

H/V スペクトル比より推定される 表層 S 波速度の不整形地盤における適用性

大塚 経志郎¹・酒井 久和²・西山 誠治³・本田 道識⁴・田辺 篤史⁵

¹ 学生会員 法政大学大学院 デザイン工学研究科都市環境デザイン工学専攻
(〒162-0843 東京都新宿区市ヶ谷田町 2-33)
keishiro.otsuka.6y@stu.hosei.ac.jp

² 正会員 法政大学教授 デザイン工学部都市環境デザイン工学科
(〒162-0843 東京都新宿区市ヶ谷田町 2-33)
hisakai@hosei.ac.jp

³ 正会員 株式会社日建設計シビル 都市基盤・エンジニアリング部門
(〒112-0004 東京都文京区後楽 1-4-27)
nishiyama@nikken.jp

⁴ 正会員 株式会社日建設計シビル 都市基盤・エンジニアリング部門
(〒112-0004 東京都文京区後楽 1-4-27)
hondam@nikken.jp

⁵ 正会員 株式会社日建設計シビル 都市基盤・エンジニアリング部門
(〒112-0004 東京都文京区後楽 1-4-27)
tanabe.atsushi@nikken.jp

地盤の S 波速度構造の推定に常時微動 H/V スペクトル比を用いた方法があるが、不整形性を有する地盤において、H/V スペクトル比から 1/4 波長則を用いて S 波速度を推定する場合、その推定値の精度や 1 次元成層地盤モデルへの適用条件などは明らかにされていない。そこで本研究では、基盤中央が水平で左右両側に傾斜部を有する 2 次元不整形地盤モデルにおける表層の H/V スペクトル比の卓越周波数と、1 次元成層地盤モデルの固有周波数の差異を比較し、H/V スペクトル比より推定される表層 S 波速度の 1 次元成層地盤モデルへの適用条件について検討した。その結果、基盤傾斜角や表層厚が異なる複数の不整形地盤モデルに対して、H/V スペクトル比を用いた S 波速度の推定精度や 1 次元成層地盤モデルへの適用条件を表層厚との関係を用いて示した。

Key Words: Irregular ground, H/V spectra ratio, S-wave velocity, Identification accuracy, Microtremor observation

1. はじめに

シナリオ地震における地表の地震波や観測記録からの推定基盤波は、地盤を 1 次元の成層地盤として計算されるのが一般的である。その際、地盤の S 波速度構造の推定には PS 検層結果を用いることが望ましいが、実際にはボーリング調査から得られる N 値によって S 波速度 V_s を求めることが少なくない。しかし、N 値から V_s を推定する実験式はこれまで多く提案されているが、その精度にばらつきがあることが多く、N 値換算 V_s を設計に用いることはあまり好ましくない^{例えば 1) 3)}。さらに、ボーリング調査で入手できる情報はあくまで地点情報であり、

不陸な地盤に対して面的な情報を得るには高額な調査費用を要する。

地盤構造を空間的に簡便に推定できる方法として、常時微動 H/V スペクトル比を用いた推定法が挙げられる。H/V スペクトル比による表層地盤の周波数特性や増幅特性の推定は、中村ら⁴⁾によって提案されて以降、観測記録や数値解析を用いて多くの研究が行われている。遠藤ら⁵⁾は、H/V スペクトル比の卓越周波数と PS 検層より求めた地盤の固有周波数が、基盤面でコントラストが明瞭な地盤においては精度良く一致することを確認し、S 波速度構造の補正法として H/V スペクトル比の有効性を示した。飛田ら⁶⁾は、地質情報などを用いて作成した地下

構造モデルに対して、H/V スペクトル比のピーク周波数とその振幅を利用して地下構造モデルを同定し、H/V スペクトル比から地下構造を推定する手法の有効性を示した。また、若松ら⁷⁾や Lachet ら⁸⁾は、微動の数値解析から、H/V スペクトル比の卓越周波数が地盤の固有周波数を精度良く計算できることを示した。ただし、これらの数値解析は地盤を1次元の成層地盤と仮定している。

1次元の成層地盤にモデル化できない不整形地盤に対しては、地盤の不整形性により増幅特性や周波数特性に影響を及ぼすことが多くの研究で報告されており^{例えば 9)~11)}、中川ら¹²⁾は S 波構造が概ね把握できている不整形地盤に対して実際に1次元地盤モデルとの比較を行った結果、傾斜部などにおいて1次元地盤モデルとの周波数特性に大きな違いがあることを確認した。

