

## 地震波形の解析結果について

## 1. 目的

近年、内閣府の中央防災会議（以下「中央防災会議」という。）等において検討が進められている南海トラフ地震等の、新たな大規模な地震動に対する屋外タンク貯蔵所の耐震安全性について確認を行うために必要な、地震波形の作成を行うことを目的とする。地震波形の作成については、解析手法について一定の妥当性があることを確認するため東北地方太平洋沖地震における観測波形を用いて石油コンビナート等災害防止法第2条第2項に規定する石油コンビナート等特別防災区域（以下「特防区域」という。）の地表面の地震波形の作成（2. ～5. 節参照）を行うとともに、南海トラフ地震について、工学的基盤波形を用いて地表面の地震波形の作成（6. 節参照）を行う。

## 2. 東北地方太平洋沖地震の地表面地震波形の解析

気象庁による2011年3月11日東北地方太平洋沖地震の概要を表2. 2-1に示す。

表 2. 2 - 1 2011年3月11日東北地方太平洋沖地震の概要

発生日時	平成23年3月11日 14時46分
震央地名	三陸沖（北緯38.1度、東経142.9度）
震源の深さ	24km
規模	モーメントマグニチュード9.0
特防区域付近の震度	震度6強：宮城県仙台市、塩竈市 震度6弱：福島県広野町

## 3. 解析対象地区の選定について

## 3. 1 解析対象地区の選定の考え方

解析対象とする地区としては、地震動が大きくなる地区を選定する。

屋外貯蔵タンク本体の耐震安全性の確認については、主に短周期地震動が課題となることを踏まえて地震動の大きさを示す指標を選定する必要がある。

地震動の大きさを示す指標には、計測震度、最大加速度、最大速度等がある。最大加速度や最大速度は、地震動の時刻歴におけるある瞬間のピーク値を示したものであり、実際の地震において、当該ピーク値により屋外貯蔵タンク本体が振動され続けるわけではない。一方、計測震度は、加速度波形をフィルター処理することにより概ね0.1秒から1秒までの周期帯を強調した指標である。当該周期帯は、屋外貯蔵タンク本体の固有周期と比較的一致することから、解析対象地区の選定基準として計測震度を採用する。

## 3. 2 東北地方太平洋沖地震に対する解析対象地区の選定

東北地方太平洋沖地震において、大きな計測震度が観測された特防区域を解析対象地区の候補として選定した。

独立行政法人 防災科学技術研究所（以下「防災科研」という。）の地震観測地点（K-NET、KiK-net）より、計測震度の大きさからリストアップした解析候補地区を、図3. 2-1に示す。

解析候補地区として、仙台、塩釜、広野の3地区が挙げられるが、仙台と塩釜は比較的距離が近いことから1つにまとめて考えるものとし、以降の検討では「仙台・塩釜特防区域」「広野特防区域」の2地区を対象として検討を行う。

特防区域近傍の計測震度（計測震度の上位3カ所、防災科研（K-NET、KiK-net））

強震記録一覧									
データ種別	観測点コード	記録開始時刻	観測点北緯	観測点東経	最大加速度	計測震度	震央距離	観測点名	
K-NET	MYG004	2011/03/11-14:46:51	38.78N	141.02E	2933.2gal	6.8	0175km	築館	
-KIK-	TCGH16	2011/03/11-14:47:08	36.55N	140.08E	1304.8gal	6.5	0301km	芳賀	
K-NET	IBR003	2011/03/11-14:47:05	36.59N	140.65E	1845.2gal	6.4	0258km	日立	
K-NET	IBR019	2011/03/11-14:47:17	36.18N	140.49E	1739.8gal	6.4	0281km	野田	
K-NET	MYG013	2011/03/11-14:46:50	38.27N	140.93E	1807.8gal	6.3	0170km	仙台	
K-NET	TCGH14	2011/03/11-14:47:08	36.58N	140.17E	1231.7gal	6.3	0284km	松本	
-KIK-	IBRH11	2011/03/11-14:47:10	36.37N	140.14E	1223.9gal	6.2	0309km	岩瀬	
-KIK-	FKSH20	2011/03/11-14:46:49	37.49N	140.99E	0663.0gal	6.2	0178km	浪江	
K-NET	TCG009	2011/03/11-14:47:22	36.73N	139.72E	1444.0gal	6.2	0317km	今市	
K-NET	MYG006	2011/03/11-14:46:50	38.58N	140.97E	0585.7gal	6.1	0174km	古川	
K-NET	IBR005	2011/03/11-14:47:10	36.39N	140.24E	0996.0gal	6.1	0301km	笠間	
-KIK-	TCGH13	2011/03/11-14:47:05	36.73N	140.18E	0907.5gal	6.1	0282km	馬頭	
K-NET	FKS016	2011/03/11-14:47:06	37.12N	140.19E	1425.3gal	6.1	0259km	白河	
-KIK-	MTGH10	2011/03/11-14:46:48	37.34N	140.63E	1136.0gal	6.0	0174km	山元	
K-NET	MYG012	2011/03/11-14:46:50	38.32N	141.02E	2018.9gal	6.0	0163km	塩竈	
K-NET	IBR009	2011/03/11-14:47:11	36.58N	140.47E	1011.0gal	6.0	0277km	六甲	
-KIK-	FKSH18	2011/03/11-14:46:55	37.49N	140.54E	0633.2gal	6.0	0216km	三春	
K-NET	FKS017	2011/03/11-14:47:02	37.28N	140.37E	0684.4gal	6.0	0238km	須賀川	
-KIK-	FKSH10	2011/03/11-14:47:04	37.16N	140.09E	1335.4gal	6.0	0266km	西郷	
-KIK-	FKSH19	2011/03/11-14:46:53	37.47N	140.72E	0914.0gal	6.0	0201km	都路	
K-NET	MYG015	2011/03/11-14:46:49	38.10N	140.87E	0433.6gal	5.9	0175km	若沼	
K-NET	IBR002	2011/03/11-14:47:05	36.71N	140.71E	0693.7gal	5.9	0246km	高萩	
K-NET	TCG006	2011/03/11-14:47:13	36.76N	140.13E	0436.0gal	5.9	0284km	小川	
K-NET	IWT010	2011/03/11-14:46:52	38.93N	141.12E	1225.8gal	5.9	0178km	一関	

強震記録一覧									
データ種別	観測点コード	記録開始時刻	観測点北緯	観測点東経	最大加速度	計測震度	震央距離	観測点名	
K-NET	IWT010	2011/03/11-14:46:52	38.93N	141.12E	1225.8gal	5.9	0178km	一関	
K-NET	FKS006	2011/03/11-14:46:57	37.50N	140.76E	0633.6gal	5.9	0197km	葛尾	
K-NET	IWT012	2011/03/11-14:46:52	39.32N	141.14E	0627.7gal	5.9	0202km	北上	
K-NET	MYG010	2011/03/11-14:46:44	38.43N	141.28E	0487.5gal	5.9	0143km	石巻	
K-NET	IBR008	2011/03/11-14:47:08	37.13N	140.36E	0607.6gal	5.9	0166km	大石	
K-NET	FKS010	2011/03/11-14:46:57	37.23N	141.00E	1239.9gal	5.9	0190km	広野	
K-NET	IBR010	2011/03/11-14:47:00	37.48N	140.98E	1119.7gal	5.9	0224km	郡山	
-KIK-	FKSH14	2011/03/11-14:46:55	37.03N	140.97E	0481.4gal	5.8	0205km	いわき東	
K-NET	IBR007	2011/03/11-14:47:14	36.35N	140.60E	0584.7gal	5.8	0279km	那珂湊	
K-NET	FKS001	2011/03/11-14:46:50	37.79N	140.92E	0682.8gal	5.8	0174km	相馬	
K-NET	FKS023	2011/03/11-14:47:14	37.48N	139.93E	0451.6gal	5.8	0267km	会津若松	
K-NET	FKS024	2011/03/11-14:47:03	37.40N	140.13E	0394.4gal	5.8	0253km	中野	
K-NET	MYG017	2011/03/11-14:46:52	37.98N	140.78E	0357.9gal	5.8	0183km	角田	
-KIK-	FKSH11	2011/03/11-14:46:59	37.20N	140.34E	0504.7gal	5.8	0244km	矢吹	
K-NET	MYG007	2011/03/11-14:46:47	38.59N	141.25E	0695.0gal	5.8	0151km	豊里	
K-NET	IBR006	2011/03/11-14:47:23	36.37N	140.45E	0851.3gal	5.8	0287km	水戸	
K-NET	FKS008	2011/03/11-14:46:58	37.44N	140.57E	1069.2gal	5.7	0215km	船引	
-KIK-	IBRH12	2011/03/11-14:47:04	36.84N	140.32E	0782.4gal	5.7	0265km	太子	
K-NET	FKS007	2011/03/11-14:46:55	37.41N	140.96E	0880.6gal	5.7	0184km	大熊	
K-NET	TCG013	2011/03/11-14:47:15	36.44N	140.02E	0465.3gal	5.7	0312km	真岡	
K-NET	IWT007	2011/03/11-14:46:46	39.27N	141.86E	0741.6gal	5.7	0156km	釜石	
-KIK-	IBRH15	2011/03/11-14:47:08	36.56N	140.30E	1062.2gal	5.7	0284km	御前山	
K-NET	FKS005	2011/03/11-14:46:51	37.64N	140.98E	0741.7gal	5.7	0173km	原町	
-KIK-	IBRH13	2011/03/11-14:47:01	36.80N	140.57E	0570.8gal	5.7	0249km	高萩	

図3. 2-1 解析候補地区

4. 仙台・塩釜特防区域における再現解析

4. 1 地表面地震波形の再現解析の流れ

図4. 1-1の手順で、仙台・塩釜の特防区域における東北地方太平洋沖地震の再現地震波形を作成する。

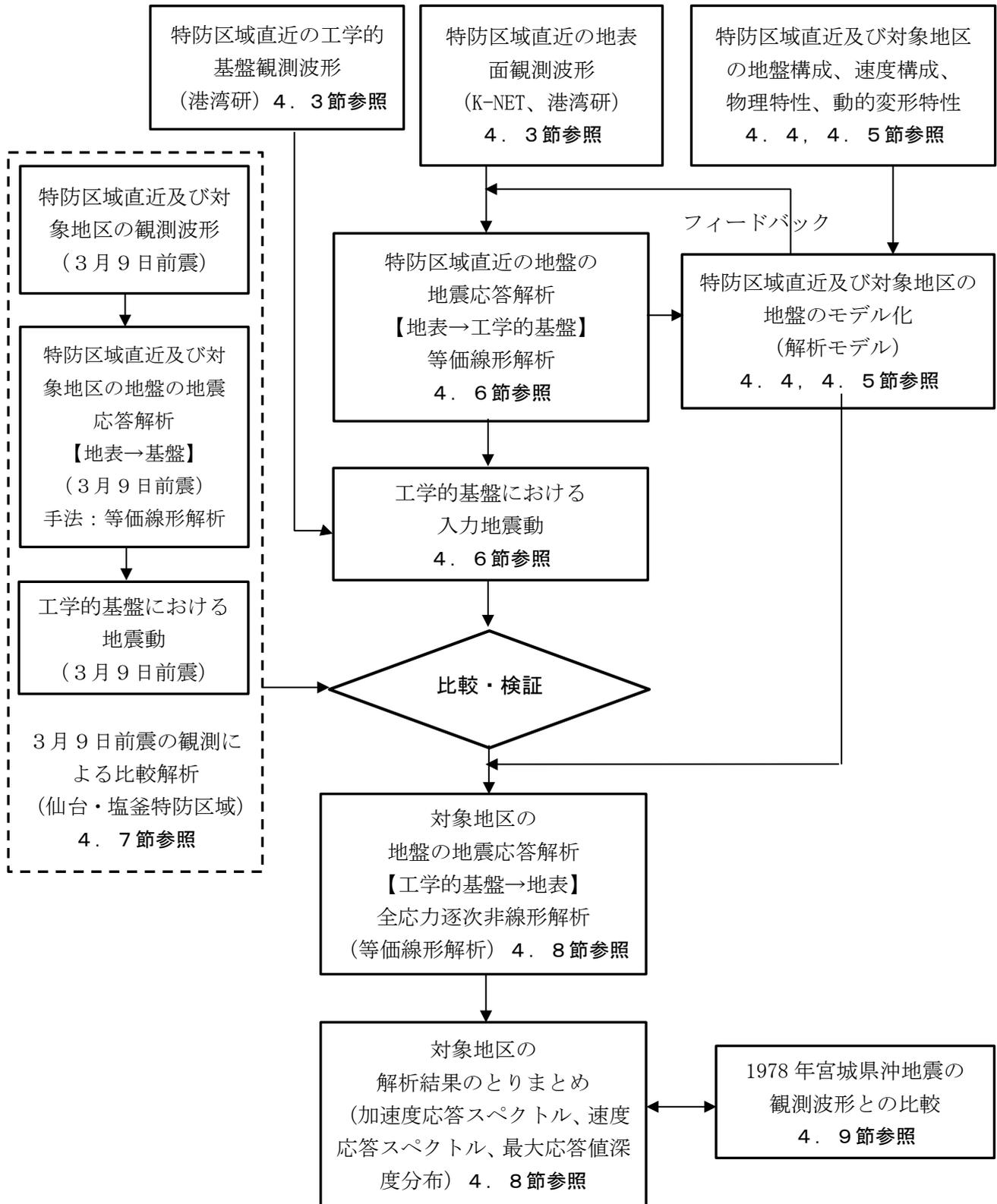


図4. 1-1 仙台・塩釜特防区域における地表面地震波形の再現解析の流れ

#### 4. 2 対象地区及び特防区域直近の観測地点

仙台・塩釜特防区域における特防区域の位置及び特防区域直近の、防災科研と独立行政法人 港湾空港技術研究所（以下「港湾研」という。）による、地震波形観測地点の位置を図4. 2-1に示す。

また、地震波形観測地点の一覧を表4. 2-1に示す。

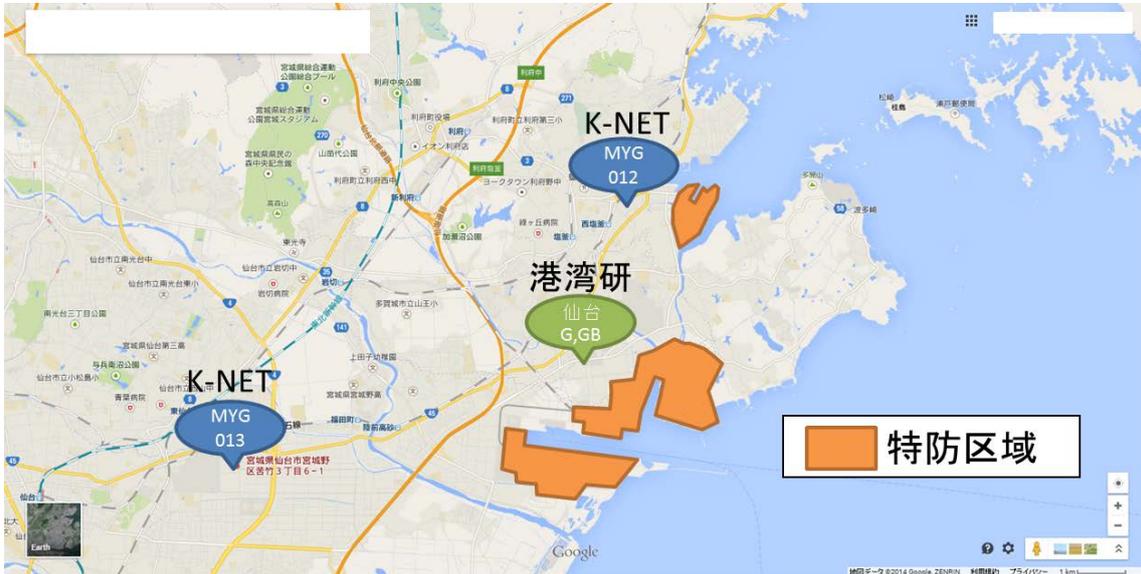


図4. 2-1 仙台・塩釜特防区域及び直近の地震観測地点の位置

表4. 2-1 仙台・塩釜特防区域及び直近の地震観測地点

観測機関	地点名	地点コード	設置位置
防災科研 K-NET	塩釜	MYG012	地表
	仙台	MYG013	地表
港湾研	仙台	仙台 G	地表
		仙台 GB	地中 (GL-10.4m)

#### 4. 3 収集した地震観測波形

仙台・塩釜特防区域直近の地震観測地点で東北地方太平洋沖地震の際に観測された地震波形の一覧を表4. 3-1に示す。

また、観測された地震波形及びスペクトルを図4. 3-1～3に示す。

表4. 3-1 東北地方太平洋沖地震の観測波形（仙台・塩釜特防区域直近）

観測機関	地点名	地点コード	設置位置	最大加速度 (cm/s/s)		
				NS	EW	UD
防災科研 K-NET	塩釜	MYG012	地表	760.5	1969.5	500.8
	仙台	MYG013	地表	1515.3	977.2	290.2
港湾研	仙台	仙台 G	地表	623.8	393.0	225.9
		仙台 GB	地中 (GL-10.4m)	217.7	252.2	144.0

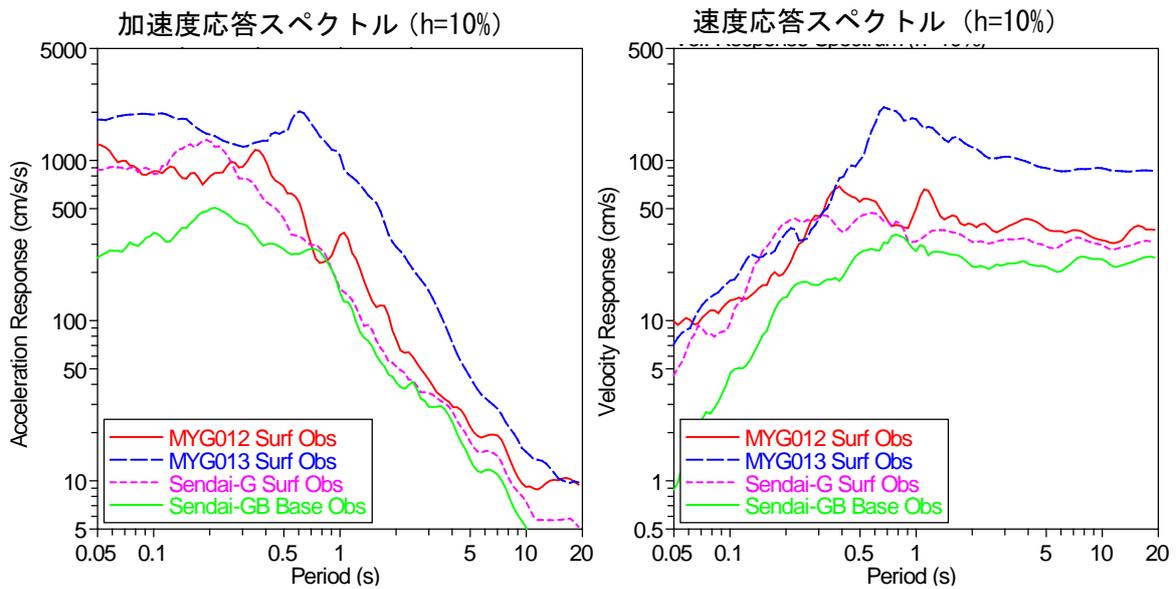
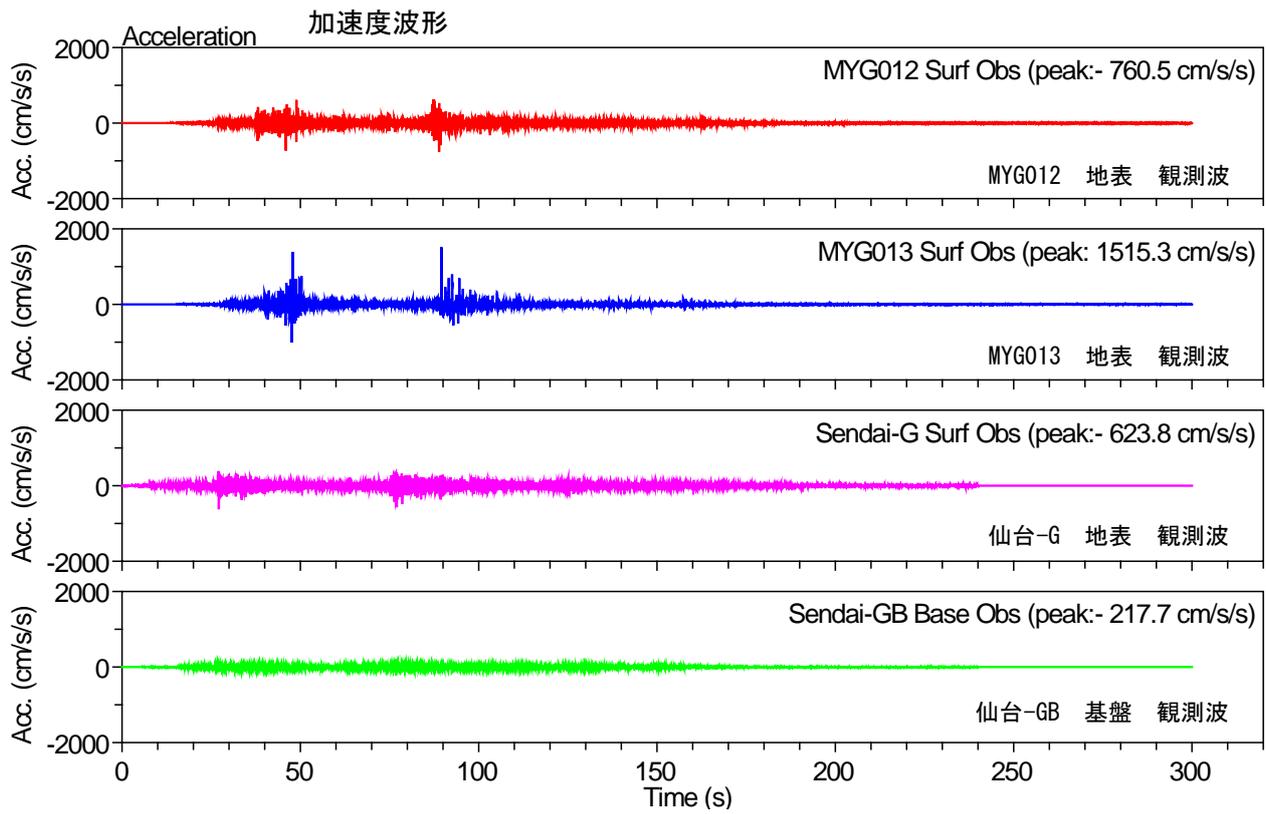


図4. 3-1 地震観測波形の比較 (NS成分)

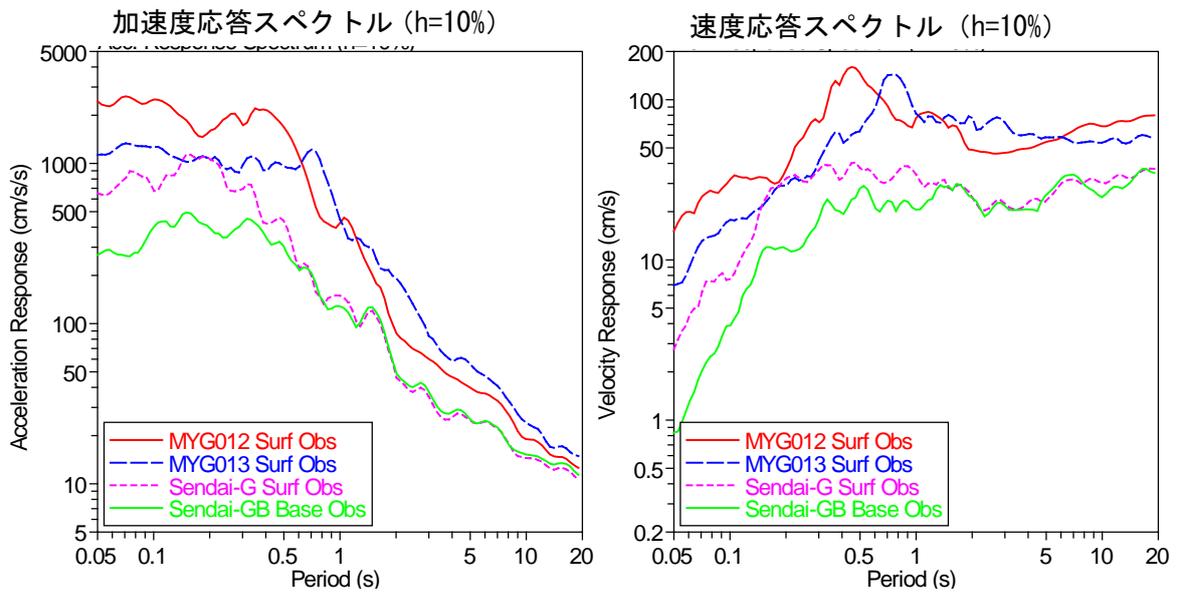
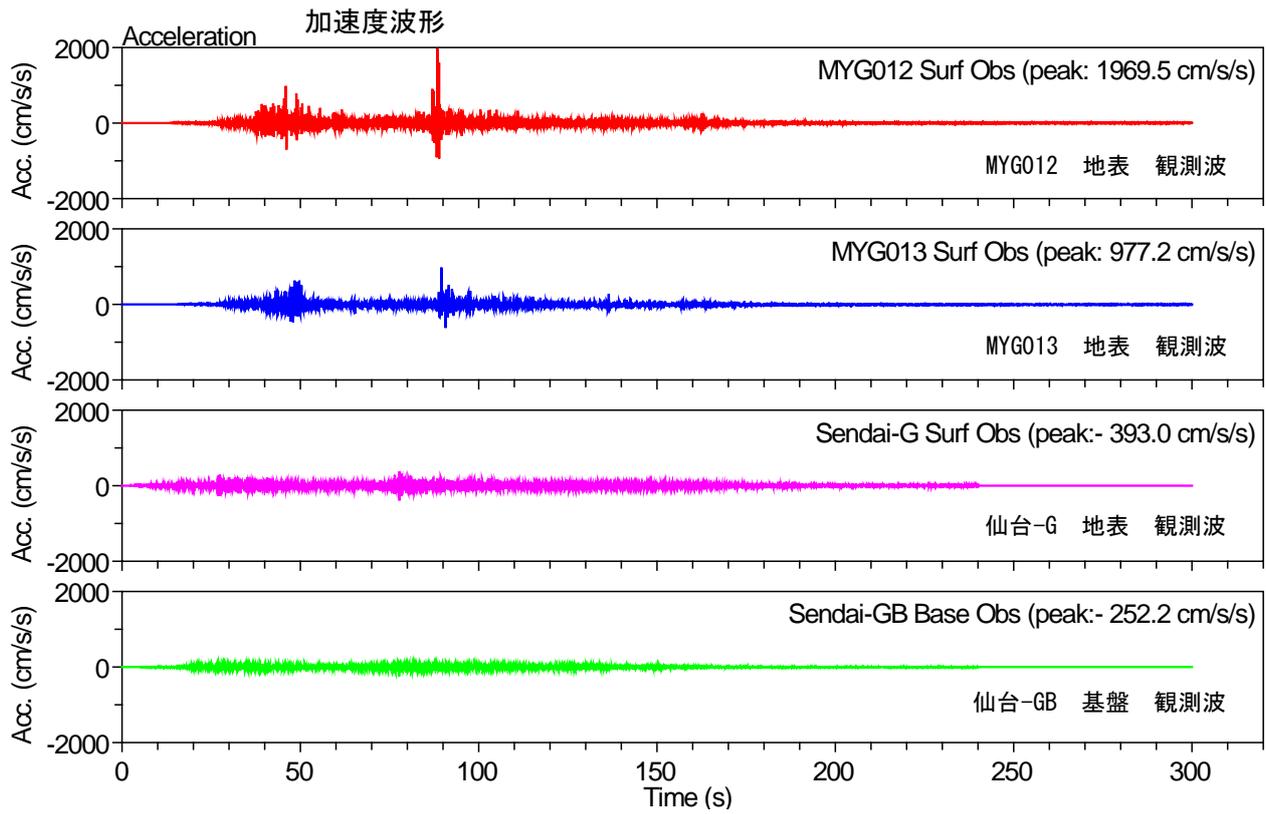


図4. 3-2 地震観測波形の比較 (EW 成分)

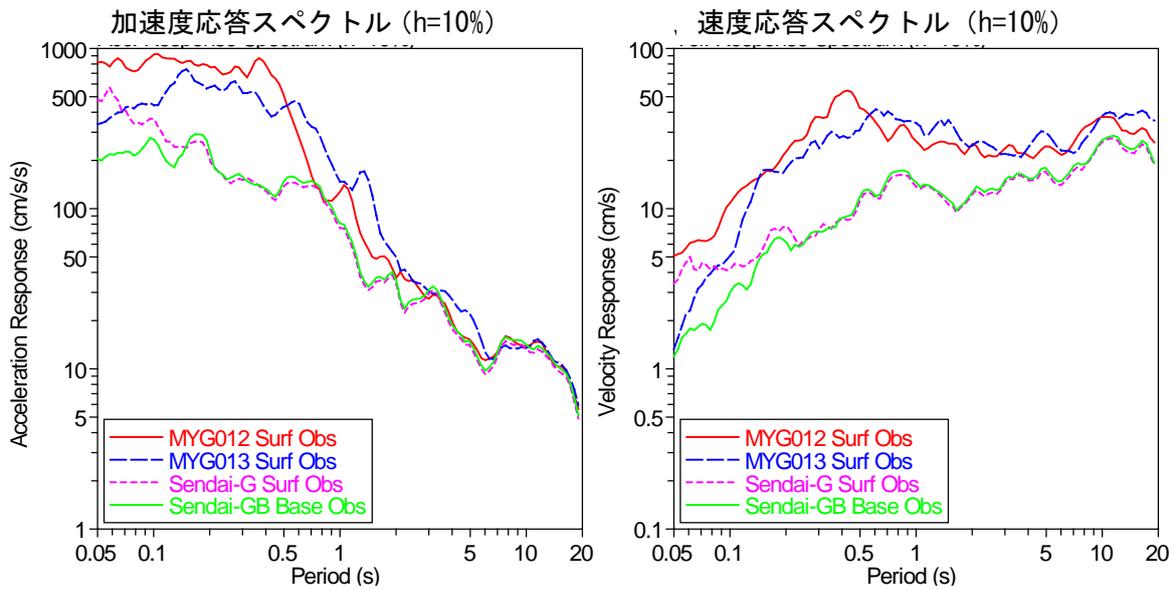
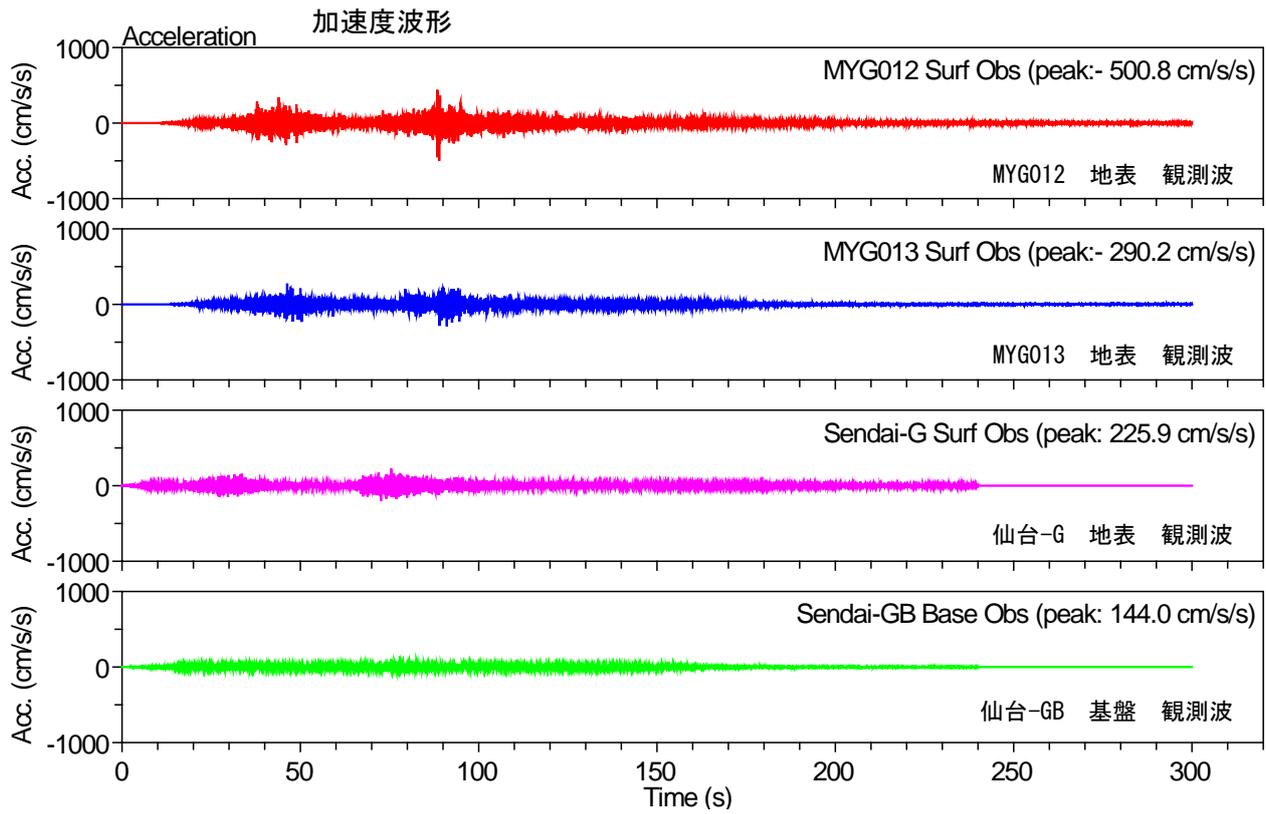


図4. 3-3 地震観測波形の比較 (UD成分)

#### 4. 4 地盤構成の検討

地震応答解析を考えた場合、地盤構成、物理特性及び動的変形特性等を適切に考慮して設定することが重要である。したがって、本検討では、関係団体より提供された屋外タンク貯蔵所に係る地盤調査資料等のデータを詳細に吟味するとともに、既往調査資料や各種文献などのデータも参考にしながら定数を設定する。

解析対象となる仙台・塩釜特防区域の地盤情報を調査した結果、工学的基盤の深さについては、仙台特防区域の海側で深く（50m超）なっている。これに対して塩釜特防区域や仙台特防区域の陸側では浅く（10～30m程度）なっている。このため、仙台・塩釜特防区域の地盤モデルとしては以下の2種類を想定した。

- 基盤が深いケース（以下「ケース①」という。）
- 基盤が浅いケース（以下「ケース②」という。）

解析対象の特防地域及び地震観測地点について設定した地盤モデルのパラメーター一覧表を表4. 4-1～2及び図4. 4-1～3に示す。

表4. 4-1 仙台・塩釜特防区域のケース①の地盤モデル

No	深さ (G. L. -m)	土質	Vs (m/s)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
1	2.70	FI (埋土)	120	1.6
2	14.05	As (沖積砂質土)	130	1.8
3	25.65	As (沖積砂質土)	130	1.8
4	40.00	Dc (洪積粘性土)	170	1.6
5	47.00	Ds (洪積砂質土)	180	1.9
6	55.75	Ds (洪積砂質土)	180	1.9
7	-	R (基盤)	850	2.2

※土質区分及び深さについては、地盤調査資料から設定。

※S波速度及び密度については、観測地点の地盤情報を参考に設定。

表4. 4-2 仙台・塩釜特防区域のケース②の地盤モデル

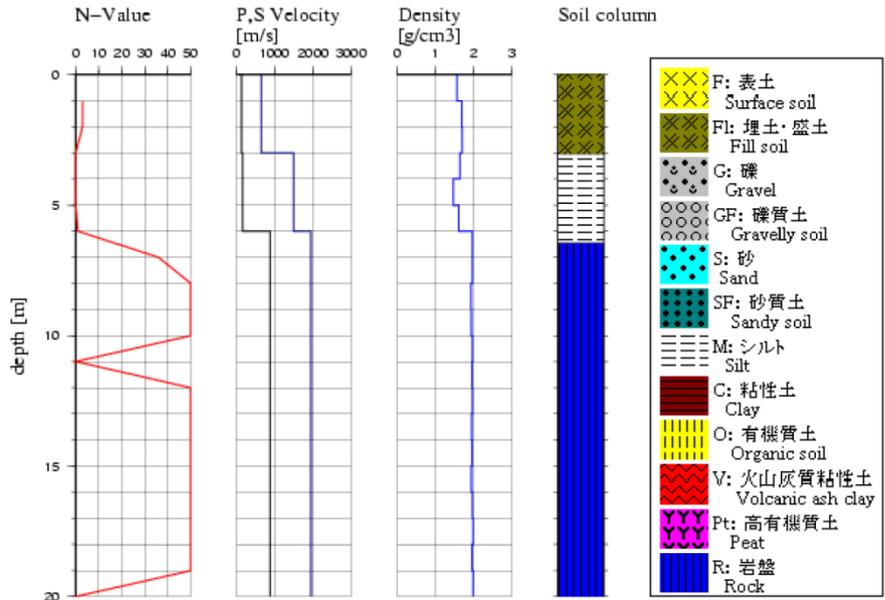
No	深さ (G. L. -m)	土質	Vs (m/s)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
1	2.70	FI (埋土)	120	1.6
2	14.05	As (沖積砂質土)	130	1.8
3	25.65	As (沖積砂質土)	130	1.8
4	35.50	Dc (洪積粘性土)	170	1.6
5	-	R (基盤)	850	2.2

※土質区分及び深さについては、地盤調査資料から設定。

※S波速度及び密度については、観測地点の地盤情報を参考に設定。

No	深さ (G. L. -m)	土質	Vp (m/s)	Vs (m/s)	$\rho$ (g/cm3)
1	3.05	F1 (盛土)	650	140	1.7
2	6.45	Ac (沖積粘性土)	1500	170	1.6
3	20.00	R (基盤)	1940	880	2.0

土質図



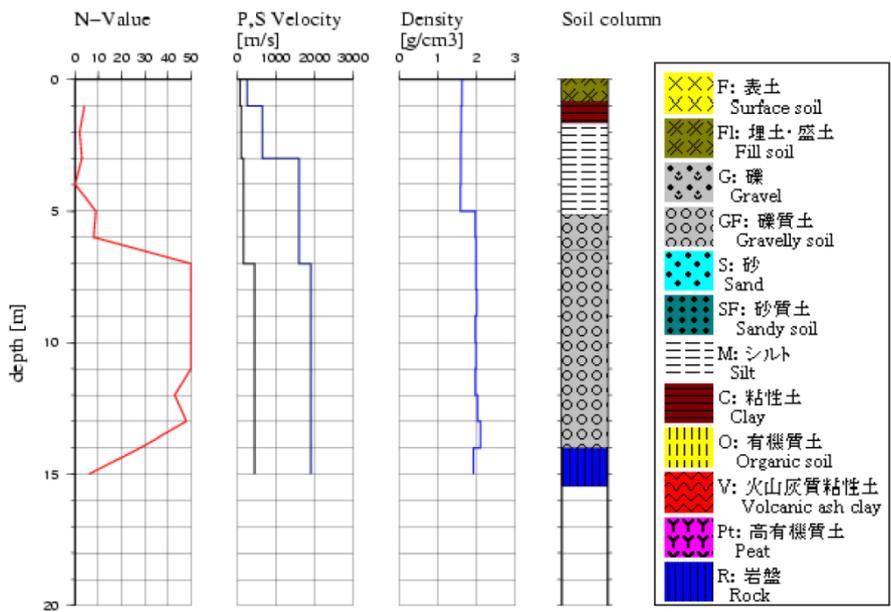
NI ED 独立行政法人防災科学技術研究所

Copyright (c) National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, All rights Reserved.

図4. 4-1 地震観測地点の地盤モデル (防災科研 K-NET MYG012)

No	深さ (G. L. -m)	土質	Vp (m/s)	Vs (m/s)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
1	0.85	F1 (埋土・盛土)	260	70	1.6
2	3.00	Ac (沖積粘性土)	650	100	1.6
3	5.15	Ac (沖積粘性土)	1600	170	1.8
4	6.50	Dg (洪積礫質土)	1600	170	1.8
5	14.00	Dg (洪積礫質土)	1900	440	2.0
6	15.00	R (基盤)	1900	440	2.0

土質図



NIED 独立行政法人防災科学技術研究所

Copyright (c) National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, All rights Reserved.

