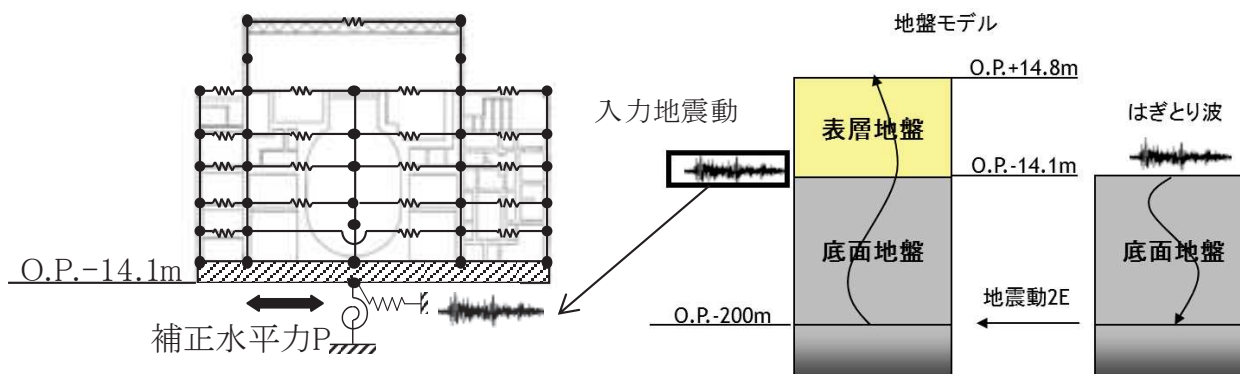
検討に用いた地震諸元

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

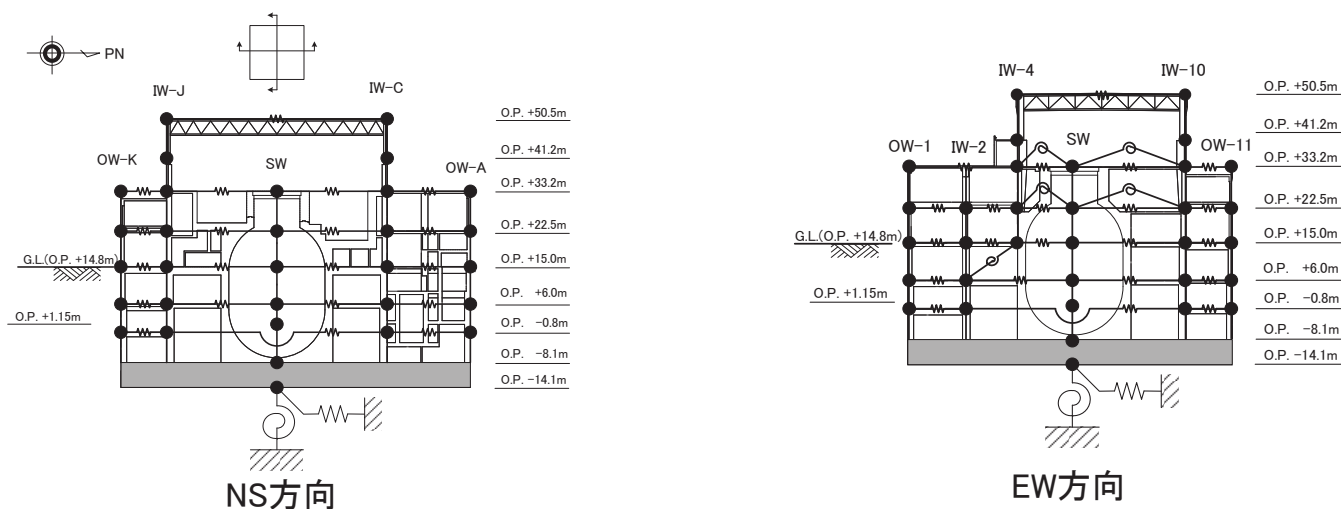
1. 検討概要と検討方法

■床応答スペクトルの比較

➤ 3.11地震および4.7地震については、はぎとり波を用いて設定した地盤モデルにより入力地震動を算定の上、建屋のシミュレーション解析を実施し、建屋の床応答スペクトルの比較を行う。なお、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。



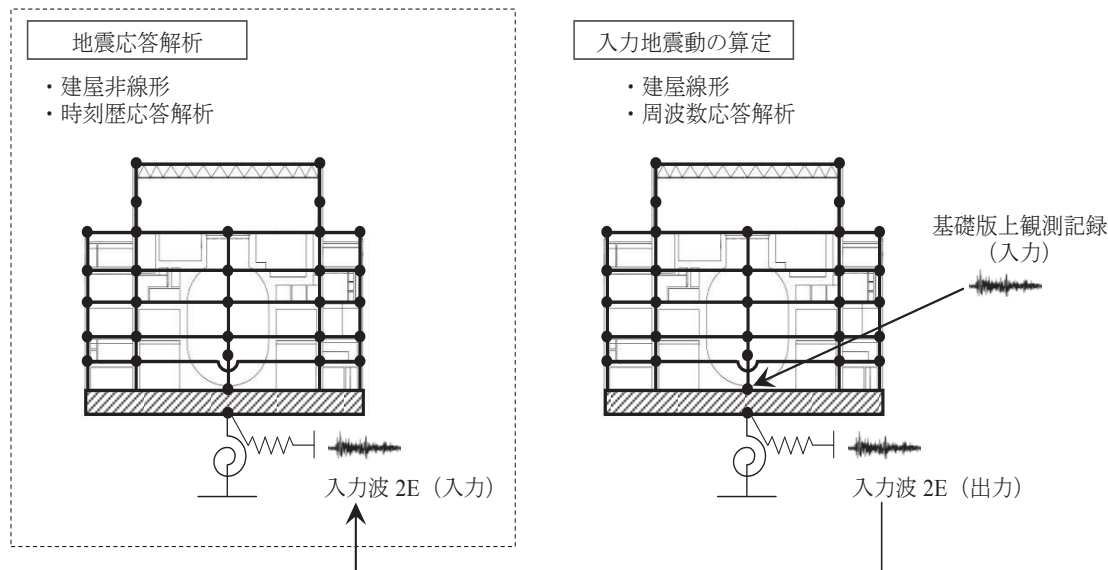
シミュレーション解析手法の概念図



建屋シミュレーション解析モデル

1. 検討概要と検討方法

■床応答スペクトルの比較



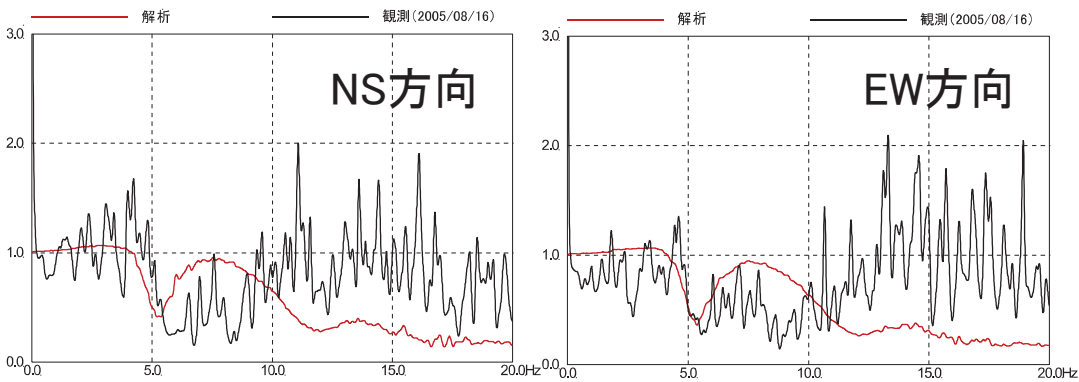
基礎版上観測記録を用いた建屋シミュレーション解析の概要

解析条件

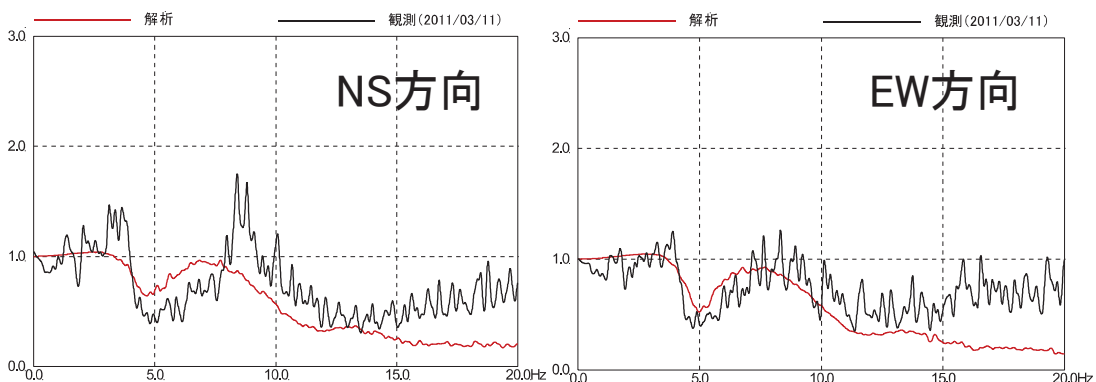
ケース	はぎとり波を用いたシミュレーション解析	(参考) 基礎版上観測記録入力
建屋	2号炉原子炉建屋	
地震動	3.11地震はぎとり波および4.7地震はぎとり波	基礎版上観測記録
入力地震動	基礎版底面位置の地震動(E+F)を算定し入力 (補正水平力考慮)	基礎版上観測記録から算定し入力
建屋モデル	3.11地震シミュレーションモデル (初期剛性低下考慮, 建屋減衰7%, 側面地盤ばね無し)	
地盤モデル	入力地震動評価用地盤モデル (表層地盤: 2層モデル)	—

2. 検討結果 (1)4地震の伝達関数の比較

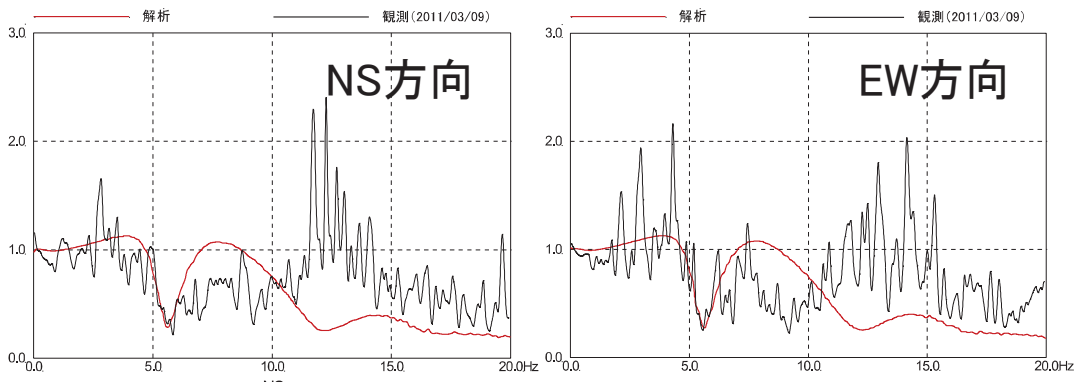
➤ 検討に用いた代表地震に対する伝達関数を比較した結果、いずれの地震についても伝達関数を概ね再現している。



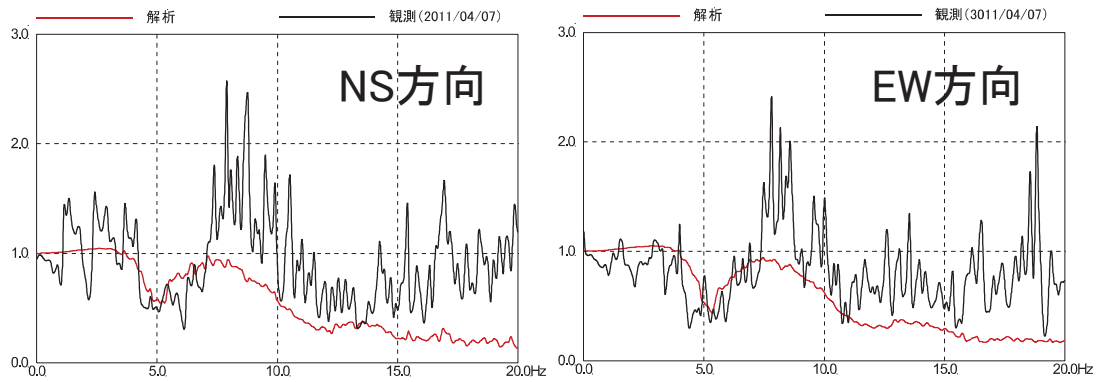
2005/8/16 地震



2011/3/11 東北地方太平洋沖地震



2011/3/9 地震



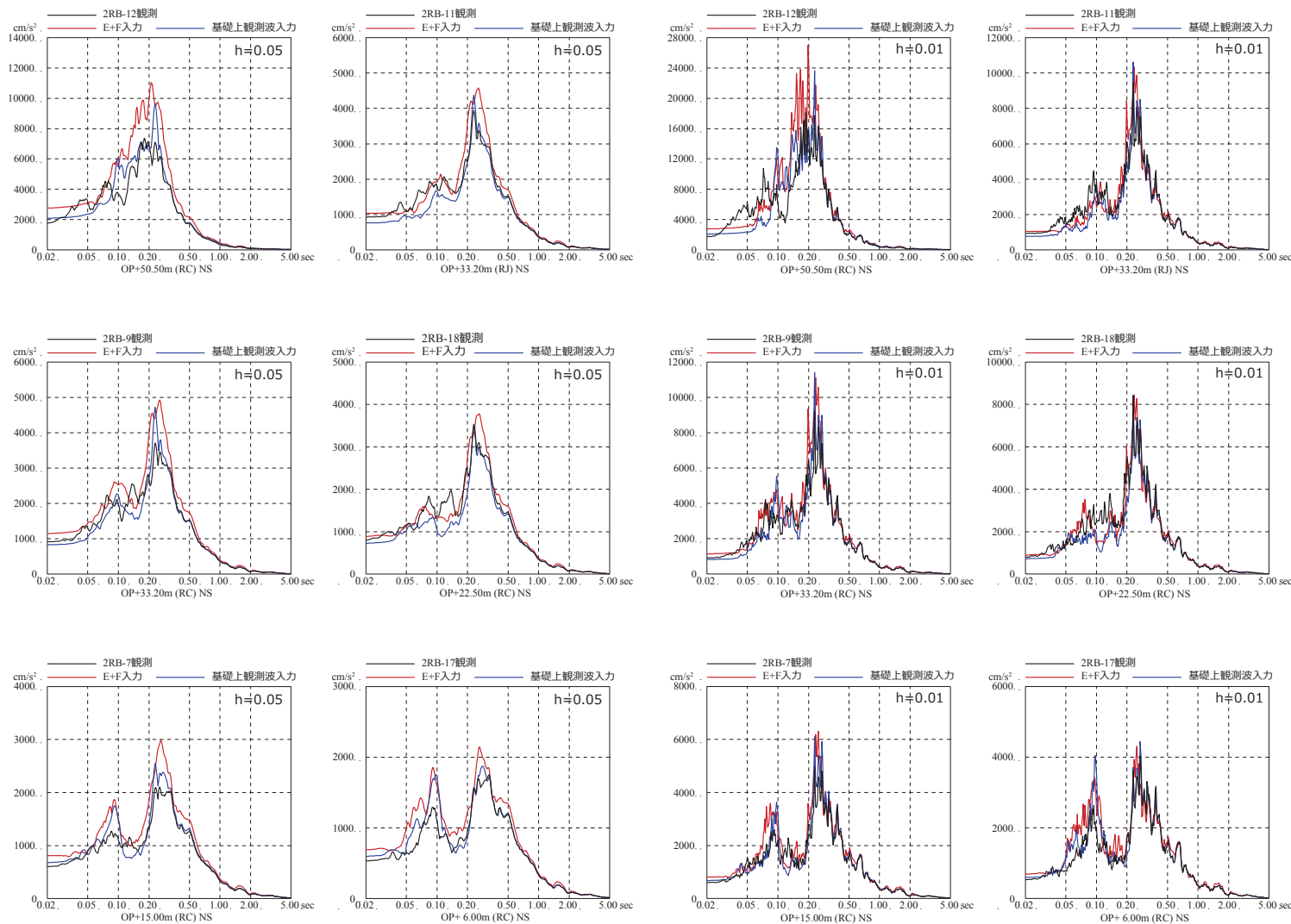
2011/4/7 地震

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)

2. 検討結果 (2)3.11地震での床応答スペクトルの比較[NS方向]

- 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、観測記録に対して基礎版上観測記録入力によるシミュレーション解析と同等の適合度となっている。

以上の検討結果から、設定した表層地盤上部のひずみ依存の非線形特性は、過去の地震について適用可能である。

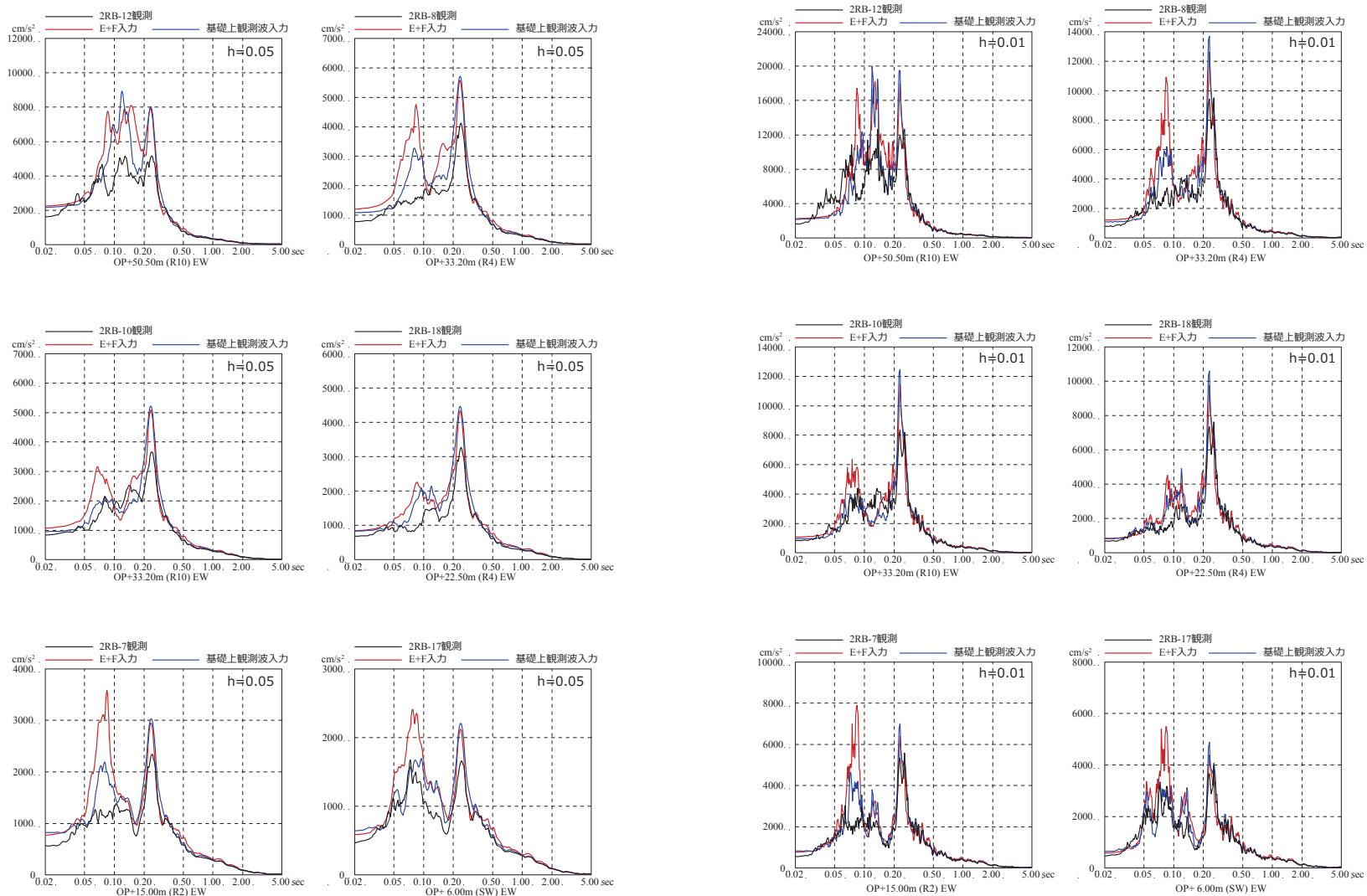


3.11地震NS方向(減衰5%)

3.11地震NS方向(減衰1%)

3.11地震のはぎ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. 検討結果 (2)3.11地震での床応答スペクトルの比較[EW方向]

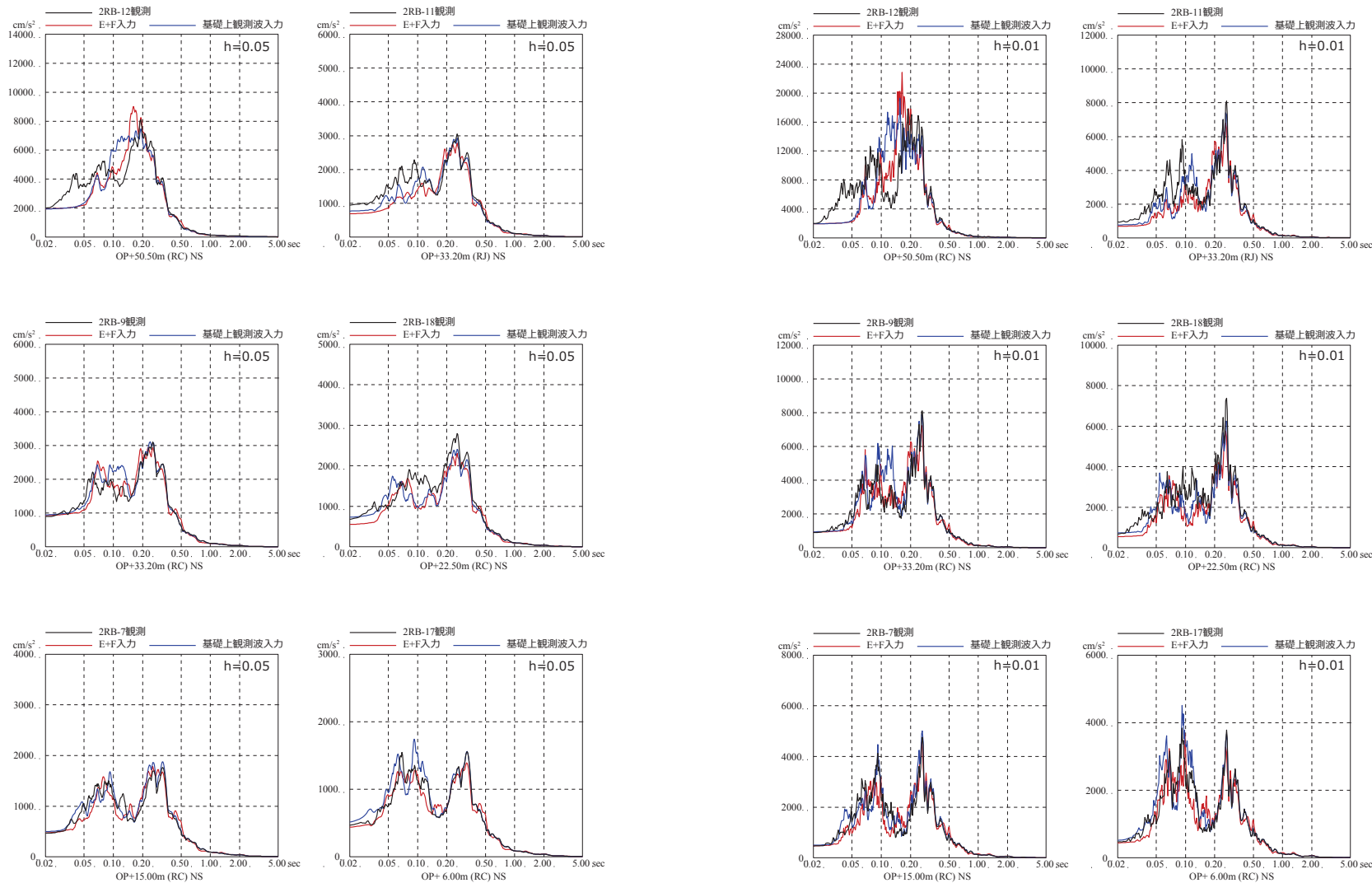


3.11地震EW方向(減衰5%)

3.11地震EW方向(減衰1%)

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. 検討結果 (3)4.7地震での床応答スペクトルの比較[NS方向]

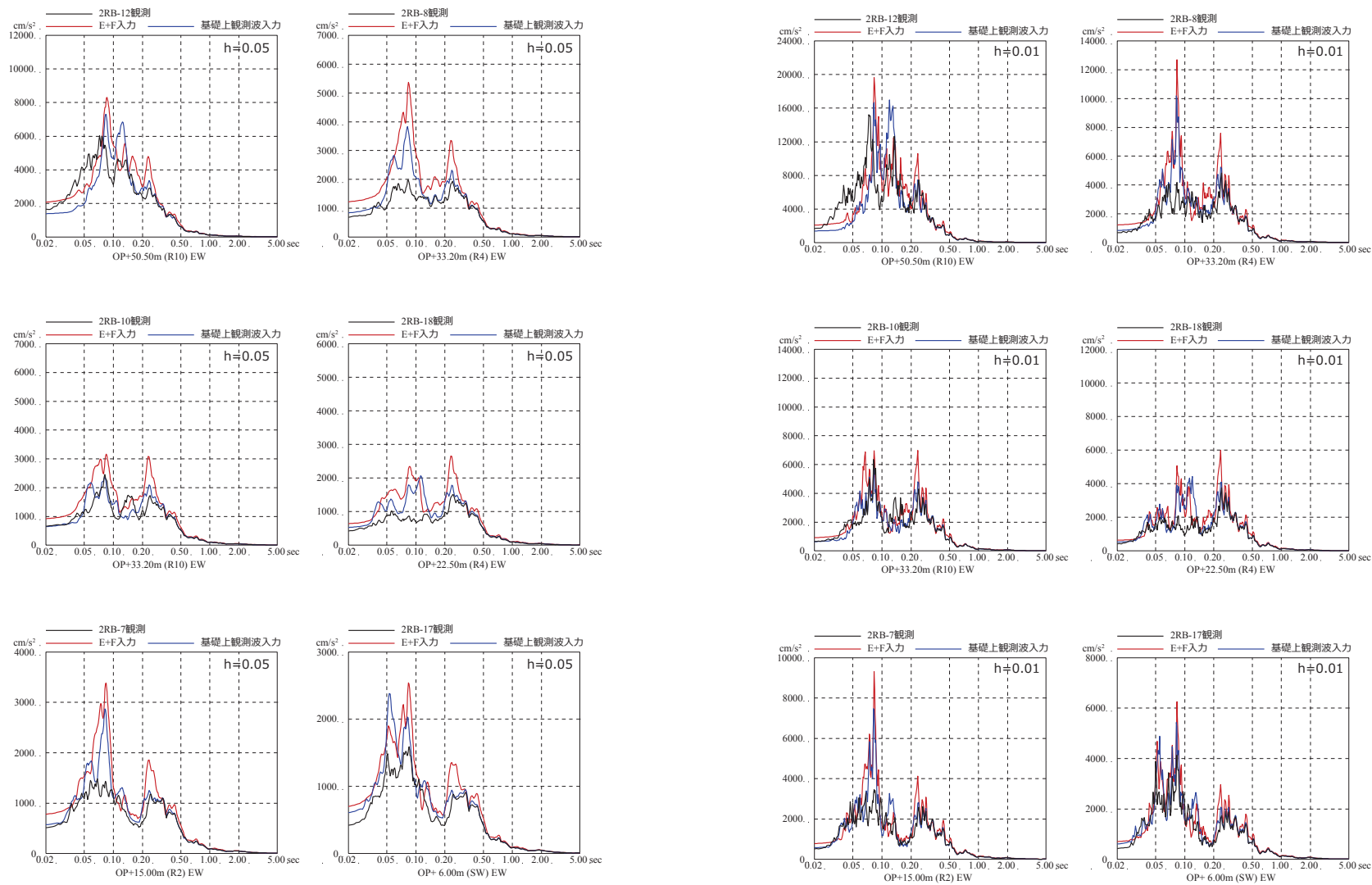


4.7地震NS方向(減衰5%)

4.7地震NS方向(減衰1%)

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. 検討結果 (3)4.7地震での床応答スペクトルの比較[EW方向]



4.7地震EW方向(減衰5%)

4.7地震EW方向(減衰1%)

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

基準地震動Ssに対する適用性検討

1. 検討概要
 2. 表層地盤下部の速度構造に関する検討
 3. 表層地盤上部の非線形特性に関する検討
 4. 減衰モデルに関する検討
 5. 地盤モデルの下端深さに関する検討
- 参考検討 逐次非線形解析と等価線形解析の比較
- 参考 基準地震動Ss時の地盤のひずみ分布
- 参考 3.11地震時の地盤のひずみ分布
- 参考 基準地震動Sd時の地盤のひずみ分布

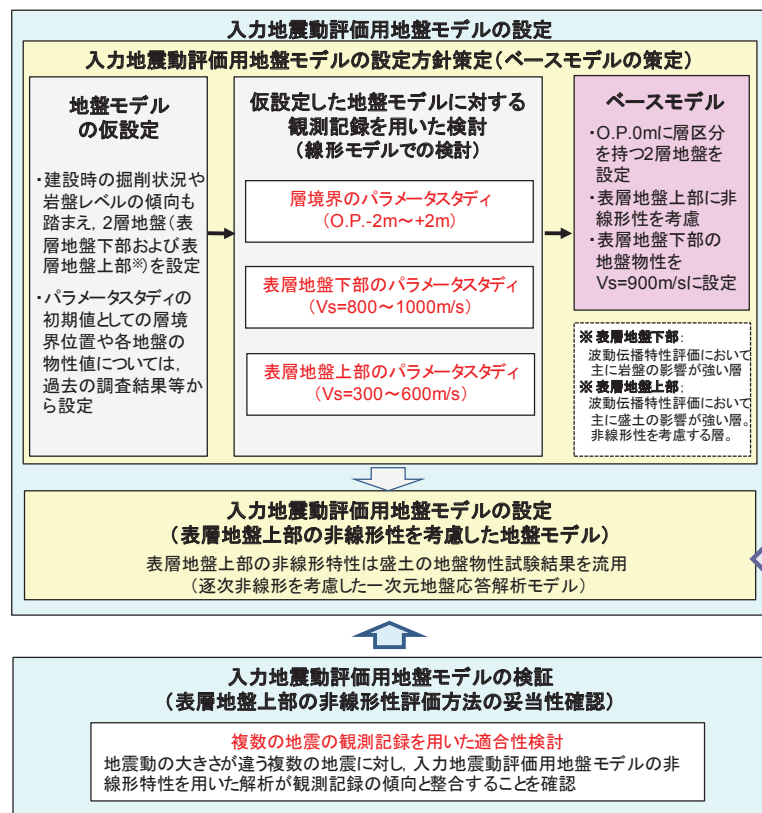
1. 検討概要

【地盤モデルに関する検討】

・表層地盤上部の非線形特性は地盤の物性試験結果を基に評価しているが、それに加え、3.11地震等の様々な記録を用い、手法の妥当性の検証を行っている。しかし、Ssでは過去の地震よりも更にひずみが進んだ状態となる(外挿関係になる)ことから、Ssに対する各種感度解析を実施し、影響について確認する。

【評価手法に関する検討】

・既往プラントでは、入力地震動評価に逐次非線形解析を採用した実績が無いことも踏まえ、評価手法の設定条件等の違いがSs応答に与える影響について感度解析を実施し、影響について確認する。



基準地震動Ssに対する適用性検討

【地盤モデルに関する検証】

- ①表層地盤下部の初期物性を低下させた場合の影響
- ②表層地盤上部の初期物性を地盤安定解析と同様の評価を採用した場合の影響

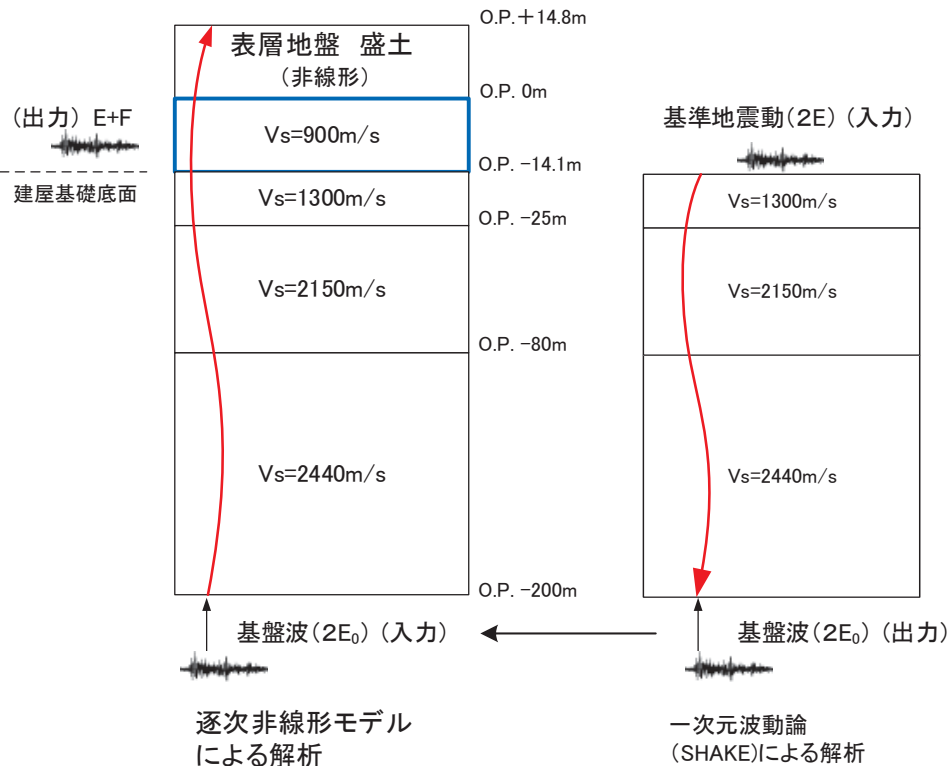
【評価手法に関する検討】

- ③地盤減衰モデル(レーリー減衰)を内部粘性減衰に変えた場合の影響検討
- ④引き下げモデルの下端深さの違いの影響

2. 表層地盤下部の速度構造に関する検討

■表層地盤下部の剛性変化に関する感度解析

➤ 表層地盤上部及び表層地盤下部のせん断波速度V_sは、パラメータスタディを踏まえそれぞれ350m/s, 900m/sを採用しているが、上部についてはせん断波速度V_sが小さく下部とのコントラストが大きいことから、ひずみレベルに応じた非線形性を考慮する。一方、下部のせん断波速度V_sは岩盤相当の値となっていることから非線形性は考慮しないが、念のために地盤物性の変化が基準地震動S_s応答に与える影響を確認した。



V_sの比較検討を行う層

検討の概念図

検討に用いた地盤モデル

		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 ^{※2} h(%)
表層地盤	上部	14.80	18.6	※1	3 ^{※3}
	下部	0.00	23.3	800~1000 ^{※4}	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V_sと相関のある初期せん断剛性G₀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 レーリー減衰(4Hz, 12Hz)

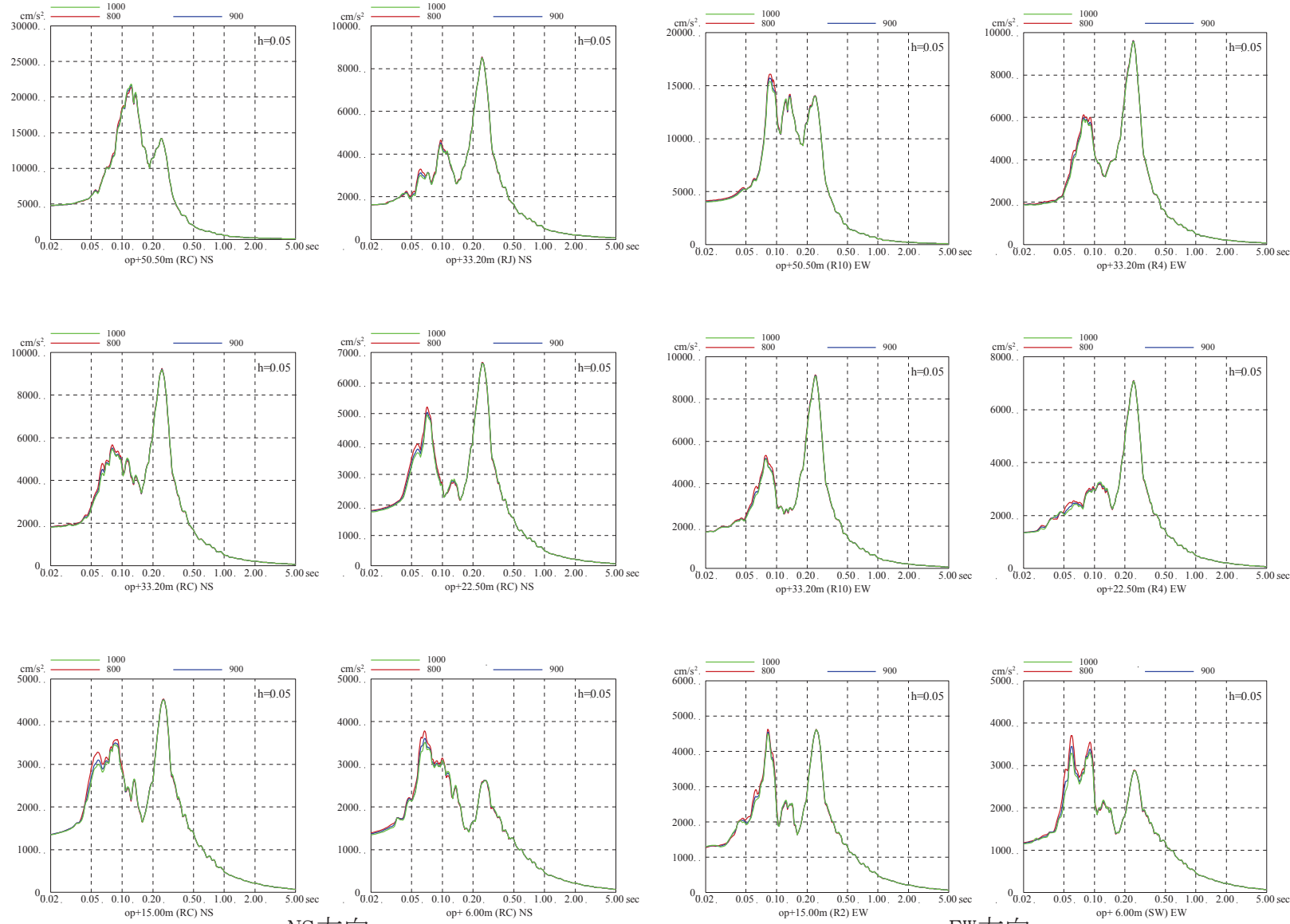
※3 ひずみ依存による非線形特性を考慮する。

※4 V_sは、800 m/s, 900m/s, 1000m/sの比較を行う

2. 表層地盤下部の速度構造に関する検討

■表層地盤下部の剛性変化に関する感度解析（床応答スペクトルの比較）

➤ 基準地震動Ss-D2による床応答スペクトルは、表層地盤下部のS波速度値を800 m/sから1000m/sの範囲で変化させても大きな差異は生じない。



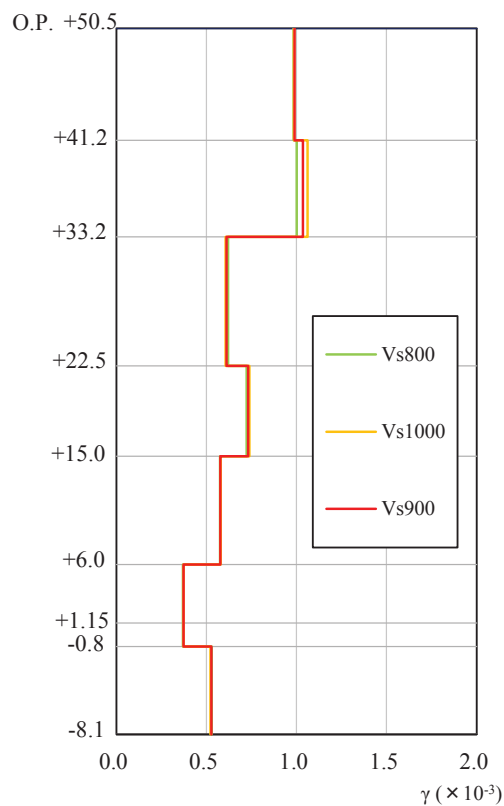
※地震計位置は別紙①参照。

表層地盤下部のせん断波速度Vsを変化させた場合の床応答スペクトルの比較
(Vs=800m/s~1000m/s, 基準地震動Ss-D2)

