

液状化した海岸埋立地盤の構造推定と一次元地震応答のばらつき

森伸一郎¹・田村一樹²

¹愛媛大学 大学院理工学研究科環境建設工学コース
(〒790-8577 愛媛県松山市文京町3)

E-mail: mori@dpc.ehime-u.ac.jp

²愛媛大学 工学部環境建設工学科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3)

E-mail: tamura.ikki.05@cee.ehime-u.ac.jp

2001年3月24日の芸予地震で液状化した愛媛県西条市壬生川の海岸埋立地を対象として、微動観測と表面波探査により当該地盤の振動特性とせん断波速度構造を推定し、せん断波速度のばらつきを検討した。これらの結果とボーリング資料と併せて地盤モデルを構築し、一次元地震応答解析を行い、最大応答のばらつきを検討した。その結果、常時微動測定と表面波探査の併用は地盤のせん断波速度構造推定に有効であること、噴砂は、概ね $V_s = 150$ m/s、N値5を下回る緩い砂層の液状化と比較的 V_s の低い地表の非液状化層がある領域に対応すること、表層地盤のせん断波速度の変動係数は0.03~0.05で、一次元地震応答解析による加速度・速度応答の変動係数も0.04~0.05であり、せん断波速度と同程度であることがわかった。

Key Words : liquefaction, microtremor, seismic response, shear wave velocity, variability

1. はじめに

性能設計において対象となる系の構造、物性、応答のばらつきを考慮することが重要である。特に、地盤の場合には層構造と層内物性のばらつきをどのように取り扱うかが重要である。

このような観点から、成層構造が期待される地盤を対象に検討する。海岸埋立地の表層地盤に限れば比較的水平的成層が望め、地震時に液状化が起こりやすい。液状化現象は地盤の不均質さに感度が高いと予想され、地盤の地震応答と地盤材料の物性に支配されると考えるからである。また、地震時の液状化の状況を適切に評価することは、実現現象の詳細な事例分析は前述の観点からは有効であると考えられる。

2001年3月24日の芸予地震では愛媛県の瀬戸内海川の海岸埋立地で多くの液状化噴砂が確認された¹⁾。そこで、本研究では、愛媛県西条市(旧・東予市)壬生川(にゅうがわ)の海岸埋立地の液状化地点を対象とする。ここでは、近くに地震観測点がある。したがって、上述の観点から研究対象に適していると考えられる。

