

東海第二発電所

標準応答スペクトルを考慮した地震動評価について
(コメント回答: 既往の地震動評価の
見直し要否に係る検討)

令和5年4月7日

日本原子力発電株式会社

本資料の概要

- 標準応答スペクトルに基づく地震動評価において新たに地盤モデルを設定したことに伴い、既往の地盤モデルや地震動評価について見直し要否を検討する。また、各種の地震動評価とその評価に用いる地盤モデルの関係を整理する。
- ・ 従来の統計的グリーン関数法用地盤モデルについては、既許可審査以降に蓄積された地震基盤相当面以深（先新第三系）からの地震波の伝播特性に関する新しい知見等を取り入れて設定した標準応答スペクトル用地盤モデルに、更新することとする。経験的グリーン関数法により策定した基準地震動（ $S_s-11\sim 14, 21, 22$ ）について、標準応答スペクトル用地盤モデルを用いた統計的グリーン関数法の評価結果により妥当性を改めて確認していることから、これを変更する必要はない。【2章】（第1097回審査会合で説明）
- ・ 留萌波の地震動評価においては、その評価に特化した速度構造を設定し、また新第三系内における地震波の伝播特性に着目して減衰定数を設定した留萌用地盤モデルを用いることが適切である。従って、留萌用地盤モデルを見直す必要はない。【3章】（コメント回答、概要はP5～7参照）
- ・ 標準応答スペクトルに基づき策定した地震動を基準地震動 S_s-32 として追加する。【4章】（第1053回審査会合で説明）
- ・ 各種の地震動評価においては、検討の目的に応じて設定した地盤モデルを用いることが適切である。各種の地震動評価とその評価に用いる地盤モデルの関係を下表の通り整理する。【5章】（コメント回答）

各種の地震動評価とその評価に用いる地盤モデルの関係

| 評価対象 | 評価に用いる地盤増幅特性の検討範囲 | 評価に用いる地盤モデル | |
|---------------------------------------|-------------------|-----------------|------------------|
| | | 本資料 | 2021年6月申請時 |
| 標準応答スペクトルに基づく地震動評価 | 先新第三系～新第三系 | 標準応答スペクトル用地盤モデル | 標準応答スペクトル用地盤モデル |
| 断層モデル手法による地震動評価のうち統計的グリーン関数法を用いた地震動評価 | | | 統計的グリーン関数法用地盤モデル |
| 留萌波の地震動評価 | 新第三系内 | 留萌用地盤モデル | 留萌用地盤モデル |

審査会合コメントリスト(1/2)

| No. | 日付 | 内容 | 回答概要 | 該当箇所 |
|-----|-----------------------------------|--|---|------------------------------|
| 1 | 令和4年 6月10日 (第1053回 審査会合) | <ul style="list-style-type: none"> ・留萌波の検討については、検討に用いる地盤モデルの選定も含めて、基準地震動S_s-31の見直しの要否について検討すること。 ・その際、標準応答スペクトル用地盤モデルを用いた留萌波の検討については、標高-655mの位置のV_sを947m/sとして評価した結果について提示した上で、どのような考え方で地震動を評価するのか説明すること。 | <ul style="list-style-type: none"> ・留萌波の検討については、既許可審査における検討経緯を踏まえ、標準応答スペクトルの取入れに伴う基準地震動S_s-31(留萌波)の位置づけを整理した上で、基準地震動S_s-31の見直しの要否について検討している。 ・今回、標準応答スペクトルの取入れに伴い新たに地盤モデルを設定したとしても、既許可審査における留萌波の検討に用いた地盤モデル(留萌用地盤モデル)とは地盤モデル設定の着眼点が異なることから、留萌用地盤モデルを用いて策定した基準地震動S_s-31を見直す必要はない。 ・念のため、標準応答スペクトル用地盤モデルを用いて留萌波の評価を行った場合についても検討しているが、留萌用地盤モデルによる評価結果とほぼ同等となることを確認している※。 | 第1097回 審査会合 において 説明 |

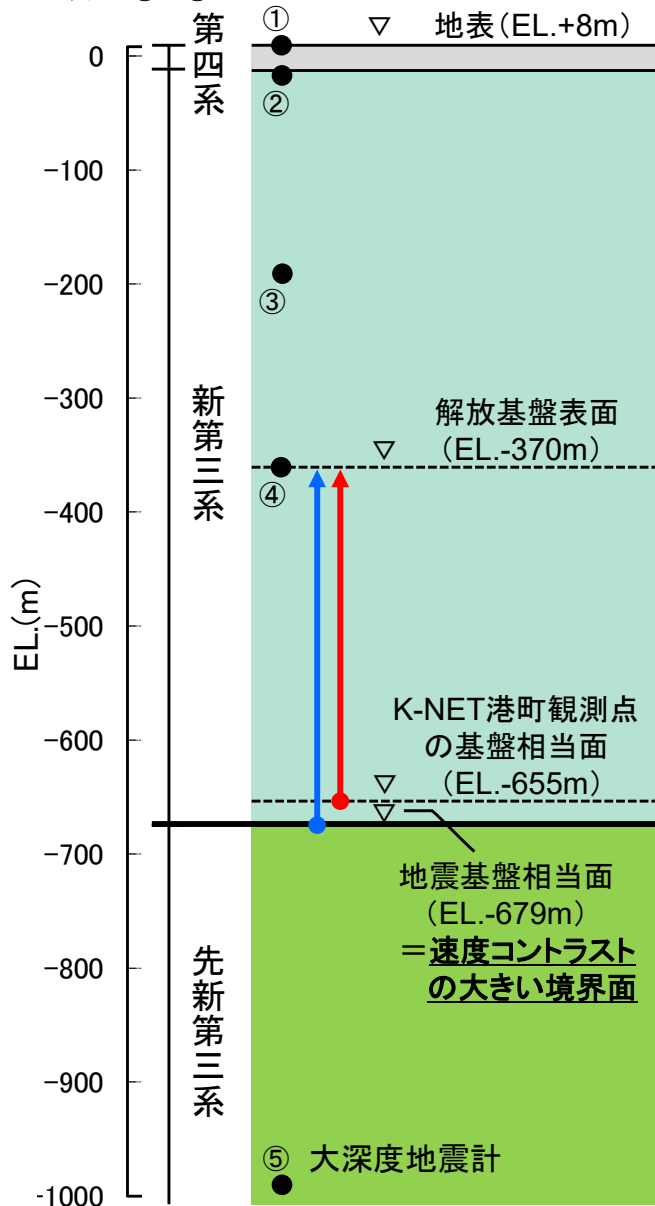
※ 第1097回審査会合(2022年12月2日)の資料において、留萌用地盤モデルとは検討の着眼点が異なる標準応答スペクトル用地盤モデルを用いて留萌波の検討を行い、評価結果を示したことは適切ではなかった。

審査会合コメントリスト(2/2)

| No. | 日付 | 内容 | 回答概要 | 該当箇所 |
|-----|-----------------------------------|---|---|--|
| 2 | 令和4年 12月2日 (第1097回 審査会合) | <p>標準応答スペクトル用地盤モデルを用いた場合の留萌波に対する地震動評価結果に関しては、S_s-31を含め既存の全てのS_sを超えている周期帯がある。それでもなおS_s-31を見直し不要とする点について、根拠が十分でないため、合理的な説明を追加すること。</p> <p>地盤は1つであるところ、2つの地盤モデルを使い分ける合理的な説明が必要である。特に、標準応答スペクトル用地盤モデルの減衰定数について、最新の知見を反映した設定となっているという説明であるならば、留萌用地盤モデルに反映しなくてよい理由を説明すること。</p> | <ul style="list-style-type: none"> ・地盤モデルの設定に際しては着目する地層区分及び深さの範囲の違いを踏まえたそれぞれの目的に応じて検討を行っている。この点について、留萌用地盤モデルと標準応答スペクトル用地盤モデルの速度構造や減衰定数の設定の考え方を改めて整理し、留萌用地盤モデルの見直し要否を判断している。 ・留萌波の地震動評価においては、その評価に特化した速度構造を設定し、また新第三系内における地震波の伝播特性に着目して減衰定数を設定した留萌用地盤モデルを用いることが適切である。従って、留萌用地盤モデルを見直す必要はない。 ・なお、第1097回審査会合(2022年12月2日)の資料において、留萌用地盤モデルとは検討の着眼点が異なる標準応答スペクトル用地盤モデルを用いて留萌波の検討を行い、評価結果を示したことは適切ではなかった。 | <p>概要: P5~7 本編: P26~37, 40</p> |

No.2 コメント回答概要(1/3)

- ↑ : 地震動評価に用いる範囲(始点:入力位置, 終点:出力位置)
 (赤:留萌波の地震動評価,
 青:標準応答スペクトルに基づく地震動評価)
 ● : 地震計(①~⑤)



東海第二発電所敷地地盤のイメージ図

■標準応答スペクトルに基づく地震動評価では、地震基盤相当面以深の先新第三系に設置した大深度地震計の観測記録の活用等により新たに地盤モデルを設定したことに伴い、既許可の留萌用地盤モデルについて、その見直し要否を以下のとおり検討する。

■モデル設定の着眼点の違いを踏まえた留萌用地盤モデルの見直し要否に係る検討

・留萌用地盤モデルの検討では、K-NET港町観測点の基盤層が $V_s 938\text{m/s}$ の層であったことから、敷地の速度構造に照らし、K-NET港町観測点の基盤相当面(EL.-655m)が位置する第四系下部更新統~新第三系鮮新統(以降、新第三系)までの深さの範囲(地震基盤相当面(EL.-679m)以浅)に着目している。一方、標準応答スペクトル用地盤モデルの検討では、標準応答スペクトルが $V_s 2200\text{m/s}$ 以上の地震基盤相当面で定義されていることから、敷地の速度構造に照らし、速度コントラストの大きい境界面(地震基盤相当面(EL.-679m))を含む先新第三系の深さまで着目する範囲を拡大している。

・このように地盤モデルの設定に際しては着目する地層区分及び深さの範囲の違いを踏まえたそれぞれの目的に応じて検討を行っている。この点について、両地盤モデルの速度構造や減衰定数の設定の考え方を改めて整理し、留萌用地盤モデルの見直し要否を判断する。

(1) 速度構造の設定

留萌用地盤モデルと標準応答スペクトル用地盤モデルの考え方を整理し比較する。

(2) 減衰定数の設定

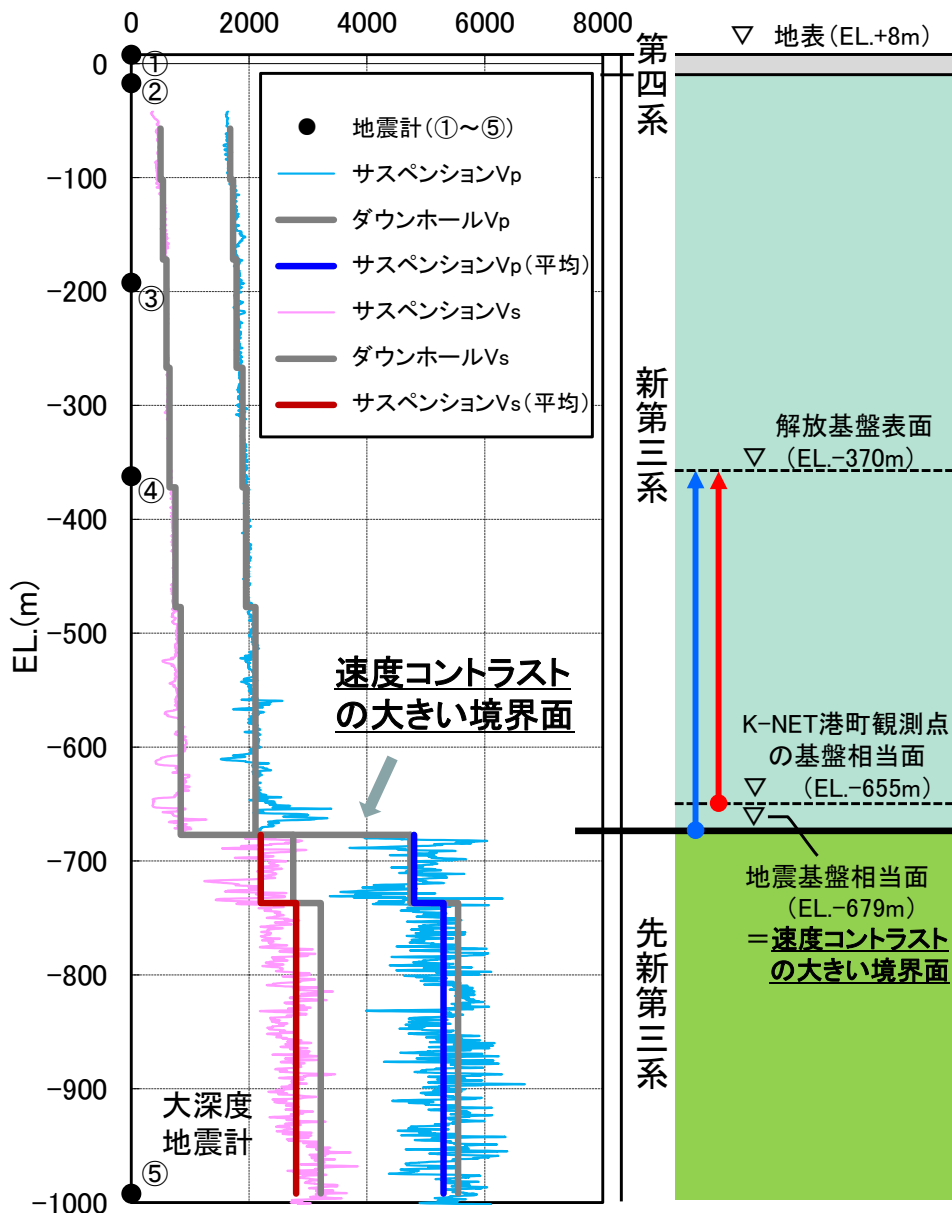
留萌用地盤モデルと標準応答スペクトル用地盤モデルの考え方を整理し比較する。

(3) 留萌用地盤モデルの見直し要否

以上の整理結果を踏まえて留萌用地盤モデルの見直し要否を判断する。

No.2 コメント回答概要(2/3)

↑ : 地震動評価に用いる範囲(始点:入力位置, 終点:出力位置)
 (赤:留萌波の地震動評価, 青:標準応答スペクトルに基づく地震動評価)
 速度(m/s)



大深度ボーリングのPS検層結果の例及び地盤モデルの検討イメージ

(1) 速度構造の設定(P27～, 第1097回審査会合で説明)

地震基盤相当面以浅(新第三系)では、留萌用地盤モデルと標準応答スペクトル用地盤モデルの速度構造の基本的な考え方は同じであるが、留萌用地盤モデルの速度構造については、新第三系の久米層の地盤速度が深度に依存して漸増する一次関数の式(標高依存式)で表現できる特徴があることから、この標高依存式を用いて、留萌波の入力位置となる基盤相当面をK-NET港町観測点における基盤層と同値となるVs938m/sとしてEL.-655mに設定しており、留萌波の検討に特化したモデルとなっている。

⇒ 留萌波の地震動評価においては、地盤速度が標高依存式で表現できる特徴を反映し、この評価に特化した留萌用地盤モデルの速度構造を用いることが適切である。

(2) 減衰定数の設定(P32～)

・留萌用地盤モデル:

明瞭な速度コントラストの見られない新第三系内における地震波の伝播特性に着目し、地震計①～④(うち、②～④は新第三系内に設置)を用いた同定解析により、新第三系としての減衰定数を一律に設定。

・標準応答スペクトル用地盤モデル:

速度コントラストの大きい境界面(地震基盤相当面(EL.-679m))の影響を考慮できるよう、地震計①～④に加えて先新第三系内に設置した⑤の大深度地震計も用いた広範囲の同定解析により、新第三系、先新第三系の減衰定数を細分化した層区分毎に設定。

⇒ 留萌波の地震動評価においては、敷地の地盤増幅特性を考慮する範囲が明瞭な速度コントラストの見られない新第三系内に留まることから、減衰定数の設定方法としては、新第三系内における地震波の伝播特性に着目して実施した同定解析を踏まえ、新第三系としての減衰定数を一律に設定する方法、すなわち留萌用地盤モデルで用いた方法を採用することが適切であり、この減衰定数の設定を見直す必要はない。

(次頁へ)

(前頁より)

(3) 留萌用地盤モデルの見直し要否(P37)

- ・以上の整理結果を踏まえると、留萌波の地震動評価においては、その評価に特化した速度構造を設定し、また新第三系内における地震波の伝播特性に着目して減衰定数を設定した留萌用地盤モデルを用いることが適切である。
- ・従って、今回、標準応答スペクトルの取入れに伴い新たに地盤モデルを設定したとしても、**留萌用地盤モデルを見直す必要はない。**

なお、第1097回審査会合(2022年12月2日)の資料において、地盤モデルの設定の着眼点が異なることから留萌用地盤モデルの見直しは不要であるとの主旨の説明を行った。その一方で、留萌用地盤モデルとは検討の着眼点が異なる標準応答スペクトル用地盤モデルを用いて留萌波の検討を行い、評価結果を示したことは、検討目的に応じた対応とは言えず、適切ではなかった。

余白

目次

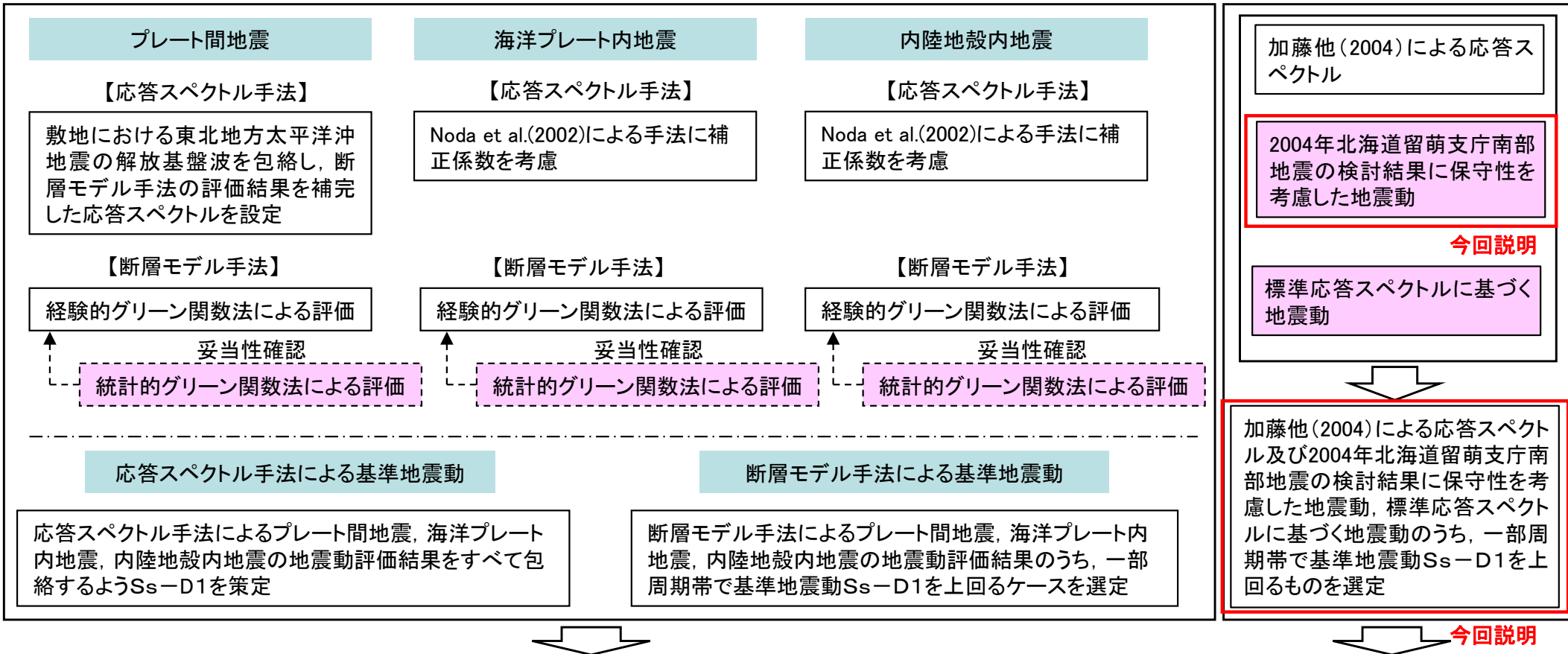
| | |
|--|----|
| 1. 基準地震動 S_s の策定と地盤モデルの関係 | 10 |
| 2. 標準応答スペクトル用地盤モデルによる既往の地震動評価の妥当性確認 | 12 |
| 3. 標準応答スペクトルの取入れに伴う留萌用地盤モデルの位置づけ | 26 |
| 4. 基準地震動 S_s の策定 | 38 |
| 5. 地震動評価に用いる地盤モデルの整理 | 40 |
| 参考文献 | 41 |
| 補足説明資料 | |
| ① 標準応答スペクトルに基づく地震動評価のための地盤モデル (第1053回(令和4年6月10日)審査会合資料の再掲) | 43 |
| ② 2004年北海道留萌支庁南部地震の検討に用いた地盤モデル (第409回(平成28年10月14日)審査会合資料及び 第291回(平成27年11月6日)審査会合資料の再掲) | 64 |

1. 基準地震動Ssの策定と地盤モデルの関係

■敷地ごとに震源を特定して策定する地震動

：地盤モデルを用いた地震動評価

■震源を特定せず策定する地震動



■基準地震動Ssの策定

- Ss-D1 応答スペクトル手法による基準地震動
- Ss-11 F1断層, 北方陸域の断層, 塩ノ平地震断層の連動による地震(M7.8)(短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点1)
- Ss-12 F1断層, 北方陸域の断層, 塩ノ平地震断層の連動による地震(M7.8)(短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点2)
- Ss-13 F1断層, 北方陸域の断層, 塩ノ平地震断層の連動による地震(M7.8)(短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点3)
- Ss-14 F1断層, 北方陸域の断層, 塩ノ平地震断層の連動による地震(M7.8)(断層傾斜角の不確かさ, 破壊開始点2)
- Ss-21 2011年東北地方太平洋沖地震(Mw9.0)(短周期レベルの不確かさ)
- Ss-22 2011年東北地方太平洋沖地震(Mw9.0)(SMGA位置と短周期レベルの不確かさの重畳)
- Ss-31 2004年北海道留萌支庁南部地震の検討結果に保守性を考慮した地震動
- Ss-32 標準応答スペクトルに基づき策定した地震動

既許可の地盤モデルの検討

■各地盤モデルの評価目的

| 地盤モデル | 評価目的 |
|---------------------------------------|---|
| 統計的グリーン関数法用地盤モデル (解放基盤表面～地震基盤面) | ・断層モデル手法による地震動評価に対する統計的グリーン関数法による地震動レベルの妥当性確認 ※断層モデル手法による地震動評価では経験的グリーン関数法による評価を行っており、地盤モデルは用いていない |
| 留萌用地盤モデル (解放基盤表面～K-NET港町観測点の基盤相当面) | ・留萌波(基盤地震動)への敷地の地盤特性の考慮 ※上記評価に保守性を考慮してSs-31を策定 |

■モデル設定の考え方

統計的グリーン関数法用地盤モデル
(解放基盤表面～地震基盤面)

| 解放基盤表面 (Vs790m/s) | 層厚 | 地盤物性 | 減衰 |
|----------------------|----------------|---|---------------|
| | ・調査結果を 基に設定 | ・調査結果を基に 設定 ・最上層は、地盤 同定解析結果を 基に設定した解 放基盤表面以浅 の地盤モデルに おける最下層と 同じ値として設 定 | 信岡他 (2012) |
| 地震基盤面 (Vs2750m/s) | ∞ | ・調査結果を基に 設定 | 佐藤他 (1994) |

留萌用地盤モデル
(解放基盤表面～K-NET港町観測点の基盤相当面)

| 解放基盤表面 (Vs790m/s) | 層厚 | 地盤物性 | 減衰 |
|------------------------------------|--|---|---|
| | ・調査結果より、 地盤物性が深 度方向に増大 する傾向が見 られることを踏 まえ、100m程 度を目安に設 定 | ・調査結果に基づく標 高依存式により算出 ・最上層は、地盤同定 解析結果を基に設 定した解放基盤表 面以浅の地盤モデ ルの最下層と同じ値 として設定 | ・地盤同定解析結 果を基に設定した 解放基盤表面以 浅の地盤モデル の最下層と同じ値 として設定 |
| K-NET港町観測 点の基盤相当面 (Vs938m/s) | ∞ | ・調査結果に基づく標 高依存式により算出 | ・上記と同様に設定 |

・敷地における大深度地震計を含む鉛直アレイ地震観測記録の伝達関数との比較により、設定した地盤モデルの妥当性を確認

2. 標準応答スペクトル用地盤モデルによる既往の地震動評価の妥当性確認

■標準応答スペクトルに基づく地震動評価では、標準応答スペクトルがVs2200m/s以上となる地震基盤相当面で定義されていることから、地震基盤相当面以深から解放基盤表面までの広範囲における地震波の伝播特性に着目して検討する必要がある。標準応答スペクトルに基づく地震動評価において着目する範囲を踏まえ、地震基盤相当面以深まで掘削している大深度ボーリングデータや地震観測記録を精査する必要があると考え、地震基盤相当面以深の先新第三系に設置した大深度地震計の観測記録の活用等により、新たに地盤モデル(標準応答スペクトル用地盤モデル)を設定した※。

■標準応答スペクトル用地盤モデルを新たに設定したことに伴い、「(1) 統計的グリーン関数法用地盤モデルの見直し要否」及び「(2) 断層モデル手法による基準地震動Ssの妥当性確認」について、以下のとおり検討する。

(1) 統計的グリーン関数法用地盤モデルの見直し要否

・従来の統計的グリーン関数法の評価に用いる地盤モデル(統計的グリーン関数法用地盤モデル)について、その見直し要否を検討する。

(2) 断層モデル手法による基準地震動Ssの妥当性確認

・既往の地震動評価のうち、「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」の断層モデル手法による地震動評価は、全て経験的グリーン関数法で実施しているが、結果の妥当性確認のため統計的グリーン関数法による地震動評価も行っている。

・そこで、(1)の検討において統計的グリーン関数法用地盤モデルの見直しが必要と判断した場合においては、今回設定した標準応答スペクトル用地盤モデルを用いて統計的グリーン関数法による地震動評価を行い、経験的グリーン関数法による地震動評価のうち、基準地震動に選定しているケースに対し、その妥当性を改めて確認する。

統計的グリーン関数法用地盤モデル

| | 上端標高 (m) | S波速度 (m/s) | P波速度 (m/s) | 密度 (g/cm ³) | 減衰定数 | |
|----------|-------------|---------------|---------------|----------------------------|-----------------------|--------|
| | | | | | 水平 | 鉛直 |
| ▽ 解放基盤表面 | -370.0 | 790 | 2000 | 1.85 | h=0.02 | h=0.01 |
| | -477.0 | 840 | 2110 | 1.96 | | |
| ▽地震基盤相当面 | -677.0 | 2750 | 4740 | 2.63 | Q=110 ^{0.69} | |

標準応答スペクトル用地盤モデル

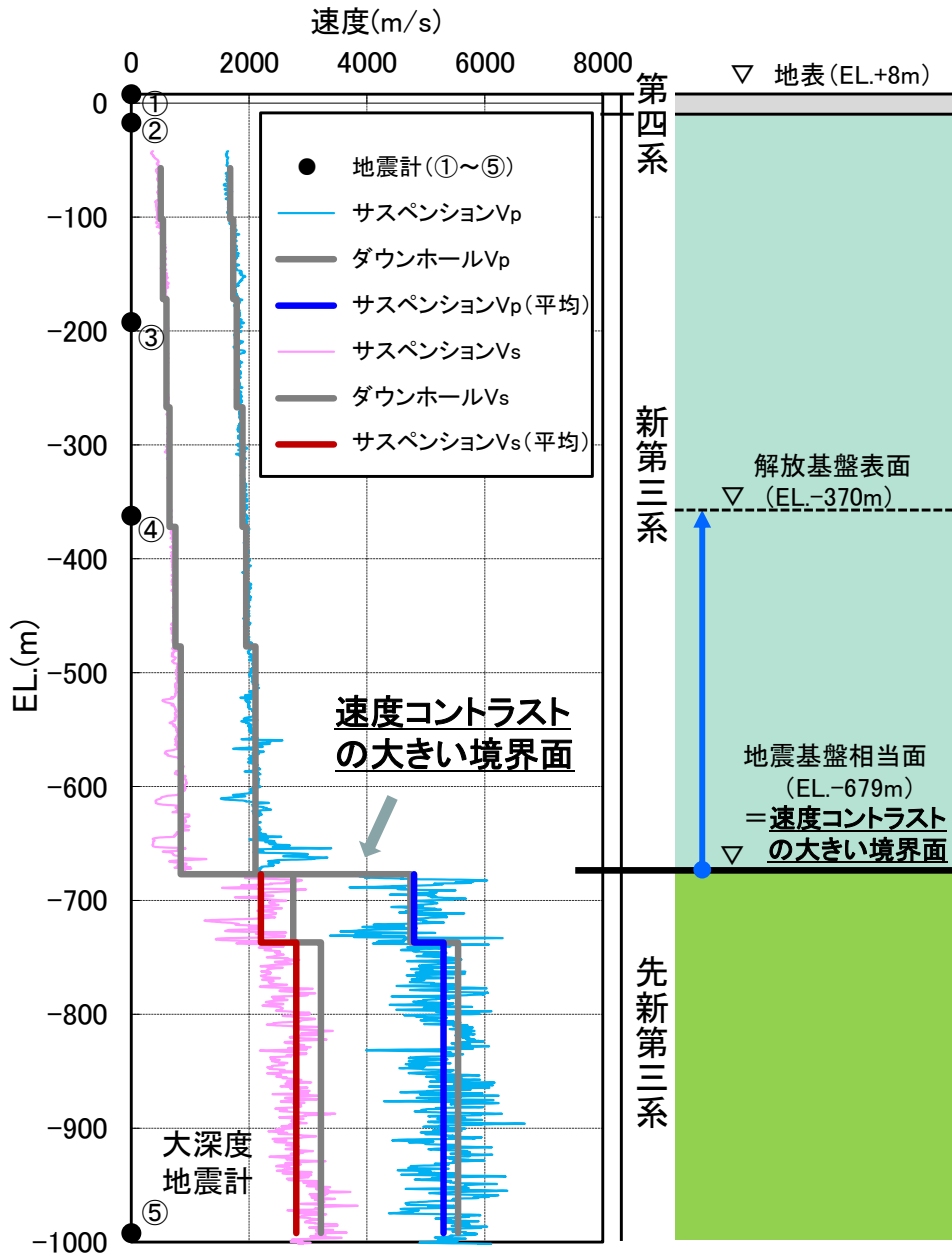
■:統計的グリーン関数法用地盤モデルと異なる物性値

| 上端標高 (m) | S波速度 (m/s) | P波速度 (m/s) | 密度 (g/cm ³) | 減衰定数h(f) | |
|-------------|---------------|---------------|----------------------------|--|--|
| | | | | 水平 | 鉛直 |
| -370.0 | 790 | 2000 | 1.85 | 0.061f ^{-1.05} (f≤6.78) 0.008 (f>6.78) | 0.264f ^{-1.05} (f≤31.74) 0.007 (f>31.74) |
| -476.0 | 835 | 2124 | 1.89 | 0.058f ^{-1.05} (f≤6.78) 0.008 (f>6.78) | 0.249f ^{-1.05} (f≤31.74) 0.007 (f>31.74) |
| -566.0 | 904 | 2205 | 2.00 | 0.054f ^{-1.05} (f≤6.78) 0.007 (f>6.78) | 0.240f ^{-1.05} (f≤31.74) 0.006 (f>31.74) |
| -655.0 | 947 | 2256 | 2.07 | 0.051f ^{-1.05} (f≤6.78) 0.007 (f>6.78) | 0.234f ^{-1.05} (f≤31.74) 0.006 (f>31.74) |
| -679.0 | 2200 | 4800 | 2.65 | 0.013f ^{-0.21} (f≤1.31) 0.012 (f>1.31) | 0.004f ^{-0.23} (f≤16.46) 0.002 (f>16.46) |

※ 標準応答スペクトル用地盤モデルの設定の詳細については、補足説明資料①に示す。

(1) 統計的グリーン関数法用地盤モデルの見直し要否

↑ : 地震動評価に用いる範囲(始点:入力位置, 終点:出力位置)



大深度ボーリングのPS検層結果の例及び地盤モデルの検討イメージ

■従来の統計的グリーン関数法用地盤モデルの設定

従来の統計的グリーン関数法の評価に用いる地盤モデルの設定の際には、敷地の大深度地震観測記録等、データの蓄積が十分でなかったことから、一般的に用いられる手法として、速度構造については大深度ボーリングデータのダウンホール法に基づき設定し、減衰定数については既往の知見に基づき設定していた。

■既許可審査以降の新しい知見等を踏まえた新しい地盤モデルの設定

一方、標準応答スペクトルに基づく地震動評価においては、標準応答スペクトルがVs2200m/s以上となる地震基盤相当面で定義されていることから、地震基盤相当面以深まで掘削している大深度ボーリングデータや地震観測記録を精査する必要があると判断した。

そこで、物理探査結果との整合性の確認や既許可審査以降も蓄積されている地震観測記録等、既許可審査では取り入れていなかった新しい知見や考え方を整理し、今回取り入れることにより、標準応答スペクトルに基づく地震動評価のための地盤モデルを新たに設定した。

■統計的グリーン関数法用地盤モデルの見直し要否

地盤モデルの設定に際しては、着目する地層区分及び深さの範囲の違いを踏まえ、地震動評価の目的に応じた検討を行う必要がある。

ここで、統計的グリーン関数法による検討においても、標準応答スペクトル用地盤モデルの設定の際に着目している、速度コントラストの大きい境界面の影響等、地震基盤相当面以深(先新第三系)から解放基盤表面(新第三系)までの地震波の伝播特性について、既許可審査以降に蓄積された新しい知見等を適切に反映する必要があると判断した。

既許可審査において、経験的グリーン関数法による地震動評価に対する妥当性確認のために用いていた統計的グリーン関数法用地盤モデルについては、既許可審査以降に蓄積された地震基盤相当面以深(先新第三系)からの地震波の伝播特性に関する新しい知見等を取り入れて設定した標準応答スペクトル用地盤モデルに、更新することとする。

(2) 断層モデル手法による基準地震動 S_s の妥当性確認(1/7)

- 前頁より、統計的グリーン関数法用地盤モデルについては、既許可審査以降に蓄積された地震基盤相当面以深(先新第三系)からの地震波の伝播特性に関する新しい知見等を取り入れて設定した標準応答スペクトル用地盤モデルに、更新することとした。
- 既往の地震動評価のうち、「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」の断層モデル手法による地震動評価は、全て経験的グリーン関数法で実施しているが、結果の妥当性確認のため統計的グリーン関数法による地震動評価も行っている。
- そこで、今回設定した標準応答スペクトル用地盤モデルを用いて統計的グリーン関数法による地震動評価を行い、経験的グリーン関数法による地震動評価のうち、基準地震動に選定しているケースに対し、その妥当性を改めて確認する。

統計的グリーン関数法用地盤モデル

▽ 解放基盤表面

| 上端標高 (m) | S波速度 (m/s) | P波速度 (m/s) | 密度 (g/cm ³) | 減衰定数 | |
|-------------|---------------|---------------|----------------------------|------------------------|--------|
| | | | | 水平 | 鉛直 |
| -370.0 | 790 | 2000 | 1.85 | h=0.02 | h=0.01 |
| -477.0 | 840 | 2110 | 1.96 | | |
| -677.0 | 2750 | 4740 | 2.63 | Q=110f ^{0.89} | |

▽ 地震基盤相当面

標準応答スペクトル用地盤モデル

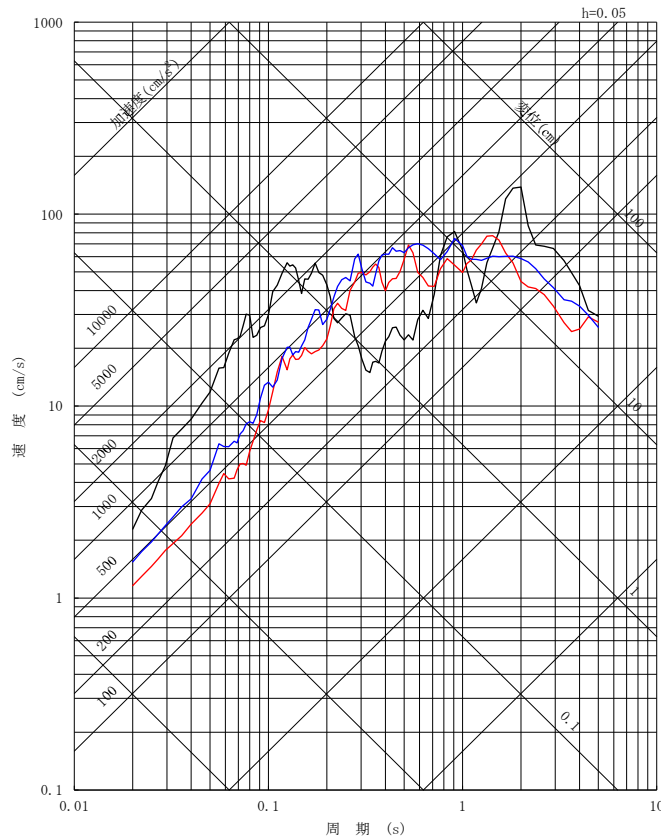
■ : 統計的グリーン関数法用地盤モデルと異なる物性値

| 上端標高 (m) | S波速度 (m/s) | P波速度 (m/s) | 密度 (g/cm ³) | 減衰定数h(f) | |
|-------------|---------------|---------------|----------------------------|---|---|
| | | | | 水平 | 鉛直 |
| -370.0 | 790 | 2000 | 1.85 | 0.061f ^{1.05} (f≤6.78) 0.008 (f>6.78) | 0.264f ^{1.05} (f≤31.74) 0.007 (f>31.74) |
| -476.0 | 835 | 2124 | 1.89 | 0.058f ^{1.05} (f≤6.78) 0.008 (f>6.78) | 0.249f ^{1.05} (f≤31.74) 0.007 (f>31.74) |
| -566.0 | 904 | 2205 | 2.00 | 0.054f ^{1.05} (f≤6.78) 0.007 (f>6.78) | 0.240f ^{1.05} (f≤31.74) 0.006 (f>31.74) |
| -655.0 | 947 | 2256 | 2.07 | 0.051f ^{1.05} (f≤6.78) 0.007 (f>6.78) | 0.234f ^{1.05} (f≤31.74) 0.006 (f>31.74) |
| -679.0 | 2200 | 4800 | 2.65 | 0.013f ^{0.21} (f≤1.31) 0.012 (f>1.31) | 0.004f ^{0.23} (f≤16.46) 0.002 (f>16.46) |

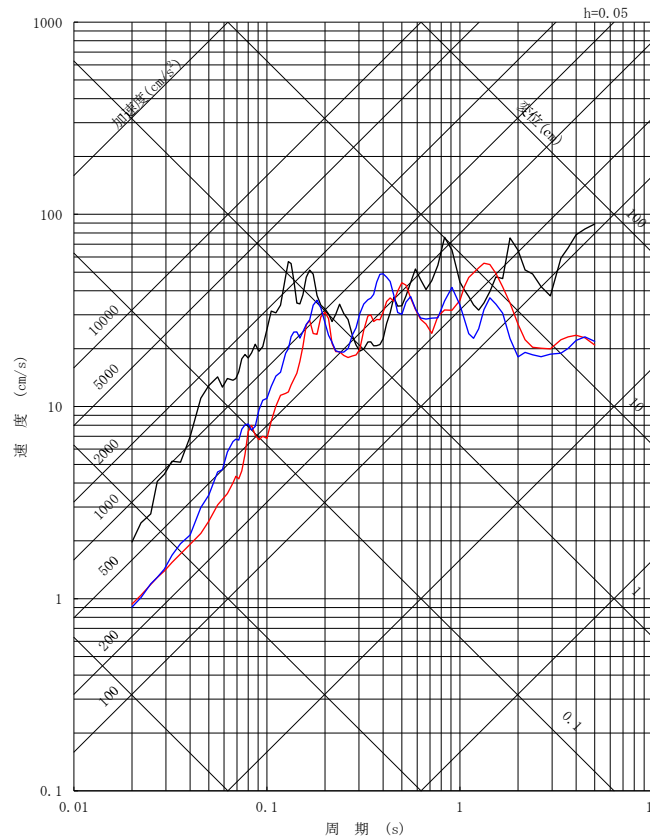
(2) 断層モデル手法による基準地震動S_sの妥当性確認(2/7)

■ S_s-11: F1断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震
(短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点1)

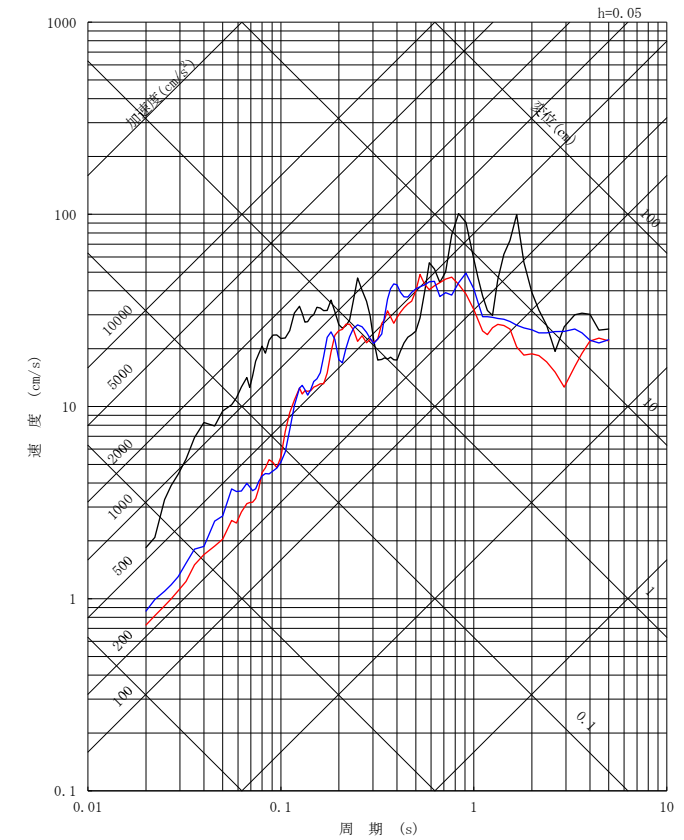
— 経験的グリーン関数法
— 統計的グリーン関数法
(統計的グリーン関数法用地盤モデル)
— 統計的グリーン関数法
(標準応答スペクトル用地盤モデル)



