

# 常時微動観測に基づく不整形地盤箇所の簡易抽出法

田中 浩平\* 坂井 公俊\*

Simple Method for Locating the Irregular Ground where the Engineering Bedrock is Inclined by Means of Microtremor Observations

Kohei TANAKA Kimitoshi SAKAI

Seismic ground motion can be locally amplified at the site where the engineering bedrock is inclined. The amplification due to the irregular ground should be taken into consideration in design ground motion. So, it is necessary to judge whether the engineering bedrock of the site is irregular or not. This irregularity is judged from the shape evaluated by interpolation between some soil surveys. The surface ground under railway / road structures greatly varies with the construction site and there is a possibility of overlooking the irregular ground. In this paper, we proposed the estimation method of the shape of the engineering bedrock using the vertical Fourier spectrum by microtremor observations. Specifically, the ratio of the vertical Fourier spectrum according to the depth of the engineering bedrock is estimated based on the theory of identifying the Green's function between sites. Finally, we performed microtremor observations on the irregular ground and it is confirmed that the shape of the bedrock can be estimated appropriately.

キーワード：常時微動観測，不整形地盤，フーリエスペクトル比，耐震設計上の基盤面

## 1. はじめに

地震動評価において、耐震設計上の基盤面以浅の表層地盤の挙動を把握することは重要な項目の1つである。特に、基盤が傾斜しているような不整形地盤では、地震動が局所的に増幅することがあり<sup>1)</sup>など、これにより構造物被害が発生することが多数報告されている<sup>2) 3) 4)</sup>など。

基盤の不整形性が地震増幅に与える影響については、数値解析による検討が実施されている<sup>5) 6) 7)</sup>など。これらの結果は、各種耐震標準にも反映されている。鉄道構造物の耐震設計<sup>8)</sup>においては、基盤の傾斜が1:10以上の地点では地盤不整形性の影響を考慮する必要があり、地表面位置での設計地震動の割増を行っている。

建設地点の基盤が傾斜していることを確認するためには、複数のボーリング位置における基盤深度を補間して、基盤傾斜角の評価を行うことが一般的である。しかし、鉄道・道路構造物のように線状に連続する構造物群では、調査費用の点から調査地点数は限られる。また、建設地点に局所的な増幅をもたらす基盤の不整形性が必ずしも建設敷地内に存在するとは限らない。よって、建設地点周辺で追加の調査を実施することが望ましいが、これらは調査箇所や費用の制約から現実的でない。

そこで、小型の携帯機材で短時間かつ非破壊の調査が可能な物理探査手法を用いた不整形地盤の抽出方法が提案されている。上林ら<sup>9)</sup>は、微動H/Vスペクトル比と分散曲線の組み合わせにより基盤深度分布を評価してお

\* 鉄道地震工学研究センター 地震動力学研究室

り、不整形地盤の抽出にH/Vスペクトル比を用いることの頑強性を指摘している。佐藤ら<sup>10)</sup>は、微動アレイ探査法により得られた位相速度を多点で同時逆解析を行うことにより傾斜基盤構造を推定する手法を提案している。野上ら<sup>11)</sup>は、微動アレイ探査と重力探査を組み合わせることにより、基盤深度分布を評価している。元木ら<sup>12)</sup>は、MND検層等の調査で基盤深度が明らかな地点で、各種物理探査手法による推定深度分布の比較を行っている。

上記検討でも指摘されているが、微動アレイ観測やH/Vスペクトル比は、理論的背景として水平成層仮定での表面波の伝播を扱っていることから、基盤が著しく傾斜する不整形地盤での適用には特別の注意を要する。また、重力探査は広域の三次元基盤構造の推定に広く活用される技術であるが、得られる構造は密度構造であり、地震時に特に重要となる地盤の速度構造を決定するためには微動観測等の併用が必要となる。反射法や屈折法による探査は精度が高いが、探査が大掛かりとなる。

そこで、本論文では、拡散波動場の理論<sup>13) 14)</sup>に基づいて、2点同時の単点微動観測の結果から2点間のグリーン関数の違いを推定するZhang and Morikawaの手法<sup>15)</sup>を用いることで、基盤形状を推定する手法を提案する。