当該地盤の振動特性とせん断波速度構造を把握することを目的として、常時微動観測と表面波探査を行い²⁾、地盤の卓越振動数やせん断波速度の統

計データを示すとともに、両方の調査結果を基に構築した地盤モデルを用いて一次元地震応答解析を行い、最大応答のばらつきを検討した。

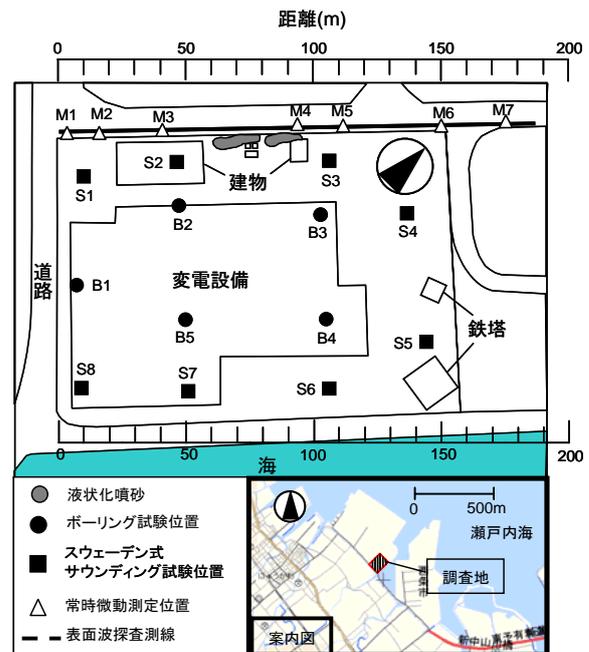


図-1 調査地点の位置、周辺状況、液状化噴砂、表面波探査測線、微動測定地点

2. 調査地点の状況と調査内容

図-1に調査地点の位置，周辺状況，液状化噴砂，表面波探査測線，微動測定地点を示す。調査地点は愛媛県の旧・東予市壬生川にある海岸埋立地であり，2001年3月24日の芸予地震（マグニチュード $M_{JMA}=6.7$ ）では，この埋立地では調査地点のみならず広い範囲で液状化噴砂の発生が確認された¹⁾。この地点から2.6 Km離れたところに防災科学技術研究所の強震観測点，K-Net東予（EHM003）があり，最大水平加速度462 cm/s²，計測震度6弱が記録され，地震直後のアンケート震度調査²⁾でも当該地点で震度6弱が確認された。この埋立地の液状化噴砂の多くは暗灰色のシルト質細砂であり，浚渫埋立土に起源があると推察されるが，調査対象地点の噴砂は黄褐色の礫混じり粗砂も混ざっていた³⁾。噴砂は，測線となる道路の歩道に面し南東に隣接する施設の道路際で噴砂が見られた。写真-1に噴砂の様子を示す。噴砂は乾いており，日光の下では白く見える。

この隣接施設の建設時（1971年）の地盤調査結果が利用できた。地質調査の土質の記載によれば，液状化噴砂は客土および浚渫埋立による埋立層が起源であると推察される。

噴砂地点と非噴砂地点の振動特性と地盤物性を比較することを目的に，施設敷地北西境界に面する道路上で，噴砂地点を通る北東-南西方向の測線に沿って常時微動測定および表面波探査を行った⁴⁾。調査日は2008年6月14日である。図-2に測線に沿う推定地盤断面と4地点（S1～S4）の標準貫入試験（SPT）のN値分布を示す。探査測線長は186 mで，微動測定点は6点（M1～M6）である。常時微動測定に用いた計測器はGEODAS（24ch）で，センサー（CR-2S）は2秒まで平坦な特性を持つ3成分の速度計である。また，表面波探査には多チャンネル



写真-1 調査地点（壬生川の埋立地）における2001年芸予地震の際の液状化噴砂の様子

地震探査装置McSEIS-SXWを用いて，1測線につきセンサー24個を2 m間隔で配置し，ランドストリーマーケーブルを使用し測線全長を連続的に探査した。打撃起振はかけやによった。噴砂地点は，測線基準点から60～100 m区間に位置し，微動測定点M4が94 mに位置する。

一次元地盤のせん断波入射時の固有周期をTとする。固有周期Tは，地盤のせん断波速度Vsと基盤面より上の表層厚Hを知れば，4分の1波長則（ $T = 4H/Vs$ ）で得られる。標準貫入試験のN値を用いてN値とVsの関係に基づく推定式⁴⁾によりVsを推定し，N値が50以上の礫層を工学的基盤として，各N値に対応した推定Vs値を用いて4分の1波長則により表層地盤の固有周期Tsptが求められる。S1地点ではN値が50以上の礫層は粘土層を挟み3層が確認されているが，残り3本のSPTでは第1の礫層が現れる深さ20 mまでしか調査されていない。表面波探査によって得られる深さ20 mまでのVs分布を用いて，