NS方向



EW方向



UD方向

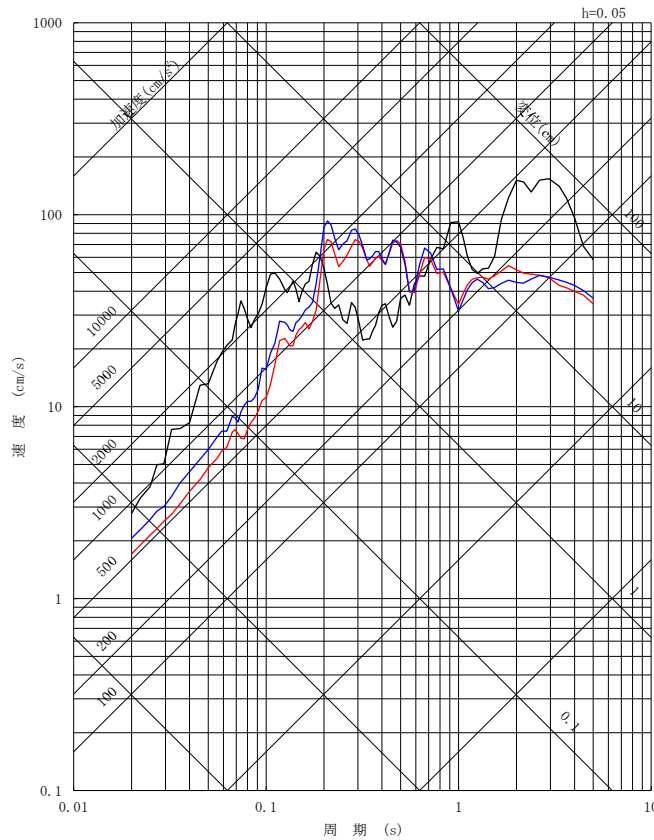
擬似速度応答スペクトル

- 標準応答スペクトル用地盤モデルを用いた統計的グリーン関数法の評価結果は、従来の統計的グリーン関数法用地盤モデルを用いた統計的グリーン関数法の評価結果とほぼ同等であり、経験的グリーン関数法で策定した基準地震動の妥当性を改めて確認した。
- 従って、経験的グリーン関数法で策定した基準地震動S_s-11の変更の必要はない。

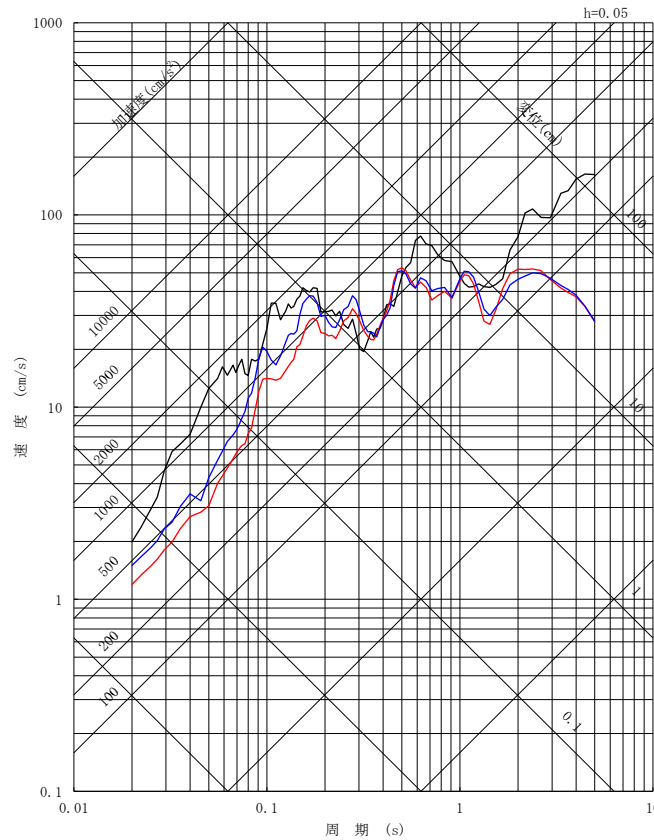
(2) 断層モデル手法による基準地震動S_sの妥当性確認(3/7)

■ S_s-12: F1断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震
(短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点2)

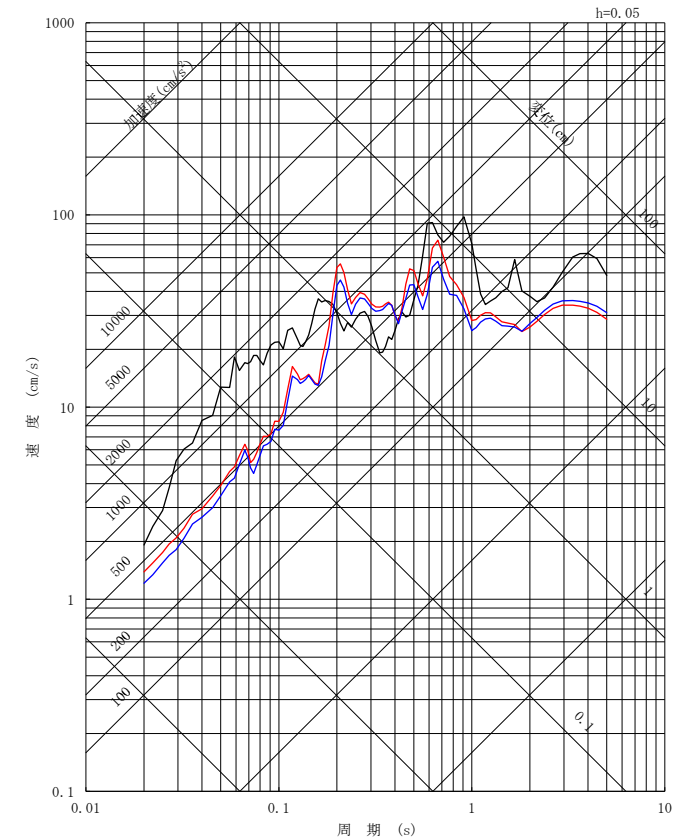
— 経験的グリーン関数法
— 統計的グリーン関数法
(統計的グリーン関数法用地盤モデル)
— 統計的グリーン関数法
(標準応答スペクトル用地盤モデル)



NS方向



EW方向



UD方向

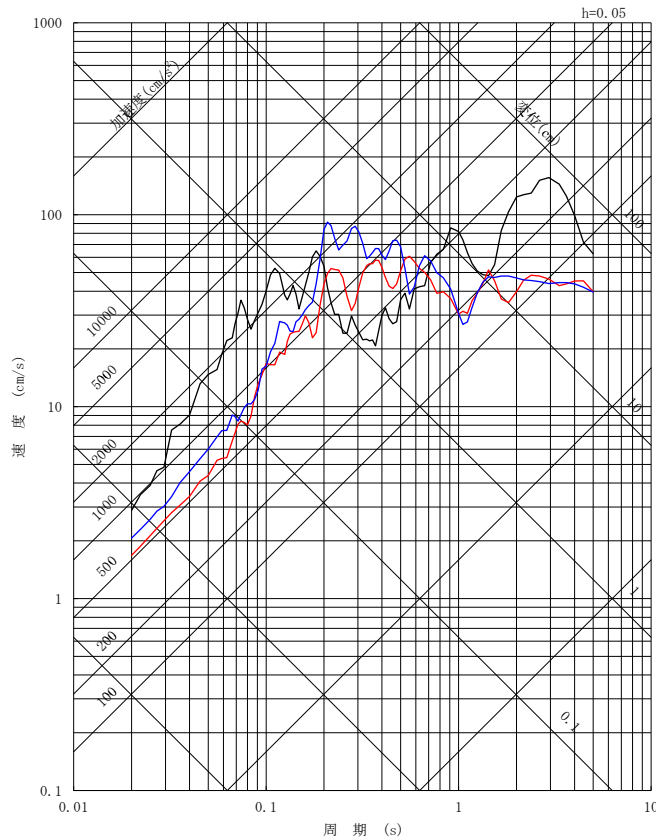
擬似速度応答スペクトル

- ・標準応答スペクトル用地盤モデルを用いた**統計的グリーン関数法**の評価結果は、従来の**統計的グリーン関数法**用地盤モデルを用いた**統計的グリーン関数法**の評価結果とほぼ同等であり、**経験的グリーン関数法**で策定した基準地震動の妥当性を改めて確認した。
- ・従って、**経験的グリーン関数法**で策定した基準地震動S_s-12の変更の必要はない。

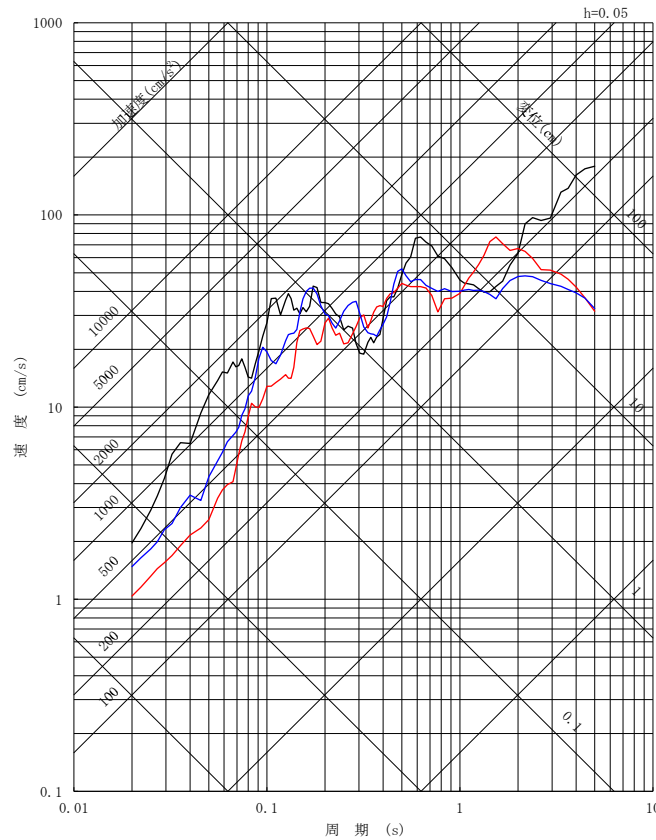
(2) 断層モデル手法による基準地震動Ssの妥当性確認(4/7)

■ Ss-13: F1断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震 (短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点3)

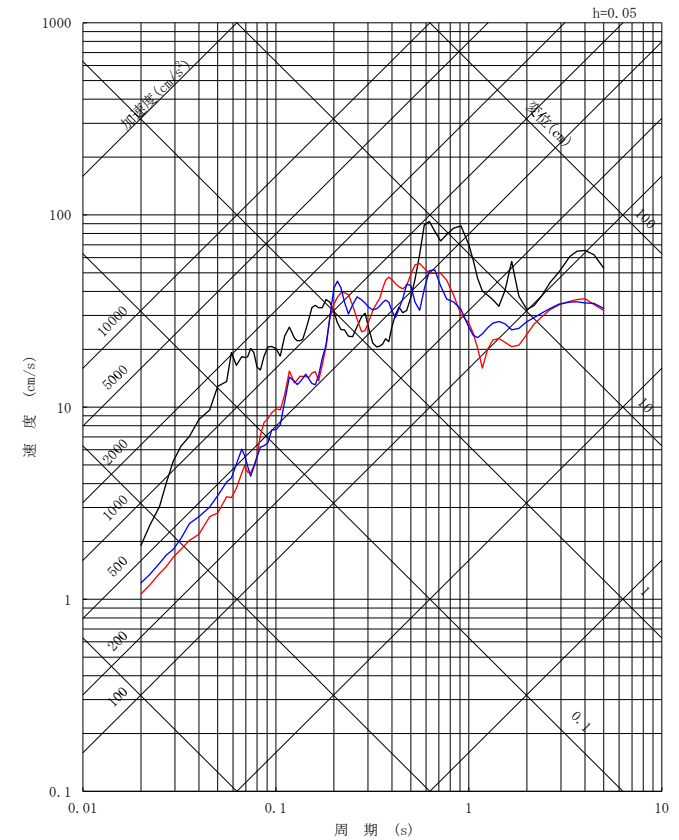
- 経験的グリーン関数法
- 統計的グリーン関数法
(統計的グリーン関数法用地盤モデル)
- 統計的グリーン関数法
(標準応答スペクトル用地盤モデル)



NS方向



EW方向



UD方向

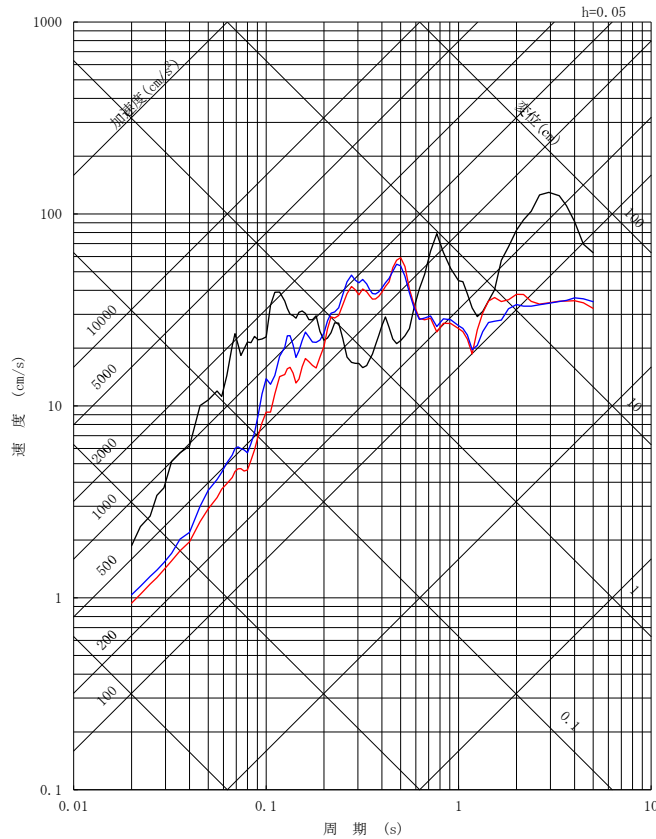
擬似速度応答スペクトル

- ・標準応答スペクトル用地盤モデルを用いた統計的グリーン関数法の評価結果は、従来の統計的グリーン関数法用地盤モデルを用いた統計的グリーン関数法の評価結果とほぼ同等であり、経験的グリーン関数法で策定した基準地震動の妥当性を改めて確認した。
- ・従って、経験的グリーン関数法で策定した基準地震動Ss-13の変更の必要はない。

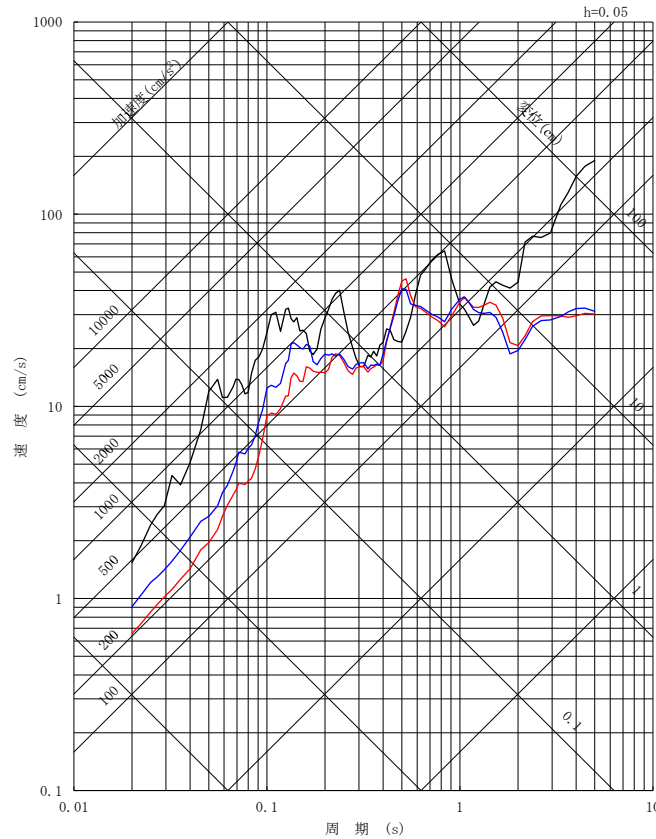
(2) 断層モデル手法による基準地震動S_sの妥当性確認(5/7)

■ S_s-14: F1断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震 (断層傾斜角の不確かさ, 破壊開始点2)

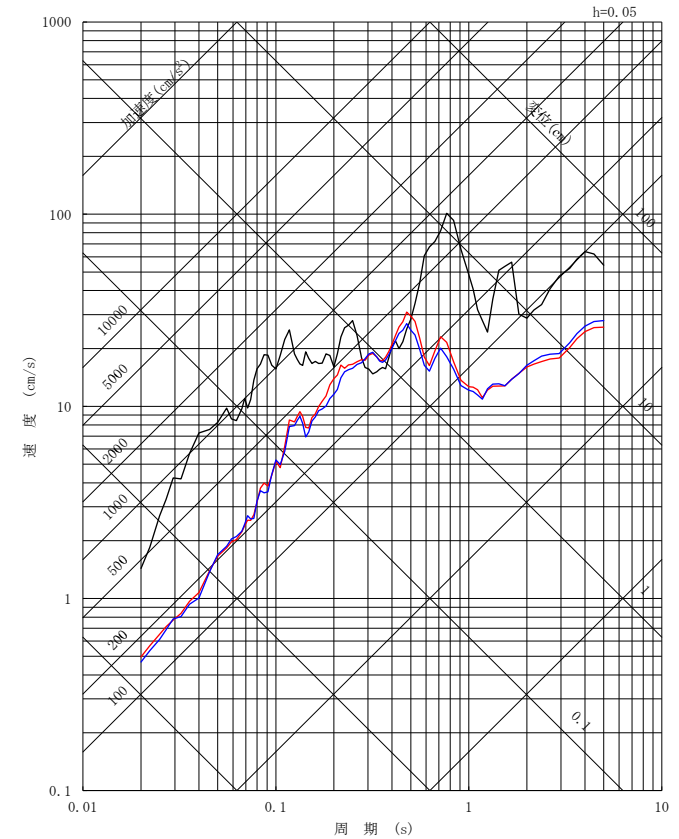
- 経験的グリーン関数法
- 統計的グリーン関数法
(統計的グリーン関数法用地盤モデル)
- 統計的グリーン関数法
(標準応答スペクトル用地盤モデル)



NS方向



EW方向



UD方向

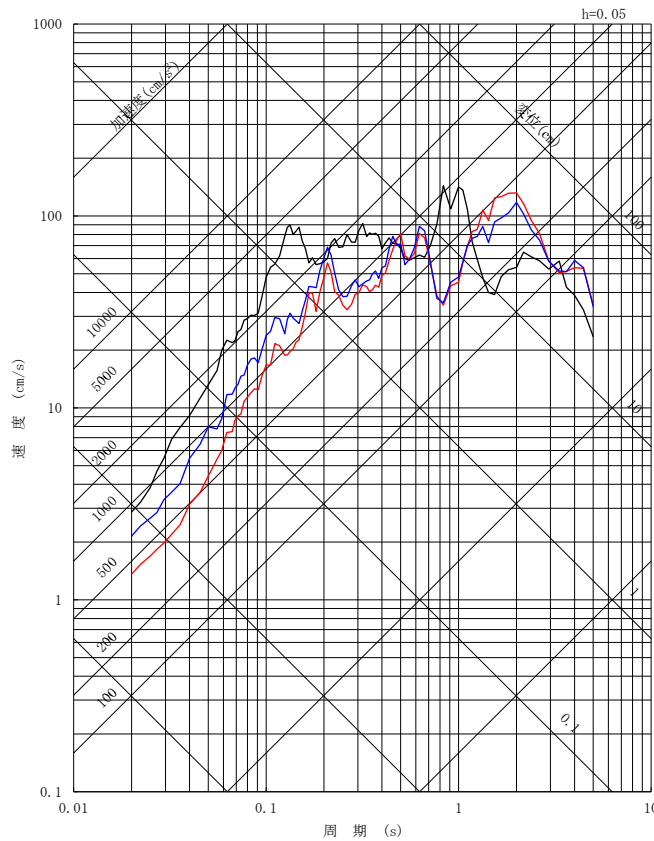
擬似速度応答スペクトル

- ・標準応答スペクトル用地盤モデルを用いた統計的グリーン関数法の評価結果は、従来の統計的グリーン関数法用地盤モデルを用いた統計的グリーン関数法の評価結果とほぼ同等であり、経験的グリーン関数法で策定した基準地震動の妥当性を改めて確認した。
- ・従って、経験的グリーン関数法で策定した基準地震動S_s-14の変更の必要はない。

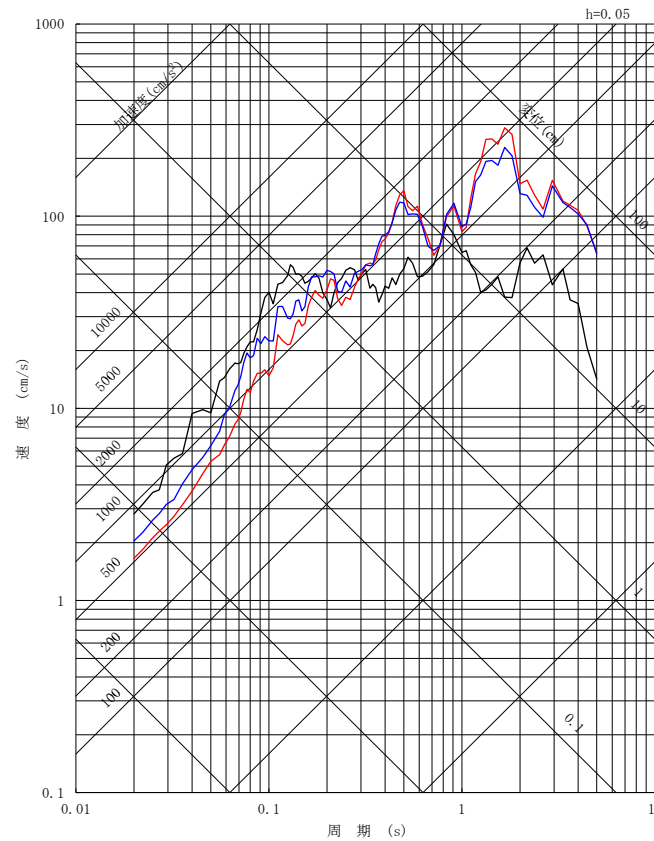
(2) 断層モデル手法による基準地震動S_sの妥当性確認(6/7)

■ S_s-21: 2011年東北地方太平洋沖型地震 (短周期レベルの不確かさ)

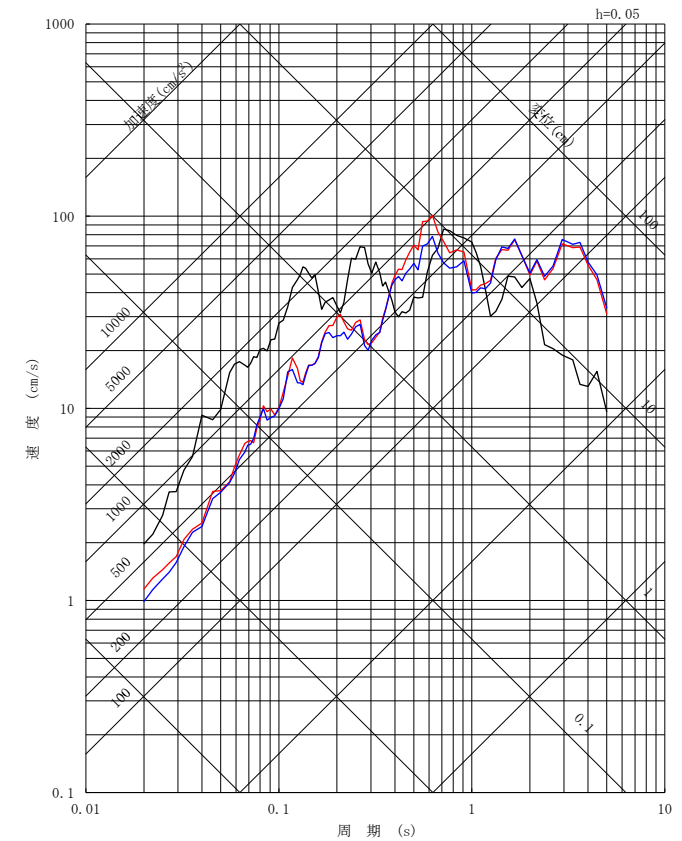
- 経験的グリーン関数法
- 統計的グリーン関数法
(統計的グリーン関数法用地盤モデル)
- 統計的グリーン関数法
(標準応答スペクトル用地盤モデル)



NS方向



EW方向



UD方向

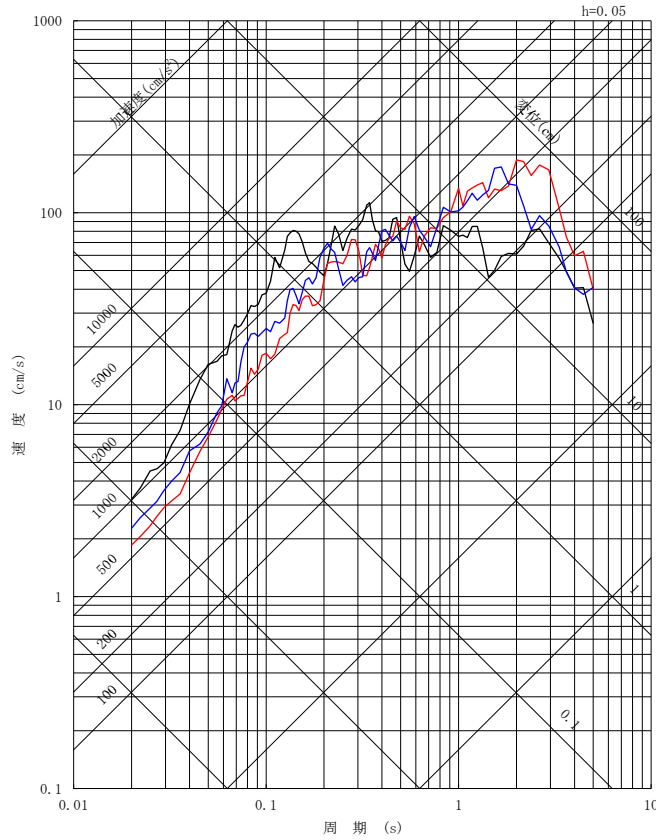
擬似速度応答スペクトル

- ・標準応答スペクトル用地盤モデルを用いた統計的グリーン関数法の評価結果は、従来の統計的グリーン関数法用地盤モデルを用いた統計的グリーン関数法の評価結果とほぼ同等であり、経験的グリーン関数法で策定した基準地震動の妥当性を改めて確認した。
- ・従って、経験的グリーン関数法で策定した基準地震動S_s-21の変更の必要はない。

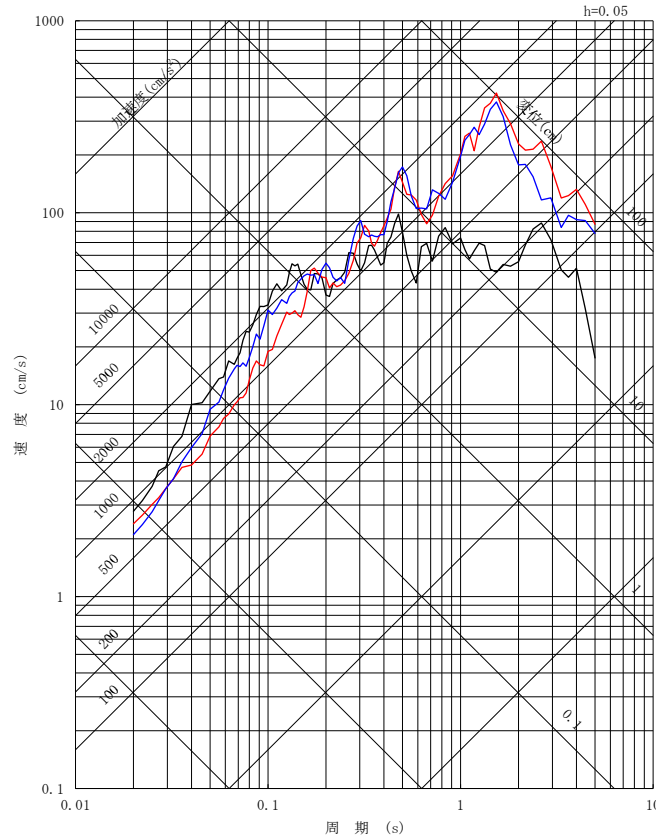
(2) 断層モデル手法による基準地震動S_sの妥当性確認(7/7)

■ S_s-22: 2011年東北地方太平洋沖型地震
(SMGA位置と短周期レベルの不確かさの重畳)

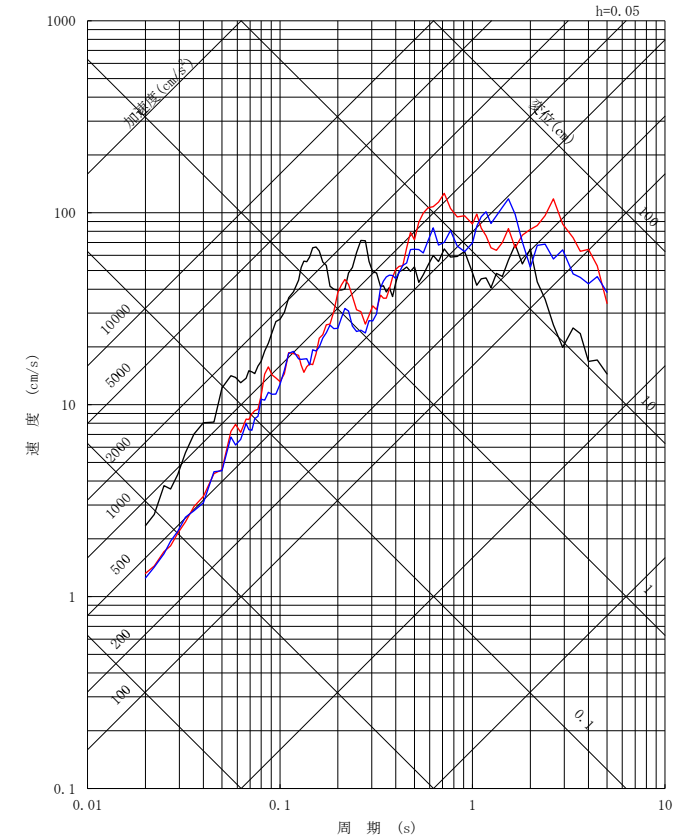
- 経験的グリーン関数法
- 統計的グリーン関数法
(統計的グリーン関数法用地盤モデル)
- 統計的グリーン関数法
(標準応答スペクトル用地盤モデル)



NS方向



EW方向



UD方向

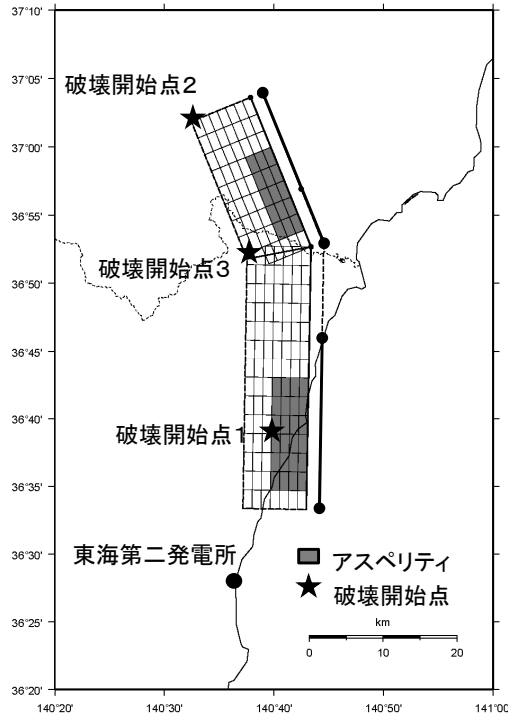
擬似速度応答スペクトル

- ・標準応答スペクトル用地盤モデルを用いた統計的グリーン関数法の評価結果は、従来の統計的グリーン関数法用地盤モデルを用いた統計的グリーン関数法の評価結果とほぼ同等であり、経験的グリーン関数法で策定した基準地震動の妥当性を改めて確認した。
- ・従って、経験的グリーン関数法で策定した基準地震動S_s-22の変更の必要はない。

参考 既往の経験的グリーン関数法と統計的グリーン関数法の比較: 内陸地殻内地震(1/2)

■評価条件

経験的グリーン関数法に用いる要素地震の妥当性確認のため、基本震源モデルに対し、統計的グリーン関数法による地震動評価を実施する。震源モデル及び評価に用いる地盤モデルを示す。

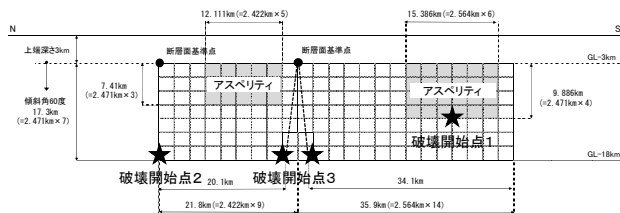


主な計算条件

- 地震基盤への鉛直入射を仮定し、一次元波動論に基づき解放基盤表面における地震波を作成する。
- 要素地震のスペクトル特性、経時特性ともBoore(1983)を用いる。
- Dan et al.(1989)の手法により波形合成を行う。

統計的グリーン関数法の評価に用いる地盤モデル

| 上面深度 | | 層厚 (m) | 密度 (g/cm ³) | Vs (m/s) | Vp (m/s) | hs | hp | 備考 |
|---------|--------|-----------|----------------------------|-------------|-------------|------------------------|------------------------|------------------|
| G.L.(m) | EL.(m) | | | | | | | |
| 0 | 8 | 378 | — | — | — | — | — | ▼解放基盤表面 EL.-370m |
| -378 | -370 | 107 | 1.85 | 790 | 2000 | 0.02 (Q=25) | 0.01 (Q=50) | ▼地震基盤 EL.-677m |
| -485 | -477 | 200 | 1.96 | 840 | 2110 | | | |
| -685 | -677 | — | 2.63 | 2750 | 4740 | Q=110f ^{0.69} | Q=110f ^{0.69} | |



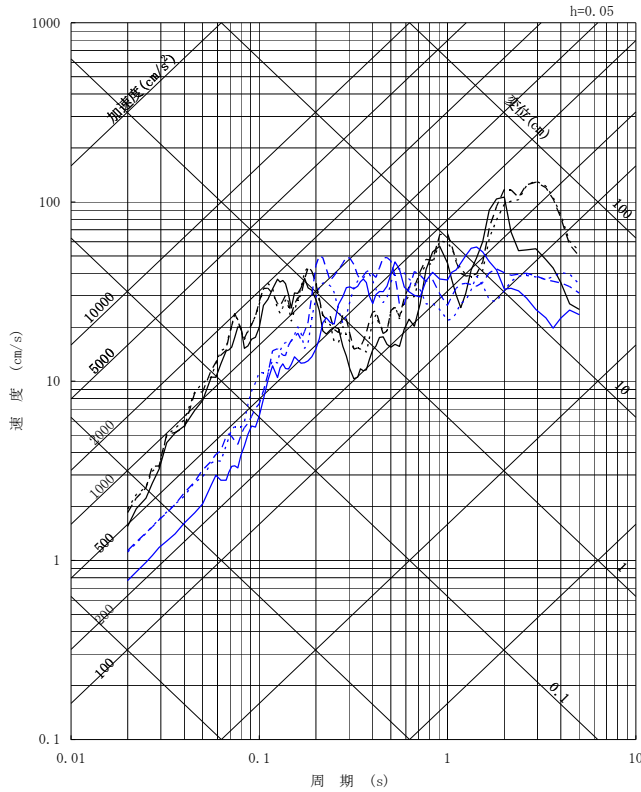
基本震源モデル

参考 既往の経験的グリーン関数法と統計的グリーン関数法の比較: 内陸地殻内地震(2/2)

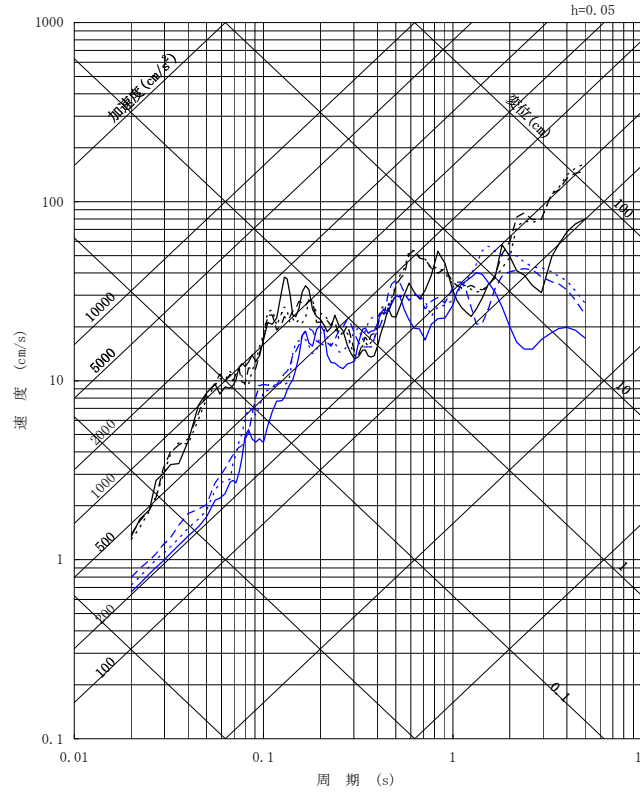
■ 基本震源モデルによる地震動評価結果の応答スペクトル

基本震源モデルに対し、経験的グリーン関数法による評価結果と統計的グリーン関数法による評価結果を比較する。

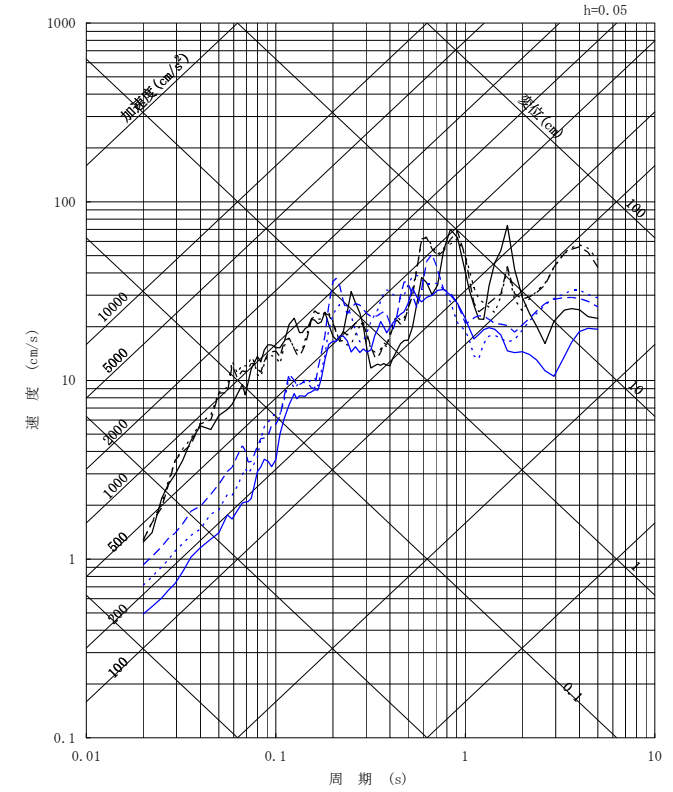
経験的グリーン関数法 破壊開始点1 ——— 破壊開始点2 - - - 破壊開始点3 - - - -
 統計的グリーン関数法 破壊開始点1 ——— 破壊開始点2 - - - 破壊開始点3 - - - -



NS方向



EW方向

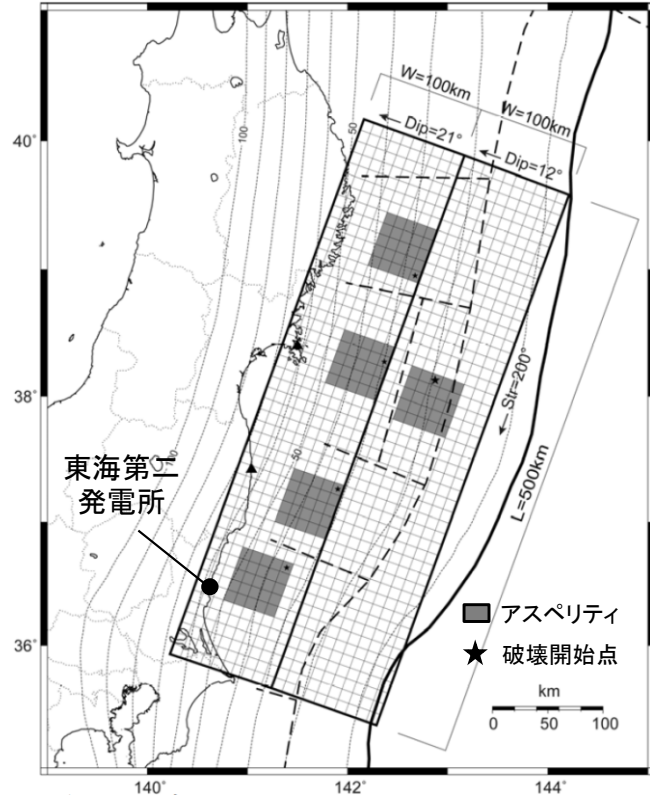


UD方向

- 統計的グリーン関数法による評価結果について、周期0.3~1秒程度から長周期側において経験的グリーン関数法による評価結果と概ね整合している。
- 短周期側における評価結果の差異は、経験的グリーン関数法において f_{max} の補正無しで評価したことにより、要素地震の f_{max} の特性がそのまま合成結果に現れたためと考えられる。

参考 既往の経験的グリーン関数法と統計的グリーン関数法の比較:プレート間地震(1/2)

