

境港の液状化地点での地震動に及ぼす深い地盤の増幅特性の影響

森 伸一郎¹・曾我部 繁之²

¹愛媛大学工学部環境建設工学科 助教授
(〒790-8577 愛媛県松山市文京町3)

E-mail: mori@chime-u.ac.jp

²愛媛大学大学院環境建設工学専攻 大学院学生
(〒790-8577 愛媛県松山市文京町3)

E-mail: shige19800315@hotmail.com

2000年10月6日の鳥取県西部地震の際に液状化した地盤で観測された地震動記録に対して、有効応力法による非線形応答解析を行うことにより、地震動に及ぼす液状化と深い地盤構造の増幅特性の影響が研究される。この観測された水平動の加速度記録には、主要動以降に長周期成分が卓越することとスパイク状の形状を有するピークを持つことの2つの特徴がある。近傍の硬質地盤で得られた地震記録を入力地震動として用いて、表層390mの地盤モデルが解析される。その結果、深い地盤による増幅は大きいこと、大きく増幅された地震動により約5mの深さで液状化に達するが、その厚さは薄く地震動への影響は大きくないこと、しかし、スパイク状の形状のピークは液状化現象に起因することなどが明らかにされる。

Key Words : liquefaction, ground motion, effective stress analysis, geological structure, amplification

1. はじめに

本論文は、鳥取県西部地震の際に液状化した地盤で観測された地震動記録に対して、有効応力法による非線形応答解析を行うことにより、地震動に及ぼす液状化と深い地盤構造の増幅特性の影響を明らかにしたものである。

2000年10月6日に発生した鳥取県西部地震では、境港市の多くの埋立地では液状化が生じ¹⁾、またその内の一地点で地震動が観測された。この記録は、主要動以降の後続位相で、やや長周期成分が卓越し、スパイク状のピークを有するという2つの特徴を持つ。この特徴に着目して、これまでいくつかこの地震記録に関して地震応答解析が行われている^{2), 3)}。しかし、地震応答解析に用いる解析モデルと地震波については課題が残っていると考えられた。著者らは、表層72mをモデル化し、地盤物性と入力パラメータの再検討を行うとともに、近くの硬質地盤で観測された地震動を入力地震動として用い、その振幅を単純調整して液状化の影響を分析したが、トータルモーションとして1.8倍にすると、観測記録をよく説明できることを明らかにした^{4), 5)}。

この1.8倍という倍率は深い地盤における増幅や多次元の増幅現象などが想定されるものの、深い地質

構造に関する情報がなければ合理的な説明はできない。しかし、最近、境港周辺の深い地盤構造が明らかにされる⁶⁾とともに、地震観測地点の表層72mについて詳細な地盤調査が行われた⁷⁾。そこで、この深い地盤構造と表層の地盤物性に基づいて地盤モデルを再構築して、有効応力法による非線形地震応答解析を行い、地表の地震動に及ぼす深い地盤構造による増幅特性と液状化の影響を検討した。

2. 液状化の状況と地震観測記録

図-1に2000年鳥取県西部地震で発生した液状化地点⁷⁾と2つの地震観測地点を示す。港湾地域強震観測の境港観測地点⁷⁾(以下S地点と略す)は、弓ヶ浜半島の北端の昭和町という埋め立て地に位置している。地震時にこの地点では噴砂は見られなかったが、周辺では約100m離れた南西、南東、北西に最も近い噴砂が観察された。S地点は地震記録と地盤資料が地震直後に公開されており、さらに最近ではPS検層などの新たな地盤情報が公開された⁷⁾。

もう1つの地震観測地点は、防災科学研究所の基盤強震観測網Kik-net⁸⁾の美保関観測地点(地点コードSMNH10, ここではM地点と呼ぶ)である。この地点は表層4 mは $V_s=500$ m/s, 表層30 mの平均は