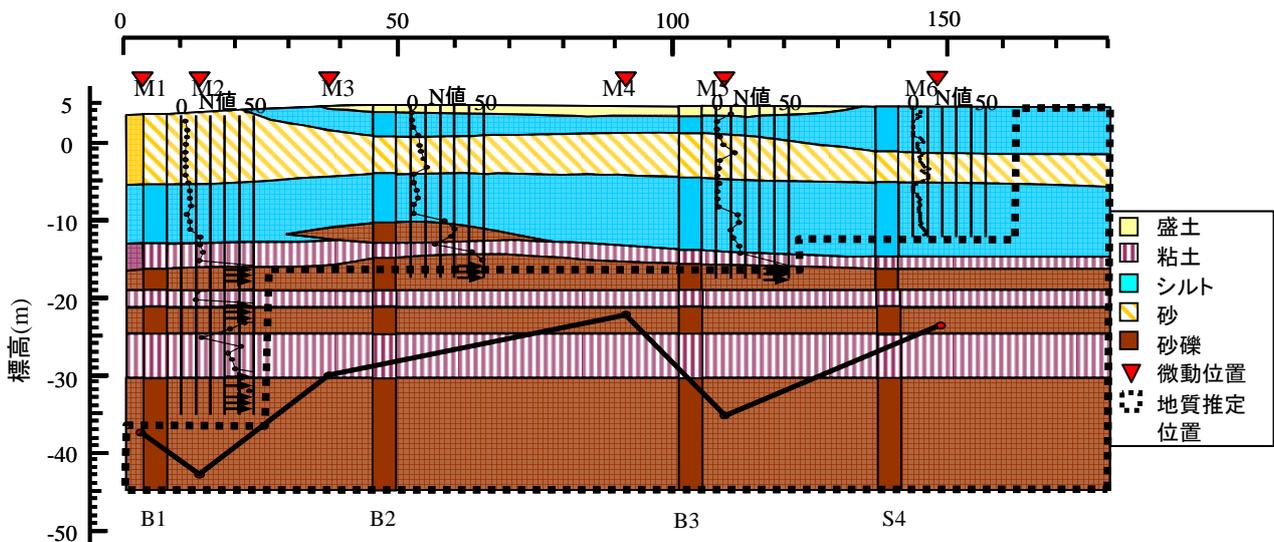


図-2 微動観測および表面波探査の調査測線に沿う推定地盤断面（点線より上部は地質調査報告書の推定図，下部は仮定）と4地点（S1～S4）の標準貫入試験（SPT）のN値分布

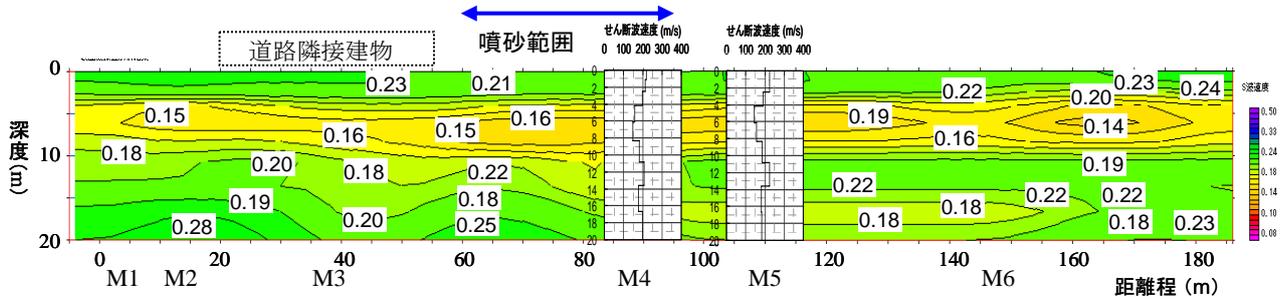


図-3 微動観測および表面波探査の調査測線に沿うせん断波速度 (Vs) 推定地盤断面と4地点 (S1~S4) の標準貫入試験 (SPT) のN値分布

基盤を深さ20 mと仮定した固有周期Tsが求められる。一方、微動のH/Vスペクトル比の卓越周期Tmより、TはTmで推定できると仮定する。TmとTsptの比較でVsの推定式の定係数の適用性が検討でき、TmとTsの比較で設定基盤の深さが推定できる。

3. 表面波探査によるせん断波速度構造

図-3に表面波探査による求められたせん断波速度の2次元等値線図を示す。この図は、深さ方向に9分割の層で得られた一次元Vs値分布が水平方向に4 m間隔で並ぶ46断面のVsの2次元分布を基に描かれている。M4とM5におけるVs分布を併せて示した。これによれば、前面に建物がある区間 (25~55 m) では地表面付近のVsが他区間より大きく、基礎施工や建物重量による圧密の影響と推察される。165~185 mの区間でも地表面付近のVsが同じ深さのVsに比べて大きい。噴砂発生範囲 (60~95 m) ではGL-4~9 mに深さ方向で相対的にVsの低い層が見られVsが150 m/s前後であるのに対して、周辺の非噴砂地域では対応する層がGL-5~8 mに見られ、Vsが160~170 m/sであり、噴砂地域に比較して相対的に大きい。このような上下で相対的に低いVs層に対応する層は図-2の推定地層断面でも緩い砂層として確認できる。したがって、わずかなVsの差ではあるが、緩い砂層のVsが相対的に小さいこと、表層の非液状化層のVsが相対的に大きいことが噴砂の有無を主に支配していると解釈できる。

