

本資料のうち、枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

|                       |                     |
|-----------------------|---------------------|
| 女川原子力発電所第2号機 工事計画審査資料 |                     |
| 資料番号                  | 02-補-E-19-0620-2_改3 |
| 提出年月日                 | 2021年4月5日           |

補足 620-2 【埋め込まれた建屋の周辺地盤による影響について】



- 別紙 1 3.11 地震のはざとり波を用いたシミュレーション解析による  
表層地盤の影響確認(原子炉建屋)
- 別紙 2 自由地盤のはざとり解析用地下構造モデルによる傾向について
- 別紙 3 原子炉建屋の炉心ボーリングの PS 検層及び密度検層結果
- 別紙 4 表層地盤の層境界の設定について
- 別紙 5 敷地における一次元波動論の適用性について
- 別紙 6 表層地盤の層境界に関する検討
- 別紙 7 表層地盤下部の地盤物性の検討
- 別紙 8 線形地盤モデルを用いた表層地盤の非線形化による影響確認
- 別紙 9 表層地盤上部 (O. P. 14. 8m~O. P. 0m) の地盤物性値の設定
- 別紙 10 観測記録を用いた地盤モデルの検証
- 別紙 11 逐次非線形モデルと等価線形モデルによる比較
- 別紙 12 入力地震動評価用地盤モデルの下端深さに関する検討
- 別紙 13 地盤の減衰の設定について
- 別紙 14 表層地盤物性値の違いによる建屋応答への影響について
- 別紙 15 表層地盤による埋込み効果の影響
- 別紙 16 側面地盤ばねの有無が建屋応答に与える影響
- 別紙 17 表層地盤の影響を考慮した入力地震動評価が建屋応答へ与える影響
- 別紙 18 シミュレーション解析による表層地盤の影響確認  
(タービン建屋, 第3号機海水熱交換器建屋)
- 
- 付録 1 地震計配置図
- 付録 2 今回工認に係る建屋と地盤との接地状況
- 付録 3 逐次非線形解析の概要
- 付録 4 入力地震動評価における補正水平力について
- 付録 5 Novak ばねの概要について

#### 4.6 埋込み効果（側面地盤ばね）に関する検討（詳細は別紙15参照）

##### (1) 検討概要

「2.2 建屋周辺地盤の特徴」で述べたように原子炉建屋の実際の施工では側面地盤には掘削土を埋め戻すなどして、拘束効果の少ない施工を実施している。また、3.11地震時には、建屋のごく周辺の地盤において揺すり込みによる沈下等が確認（図4-41）されており、強震動時にはさらに側面地盤による埋込み効果は小さいと考えられる。

一方、J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版では支持岩盤と側面地盤のせん断波速度の違いが大きい場合は、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おり、硬質岩盤における Novak ばねの課題を指摘した論文もある。<sup>※1</sup>

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

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

※1：硬質岩盤における埋込み SR モデルの適用性に関する研究 その1～その3，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1057-1062，1995年8月

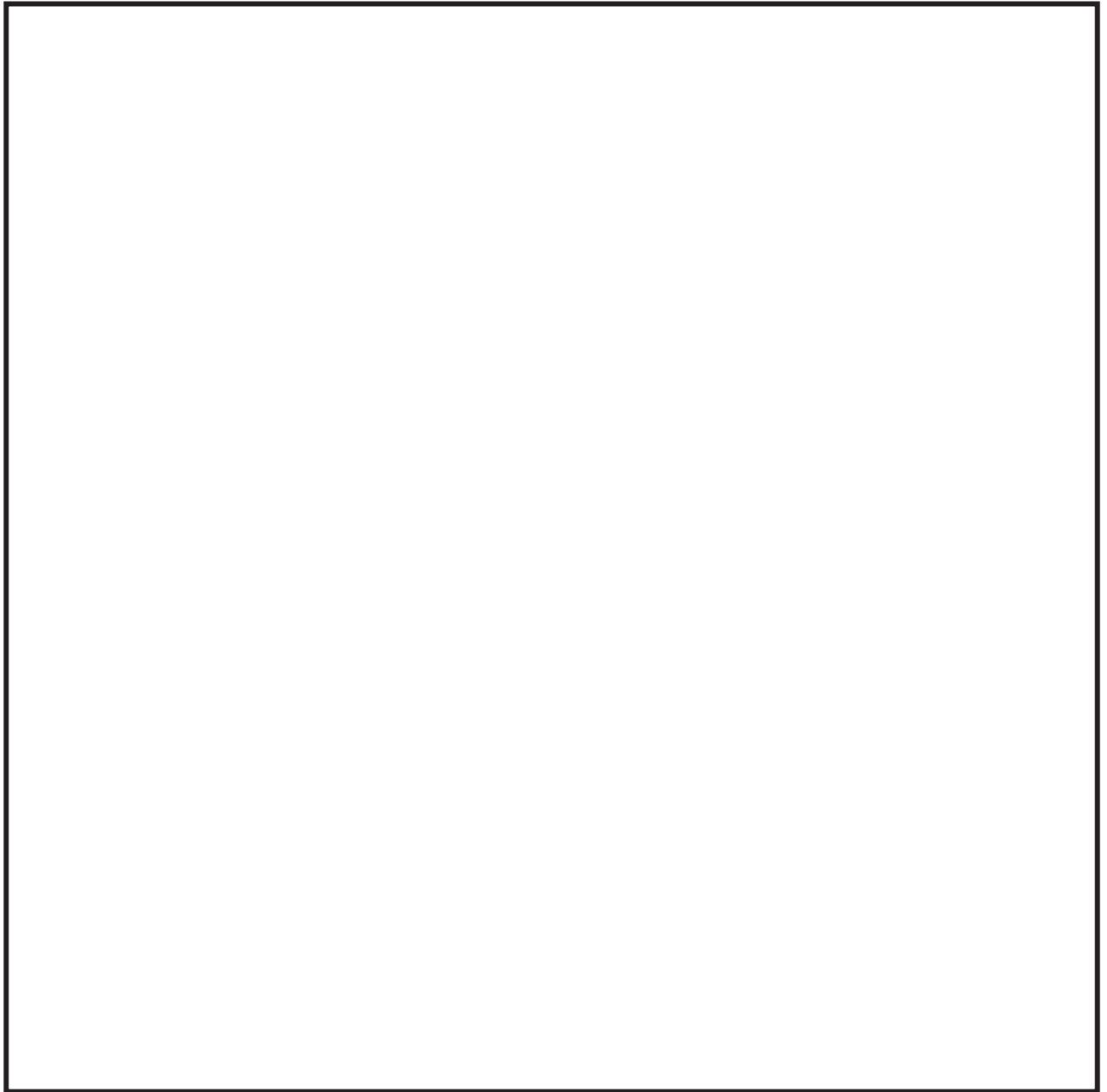


図 4-41 3.11 地震時の建屋周辺の状況

枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

(2) 側面地盤ばねの有無が建屋応答に及ぼす影響検討（原子炉建屋）

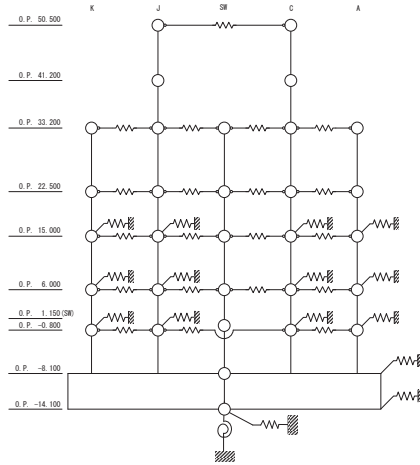
a. 検討方法

側面地盤が原子炉建屋の地震応答解析結果に及ぼす影響を確認するため、側面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。

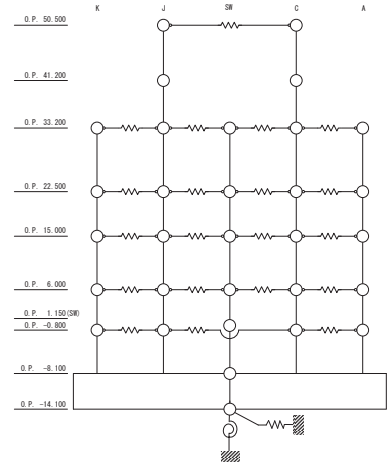
側面地盤モデルは、建屋側面の埋戻し土の断面形状が深さ方向に三角形分布をしていると仮定し、地盤を地中の質点位置ごとに、支配高さで平面的に切り出したモデルを設定し、建屋を面積が等価な円形平面に置換して、側面地盤ばねをNovakの方法（J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版による方法）により算定する。

側面地盤ばねの理論解  $T(\omega)$  の算定に用いる地盤定数は、埋戻し部分の形状を考慮し、表 4-13 に示す側面地盤ばねの設定に用いる埋戻し土及び等価地盤の物性値を用いる。建屋の地震応答解析モデルは、3.11地震シミュレーションモデルをベースとし、側面地盤ばねの有無の2つのモデルを設定する（側面地盤ばねの有無の検討に用いる地震応答解析モデルを図 4-42 に示す）。

解析モデルへの入力地震動は、3.11地震のはざとり波を表 4-2 に示す地盤モデルを用いて算定して建屋基礎版下位置の地震動とし、建屋各部の応答を評価する。



側面地盤ばね考慮



側面地盤ばね非考慮

|                    | 側面地盤ばね (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                 | 原子炉建屋  |                                      |
| 地震動                | 3.11 地震のはざとり波                                  |                                      |
| 入力地震動              | 基礎版底面レベル及び側面地盤ばね位置の地震動を算定し入力 (E+F 入力, 補正水平力考慮) | 基礎版底面レベルの地震動を算定し入力 (E+F 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)      |                                      |

図 4-42 側面地盤ばねの有無の検討に用いる地震応答解析モデル

表 4-13 側面地盤ばね (Novak ばね) の設定に用いる埋戻し土及び等価地盤の物性値

| 建屋質点<br>レベル<br>O.P. (m) | 深さ<br>(m) | 埋戻し土                      |   |  |                 | 等価地盤                      |   |  |                 |                      |
|-------------------------|-----------|---------------------------|---|--|-----------------|---------------------------|---|--|-----------------|----------------------|
|                         |           | せん断波<br>速度 $V_s$<br>(m/s) | せん断<br>弾性係数 $G$<br>( $\times 10^4$<br>$\text{kN/m}^2$ ) | 単位体積<br>重量 $\gamma$<br>( $\text{kN/m}^3$ ) | ポアソン<br>比 $\nu$ | せん断波<br>速度 $V_s$<br>(m/s) | せん断<br>弾性係数 $G$<br>( $\times 10^5$<br>$\text{kN/m}^2$ ) | 単位体積<br>重量 $\gamma$<br>( $\text{kN/m}^3$ ) | ポアソン<br>比 $\nu$ | 減衰定数<br>$h_e$<br>(%) |
| 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                    |

