

単点常時微動探査を用いた基盤深さ推定技術 Evaluation of the Engineering Bedrock Depth Using Microtremor Measurement

萩原 由訓

Yoshinori Hagiwara

1. はじめに

一般に地盤調査の原位置試験は、ボーリングなど「点」における深度方向の調査が行われている。杭の支持層となるような固い層（以下、基盤）に不陸があることが予想される敷地に対して、面的に調査精度の向上を図るために、段階的に地盤調査を計画し過不足なく調査を行うことが重要である¹⁾。そのうち初期の段階で行う調査としては、コストや簡便さに優れた探査が求められる。地表面に設置したセンサーで地面の極小さな揺れ（常時微動）を観測する微動探査は簡便な手法であり非常に有用であると考えられる。微動探査を敷地内で面的に多数行い、その結果から基盤の傾斜の大きい場所を大まかに把握することができれば、ボーリング調査などの次の段階の調査をそこに集中し、基盤の不陸の見落としのリスクを低減することができる。

これまで、微動探査は、地盤構造を平行成層だと仮定して用いられることが多かった。しかし、近年では不陸のある基盤構造を対象として微動を観測し、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^{例(例えば)2)}。

本報では、観測点毎に分析を行う単点常時微動探査を用いた基盤深さ推定手法について述べるとともに、不陸のある基盤構造であると考えられた敷地に対し、微動探査を用いて基盤深さを推定し、実際の基盤深さと比較した事例³⁾の紹介を行う。

2. 基盤深さ推定手法

単点で観測した常時微動の水平/上下スペクトル（以下、H/V）を用いて敷地の基盤深さの推定を行う。なお、本手法で基盤深さを推定する対象としては、固さのコントラストがあり、表層と基盤の2層にモデル化が可能な単純な地盤構造としている。

基盤深さの推定手順を以下に説明する（Fig. 1）。以下では、敷地内の複数のボーリング地点においてデータを取得した場合についての手順を示す。

- 1) 敷地内で微動の観測を行う。ここでは面的に基盤深さの推定を行うため、多数の地点で観測を行う（例えば、10~20m 毎）。なお、敷地内および周辺でボーリング調査が行われている場合は、その地点においても観測を行う。
- 2) 観測点毎に H/V を算出する。一般的には H/V を算出する際、水平成分には直交する 2 成分の平均値

を使用する場合が多い。しかし、廣川・他⁴⁾により、不陸のある基盤の存在する場所では、基盤の傾斜方向およびそれに直交する方向で H/V が大きく異なることが示されている。その違いとして H/V のピーク振動数は基盤傾斜方向の方が高く、ピーク振幅は基盤傾斜直交方向の方が大きいとされている。そのためここでは、直交する 2 方向の H/V の差が小さい方向が基盤の傾斜の影響が同じになる方向（Fig. 2(a)右図および(c)右図）と考え、その方向（角度）を求める⁵⁾。

