

# 単点常時微動観測を用いた基盤深さ推定に関する研究

萩原 由 訓      野 畑 有 秀

## Study on Evaluation of Engineering Base Depth Using Microtremor Measurement

Yoshinori Hagiwara      Arihide Nobata

### Abstract

Microtremor measurement is a convenient technique with a lower cost than other exploration methods, such as PS-logging and boring in a ground profile investigation. The engineering bedrock depth distribution was evaluated using multi-independent-points microtremor measurements. The evaluated engineering bedrock depth from the H/V spectrum of the microtremor was compared using the real value obtained during soil improvement work. This revealed that the estimation error of the engineering bedrock depth was about 20%.

### 概 要

微動探査は、PS検層やボーリング探査といった他の探査と比べ低コストで簡便な探査法である。本報では、この点に着目し、対象とする敷地内で多数の点で微動を観測し、微動の水平上下スペクトル比(H/Vスペクトル)の卓越振動数から、面的に基盤深さの推定を行った。さらに、それらと地盤改良工事により判明した実際の基盤深さとの比較検討を行った。その結果、基盤と表層地盤のインピーダンス比が大きく、基盤と表層の2層でモデル化できるような単純な地盤である場合、微動のH/Vの卓越振動数から基盤深さの推定が可能であること、微動から推定した基盤深さの誤差は実基盤深さに対して概ね2割であり、簡易評価としては実基盤深さと対応していることを示した。

## 1. はじめに

地震被害低減のためには、地盤の振動特性の把握が不可欠である。地盤振動特性の把握のためには、PS検層やボーリング探査といった物理探査を用いて地盤構造を把握する必要がある。それらの物理探査の一つに常時微動観測による微動探査がある。微動探査は、コストや簡便さの点において他の探査と比べ優れているため、地震工学の分野で数多く利用されている。

微動とは、車両交通などの人間活動や、海洋波浪などの自然現象によって常に発生している、人間には感じることができないような小さな振動のことである<sup>1)</sup>。1950年代には微動の水平動スペクトルの卓越周期から地盤の1次固有周期を直接推定する研究が精力的に行われた<sup>例え</sup>ば<sup>2)</sup>。中村・上野<sup>3)</sup>は、地表面における水平成分のスペクトルを上下成分のスペクトルで除す(以下、H/VスペクトルまたはH/V)と、表層地盤のS波増幅特性が近似的に得られることを示した。この理論的解釈として実体波の1次元重複反射を用いた説明を試みている。一方、Arai and Tokimatsu<sup>4)</sup>は、H/Vスペクトルの周期特性は表面波の特性に支配されているとし、レイリー波やラブ波の影響を高次モードまで考慮する提案を行っている。最近では、拡散波動場理論を用いた解釈も提案されている<sup>5)</sup>。

これまで地震動評価に利用するために、H/Vスペクトルを用いた地盤構造推定や地盤増幅特性評価は数多く行われている<sup>例え</sup>ば<sup>6, 7)</sup>。一方で、基盤が傾斜している不整形な地盤構造である場合、平行成層を想定して地震動評価したものとの差異は大きくなる。そこで、より実際に近

い地震動評価を行うために、不整形な基盤構造を対象として微動を観測し、不整形な地盤構造を推定することが行われるようになってきている<sup>8~11)</sup>。

不整形地盤構造を対象とした微動観測は、多くの実測データを蓄積していくことが重要である。本報告では、不整形構造を有する敷地で行った微動探査のうち、1つの敷地を対象として以下の検討を行った。まず敷地内で行った多数の点での微動観測結果から簡易的な式を用いて面的な基盤深さの推定を行い、さらに、推定した基盤深さと実際の基盤深さの比較検討を行った。

## 2. 測定・解析の概要

### 2.1 測定機器および測定方法の概要

測定に使用した機器をPhoto 1に示す。微動計は加速度センサー、データロガー、バッテリー内蔵型<sup>12)</sup>であり、外部記録媒体に連続的に3方向の振動データを記録する。Table 1にこの仕様を示す。本微動計はリアルタイムに測定データをパソコンに送信する機能を有しているため、無線LANおよびモバイルバッテリーを用い、測定したデータをリアルタイムにパソコンで確認できるシステムを構築した(Fig. 1)。これにより、ノイズ等によるデータの品質低下の確認もその場ででき、再測定の手戻りを防止することが可能となった。

