

静岡市清水区における常時微動観測

東海大学海洋学部 正会員 北 勝利

1. はじめに

静岡市は、想定される東海地震の震源域北東端部直上に位置し、地震により甚大な被害が予測されている¹⁾。同市清水区の地盤震動特性について、これまでに常時微動観測や重力探査結果に基づく地震基盤構造の推定が試みられている²⁾。一方表層地盤特性については、主としてボーリング資料や地形情報に基づく検討が行われている³⁾⁴⁾。

清水区市街地域の表層地質⁵⁾を図-1に示す。清水平野は南北を有度丘陵、庵原山地で挟まれた巴川の三角州として発達し、その表層は主に泥砂礫質～砂泥質より成る。平野部には秋葉山、入江岡の微高地が南北に並び、両微高地間狭窄部を巴川が通る。微高地東側は砂堆列を経て埋め立て地盤の清水港湾岸域に続き、西側には約8000年前以降に両微高地により閉鎖的となった内湾性環境で軟弱層が厚く堆積した巴川低地が形成されている⁴⁾。山口らはボーリング資料を元に、巴川流域の洪積世中期から沖積世に堆積した軟弱層を3層に分類し、これらを巴川層と名付けるとともに、東京下町地盤の層序との対応および各層の地盤工学的特徴を整理した。

本文では、清水市街地における表層地盤震動特性の把握を目的として実施した、常時微動観測結果について報告する。具体的には、微動記録より観測地点毎に2種の地盤震動特性指標(水平動と鉛直動の振幅比(H/V)スペクトルの卓越周期 T_0 、および波長40mのレイリー波速度 V_{r40})を求めるとともに、既往ボーリングデータより算出した地盤の特性値 T_G の場所的分布性状との対比を行った。

2. 観測方法

常時微動観測は、静岡市清水区の市街地公園など図-1中○内数字で示す32地点において、交通振動等が比較的軽微と考えられる夜間23～翌5時に実施した。全地点において1点3(互いに直交する水平2方向+鉛直方向)成分同時観測および辺長3mまたは10mの正三角形の頂点位置に鉛直動微動計を配置した3点アレイ観測を実施し、地点によりセンサ間隔20mの3点アレイ観測も行った。観測時間は1回あたり180秒とし、交通振動状況に応じてそれぞれ2～6回繰り返した。

観測では勝島製作所製動電型微動計PMK-110H(水平)およびPMK-110V(鉛直)(ともに固有周期1秒)を使用した。微動計からの電気信号は増幅器(同社製PUD-1)で増幅およびローパスフィルタ処理(カットオフ周波数30Hz)の後、16ビット分解能のPCカード型AD変換器(キースリー社KPCM CIA-16AI-C)を介してパーソナルコンピュータにデジタルデータとして収録した。サンプリング周波数は200Hzとした。

