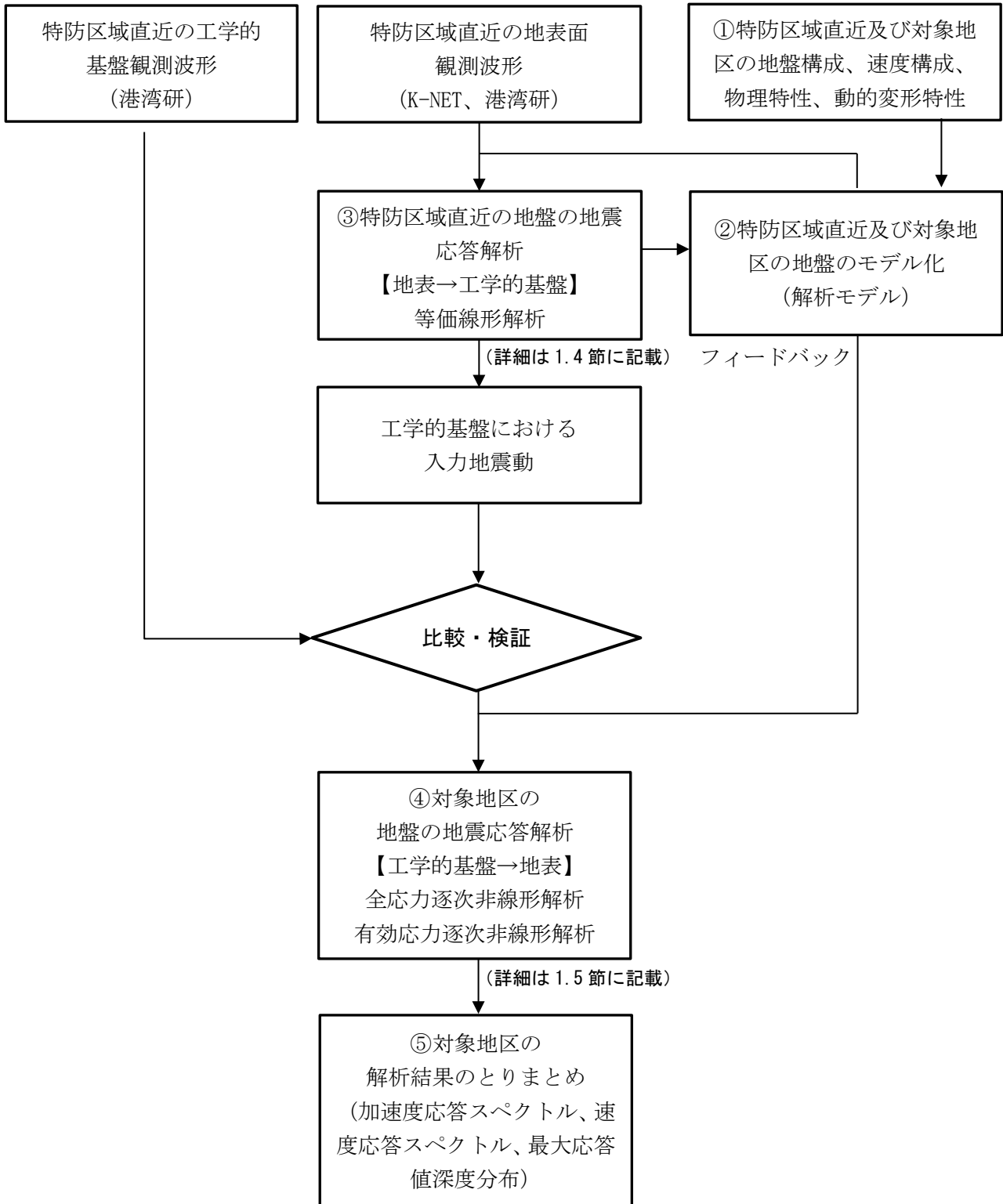


地震波形の解析について

1 東北地方太平洋沖地震の地表面地震波形の再現解析

以下の手順により、仙台・塩釜及び広野の特防区域における東北地方太平洋沖地震の再現波形を作成する。



1. 1 地盤構成、速度構成、物理特性及び動的変形特性の検討

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。特に、本調査では、有効応力逐次非線形解析を行うため、等価線形解析法と異なり、多くの定数（パラメータ）の設定が必要となる（表1. 1-1参照）。したがって、本調査では、提供データ（地盤調査資料等）を詳細に吟味するとともに、既往調査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。

表1. 1-1 有効応力逐次非線形解析に必要な定数

定数No.		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18		
		DZ				RHO				IFOGT				CA	CB	CC				MV	SEP
地盤大区分	地層細区分No.	下層深さ	層厚	中央深さ	単位体積重量	有効上載圧 σ'_v	平均有効主応力 σ'_m	V_s	V_u	VsからのCo使用時の σ'_v 計算に使う σ'_v	他家圧依存の σ'_v 計算に使うA	他家圧依存の σ'_v 計算に使うB	他家圧依存の σ'_v 計算に使うC	G_0 (Vsから計算)	G_0 (Vsから計算)	平均N値	絶対含水率 w_0	D50	体積圧縮係数 e_{sv}	透水係数 k_v	
		(m)	(m)	(m)	(g/cm^3)	(t/m^2)	(t/m^2)	(m/s)						(t/m^2)	(t/m^2)		(%)	(mm)	(cm^2/sg)	(m/s)	
1	1	1.200	1.200	0.600	1.65	0.990	0.660	149	0					2.17	0.4						
	2	2.400	1.200	1.800	1.65	2.970	1.980	149	0												
2	3	3.600	1.400	3.100	1.80	5.220	3.480	189	0												
	4	4.800	1.000	4.300	1.80	7.380	4.920	179	0												
3	5	5.800	1.000	5.300	1.80	9.180	5.120	179	0												
	6	6.800	1.000	6.300	1.80	10.480	5.987	199	0												
4	7	7.800	1.000	7.300	1.80	11.280	7.530	199	0												
	8	8.800	1.000	8.300	1.80	12.080	8.053	199	0												
5	9	9.800	1.000	9.300	1.80	12.880	8.577	210	0												
	10	10.800	1.000	10.300	1.80	13.680	9.120	210	0												
6	11	11.800	1.000	11.300	1.80	14.480	9.653	210	0												
	12	12.900	1.100	12.350	1.80	15.320	10.213	230	1												
7	13	14.000	1.100	13.450	1.80	16.200	10.800	230	1												
	14	15.100	1.100	14.550	1.80	17.080	11.387	230	1												
8	15	16.600	1.500	15.850	1.85	18.158	12.105	340	0												
	16	18.100	1.500	17.350	1.85	19.433	12.955	340	0												
8	17	-	-	-	2.00	-	-	500													

定数No.		1	2	3	4	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	
		DZ				RHO	ROBETA				ROSTRN	IFGST	PHAI	PHAI	PHIT	IFGEF	BP	BU	
地盤大区分	地層細区分No.	下層深さ	層厚	中央深さ	単位体積重量	過飽和比 r_{as}	r_{max}	ROの定数 r (β)	ROの定数 α	せん断耐力 τ (kPa)	せん断耐力 τ (kPa)	せん断耐力 τ (kPa)	せん断耐力 τ (kPa)	せん断耐力 τ (kPa)	せん断耐力 τ (kPa)	せん断耐力 τ (kPa)	せん断耐力 τ (kPa)	せん断耐力 τ (kPa)	せん断耐力 τ (kPa)
		(m)	(m)	(m)	(g/cm^3)														
1	1	1.200	1.200	0.600	1.65	0.10521	0.255	2.336	2.525	0	3.472	34.1	72.0	0	0.158	0.201	2.100	0.130	
	2	2.400	1.200	1.800	1.65	0.11860	0.265	2.426	2.687	0	3.914	32.8	49.1	1	-	-	-	-	
2	3	3.600	1.400	3.100	1.80	0.06655	0.270	2.473	2.726	0	3.560	37.2	33.6	1	-	-	-	-	
	4	4.800	1.000	4.300	1.80	0.08591	0.280	2.570	2.970	0	3.499	25.4	22.5	1	-	-	-	-	
3	5	5.800	1.000	5.300	1.80	0.07115	0.360	3.603	6.075	0	3.777	22.4	19.8	1	-	-	-	-	
	6	6.800	1.000	6.300	1.80	0.06045	0.380	3.962	7.790	0	4.008	20.9	18.5	0	0.158	0.201	2.100	0.130	
4	7	7.800	1.000	7.300	1.80	0.06237	0.390	4.163	8.955	0	4.136	20.1	17.8	0	0.155	0.197	1.000	0.090	
	8	8.800	1.000	8.300	1.80	0.06423	0.400	4.381	10.418	0	4.239	19.4	17.1	0	0.151	0.152	2.100	0.155	
5	9	9.800	1.000	9.300	1.80	0.06238	0.390	4.163	8.955	0	5.053	21.4	18.9	0	0.174	0.221	1.600	0.110	
	10	10.800	1.000	10.300	1.80	0.06411	0.405	4.497	11.291	0	5.193	20.8	18.4	0	0.170	0.216	1.500	0.100	
6	11	11.800	1.000	11.300	1.80	0.06579	0.410	4.618	12.281	0	5.529	20.2	17.8	0	0.167	0.212	1.900	0.100	
	12	12.900	1.100	12.350	1.80	0.07447	0.380	2.570	2.970	0	7.076	24.8	22.0	0	0.199	0.252	1.580	0.100	
8	13	14.000	1.100	13.450	1.80	0.07626	0.380	2.570	2.970	0	7.443	24.4	21.8	0	0.194	0.247	1.560	0.095	

1. 2 地盤のモデル化（解析モデル）

屋外タンク貯蔵所付近の解析地点を対象として、地盤のモデル化を行う。地盤のモデル化に際しては、対象となる箇所が主に埋立地や沖積低地となることが想定されることから、対象地を含む周辺の地形・地質特性や埋立履歴等を考慮してモデル化を行う。解析で重要となる表層地盤については、地盤構成、物理・力学特性及び動的変形特性等の諸元を考慮してモデル化を行い、1次元及び2次元の解析モデルを作成する。作成した1次元の解析モデルについては地震応答解析に、2次元の解析モデルについては地盤及び構造物の解析に用いる。

