

2021年2月13日福島県沖地震 はぎとり波の詳細とSs, Sdとの比較

2021年5月27日

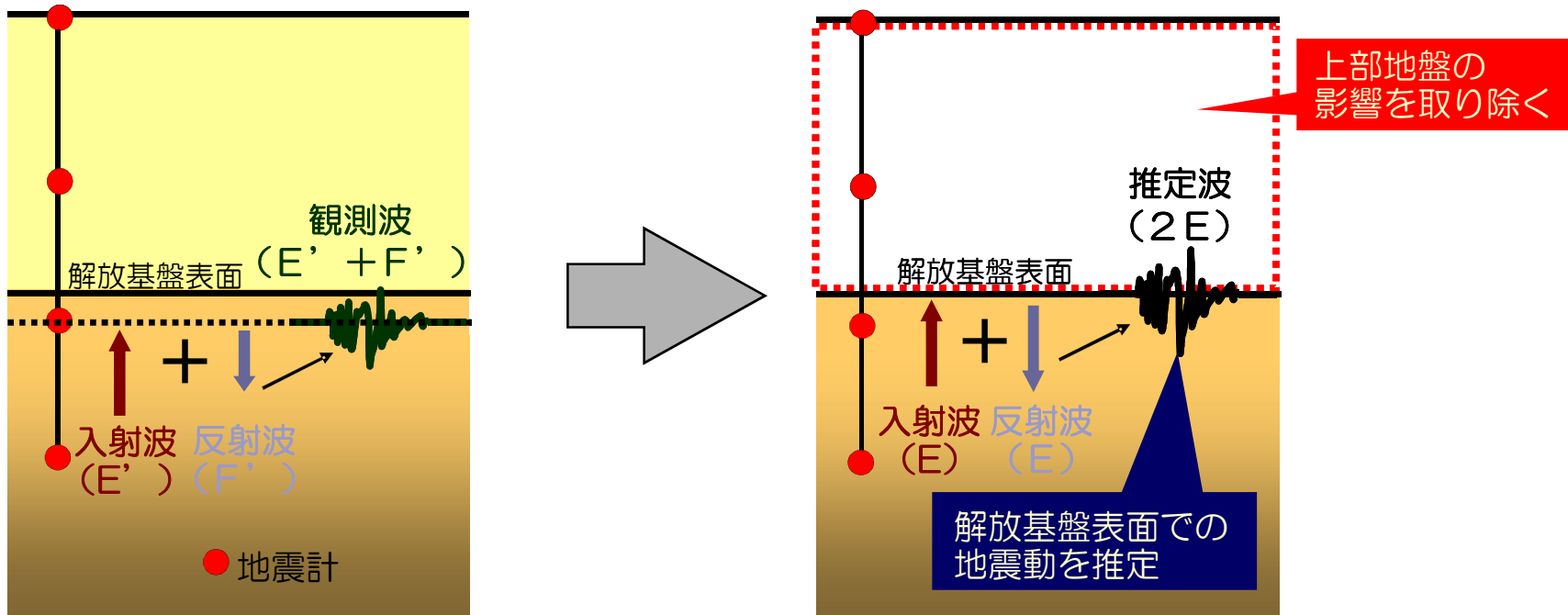


東京電力ホールディングス株式会社

本資料中におけるO.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。
T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.から
T.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
<換算式> $T.P. = \text{旧O.P.} - 1,436\text{mm}$

はぎとり解析の目的

地盤中の記録から，上部地盤の影響を取り除き，解放基盤表面の地震動を推定する。
なお，解放基盤表面の地震動を「はぎとり波」と呼ぶ。



はぎとり解析の概念図

地盤中の記録から，上部地盤の影響を取り除き，はぎとり波を推定する。はぎとり波は，最も観測記録が多く得られている自由地盤系北地点の水平動の分析結果を踏まえ，以下の検討フローに基づき推定する。

①地盤モデル同定

最も観測記録が多く得られている自由地盤系北地点の水平動を対象に，今回の地震観測記録を用いて評価した伝達関数を対象に逆解析を実施し，地盤モデル（以下，今回モデル）を同定。

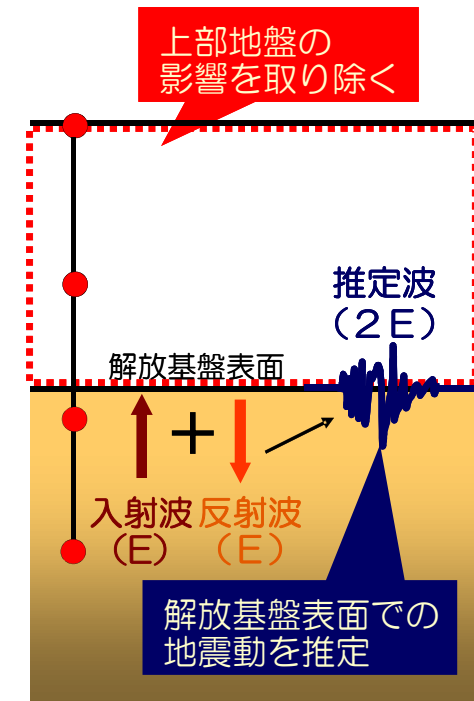
- ・ 逆解析手法はG Aを採用
- ・ 同定の対象としたパラメータ S波速度・減衰
- ・ 層厚，密度についてはPS検層結果を参考に固定

②はぎとり解析用の地盤モデルの設定

①で求めた今回モデルと2011年東北地方太平洋沖地震の観測記録を用いて同定した地盤モデル（以下，既往モデル）を比較。両モデルのS波速度・減衰，理論伝達関数，及びはぎとり波がほぼ同等となることから，既往モデルを用いることが妥当と考えられる。なお，北地点（水平動）については，今回の記録を用いて適切に地盤同定ができたことから今回モデルを用いる。

③はぎとり波推定

②で設定した地盤モデルを用いて，はぎとり波を推定



①地盤モデル同定（今回モデル）

自由地盤系北地点 地盤モデルの同定（水平方向）

- S波の鉛直入射を仮定した一次元波動論に基づく理論地盤伝達特性を当てはめる逆解析により同定
- 観測記録による伝達関数は、方向による差異が無いことを確認後、NS・EW方向の平均で評価
- 同定対象は、S波速度及び減衰（層厚、密度はPS検層結果で固定）
- 探索範囲は以下の通り設定
【S波速度】
 O.P.+14.2m～O.P.+0.2m
 ・・・・初期モデルの0.25～1.2倍
 上記以外・・・初期モデルの0.8～1.2倍

【減衰】

$$h(f) = h_0 \times f^{-\alpha} \quad 0 \leq h(f) \leq 1$$
 探索範囲は h_0, α とも $0 \sim 1$
- 遺伝的アルゴリズムを用い、初期乱数を変えた10回の試行計算を実施。最小誤差を与える地盤モデルを採用。