表-1 表面波探査により得られた深さごとのせん断波速度 (Vs) の統計量

層下端深度 (m)	1.1	2.5	4.2	6.1	8.3	10.8	13.6	16.7	20.0
最大	237	225	201	171	174	199	224	193	283
最小	208	199	170	142	147	161	188	174	184
平均	220	214	189	156	158	182	214	182	219
標準偏差	8.4	6.7	9.2	8.1	7.6	9.1	11.5	5.3	31.2
変動係数	0.038	0.031	0.049	0.052	0.048	0.05	0.054	0.029	0.143

この解釈をN値の観点から言い直すと、噴砂範囲に対応する柱状図によれば、深さ4~9 mでN値が2~5の砂層またはシルト混じり砂層、非噴砂範囲では深さ4~9 mでN値が5~11の砂層があり、噴砂範囲では極めて緩い砂層がある。Vsで150 m/s程度以下、N値で5程度以下の砂層の液状化砂が厚さ4mの非液状化層を通り噴砂を生じたと考えられる。

4m間隔で46断面のせん断波速度Vsが得られる。精度の問題はあるが、平面的に密に把握できるので統計量を考察する。分散曲線の逆解析では20mの深さを9分割してVsを求めている。図-4に表面波探査で求められた各探査層の求められたVsのヒストグラムを示す。図で縦軸は10m/sごとに区切った区間上限値を示している。また、表-1にはその統計量を示す。8.3 m以浅の層では最頻値と平均値は近く対称な分布をしており、ばらつきも比較的小さく均質な水平成層を裏付けている。深さ4.2~10.8 mの砂層に対応する層では平均値は異なるが変動係数は0.05程度で一定である。深さ4.2から6.1 mの区間が最もVsが小さく平均値が156 m/sであり、先の

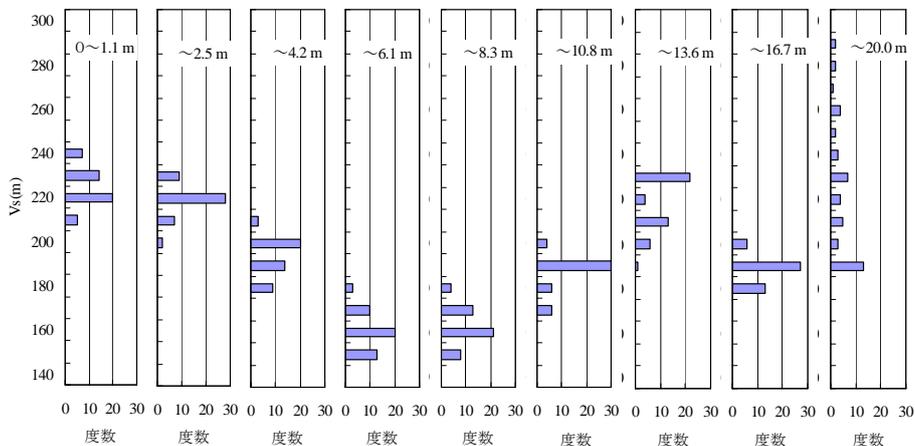


図-4 表面波探査で求められた各探査層の求められた Vs のヒストグラム

解釈を裏付ける。では深さ10.8~13.6 mでは均質さを欠く。一方で、深さ16.7~20.0 mでは調査精度の問題もあるが、精度良く求められているものだけみてもばらついており、図-2や図-3で示したように、そのばらつきは特に水平距離100~146mの間でVsが約190 m/s (平均値-標準偏差に相当する)を下回っており、その区間では工学的基盤が深くなるような地層の不整形性に由来していると考えられる。