一般に、多少の不整形を有する地盤や、基盤が急な傾斜部でない場合は、地盤を1次元の成層地盤と仮定して解析が行われるのが現状である。その際、地盤の S 波速度を 1/4 波長則に基づいて推定すると、地層構造が水平な地盤であれば、前述の既往の研究成果等により H/V スペクトル比を用いて精度の良い地盤モデルが作成できると考えられる。一方、地盤が不整形である場合や、対象地周辺に不整形性を有する地盤が存在する場合、前述のように H/V スペクトル比を用いた表層 S 波速度が1次元成層地盤と異なる研究は数多くなされているものの、微動による表層 S 波速度の推定値が1次元地盤モデルへ適用可能である不整形地盤における位置や推定精度について必ずしも明らかにされていない。

そこで本検討では、中央部が水平で左右両側に傾斜部を有する2次元不整形地盤モデルに対して、表層の H/V スペクトル比の卓越周波数と1次元水平成層地盤モデルの固有周波数を比較することで、H/V スペクトル比の卓

越周波数から 1/4 波長則を用いて推定される S 波速度が、1次元成層地盤モデルへ精度よく適用できる範囲について検討した。さらに、パラメトリックスタディより基盤傾斜部の角度を変化させ、不整形性の程度が推定 S 波速度の適用条件に与える影響についても検討を行った。

2. 解析方法

本章では、微動に関する数値解析と解析に使用する2次元不整形地盤モデルの概要について説明する。

(1)微動に関する数値解析

水平成層地盤では、H/V スペクトル比の周波数特性はレイリー波の影響を大きく受けていることが示されている^{例えば 7)13)}。関口ら¹⁴⁾や Uebayashi¹⁵⁾は、不整形地盤に対しても、レイリー波による影響が大きいと仮定し、面内方向の地盤の不整形性を考慮した2次元モデルに対する数値解析で、微動観測の H/V スペクトル比の周波数特性を概ね再現できることを示した。そこで、本検討においてもレイリー波による影響が大きいと仮定し、文献^{7)14)~16)}を参考にして不整形地盤における微動の数値解析を実施した。本節ではまず、微動に関する数値解析手法の概要について説明する。

図 2-1 に、微動の数値解析の概要図を示す。加振方法として、任意の観測点から 50m~1,000m の範囲において 50m 間隔に加振点 ($i=1\sim n$) を設置し、鉛直加振によりレイリー波を隆起させる。各加振点の加振力は全て同一とし、それぞれを単一加振させたときの観測点の水平成分と鉛直成分 (H_i , V_i) を求め、以下の式を用いて観測点の H/V スペクトル比を算出する。

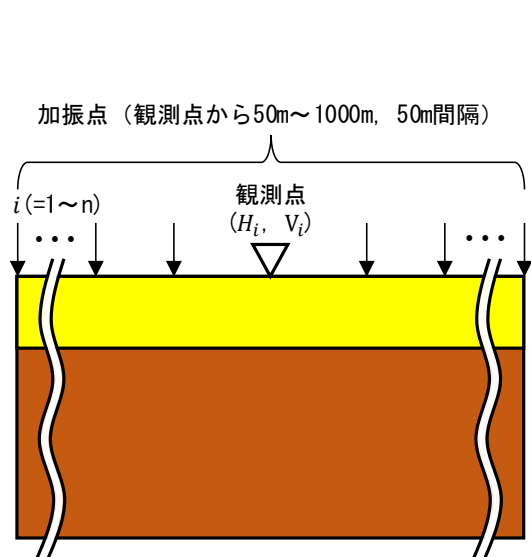


図 2-1 微動の数値解析の概要

(H_i : 水平成分, V_i : 鉛直成分, i : 加振点番号)

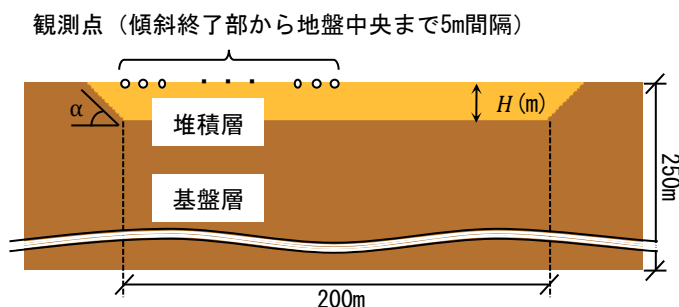


図 2-2 不整形地盤モデル

(H (m) : 堆積層厚, α (度) : 傾斜角)

表 2-1 地盤物性値

	せん断波速度 V_s (m/s)	密度 ρ (t/m ³)	ポアソン比 ν
堆積層	100	1.8	0.49
基盤層	400	2.0	0.49

$$H/V = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n |H_i|^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n |V_i|^2}} \quad (1)$$

i は加振点番号, H_i , V_i は水平成分と鉛直成分の複素伝達関数である.