注：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

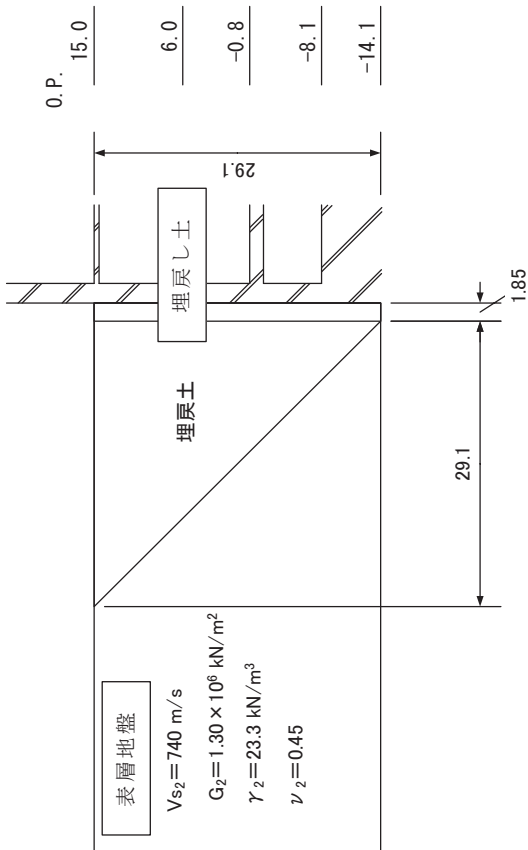
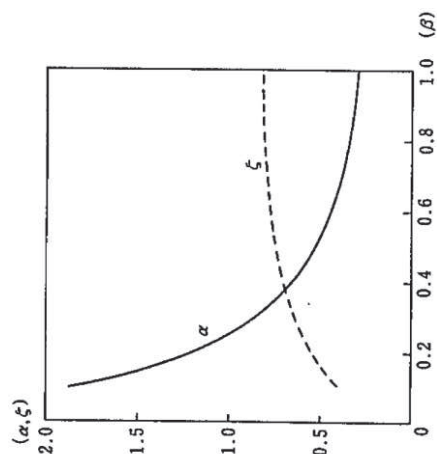
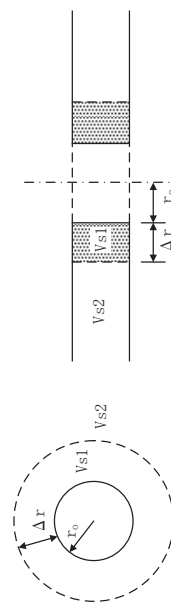
$$Y = (1 - \beta) \cdot \exp(-\alpha X^\zeta) + \beta$$

$$Y = V_{se} / V_{s2}$$

$$\beta = V_{s1} / V_{s2}$$

$$X = \Delta r / r_0$$

$\alpha, \zeta$  : 右図参照



埋戻し土の形状 (単位 : m)



## b. 検討結果

検討結果として 3.11 地震のはぎとり波を用いた側面地盤ばねの有無によるシミュレーション解析結果の比較を図 4-43 に示す。どちらの結果も観測記録に比べて大きな解析結果となっているが、側面地盤ばねがない場合の方が観測記録との適合性が良い。

女川原子力発電所第 2 号機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。

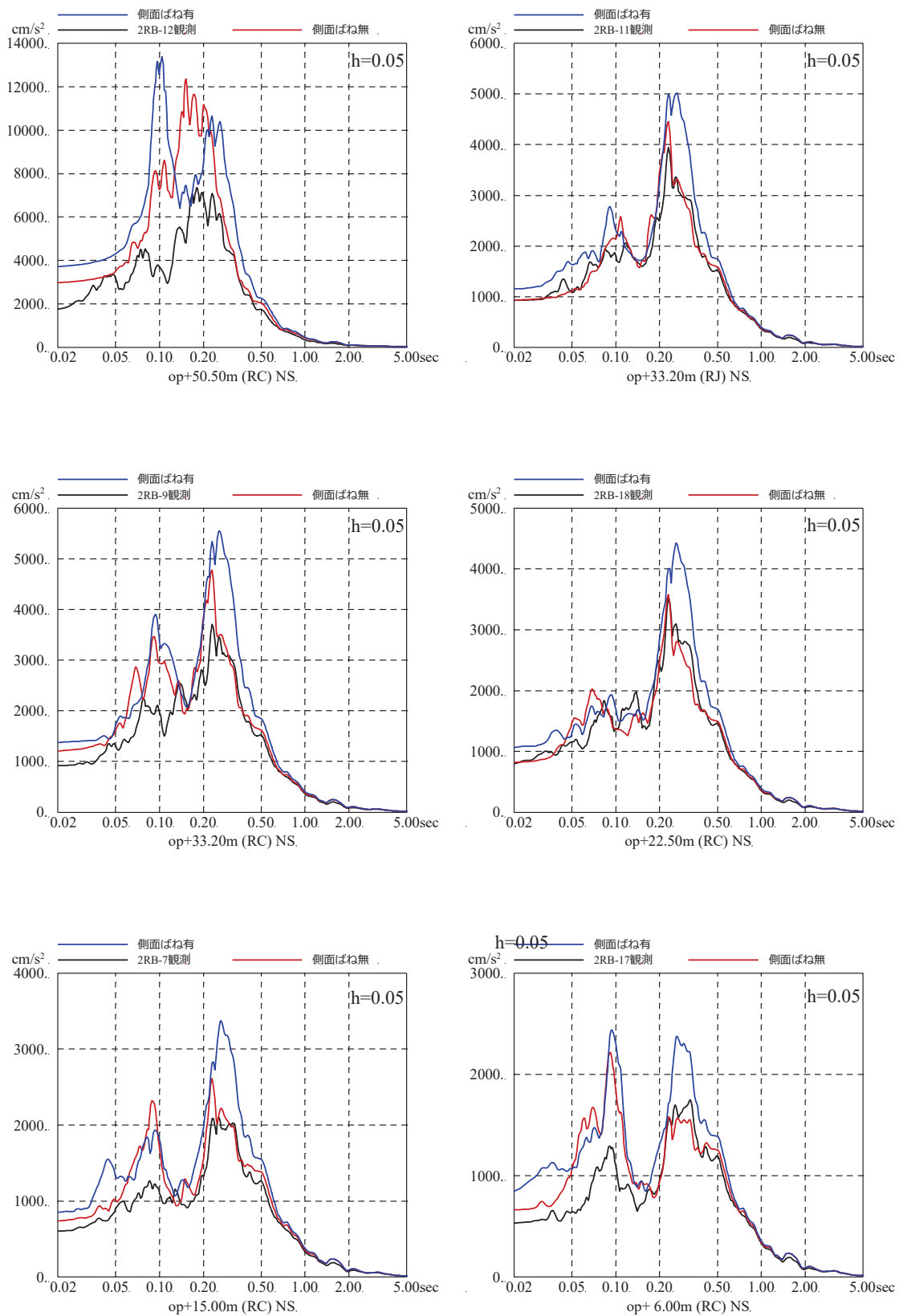


図 4-43 3.11 地震のはぎとり波を用いた側面地盤ばねの有無による  
シミュレーション解析結果の比較  
(原子炉建屋, NS 方向)

※地震計位置は、付録 1 参照

(3) 表層地盤が建屋応答に及ぼす影響検討（第3号機海水熱交換器建屋）

a. 検討方法

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

- ① 側面地盤ばね（Novak ばね）を考慮したモデル（はぎとり波入力）
- ② ①のモデルに対して、側面地盤ばね（Novak ばね）を考慮しないモデル（はぎとり波入力）
- ③ 建屋減衰を変動させたモデル（基礎版上観測記録入力）

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

図4-44に第3号機海水熱交換器建屋の概要を示す。解析条件を表4-14に、側面地盤ばね（Novak ばね）を考慮したケースの地震応答解析モデルを図4-45に、地盤調査結果に基づき設定した初期地盤モデルの地盤物性値を表4-15に示す。

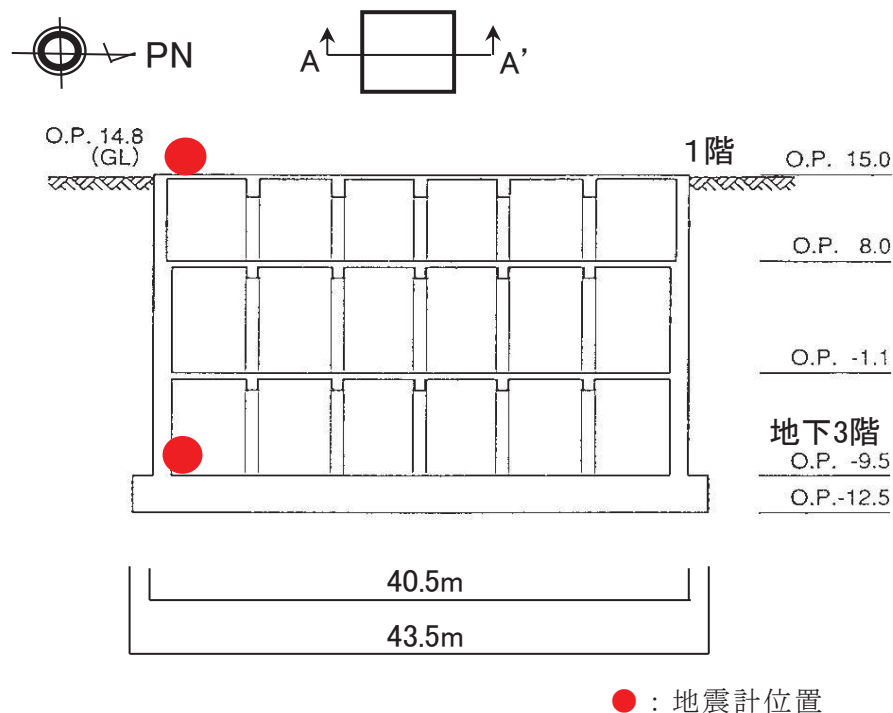


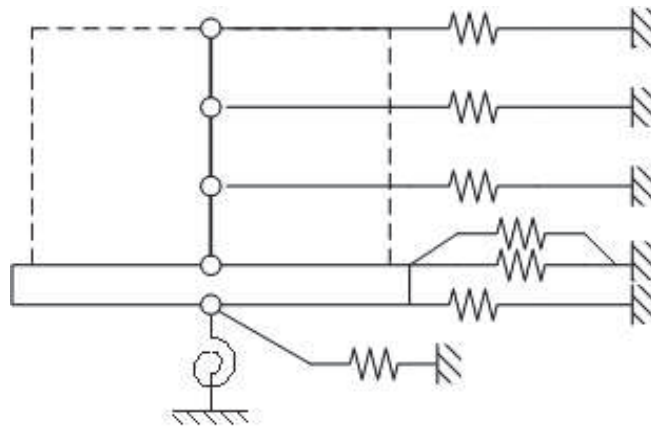
図4-44 第3号機海水熱交換器建屋の概要（A-A'）

表 4-14 解析条件

(側面地盤ばね有無の影響検討 [第3号機海水熱交換器建屋])