図4. 4-2 地震観測地点の地盤モデル (防災科研 K-NET MYG013)

No	深さ (G. L. -m)	土質	Vp (m/s)	Vs (m/s)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
1	0.50	Ag (沖積礫質土)	1100	130	1.75
2	3.00	As (沖積砂質土)	1100	130	1.75
3	7.00	As (沖積砂質土)	1100	180	1.85
4		R (基盤)	2100	820	2.40

### Site Information

仙台-G, GB

所在地: 宮城県多賀城市明月1-4-6

緯度: 38.286N 経度: 141.012E

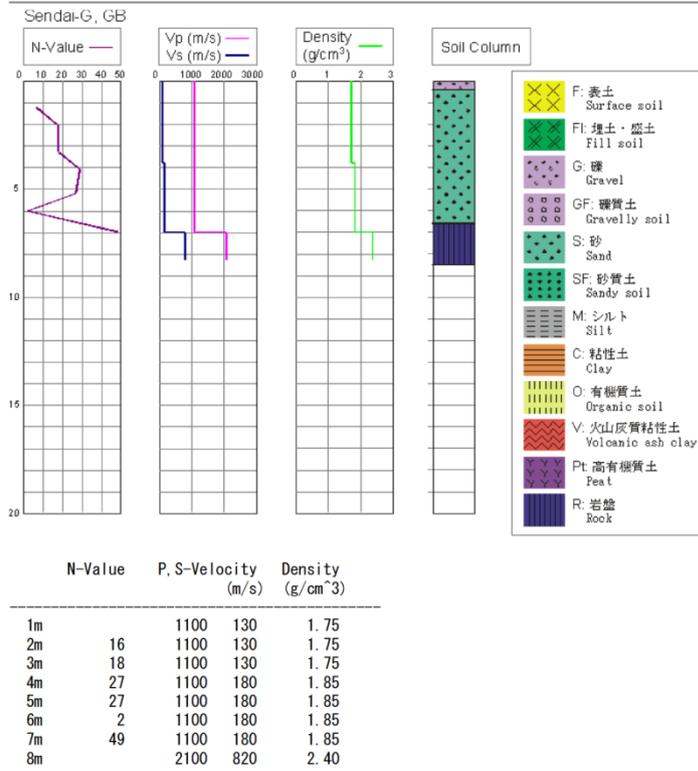


図4. 4-3 地震観測地点の地盤モデル (港湾研 仙台-G, GB)

#### 4. 5 動的変形特性の検討

地震応答解析に必要な物性値のうち、仙台・塩釜特防区域の動的変形特性については、提供された地盤調査資料等のデータからは得られなかったため、既往の文献資料を基に設定を試みた。

動的変形特性に関する文献としては、古山田（2003）<sup>1</sup>を採用した。これは比較的近年に、全国の動的試験結果を収集して土質別に設定したものである。しかし、図4. 5-1に○印で示すように試験値にはばらつきがあるため、港湾研の工学的基盤の観測地震波形を入力として動的変形曲線を試験値のばらつきの範囲で変化させて等価線形計算を行い、地表面における観測地震波形をよく再現できるような動的変形曲線の同定を試みた。

採用した動的変形特性曲線を図4. 5-1の赤線で示した。また、応答計算による地表の計算地震波形と観測地震波形を比較して表4. 5-1及び図4. 5-2～4に示した。

上記地震波形を比較した結果、地震波形の形状、最大値やスペクトルにおいて、周期や増幅特性などの再現性が高いことが確認された。

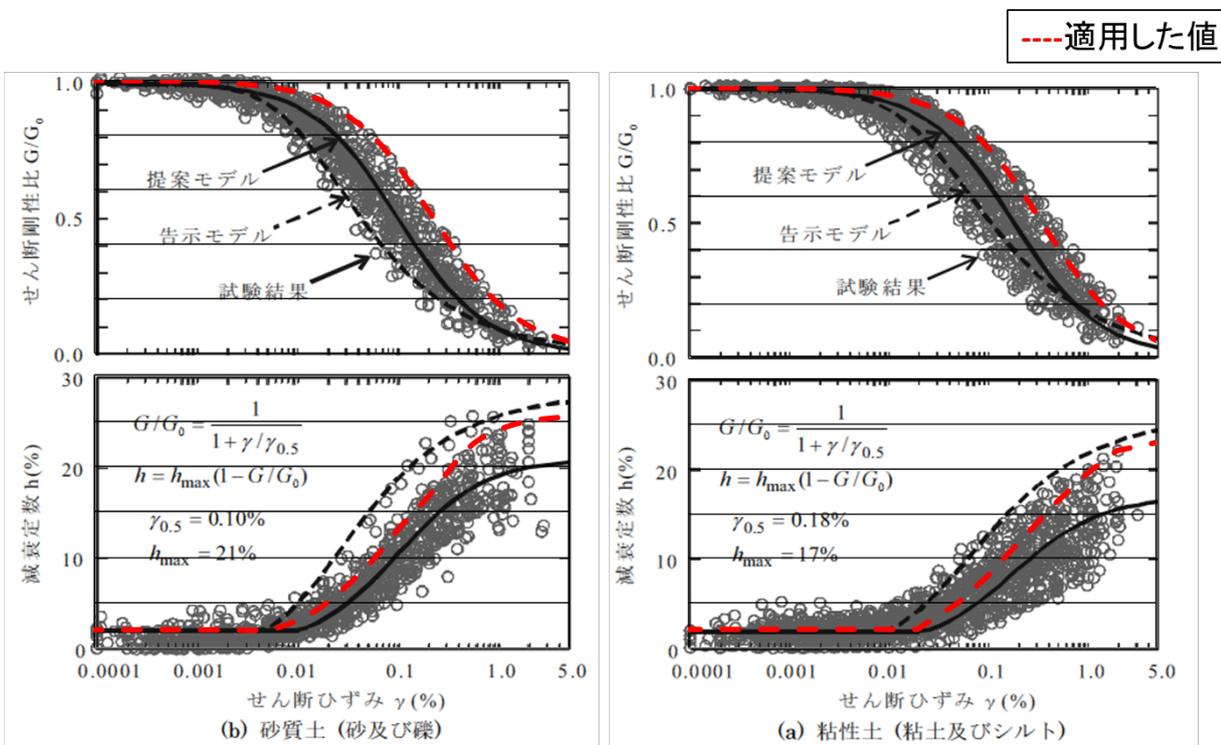


図4. 5-1 採用した動的変形特性曲線（赤色破線）

表4. 5-1 港湾研における応答計算結果と観測地震波形との比較  
(東北地方太平洋沖地震)

地点コード	設置位置	最大加速度 (cm/s/s)		最大速度 (cm/s)	
		NS	EW	NS	EW
観測地震波形 (仙台-G)	地表	623.8	393.0	24.49	28.56
解析地震波形 (等価線形)	地表	595.7	484.5	27.38	32.65
観測地震波形 (仙台-GB)	基盤	217.7	252.2	19.47	19.53

<sup>1</sup> 古山田耕司、宮本裕司、三浦賢治：多地点での原位置採取試料から評価した表層地盤の非線形特性、第38回地盤工学会研究発表会、pp.2077-2078、2003.7

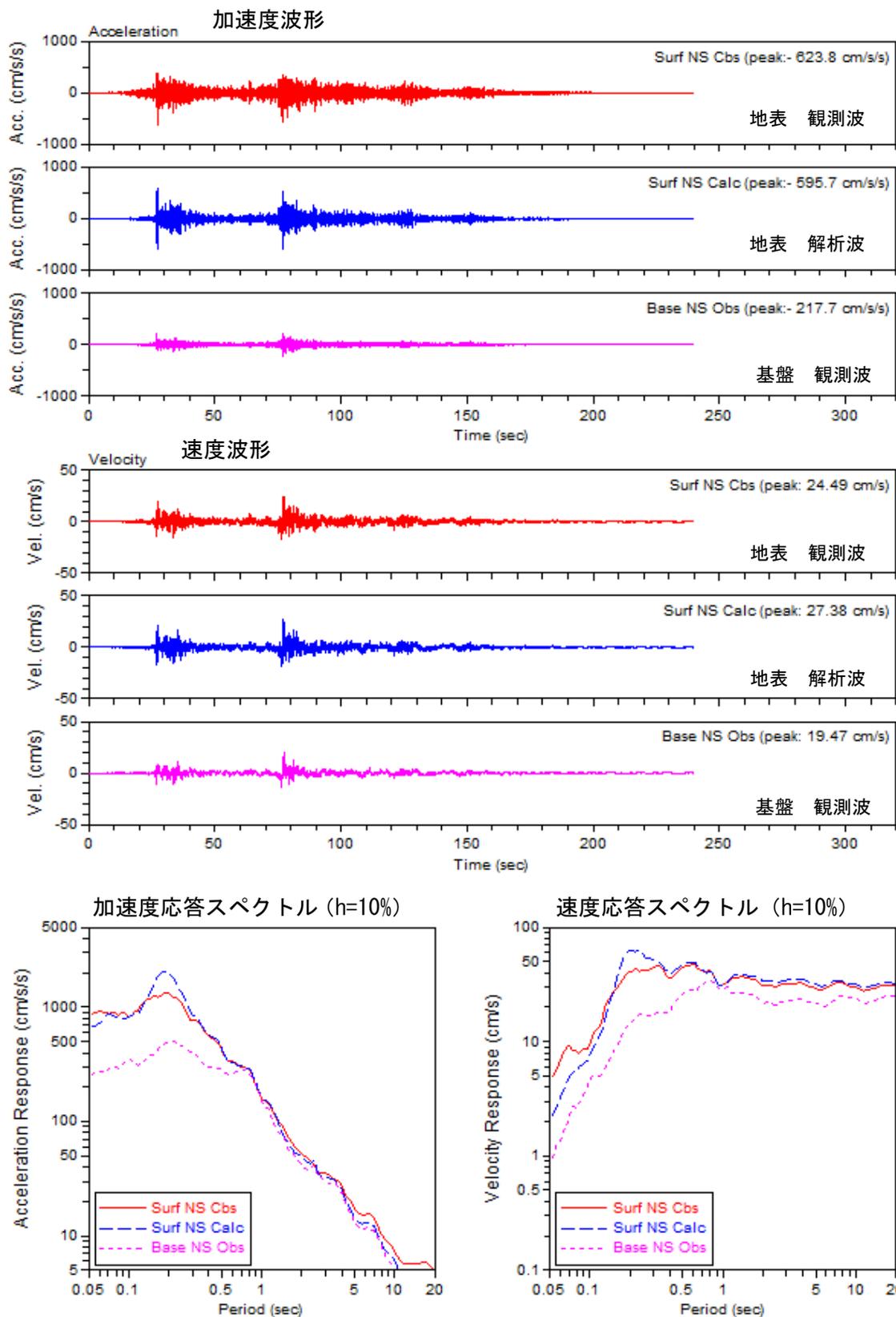


図4. 5-2 応答計算による地表計算地震波形と観測地震波形(仙台-G)との比較  
(港湾研地震観測地点・NS成分)

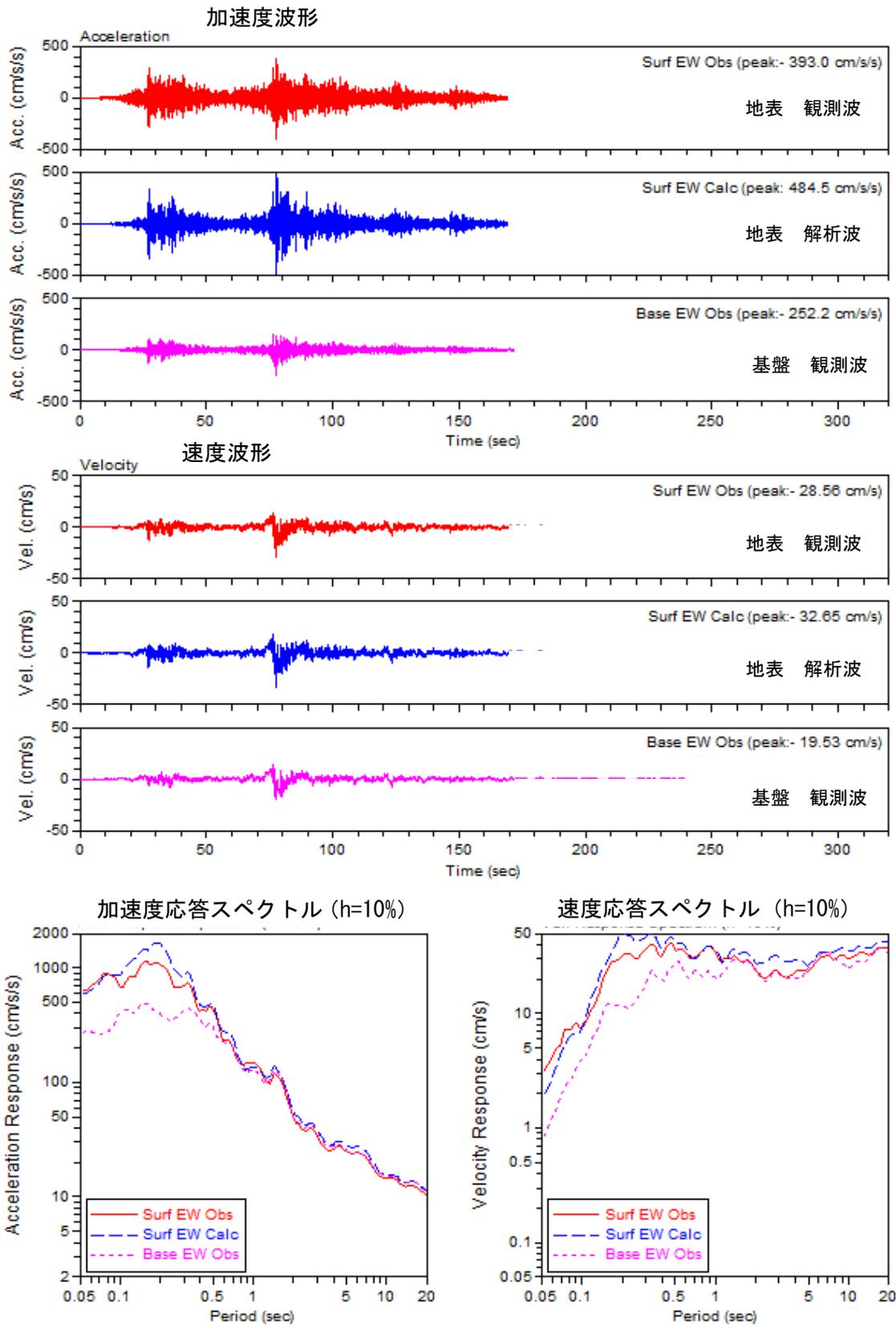


図4. 5-3 応答計算による地表計算地震波形と観測地震波形（仙台-G）との比較  
（港湾研地震観測地点・EW成分）

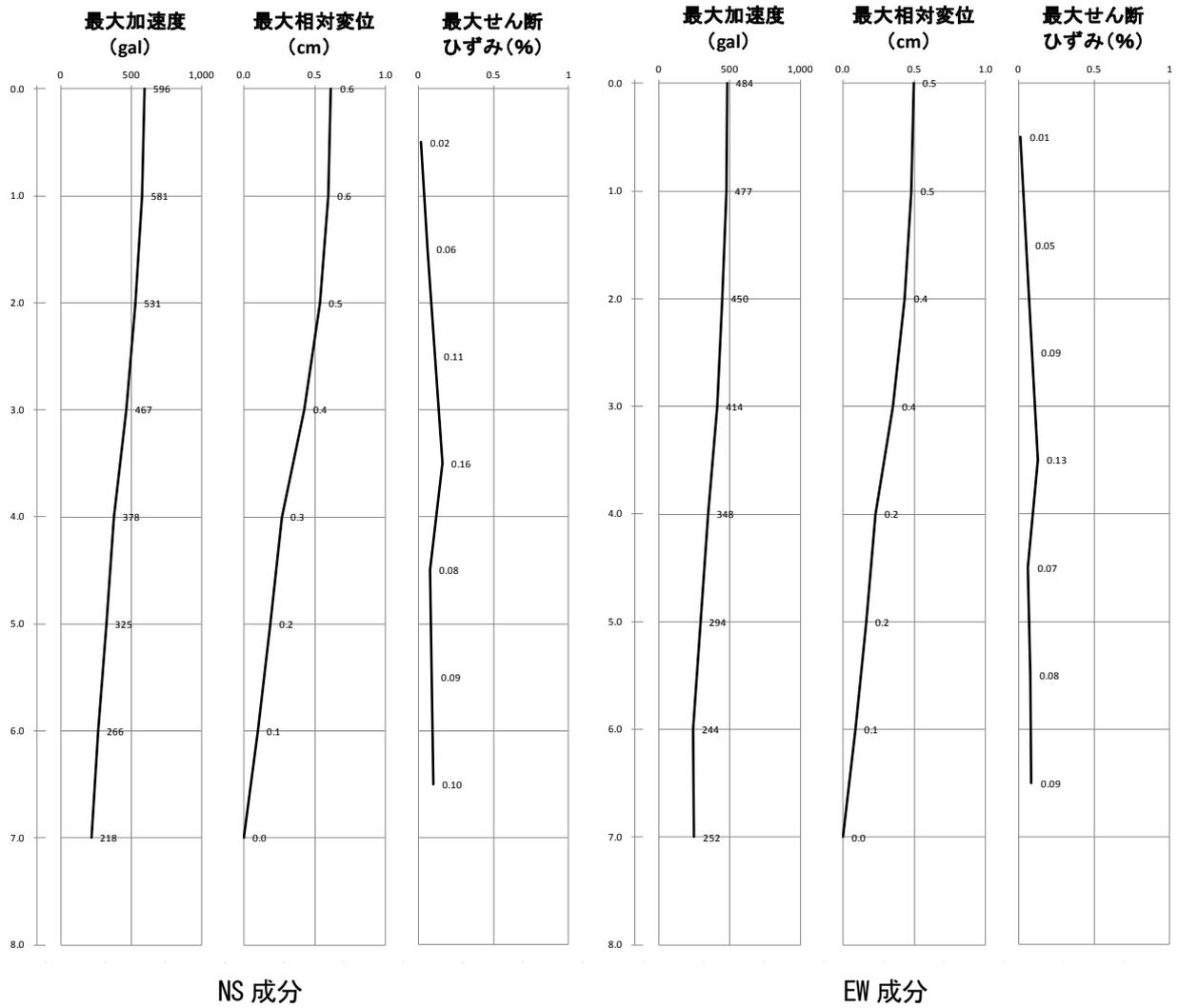


図4. 5-4 応答計算結果の深さ方向分布図  
(港湾研地震観測地点)

#### 4. 6 地盤の地震応答解析【地表→工学的基盤】

仙台・塩釜特防区域直近の地表面観測地震波形（防災科研 K-NET MYG012、MYG013）から、逆解析により工学的基盤での時刻歴地震波形を作成した。

逆解析での地震応答解析は、周波数領域の等価線形解析法を採用し、プログラムコードとしては、『A computer program for DYNamic response analysis of level ground by Equivalent linear method（以下「DYNEQ」という。）』を採用した。これは、後述する『YUSAYUSA-2』は、逐次積分による計算であり、観測地震波形をそのまま入力することはできないためである。

解析結果を、港湾研における工学的基盤における観測地震波形（仙台-GB）と比較して表4. 6-1及び図4. 6-1～6に示す。

地表面における観測地震波形と解析した工学的基盤での地震波形とを比較すると、以下のことがいえる。

- ・港湾研 仙台-G（地表）と仙台-GB（基盤）の応答スペクトルを比較した場合、1秒以下の短周期成分のみが増幅していることが確認できた。（図4. 3-1～2）
- ・防災科研 K-NET MYG012、MYG013の地表面における観測地震波形を等価線形により工学的基盤に戻して比較すると、港湾研と同様に1秒以下の短周期成分のみが減衰する結果となった。（図4. 6-1～6）

このように、地表面における観測地震波形に対して、防災科研 K-NET に推定した工学的基盤における地震波形も観測された地震波形も同様の傾向を示していることが確認された。

しかし、推定した工学的基盤における地震波形の最大振幅は防災科研 K-NET MYG012、MYG013 と港湾研仙台-GB とで大きく異なる。（表4. 6-1）

このため、仙台・塩釜特防区域において地表面での地震波形が観測されている2011年3月9日の三陸沖地震（M7.3）（東北地方太平洋沖地震の前震と考えられており、以下「3月9日の前震」という。）について、同様の解析を行い比較検討した上で、対象地区の入力波形としてどの波形を採用するかを決めることとする。

表4. 6-1 港湾研観測地点における応答計算結果と観測地震波形との比較  
（東北地方太平洋沖地震）

地点コード	設置位置	最大加速度(cm/s/s)		
		NS	EW	UD
解析波形 (MYG012)	基盤	393.6	900.4	307.9
解析波形 (MYG013)	基盤	684.6	365.6	158.6
観測波形 (仙台-GB)	基盤	217.7	252.2	144.0

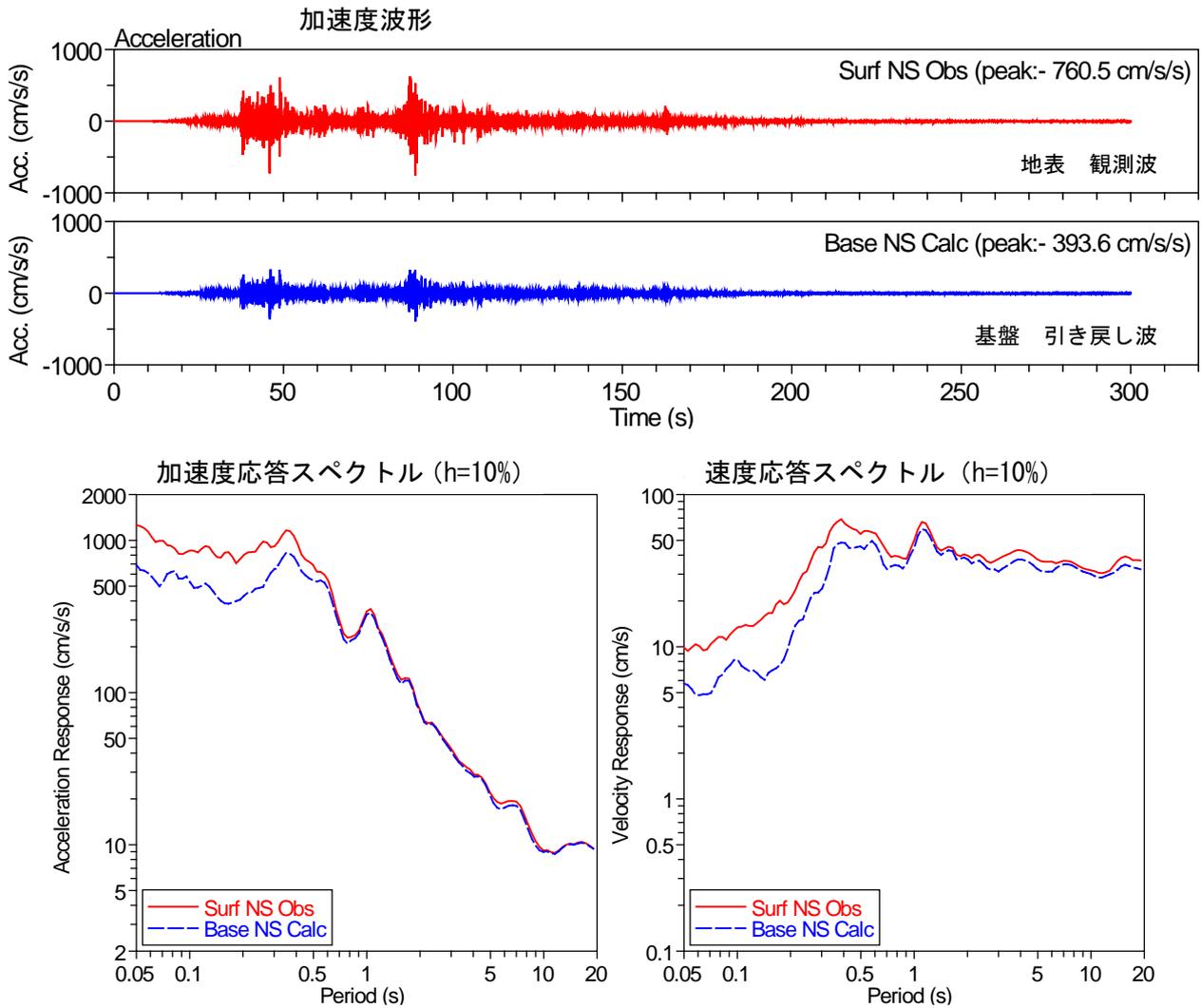


図4. 6-1 地表面での観測地震波形と応答計算による工学的基盤での地震波形の比較  
(防災科研 K-NET MYG012・NS成分)

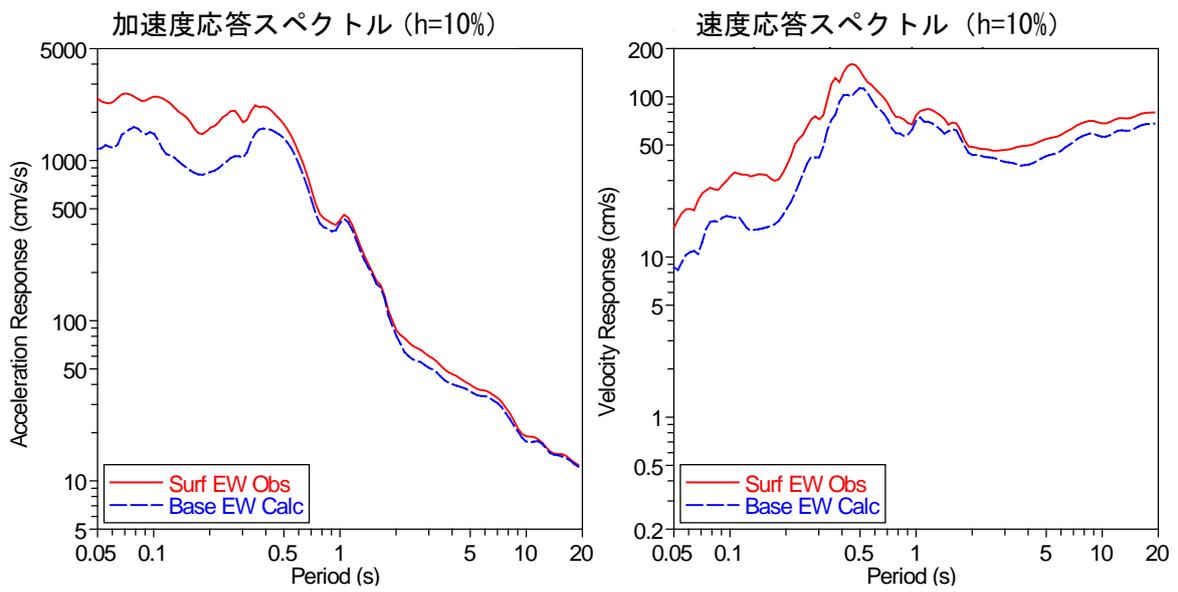
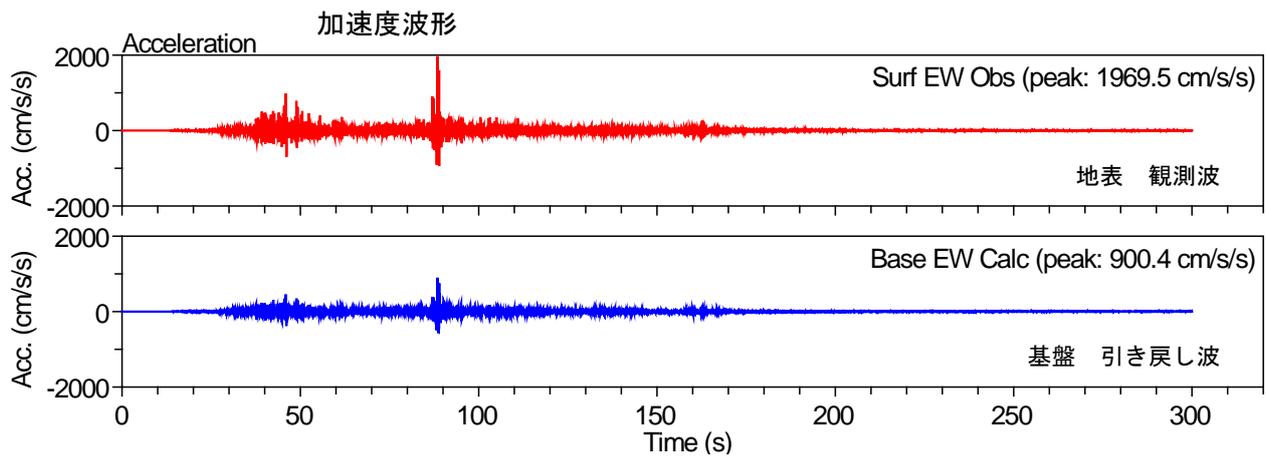


図4. 6-2 地表面での観測地震波形と応答計算による工学的基盤での地震波形の比較  
(防災科研 K-NET MYGO12・EW成分)

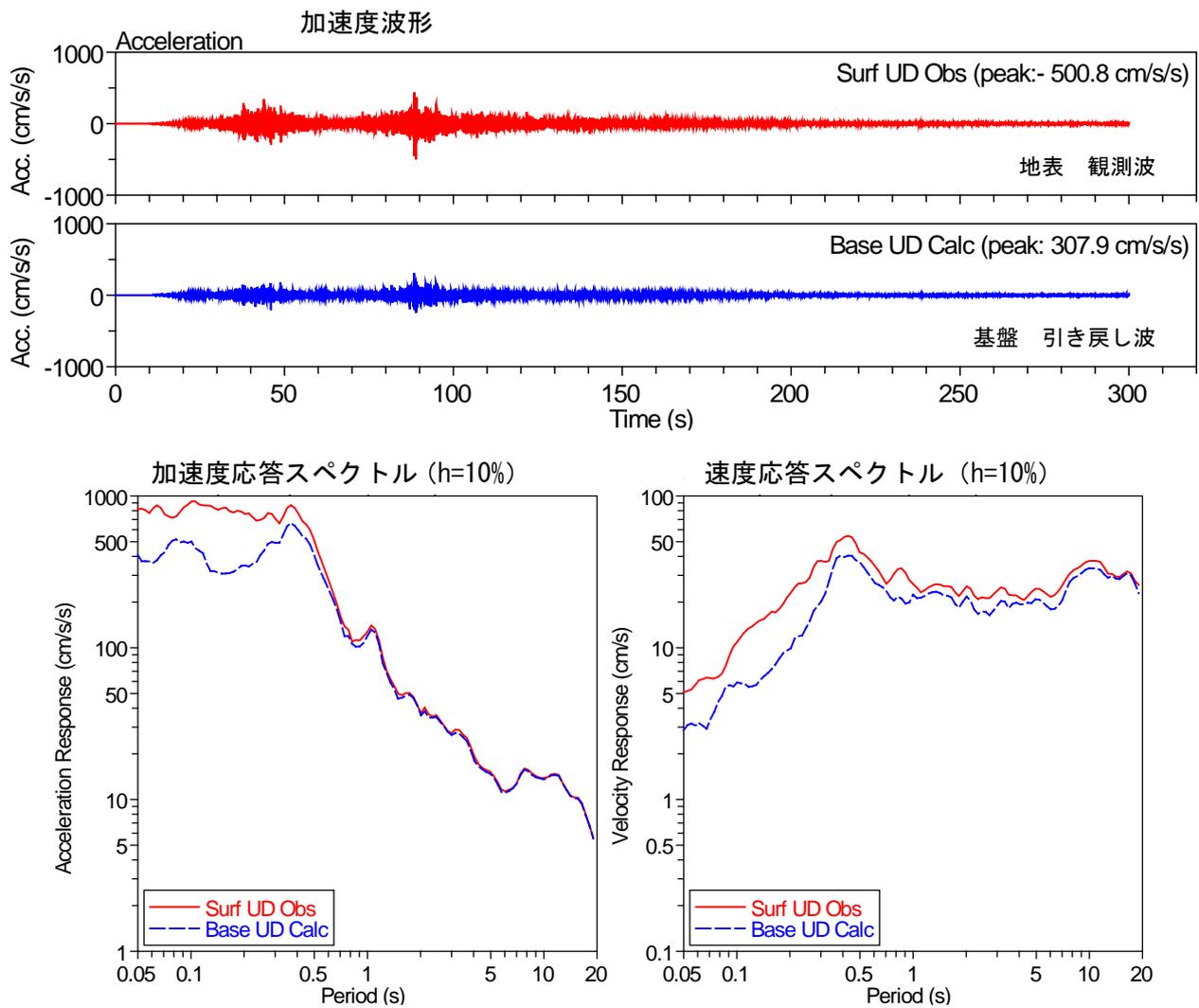


図4. 6-3 地表面での観測地震波形と応答計算による工学的基盤での地震波形の比較  
(防災科研 K-NET MYG012・UD成分)

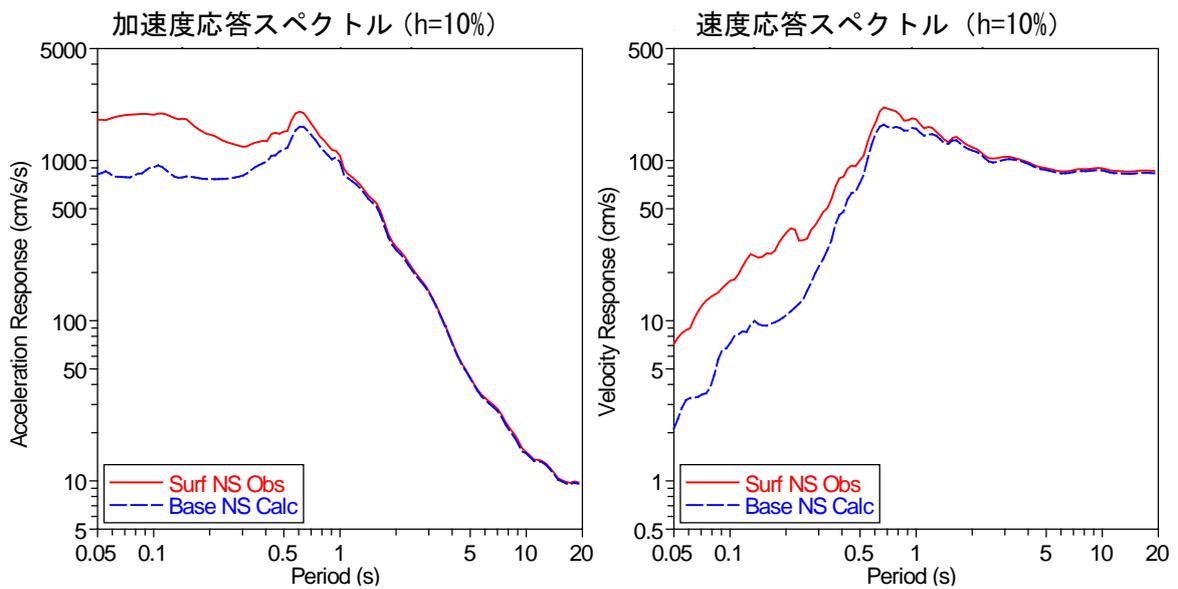
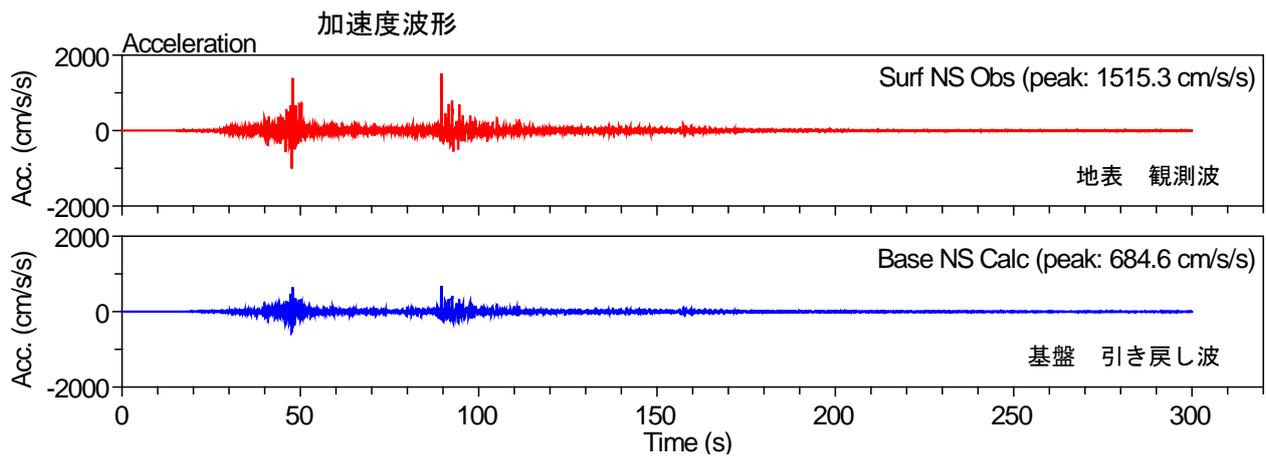


図4. 6-4 地表面での観測地震波形と応答計算による工学的基盤での地震波形の比較  
(防災科研 K-NET MYG013・NS成分)

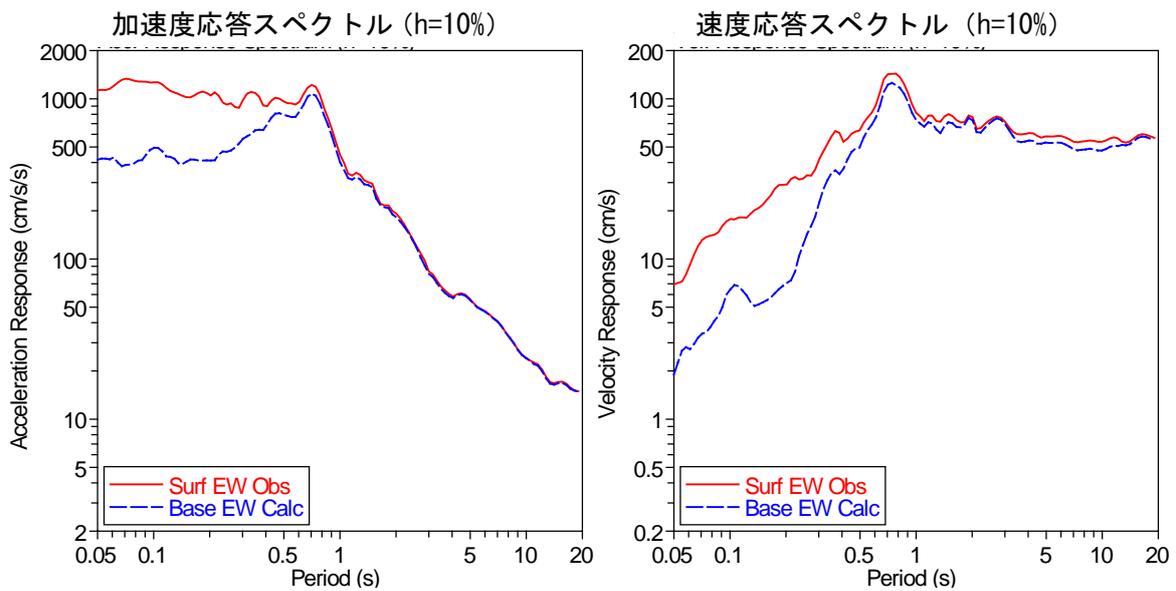
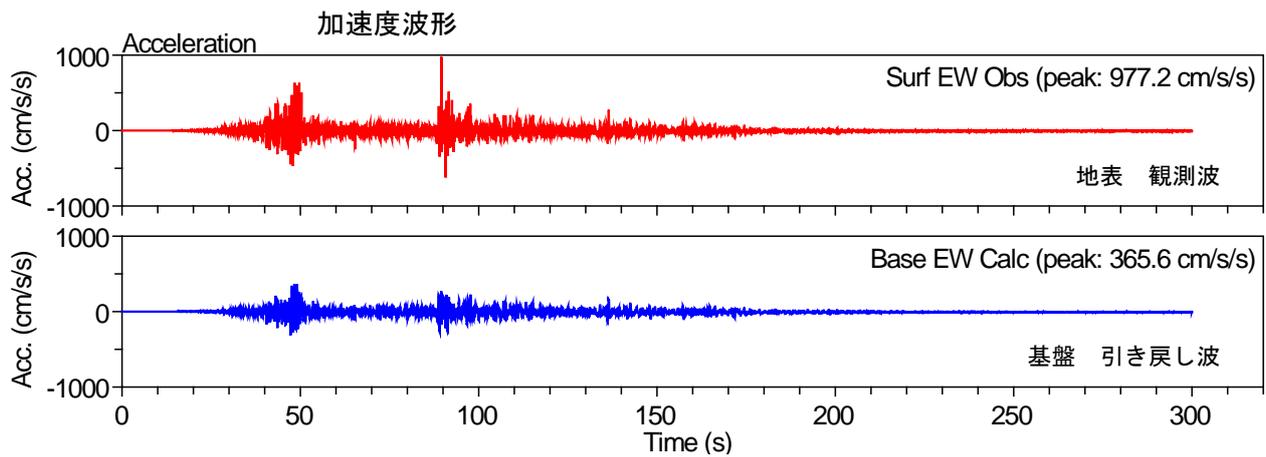


図4. 6-5 地表面での観測地震波形と応答計算による工学的基盤での地震波形の比較  
(防災科研 K-NET MYG013・EW成分)

