

# 微動探査を用いたマレーシア・ペナン島における地盤構造の推定

濱崎翔平<sup>1</sup>・Tze Liang LAU<sup>2</sup>・盛川仁<sup>3</sup>・小倉祐美子<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 非会員 東京工業大学 大学院総合理工学研究科 (〒 226-8502 横浜市緑区長津田町 4259-G3-7)

E-mail: hamasaki.s.aa@m.titech.ac.jp

<sup>2</sup>School of Civil Engineering, Universiti Sains Malaysia

<sup>3</sup> 正会員 東京工業大学 大学院総合理工学研究科 (〒 226-8502 横浜市緑区長津田町 4259-G3-7)

E-mail: morika@enveng.titech.ac.jp

近年スマトラ島沖で多発している地震では、マレーシアの都市でも揺れが観測されており、マレーシア政府は耐震設計基準の導入を検討している。そこで本研究では、ペナン島の東海岸地域を対象地域として地盤構造の解明を目的とした微動アレー観測を行った。得られた観測データより、地震動のマイクロゾーニングに資するための基礎的検討として、SPAC 法を用いて Rayleigh 波の位相速度の分散曲線を推定した。また、速度構造モデルを推定し、H/V スペクトル比によってそのモデルの妥当性を検討した。H/V スペクトル比に現れる地盤の卓越周期の特徴より、表層地盤と工学的基盤の S 波速度コントラストは概して明確で、表層厚さは高々数十メートルであることが推定された。

**Key Words:** *Microtremor observation, SPAC method, H/V spectrum, Malaysia*

## 1. はじめに

2004 年 12 月 26 日に発生したスマトラ島沖地震<sup>1)</sup>は、マグニチュード (Mw) 9.1 を記録し、各地に甚大な被害をもたらした。マラッカ海峡を挟んでスマトラ島の北東側に位置するマレー半島でも揺れが感じられた。その後もスマトラ島沖では頻繁に大きな地震が発生しており、クアラルンプールやジョージタウンなどのマレーシアの都市でも揺れが感じられ、地震に慣れていない人々の混乱が問題となっている。

元来、マレー半島南部とボルネオ島北部を領域とするマレーシアは地震被害の少ない地域である。そのため、国の耐震設計基準は十分ではなく、都市に立ち並ぶ超高層ビルを含め建造物のほとんどは、地震をあまり考慮していない設計となっている。しかし、マレーシア政府は近年頻繁に起こるスマトラ島沖での地震をうけ、建造物に対する耐震設計基準の本格的な導入を検討しており、導入に向けた様々な調査、研究が進められつつある。こうした背景のもとで、建造物を支える地盤構造についても、地震動予測の観点から新たに調査、研究の機運が高まっている。

本調査では、マレー半島北西に位置するペナン島を

対象地域として、地盤構造の推定を目的として微動アレー観測を行った。マレーシア有数の都市であるジョージタウンを中心としたペナン島は、東海岸地域を中心にコンドミニアムやホテルなどの超高層ビルや大型商業施設が立ち並んでいる。前述の通り、多くの建造物は地震を十分には考慮していない設計であり、どのような地盤構造の上に建設されているのかも必ずしも明らかではない。そこで本調査では、ペナン島東海岸地域を中心に地盤構造が建造物に与える影響を明らかにし、また、耐震設計基準導入における地震動マイクロゾーニングを進めるための基礎資料とすべく微動探査を行った。

## 2. 観測概要

2012 年 7 月 31 日から 8 月 14 日にかけての 15 日間にマレーシア、ペナン島においてアレー観測を中心とした微動探査を実施した。アレー観測では、図-1 に示す地域において、16 サイト計 34 アレーを構成した。空間自己相関法 (SPAC 法)<sup>2)</sup>による解析を行うために、アレーは図-2 に示すような中心と正三角形の頂点からな