■基本震源モデルに対して統計的グリーン関数法による評価を行う。



背景の太線は日本海溝、破線は海溝型地震の発生領域

震源モデル

統計的グリーン関数法の評価に用いる地盤モデル

| 上面深度 | | 層厚 (m) | 密度 (g/cm ³) | Vs (m/s) | Vp (m/s) | hs | hp | 備考 |
|----------|---------|-----------|----------------------------|-------------|-------------|------------------------|------------------------|------------------|
| G.L. (m) | EL. (m) | | | | | | | |
| 0 | 8 | 378 | — | — | — | — | — | ▼解放基盤表面 EL.-370m |
| -378 | -370 | 107 | 1.85 | 790 | 2000 | 0.02 (Q=25) | 0.01 (Q=50) | ▼地震基盤 EL.-677m |
| -485 | -477 | 200 | 1.96 | 840 | 2110 | | | |
| -685 | -677 | — | 2.63 | 2750 | 4740 | Q=110f ^{0.69} | Q=110f ^{0.69} | |

主な計算条件

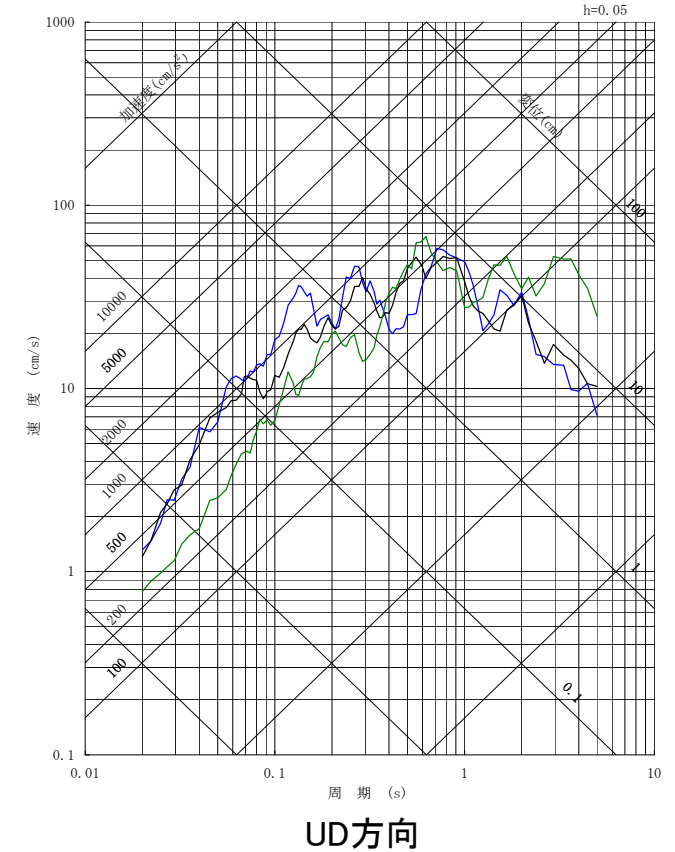
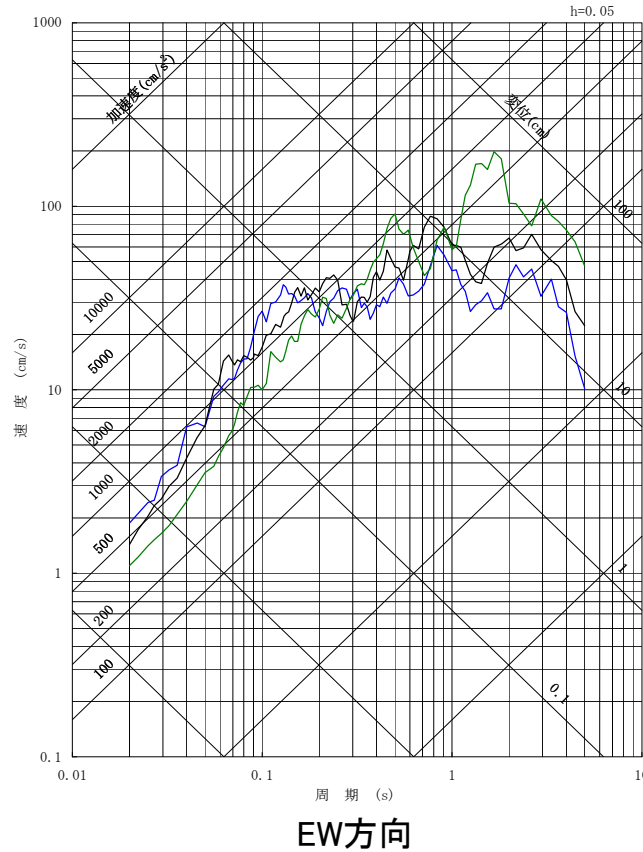
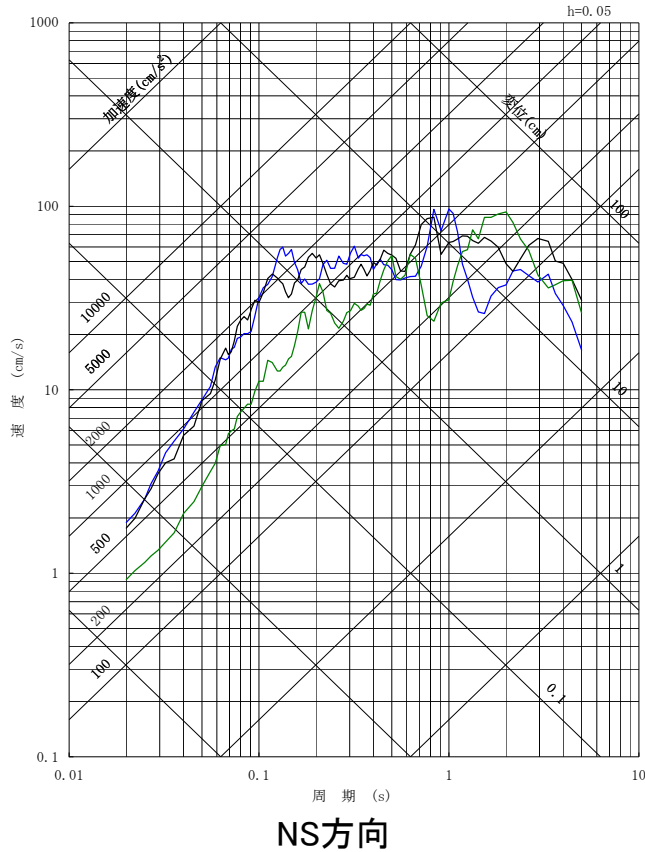
| 審査会合 | 地盤モデル | 入射方法 | 鉛直成分の計算方法 | f _{max} | 放射特性係数の補正 |
|----------------------|------------------------|------|---|------------------|---|
| 第243回 (諸井他(2013)) | 耐震バックチェックで用いた地盤モデル | 斜め入射 | 地震基盤においてSV波の平行成層地盤に対する斜め入射により算出する。 | 13.5Hz | 短周期成分を一定値(SV波, SH波で各0.445)とし、長周期成分を理論値とし、その間是对数軸上で線形補間した値とする。 |
| 第336回 | 耐震バックチェックで用いた地盤モデル | 鉛直入射 | 地震基盤において耐専スペクトルの鉛直/水平の応答スペクトル比を水平方向(SV波)のフーリエスペクトルに乗じて算出する。 | 13.5Hz | 短周期成分を一定値(SV波, SH波で各0.445)とし、長周期成分を理論値とし、その間是对数軸上で線形補間した値とする。 |
| 今回 | 統計的グリーン関数法の評価に用いる地盤モデル | 鉛直入射 | 地震基盤において耐専スペクトルの鉛直/水平の応答スペクトル比を水平方向(SV波)のフーリエスペクトルに乗じて算出する。 | 13.5Hz | 短周期成分を一定値(SV波, SH波で各0.445)とし、長周期成分を理論値とし、その間是对数軸上で線形補間した値とする。 |

参考 既往の経験的グリーン関数法と統計的グリーン関数法の比較:プレート間地震(2/2)

■断層モデルを用いた手法による地震動評価結果と東北地方太平洋沖地震の解放基盤波の比較

基本震源モデルを対象に、断層モデルを用いた手法による地震動評価結果(統計的グリーン関数法及び経験的グリーン関数法)と東北地方太平洋沖地震の解放基盤波とを比較する。

— 統計的グリーン関数法
— 経験的グリーン関数法
— 東北地方太平洋沖地震の解放基盤波



- 統計的グリーン関数法による評価結果について、経験的グリーン関数法による評価結果と概ね整合しているものの、短周期側はどの成分も統計的グリーン関数法による評価結果の方が小さい。
- 短周期側における評価結果の差異は、経験的グリーン関数法において f_{max} の補正無しで評価したことにより、要素地震の f_{max} の特性がそのまま合成結果に現れたためと考えられる。
- どの成分も経験的グリーン関数法を用いた方が観測記録との対応がよいことを確認した。

まとめ

■ 地震基盤相当面以深の先新第三系に設置した大深度地震計の観測記録の活用等により、標準応答スペクトル用地盤モデルを新たに設定したことに伴い、「(1) 統計的グリーン関数法用地盤モデルの見直し要否」及び「(2) 断層モデル手法による基準地震動 S_s の妥当性確認」について検討した。検討結果を以下に示す。

(1) 統計的グリーン関数法用地盤モデルの見直し要否

- 既許可審査において、経験的グリーン関数法による地震動評価に対する妥当性確認のために用いていた統計的グリーン関数法用地盤モデルについては、既許可審査以降に蓄積された地震基盤相当面以深(先新第三系)からの地震波の伝播特性に関する新しい知見等を取り入れて設定した標準応答スペクトル用地盤モデルに、更新することとする。

(2) 断層モデル手法による基準地震動 S_s の妥当性確認

- 既往の地震動評価のうち断層モデル手法による基準地震動 S_s に対し、今回新たに設定した標準応答スペクトル用地盤モデルを用いて、その妥当性を改めて確認した。
- 標準応答スペクトル用地盤モデルを用いた統計的グリーン関数法の評価結果により、経験的グリーン関数法により策定した基準地震動($S_s-11\sim 14, 21, 22$)の妥当性を改めて確認していることから、基準地震動($S_s-11\sim 14, 21, 22$)を変更する必要はない。

標準応答スペクトル用地盤モデル

| | 上端標高 (m) | S波速度 (m/s) | P波速度 (m/s) | 密度 (g/cm ³) | 減衰定数h(f) | |
|-----------|-------------|---------------|---------------|----------------------------|--|--|
| | | | | | 水平 | 鉛直 |
| ▽ 解放基盤表面 | -370.0 | 790 | 2000 | 1.85 | 0.061f ^{-1.05} (f≤6.78) 0.008 (f>6.78) | 0.264f ^{-1.05} (f≤31.74) 0.007 (f>31.74) |
| | -476.0 | 835 | 2124 | 1.89 | 0.058f ^{-1.05} (f≤6.78) 0.008 (f>6.78) | 0.249f ^{-1.05} (f≤31.74) 0.007 (f>31.74) |
| 地震基盤相当面 | -566.0 | 904 | 2205 | 2.00 | 0.054f ^{-1.05} (f≤6.78) 0.007 (f>6.78) | 0.240f ^{-1.05} (f≤31.74) 0.006 (f>31.74) |
| =速度コントラスト | -655.0 | 947 | 2256 | 2.07 | 0.051f ^{-1.05} (f≤6.78) 0.007 (f>6.78) | 0.234f ^{-1.05} (f≤31.74) 0.006 (f>31.74) |
| ▽ の大きい境界面 | -679.0 | 2200 | 4800 | 2.65 | 0.013f ^{-0.21} (f≤1.31) 0.012 (f>1.31) | 0.004f ^{-0.23} (f≤16.46) 0.002 (f>16.46) |

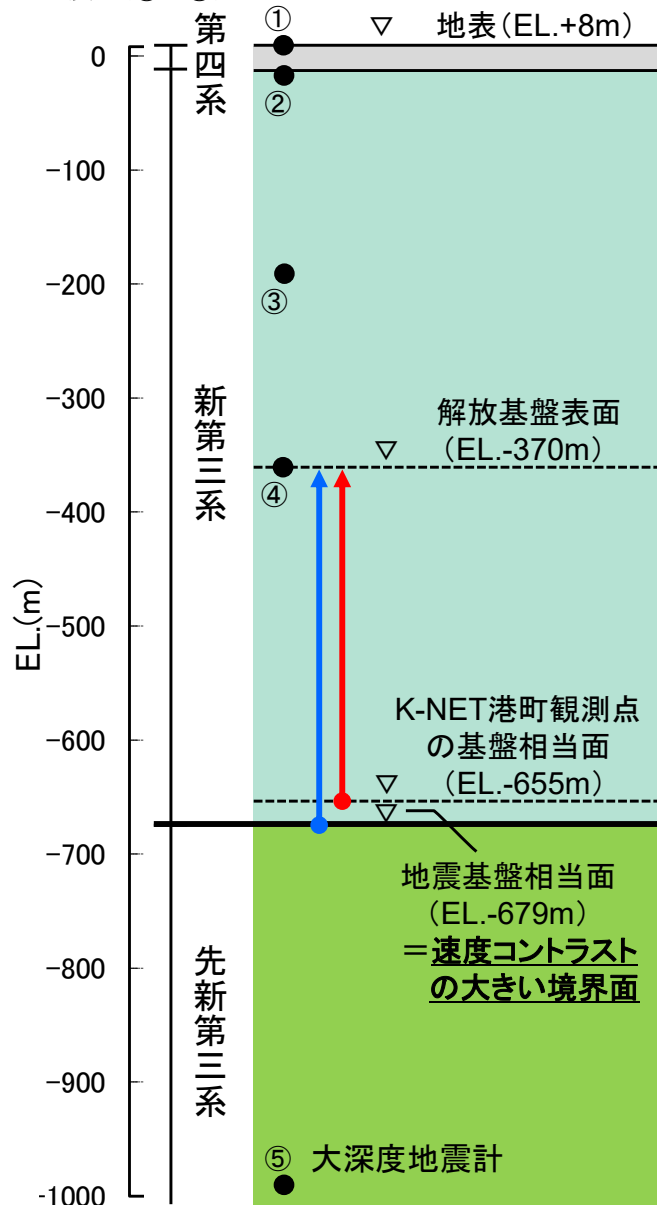
統計的グリーン関数法用地盤モデル
(左記モデルに更新)

| 上端標高 (m) | S波速度 (m/s) | P波速度 (m/s) | 密度 (g/cm ³) | 減衰定数 | |
|-------------|---------------|---------------|----------------------------|------------------------|--------|
| | | | | 水平 | 鉛直 |
| -370.0 | 790 | 2000 | 1.85 | h=0.02 | h=0.01 |
| -477.0 | 840 | 2110 | 1.96 | | |
| -677.0 | 2750 | 4740 | 2.63 | Q=110f ^{0.69} | |

■ :新第三系
■ :先新第三系

3. 標準応答スペクトルの取入れに伴う留萌用地盤モデルの位置づけ

- ↑ : 地震動評価に用いる範囲(始点:入力位置, 終点:出力位置)
 (赤:留萌波の地震動評価,
 青:標準応答スペクトルに基づく地震動評価)
 ● : 地震計(①~⑤)



東海第二発電所敷地地盤のイメージ図

■標準応答スペクトルに基づく地震動評価では、地震基盤相当面以深の先新第三系に設置した大深度地震計の観測記録の活用等により新たに地盤モデルを設定したことに伴い、既許可の留萌用地盤モデルについて、その見直し要否を以下のとおり検討する。

■モデル設定の着眼点の違いを踏まえた留萌用地盤モデルの見直し要否に係る検討

・留萌用地盤モデルの検討では、K-NET港町観測点の基盤層が $V_s 938\text{m/s}$ の層であったことから、敷地の速度構造に照らし、K-NET港町観測点の基盤相当面(EL.-655m)が位置する第四系下部更新統～新第三系鮮新統(以降、新第三系)までの深さの範囲(地震基盤相当面(EL.-679m)以浅)に着目している。一方、標準応答スペクトル用地盤モデルの検討では、標準応答スペクトルが $V_s 2200\text{m/s}$ 以上の地震基盤相当面で定義されていることから、敷地の速度構造に照らし、速度コントラストの大きい境界面(地震基盤相当面(EL.-679m))を含む先新第三系の深さまで着目する範囲を拡大している。

・このように地盤モデルの設定に際しては着目する地層区分及び深さの範囲の違いを踏まえたそれぞれの目的に応じて検討を行っている。この点について、両地盤モデルの速度構造や減衰定数の設定の考え方を改めて整理し、留萌用地盤モデルの見直し要否を判断する。

(1) 速度構造の設定

留萌用地盤モデルと標準応答スペクトル用地盤モデルの考え方を整理し比較する。

(2) 減衰定数の設定

留萌用地盤モデルと標準応答スペクトル用地盤モデルの考え方を整理し比較する。

(3) 留萌用地盤モデルの見直し要否

以上の整理結果を踏まえて留萌用地盤モデルの見直し要否を判断する。

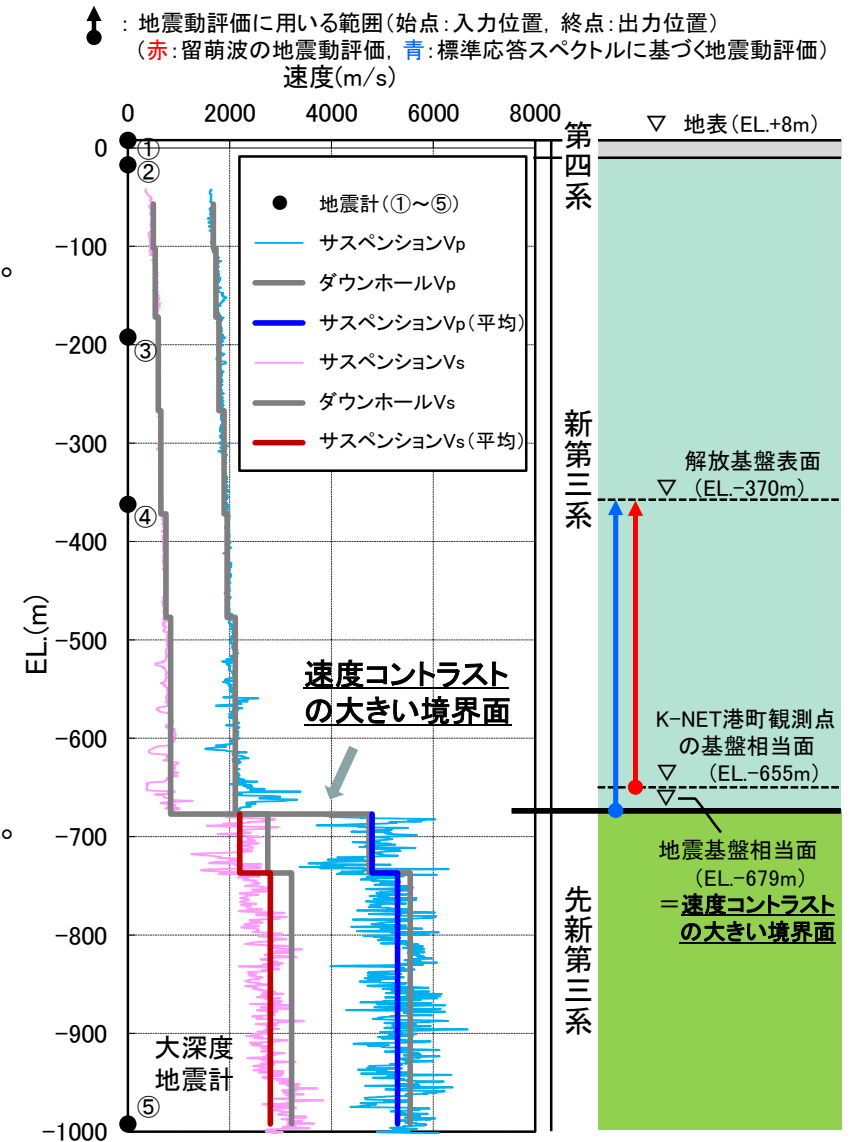
(1) 速度構造の設定

■留萌用地盤モデルの速度構造の考え方

- 留萌波の検討においては、K-NET港町観測点における基盤地震動に敷地の地盤特性を考慮する必要がある。具体的には、基盤地震動を推定した基盤層に相当する層を検討し、その層に基盤地震動を入力して解放基盤表面まで引き上げることで、敷地の地盤物性を考慮する。
- 東海第二発電所敷地に分布する新第三系の久米層の地盤速度は、物理探査等の調査結果から、深度に依存して漸増する一次関数の式(標高依存式)で表現できる。この特徴を踏まえ、より適切な基盤相当層を検討すべく、既に設定済であった統計的グリーン関数法用地盤モデルとは別に、より層区分を細分化する等の検討を行い、**留萌波の検討に特化した新たな地盤モデルを設定**することとした。
- 地盤速度や密度の値については細分化した層区分に対して上述の標高依存式により算出することとした。基盤相当面については、K-NET港町観測点における基盤層と同値となる $V_s 938\text{m/s}$ として、この標高依存式を用いて、EL.-655m位置に設定した。

■標準応答スペクトル用地盤モデルの速度構造の考え方

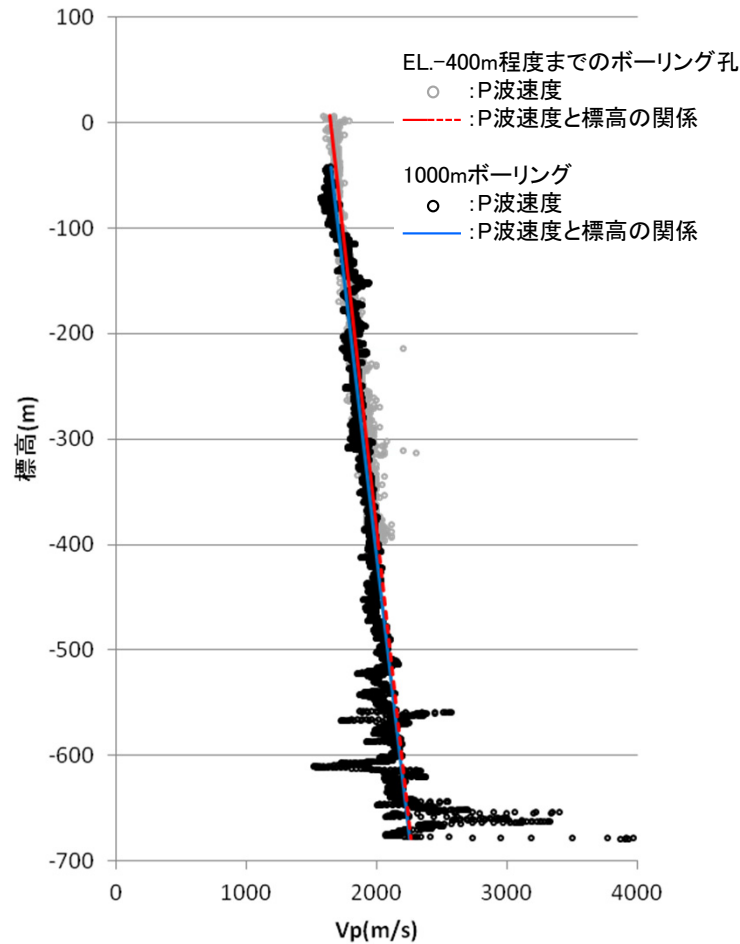
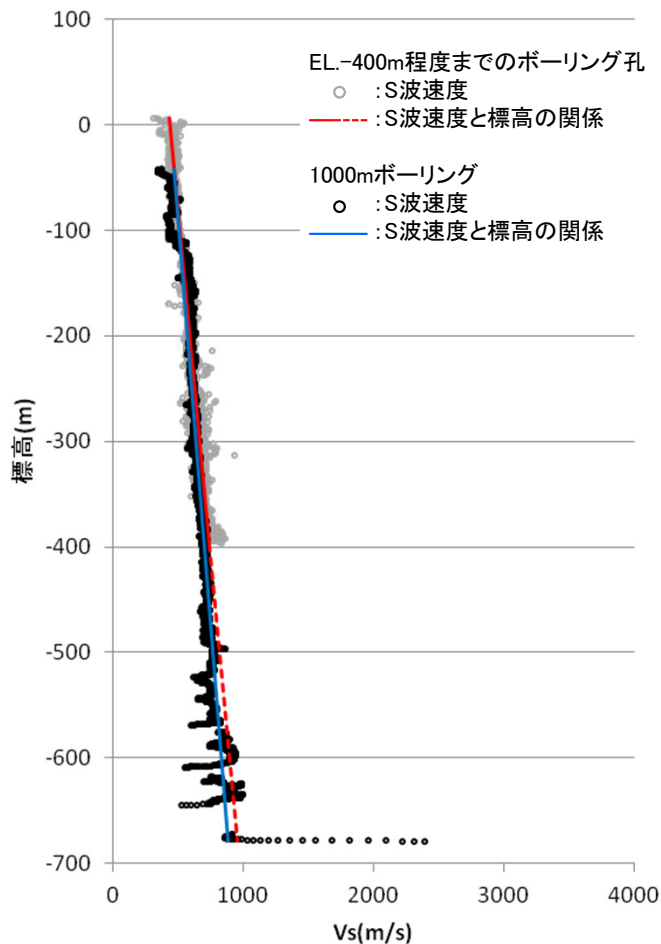
- 標準応答スペクトルに基づく検討においては、 $V_s 2200\text{m/s}$ 以上の地震基盤相当面で定義された標準応答スペクトルに敷地の地盤特性を考慮する必要がある。具体的には、標準応答スペクトルに適合するよう作成した模擬地震波を、地震基盤相当面に入力して解放基盤表面まで引き上げることで、敷地の地盤物性を考慮する。
- 標準応答スペクトルが定義されている地震基盤相当面($V_s 2200\text{m/s}$ 以上)に相当する敷地での層を検討する観点から、地震基盤相当面以深(先新第三系)まで掘削している大深度ボーリングデータに着目し、既許可の地盤モデルから地震基盤相当面以深の速度構造について再度検討を行い、**標準応答スペクトルに基づく地震動評価のための新たな地盤モデルを設定**することとした。
- 地震基盤相当面については、既往の物理探査結果との比較により妥当性を確認した上で、大深度ボーリングデータのサスペンション法の結果に準拠し、 $V_s 2200\text{m/s}$ として、EL.-679m位置に設定した。
- 地震基盤相当面以浅(新第三系)については、留萌用地盤モデルと同様、細分化した層区分に対して標高依存式を用いて設定した。



大深度ボーリングのPS検層結果の例及び地盤モデルの検討イメージ

地震基盤相当面以浅(新第三系)の速度構造の設定(2つの地盤モデル共通)

- ・東海第二発電所敷地に分布する新第三系の久米層の地盤速度は、深度方向に増大する傾向を示す。
- ・標高-400m程度まで掘削した5孔のボーリング孔で実施したPS検層によって得られた地盤速度と1000mボーリングで実施したPS検層によって得られた地盤速度を以下に示す。また併せて、それぞれのPS検層結果から得られる標高と地盤速度の関係を示す。
- ・標高-400m程度まで掘削した5孔のボーリング孔で実施したPS検層データを基に作成した地盤速度と標高の関係は、1000mボーリングで実施したPS検層結果と整合的であり、久米層における地盤速度は、標高-400m程度まで掘削した5孔のボーリング孔で実施したPS検層データを基に作成した地盤速度と標高の関係より求める。



久米層における
地盤速度と標高の関係

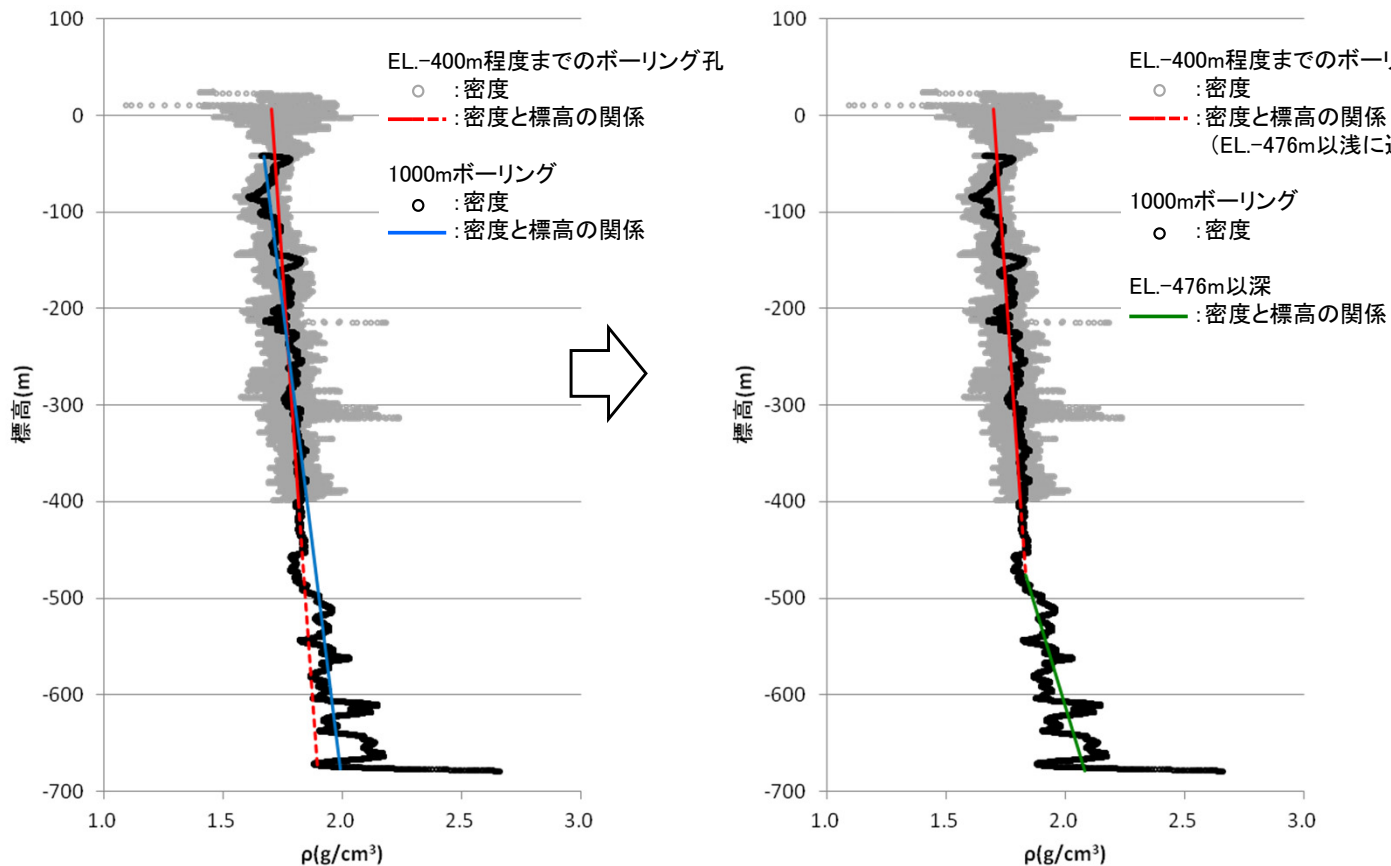
$$V_s = 0.433 - 7.71 \times 10^{-4} \cdot Z$$

$$V_p = 1.65 - 9.09 \times 10^{-4} \cdot Z$$

ここで、 V_s : S波速度 (km/s)
 V_p : P波速度 (km/s)
 Z : 標高 (m)

地震基盤相当面以浅(新第三系)の密度の設定(2つの地盤モデル共通)

- ・東海第二発電所敷地に分布する新第三系の久米層の密度は、深度方向に増大する傾向を示す。
- ・標高-400m程度まで掘削した5孔のボーリング孔で実施した密度検層によって得られた密度と1000mボーリングで実施した密度検層によって得られた密度を以下に示す。また併せて、それぞれの密度検層結果から得られる標高と密度の関係を示す。
- ・標高-400m程度まで掘削した5孔のボーリング孔で実施した密度検層データを基に作成した密度と標高の関係は、1000mボーリングで実施した密度検層結果とEL.-500m程度まで整合的であるが、EL.-500m以深では密度と標高の関係より密度検層データが大きくなる。
- ・1000mボーリング結果によると、EL.-476m以深では砂質泥岩層と乱堆積物層との互層が見られることより、EL.-476mを境に密度と標高の関係を変えることとした。

久米層における
密度と標高の関係

$$\rho = 1.702 - 2.828 \times 10^{-4} \cdot Z$$

(EL.-476m 以浅)

$$\rho = 1.253 - 1.220 \times 10^{-3} \cdot Z$$

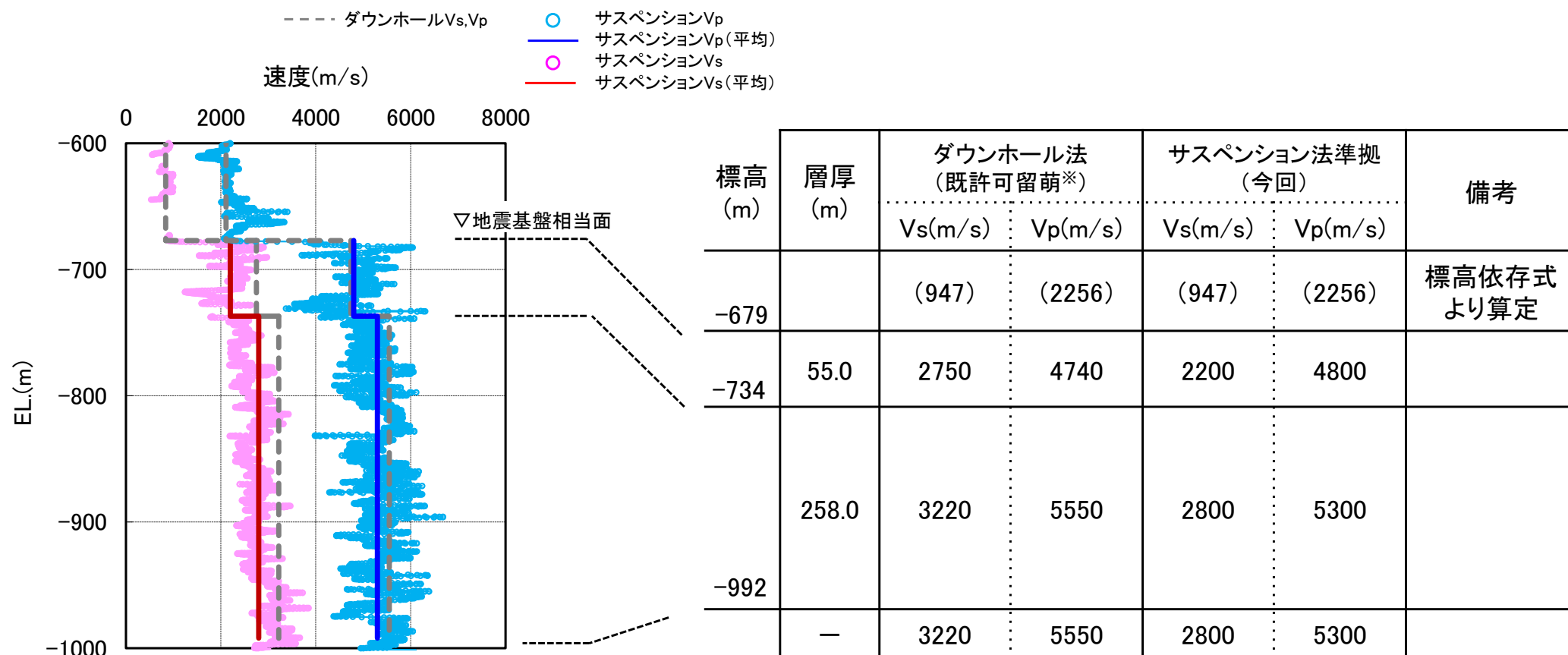
(EL.-476m 以深)

ここで、 ρ : 密度 (g/cm³)
Z : 標高 (m)

地震基盤相当面以深(先新第三系)の速度構造の設定(標準応答スペクトル用地盤モデル)

■EL.-679m以深(先新第三系)

- ・地震基盤相当面以深では、大深度ボーリングのダウンホール法とサスペンション法との結果で差が生じていることから速度構造を再検討する。今回は、サスペンション法に準拠して速度構造を設定する。具体的には、ダウンホール法における同一層内で、サスペンション法のVs, Vpをそれぞれ平均して求めた値を用いる。
- ・地震基盤相当面位置は、Vs2200m/s以上に相当する敷地での層の上面としてEL.-679m(Vs2200m/s)に設定する。
- ・**上記の通り設定した速度構造**について、既往の物理探査結果との比較により妥当性を確認する。



※ 既許可においては、地盤モデルの層区分との対応が明確なダウンホール法のVs, Vp値を設定

2つの地盤モデルにおける速度構造の設定及び比較

■ 留萌用地盤モデルと標準応答スペクトル用地盤モデル, それぞれの速度構造の設定について, 比較して以下に示す。

【速度構造の設定】

両モデル共通:

- ① 層区分については概ね100m程度を目安に設定。
- ② 上層との連続性を考慮し, 上層(地表(EL.8m)からEL.-372mで観測した地震記録をもとに地盤同定解析を行い設定)と同じ値を設定。
- ③ 調査結果に基づく標高依存式より, 当該層の中心位置の値を算出。

留萌用地盤モデル:

- ④ 敷地におけるK-NET港町観測点の基盤相当面位置については, K-NET港町観測点における基盤層と同値となるVs938m/sとして, 調査結果に基づく標高依存式を用いてEL.-655mに設定した。Vp, 密度の値についてはEL.-655m位置において標高依存式から得られる値を設定。

標準応答スペクトル用地盤モデル:

- ③' 調査結果に基づく標高依存式より, 当該層の中心位置の値を算出。
- ⑤ 大深度ボーリングデータのサスペンション法の結果に準拠し, ダウンホール法における同一層内で, サスペンション法のVs, Vpをそれぞれ平均して求めた値を設定。

留萌用地盤モデルの速度構造

| | 上端標高 (m) | S波速度 (m/s) | P波速度 (m/s) | 密度 (g/cm ³) |
|-----------------|----------|------------|------------|-------------------------|
| ▽解放基盤表面 | | | | |
| ① | -370.0 | ② 790 | 2000 | 1.85 |
| K-NET 港町観測点の | -476.0 | ③ 835 | 2124 | 1.89 |
| ▽基盤相当面 | -566.0 | 904 | 2205 | 2.00 |
| ④ | -655.0 | 938 | 2245 | 2.05 |

□ : 留萌波の評価に特化した物性値

標準応答スペクトル用地盤モデルの速度構造

| | 上端標高 (m) | S波速度 (m/s) | P波速度 (m/s) | 密度 (g/cm ³) |
|----------|----------|------------|------------|-------------------------|
| ① | -370.0 | ② 790 | 2000 | 1.85 |
| | -476.0 | ③ 835 | 2124 | 1.89 |
| | -566.0 | 904 | 2205 | 2.00 |
| | -655.0 | ③' 947 | 2256 | 2.07 |
| ▽地震基盤相当面 | ⑤ -679.0 | 2200 | 4800 | 2.65 |

・地震基盤相当面以浅(新第三系)では, 留萌用地盤モデルと標準応答スペクトル用地盤モデルの速度構造の基本的な考え方は同じであるが, 留萌用地盤モデルの速度構造については, 新第三系の久米層の地盤速度が深度に依存して漸増する一次関数の式(標高依存式)で表現できる特徴があることから, この標高依存式を用いて, 留萌波の入力位置となる基盤相当面をK-NET港町観測点における基盤層と同値となるVs938m/sとしてEL.-655mに設定しており, 留萌波の検討に特化したモデルとなっている。

・留萌波の地震動評価においては, 地盤速度が標高依存式で表現できる特徴を反映し, この評価に特化した留萌用地盤モデルの速度構造を用いることが適切である。

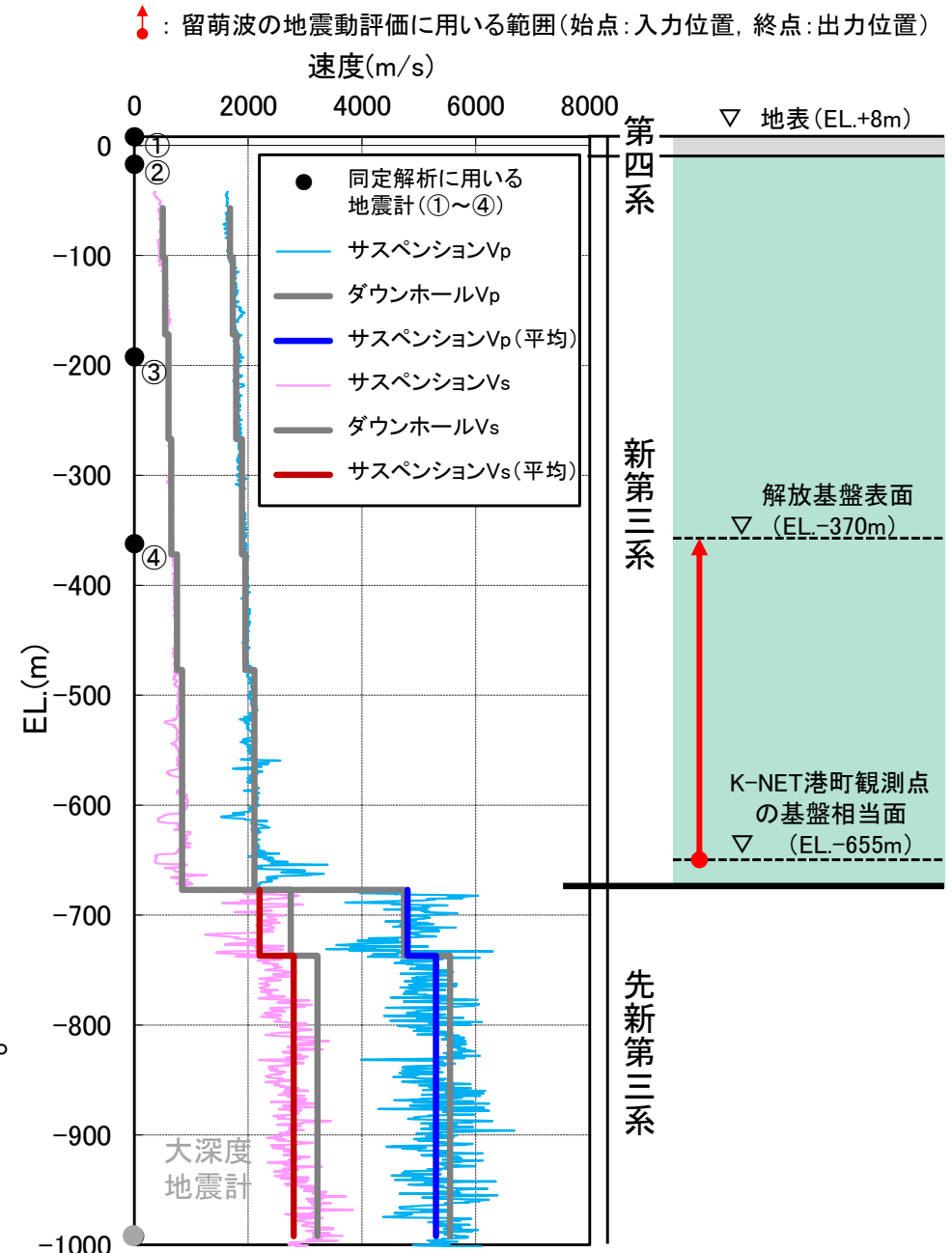
(2) 減衰定数の設定: 減衰定数の設定(留萌用地盤モデル) (1/2)

