

川内原子力発電所1号炉、2号炉審査資料	
資料番号	TTS-031
提出年月日	2023年7月12日

川内原子力発電所 1号炉及び2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7月12日
九州電力株式会社

目次

1. コメントリスト及び今後の審査スケジュール	P. 2
2. コメント回答方針	P. 7
3. 地下構造モデルの設定の概要	P. 11
4. 地下構造モデルの設定	P. 14
4.1 地下構造モデルの設定	P. 15
4.2 地下構造モデルの適用性確認	P. 19
4.3 まとめ	P. 32
5. 今後の取り組み	P. 33
【補足①】 ボーリング孔内減衰測定結果	P. 34
【参考①】 速度構造の見直しに係る経緯について	P. 40
【参考②】 応答スペクトルの比較結果	P. 49
【参考③】 既許可の地下構造モデル	P. 70
【参考④】 ボーリング孔内Q値に関する知見	P. 80



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	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、EL. -28.5m~EL. -480mの層を分割していること、また、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. -118.5m~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
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
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、 $V_s=2,150\text{m/s}$ の層上面 (EL. -480m) 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
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： TTS-030にて説明
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
6	変はんれい岩類について、地質層序と地質図の凡例の記載の考え方を説明すること。		第1049回会合にて説明
7	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
8	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
9	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
10	乱數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： TTS-030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

No.	コメント	指摘場所	対応状況
11	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
12	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
13	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
14	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. 1, 2, 8につい て 第1103回会合にて説明
15	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
16	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
17	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。 補正申請については、地下構造モデルと基準地震動の審議が取り纏まった段階で、部分的に補正するなど、限られた時間を活用する工夫を検討すること。	第1080回、第1088回 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4年10月7日、 令和4年10月28日、 令和5年4月28日)	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
18	地下構造モデルについて、地震観測記録等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
19	川内の地下構造モデルの設定について、抜本的な改善を含めて現実的な方法で見直しを検討し、地下構造モデルの設定の方針を速やかに説明すること。	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1163回会合にて説明
20	地下構造モデルの見直し方針の説明では、単なる方針、速度構造を見直して観測事実と合わせ込むというだけでなく、既許可及びそれ以降の観測事実を踏まえた地下構造モデルの構築に係る論理構成、観測事実を再現できるという成立性とそれらの根拠を具体的に示すこと。	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)	第1163回会合にて説明
21	以下について資料に反映すること。 ・既許可モデルに見直した経緯について、端的な表現に見直すこと。 ・EL. -200m以浅の地盤減衰に大きな保守性がある点について、わかりやすい説明になるようデータを資料に追加し、提示すること。	第1163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6月30日)	今回説明 (P40~P48、P34~P39)

2. コメント回答方針

2. コメント回答方針

○ 第1113回審査会合（令和5年2月10日）でのご指摘

- ・ 地下構造モデルの設定方針について、既許可モデルをそのまま用いた場合に観測記録と整合するか確認したうえで、浅部の地盤減衰や速度構造を見直す等、どのように見直し対応するか、速やかに説明すること。

○ 第1142回審査会合（令和5年4月28日）でのご指摘

- ・ 地下構造モデルの見直し方針の説明では、単なる方針、速度構造を見直して観測事実と合わせ込むというだけでなく、既許可及びそれ以降の観測事実を踏まえた地下構造モデルの構築に係る論理構成、観測事実を再現できるという成立性とそれらの根拠を具体的に示すこと。

2. コメント回答方針

■ コメント回答方針

- 現申請モデルに対するコメントを踏まえ、既許可モデル※による観測記録との整合性の確認を実施。

※長周期帯における理論的手法による評価に用いる解放基盤表面以深の地下構造モデル

- 既許可モデルは、現申請モデルより地盤減衰が小さく、応答波の応答スペクトルが短周期帯で増大することにより、周期0.1秒から0.2秒において、観測記録と同等もしくは上回ることから、現申請モデルに比べて整合性が改善される。(10頁)
- 短周期帯において観測記録を大きく上回り、大きな保守性を有する。(10頁)

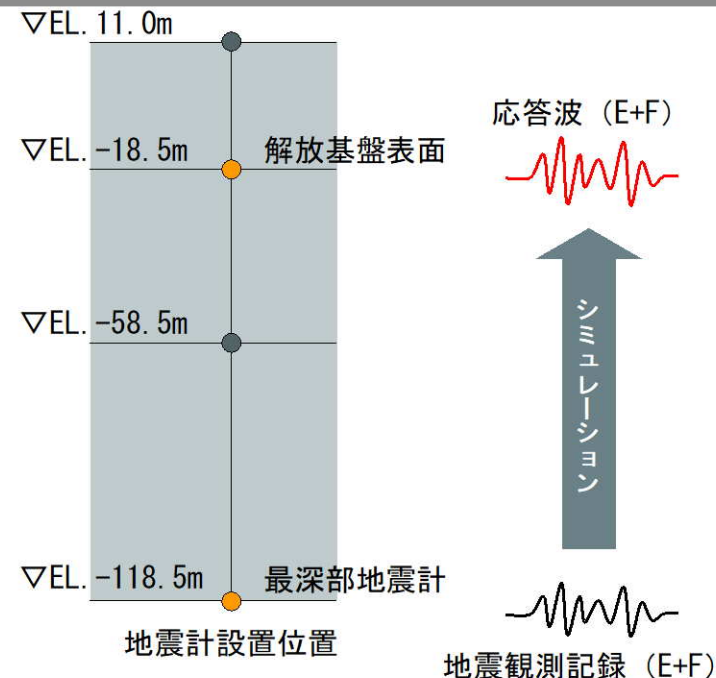


- 以上を踏まえ、既許可モデルを用いる方針とする。

2. コメント回答方針

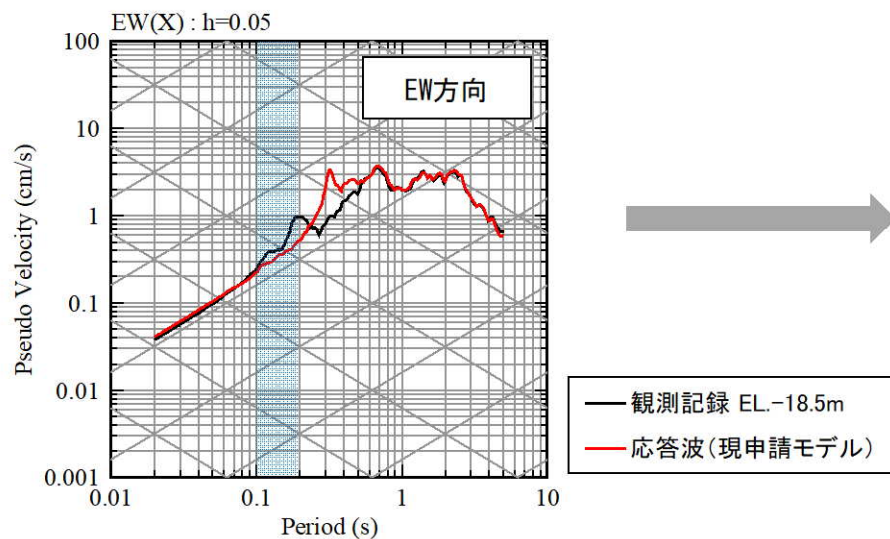
■ 既許可モデルによる観測記録との整合性確認

- 既許可モデルを用いて、最深部地震計（EL. -118.5m）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. -18.5m）※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。
- 既許可モデルは、現申請モデルより、地盤減衰が小さく、応答波の応答スペクトルが短周期帯で増大することにより、水平方向の周期0.1秒から0.2秒において、観測記録と同等もしくは上回ることから、現申請モデルに比べて観測記録との整合性が改善される。（参考②）
- 短周期帯において観測記録を大きく上回り、大きな保守性を有する。

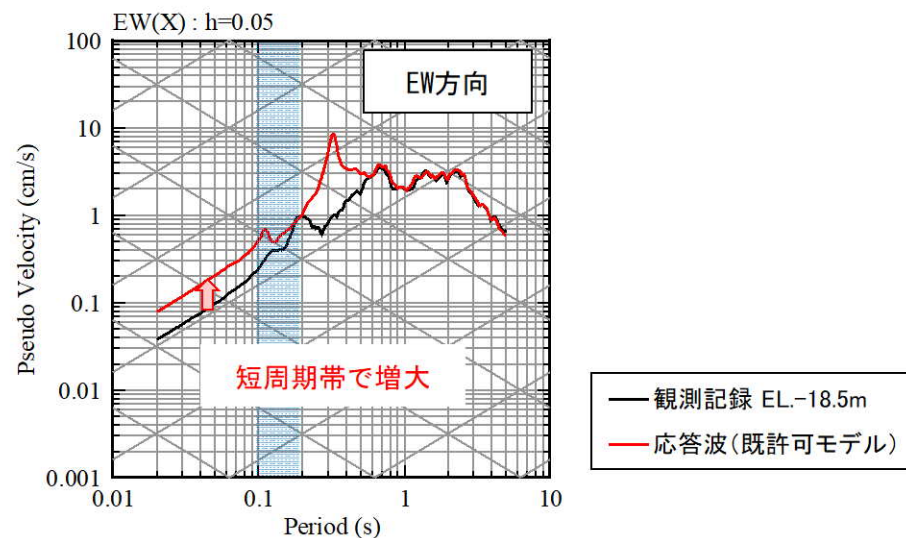


※入力の最深部地震計（EL.-118.5m）で得られた地震観測記録及び出力の解放基盤表面（EL.-18.5m）での応答波は地中記録のため、E+Fで評価

〔①〕熊本県熊本地方（2016年熊本地震本震）の例〕



現申請モデル



既許可モデル

3. 地下構造モデルの設定の概要

3. 地下構造モデルの設定の概要

■ 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる地下構造モデル

- 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる地下構造モデルは、既許可モデルを用いる。
 - 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。
 - 今回、既許可モデルは、長周期帯に限定したものではないことを確認し、短周期から長周期までの全ての周期帯の地震動評価に用いる。(4.1節)
- 標準応答スペクトルは地震基盤相当面 ($V_s=2200\text{m/s}$ 以上の層) で定義されることから、既許可モデルの $V_s=3010\text{m/s}$ の層上面 (EL. -1018.5m) に地震基盤相当面を設定する。

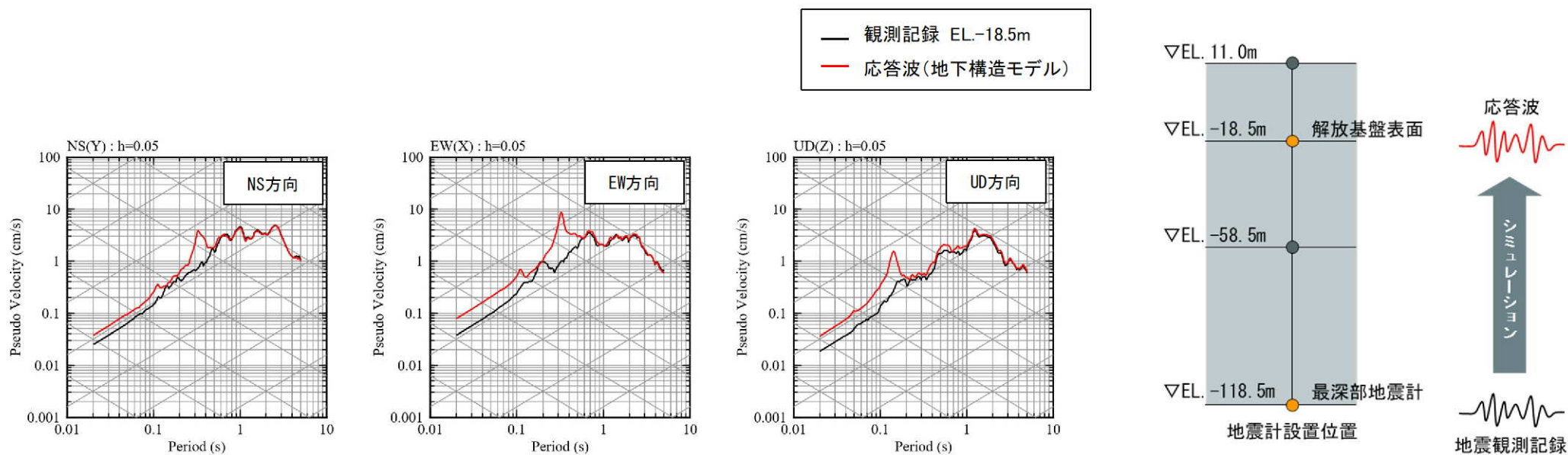
長周期帯における理論的手法による地震動評価及び
標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる地下構造モデル

EL.	層上面 (km)	密度 ρ (g/cm^3)	V_s (m/s)	V_p (m/s)	Q値	
-18.5m	0.0	2.70	1500	3200	100	▼解放基盤表面
-28.5m	-0.01	2.70	1600	3700	100	
-480m	-0.462	2.70	2150	4400	200	▼地震基盤相当面
-1018.5m	-1.0	2.70	3010	5200	200	
-2018.5m	-2.0	2.70	3240	5600	300	
-3018.5m	-3.0	2.70	3500	5900	300	
-17018.5m	-17.0	3.00	3800	6600	500	
-33018.5m	-33.0	3.30	4300	7600	500	

3. 地下構造モデルの設定の概要

■ 短周期から長周期までの全ての周期帯への適用性確認

- 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（応答スペクトル）に照らしても、長周期帯だけでなく、短周期帯についても保守性の観点から適用できることを確認。（4.2節）
 - 既許可モデルと地震観測記録の応答スペクトルを比較した結果、既許可モデルが地震観測記録と同等もしくは上回る。
 - 短周期側では大きな保守性を有する。



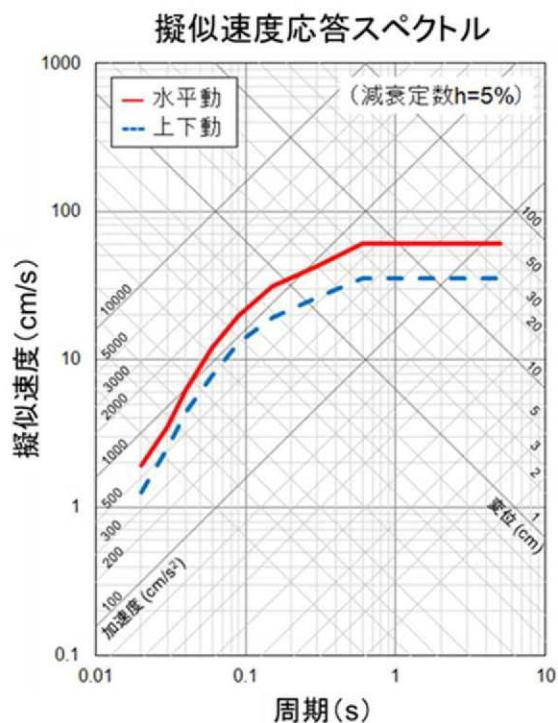
地震観測記録と応答波(地下構造モデル)の応答スペクトルによる比較結果（2016年熊本地震本震の例）

4. 地下構造モデルの設定

4.1 地下構造モデルの設定

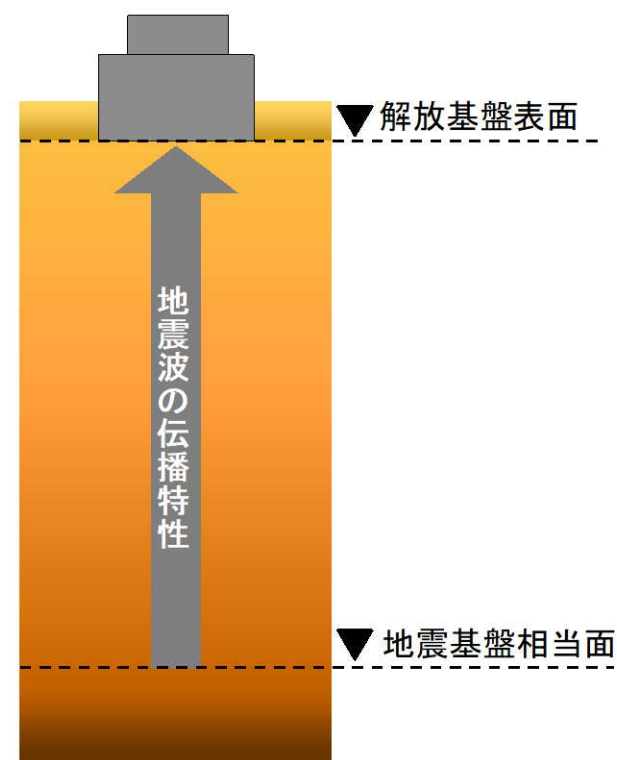
■ 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる地下構造モデル

- 標準応答スペクトルは、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。



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

4.1 地下構造モデルの設定

■ 地下構造モデルの設定 (1/2)

- 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は、既許可モデルを用いる。
 - 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。
 - 今回、既許可モデルは、長周期帯に限定したものではないことを確認し、短周期から長周期までの全ての周期帯の地震動評価に用いる。
 - 》試掘坑内弾性波試験、鉛直アレイ観測、微動アレイ観測、宮腰ほか(2004)¹⁾及び地震調査委員会(2003)²⁾の文献等の設定根拠は短周期から長周期までに適用できる手法に基づき設定されている。(参考③)
 - 》文献で設定されている範囲については、地下構造モデルに反映が必要な新知見が既許可以降得られていないことを確認。
- 標準応答スペクトルは地震基盤相当面 ($V_s=2200\text{m/s}$ 以上の層) で定義されることから、既許可モデルの $V_s=3010\text{m/s}$ の層上面 (EL. -1018.5m) に地震基盤相当面を設定する。
- 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 (18頁) (応答スペクトル) に照らしても、長周期帯だけでなく、短周期帯についても適用できることを確認する。

長周期帯における理論的手法による地震動評価及び
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.	層上面 (km)	密度 ρ (g/cm^3)	V_s (m/s)	V_p (m/s)	Q値	
-18.5m	0.0	2.70	1500	3200	100	▼解放基盤表面
-28.5m	-0.01	2.70	1600	3700	100	
-480m	-0.462	2.70	2150	4400	200	▼地震基盤相当面
-1018.5m	-1.0	2.70	3010	5200	200	
-2018.5m	-2.0	2.70	3240	5600	300	
-3018.5m	-3.0	2.70	3500	5900	300	
-17018.5m	-17.0	3.00	3800	6600	500	
-33018.5m	-33.0	3.30	4300	7600	500	

4.1 地下構造モデルの設定

■ 地下構造モデルの設定 (2/2)

- 設定根拠は下表のとおり。(参考③)

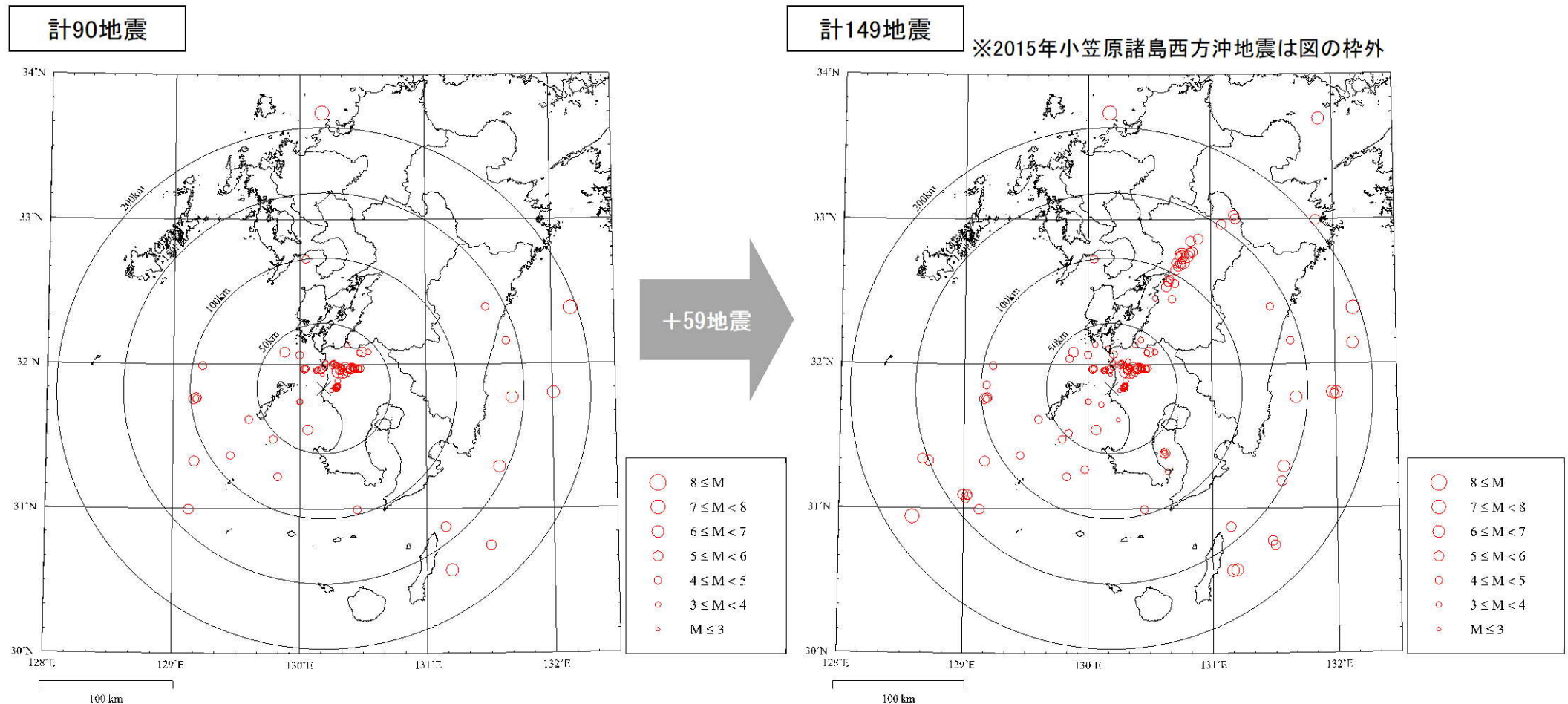
既許可モデルの設定根拠

	層上面 (km)	密度 ρ (g/cm ³)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値	設定根拠		
						密度 ρ	Vs、Vp	Q値
解放基盤表面 EL. -18.5m								
EL. -28.5m	0.0	2.70	1500	3200	100	岩石試験 結果を基 に設定	試掘坑内 弾性波試験	慣用値 (Vs/15~ 10)
EL. -480m	-0.01	2.70	1600	3700	100		鉛直アレイ及び微動 アレイの速度構造を 基に設定	
地震基盤相当面 EL. -1018.5m	-0.462	2.70	2150	4400	200		微動アレイの 速度構造を基に設定	
EL. -2018.5m	-1.0	2.70	3010	5200	200		宮腰ほか(2004)	
EL. -3018.5m	-2.0	2.70	3240	5600	300			
EL. -17018.5m	-3.0	2.70	3500	5900	300			
EL. -33018.5m	-17.0	3.00	3800	6600	500		地震調査委員会(2003)	
	-33.0	3.30	4300	7600	500			

4.1 地下構造モデルの設定

■ 敷地内の鉛直アレイ地震観測記録

- 既許可時審査以降、川内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59地震の観測記録を取得。（計149地震の観測記録）



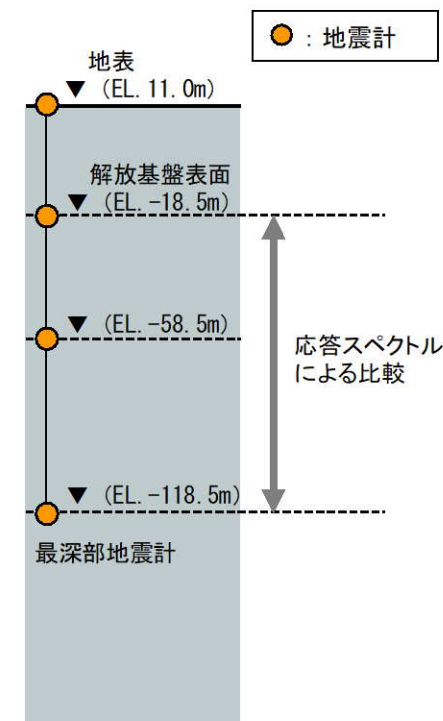
敷地地盤における観測地震の震央分布
(観測開始～既許可時審査)

敷地地盤における観測地震の震央分布
(観測開始～2019年度)

4.2 地下構造モデルの適用性確認

■ 既許可モデルの適用性確認

- 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（応答スペクトル）に照らしても、長周期帯だけでなく、短周期帯についても保守性の観点から適用できることを以下の方法により確認した。
- 地震観測記録の応答スペクトルによる適用性の確認（20～31頁）
 - 解放基盤表面（EL. -18.5m）からEL. -118.5mの範囲について、既許可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。
 - 短周期側では大きな保守性を有する。
- なお、EL. -18.5mからEL. -118.5mの範囲における応答スペクトルの比較では、水平方向の一部の地震観測記録において、周期0.1～0.2秒付近で既許可モデルによる応答波が局所的に観測記録を僅かに下回る。
- 一方、EL. -118.5mからEL. -200mの範囲のボーリング孔内減衰測定結果との比較において、既許可モデルの地盤減衰（Q値）は大きな保守性を有している。（補足①）
- 以上より、EL. -18.5mからEL. -118.5mの範囲において、周期0.1～0.2秒付近で観測記録を僅かに下回るが、EL. -118.5mからEL. -200mの範囲で地盤減衰（Q値）が大きな保守性を有しており、保守性の観点から既許可モデルの適用に問題はない。



4.2 地下構造モデルの適用性確認

■ 地震観測記録の応答スペクトルによる適用性の確認

- 既許可時審査以降に取得した地震観測記録を加えた計20地震※を用いて応答スペクトルによる適用性の確認を実施する。

※ Noda et al. (2002)³⁾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

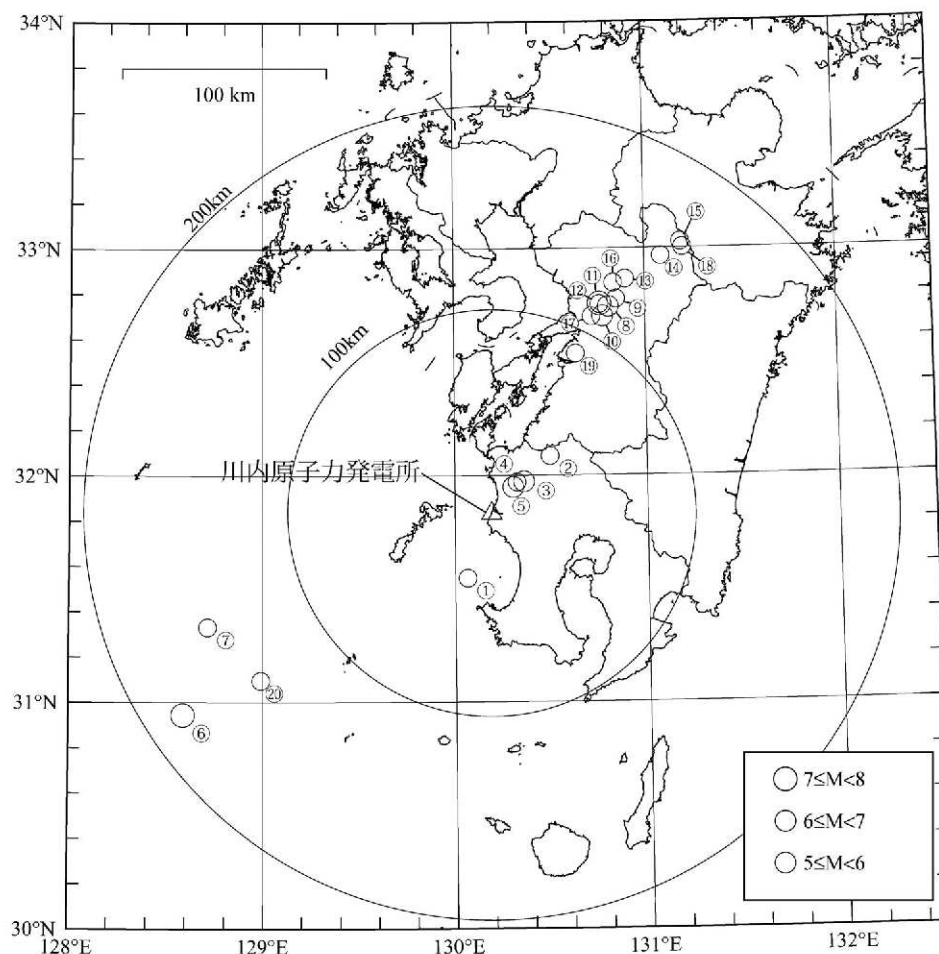
適用性確認に用いる地震諸元 (計20地震)

番号	地震名	発生日	M	震央距離 (km)	入射角 (°)
①	九州西側海域	1984年8月15日	5.5	34	24
②	鹿児島県北西部	1994年2月13日	5.7	40	25
③	鹿児島県北西部	1997年3月26日	6.6	22	23
④	鹿児島県北西部	1997年4月3日	5.7	20	21
⑤	鹿児島県北西部	1997年5月13日	6.4	17	23
⑥	薩摩半島西方沖	2015年11月14日	7.1	181	25
⑦	薩摩半島西方沖	2015年11月15日	5.9	151	25
⑧	熊本県熊本地方	2016年4月14日	6.5	116	25
⑨	熊本県熊本地方	2016年4月14日	5.8	122	25
⑩	熊本県熊本地方	2016年4月15日	6.4	111	25
⑪	熊本県熊本地方	2016年4月16日	7.3	116	25
⑫	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.4	115	25
⑬	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.9	132	25
⑭	熊本県阿蘇地方	2016年4月16日	5.9	151	25
⑮	熊本県阿蘇地方	2016年4月16日	5.8	162	25
⑯	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.4	128	25
⑰	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.4	108	25
⑱	熊本県阿蘇地方	2016年4月18日	5.8	161	25
⑲	熊本県熊本地方	2016年4月19日	5.5	88	25
⑳	薩摩半島西方沖	2016年5月7日	5.5	140	25

既許可時審査



今回新たに追加

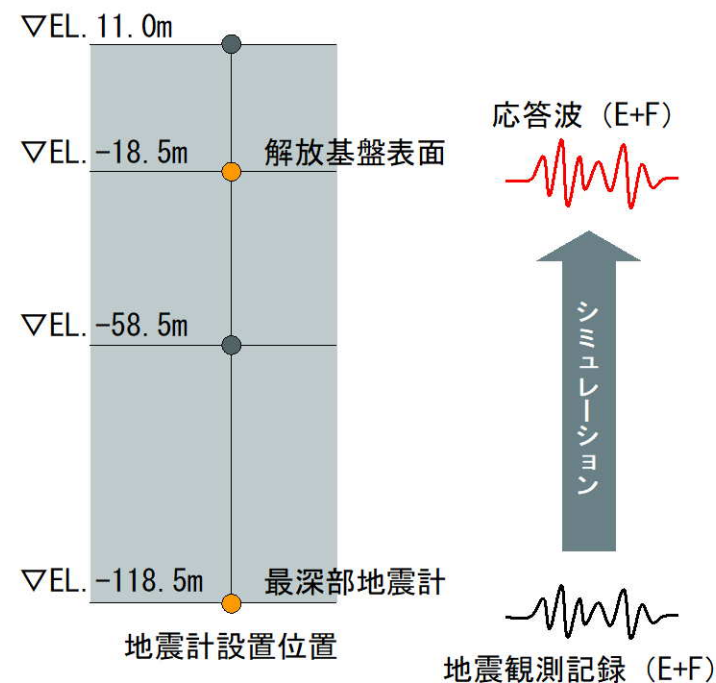


適用性確認に用いる地震の震央位置 (計20地震)

4.2 地下構造モデルの適用性確認

■ 地震観測記録の応答スペクトルによる適用性の確認結果

- 最深部地震計（EL. -118.5m）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. -18.5m）※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、以下の点を確認した。（22～31頁）
 - 応答波の応答スペクトルが、短周期から長周期までの全ての周期帯において、地震観測記録の応答スペクトルと同等もしくは上回る。
 - 短周期側では大きな保守性を有する。

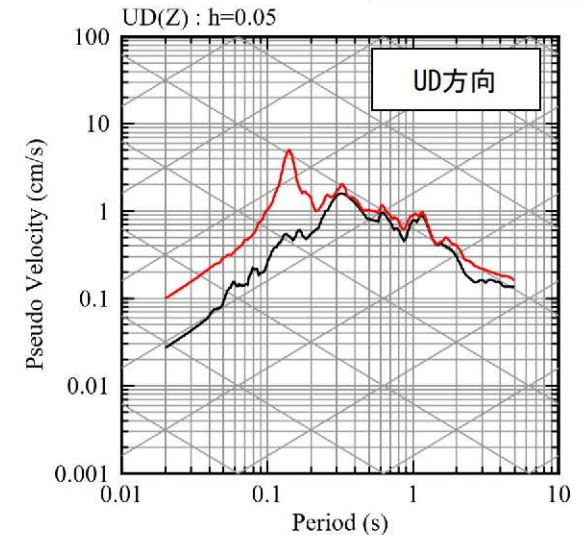
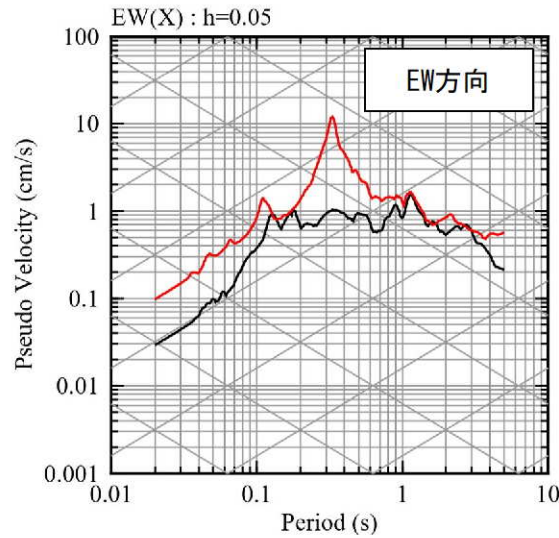
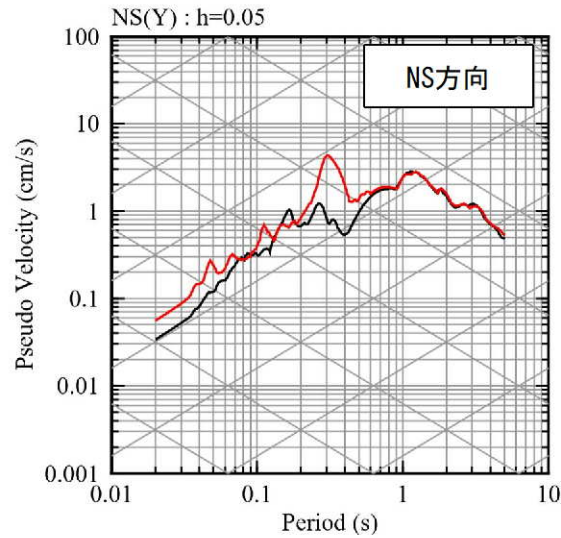


※入力 の最深部地震計(EL.-118.5m)で得られた地震観測記録及び出力の解放基盤表面(EL.-18.5m)での応答波は地中記録のため、E+Fで評価

4.2 地下構造モデルの適用性確認

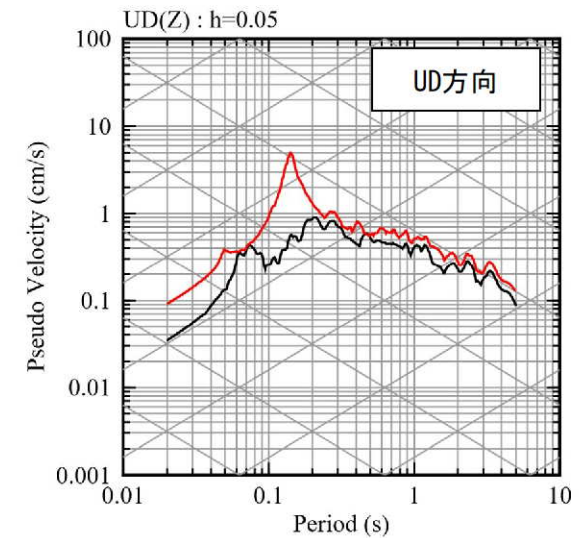
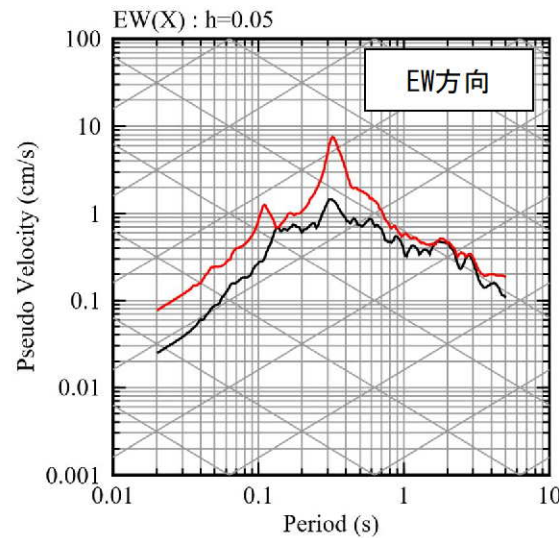
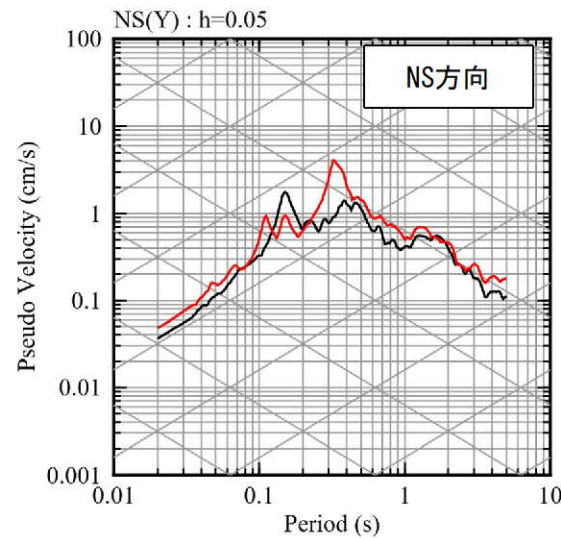
■ 応答スペクトルの比較結果 (1/10)

