

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6月16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. 9
3. 地下構造モデルの設定	P. 14
3.1 地下構造モデルの設定方針	P. 15
3.1.1 既許可以降に取得した地震観測記録	P. 17
3.1.2 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	P. 18
3.1.3 標準応答スペクトル用モデルの設定方針	P. 23
3.2 地盤減衰 (Q値) の設定	P. 28
3.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)	P. 29
(1) 地盤減衰 (Q値) の検討	P. 29
a. 伝達関数 (周波数依存型) による検討	P. 30
b. 伝達関数 (バイリニア型) による検討	P. 34
c. 地震波干渉法による検討	P. 38
(2) 地盤減衰 (Q値) の確認	P. 46
a. 応答スペクトルによる地盤減衰 (Q値) の確認	P. 46
b. 伝達関数による地盤減衰 (Q値) の確認	P. 57
(3) 地盤減衰 (Q値) の設定	P. 58
3.2.2 最深部地震計以深の地盤減衰 (Q値)	P. 59
(1) 地盤減衰 (Q値) の検討	P. 59
a. 速度層断面による検討	P. 60
b. ボーリング孔内減衰測定による検討	P. 64
(2) 地盤減衰 (Q値) の確認	P. 68
a. 岩石コアを用いた減衰測定による確認	P. 68
(3) 地盤減衰 (Q値) の設定	P. 72
3.3 地下構造モデルの設定	P. 73

目次 (2/2)

3.4 地下構造モデルの妥当性確認	P. 74
(1)地震観測記録の応答スペクトルによる確認	P. 75
(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. 92
3.6 標準応答スペクトル用モデルの妥当性確認	P. 93
3.7 まとめ	P. 96
3.8 今後の取り組み	P. 98
【補足①】 深部地下構造モデルの確認	P. 99
【補足②】 地震観測記録の伝達関数との整合性に関する検討	P. 101
【補足③】 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. 110
【補足④】 PS検層モデルとの比較による確認における境界条件の影響検討	P. 117
【補足⑤】 上下方向に関する観測事実との整合性に係る検討	P. 131
【補足⑥】 地震観測記録を用いた地盤減衰 (Q値) の見直しの影響検討	P. 137
【補足⑦】 既許可の地震動評価への影響確認	P. 151
【参考①】 既許可の地下構造モデル	P. 167
【参考②】 地盤減衰 (Q値) の周波数依存性及び上限に関する知見	P. 178
【参考③】 ボーリング孔内Q値に関する知見	P. 186
【参考④】 岩石コアQ値に関する知見	P. 192
【参考⑤】 友澤ほか (2021) の概要	P. 194
【参考⑥】 経験的地盤増幅率による確認	P. 205
【参考⑦】 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. 209
【参考⑧】 友澤ほか (2021) のブロックインバージョン結果の確認	P. 246
【参考⑨】 ブロックインバージョンにおける残差	P. 250



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： 資料1-2にて説明
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)	第1142回会合にて説明
14	審査会合において確認した上下動の一部周期における観測記録との不整合の要因及び地下構造モデルへの反映要否についての考え方などを資料に反映すること。	第1142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4月28日)	今回説明 (P90、131~136)
15	EL. -90mからEL. -200mの範囲の地盤減衰を $Q=16.7$ に設定した標準応答スペクトル用モデルと観測事実との比較結果について、資料に追加すること。		今回説明 (P93~95、137~150)

1. コメントリスト及び今後の審査スケジュール

■ 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 今回説明 （P151～166）
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： 資料1-2にて説明
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

〔本日のご説明〕

今回、第1142回審査会合でいただいたコメントに対して、資料を整え直した以下の内容についてご説明。

■ No. 14に対するコメント回答概要

- 解放基盤表面からEL. -90mまでの範囲では、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、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、スペクトル形状（凹凸）の僅かな差異により局所的に観測記録を下回るが、解放基盤表面からEL. -200mまでの範囲では、設定した地下構造モデルとPS検層モデルの伝達関数の比較結果によると、上下方向の当該周期帯において十分な保守性を有する地下構造モデルであることから、地下構造モデルの妥当性に影響はないと判断。（90頁、131~136頁）

■ No. 15に対するコメント回答概要

- 以下の比較結果について、資料に追加。
 - 標準応答スペクトル用モデルの妥当性確認のための標準応答スペクトル用モデルとPS検層モデルの理論伝達関数の比較結果。（93頁~95頁）
 - 地震観測記録を用いた地盤減衰（Q値）の見直しの影響検討のための設定した地下構造モデルと標準応答スペクトル用モデルの最大加速度等の比較結果。（137頁~150頁）

■ No. S-2に対するコメント回答概要

- 既許可の「断層モデルを用いた手法」による地震動評価のうち、地下構造モデルを使用しているハイブリッド合成法（「経験的グリーン関数法+理論的手法」）における理論的手法、及び経験的グリーン関数法の妥当性確認における統計的グリーン関数法について、標準応答スペクトル用モデルが与える影響について確認し、既許可の地震動評価への影響がないことを確認。（151頁~166頁）

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					(方針) 第1088回 ▼★												▼: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
	・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					(方針) 第1088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																	
模擬地震波	・乱数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																	
	・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、乱数位相を用いた地震波を選定した妥当性を説明																	
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	-	・基礎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																	
補正申請	-	-	-																	

▼: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]

(特重)
 ☆
 (特重以外)
 ☆

(安定性解析) ◇

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、短周期から長周期までの全ての周期帯の地震動評価に適用。(3.1節)
- 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等の観測事実等に基づき、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。(3.1.3項、3.3節)
 - 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)(3.1.1項)
 - EL. -200mまでのボーリング孔内減衰測定を3箇所を実施。(3.1.3項)
- 既許可以降の地震観測記録の分析の結果、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、速度構造は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。(3.1.2項、3.1.3項)
- 既許可の地下構造モデルは、長周期帯の地震動評価に用いていたが、その設定根拠は長周期帯に限定したものではないため、短周期帯の地震動評価にも用いる。(3.1.3項)

【EL. -200m以深】

- 既許可の地下構造モデルを流用して設定し、短周期から長周期までの全ての周期帯への適用性を確認。(3.1.3項、3.3節)

【EL. -200m以浅】

- 速度構造・密度は、既許可の地下構造モデルを流用して設定。(3.3節)
- 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ボーリング孔内減衰測定結果等の観測事実等に基づき、最新の技術的知見を取り入れた多面的な検討・確認を実施し、 $Q=12.5$ と設定。(3.2節、3.3節)

2. 地下構造モデルの設定の概要

■ 地下構造モデルの設定

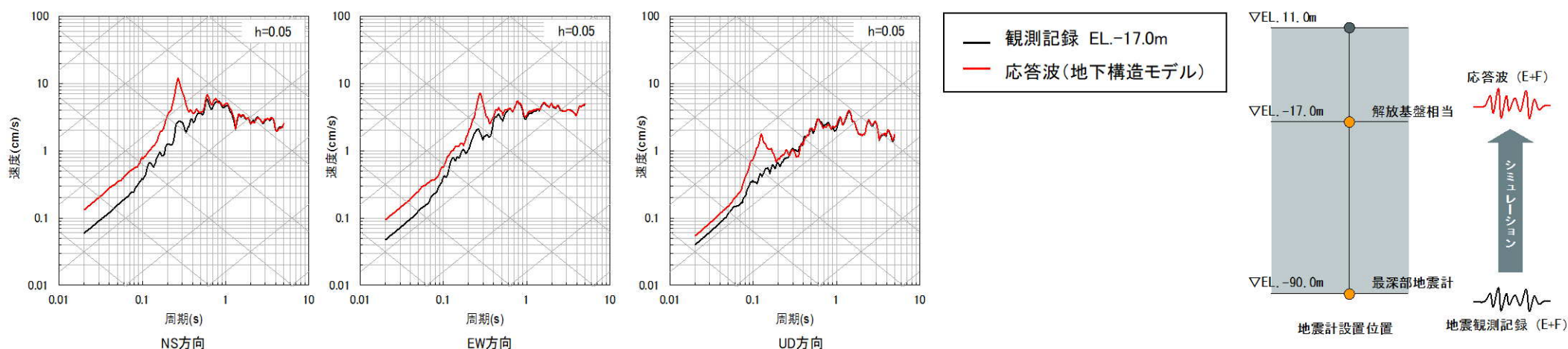
- 前頁を踏まえ設定した地下構造モデルを以下に示す。

地表 ▼ EL. 11. 0m		密度 ρ (g/cm ³)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値	設定根拠	
解放基盤表面 ▼ EL. -15. 0m	速度構造・密度					地盤減衰 (Q値)	
	鉛直アレイ地震観測記録 ボーリング孔内減衰測定等	2. 35	1350	3000	12. 5	既許可の地下構造モデルを流用 速度構造は、試掘坑内弾性波試験結果を基に設定 密度は、岩石試験結果を基に設定	地震観測記録を用いた以下の検討・確認結果に基づき設定 ・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 ・応答スペクトルによる確認 ・伝達関数による確認
▼ EL. -50. 0m							
最深部地震計 ▼ EL. -90. 0m		2. 35	1570	3440	12. 5	既許可の地下構造モデルを流用 速度構造は、PS検層結果を基に設定 密度は、岩石試験結果を基に設定	以下の検討・確認結果に基づき、EL. -90m 以浅と同様に設定 ・速度層断面による検討 ・ボーリング孔内減衰測定による検討 ・岩石コアを用いた減衰測定による確認
▼ EL. -100m					12. 5		
▼ EL. -150m		2. 35	1730	3470	12. 5		
▼ EL. -200m		2. 35	1770	3650	12. 5		
地震基盤相当面 ▼ EL. -1804m		2. 40	2100	4000	200	既許可の地下構造モデルを流用 地震調査委員会（2007）を基に設定	既許可の地下構造モデルを流用 慣用値 (Vs/15~10) を基に設定
		2. 60	3100	5500	300		

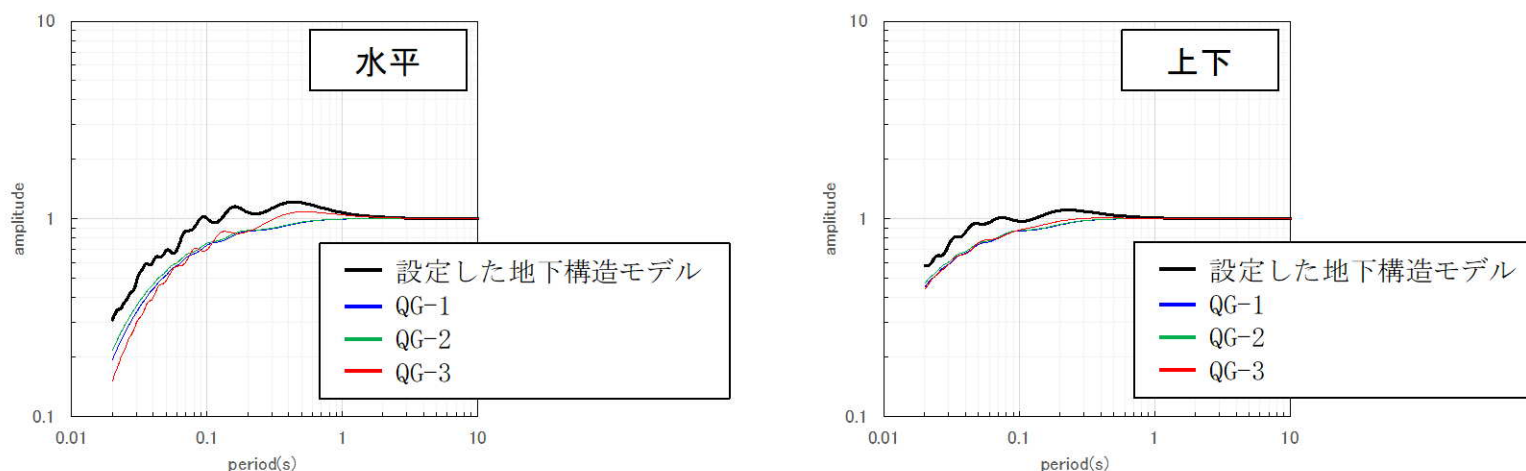
2. 地下構造モデルの設定の概要

■ 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等（伝達関数）の新たに得られた観測事実を用いて、全ての周期帯における妥当性を確認。（3.4節）
 - 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 (EL. -15m/EL. -200m) による比較結果

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

- EL. -90mからEL. -200mまでの範囲の地盤減衰（Q値）について、以下の点を踏まえ、地盤減衰（Q値）をQ=12.5からQ=16.7に見直し。（3.5節）
 - EL. -90mからEL. -200mまでの範囲は、地震観測記録が得られておらず、相対的に信頼性が劣る。
 - 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。

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）

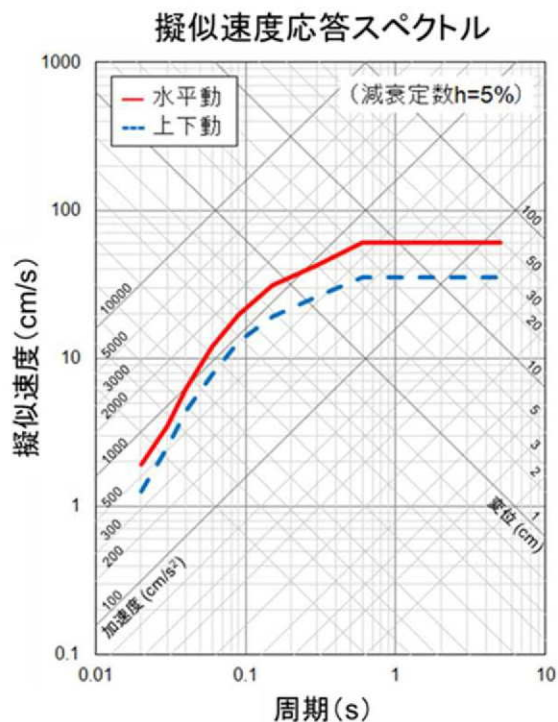
	層上面 (km)	密度 ρ (g/cm ³)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値
解放基盤表面					
-15m	0.0	2.35	1350	3000	12.5
-50m	-0.035	2.35	1570	3440	12.5
-90m	-0.075	2.35	1570	3440	16.7
-100m	-0.085	2.35	1730	3470	16.7
-150m	-0.135	2.35	1770	3650	16.7
-200m	-0.185	2.40	2100	4000	200
地震基盤相当面					
-1804m	-1.789	2.60	3100	5500	300

3. 地下構造モデルの設定

3.1 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

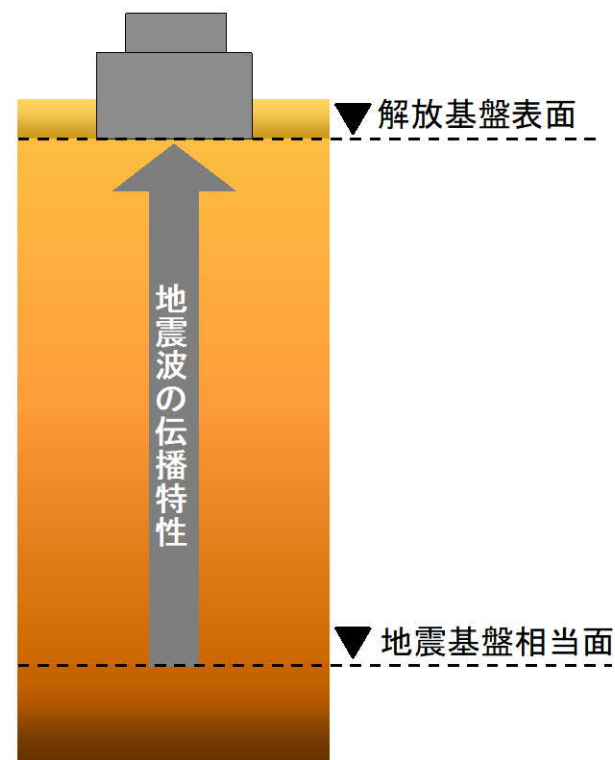
- 標準応答スペクトルは、周期0.02秒から5秒までの応答スペクトルで定義されることを踏まえ、全ての周期帯に適用できる地下構造モデルを設定することが必要となる。
- また、標準応答スペクトルは、地震基盤相当面で定義されるため、地震基盤相当面から解放基盤表面までの地下構造モデルを設定する。
- 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる地下構造モデル（以下、標準応答スペクトル用モデル）の設定にあたっては、既許可以降継続的に取得している鉛直アレイの地震観測記録やボーリング孔内減衰測定結果等の観測事実等に基づき、最新の技術的知見を取り入れた多面的な検討・確認を実施。



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 地下構造モデルの設定方針

① 既許可の地下構造モデル（参考①）

- 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。
- 解放基盤表面からEL. -200mの範囲について、速度構造は、試掘坑内弾性波試験結果及び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。密度は、岩石試験結果に基づき設定。EL. -200m以深は、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（ $V_s/15\sim 10$ ）に基づき設定。
- 鉛直アレイや微動アレイ観測により確認。

② 地震観測記録の増加（3.1.1項）

- 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（3.1.2項）

- 地盤減衰（Q値）は、既許可の地下構造モデルのQ値を大きく下回ることを確認。
- 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。

④ 標準応答スペクトル用モデル（3.1.3項）

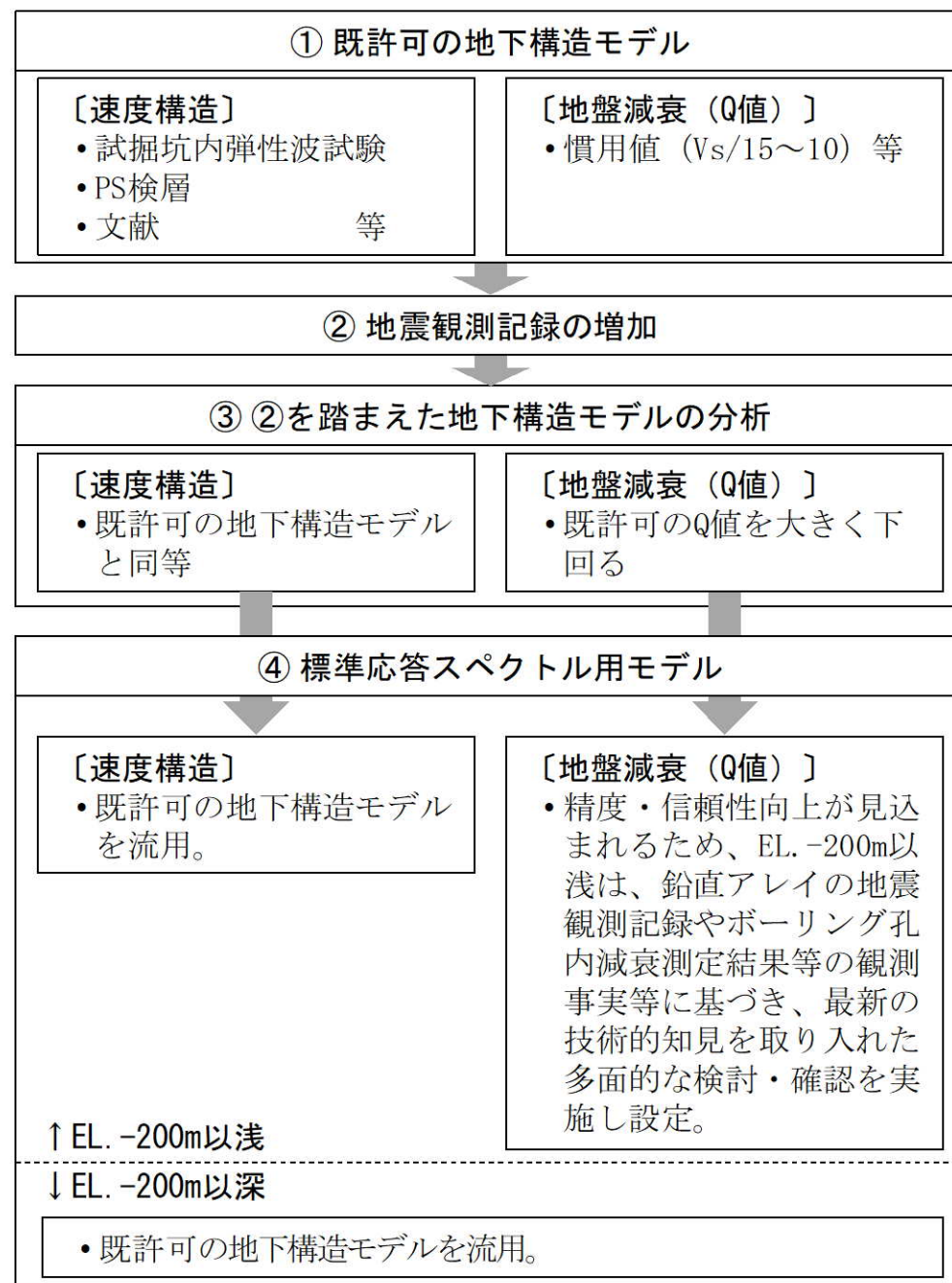
- 既許可の地下構造モデルは、長周期帯の地震動評価に用いていたが、その設定根拠は長周期帯に限定したのではないため、短周期帯の地震動評価にも用いる。

【EL. -200m以深】

- 既許可の地下構造モデルを流用して設定し、短周期から長周期までの全ての周期帯への適用性を確認。

【EL. -200m以浅】

- 速度構造・密度は、既許可の地下構造モデルを流用して設定。
- 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（19地震）やボーリング孔内減衰測定結果等の観測事実等に基づき、最新の技術的知見を取り入れた多面的な検討・確認を実施し、設定。
- 全ての周期帯における地下構造モデルの妥当性を、地震観測記録やボーリング孔内減衰測定結果等の観測事実により確認。



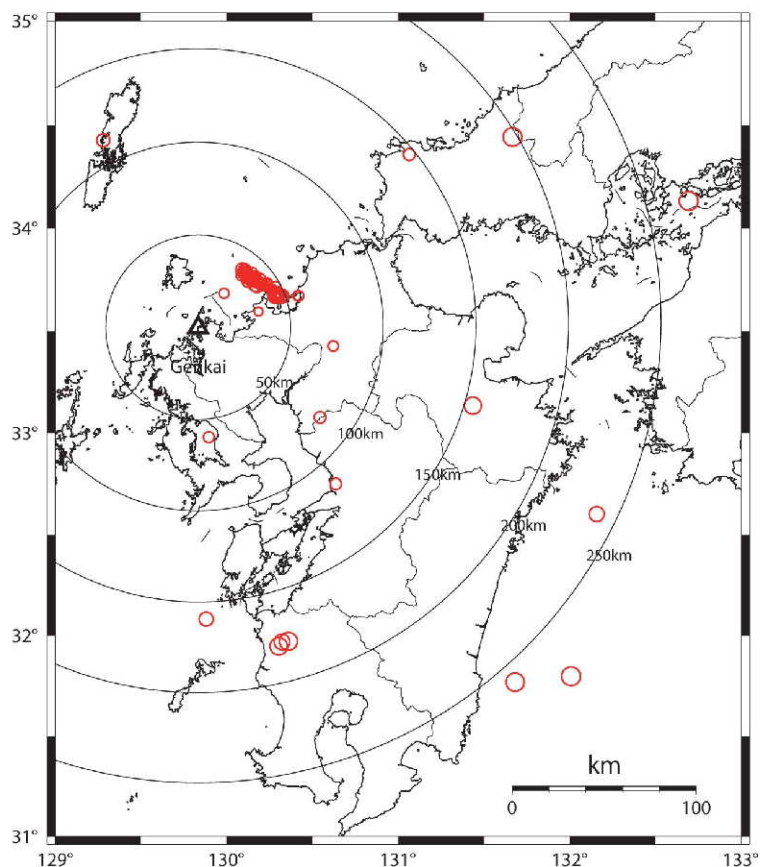
3.1.1 既許可以降に取得した地震観測記録

■ 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

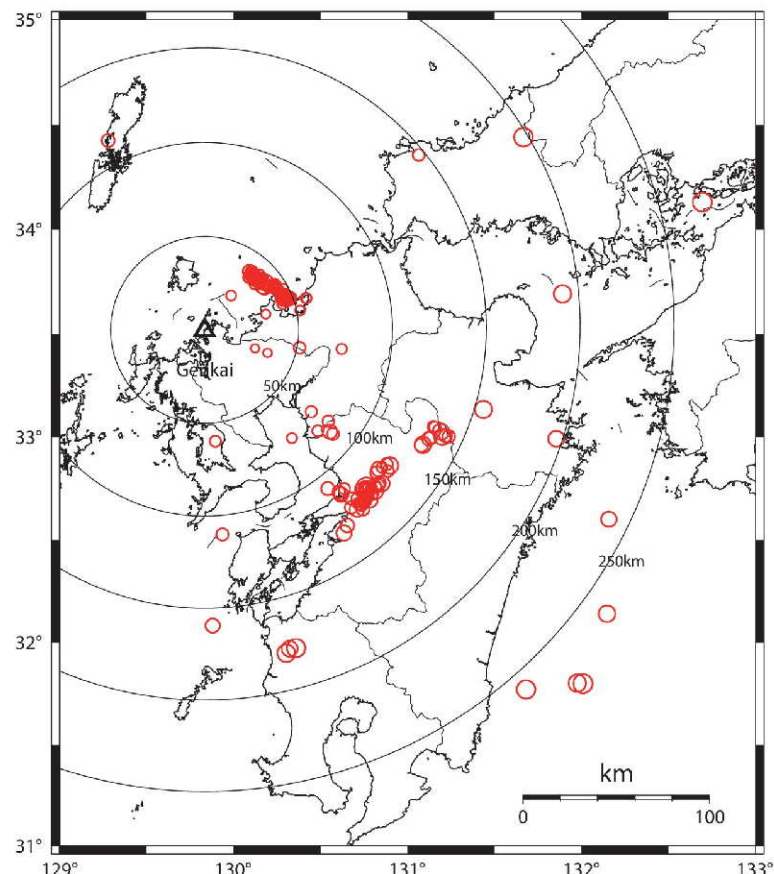
※2000年鳥取県西部地震は図の枠外



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

3.1.2 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

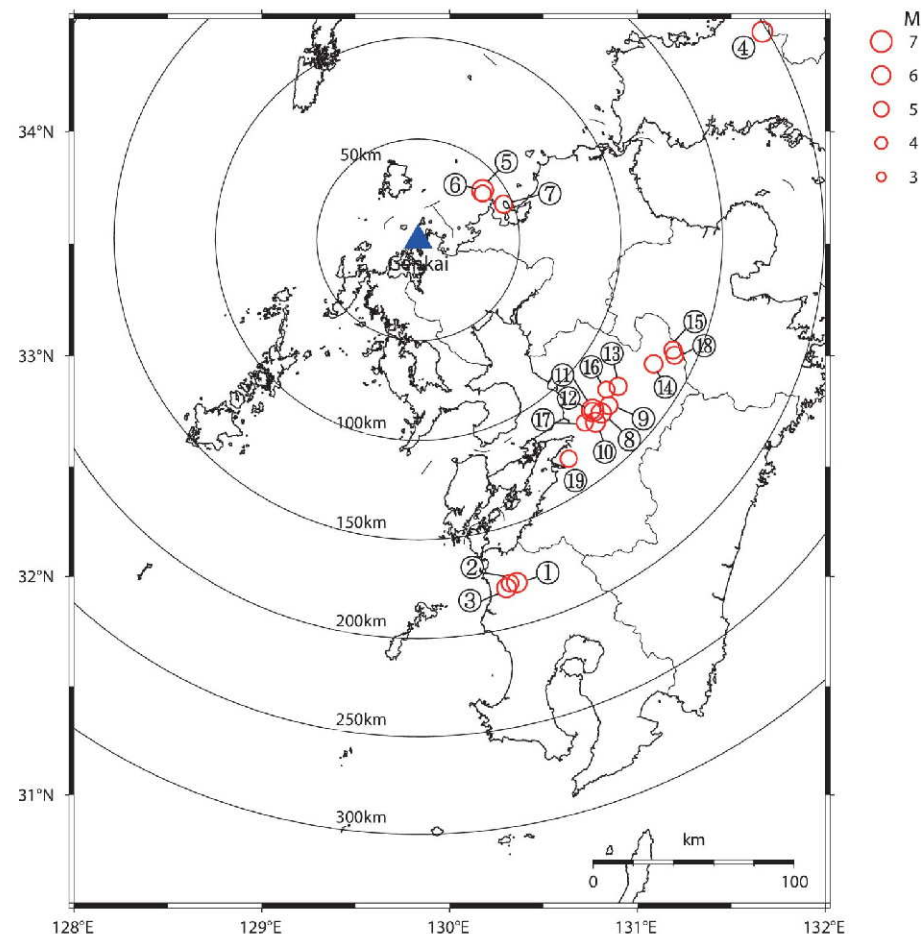
- 既許可時審査と同様の観点※で、既許可時審査以降に取得した地震観測記録を加えた計19地震の観測記録の伝達関数に対して、Vs、Vpと地盤減衰（Q値）の同定を実施。

※ 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



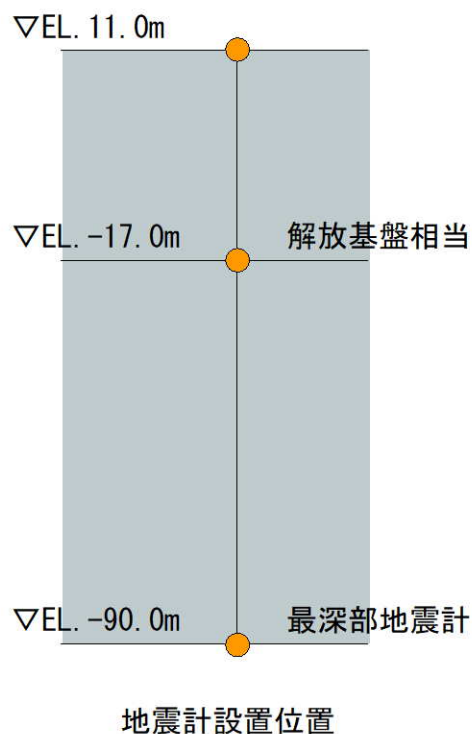
伝達関数（周波数依存型）による
地盤同定に用いた地震の震央位置（計19地震）

3.1.2 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

■ 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

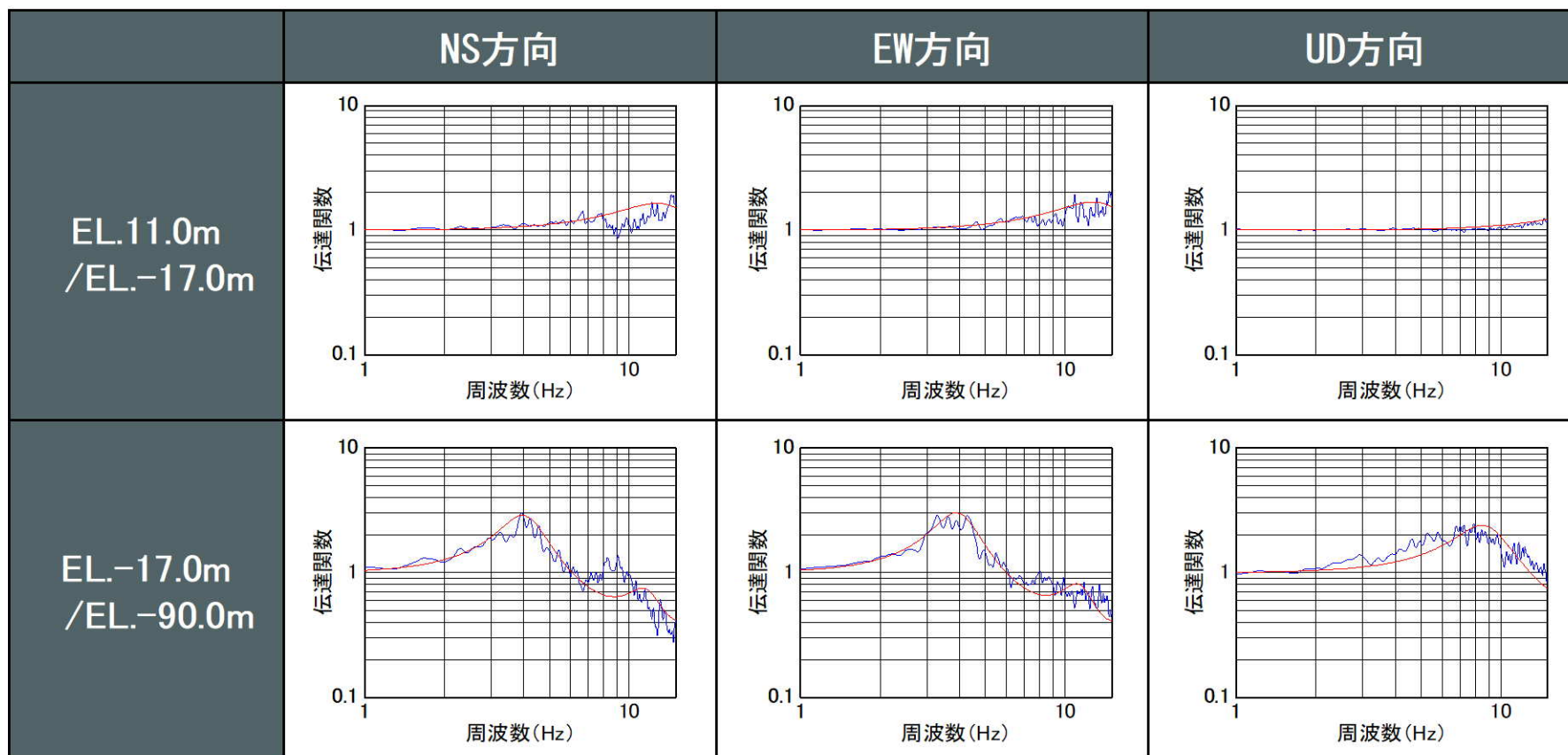
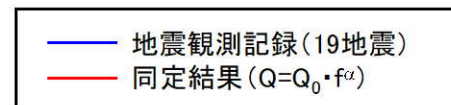


項目	条件
対象地震の選定条件	M5.4以上、震央距離200km程度以内の内陸地殻内地震
対象地震数	19地震
ターゲットとする観測伝達関数	19地震の平均伝達関数（NS, EW, UD成分） <ul style="list-style-type: none"> ・ EL. 11.0m/EL. -17.0m ・ EL. -17.0m/EL. -90.0m P波・S波を含む40秒間を抽出 Band幅0.2HzのParzenウィンドウ
同定方法	層厚、密度は既許可の地下構造モデルの値を参照し、S波速度 V_s 、P波速度 V_p 、地盤減衰（Q値）を同定
Q値	$Q(f) = Q_0 \cdot f^\alpha$

3.1.2 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

■ 地盤同定結果 (Vs、Vp、Q値同定解析)