(2)解析モデル

本検討に用いる解析モデルを図 2-2 に示す. 解析モデルは, 基盤中央部が水平で左右両側に傾斜部を有する不整形地盤モデルである. 地盤は, 堆積層と基盤層からなる 2 層構造で線形材とし, それぞれの物性値を表 2-1 に示す. モデルのサイズは, 地盤の半無限性を考慮するため, 高さは 250m, 横幅は 2,600m あり, 図 2-2 はその中心部を示している. 堆積層の層厚及び基盤部の傾斜角度は解析ケースによって可変できるように設定した. メッシュサイズは, 精度保証周波数を 10Hz 確保するため, 堆積層は 1m×1m, 基盤層は最大で 8m×8m とした. 減衰には履歴減衰を使用し, 材料減衰比は堆積層と基盤層で一律 3%とした. 境界条件は, モデル底面を粘性境界要素, モデル側方は広域の自由地盤とダッシュポットを介して接続した粘性境界とすることで地盤の逸散現象を考慮した. 加振方法は, (1)節で示したように, 観測点から 50

～1,000mの範囲において 50m間隔で加振点を設置し, 周波数領域の解析より各加振点において周波数帯 0.1～10Hz, 周波数間隔 0.1Hz で表面加振を行い, (1)式を用いて H/V スペクトル比を算出した. また, 既往研究等⁹⁾¹²⁾より基盤傾斜部を成層構造と仮定した場合, 不整形性の影響が大きく逆解析等の精度が著しく低下することが示されている. そのため, 観測点は図 2-2 に示すように基盤傾斜終了部から地盤の中央部まで 5m 間隔で設置した. 各観測点の H/V スペクトル比の卓越周波数と, 観測点にボーリング地点があることを想定し, 地点直下の地質構造を基に作成された 1 次元成層地盤の固有周波数との差異を比較することで, H/V スペクトル比より推定される S 波速度が 1 次元地盤モデルへ精度良く適用できる条件について検討した.

3. 解析結果

本章では, まず不整形地盤における H/V スペクトル比を用いた推定 S 波速度の 1 次元成層地盤モデルへの適用性について, 基盤傾斜角が 45 度のケース, 次いで異なる基盤傾斜角のケースについて検討を行った

表 3-1 解析ケース

	堆積層層厚 H (m)	傾斜角度 α (度)
CASE1-1	10	45
CASE2-1	20	

(1)H/V スペクトル比と 1 次元成層地盤の応答加速度の周波数特性 (基盤傾斜角 45 度)