地盤モデルの同定結果（水平方向）

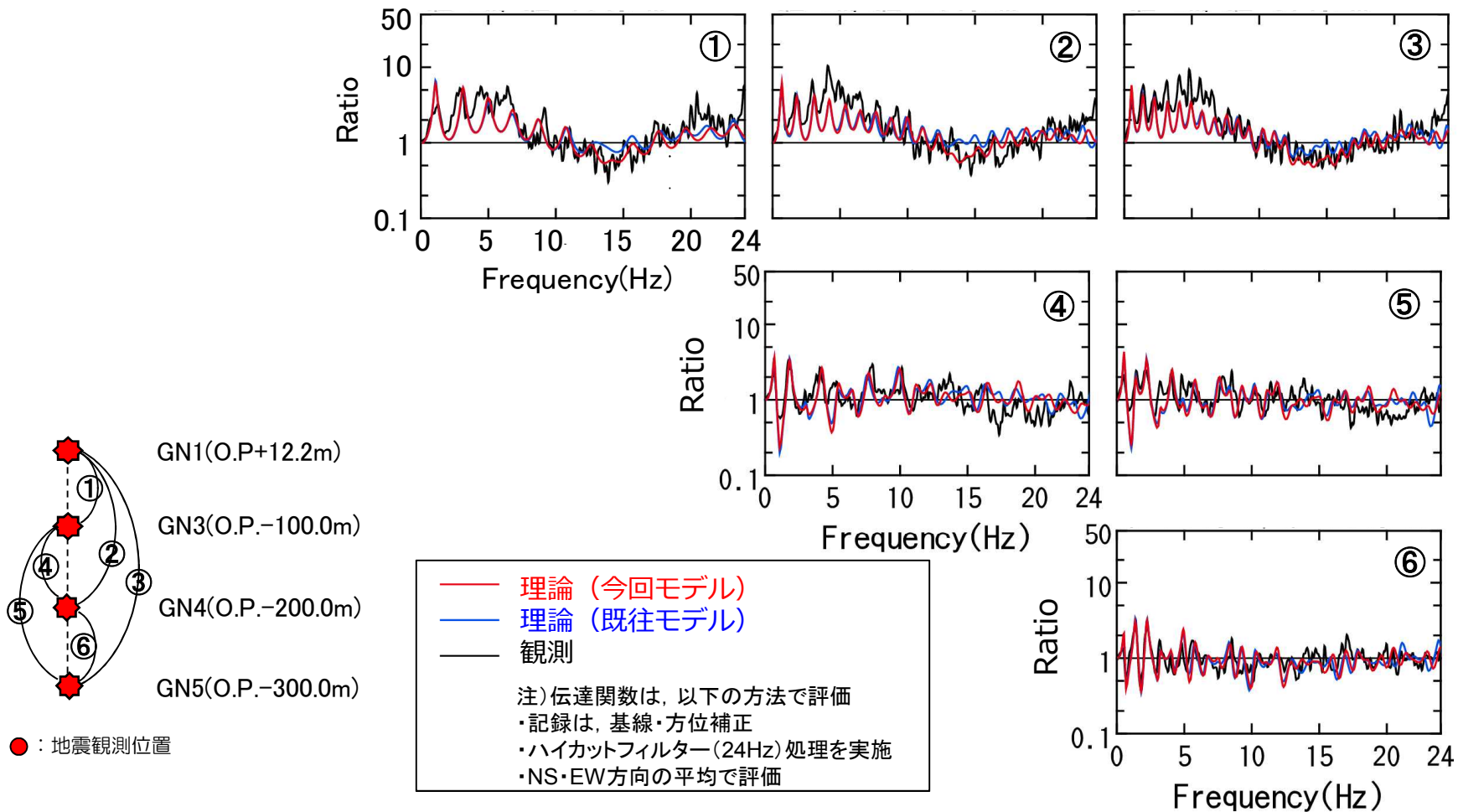
固定パラメータ			初期モデル	同定結果		
O.P.	層厚	密度	S波速度	S波速度	減衰 h(f)=h ₀ × f ^{-α}	
(m)	(m)	(g/cm ³)	(m/s)	(m/s)	h ₀	α
+14.2						
+12.2	2.0	1.70	150	111	0.193	0.26
	12.0	1.80	430	318		
+0.2	5.2	1.68	470	455	0.149	1.00
-5.0	66.8	1.68				
-71.8	22.0	1.70	570	535	0.063	0.87
-93.8	6.2	1.78	610	572		
-100.0	85.8	1.78				
-185.8	10.2	1.83	780	735		
-196.0	4.0	1.83				
-200.0	100.0	1.83				
-300.0	—	1.83				

●：地震観測位置

※固定パラメータPS検層結果による。

②はぎとり解析用の地盤モデルの設定

- ・ 今回モデルの理論伝達関数は観測記録による伝達関数を再現。
- ・ 今回モデルと既往モデルの理論伝達関数はほぼ同等。



今回モデルの理論伝達関数（赤），既往モデルの理論伝達関数（青），
及び観測記録による伝達関数（黒）の比較

②はぎとり解析用の地盤モデルの設定

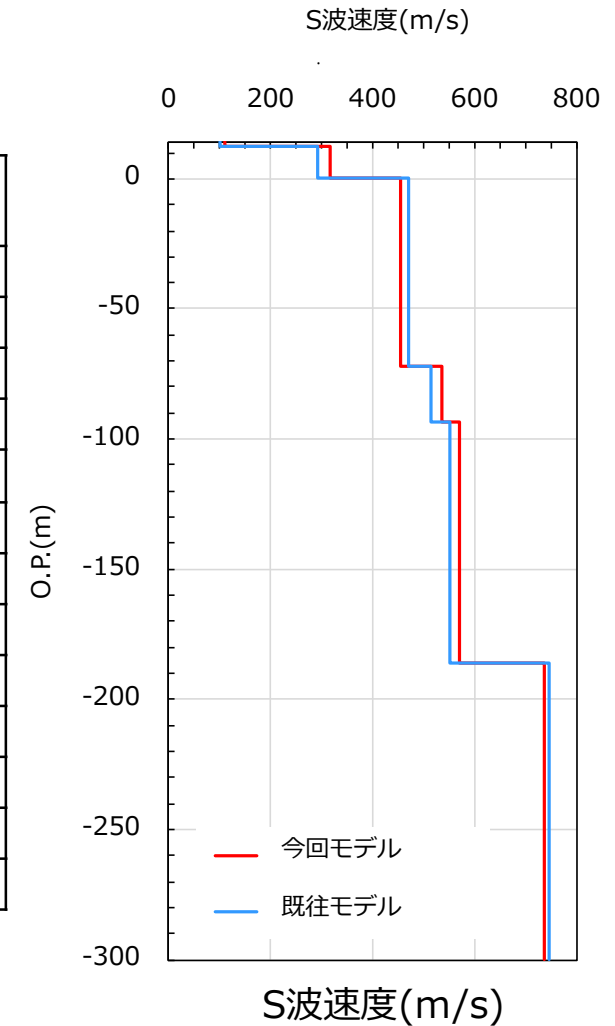
- ・ 同定された今回モデルのS波速度と減衰は既往モデルとほぼ同等。

今回モデル

O.P. (m)	層厚 (m)	S波速度 (m/s)	減衰 $h(f)=h_0 \times f^{-\alpha}$	
			h_0	α
+14.2				
	2.0	111	0.193	0.26
+12.2	12.0	318	0.193	0.26
+0.2	5.2	455	0.149	1.00
-5.0	66.8	455	0.149	1.00
-71.8	22.0	535	0.063	0.87
-93.8	6.2	572	0.063	0.87
-100.0	85.8	572	0.063	0.87
-185.8	10.2	735	0.063	0.87
-196.0	4.0	735	0.063	0.87
-200.0	100.0	735	0.063	0.87
-300.0	—	735	0.063	0.87

既往モデル

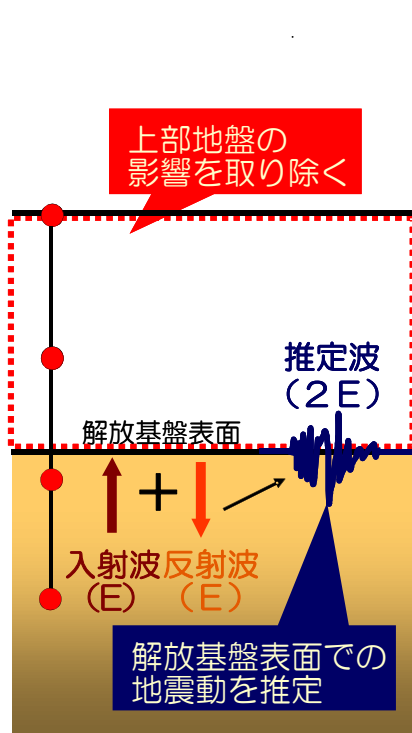
O.P. (m)	層厚 (m)	S波速度 (m/s)	減衰 $h(f)=h_0 \times f^{-\alpha}$	
			h_0	α
+14.2				
	2.0	103	1.000	0.59
+12.2	12.0	294	0.363	0.53
+0.2	5.2	471	0.127	1.00
-5.0	66.8	471	0.127	1.00
-71.8	22.0	515	0.070	0.94
-93.8	6.2	551	0.070	0.94
-100.0	85.8	551	0.070	0.94
-185.8	10.2	746	0.070	0.94
-196.0	4.0	746	0.070	0.94
-200.0	100.0	746	0.070	0.94
-300.0	—	746	0.070	0.94