- 同定結果の伝達関数と19地震の平均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

3.1.2 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

■ 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

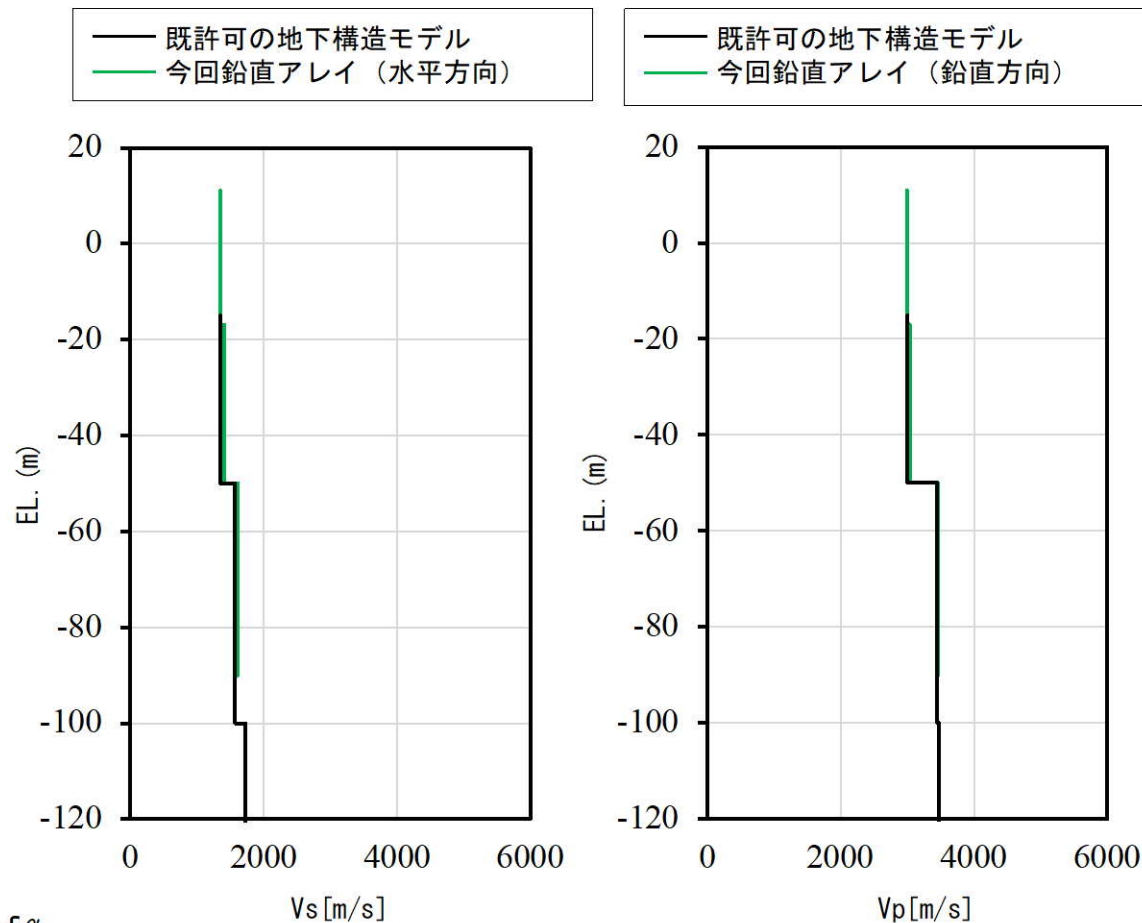
【EW方向】

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

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



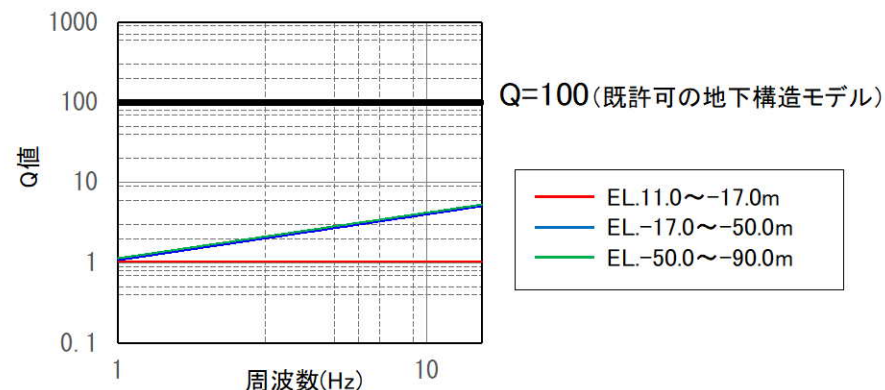
3.1.2 既許可以降に取得した地震観測記録を踏まえた地下構造モデルの分析

■ 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Q値を大きく下回ることを確認。

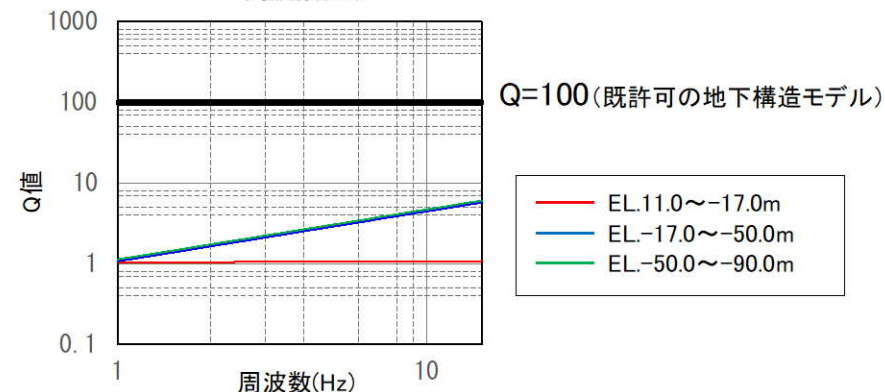
【NS方向】

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



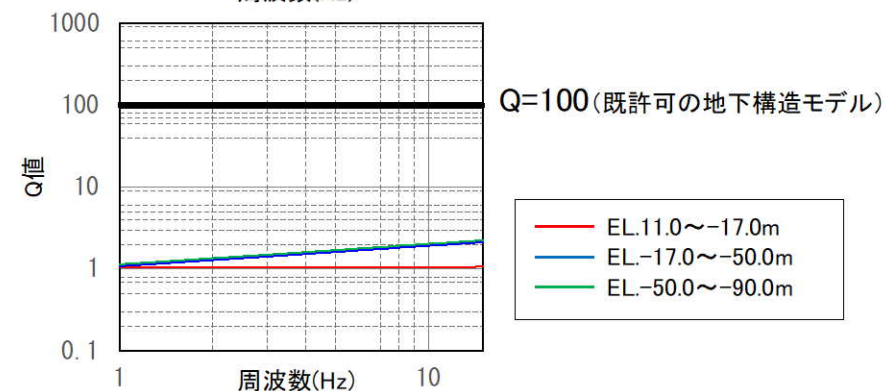
【EW方向】

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



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

3.1.3 標準応答スペクトル用モデルの設定方針

■ 地下構造モデルの設定方針 (1/2)

- 前項における既許可時審査以降に取得した地震観測記録を加えた分析により、以下の結果を確認。
 - 地盤減衰 (Q値) は、既許可の地下構造モデルのQ値を大きく下回り、精度・信頼性の向上が見込まれる。
 - 速度構造は、既許可の地下構造モデルの速度構造と同等である。
- 既許可の地下構造モデルは、「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」の「断層モデルを用いた手法による地震動評価」において、理論的手法による長周期帯の地震動評価に用いていたが、その設定根拠としたPS検層結果や文献等は長周期帯に限定したものではないため、短周期から長周期までの全ての周期帯の地震動評価に用いる。

【EL. -200m以深】

- 既許可の地下構造モデルを流用して設定し、短周期から長周期までの全ての周期帯への適用性を確認した。
 - 設定根拠としている地震調査委員会 (2007)²⁾における地盤構造の物性値は、詳細法 (ハイブリッド合成法) による強震動計算を目的として設定されており、短周期から長周期までの全ての周期帯へ適用されている。
 - なお、既許可以降の知見である防災科学技術研究所 地震ハザードステーション J-SHIS (V3.2)³⁾の深部地盤と、地震調査委員会 (2007) の地盤構造の物性値が整合する。(補足①)

【EL. -200m以浅】

- 速度構造・密度は、既許可の地下構造モデルを流用して設定する。
- 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ボーリング孔内減衰測定結果等の観測事実に基づき、最新の技術的知見を取り入れた多面的な検討・確認を実施し、設定する。
- 全ての周期帯における地下構造モデルの妥当性を、地震観測記録やボーリング孔内減衰測定結果等の観測事実により確認する。

3.1.3 標準応答スペクトル用モデルの設定方針

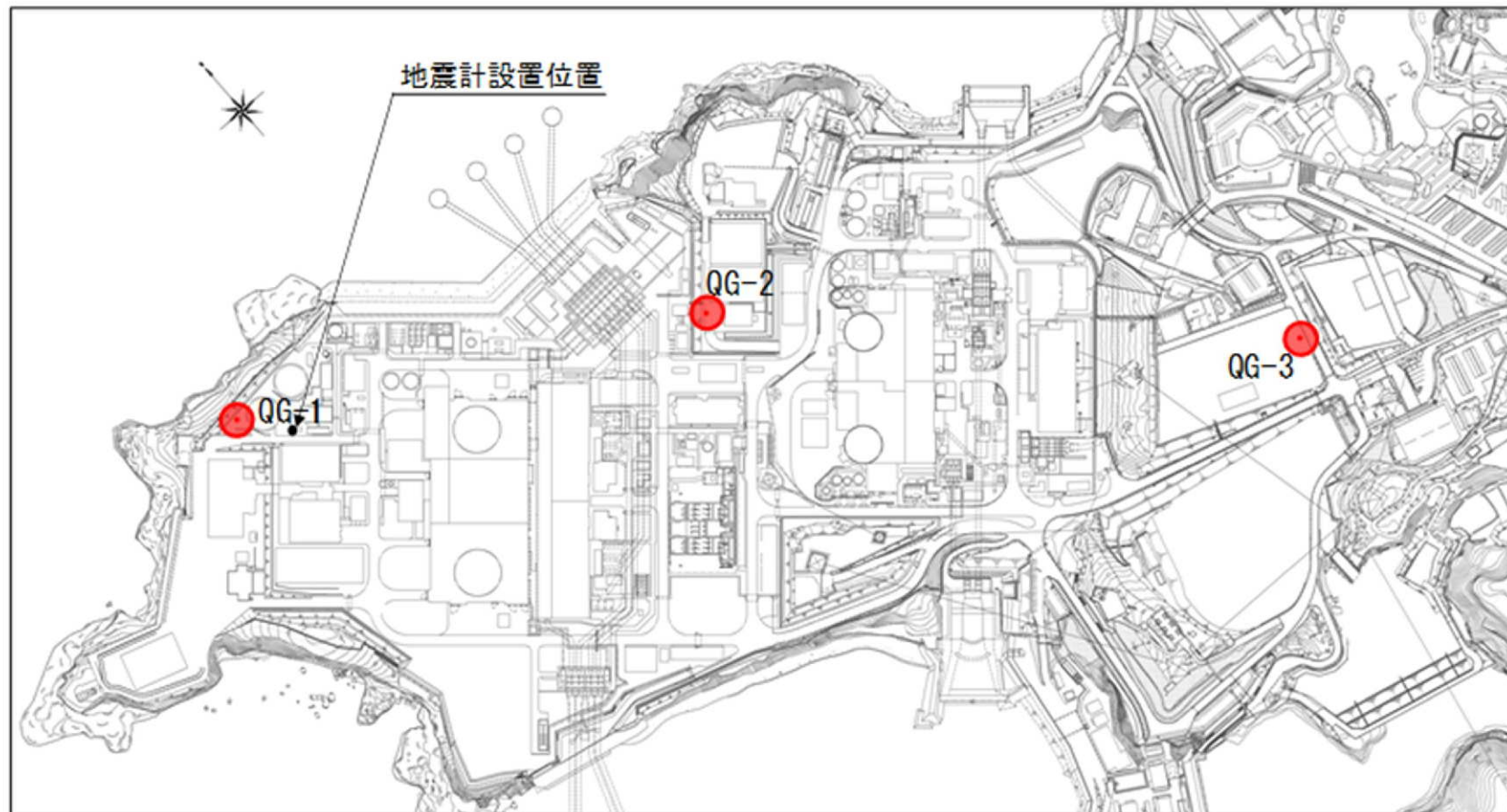
■ 地下構造モデルの設定方針 (2/2)

地表 ▼ EL. 11.0m 解放基盤表面 ▼ EL. -15.0m	地盤減衰 (Q値)	速度構造・密度
▼ EL. -50.0m 最深部地震計 ▼ EL. -90.0m	地震観測記録を用いた検討・確認結果に基づき 設定	既許可の地下構造モデルを流用 [速度構造は、試掘坑内弾性波試験結果を基に設定 密度は、岩石試験結果を基に設定]
▼ EL. -200m	ボーリング孔内減衰測定結果等を用いた検討・ 確認結果に基づき、EL. -90m以浅と同様に設定	既許可の地下構造モデルを流用 [速度構造は、PS検層結果を基に設定 密度は、岩石試験結果を基に設定]
地震基盤相当面 ▼ EL. -1804m	既許可の地下構造モデルを流用 [慣用値 ($V_s/15\sim 10$) を基に設定]	既許可の地下構造モデルを流用 [地震調査委員会 (2007) を基に設定]

3.1.3 標準応答スペクトル用モデルの設定方針

■ ボーリング孔内減衰測定

- 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。
- 追加ボーリング孔内減衰測定により、地盤減衰（Q値）を測定。
- 追加ボーリング孔におけるPS検層により、速度（Vs、Vp）を測定。



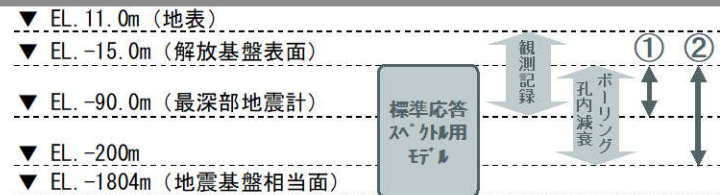
3.1.3 標準応答スペクトル用モデルの設定方針

■ 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）の検討の多面化・ 設定した地下構造モデルの妥当性確認の多面化
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）の検討の多面化
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）の検討の多面化
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）を検討、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">・ 地盤減衰（Q値）の検討の多面化・ 設定した地下構造モデルの妥当性確認の多面化
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）を確認	<ul style="list-style-type: none">・ 地盤減衰（Q値）の確認の多面化

3.1.3 標準応答スペクトル用モデルの設定方針

■ 地盤減衰（Q値）の設定及び地下構造モデルの妥当性確認の流れ



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）の設定【3.2.1項】

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）を複数の手法により検討。

- 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)

検討結果を踏まえ、保守的にQ=12.5とした地盤減衰（Q値）を確認。

- 応答スペクトルによる確認
- 伝達関数による確認

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）の設定【3.2.2項】

最深部地震計以深の地盤減衰（Q値）が最深部地震計以浅と同等であることを複数の手法により検討。

- 速度層断面による検討
 - 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。
- ボーリング孔内減衰測定による検討
 - ボーリング孔内測定による地盤減衰（Q値）が、最深部地震計以浅と最深部地震計以深で同等であることを確認。

検討結果を踏まえ、最深部地震計以浅と同じQ=12.5とした地盤減衰（Q値）を確認。

- 岩石コアを用いた減衰測定による確認
 - 岩石コアを用いた測定による岩石の減衰（Q値）が、最深部地震計以浅と最深部地震計以深で同等であることを確認。

EL. -200mまでの範囲の地盤減衰（Q値）は、最深部地震計以浅と同じQ=12.5と設定

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。
- 速度構造・密度及びEL. -200m以深の地盤減衰（Q値）は、既許可の地下構造モデルを流用。

地下構造モデルの妥当性確認【3.4節】

解放基盤表面からEL. -200mまでの範囲について、全ての周期帯における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 (①) [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 (②) [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ボーリング孔内減衰測定結果等の観測事実等に基づき、最新の技術的知見を取り入れた評価により、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。

地表 ▼ EL. 11.0m 解放基盤表面 ▼ EL. -15.0m	地盤減衰（Q値）
▼ EL. -50.0m 最深部地震計 ▼ EL. -90.0m	地震観測記録を用いた以下の検討・確認結果に基づき設定 <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 ・応答スペクトルによる確認 ・伝達関数による確認
▼ EL. -200m	以下の検討・確認結果に基づき、EL. -90m以浅と同様に設定 <ul style="list-style-type: none"> ・速度層断面による検討 ・ボーリング孔内減衰測定による検討 ・岩石コアを用いた減衰測定による確認
地震基盤相当面 ▼ EL. -1804m	既許可の地下構造モデルを流用 [慣用値 ($V_s/15\sim 10$) を基に設定]

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

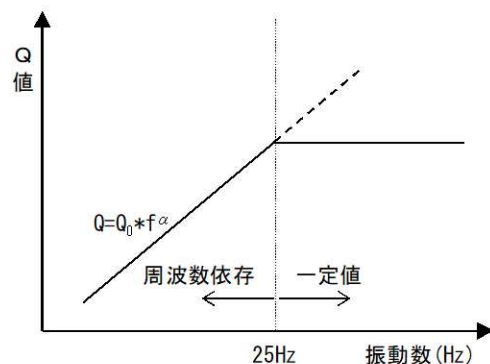
地盤減衰 (Q値) の検討方針

- 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：

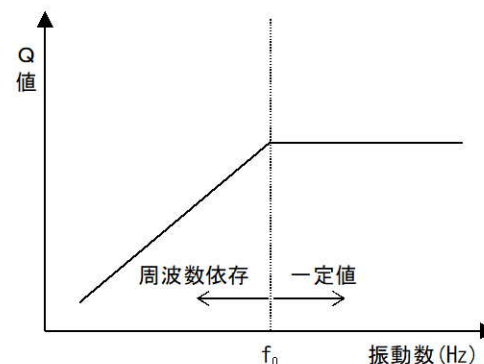
地盤減衰 (Q値) が周波数のべき乗に比例する関数モデル ($Q=Q_0*f^\alpha$) を仮定し、地盤減衰 (Q値) を同定。既往の知見^{4)~9)}によると、地盤減衰 (Q値) は20Hz程度までのある周波数で上限が存在することから、安全側に考慮し、25Hz以上の値を上限値として採用。
 - b. 伝達関数 (バイリニア型) による検討：

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。
- 複数の手法による検討結果に、不確かさを考慮した地盤減衰 (Q値) を検討。



(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

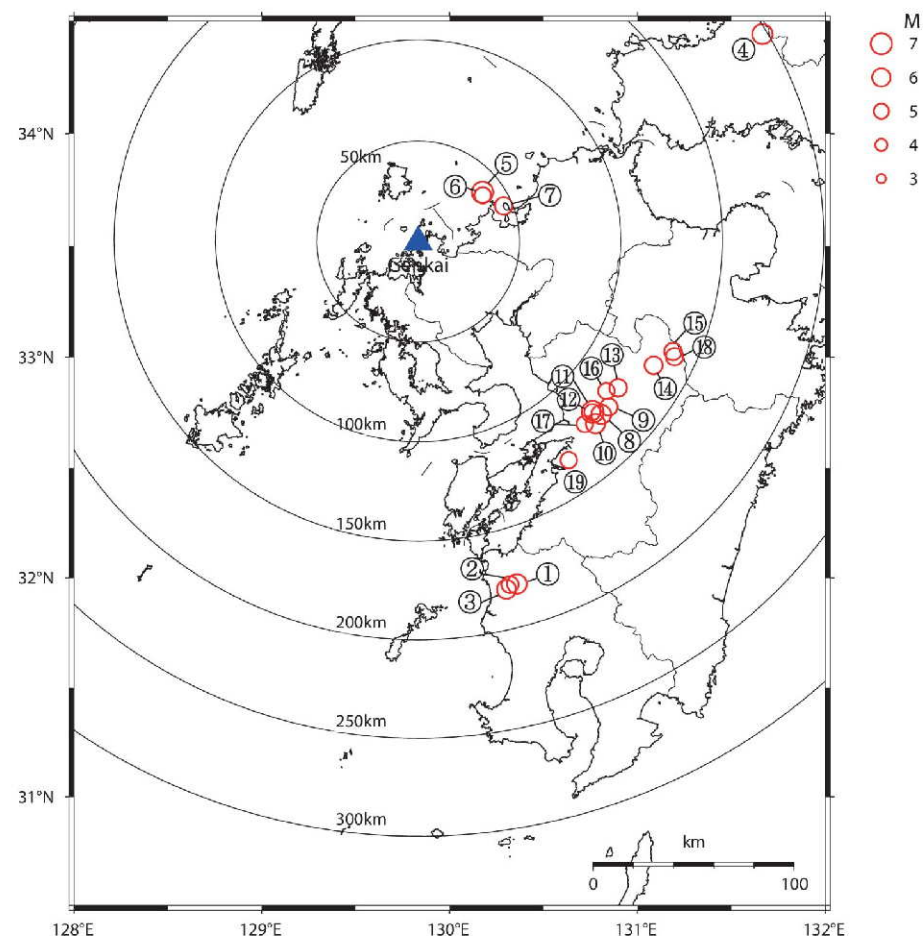
- 既許可時審査と同様の観点※で、既許可時審査以降に取得した地震観測記録を加えた計19地震の観測記録の伝達関数に対して、地盤減衰の同定を実施。

※ 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

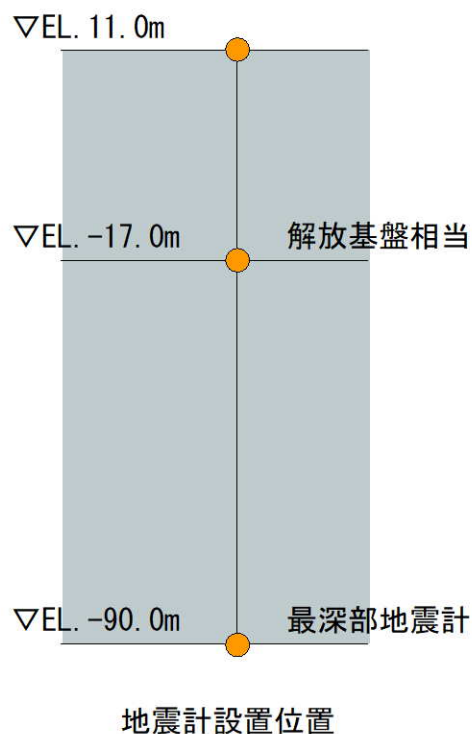


伝達関数 (周波数依存型) による地盤減衰の
同定に用いた地震の震央位置 (計19地震)

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。



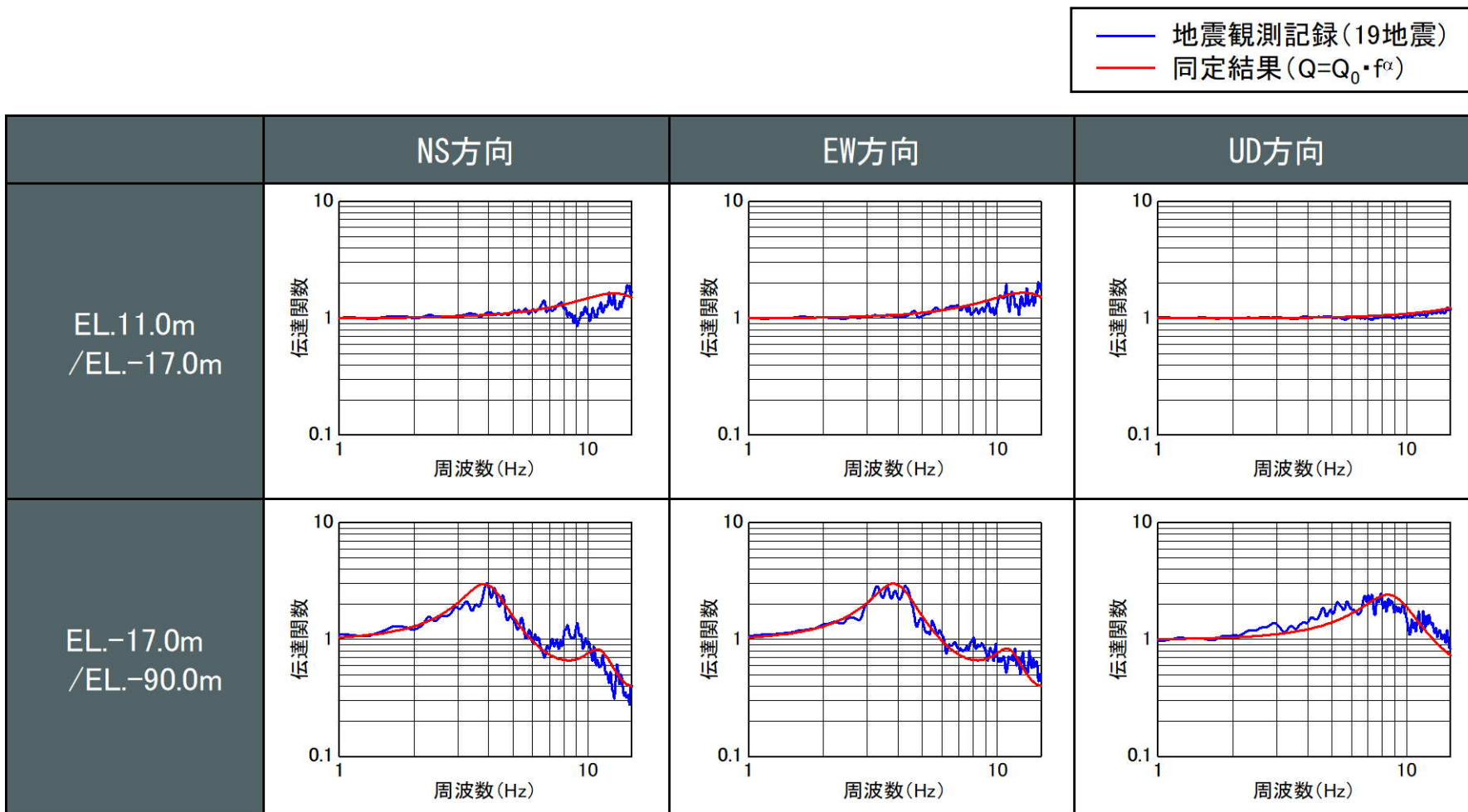
伝達関数（周波数依存型）による地盤減衰の同定における解析条件

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。

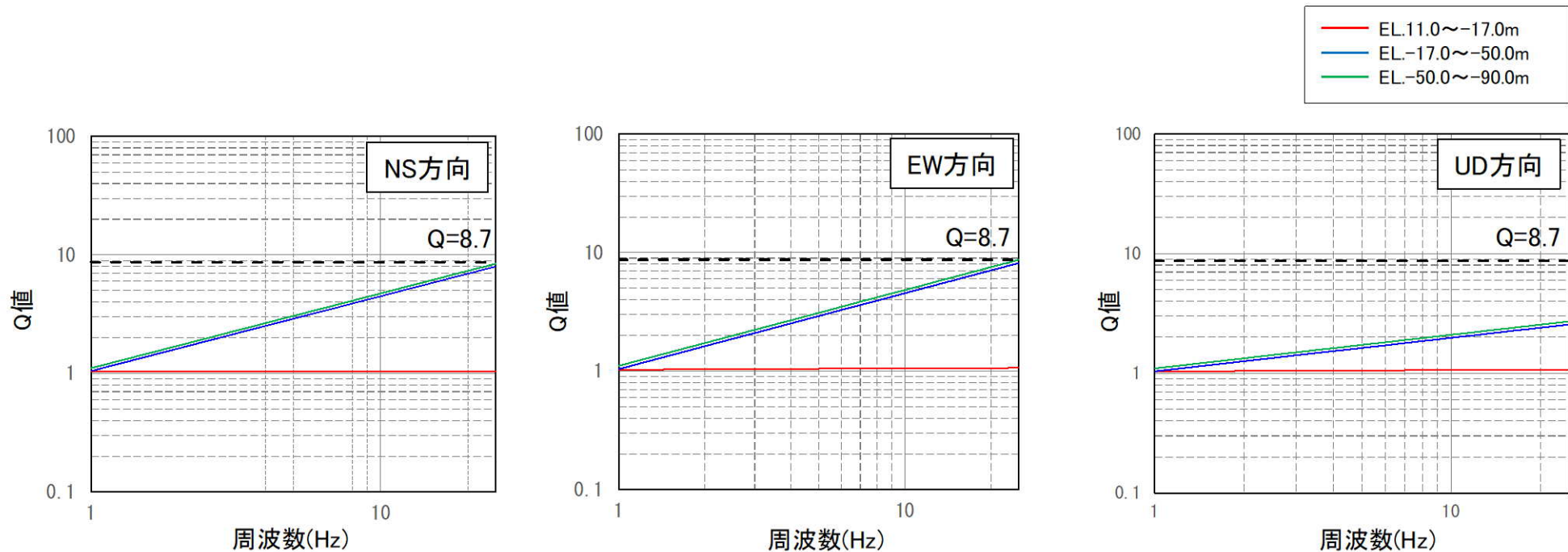


※観測記録及び理論の伝達関数はParzen Window 0.2Hzでスムージング
 ※観測記録の伝達関数との整合性については、補足②に記載

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。(参考②)

文献	概要
武村ほか(1993) ⁴⁾	<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) ⁵⁾	<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)⁴⁾ 等) を踏まえ、減衰定数を一定として設定
木下・大池(2002) ⁶⁾	<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) ⁷⁾	<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) ⁸⁾	<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) ⁹⁾	<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)¹⁰⁾) 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)⁹⁾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

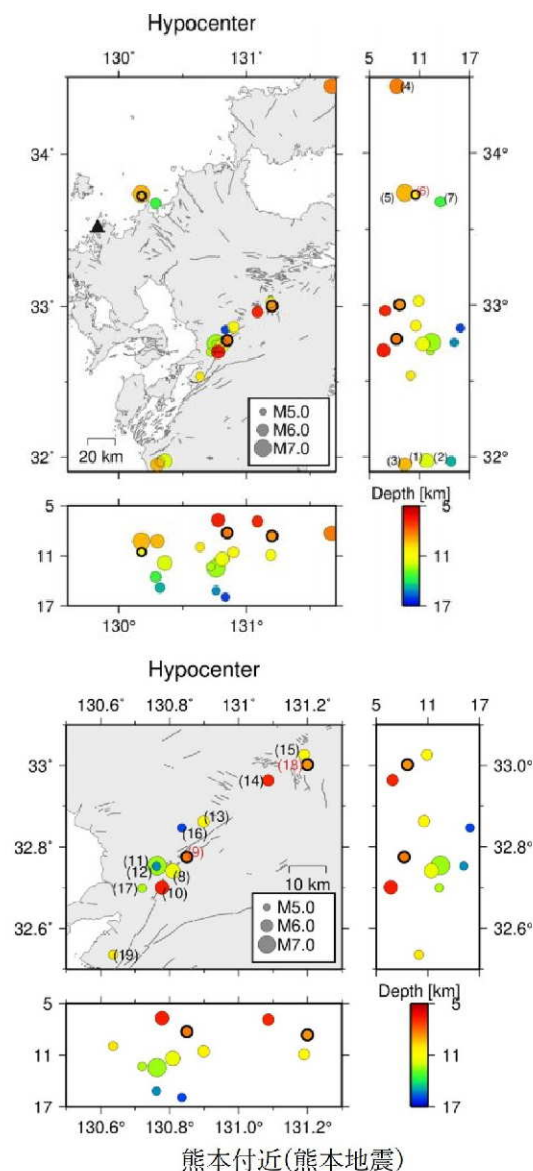
項目	条件
対象地震の選定条件	M5.4以上、震央距離200km程度以内の内陸地殻内地震のうち、 <u>平均的な特徴を有する地震</u> ^{※1}
対象地震数	3地震
ターゲットとする観測伝達関数	3地震の伝達関数 (Transverse成分) <ul style="list-style-type: none"> EL. 11.0m/EL. -17.0m EL. 11.0m/EL. -90.0m EL. -17.0m/EL. -90.0m S波を含む10秒間を抽出 Band幅0.2HzのParzenウィンドウ
同定方法	層厚、密度、S波速度Vs及びP波速度Vpは、既許可の地下構造モデルの値を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

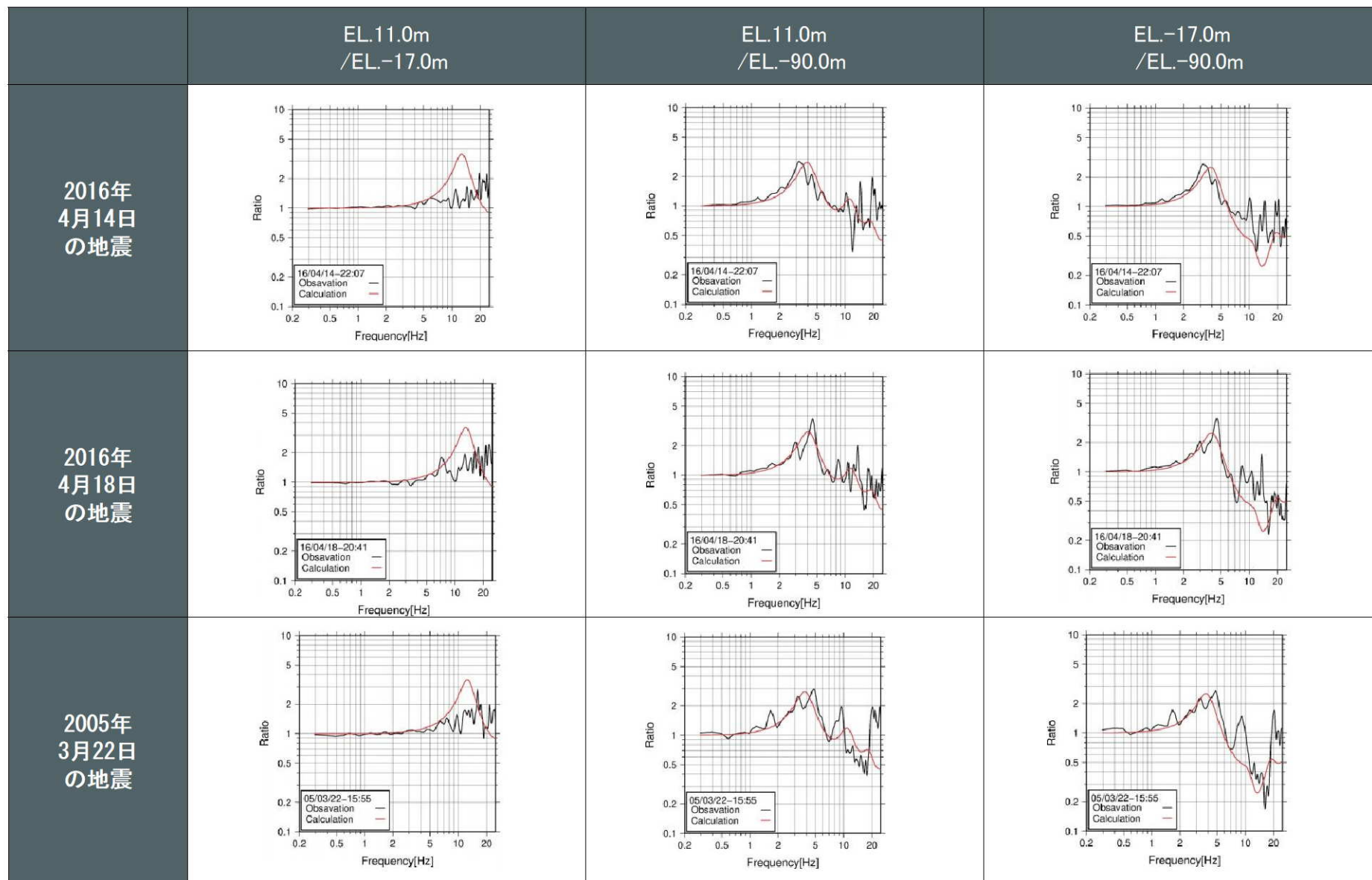


伝達関数(バイリニア型)による地盤減衰の同定に用いた地震の震央位置(太枠、計3地震)