解析ケースを表 3-1 に示す. CASE1-1, CASE2-1 は傾斜角が 45 度で, 堆積層層厚がそれぞれ 10m, 20m の不整形

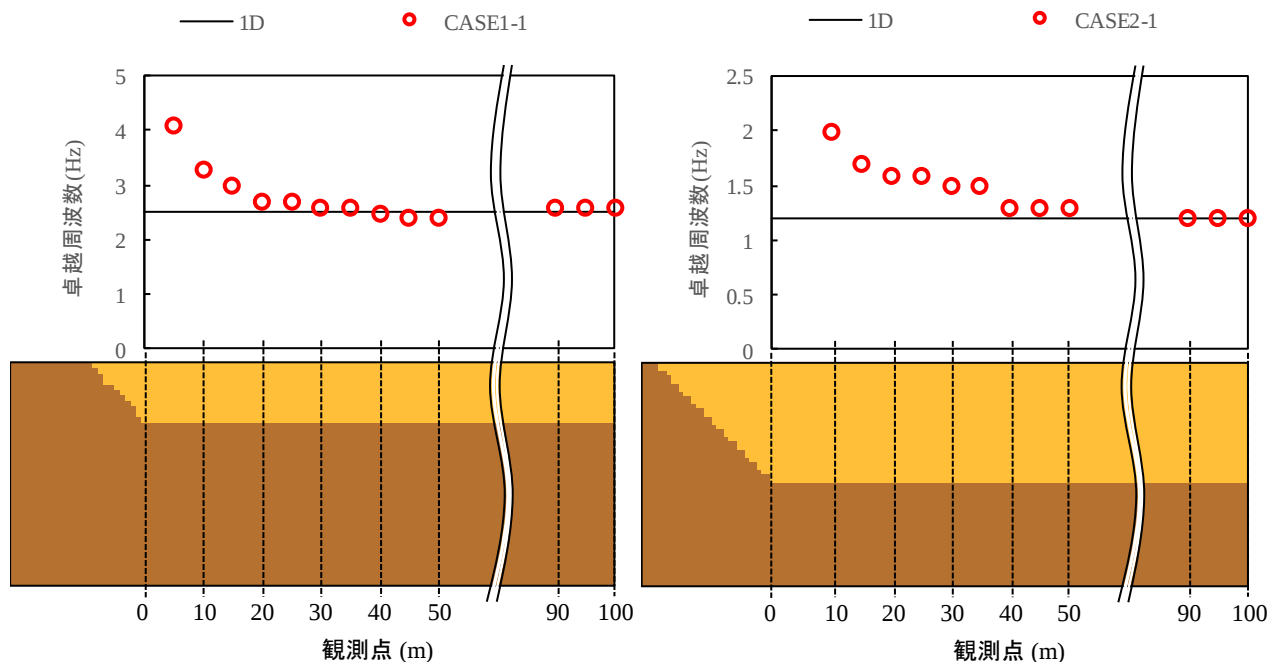
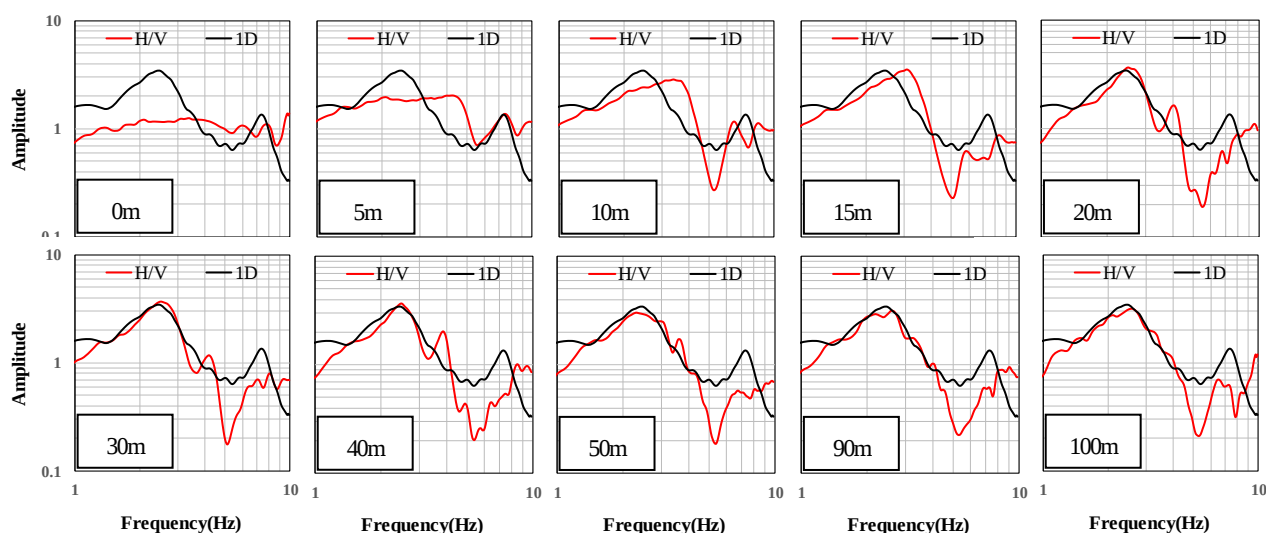
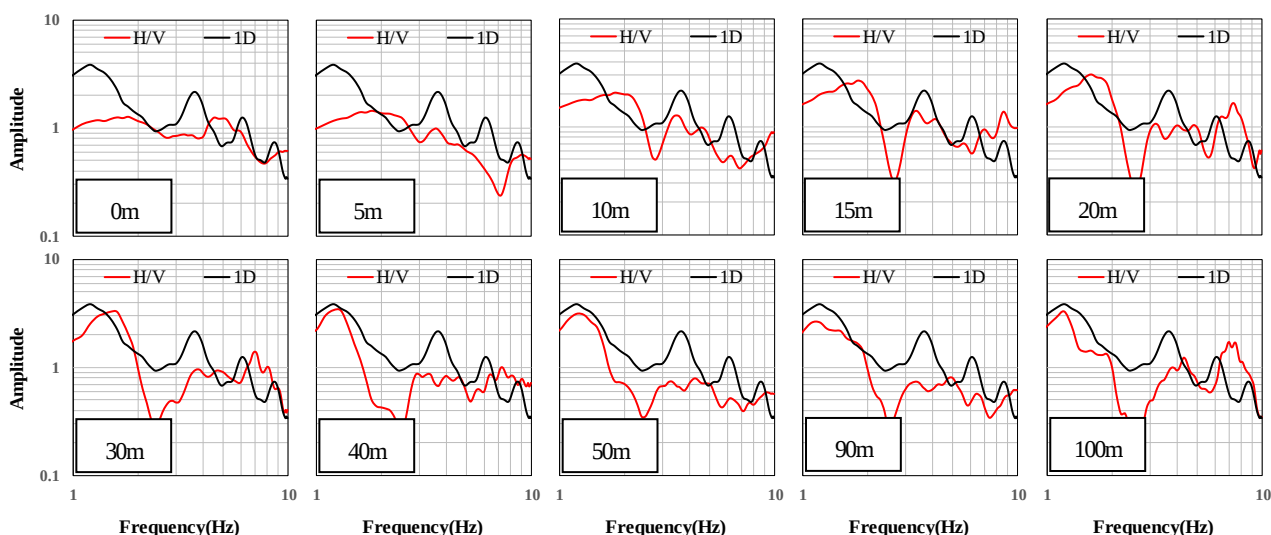