■ 留萌用地盤モデルの検討の着眼点

検討に用いる留萌波が $V_s 938\text{m/s}$ の基盤層で推定されていることから、敷地の新第三系の地盤速度の特徴を踏まえ基盤相当面を新第三系内の $\text{EL.}-655\text{m}$ に $V_s 938\text{m/s}$ として設定している。検討範囲が新第三系に留まることから、新第三系内における伝播特性に着目して検討を行っている。

■ 新第三系の特徴を踏まえた減衰定数の考え方

- ・新第三系の速度構造については、前述のとおり、地盤速度が物理探査等の調査結果から深度に依存して漸増する一次関数の式(標高依存式)で表現でき、明瞭な速度コントラストが見られないという特徴がある。
- ・新第三系内以浅には地表(第四系)を含む4点(①~④)の鉛直アレイ地震計があり、そのうち3点(②~④)は新第三系内に設置している。
- ・この新第三系内に設置している3点の地震計による3ペアの伝達関数(② $\text{EL.}-17\text{m}$ / ③ $\text{EL.}-192\text{m}$, ② $\text{EL.}-17\text{m}$ / ④ $\text{EL.}-372\text{m}$, ③ $\text{EL.}-192\text{m}$ / ④ $\text{EL.}-372\text{m}$)を含め、伝達関数の組合せとして最大となる6ペアの伝達関数を考慮した同定解析から得られた新第三系の区間の減衰定数を一括で求めている。
- ・新第三系の連続性を考慮して、上記で求めた減衰定数を新第三系の下端まで一律に設定している。



大深度ボーリングのPS検層結果の例及び地盤モデルの検討イメージ

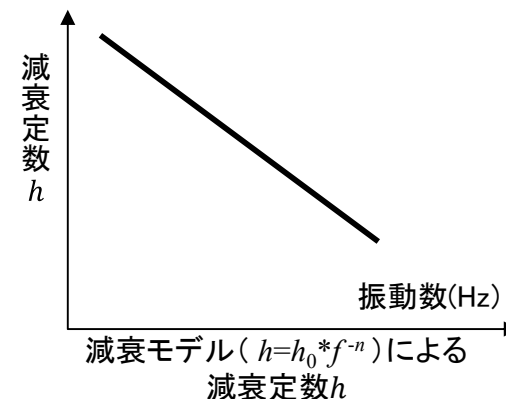
減衰定数の設定(留萌用地盤モデル) (2/2)

■留萌用地盤モデルの減衰定数の設定

- ・明瞭な速度コントラストの見られない新第三系内の地震波の伝播特性に着目して実施した同定解析結果を踏まえ、新第三系としての減衰定数を一律に設定している。
- ・同定解析における減衰モデル h は、下限値を考慮しない振動数依存型を採用し、減衰定数 $h(f)$ を設定している。

地表～新第三系の地盤モデル

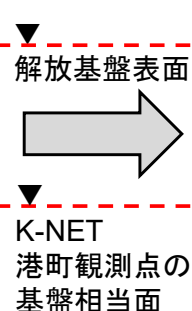
| EL. (m) | 層厚 (m) | 地層 | S波速度 (m/s) | P波速度 (m/s) | 密度 (g/cm ³) | 減衰定数 $h(f)$ | |
|------------|-----------|------|---------------|---------------|----------------------------|--------------------|-------------------|
| | | | | | | 水平 | 鉛直 |
| 8.0 | | 第四系 | | | | | |
| 5.5 | 2.5 | | 130 | 280 | 1.71 | 0.236 $f^{-0.752}$ | 0.203 $f^{-0.21}$ |
| 1.0 | 4.5 | | 151 | 403 | | | |
| -7.0 | 8.0 | | 308 | 1589 | 1.66 | | |
| -15.0 | 8.0 | | 478 | 1509 | 1.82 | | |
| -106.0 | 91.0 | 477 | 1753 | 1.69 | 0.072 $f^{-0.931}$ | | |
| -168.0 | 62.0 | 557 | 1742 | 1.74 | | | |
| -260.0 | 92.0 | 669 | 2067 | 1.78 | | | |
| -368.0 | 108.0 | 756 | 2256 | 1.82 | | | |
| -370.0 | 2.0 | 新第三系 | 790 | 2000 | | 1.85 | |
| -476.0 | 106.0 | | 835 | 2124 | | 1.89 | |
| -566.0 | 90.0 | | 835 | 2124 | | 1.89 | |
| -655.0 | 89.0 | | 904 | 2205 | | 2.00 | |
| -679.0 | 24.0 | | 947 | 2256 | | 2.07 | |



同定解析に用いる減衰モデル h のイメージ図

留萌用地盤モデル※

| EL. (m) | 層厚 (m) | S波速度 (m/s) | P波速度 (m/s) | 密度 (g/cm ³) | 減衰定数 $h(f)$ | |
|------------|-----------|---------------|---------------|----------------------------|--------------------|-------------------|
| | | | | | 水平 | 鉛直 |
| -370.0 | | | | | | |
| -476.0 | 106.0 | 790 | 2000 | 1.85 | 0.072 $f^{-0.931}$ | 0.203 $f^{-0.93}$ |
| -566.0 | 90.0 | 835 | 2124 | 1.89 | | |
| -655.0 | 89.0 | 904 | 2205 | 2.00 | | |
| -679.0 | - | 938 | 2245 | 2.05 | | |



▽出力位置
▽入力位置

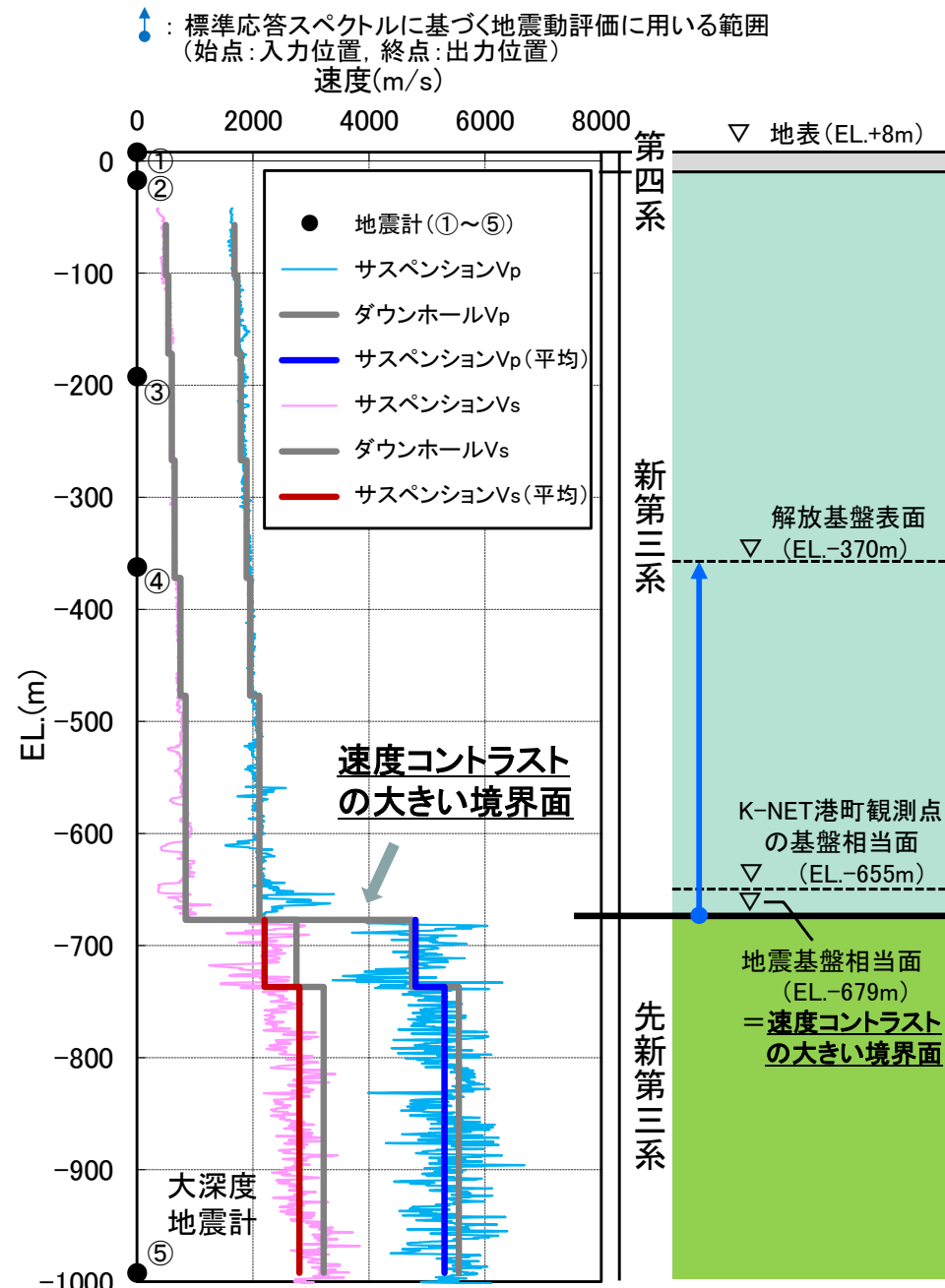
※ 留萌用地盤モデルの設定の詳細については、補足説明資料②に示す。

■標準応答スペクトル用地盤モデルの検討の着眼点

標準応答スペクトルが $V_s 2200\text{m/s}$ 以上となる地震基盤相当面で定義されており、検討範囲が新第三系から先新第三系にわたることから、速度コントラストの大きい境界面が含まれる、地震基盤相当面以深から解放基盤表面までの広範囲における地震波の伝播特性に着目して検討を行っている。

■深部地下構造の特徴を踏まえた減衰定数の設定の考え方

- ・新第三系と先新第三系の間には速度コントラストの大きい境界面(地震基盤相当面(EL.-679m))が存在することから、この2つの層を地震波が伝播する過程で増幅特性が大きく変化することが想定され、この増幅特性を適切に評価することが重要である。
- ・敷地においては先新第三系のEL.-992m位置に大深度地震計を設置して観測を行っていることから、このデータと浅部の鉛直アレイ地震計を組み合わせることで速度コントラストの大きい境界面を伝播した際の増幅特性について、観測記録を用いた確認が可能となる。
- ・速度コントラストの大きい境界面の影響が含まれる、鉛直アレイ地震計(④EL.-372m)と大深度地震計(⑤EL.-992m)のペア間の伝達関数を考慮した広範囲の同定解析により、新第三系、先新第三系の減衰定数を細分化した層区分毎に設定している。



大深度ボーリングのPS検層結果の例及び地盤モデルの検討イメージ

3. 標準応答スペクトルの取入れに伴う留萌用地盤モデルの位置づけ (2) 減衰定数の設定

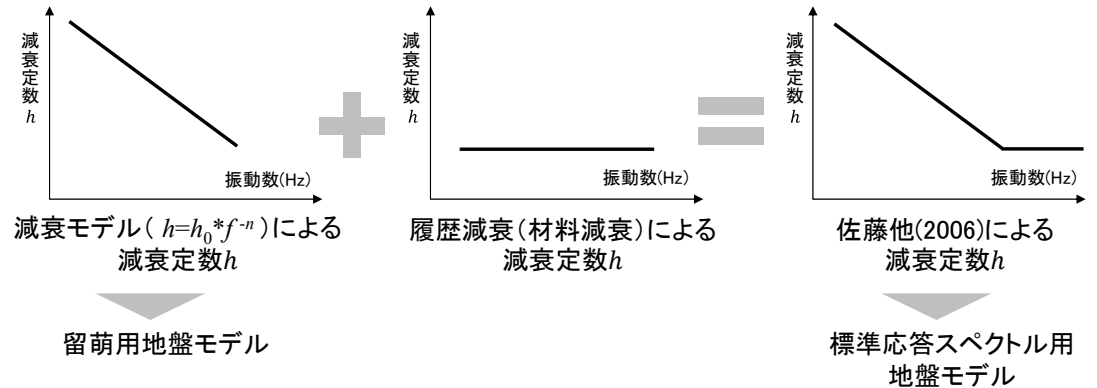
減衰定数の設定(標準応答スペクトル用地盤モデル) (2/2)

■標準応答スペクトル用地盤モデルの減衰定数の設定

- ・速度コントラストの大きい境界面の影響が含まれる, 広範囲の同定解析により, 新第三系, 先新第三系の減衰定数を細分化した層区分毎に設定している。
- ・同定解析における減衰モデル h は, 評価事例の蓄積を踏まえ, より現実に則した合理的なモデルとして下限値を考慮した振動数依存型を採用し, 減衰定数 $h(f)$ を設定している。

地表～地下深部までの地盤モデル

| EL. (m) | 層厚 (m) | S波速度 (m/s) | P波速度 (m/s) | 密度 (g/cm ³) | 減衰定数 $h(f)$ | | |
|------------|-----------|----------------------|---------------|----------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| | | | | | 水平 | 鉛直 | |
| 第四系 | 8.0 | 2.5 | 130 | 280 | 0.921 $f^{-1.32}$ ($f \leq 18.74$) | 1.170 $f^{-0.91}$ ($f \leq 19.45$) | |
| | 5.5 | | | | 0.019 ($f > 18.74$) | 0.079 ($f > 19.45$) | |
| | 1.0 | 4.5 | 151 | 403 | 0.793 $f^{-1.32}$ ($f \leq 18.74$) | 0.813 $f^{-0.91}$ ($f \leq 19.45$) | |
| | | | | | 0.017 ($f > 18.74$) | 0.055 ($f > 19.45$) | |
| 新第三系 | 8.0 | 308 | 1589 | 1.66 | 0.389 $f^{-1.32}$ ($f \leq 18.74$) | 0.206 $f^{-0.91}$ ($f \leq 19.45$) | |
| | -7.0 | 8.0 | 478 | 1509 | 1.82 | 0.250 $f^{-1.32}$ ($f \leq 18.74$) | 0.217 $f^{-0.91}$ ($f \leq 19.45$) |
| | -15.0 | 2.0 | 477 | 1753 | 1.69 | 0.102 $f^{-1.05}$ ($f \leq 6.78$) | 0.301 $f^{-1.05}$ ($f \leq 31.74$) |
| | -17.0 | 89.0 | | | | 0.014 ($f > 6.78$) | 0.008 ($f > 31.74$) |
| | -106.0 | 62.0 | 557 | 1742 | 1.74 | 0.087 $f^{-1.05}$ ($f \leq 6.78$) | 0.303 $f^{-1.05}$ ($f \leq 31.74$) |
| | -168.0 | 24.0 | 669 | 2067 | 1.78 | 0.072 $f^{-1.05}$ ($f \leq 6.78$) | 0.256 $f^{-1.05}$ ($f \leq 31.74$) |
| | -192.0 | 68.0 | | | | 0.010 ($f > 6.78$) | 0.007 ($f > 31.74$) |
| | -260.0 | 108.0 | 756 | 2256 | 1.82 | 0.064 $f^{-1.05}$ ($f \leq 6.78$) | 0.234 $f^{-1.05}$ ($f \leq 31.74$) |
| | -368.0 | 2.0 | 790 | 2000 | 1.85 | 0.061 $f^{-1.05}$ ($f \leq 6.78$) | 0.264 $f^{-1.05}$ ($f \leq 31.74$) |
| | -370.0 | 0.008 ($f > 6.78$) | | | | 0.007 ($f > 31.74$) | |
| | -372.0 | 104.0 | 790 | 2000 | 1.85 | 0.061 $f^{-1.05}$ ($f \leq 6.78$) | 0.264 $f^{-1.05}$ ($f \leq 31.74$) |
| | -476.0 | 90.0 | 835 | 2124 | 1.89 | 0.058 $f^{-1.05}$ ($f \leq 6.78$) | 0.249 $f^{-1.05}$ ($f \leq 31.74$) |
| -566.0 | 89.0 | 904 | 2205 | 2.00 | 0.054 $f^{-1.05}$ ($f \leq 6.78$) | 0.240 $f^{-1.05}$ ($f \leq 31.74$) | |
| -655.0 | 24.0 | 947 | 2256 | 2.07 | 0.051 $f^{-1.05}$ ($f \leq 6.78$) | 0.234 $f^{-1.05}$ ($f \leq 31.74$) | |
| -679.0 | 55.0 | 2200 | 4800 | 2.65 | 0.013 $f^{-0.21}$ ($f \leq 1.31$) | 0.004 $f^{-0.23}$ ($f \leq 16.46$) | |
| -734.0 | 258.0 | 2800 | 5300 | 2.78 | 0.010 $f^{-0.21}$ ($f \leq 1.31$) | 0.004 $f^{-0.23}$ ($f \leq 16.46$) | |
| -992.0 | - | 2800 | 5300 | 2.78 | 0.009 ($f > 1.31$) | 0.002 ($f > 16.46$) | |



同定解析に用いる減衰モデル h のイメージ図

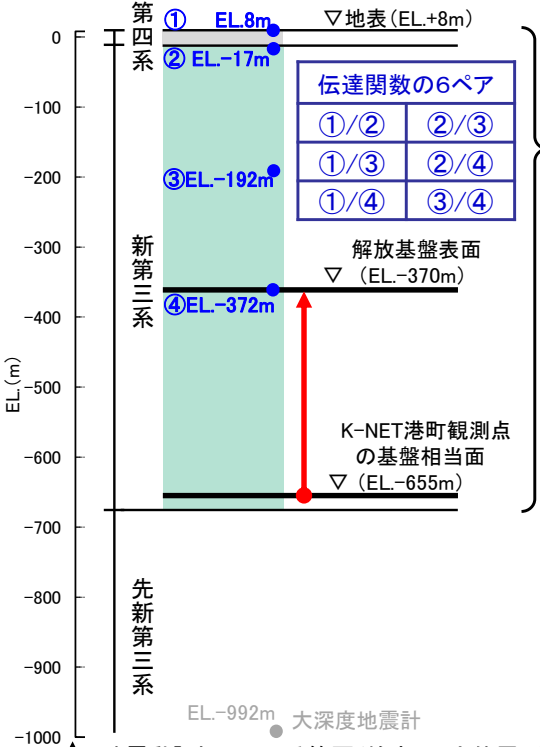
標準応答スペクトル用地盤モデル※

| EL. (m) | 層厚 (m) | S波速度 (m/s) | P波速度 (m/s) | 密度 (g/cm ³) | 減衰定数 $h(f)$ | | 出力位置 ▽ |
|------------|-----------|---------------|---------------|----------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|-----------|
| | | | | | 水平 | 鉛直 | |
| -370.0 | | | | | 水平 | 鉛直 | |
| | 2.0 | 790 | 2000 | 1.85 | 0.061 $f^{-1.05}$ ($f \leq 6.78$) | 0.264 $f^{-1.05}$ ($f \leq 31.74$) | |
| | | | | | 0.008 ($f > 6.78$) | 0.007 ($f > 31.74$) | |
| -372.0 | 104.0 | 790 | 2000 | 1.85 | 0.061 $f^{-1.05}$ ($f \leq 6.78$) | 0.264 $f^{-1.05}$ ($f \leq 31.74$) | |
| | | | | | 0.008 ($f > 6.78$) | 0.007 ($f > 31.74$) | |
| -476.0 | 90.0 | 835 | 2124 | 1.89 | 0.058 $f^{-1.05}$ ($f \leq 6.78$) | 0.249 $f^{-1.05}$ ($f \leq 31.74$) | |
| | | | | | 0.008 ($f > 6.78$) | 0.007 ($f > 31.74$) | |
| -566.0 | 89.0 | 904 | 2205 | 2.00 | 0.054 $f^{-1.05}$ ($f \leq 6.78$) | 0.240 $f^{-1.05}$ ($f \leq 31.74$) | |
| | | | | | 0.007 ($f > 6.78$) | 0.006 ($f > 31.74$) | |
| -655.0 | 24.0 | 947 | 2256 | 2.07 | 0.051 $f^{-1.05}$ ($f \leq 6.78$) | 0.234 $f^{-1.05}$ ($f \leq 31.74$) | |
| | | | | | 0.007 ($f > 6.78$) | 0.006 ($f > 31.74$) | |
| -679.0 | 55.0 | 2200 | 4800 | 2.65 | 0.013 $f^{-0.21}$ ($f \leq 1.31$) | 0.004 $f^{-0.23}$ ($f \leq 16.46$) | 入力位置 ▽ |
| | | | | | 0.012 ($f > 1.31$) | 0.002 ($f > 16.46$) | |

※ 標準応答スペクトル用地盤モデルの設定の詳細については, 補足説明資料①に示す。

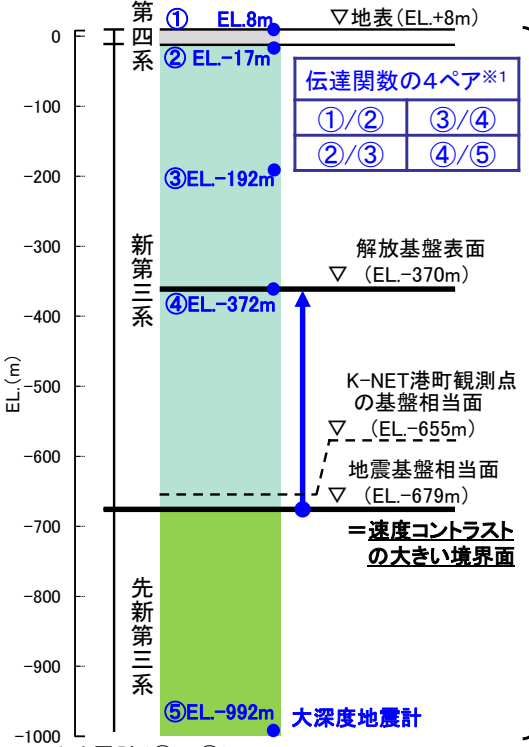
留萌用地盤モデルの見直し要否

【留萌用地盤モデルの検討】



- ・評価対象: 留萌波の地震動評価
- ・入力位置: 新第三系内
- ・出力位置: 新第三系内
- ・減衰モデル h : 振動数依存
- ・明瞭な速度コントラストの見られない新第三系内の地震波の伝播特性に着目し、新第三系内3点(②~④)を含む合計4点(①~④)の地震計のペアとして最大となる6個の伝達関数を考慮して同定解析を実施
- ⇒ 新第三系としての減衰定数を一律に設定(Ⓐの方法)

【標準応答スペクトル用地盤モデルの検討】



- ・評価対象: 標準応答スペクトルに基づく地震動評価
- ・入力位置: 先新第三系上面
- ・出力位置: 新第三系内
- ・減衰モデル h : 振動数依存(下限考慮)
- ・速度コントラストの大きい境界面の影響が含まれる, ④EL.-372m地震計と⑤大深度地震計のペア間の伝達関数を考慮した広範囲の同定解析を実施
- ⇒ 新第三系, 先新第三系の減衰定数を細分化した層区分毎に設定(Ⓑの方法)

標準応答スペクトル用地盤モデルで設定した減衰定数を用いて留萌波の検討を行う場合、K-NET港町観測点の基盤相当面(破線)以浅のみの範囲を対象として検討することとなる。

↑: 地震動評価に用いる範囲(始点: 入力位置, 終点: 出力位置)
 (赤: 留萌波の地震動評価, 青: 標準応答スペクトルに基づく地震動評価)

●: 同定解析に用いる地震計(①~⑤)

※1 鉛直方向は①/③, ③/④, ④/⑤の3ペア

- 留萌波の検討に当たり、敷地における速度構造や地震計設置状況を踏まえると、減衰定数の設定方法は以下の2つが考えられる。
 - Ⓐ 明瞭な速度コントラストの見られない新第三系内の地震波の伝播特性に着目し、新第三系内3点(②~④)を含む合計4点(①~④)の地震計を用いた多数の伝達関数に基づく同定解析結果を踏まえ、新第三系としての減衰定数を一律に設定する方法(留萌用地盤モデル)
 - Ⓑ 速度コントラストの大きい境界面の影響が含まれる、④EL.-372m地震計と⑤大深度地震計のペア間の伝達関数を考慮した広範囲の同定解析により、新第三系, 先新第三系の減衰定数を細分化した層区分毎に設定する方法(標準応答スペクトル用地盤モデル)
- 留萌波の地震動評価においては、敷地の地盤増幅特性を考慮する範囲が明瞭な速度コントラストの見られない新第三系内に留まることから、減衰定数の設定方法としては、**新第三系内における地震波の伝播特性に着目して実施した同定解析結果を踏まえ、新第三系としての減衰定数を一律に設定する上記Ⓐの方法を採用することが適切であり、留萌用地盤モデルの減衰定数の設定を見直す必要はない。**
- なお、同定解析に当たり用いる減衰モデル h については、減衰定数の評価事例の蓄積を踏まえると、標準応答スペクトル用地盤モデルで採用している、高振動数帯で下限を考慮する方法がより現実に則した合理的なモデル設定の方法であると考えられるものの、留萌用地盤モデルで採用している、高振動数帯で下限を考慮せず振動数依存とする方法の方が保守的な設定※2となっている。

※2 一般的に、減衰定数 h が小さいほど地震波の増幅が大きく地震動も大きくなることから、振動数依存の減衰モデル h については、減衰定数 h が低下する高振動数帯において下限を考慮しない方が保守的な設定と言える。



(3) 留萌用地盤モデルの見直し要否

■結論

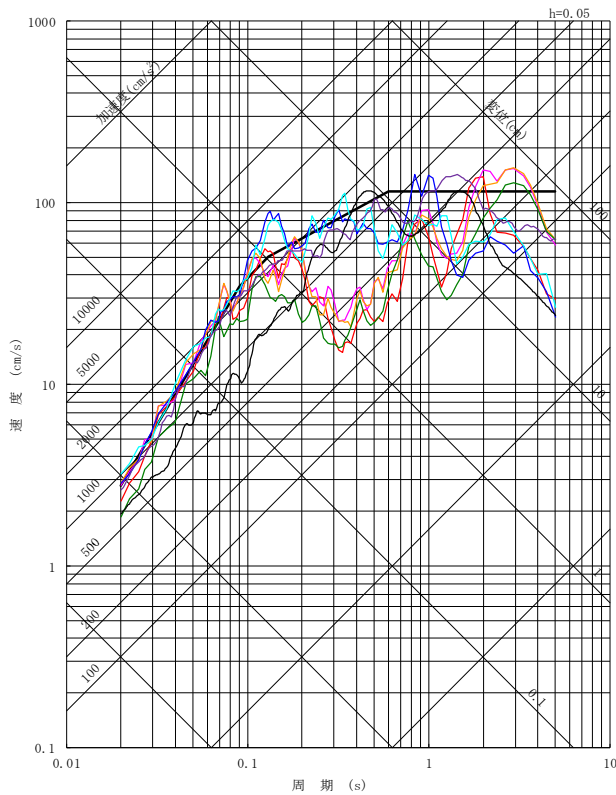
- ・以上の整理結果を踏まえると、留萌波の地震動評価においては、その評価に特化した速度構造を設定し、また新第三系内における地震波の伝播特性に着目して減衰定数を設定した留萌用地盤モデルを用いることが適切である。
- ・従って、今回、標準応答スペクトルの取入れに伴い新たに地盤モデルを設定したとしても、留萌用地盤モデルを見直す必要はない。

なお、第1097回審査会合(2022年12月2日)の資料において、地盤モデルの設定の着眼点が異なることから留萌用地盤モデルの見直しは不要であるとの主旨の説明を行った。その一方で、留萌用地盤モデルとは検討の着眼点異なる標準応答スペクトル用地盤モデルを用いて留萌波の検討を行い、評価結果を示したことは、検討目的に応じた対応とは言えず、適切ではなかった。

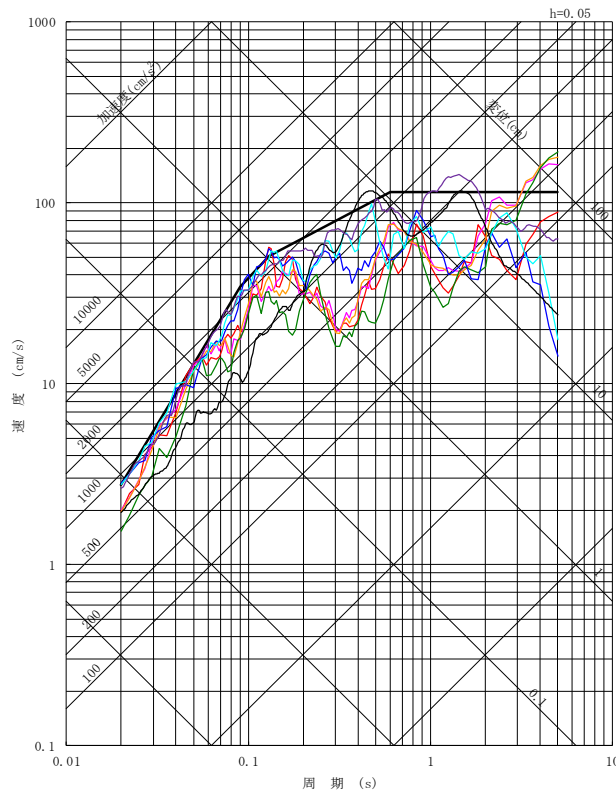
4. 基準地震動S_sの策定(1/2)

■ 標準応答スペクトルに基づき策定した地震動を基準地震動S_s-32とし、既許可の全ての基準地震動と合わせて下記に示す。

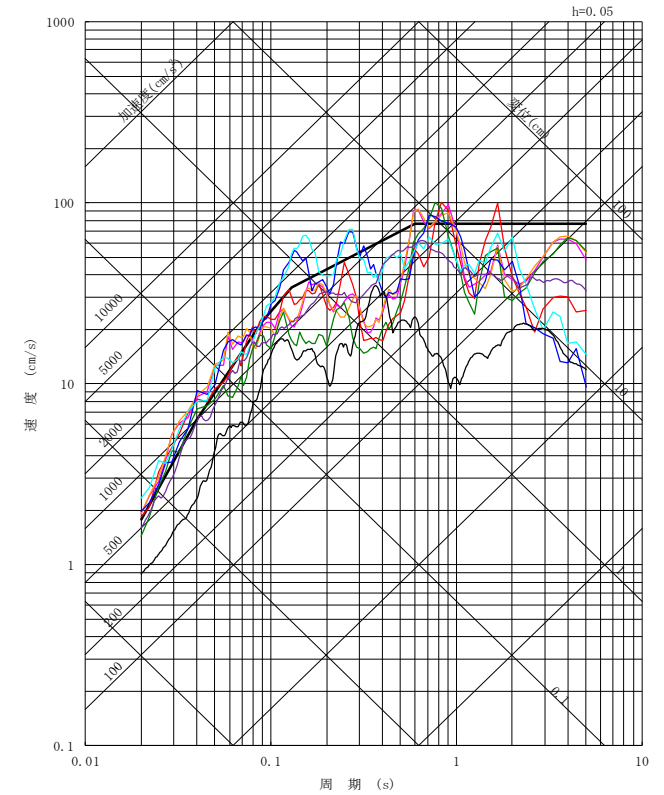
- S_s-D1 応答スペクトル手法による基準地震動
- S_s-11 F1断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震(短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点1)
- S_s-12 F1断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震(短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点2)
- S_s-13 F1断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震(短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点3)
- S_s-14 F1断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震(断層傾斜角の不確かさ, 破壊開始点2)
- S_s-21 2011年東北地方太平洋沖型地震(短周期レベルの不確かさ)
- S_s-22 2011年東北地方太平洋沖型地震(SMGA位置と短周期レベルの不確かさの重畳)
- S_s-31 2004年北海道留萌支庁南部地震の検討結果に保守性を考慮した地震動
- S_s-32 標準応答スペクトルに基づき策定した地震動



NS方向



EW方向



UD方向

4. 基準地震動S_sの策定(2/2)

■基準地震動S_sの最大加速度の一覧を示す。

| 基準地震動 | | 最大加速度(cm/s ²) | | |
|--------------------|--|---------------------------|------|------|
| | | NS方向 | EW方向 | UD方向 |
| S _s -D1 | 応答スペクトル手法による基準地震動 | 870 | | 560 |
| S _s -11 | F1断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震 (短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点1) | 717 | 619 | 579 |
| S _s -12 | F1断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震 (短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点2) | 871 | 626 | 602 |
| S _s -13 | F1断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震 (短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点3) | 903 | 617 | 599 |
| S _s -14 | F1断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震 (断層傾斜角の不確かさ, 破壊開始点2) | 586 | 482 | 451 |
| S _s -21 | 2011年東北地方太平洋沖型地震 (短周期レベルの不確かさ) | 901 | 887 | 620 |
| S _s -22 | 2011年東北地方太平洋沖型地震 (SMGA位置と短周期レベルの不確かさの重畳) | 1009 | 874 | 736 |
| S _s -31 | 2004年北海道留萌支庁南部地震の検討結果に保守性を考慮した地震動 | 610 | | 280 |
| S _s -32 | 標準応答スペクトルに基づき策定した地震動 | 829 | | 499 |

5. 地震動評価に用いる地盤モデルの整理

- 標準応答スペクトルに基づく地震動評価において新たに地盤モデルを設定したことに伴い、各種の地震動評価とその評価に用いる地盤モデルの関係を整理する。
 - ・ 各種の地震動評価においては、検討の目的に応じて設定した地盤モデルを用いることが適切である。
 - ・ 標準応答スペクトルに基づく地震動評価においては、新第三系とは地盤速度が大きく変化する先新第三系上面に入力することから、速度コントラストの大きい境界面の影響を適切に評価できる速度構造や減衰定数を設定した標準応答スペクトル用地盤モデルを用いることが適切である。
 - ・ 断層モデル手法による地震動評価のうち、統計的グリーン関数法を用いた地震動評価においては、標準応答スペクトルに基づく地震動評価と同様、新第三系とは地盤速度が大きく変化する先新第三系内に入力して評価することから、その評価には標準応答スペクトル用地盤モデルを用いることが適切である。
 - ・ 留萌波の地震動評価においては、その評価に特化した速度構造を設定し、また新第三系内における地震波の伝播特性に着目して減衰定数を設定した留萌用地盤モデルを用いることが適切である。

各種の地震動評価とその評価に用いる地盤モデルの関係

| 評価対象 | 評価に用いる地盤増幅特性の検討範囲 | 評価に用いる地盤モデル | |
|---------------------------------------|-------------------|-----------------|------------------|
| | | 本資料 | 2021年6月申請時 |
| 標準応答スペクトルに基づく地震動評価 | 先新第三系～新第三系 | 標準応答スペクトル用地盤モデル | 標準応答スペクトル用地盤モデル |
| 断層モデル手法による地震動評価のうち統計的グリーン関数法を用いた地震動評価 | | | 統計的グリーン関数法用地盤モデル |
| 留萌波の地震動評価 | 新第三系内 | 留萌用地盤モデル | 留萌用地盤モデル |

- S. Noda, K. Yashiro, K. Takahashi, M. Takemura, S. Ohno, M. Tohdo, and T. Watanabe (2002): RESPONSE SPECTRA FOR DESIGN PURPOSE OF STIFF STRUCTURES ON ROCK SITES, OECD-NEA Workshop on the Relations Between Seismological DATA and Seismic Engineering, Oct. 16-18, Istanbul.
- 加藤研一・宮腰勝義・武村雅之・井上大栄・上田圭一・壇一男(2004): 震源を事前に特定できない内陸地殻内地震による地震動レベル—地質学的調査による地震の分類と強震観測記録に基づく上限レベルの検討—, 日本地震工学会論文集, 第4巻, 第4号, pp.46-86.
- 信岡大・川里健・生玉真也(2012): 人工振源を用いた軟岩サイトにおけるQ値測定, 物理探査学会第127回学術講演会論文集, pp. 102-105
- 佐藤智美・川瀬博・佐藤俊明(1994): 表層地盤の影響を取り除いた工学的基礎波の統計的スペクトル特性—仙台地域のボアホールで観測された多数の中小地震記録を用いた解析—, 日本建築学会構造系論文集, pp. 79-89
- 原子力規制委員会(2021): 第5回原子力規制委員会 資料1 標準応答スペクトルの規制への取り入れのための実用発電用原子炉及びその附属施設の位置, 構造及び設備の基準に関する規則の解釈等の一部改正—改正案に対する意見募集の結果及びこれを踏まえた修正並びに今後の対応—
- 福島美光・翠川三郎(1994): 周波数依存性を考慮した表層地盤の平均的な Q^{-1} 値とそれに基づく地盤増幅率の評価, 日本建築学会構造系論文集, 第460号, pp. 37-46
- 木下繁夫・大池美保(2002): 関東地域の堆積層—基盤系におけるS波の減衰特性 —0.5~16Hz—, 地震第2輯, 第55巻, 19-31頁
- 武村雅之・池浦友則・高橋克也・石田寛・大島豊(1993): 堆積地盤における地震波減衰特性と地震動評価, 日本建築学会構造系論文報告集, 第446号, 1-11
- 佐藤浩章・金谷守・大島靖樹(2006): 減衰定数の下限値を考慮したスペクトル比の逆解析による同定手法の提案: 岩盤における鉛直アレイ記録への適用と減衰特性の評価, 日本建築学会構造系論文集, 第604号, pp. 55-62
- R. Fukushima, H. Nakahara, and T. Nishimura(2016): Estimating S-Wave Attenuation in Sediments by Deconvolution Analysis of KiK-net Borehole Seismograms, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 106, No. 2. pp. 552-559, <https://doi.org/10.1785/0120150059>

- ① 標準応答スペクトルに基づく地震動評価のための地盤モデル
(第1053回(令和4年6月10日)審査会合資料の再掲)
 - (1) 新たな地盤モデルの設定について
 - (2) 速度構造と地震基盤相当面位置の設定
 - (3) 減衰定数の設定
 - (4) まとめ

- ② 2004年北海道留萌支庁南部地震の検討に用いた地盤モデル
(第409回(平成28年10月14日)審査会合資料及び
第291回(平成27年11月6日)審査会合資料の再掲)

(1) 新たな地盤モデルの設定について

■新たな知見等を踏まえた地盤モデルの設定

- ・ 既許可の留萌用地盤モデルの検討では、K-NET港町観測点の基盤に相当する層が $V_s 938\text{m/s}$ の層であったことから、地震基盤相当面以浅に着目していた。
- ・ 一方、今回の検討では、標準応答スペクトルが $V_s 2200\text{m/s}$ 以上となる地震基盤相当面で定義されていることから、地震基盤相当面以深まで掘削している大深度ボーリングデータや地震観測記録を精査する必要があると考え、物理探査結果との整合性の確認や既許可審査以降も蓄積されている地震観測記録等、下表で示す既許可審査では取り入れていなかった新しい知見や考え方を整理した上で今回取り入れることにより、地盤モデルの精度を向上させ、標準応答スペクトルに基づく地震動評価のための地盤モデルを新たに設定する。