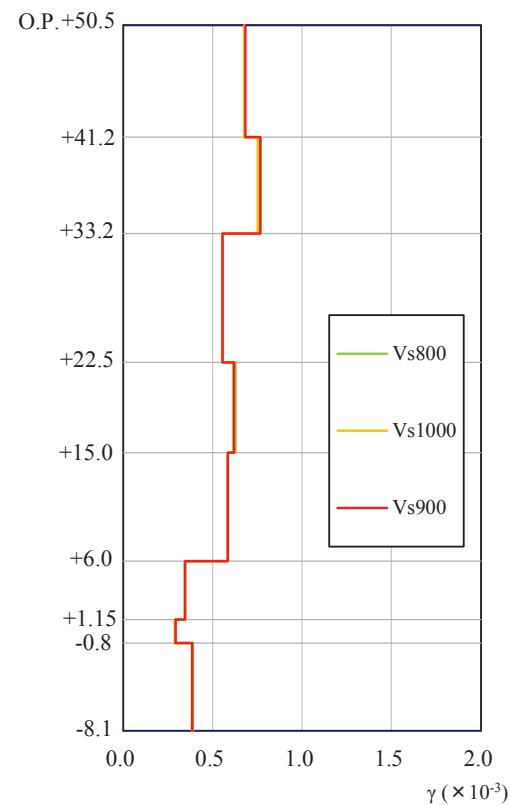
2. 表層地盤下部の速度構造に関する検討

■表層地盤下部の剛性変化に関する感度解析(最大応答せん断ひずみの比較)

➤ 基準地震動Ss-D2による最大応答せん断ひずみは、表層地盤下部のせん断波速度Vsを800m/sから1000m/sの範囲で変化させても大きな差異はない。



NS方向



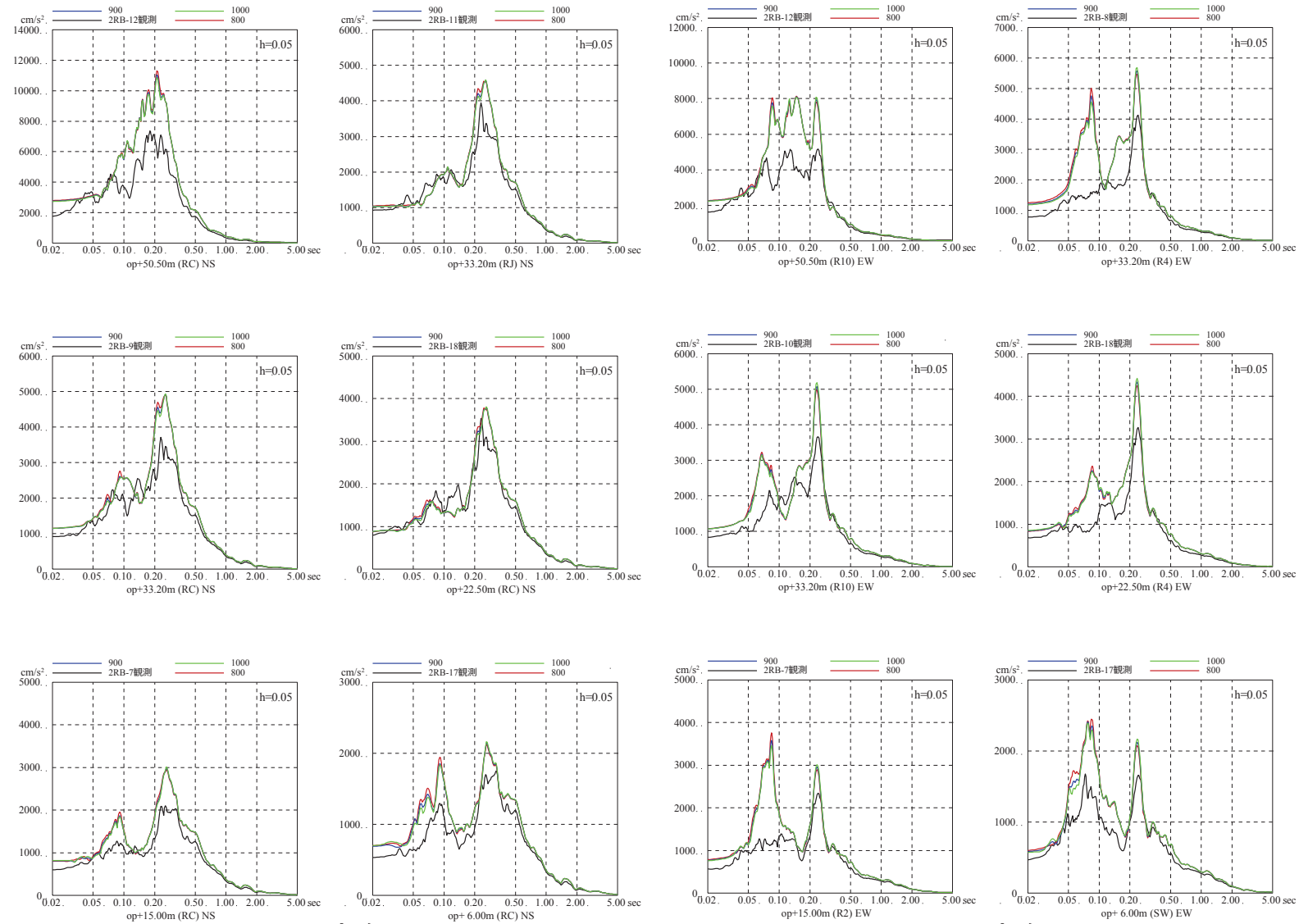
EW方向

表層地盤下部のせん断波速度Vsを変化させた場合の最大応答せん断ひずみの比較
(Vs=800m/s~1000m/s, 基準地震動Ss-D2)

2. 表層地盤下部の速度構造に関する検討

■(参考)表層地盤下部の剛性変化に関する感度解析 (床応答スペクトルの比較)

- ▶ 参考に、入力地震動評価用地盤モデル(表層地盤上部に非線形特性を考慮)を用いて、3.11地震のはざとり波による床応答スペクトルの比較を行った。
- ▶ 床応答スペクトルは、表層地盤下部のせん断波速度Vsを800m/sから1000m/sの範囲で変化させても大きな差異は生じない。



※地震計位置は別紙①参照。
 NS方向
 EW方向
 表層地盤下部のせん断波速度Vsを変化させた場合の床応答スペクトルの比較
 (Vs=800m/s~1000m/s, 3.11地震)

3. 表層地盤上部の非線形特性に関する検討

■検討の目的

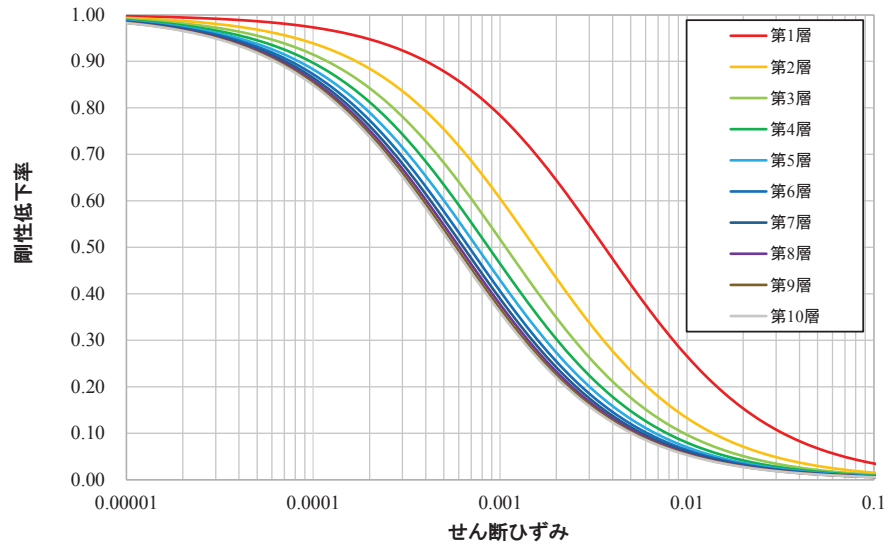
- ▶ 表層地盤上部のせん断波速度Vsは、地震動レベルに応じた非線形化が予想される値のため、ひずみレベルに応じた非線形性を考慮している。
- ▶ 表層地盤の非線形特性は、PS検層結果から初期せん断剛性 G_0 を、原位置せん断試験結果から双曲線モデルとして $G/G_0 - \gamma$ 曲線を、繰返し三軸試験結果から $h - \gamma$ 曲線を設定し、地震観測記録のシミュレーション解析により検証している。
- ▶ 一方、初期せん断剛性 G_0 および $G/G_0 - \gamma$ 曲線については、繰返し三軸試験による結果も存在することから、この結果を反映した地盤モデルを採用した場合のシミュレーション解析を行い、観測記録との整合性について検討する。

■検討方法

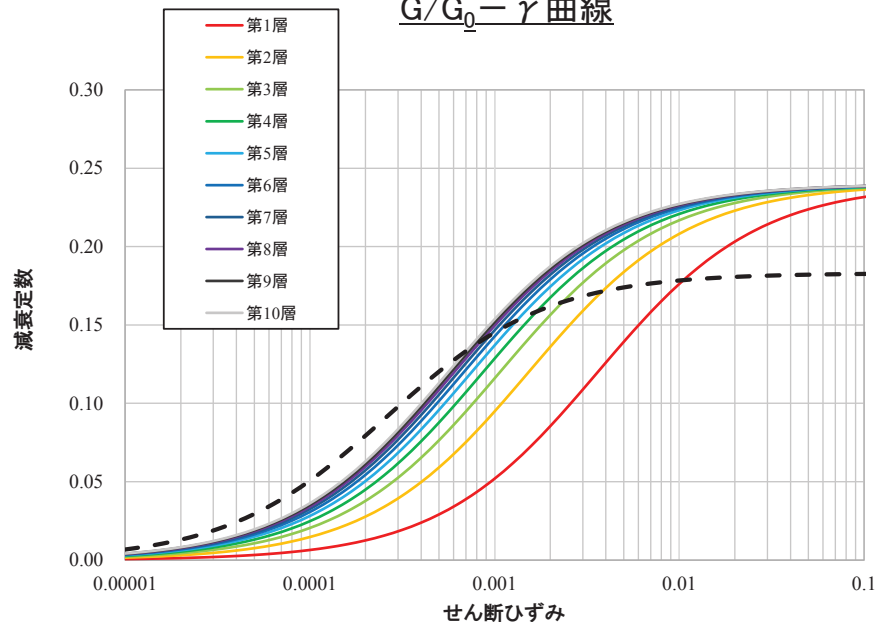
- ▶ 入力地震動の算定に用いる地盤モデルの非線形特性として、PS検層結果から初期せん断剛性 G_0 、原位置せん断試験結果から双曲線モデルとして $G/G_0 - \gamma$ 曲線を設定した場合(基本ケース)と、繰返し三軸試験結果から初期せん断剛性 G_0 および $G/G_0 - \gamma$ 曲線を設定した場合(ケース1)の観測記録の再現性を確認する。
- ▶ 検討は、入力地震動評価用地盤モデルの検証に用いた3.11地震のはぎとり波と基準地震動Ss-D2を用いて建屋シミュレーション解析を実施し、観測記録と解析結果の加速度応答スペクトルの比較により行う。
- ▶ 基本ケースでは、O.P.14.8m～O.P.0mの表層地盤非線形特性として初期せん断剛性 G_0 は、PS検層結果により設定する。
- ▶ 検討は、以下の3種類について比較を行う。
 - ①初期せん断剛性 G_0 のみを変更する
(この場合 $G/G_0 - \gamma$ 曲線は従来のモデルと同じとし、(7)式の基準ひずみは適用しない)
 - ② $G/G_0 - \gamma$ 曲線のみ変更する
(この場合(7)式の基準ひずみと初期せん断剛性 G_0 の関係式は適用しない)
 - ③初期せん断剛性 G_0 と $G/G_0 - \gamma$ 曲線の両方を変更する

3. 表層地盤上部の非線形特性に関する検討

■基本ケースの解析において用いたG/G₀-γ曲線、h-γ曲線



G/G₀-γ曲線



h-γ曲線

初期せん断剛性G₀は、PS検層結果により(1)式で設定する。

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

ここで、 σ_c [MN/m²] = Z × ρ_t × $\frac{2}{3}$ Z: 深度

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

G/G₀-γ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と初期せん断剛性G₀から、基準ひずみγ_mを算定し(2)式により求める。

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

ここで、 $\gamma_m = \frac{\tau_m}{G_0}$ $\tau_m = \tau_0 + \sigma_{md} \tan \phi$ τ_0 [N/mm²] = 0.1

$$\phi [^\circ] = 33.9 \quad \sigma_{md} = 3/4 \times Z \times \rho_t \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

h-γ曲線は逐次非線形解析に用いる解析コードではH-Dモデルの関数形としてh-γ曲線を定義する。H-Dモデルの関係式を以下に示す。

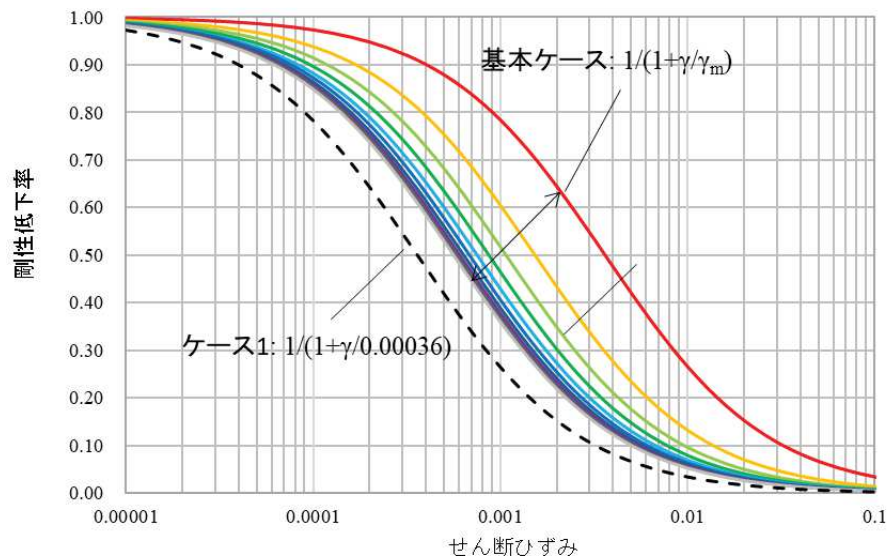
$$h = h_{\max} (1 - G/G_0) \quad (3)$$

h_{max}はせん断ひずみが0.001~0.003程度で繰返し三軸試験結果に基づいた(4)式と同程度の減衰となるようにh_{max}=0.24と設定した。

$$h = 0.183\gamma / (\gamma + 0.000261) \quad (4)$$

3. 表層地盤上部の非線形特性に関する検討

■ケース1の解析において用いたG/G₀ - γ 曲線、h - γ 曲線

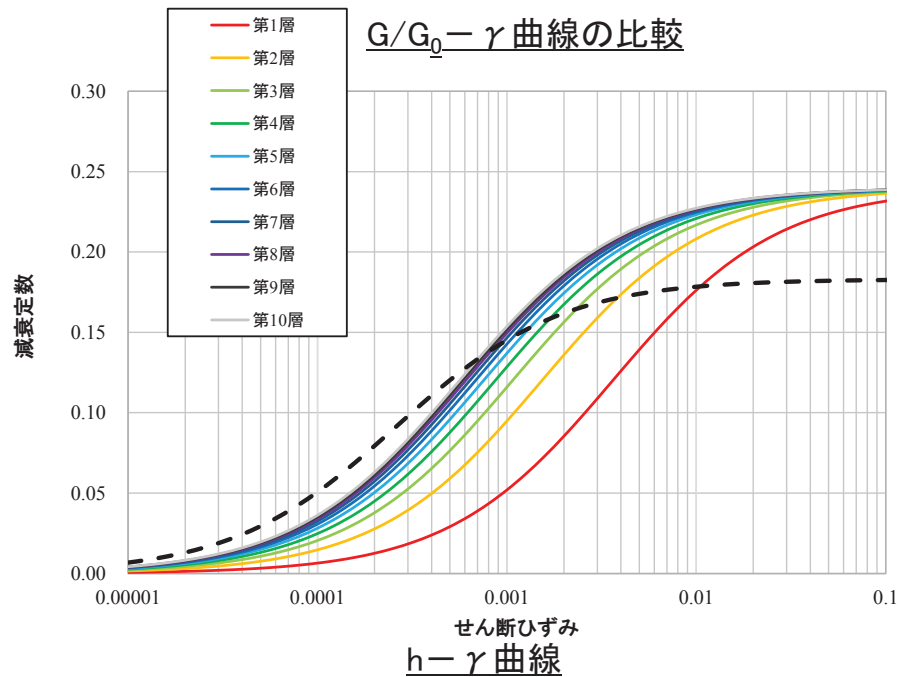


ケース1の表層地盤非線形特性として初期せん断剛性G₀およびG/G₀ - γ 曲線は、繰返し三軸試験結果から(5)式および(6)式で設定する。

$$G_0 = 382\sigma_c^{0.71} \tag{5}$$

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_m}} \tag{6}$$

$$\gamma_m = \frac{\tau_m}{G_0} = 0.00036 \tag{7}$$

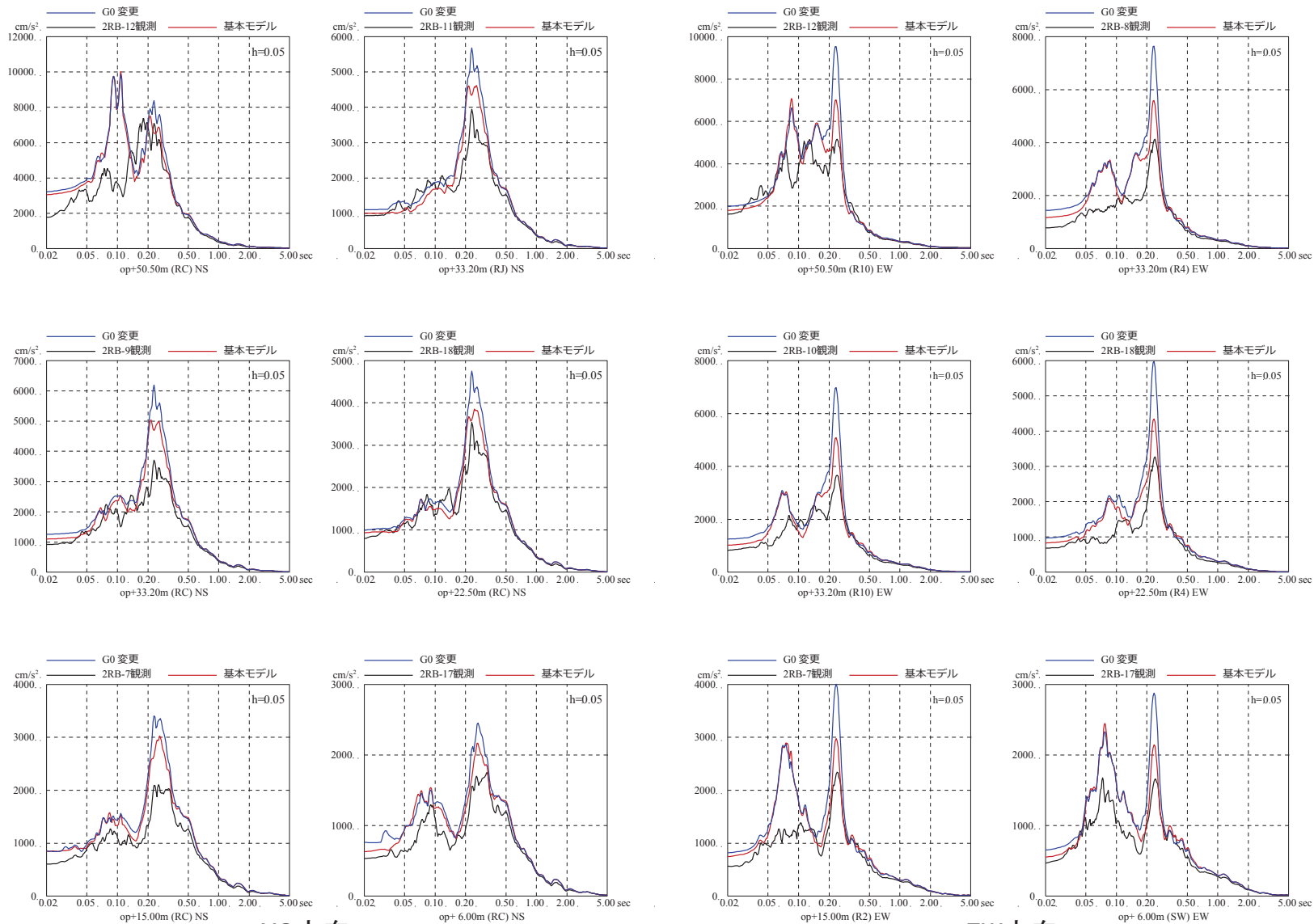


h - γ 曲線は、基本ケースと同様とする。

3. 表層地盤上部の非線形特性に関する検討

■検討結果 3.11地震はぎとり波(初期せん断剛性 G_0 を変更した場合)

➤ 床応答スペクトルは、周期0.2秒~0.3秒の1次ピーク付近で基本ケースよりケース1が大きくなる傾向が見られ、基本ケースの方が観測記録に近い結果となっている。



NS方向

EW方向

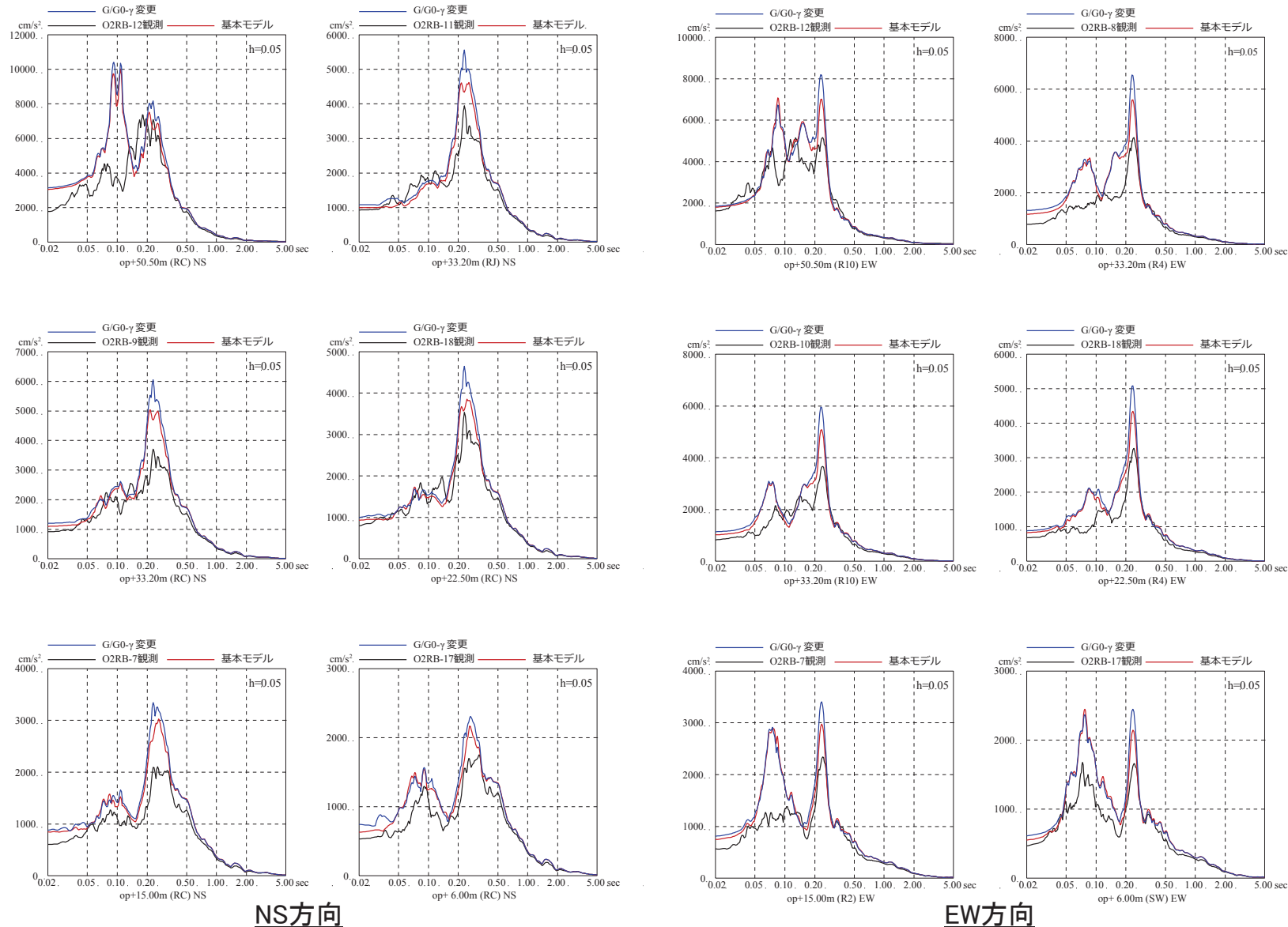
※地震計位置は別紙①参照。

表層地盤上部の非線形特性を変えた場合の床応答スペクトルの比較(3.11地震)
(初期せん断剛性 G_0 を変更した場合)

3. 表層地盤上部の非線形特性に関する検討

■検討結果 3.11地震はぎとり波($G/G_0 - \gamma$ 曲線のみ変更した場合)

➤ 床応答スペクトルは、周期0.2秒～0.3秒の1次ピーク付近で基本ケースよりケース1が大きくなる傾向が見られ、基本ケースの方が観測記録に近い結果となっている。



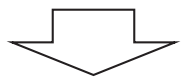
※地震計位置は別紙①参照。

表層地盤上部の非線形特性を変えた場合の床応答スペクトルの比較(3.11地震)
($G/G_0 - \gamma$ 曲線のみ変更した場合)

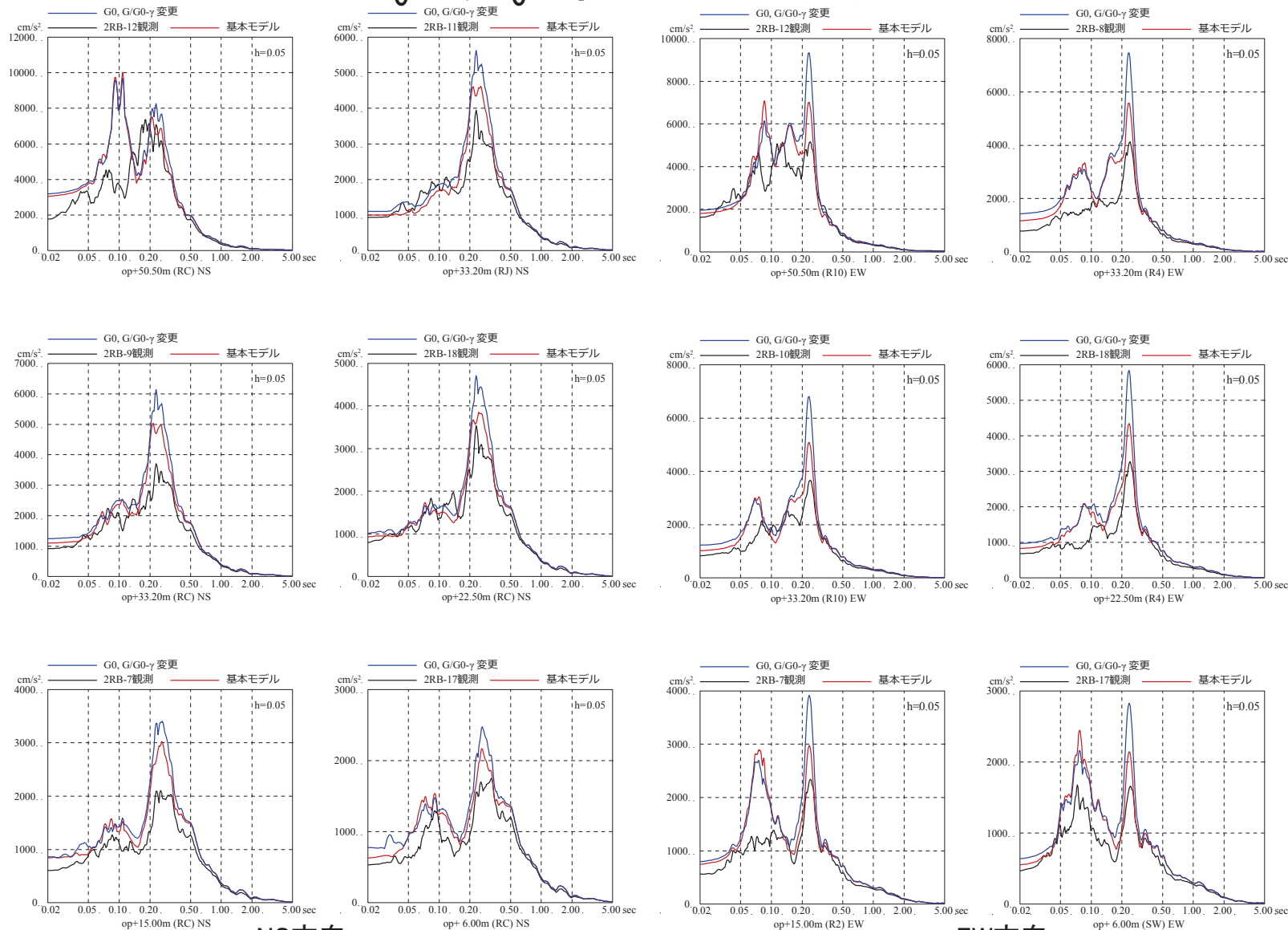
3. 表層地盤上部の非線形特性に関する検討

■検討結果 3.11地震はぎとり波(初期せん断剛性 G_0 と $G/G_0-\gamma$ 曲線を変更した場合)

➤ 床応答スペクトルは、周期0.2秒~0.3秒の1次ピーク付近で基本ケースよりケース1が大きくなる傾向が見られ、基本ケースの方が観測記録に近い結果となっている。



以上より、設計で採用している手法の方が適切な評価を与えることを確認した。



NS方向

EW方向

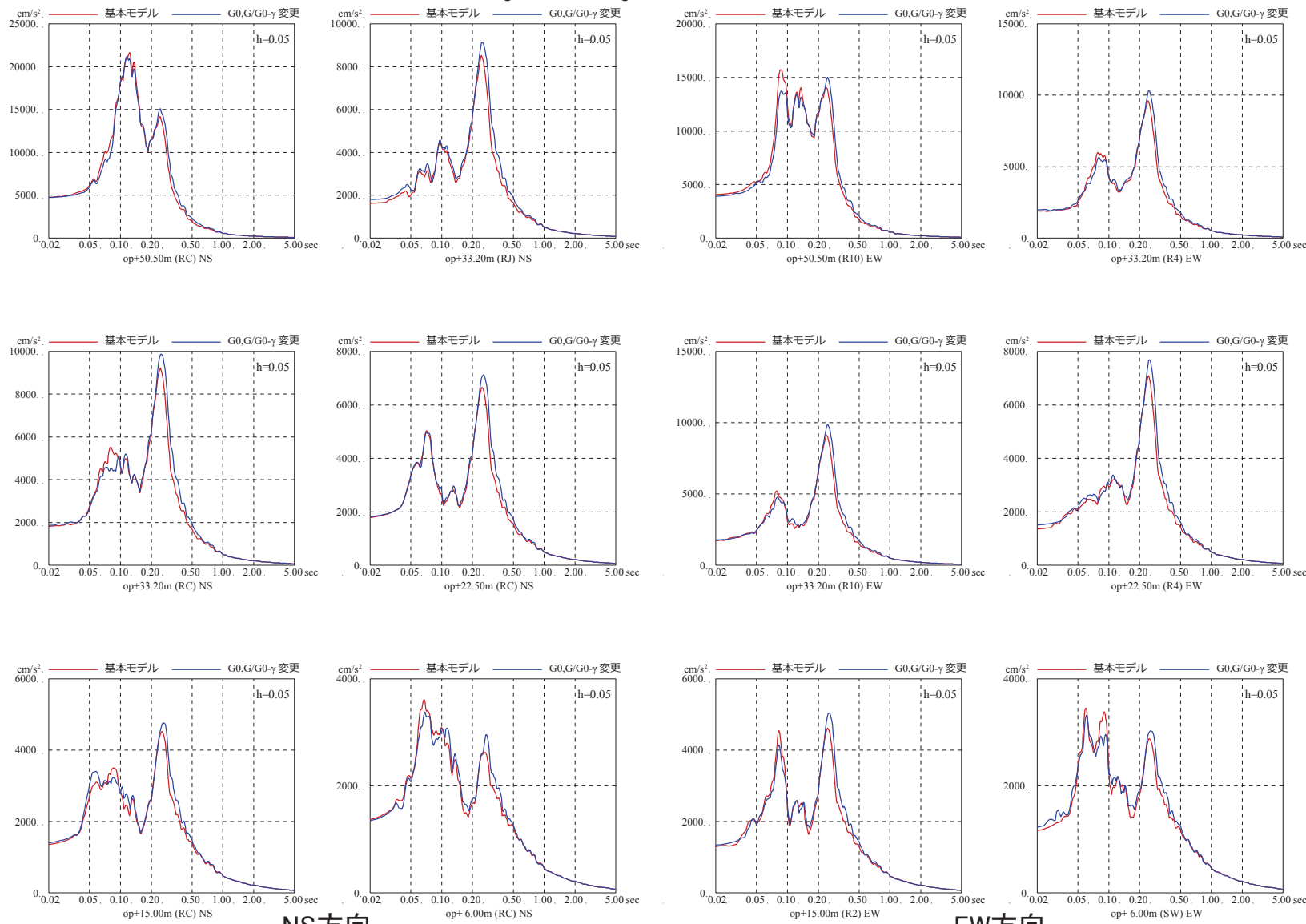
※地震計位置は別紙①参照。

表層地盤上部の非線形特性を変えた場合の床応答スペクトルの比較(3.11地震)
(初期せん断剛性 G_0 と $G/G_0-\gamma$ 曲線を変更した場合)

3. 表層地盤上部の非線形特性に関する検討

■基準地震動Ss-D2を用いた感度解析(初期せん断剛性 G_0 と $G/G_0 - \gamma$ 曲線を変更した場合)

➤ ひずみレベルの大きい基準地震動Ssに対しては、評価方法の違いが地震応答解析結果に与える影響は小さい。

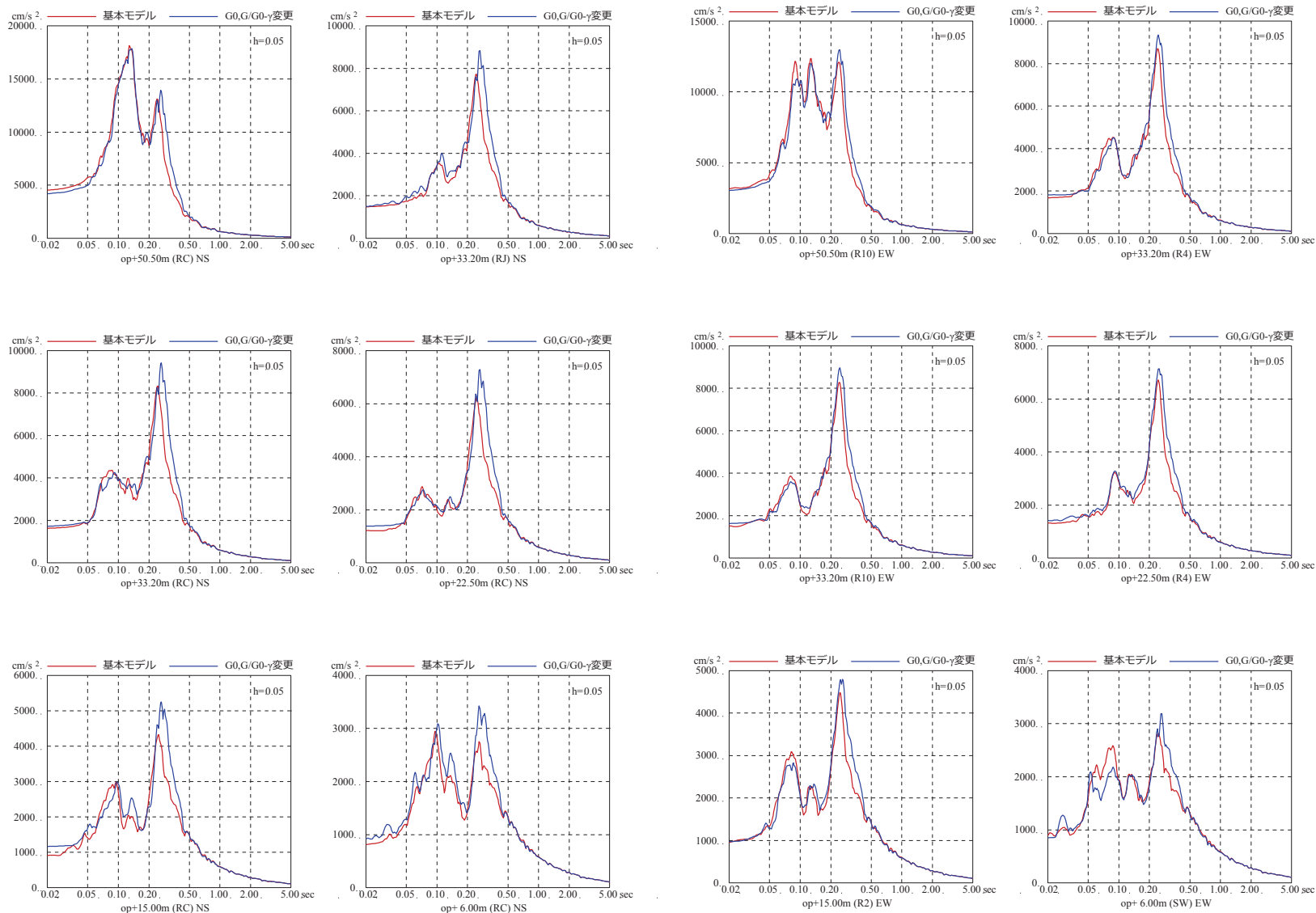


表層地盤上部の非線形特性を変えた場合の床応答スペクトルの比較(基準地震動Ss-D2)
(初期せん断剛性 G_0 と $G/G_0 - \gamma$ 曲線を変更した場合)