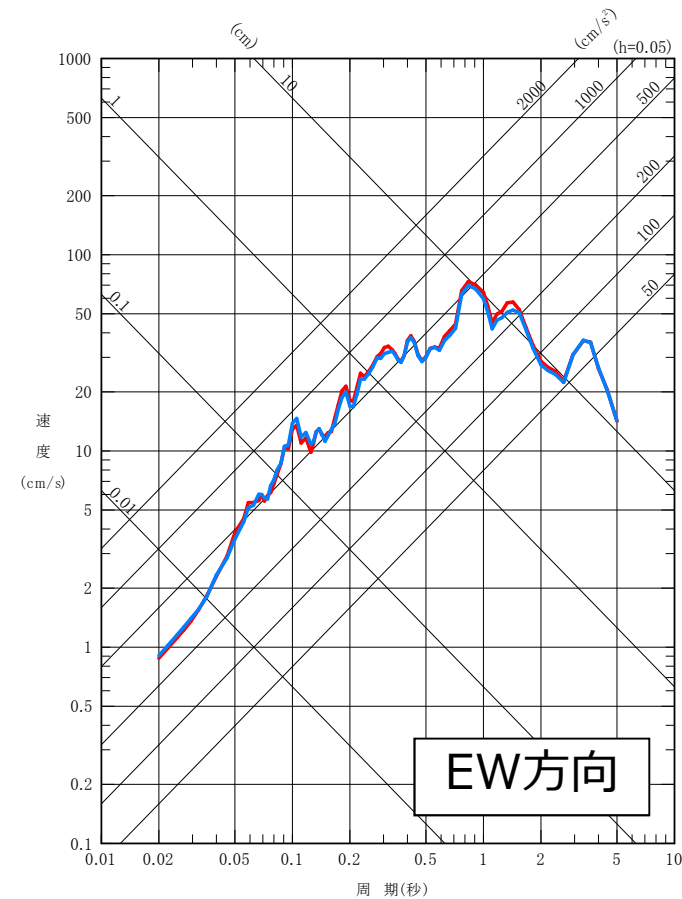
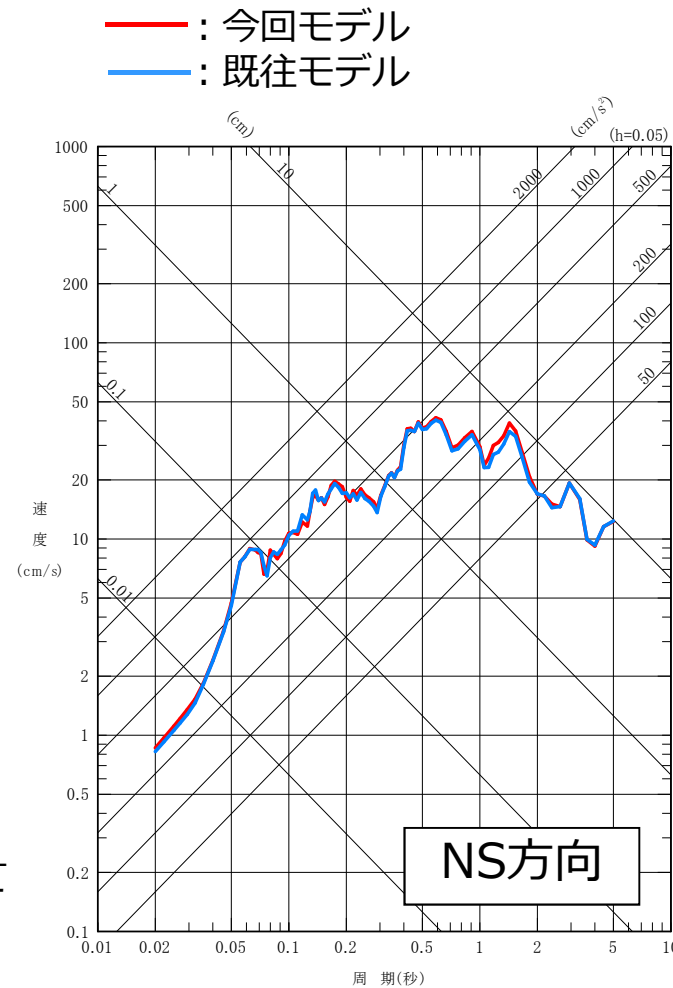
今回モデルと既往モデルのS波速度と減衰の比較

②はぎとり解析用の地盤モデルの設定

- ・ 今回モデルによるはぎとり波は既往モデルによるはぎとり波とほぼ同等。



※解放基盤表面 (O.P.-196m) に最も近いO.P.-200mの位置に設置されている地震計の記録を用いて、はぎとり波を推定。



今回モデルによるはぎとり波 (赤) と既往モデルによるはぎとり波 (青)

②はぎとり解析用の地盤モデルの設定

地盤モデルの設定方針

今回モデルと既往モデルのS波速度・減衰，理論伝達関数，及びはぎとり波がほぼ同等となることから，既往モデルを用いることが妥当と考えられる。なお，北地点（水平動）については，今回の記録を用いて適切に地盤同定ができたことから今回モデルを用いる。

北地点（水平方向）今回モデル

O.P. (m)	層厚 (m)	密度 (g/cm ³)	S波速度 (m/s)	減衰 $h(f)=h_0 \times f^{-\alpha}$	
				h_0	α
+14.2					
	2.0	1.70	111	0.193	0.26
+12.2	12.0	1.80	318	0.193	0.26
+0.2	5.2	1.68	455	0.149	1.00
-5.0	66.8	1.68	455	0.149	1.00
-71.8	22.0	1.70	535	0.063	0.87
-93.8	6.2	1.78	572	0.063	0.87
-100.0	85.8	1.78	572	0.063	0.87
-185.8	10.2	1.83	735	0.063	0.87
-196.0	4.0	1.83	735	0.063	0.87
-200.0	100.0	1.83	735	0.063	0.87
-300.0	—	1.83	735	0.063	0.87

北地点（上下方向）既往モデル

O.P. (m)	層厚 (m)	密度 (g/cm ³)	P波速度 (m/s)	減衰 $h(f)=h_0 \times f^{-\alpha}$	
				h_0	α
+14.2					
	2.0	1.70	1229	0.382	0.40
+12.2	12.0	1.80	1229	0.382	0.40
+0.2	5.2	1.68	1803	0.582	1.00
-5.0	66.8	1.68	1803	0.582	1.00
-71.8	22.0	1.70	1803	0.582	1.00
-93.8	6.2	1.78	1879	0.266	1.00
-100.0	85.8	1.78	1879	0.266	1.00
-185.8	10.2	1.83	1982	0.196	1.00
-196.0	4.0	1.83	1982	0.196	1.00
-200.0	100.0	1.83	1982	0.196	1.00
-300.0	—	1.83	1982	0.196	1.00

②はぎとり解析用の地盤モデルの設定

南地点（水平方向） 既往モデル

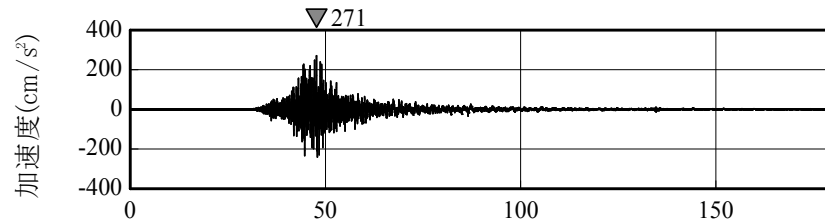
O.P. (m)	層厚 (m)	密度 (g/cm ³)	S波速度 (m/s)	減衰 $h(f)=h_0 \times f^{-\alpha}$	
				h_0	α
+34.9					
	2.0	2.10	285	0.291	0.25
+32.9	6.0	2.10	285	0.291	0.25
+26.9	8.0	2.00	252	0.274	1.00
+18.9	22.0	1.73	400	0.274	1.00
-3.1	1.9	1.73	486	0.107	0.67
-5.0	44.1	1.73	486	0.107	0.67
-49.1	24.0	1.80	486	0.107	0.67
-73.1	24.0	1.80	592	0.107	0.67
-97.1	2.9	1.77	592	0.107	0.67
-100.0	9.1	1.77	592	0.107	0.67
-109.1	46.0	1.77	659	0.063	1.00
-155.1	40.0	1.76	659	0.063	1.00
-195.1	0.9	1.76	740	0.063	1.00
-196.0	4.0	1.76	740	0.063	1.00
-200.0	10.1	1.76	740	0.063	1.00
-210.1	89.9	1.81	740	0.063	1.00
-300.0	—	1.81	740	0.063	1.00

南地点（上下方向） 既往モデル

O.P. (m)	層厚 (m)	密度 (g/cm ³)	P波速度 (m/s)	減衰 $h(f)=h_0 \times f^{-\alpha}$	
				h_0	α
+34.9					
	2.0	2.10	366	0.139	0.55
+32.9	6.0	2.10	366	0.139	0.55
+26.9	8.0	2.00	1042	1.000	0.71
+18.9	22.0	1.73	1502	1.000	0.71
-3.1	1.9	1.73	1823	0.627	1.00
-5.0	44.1	1.73	1823	0.627	1.00
-49.1	24.0	1.80	1823	0.627	1.00
-73.1	24.0	1.80	1823	0.627	1.00
-97.1	2.9	1.77	1823	0.627	1.00
-100.0	9.1	1.77	1823	0.627	1.00
-109.1	46.0	1.77	1907	0.252	1.00
-155.1	40.0	1.76	1907	0.252	1.00
-195.1	0.9	1.76	2108	0.252	1.00
-196.0	4.0	1.76	2108	0.252	1.00
-200.0	10.1	1.76	2108	0.252	1.00
-210.1	89.9	1.81	2108	0.252	1.00
-300.0	—	1.81	2108	0.252	1.00

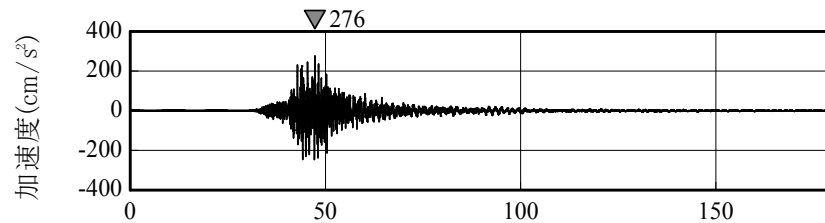
③自由地盤系北地点 はぎとり波の推定（加速度時刻歴波形）

解放基盤表面（O.P.-196m）に最も近いO.P.-200mの位置に設置されている地震計の記録を用いて、はぎとり波を推定。



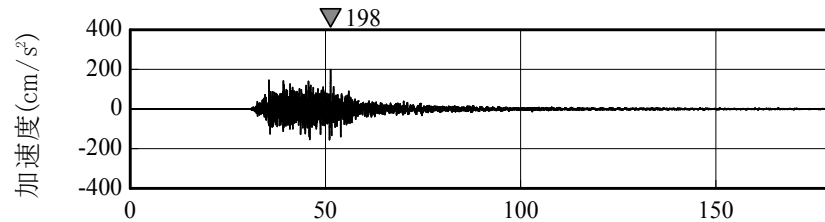
時間(秒)