■今回取り入れた新たな知見や考え方

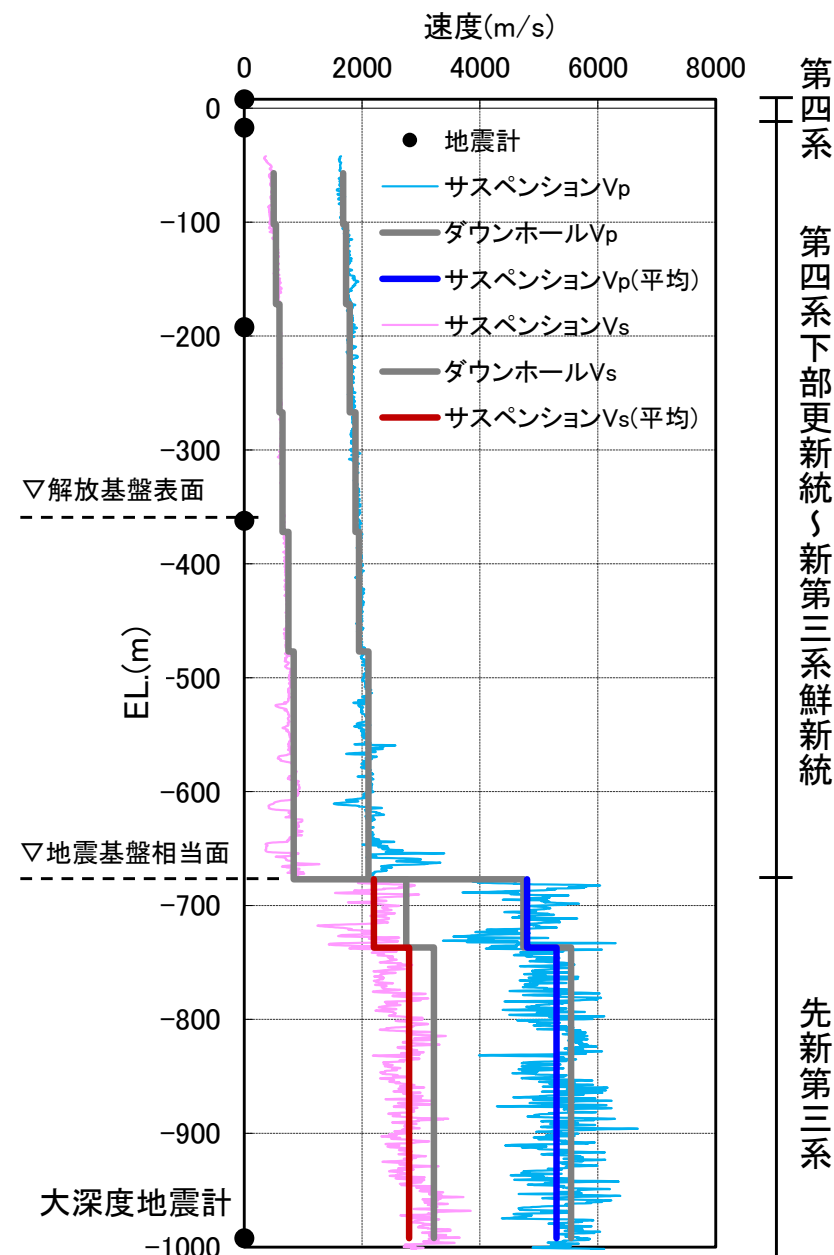
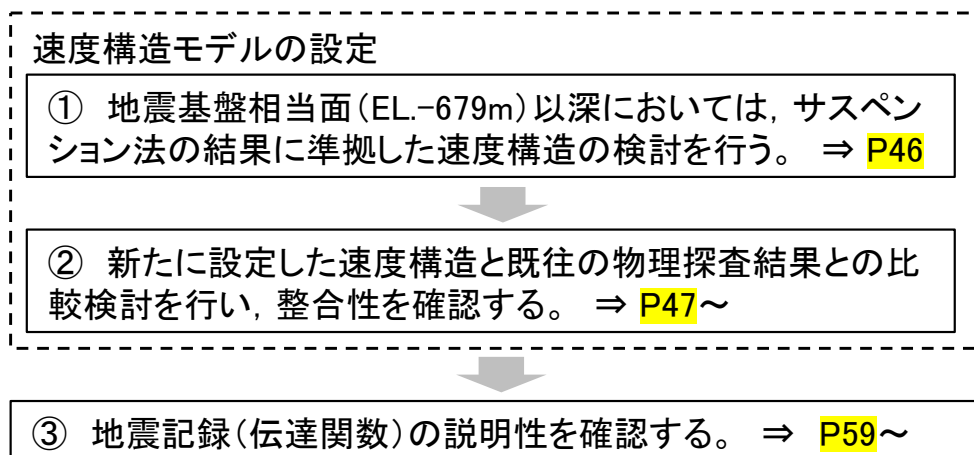
| 設定 | 新たな知見 | 新たな考え方 | 既許可 (留萌用地盤モデル) | 今回 |
|------|------------------------|--|--|--|
| 速度構造 | 地震基盤相当面で定義された標準応答スペクトル | 大深度ボーリングデータに着目した深部速度構造の再検討 | 大深度ボーリングのダウンホール法に基づいて設定 | 地震基盤相当面以深まで掘削している大深度ボーリングデータに着目し、既往の物理探査結果との比較により妥当性を確認した上で、サスペンション法に準拠して新たに設定 ⇒ 新たに設定した速度構造について地震観測記録の説明性も確認 |
| 減衰定数 | 敷地における地震観測記録の蓄積 | 大深度地震計を含む鉛直アレイ地震観測記録を用いた地盤同定解析の適用範囲の拡大 | 地震基盤相当面位置(EL.-679m)～大深度地震計設置位置(EL.-992m) | 地表～大深度地震計設置位置(EL.-992m) ⇒ 地震基盤相当面位置から解放基盤表面位置までの増幅特性を直接的に評価 |
| | | 地盤同定解析に用いる、内陸地殻内地震の評価に特化した目標伝達関数の設定 | 海溝型地震と内陸地殻内地震を含めて地盤同定解析の目標伝達関数を設定 | 標準応答スペクトルに基づく地震動評価という目的に合わせ、内陸地殻内地震のみで地盤同定解析の目標伝達関数を設定 ⇒ 目標伝達関数の精度向上 |
| | 減衰定数 h の下限を示す評価事例の蓄積 | 減衰定数 h の下限を考慮した減衰モデルの高度化 | 振動数依存モデル | 振動数依存+減衰定数 h の下限考慮モデル ⇒ 増幅特性の評価における、より広帯域での精度向上 |

(2) 速度構造と地震基盤相当面位置の設定

■ 深部速度構造の再検討

- 既許可の留萌用地盤モデルの検討では、K-NET港町観測点の基盤層 ($V_s 938\text{m/s}$) に相当する敷地での層を検討する観点から、地震基盤以浅のボーリングデータに着目して速度構造の検討を行っている。
- 一方、今回の検討では、標準応答スペクトルが定義されている地震基盤相当面 ($V_s 2200\text{m/s}$ 以上) に相当する敷地での層を検討する観点から、地震基盤相当面以深まで掘削している大深度ボーリングのデータに着目して速度構造の検討を行う。
- 地震基盤相当面以深では、大深度ボーリングのダウンホール法とサスペンション法との結果で差が生じていることから速度構造を再検討することとし、既往の物理探査結果との比較により妥当性を確認した上で、標準応答スペクトルの地震動評価に用いる新たな速度構造モデルとして設定する。
- 地震基盤相当面位置は、 $V_s 2200\text{m/s}$ 以上に相当する敷地での層の上面としてEL.-679mに設定する。
- 速度構造モデルの設定については、後述する減衰定数の設定と合わせて、地震観測記録の説明性の観点においてその妥当性を確認する。

■ 新たな速度構造モデルの設定とその妥当性確認は下記の流れで行う。

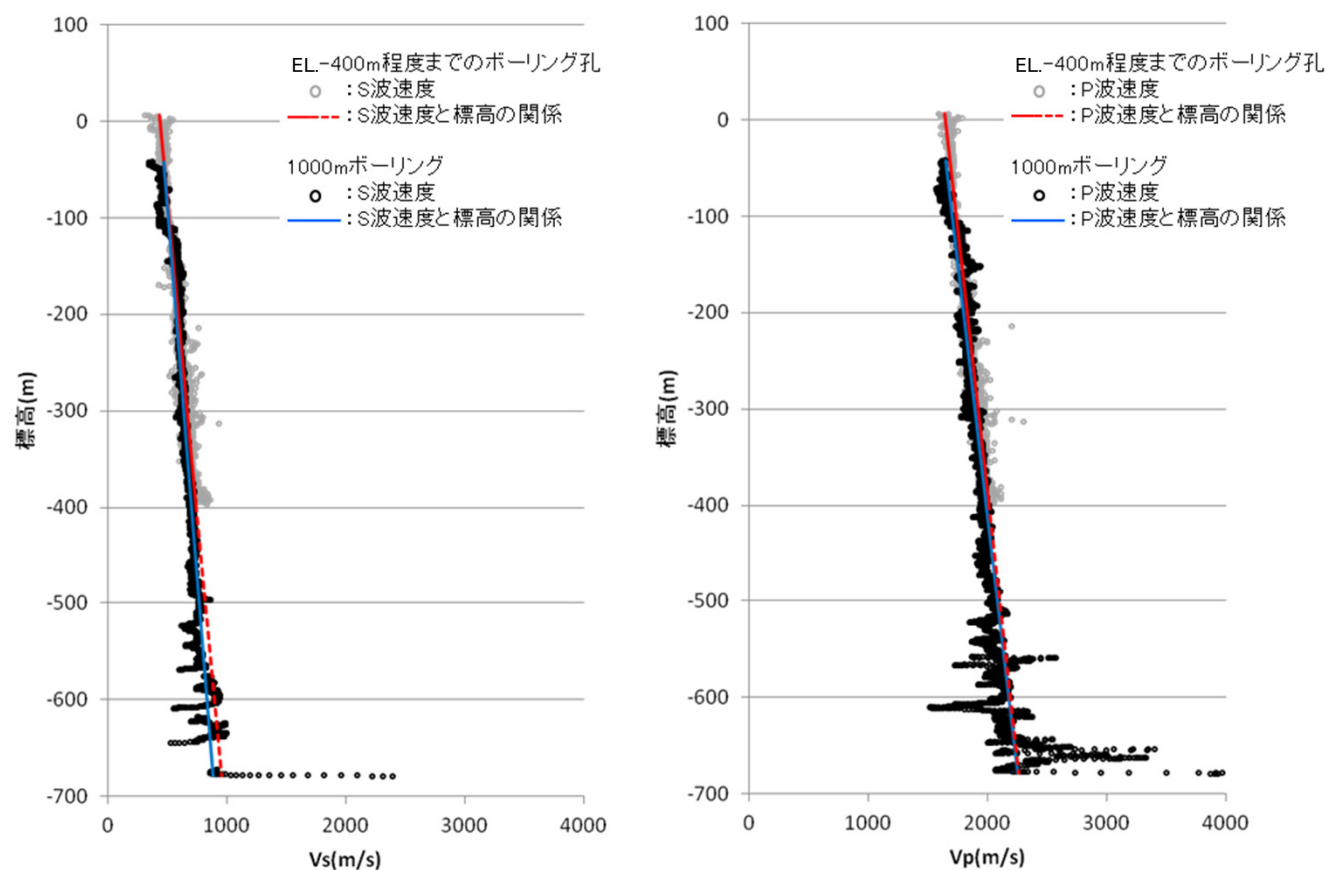


大深度ボーリングのPS検層結果の例

地震基盤相当面(EL.-679m)以浅の速度構造の設定

■EL.-679m以浅(解放基盤表面～新第三系鮮新統下端)

- ・Vs, Vpとも深くなるにつれ値が漸増する構造であり, また複数の調査結果と整合していることから, 2004年北海道留萌支庁南部地震の検討においては, 解放基盤表面からEL.-679m(新第三系鮮新統下端)までの速度構造を標高依存式により設定している。
- ・標準応答スペクトルによる地震動の検討に際しても, 解放基盤表面からEL.-679m(新第三系鮮新統下端)までの速度構造は, 既許可の2004年北海道留萌支庁南部地震の検討で用いたものを採用する。



久米層における
地盤速度と標高の関係

$$V_s = 0.433 - 7.71 \times 10^{-4} \cdot Z$$

$$V_p = 1.65 - 9.09 \times 10^{-4} \cdot Z$$

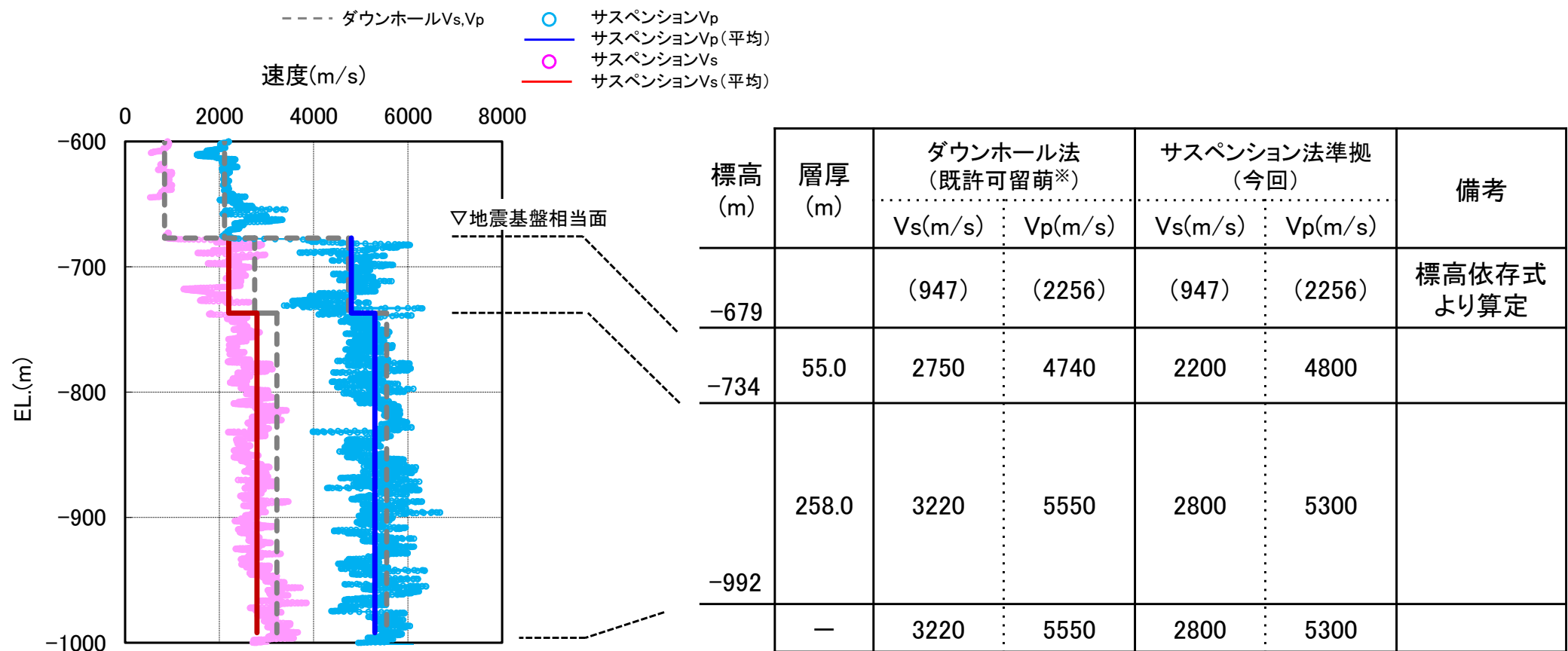
ここで, Vs: S波速度 (km/s)
Vp: P波速度 (km/s)
Z: 標高 (m)

図は第409回審査会合資料より抜粋

地震基盤相当面(EL.-679m)以深の速度構造の設定

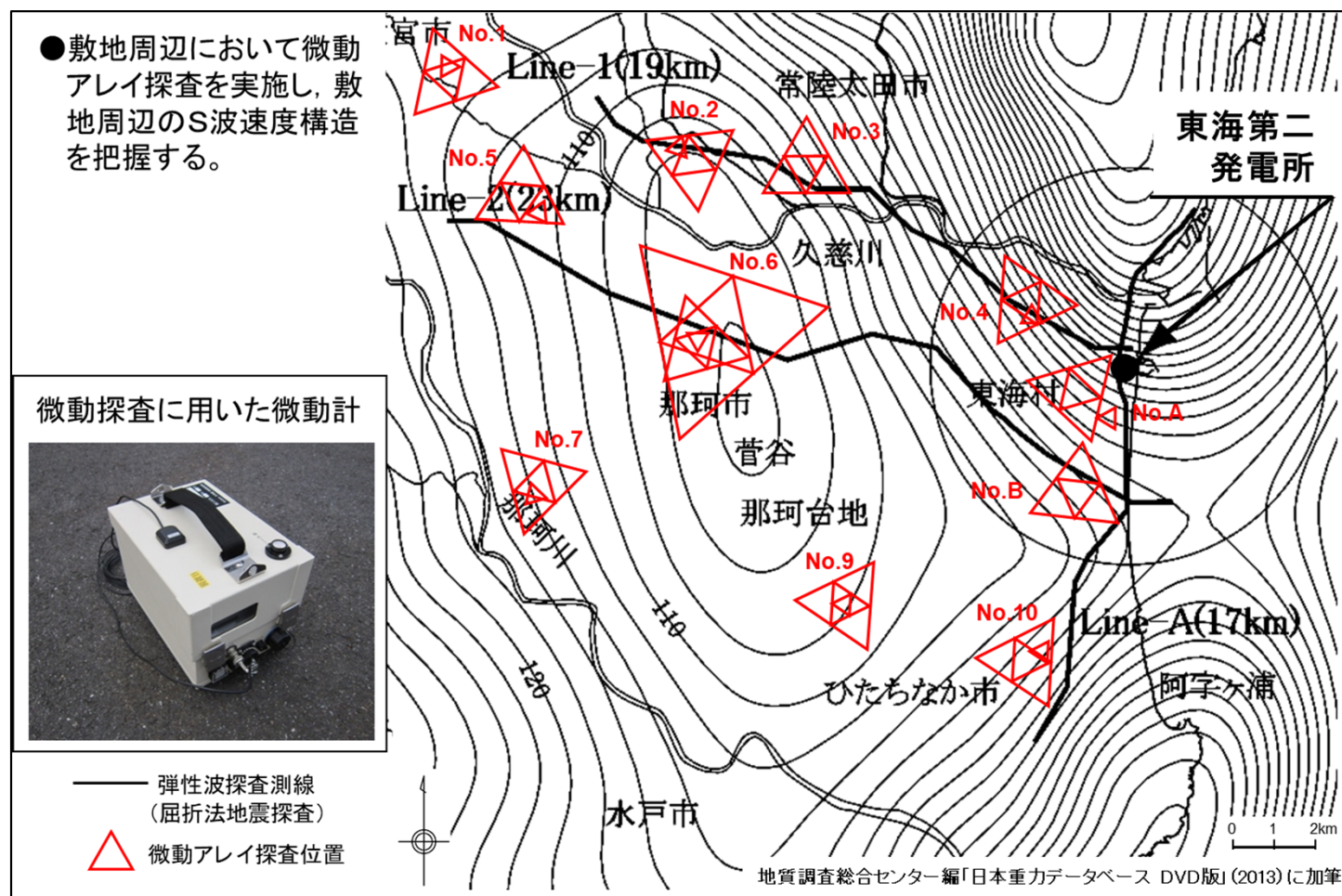
■EL.-679m以深(先新第三系)

- ・地震基盤相当面以深では、大深度ボーリングのダウンホール法とサスペンション法との結果で差が生じていることから速度構造を再検討する。今回は、サスペンション法に準拠して速度構造を設定する。具体的には、ダウンホール法における同一層内で、サスペンション法の V_s 、 V_p をそれぞれ平均して求めた値を用いる。
- ・地震基盤相当面位置は、 V_s 2200m/s以上に相当する敷地での層の上面としてEL.-679m(V_s 2200m/s)に設定する。
- ・次頁以降では、今回新たに設定する速度構造について、既往の物理探査結果との比較により妥当性を確認する。



※ 既許可においては、地盤モデルの層区分との対応が明確なダウンホール法の V_s 、 V_p 値を設定

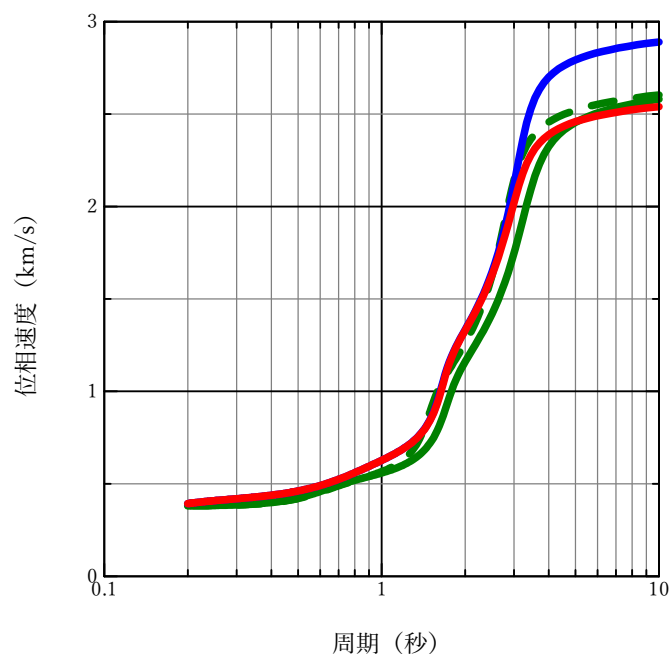
- 既許可の地下構造審査において、敷地内で実施している微動アレイ探査については、アレイサイズ(底辺長)が約470m以下と小さい。
- 一方、敷地周辺では、重力異常域と地下構造の関係を把握するため、屈折法地震探査及び微動アレイ探査を実施しており、この時実施した微動アレイ探査の底辺長は4kmないし2kmであることから地下数kmまで探査範囲が及んでいる。また、これらの探査結果に基づいて3次元地下構造モデルを作成している。
- そこで、この3次元地下構造モデルにおける敷地での位相速度の分散曲線と、既許可の留萌用地盤モデル、今回設定した地盤モデルの位相速度の分散曲線を比較し、関係を整理する。



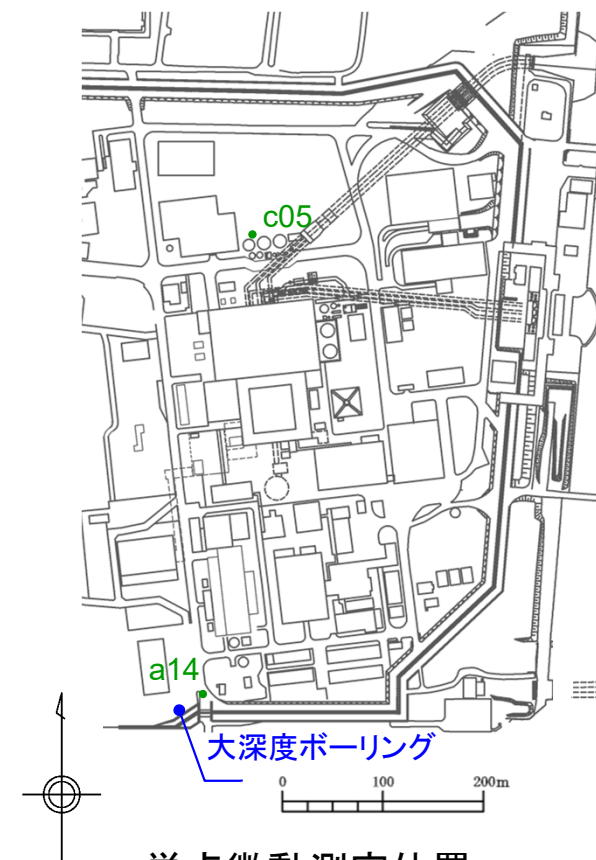
図は第338回審査会合資料より抜粋

■微動探査等に基づく3次元地下構造モデルから敷地（大深度ボーリング位置に近いa14地点及び既許可の審査時において実施した微動アレイ探査位置のc05地点）での情報を切り出した1次元モデルによる位相速度の分散曲線と、既許可の留萌用地盤モデル、今回設定した地盤モデルの位相速度の分散曲線を比較し、関係を整理する。

- 微動探査等に基づく3次元地下構造モデルから切り出した1次元モデルの位相速度の分散曲線（a14地点）
- - 微動探査等に基づく3次元地下構造モデルから切り出した1次元モデルの位相速度の分散曲線（c05地点）
- 既許可の留萌用地盤モデルの位相速度の分散曲線
- サスペンション法に準拠して今回設定した地盤モデルの位相速度の分散曲線



各モデルの位相速度の分散曲線に関する比較

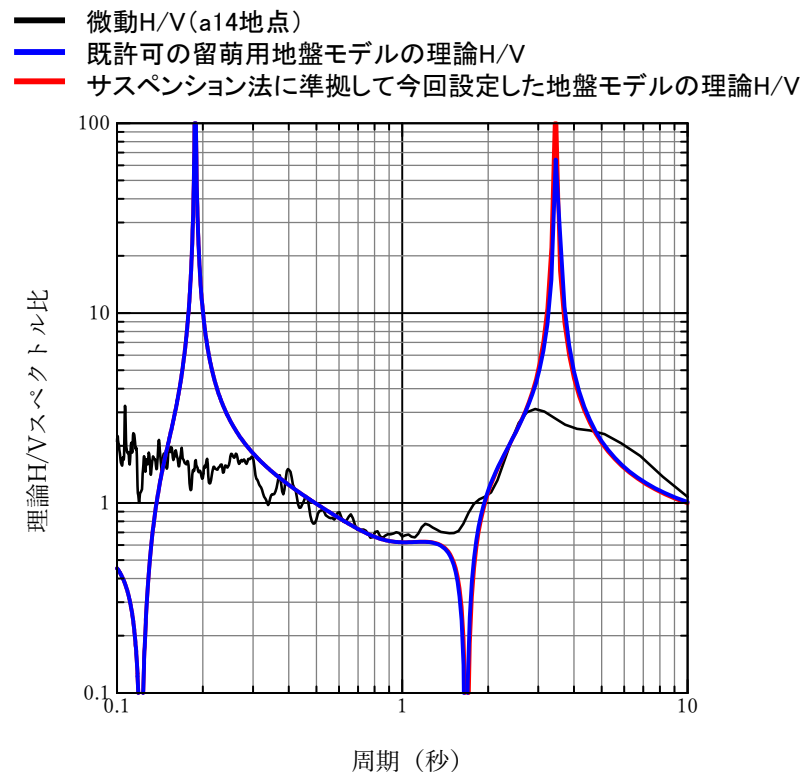


単点微動測定位置

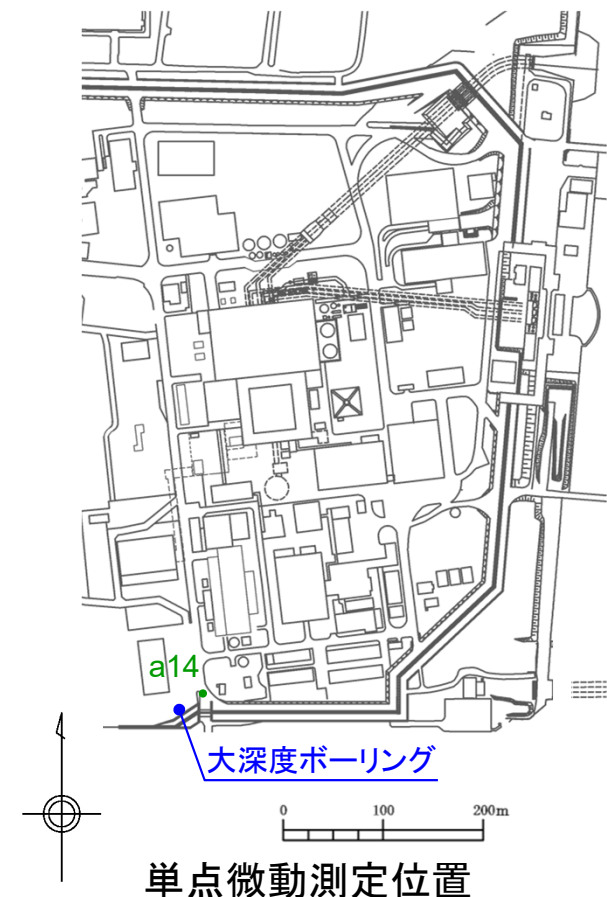
今回設定した地盤モデルと微動探査等に基づく3次元地下構造モデルから切り出した1次元モデルの位相速度の分散曲線は、全周期帯において、良く整合していることを確認した。なお、周期3秒よりも長周期側において既許可の留萌用地盤モデルの位相速度が他の地盤モデルの位相速度と比較して速くなっているが、これは地震基盤相当面以深における速度構造の違いによるものであり、地盤モデルのうち地震基盤相当面以浅の層のみを用いた既許可の2004年北海道留萌支庁南部地震の地震動評価結果には影響しない。

既往の各種物理探査結果との関係： H/Vスペクトル比

- 既許可の地下構造審査においては、敷地内における基盤の広がり把握するため、敷地内で単点微動測定を実施し、H/Vスペクトル比の空間分布を検討している。
- 大深度ボーリング位置に最も近いa14地点でのH/Vスペクトル比と、既許可の留萌用地盤モデル、今回設定した地盤モデルのレイリー波の理論H/Vを比較し、関係を整理する。



探査によるH/Vと2つのモデルの理論H/Vに関する比較
(理論H/Vはレイリー波の基本モードによる)



単点微動測定位置

H/Vスペクトル比に関してはモデルの違いが明瞭には現れず、ほぼ同じ形状を示しており、どちらもa14地点の微動H/Vスペクトル比のピークと同じ周期帯にピークが生じていることを確認した。

➡ 既往の物理探査結果(探査結果に基づいて作成した3次元地下構造モデルから切り出した1次元モデルの位相速度の分散曲線, 単点微動のH/Vスペクトル比)との比較により、今回設定した速度構造の妥当性を確認した。

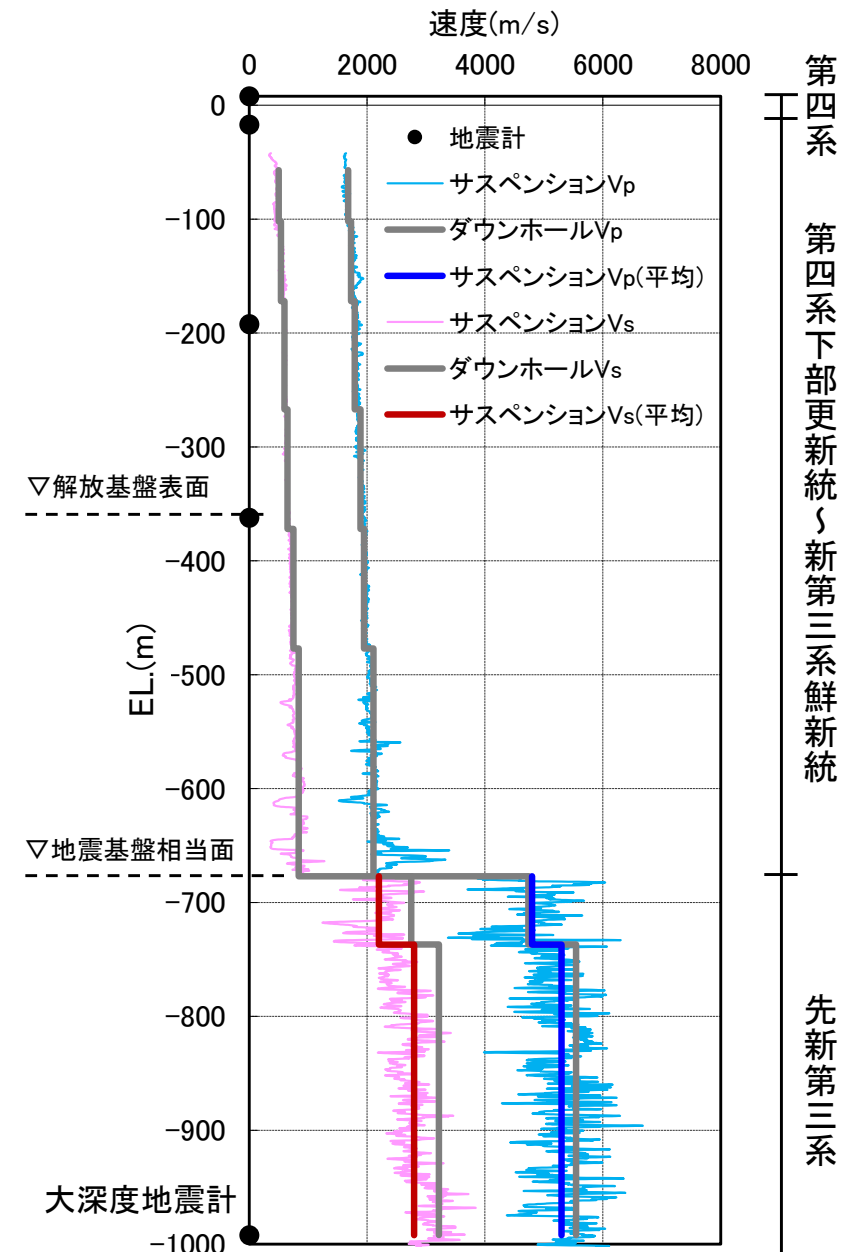
(3) 減衰定数の設定：方針

■大深度地震計を含む鉛直アレイ地震観測記録を用いて減衰定数を設定する。

- ・大深度地震計は地震基盤相当面より深い位置(EL.-992m)に設置されており、他の鉛直アレイ地震観測記録と併用することで、地震基盤相当面から解放基盤表面までの地震波の伝播の状況を直接調べることができる。そこで、大深度地震計を含めた鉛直アレイ地震観測記録の伝達関数の逆解析により、減衰定数(Q値)を求める。
- ・伝達関数の逆解析による減衰定数(Q値)の同定範囲は地表面からEL.-992mの範囲とする。
- ・地盤の減衰定数 h は一般に振動数依存が認められ、高振動数になるほど減衰定数 h が低下する性質があるが、それには下限が存在すると考えられることから(例えば佐藤他(2006))、減衰定数 h の同定に際しては、減衰定数 h の下限を考慮する。

参考 既許可での評価方法との比較

| 項目 | | 2004年北海道留萌支庁南部地震の検討 | 本検討 |
|---------------|----------------|------------------------------|-------------------|
| 設定方法 | 地表～解放基盤表面 | EL.-372m以浅の地震観測記録による同定解析 | 大深度地震観測記録を含めた同定解析 |
| | 解放基盤表面～地震基盤相当面 | 上記結果うち、第四系下部更新統～新第三系鮮新統の値を設定 | |
| | 地震基盤相当面以深 | 大深度地震観測記録を含めた同定解析 | |
| 減衰定数 h のモデル | | 振動数依存(下限考慮なし) | 振動数依存(下限考慮あり) |



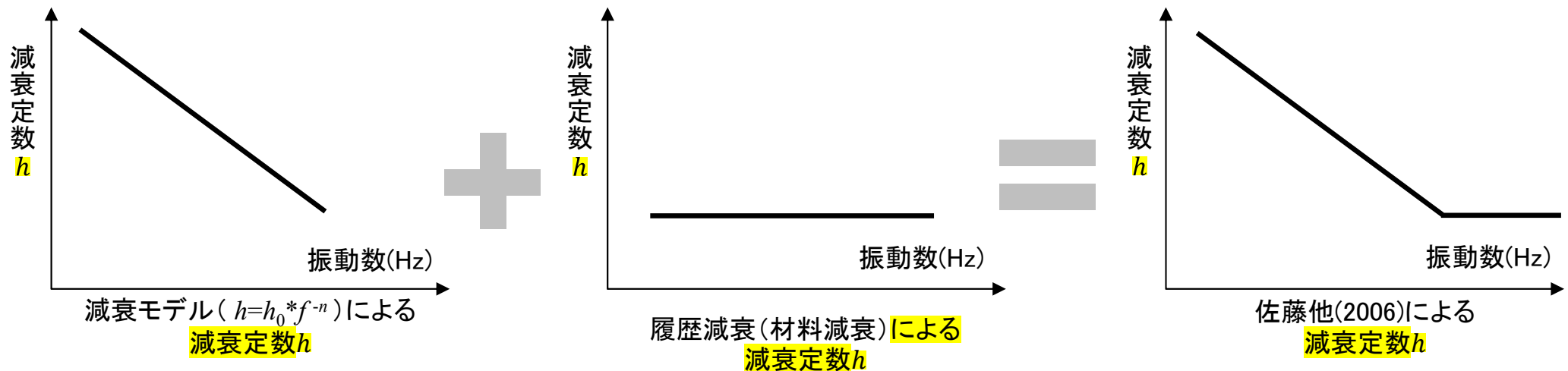
大深度ボーリングのPS検層結果の例

減衰モデルの考え方

■地震動評価に用いる減衰定数の設定に関する知見の整理

- ・伝達関数の逆解析に関する既往研究(例えば福島・翠川(1994))では, 対象とする振動数帯域で減衰定数 h が振動数の負のべき乗に比例する関数モデル($h=h_0*f^{-n}$)を用いている。
- ・一方, 減衰定数 h の関数モデルを設定しないで同定を行った木下・大池(2002)によれば, 減衰定数 h にはある振動数から下限値が存在し, それより高振動数側で振動数依存性が見られなくなることを示している。
- ・高振動数帯で減衰定数 h が一定となる要因として, 振動数に依存しない微小ひずみの履歴減衰(材料減衰)の存在が指摘されている(例えば武村他(1993), 佐藤他(2006))。
- ・最近の研究として, 複数のKiK-net観測点を対象に地震波のデコンボリューションを用いる方法により減衰定数 h を推定したFukushima et al.(2016)においても, 木下・大池(2002)と同様, 減衰定数 h の下限値の存在が示されている。

以上のように, 減衰定数 h の下限を示す評価事例が蓄積されてきたことから, 減衰定数 h の同定に際しては, 振動数依存性と高振動数帯での下限を考慮する。

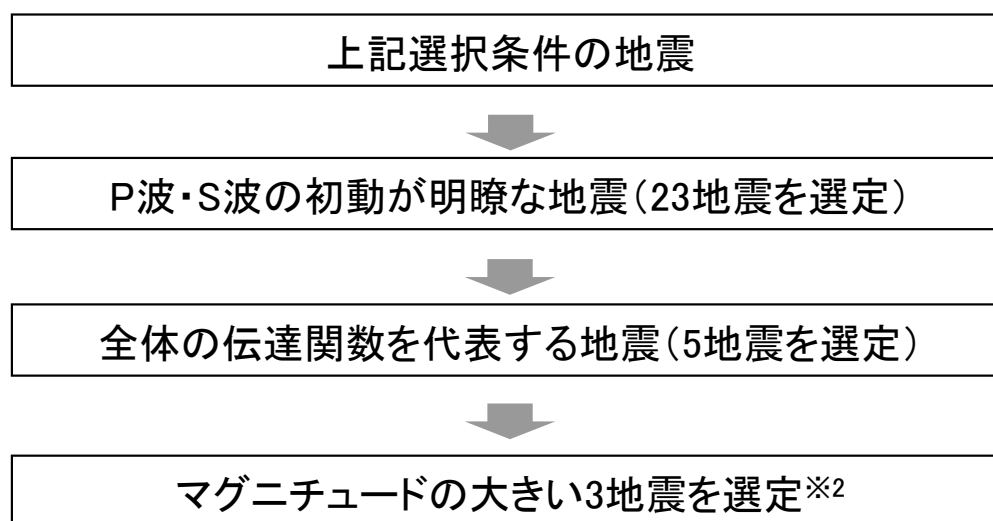
逆解析に用いる減衰モデル h のイメージ図

地盤同定解析に用いる地震の選定

- 地盤同定解析に用いる検討対象地震については、標準応答スペクトルの策定において対象とされた地震同様、内陸地殻内地震とし、具体的には下記に示す手順に従って選定する。

【検討対象地震の選定条件】

- ・地震発生様式 : 内陸地殻内地震
- ・対象期間^{※1} : 2012年8月～2019年1月
- ・震源深さ : 25km以浅



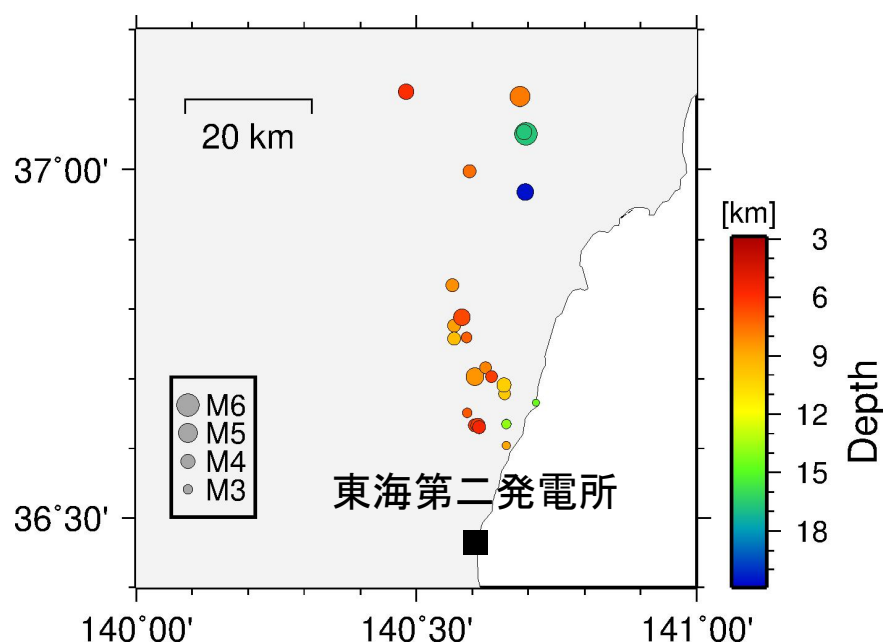
地盤同定解析に用いる地震の選定フロー

※1 検討対象とした地震記録は、大深度地震観測開始時期の2012年から地盤同定解析を開始した2019年までのものとした。

※2 比較的規模の大きい地震を選定することで、振幅が大きく、また広帯域の振動数成分が含まれることになる。その結果、S/Nが大きくなり、地盤同定解析に用いる伝達関数の精度が高まる。

地盤同定解析に用いる地震の選定： 23地震の選定

- 2012年8月～2019年1月に観測した地震から、ノイズや機器の不具合による影響のないデータを選定し、P波・S波の初動が明瞭に見られた下記に示す23地震を選定する。
- 2015年以降に解放基盤表面以浅の地震計の一部が連続して故障したこと等により、結果として、検討に用いる地震観測記録が2014年以前に偏っているが、2011年東北地方太平洋沖地震をきっかけに活発化した福島県南部から茨城県北部にかけての地震活動により、今回の地盤同定解析に用いる地震の選定に**当たり**十分な記録が得られていること、時間経過とともに地震活動が沈静化傾向にあることを確認している。



選定した23地震の震央分布図

23地震の諸元

| No. | 発震日時 | | 震央位置 | | マグニチュード | 震源深さ (km) | 震央距離 (km) |
|-----|------------|-------|---------|----------|---------|-----------|-----------|
| | | | 緯度(度) | 経度(度) | | | |
| 1 | 2012/08/10 | 07:18 | 36.7590 | 140.5900 | 3.2 | 7.2 | 32.6 |
| 2 | 2012/11/12 | 00:12 | 36.6350 | 140.6600 | 3.0 | 13.9 | 19.4 |
| 3 | 2013/01/13 | 02:54 | 36.6510 | 140.5910 | 3.1 | 7.0 | 20.6 |
| 4 | 2013/01/15 | 09:08 | 36.6040 | 140.6600 | 2.9 | 8.8 | 16.1 |
| 5 | 2013/01/31 | 23:53 | 36.7030 | 140.6040 | 4.7 | 8.4 | 26.0 |
| 6 | 2013/02/24 | 13:55 | 36.9680 | 140.6940 | 4.5 | 20.6 | 56.0 |
| 7 | 2013/04/25 | 16:16 | 37.1110 | 140.4820 | 4.2 | 6.0 | 72.5 |
| 8 | 2013/06/04 | 13:09 | 36.7580 | 140.5670 | 3.7 | 9.6 | 32.6 |
| 9 | 2013/07/12 | 03:18 | 36.7760 | 140.5670 | 3.8 | 8.7 | 34.6 |
| 10 | 2013/07/23 | 12:02 | 37.1040 | 140.6850 | 5.2 | 7.8 | 71.2 |
| 11 | 2013/08/14 | 09:45 | 36.6330 | 140.6040 | 3.8 | 6.3 | 18.6 |
| 12 | 2013/08/14 | 14:31 | 36.6330 | 140.6100 | 4.1 | 6.3 | 18.6 |
| 13 | 2013/08/19 | 11:22 | 36.6310 | 140.6120 | 3.8 | 5.7 | 18.3 |
| 14 | 2013/09/20 | 02:25 | 37.0510 | 140.6950 | 5.9 | 16.7 | 65.0 |
| 15 | 2013/09/26 | 14:44 | 36.7160 | 140.6230 | 3.6 | 8.0 | 27.8 |
| 16 | 2013/09/27 | 07:37 | 37.0530 | 140.6920 | 4.2 | 16.7 | 65.6 |
| 17 | 2013/11/12 | 03:28 | 36.7030 | 140.6338 | 3.6 | 6.4 | 26.4 |
| 18 | 2014/01/09 | 04:08 | 36.7885 | 140.5810 | 4.6 | 6.6 | 35.9 |
| 19 | 2014/03/27 | 14:20 | 36.8345 | 140.5643 | 3.8 | 8.3 | 41.1 |
| 20 | 2014/04/01 | 01:15 | 36.6780 | 140.6570 | 3.6 | 10.0 | 24.0 |
| 21 | 2014/07/03 | 07:57 | 36.6910 | 140.6560 | 4.0 | 10.2 | 25.4 |
| 22 | 2014/08/08 | 03:47 | 36.6660 | 140.7130 | 2.5 | 14.6 | 24.2 |
| 23 | 2014/11/17 | 08:59 | 36.9970 | 140.5950 | 3.8 | 7.5 | 59.0 |