図 3-1 H/V スペクトルの卓越周波数の位置的变化 (左: CASE1-1, 右: CASE2-1)



CASE1-1



CASE2-1

図 3-2 各観測点の H/V スペクトル比（上：CASE1-1，下：CASE2-1，凡例の 1D は 1 次元成層地盤）

地盤モデルである。各ケースにおける観測点ごとの卓越周波数と、その観測点の地盤構造の層厚を基に作成した 1 次元成層地盤モデルの解析結果を合わせて図 3-1 に示す。ただし、各地点の卓越周波数は、図 3-2 に示す H/V スペクトル比から、別途実施した固有値解析結果より基盤層による影響が小さいと考えられる周波数帯（1～10Hz）における 1 次卓越周波数を抽出した。ここに、図中の 1D は 1 次元成層地盤の応答加速度の周波数特性を示す。

図 3-1 より、CASE1-1（堆積層層厚 $H=10\text{m}$ 、傾斜角 45 度）では傾斜終了部から 5m 離れた地点における H/V スペクトル比の卓越周波数と、1 次元層地盤モデルの固有周波数の差異は約 64%で観測点の中で最も大きいことが分かる。なお、傾斜終了部（0m）では、H/V スペクトル

比の卓越周波数が不明確だったためグラフには示しておらず、傾斜終了部における推定 S 波速度の適用性は低いと考えられる。また、傾斜終了部からそれぞれ 10m, 15m, 20m 離れた地点における両者の差異は、それぞれ 32%, 20%, 08%ほどであった。表層厚との関係を示すと、傾斜終了部から表層厚 $\times 2$ 倍（20m）ほど離れた場合に両者の差異が 1 割未満に収まることが分かった。

CASE2-1（堆積層層厚 $H=20\text{m}$ 、傾斜角 45 度）では、傾斜終了部から 5m, 10m 離れた地点における両者の差異が約 58%で最も大きいことが分かる。なお、傾斜終了部（0m）では、CASE1-1 と同様に H/V スペクトル比の卓越周波数が不明確だったため、グラフには示していない。さらに、傾斜終了部から 20m, 30m, 40m 離れた地点では、それぞれ 33%, 25%, 8%ほどの差異が見られた。表

層厚との関係を示すと、CASE1-1 と同様に表層厚×2 倍（40m）離れた地点において両者の差異が 1 割未満となった。

以上より、基盤の傾斜角 45 度の不整形地盤モデルでは、堆積層の層厚によらず、傾斜終了部から表層厚×2 倍離れた観測点において、両者の差異が 1 割未満となり、推定 S 波速度の 1 次元成層地盤モデルへの適用性が高まると考えられる。

(2)傾斜角のパラメトリックスタディ

本節では、表 3-2 に示すように基盤傾斜角の異なる解析ケースにおいて推定 S 波速度の精度や 1 次元成層地盤への適用条件に与える影響について検討した。CASE1-1～CASE1-4 と CASE2-1～CASE2-4 の解析結果を合わせて図 3-3 に示す。

図 3-3 より、H/V スペクトル比の卓越周波数と 1 次元成層地盤の固有周波数を比較すると、傾斜角が緩い地盤モデルほど同地点における両者の差異は小さく、傾斜角

が最も緩い CASE1-4 と CASE2-4（傾斜角 9.5 度）では、堆積層の層厚によらず傾斜終了部から表層厚×0.5 倍ほど観測点が離れると、両者の差異が 1 割未満となった。また、CASE1-3、2-3（傾斜角 18 度）では、いずれも表層厚×1.5 倍離れた地点において両者の差異が 1 割より小さくなり、CASE1-2、CASE2-2（傾斜角 27 度）では、(1)節で示した CASE1-1、CASE2-1（傾斜角 45 度）と同様、表層厚×2 倍離れた観測点において、両者の差異が 1 割未満となり、H/V スペクトル比より推定される S 波速度が 1 次元成層地盤モデルへ精度良く適用できることが分かった。