表-1 観測概要

| アレー | サイズ | アレー半径 r(m) | 観測時間 (min) |
|-----|-----|------------|------------|
| PDE | L   | 73         | 45         |
|     | M   | 11.4       | 30         |
|     | S   | 6          | 33         |
| STR | L   | 8          | 32         |
|     | M   | 2          | 38         |
| PDC | L   | 4          | 33         |
|     | M   | 1          | 35         |
| QSB | L   | 40         | 40         |
|     | M   | 15         | 32         |
|     | S   | 5          | 30         |
| TMN | L   | 4          | 30         |
|     | M   | 1          | 30         |
| TSA | L   | 8          | 33         |
|     | M   | 2          | 33         |
| IIC | L   | 10         | 30         |
|     | M   | 3          | 30         |
| MBC | L   | 10         | 31         |
|     | M   | 3          | 33         |
| FBC | L   | 30         | 34         |
|     | M   | 4.62       | 27         |
| KMB | L   | 7.32       | 34         |
|     | M   | 2          | 30         |
| BKC | L   | 18         | 43         |
|     | M   | 3          | 30         |
| USM | L   | 40         | 30         |
|     | M   | 10         | 31         |
|     | S   | 3          | 30         |
| STB | L   | 10         | 30         |
|     | M   | 3          | 31         |
| SLJ | L   | 4          | 30         |
|     | M   | 1          | 30         |
| FIZ | L   | 6          | 31         |
|     | M   | 2          | 31         |