図-3のVs等値線図は、深さ方向に9分割の層で得られた一次元Vs値分布が水平方向に4 m間隔並ぶVsの2次元分布を基に描かれている。この46断面の一次元Vs分布を用いて、基盤を深さ20 mと仮定した固有周期Tsを求めることにより、振動特性の観点から見た基盤構造推定に寄与できると考えられ、次章で利用する。

4. 常時微動測定による卓越周期と標準貫入試験や表面波探査を合わせた地盤構造推定

本章では、(1)微動測定による振動特性が現実の地盤振動特性を表している、(2)表面波探査による表層20mのせん断波速度構造を捉えている、という仮定の下、(3)工学的基盤まで達しているボーリング調査結果による地層構成を参照するという考えに立ち、参照地点でのSPTのN値と表面波探査によるVsを用いたN値-Vs推定式の修正と微動卓越周期との整合性の確認を経て、他の微動測定地点における基盤深さ推定、直線補間による全域の表層Vs構造の推定の方法と結果を示す。

微動測定は、昼間に行ったが工業団地である調査地内では通行車両はわずかであった。1箇所1回あたりサンプリング周波数100Hzで、300秒間のデータを取得した。記録が安定している区間を選び、2048個のデータを1セグメントとし、複数のセグメントでフーリエ解析を行い、フーリエスペクトルやその比についてアンサンブル平均を求めた。地盤の卓越振動数は、水平動Hと鉛直動Vのスペクトル比、H/Vスペクトル比法によった。平均化されたH/Vスペクトル比は、有意な卓越部分を判定した上で、バンド幅0.5 HzのParzenウィンドウを施して卓越振動数を読み取った。生のスペクトル比でノイズが卓越していてウィンドウ処理により生じたピークは卓越振動数とは読み取らないようにした。

図-5に調査側線に沿う微動のH/Vスペクトル比を示す。噴砂地点はM4に相当する隣接するM地点と比較する。2つのH/Vで1次卓越部の振動数と振幅は、それぞれ、M4地点では1.8 Hzと4.7であるのに対しM5地点では1.4 Hzと10であり、差がある。M5地点で、卓越振動数fmが低く振幅比が大きいのは、この卓越の原因となる境界面が深く、境界より上の地盤の平均Vsが小さいことが考えられる。微動H/Vより得られる地盤の卓越振動数fmの逆数で卓越周期Tmを求める。

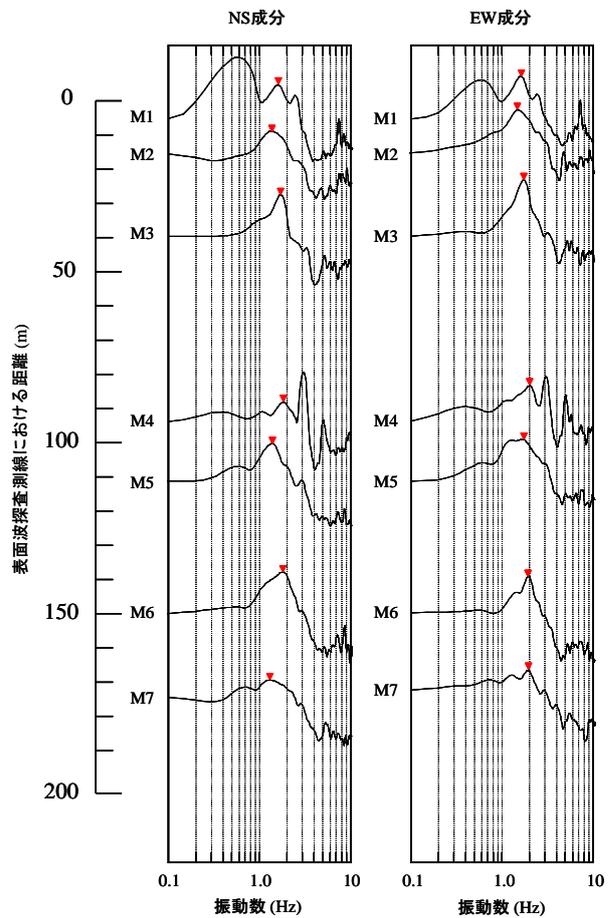
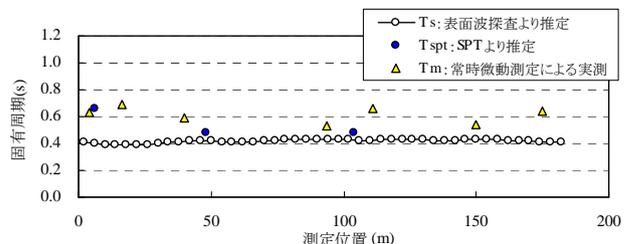
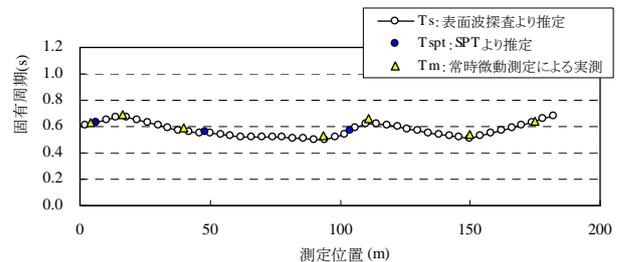


