

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、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。

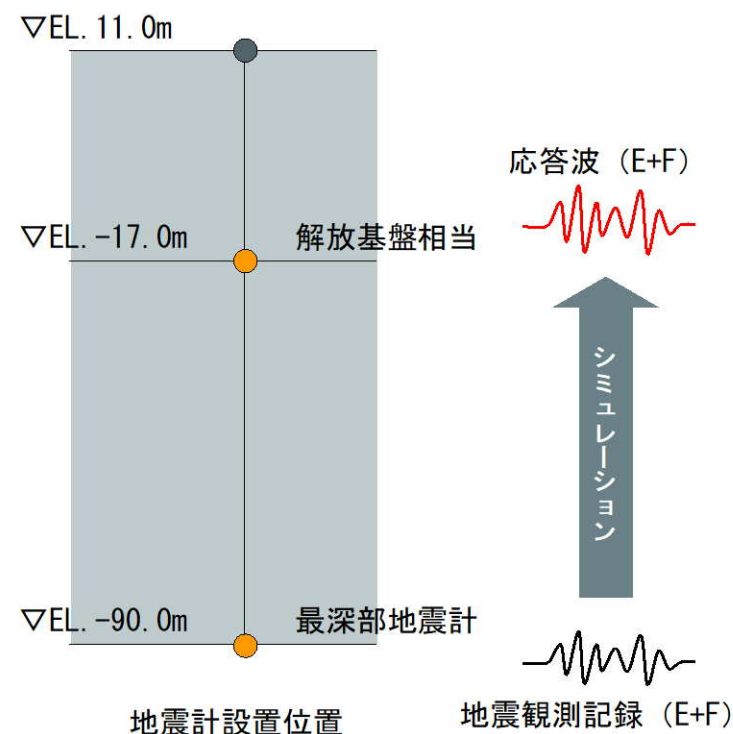
確認方法	対象深度EL. (m)		比較方法	比較対象		確認する観点
	-15.0	-90.0		-200		
応答スペクトルによる確認	EL. -15.0m~EL. -90m		応答スペクトル	設定した地下構造モデル	地震観測記録（解放基盤相当）	設定した地下構造モデルによる応答波の応答スペクトルが、地震観測記録の応答スペクトルと同等もしくは上回る。
PS検層モデルとの比較による確認	EL. -15.0m~EL. -200m		理論伝達関数	設定した地下構造モデル	PS検層モデル	設定した地下構造モデルによる理論伝達関数が、PS検層モデルによる理論伝達関数と同等もしくは上回る。

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。（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②参照）

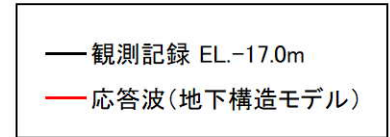
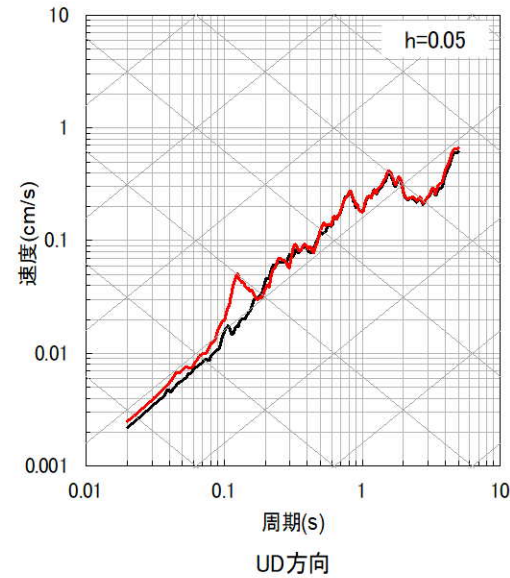
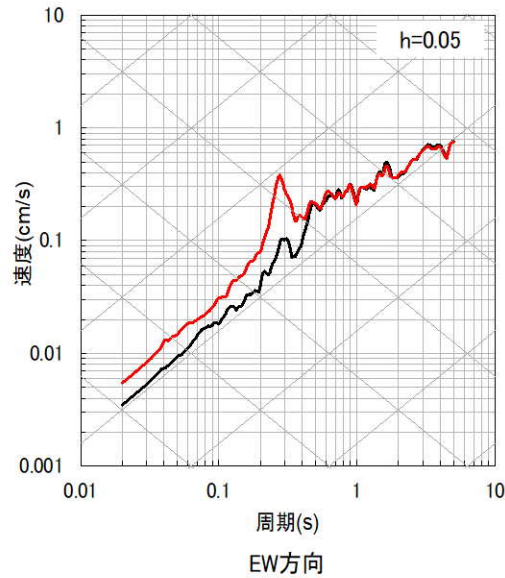
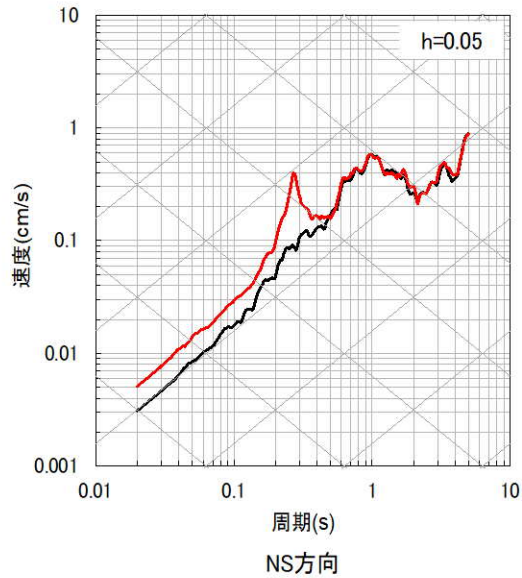
※入力 of 最深部地震計（EL. -90m）で得られた地震観測記録及び出力の解放基盤相当（EL. -17m）での応答波は地中記録のため、E+Fで評価。



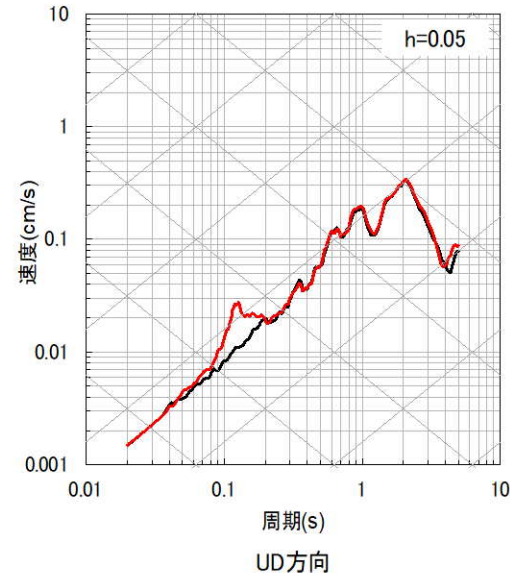
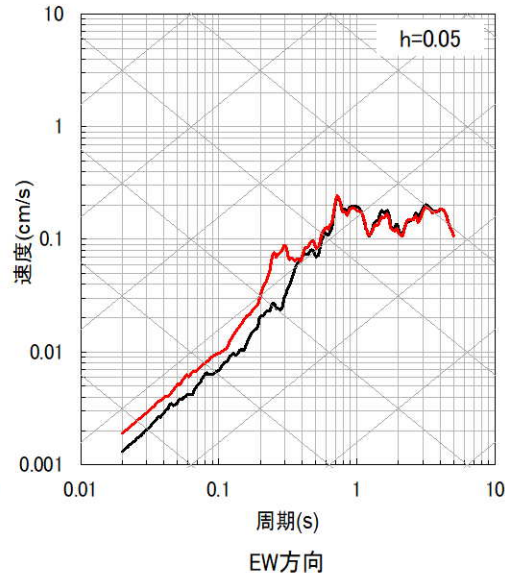
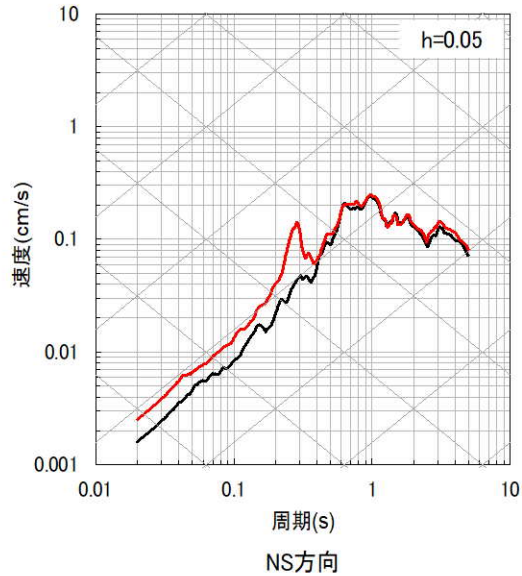
3.4 地下構造モデルの妥当性確認

■ 応答スペクトルの比較結果 (1/10)

① 鹿児島県北西部



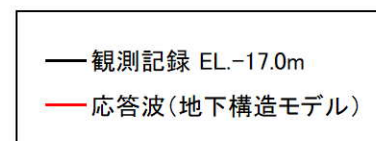
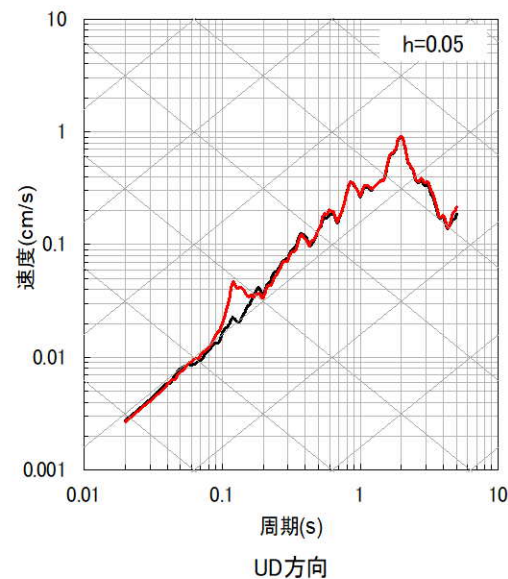
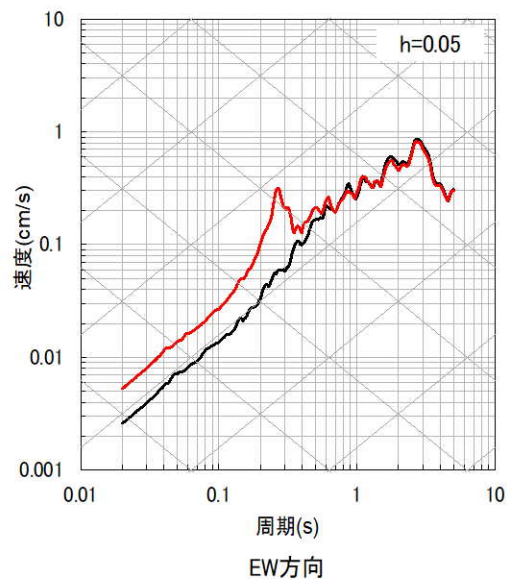
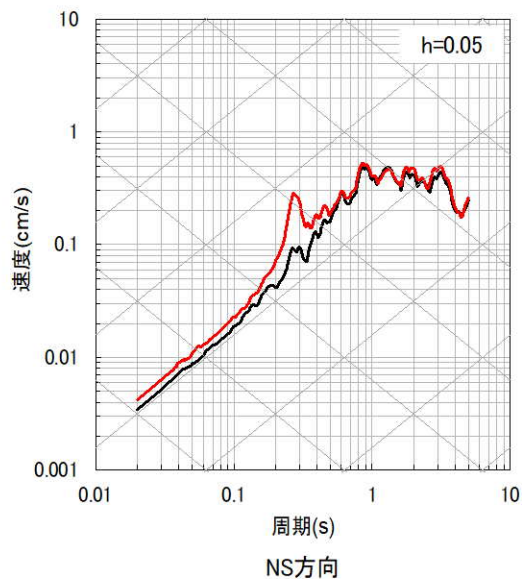
② 鹿児島県北西部