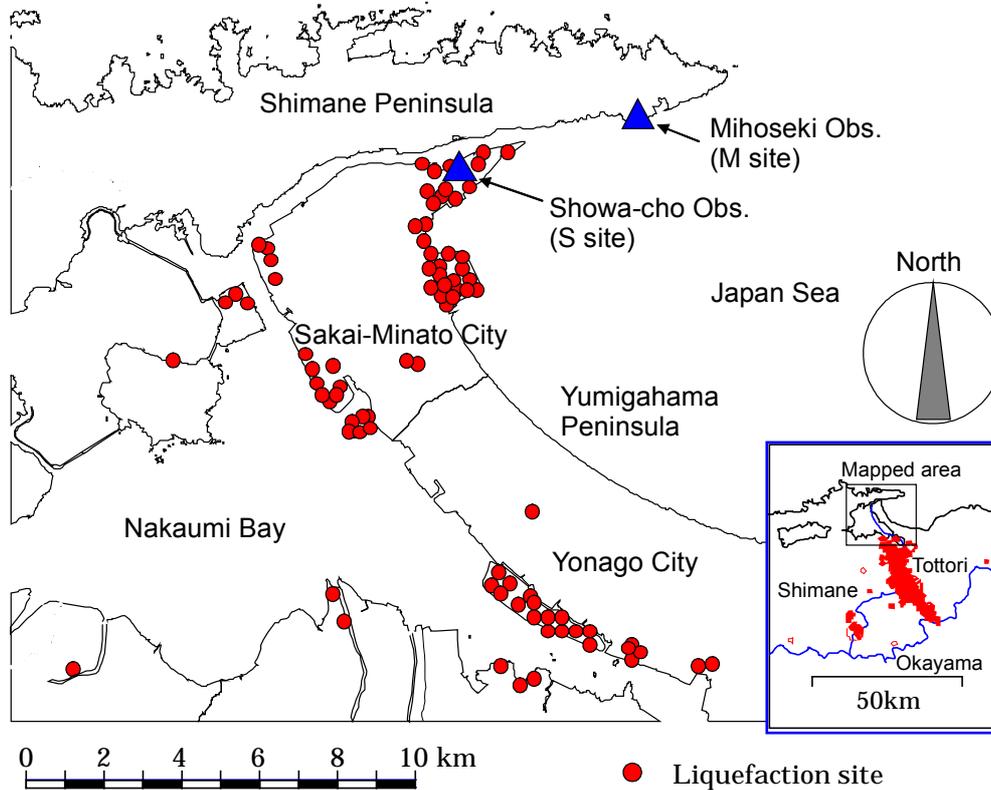


図-1 2000年鳥取県西部地震で発生した液状化地点⁷⁾と2つの地震観測地点

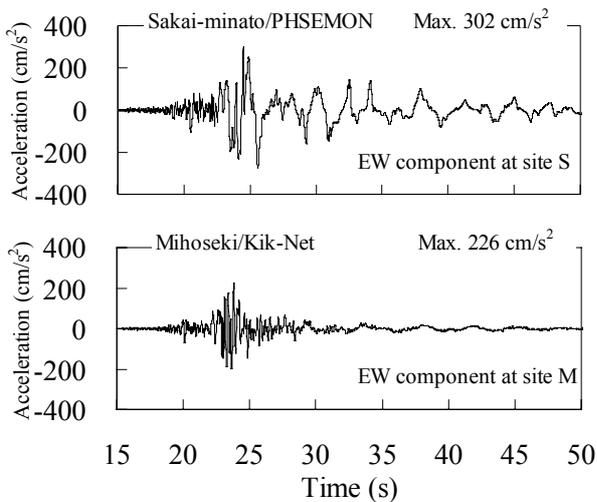


図-2 S地点とM地点で観測された水平加速度の時刻歴のEW成分

$V_s=1000$ m/sという硬質地盤である。両観測地点は約4.5 km離れているが、震源から概ね北に位置する2点の震央距離は約32 kmでありほぼ等しい。M地点の加速度記録が、後のS地点の地震応答解析に用いられる。

図-2にS地点とM地点で観測された水平加速度の時刻歴のEW成分を示す。最大加速度はS地点で 302 cm/s^2 、M地点で 226 cm/s^2 であり、両地点ともEW成分が卓越している。S地点の観測記録の開始時刻から5.4秒まで0を加えた。これは、M地点の観測記録を入力した解析結果による地表の応答と比較をする際に位相を合わせるためである。

S地点の加速度記録にはM地点の記録と比較して次の二つの特徴が認められる。すなわち、M地点では、22～26秒に見られる主要動部分では短周期成分が卓越し、それに続く後続部分では小振幅の長周期成分が見られるのに対して、S地点では、主要動部分では急激に長周期成分が卓越しており、後続部では振幅の大きい長周期成分の卓越とスパイク状のピークを有する波形になっていることが特徴である。特にこのスパイク状のピークは表層地盤の液状化（サイクリックモビリティ）の影響と推察される^{2), 3), 4)}。S地点の記録は約0.55 Hz付近で卓越している。

3. 解析モデルと解析条件

(1) S地点の地盤

図-3にS地点の地盤柱状図を示す。図中のせん断波速度 V_s の分布は新たにPS検層により得られたものである。S地点は深さ0～4.8 mまでは平均N値6の緩い砂層があり、4.8～11.7 mまでは中位の細砂層があり、それから深さ41 mまでN値3～6の中位のシルト・粘土層が分布している。41 m以浅の平均 V_s は135 m/sであり軟弱な地盤である。63 m以深はN値50以上の層が分布する地盤構造をしている。先の解析では質量密度とせん断波速度はN値と土質名から推定した⁴⁾が、ここでは両方とも測定値を用いる。1.8～3.0 mのシルト層の土質は、下部に従い含水が多くなっているとの調査による記述があるので、本解析モデルにおける地下水面はこのシルト層の中間である深さ2.4 mとした。

深さ72 mまではボーリング調査により知られるが、

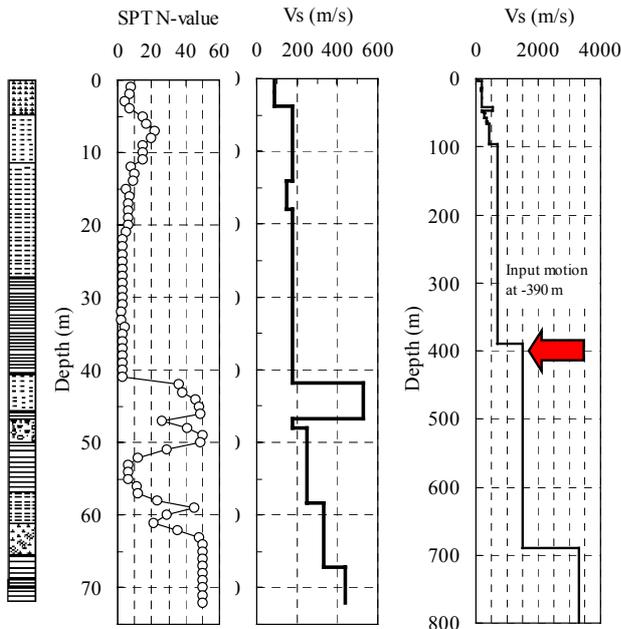


図-3 S地点の地盤柱状図とせん断波速度分布

それより深い地盤構造は、次のように推定した。吉川ら⁶⁾は、直線上に配置した地震計による余震観測、アレー微動観測、重力測定を行い、弓ヶ浜半島の深い地盤構造を決定した。図-4に深い地盤構造を示す。図-1のA-A'断面である。重力測定によるブーゲー異常に基づき大局的な基盤構造を把握し、余震観測のレイトレーシング解析により基盤の南側の急激なせり上がりを確認し、特にアレー微動観測の行われた4か所では、 V_s 、 V_p の速度構造が逆解析により得られている。4か所内の1地点（SSH地点）がS地点に近く、これを参考に、S地点の深い地盤構造を決定した。SSH地点では、深さ96.4 mで V_s が700 m/s、390 mで1500 m/s、690 mで3300 m/sの層上端がある。

