

| | |
|---------------------|------------|
| 玄海原子力発電所3号炉、4号炉審査資料 | |
| 資料番号 | TTG-023 |
| 提出年月日 | 2023年4月17日 |

玄海原子力発電所3号炉及び4号炉

標準応答スペクトルを考慮した地震動評価における 地下構造モデルの設定について

2023年4月17日
九州電力株式会社

目次 (1/2)

| | |
|--------------------------|-------|
| 1. コメントリスト及び今後の審査スケジュール | P. 3 |
| 2. 地下構造モデルの設定の概要 | P. 7 |
| 3. 地下構造モデルの設定 | P. 12 |
| 3.1 新たな地下構造モデルの設定方針 | P. 13 |
| 3.2 地盤減衰 (Q値) の設定 | P. 24 |
| 3.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値) | P. 25 |
| (1) 地盤減衰 (Q値) の検討 | P. 25 |
| a. 伝達関数 (周波数依存型) による検討 | P. 26 |
| b. 伝達関数 (バイリニア型) による検討 | P. 30 |
| c. 地震波干渉法による検討 | P. 34 |
| (2) 地盤減衰 (Q値) の設定 | P. 41 |
| (3) 地盤減衰 (Q値) の妥当性確認 | P. 42 |
| a. 応答スペクトルによる確認 | P. 43 |
| b. 伝達関数による確認 | P. 54 |
| 3.2.2 最深部地震計以深の地盤減衰 (Q値) | P. 56 |
| (1) 地盤減衰 (Q値) の検討 | P. 56 |
| (2) 地盤減衰 (Q値) の設定 | P. 60 |
| (3) 地盤減衰 (Q値) の妥当性確認 | P. 61 |
| a. ボーリング孔内における減衰測定による確認 | P. 63 |
| b. 岩石コアを用いた減衰測定による確認 | P. 66 |
| 3.3 地下構造モデルの設定 | P. 70 |

目次 (2/2)

| | |
|-----------------------------------|--------|
| 3.4 地下構造モデルの妥当性確認 | P. 71 |
| (1)地震観測記録の応答スペクトルによる確認 | P. 72 |
| (2)PS検層モデルとの比較による確認 | P. 86 |
| 3.5 標準応答スペクトル用モデルの設定 | P. 95 |
| 3.6 まとめ | P. 97 |
| 【補足①】地震観測記録の伝達関数との整合性に関する検討 | P. 99 |
| 【補足②】応答スペクトルによる確認における特異な地震観測記録の分析 | P. 108 |
| 【参考①】地盤減衰(Q値)の周波数依存性及び上限に関する知見 | P. 115 |
| 【参考②】ボーリング孔内Q値に関する知見 | P. 123 |
| 【参考③】岩石コアQ値に関する知見 | P. 129 |
| 【参考④】経験的地盤増幅率による確認 | P. 131 |
| 【参考⑤】ブロックインバージョン結果を用いた地震波による確認 | P. 135 |
| 【参考⑥】友澤ほか(2021)のブロックインバージョン結果の確認 | P. 158 |
| 【参考⑦】ブロックインバージョンにおける残差 | P. 162 |
| 【参考⑧】友澤ほか(2021)の概要 | P. 167 |
| 【参考⑨】既許可の地下構造モデル | P. 178 |

※本資料は、標準応答スペクトルを考慮した地震動評価における地下構造モデルの設定について、過去の審査会合にて説明した一連の内容を取り纏め、一部を修正及び追加したもの。
※主な修正・追加箇所を で示す。



1. コメントリスト及び今後の審査スケジュール

1. コメントリスト及び今後の審査スケジュール

| No. | コメント | 指摘場所 | 対応状況 |
|-----|---|---|--|
| 1 | 既許可の地下構造モデルと新たに設定した地下構造モデルの位置づけの記載を充実すること。 | 第1026回 原子力発電所の 新規制基準適合性に 係る審査会合 (令和4年1月21日) | 第1080回会合にて説明 |
| 2 | 新たに設定した地下構造モデルについて、以下を踏まえ、地盤減衰の設定の考え方、根拠を明確にし、説明すること。 ①15Hz程度までの範囲で評価した地盤減衰の高周波数帯への適用性 ②地震観測記録が得られていない深さにおける地盤減衰の設定 ③地盤減衰の不確かさの考え方 | | 第1049回会合、 第1103回会合にて説明 |
| 3 | 地震基盤相当面は、設置許可基準規則解釈別記2の定義に従い $V_s=2, 200\text{m/s}$ 以上の層に設定すること。 | | 第1057回会合にて説明 |
| 4 | 乱数位相を用いた模擬地震波の作成について、継続時間の設定を含め検討し、説明すること。 | | 説明方針： 第1097回会合にて説明 コメント回答： 次回以降説明予定 |
| 5 | 地震動評価にあたって、どのような地下構造モデルを使うのか方針を示すこと。 | 第1049回 原子力発電所の 新規制基準適合性に 係る審査会合 (令和4年5月20日) | 第1057回会合にて説明 |
| 6 | 全体スケジュールを考慮した上で、地下構造モデル設定、地震動評価及び全体方針を示すこと。 | | 第1057回会合にて説明 |
| 7 | 審査全体を見通した上で、スケジュールを示すこと。 | 第1057回 原子力発電所の 新規制基準適合性に 係る審査会合 (令和4年7月1日) | 第1080回会合にて説明 |
| 8 | 今回地下構造モデルの方針を変更していることから、説明済みとなっているコメントに関しても、改めて説明すること。 | | コメントNo. 2について 第1103回会合にて説明 |
| 9 | 新たなボーリング調査から得られる結果を踏まえ、設定した地下構造モデルの妥当性を示すこと。 | | 第1103回会合にて説明 |
| 10 | 今後説明予定の新たに設定した地下構造モデルの妥当性について、適切な論理で十分な根拠に基づき説明すること。 | 第1080回、第1088回 原子力発電所の 新規制基準適合性に 係る審査会合 (令和4年10月7日、 令和4年10月28日) | 説明方針： 第1088回会合にて説明 コメント回答： 第1103回会合にて説明 |
| 11 | 審査事項に係る方針・考え方を準備ができたものから前倒しで説明する等、効果的かつ効率的な審査スケジュールを示すこと。 | | 適宜説明 |

1. コメントリスト及び今後の審査スケジュール

| No. | コメント | 指摘場所 | 対応状況 |
|-----|--|--|------------------------|
| 12 | 地下構造モデルについて、追加調査結果に見られる一部の周期帯におけるピークが適切に評価できていないことを踏まえ、検討すること。 | 第1103回 原子力発電所の 新規制基準適合性に 係る審査会合 (令和4年12月16日) | 第1113回会合にて説明 |
| 13 | 鉛直方向の観測事実との整合性に係る検討、最深部地震計からEL. -200mまでの範囲の地盤減衰の設定の考え方を追加したうえで、全体の取り纏めとあわせて説明すること。 | 第1113回 原子力発電所の 新規制基準適合性に 係る審査会合 (令和5年2月10日) | 今回説明 (P71~85、95~96) |

■ 川内原子力発電所に関するコメントの反映

- ・ 第983回審査会合において、川内原子力発電所に関するコメントを受領。
- ・ 玄海原子力発電所についても共通する以下のコメントへの対応を実施。

| No. | コメント | 指摘場所 | 対応状況 |
|-----|--|--|--|
| S-1 | 地下構造モデルの地盤減衰の設定について、既許可からの変更点の妥当性を説明すること。その際、地盤減衰の設定根拠としている地震観測記録が得られていない範囲(EL. -90m~EL. -200m)の地盤減衰の設定の妥当性についても併せて説明すること。 | 第983回 原子力発電所の 新規制基準適合性に 係る審査会合 (令和3年6月11日) | 第1026回会合、 第1103回会合にて説明 |
| S-2 | 地下構造モデルの変更に伴う既許可の基準地震動への影響について説明すること。 | | 第1026回会合、 第1103回会合にて説明 次回以降改めて説明予定 |
| S-3 | 地震基盤相当面について、設置許可基準規則解釈別記2の $V_s=2, 200\text{m/s}$ 以上に対し、 $V_s=2, 100\text{m/s}$ の層上面(EL. -200m)に設定したことの妥当性を説明すること。 | | 第1026回会合にて説明 |
| S-4 | 模擬地震波の作成について、複数の方法から一様乱数の位相をもつ正弦波の重ね合わせを採用した妥当性を説明すること。 | | 説明方針： 第1097回会合にて説明 コメント回答： 次回以降説明予定 |
| S-5 | 既許可以降の観測・調査・分析などについて説明すること。 | | 第1103回会合にて説明 |

1. コメントリスト及び今後の審査スケジュール

| 項目 | 内容 | 関連 コメント | 対応方針 | ... | 2022年度 | | | 2023年度 | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------|-------------------------|---------------------------------|---|-----|--------|---|---|--------|----------|----------------|------------|--------|----|---|---|---|---|---|---|----|-----|----|----------------------------|
| | | | | | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | ... | | |
| 地下構造モデル 位置付け | ・既許可モデルと新たに設定したモデルの位置付け | No.1 | ・既許可モデルと新たに設定したモデルは検討の目的に応じて設定することを明記 | | | | | | ▼★第1080回 | | | | | | | | | | | | | | |
| | ・既許可の地震動評価への影響 | No.S-2 | ・新たな地下構造モデルによる既許可の基準地震動への影響確認を実施 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ▽☆ | |
| 地盤減衰 | ・地盤減衰の設定および妥当性確認 | No.2 No.S-1 No.12 | ・地震観測記録に基づく伝達関数の分析、地震波干渉法等、複数の手法により設定 ・地震計設置以浅について、観測記録による応答スペクトルの比較等により妥当性を確認 ・地震計設置以深は、追加調査等を基に地震計設置以浅で設定した地盤減衰と同等であることを多面的な検討により確認 | | | | | | 第1088回 | (方針) 第1103回 | ▼★ | ▼★ | ▼★ | | | | | | | | | | ▼☆ |
| | ・設定した地下構造モデルの妥当性 | No.9 No.10 No.12 No.13 | ・観測記録による応答スペクトルの比較により地震計設置以浅の妥当性を確認 ・追加調査による伝達関数の比較によりEL-200m以浅の妥当性を確認 | | | | | | 第1088回 | (方針) 第1103回 | ▼★ | ▼★ | ▼★ | | | | | | | | | | ▼☆ |
| 地震基盤相当面 | ・設置許可基準規則解釈別記2の定義に基づく設定 | No.3 No.S-3 | ・ $V_s=3,100\text{m/s}$ の層上面に設定 | | | | | | ★第1057回 | | | | | | | | | | | | | | |
| 模擬地震波 | ・乱數位相を用いた地震動評価 | No.4 | ・先行他社と同様に、M7.0、 $X_{eq}10\text{km}$ で継続時間を設定 | | | | | | | | (方針) ▼★ | 第1097回 | | | | | | | | | | | ▽☆ |
| | ・複数の手法による検討 | No.S-4 | ・先行他社と同様に、複数の手法による検討により、乱數位相を用いた地震波を選定した妥当性を説明 | | | | | | | | (方針) ▼★ | 第1097回 | | | | | | | | | | | ▽☆ |
| 基準地震動策定 | ・ S_s-6 の策定 | - | ・地震基盤相当面、地盤減衰、模擬地震波の設定を踏まえ、 S_s-6 を策定 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ▽☆ |
| 基礎地盤及び周辺斜面の安定性評価 | ・ S_s-6 による評価 | - | ・基準地震動見直し後の基礎地盤及び周辺斜面の安定性の評価を実施 ・評価条件は、既許可申請と同じもので評価 | | | | | | | | (方針) ▼★ | 第1097回 | | | | | | | | | | | (特重) ▽☆ (特重以外) ▽☆ |
| 補正申請 | - | - | - | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | (安定性解析) ◇ |

▼: 資料提出(実績)
▽: 資料提出(予定)
★: 審査会合(実績)
☆: 審査会合希望時期

[友澤ほか・岩石コア・ボーリング孔内]

2. 地下構造モデルの設定の概要

2. 地下構造モデルの設定の概要

■ 地下構造モデルの位置づけ

- ・ 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価における地下構造モデルは、解放基盤表面から地震基盤相当面を含む層まで設定し、短周期帯から長周期帯にわたる地震動評価に適用。
- ・ なお、既許可の地下構造モデルは、解放基盤表面から地震基盤以深まで設定し、長周期帯の地震動評価に適用。

■ 地下構造モデルの設定

- ・ 既許可時審査以降、継続的に取得している鉛直アレイの地震観測記録やボーリング孔内減衰測定結果の観測事実に基づき、精度・信頼性を向上させた評価を実施し、地下構造モデルを設定。
 - 既許可時審査以降、鉛直アレイにおける地震観測（EL. -90mまで）により、80地震の観測記録を取得。（計156地震の観測記録）
 - EL. -200mまでのボーリング孔内減衰測定を3箇所を実施。

〔速度構造〕

- ・ 解放基盤表面からEL. -200mの範囲について、試掘坑内弾性波試験結果及びPS検層結果を基に設定。（既許可モデルの設定値と同値）
- ・ EL. -200m以深は、地震調査委員会(2007)を基に設定。（既許可モデルの設定値と同値）

〔地盤減衰（Q値）〕

- ・ 解放基盤表面からEL. -200mの範囲について、既許可時審査以降、継続的に取得している鉛直アレイの地震観測記録（伝達関数・地震波干渉法による検討）やボーリング孔内減衰測定結果の観測事実を基に $Q=12.5$ と設定。
- ・ EL. -200m以深は、慣用値（ $V_s/15\sim 10$ ）を基に設定。（既許可モデルの設定値と同値）

2. 地下構造モデルの設定の概要

■ 地下構造モデルの設定

- 前頁を踏まえ設定した地下構造モデルを以下に示す。

地表

▼ EL. 11. 0m

| 解放基盤表面 ▼ EL. -15. 0m | 速度構造 | | | 地盤減衰 | |
|-------------------------|-------------|-------------|---|-------|---|
| | Vs (m/s) | Vp (m/s) | 設定方法 | Q値 | 設定方法 |
| ▼ EL. -50. 0m | 1350 | 3000 | 試掘坑内弾性波試験を 基に設定 (既許可モデルの設定値 と同値) | 12. 5 | 地震観測記録を用いた以下の検討結果に基づき設定 ・伝達関数(周波数依存型)による検討 ・伝達関数(バイリニア型)による検討 ・地震波干渉法による検討 |
| 最深部地震計 ▼ EL. -90. 0m | 1570 | 3440 | PS検層結果を基に設定 (既許可モデルの設定値 と同値) | 12. 5 | 以下により、妥当性を確認 ・応答スペクトルによる確認 ・伝達関数による確認 |
| ▼ EL. -100m | | | | 12. 5 | 以下の検討結果に基づき、EL. -90m以浅と同等に設定 ・速度層断面による検討 |
| ▼ EL. -150m | | | | 12. 5 | 以下により、妥当性を確認 ・ボーリング孔内減衰測定による確認 ・岩石コア減衰測定による確認 |
| ▼ EL. -200m | 1770 | 3650 | 地震調査委員会(2007) を基に設定 (既許可モデルの設定値 と同値) | 12. 5 | 慣用値(Vs/15~10)を基に設定 (既許可モデルの設定値と同値) |
| 地震基盤相当面 ▼ EL. -1804m | 2100 | 4000 | | 200 | |
| | 3100 | 5500 | | 300 | |

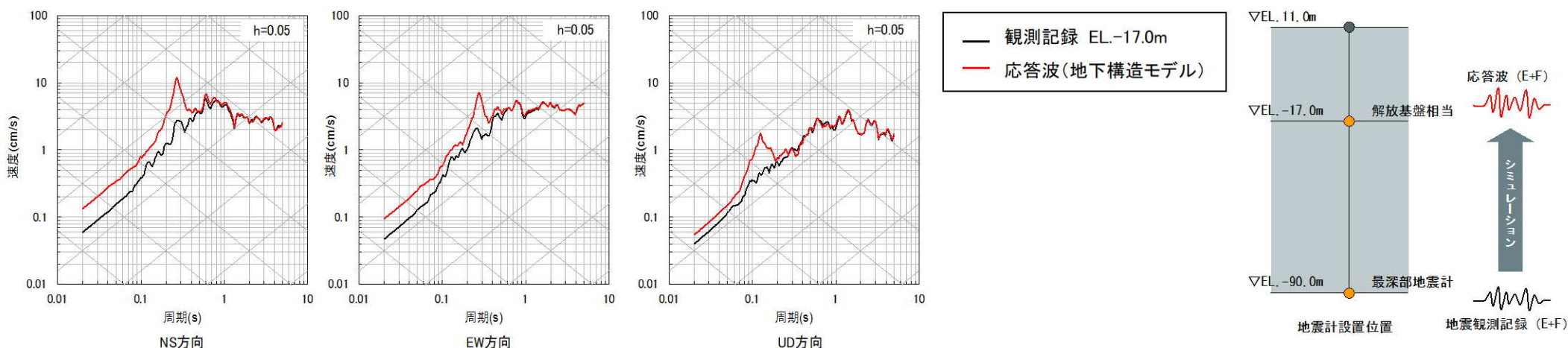
鉛直アレイ地震観測記録

ボーリング孔内減衰測定等

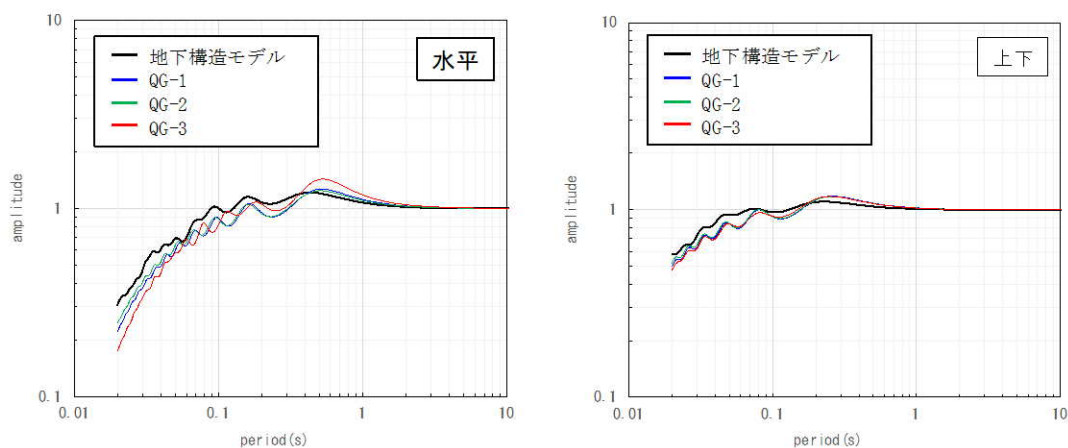
2. 地下構造モデルの設定の概要

■ 地下構造モデルの妥当性確認

- 解放基盤表面からEL. -200mの範囲について、鉛直アレイの地震観測記録（応答スペクトル）及びボーリング孔内減衰測定結果（伝達関数）の新たに得られた観測事実を用いて、妥当性を確認。
 - 設定した地下構造モデルと観測事実を比較した結果、設定した地下構造モデルが観測事実と同等もしくは上回ることを確認。



地震観測記録と応答波(地下構造モデル)の応答スペクトルによる比較結果 (2016年熊本地震本震の例)



ボーリング孔内減衰測定結果と地下構造モデルの伝達関数による比較結果

※一部の周期帯（水平：0.5秒付近）の特徴的なピークの影響により設定した地下構造モデルが観測事実を下回るが、その要因は計算の境界条件（EL. -200mでの速度コントラスト）の影響であると考えられ、地下構造モデルの妥当性に影響はないと判断。

2. 地下構造モデルの設定の概要

■ 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる地下構造モデル

- 標準応答スペクトルを考慮した地震動に更に余裕を持たせることで安全裕度の向上を図るため、地下構造モデルのEL. -90mからEL. -200mまでの範囲の地盤減衰（Q値）を $Q=12.5$ から $Q=16.7$ に設定。

標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる地下構造モデル
(標準応答スペクトル用モデル)

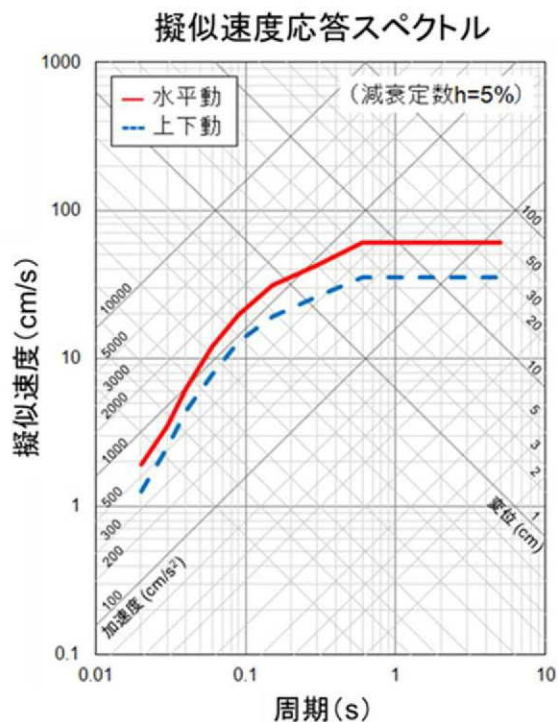
| | 層上面 (km) | 密度 ρ (g/cm^3) | V_s (m/s) | V_p (m/s) | Q値 |
|--------|-------------|---------------------------|----------------|----------------|------|
| 解放基盤表面 | | | | | |
| -15m | 0.0 | 2.35 | 1350 | 3000 | 12.5 |
| -50m | -0.035 | 2.35 | 1570 | 3440 | 12.5 |
| -90m | -0.075 | 2.35 | 1570 | 3440 | 16.7 |
| -100m | -0.085 | 2.35 | 1730 | 3470 | 16.7 |
| -150m | -0.135 | 2.35 | 1770 | 3650 | 16.7 |
| -200m | -0.185 | 2.40 | 2100 | 4000 | 200 |
| -1804m | -1.789 | 2.60 | 3100 | 5500 | 300 |

3. 地下構造モデルの設定

3.1 新たな地下構造モデルの設定方針

■ 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる地下構造モデル

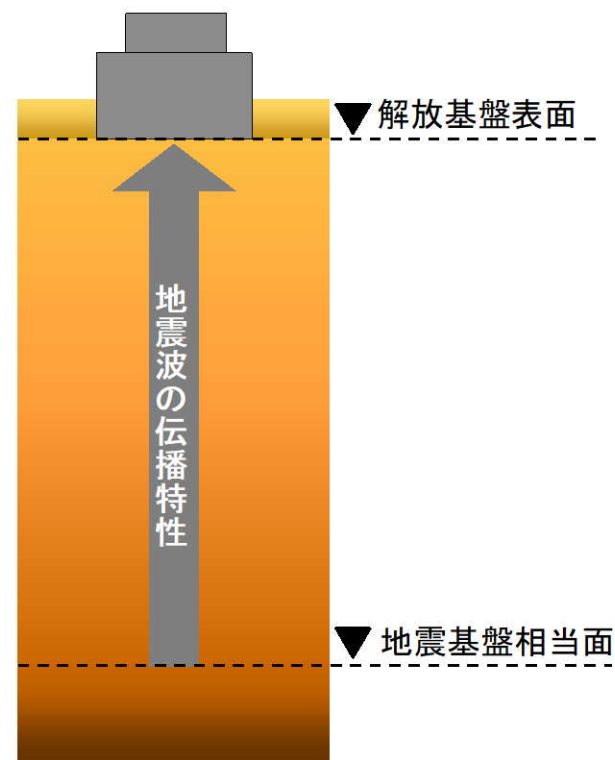
- 標準応答スペクトルは、周期0.02秒から5秒までの応答スペクトルで定義されることを踏まえ、全ての周期帯に適用できる地下構造モデルを設定することが必要となる。
- また、標準応答スペクトルは、地震基盤相当面で定義されるため、地震基盤相当面から解放基盤表面までの地下構造モデルを設定する。
- 新たな地下構造モデル（以下、標準応答スペクトル用モデル）の設定にあたっては、既許可以降継続的に取得している鉛直アレイの地震観測記録や最新の技術的知見に基づき、多面的な検討を実施。



地震基盤相当面における標準応答スペクトル

コントロールポイント

| 周期 (s) | 水平動 | 上下動 |
|--------|-------------|-------------|
| | 擬似速度 (cm/s) | 擬似速度 (cm/s) |
| 0.02 | 1.910 | 1.273 |
| 0.03 | 3.500 | 2.500 |
| 0.04 | 6.300 | 4.400 |
| 0.06 | 12.000 | 7.800 |
| 0.09 | 20.000 | 13.000 |
| 0.15 | 31.000 | 19.000 |
| 0.30 | 43.000 | 26.000 |
| 0.60 | 60.000 | 35.000 |
| 5.00 | 60.000 | 35.000 |



標準応答スペクトルを考慮した地震動の評価のイメージ

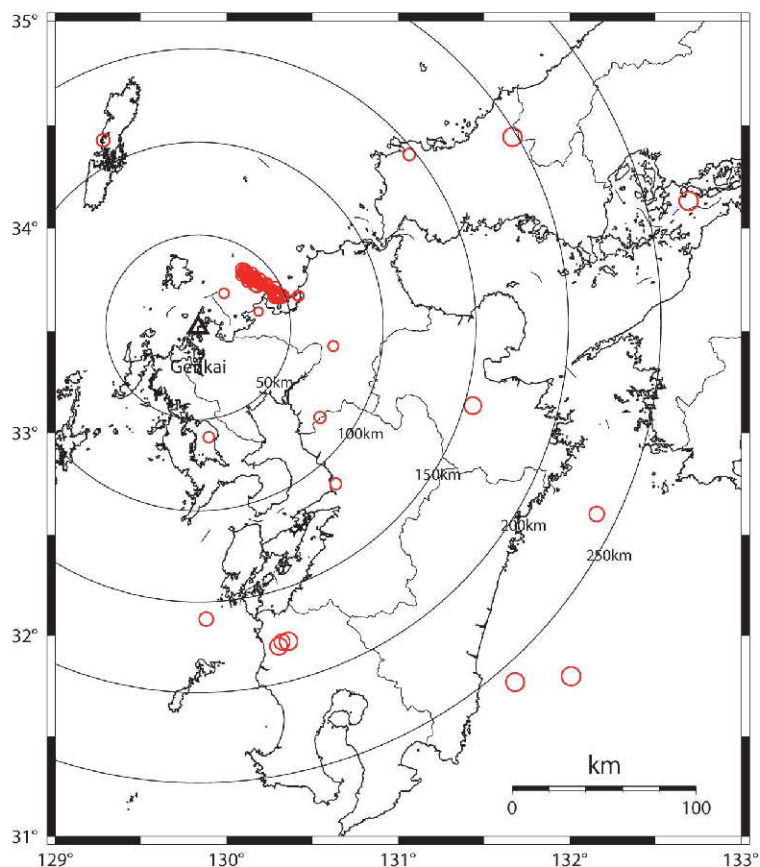
3.1 新たな地下構造モデルの設定方針

■ 敷地内の鉛直アレイ地震観測記録

- 既許可時審査以降、玄海原子力発電所の敷地地盤における鉛直アレイによる地震観測を継続して実施しており、新たに、2016年熊本地震を含む80地震の観測記録を取得。（計156地震の観測記録）

計76地震

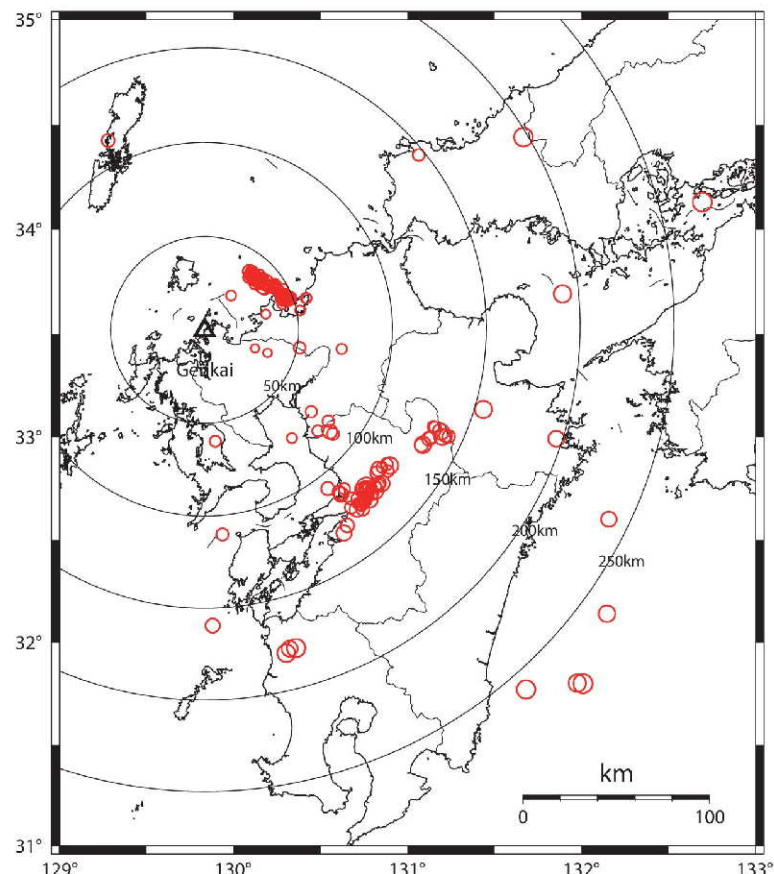
※2000年鳥取県西部地震は図の枠外



敷地地盤における観測地震の震央分布
(観測開始～既許可時審査)

計156地震

※2000年鳥取県西部地震等は図の枠外



敷地地盤における観測地震の震央分布
(観測開始～2019年度)

+80地震

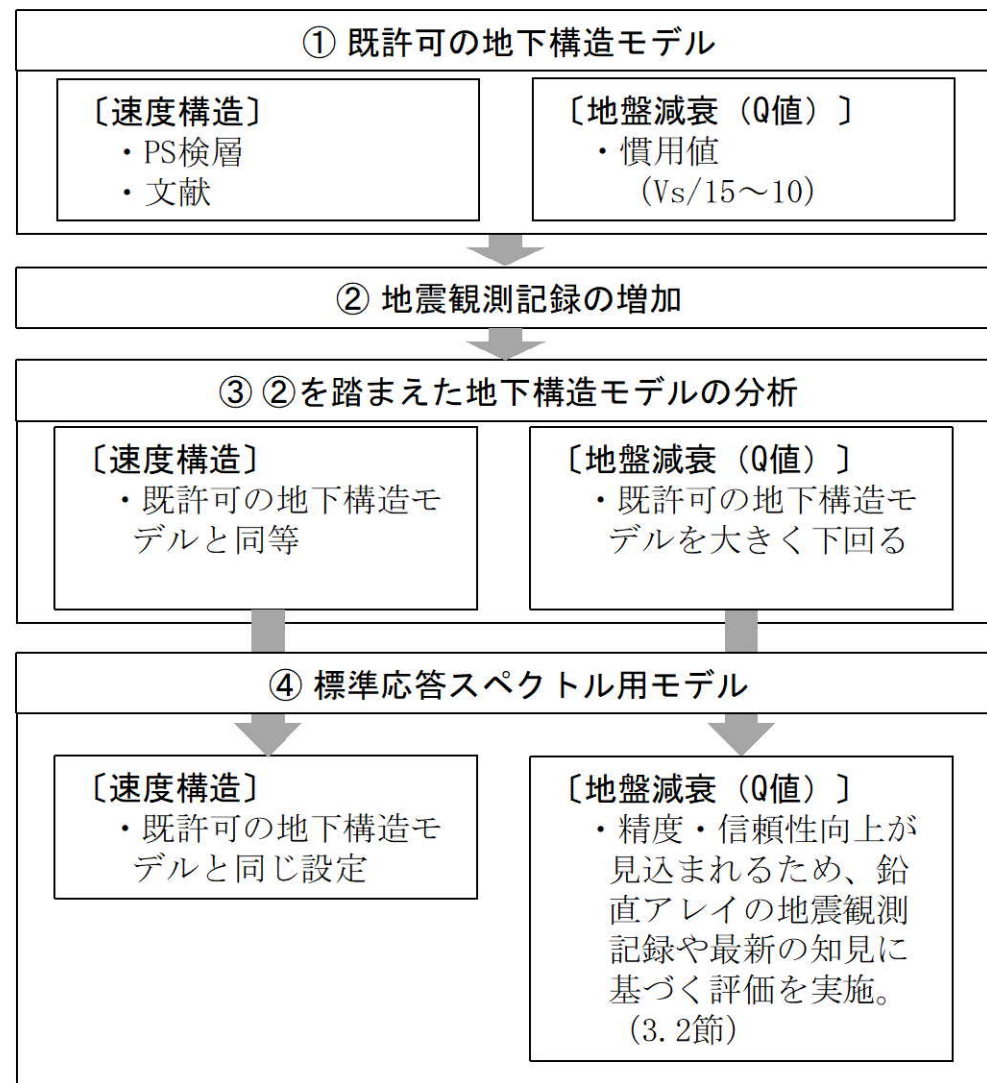
3.1 新たな地下構造モデルの設定方針

■ 今回取り入れる新たな知見や考え方

| 新たな知見 | 考え方 | 標準応答スペクトル用モデルの設定 |
|-----------------------|--|---|
| 敷地における地震観測記録の蓄積 | 蓄積した鉛直アレイ地震観測記録を用いた伝達関数により速度構造及び地盤減衰（Q値）を検討、及び応答スペクトルにより地下構造モデルの妥当性を確認 | <ul style="list-style-type: none">・伝達関数による地盤減衰（Q値）の検討に用いる観測記録数の増加・地盤減衰（Q値）検討の多面化・設定した地下構造モデルの確認の多面化 |
| 地震波干渉法 | 蓄積した鉛直アレイ地震観測記録を用いた地震波干渉法により、地盤減衰（Q値）を検討 | <ul style="list-style-type: none">・地下構造モデルに依存しない手法での地盤減衰（Q値）の検討・地盤減衰（Q値）検討の多面化 |
| 地盤減衰（Q値）の上限を示す評価事例の蓄積 | 蓄積した鉛直アレイ地震観測記録を用い、上限値を考慮した伝達関数による同定により、地盤減衰（Q値）を検討 | <ul style="list-style-type: none">・より広帯域での地盤減衰（Q値）の検討・地盤減衰（Q値）検討の多面化 |
| ボーリング孔内減衰測定 | 追加ボーリング孔内減衰測定結果から地盤減衰（Q値）の妥当性を確認、及びPS検層モデルの伝達関数との比較により地下構造モデルの妥当性を確認 | <ul style="list-style-type: none">・設定した地盤減衰（Q値）の確認の多面化・設定した地下構造モデルの確認の多面化 |
| 岩石コアを用いた減衰測定 | 岩石コアを用いた減衰測定結果から地盤減衰（Q値）の妥当性を確認 | <ul style="list-style-type: none">・設定した地盤減衰（Q値）の確認の多面化 |

3.1 新たな地下構造モデルの設定方針

- ① 既許可の地下構造モデル
 - ・ 既許可では、当時の調査・観測データに基づき、基準地震動策定に適切な地下構造モデルを設定。
 - ・ 速度構造は、PS検層、鉛直アレイ地震観測や微動アレイ観測などによる多面的な検討を実施した結果、敷地の平均的な地下構造特性を反映していると考えられる3号炉基礎マット範囲におけるPS検層結果に基づき設定。深部は文献に基づき設定。
 - ・ 地盤減衰 (Q値) は、長周期帯の地震動評価を目的としていたこと及び十分な観測・調査データが得られていなかったことから、慣用値に基づき設定。
- ② 地震観測記録の増加
 - ・ 既許可以降、2016年熊本地震を含む80地震の観測記録を取得。(計156地震の観測記録)
- ③ ②を踏まえた地下構造モデルの分析
 - ・ 速度構造は、既許可の地下構造モデルと同等であることを確認。
 - ・ 地盤減衰 (Q値) は、既許可の地下構造モデルの地盤減衰 (Q値) を大きく下回ることを確認。
- ④ 標準応答スペクトル用モデル
 - ・ 地盤減衰 (Q値) は、精度・信頼性の向上が見込まれるため、鉛直アレイの地震観測記録や最新の知見に基づく評価を実施し、短周期帯にも適用する地下構造モデルを設定。
 - ・ 設定した地下構造モデルについて、地震観測記録やボーリング孔内減衰測定結果等により妥当性を確認。



3.1 新たな地下構造モデルの設定方針

■ 既許可以降に取得した地震観測記録を踏まえた地下構造モデルの分析

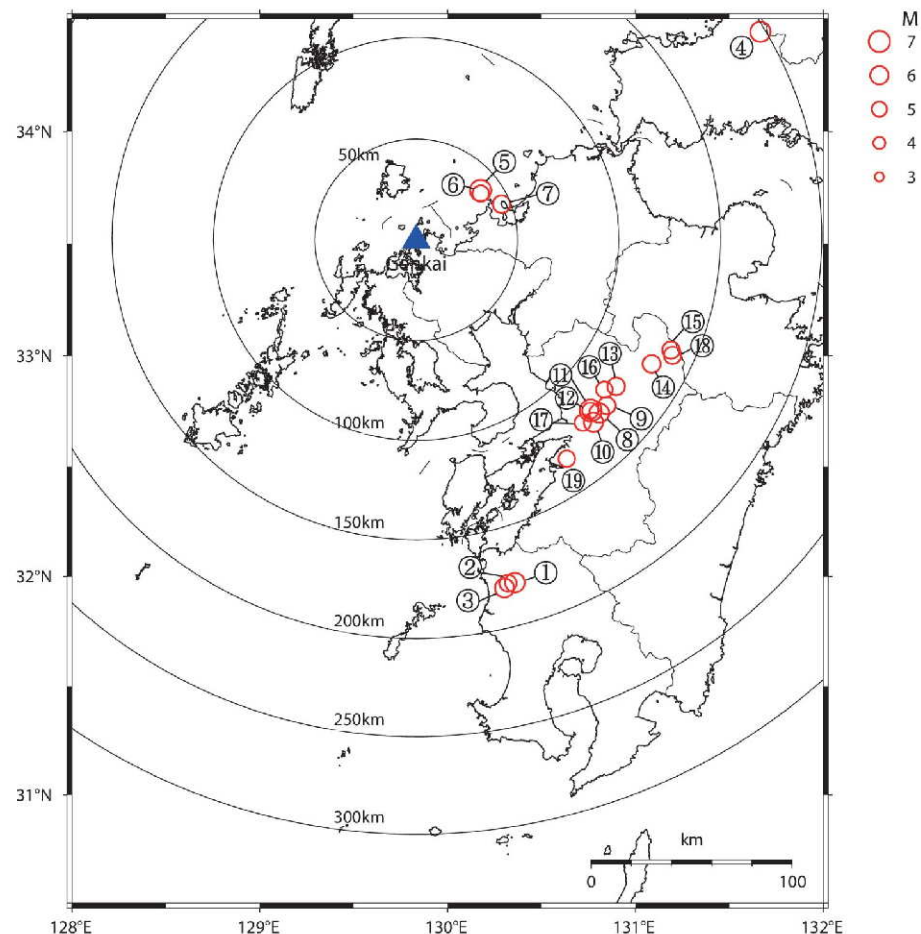
- 既許可時審査と同様の観点※で、既許可時審査以降に取得した地震観測記録を加えた計19地震の観測記録の伝達関数に対して、Vs、Vpと地盤減衰（Q値）の同定を実施。

※ Noda et al. (2002)¹⁾の適用範囲を参考にM5.4以上、震央距離200km程度以内の内陸地殻内地震を選定

伝達関数（周波数依存型）による
地盤同定に用いた地震諸元（計19地震）

| 番号 | 地震名 | 発生日 | M | 震央距離 (km) | 入射角 (°) |
|----|---------|------------|-----|--------------|------------|
| ① | 鹿児島県北西部 | 1997年3月26日 | 6.6 | 178 | 23 |
| ② | 鹿児島県北西部 | 1997年4月3日 | 5.7 | 178 | 23 |
| ③ | 鹿児島県北西部 | 1997年5月13日 | 6.4 | 180 | 23 |
| ④ | 山口県 | 1997年6月25日 | 6.6 | 198 | 23 |
| ⑤ | 九州北西沖 | 2005年3月20日 | 7.0 | 40 | 22 |
| ⑥ | 九州北西沖 | 2005年3月22日 | 5.4 | 39 | 22 |
| ⑦ | 福岡県中部 | 2005年4月20日 | 5.8 | 46 | 22 |
| ⑧ | 熊本県熊本地方 | 2016年4月14日 | 6.5 | 125 | 23 |
| ⑨ | 熊本県熊本地方 | 2016年4月14日 | 5.8 | 126 | 23 |
| ⑩ | 熊本県熊本地方 | 2016年4月15日 | 6.4 | 126 | 23 |
| ⑪ | 熊本県熊本地方 | 2016年4月16日 | 7.3 | 121 | 23 |
| ⑫ | 熊本県熊本地方 | 2016年4月16日 | 5.4 | 121 | 23 |
| ⑬ | 熊本県熊本地方 | 2016年4月16日 | 5.9 | 123 | 23 |
| ⑭ | 熊本県阿蘇地方 | 2016年4月16日 | 5.9 | 132 | 23 |
| ⑮ | 熊本県阿蘇地方 | 2016年4月16日 | 5.8 | 138 | 23 |
| ⑯ | 熊本県熊本地方 | 2016年4月16日 | 5.4 | 119 | 23 |
| ⑰ | 熊本県熊本地方 | 2016年4月16日 | 5.4 | 123 | 23 |
| ⑱ | 熊本県阿蘇地方 | 2016年4月18日 | 5.8 | 140 | 23 |
| ⑲ | 熊本県熊本地方 | 2016年4月19日 | 5.5 | 132 | 23 |

既許可時審査
↑
今回新たに追加

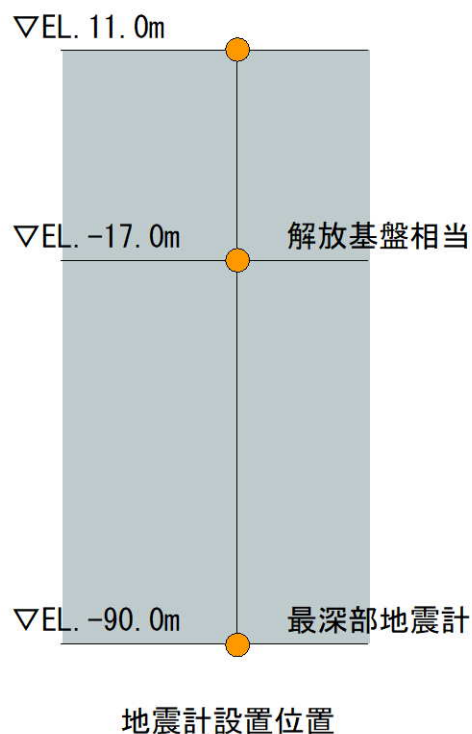


伝達関数（周波数依存型）による
地盤同定に用いた地震の震央位置（計19地震）

3.1 新たな地下構造モデルの設定方針

■ 同定における解析条件

- 伝達関数（周波数依存型）により地盤同定を行う。解析条件は以下の通り。



伝達関数（周波数依存型）による地盤同定における解析条件

| 項目 | 条件 |
|----------------|--|
| 対象地震の選定条件 | M5.4以上、震央距離200km程度以内の内陸地殻内地震 |
| 対象地震数 | 19地震 |
| ターゲットとする観測伝達関数 | 19地震の平均伝達関数（NS, EW, UD成分） <ul style="list-style-type: none"> ・ EL. 11.0m/EL. -17.0m ・ EL. -17.0m/EL. -90.0m P波・S波を含む40秒間を抽出 Band幅0.2HzのParzenウィンドウ |
| 同定方法 | 層厚、密度は既許可の地下構造モデルの値を参照し、 S波速度 V_s 、P波速度 V_p 、地盤減衰（Q値）を同定 |
| Q値 | $Q(f) = Q_0 \cdot f^\alpha$ |