3. 表層地盤上部の非線形特性に関する検討

■基準地震動Ss-D1を用いた感度解析(初期せん断剛性 G_0 と $G/G_0 - \gamma$ 曲線を変更した場合)

➤ ひずみレベルの大きい基準地震動Ssに対しては、評価方法の違いが地震応答解析結果に与える影響は小さい。



NS方向

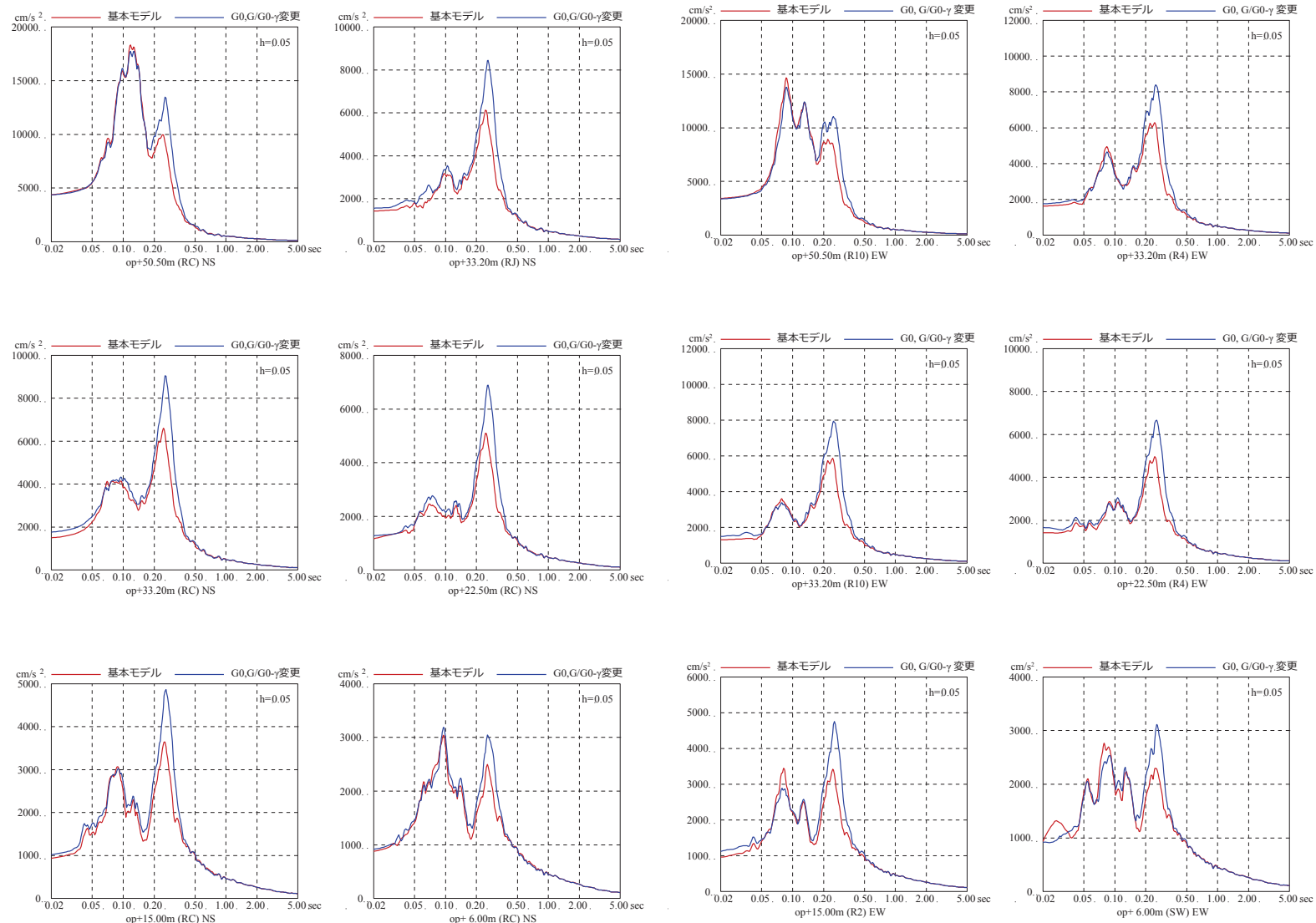
EW方向

表層地盤上部の非線形特性を変えた場合の床応答スペクトルの比較(基準地震動Ss-D1)
(初期せん断剛性 G_0 と $G/G_0 - \gamma$ 曲線を変更した場合)

3. 表層地盤上部の非線形特性に関する検討

■基準地震動Ss-D3を用いた感度解析(初期せん断剛性 G_0 と $G/G_0-\gamma$ 曲線を変更した場合)

➤ ひずみレベルの大きい基準地震動Ssに対しては、評価方法の違いが地震応答解析結果に与える影響は小さい。



NS方向

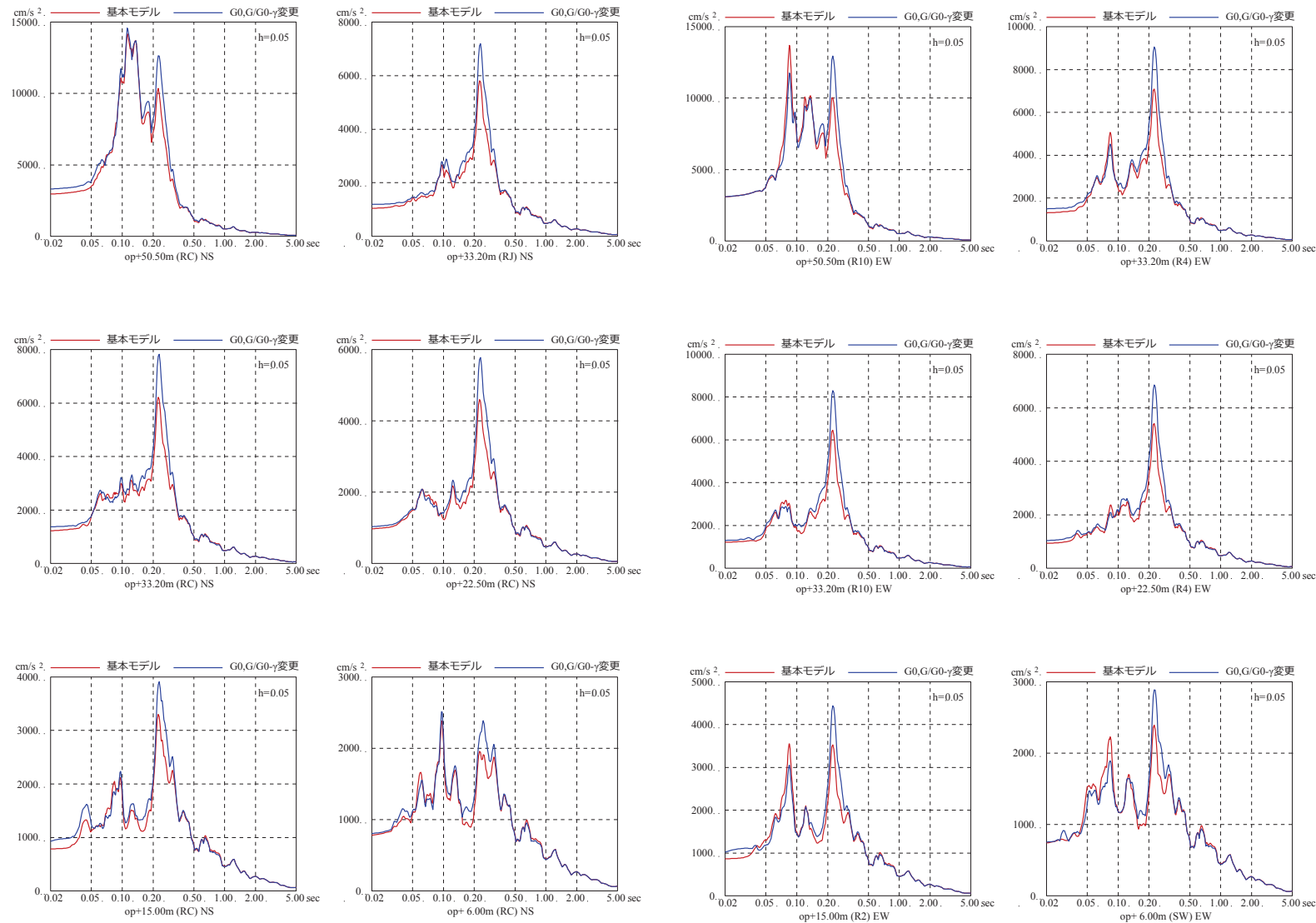
EW方向

表層地盤上部の非線形特性を変えた場合の床応答スペクトルの比較(基準地震動Ss-D3)
(初期せん断剛性 G_0 と $G/G_0-\gamma$ 曲線を変更した場合)

3. 表層地盤上部の非線形特性に関する検討

■基準地震動Ss-F1を用いた感度解析(初期せん断剛性 G_0 と $G/G_0 - \gamma$ 曲線を変更した場合)

➤ ひずみレベルの大きい基準地震動Ssに対しては、評価方法の違いが地震応答解析結果に与える影響は小さい。



NS方向

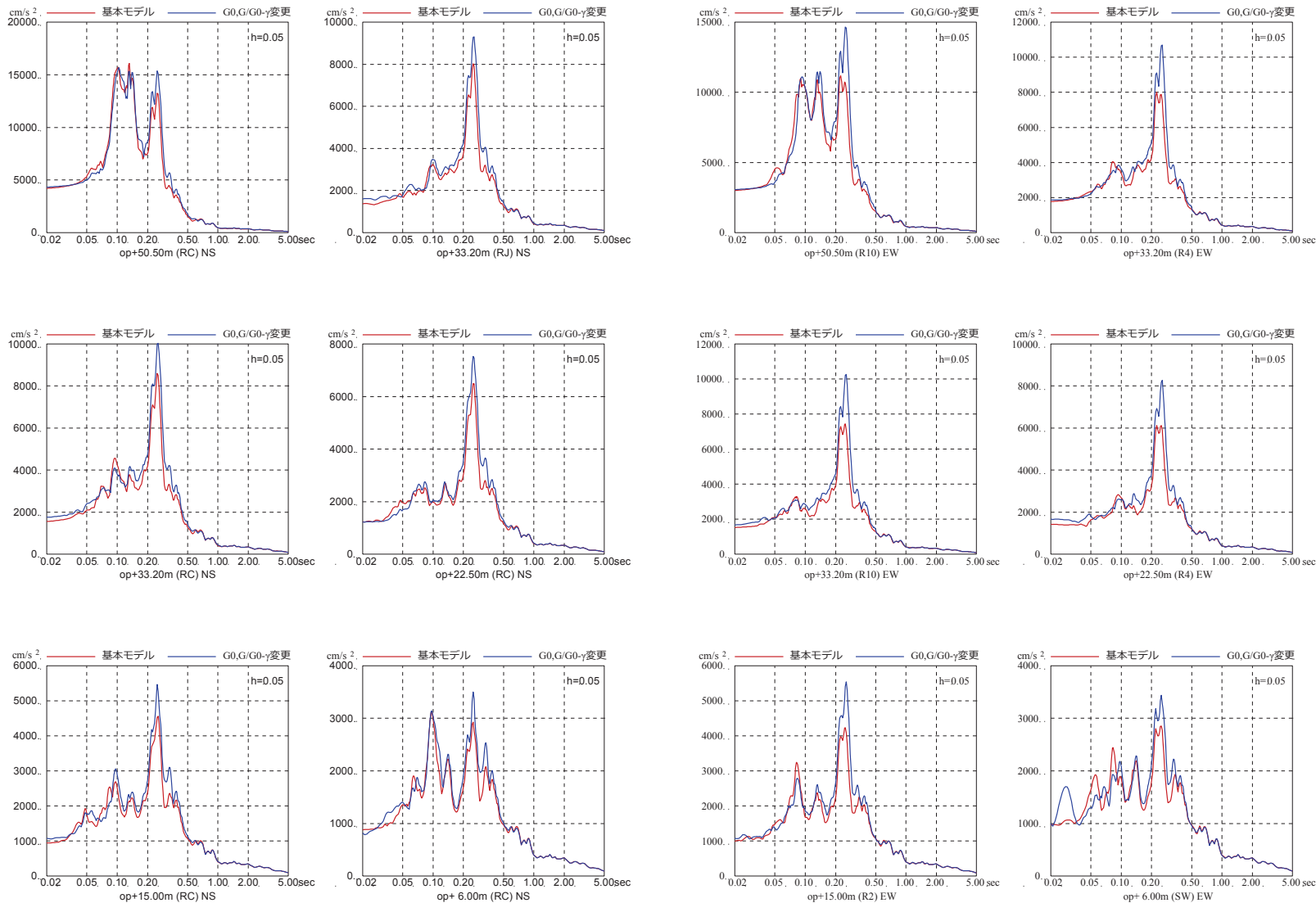
EW方向

表層地盤上部の非線形特性を変えた場合の床応答スペクトルの比較(基準地震動Ss-F1)
(初期せん断剛性 G_0 と $G/G_0 - \gamma$ 曲線を変更した場合)

3. 表層地盤上部の非線形特性に関する検討

■基準地震動Ss-F2を用いた感度解析(初期せん断剛性 G_0 と $G/G_0-\gamma$ 曲線を変更した場合)

➤ ひずみレベルの大きい基準地震動Ssに対しては、評価方法の違いが地震応答解析結果に与える影響は小さい。



NS方向

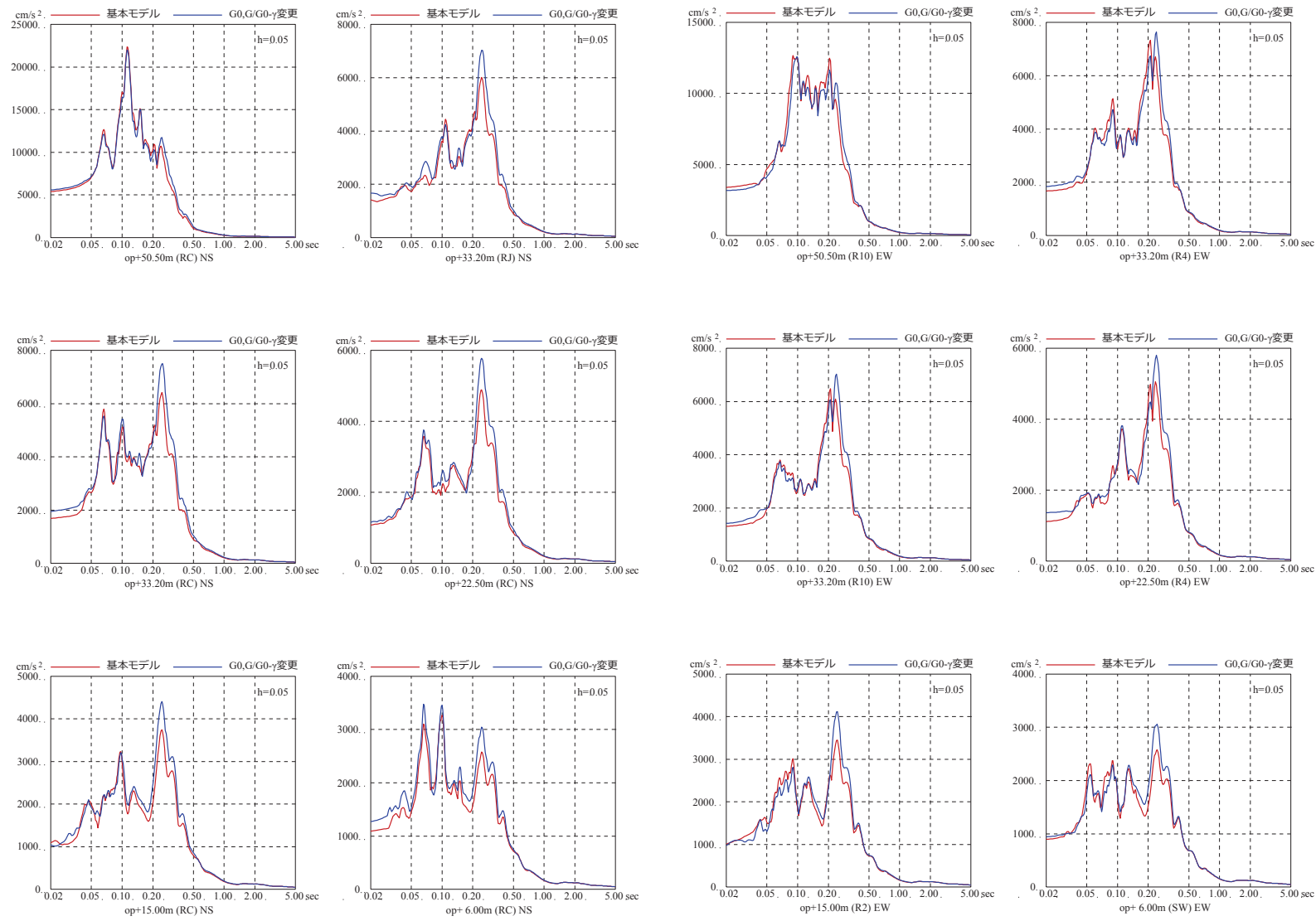
EW方向

表層地盤上部の非線形特性を変えた場合の床応答スペクトルの比較(基準地震動Ss-F2)
(初期せん断剛性 G_0 と $G/G_0-\gamma$ 曲線を変更した場合)

3. 表層地盤上部の非線形特性に関する検討

■基準地震動Ss-F3を用いた感度解析(初期せん断剛性 G_0 と $G/G_0-\gamma$ 曲線を変更した場合)

➤ ひずみレベルの大きい基準地震動Ssに対しては、評価方法の違いが地震応答解析結果に与える影響は小さい。



NS方向

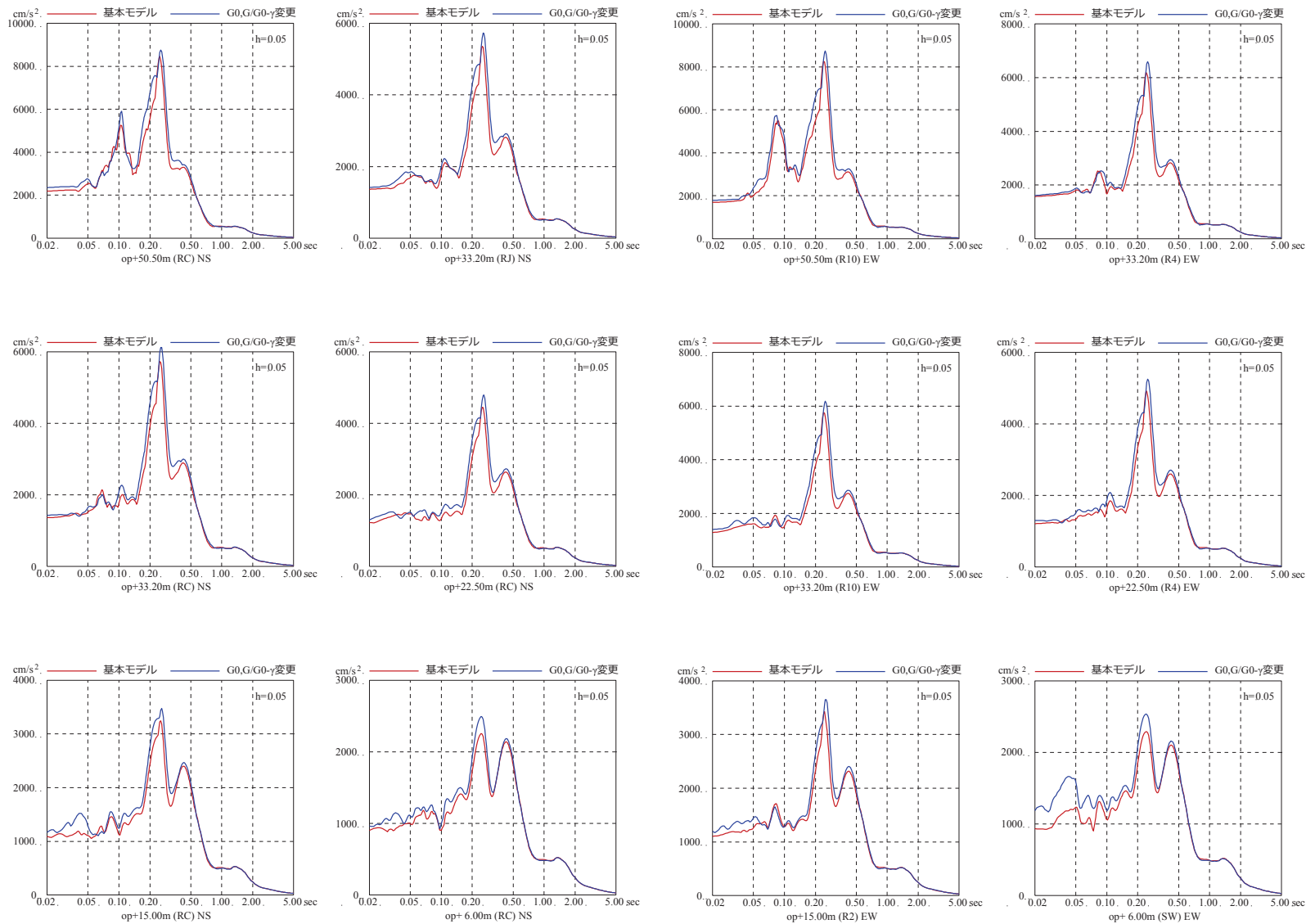
EW方向

表層地盤上部の非線形特性を変えた場合の床応答スペクトルの比較(基準地震動Ss-F3)
(初期せん断剛性 G_0 と $G/G_0-\gamma$ 曲線を変更した場合)

3. 表層地盤上部の非線形特性に関する検討

■基準地震動Ss-N1を用いた感度解析(初期せん断剛性 G_0 と $G/G_0 - \gamma$ 曲線を変更した場合)

➤ ひずみレベルの大きい基準地震動Ssに対しては、評価方法の違いが地震応答解析結果に与える影響は小さい。



NS方向

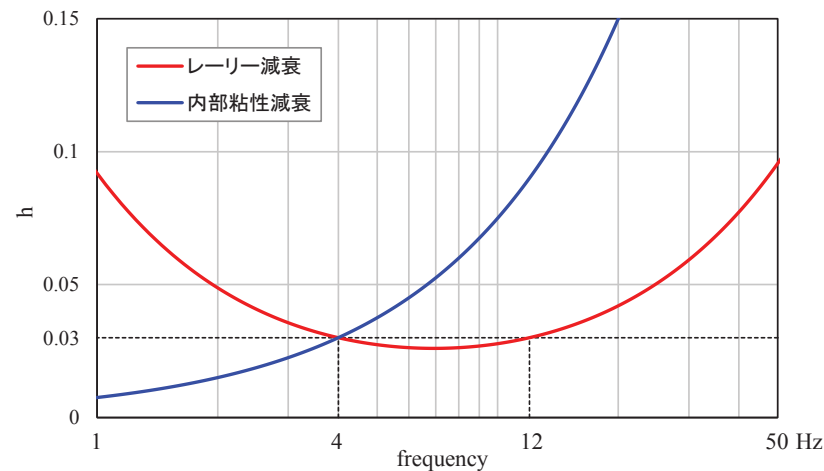
EW方向

表層地盤上部の非線形特性を変えた場合の床応答スペクトルの比較(基準地震動Ss-N1)
(初期せん断剛性 G_0 と $G/G_0 - \gamma$ 曲線を変更した場合)

4. 減衰モデルに関する検討

■検討の目的

- 女川2号炉原子炉建屋の基準地震動の入力地震動の算定においては、入力地震動の加速度振幅が大きいことから、表層地盤の非線形性を考慮した解析を行っている。地盤の非線形性を考慮した解析としては、地盤のひずみレベルが小さい場合(目安として地盤のひずみ0.1%以下)には、次元波動論(SHAKE)の等価線形解析が用いられることが多い。
- 今回工認では、基準地震動Ss入力時の地盤のひずみレベルが等価線形解析の適用の目安値を上回ることから、ひずみレベルが大きい場合でも適用できる逐次非線形解析を採用した。
- 逐次非線形解析では、減衰モデルは内部粘性減衰またはレーリー減衰が適用できる。内部粘性減衰では、通常1次固有振動数の減衰量を与え、それよりも高次の振動数については振動数比例として評価される。一方、レーリー減衰は2つの振動数で減衰量を与えることができるため、例えば1次固有振動数と2次固有振動数それぞれに同じ減衰量を与えることができる。
- 入力地震動(E+F)の算定に当たっては、表層地盤部の減衰が小さい方が入力地震動(E+F)は大きく算定されるため、入力地震動(E+F)の評価に当たっては、1次固有振動数と2次固有振動数で減衰定数を合わせたレーリー減衰を適用している。
- 本検討では、減衰の違いによる建屋応答への影響を確認するために感度解析を実施する。

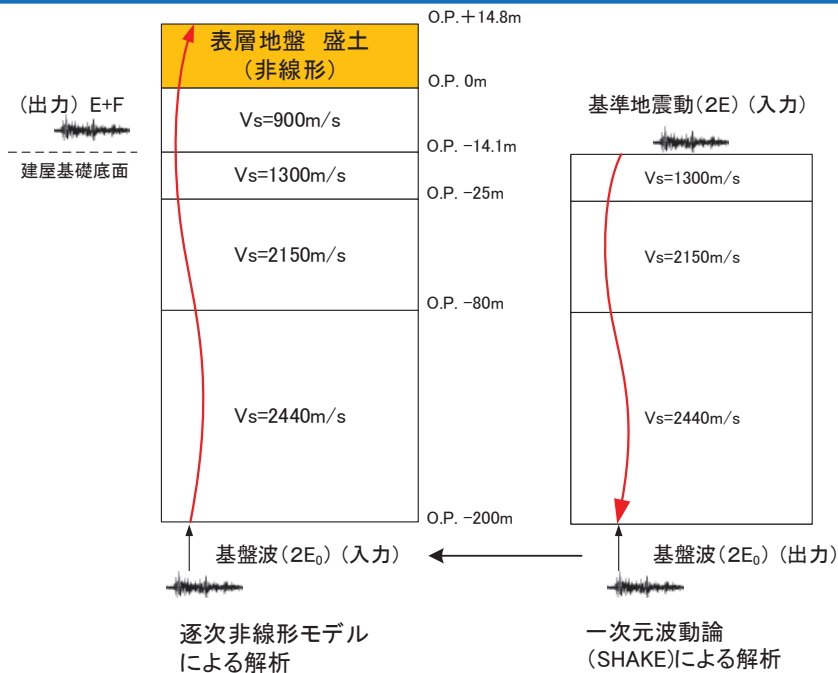


レーリー減衰と内部粘性減衰の比較

4. 減衰モデルに関する検討

■検討方法

- 3.11地震等の記録を用いた表層地盤上部の非線形性評価方法の妥当性検討では逐次非線形解析を採用しているが、その際の減衰モデルはレーリー減衰(3%)を適用している。その結果、観測記録との整合性が確認できたことから、基準地震動Ssに対する入力地震動評価にあたって、レーリー減衰を採用している。
- 一方、逐次非線形解析では、レーリー減衰の他に内部粘性減衰も採用可能であるため、参考に、内部粘性減衰を適用した場合の建屋応答への影響を確認する。
- 内部粘性減衰は、表層地盤の1次振動数(4Hz)で減衰定数が3%となるように設定し、レーリー減衰は、表層地盤の1次振動数(4Hz)および2次振動数(12Hz)で減衰が3%となるように設定する。
- 解析は、一次元波動論を用いて、モデル基盤までの引き下げを線形解析とし、モデル基盤から解放基盤相当位置までの引き上げを逐次非線形解析とする。検討に用いる地震動は基準地震動Ss-D1および基準地震動Ss-D2とする。
- 使用した解析コードは、線形解析では「SHAKE」、逐次非線形解析では「mflow ver.1.0」である。



検討に用いた地盤モデル

	地層レベル	単位体積重量	せん断波速度	減衰定数
	O.P.(m)	$\gamma(\text{kN/m}^3)$	$V_s(\text{m/s})$	$h(\%)^{※2}$
表層地盤	14.80	18.6	※1	3※3
	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

※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 V_s と相関のある初期せん断剛性 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 レーリー減衰(4Hz, 12Hz)

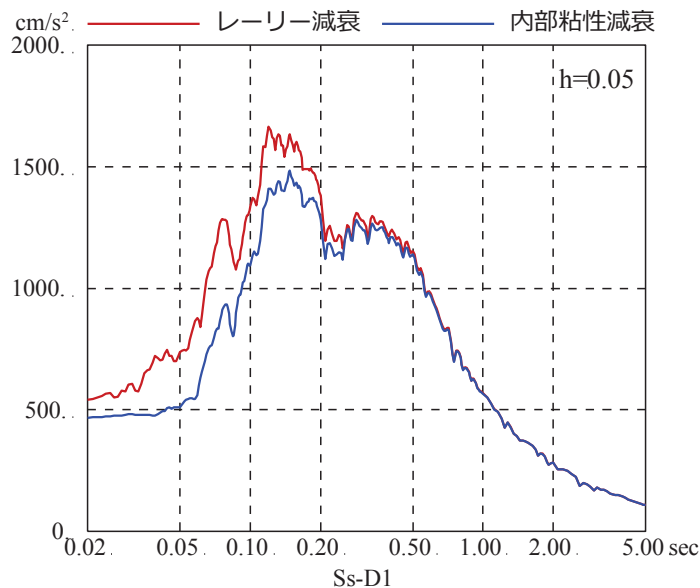
※3 ひずみ依存による非線形特性を考慮する。

解析概念図

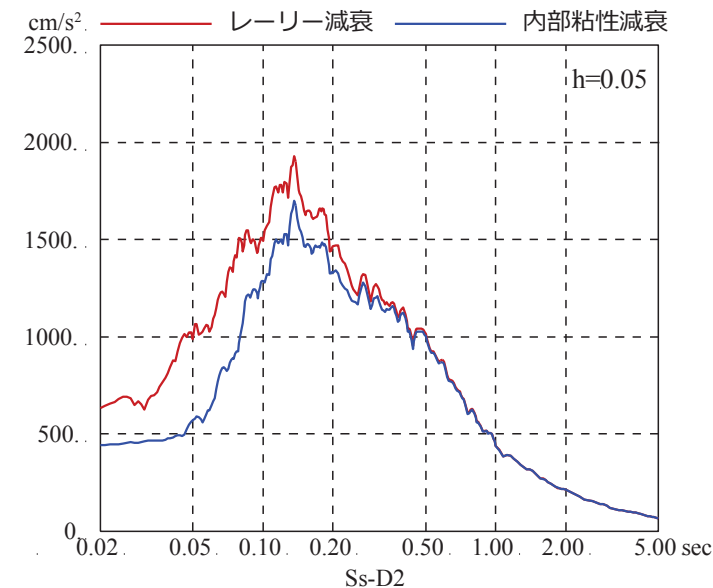
4. 減衰モデルに関する検討

■検討結果 入力地震動(E+F)の比較

- 地盤モデルの減衰に内部粘性減衰を適用した場合とレーリー減衰を適用した場合に算定される入力地震動(E+F)の比較を基準地震動Ss-D1, Ss-D2について算定した結果を示す。
- 入力地震動の応答スペクトルは、基準地震動Ss-D1, Ss-D2でも0.2秒から短周期において内部粘性減衰を適用した場合よりレーリー減衰を適用した場合の方が大きくなっている。



基準地震動Ss-D1



基準地震動Ss-D2

減衰モデルの異なる地盤モデルによる
入力地震動(E+F)の応答スペクトルの比較

4. 減衰モデルに関する検討

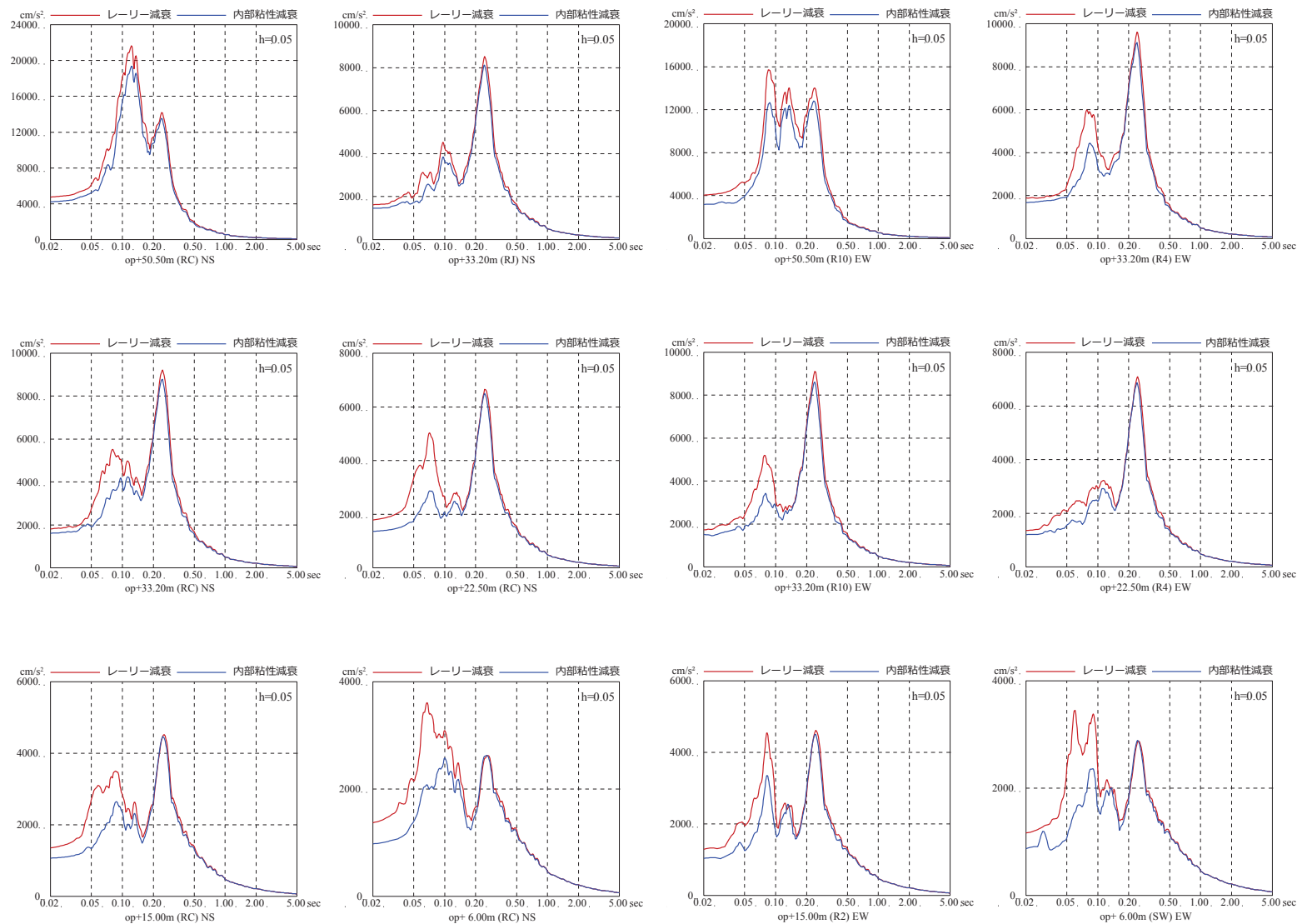
■検討結果 原子炉建屋の床応答スペクトルの比較(基準地震動Ss-D2)

➤ 地盤モデルの減衰に内部粘性減衰を適用した場合とレーリー減衰を適用した場合の基準地震動Ss-D2による床応答スペクトルの比較を示す。

➤ 建屋の床応答スペクトルにおいても、内部粘性減衰を適用した場合よりレーリー減衰を適用した場合の方が、床応答スペクトルが大きくなっており、短周期でその傾向が高い。



➤ 基準地震動Ssの入力地震動評価に採用したレーリー減衰の方が、内部粘性減衰に比べ大きな結果を与える。



NS方向

EW方向

減衰モデルの異なる地盤モデルによる
原子炉建屋の床応答スペクトルの比較(基準地震動Ss-D2)