S地点の地盤モデルでは、72 mから96.4 mまでは $V_s=440$ m/sであると仮定し、それ以深はSSHと同様とした。

(2) 解析方法とS地点の地盤物性

地震応答解析は有効応力法に基づく非線形解析により行った。解析プログラムはIaiら⁹⁾によって開発されたFLIPである。FLIPに組み込まれている構成モデルでは、応力ひずみ関係が双曲線型であり、サイクリックモビリティが表現でき、その際の繰り返しによる有効応力経路の原点方向への進展が制御されている。解析は非排水条件である。入力パラメータとして動的変形特性と液状化に関するものがある。これらのうち、弾性に関する物性はPS検層に基づいて決定した。密度 ρ は測定値である。弾塑性や液状化に関するパラメータはN値と土質名に基づき設定した。一次元応答を対象にしたモデル化とした。

動的変形特性を決定づけるパラメータに初期有効拘束圧 σ_{c0}' 、初期せん断剛性 G_0 、初期体積弾性係数 K_0 、減衰定数の上限値 h_{max} がある。本解析では

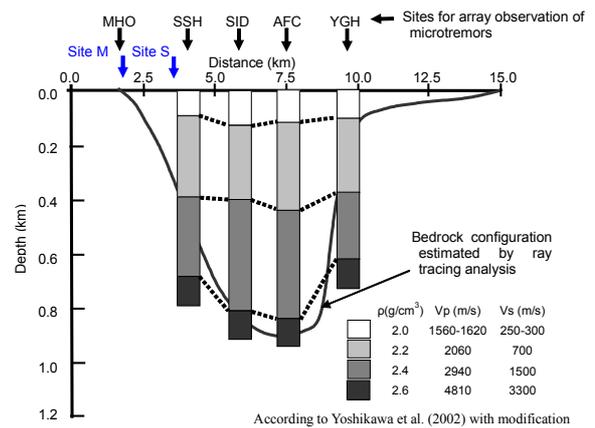


図-4 弓ヶ浜半島の深い地盤構造 (原図：吉川ら¹²⁾，再描画，一部修正)

$G_0=\rho Vs^2$ (ρ は密度)により初期せん断剛性を求めた。各層の初期せん断剛性は初期有効拘束圧に依存した形で表されるため、各層中央の初期せん断剛性が $G_0=\rho Vs^2$ になるように、解析パラメータにおける基準となる初期有効拘束圧を各層中央の初期平均有効拘束圧とした。体積弾性係数 K_0 は、次式より求めた。

$$K_0=(2/3)(1+\nu)/(1-2\nu)G_0 \quad (1)$$

ここで、ポアソン比 ν は全ての層で0.33とした。砂の内部摩擦角 ϕ_f については、まずN値から相対密度を推定し、既往の三軸試験の結果を参照して設定した¹⁰⁾。粘土の内部摩擦角については、30度とした。減衰定数の上限については、既往の研究結果^{11),12)}より砂質土のとき0.3、シルト・粘土のとき0.24と設定した。表-1に各土層の地盤物性を示す。

図-5に解析モデルで用いる各層のせん断剛性と減衰定数のひずみ依存特性を示す。ここに示す動的変形特性については、FLIPの要素シミュレーションで液状化パラメータを設定しない条件で解析を行い算出したものである。

また、液状化に関するパラメータは、初めに2つの繰り返し回数に対する液状化強度比を設定し、次に要素シミュレーションによりその2点を目標として適切なパラメータを試行錯誤的に設定するものである。目標とする液状化強度は、道路橋示方書¹³⁾の液状化判定式に用いられている海洋型と直下型に対応する液状化強度を、それぞれ繰り返し回数20回の液状化強度R20と繰り返し回数5回の液状化強度R5に対応するものとして考えた。表-2に液状化検討対象層の液状化強度R20、R5と解析で用いた液状化パラメータ(変相角、 $s1$ 、 $w1$ 、 $p1$ 、 $p2$ 、 $c1$)を示す。図-6に目標と要素シミュレーションによって求められた液状化抵抗曲線を示す。なお、液状化パラメータの設定では、パラメータの感度分析を行い目標となる液状化強度により近づけた。