3.1 新たな地下構造モデルの設定方針

■ Vs、Vpの同定結果

- 鉛直アレイ地震観測記録の伝達関数に対して、Vs、Vpと地盤減衰（Q値）の同定を実施した結果、既許可の地下構造モデルの速度構造と同等であることを確認。

【NS方向】

| 層上面 EL (m) | 密度 ρ (g/cm ³) | Vs (m/s) | 減衰 | |
|---------------|-----------------------------------|-------------|----------------|----------|
| | | | Q ₀ | α |
| 11.0 | 2.35 | 1349 | 1.03 | 0.00 |
| -17.0 | 2.35 | 1413 | 1.08 | 0.57 |
| -50.0 | 2.35 | 1614 | 1.14 | 0.57 |

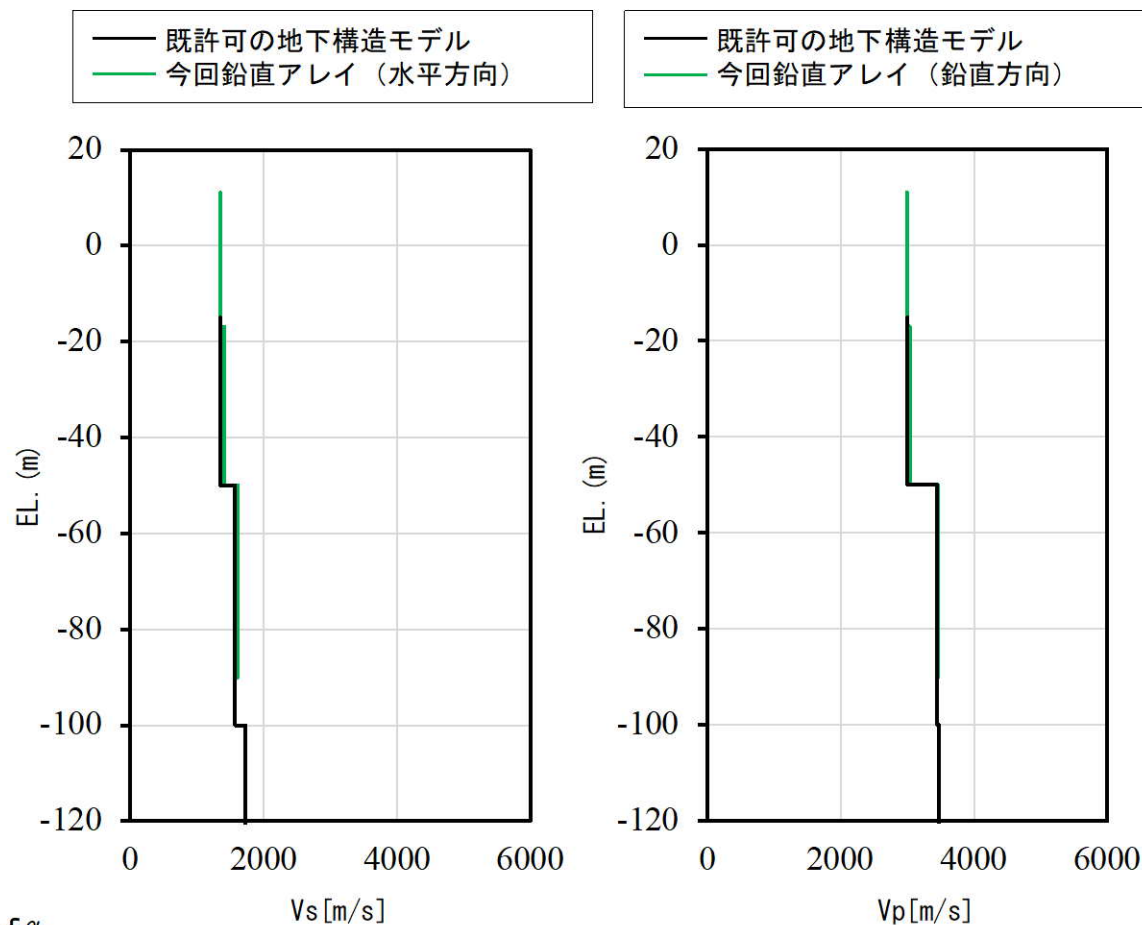
【EW方向】

| 層上面 EL (m) | 密度 ρ (g/cm ³) | Vs (m/s) | 減衰 | |
|---------------|-----------------------------------|-------------|----------------|----------|
| | | | Q ₀ | α |
| 11.0 | 2.35 | 1348 | 1.04 | 0.01 |
| -17.0 | 2.35 | 1373 | 1.07 | 0.62 |
| -50.0 | 2.35 | 1593 | 1.13 | 0.62 |

【UD方向】

| 層上面 EL (m) | 密度 ρ (g/cm ³) | Vp (m/s) | 減衰 | |
|---------------|-----------------------------------|-------------|----------------|----------|
| | | | Q ₀ | α |
| 11.0 | 2.35 | 2997 | 1.04 | 0.01 |
| -17.0 | 2.35 | 3032 | 1.08 | 0.25 |
| -50.0 | 2.35 | 3463 | 1.14 | 0.25 |

$$\ast Q(f) = Q_0 \cdot f^\alpha$$



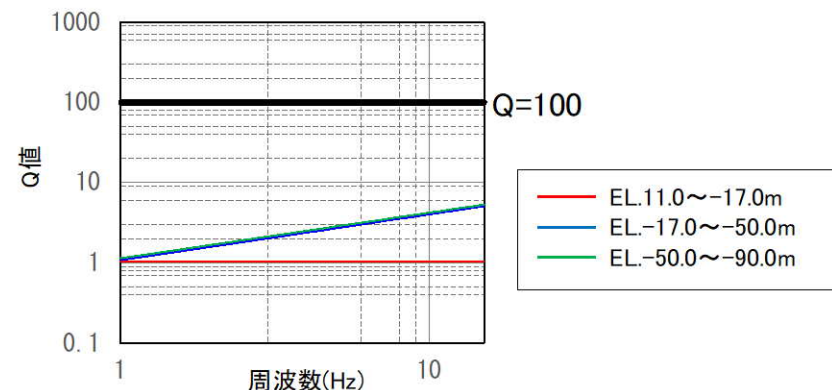
3.1 新たな地下構造モデルの設定方針

■ 地盤減衰（Q値）の同定結果

- 鉛直アレイ地震観測記録の伝達関数に対して、Vs、Vpと地盤減衰（Q値）の同定を実施した結果、既許可の地下構造モデルの地盤減衰（Q=100）を大きく下回ることを確認。

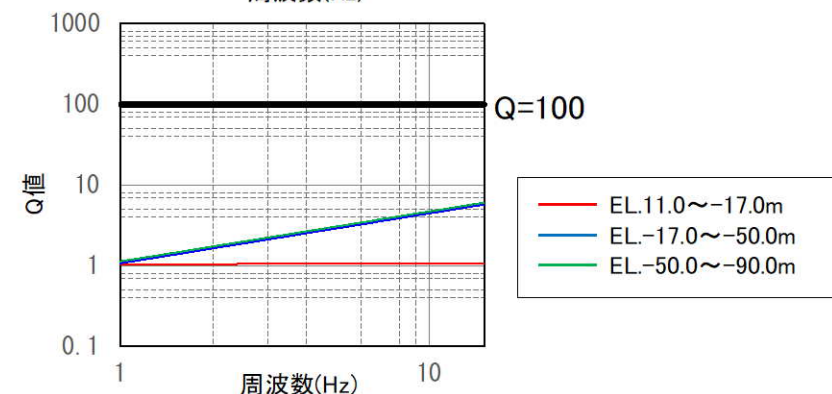
【NS方向】

| 層上面 EL (m) | 密度 ρ (g/cm ³) | Vs (m/s) | 減衰 | |
|---------------|-----------------------------------|-------------|----------------|----------|
| | | | Q ₀ | α |
| 11.0 | 2.35 | 1349 | 1.03 | 0.00 |
| -17.0 | 2.35 | 1413 | 1.08 | 0.57 |
| -50.0 | 2.35 | 1614 | 1.14 | 0.57 |



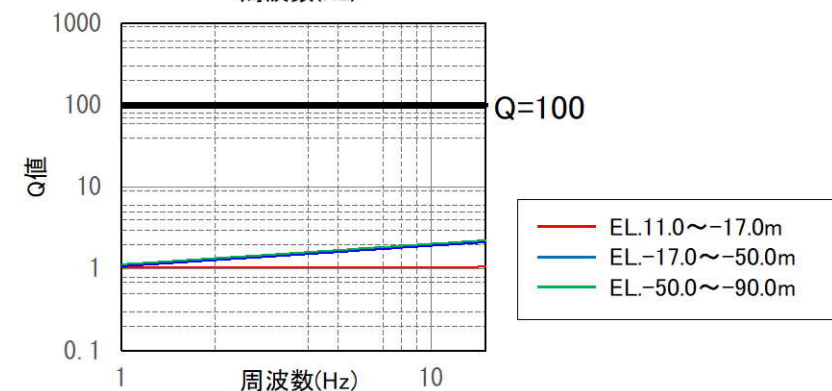
【EW方向】

| 層上面 EL (m) | 密度 ρ (g/cm ³) | Vs (m/s) | 減衰 | |
|---------------|-----------------------------------|-------------|----------------|----------|
| | | | Q ₀ | α |
| 11.0 | 2.35 | 1348 | 1.04 | 0.01 |
| -17.0 | 2.35 | 1373 | 1.07 | 0.62 |
| -50.0 | 2.35 | 1593 | 1.13 | 0.62 |



【UD方向】

| 層上面 EL (m) | 密度 ρ (g/cm ³) | Vp (m/s) | 減衰 | |
|---------------|-----------------------------------|-------------|----------------|----------|
| | | | Q ₀ | α |
| 11.0 | 2.35 | 2997 | 1.04 | 0.01 |
| -17.0 | 2.35 | 3032 | 1.08 | 0.25 |
| -50.0 | 2.35 | 3463 | 1.14 | 0.25 |



$$\ast Q(f) = Q_0 \cdot f^\alpha$$

3.1 新たな地下構造モデルの設定方針

■ 地下構造モデルの検討・設定及び妥当性確認の流れ (第1113回審査会合時の方針)

最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値) の検討・設定 【第1103回審査会合 資料4 2.2.1項 (1)(2)】

発電所敷地で取得した地震観測記録に基づき、解放基盤表面から最深部地震計 (EL. -90.0m) までの範囲の地盤減衰 (Q値) を、以下の手法で検討した結果、上限値は $Q=8.7$ 程度。

- 伝達関数 (周波数依存型) による検討 ($Q=8.7$ 程度)
- 伝達関数 (バイリニア型) による検討 ($Q=3.7$ 程度)
- 地震波干渉法による検討 ($Q=8.6$ 程度)

地盤減衰 (Q値) は、保守的に $Q=12.5$ と設定。

最深部地震計以深の地盤減衰 (Q値)

最深部地震計以深の地盤減衰 (Q値) の検討・設定 【第1103回審査会合 資料4 2.2.2項 (1)(2)】

- 速度層断面により、解放基盤表面からEL. -200mまでの範囲は概ね同じ速度層に分類されることを確認。
- 発電所敷地で取得した地震観測記録に基づく地盤増幅率 (以下、「経験的地盤増幅率」と理論増幅率の残差が最小となる $Q=12.5$ の層下面深度を検討し、 $Q=12.5$ をEL. -200m以深まで適用できることを確認。

$Q=12.5$ の適用範囲は、保守的にEL. -200mまでに設定。

地下構造モデル

地下構造モデルの設定 【第1103回審査会合 資料4 2.3節】

解放基盤表面からEL. -200mまでの範囲における地盤減衰 (Q値) を $Q=12.5$ に設定。

※1: 震源車による人工震源を用いた減衰測定。振幅レベルや周波数特性における自然地震との違いに留意した検討及び分析を実施。

※2: 岩石コア供試体を用いた超音波試験による減衰測定。岩盤の不均質性による減衰が含まれていない点や周波数特性における自然地震との違いに留意した検討及び分析を実施。

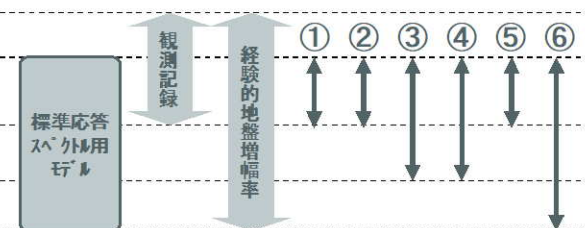
▼ EL. 11.0m (地表)

▼ EL. -15.0m (解放基盤表面)

▼ EL. -90.0m (最深部地震計)

▼ EL. -200m

▼ EL. -1804m (地震基盤相当面)



最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値) の妥当性確認 【第1103回審査会合 資料4 2.2.1項 (3)】

$Q=12.5$ の妥当性を以下の観点で確認。

- $Q=12.5$ の応答波の応答スペクトルが、地震観測記録の応答スペクトルと同等もしくは上回る (①)
- 卓越周波数において、 $Q=12.5$ による理論伝達関数の方が、同定結果による理論伝達関数より大きなピークを有する (②)

最深部地震計以深の地盤減衰 (Q値) の妥当性確認 【第1103回審査会合 資料4 2.2.2項 (3)】

解放基盤表面からEL. -200mまでの範囲において、同一の地盤減衰 (Q値) とする妥当性を以下の観点で確認。

- ボーリング孔内測定による減衰※1 (③) が、最深部地震計以浅と最深部地震計以深で同等である
- 岩石コアを用いた測定による減衰※2 (④) が、最深部地震計以浅と最深部地震計以深で同等である

地下構造モデルの妥当性確認

設定した地下構造モデルの妥当性を以下の観点で確認。

- 設定した地下構造モデルの応答波の応答スペクトルが、地震観測記録の応答スペクトルと同等もしくは上回る (⑤) [EL. -90m ~ 解放基盤表面]
- ブロックインバージョン結果を用いた地震波による応答波の応答スペクトルが、地震観測記録の応答スペクトルと同等もしくは上回る (⑥) [地震基盤相当面 ~ 解放基盤表面]

3.1 新たな地下構造モデルの設定方針

■ 地下構造モデルの妥当性確認の方針見直し

- 当社の基本的な方針として、既許可以降継続的に取得している鉛直アレイの地震観測記録等の観測事実に基づいて地下構造モデルを設定。
- ブロックインバージョン結果を用いた地震波による検討については、科学的・技術的に個別地点の地下構造モデルの妥当性を確認する明確な根拠として適用することは現時点で困難と考えられる。



- 上記を踏まえ、妥当性確認の方針を見直し、全体の論理構成を再構成する。
- (1) 解放基盤表面 (EL. -15m) からEL. -90mの範囲の地下構造モデルについて、「地震観測記録の応答スペクトルによる確認」により、観測事実との整合性に基づいて、以下の観点で妥当性を確認する。
 - 設定した地下構造モデルによる応答波の応答スペクトルが、地震観測記録の応答スペクトルと同等もしくは上回ることを確認する。
 - (2) 解放基盤表面 (EL. -15m) からEL. -200mの範囲の地下構造モデルについて、「PS検層モデルとの比較による確認」により、観測事実との整合性に基づいて、以下の観点で妥当性を確認する。
 - 設定した地下構造モデルに理論伝達関数が、ボーリング孔内減衰測定結果等を踏まえたPS検層モデルによる理論伝達関数と同等もしくは上回ることを確認する。
- なお、「ブロックインバージョン結果を用いた地震波による確認」については、より一層の説明性の向上を目的として、深部を含む全体を見ても、浅部で確認した地下構造モデルの妥当性に矛盾がないことを、参考として確認する。(参考⑤)

3.1 新たな地下構造モデルの設定方針

■ 地下構造モデルの検討・設定及び妥当性確認の流れ (見直し後の方針)

最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値) の検討・設定 【3.2.1項 (1) (2)】

発電所敷地で取得した地震観測記録に基づき、解放基盤表面から最深部地震計 (EL. -90.0m) までの範囲の地盤減衰 (Q値) を、以下の手法で検討した結果、上限値は $Q=8.7$ 程度。

- 伝達関数 (周波数依存型) による検討 ($Q=8.7$ 程度)
- 伝達関数 (バイリニア型) による検討 ($Q=3.7$ 程度)
- 地震波干渉法による検討 ($Q=8.6$ 程度)

地盤減衰 (Q値) は、保守的に $Q=12.5$ と設定。

最深部地震計以深の地盤減衰 (Q値)

最深部地震計以深の地盤減衰 (Q値) の検討・設定 【3.2.2項 (1) (2)】

• 速度層断面により、解放基盤表面からEL. -200mまでの範囲は概ね同じ速度層に分類されることを確認。

地盤減衰 (Q値) は、最深部地震計以浅と同じ $Q=12.5$ と設定。

地下構造モデル

地下構造モデルの設定 【3.3節】

解放基盤表面からEL. -200mまでの範囲における地盤減衰 (Q値) を $Q=12.5$ に設定。

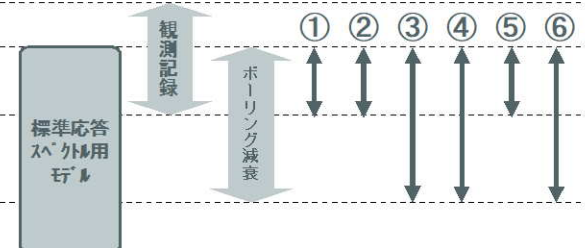
▼ EL. 11.0m (地表)

▼ EL. -15.0m (解放基盤表面)

▼ EL. -90.0m (最深部地震計)

▼ EL. -200m

▼ EL. -1804m (地震基盤相当面)



最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値) の妥当性確認 【3.2.1項 (3)】

$Q=12.5$ の妥当性を以下の観点で確認。

- $Q=12.5$ の応答波の応答スペクトルが、地震観測記録の応答スペクトルと同等もしくは上回る (①)
- 卓越周波数において、 $Q=12.5$ による理論伝達関数の方が、同定結果による理論伝達関数より大きなピークを有する (②)

最深部地震計以深の地盤減衰 (Q値) の妥当性確認 【3.2.2項 (3)】

解放基盤表面からEL. -200mまでの範囲において、同一の地盤減衰 (Q値) とする妥当性を以下の観点で確認。

- ボーリング孔内測定による減衰 (③) が、最深部地震計以浅と最深部地震計以深で同等である
- 岩石コアを用いた測定による減衰 (④) が、最深部地震計以浅と最深部地震計以深で同等である

地下構造モデルの妥当性確認 【3.4節】

設定した地下構造モデルの妥当性を以下の観点で確認。

- 設定した地下構造モデルによる応答波の応答スペクトルが、地震観測記録の応答スペクトルと同等もしくは上回る (⑤) [解放基盤表面~EL. -90m]
- 設定した地下構造モデルの理論伝達関数が、ボーリング孔内減衰測定結果等を踏まえたPS検層モデルの理論伝達関数に対して同等もしくは上回る (⑥) [解放基盤表面~EL. -200m]

3.2 地盤減衰（Q値）の設定

■ 地盤減衰（Q値）の設定方針

- 既許可以降継続的に取得している鉛直アレイの地震観測記録や最新の知見に基づく評価により、地盤減衰（Q値）の精度・信頼性の向上が見込まれるため、地盤減衰（Q値）を対象に評価を実施。

| 解放基盤表面 ▼ EL. -15.0m | 地盤減衰（Q値） | 速度構造 |
|-------------------------|--|---------------------------------------|
| ▼ EL. -50.0m | 地震観測記録を用いた検討結果に基づき設定 | 試掘坑内弾性波試験を基に設定 （既許可モデルの設定値と同値） |
| 最深部地震計 ▼ EL. -90.0m | | PS検層結果を基に設定 （既許可モデルの設定値と同値） |
| ▼ EL. -200m | 速度層断面による検討結果に基づき設定 | 地震調査委員会(2007)を基に設定 （既許可モデルの設定値と同値） |
| 地震基盤相当面 ▼ EL. -1804m | 慣用値 ($V_s/15\sim 10$) を基に設定 （既許可モデルの設定値と同値） | |

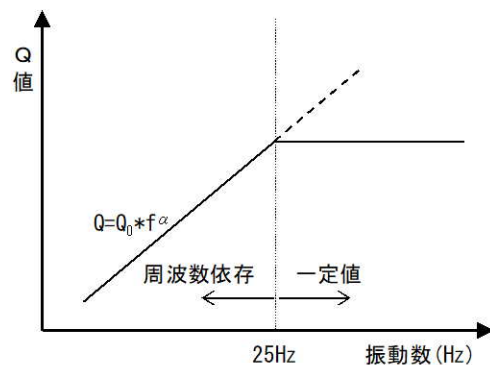
地表
▼ EL. 11.0m
 観測記録
 ボーリング孔内減衰測定等

3.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

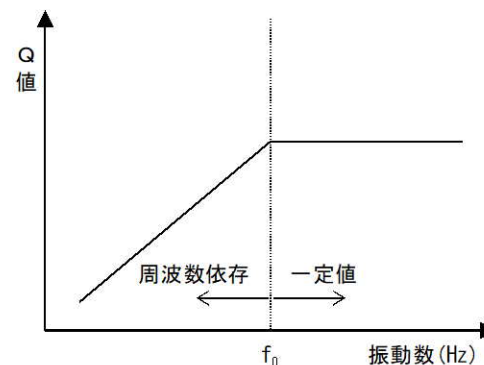
(1) 地盤減衰 (Q値) の検討

地盤減衰 (Q値) の検討方針

- 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値) について、既許可以降に取得した鉛直アレイ地震観測記録を基に、以下のとおり、多面的な検討を実施。
 - a. 伝達関数 (周波数依存型) による検討：
地盤減衰 (Q値) が周波数のべき乗に比例する関数モデル ($Q=Q_0*f^\alpha$) を仮定し、地盤減衰 (Q値) を同定。既往の知見^{2)~7)}によると、地盤減衰 (Q値) は20Hz程度までのある周波数で上限が存在することから、安全側に考慮し、25Hz以上の値を上限値として採用。
 - b. 伝達関数 (バイリニア型) による検討：
低周波数側では地盤減衰 (Q値) が周波数のべき乗に比例 ($Q=Q_0*f^\alpha$) し、ある周波数 f_0 (Hz) より高周波数側では、上限値で頭打ち ($Q=Q_0$) するバイリニア型関数モデルを仮定し、地盤減衰 (Q値) を同定。 f_0 は探索パラメータとして地盤減衰 (Q値) と同時に同定。
 - c. 地震波干渉法による検討：
上記伝達関数による検討では、地盤減衰 (Q値) の関数モデルの設定に速度構造を加えた地下構造モデルが必要であるが、地下構造モデルを用いず、地盤減衰 (Q値) を推定。



(a) 伝達関数 (周波数依存型)



(b) 伝達関数 (バイリニア型)

各手法における減衰モデルのイメージ

3.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

a. 伝達関数 (周波数依存型) による検討

■ 同定に用いる地震諸元

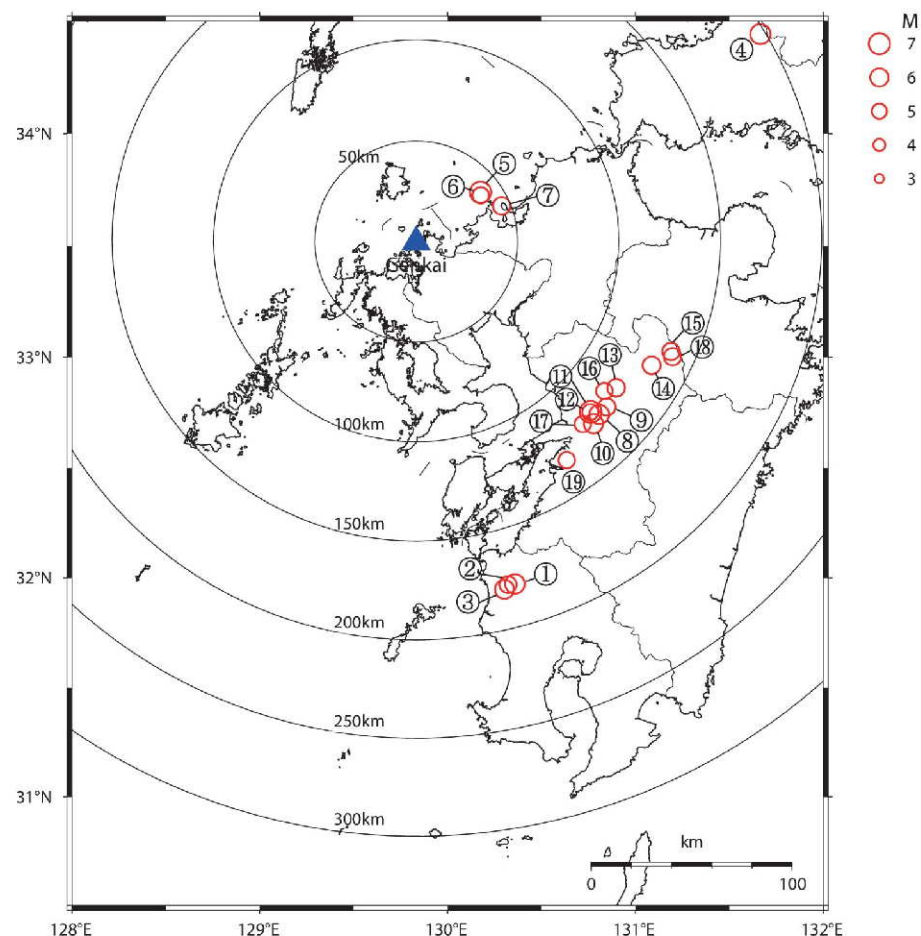
- 既許可時審査と同様の観点※で、既許可時審査以降に取得した地震観測記録を加えた計19地震の観測記録の伝達関数に対して、地盤減衰の同定を実施。

※ Noda et al. (2002)¹⁾の適用範囲を参考にM5.4以上、震央距離200km程度以内の内陸地殻内地震を選定

伝達関数 (周波数依存型) による地盤減衰の
同定に用いた地震諸元 (計19地震)

| 番号 | 地震名 | 発生日 | M | 震央距離 (km) | 入射角 (°) |
|----|---------|------------|-----|-----------|---------|
| ① | 鹿児島県北西部 | 1997年3月26日 | 6.6 | 178 | 23 |
| ② | 鹿児島県北西部 | 1997年4月3日 | 5.7 | 178 | 23 |
| ③ | 鹿児島県北西部 | 1997年5月13日 | 6.4 | 180 | 23 |
| ④ | 山口県 | 1997年6月25日 | 6.6 | 198 | 23 |
| ⑤ | 九州北西沖 | 2005年3月20日 | 7.0 | 40 | 22 |
| ⑥ | 九州北西沖 | 2005年3月22日 | 5.4 | 39 | 22 |
| ⑦ | 福岡県中部 | 2005年4月20日 | 5.8 | 46 | 22 |
| ⑧ | 熊本県熊本地方 | 2016年4月14日 | 6.5 | 125 | 23 |
| ⑨ | 熊本県熊本地方 | 2016年4月14日 | 5.8 | 126 | 23 |
| ⑩ | 熊本県熊本地方 | 2016年4月15日 | 6.4 | 126 | 23 |
| ⑪ | 熊本県熊本地方 | 2016年4月16日 | 7.3 | 121 | 23 |
| ⑫ | 熊本県熊本地方 | 2016年4月16日 | 5.4 | 121 | 23 |
| ⑬ | 熊本県熊本地方 | 2016年4月16日 | 5.9 | 123 | 23 |
| ⑭ | 熊本県阿蘇地方 | 2016年4月16日 | 5.9 | 132 | 23 |
| ⑮ | 熊本県阿蘇地方 | 2016年4月16日 | 5.8 | 138 | 23 |
| ⑯ | 熊本県熊本地方 | 2016年4月16日 | 5.4 | 119 | 23 |
| ⑰ | 熊本県熊本地方 | 2016年4月16日 | 5.4 | 123 | 23 |
| ⑱ | 熊本県阿蘇地方 | 2016年4月18日 | 5.8 | 140 | 23 |
| ⑲ | 熊本県熊本地方 | 2016年4月19日 | 5.5 | 132 | 23 |

既許可時審査
↑
今回新たに追加

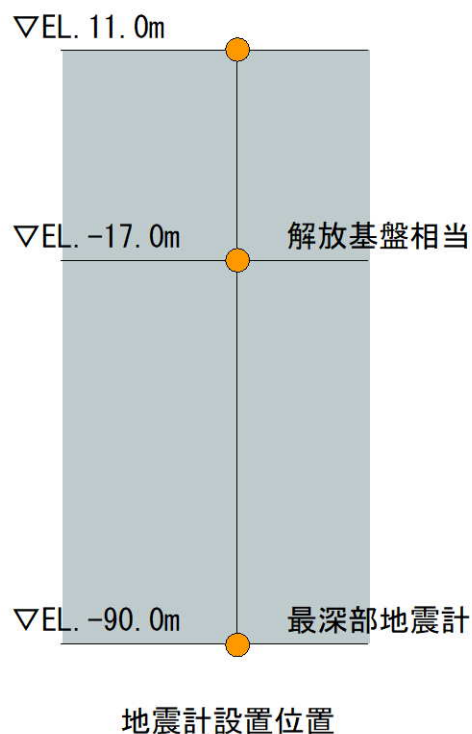


伝達関数 (周波数依存型) による地盤減衰の
同定に用いた地震の震央位置 (計19地震)

3.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰（Q値）

■ 同定における解析条件

- 伝達関数（周波数依存型）により地盤減衰の同定を行う。解析条件は以下の通り。



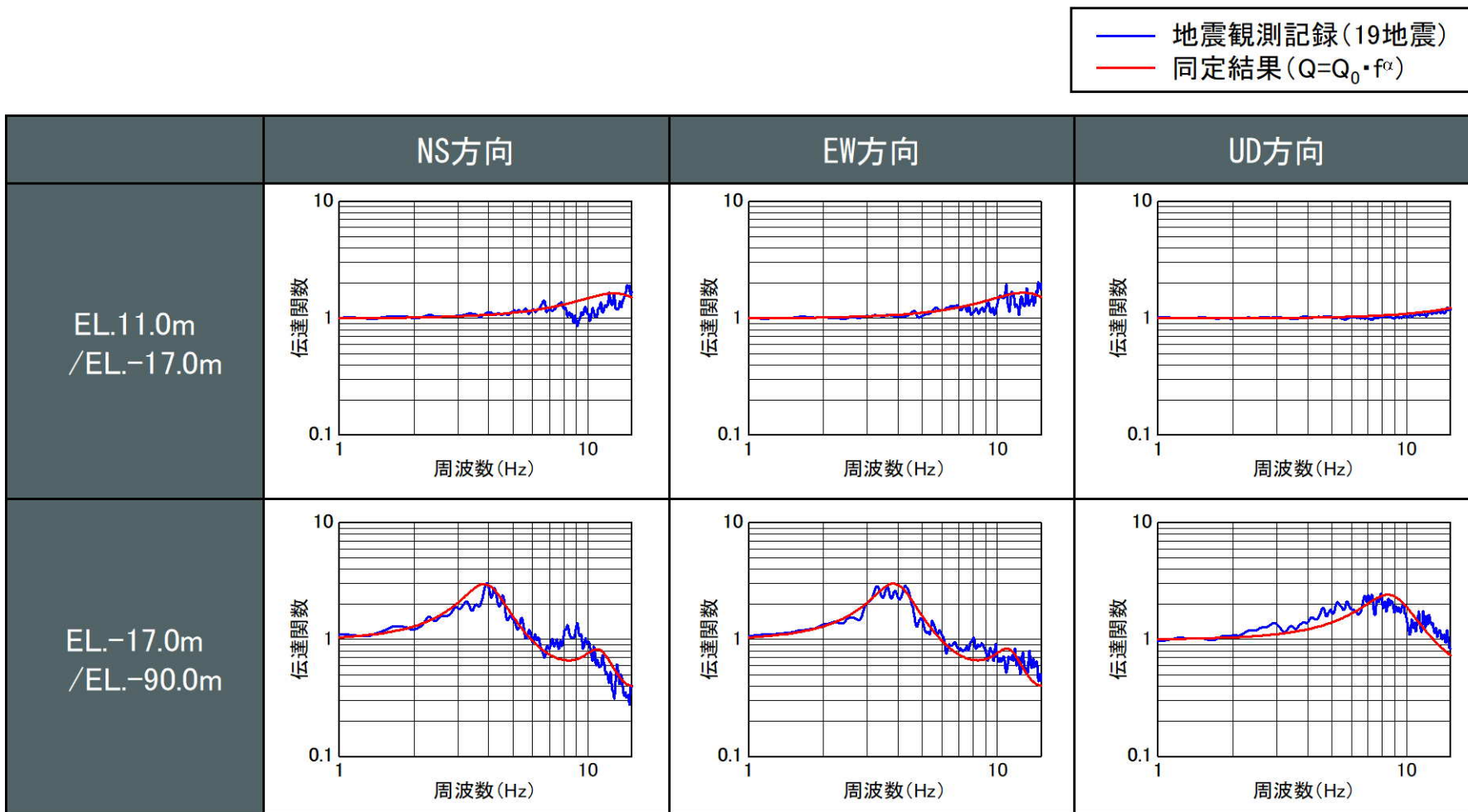
伝達関数（周波数依存型）による地盤減衰の同定における解析条件

| 項目 | 条件 |
|----------------|--|
| 対象地震の選定条件 | M5.4以上、震央距離200km程度以内の内陸地殻内地震 |
| 対象地震数 | 19地震 |
| ターゲットとする観測伝達関数 | 19地震の平均伝達関数（NS, EW, UD成分） <ul style="list-style-type: none"> ・ EL. 11.0m/EL. -17.0m ・ EL. -17.0m/EL. -90.0m P波・S波を含む40秒間を抽出 Band幅0.2HzのParzenウィンドウ |
| 同定方法 | 層厚、密度、S波速度Vs及びP波速度Vpは、既許可の地下構造モデルの値を参照し、地盤減衰（Q値）を同定 |
| Q値 | $Q(f) = Q_0 \cdot f^\alpha$ |

3.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

■ 地盤減衰 (Q値) の同定結果

- 同定結果の伝達関数と19地震の平均伝達関数の伝達関数を以下に示す。

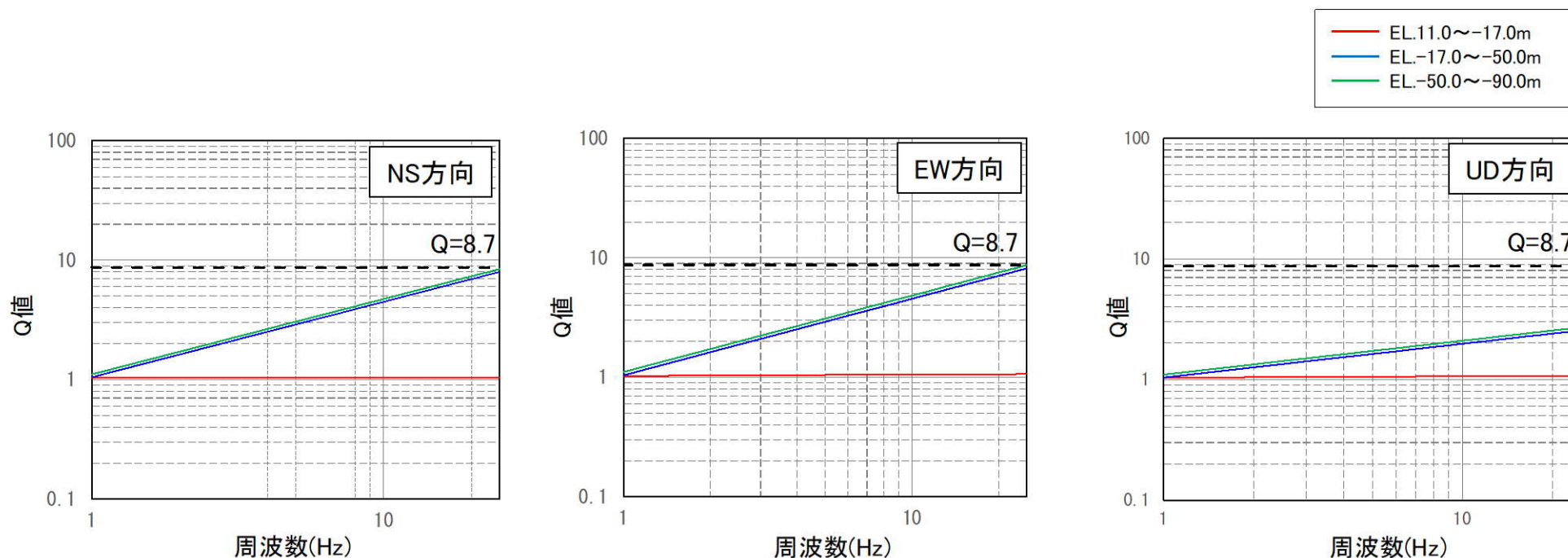


※観測記録及び理論の伝達関数はParzen Window 0.2Hzでスムージング

3.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

■ 地盤減衰 (Q値) の同定結果

- 伝達関数 (周波数依存型) により同定された地盤減衰 (Q値) の上限値は、 $Q=8.7$ 程度。



伝達関数 (周波数依存型) により同定された地盤減衰 (EL. 11.0m~EL. -90.0m)

同定結果による地盤減衰 (Q値)

| 層上面 EL (m) | 密度 ρ (g/cm ³) | Vs (m/s) | Vp (m/s) | 減衰-NS | | 減衰-EW | | 減衰-UD | |
|---------------|-----------------------------------|-------------|-------------|-------|----------|-------|----------|-------|----------|
| | | | | Q_0 | α | Q_0 | α | Q_0 | α |
| 11.0 | 2.35 | 1350 | 3000 | 1.03 | 0.00 | 1.03 | 0.01 | 1.04 | 0.01 |
| -17.0 | 2.35 | 1350 | 3000 | 1.05 | 0.63 | 1.04 | 0.64 | 1.04 | 0.28 |
| -50.0 | 2.35 | 1570 | 3440 | 1.11 | 0.63 | 1.11 | 0.64 | 1.10 | 0.28 |

3.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

b. 伝達関数 (バイリニア型) による検討

■ 既往知見の整理

- ・ 地盤減衰 (Q値) の周波数依存性及び上限に関する知見は以下の通り。

| 文献 | 概要 |
|---------------------------------------|--|
| 武村ほか (1993) ²⁾ | <ul style="list-style-type: none">・ Q値の周波数に対する単調増加の傾向 (周波数依存性) が見られる。・ 高周波数側でのQ値の頭打ちが見られる。 |
| 福島・翠川 (1994) ³⁾ | <ul style="list-style-type: none">・ 周波数帯域 (0.5Hz~5Hz) において周波数依存性を考慮したモデルの提案・ 5Hz以上の高周波数帯域については、既往研究結果 (武村ほか (1993)²⁾ 等を踏まえ、減衰定数を一定として設定 |
| 木下・大池 (2002) ⁴⁾ | <ul style="list-style-type: none">・ 0.5~2Hzでは減衰定数が周波数とともに減少することを示している。・ 一方で、2~16Hzにおいてほぼ一定の値となることを示している。 |
| Fukushima et al. (2016) ⁵⁾ | <ul style="list-style-type: none">・ Q^{-1}値は約2~3Hzまでの振動数で減少するが、それより高い振動数ではほぼ一定になることを示している。 |
| 佐藤ほか (2006) ⁶⁾ | <ul style="list-style-type: none">・ 減衰定数がある周波数を境に、低周波数側では周波数に依存し、高周波数側では一定になることを表現したモデルの提案がなされている。 |
| 佐藤 (2012) ⁷⁾ | <ul style="list-style-type: none">・ バイリニア型周波数依存モデルを用いた評価から「10Hz付近での変移」の存在を明らかにしており、10~20Hzで周波数一定とすると既往の研究と調和的な結果・ 低周波数側の減衰を、単純に高周波数側に拡張することはできないとする指摘 (Abercrombie (1998)⁸⁾) とも整合している。 |

3.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

■ 同定に用いる地震諸元及び解析条件

- 佐藤(2012)⁷⁾による、ある周波数を境に低周波数側では周波数に依存し、高周波数側では一定になることを表現したバイリニア型周波数依存モデルを用いて伝達関数により地盤減衰 (Q値) を同定。

伝達関数(バイリニア型)による地盤減衰の同定における解析条件

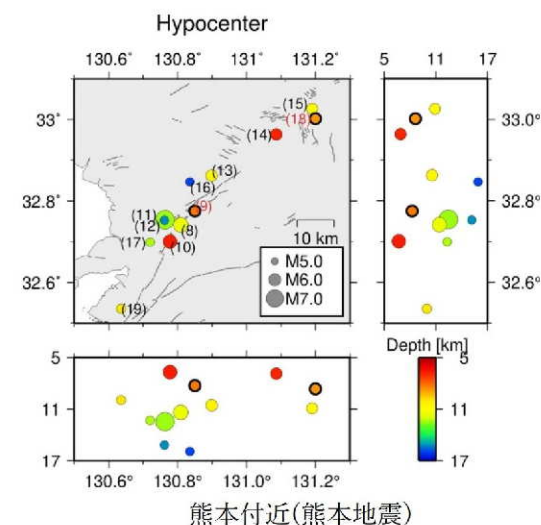
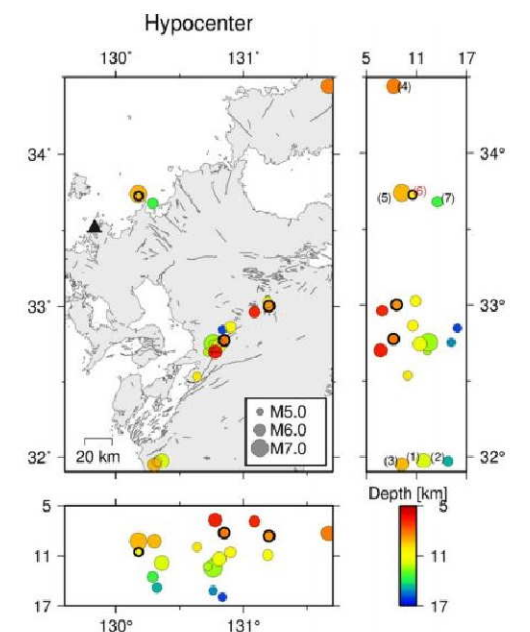
| 項目 | 条件 |
|----------------|---|
| 対象地震の選定条件 | M5.4以上、震央距離200km程度以内の内陸地殻内地震のうち、 <u>平均的な特徴を有する地震</u> ^{※1} |
| 対象地震数 | 3地震 |
| ターゲットとする観測伝達関数 | 3地震の伝達関数 (Transverse成分) <ul style="list-style-type: none"> EL. 11.0m/EL. -17.0m EL. 11.0m/EL. -90.0m EL. -17.0m/EL. -90.0m S波を含む10秒間を抽出 Band幅0.2HzのParzenウィンドウ |
| 同定方法 | 層厚、密度、S波速度Vs及びP波速度Vpは、既許可の地下構造モデルの値を参照し、 <u>入射角、地盤減衰 (Q値) を同定</u> |
| Q値 | $Q(f) = Q_0 \cdot f^\alpha \quad (f < f_0)$ $Q(f) = Q_0 \quad (f \geq f_0)$ |