## 2. 常時微動を用いた不整形地盤箇所の抽出法

### 2.1 提案手法の理論的背景

観測点に全方位から等密度でエネルギーが入射する拡散波動場の理論<sup>13) 14)</sup>によると、2つの観測点A, B間のク

特集：防災技術

ロススペクトルのアンサンブル平均と  $A, B$  の 2 点間のグリーン関数の虚部 (以下,  $\text{IoG} = \text{Imaginary part of Green's function}$  と呼称) の関係は, 式 (1) で与えられる<sup>14)</sup>。

$$\langle F_l(\mathbf{X}_A, \omega) F_m^*(\mathbf{X}_B, \omega) \rangle = -2\pi E_s k^{-3} \Im[G_{lm}(\mathbf{X}_A, \mathbf{X}_B, \omega)] \quad (1)$$

ここで  $F_i(\mathbf{X}_j, \omega)$  ( $i = l, m, j = A, B$ ) は, 位置ベクトル  $\mathbf{X}_j$  なる観測点  $j$  における  $i$  方向成分の変位場 (周波数  $\omega$  のフーリエ成分),  $E_s, k$  はそれぞれせん断波の平均エネルギー密度および波数,  $G_{lm}(\mathbf{X}_A, \mathbf{X}_B, \omega)$  は観測点  $B$  における  $m$  方向成分の単位調和加振力に対する, 観測点  $A$  の  $l$  方向成分の変位を表わすグリーン関数である。\* は複素共役,  $\Im [ ]$  は複素数の虚部,  $\langle \rangle$  はアンサンブル平均を表す。また, 式 (1) における  $\Im [G_{lm}]$  が  $\text{IoG}$  を表す。

ここで微動の上下動成分のみを利用すると, 式 (1) において, 同一観測点  $A$  の鉛直成分  $z$  は式 (2) のようになる。

$$\langle F_z(\mathbf{X}_A, \omega) F_z^*(\mathbf{X}_A, \omega) \rangle = -2\pi E_s k^{-3} \Im[G_{zz}(\mathbf{X}_A, \mathbf{X}_B, \omega)] \quad (2)$$

式 (2) の左辺は, 観測点  $A$  における上下動成分のパワースペクトル  $S_{AA}(\omega)$  である。一方, 式 (2) の右辺は, 波動場のエネルギー  $E_s$  と  $\text{IoG}$  の関数である。ここで,  $E_s$  と  $k$  は未知であり, 観測値のみから  $\text{IoG}$  を決定することはできない。しかし, 観測点  $A, B$  の上下動のパワースペクトルの比をとると, 未知量は消去され, 式 (3) となる。

$$\frac{S_{AA}(\omega)}{S_{BB}(\omega)} = \frac{\Im[G_{zz}(\mathbf{X}_A, \mathbf{X}_A, \omega)]}{\Im[G_{zz}(\mathbf{X}_B, \mathbf{X}_B, \omega)]} \quad (3)$$

式 (3) より, 微動スペクトル比と  $\text{IoG}$  比が関連付けられた。

## 2.2 提案手法の概要

式 (3) により, 2 地点同時の常時微動観測から得られる鉛直方向のパワースペクトル比と  $\text{IoG}$  の比が一致することがわかった。すなわち, 不整形地盤を対象とした数値解析により  $\text{IoG}$  比と基盤形状の関係を整理することで, 観測のパワースペクトル比からその地点での基盤形状を把握することが可能となる。本検討では,  $\text{IoG}$  比における変動の特徴量として, ピークを与える周期  $T_{\text{IoG}}$  に着目した整理を行う。地盤を堆積層と基盤層の単純な 2 層構造と仮定した場合,  $T_{\text{IoG}}$  は表層地盤の層厚に大きく

依存するため, 基準点 ( $\text{IoG}$  比の分母とする観測点: 図 1 (a) における基準点) を同じくした移動観測点 (図 1 (a) の観測点  $A, B$ ) における  $\text{IoG}$  比のピーク周期の差  $\Delta T_{\text{IoG}}$  は, 基盤と堆積層の境界面の深度の変化量  $\Delta H$  の関数となると推察される。この関係を数値解析等により整理できれば, 2 点間の基盤深度差を常時微動観測から評価することができる。提案手法の手順は, 以下の通りである。