・0~80 度まで 10 度刻みで観測データを回転させ

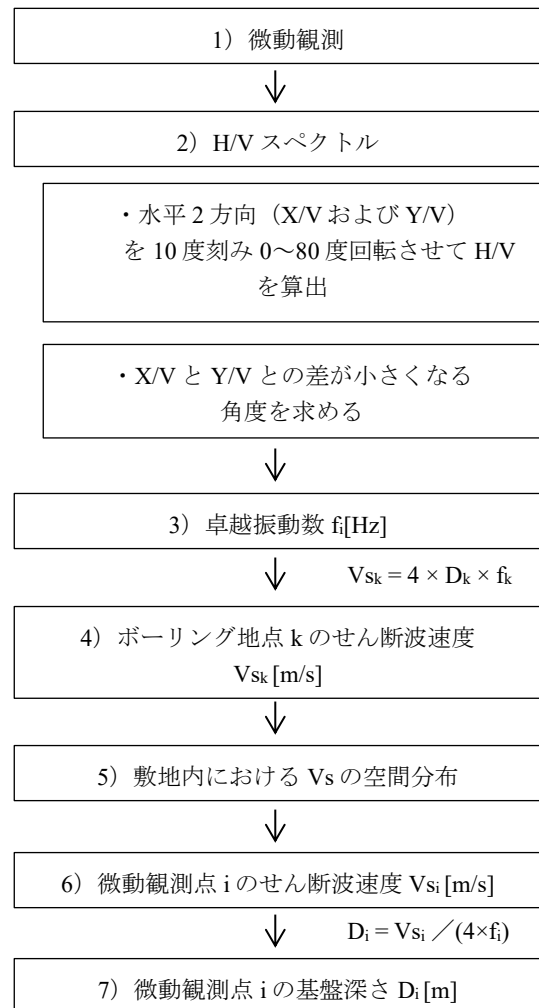


Fig. 1 基盤深さの推定手順
Process of Evaluation of Engineering Bedrock Depth

て解析し、水平2方向それぞれのH/V (X/V および Y/V) を算出する。

- X/V と Y/V とで差が最も小さくなる角度を求める。
- 3) 2)で求めた角度における H/V の卓越振動数とその観測点の卓越振動数とする。各 X/V または Y/V に関して、卓越振動数 (f_i [Hz], i は観測点) を読み取る。
- 4) 1/4 波長則 (式(1)) を用いてボーリング地点 k での表層地盤のせん断波速度 (V_{sk} [m/s]) を算出する。

$$V_{sk} = 4 \times D_k \times f_k \quad (1)$$

ここで、
 V_{sk} : ボーリング地点 k における表層地盤のせん断波速度
 D_k : 地点 k における基盤深さ (=表層地盤の層厚)
 f_k : 地点 k における卓越振動数
- 5) 複数の地点 k での V_s を用いて、敷地内における V_s の空間分布を推定する。
- 6) 5)より、微動の各観測点 i における表層地盤のせん断波速度 (V_{si}) を算出する。
- 7) 1/4 波長則 (式(2)) により、微動観測点 i における基盤深さ (D_i) を算出する。

$$D_i = V_{si} / (4 \times f_i) \quad (2)$$

$i=k$ となるボーリング地点では、 $D_i=D_k$ となる。

上記の手順により、ボーリング地点の実際の基盤深さを反映しつつ、各微動観測点における卓越振動数から基盤深さを推定する。

3. 基盤深さ推定事例

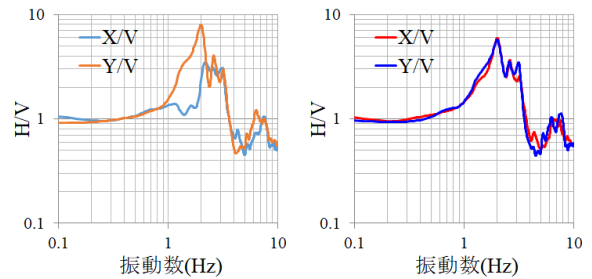
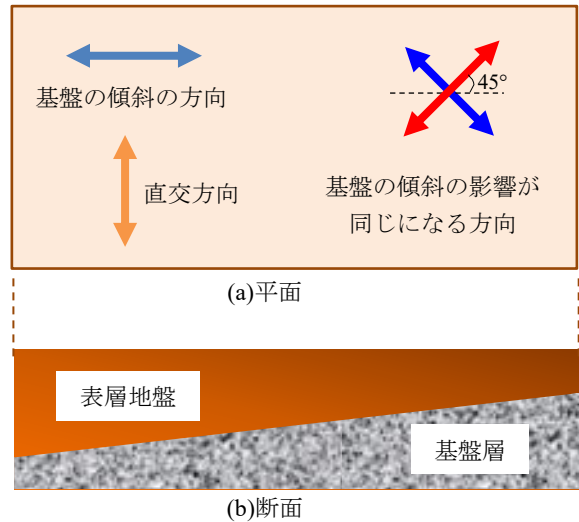
Fig. 3 に、検討対象地のボーリングの位置を示す。おおよそ南北に 430m、東西に 150~230m の敷地である。敷地内で、67 本のボーリング調査が行われている。ボーリング間隔は約 40m である。Fig. 4 に地盤調査結果 (標準貫入試験と土質) を示す (位置は Fig. 3 中に○で示す)。Fig. 4 によれば、表層と基盤である砂岩とで N 値にコントラストがあり、2 層にモデル化が可能な地盤構造であることがわかる。

この敷地内で、339 点の微動観測 (Fig. 5(a)に△で示す) を行った。観測はサンプリング振動数 100Hz で行い、1 地点あたり 25 分間とした。分析は、観測波形のうちノイズの少ない区間を選び、40.96 秒のデータセットを 20 個作成しその相乗平均から、H/V (X/V および Y/V) を算出した。2 章で述べたように、各点で X/V と Y/V とで差が小さくなる角度を求め卓越振動数を読み取り、せん断波速度の空間分布を評価したうえで基盤深さの分布を推定した。