5. 地盤モデルの下端深さに関する検討

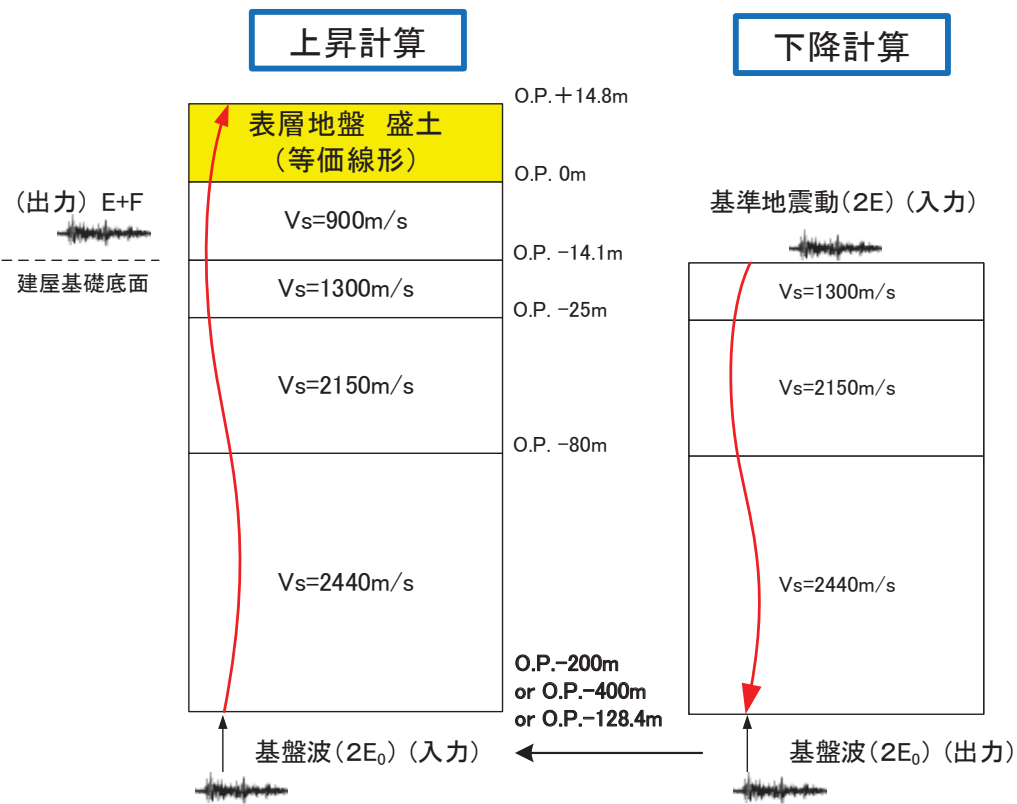
■検討の目的

- 女川2号炉原子炉建屋の基準地震動Ssの入力地震動は、表層地盤の影響を考慮して算定している。入力地震動の算定の際には、基礎版底面レベルに設定した解放基盤表面の入力地震動(2E)からO.P.-200mの基盤波(2E₀)を算定し、表層地盤を考慮した地盤モデルに算定した基盤波を入力して基礎版底面レベルの入力地震動(E+F)を算定している。
- 算定にあたっては、下降計算、上昇計算とも基本的には同じ次元波動論を採用していることから、引き戻す地盤モデルの下端深さの違いが解析結果に与える影響は基本的には大きいものではないことを踏まえ、下端深さは地震基盤相当レベル(O.P.-128.4m)よりも更に深いO.P.-200mに設定している。
- 本検討では、入力地震動評価の際の地盤モデルの下端深さの違いが、入力地震動の算定結果へ与える影響を確認する。

■検討方法

以下の3ケースについて検討を実施。

	基盤深さ	下降計算	上昇計算
基本ケース	O.P.-200m	SHAKE	逐次非線形
ケース1	O.P.-400m	SHAKE	SHAKE
ケース2	O.P.-400m	SHAKE	逐次非線形
ケース3	O.P.-128.4m	SHAKE	逐次非線形

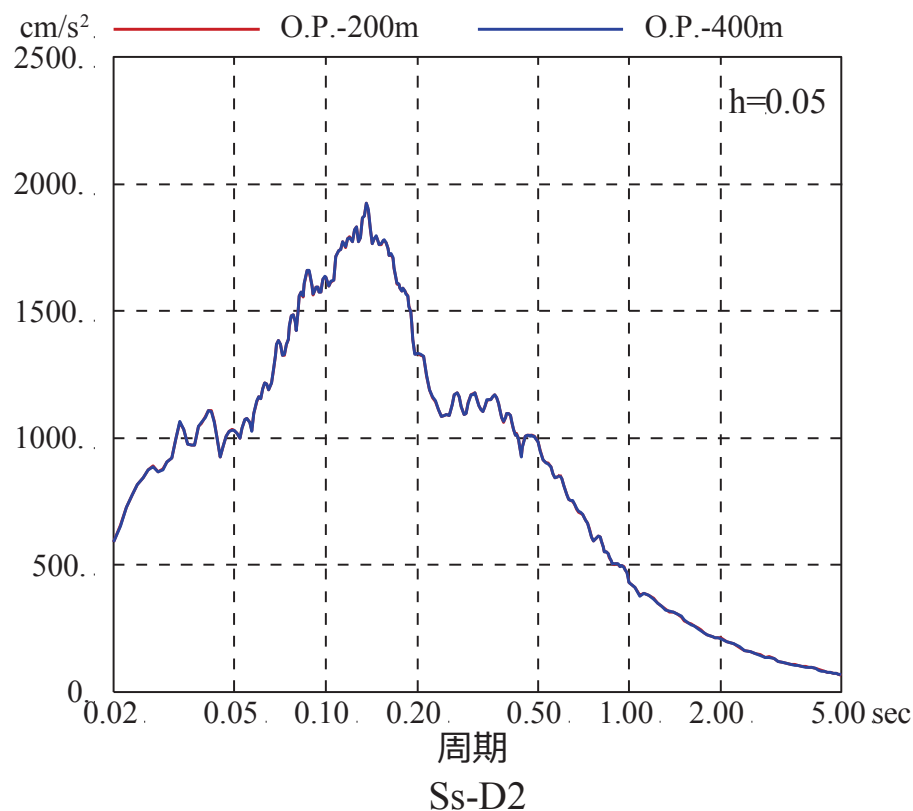


解析モデルの概要

5. 地盤モデルの下端深さに関する検討

■検討結果

- 地盤モデルの下端深さをO.P.-400mとした場合とO.P.-200mとした場合の入力地震動(O.P.-14.1m)の応答スペクトルの比較を示す。
- 入力地震動評価において、解放基盤表面から地盤モデルの下端深さまで引き下げる地盤と下端深さから入力地震動評価位置まで引き上げる地盤が同一であるため、地盤モデルの下端深さに関わらず同じ結果となっている。

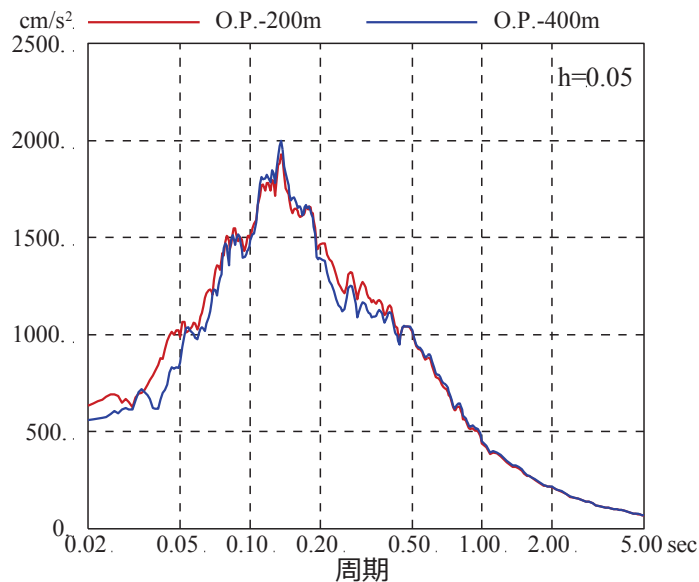


【ケース1】地盤モデルの下端深さの差異による基準地震動Ss-D2の入力地震動(E+F)の応答スペクトルの比較

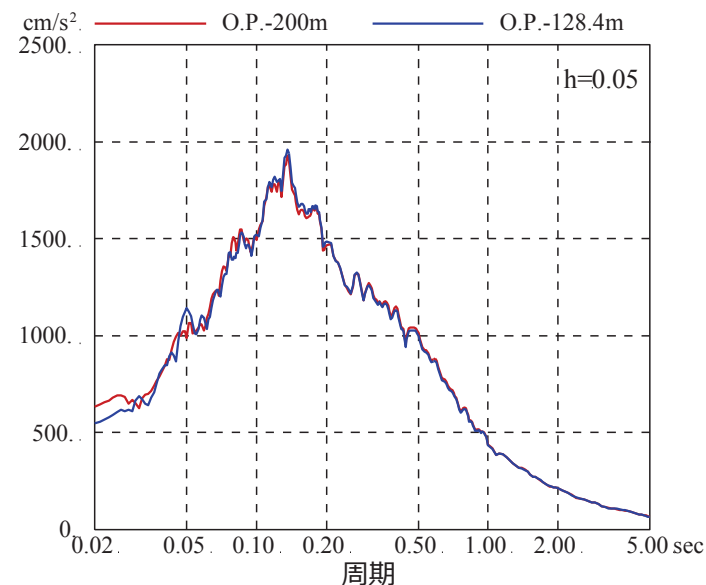
5. 地盤モデルの下端深さに関する検討

■検討結果

- 地盤モデルの下端深さをO.P.-400mとした場合とO.P.-200mとした場合の入力地震動(O.P.-14.1m)の応答スペクトルの比較を左図に、地盤モデルの下端深さをO.P.-128.4mとした場合との比較を右図に示す。
- どちらの結果も短周期側でわずかに差が生じているが、地盤モデルの下端深さが入力地震動に与える影響は小さい。



【ケース2】地盤モデルの下端深さO.P.-400mの比較



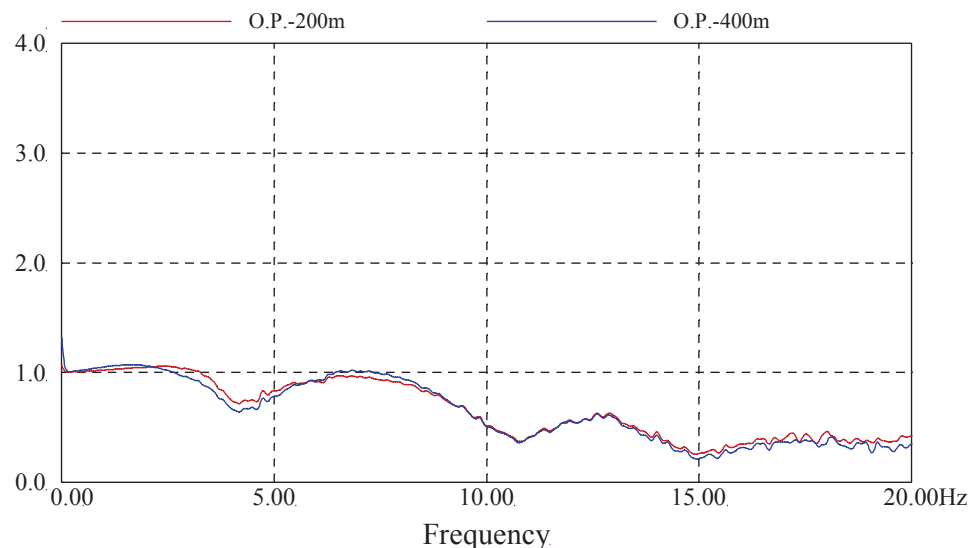
【ケース3】地盤モデルの下端深さO.P.-128.4mの比較

地盤モデルの下端深さの差異による基準地震動Ss-D2の
入力地震動(E+F)の応答スペクトルの比較

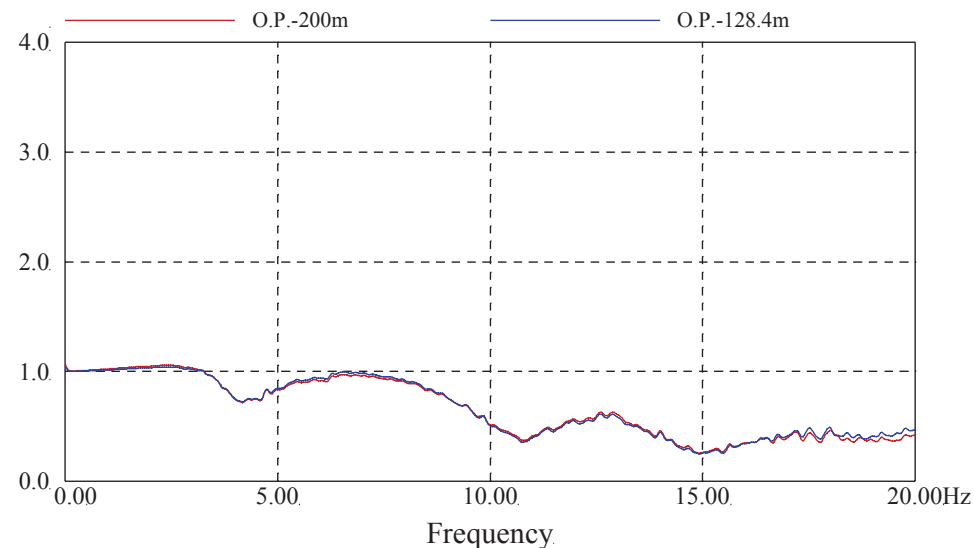
5. 地盤モデルの下端深さに関する検討

■検討結果

- 地盤モデルの下端深さをO.P.-400mとした場合とO.P.-200mとした場合の入力地震動(O.P.-14.1m)の伝達関数の比較を左図に、地盤モデルの下端深さをO.P.-128.4mとした場合との比較を右図に示す。
- どちらの結果も短周期側でわずかに差が生じているが、地盤モデルの下端深さが入力地震動に与える影響は小さい。



【ケース2】地盤モデルの下端深さO.P.-400mの比較



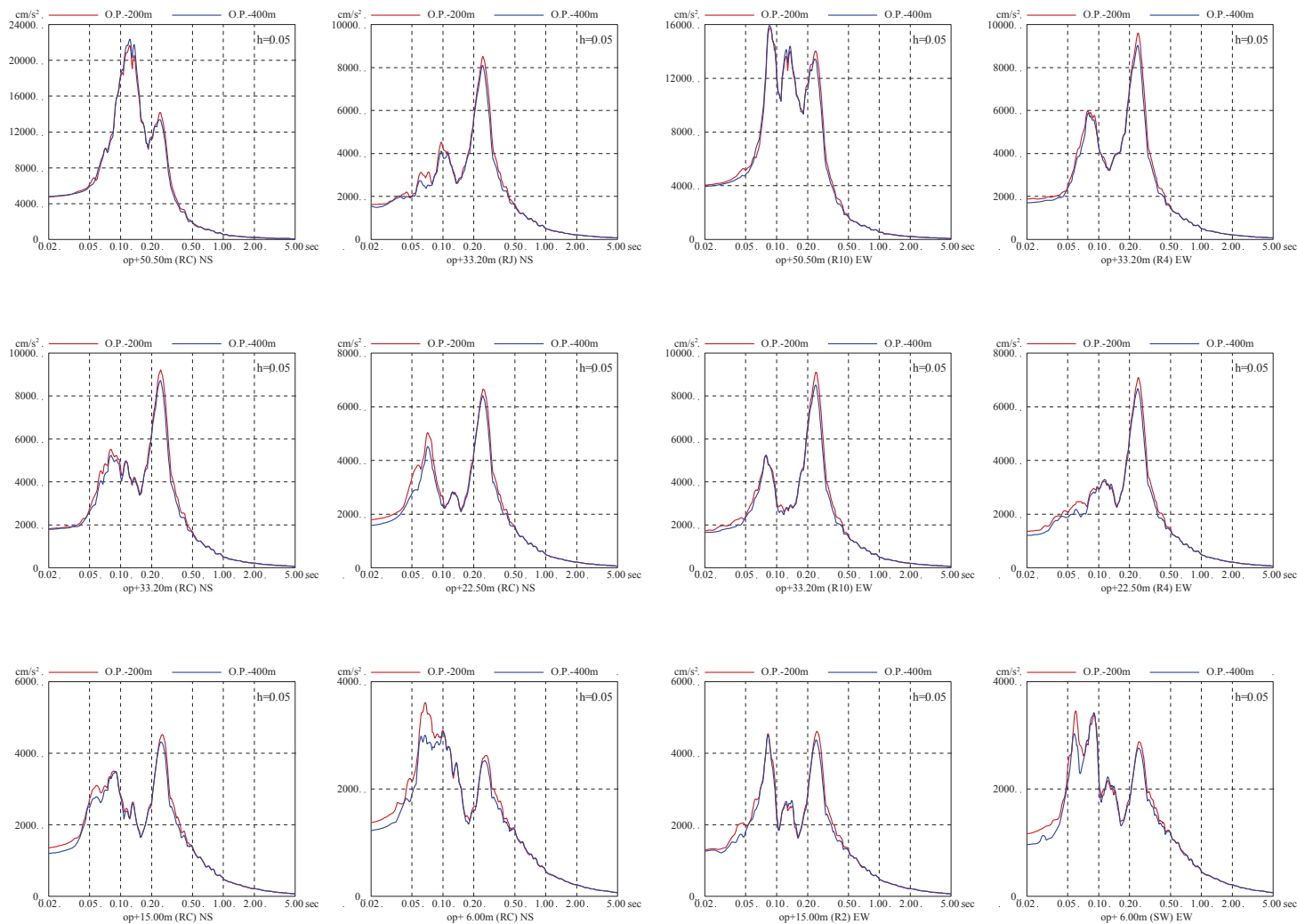
【ケース3】地盤モデルの下端深さO.P.-128.4mの比較

地盤モデルの下端深さの差異による基準地震動Ss-D2の
入力地震動(E+F)の伝達関数の比較

5. 地盤モデルの下端深さに関する検討

■検討結果

- 地盤モデルの下端深さをO.P.-200mとした場合と、O.P.-400mとした場合の建屋の床応答スペクトルの比較を示す。
- 周期0.1秒以下の短周期領域と周期0.2秒から周期0.5秒では若干の差異はあるが、建屋応答へ与える影響は小さい。



NS方向

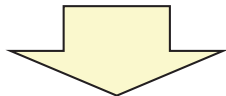
EW方向

【ケース2】地盤モデルの下端深さの差異による建屋の応答スペクトルへの影響比較
 (地盤モデルの下端深さO.P.-400mの比較, 基準地震動Ss-D2)

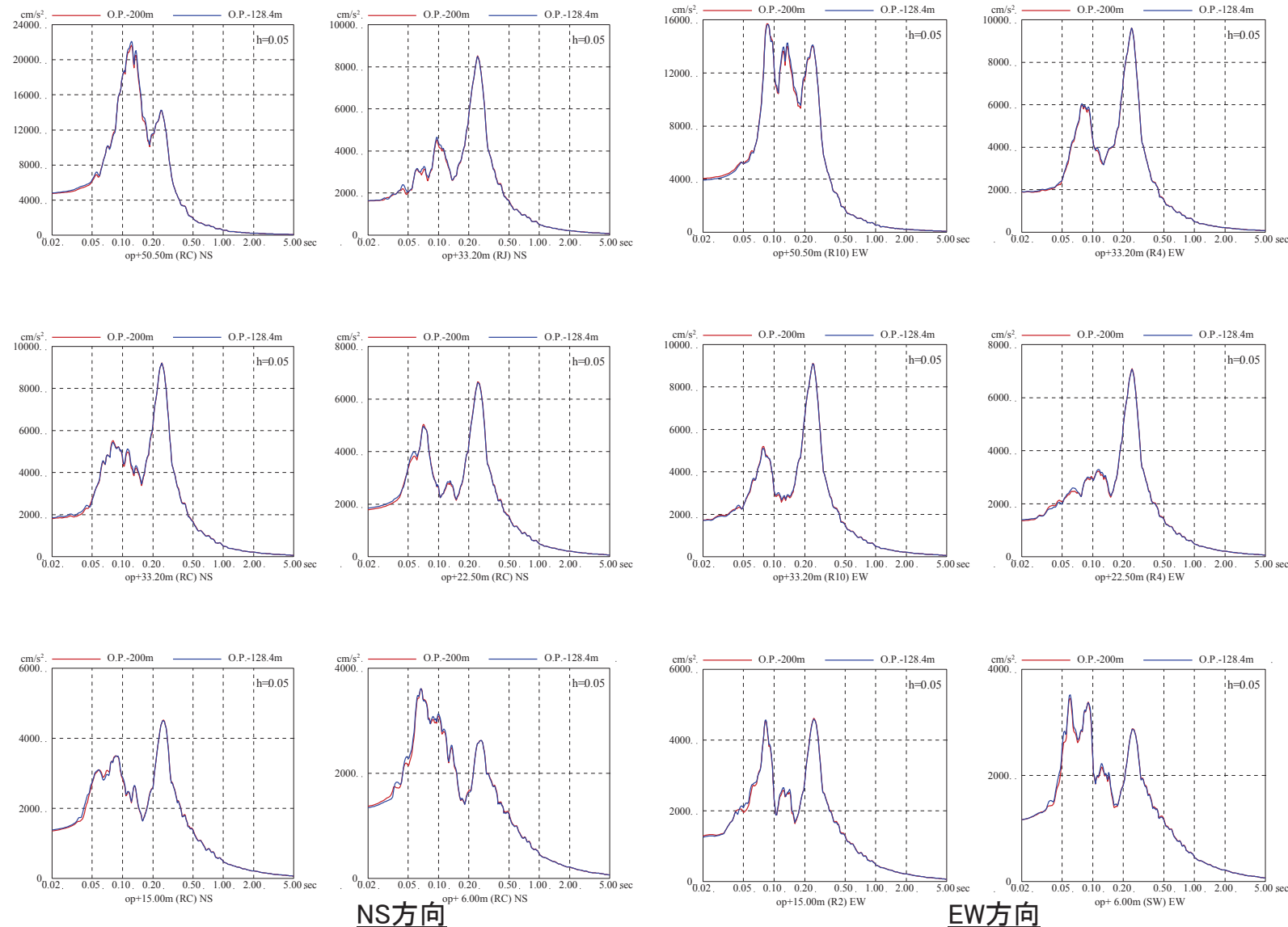
5. 地盤モデルの下端深さに関する検討

■検討結果

- 地盤モデルの下端深さをO.P.-200mとした場合と、O.P.-128.4mとした場合の建屋の床応答スペクトルの比較を示す。
- 周期0.1秒以下の短周期領域と周期0.2秒から周期0.5秒では若干の差異はあるが、建屋応答へ与える影響は小さい。



- 以上の検討結果から、入力地震動評価の際の地盤モデルの下端深さの違いが、入力地震動の算定結果へ与える影響は小さいことを確認した。
- 確認結果も踏まえ、入力地震動評価における地盤モデルの下端深さについてはO.P.-200mを採用する。

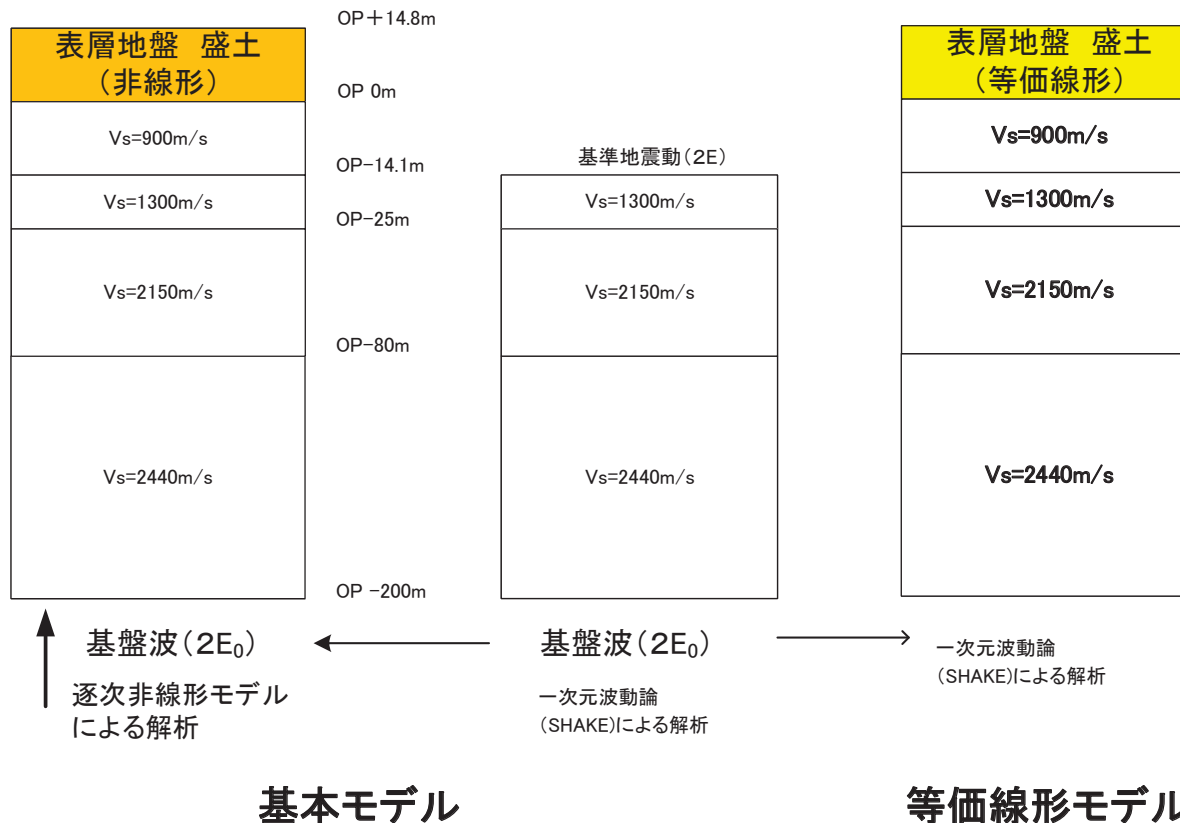


【ケース3】地盤モデルの下端深さの差異による建屋の応答スペクトルへの影響比較
(地盤モデルの下端深さO.P.-128.4mの比較, 基準地震動Ss-D2)

参考検討 逐次非線形解析と等価線形解析の比較

■検討の目的

- 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の目安値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、地盤モデルの下端深さまでの引き下げは、線形解析とし、地盤モデルの下端深さ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。

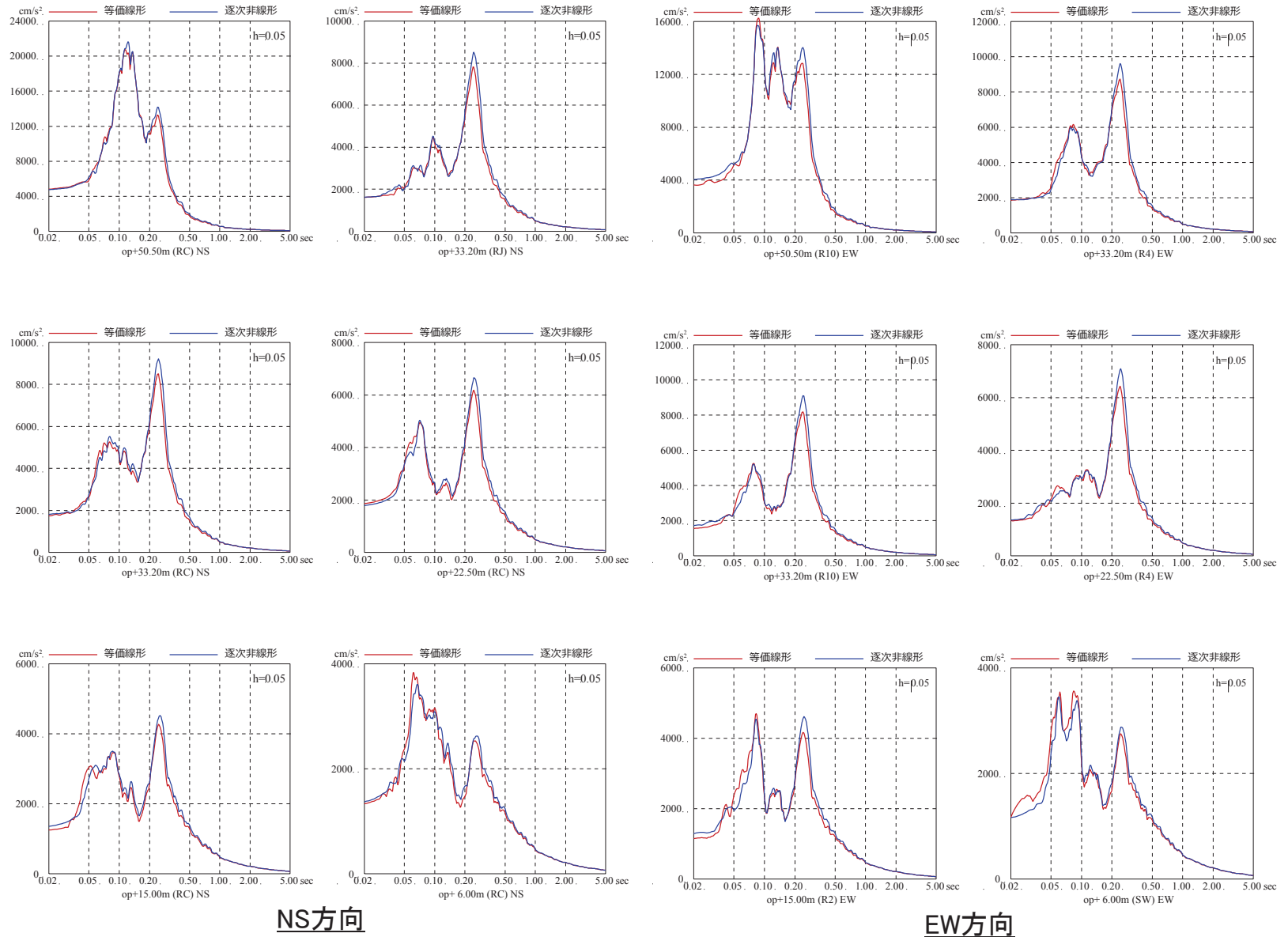


検討概念図

参考検討 逐次非線形解析と等価線形解析の比較

■検討結果（応答スペクトルの比較）

➤ 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。

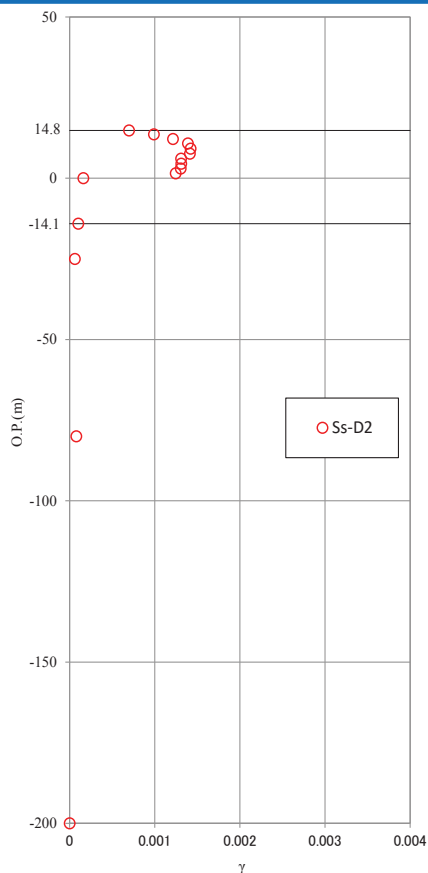


等価線形解析と逐次非線形解析による結果の比較(基準地震動Ss-D2)

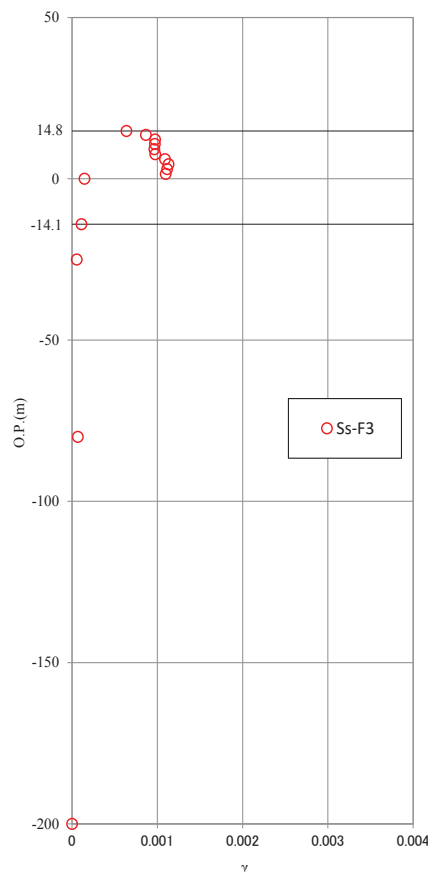
参考検討 逐次非線形解析と等価線形解析の比較

■検討結果（等価線形解析により算定した際の地盤のひずみ分布）

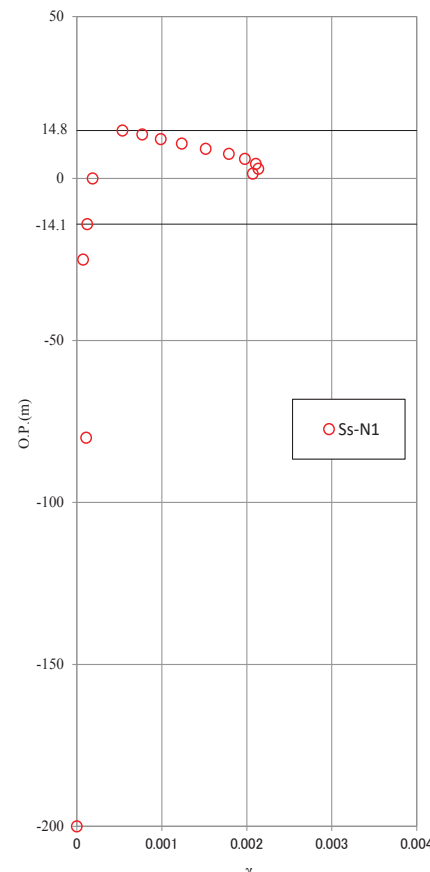
- 基準地震動Ssの入力地震動を等価線形解析により算定した際の地盤のひずみを示す。表層地盤上部のひずみは、概ね0.1%～0.3%程度の範囲となっている。
- 等価線形解析の適用範囲の目安(地盤のひずみ0.1%程度)を超える地盤のひずみが生じることから基準地震動Ssの評価にあたっては逐次非線形解析を採用することとしている。



基準地震動Ss-D2



基準地震動Ss-F3

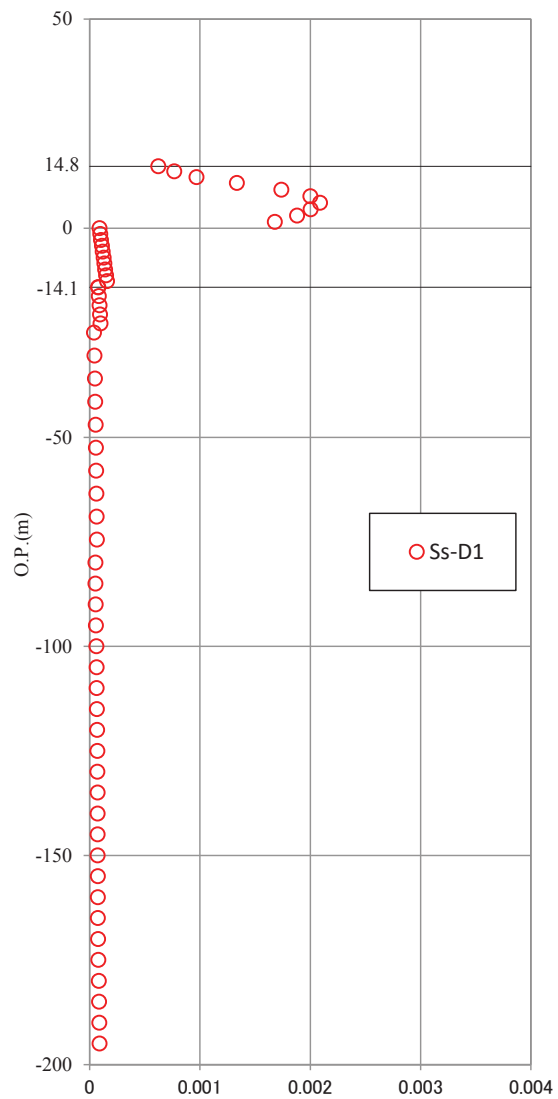


基準地震動Ss-N1

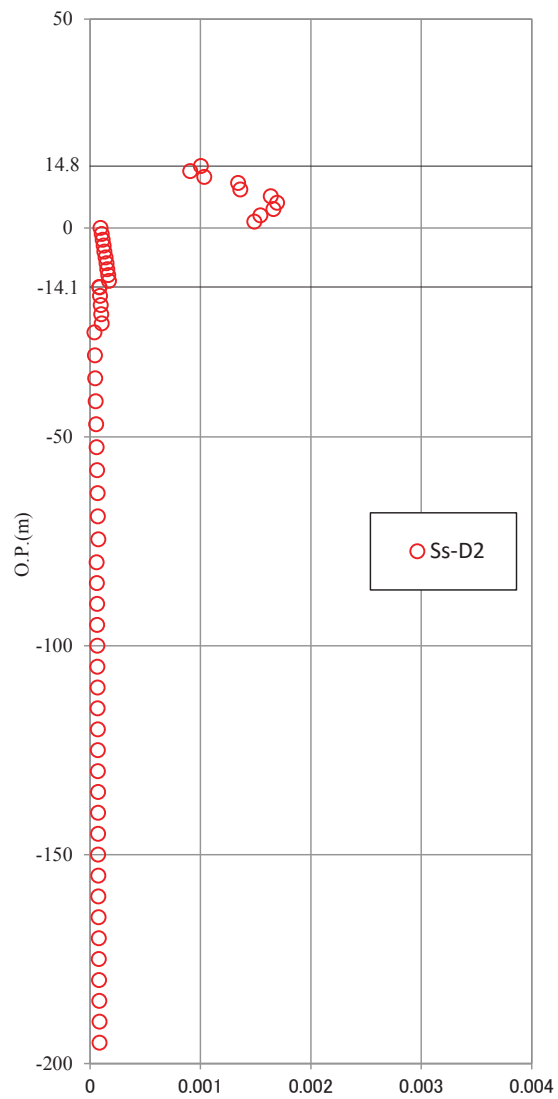
基準地震動Ss時の地盤のひずみ(等価線形解析)