※1: 19地震平均伝達関数と同様な傾向の伝達関数を有する地震を選定

※下線部は伝達関数(周波数依存型)による同定における解析条件からの変更点

伝達関数(バイリニア型)による地盤減衰の同定に用いた地震諸元(計3地震)

| 地震名 | 発生日 | M | 震央距離(km) |
|---------|------------|-----|----------|
| 熊本県熊本地方 | 2016年4月14日 | 5.8 | 126 |
| 熊本県阿蘇地方 | 2016年4月18日 | 5.8 | 140 |
| 九州北西沖 | 2005年3月22日 | 5.4 | 39 |

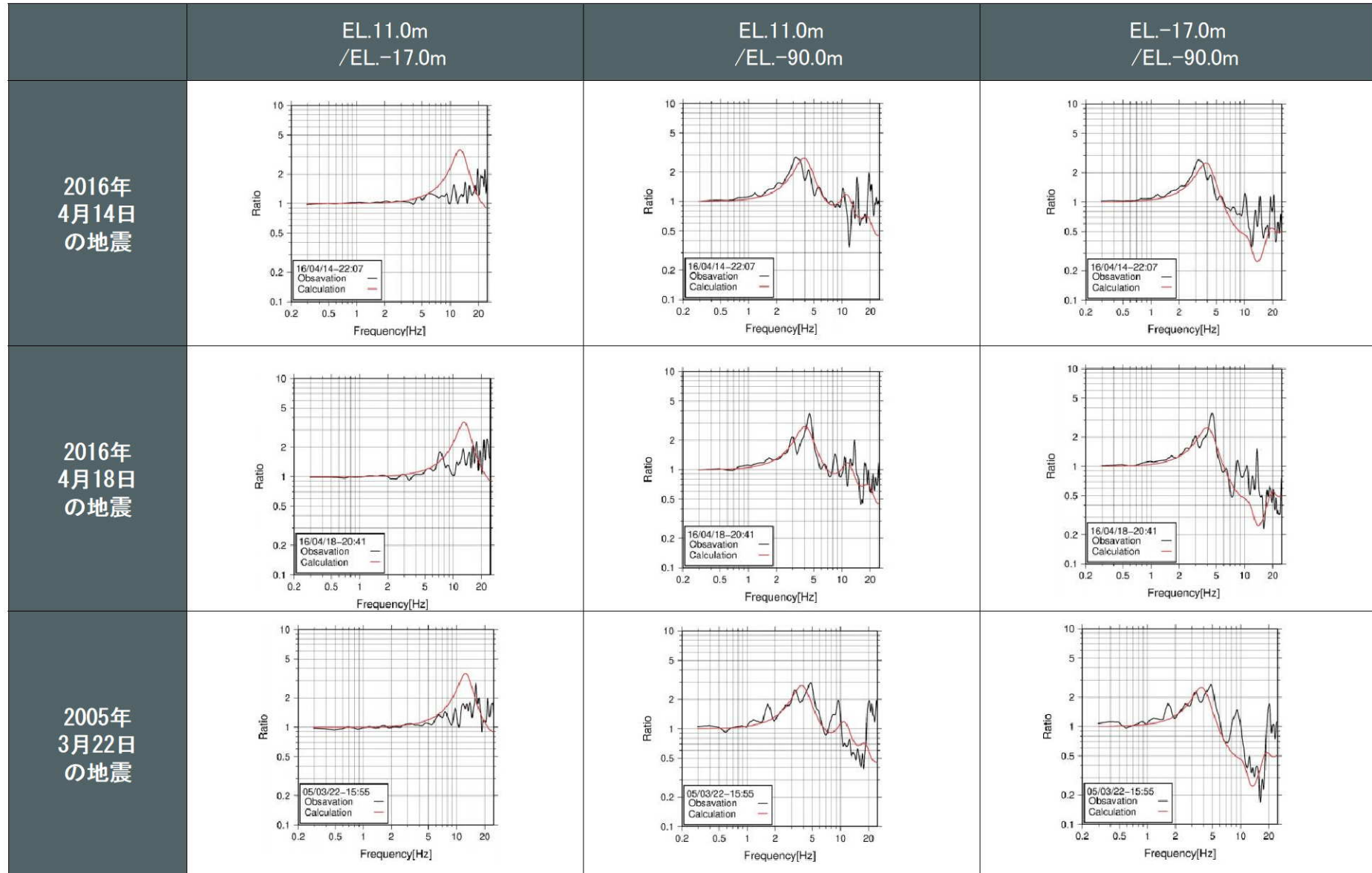


伝達関数(バイリニア型)による地盤減衰の同定に用いた地震の震央位置(太枠、計3地震)

3.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

■ 地盤減衰 (Q値) の同定結果 (Transverse成分)

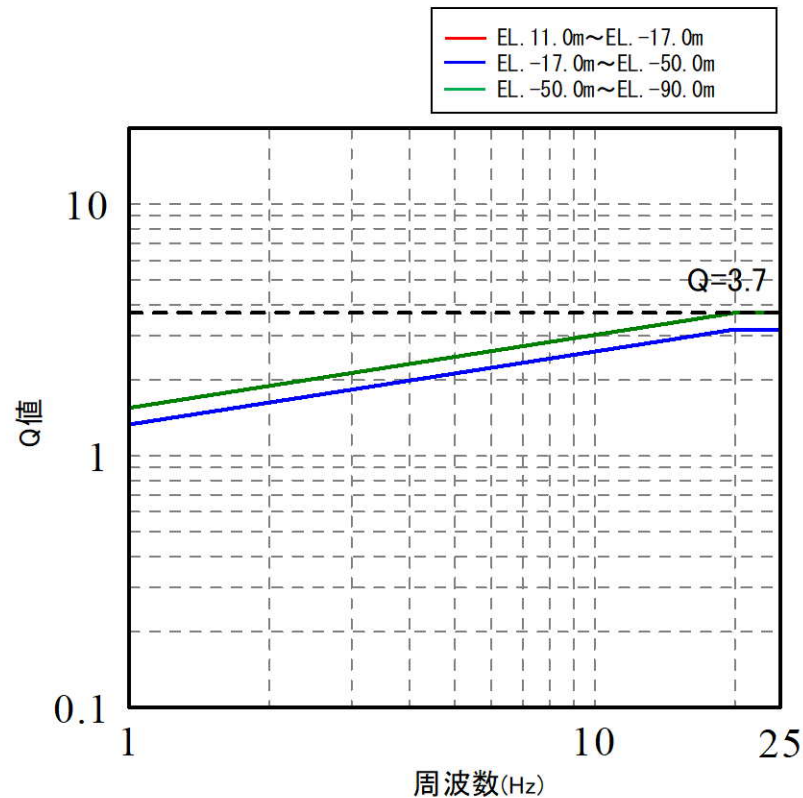
- 同定結果の伝達関数と観測記録の伝達関数を以下に示す。



3.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

■ 地盤減衰 (Q値) の同定結果

- 伝達関数 (バイリニア型) により同定された地盤減衰 (Q値) の上限値は、 $Q=3.7$ 程度。



伝達関数(バイリニア型)により同定された
地盤減衰(EL.11.0m~EL.-90.0m)

| 層上面 EL (m) | 密度 ρ (g/cm ³) | V_s (m/s) | V_p (m/s) | 減衰-TR | | |
|---------------|-----------------------------------|----------------|----------------|-------|----------|-------|
| | | | | Q_0 | α | f_0 |
| 11.0 | 2.35 | 1350 | 3000 | 1.34 | 0.29 | 19.98 |
| -17.0 | 2.35 | 1350 | 3000 | 1.34 | 0.29 | 19.98 |
| -50.0 | 2.35 | 1570 | 3440 | 1.56 | 0.29 | 19.98 |

3.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

c. 地震波干渉法による検討

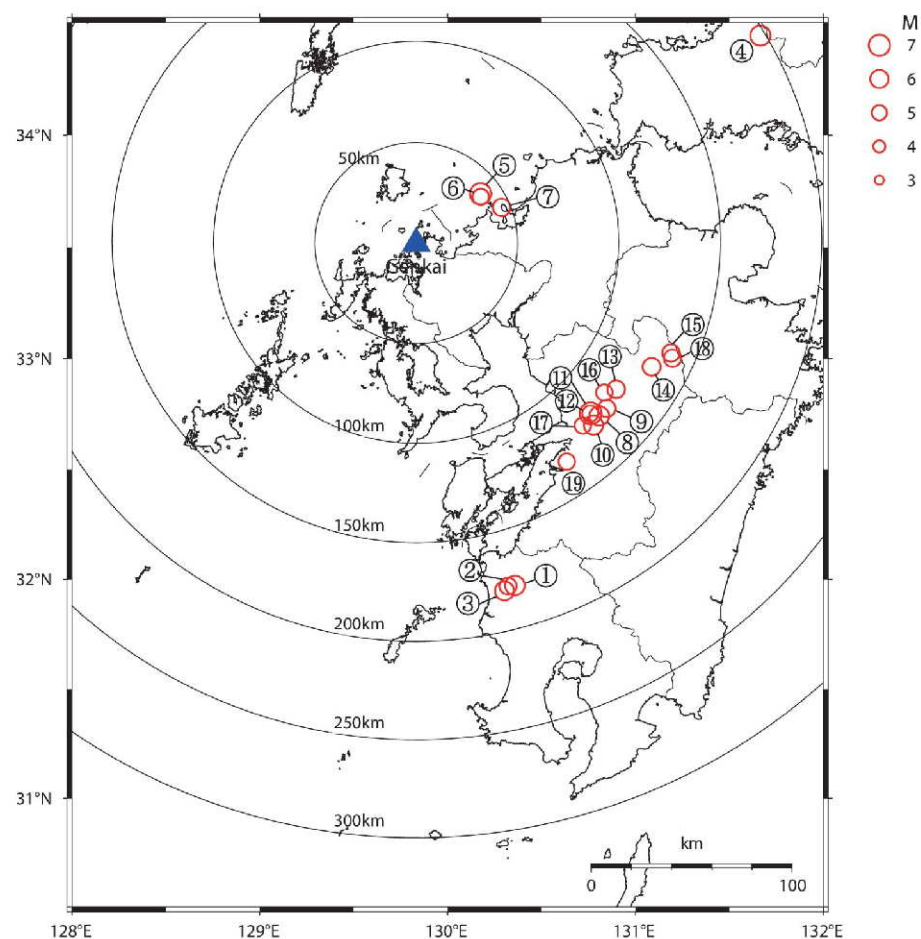
■ 同定に用いる地震諸元

- 地震波干渉法による地盤減衰 (Q値) の推定は、伝達関数 (周波数依存型) による検討と同様の観点※で計19地震の観測記録を対象として実施。

※ Noda et al. (2002)¹⁾ の適用範囲を参考にM5.4以上、震央距離200km程度以内の内陸地殻内地震を選定

地震波干渉法による地盤減衰の
同定に用いた地震諸元 (計19地震)

| 番号 | 地震名 | 発生日 | M | 震央距離 (km) | 入射角 (°) |
|----|---------|------------|-----|-----------|---------|
| ① | 鹿児島県北西部 | 1997年3月26日 | 6.6 | 178 | 23 |
| ② | 鹿児島県北西部 | 1997年4月3日 | 5.7 | 178 | 23 |
| ③ | 鹿児島県北西部 | 1997年5月13日 | 6.4 | 180 | 23 |
| ④ | 山口県 | 1997年6月25日 | 6.6 | 198 | 23 |
| ⑤ | 九州北西沖 | 2005年3月20日 | 7.0 | 40 | 22 |
| ⑥ | 九州北西沖 | 2005年3月22日 | 5.4 | 39 | 22 |
| ⑦ | 福岡県中部 | 2005年4月20日 | 5.8 | 46 | 22 |
| ⑧ | 熊本県熊本地方 | 2016年4月14日 | 6.5 | 125 | 23 |
| ⑨ | 熊本県熊本地方 | 2016年4月14日 | 5.8 | 126 | 23 |
| ⑩ | 熊本県熊本地方 | 2016年4月15日 | 6.4 | 126 | 23 |
| ⑪ | 熊本県熊本地方 | 2016年4月16日 | 7.3 | 121 | 23 |
| ⑫ | 熊本県熊本地方 | 2016年4月16日 | 5.4 | 121 | 23 |
| ⑬ | 熊本県熊本地方 | 2016年4月16日 | 5.9 | 123 | 23 |
| ⑭ | 熊本県阿蘇地方 | 2016年4月16日 | 5.9 | 132 | 23 |
| ⑮ | 熊本県阿蘇地方 | 2016年4月16日 | 5.8 | 138 | 23 |
| ⑯ | 熊本県熊本地方 | 2016年4月16日 | 5.4 | 119 | 23 |
| ⑰ | 熊本県熊本地方 | 2016年4月16日 | 5.4 | 123 | 23 |
| ⑱ | 熊本県阿蘇地方 | 2016年4月18日 | 5.8 | 140 | 23 |
| ⑲ | 熊本県熊本地方 | 2016年4月19日 | 5.5 | 132 | 23 |



地震波干渉法による地盤減衰の
同定に用いた地震の震央位置 (計19地震)

3.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰（Q値）

■ 同定における解析条件

- 地震波干渉法により地盤減衰の同定を行う。解析条件は以下の通り。

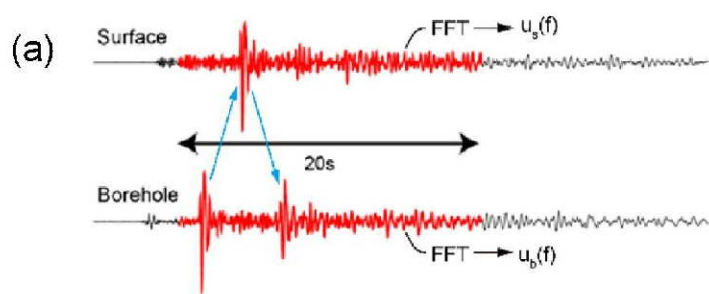
地震波干渉法による地盤減衰の同定における解析条件

| | 項目 | 条件 |
|------------|-----------|--|
| デコンボリューション | 対象地震の選定条件 | M5.4以上、震央距離200km程度以内の内陸地殻内地震 |
| | 対象地震数 | 19地震 |
| | 解析成分 | Transverse成分 |
| | 解析区間 | S波を含む20秒 |
| | テーパー | コサインテーパー（両端に1秒） |
| Q値推定 | 対象地震の選定条件 | スタックしたデコンボリューション波形と一致度が高い（ $C^* > 8$ ）地震 |
| | 対象地震数 | 16地震 |
| | 解析区間 | ピーク時間 × 2 |
| | スムージング | 対数型Parzenウィンドウ Band幅は中心周波数fに対して $f/1.3 \sim 1.3f$ |

3.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

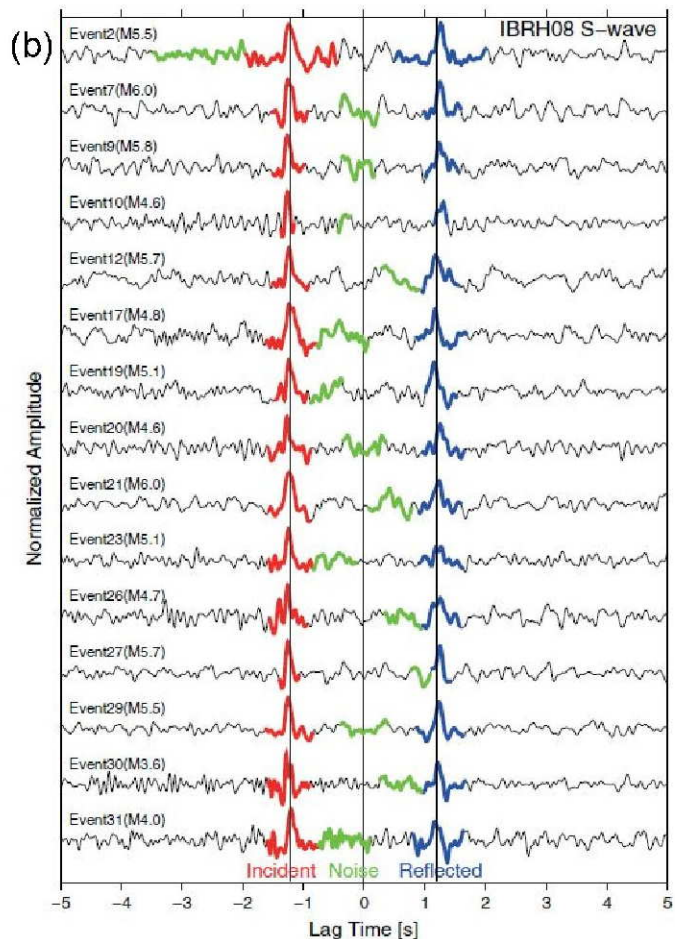
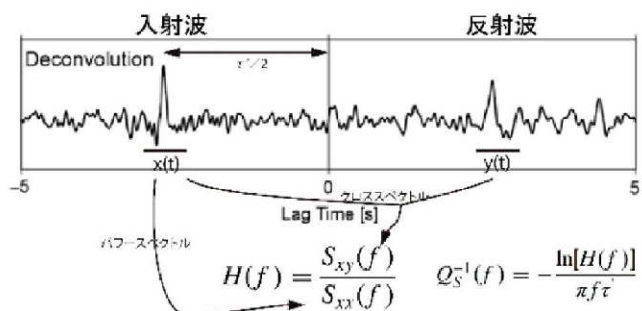
■ 地盤減衰 (Q値) の推定方法

- 既許可時審査以降の最新の技術的知見として、地震波干渉法^{5)、9)}により、地下構造モデルを用いず、鉛直アレイ地震観測記録から地盤減衰 (Q値) を直接推定。
- 地中の地震観測記録には、鉛直下方から入射された波動が地表で反射し、反射波が記録されるため、地表の観測記録に対して地中記録をデコンボリューションすると、入射波 (負側) と反射波 (正側) が分離。
- 複数の地震観測記録をスタックしたデコンボリューション波形を用いて、入射波に対する反射波の振幅の比率に基づき、地盤減衰 (Q値) を推定。



$$W_\varepsilon(\omega) = \frac{u_b(\omega) u_s^*(\omega)}{|u_s(\omega)|^2 + \varepsilon}$$

IFFT
(Deconvolution)

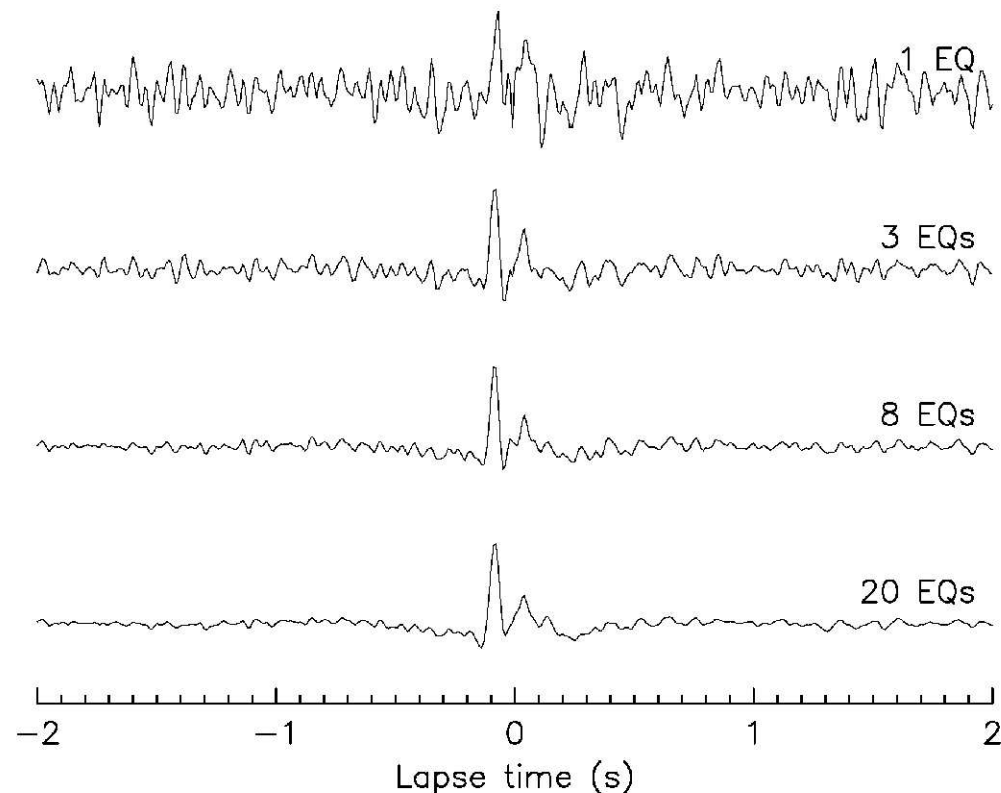


Fukushima et al.(2016)より抜粋

3.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

■ 地盤減衰 (Q値) の推定精度

- デコンボリューション波形を精度よく求めるためには、多くの地震観測記録のデコンボリューション波形をスタックする必要がある。
 - スタックする地震観測記録が多くなると、ノイズが除去され、シグナルが明瞭になる。
 - スタックする地震観測記録が少なく、シグナルが不明瞭なデコンボリューション波形を用いると、地盤減衰 (Q値) を適切に推定できない。



地震観測記録数によるデコンボリューション波形の違い

3.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

■ GOFによる波形の抽出方法

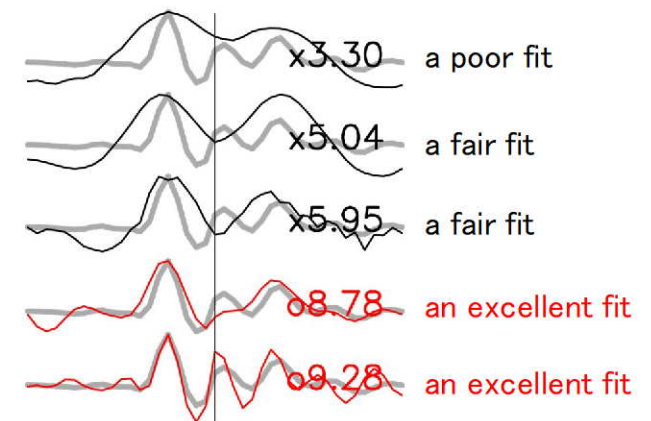
- 対象とした19地震の観測記録から、Anderson(2004)¹⁰⁾による指標 (GOF: Goodness Of Fit) に基づき、スタックしたデコンボリューション波形と各地震のデコンボリューション波形の一致度が高いものを抽出。
 - Anderson(2004)では、2つの波形の一致度などを表す適合度指標を提案。
 - これらのうち2つの波形の相関を表す指標 (GOF) として、コヒーレンスを10倍した値を採用し、その値に応じた以下の適合度が示されている。

| | |
|------------------|-----------------------|
| a poor fit : ~4 | a good fit : 6~8 |
| a fair fit : 4~6 | an excellent fit : 8~ |
- 本検討では、スタックしたデコンボリューション波形と各地震のデコンボリューション波形のGOFを求め、an excellent fit (8~) の波形を抽出。

2つの波形の相関を表す指標 (GOF)

| Number | Symbol | Name: Similarity of | Definition ¹ |
|--------|--------|---------------------|---|
| C10 | C* | Cross Correlation | $C^* = 10 \max[C(a_1(t), a_2(t)), 0]$ where $C(a_1, a_2) = \frac{\int a_1(t)a_2(t)dt}{\left[\int a_1^2(t)dt\right]^{1/2} \left[\int a_2^2(t)dt\right]^{1/2}}$ |

Anderson(2004)より抜粋

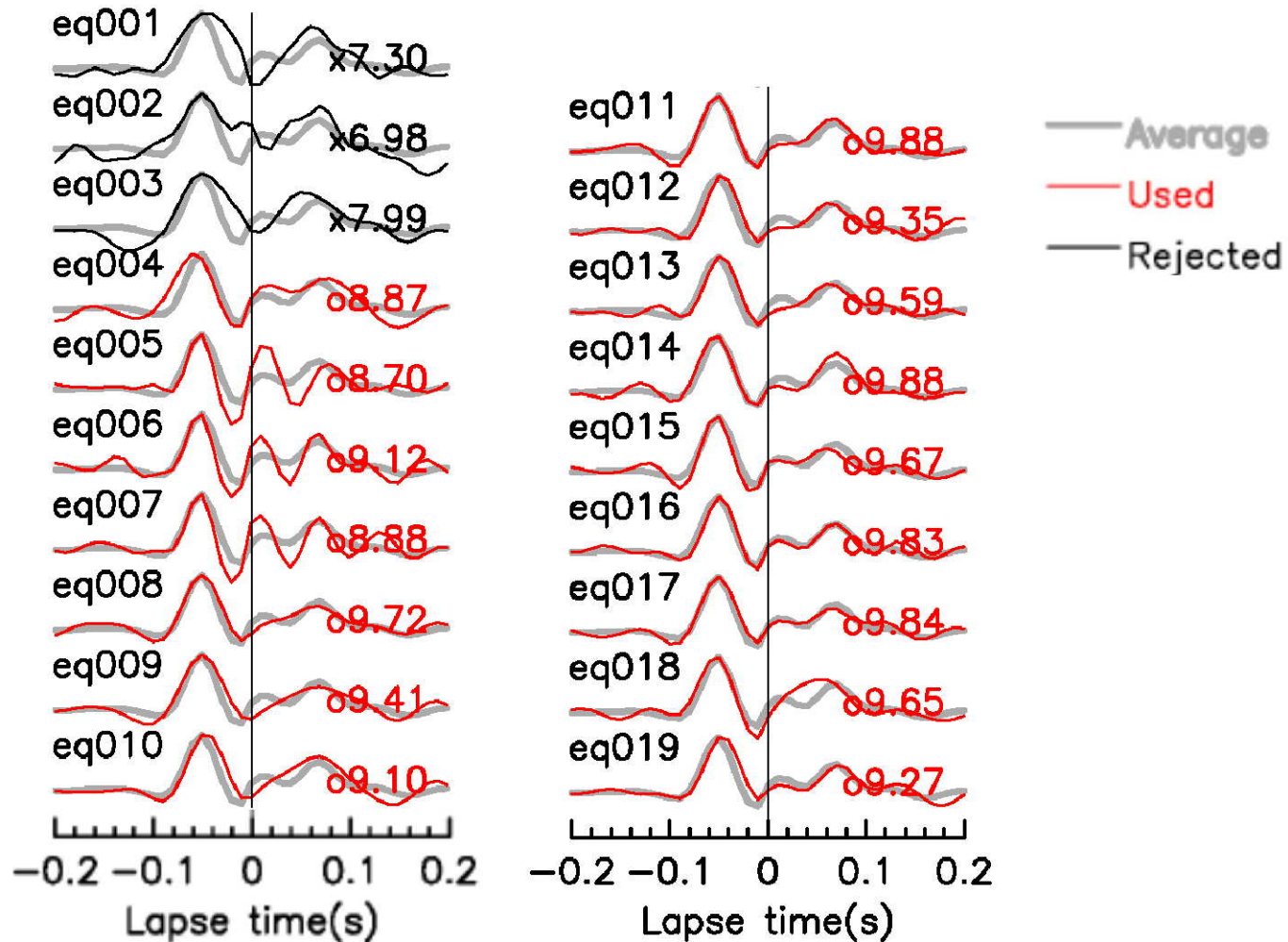


GOFの例
(赤線を抽出、黒線を除外)

3.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

■ GOFによる波形の抽出結果

- Anderson (2004)¹⁰⁾の指標に基づき、スタックしたデコンボリューション波形と各地震の波形の一致度が高い16地震の波形を抽出。

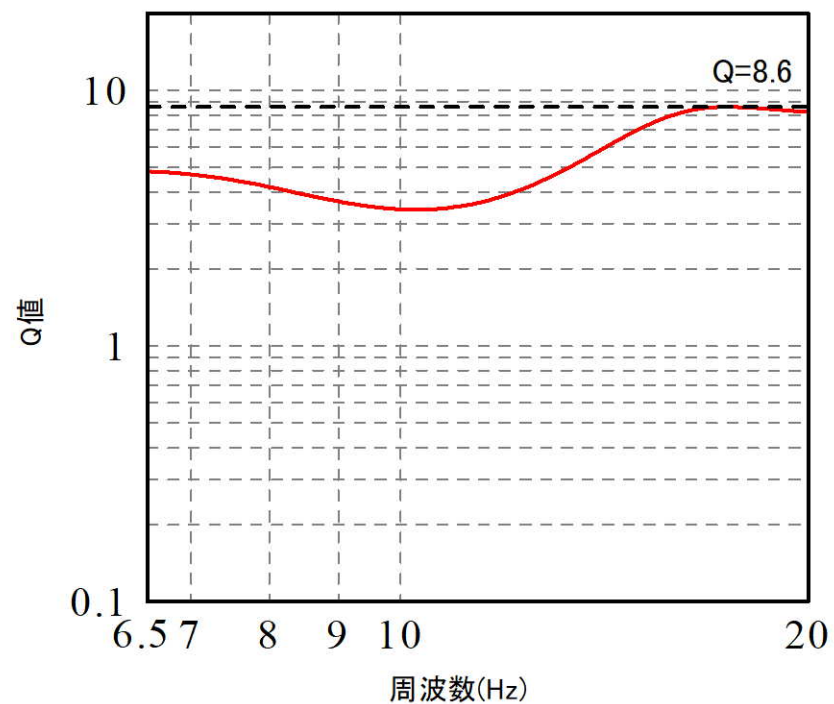


スタックした波形と各地震の波形の相関

3.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

■ 地盤減衰 (Q値) の同定結果

- 地震波干渉法により推定された地盤減衰 (Q値) の上限は $Q=8.6$ 程度。



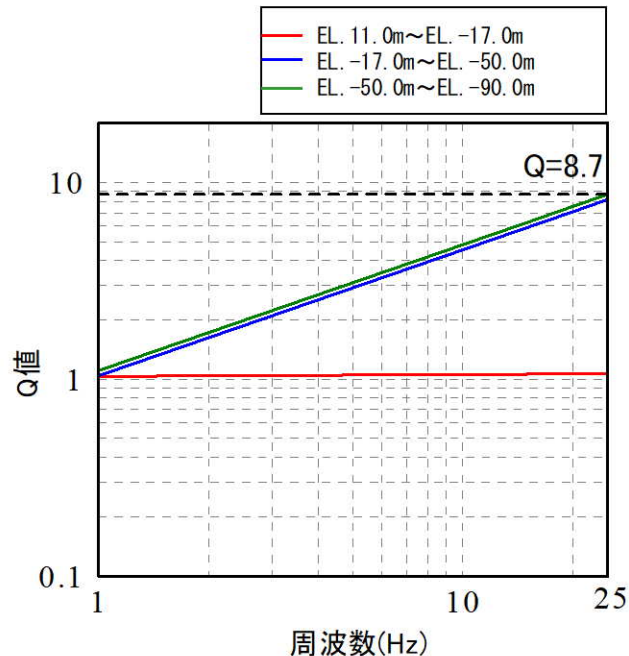
地震波干渉法により推定された地盤減衰(EL.11.0m~EL.-90.0m)

3.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

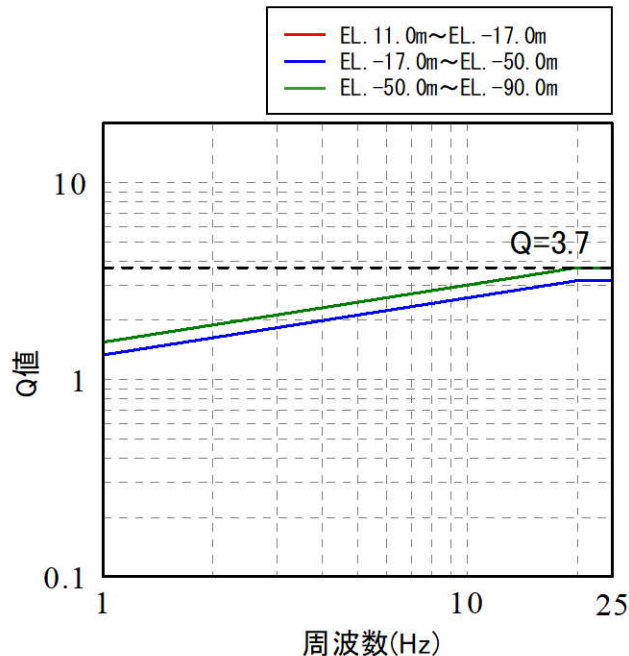
(2) 地盤減衰 (Q値) の設定

- 地盤減衰 (Q値) の検討における解析に含まれる不確かさについては、複数の手法による多面的な検討を実施することにより考慮。
- 地盤減衰 (Q値) は、地震観測記録に基づき検討を実施。地震は自然現象であり、これまでに取得している地震観測記録は限られていることから、不確かさを考慮し、周波数に依存せず、 $Q=12.5$ と保守的に設定。
- なお、鉛直方向の地盤減衰 (Q値) は、29頁に示した通り、水平方向に比べ小さい傾向であるが、水平方向及び鉛直方向ともに同一の地盤減衰 (Q値) を設定しており、水平方向に比べ十分な保守性を有している。

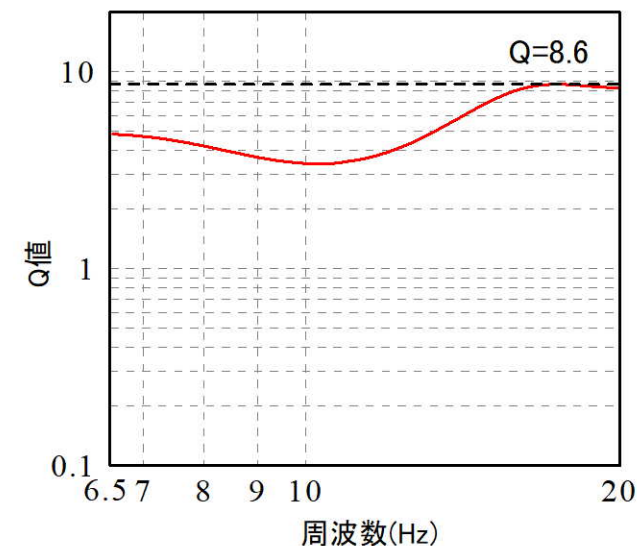
| 検討手法 | 伝達関数による検討 (周波数依存型) | 伝達関数による検討 (バイリニア型) | 地震波干渉法による検討 |
|---------------|-----------------------|-----------------------|-------------|
| 検討結果 (上限値) | $Q=8.7$ 程度 | $Q=3.7$ 程度 | $Q=8.6$ 程度 |



伝達関数(周波数依存型)により同定された地盤減衰(EW:EL.11.0m~EL.-90.0m)



伝達関数(バイリニア型)により同定された地盤減衰(EL.11.0m~EL.-90.0m)



地震波干渉法により推定された地盤減衰(EL.11.0m~EL.-90.0m)

3.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

(3) 地盤減衰 (Q値) の妥当性確認

■ 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値) の妥当性確認方針

- 前節の通り、最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値) は、複数の手法による検討結果に不確かさを考慮して設定。
- 本節では、下表の方法により、地盤減衰 (Q値) の設定の妥当性を確認。

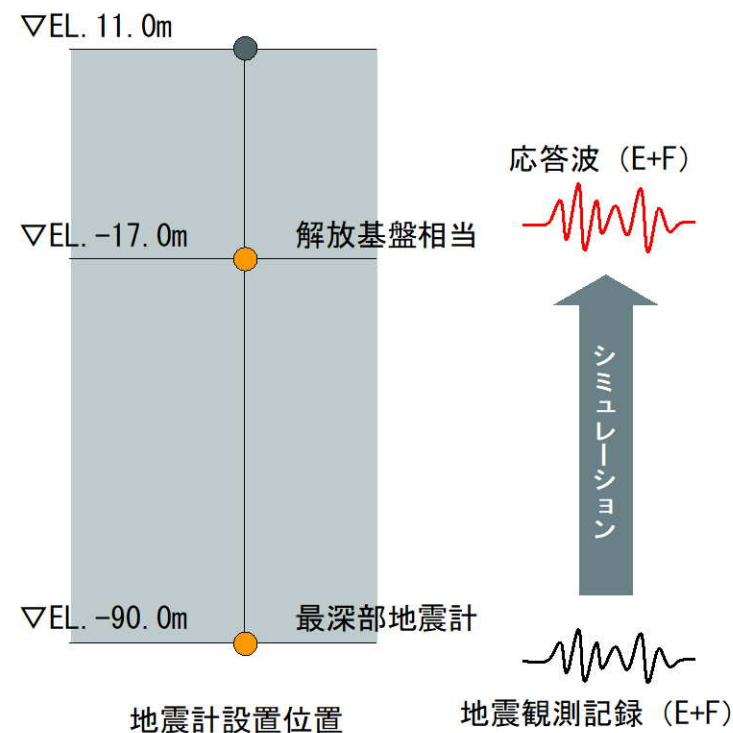
| 確認方法 | 対象深度EL. (m) | | 比較方法 | 比較対象 | | 確認する観点 |
|------------------|-----------------------|---------------|-------------|-----------------------------|-----------------------------|---|
| | -15.0 | -90.0 -200 | | | | |
| 応答スペクトル による確認 | EL. -15.0m~EL. -90.0m | | 応答 スペクトル | 伝達関数 (周波数依存型) による同定結果 | 地震観測記録 (解放基盤相当) | 同定結果による応答波の応答スペクトルが、地震観測記録の応答スペクトルと同等。 |
| | EL. -15.0m~EL. -90.0m | | 応答 スペクトル | Q=12.5 | 地震観測記録 (解放基盤相当) | Q=12.5の応答波の応答スペクトルが、地震観測記録の応答スペクトルと同等もしくは上回る。 |
| 伝達関数 による確認 | EL. -15.0m~EL. -90.0m | | 理論 伝達関数 | Q=12.5 | 伝達関数 (周波数依存型) による同定結果 | 卓越周波数において、Q=12.5による理論伝達関数の方が、同定結果による理論伝達関数より大きなピークを有する。 |

3.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

a. 応答スペクトルによる確認

- 最深部地震計 (EL. -90.0m) で得られた地震観測記録を入力*とし、1次元波動論に基づき、推定した応答波 (EL. -17.0m) *の応答スペクトルと同位置の地震計で得られた地震観測記録の応答スペクトルとの比較を実施。(44~53頁参照)
- 前節で設定した $Q=12.5$ の妥当性を以下の観点で確認した。
 - 伝達関数 (周波数依存型) の同定結果による応答波の応答スペクトルが、地震観測記録の応答スペクトルと同等。
 - $Q=12.5$ の応答波の応答スペクトルが、地震観測記録の応答スペクトルと同等もしくは上回る。
- なお、 $Q=12.5$ の応答波の応答スペクトルが、地震観測記録の応答スペクトルを下回る地震 (⑩熊本県熊本地方の地震 (EW方向)) について、特異な地震観測記録であることを確認し、地下構造モデルの妥当性に影響はないと判断した。(補足②参照)

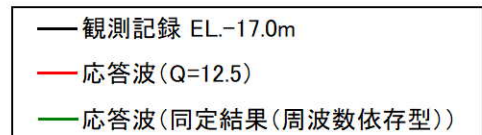
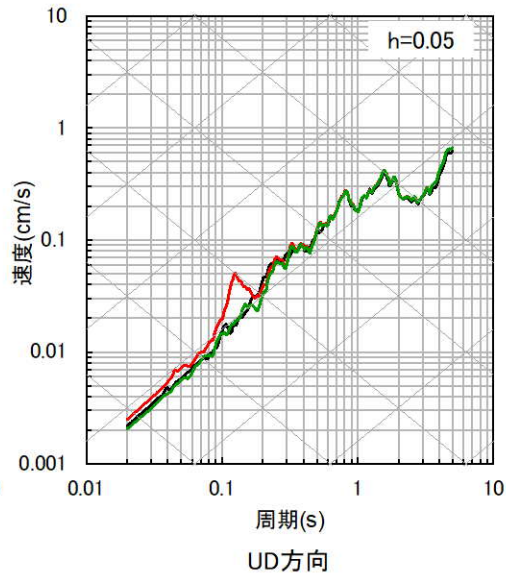
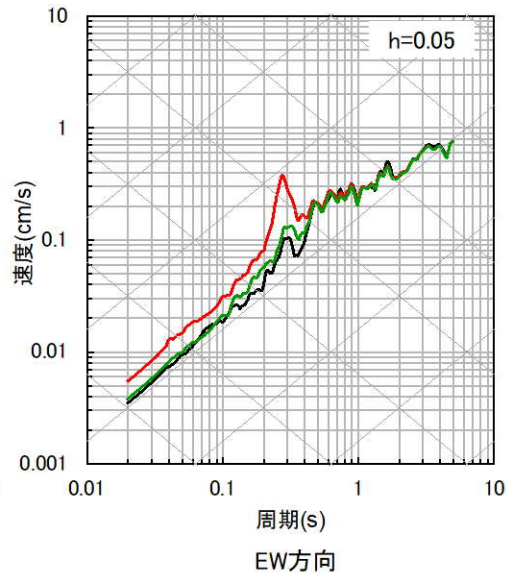
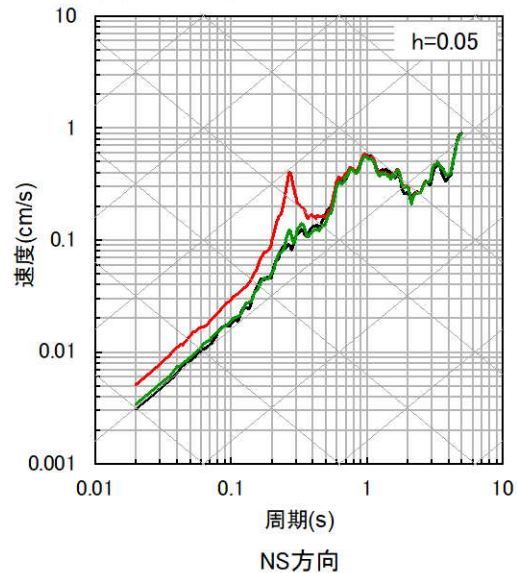
*入力 of 最深部地震計 (EL. -90.0m) で得られた地震観測記録及び出力 of 解放基盤相当 (EL. -17.0m) での応答波は地中記録のため、E+Fで評価