- ① 地表面で基準点と同時の常時微動観測を, 離間距離  $\Delta x$  の  $A, B$  地点で実施する (図 1 (a))。最終的な目標はこの 2 点間の基盤深度差  $\Delta H$  の評価である。
- ② 微動波形から, 各観測セットにおける基準点からの鉛直フーリエスペクトル比を評価し, それぞれのピーク周期  $T_{\text{IoG}}^A, T_{\text{IoG}}^B$  を読み取る (図 1 (b))。
- ③ 2 セットの鉛直フーリエスペクトル比に見られるピーク周期差  $\Delta T_{\text{IoG}}$  を評価する (図 1 (b))。
- ④ 別途実施する数値解析結果に基づき評価した  $\Delta T_{\text{IoG}}$  と  $\Delta H$  の関係式から,  $A, B$  地点間の基盤深度差  $\Delta H$  を評価する (図 1 (c))。

上記①～④の作業を対象区間で繰り返し実施し, 対象区間内の相対的な基盤深度の変化を推定する。さらに, ボーリング調査等による基盤深度がわかっている地点を基準とすることで, 対象区間内全域の基盤深度分布を評価することも可能となる。本検討では,  $\Delta T_{\text{IoG}}$  と  $\Delta H$  の関係を評価するための数値解析を 2.3 節, 実サイトにおける提案手法の適用性検証を 3 章において説明する。

## 2.3 数値解析に基づく基盤変化推定法の構築

### 2.3.1 数値解析の概要

不整形地盤における数値解析を実施し, 基盤深度の変化に伴う  $\text{IoG}$  比の変動を把握する。数値解析は 3 次元有限要素法による線形解析とし, 図 2 に示す地層境界に傾斜を有する 3 次元モデルを作成した。地盤は堆積層と基盤層の 2 層からなるものとし, 単位体積重量  $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$ , ポアソン比 0.45 とした。基盤層のせん断弾性波速度  $V_s = 400 \text{ m/s}$  とし, これが側方および下方に半無限に連続するものとして, ダッシュポットによる粘性境界を設定した。

$\text{IoG}$  比の変動に影響を与えると考えられる, 基盤層の傾斜角と堆積層の  $V_s$  のパラメータを変化させた 7 ケース

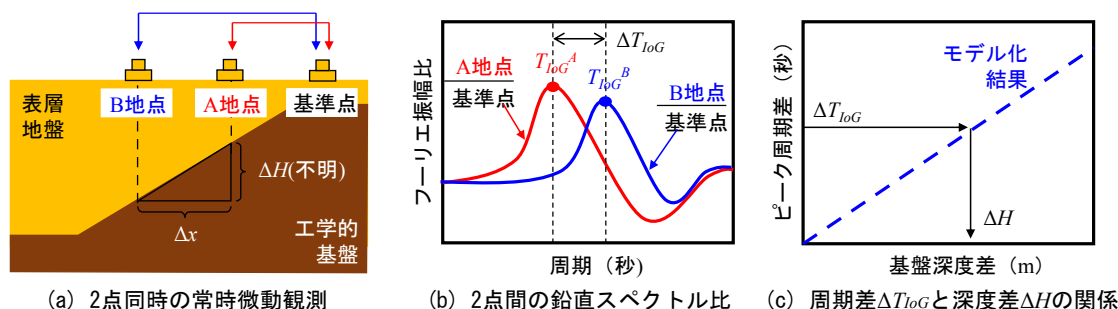


図1 常時微動観測に基づく不整形地盤箇所の抽出方法の概要

のモデルを作成した(表1)。設定した解析モデルサイズは長さ1200m×高さ60m×奥行き幅200mである。メッシュサイズは、全てのケースにおいて解析保証周波数10Hzを満足できるように十分細かくとることとし、地層境界は、ボクセル要素による表現ではなく、図2に示す傾斜形状を可能な限り再現したメッシュ分割とする。

解析は時刻歴応答解析により実施し、加振点は地表位置に表1に示す間隔で設定し、それぞれ鉛直方向にインパルス力を与える。解析時間は10.24秒、解析時間刻みは0.005秒とした。動的解析時の減衰定数は、0.5Hzと10Hzで3%となるレーリー減衰を設定することとし、全ケースで共通とした。

2.3.2 数値解析の結果(ケース3-1)

解析結果の一例として、ケース3-1(基盤傾斜1:10、表層Vs=100m/s)を示す。結果表示地点は、図2に示す60m間隔のA~J地点である。基準点は解析モデル右端である。