参考 基準地震動Ss時の地盤のひずみ分布

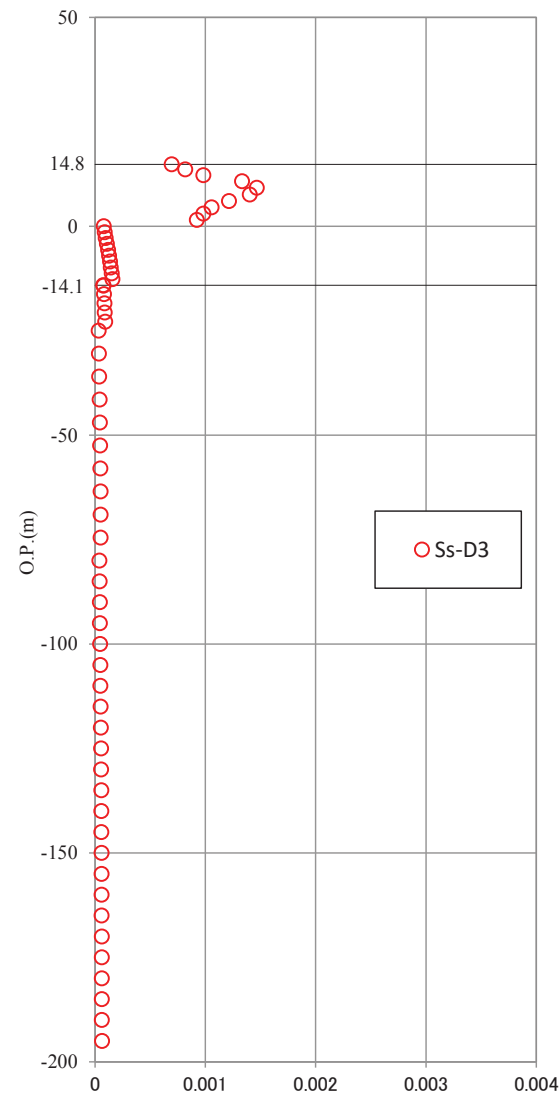
■ 逐次非線形解析により算定した際の地盤のひずみ分布



基準地震動Ss-D1



基準地震動Ss-D2

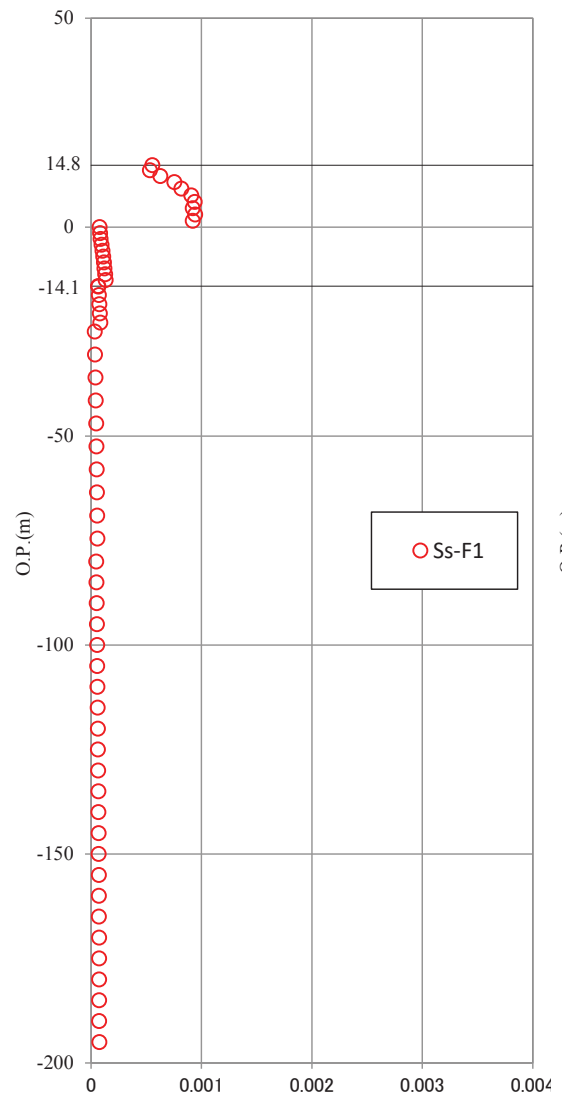


基準地震動Ss-D3

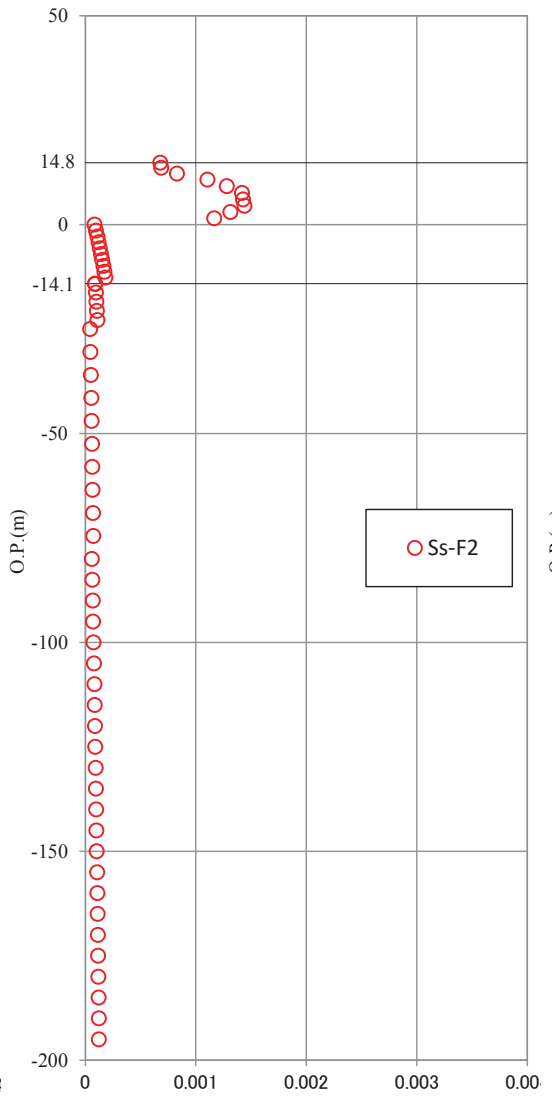
基準地震動Ss時の地盤のひずみ(逐次非線形解析)

参考 基準地震動Ss時の地盤のひずみ分布

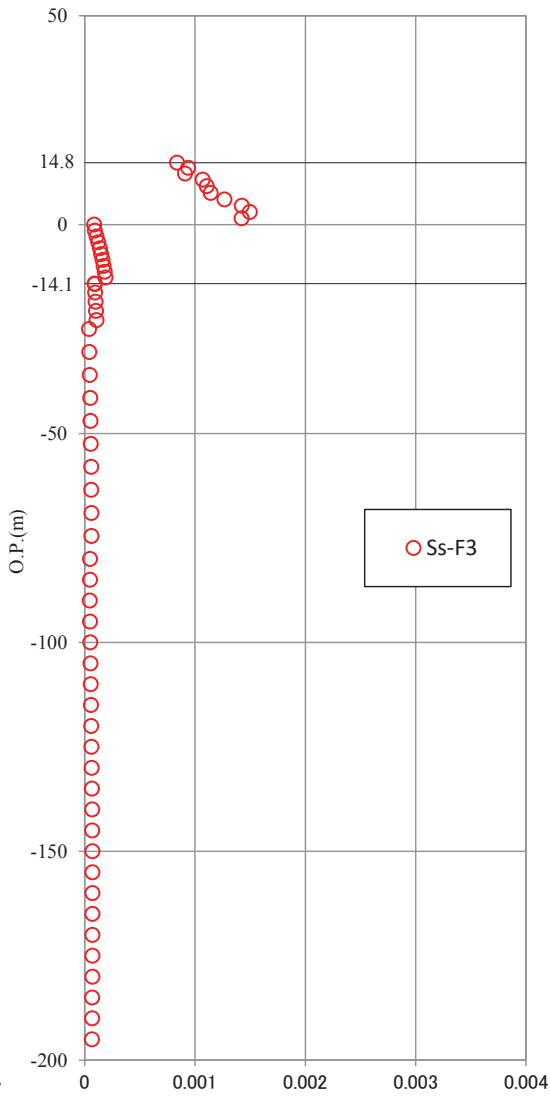
■ 逐次非線形解析により算定した際の地盤のひずみ分布



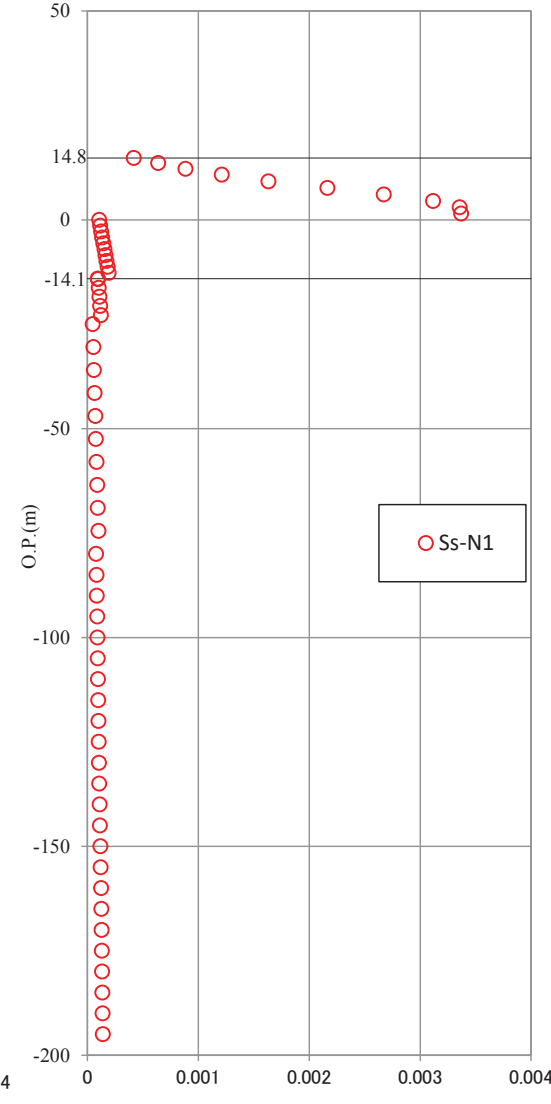
基準地震動Ss-F1



基準地震動Ss-F2



基準地震動Ss-F3

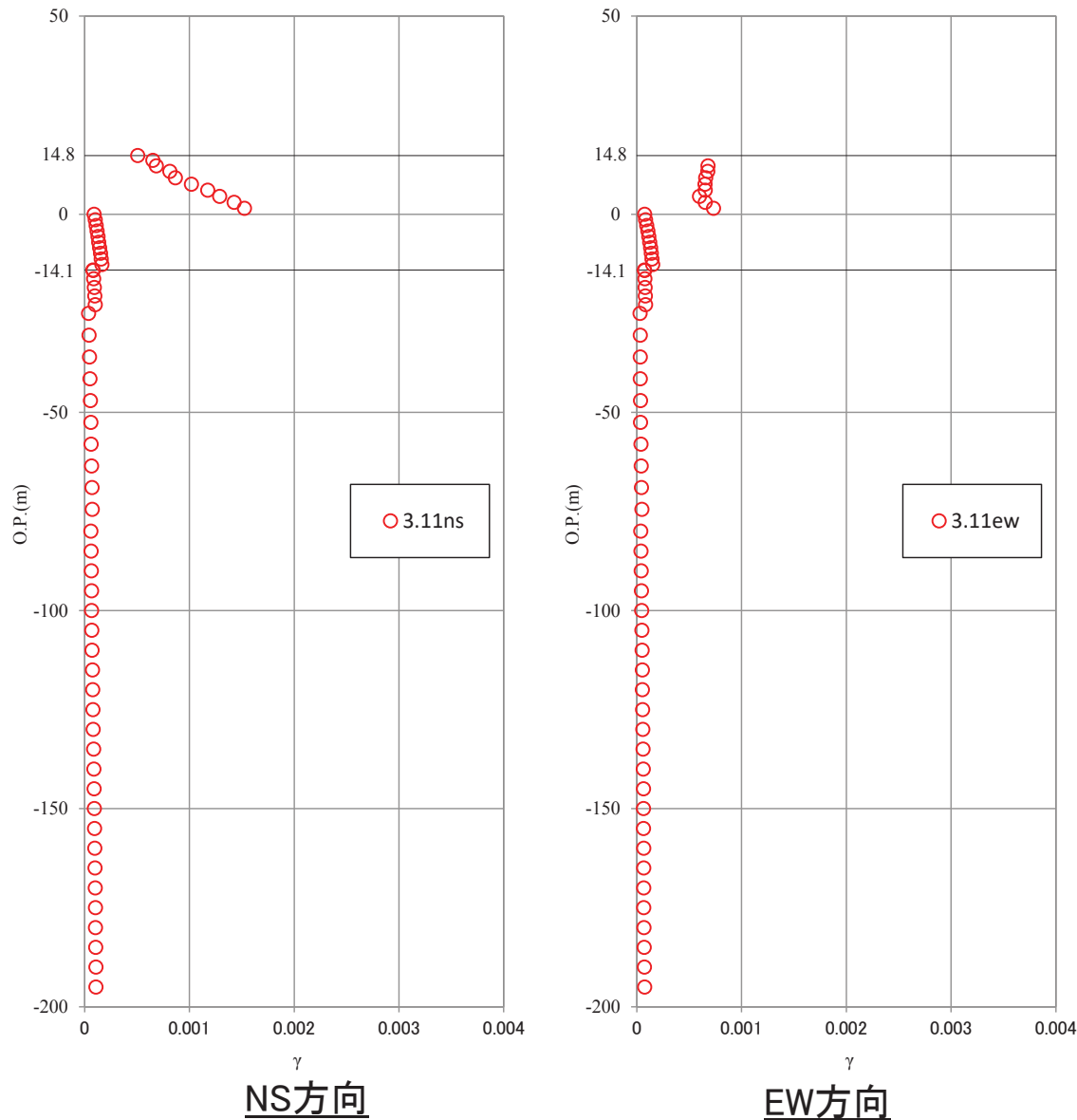


基準地震動Ss-N1

基準地震動Ss時の地盤のひずみ(逐次非線形解析)

参考 3.11地震時の地盤のひずみ分布

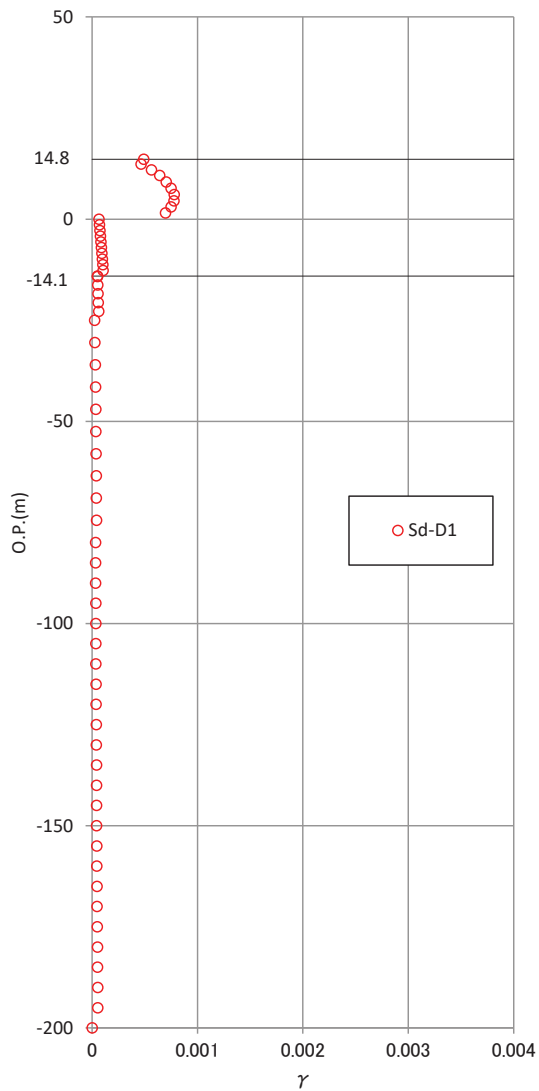
■ 逐次非線形解析により算定した際の地盤のひずみ分布



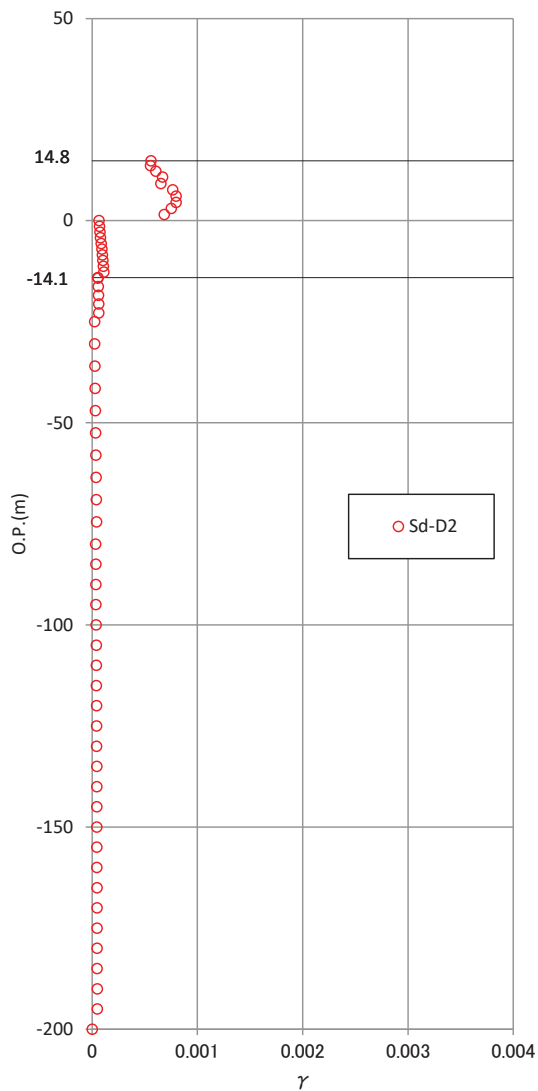
3.11地震時の地盤のひずみ(逐次非線形解析)

参考 基準地震動Sd時の地盤のひずみ分布

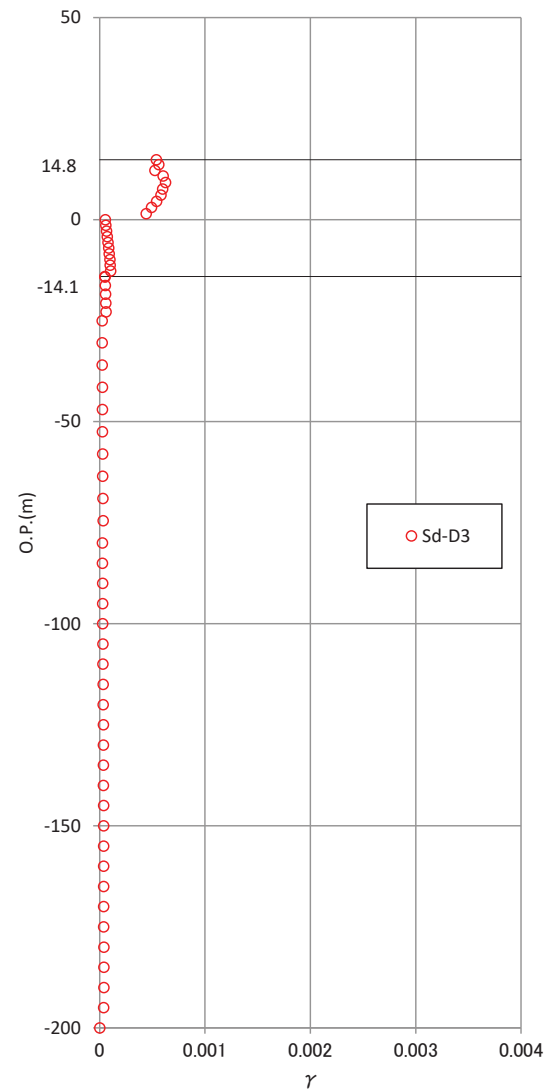
■ 逐次非線形解析により算定した際の地盤のひずみ分布



基準地震動Sd-D1



基準地震動Sd-D2

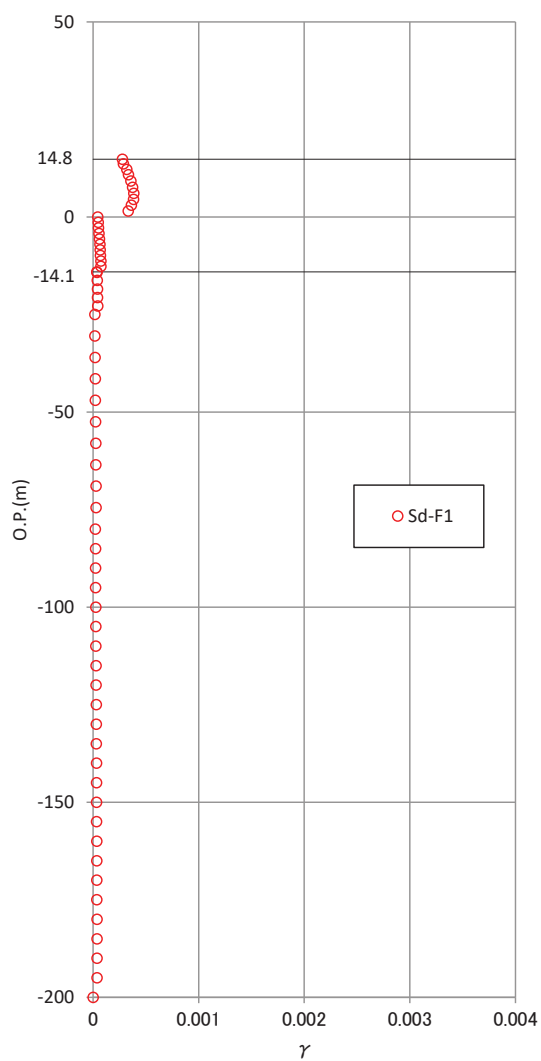


基準地震動Sd-D3

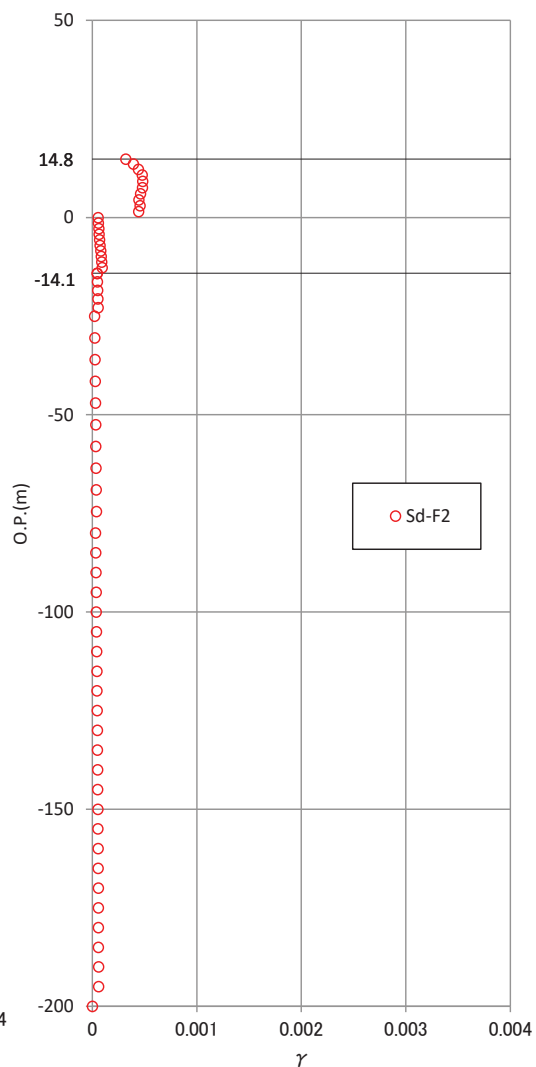
基準地震動Sd時の地盤のひずみ(逐次非線形解析)

参考 基準地震動Sd時の地盤のひずみ分布

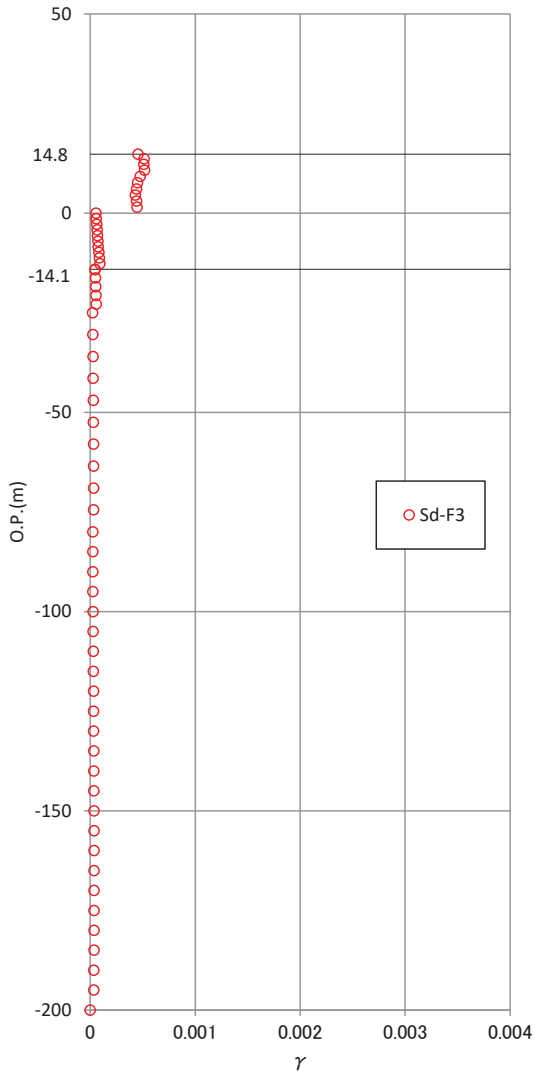
■ 逐次非線形解析により算定した際の地盤のひずみ分布



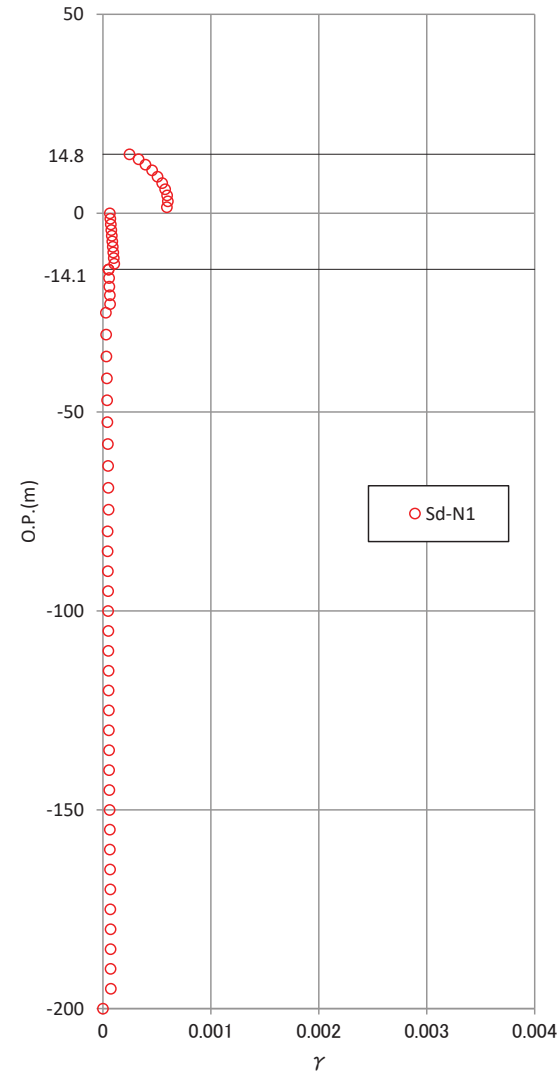
基準地震動Sd-F1



基準地震動Sd-F2



基準地震動Sd-F3



基準地震動Sd-N1

基準地震動Sd時の地盤のひずみ(逐次非線形解析)

埋込み効果に関する検討

1. 原子炉建屋の埋込み効果に関する検討
2. 3号炉海水熱交換器建屋の埋込み効果に関する検討
3. タービン建屋の埋込み効果に関する検討

1. 原子炉建屋の埋込み効果に関する検討

2号炉原子炉建屋を対象とした3.11地震の建屋シミュレーション解析

■検討目的および検討方法

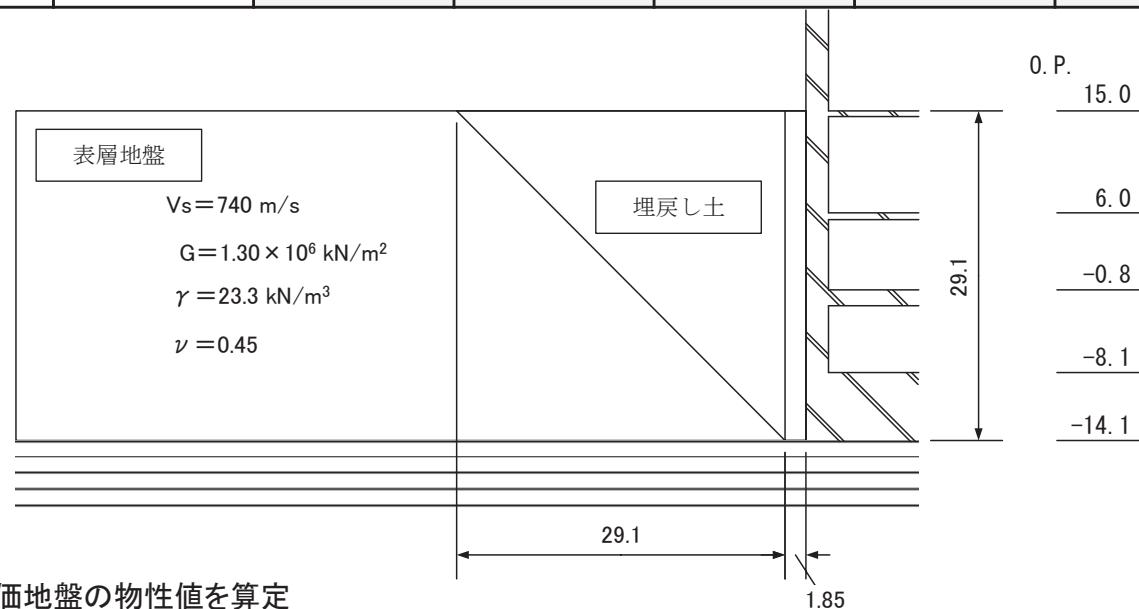
- 側面地盤が原子炉建屋の地震応答解析結果に及ぼす影響を確認するため、**側面地盤ばねを考慮したモデルと考慮しないモデル**を用いて、3.11地震のはざとり波によるシミュレーション解析を実施した。
- 側面地盤モデルは、建屋側面の埋戻し土の断面形状が深さ方向に三角形分布をしていると仮定し、地盤を地中の質点位置ごとに、単位厚さで平面的に切り出したモデルを設定し、建屋を面積が等価な円形平面に置換して、側面地盤ばねをNovakの方法(JEAG4601-1991[追補版]による方法)により算定する。
- 側面地盤ばねの理論解 $T(\omega)$ の算定に用いる地盤定数は、埋め戻し部分の形状を考慮し、等価地盤の値を用いる。
- 解析モデルへの入力地震動は、3.11地震のはざとり波を算定して建屋底面位置の地震動とし、建屋各部の応答を評価する。

	側面地盤ばねを考慮するケース	側面地盤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地震はざとり波	
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 (補正水平力考慮)
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)	

1. 原子炉建屋の埋込み効果に関する検討

■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 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	せん断波速度 Vs (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 he (%)
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

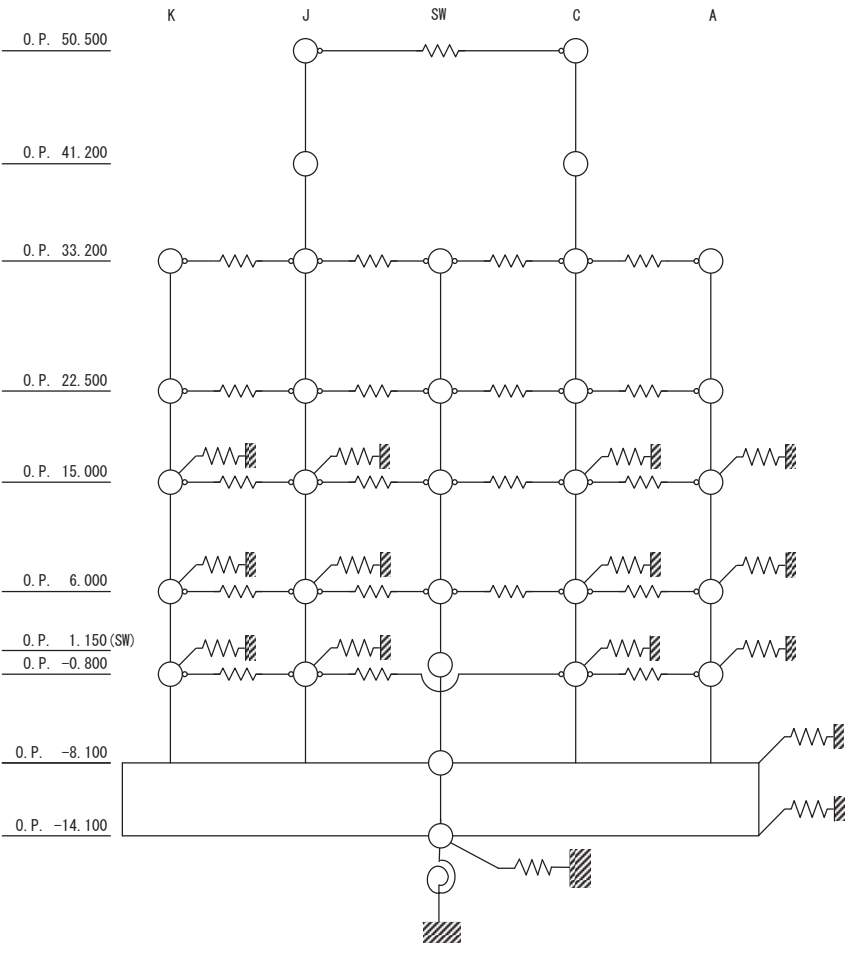


※表層地盤と埋戻し土の物性値より等価地盤の物性値を算定

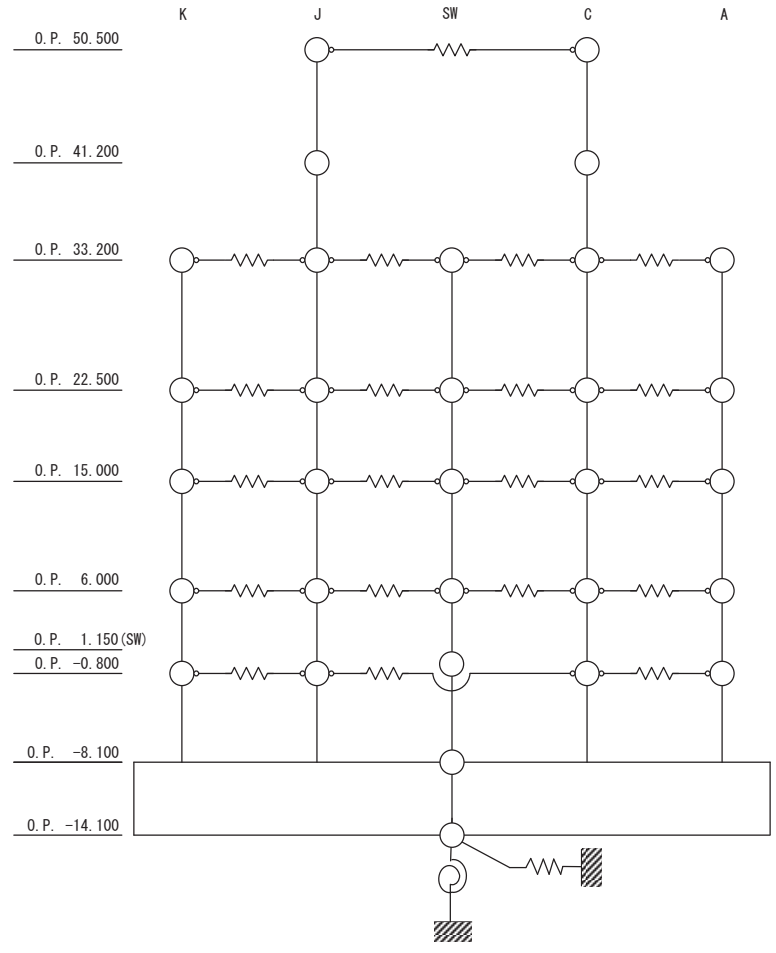
埋戻し土の形状(単位:m)

1. 原子炉建屋の埋込み効果に関する検討

■地震応答解析モデルの概要



側面地盤有

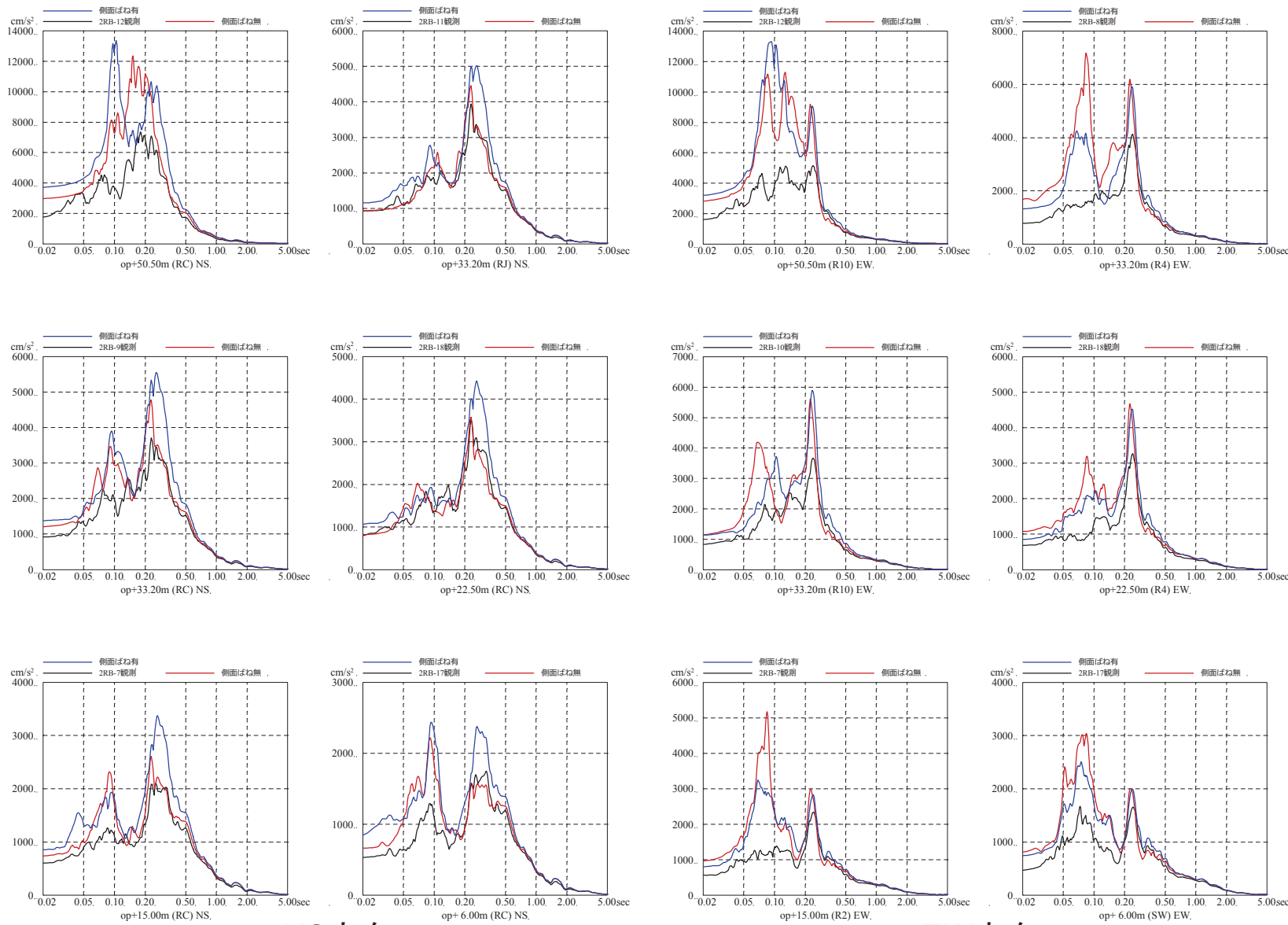


側面地盤無

1. 原子炉建屋の埋込み効果に関する検討

■解析結果

➤ 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。



NS方向 EW方向

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

1. 原子炉建屋の埋込み効果に関する検討

2号炉原子炉建屋を対象とした基準地震動Ss時の埋込み効果の検討

■検討目的および検討方法

- 女川2号炉原子炉建屋の今回工認では、側面地盤ばね(Novakばね)はモデル化していない。これは、建屋周辺の埋め戻しの施工状況から拘束効果は期待出来ないこと、また、3.11地震のシミュレーション解析では埋込み効果を見逃したモデルによる応答結果が観測記録と整合することを踏まえて判断したものである。
- また、JEAGでは、支持地盤と側面地盤のせん断波速度Vsの違いが大きい場合、側面地盤ばね(Novakばね)の適用性について留意することとされている。
- これらを踏まえ、ここでは、参考検討として、基準地震動Ssを入力した場合の側面地盤ばね(Novakばね)の有無が建屋の振動特性に与える影響を確認する。
- 側面地盤ばね(Novakばね)の有り・無しモデルについて、固有モードや応答結果の違いを確認する。また、側面地盤ばね(Novakばね)から入力される地震動の傾向を確認する。
- 側面地盤は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。