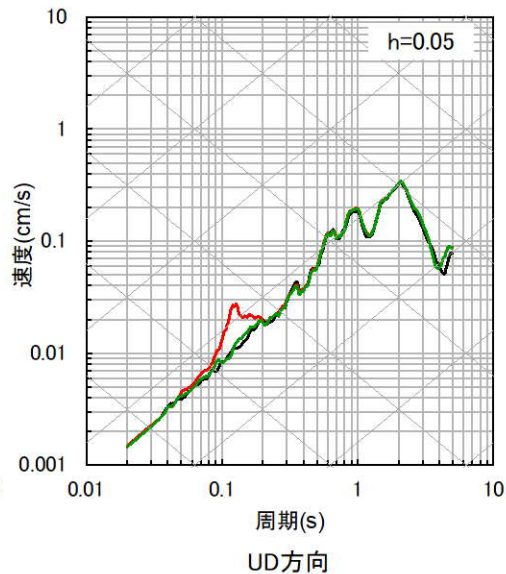
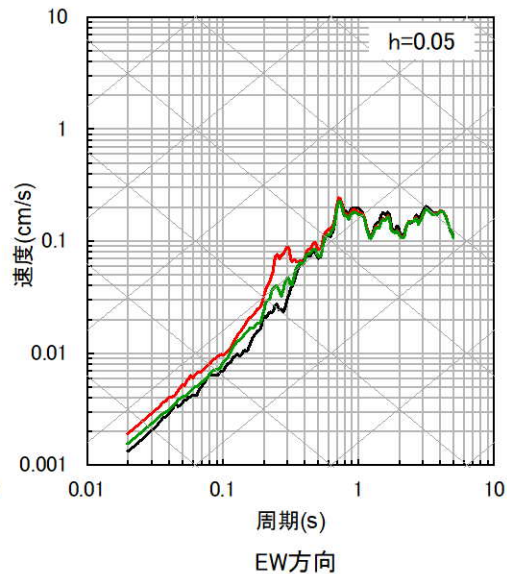
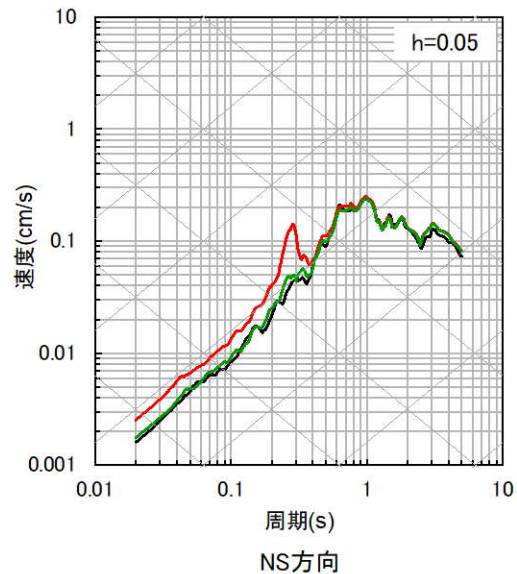
3.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

■ 応答スペクトルの比較結果 (1/10)

① 鹿児島県北西部



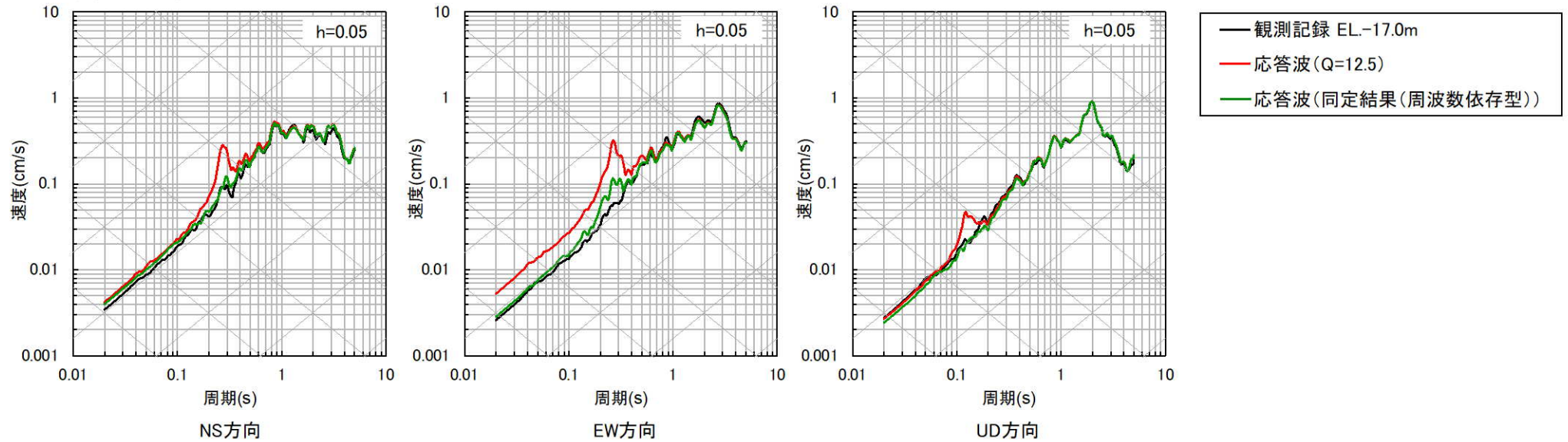
② 鹿児島県北西部



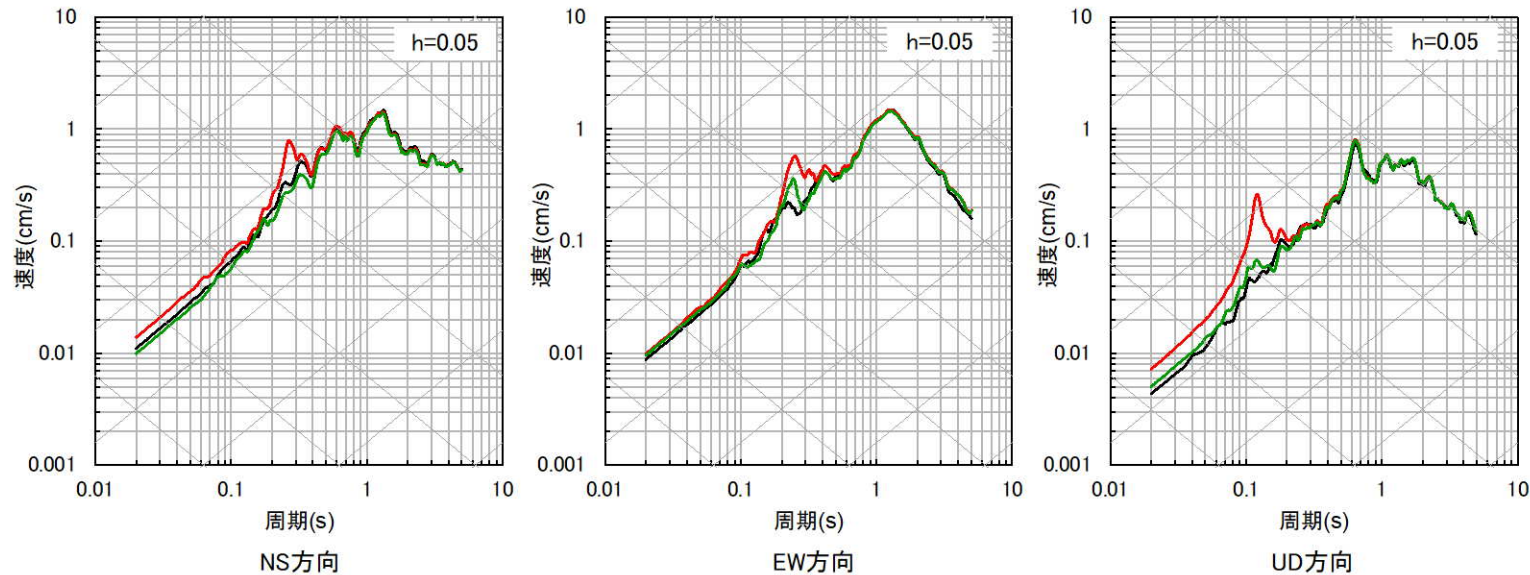
3.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

■ 応答スペクトルの比較結果 (2/10)

③ 鹿児島県北西部



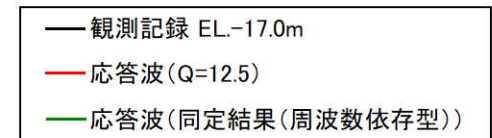
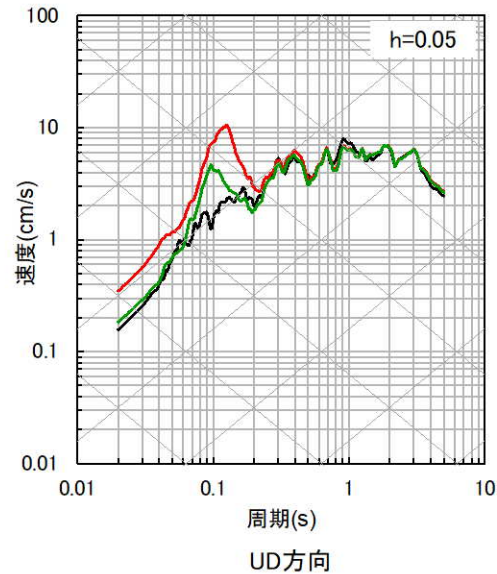
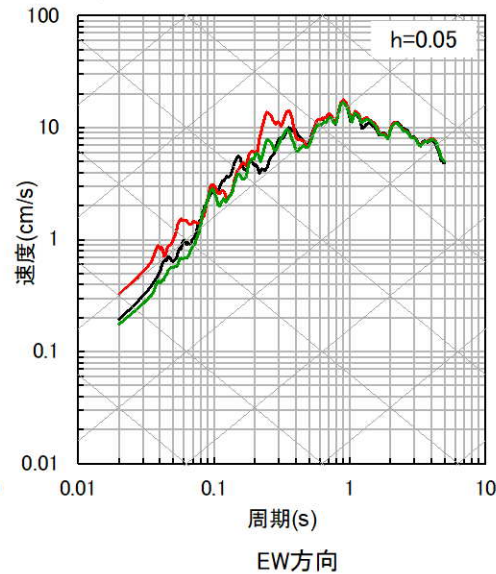
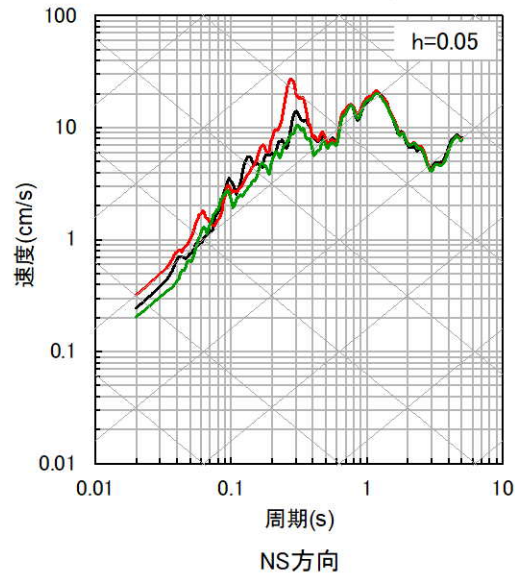
④ 山口県



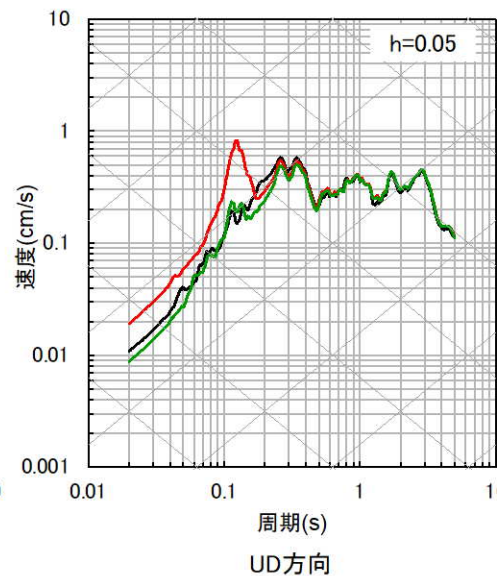
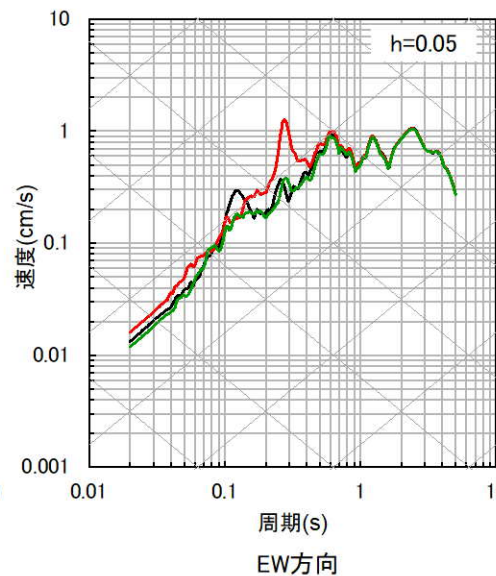
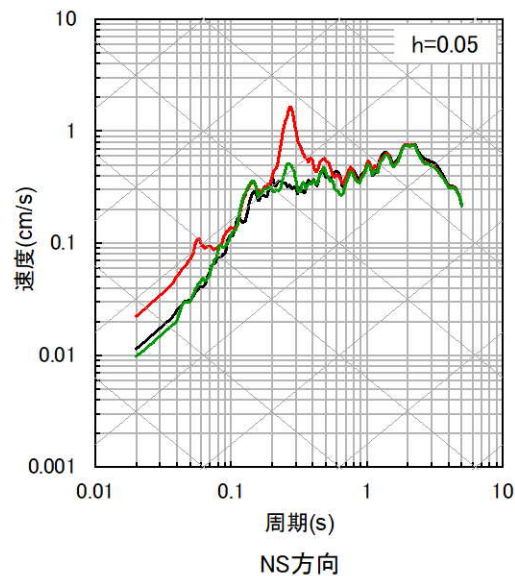
3.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

■ 応答スペクトルの比較結果 (3/10)

⑤九州北西沖 (2005年福岡県西方沖地震本震)



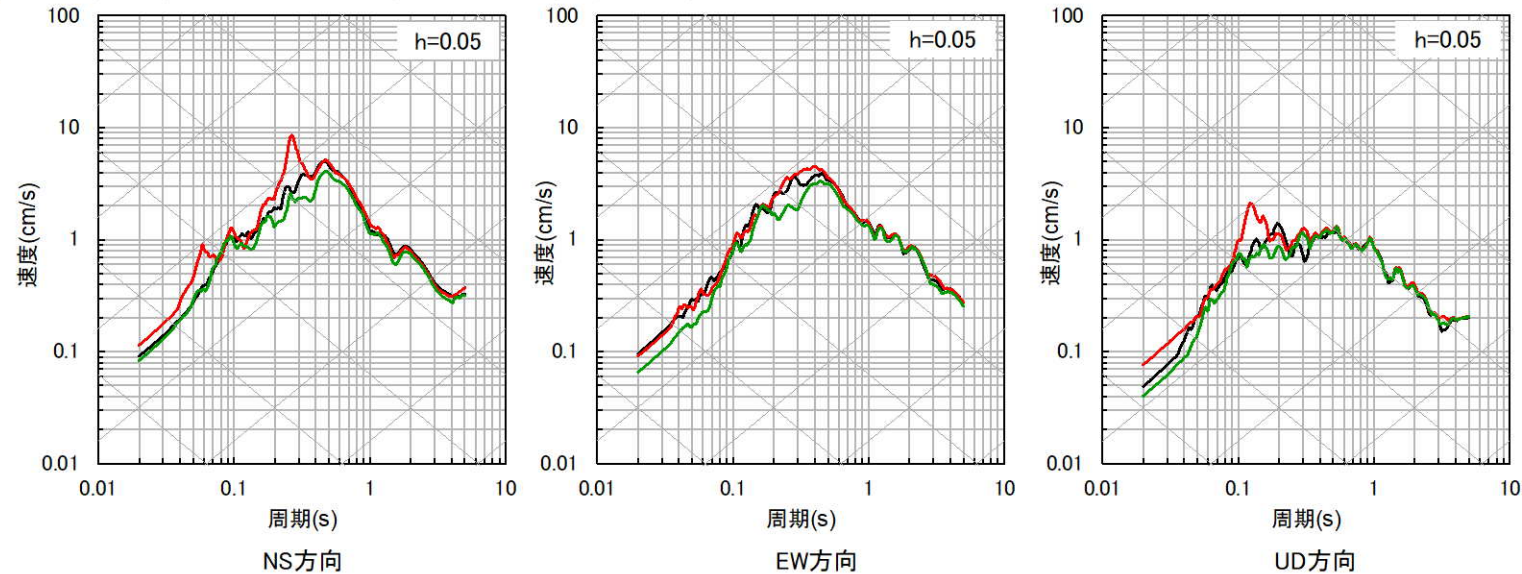
⑥九州北西沖



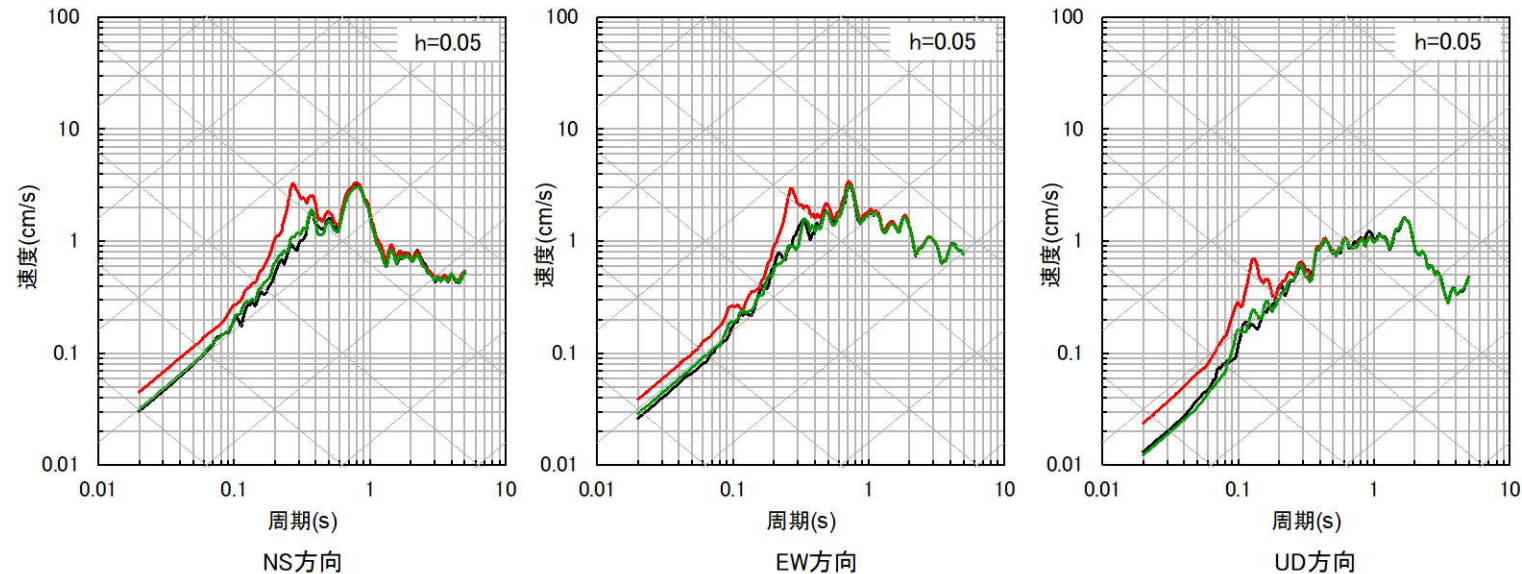
3.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

■ 応答スペクトルの比較結果 (4/10)

⑦福岡県中部 (2005年福岡県西方沖地震最大余震)



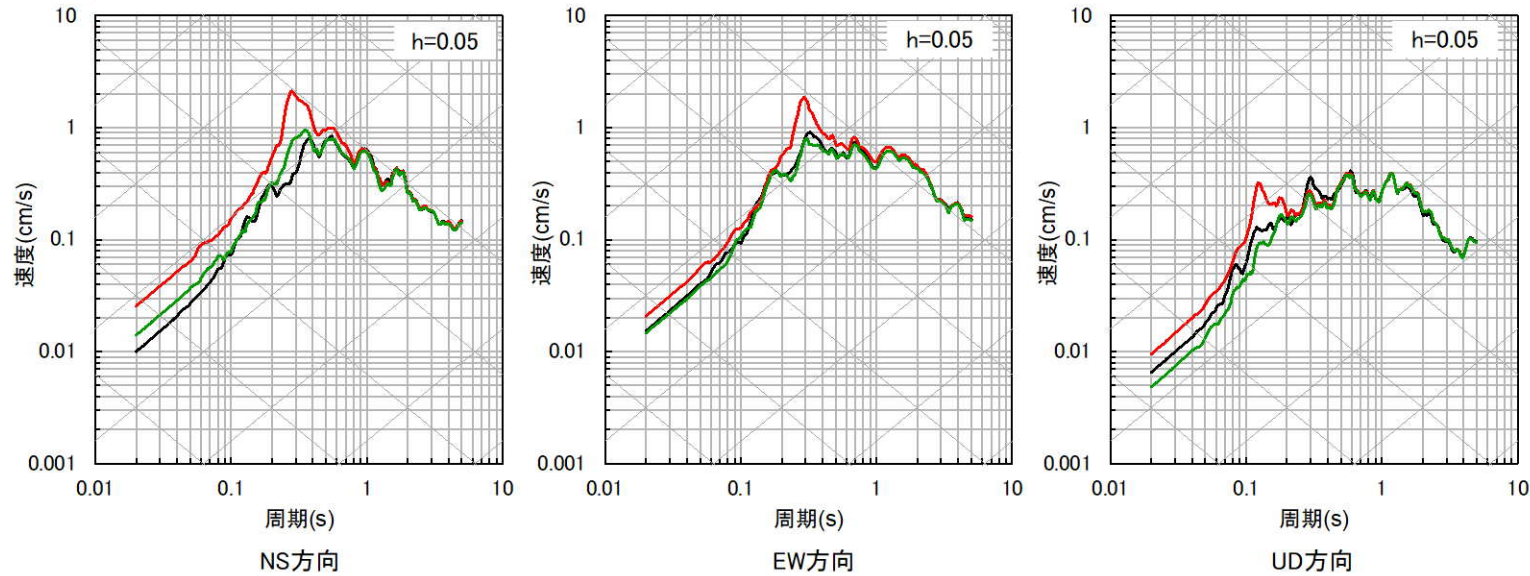
⑧熊本県熊本地方 (2016年熊本地震前震)



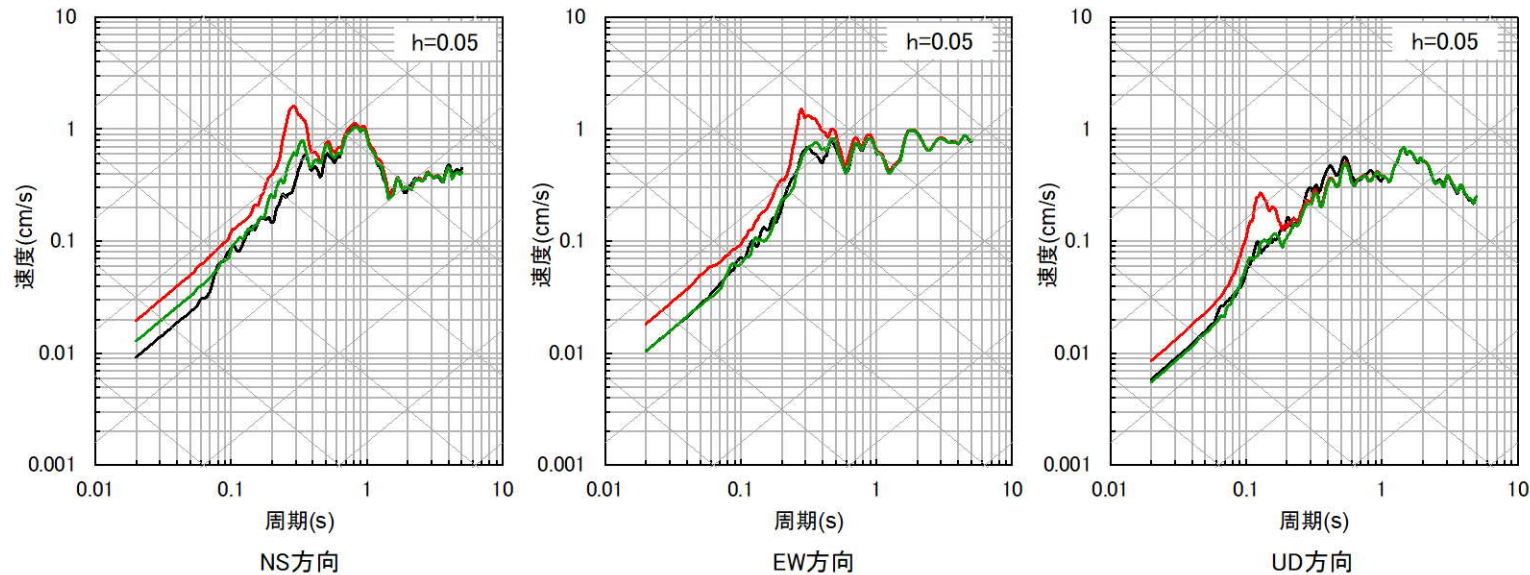
3.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

■ 応答スペクトルの比較結果 (5/10)

⑨ 熊本県熊本地方



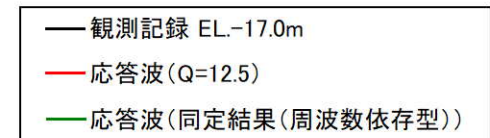
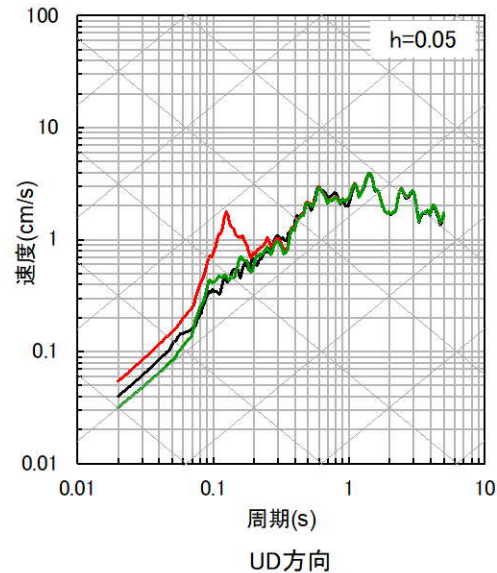
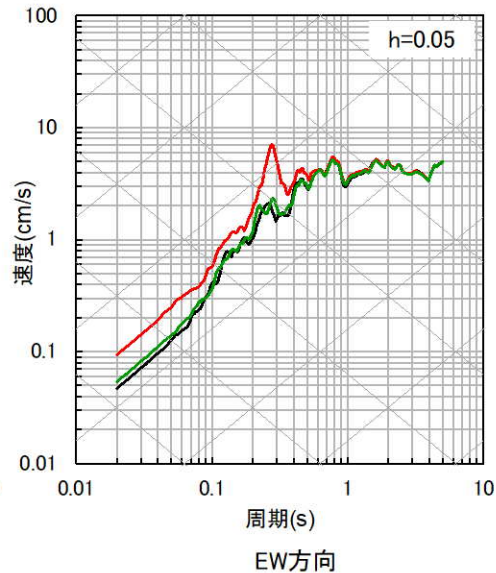
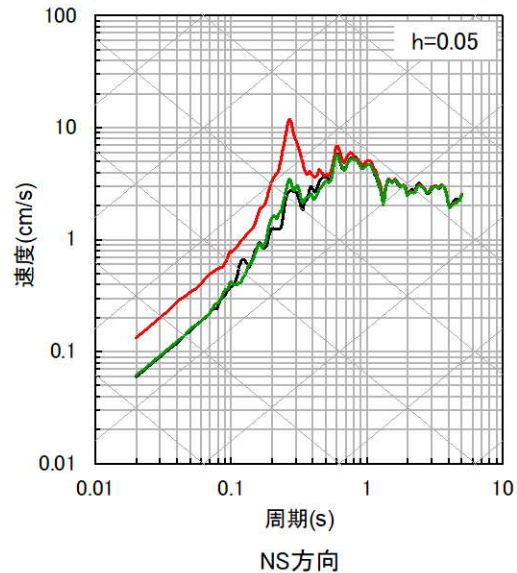
⑩ 熊本県熊本地方



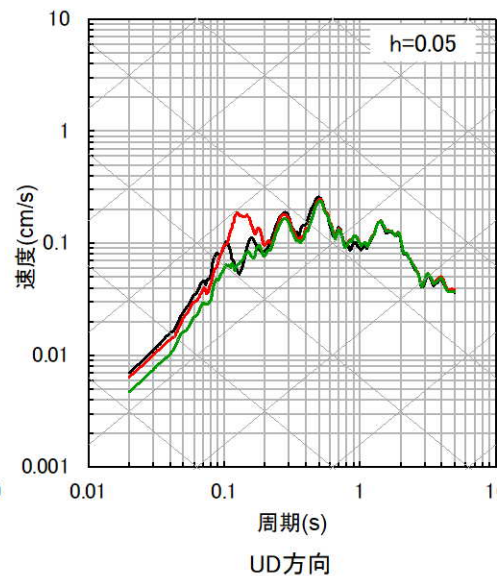
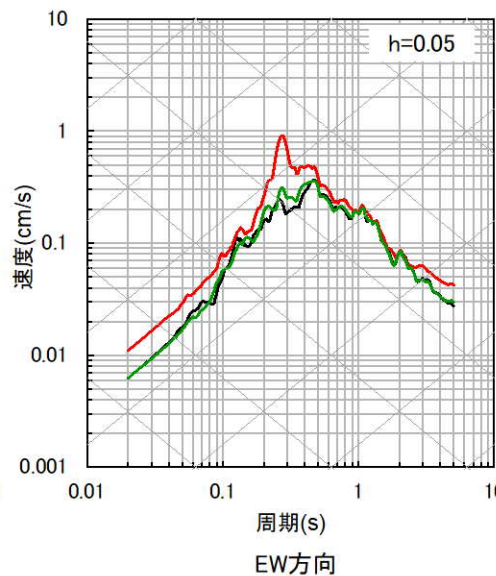
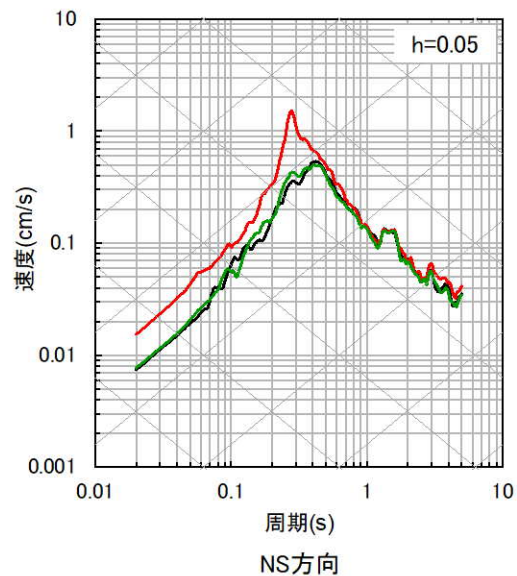
3.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

■ 応答スペクトルの比較結果 (6/10)

⑪ 熊本県熊本地方 (2016年熊本地震本震)



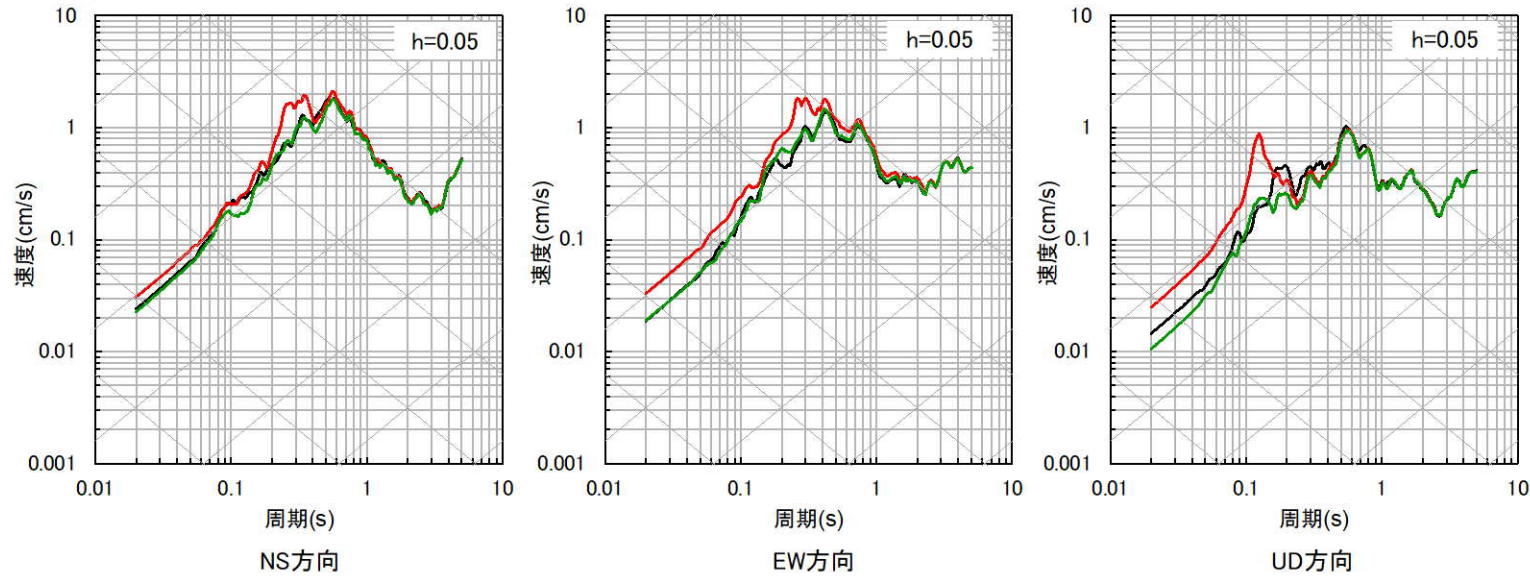
⑫ 熊本県熊本地方



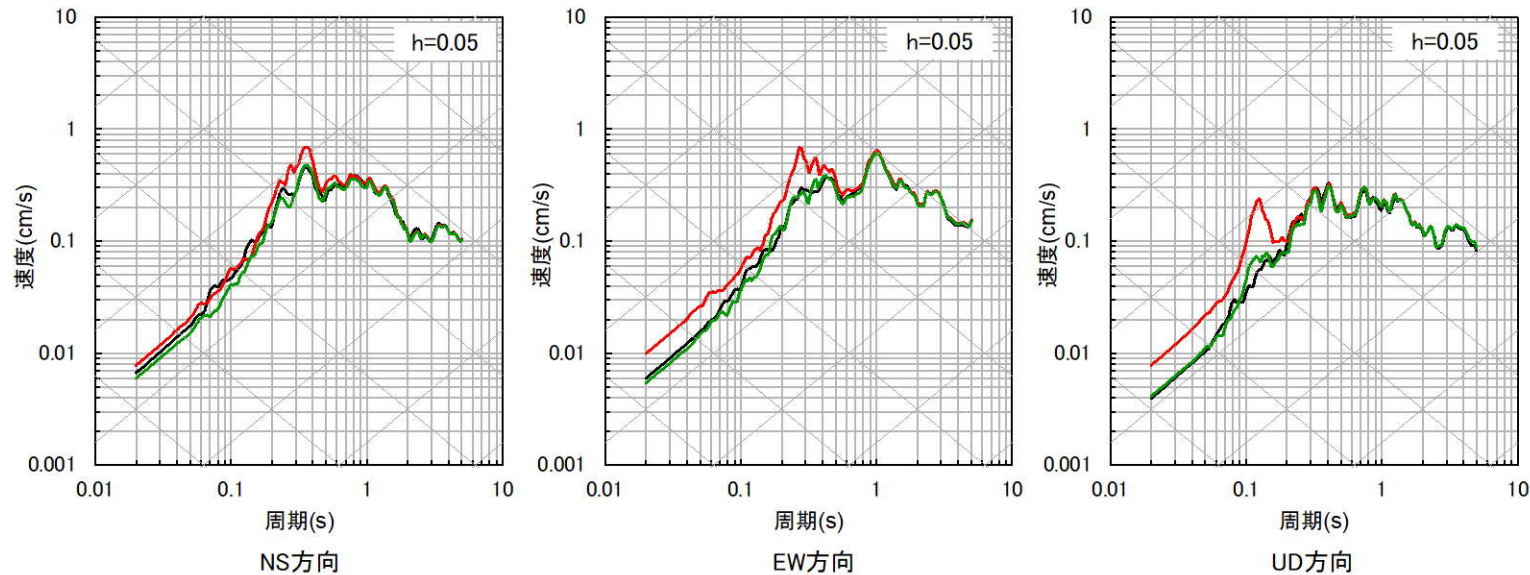
3.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

■ 応答スペクトルの比較結果 (7/10)

⑬ 熊本県熊本地方



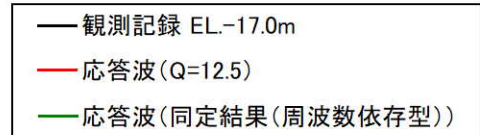
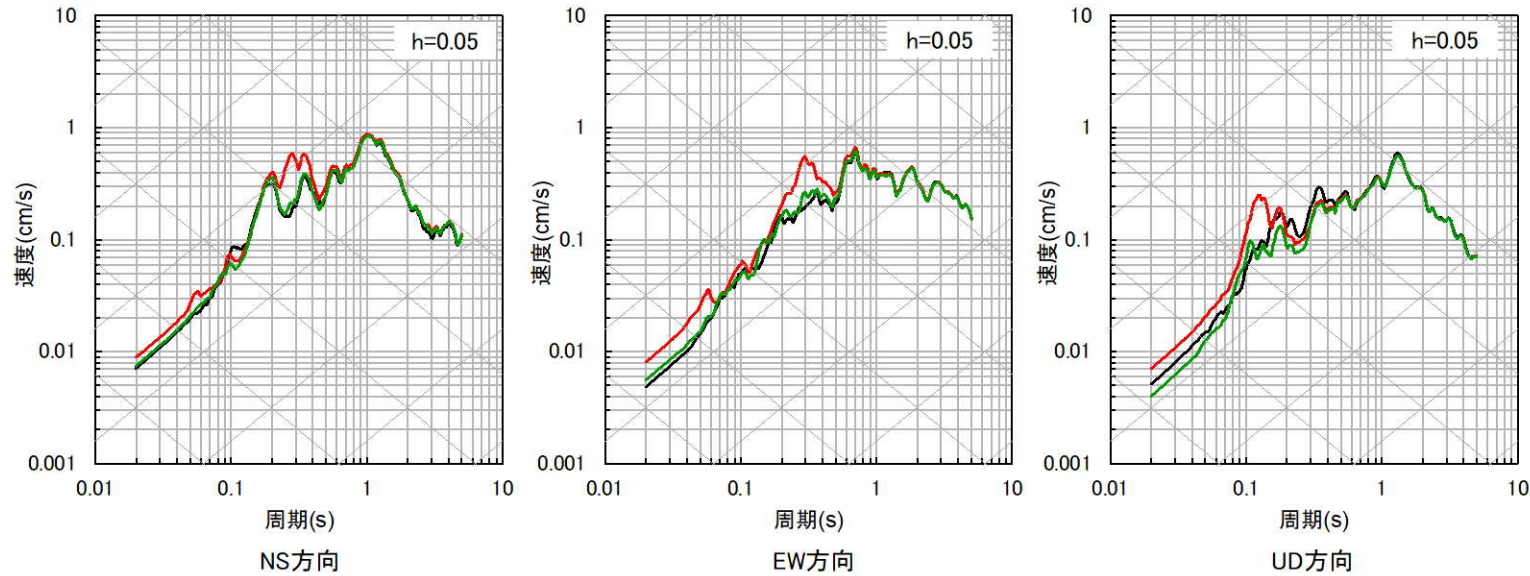
⑭ 熊本県阿蘇地方



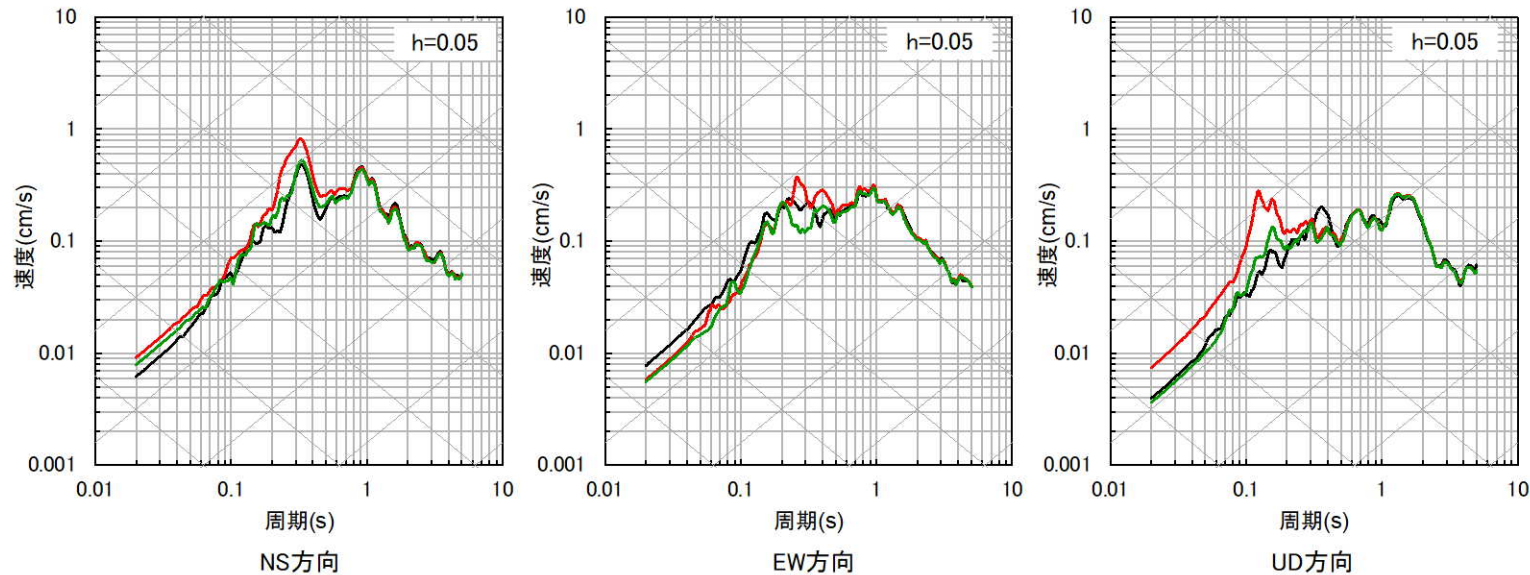
3.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