Fig. 5(a)に、推定した基盤の空間分布を示す。ここでは、基盤の分布を標高(T.P.)で示している。なお、この推定にはすべてのボーリングを使用している (式(1)に

おいて $k=1\sim 67$)。推定結果では、敷地南側で標高が高く (基盤が浅く)、北に行くほど標高が低く (基盤が深く) になっている。また、敷地北側ではコンターで緑色に示される谷筋が 2 本確認でき、X37Y76 付近において最も標高が低い-31m となっている。

Fig. 5(b)に、杭支持層の実測の標高を示す。ここで、実測とは、杭施工時に杭業者が支持層と判定した位置で



(c) H/V のイメージ (緑色は(a)に対応)

Fig. 2 基盤傾斜の方向とH/Vの例

Example of Direction of Slanted Bedrock and H/V-Spectrum

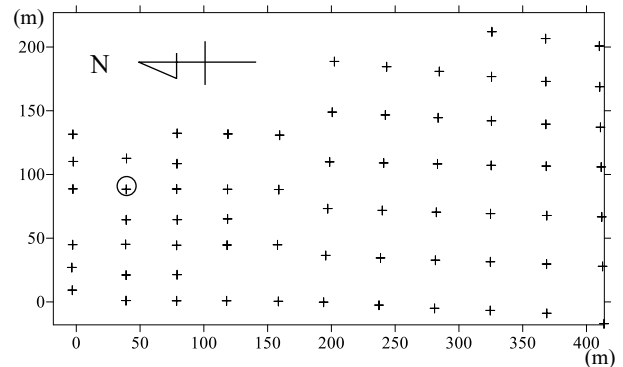


Fig. 3 検討対象地のボーリング位置図 (+: ボーリング位置, O: Fig. 4の位置を示す)

Location of Boring Points

(+: Boring Point, O: Point of Fig. 4)

ある (約 1200 本分)。なお、Fig. 5(b)の周縁部が空白になっているのは、杭の施工範囲が微動探査の範囲に比べ狭いためである。実測の結果を見ると、Fig. 5(a)の推定結果と同様に、敷地南側で標高が高く、敷地北側には 2本の谷筋が確認できる。

Fig. 6 には、Y76 ラインにおける基盤面標高を示す。これを見ると、標高差が大きいところ (X=80~100m) では差があるものの、微動による推定がおおむね実測に則したものになっていることが確認できる。

Fig. 5(c)には、ボーリングを 1 本だけ使用した場合の推定結果を示す。式(1)においてk=1のみであるので、敷地内で Vs は一様な分布であると仮定していることになる。この推定結果と Fig. 5(b)の実測を比較すると、標高の値自体には差があるものの、敷地南側で標高が高いこと、敷地北側に 2本の谷筋が存在することが確認できる。したがって、Fig. 3 に示すような事前に数多くのボーリング調査が行われていない場合でも、基盤の傾斜の大きい場所を大まかに把握するという目的に対して、本手法は有効であることが確認された。

4. 推定基盤深さの信頼性評価

追加ボーリングの本数や配置などの意思決定に対して、判断材料として有益となる、微動探査による基盤深さ推定結果の信頼性を評価した事例を紹介する。

2 章で示したように、本手法では微動観測点 i に対して、卓越振動数 f [Hz]を求める(Fig. 1 中、手順3))。この際、鋭い単峰、緩い単峰、多峰など様々なグラフ形状の H/V より卓越振動数を読み取ることとなる。鋭い単峰である場合は、卓越振動数の判断は容易であるため、卓越振動数の読み取りの信頼性が最も高い。一方、多峰の場合は唯一の卓越振動数を決めるのは難しくなるため信頼性は低くなる。そこで、観測点毎の H/V の値の大小を推定基盤深さとともに表示することでその信頼性を表現する。