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)

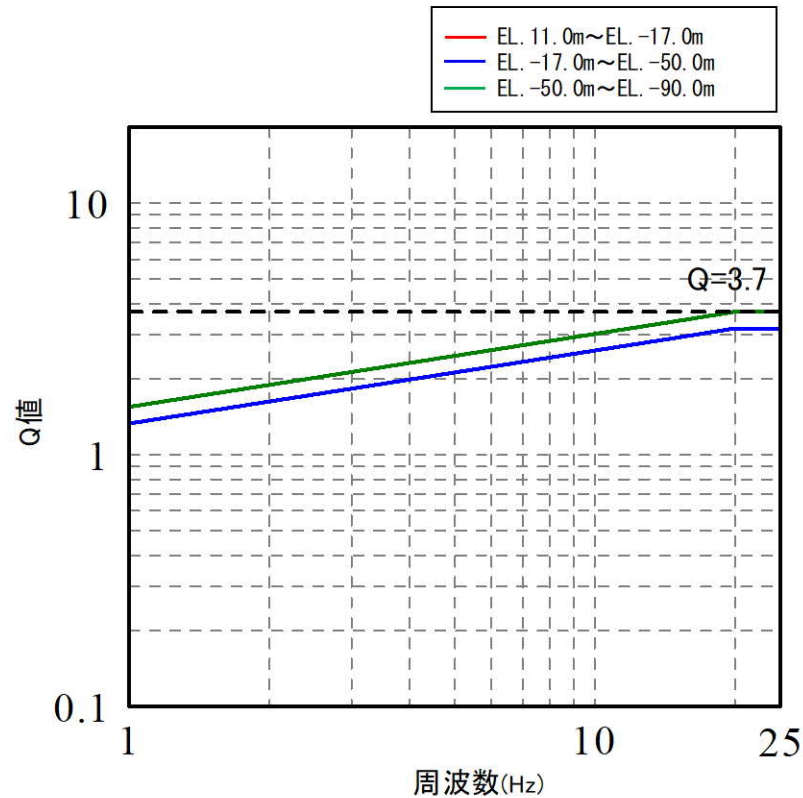
- 同定結果の伝達関数と観測記録の伝達関数を以下に示す。



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

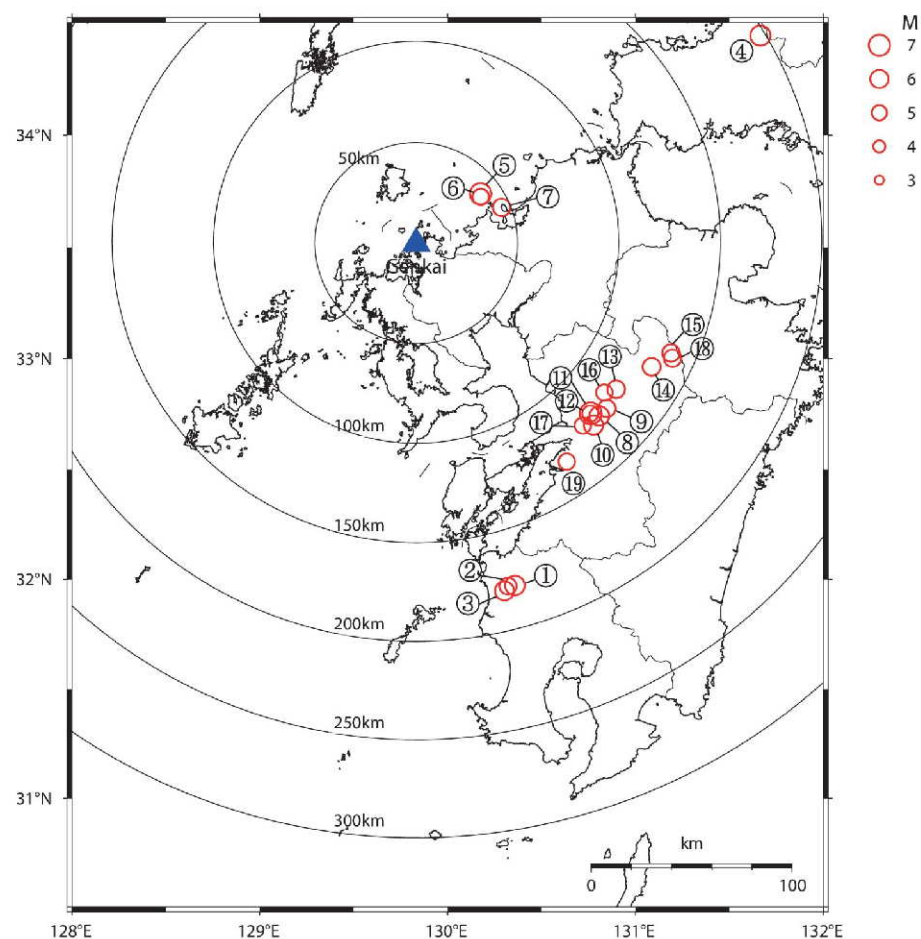
■ 同定に用いる地震諸元

- 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。

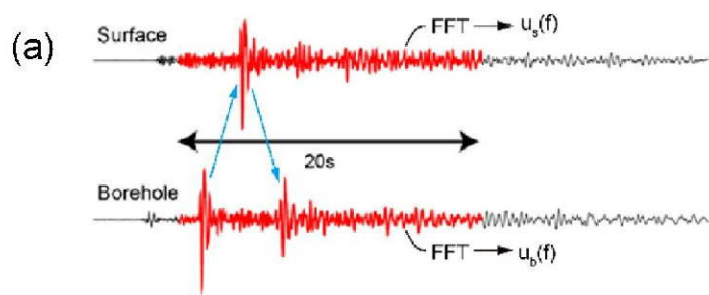
地震波干渉法による地盤減衰の同定における解析条件

	項目	条件
デコンボリユーション	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ユ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)

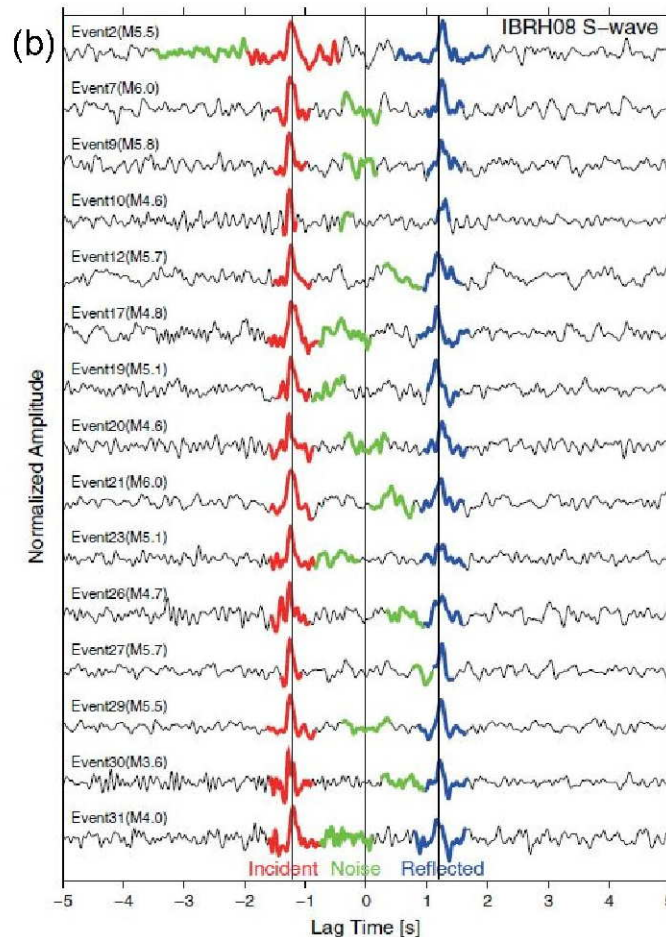
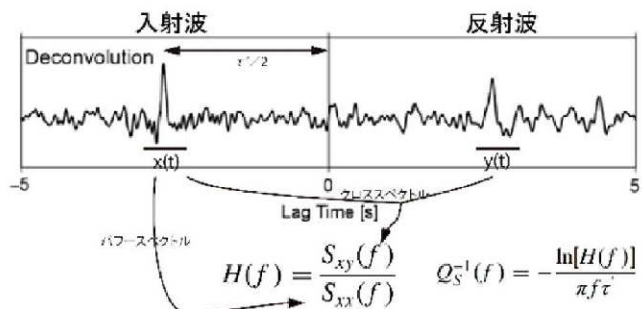
■ 地盤減衰 (Q値) の推定方法

- 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^{7)、11)}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)

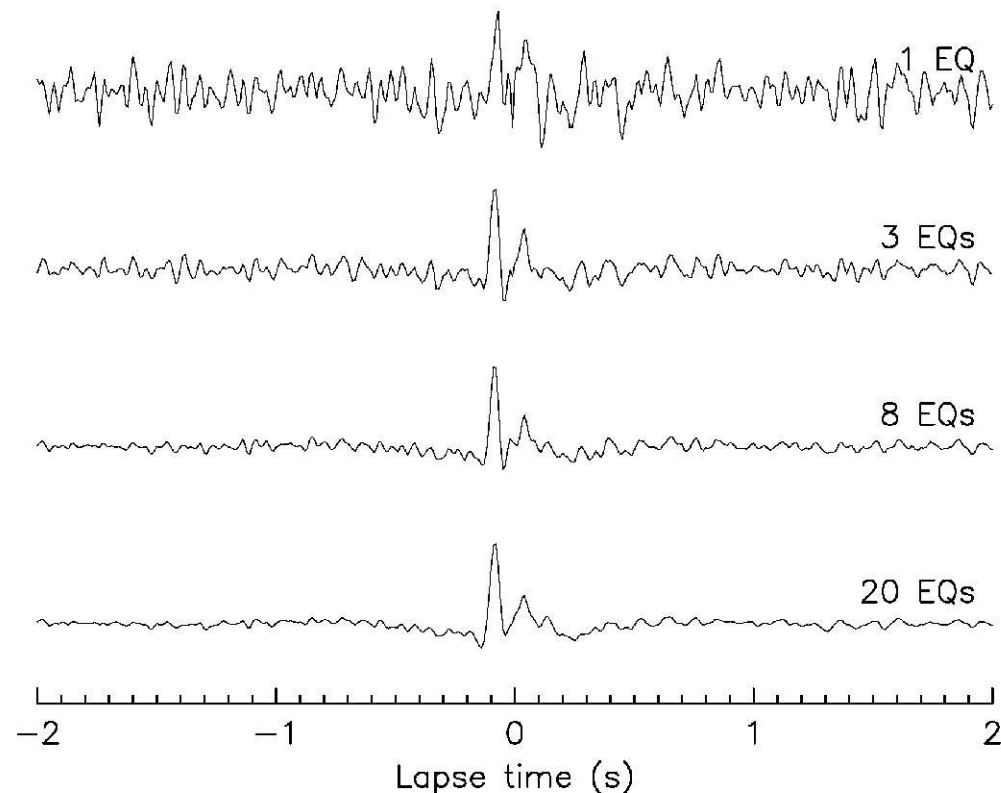


Fukushima et al.(2016)より抜粋

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

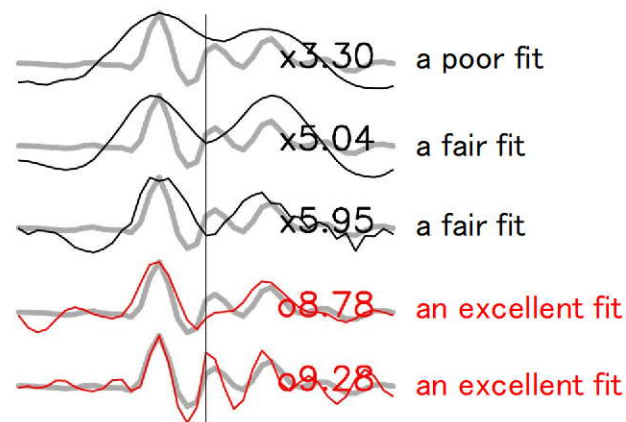
- 対象とした19地震の観測記録から、Anderson(2004)¹²⁾による指標 (GOF: Goodness Of Fit) に基づき、スタックしたデコンボリューション波形と各地震のデコンボリューション波形の一致度が高いものを抽出。
 - Anderson(2004)では、2つの波形の一致度などを表す適合度指標を提案。
 - これらのうち2つの波形の相関を表す指標 (GOF) として、コヒーレンスを10倍した値を採用し、その値に応じた以下の適合度が示されている。

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

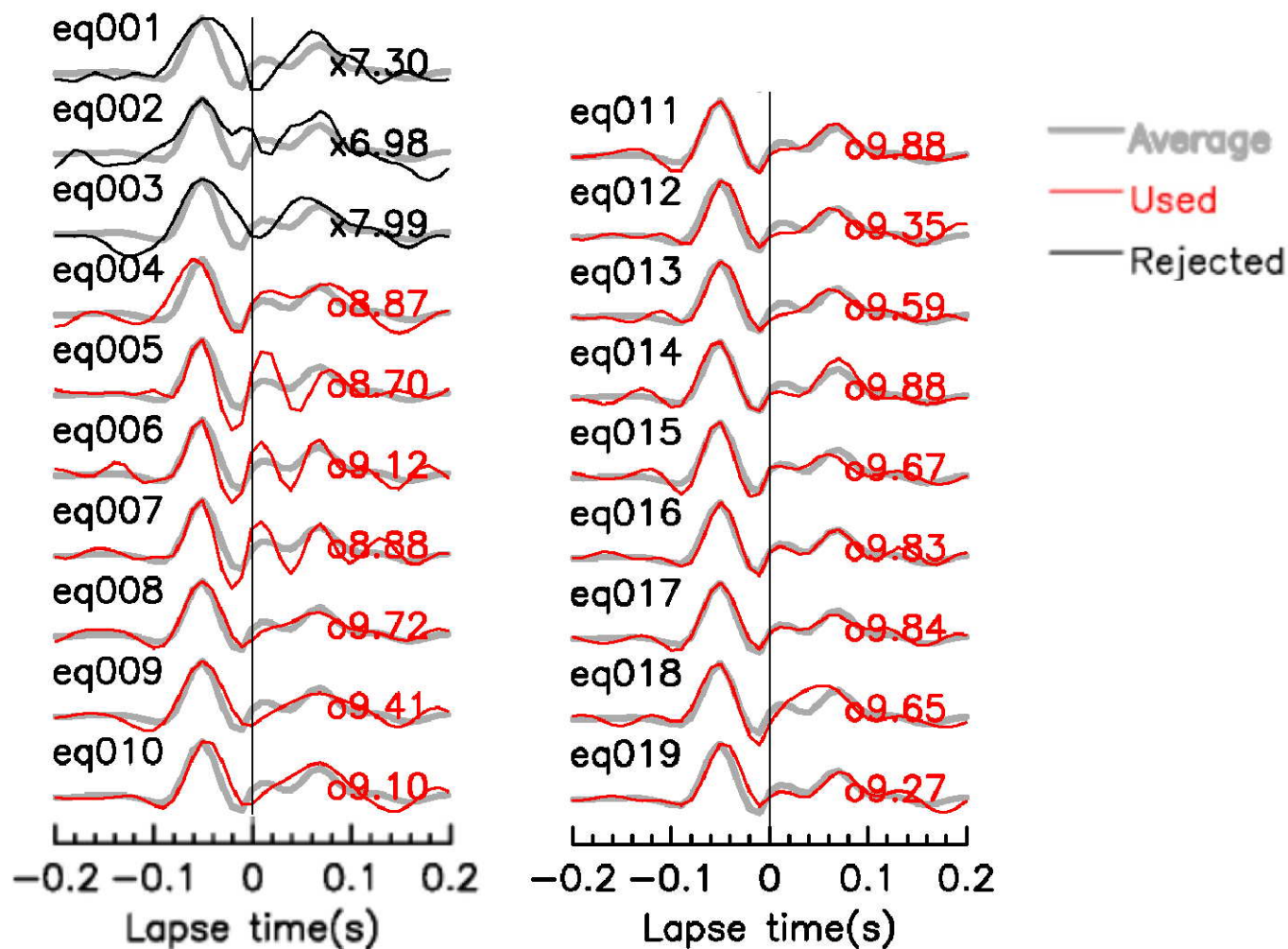


GOFの例
(赤線を抽出、黒線を除外)

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)¹²⁾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。

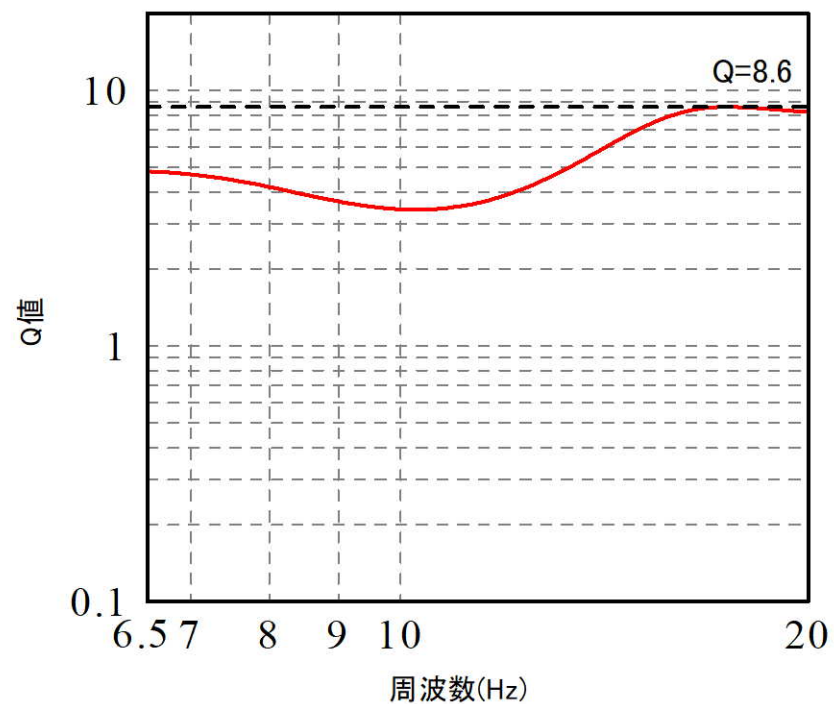


スタックした波形と各地震の波形の相関

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) の上限値は $Q=8.6$ 程度。



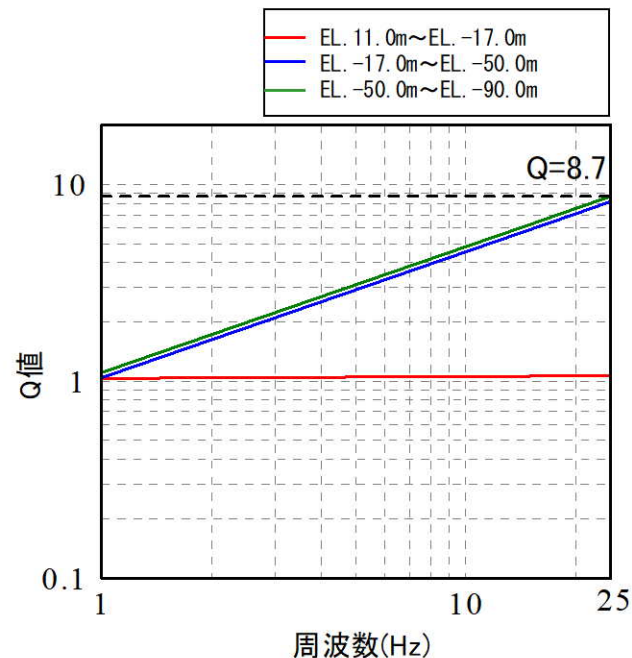
地震波干渉法により推定された地盤減衰(EL.11.0m~EL.-90.0m)

3.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

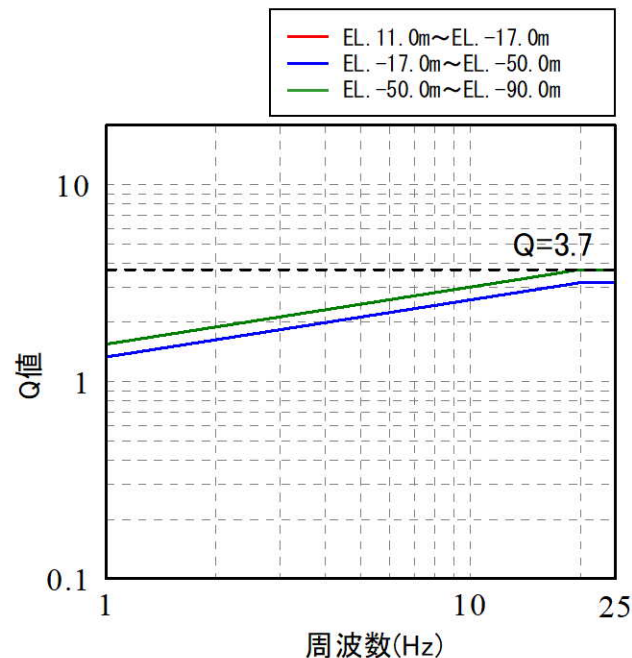
■ 複数の手法による検討結果を踏まえた地盤減衰 (Q値)

- 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、保守的に $Q=12.5$ とする。
- なお、鉛直方向のQ値は、33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Q値としており、水平方向に比べ十分な保守性を有している。

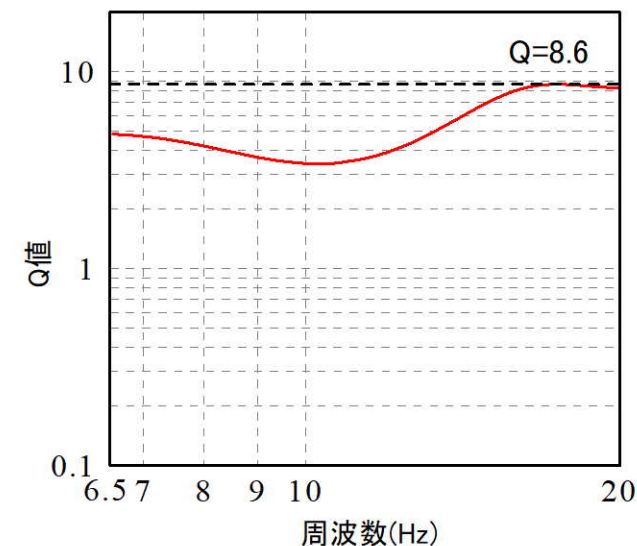
検討手法	伝達関数による検討 (周波数依存型)	伝達関数による検討 (バイリニア型)	地震波干渉法による検討
検討結果 (上限値)	Q=8.7程度	Q=3.7程度	Q=8.6程度



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)

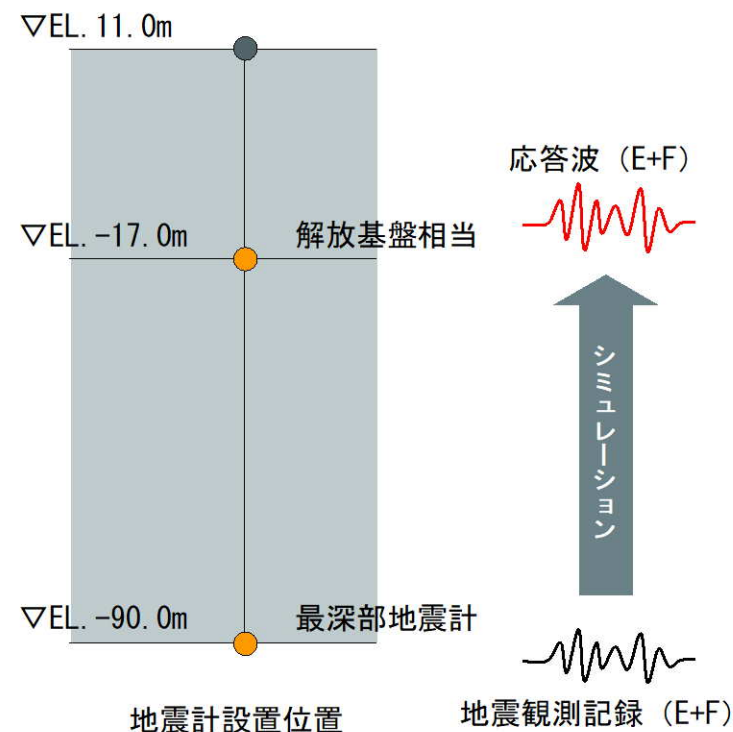
3.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

(2) 地盤減衰 (Q値) の確認

a. 応答スペクトルによる地盤減衰 (Q値) の確認

- 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し、地盤減衰 ($Q=12.5$) について以下の点を確認した。(47~56頁参照)
 - 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。

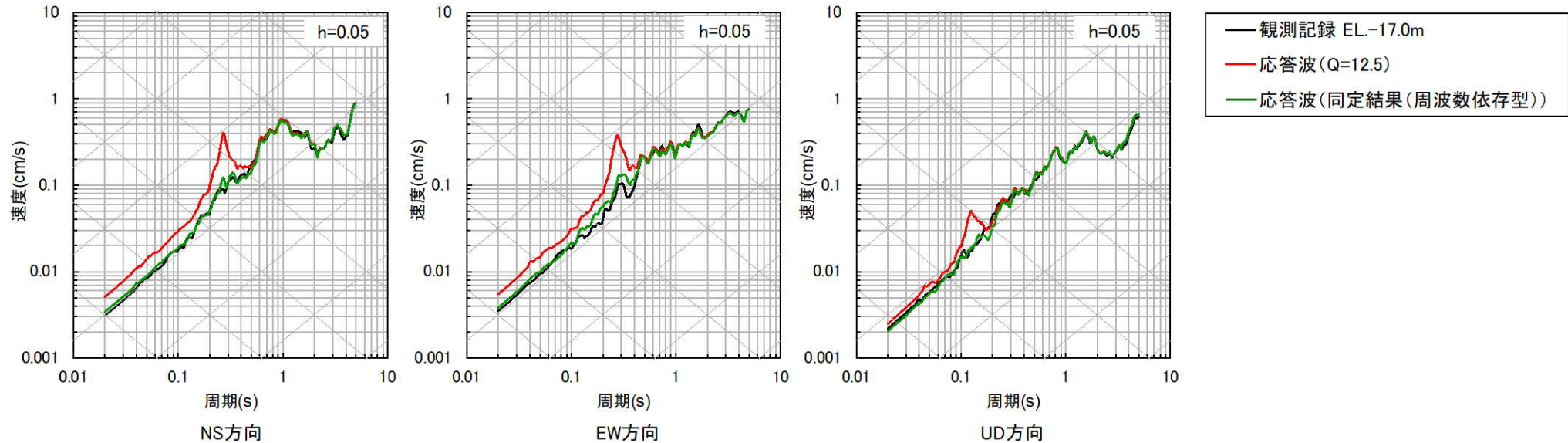
*入力 of 最深部地震計 (EL. -90.0m) で得られた地震観測記録及び出力 of 解放基盤相当 (EL. -17.0m) での応答波は地中記録のため、E+Fで評価



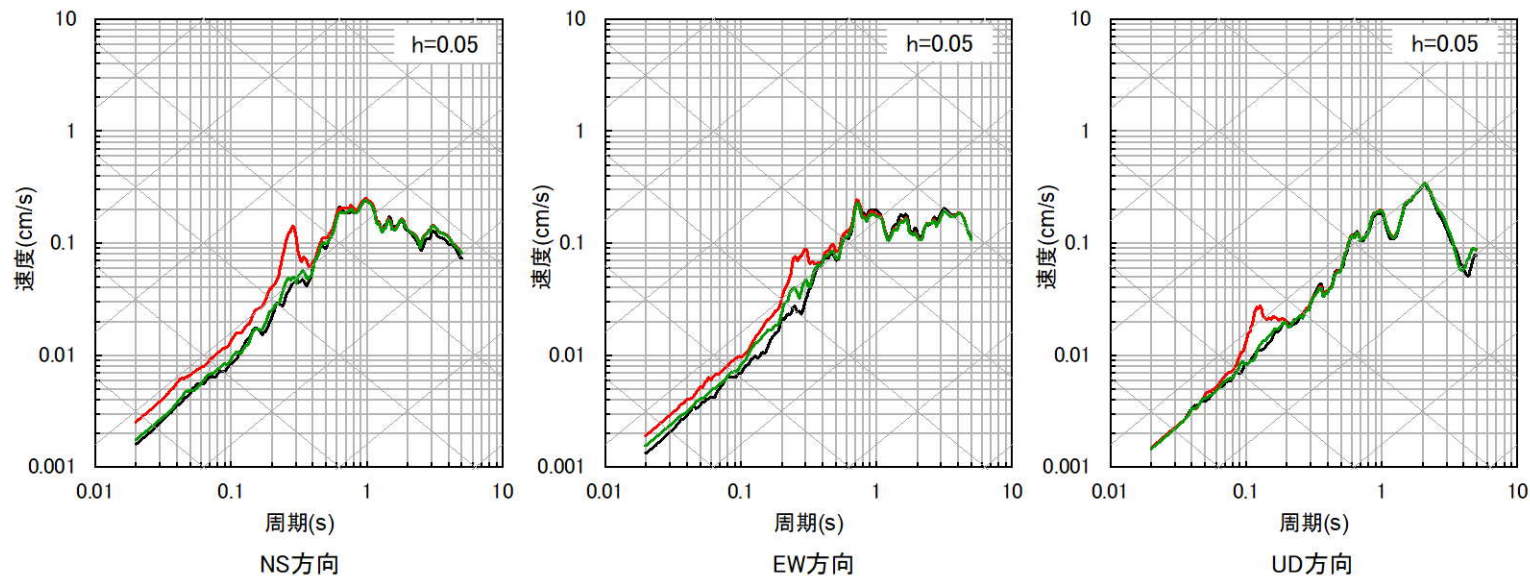
3.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

■ 応答スペクトルの比較結果 (1/10)

① 鹿児島県北西部



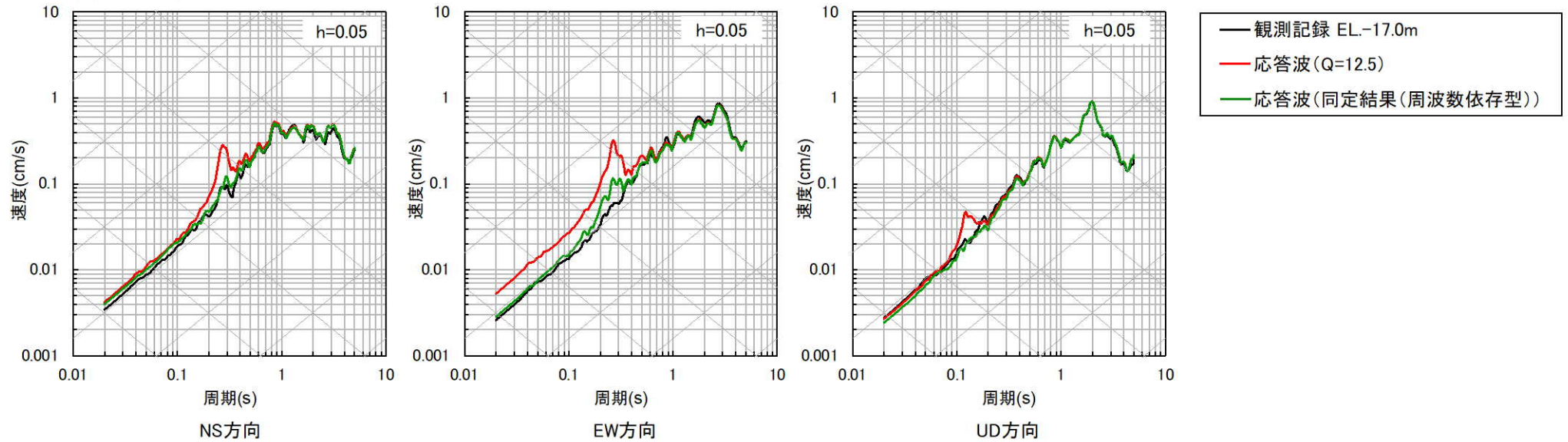
② 鹿児島県北西部



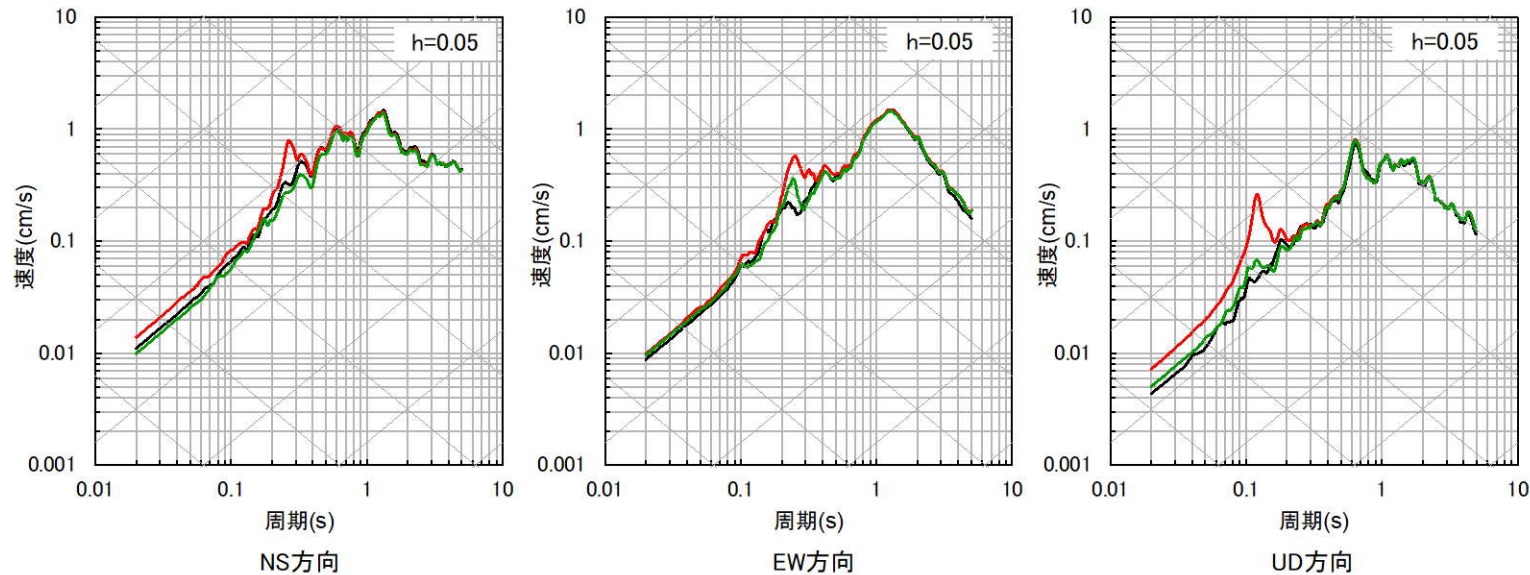
3.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

■ 応答スペクトルの比較結果 (2/10)