また、レイリー減衰に関するパラメータは、 $\alpha=0$ 、 $\beta=0.001$ とした。ただし、 β を0.0001~0.005の間で感

表-1 各土層の地盤物性

No.	Depth of bottom (m)	Soil classification	Unit weight (Mg/m ³)	Mean SPT-N	Shear velocity (m/s)	Number of element division	Rigidity, G (MPa)	Bulk modulus, K (MPa)	Initial effective overburden pressure (kPa)	Upper limit of damping ratio h_{max}	Internal friction angle ϕ_r (deg.)
1	1.8	Sand	1.50	6	90	2	12.2	32	24.9	0.30	39
2*	3.8	Sand	1.66	6	90	2	12.2	32	24.9	0.30	39
3*	11.7	Fine sand	1.88	16	180	3	60.9	159	55.1	0.30	41
4*	14.0	Silt	1.88	9	180	1	60.9	159	88	0.24	38
5*	18.0	Silt	1.76	6	150	2	39.6	103	107	0.24	37
6*	27.9	Silt	1.69	4	180	3	55.0	143	143	0.24	37
7	41.8	Clay	1.63	3	180	4	53.0	138	200	0.24	30
8	46.7	Sand	1.95	43	530	2	548.0	1,429	250	0.30	41
9	48.1	Clay	1.77	34	180	1	57.3	149	271	0.24	30
10	51.3	Gravelly sand	2.01	43	250	1	126.0	329	286	0.30	40
11	58.3	Clay	1.57	11	250	2	98.0	256	313	0.24	30
12	62.9	Sandy silt	1.96	33	330	1	213.0	555	344	0.24	39
13	67.2	Sand	1.96	50	330	1	213.0	555	375	0.30	40
14	72.0	Clay	2.01	50	440	1	389.0	1,014	408	0.24	30
15	96.4	Clay and sand	2.0		440	5	387.0	1,009	516	0.30	45
16	390	Firm soil	2.2		700	20			Vp=2,060 m/s as reference		
17	690	Rock	2.4		1,500	Viscous boundary			Vp=2,940 m/s used in viscous damper		

Note: Poisson's ratio = 0.33 (for static analysis), Porosity = 0.3, Cohesion = 0 for all layers except two lowest layers.

Number of elements = 51

* Layers No.2 to 6 are considered as liquefiable soil layers are modeled with liquefaction parameters.

Layer 16 and 17 are modeled as linear elastic medium. Layer 17 is modeled into viscous boundary as dash pots.

表-2 液状化検討対象層の液状化強度と解析で用いた液状化パラメータ

No.	Depth (m)	Soil classification	Liquefaction resistance CRR			Model parameters				
			R ₂₀	R ₅	PTA ϕ_p'	S1	W1	P1	P2	C1
2	3.8	Sand	0.21	0.29	28	0.005	6.0	0.5	1.0	2.2
3	11.7	Fine sand	0.29	0.48	28	0.005	8.5	0.7	1.0	3.0
4	14.0	Silt	0.30	0.49	28	0.005	13.0	0.6	1.0	3.0
5	18.0	Silt	0.24	0.34	28	0.005	9.5	0.6	1.0	2.3
6	27.9	Silt	0.22	0.31	28	0.005	8.0	0.5	1.0	2.2

Note PTA: Phase transmission angle

R20 and R5 are determined as liquefaction resistance ratios for subductionzone earthquake type and internal crustal earthquake type, respectively, according to Seismic Standard for Highway Bridge of Japan Road Association.

度分析を行い、5Hz以上の高振動数領域での感度を調べて設定した。解析モデルは一列51要素であり下方に粘性境界を設定した。自重解析の後、全節点水水平方向自由、左右節点同一変位の条件で解析した。

(3) 入力地震動とその扱い

入力地震動については、前述の通りM地点の地表で観測されたEW成分の加速度時刻歴を用いた。観測記録は開始時刻が13時30分0秒で300秒間であり、初めの80秒間を解析に使用した。

M地点の地盤は、深さ4mまで硬い中砂が堆積しそれ以上は岩盤である。各地層のせん断波速度は、表層は500 m/s、深さ4 mで960 m/s、深さ14 mで1270 m/s、深さ140 mで1570 m/sの層が現れる。S地点のVs=1500 m/sの層とM地点の1270 m/sの層がほぼ対応するものと考え、S地点は深さ390 mの層を弾性層と

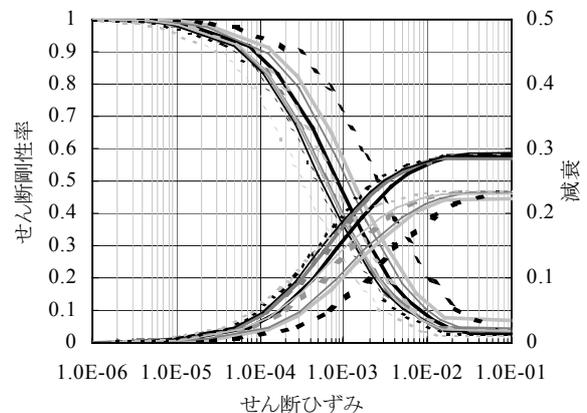


図-5 解析モデルで用いる各層のせん断剛性と減衰定数のひずみ依存特性

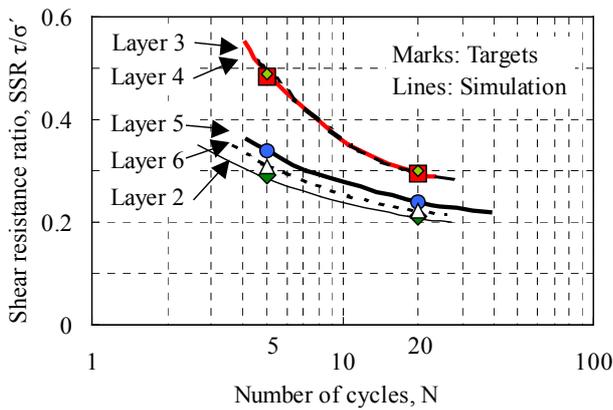


図-6 目標と要素シミュレーションによって求められた液状化抵抗曲線

考えそれより浅い部分をモデル化し、390 mで入射波入力させることとした。M地点の地表の観測波を入力として利用するが、M地点の表層14 mの増幅の影響は10 Hz以下では極めて小さかったので、無視できると考え観測波そのままを用いた。