|                       |   |
|-----------------------|---|
|                       | ① 側面地盤ばね (Novak ばね) を考慮したケース<br>② 側面地盤ばね (Novak ばね) を考慮しないケース                                 |
| 建屋                    | 第3号機海水熱交換器建屋  |
| 地震動                   | 3.11 地震のはぎとり波   |
| 入力地震動                 | ① 基礎版底面レベル及び側面地盤ばね位置の地震動を算定し入力 (E+F 入力, 補正水平力を考慮)<br>② 基礎版底面レベル位置の地震動を算定し入力 (E+F 入力, 補正水平力考慮) |
| 建屋モデル<br>(建屋剛性, 建屋減衰) | 既工認モデル<br>(設計剛性, 建屋減衰 5%)   |
| 建屋モデル<br>(側面地盤ばね)     | ① 有り<br>② なし  |
| 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<br>(表層地盤: 盛土物性値)  |

|                       |  |
|-----------------------|--|
|                       | ③ 建屋減衰を変動させたケース                          |
| 建屋                    | 第3号機海水熱交換器建屋                             |
| 地震動                   | 3.11 地震の基礎版上観測記録                         |
| 入力地震動                 | 基礎版底面レベルの地震動を逆算し入力 (2E 入力)               |
| 建屋モデル<br>(建屋剛性, 建屋減衰) | 既工認モデルをベースとして建屋減衰を変動<br>(設計剛性, 建屋減衰 20%) |
| 建屋モデル<br>(側面地盤ばね)     | 無し                                       |
| 地盤モデル                 | —  |



側面地盤ばね考慮

図 4-45 側面地盤ばね (Novak ばね) を考慮したケースの地震応答解析モデル

表 4-15 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<br>O. P. (m) | 単位体積重量<br>$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) | せん断波速度<br>$V_s$ (m/s) | 減衰定数 <sup>※2</sup><br>h (%) |
|------|--------------------|---|-----------------------|-----------------------------|
| 表層地盤 | 14.80              | 18.6                                    | ※1                    | 3 <sup>※3</sup>             |
| 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 0. P. 14.8m~0. P. -12.5m は、上載圧依存を考慮してせん断波速度と相関のある初期剛性 $G_0$ を設定する。また、ひずみ依存による非線形特性を考慮する。

※2 レーリー減衰

※3 ひずみ依存による非線形特性を考慮する。

## b. 検討結果

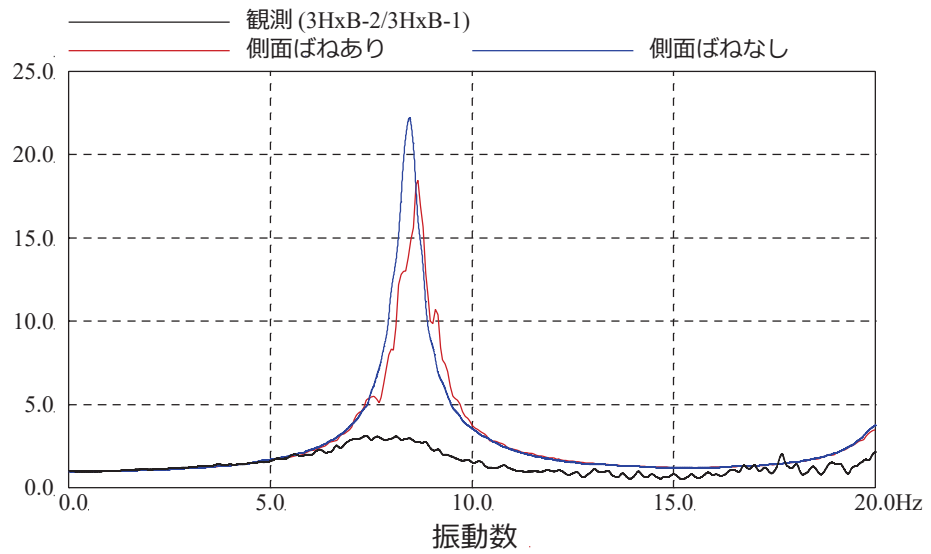
3種類の地震応答解析モデルによる検討結果は以下のとおり。

- ① 側面地盤ばね（Novak ばね）を考慮する場合と考慮しない場合のモデルによる検討結果として、建屋基礎版（地下3階）に対する建屋上部（地上1階）の伝達関数、及び建屋上部（地上1階）の観測記録と解析による応答スペクトルとの比較を図4-46に示す。

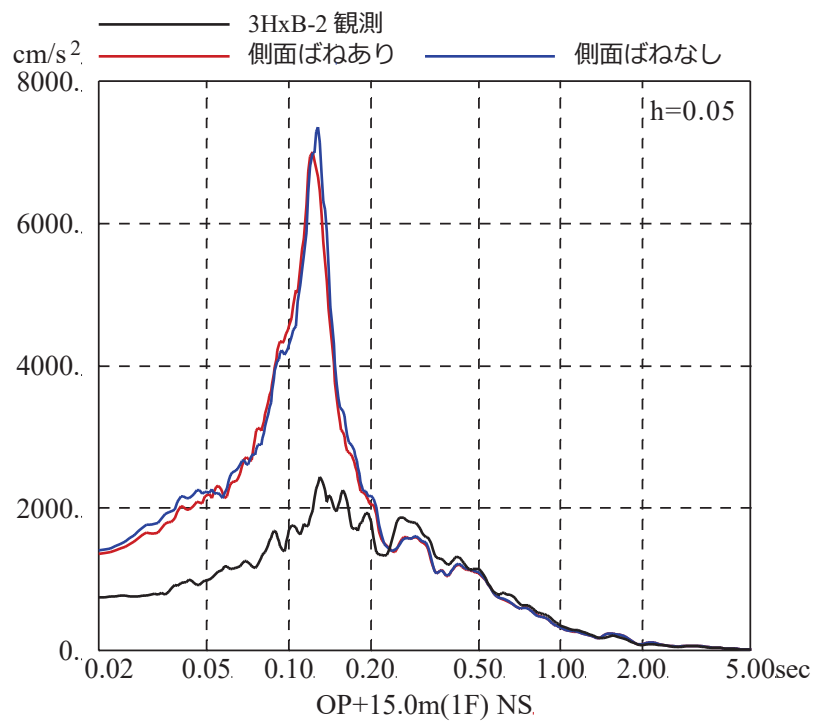
側面地盤ばね（Novak ばね）を考慮しない場合（建屋減衰5%）の解析結果は観測記録に対しかなり過大であり、埋込みの効果が確認される。また、側面地盤ばね（Novak ばね）を考慮する場合（建屋減衰5%）も観測に比べ過大になっている。これは、建屋固有振動数（約8Hz）と表層地盤の卓越振動数（約2Hz）の乖離が大きく、Novak ばねから入力される地震動による影響が小さいためと考えられる。

- ② 建屋減衰を変動させたモデルによる検討結果として、建屋基礎版（地下3階）に対する建屋上部（1階）の伝達関数、及び建屋上部（1階）の観測記録と解析による応答スペクトルとの比較を図4-47に示す。この検討では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を同定した。その結果、建屋減衰を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（一般的な建屋減衰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。一方で、建屋の固有周期自体はあまりその影響を受けていない。

以上の検討から、比較的小規模で建屋全体が埋め込まれている第3号機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、考慮しないモデルともに過大な応答を与えること、一方、観測記録からは埋め込まれていることによる建屋応答低減効果が認められることを確認した。