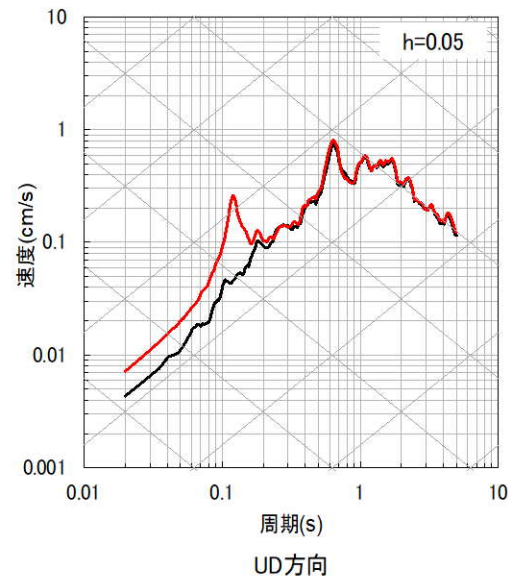
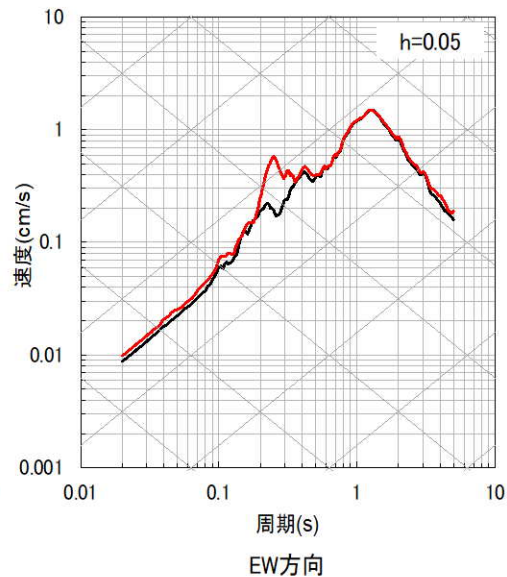
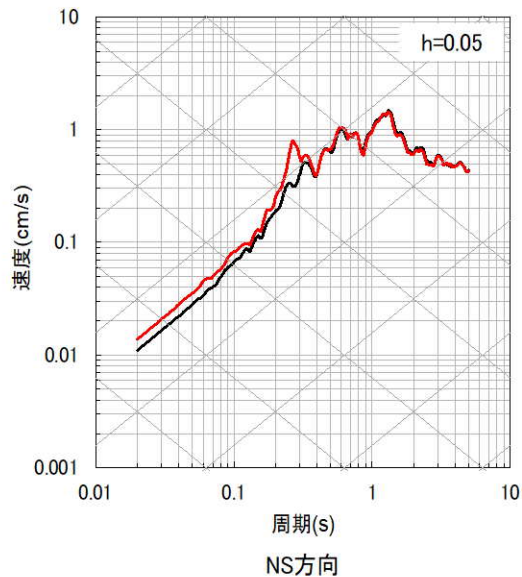
3.4 地下構造モデルの妥当性確認

■ 応答スペクトルの比較結果 (2/10)

③ 鹿児島県北西部



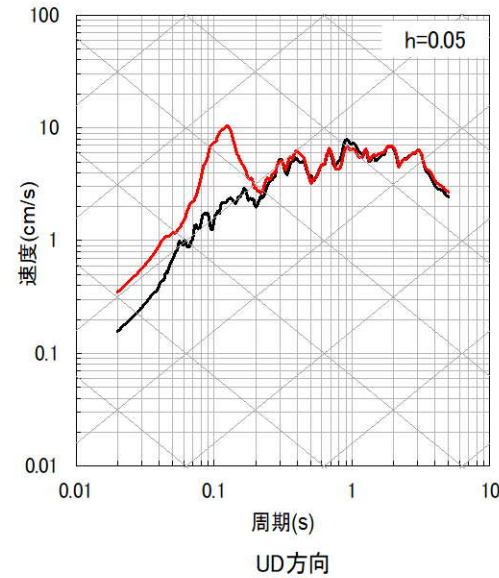
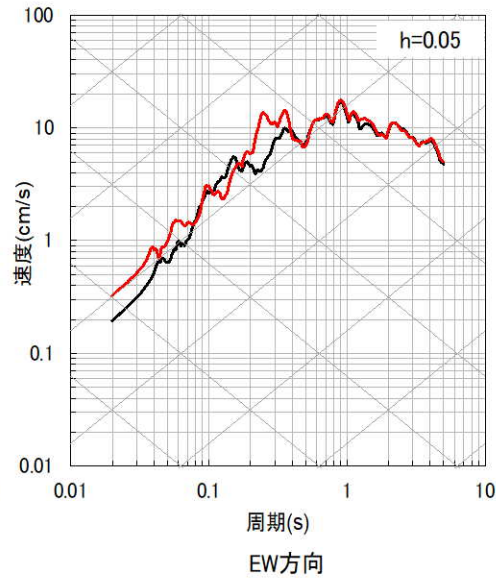
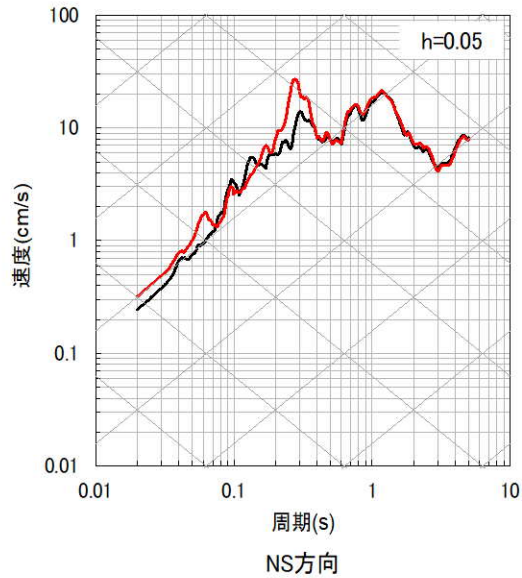
④ 山口県



3.4 地下構造モデルの妥当性確認

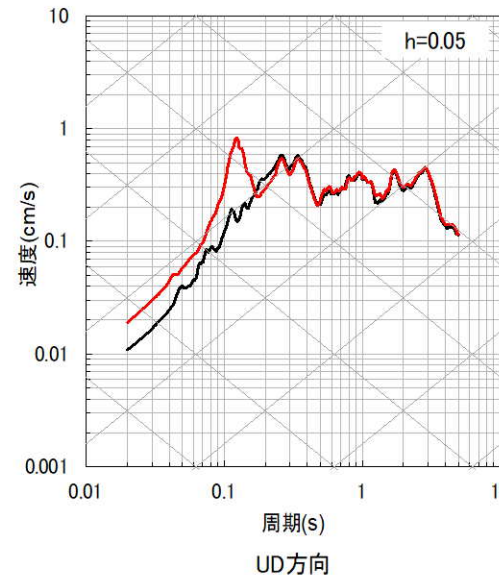
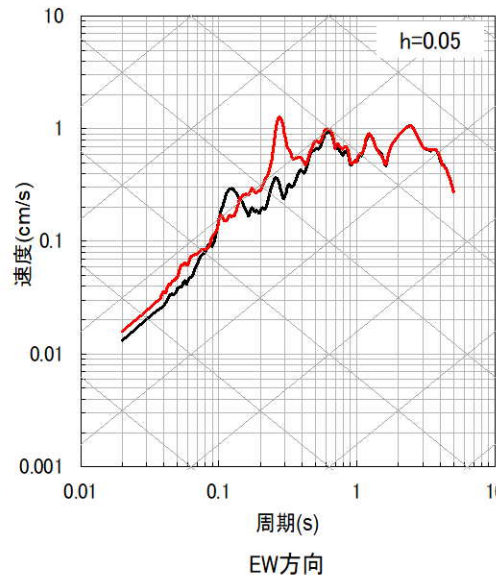
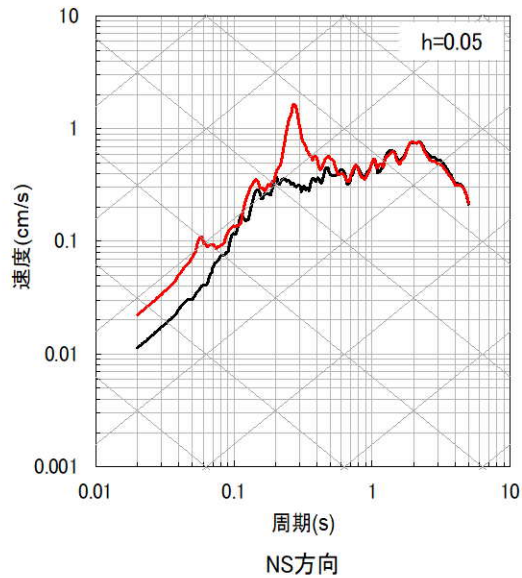
■ 応答スペクトルの比較結果 (3/10)

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)

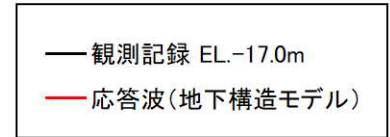
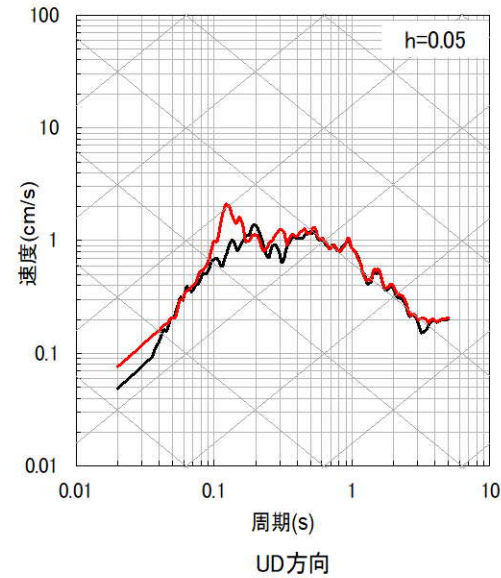
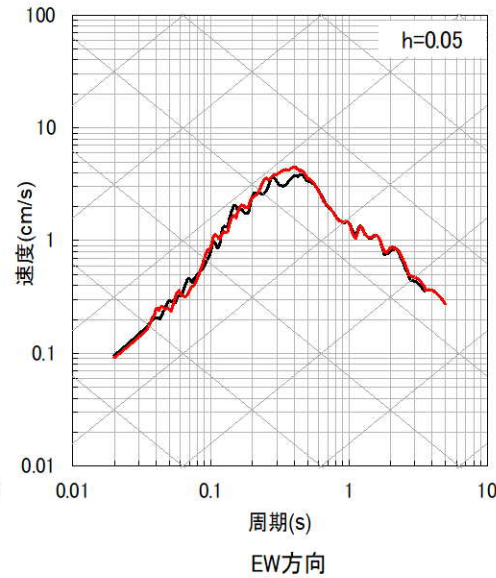
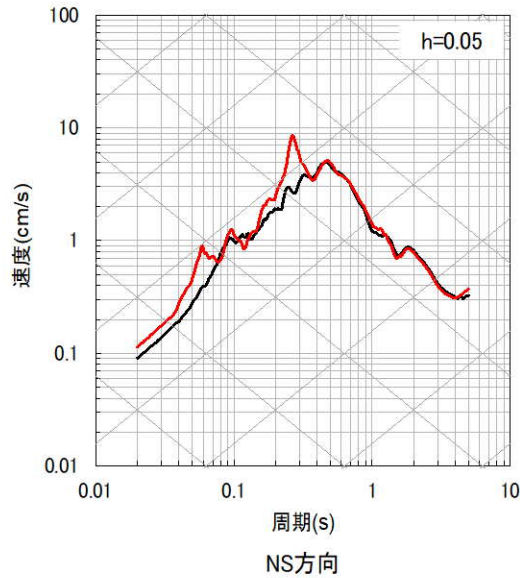
⑥九州北西沖