S地点の地盤モデルでは、深さ390 mから現れる $V_s=1500$ m/sの層を粘性境界にモデル化して、M地点で観測された加速度時刻歴を用いて入射波として入力した。

(3) 解析ケース

解析は、上述の有効応力解析（ESAと略す）を基本ケースとし、それに加えて、次の2ケースを比較のために実施した。一つは液状化の影響を評価するためのもので、液状化可能層を液状化しないものとした解析、すなわち全応力解析（TSAと略す）であり、他の一つは、深い地盤の増幅特性の影響を評価

しようとするもので、72mの深さに入射波入力するESAである。

4. 解析結果

(1) 最大応答分布

図-7に加速度，相対速度，相対変位，せん断ひずみ，過剰間隙水圧比の最大応答分布を示す。

ESAの390 m入力の応答をTSAの390 m入力の応答と比較する。この差は、液状化の影響として評価される。過剰間隙水圧の応答が第一義的な違いである。深さ3-4 mで過剰間隙水圧比（EPWP比）が約1に達しており、完全液状化が極めて薄い層で起きたと評価される。このことは、実際の現地を観察された液状化の状況と整合する。深さ14-27 mのシルト層でもEPWP比が0.4-0.6に達している。

このEPPRの応答は、せん断ひずみ応答に反映される。ひずみ振幅はそれぞれの深さで、TSAの場合に0.15 %と0.2-0.3 %であるのに対して、ESAでは深さ3-4 mで5 %，深さ14-27 mで0.2-0.5 %にまで伸びている。さらに、このようなひずみ分布の違いは、直接的には変位分布の違いに見られ、深さ14-27 mの間での緩やかな増幅と深さ3-4 mにおける不連続な増幅がそれに当たる。

一方、加速度や相対速度の分布にはほとんど差異がない。一般に応答の最大値は、変位は長周期成分に、加速度は短周期成分に支配されるので、これらを併せて考えると、変位に現れた違いは液状化による軟化で長周期成分が増幅されたと考えられるが、そのような成分を除く他の短周期成分は、両者でほぼ同じであることを示唆している。また、27 m以深にどの応答にも差が見られないことを指摘しておく。

さて、ESAの72 m入力を390 m入力と比べる。

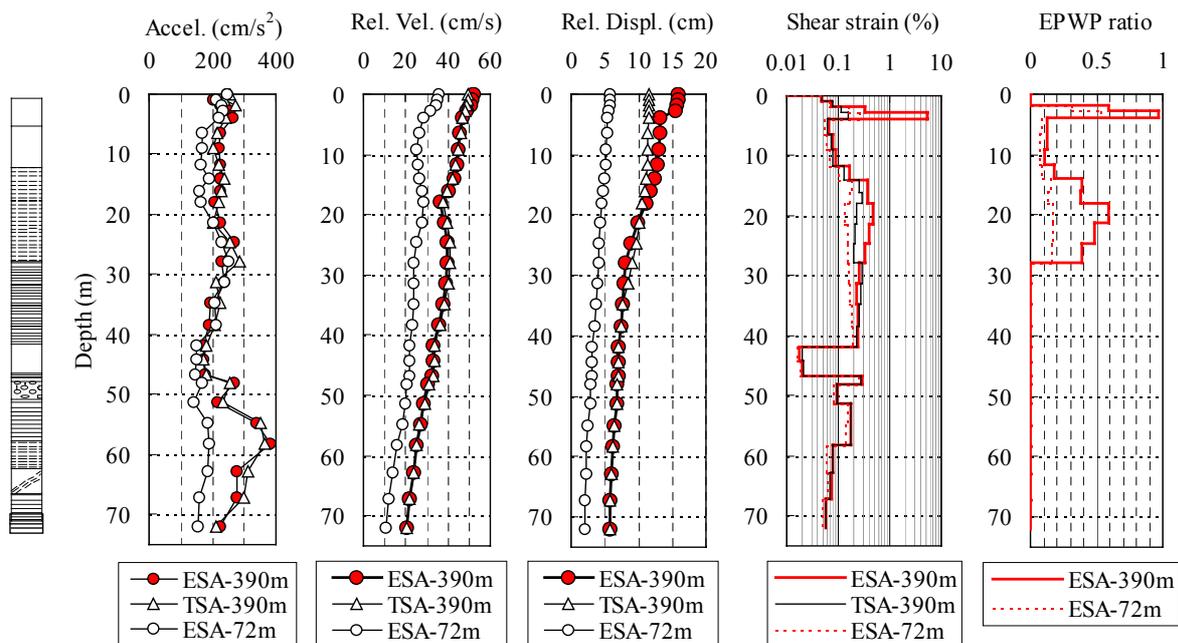


図-7 加速度，相対速度，相対変位，せん断ひずみ，過剰間隙水圧比の最大応答分布

EPWP比は72 m入力では深さ3-4 mで0.5，深さ14-27 mで0.06-0.16であり，390 m入力より小さい．せん断ひずみは，深さ3-4mで2.5 %，深さ14-27 mで0.14-0.18 %であり，390 m入力の場合のおよそ1/2である．42 m以深のせん断ひずみの大きさにあまり差が見られない．したがって，390 m入力は72 m入力の場合に比べて，表層27 m以浅のせん断ひずみを約2倍にさせる効果があることがわかる．速度や変位についても図では異なるが，これらは入射基盤に対する相対変位であるので，ここでは詳細な議論はしない．