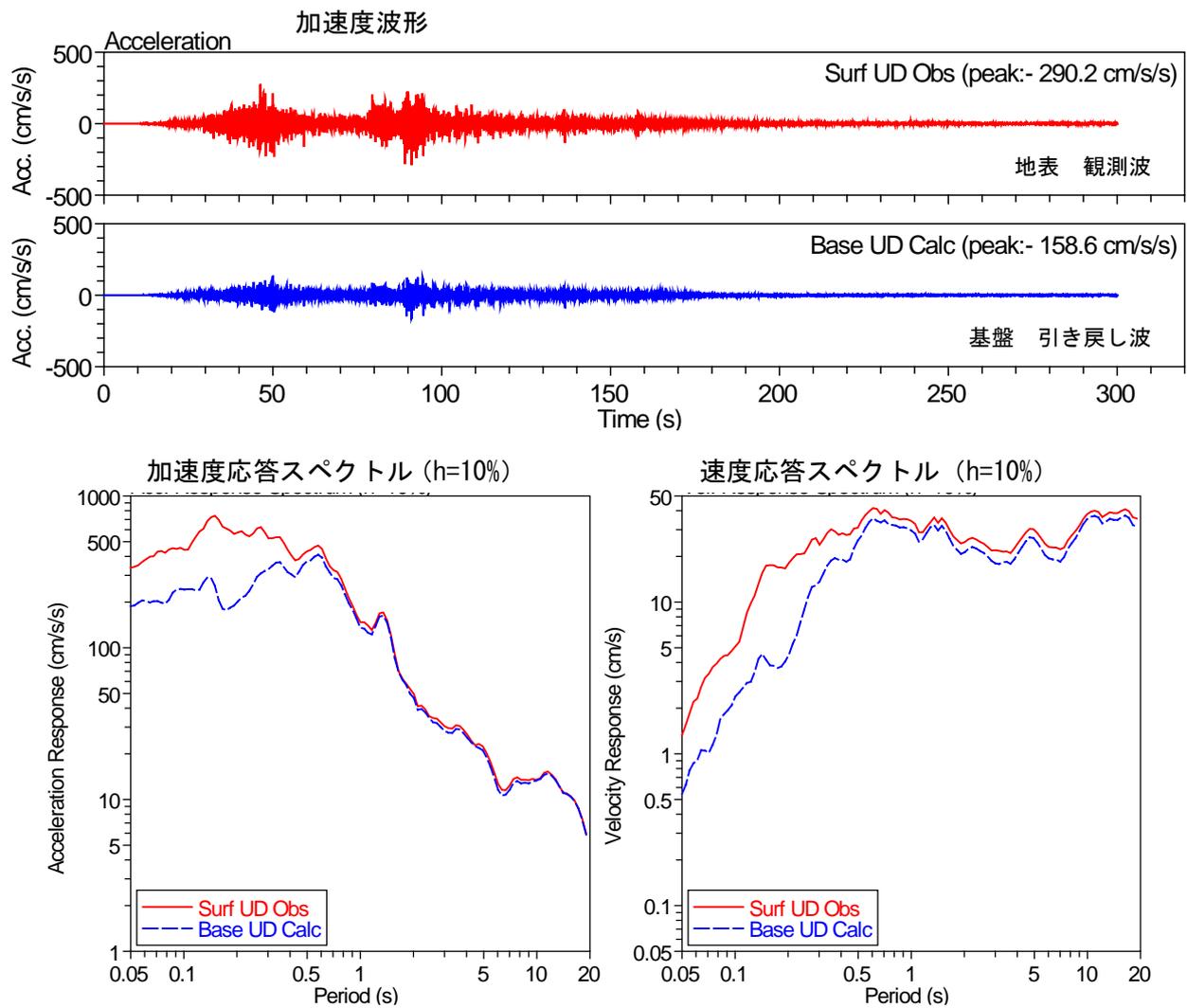


図4. 6-6 地表面での観測地震波形と応答計算による工学的基盤での地震波形の比較  
(防災科研 K-NET MYG013・UD成分)

#### 4. 7 3月9日の前震の観測地震波形を用いた地盤の地震応答解析【地表→工学的基盤】

4. 6節で述べたように、仙台・塩釜特防区域周辺には3か所の地震観測記録が残っている。このうち2つは防災科研が設置している地震計の観測記録K-NET (MYG012、MYG013) であり、地表面での最大加速度で約2000cm/s/s、約1500cm/s/sを示している。一方、港湾研が設置している地震計の観測記録(仙台-G、仙台-GB)では、地表面での最大加速度が約600cm/s/s、工学的基盤では約250cm/s/sを示している。

防災科研と港湾研における記録に大きな差がみられることから、本検討の再現計算において、どの記録を採用するのが適当であるか、東北地方太平洋沖地震以外の観測地震波形について調査する。

3月9日の前震においては、先に示した東北地方太平洋沖地震の地震観測点に加えて、消防研究センター(以下「消防研」という。)の仙台コンビナート地区の地震観測点においても地表面での地震波形が観測されている。この地震は、東北地方太平洋沖地震と伝播特性が類似していると考えられることから、この地震についてもこれまでの手順と同様の手法で工学的基盤における地震波形を求め、地震観測点毎の地震波形の特性について比較を行う。

##### (1) 地震の概要

気象庁による3月9日の前震の概要を、表4. 7-1に示す。

表4. 7-1 3月9日の前震の概要

発生日時	平成23年3月9日 11時45分
震央地名	三陸沖(北緯38.3度、東経141.3度)
震源の深さ	8km
規模	マグニチュード7.3
特防区域付近の震度	震度4:宮城県仙台市、塩竈市

##### (2) 観測地点

3月9日の前震における地震波形観測地点を、表4. 7-2及び図4. 7-1に示す。

表4. 7-2 3月9日の前震の地震波形観測地点

観測機関	地点名	地点コード	設置位置
防災科研 K-NET	塩釜	MYG012	地表
	仙台	MYG013	地表
港湾研	仙台	仙台-G	地表
		仙台-GB	地中(GL-10.4m)
消防研	仙台	仙台コンビ	地表



図4. 7-1 3月9日の前震の地震観測地点の位置（仙台・塩釜特防区域）

(3) 観測波形

3月9日の前震で観測された地震波形の一覧を表4. 7-3に示す。また、観測地震波形及びスペクトルを図4. 7-2～5に示す。

表4. 7-3 3月9日の前震の観測地震波形（仙台・塩釜特防区域）

観測機関	地点名	地点コード	設置位置	最大加速度(cm/s/s)		
				N S	E W	U D
防災科研 K-NET	塩釜	MYG012	地表	34.9	45.6	23.8
	仙台	MYG013	地表	30.7	42.2	17.5
港湾研	仙台	仙台-G	地表	17.0	19.2	6.8
		仙台-GB	地中(GL-10.4m)	8.0	8.0	5.7
消防研	仙台	仙台コンビ	地表	36.8	31.9	15.1

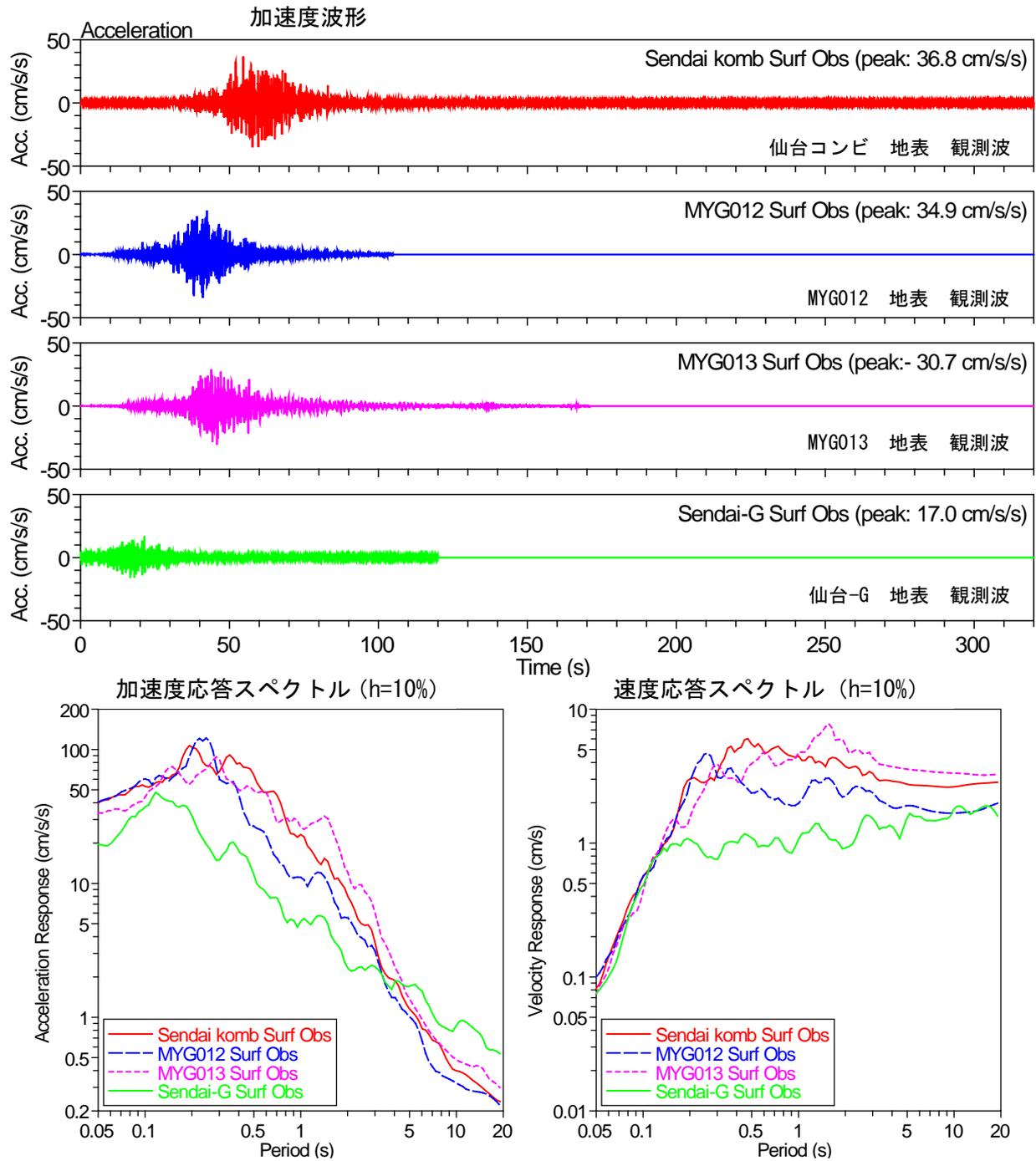


図4. 7-2 3月9日の前震の地表面における観測地震波形の比較 (NS成分)

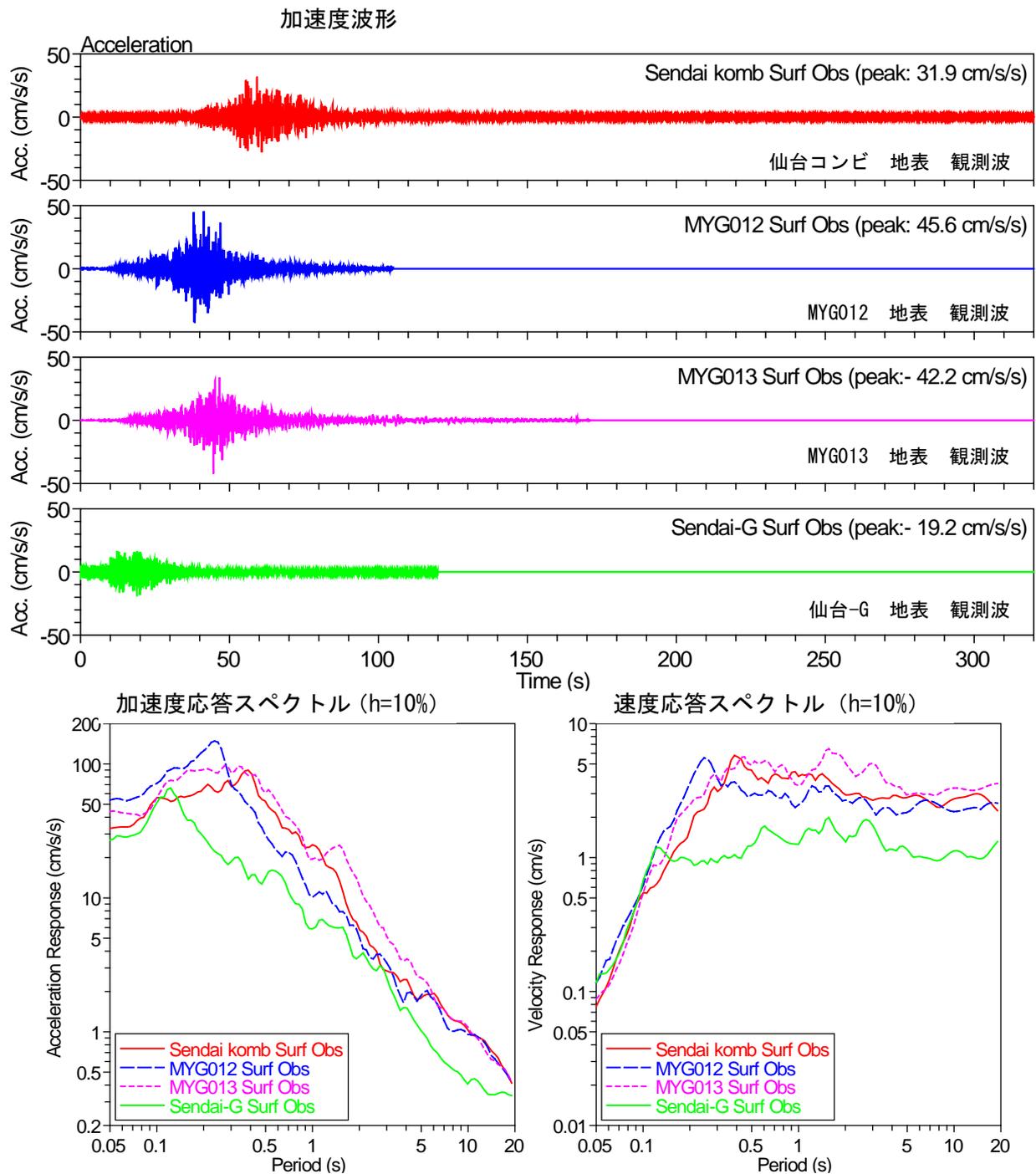


図4. 7-3 3月9日の前震の地表面における観測地震波形の比較 (EW成分)

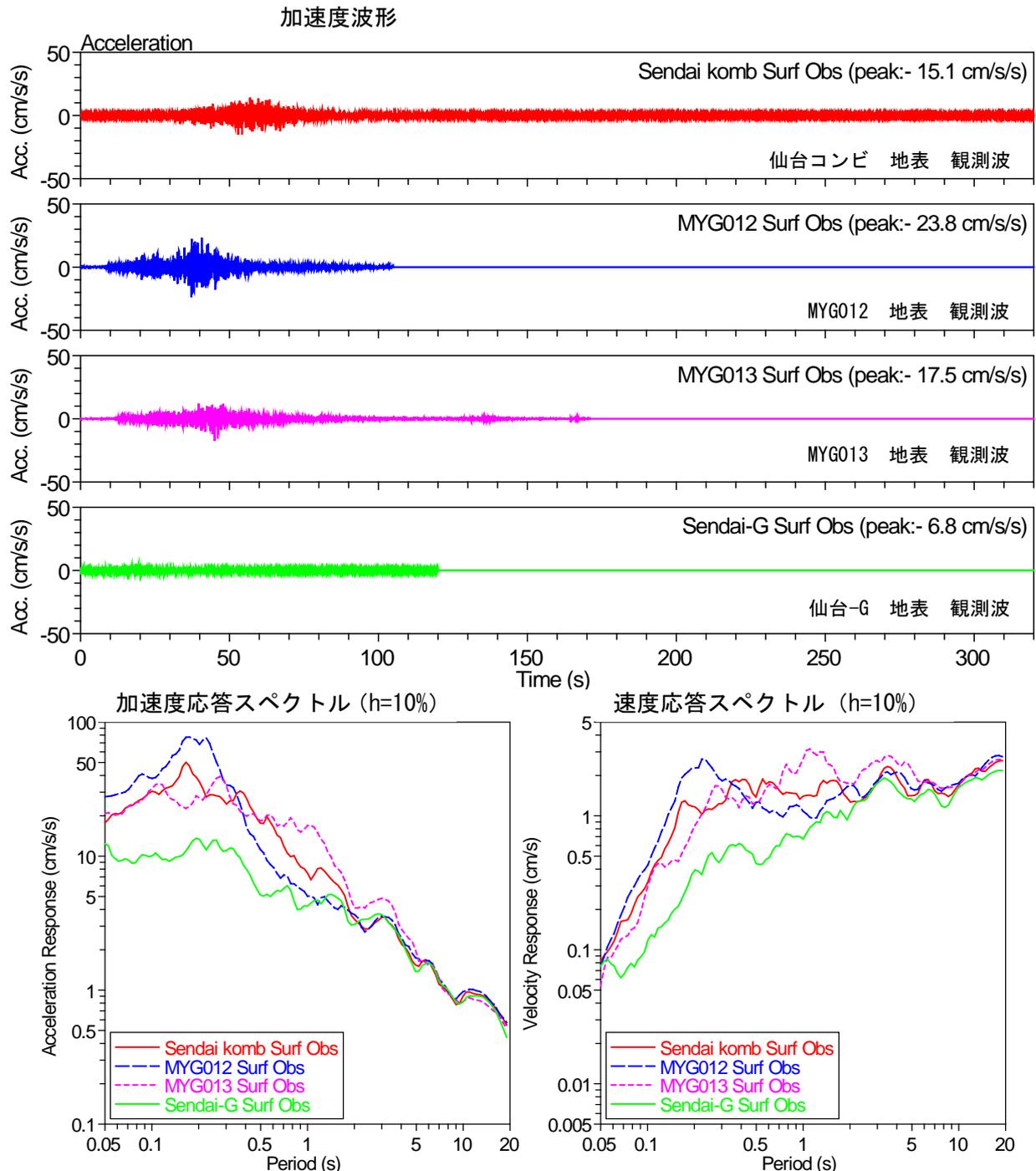


図4. 7-4 3月9日の前震の地表面における観測地震波形の比較 (UD成分)

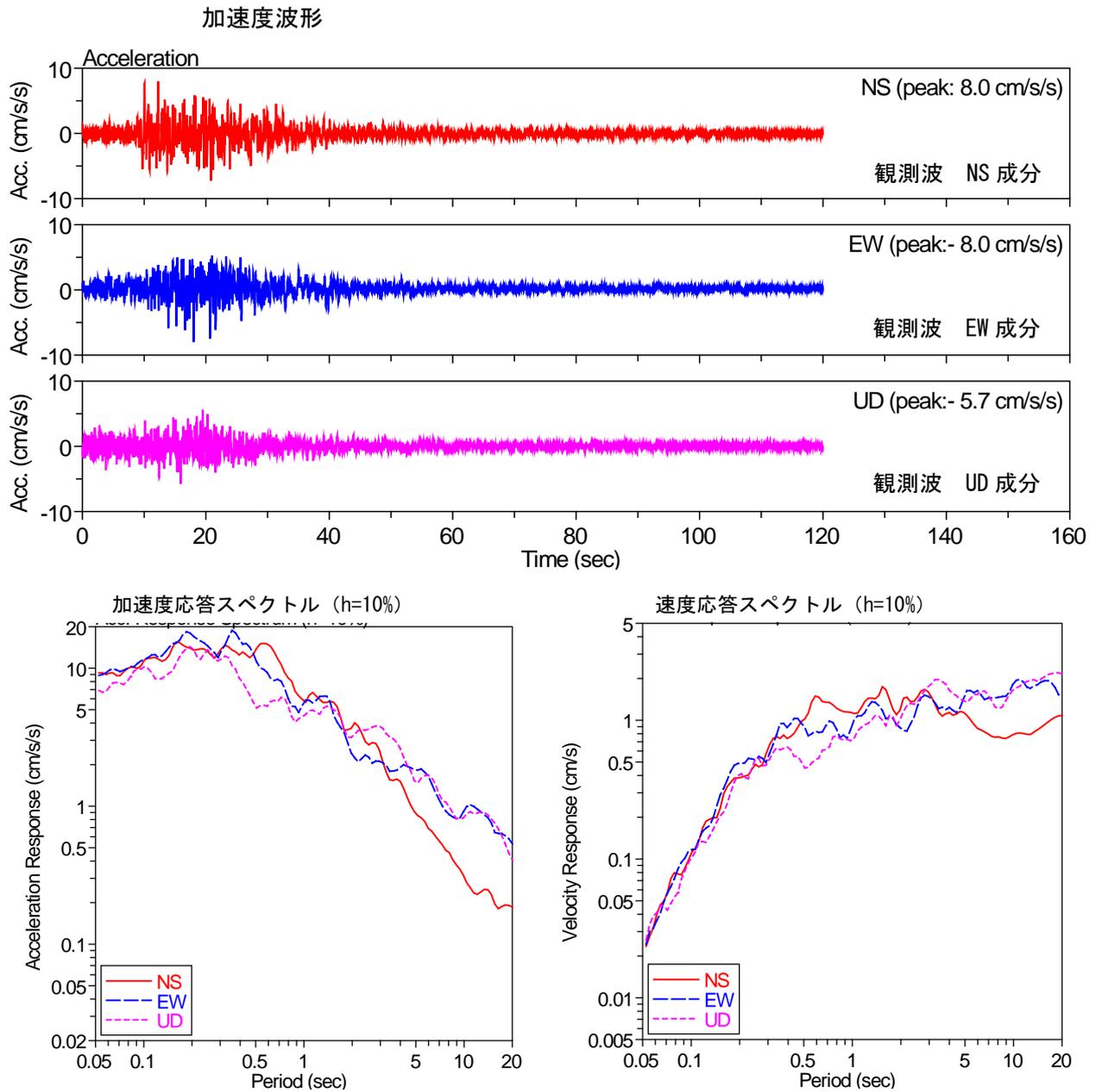


図4. 7-5 3月9日の前震の工学的基盤における観測地震波形（港湾研 仙台-GB）

(3) 地盤モデル

仙台・塩釜特防区域の地表面での観測地震波形を工学的基盤に戻す解析に用いる地盤モデルについては、4. 5節で設定した解析対象地区の地盤モデルを参照し、表4. 7-4のように設定した。動的変形曲線については、4. 5節で設定したものを用了。

表4. 7-4 仙台・塩釜特防区域の地盤モデル

No	深さ (G. L. -m)	土質	Vs (m/s)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
1	3.00	Fl (c) (埋土 (粘性土主体))	120	1.6
2	19.60	As (沖積砂質土層)	130	1.8
3	28.20	Dc (洪積粘性土層)	170	1.6
4	-	R (基盤)	850	2.2

(4) 解析結果

4. 6節と同様に『DYNEQ』を用いて等価線形解析により、工学的基盤での地震波形を計算した。計算結果を表4. 7-5及び図4. 7-6～8に示す。

3成分のいずれも、仙台コンビと比較すると以下のような傾向が読み取れる。

- ・MYG012は、0.2秒程度の短周期は同じレベル。0.5秒～2秒のやや長周期が同じレベル
- ・MYG013は、0.5秒～5秒の周期が大きい。
- ・仙台-GBは、0.1秒～5秒の周期が小さい。

また、加速度振幅を比較すると、仙台コンビ、MYG012、MYG013と比較して仙台-GBは非常に小さくなっている。

これらの違いを地震観測地点における工学的基盤までのサイト特性と考え、東北地方太平洋沖地震の解析の入力波としては、仙台コンビと傾向が概ね同じである、MYG012を採用することとする。

表4. 7-5 3月9日の前震の工学的基盤波形の比較

地点コード	設置位置	最大加速度(cm/s/s)		
		NS	EW	UD
解析波形 (仙台コンビ)	基盤	29.5	27.9	13.3
解析波形 (MYG012)	基盤	20.9	22.8	10.4
解析波形 (MYG013)	基盤	17.4	22.2	9.2
観測波形 (仙台-GB)	基盤	8.0	8.0	5.7

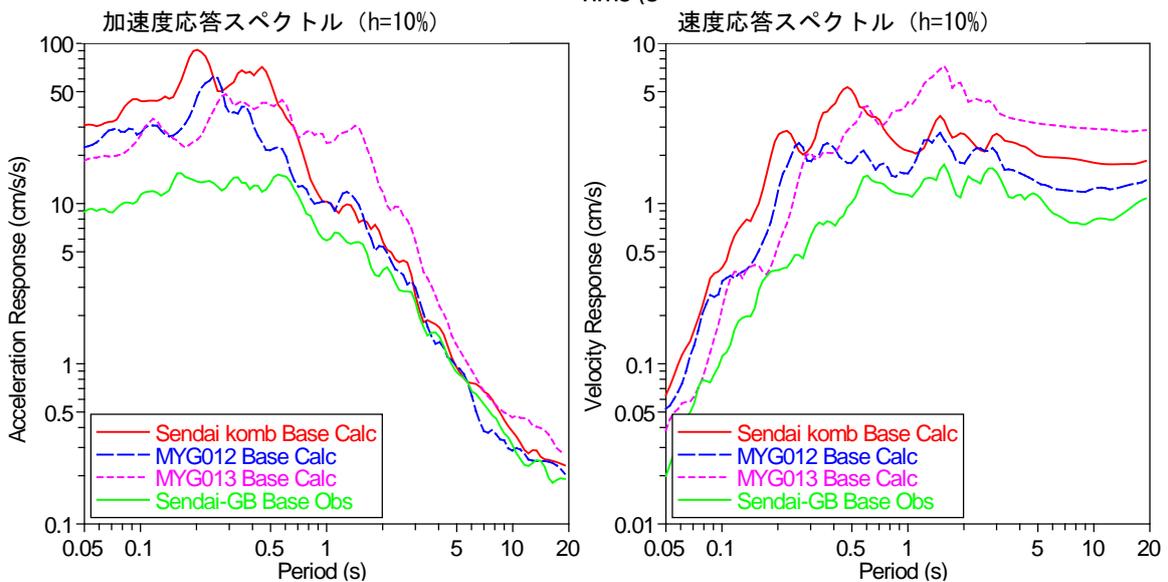
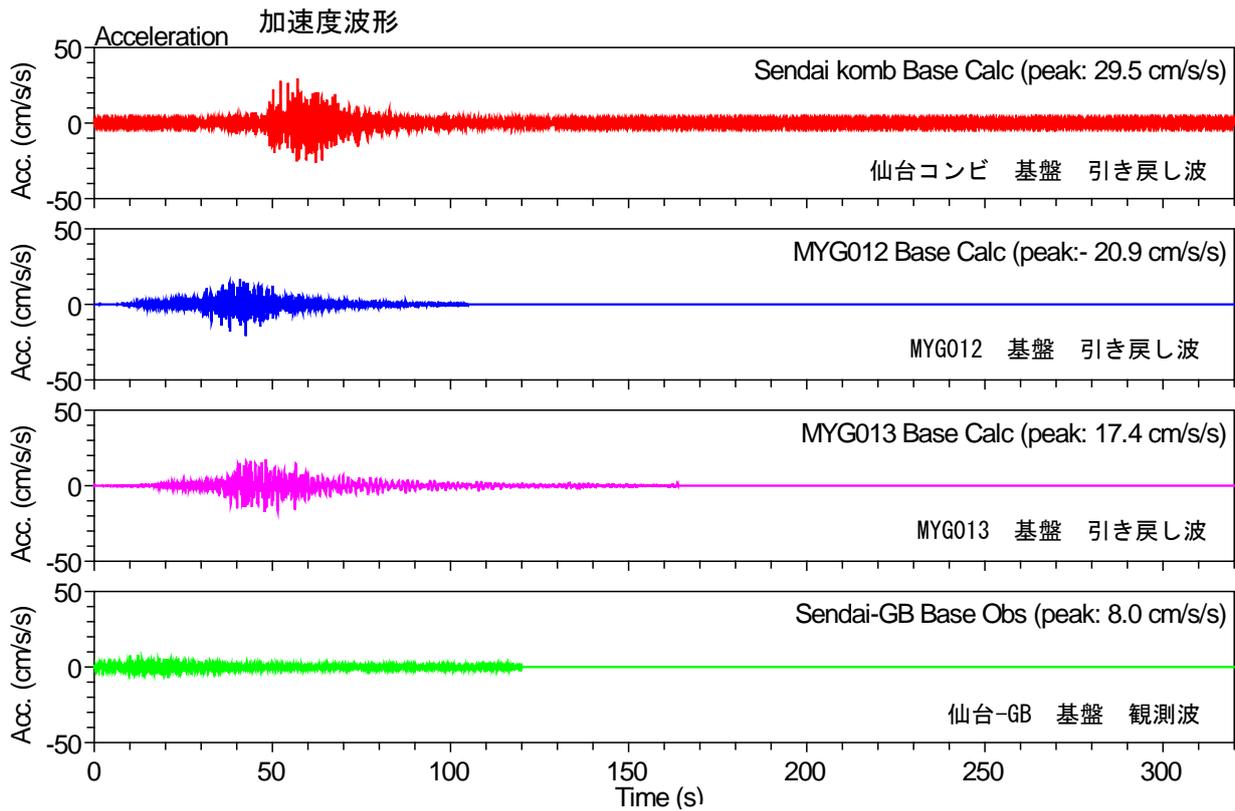


図4. 7-6 3月9日の前震の工学的基盤における地震波形 (NS成分)

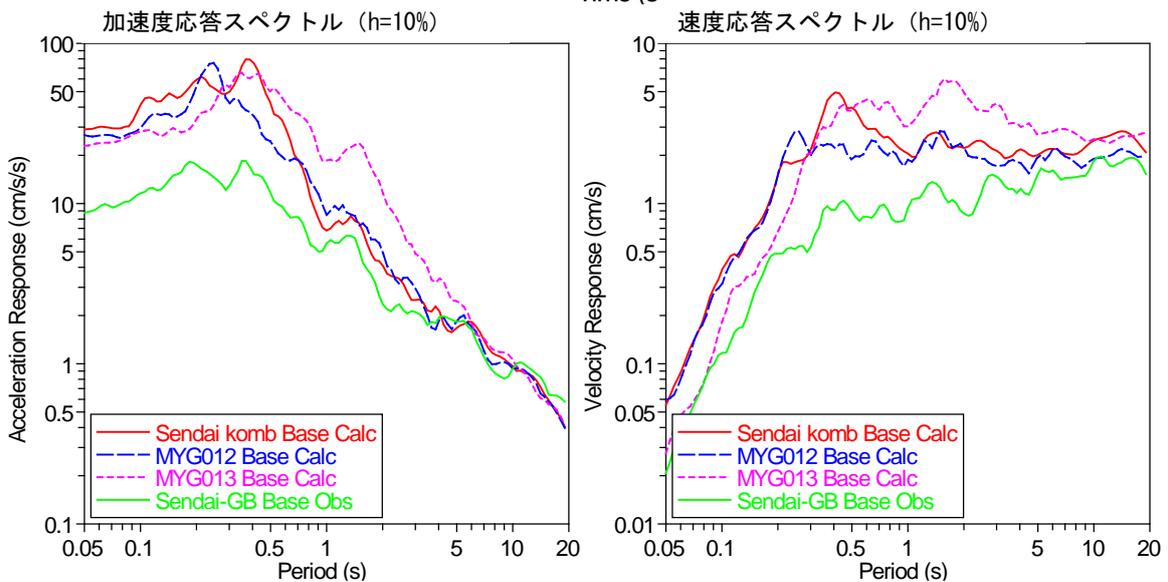
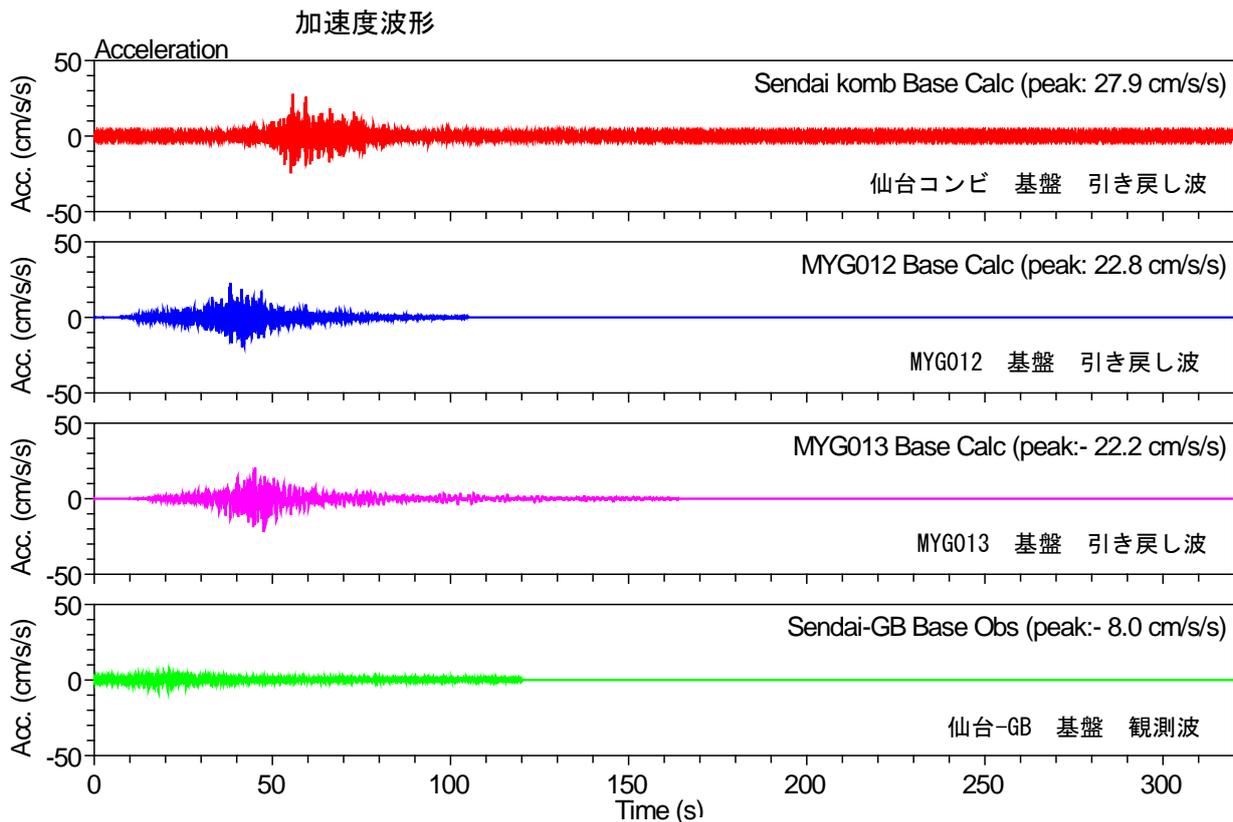


図4. 7-7 3月9日の前震の工学的基盤における地震波形 (EW成分)

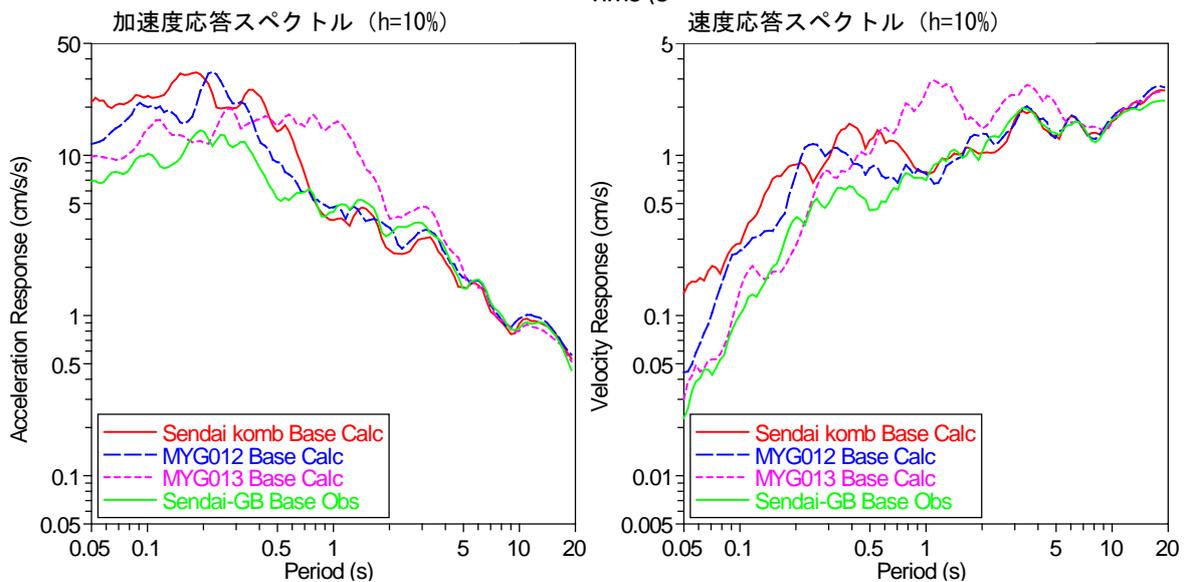
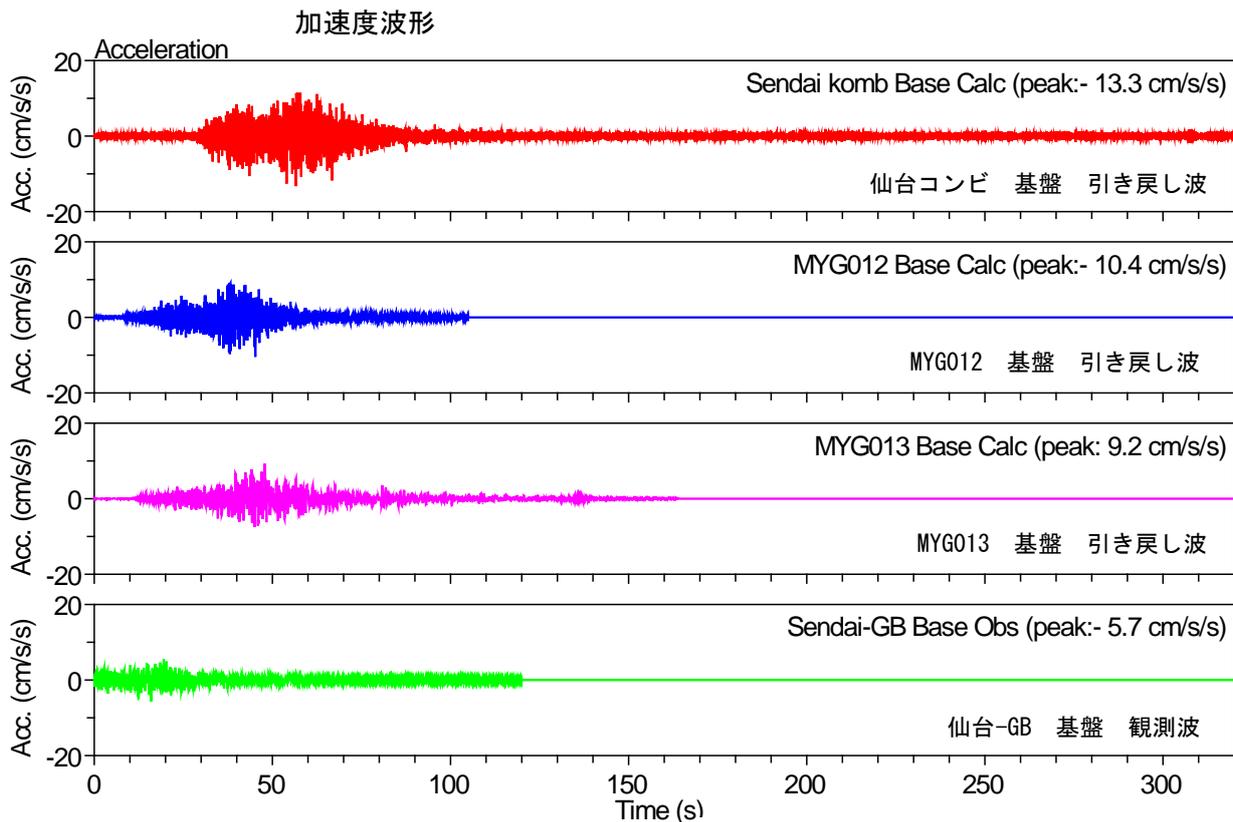


図4. 7-8 3月9日の前震の工学的基盤における地震波形 (UD成分)

#### 4. 8 地盤の地震応答解析【工学的基盤→地表】

これまでの検討結果を踏まえ、MYG012 で工学的基盤に戻した地震波形を入力地震波として、仙台・塩釜特防区域における地表面での地震波形の再現計算を行った。

地震応答解析は、基盤深さが約 35～55m と厚く非線形効果が大きいと見込まれるため全応力逐次非線形解析を採用し、プログラムコードとしては、『YUSAYUSA-2』を採用した。加えて、地震動応答解析の実績が格段に多い等価線形解析法による計算も行い、両者による解析結果を比較した。

解析は、ケース①とケース②の 2 ケースとした。(4. 4 節参照)

解析結果を、表 4. 8-1 及び図 4. 8-1～8 に示す。

解析結果について、以下に述べる

- ・応答スペクトルを比較すると、いずれのケースにおいても短周期 (0.2 秒以下) 成分が非線形効果により大きく減衰しているのに対し、長周期成分 (概ね 0.5 秒以上) については増幅している。
- ・最大加速度、最大速度を比較すると非線形計算の方が等価線形計算よりもやや振幅が小さい。
- ・基盤が深いケース①の方が基盤の浅いケース②よりも非線形効果が大きく、やや振幅が小さい。

以上の結果は、港湾研の観測地震波形の傾向 (図 4. 5-2～3) と概ね一致しており、解析結果は妥当であるといえる。

また、等価線形計算と非線形計算結果は比較的近い結果が得られているが、非線形計算は地盤の非線形効果を理論的に与えているのに対し、等価線形計算は近似的な手法で与えている。このため、実現象をよりよく再現していると考えられる非線形計算の結果を採用する。

表 4. 8-1 仙台・塩釜特防区域における応答計算結果  
(東北地方太平洋沖地震・地表)

地点コード	設置位置	最大加速度 (cm/s/s)			最大速度 (cm/s)		
		NS	EW	UD	NS	EW	UD
解析波形 (ケース①)	等価線形	256.8	344.3	402.7	38.45	40.25	40.86
	非線形	250.9	336.9	—	36.99	46.69	—
解析波形 (ケース②)	等価線形	303.9	485.8	475.7	42.09	44.91	41.26
	非線形	238.4	361.3	—	39.01	44.05	—