地盤同定解析に用いる地震の選定結果 (Transverse方向)

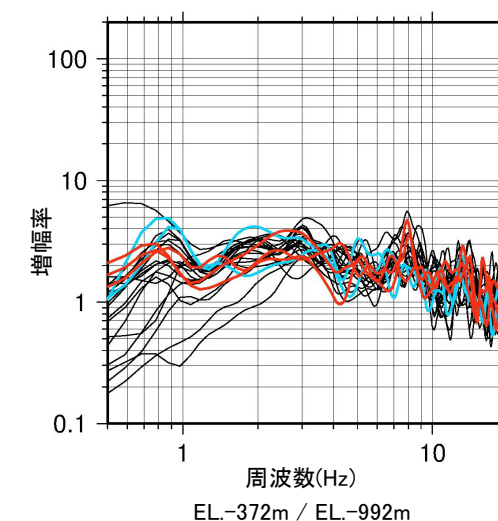
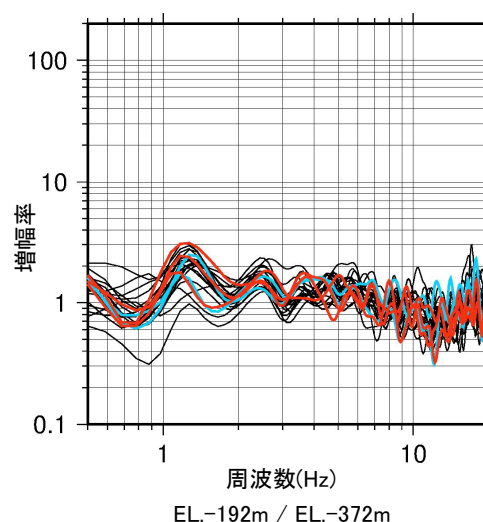
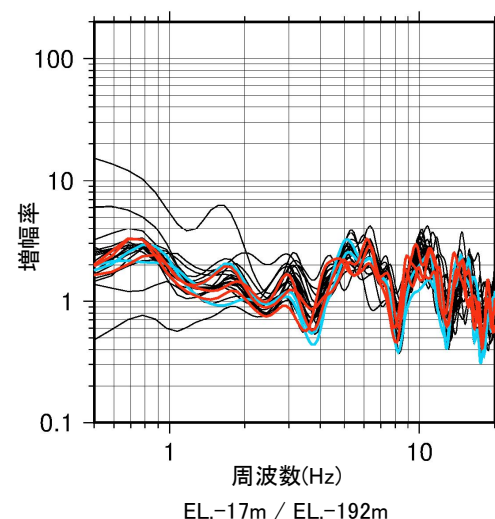
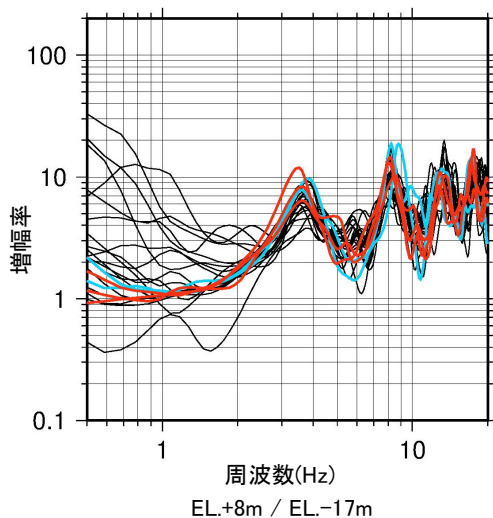
■P波・S波の初動が明瞭に見られた23地震の伝達関数を比較して、全体の伝達関数を代表する地震を5地震選定し、このうちマグニチュードが大きい3地震を地盤同定解析に用いる地震に選定する。

伝達関数を代表する5地震

| No. | 発震日時 | | 震央位置 | | マグニチュード | 震源深さ (km) | 震央距離 (km) |
|-----|------------|-------|---------|----------|---------|-----------|-----------|
| | | | 緯度(度) | 経度(度) | | | |
| 5 | 2013/01/31 | 23:53 | 36.7030 | 140.6040 | 4.7 | 8.4 | 26.0 |
| 6 | 2013/02/24 | 13:55 | 36.9680 | 140.6940 | 4.5 | 20.6 | 56.0 |
| 14 | 2013/09/20 | 02:25 | 37.0510 | 140.6950 | 5.9 | 16.7 | 65.0 |
| 18 | 2014/01/09 | 04:08 | 36.7885 | 140.5810 | 4.6 | 6.6 | 35.9 |
| 21 | 2014/07/03 | 07:57 | 36.6910 | 140.6560 | 4.0 | 10.2 | 25.4 |

網掛け：地盤同定解析に用いる3地震

— 選定した5地震のうち、地盤同定解析に用いる3地震
— 選定した5地震のうち、地盤同定解析に用いない2地震
— 残りの18地震



備考

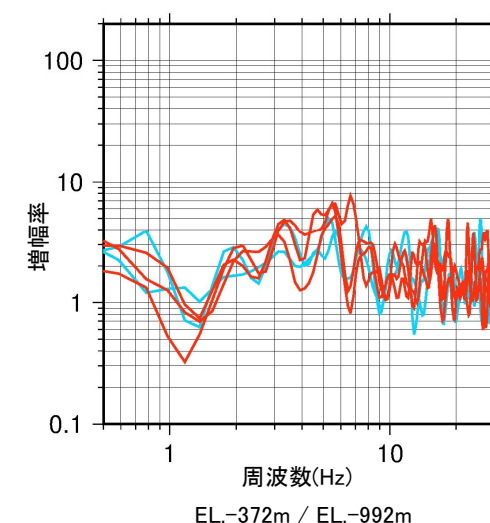
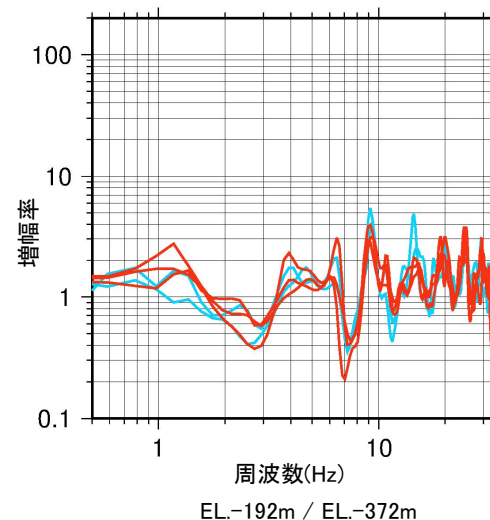
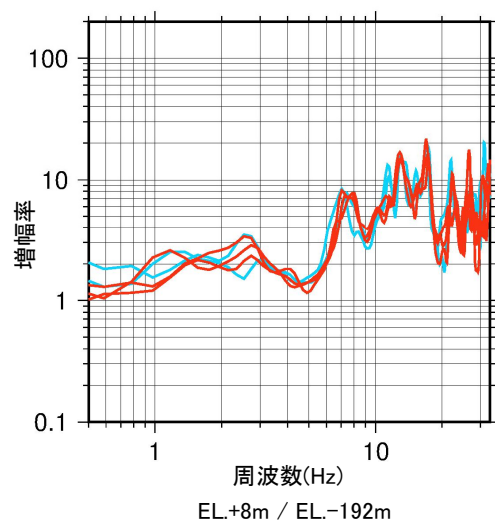
伝達関数は、0.5HzのParzen windowで平滑化。

23地震の伝達関数 (Transverse方向)

- ・P波・S波の初動が明瞭に見られた23地震の伝達関数については、3Hz以下の周波数帯では、イベント毎のばらつきが大きいものの3Hz以上の周波数帯では小さくなっている。
- ・全体の伝達関数を代表するよう5地震を選定した段階で、3Hz以下も含めた全周波数帯において伝達関数のばらつきは小さくなり、地盤同定解析に用いる3地震と他の2地震の伝達関数に大きな差はない。

- UD方向の地盤同定解析に用いる地震は、Transverse方向の地盤同定解析に用いた地震と同じものを用いる。
- UD方向の伝達関数に関して、Transverse方向の検討で選定した5地震と地盤同定解析に用いる3地震の伝達関数を比較して下に示す。

— 選定した5地震のうち、地盤同定解析に用いる3地震
— 選定した5地震のうち、地盤同定解析に用いない2地震



選定した5地震の伝達関数(UD方向)

備考

- ・伝達関数は、0.5HzのParzen windowで平滑化。
- ・UD方向のEL.-17mの地震計は故障のため欠測。現在は復旧済。

UD方向の伝達関数についても、Transverse方向同様、5地震を選定した段階で、全周波数帯において伝達関数のばらつきは小さく、地盤同定解析に用いる3地震と他の2地震の伝達関数に大きな差はない。

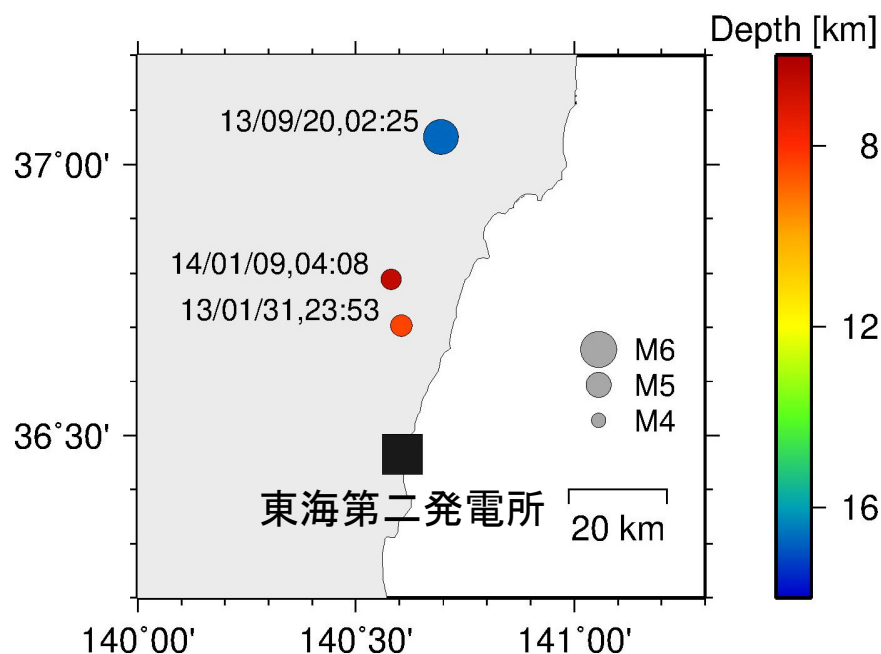
地盤同定解析に用いる3地震について

■前頁までの検討により、地盤同定解析に用いる3地震の伝達関数について、以下のとおり整理する。

- ・P波, S波初動の明瞭な23地震選定の段階では、およそ3Hz以下の低周波数帯でばらつきは大きいものの、3Hz以上の高周波数帯では小さくなり、更に、全体を代表する5地震を選定した段階で全周波数帯でばらつきは小さくなる。
- ・全体を代表する5地震の伝達関数では、Transverse方向, UD方向とも伝達関数の違いは小さいことを確認した上で、マグニチュードの大きい3地震を地盤同定解析に用いる地震として選定する。

23地震全体の伝達関数の中から代表性のあるものとして5地震の伝達関数を選定し、それらの伝達関数に大きな差はないことを確認している。従って、検討に用いる3地震の選定プロセスの段階で、3地震以外の地震の記録での検証を行い、最終的に用いる3地震の記録の妥当性を確認している。

■地盤同定解析に用いる3地震の諸元を下記に示す。



検討対象3地震の諸元

| No. | 発震日時 | | 震央位置 | | マグニチュード | 震源深さ (km) | 震央距離 (km) |
|-----|------------|-------|---------|----------|---------|-----------|-----------|
| | | | 緯度(度) | 経度(度) | | | |
| 5 | 2013/01/31 | 23:53 | 36.7030 | 140.6040 | 4.7 | 8.4 | 26.0 |
| 14 | 2013/09/20 | 02:25 | 37.0510 | 140.6950 | 5.9 | 16.7 | 65.0 |
| 18 | 2014/01/09 | 04:08 | 36.7885 | 140.5810 | 4.6 | 6.6 | 35.9 |

検討対象3地震の震央分布図

解析条件及び探索範囲(1/2)

- Q値を対象に地盤同定解析を行う。
- Q値の上限(減衰定数 h の下限)を考慮したバイリニア型のモデルを用いる。また、Q値のS波速度(V_s), P波速度(V_p)依存を考慮する。

- ① 地表(EL.8m)からEL.-372mで観測した地震記録をもとに地盤同定解析を行い設定した地盤モデルを用いる。
- ② 概ね100m程度を目安に層厚を設定する。
- ③ EL.-372m ~ -476mの地盤物性については、上層との連続性を考慮し、上層と同じ値を設定する。
- ④ EL.-476m ~ -679mの地盤物性については、調査結果に基づく標高依存式より算出する。
- ⑤ EL.-679m以深のS波速度及びP波速度については、1000mボーリングにおけるPS検層(サスペンション法)結果、密度については1000mボーリングにおける密度検層結果を基に設定する。
- ⑥ 地表(EL.8m)からEL.-992mで観測した地震記録をもとに地盤同定解析を行う。

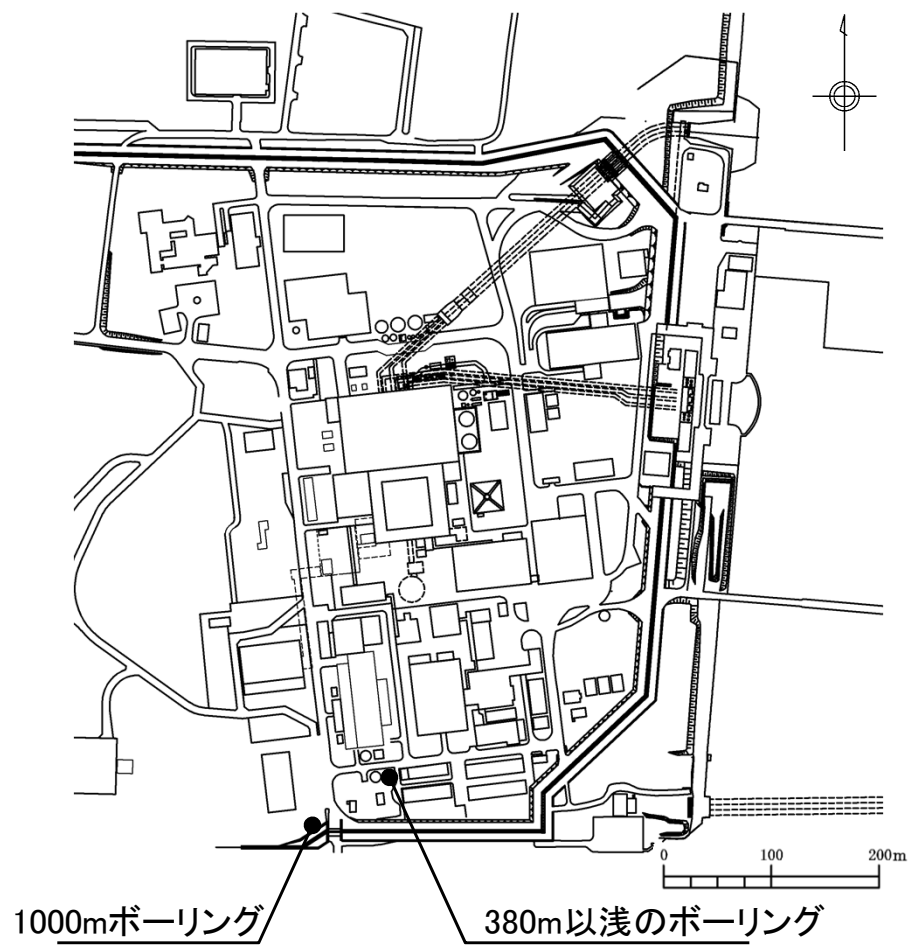
同定解析における探索範囲

| 固定パラメータ | | | | | | 探索範囲 | | | | | |
|----------------------|--------|----------------------------------|------------|------------|-------------------------|-----------------------------|---------|----------|-----------------------------|---------|----------|
| EL. (m) | 層厚 (m) | 地層 | S波速度 (m/s) | P波速度 (m/s) | 密度 (g/cm ³) | Q=(Vs/n)(f/f0) ^α | | | Q=(Vp/n)(f/f0) ^α | | |
| | | | | | | 水平 | | | 鉛直 | | |
| | | | | | | n | α | fo | n | α | fo |
| ● 8.0 | 2.5 | 第四系 | ① 130 | 280 | 1.71 | ⑥ 1-50 | 0.0-1.5 | 1.0-20.0 | 1-200 | 0.0-1.5 | 1.0-33.3 |
| 5.5 | 4.5 | | 151 | 403 | | | | | | | |
| 1.0 | 8.0 | | 308 | 1589 | | | | | | | |
| -7.0 | 8.0 | | 478 | 1509 | | | | | | | |
| ● -15.0 | 2.0 | 第四系 下部更新統 ~ 新第三系 鮮新統 | 477 | 1753 | 1.69 | 10-80 | 0.0-1.5 | 1.0-20.0 | 10-320 | 0.0-1.5 | 1.0-33.3 |
| ● -17.0 | 89.0 | | 557 | 1742 | | | | | | | |
| ● -106.0 | 62.0 | | 669 | 2067 | | | | | | | |
| ● -168.0 | 24.0 | | 669 | 2067 | | | | | | | |
| ● -192.0 | 68.0 | 第四系 下部更新統 ~ 新第三系 鮮新統 | 756 | 2256 | 1.82 | 10-80 | 0.0-1.5 | 1.0-20.0 | 10-320 | 0.0-1.5 | 1.0-33.3 |
| ● -260.0 | 108.0 | | 790 | 2000 | | | | | | | |
| ▽解放基盤表面 ● -368.0 | 2.0 | | 790 | 2000 | | | | | | | |
| ● -370.0 | 2.0 | | 790 | 2000 | | | | | | | |
| ● -372.0 | 104.0 | 先新第三系 | ② 790 | ③ 2000 | 1.85 | 10-100 | 0.0-1.5 | 1.0-20.0 | 10-400 | 0.0-1.5 | 1.0-33.3 |
| ● -476.0 | 90.0 | | 835 | ④ 2124 | | | | | | | |
| ● -566.0 | 89.0 | | 904 | ④ 2205 | | | | | | | |
| ● -655.0 | 24.0 | | 947 | 2256 | | | | | | | |
| ▽地震基盤相当面 ● -679.0 | 55.0 | 先新第三系 | ⑤ 2200 | 4800 | 2.65 | 10-100 | 0.0-1.5 | 1.0-20.0 | 10-400 | 0.0-1.5 | 1.0-33.3 |
| ● -734.0 | 258.0 | | 2800 | 5300 | | | | | | | |
| ● -992.0 | - | | 2800 | 5300 | | | | | | | |

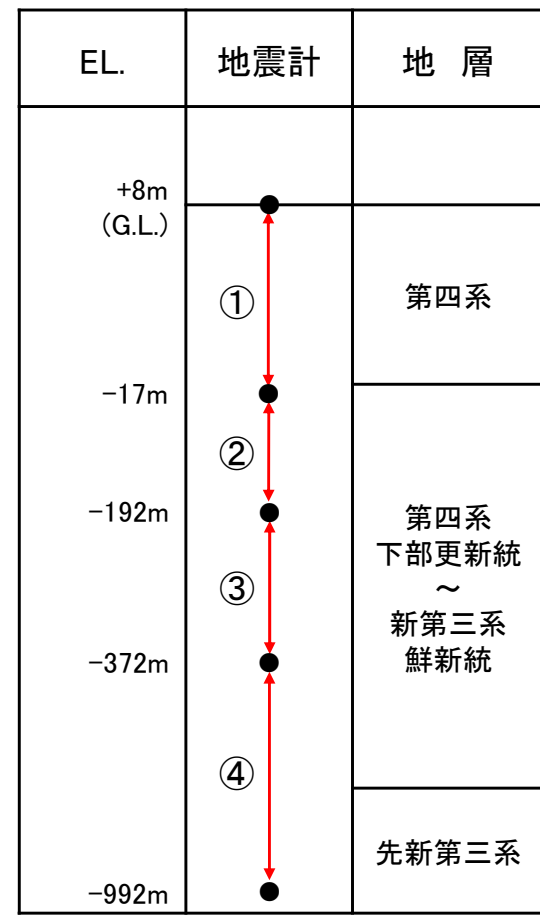
●: 地震計位置
網掛け: 第409回審査会合の2004年北海道留萌支庁南部地震の検討に用いた値と異なる箇所

解析条件及び探索範囲(2/2)

- 地震計間の伝達関数には、①EL.+8m/EL.-17m、②EL.-17m/EL.-192m、③EL.-192m/EL.-372m、④EL.-372m/EL.-992mの4ペアを用いる。
- 前述した3地震の観測記録の伝達関数を同時にフィッティングさせてQ値を同定する。フィッティングに際しては3地震それぞれの入射角も未知数として同定対象とする。
- 逆解析については5回の試行を行い、そのうち最小の解を結果とする。



地震計の設置位置



地震計の設置深さ

入射角

| No. | 地震 | 入射角探索範囲* | |
|-----|------------|---------------|-------|
| | | Transverse 方向 | UD 方向 |
| 5 | 2013/01/31 | 55-65 | 60-70 |
| 14 | 2013/09/20 | 30-40 | 45-55 |
| 18 | 2014/01/09 | 25-35 | 55-65 |

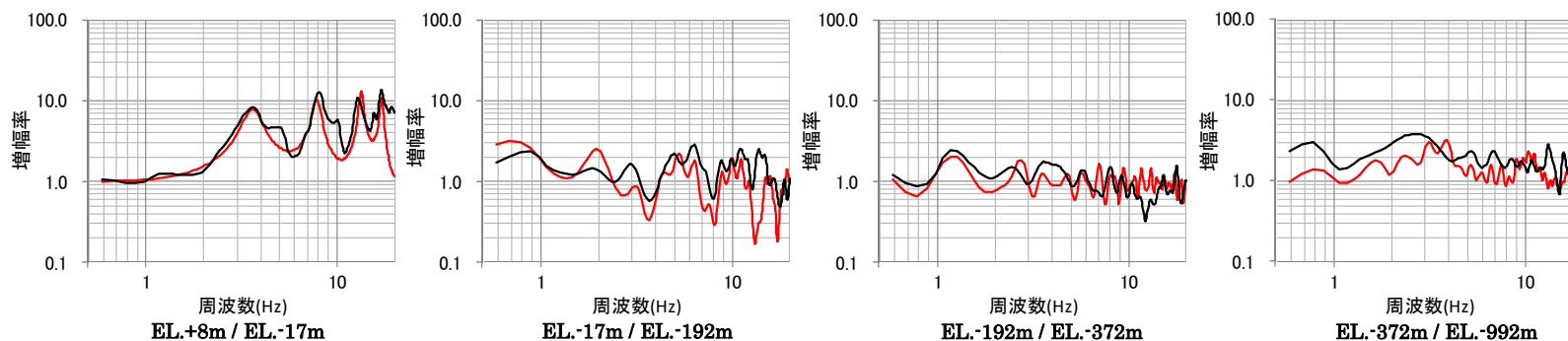
※震源と観測点の位置関係及びEL.-992mの地震計のUD方向-Transverse方向のオービットに基づき設定。

観測伝達関数と理論伝達関数の比較 (Transverse方向)

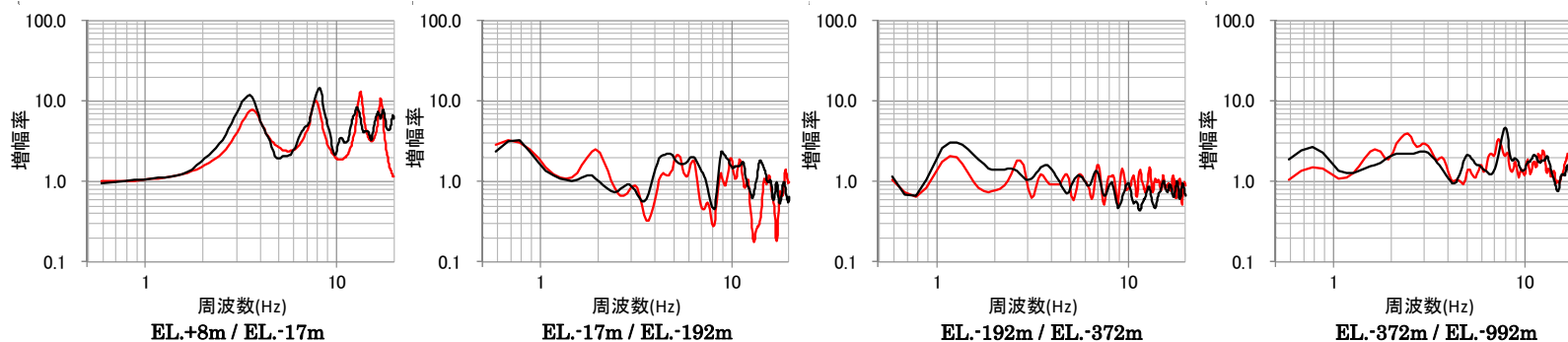
■ 観測記録の伝達関数と同定結果の伝達関数を下記に示す。同定結果は観測記録を再現している。

— 同定結果
— 観測記録

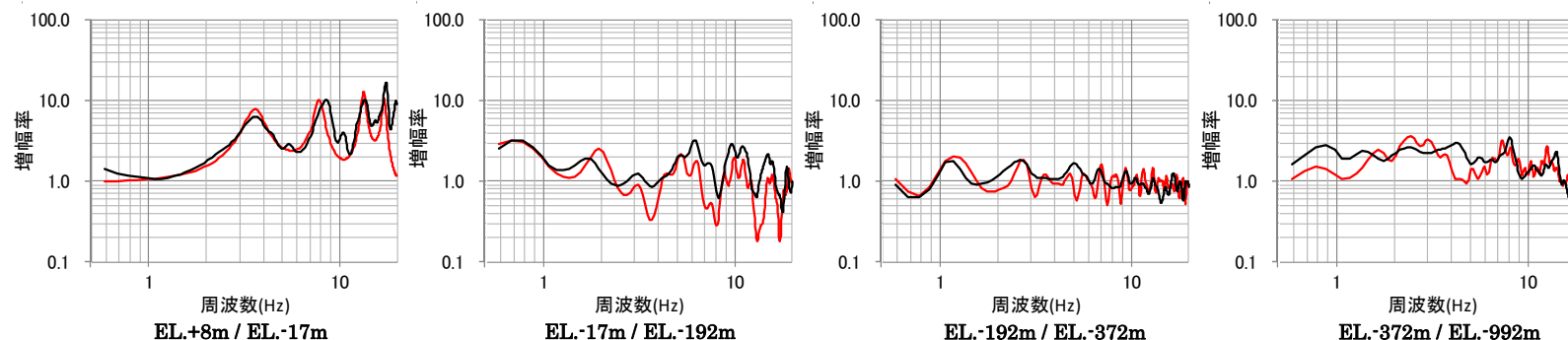
2013年1月31日
入射角: 55.63°



2013年9月20日
入射角: 30.22°



2014年1月9日
入射角: 34.30°



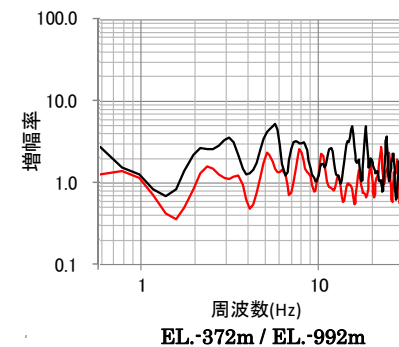
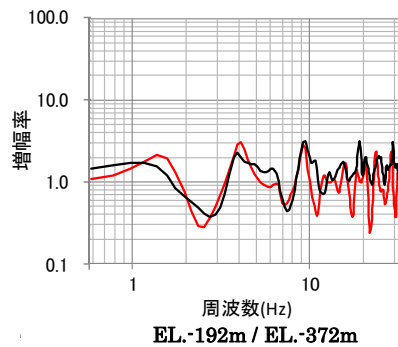
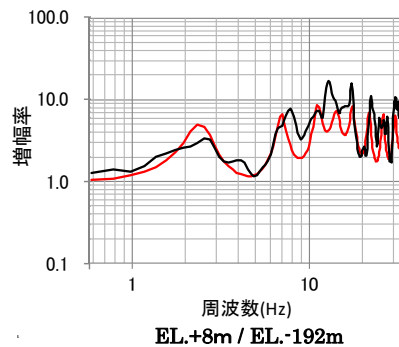
観測記録の伝達関数と同定結果の伝達関数

備考

対象周波数: 0.5~20Hz。地震観測記録の伝達関数は、0.5HzのParzen windowで平滑化。

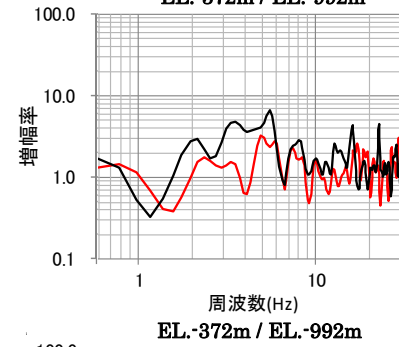
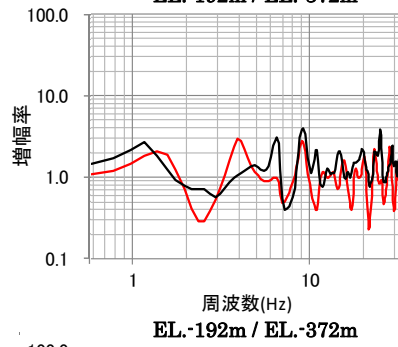
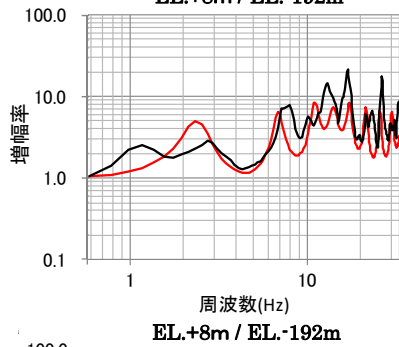
■ 観測記録の伝達関数と同定結果の伝達関数を下記に示す。同定結果は観測記録を再現している。

2013年1月31日
入射角: 60.74°

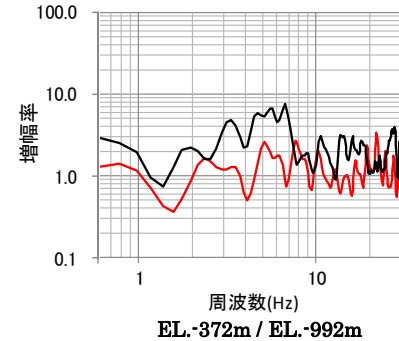
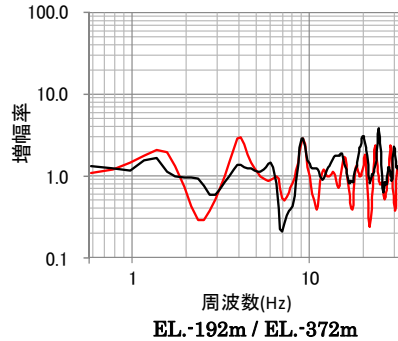
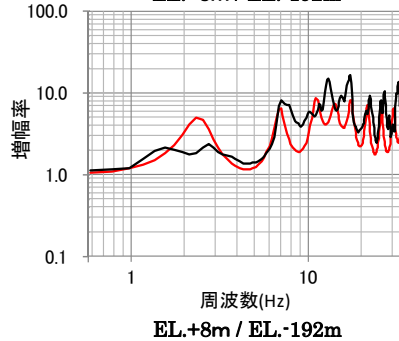


— 同定結果
— 観測記録

2013年9月20日
入射角: 45.27°



2014年1月9日
入射角: 55.99°



観測記録の伝達関数と同定結果の伝達関数



以上より、今回新たに設定した速度構造及び同定した減衰定数は、観測記録の伝達関数をよく再現しており、地震観測記録の説明性の観点において新しい地盤モデルの妥当性について確認した。

備考

・対象周波数: 0.5~33Hz。地震観測記録の伝達関数は、0.5HzのParzen windowで平滑化。 ・UD方向のEL.-17mの地震計は故障のため欠測。現在は復旧済。

地盤モデルの設定結果

■Q値の同定結果及び標準応答スペクトルに基づく地震動評価のために新たに設定した地盤モデルを下表に示す。

新たに設定した地盤モデル (減衰定数hは $Q=1/(2h)$ の関係より算定)

| 固定パラメータ | | | | | | 同定結果 (f: 周波数 (Hz)) | | | | | | | | |
|----------|--------|----------------------------------|------------|------------|-------------------------|------------------------------|--------------------|---------------------|------------------------------|----------|--------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| EL. (m) | 層厚 (m) | 地層 | S波速度 (m/s) | P波速度 (m/s) | 密度 (g/cm ³) | $Q=(V_s/n)(f/f_0)^{-\alpha}$ | | | $Q=(V_p/n)(f/f_0)^{-\alpha}$ | | | 減衰定数h(f) | | |
| | | | | | | 水平 | | | 鉛直 | | | 水平 | 鉛直 | |
| | | | | | | n | α | f ₀ | n | α | f ₀ | | | |
| ● 8.0 | 2.5 | 第四系 | 130 | 280 | 1.71 | 5 | 1.32 | 18.74 | 44 | 0.91 | 19.45 | $0.921f^{-1.32}$ (f ≤ 18.74) | $1.170f^{-0.91}$ (f ≤ 19.45) | |
| | 5.5 | | 151 | 403 | | | | | | | | 0.019 (f > 18.74) | 0.079 (f > 19.45) | |
| | 8.0 | | 308 | 1589 | 1.66 | | | | | | | $0.793f^{-1.32}$ (f ≤ 18.74) | $0.813f^{-0.91}$ (f ≤ 19.45) | |
| | -7.0 | | 478 | 1509 | 1.82 | | | | | | | 0.017 (f > 18.74) | 0.055 (f > 19.45) | |
| | -15.0 | | 8.0 | 478 | 1509 | | | | | | | 1.82 | $0.389f^{-1.32}$ (f ≤ 18.74) | $0.206f^{-0.91}$ (f ≤ 19.45) |
| | | | | | | | | | | | | 0.008 (f > 18.74) | 0.014 (f > 19.45) | |
| | | | | | | | | | | | | $0.250f^{-1.32}$ (f ≤ 18.74) | $0.217f^{-0.91}$ (f ≤ 19.45) | |
| | | | | | | | | | | | | 0.005 (f > 18.74) | 0.015 (f > 19.45) | |
| ● -17.0 | 2.0 | 第四系 下部更新統 | 477 | 1753 | 1.69 | 13 | 1.05 | 6.78 | 28 | 1.05 | 31.74 | $0.102f^{-1.05}$ (f ≤ 6.78) | $0.301f^{-1.05}$ (f ≤ 31.74) | |
| | 89.0 | | | | 0.014 (f > 6.78) | | | | | | | 0.008 (f > 31.74) | | |
| | -106.0 | | 62.0 | 557 | 1742 | | | | | | | 1.74 | $0.087f^{-1.05}$ (f ≤ 6.78) | $0.303f^{-1.05}$ (f ≤ 31.74) |
| | -168.0 | | 24.0 | 669 | 2067 | | | | | | | 1.78 | 0.012 (f > 6.78) | 0.008 (f > 31.74) |
| ● -192.0 | 68.0 | 第四系 下部更新統 ~ 新第三系鮮 新統 | 756 | 2256 | 1.82 | | | | | | | $0.072f^{-1.05}$ (f ≤ 6.78) | $0.256f^{-1.05}$ (f ≤ 31.74) | |
| | -260.0 | | 108.0 | 790 | 2000 | 1.85 | 0.010 (f > 6.78) | 0.007 (f > 31.74) | | | | | | |
| ▽解放基盤表面 | 2.0 | | 790 | 2000 | 1.85 | | | | | | | $0.064f^{-1.05}$ (f ≤ 6.78) | $0.234f^{-1.05}$ (f ≤ 31.74) | |
| | -368.0 | 2.0 | 790 | 2000 | 1.85 | | | | | | | 0.009 (f > 6.78) | 0.006 (f > 31.74) | |
| | -370.0 | 2.0 | 790 | 2000 | 1.85 | | | | | | | $0.061f^{-1.05}$ (f ≤ 6.78) | $0.264f^{-1.05}$ (f ≤ 31.74) | |
| | -372.0 | 104.0 | 790 | 2000 | 1.85 | | | | | | | 0.008 (f > 6.78) | 0.007 (f > 31.74) | |
| | -476.0 | 90.0 | 835 | 2124 | 1.89 | | | | | | | $0.061f^{-1.05}$ (f ≤ 6.78) | $0.264f^{-1.05}$ (f ≤ 31.74) | |
| | -566.0 | 89.0 | 904 | 2205 | 2.00 | | | | | | | 0.008 (f > 6.78) | 0.007 (f > 31.74) | |
| | -655.0 | 24.0 | 947 | 2256 | 2.07 | | | | | | | $0.058f^{-1.05}$ (f ≤ 6.78) | $0.249f^{-1.05}$ (f ≤ 31.74) | |
| | -679.0 | 55.0 | 2200 | 4800 | 2.65 | | | | | | | 0.008 (f > 6.78) | 0.007 (f > 31.74) | |
| | -734.0 | 258.0 | 2800 | 5300 | 2.78 | | | | | | | $0.054f^{-1.05}$ (f ≤ 6.78) | $0.240f^{-1.05}$ (f ≤ 31.74) | |
| | -992.0 | - | 2800 | 5300 | 2.78 | | | | | | | 0.007 (f > 6.78) | 0.006 (f > 31.74) | |
| ● -992.0 | | 先新第三系 | 2200 | 4800 | 2.65 | 53 | 0.21 | 1.31 | 20 | 0.23 | 16.46 | $0.013f^{-0.21}$ (f ≤ 1.31) | $0.004f^{-0.23}$ (f ≤ 16.46) | |
| | -734.0 | | 2800 | 5300 | 2.78 | | | | | | | 0.012 (f > 1.31) | 0.002 (f > 16.46) | |
| | -992.0 | | 2800 | 5300 | 2.78 | | | | | | | $0.010f^{-0.21}$ (f ≤ 1.31) | $0.004f^{-0.23}$ (f ≤ 16.46) | |
| | | | | | | | | | | | 0.009 (f > 1.31) | 0.002 (f > 16.46) | | |

●: 地震計位置

(4) まとめ(1/2)

(2) 速度構造と地震基盤相当面位置の設定

概 要

標準応答スペクトルが定義されている地震基盤相当面 ($V_s 2200\text{m/s}$ 以上)に相当する敷地での層を検討する観点から、地震基盤相当面以深まで掘削している大深度ボーリングのデータに着目して速度構造の検討を行った。

- ・ 解放基盤表面からEL.-679m(新第三系鮮新統下端)までの速度構造は、既許可の2004年北海道留萌支庁南部地震の検討で用いたものを採用した。
- ・ EL.-679m以深においては、サスペンション法の結果に準拠した速度構造を新たに設定した。

地震基盤相当面位置は、 $V_s 2200\text{m/s}$ 以上に相当する敷地での層の上面としてEL.-679mに設定した。

新たに設定した速度構造については、既往の物理探査結果(探査結果に基づいて作成した3次元地下構造モデルから切り出した1次元モデルの位相速度の分散曲線、単点微動のH/Vスペクトル比)との整合性を確認した。(地震観測記録の説明性については「(3)減衰定数の設定」で確認。)

(4) まとめ(2/2)

(3) 減衰定数の設定

概 要

減衰定数に関する知見については、従来振動数が大きくなるにつれて減衰定数 h が小さくなることが指摘されていたところ、現在では下限の存在を示す評価事例が蓄積されてきたことから、減衰定数 h の同定に際しては下限を考慮することとした。