加速度分布では50 m以深の値が約2倍である．しかし，それ以浅では1-1.3倍程度であり，特に地表ではほぼ同じ大きさである．これは，40 m以浅の地層におけるひずみ応答が大きくなることで減衰効果が発揮され，最大加速度値に大きく作用する短周期成分が減衰するためであると考えられる．

すなわち，粘性境界を用いた入射波入力による有効応力解析（ESA）では，深さ390 mへの入力は，深さ72 mへの入力の場合に比べて，地下72 m以上の表層では，加速度が約2倍になって入射されること，軟質な表層27 mではせん断ひずみが約2倍にする効果があることがわかる．

(2) 地表の加速度時刻歴

図-8に地表の加速度時刻歴を示す．加速度時刻歴について観測記録と解析結果を考察する．23秒までの時刻歴は，短周期成分が卓越し，振幅や波形の包絡形について，どの解析も観測とよく似ている．したがって，ひずみレベルが小さく短周期成分が卓越している状態では入力する深い部分での増幅は波形に影響がない．

3つの解析は23秒以降異なる様相を示す．おおよそ23秒から25秒までは，解析3ケースで位相が異なり始めるが，振幅については大差はなく，最大値も238-248 cm/s^2 でありほぼ同じである．しかし，25秒以降は大きく異なる．25秒は2つのESAで過剰間隙水圧の上昇のしかたが大きく違い始める時期に相当する．

ESAの-72 m入力の場合は，25秒以降，振幅は時間とともに小さくなり，30秒以降に卓越する長周期成分の振幅もどれよりも小さい．

TSAの-390 m入力の場合には，25秒以降振幅は時間とともに減衰するものの，30秒以降に卓越する長周期成分の振幅は，ESAの-72 m入力の場合より約2倍大きく観測波の振幅に近づく．このことから，深い地質による長周期成分の増幅の効果が重要であることがわかる．しかしながら，観測波と比べて振幅が不足し，短周期成分が多く，スパイク状のピークは再現できない．

一方，ESAの-390 mの場合は，30秒以降に卓越する長周期成分の振幅・位相ともに観測波にほぼ等しく，しかも観測波に現れている第2の特徴であるスパイク状のピークもかなりよく表現できている．

以上の考察から，長周期成分の振幅の伸びは，深部の地質による増幅と表層の液状化による増幅が相まって現れたものであるという解釈が得られる．

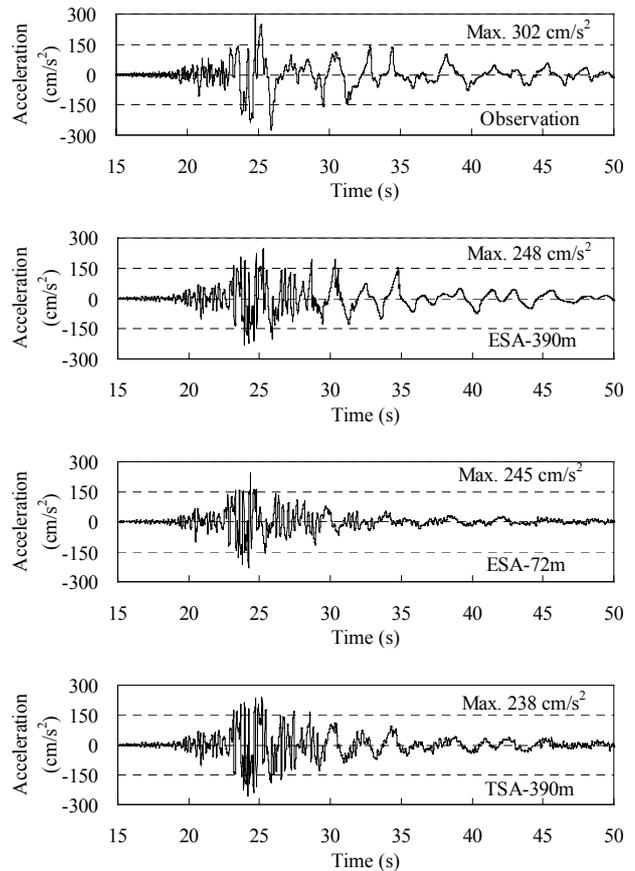


図-8 地表の加速度時刻歴．上より，観測記録，-390m入力 ESA，-72m入力 ESA，-390m入力のTSAの応答

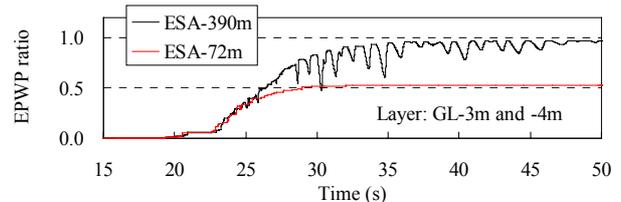


図-9 深さ 3-4 m の層の過剰間隙水圧の時刻歴

(3) 過剰間隙水圧の時刻歴

図-9に深さ3-4 mの層の過剰間隙水圧の時刻歴を示す．2つの有効応力解析（ESA-390 mとESA-72 m）による過剰間隙水圧比（EPWP比）の挙動を見る．図には最も間隙水圧の上昇した深さ3～4 mのEPWP比の時刻歴を示す．加速度応答の最大値を示す約25秒までは余り違いはないが，それ以降違いが生じる．-72 m入力では25秒ですでに最大EPWPの約7割が上昇し，その後の上昇が鈍く，負方向の水圧の変動は見られない．

一方，-390 m入力では25秒以降もどんどん上昇し続け，30秒ではEPWP比が0.8に達し，それ以降は上

昇を続けながら，負方向の水圧変動が顕著になる．この1秒強の周期で現れる負方向の変動は，2秒強の振動の卓越と併せ考えると，土のサイクリックモビリティに起因することは明らかである．