次に、図 3-4 に示す各地点における応答加速度の水平成分と鉛直成分より作成したレイリー波の振動軌跡を用いて、前述の結論に対する検証を行う。図 3-4 は、CASE1-1～CASE1-4 におけるレイリー波の振動軌跡で、レイリー波の周波数は、1 次元成層地盤の固有周波数（2.5Hz）とした。図 3-4 の CASE1-1 より、傾斜部付近では観測点によってレイリー波の形状にばらつきが見られるが、傾斜終了部から表層厚×約 2 倍以上離れると、観測点によらずレイリー波の形状が概ね一定になることが確認できる。同様に、CASE1-2、CASE1-3 では、表層厚×1.5～2 倍、CASE1-4 では表層厚×約 1 倍以上離れると、レイリー波の形状がほぼ一定となり地盤の不整形性による影響が小さくなることが分かる。上記より得られた結果と、前述の結論で示した推定 S 波速度の適用性と表層厚との関係を比較すると、概ね整合性がとれていることが分かり、レイリー波の振動軌跡を用いても同等の結果が得られることを確認した。

表 3-2 解析ケース

	堆積層層厚 $H(m)$	傾斜角 $\alpha(度)$
CASE1-1	10	45
CASE1-2		27
CASE1-3		18
CASE1-4		9.5
CASE2-1	20	45
CASE2-2		27
CASE2-3		18
CASE2-4		9.5