③ 鹿児島県北西部



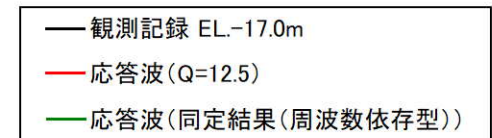
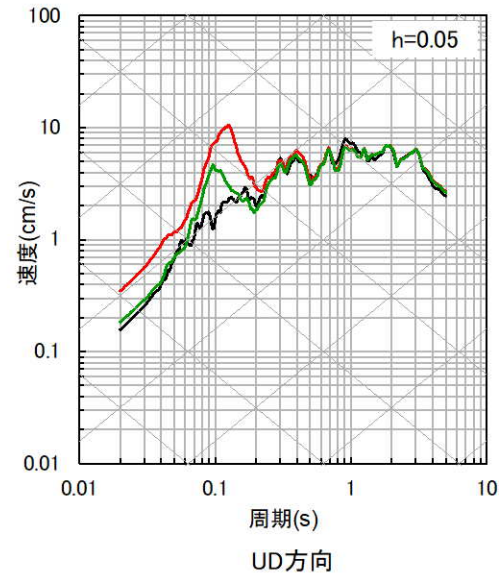
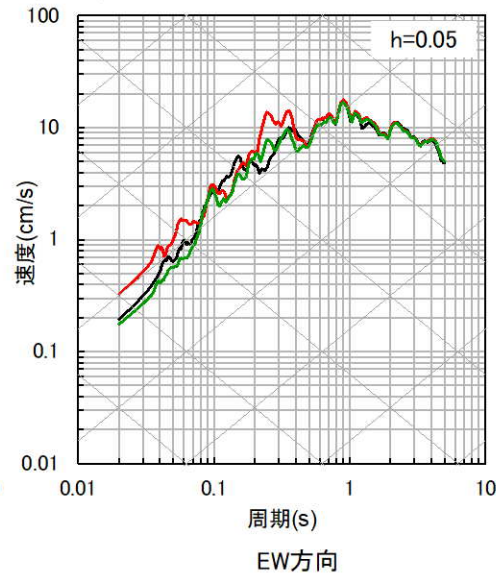
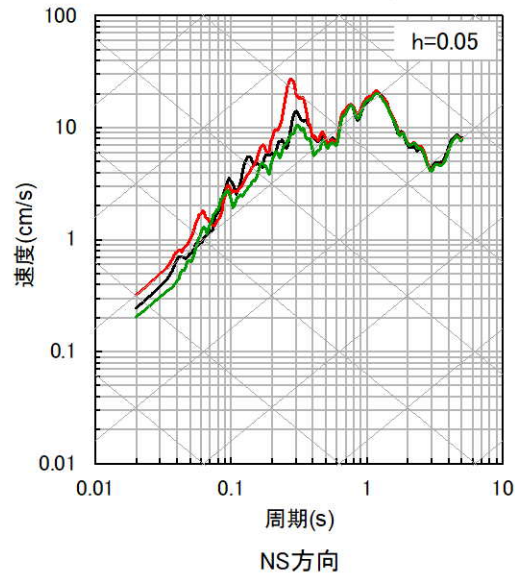
④ 山口県



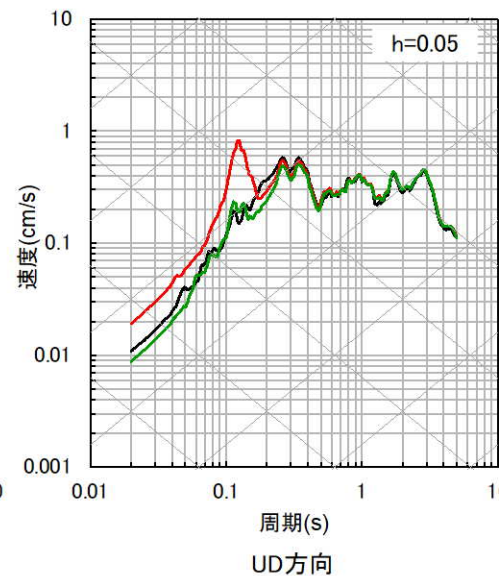
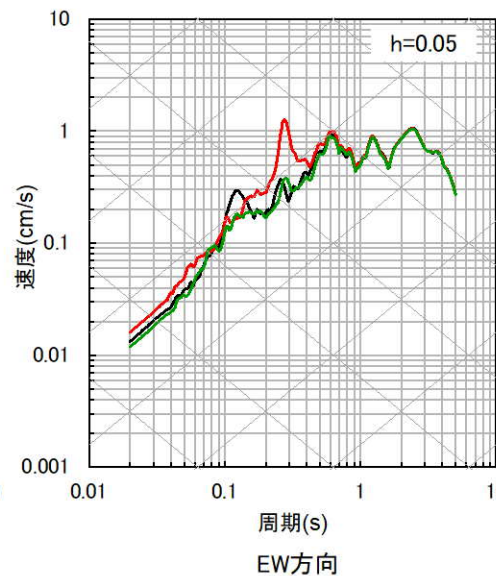
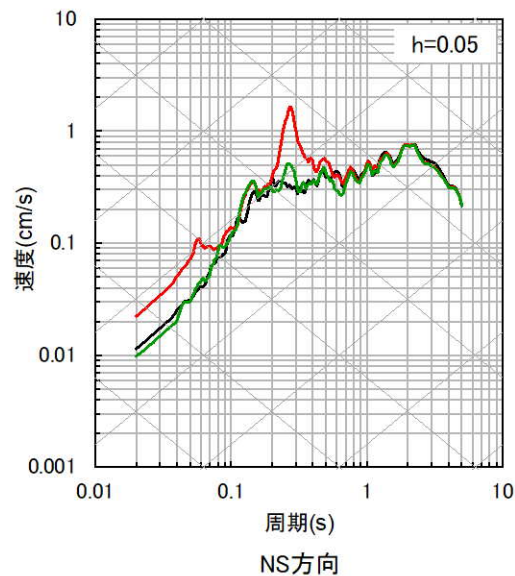
3.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

■ 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)



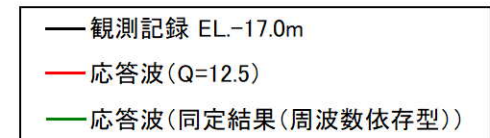
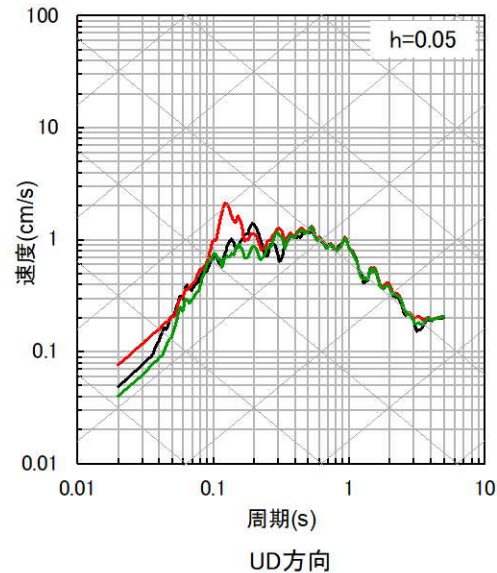
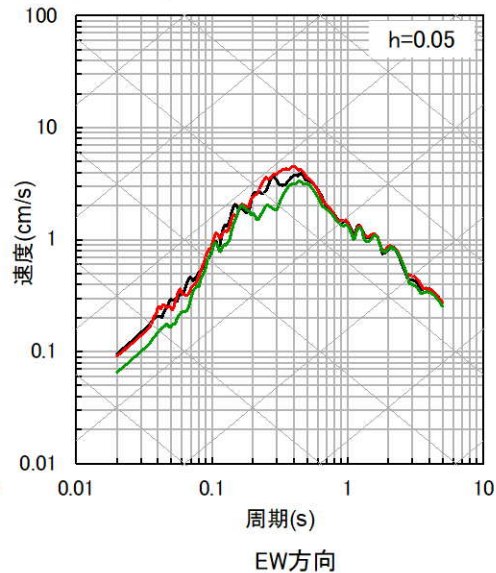
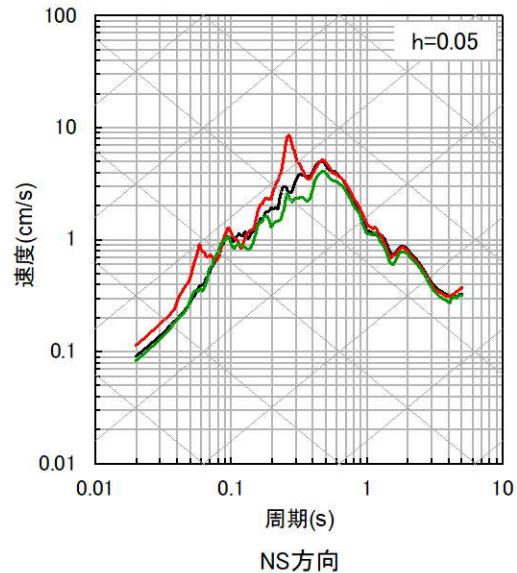
⑥九州北西沖



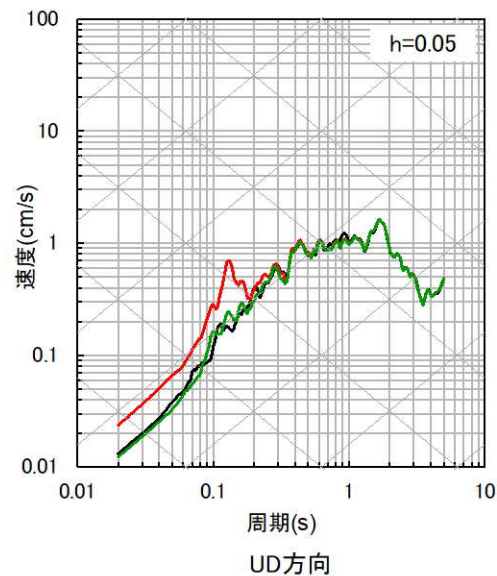
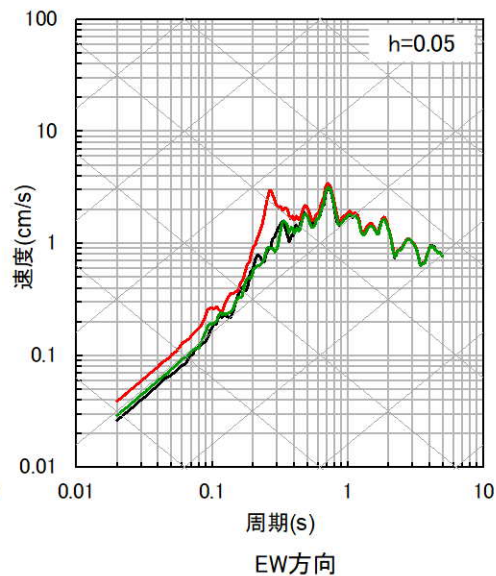
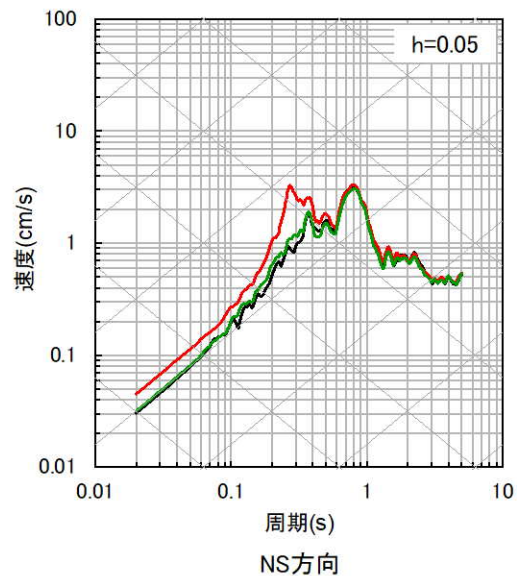
3.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

■ 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)



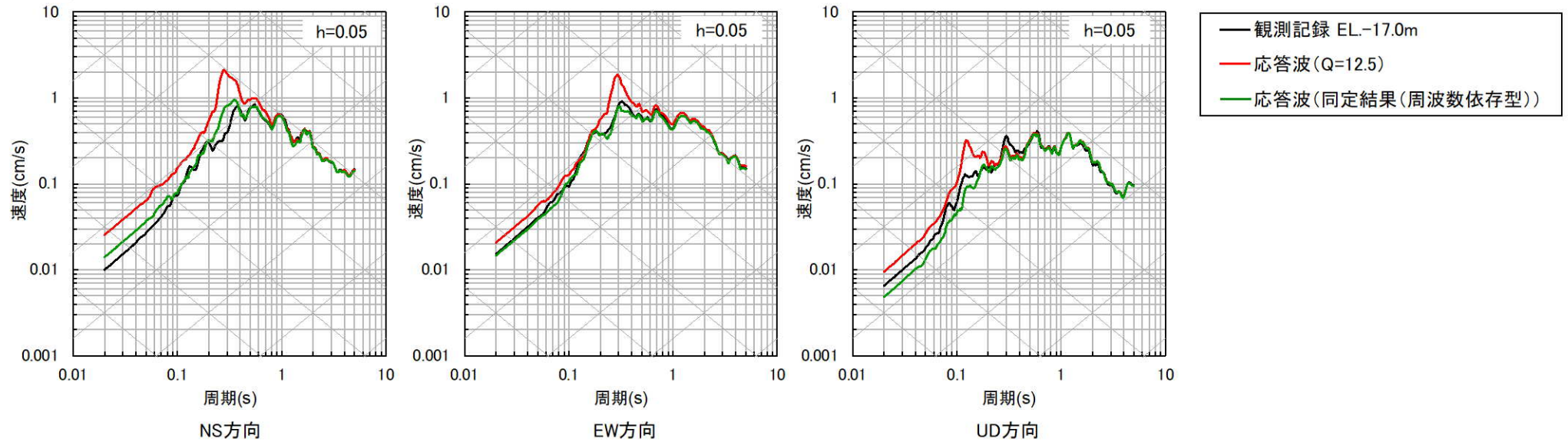
⑧熊本県熊本地方 (2016年熊本地震前震)



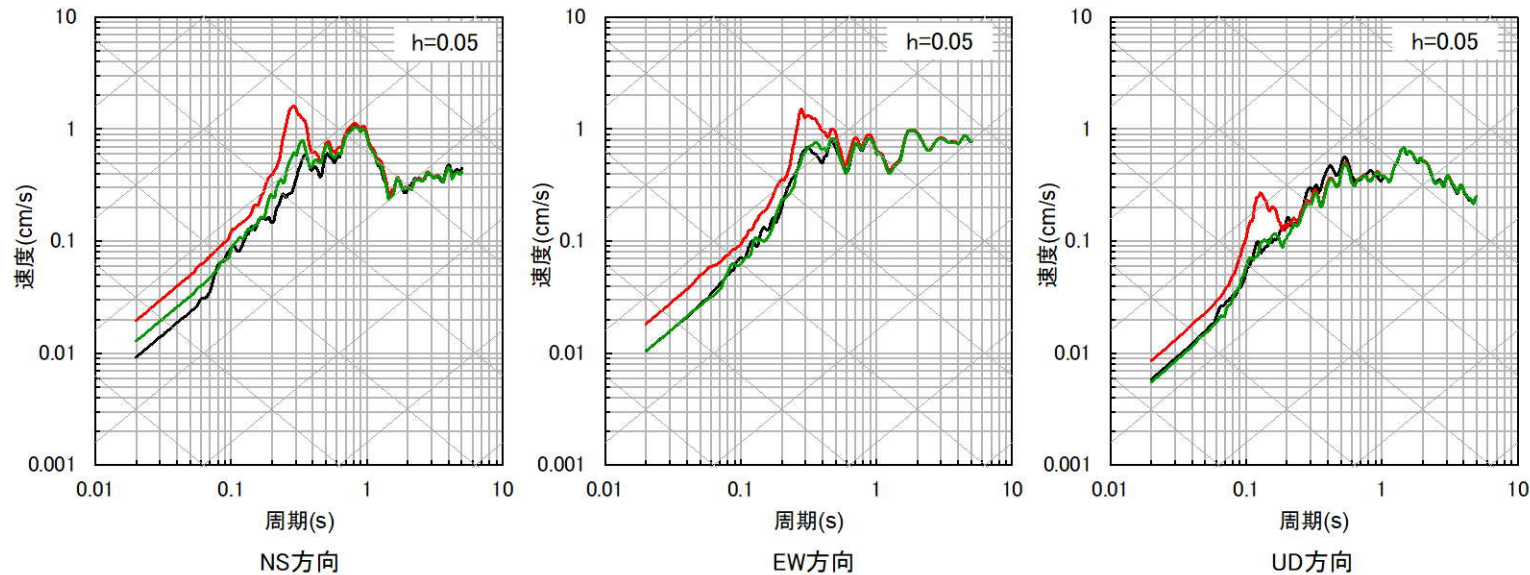
3.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

■ 応答スペクトルの比較結果 (5/10)

⑨ 熊本県熊本地方



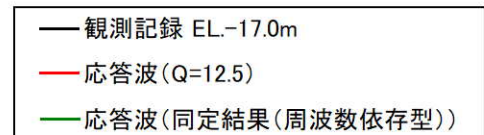
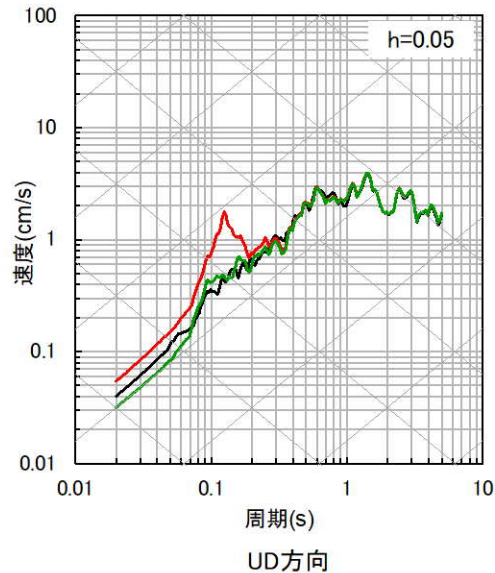
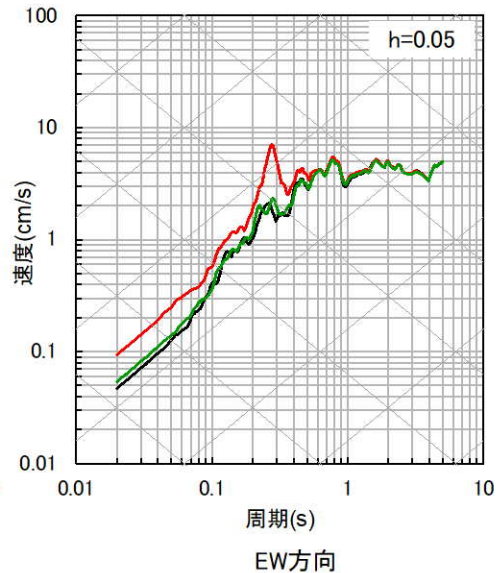
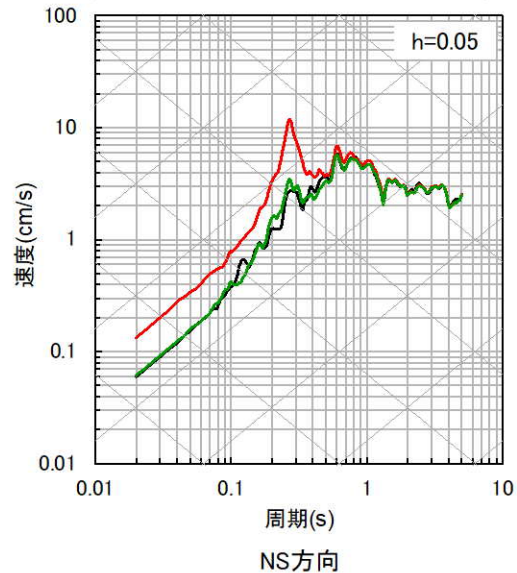
⑩ 熊本県熊本地方



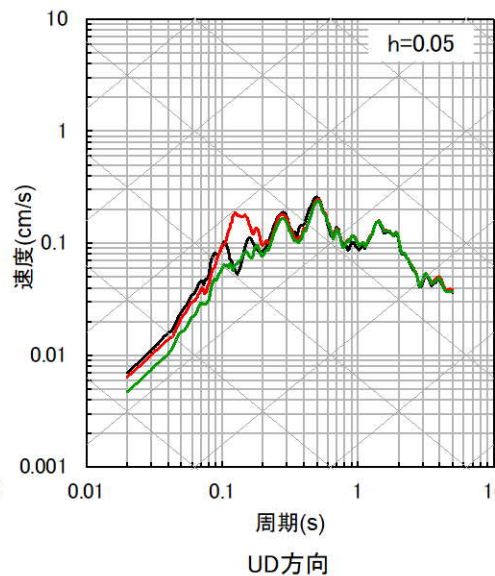
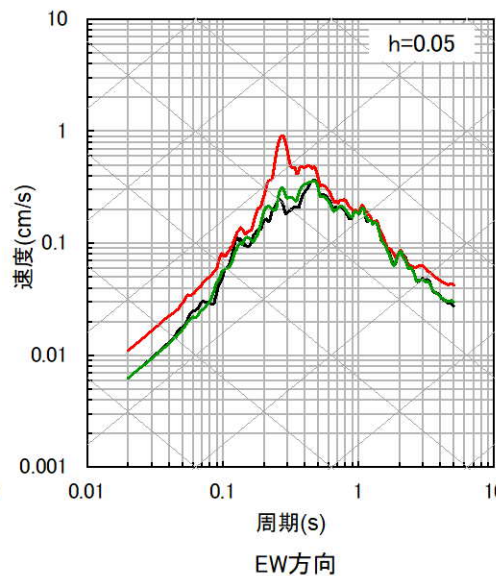
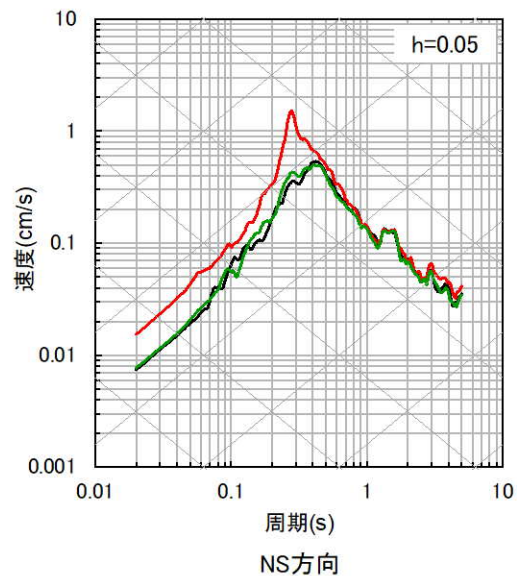
3.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

■ 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)



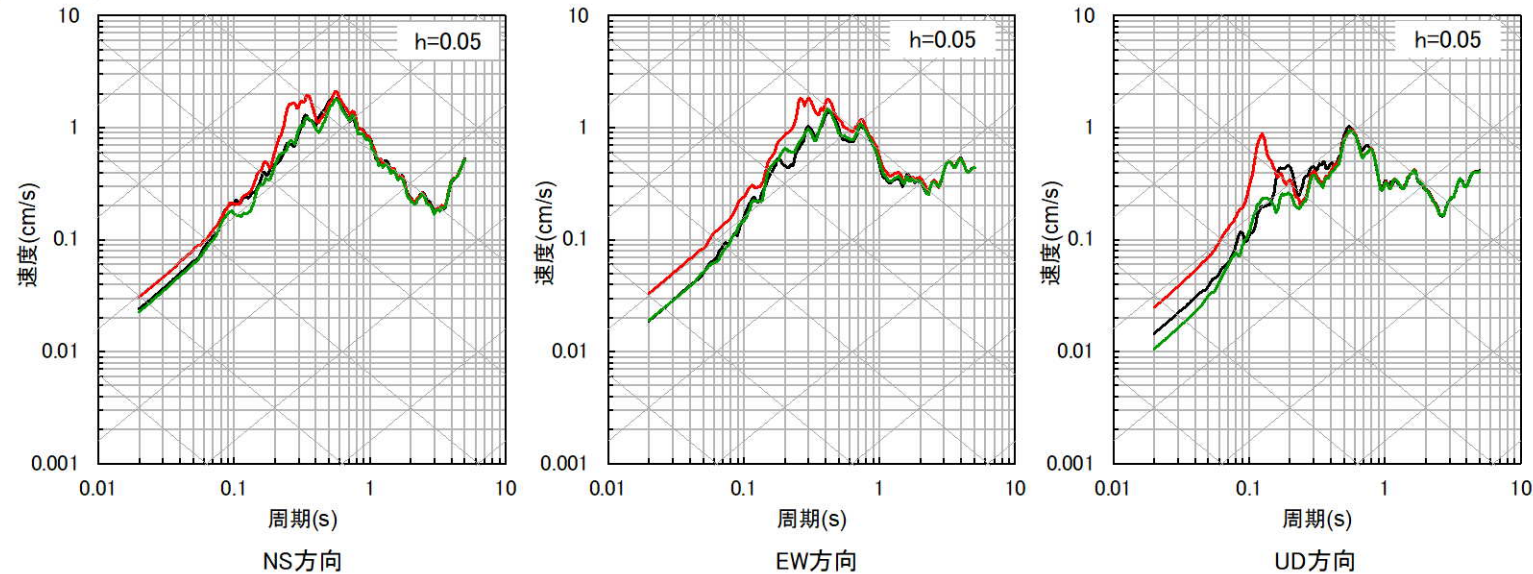
⑫ 熊本県熊本地方



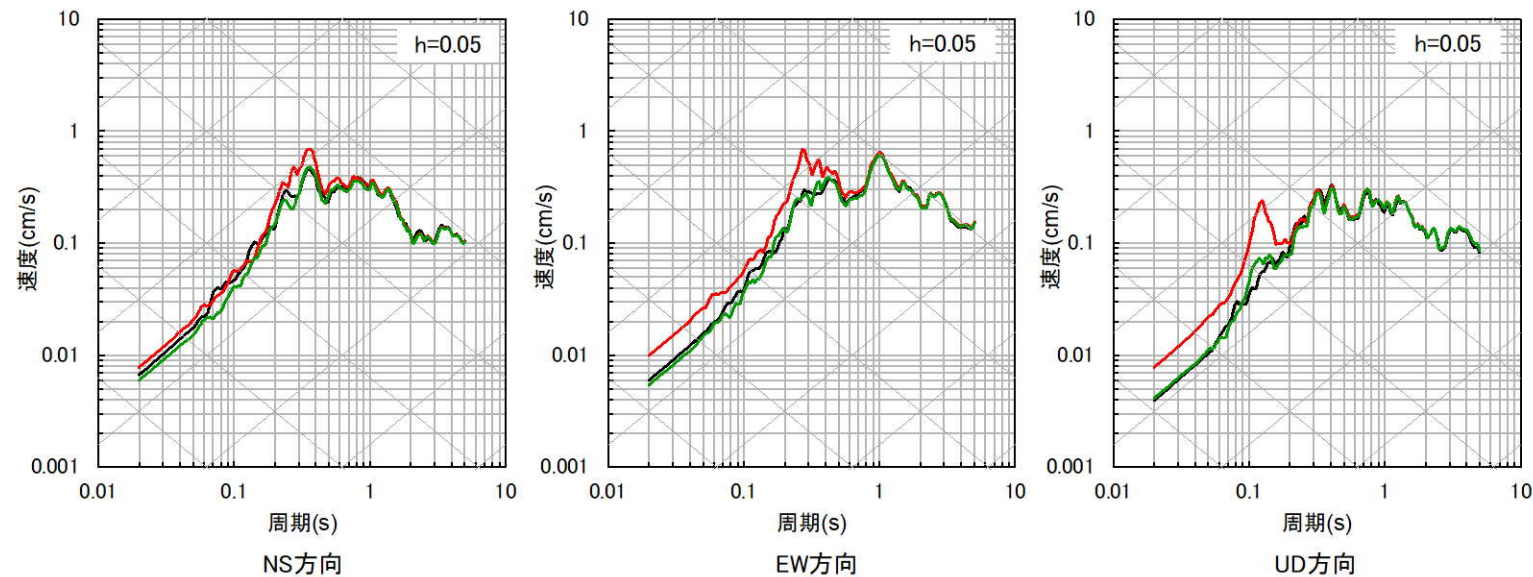
3.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

■ 応答スペクトルの比較結果 (7/10)

⑬ 熊本県熊本地方



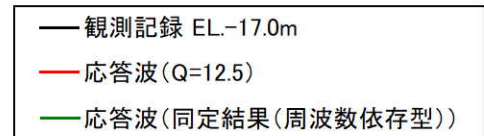
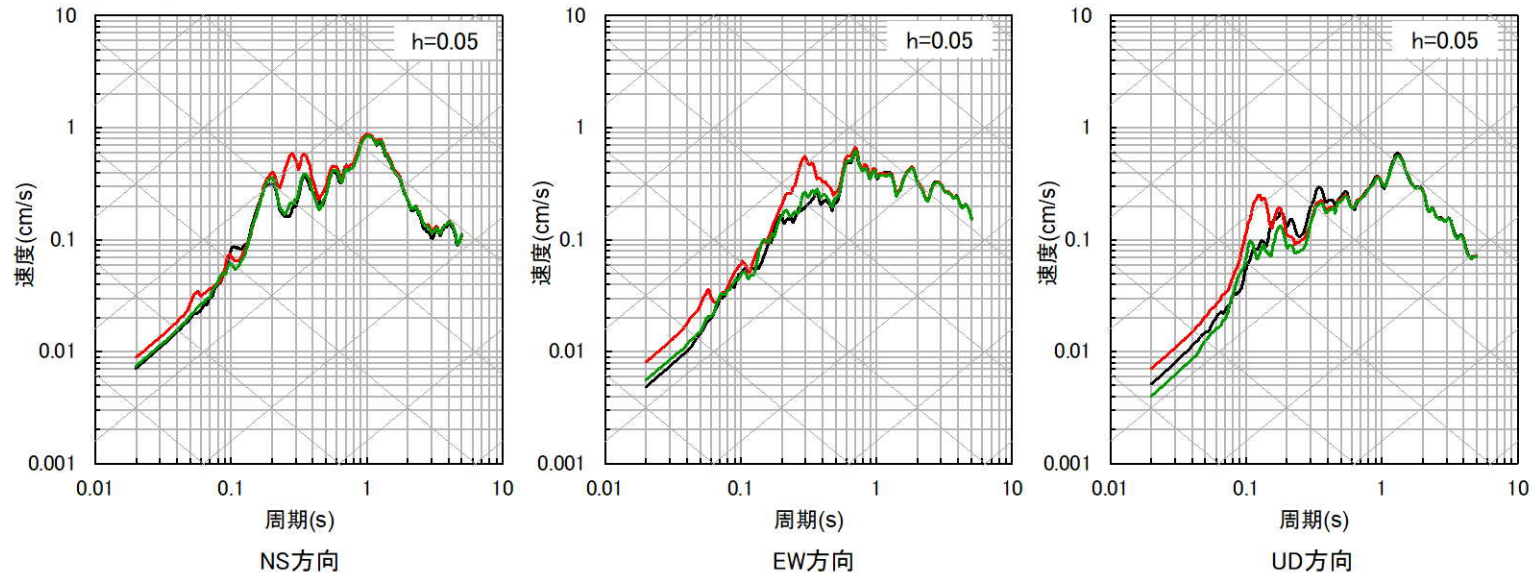
⑭ 熊本県阿蘇地方



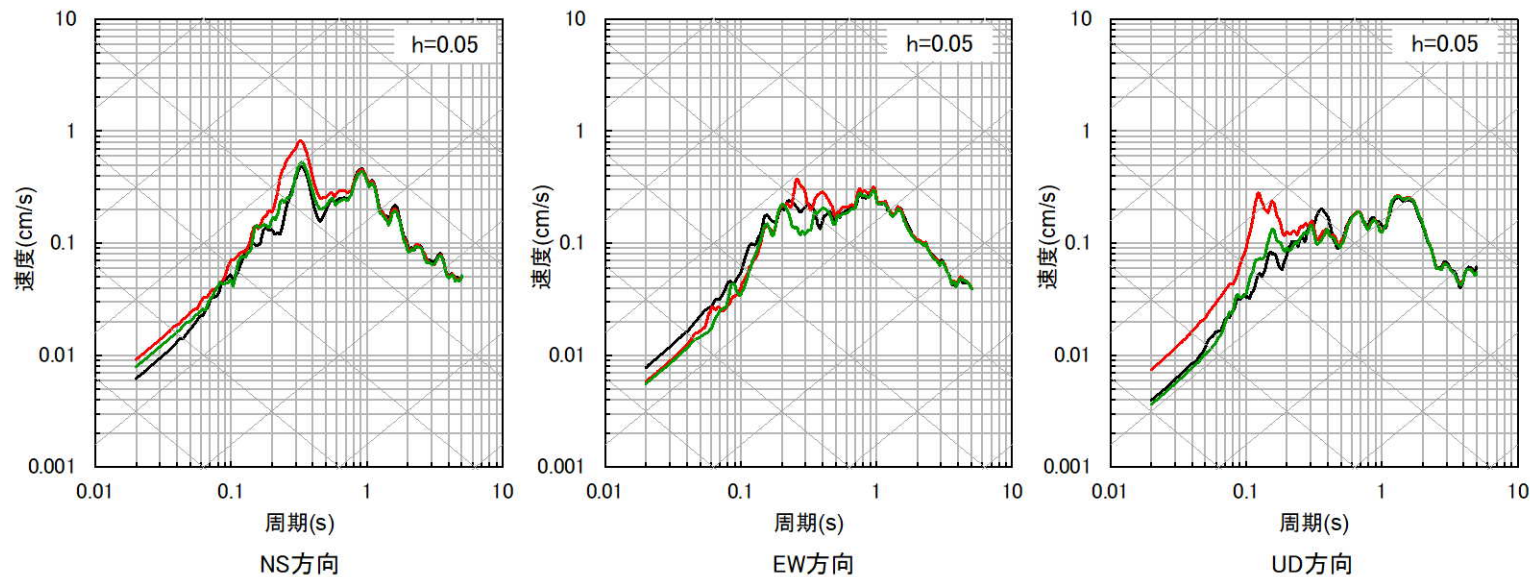
3.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

■ 応答スペクトルの比較結果 (8/10)