測定の時間は各点20~30分とし、水平2成分(NS,EW)および上下成分(UD)の3成分を同時測定した。測定点の間隔は10mまたは20mとした。測定の状況をPhoto 2に示す。なお、風によるノイズを避けるために、測定機器に

プラスチックケースをかぶせその上に重りを載せている。

## 2.2 解析の概要

解析の振動数範囲は、0.1Hz～20Hzとする。解析は、まず、各観測点で観測波形20～30分間について加速度振幅の2乗平均値の小さい順に20区間選定する。この際、1区間の長さは40.96秒とする(40.96秒×20区間=819.2秒)。選定した区間の波形データに対して、ゼロ線補正及びトレンドの除去を行い、データの頭と終わりにcos型の2秒間のテーパ処理を施す。続いて、作成した各観測点の

データセットに対し、バンド幅0.3HzのParzen windowをかけたうえでFFTを実施しH/Vスペクトルを求める。水平2成分を考慮したH/V算出は、(1)式に示すように、NS/UD(H<sub>NS</sub>/V)およびEW/UD(H<sub>EW</sub>/V)の相乗平均<sup>13)</sup>とする。

$$\frac{H_{ave}(\omega)}{V_{ave}(\omega)} = \sqrt[2n]{\left| \frac{H_{1NS}(\omega)}{V_1(\omega)} \times \frac{H_{1EW}(\omega)}{V_1(\omega)} \times \frac{H_{2NS}(\omega)}{V_2(\omega)} \times \frac{H_{2EW}(\omega)}{V_2(\omega)} \times \dots \times \frac{H_{nNS}(\omega)}{V_n(\omega)} \times \frac{H_{nEW}(\omega)}{V_n(\omega)} \right|} \quad (1)$$



Photo 1 使用した機器  
Instruments of Microtremor

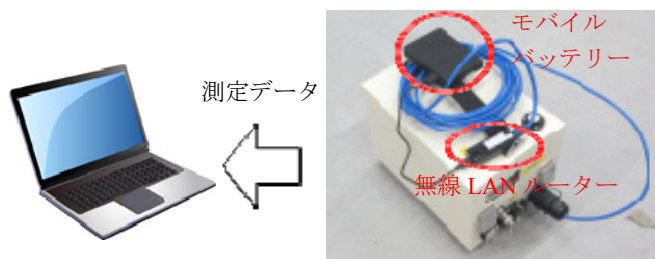


Fig. 1 測定システムの構成  
Constitution of the Measurement System



Photo 2 測定状況  
Situation of the Measurement

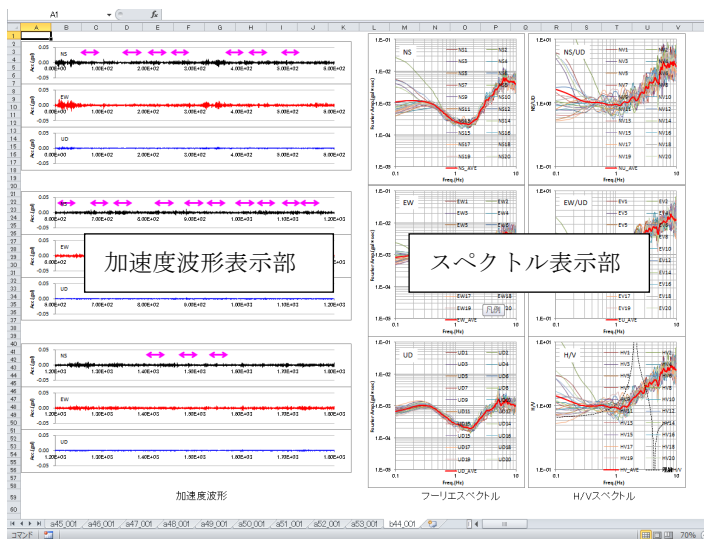


Fig. 2 処理プログラムの画面例  
Screen-Shot of Analysis Program

Table 1 使用した機器の仕様  
Specifications of Measuring Equipments

機器名	項目	仕様	
微動観測キット	センサー部 (加速度)	測定成分 最大計測レンジ	上下×1, 水平×2 ±4G
	ロガー部	サンプリング AD分解能	1, 40, 100, 200Hz 24bit
	寸法		172×245×160mm (突起部除く)
	重量		約5kg
	動作温度		0℃～+40℃

n : 区間数(n=20)。

エクセルを用いた処理プログラム (Fig. 2) を作成し、上記一連の処理をパソコンで行えるようにした。これにより、現地でH/Vスペクトルの確認が行え、卓越振動数の空間分布の概要の把握も行えるようになった。