また、解析断面の作成の際には、既存資料を踏まえて敷地全体の3次元的な構造を考慮した上でモデル化を行う。

1. 3 観測記録の整理、活用【地表及び工学的基盤】

対象とする特防区域と地震観測記録について整理した（表1. 3-1、図1. 3-1～4及び図1. 3-9～10参照）。この地域周辺には、防災科学技術研究所により強震観測記録（以下「K-NET」という。）、及び仙台・塩釜地区の直近には国土交通省港湾局により港湾地域強震観測が行われており（図1. 3-5参照）、独立行政法人港湾空港技術研究所（以下「港湾研」という。）から記録が公開されている。

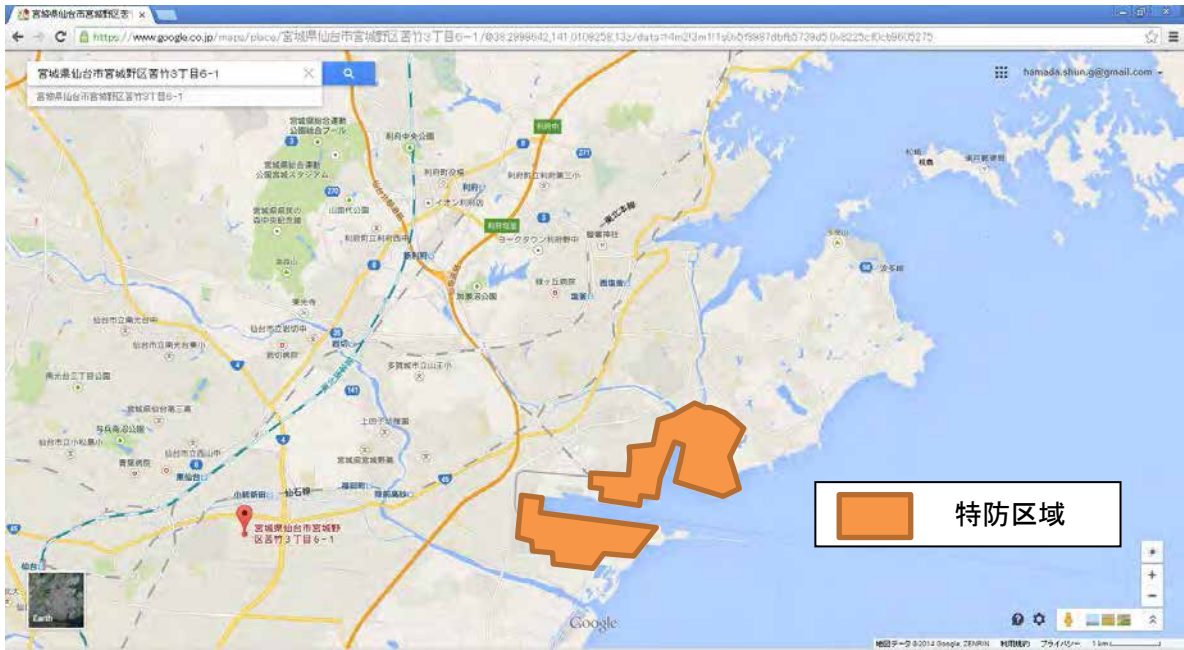
特に仙台・塩釜地区では、港湾研でも東北地方太平洋沖地震の記録が観測されており、地表及び工学的基盤の波形が得られている（図1. 3-6～8参照）。今回検討対象とする仙台・塩釜地区と、観測点との距離は、数kmであり、震源からの距離と比べて十分小さい。よって、仙台・塩釜地区のK-NETで観測されている地表波形から推定した工学的基盤波形と比較し、この観測記録の検証を行った上で、仙台・塩釜地区の特防区域の東北地方太平洋沖地震の地表面地震波形の再現解析の入力波には、地表面から工学的基盤に戻した推定波形ではなく、実際に工学的基盤で観測された記録を用いる。

広野地区では、K-NET 観測地点が特防区域から数百mの位置にあり、ここでも震源からの距離の影響は無視できると考える。また、観測地点と対象の特防区域の工学的基盤深さとが大きく変わらないことから、仙台・塩釜地区での検証結果も含めて地盤のモデル化を行う。その後、K-NET の地表波形から工学的基盤の波形を解析し、東北地方太平洋沖地震の地表面地震波形の再現解析の入力波とする。

表1. 3-1 対象区域と観測記録波形

ID	特防区域	K-NET	港湾研	備考
7	塩釜※	MYG012 (地表)	仙台-G(地表)、GB(工学的基盤)	仙台-G 地表 G.L. 0m
8	仙台※	MYG013 (地表)		仙台-GB 地中 G.L. -10.4m
11-2	広野	FKS010 (地表)		