①九州西側海域



— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波 (既許可モデル)

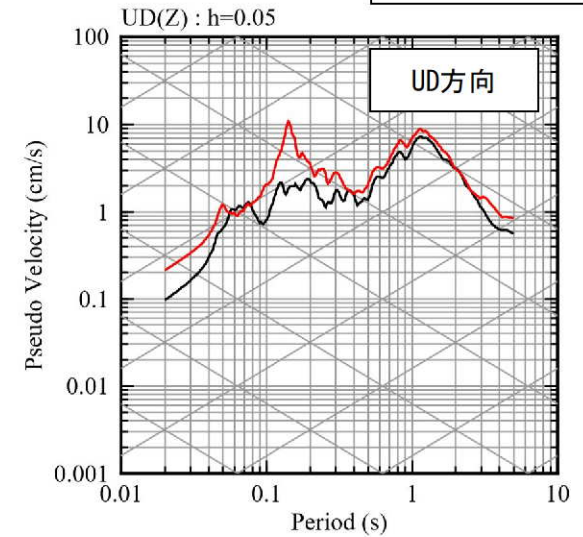
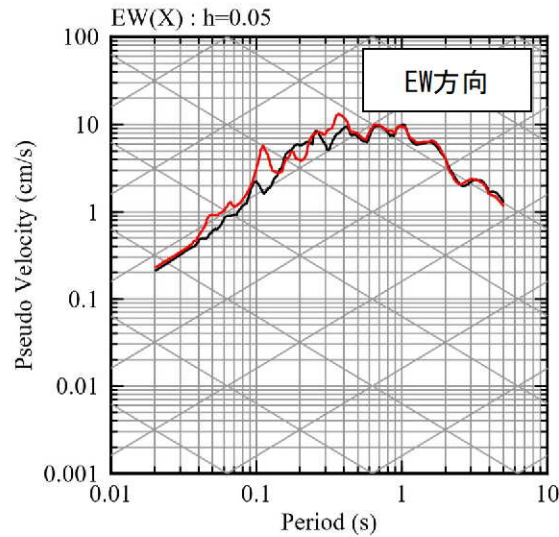
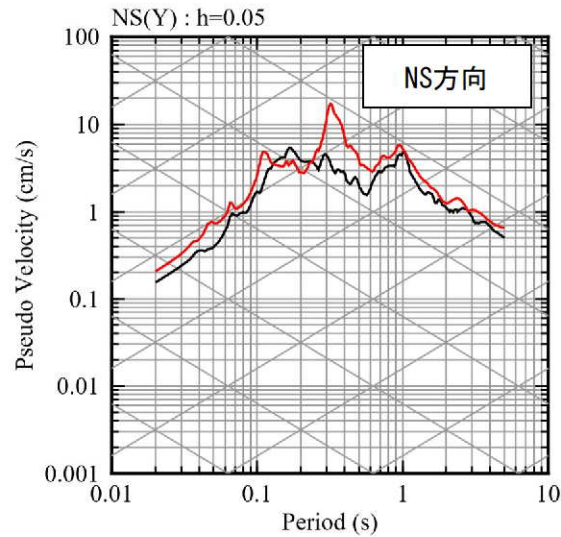
②鹿児島県北西部



4.2 地下構造モデルの適用性確認

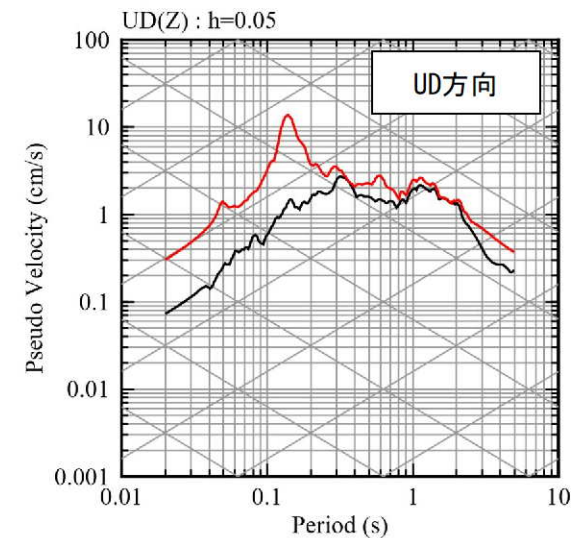
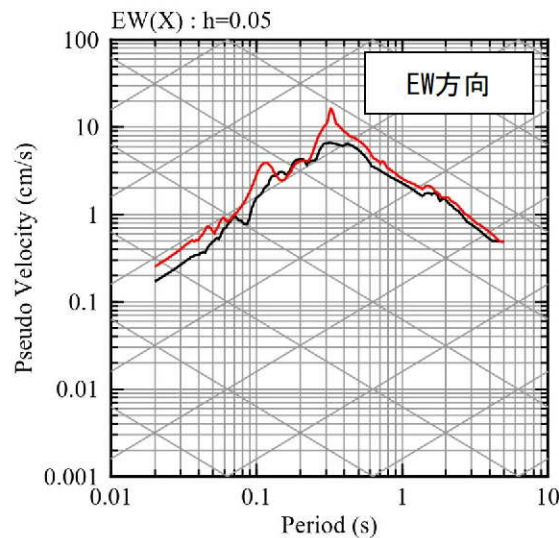
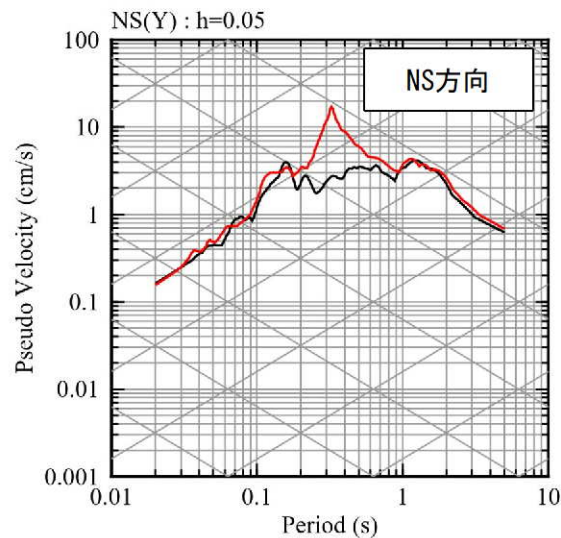
■ 応答スペクトルの比較結果 (2/10)

③ 鹿児島県北西部 (1997年3月本震)



— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(既許可モデル)

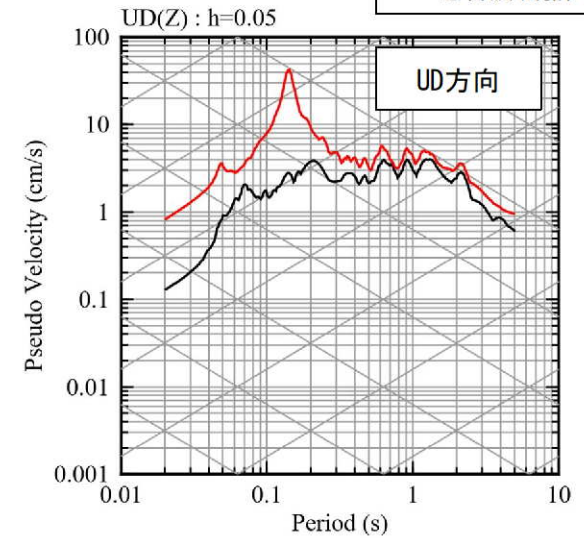
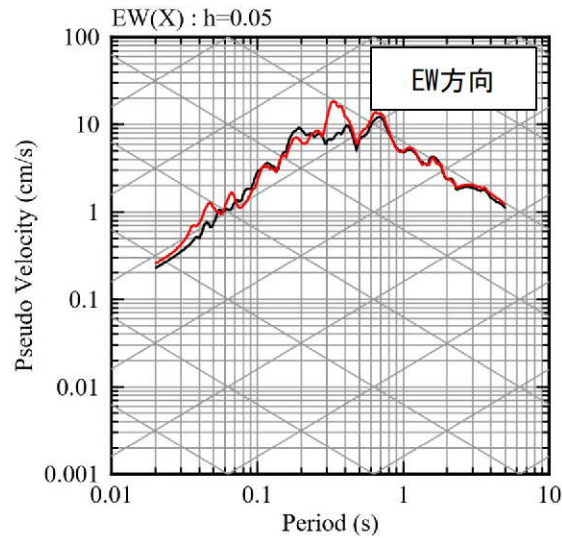
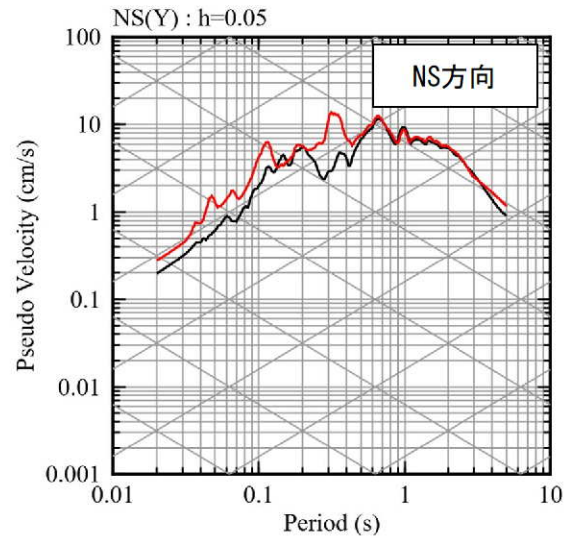
④ 鹿児島県北西部



4.2 地下構造モデルの適用性確認

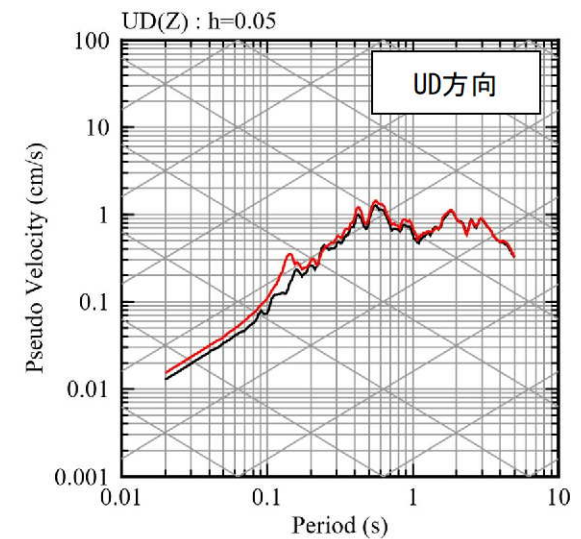
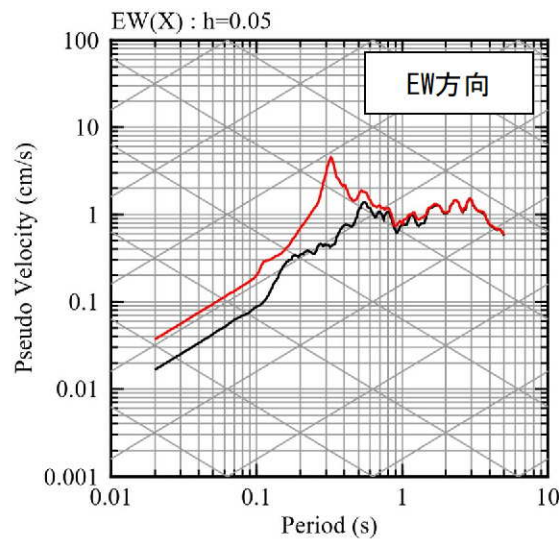
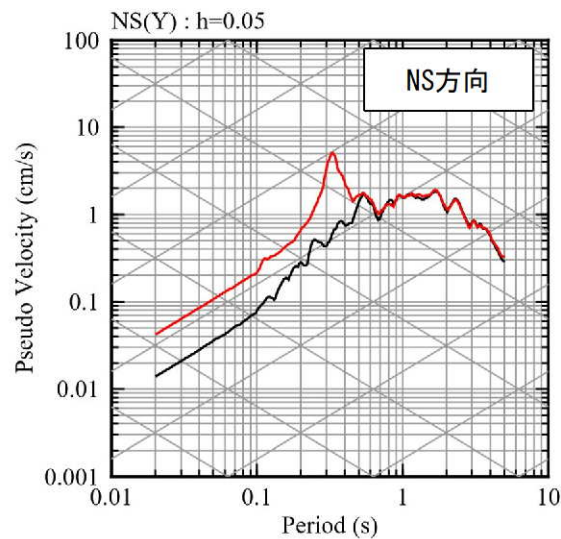
■ 応答スペクトルの比較結果 (3/10)

⑤ 鹿児島県北西部 (1997年5月本震)



— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(既許可モデル)

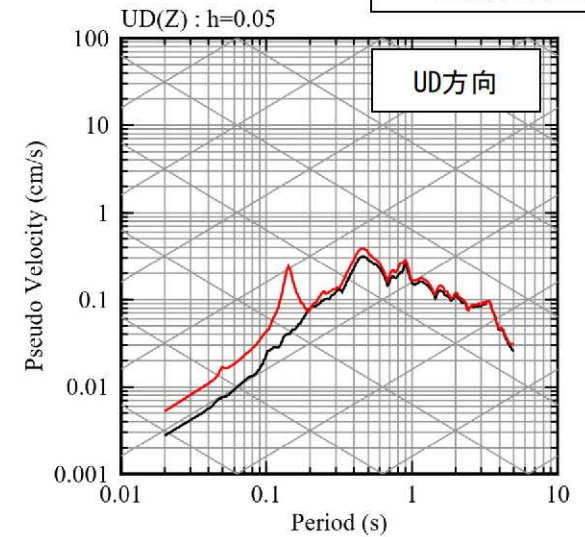
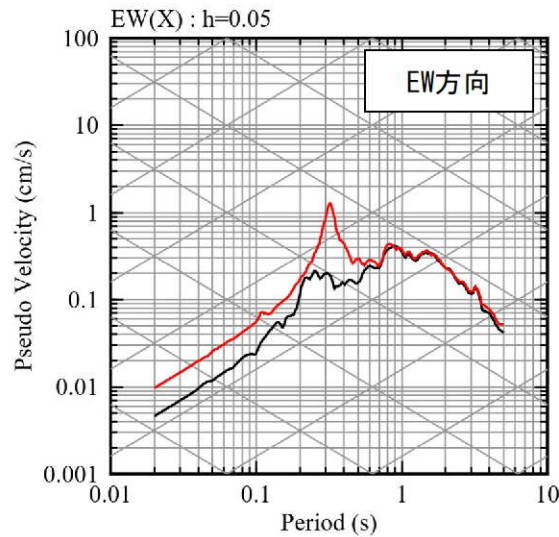
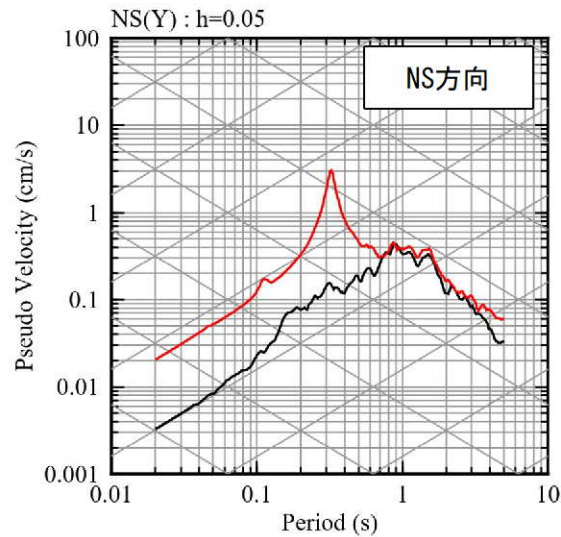
⑥ 薩摩半島西方沖



4.2 地下構造モデルの適用性確認

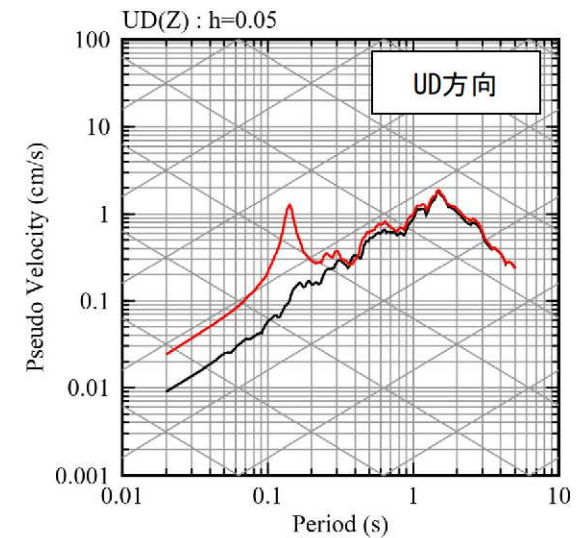
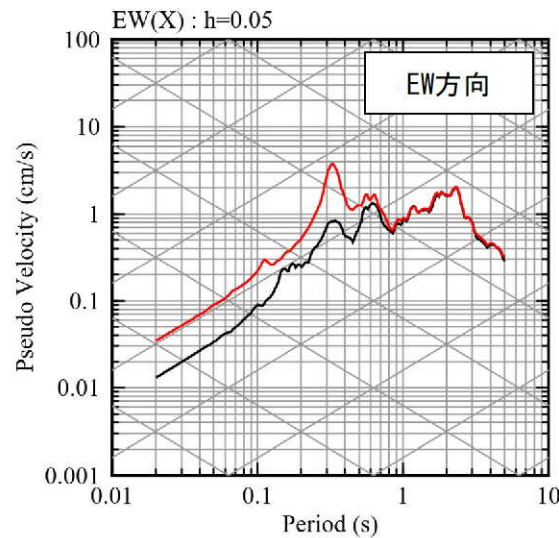
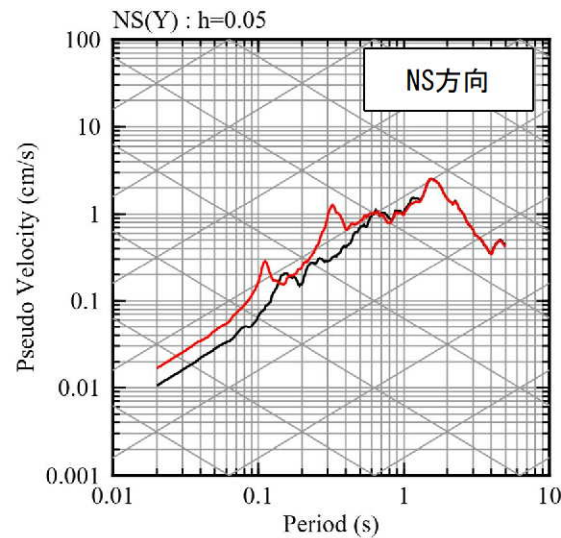
■ 応答スペクトルの比較結果 (4/10)

⑦ 薩摩半島西方沖



— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(既許可モデル)

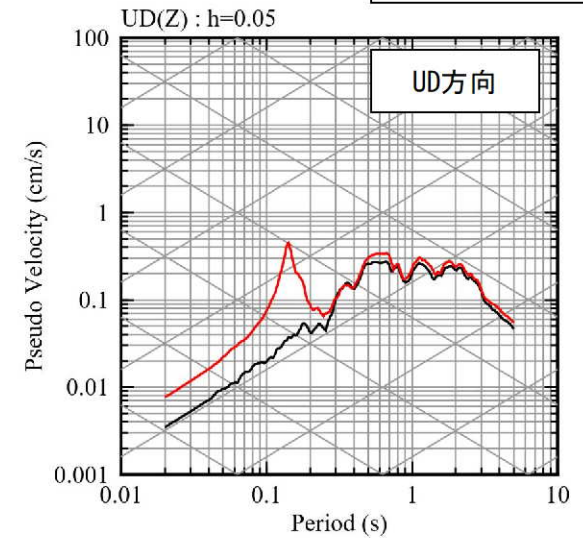
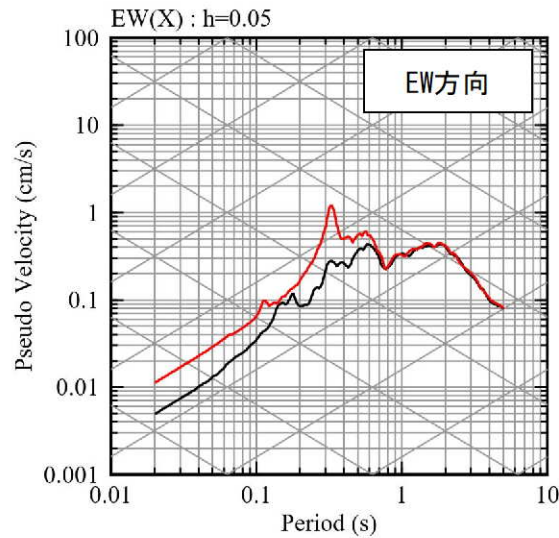
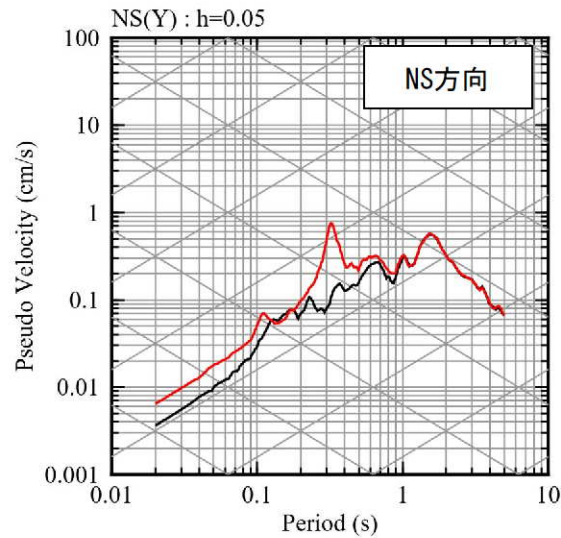
⑧ 熊本県熊本地方 (2016年熊本地震前震)



4.2 地下構造モデルの適用性確認

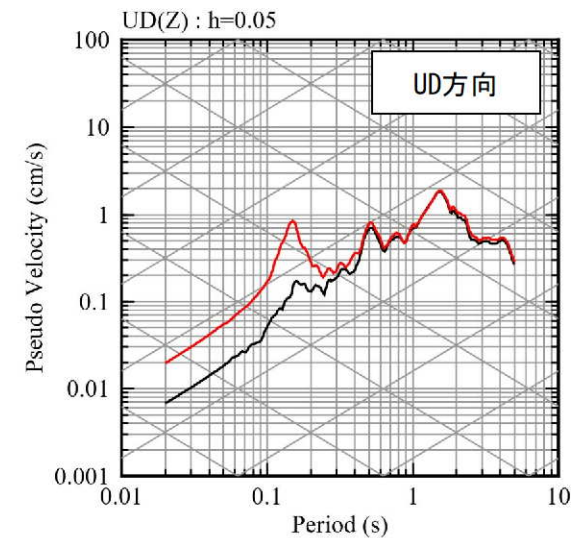
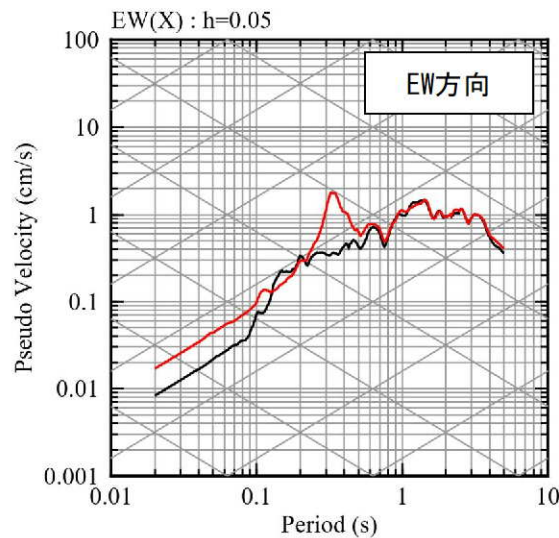
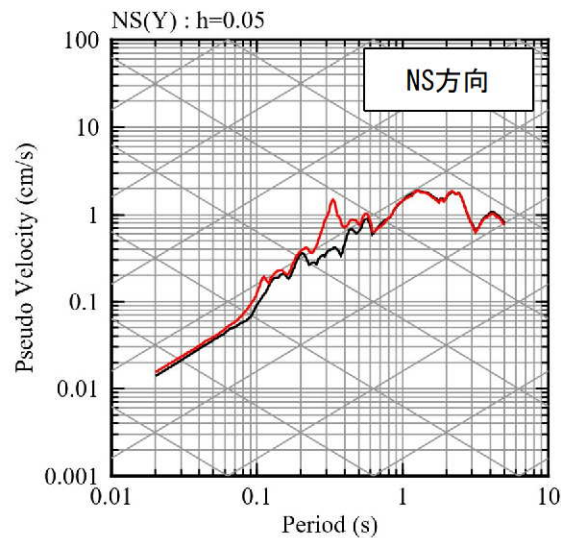
■ 応答スペクトルの比較結果 (5/10)

⑨ 熊本県熊本地方



— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(既許可モデル)

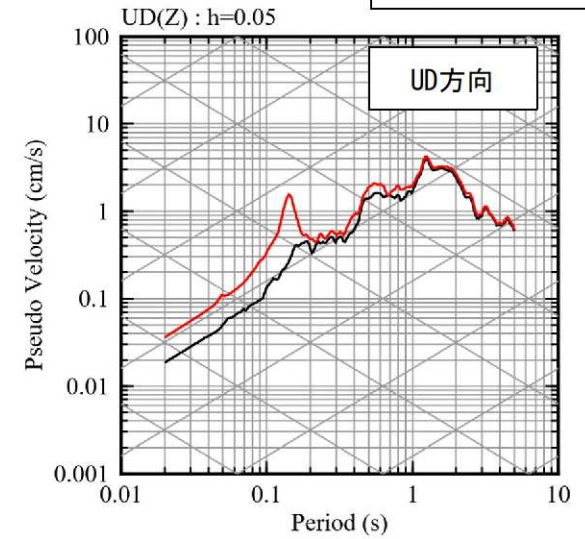
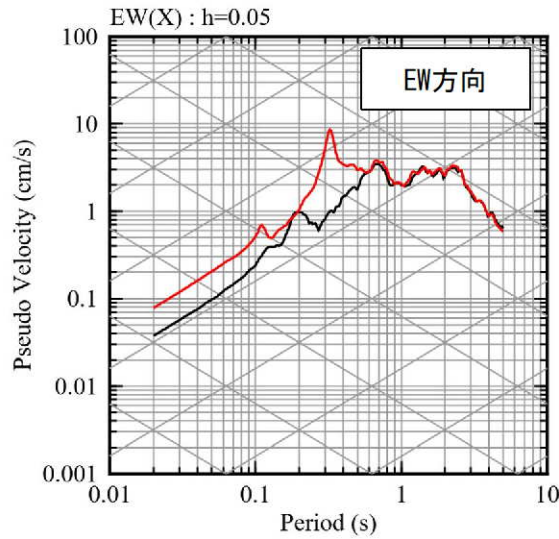
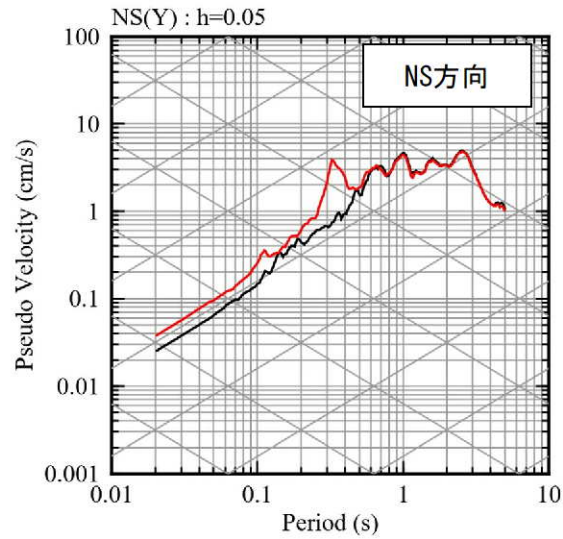
⑩ 熊本県熊本地方



4.2 地下構造モデルの適用性確認

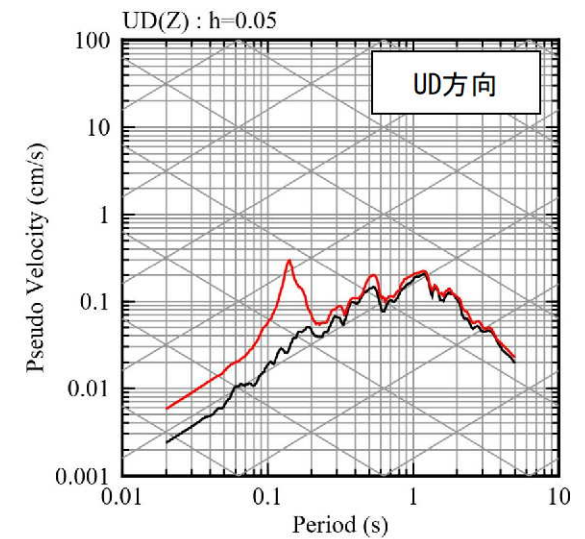
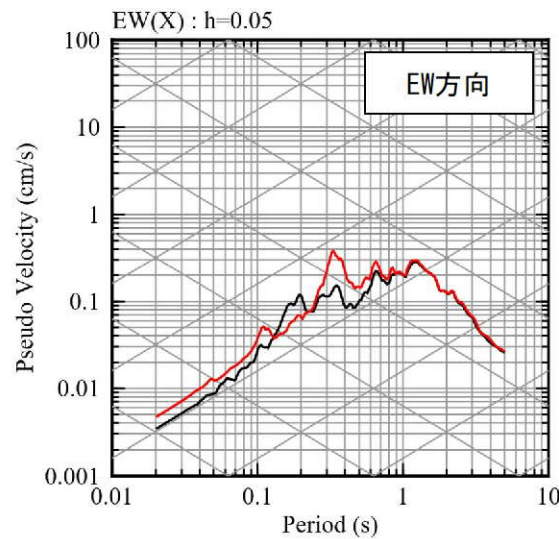
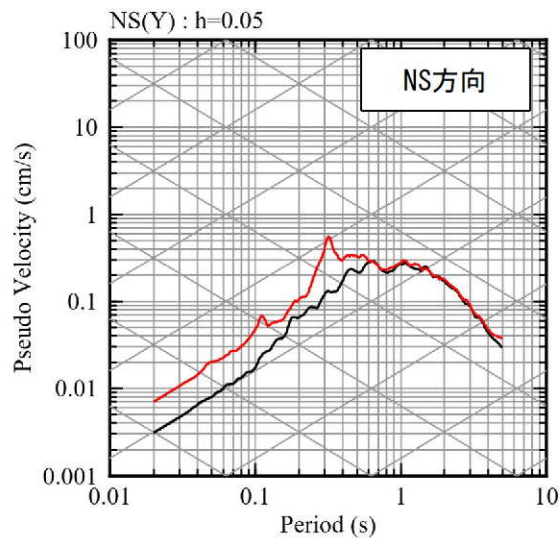
■ 応答スペクトルの比較結果 (6/10)

⑪ 熊本県熊本地方 (2016年熊本地震本震)



— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(既許可モデル)

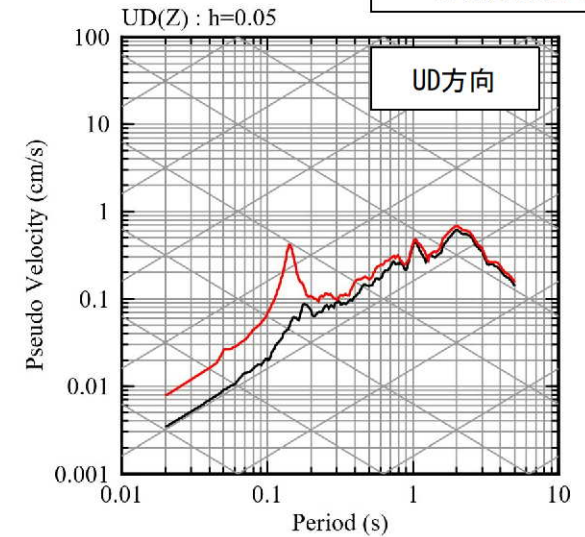
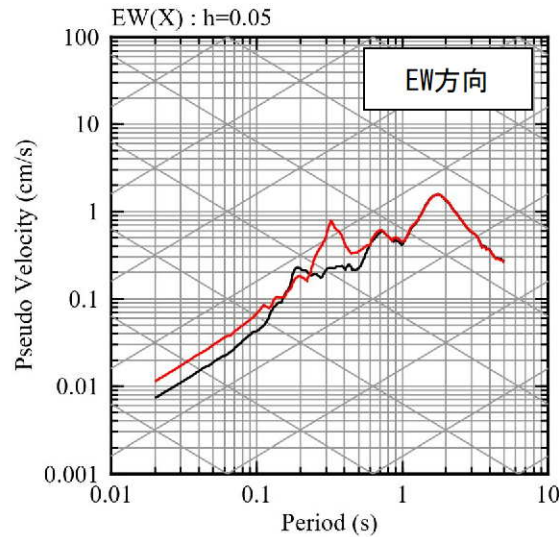
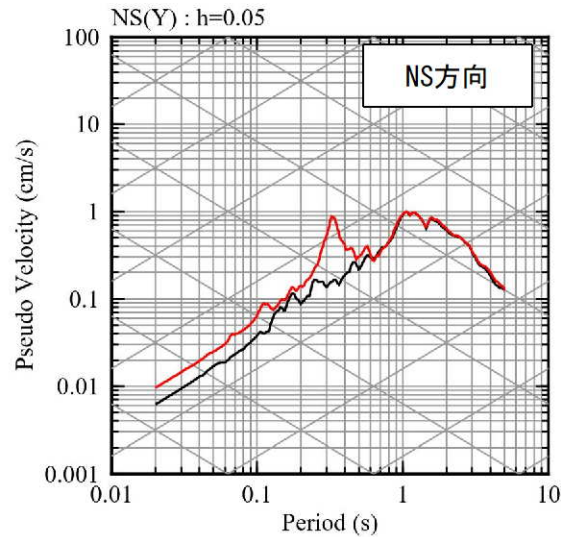
⑫ 熊本県熊本地方



4.2 地下構造モデルの適用性確認

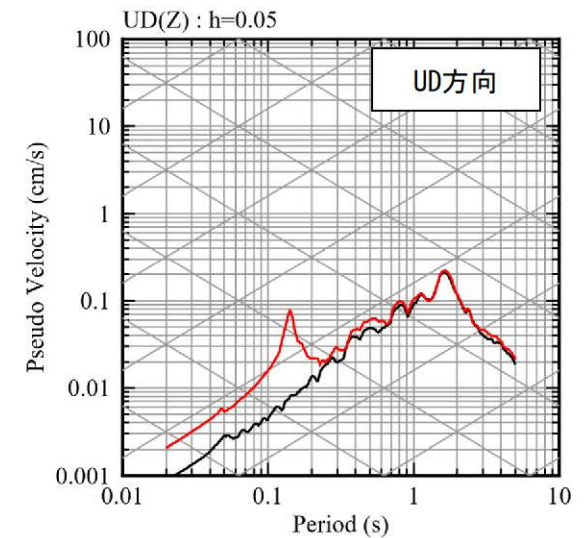
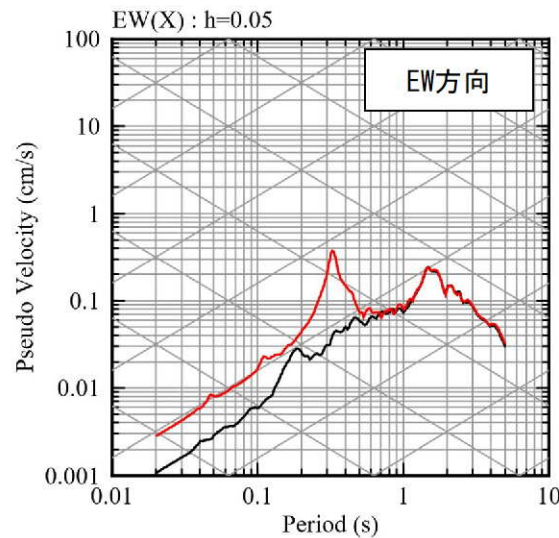
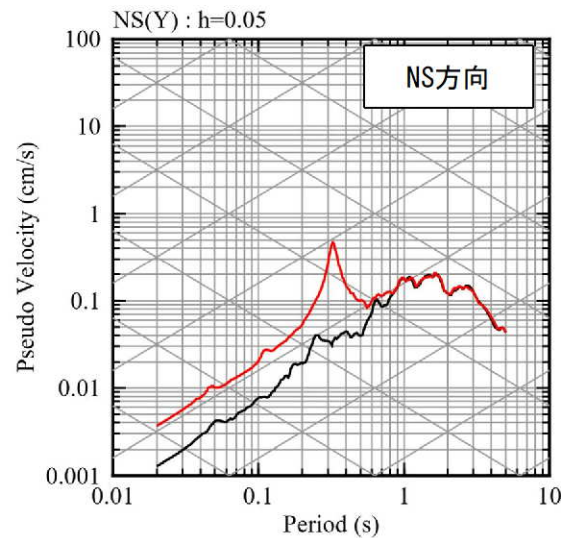
■ 応答スペクトルの比較結果 (7/10)

⑬ 熊本県熊本地方



— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(既許可モデル)