### 3. 単点常時微動観測を用いた基盤深さ推定

#### 3.1 敷地の概要

当該敷地 (Fig. 3 中四角で示すエリア) は、宮城県北部に位置しており、北に河川が流れ約1km東には湾がある。J-SHIS<sup>14)</sup>の微地形分類では三角州・海岸低地に属している。一方、敷地の南部に標高40m程度の丘陵があり、西側は砂礫質台地に囲まれている (Fig. 3)。

本敷地では、微動測定前に行ったボーリング調査 (Fig. 4 中観測点c50の位置) により16m程度でN値50以上の基盤岩に達することが分かっている。その上部は完新世の堆積物で構成されており、そのN値は3以下と非常にゆるく、基盤との固さのコントラストが非常に大きい地盤構造となっている (Table 2)。Fig. 4に測定点の配置を示す。Fig. 4には、Fig. 3に青丸で示すボーリング、地形・地質などから推定された基盤深さ分布を参考として図示している。測定点は、この基盤深さを参考に基盤深さの変化が大きい箇所を中心に配置した。この基盤深さ分布によると、測定点を密に配置したFig. 4左下の範囲では、水平距離

30mの間に基盤が最大約10m深く (傾斜角18°程度) なっている。

#### 3.2 微動測定結果

3.2.1 代表的な観測点におけるH/V Fig. 4に示したc50およびq50におけるH/VスペクトルをFig. 5に示す。細線は1区間 (40.96秒) から求めたH/Vであり、その相乗平均を赤太線で示している。前述のようにc50は微動測定前に行われたボーリング地点であり、このボーリングの情報 (Table 2) から地盤モデルを作成し、レイリー波の理論H/Vを算出し観測結果と比較を行った。地盤モデル作成に際し、せん断波速度 (Vs) はN値から太田・後藤<sup>15)</sup>

Table 2 地盤の構成  
Layer Parameters

深 度	層厚 (m)	土 質	N値範囲
0.00 ~ 1.80	1.80	盛土	-
1.80 ~ 2.40	0.60	シルト混じり砂	3
2.40 ~ 11.50	9.10	シルト	0~3
11.50 ~ 15.90	4.40	砂	2~3
15.90 ~ 16.25	0.35	砂礫	50以上 (214)
16.25 ~		風化礫岩	50以上 (107~500)