(4) 変位の時刻歴

図-10に地表の変位時刻歴を示す．変位時刻歴について，観測波は最大加速度を示した25秒より少し前に最大変位が生じるが，同振幅のピークは31秒にも現れ，40秒程度まではほとんど減衰しないことが特徴的である．次に観測記録と解析結果を比較して考察する．

23秒までの時刻歴は，入力位置によって振幅が異なる．-390 m入力の場合は-72 m入力の場合の約1.7倍である．加速度波形では短周期成分が卓越し振幅に違いはなかったが，長周期成分の増幅が異なることがわかる．

-72 m入力のESAの場合は，EPWPの発生が考慮されているとは言え，-390 m入力のTSAと比べて，終始振幅はおおよそ1/2である．両者とも30秒付近の2回目の最大変位のピークを示した後，時間の経過とともに減衰している．また，この2つは振幅だけでなく波形も異なる．

-390 m入力のESAとTSAを比較する．両者は，30秒付近までは波形がよく似ているが，30秒以降様相を異にする．すなわち，30秒から40秒にかけて，TSAでは振幅が観測波よりも小さく，時間の経過とともに減衰するのに対して，ESAでは観測波と比べて振幅がほぼ一致し，時間とともに減衰する様子が極めて小さいことである．この時間帯は，EPWP比が0.8から1.0に徐々に上がっていく過程であり，サイクリックモビリティがよく現れた時間帯である．

以上の考察から，深部の地質が地震動の長周期成分の増幅が表層地盤の振動に基本的に重要な役割を果たし，ひいては液状化現象の進展にも重要な役割を果たすこと，30秒以降の過剰間隙水圧が0.8を越えサイクリックモビリティを発生させながら完全液状化へ向かう過程は，長周期成分のさらなる増幅に重要な役割を果たすことが理解できる．

(5) フーリエスペクトル

以上の議論により，時刻歴ではESAの-390 m入力の解析が観測記録をよく説明できることがわかった．そこで，最後に振動数領域の面から考察する．

図-11に観測記録，ESA-390 m入力の際の地表の応答，入力地震動のフーリエスペクトルを示す．0.1-10 Hzの広い範囲にわたって，1-2 Hzを除き，ESA-390 m入力の解析は観測に概ね等しいことがわかる．入力地震動に対する地表の応答のフーリエスペクトル比では，0.4 Hzで6倍，1.3 Hzで3倍，2.0 Hzで3.5倍のピークが認められる．図の1-2 Hzに見られる観測との差異は，S地点北側にある島根半島向かって急激に上がるであろう基盤の変化などによる多次元効果によるものと推察される．ESA-72 mは他の2つの解析に比べて小さく，TSA-390 mは，1.3Hz付近で異なるが，1Hz以下の領域では大きく増幅している．

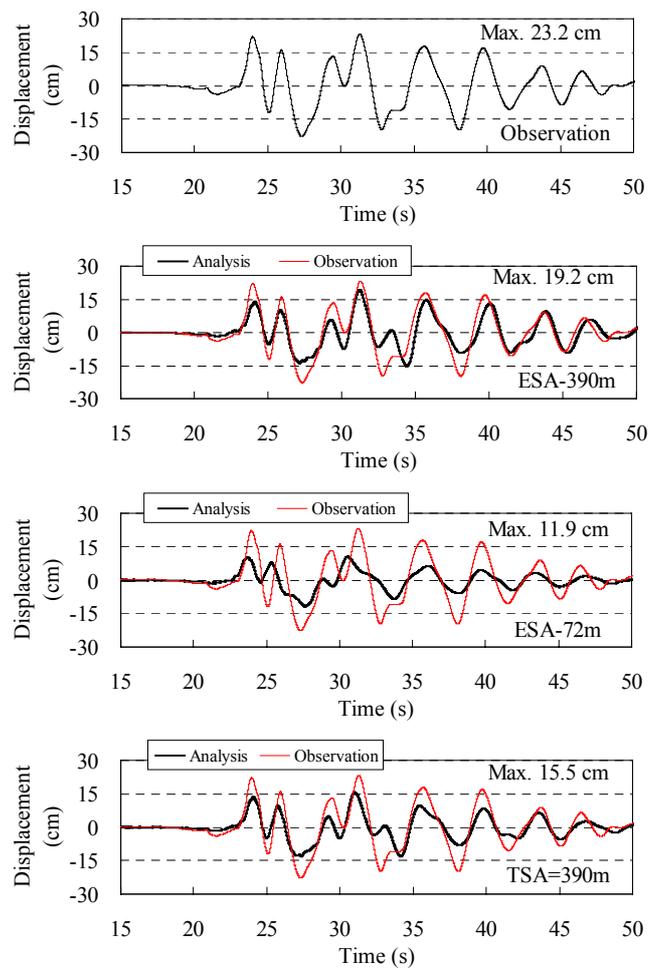


図-10 地表の絶対変位時刻歴．上より，観測記録，-390m 入力 ESA，-72m 入力 ESA，-390m 入力の TSA の応答．応答波形には参考のため観測波形も重ねて示した