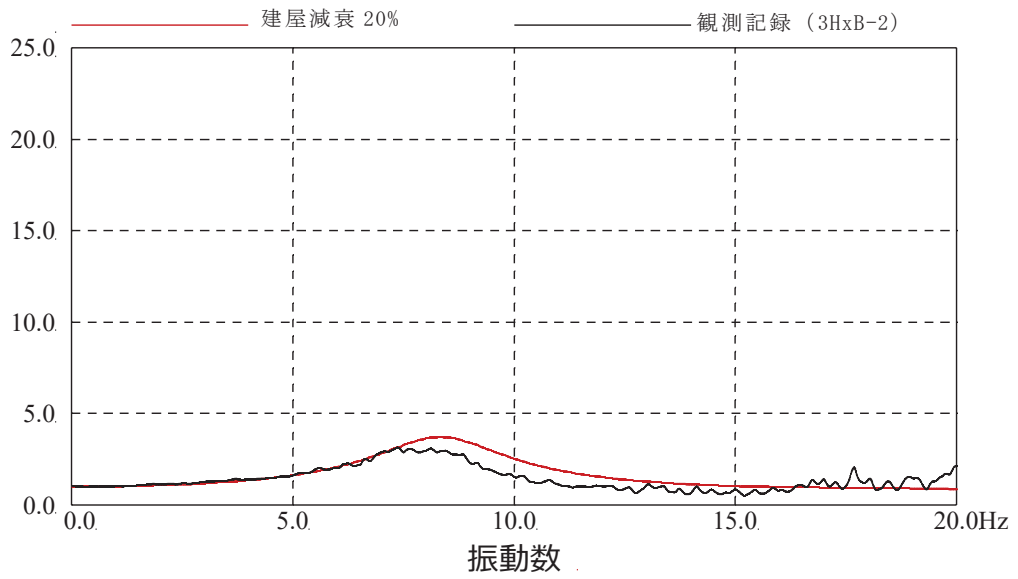


伝達関数の比較（地上1階／地下3階，NS方向）

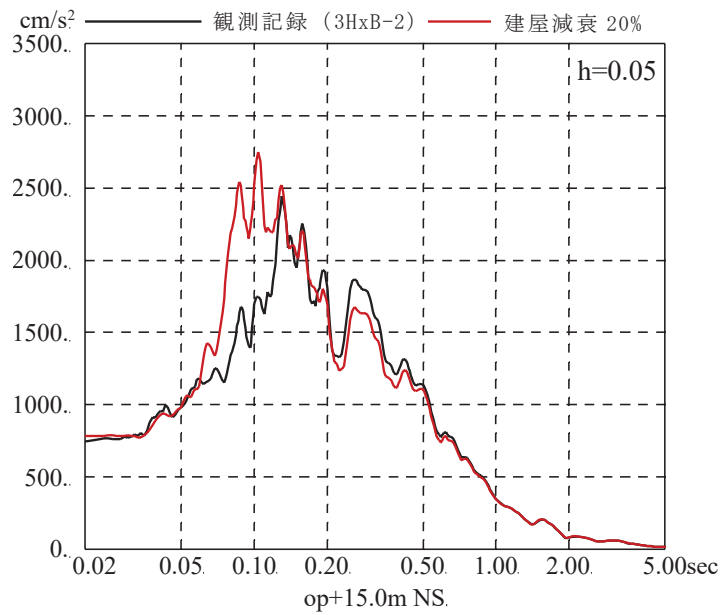


応答スペクトルの比較（地上1階，NS方向）

図 4-46 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  
（第3号機海水熱交換器建屋）



伝達関数の比較（地上 1 階／地下 3 階，NS 方向）



応答スペクトルの比較（地上 1 階，NS 方向）

図 4-47 3.11 地震の基礎版上観測記録を用いた建屋減衰 20%とした場合の  
シミュレーション解析結果の比較  
（第 3 号機海水熱交換器建屋）



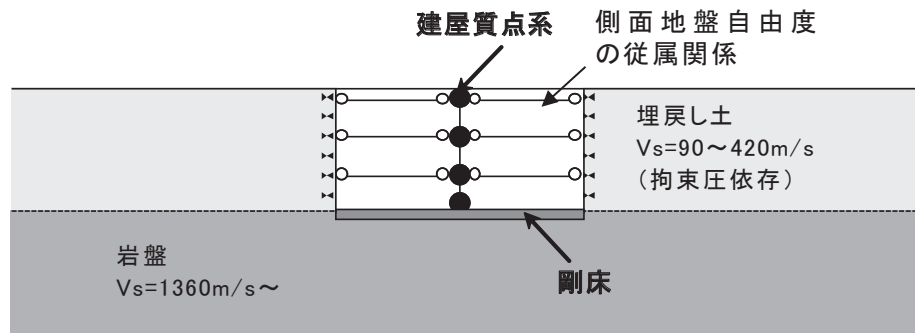
(4) 第3号機海水熱交換器建屋の3次元地盤 FEM モデルによる検討

第3号機海水熱交換器建屋においては、前章の検討により側面地盤ばね（Novak ばね）を考慮したモデルは過大な応答を与える一方で、観測記録からは埋め込まれていることによる建屋応答低減効果が顕著に認められたことから、建屋周辺地盤を3次元 FEM でモデル化し周辺地盤の影響を詳細に検討した。

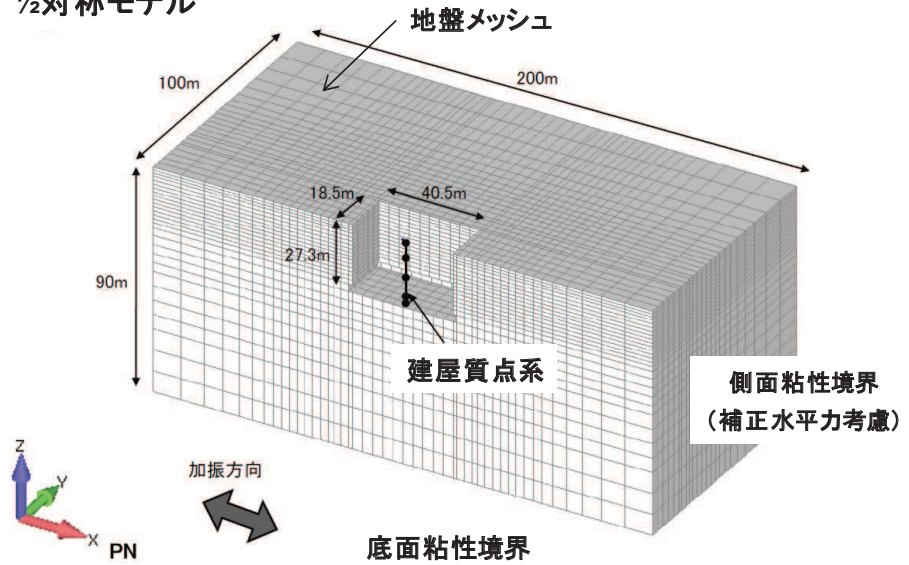
a. 3次元地盤 FEM モデルの概要と検討方法

検討に用いた3次元地盤 FEM モデルの概要を図4-48に示す。

入力地震動は3.11地震のNS方向とし、建屋周辺地盤応答の空間分布について基礎版下基盤層及び地表面における建屋周辺地盤応答を評価する。



1/2対称モデル



|     |  |
|-----|--|
| 地盤  | 線形又は非線形(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<br>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                  |

図 4-48 3次元地盤 FEM モデルの概要

b. 検討結果

地上 1 階の観測記録と解析結果の加速度応答スペクトルの比較を図 4-49 に示す。

基礎版底面と同レベルの岩盤面の加速度応答スペクトル，地表面の加速度応答スペクトルを図 4-50，図 4-51 に，最大加速度分布，最大速度分布，最大ひずみ分布を図 4-52~図 4-54 に示す。

3次元地盤 FEM モデルによるシミュレーション解析では地上 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。

基礎版底面と同レベルの岩盤面の加速度応答スペクトルは、図 4-50 から建屋近傍位置～建屋遠方位置まで自由地盤の応答スペクトルとほぼ同様となっており、位置の違いによる差は小さいことがわかる。

地表面の加速度応答スペクトルは、図 4-51 から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。

図 4-52 の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。図 4-53 の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。図 4-54 の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。

以上から、建屋周辺地盤の応答分布には偏りが生じており、建屋近傍では建屋影響があり、離れるに従い自由地盤の応答に近づく傾向が確認された。Novak ばねによる埋込み効果が実際の応答を現しにくいのは、Novak ばねでは遠方（自由地盤相当）の地盤性状をモデル化しており、建屋近傍の実際の地盤応答が建屋により抑えられていることをうまく再現できないことから、建屋に入力する地震動を大きく見積もる場合があること等が要因の一つと考えられる。

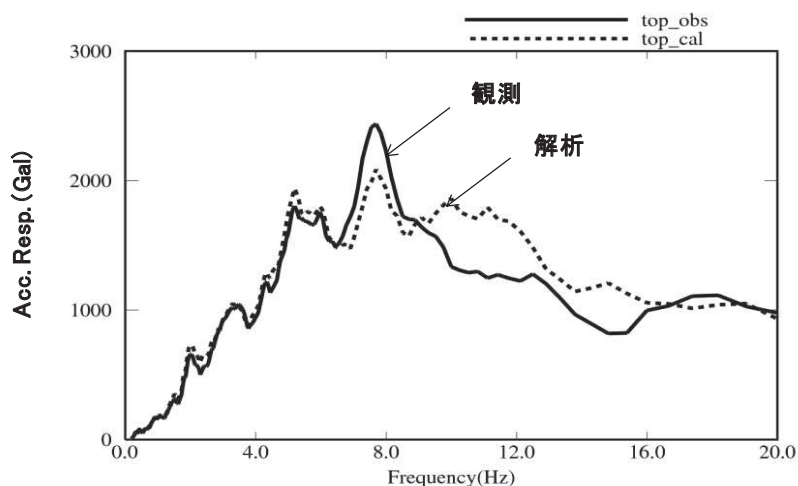


図 4-49 加速度応答スペクトル (h=5%)  
(建屋上部 (地上 1 階), NS 方向)