各地点の鉛直方向の加速度応答波形を図3に示す。D地点とI地点で評価した応答波形と基準点の応答波形の比較を示している。なお、D地点とI地点の違いを確認するために縦軸を拡大して表示している。基盤からの反射波が含まれるような後続波において、D地点とI地点の波形に違いがみられる。

各地点で評価したIoGを図4に示す。地点ごとのIoGには直線上の凹凸の違いが確認できる。また、各地点のIoGに対して基準点からの比を取ったものを図5に示す。基盤が傾斜している地点に該当するC~J地点では明瞭なピークの変化が確認できる。一方でA、B地点では深度方向の堆積構造は同一であるため、IoG比もほぼ一致している。IoG比のピーク周期は、基盤深度が浅くなるにつれて短くなる。

図5で評価したIoG比から、各地点のピーク周期 $T_{IoG}$ を評価した。IoG比において明瞭なピークがみられる基盤傾斜箇所C~J地点において、ピーク周期をプロットしたものを図6に示す。ピーク周期は評価地点位置に対して直線状に変化する。この結果から、基盤が直線的に傾斜する不整形地盤では、評価地点が傾斜基盤上のどの位置にあったとしても、ピーク周期が基盤深度に対してほとんど線形に変動することがわかる。

続いて、C~J地点の範囲にある20m間隔の評価地点において、各点のピーク周期差 $\Delta T_{IoG}$ と基盤深度差 $\Delta H$ を評価したものを図7に示す。ピーク周期差と基盤深度差は線形に変化する。この結果は、傾斜基盤上の様々な2点の組合せから得られており、観測点直下の基盤傾斜の状況が、事前に把握できない場合にも活用できる。すなわち、観測で2点間のピーク周期差が得られれば、その2点間での基盤深度差が評価できることを表している。

2.3.3 全解析結果の総括

$V_s=100\text{m/s}$ 、 $200\text{m/s}$ のそれぞれのケースに対して、基

準点からのIoG比のピーク周期 $T_{IoG}$ をプロットしたものを図8に示す。基盤傾斜角に関係なく基盤深度とピーク

表1 検討ケース一覧

ケース No.	傾斜角度	傾斜部の長さ (m)	表層 Vs(m/s)	評価地点間隔 (m)
1-1	1:20	1000	100	10
1-2	1:20	1000	200	10
2-1	1:15	750	100	10
3-1	1:10	500	100	10
4-1	1:8	400	100	10
5-1	1:5	250	100	20
5-2	1:5	250	200	10

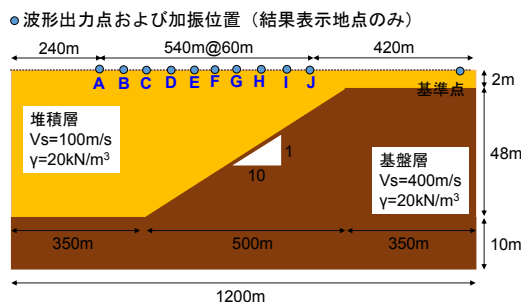


図2 3次元有限要素法モデルの一例(ケース3-1)

