

微動による地盤の S 波速度構造の推定—微動探査法—

Estimation of S-wave velocity Structure Using Microtremors —Microtremor Exploration—

山中 浩 明 (やまなか ひろあき)

東京工業大学大学院准教授 総合理工学研究科

1. はじめに

微動の地震工学的な利用に関する研究は1960年代から始められ、今日でも重要な研究テーマの一つである。また、耐震設計の実務でも地盤種別の判別などの際に使われることがあり、実務者にも馴染みが深いものである。最近では、計測技術の向上によって微動を同時に複数地点で観測することも容易になり、微動探査に基づく、より信頼性の高い微動の利用も可能となっている。ここでは、微動の地震工学的利用、とくに微動探査について説明する。

2. 単点観測に基づく評価

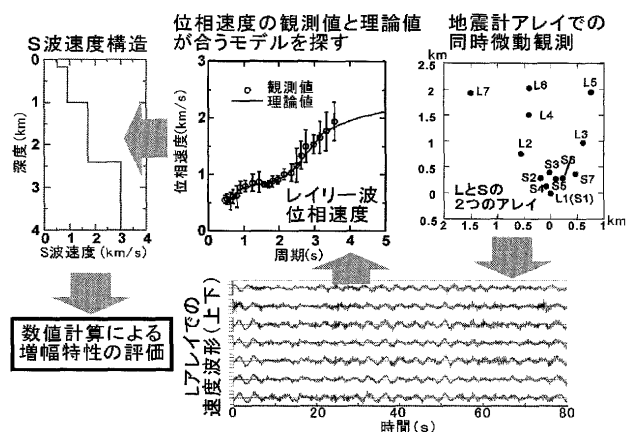
地盤震動特性の評価における微動の活用をまとめたものを口絵写真—15に示す。最も簡単な微動の利用は、周期1秒以下の微動を用いた表層地盤の卓越周期の評価であり、工学的基盤よりも深い地盤との関連で周期1秒以上の長周期帯域でも同様の試みが行われている。しかし、一般に、微動は判別できない多数の振動源による弾性波であり、物理的な解釈は容易ではない。そのために、微動の卓越周期やスペクトル特性を用いて地盤特性を理解することは単純ではない。現在では、地盤種別の判別に微動を利用する本来の目的が薄れつつあることが多い。微動の振動源の影響を除去するために、2点間のスペクトル比や1点での水平動と上下動のスペクトル比が用いられている。2点間のスペクトル比が地盤震動特性の差異を反映するための条件などは明確ではなく、適用可能範囲が十分に明らかではない。一方、水平動と上下動のスペクトル比はS波の増幅特性と考えられることもあるが、微動の主成分が表面波であることから、レイリー波¹⁾の楕円率（上下成分に対する動径成分のスペクトル比）に関連して解釈されることが多い。レイリー波の楕円率は、振動源のスペクトル特性に依存せず、地下構造にのみ依存したスペクトル形状になるので、地下構造に関する情報を得ることができる。ラブ波の寄与などの仮定がどの程度満たされているかなどの確認すべき点が残されているが、1点での観測で十分であるなどの長所もあり、目的や必要とされる精度を踏まえて利用できると考えられる。

3. アレイ観測による評価

より精度の高い微動の工学的活用は、微動探査法に基

づくものである。これは、微動を多数の地震計のアレイで観測し（口絵写真—16～17）、微動に含まれる表面波の位相速度を推定し、観測値に合う理論位相速度を持つS波速度構造を推定するものである²⁾。この考え方は、前述の卓越周期やスペクトル比に比べて理論的背景が明瞭であり、探査手法としてある程度確立されており、現時点において微動の最も定量的な活用方法であるといえる。すでに、地下数kmの深部から数mの浅部の地盤のS波速度構造推定に関する数多くの適用例が報告されている（例えば参考文献3), 4)）。図—1は、微動探査の例を示しており、周期数秒までの位相速度から深部地盤のS波速度構造が推定されている。微動探査法は、強震動評価と同じような周期帯域の波動を用いた唯一のS波速度構造推定法である。また、得られるS波速度構造は、その地点での表面波の位相速度の特徴を満足するものであり、これも他の物理探査にない微動探査の特徴の一つである。

図—1に示すように、微動探査では、表面波の位相速度の推定と地下構造モデルへの逆解析が主要な要素技術となる。アレイで観測された微動（多くの場合、上下成分）から微動の位相速度を推定する際によく用いられている方法は、周波数-波数スペクトル法（FK法）と空間自己相関関数法（SPAC法）である²⁾。FK法は、基本的には各点の観測記録の時間差（位相差）から伝播速度を求めるものであり、どのような観測点配置によるアレイでの記録に対しても適用できるので、観測時の自由度は大きい。一方、SPAC法では、微動の自己相関関数の距離による変化から位相速度を求めるものであり、解析上



図—1 深部地盤を対象とした微動探査の例

の前提から円の中心とその円周上に地震計を配置する円形アレイが用いられることが多い。この方法では、自己相関関数の空間変化に基づくものであり、FK 法よりも小さいサイズのアレイで安定した結果が得られることが利点である。最近、SPAC 法を拡張して、より安定した位相速度推定方法も提案されている⁵⁾。しかし、微動という受動的振動源を用いているために、観測される微動の振幅が非常に小さい周期帯域では本質的に位相速度の推定が難しい。とくに、周期数秒よりも長周期での位相速度を得ることは難しく、地下構造モデルのより深い部分での不確かさの原因の一つになる。この点を克服するために、中小地震の記録の解析から得られる地盤に關係した物理量を微動探査による位相速度と同時に逆解析する手法が提案されている。例えば、地震による長周期表面波の位相速度やレシーバー関数（初期微動部分から PS 変換波を抽出したもの）などを微動探査による位相速度と同時に考慮した逆解析も行われている⁶⁾。