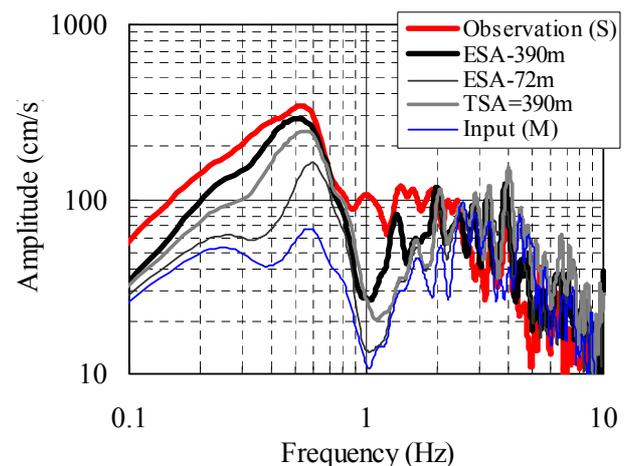


図-11 観測記録，ESA-390 m，TSA-390m，ESA-72m モデルの地表の応答，入力地震動のフーリエスペクトル

5. 結論

2000年鳥取県西部地震の際に境港の液状化が発生した地点で観測された地震動の水平加速度記録には、主要動に続く後続位相で、長周期成分が卓越し、スパイク状のピークが現れるという2つの特徴が見られた。この原因を深い地盤構造の増幅と液状化の影響の2つの観点から、有効応力法による地震応答解析に基づき検討し、次の結論を得た。

- (1) 近くの硬質地盤で観測された地震波を地下390 mに入力した有効応力解析は、加速度、変位の時刻歴で観測をよく模擬できた。特に、2つの特徴は定量的にも再現できた。
- (2) その解析で、深さ3-4mで過剰間隙水圧比が約1に達しており、完全液状化が極めて薄い層で起きたと評価された。このことは、実際の現地を観察された液状化の状況と整合する。
- (3) 地下72 mに入力した解析との比較から、地下390 mから72 mまでの深い地質構造を考慮することにより、後続位相で卓越する長周期成分を概ね2倍に増幅させる効果があった。
- (4) 地下390 mに入力する全応力解析との比較から、深部の地質による増幅が表層地盤の振動に基本的に重要な役割を果たすこと、ひいては液状化現象の進展にも重要な役割を果たすこと、後続部のサイクリックモビリティを発現させながら完全液状化へ向かう過程は、長周期成分のさらなる増幅に重要な役割を果たすことがわかった。

謝辞：本研究では、港湾地域強震観測の境港の記録及び防災科学技術研究所のKiK-net美保関の観測記録を使用させていただきました。また、財団法人沿岸開発技術研究センターのFLIP研究会の特別会員(森)として、FLIP ver.4.2.8を使用させていただきました。記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 森 伸一郎：液状化被害(その3), 平成12年鳥取県西部

地震災害緊急調査団報告, 地盤工学会, pp.78-82, 2000.

- 2) 森 伸一郎, 阿部 雅弘, 服部 加奈子: 2000年鳥取県西部地震における境港市の埋立地の地震応答, 土木学会第26回地震工学研究発表会講演論文集, pp. 349-352, 2001.
- 3) 三輪 滋, 池田 隆明, 綾部 孝之, 沼田 淳紀: 2000年鳥取県西部地震における境港市の地盤の地震時挙動, 構造工学論文集, Vol. 48A, pp.445-455, 2002.
- 4) 森 伸一郎, 曾我部 繁之, 阿部 雅弘: 境港での液状化地盤の地震時挙動における液状化の影響分析, 第11回日本地震工学シンポジウム論文集, pp. 825-830, 2002.
- 5) Mori, S. and Sogabe, S.: Influence of liquefaction on seismic ground motion at a liquefied site, *Proceedings of the 12th Panamerican Conference for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering and the 39th US Rock Mechanics Symposium, Soil and Rock America 2003*, June 22-26, 2003, MIT, Cambridge, MA, USA, Vol. 2, pp. 2855-2861, 2003.
- 6) 吉川 大智, 盛川 仁, 赤松 純平, 野口 竜也, 西田 良平: 余震, 微動, 重力を用いた弓ヶ浜半島における2次元基盤構造の推定, 地震第2輯, 第5巻, pp. 61-73, 2002.
- 7) 国土交通省港湾技術研究所: 港湾地域強震観測ホームページ, <http://www.phri.go.jp/jishin/index.html>
- 8) 科学技術庁防災研究所基盤強震観測網(KiK-net) ホームページ, <http://www.kik.bosai.go.jp/kik/>
- 9) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain space plasticity model for cyclic mobility, *Soils and Foundations*, Japanese Geotechnical Society, Vol., 32, No. 2, pp. 1-15, 1992.
- 10) 善 功企, 山崎 浩之, 佐藤 泰: 事前混合処理工法による処理土の強度・変形特性, 港研報告, 第29巻, 第2号, pp.85-118, 1990.
- 11) 運輸省港湾局監修: 埋立地の液状化ハンドブック, 沿岸開発技術研究センター, p.285, 1993.
- 12) 清田 芳治, 萩原 庸嘉, 田村 英雄: 珪砂6号の動的変形特性に関する研究, 第30回土質工学研究発表会講演集, pp. 851-852, 1995.
- 13) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 (V耐震設計編), 1996.

(2003. 7. 10 受付)

EFFECT OF AMPLIFICATION IN DEEP GEOLOGY ON GROUND MOTION AT A LIQUEFIED SITE IN SAKAI-MINATO

Shinichiro MORI and Shigeyuki SOGABE

This paper presents a case study on a strong ground motion record dominated by longer-period components at a liquefied site in Sakai-Minato during the Western Tottori earthquake in 2000, and elucidates the cause of the predominance both in the effect of liquefaction of subsurface soil and in the amplification through deep geological structures. Nonlinear effective-stress dynamic analyses are carried out. The result of the effective stress analysis shows good agreement between the observed and the analyzed surface ground motions. Comparisons between different cases show the amplification in deep geology contributes to predominance of longer-period components rather than the effect of liquefaction.