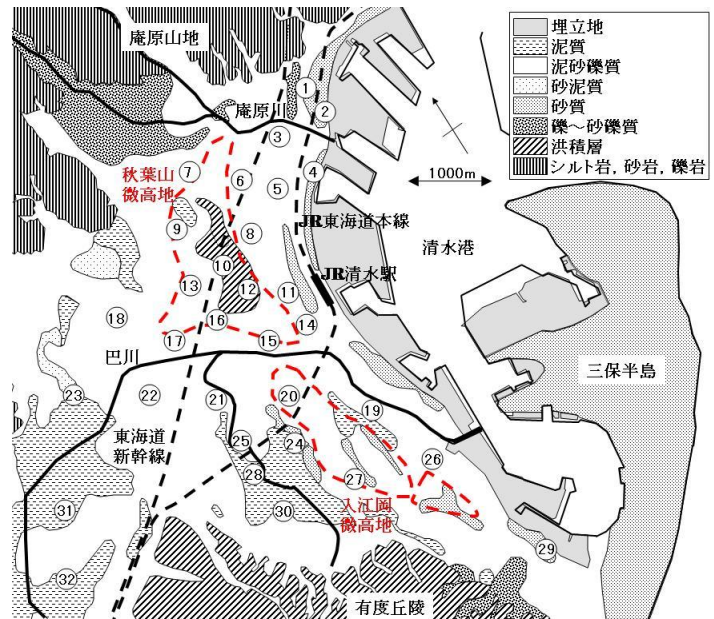


図-1 清水平野部の表層地質

3. データ処理方法

観測した速度時刻歴を 20.48 秒区間毎に分割し、交通振動の影響が軽微と考えられる 6~8 区間を選出、周波数解析に供した。1 点 3 成分同時観測データについては、0.3Hz 幅の Parzen ウィンドウによる平滑化の後、水平動と鉛直動の振幅比(H/V)スペクトルを求め、大町らの方法⁶⁾に基づき卓越周期 T_0 を決定した。一方 3 点鉛直動アレイ観測結果については、3 組の 2 点間コヒーレンスの平均値より空間自己相関法に基づきレイリー波の分散(周期~波速および波長~波速)関係を求めた後⁷⁾、波長 40m のレイリー波速度 V_{r40} を決定した。紺野・片岡は、地盤の地震動増幅率との相関性が高い表層 30m 区間の平均 S 波速度 V_{s30} が、波長 35m または波長 40m のレイリー波速度と概ね一致することを指摘している⁸⁾。

4. 観測結果と検討

地点 10(図-1 参照)での観測結果に基づく H/V スペクトルを図-2 に示す。図-1 より、同地点は秋葉山微高地に位置し、表層は洪積地盤で構成されている。図-2 より、H/V スペクトルの卓越周期は $T_0 \approx 0.19s$ となる。一方河川近傍で泥砂礫質地盤上に位置する地点 21 で観測した H/V スペクトルを図-3 に示す。卓越周期は $T_0 \approx 0.68s$ であり、地点 10 と比較して著しく長周期である。

全 32 観測点における H/V スペクトルの卓越周期の場所的分布を図-4 に示す。同図背景色は、N 値に基づき工学的基盤が比較的明確に設定できた 203 点分の既往ボーリングデータ⁹⁾より、次式を用いて計算した地盤の特性値 T_G の等高線分布を表している。

$$T_G = 4 \sum \frac{H_i}{V_{si}}$$

$$V_{si} = \begin{cases} 100N^{1/3} & (\text{粘性土}) \\ 80N^{1/3} & (\text{砂質土}) \end{cases}$$

ここに、 H_i : 第 i 層の層厚である。同図背景と図-1 を比較すると、有度丘陵や秋葉山微高地の表層洪積層の地域近傍で $T_G < 0.2s$ であるのに対し、

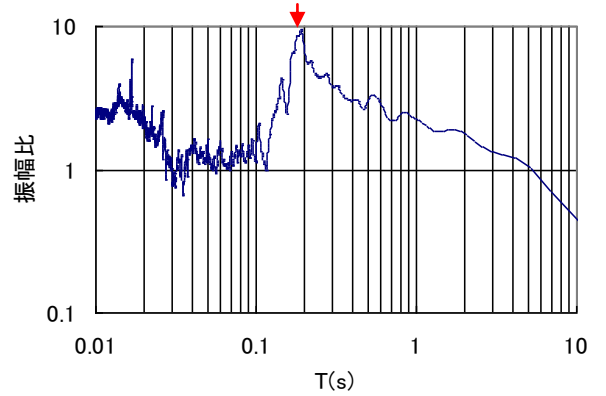


図-2 H/V スペクトル(地点 10)

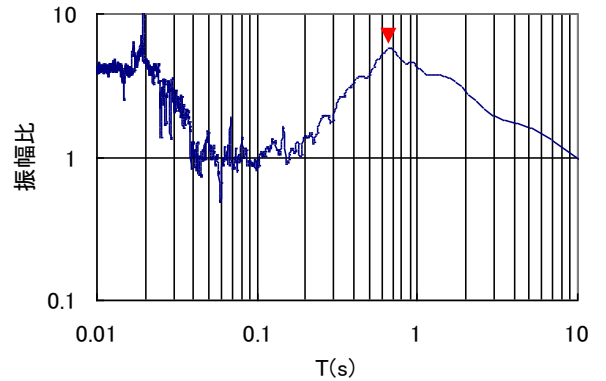


図-3 H/V スペクトル(地点 21)