各観測点 i における表層地盤のせん断波速度(Vs_i)および式(3)を用いることで、観測点 i における H/V のグラフ

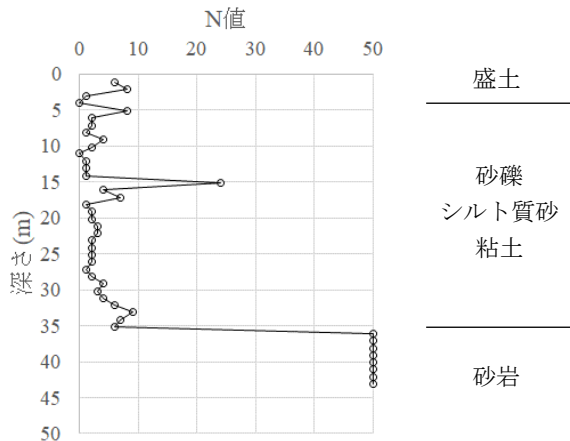


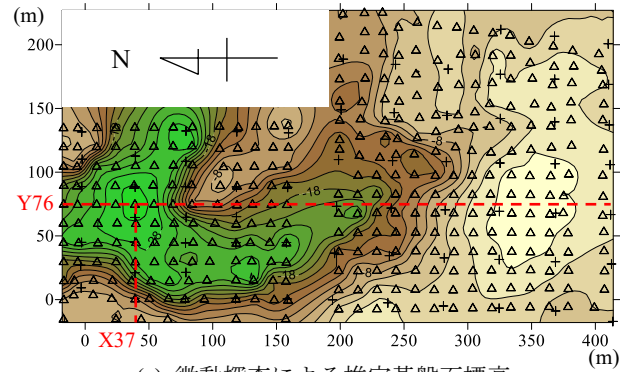
Fig. 4 地盤調査結果
Result of Soil Investigation

の横軸の振動数 f を深さに換算する。

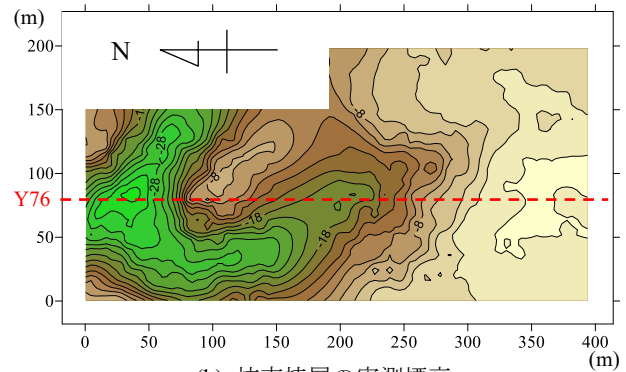
$$D_{i,n} = V_{s_i} / (4 \times f_{i,n}) \quad (3)$$

$D_{i,n}$: 観測点 i における、H/V のグラフの横軸 n 番目の振動数の換算深さ

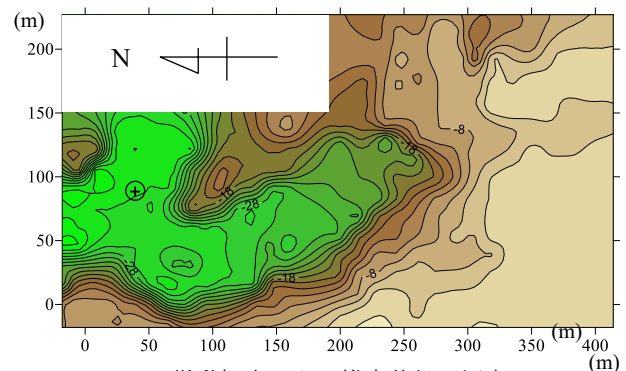
$f_{i,n}$: 観測点 i における、n 番目の振動数



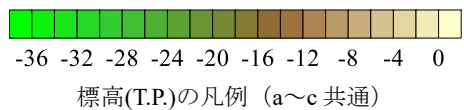
(a) 微動探査による推定基盤面標高
(ボーリングを 67 本すべて使用)



(b) 杭支持層の実測標高
(杭施工時の支持層判定)



(c) 微動探査による推定基盤面標高
(ボーリングを 1 本 [○] だけ使用)



標高(T.P.)の凡例 (a~c 共通)

Fig. 5 基盤面標高分布 (推定と実測との比較)
Elevation of Bedrock (Comparison of Estimation and Actual Measurement)