⑮ 熊本県阿蘇地方



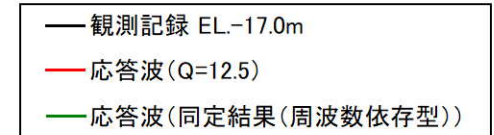
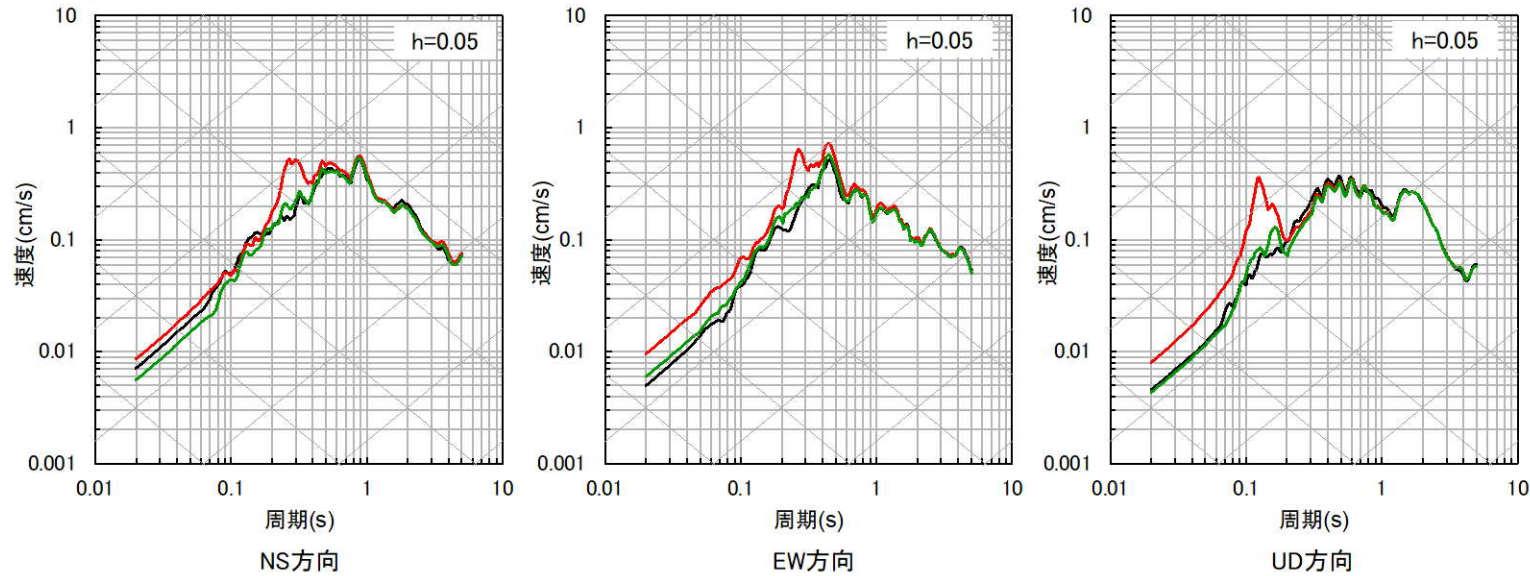
⑯ 熊本県熊本地方



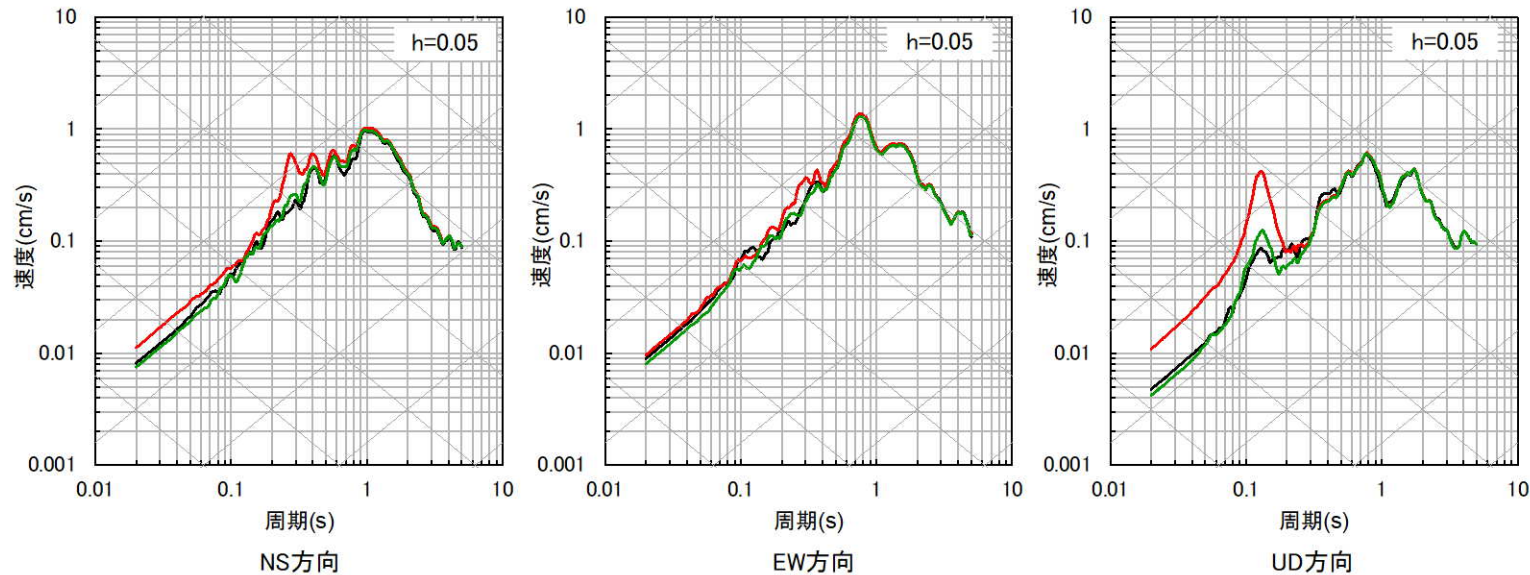
3.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

■ 応答スペクトルの比較結果 (9/10)

⑰ 熊本県熊本地方



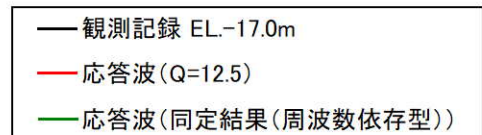
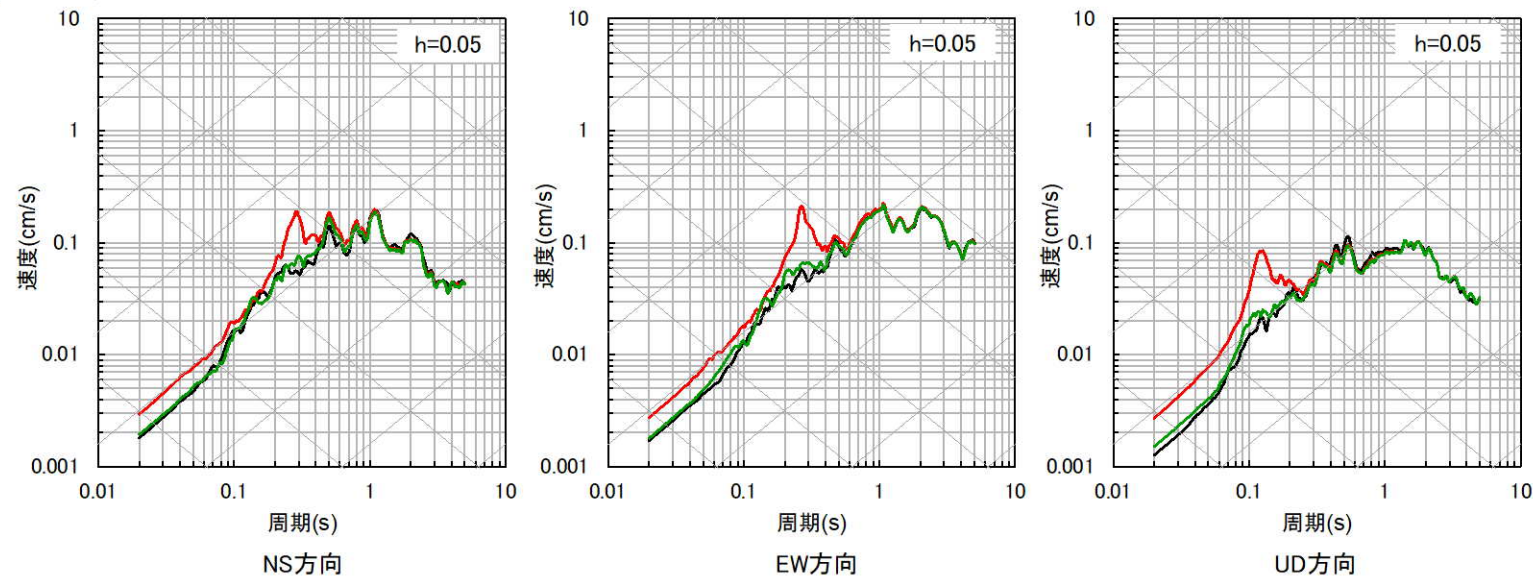
⑱ 熊本県阿蘇地方



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)

①9 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)

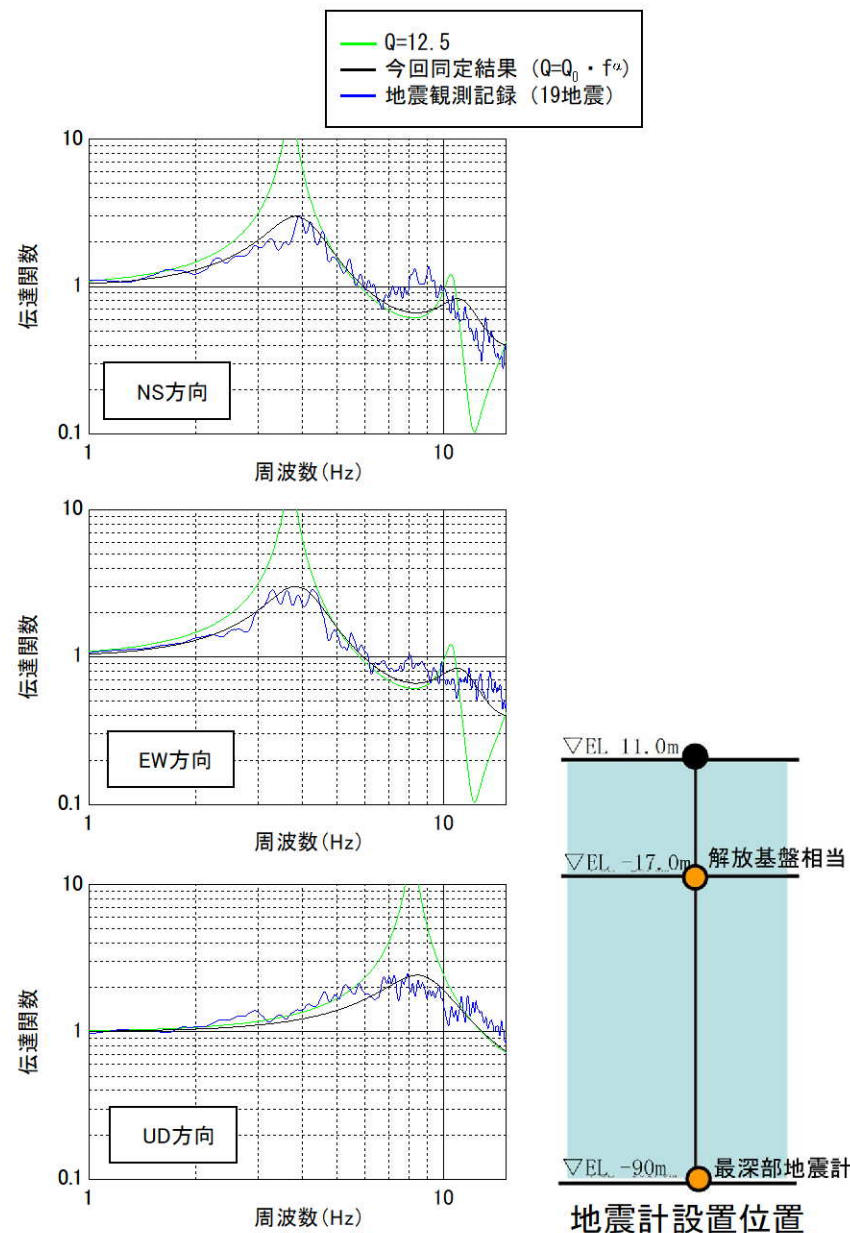
b. 伝達関数による地盤減衰 (Q値) の確認

- 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、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) 地盤減衰 (Q値) の設定

- 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に基づき、最新の技術的知見を取り入れた多面的な検討により、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した。
- 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した。
- 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した。
- 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、保守的に $Q=12.5$ とした。
- 地盤減衰 ($Q=12.5$) について、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た。

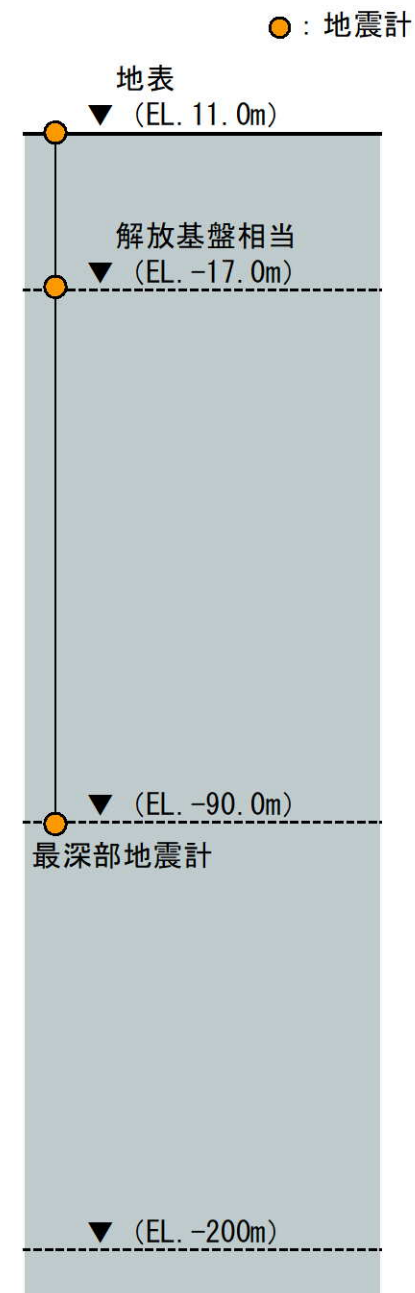


- 上記の検討・確認を踏まえ、地盤減衰 (Q値) は、保守的に $Q=12.5$ と設定する。

3.2.2 最深部地震計以深の地盤減衰（Q値）

(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、以下の通り、多面的な検討を実施。
 - a. 速度層断面による検討：
 - ・ 解放基盤表面からEL. -200mまでの範囲において、既存の速度層断面が得られている。
 - ・ 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。
 - b. ボーリング孔内減衰測定による検討：
 - ・ ボーリング孔内における減衰測定により、解放基盤表面からEL. -200mまでの範囲の地盤減衰（Q値）を測定する。
 - ・ 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ことを確認する。
- 複数の手法による検討結果を踏まえて、地盤減衰（Q値）を検討。



3.2.2 最深部地震計以深の地盤減衰（Q値）

a. 速度層断面による検討

- 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。

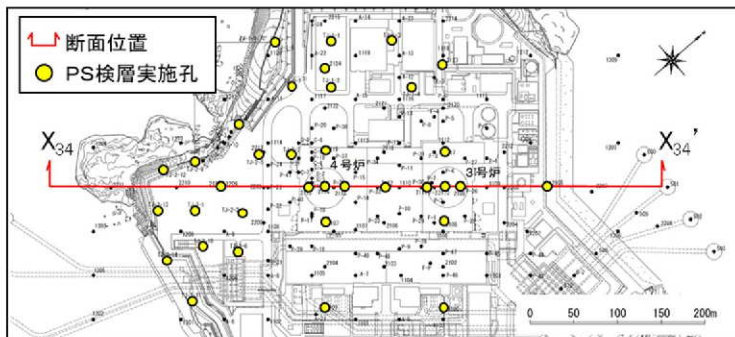
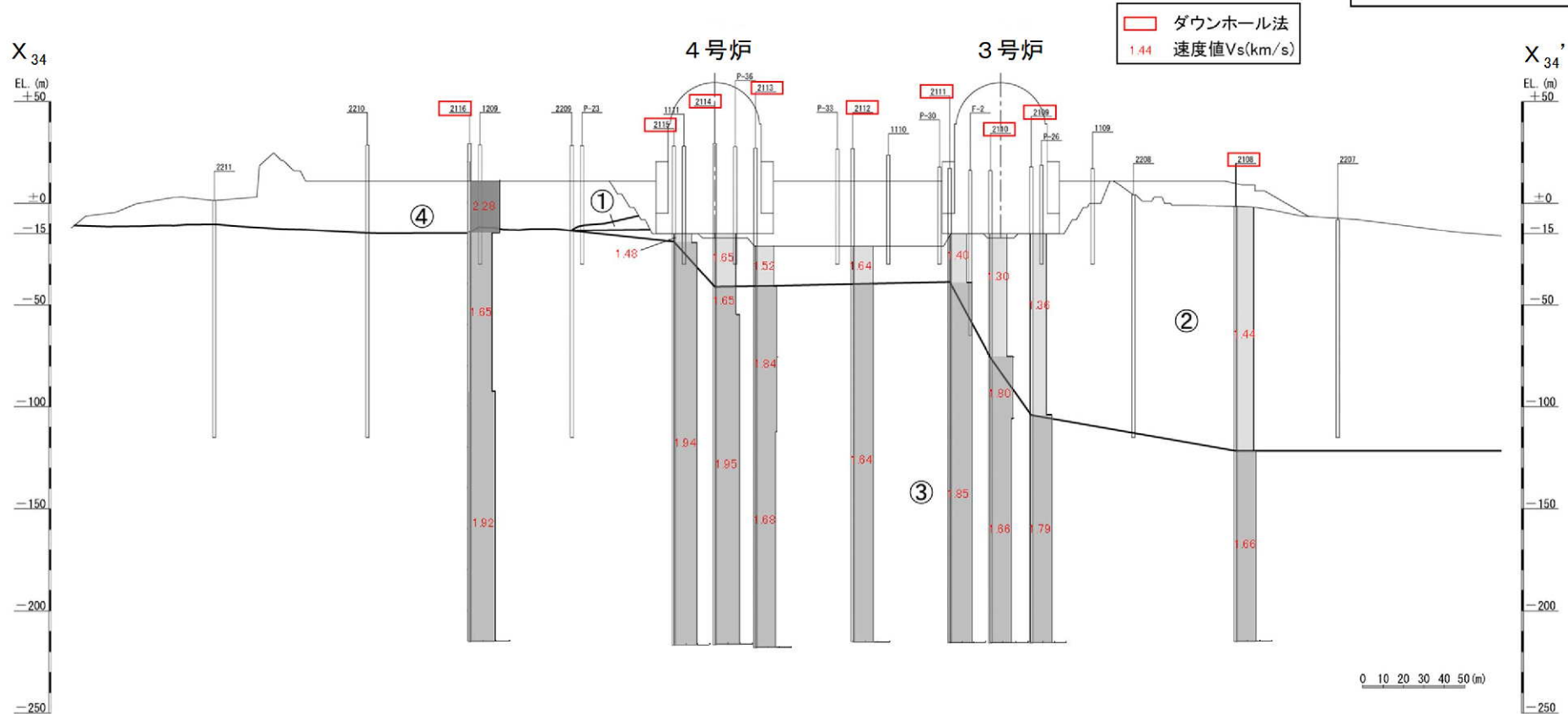


- 原子炉設置位置付近の既存の速度層断面では、解放基盤表面からEL. -200mまでは概ね②、③速度層に分類されており、最深部地震計（EL. -90.0m）以浅と最深部地震計以深の速度に大きな差異が見られないことを確認した。（61～63頁参照）

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

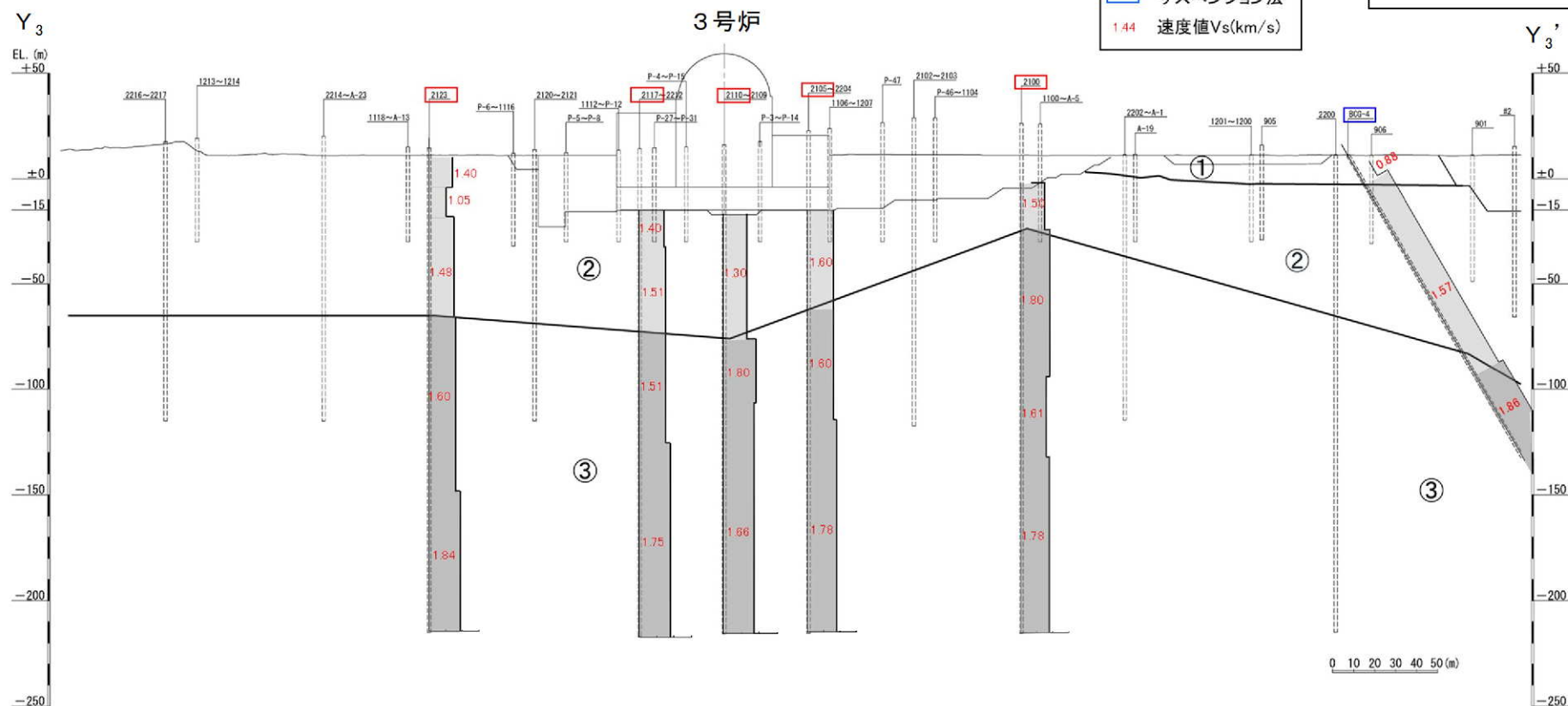
- ・原子炉基礎地盤は浅部でも速い速度 (Vs=約1.4~1.8km/s) を示す。
- ・速度構造に極端なコントラストを示す領域は存在しない。

※ 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。

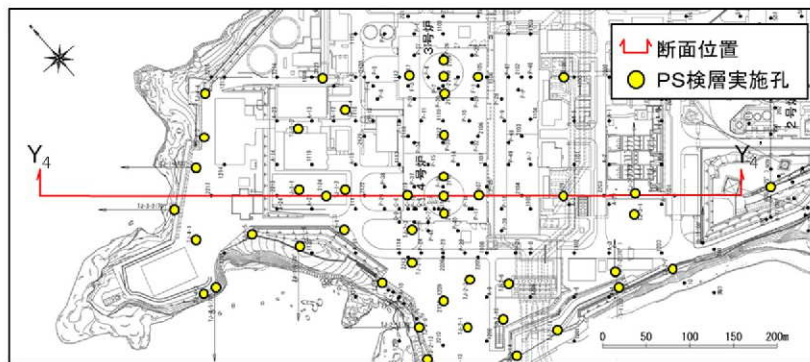
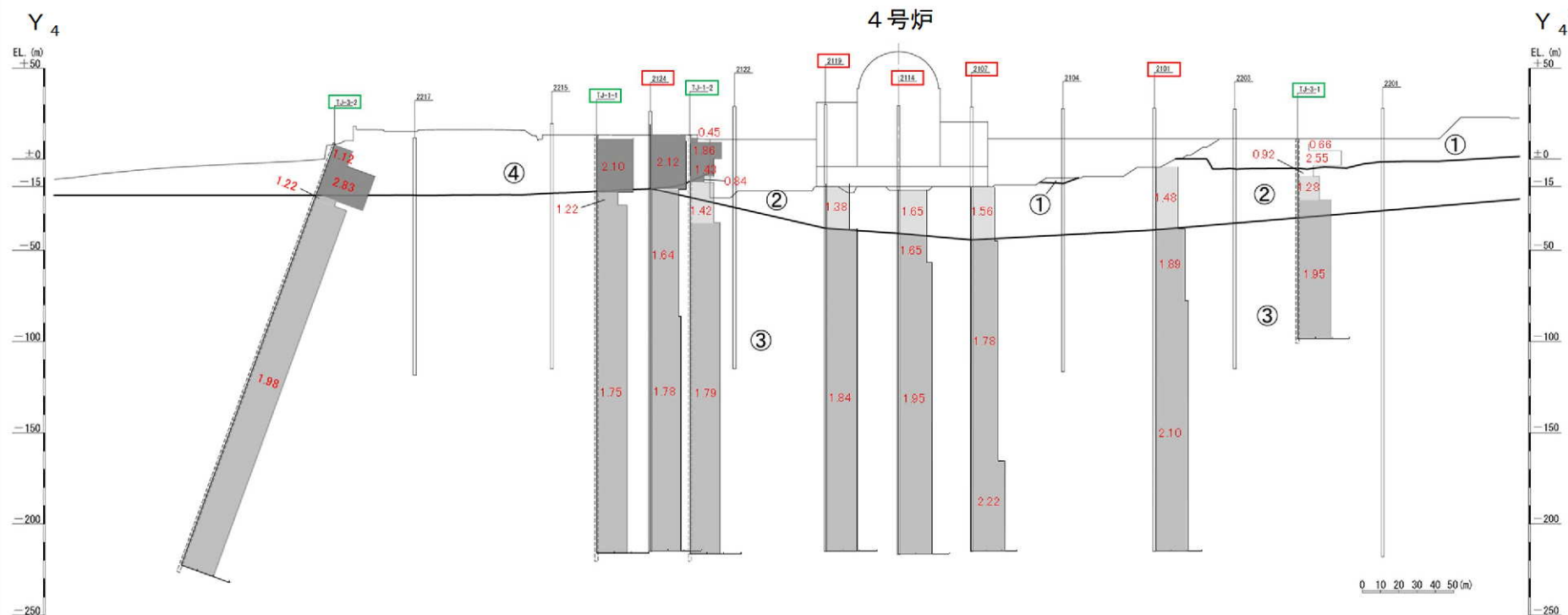
※ H31.4許可の設置変更許可申請書の情報への更新 (①速度層境界の表示、②地形の変更)

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。

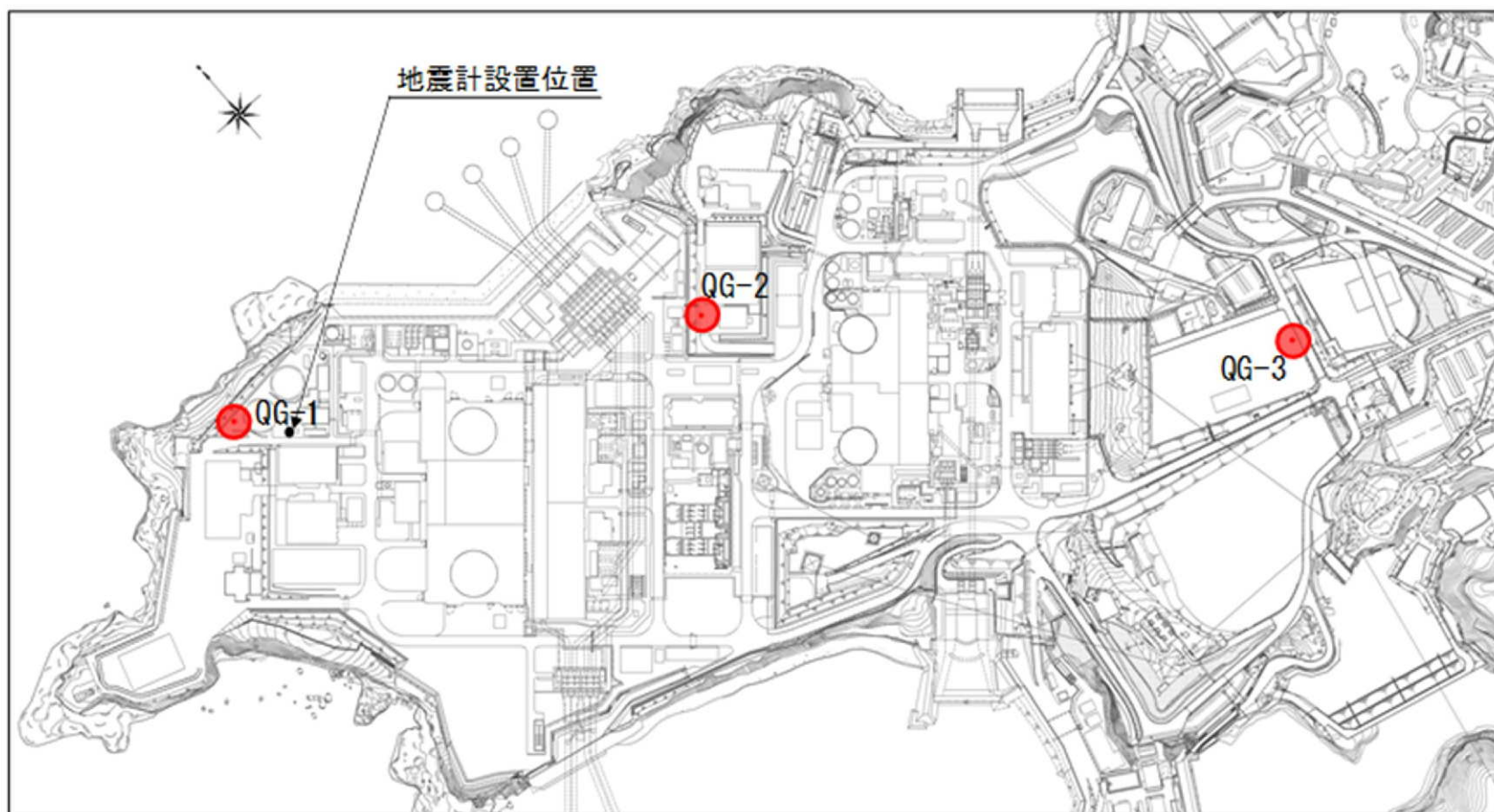
※ H31.4許可の設置変更許可申請書の情報への更新 (①TJ-3-2, TJ-1-1, TJ-1-2, TJ-3-1孔の追加、②速度層境界の変更、③地形の変更)

3.2.2 最深部地震計以深の地盤減衰（Q値）

b. ボーリング孔内減衰測定による検討

■ 追加ボーリング調査位置

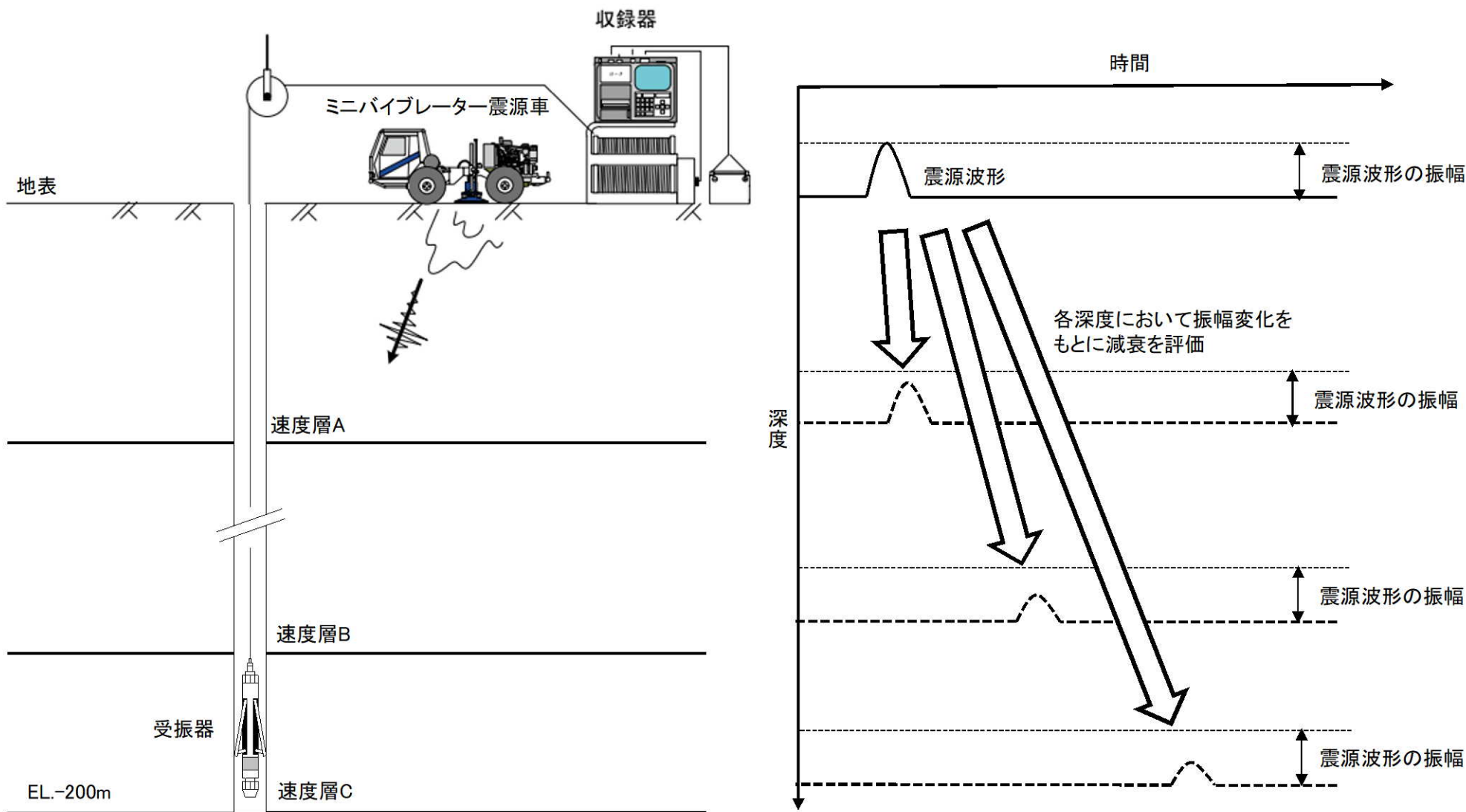
- 発電所構内において、解放基盤表面からEL. -200mまでの追加ボーリング調査を3箇所を実施し、地盤減衰（Q値）を測定。



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^{13), 14)}

- 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¹³⁾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¹⁴⁾する。(参考③)