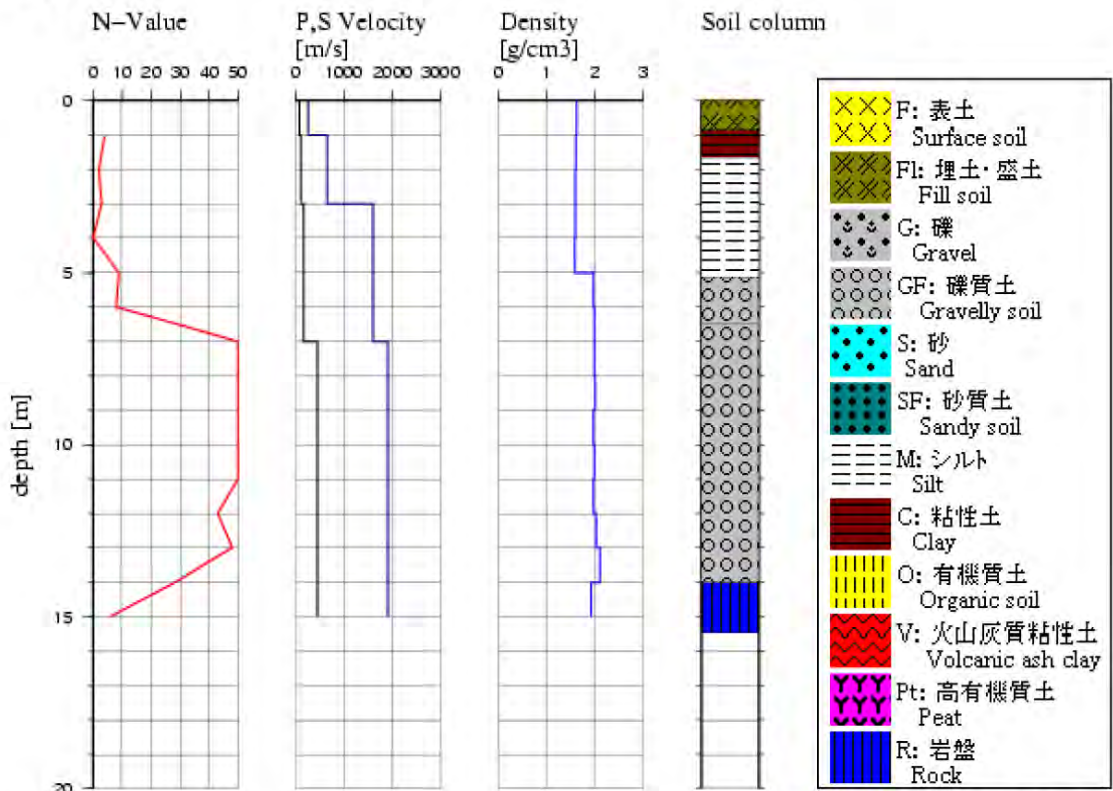
※ 仙台・塩釜は1地区とみなして解析を行う。



2014/11/6

MYG013

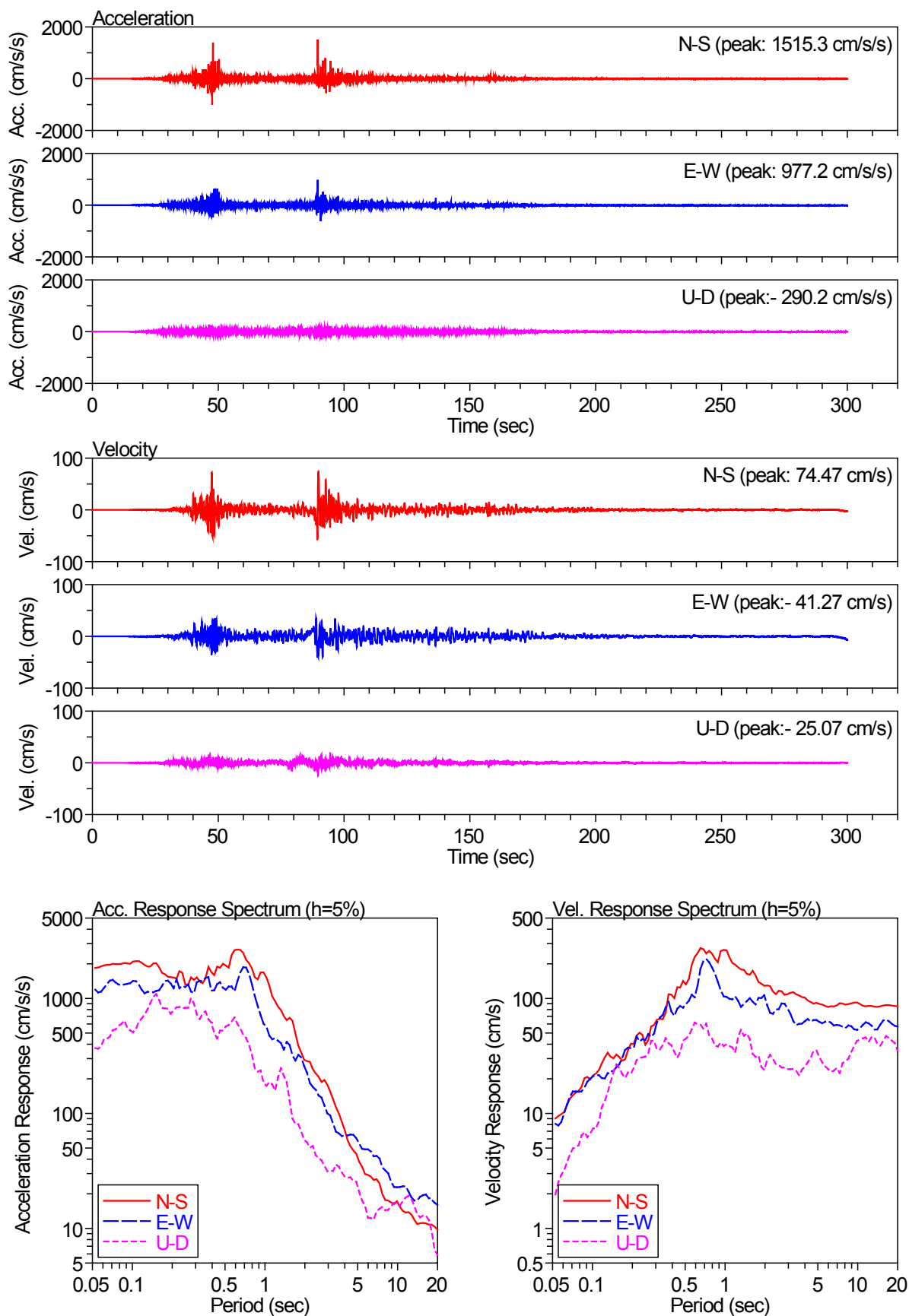
土質図



NIED 独立行政法人防災科学技術研究所

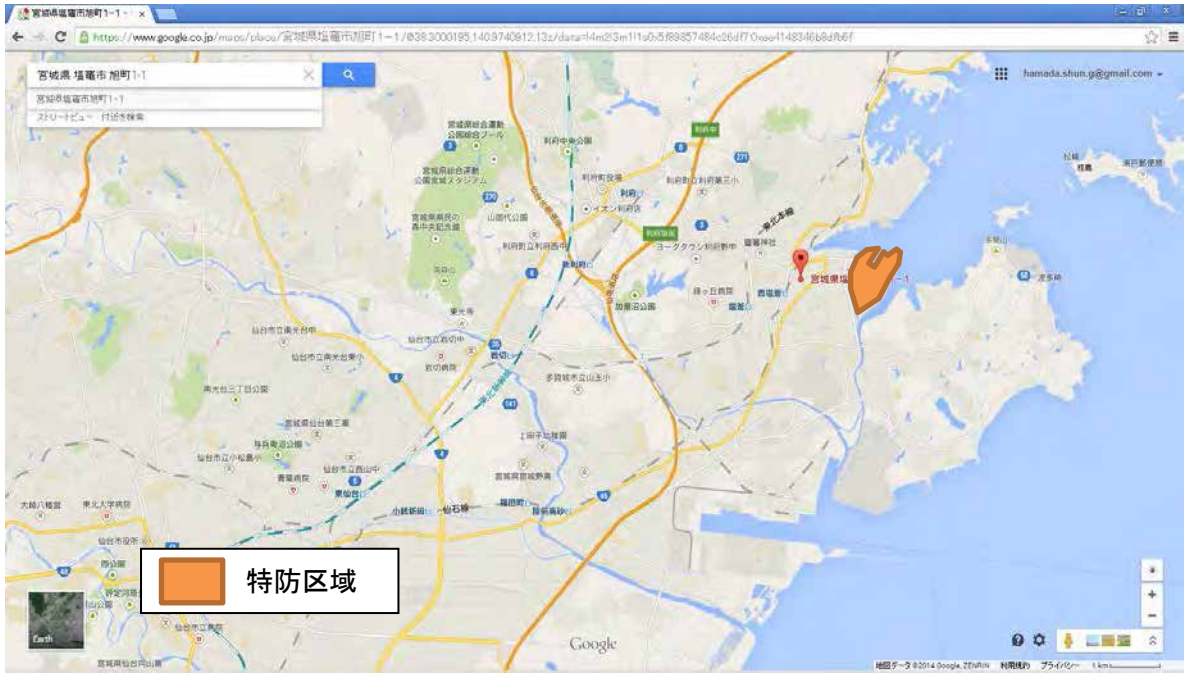
Copyright (c) National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, All rights Reserved.

図1. 3-1 K-NET (仙台) の観測地点と土質柱状図



2011/03/11 14:46:35, Site: MYG013, JMA Intensity: 6.3

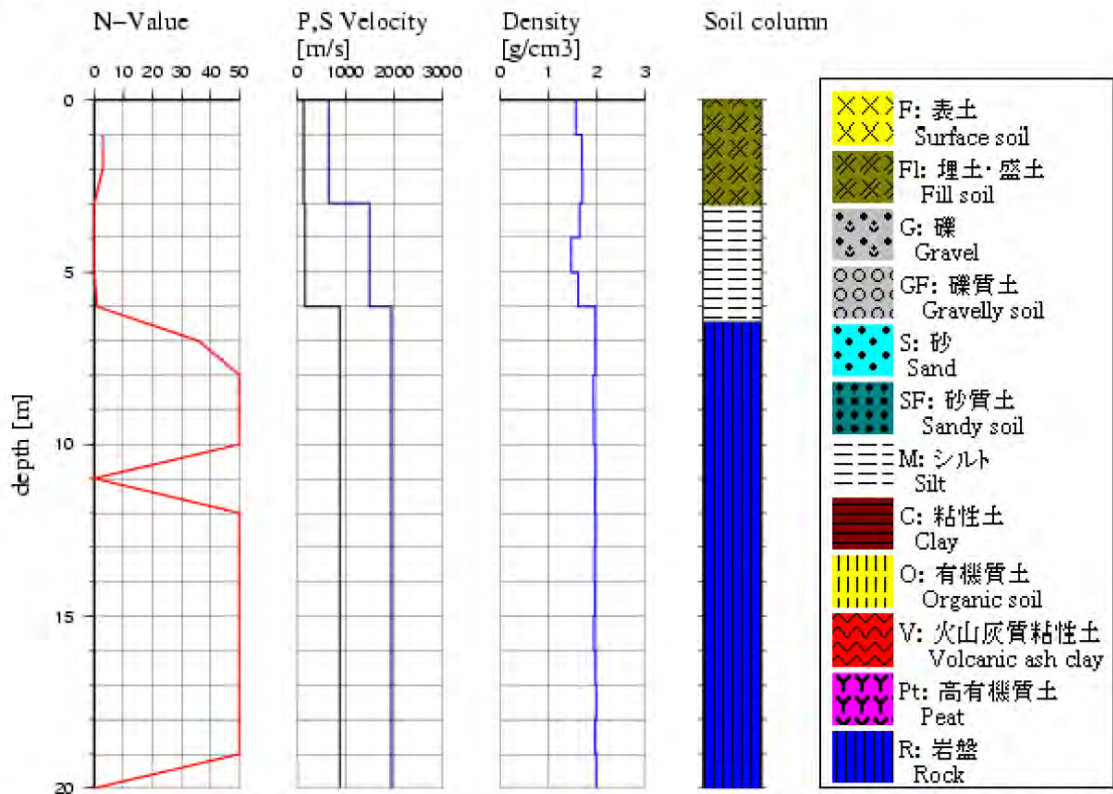
図1. 3-2 K-NET (仙台) の観測波形



2014/11/6

MYG012

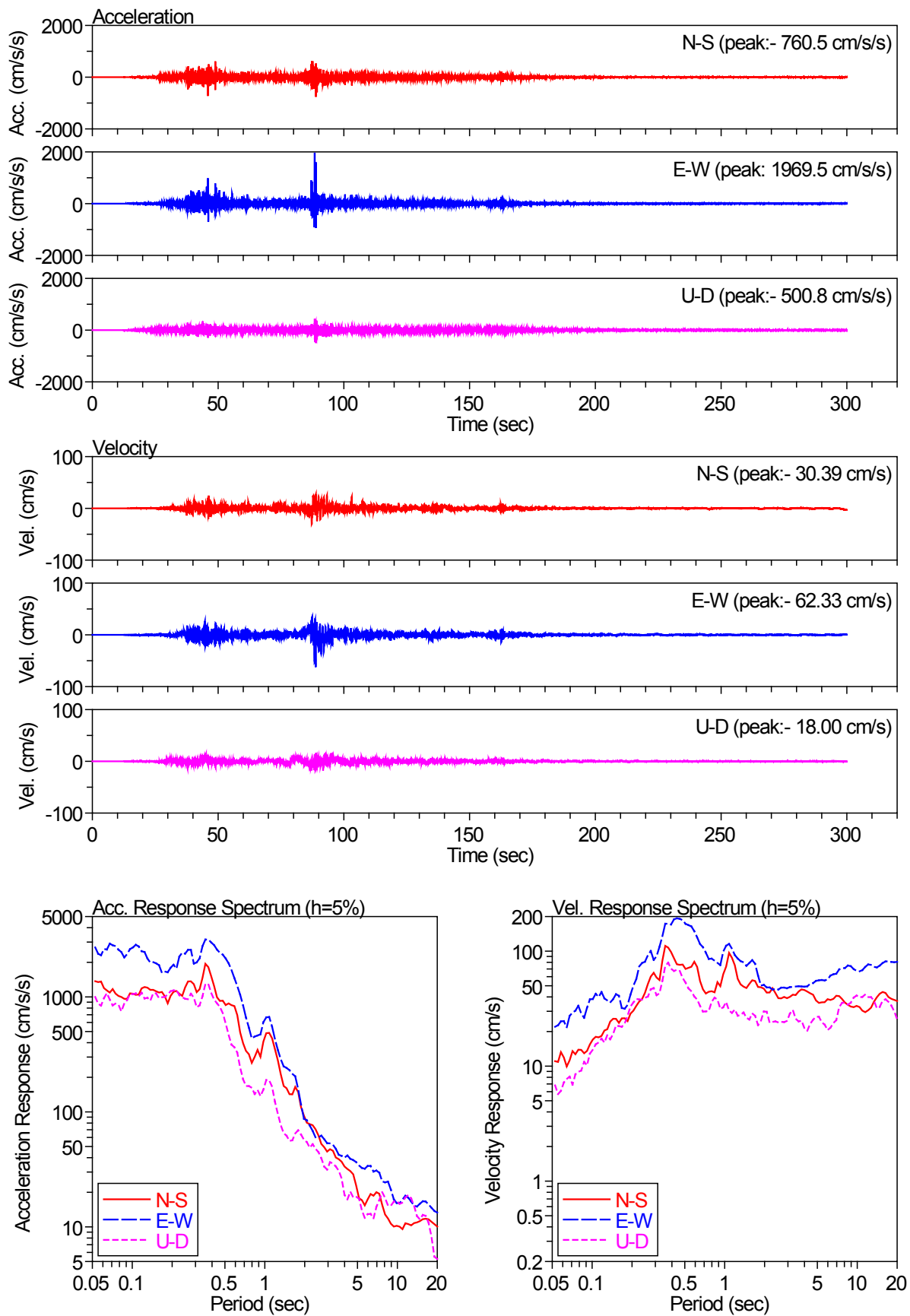
土質図



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1. 3-3 K-NET (塩釜) の観測地点と土質柱状図