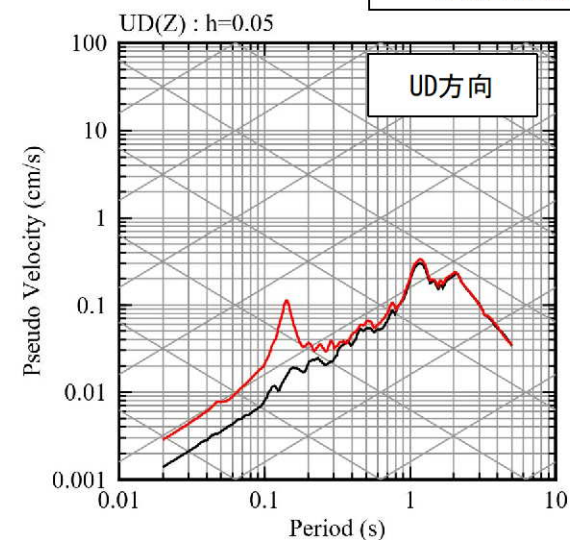
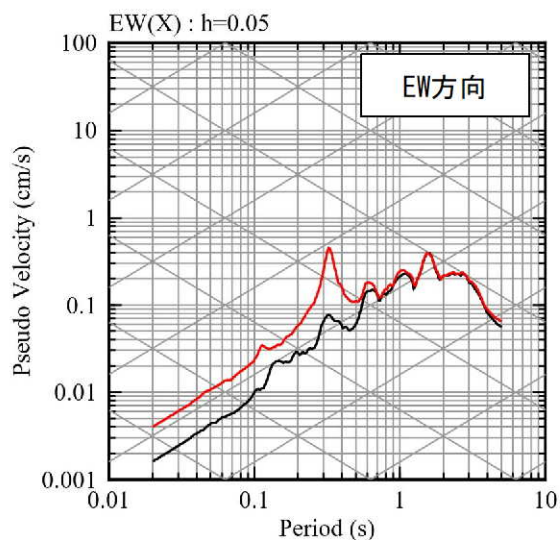
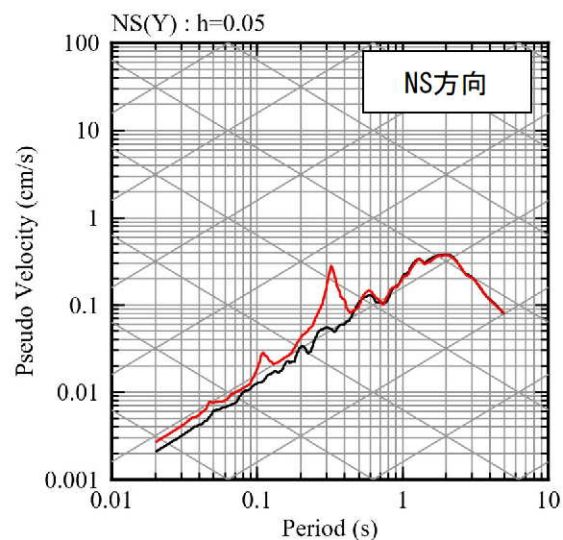
⑭ 熊本県阿蘇地方



4.2 地下構造モデルの適用性確認

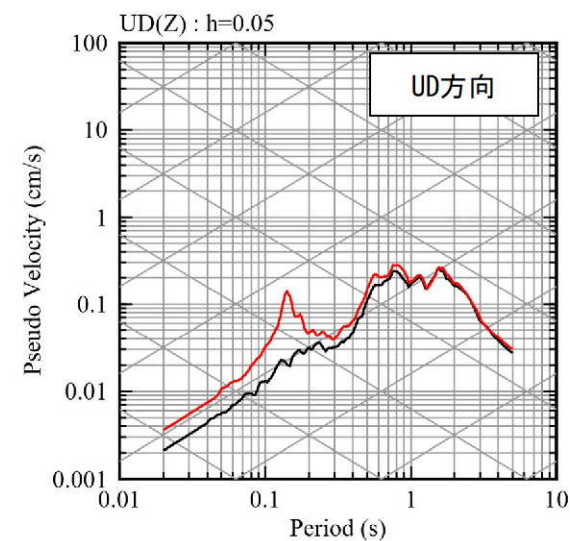
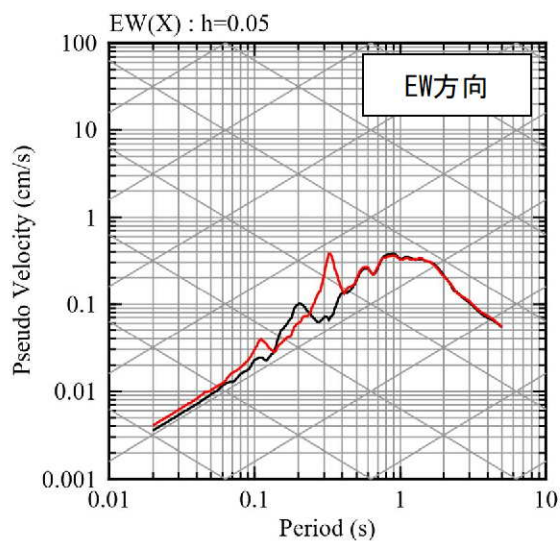
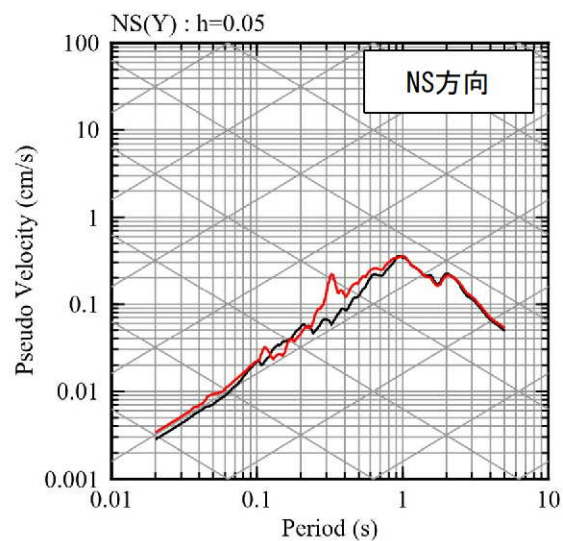
■ 応答スペクトルの比較結果 (8/10)

⑮ 熊本県阿蘇地方



— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(既許可モデル)

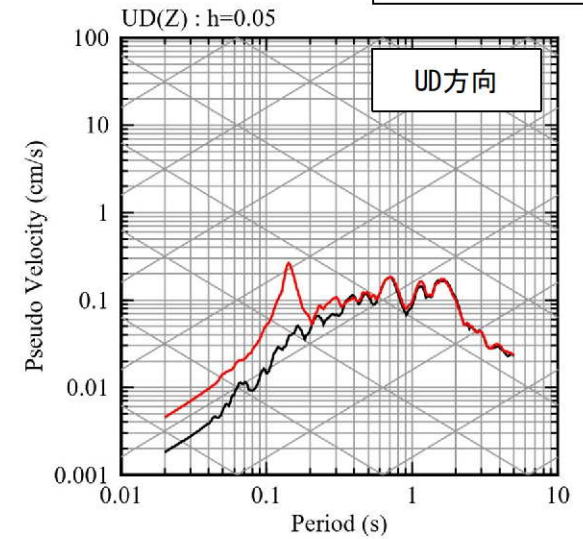
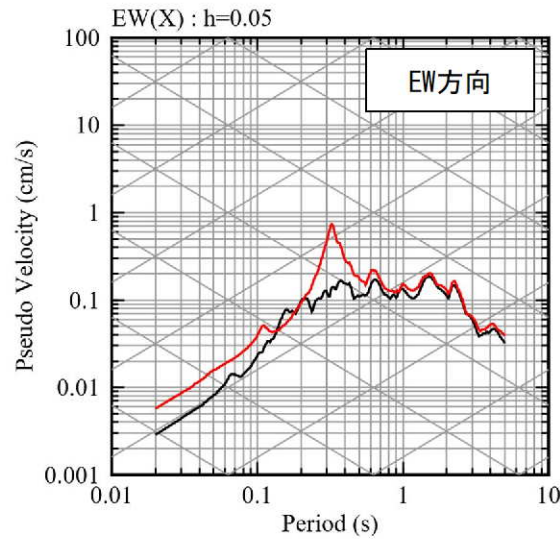
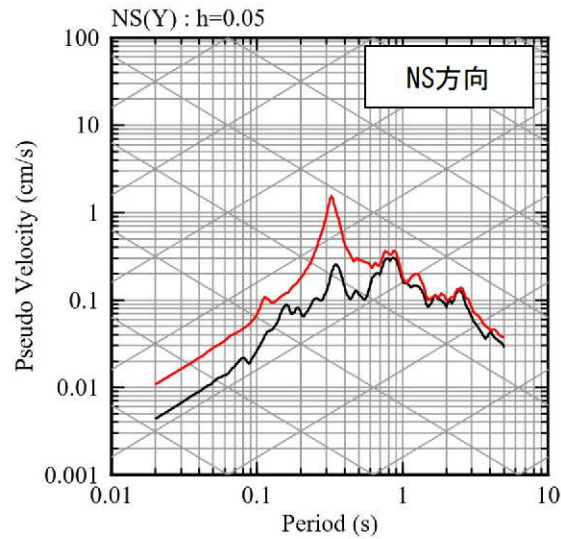
⑯ 熊本県熊本地方



4.2 地下構造モデルの適用性確認

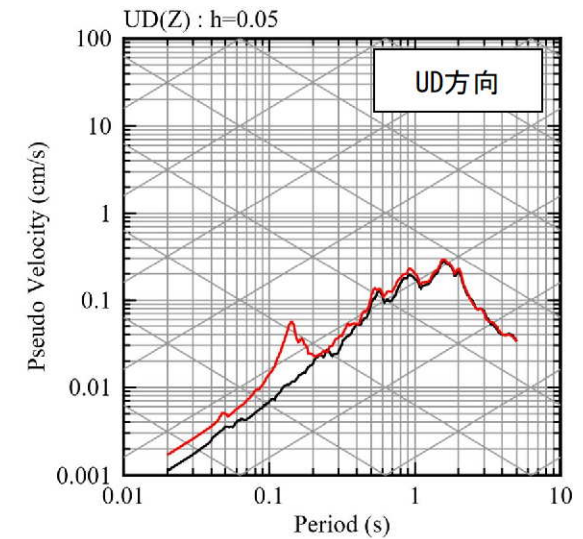
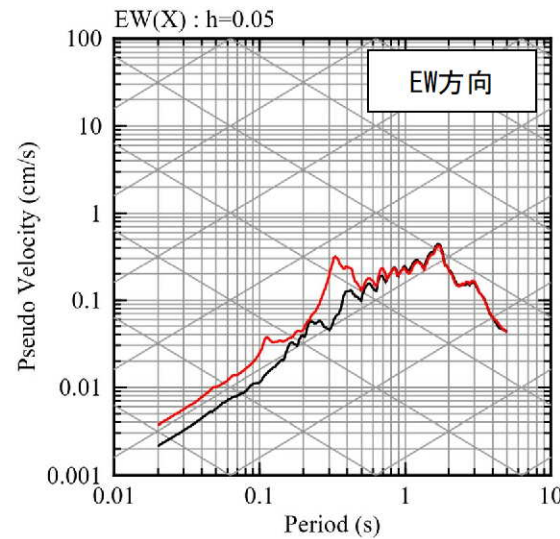
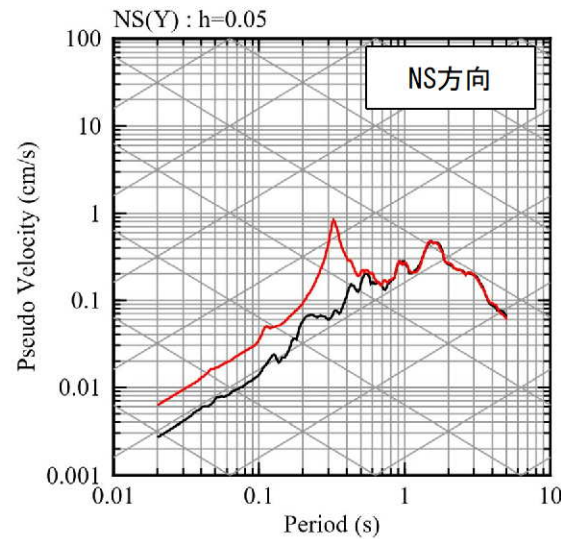
■ 応答スペクトルの比較結果 (9/10)

⑰ 熊本県熊本地方



— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(既許可モデル)

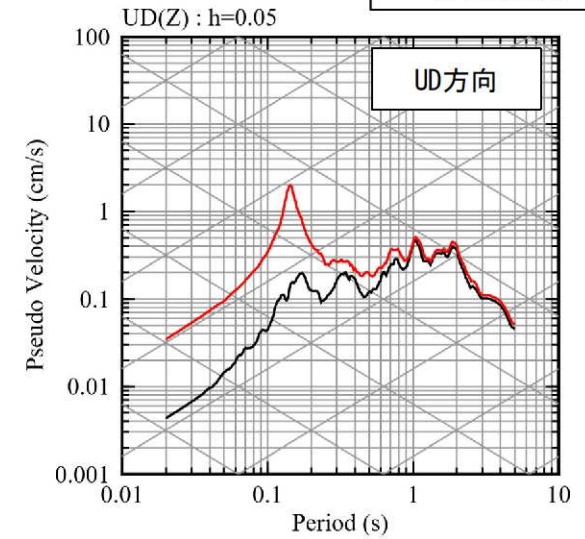
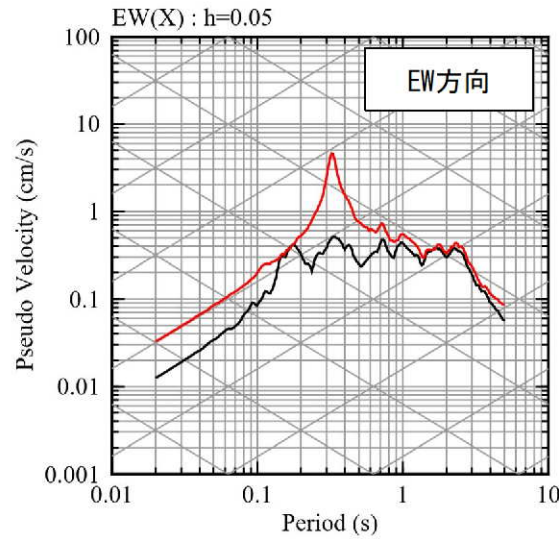
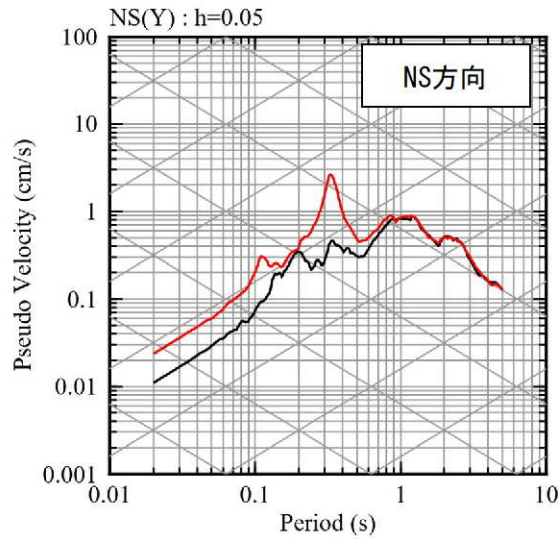
⑱ 熊本県阿蘇地方



4.2 地下構造モデルの適用性確認

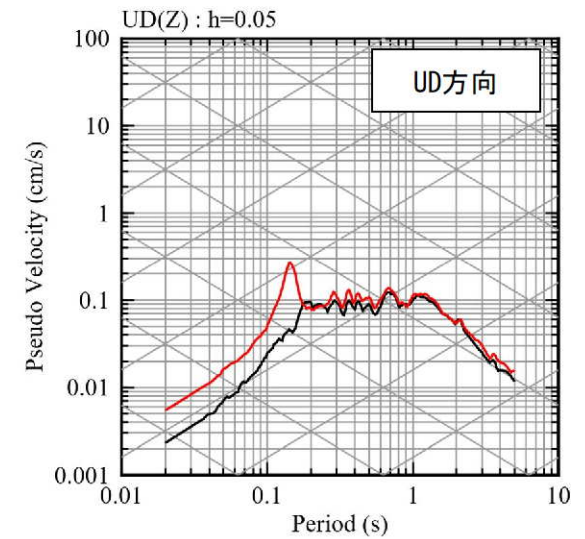
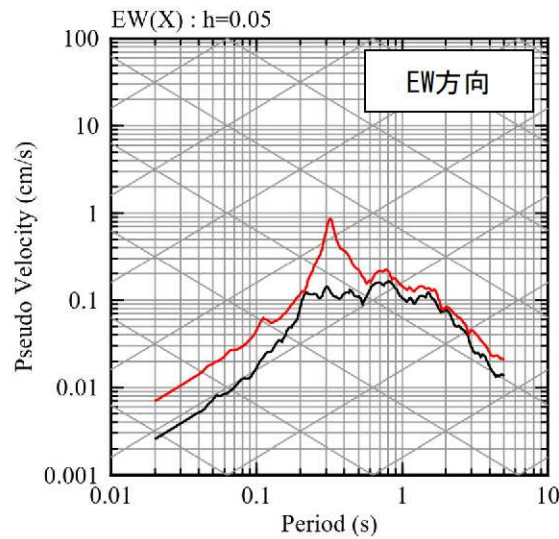
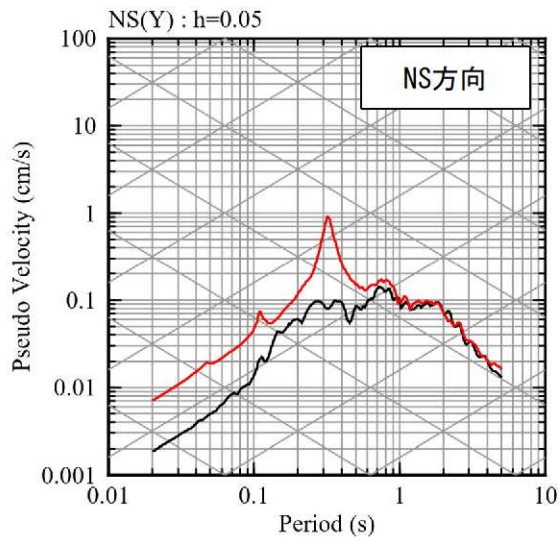
■ 応答スペクトルの比較結果 (10/10)

①9 熊本県熊本地方



— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(既許可モデル)

②0 薩摩半島西方沖



4.3 まとめ

■ まとめ

- 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は、既許可モデルを用いる。
 - 今回、既許可モデルは、長周期帯に限定したものではないことを確認し、短周期から長周期までの全ての周期帯の地震動評価に用いる。
- 標準応答スペクトルは地震基盤相当面 ($V_s=2200\text{m/s}$ 以上の層) で定義されることから、既許可モデルの $V_s=3010\text{m/s}$ の層上面 (EL. -1018.5m) に地震基盤相当面を設定する。
- 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照らしても、長周期帯だけでなく、短周期帯についても保守性の観点から適用できることを確認した。
 - 地震観測記録の応答スペクトルによる適用性の確認
 - 解放基盤表面 (EL. -18.5m) からEL. -118.5mの範囲について、既許可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。
 - 短周期側では大きな保守性を有する。

5. 今後の取り組み

- 以上の通り、経過措置期限を考慮し、迅速に標準応答スペクトルを考慮した評価を行い安全裕度の向上を図るべきとの観点に立ち、標準応答スペクトルを考慮した地震動評価では既許可モデルを用いることとした。

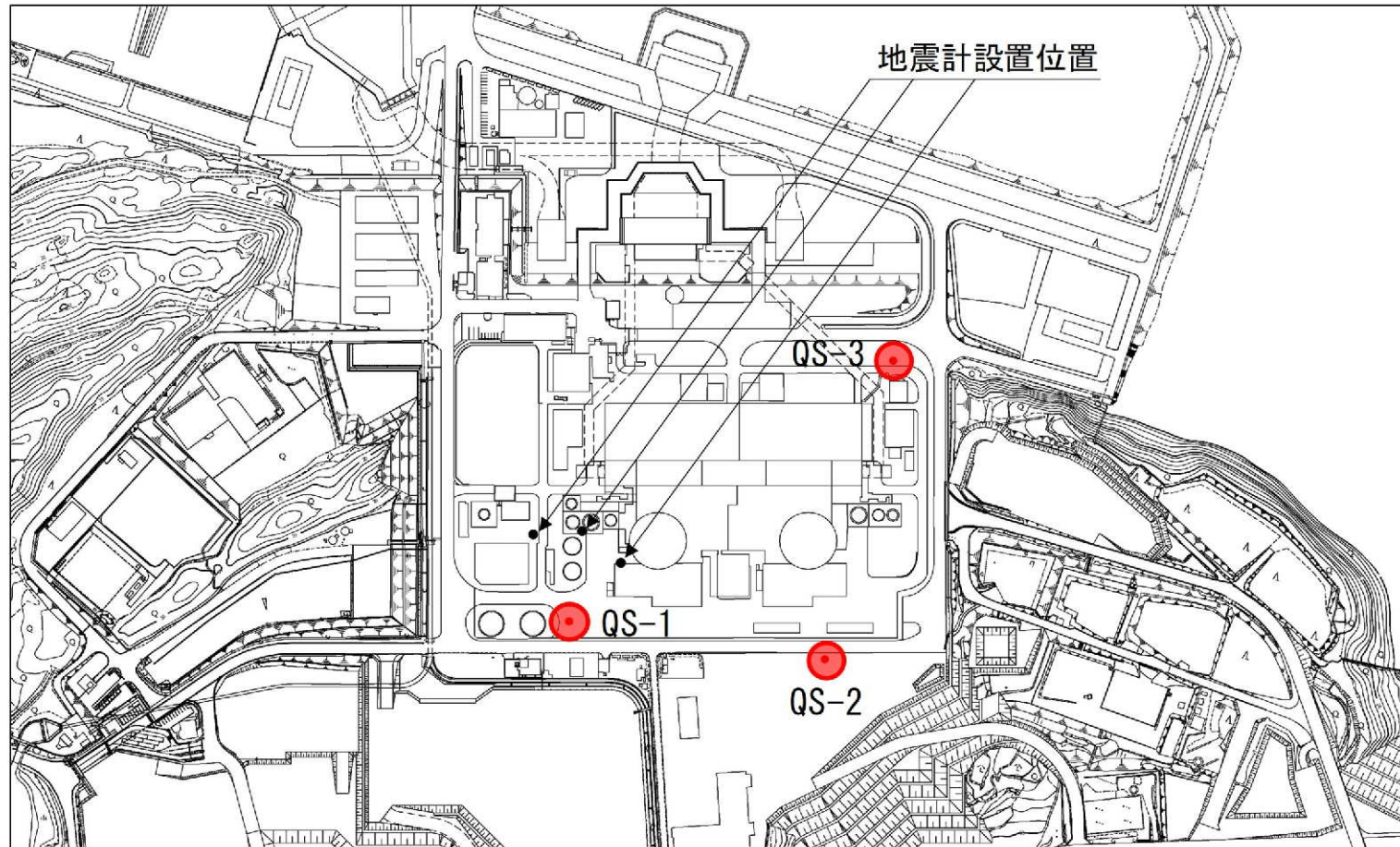
- 今後も、更なる安全性・信頼性の向上を図ることを目的に、最新の技術的知見の収集・分析・評価を実施する。
 - 広域地震観測〔継続〕
 - 敷地内地下構造の把握
 - ・ 敷地内鉛直アレイ地震観測〔継続〕
 - ・ 減衰測定に用いたボーリング孔における地震計増設（EL. -200m）
 - ・ 大深度ボーリング及び地下深部の地震観測の実施についても検討

【補足①】 ボーリング孔内減衰測定結果

【補足①】 ボーリング孔内減衰測定結果

■ 追加ボーリング調査位置

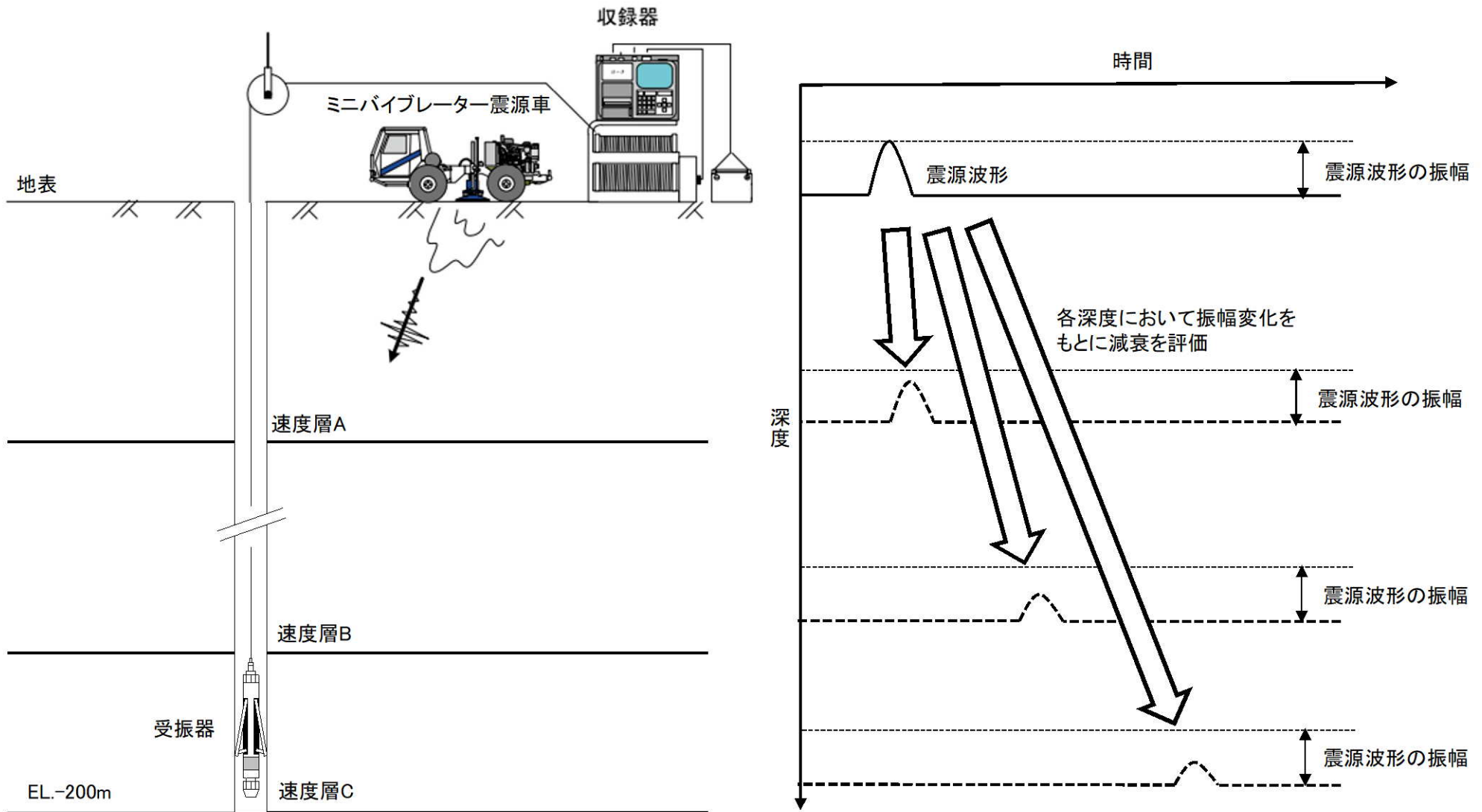
- 発電所構内において、EL. -200mまでの追加ボーリング調査を3箇所を実施し、地盤減衰（Q値）を測定。



【補足①】ボーリング孔内減衰測定結果

■ ボーリング孔内における減衰測定^{4), 5)}

- 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⁴⁾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⁵⁾する。（参考④）



減衰評価イメージ図

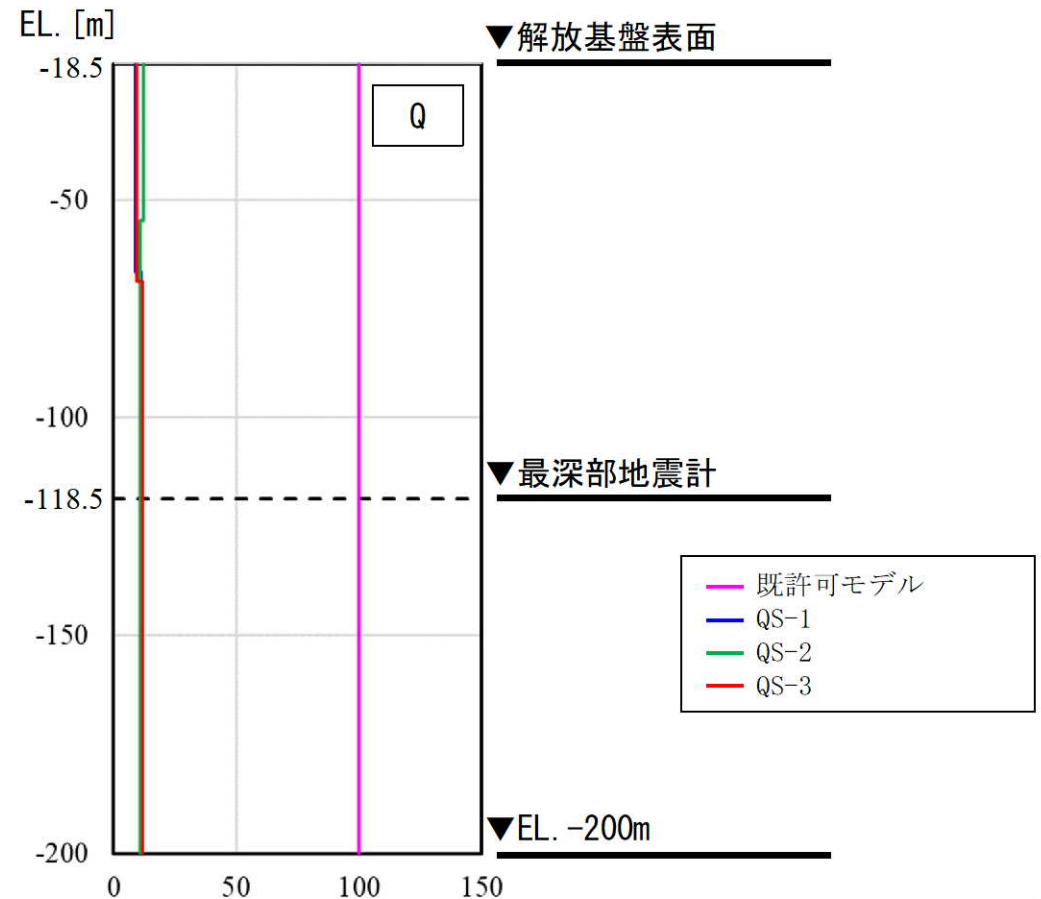
【補足①】ボーリング孔内減衰測定結果

■ ボーリング孔内における減衰測定の結果

- EL. -118.5mからEL. -200mの範囲の地盤減衰（Q値）について、既許可モデル（Q=100）は、QS-1孔からQS-3孔までのQ値（10.6～11.8）を大きく上回り、大きな保守性を有する。

孔名	EL. (m)	卓越周波数 (Hz)	Q値	減衰定数 h (%)
QS-1	-18.5 ~ -66.5	24	9.0	5.6
	-66.5 ~ -200.0	24	11.4	4.4
QS-2	-18.5 ~ -54.5	29	12.2	4.1
	-54.5 ~ -200.0	33	10.6	4.7
QS-3	-18.5 ~ -68.5	32	9.3	5.4
	-68.5 ~ -200.0	28	11.8	4.2

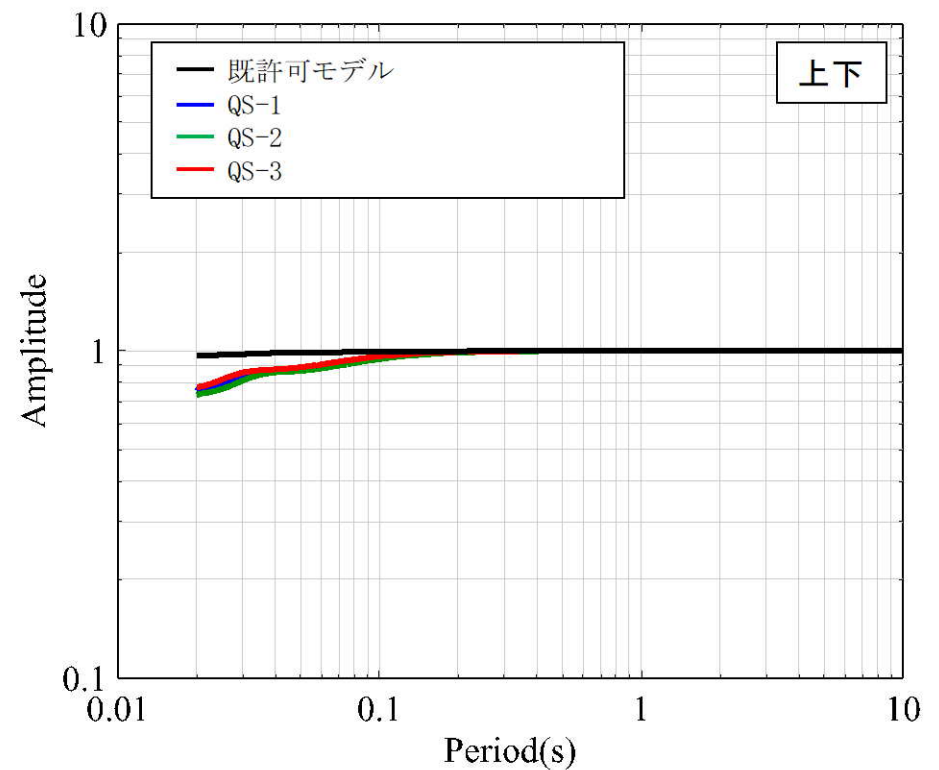
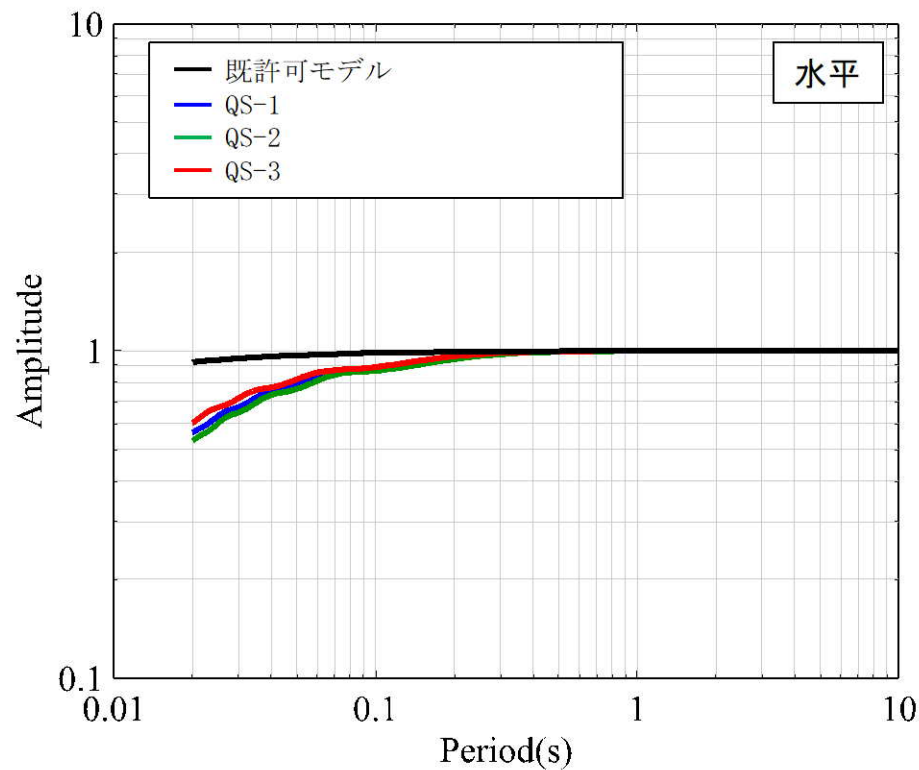
※ 調査結果は解放基盤以深からEL.-200mに範囲を統一したものを記載



【補足①】 ボーリング孔内減衰測定結果

■ ボーリング孔内減衰測定結果による伝達関数の比較結果

- EL. -118.5mからEL. -200mの範囲の伝達関数について、既許可モデルは、QS-1孔からQS-3孔までの伝達関数に対して、短周期から長周期までの全ての周期帯において同等もしくは上回り、短周期側では大きな保守性を有する。



伝達関数の比較 (EL. -118.5m /EL. -200m)

【補足①】ボーリング孔内減衰測定結果

■ 伝達関数の比較に用いた物性値について

- 前頁の伝達関数の比較に用いた物性値は下記の通り。Vs、Vpについては各孔のPS検層結果を用いた。

最深部地震計 ▼ (EL. -118.5m)	既許可モデル			QS-1孔			QS-2孔			QS-3孔		
	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
	1600	3700	100	1930	4010	11.4	1880	3760	10.6	2170	4320	11.8
▼ (EL. -200m)	1600	3700	100	1930	4010	100	1880	3760	100	2170	4320	100

【参考①】 速度構造の見直しに係る経緯について

【参考①】速度構造の見直しに係る経緯について

- 現申請モデルに対するコメントを踏まえ、地震観測記録の応答スペクトルによる確認における観測記録との整合性を改善するため、速度構造の見直しの検討を実施した。
- その結果、水平方向の周期0.1秒から0.2秒における観測記録との整合性が改善する傾向が見られた。（42頁、参考②）
- 一方で、地下深部の速度構造については、地震観測記録やPS検層による直接的な地盤物性のデータがない。（43頁）



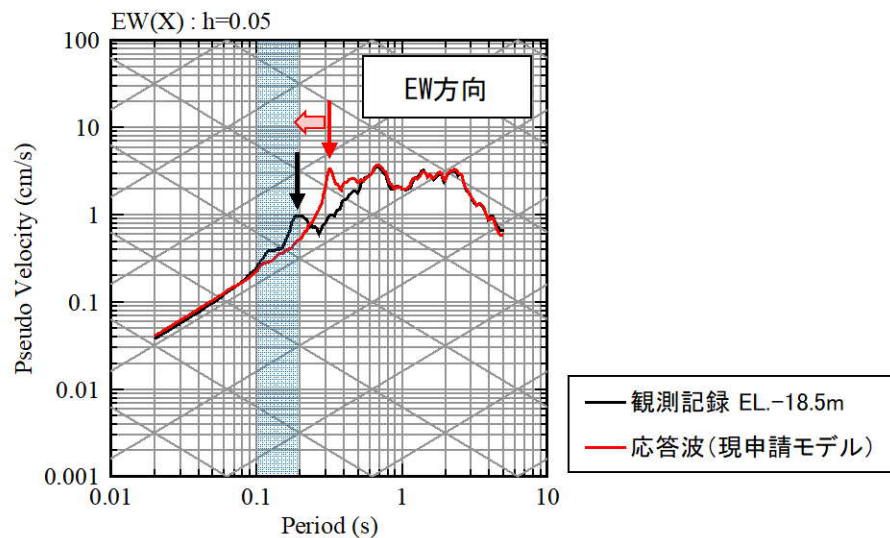
以上を踏まえ、経過措置期限を考慮し、迅速に標準応答スペクトルを考慮した評価を行い安全裕度の向上を図るべきとの観点に立ち、既許可モデルを用いる方針とする。