図-5 調査側線に沿う微動のH/Vスペクトル比



(a) 測定・探査結果に基づく推定値



(b) 補正したVs推定式と微動の卓越周期に合うように基盤深さと20m以深の地盤を仮定した推定値

図-6 3種の地盤の卓越周期の分布 (Tm: 微動, Tspt: SPTのN値とVsの推定値利用, Ts: 表面波探査によるVs利用)

図-6 にこれらの 3 種の地盤の卓越周期の分布 (T_m : 微動, T_{spt} : SPT の N 値と V_s の推定値利用, T_s : 表面波探査による V_s 利用) の分布を示す. (a) 測定・探査結果に基づく推定値と (b) 補正した V_s 推定式と微動の卓越周期に合うように基盤深さと 20m 以深の地盤を仮定した推定値を示し, ここで提案する方法の効果を示している.

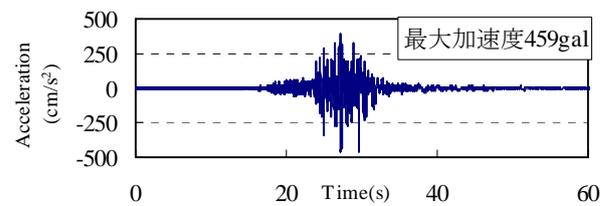
T_{spt} で, 距離 10 m の S1 地点のみ第 3 礫層を基盤としている. この図より, (1) 基盤を 20 m と仮定すると距離 10 m, 50 m, 100 m では, T_{spt} は T_s よりやや大きくその比は同等で, 定係数を修正した V_s 推定式を利用すれば $T_{spt} = T_s$ となること, (2) 距離 10 m (S1) では T_m と T_{spt} はほぼ同じであり, 修正 V_s 推定式によれば $T_m = T_{spt}$ となることがわかった. 数は少ないが, 微動, 表面波探査, ボーリング SPT の併用による表層地盤の V_s 構造モデル化の有効性を示している. なお, ここで N 値による V_s 推定式⁵⁾とは $V_s = 80N^{1/3}$ (砂質土), $V_s = 100N^{1/3}$ (粘性土) のことであり, 80 や 100 などの定係数を修正の対象としている.

地質調査時の地層断面推定は, ボーリング深さまでであるが, 図-2(a) では 20 m 以深は S1 地点の層構成が水平に延びると仮定して描いてある. そこで, 物性 (V_s) もその仮定に基づき, 修正 V_s 推定式を使えば, ($T_s =$) $T_{spt} = T_m$ となる基盤深さを求められる. 求めた微動測定地点の基盤深さを直線でつないだものを 図-2(b) に示してある. この不陸のある推定基盤面より上位の地盤を, 20 m 以浅を表面波探査による V_s で, 20 m 以深を修正 V_s 推定式による V_s でモデル化して, 46 断面の地震応答解析用の地盤モデルとして構築する.

