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 CHARACTERISTICS OF RAYLEIGH WAVES IN MICROTREMORS AND THEIR RELATION TO UNDERGROUND STRUCTURES

時松孝次*, 宮寺泰生**
Kohji TOKIMATSU and Yasuo MIYADERA

Short-period microtremors are observed at two sites using arrays. It is found that their variation with frequency of amplitude ratio between horizontal and vertical motions is stable during a 24-hour period and is similar to that of Rayleigh waves, and that the frequencies at which the amplitude ratio becomes the maximum correspond to the natural periods of the sites. The frequency-wavenumber spectrum analysis of microtremor vertical motions yields Rayleigh wave dispersion curves which reflect the shear structures of the sites. These findings suggest that site effects can be reliably estimated by extracting Rayleigh wave characteristics from microtremors.

Keywords : short-period microtremors, shear wave velocity, Rayleigh wave, geophysical exploration, natural site period, array observation
短周期微動, S波速度, レイリー波, 物理探査, 地盤の固有周期, アレイ観測

1. 序 論

微動は地表で時間を選ばず観測でき、しかも地盤特性に関する情報を含んでいるため、これを利用した地盤調査法が古くから研究されている。金井、田中¹⁾は周期1秒程度以下の短周期微動がS波の重複反射によるものであると考え、1点で観測された微動のスペクトル解析より求められる卓越周期等に基づいて地盤種別を推定する方法を提案した。以後、この方法は常時微動測定と呼ばれ短周期微動を利用した調査の中で、最も一般化されたものとなっている。しかし、短周期微動の周期特性は観測点の地盤特性に加えて周辺の振動源特性をも反映するため、微動の卓越周期が地盤の固有周期と対応しない場合がある²⁾。そのため、常時微動測定の有効性に関しては意見の分かれるところである。

振動源の特性が測定結果に与える影響を軽減するため、中村、上野³⁾は、1点で観測された微動の水平鉛直振幅比の周期特性から地盤の固有周期を推定する方法を提案している。そして、その妥当性は、金井、田中の研究¹⁾の場合と同様、短周期微動がS波の重複反射によるものであると仮定して説明されている。しかし、一方では、短周期微動には表面波が卓越していることを示唆す

る報告^{4)~7)}もある。

Allam, 嶋³⁾は、地表と基盤とのコントラストが明瞭な地点では、微動を実体波または表面波あるいは両者からなるもののいずれとして取扱っても、卓越周期に関する限り違いが無いことを示している。しかし、短周期微動の波動的性質については現在まで未解明の部分がある。

周期約1秒以上の長周期微動に対しては、アレイ観測等から、表面波(レイリー波とラブ波)が優勢であることがすでに認められている^{9)~11)}。また、鉛直微動のアレイ観測に基づきレイリー波のものと考えられる分散特性を求め、その逆解析から地盤のS波速度構造を推定した例^{12),13)}もある。レイリー波の分散特性は地盤固有のもので振動源の周期特性に影響されないため、このように地盤構造の推定が可能となる。近年、短周期微動に対しても同様の試みが報告されている^{14),15)}。これらの報告のように微動からレイリー波の特性が常に抽出できるならば、より信頼性の高い地盤特性の把握が可能になる。

そこで、本研究では短周期微動に含まれる表面波成分の工学的利用法に関する基礎的研究として、2地点で一昼夜にわたる連続アレイ観測を行い、短周期微動に含ま

* 東京工業大学工学部建築学科 助教授・博士(工学)

** 東京工業大学工学部建築学科 大学院生・修士(工学)

Assoc. Prof., Dept. of Architecture and Building Engineering, Faculty of Engineering, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.
Graduate Student, Dept. of Architecture and Building Engineering, Faculty of Engineering, Tokyo Institute of Technology, M. Eng.

