

愛媛大学大学院 フェロー 森 伸一郎
愛媛大学工学部 学生会員 ○田村 一樹

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。特に地盤において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。本研究での対象地盤は、2001年3月24日の芸予地震で液状化噴砂が確認された愛媛県西条市（旧・東予市）壬生川（にゅうがわ）の海岸埋立地¹⁾である。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表面波探査と常時微動観測を行い²⁾、それに基づき構築した地盤モデルで一次元地震応答解析を行い、地盤構造、せん断波速度、最大応答のばらつきを検討した。

2. 調査地点の状況と研究方法

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。調査地点は埋立地であり、測線は道路に沿うが、この道路の歩道に面し南東隣接施設の道路際で噴砂が見られた。この施設の地盤調査結果が利用できた。液状化噴砂は埋立層より噴出したと思われる礫混じり粗砂であった。

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。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186mで、微動測定点は6点（M1～M6）である。噴砂地点は測線基準点から60～100m区間に位置し、微動測定点M4が94m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 V_s と基盤面より上の表層厚 H を知れば、4分の1波長則（ $T=4H/V_s$ ）で得られる。標準貫入試験のN値を用いてN値と V_s の関係に基づく推定式³⁾により V_s 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 V_s 値を用いて表層地盤の固有周期 T_{spt} が求められる。S1地点では礫層は粘土層を挟み3層が確認されているが、残り3本の調査深度は第1の礫層が現れる深さ20mまでである。表面波探査で得られる深さ20mまでの V_s 分布を用いて、基盤を深さ20mと仮定した固有周期 T_s が求められる。一方、微動のH/Vスペクトル比の卓越周期 T_m より、 T は T_m で推定できると仮定する。 T_m と T_{spt} の比較で V_s の推定式の定係数の適用性が検討でき、 T_m と T_s 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と既往の地盤調査結果

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。M4とM5における V_s 分布を併せて示す。噴砂発生範囲（60～95m）ではGL-6～9mに深さ方向で相対的に V_s の低い層が見られ V_s が150m/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で V_s が160～170m/sであり、噴砂地域に比較して相対的に大きい。この僅かな V_s の差が噴砂の有無を主に支配していると解釈できる。 V_s で150m/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。

図-3の V_s 等値線図は、深さ方向に10分割の層で得られ



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

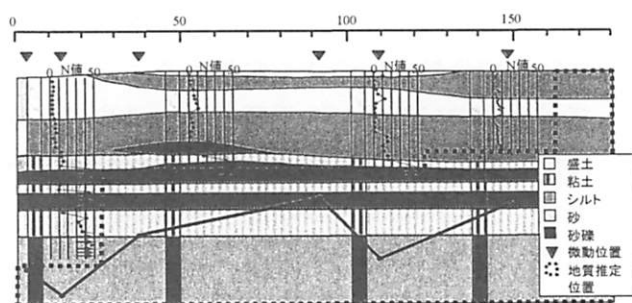


図-2 測線に沿う推定地盤断面と4地点（S1～S4）の標準貫入試験（SPT）のN値分布

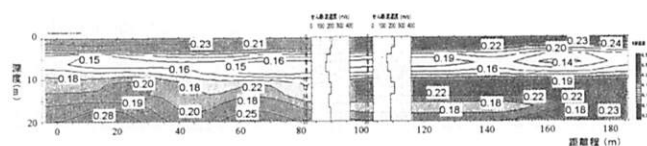


図-3 表面波探査による求められたせん断波速度の2次元等値線図

た一次元 Vs 値分布が水平方向に 4m 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 20m と仮定した固有周期 Ts を求める。

4. 常時微動測定と表面波探査による卓越周期の考察と地盤モデルの構築

図-4 にこれらの 3 種の卓越周期 (Tm, Tspt, Ts) の分布を示す。Tspt で、距離 10m の S1 地点のみ第 3 礫層を基盤としている。(1) 基盤を 20m と仮定すると距離 10m, 50m, 100m では、Tspt は Ts よりやや大きくその比は同等で、定係数を修正した Vs 推定式を利用すれば Tspt=Ts となり、(2) 距離 10m (S1) では Tm と Tspt はほぼ同じであり、修正 Vs 推定式によれば Tm=Tspt となる。

図-2 では 20m 以深は S1 地点の層構成が水平に延びると仮定して描いた。そこで、物性 (Vs) もその仮定に基づき、修正 Vs 推定式を使えば、(Ts=)Tspt=Tm 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 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、20m 以浅を表面波探査による Vs で、20m 以深を修正 Vs 推定式による Vs 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

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 SHAKE) を実施した。K-Net 東予で観測された加速度時刻歴 (Amax=459cm/s²) を用いて、観測地点の工学的基盤入射波 (2E: Amax=351cm/s²) を求め、それを対象地盤の工学的基盤に入射波として入力した。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⁴⁾により、有効係数を 0.65 とし収束誤差 5% で等価線形解析を行った。

図-5 に(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、2~3Hz より高振動数では増幅は 1 以下に低下し、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-1 に地表面の最大加速度と最大速度を示す。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、運動応答で評価するのは適さず、せん断ひずみで評価に適切で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が、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。

6. 結 論

- (1) 深い地盤調査結果が 1 点あれば、常時微動測定と表面波探査による地盤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、Vs=150m/s, N 値 5 を下回る緩い砂層の液状化が原因である。
- (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、加速度や速度よりせん断ひずみ応答が適切である。
- (4) 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：隣接施設を管理する皆様に地盤調査資料を借用しました。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。地震工学研究室の学生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) 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.
 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 (V.耐震設計編), 1996.
 4) 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

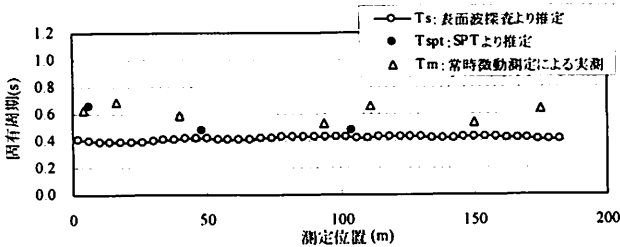


図-4 3 種の卓越周期 (Tm, Tspt, Ts) の分布 (Tm：微動, Tspt：SPT, Ts：表面波探査)

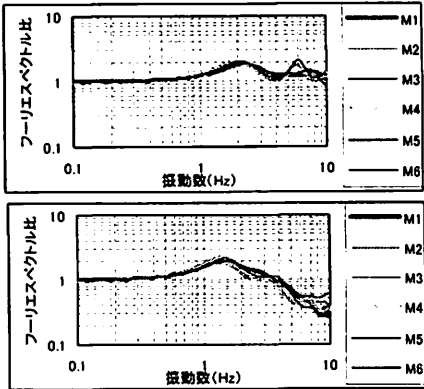


図-5 線形 (上) と非線形 (下) の伝達関数

表-1 地表面の最大加速度と最大速度

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	389.83	25.82
標準偏差	18.92	0.94