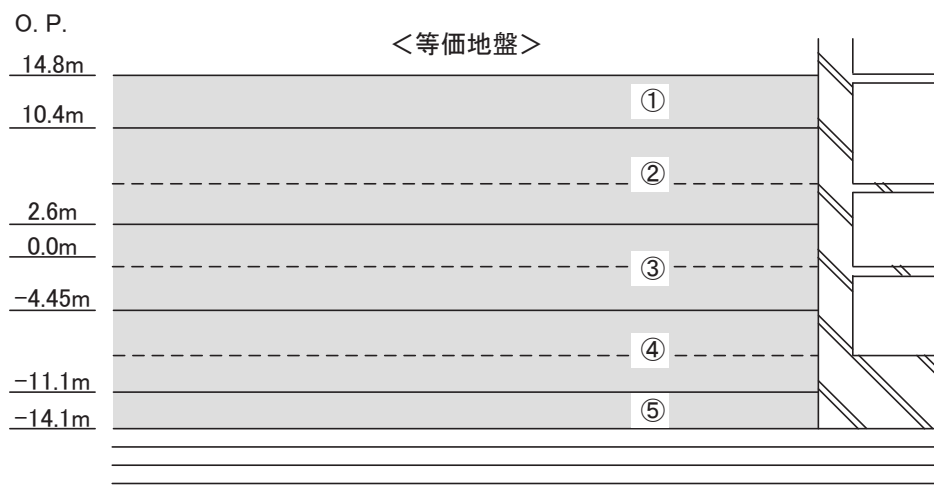
	側面地盤ばね(Novakばね)を考慮するケース	側面地盤ばね(Novakばね)を考慮しないケース
建屋	2号炉原子炉建屋	
地震動	基準地震動Ss-D2および基準地震動Ss-D1	
入力地震動	基礎版底面位置および側面地盤ばね位置の地震動(E+F)を算定し入力(補正水平力考慮)	基礎版底面位置の地震動(E+F)を算定し入力(補正水平力考慮)
建屋モデル (建屋剛性, 建屋減衰)	今回工認モデル (初期剛性低下考慮, 建屋減衰5%, 耐震補強考慮)	
建屋モデル (側面地盤ばね)	有り	無し
地盤モデル	入力地震動評価用地盤モデル (表層地盤:2層モデル)	

1. 原子炉建屋の埋込み効果に関する検討

■側面地盤ばねの設定に用いる等価地盤の物性値

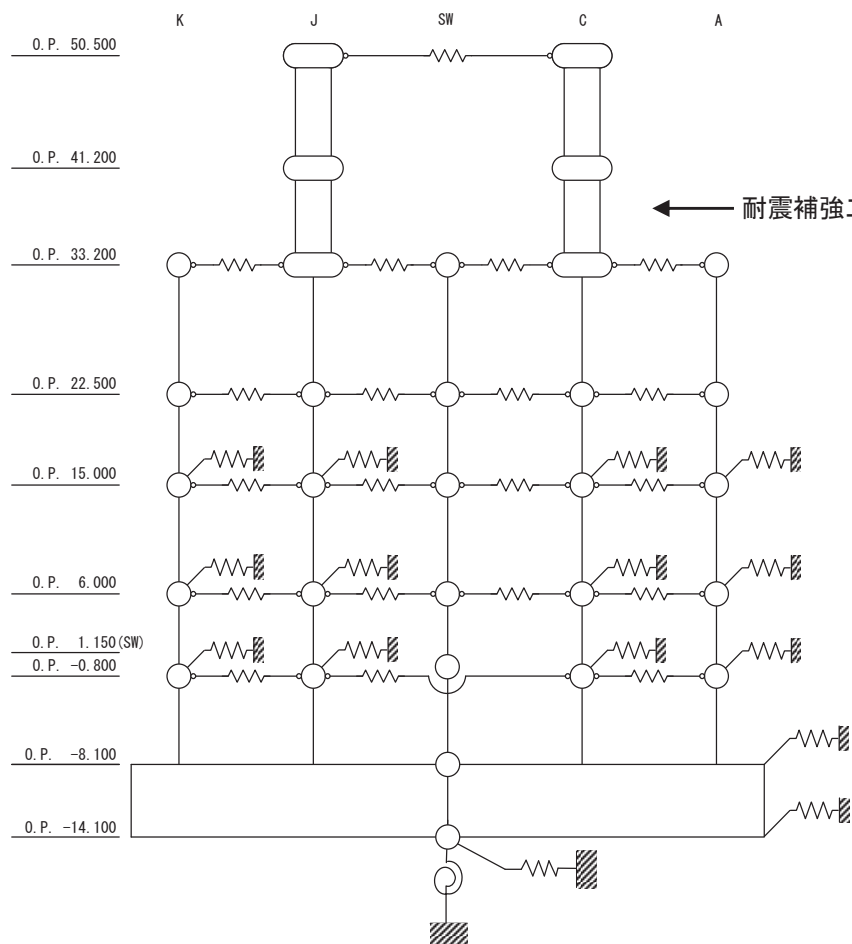
側面地盤ばね (Novakばね) の設定に用いる等価地盤の物性値

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

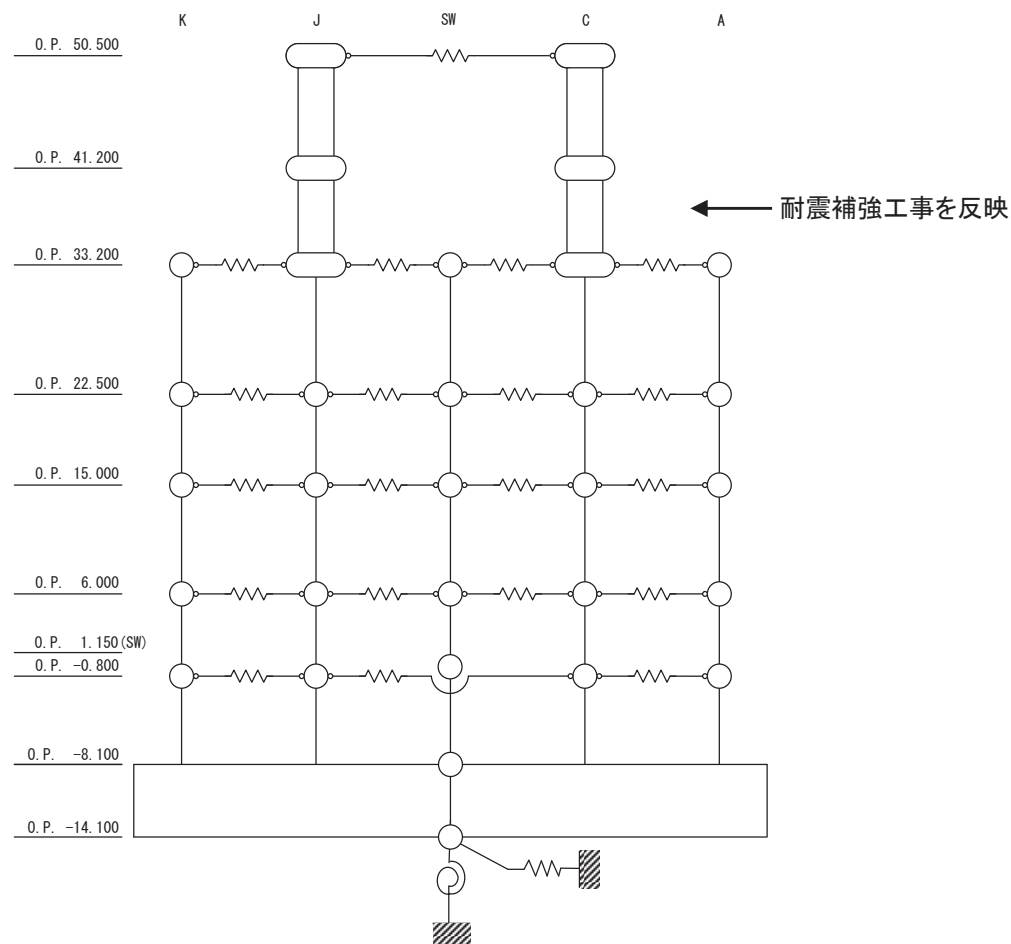


1. 原子炉建屋の埋込み効果に関する検討

■地震応答解析モデルの概要



側面地盤有



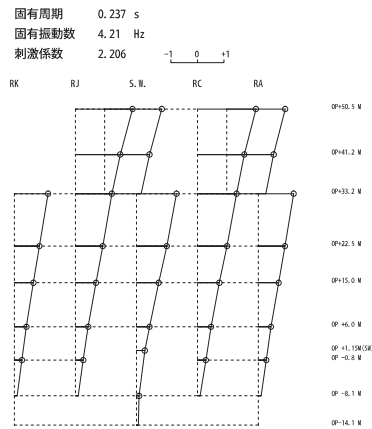
側面地盤無

地震応答解析モデルの概要

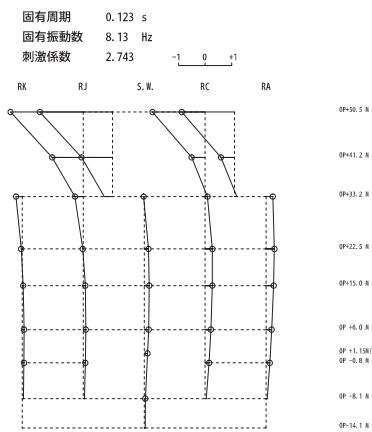
1. 原子炉建屋の埋込み効果に関する検討

■検討結果（固有モード図の比較）

➤ 各モデルの固有値および固有モードは、モデル毎に大きな差異は確認されないことから、側面地盤ばね(Novakばね)が建屋の振動特性に与える影響は小さい。

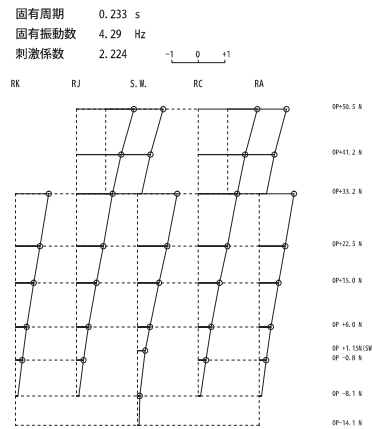


1次モード図

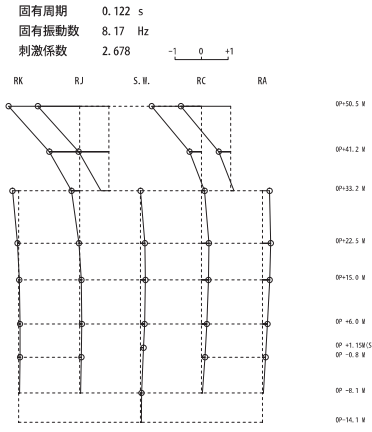


2次モード図

側面ばねなし

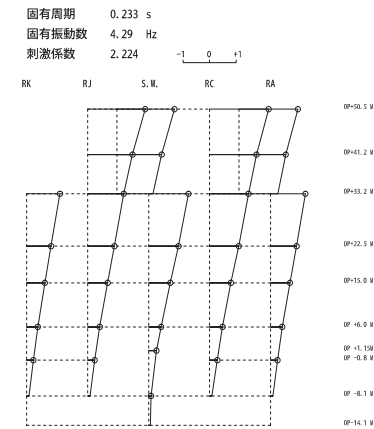


1次モード図

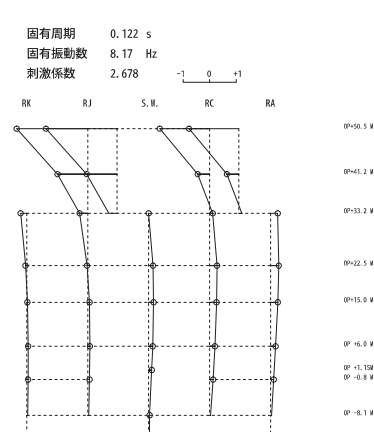


2次モード図

側面ばねあり(Ss-D1地盤)



1次モード図



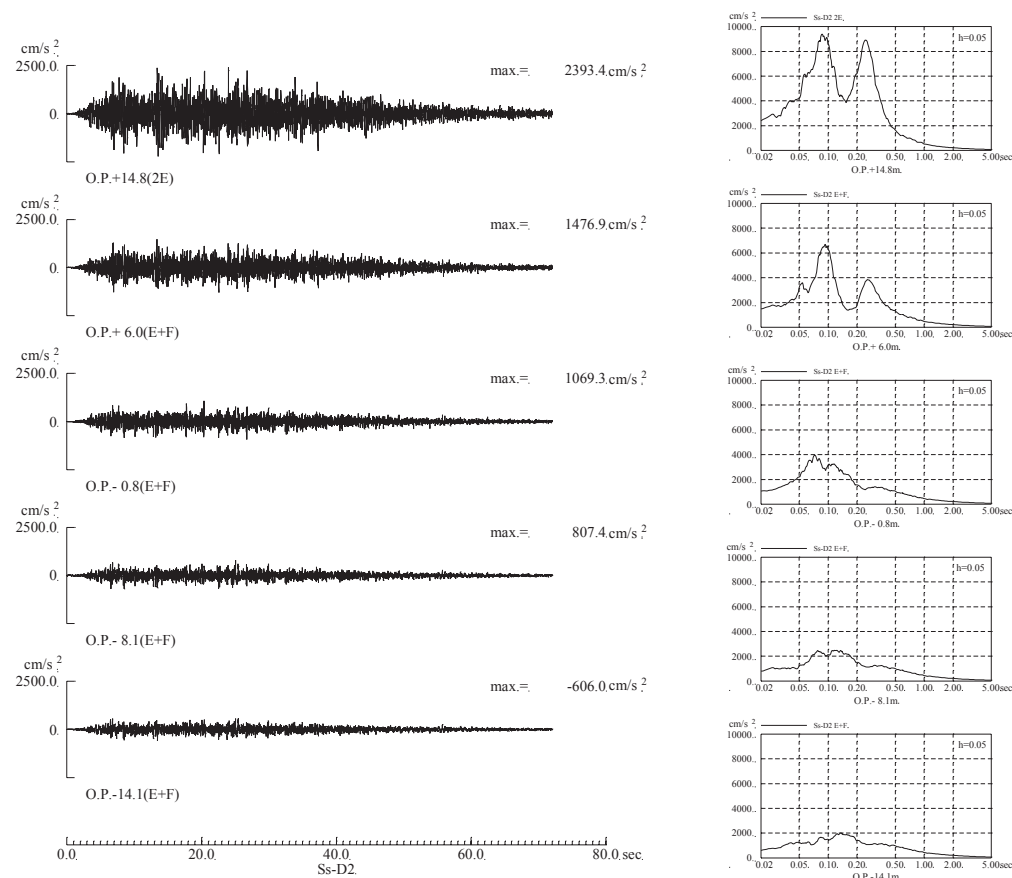
2次モード図

側面ばねあり(Ss-D2地盤)

1. 原子炉建屋の埋込み効果に関する検討

■検討結果（側面地盤ばね位置の地盤の加速度波形）

- 側面地盤ばね (Novakばね) を考慮した解析モデルへの入力となる側面地盤ばね位置の加速度波形 (E+F) の算定結果を示す。
- 地表面 (O.P.+14.8m) の加速度振幅は、最上部では2000Galを超える大きな振幅となっている。また、表層地盤の卓越周期 (周期0.2秒過ぎ、周期約0.1秒手前) で特に大きな振幅となっており、これは建屋の卓越周期に近い成分である。建屋の1階フロアの応答加速度が1000ガル程度であることから、地盤の揺れは2倍近いものとなっており、側面地盤ばねの精度によっては、大きな誤差を生じる可能性がある。



側面地盤ばね位置の地盤の加速度波形 (基準地震動Ss-D2)

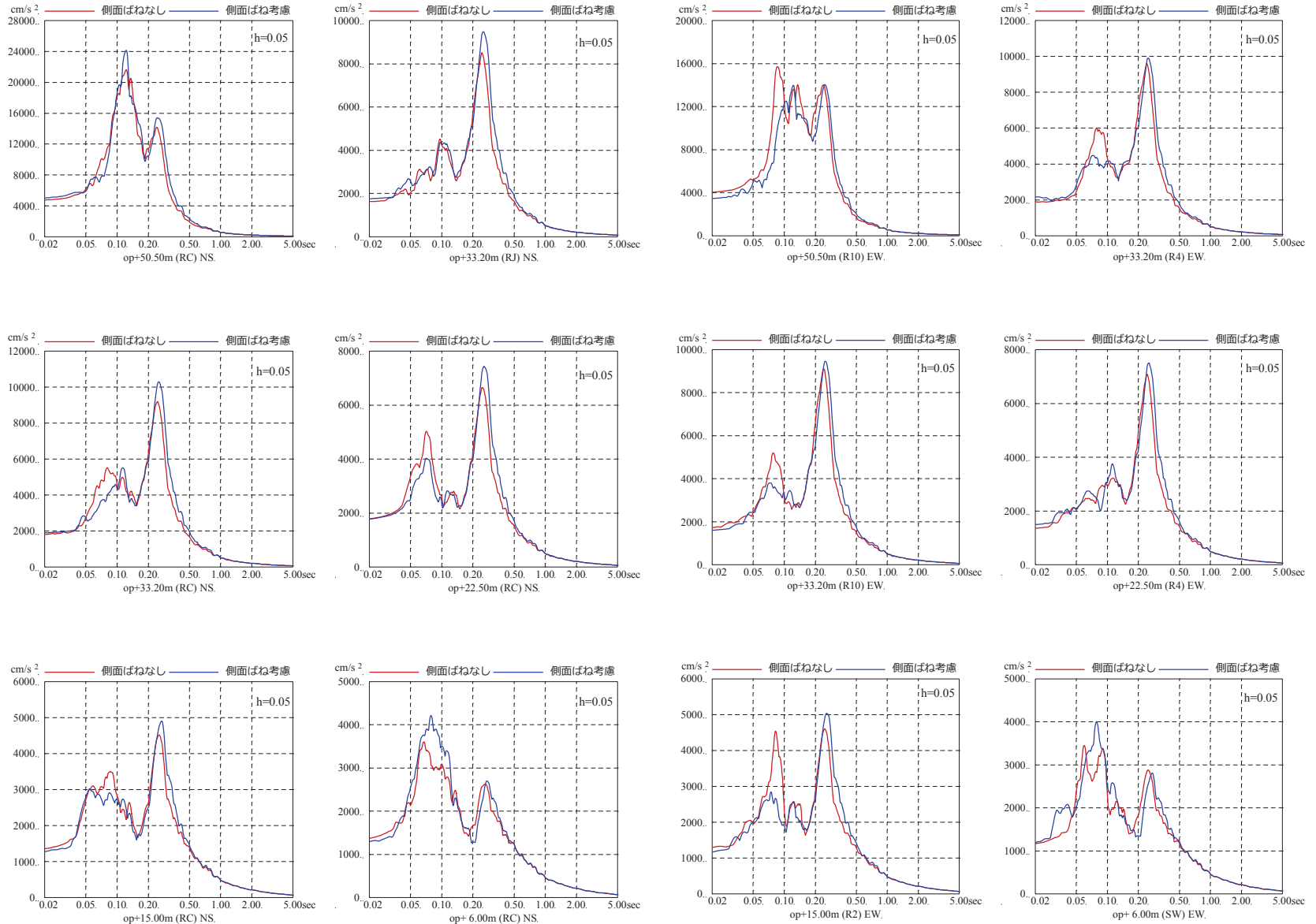
1. 原子炉建屋の埋込み効果に関する検討

■検討結果

- ▶ 側面地盤ばね (Novak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示す。
- ▶ 側面地盤ばね (Novak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。但し、側面地盤ばね (Novakばね) から入力される地震動の特徴から、部分的にはばね有りモデルが小さい結果を与えているフロアもある。



- ▶ 3.11地震に対する原子炉建屋のシミュレーション解析では、側面地盤ばね (Novakばね) 無しモデルの整合性が良いこと、また、3号炉海水熱交換器建屋の傾向 (埋込み効果は振動を促進する方向に作用していない傾向) も踏まえ、今回工認モデルにおいても既工認モデルと同様に、側面地盤ばね (Novakばね) は考慮しないモデルを採用する。



基準地震動S_s-D2, NS方向, 減衰5%

基準地震動S_s-D2, EW方向, 減衰5%

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. 3号炉海水熱交換器建屋の埋込み効果に関する検討

■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(質点系モデル)

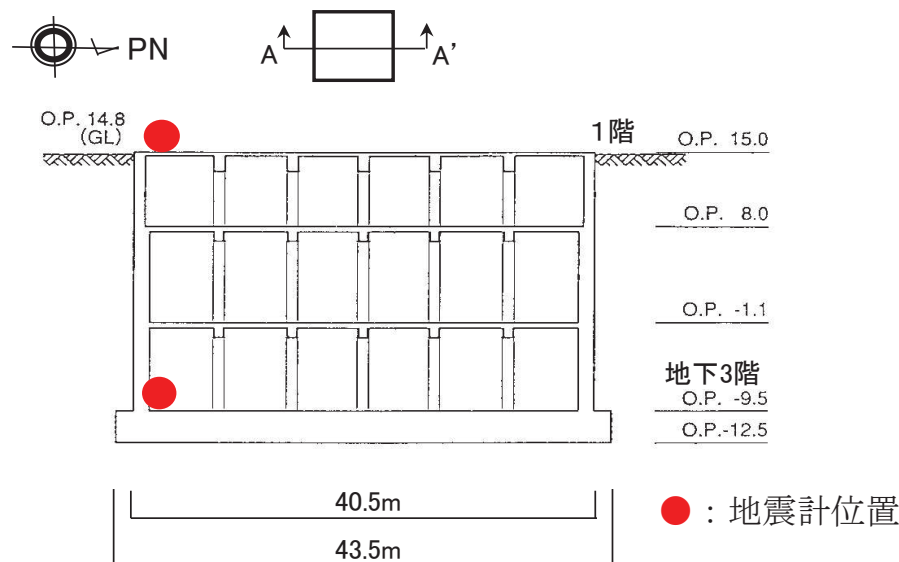
- 比較的小規模で建屋全体が埋め込まれている3号炉海水熱交換器建屋を対象に、表層地盤が建屋応答に及ぼす影響を確認する。
- 地盤の非線形性が大きい3.11地震の観測記録を用い、以下の建屋地震応答解析を実施する。

【質点系モデルによる検討】

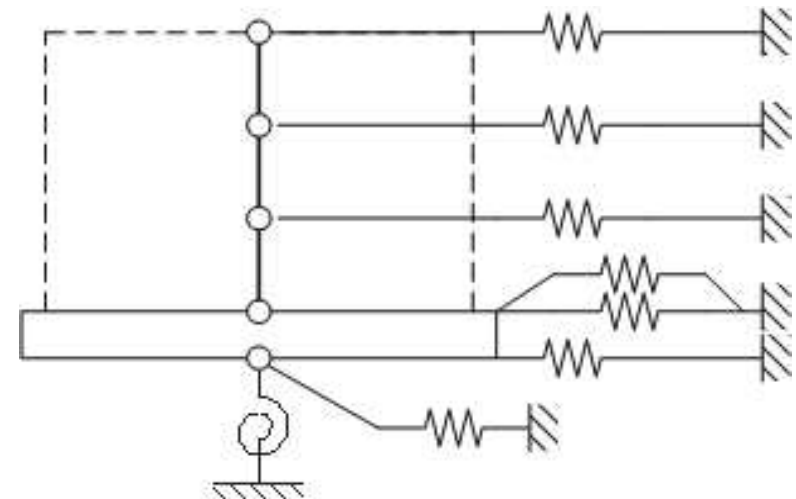
- ・側面地盤ばね(Novakばね)の適用性を確認するために、Novakばね有り・無しモデルの応答結果と観測記録を比較
- ・埋込み効果による応答低減効果を定量的に表すために、Novakばね無しモデルについて、観測記録と整合する建屋減衰(RC減衰)を同定(埋込み効果による応答低減効果を仮にRC減衰に置き換えた場合の検討)

【3次元地盤FEMモデルによる検討】

- ・側面地盤と建屋の相互作用をより詳細に把握可能な3次元地盤FEMモデルを用いた検討



3号炉海水熱交換器建屋の概要



解析モデル(側面地盤ばね考慮)

2. 3号炉海水熱交換器建屋の埋込み効果に関する検討

【質点系モデルによる検討】 ■解析条件

	①側面地盤ばね(Novakばね)を考慮したケース ②側面地盤ばね(Novakばね)を考慮しないケース	③建屋減衰を変動させたケース
建屋	3号炉海水熱交換器建屋	
地震動	3.11地震はぎとり波	3.11地震の基礎版上観測記録
入力地震動	①基礎版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) ②基礎版底面位置の地震動(E+F)を算定し入力(補正水平力考慮)	3.11地震の基礎版上観測記録から基礎版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(RC減衰)を変動
建屋モデル (側面地盤ばね)	①有り ②無し	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)	—

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 Vs(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Vsと相関のある初期せん断剛性G₀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。

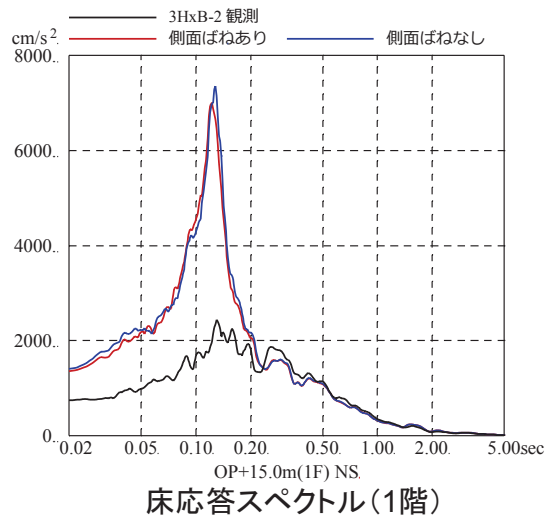
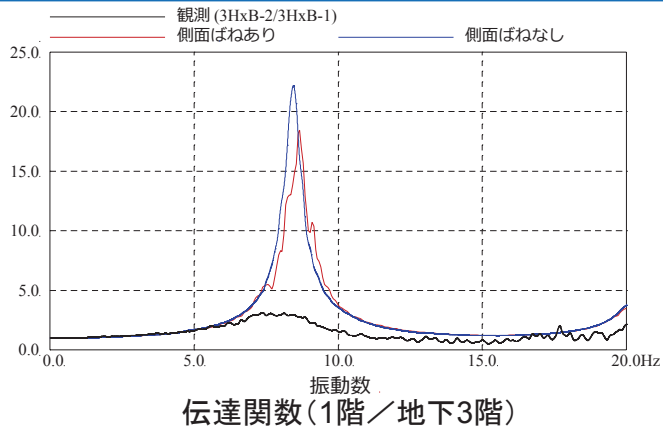
※2 レーリー減衰。また、ひずみ依存による非線形特性を考慮する。

2. 3号炉海水熱交換器建屋の埋込み効果に関する検討

【質点系モデルによる検討】 ■解析結果

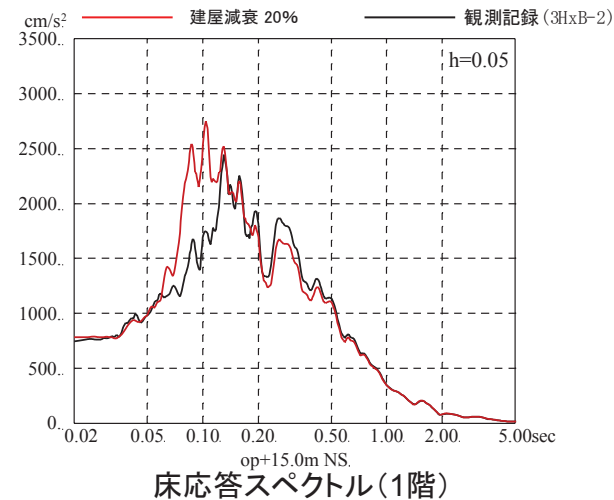
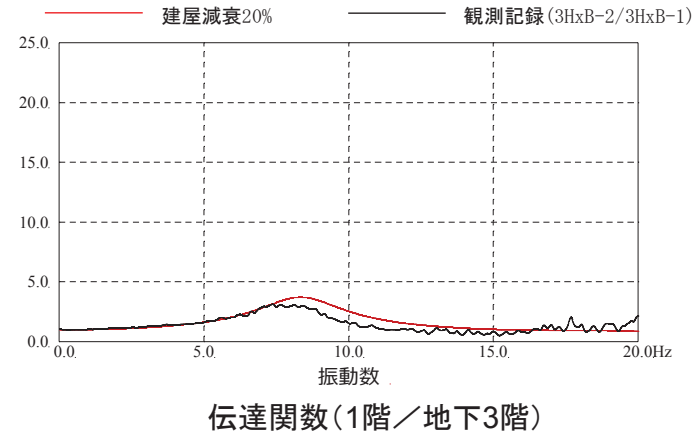
側面地盤ばね (Novakばね) 有り・無しモデルの応答結果

- 側面地盤ばね (Novakばね) 無し (減衰5%) の解析結果は観測記録に対しかなり過大であり、埋込みの効果を確認される。
- また、側面地盤ばね (Novakばね) 有り (減衰5%) も観測記録に比べ過大になっている。これは、建屋固有振動数 (約8Hz) と表層地盤の卓越振動数 (約2Hz) の乖離が大きく、Novakばねから入力される地震動による影響が小さいためと考えられる。



建屋減衰の検討 (側面地盤ばね無しモデル)

- 埋込み効果による応答低減効果を定量的に表すために、観測記録と整合する建屋減衰 (RC減衰) を同定した。その結果、減衰を**20%**にすることにより解析と観測記録は整合するため、概ねこの減衰の差分 (一般的な減衰5%に対して20%相当の応答分) が埋込みによる低減効果相当量と考えられる。



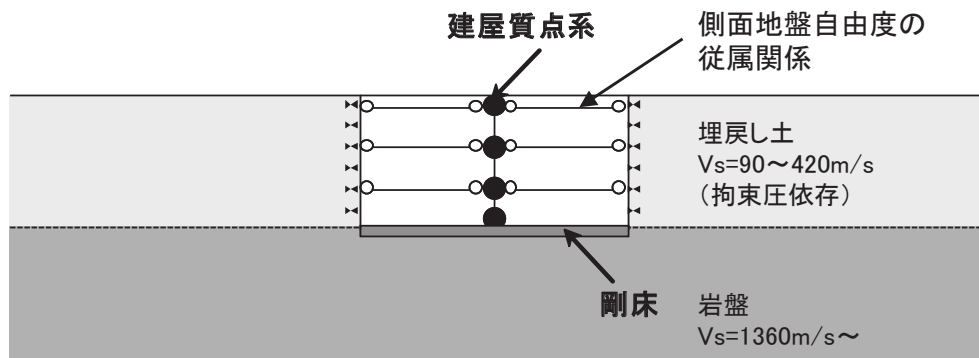
埋込みによる
応答低減効果
について、3次
元地盤FEMモ
デルによりさ
らに検討する。

2. 3号炉海水熱交換器建屋の埋込み効果に関する検討

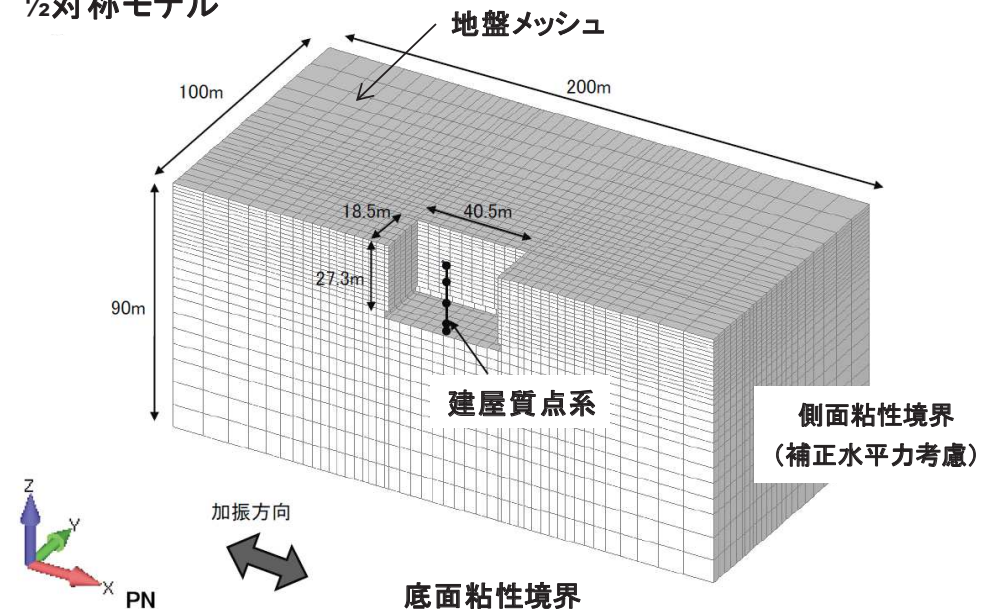
【3次元地盤FEMモデルによる検討】

➤ 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が、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たことから、建屋周辺地盤を3次元モデル化し周辺地盤の影響について検討する。

■3次元FEMモデルの概要



1/2対称モデル



地盤	線形または非線形(H-Dモデル)
建屋	線形
減衰	地盤建屋ともに共通:初期剛性比例型 振動数4Hz, 8Hzに対して3%のレーリー減衰
入力波	3.11地震NS方向 時刻35~75秒の40秒間

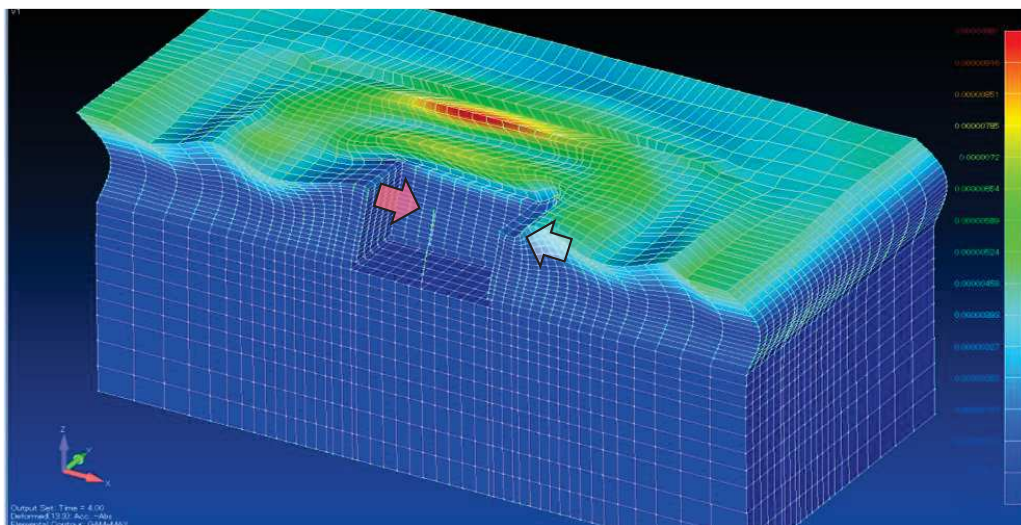
2. 3号炉海水熱交換器建屋の埋込み効果に関する検討

【3次元地盤FEMモデルによる検討(小地震による検討)】

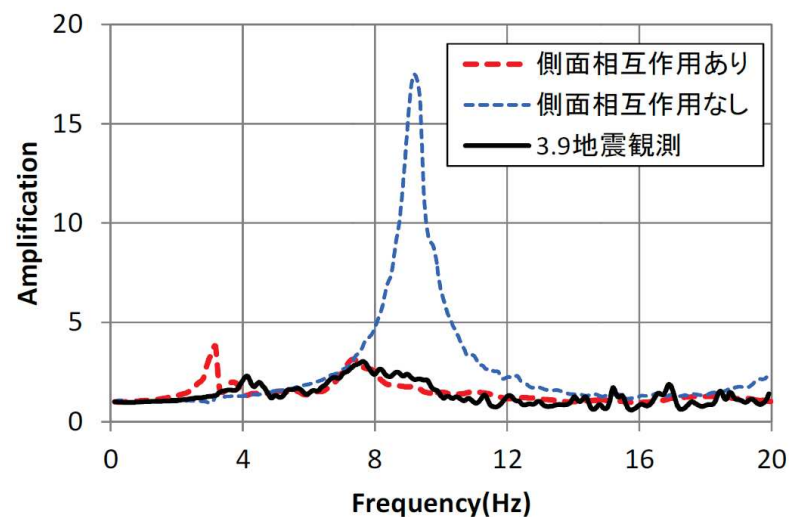
■解析結果

3次元地盤FEMモデルによる解析結果(主な特徴)

- ・小地震の場合、建屋1次振動数に相当する8Hzの定常sin波を入力した場合の変形図より、地盤の2次モードと建屋の1次モードが概ね逆位相で連成していることから、地盤振動が建屋の応答の増幅を抑制していると考えられる。
- ・建屋側面の地盤の相互作用が建屋応答に及ぼす影響は、地盤と建屋側面の従属関係を解除した場合としない場合の建屋基礎版に対する建屋上部の伝達関数を比較した結果から、相互作用がない場合には、建屋の応答は20倍程度に増幅しており、相互作用の有無が応答に大きく影響することを示している。



定常sin波(8Hz:建屋1次振動数に相当)を入力した場合の変形図
(スナップショット)