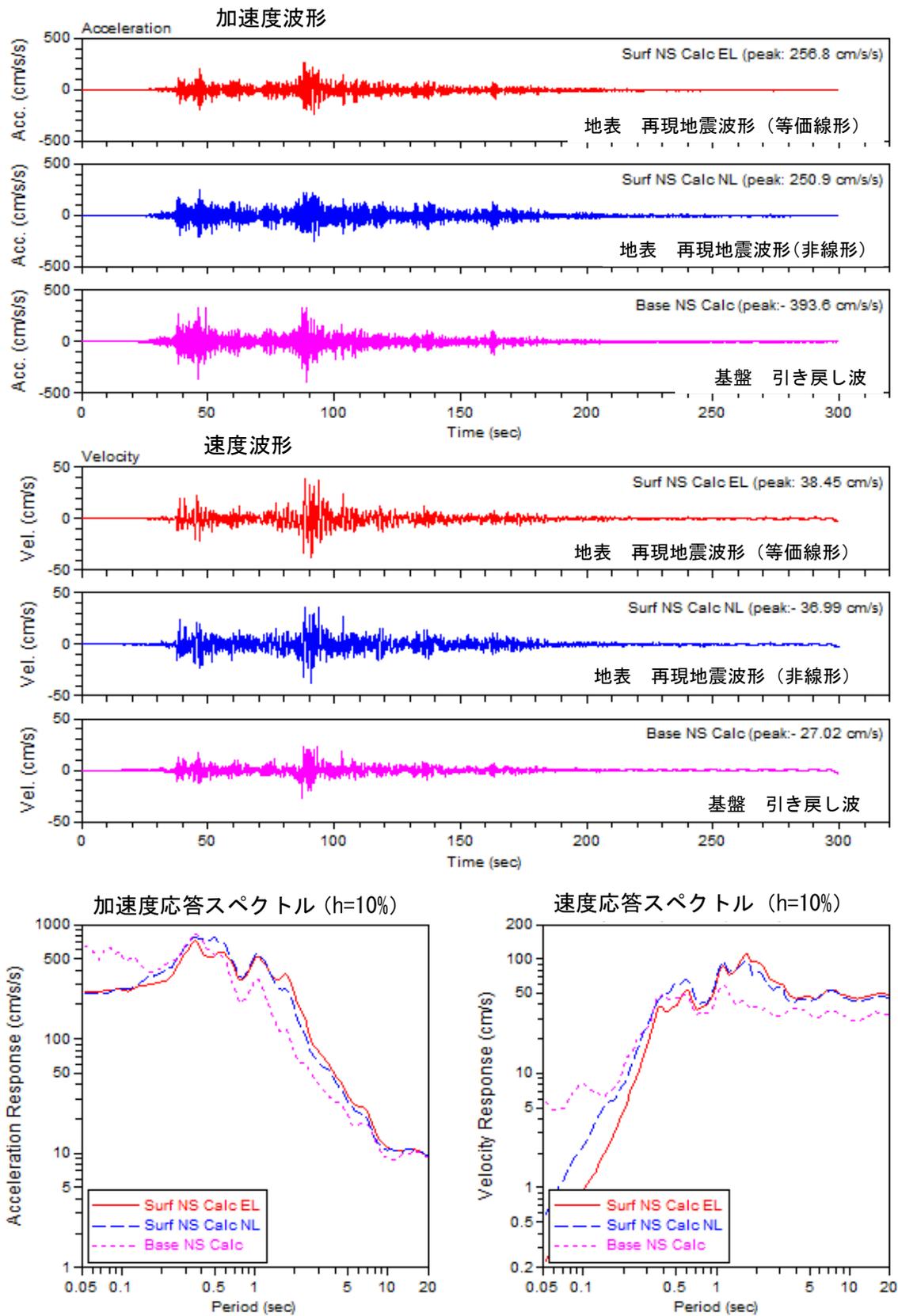


図4. 8-1 応答計算による地表面での地震波形の再現結果  
(ケース①の解析結果・NS成分)

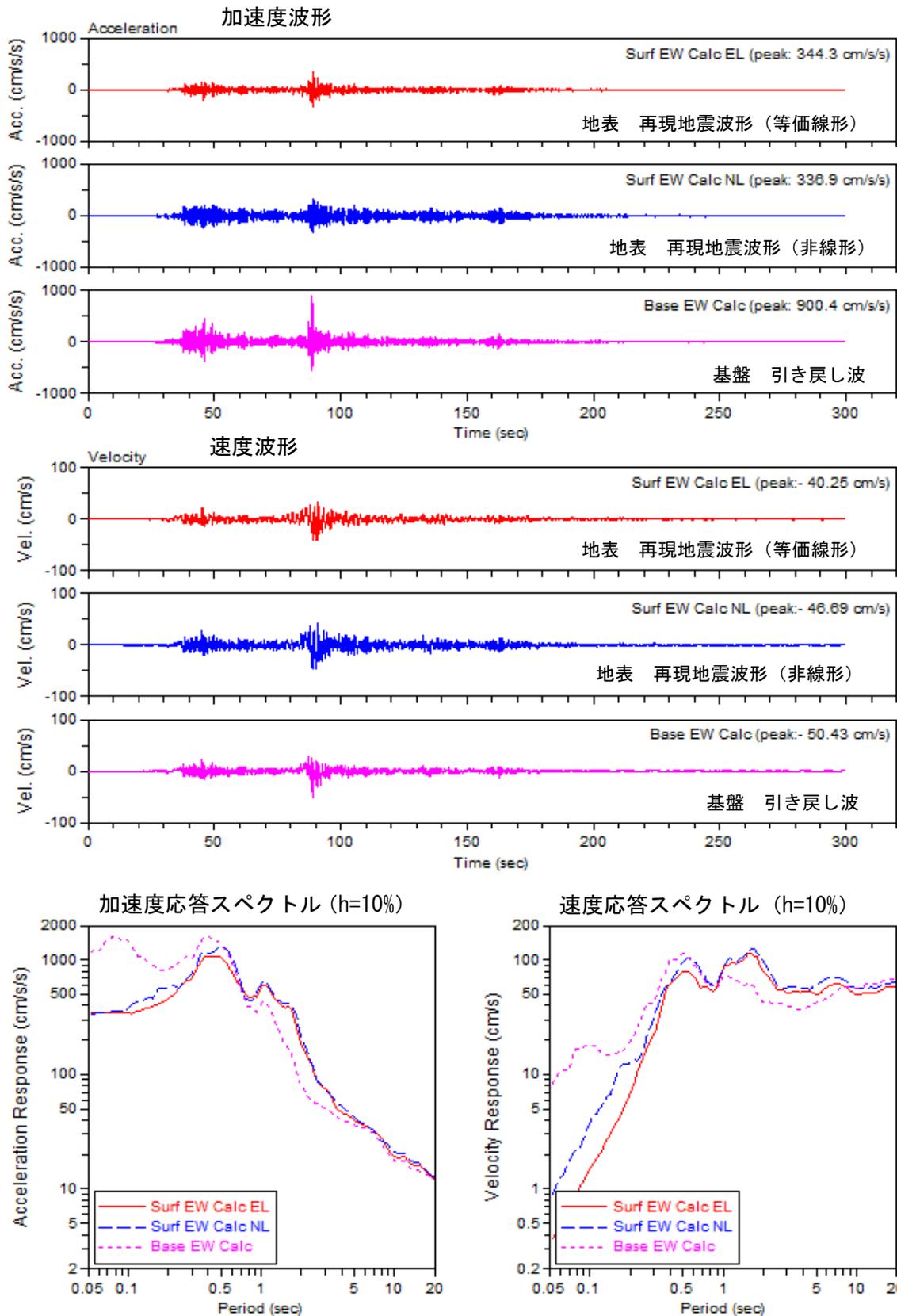


図4. 8-2 応答計算による地表面での地震波形の再現結果  
(ケース①の解析結果・EW成分)

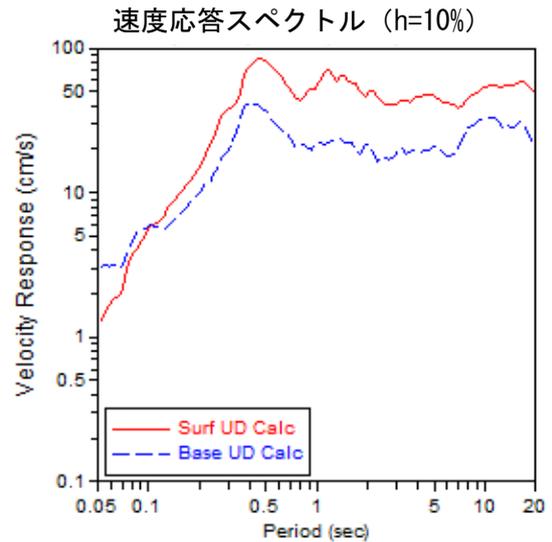
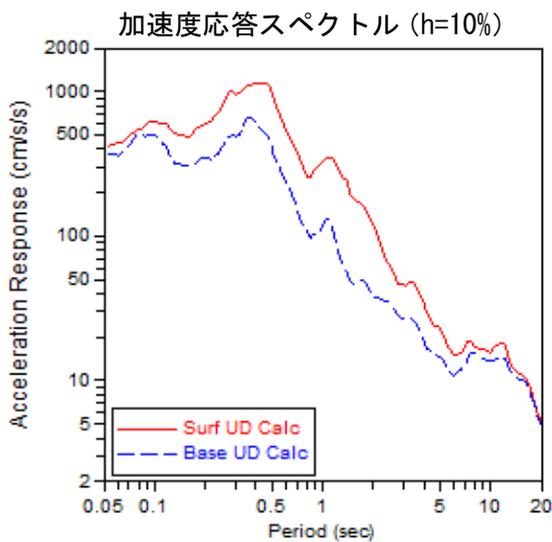
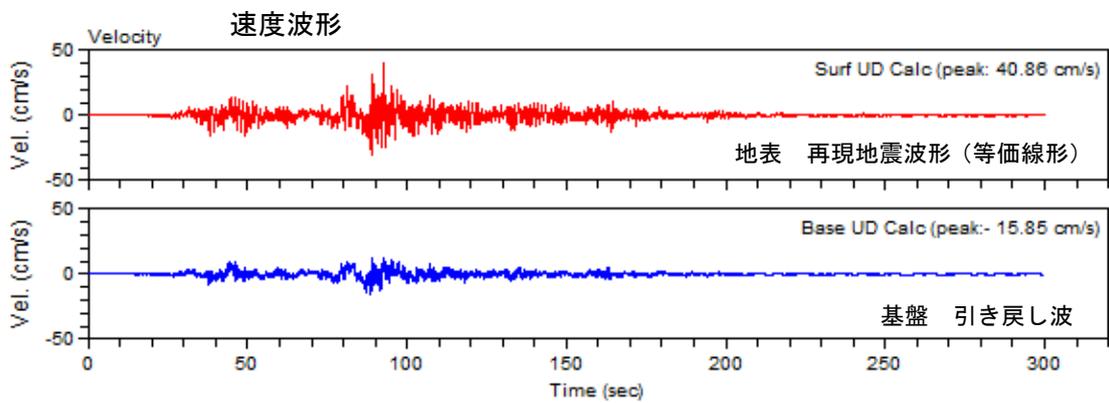
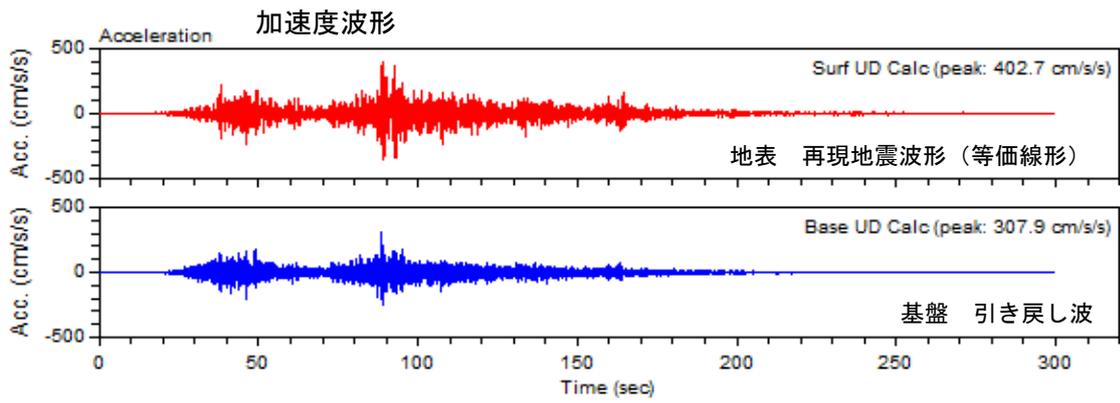


図4. 8-3 応答計算による地表面での地震波形の再現結果  
(ケース①の解析結果・UD成分)

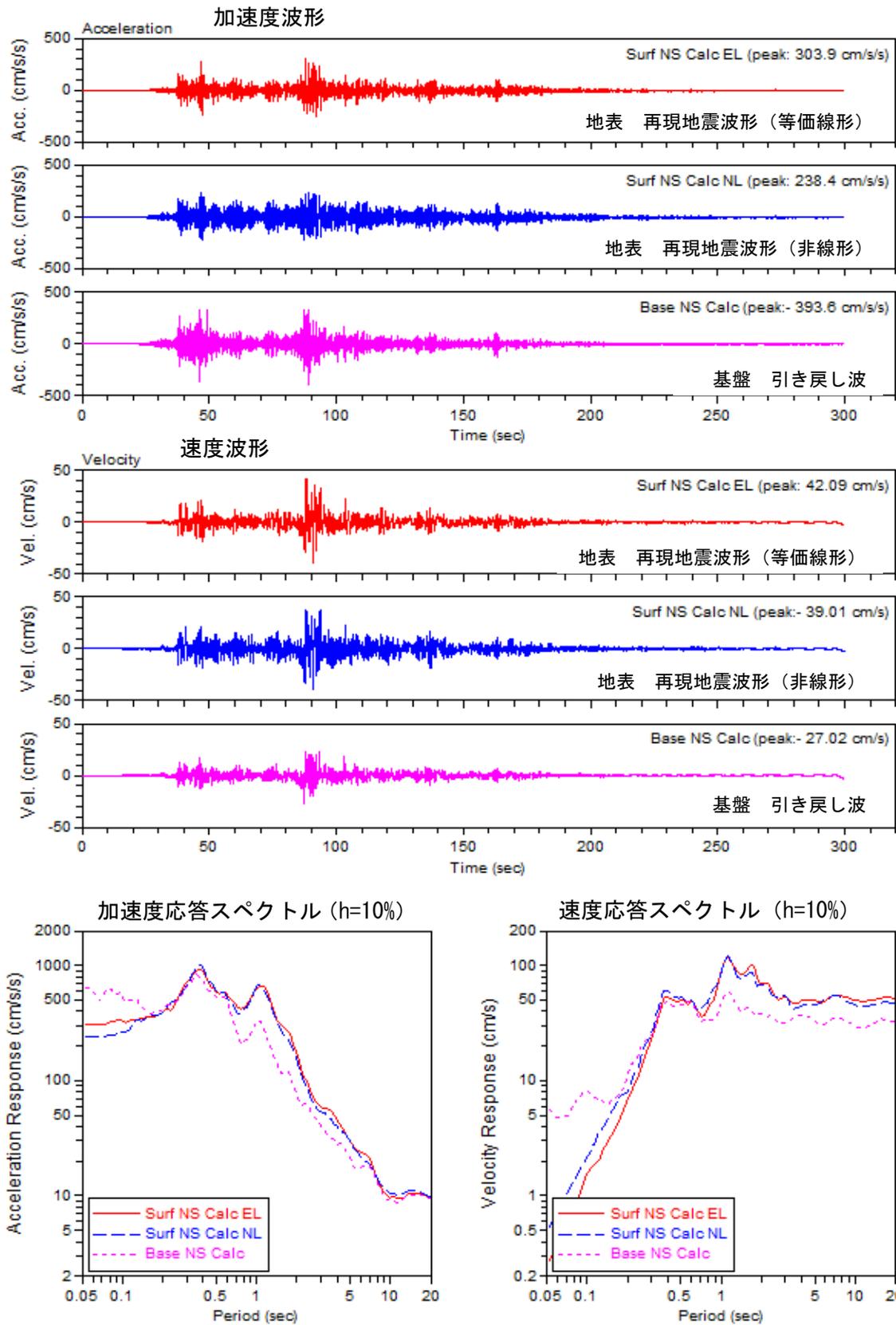


図4. 8-4 応答計算による地表面での地震波形の再現結果  
(ケース②の解析結果・NS成分)

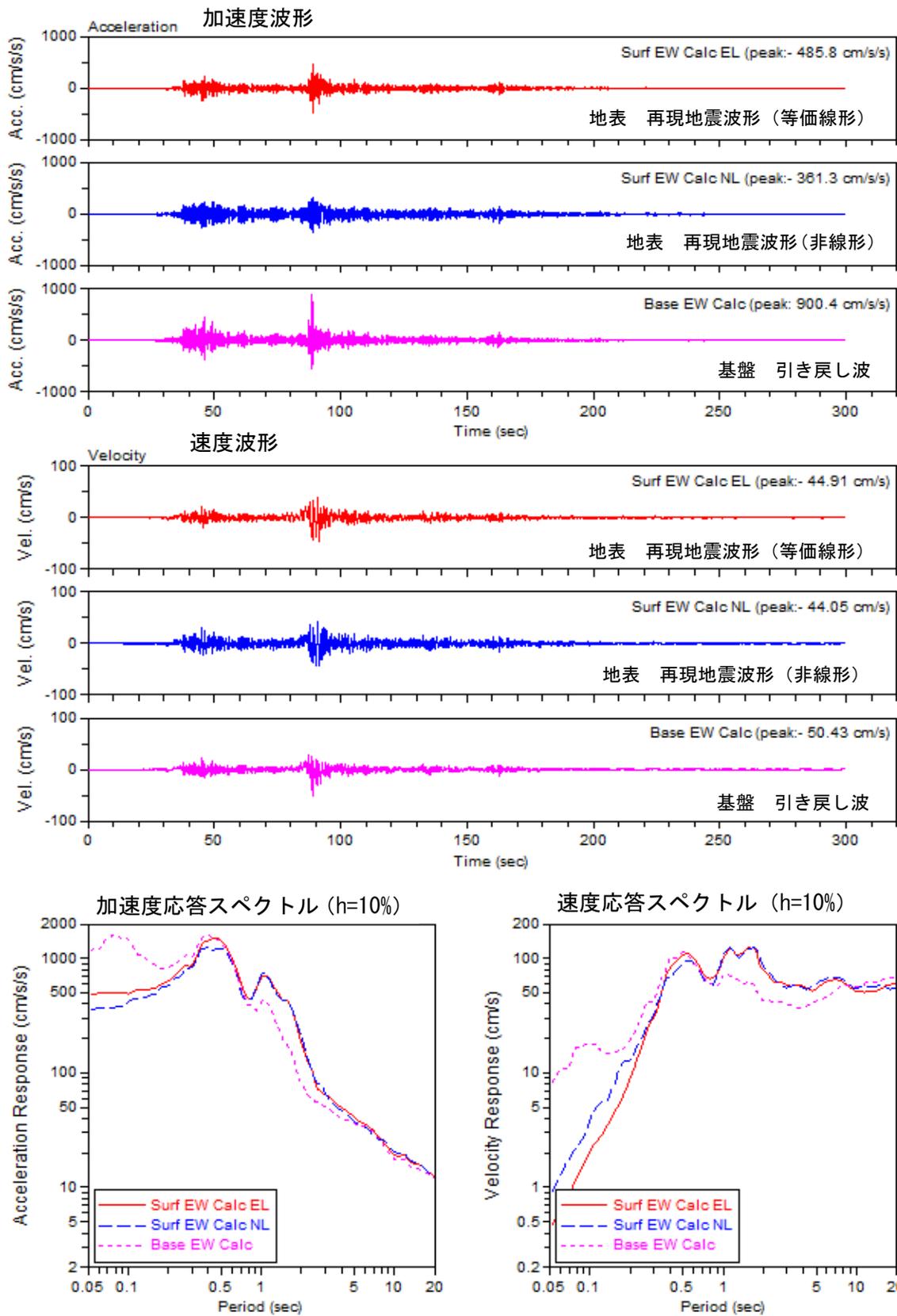


図4. 8-5 応答計算による地表面での地震波形の再現結果  
(ケース②の解析結果・EW成分)

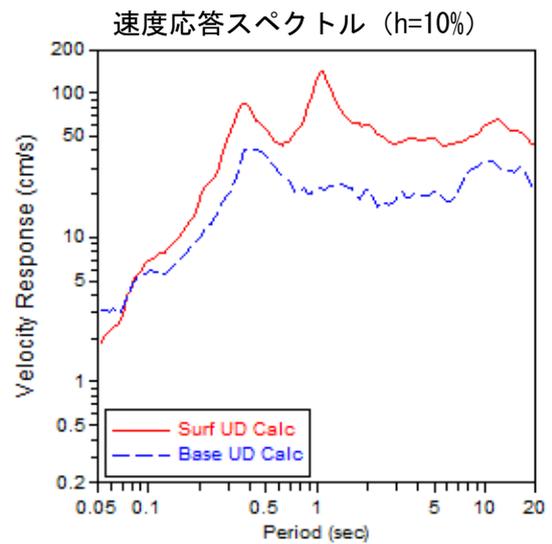
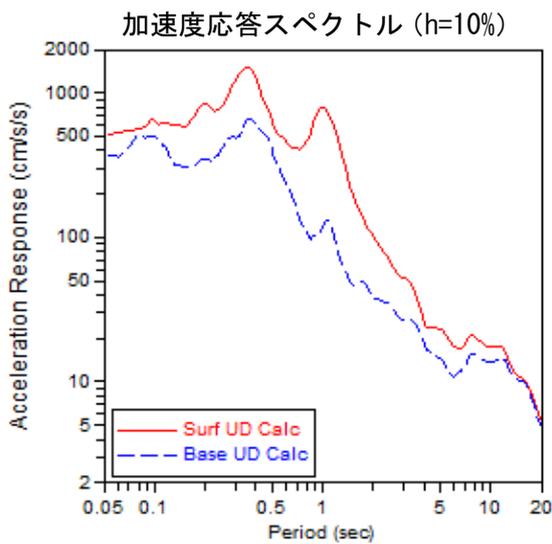
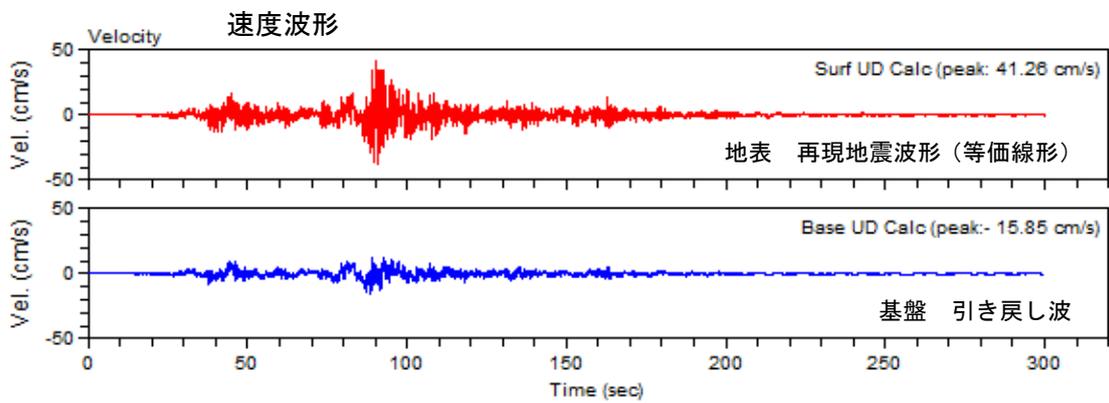
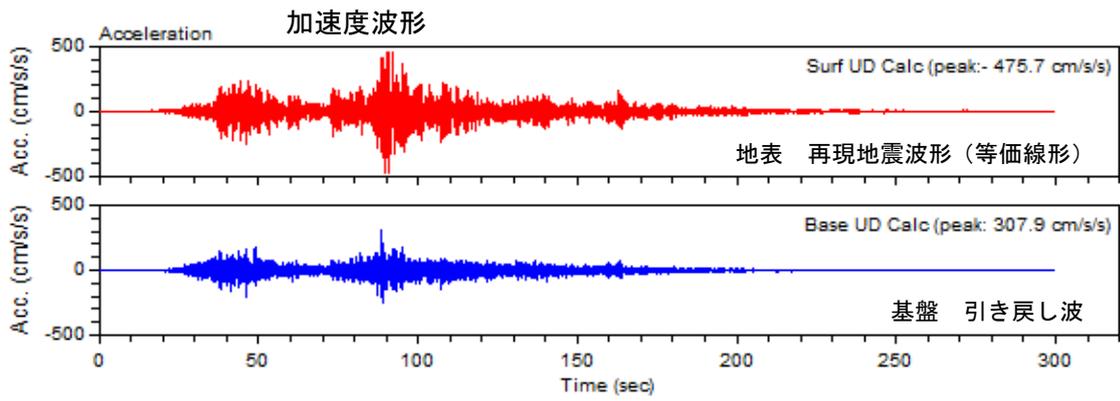


図4. 8-6 応答計算による地表での地震波形の再現結果  
(ケース②の解析結果・UD成分)

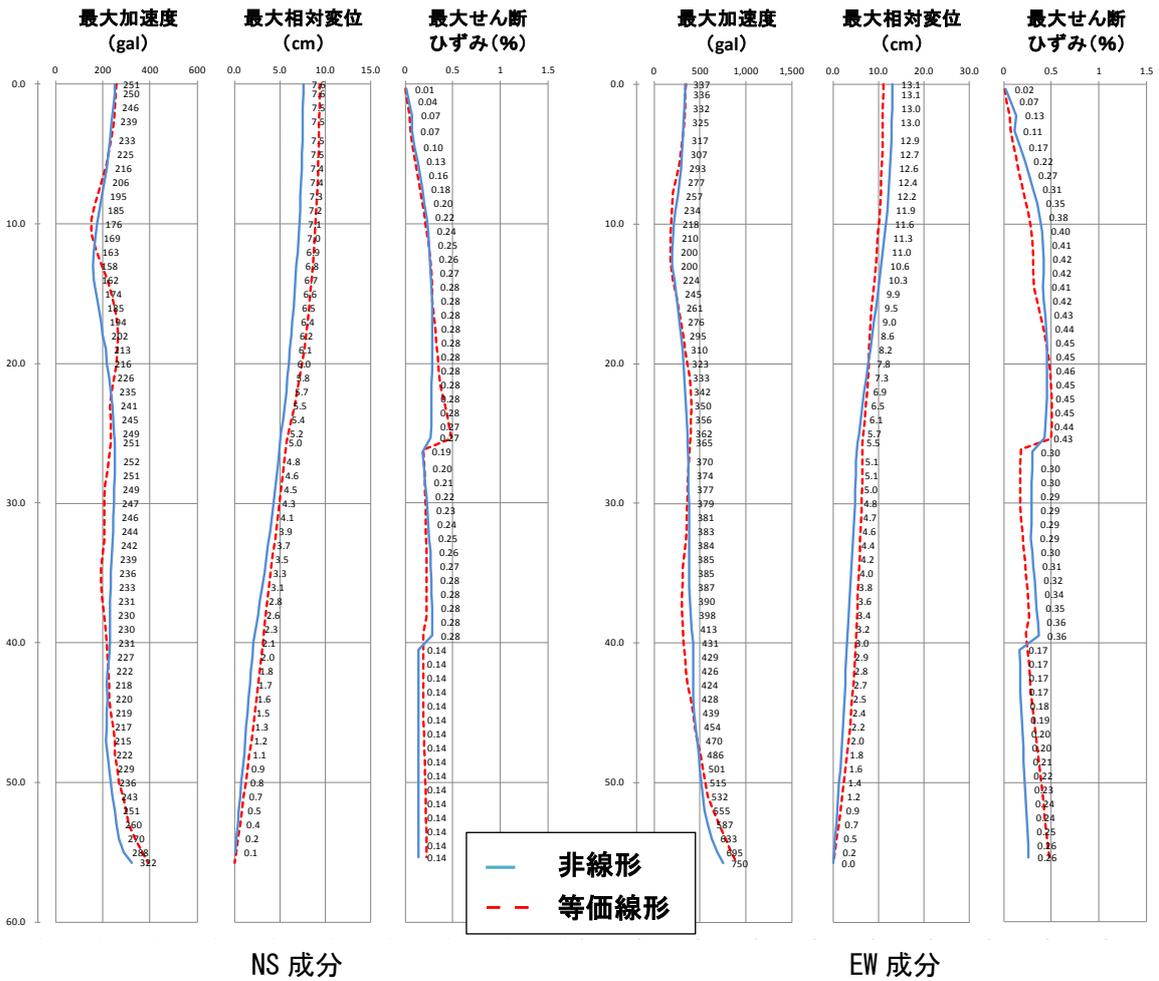


図 4. 8-7 応答計算結果の深さ方向分布図 (ケース①の解析結果)

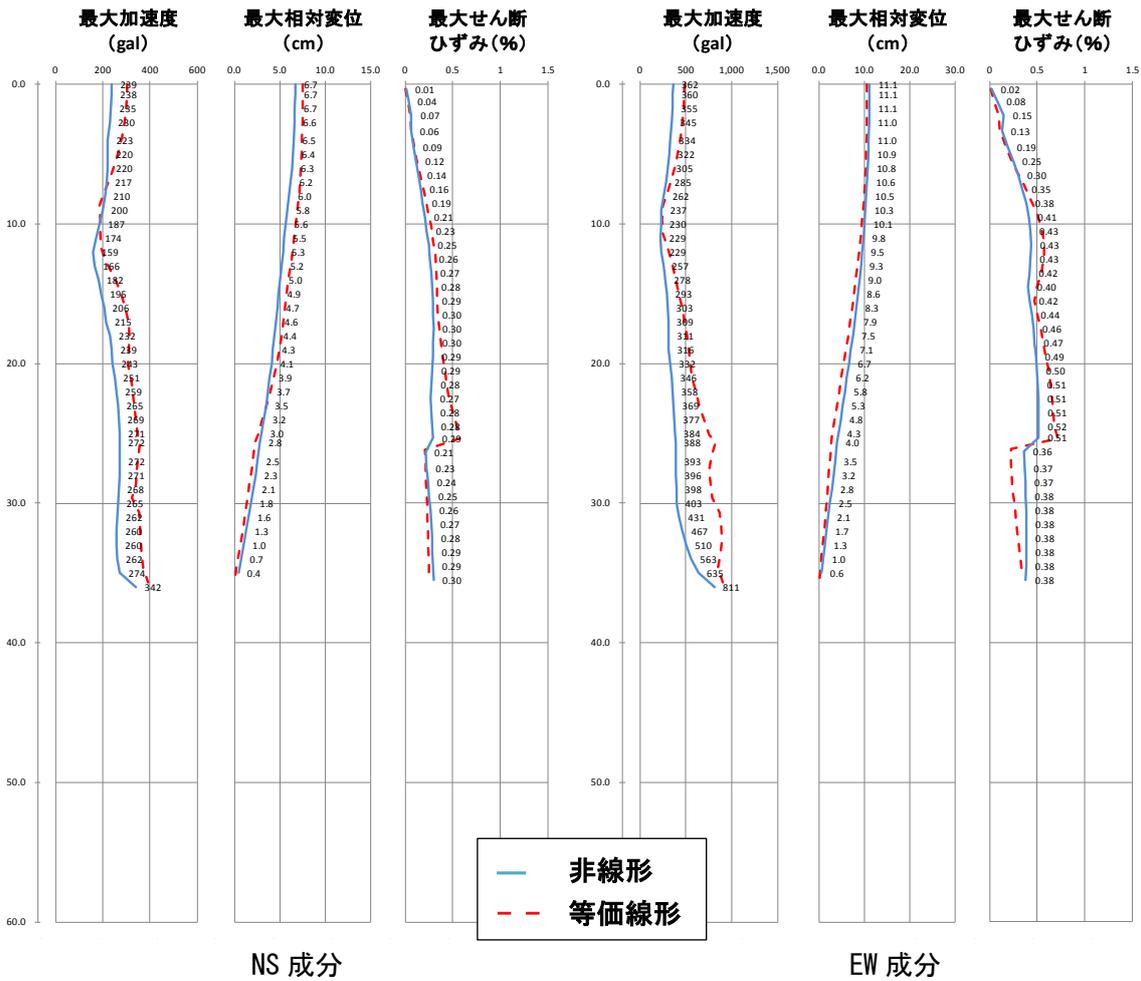


図 4. 8-8 応答計算結果の深さ方向分布図 (ケース②の解析結果)

#### 4. 9 1978年宮城県沖地震の地震波形との比較

1978年6月12日の宮城県沖地震(M7.4)の際に、港湾地域強震観測の塩釜工場-S(以下「塩釜工場-S」という。)において地表面での地震波形が観測されており、今回の東北地方太平洋沖地震の再現結果と比較した。

##### (1) 地震の概要

気象庁による1978年6月12日の宮城県沖地震の概要を、表4.9-1に示す。

表4.9-1 1978年6月12日 宮城県沖地震の概要

発生日時	昭和53年6月12日 17時14分
震央地名	宮城県東方沖(北緯38.2度、東経142.2度)
震源の深さ	40km
規模	マグニチュード7.4
特防区域付近の震度	震度5:宮城県仙台市

##### (2) 観測地点

1978年宮城県沖地震における波形観測地点を、表4.9-2及び図4.9-1に示す。

表4.9-2 1978年宮城県沖地震の波形観測地点

観測機関	地点名	地点コード	設置位置
港湾研	仙台	塩釜工場-S	地表

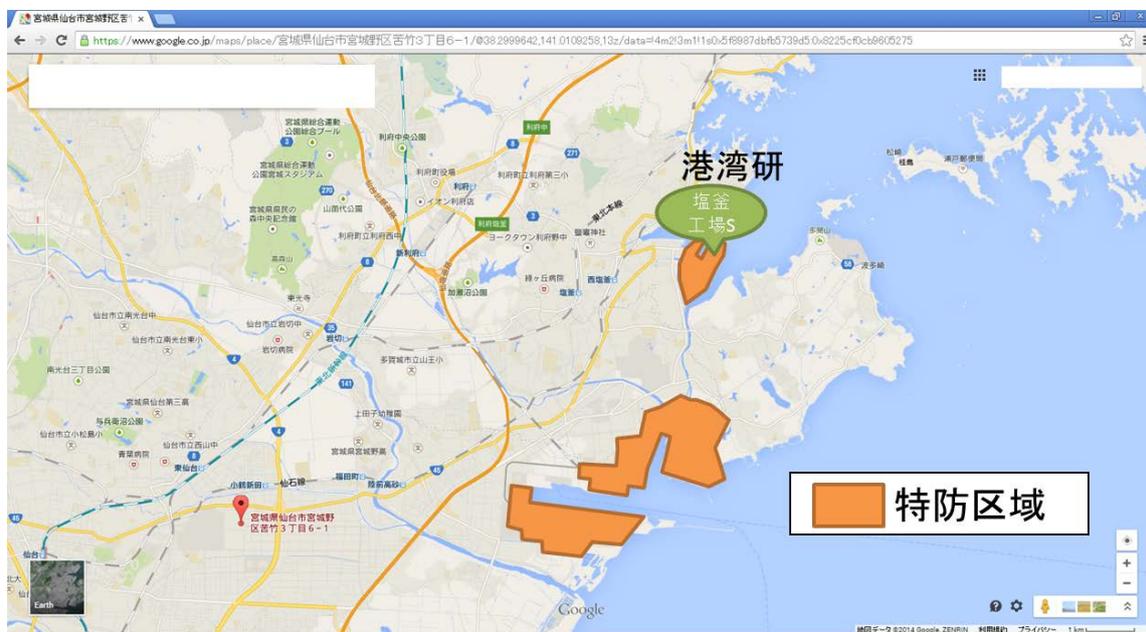


図4.9-1 1978年宮城県沖地震の地震観測地点の位置(仙台・塩釜特防区域)

##### (3) 地震観測地点の地盤構成

塩釜工場-S地点の地盤構成を図4.9-2に示す。塩釜工場-S地点は、地表面から深さ10mまでS波速度が100m/sを下回るような非常に軟弱な地盤である。

No	深さ (G. L. -m)	土質	Vp (m/s)	Vs (m/s)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
1	3.40	F1 (埋土・盛土)	800	95	1.55
2	10.80	Ac (沖積粘性土)	800	60	1.35
3	13.90	As (沖積砂質土)	1500	145	1.70
4		R (基盤)	2000	850	1.80

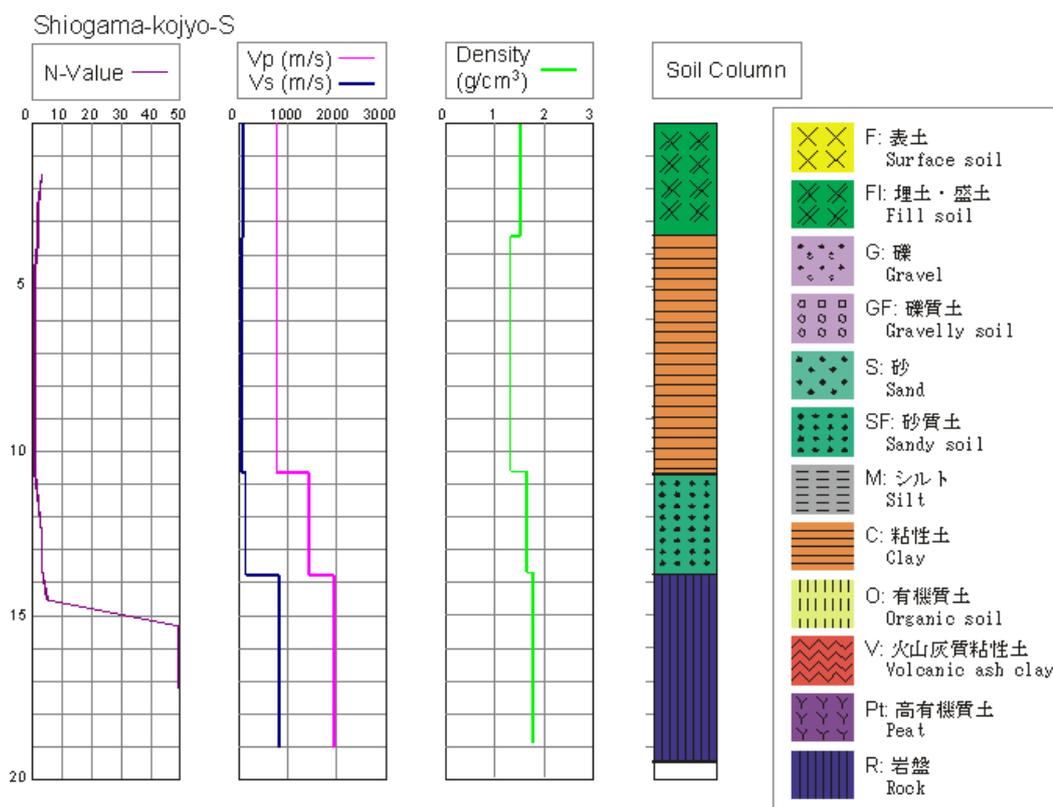


図4. 9-2 塩釜工場-S地点の地盤構成

(4) 観測地震波形の比較

観測された地震波形及びスペクトルを図4. 9-3~5に示す。

塩釜工場-S 地点の宮城県沖地震でのスペクトルは、0.7~0.9 秒付近にピークが見られる。

これに対して、仙台・塩釜特防区域における東北地方太平洋沖地震再現地震波形のスペクトルは 0.3 秒及び 1.0 秒付近にピークが見られる。ただし、仙台・塩釜特防区域の 0.3 秒及び 1.0 秒付近のピークについては、工学的基盤でのスペクトルにも同様に見られる (図4. 8-1~6 参照) ことから、これらのピークは浅部地盤の影響ではないと考えられる。

また、仙台・塩釜特防区域の入力地震波形としては、防災科研 K-NET MYG012 (塩釜) の引き戻し波を用いており、塩釜工場-S の地震観測地点と比較的近いことから、震源から工学的基盤までの伝搬特性についても両者は比較的近いことが考えられる。