【参考①】速度構造の見直しに係る経緯について

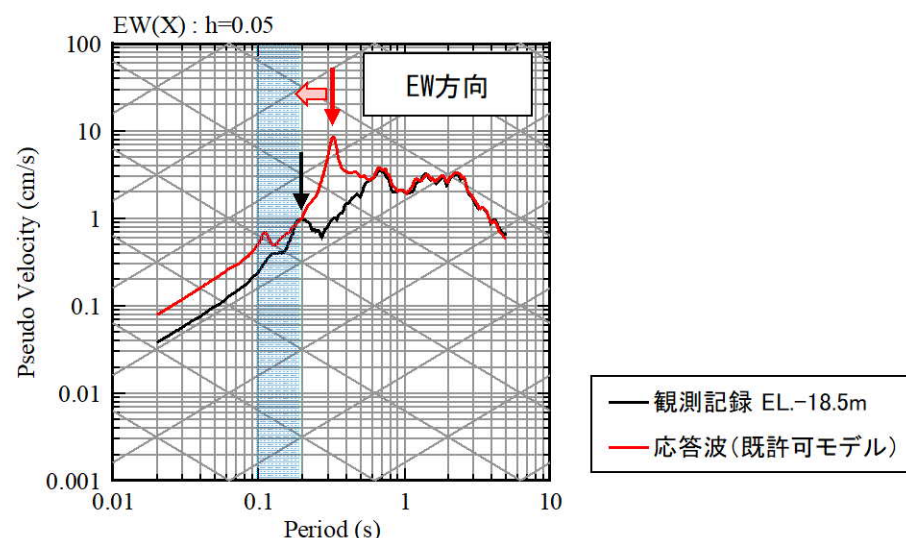
速度構造を見直したモデルの設定 (1/2)

- 観測記録の応答スペクトルでは水平方向の周期0.1秒から0.2秒にピークが見られるのに対し、速度構造が同じである現申請モデル及び既許可モデルの応答波の応答スペクトルでは周期0.3秒から0.4秒にピークが見られ、両者のピークの周期がずれている。
- このピークの周期のずれは、速度構造に起因すると考えられ、ピークを合わせるためには、地下構造モデルの速度を速くする必要がある。既許可時から得られている以下を参照し、速度構造の見直しを検討。
 - 2号炉心位置周辺におけるPS検層結果（建設時の地質調査結果）では、解放基盤表面付近のせん断波速度は $V_s=2150\text{m/s}$ である。（44頁）
 - PS検層結果に基づく速度層断面では、炉心位置周辺のせん断波速度は $V_s=2050\text{m/s}$ である。（45頁～47頁）
- 以上を踏まえ、次頁のとおり、速度構造を見直したモデル（以下、見直しモデル）を設定。

〔①〕熊本県熊本地方（2016年熊本地震本震）の例



現申請モデル



既許可モデル

【参考①】速度構造の見直しに係る経緯について

速度構造を見直したモデルの設定 (2/2)

- EL. -28.5m~EL. -200mのVsについては、炉心位置周辺におけるPS検層結果（建設時の地質調査結果）を踏まえ、Vs=2150m/sと設定。EL. -200m~EL. -480mのVsについては、上下層の速度を参照してVs=2150m/sと設定。
- EL. -28.5m~EL. -480mのVpについては、炉心位置周辺におけるPS検層結果（建設時の地質調査結果）のVp=4250m/s、PS検層結果に基づく速度層断面のVp=4330m/s、及びEL. -480m以深の微動アレイの速度構造のVp=4400m/sを基に、Vs=2150m/sの範囲は同じVpの値となるようVp=4400m/sと設定。

なお、地下深部（EL.-200mからEL.-480mまで）の速度構造について、地震観測記録やPS検層による直接的な地盤物性のデータがない。

(現申請モデル)

(速度構造を見直したモデル)

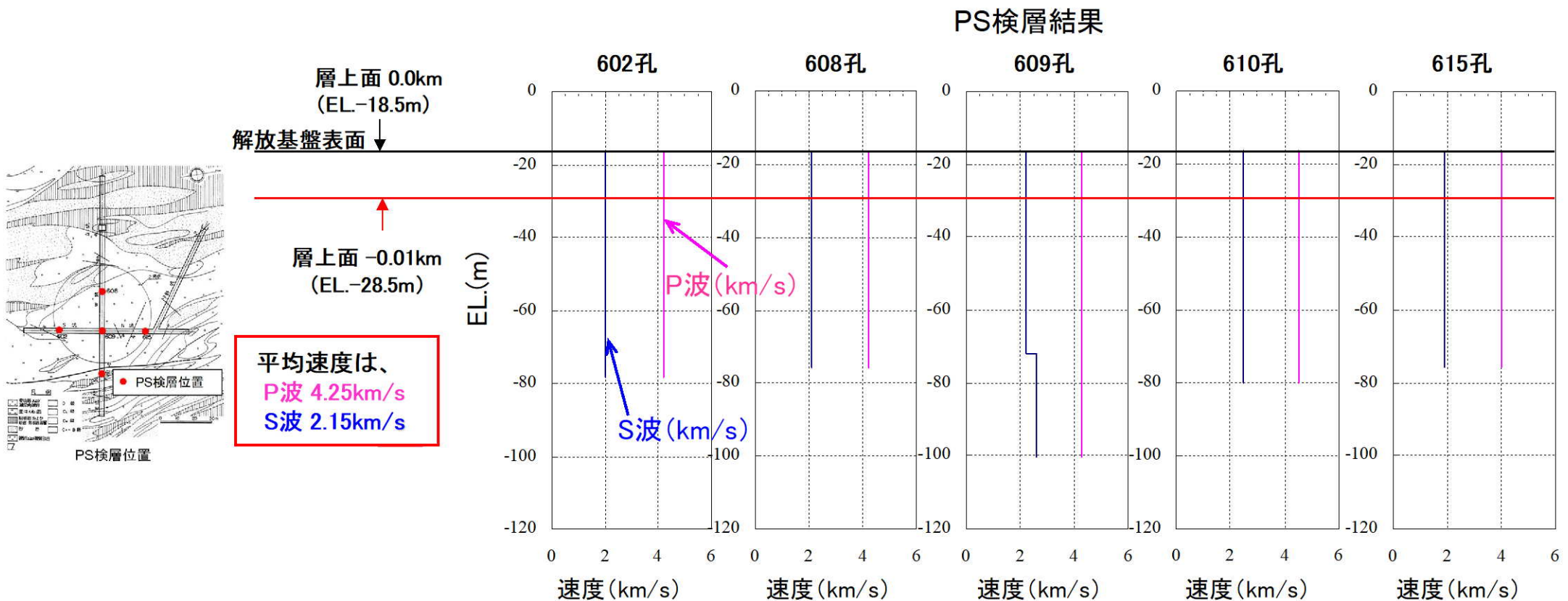
EL.	層上面 (km)	密度 ρ (g/cm ³)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値	設定根拠 (Vs、Vp)	密度 ρ (g/cm ³)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値	設定根拠 (Vs、Vp)	
解放基盤表面	-18.5m	0.0	2.70	1500	3200	12.5	試掘坑内弾性波試験	2.70	1500	3200	12.5	試掘坑内弾性波試験
-28.5m	-0.01	2.70	1600	3700	12.5	鉛直アレイ及び微動アレイの速度構造を基に設定	2.70	2150	4400	12.5	PS検層結果を基に設定	
-200m	-0.182	2.70	1600	3700	100	微動アレイの速度構造を基に設定	2.70	2150	4400	100	上下層の速度を基に設定	
-480m	-0.462	2.70	2150	4400	200	微動アレイの速度構造を基に設定	2.70	2150	4400	200	微動アレイの速度構造を基に設定	
-1018.5m	-1.0	2.70	3010	5200	200	宮腰ほか（2004）	2.70	3010	5200	200	宮腰ほか（2004）	

【参考①】速度構造の見直しに係る経緯について

建設時のPS検層結果

- 2号炉心位置周辺におけるPS検層結果（建設時の地質調査結果）では、解放基盤表面付近で $V_s=2150\text{m/s}$ 、 $V_p=4250\text{m/s}$ である。

第18回審査会合資料より抜粋



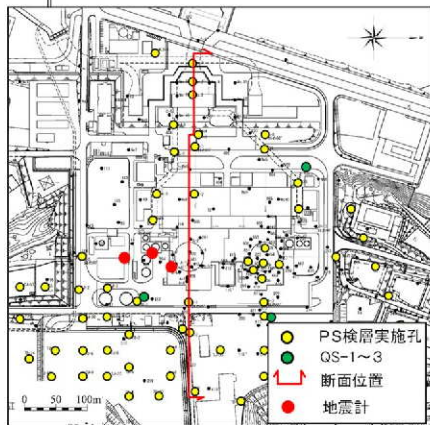
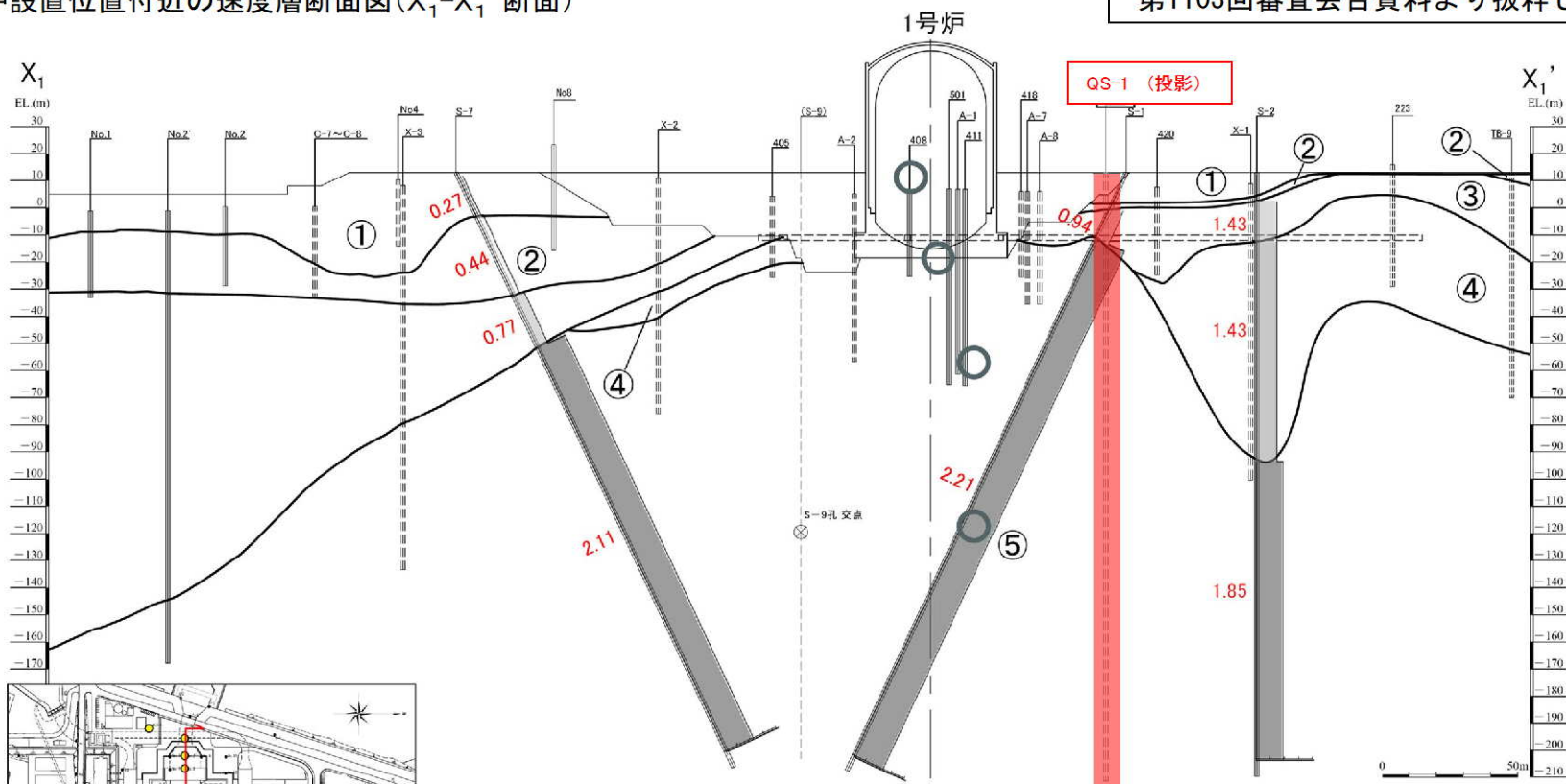
【参考①】速度構造の見直しに係る経緯について

PS検層結果に基づく速度層断面 (1/3)

– PS検層結果に基づく速度層断面では、解放基盤表面 (EL. -18.5m) 以深の原子炉建屋直下及び地震計位置で $V_s=2050\text{m/s}$ 、 $V_p=4330\text{m/s}$ である。

原子炉設置位置付近の速度層断面図 (X_1-X_1' 断面)

第1103回審査会合資料より抜粋し一部追記※



速度層区分	S波速度 V_s (km/s)	P波速度 V_p (km/s)
①	0.28	1.17
②	0.52	1.86
③	0.90	2.51
④	1.37	3.40
⑤	2.05	4.33

○ 地震計設置位置 (投影)

※第1103回会合資料の抜粋に、試掘坑位置、各速度層区分のP波速度、追加ボーリング位置 (QS-1~3) 及び地震計設置位置を追記

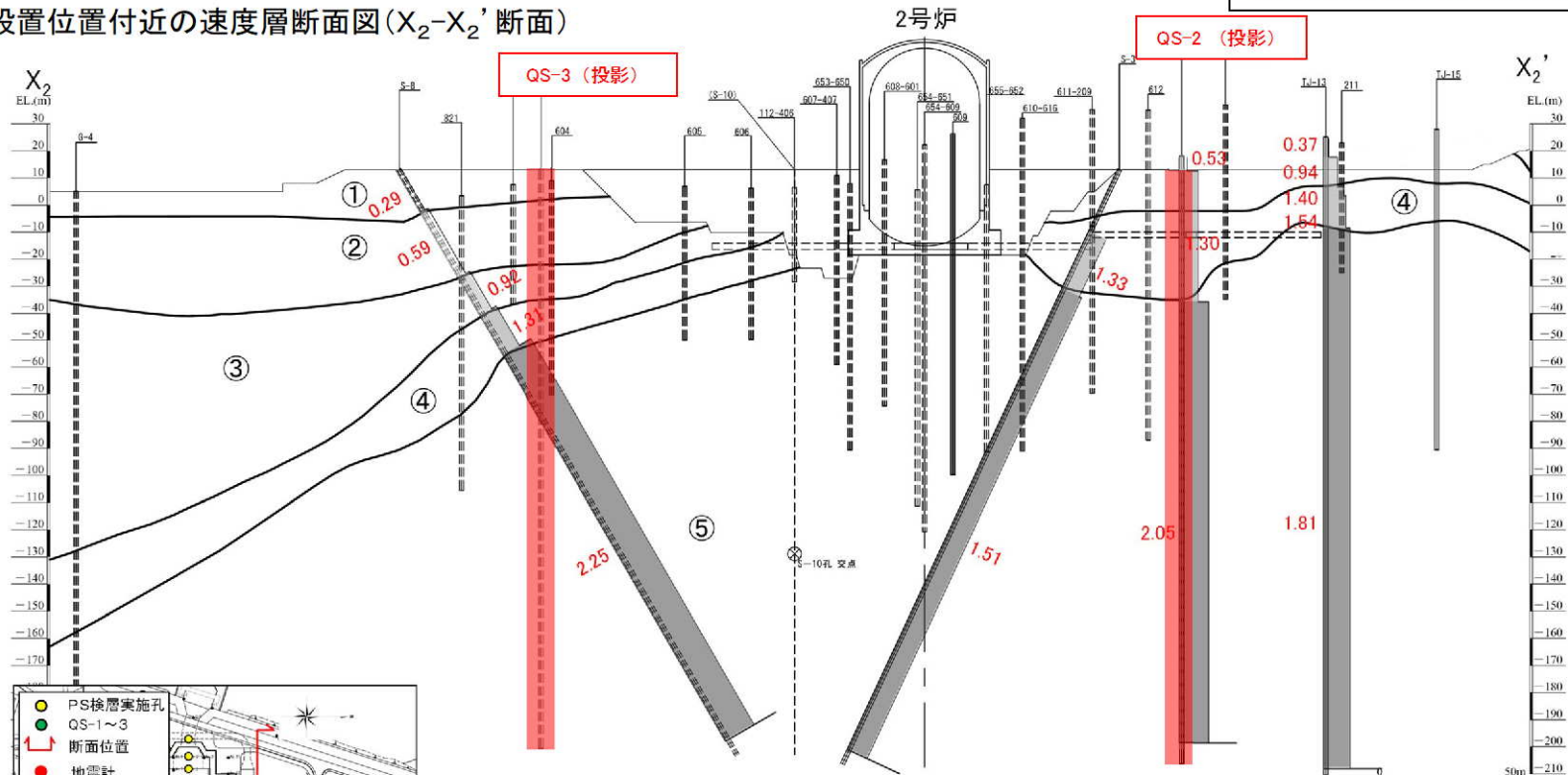
【参考①】速度構造の見直しに係る経緯について

PS検層結果に基づく速度層断面 (2/3)

- PS検層結果に基づく速度層断面では、解放基盤表面 (EL. -18.5m) 以深の原子炉建屋直下及び地震計位置で $V_s=2050\text{m/s}$ 、 $V_p=4330\text{m/s}$ である。

原子炉設置位置付近の速度層断面図 (X_2-X_2' 断面)

第1103回審査会合資料より抜粋し一部追記※



速度層区分	S波速度Vs (km/s)	P波速度Vp (km/s)
①	0.28	1.17
②	0.52	1.86
③	0.90	2.51
④	1.37	3.40
⑤	2.05	4.33

※第1103回会合資料の抜粋に、試掘坑位置、各速度層区分のP波速度、追加ボーリング位置 (QS-1~3) 及び地震計設置位置を追記

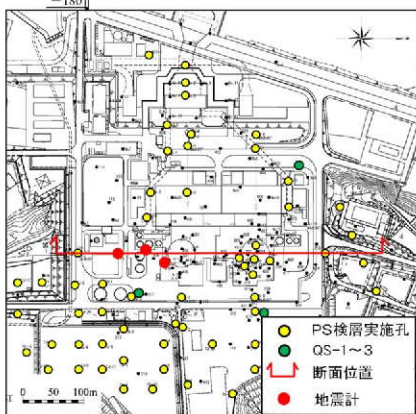
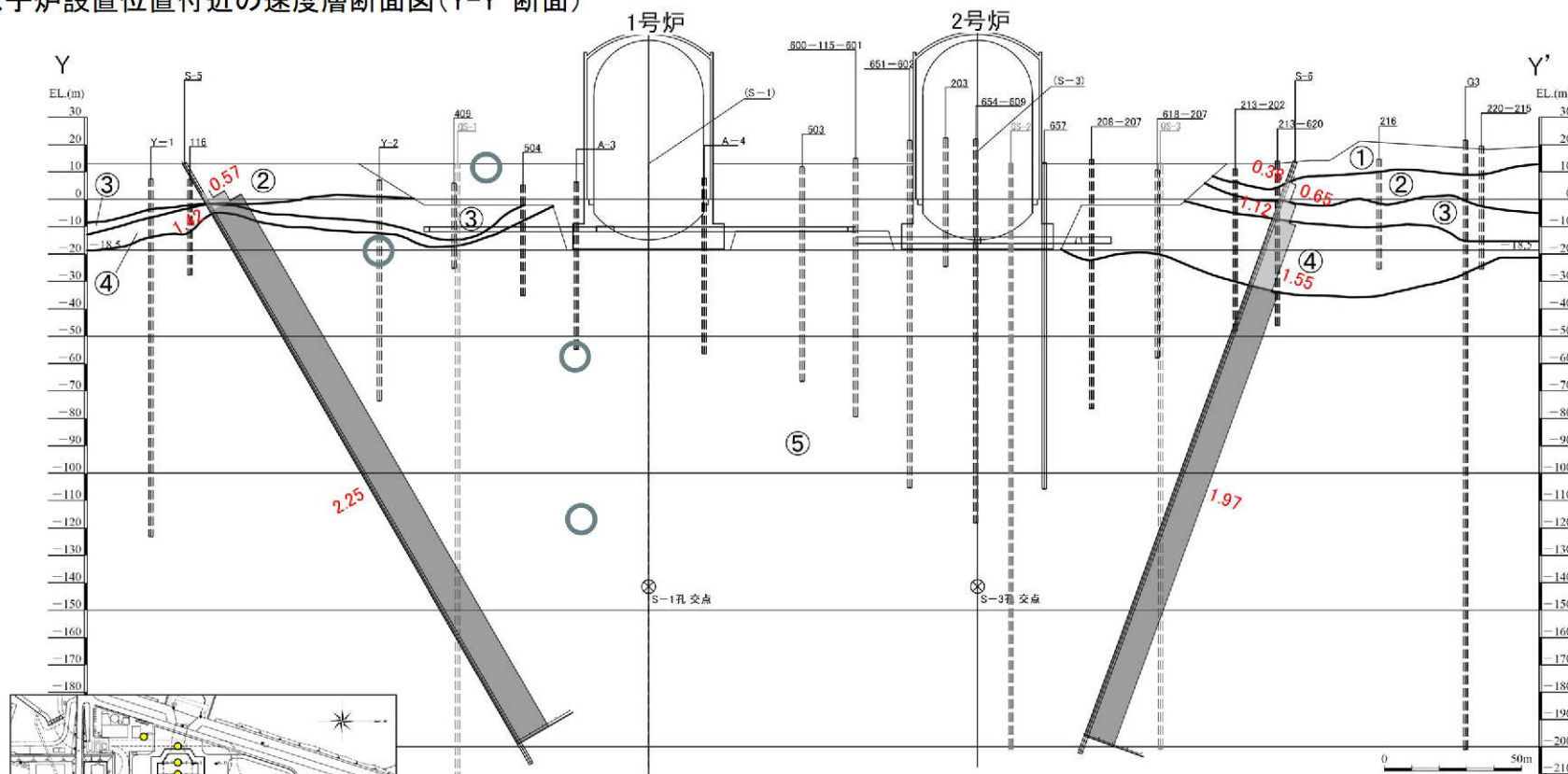
【参考①】速度構造の見直しに係る経緯について

PS検層結果に基づく速度層断面 (3/3)

- PS検層結果に基づく速度層断面では、解放基盤表面 (EL. -18.5m) 以深の原子炉建屋直下及び地震計位置で $V_s=2050\text{m/s}$ 、 $V_p=4330\text{m/s}$ である。

第1103回審査会合資料より抜粋し一部追記※

原子炉設置位置付近の速度層断面図(Y-Y'断面)



速度層区分	S波速度Vs (km/s)	P波速度Vp (km/s)
①	0.28	1.17
②	0.52	1.86
③	0.90	2.51
④	1.37	3.40
⑤	2.05	4.33

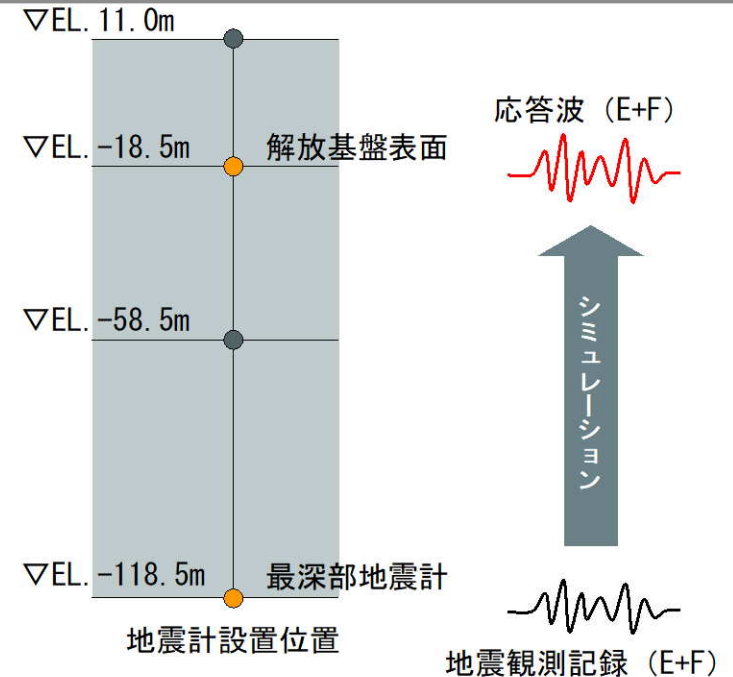
○ 地震計設置位置(投影)

※第1103回会合資料の抜粋に、各速度層のP波速度、追加ボーリング位置(QS-1~3)及び地震計設置位置を追記

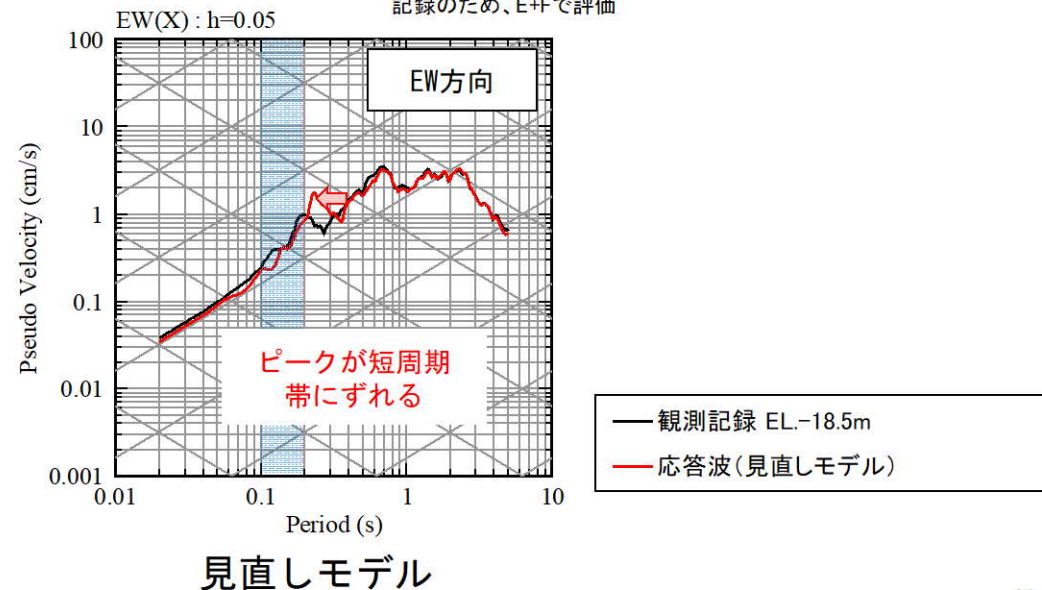
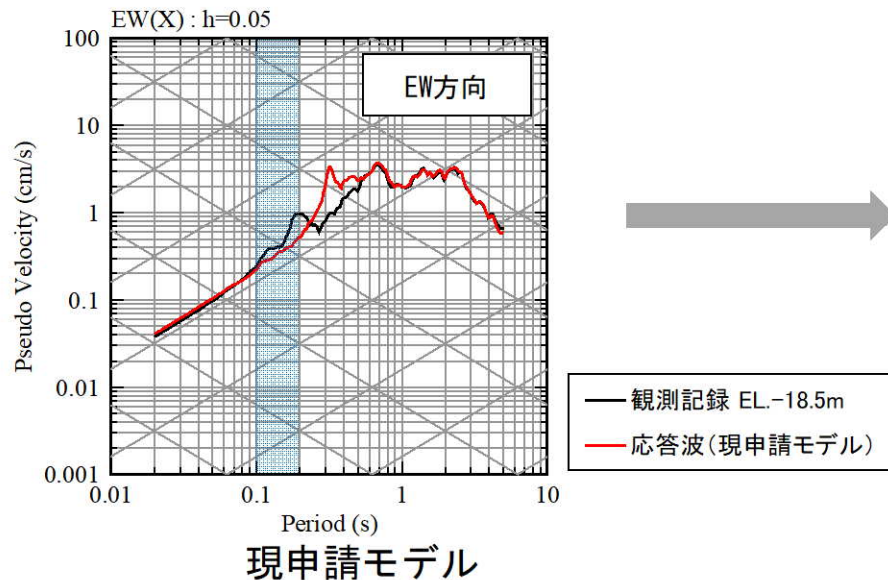
【参考①】速度構造の見直しに係る経緯について

速度構造を見直したモデルによる観測記録との整合性確認

- 速度構造を見直したモデル（43頁）を用いて、最深部地震計（EL. -118.5m）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. -18.5m） ※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。
- 見直しモデルは、現申請モデルに比べて速度を速くすることにより、現申請モデルの応答波に見られる0.3秒から0.4秒のピークが短周期帯にずれることから、周期0.1秒から0.2秒において、観測記録との整合性が改善されるものの、既許可モデルと同程度。（参考②）



〔①〕熊本県熊本地方（2016年熊本地震本震）の例



※入力の最深部地震計(EL.-118.5m)で得られた地震観測記録及び出力の解放基盤表面(EL.-18.5m)での応答波は地中記録のため、E+Fで評価

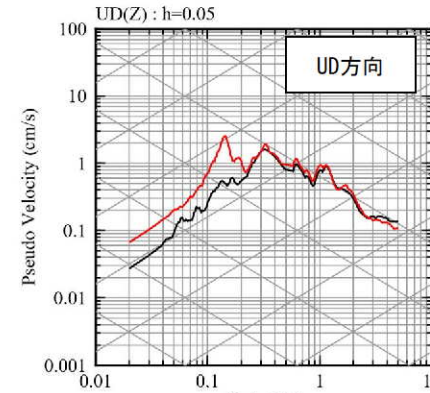
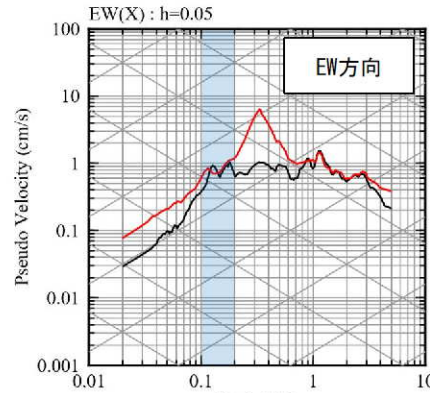
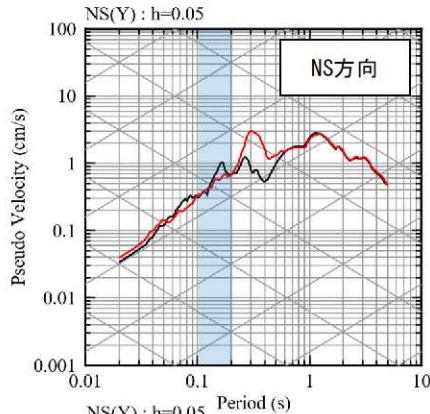
【参考②】 応答スペクトルの比較結果

【参考②】 応答スペクトルの比較結果

■ 応答スペクトルの比較結果 (1/20)

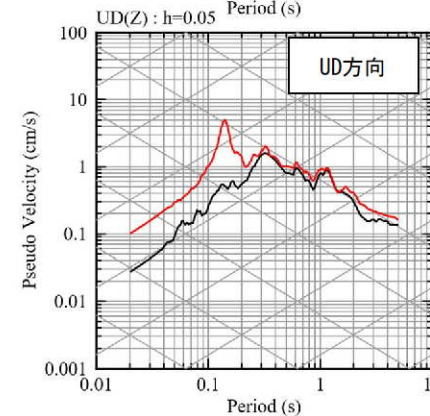
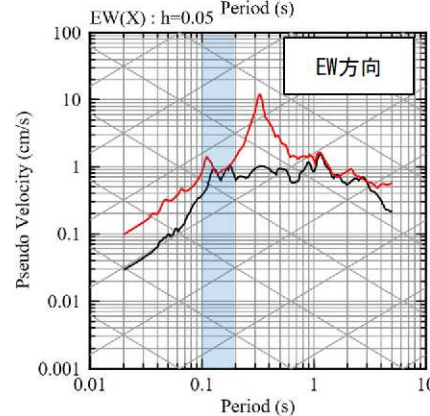
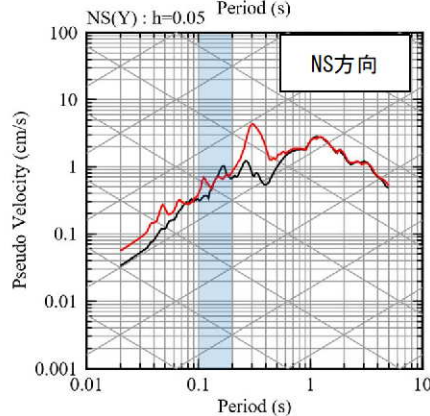
①九州西側海域

現申請モデル



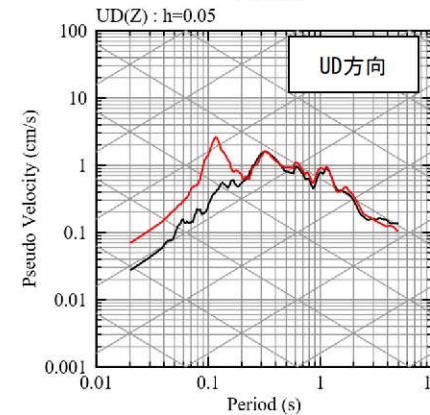
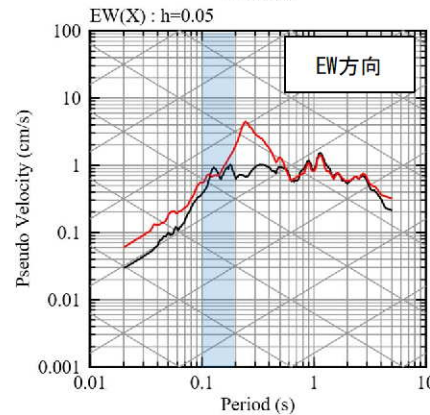
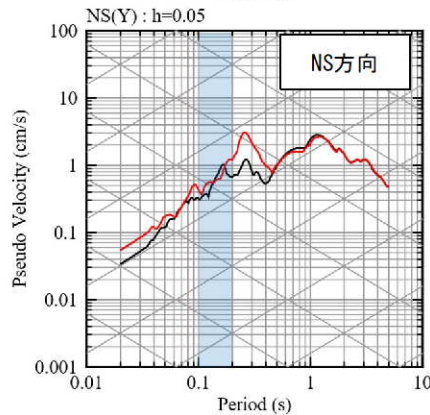
— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波 (現申請モデル)

既許可モデル



— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波 (既許可モデル)

見直しモデル



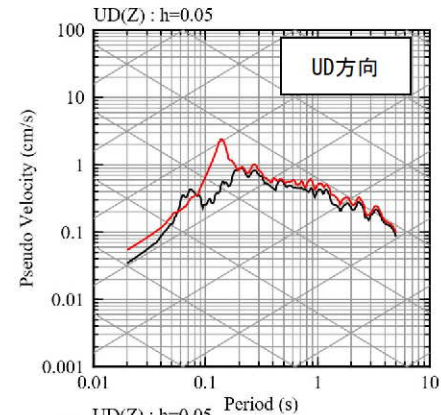
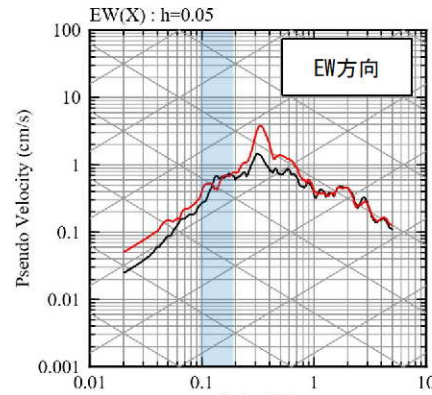
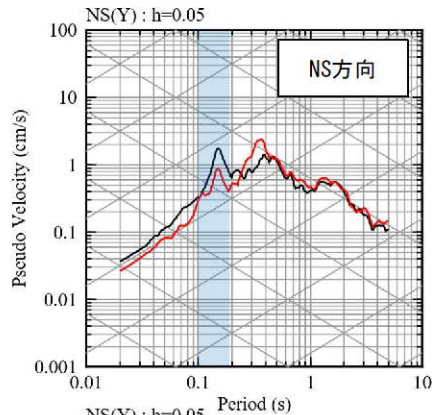
— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波 (見直しモデル)

【参考②】 応答スペクトルの比較結果

■ 応答スペクトルの比較結果 (2/20)

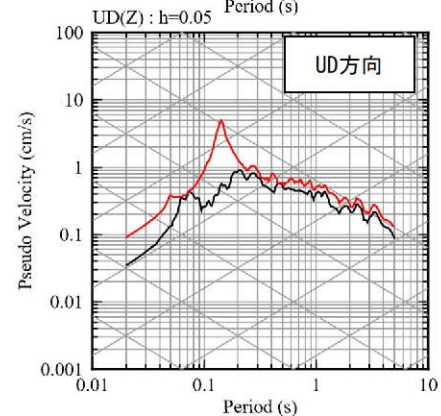
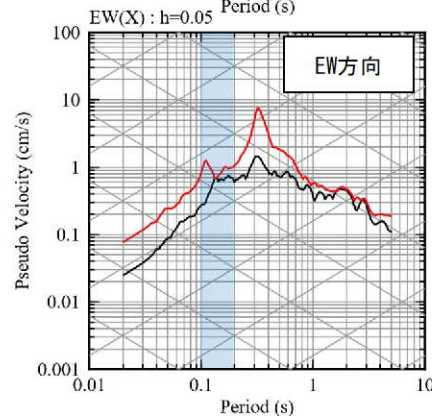
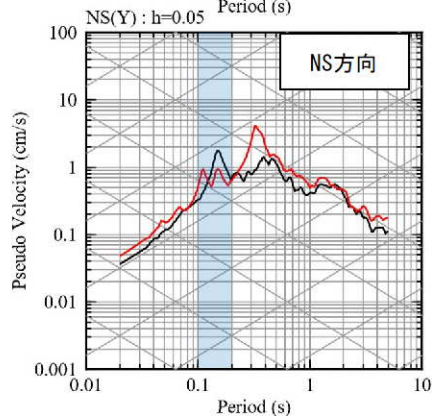
② 鹿児島県北西部