■ 応答スペクトルの比較結果 (8/10)

⑮ 熊本県阿蘇地方



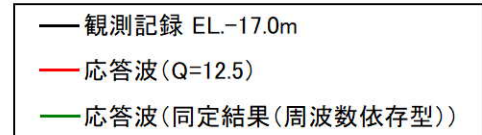
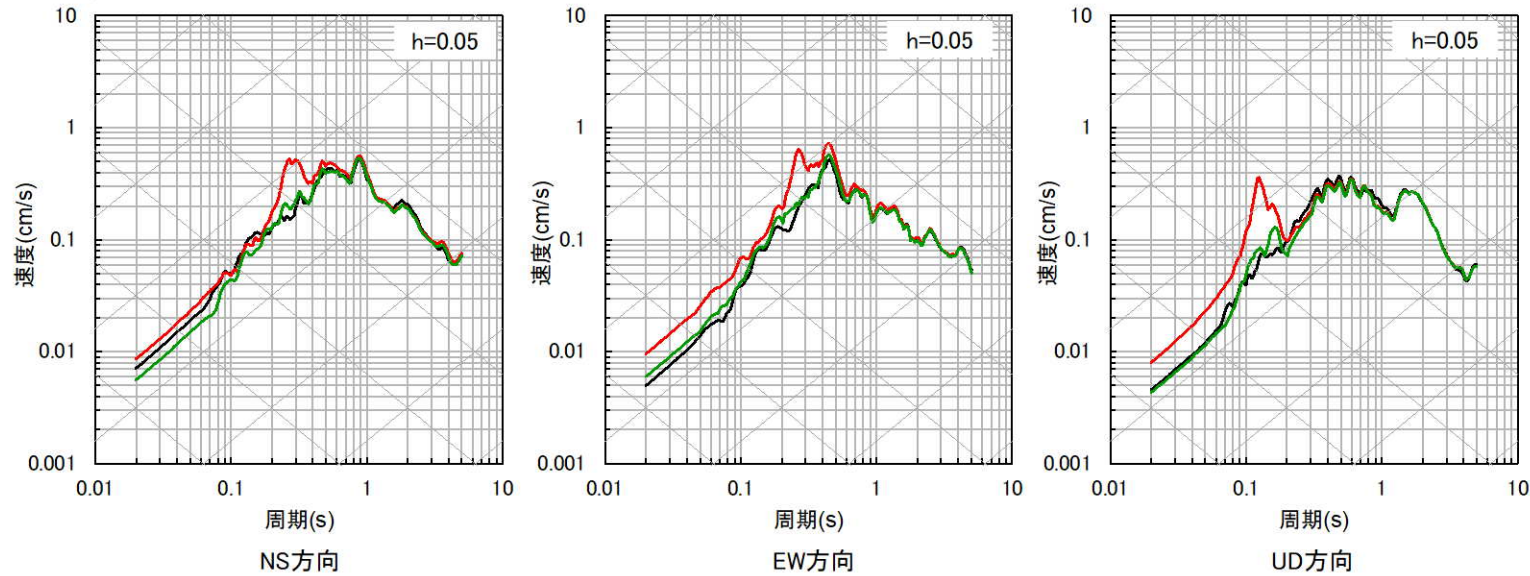
⑯ 熊本県熊本地方



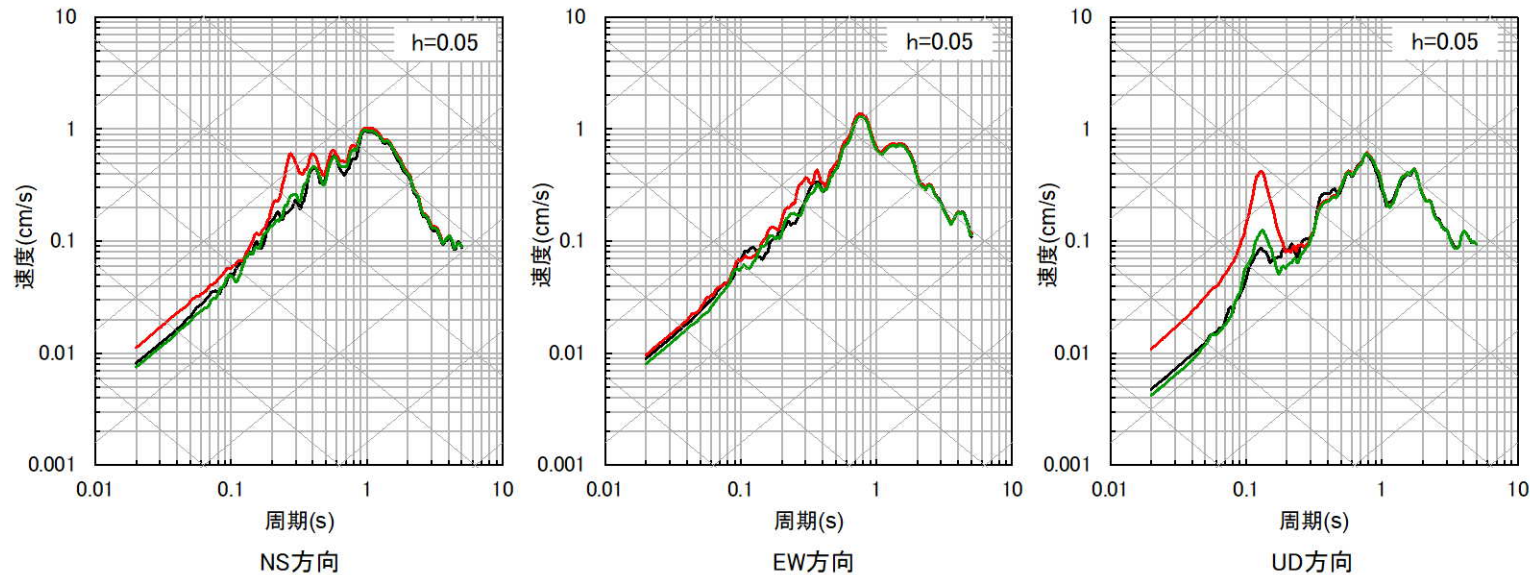
3.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

■ 応答スペクトルの比較結果 (9/10)

⑰ 熊本県熊本地方



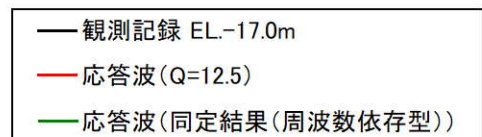
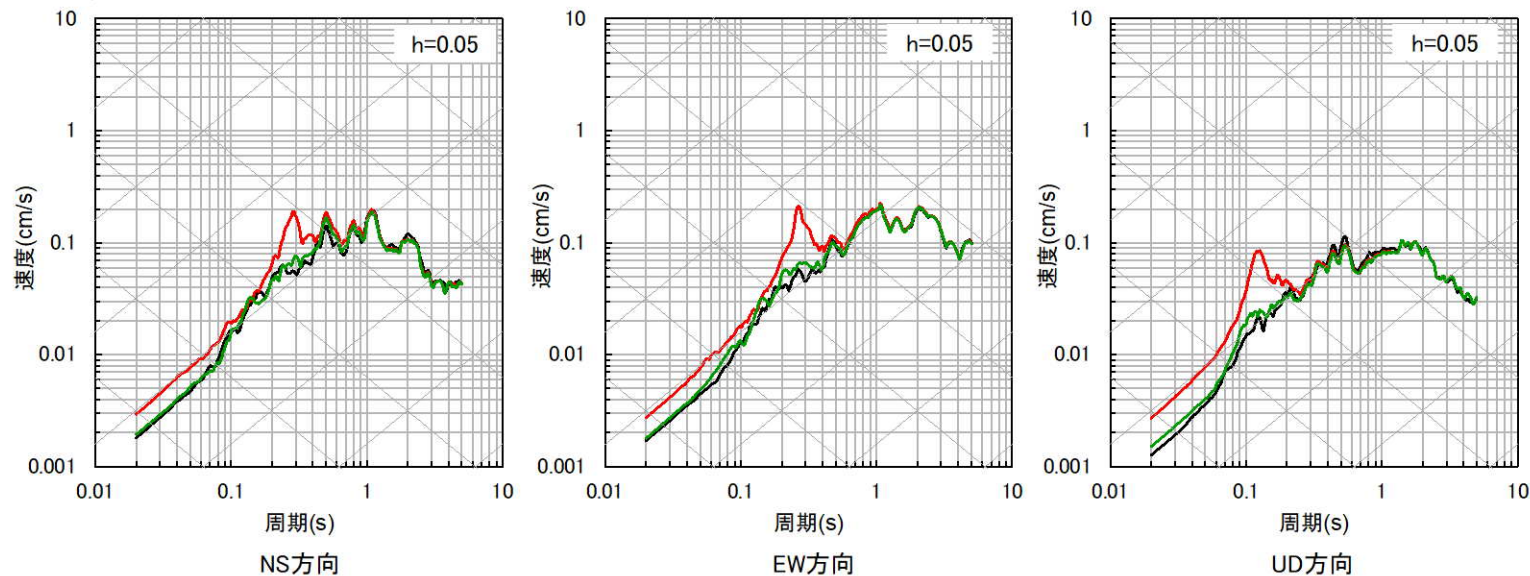
⑱ 熊本県阿蘇地方



3.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

■ 応答スペクトルの比較結果 (10/10)

⑬ 熊本県熊本地方



3.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

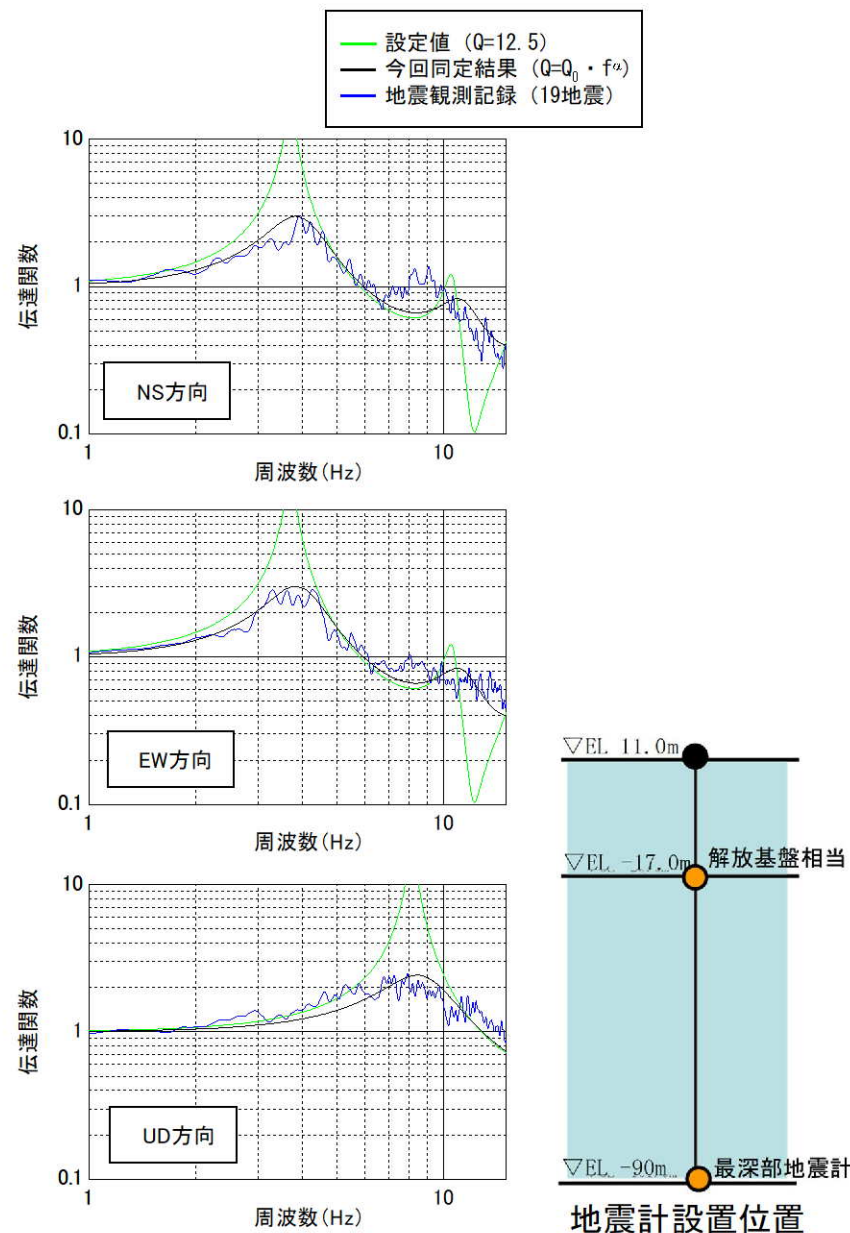
b. 伝達関数による確認

- 今回設定した地盤減衰 (Q=12.5) による理論伝達関数と伝達関数 (周波数依存型) により同定した地盤減衰による理論伝達関数との比較を実施。
- その結果、今回設定した地盤減衰 (Q=12.5) による理論伝達関数のほうが卓越周波数において大きなピークを有することを確認した。

地下構造モデル (Q=12.5)

| EL. (m) | 密度 ρ (g/cm ³) | Vs (m/s) | Vp (m/s) | Q値 |
|---------|--------------------------------|----------|----------|------|
| 11m | 2.35 | 1350 | 3000 | 12.5 |
| -15m | 2.35 | 1350 | 3000 | 12.5 |
| -50m | 2.35 | 1570 | 3440 | 12.5 |
| -100m | | | | |

※解放基盤表面 (EL. -15m) 上に層を追加



伝達関数の比較
(EL.-17.0m/EL.-90.0m)

※観測記録及び理論の伝達関数はParzen Window 0.2Hzでスムージング


3.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰（Q値）

「3.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰（Q値）」のまとめ

- 既許可以降継続的に取得している鉛直アレイの地震観測記録や最新の知見に基づく評価により、地盤減衰（Q値）の精度・信頼性の向上が見込まれるため、地盤減衰（Q値）を対象に評価を実施。
- 地盤減衰（Q値）は、周波数依存が認められ、高周波数になるほど地盤減衰（Q値）が増加する性質やある周波数で上限が存在する性質を踏まえた地盤減衰（Q値）の関数モデルに速度構造を加えた地下構造モデルを用い、伝達関数による検討を実施。
- 伝達関数による検討に加え、地下構造モデルを用いず、鉛直アレイ地震観測記録から地盤減衰（Q値）を直接推定可能な地震波干渉法による検討も実施。
- 上記検討で得られた地盤減衰（Q値）を基に、これまでに取得している地震観測記録は限られていることの不確かさを考慮し、周波数に依存せず、 $Q=12.5$ と保守的に設定。
- 設定した地盤減衰（Q値）の妥当性確認のため、最深部地震計の観測記録と解放基盤相当における観測記録を用いて、応答スペクトルによる確認及び伝達関数による確認を実施し、妥当性を確認。

3.2.2 最深部地震計以深の地盤減衰（Q値）

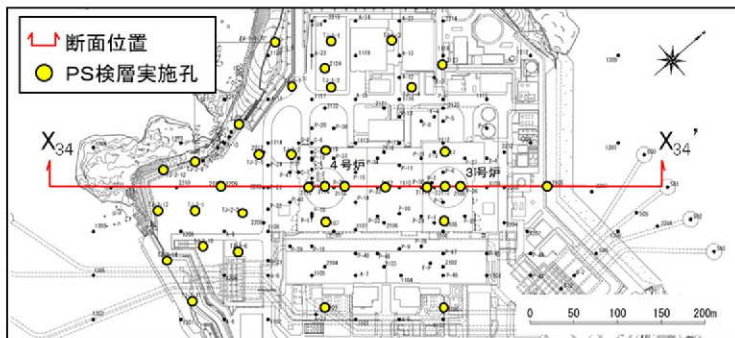
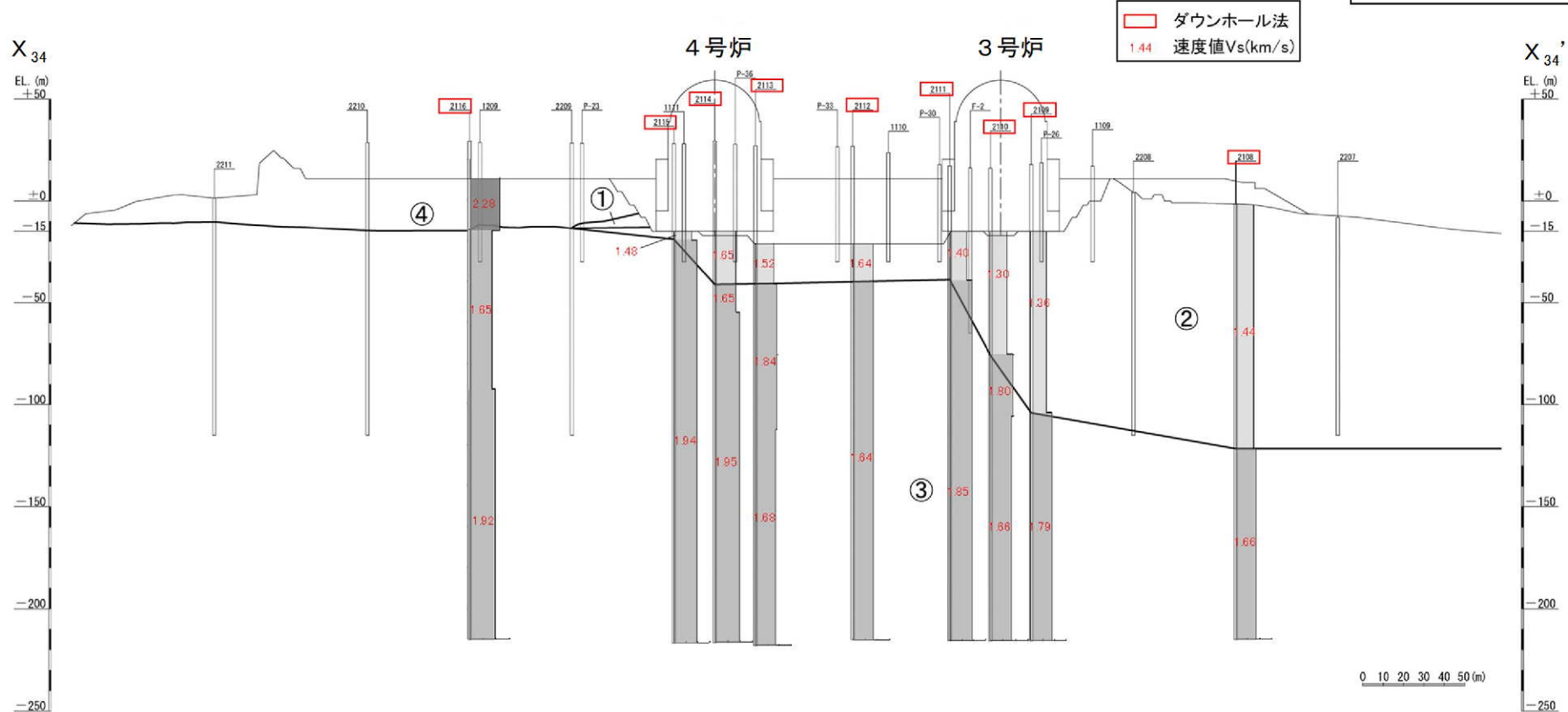
（1）地盤減衰（Q値）の検討

- 最深部地震計以深の地盤減衰（Q値）について、速度層断面を基に検討を実施する。
 - 原子炉設置位置付近の既存の速度層断面により、解放基盤表面からEL. -200mまでの範囲は概ね同じ速度層に分類されることを確認する。
- 
- 原子炉設置位置付近の既存の速度層断面では、解放基盤表面からEL. -200mまでは概ね②、③速度層に分類されており、最深部地震計（EL. -90.0m）以浅と最深部地震計以深の速度に大きな差異が見られないことを確認した。（57～59頁参照）

3.2.2 最深部地震計以深の地盤減衰（Q値）

第402回
審査会合資料
(一部修正※)

速度構造について (X₃₄-X_{34'} 断面) (S波速度)



| 速度層区分 | V _s (km/s) |
|-------|-----------------------|
| ① | 0.79 |
| ② | 1.44 |
| ③ | 1.80 |
| ④ | 2.03 |

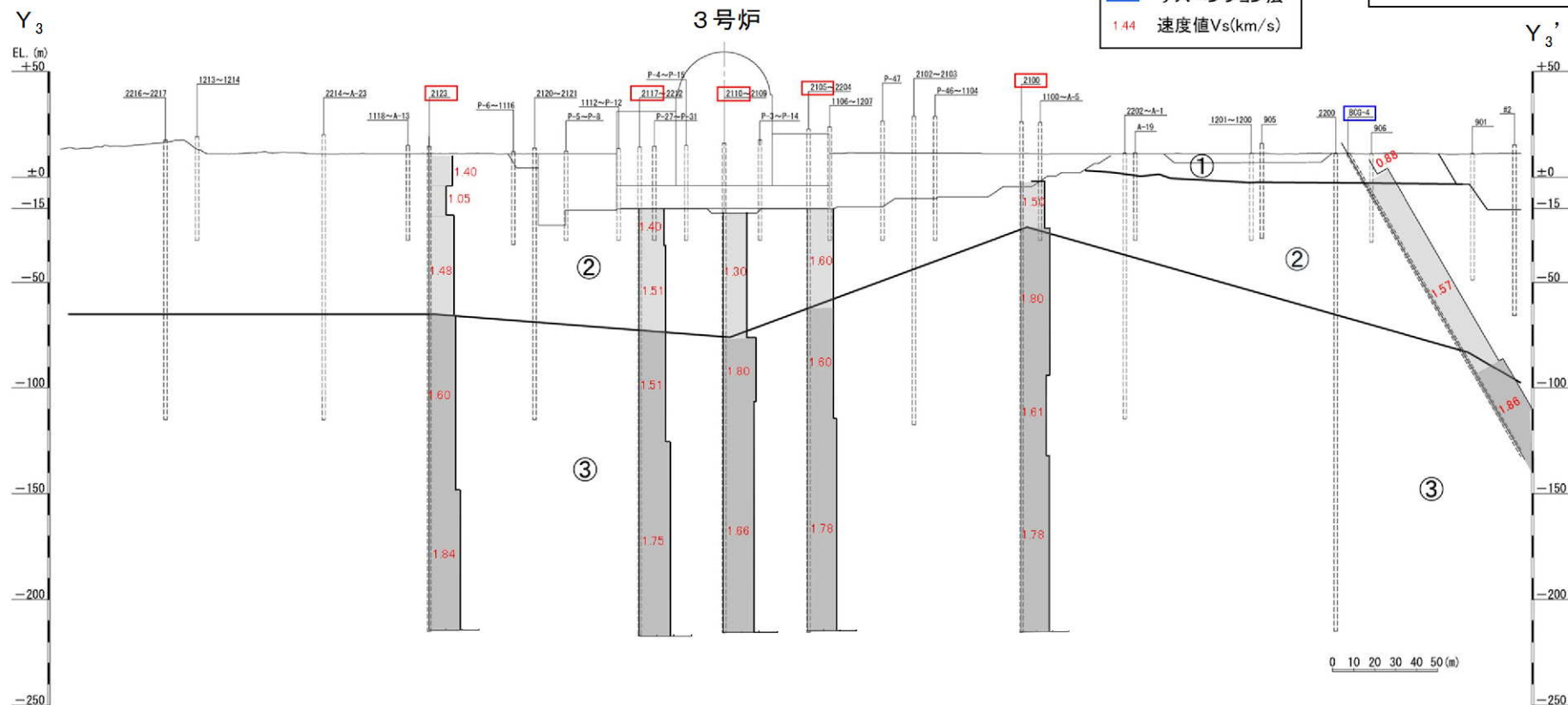
- ・原子炉基礎地盤は浅部でも速い速度 (Vs=約1.4~1.8km/s) を示す。
- ・速度構造に極端なコントラストを示す領域は存在しない。

※ H31.4許可の設置変更許可申請書の情報への更新 (①速度層境界の表示、②地形の変更)

3.2.2 最深部地震計以深の地盤減衰 (Q値)

第402回
審査会合資料
(一部修正※)

速度構造について (Y₃-Y₃' 断面) (S波速度)



| 速度層区分 | V _s (km/s) |
|-------|-----------------------|
| ① | 0.79 |
| ② | 1.44 |
| ③ | 1.80 |
| ④ | 2.03 |

- ・ 原子炉基礎地盤は浅部でも速い速度 (Vs=約1.4~1.8km/s) を示す。
- ・ 速度構造に極端なコントラストを示す領域は存在せず、おおむね水平な速度構造と評価される。

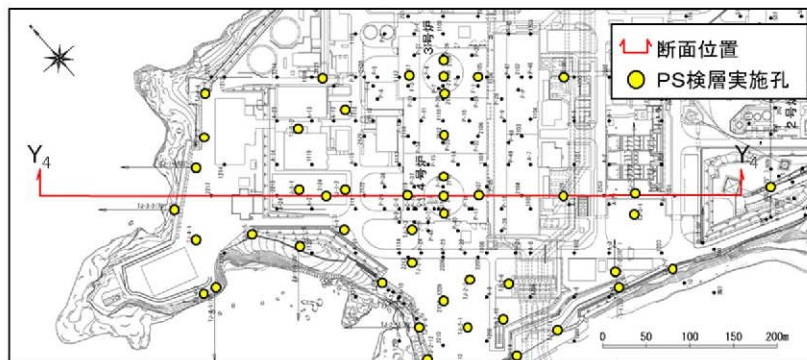
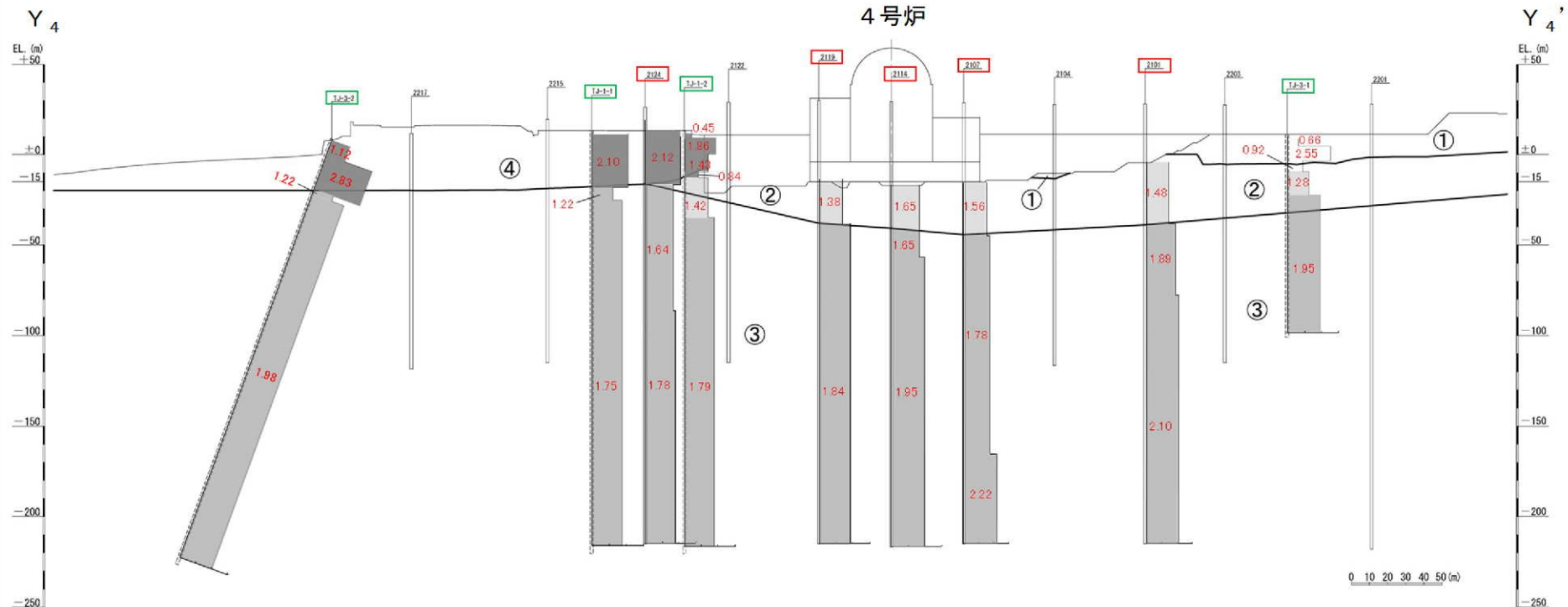
※ H31.4許可の設置変更許可申請書の情報への更新 (①速度層境界の表示、②地形の変更)

3.2.2 最深部地震計以深の地盤減衰 (Q値)

第402回
審査会合資料
(一部修正※)

速度構造について (Y₄-Y₄'断面) (S波速度)

ダウンホール法
 ダウンホール法+サスペンション法
 1.44 速度値Vs(km/s)



| 速度層区分 | V _s (km/s) |
|-------|-----------------------|
| ① | 0.79 |
| ② | 1.44 |
| ③ | 1.80 |
| ④ | 2.03 |

- ・ 原子炉基礎地盤は浅部でも速い速度 (Vs=約1.4~1.8km/s) を示す。
- ・ 速度構造に極端なコントラストを示す領域は存在せず、おおむね水平な速度構造と評価される。

※ H31.4許可の設置変更許可申請書の情報への更新 (①TJ-3-2, TJ-1-1, TJ-1-2, TJ-3-1孔の追加、②速度層境界の変更、③地形の変更)

3.2.2 最深部地震計以深の地盤減衰（Q値）

（2）地盤減衰（Q値）の設定

- 速度層断面による検討の結果、解放基盤表面からEL. -200mまでの範囲は、最深部地震計（EL. -90.0m）以浅と最深部地震計以深の速度に大きな差異が見られないことを確認した。
- 最深部地震計以深の地盤減衰（Q値）は、最深部地震計以浅と同じ $Q=12.5$ と設定する。

3.2.2 最深部地震計以深の地盤減衰（Q値）

（3）地盤減衰（Q値）の妥当性確認

■ 最深部地震計以深の地盤減衰（Q値）の妥当性確認方針

- 前頁の通り、最深部地震計以深の地盤減衰（Q値）は、最深部地震計以浅と最深部地震計以深の速度に大きな差異が見られないことを確認し、設定。
- 本節では、下表の方法により地盤減衰（Q値）の設定の妥当性を確認。

| 確認方法 | 対象深度EL. (m) | | 比較方法 | 比較対象 | | 確認する観点 |
|----------------|----------------------|-------|----------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | -15.0 | -90.0 | | -200 | | |
| ボーリング孔内減衰による確認 | EL. -15.0m~EL. -200m | | 地盤減衰（Q値） | ボーリング孔内測定結果（最深部地震計以浅） | ボーリング孔内測定結果（最深部地震計以深） | 最深部地震計以浅と最深部地震計以深で同等。 |
| 岩石コア減衰による確認 | EL. -15.0m~EL. -200m | | 地盤減衰（Q値） | 岩石コア（最深部地震計以浅） | 岩石コア（最深部地震計以深） | 最深部地震計以浅と最深部地震計以深で同等。 |

3.2.2 最深部地震計以深の地盤減衰（Q値）

a. ボーリング孔内における減衰測定による確認

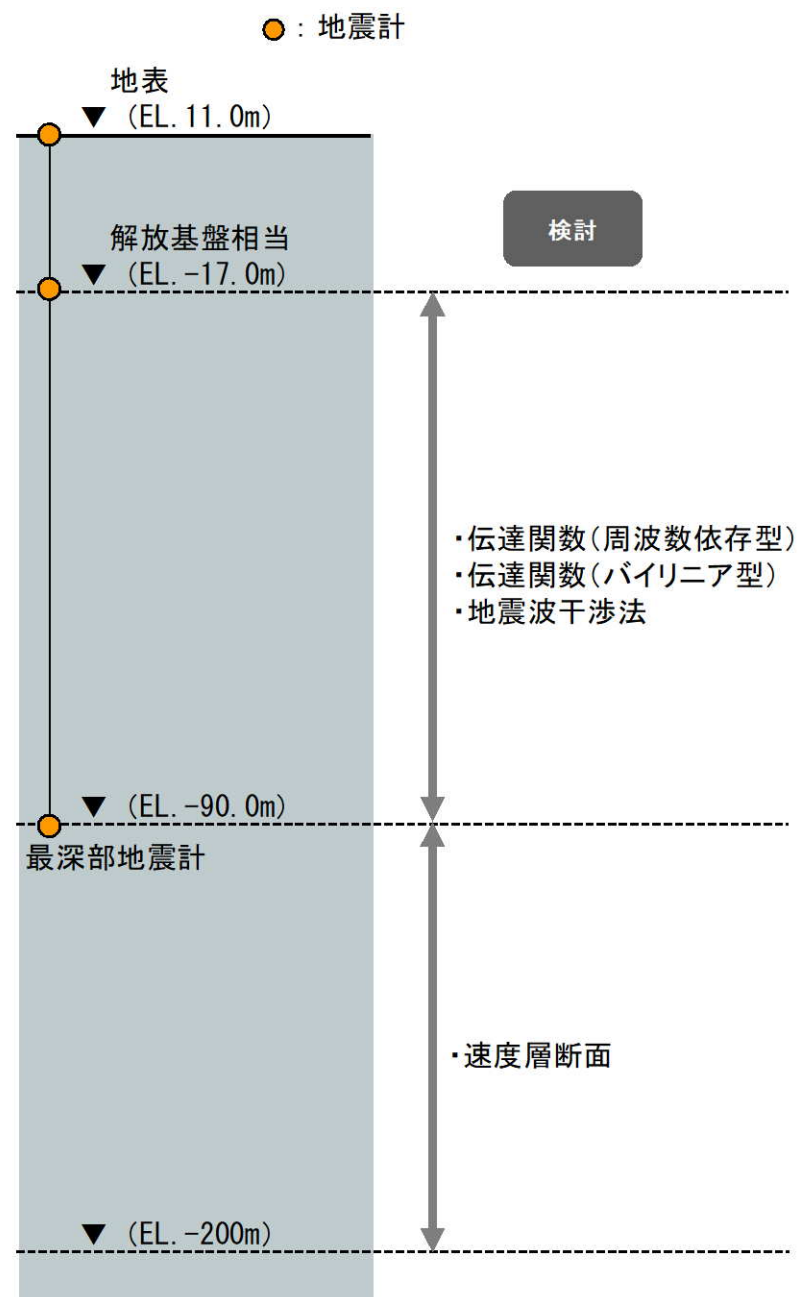
- ボーリング孔内における減衰測定により、EL. -200mまでの範囲の地盤減衰（Q値）を測定。
- 解放基盤表面からEL. -200mまでの範囲において、同一の地盤減衰（Q値）とする妥当性を以下の観点で確認する。
 - ボーリング孔内測定による減衰が、最深部地震計以浅と最深部地震計以深で同等である

b. 岩石コアを用いた減衰測定による確認

- 岩石コアを用いた減衰測定により、EL. -200mまでの範囲における岩石の減衰（Q値）を測定。
- 解放基盤表面からEL. -200mまでの範囲において、同一の地盤減衰（Q値）とする妥当性を以下の観点で確認する。
 - 岩石コアを用いた測定による減衰※が、最深部地震計以浅と最深部地震計以深で同等である

※佐藤・岡田(2012)¹¹⁾での指摘

- 岩石コアを用いて測定した減衰は、鉛直アレイ観測記録に基づき評価した減衰に比べて小さくなる。
- 鉛直アレイ観測記録に基づき評価された減衰は、実際の岩盤を対象としているため、顕著な亀裂やランダム性の存在による減衰の付加効果が生じている。

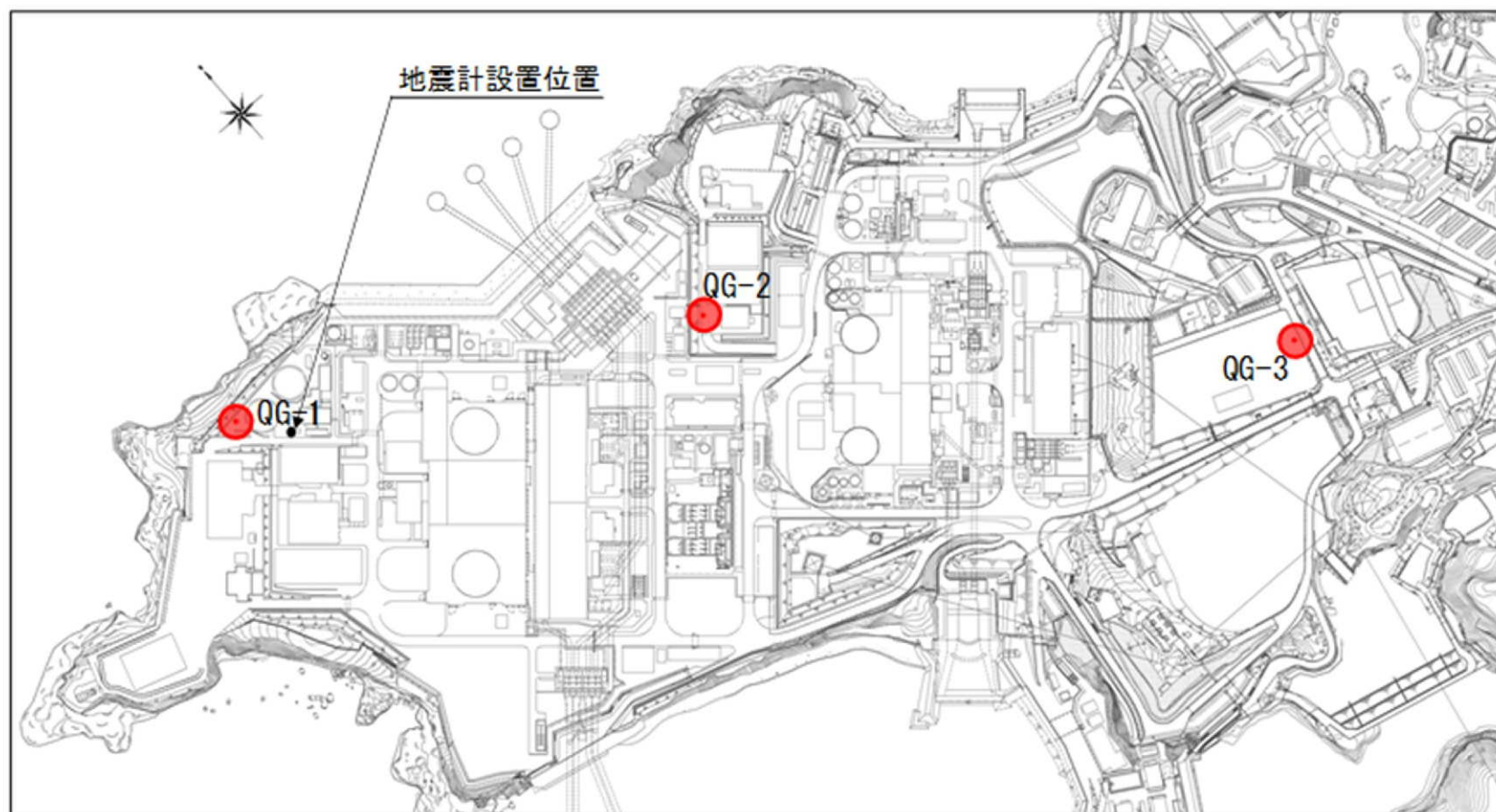


3.2.2 最深部地震計以深の地盤減衰（Q値）

a. ボーリング孔内における減衰測定による確認

■ 追加ボーリング調査位置

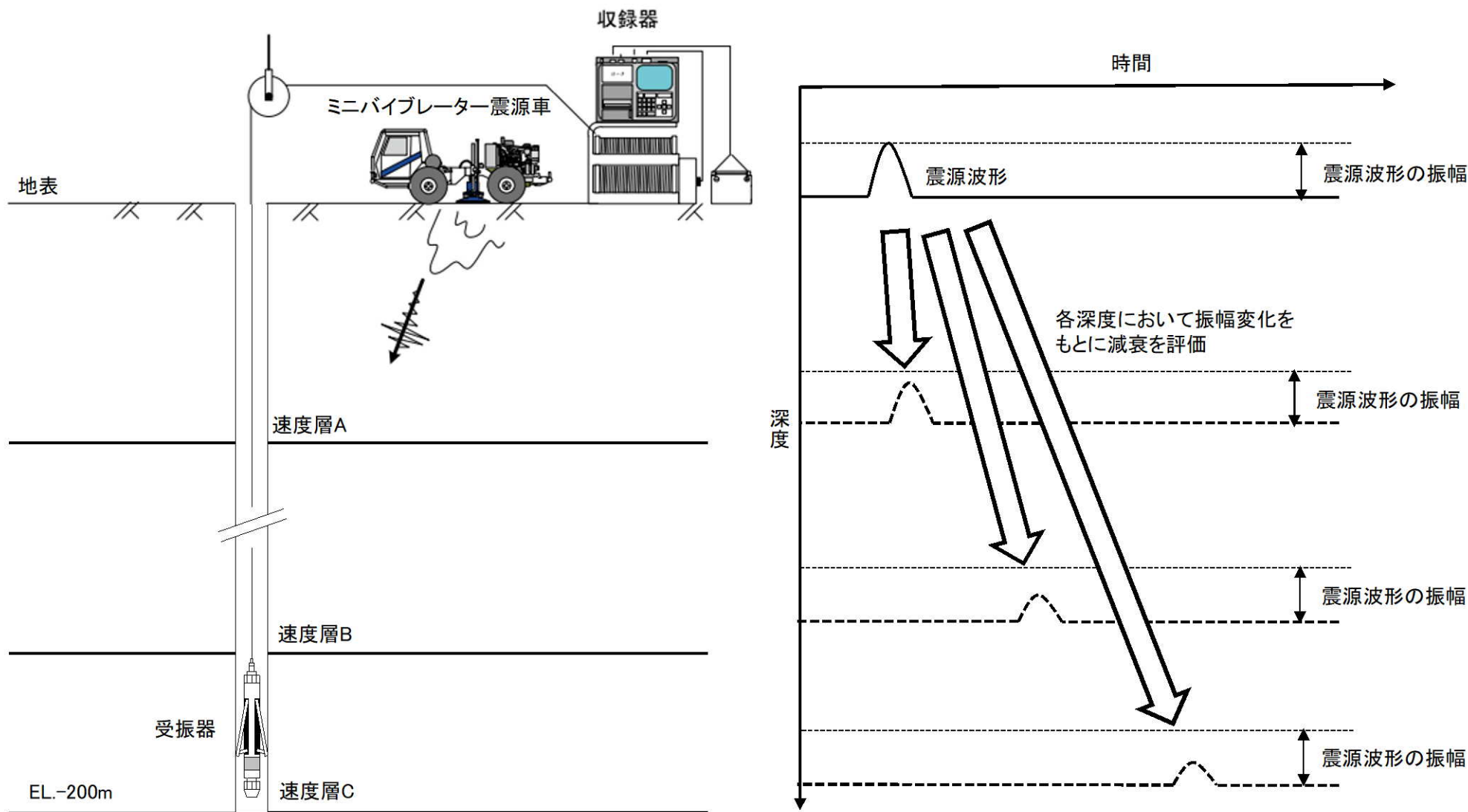
- 発電所構内において、EL. -200mまでの追加ボーリング調査を3箇所を実施し、地盤減衰（Q値）を測定。