以上のことから、仙台・塩釜特防区域における再現地震波形と宮城県沖地震の観測地震波のスペクトルの周期特性の違いは、地震の震源特性の違いによるものと推測される。

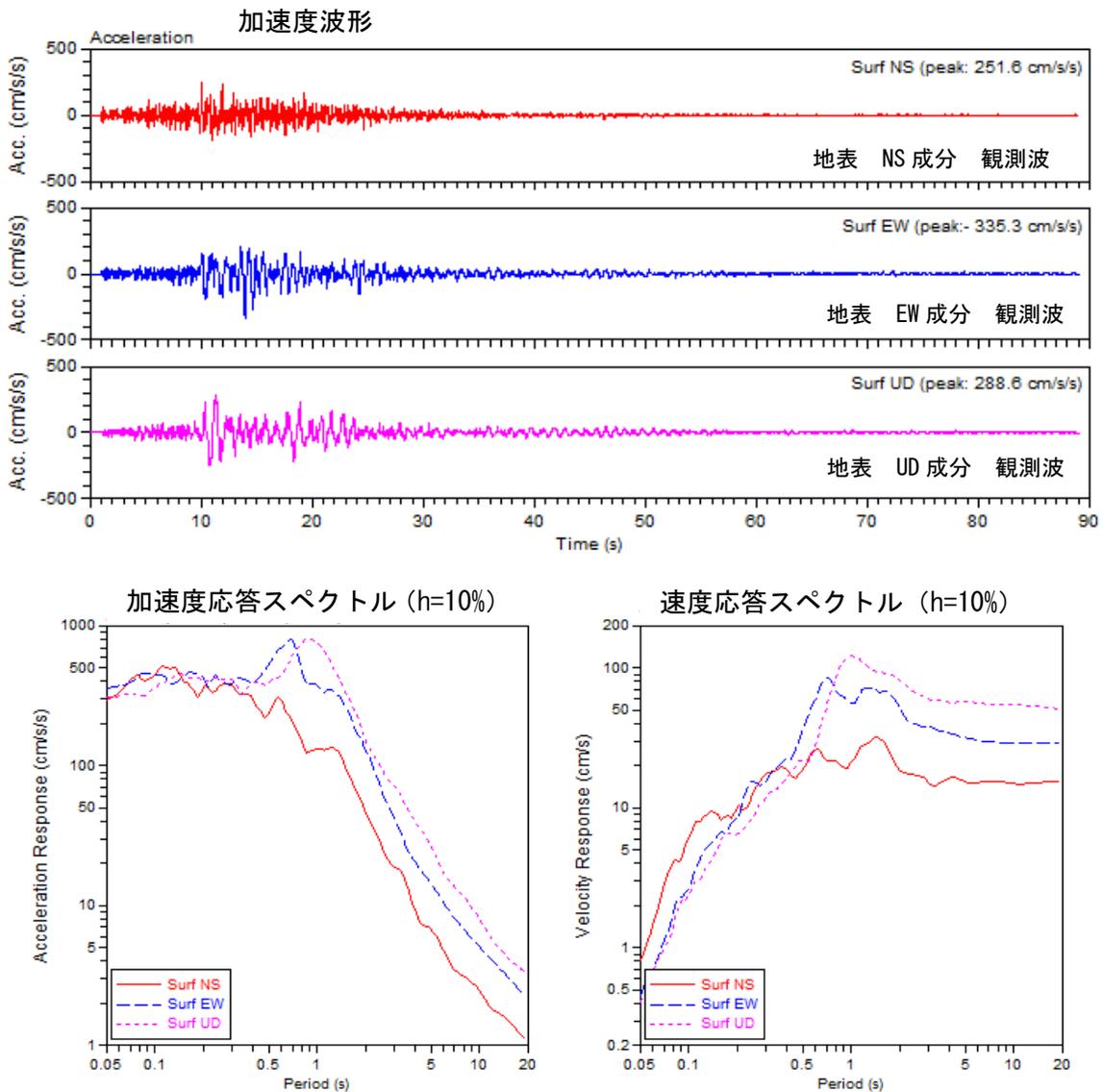


図4. 9-3 塩釜工場-Sにおける1978年宮城県沖地震の観測地震波形

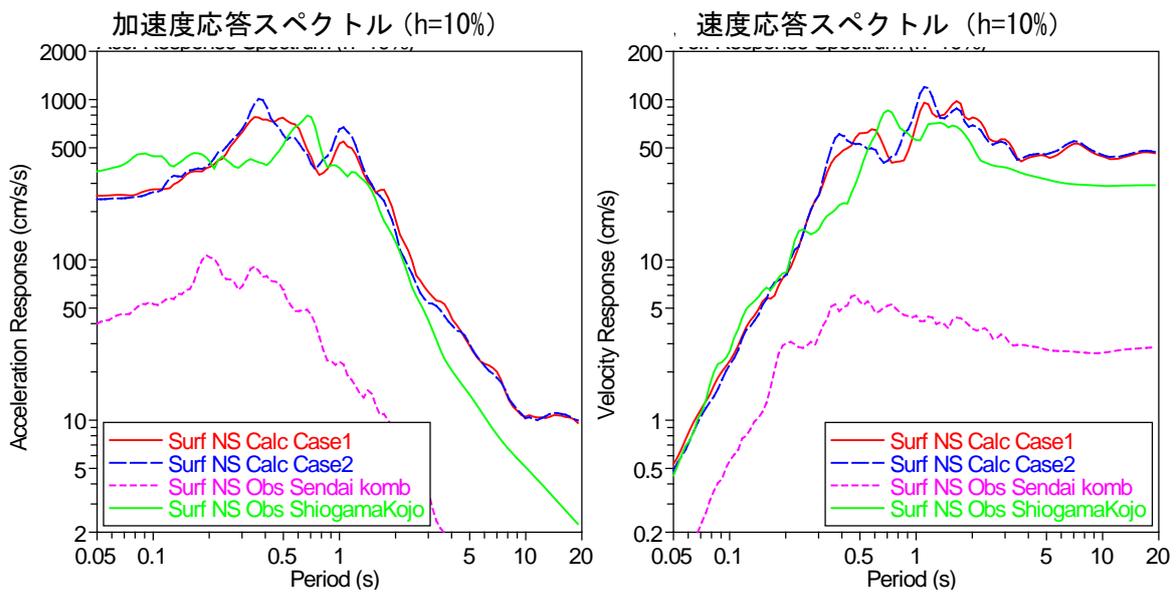
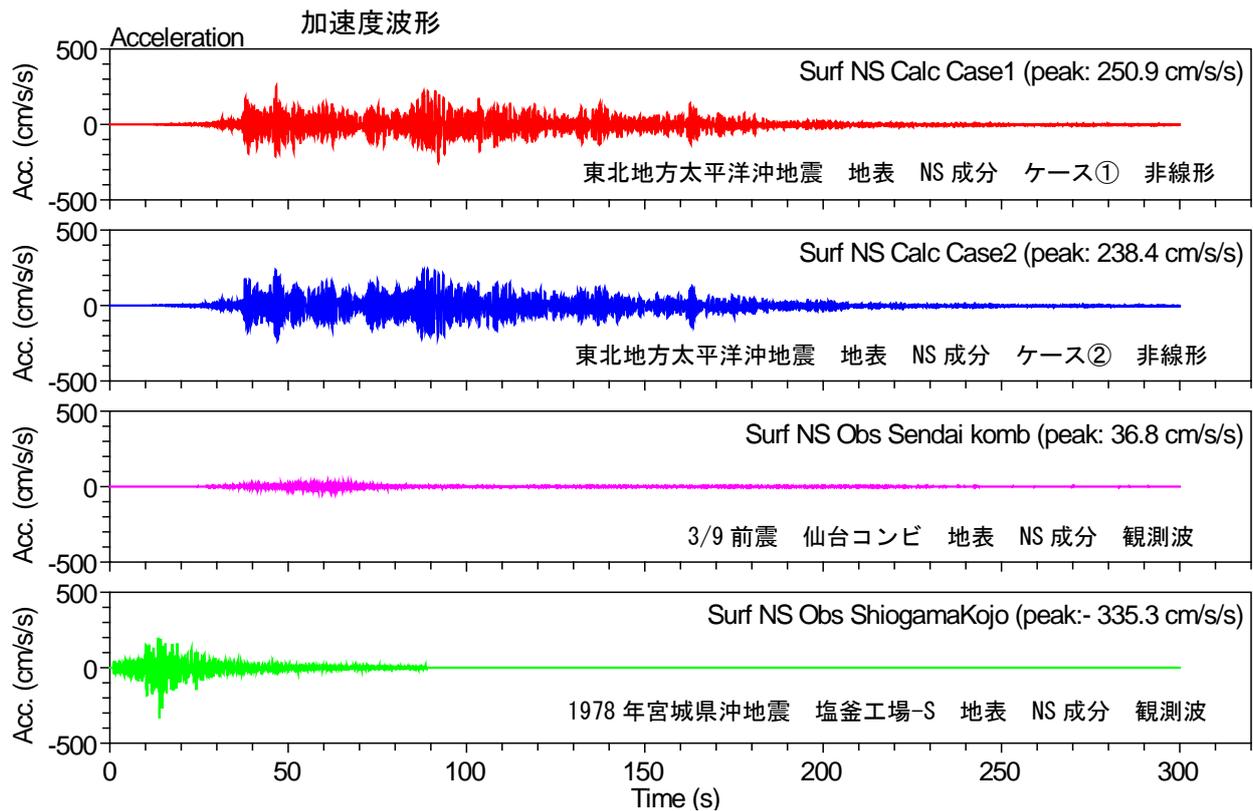


図4. 9-4 東北地方太平洋沖地震の解析地震波形と  
3月9日の前震、1978年宮城県沖地震の観測地震波形との比較 (NS成分)

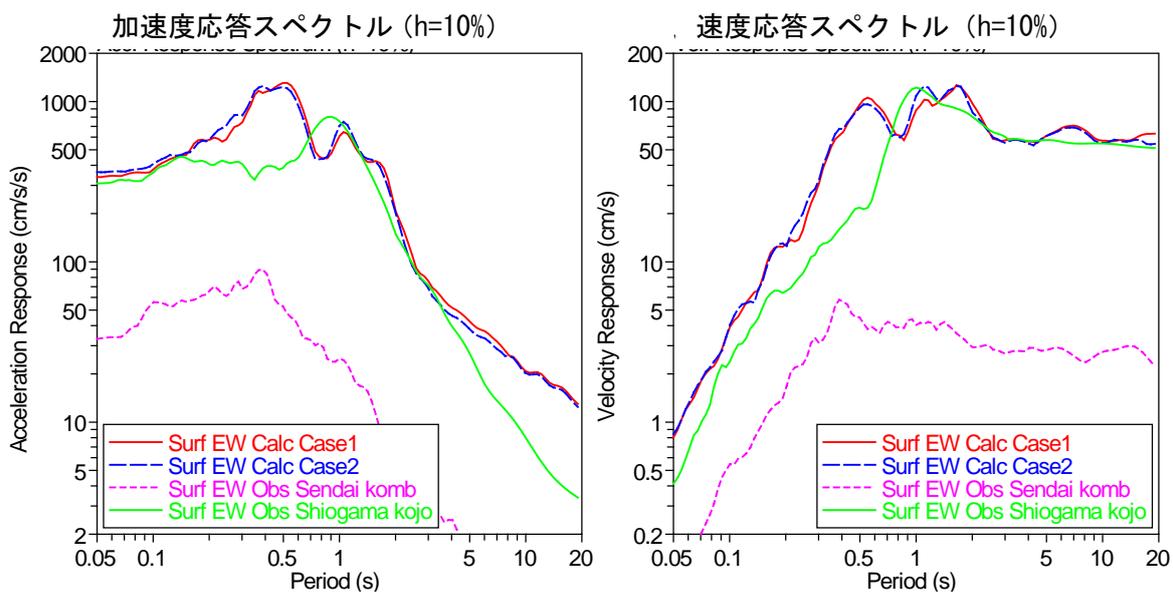
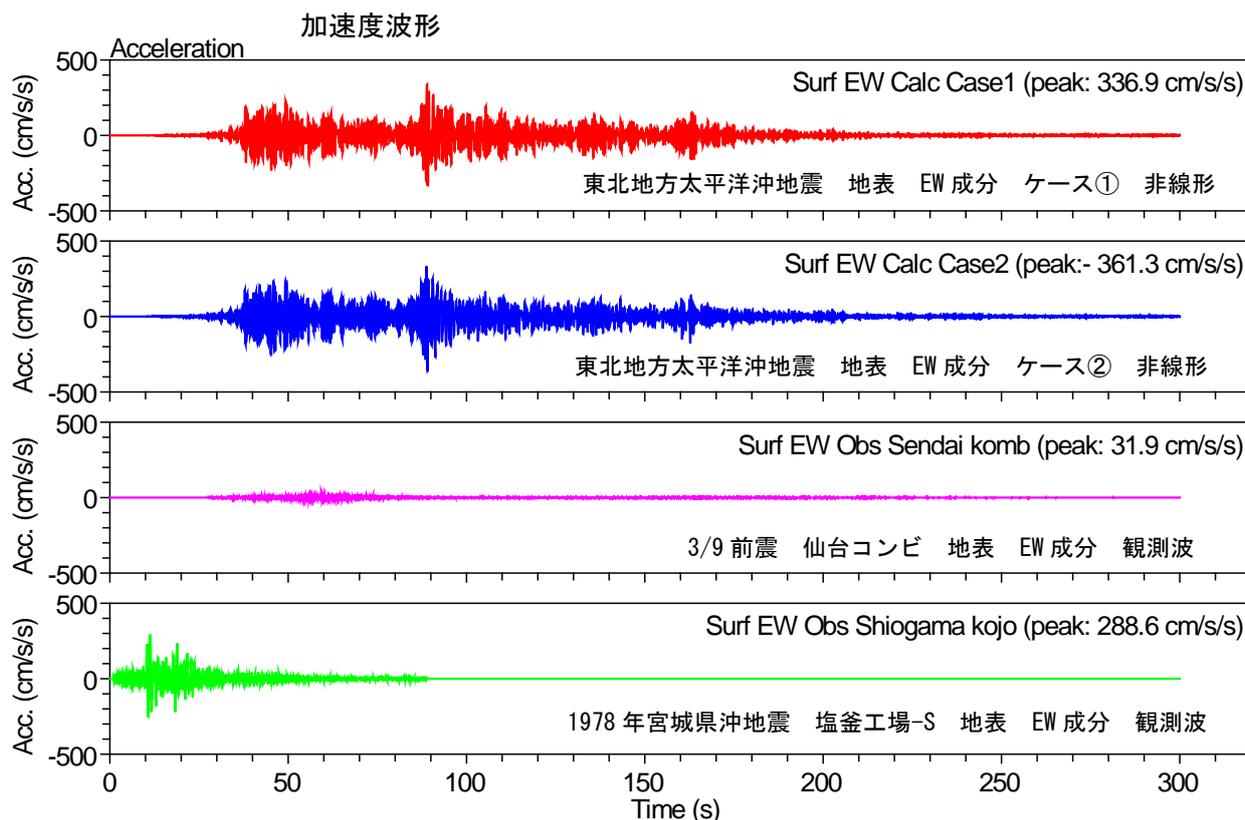


図4. 9-5 東北地方太平洋沖地震の解析地震波形と  
3月9日の前震、1978年宮城県沖地震の観測地震波形との比較 (EW成分)

5. 広野特防区域における再現解析

5. 1 地表面での地震波形の再現解析の流れ

図5. 1-1の手順により、広野特防区域における東北地方太平洋沖地震の再現地震波形を作成する。

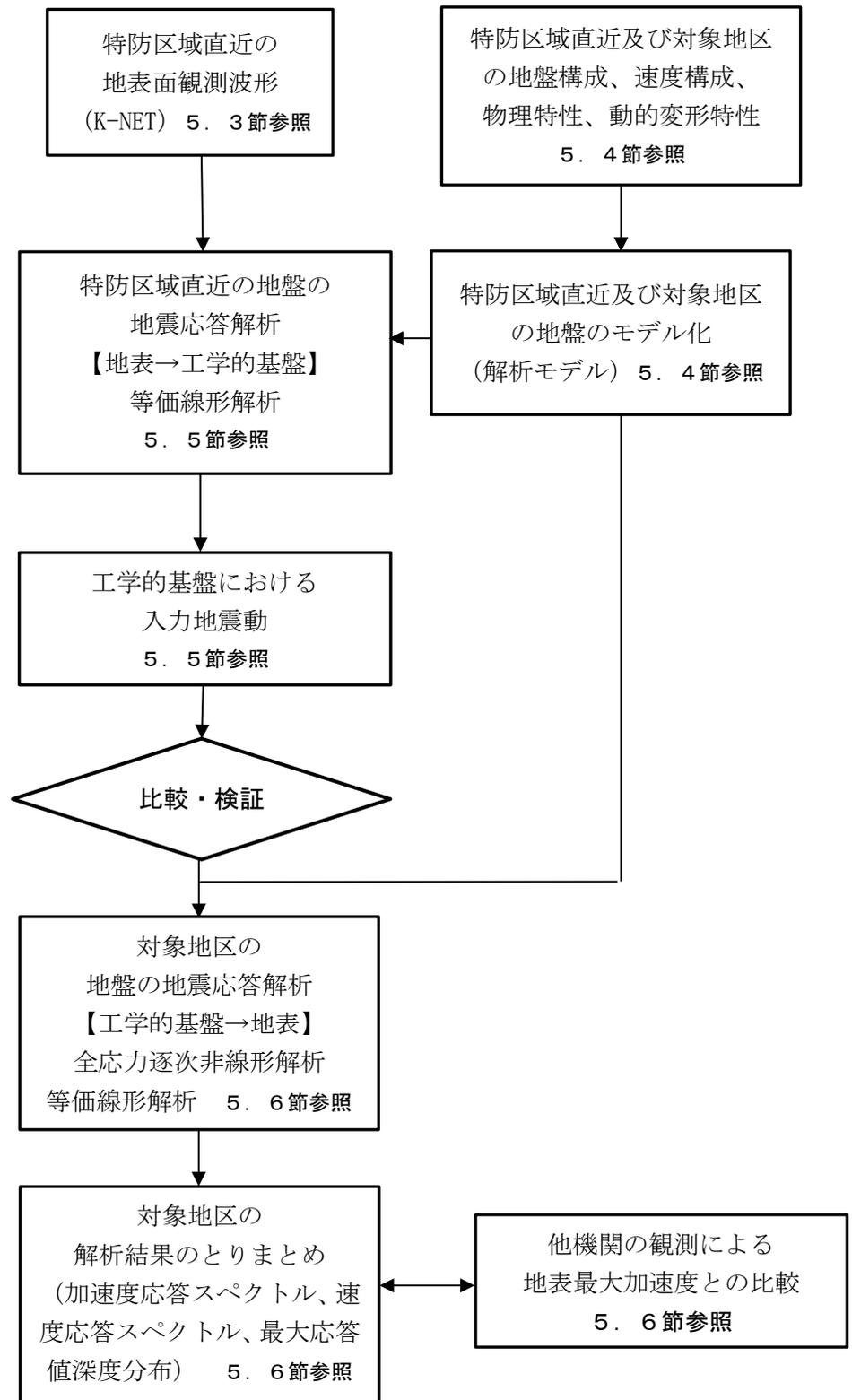


図5. 1-1 広野特防地域における地表面地震波形の再現解析の流れ

## 5. 2 対象地区及び特防区域直近の観測地点

広野特防区域における特防区域の位置及び特防区域直近の地震波形の防災科研による、地震波形観測地点の位置を図5. 2-1に示す。

また、地震波形観測地点の一覧を表5. 2-1に示す。

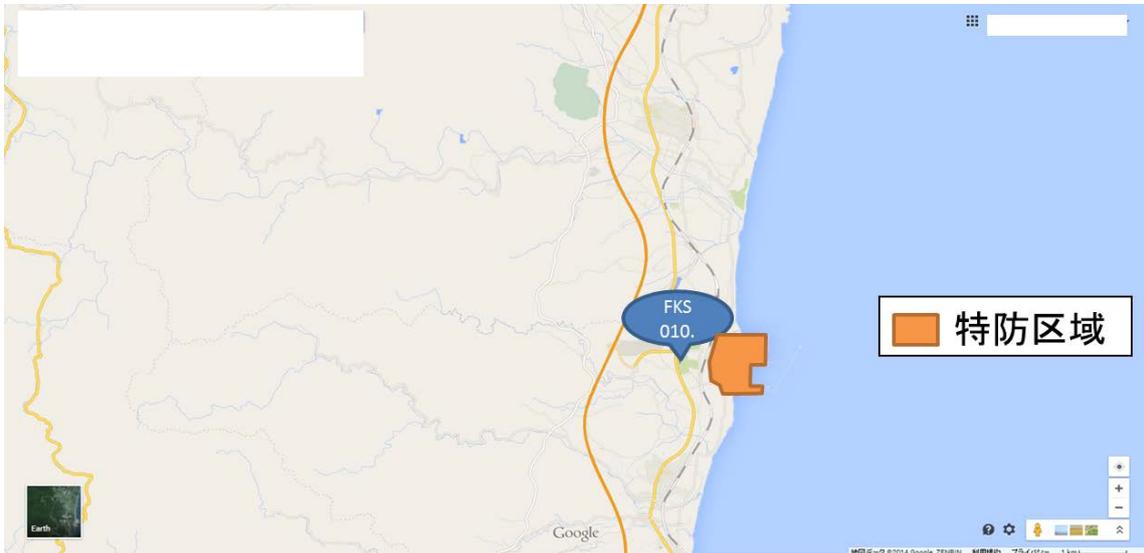


図5. 2-1 広野特防区域及び直近の地震観測地点の位置

表5. 2-1 広野特防区域及び直近の地震観測地点

観測機関	地点名	地点コード	設置位置
防災科研 K-NET	広野	FKS010	地表

## 5. 3 収集した観測地震波形

広野特防区域直近の地震観測地点で東北地方太平洋沖地震の際に観測された地震波形の一覧を表5. 3-1に示す。

また、観測された地震波形及びスペクトルを図5. 3-1に示す。

表5. 3-1 東北地方太平洋沖地震の観測地震波形（広野特防区域直近）

観測機関	地点名	地点コード	設置位置	最大加速度 (cm/s/s)	最大速度 (cm/s)
防災科研 K-NET	広野	FKS010	地表	1162.2	62.58

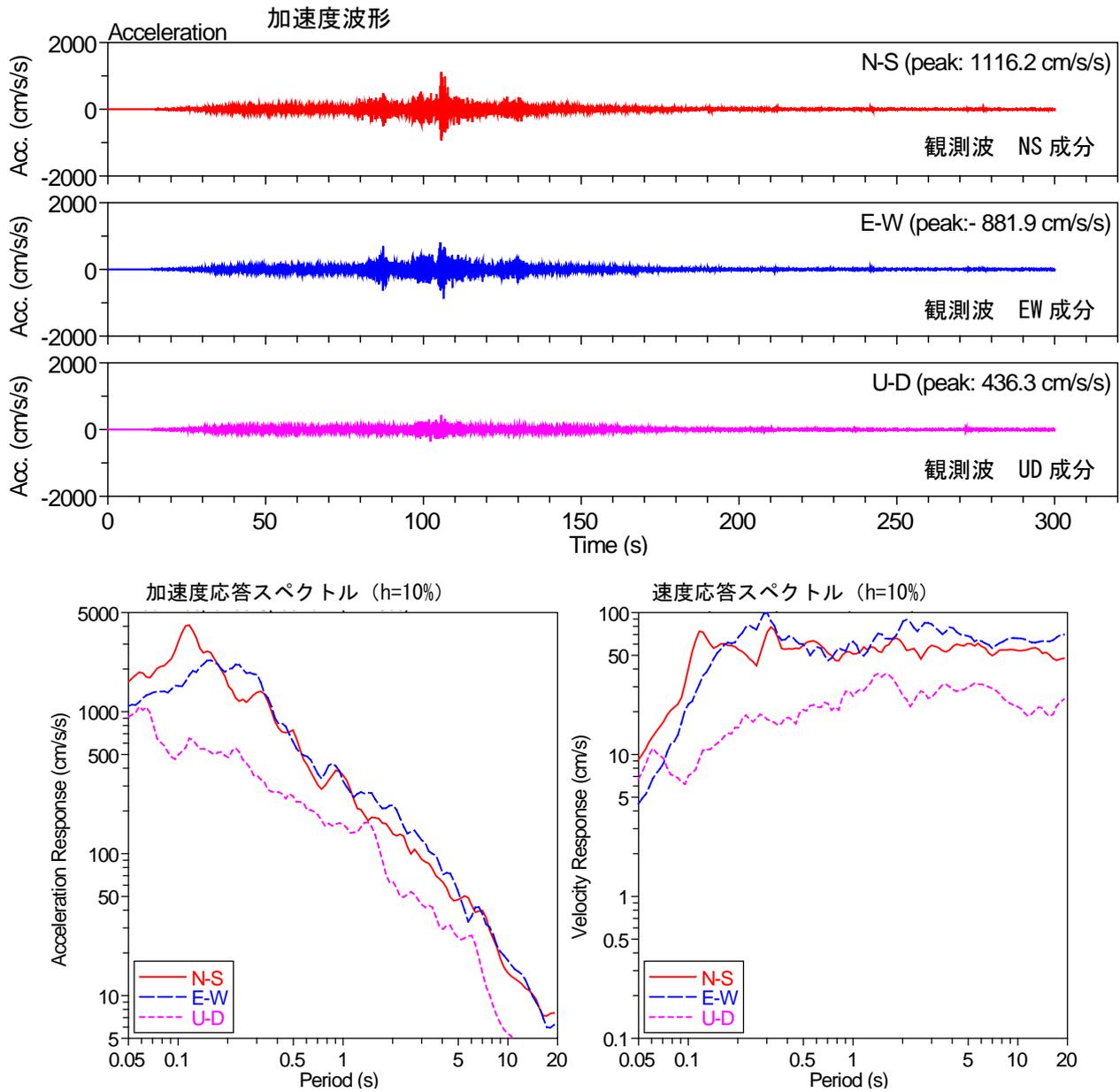


図 5. 3 - 1 防災科研 K-NET FKS010 の観測地震波形

#### 5. 4 地盤構成の検討

関係団体より提供された屋外タンク貯蔵所に係る地盤調査資料等を収集し、地盤モデルを作成した。解析対象となる広野特防区域及び地震観測地点について設定した地盤モデルのパラメーター一覧表を表5. 4-1、表5. 4-2及び図5. 4-1に示す。

なお、動的変形特性については、仙台・塩釜特防区域と同じとした。

表5. 4-1 広野特防区域の地盤モデル

No	深さ (G. L. -m)	土質	Vs (m/s)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
1	5.3	Fl 1 (c) (埋土 (粘性土主体))	175	1.7
2	8.3	Fl 2 (c) (埋土 (粘性土主体))	160	1.7
3	10.3	As (沖積砂質土層)	225	1.8
4	-	R (基盤)	480	1.9

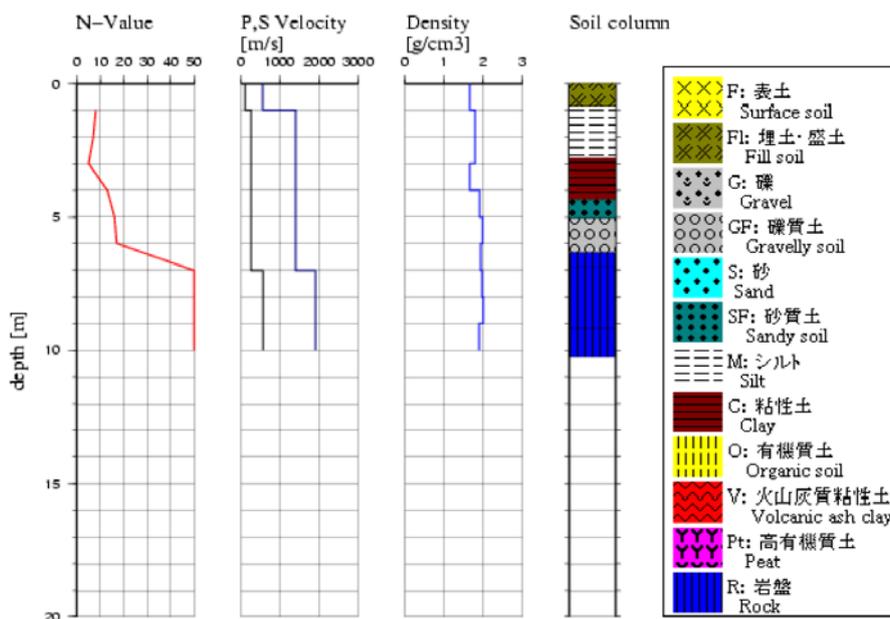
※地盤調査資料から設定。

表5. 4-2 地震観測地点の地盤モデル (防災科研 K-NET FKS010)

No	深さ (G. L. -m)	土質	Vs (m/s)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
1	0.9	Fl (c) (埋土・盛土)	100	1.7
2	4.4	Dc (洪積粘性土層)	260	1.7
3	6.9	Ds (洪積砂質土層)	260	1.9
4	-	R (基盤)	570	2.0

※地盤調査資料から設定。

#### 土質図



NIED 独立行政法人防災科学技術研究所

Copyright (c) National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, All rights Reserved.

図5. 4-1 地震観測地点の地盤モデル (防災科研 K-NET FKS010)

#### 5. 5 地盤の地震応答解析【地表→工学的基盤】

広野特防区域直近の地表面観測地震波形（防災科研 K-NET FKS010）から、逆解析により工学的基盤での時刻歴地震波形を作成した。

逆解析での地震応答解析は、周波数領域の等価線形解析法を採用し、プログラムコードとしては、仙台・塩釜特防区域の解析と同様に『DYNEQ』を採用した。

解析結果を表5. 5-1及び図5. 5-1～3に示す。

表5. 5-1 防災科研観測地点における応答計算結果  
(東北地方太平洋沖地震・工学的基盤)

地点コード	設置 位置	最大加速度(cm/s/s)		
		NS	EW	UD
解析波形 (FKS010)	基盤	457.7	522.9	215.9

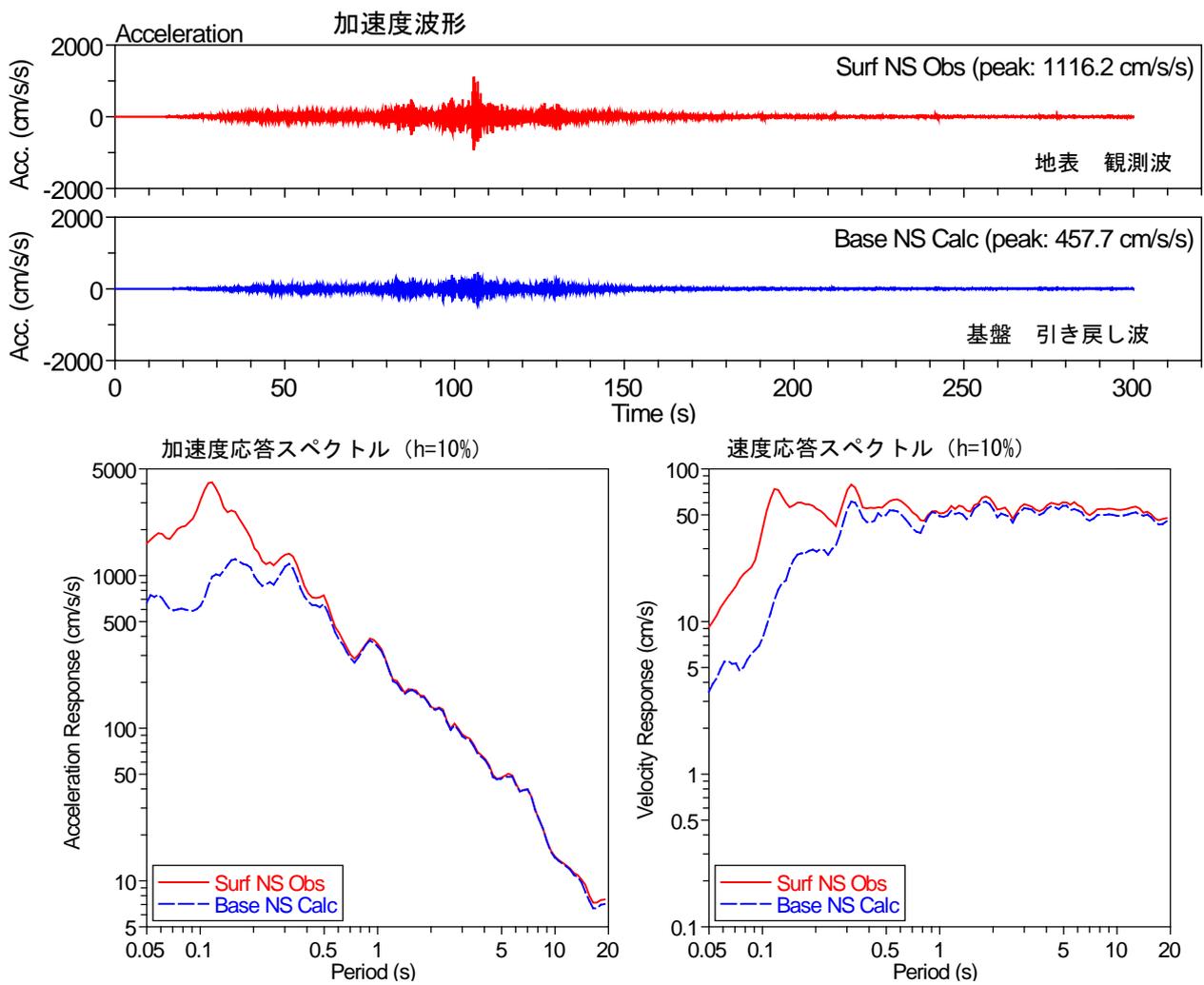


図5. 5-1 工学的基盤における引き戻し解析地震波形 (NS成分)

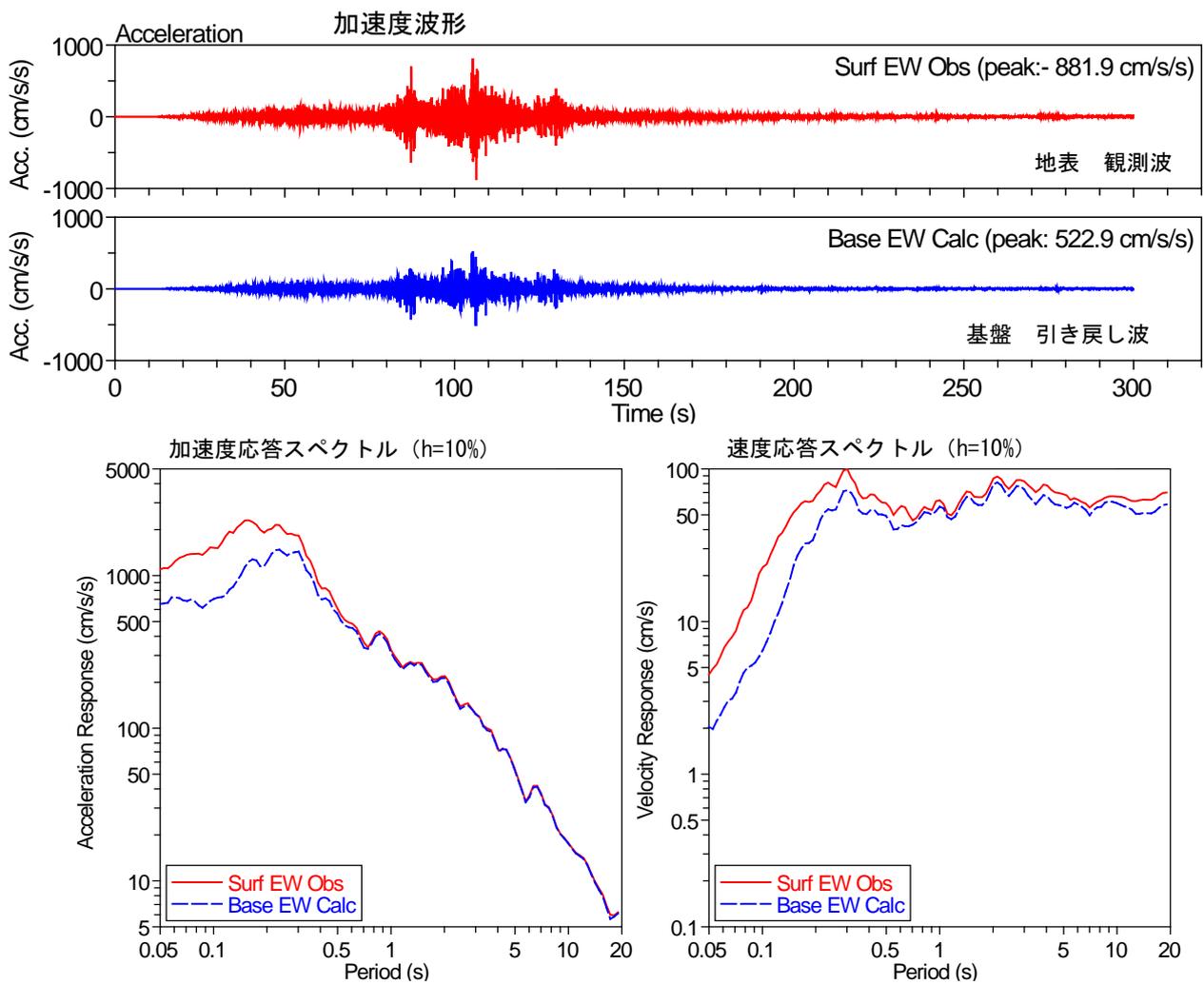


図5. 5-2 工学的基盤における引き戻し解析地震波形 (EW成分)

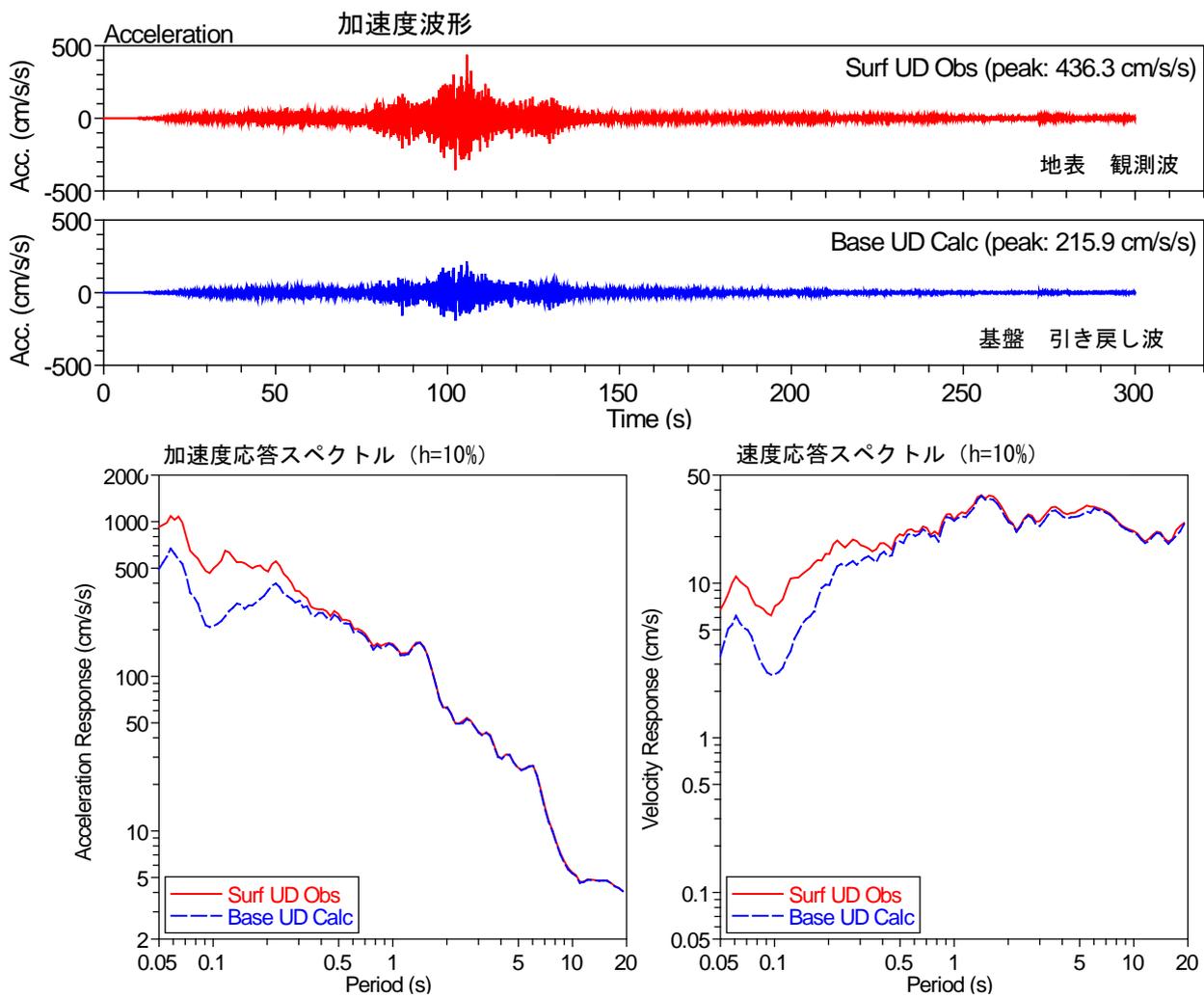


図5. 5-3 工学的基盤における引き戻し解析地震波形 (UD成分)

## 5. 6 地盤の地震応答解析【工学的基盤→地表】

これまでの検討結果を踏まえ、FKS010 で工学的基盤に戻した地震波形を入力地震波として、広野特防区域における地表面での地震波形の再現計算を行った。

地震応答解析は、仙台・塩釜特防区域と同様に全応力逐次非線形解析を採用し、プログラムコードとしては、『YUSAYUSA-2』を採用した。加えて、地震動応答解析の実績が格段に多い等価線形解析法による計算も行い、両者による解析結果を比較した。

解析結果を表 5. 6-1 及び図 5. 6-1～4 に示す。

表 5. 6-1 広野特防区域における応答計算結果  
(東北地方太平洋沖地震・地表)

地点コード	設置位置	最大加速度(cm/s/s)		
		NS	EW	UD
解析波形	等価線形	1168.0	1366.0	867.4
	非線形	522.8	574.1	—

最大加速度は EW 成分の等価線形結果の約 1400cm/s/s であるが、この値は非線形の全応力結果では約 570cm/s/s まで低減する。

また、東京電力(2013)が公開<sup>2</sup>している東北地方太平洋沖地震における地震観測記録を表 5. 6-2 に示す。これによると最大約 740cm/s/s の揺れであったとされている。加速度のピーク値で比較することに問題がないわけではないが、非線形計算の結果と概ね合致していると判断できる。