現申請モデル



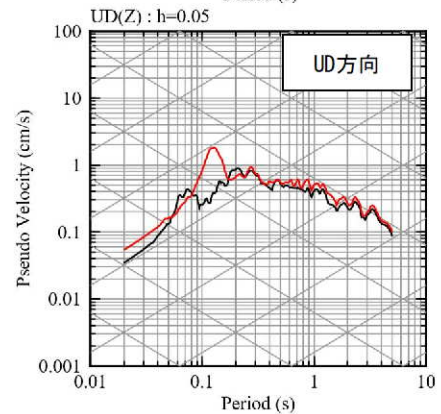
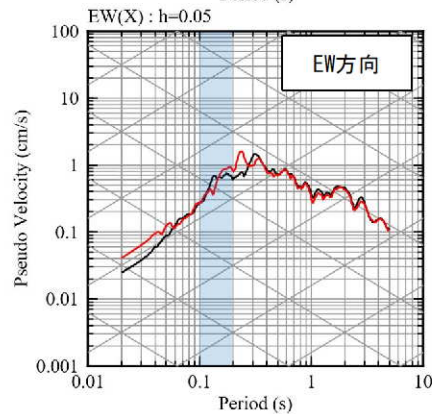
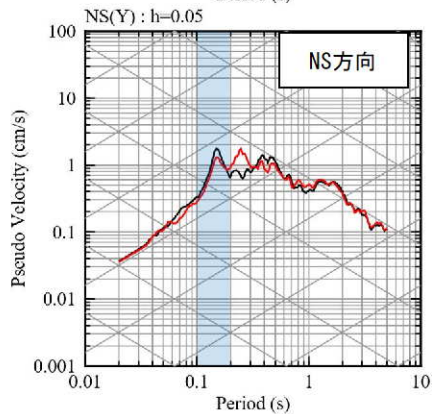
— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(現申請モデル)

既許可モデル



— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(既許可モデル)

見直しモデル



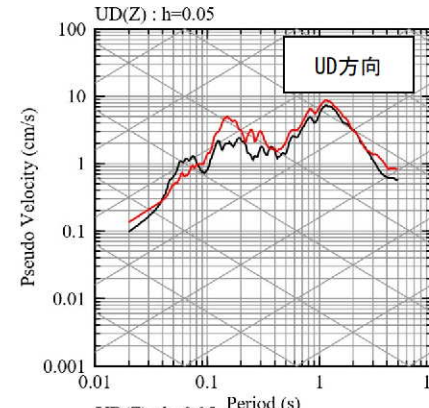
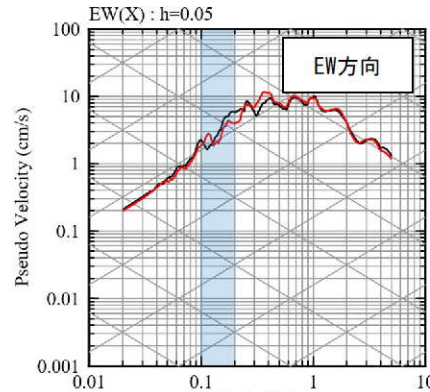
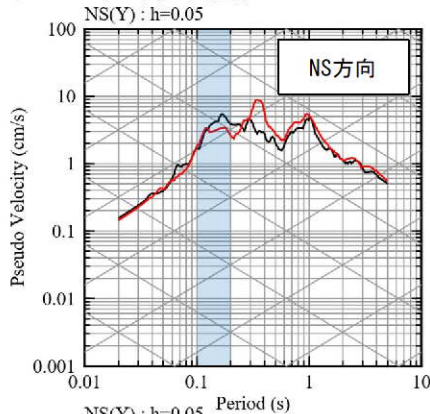
— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(見直しモデル)

【参考②】 応答スペクトルの比較結果

■ 応答スペクトルの比較結果 (3/20)

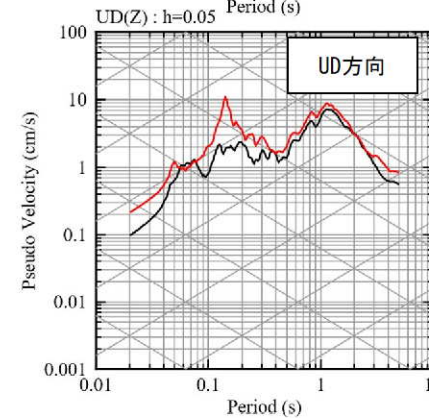
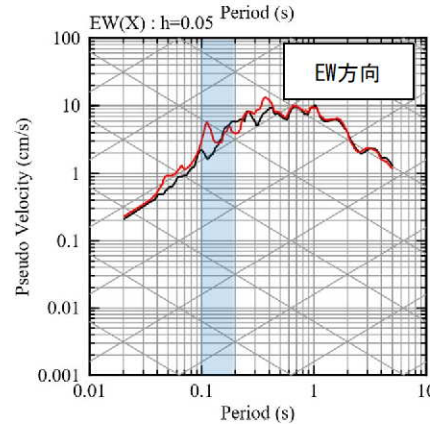
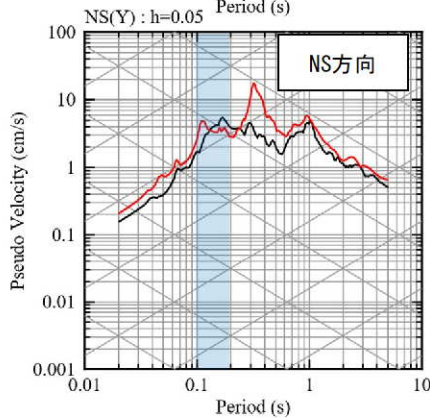
③ 鹿児島県北西部 (1997年3月本震)

現申請モデル



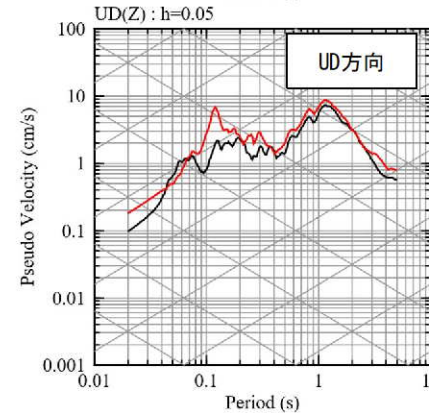
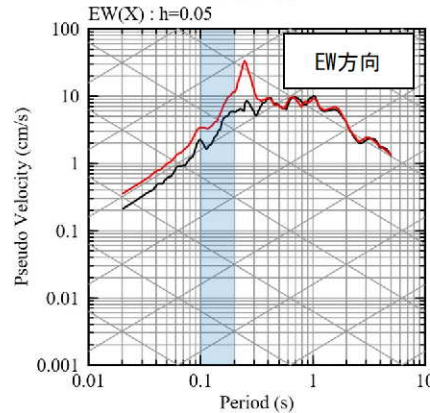
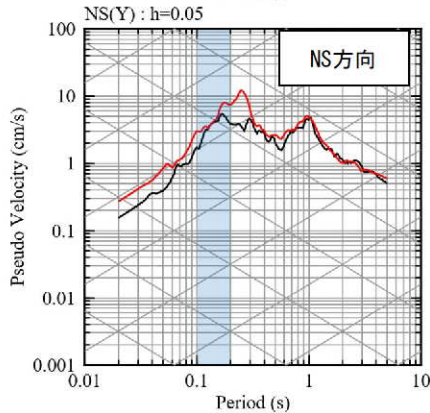
— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波 (現申請モデル)

既許可モデル



— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波 (既許可モデル)

見直しモデル



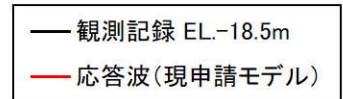
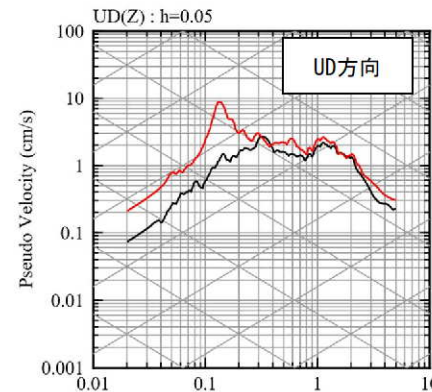
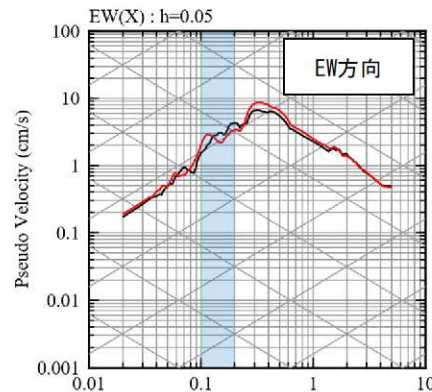
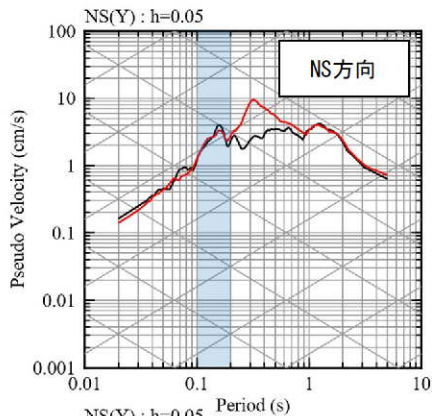
— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波 (見直しモデル)

【参考②】 応答スペクトルの比較結果

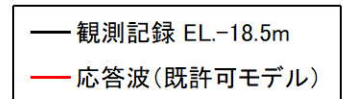
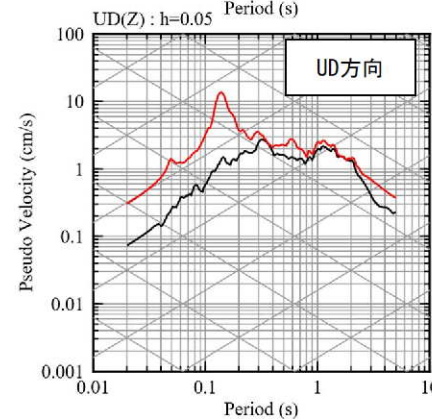
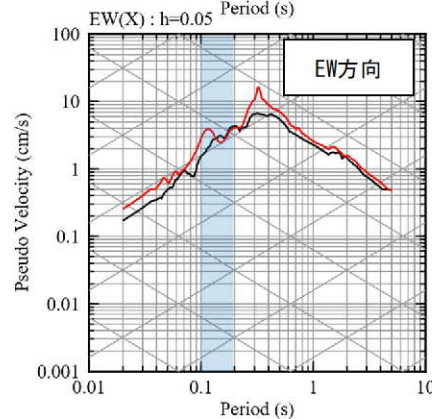
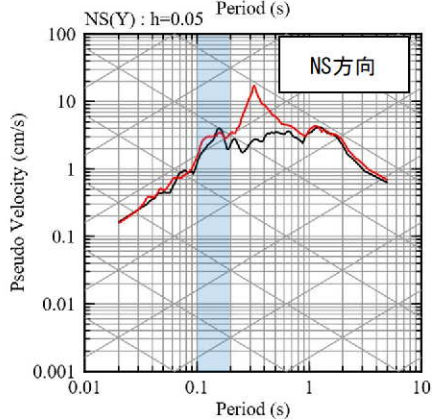
■ 応答スペクトルの比較結果 (4/20)

④ 鹿児島県北西部

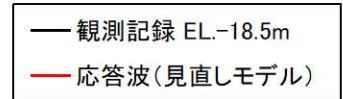
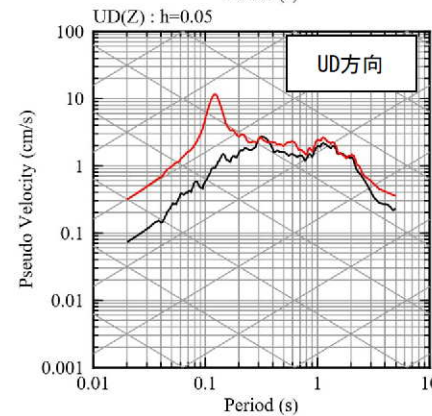
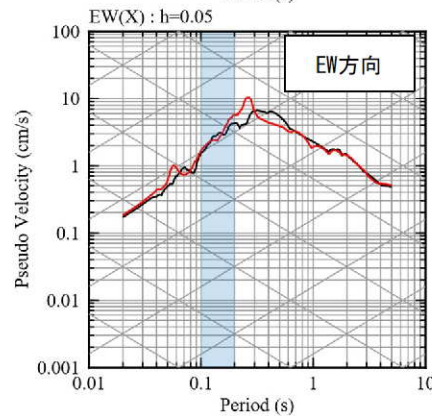
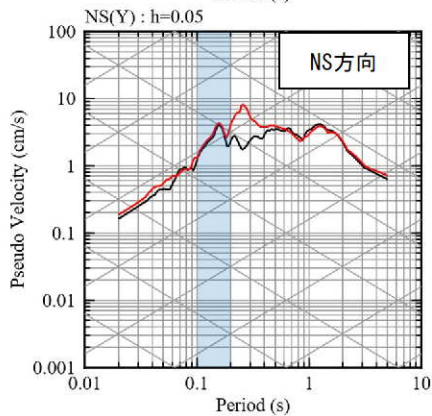
現申請モデル



既許可モデル



見直しモデル

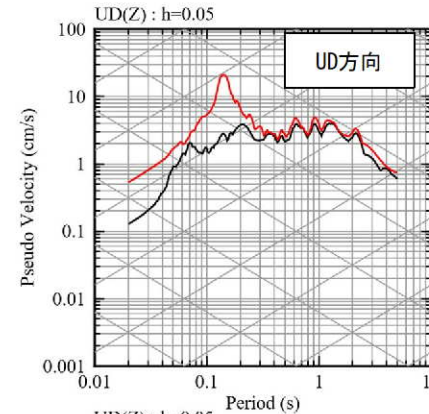
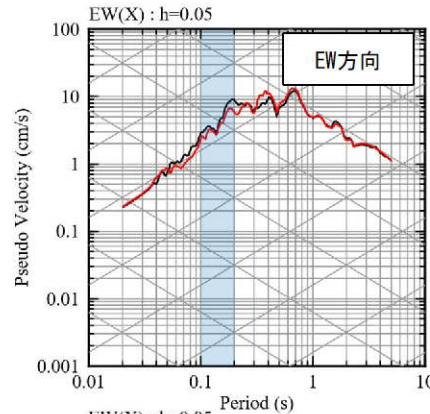
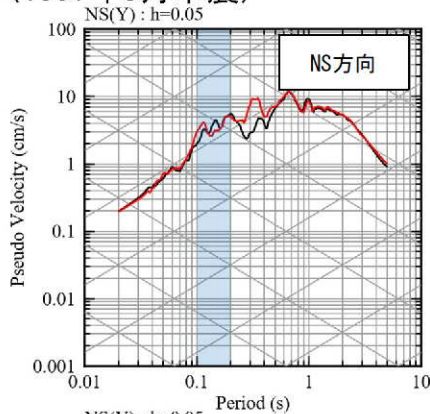


【参考②】 応答スペクトルの比較結果

■ 応答スペクトルの比較結果 (5/20)

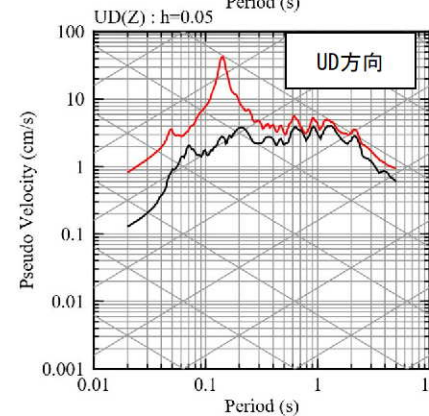
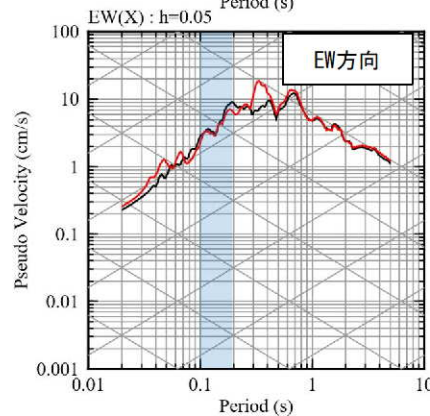
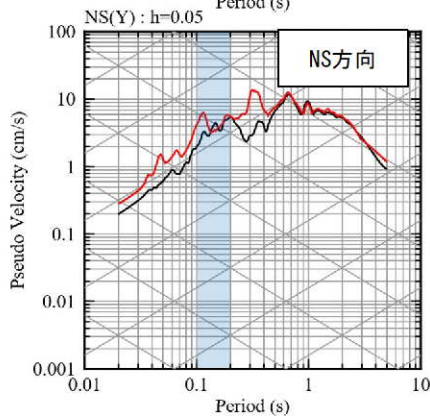
⑤ 鹿児島県北西部 (1997年5月本震)

現申請モデル



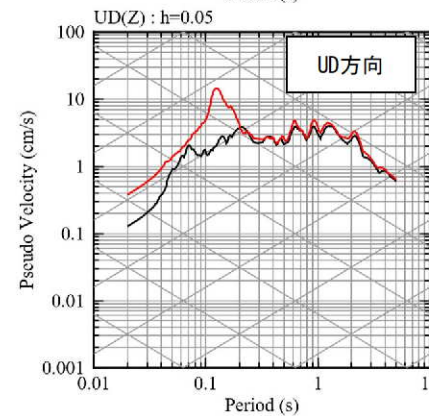
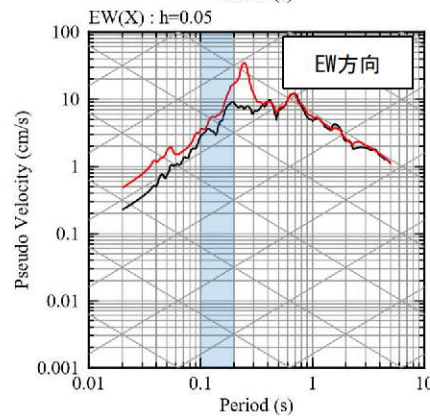
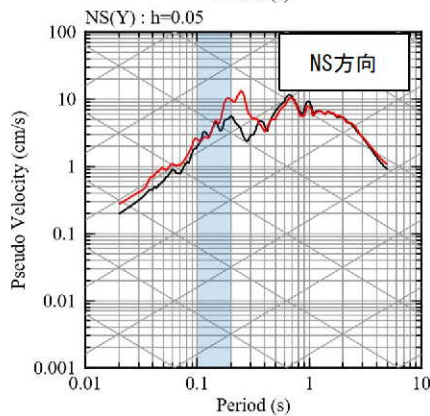
— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波 (現申請モデル)

既許可モデル



— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波 (既許可モデル)

見直しモデル



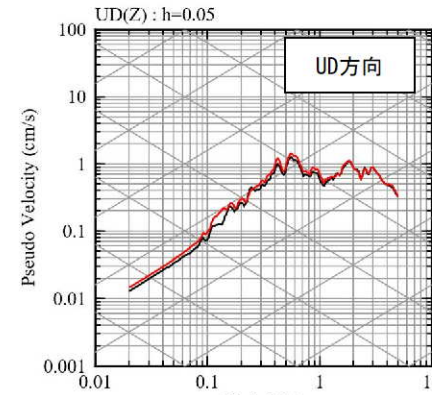
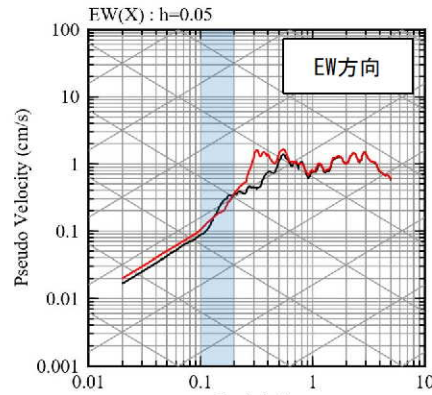
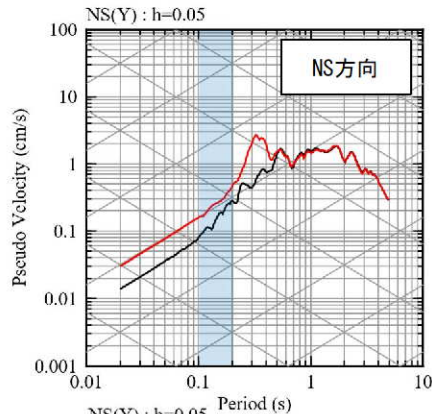
— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波 (見直しモデル)

【参考②】 応答スペクトルの比較結果

■ 応答スペクトルの比較結果 (6/20)

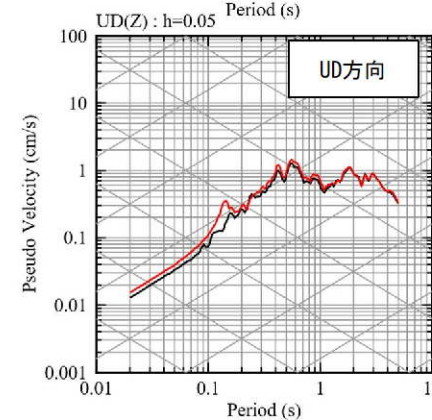
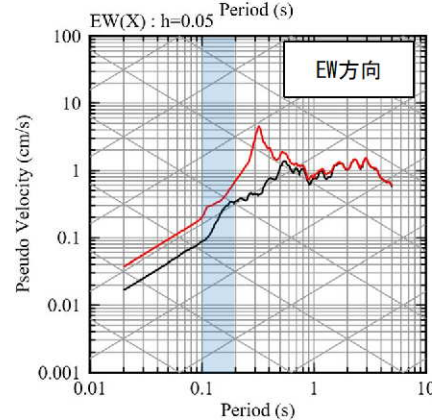
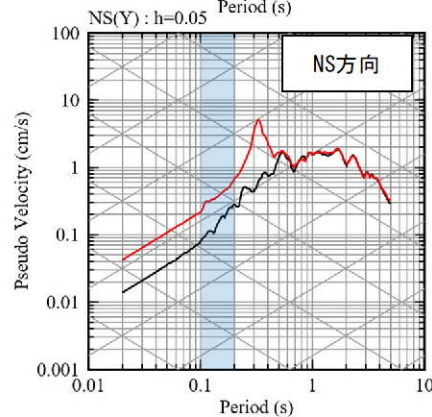
⑥ 薩摩半島西方沖

現申請モデル



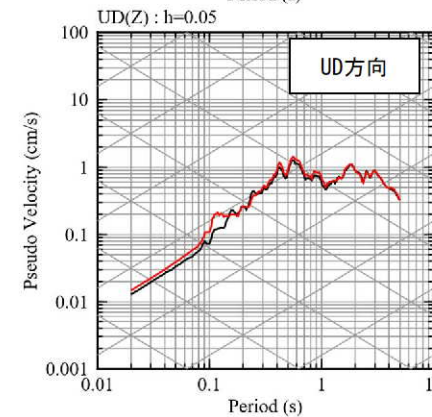
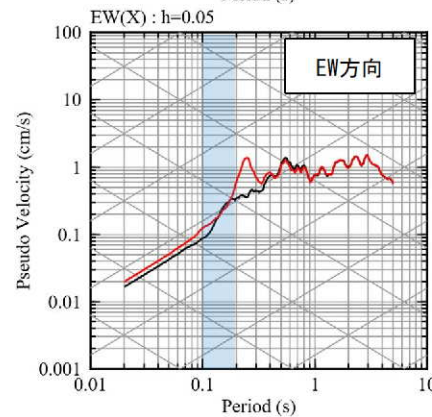
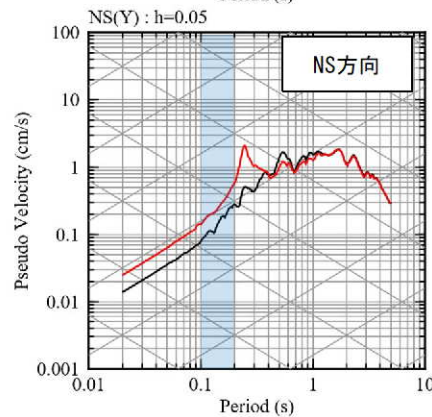
— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波 (現申請モデル)

既許可モデル



— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波 (既許可モデル)

見直しモデル



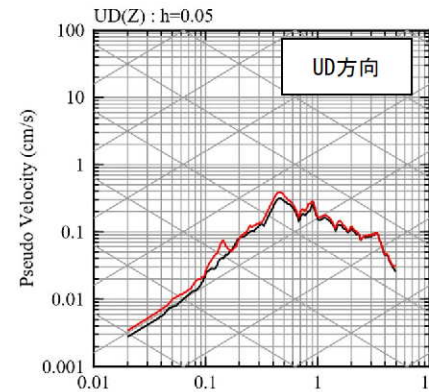
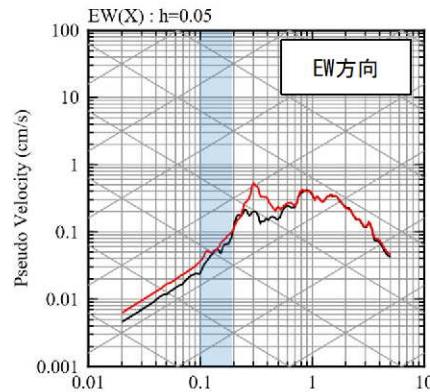
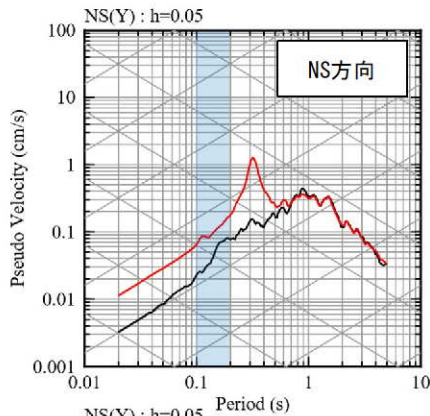
— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波 (見直しモデル)

【参考②】 応答スペクトルの比較結果

■ 応答スペクトルの比較結果 (7/20)

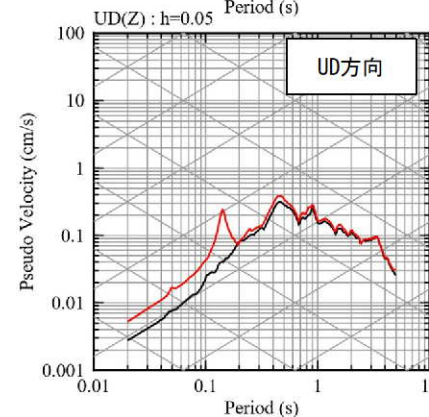
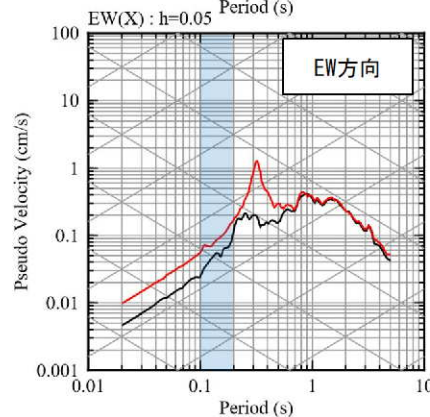
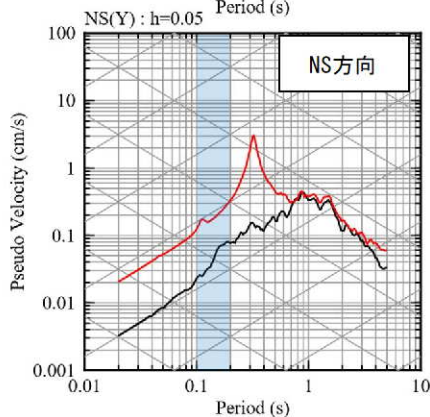
⑦ 薩摩半島西方沖

現申請モデル



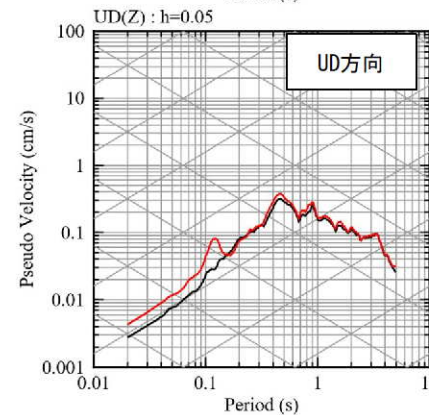
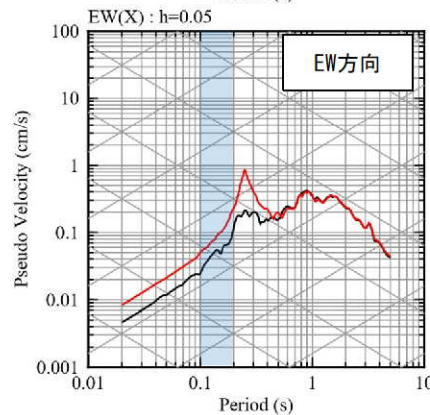
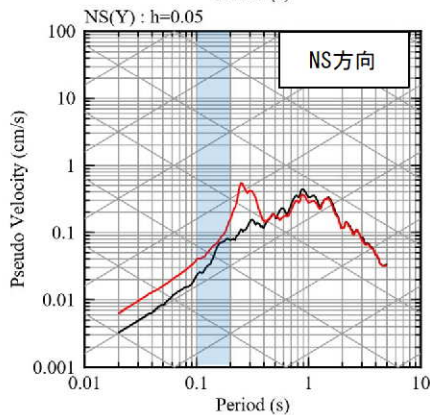
— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波 (現申請モデル)

既許可モデル



— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波 (既許可モデル)

見直しモデル



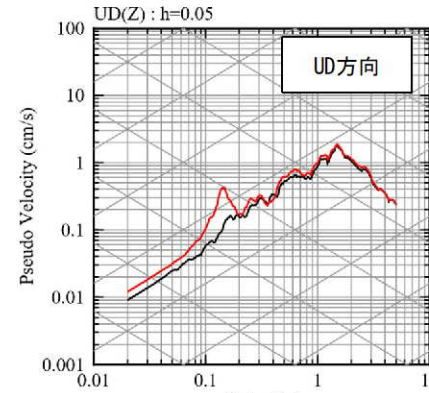
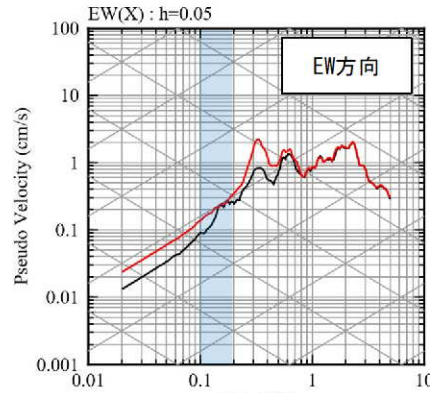
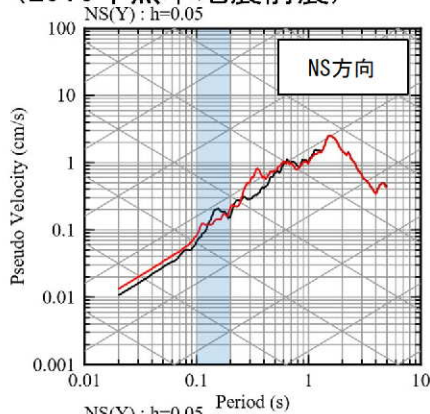
— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波 (見直しモデル)

【参考②】 応答スペクトルの比較結果

■ 応答スペクトルの比較結果 (8/20)

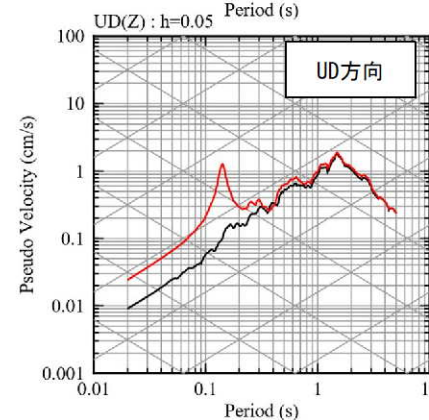
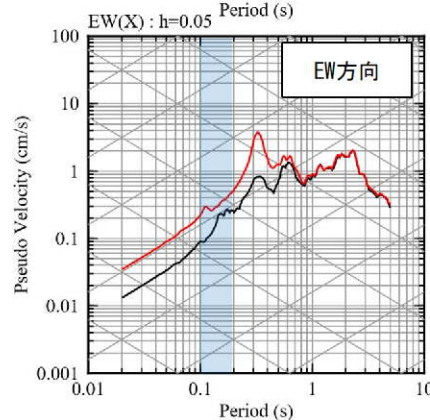
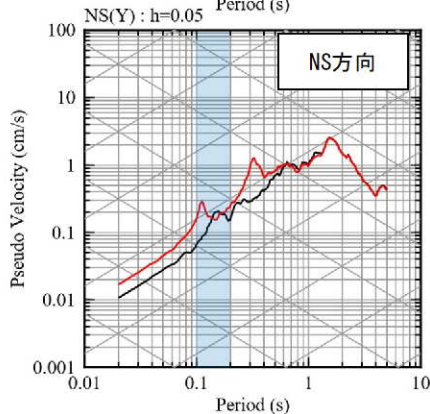
⑧熊本県熊本地方 (2016年熊本地震前震)

現申請モデル



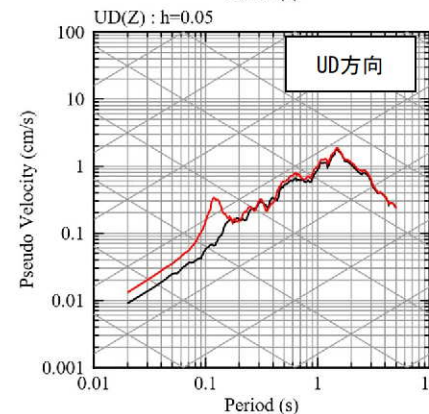
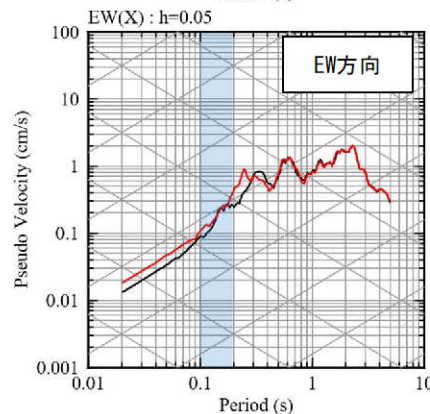
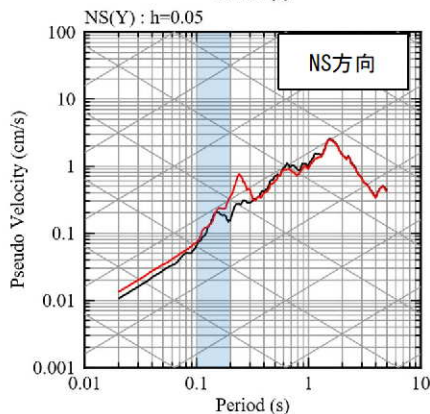
— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(現申請モデル)

既許可モデル



— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(既許可モデル)

見直しモデル



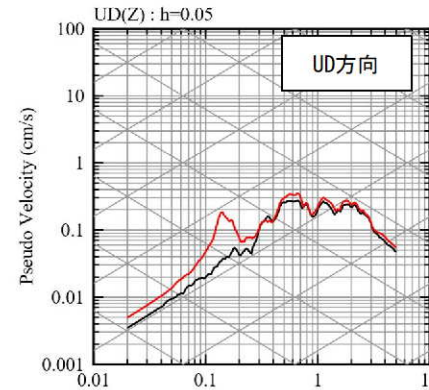
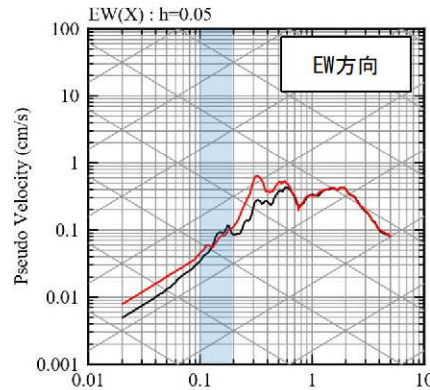
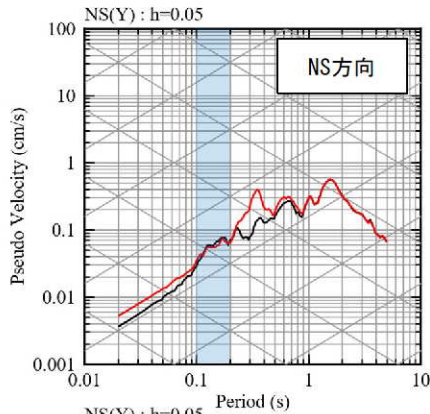
— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(見直しモデル)

【参考②】 応答スペクトルの比較結果

■ 応答スペクトルの比較結果 (9/20)

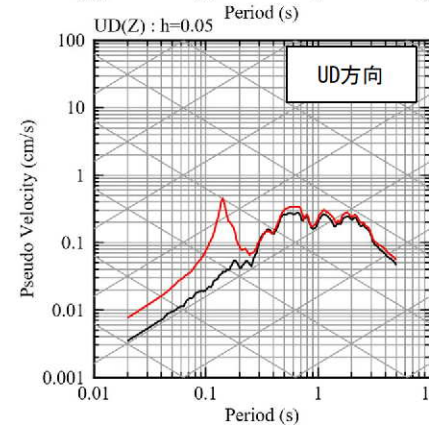
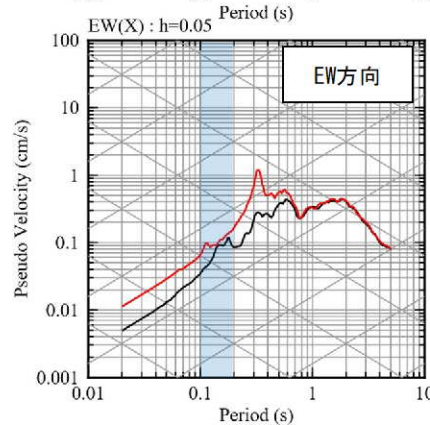
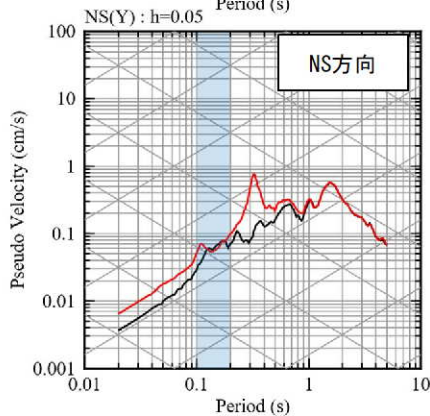
⑨ 熊本県熊本地方