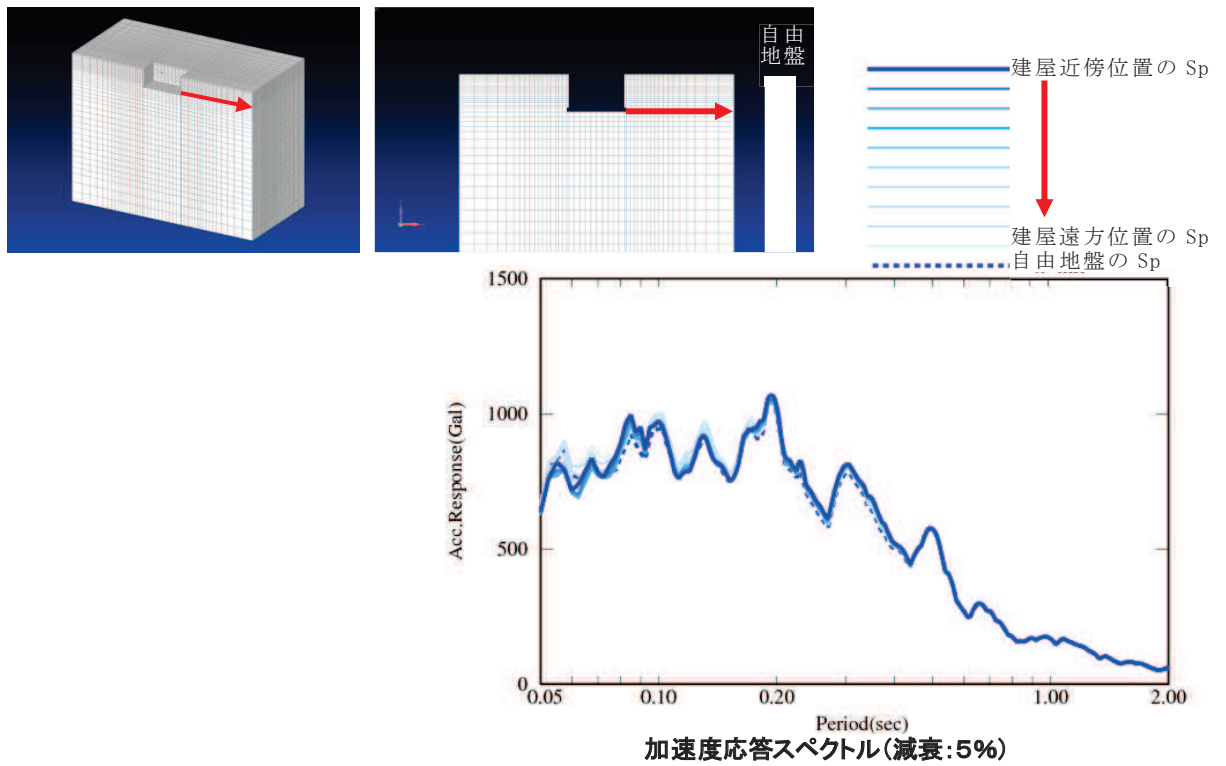


図 4-50 加速度応答スペクトル（基礎版底面と同レベルの岩盤面）

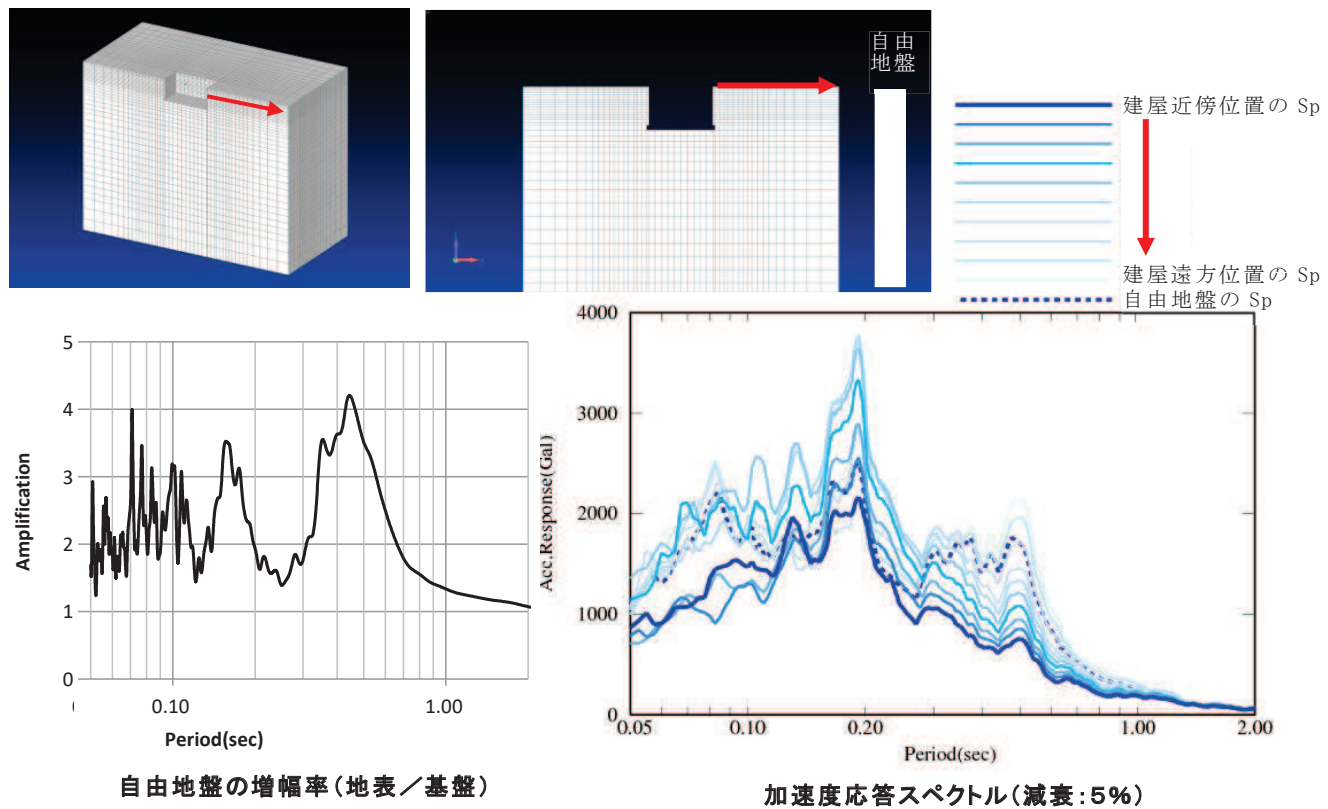


図 4-51 加速度応答スペクトル（地表面）

自由地盤

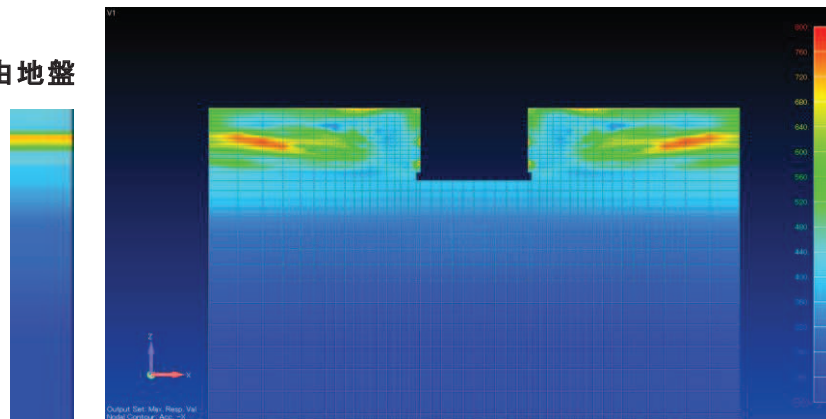


図 4-52 最大加速度分布

自由地盤

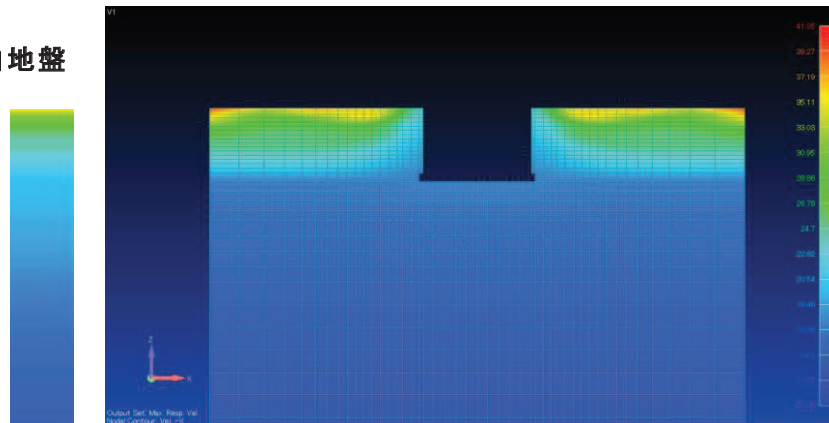


図 4-53 最大速度分布

自由地盤

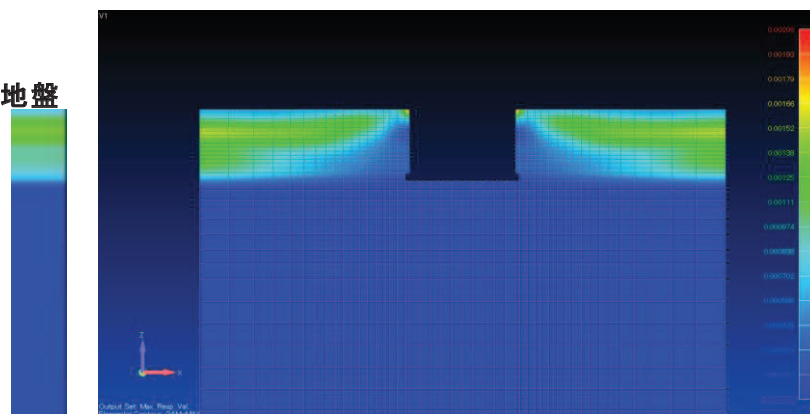


図 4-54 最大ひずみ分布

(5) 基準地震動 S s 時の表層地盤の非線形化による埋込み効果の影響

a. 検討方法

基準地震動 S s 時の表層地盤上部の非線形化の状況を推定することを目的として、基準地震動 S s 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。

b. 検討結果

地盤の最大応答ひずみと表層地盤の卓越振動数の関係を図 4-55 に示す。

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 地震では約 0.3~0.7）も考慮すると、表層地盤のせん断波速度は  $V_s=100\sim 250\text{m/s}$  程度以下と評価され、基準地震動 S s では更に低下することになる。

従って、表層地盤の非線形化が大きくなることで、埋込み効果が建屋応答に与える影響は 3.11 地震時よりも基準地震動 S s 時は小さいと考えられる。

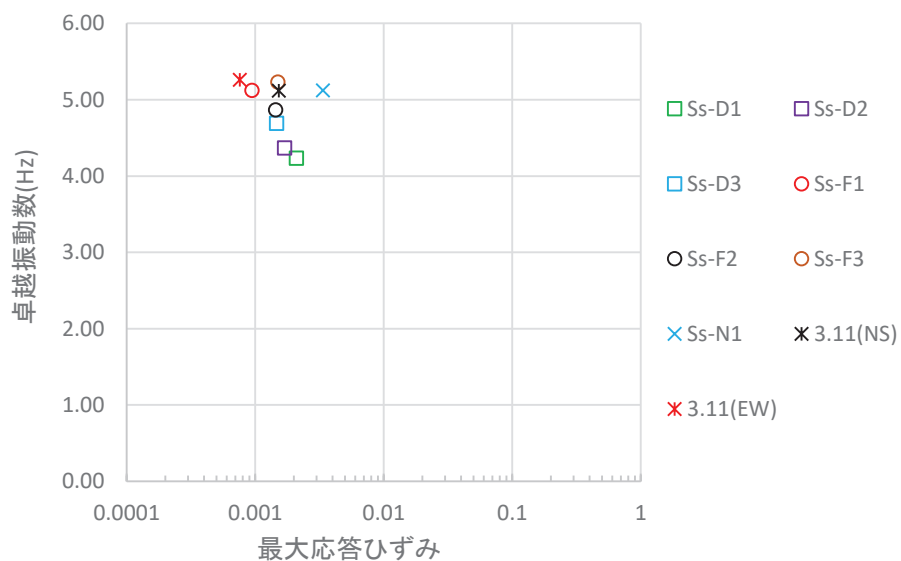


図 4-55 地盤の最大応答ひずみと表層地盤の卓越振動数の関係

(6) 埋込み効果が建屋応答に与える影響（詳細は別紙 16 参照）

a. 検討概要

原子炉建屋の今回工認では、側面地盤ばね（Novak ばね）はモデル化しない方針である。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できないこと、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、J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版では、支持地盤と側面地盤のせん断波速度  $V_s$  の違いが大きい場合、Novak ばねの適用性について留意することとされており、硬質岩盤における Novak ばねの課題を指摘した論文もある。

今回工認では E+F 入力を採用するため、埋込み効果に関するトータル的な保守性の確認が必要であり、観測記録を用いた検討を行う。

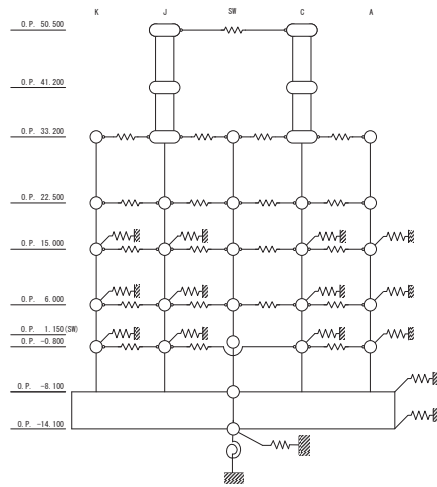
b. 検討方法

検討は、側面地盤ばねを考慮したモデルと考慮しないモデルを用いて基準地震動  $S_s - D_2$  による地震応答解析を行う。

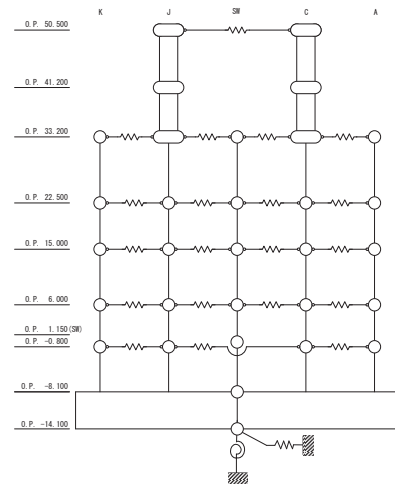
側面地盤は、前節にて設定した地盤物性値を用いて入力地震動を算定した際の収束物性値（地盤各層のせん断剛性低下率の最小値）を用いて、地盤を地中の質点位置ごとに、支配高さで平面的に切り出したモデルを設定し、建屋を面積が等価な円形平面に置換して、側面地盤ばねを Novak の方法（J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版による方法）により算定する。また、同レベルの質点は床ばねで接続されているので、各質点が支配する外周長を全周長で除した比率をばね値に乘じ、各質点に振り分ける。側面地盤ばねの有無の検討に用いる地震応答解析モデルを図 4-56 に、側面地盤ばねの設定に用いる等価地盤の物性値を表 4-16 に示す。