れるレイリー波成分の抽出を試み、短周期微動から振動源の影響を除去して地盤特性を推定する可能性について検討する。

2. 短周期微動の連続アレイ観測

2.1 測定地点の特性

2地点で一昼夜にわたる短周期微動のアレイ観測を行った。測定地点は、東京湾の台場（以下サイトAと呼ぶ）と、東京工業大学緑が丘グラウンド（以下サイトBと呼ぶ）である。サイトAの南東側には首都高速道路が通り、昼夜とも交通量が多い。さらに同方角では建設工事が行われており、日中は建設用重機が運転され、振動レベルが高い。しかしそのほかには人工的振動源はほとんどない。また周囲を海に囲まれ海岸が非常に近い。サイトBの北側および東側には校舎および実験棟がある。周辺は閑静な住宅街であるが、南側遠方に東急目蒲線と大井町線が走り、西側そばを道路が通る。

標準貫入試験およびPS検層より求めた各サイトの地盤構造を図-1, 2に示す。サイトAはS波速度150 m/s程度の沖積粘土層が深度30mまで続き、その下にS波速度300 m/s以上の洪積層がある。一方、サイトBは、

図-1 サイトAの地盤構造

図-2 サイトBの地盤構造

図-3 観測計器と観測アレイ

S波速度150 m/s程度の関東ローム層が表層に薄く堆積し、深度6mよりS波速度300 m/s以上の硬質層となる。両地点とも、表層とその下にある硬質層とのコントラストが比較的明瞭である。図に示すS波速度構造の最下層（S波速度約600 m/s）が半無限に続くものと仮定してS波重複反射理論より求めたサイトAの1次固有周期は約1秒、2次固有周期は約0.35秒、またサイトBの固有周期は約0.2秒である。

2.2 測定方法

観測に用いた計器は、速度計およびローパスフィルタを組込んだ増幅器（8チャンネル）、12ビットAD変換器とラップトップコンピュータである（図-3）。微動計の総合特性は、約1秒以下で速度に対して平坦なものである。観測アレイは、水平2方向（NS, EW）および鉛直方向（UD）の3成分速度計を観測点中心に固定し、その点を中心とする円周上に5個の鉛直成分速度計を等間隔に配置したもの（図-3）である。

観測は一昼夜、3時間ごとに、サイトAでは半径5, 10, 20, 30mのアレイを、サイトBでは半径2, 5, 10mのアレイを組んで行った。アレイ半径の最大値は各地点の敷地条件の制約によるものである。半径の異なるアレイごとに、数分ないし10分程度、8成分（鉛直6, 水平2）の微動データを同時観測した。観測波形はローパスフィルタ（12.5 Hz または 25 Hz, -12 dB/Oct）と増幅器をとおして、サンプリング周波数100~200 Hz程度でデジタル化して、ラップトップコンピュータに取り込んだ。この際、1成分につき2048ポイントを単位とする8ないし16個のデータファイルを作成して以後の解析に用いた。

3. 解析手法

3.1 3成分測定に対する解析

コンピュータに取り込んだ時間領域の微動データをフーリエ変換し、加算平均を行ってNS, EW, UD成分のフーリエスペクトルを求めた。加算平均された水平2成分のフーリエスペクトル振幅を次式で相乗平均して、

水平動の平均スペクトル振幅 S_H とする。

$$S_H = \sqrt{S_{NS} S_{EW}} \quad (1)$$

ここに、 S_{NS} 、 S_{EW} はそれぞれ NS 、 EW 成分のフーリエスペクトル振幅である。微動の水平鉛直振幅比 $(u/w)_m$ を、さらに次式で定義する。

$$(u/w)_m = S_H / S_{UD} \quad (2)$$

ここに、 S_{UD} は鉛直成分のフーリエスペクトル振幅である。

3.2 アレイ観測データに対する解析

アレイ観測された鉛直微動データに対して、 F - K スペクトル解析を適用し、その位相速度を求めた。 i 番目の鉛直速度計が、座標ベクトル x_i にあるとすれば、最尤法による F - K スペクトル、 $P(f, k)$ 、が次式で定義できる¹⁶⁾。

$$P(f, k) = \sum_{j,l=1}^n A_j^*(f, k) A_l(f, k) G_{jl}(f) \exp \{ ik \cdot (X_j - X_l) \} \quad (3)$$