地盤同定解析に用いる地震については下記のとおり選定した。

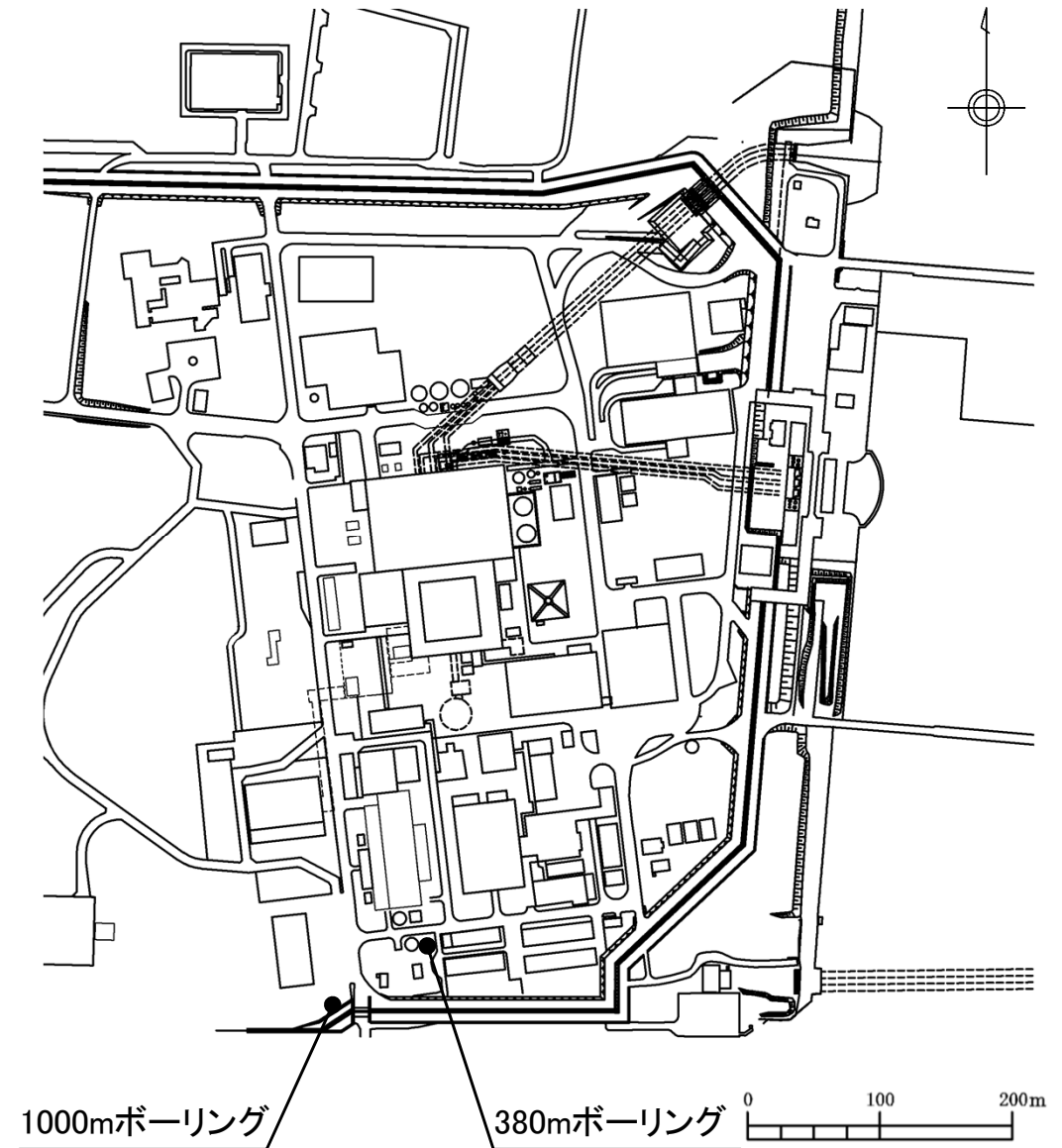
- ・ 地盤同定解析に用いる地震の候補として23地震を選定し、その23地震の伝達関数の比較を通して代表性のある5地震を選定した。この5地震の伝達関数に大きな差異は見られないことを確認した上で、最終的に3地震の伝達関数を用いた。
- ・ 以上のとおり、検討に用いる3地震の選定プロセスの段階で、3地震以外の地震の記録での検証を行い、最終的に用いる3地震の記録の妥当性を確認した。

地盤同定解析は、下記の条件で実施した。

- ・ Q値を対象に地盤同定解析を行った。減衰モデルについては、Q値の上限(減衰定数 h の下限)を考慮したバイリニア型のモデルを用いた。
- ・ Q値の同定範囲は、地表(EL.+8m)～大深度地震計設置位置(EL.-992m)とした。
- ・ 選定した3地震の伝達関数を同時にフィッティングさせて逆解析した。

今回新たに設定した速度構造及び減衰定数について、地震観測記録の説明性の観点においてその妥当性を確認した。

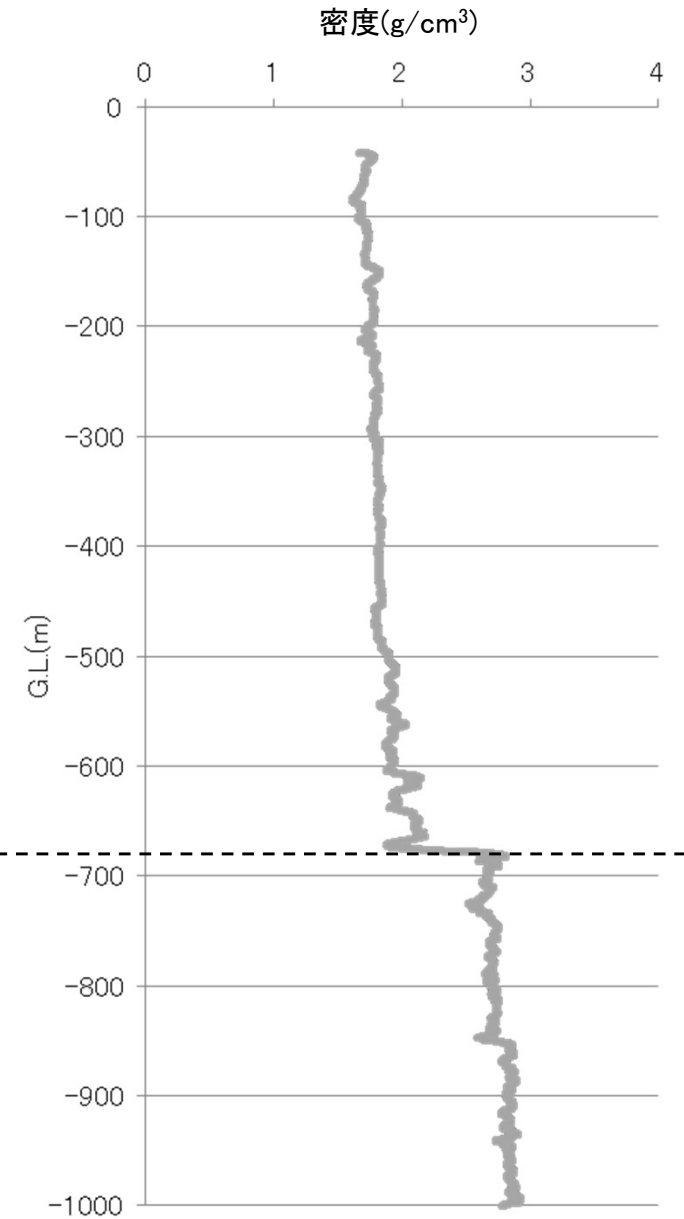
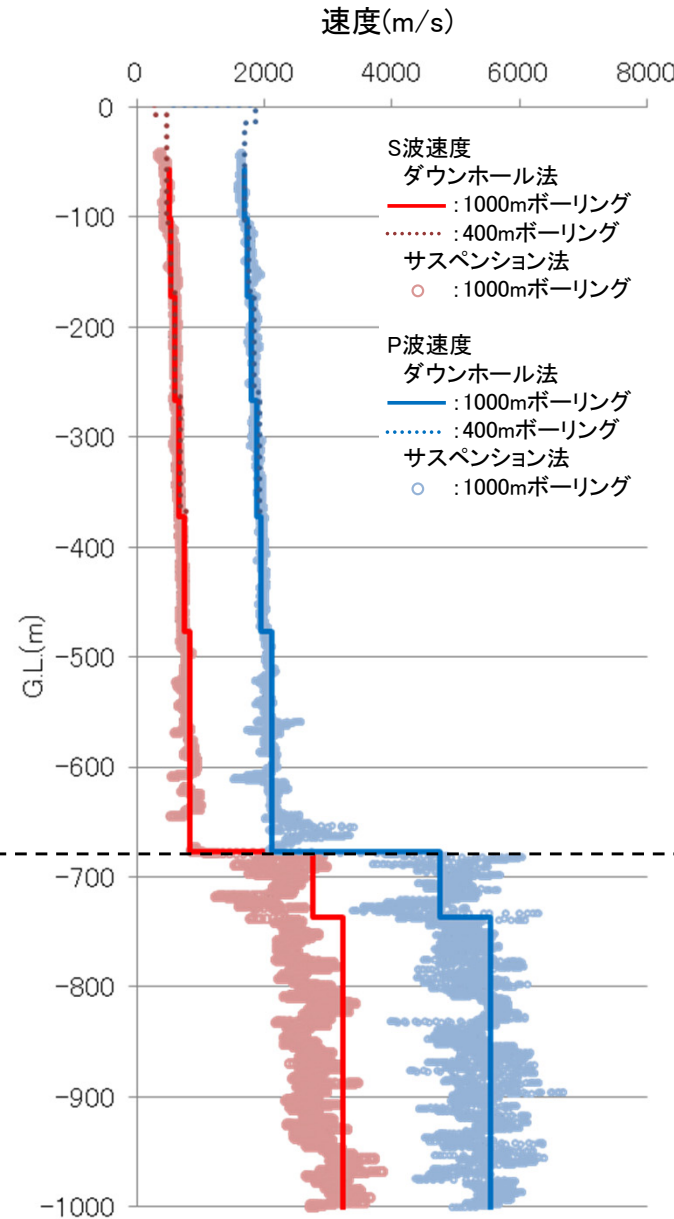
- ・第338回審査会合において、東海第二発電所で実施した1000mボーリングによる調査結果に基づく地盤モデルについて説明した。
- ・その後、1000mボーリング孔に設置している地震計による地震観測記録の中から、ノイズや機器の不具合等による影響のないデータを選定し、解放基盤表面以深の地盤モデルについて再検討を実施した。



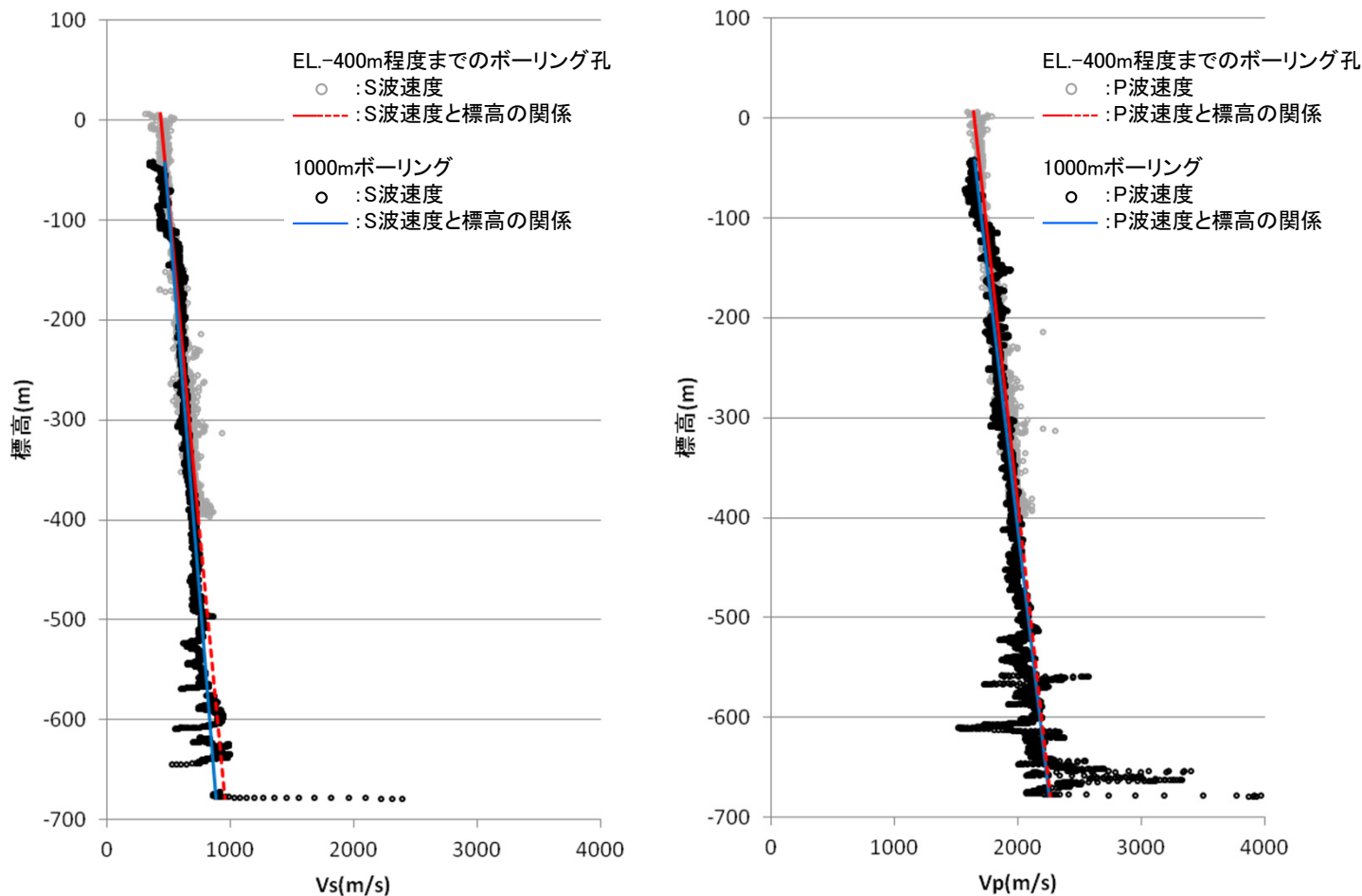
地盤モデルの検討に用いた
ボーリング位置(平面)

【1000mボーリング】

| G.L. (m) | S波速度 (m/s) | P波速度 (m/s) | 減衰定数 η | | 地層 |
|-------------|---------------|---------------|-------------|--------|-------|
| | | | 水平 | 鉛直 | |
| -65 | — | — | | | 新第三系 |
| -110 | 500 | 1680 | | | |
| -180 | 540 | 1730 | | | |
| -275 | 600 | 1790 | — | — | |
| -380 | 650 | 1890 | | | |
| -485 | 750 | 1950 | | | 先新第三系 |
| -685 | 840 | 2110 | 0.0246 | 0.0103 | |
| -745 | 2750 | 4740 | 0.0725 | 0.0397 | |
| -745 | 3220 | 5550 | 0.0154 | 0.0102 | |
| -1000 | — | — | — | — | |



- ・東海第二発電所敷地に分布する新第三系の久米層の地盤速度は、深度方向に増大する傾向を示す。
- ・標高-400m程度まで掘削した5孔のボーリング孔で実施したPS検層によって得られた地盤速度と1000mボーリングで実施したPS検層によって得られた地盤速度を以下に示す。また併せて、それぞれのPS検層結果から得られる標高と地盤速度の関係を示す。
- ・標高-400m程度まで掘削した5孔のボーリング孔で実施したPS検層データを基に作成した地盤速度と標高の関係は、1000mボーリングで実施したPS検層結果と整合的であり、久米層における地盤速度は、標高-400m程度まで掘削した5孔のボーリング孔で実施したPS検層データを基に作成した地盤速度と標高の関係より求める。



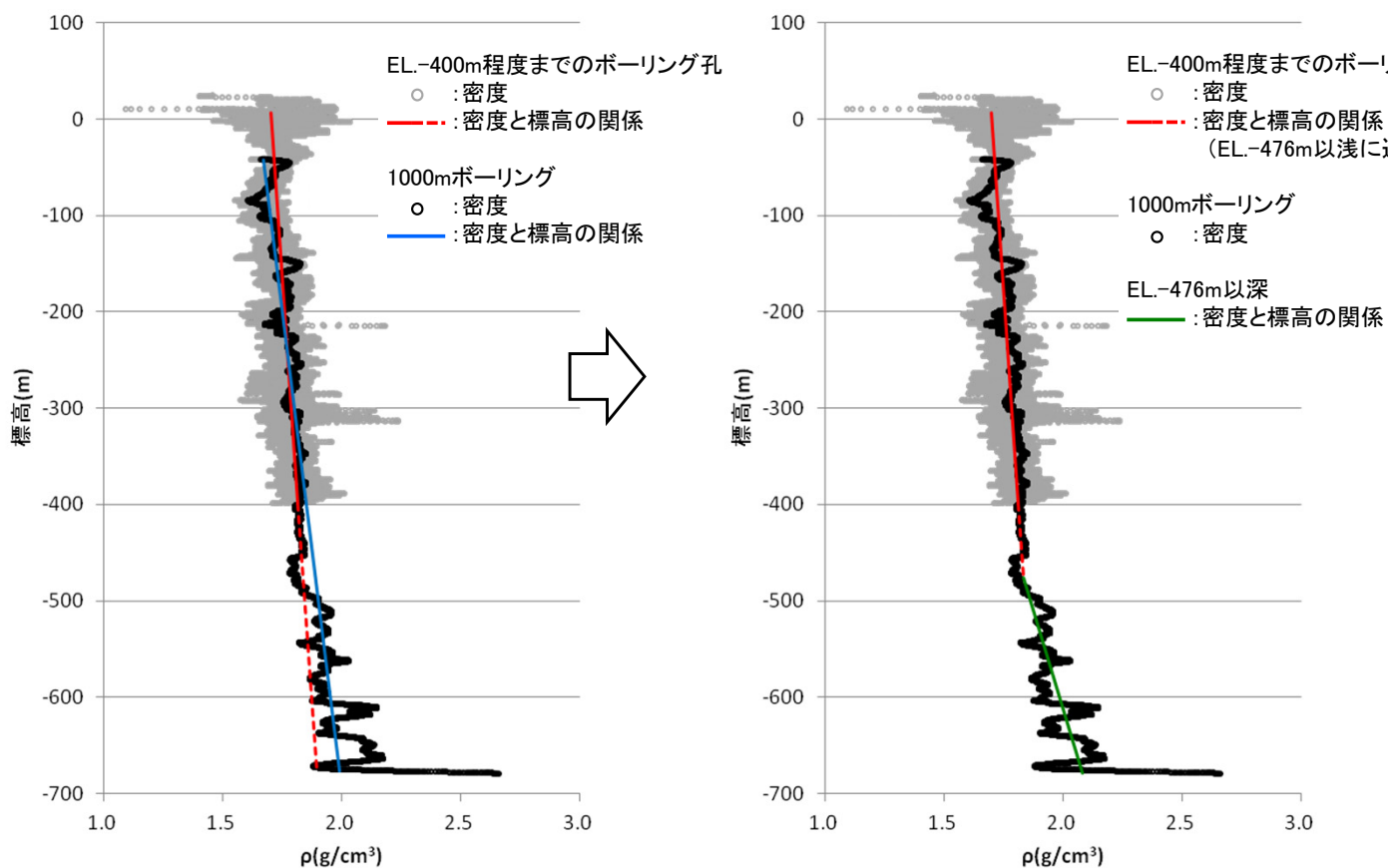
久米層における
地盤速度と標高の関係

$$V_s = 0.433 - 7.71 \times 10^{-4} \cdot Z$$

$$V_p = 1.65 - 9.09 \times 10^{-4} \cdot Z$$

ここで、 V_s : S波速度 (km/s)
 V_p : P波速度 (km/s)
 Z : 標高 (m)

- ・東海第二発電所敷地に分布する新第三系の久米層の密度は、深度方向に増大する傾向を示す。
- ・標高-400m程度まで掘削した5孔のボーリング孔で実施した密度検層によって得られた密度と1000mボーリングで実施した密度検層によって得られた密度を以下に示す。また併せて、それぞれの密度検層結果から得られる標高と密度の関係を示す。
- ・標高-400m程度まで掘削した5孔のボーリング孔で実施した密度検層データを基に作成した密度と標高の関係は、1000mボーリングで実施した密度検層結果とEL.-500m程度まで整合的であるが、EL.-500m以深では密度と標高の関係より密度検層データが大きくなる。
- ・1000mボーリング結果によると、EL.-476m以深では砂質泥岩層と乱堆積物層との互層が見られることより、EL.-476mを境に密度と標高の関係を変えることとした。



久米層における 密度と標高の関係

$$\rho = 1.702 - 2.828 \times 10^{-4} \cdot Z$$

(EL.-476m 以浅)

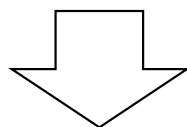
$$\rho = 1.253 - 1.220 \times 10^{-3} \cdot Z$$

(EL.-476m 以深)

ここで、 ρ : 密度 (g/cm³)
Z : 標高 (m)

設定した初期地盤モデル

- ① EL.-372m以浅の地盤モデルは、地表(EL.8m)からEL.-372mで観測した地震記録をもとに地盤同定解析を行い設定した地盤モデルを用いた。
【第291回審査会合】
- ② 概ね100m程度を目安に層厚を設定した。
- ③ EL.-372m ~ -476mの地盤物性については、上層との連続性を考慮し、上層と同じ値を設定した。
- ④ EL.-476m ~ -679mの地盤物性については、調査結果に基づく標高依存式より算出した。
- ⑤ EL.-372 ~ -679mの新第三系(久米層)の減衰定数は、上層との連続性を考慮し、上層と同じ値を設定した。
- ⑥ EL.-679m以深のS波速度及びP波速度については、1000mボーリングにおけるPS検層(ダウンホール法)結果、密度については1000mボーリングにおける密度検層結果を基に設定した。
- ⑦ EL.-679m以深の減衰定数は仮定した。

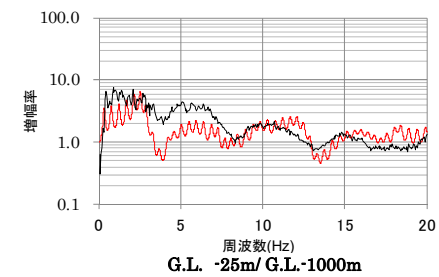
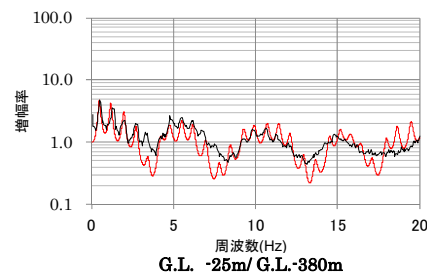
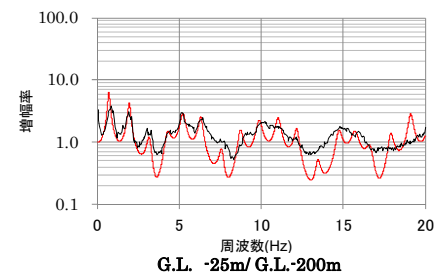
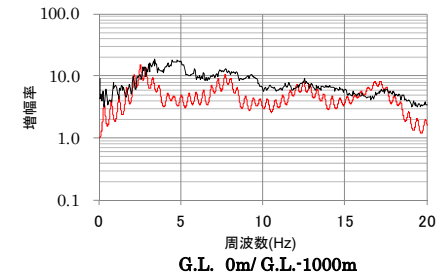
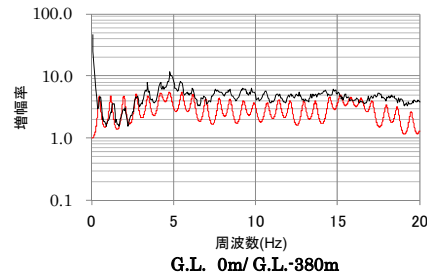
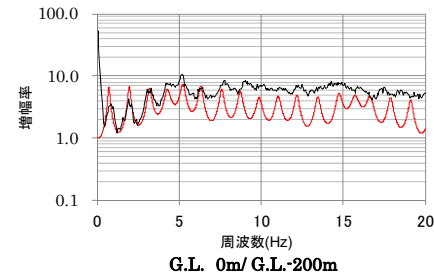
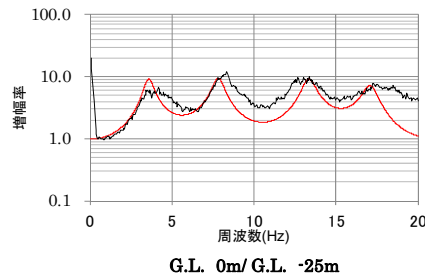


●初期地盤モデルの理論伝達関数と観測記録による伝達関数を比較する

| EL. (m) | 層厚 (m) | 地層 | 密度 (g/cm ³) | S波速度 (m/s) | P波速度 (m/s) | 減衰定数h(f) | | | | | | | | |
|------------|-----------|-------|----------------------------|---------------|---------------|--------------------------|-------------------------|------|---------|--------------------------|-------------------------|------|-----|------|
| | | | | | | 水平 | 鉛直 | | | | | | | |
| ▼ 8.0 | ① 2.5 | 第四系 | 1.71 | 130 | 280 | 0.236f ^{-0.752} | 0.203f ^{-0.21} | | | | | | | |
| 5.5 | 4.5 | | | 151 | 403 | | | | | | | | | |
| 1.0 | 8.0 | | | 308 | 1589 | | | | | | | | | |
| -7.0 | 8.0 | | | 478 | 1509 | | | | | | | | | |
| -15.0 | 2.0 | | | 新第三系 | 1.69 | | | 477 | 1753 | 0.072f ^{-0.931} | 0.203f ^{-0.93} | | | |
| ▼ -17.0 | 89.0 | 1.74 | 557 | | | 1742 | | | | | | | | |
| -106.0 | 62.0 | | | | | | | | | | | | | |
| -168.0 | 24.0 | | | | | | | | | | | | | |
| ▼ -192.0 | 68.0 | | | | | | 1.78 | 669 | 2067 | | | | | |
| -260.0 | 108.0 | | | | | | | | | | | 1.82 | 756 | 2256 |
| -368.0 | 2.0 | | | | | | | | | | | | | |
| ▽ -370.0 | 2.0 | | | | | | | | | | | | | |
| ▼ -372.0 | ② 104.0 | 先新第三系 | 2.65 | 790 | 2000 | 0.072f ^{-0.931} | 0.203f ^{-0.93} | | | | | | | |
| -476.0 | 90.0 | | | ③ 1.85 | 835 | | | 2124 | | | | | | |
| -566.0 | 89.0 | | | ④ 2.00 | 904 | | | 2205 | | | | | | |
| -655.0 | 24.0 | | | 2.07 | 947 | | | 2256 | | | | | | |
| △ -679.0 | ⑥ 55.0 | | | 2.78 | 3220 | | | 5550 | ⑦ 0.010 | 0.010 | | | | |
| -734.0 | 258.0 | 2.78 | 3220 | 5550 | | | | | | | | | | |
| ▼ -992.0 | - | 2.78 | 3220 | 5550 | | | | | | | | | | |

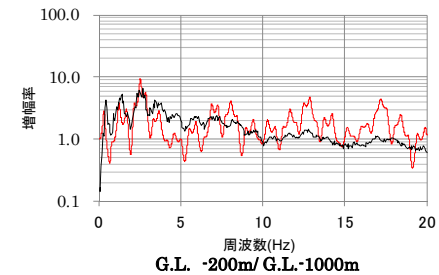
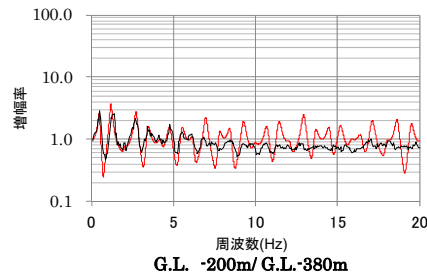
▼:地震計位置 ▽:解放基盤表面 △:地震基盤

- ・初期地盤モデルによる理論伝達関数を算出し、地震観測記録による伝達関数と比較した。
- ・初期地盤モデルと地震観測記録による伝達関数のピークとトラフは整合しており、初期地盤モデルの層厚と地盤速度の設定は妥当であり、地盤同定解析では減衰定数を解析対象とする。



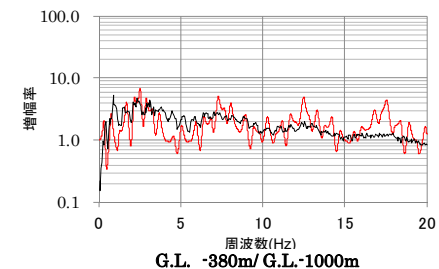
— 初期地盤モデル
— 観測記録の平均

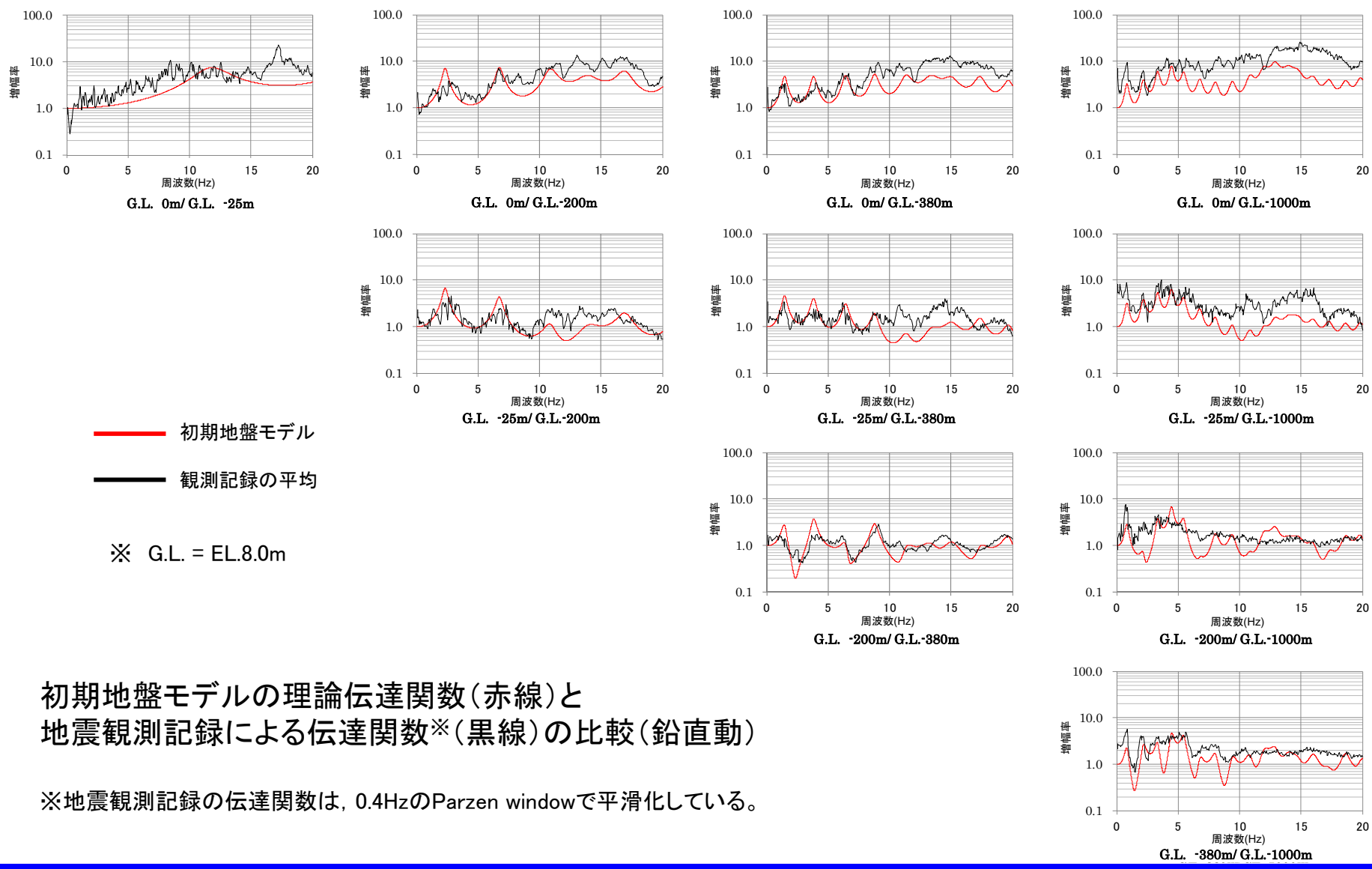
※ G.L. = EL.8.0m



初期地盤モデルの理論伝達関数(赤線)と
地震観測記録による伝達関数※(黒線)の比較(水平動)

※地震観測記録の伝達関数は、0.4HzのParzen windowで平滑化している。





初期地盤モデルの理論伝達関数(赤線)と地震観測記録による伝達関数※(黒線)の比較(鉛直動)

※地震観測記録の伝達関数は、0.4HzのParzen windowで平滑化している。

●地盤モデルの同定結果

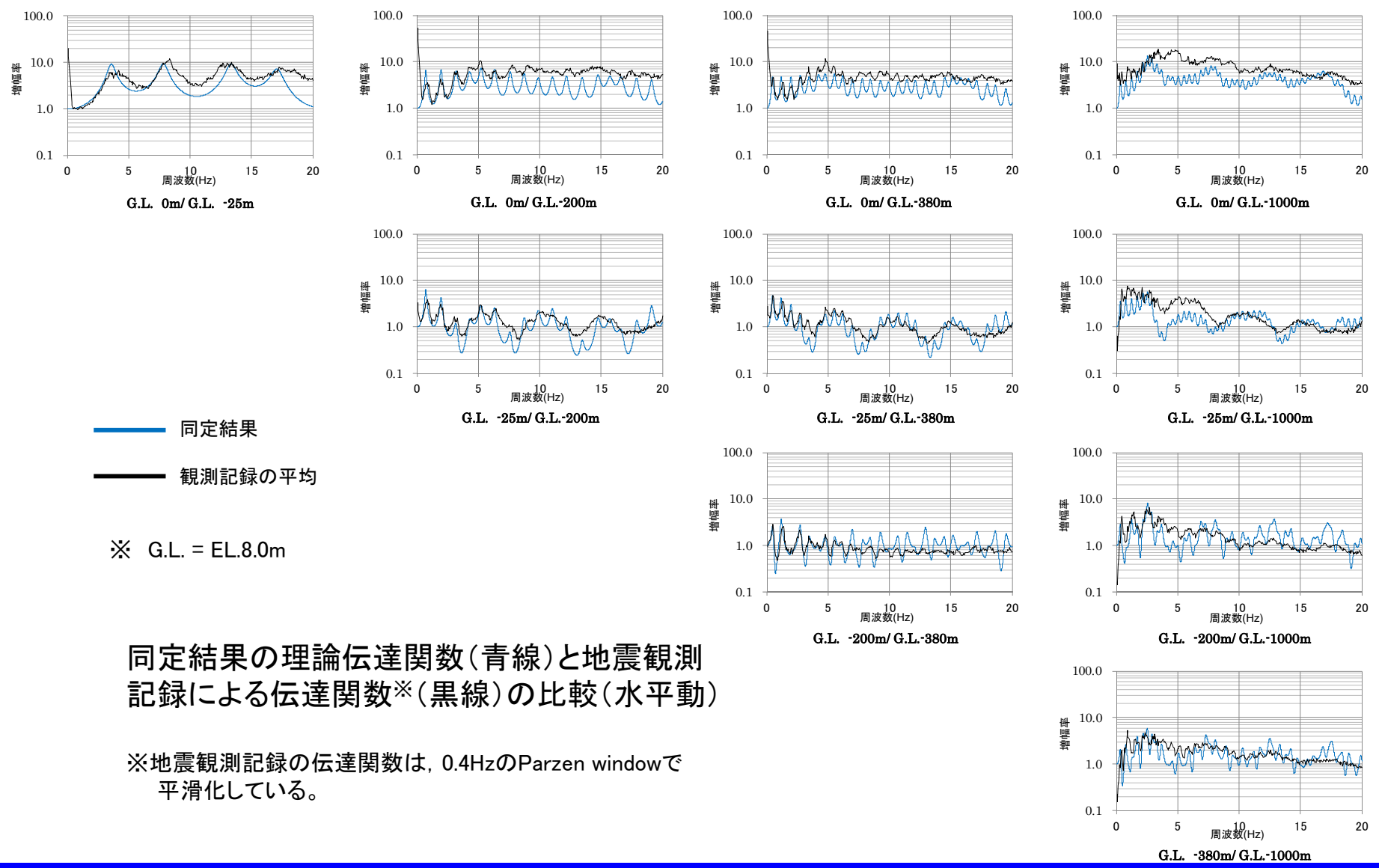
- 地震観測記録から求めた伝達関数に、一次元波動論に基づく理論伝達特性を当てはめる逆解析により、地盤モデルを同定した。
- 減衰定数 h の初期値は0.01(1%)と仮定した。
- 解析手法は遺伝的アルゴリズムを用い、乱数の初期値を変えた5通りの計算結果の平均値を採用した。
- 解析パラメータについては、山中・石田(1995)を参考に設定した。
- 得られた結果を以下に示す。
 水平成分 $h(f)=0.022$
 鉛直成分 $h(f)=0.001 \times f^{-1.000}$

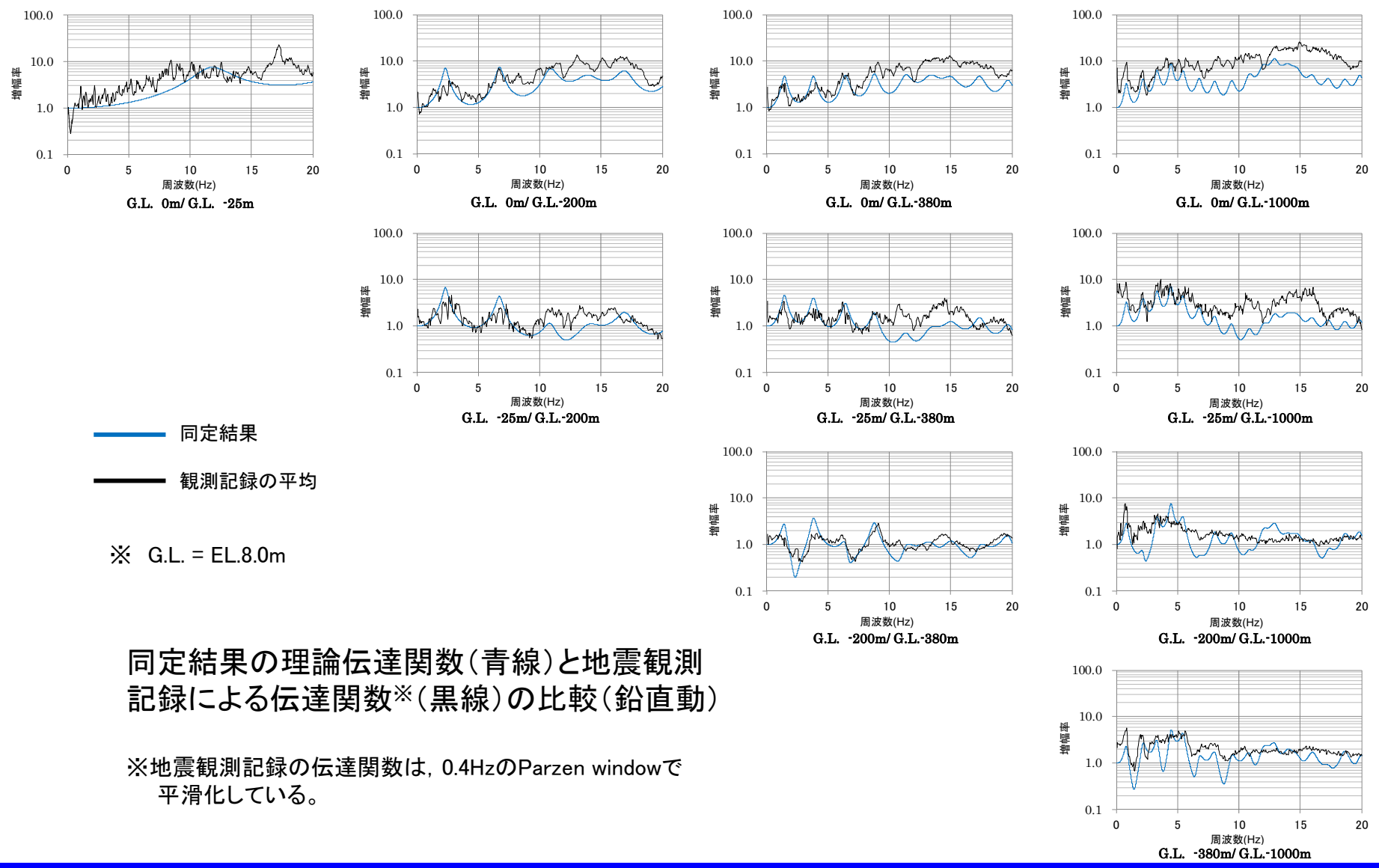
同定解析における初期値, 探索範囲, 同定結果

| 固定パラメータ | | | | | | 探索範囲 | | 同定結果 | | |
|------------|-----------|-------|---------------|---------------|----------------------------|------------------------------------|-------------------------|--|----------------------------------|----------------------------------|
| EL. (m) | 層厚 (m) | 地層 | S波速度 (m/s) | P波速度 (m/s) | 密度 (g/cm ³) | 減衰定数 $h(f)=h_0 \times f^{-\alpha}$ | | | | |
| | | | | | | 水平 | 鉛直 | 水平 | 鉛直 | |
| ▼ 8.0 | 2.5 | 第四系 | 130 | 280 | 1.71 | 0.236f ^{-0.752} | 0.203f ^{-0.21} | - | | |
| 5.5 | 4.5 | | 151 | 403 | | | | | | |
| 1.0 | 8.0 | | 308 | 1589 | | | | | | 1.66 |
| -7.0 | 8.0 | | 478 | 1509 | | | | | | 1.82 |
| ▼ -15.0 | 2.0 | 新第三系 | 477 | 1753 | 1.69 | 0.072f ^{-0.931} | 0.203f ^{-0.93} | - | | |
| -17.0 | 89.0 | | 557 | 1742 | | | | | | 1.74 |
| -106.0 | 62.0 | | 669 | 2067 | | | | | | 1.78 |
| -168.0 | 24.0 | | 756 | 2256 | | | | | | 1.82 |
| ▼ -192.0 | 68.0 | 先新第三系 | 790 | 2000 | 1.85 | 0.072f ^{-0.931} | 0.203f ^{-0.93} | - | | |
| -260.0 | 108.0 | | 790 | 2000 | | | | | | 1.85 |
| -368.0 | 2.0 | | 835 | 2124 | | | | | | 1.89 |
| ▽ -370.0 | 2.0 | | 904 | 2205 | | | | | | 2.00 |
| ▼ -372.0 | 104.0 | 先新第三系 | 947 | 2256 | 2.07 | 0.072f ^{-0.931} | 0.203f ^{-0.93} | - | | |
| -476.0 | 90.0 | | 2750 | 4740 | | | | | | 2.65 |
| -566.0 | 89.0 | | 3220 | 5550 | | | | | | 2.78 |
| -655.0 | 24.0 | | 3220 | 5550 | | | | | | 2.78 |
| △ -679.0 | 55.0 | 先新第三系 | 2750 | 4740 | 2.65 | - | - | h ₀ :0.001~1.000 α:0.000~1.000 | h ₀ :0.022 α:0.000 | h ₀ :0.001 α:1.000 |
| -734.0 | 258.0 | | 3220 | 5550 | | | | | | |
| ▼ -992.0 | - | | 3220 | 5550 | 2.78 | | | | | |