3.2.2 最深部地震計以深の地盤減衰 (Q値)

■ ボーリング孔内における減衰測定^{12), 13)}

- 地表にて震源車を用いて人工的に励起した振動を追加ボーリング孔内に設置した受振器で観測¹²⁾し、震源位置の波形の振幅と孔内受振器の波形の振幅の関係から速度層区間ごとのQ値を算出¹³⁾する。



減衰評価イメージ図

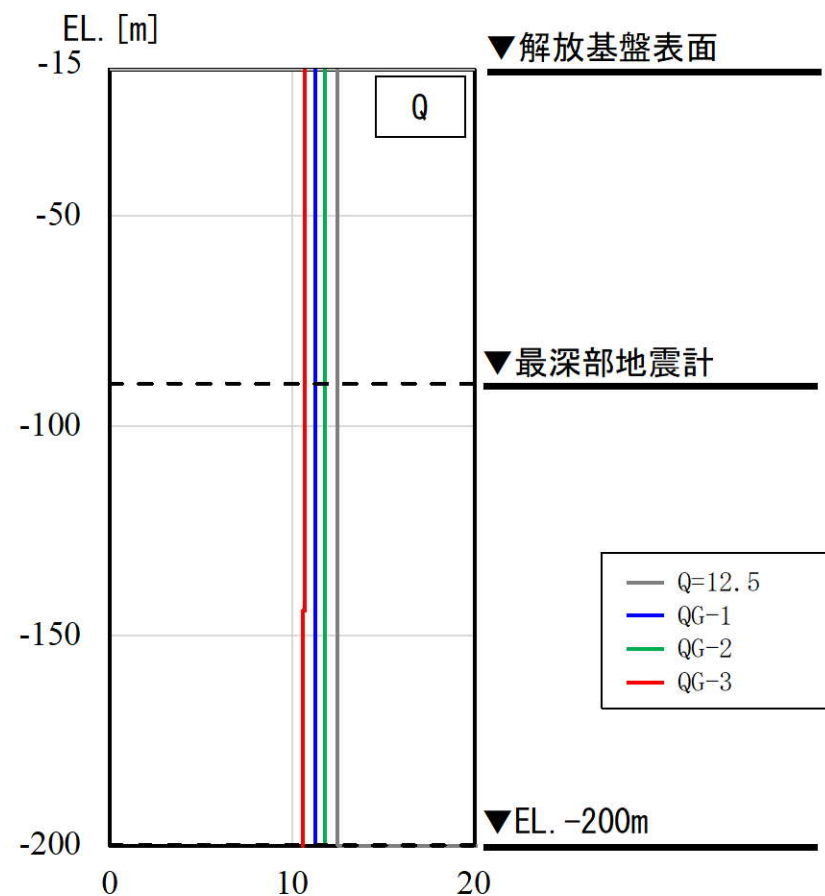
3.2.2 最深部地震計以深の地盤減衰（Q値）

■ 減衰測定結果を踏まえた地盤減衰（Q値）の妥当性確認

- ボーリング孔内における減衰測定の結果、QG-1孔は $Q=11.3$ 、QG-2孔は $Q=11.8$ 及びQG-3孔は $Q=10.6\sim 10.7$ となり、全孔ともに最深部地震計以浅と最深部地震計以深でQ値は同等である。
- なお、全孔ともにQ値は、 $Q=12.5$ を下回る。

| 孔名 | EL. (m) | 卓越周波数 (Hz) | Q値 | 減衰定数 h (%) |
|------|-----------------|------------|------|------------|
| QG-1 | -15.0 ~ -200.0 | 37 | 11.3 | 4.4 |
| QG-2 | -15.0 ~ -200.0 | 29 | 11.8 | 4.2 |
| QG-3 | -15.0 ~ -144.0 | 36 | 10.7 | 4.7 |
| | -144.0 ~ -200.0 | 31 | 10.6 | 4.7 |

※ 調査結果は解放基盤以深からEL.-200mに範囲を統一したものを記載

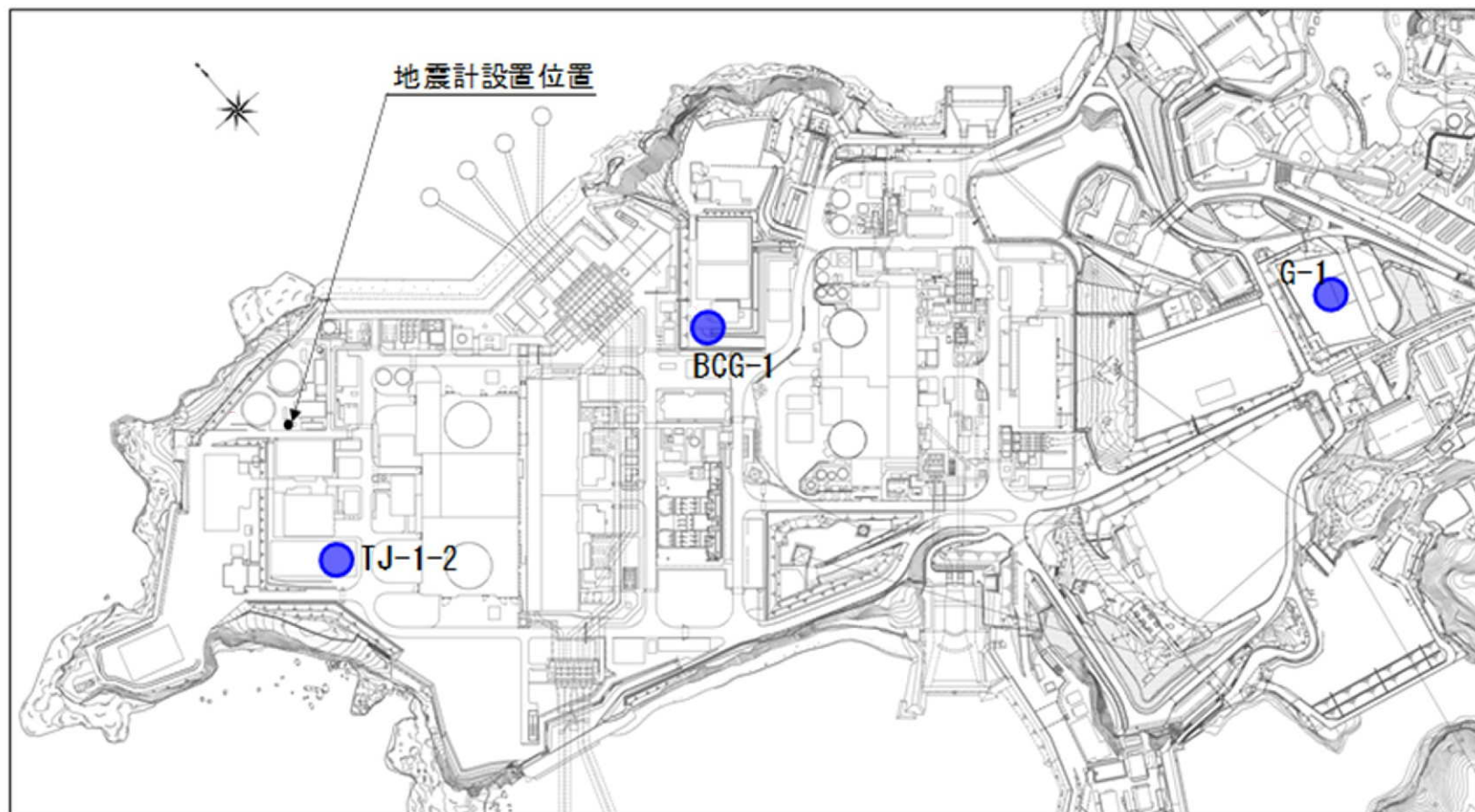


3.2.2 最深部地震計以深の地盤減衰（Q値）

b. 岩石コアを用いた減衰測定による確認

■ 岩石コア採取位置

- 発電所構内におけるEL. -200mまでの既存ボーリング3孔から、最深部地震計以浅と最深部地震計以深のそれぞれ6本ずつの岩石コア供試体（砂岩）を採取し、岩石の減衰（Q値）を測定。



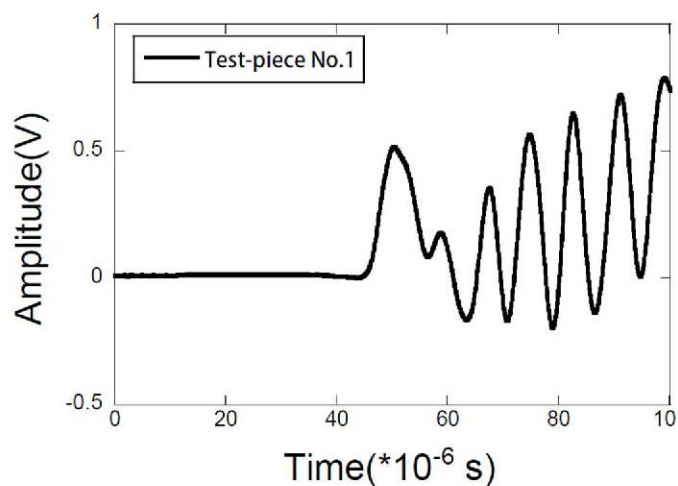
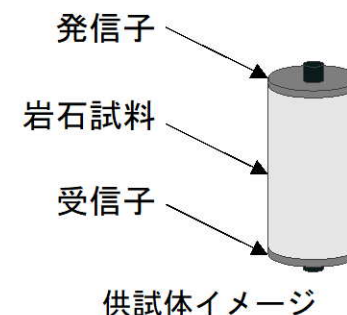
3.2.2 最深部地震計以深の地盤減衰 (Q値)

■ 岩石コアを用いた減衰測定^{11), 14)}

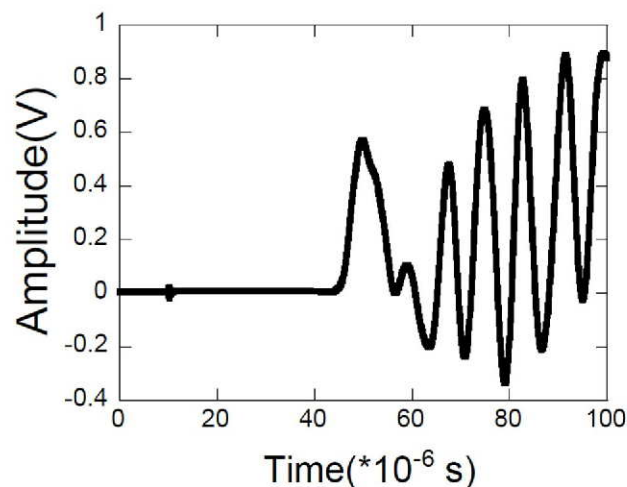
- 佐藤・岡田(2012)¹¹⁾において適用性が確認された、異なる試験体の透過パルス波のスペクトル比を用いる「スペクトル比法」(Toksöz et al. (1979)¹⁴⁾)による評価を実施。供試体1として敷地内のボーリング調査により得られた岩石コアを、供試体2としてQ値が既知なアルミニウムを使用し、透過波のスペクトル比 $A_1(f)/A_2(f)$ から次式に基づき、岩石の減衰(Q値)を推定。
- 岩石コアで得られるQ値は、地盤を構成する材料の減衰であり、亀裂等を含む地盤全体の減衰に対して部分的であることから、最深部地震計以浅と最深部地震計以深の相对比较による検討を実施。

$$\ln\left(\frac{A_1(f)}{A_2(f)}\right) = -\pi x f \left(\frac{1}{Q_1 c_1} - \frac{1}{Q_2 c_2}\right) + K$$

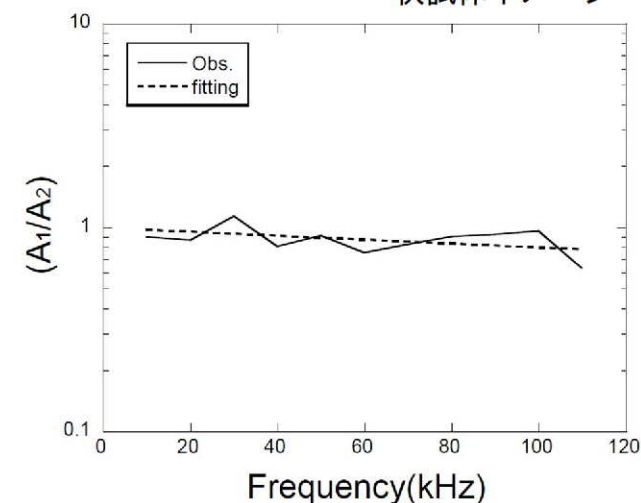
c 弾性波速度
 Q Q値
 x 伝播距離(供試体長さ)
 f 周波数
 K 供試体での幾何減衰に関する項



岩石コア供試体の超音波受振波形



アルミニウム供試体の超音波受振波形



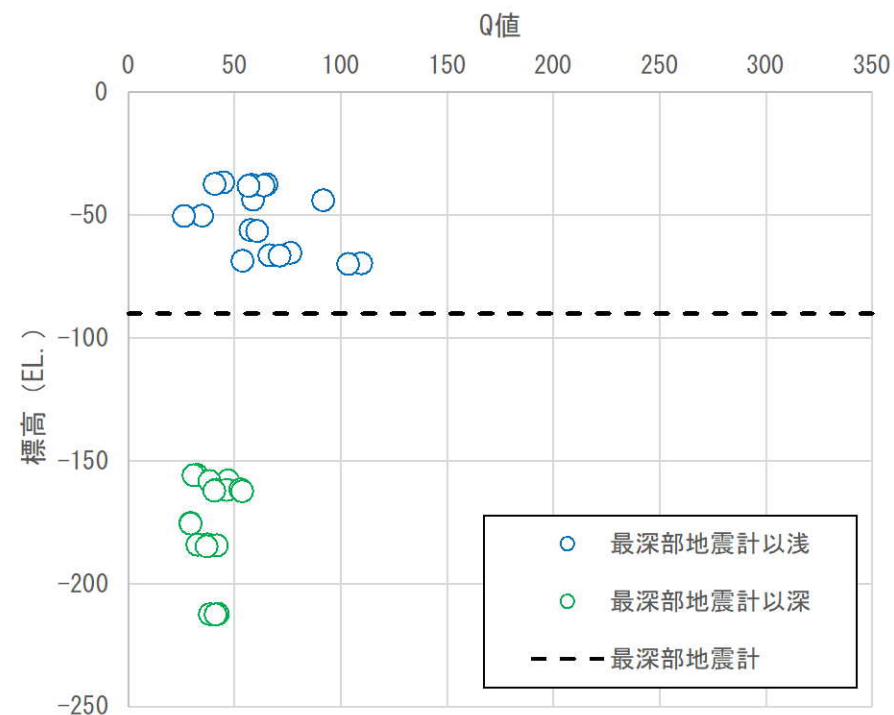
岩石コア供試体とアルミニウム供試体のスペクトル比とフィッティング結果

3.2.2 最深部地震計以深の地盤減衰（Q値）

■ Q値測定結果を踏まえた地盤減衰（Q値）の妥当性確認

- 岩石コアを用いた減衰測定の結果、最深部地震計以浅のQ値は $Q=20\sim110$ の範囲に分布し、平均値は $Q=63.3$ 、最深部地震計以深のQ値は $Q=20\sim60$ の範囲に分布し、平均値は $Q=39.5$ となり、岩石コアのQ値は最深部地震計以浅と最深部地震計以深とで概ね同等もしくは最深部地震計以深が小さい傾向にある。

| 6供試体平均 | TJ-1-2 | | BCG-1 | | G-1 | | 全孔平均 | |
|----------|--------|-----------|-------|-----------|------|-----------|------|-----------|
| | Q値 | 減衰定数 h(%) | Q値 | 減衰定数 h(%) | Q値 | 減衰定数 h(%) | Q値 | 減衰定数 h(%) |
| 最深部地震計以浅 | 54.8 | 0.91 | 76.9 | 0.65 | 58.2 | 0.86 | 63.3 | 0.79 |
| 最深部地震計以深 | 44.8 | 1.12 | 34.5 | 1.45 | 39.3 | 1.27 | 39.5 | 1.27 |



3.2.2 最深部地震計以深の地盤減衰（Q値）

「3.2.2 最深部地震計以深の地盤減衰（Q値）」のまとめ

- 速度層断面による検討の結果、解放基盤表面からEL. -200mまでの範囲は、最深部地震計（EL. -90.0m）以浅と最深部以深の速度に大きな差異が見られないことから、最深部地震計以深の地盤減衰（Q値）は、最深部地震計以浅と同じ $Q=12.5$ と設定。
- 設定した地盤減衰（Q値）の妥当性確認のため、追加ボーリング孔内における減衰測定による確認及び岩石コア減衰測定による確認を実施。
- 追加ボーリング孔内における減衰測定では、最深部地震計以浅と最深部地震計以深でQ値は同等であることを確認。
- 岩石コア減衰測定では、最深部地震計以浅と最深部地震計以深でQ値は同等もしくは最深部地震計以深が小さい傾向であることを確認。
- 追加ボーリング孔内における減衰測定による確認及び岩石コア減衰測定により、解放基盤表面からEL. -200mまでの範囲において、同一の地盤減衰（Q値）とする妥当性を確認。

3.3 地下構造モデルの設定

■ 地下構造モデルの設定

- 解放基盤表面からEL. -200mまでの範囲において、既許可以降継続的に取得している鉛直アレイの地震観測記録等による検討から地盤減衰（Q値）を設定し、追加ボーリング調査結果等の観測事実に基づいて妥当性を確認した上で、以下の地下構造モデルを設定する。

設定した地下構造モデル

| EL. 解放基盤表面 | 層上面 (km) | 密度 ρ (g/cm ³) | Vs (m/s) | Vp (m/s) | Q値 |
|---------------|-------------|-----------------------------------|-------------|-------------|------|
| -15m | 0.0 | 2.35 | 1350 | 3000 | 12.5 |
| -50m | -0.035 | 2.35 | 1570 | 3440 | 12.5 |
| -100m | -0.085 | 2.35 | 1730 | 3470 | 12.5 |
| -150m | -0.135 | 2.35 | 1770 | 3650 | 12.5 |
| -200m | -0.185 | 2.40 | 2100 | 4000 | 200 |
| -1804m | -1.789 | 2.60 | 3100 | 5500 | 300 |

3.4 地下構造モデルの妥当性確認

■ 地下構造モデルの妥当性確認方針

- 前節までの通り、地盤減衰（Q値）は、既許可以降継続的に取得している鉛直アレイの地震観測記録や追加ボーリング調査結果等の観測事実に基づいて設定。
- 本節では、下表の方法により、設定した地下構造モデルの妥当性を確認。

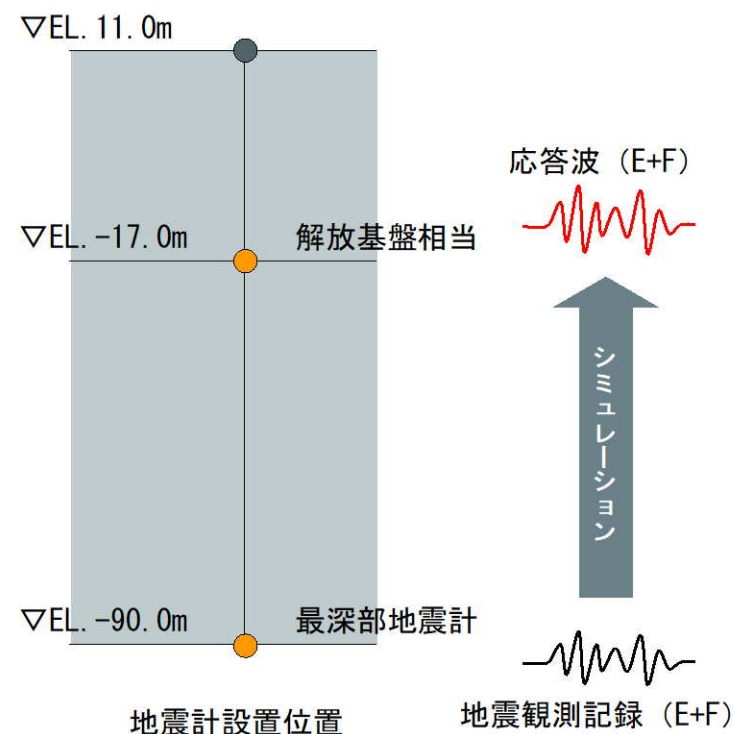
| 確認方法 | 対象深度EL. (m) | | 比較方法 | 比較対象 | | 確認する観点 |
|------------------|----------------------|---------------|---------|-------------|----------------|--|
| | -15.0 | -90.0 -200 | | | | |
| 応答スペクトルによる確認 | EL. -15.0m~EL. -90m | | 応答スペクトル | 設定した地下構造モデル | 地震観測記録（解放基盤相当） | 設定した地下構造モデルによる応答波の応答スペクトルが、地震観測記録の応答スペクトルと同等もしくは上回る。 |
| PS検層モデルとの比較による確認 | EL. -15.0m~EL. -200m | | 理論伝達関数 | 設定した地下構造モデル | PS検層モデル | 設定した地下構造モデルによる理論伝達関数が、PS検層モデルによる理論伝達関数と同等もしくは上回る。 |

3.4 地下構造モデルの妥当性確認

(1) 地震観測記録の応答スペクトルによる確認

- 地震観測記録の得られている浅部の地下構造モデルについて、鉛直アレイの地震観測記録に基づいた観測事実との整合性を確認するため、最深部地震計（EL. -90m）で得られた地震観測記録を入力※とし、1次元波動論に基づき、推定した応答波（EL. -17m）の応答スペクトル※と同位置の地震計で得られた地震観測記録の応答スペクトルとの比較を実施。（73～82頁参照）
- 解放基盤表面（EL. -15m）からEL. -90mまでの範囲における地下構造モデルについて、以下の観点で妥当性を確認した。
 - 設定した地下構造モデルの応答波の応答スペクトルが、地震観測記録の応答スペクトルと同等もしくは上回る。

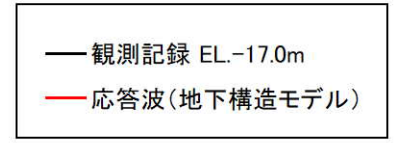
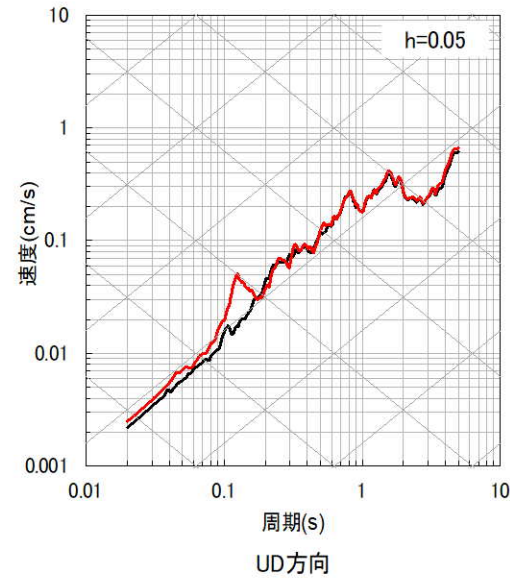
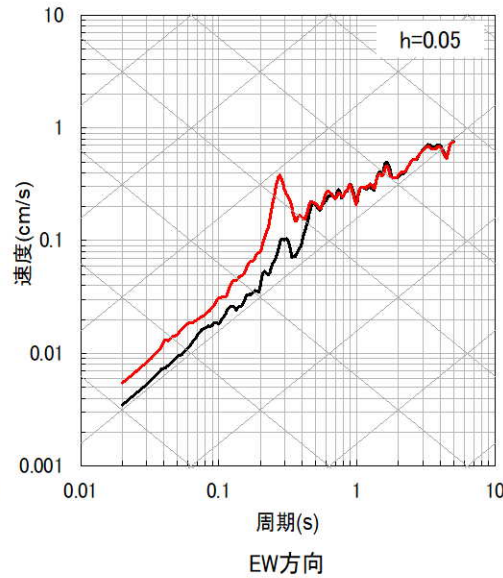
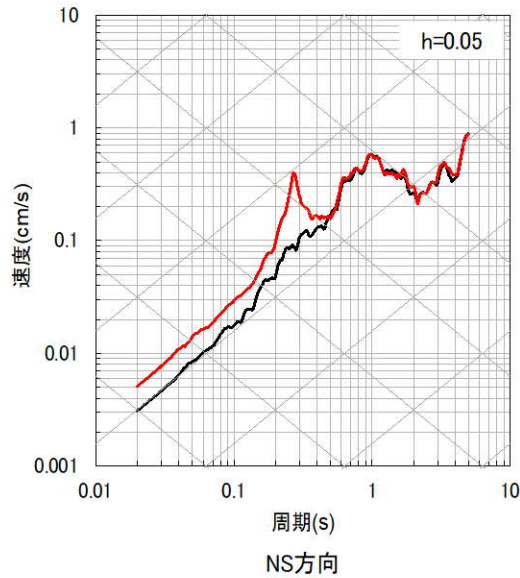
※入力 of 最深部地震計（EL. -90m）で得られた地震観測記録及び出力の解放基盤相当（EL. -17m）での応答波は地中記録のため、E+Fで評価。



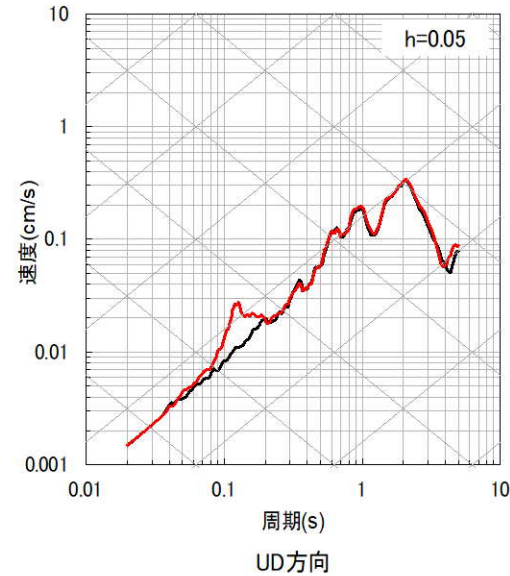
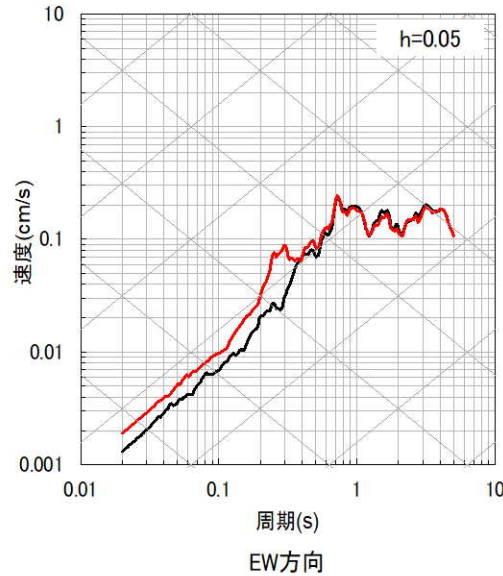
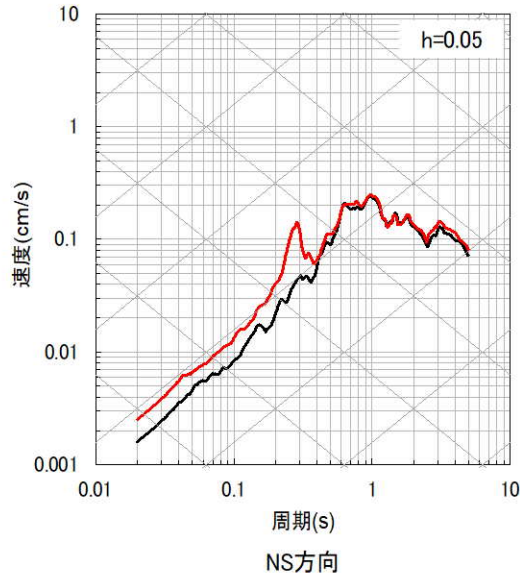
3.4 地下構造モデルの妥当性確認

■ 応答スペクトルの比較結果 (1/10)

① 鹿児島県北西部



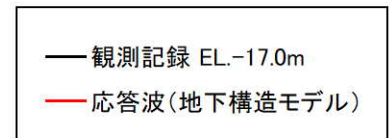
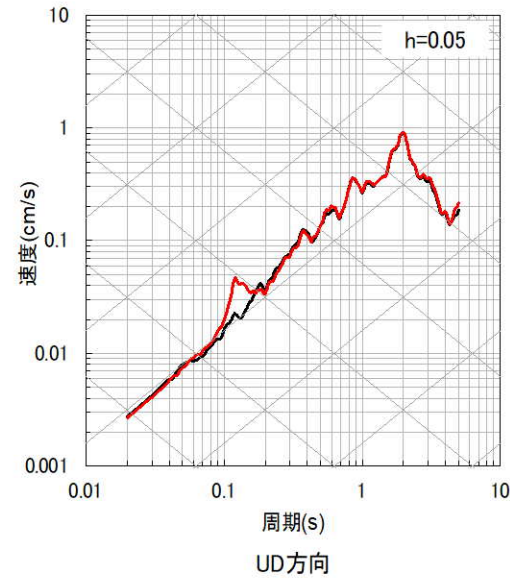
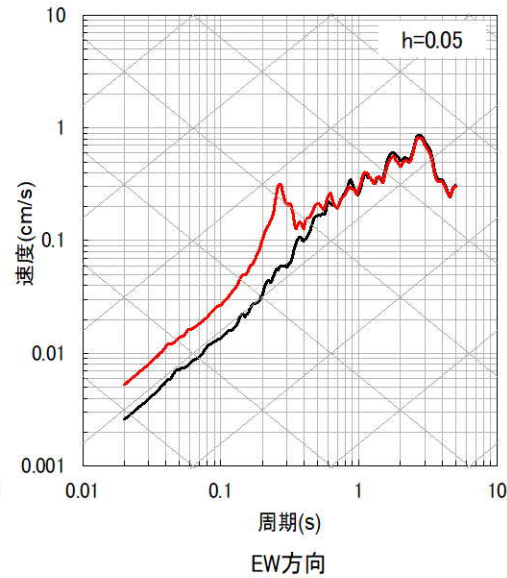
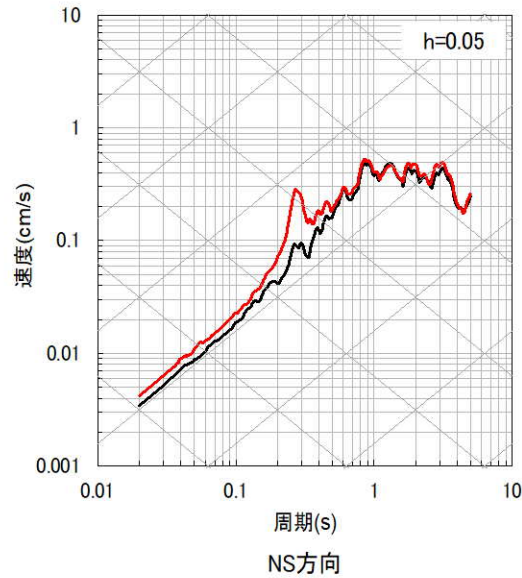
② 鹿児島県北西部



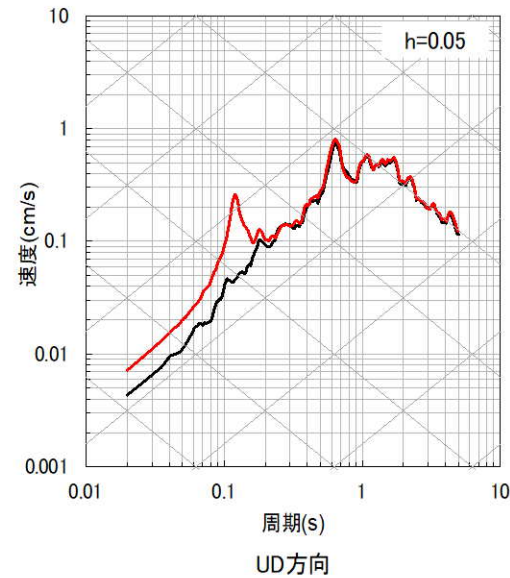
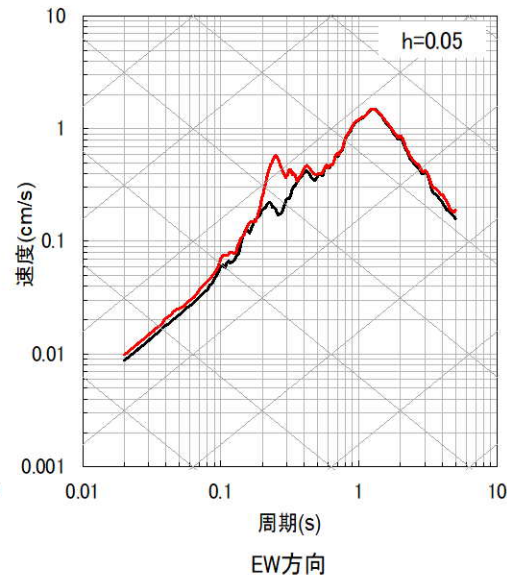
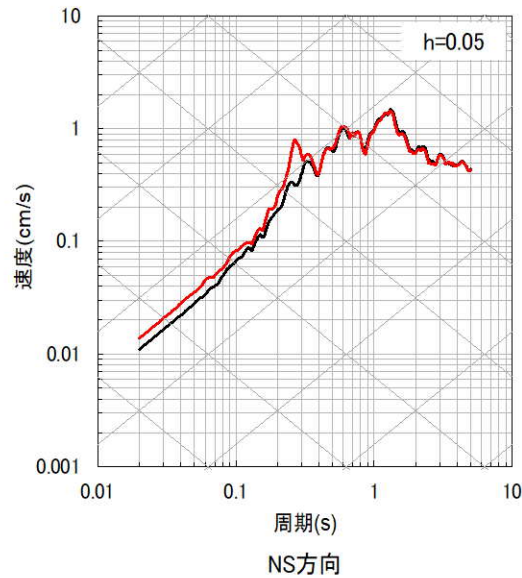
3.4 地下構造モデルの妥当性確認

■ 応答スペクトルの比較結果 (2/10)

③ 鹿児島県北西部



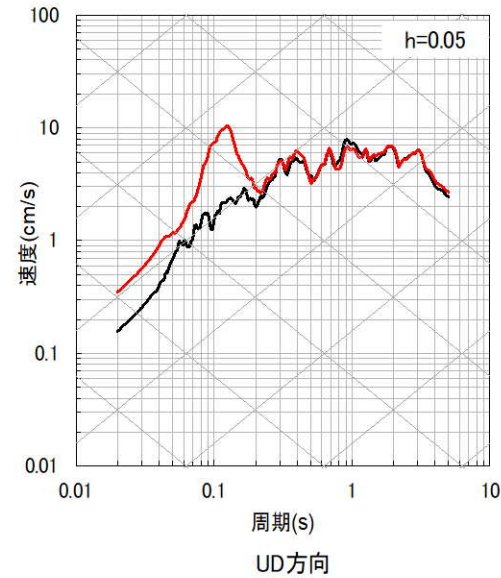
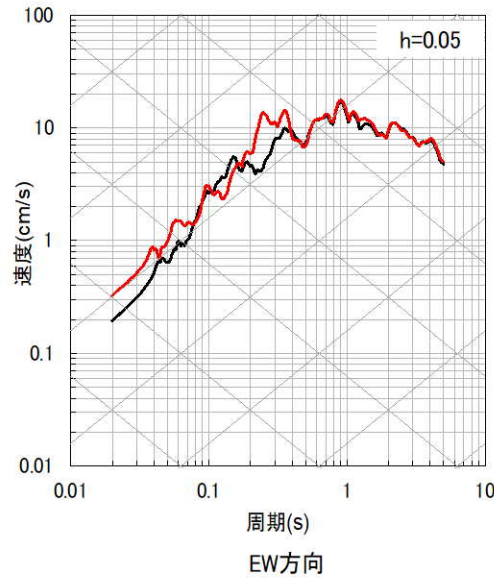
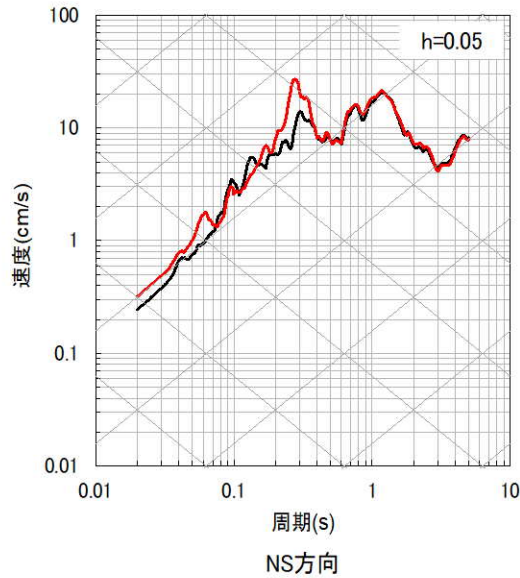
④ 山口県



3.4 地下構造モデルの妥当性確認

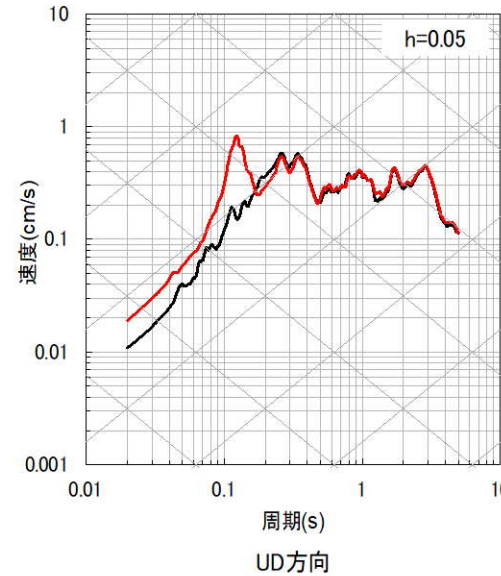
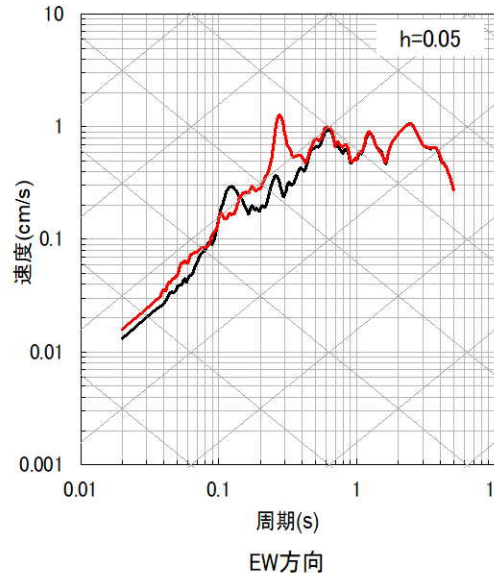
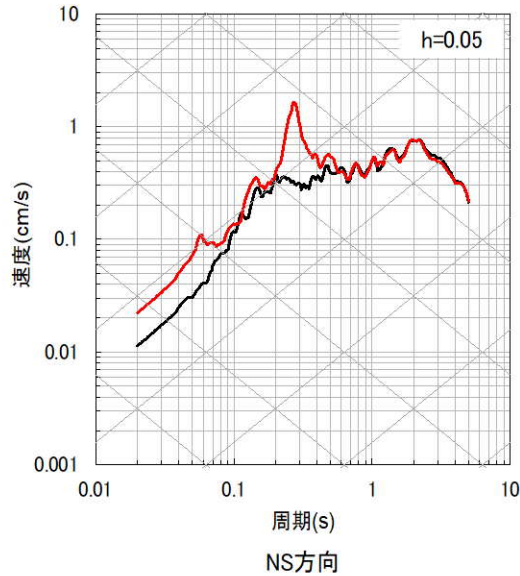
■ 応答スペクトルの比較結果 (3/10)

⑤九州北西沖 (2005年福岡県西方沖地震本震)



— 観測記録 EL.-17.0m
— 応答波(地下構造モデル)

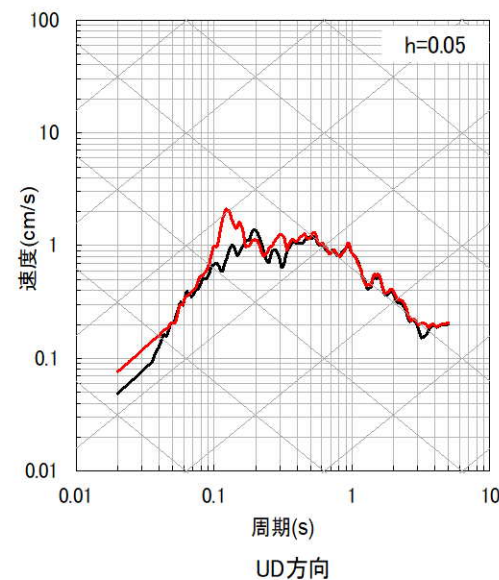
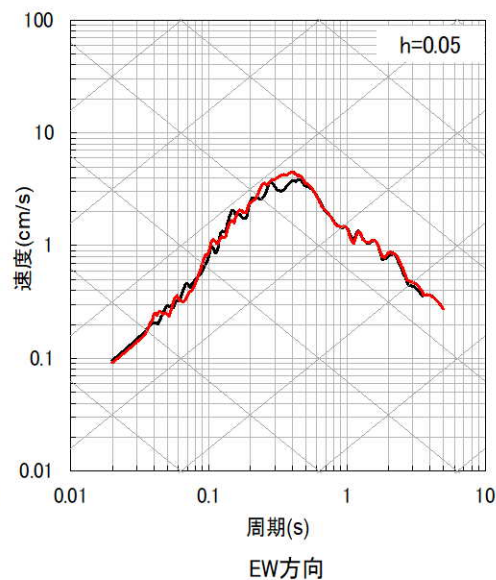
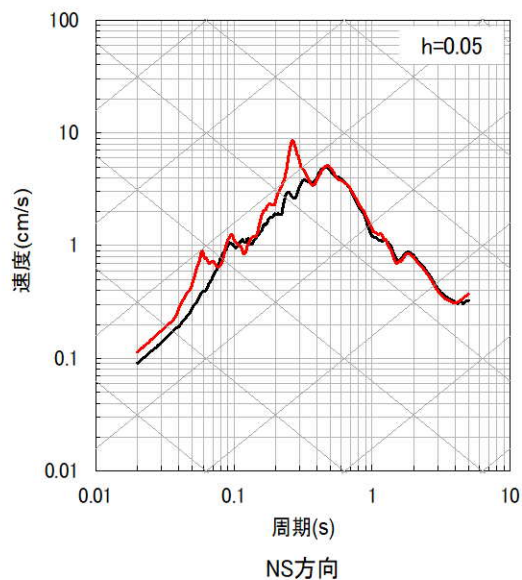
⑥九州北西沖