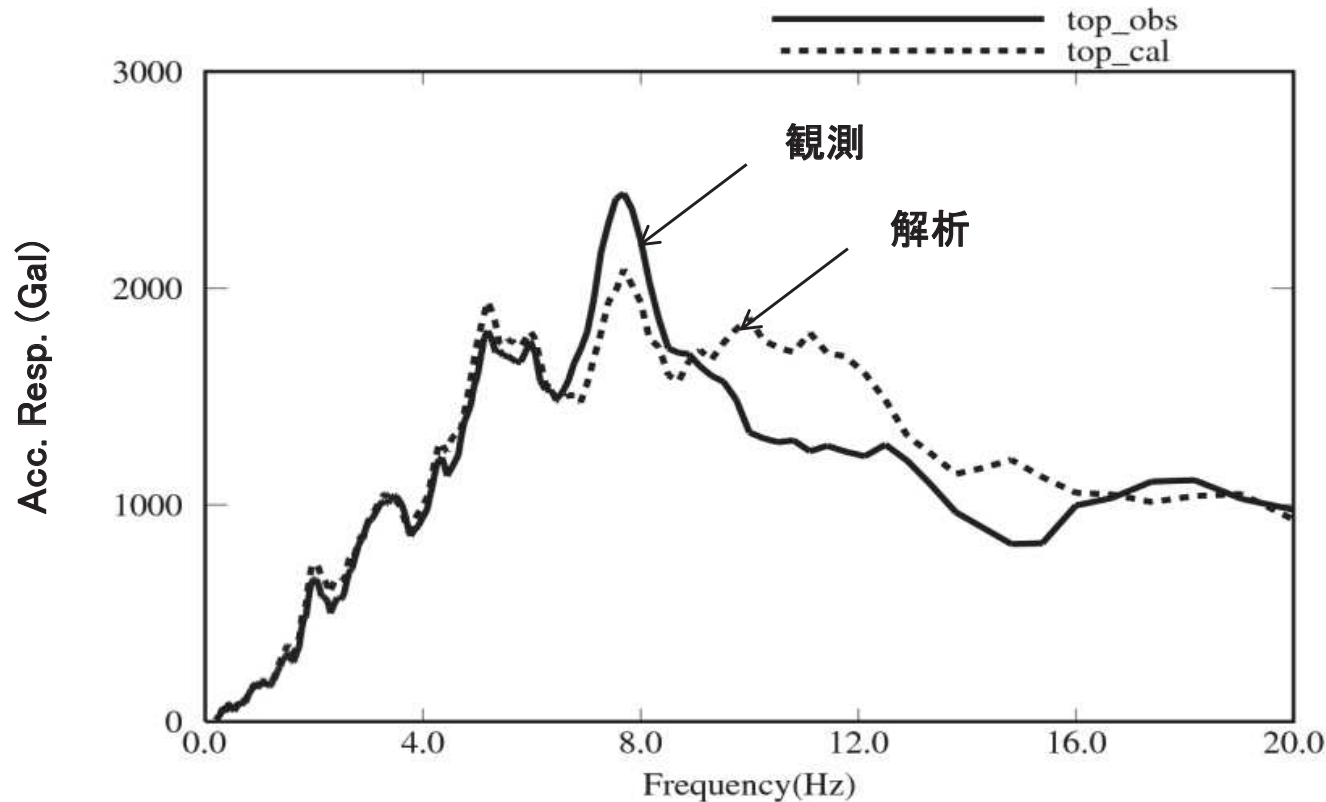


建屋の伝達関数(上部/基礎版) 3.9地震(NS方向)

2. 3号炉海水熱交換器建屋の埋込み効果に関する検討

【3次元地盤FEMモデルによる検討(3.11地震による検討)】

■解析結果



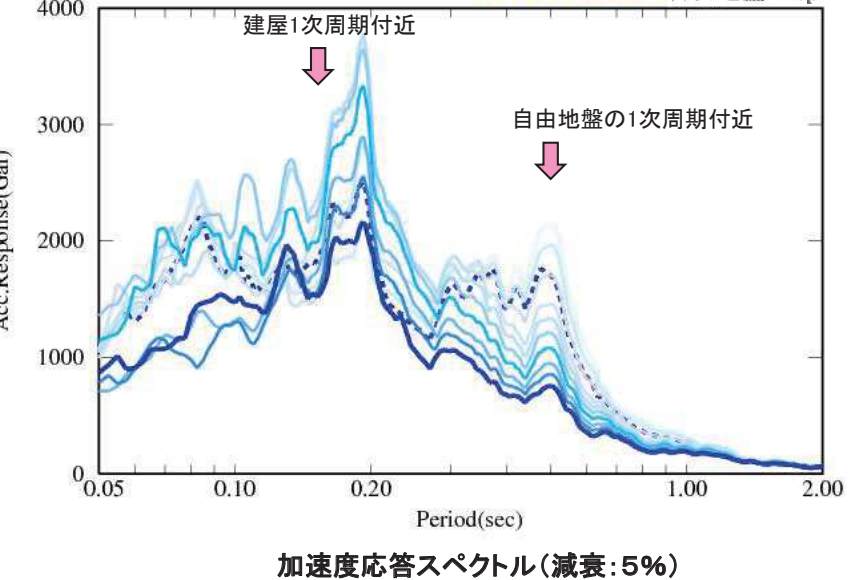
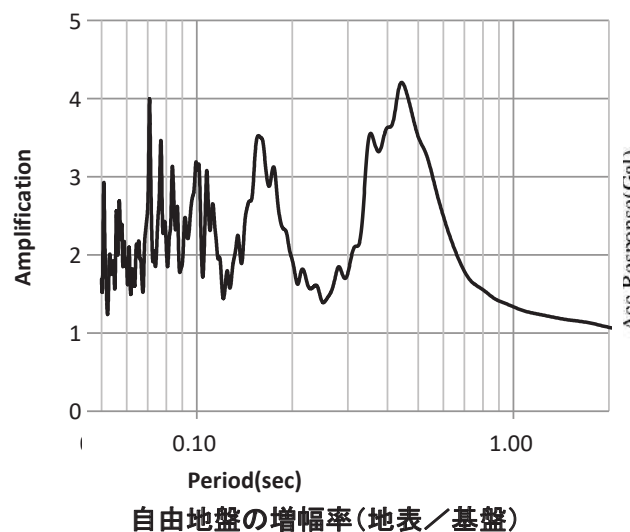
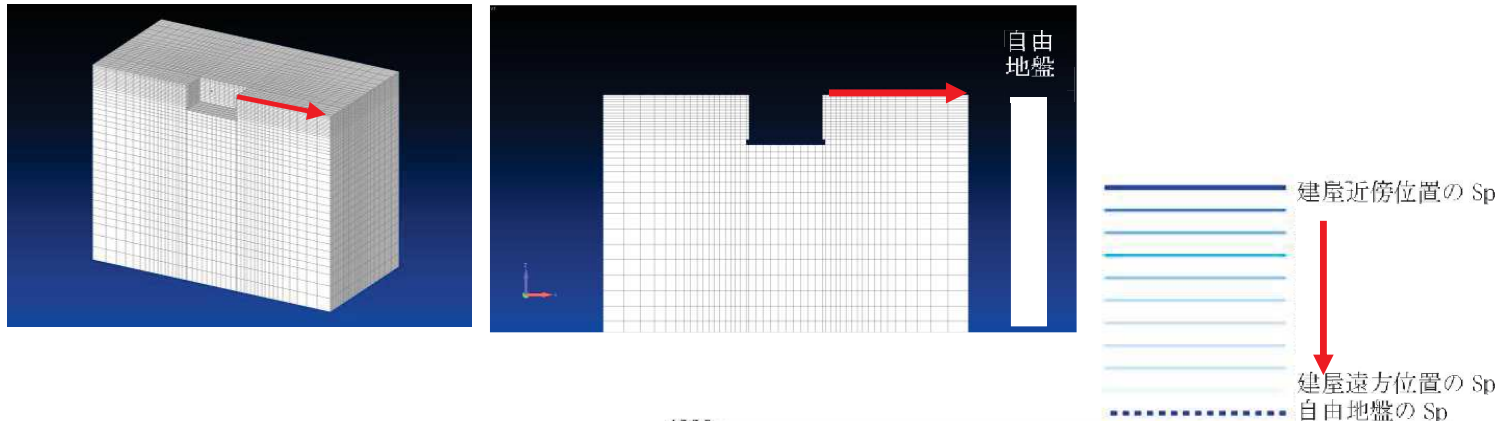
加速度応答スペクトル(h=5%)
(建屋上部(1階), NS方向)

- 3次元地盤FEM解析モデルによるシミュレーション解析では、3号炉海水熱交換器建屋1階の観測記録と解析結果は概ね整合する結果となっている。

2. 3号炉海水熱交換器建屋の埋込み効果に関する検討

【3次元地盤FEMモデルによる検討(3.11地震による検討)】

■解析結果



加速度応答スペクトル(地表面)

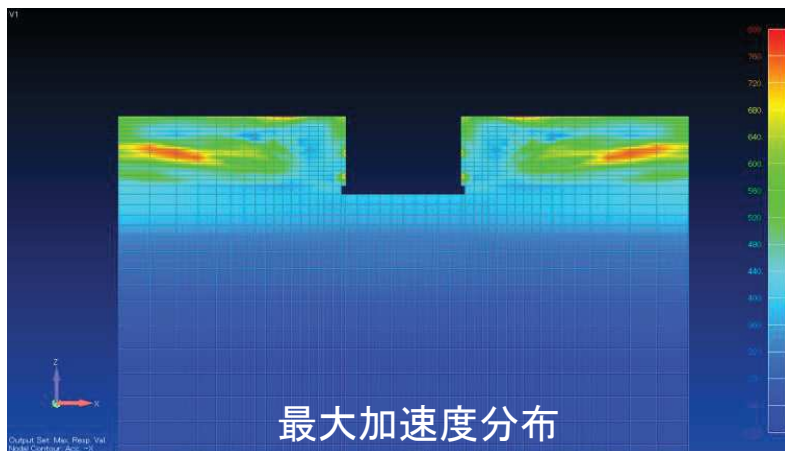
➤ 位置による違いが顕著であり建屋応答による影響が見られる。周期0.5秒付近のピークは自由地盤の1次卓越周期であり、建屋近傍位置では地盤が建屋側面に拘束されて増幅率が小さく、遠方位置自由地盤の応答に近づいている。周期0.2秒付近のピークは建屋側面に対して中間位置で増大し、遠方位置では減少し自由地盤の応答に近づいている。

2. 3号炉海水熱交換器建屋の埋込み効果に関する検討

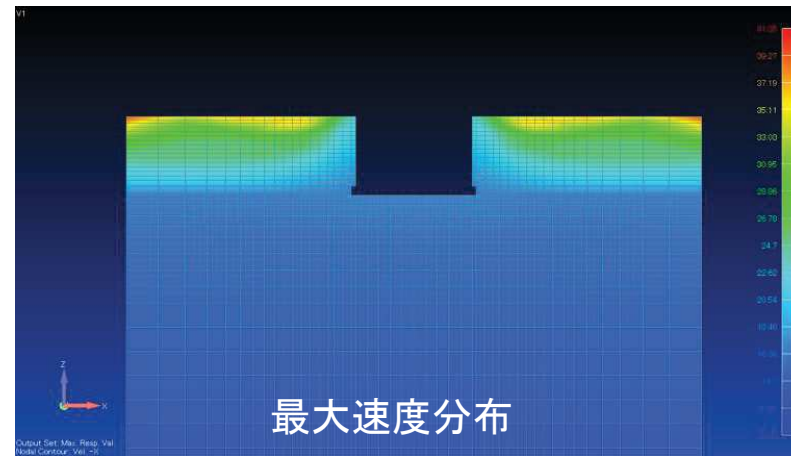
【3次元地盤FEMモデルによる検討(3.11地震による検討)】

■解析結果

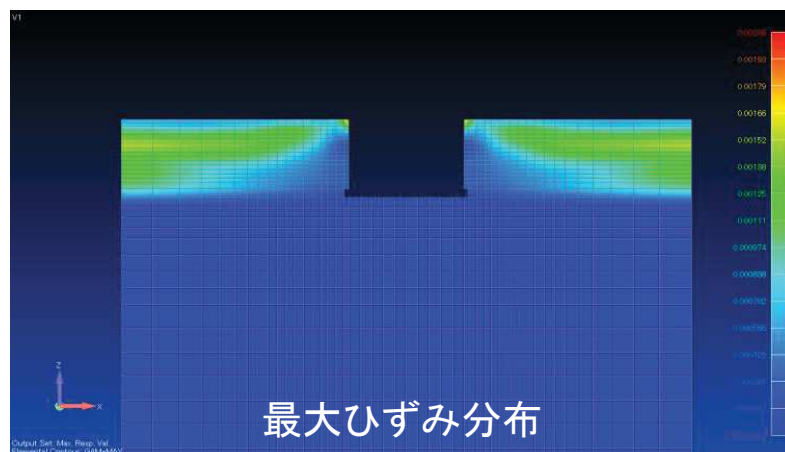
自由地盤



自由地盤



自由地盤



- 最大加速度分布は比較的複雑な分布となるが、建屋近傍は遠方よりも小さい傾向が見られる。
- 最大速度分布は建屋から離れるにつれて自由地盤に近づく傾向であり、建屋近傍は小さめである。
- 最大ひずみ分布は建屋近傍の地盤は建屋に拘束されて遠方地盤に比べて最大ひずみは小さくなっている。

地盤応答の空間分布図



- 埋込み効果について、3次元FEMモデルによるシミュレーション解析が概ね観測記録と整合するのに対し、Novakばねを用いた埋込み効果の評価が過大になった要因としては、Novakばねでは側面地盤から建屋に入力する地震動をかなり大きく見積もっていることが考えられる。

2. 3号炉海水熱交換器建屋の埋込み効果に関する検討

3号炉海水熱交換器建屋の埋込み効果に対する今回工認モデル

以上の検討において、

- ①側面地盤ばね(Novakばね)を用いたシミュレーション解析結果は観測記録に対して過大な評価結果となったこと
- ②側面地盤ばね(Novakばね)を考慮しないシミュレーション解析では、RC減衰を20%程度にすると観測記録との整合が図れたこと、一方で、建屋の固有周期の変動に与える影響は小さいことから、埋込み効果は建屋の振動抑制に効果があること
- ③埋込み効果による建屋の振動抑制効果は3次元地盤FEM解析でも確認されたこと

から、今回工認モデルは、埋込み効果については、以下のように設定する。

【今回工認モデル】

- 入力地震動評価は、表層地盤の影響を考慮して算定し、建屋モデルは基本的に既工認モデルと同様に側面地盤ばね(Novakばね)を設けない質点系モデルを採用する。
(剛性低下については別途検討の上考慮)
- 建屋減衰(RC減衰)について、既工認モデルと同じ5%を採用し、振動抑制効果を考慮しないことで、保守性を確保する。

3. タービン建屋の埋込み効果に関する検討

■検討目的および検討方法

- 女川2号炉タービン建屋の今回工認では、原子炉建屋同様に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、側面地盤ばねはモデル化していない。
- ここでは、3.11地震のはざとり波を入力した場合の側面地盤ばね（Novakばね）の有無が建屋の振動特性に与える影響を確認する。
- 側面地盤は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。

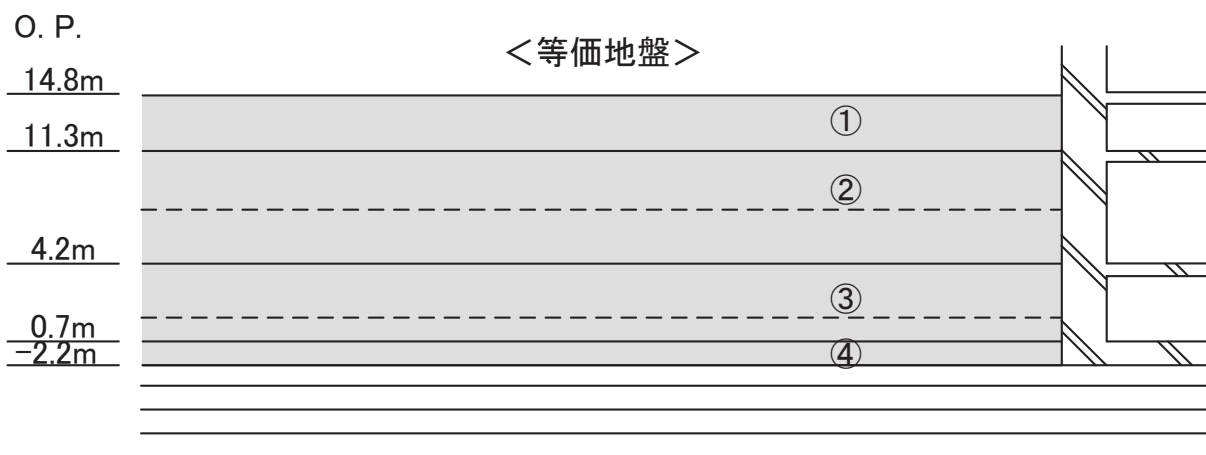
	側面地盤ばね（Novakばね）を考慮するケース	側面地盤ばね（Novakばね）を考慮しないケース
建屋	2号炉タービン建屋	
地震動	3.11地震はざとり波	
入力地震動	基礎版底面位置および側面地盤ばね位置の地震動（E+F）を算定し入力（補正水平力考慮）	基礎版底面位置の地震動（E+F）を算定し入力（補正水平力考慮）
建屋モデル （建屋剛性、建屋減衰）	今回工認モデル （初期剛性低下考慮、建屋減衰5%）	
建屋モデル （側面地盤ばね）	有り	無し
地盤モデル	入力地震動評価用地盤モデル （表層地盤：2層モデル）	

3. タービン建屋の埋込み効果に関する検討

■検討目的および検討方法

側面地盤ばね(Novakばね)の設定に用いる等価地盤の物性値

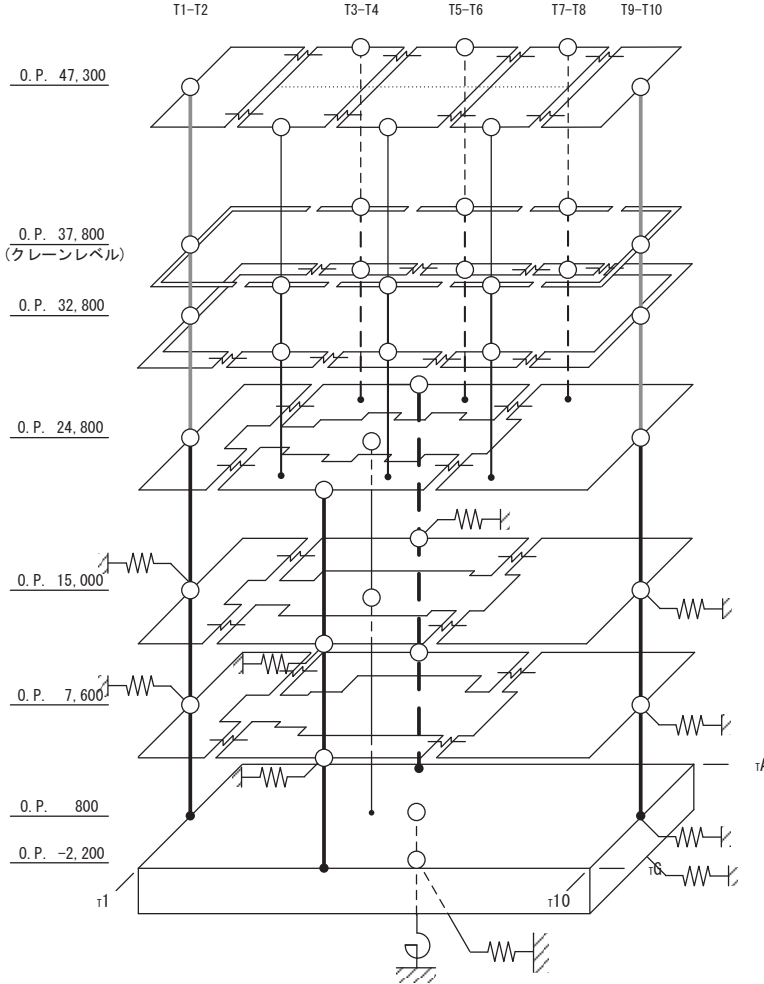
建屋質点レベル O.P.(m)	層No.	等価地盤				
		せん断波速度 Vs (m/s)	せん断弾性係数 G ($\times 10^4$ kN/m ²)	単位体積重量 γ (kN/m ³)	ポアソン比 ν	減衰定数 he (%)
15.0	①	166	5.23	18.6	0.45	3
7.6	②	262	13.1	18.6	0.45	3
0.8	③	470	43.5	19.3	0.45	3
-2.2	④	900	193	23.3	0.45	3



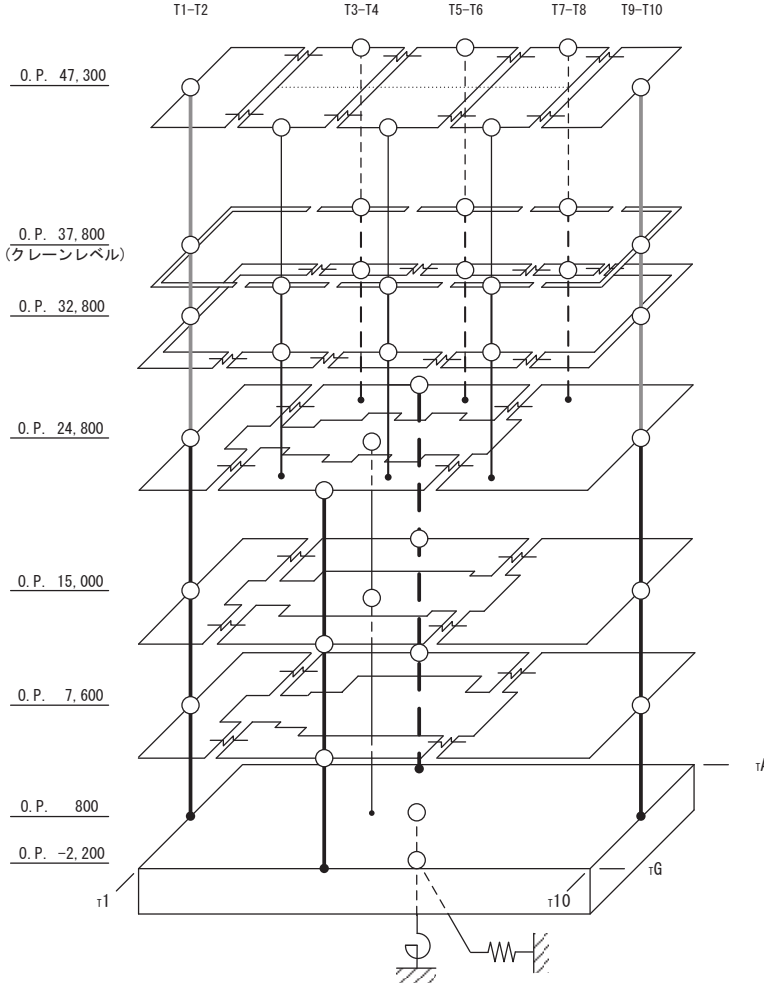
埋戻し土の形状(単位:m)

3. タービン建屋の埋込み効果に関する検討

■地震応答解析モデルの概要



側面地盤有



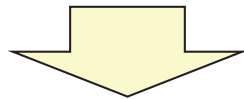
側面地盤無

地震応答解析モデルの概要

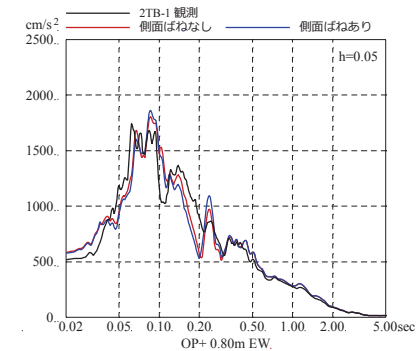
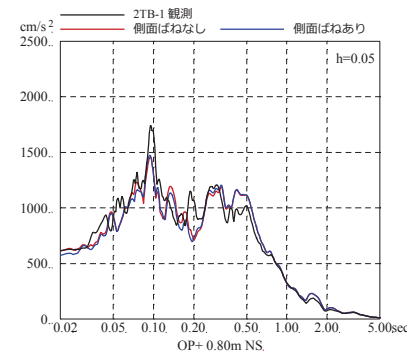
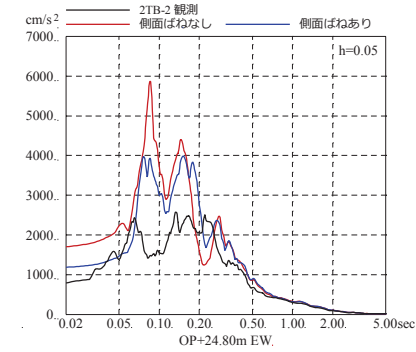
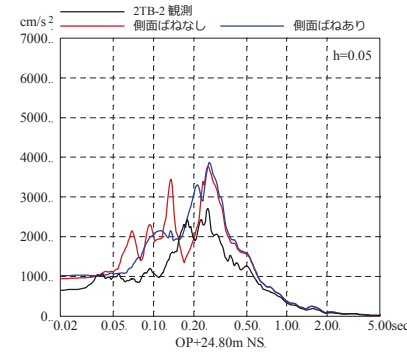
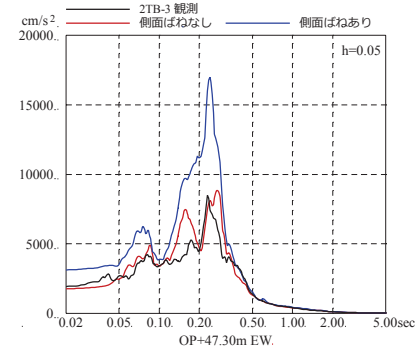
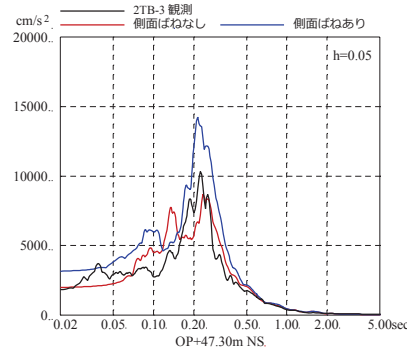
3. タービン建屋の埋込み効果に関する検討

■検討結果

- 側面地盤ばね(Novak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示す。
- 側面地盤ばね(Novak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。但し、側面地盤ばねから入力される地震動の特徴から、部分的にはばね有りモデルが小さい結果を与えている階もある。
- 側面地盤ばね(Novakばね)が無い場合に観測記録との整合が良い。



- 今回工認モデルにおいても既工認モデルと同様に、側面地盤ばね(Novakばね)は考慮しないモデルを採用する。



NS方向, 減衰5%

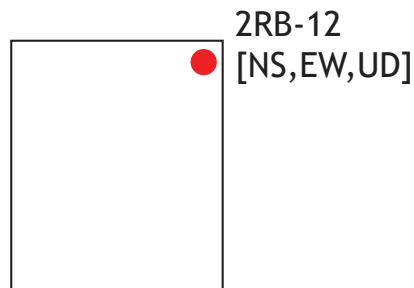
EW方向, 減衰5%

3.11地震はざり波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

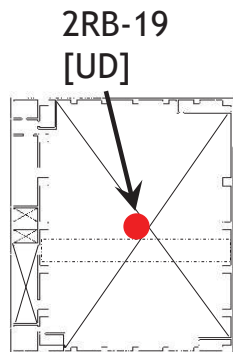
地震観測位置

女川2号炉原子炉建屋
女川3号炉海水熱交換器建屋
女川2号炉タービン建屋

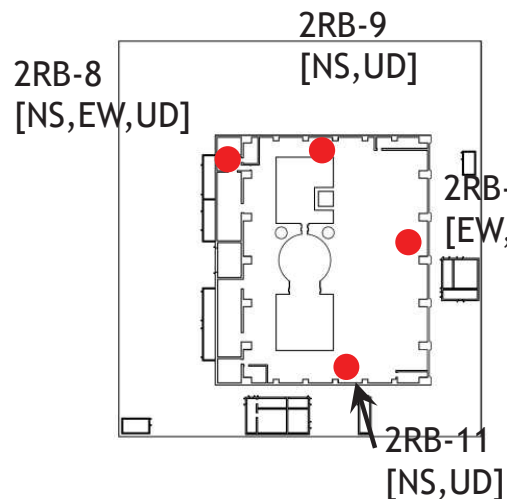
女川2号炉原子炉建屋



RF (O.P.50.5m)

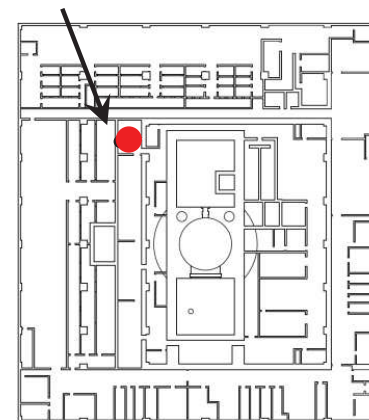


屋根トラス (O.P.46.95m)

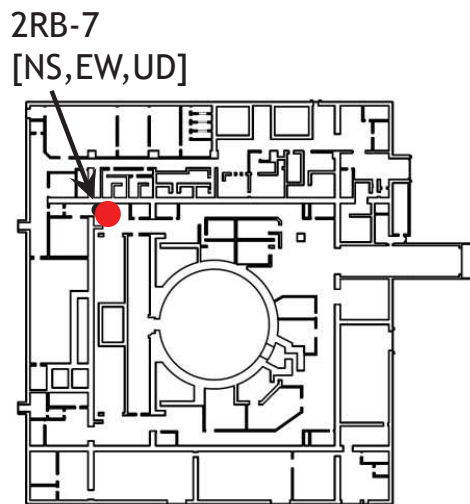


3F (O.P.33.2m)

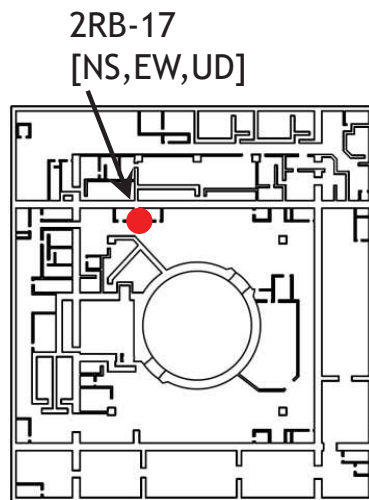
2RB-18
[NS,EW,UD]



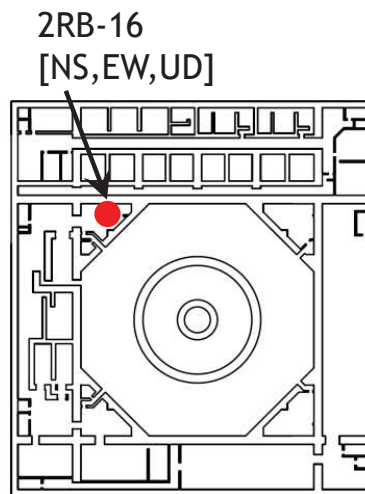
2F (O.P.22.5m)



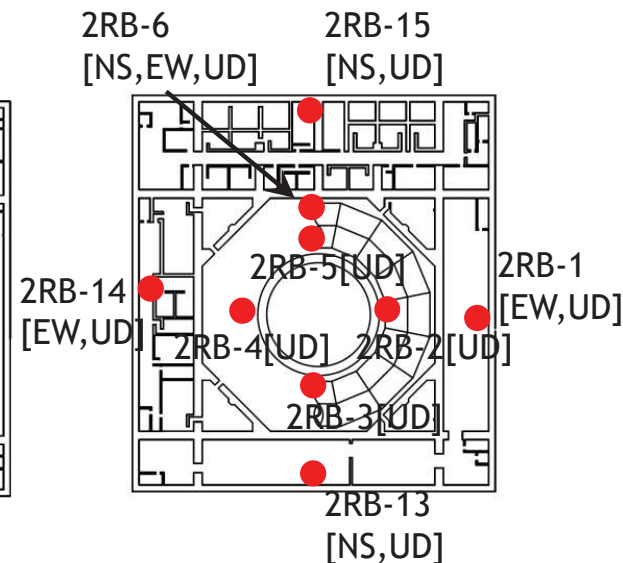
1F (O.P.15.0m)



B1F (O.P.6.0m)

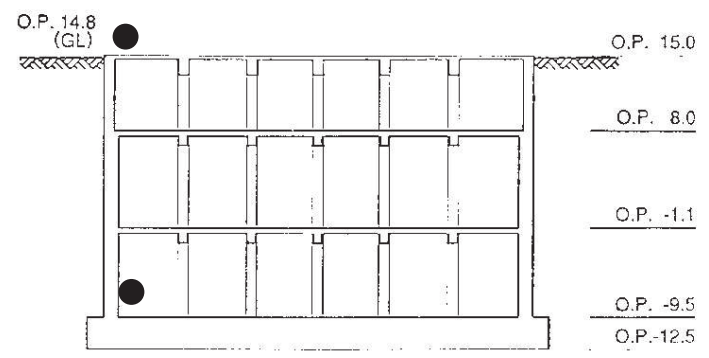
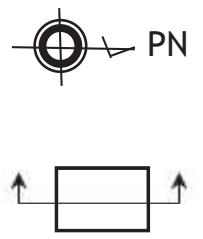


B2F (O.P.-0.8m)



基礎版上 (O.P.-8.1m)

女川3号炉海水熱交換器建屋



断面図

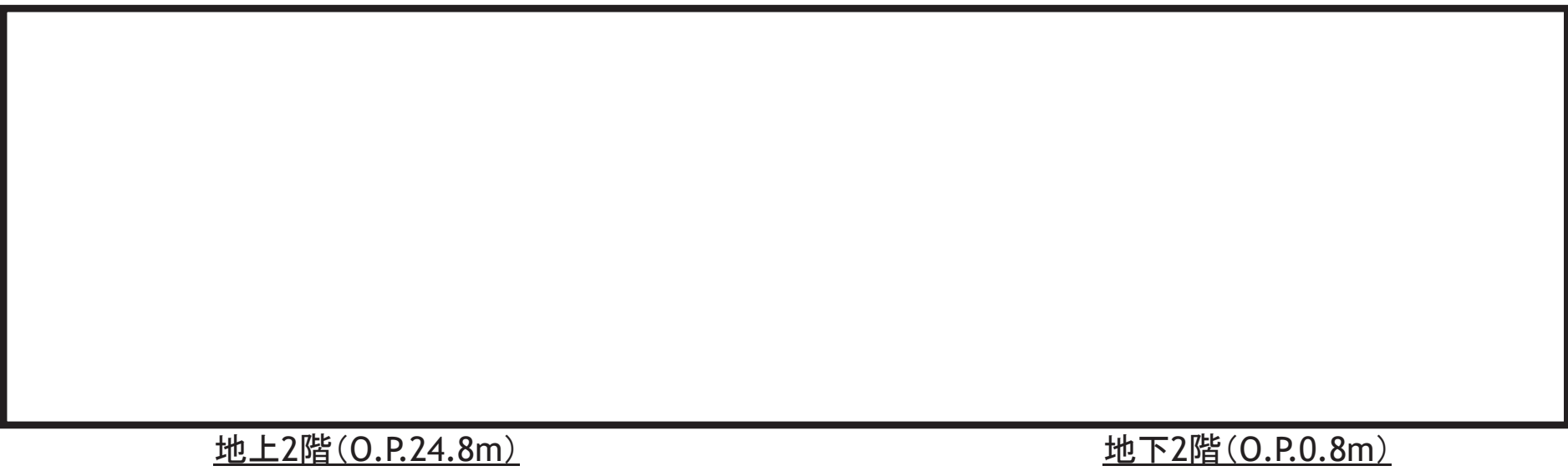
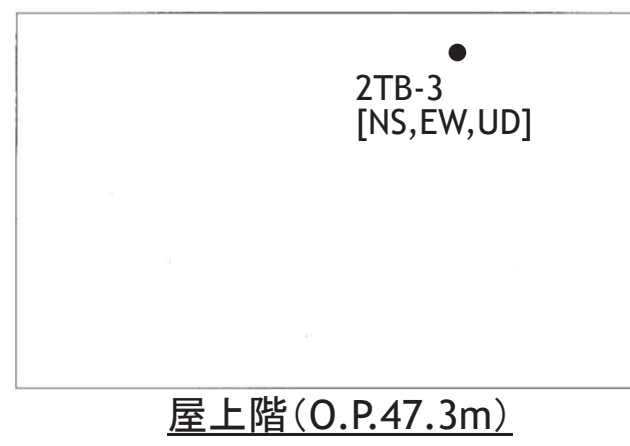
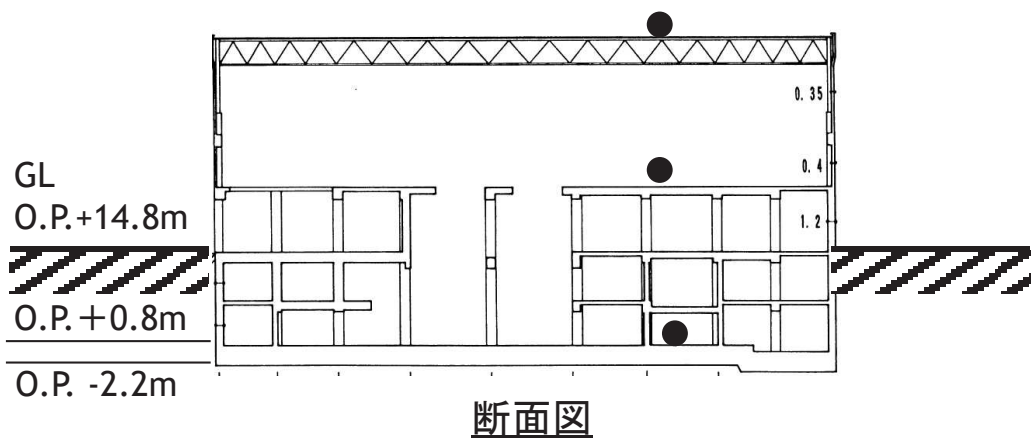
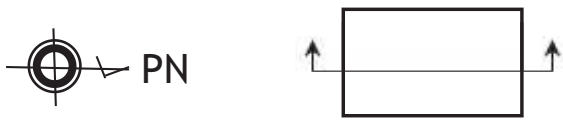


地下3階(O.P.-9.5m)

地上1階(O.P.15.0m)