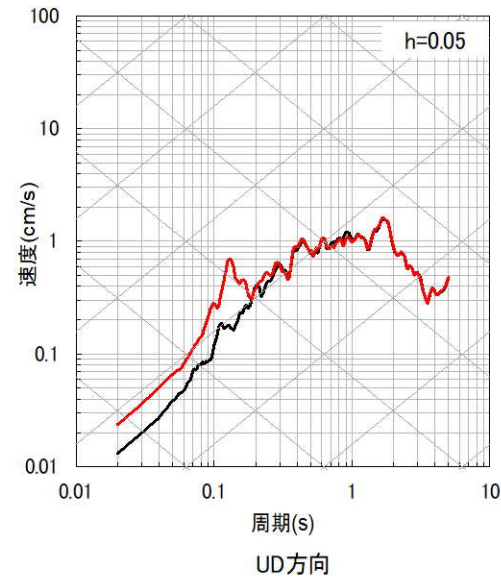
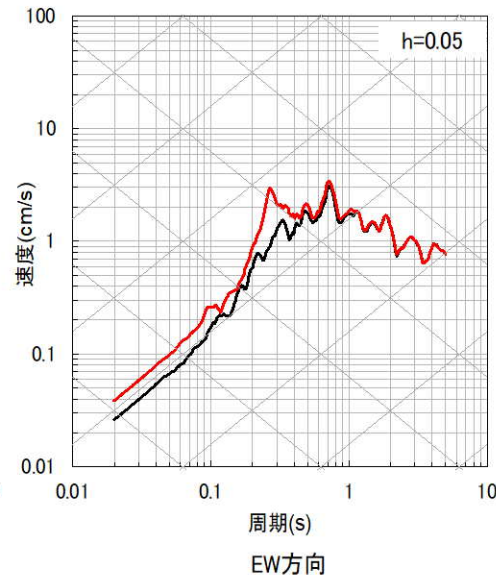
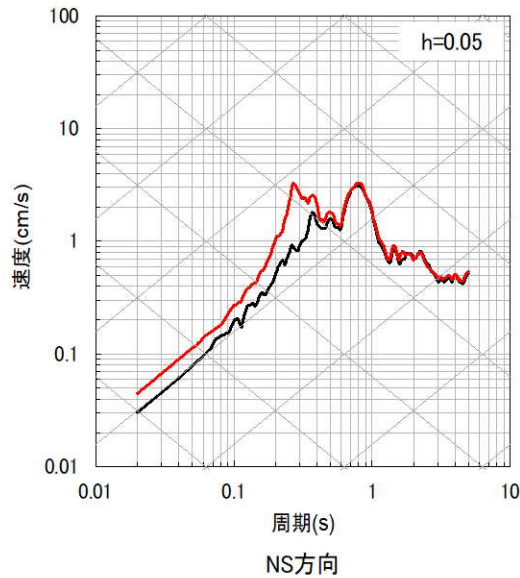
3.4 地下構造モデルの妥当性確認

■ 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)



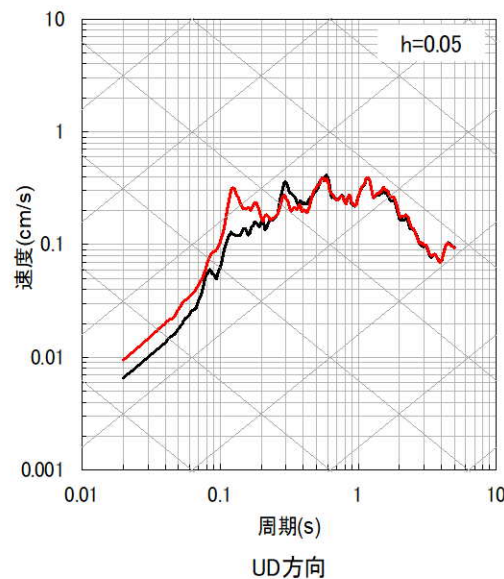
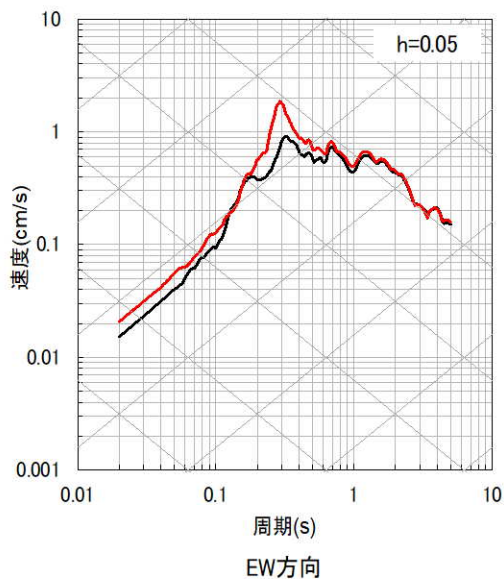
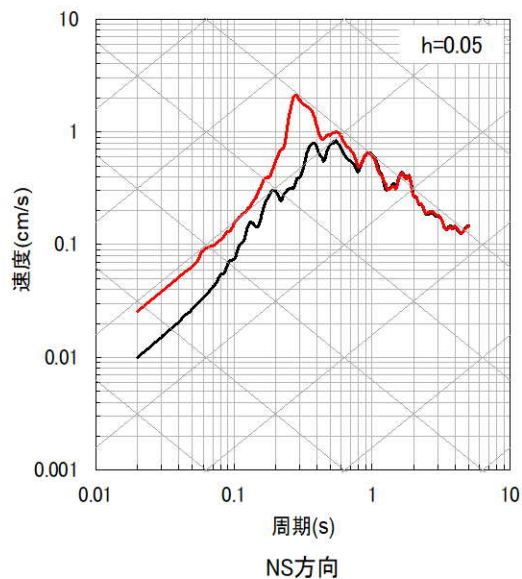
⑧熊本県熊本地方 (2016年熊本地震前震)



3.4 地下構造モデルの妥当性確認

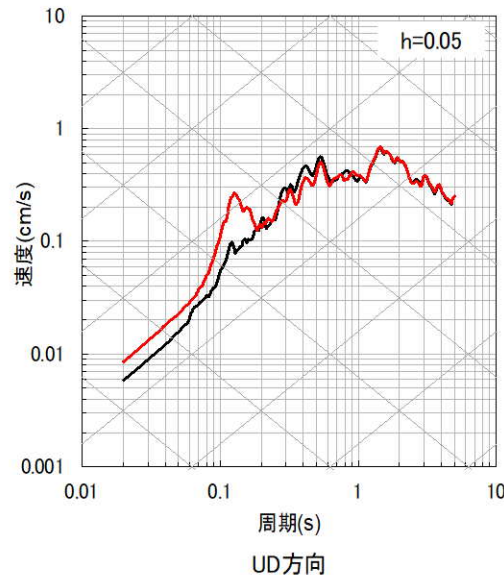
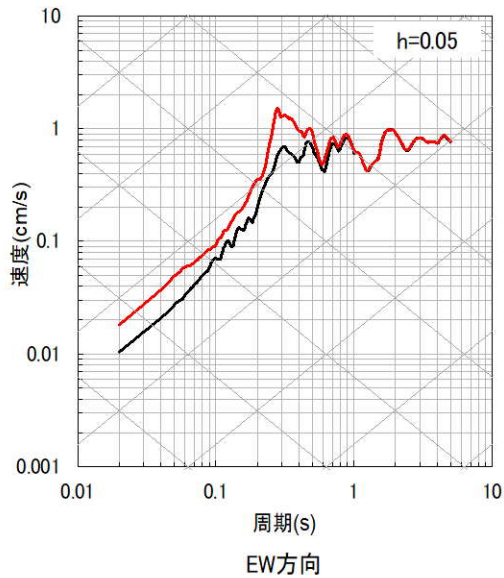
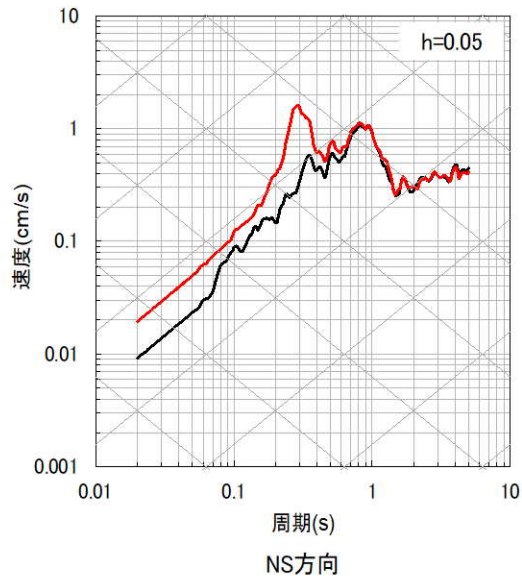
■ 応答スペクトルの比較結果 (5/10)

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)

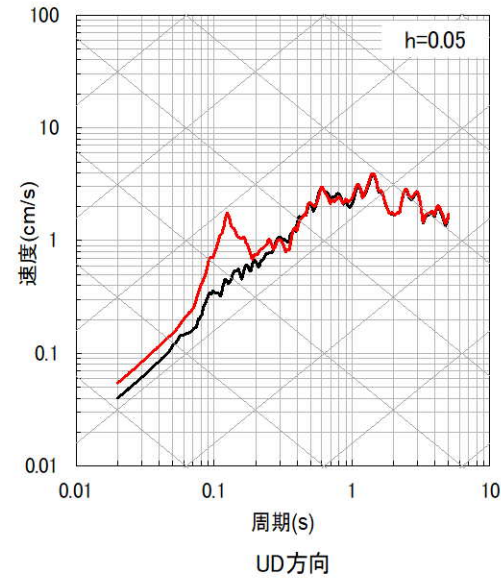
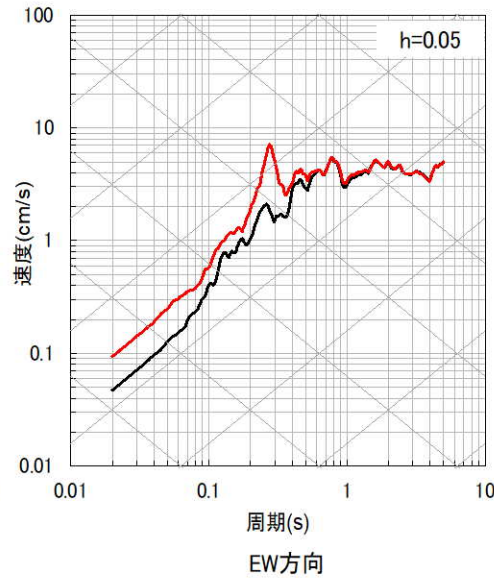
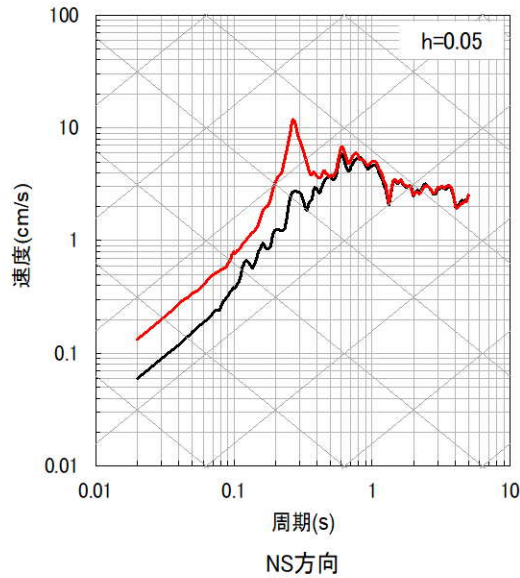
⑩ 熊本県熊本地方



3.4 地下構造モデルの妥当性確認

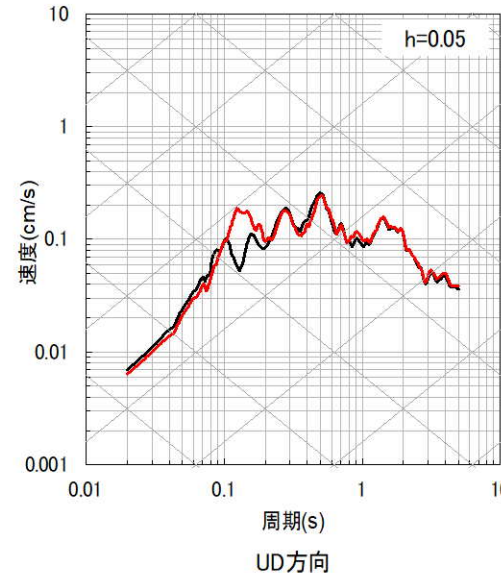
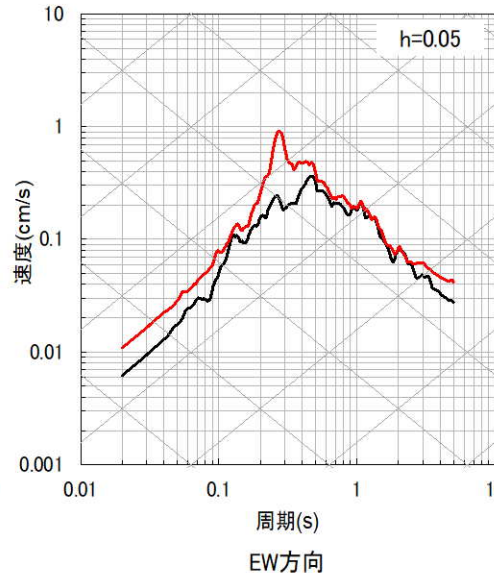
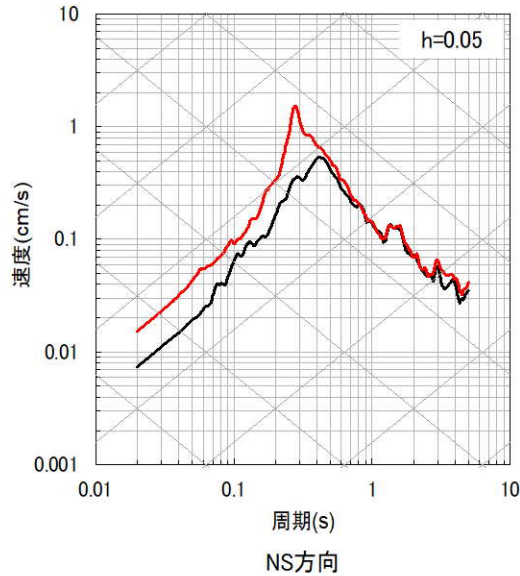
■ 応答スペクトルの比較結果 (6/10)