さらに、固有モードの違いや側面地盤ばね（Novak ばね）から入力される地震動の傾向を確認し、応答結果の差異について分析する。





側面地盤有



側面地盤無

|                    | 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                 | 原子炉建屋                                 |                                      |
| 地震動                | 基準地震動 $S_s - D_2$                     |                                      |
| 入力地震動*             | 基礎版底面レベル及び側面地盤ばね位置の地震動を算定し入力 (E+F 入力) | 基礎版底面レベルの地震動を算定し入力 (E+F 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, 耐震補強考慮, 建屋減衰 5%)   |                                      |
| 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              | 入力地震動評価用地盤モデル (表層地盤: 2 層モデル)          |                                      |

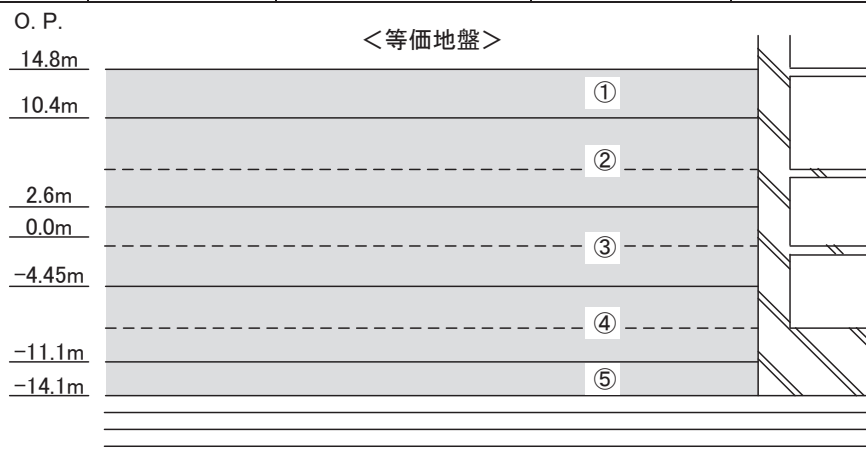
注記\*: 地震応答解析モデルへの入力地震動は、まず、解放基盤表面以深の地盤を一次元地盤としてモデル化し、解析コード「SHAKE」を用いて一次元波動論に基づく評価により O.P. -200m の入射波を算定する。次に、解析コード「mflow」を用いて、「SHAKE」により算定した O.P. -200m の入射波を、表層地盤の非線形性を考慮した一次元地盤モデルに入力して逐次非線形解析を行い、建屋基礎底面及び側面地盤ばね位置での地盤の応答を評価して入力地震動とする。

図 4-56 側面地盤ばねの有無の検討に用いる地震応答解析モデル



表 4-16 側面地盤ばねの設定に用いる等価地盤の物性値

| 建屋<br>質点<br>レベル<br>O.P. (m) | 層 No. | 等価地盤                         |   |  |                    |                      |
|-----------------------------|-------|------------------------------|---|--|--------------------|----------------------|
|                             |       | せん断波<br>速度<br>$V_s$<br>(m/s) | せん断弾性係数<br>$G$<br>( $\times 10^4$ kN/m <sup>2</sup> ) | 単位体積<br>重量<br>$\gamma$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | ポアソン<br>比<br>$\nu$ | 減衰定数<br>$h_e$<br>(%) |
| 15.0                        | ①     | 157                          | 4.69  | 18.6   | 0.45               | 3                    |
| 6.0                         | ②     | 204                          | 7.94  | 18.6   | 0.45               | 3                    |
| -0.8                        | ③     | 755                          | 12.6  | 21.6   | 0.45               | 3                    |
| -8.1                        | ④     | 900                          | 193   | 23.3   | 0.45               | 3                    |
| -14.1                       | ⑤     | 900                          | 193   | 23.3   | 0.45               | 3                    |



埋戻し土の形状 (単位 : m)

### c. 検討結果

各モデルの固有値解析結果を表 4-17 に、固有モードの比較を図 4-57～図 4-61 に、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 波) の算定結果を図 4-62 に、側面地盤ばねの有無をパラメータとした地震応答解析結果の加速度応答スペクトルの比較を図 4-63 に示す。

表 4-17 及び図 4-57～図 4-61 より、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ことが確認できる。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。

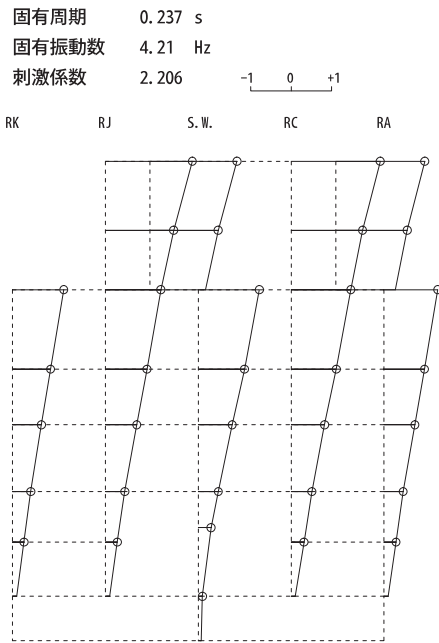
図 4-62 より、側面地盤の揺れは最上層で  $2000\text{cm/s}^2$  を超える大きさになっており、これは建屋の同一レベルの揺れに比べ 2 倍程度の大きさとなる。また、表層地盤の 1 次、2 次モードに相当する周期帯で特に大きい傾向にある。

図 4-63 より、地震応答解析の結果では、側面地盤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ていることが確認できる。

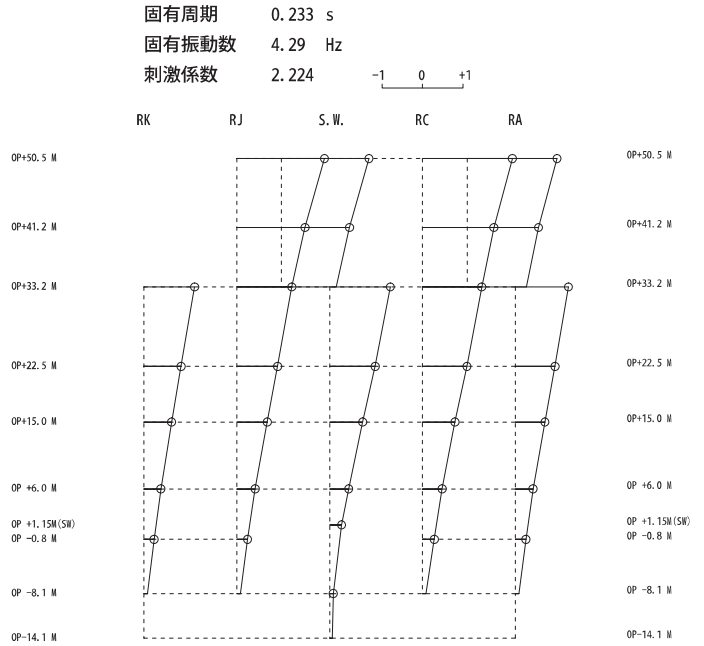
このことから、支持地盤と側面地盤のせん断波速度  $V_s$  の違いが大きい場合、側面地盤からの入力が大きくなるため、側面地盤ばねの精度によって誤差の大きい結果を与えるおそれがあることから、原子炉建屋の応答結果も、側面からの入力の影響で差異が生じていると考えられる。

表 4-17 固有値解析結果 (NS 方向)

| 次数 | 側面地盤ばねなし    |               |       | 側面地盤ばねモデル (S <sub>s</sub> -D <sub>2</sub> ) |               |       |
|----|-------------|---------------|-------|---|---------------|-------|
|    | 固有周期<br>(s) | 固有振動数<br>(Hz) | 刺激係数  | 固有周期<br>(s)                                 | 固有振動数<br>(Hz) | 刺激係数  |
| 1  | 0.237       | 4.21          | 2.206 | 0.233                                       | 4.29          | 2.224 |
| 2  | 0.123       | 8.13          | 2.743 | 0.122                                       | 8.17          | 2.678 |
| 3  | 0.116       | 8.60          | 1.100 | 0.116                                       | 8.63          | 1.174 |
| 4  | 0.097       | 10.33         | 2.094 | 0.096                                       | 10.41         | 2.013 |
| 5  | 0.093       | 10.76         | 1.098 | 0.093                                       | 10.81         | 1.264 |

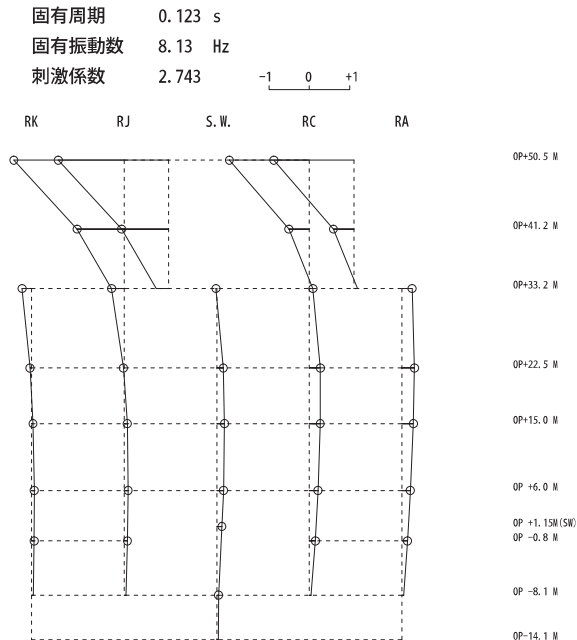


側面地盤ばねなし

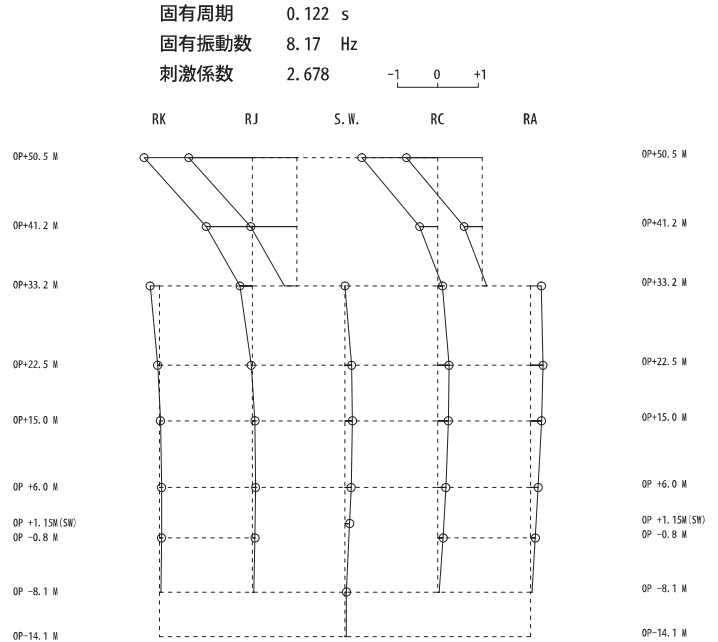


側面地盤ばねあり (S<sub>s</sub>-D<sub>2</sub> 地盤)