2011/03/11 14:46:35, Site: MYG012, JMA Intensity: 6.0

図 1. 3 - 4 K-NET (塩釜) の観測波形

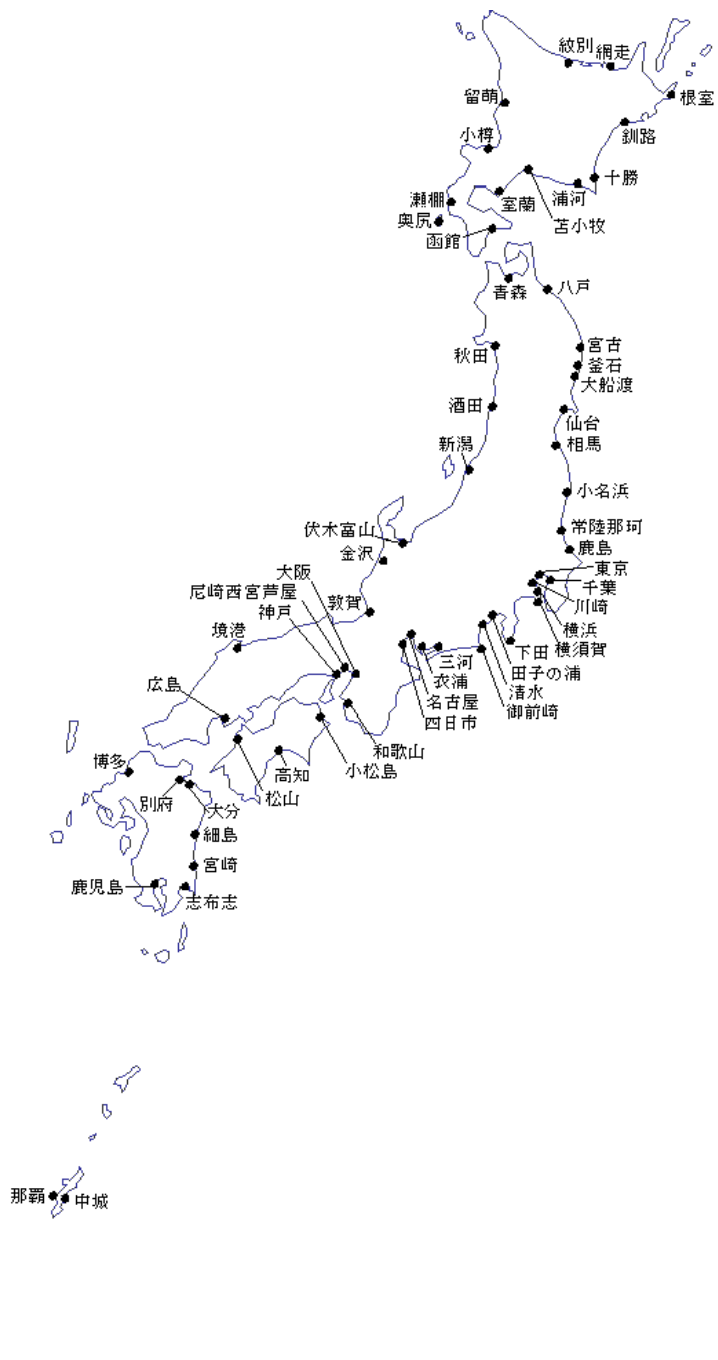
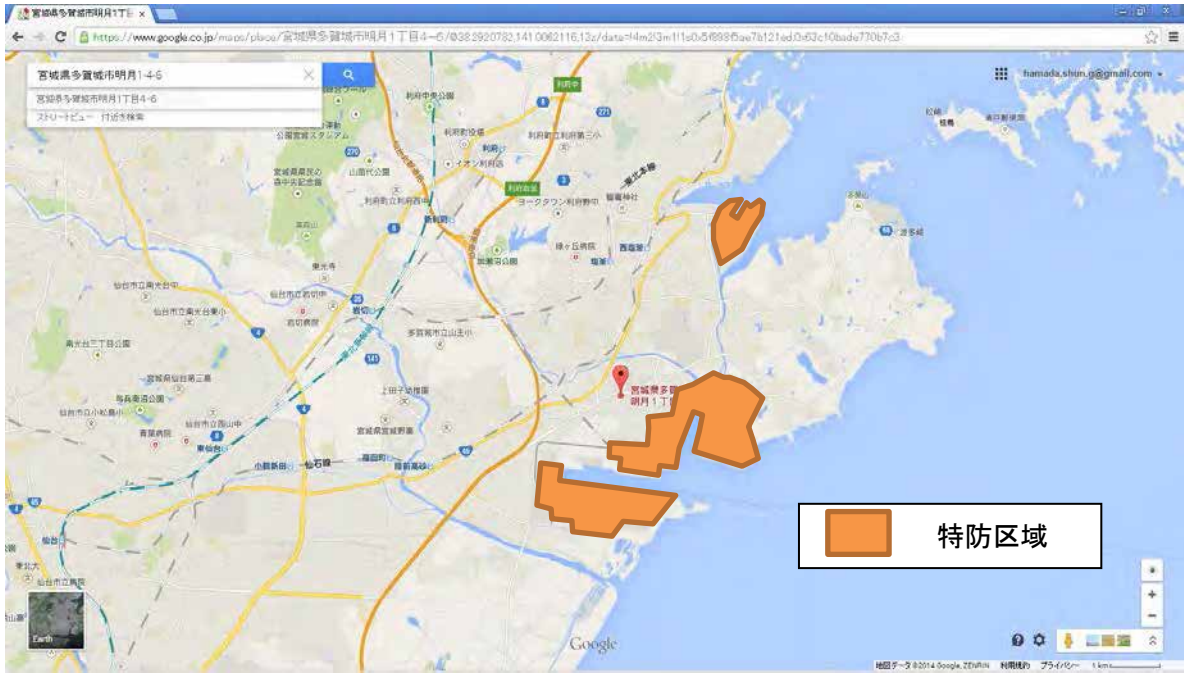