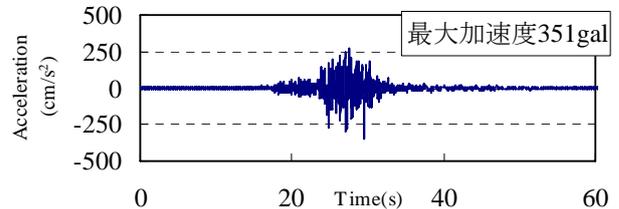
5. 微動測定地点における一次元応答解析

前述の地盤モデルの内, 微動測定地点におけるモデルを用いて一次元応答解析 (プログラム SHAKE⁶⁾) を実施した. K-Net 東予で観測された加速度時刻歴 ($A_{max} = 459 \text{ cm/s}^2$) を用いて, 観測地点の地盤モデルで工学的基盤と考えられる $V_s = 300 \text{ m/s}$ の層の入射波 ($2E$: $A_{max} = 351 \text{ cm/s}^2$) を逆応答解析により求め, それを対象地盤の工学的基盤 ($V_s = 300 \text{ m/s}$) に入射波として入力地震動として設定した. 等価線形解析の際に用いる地盤の材料非線形性 (剛性・減衰のひずみ依存性) は, 安田・山口モデル⁷⁾により, 有効係数を 0.65 として収束誤差 5% で等価線形解析を行った. 図-7 に (a) K-Net 東予の観測と (b) 逆応答による工学的基盤における露頭波の加速度時刻歴を示す.

図-8 に微動観測地点 (M1~M6) の地盤モデルの (a) 線形と (b) 非線形の伝達関数を示す. 線形時には, M4 と M6 地点で 2 次の増幅が大きいことを除けば, 地点による形状の差は全般的に小さい. この 2 点で 1 次卓越振動数が微差ながら最も低い. 非線形時には, 2~3 Hz より高振動数では増幅は 1 以下に低下

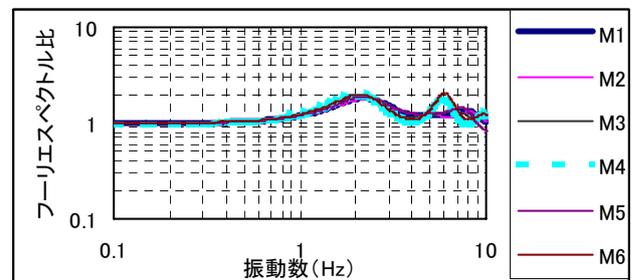


(a) K-Net 東予の観測記録

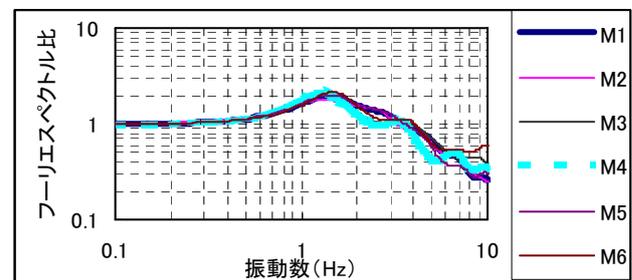


(b) 逆応答による工学的基盤における露頭波

図-7 (a) K-Net 東予の観測と (b) 逆応答による工学的基盤における露頭波の加速度時刻歴



(a) 線形



(b) 非線形

図-8 微動観測地点 (M1~M6) の地盤モデルの (a) 線形と (b) 非線形の伝達関数

し, 前述の 2 次の増幅の影響は消失するが, 1 次の低振動数側へのシフトが M4 地点で最も顕著である. せん断ひずみもこの地点で大きい. 表-2 に等価線形解析の場合の最大加速度と最大速度とそれらの統計量を示す. M4 地点はいずれも最小である. 等価線形解析の結果を利用して液状化判定をする場合, これらの運動応答で評価するのは適さないことを示しており, せん断ひずみで評価する必要があることを示唆している.