微動の位相速度が周期によって異なる（分散性を有する）場合には、微動の位相速度は表面波によるものであると解釈でき、位相速度の観測値と理論値が一致するようにして地下構造を求めることができる（図—1）。一般に、観測データから数学的モデルのパラメータを推定することを逆解析という。表面波の位相速度の逆解析では、成層構造モデルを仮定し、そのモデルパラメータを推定することになる。レイリー波の位相速度は、P 波と S 波の速度、密度、層厚によって決まる。一般に、P 波速度や密度は位相速度に大きな影響を与えないことから、固定、もしくは、他のパラメータとの回帰式で連動させることが行われ S 波速度や層厚が逆解析の未知数として用いられている場合が多い。一般的な最小 2 乗法に基づく逆解析では、位相速度の理論式が非線形であるために、擬似線形化を行い、繰返し計算により最適なパラメータを求めている。しかし、実際に計算を行ってみると、解の初期モデル依存性や計算の不安定さなどの問題点が生じることがある。これらの問題点を解消するために、遺伝的アルゴリズムや焼きなまし法などの大局最適化法を用いた逆解析手法が提案されている⁷⁾。ほとんどの逆解析では、微動探査で得られる位相速度がアレイ内の観測点設置範囲の直下での地下構造を反映した平均的な値であるとして成層地盤モデルが仮定されている。しかし、断層や傾斜などの不整形性の強い地盤では位相速度に方位依存性や高次モードの発生など問題があり、結果の解釈に注意が必要である。また、逆解析における解の一意性の問題によって得られる結果が初期モデルや制約条件に依存する場合もあり、既往の調査結果との比較などの検討が大切となる。

4. 地震波干渉法による評価

二つの地点での非常に長い時間にわたる微動記録の相互相関関数⁸⁾から 2 地点間のグリーン関数を推定する試みがある⁹⁾。これは地震波干渉法といわれており、最近、その適用性の検討が行われている。相互相関関数を長い

時間平均することは、震源が周辺に満遍なくあることになり、すべての波の影響を加算すると、2 点を結ぶ線分の外部延長側の振動源の影響だけが相殺されずに残ってくると考えるものである。グリーン関数は、弾性体のインパルスに対する応答であり、波動伝播の基礎的な情報（P 波、S 波、表面波）をすべて含んでいるものである。そこで、地震波干渉法による微動の相互相関関数から 2 地点間の表面波群速度を求め、S 波速度構造を推定することが行われている（例えば、¹⁰⁾）。地震波干渉法に基づくデータ処理で安定した結果を得るには、最低でも 1~2 ヶ月間の連続観測データが必要となるが、地盤構造推定での応用可能性は高いと考えられる。とくに、アレイ観測に基づく微動探査が難しい山岳部や海洋部などの地域における S 波速度構造推定への適用が期待される¹⁰⁾。

5. お わ り

微動を用いた地盤震動特性の評価には、コストや精度・信頼性などに応じて様々なオプションがある。とくに、アレイ観測に基づく微動探査は多くの調査事例があり、実務でも信頼性の高い調査方法として使用できるものである。これらの方法の適用範囲や特徴を踏まえて、微動が適切に活用されることが望ましい。ここでは微動に関する多岐にわたる研究の一部を紹介したにすぎない。微動探査の詳細については、物理探査学会のハンドブック¹¹⁾が参考になる。

参 考 文 献

- 1) 物理探査学会：物理探査用語辞典，愛智出版，pp. 242~243, 2005.
- 2) 岡田 廣・松島 健・森谷武男・笹谷 努：広域・深層地盤調査のための長周期微動探査法，物理探査，Vol. 43, pp. 402~417, 1990.
- 3) 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集，Vol. 439, pp. 81~87, 1992.
- 4) 松岡達郎・梅沢夏実・巻島秀男：地下構造推定のための空間自己相関法の適用性に関する検討，Vol. 49, pp. 26~41, 1996.
- 5) Cho, I., T. Tada and Y. Shinozaki: A new methods ftp determine phase velocities of Rayleigh wave from microseisms, *Geophysics*, Vol. 69, pp. 2535~1551, 2004.
- 6) Kurose T. and H. Yamanaka: Joint inversion of receiver function and surface-wave phase velocity for estimation of shear-wave velocity of sedimentary layers, *Exploration Geophysics*, Vol. 59, pp. 93~101, 2006.
- 7) 山中浩明：ハイブリッドヒューリスティック探索による位相速度の逆解析，物理探査，Vol. 60, pp. 265~275, 2007.
- 8) 物理探査学会：物理探査用語辞典，愛智出版，129, 2005.
- 9) Shapiro, N. M. and M. Campillo: Emergence of broadband Rayleigh waves from correlations of the ambient seismic noise, *Geophy. Res. Lett.*, 31, L07614. doi: 10.1029/2004GL019491, 2004.
- 10) 山中浩明・内山知道：微動探査と地震波干渉法による松本盆地の S 波速度構造の推定，物理探査，Vol. 61, pp. 469~482, 2008.
- 11) 物理探査学会：微動・振動，物理探査ハンドブック，物理探査学会，1998.

(原稿受理 2010.3.2)