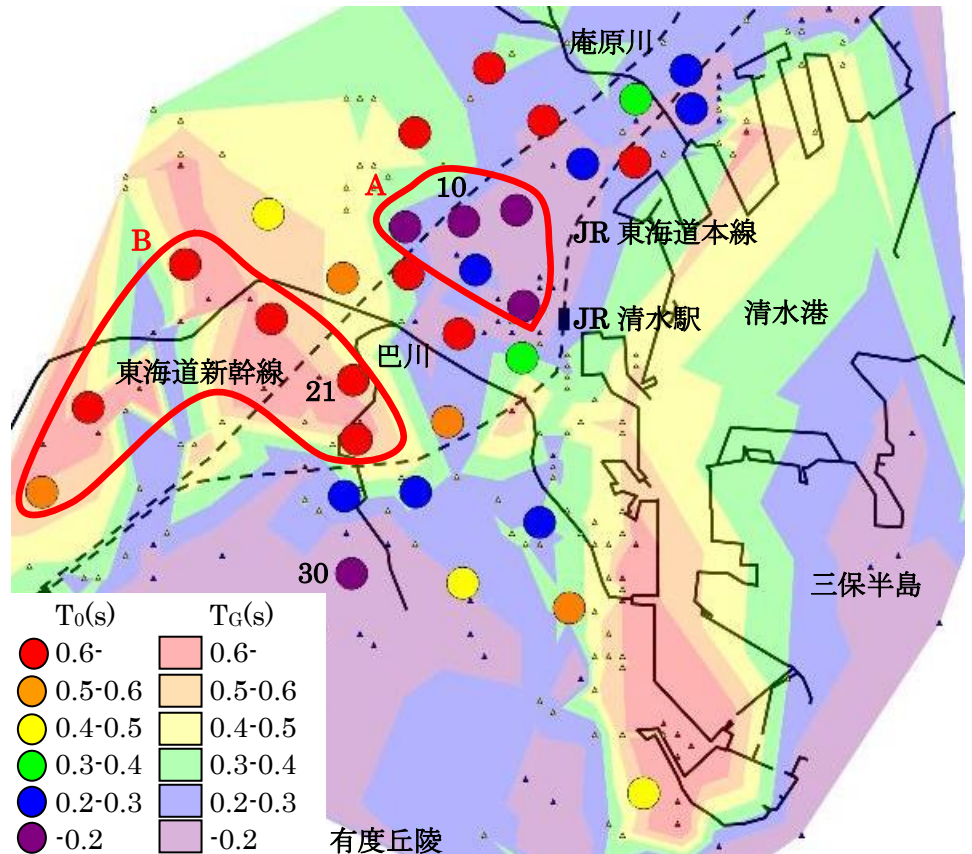


図-4 H/V スペクトルの卓越周期 T_0 と地盤の特性値 T_G の分布

清水港湾岸域の埋め立て地域や巴川低地(巴川合流部付近より上流(西側)において $T_G \geq 0.6s$ となっている。一方 H/V スペクトルの卓越周期 T_0 に着目すると、図-4 中赤線 A で囲まれた秋葉山微高地近傍の観測地点や有度丘陵麓部近傍の地点 30 では $T_0 < 0.3s$ 、赤線 B で囲まれた巴川合流部より上流沿岸の観測地点では $T_0 \geq 0.5s$ であり、 T_G と T_0 の分布性状は概ね調和的である。

地点 10 及び 21 における鉛直動アレイ観測結果より得られたレイリー波の波長～波速関係を、図-5 および図-6 に示す。これらの図より、波長 40 m に対するレイリー波速度は、地点 10 で $Vr_{40}=350m/s$ 、地点 21 では $Vr_{40}=190m/s$ となる。 Vr_{40} の場所的分布を図-7 に示す。地盤の特性値 T_G が短い秋葉山微高地近傍では $Vr_{40} \geq 350m/s$ (図中 A)、巴川低地近傍の軟弱地域では、 $Vr_{40} \leq 250m/s$ (同 B)となる。 Vr_{40} の場所的分布も T_G の分布性状と整合していることがわかる。