加えて、非線形計算は地盤の非線形効果を理論的に与えているのに対し、等価線形計算は近似的な手法で与えている。このため、仙台・塩釜特防区域と同様に非線形計算の結果を採用する。

表 5. 6-2 地表面での最大加速度記録一覧(単位 ; cm/s/s )

番号	設備区分	都県	観測地点名	NS(X)	EW(Y)	UD(Z)
3	火力	福島県	広野火力発電所	528	744	-

<sup>2</sup> 東京電力(株) : 東北地方太平洋沖地震に伴う電気設備の停電復旧記録、H25.3

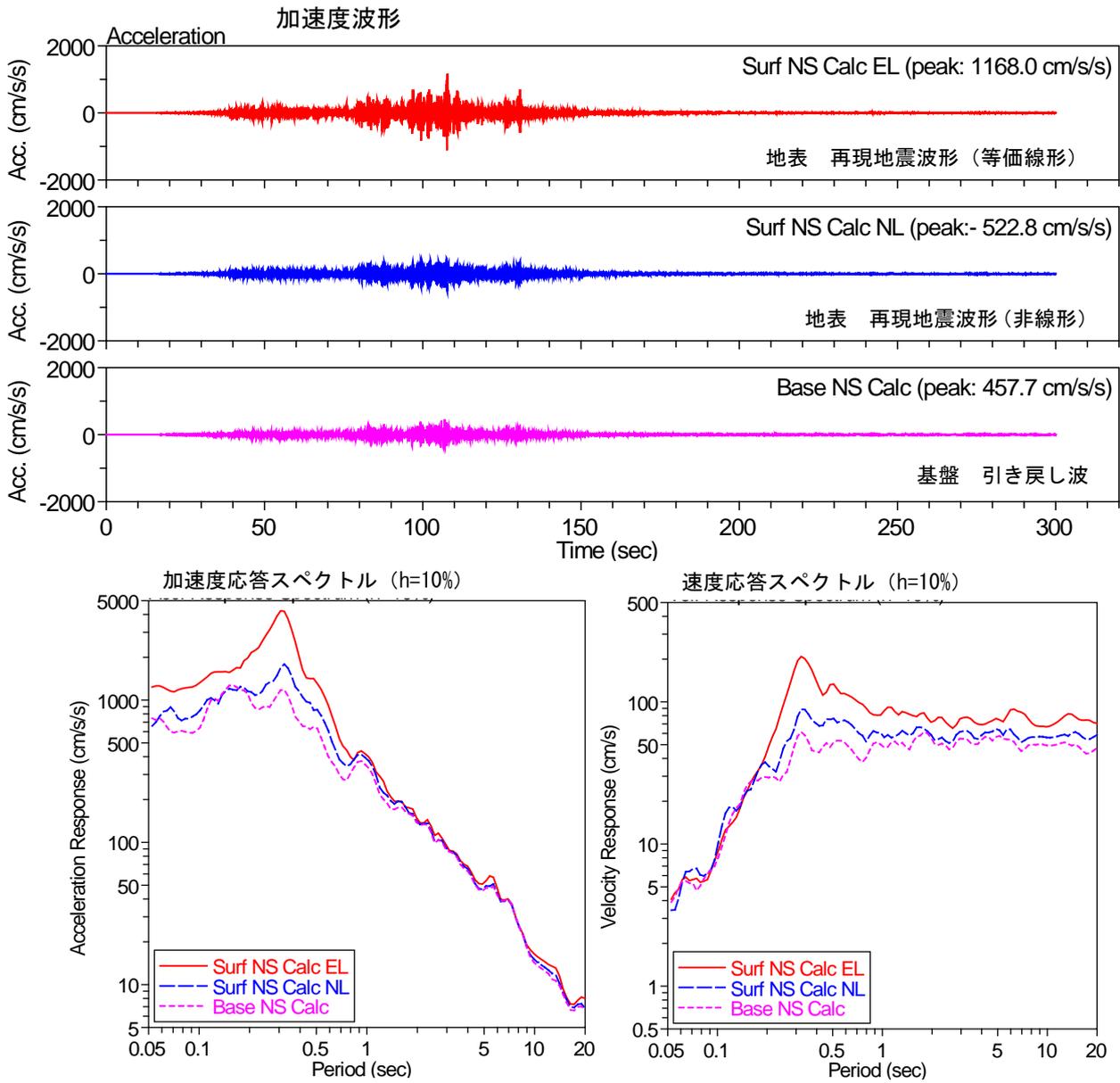


図5. 6-1 地表面及び工学的基盤における解析地震波形 (NS成分)

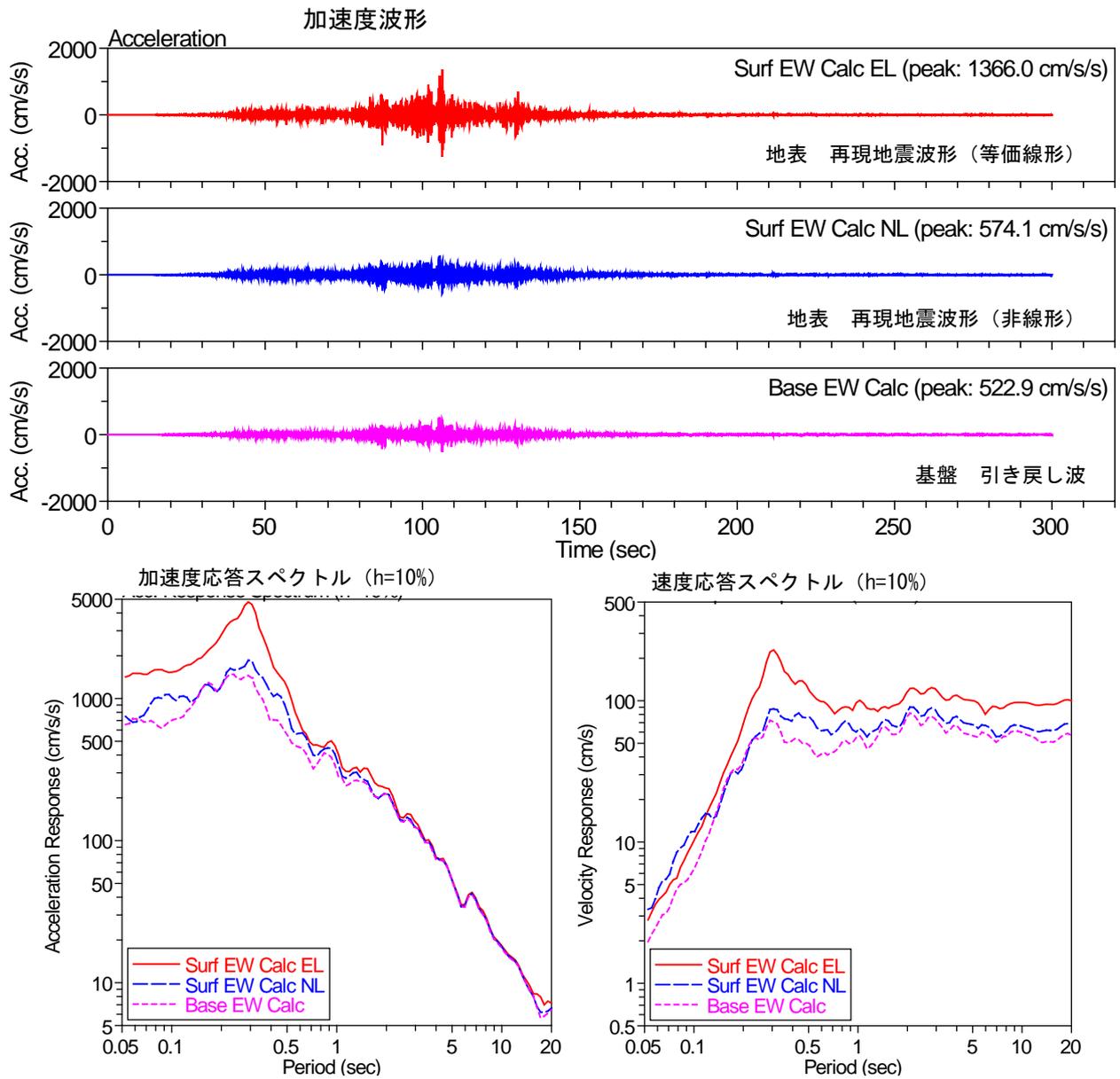


図5. 6-2 地表面及び工学的基盤における解析地震波形 (EW成分)

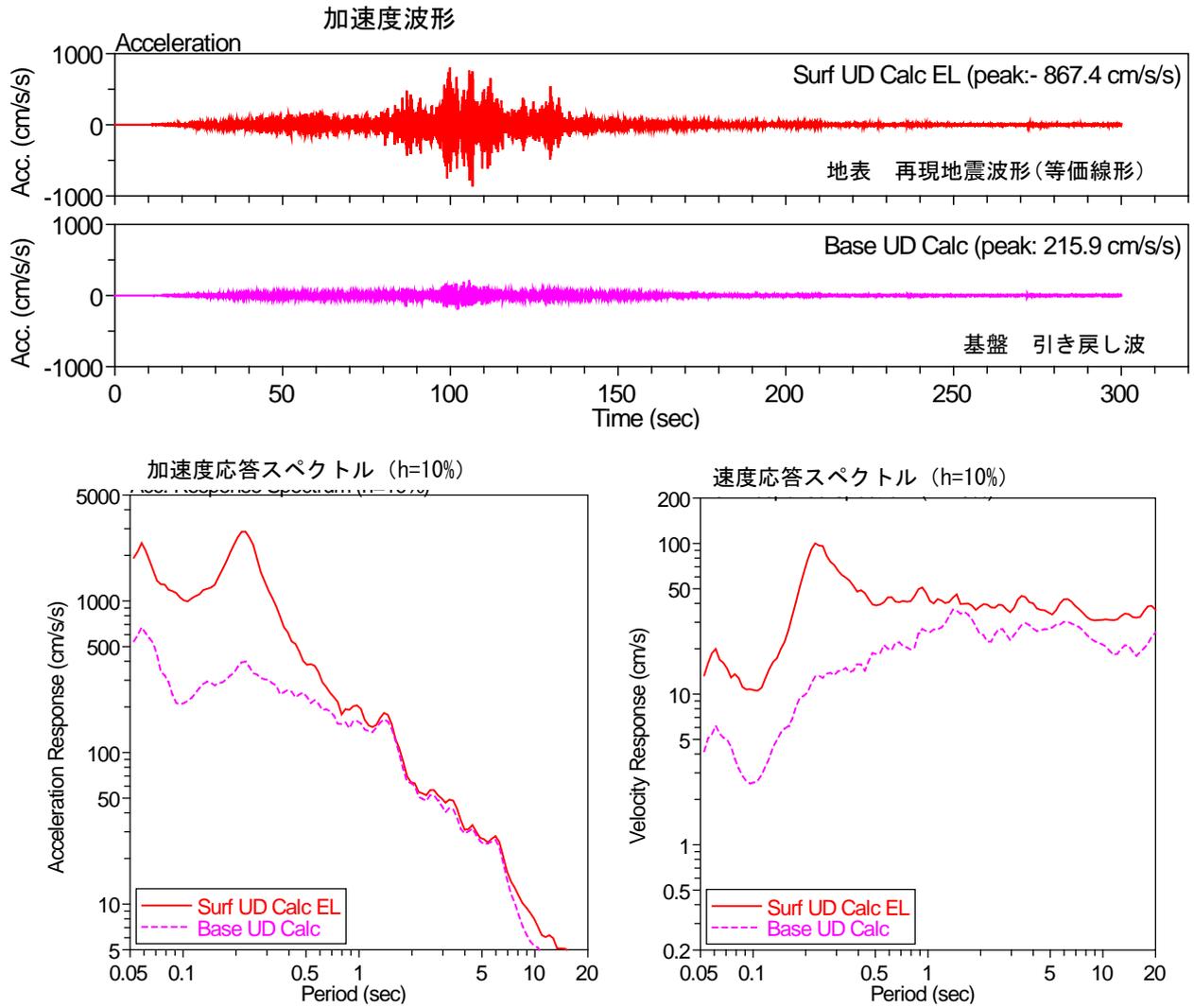
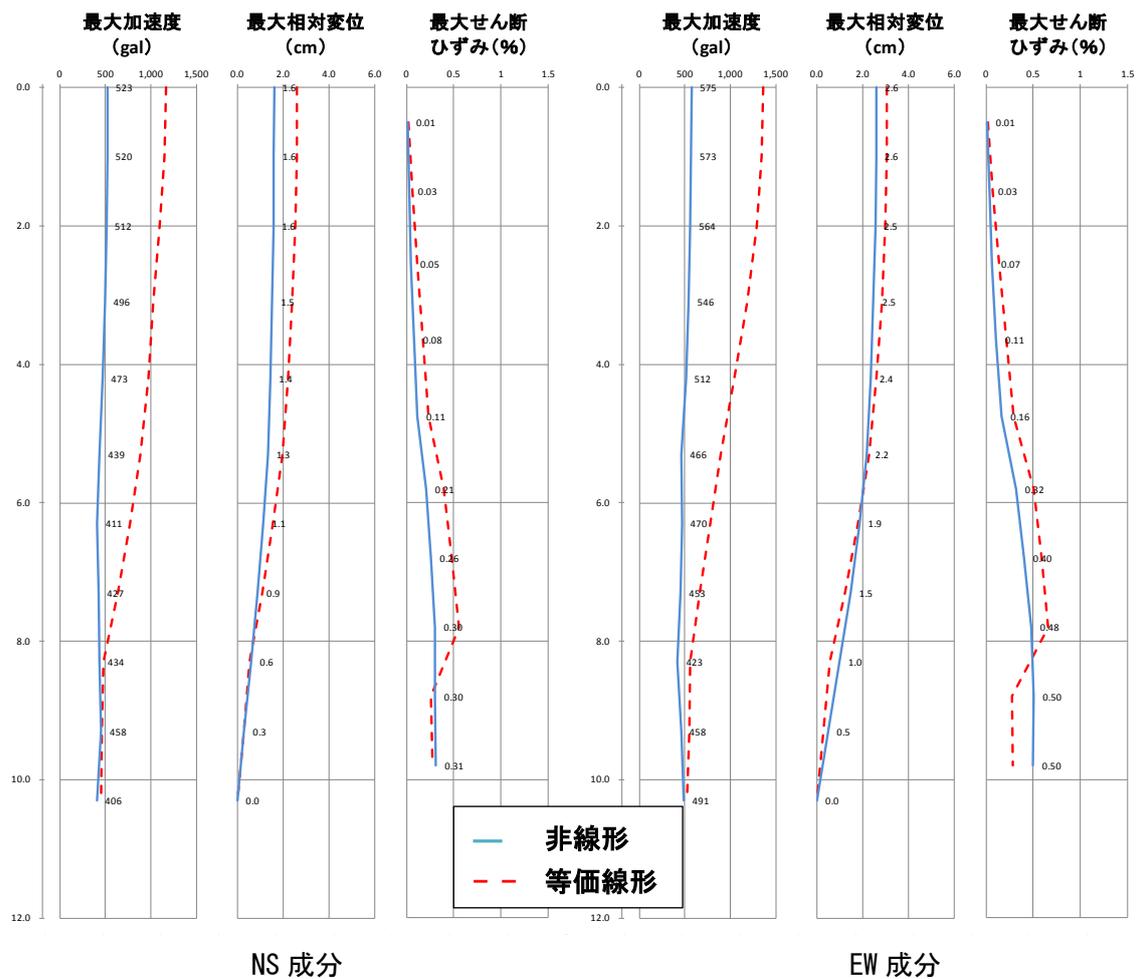


図5. 6-3 地表面及び工学的基盤における解析地震波形 (UD成分)



NS 成分 EW 成分  
 図5. 6-4 応答計算結果の深さ方向分布図  
 (広野特防区域)

## 5. 7 解析手法の確認と課題

今回採用した解析手法は、地表面での観測地震波形から等価線形により工学的基盤での波形を予測し、特防区域の入力波として、全応力解析にて再現地震波形を作成した。

ここでは、解析手法の確認として、広野特防区域波形観測地点（防災科研 K-NET FKS010）にて、各解析のポイントを示し、以下の手順で妥当性を確認した。

【確認①】地表面観測波⇒等価線形により工学的基盤波の予測⇒等価線形により地表面波の予測＝地表面観測波

等価線形解析で工学的基盤に戻した地震波形を、等価線形解析で地表に上げた結果を図5.7-2、図5.7-3に示す。加速度波形、応答スペクトルともに観測地震波形とほぼ完全に位置することを確認した。

【確認②】地表面観測波⇒等価線形により工学的基盤波の予測⇒非線形により地表面波の予測≠地表面観測波

等価線形解析で工学的基盤に戻した地震波形を、非線形解析で地表に上げた結果を図5.7-4、図5.7-5に示す。NS成分の加速度の最大値や応答スペクトルの0.1秒付近に若干の差はみられるものの、NS成分、EW成分ともに概ね観測地震波形を再現しているといえる。

確認①、②の結果から、推定した再現地震波形は、観測地震波形から工学的基盤波を等価線形にて予測する段階で、周期0.1秒程度での減衰が大きくなっている可能性が考えられる。一方、屋外貯蔵タンク本体等の構造物の固有周期である周期0.3秒あたりの再現性は確認できている。

以上のように、解析手法などに起因するいくつかの課題はあるものの、以下に示す件が整っていれば、本検討で採用した解析手法は概ね妥当であると考えられる、

- 地震波形の観測地点の地盤が、著しい非線形挙動は生じていない。
- 再現地震波形を作成する対象区域が非線形挙動をする可能性が高い。
- 検討対象物（屋外貯蔵タンク本体）で議論する卓越周期の再現性が確認できる。

等価線形解析法は解析の利便性などから過去の適用事例、実績が多い手法である。しかし、非線形挙動が卓越する場合などに精度が落ちることが指摘されている。

一方、逐次積分による非線形解析は、1%を超える大ひずみの適用性に優れている反面、定数などの設定条件が多く、結果のブレが大きいことなどが指摘されている。

このように、解析手法の違いにより一長一短があるが、等価線形解析は、線形化したことにより周波数領域で問題を解くことができる。その結果、任意の層で波動（入射波、反射波、複合波）を取り出すことが可能である。これは逐次積分型の解法では不可能であり、地表面波から工学的基盤波を予測する際には、等価線形解析法が多く用いられている。

一方、非線形解析は近年の大きな地震を対象とした場合、大ひずみ領域を対象とすることになるため、適用することが多くなっている。

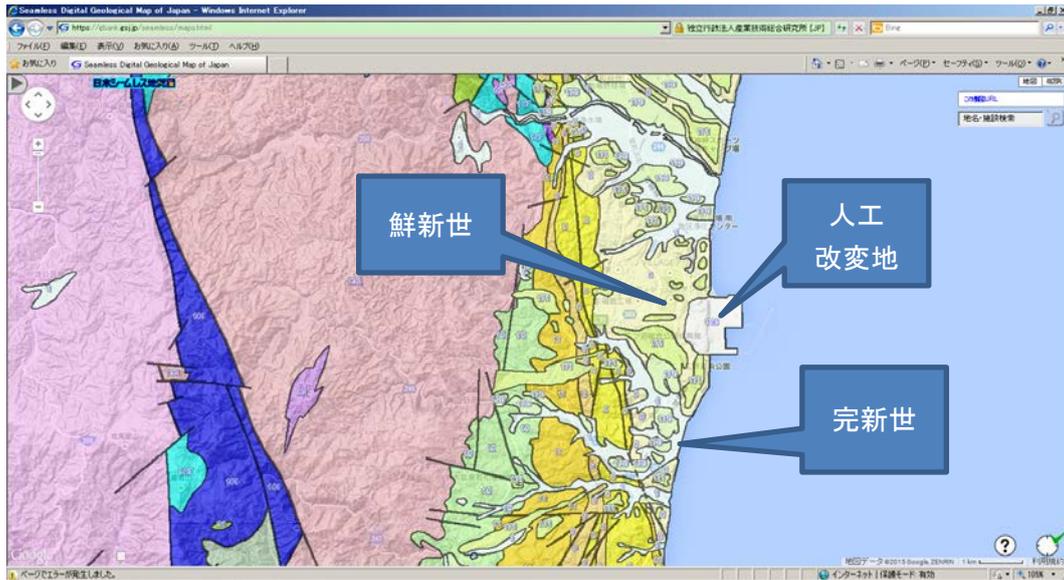


図 5.7-1 20 万分の 1 日本シームレス地質図に加筆  
 (出典：産業技術総合研究所 地質調査総合センター)

表 5.7-1 広野特防区域の地盤モデル

No	深さ (G. L. -m)	土質	Vs (m/s)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
1	5.3	Fl 1 (c) (埋土 (粘性土主体))	175	1.7
2	8.3	Fl 2 (c) (埋土 (粘性土主体))	160	1.7
3	10.3	As (沖積砂質土層)	225	1.8
4	-	R (基盤)	480	1.9

※地盤調査資料から設定。

表 5.7-2 観測地点の地盤モデル (防災科研 K-NET FKS010)

No	深さ (G. L. -m)	土質	Vs (m/s)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
1	0.9	Fl (c) (埋土・盛土)	100	1.7
2	4.4	Dc (洪積粘性土層)	260	1.7
3	6.9	Ds (洪積砂質土層)	260	1.9
4	-	R (基盤)	570	2.0

※地盤調査資料から設定。

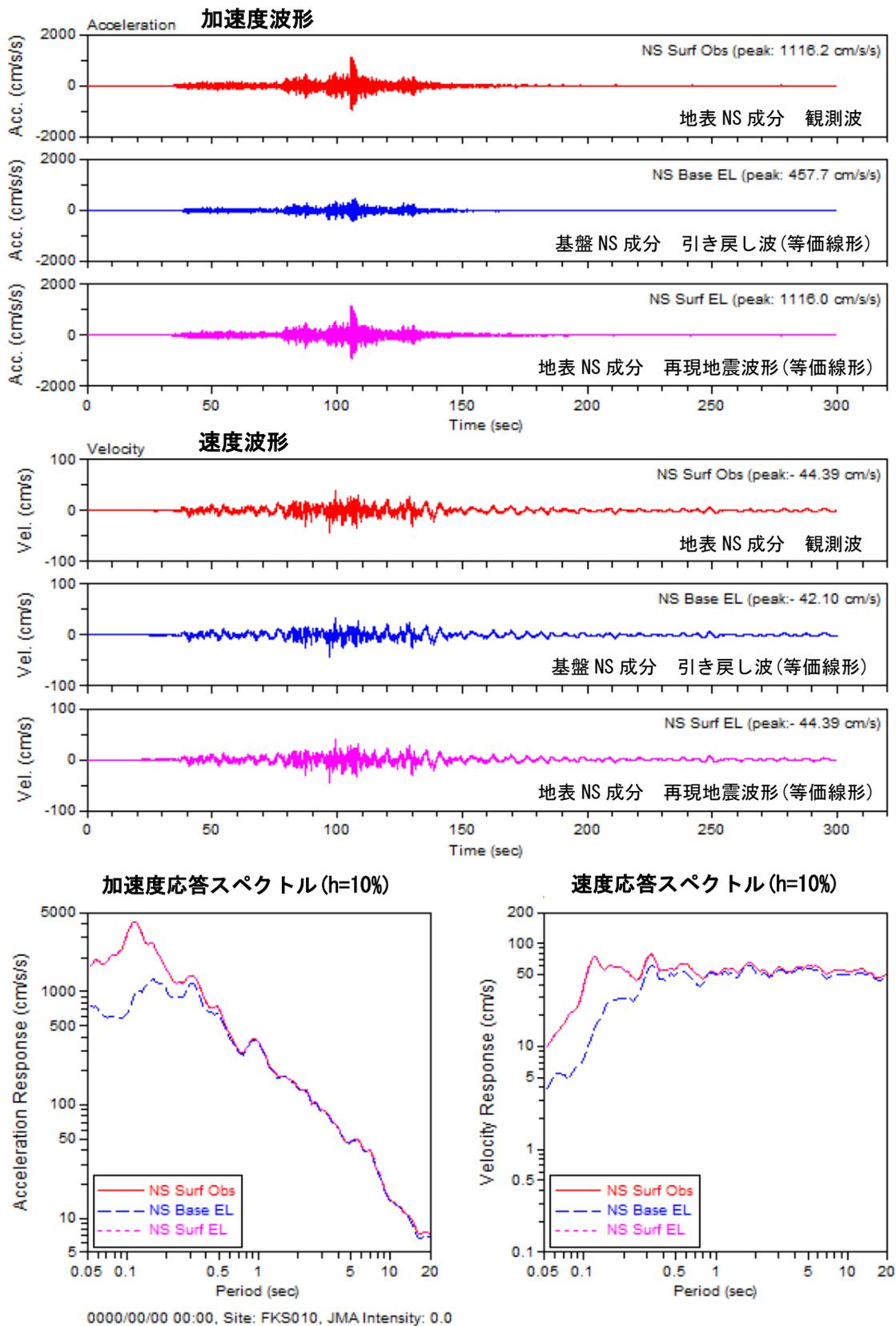


図5.7-2 防災科研 K-NET FKS010における等価線形計算結果 (NS成分)

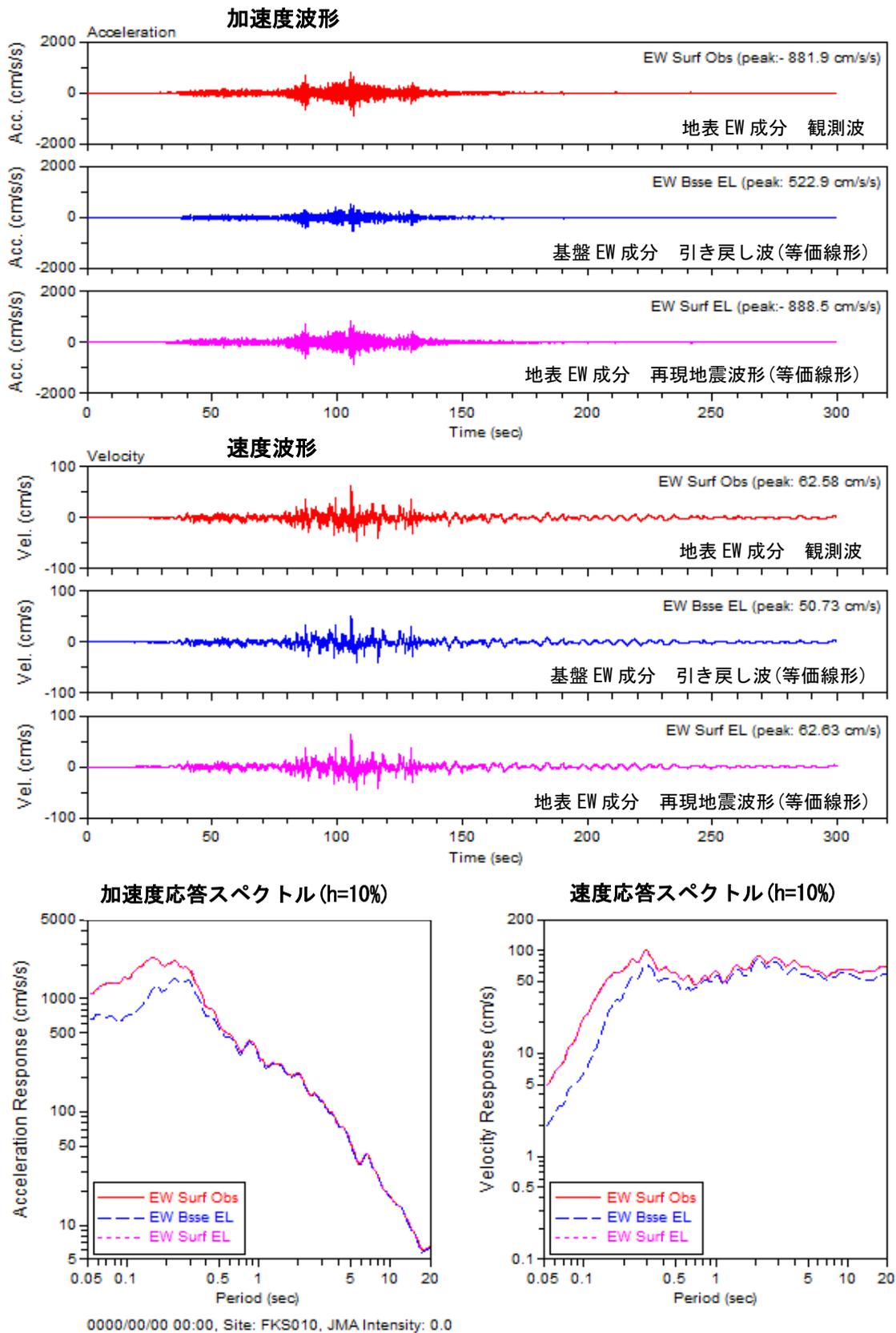


図 5. 7 - 3 防災科研 K-NET FKS010 における等価線形計算結果 (EW 成分)

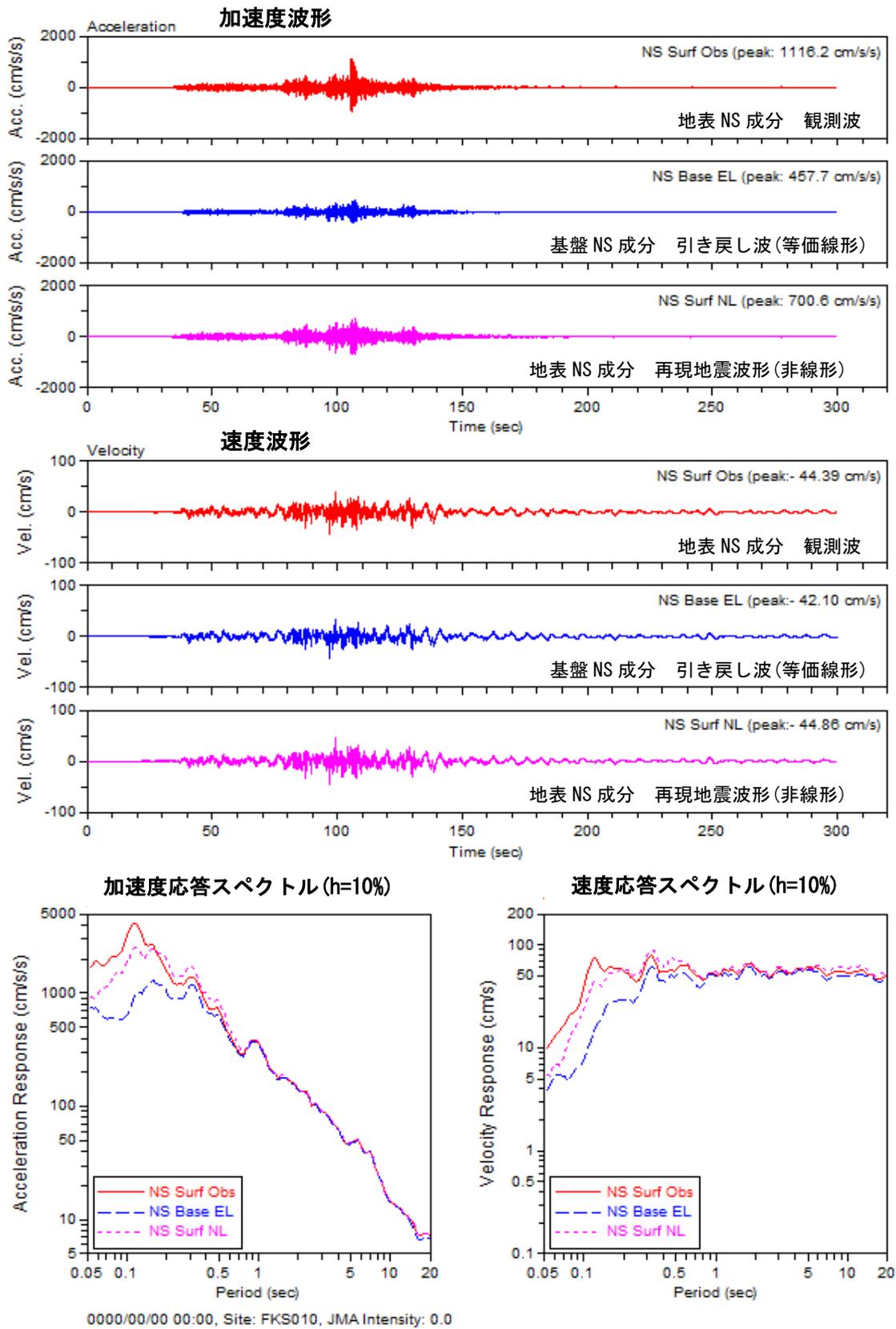


図 5. 7 - 4 防災科研 K-NET FKS010 における非線形計算結果 (NS 成分)

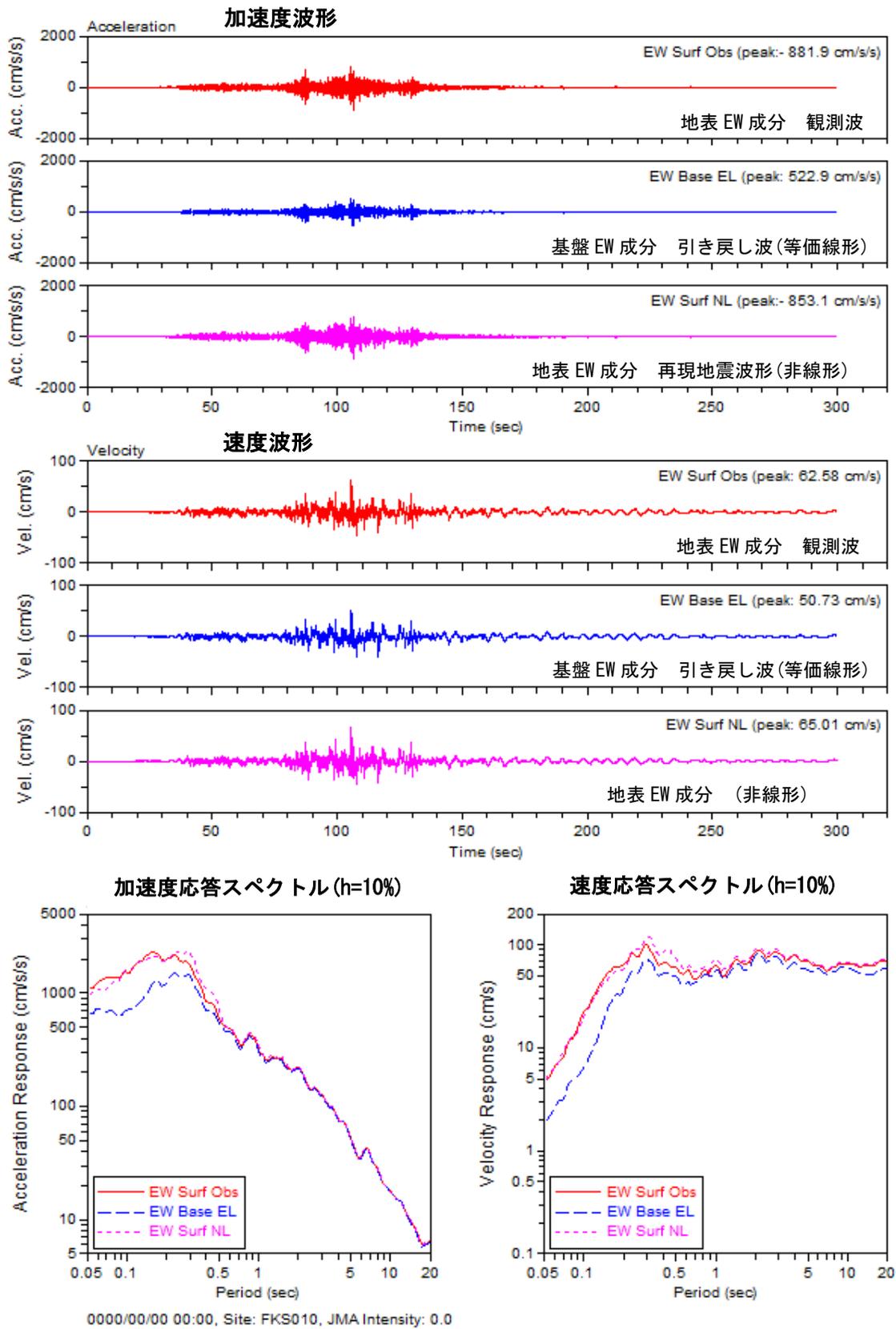


図 5.7-5 防災科研 K-NET FKS010 における非線形計算結果 (WE 成分)

## 6. 南海トラフ地震の地表面での地震波形の解析

### 6. 1 南海トラフ地震の概要

中央防災会議（2012）<sup>3</sup>による南海トラフ地震の震源域を図6. 1-1に示す。

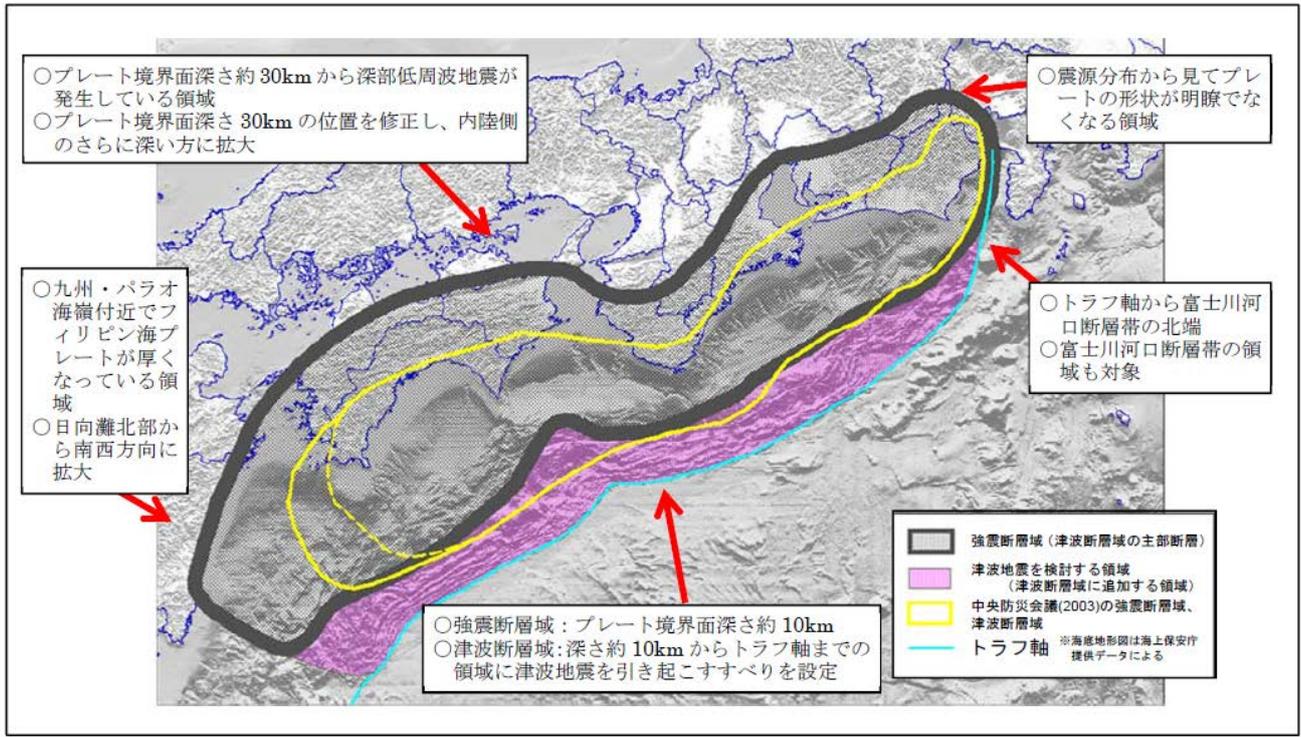


図6. 1-1 南海トラフ地震の震源域

<sup>3</sup> 内閣府南海トラフの巨大地震モデル検討会：南海トラフの巨大地震モデル検討会（第二次報告）（平成24年8月29日発表）

## 6. 2 地表面での地震波形の解析の流れ

図6. 2-1に示す手順により、南海トラフ地震の想定地震波形を作成する。

なお、中央防災会議が行った南海トラフ地震の検討では、震源モデルや既知の歴史地震との比較分析により妥当性が確認されており、今回作成した対象地区の想定地震波形については、東北地方太平洋沖地震の再現解析において妥当性が確認できた手法と同様の手法を用いており、解析の妥当性が確保されていると考える。一方、中央防災会議から公開された想定地震波形については統計的グリーン関数法により検討した一つの結果であり、統計処理上の癖やバラつきが生じている可能性もあるため、作成した地震波形について、震源特性や地盤特性など以外で物理的に有意でない要因が問題になった場合には、工学的基盤面での波形を再解析することで妥当性を確認する。