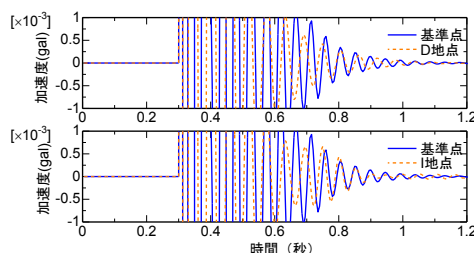


図3 鉛直方向の応答加速度波形の比較

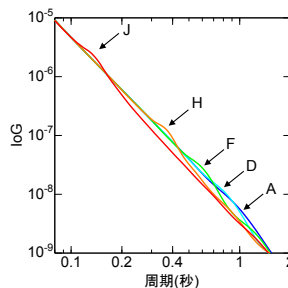


図4 応答加速度波形から評価したIoG

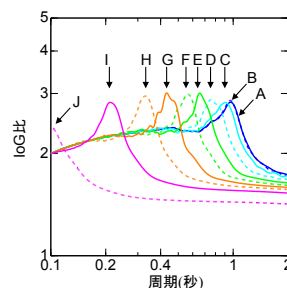


図5 応答加速度波形から評価したIoG比の比較

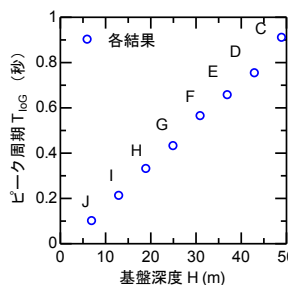


図6 IoG比にみられるピーク周期 $T_{IoG}$ の変化

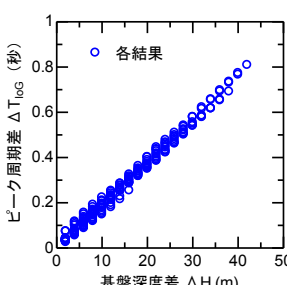


図7 2点間の層厚差 $\Delta H$ と周期差 $\Delta T_{IoG}$

特集：防災技術

周期はほぼ同一の直線となる。また、 $V_s=200\text{m/s}$  のケースでは、 $V_s=100\text{m/s}$  のケースと比較して直線の傾きが 0.5 倍になることがわかった。

これらの直線上の点で、2.3.2 項と同様にピーク周期差  $\Delta T_{IoG}$  と基盤深度差  $\Delta H$  を整理したものを図 9 に示す。いずれのケースにおいても同様の線形関係が見られ、この結果から基盤の傾斜角や観測点直下の基盤の状況によらない、ピーク周期差と基盤深度差の関係を取り出すことができた。この関係を式 (4) のようにモデル化した。

$$\Delta T = \frac{1.9 \cdot \Delta H}{V_s} \quad (4)$$

ここで、 $\Delta H$  は基盤深度の差、 $\Delta T$  はピーク周期の差、 $V_s$  は表層地盤のせん断波速度を表す。式 (4) は図 9 に示すようにシミュレーション結果を概ね表現できており、この結果を用いることで、 $\Delta T$  から各地点の基盤深度の変化  $\Delta H$  を推定することが可能である。

3. 提案手法の有効性の検証

ボーリング調査により事前に基盤形状の変化が把握できている地点において常時微動観測に基づいた提案法を適用し、基盤推定法の有効性を確認する。

3.1 観測の概要

観測を行う不整形サイトの概要を図 10 に示す。この区間のボーリング調査は図 10 に示す 3 地点で実施されており、これらの地点での N 値の深度分布を図 11 に示す。各ボーリング地点で N 値 50 以上が連続する深度を基盤深度として読み取った。調査結果から測線の起点側の基盤が浅く、観測区間内で急激に基盤が深くなることが分かっている。

常時微動観測を行うセンサーは 8 台で、各センサーの配置位置は図 10 の▽に示すとおりである。センサーには速度計 (CR4.5-1S, ANET 社製) を用い、各点において水平直交 2 成分と上下動の 3 成分を観測した。センサーは河川を横断する方向に河川敷に 20m 程度の間隔で設置した。観測は、200Hz サンプルングで 30 分間の観測を行った。

3.2 観測結果と基盤深度の推定

常時微動記録を 20.48 秒間隔のブロックに分割して、ブロックごとに鉛直フーリエスペクトルを評価し、0.2Hz の parzen-window を施して平滑化した。鉄道や自動車等の外乱が小さい記録から 40 ブロックのデータを平均したものを各センサー位置での鉛直スペクトルとした。各地点の鉛直スペクトルに対して ch1 の鉛直スペクトルを基準としてスペクトル比を評価したものを図 12 に示す。実際の地盤は単純な 2 層地盤ではないため、スペクトル比は様々な周期にピークを有する。また、ピーク形状は