はぎとり波(NS方向)



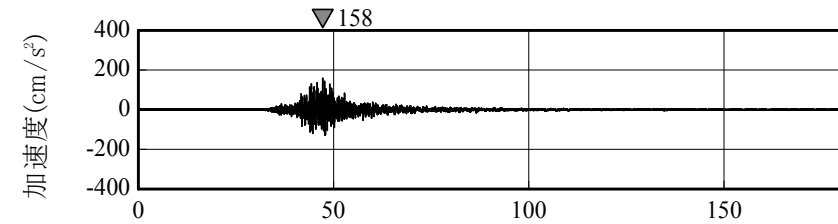
時間(秒)

はぎとり波(EW方向)



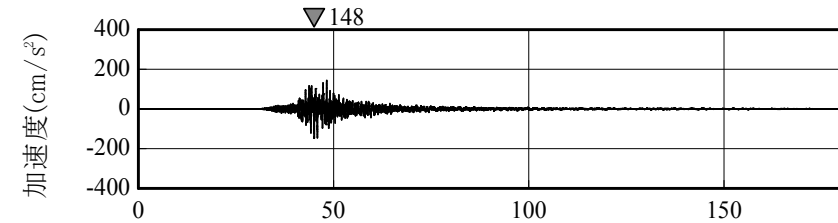
時間(秒)

はぎとり波(UD方向)



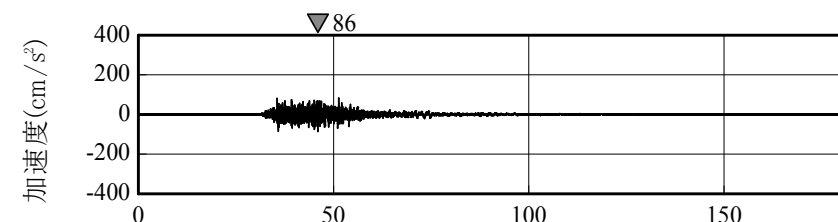
時間(秒)

O.P.-200m観測記録(NS方向)



時間(秒)

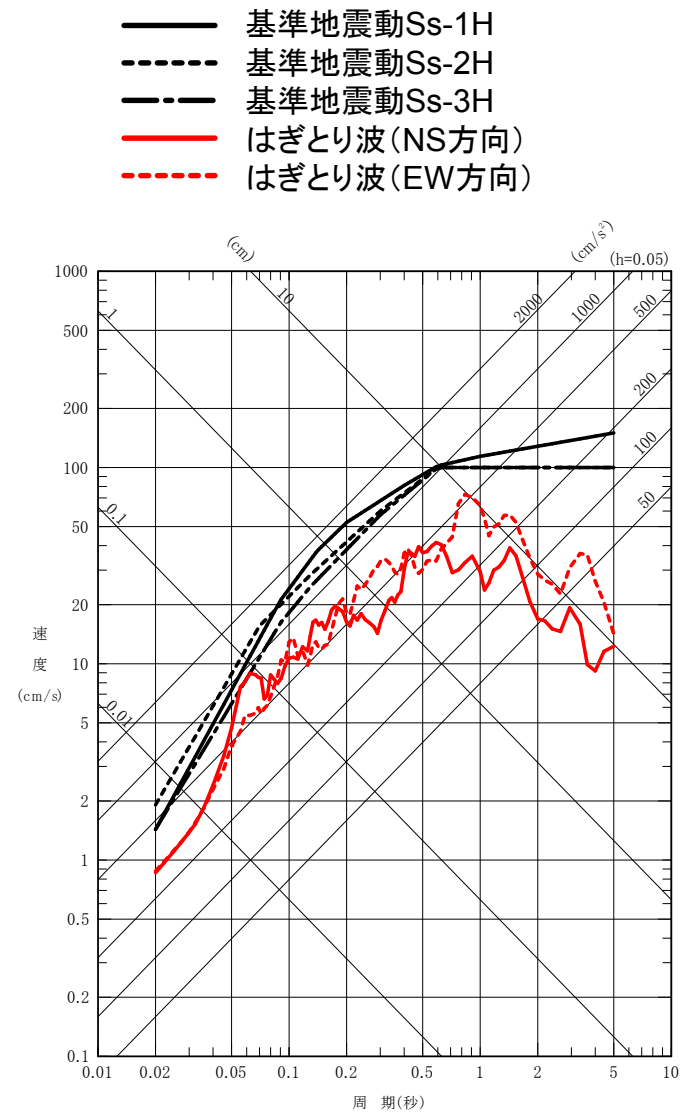
O.P.-200m観測記録(EW方向)



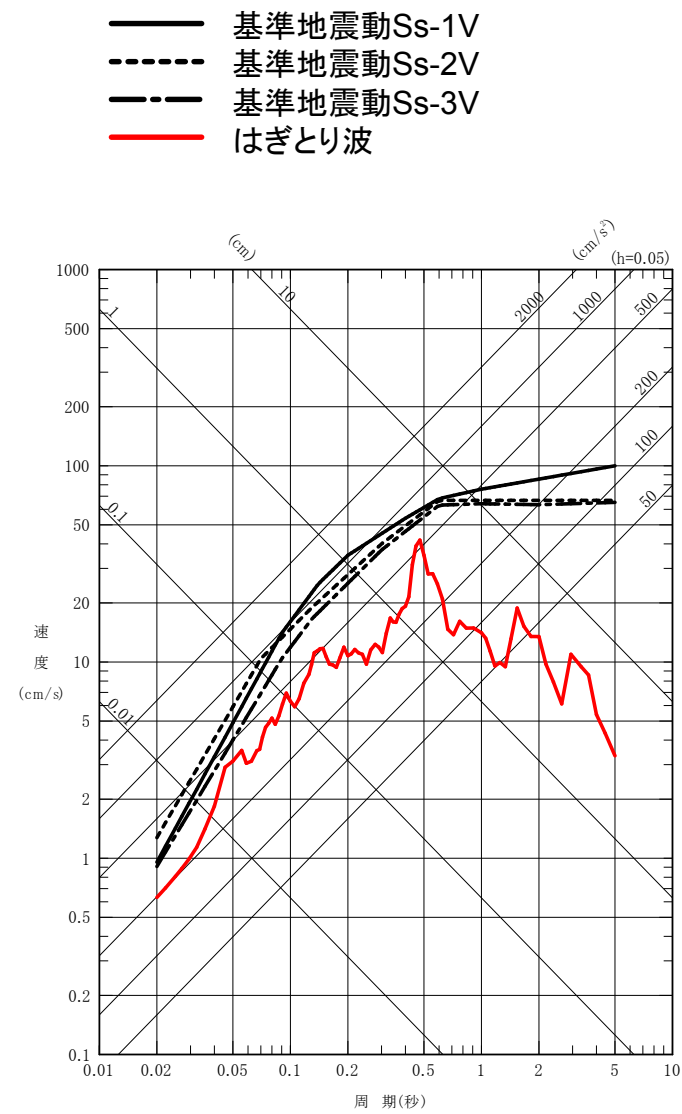
時間(秒)

O.P.-200m観測記録(UD方向)

③自由地盤系北地点 はぎとり波の推定（擬似速度応答スペクトル）



はぎとり波と基準地震動Ssの比較(水平方向)

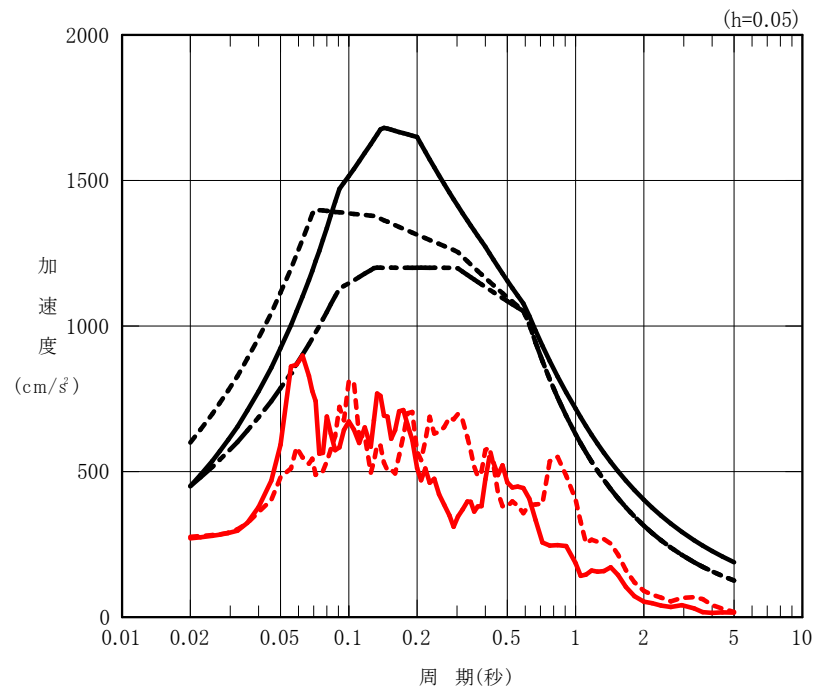


はぎとり波と基準地震動Ssの比較(鉛直方向)