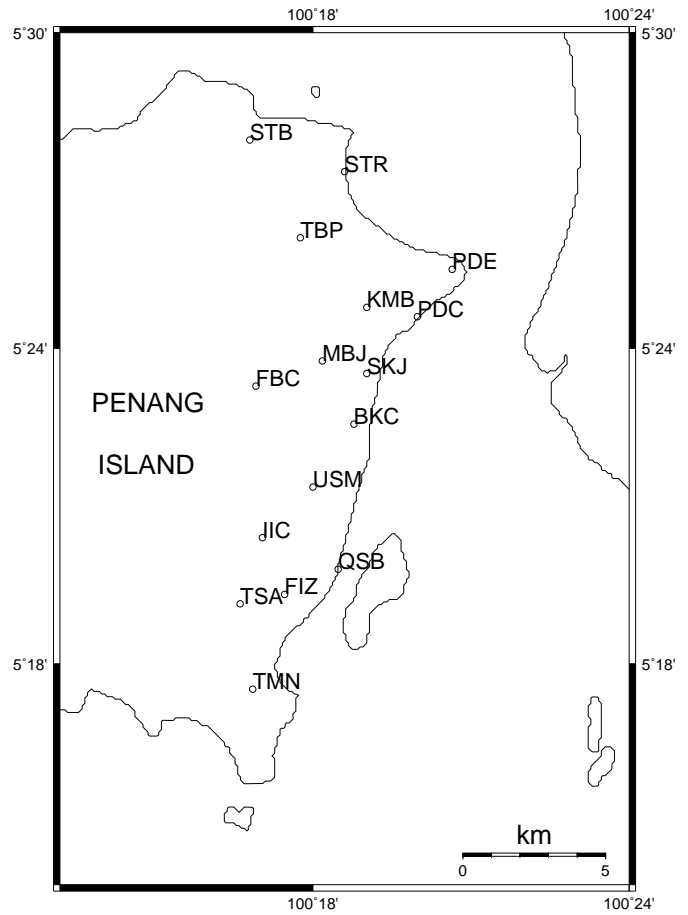


図-1 微動観測の対象地域

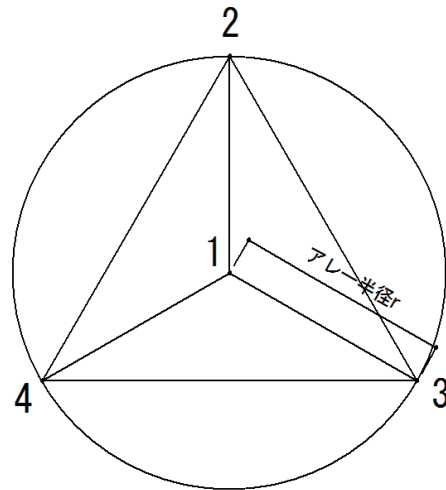
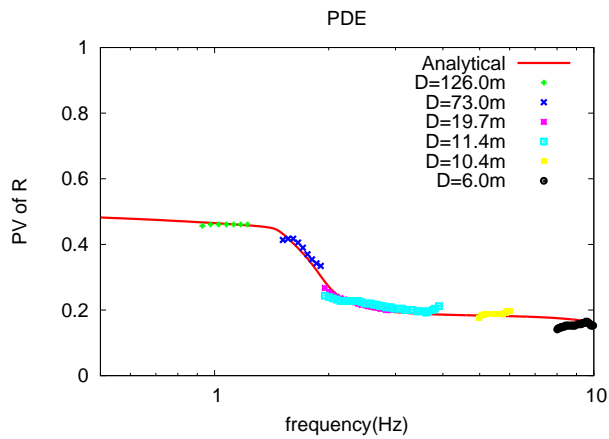


図-2 アレー観測

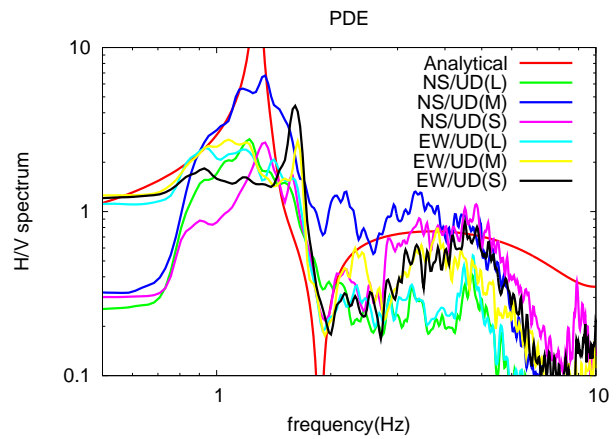
る4点で構成され、これら4点での同時観測を行った。表-1に各サイトの観測の詳細を示す。観測では、固有振動周波数約2Hzの動コイル型速度計を用いて、上下成分と水平直交2成分の計3成分を観測した。速度計の出力を差動アンプにより256倍に増幅し、約40Hzのカットオフ周波数を有するローパスフィルターを通して200Hzのサンプリングレートで記録した。また、GPSに同期する時計を用いて各記録の同時性を保持している。