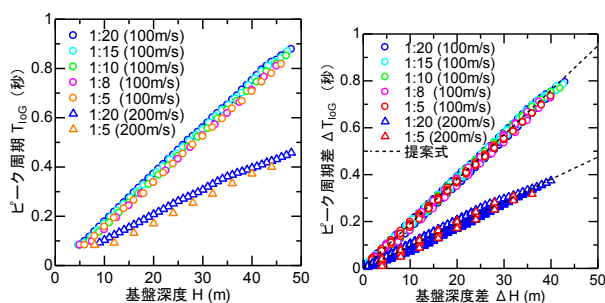


図 8 IoG 比にみられる 図 9 2 点間の層厚差  $\Delta H$  と周期差  $\Delta T_{IoG}$  の関係

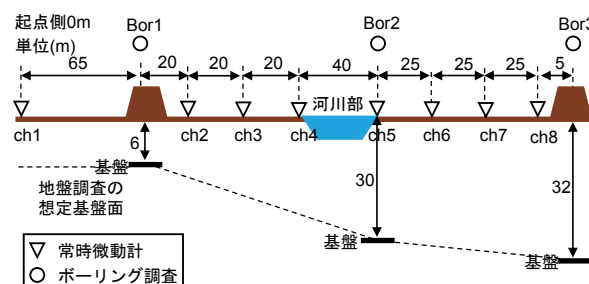


図 10 不整形サイトにおける観測状況

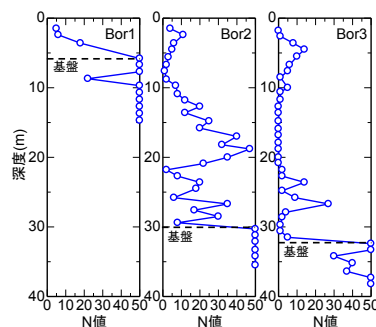


図 11 各ボーリングの N 値分布

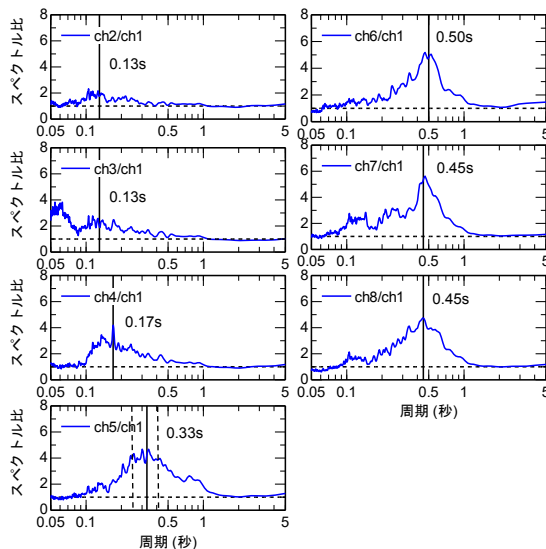


図 12 各微動計位置における鉛直スペクトル比

スペクトル比の値が大きい鋭いピークから裾野の広いなだらかなピークまで様々である。ピーク周期  $T_{IoG}$  の読み取りは任意性が高いが、現状は特に明瞭に見られるピーク

ク周期を前後の観測点との連続性を保ちながら読み取った。読み取ったピーク周期について、その位置を縦実線で図 12 に示す。

得られたピーク周期差  $\Delta T_{loG}$  から深度差  $\Delta H$  を評価するためには式 (4) を用いる必要があるが、このとき当該サイトの表層地盤の平均せん断波速度を与える必要がある。この値は周辺のボーリング調査結果等から評価できるが、ここでは ch8 地点の基盤深度 (32m) と H/V スペクトル比のピーク周期 (1.11 秒) から 1/4 波長則を用いて 115m/s と設定した。これは、ボーリングの N 値から算出した平均  $V_s$  (113m/s) と比較的近い値を示す。

微動観測により得られたピーク周期の変動と式 (4) を用いて各センサー間の相対的な深度差を評価した。この深度差に Bor1 地点の基盤深度 (6.0m) を考慮して各位置の基盤深度を推定した結果を図 13 に示す。この結果から、基盤傾斜区間はボーリング調査結果による基盤位置を線形で補間したものよりも狭く、位置 60 ~ 120m の区間に限定されることがわかる。また、基盤深度変化の大まかな傾向はボーリング調査結果と一致しているものの、起点から 100m 地点の基盤深度が、ボーリングと比較して多少浅く評価されていることが分かる。

### 3.3 推定結果に関する考察

100m 地点における推定結果が調査結果に一致していない原因について考察する。図 12 に示す ch5 の鉛直スペクトル比を確認すると、ch6-8 のスペクトル比と比べてなだらかでスペクトル比の裾野が広がっている。Bor2, Bor3 の N 値分布 (図 11) を比較すると、Bor3 は耐震設計上の基盤位置のみに高い N 値が見られるが、Bor2 は耐震設計上の基盤以外の中間層にも N 値の高い層が見られる。よって、複数の反射面からのピークにより、0.33 秒付近のなだらかなピークが構成されている可能性がある。そこで、図 12 の 5ch/1ch に示す 2 本の縦点線のように、0.33 秒の前後に 2 つのピークが存在すると考えて基盤深度を再度評価した (図 13)。その結果、修正された深度分布のうち、より深い基盤の形状は調査結果によく一致している。