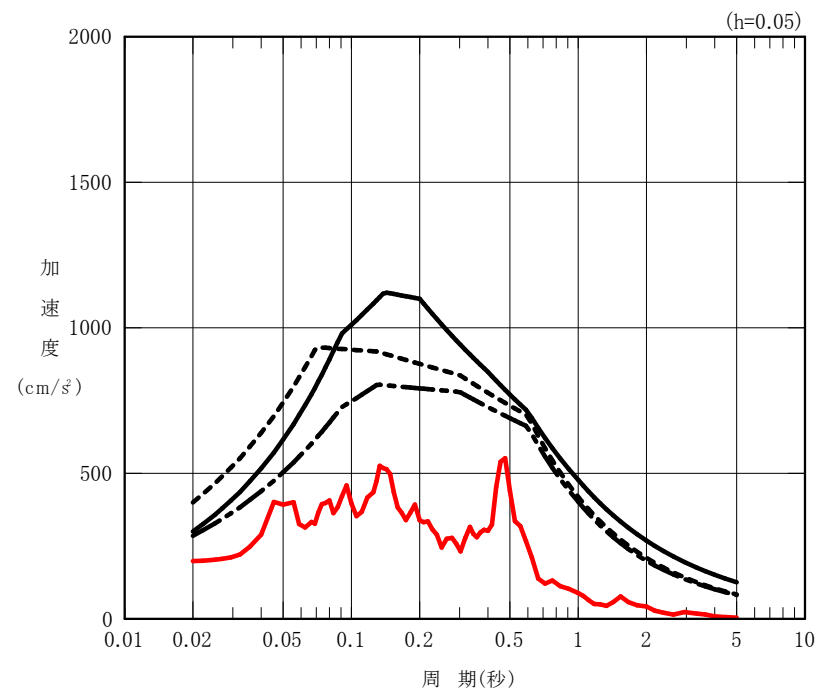
③自由地盤系北地点 はぎとり波の推定（加速度応答スペクトル）

— 基準地震動Ss-1H
 - - - 基準地震動Ss-2H
 - · - 基準地震動Ss-3H
 — はぎとり波(NS方向)
 - - - はぎとり波(EW方向)

— 基準地震動Ss-1V
 - - - 基準地震動Ss-2V
 - · - 基準地震動Ss-3V
 — はぎとり波

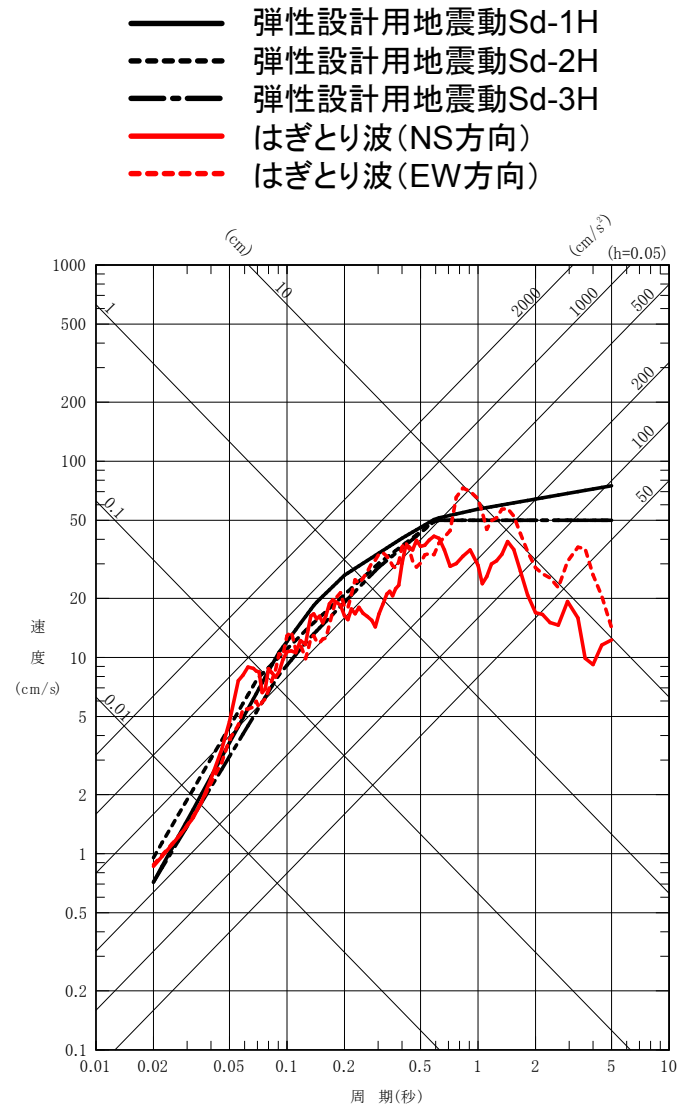


はぎとり波と基準地震動Ssの比較(水平方向)

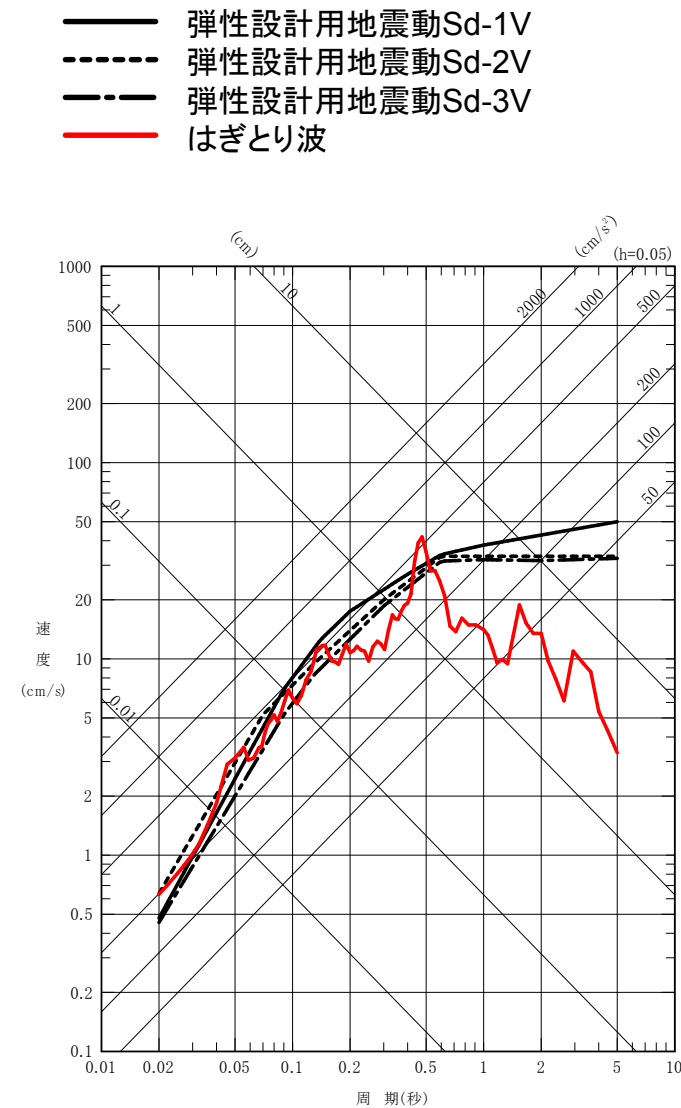


はぎとり波と基準地震動Ssの比較(鉛直方向)

③自由地盤系北地点 はぎとり波の推定（擬似速度応答スペクトル）



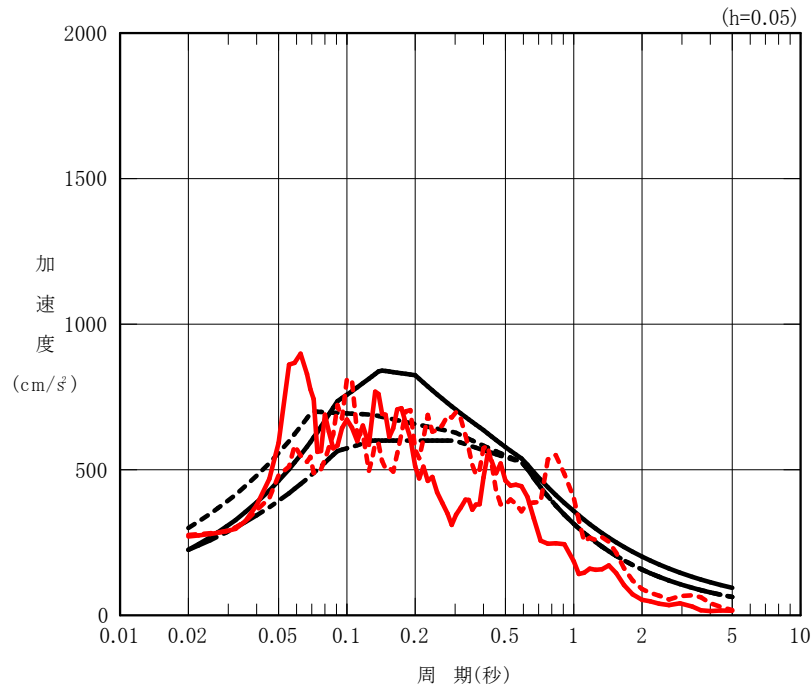
はぎとり波と弾性設計用地震動Sdの比較(水平方向)