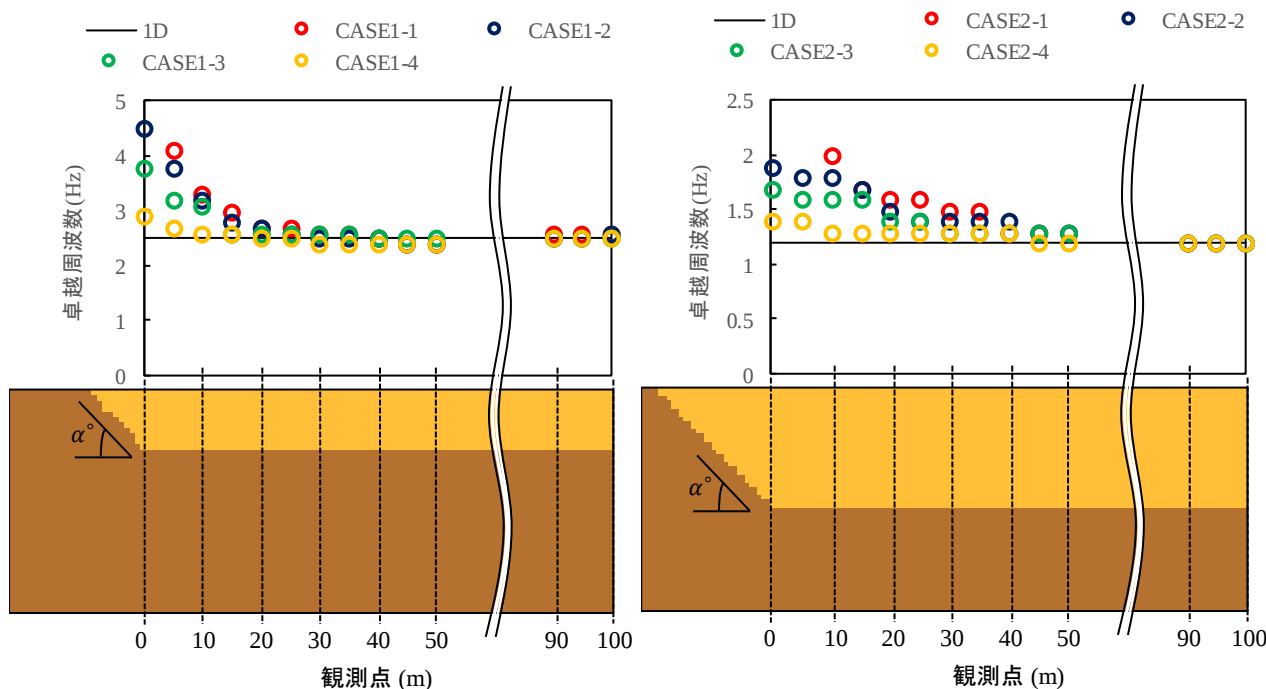


図 3-3 H/V スペクトル比の卓越周波数の位置的变化（左：CASE1-1～CASE1-4、右：CASE2-1～2-4）

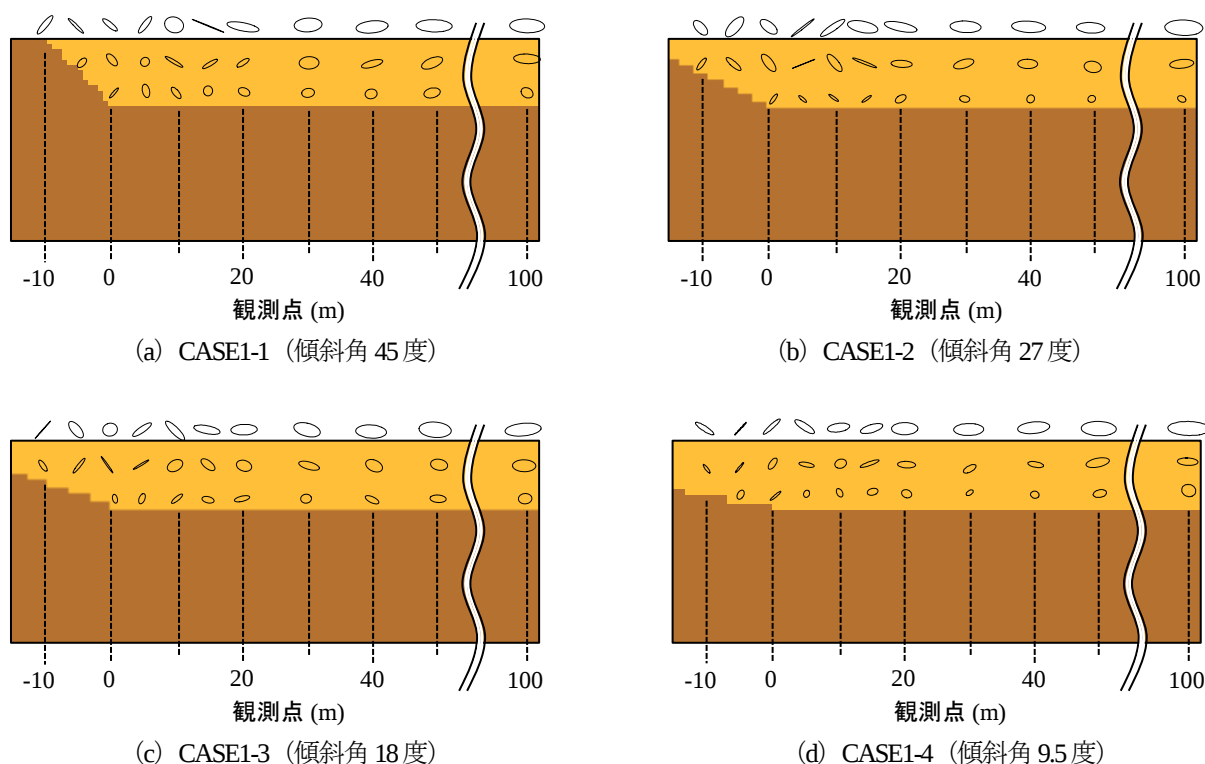


図 3-4 レイリー波の振動軌跡 (堆積層層厚：10m, 周波数：2.5Hz)

以上の検討より、基盤傾斜角が異なる不整形地盤モデルにおける、 H/V スペクトル比を用いた S 波速度の推定値の精度や、1次元地盤モデルへの適用条件を表層厚との関係を用いて示した。

4. 結論

本研究では、2次元不整形地盤モデルより算出した表層の H/V スペクトル比の卓越周波数と1次元成層地盤モデルの固有周波数を比較することで、 H/V スペクトル比より推定される S 波速度の精度や1次元成層地盤モデルへの適用条件について検討した。その結果、基盤傾斜角が 9.5 度より小さい不整形地盤である場合、傾斜終了部から表層厚 $\times 0.5$ 倍離れた観測点において、 H/V スペクトル比の卓越周波数が1次元成層地盤の固有周波数と概ね一致し、傾斜角が 27 度以上の場合、表層厚 $\times 2$ 倍離れた観測点において両者が概ね一致し、推定 S 波速度の適用性が高まることが示された。これにより、表層厚や基盤傾斜角の異なる不整形地盤モデルに対して、 H/V スペクトル比より推定される S 波速度の精度や、1次元成層地盤モデルへの適用条件を表層厚との関係を用いて示すことができた。