N 値の ( ) は換算値

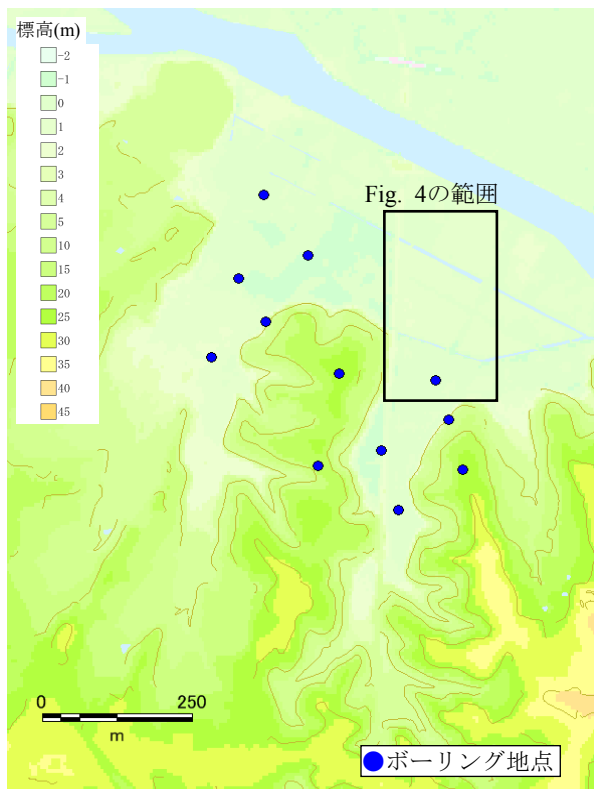


Fig. 3 測定点の周辺の地形  
Topography around Observation

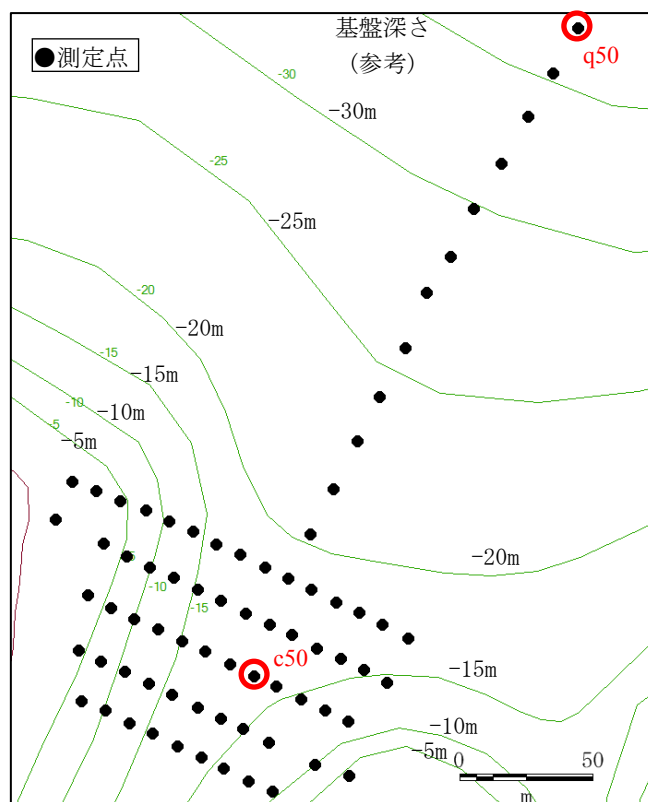


Fig. 4 想定基盤深さおよび観測点配置  
Depth of Engineering Bedrock and Distribution of  
the Observation Point

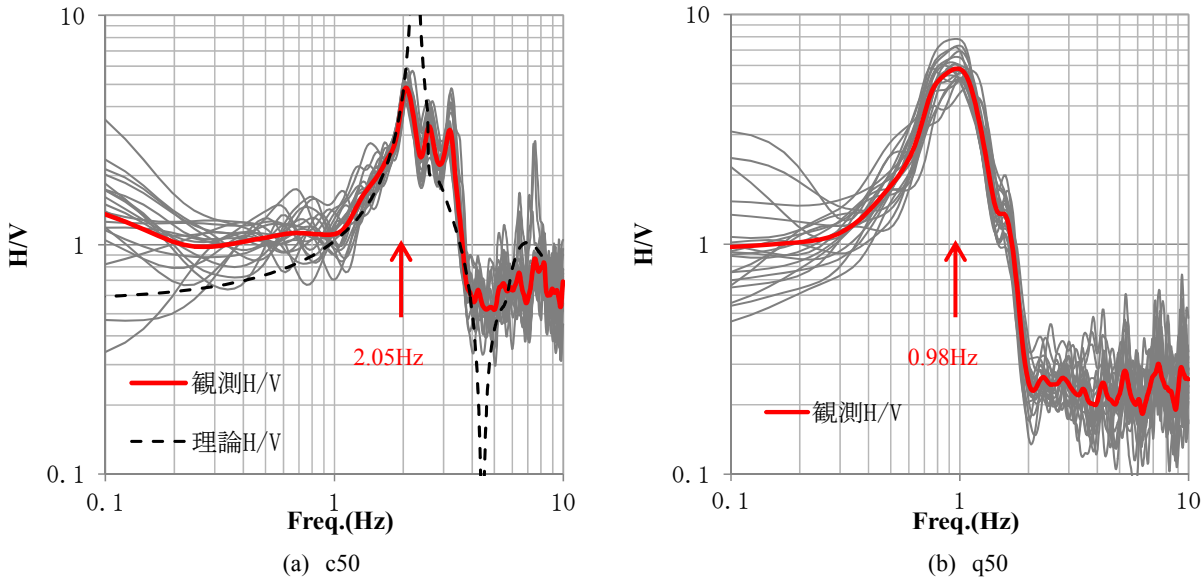


Fig. 5 観測 H/V スペクトルと理論 H/V スペクトルの比較  
Comparison between Observed H/V Spectrum and Theoretical H/V Spectrum