現申請モデル



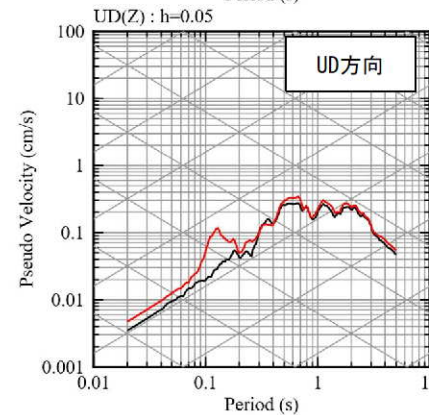
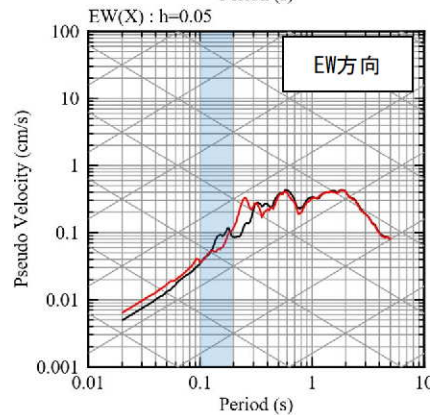
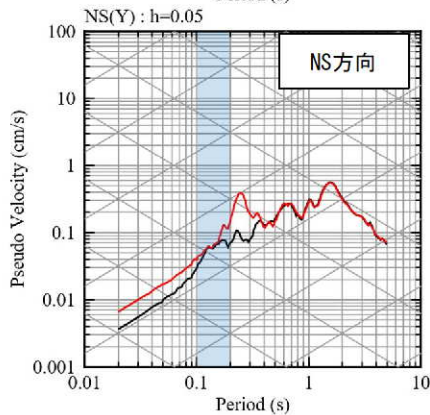
— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波 (現申請モデル)

既許可モデル



— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波 (既許可モデル)

見直しモデル



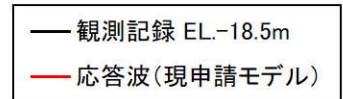
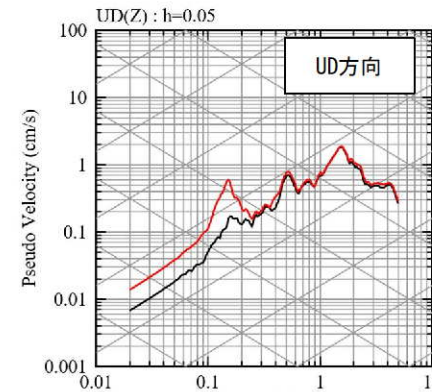
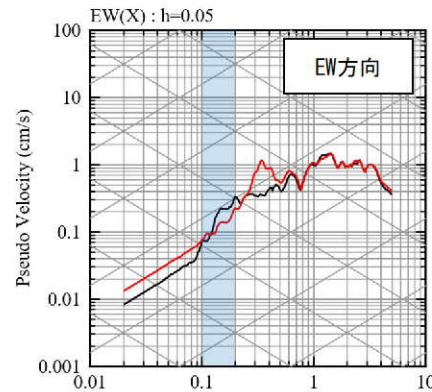
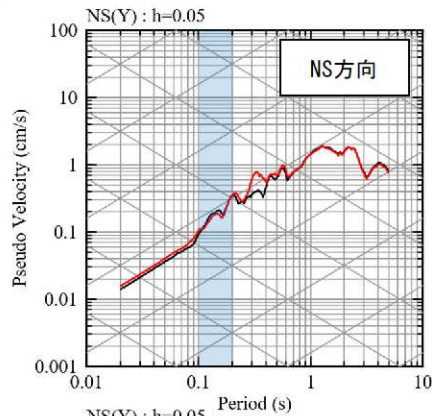
— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波 (見直しモデル)

【参考②】 応答スペクトルの比較結果

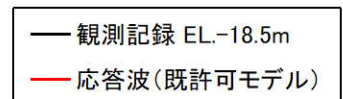
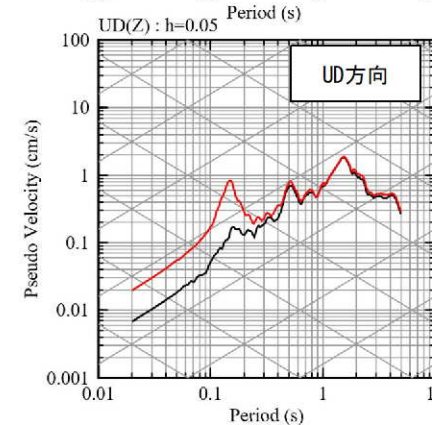
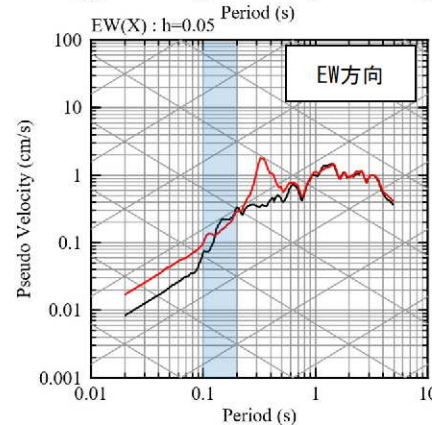
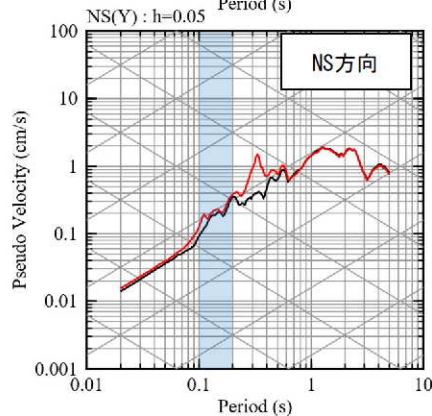
■ 応答スペクトルの比較結果 (10/20)

⑩ 熊本県熊本地方

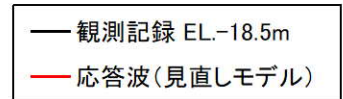
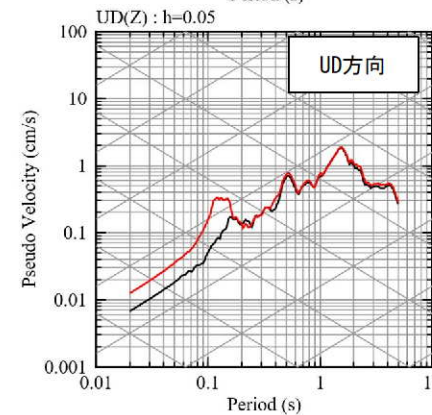
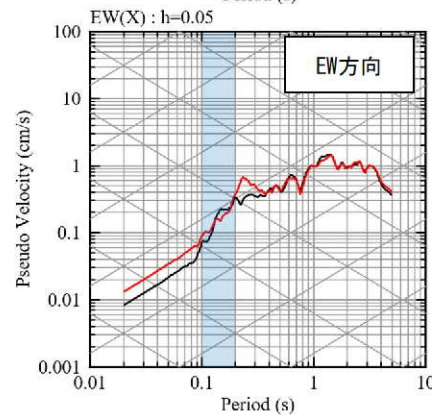
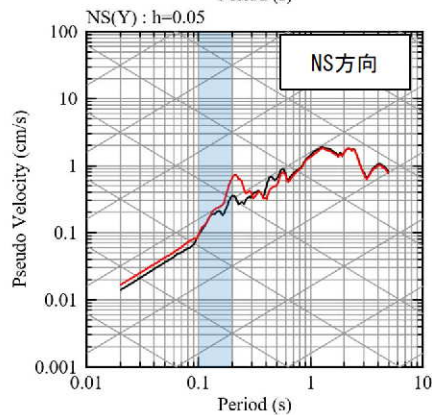
現申請モデル



既許可モデル



見直しモデル

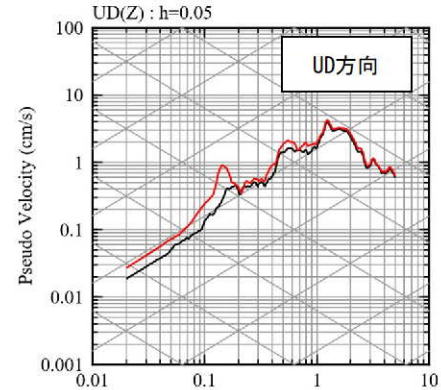
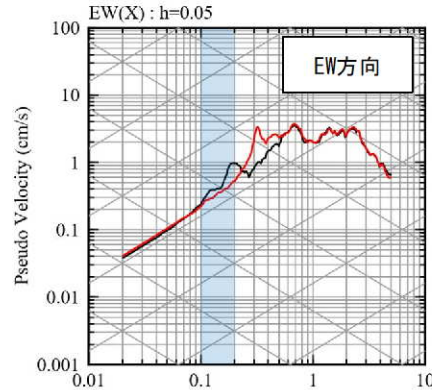
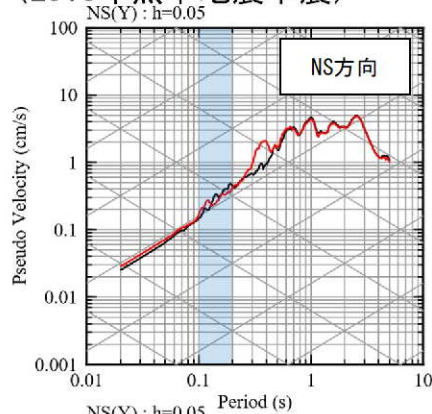


【参考②】 応答スペクトルの比較結果

■ 応答スペクトルの比較結果 (11/20)

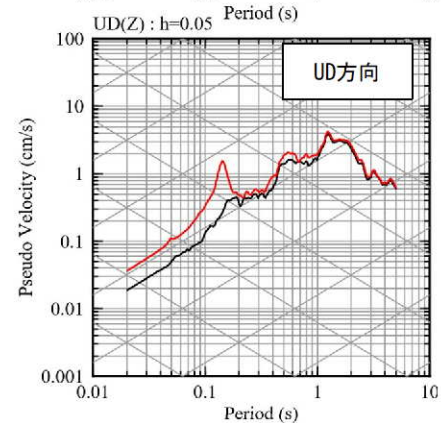
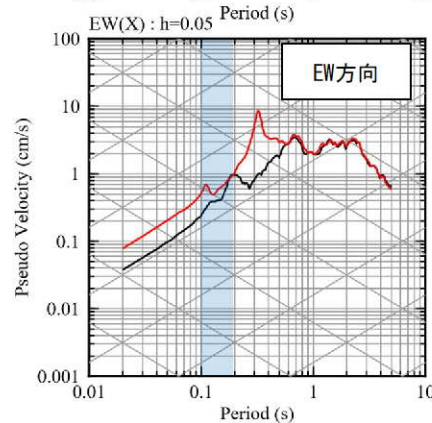
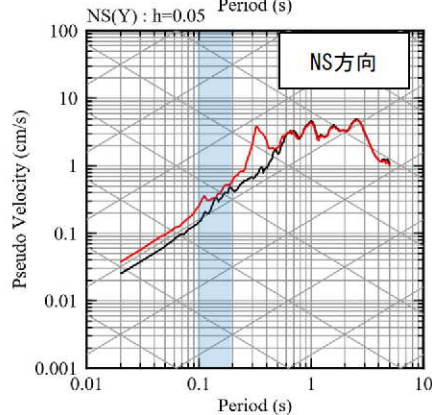
① 熊本県熊本地方 (2016年熊本地震本震)

現申請モデル



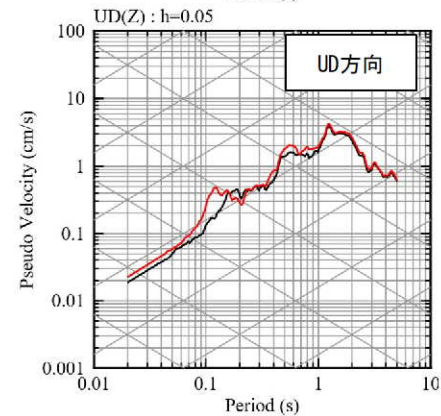
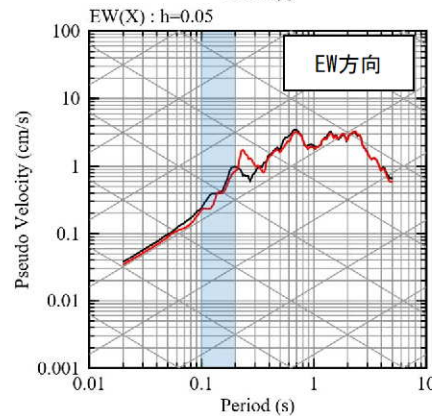
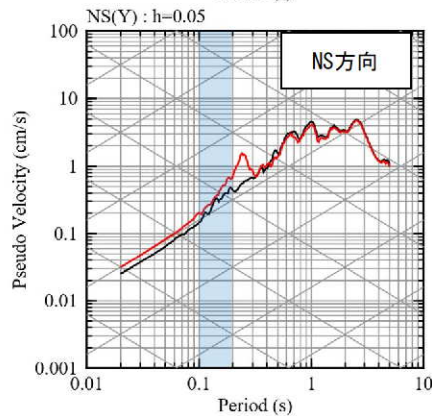
— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波 (現申請モデル)

既許可モデル



— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波 (既許可モデル)

見直しモデル



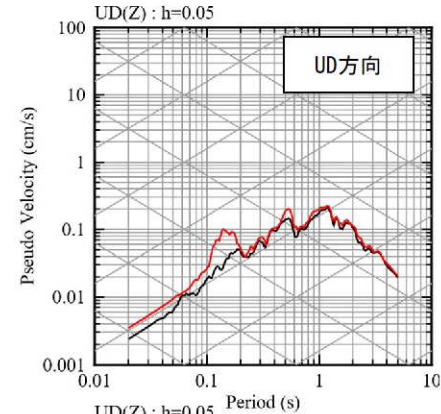
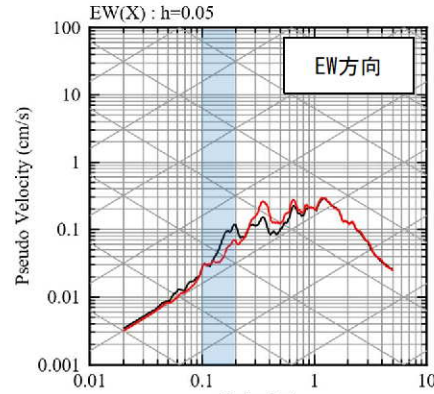
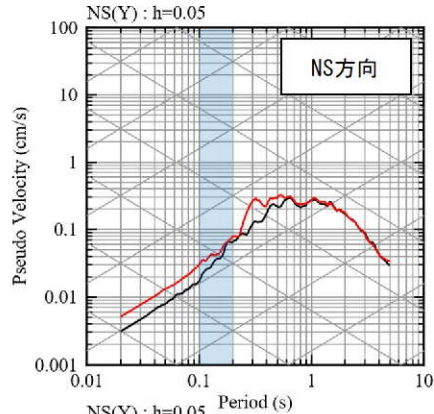
— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波 (見直しモデル)

【参考②】 応答スペクトルの比較結果

■ 応答スペクトルの比較結果 (12/20)

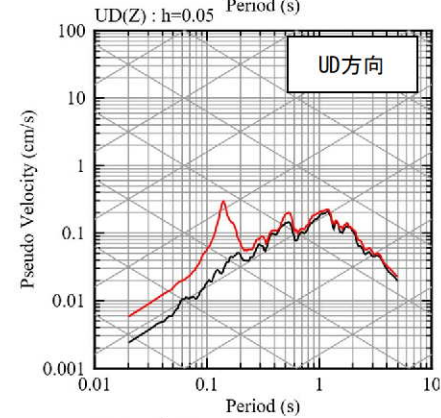
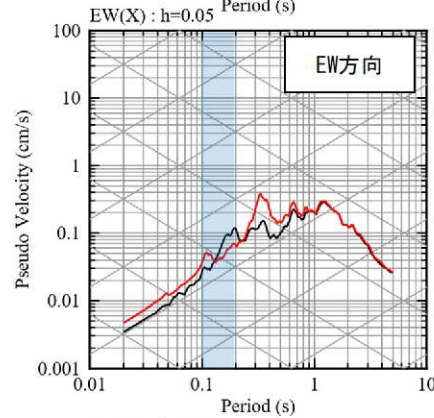
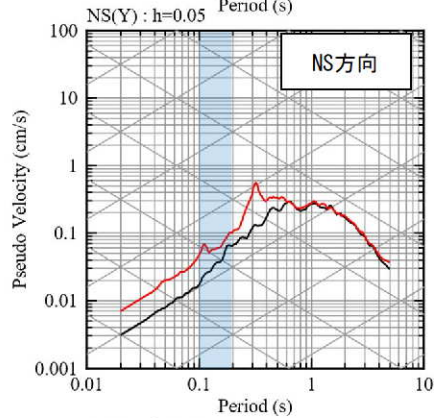
⑫ 熊本県熊本地方

現申請モデル



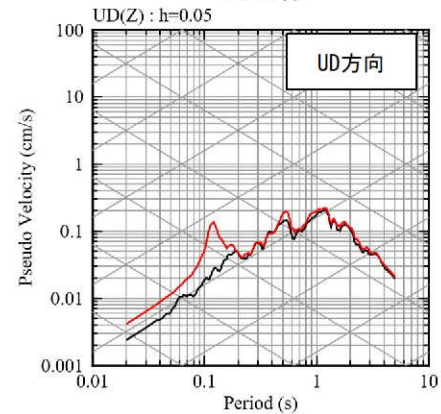
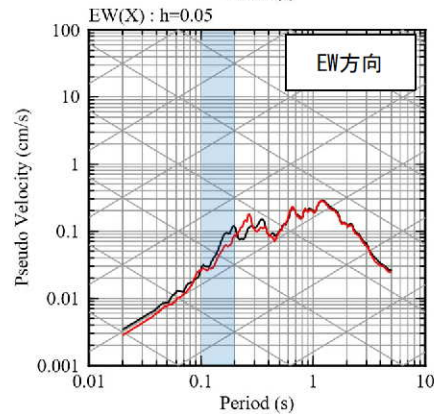
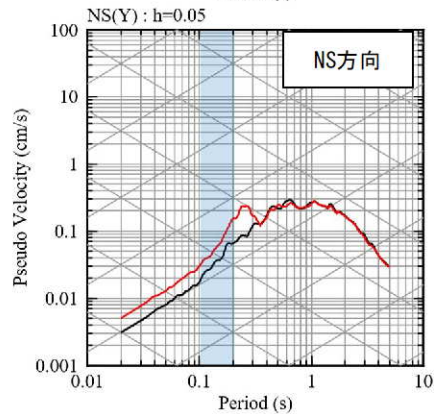
— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波 (現申請モデル)

既許可モデル



— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波 (既許可モデル)

見直しモデル



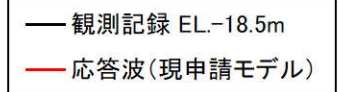
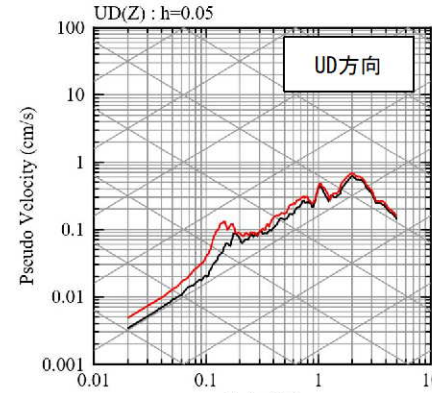
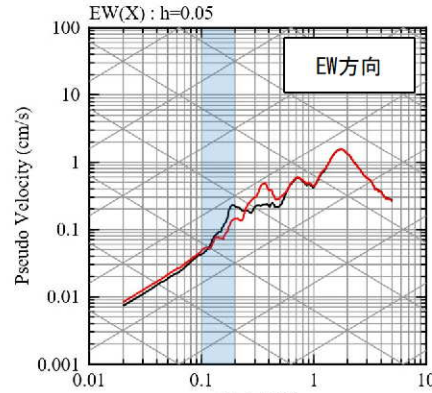
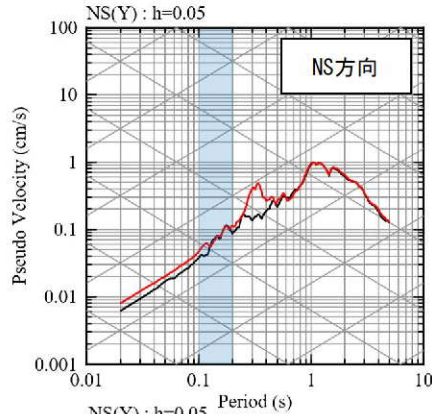
— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波 (見直しモデル)

【参考②】 応答スペクトルの比較結果

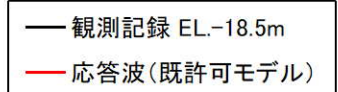
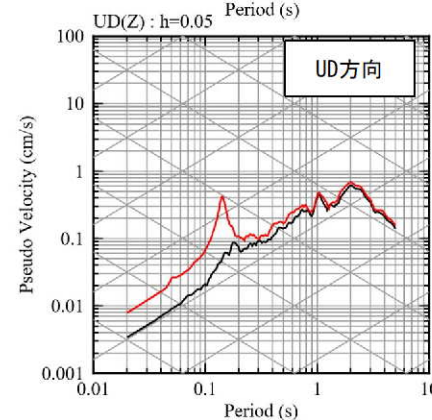
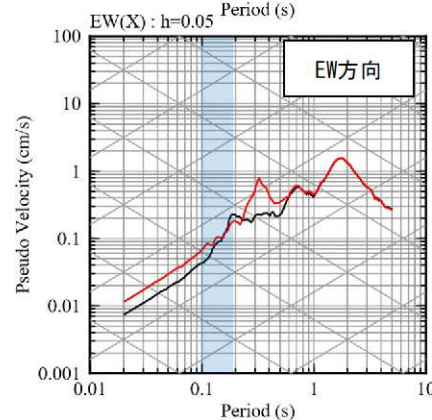
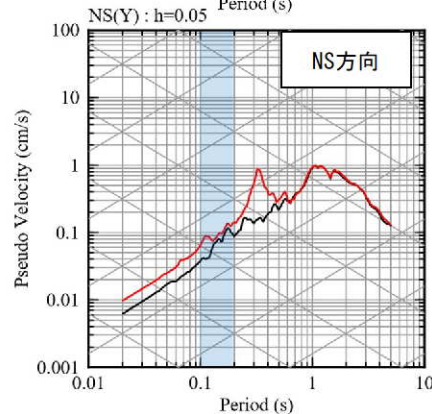
■ 応答スペクトルの比較結果 (13/20)

⑬ 熊本県熊本地方

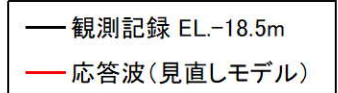
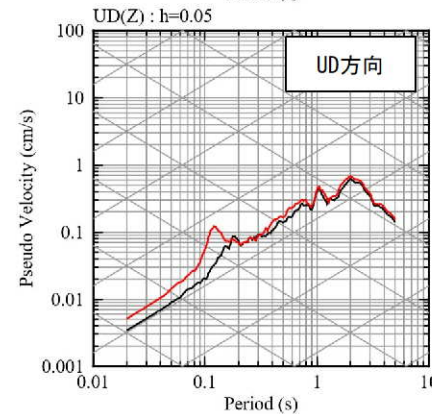
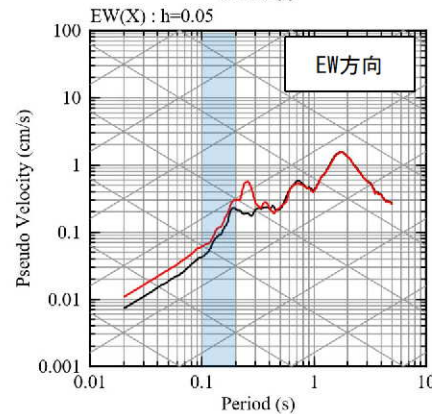
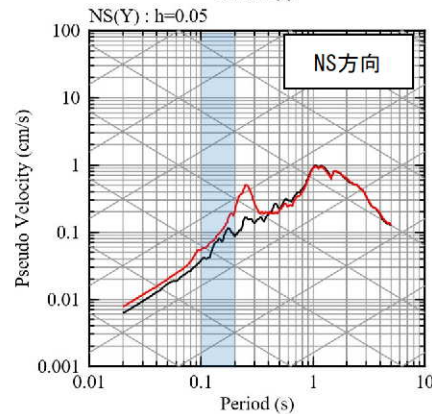
現申請モデル



既許可モデル



見直しモデル

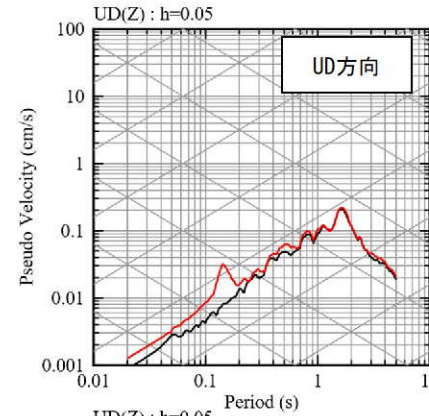
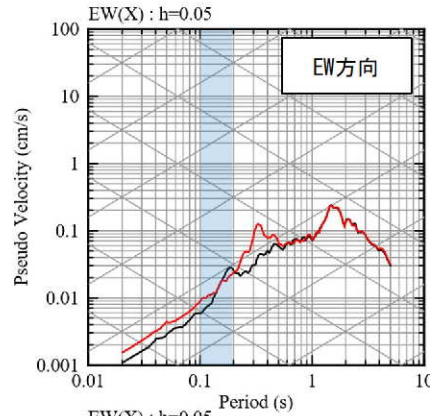
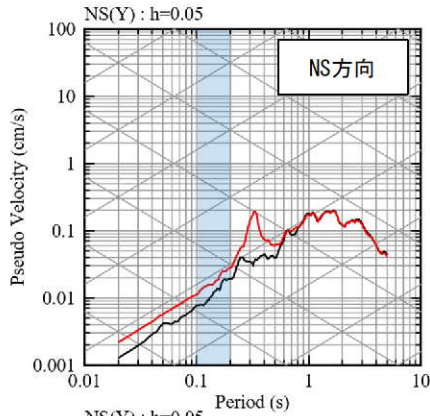


【参考②】 応答スペクトルの比較結果

■ 応答スペクトルの比較結果 (14/20)

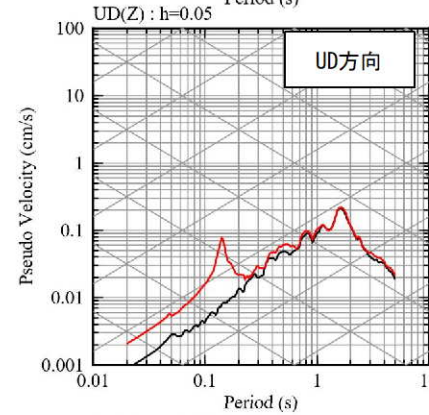
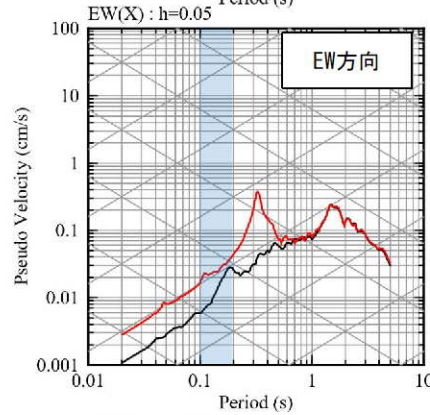
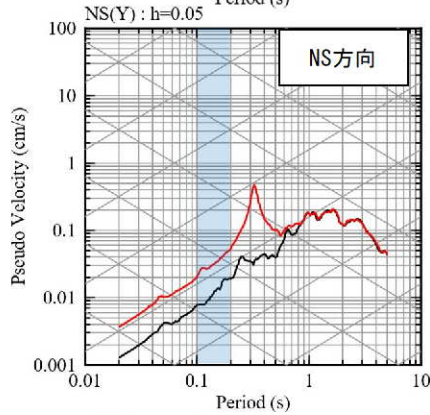
⑭ 熊本県阿蘇地方

現申請モデル



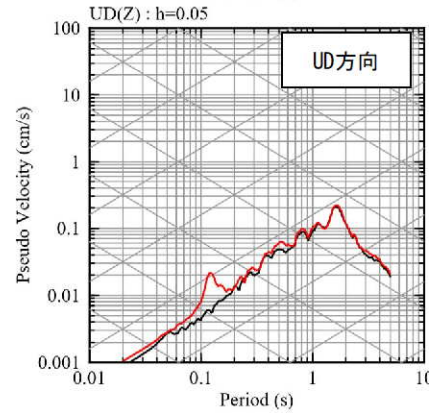
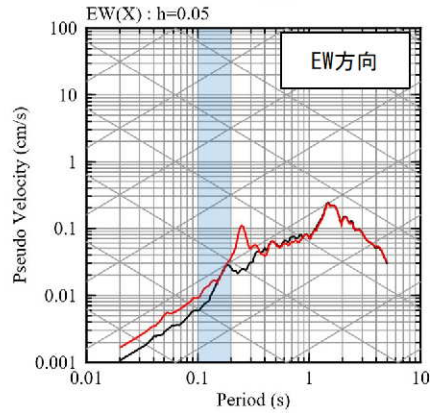
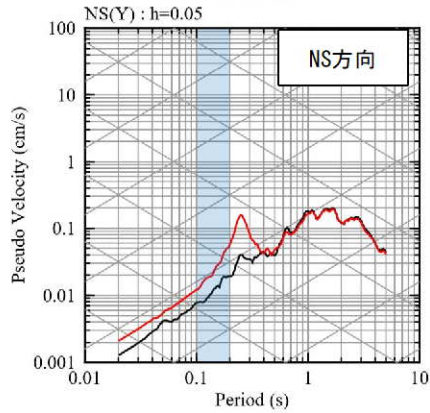
— 観測記録 EL-18.5m
— 応答波(現申請モデル)

既許可モデル



— 観測記録 EL-18.5m
— 応答波(既許可モデル)

見直しモデル



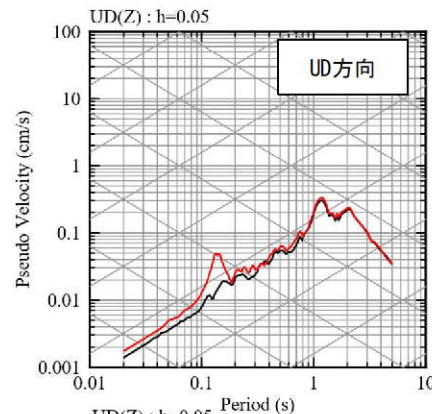
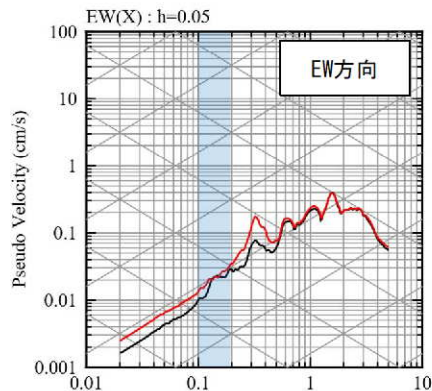
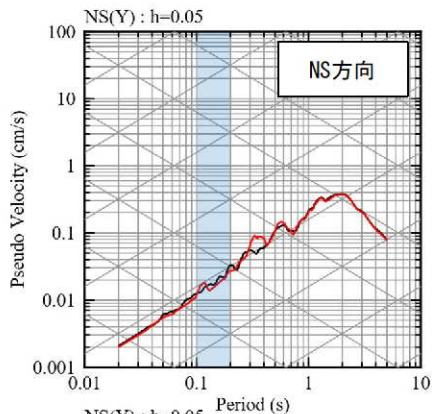
— 観測記録 EL-18.5m
— 応答波(見直しモデル)

【参考②】 応答スペクトルの比較結果

■ 応答スペクトルの比較結果 (15/20)

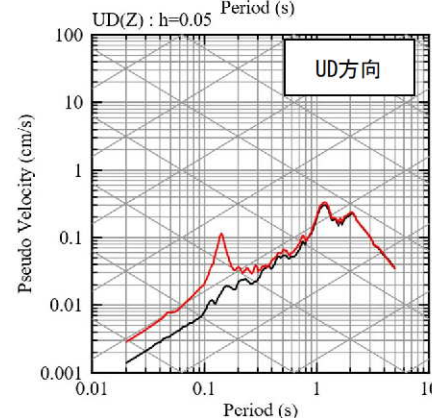
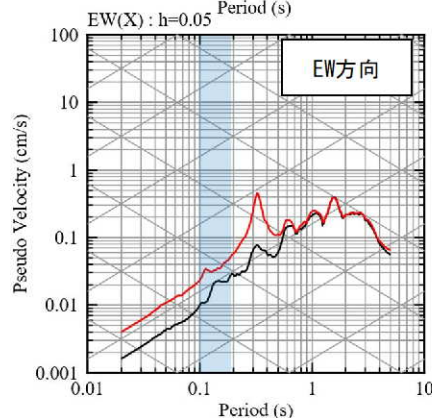
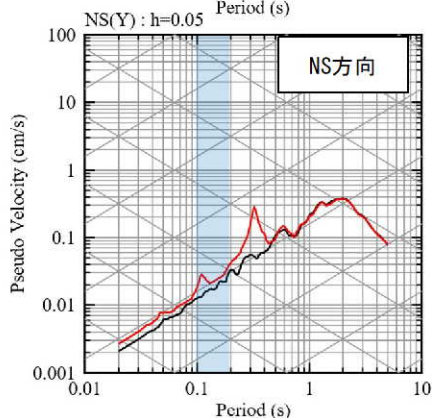
⑮ 熊本県阿蘇地方

現申請モデル



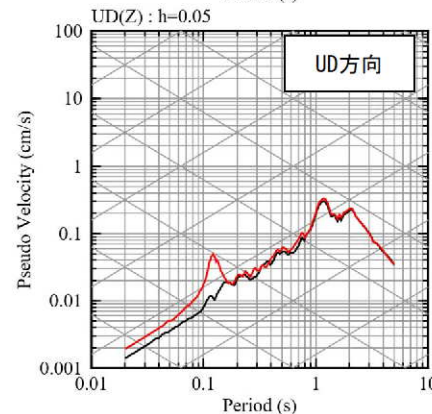
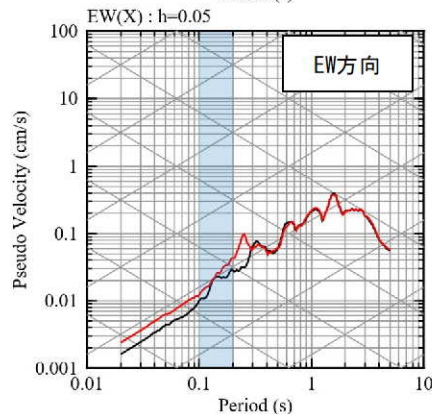
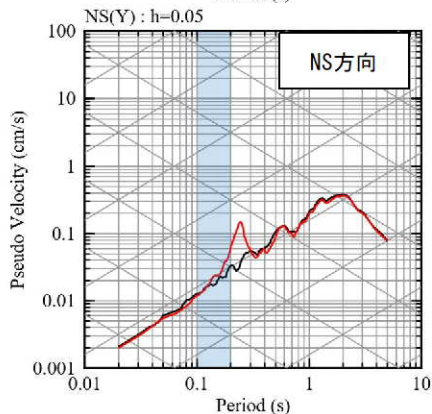
— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波 (現申請モデル)

既許可モデル



— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波 (既許可モデル)

見直しモデル



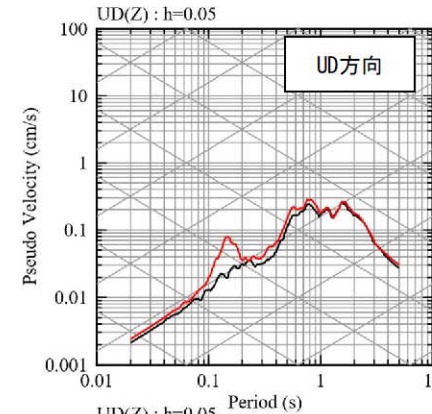
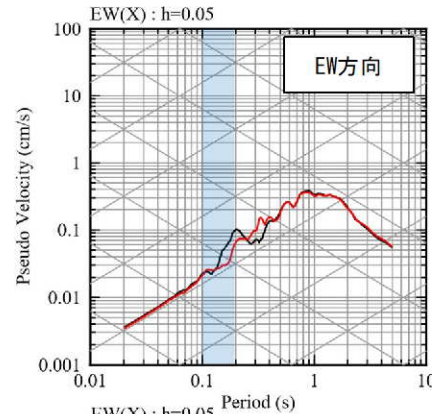
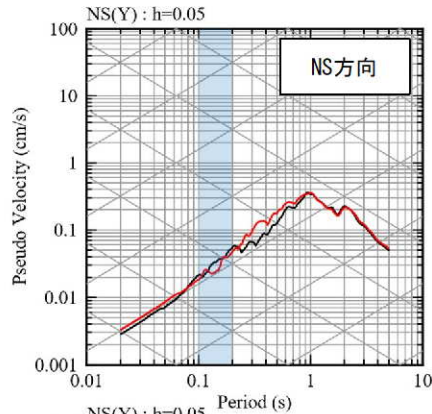
— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波 (見直しモデル)