図 4-57 固有モードの比較 (NS 方向 1 次)



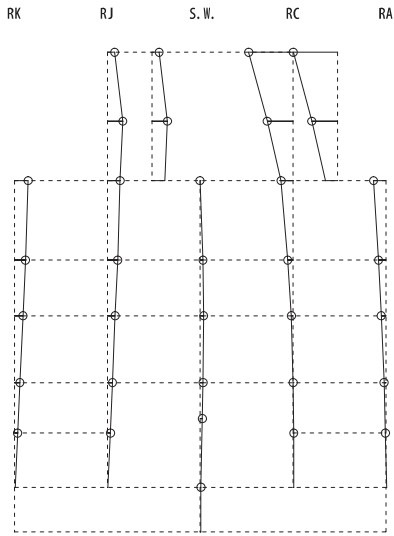
側面地盤ばねなし



側面地盤ばねあり (S<sub>s</sub>-D<sub>2</sub> 地盤)

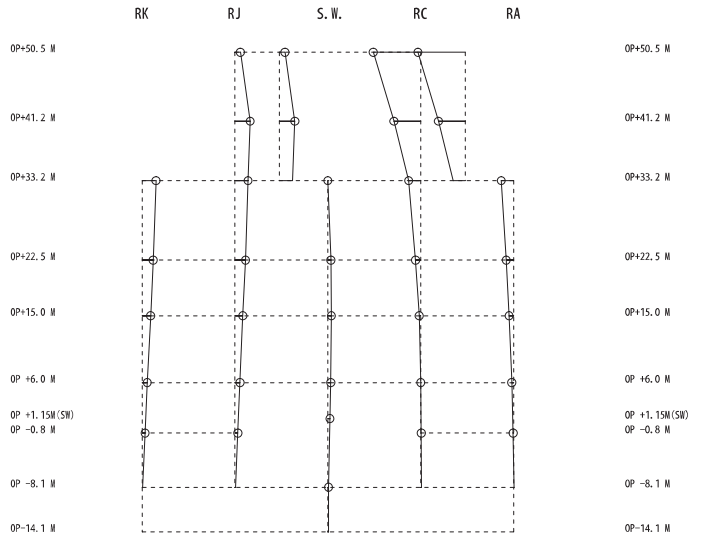
図 4-58 固有モードの比較 (NS 方向 2 次)

固有周期 0.116 s  
 固有振動数 8.60 Hz  
 刺激係数 1.100



側面地盤ばねなし

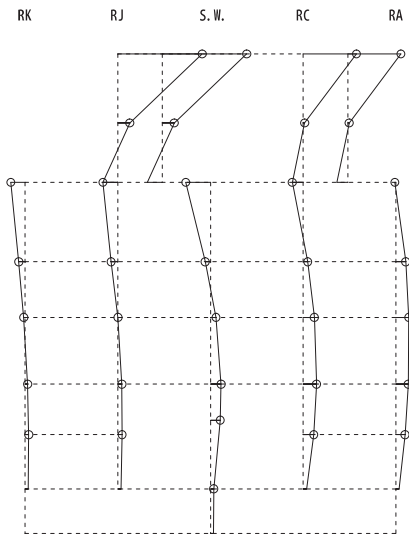
固有周期 0.116 s  
 固有振動数 8.63 Hz  
 刺激係数 1.174



側面地盤ばねあり (S<sub>s</sub>-D<sub>2</sub>地盤)

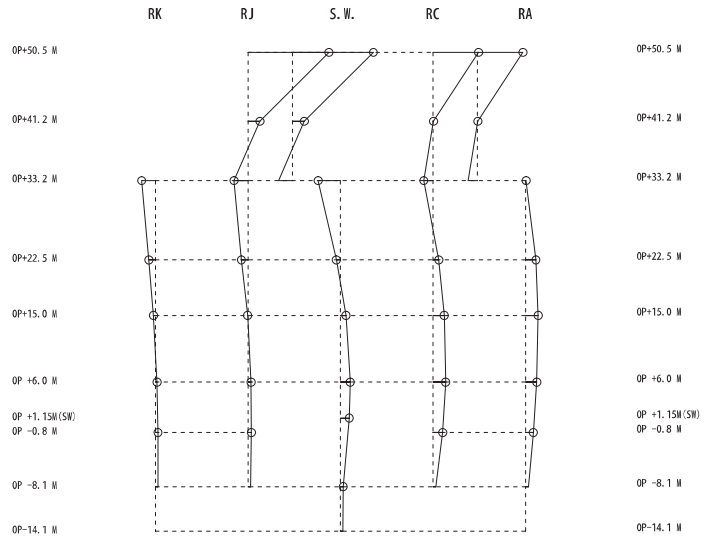
図 4-59 固有モードの比較 (NS 方向 3 次)

固有周期 0.097 s  
 固有振動数 10.33 Hz  
 刺激係数 2.094



側面地盤ばねなし

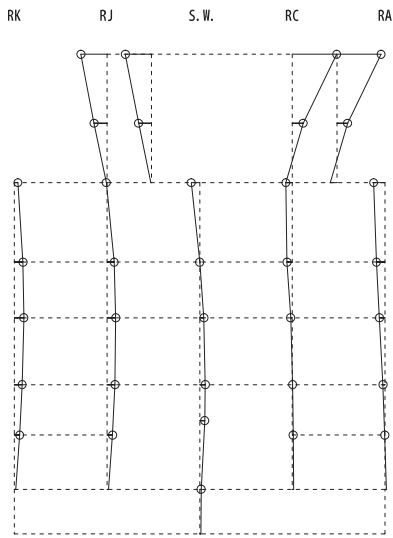
固有周期 0.096 s  
 固有振動数 10.41 Hz  
 刺激係数 2.013



側面地盤ばねあり (S<sub>s</sub>-D<sub>2</sub>地盤)

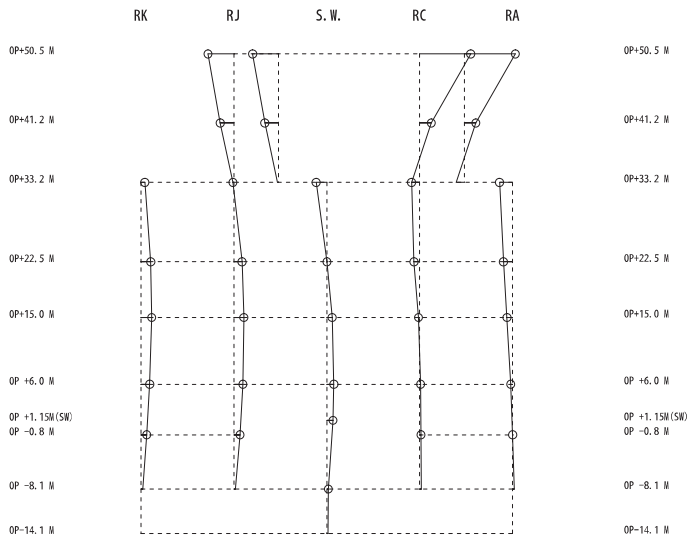
図 4-60 固有モードの比較 (NS 方向 4 次)

固有周期 0.093 s  
 固有振動数 10.76 Hz  
 刺激係数 1.098



側面地盤ばねなし

固有周期 0.093 s  
 固有振動数 10.81 Hz  
 刺激係数 1.264



側面地盤ばねあり (S s - D 2 地盤)

図 4-61 固有モードの比較 (NS 方向 5 次)