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)

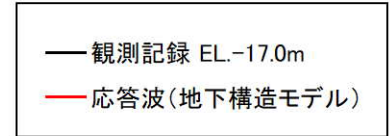
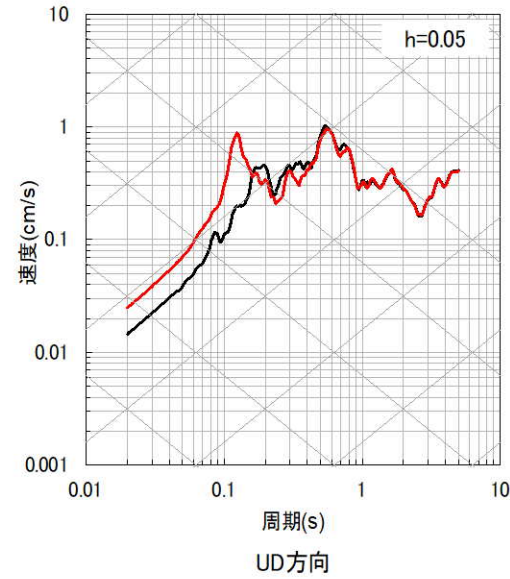
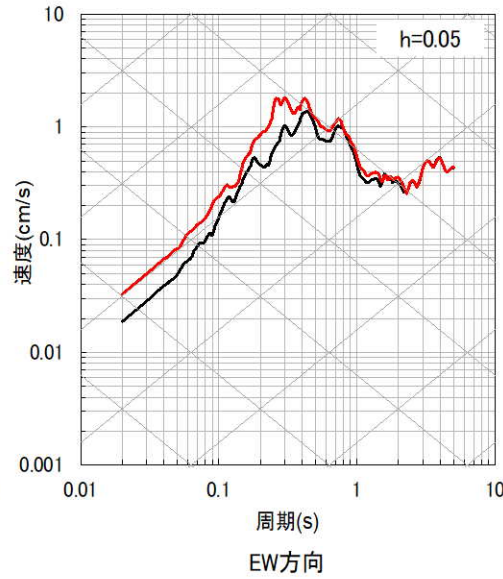
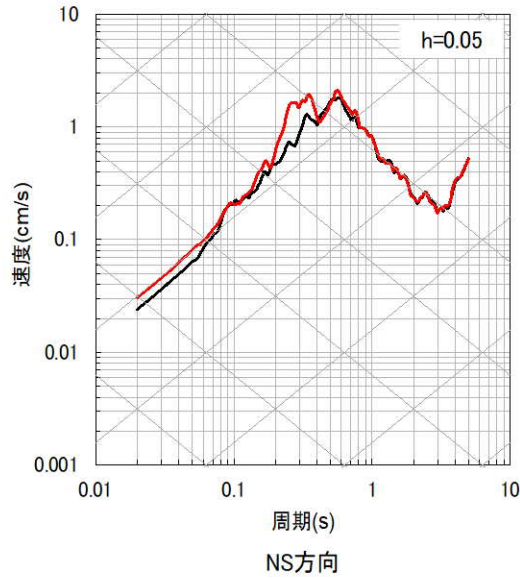
⑫ 熊本県熊本地方



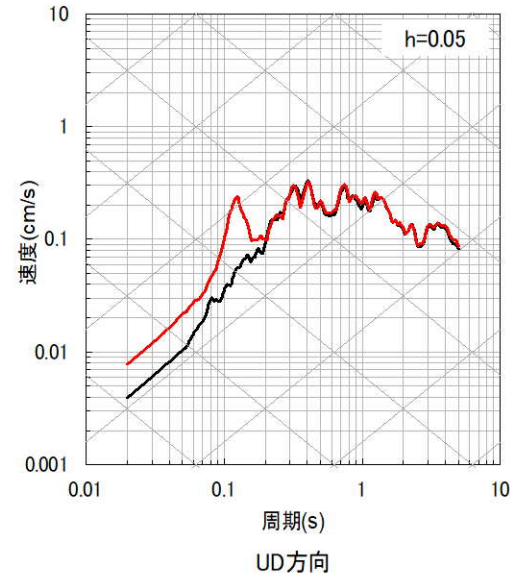
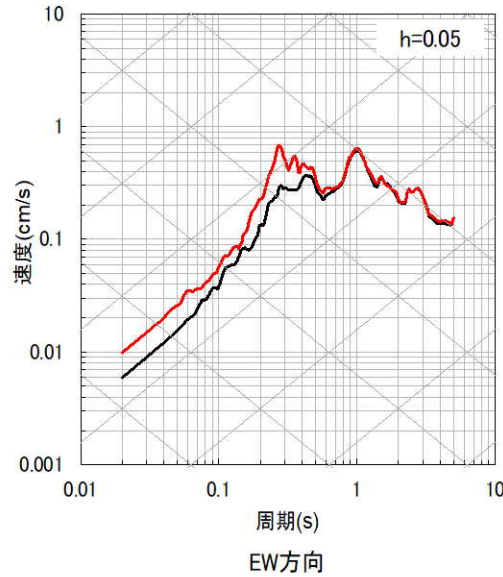
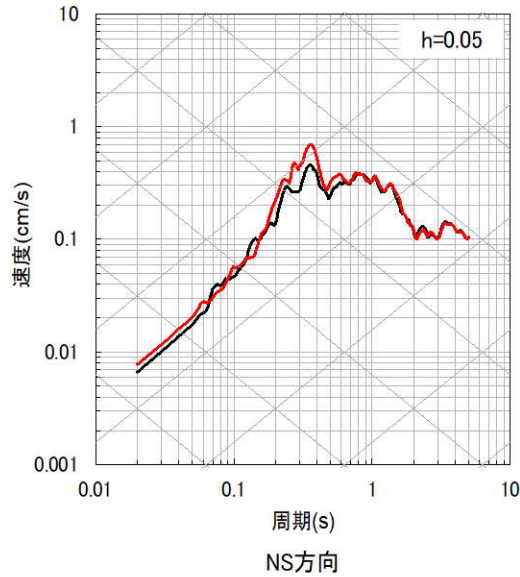
3.4 地下構造モデルの妥当性確認

■ 応答スペクトルの比較結果 (7/10)

⑬熊本県熊本地方



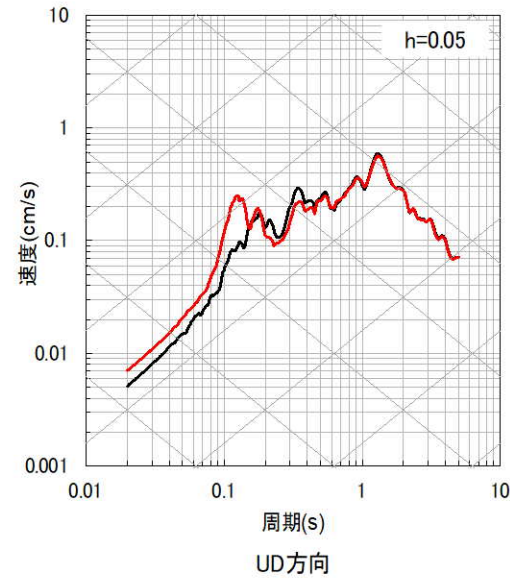
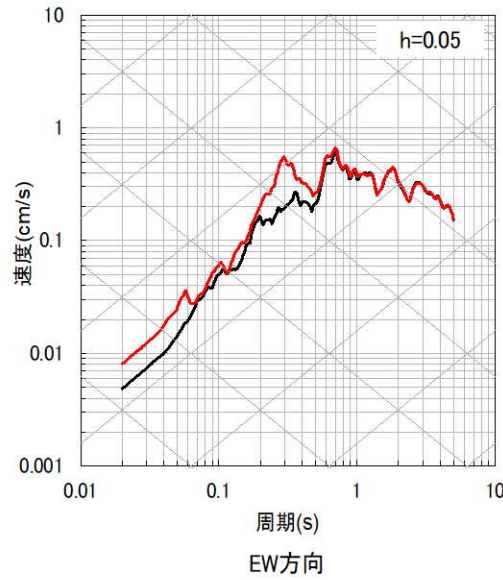
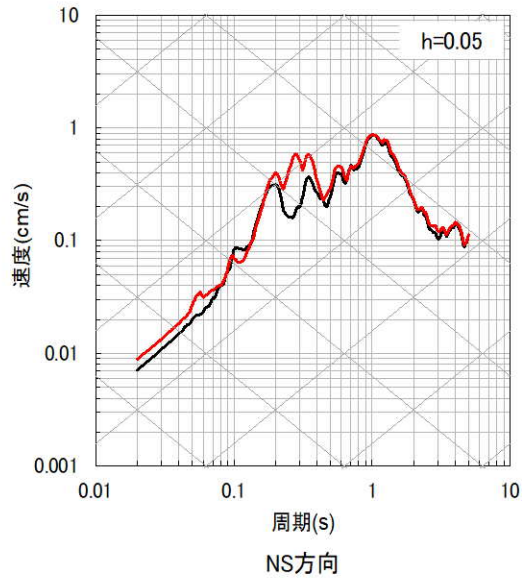
⑭熊本県阿蘇地方



3.4 地下構造モデルの妥当性確認

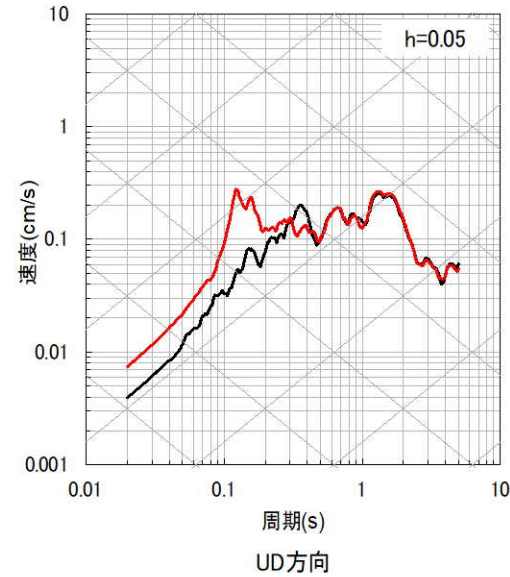
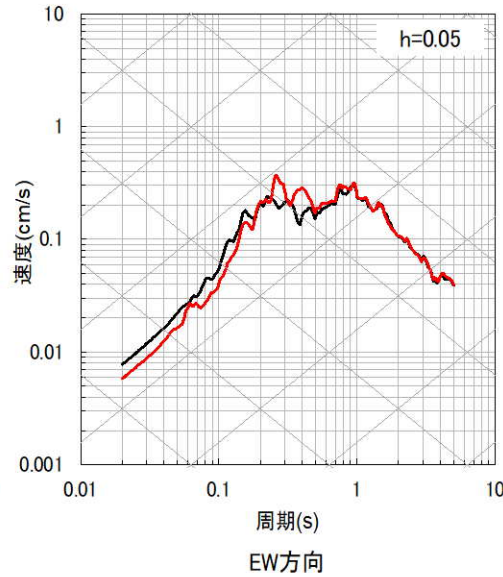
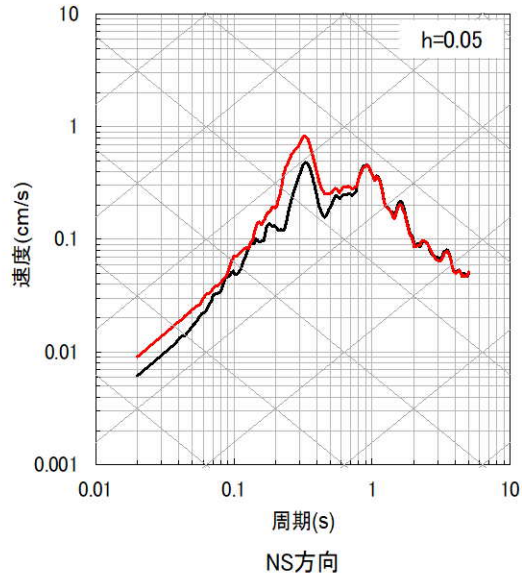
■ 応答スペクトルの比較結果 (8/10)