3.4 地下構造モデルの妥当性確認

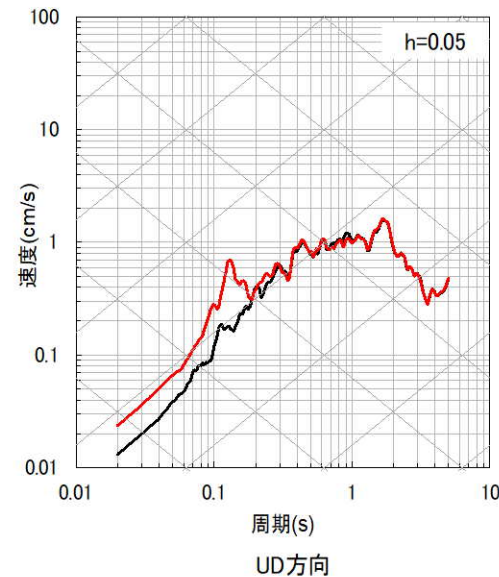
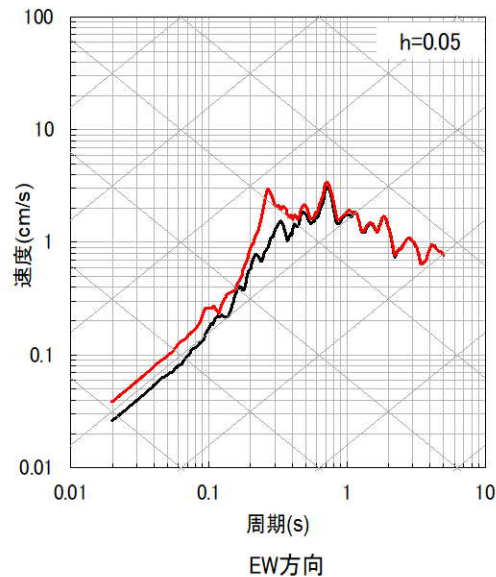
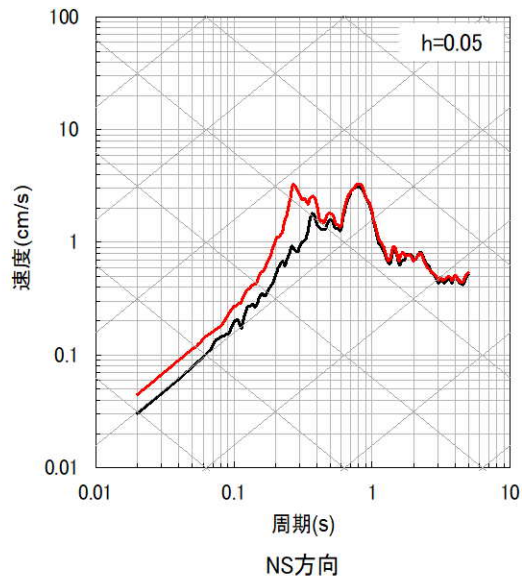
■ 応答スペクトルの比較結果 (4/10)

⑦福岡県中部 (2005年福岡県西方沖地震最大余震)



— 観測記録 EL.-17.0m
— 応答波(地下構造モデル)

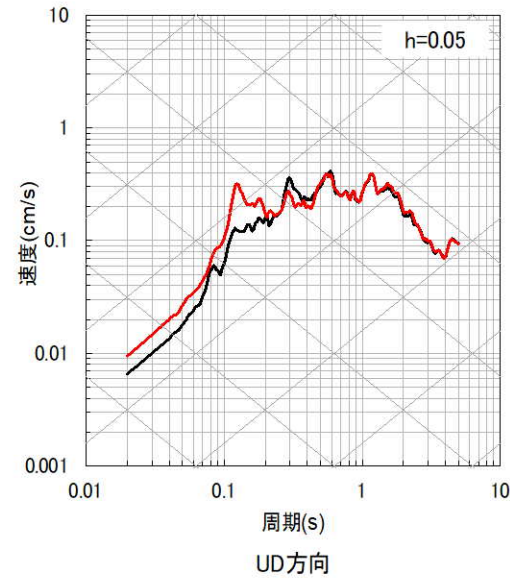
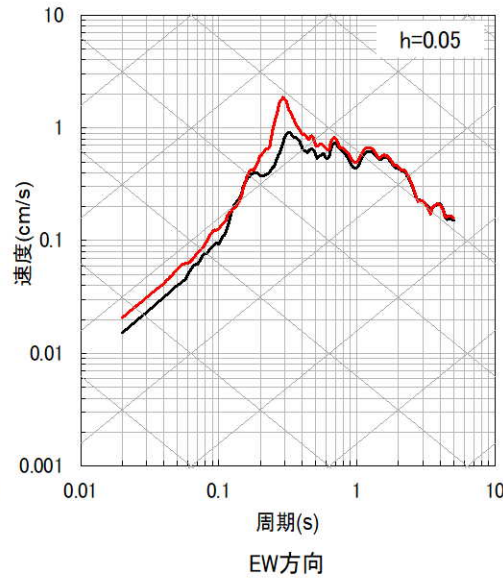
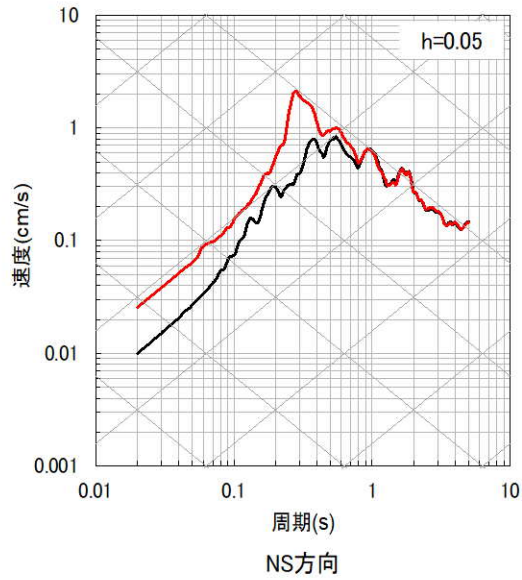
⑧熊本県熊本地方 (2016年熊本地震前震)



3.4 地下構造モデルの妥当性確認

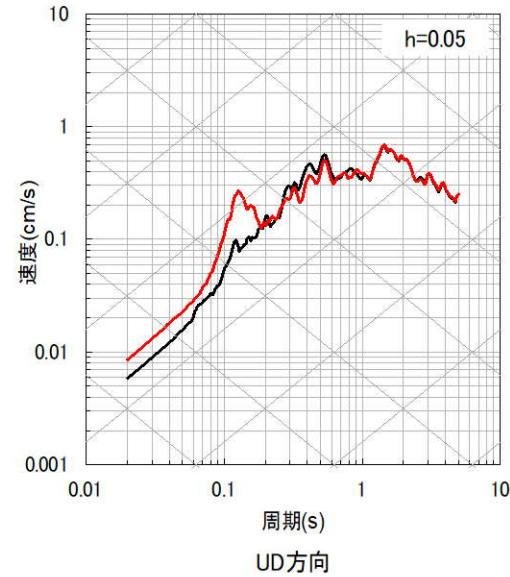
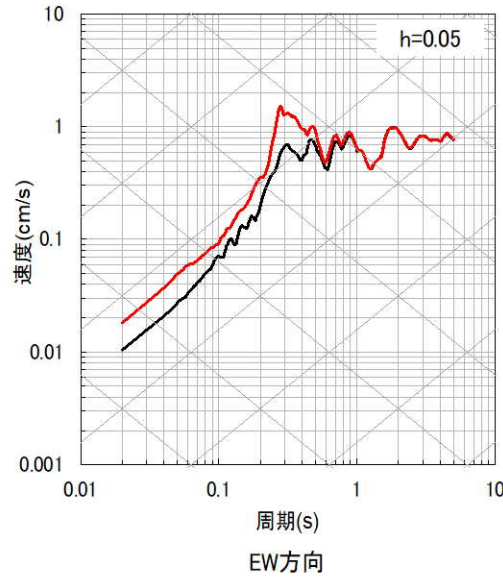
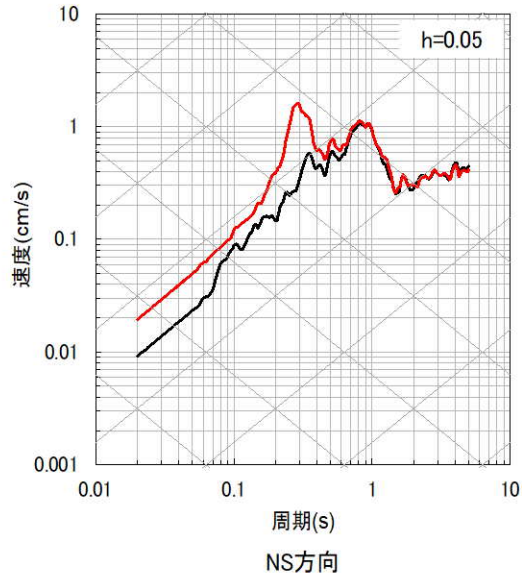
■ 応答スペクトルの比較結果 (5/10)

⑨ 熊本県熊本地方



— 観測記録 EL.-17.0m
— 応答波(地下構造モデル)

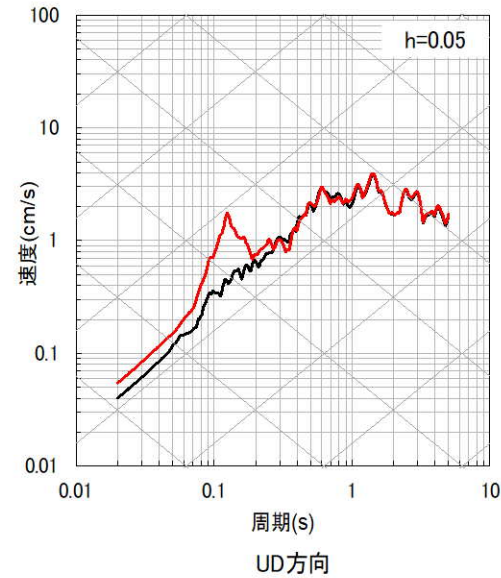
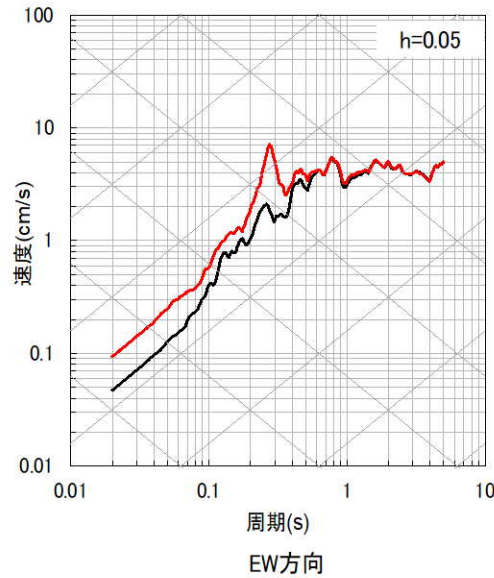
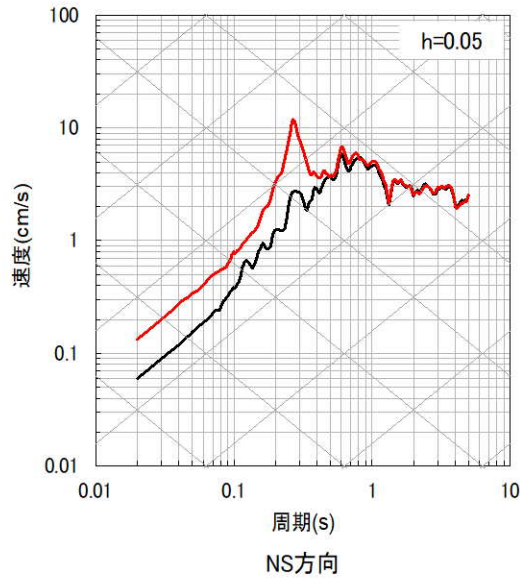
⑩ 熊本県熊本地方



3.4 地下構造モデルの妥当性確認

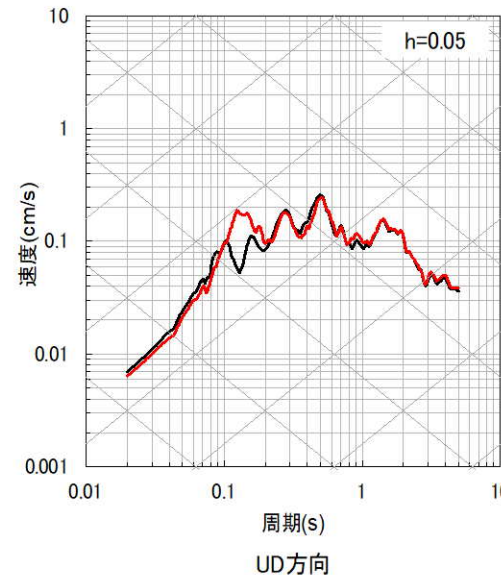
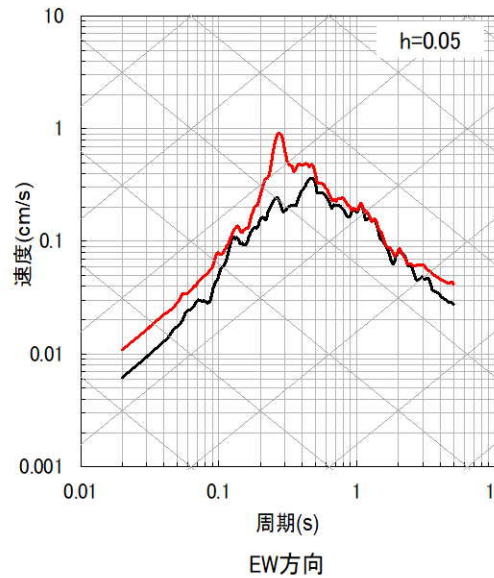
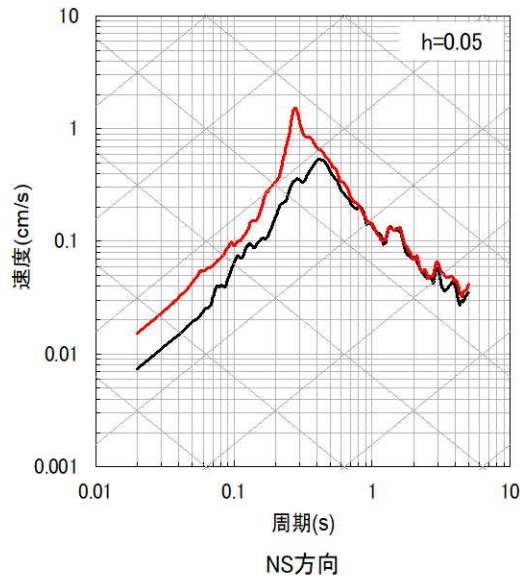
■ 応答スペクトルの比較結果 (6/10)

⑪ 熊本県熊本地方 (2016年熊本地震本震)



— 観測記録 EL.-17.0m
— 応答波(地下構造モデル)

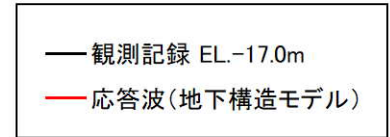
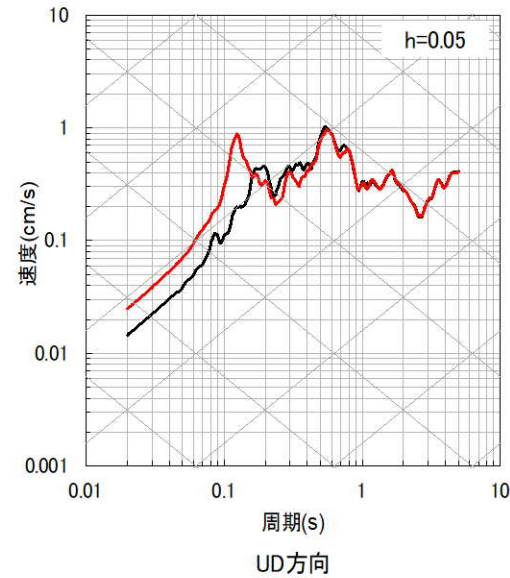
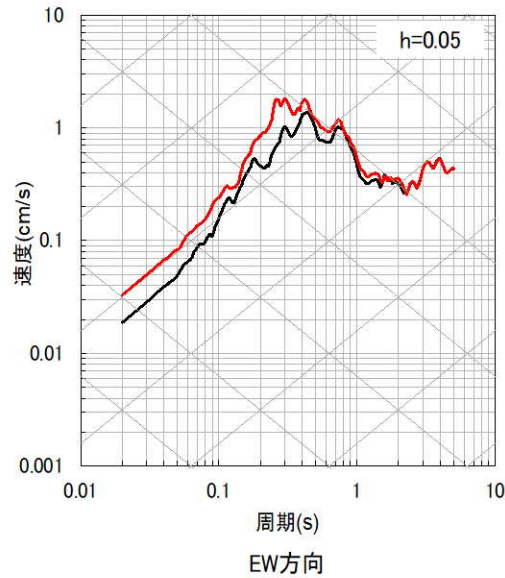
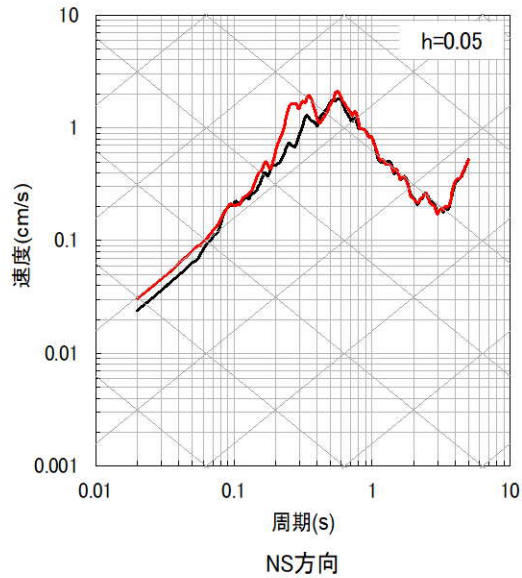
⑫ 熊本県熊本地方



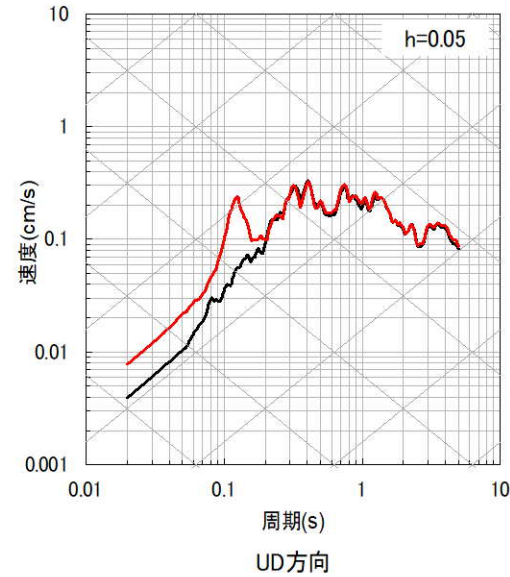
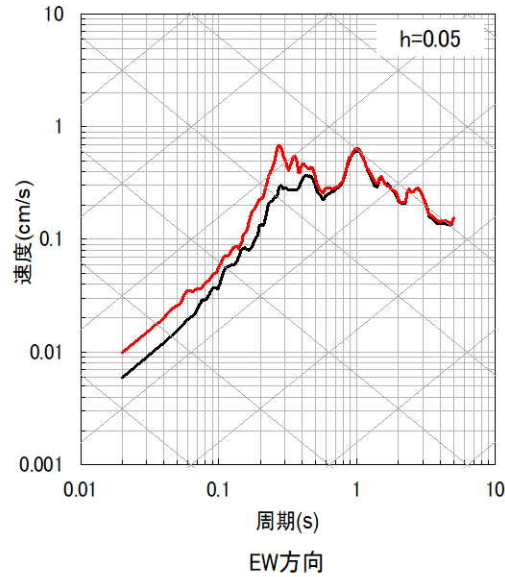
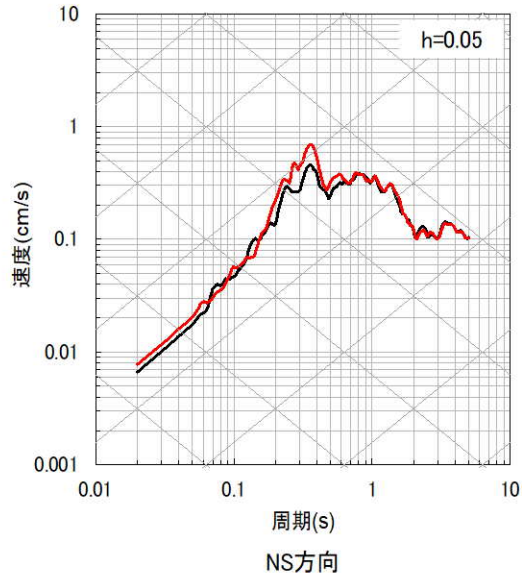
3.4 地下構造モデルの妥当性確認

■ 応答スペクトルの比較結果 (7/10)

⑬熊本県熊本地方



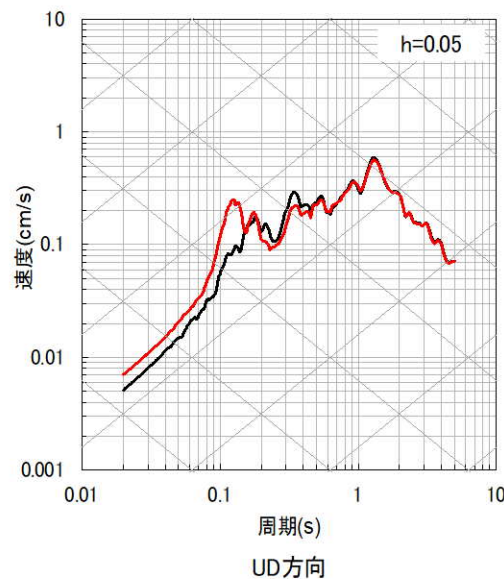
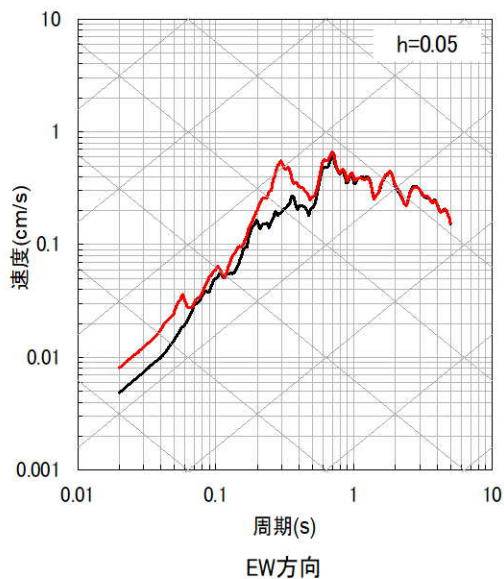
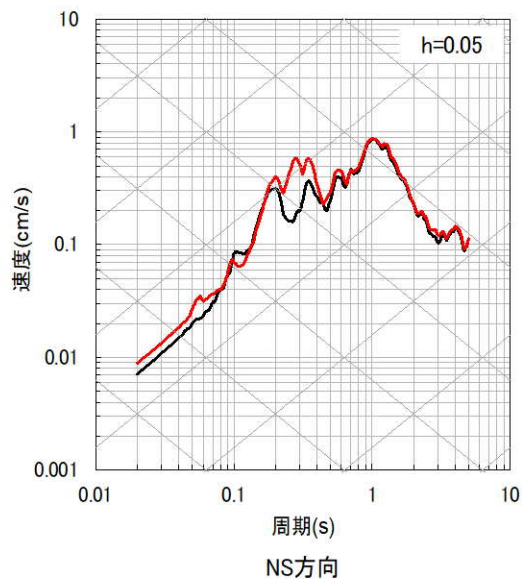
⑭熊本県阿蘇地方



3.4 地下構造モデルの妥当性確認

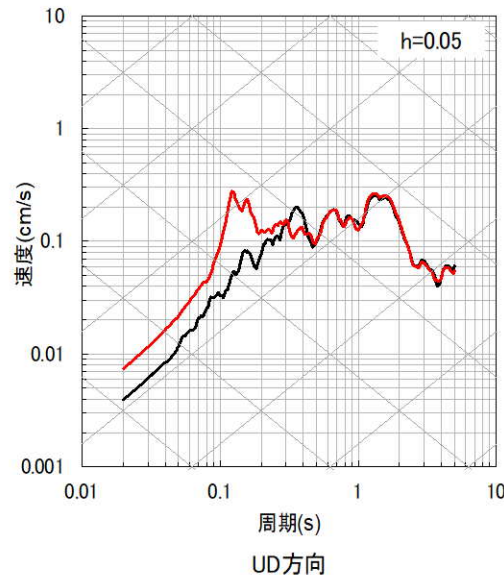
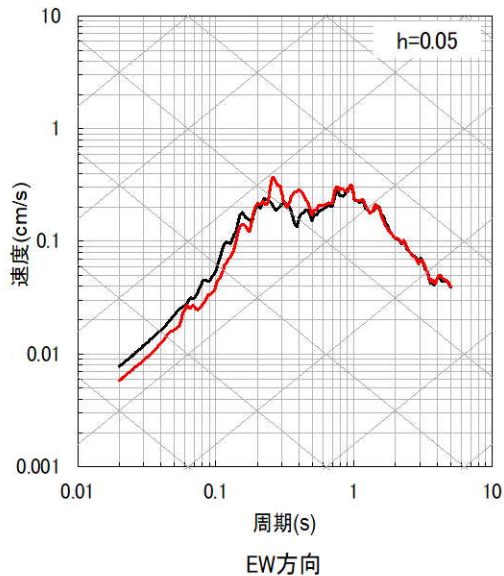
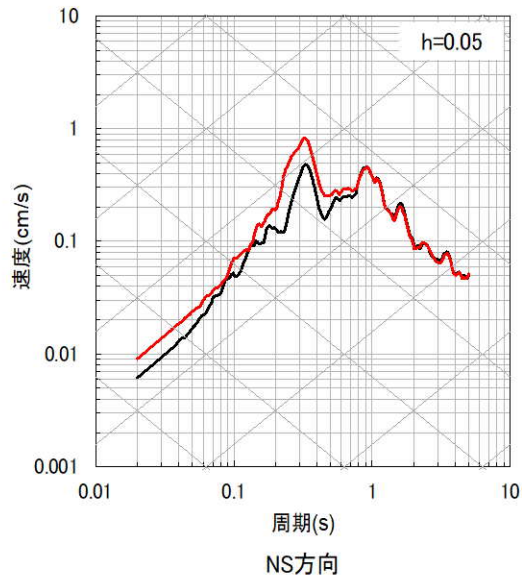
■ 応答スペクトルの比較結果 (8/10)

⑮ 熊本県阿蘇地方



— 観測記録 EL.-17.0m
— 応答波(地下構造モデル)

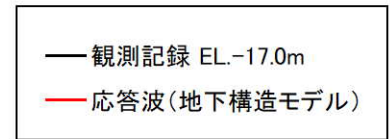
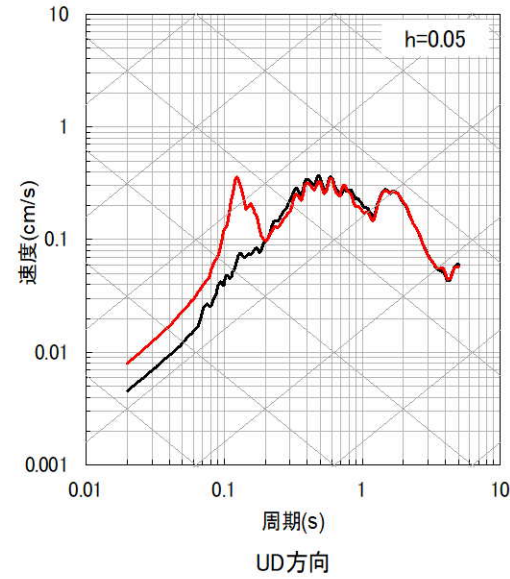
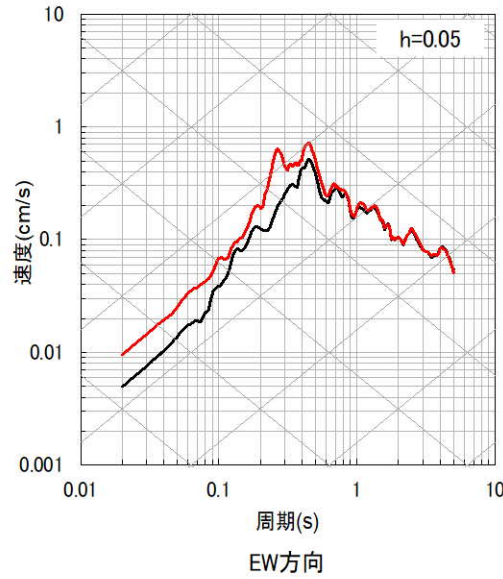
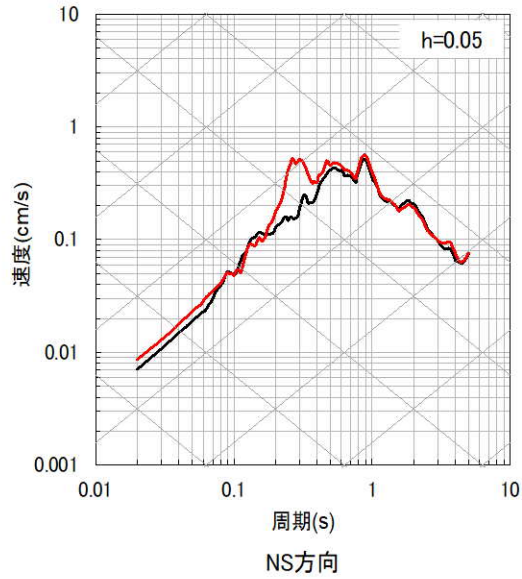
⑯ 熊本県熊本地方



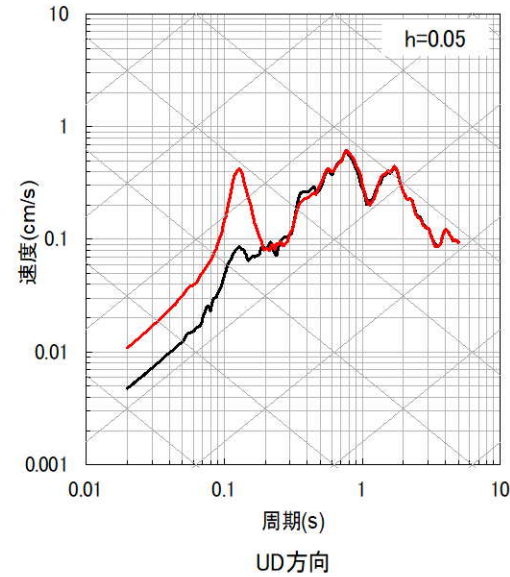
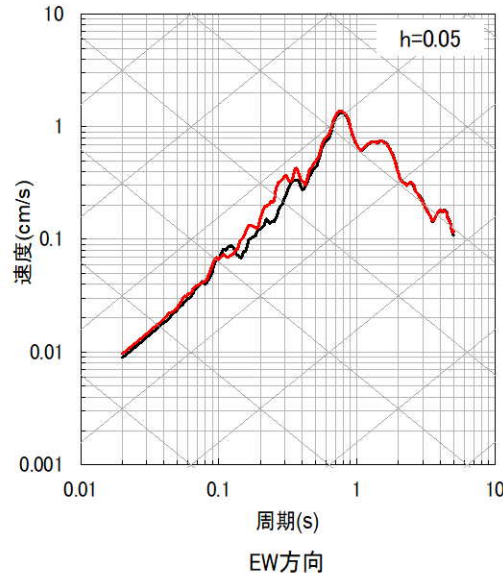
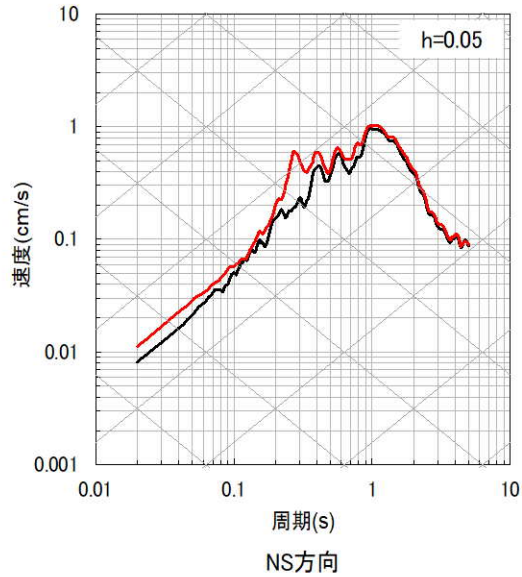
3.4 地下構造モデルの妥当性確認

■ 応答スペクトルの比較結果 (9/10)

⑰ 熊本県熊本地方



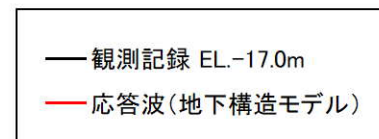
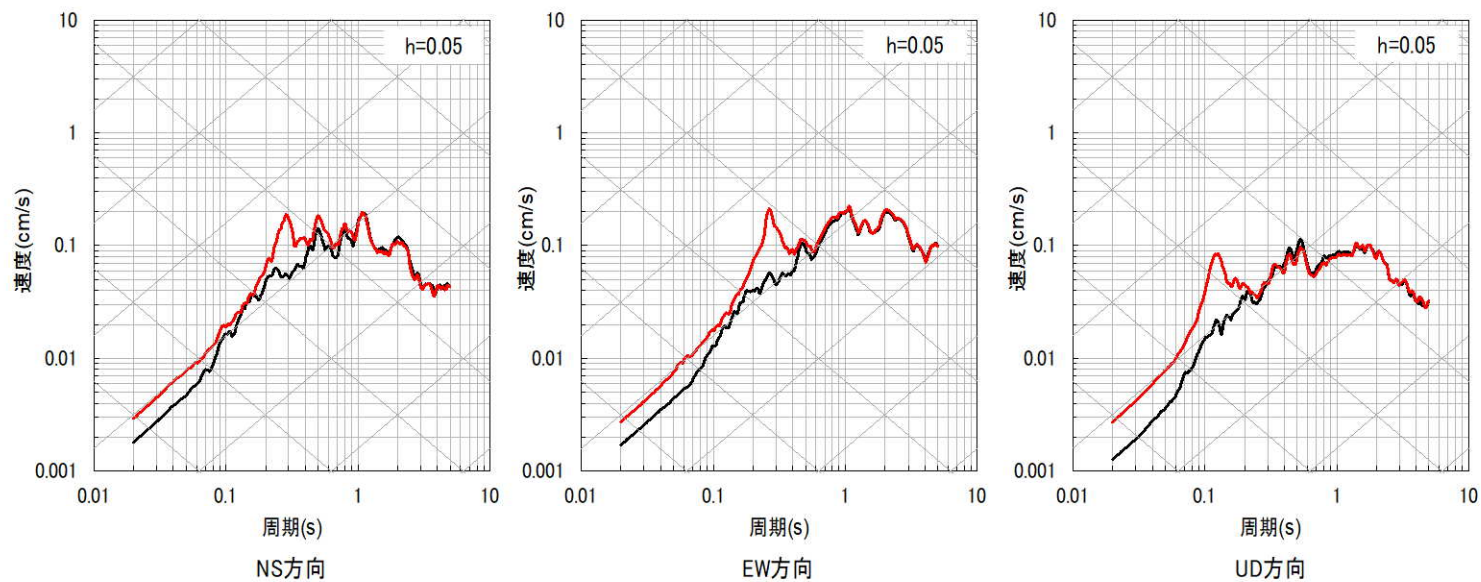
⑱ 熊本県阿蘇地方



3.4 地下構造モデルの妥当性確認

■ 応答スペクトルの比較結果 (10/10)

⑬ 熊本県熊本地方



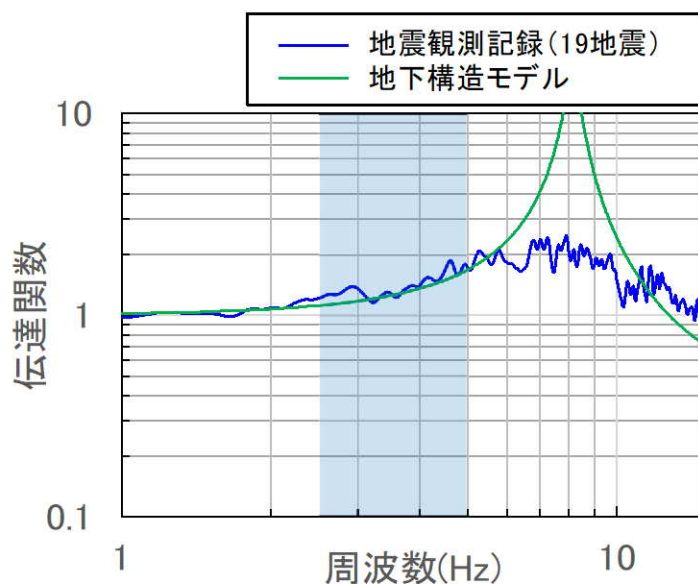
3.4 地下構造モデルの妥当性確認

■ 上下方向に関する観測事実との整合性に係る検討

- 前頁までの19地震の応答スペクトルの比較における、上下方向の一部の地震観測記録の、周期0.2~0.4秒付近において、応答波が局所的に観測記録を下回る。(73~82頁参照、例：⑬熊本県熊本地方の地震)
- 応答スペクトルの比較において、スペクトル形状(凹凸)の僅かな差異により応答波が局所的に観測記録を下回るが、以下の検討から、その要因はEL. -90m以深の範囲にあると考えられる。
 - 地震観測記録と設定した地下構造モデルの伝達関数(EL. -17.0m/EL. -90.0m)を比較した結果、当該周期帯(2.5~5Hz付近)においても両者は整合していることを確認した。(下図)
 - 深度毎の地震観測記録の応答スペクトルを比較した結果、解放基盤相当(EL. -17m)で見られたスペクトル形状(凹凸)は、最深部地震計(EL. -90m)でも同様の傾向が見られることを確認した。(84~85頁参照)



- 解放基盤表面(EL. -15m)からEL. -90mまでの範囲における地下構造モデルの妥当性に影響はないと判断した。



伝達関数の比較 (EL. -17.0m/EL. -90.0m)

※観測記録及び理論の伝達関数はParzen Window 0.2Hzでスムージング

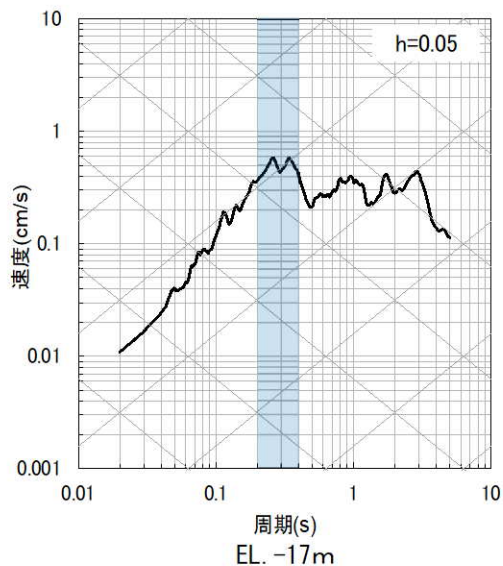


地震計設置位置

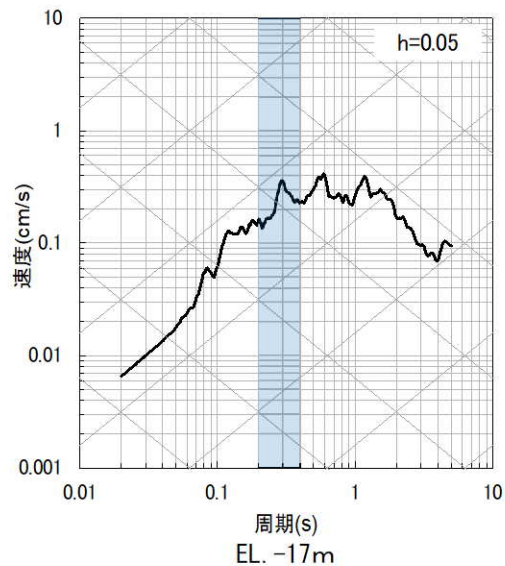
3.4 地下構造モデルの妥当性確認

■ 地震観測記録の深度毎の応答スペクトルの比較結果 (1/2)