減衰評価イメージ図

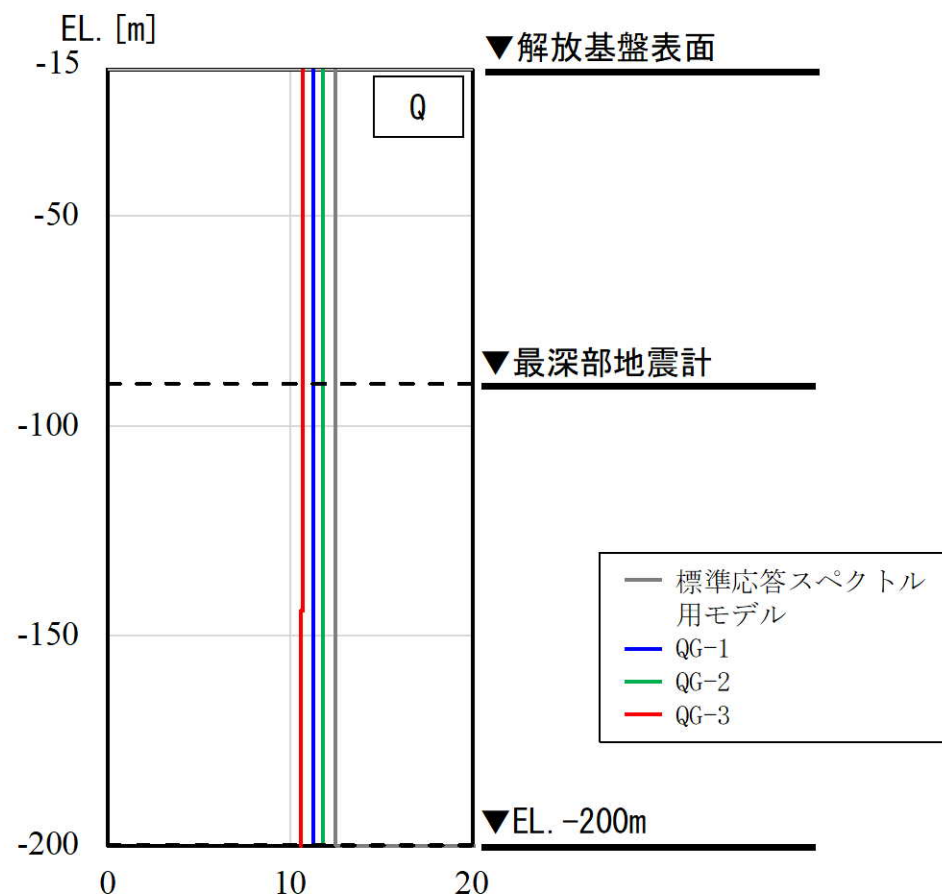
3.2.2 最深部地震計以深の地盤減衰（Q値）

■ 減衰測定結果を踏まえた地盤減衰（Q値）の検討

- 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、標準応答スペクトルに用いる $Q=12.5$ 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表面以深からEL.-200 mに範囲を統一したものを記載



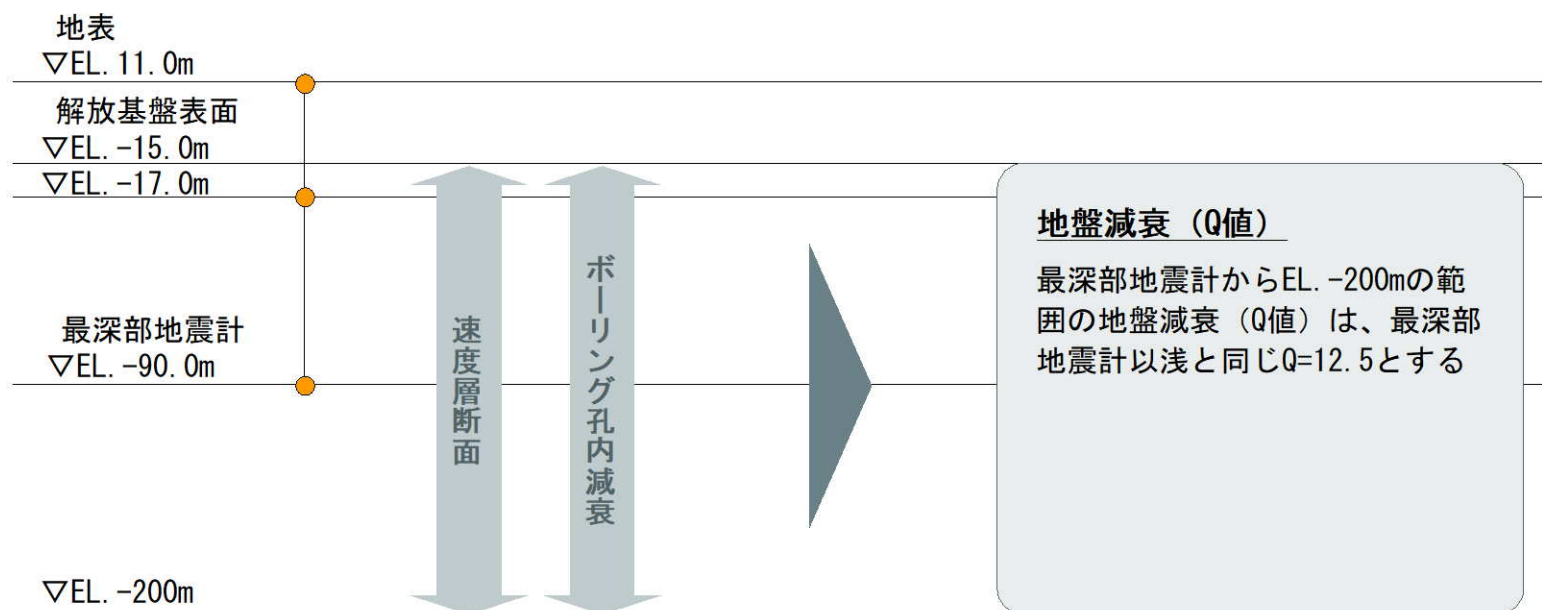
3.2.2 最深部地震計以深の地盤減衰（Q値）

■ 複数の手法による検討結果を踏まえた地盤減衰（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（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。
- ボーリング孔内減衰測定結果が、最深部地震計以浅と最深部地震計以深で同等であることを確認した。



- 最深部地震計からEL. -200mの範囲の地盤減衰（Q値）は、最深部地震計以浅と同じ $Q=12.5$ とする。



●：地震計

3.2.2 最深部地震計以深の地盤減衰（Q値）

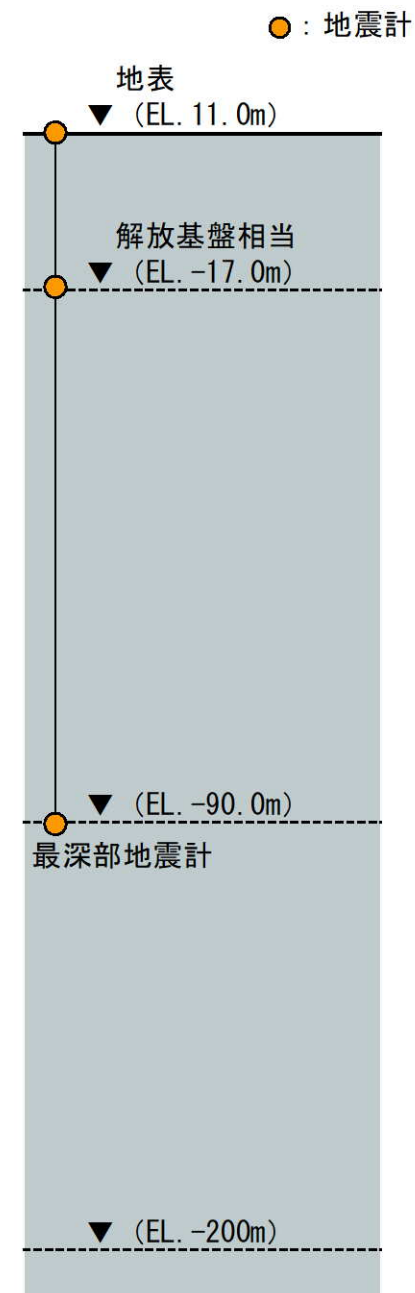
(2) 地盤減衰（Q値）の確認

a. 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、解放基盤表面からEL. -200mまでの範囲における岩石の減衰（Q値）を測定。
- 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ことを確認する。

※佐藤・岡田(2012)¹⁵⁾での指摘（参考④）

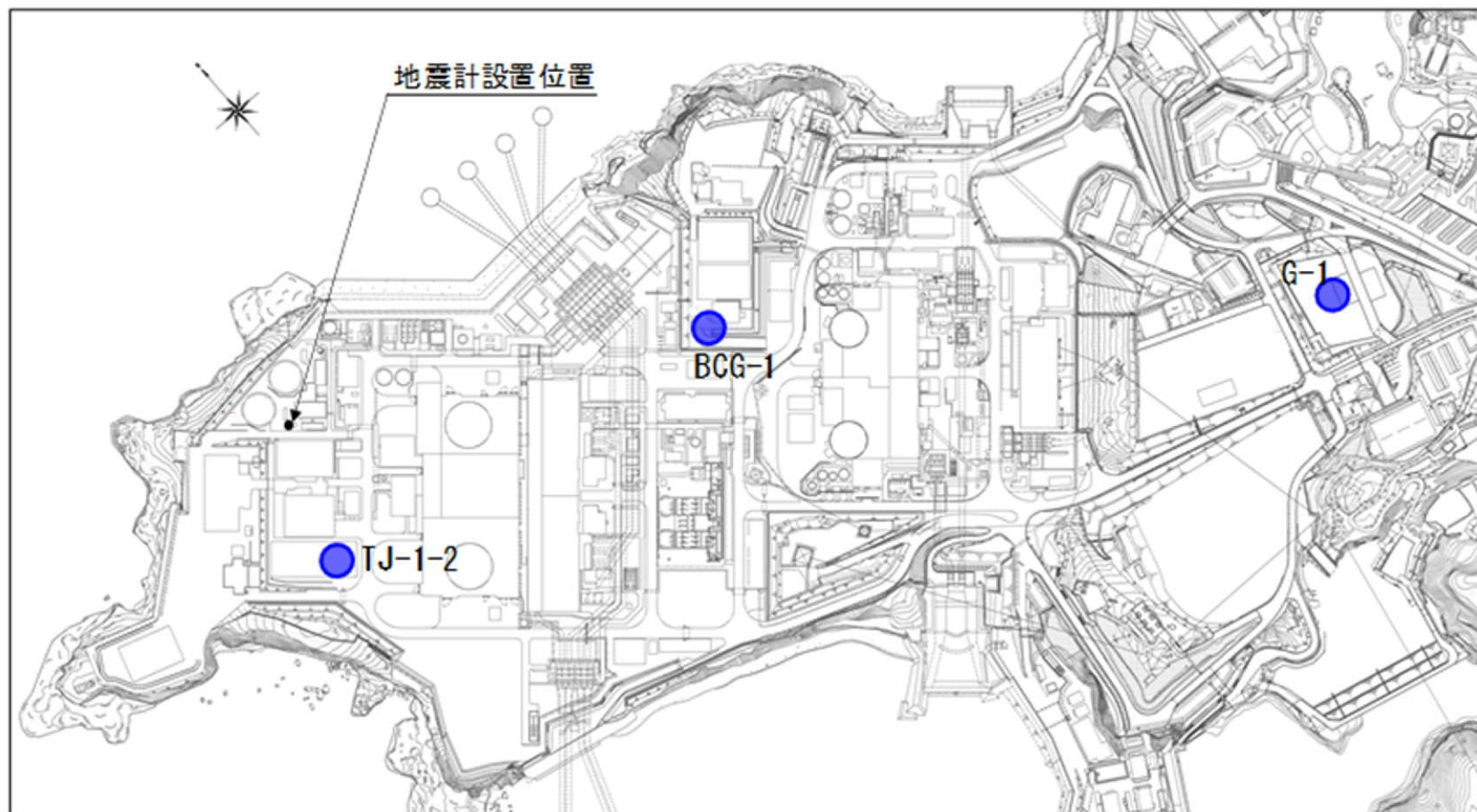
- 岩石コアを用いて測定した減衰は、鉛直アレイ観測記録に基づき評価した減衰に比べて小さくなる。
- 鉛直アレイ観測記録に基づき評価された減衰は、実際の岩盤を対象としているため、顕著な亀裂やランダム性の存在による減衰の付加効果が生じている。



3.2.2 最深部地震計以深の地盤減衰（Q値）

■ 岩石コア採取位置

- 発電所構内における解放基盤表面から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。



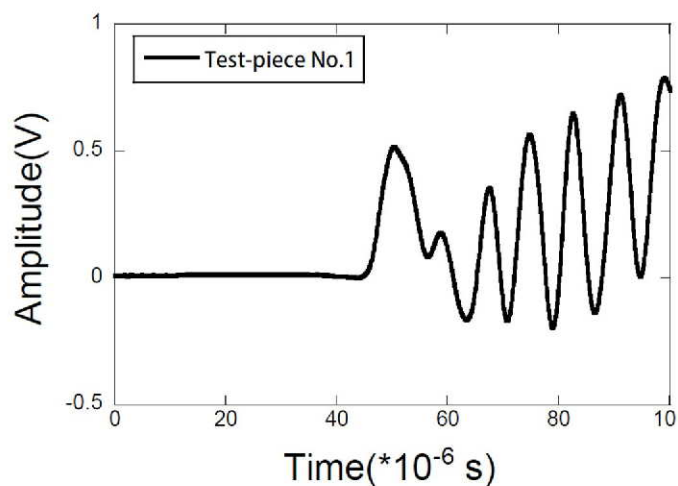
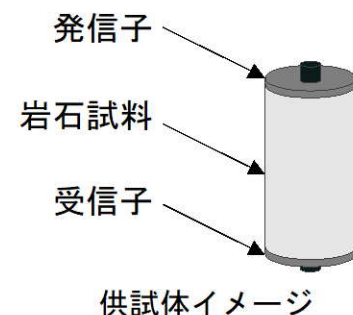
3.2.2 最深部地震計以深の地盤減衰 (Q値)

■ 岩石コアを用いた減衰測定^{15), 16)}

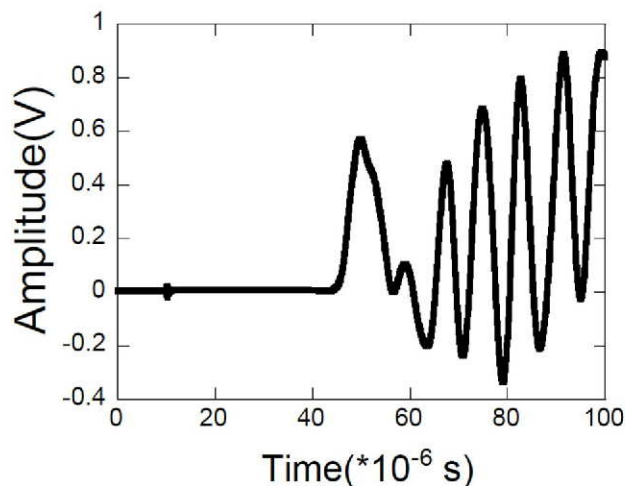
- 佐藤・岡田(2012)¹⁵⁾において適用性が確認された、異なる試験体の透過パルス波のスペクトル比を用いる「スペクトル比法」(Toksöz et al. (1979)¹⁶⁾)による評価を実施。供試体1として敷地内のボーリング調査により得られた岩石コアを、供試体2としてQ値が既知なアルミニウムを使用し、透過波のスペクトル比 $A_1(f)/A_2(f)$ から次式に基づき、岩石の減衰(Q値)を推定。
- 岩石コアで得られるQ値は、地盤を構成する材料の減衰であり、亀裂等を含む地盤全体の減衰に対して部分的であることから、最深部地震計以浅と最深部地震計以深の相对比较による検討を実施。

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

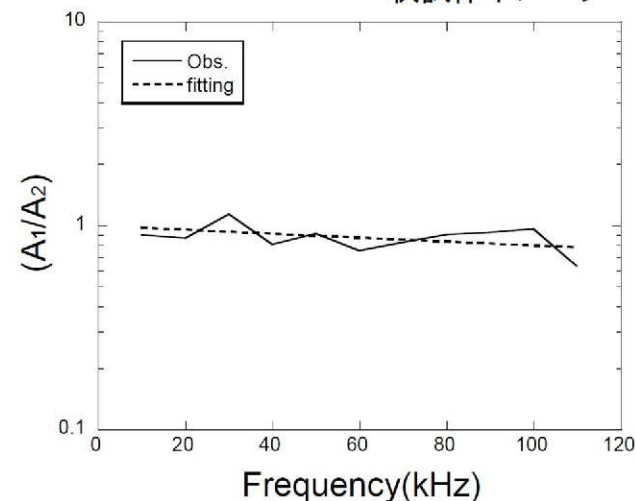
c	弾性波速度
Q	Q値
x	伝播距離(供試体長さ)
f	周波数
K	供試体での幾何減衰に関する項



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



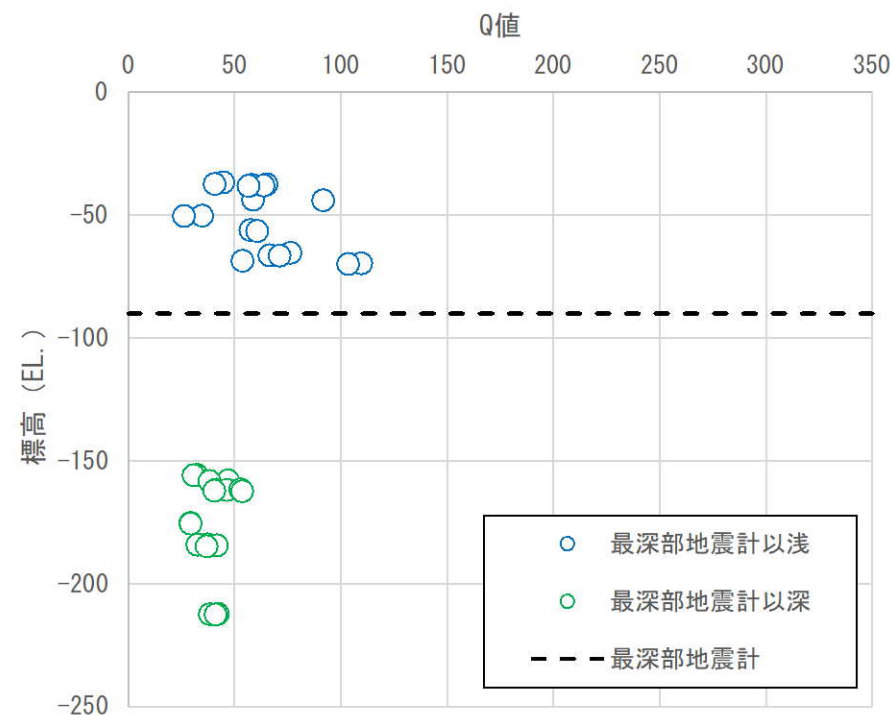
岩石コア供試体とアルミニウム供試体の
スペクトル比とフィッティング結果

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) 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）以浅と最深部以深の速度に大きな差異が見られないことを確認した。
- ボーリング孔内減衰測定結果が、最深部地震計以浅と最深部地震計以深で同等であることを確認した。
- 上記の検討結果から、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 $Q=12.5$ とした。
- 設定した地盤減衰（Q値）について、岩石コアを用いた減衰測定による確認を実施した。



- 上記の検討・確認を踏まえ、最深部地震計からEL. -200mの範囲の地盤減衰（Q値）は、最深部地震計以浅と同じ $Q=12.5$ と設定する。
- なお、参考として、より一層の説明性の向上を目的として、「経験的地盤増幅率による検討」により、最深部地震計（EL. -90m）からEL. -200mまでの範囲で設定した地盤減衰（ $Q=12.5$ ）に矛盾がないことを確認した。（参考⑤、⑥）

3.3 地下構造モデルの設定

■ 地下構造モデルの設定

- EL. -200m以深の範囲は、既許可の地下構造モデルを流用して設定し、短周期から長周期までの全ての周期帯への適用性を確認。
 - 設定根拠としている地震調査委員会（2007）²⁾における地盤構造の物性値は、詳細法（ハイブリッド合成法）による強震動計算を目的として設定されており、短周期から長周期までの全ての周期帯へ適用されている。
 - なお、既許可以降の知見である防災科学技術研究所 地震ハザードステーション J-SHIS (V3.2)³⁾の深部地盤と、地震調査委員会（2007）の地盤構造の物性値が整合する。（補足①）
- 解放基盤表面からEL. -200mまでの速度構造・密度は、既許可の地下構造モデルを流用する。
- 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やボーリング孔内減衰測定結果等の観測事実等に基づき、最新の技術的知見を取り入れた多面的な検討から地盤減衰（Q値）を設定する。
- 上記を踏まえ、以下の通り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ボーリング孔内減衰測定結果等の観測事実等に基づいて設定。
- 本節では、解放基盤表面からEL. -200mまでの範囲について、下表の方法により、全ての周期帯における設定した地下構造モデルの妥当性を確認。

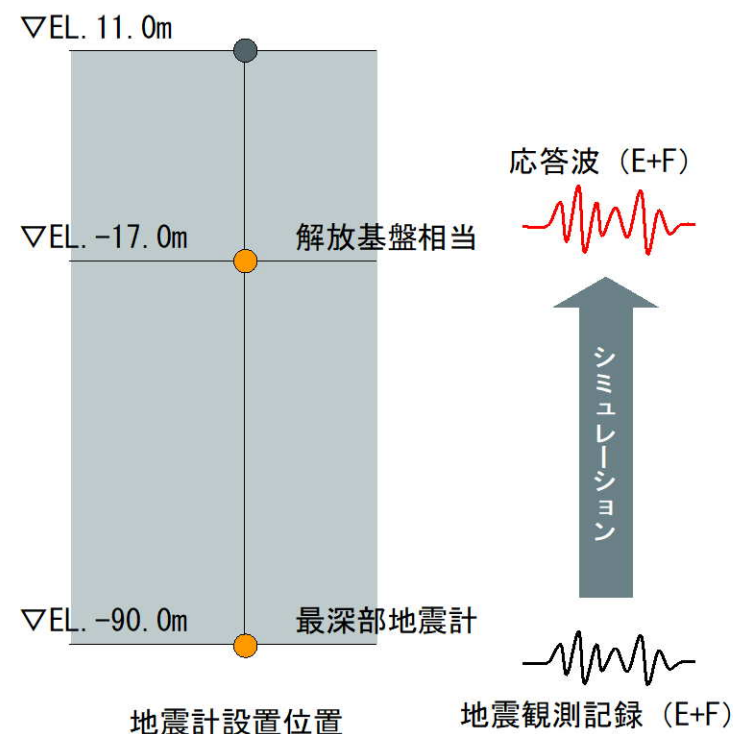
確認方法	対象深度EL. (m)		比較方法	比較対象		確認する観点
	-15.0	-90.0		-200		
応答スペクトルによる確認	EL. -15.0m~EL. -90m		応答スペクトル	設定した地下構造モデル	地震観測記録（解放基盤相当）	設定した地下構造モデルによる応答波の応答スペクトルが、地震観測記録の応答スペクトルと同等もしくは上回る。
PS検層モデルとの比較による確認	EL. -15.0m~EL. -200m		理論伝達関数	設定した地下構造モデル	PS検層モデル	設定した地下構造モデルによる理論伝達関数が、PS検層モデルによる理論伝達関数と同等もしくは上回る。

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。（76～85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について、以下の観点で全ての周期帯における妥当性を確認した。
 - 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。
- なお、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、設定した地下構造モデルの妥当性に影響はないと判断した。（補足③）

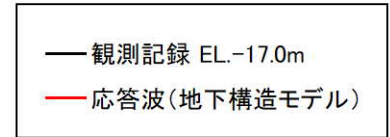
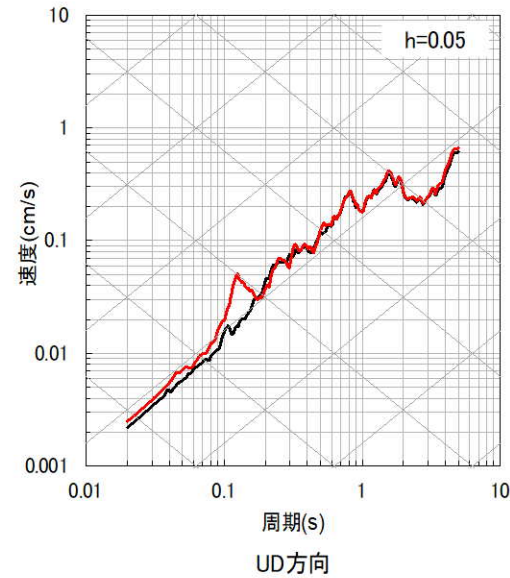
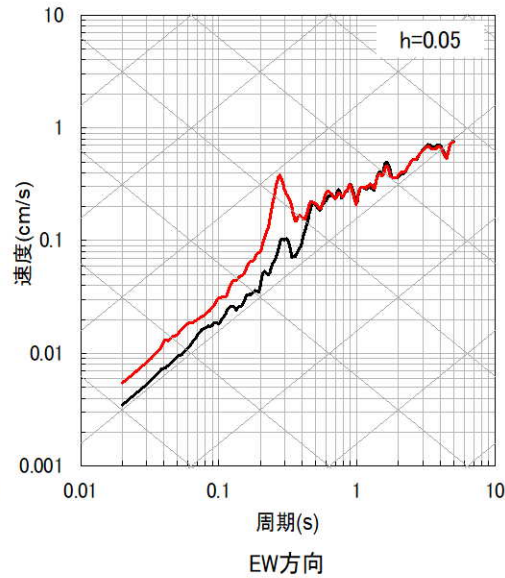
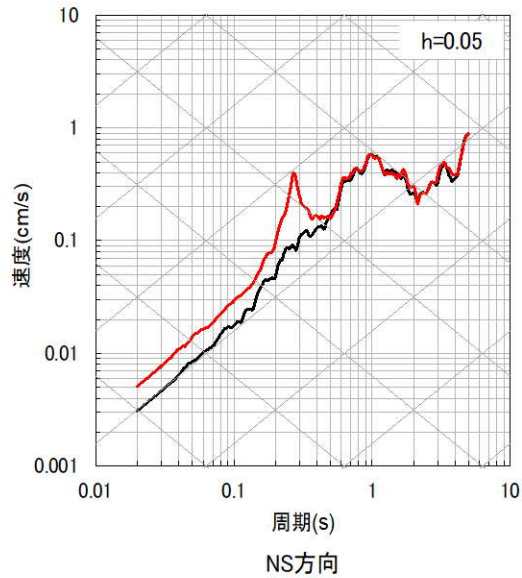
※入力最深部地震計（EL. -90m）で得られた地震観測記録及び出力の解放基盤相当（EL. -17m）での応答波は地中記録のため、E+Fで評価。



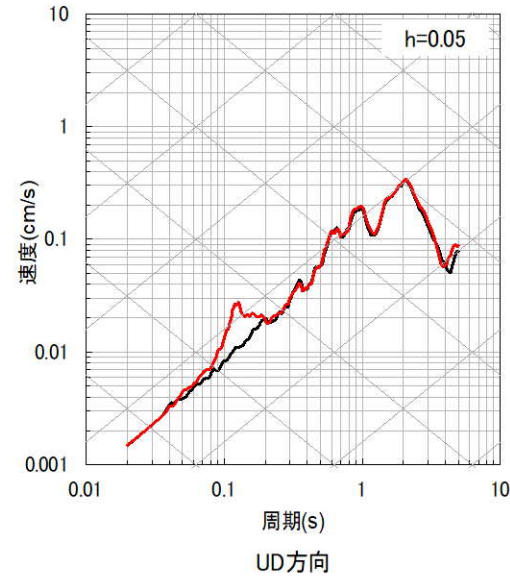
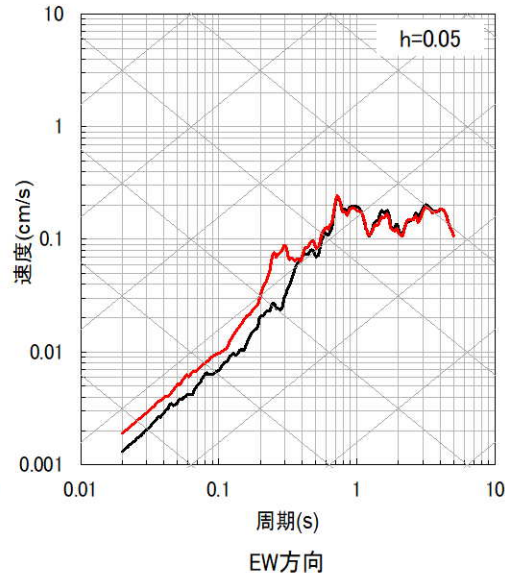
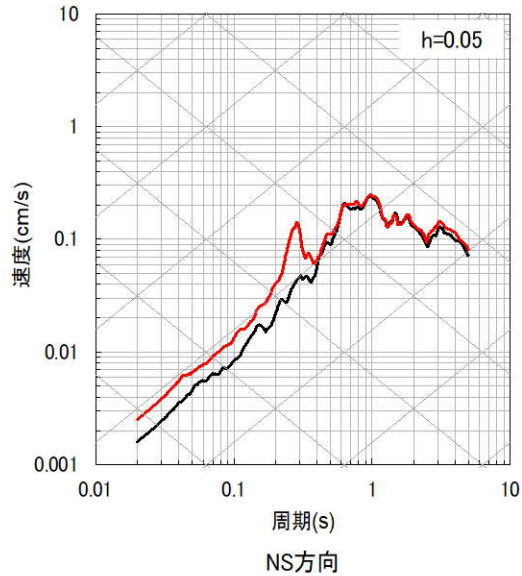
3.4 地下構造モデルの妥当性確認

■ 応答スペクトルの比較結果 (1/10)

① 鹿児島県北西部



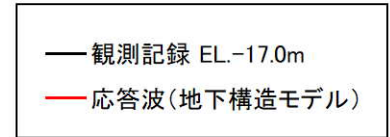
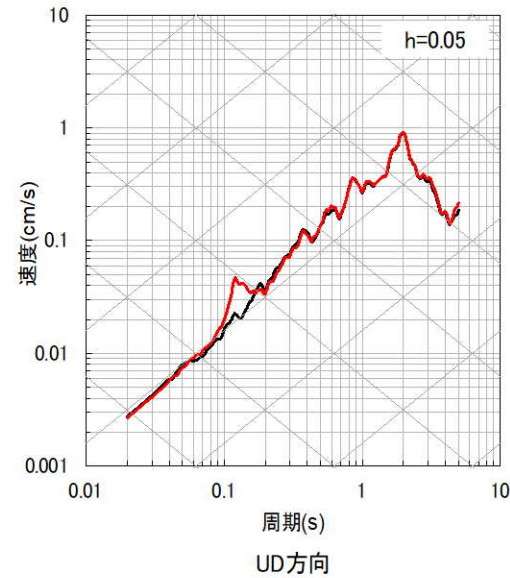
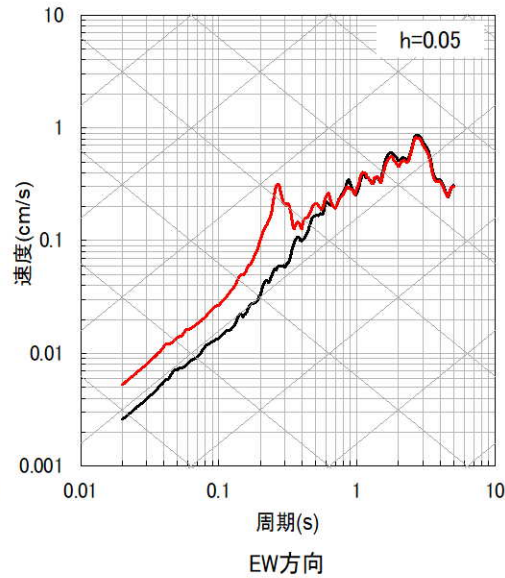
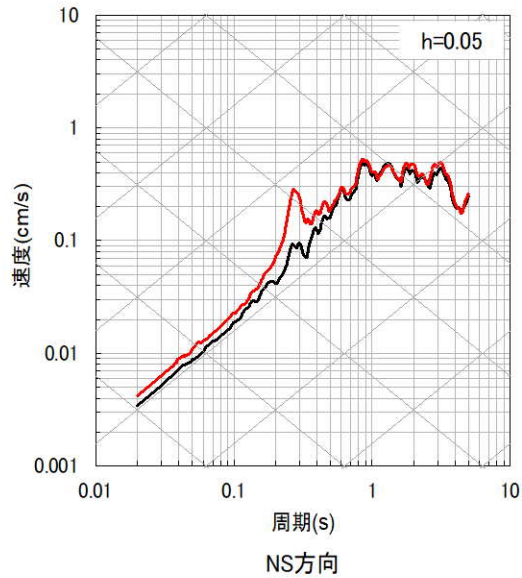
② 鹿児島県北西部



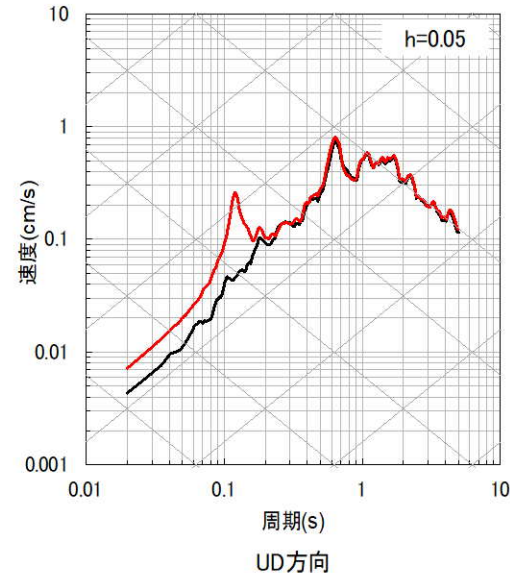
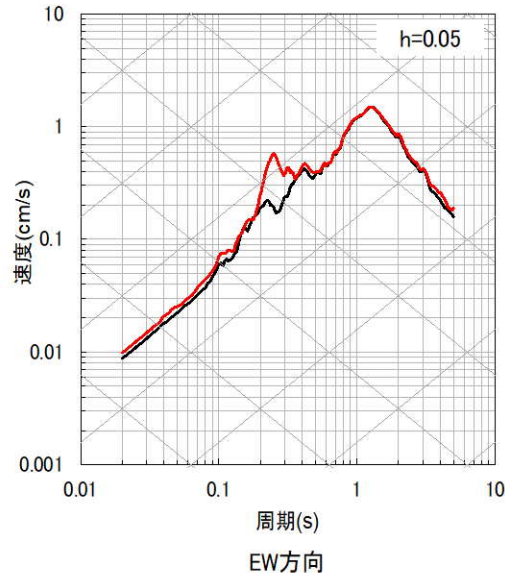
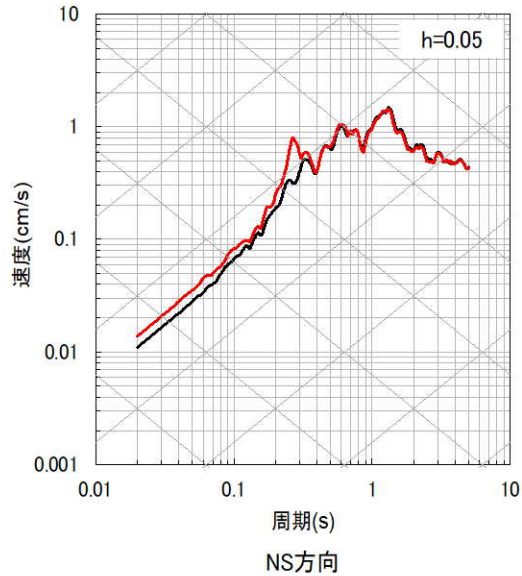
3.4 地下構造モデルの妥当性確認