ここに、

$$A_j(f, k) = \sum_{l=1}^n q_{jl}(f, k) / \sum_{j,l=1}^n q_{jl}(f, k) \quad (4)$$

また、 $*$ は共役複素数を示し、 f は周波数、 n は鉛直速度計の数、 $\{q_{jl}\}$ は $\exp[ik \cdot (X_j - X_l)] G_{jl}$ の逆マトリックス、 G_{jl} は j, l 番目のセンサーで観測される波形の加算平均された正規化クロススペクトル、 k は 2 次元波数ベクトル (k_x, k_y) で、単位は rad/m である。

2 次元波数平面に描いたスペクトルがピークとなる波数ベクトルを k_p とすれば、位相速度 c および波長 λ が次式で計算される。

$$c = 2\pi f / |k_p| \quad (5)$$

$$\lambda = 2\pi / |k_p| \quad (6)$$

各周波数に対して上記の操作を繰返し、位相速度と波長の関係、すなわち分散特性を得る。

4. 水平動および鉛直動スペクトル

4.1 サイト A における結果

3 時間ごとに測定した水平動と鉛直動スペクトルを 24 時間分重ねて図-4、5 に示す。水平動スペクトル (図-4) に昼夜とも卓越する周期約 1 秒と約 0.35 秒の成分は、それぞれ地盤の 1 次および 2 次の固有周期に対応している。1 秒のピークは顕著な振幅の日変化を示し、夜間 (21 時～6 時) の振幅は昼間 (9 時～18 時) の 1/4 程度となる。一方、0.35 秒のピークは夜間でも昼間の 1/2 以上の振幅をもち、その日変化が比較的小さく、昼夜にかかわらず安定している。

鉛直動スペクトル (図-5) には水平動の 2 次の卓越周期約 0.35 秒付近にピークが見られる。しかし、どの時刻においても 1 次卓越周期に対応する 1 秒の成分がピークとなることはない。

図-4 サイト A の水平動スペクトルの日変化

図-5 サイト A の鉛直動スペクトルの日変化

4.2 サイト B における結果

サイト B において 3 時間ごとに測定した水平動スペクトルと鉛直動スペクトルを図-6、7 に示す。周期 0.2 秒以下および 1 秒以上でややスペクトル振幅の日変化が認められるが、サイト A に比べその変化は相対的に小さい。

水平動スペクトル (図-6) は約 0.2 秒から約 0.4 秒が卓越しているが、日中は 0.2 秒、夜間は 0.4 秒のピークがやや優勢である。日中のピークとなる 0.2 秒は地盤の 1 次固有周期にほぼ対応しているが、夜間にこの周期を明確にとらえることは難しい。このことから、地盤条件と測定時間によっては水平動スペクトルが最大となる周期と地盤の固有周期が明確に対応しない場合のあることが確認される。以上の現象は従来から指摘されている²⁾ように、微動が地盤固有の性質に加え、人間活動にともなう振動の影響をも強く受けているためと考えられ

る。また、サイトAとサイトBの比較から、その影響は卓越周期の短い硬質地盤で顕著になる可能性のあることが示唆される。

一方、鉛直動スペクトル（図—7）には、夜間に水平動スペクトルが最大となる周期約0.4秒に比較的確かな山が見られる。しかし、昼間に水平動スペクトルが最大となる周期0.2秒付近は、どの時刻においても谷となっている。

4.3 水平鉛直振幅比

図—4～7より、地盤の1次卓越周期（サイトAで1秒、サイトBで0.2秒）付近では水平動の振幅が鉛直動の振幅よりかなり大きく、それ以外の周期ではおよそ1対1となっている傾向が読取れる。そこで各測定地点の3時間ごとの微動の水平鉛直振幅比の周期特性をまとめて図—8, 9に実線で示す。微動の水平鉛直振幅比の周期特性