上記の検証結果から、常時微動観測から得られた鉛直スペクトル比には、複数のピークが混在しており、いずれが対象とする耐震設計上の基盤面からの反射を表すピークであるかを特定することは容易でない。このような状況でピーク周期から基盤形状を推定するためには、複数観測点でのピーク周期の連続性や各ピークの明瞭性、地盤調査結果等を参照する必要があることがわかった。つまり、ピークの読み取りにあたって客観性を高めるためには、各ピーク周期に対応した反射面の深度を表すコンターが描けると良い。

そこで、図 12 で示したスペクトル比を、縦軸の大き

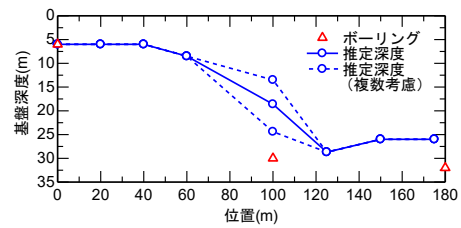
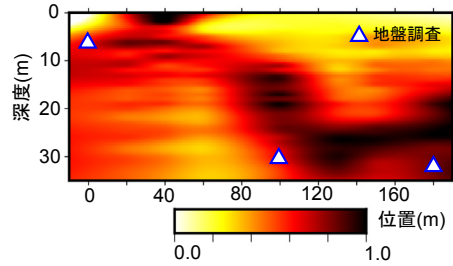
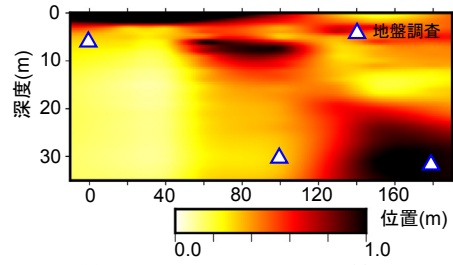


図 13 推定基盤深度分布



(a) 提案手法の結果



(b) H/Vスペクトルによる結果

図 14 基盤形状の評価結果の比較

さを 0.05-1 秒の範囲の最大値で正規化し、さらに横軸の周期を基準となる周期 (例えば不整形サイト A では ch2/ch1 の比から評価した 0.13 秒) からの差と式 (4) を用いて基盤深度に変換したものを図 14(a) に示す。この図において、値が大きくなっているところがスペクトル比のピークに対応しており、地層境界 (反射面) が存在する可能性がある。また、この図にはボーリング調査の結果判明している基盤深度も併せて示している。これを見ると、鉛直スペクトル比から作成したコンターは、値が大きいく所にボーリング調査による基盤深度がプロットされており、スペクトルのピークと基盤深度の相関が高い。また、鉛直スペクトル比で明瞭な単独のピークが判読できなかった不整形サイトの位置 80-120m 付近において、1.0 に近い値が幅広い深度で確認でき、複数の基盤が存在する可能性もチェックできる。

一方で、H/V スペクトル比のピーク周期から 1/4 波長則を用いて基盤深度を推定する手法も存在する。そこで、各地点の H/V スペクトル比から、図 14 (a) と同様の手順で変換した結果を図 14 (b) に示す。H/V スペクトル比を用いた場合にも何らかの基盤形状の変化を確認することができ、これらの一部は鉛直スペクトル比を用いた場合の基盤と一致する。しかし、H/V スペクトル比では特定の基盤のみが明瞭にあらわれる結果となっており、これらは必ずしもボーリング調査の深度とは一致し

## 特集：防災技術

ていない。これに比べて、鉛直スペクトル比のコンターでは様々な反射面が表れており、いずれかの面がボーリング調査の基盤と対応している。

## 4. まとめ

本論文では、2点同時の常時微動観測により得られる鉛直スペクトル比のピーク周期  $T_{log}$  から、耐震設計上の基盤面形状を推定するための工学的手法を提案した。2点のピーク周期差  $\Delta T_{log}$  と基盤深度差  $\Delta H$  の関係を、不整形地盤の数値解析から線形回帰によりモデル化した。この式と観測から得られたピーク周期差から、基盤深度差を評価することが可能となる。