■ 応答スペクトルの比較結果 (2/10)

③ 鹿児島県北西部



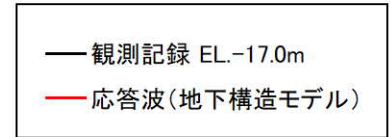
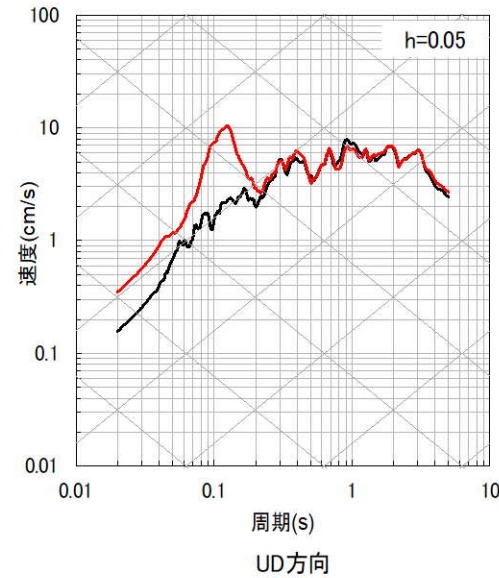
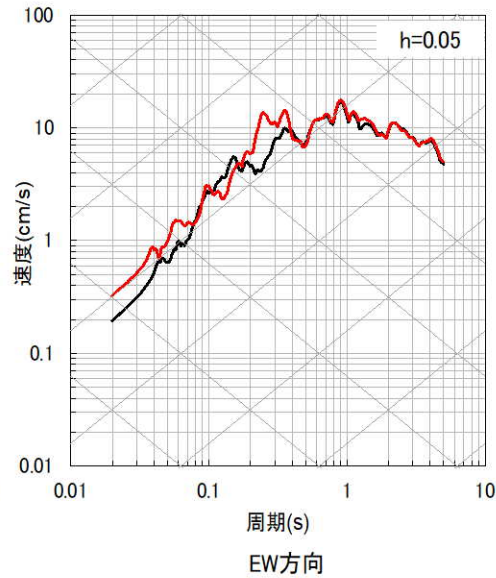
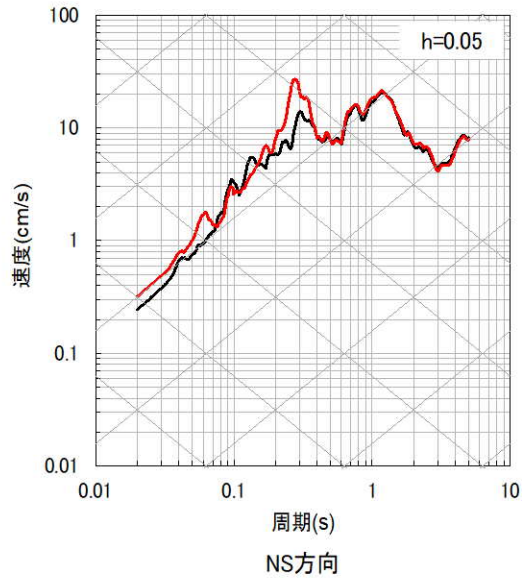
④ 山口県



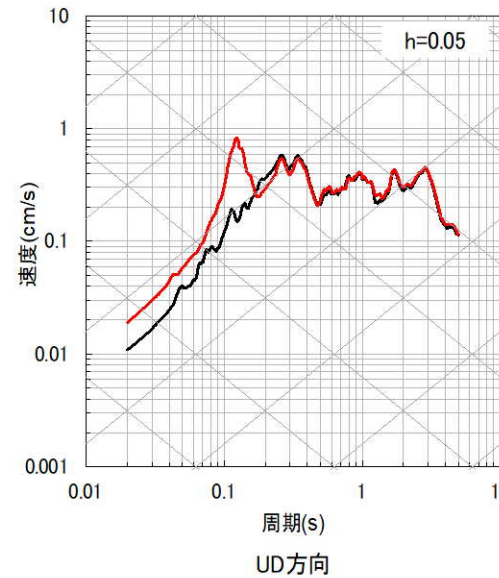
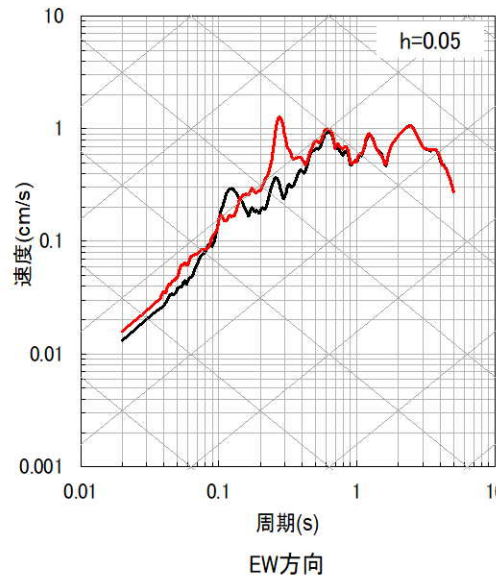
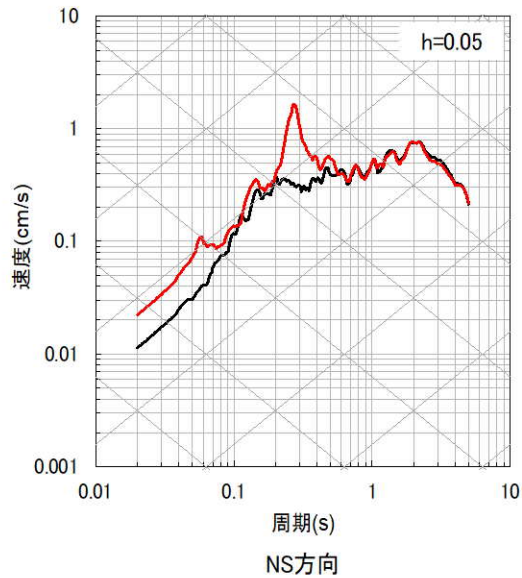
3.4 地下構造モデルの妥当性確認

■ 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)



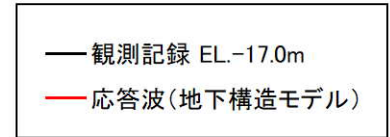
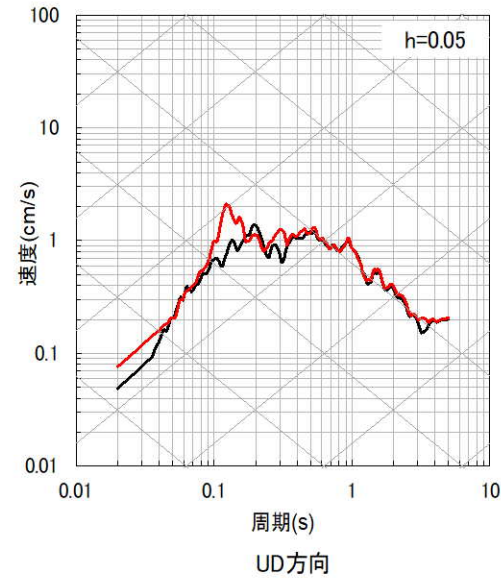
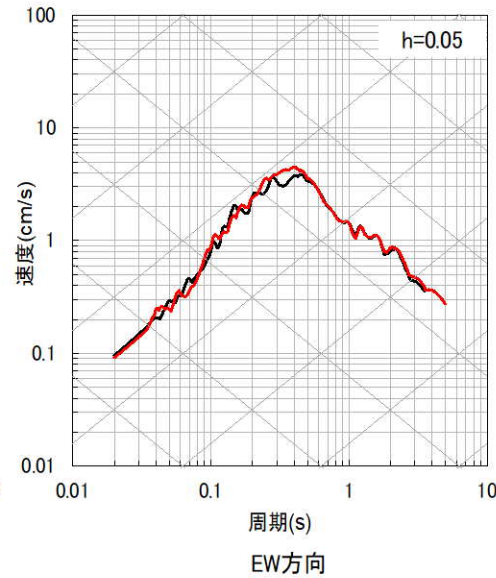
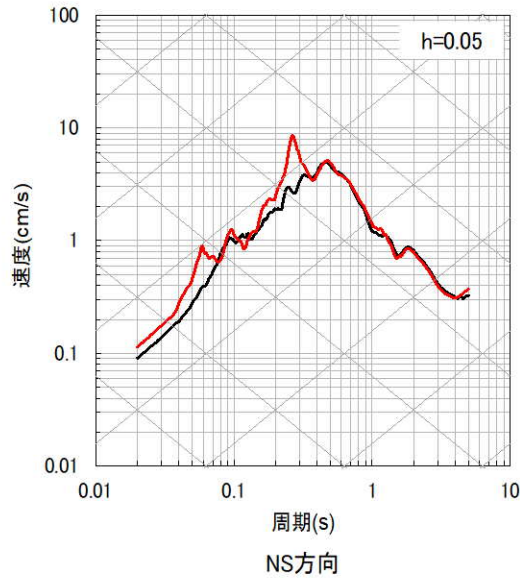
⑥九州北西沖



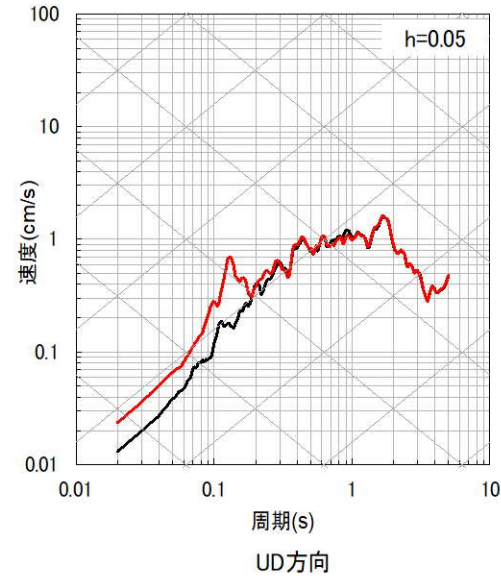
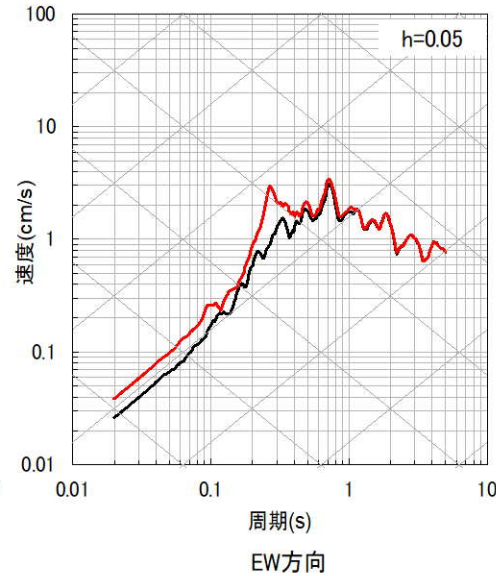
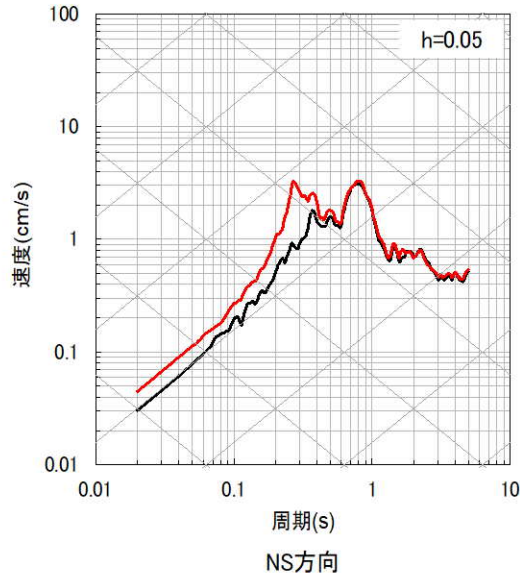
3.4 地下構造モデルの妥当性確認

■ 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)



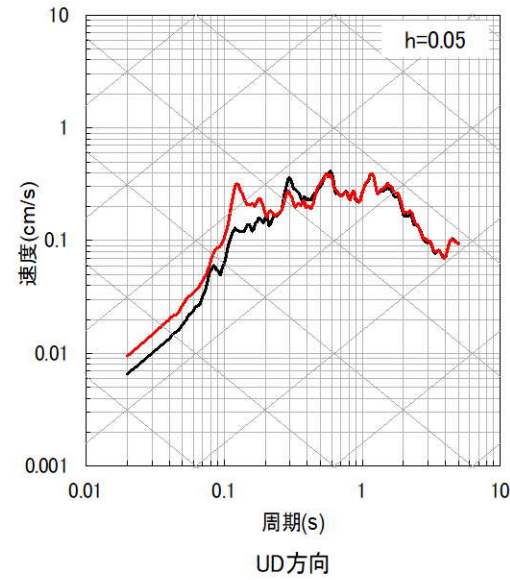
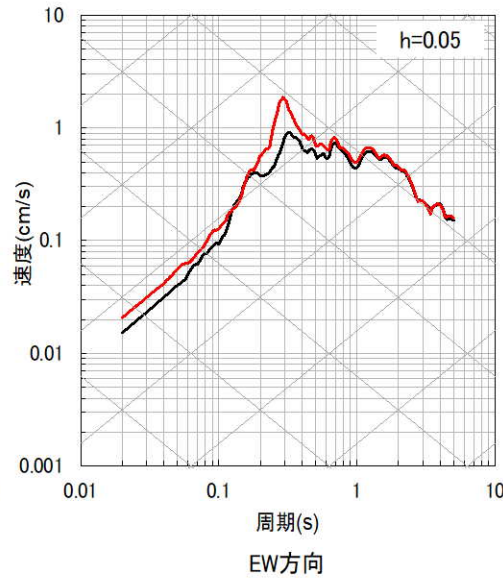
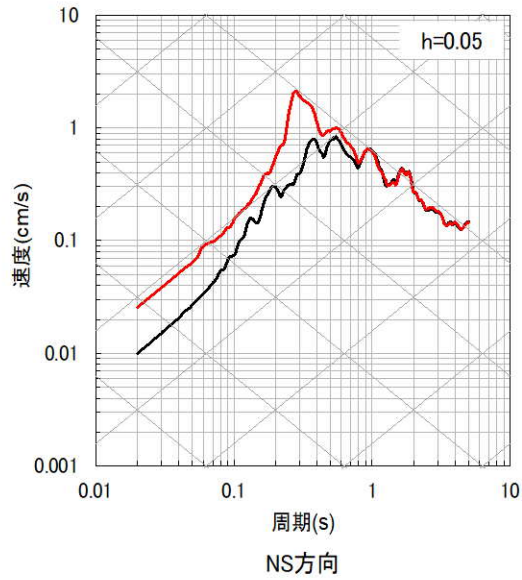
⑧熊本県熊本地方 (2016年熊本地震前震)



3.4 地下構造モデルの妥当性確認

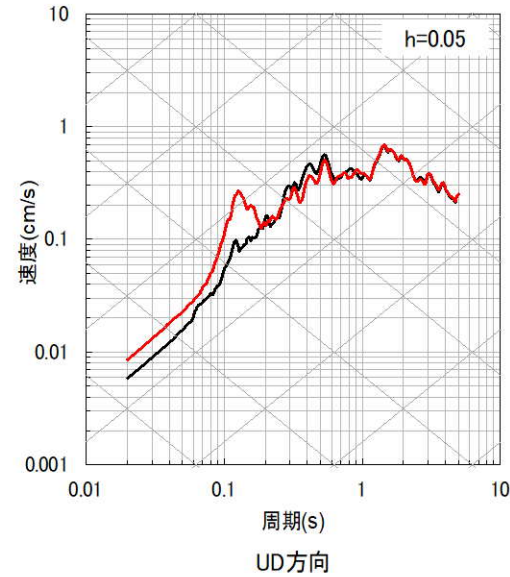
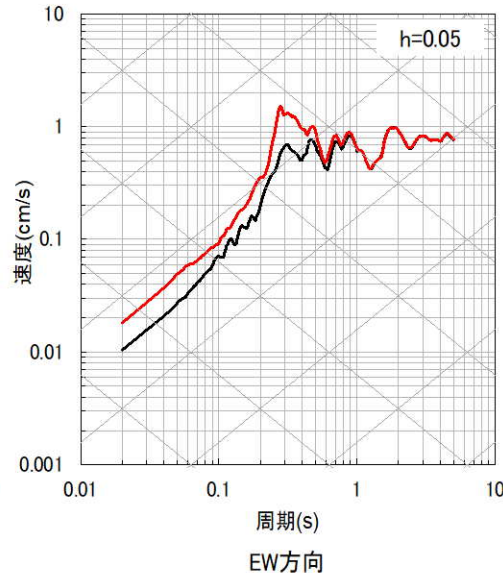
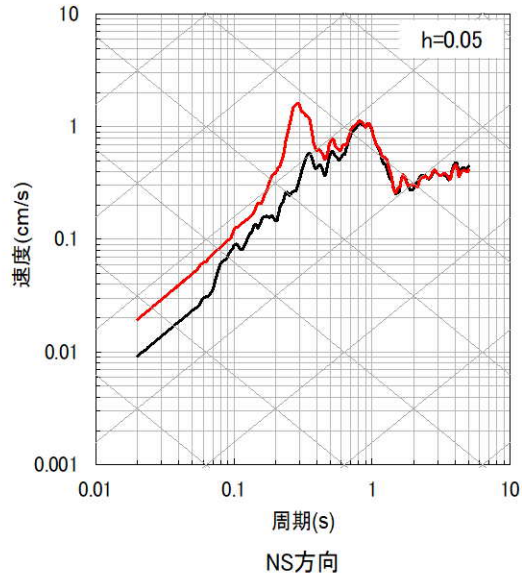
■ 応答スペクトルの比較結果 (5/10)

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)

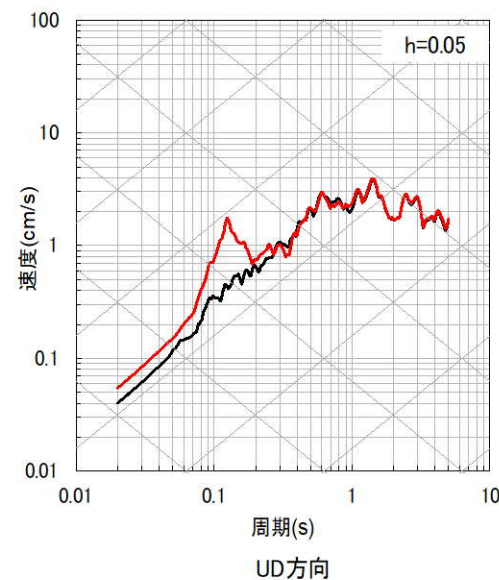
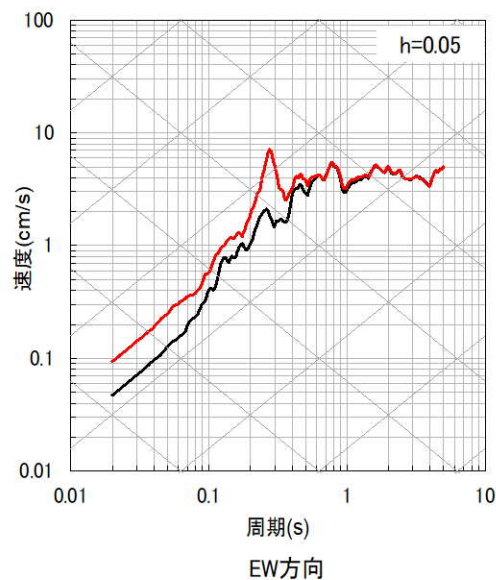
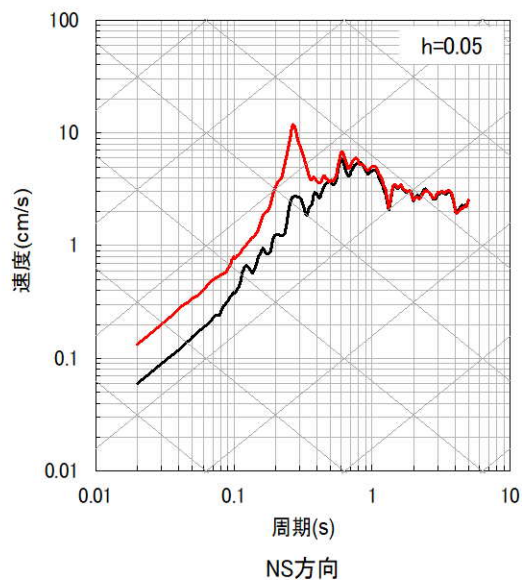
⑩ 熊本県熊本地方



3.4 地下構造モデルの妥当性確認

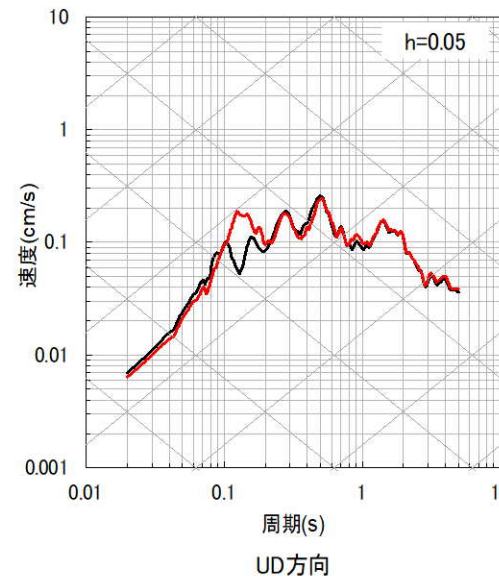
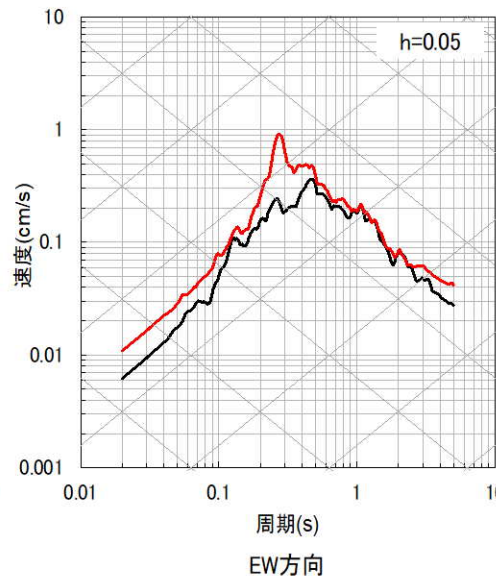
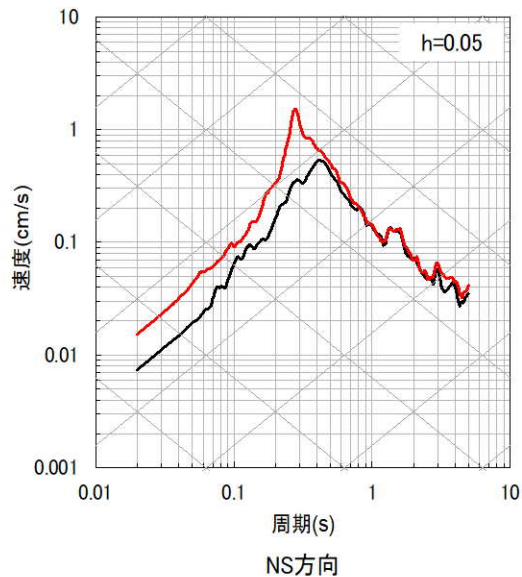
■ 応答スペクトルの比較結果 (6/10)

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)

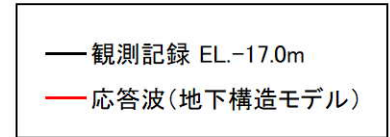
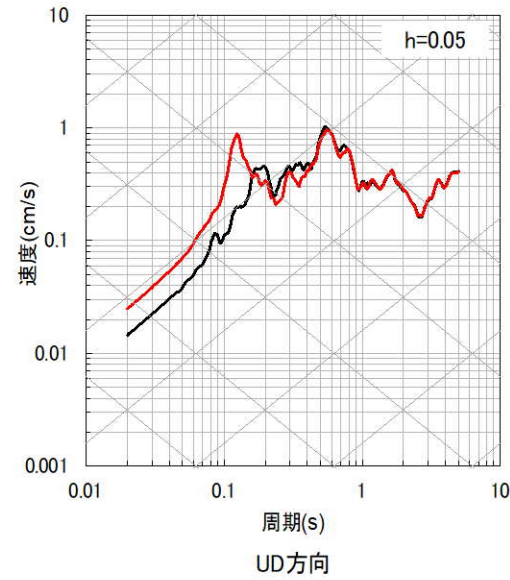
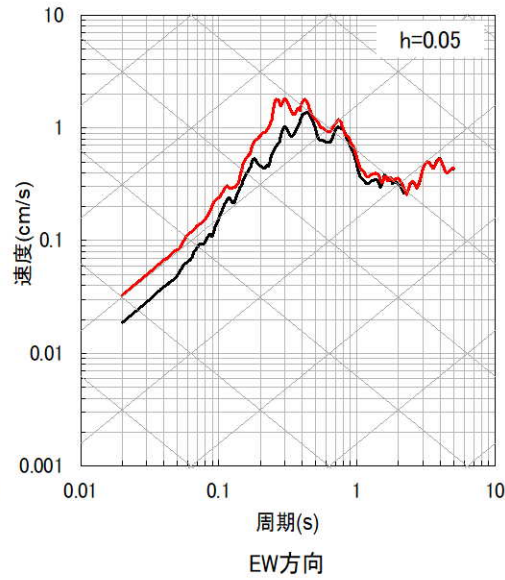
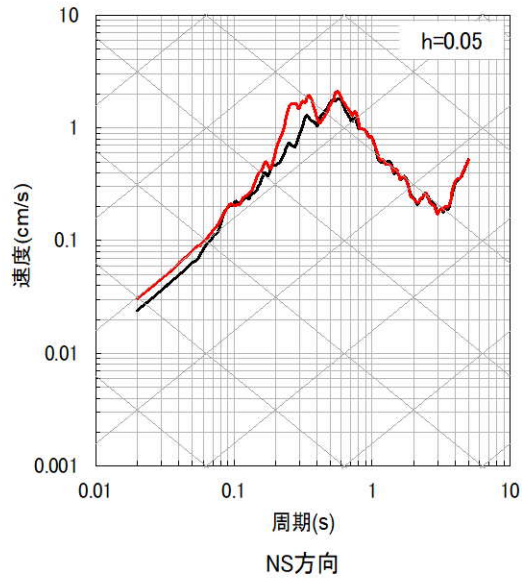
⑫ 熊本県熊本地方



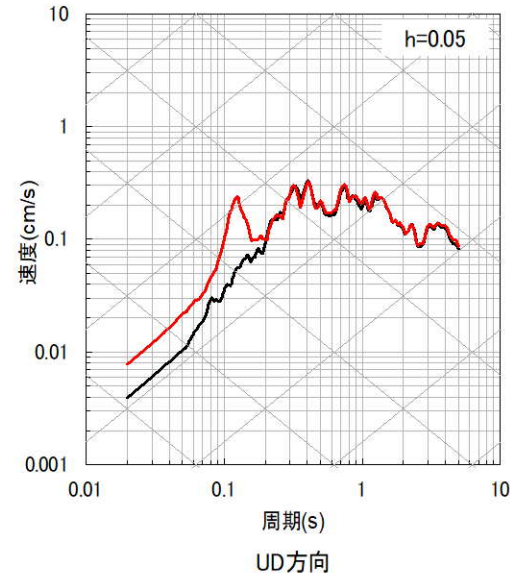
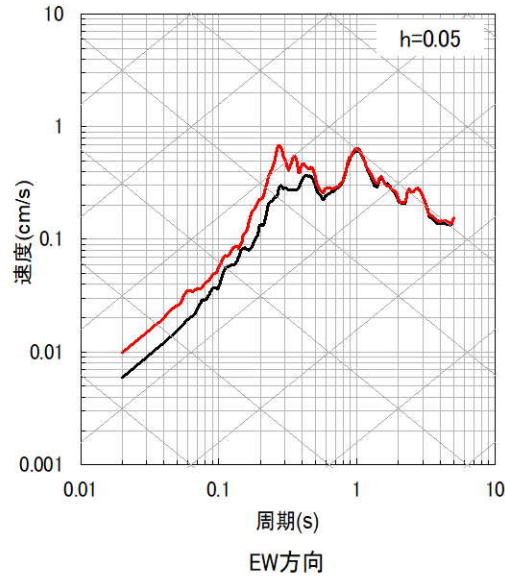
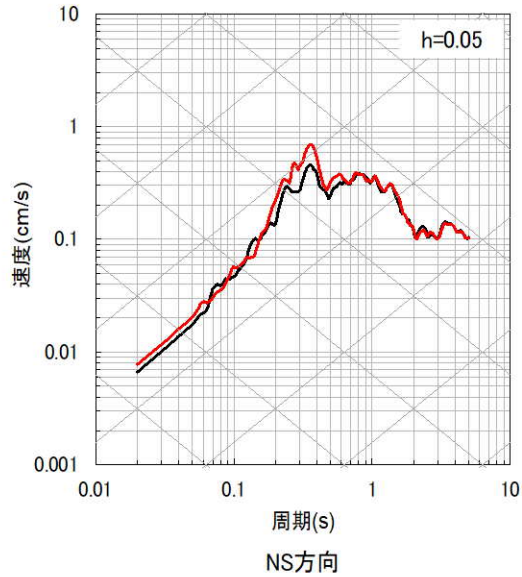
3.4 地下構造モデルの妥当性確認

■ 応答スペクトルの比較結果 (7/10)

⑬熊本県熊本地方



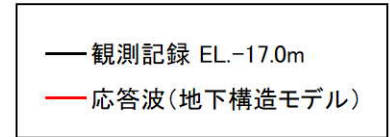
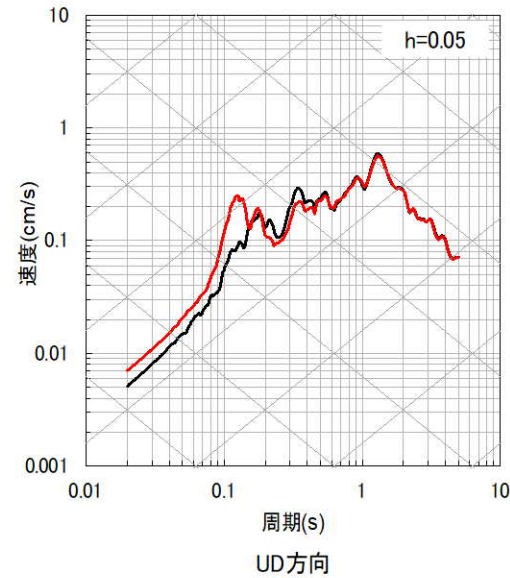
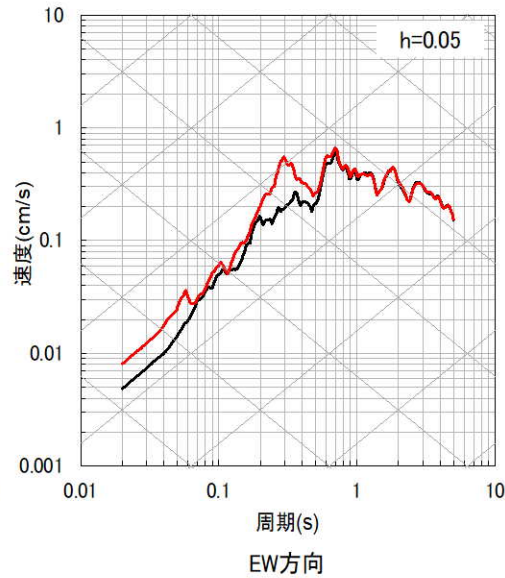
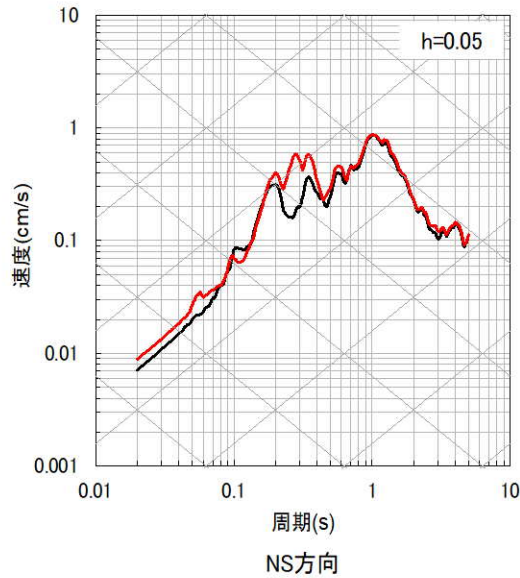
⑭熊本県阿蘇地方



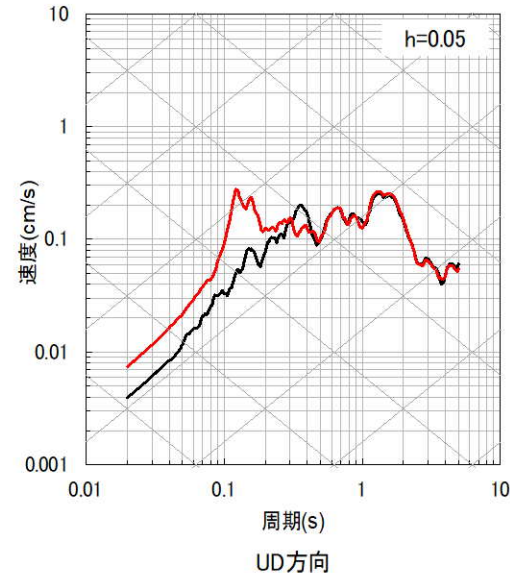
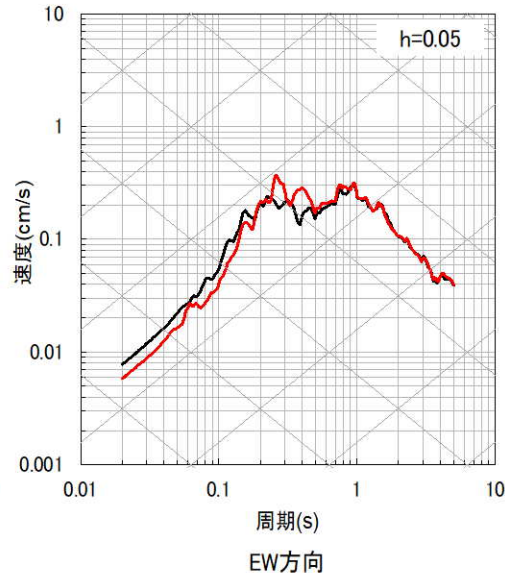
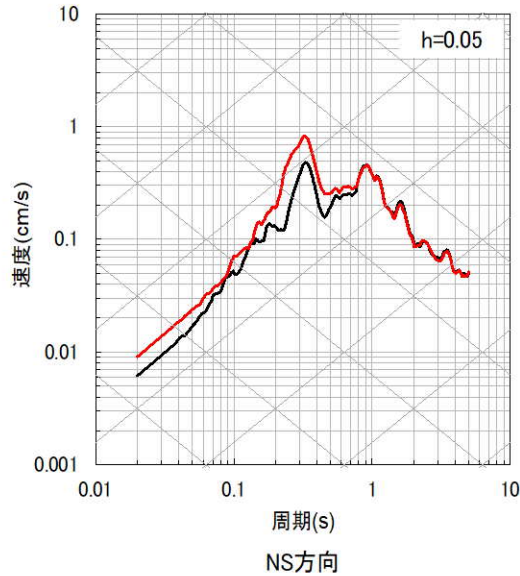
3.4 地下構造モデルの妥当性確認