H/V スペクトルの卓越周期 T_0 と Vr_{40} の関係を図-8 に示す。両者は良い相関を示し、 T_0 の増大とともに Vr_{40} は減少するが、 $T_0 > 0.5s$ では $Vr_{40}=200 - 250 m/s$ でほぼ一定となっている。

地盤震動特性の詳細な評価を目的として、H/V スペクトルやアレイ観測より求めたレイリー波の分散関係を対象とした地盤構造同定が実施されている¹⁰⁾¹¹⁾。本文では、地点 10 における H/V スペクトルの卓越周期および周期～レイリー波速関係(図-9)を対象として、遺伝的アルゴリズム¹²⁾による地盤構造推定を試みる。遺伝的アルゴリズムでは、2 進法コーディング、ルーレット選択、一様交叉を採用し、個体数 50、遺伝子長 5bit、交叉率 0.7、突然変異率 0.03 として 100 世代まで計算した。

適応度関数 F は次式で定義した。

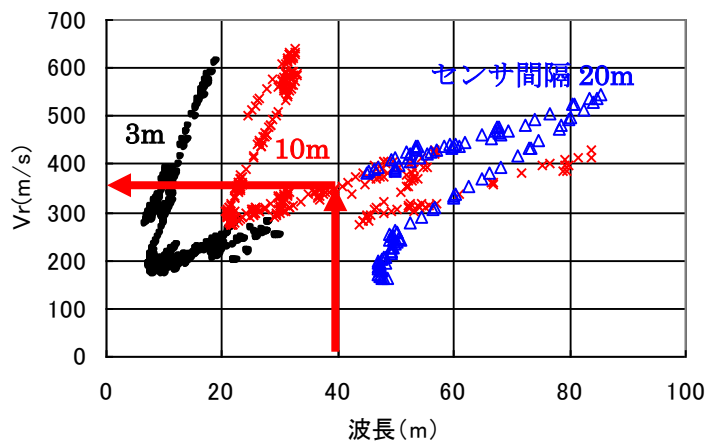


図-5 波長～波速関係(地点 10)

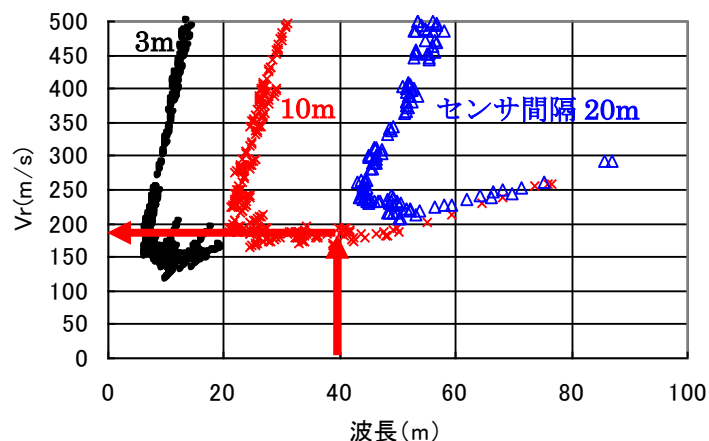


図-6 波長～波速関係(地点 21)