は、両サイトとも測定時刻にかかわらず極めて安定し、日変化がない。したがって、水平動のスペクトルよりも水平鉛直振幅比の周期特性のほうが、振動源の影響が少なく、地盤構造をより強く反映していると考えられる。同様の現象は中村、上野³⁾によっても指摘されている。

図—8, 9において水平鉛直振幅比が最大となる周期はサイトAで約1秒、サイトBで約0.2秒となり、日変化がなく安定している。さらに、これらの周期は各サイトの地盤の1次固有周期にほぼ対応している。以上の結果から、中村、上野³⁾が指摘しているように、水平鉛直振幅比が最大となる周期から地盤の固有周期を推定できる可能性が示唆される。

長周期微動に対しては、その水平鉛直振幅比の周期特性に日変化が少なく、その原因が微動にレイリー波が含まれているためであることが小林¹⁷⁾により指摘されてい

図—6 サイトBの水平動スペクトルの日変化

図—8 サイトAの水平鉛直振幅比の観測と理論の比較

図—7 サイトBの鉛直動スペクトルの日変化

図—9 サイトBの水平鉛直振幅比の観測と理論の比較

る。レイリー波は楕円形の軌跡を持ち、その水平動と鉛直動の振幅比は振動源の影響を受けず地盤構造に依存して決まる。したがって、短周期微動の水平動および鉛直動それぞれの振幅が日変化しても、その比をとると一定となるのは、微動にレイリー波が卓越しているためと考えられる。

そこで、図-1, 2 に示す地盤構造からレイリー波基本モードの水平鉛直振幅比をハスケルの理論¹⁸⁾に基づいて求め、図-8, 9 に破線で示す。理論振幅比の周期特性は観測と全般的な傾向が良く一致し、その値が最大となる周期も観測と良く対応している。理論と観測における振幅比の整合性は、短周期微動にレイリー波が含まれていることを裏付けるものと考えられる。なお、理論と観測においてその値が完全に一致しない理由には、レイリー波以外の波の影響、高次モードレイリー波の影響、既往の調査より求められた地盤構造の精度、理論において仮定した水平成層構造の妥当性などが考えられるが、現状では判断がつかない。

中村, 上野³⁾は、短周期微動の水平鉛直振幅比の周期特性が安定し、その値が最大となる周期が地盤の卓越周期に対応している理由を、S波の増幅特性と関連づけて説明している。しかし、本研究結果に基づけば、以上の現象は、短周期微動にレイリー波が卓越していることで、より明確に説明づけられると思われる。

5. 鉛直動の分散特性

短周期微動にレイリー波が卓越しているという前章の結果を踏まえ、両サイトで3時間ごとに観測された微動のアレイ観測記録に対し $F-K$ スペクトル解析を行って、鉛直成分の分散特性を求めた。この際、結果の信頼性を考慮して、鉛直動のスペクトル振幅がその最大振幅のおおむね 1/10 以上ある周波数帯を解析対象とした。

図-10, 11 はサイトAおよびサイトBにおいて日中に観測された微動に対する解析結果を、それぞれ4種類の周波数に対して示したものである。解析より求められた $F-K$ スペクトルは、2次元波数平面上 (k_x, k_y) に、その最大値から 2 dB ごとに 12 dB まで等高線で示している。なお、図の*はスペクトルの最大値を示し、図の上が北に対応する。

サイトAにおけるスペクトル (図-10) の最大値が、いずれの周波数においても原点 (各図の中心) の右下方にあることから、微動が主として南東より伝播していることが分かる。これはその方角にある高速道路を通行する車両および建設工事にともなう振動が微動の主たる振動源となっているためと考えられる。一方、サイトBのスペクトル (図-11) が最大値となる方角は各周波数ごとに一定でない。これは、このサイトにおける微動の振動源が、サイトAに比べて一定の方角に集中していない

図-10 サイトAの $F-K$ スペクトル例 (12時)

図-11 サイトBの $F-K$ スペクトル例 (15時)