を、重量は地質区分から既往の文献<sup>16)</sup>を参考に設定することとした。算出したレイリー波の理論H/VをFig. 5に破線で示す。なお、レイリー波の理論H/Vは、時松・新井<sup>7)</sup>を参考に以下の式を用いており、2次モードまでを考慮することとした(M=2)。

$$\left(\frac{H}{V}\right)_R = \sqrt{\frac{P_{HR}}{P_{VR}}} \quad (2)$$

ここで、

$$P_{VR} : \sum_{j=0}^M P_{VRj}$$

$$P_{HR} : \sum_{j=0}^M P_{HRj}$$

$P_{VRj}$ ,  $P_{HRj}$  は、j次モードレイリー波の鉛直および水平変位成分の相対パワーであり、それぞれレイリー波のミディアムレスポンス  $A_{Rj}$  を用いて、

$$P_{VRj} = \left(\frac{A_{Rj}}{k_{Rj}}\right)^2 \left\{1 + \left(\alpha^2/2\right) \left(\frac{u}{w}\right)_j^2\right\} \quad (3)$$

$$P_{HRj} = P_{VRj} \times \left(\frac{u}{w}\right)_j^2 \quad (4)$$

$k_{Rj}$  : レイリー波の波数

$\left(\frac{u}{w}\right)_j$  : j次モードのレイリー波の地表での粒子軌

跡縦横比

$\alpha$  : 加振力の水平鉛直比 (水平/鉛直)

と表せる。

ただし、ここでは、加振力は鉛直成分のみを考慮することとし、水平成分は考慮しない( $\alpha = 0$ )とすることで、

$$P_{VRj} = \left(\frac{A_{Rj}}{k_{Rj}}\right)^2 \quad (5)$$

とした<sup>18)</sup>。

Fig. 5の卓越振動数を見ると、c50は理論H/Vと概ね一致し、スペクトルの形状の山谷も一致する。一方、q50では卓越振動数がc50(2.05Hz)よりも低振動数(0.98Hz)に移動しており、両者の地盤構造が大きく異なっている

ことが推察される。

3.2.2 卓越振動数分布および基盤深さ推定 Fig. 6に各観測点におけるH/Vスペクトルの卓越振動数をプロットした。この卓越振動数から、各観測点における基盤深さの推定を行った。若松・安井<sup>7)</sup>は表層1層地盤の解析から、インピーダンス比が2から3程度より大きい場合H/Vのピーク周期はS波増幅率にほぼ等しいことを示している。本敷地でもこの条件をほぼ満たしていると考えられるため、以下に示す4分の1波長則を用いて、基盤深さの推定を行った。下式のような簡易的な式を用いることで、多数の地点の解析も容易に行うことができ、観測したその場で基盤深さの推定結果を確認することが可能となる。

$$H = Vs/4f \quad (6)$$

H(m) : 表層層厚

Vs(m/s) : 表層地盤のせん断波速度

f(Hz) : 卓越振動数

なお、ボーリングが行われているc50を基準とし、ここでのVsはc50の卓越振動数(Fig. 5(a))とボーリングによる基盤深さから求めた値を、全観測点に適用した。Fig. 7には、Fig. 6中に矢印で示したように北東側から見た推定基盤深さを示す。

また、本敷地では微動測定後、基盤までの地盤改良が行われている。その範囲をFig. 6中破線で示す。そこで、地盤改良の施工記録による基盤深さとH/Vスペクトルの卓越振動数から推定した基盤深さの比較を行う。Fig. 8には、地盤改良の施工記録深さ(以下、実基盤深さ)と微動のH/Vスペクトルを用いて推定した基盤深さとの比較を示す。同図には両者が等しくなる直線を実線で、1.2倍および0.8倍になる関係破線で示している。微動から推定した基盤深さは、実基盤深さと良く対応しており、63%