本研究で用いた地盤モデルは、地盤幅や地盤形状、物性値などが一定で解析ケースが限定的であったため、今

後は地盤条件を増やして更なる検討を行っていく予定である。

謝辞：本研究は、JSPS 科研費 17K01343 の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説耐震設計, p270, 丸善, 2012.
- 2) 上野勝大, 肥塚二郎, 中川元宏：鉄道構造物設計における PS 検層の有用性に関する一考察, 土木学会第 57 回年次学術講演会, pp.181-182, 2002.
- 3) 遠藤大輔, 上田稔, 今枝靖博, 葛巻亜弥子： N 値から推定された S 波速度を地盤の初期の速度構造とした場合の地震応答解析精度, 土木学会第 57 回年次学術講演会, pp.1125-1126, 2002.
- 4) 中村豊, 上野眞：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.
- 5) 遠藤大輔, 上田稔, 橋爪正弘, 永坂英明, 葛巻亜弥子：常時微動 H/V スペクトルの卓越振動数と S 波検層結果および N 値から換算した S 波速度構造から算出した固有振動数の比較, 第 39 回地盤工学研究発表会, pp.2021-2022, 2004.
- 6) 飛田幸樹, 川瀬博, 松島信一：常時微動を用いた大阪平野南部における地盤構造の推定, 日本地震工学会論文集, Vol.14, No.2, pp.104-121, 2014.
- 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, Vol.471, pp.61-70, 1995.
- 8) Corinne Lachet, Pierre-Yves Bard : Numerical and Theoretical Investigations on the Possibilities and Limitations of Nakamura's Technique, *J. Phys. Earth*, Vol.42, pp.377-397, 1994
 - 9) 大橋正, 杉戸真太, 古本吉倫 : 谷埋め盛土の谷直角方向地震動増幅特性が斜面安定に及ぼす影響, 土木学会論文集 A1, Vol.65, No.1, pp.19-23, 2009.
 - 10) 渡辺哲史, 飯場正紀, 加藤研一, 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, 日本建築技術学会報告集, No.17, Vol.36, pp.455-459, 2011.
 - 11) 古本吉倫, 杉戸真太, 細木洋輔 : 盛土や不整形地盤に適用できる地震動伝達関数の簡易推定法, 地震工学研究発表会報告集, Vol.28, pp.1-6, 2005.
 - 12) 中川博人, 中井正一 : 斜面地盤が短周期微動の H/V スペクトルと分散曲線に与える影響, 日本建築学会構造系論文集, Vol.75, No.656, pp.1827-1833, 2010.
 - 13) 時松孝次, 宮寺泰生 : 短周期微動に含まれるレイリー波の特性と地盤構造の関係, 日本建築学会構造系論文報告集, Vol.439, pp.81-87, 1992.
 - 14) 関口徹, 土佐内優介, 中井正一 : 台地端部における微動 H/V スペクトルの評価, 日本建築学会構造系論文集, Vol.75, No.649, pp.587-592, 2010.
 - 15) Hirotoshi Uebayashi : Extrapolation of Irregular Subsurface Structures Using the Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio of Long-Period Microtremors : *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.93, No.2, pp.570-582, 2003.
 - 16) 田中浩平, 坂井公俊, 盛川仁, 飯山かほり : 常時微動観測に基づく基盤傾斜角の簡易推定法の提案, 第 52 回地盤工学研究発表会, pp.1771-1772, 2017

(2018.?? 受付)

IDENTIFICATION ACCURACY OF S-WAVE VELOCITY FROM H/V SPECTRA RATIO OBSERVED ON IRREGULAR GROUND WITH INCLINED BEDROCK

Keishiro OTSUKA, Hisakazu SAKAI, Seiji NISHIYAMA and Michinori HONDA,
Atsushi TANABE

Horizontal to vertical spectra ratio (H/V spectra ratio) gained from ambient noise measurements is commonly used for a estimate of S-wave velocity profile. However, the estimate by H/V spectra ratio would be wrongly evaluated at the ground with irregular soil layers in case it is applied to one-dimensional flat layer models. On the other hand, it has not been clear yet about the identification accuracy of the estimated S-wave velocity on the irregular ground. It is essential to well understand the condition providing satisfactory estimates especially when applying the estimated S-wave velocity on irregular ground to one-dimensional flat layer models. Therefore, we simulated H/V spectra ratio on irregular ground models with inclined bedrock and compared the peak frequency with the simulation results of one-dimensional flat layer models.

The results showed that the peak frequency of the H/V spectra ratio exhibited a good correlation with fundamental frequency of one-dimensional flat layer model depending on observation points, the depth of topsoil and angle inclination of the bedrock. Using the simulation results gained, we could clarify the condition to provide the satisfactory estimates of S-wave velocity.