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)

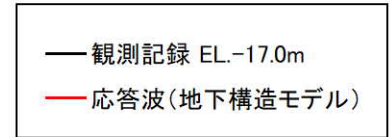
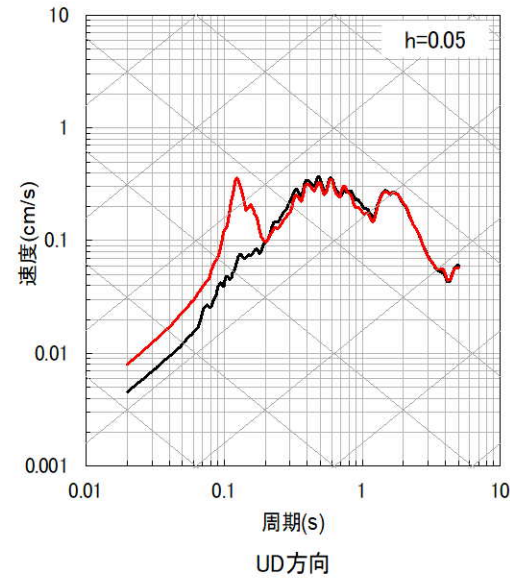
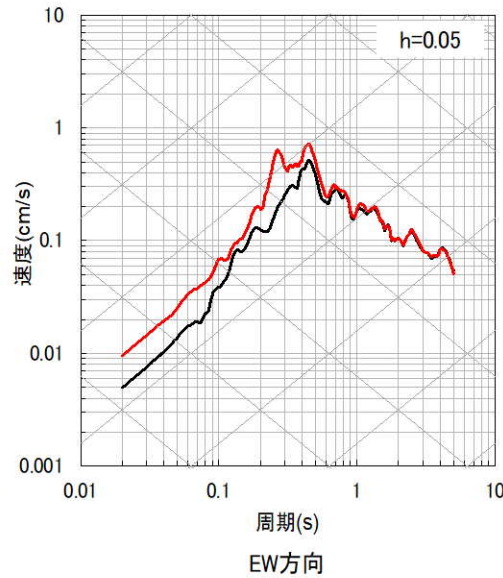
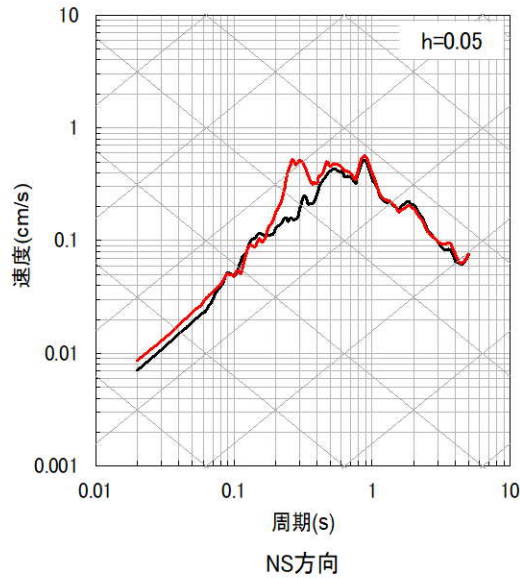
⑯ 熊本県熊本地方



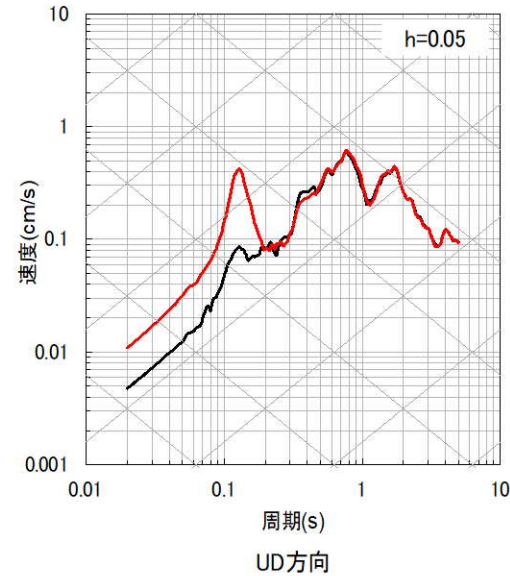
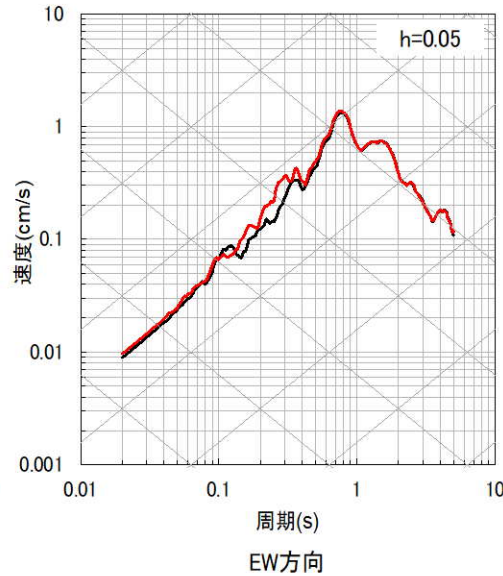
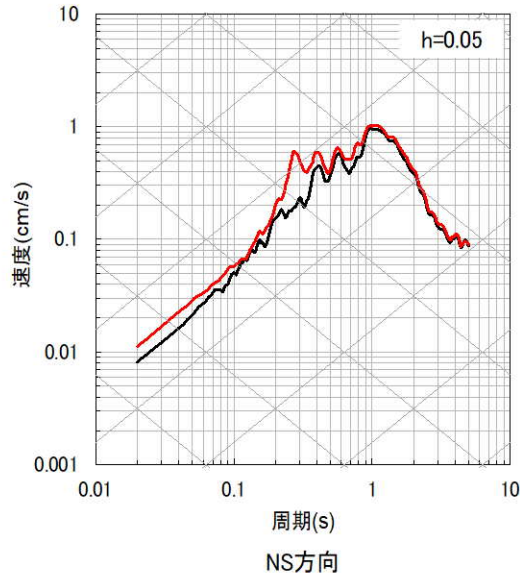
3.4 地下構造モデルの妥当性確認

■ 応答スペクトルの比較結果 (9/10)

⑰ 熊本県熊本地方



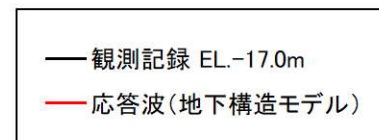
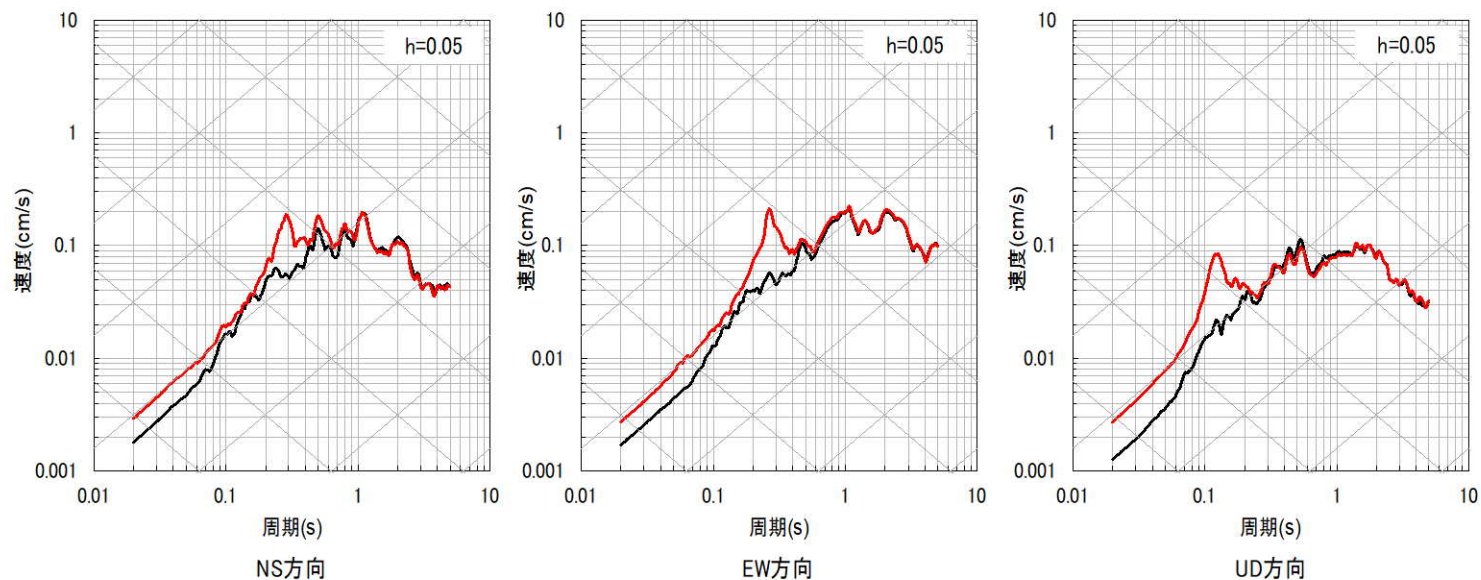
⑱ 熊本県阿蘇地方



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)

① 熊本県熊本地方



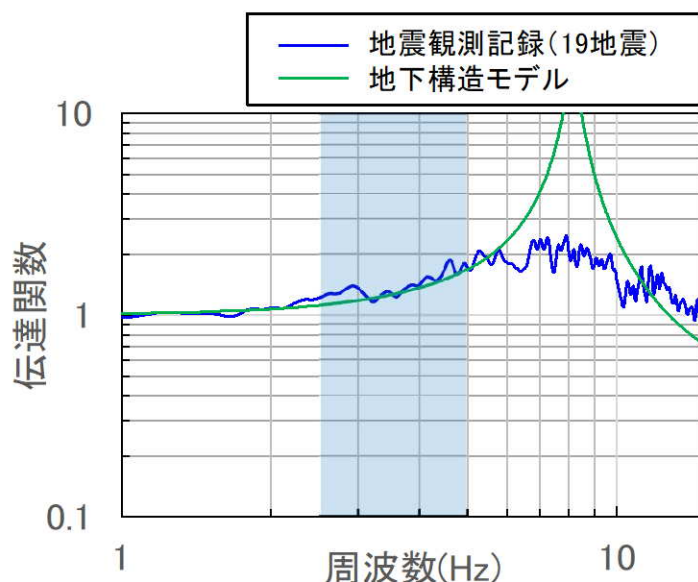
3.4 地下構造モデルの妥当性確認

■ 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。（76~85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りますが、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。（87~88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