### 3. 解析結果

ここで、サイトPDEについての解析結果を示す。通常、得られた記録は計器補正を行い、大きなノイズが発生した区間を除いた後に解析を行うが、本論文では



(a) 推定された位相速度の分散曲線とモデル地盤の理論分散曲線



(b) H/V スペクトル比とモデル地盤の理論楕円率

図-3 サイト PDE における解析結果

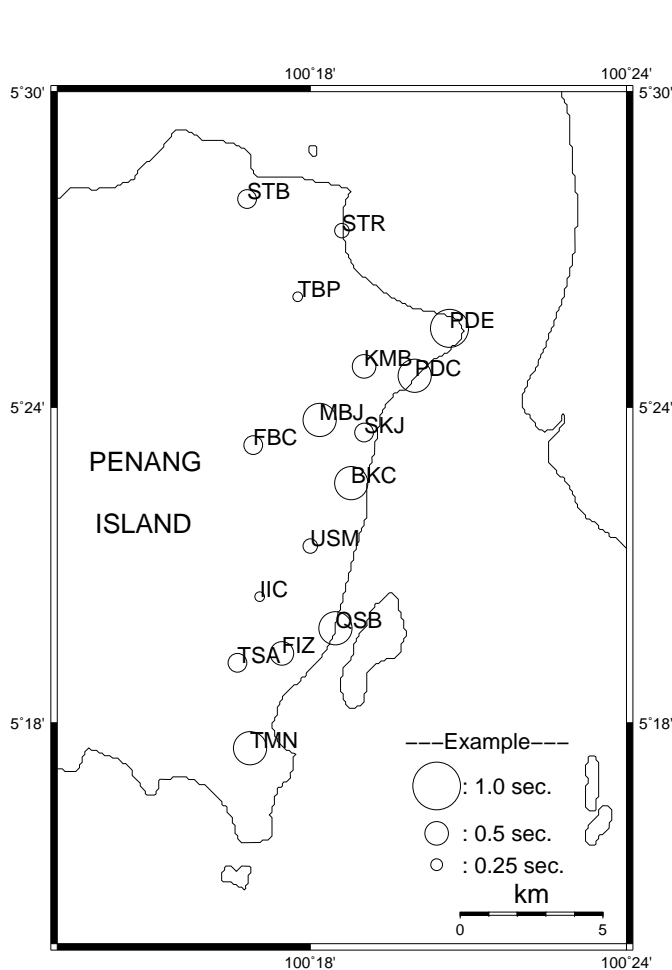


図-4 各サイトの H/V の卓越周期

それらの作業を省略した簡易的な解析結果を示している。そのため、詳細な解析によって結果が多少異なることもあり得る。空間自己相関法 (SPAC 法) を用いて、各周波数毎に Rayleigh 波の位相速度の分散曲線を推定

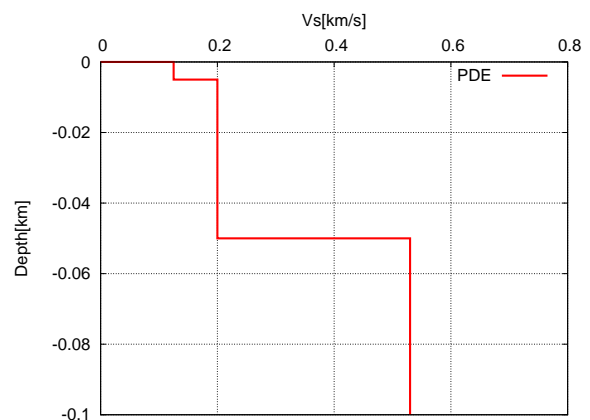


図-5 推定された S 波速度構造

した。次に、各アレーの中心点における微動の水平成分と鉛直成分のスペクトル比 (以下では、H/V とする) を求めた。記録のフーリエスペクトルの計算にあたっては、解析区間を 40 秒とし、観測時間に応じて分割し、各区間から得られたスペクトルの平均を求めた。図-3 にサイト PDE において推定された位相速度および H/V を示す。図-3(a) 中の D(m) は、解析に用いたセンサーの間隔を示す。図-3(b) 中の NS, EW, UD はそれぞれ南北、東西、上下成分、L, M, S はそれぞれ表-1 のアレーサイズに対応する。

PDE 以外のサイトについては、図-4 に H/V の卓越周期をプロットした。卓越周期が長周期であるほど円が大きくなっている。最も短周期の卓越周期は約 0.2 秒 (サイト IIC, TBP)、最も長周期の卓越周期は約 0.8 秒 (サイト PDE) であった。

## 4. 考察

これまでに行った解析結果をもとに考察を行う。はじめに SPAC 法によって推定された Rayleigh 波の位相速度の分散曲線を用いて、観測地点での S 波速度構造を逆解析によって推定する。まず、観測地点近傍における既知の地盤構造を参考にして、理論分散曲線を計算し、観測値とよく一致する地盤モデルを推定地盤構造と仮定する。この地盤構造は平行成層であることを仮定しており、また、理論分散曲線の計算には Haskell のマトリクス法<sup>3)</sup>を用いている。

サイト PDE において推定された速度構造を図-5 に示す。仮定した地盤モデルに基づいて得られた分散曲線は、図-3(a) に実線で示されている。 $V_s = 0.53\text{km/s}$  以上の層を工学的基盤とみなすと、基盤までの深度は 50m となる。