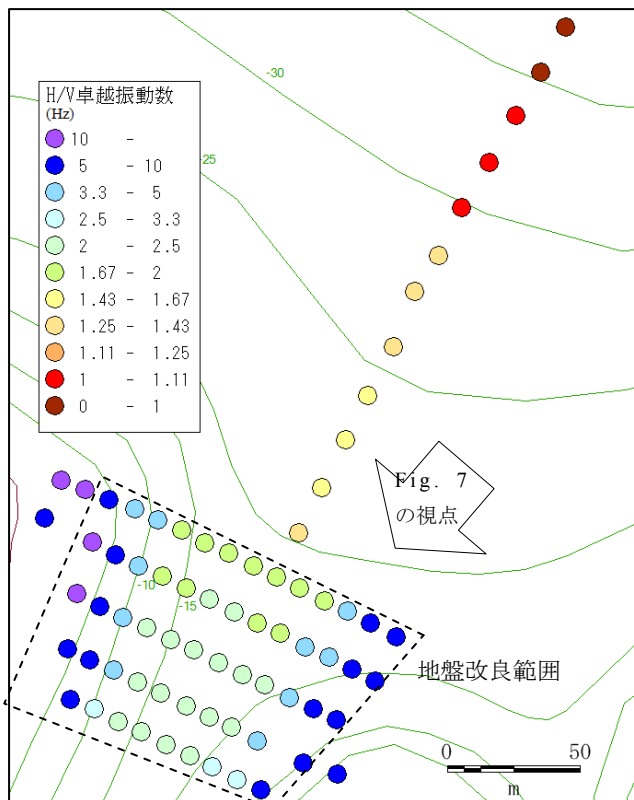


Fig. 6 各観測点の H/V スペクトルの卓越振動数(Hz)  
Predominant Frequency of Observed H/V Spectrum

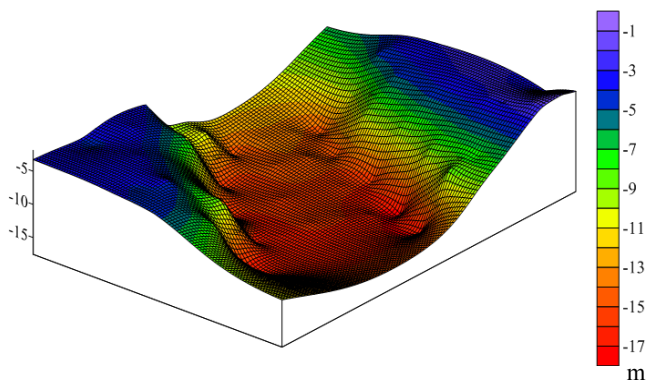


Fig. 7 推定基盤深さ (3D 表示)  
Estimate Value of Engineering Bedrock Depth Using H/V  
Spectrum (3D)

が0.8から1.2倍の範囲内の予測値になった。なお、全観測点に対する実基盤深さと推定値との2乗平均平方根 (RMS) 誤差は2.5mである。

今後は、誤差を生じている原因についての分析を行い、基盤深さ推定のさらなる精度向上を行っていく必要がある。

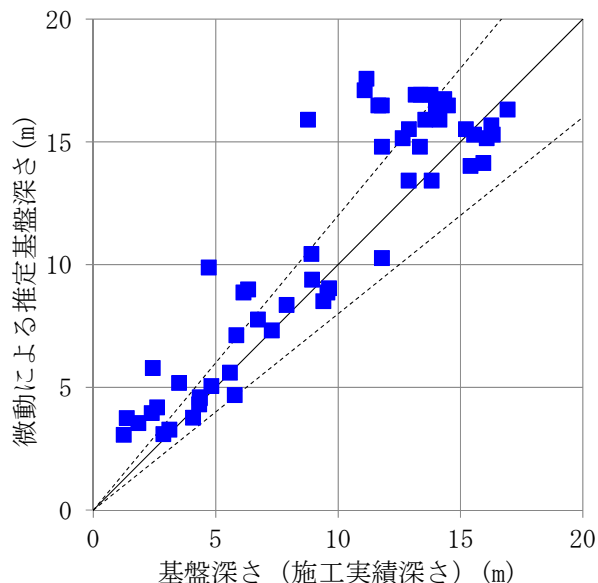


Fig. 8 微動から推定した基盤深さと実基盤深さとの比較

Comparison between the Estimate Value of Engineering Bedrock Depth Using H/V Spectrum and Real Value by Record of Soil Improvement Work

#### 4. まとめ

対象とする敷地内で多数の点で微動を観測し、その H/Vスペクトルの卓越振動数から面的に基盤深さの推定を行った。さらに、推定結果と実際の基盤深さとの比較検討を行った。得られた結果を以下に示す。