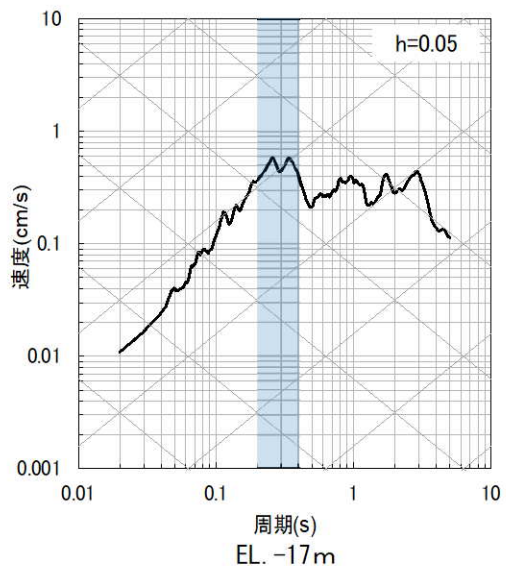


地震計設置位置

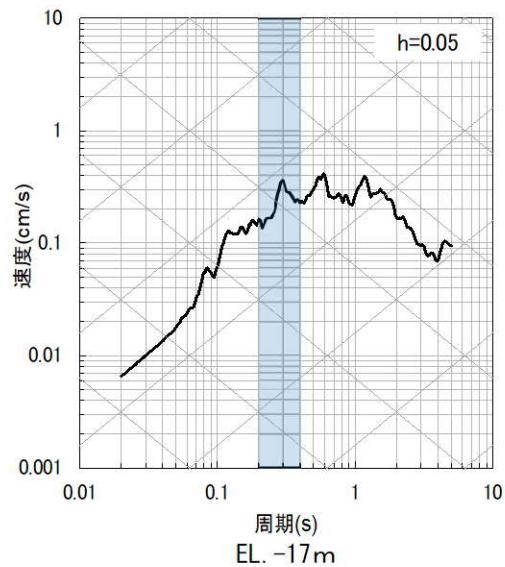
3.4 地下構造モデルの妥当性確認

■ 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)

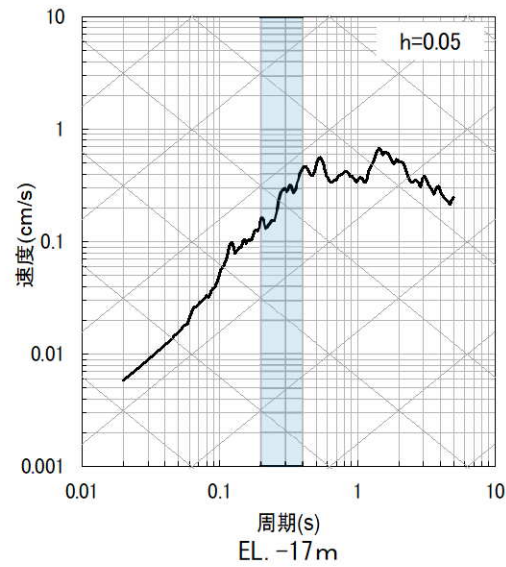
⑥九州北西沖



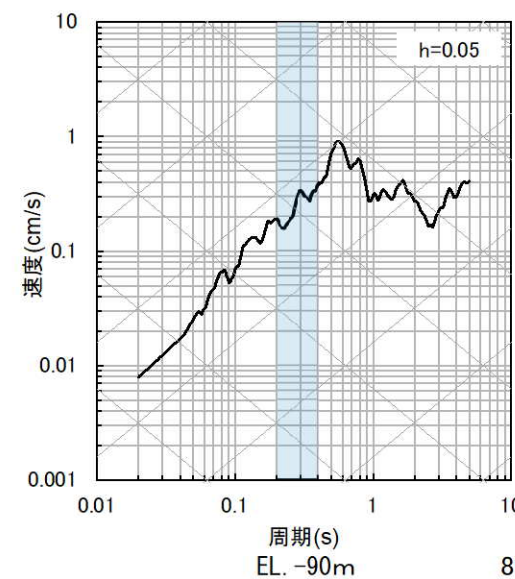
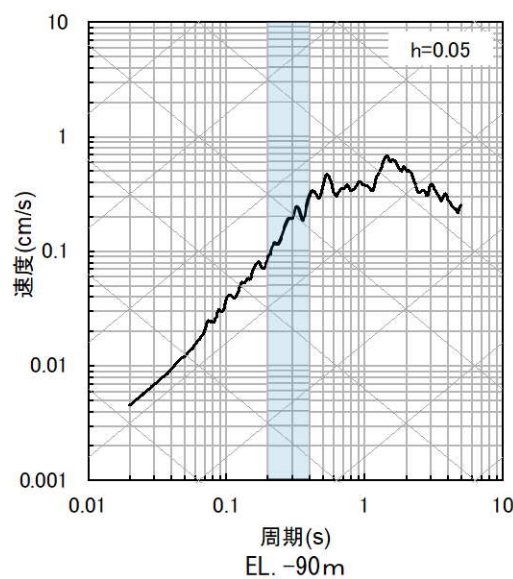
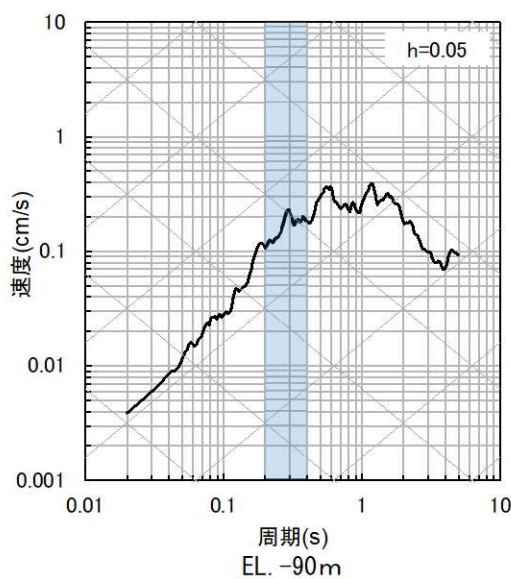
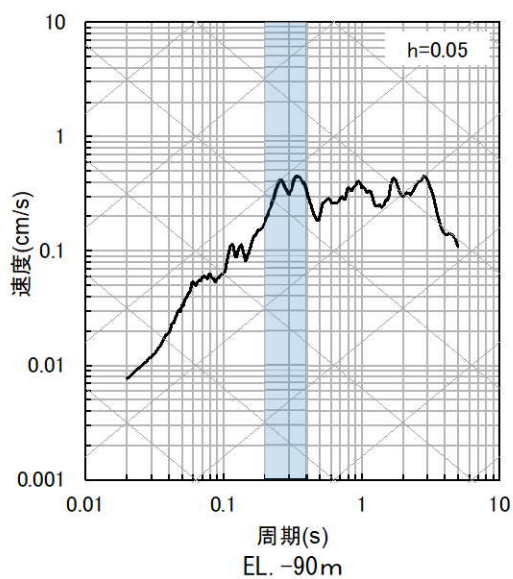
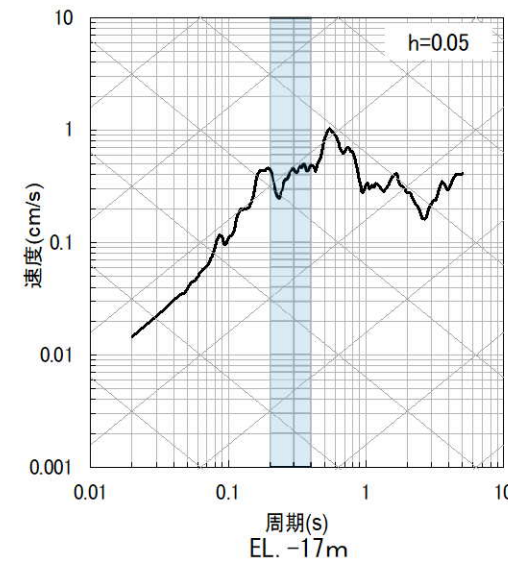
⑨熊本県熊本地方



⑩熊本県熊本地方



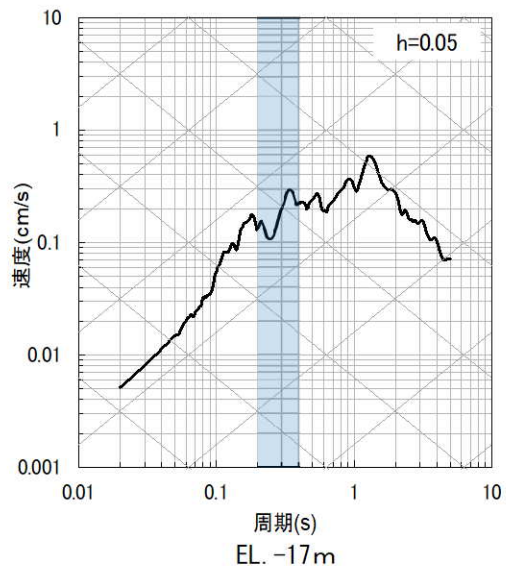
⑬熊本県熊本地方



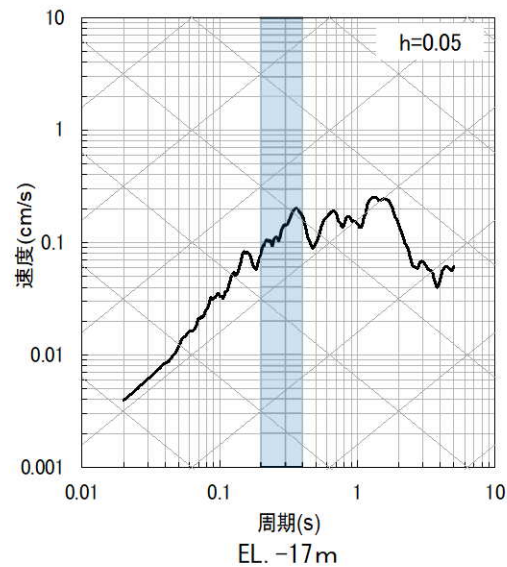
3.4 地下構造モデルの妥当性確認

■ 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)

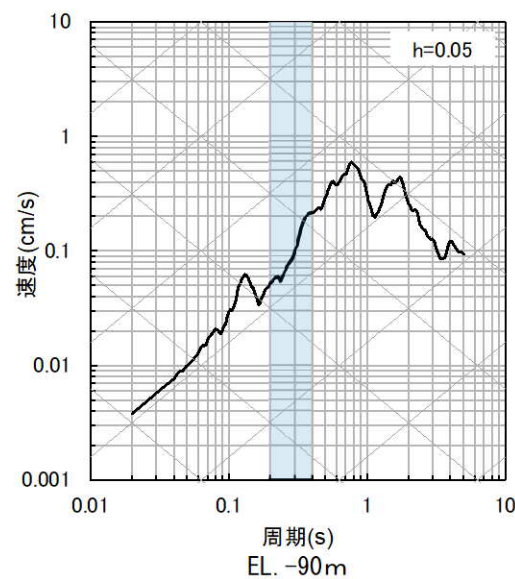
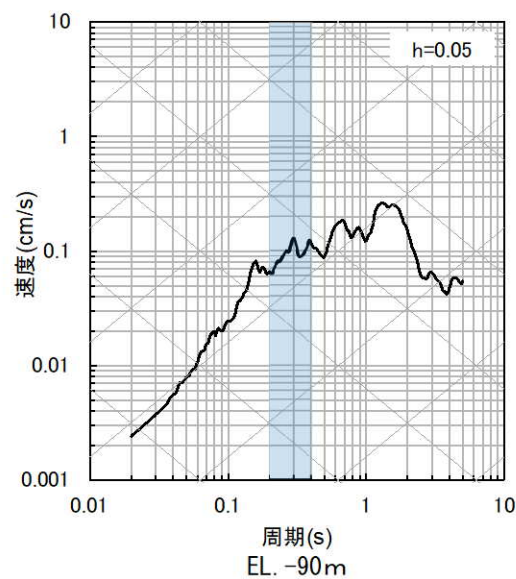
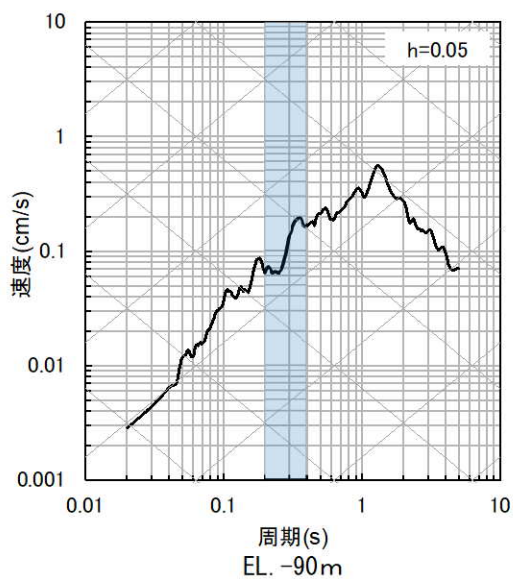
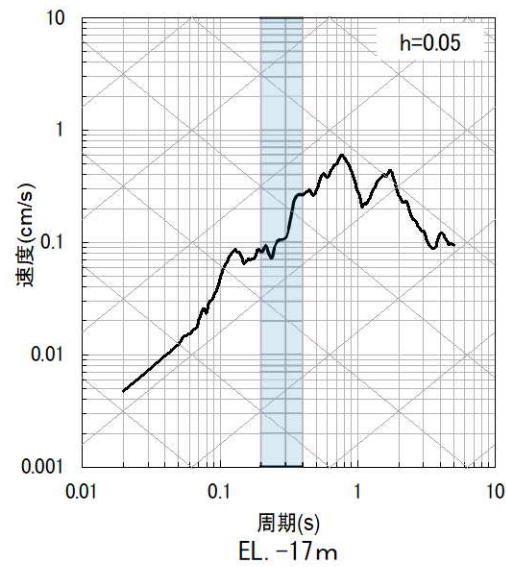
⑮熊本県阿蘇地方