次に、推定された速度構造モデルの妥当性を検討するために、観測された H/V と、速度構造モデルの Rayleigh 波の基本モード楕円率を比較する。微動は Rayleigh 波だけから構成されるわけではないので、完全に一致するわけではないが、経験的にある程度一致することが知られており、推定された速度構造の妥当性を検証するために用いることができると考えられる。推定された速度構造モデルに基づく楕円率は図-3(b) に赤の実線で示されている。図-3 より、推定された速度構造モデルはある程度は妥当なものであると考えられる。

サイト PDE において、推定された S 波構造では第 1 層、第 2 層では S 波速度に大きな差がない。そのため、H/V においてこの境界面による卓越周期がはっきりしなかったと考えられる。一方、第 2 層と工学的基盤となる第 3 層の間には大きな S 波速度コントラストがあるため、第 3 層を基盤と見なして 1/4 波長則を適用したときの卓越周波数(約 1Hz)と H/V の卓越周波数(約 1.2Hz)とよい対応を示していると考えられる。

また、サイト PDE では表層の 5m 程の S 波速度が 125m/s という非常に柔らかい層であることが推定された。海に近く、埋め立てられた場所である可能性も高いが、計器補正などを行っていない簡易な解析であることが影響している可能性も考えられる。また、GPS による時計の同期の精度が不十分であった可能性もあり、位相速度の推定については今後より精度を高めた解析を行う必要がある。

全サイトにおける H/V に基づいた卓越周期の推定では、海に近い地点ほど卓越周期が長周期側になることが明らかになった。ほとんどのサイトにおいて、H/V の卓越周期がはっきり見えることから、S 波速度コントラストが大きいことが推定される。また、今回観測

を行ったサイトでは、卓越周期が 0.2~0.8 秒の範囲にある結果となった。表層の S 波速度を 200m/s と仮定して 1/4 波長則を適用すると、表層厚さは 10~40m 程度であると推定される。

## 5. まとめ

本研究では、マレーシア・ペナン島において微動アレー観測を行った。微動アレーによる上下動の記録から SPAC 法により Rayleigh 波の位相速度の分散曲線を求め、基盤深度を推定した。また、観測記録の H/V に基づいた卓越周期を用いて速度構造モデルを推定し、その妥当性を検証した。

H/V より得られた各サイトの地盤の卓越周期は、0.2~0.8 秒の範囲であった。これは、多くの建物の固有周期と一致する範囲であり、このような地盤特性が建物に大きな被害をもたらすことが考えられる。今後さらに地盤構造を明らかにしたうえで、地震動予測を進めていく必要がある。

謝辞:本研究の観測においては、Universiti Sains Malaysia の学生諸氏および東京工業大学学部生の中村翔平氏の協力を得た。また、本研究の一部は(独)国際協力機構(JICA)による Special Research Program for Alumni Members (SRA) の支援を受けた。記して感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) USGS ホームページ: Magnitude 9.1 - OFF THE WEST COAST OF NORTHERN SUMATRA, <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2004/us2004slav/>
- 2) Aki, K.: Space and time spectra of stationary stochastic wave, with special reference to microtremor, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 35, pp.415-456, 1957.
- 3) Haskell, N.A.: The dispersion of surface waves on multilayered media, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.43, pp.17-34, 1953.

(2012.9.21 受付)

# ESTIMATION OF GROUND STRUCTURE USING MICROTREMOR OBSERVATION IN PENANG ISLAND, MALAYSIA

Shohei HAMASAKI, Tze Liang LAU, Hitoshi MORIKAWA, and Yumiko OGURA

Recently, huge earthquakes have been frequently occurred off the west coast of Sumatra island. The shakes of these earthquakes were felt in many cities of Malay Peninsula and the government of Malaysia has intended to establish seismic design code. In this research, the microtremor array observation has been carried out around the east coast of Penang island. As a fundamental investigation, of the seismic microzonation, the dispersion curve of the phase velocity of the Rayleigh wave has been estimated by applying the SPAC method. Besides, the estimated velocity model was examined by using the H/V spectrum. Since the predominant period on the H/V spectrum was remarkable, the S wave velocity contrast of the subsurface ground and the engineering bedrock is can be analyzed and the depth of the subsurface ground is estimated to be dozens of meters.