この手法を、ボーリング調査等によりあらかじめ基盤深度が特定できている不整形地盤エリアに適用し、基盤深度分布の推定を行った。評価された深度は、調査による深度と概ね一致することがわかり、本手法の適用性を確認した。

一方で、スペクトル比に複数のピークが混在する場合に、特定の基盤に対応するピーク周期が特定できないという問題点が発生した。そこで、スペクトル比の各ピーク対応する反射面の深度を全観測点で連続的に表示し、別途実施された部分的な地盤調査の結果と併せることで基盤形状の把握を容易にする方法を説明した。また、同様の手法を H/V スペクトル比にも適用し、本論文における観測サイトにおいては、鉛直スペクトル比を用いたほうがボーリング調査の基盤深度との相関性が高いことを確認した。

今後は、実務的な運用を目指して、基準点の取り方や観測点の密度の設定方法等について、実サイトでの検証を進める予定である。

## 文 献

- 1) Kawase H.: The cause of the damage belt in Kobe. "The basin edge effects". Constructive interference of the S-wave with the basin-induced diffracted/Rayleigh waves, *Seism. Res. Lett.*, Vol.67, pp.25-34, 1996.
- 2) 元木健太郎, 山中浩明, 瀬尾和夫, 川瀬博: 2005年福岡県西方沖の地震の余震観測に基づく警固断層周辺の不整形地盤による地盤増幅特性の評価, 日本建築学会構造系論文集, 第602号, pp.129-137, 2006
- 3) 高橋光昭, 那須誠, 及川浩: 平成5年釧路沖地震による橋梁の地震被害原因の考察, 土木学会年次学術講演概要集, 第3部, Vol.48, pp.12-13, 1993
- 4) 菊入崇, 室野剛隆, 永妻真治, 西村昭彦: 局所的な地盤条件が鉄道高架橋の被害に与える影響について, 第24回地震工学研究発表会講演論文集, pp.1105-1107, 1997
- 5) 室野剛隆, 西村昭彦, 室谷耕輔: 地震動に与える表層地盤の局所的变化の影響と耐震設計への適用性に関する提案, 土木学会 ローカルサイト・エフェクト・シンポジウム論文集, pp.183-188, 1998
- 6) 古川愛子, 大塚久哲, 内海寿紀: エネルギー保存を仮定した不整形地盤の地震時最大軸ひずみの簡易推定に関する検討, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.65, No.1, pp.137-148, 2009
- 7) 渡辺哲史, 加藤研一, 飯場正紀, 小鹿紀英: 工学的基盤の傾斜が表層地盤の増幅特性に与える影響に関する基本的検討, 日本建築学会技術報告集, 第17巻, 第36号, pp.455-459, 2011
- 8) 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説耐震設計, 丸善, pp.74-76, 2012
- 9) 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, Vol.74, No.642, pp.1453-1460, 2009
- 10) 佐藤浩章, 東貞成: 微動アレイ探査法の傾斜基盤構造探査への応用一位相速度の多点同時逆解析による傾斜基盤の推定法の提案一, 電力中央研究所報告, 研究報告 No.4004, 2005
- 11) 野上雄太, 坂井公俊, 高橋千佳, 室野剛隆, 盛川仁, 佐藤勉: 物理探査手法を用いた浅部不整形地盤構造の推定と耐震設計への適用事例, 土木学会論文集 A, Vol.65, No.4, pp.1006-1015, 2009
- 12) 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, Vol.78, No.688, pp.1081-1088, 2013
- 13) Sánchez-Sesma, F.J. and Campillo, M.: Retrieval of the Green's function from cross correlation: The canonical elastic problem, *Bulletin Seismological Society of America*, Vol. 96, No. 3, pp.1182-1191, 2006.
- 14) Sánchez-Sesma, F.J., Pérez-Ruiz, J.A., Luçon, F., Campillo, M. and Rodríguez-Castellanos, A.: Diffuse fields in dynamic elasticity, *Wave motion*, 45, pp.641-654, 2008.
- 15) Zhang, X.-R. and Morikawa, H.: A new significance on the vertical component ratio of the power spectra between two sites in the application of array methods, *Journal of Seismology*, Vol. 20, No. 1, pp.185-196, doi:10.1007/s10950-015-9519-7, 2016.