図 1. 3 - 5 港湾地域強震観測地点



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

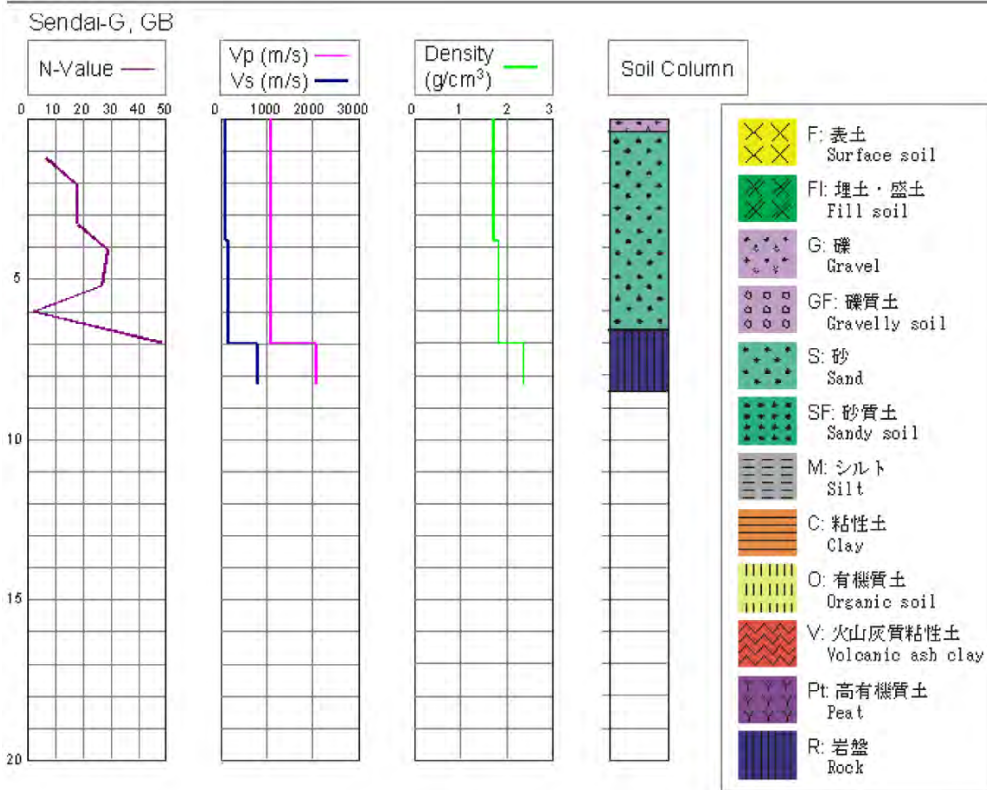
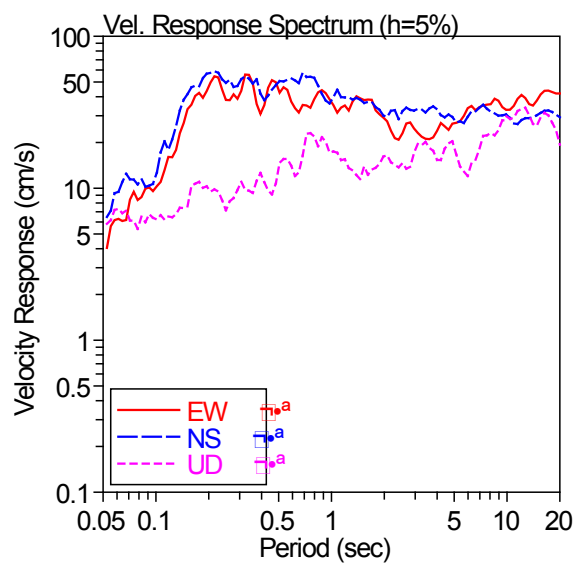
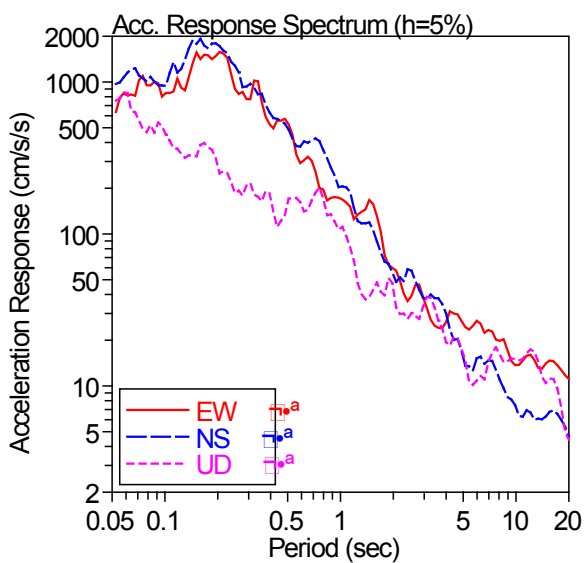
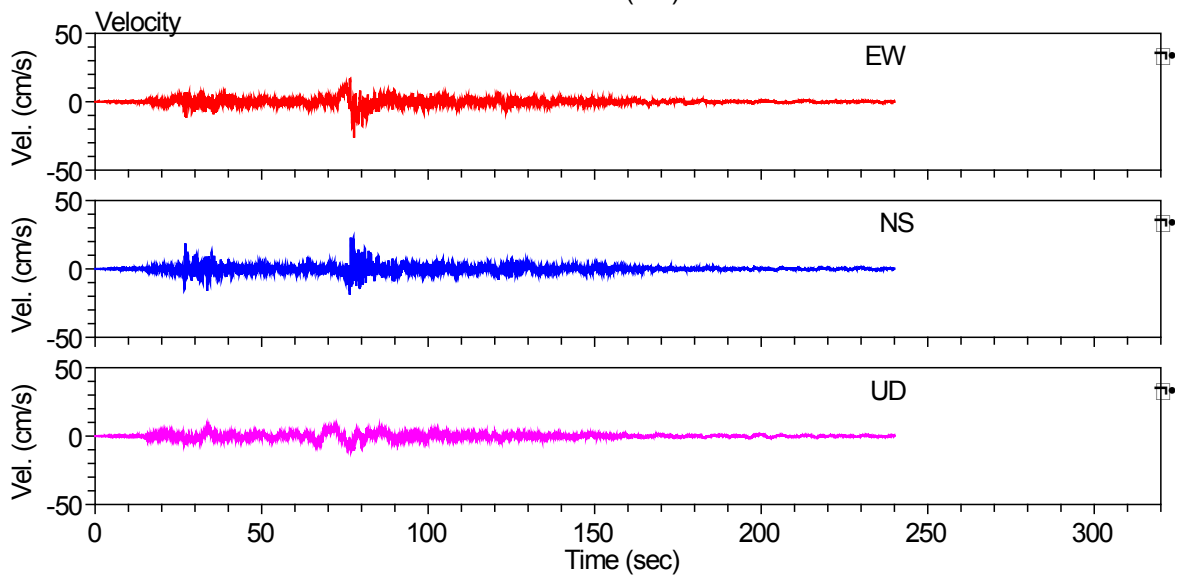
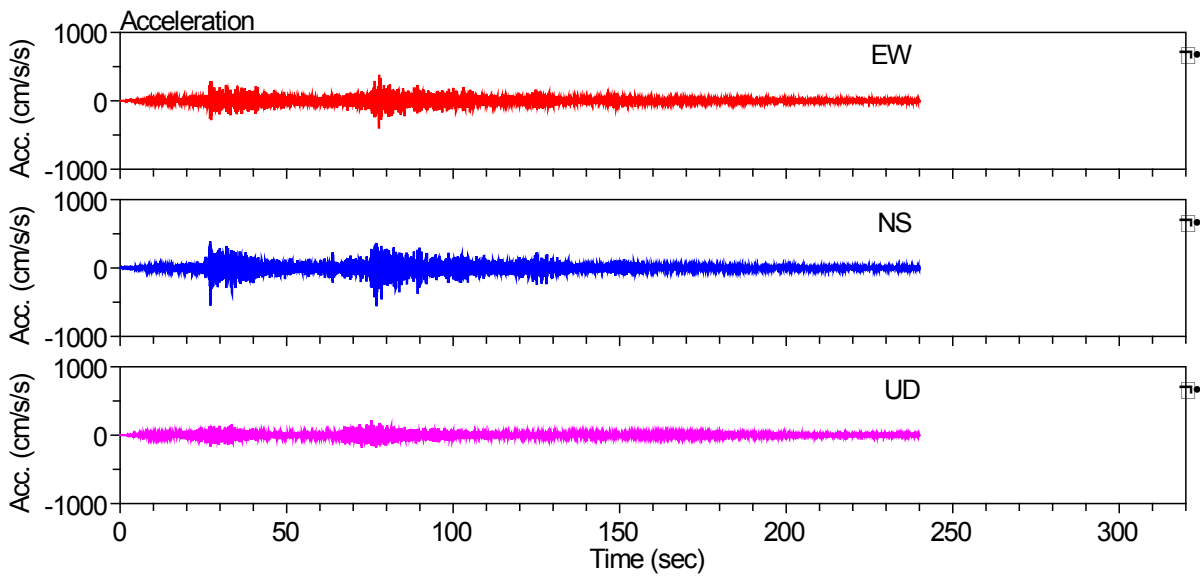
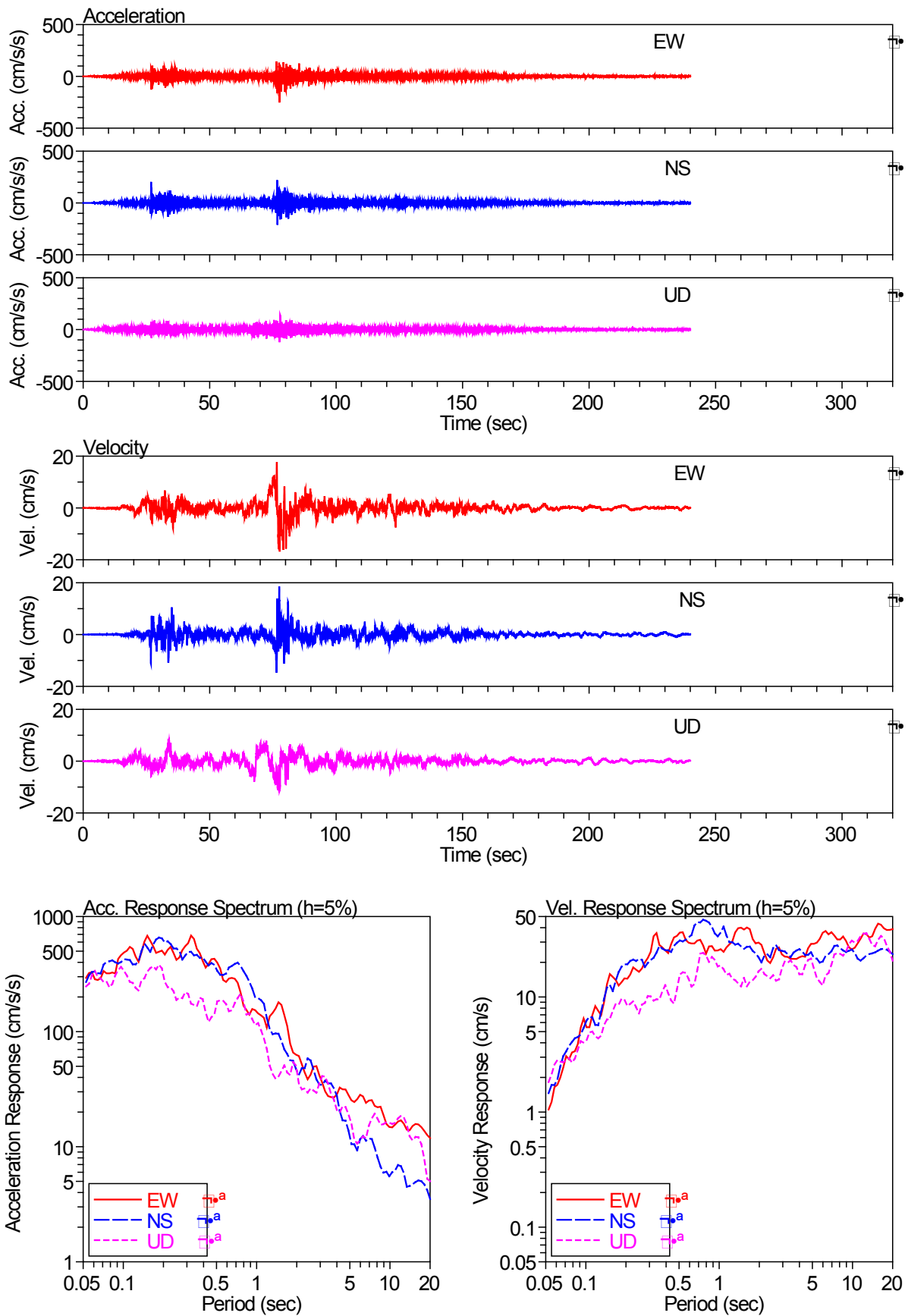