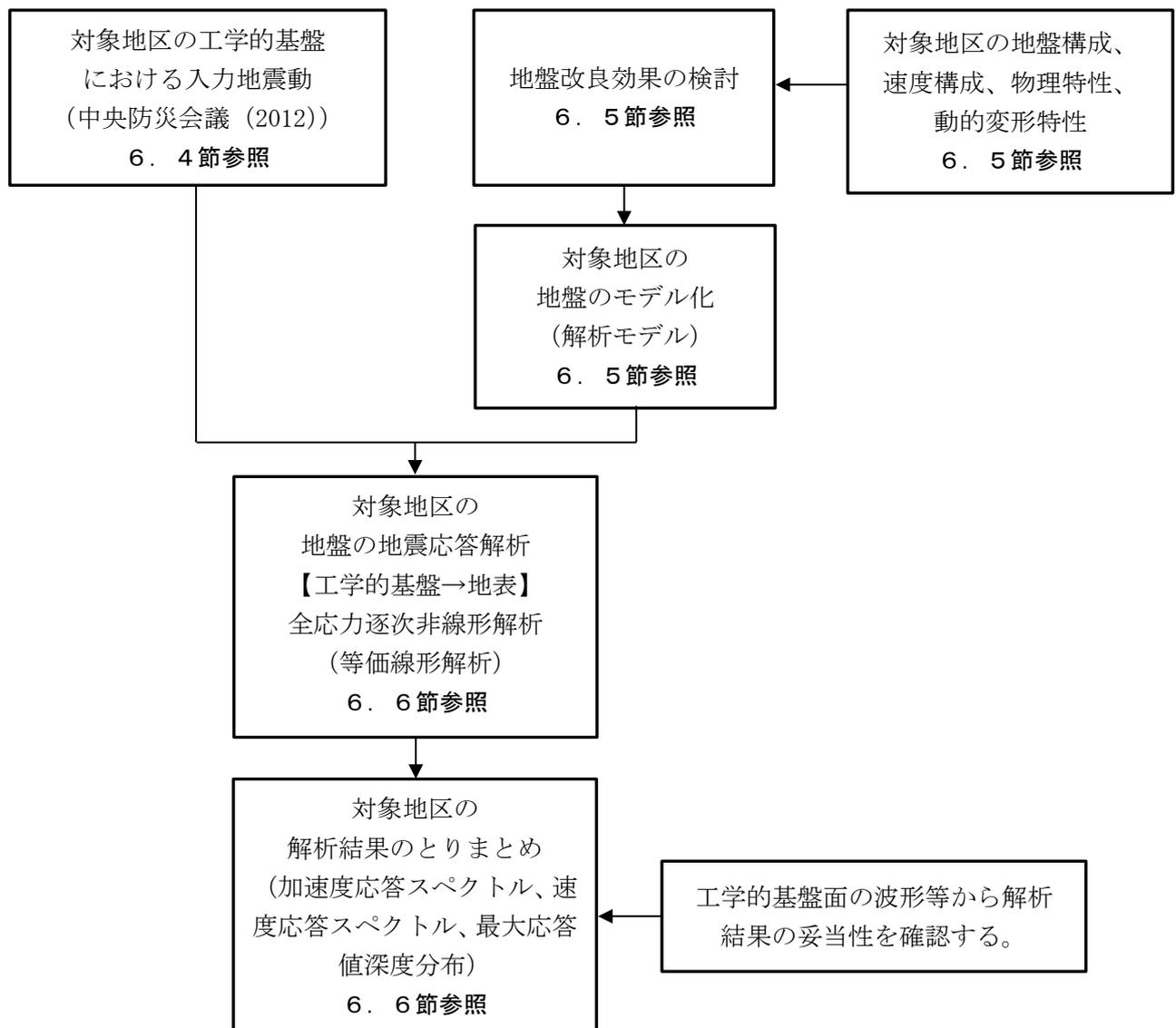


図6. 2-1 地表面地震波形の解析の流れ

### 6. 3 対象地区

中央防災会議から公開されている南海トラフ地震による震度分布（図6. 3-1）を参照して、全国の特防区域を管轄する市町村のうち想定震度が震度7となる特防区域を抽出した。これらの特防区域について、コンビナート地域をカバーする3次メッシュの最大計測震度を確認し、最大計測震度の大きい5地区（A地区～E地区）を抽出した。

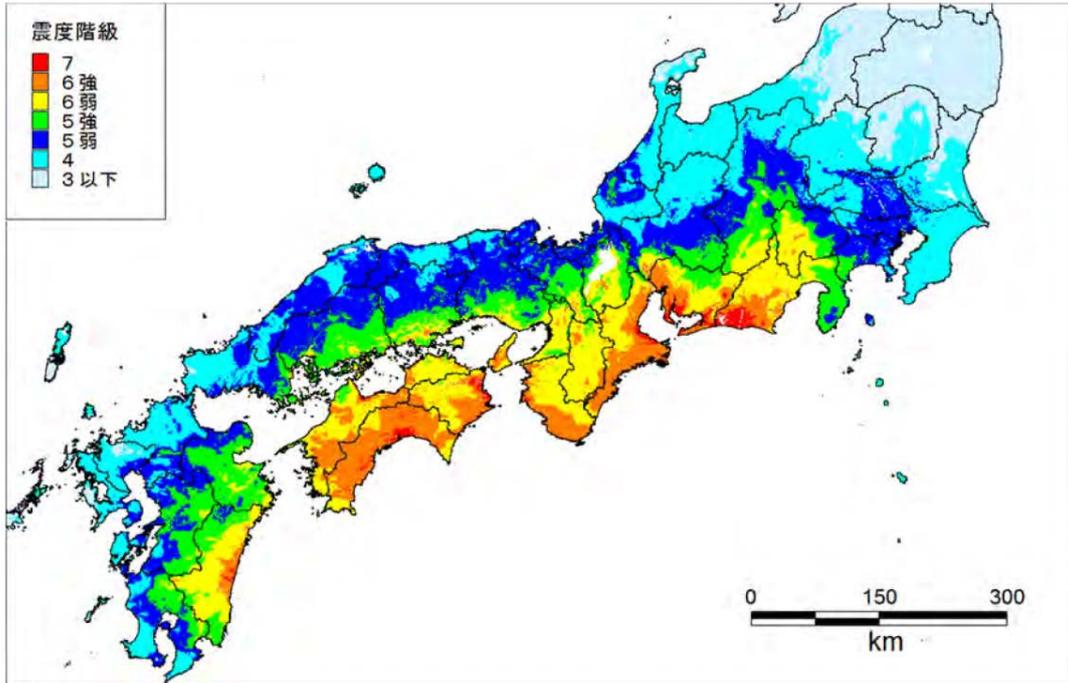


図6. 3-1 南海トラフ地震による震度分布

出典：南海トラフ地震モデル検討会（第二次報告） 強震断層モデル編  
－強震断層モデルと震度分布について－ 平成24年8月29日

これらの5地区について、計測震度、地盤構成、液状化対策の状況等を比較した結果を図6. 3-2に示す。

5地区を比較した結果、以降の解析の対象地区として以下の3地区を選定した。

- A地区：計測震度6.8であるが、液状化可能性は低い地盤である。
- B地区：計測震度6.8であり、液状化対策としてサンドコンパクションパイル（SCP）工法及び浸透固化工法が実施されている。
- E地区：計測震度6.4であり、液状化対策として動圧密工法が実施されている。

	A地区	B地区	C地区	D地区	E地区
想定震度階 (計測震度)	7 (6.8)	7 (6.8)	7 (6.5)	6強 (6.4)	6強 (6.4)
液状化可能性 (N値 $\leq 15$ 程度の砂・ 砂礫層で高い)	低い N値 $> 20$ の砂 礫層が続く	高い N値 $< 10$ の砂 と粘土の互層	高い N値4~20の 砂礫層(含む 埋土)	中くらい N値0~30の シルト層に砂 層挟在	高い N値3~30の 砂・砂礫層
解析精度 (既存資料)	非常に良い	良い	良い	良い	非常に良い
地盤改良 (既存資料)	—	サトコンパクション 注入固化 改良後N値	サトコンパクション 一部調査中 改良後N値	ハイブリッド コンポーザー 改良後N値	動圧密 改良後N値
地震応答解析の 対象とする地区	対象	対象	—	—	対象

図6. 3-2 抽出した特防区域の計測震度・地盤状況等の比較

#### 6. 4 計算に用いる波形

中央防災会議から公開されている解析対象地区直近の工学的基盤での波形を表6. 4-1に示す。  
また、工学的基盤での波形及びスペクトルを図6. 4-1~3に示す。

表6. 4-1 南海トラフ地震の工学的基盤波形

設置位置	最大加速度 (cm/s/s)	
	N S	E W
A地区	1184.3	1607.1
B地区	971.5	891.9
E地区	469.9	476.8

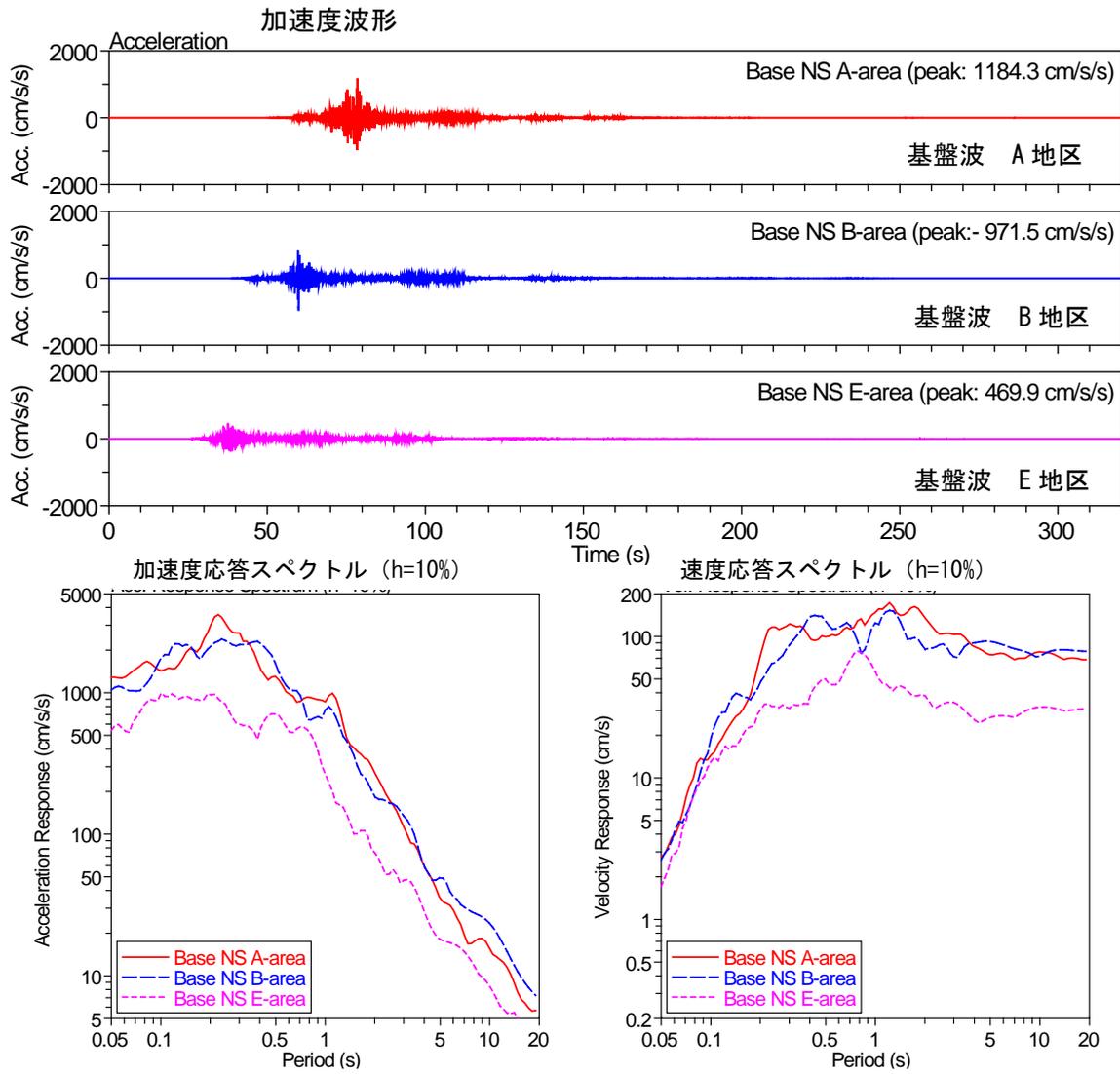


図6. 4-1 南海トラフ地震の工学的基盤における波形 (NS成分)

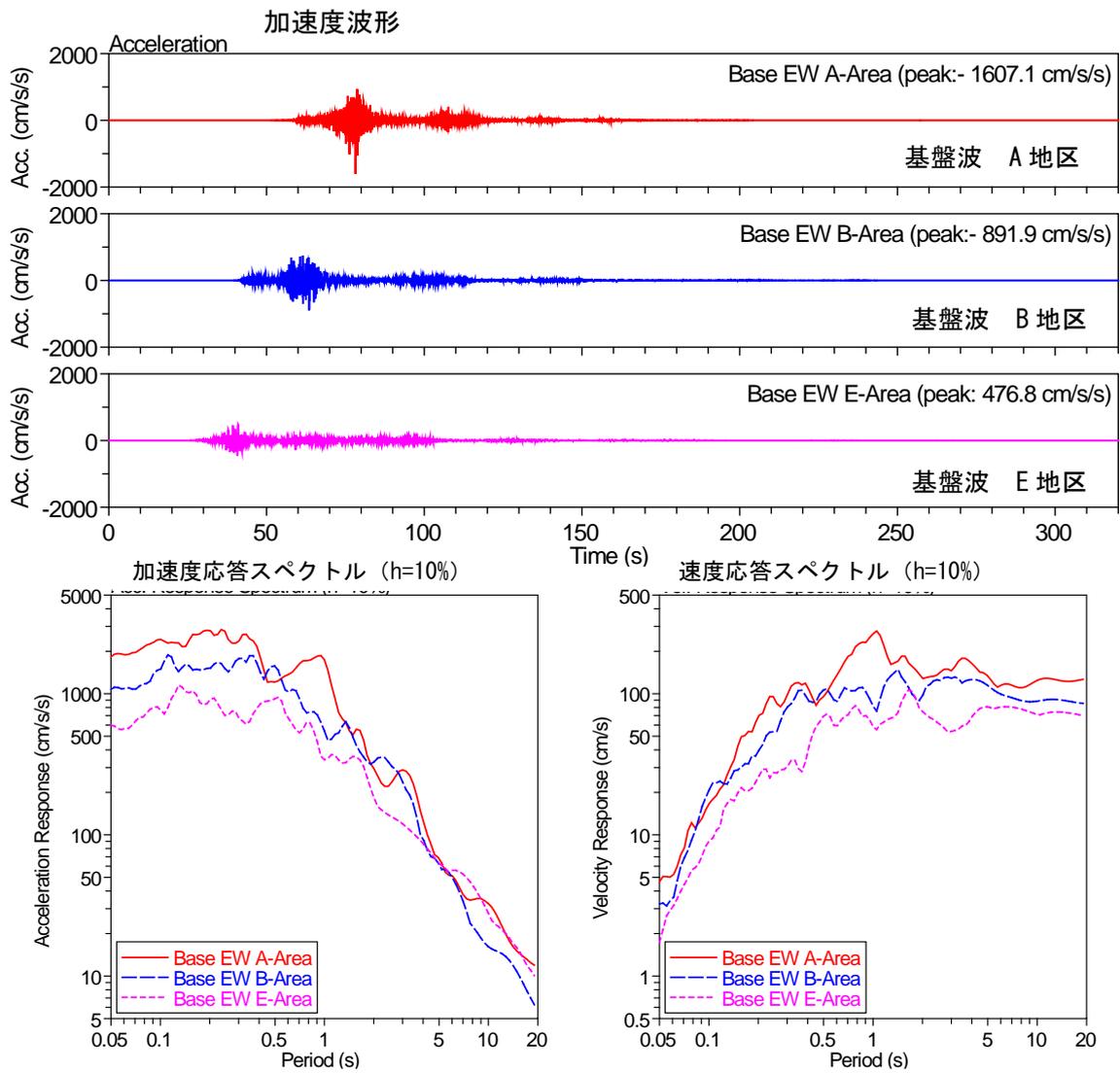


図6. 4-2 南海トラフ地震の工学的基盤における波形 (EW 成分)

## 6. 5 地盤構成の検討

地震応答解析を考えた場合、地盤構成、物理特性及び動的変形特性等を適切に考慮して設定することが重要である。また、屋外タンク貯蔵所の基礎・地盤については、液状化対策が行われていることが前提となる。したがって、関係団体より提供されたデータ（地盤調査及び液状化対策工法に関する資料）を詳細に吟味するとともに、既往調査資料や各種文献などのデータも参考にしながら定数を設定した。

### (1) A地区

A地区において設定した地盤モデルについて図6. 5-1に示す。

A地区の地盤は、地表から深度22.8mまでN値の比較的高い砂礫層が連続し、液状化可能性の低い地盤構成となっている。このため、原地盤の地盤情報を元にモデル化を行った。

動的変形曲線は、試験値及び高橋ら(2013)<sup>4</sup>(図6. 5-2)より設定した。

### (2) B地区

B地区において設定した地盤モデルについて図6. 5-3に示す。

B地区の地盤は、地表から粘性土層と砂層が互層になっている。液状化対策としてサンドコンパクションパイル(SCP)工法による地盤改良が実施されている。加えて、第二砂質土層を対象として浸透固化処理工法による液状化対策も実施されている。

地盤情報としては、サンドコンパクションパイル前後のN値が得られている。地盤改良前後の実測N値、及びN値から推定されるS波速度を比較して表6. 5-1に示す。地盤改良前後のN値から推定されるS波速度は、粘性土層で1.0~1.1倍、砂質土層で1.1~1.4倍となった。

また、第二砂質土層の浸透固化処理による液状化対策効果については、土木学会論文などの報告を考慮して、S波速度で+20m/s程度の増加を見込み、200m/sとした。

動的変形曲線は、古山田、(2003)(図6. 5-4)による平均値を採用した。

### (3) E地区

E地区において設定した地盤モデルについて図6. 5-5に示す。

E地区においては、動圧密工法による液状化対策が実施されている。

地盤情報としては、モデル化地点においてPS検層、動的変形特性試験等が実施されている。また、モデル化地点の周辺において、地盤改良前後のN値が計測されている。

B地区と同様に地盤改良前後の実測N値を比較して表6. 5-2に示す。地盤改良前後のN値から推定されるS波速度の倍率を土質区分毎に求めたところ、1.2~1.4倍程度となった。得られた倍率をPS検層から把握された地盤改良前のS波速度に乗ずることで、地盤改良後のS波速度を設定した。

動的変形特性曲線については、試験値より設定した。図6. 5-6に設定した動的変形曲線を示す

---

<sup>4</sup> 高橋ほか：名古屋市域における表層地盤の非線形特性，日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道）2013年8月

赤字: 既往資料等により設定した物性値



図 6. 5 - 1 A地区の地盤モデル

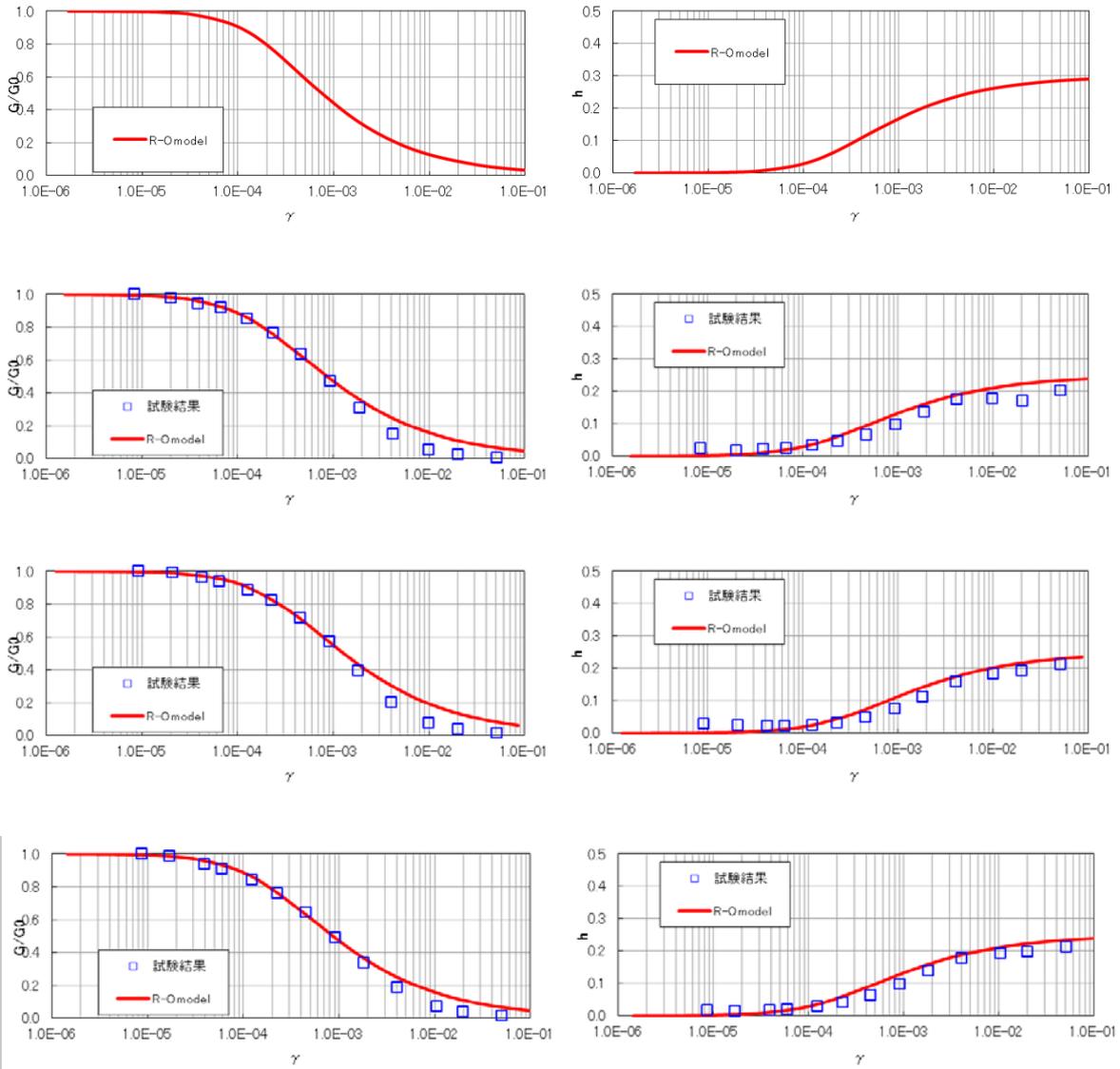


図6. 5-2 A地区で採用した動的変形曲線  
(上から礫質土 (高橋ら 2013)、砂質土 (試験値 22.8~25.0m)、  
砂質土 (試験値 25.0~27.0m)、砂質土 (試験値 27.0~32.9m) )

赤字：既往資料等により設定した物性値



図 6. 5 - 3 B地区の地盤モデル

表 6. 5 - 1 B地区における地盤改良前後のN値とS波速度の比較

土層	実測 N 値		N 値から求めた S 波速度 (m/s)		S 波速度の比 改良後/改良前
	改良前	改良後	改良前	改良後	
第一粘性土	7	7	191	191	1.0
第一砂層	5	11	132	179	1.4
第二粘性土	4	5	162	167	1.0
第二砂層	6	11	149	178	1.2
第三粘性土	3	4	145	162	1.1
第三砂層	6	8	149	160	1.1
第四粘性土	3	3	145	140	1.0

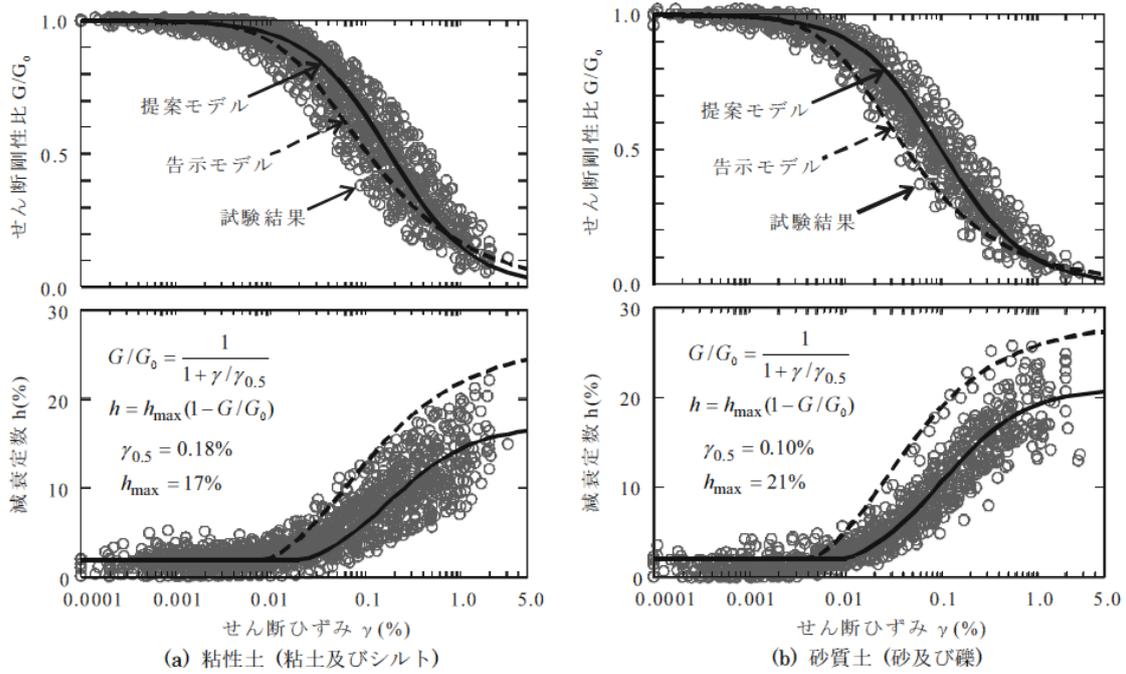


図1 全データから評価した地盤の非線形特性

図6. 5-4 B地区で採用した動的変形曲線 (古山田、2003)

赤字: 既往資料等により設定した物性値



図 6. 5-5 E 地区の地盤モデル

表 6. 5-2 E 地区における地盤改良前後の N 値と S 波速度の比較

土層	実測 N 値の平均		N 値から求めた S 波速度 (m/s)		S 波速度の比 改良後/改良前 k	PS 検層による S 波速度 (m/s)	
	改良前	改良後	改良前	改良後		改良前	改良後*
盛土	10	29	170	246	1.4	180	260
礫質土	20	33	218	257	1.2	220	260
砂質土	12	21	182	219	1.2	190	230
粘性土	5	8	171	203	1.2	190	230

※改良前 S 波速度 × k

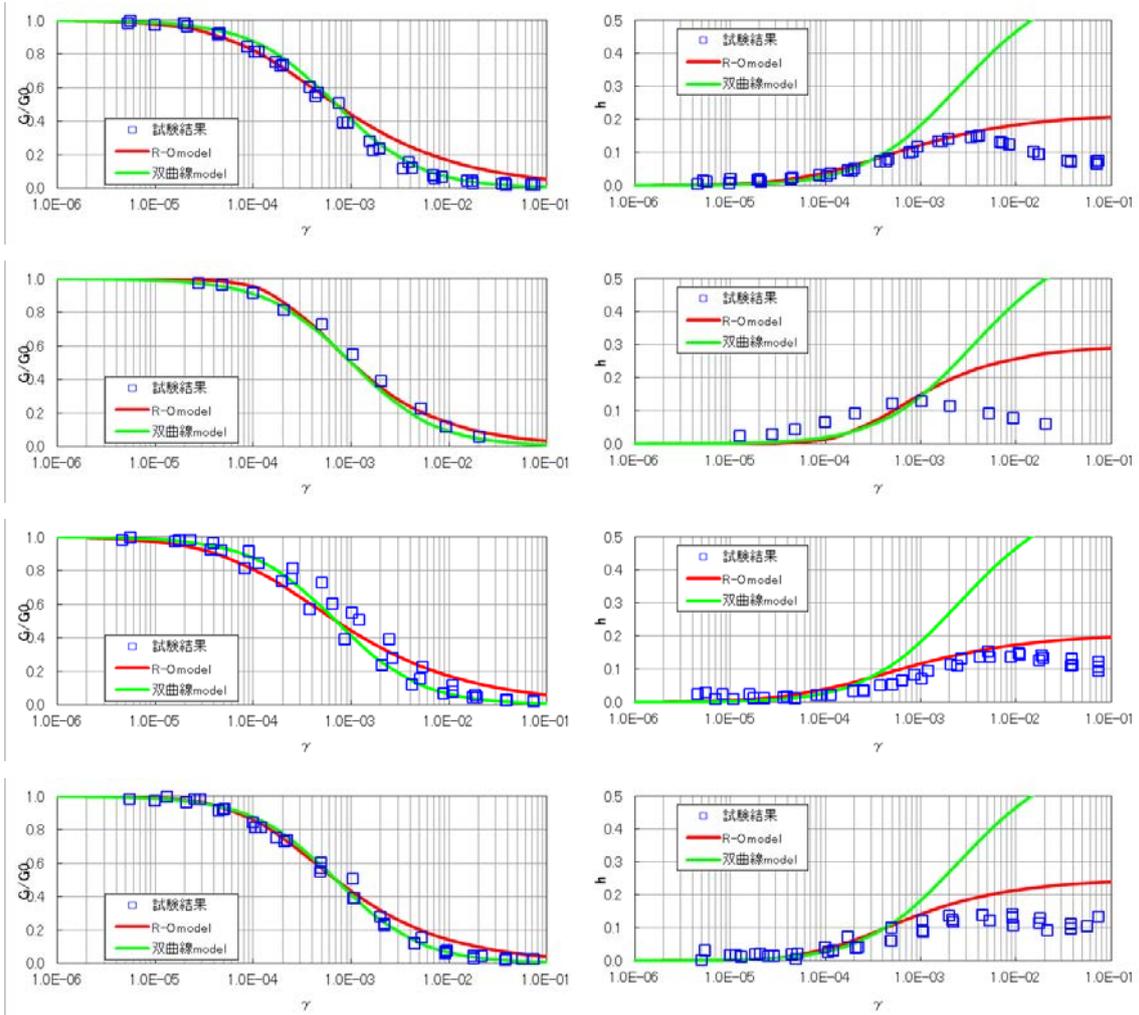


図6. 5-6 E地区で採用した動的変形曲線  
(実測値：上から砂質土 As1、礫質土 Ag、砂質土 As2、砂質土 As2 下部)

## 6. 6 地盤の地震応答解析【工学的基盤→地表】

これまでの検討結果を踏まえ、中央防災会議による工学的基盤の波形を入力地震波として、対象地区における地表面での地震波形の計算を行った。

地震応答解析は、全応力逐次非線形解析を採用し、プログラムコードとしては、『YUSAYUSA-2』を採用した。加えて、地震動応答解析の実績が格段に多い等価線形解析法による計算も行い、両者による解析結果を比較した。

解析結果を表6. 6-1及び図6. 6-1～9に示す。

表6. 6-1 対象地区における応答計算結果  
(南海トラフ地震南海トラフ巨大地震・地表)

地点コード	設置位置	最大加速度 (cm/s/s)	
		NS	EW
A地区	等価線形	706.5	1010.0
	非線形	633.2	767.1
B地区	等価線形	698.4	435.4
	非線形	532.1	424.0
E地区	等価線形	414.9	503.2
	非線形	372.9	490.6

A地区は7～12m付近で、ひずみが1%を超えており、スペクトルでは0.3～0.5秒、1秒のところにピークが出てきている。

B地区は10mより深いところで、ひずみが1%を超えており、スペクトルでは0.4秒、1秒～2秒のところにピークが出てきている。

E地区は、どの層においても1%未満のひずみであり、スペクトルでは0.7秒や、1秒～2秒のところにピークが出てきている。

以上より、今回解析した結果については、震源特性や地盤特性など以外で物理的に有意でない要因が問題とはならなかったため、解析結果は妥当であると考えている。

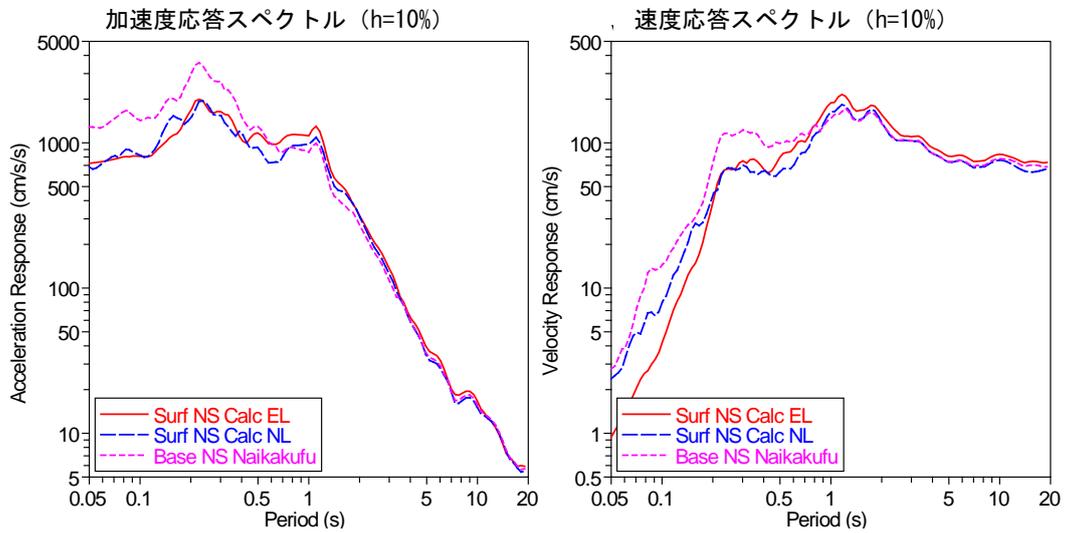
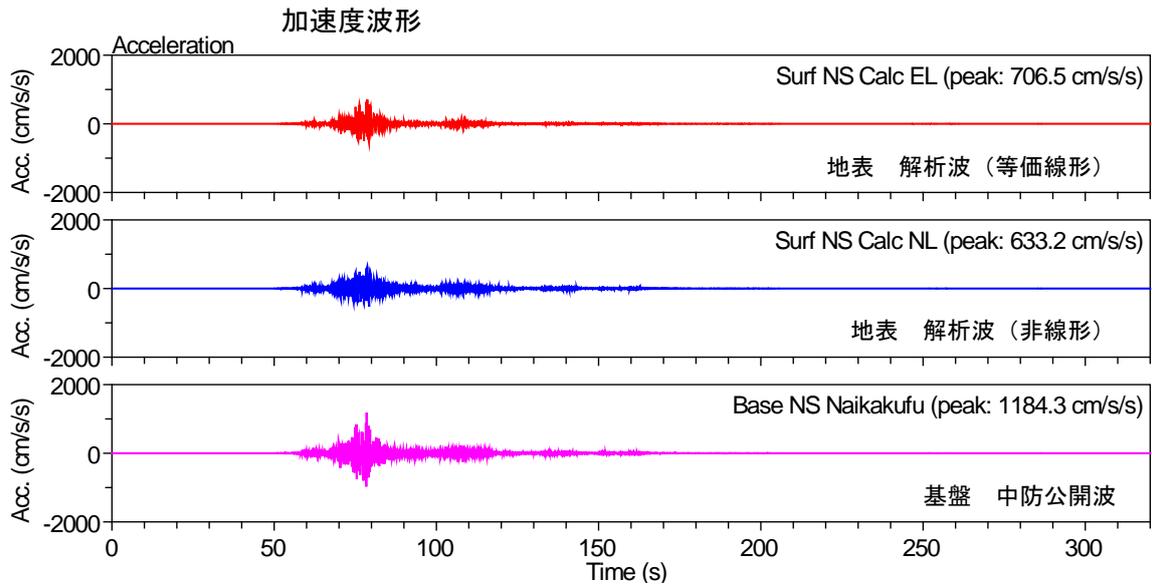


図 6. 6-1 地表面及び工学的基盤における解析地震波形 (NS 成分)  
(南海トラフ地震・A 地区)

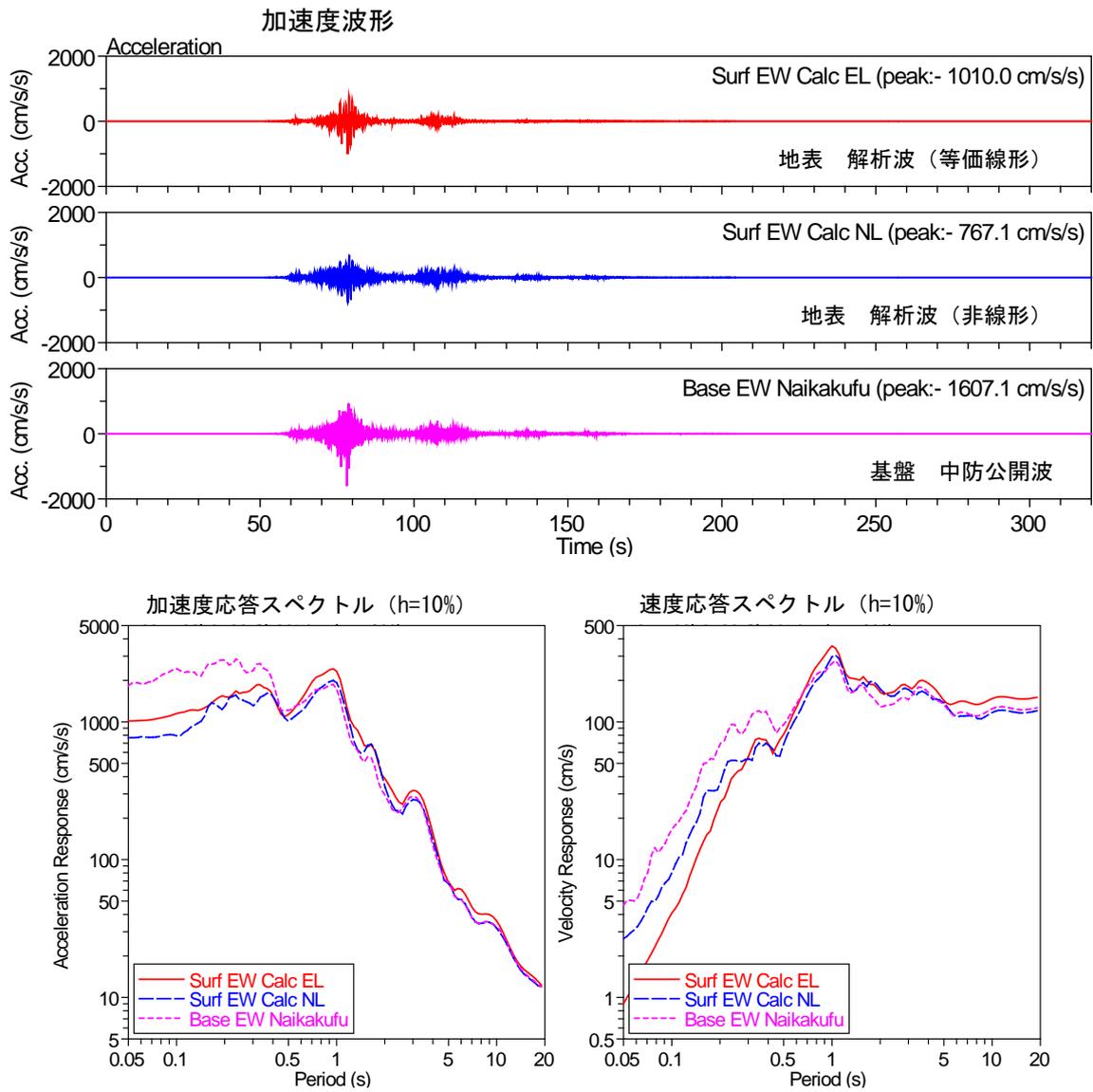
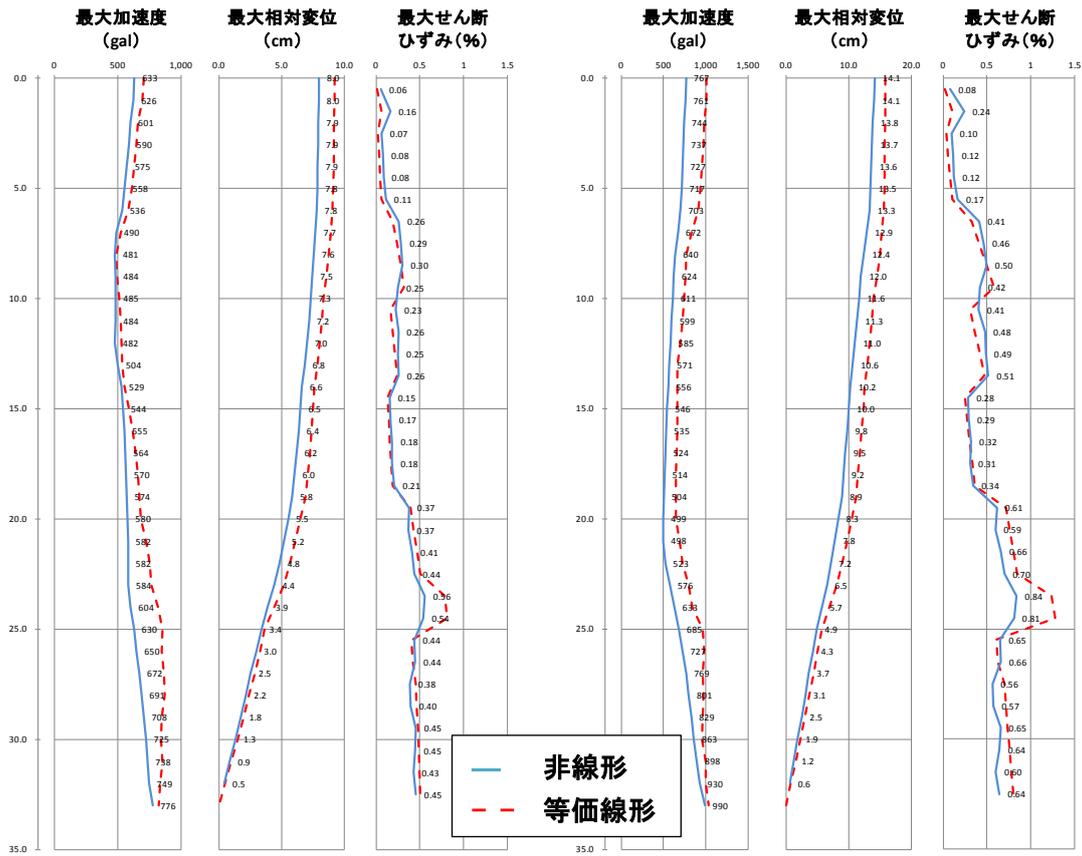