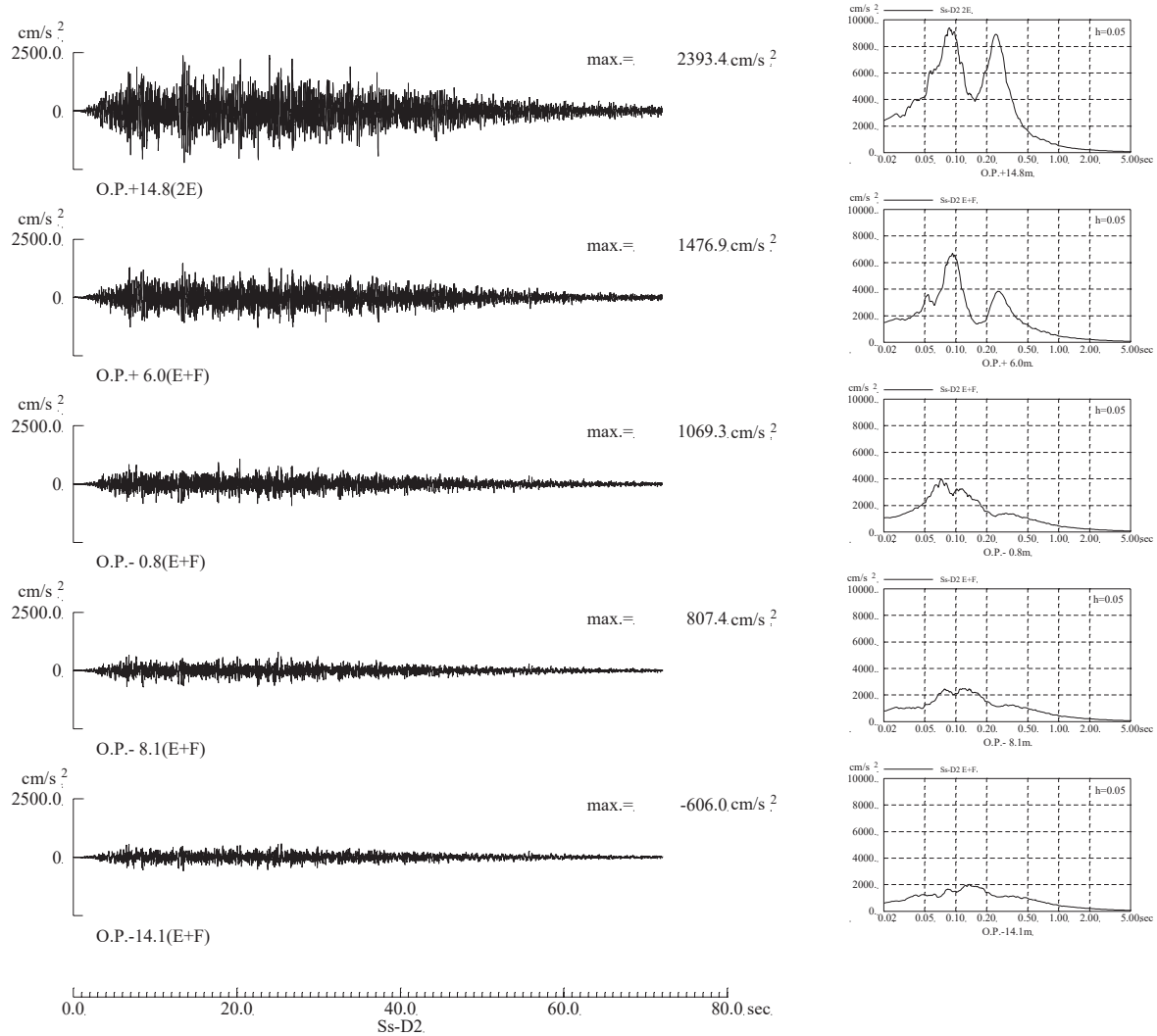


図 4-62 側面地盤ばね位置の地盤の加速度波形（基準地震動 S<sub>s</sub>-D2）

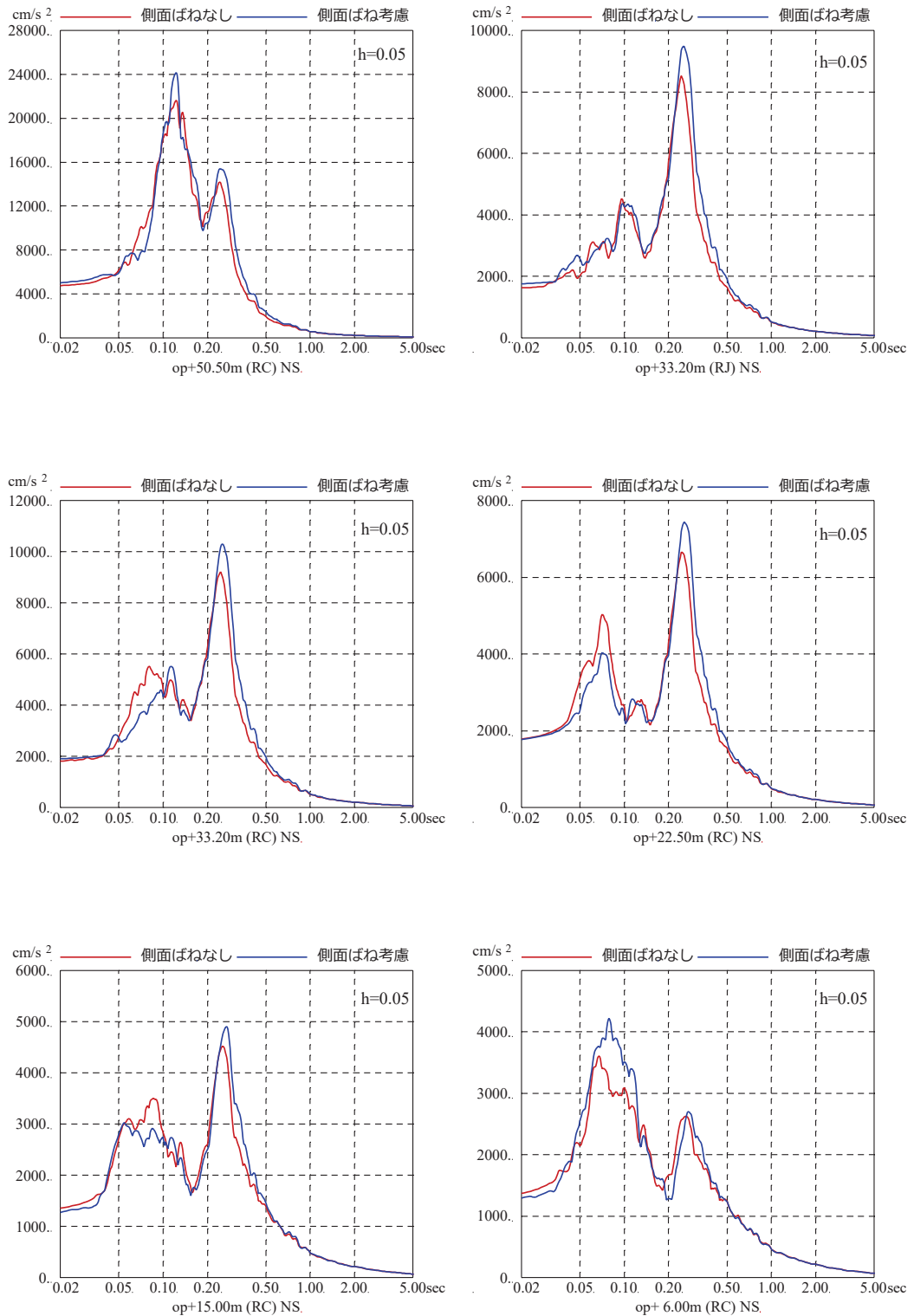


図 4-63 基準地震動 S<sub>s</sub>-D2 を用いた側面地盤ばねの有無による地震応答解析結果の比較 (原子炉建屋, NS 方向, 建屋減衰 5%)



(7) 建屋の応力解析における地震時増分土圧の評価方針

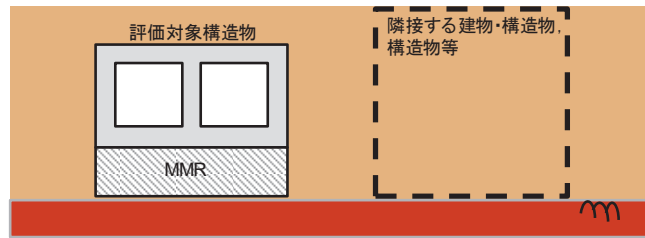
地震応答解析では側面地盤が建屋応答に与える影響が小さいことを確認した上でその影響を無視しているが、建屋の応力解析においてはこの影響を考慮する。具体的には、側面地盤による土圧（常時土圧、地震時増分土圧）を算定し、地震荷重と組み合わせて評価を行う。地震時増分土圧荷重は、修正物部・岡部式及び J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版に基づいて求めた包絡値、又は FEM 解析により土圧を算定する。今回工認対象建屋の応力解析における地震時増分土圧の算定方法について、表 4-18 に示す。

表 4-18 今回工認対象建屋の応力解析における地震時増分土圧の算定方法

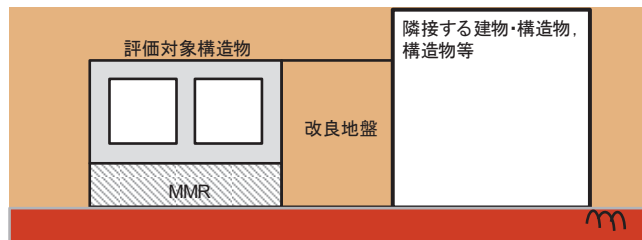
| 建屋       | 応力解析<br>(基礎版) | 地震時増分土圧<br>評価方法   | 隣接建屋等の考慮                         |
|----------|---------------|-------------------|----------------------------------|
| 原子炉建屋    | FEM モデル       | 2D-FEM            | EW 方向について東側改良地盤考慮                |
| 制御建屋     | FEM モデル       | 2D-FEM<br>(NS 方向) | 考慮なし<br>(土圧は隣接建屋のない北側及び南側の一部で考慮) |
| 緊急用電気品建屋 | FEM モデル       | JEAG 式            | —                                |
| 緊急時対策建屋  | FEM モデル       | JEAG 式            | —                                |

なお、屋外重要土木構造物の評価においては、構造物と地盤の相互作用について土圧を含めて考慮できる連成系の地震応答解析手法を用いて耐震評価を実施する方針としている。

また、屋外重要土木構造物と隣接する建物・構築物間が盛土で埋め戻されている場合には、隣接する建物・構築物をモデル化した方が周辺地盤の変形が抑制され評価対象構造物に作用する土圧が低減されると考えられることから、隣接する建物・構築物はモデル化しない。屋外重要土木構造物と隣接する建物・構築物間が地盤改良されている場合には、剛性の大きい改良地盤を介して隣接する建物・構築物の地震時応答が評価対象構造物に伝達することから隣接する建物・構築物を含めてモデル化する。



評価対象構造物と隣接する建物・構築物の  
間が盛土で埋め戻されている場合



評価対象構造物と隣接する建物・構築物の  
間が地盤改良されている場合

図 4-64 屋外重要土木構造物の土圧に関する評価方針

(8) 検討結果のまとめ

原子炉建屋及び第3号機海水熱交換器建屋について、側面地盤ばね(Novakばね)の有無が建屋応答に与える影響等を、地震観測記録を用いた建屋応答解析により確認した。その結果、以下の知見を得た。

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

J E A G 4 6 0 1-1991 追補版では、側面地盤ばね(Novakばね)は、支持地盤と表層地盤のインピーダンス比が大きい場合、その適合性に留意する必要があることが記載されているが、特に女川のように支持地盤が硬質岩盤で、埋戻し土に掘削土等を用いて施工した場合には、Novakばねは過大な応答結果を与えるおそれがあるため、今回工認の原子炉建屋の地震応答解析モデルには側面地盤ばねは適用しないこととする。

また、第3号機海水熱交換器建屋については、Novakばねによる埋込み効果は実際の応答を現しにくい(過大な応答となる)一方で、観測記録によるシミュレーション解析から埋め込まれていることによる建屋応答低減効果が認められることから、そのメカニズムについて周辺地盤を3次元地盤FEMでモデル化し検討を行った。その結果、3次元地盤FEMモデルでは、3.11地震のシミュレーション解析で建屋上部の応答が概ね観測記録と整合しており、建屋近傍の周辺地盤の応答は建屋応答の影響を受けて、遠方の自由地盤の応答とは違った傾向となること、最大加速度、最大速度、最大ひずみは建屋近傍よりも遠方の自由地盤のほうが大きめとなることが確認された。したがって、Novakばねによる埋込み効果が実際の応答を現しにくいのは、Novakばねでは遠方(自由地盤相当)の地盤性状をモデル化しており、建屋近傍の実際の地盤応答が建屋により抑えられていることをうまく再現できないことから、建屋に入力する地震動を大きく見積もる場合があること等が要因の一つと考えられる。

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。