図 1. 3-6 港湾地域強震観測 (仙台) の観測地点と土質柱状図



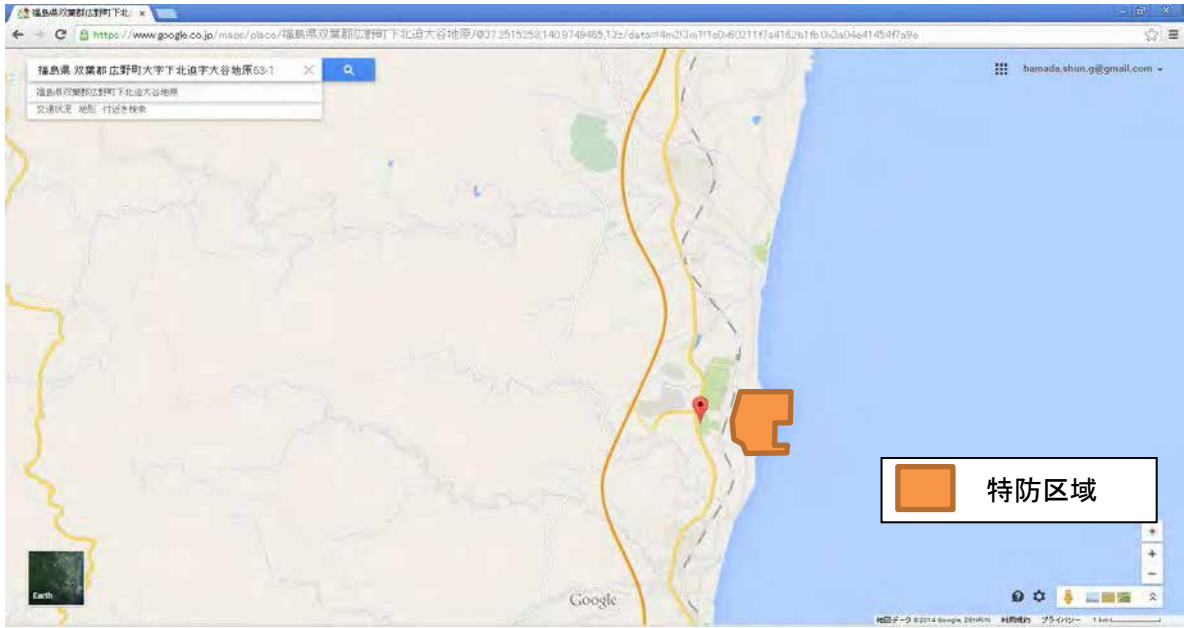
0000/00/00 00:00, Site: F-2959, JMA Intensity: 5.3

図 1. 3 - 7 港湾地域強震観測 (仙台) の観測波形 (地表)

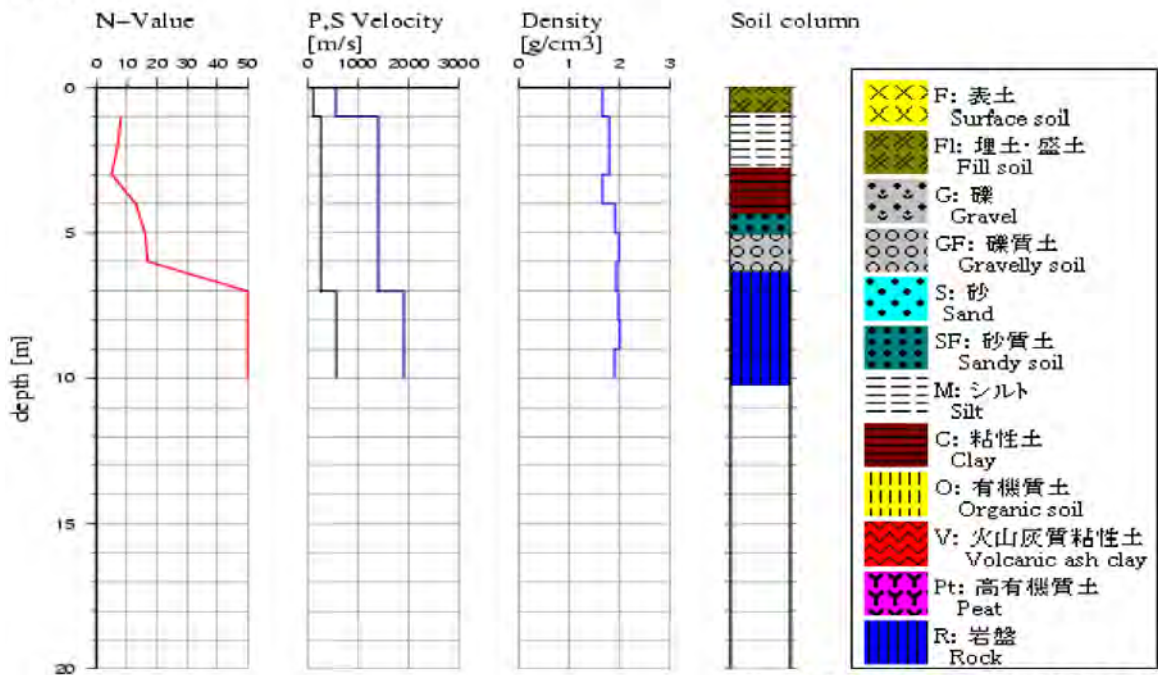


0000/00/00 00:00, Site: F-2958, JMA Intensity: 5.0

図1. 3-8 港湾地域強震観測(仙台)の観測波形(工学的基盤)



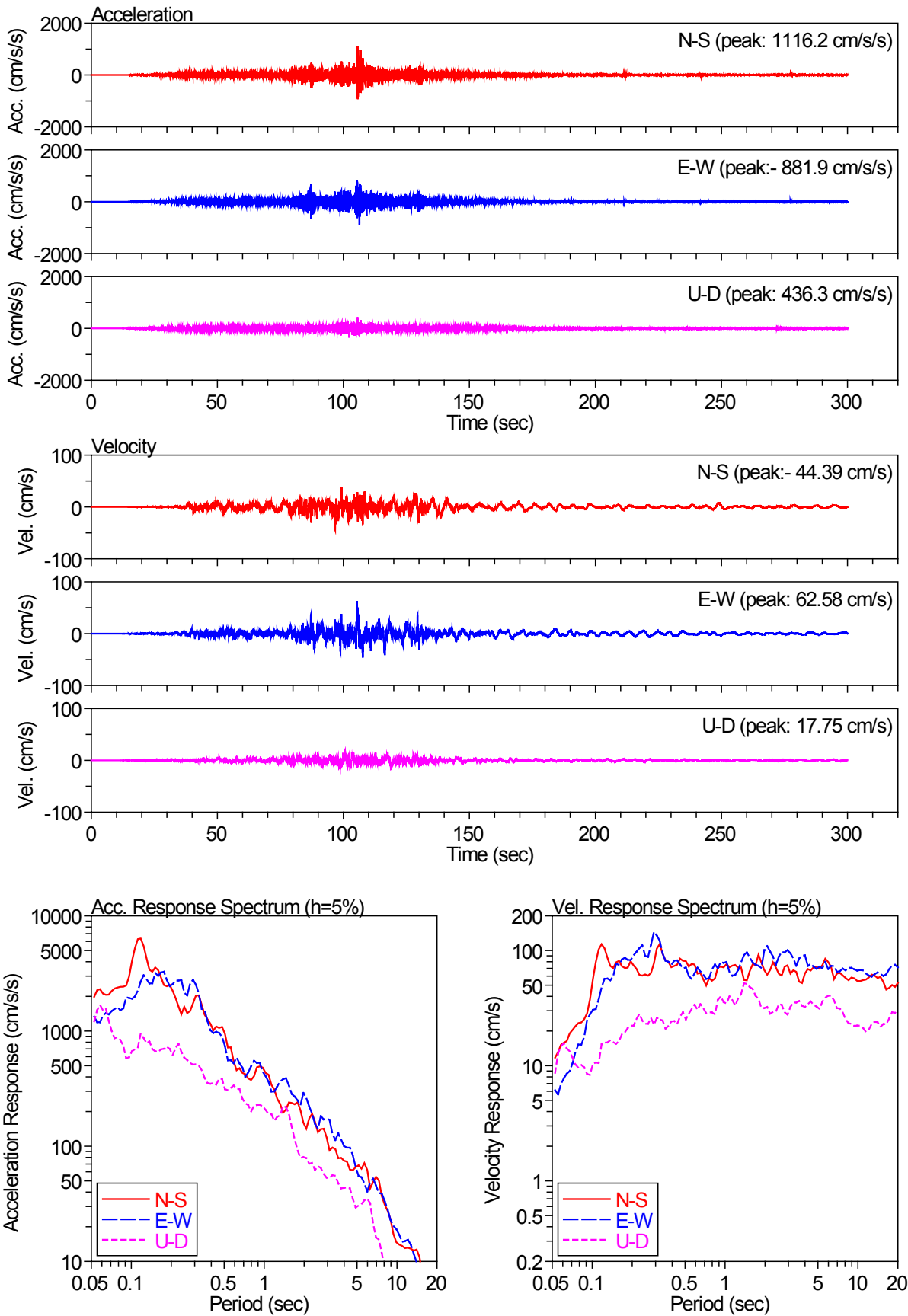
土質図



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 1. 3-9 K-NET (広野) の観測地点と土質柱状図