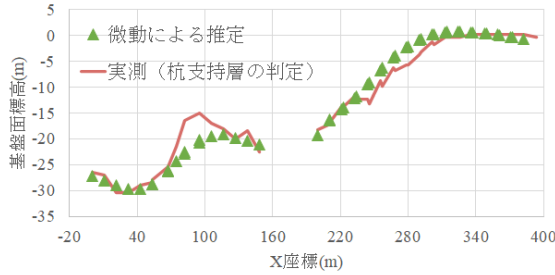


Fig. 6 Y76ラインにおける基盤面標高
(推定と実測との比較)
Elevation of Bedrock on Line of Y76

換算した深さおよび、Fig. 7に示すように H/V のグラフの縦軸に対して設定した信頼性を評価する色により、推定結果の信頼性を表す指標とする(Fig. 8(a))。Fig. 8(b)には、上記の信頼性指標に加えて Fig. 5(a)の推定基盤面を示す。このように推定基盤深さの面の情報に加えて、その信頼性を表示することで、意思決定の際の有益な判断材料とすることができる。

5. おわりに

表層と基盤の2層にモデル化が可能な単純な地盤構造で、その基盤に不陸がある敷地を対象に、微動探査を用いて基盤深さの推定を行った事例を紹介した。推定結果と実測との比較を行い、微動探査による推定は実測に則したものであることを示した。

また、上記の結果は微動探査と67本のボーリング調査結果とを組み合わせた推定であったが、微動探査とボーリング調査結果1本のみとを組み合わせただけの場合でも、敷地内における基盤深さの空間分布の傾向を把握することが可能であり、多段階の地盤調査における初期調査としては有用であることを示した。さらに、意思決定の際の有益な判断材料となる信頼性評価の事例を紹介した。

本報では、多段階の地盤調査の初期調査および追加調査の意思決定の判断材料としての使用例を示したが、微動探査と他の基盤深さ推定結果とを組み合わせることで、杭長の見直しなどにも活用⁶⁾され始めており、今後も微動探査による基盤深さ推定の活用が期待される。

参考文献

- 1) 日本建築学会編著：建築基礎構造設計のための地盤評価・Q&A，日本建築学会，p. 24，2015.11
- 2) 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，78巻，第688号，pp. 1081-1088，2013.6

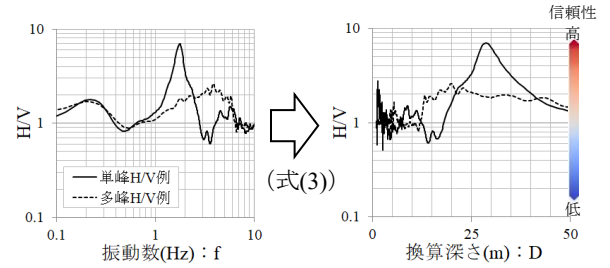
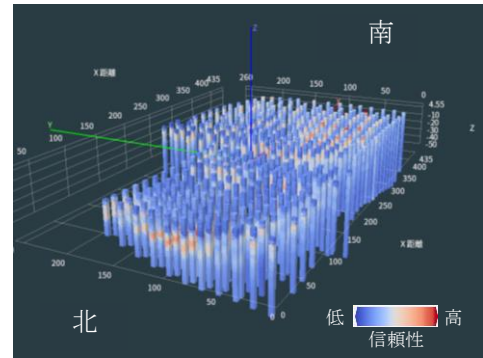
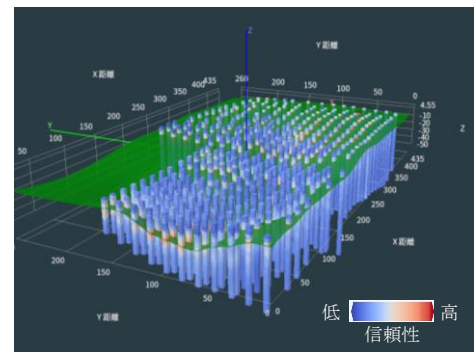


Fig. 7 振動数から深さへの変換例
Example of Conversion from Frequency to Depth



(a) 信頼性指標



(b) 信頼性指標および推定基盤面

Fig. 8 推定基盤面の信頼性評価
Reliability Assessment of Estimated Bedrock

- 3) 萩原由訓：単点常時微動探査を用いた基盤深さ推定事例，基礎工，Vol. 52，No.3，pp. 45-47，2004.3
- 4) 廣川貴則，松島信一，川瀬博：微動H/Vスペクトル比の方位依存性と基盤の不整形性，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 155-156，2011.8
- 5) 萩原由訓，野畑有秀：単点常時微動観測を用いた基盤の傾斜方向推定に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 307-308，2017.8
- 6) 児島理士，萩原由訓：杭の支持層深度の推定値と実測値の比較，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 317-318，2022.9