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。

女川2号炉タービン建屋



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。

建屋と地盤との接地状況

女川2号炉原子炉建屋

女川2号炉制御建屋

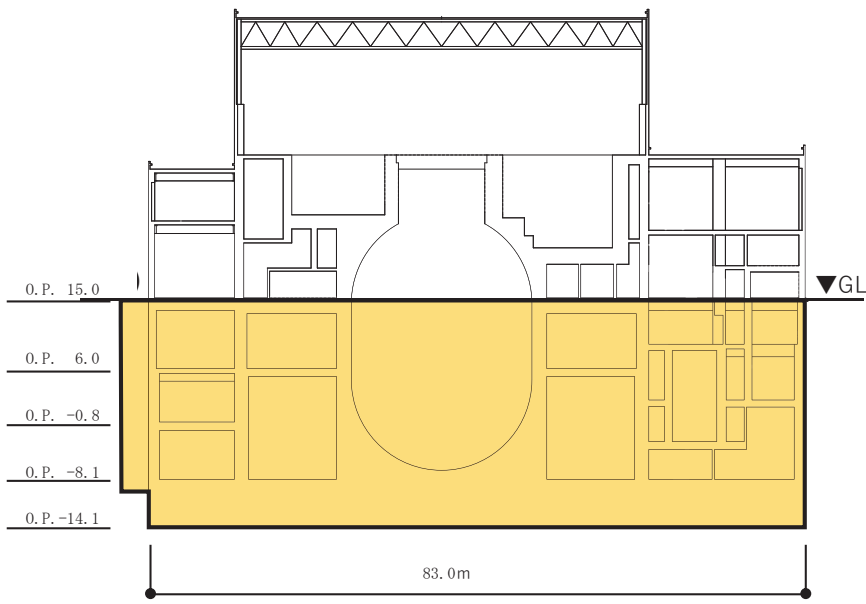
女川2号炉タービン建屋

女川2号炉補助ボイラー建屋

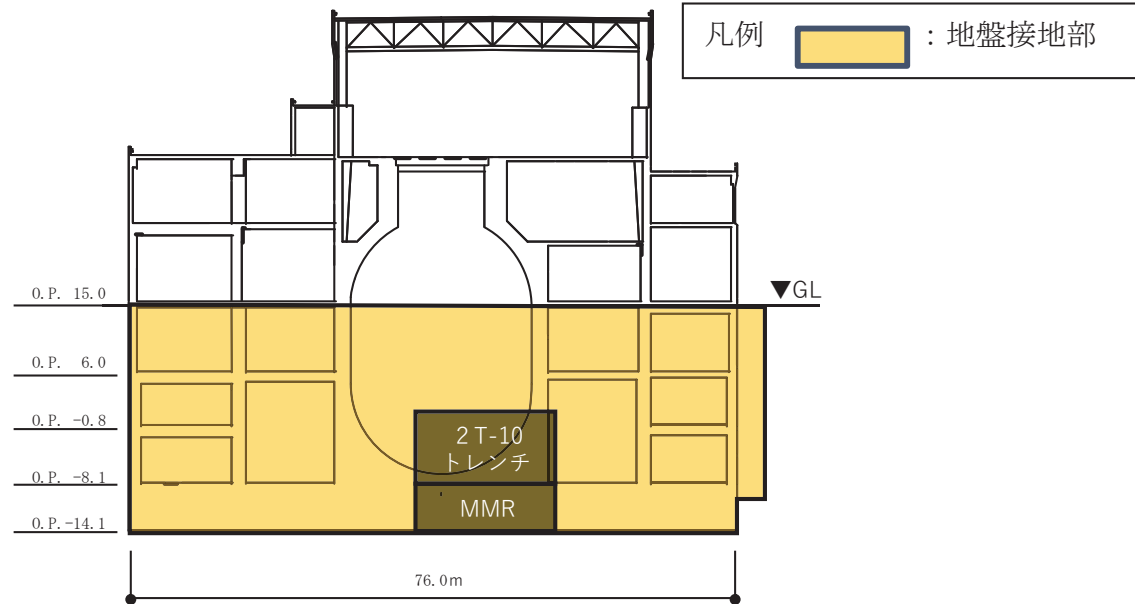
女川3号炉海水熱交換器建屋

女川1号炉制御建屋

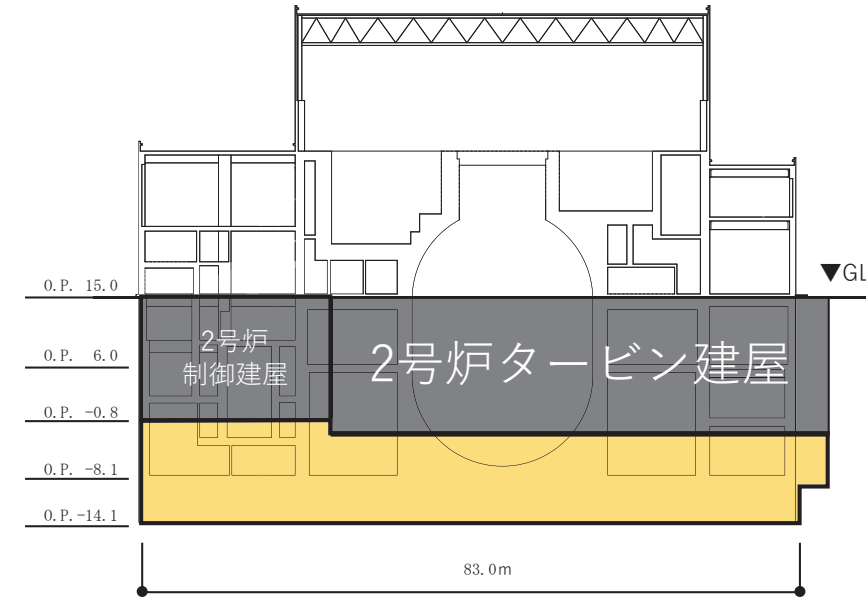
女川2号炉原子炉建屋



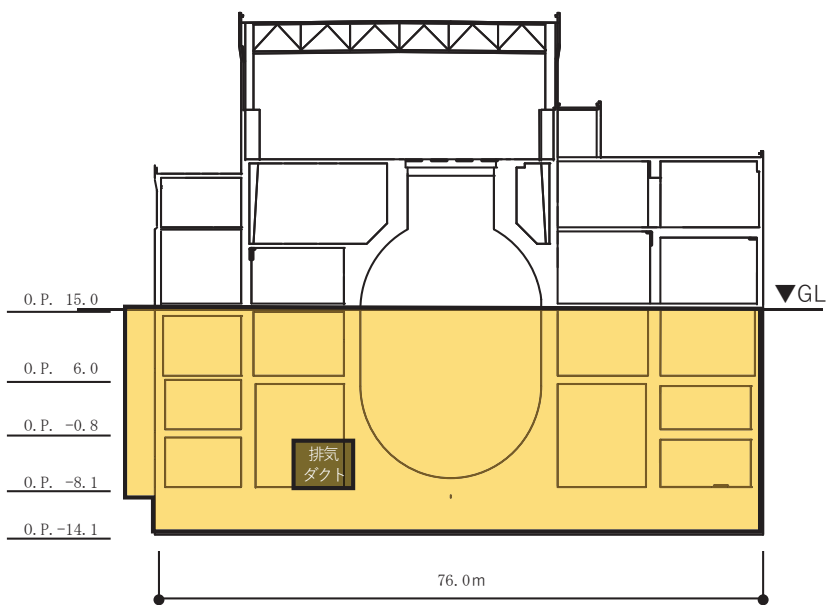
2号炉原子炉建屋（北面）の地盤の接地状況



2号炉原子炉建屋（東面）の地盤の接地状況



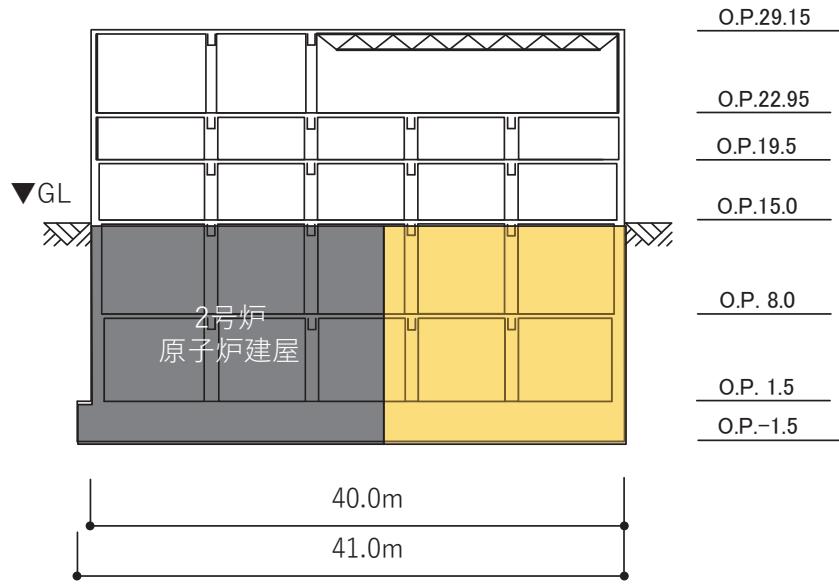
2号炉原子炉建屋（南面）の地盤の接地状況



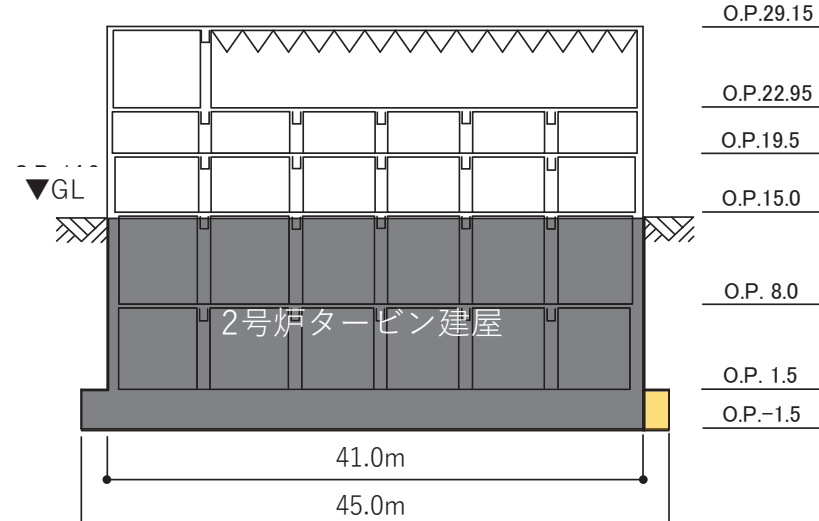
2号炉原子炉建屋（西面）の地盤の接地状況

女川2号炉制御建屋

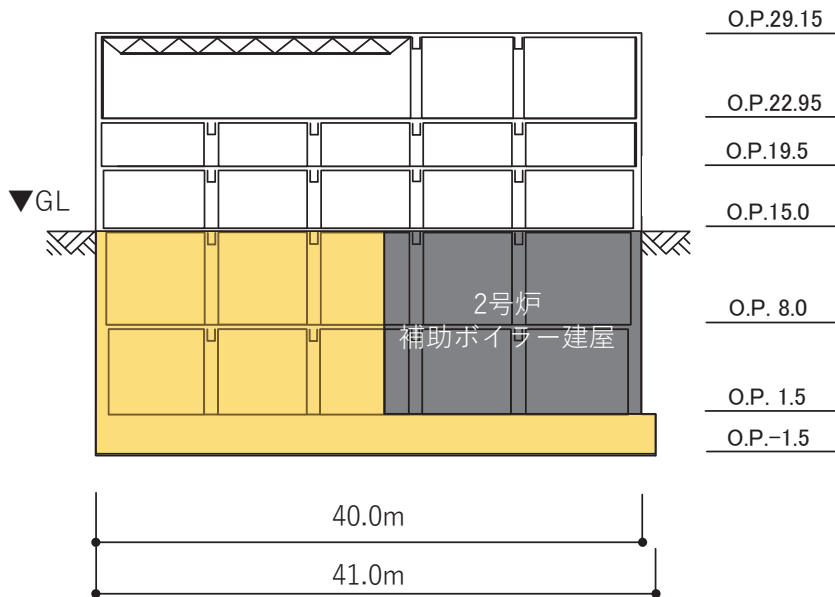
凡例  : 地盤接地部



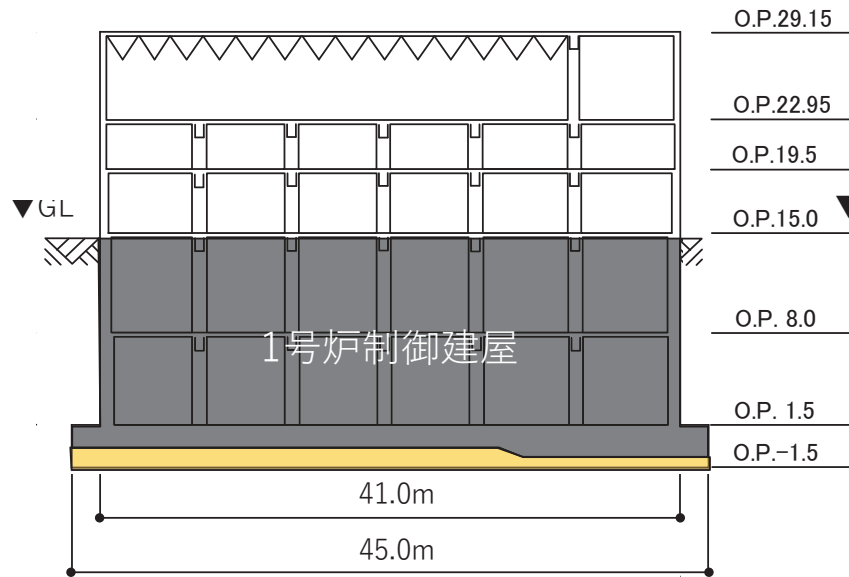
2号炉制御建屋（北面）の地盤の接地状況



2号炉制御建屋（東面）の地盤の接地状況



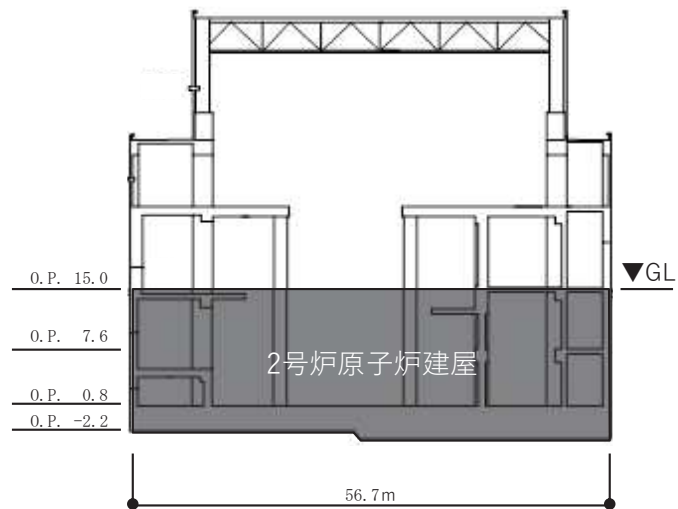
2号炉制御建屋（南面）の地盤の接地状況



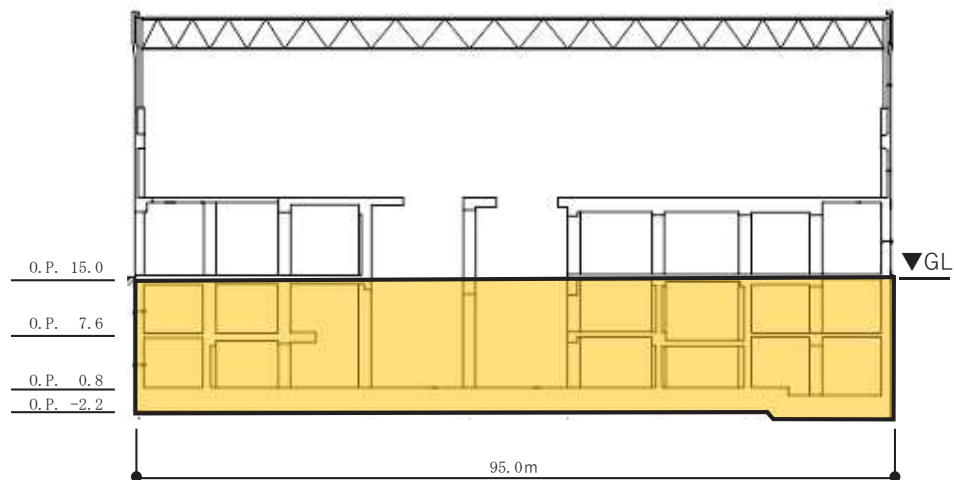
2号炉制御建屋（西面）の地盤の接地状況

女川2号炉タービン建屋

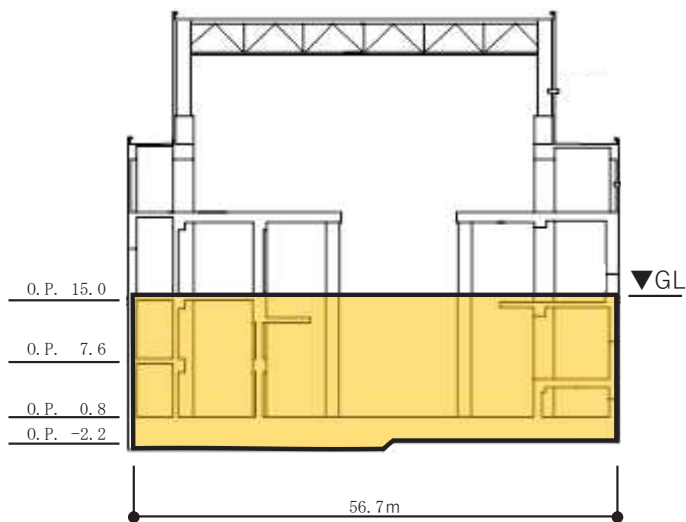
凡例  : 地盤接地部



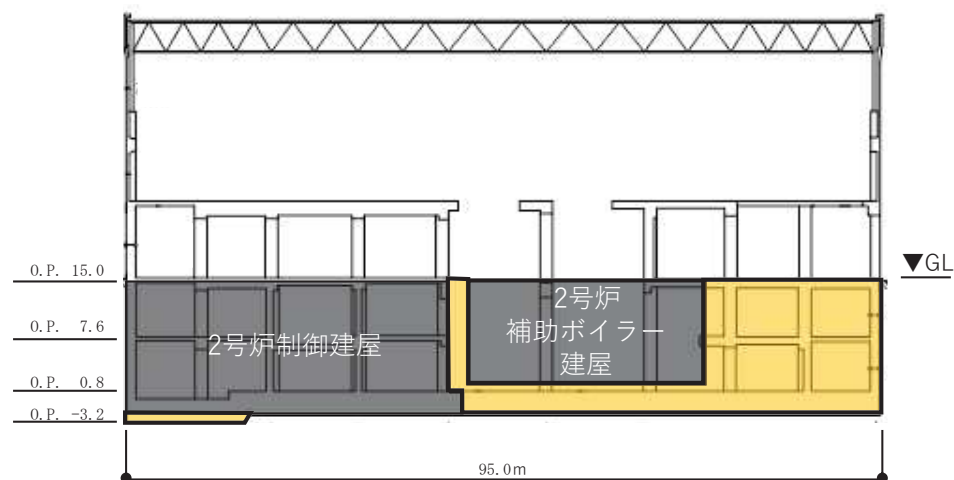
2号炉タービン建屋（北面）の地盤の接地状況



2号炉タービン建屋（東面）の地盤の接地状況



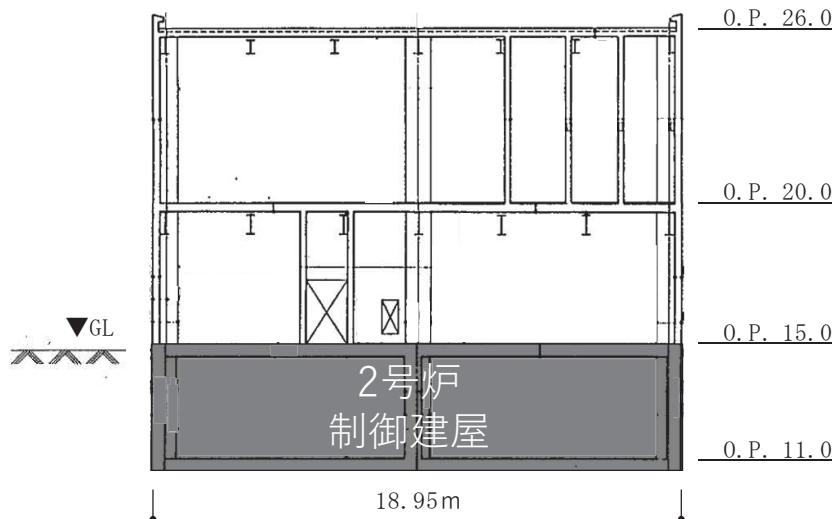
2号炉タービン建屋（南面）の地盤の接地状況



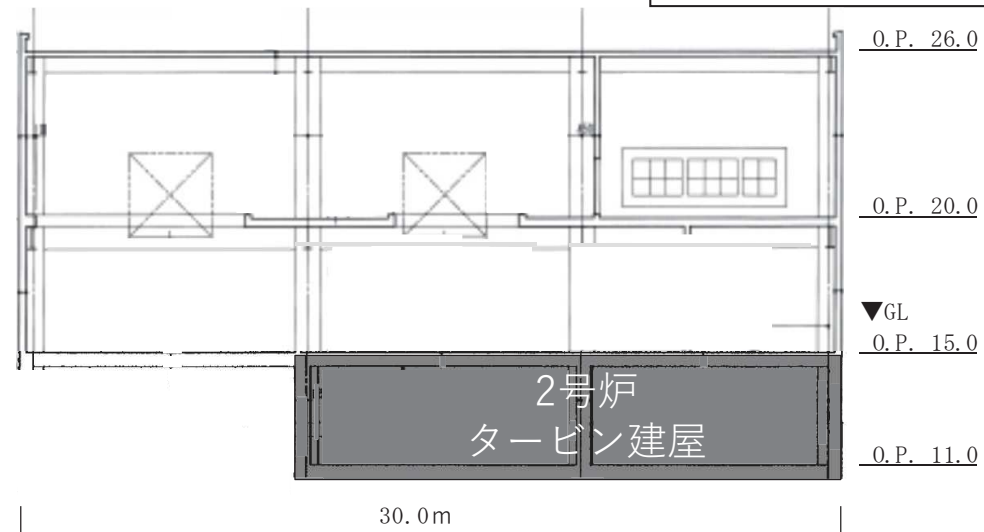
2号炉タービン建屋（西面）の地盤の接地状況

女川2号炉補助ボイラー建屋

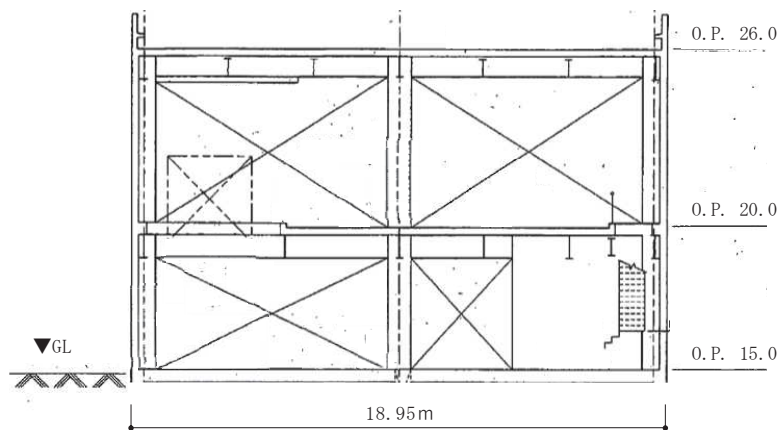
凡例  : 地盤接地部



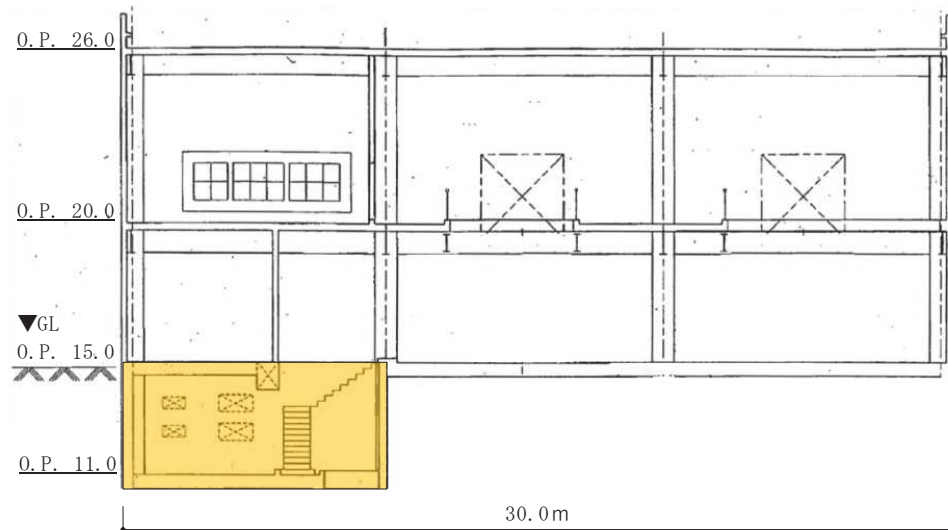
2号炉補助ボイラー建屋（北面）の地盤の接地状況



2号炉補助ボイラー建屋（東面）の地盤の接地状況

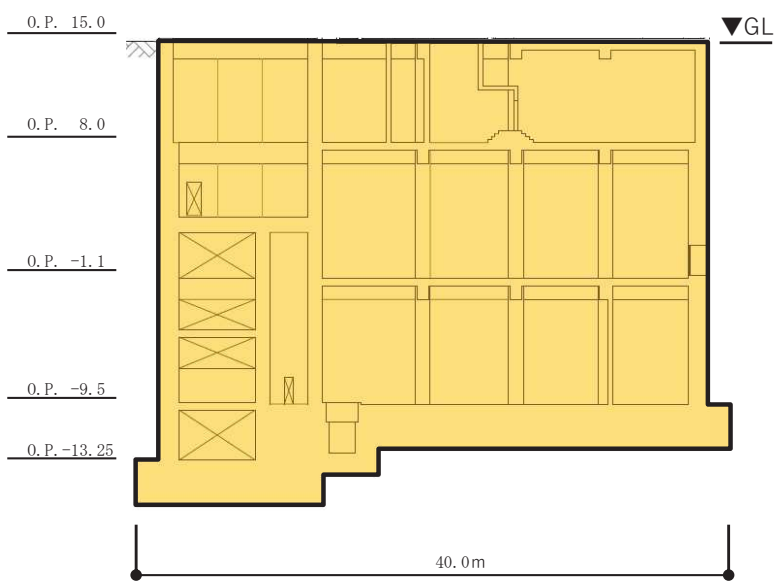


2号炉補助ボイラー建屋（南面）の地盤の接地状況

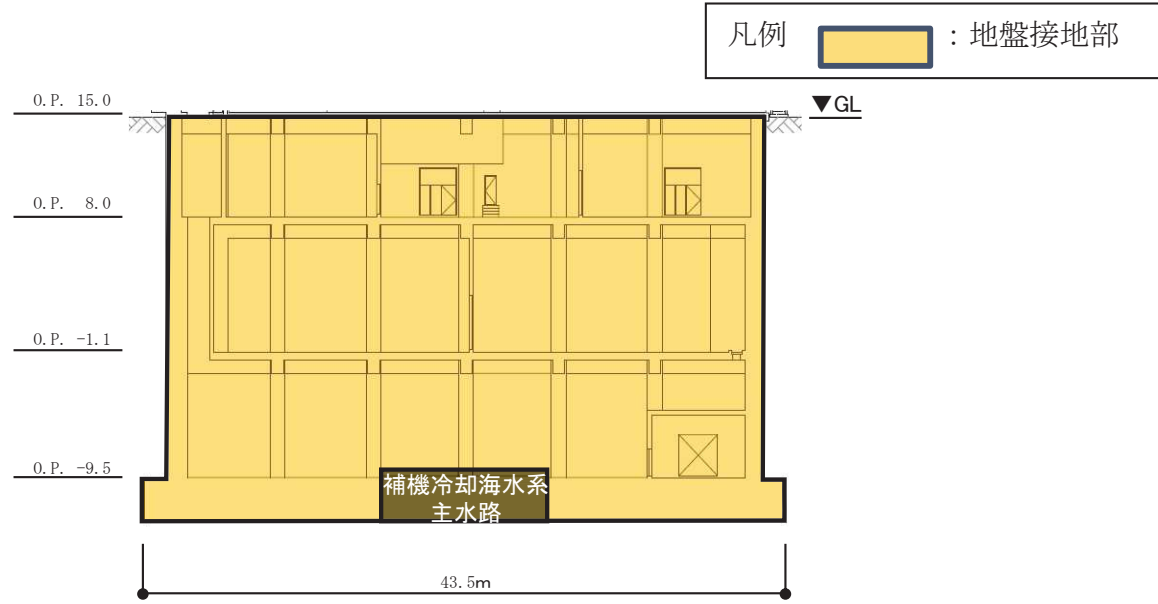


2号炉補助ボイラー建屋（西面）の地盤の接地状況

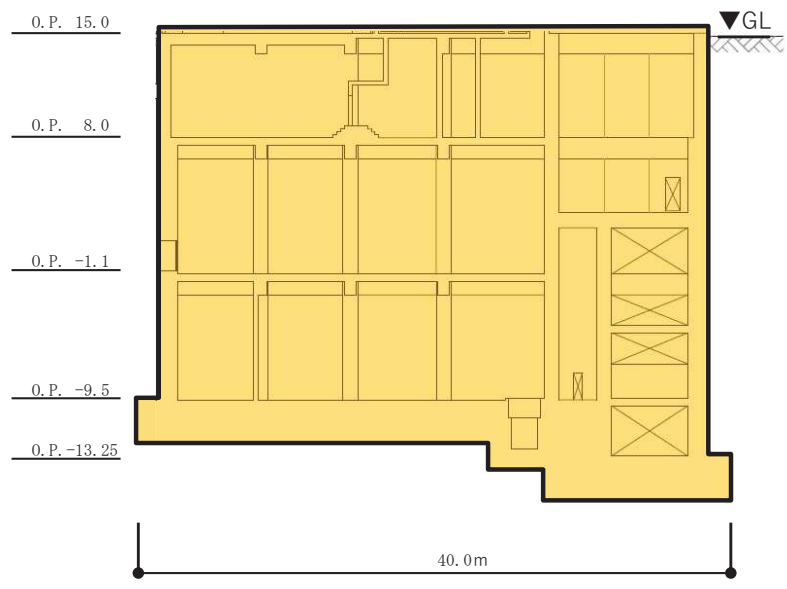
女川3号炉海水熱交換器建屋



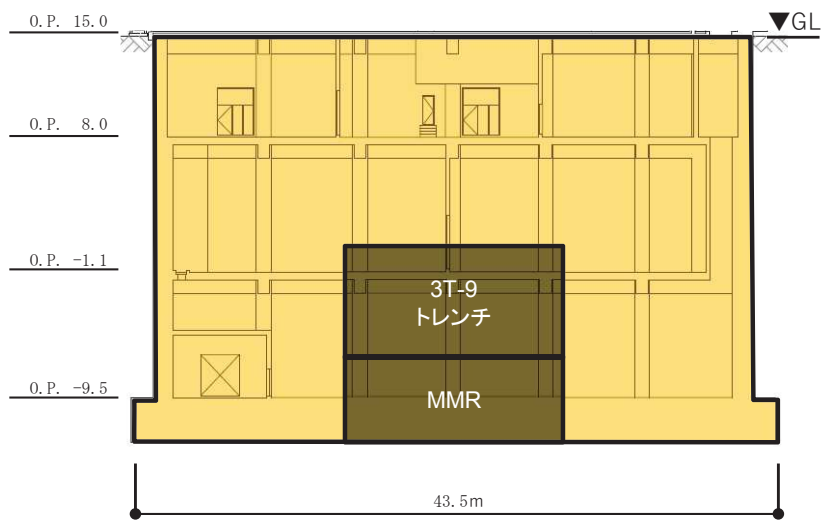
3号炉熱交換器建屋（北面）の地盤の接地状況



3号炉熱交換器建屋（東面）の地盤の接地状況



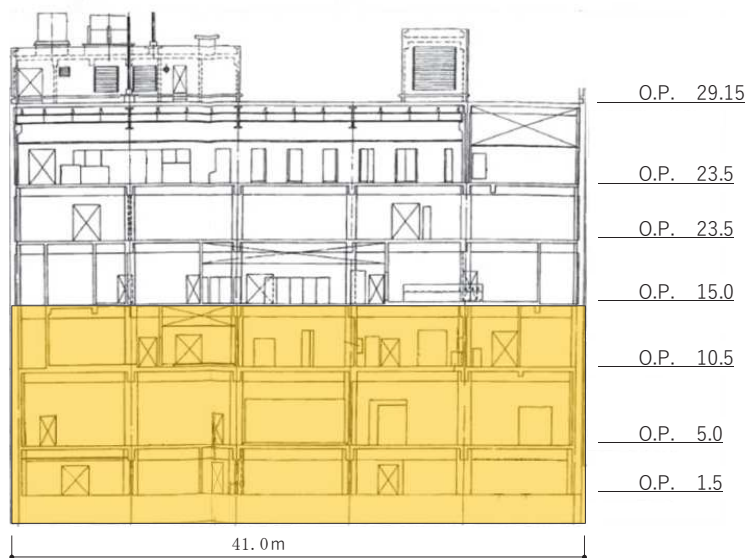
3号炉熱交換器建屋（南面）の地盤の接地状況



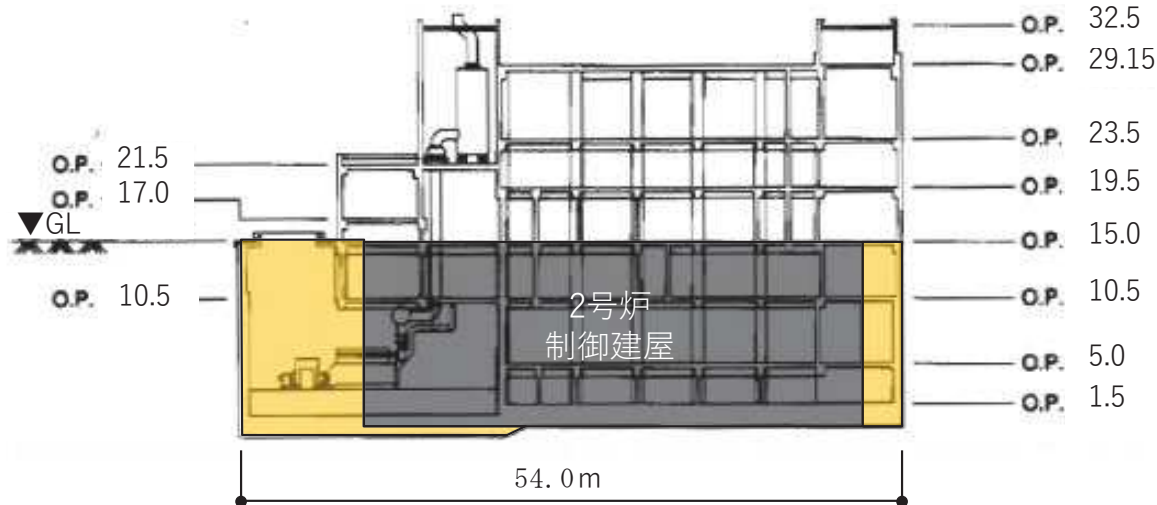
3号炉熱交換器建屋（西面）の地盤の接地状況

女川1号炉制御建屋

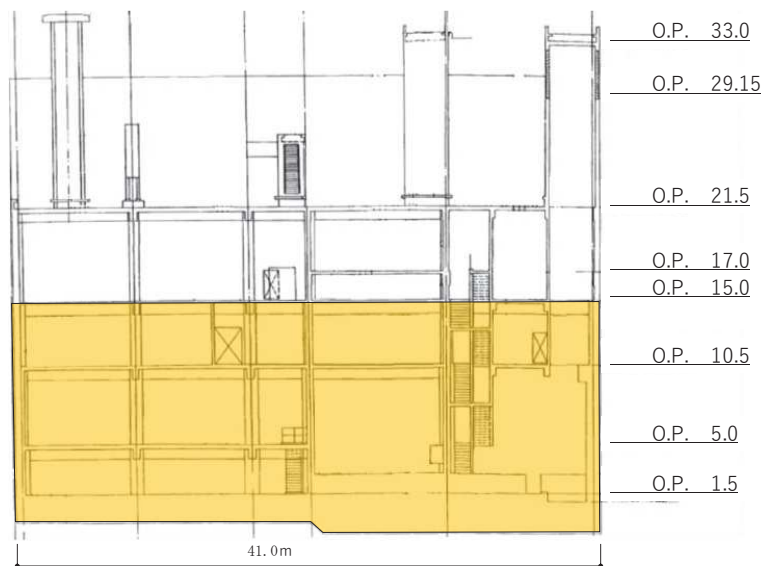
凡例  : 地盤接地部



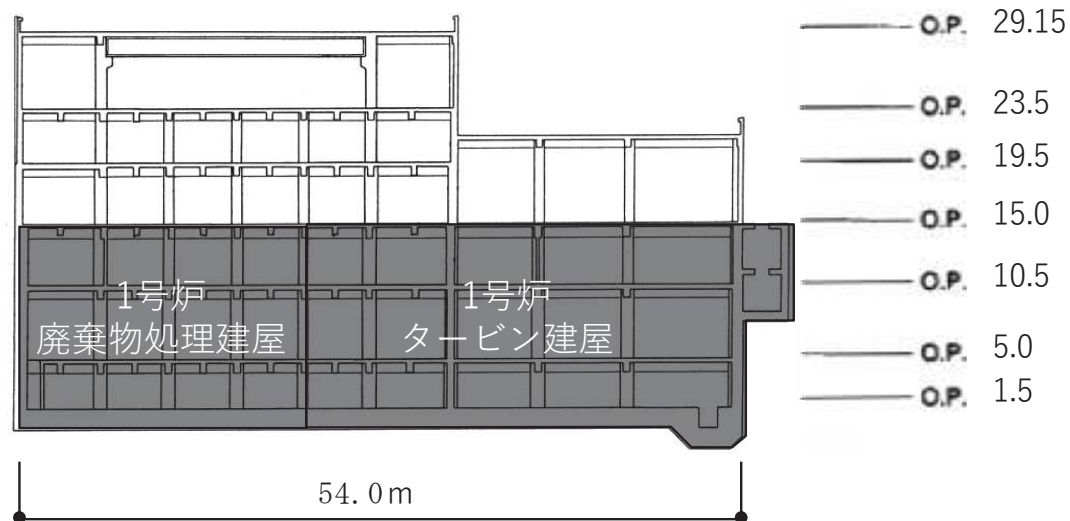
1号炉制御建屋（北面）の地盤の接地状況



1号炉制御建屋（東面）の地盤の接地状況



1号炉制御建屋（南面）の地盤の接地状況



1号炉制御建屋（西面）の地盤の接地状況