ためと思われる。

図-12, 13 は両サイトで3時間ごとに求められた分散特性をそれぞれ比較したものである。異なるアレイ半径より得られた微動の $F-K$ スペクトル解析から求められた分散特性は、波長がアレイ半径の約2から6倍程度の範囲でほぼ連続するものであった。したがって、サイトAでは波長約 180 m 以下 (約 1.7 Hz 以上)、サイトBでは波長 60 m 以下 (約 7 Hz 以上) に対して分散特性を示した。

図-12, 13 から、両サイトで得られた鉛直微動の周波数特性が日変化しているにもかかわらず、その分散特性は日変化がなく安定していることが分かる。このことは、測定された分散特性が、水平鉛直振幅比と同様、振動源の日変化に依存せず、地盤固有の特性を反映したもので

図-12 サイトAの分散特性の日変化と理論分散曲線

図-13 サイトBの分散特性の日変化と理論分散曲線

あることを示唆している。

そこで、図-1, 2の地盤構造に対するレイリー波基本モードの分散特性をハスケルの理論¹⁸⁾に基づいて求め、図-12, 13に実線で示す。なお、サイトAの波長30m以下では、やや逆分散の傾向を示し、高次モードの存在が示唆される。そこで、この部分に対しては、1次高次モードの理論分散特性も破線で示した。微動のF-Kスペクトル解析より求められた分散特性は、レイリー波の理論分散特性と比較的良好な対応があり、観測された周期領域における微動の鉛直成分にレイリー波が卓越していることが確認される。

サイトBの結果では、夕方から早朝にかけて微動の振

幅が相対的に低下するため分散特性がばらつく周波数帯があるが、それ以外の時間において求められた分散特性は安定している。このことより、対象とする周波数帯における微動のパワーが十分ならば安定した分散特性が抽出できる可能性が示唆される。

短周期微動の観測からレイリー波分散曲線が抽出できれば、それを逆解析することで、表層地盤のS波速度構造が推定できる可能性もある。このような表面波特有の性質に着目した地盤探査として、地表で強制的にレイリー波を発生させ、その分散性を観測する方法が従来より提案されている^{19), 20)}。しかし、これらの方法で、深度10mより深い地盤構造を決定しようとするれば、重量のある振源を用意する必要がある。一方、短周期微動を積極的に利用すれば、振源を用意することなしに対応する深度のS波速度構造を迅速に推定できる可能性がある。この点で、短周期微動を利用した地盤探査は有望と考えられるが、その有効性と適応限界を見極めるためには、さらに観測例の蓄積が必要と思われる。また、図-12に見られるような分散曲線に含まれる高次モードの影響を逆解析でどのように評価するかなど、さらに検討を要する点もある。

6. 結 論

地盤構造の分かっている2地点で一昼夜にわたる短周期微動のアレイ観測を行い、両地点における短周期微動の基本的特性に関して以下の結論を得た。

- 1) 短周期微動の水平動と鉛直動のスペクトル振幅およびその卓越周期に日変化が認められる場合でも、水平鉛直振幅比の周期特性およびその比が最大となる周期は日変化がなく安定している。
- 2) 短周期微動の水平鉛直振幅比の周期特性はレイリー波の水平鉛直振幅比の周期特性と比較的良好に対応している。
- 3) 短周期微動の水平鉛直振幅比が最大となる周期は、レイリー波の理論水平鉛直振幅比が最大となる周期およびS波重複反射理論から求められる地盤の固有周期にはほぼ対応している。
- 4) 短周期微動の鉛直動に対するF-Kスペクトル解析より、レイリー波のものと考えられる分散特性が求められる。この分散特性は微動のパワーが十分ある周波数領域では日変化がなく安定している。

今後、周辺環境条件の異なる種々の地盤に対し、更に、観測例を蓄積する必要があるものの、以上より、短周期微動にはレイリー波が含まれており、この特性を抽出することで、振動源の特性を除去して地盤特性を推定できる可能性が示された。