一方, 構造物の設計面からは, 運動応答が重要である. 対象地点では, 応答のばらつきは小さく, 平均的な物性と構造でモデル化することの妥当性を支持していると考えられる. もちろんサンプル

表-2 最大加速度と最大速度とそれらの統計量

解析地点	最大加速度 (cm/s ²)	最大速度 (cm)
M1	401	26.7
M2	394	25.7
M3	377	24.9
M4	354	24.5
M5	407	27.2
M6	406	25.9
平均	389.8	25.8
標準偏差	18.92	0.94
変動係数	0.049	0.036

数が少なく、統計モデルではなく、全46断面の解析しているわけではないので、統計を正面から論ずることは困難であるが、参考にはなる。変動係数はおおよそ、最大加速度で0.05、最大速度で0.04であり、Vsの変動係数に近い。信頼性を取り込んだ性能設計には地盤の統計量とこれらの応答の統計量の評価が重要になると考えられる。

6. 結論

2001年3月24日の芸予地震で液状化した愛媛県西条市壬生川の海岸埋立地を対象として、微動観測と表面波探査により当該地盤の振動特性とせん断波速度構造を推定し、せん断波速度のばらつきを検討した。これらの結果とボーリング資料と併せて地盤モデルを構築し、一次元地震応答解析を行い、最大応答のばらつきを検討した。その結果、得られた結論は以下の通りである。

- (1) 深い地盤調査結果が1点あれば、常時微動測定による卓越周期評価と表面波探査による地盤のせん断波速度構造推定は有効である。
- (2) 2001年芸予地震による壬生川埋立地での噴砂は、概ねVs = 150 m/s、N値5を下回る緩い砂層の液状化が原因であり、噴砂は加えて地表の非液状化層のVsの小さいところに対応する。
- (3) 液状化評価に一次元等価線形地震応答解析を用いる場合、加速度や速度の応答よりせん断ひずみ応答が適切である。

- (4) おおむね水平成層状態の埋立砂層と沖積粘性土層では平均値は異なってもせん断波速度の変動係数は0.03~0.05程度である。代表的な断面の一次元地震応答解析による加速度・速度応答の変動係数も0.04~0.04程度であり、せん断波速度の場合と同程度である。
- (5) 工学的基盤に多少の不陸が推定されても、海岸埋立地の地震応答のばらつきは小さいが、統計量が重要である。

謝辞：隣接施設の管理者には地盤調査資料の利用を快諾して戴きました。K-Netを設置・運営する防災科学技術研究所の貴重な地震記録を利用させて戴きました。愛媛大学地震工学研究室の学生の皆様には測定に助力戴きました。謝意を表します。

参考文献：

- 1) 森 伸一郎，門脇 慶典：2001年芸予地震における液状化調査，第37回地盤工学研究発表会講演集，pp.1957-1958，2002.7
- 2) 森 伸一郎，掛水 真一，俵 司，村上 ひとみ，河原 荘一郎，向谷 光彦，重松 尚久，山下 祐一：2001年芸予地震におけるアンケート調査による推定震度の精度とばらつき，第11回日本地震工学シンポジウム論文集，pp. 5-10，2002.11.
- 3) 森 伸一郎：第I編 第4章 地盤災害 4.1液状化と地盤に関する災害，愛媛大学芸予地震学術調査団最終報告書，pp.35-42，2002.3.
- 4) 田村 一樹，森 伸一郎，久木留 貴裕：2001年芸予地震で液状化の発生した埋立地の地盤構造と振動特性，地盤工学会四国支部技術研究発表会講演概要集，pp.55-56，2008.9.
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説（V.耐震設計編），1996.
- 6) Schnabel, P.B., Lysmer, J. and Seed, H.B.: SHAKE - A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites - ,University of California Berkeley, Report NO.EERC 72-12, pp.1-54, 1972.
- 7) 安田 進，山口 勇：種々の不攪乱土における土の動的変形特性，第20回土質工学研究発表会，pp.539-542，1985

ESTIMATION OF VS-STRUCTURE OF SEISMICALLY LIQUEFIED GROUND AND VARIABILITY OF ONE DIMENSIONAL SEISMIC RESPONSE

Shinichiro MORI and Ikki TAMURA

Shear wave velocity (Vs) structure of seismically liquefied level ground at Nyugawa, Ehime, Japan was estimated using microtremor measurement and surface wave exploration, and one-dimensional seismic response analysis was conducted on the estimated ground model at several points. Based on the result of the measurement and exploration and the analysis, the actual liquefaction appearance and the variability of Vs and seismic response at the focused site was studied and the effectiveness of estimation was clarified.