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。

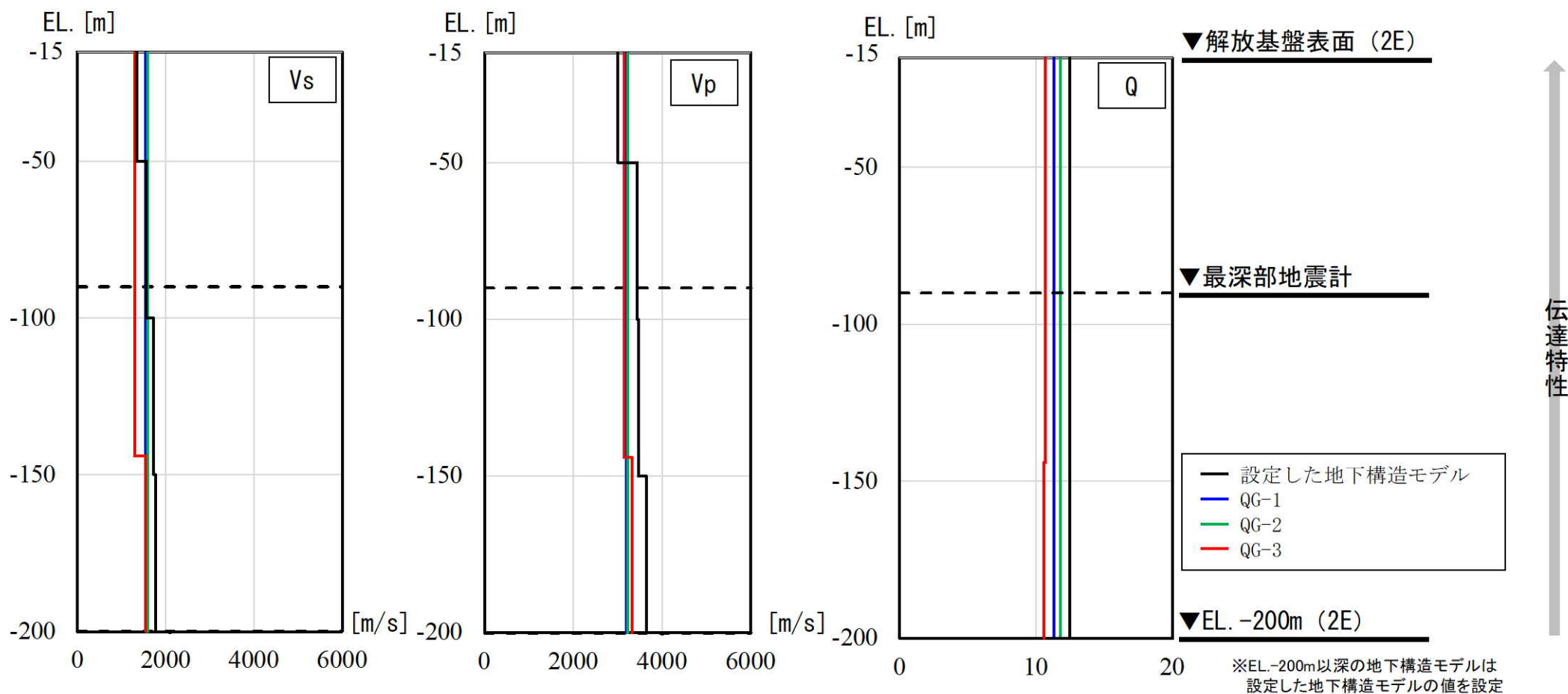
地表 ▼ (EL. 11.0m)	設定した地下構造モデル			PS検層モデル				
解放基盤表面 ▼ (EL. -15.0m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値	伝達特性	伝達特性	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値
▼ (EL. -50.0m)	1350	3000	12.5			PS検層結果		
▼ (EL. -90.0m)	1570	3440	12.5			PS検層結果		
▼ (EL. -100m)						PS検層結果		
▼ (EL. -150m)	1730	3470	12.5			PS検層結果		
▼ (EL. -200m)	1770	3650	12.5			PS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

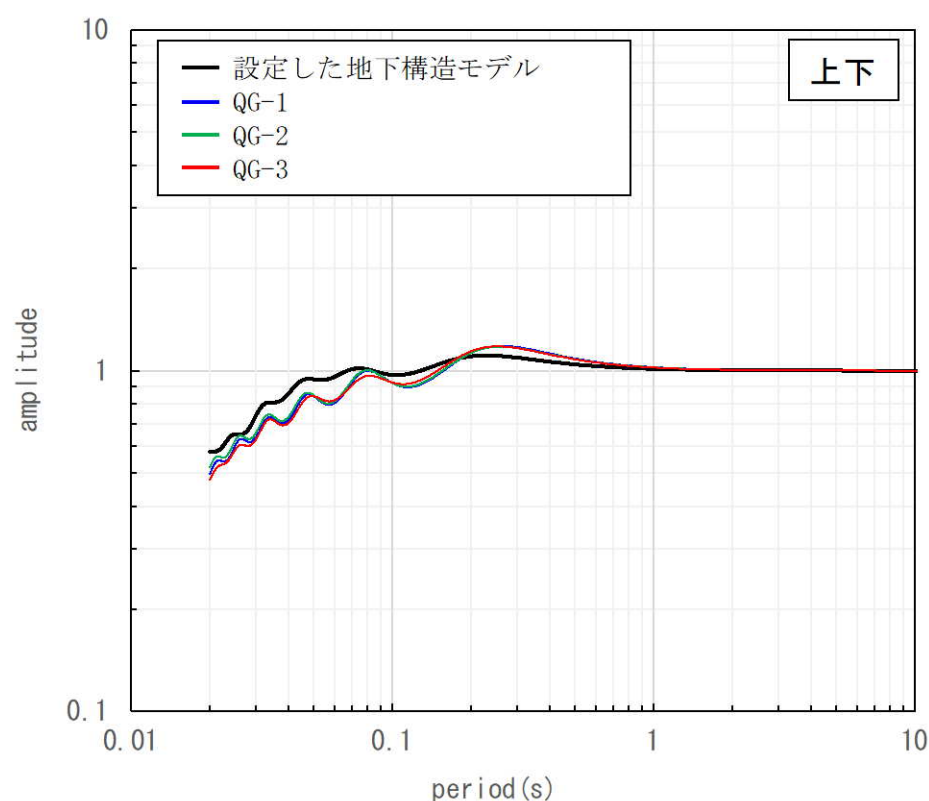
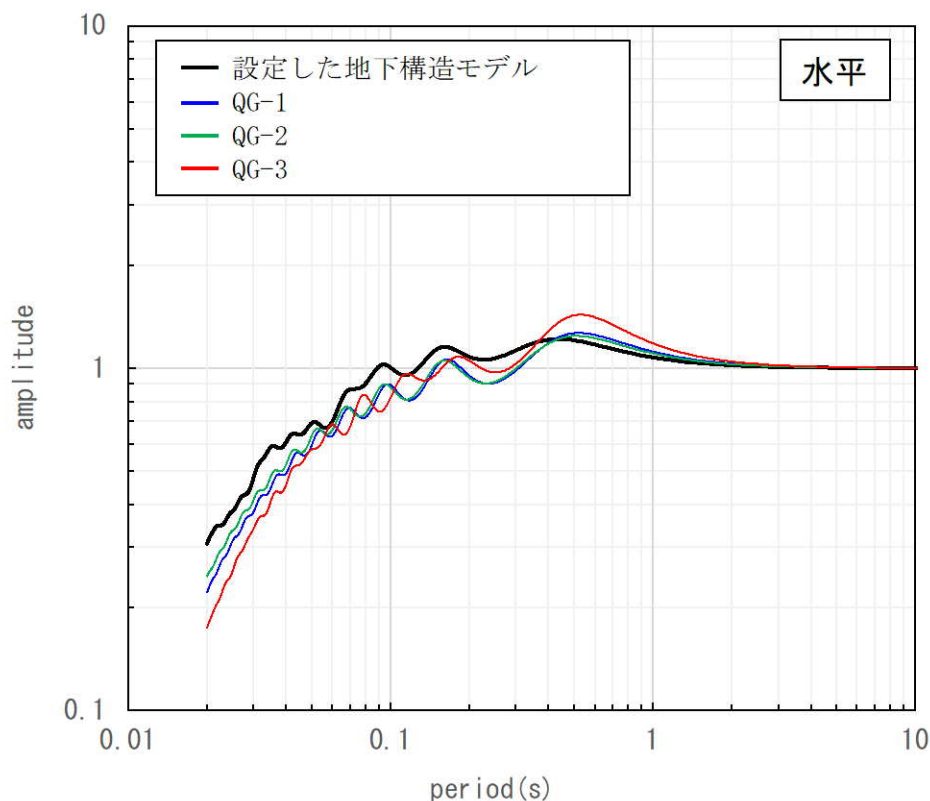
- 追加ボーリング孔におけるEL. -200mまでのPS検層結果等を踏まえ、PS検層モデルを設定。
- 追加ボーリング孔におけるPS検層による速度 (V_s 、 V_p) は、設定した地下構造モデルと概ね整合している。
- 追加ボーリング孔内減衰測定によるQ値は、いずれも設定した地下構造モデルの $Q=12.5$ を下回る。なお、得られたQ値は、高周波数側におけるQ値の上限値に対応すると考えられるが、周波数によらず一定のQ値を設定。



3.4 地下構造モデルの妥当性確認

■ 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。（92～96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。
 - 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モデルを以下に示す。
- 敷地地下深部の地下構造は、硬質かつ水平な速度構造を示す佐世保層群が十分な深さまで分布していることを確認しており、実地盤の状況に近いモデルであると考えられる。

地表 ▼ (EL. 11.0m)	モデル-a			QG-1aモデル			QG-2aモデル			QG-3a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
	1770	3650	200	1550	3190	200	1590	3220	200	1550	3320	200

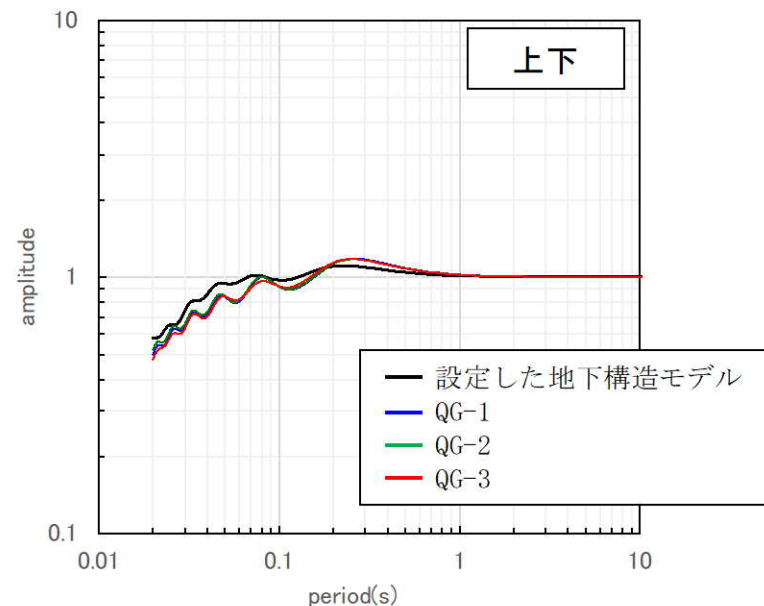
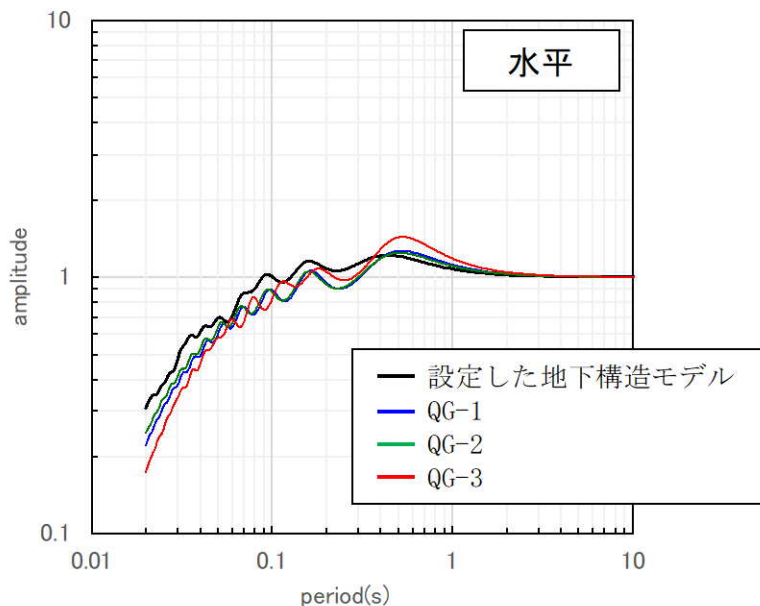
 : 92頁で示したモデルとの相違点