2011/03/11 14:46:42, Site: FKS010, JMA Intensity: 5.9

図 1. 3 - 1 0 K-NET (広野) の観測波形

1. 4 地盤の地震応答解析【地表→工学的基盤】

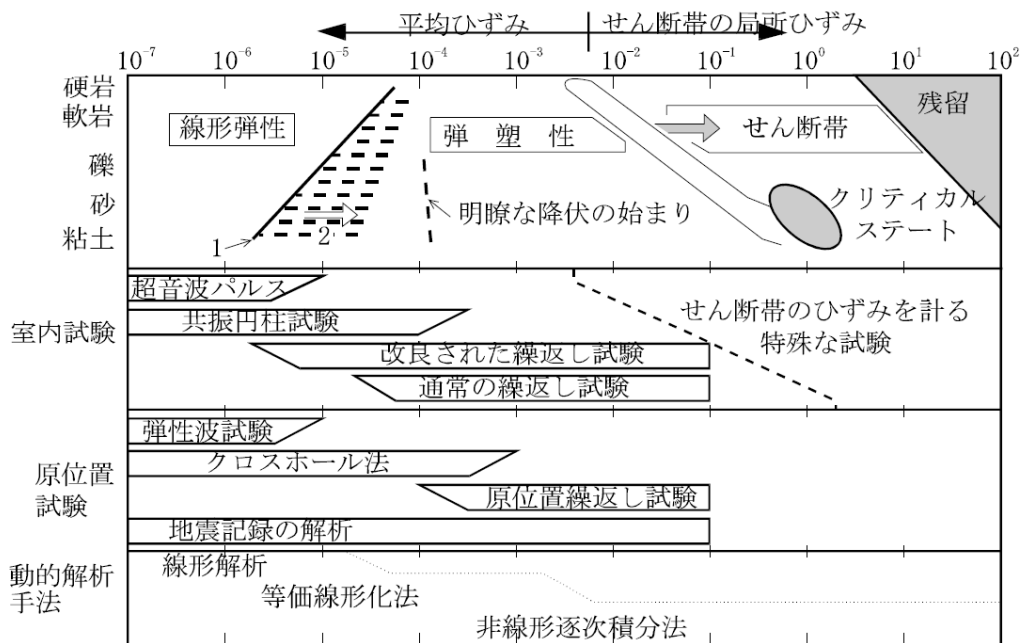
特防区域直近の地表面観測波形から、逆解析により工学的基盤での時刻歴波形を作成する。逆解析での地震応答解析は、周波数領域の等価線形解析法を採用し、プログラムコードとしては、『DYNEQ』(A computer program for DYNAMIC response analysis of level ground by Equivalent linear method) を採用する。これは、後述する『YUSAYUSA-2』は、逐次積分による計算であり、観測波形をそのまま入力することはできないためである。(解析手法と適用範囲については図1. 4-1参照。)

解析結果については、後述する工学的基盤から地表面への非線形解析の入力波形として用いると共に、前述した地盤のモデル化にフィードバックすることにより、解析モデルの精緻化をはかる。

なお、特防区域直近に基盤観測波形がある場合は、解析による推定波形と比較した上で、どちらを対象地区における非線形解析の入力波形として採用するかを決める(1. 3節参照)。

1. 5 地盤の地震応答解析【工学的基盤→地表】

前述した工学的基盤面の加速度波形を入力として地震応答解析を行い、対象地区の地表面の加速度波形を求める。地震応答解析は、全応力逐次非線形解析及び有効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』を採用する。また、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う。これら3手法による解析を比較することで、それぞれの結果の確からしさを担保する。



1. 単調荷を受ける正規圧密土
2. 過圧密比OCRと繰返し数の増加に伴い増加

図1. 4. 1 地盤材料の歪み依存性と解析手法との関係
[吉田望(地盤の地震応答解析, 鹿島出版会, 2010)]

1. 6 解析結果のとりまとめ

地震応答解析の結果については、最大応答値の深度分布を整理し、解析結果の妥当性について確認する(図1. 6-1参照)。

また、地震応答解析によって得られた地表面の時刻歴波形(図1. 6-2参照)から、計測震度、地表最大加速度、地表最大速度等の指標値について整理する。東北地方太平洋沖地震の際に観測・整理された震度分布等と今回の結果を比較し、その妥当性について確認する。