はぎとり波と弾性設計用地震動Sdの比較(鉛直方向)

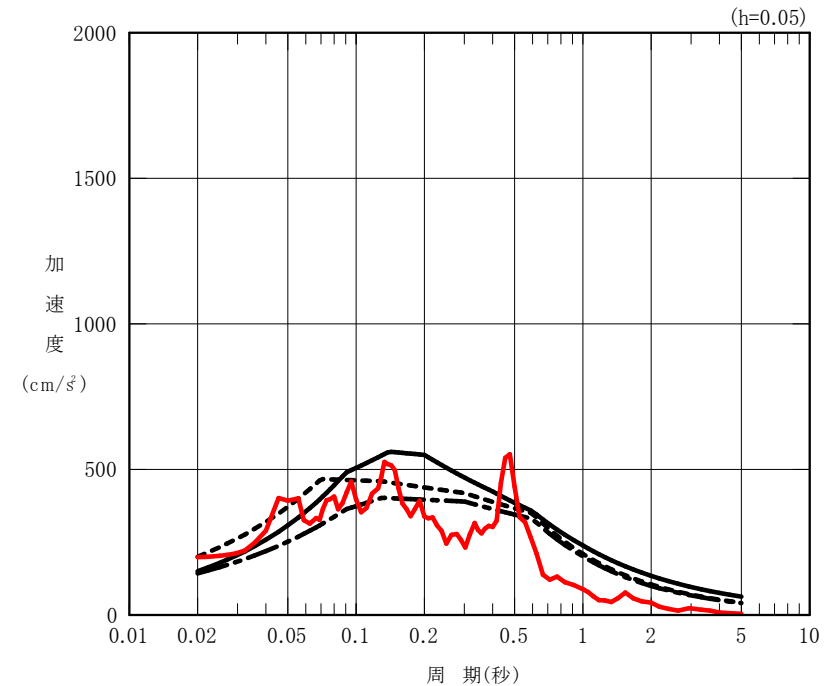
③自由地盤系北地点 はぎとり波の推定（加速度応答スペクトル）

- 弾性設計用地震動Sd-1H
- - - 弾性設計用地震動Sd-2H
- · - 弾性設計用地震動Sd-3H
- はぎとり波(NS方向)
- - - はぎとり波(EW方向)



はぎとり波と弾性設計用地震動Sdの比較(水平方向)

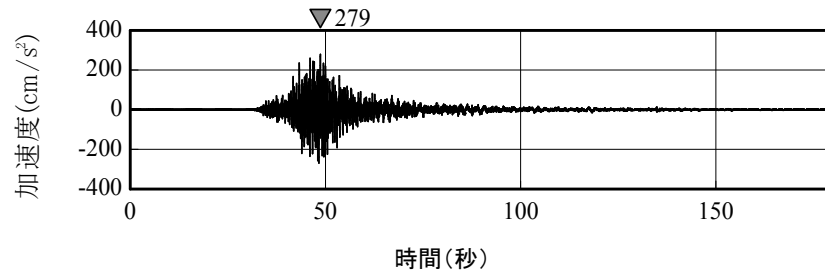
- 弾性設計用地震動Sd-1V
- - - 弾性設計用地震動Sd-2V
- · - 弾性設計用地震動Sd-3V
- はぎとり波



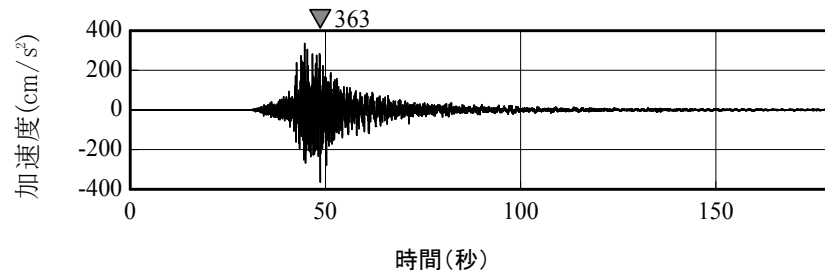
はぎとり波と弾性設計用地震動Sdの比較(鉛直方向)

③自由地盤系南地点 はぎとり波の推定（加速度時刻歴波形）

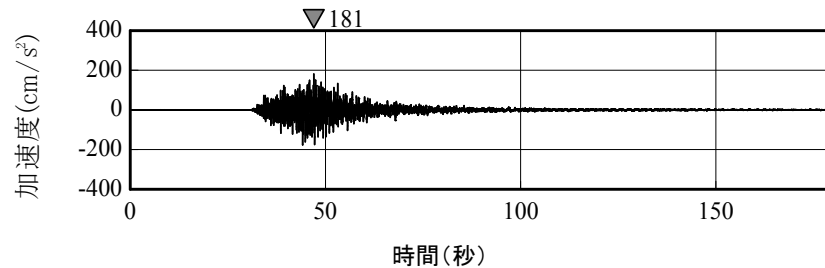
解放基盤表面（O.P.-196m）に最も近いO.P.-200mの位置に設置されている地震計の記録を用いて、はぎとり波を推定。



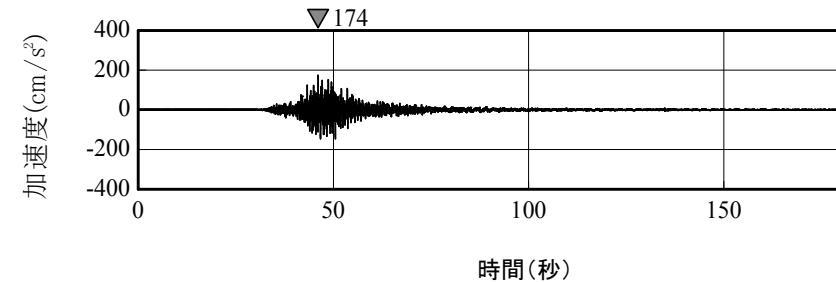
はぎとり波(NS方向)



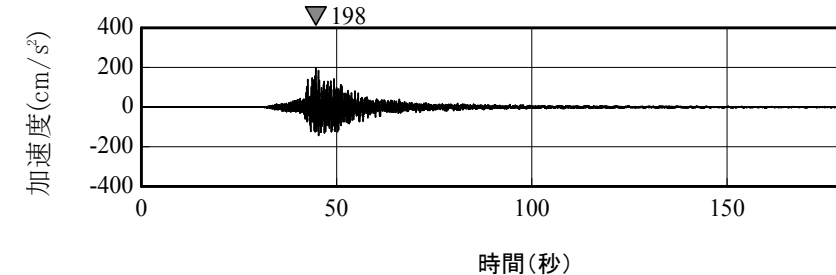
はぎとり波(EW方向)



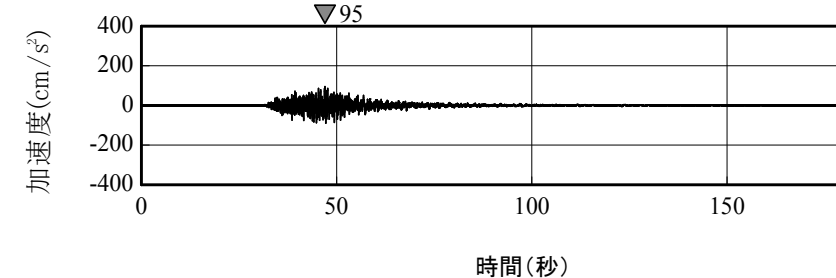
はぎとり波(UD方向)



O.P.-200m観測記録(NS方向)