【参考②】 応答スペクトルの比較結果

■ 応答スペクトルの比較結果 (16/20)

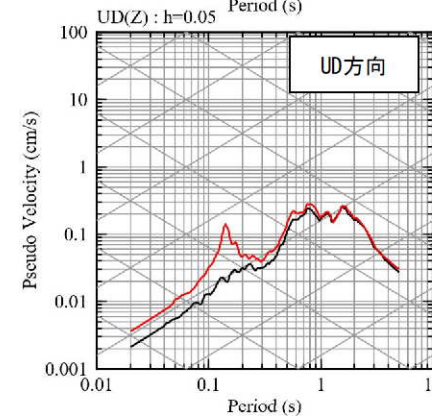
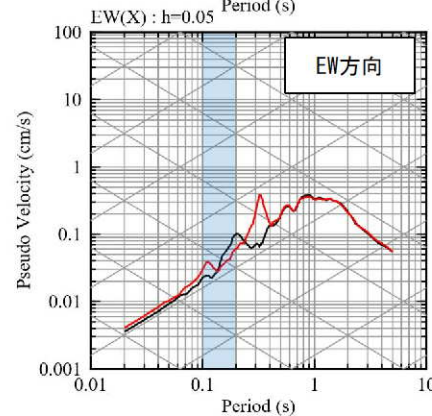
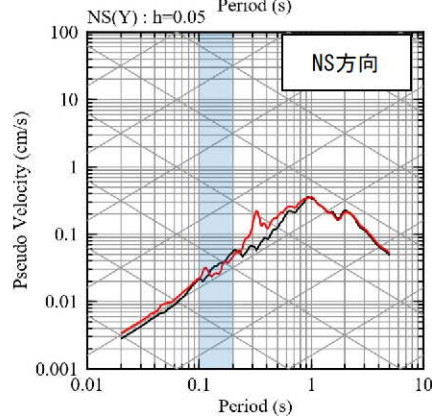
⑩ 熊本県熊本地方

現申請モデル



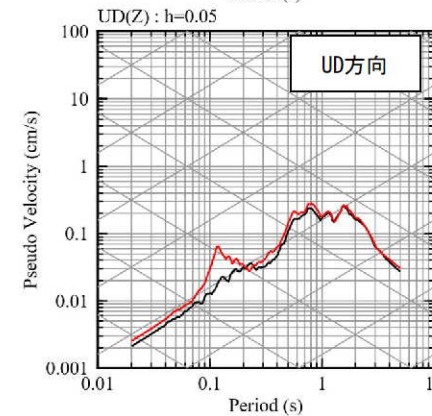
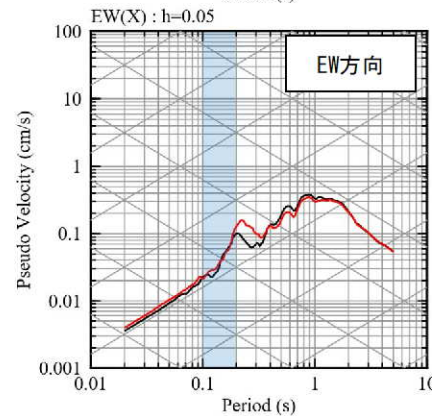
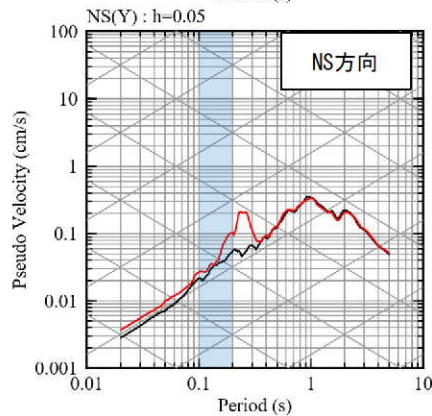
— 観測記録 EL-18.5m
— 応答波 (現申請モデル)

既許可モデル



— 観測記録 EL-18.5m
— 応答波 (既許可モデル)

見直しモデル



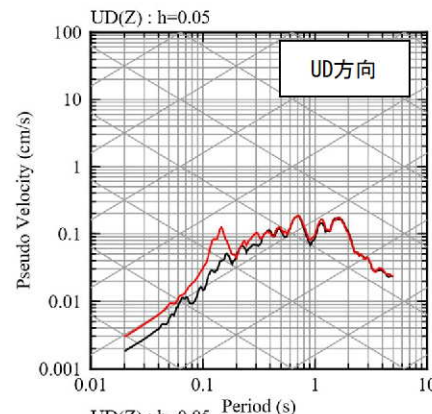
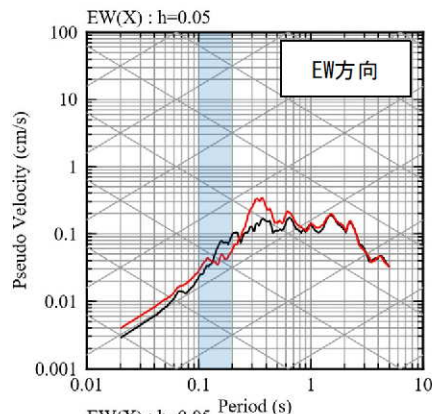
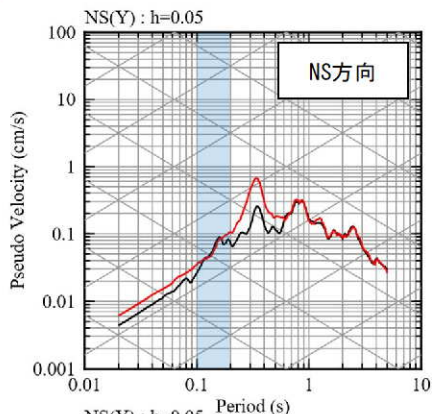
— 観測記録 EL-18.5m
— 応答波 (見直しモデル)

【参考②】 応答スペクトルの比較結果

■ 応答スペクトルの比較結果 (17/20)

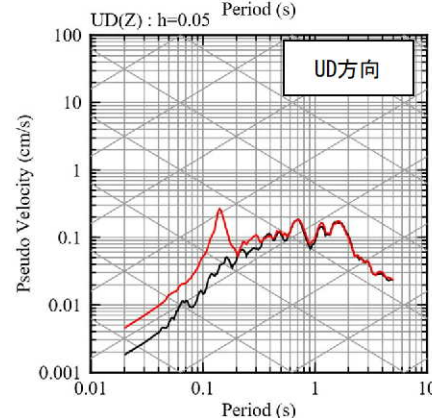
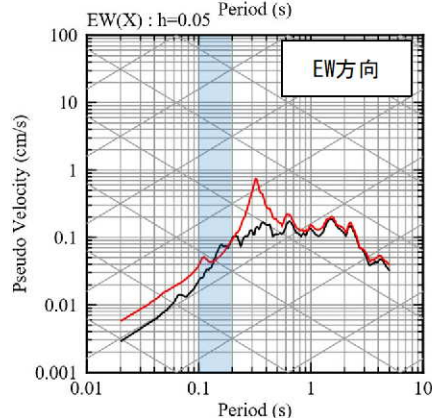
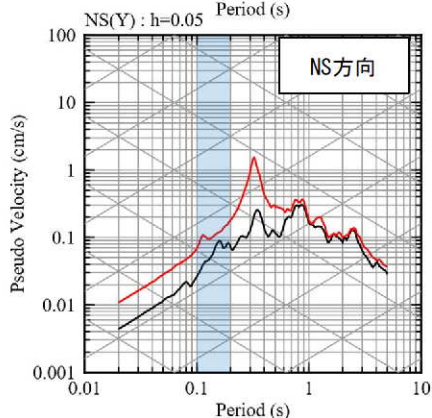
⑰ 熊本県熊本地方

現申請モデル



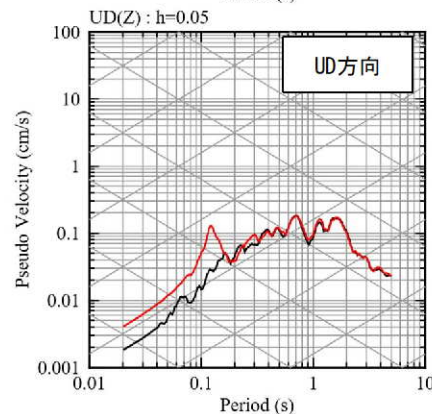
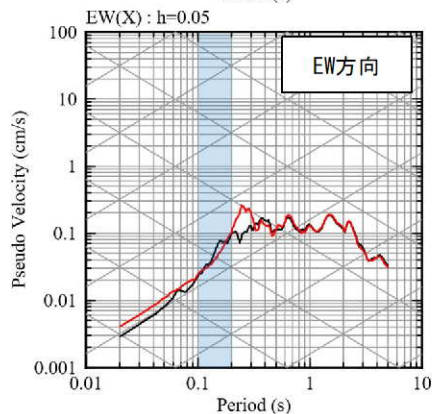
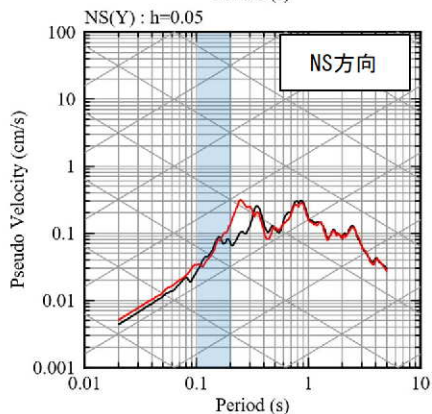
— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波 (現申請モデル)

既許可モデル



— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波 (既許可モデル)

見直しモデル



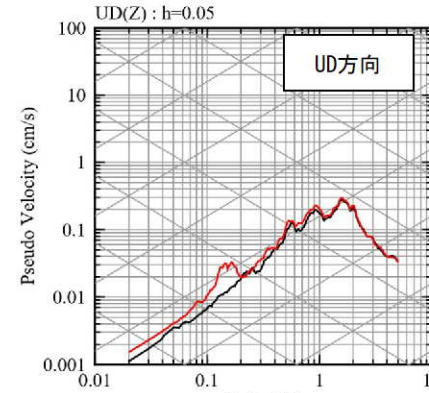
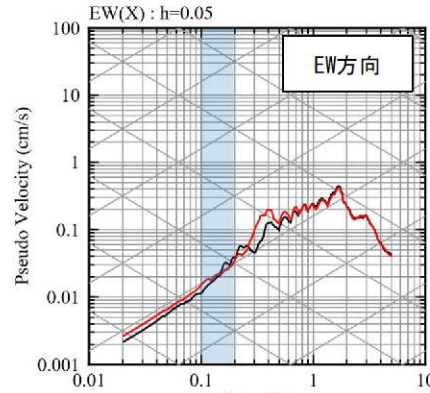
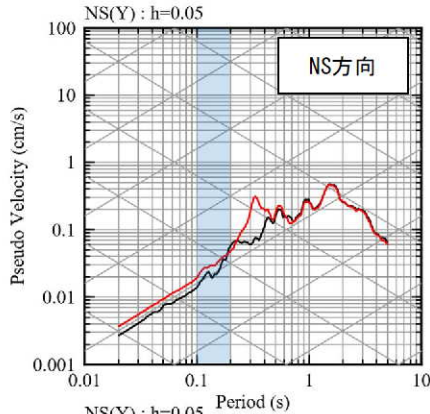
— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波 (見直しモデル)

【参考②】 応答スペクトルの比較結果

■ 応答スペクトルの比較結果 (18/20)

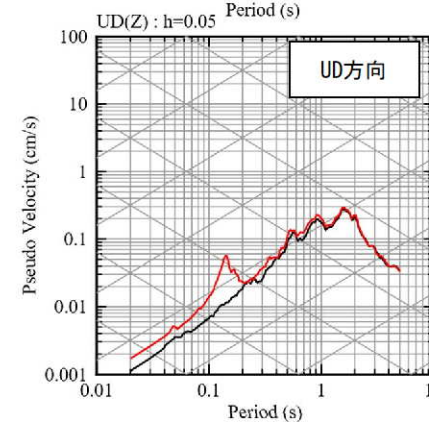
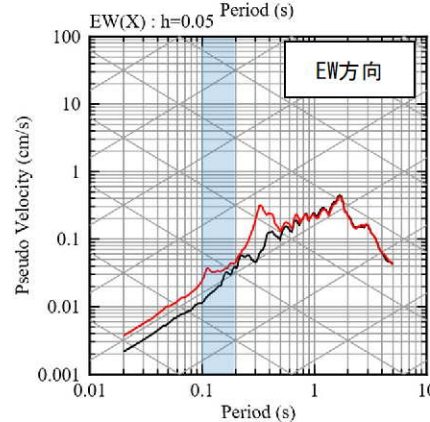
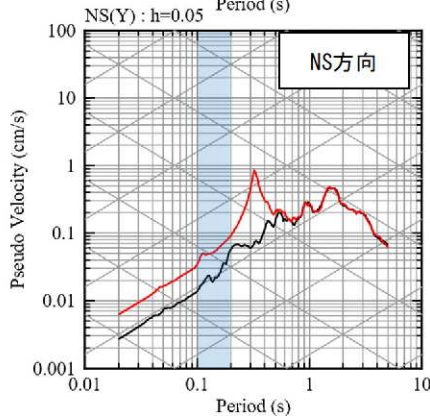
⑱ 熊本県阿蘇地方

現申請モデル



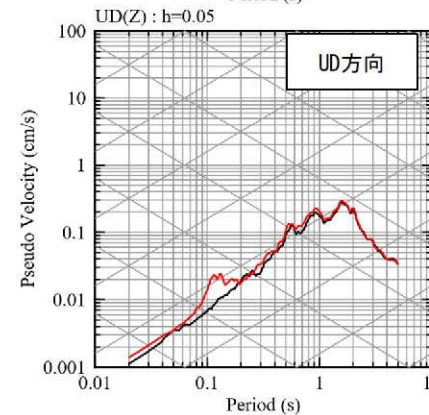
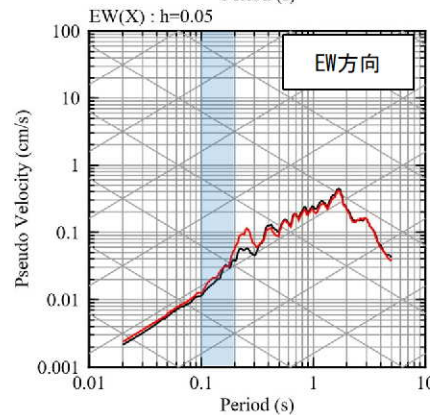
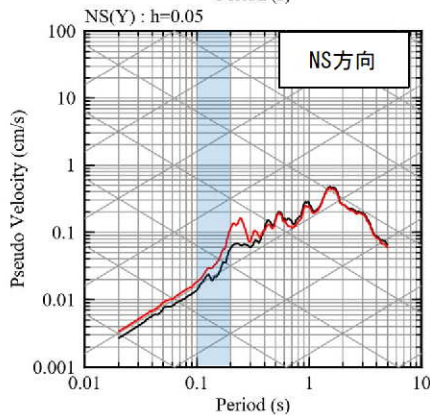
— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波 (現申請モデル)

既許可モデル



— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波 (既許可モデル)

見直しモデル



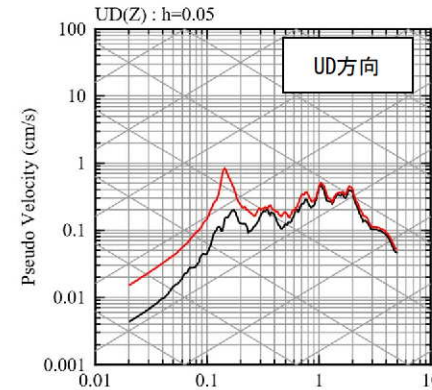
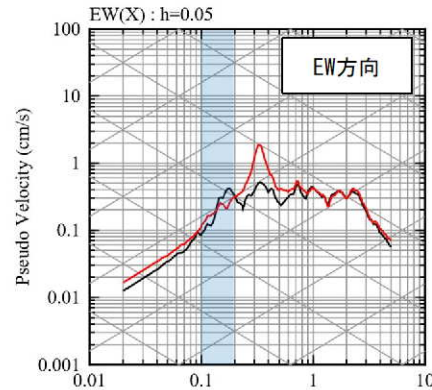
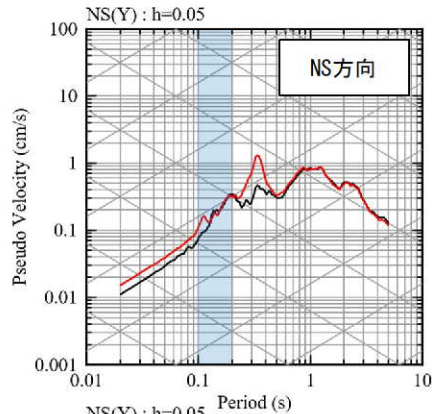
— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波 (見直しモデル)

【参考②】 応答スペクトルの比較結果

■ 応答スペクトルの比較結果 (19/20)

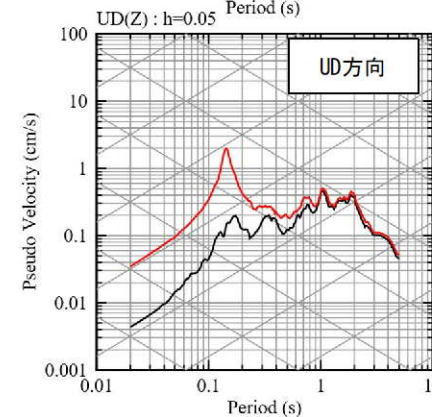
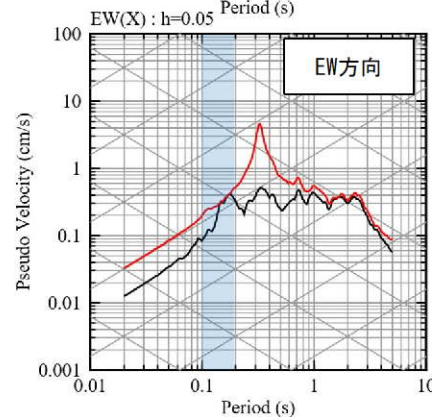
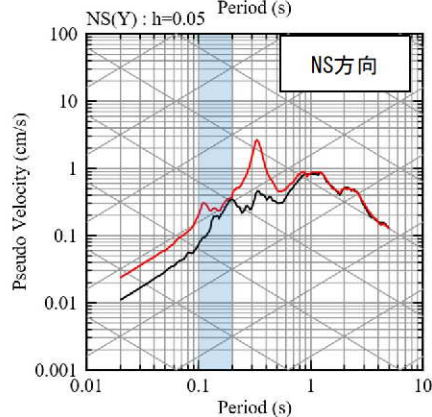
①9 熊本県熊本地方

現申請モデル



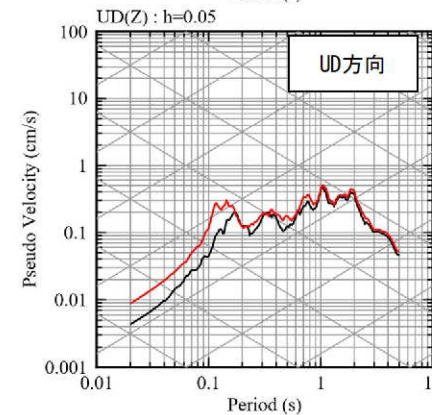
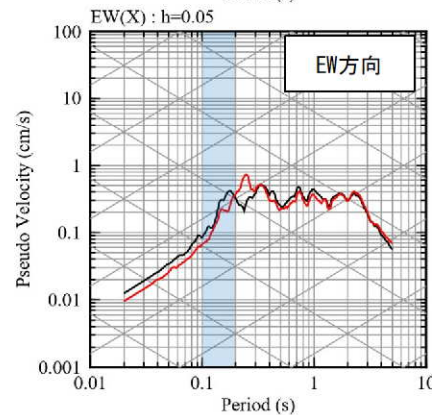
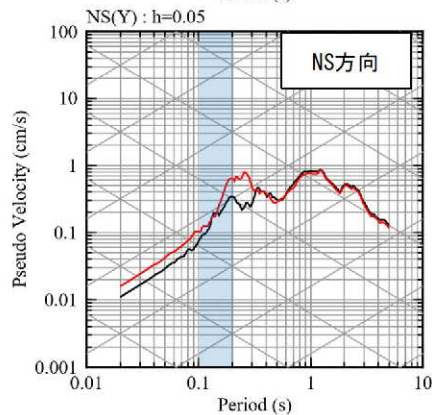
— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波 (現申請モデル)

既許可モデル



— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波 (既許可モデル)

見直しモデル



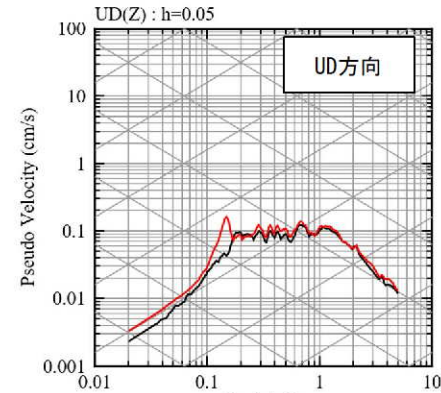
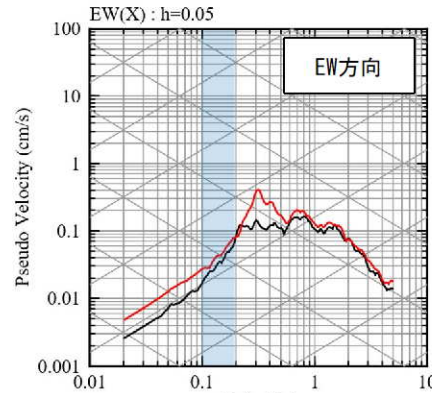
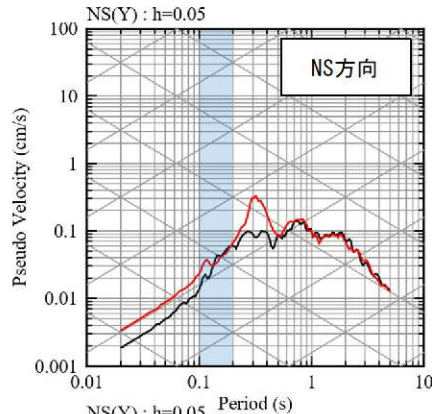
— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波 (見直しモデル)

【参考②】 応答スペクトルの比較結果

■ 応答スペクトルの比較結果 (20/20)

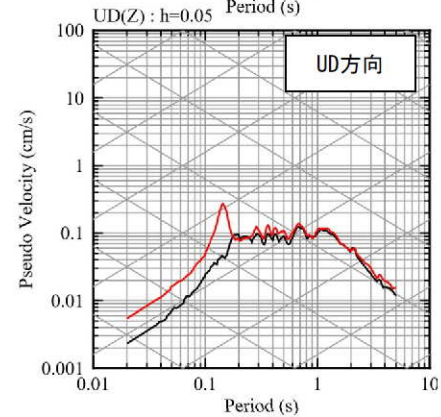
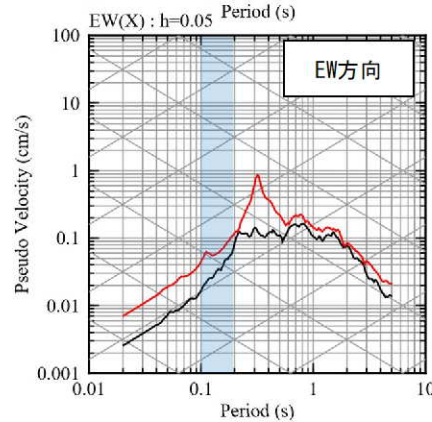
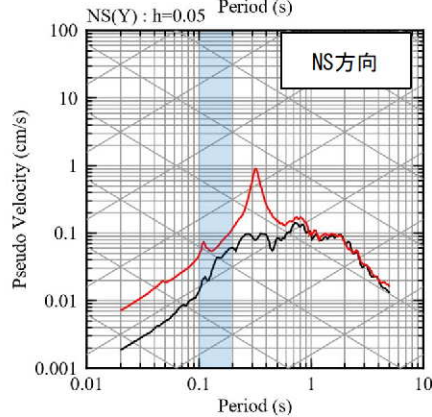
⑳ 薩摩半島西方沖

現申請モデル



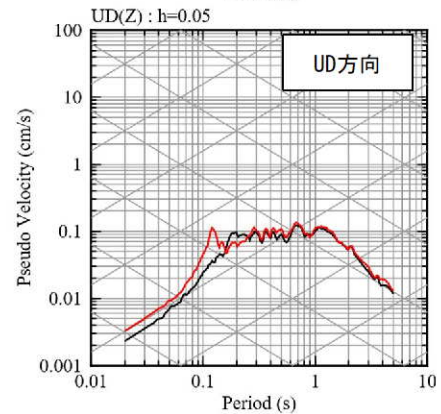
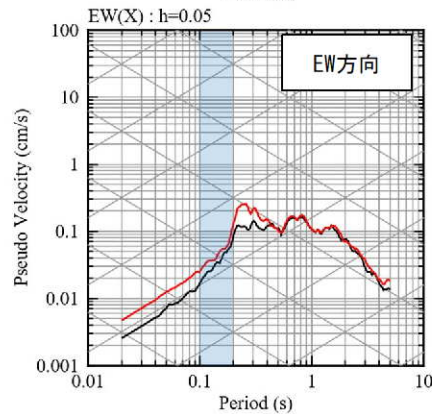
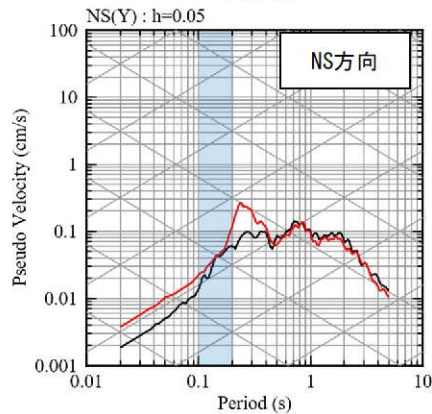
— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波 (現申請モデル)

既許可モデル



— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波 (既許可モデル)

見直しモデル



— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波 (見直しモデル)

【参考③】既許可の地下構造モデル

【参考③】既許可の地下構造モデル

■ 既許可の地下構造モデル

- 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る。

既許可における長周期帯の理論的手法に用いる一次元地下構造モデル

EL.	層上面 (km)	密度 ρ (g/cm ³)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値	設定根拠	
						Vs、Vp	Q値
解放基盤表面	-18.5m	0.0	2.70	1500	3200	100	慣用値 (Vs/15~10)
	-28.5m	-0.01	2.70	1600	3700	100	
	-480m	-0.462	2.70	2150	4400	200	
	-1018.5m	-1.0	2.70	3010	5200	200	
	-2018.5m	-2.0	2.70	3240	5600	300	
	-3018.5m	-3.0	2.70	3500	5900	300	
	-17018.5m	-17.0	3.00	3800	6600	500	
	-33018.5m	-33.0	3.30	4300	7600	500	

【参考③】既許可の地下構造モデル

■ 既許可の地下構造モデルの設定（解放基盤表面～EL. -28.5mまで）

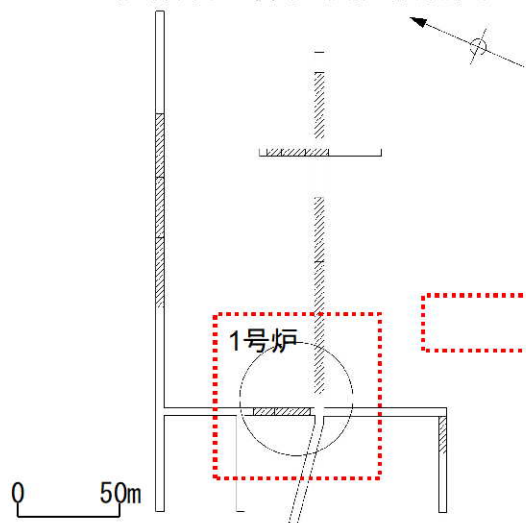
第18回審査会合資料より抜粋（一部修正）

EL.	層上面 (km)	密度 ρ (g/cm ³)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値	設定根拠 (Vs、Vp)
解放基盤表面						
-18.5m	0.0	2.70	1500	3200	100	試掘坑内弾性波試験
-28.5m	-0.01	2.70	1600	3700	100	鉛直アレイ及び微動アレイの速度構造を基に設定
-480m	-0.462	2.70	2150	4400	200	微動アレイの速度構造を基に設定
-1018.5m	-1.0	2.70	3010	5200	200	宮腰ほか(2004)
-2018.5m	-2.0	2.70	3240	5600	300	
-3018.5m	-3.0	2.70	3500	5900	300	地震調査委員会(2003)
-17018.5m	-17.0	3.00	3800	6600	500	
-33018.5m	-33.0	3.30	4300	7600	500	

- 解放基盤表面～層上面-0.01kmまでのP波速度及びS波速度については、炉心位置周辺における試掘坑弾性波試験結果の加重平均により算出。密度 ρ については、岩石試験結果より設定。

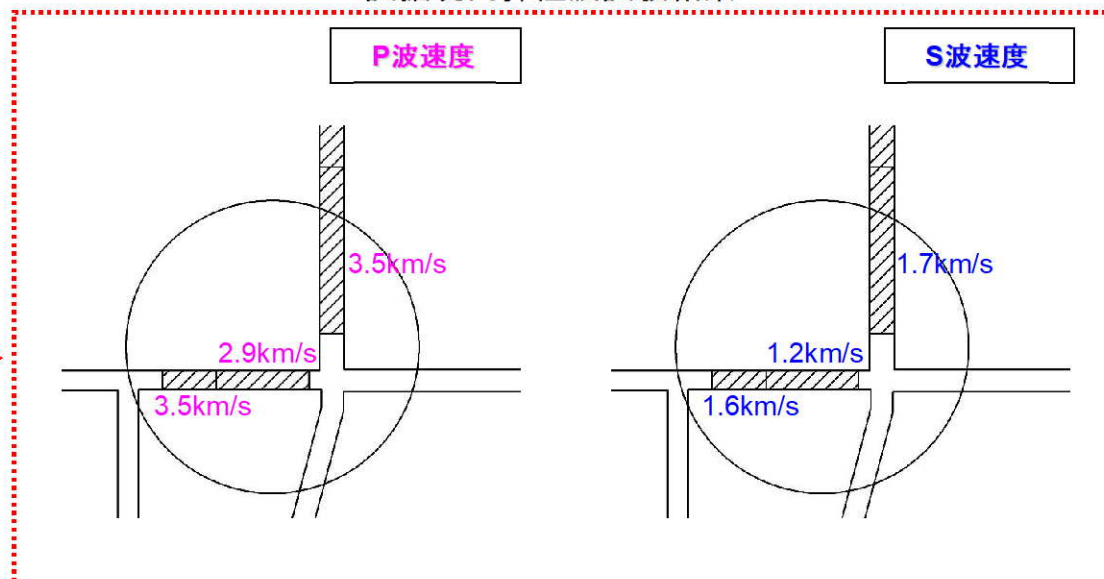
平均速度は、
P波 3.20km/s
S波 1.50km/s

試掘坑内弾性波試験範囲



試掘坑レベルEL.-12m

試掘坑内弾性波試験結果



【参考③】既許可の地下構造モデル

■ 既許可の地下構造モデルの設定 (EL. -28.5~EL. -1018.5mまで)

EL.	層上面 (km)	密度 ρ (g/cm ³)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値	設定根拠 (Vs、Vp)
解放基盤表面						
-18.5m	0.0	2.70	1500	3200	100	試掘坑内弾性波試験
-28.5m	-0.01	2.70	1600	3700	100	鉛直アレイ及び微動アレイの速度構造を基に設定
-480m	-0.462	2.70	2150	4400	200	微動アレイの速度構造を基に設定
-1018.5m	-1.0	2.70	3010	5200	200	宮腰ほか(2004)
-2018.5m	-2.0	2.70	3240	5600	300	
-3018.5m	-3.0	2.70	3500	5900	300	
-17018.5m	-17.0	3.00	3800	6600	500	地震調査委員会(2003)
-33018.5m	-33.0	3.30	4300	7600	500	

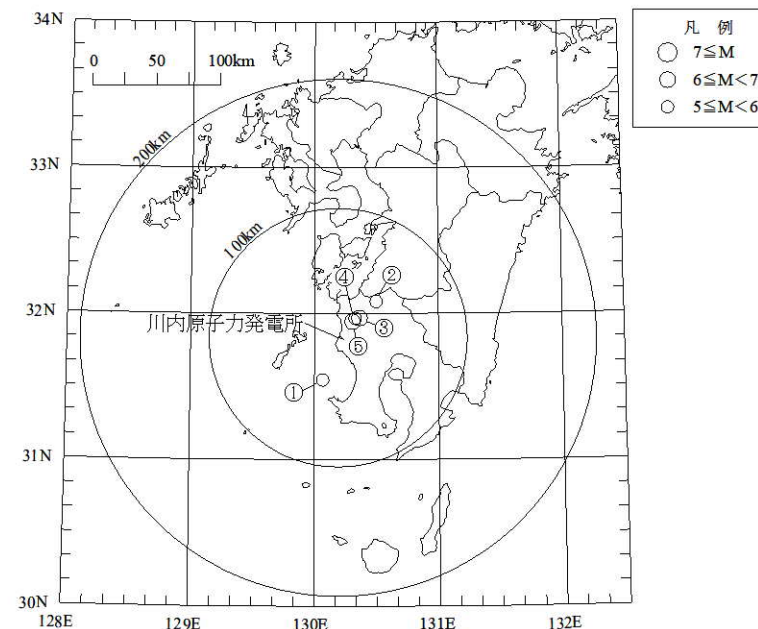
第18回審査会合資料より抜粋(一部修正)

- 層上面-0.01km~-0.462kmまでのP波速度及びS波速度については、敷地における鉛直アレイ地震観測記録及び微動アレイ観測記録に基づく地盤同定による速度構造を基に設定。
- 層上面-0.462km~-1.0kmまでのP波速度及びS波速度については、微動アレイ観測記録に基づく地盤同定による速度構造を基に設定。

◆敷地における鉛直アレイ地震観測記録に基づく地盤同定

検討対象地震の地震諸元

番号	地震名	発生日	M	深さ (km)	震央距離 (km)	備考
①	九州西側海域の地震	1984年8月15日	5.5	13.00	34	
②	鹿児島県北西部の地震	1994年2月13日	5.7	5.20	40	
③	鹿児島県北西部地震	1997年3月26日	6.6	11.85	22	本震
④	鹿児島県北西部地震	1997年4月3日	5.7	14.79	20	
⑤	鹿児島県北西部地震	1997年5月13日	6.4	9.24	17	本震



検討対象地震の震央位置

【参考③】既許可の地下構造モデル

- 敷地で観測された鉛直アレイ地震観測記録を用いた逆解析により、EL. 11.0m~EL. -118.5mまでの地盤同定を実施。
- 地盤同定にあたっては、遺伝的アルゴリズムを用い、各地震計観測点間の伝達関数を目的関数に設定。
- 検討対象地震は、敷地で観測された主な5地震を対象。
- 地盤減衰 (Q値) は慣用値 ($V_s/15\sim 10$) を基に設定。

第18回審査会合資料より抜粋(一部修正)

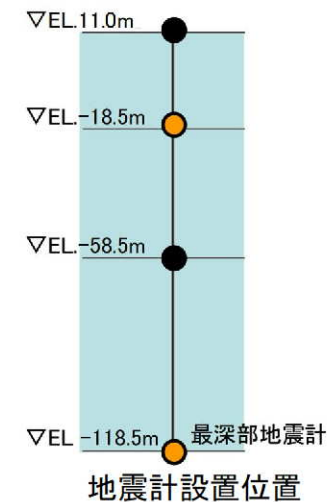
鉛直アレイ観測記録に基づく地盤同定結果

NS方向	層	層上面 EL (m)	密度 ρ (g/cm ³)	V_s (km/s)	減衰	
					Q_0	α
	1	11.0	2.70	1.29	1.29	0.45
	2	-18.5	2.70	1.78	1.47	0.45
	3	-58.5	2.70	1.80	1.47	0.45

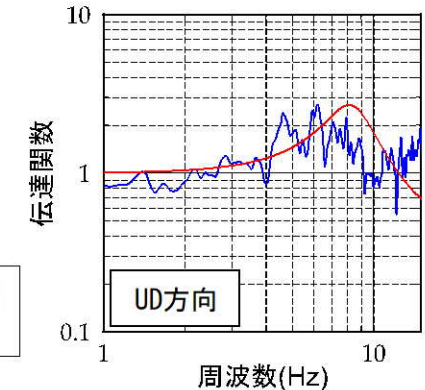
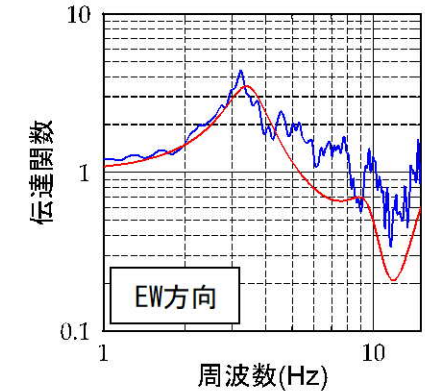
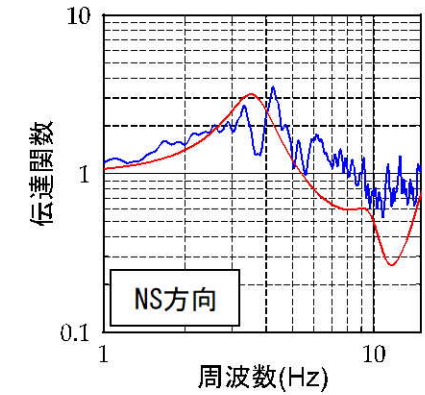
EW方向	層	層上面 EL (m)	密度 ρ (g/cm ³)	V_s (km/s)	減衰	
					Q_0	α
	1	11.0	2.70	1.34	1.73	0.32
	2	-18.5	2.70	1.60	1.85	0.32
	3	-58.5	2.70	1.78	1.93	0.32

UD方向	層	層上面 EL (m)	密度 ρ (g/cm ³)	V_p (km/s)	減衰	
					Q_0	α
	1	11.0	2.70	3.05	0.70	0.48
	2	-18.5	2.70	4.07	0.78	0.48
	3	-58.5	2.70	4.11	0.78	0.48