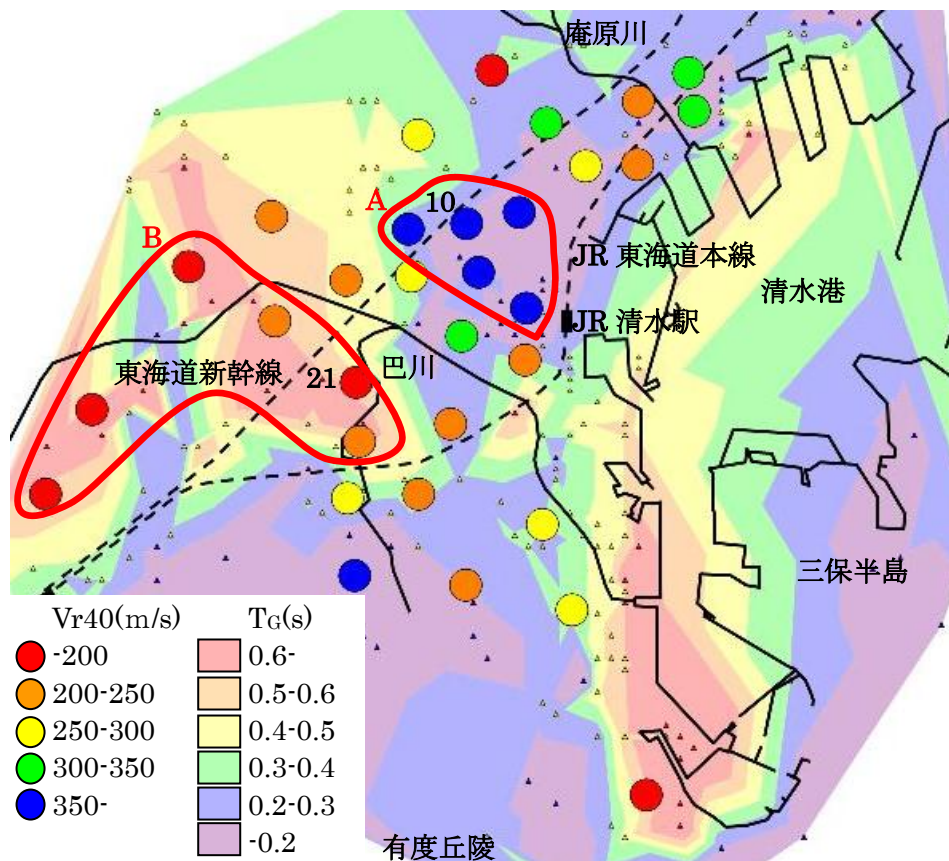


図-7 波長 40m に対応するレイリー波速度 Vr_{40} と地盤の特性値 T_G の分布

$$F = F_S + F_D$$

$$F_S = w_S \times \frac{1}{\left\{ \frac{T_{0m} - T_{0h}}{T_{0m}} \right\}^2}$$

$$F_D = w_D \times \frac{1}{\frac{1}{N_D} \sum_{i=1}^{N_D} \left\{ \frac{V_{rm}(T_i) - V_{rh}(T_i)}{V_{rm}(T_i)} \right\}^2}$$

ここに、 T_{0m} : H/V スペクトルの卓越周期の観測値、 T_{0h} : ハスケル法¹³⁾より計算したレイリー波楕円率 (H/V)が最大の周期、 $V_{rm}(T_i)$: 観測に基づく周期 T_i でのレイリー波速度、 $V_{rh}(T_i)$: ハスケル法によるレイリー波速度計算値である。ただしここでは、センサ間隔 3 ~ 20m のアレイ観測より求めた分散関係に対し最小自乗法に基づき折線近似した値を V_{rm} として用いた(図-9 参照)。 w_s , w_d は重み係数で、それぞれ 0.3、0.7 とした。

計算では、基盤を含めて地盤を 4 層構造と仮定して、表層~第 3 層の層厚と S 波速度および第 4(基盤)層の S 波速度を探索パラメータとした。各パラメータの探索範囲を表-1 に示す。密度および P 波速度はそれぞれ 2000kg/m³および 1500m/s で、基盤を含む全層で同一とした。

15 回試行計算し、適応度が最大の同定結果を図-9、表-1 に示す。また適応度上位 5 ケースについて、同定された地盤プロファイルを図-10 に示す。

参考文献 1) 静岡県防災局: 第 3 次被害想定報告書

2) 新井・野津: 日本建築学会大会学術講演梗概集,

B-2, pp.95-96, 2006. 3) 山口ほか: 静岡地学, 第

48 号, pp.1-7, 1983. 4) 大崎ほか: 東海大学海洋研究所研究報告,

第 22 号, pp.15-28, 2001. 5) 静岡県地震対策課: 静岡県地震対策

地質条件図 3(静岡-御前崎), 1994. 6) 大町ほか: 土木学会論文集,

No.489, pp.251~260, 1994. 7) 紺野: 土木学会論文集, No.654,

pp.367~375, 2000. 8) 紺野・片岡: 土木学会論文集, No.647,

pp.415~423, 2000. 9) 静岡県地震対策課: 静岡県地震対策基礎資料-

ボーリング柱状図集(中), 1997. 10)新井: 第 3 回地震防災シン

ポジウム講演概要集, 物理探査学会, pp.65-74, 2008. 11)山中:

第 3 回地震防災シンポジウム講演概要集, 物理探査学会, pp.89-96,

2008. 12)山中・石田: 建築学会構造系論文集, 468, pp.9-17, 1995.

13)Haskell, N.A.: BSSA, Vol.43, No.1, pp.17-34, 1953.

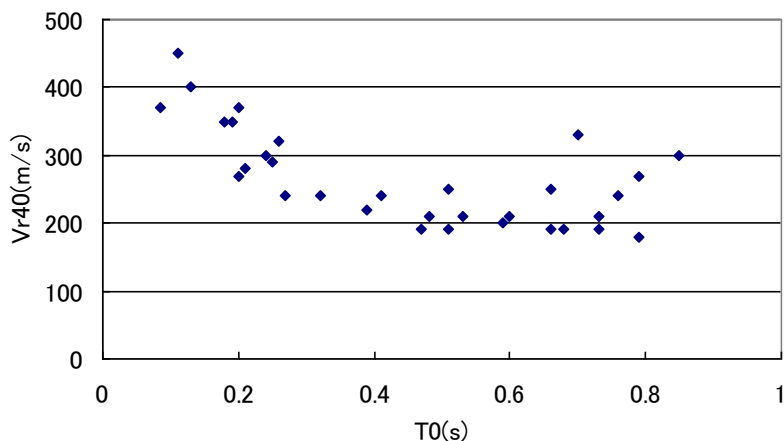


図-8 $T_0 \sim Vr_{40}$ 関係

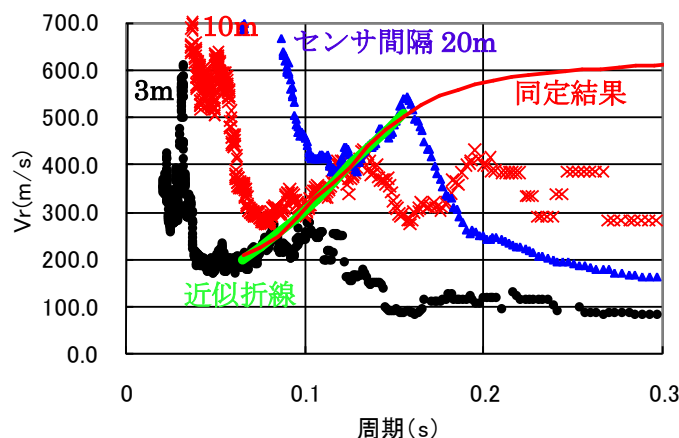


図-9 分散関係(地点 10)

表-1 パラメータの探索範囲と同定結果例

層番号	項目(単位)	最小値	最大値	同定値
1	Vs(m/s)	80	390	200
	層厚(m)	0.5	16	8
2	Vs(m/s)	80	390	350
	層厚(m)	0.5	16	3
3	Vs(m/s)	80	700	580
	層厚(m)	1	32	23
4(基盤)	Vs(m/s)	700	1320	700

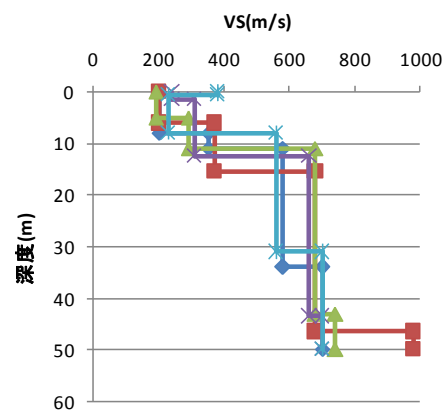


図-10 Vs の深度分布