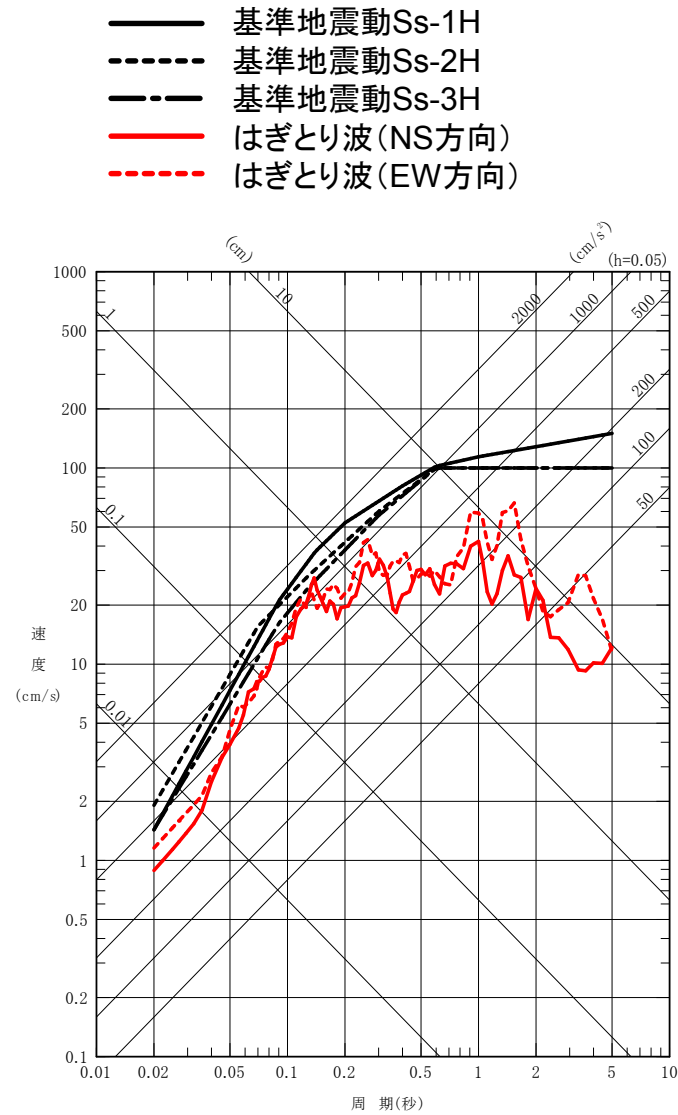


O.P.-200m観測記録(EW方向)

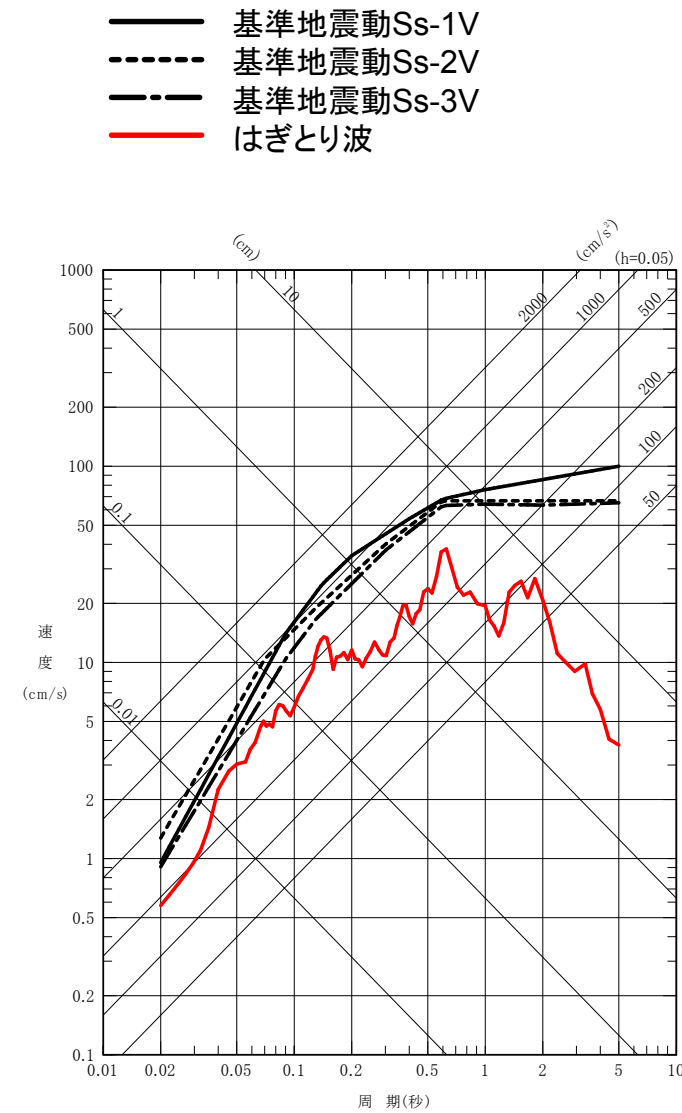


O.P.-200m観測記録(UD方向)

③自由地盤系南地点 はぎとり波の推定（擬似速度応答スペクトル）



はぎとり波と基準地震動Ssの比較(水平方向)

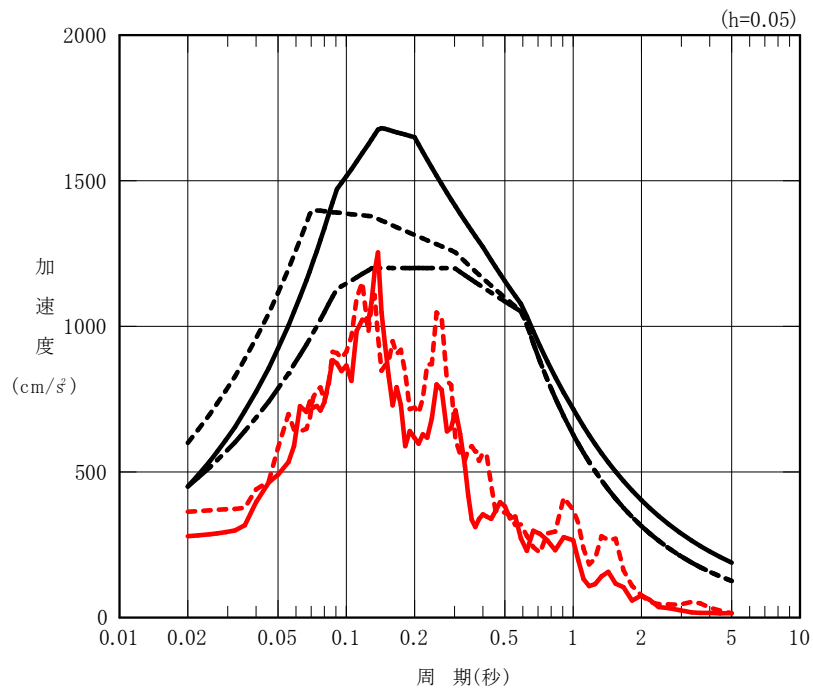


はぎとり波と基準地震動Ssの比較(鉛直方向)

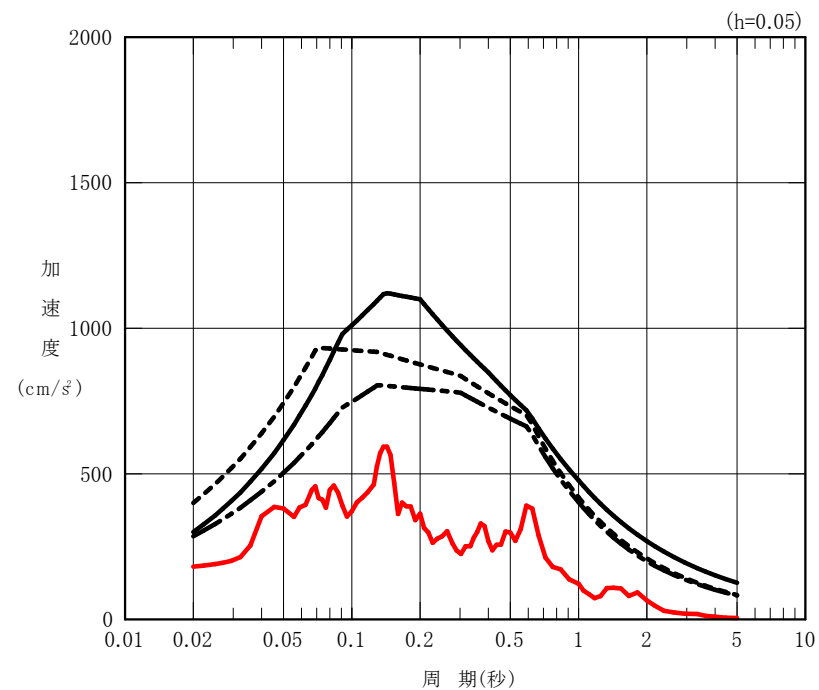
③自由地盤系南地点 はぎとり波の推定（加速度応答スペクトル）

— 基準地震動Ss-1H
 - - - 基準地震動Ss-2H
 - · - 基準地震動Ss-3H
 — はぎとり波(NS方向)
 - - - はぎとり波(EW方向)