3.4 地下構造モデルの妥当性確認

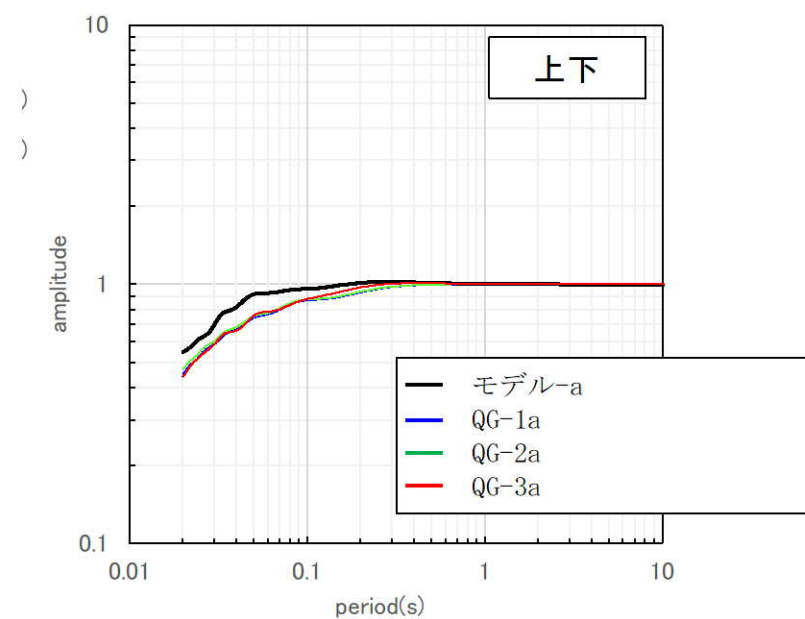
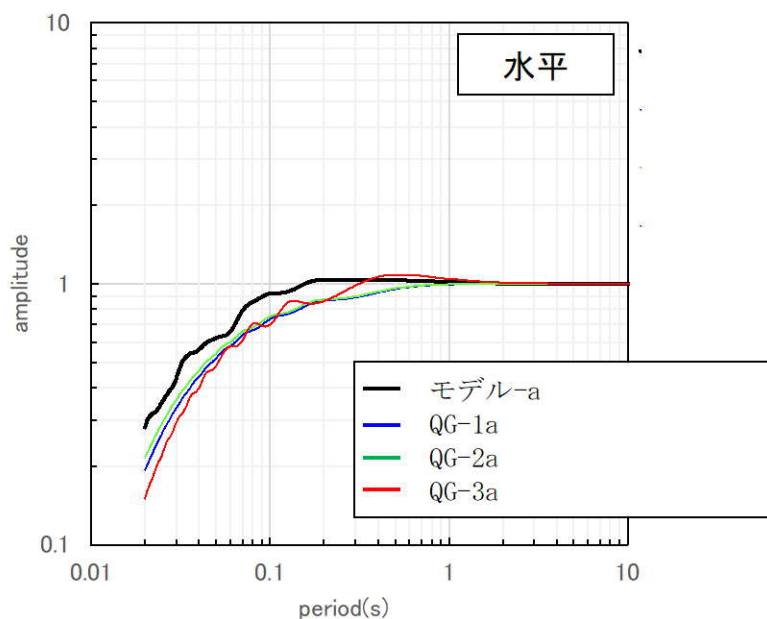
■ 伝達関数の比較

- 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

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）

- 速度コントラストを大きくした場合のモデルを以下に示す。

地表 ▼ (EL. 11.0m)	モデル-b			QG-1bモデル			QG-2bモデル			QG-3b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
	3100	5500	200	3100	5500	200	3100	5500	200	3100	5500	200

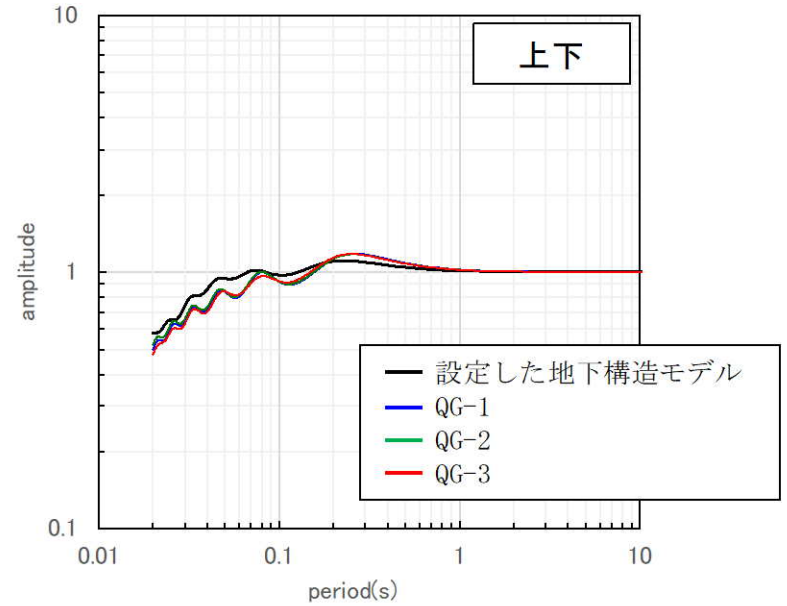
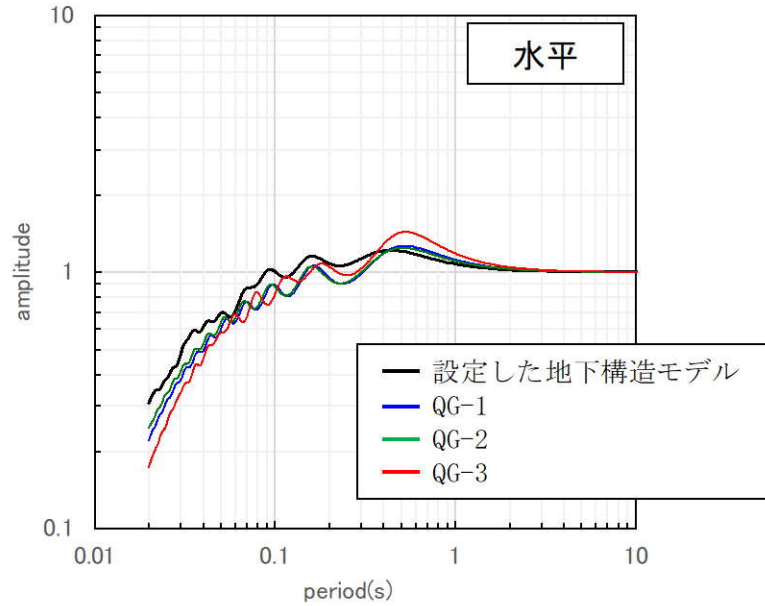
 : 92頁で示したモデルとの相違点

3.4 地下構造モデルの妥当性確認

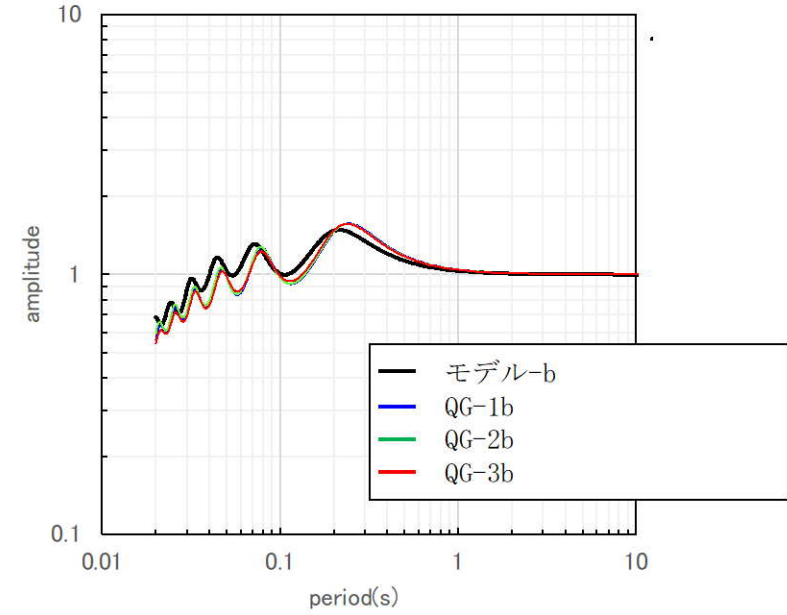
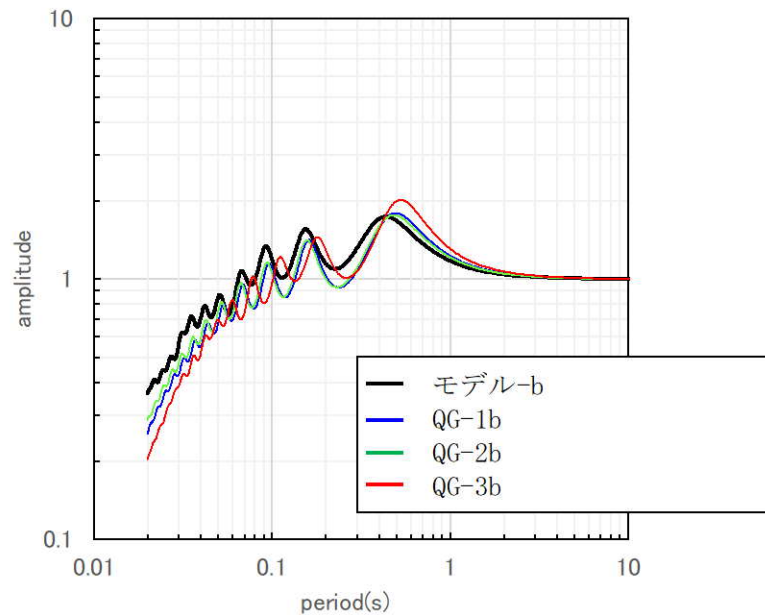
■ 伝達関数の比較

- 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、実地盤の状況に近いと考えられる、EL. -200mでの速度コントラストをなくした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(94頁参照)。
- 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⑤）

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。
- 以下のとおり、EL. -90mからEL. -200mまでの範囲は、地震観測記録が得られていないことから、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。
 - 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等により設定し、EL. -90mからEL. -200mまでの範囲の地下構造モデルは、PS検層モデルとの比較により妥当性を確認している。
 - 応答スペクトルによる確認における上下方向の一部の観測記録の周期0.2~0.4秒付近で応答波が観測記録を下回る要因は、EL. -90m以深にあると考えられる。

▼ EL. 11.0m（地表）		
▼ EL. -15.0m（解放基盤表面）	地盤減衰（Q値）	地下構造モデル
▼ EL. -90.0m（最深部地震計）	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 	地震観測記録の応答スペクトルにより妥当性を確認
▼ EL. -200m	以下の検討・確認結果に基づき、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 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 	PS検層モデルの理論伝達関数との比較により妥当性を確認
▼ 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）	

地震観測記録

ボーリング孔内減衰測定等

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						-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	-0.185	2.40	2100	4000	200	-0.185	2.40	2100	4000	200
-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、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及びボーリング孔内減衰測定による検討の結果、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。

3.6 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、地盤減衰 (Q値) を見直し。
- EL. -90mからEL. -200mまでの範囲は、地震観測記録が得られていないことから、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。