▼:地震計位置 ▽:解放基盤表面 △:地震基盤

h₀:0.001~1.000
α:0.000~1.000 : 同定対象

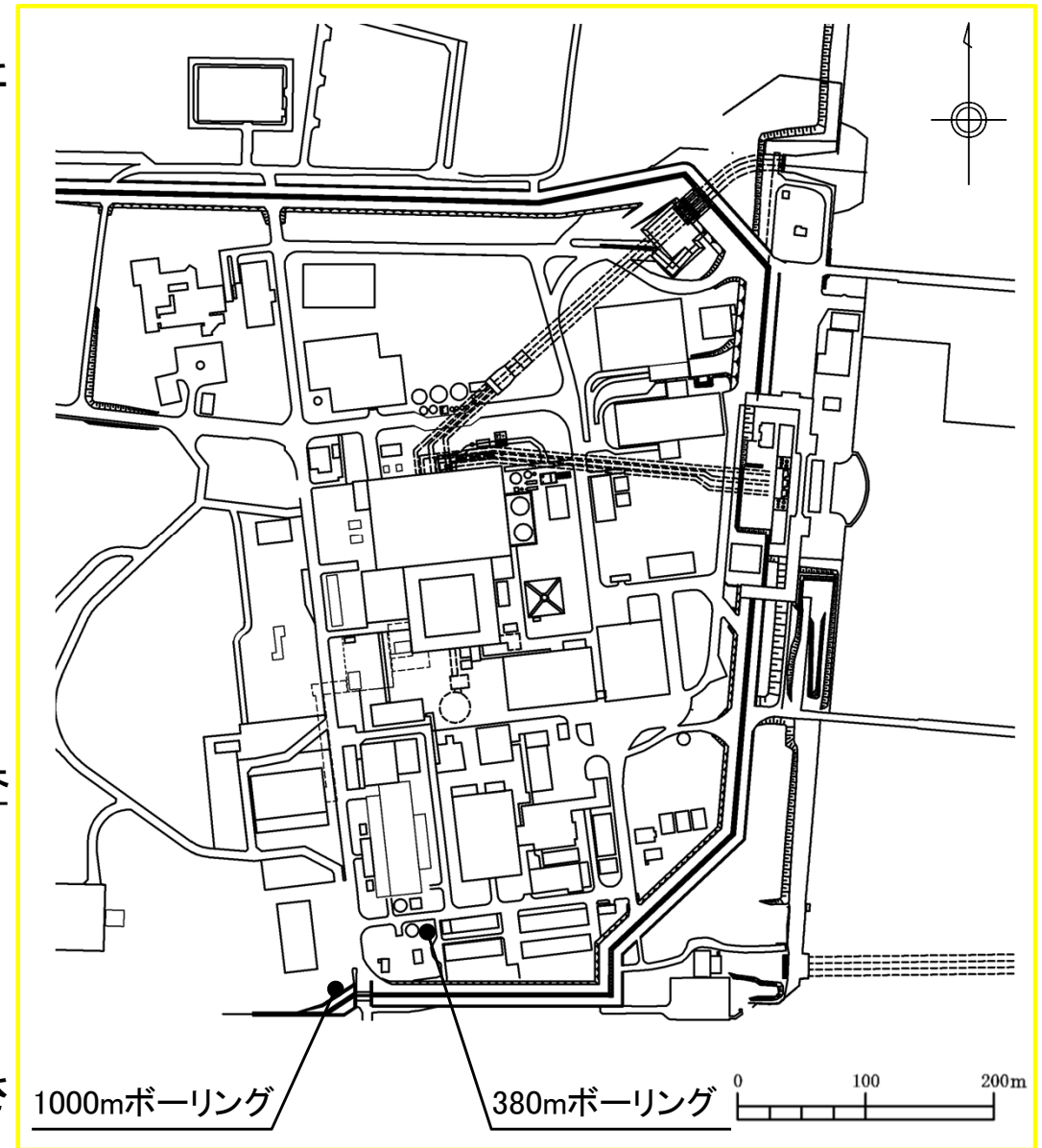




同定結果の理論伝達関数(青線)と地震観測記録による伝達関数※(黒線)の比較(鉛直動)

※地震観測記録の伝達関数は、0.4HzのParzen windowで平滑化している。

- 地震観測記録を用いた地震波の到来方向による検討や、地球物理学的調査に基づき作成した地下構造モデルによる解析的検討の結果より、東海第二発電所の地下構造は水平成層とみなせることを確認したので、地盤調査結果と地震観測記録を用いて、一次元波動論に基づき地盤モデルを設定する。
- 東海第二発電所の敷地では、1993年に深さ380m程度の解放基盤表面までを対象としたボーリング調査を実施するとともに、ボーリング孔を利用した鉛直アレイ地震観測を開始した。その後、2011年までに深さ1000m程度のボーリング調査を追加実施した。
- 解放基盤表面以浅については、ボーリング調査結果と地震観測記録を用いた地盤同定解析を実施した。
- 東海第二発電所敷地直下の地盤モデルは、解放基盤表面以浅を地震観測記録により同定した解析モデルを用い、解放基盤表面以深に深さ1000m程度のボーリング調査結果を組み合わせて設定することとした。



地盤モデルの検討に用いた
ボーリング位置(平面)

【380mボーリング】

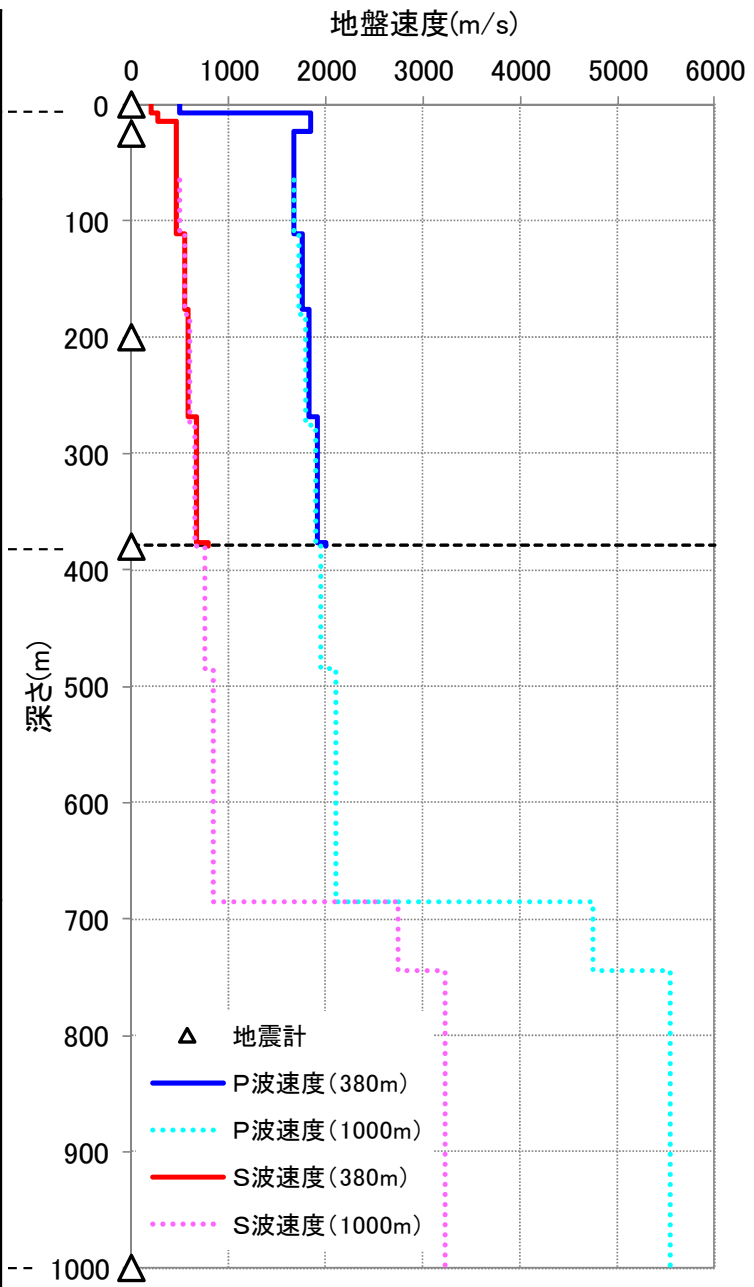
| 上端深さ (m) | S波速度 (m/s) | P波速度 (m/s) | 地層 |
|-------------|---------------|---------------|------|
| 0 | 210 | 500 | 第四系 |
| 7 | 280 | 1850 | |
| 15 | 470 | 1850 | |
| 23 | 460 | 1680 | 新第三系 |
| 114 | 540 | 1760 | |
| 176 | 590 | 1830 | |
| 268 | 670 | 1920 | |
| 376 | 790 | 2000 | |
| 380 | — | — | |

【1000mボーリング】

| 上端深さ (m) | S波速度 (m/s) | P波速度 (m/s) | 減衰定数 h | | 地層 |
|-------------|---------------|---------------|----------|--------|-------|
| | | | 水平 | 鉛直 | |
| — | — | — | — | — | — |
| 65 | 500 | 1680 | — | — | 新第三系 |
| 110 | 540 | 1730 | — | — | |
| 180 | 600 | 1790 | — | — | |
| 275 | 650 | 1890 | — | — | |
| 380 | 750 | 1950 | — | — | |
| 485 | 840 | 2110 | 0.0246 | 0.0103 | |
| 685 | 2750 | 4740 | 0.0725 | 0.0397 | 先新第三系 |
| 745 | 3220 | 5550 | 0.0154 | 0.0102 | |
| 1000 | — | — | — | — | |

※ G.L. = EL.8.0m

注) 1000mボーリングにおける65m以浅のS波速度とP波速度, 485m以浅の減衰定数 h は取得していない。



- ・検討対象期間 : 1996年6月～2011年6月
- ・検討対象地震数 : 164地震

| No. | 発震日時 | | 震央位置 | | 震源深さ (km) | マグニ チュード | 震央距離 (km) |
|-----|------------|-------|--------|---------|--------------|-------------|--------------|
| | | | 緯度(度) | 経度(度) | | | |
| 1 | 1996/06/03 | 02:18 | 36.339 | 140.664 | 60 | 3.7 | 14 |
| 2 | 1996/06/08 | 16:14 | 36.474 | 140.611 | 56 | 4.0 | 2 |
| 3 | 1996/09/11 | 11:37 | 35.636 | 141.220 | 52 | 6.4 | 107 |
| 4 | 1996/10/07 | 06:03 | 36.393 | 140.930 | 35 | 4.3 | 30 |
| 5 | 1996/12/21 | 10:28 | 36.093 | 139.864 | 53 | 5.4 | 78 |
| 6 | 1997/04/11 | 08:30 | 36.362 | 140.540 | 54 | 4.1 | 13 |
| 7 | 1997/08/22 | 05:01 | 36.423 | 140.689 | 51 | 3.9 | 8 |
| 8 | 1997/10/20 | 23:12 | 36.314 | 140.917 | 43 | 4.1 | 32 |
| 9 | 1997/11/15 | 13:42 | 36.874 | 141.518 | 64 | 4.9 | 93 |
| 10 | 1998/01/22 | 05:11 | 36.515 | 140.590 | 59 | 3.8 | 6 |
| 11 | 1998/02/10 | 01:03 | 36.446 | 140.615 | 56 | 3.6 | 2 |
| 12 | 1998/02/24 | 18:41 | 36.398 | 141.055 | 46 | 4.1 | 41 |
| 13 | 1998/03/23 | 18:37 | 36.370 | 141.175 | 45 | 5.3 | 52 |
| 14 | 1998/04/09 | 02:44 | 36.952 | 140.891 | 94 | 4.6 | 60 |
| 15 | 1998/04/09 | 17:45 | 36.941 | 141.032 | 93 | 5.4 | 65 |
| 16 | 1998/04/11 | 19:07 | 36.438 | 140.663 | 55 | 4.3 | 5 |
| 17 | 1998/05/01 | 05:59 | 36.381 | 141.117 | 44 | 3.8 | 46 |
| 18 | 1998/06/05 | 16:55 | 36.583 | 141.073 | 47 | 3.9 | 44 |
| 19 | 1998/06/22 | 06:23 | 36.336 | 141.035 | 42 | 4.0 | 41 |
| 20 | 1998/06/24 | 23:52 | 36.122 | 140.106 | 73 | 4.6 | 59 |
| 21 | 1998/08/29 | 08:46 | 35.604 | 140.045 | 67 | 5.1 | 108 |
| 22 | 1998/11/01 | 03:01 | 36.459 | 140.603 | 56 | 3.9 | 1 |
| 23 | 1998/11/05 | 06:43 | 36.446 | 140.541 | 62 | 4.2 | 6 |
| 24 | 1998/11/16 | 17:25 | 36.374 | 141.418 | 46 | 4.2 | 73 |
| 25 | 1998/11/21 | 01:40 | 36.429 | 141.174 | 46 | 4.3 | 51 |
| 26 | 1998/12/17 | 21:49 | 36.076 | 141.376 | 41 | 4.9 | 81 |
| 27 | 1998/12/18 | 10:27 | 36.376 | 141.057 | 44 | 4.0 | 41 |
| 28 | 1999/01/02 | 01:20 | 36.219 | 141.692 | 52 | 5.0 | 101 |
| 29 | 1999/02/07 | 00:22 | 36.578 | 140.904 | 52 | 3.8 | 29 |
| 30 | 1999/03/19 | 19:33 | 36.377 | 140.974 | 45 | 4.0 | 34 |
| 31 | 1999/03/26 | 08:31 | 36.455 | 140.616 | 58 | 4.9 | 1 |
| 32 | 1999/04/25 | 21:27 | 36.461 | 140.630 | 58 | 5.1 | 2 |
| 33 | 1999/07/02 | 04:17 | 36.511 | 140.715 | 56 | 3.8 | 11 |
| 34 | 1999/07/15 | 07:56 | 35.924 | 140.461 | 56 | 4.9 | 61 |
| 35 | 1999/09/14 | 20:08 | 36.325 | 140.998 | 46 | 3.7 | 38 |
| 36 | 1999/09/25 | 03:05 | 36.736 | 141.532 | 41 | 4.4 | 88 |
| 37 | 1999/10/16 | 17:14 | 36.468 | 141.486 | 34 | 5.0 | 79 |
| 38 | 1999/10/19 | 22:16 | 36.444 | 141.518 | 46 | 4.7 | 81 |
| 39 | 2000/01/12 | 11:09 | 36.450 | 140.590 | 58 | 4.4 | 2 |
| 40 | 2000/01/28 | 20:28 | 36.598 | 141.113 | 48 | 4.5 | 48 |
| 41 | 2000/02/04 | 16:53 | 36.315 | 140.613 | 92 | 3.4 | 16 |
| 42 | 2000/03/04 | 12:35 | 36.458 | 140.607 | 56 | 3.7 | 0 |
| 43 | 2000/04/10 | 06:30 | 36.187 | 140.068 | 55 | 4.6 | 57 |

| No. | 発震日時 | | 震央位置 | | 震源深さ (km) | マグニ チュード | 震央距離 (km) |
|-----|------------|-------|--------|---------|--------------|-------------|--------------|
| | | | 緯度(度) | 経度(度) | | | |
| 44 | 2000/05/16 | 19:40 | 36.442 | 140.712 | 51 | 4.6 | 9 |
| 45 | 2000/07/06 | 13:09 | 36.432 | 142.402 | 72 | 5.0 | 161 |
| 46 | 2000/07/21 | 03:39 | 36.522 | 141.097 | 49 | 6.0 | 44 |
| 47 | 2000/09/29 | 19:14 | 36.457 | 140.573 | 56 | 3.7 | 3 |
| 48 | 2000/10/04 | 20:00 | 36.455 | 140.632 | 56 | 4.0 | 2 |
| 49 | 2000/10/18 | 12:58 | 36.920 | 139.700 | 9 | 4.5 | 96 |
| 50 | 2000/10/23 | 17:44 | 36.458 | 140.617 | 56 | 3.9 | 1 |
| 51 | 2000/11/16 | 18:31 | 37.480 | 141.605 | 51 | 5.0 | 144 |
| 52 | 2000/11/26 | 16:30 | 36.555 | 140.437 | 100 | 3.7 | 19 |
| 53 | 2001/01/19 | 08:10 | 36.520 | 140.585 | 57 | 3.8 | 7 |
| 54 | 2001/01/29 | 09:59 | 36.502 | 140.483 | 53 | 3.7 | 12 |
| 55 | 2001/02/19 | 12:55 | 36.447 | 140.615 | 57 | 3.5 | 2 |
| 56 | 2001/03/06 | 14:32 | 36.628 | 140.980 | 52 | 4.6 | 38 |
| 57 | 2001/04/12 | 16:01 | 37.255 | 141.717 | 44 | 5.0 | 132 |
| 58 | 2001/05/25 | 15:55 | 35.748 | 140.693 | 50 | 4.8 | 79 |
| 59 | 2001/05/31 | 08:59 | 36.183 | 139.813 | 55 | 4.5 | 78 |
| 60 | 2001/06/01 | 07:01 | 36.433 | 140.670 | 52 | 3.5 | 6 |
| 61 | 2001/07/06 | 03:57 | 36.630 | 140.937 | 53 | 4.5 | 35 |
| 62 | 2001/07/20 | 06:02 | 36.167 | 139.825 | 56 | 4.8 | 78 |
| 63 | 2001/07/31 | 13:59 | 36.078 | 141.627 | 49 | 4.9 | 101 |
| 64 | 2001/08/20 | 19:42 | 36.460 | 140.608 | 55 | 4.0 | 0 |
| 65 | 2001/09/03 | 00:03 | 36.387 | 141.143 | 45 | 4.6 | 49 |
| 66 | 2001/09/04 | 23:54 | 36.750 | 141.502 | 45 | 5.2 | 86 |
| 67 | 2001/09/25 | 04:57 | 36.305 | 140.100 | 71 | 4.5 | 49 |
| 68 | 2001/10/02 | 17:19 | 44.250 | 141.817 | 41 | 5.4 | 177 |
| 69 | 2001/11/25 | 05:22 | 37.175 | 141.415 | 46 | 4.8 | 107 |
| 70 | 2002/01/29 | 08:45 | 37.763 | 141.825 | 39 | 4.8 | 180 |
| 71 | 2002/02/11 | 10:09 | 35.782 | 141.092 | 35 | 5.0 | 87 |
| 72 | 2002/02/12 | 22:44 | 36.585 | 141.085 | 48 | 5.5 | 45 |
| 73 | 2002/02/25 | 22:14 | 36.360 | 140.732 | 85 | 4.7 | 16 |
| 74 | 2002/03/09 | 12:57 | 37.103 | 141.128 | 51 | 4.5 | 85 |
| 75 | 2002/04/17 | 09:10 | 36.447 | 140.617 | 57 | 4.1 | 2 |
| 76 | 2002/06/14 | 11:42 | 36.212 | 139.980 | 57 | 4.9 | 63 |
| 77 | 2002/06/16 | 04:39 | 36.623 | 141.200 | 45 | 4.6 | 56 |
| 78 | 2002/06/16 | 11:38 | 36.517 | 140.587 | 60 | 3.8 | 7 |
| 79 | 2002/06/19 | 18:16 | 36.188 | 141.807 | 58 | 5.0 | 112 |
| 80 | 2002/07/13 | 21:45 | 35.995 | 140.127 | 65 | 4.8 | 67 |
| 81 | 2002/07/24 | 05:05 | 37.228 | 142.318 | 30 | 5.7 | 174 |
| 82 | 2002/07/27 | 17:58 | 36.453 | 140.620 | 58 | 4.5 | 1 |
| 83 | 2002/08/01 | 19:15 | 36.448 | 140.607 | 57 | 4.0 | 1 |
| 84 | 2002/08/15 | 04:16 | 36.438 | 140.618 | 57 | 4.1 | 3 |
| 85 | 2002/10/13 | 04:28 | 36.430 | 140.697 | 54 | 4.2 | 8 |
| 86 | 2002/10/16 | 13:04 | 35.832 | 140.905 | 34 | 4.8 | 75 |

| No. | 発震日時 | | 震央位置 | | 震源深さ (km) | マグニ チュード | 震央距離 (km) |
|-----|------------|-------|--------|---------|--------------|-------------|--------------|
| | | | 緯度(度) | 経度(度) | | | |
| 87 | 2011/03/11 | 14:51 | 36.735 | 142.029 | 11 | 6.8 | 131 |
| 88 | 2011/03/11 | 14:54 | 36.717 | 140.576 | 9 | 5.7 | 28 |
| 89 | 2011/03/11 | 14:58 | 37.676 | 141.911 | 23 | 6.4 | 177 |
| 90 | 2011/03/11 | 15:05 | 37.521 | 141.626 | 17 | 5.9 | 148 |
| 91 | 2011/03/11 | 15:11 | 36.864 | 140.620 | 8 | 5.6 | 44 |
| 92 | 2011/03/11 | 15:12 | 37.205 | 141.660 | 27 | 6.1 | 125 |
| 93 | 2011/03/11 | 15:17 | 35.959 | 141.070 | 33 | 5.7 | 70 |
| 94 | 2011/03/11 | 15:57 | 35.854 | 141.186 | 23 | 6.1 | 86 |
| 95 | 2011/03/11 | 16:14 | 36.555 | 142.069 | 20 | 6.7 | 131 |
| 96 | 2011/03/11 | 16:28 | 36.905 | 141.870 | 26 | 6.2 | 123 |
| 97 | 2011/03/11 | 16:30 | 37.356 | 141.281 | 27 | 6.0 | 116 |
| 98 | 2011/03/11 | 16:44 | 36.314 | 141.944 | 57 | 5.6 | 121 |
| 99 | 2011/03/11 | 16:49 | 36.559 | 141.995 | 25 | 5.5 | 125 |
| 100 | 2011/03/11 | 16:54 | 37.672 | 141.689 | 29 | 5.5 | 165 |
| 101 | 2011/03/11 | 16:56 | 37.053 | 142.527 | 1 | 6.2 | 183 |
| 102 | 2011/03/11 | 17:04 | 37.285 | 142.157 | 19 | 6.0 | 165 |
| 103 | 2011/03/11 | 17:12 | 36.588 | 141.475 | 29 | 6.6 | 79 |
| 104 | 2011/03/11 | 17:19 | 36.167 | 141.752 | 18 | 6.8 | 108 |
| 105 | 2011/03/11 | 17:31 | 37.472 | 141.396 | 30 | 5.9 | 132 |
| 106 | 2011/03/11 | 17:40 | 37.425 | 141.318 | 27 | 6.1 | 124 |
| 107 | 2011/03/11 | 19:21 | 37.302 | 141.960 | 25 | 5.5 | 152 |
| 108 | 2011/03/11 | 20:00 | 37.715 | 141.740 | 44 | 5.5 | 171 |
| 109 | 2011/03/11 | 20:13 | 36.321 | 141.942 | 20 | 5.6 | 121 |
| 110 | 2011/03/11 | 20:20 | 36.827 | 141.473 | 25 | 5.5 | 87 |
| 111 | 2011/03/11 | 20:44 | 36.743 | 142.444 | 7 | 5.7 | 167 |
| 112 | 2011/03/11 | 20:46 | 36.083 | 141.197 | 39 | 5.6 | 68 |
| 113 | 2011/03/11 | 21:13 | 37.146 | 142.212 | 21 | 6.1 | 162 |
| 114 | 2011/03/11 | 22:16 | 36.443 | 141.857 | 20 | 5.7 | 112 |
| 115 | 2011/03/11 | 22:34 | 36.317 | 141.903 | 0 | 5.6 | 118 |
| 116 | 2011/03/11 | 23:56 | 36.059 | 141.574 | 9 | 5.8 | 98 |
| 117 | 2011/03/12 | 00:13 | 36.037 | 142.030 | 22 | 6.6 | 137 |
| 118 | 2011/03/12 | 00:19 | 36.338 | 142.064 | 15 | 6.4 | 132 |
| 119 | 2011/03/12 | 00:42 | 36.054 | 141.963 | 29 | 5.6 | 130 |
| 120 | 2011/03/12 | 03:11 | 37.135 | 142.046 | 16 | 6.1 | 148 |
| 121 | 2011/03/12 | 03:17 | 36.275 | 141.484 | 25 | 5.6 | 82 |
| 122 | 2011/03/12 | 03:59 | 36.986 | 138.598 | 8 | 6.7 | 189 |
| 123 | 2011/03/12 | 04:24 | 35.795 | 141.044 | 34 | 5.7 | 84 |
| 124 | 2011/03/12 | 04:31 | 36.949 | 138.572 | 1 | 5.9 | 190 |
| 125 | 2011/03/12 | 05:23 | 35.986 | 141.887 | 13 | 5.5 | 127 |

| No. | 発震日時 | | 震央位置 | | 震源深さ (km) | マグニ チュード | 震央距離 (km) |
|-----|------------|-------|--------|---------|--------------|-------------|--------------|
| | | | 緯度(度) | 経度(度) | | | |
| 126 | 2011/03/12 | 05:25 | 37.025 | 141.790 | 9 | 5.5 | 123 |
| 127 | 2011/03/12 | 08:59 | 36.462 | 141.477 | 24 | 5.5 | 78 |
| 128 | 2011/03/12 | 09:45 | 36.205 | 141.958 | 19 | 5.6 | 125 |
| 129 | 2011/03/15 | 22:27 | 37.599 | 142.298 | 10 | 6.2 | 196 |
| 130 | 2011/03/16 | 05:30 | 35.285 | 141.224 | 24 | 5.8 | 142 |
| 131 | 2011/03/16 | 12:52 | 35.837 | 140.906 | 10 | 6.1 | 75 |
| 132 | 2011/03/16 | 13:14 | 37.535 | 141.581 | 25 | 5.6 | 147 |
| 133 | 2011/03/17 | 21:32 | 35.630 | 140.978 | 28 | 5.7 | 99 |
| 134 | 2011/03/17 | 21:54 | 36.738 | 141.309 | 47 | 5.7 | 70 |
| 135 | 2011/03/18 | 03:55 | 37.142 | 142.523 | 9 | 5.7 | 187 |
| 136 | 2011/03/19 | 18:56 | 36.784 | 140.571 | 5 | 6.1 | 36 |
| 137 | 2011/03/20 | 10:30 | 36.939 | 141.177 | 29 | 5.5 | 73 |
| 138 | 2011/03/22 | 12:38 | 35.264 | 141.237 | 37 | 5.9 | 145 |
| 139 | 2011/03/22 | 18:19 | 37.316 | 141.910 | 43 | 6.4 | 150 |
| 140 | 2011/03/22 | 21:04 | 36.231 | 141.627 | 48 | 5.9 | 95 |
| 141 | 2011/03/22 | 22:50 | 35.861 | 141.781 | 22 | 6.0 | 125 |
| 142 | 2011/03/23 | 00:03 | 35.875 | 141.763 | 23 | 5.8 | 123 |
| 143 | 2011/03/23 | 07:12 | 37.085 | 140.788 | 8 | 6.0 | 71 |
| 144 | 2011/03/23 | 07:13 | 37.035 | 140.769 | 1 | 5.8 | 65 |
| 145 | 2011/03/23 | 07:34 | 37.098 | 140.796 | 7 | 5.5 | 72 |
| 146 | 2011/03/23 | 07:36 | 37.063 | 140.771 | 7 | 5.8 | 68 |
| 147 | 2011/03/29 | 19:54 | 37.409 | 142.470 | 13 | 6.6 | 196 |
| 148 | 2011/03/30 | 14:29 | 36.124 | 142.471 | 80 | 6.3 | 172 |
| 149 | 2011/04/11 | 17:16 | 36.946 | 140.673 | 6 | 7.0 | 54 |
| 150 | 2011/04/11 | 17:17 | 36.891 | 140.715 | 9 | 5.7 | 48 |
| 151 | 2011/04/11 | 20:42 | 36.966 | 140.635 | 11 | 5.9 | 56 |
| 152 | 2011/04/12 | 07:26 | 36.819 | 138.606 | 0 | 5.6 | 183 |
| 153 | 2011/04/12 | 08:08 | 35.482 | 140.868 | 26 | 6.4 | 112 |
| 154 | 2011/04/12 | 14:07 | 37.053 | 140.643 | 15 | 6.4 | 65 |
| 155 | 2011/04/13 | 10:07 | 36.915 | 140.707 | 5 | 5.7 | 51 |
| 156 | 2011/04/14 | 15:08 | 35.517 | 142.465 | 28 | 6.0 | 198 |
| 157 | 2011/04/28 | 18:27 | 37.413 | 141.781 | 44 | 5.7 | 148 |
| 158 | 2011/05/14 | 08:35 | 37.328 | 141.628 | 41 | 5.9 | 132 |
| 159 | 2011/05/20 | 09:46 | 35.801 | 141.176 | 36 | 5.8 | 90 |
| 160 | 2011/05/22 | 07:06 | 35.730 | 140.644 | 48 | 5.5 | 82 |
| 161 | 2011/06/4 | 01:00 | 36.990 | 141.211 | 30 | 5.5 | 79 |
| 162 | 2011/06/9 | 19:38 | 36.497 | 140.971 | 13 | 5.7 | 33 |
| 163 | 2011/06/18 | 20:31 | 37.618 | 141.821 | 28 | 6.0 | 167 |
| 164 | 2011/06/21 | 17:49 | 35.760 | 141.474 | 21 | 5.5 | 111 |

●地盤モデルの同定結果(水平動)

- ・地震観測記録から求めた伝達関数に、一次元波動論に基づく理論伝達特性を当てはめる逆解析により、地盤モデルを同定した。
- ・初期値は、380mボーリングの調査結果とし、S波速度と減衰定数について同定した。
- ・解析手法は遺伝的アルゴリズムを用い、乱数の初期値を変えた5通りの計算結果の平均値を採用した。
- ・解析パラメータについては、山中・石田(1995)を参考に設定した。

同定解析における初期値, 探索範囲, 同定結果(水平動)

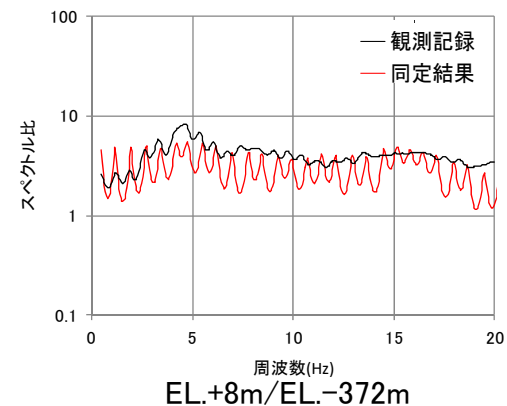
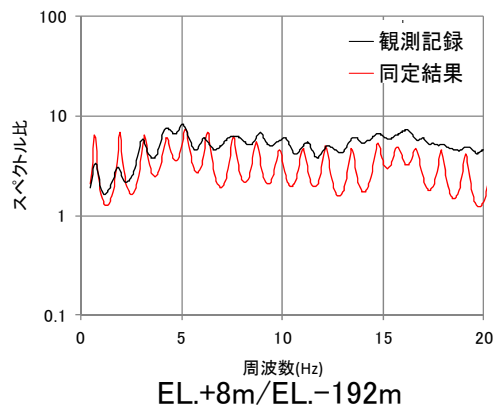
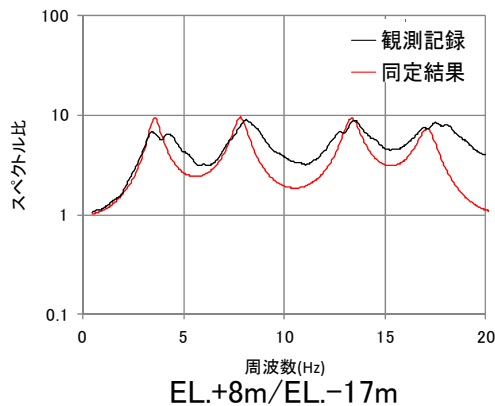
| 固定パラメータ | | | | | 初期値 | 探索範囲 | | 同定結果 | |
|-------------|-----------|----------------------------|----------|------|---------------|------------------|---|---------------|------------------------------------|
| G.L. (m) | 層厚 (m) | 密度 (g/cm ³) | 地層区分 | 地層 | S波速度 (m/s) | S波速度 | 減衰定数 $h(f)=h_0 \times f^\alpha$ | S波速度 (m/s) | 減衰定数 $h(f)=h_0 \times f^\alpha$ |
| ▲ 0.0 | 2.5 | 1.71 | 砂 | 第四系 | 210 | 初期値の 0.6~1.2倍 | $h_0: 0.010 \sim 1.000$ $\alpha: 0.00 \sim 1.00$ | 130 | $h_0: 0.236$ $\alpha: 0.75$ |
| -2.5 | 4.5 | | | | | | | 151 | |
| -7.0 | 8.0 | 礫混じり砂 | 280 | | 308 | | | | |
| -15.0 | 8.0 | シルト | 470 | | 478 | | | | |
| -23.0 | 8.0 | 1.82 | 砂礫 | | | | | | |
| ▲ -114.0 | 91.0 | 1.69 | 砂質 泥岩 | 新第三系 | 460 | 初期値の 0.8~1.2倍 | | 477 | $h_0: 0.072$ $\alpha: 0.93$ |
| -176.0 | 62.0 | 1.74 | | | 540 | | 557 | | |
| ▲ -268.0 | 92.0 | 1.78 | | | 590 | | 669 | | |
| -376.0 | 108.0 | 1.82 | | | 670 | | 756 | | |
| ▽ | 4.0 | 1.85 | | | 790 | | | 790 | |
| ▲ -380.0 | — | | | | | | | | |

▲:地震計設置位置
▽:解放基盤表面

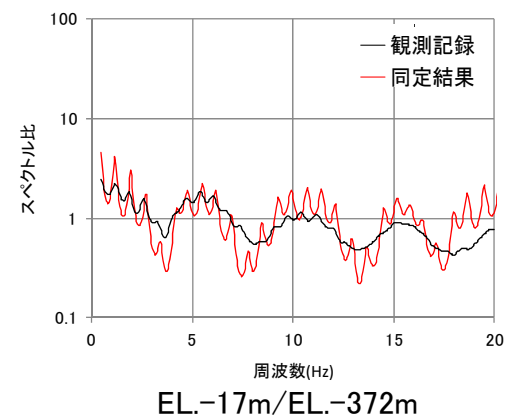
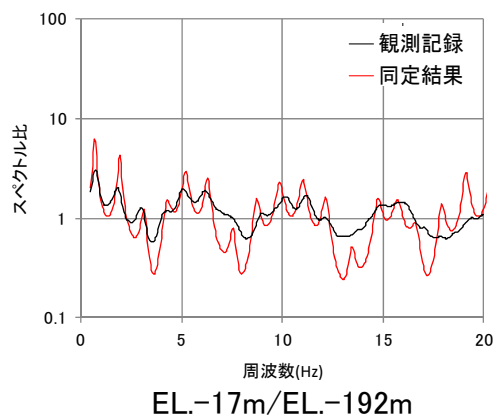
同定対象

※ G.L. = EL.8.0m

●地盤モデルの同定結果(水平動)

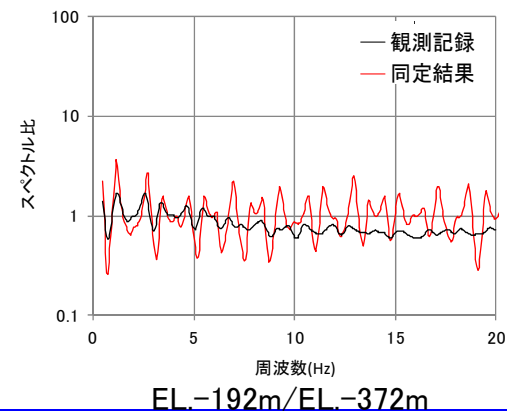


※ G.L. = EL.8.0m



地震観測記録による伝達関数※(黒線)と
同定結果の理論伝達関数(赤線)の比較

※地震観測記録の伝達関数は、0.4HzのParzen windowで
平滑化している。



●地盤モデルの同定結果(鉛直動)

- ・地震観測記録から求めた伝達関数に、一次元波動論に基づく理論伝達特性を当てはめる逆解析により、地盤モデルを同定した。
- ・初期値は、380mボーリングの調査結果とし、P波速度と減衰定数について同定した。
- ・解析手法は遺伝的アルゴリズムを用い、乱数の初期値を変えた5通りの計算結果の平均値を採用した。
- ・解析パラメータについては、山中・石田(1995)を参考に設定した。

同定解析における初期値, 探索範囲, 同定結果(鉛直動)

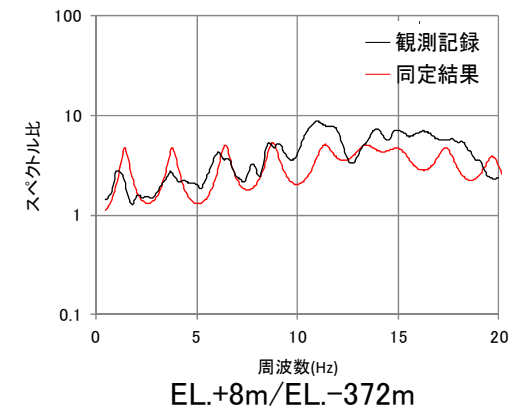
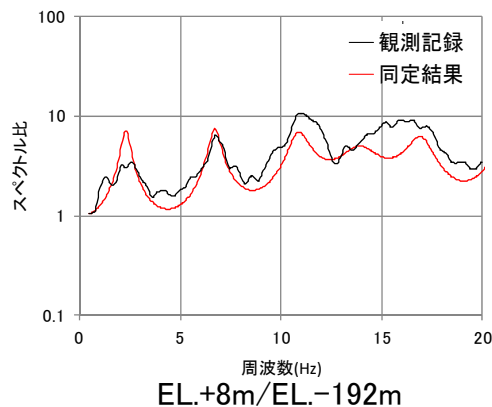
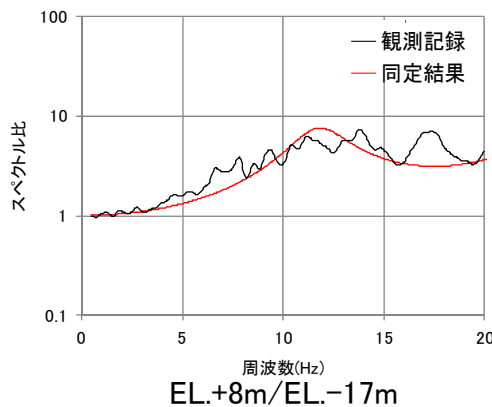
| 固定パラメータ | | | | | 初期値 | 探索範囲 | | 同定結果 | |
|-------------|-----------|----------------------------|----------|------|---------------|------------------|---|---------------|---------------------------------------|
| G.L. (m) | 層厚 (m) | 密度 (g/cm ³) | 地層区分 | 地層 | P波速度 (m/s) | P波速度 | 減衰定数 $h(f)=h_0 \times f^{-\alpha}$ | P波速度 (m/s) | 減衰定数 $h(f)=h_0 \times f^{-\alpha}$ |
| ▲ 0.0 | 2.5 | 1.71 | 砂 | 第四系 | 500 | 100~500 (m/s) | $h_0:0.010\sim1.000$ $\alpha:0.00\sim1.00$ | 280 | $h_0:0.203$ $\alpha:0.21$ |
| -2.5 | 4.5 | | | | | | | 403 | |
| -7.0 | 8.0 | 礫混じり砂 | 1850 | | 1589 | | | | |
| -15.0 | 8.0 | シルト | 1850 | | 1509 | | | | |
| -23.0 | 8.0 | 1.82 | 砂礫 | 1850 | 1850 | 1509 | 1509 | | |
| ▲ -114.0 | 91.0 | 1.69 | 砂質 泥岩 | 新第三系 | 1680 | 初期値の 0.8~1.2倍 | $h_0:0.010\sim1.000$ $\alpha:0.00\sim1.00$ | 1753 | $h_0:0.203$ $\alpha:0.93$ |
| -176.0 | 62.0 | 1.74 | | | 1760 | | | 1742 | |
| -268.0 | 92.0 | 1.78 | | | 1830 | | | 2067 | |
| -376.0 | 108.0 | 1.82 | | | 1920 | | | 2256 | |
| ▽ -380.0 | 4.0 | 1.85 | | | 2000 | | | 2000 | |
| ▲ -380.0 | — | | | | | | | | |

▲:地震計設置位置
▽:解放基盤表面

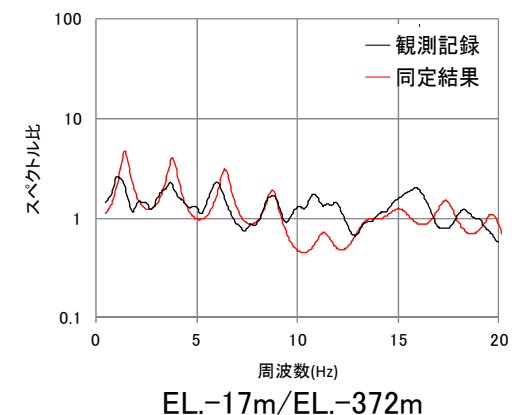
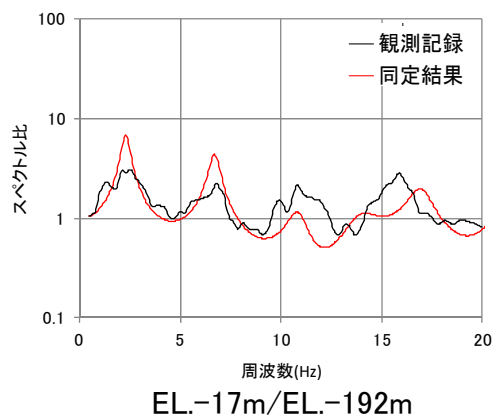
□ 同定対象

※ G.L. = EL.8.0m

●地盤モデルの同定結果(鉛直動)



※ G.L. = EL.8.0m



地震観測記録による伝達関数※(黒線)と
同定結果の理論伝達関数(赤線)の比較

※地震観測記録の伝達関数は、0.4HzのParzen windowで
平滑化している。