謝 辞

本研究に関し、東京工業大学大学院総合理工学研究科

翠川三郎助教授には貴重なご意見を賜わった。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Kanai, K. and Tanaka, T. : On microtremor, Ⅷ, Bulletin, Earthquake Research Institute, 39, pp. 97~114, 1961.
- 2) Udvardi, F.E. and Trifunac, M.D. : Comparison of earthquake and microtremor ground motions in El Centro, California, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 63, No. 4, pp. 1227~1253, 1973.
- 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講演集, pp. 265~270, 1986.
- 4) Aki, K. : Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors, Bulletin, Earthquake Research Institute, 35, pp. 415~456, 1957.
- 5) 野越三雄, 五十嵐亮 : 微動の伝播性, 地震 第2輯, 第23巻, pp. 264~280, 1970.
- 6) Asten, M.W. : Geological control on the three-component spectra of Rayleigh-wave microseisms, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 68, No. 6, pp. 1623~1636, 1978.
- 7) Liaw, A.L. and McEvilly, T.V. : Microseisms in geothermal exploration studies in Grass Valley, Nevada, Geophysics, Vol. 44, No. 6, pp. 1097~1115, 1979.
- 8) Allam, A. and Shima, E. : An Investigation into the Nature of Microtremors, Bulletin, Earthquake Research Institute, 45, pp. 43~60, 1967.
- 9) 工藤一嘉, 太田 裕, 後藤典俊, 鏡味洋史, 塩野計司, 坂尻直巳, 成瀬聖慈, 出原孝示, 竹内文朗 : やや長周期の微動観測と地震工学への適用 (4) —Array観測による微動伝播性の検討—, 地震 第2輯, 第29巻, pp. 323~337, 1979.
- 10) 塩野計司, 太田 裕, 工藤一嘉 : やや長周期の微動観測と地震工学への適用 (6) —微動に含まれる Rayleigh 波成分—, 地震 第2輯, 第32巻, pp. 115~124, 1979.
- 11) Asten, M.W. and Henstridge, J.D. : Array estimator and the use of microseisms for reconnaissance of sedimentary basins, Geophysics, Vol. 49, No. 11, pp. 1828~1837, 1984.
- 12) Horike, M. : Inversion of phase velocity of long-period microtremors to the S-wave-velocity structure down to the basement in urbanized area, Journal of Phys. Earth., 33, pp. 59~96, 1985.
- 13) 岡田 広, 松島 健 : 長周期微動の観測による厚い地盤構造の推定について, 第7回日本地震工学シンポジウム講演集, pp. 211~216, 1986.
- 14) Tokimatsu, K., Shinzawa, K., Kuwayama, S., and Abe, A. : Estimation of Vs profiles from Rayleigh wave dispersion data at sites affected in the Loma Prieta Earthquake, Proc., Int. Conf. on Seismic Zonation, Vol. 2, pp. 507~514, 1991.
- 15) Sato, T., Kawase, H., Matsui, M., and Kataoka, S. : Array measurement of high frequency microtremors for underground structure estimation, Proc., Int. Conf. on Seismic Zonation, Vol. 2, pp. 409~416, 1991.
- 16) Capon, J. : High-Resolution Frequency-Wave-number Spectrum Analysis, Proc., IEEE, 57, pp. 1408~1418, 1964.
- 17) 小林喜久二 : やや長周期微動の基礎的性質と地下構造推定への応用, 第17回地盤振動シンポジウム, 微動の工学的利用について—その現状と可能性—, pp. 19~30, 1989.
- 18) Haskell, N.A. : The Dispersion of Surface Waves on Multilayered Media, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 43, No. 1, pp. 17~34, 1953.
- 19) Nazarian, S., and Stokoe, K.H., II : In situ shear wave velocity from spectral analysis of surface waves, Proc., 8th World Conf. on Earthquake Engineering, Vol. 3, pp. 31~38, 1984.
- 20) Tokimatsu, K., Kuwayama, S., Tamura, S., and Miyadera, Y. : Vs determination from steady state Rayleigh wave method, Soils and Foundations, Vol. 31, No. 2, pp. 153~163, 1991.

(1992年3月30日原稿受理, 1992年6月20日採用決定)