※ $Q(f) = Q_0 \cdot f^\alpha$



— 理論伝達関数(同定地下構造モデル)
— 地震観測記録による伝達関数

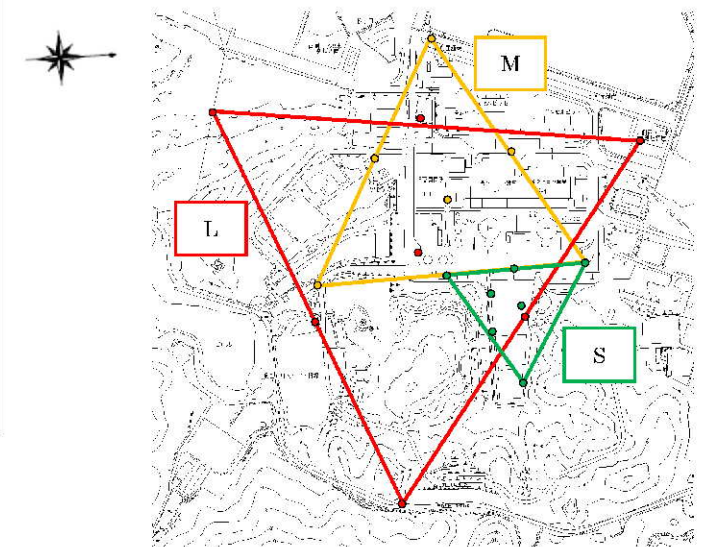


【参考③】既許可の地下構造モデル

◆微動アレイ観測記録に基づく地盤同定

- 一辺が約930mのLアレイ、約570mのMアレイ、約280mのSアレイについて、それぞれの頂点3点、中点3点、重心位置の計7点で微動観測を実施。
- 微動観測から得られたそれぞれの分散曲線に対して、アレイサイズに応じた推定可能範囲により、Lアレイは0.45-1Hz、Mアレイは1-2.5Hz、Sアレイは2.5-5.8Hzの帯域を切り出して重ね合わせ、観測分散曲線を作成し、S波速度の同定を実施。
- EL. -28.5mからEL. -118.5mまでは、鉛直アレイ地震観測記録及び微動アレイ観測結果による平均的な速度構造を採用。
- EL. -118.5mからEL. -1018.5mまでは、微動アレイ観測結果を採用。

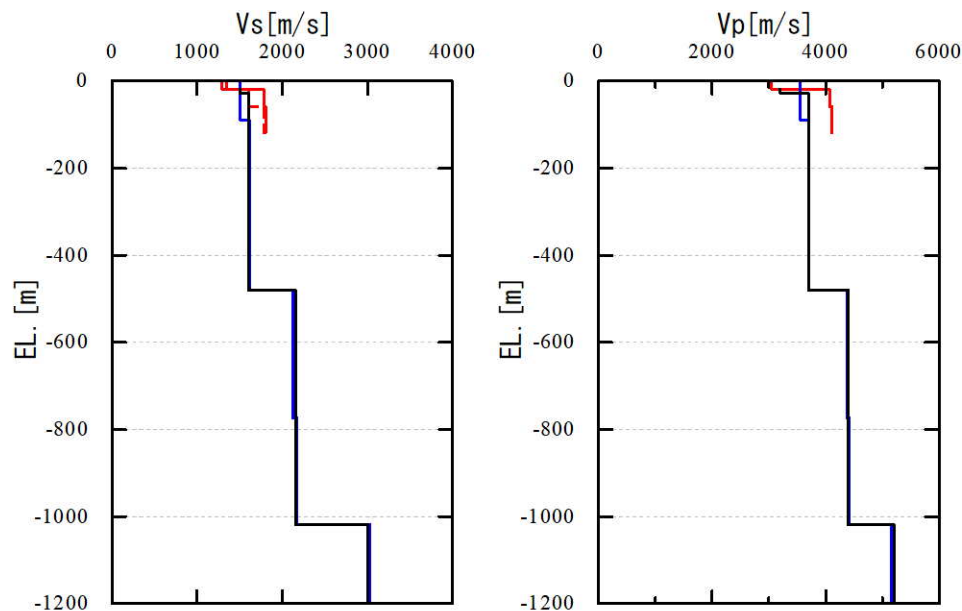
第18回審査会合資料より抜粋(一部修正)



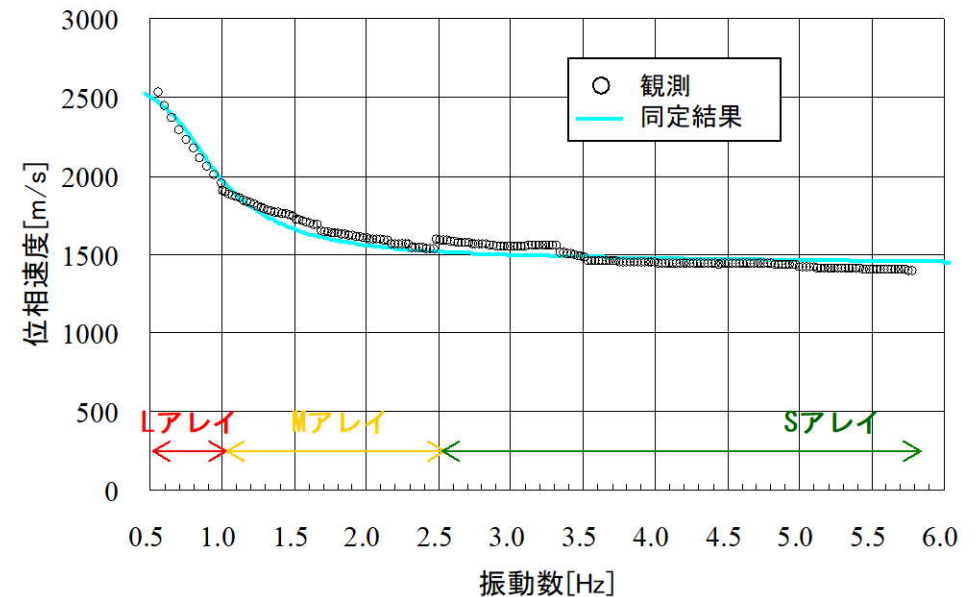
微動アレイ観測位置

— 同定結果 (伝達関数 NS方向)
 ... 同定結果 (伝達関数 EW方向)
 — 同定結果 (微動アレイ)
 — 既許可の地下構造モデル

— 同定結果 (伝達関数 UD方向)
 — 同定結果 (微動アレイ)
 — 既許可の地下構造モデル



伝達関数及び微動アレイによる同定結果



観測分散曲線と理論分散曲線

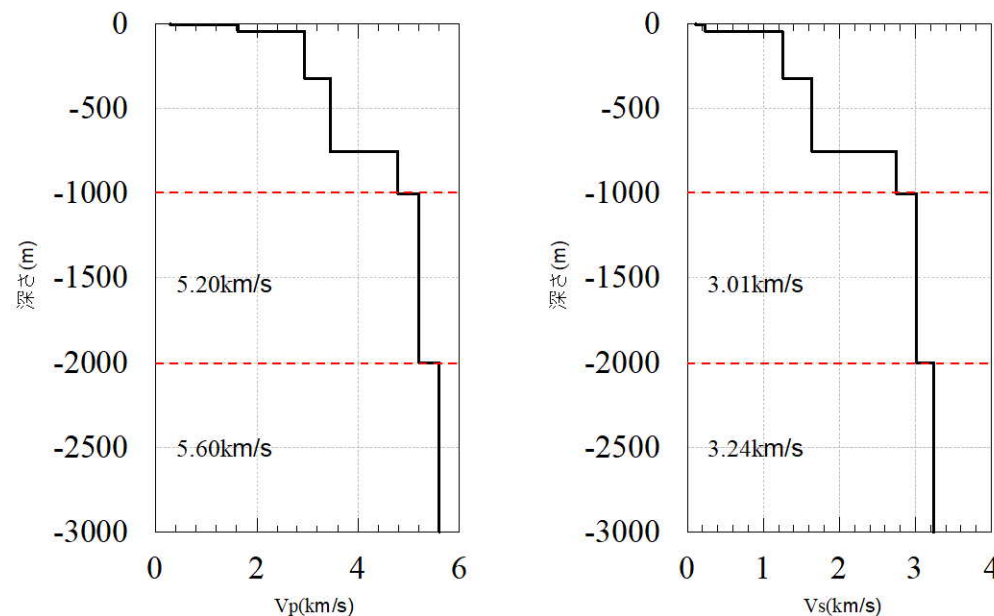
【参考③】既許可の地下構造モデル

■ 既許可の地下構造モデルの設定 (EL. -1018.5~EL. -3018.5mまで)

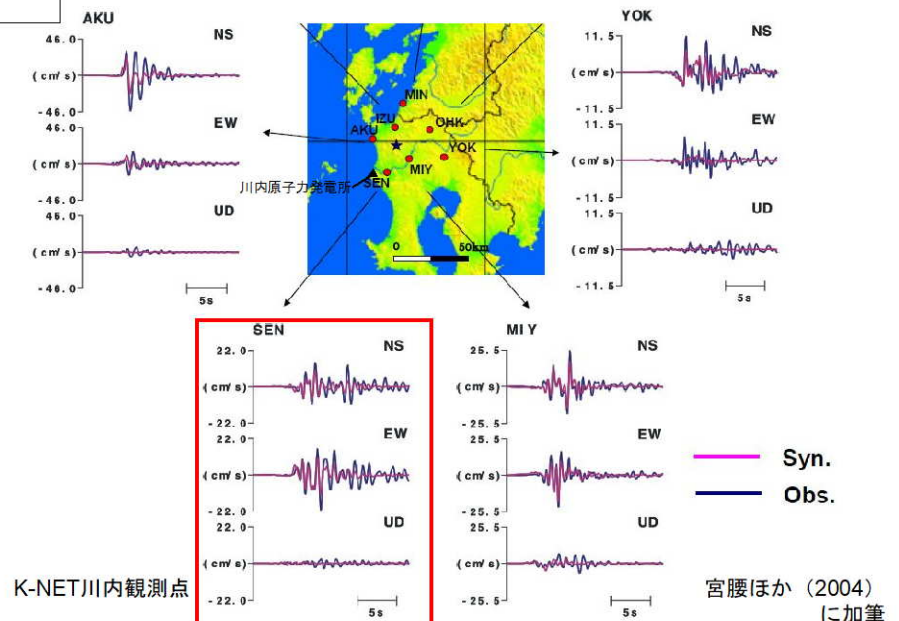
第18回審査会合資料より抜粋(一部修正)

EL.	層上面 (km)	密度 ρ (g/cm ³)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値	設定根拠 (Vs、Vp)
解放基盤表面						
-18.5m	0.0	2.70	1500	3200	100	試掘坑内弾性波試験
-28.5m	-0.01	2.70	1600	3700	100	鉛直アレイ及び微動アレイの速度構造を基に設定
-480m	-0.462	2.70	2150	4400	200	
-1018.5m	-1.0	2.70	3010	5200	200	宮腰ほか(2004)
-2018.5m	-2.0	2.70	3240	5600	300	
-3018.5m	-3.0	2.70	3500	5900	300	
-17018.5m	-17.0	3.00	3800	6600	500	地震調査委員会(2003)
-33018.5m	-33.0	3.30	4300	7600	500	

- 層上面EL. -1.0km~EL. -3.0kmまでの地盤物性値については、宮腰ほか(2004)を参考に設定。
- 宮腰ほか(2004)では、中規模地震(1997年3月26日鹿児島県北西部地震余震)のK-NET観測記録をもとに、R/Vレシーバ関数を用い、K-NET観測地点の地下構造モデルを推定している。
- 敷地から最も近いK-NET川内観測点で推定された地下構造を地震動評価に用いる



宮腰ほか(2004)により推定された地下構造モデル(K-NET川内観測点)



1997年3月26日鹿児島県北西部地震におけるK-NET観測記録と震源インバージョンの震源モデルによる計算結果

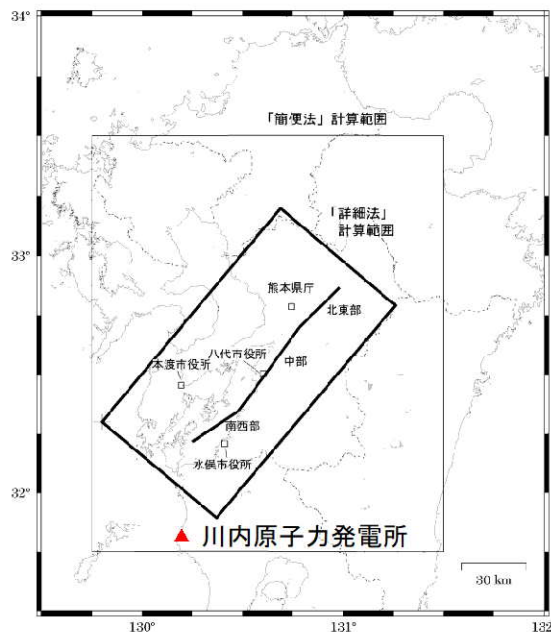
【参考③】既許可の地下構造モデル

■ 既許可の地下構造モデルの設定 (EL. -3018.5m以深)

EL.	層上面 (km)	密度 ρ (g/cm ³)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値	設定根拠 (Vs、Vp)
解放基盤表面						
-18.5m	0.0	2.70	1500	3200	100	試掘坑内弾性波試験
-28.5m	-0.01	2.70	1600	3700	100	鉛直アレイ及び微動アレイの速度構造を基に設定
-480m	-0.462	2.70	2150	4400	200	
-1018.5m	-1.0	2.70	3010	5200	200	宮腰ほか(2004)
-2018.5m	-2.0	2.70	3240	5600	300	
-3018.5m	-3.0	2.70	3500	5900	300	地震調査委員会(2003)
-17018.5m	-17.0	3.00	3800	6600	500	
-33018.5m	-33.0	3.30	4300	7600	500	

第18回審査会合資料より抜粋(一部修正)

- 層上面-3.0km以深については、地震調査委員会(2003)をもとに設定した。
- 地震調査委員会(2003)では、布田川・日奈久断層帯の地震を想定した地震動評価を実施しており、地震基盤以深の地下構造モデルが示されている。



地震基盤以深の各層のモデルパラメータ

名称	上面深度 (km)	層厚 (km)	S波速度 (km/s)	P波速度 (km/s)	密度 (g/cm ³)	Q
上部地殻	3	14	3.5	5.9	2.70	300
下部地殻	17	16	3.8	6.6	3.00	500
上部マントル	33	∞	4.3	7.6	3.30	500

※地震調査委員会(2003)に加筆

【参考③】 既許可の地下構造モデル

■ 鉛直アレイによる既許可の地下構造モデルの確認

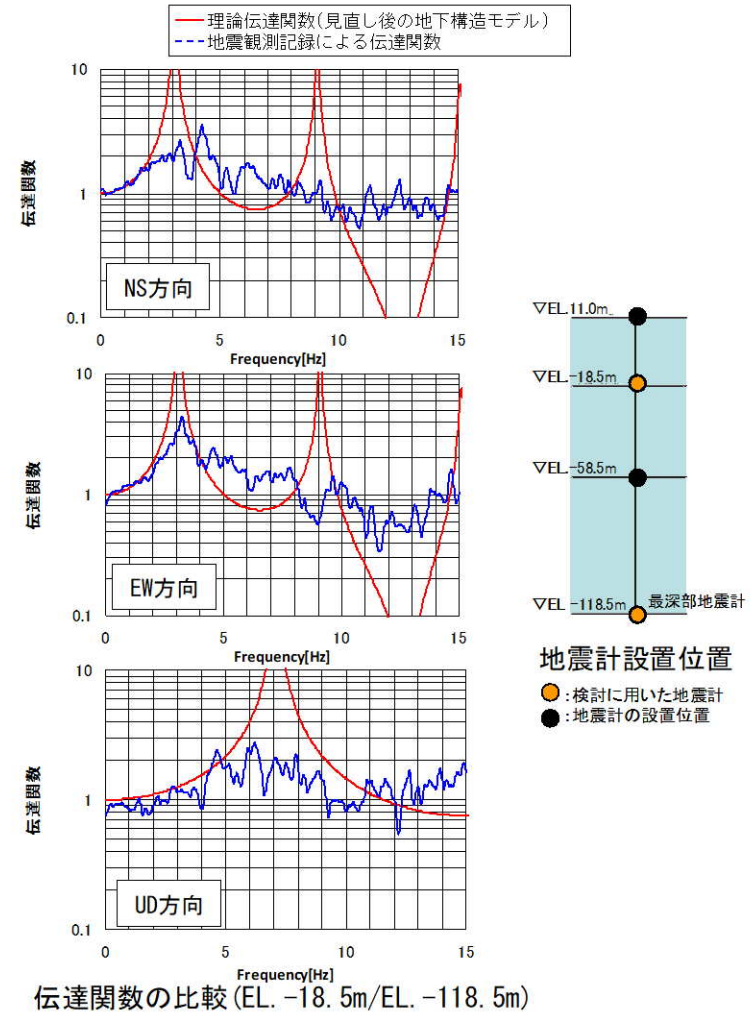
■ 見直し後の地下構造モデルから算出した伝達関数は、鉛直アレイ地震観測記録の伝達関数及び地震観測記録から同定された地下構造による理論伝達関数とほぼ整合していることを確認した。

地下構造モデル（見直し後）

EL. (m)	層	密度 ρ (g/cm^3)	Vs (km/s)	Vp (km/s)	Q値
11.0m	0	2.7	1.50	3.20	100
-18.5m	1	2.7	1.50	3.20	100
-28.5m	2	2.7	1.60	3.70	100

解放基盤表面 (EL. -18.5m) 上に0層を追加

第114回審査会合資料より抜粋



【参考③】 既許可の地下構造モデル

■ 微動アレイによる既許可の地下構造モデルの確認

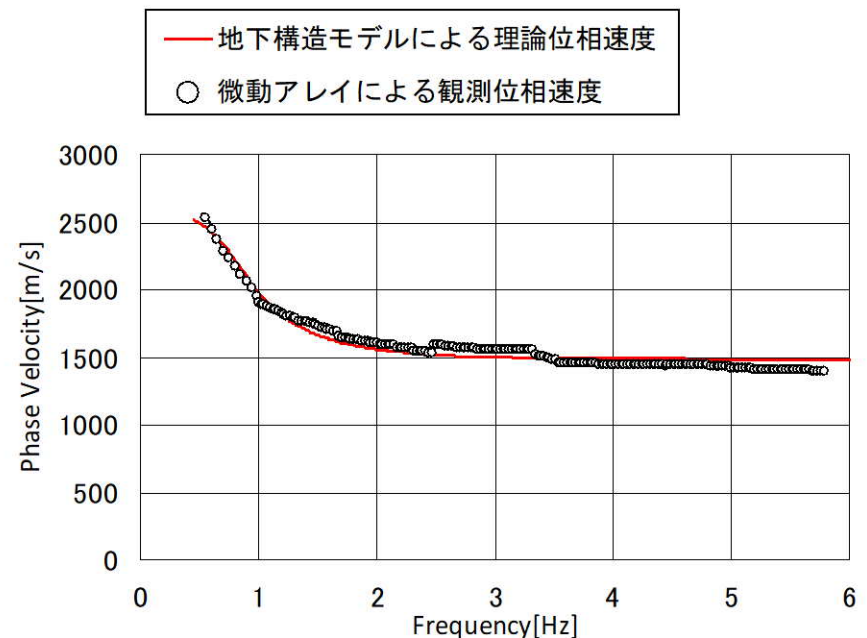
第114回審査会合資料より抜粋

■ 見直し後の地下構造モデルを基に、レイリー波の理論位相速度を算出し、微動アレイ探査結果から得られた観測位相速度と比較すると、両者はおおむね一致することを確認した。

地下構造モデル（見直し後）

EL. (m)	層	密度 ρ (g/cm^3)	V_s (km/s)	V_p (km/s)	Q値
11.0m	0	2.7	1.50	3.20	100
-18.5m	1	2.7	1.50	3.20	100
-28.5m	2	2.7	1.60	3.70	100
-480m	3	2.7	2.15	4.40	200
-1018.5m	4	2.7	3.01	5.20	200

解放基盤表面 (EL. -18.5m) 上に0層を追加



理論位相速度と観測位相速度の比較

【参考④】ボーリング孔内Q値に関する知見

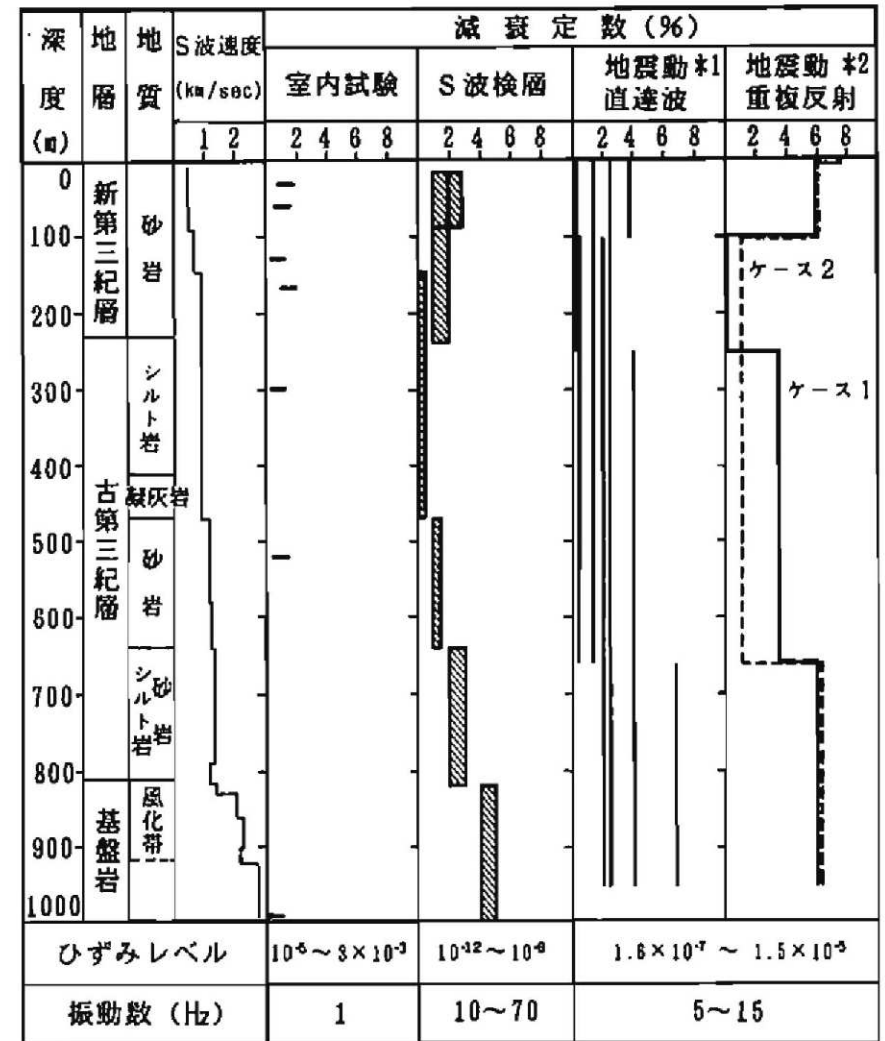
【参考④】ボーリング孔内Q値に関する知見

文献	概要
石田ほか(1987) ⁶⁾	<ul style="list-style-type: none"> ・ S波検層による方法は、比較的純粋なSH波を発生させることができるが、一般に地震時に比べて、ひずみレベルが小さく、卓越振動数が高くなるという問題がある。 ・ 観測地震動を用いる方法は、地盤の地震応答解析を行なうときと同様の条件下で減衰性を評価できるという有利さはあるものの、地盤内での地震波動の伝播が非常に複雑であるため、観測地震動が解析の際に仮定した条件に適合するかどうかの問題である。 ・ S波検層と観測地震動の解析との関係は、ひずみレベルや振動数成分が異なるにも拘わらず、両者の全体の傾向は良く整合している。
小林ほか(2010) ⁷⁾	<ul style="list-style-type: none"> ・ Q値測定は対象の周波数が数10Hz以上と実地震動のそれに比べて高く、且つひずみレベルが小さいという理解もあって、得られた減衰定数が地震動評価（耐震設計）に使われることはそう多くないのが現状。 ・ PS検層と鉛直アレー観測記録から評価される減衰定数において、信頼性のある同一周波数帯のS波に着目した場合、評価手法の違いによる差、あるいはひずみレベルの違いによる差はほとんどない結果が示された。
小林ほか(2013) ⁸⁾	<ul style="list-style-type: none"> ・ PS検層は地表人工震源による弾性波動を扱っていることから対象の周波数が数10Hz以上と実地震動のそれに比べて高く、周波数帯域の違いによる適用上の問題から、PS検層により得られたS波の減衰特性が地震動評価に使われることはそう多くはない。 ・ 鉛直アレー観測及びPS検層から評価されるS波の減衰定数は、PS検層が適用対象とするおよそ10Hzより高周波数側でほぼ一致し、評価手法の違いによる差はほとんどないことが示された。
佐藤(2010) ⁹⁾	<ul style="list-style-type: none"> ・ PS検層による減衰定数は、スペクトル比の逆解析により得られた同定結果の下限值の周波数軸上の延長上に位置しており、両者が減衰定数の下限値において良く対応していることが分かる。 ・ バイリニア型の周波数依存モデルの妥当性と高周波数側への拡張性、ならびにPS検層によって減衰定数の下限値を推定できる可能性を示している。

【参考④】ボーリング孔内Q値に関する知見

■ 石田ほか(1987)⁶⁾の概要

- 同一地点に対する室内試験、S波検層および観測地震動に基づく地盤の減衰性の評価手法を示し、それらの結果の比較考察を実施。
- 観測地震動を用いる方法は、地盤の地震応答解析を行なうときと同様の条件下で減衰性を評価できるという有利さはあるものの、地盤内での地震波動の伝播が非常に複雑であるため、観測地震動が解析の際に仮定した条件に適合するかどうかの問題である。
- S波検層と観測地震動の解析との関係は、ひずみレベルや振動数成分が異なるにも拘わらず、両者の全体の傾向は良く整合している。S波検層で発生する波と地震動とは、地盤内での波の伝播の状況が対照的であり、両者のデータを用いて地盤の減衰を評価する方法は互いに弱点を補い合う関係にあるべきものと考えられる。



*1) 各観測点間ごとの値を示す

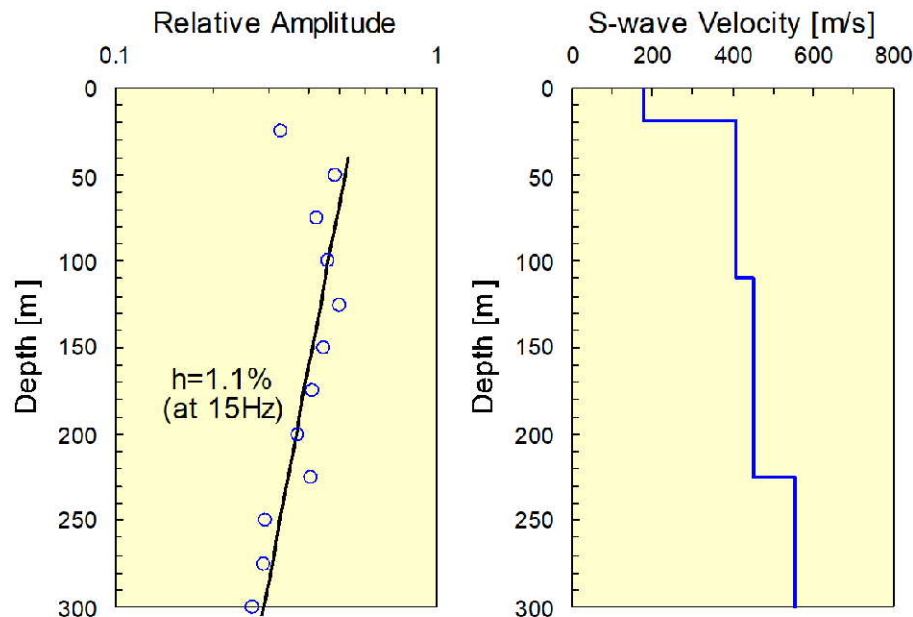
*2) 層分割の異なる2つの最適モデルを示す。

各種の手法による減衰定数の比較

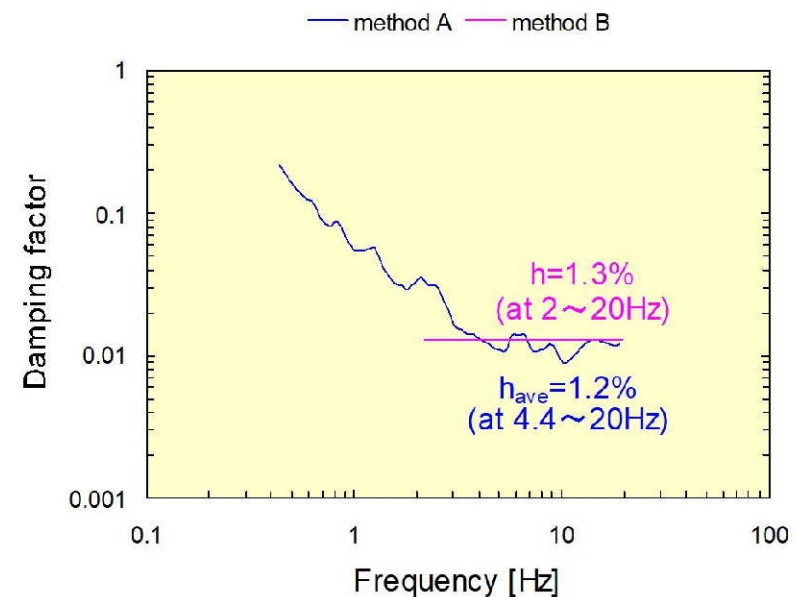
【参考④】ボーリング孔内Q値に関する知見

■ 小林ほか(2010)⁷⁾の概要

- Q値測定は対象の周波数が数10Hz以上と実地震動のそれに比べて高く、且つひずみレベルが小さいという理解もあって、得られた減衰定数が地震動評価（耐震設計）に使われることはそう多くないのが現状。
- 防災科学技術研究所の基盤強震観測網（KiK-net）成田観測点を事例対象として、（PS検層による）Q値測定と鉛直アレー観測から評価されるS波の減衰定数の関係性を数値実験及び実データから検討。
- 成田観測点において、PS検層記録と鉛直アレー観測記録に基づき評価される15Hzにおける減衰定数は共に同程度の値（等価減衰定数1.1~1.3%）を有する。
- PS検層と鉛直アレー観測記録から評価される減衰定数において、信頼性のある同一周波数帯のS波に着目した場合、評価手法の違いによる差、あるいはひずみレベルの違いによる差はほとんどない結果が示された。このことは、Q値測定により得られる地盤の減衰定数が地震動評価に適用できることを示唆している。



成田観測点のQ値解析結果及びS波速度構造



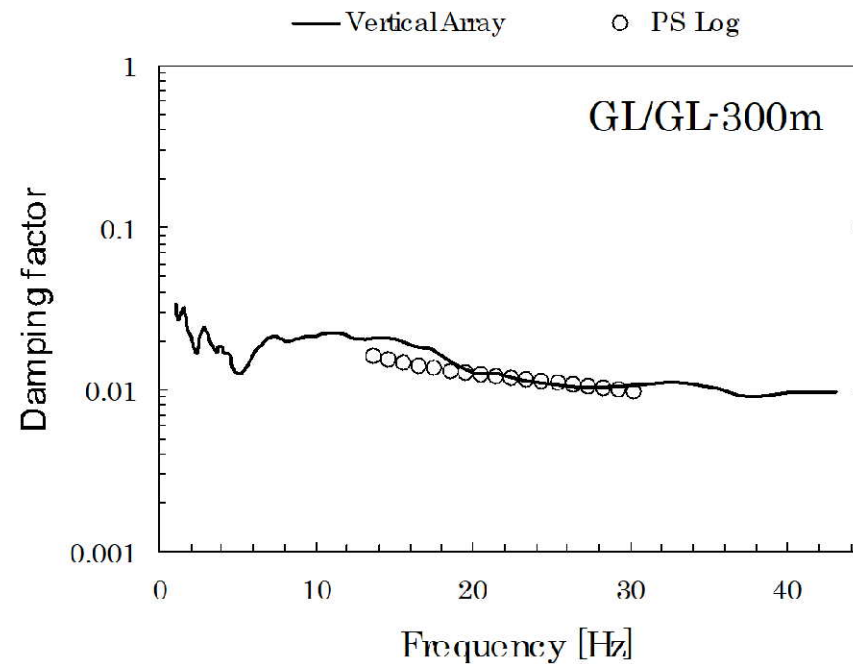
成田観測点の地盤同定解析結果

小林ほか(2010)より抜粋

【参考④】 ボーリング孔内Q値に関する知見

■ 小林ほか(2013)⁸⁾の概要

- ほぼ水平な地質構造を持つ第四紀地盤テストフィールドにおいて、PS検層（ダウンホールPS検層）に基づく減衰定数の評価に関する実証試験を実施。
- 実証試験では、主として鉛直アレー観測による減衰定数の評価結果に対比させる形でPS検層の適用性を検討。
- 両手法から評価されるS波の減衰定数は、PS検層が適用対象とするおよそ10Hzより高周波数側でほぼ一致し、評価手法の違いによる差はほとんどないことが示された。

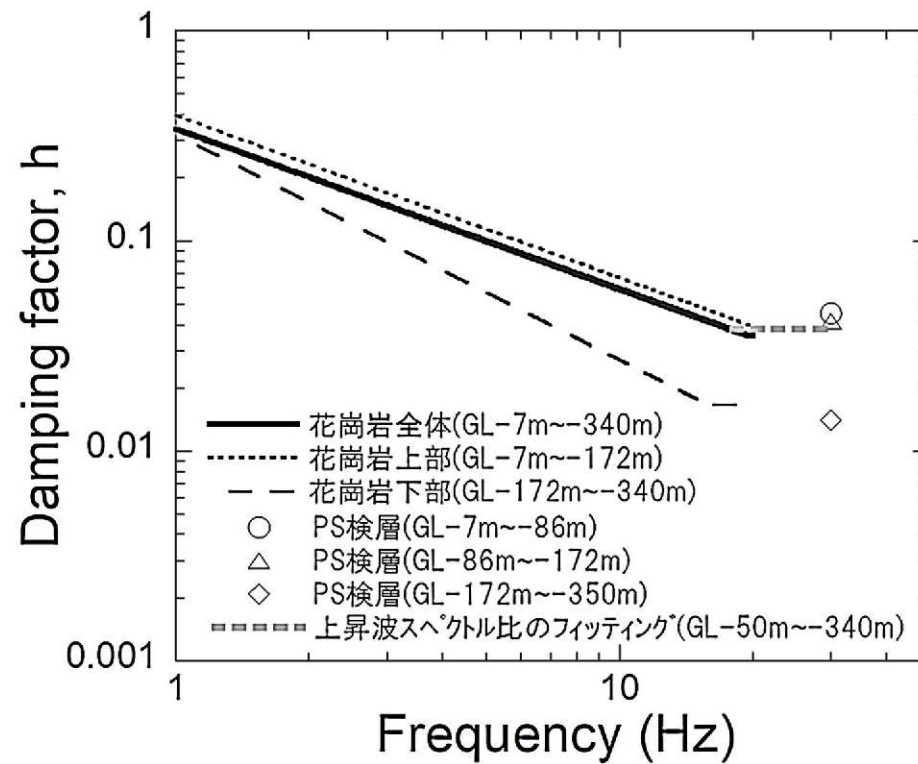


PS検層及び鉛直アレー記録に基づき推定された
S波の減衰定数の比較

【参考④】 ボーリング孔内Q値に関する知見

■ 佐藤 (2010)⁹⁾ の概要

- 花崗岩からなる硬質岩盤において鉛直アレイ観測とPS検層により得られるS波の減衰定数を比較検討。
- PS検層による減衰定数は、スペクトル比の逆解析により得られた同定結果の下限値の周波数軸上の延長上に位置しており、両者が減衰定数の下限値において良く対応していることが分かる。このことは、バイリニア型の周波数依存モデルの妥当性と高周波数側への拡張性、ならびにPS検層によって減衰定数の下限値を推定できる可能性を示している。



異なる手法による減衰定数の評価結果の比較

参考文献

- 1) 宮腰研・PETUHKHIN A・香川敬生(2004)：地殻内地震のやや短周期まで精度のある震源モデルの推定—1997年3月鹿児島県北西部地震と1997年山口県北部地震—、日本地震学会2004年秋季大会予稿集、P065
- 2) 地震調査研究推進本部地震調査委員会(2003)：布田川・日奈久断層帯の地震を想定した強震動評価について
- 3) S. Noda, K. Yashiro, K. Takahashi, M. Takemura, S. Ohno, M. Tohdo and T. Watanabe (2002) : RESPONSE SPECTRA FOR DESIGN PURPOSE OF STIFF STRUCTURES ON ROCK SITES, OECD-NEA Workshop on the Relations between Seismological Data and Seismic Engineering, Oct. 16-18, pp. 399-408.
- 4) 地盤工学会(2013)：地盤の弾性波速度検層方法, JGS1122-2013, 2013年3月
- 5) 信岡大, 東宏幸, 大場政章(2012)：PS検層の手法を用いた地盤減衰特性(Q値)の評価, 物理探査, 第6巻, 第1&2号, 79-90, 2012年
- 6) 石田寛, 太田外気晴, 原昭夫, 高橋克也(1987)：室内試験、S波検層および観測地震動に基づく地盤の減衰評価, 第15回地盤震動シンポジウム, 1987年8月
- 7) 小林源裕, 儘田豊, 堤英明(2010)：PS検層と鉛直アレー観測記録から評価される地盤の減衰定数の関係性, 物理探査学会第122回学術講演会論文集(2010), 37-40, 2010年
- 8) 小林源裕, 儘田豊, 堤英明, 安藤誠, 鈴木晴彦, 松山尚典(2013)：PS検層による地盤のS波の減衰定数の評価に関する検討—鉛直アレー観測による減衰定数との比較—, 物理探査, 第66巻, 第3号, 153-165, 2013年
- 9) 佐藤浩章(2010)：地震観測記録に基づく地震動の減衰特性(その4) —地表に近い岩盤における減衰定数の評価と速度の揺らぎとの関係—, 電力中央研究所報告, N10004, 2010年8月