— 基準地震動Ss-1V
 - - - 基準地震動Ss-2V
 - · - 基準地震動Ss-3V
 — はぎとり波

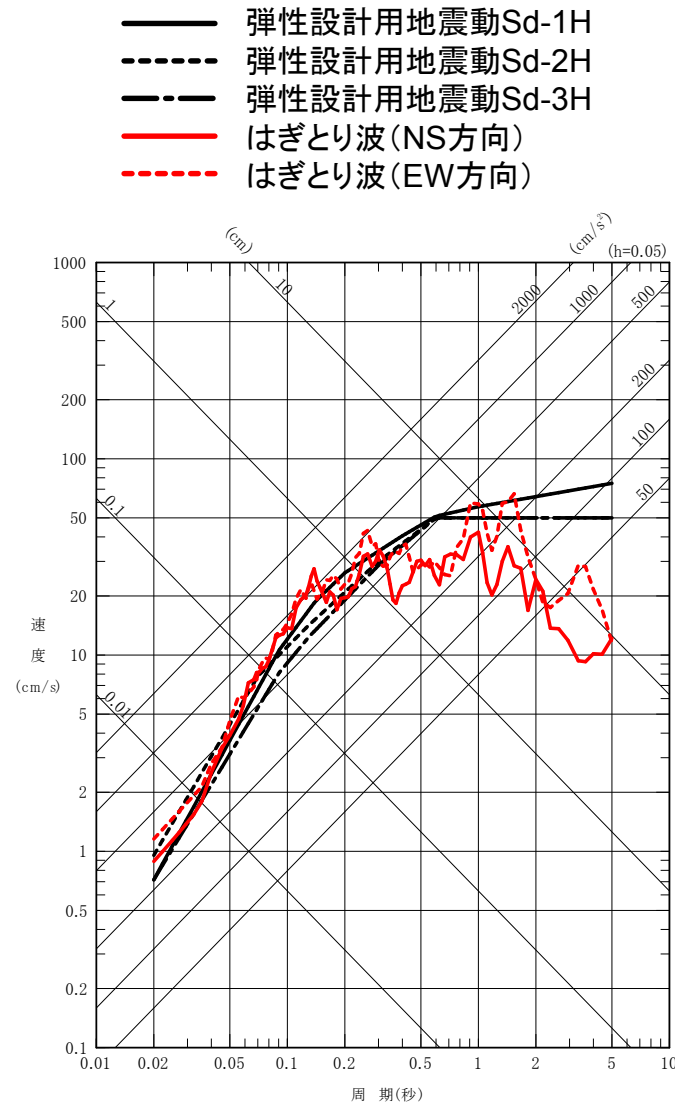


はぎとり波と基準地震動Ssの比較（水平方向）

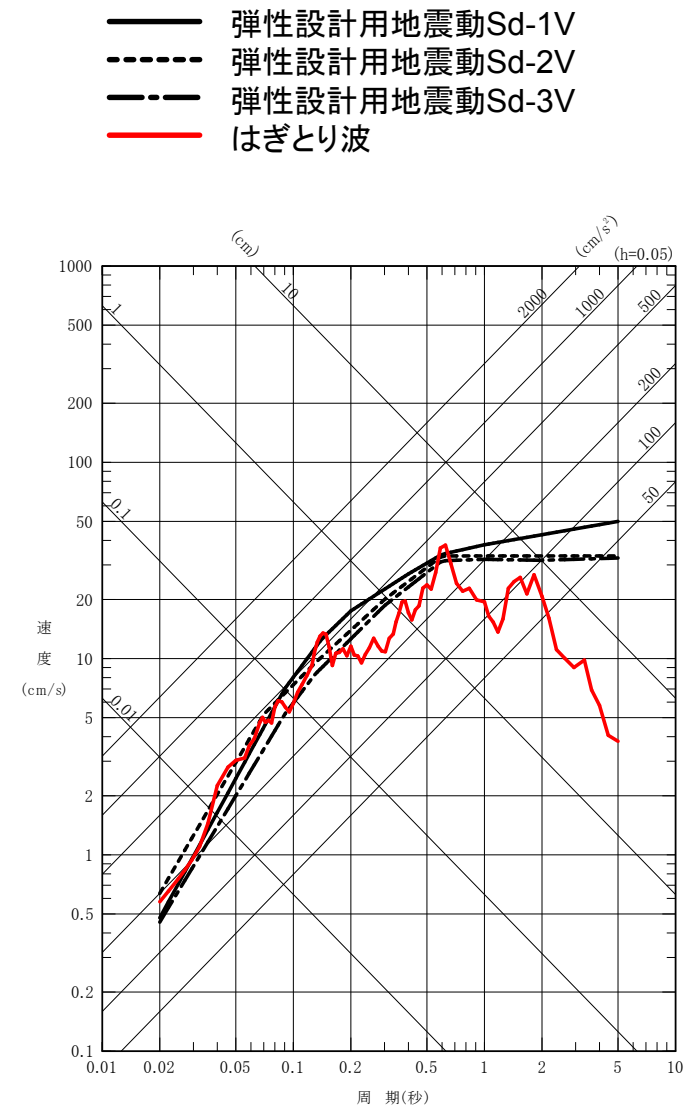


はぎとり波と基準地震動Ssの比較（鉛直方向）

③自由地盤系南地点 はぎとり波の推定（擬似速度応答スペクトル）



はぎとり波と弾性設計用地震動Sdの比較(水平方向)

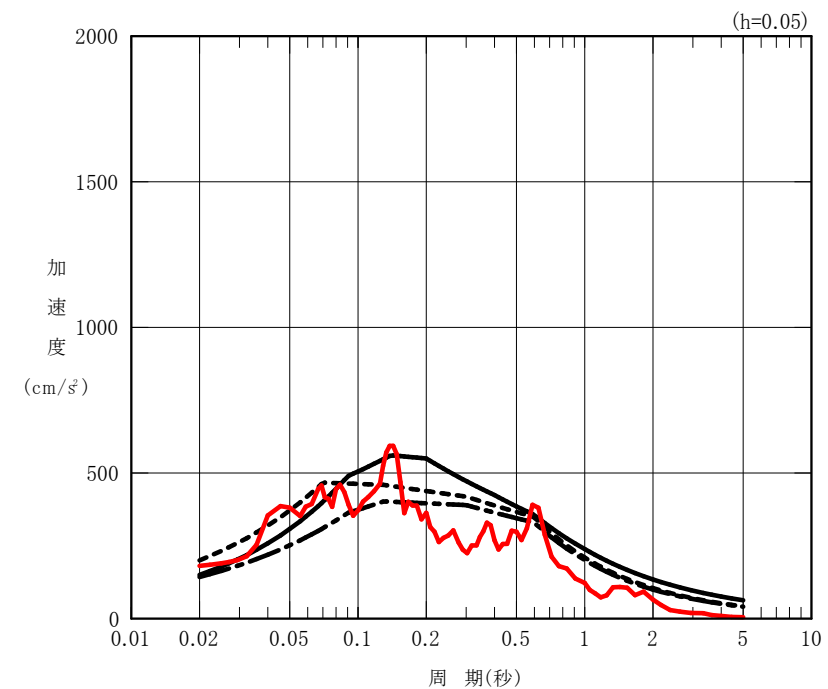
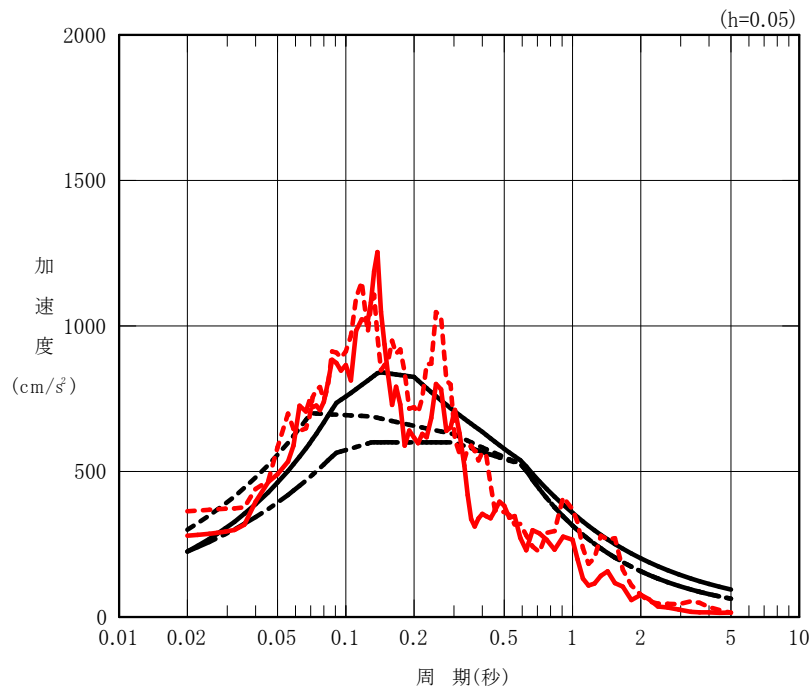


はぎとり波と弾性設計用地震動Sdの比較(鉛直方向)

③自由地盤系南地点 はぎとり波の推定（加速度応答スペクトル）

— 弾性設計用地震動Sd-1H
 - - 弾性設計用地震動Sd-2H
 - · - 弾性設計用地震動Sd-3H
 — はぎとり波(NS方向)
 - - はぎとり波(EW方向)

— 弾性設計用地震動Sd-1V
 - - 弾性設計用地震動Sd-2V
 - · - 弾性設計用地震動Sd-3V
 — はぎとり波



はぎとり波と弾性設計用地震動Sdの比較(水平方向)

はぎとり波と弾性設計用地震動Sdの比較(鉛直方向)