■ 応答スペクトルの比較結果 (8/10)

⑮ 熊本県阿蘇地方



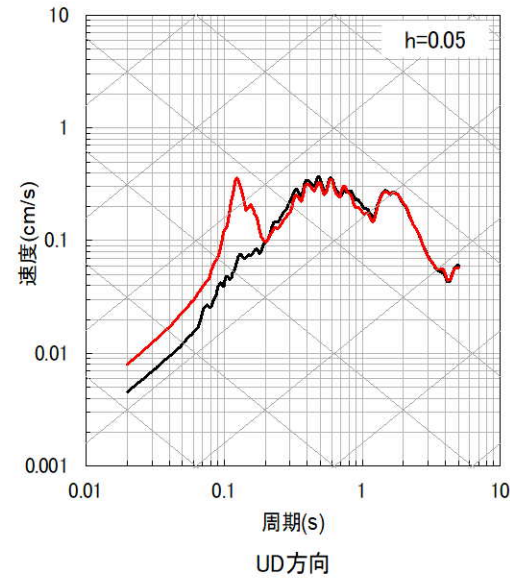
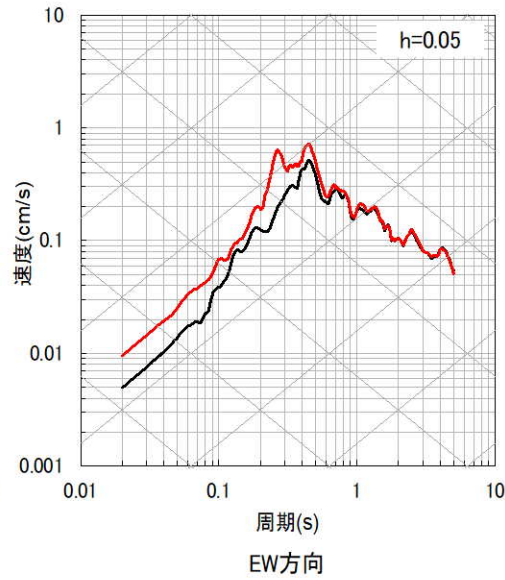
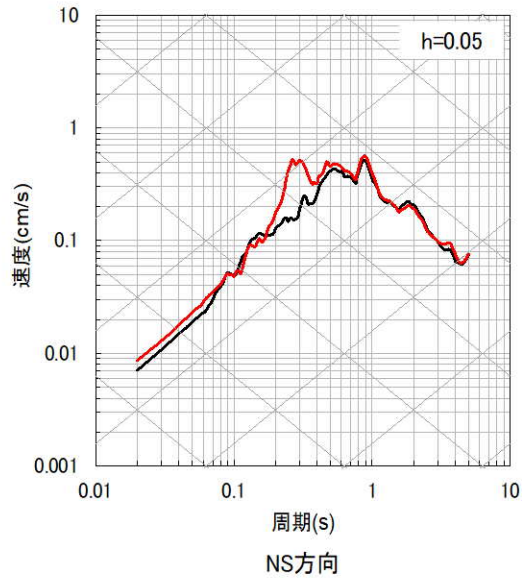
⑯ 熊本県熊本地方



3.4 地下構造モデルの妥当性確認

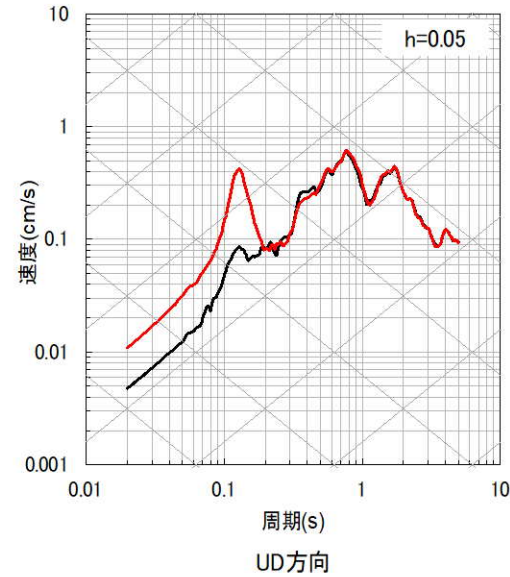
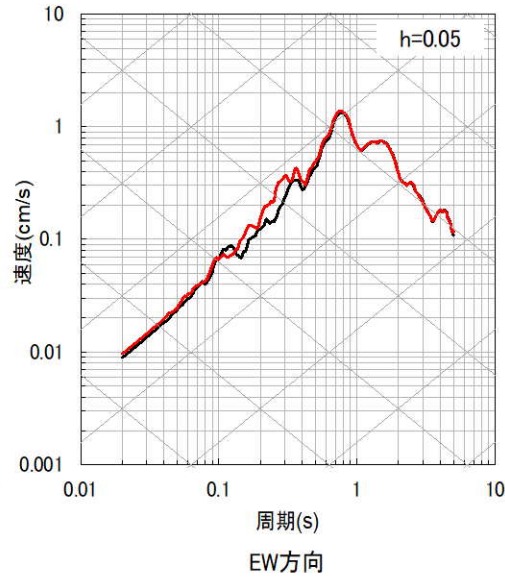
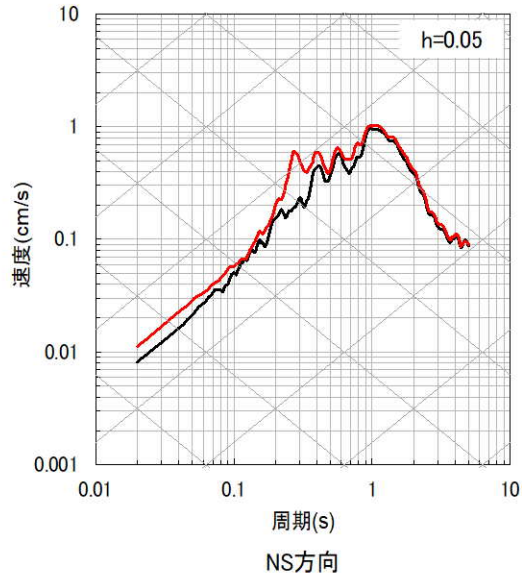
■ 応答スペクトルの比較結果 (9/10)

⑰ 熊本県熊本地方



— 観測記録 EL.-17.0m
— 応答波(地下構造モデル)

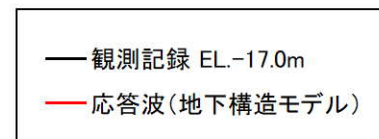
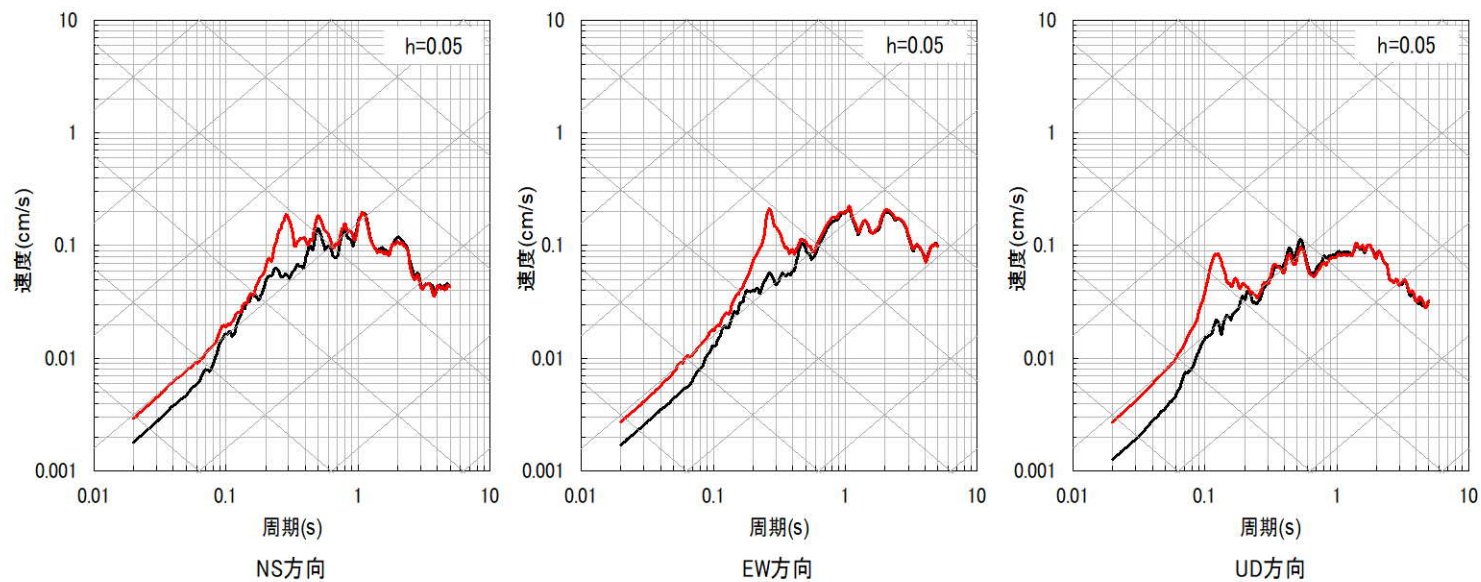
⑱ 熊本県阿蘇地方



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

(2) PS検層モデルとの比較による確認

- 追加調査により解放基盤表面からEL. -200mまでの範囲において得られた、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。

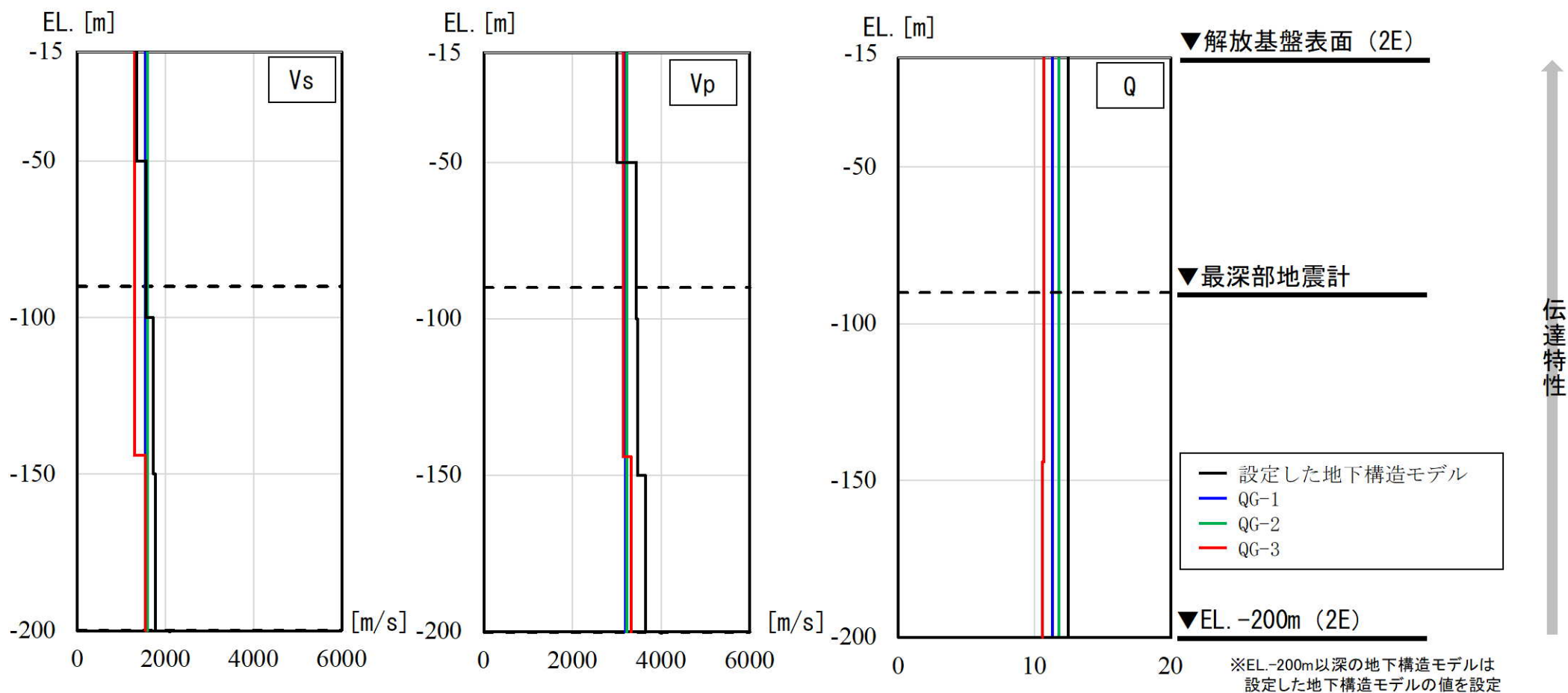
地表 ▼ (EL. 11.0m)	設定した地下構造モデル			PS検層モデル				
解放基盤表面 ▼ (EL. -15.0m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値	伝達特性	伝達特性	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値
▼ (EL. -50.0m)	1350	3000	12.5			PS検層結果		
▼ (EL. -90.0m)	1570	3440	12.5			PS検層結果		
▼ (EL. -100m)						PS検層結果		
▼ (EL. -150m)	1730	3470	12.5			PS検層結果		
▼ (EL. -200m)	1770	3650	12.5			PS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解放基盤表面からEL. -200mまでのPS検層結果等を踏まえ、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

■ PS検層モデルにおけるEL. -200m以深の設定

- 実地盤の状況として、EL. -200mで大きく速度構造が変わらないと考えられるため（補足④）、EL. -200mに速度コントラストのないモデルを以下の通り、設定する。

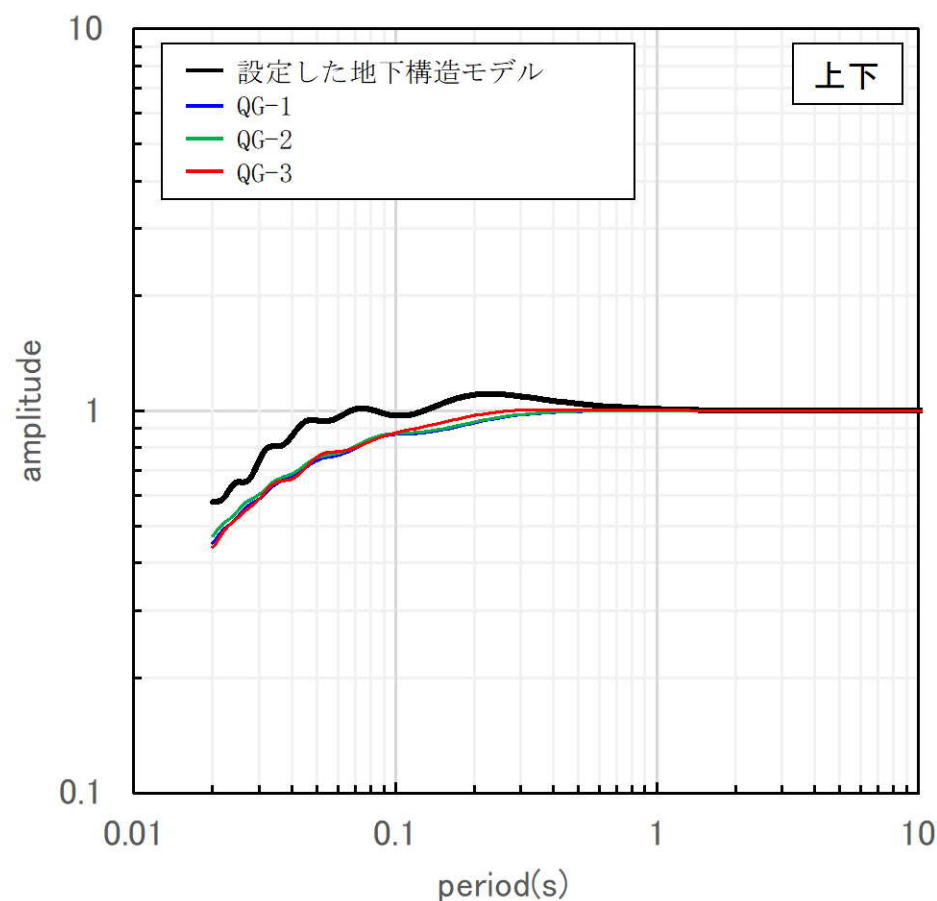
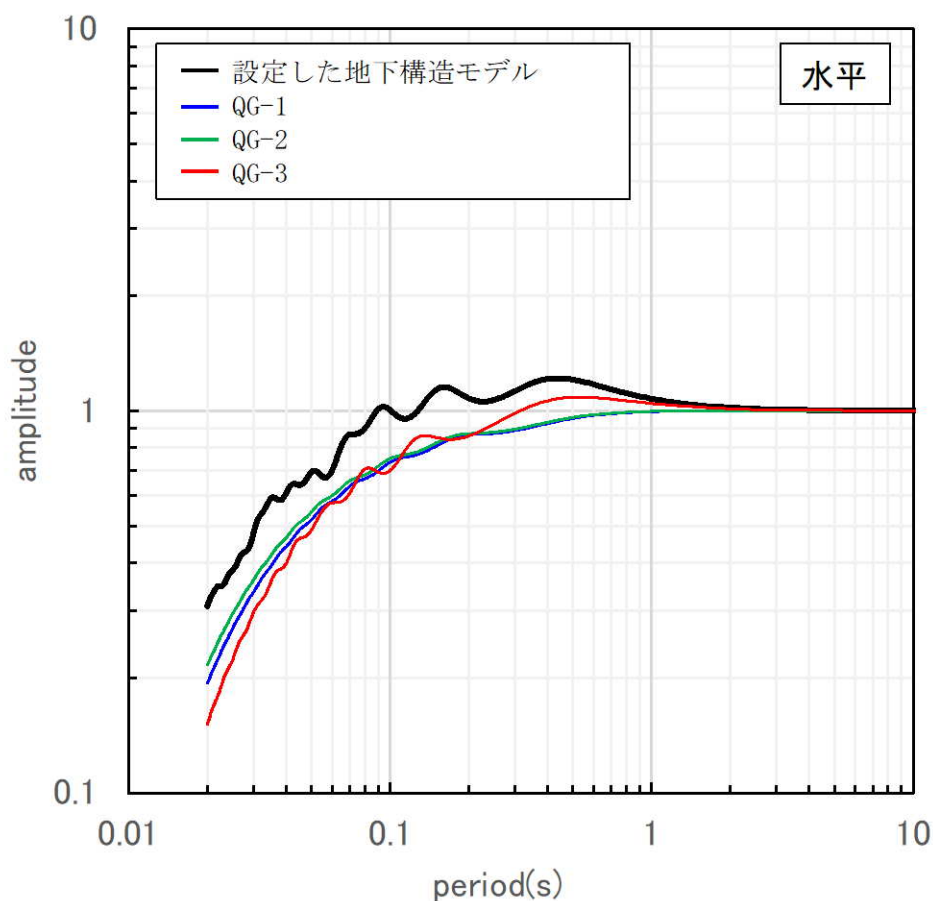
地表 ▼ (EL. 11.0m)	設定した地下構造モデル※			QG-1モデル			QG-2モデル			QG-3モデル		
解放基盤表面 ▼ (EL. -15.0m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値
▼ (EL. -50.0m)	1350	3000	12.5									
▼ (EL. -100m)	1570	3440	12.5							1300	3140	10.7
▼ (EL. -144m)	1730	3470	12.5	1550	3190	11.3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

※速度コントラストをなくした場合(EL. -200m以深を上層と同じ速度に設定)の設定値について括弧で示す。

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、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全ての周期帯において妥当と判断した。



伝達関数の比較 (EL. -15m/EL. -200m)

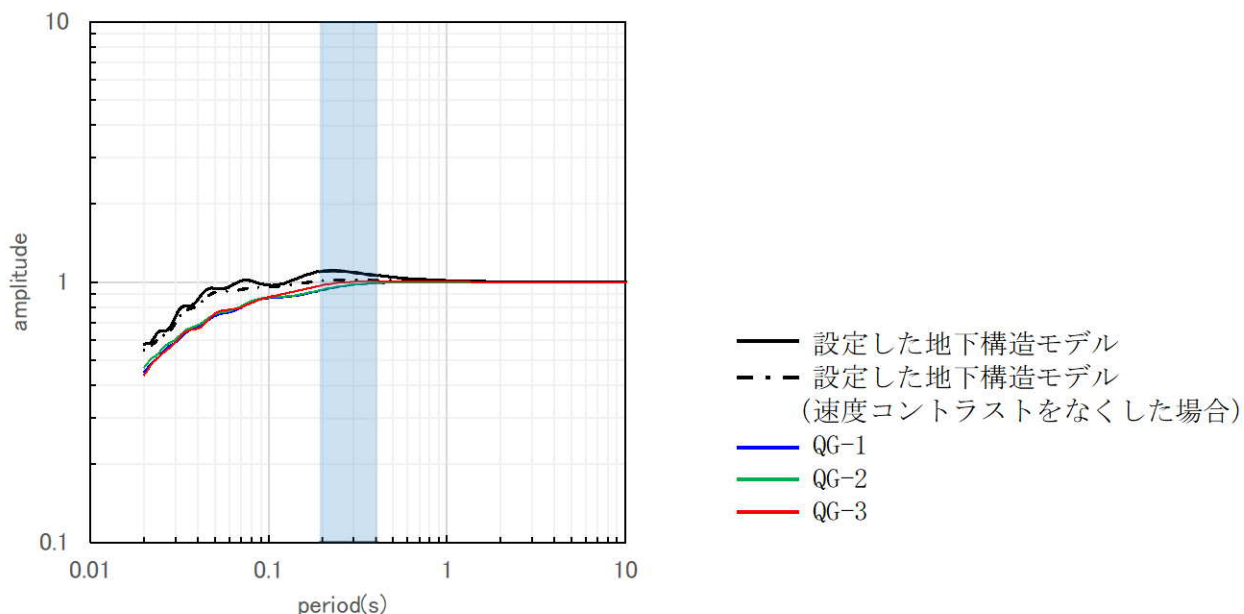
3.4 地下構造モデルの妥当性確認

■ 上下方向に関する観測事実との整合性を踏まえた地下構造モデルの妥当性

- 地震観測記録が得られている解放基盤表面 (EL. -15m) からEL. -90mまでの範囲で見ると、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、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、スペクトル形状 (凹凸) の僅かな差異により、局所的に観測記録を下回る。(76~85頁参照、例: ⑬熊本県熊本地方の地震)
- 一方、追加調査を行った解放基盤表面からEL. -200mまでの範囲で見ると、EL. -200mの速度コントラストがないよう条件を揃えた場合の、設定した地下構造モデルとPS検層モデルの伝達関数の比較では、設定した地下構造モデル (黒一点鎖線) はPS検層モデル (青・緑・赤線) を上回る。
- 設定した地下構造モデル (黒実線) は、実際にはEL. -200mに速度コントラストを設けており、その効果によって、下図のとおり、当該周期帯 (0.2~0.4秒付近) において、さらに保守性を有するものとなっている。



- 設定した地下構造モデルは、解放基盤表面からEL. -200mまでの範囲において十分な保守性を有していることから、上下方向に関する観測事実との不整合を踏まえても、その妥当性に影響はないと判断した。(補足⑤)



伝達関数の比較 (EL. -15m/EL. -200m、上下方向)

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、全ての周期帯において、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、全ての周期帯において、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。
- なお、参考として、より一層の説明性の向上を目的に、「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」により、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確認した。（参考⑦）

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

- 設定した地下構造モデルのうち、EL. -90mからEL. -200mまでの範囲の地盤減衰（Q値）について、以下の点を踏まえ、地盤減衰（Q値）を $Q=12.5$ から $Q=16.7$ に見直し、標準応答スペクトル用モデルを設定した。
 - EL. -90mからEL. -200mまでの範囲は、地震観測記録が得られておらず、相対的に信頼性が劣る。
 - 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。
- 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、基準地震動の最大加速度で $10\sim 20\text{cm/s}^2$ 程度増大すると想定。
地震観測記録の最大加速度で数 cm/s^2 程度増大する。（補足⑥）

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)	V_s (m/s)	V_p (m/s)	Q 値		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		0.0	2.35	1350	3000	12.5
-50m							-0.035	2.35	1570	3440	12.5
-90m	-0.035	2.35	1570	3440	12.5		-0.075	2.35	1570	3440	16.7
-100m	-0.085	2.35	1730	3470	12.5		-0.085	2.35	1730	3470	16.7
-150m	-0.135	2.35	1770	3650	12.5		-0.135	2.35	1770	3650	16.7
-200m											
地震基盤相当面											
-1804m	-0.185	2.40	2100	4000	200		-0.185	2.40	2100	4000	200
	-1.789	2.60	3100	5500	300		-1.789	2.60	3100	5500	300

: 見直し範囲

3.6 標準応答スペクトル用モデルの妥当性確認

■ 標準応答スペクトル用モデルの妥当性確認方針

- 標準応答スペクトル用モデルの設定にあたり、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。
- 本節では、「3.4 地下構造モデルの妥当性確認」で実施した項目のうち、EL. -90mからEL. -200mまでの範囲の地盤減衰（Q値）の見直しの影響を受ける「PS検層モデルとの比較による確認」により、全ての周期帯における、標準応答スペクトル用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				
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	標準応答スペクトル用モデル	PS検層モデル	標準応答スペクトル用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。

3.6 標準応答スペクトル用モデルの妥当性確認

■ PS検層モデルとの比較

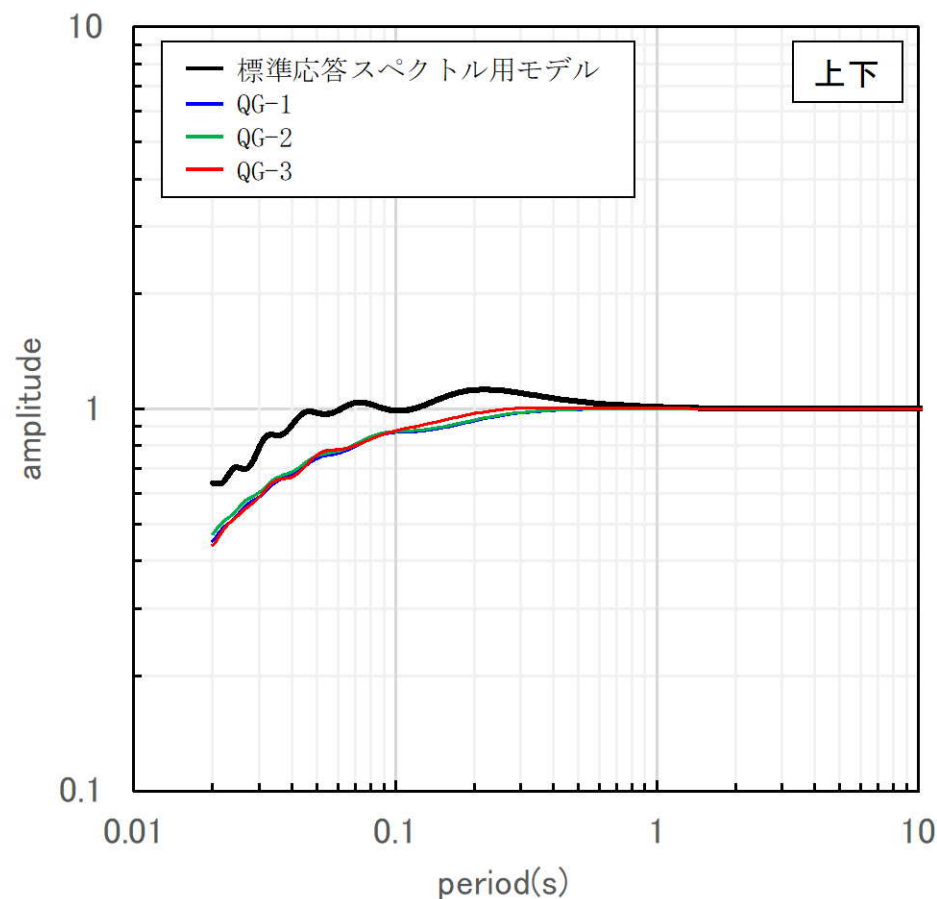
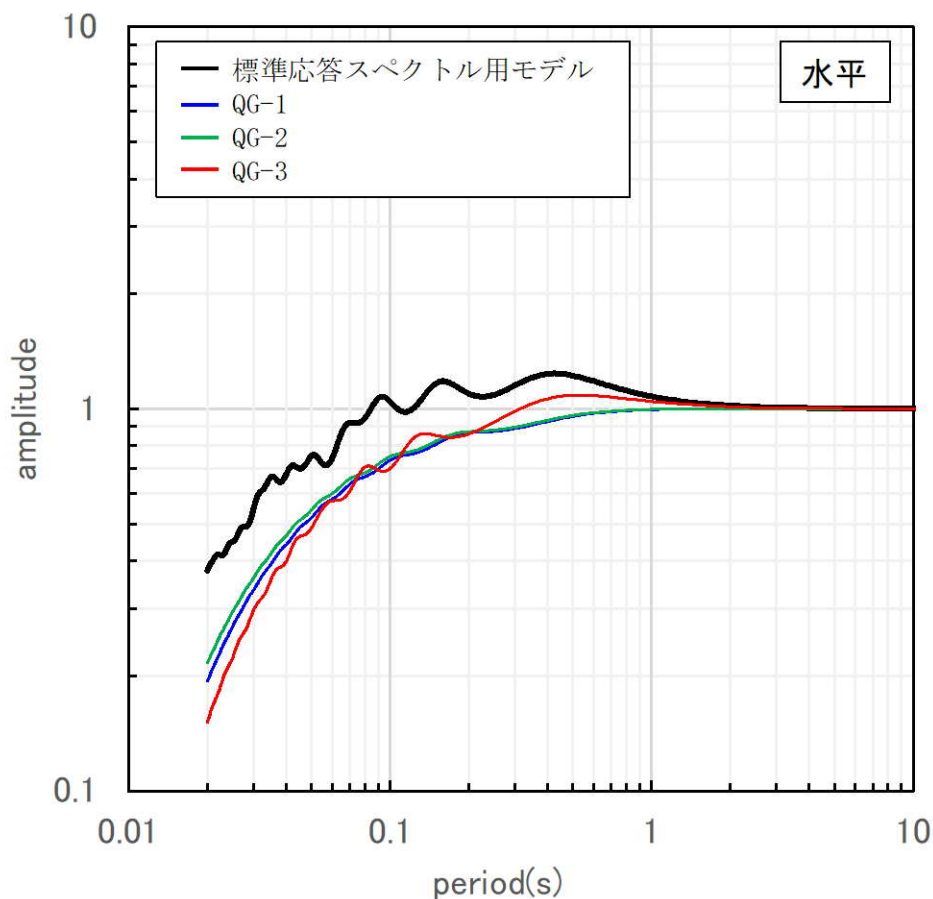
- 標準応答スペクトル用モデルとPS検層モデルの理論伝達関数（解放基盤表面／EL. -200m）の比較を実施する。

地表 ▼ (EL. 11.0m)	標準応答スペクトル用 モデル			QG-1モデル			QG-2モデル			QG-3モデル		
	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
解放基盤表面 ▼ (EL. -15.0m)												
▼ (EL. -50.0m)	1350	3000	12.5									
▼ (EL. -90.0m)	1570	3440	12.5							1300	3140	10.7
▼ (EL. -100m)	1570	3440	16.7	1550	3190	11.3	1590	3220	11.8	1550	3320	10.6
▼ (EL. -144m)	1730	3470	16.7									
▼ (EL. -150m)												
▼ (EL. -200m)	1770	3650	16.7									
	2100	4000	200	1550	3190	200	1590	3220	200	1550	3320	200

3.6 標準応答スペクトル用モデルの妥当性確認

■ 伝達関数の比較

- 標準応答スペクトル用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、解放基盤表面（EL. -15m）からEL. -200mまでの範囲における標準応答スペクトル用モデルは全ての周期帯において妥当と判断した。



伝達関数の比較 (EL. -15m/EL. -200m)

3.7 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やボーリング孔内減衰測定結果等の観測事実等に基づき、最新の技術的知見を取り入れた多面的な検討・確認を実施し、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、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、速度構造は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した。
- 既許可の地下構造モデルは、長周期帯の地震動評価に用いていたが、その設定根拠は長周期帯に限定したものではないため、短周期帯の地震動評価に用いる。

【EL. -200m以深】

- 既許可の地下構造モデルを流用して設定し、短周期から長周期までの全ての周期帯への適用性を確認した。

【EL. -200m以浅】

- 速度構造・密度は、既許可の地下構造モデルを流用して設定した。
- 地盤減衰（Q値）は、以下の検討・確認を実施し、設定した。

〔最深部地震計以浅（EL. -90m以浅）の地盤減衰（Q値）〕

- 地震観測記録に基づき、最新の技術的知見を取り入れた多面的な検討・確認を実施し、不確かさを考慮し、周波数に依存せず、保守的に $Q=12.5$ とした。
- 地盤減衰（ $Q=12.5$ ）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、及びボーリング孔内減衰測定結果が、最深部地震計以浅と最深部地震計以深で同等であることを確認し、最深部地震計からEL. -200mの範囲の地盤減衰（Q値）は、最深部地震計以浅と同じ $Q=12.5$ とした。
- 地盤減衰（ $Q=12.5$ ）について、岩石コアを用いた減衰測定により確認した。

3.7 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、全ての周期帯において、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、全ての周期帯において、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

- 設定した地下構造モデルのうち、EL. -90mからEL. -200mまでの範囲の地盤減衰 (Q値) について、以下の点を踏まえ、地盤減衰 (Q値) を $Q=12.5$ から $Q=16.7$ に見直し、標準応答スペクトル用モデルを設定した。
 - EL. -90mからEL. -200mまでの範囲は、地震観測記録が得られておらず、相対的に信頼性が劣る。
 - 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。

■ 標準応答スペクトル用モデルの妥当性確認

- EL. -200m以深の範囲は、設定した地下構造モデルと同じ設定であり、短周期から長周期までの全ての周期帯への適用性は変わらない。
- EL. -200m以浅の範囲の標準応答スペクトル用モデルについて、「PS検層モデルとの比較による確認」の結果、全ての周期帯において、標準応答スペクトル用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。

3.8 今後の取り組み

- 以上のとおり、既許可時審査以降継続的に取得している鉛直アレイ観測記録やボーリング孔内減衰測定結果等の観測事実等に基づき、最新の技術的知見を取り入れた多面的な検討・確認を実施し、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を設定した。

- 今後も、更なる信頼性の向上を図ることを目的に、最新の技術的知見の収集・分析・評価を実施する。
 - 広域地震観測〔継続〕
 - 敷地内地下構造の把握
 - ・ 敷地内鉛直アレイ地震観測〔継続〕
 - ・ 減衰測定に用いたボーリング孔における地震計増設（EL. -200m）
 - ・ 大深度ボーリング及び地下深部の地震観測の実施についても検討