図6. 6-2 地表面及び工学的基盤における解析地震波形 (EW成分)  
(南海トラフ地震・A地区)



NS 成分

EW 成分

図 6. 6-3 応答計算結果の深さ方向分布図  
(南海トラフ地震・A地区)

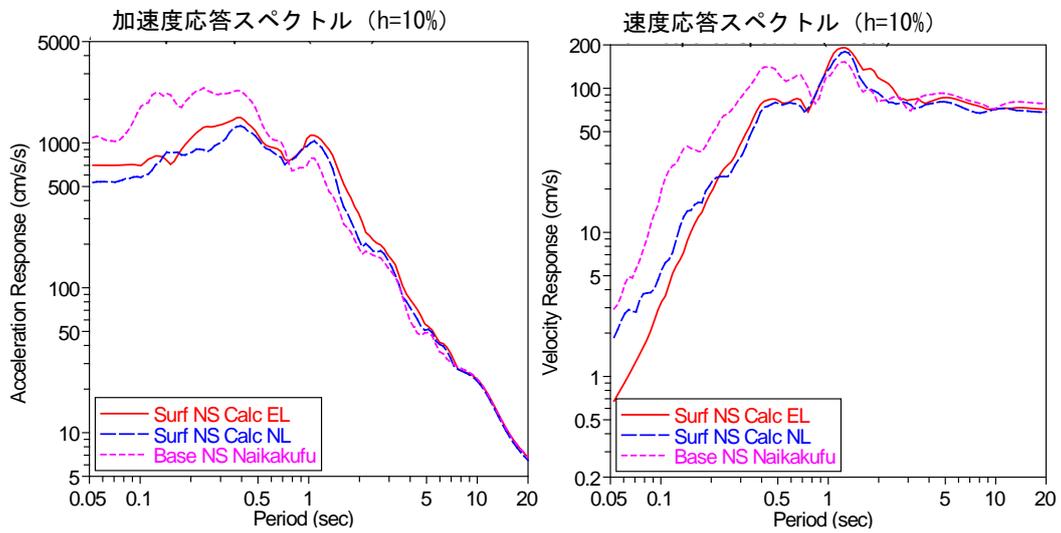
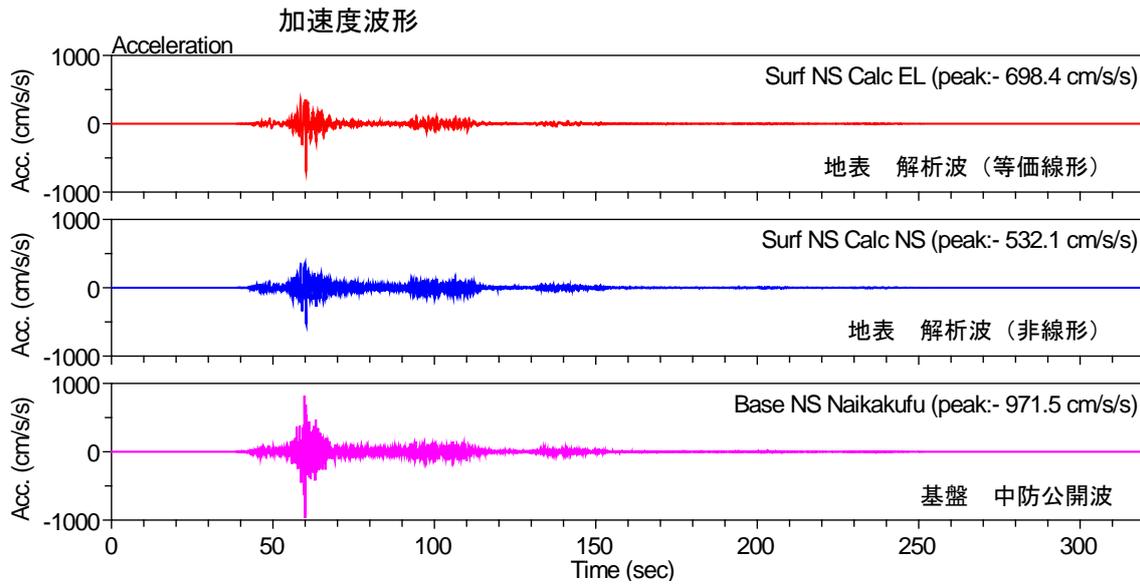


図6. 6-4 地表面及び工学的基盤における解析地震波形 (NS成分)  
(南海トラフ地震・B地区)

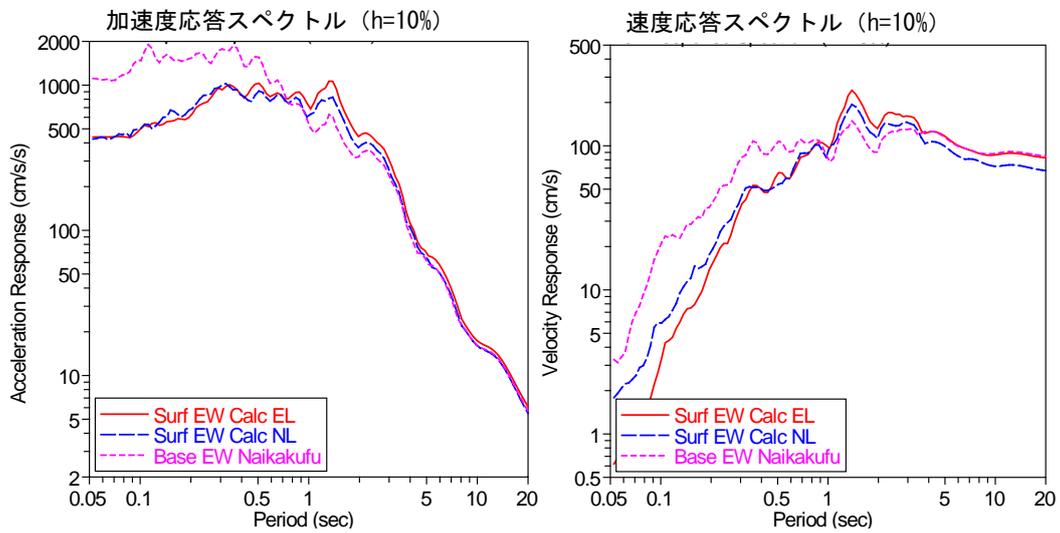
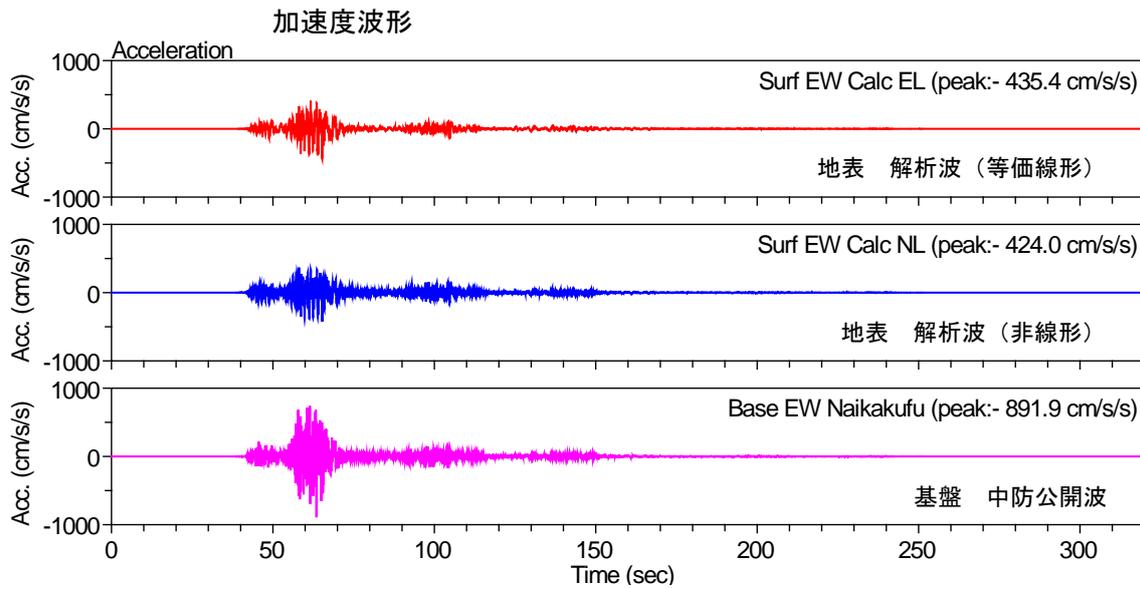
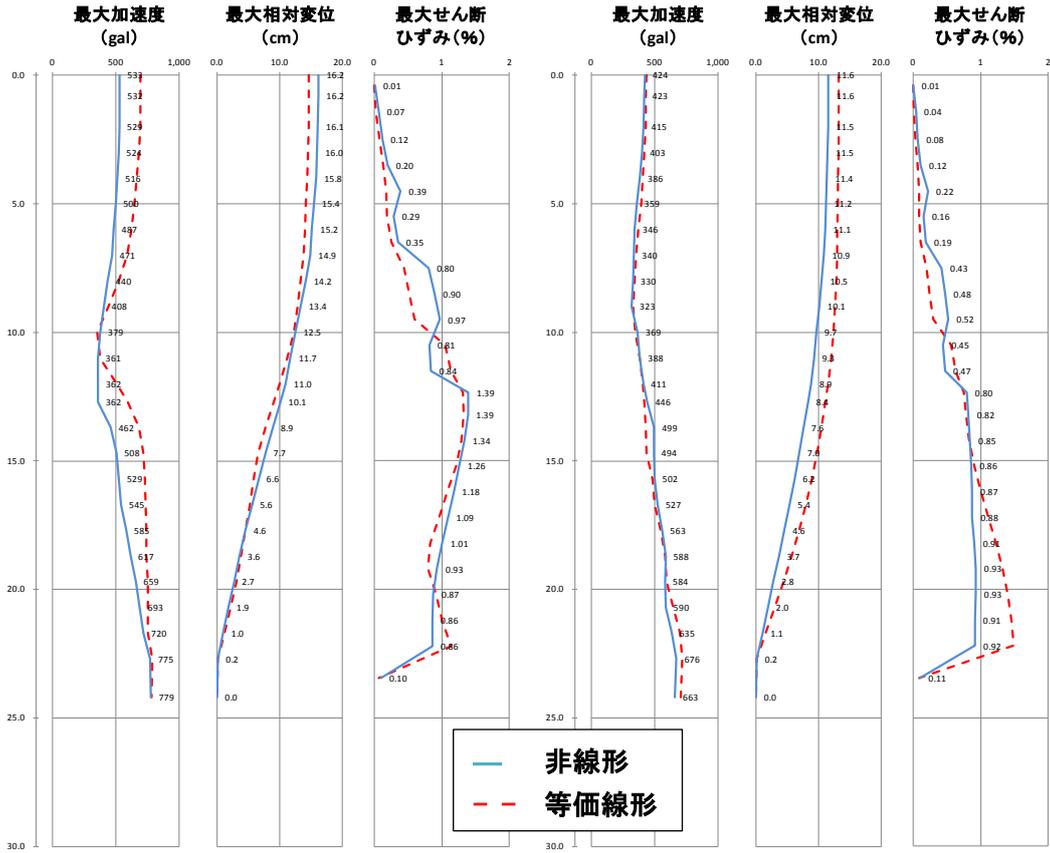


図6. 6-5 地表面及び工学的基盤における解析地震波形 (EW成分)  
(南海トラフ地震・B地区)



NS 成分

EW 成分

図 6. 6-6 応答計算結果の深さ方向分布図  
(南海トラフ地震・B地区)

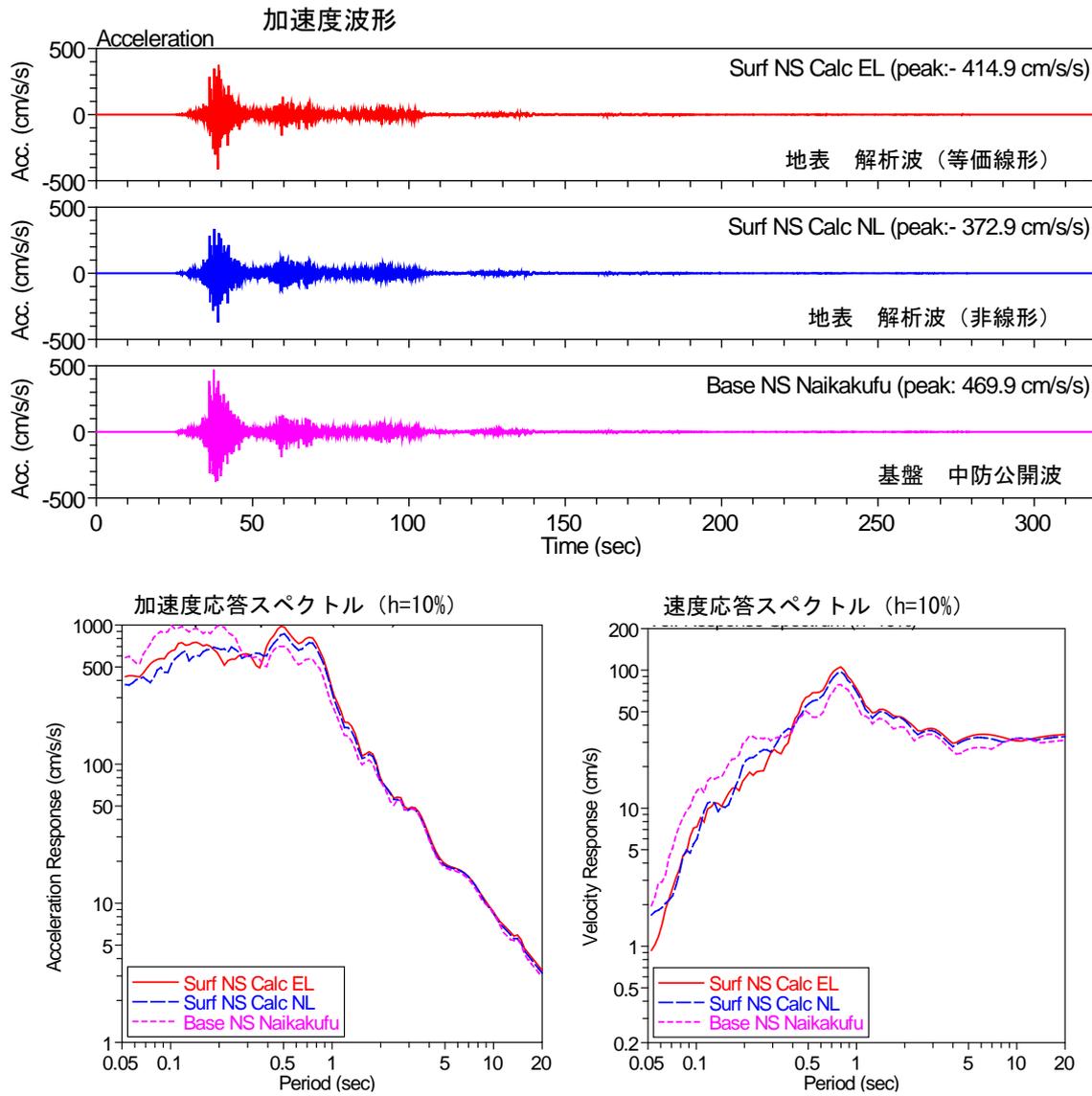


図 6. 6-7 地表面及び工学的基盤における解析地震波形 (NS 成分)  
(南海トラフ地震・E 地区)

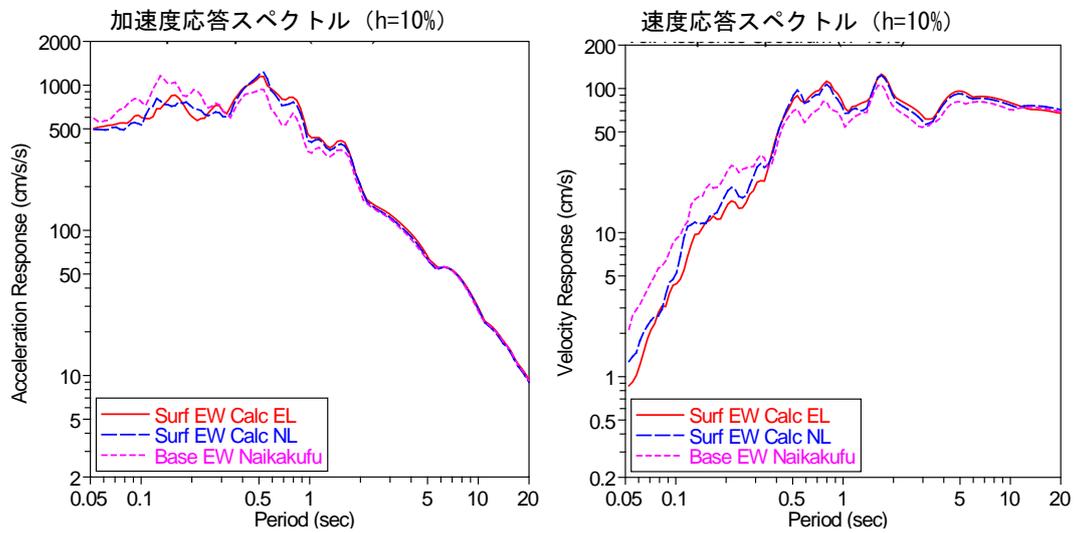
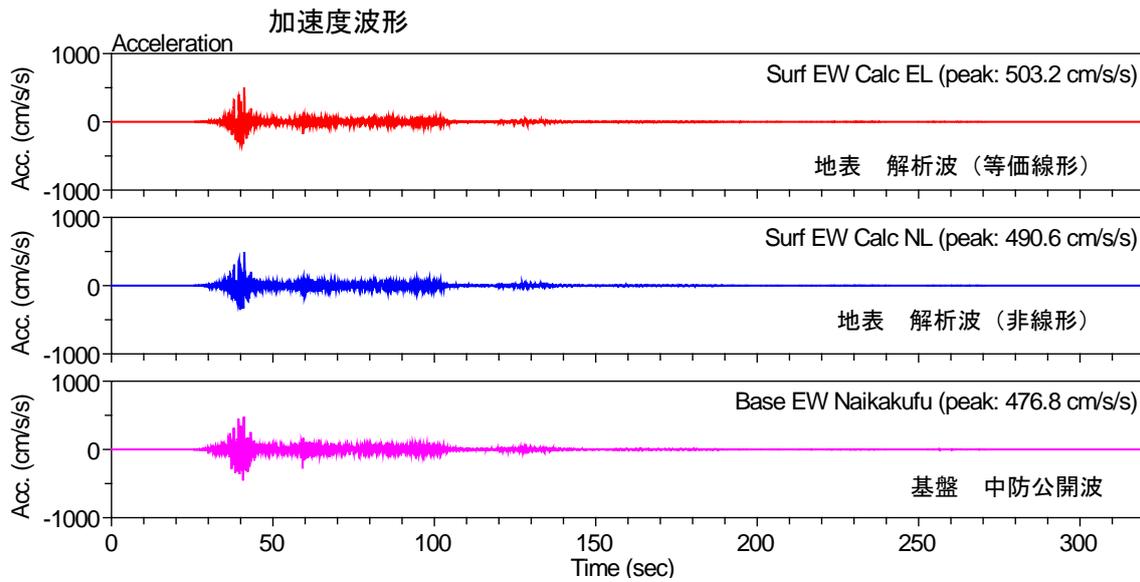
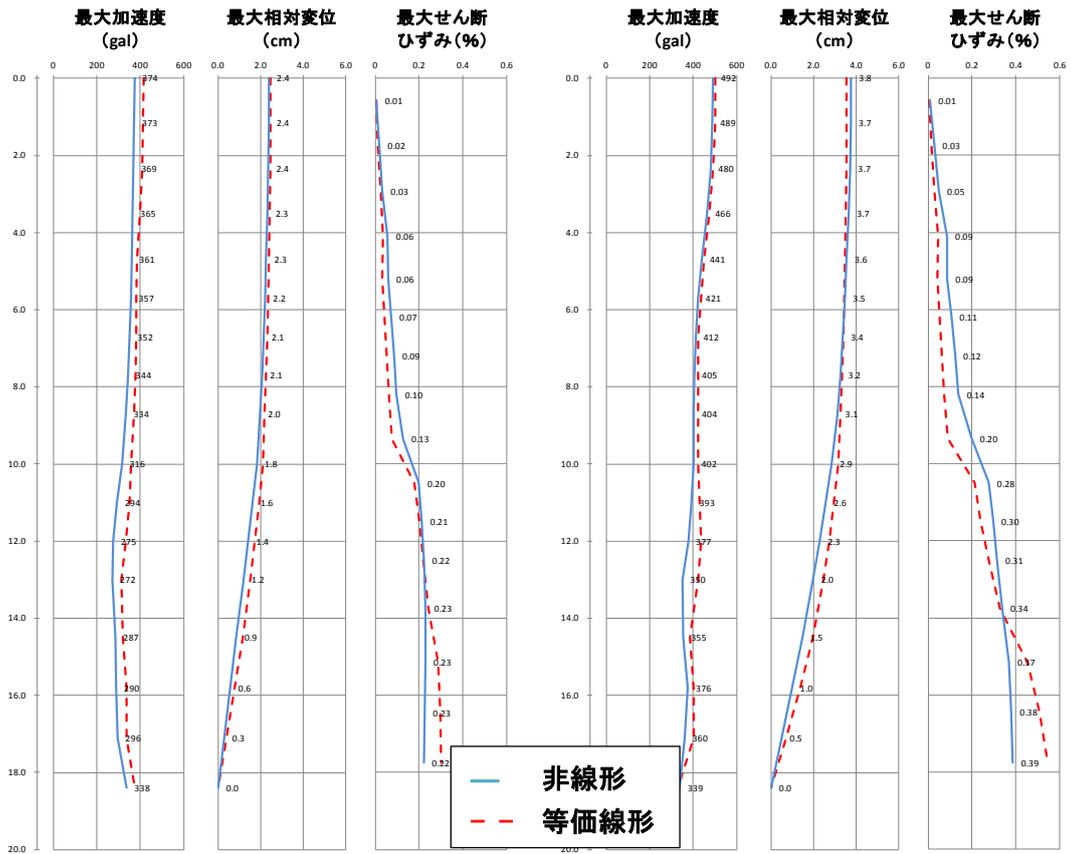


図 6. 6-8 地表面及び工学的基盤における解析地震波形 (EW 成分)  
(南海トラフ地震・E 地区)



NS 成分

EW 成分

図 6. 6-9 応答計算結果の深さ方向分布図  
(南海トラフ地震・E地区)

## 7. まとめ

### 7. 1 解析手法等

平成 26 年度は、東北地方太平洋沖地震での地震動の再現と、南海トラフ沿いで発生が指摘される、最大クラスの地震の予測を行った。地震動の予測に際しては、屋外貯蔵タンク本体への影響という観点から短周期に着目し実施した。

なお、この解析にあたっては、解析手法について一定の信頼性があることを確認するため、東北地方太平洋沖地震における観測地震波形を再現できることを確認したうえで、同様の解析手法を南海トラフの地震へ適用した。南海トラフ地震の工学的基盤での波形は、中央防災会議（2012）の公開波形を採用し、その波形を用いて解析対象地区の地表面での地震波形を作成した。今回対象とした地震動は、現時点で考えられる最新の科学的知見を踏まえ中央防災会議の検討会においてとりまとめられたものであるが、通常の屋外タンク貯蔵所の設計で用いられるような比較的発生頻度の高い地震ではなく、千年に一度、あるいはそれよりもっと発生頻度が低いものであり、また、考え得る最大クラスの地震である。

### 7. 2 解析結果

これまで検討した東北地方太平洋沖地震の 2 地区 3 波の再現地震波形、及び南海トラフ地震の 3 地区 3 波の想定地震波形をまとめた。

最大加速度で比較すると、東北地方太平洋沖地震の再現地震波形では広野特防区域が、南海トラフの想定地震波形では A 地区が、大きな結果となっている。

加速度スペクトルで比較すると、東北地方太平洋沖地震の再現地震波形はいずれも 0.3 秒付近にピークがあるが、南海トラフの想定地震波形は 1 秒を超えるところにピークがあり、屋外タンク貯蔵所の固有周期とは周期帯が異なることが分かる。

速度応答スペクトルでは、東北地方太平洋沖地震の再現地震波形より南海トラフの想定地震波形の方が全体として大きい傾向であり、特に A 地区では、周期 1.0 秒付近で大きな値を示している。

図 7. 2-1 に、東北地方太平洋沖地震の時刻歴の再現地震波形を示す。

図 7. 2-2 に、南海トラフ地震の時刻歴の想定地震波形を示す。

図 7. 2-3 に、東北地方太平洋沖地震の再現地震波形の応答スペクトル（10%減衰）を示す。

図 7. 2-4 に、南海トラフ地震の想定地震波形の応答スペクトル（10%減衰）を示す。

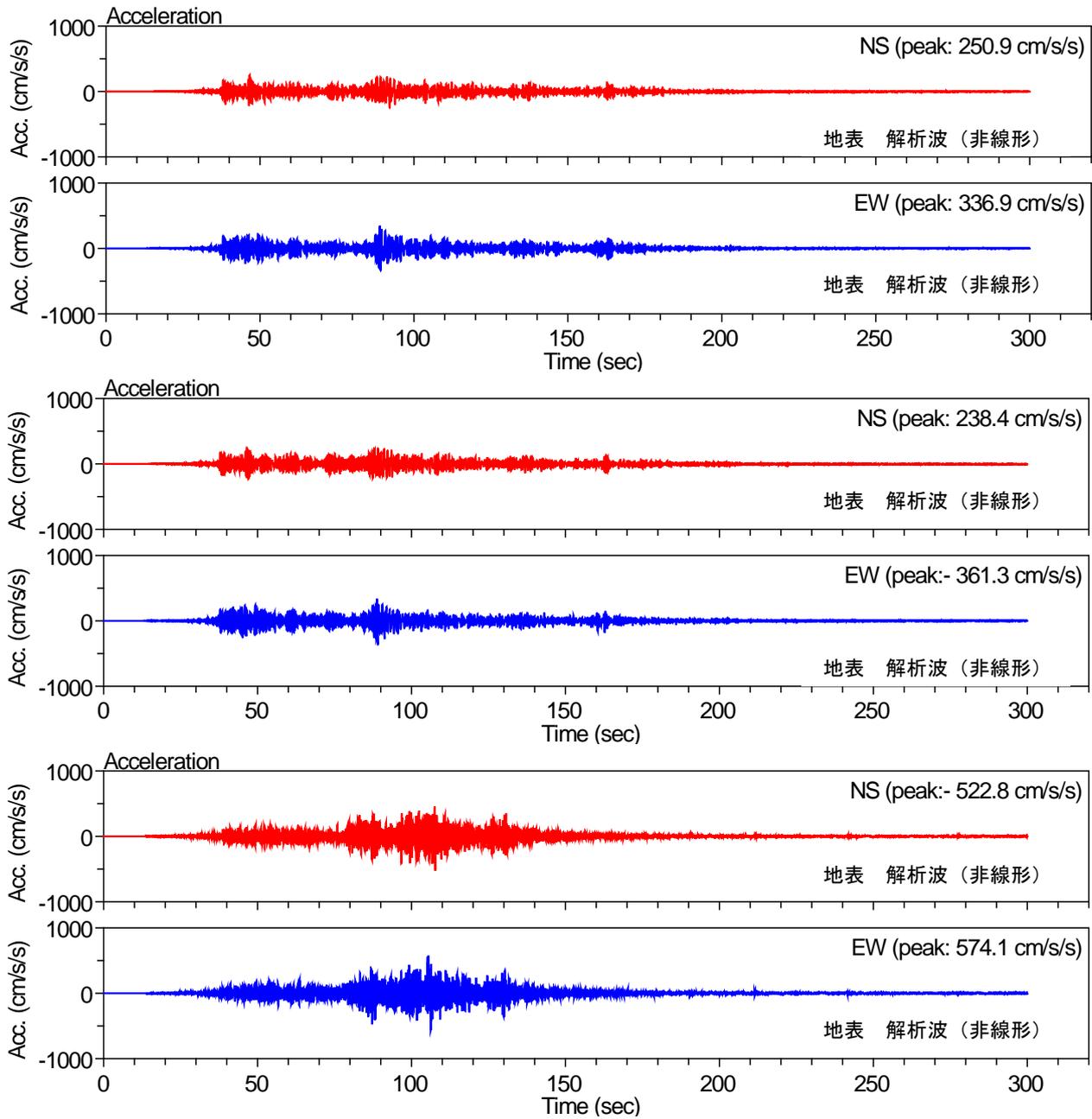


図7. 2-1 東北地方太平洋沖地震の再現地震波形  
 加速度時刻歴波形 (NS成分・EW成分)  
 (上から、仙台・塩釜特防区域ケース①、仙台・塩釜特防区域ケース②、広野特防区域)

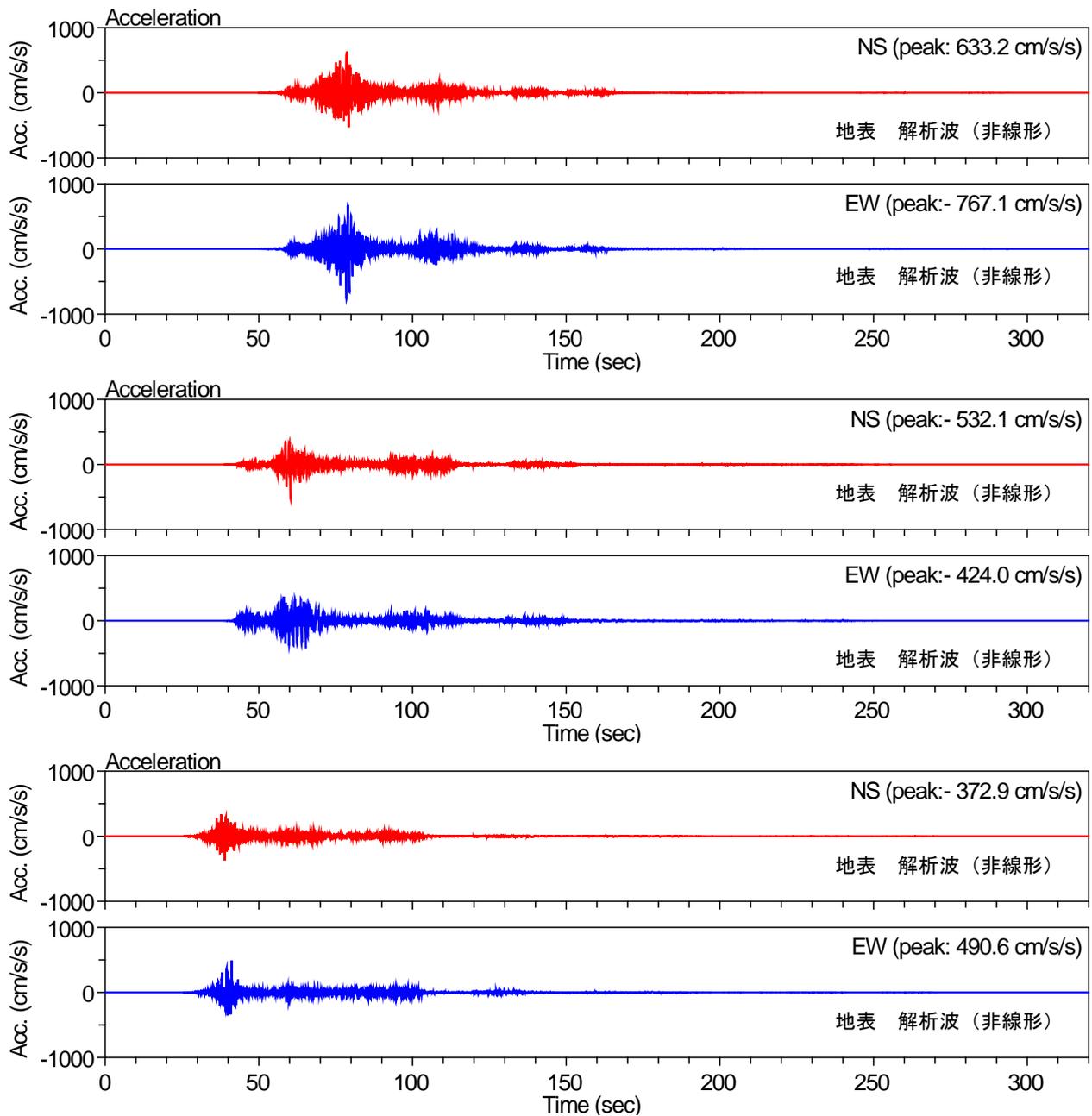


図7. 2-2 南海トラフ地震の想定地震波形  
 加速度時刻歴波形 (NS成分・EW成分)  
 (上から、A地区、B地区、E地区)

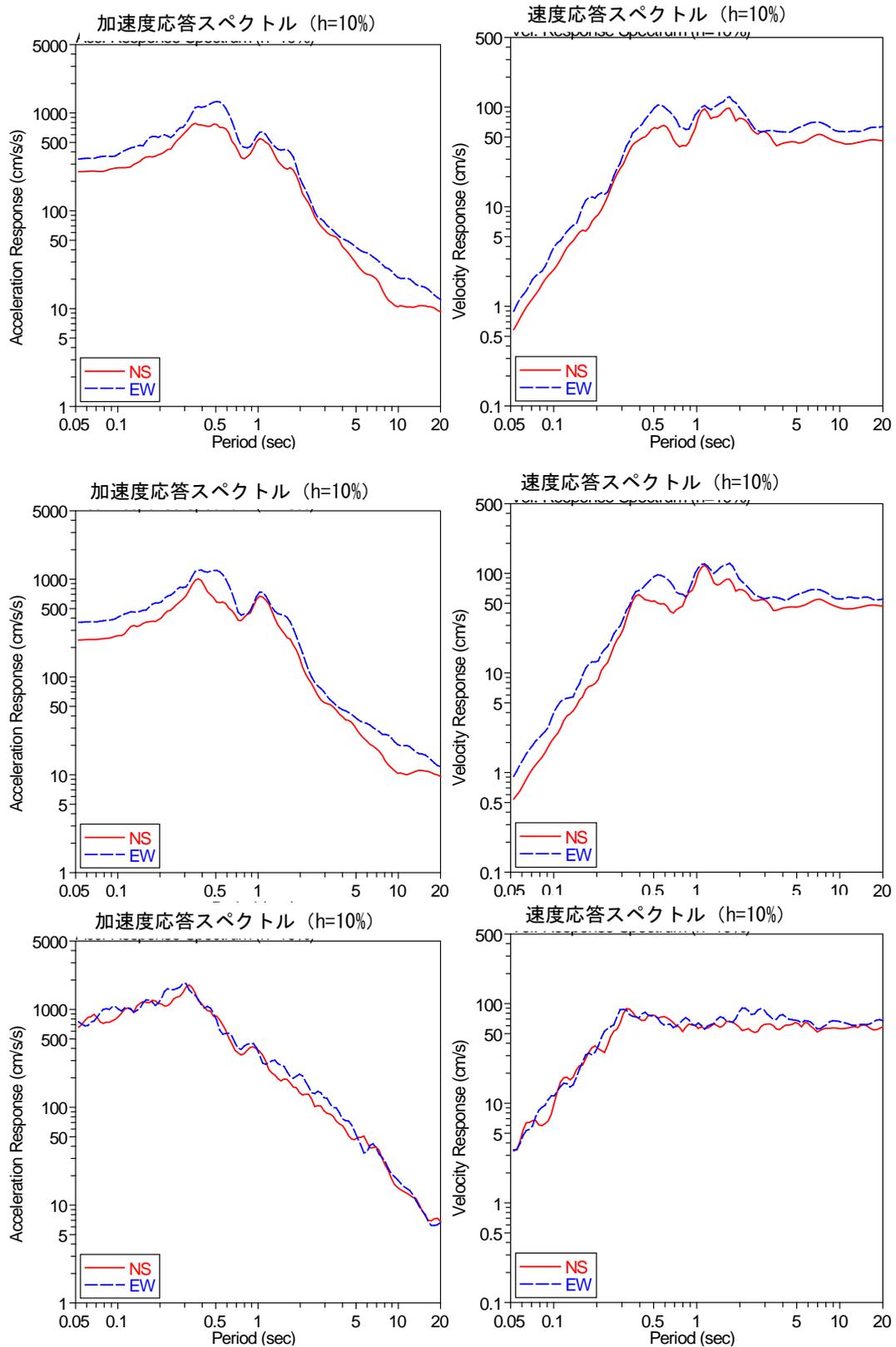


図7. 2-3 東北地方太平洋沖地震の再現地震波形 (NS成分・EW成分)  
 加速度応答スペクトル (左) と速度応答スペクトル (右)  
 (上から、仙台・塩釜特防区域ケース①、仙台・塩釜特防区域ケース②、広野特防区域)

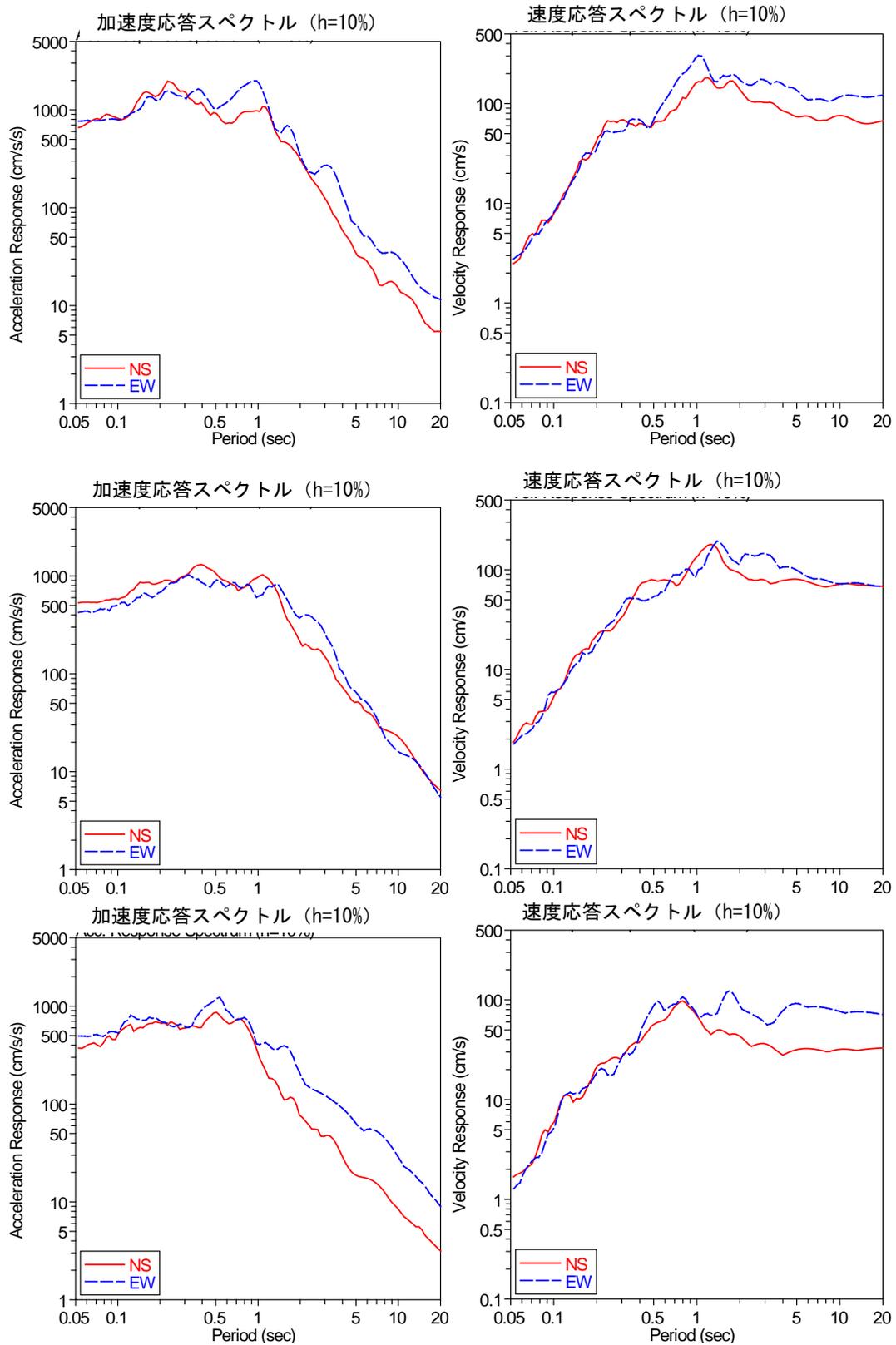


図7. 2-4 南海トラフ地震の想定地震波形 (NS成分・EW成分)  
 加速度応答スペクトル (左) と速度応答スペクトル (右)  
 (上から、A地区、B地区、E地区)