- 1) 基盤と表層地盤のインピーダンス比が大きく、基盤と表層の2層でモデル化できるような地盤である場合、微動のH/Vの卓越振動数から簡易的な式により、基盤深さの推定が可能である。
- 2) 微動から推定した基盤深さは、実基盤深さと良く対応しており、全観測点の6割以上が実基盤深さに対して2割の誤差範囲に収まっている。また全観測点に対する実基盤深さと推定値との2乗平均平方根 (RMS) 誤差は2.5mであった。

#### 参考文献

- 1) 新井洋：地盤における微動H/Vスペクトルの利用法、微動の利用技術、日本地震工学会微動利用技術研究委員会、pp.1-34、2011.12
- 2) Kanai,K., T.Tanaka：On Microtremor VIII, Bulletin of the Earthquake Research Institute, Vol.39, the Univ. of Tokyo, pp.97-114, 1961.3
- 3) 中村豊, 上野真：地表面震動の上下成分と水平成分を利用した表層地盤特性推定の試み、第7回日本地震工学シンポジウム、pp.265-270,1986
- 4) Arai,H. and K.Tokimatsu：S-wave Velocity Profiling by Inversion of Microtremor H/V Spectrum, Bulletin of

- Seismological Society of America, Vol.94, No.1, pp.53-63, 2004
- 5) Sánchez-Sesma, F. J., Rodriguez, M., Iturraran-Viveros, U., Luzon, F., Campillo, M., Margerin, L., Garcia-Jerez, A., Suarez, M., Santoyo, M. A. and Rodriguez-Castellanos, A. : A theory for microtremor H/V spectral ratio - application for a layered medium, *Geophysical Journal International*, Vol.186, pp.221-225, 2011
  - 6) 新井洋：微動の分散特性とH/Vスペクトルの逆解析によるS波速度構造の推定, 第10回日本地震工学シンポジウム, Vol.1, pp.613-618, 1998
  - 7) 若松邦夫, 安井謙：短周期微動の水平上下スペクトル比による地盤増幅特性評価の可能性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第471号, pp.61-70, 1995.5
  - 8) 上林宏敏, 川辺秀憲, 釜江克宏, 宮腰研, 堀家正則：傾斜基盤構造推定における微動H/Vスペクトルの頑健性とそれを用いた大阪平野南部域の盆地構造モデルの改良, 日本建築学会構造系論文集, 第74巻, 第642号, pp.1453-1460, 2009.8
  - 9) 元木健太郎, 渡辺哲史, 加藤研一, 武居幸次郎, 山中浩明, 飯場正紀, 小山信：微動アレイ計測に基づく傾斜基盤構造の推定, 日本建築学会構造系論文集, 第78巻, 第688号, pp.1081-1088, 2013.6
  - 10) 境茂樹, 井川望, 竹中宏明, 瀬尾和夫, 飯場正紀：基盤傾斜地における常時微動H/Vスペクトルと基盤深さに関する検討, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.793-794, 2010.9
  - 11) 松島信一, Florent De Martin, 川瀬博, Sánchez-Sesma：拡散波動場における微動の理論水平上下スペクトル比の方位依存性と不整形基盤形状の関係, 第14回日本地震工学シンポジウム, OS3-Thu-PM2-2, 2014.12
  - 12) 先名重樹：地形・地盤分類および常時微動のH/Vスペクトル比を用いた地震動のスペクトル増幅率の推定, 防災科学技術研究所資料, 第353号, 236p., 2011.1
  - 13) 時松孝次・中條有二, 田村修次：短周期微動の水平鉛直振幅比と地盤特性の関係, 日本建築学会構造系論文集, 第457号, pp.11-18, 1994.3
  - 14) J-SHIS：地震ハザードステーション, <http://www.j-shis.bosai.go.jp/map/>, 2015/6/10閲覧
  - 15) 太田裕・後藤典俊：横波速度を推定するための実験式とその物理的背景, 物理探鉱, 第31巻, 第1号, pp.8-17, 1978.2
  - 16) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編, 1990
  - 17) 時松孝次・新井洋：レイリー波とラブ波の振幅比が微動の水平鉛直スペクトル比に与える影響, 日本建築学会構造系論文集, 第511号, pp.69-75, 1998.9
  - 18) 鈴木晴彦：地震記録を用いた深部地盤のS波速度構造モデルの推定法に関する研究, 東京工業大学大学院 環境理工学創造専攻, 博士論文, p.23, 2009.9