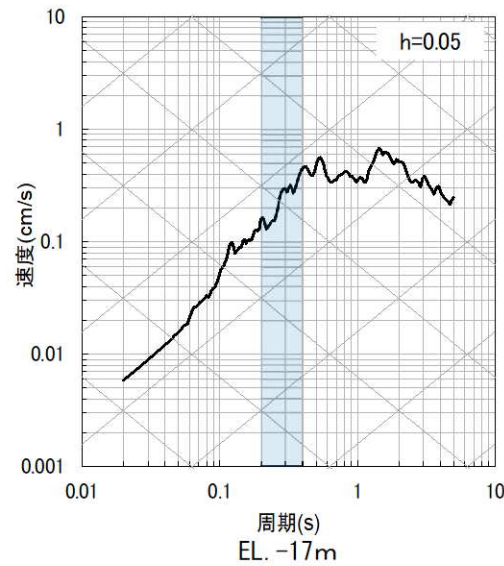
⑥九州北西沖



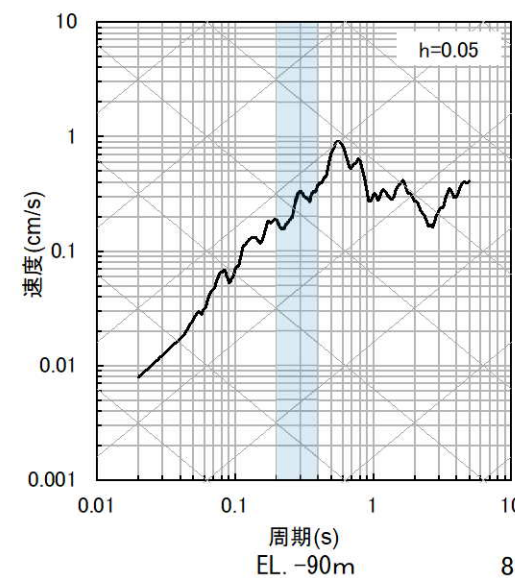
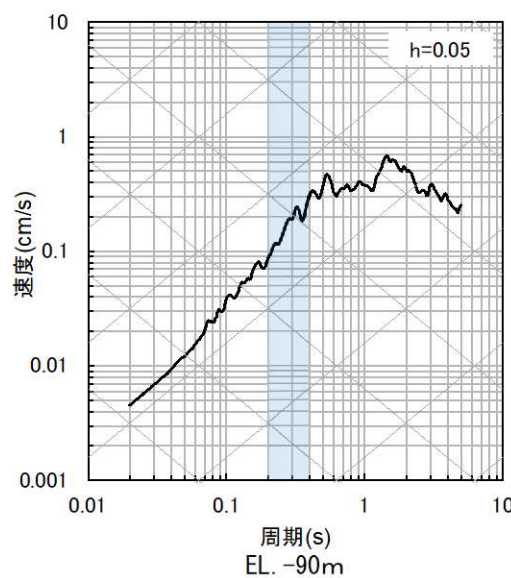
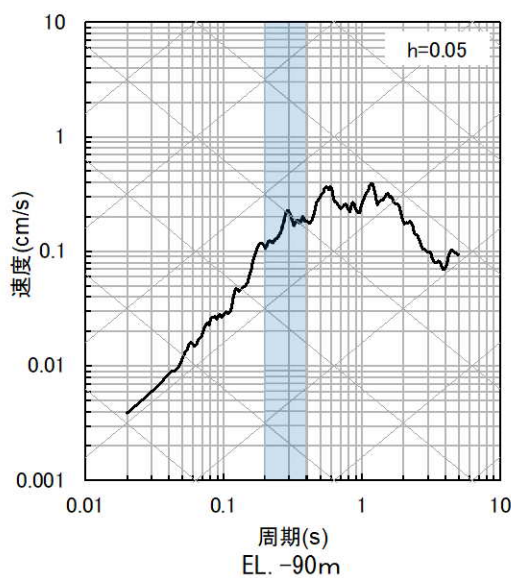
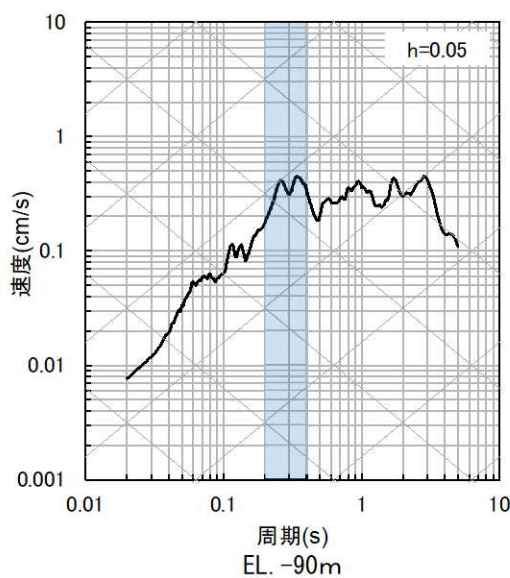
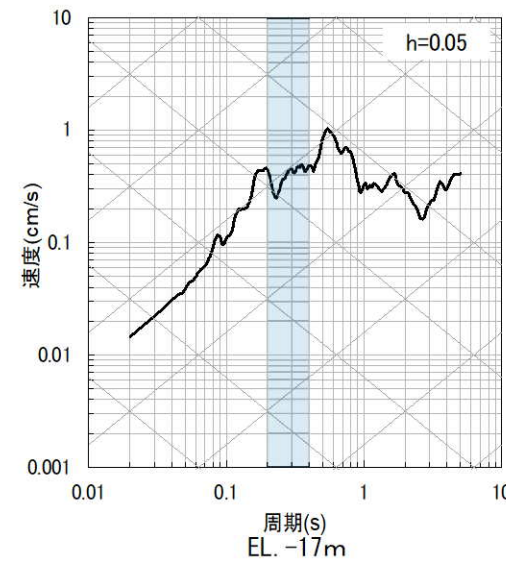
⑨熊本県熊本地方



⑩熊本県熊本地方



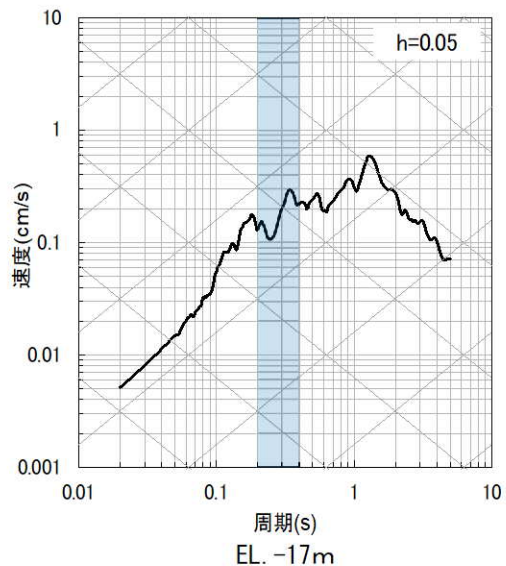
⑬熊本県熊本地方



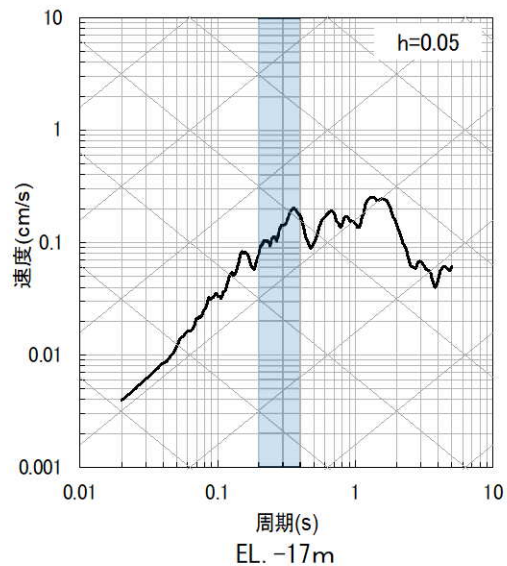
3.4 地下構造モデルの妥当性確認

■ 地震観測記録の深度毎の応答スペクトルの比較結果 (2/2)

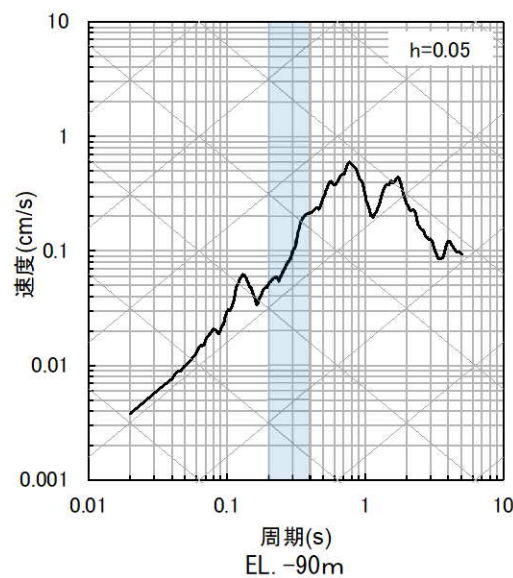
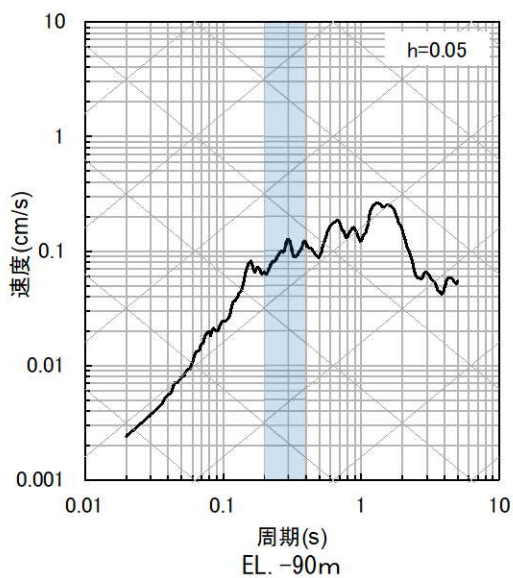
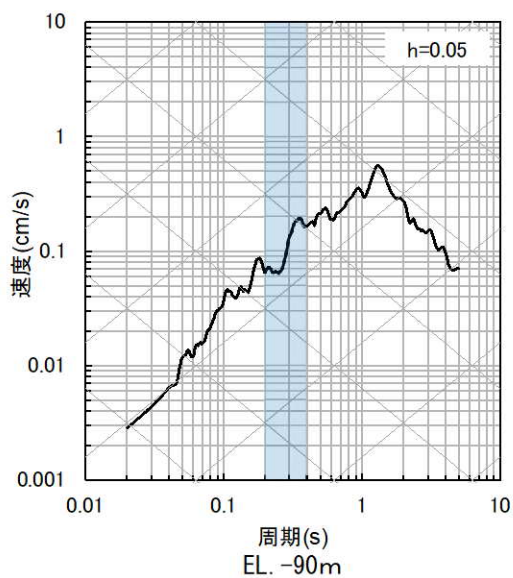
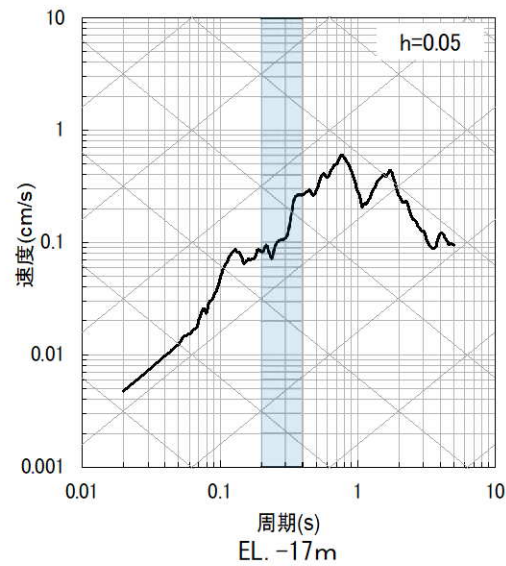
⑮熊本県阿蘇地方



⑯熊本県熊本地方



⑰熊本県阿蘇地方



3.4 地下構造モデルの妥当性確認

(2) PS検層モデルとの比較による確認

- 追加調査によりEL. -200mまでの範囲において得られた、層厚、Vs、Vp、Q値を基に、PS検層モデルを設定。
- 設定した地下構造モデルとPS検層モデルによる理論伝達関数の比較により、設定した地下構造モデルの妥当性を確認する。

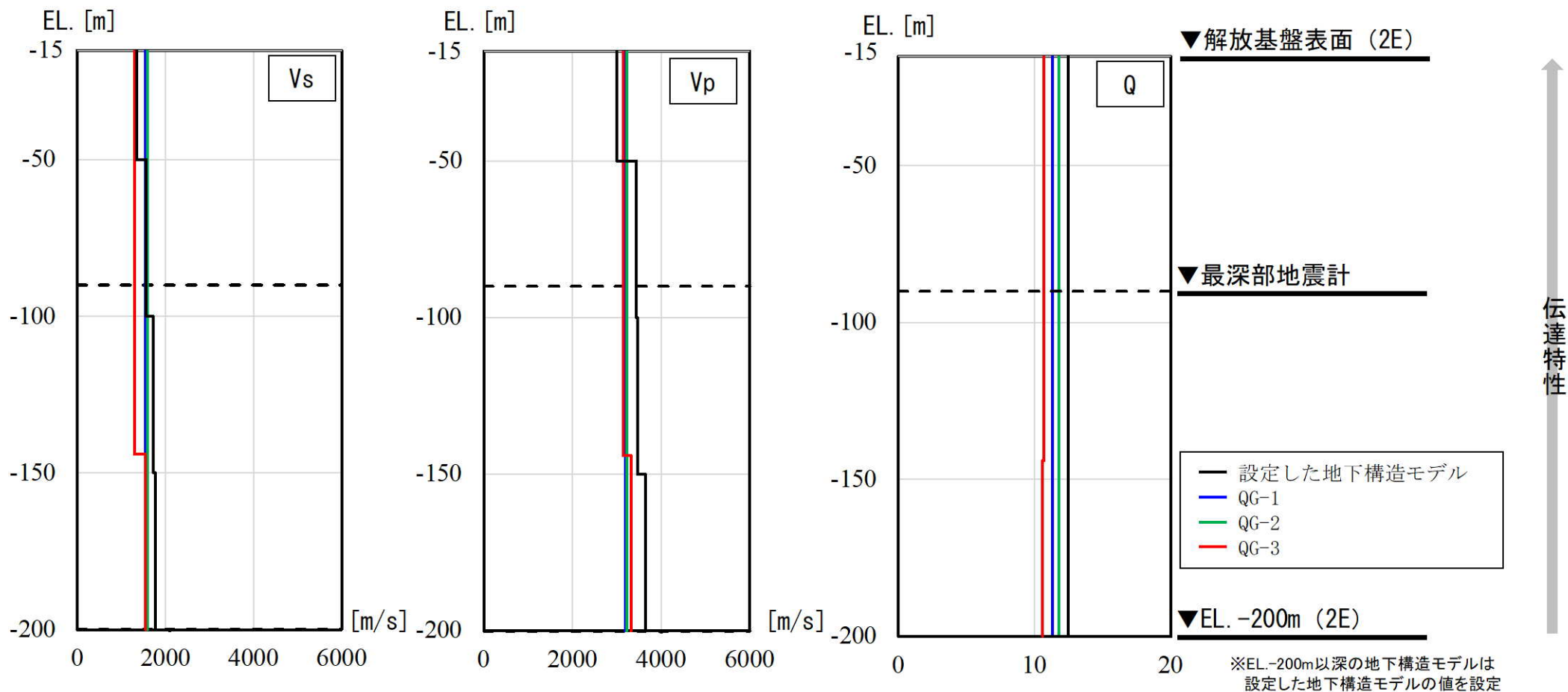
| 地表 ▼ (EL. 11.0m) | 設定した地下構造モデル | | | PS検層モデル | | | | |
|--------------------------|-------------|----------|------|---------|------|----------|----------|----|
| 解放基盤表面 ▼ (EL. -15.0m) | Vs (m/s) | Vp (m/s) | Q値 | 伝達特性 | 伝達特性 | Vs (m/s) | Vp (m/s) | Q値 |
| ▼ (EL. -50.0m) | 1350 | 3000 | 12.5 | | | PS検層結果 | | |
| ▼ (EL. -90.0m) | 1570 | 3440 | 12.5 | | | PS検層結果 | | |
| ▼ (EL. -100m) | | | | | | PS検層結果 | | |
| ▼ (EL. -150m) | 1730 | 3470 | 12.5 | | | PS検層結果 | | |
| ▼ (EL. -200m) | 1770 | 3650 | 12.5 | | | PS検層結果 | | |
| ▼ (EL. -1804m) | 2100 | 4000 | 200 | | | | | |
| | 3100 | 5500 | 300 | | | | | |

検討イメージ

3.4 地下構造モデルの妥当性確認

■ PS検層モデルの設定

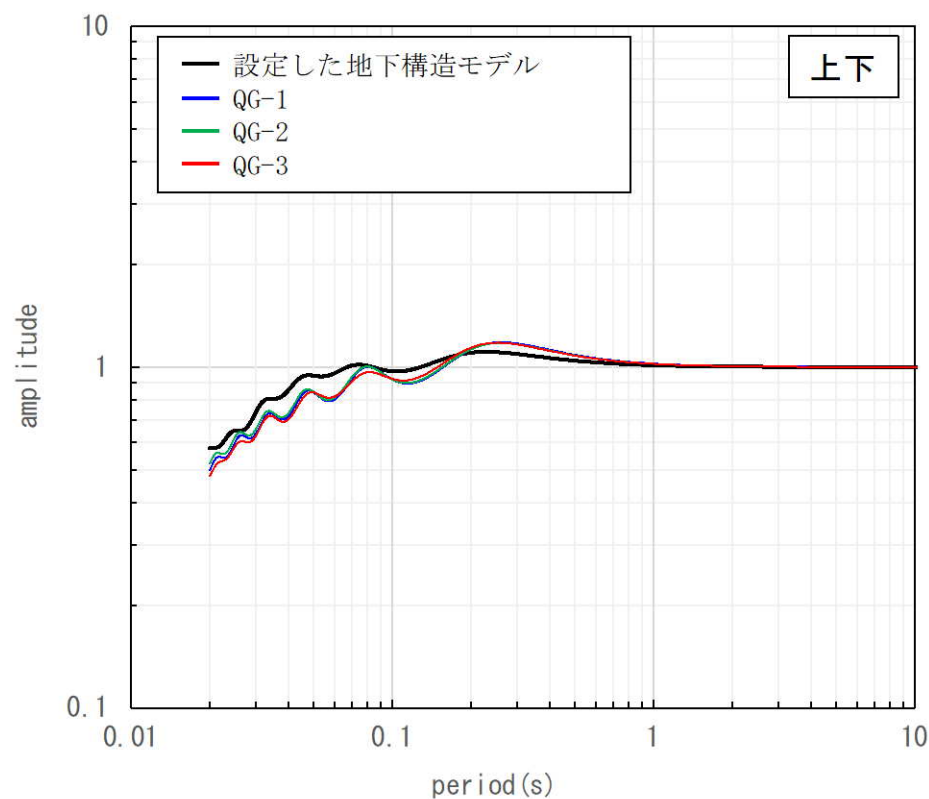
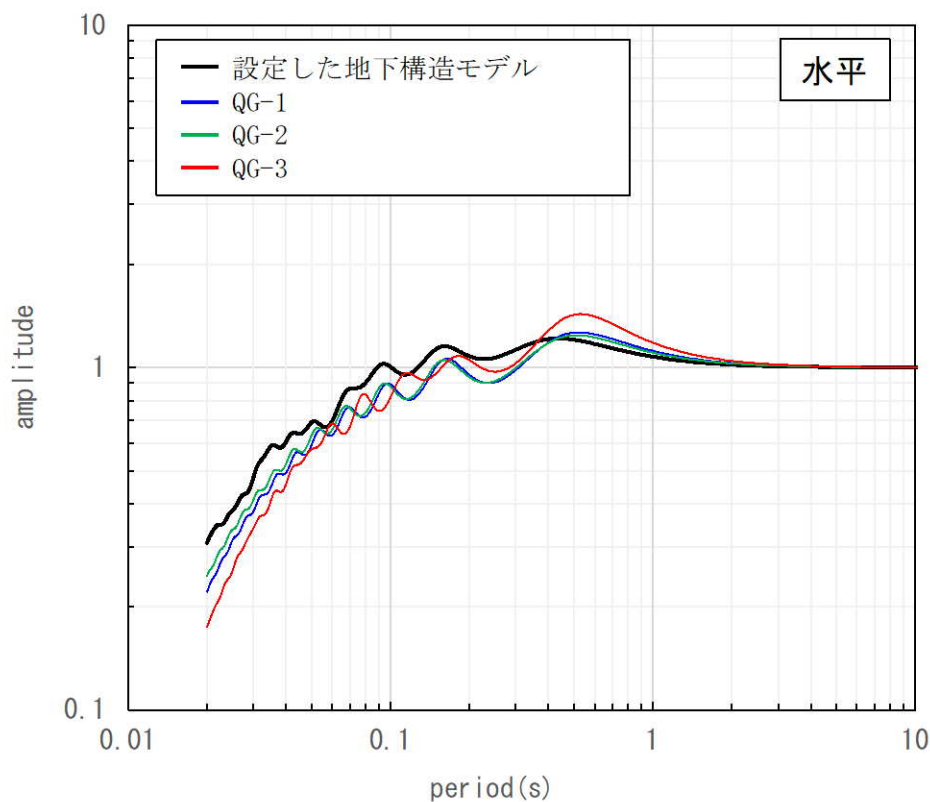
- 追加ボーリング孔におけるEL. -200mまでのPS検層結果を踏まえ、PS検層モデルを設定。
- 追加ボーリング孔におけるPS検層による速度 (V_s 、 V_p) は、設定した地下構造モデルと概ね整合している。
- 追加ボーリング孔内減衰測定によるQ値は、いずれも設定した地下構造モデルの $Q=12.5$ を下回る。なお、得られたQ値は、高周波数側におけるQ値の上限値に対応すると考えられるが、周波数によらず一定のQ値を設定。



3.4 地下構造モデルの妥当性確認

■ 伝達関数の比較

- 設定した地下構造モデルによる理論伝達関数（解放基盤表面／EL. -200m）が、PS検層モデルによる理論伝達関数（解放基盤表面／EL. -200m）に対して、同等もしくは上回ることを確認した。
 - なお、一部の周期帯（水平：0.5秒付近）の特徴的なピークの影響により下回るが、その要因は計算の境界条件（EL. -200mでの速度コントラスト）の影響であると考えられる。（89～93頁参照）
- ▼
- 解放基盤表面（EL. -15m）からEL. -200mまでの範囲における地下構造モデルは妥当と判断した。



3.4 地下構造モデルの妥当性確認

■ 計算の境界条件（EL. -200mでの速度コントラスト）の影響検討

- PS検層モデルの理論伝達関数（解放基盤表面／EL. -200m）の算出にあたり、EL. -200m以深の設定が必要であり、EL. -200m以深は設定した地下構造モデルを流用している。
- PS検層モデルの理論伝達関数に見られる一部の周期帯（水平：周期0.5秒付近）におけるピークの生成要因は、計算の境界条件（EL. -200mでの速度コントラスト）の影響によるものと考えられるため、以下の2ケースの検討による影響確認を実施した結果、計算の境界条件（EL. -200mでの速度コントラスト）によることを確認した。
 - a. 速度コントラストをなくした場合（PS検層モデルのEL. -200m以深を上層と同じ速度に設定）
 - b. 速度コントラストを大きくした場合（PS検層モデルのEL. -200m以深の速度を大きく設定）

| 地表 ▼ (EL. 11.0m) | 設定した地下構造モデル | | | QG-1モデル | | | QG-2モデル | | | QG-3モデル | | |
|--------------------------|-------------|-------------|------|-------------|-------------|------|-------------|-------------|------|-------------|-------------|------|
| 解放基盤表面 ▼ (EL. -15.0m) | Vs (m/s) | Vp (m/s) | Q値 | Vs (m/s) | Vp (m/s) | Q値 | Vs (m/s) | Vp (m/s) | Q値 | Vs (m/s) | Vp (m/s) | Q値 |
| ▼ (EL. -50.0m) | 1350 | 3000 | 12.5 | | | | | | | | | |
| ▼ (EL. -100m) | 1570 | 3440 | 12.5 | | | | | | | 1300 | 3140 | 10.7 |
| ▼ (EL. -144m) | 1730 | 3470 | 12.5 | 1550 | 3190 | 11.3 | 1590 | 3220 | 11.8 | | | |
| ▼ (EL. -150m) | | | | | | | | | | | | |
| ▼ (EL. -200m) | 1770 | 3650 | 12.5 | | | | | | | 1550 | 3320 | 10.6 |
| | 2100 | 4000 | 200 | 2100 | 4000 | 200 | 2100 | 4000 | 200 | 2100 | 4000 | 200 |

3.4 地下構造モデルの妥当性確認

a. 速度コントラストをなくした場合（PS検層モデルのEL. -200m以深を上層と同じ速度に設定）

- 速度コントラストをなくした場合のPS検層モデルを以下に示す。

| 地表 ▼ (EL. 11.0m) | QG-1aモデル | | | QG-2aモデル | | | QG-3aモデル | | | (出力) |
|--------------------------|----------|----------|------|----------|----------|------|----------|----------|------|------|
| 解放基盤表面 ▼ (EL. -15.0m) | Vs (m/s) | Vp (m/s) | Q値 | Vs (m/s) | Vp (m/s) | Q値 | Vs (m/s) | Vp (m/s) | Q値 | |
| ▼ (EL. -50.0m) | | | | | | | | | | |
| ▼ (EL. -90.0m) | 1550 | 3190 | 11.3 | 1590 | 3220 | 11.8 | 1300 | 3140 | 10.7 | |
| ▼ (EL. -100m) | | | | | | | | | | |
| ▼ (EL. -144m) | | | | | | | | | | |
| ▼ (EL. -150m) | | | | | | | 1550 | 3320 | 10.6 | |
| ▼ (EL. -200m) | | | | | | | | | | |
| | 1550 | 3190 | 200 | 1590 | 3220 | 200 | 1550 | 3320 | 200 | (入力) |

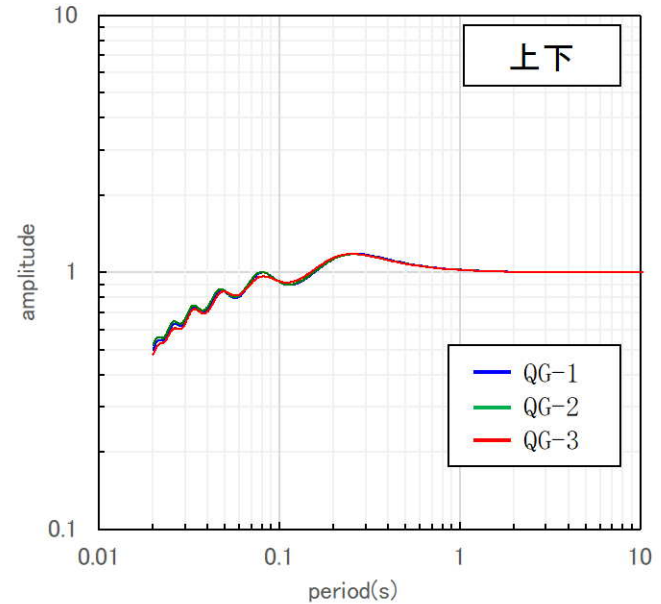
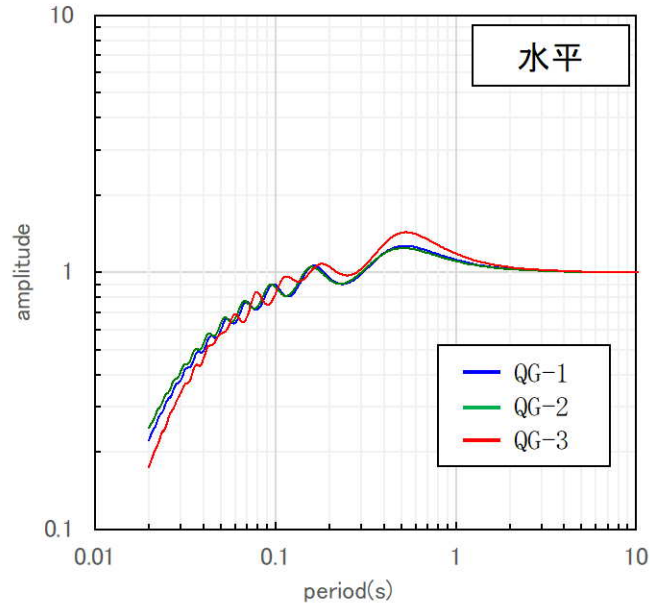
: PS検層モデル (QG-1~3) との相違点

3.4 地下構造モデルの妥当性確認

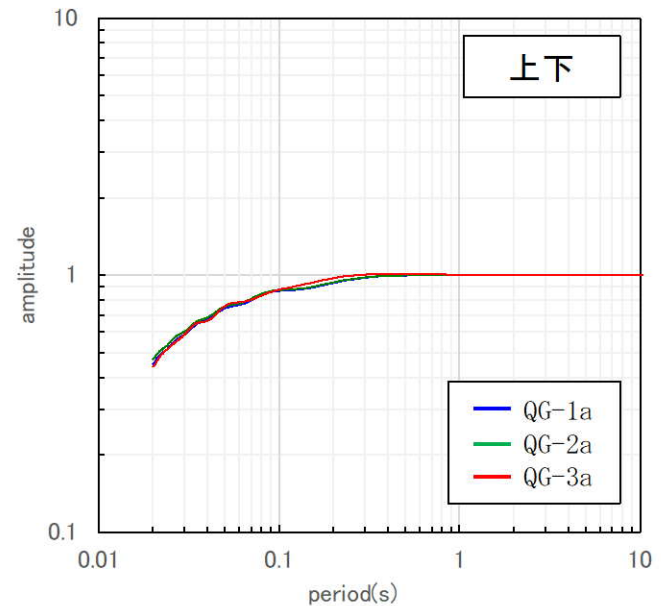
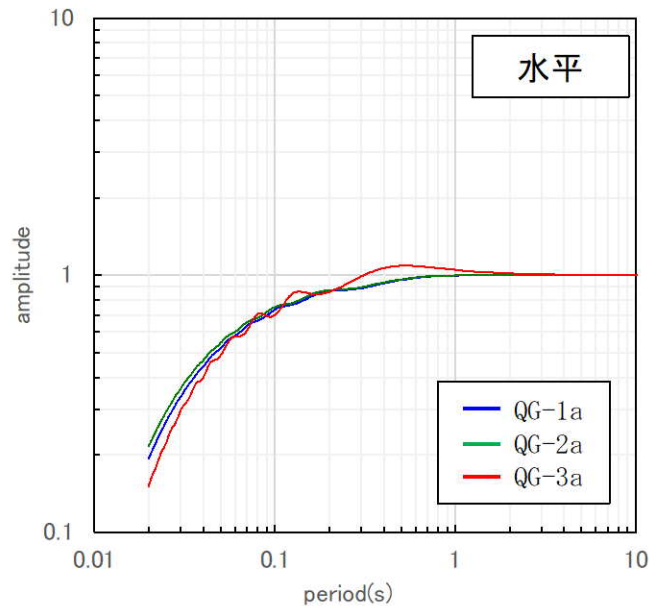
■ 伝達関数の比較

- 速度コントラストをなくした結果、一部の周期帯（水平：周期0.5秒付近）における特徴的なピークの解消を確認。

変更前
(コントラスト有)



変更後
(コントラスト無)



3.4 地下構造モデルの妥当性確認

a. 速度コントラストを大きくした場合（PS検層モデルのEL. -200m以深の速度を大きく設定）

- 速度コントラストを大きくした場合のPS検層モデルを以下に示す。

| 地表 ▼ (EL. 11.0m) | QG-1bモデル | | | QG-2bモデル | | | QG-3bモデル | | | (出力) | |
|--------------------------|----------|----------|------|----------|----------|------|----------|----------|------|------|-----------|
| 解放基盤表面 ▼ (EL. -15.0m) | Vs (m/s) | Vp (m/s) | Q値 | Vs (m/s) | Vp (m/s) | Q値 | Vs (m/s) | Vp (m/s) | Q値 | | |
| ▼ (EL. -50.0m) | | | | | | | | | | | ↑ (入力) |
| ▼ (EL. -90.0m) | 1550 | 3190 | 11.3 | 1590 | 3220 | 11.8 | 1300 | 3140 | 10.7 | | |
| ▼ (EL. -100m) | | | | | | | | | | | |
| ▼ (EL. -144m) | | | | | | | | | | | |
| ▼ (EL. -150m) | | | | | | | | | | | |
| ▼ (EL. -200m) | | | | | | | 1550 | 3320 | 10.6 | | |
| | 3100 | 5500 | 200 | 3100 | 5500 | 200 | 3100 | 5500 | 200 | (入力) | |

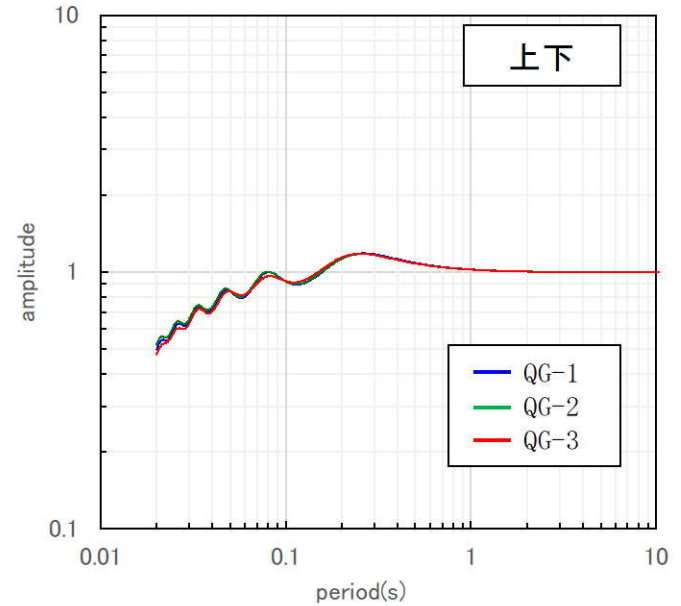
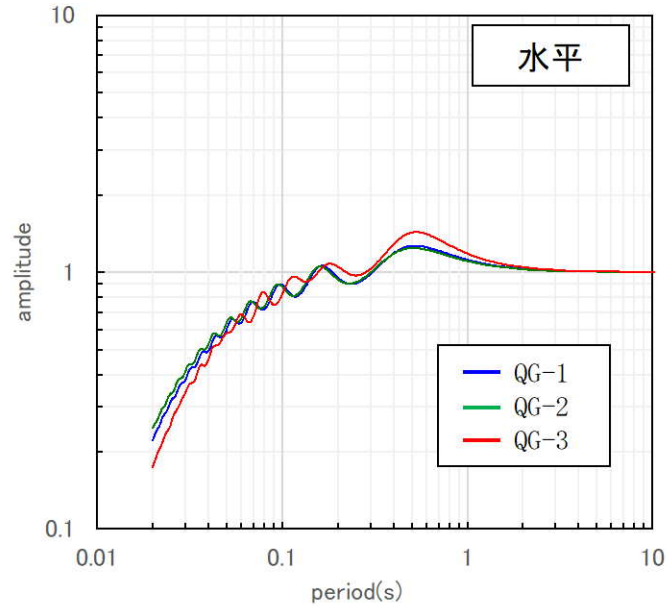
: PS検層モデル (QG-1~3) との相違点

3.4 地下構造モデルの妥当性確認

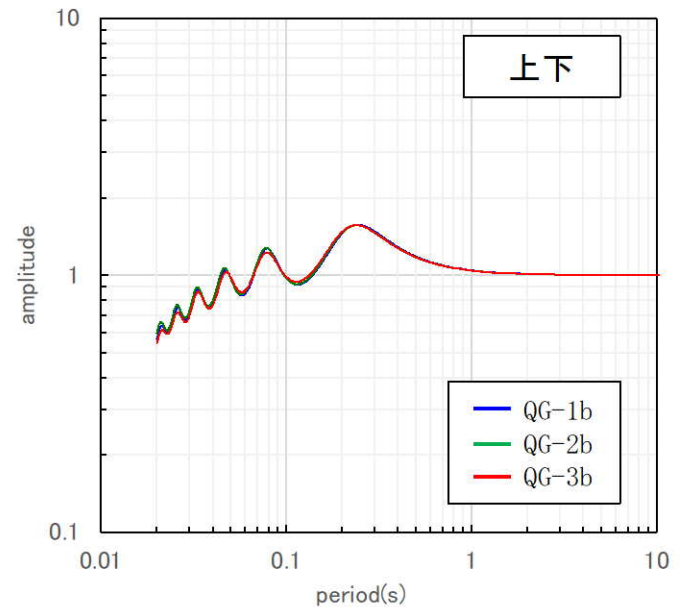
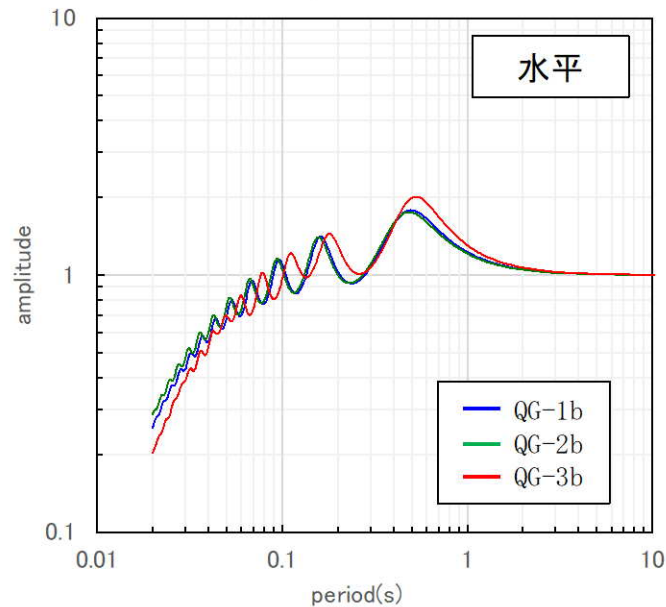
■ 伝達関数の比較

- 速度コントラストを大きくした結果、一部の周期帯（水平：周期0.5秒付近）における特徴的なピークの増大を確認。

変更前
(コントラスト有)



変更後
(コントラスト大)



3.4 地下構造モデルの妥当性確認

「3.4 地下構造モデルの妥当性確認」のまとめ

- 解放基盤表面（EL. -15m）からEL. -90mの範囲の地下構造モデルについて、「地震観測記録の応答スペクトルによる確認」の結果、設定した地下構造モデルによる応答波の応答スペクトルが、地震観測記録の応答スペクトルと同等もしくは上回ることから、妥当性を確認。
- 解放基盤表面（EL. -15m）からEL. -200mの範囲の地下構造モデルについて、「PS検層モデルとの比較による確認」の結果、設定した地下構造モデルによる理論伝達関数が、PS検層モデルによる理論伝達関数に対して、同等もしくは上回ることから、妥当性を確認。

3.5 標準応答スペクトル用モデルの設定

■ 地盤減衰（Q値）の見直し

- 標準応答スペクトルを考慮した地震動に更に余裕を持たせることで安全裕度の向上を図るため、地盤減衰（Q値）を見直し。
- 以下の違いを踏まえ、EL. -90mからEL. -200mまでの範囲の地盤減衰（Q値）を $Q=12.5$ から $Q=16.7$ に見直し。
 - 解放基盤表面からEL. -90mまでの範囲の地盤減衰（Q値）は、地震観測記録の検討に基づき設定し、地震観測記録との整合性に基づいて、妥当性を直接的に確認している。
 - EL. -90mからEL. -200mまでの範囲の地盤減衰（Q値）は、既存の速度層断面を用いた確認によりEL. -90m以浅と同じ地盤減衰（Q値）を設定し、地震観測記録ではなく、ボーリング孔内における減衰測定等により妥当性を確認している。

| | | |
|-----------------------|--------------|--|
| ▼ EL. 11.0m（地表） | | |
| ▼ EL. -15.0m（解放基盤表面） | 地震観測記録 | 地盤減衰（Q値） |
| ▼ EL. -90.0m（最深部地震計） | | 地震観測記録を用いた以下の検討結果に基づき、設定 <ul style="list-style-type: none"> ・伝達関数（周波数依存型）による検討 ・伝達関数（バイリニア型）による検討 ・地震波干渉法による検討 以下により、妥当性を確認 <ul style="list-style-type: none"> ・応答スペクトルによる確認 ・伝達関数による確認 |
| ▼ EL. -200m | ボーリング孔内減衰測定等 | 以下の検討結果に基づき、EL. -90m以浅と同等に設定 <ul style="list-style-type: none"> ・速度層断面による検討 以下により、妥当性を確認 <ul style="list-style-type: none"> ・ボーリング孔内減衰測定による確認 ・岩石コア減衰測定による確認 |
| ▼ EL. -1804m（地震基盤相当面） | | 慣用値（ $V_s/15\sim 10$ ）を基に設定（既許可モデルの設定値と同値） |

3.5 標準応答スペクトル用モデルの設定

■ 標準応答スペクトル用モデルの設定

- 前頁を踏まえ、設定した地下構造モデルを以下の通り見直す。
- 見直し後の地下構造モデルを用いて、標準応答スペクトルを考慮した地震動評価を実施する。

※ 地盤減衰（Q値）の見直しにより地震動レベルは、最大加速度で10～20cm/s²程度増大すると想定。

設定した地下構造モデル

標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる地下構造モデル
(標準応答スペクトル用モデル)

| EL. | 層上面 (km) | 密度 ρ (g/cm ³) | Vs (m/s) | Vp (m/s) | Q値 | 層上面 (km) | 密度 ρ (g/cm ³) | Vs (m/s) | Vp (m/s) | Q値 |
|--------|-------------|-----------------------------------|-------------|-------------|------|-------------|-----------------------------------|-------------|-------------|------|
| 解放基盤表面 | | | | | | | | | | |
| -15m | 0.0 | 2.35 | 1350 | 3000 | 12.5 | 0.0 | 2.35 | 1350 | 3000 | 12.5 |
| -50m | | | | | | | | | | |
| -90m | -0.035 | 2.35 | 1570 | 3440 | 12.5 | -0.035 | 2.35 | 1570 | 3440 | 12.5 |
| -100m | | | | | | | | | | |
| -150m | -0.085 | 2.35 | 1730 | 3470 | 12.5 | -0.085 | 2.35 | 1730 | 3470 | 16.7 |
| -200m | | | | | | | | | | |
| -1804m | -1.789 | 2.60 | 3100 | 5500 | 300 | -1.789 | 2.60 | 3100 | 5500 | 300 |

: 見直し範囲

3.6 まとめ (1/2)

- 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価にあたり、既許可以降取得した地震観測記録等や最新知見に基づき、地震基盤相当面から解放基盤表面までの標準応答スペクトル用モデルを新たに設定するとともに、その妥当性について確認した。

■ 地下構造モデルの設定

- 既許可以降の地震観測記録の分析の結果、速度構造は既許可モデルの速度構造と同じ設定で妥当、地盤減衰（Q値）は精度・信頼性の向上が見込まれると判断した。このため、地盤減衰（Q値）について、地震観測記録や最新の技術的知見に基づく多面的な検討を実施した。

【最深部地震計以浅（EL. -90m以浅）の地盤減衰（Q値）】

- 地震観測記録や最新の知見に基づく多面的な検討を実施し、周波数に依存せず一律で地盤減衰 $Q=12.5$ と設定した。
- 設定した地盤減衰（Q値）の妥当性について、地震観測記録を用いて、応答スペクトル及び伝達関数により確認した。

【最深部地震計以深（EL. -90m以深）の地盤減衰（Q値）】

- 速度層断面による検討の結果、解放基盤表面からEL. -200mまでの範囲は、最深部地震計以浅と最深部地震計以深の速度に大きな差異が見られないことから、最深部地震計以深の地盤減衰（Q値）は、最深部地震計以浅と同じ $Q=12.5$ と設定した。
- 設定した地盤減衰（Q値）の妥当性について、追加ボーリング孔及び岩石コアを用いた減衰測定により確認した。

3.6 まとめ (2/2)

■ 地下構造モデルの妥当性確認

- 解放基盤表面 (EL. -15m) からEL. -90mの範囲の地下構造モデルについて、「地震観測記録の応答スペクトルによる確認」の結果、設定した地下構造モデルによる応答波の応答スペクトルが、地震観測記録の応答スペクトルと同等もしくは上回ることから、妥当性を確認した。
- 解放基盤表面 (EL. -15m) からEL. -200mの範囲の地下構造モデルについて、「PS検層モデルとの比較による確認」の結果、設定した地下構造モデルによる理論伝達関数が、PS検層モデルによる理論伝達関数に対して、同等もしくは上回ることから、妥当性を確認した。

■ 標準応答スペクトル用モデルの設定

- 標準応答スペクトルを考慮した地震動に更に余裕を持たせることで安全裕度の向上を図るため、EL. -90mからEL. -200mまでの範囲の地盤減衰 (Q値) を $Q=12.5$ から $Q=16.7$ に見直した。