さらに、速度応答スペクトル及び加速度応答スペクトルを計算し、それぞれについて整理する。

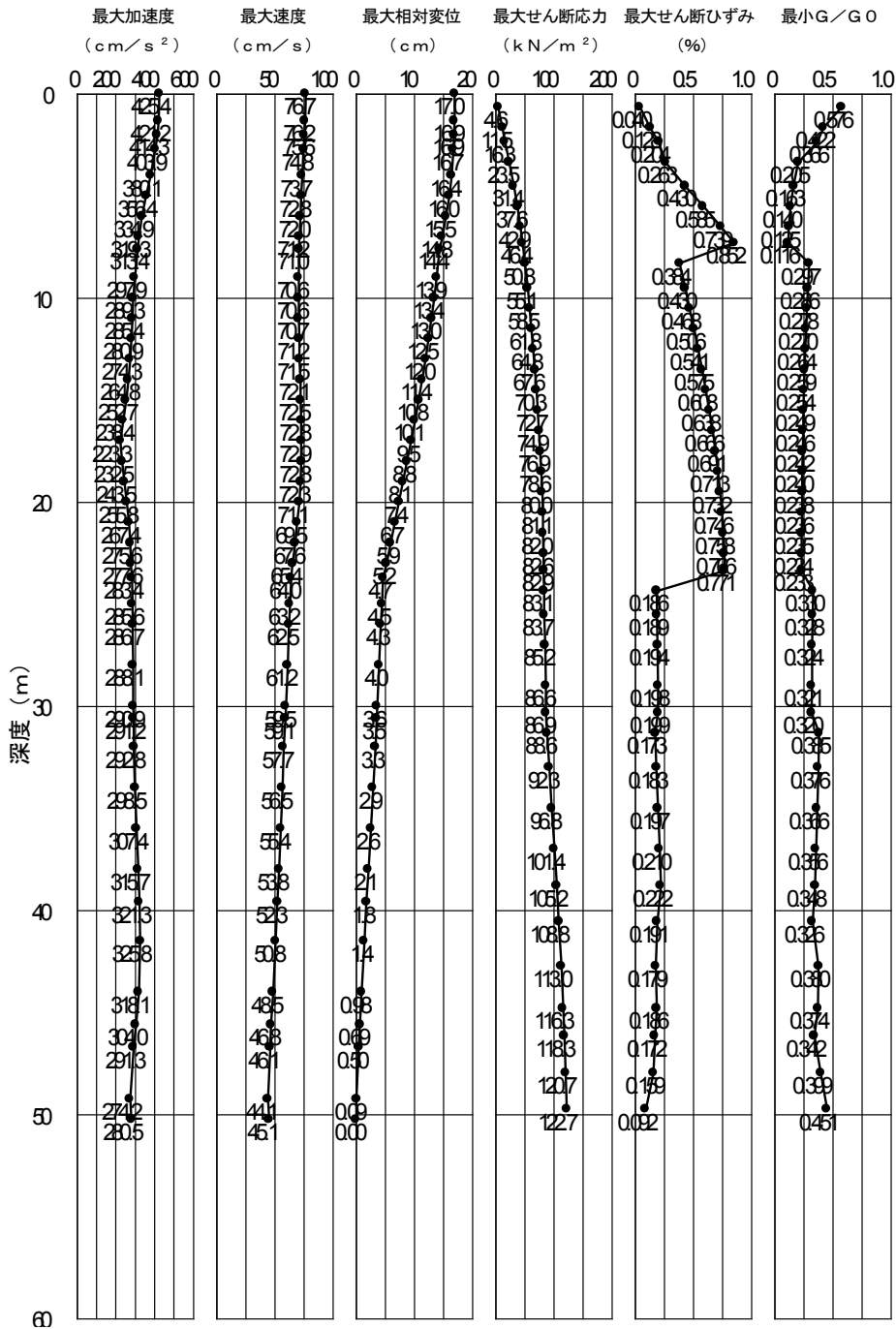


図1. 6-1 最大応答値の深度分布の例

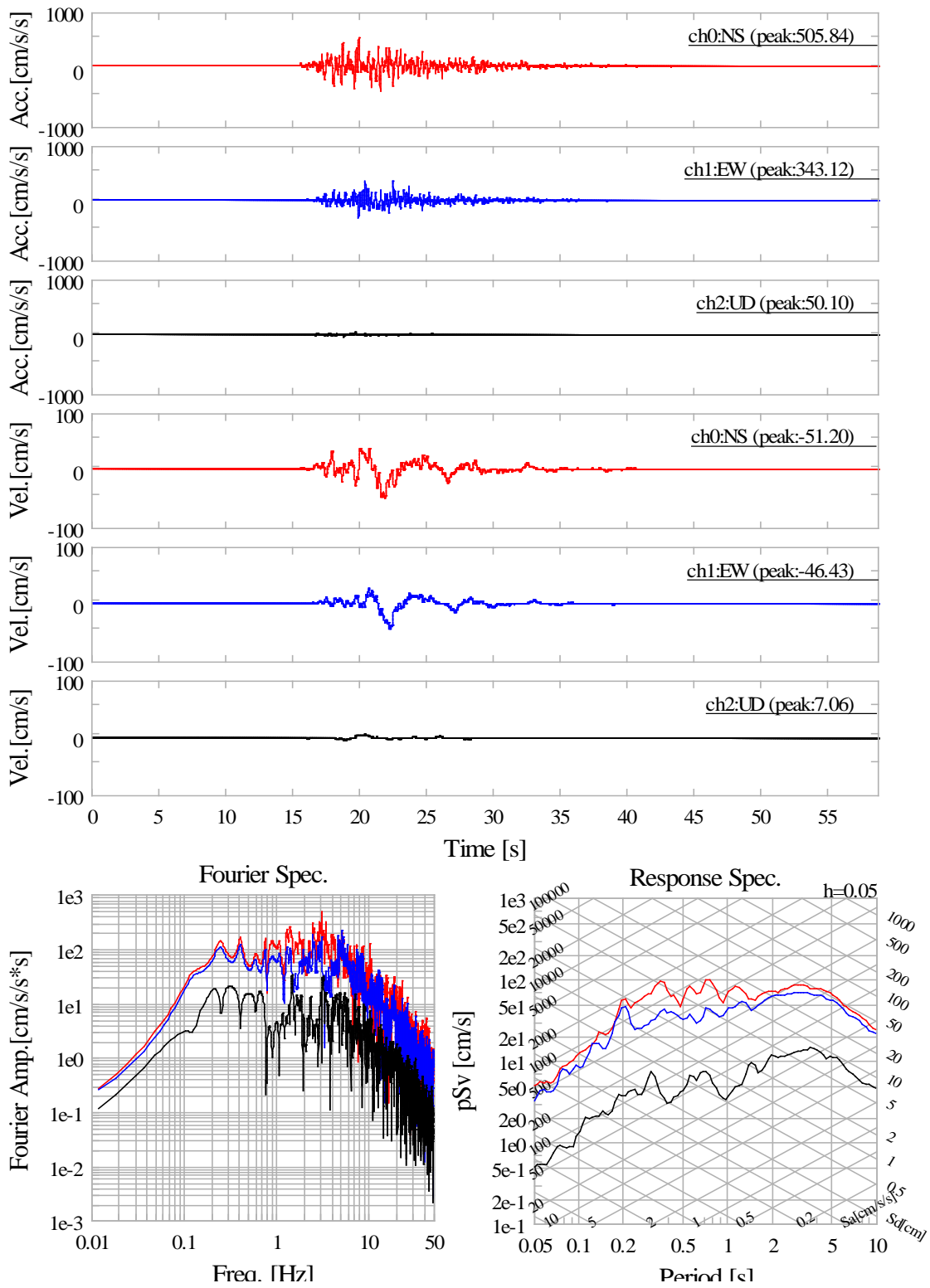
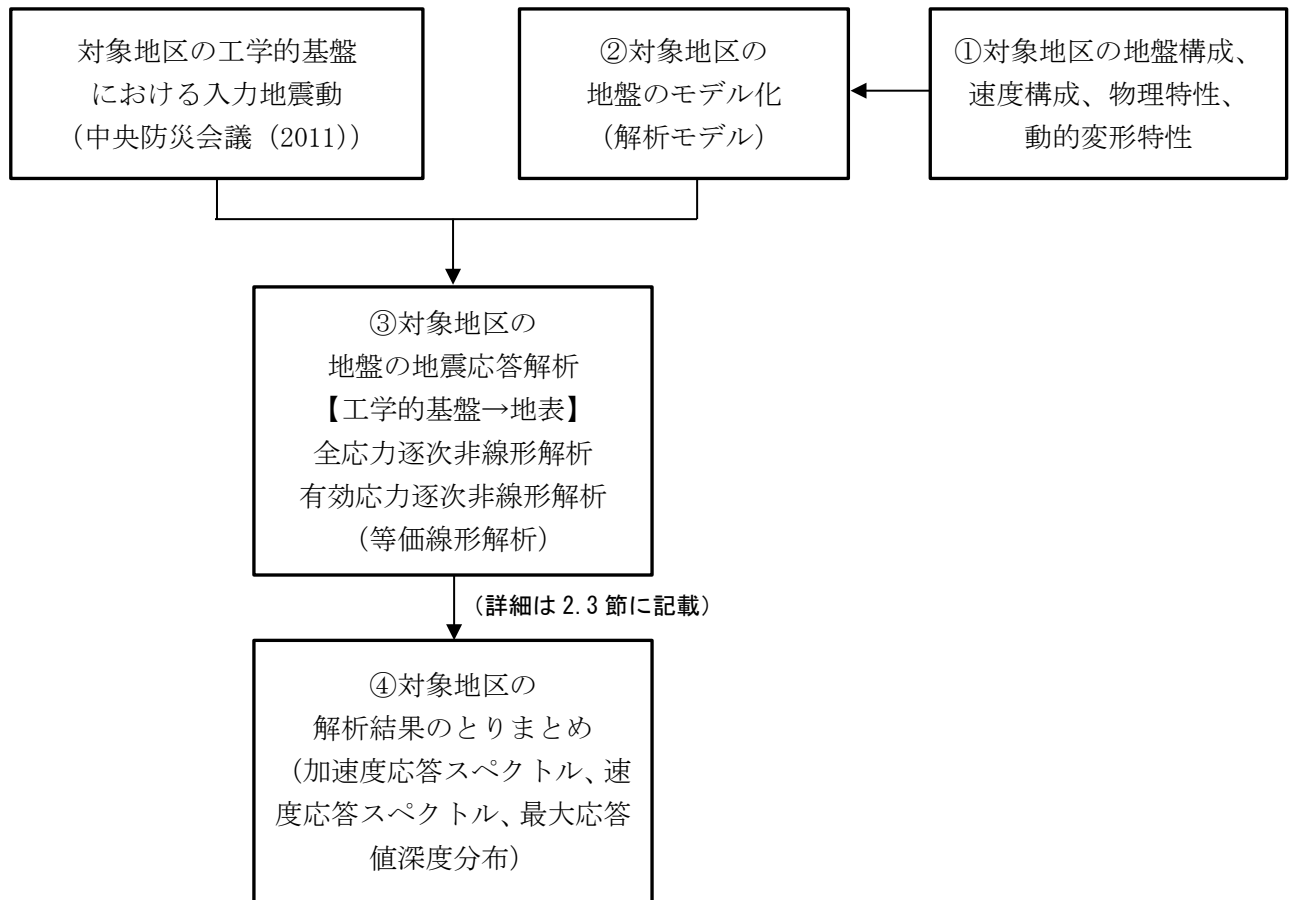


図1. 6-2 地震応答解析結果の整理の例

2 南海トラフ地震の地表面地震波形の解析

以下のような手順により、南海トラフ地震の想定地震波形を作成する。



2. 1 地盤構成、速度構成、物理特性、動的変形特性の検討

1. 1節で述べたのと同様の手法を用いて、地盤構成、物理特性、動的変形特性について検討を行い、定数を設定する。

2. 2 地盤のモデル化 (解析モデル)

1. 2節で述べたのと同様の手法を用いて地盤のモデル化を行い、1次元及び2次元の解析モデルを作成する。作成した1次元の解析モデルについては地震応答解析に、2次元の解析モデルについては地盤及び構造物の解析に用いる。

2. 3 地盤の地震応答解析【工学的基盤→地表】

中央防災会議による南海トラフ地震の工学的基盤における加速度波形を入力として地震応答解析を行い、地表面の加速度波形を求める。地震応答解析は、全応力逐次非線形解析及び有効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』を採用する。また、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う。これら3手法による解析を比較することで、それぞれの結果の確からしさを担保する。

なお、中央防災会議の公開波形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るため、統計処理上の癖・バラつきが生じる可能性がある。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、工学的基盤面での波形を再解析することでその確からしさを担保する。

2. 4 解析結果のとりまとめ

地震応答解析の結果については、最大応答値の深度分布を整理し、解析結果の妥当性について確認する。

また、地震応答解析によって得られた地表面の時刻歴波形から、計測震度、地表最大加速度、地表最大速度等の指標値について整理する。

さらに、速度応答スペクトル及び加速度応答スペクトルを計算し、それぞれについて整理する。

中央防災会議より公表されている南海トラフ地震の震度分布（図2. 4-1参照）については、南海トラフの巨大地震モデル検討会において、ボーリングデータや観測データとの比較により震度分布の算出に用いた震度増分の妥当性が確認されている。このため、解析結果及び解析に用いたモデルの妥当性については、公表されている震度分布との比較により結果の妥当性を確認する。

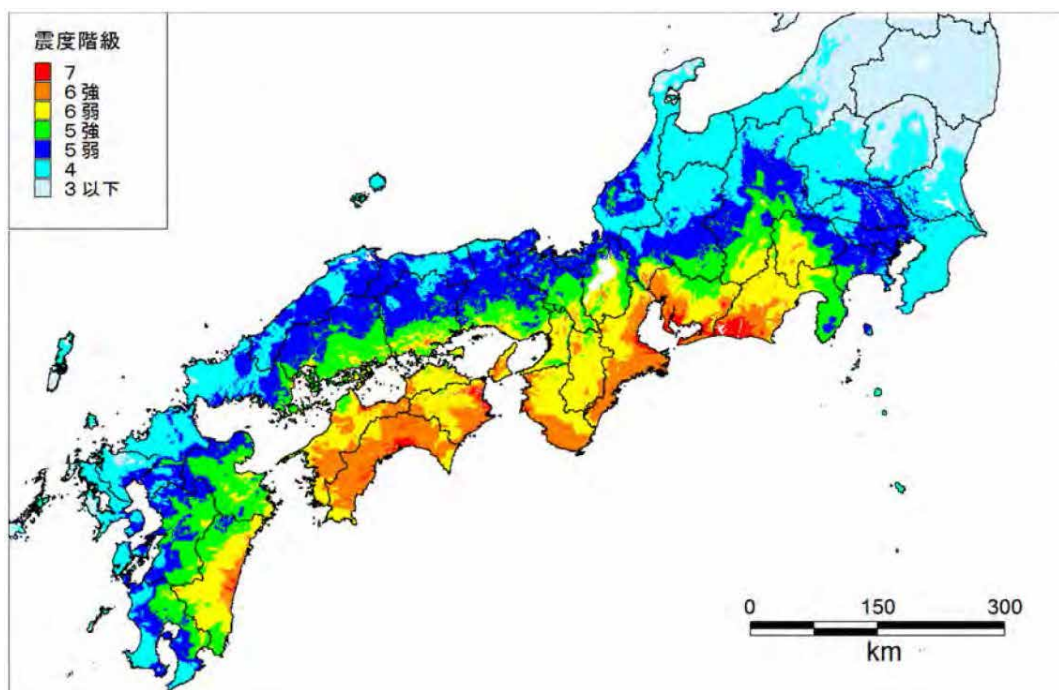


図2. 4-1 南海トラフの巨大地震による震度分布

出典：南海トラフの巨大地震モデル検討会（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