

地震動と微動の地盤特性に関する数値的検討

趙 伯明¹・堀家正則²・竹内吉弘³・藤原広行⁴

¹工博 財団法人大阪土質試験所 (〒550-0012, 大阪市西区立売堀4-3-2)

²理博 大阪工業大学工学部教授 (〒535-0002, 大阪市旭区大宮5-16-1)

³工博 大阪工業大学工学部教授 (〒535-0002, 大阪市旭区大宮5-16-1)

⁴理博 防災科学技術研究所主任研究官 (〒305-0006, 茨城県つくば市天王台3-1)

本論文は、地盤条件の異なる複数の地域でアレイ観測により得た微動と地震動から推定した地盤特性の比較結果を弾性波動論に基づく数値計算により確認することを目的とする。具体的手法として、不整形地盤モデルに対する平面SV波入射と地表面での点震源加振による地表面応答から推定した3つの地盤特性(卓越周期, 異なる観測点間の水平成分のスペクトル比, 水平成分対上下成分のスペクトル比)を比較することにより、観測事実の説明を試みた。使用する計算方法は境界要素法と薄層有限要素法のハイブリッド法である。比較的柔らかい表層がある地盤モデルでは得られた結果は、堆積地盤での観測事実をかなり説明すると考えられる。固い地盤モデルでは、地表震源の加振方向を水平とした場合が観測結果を適切に説明できる。

Key words: Simulation between seismic motion and microtremors, site-specific characteristics, spectral ratio, hybrid technique of FEM and TLFEM.

1. はじめに

趙ら¹⁻³⁾は地盤条件の異なる5テストフィールドで地震動と微動の地盤特性を直接比較し、微動による地震動の推定可能性を検討した。結論には、(1)異なる地点間の微動水平成分或いは上下成分のスペクトル比(HH/VV)は、狭い範囲内では、地震動のそれと一致する可能性が高い；(2)微動の上下成分に対する水平成分のスペクトル比(HV)は、地震動のそれと同じかやや小さい；(3)軟らかい地盤では、卓越周波数の推定法としてHV比がパワースペクトルより優れるが、固い地盤ではそうではない。但し、地震動はS波部分を解析し、微動は表面波が優勢である可能性が高いと考えられるので、異なる弾性波のスペクトル比が一致する原因として両者が共に表層地質に支配されるとの説明だけでは不十分である。また、解析結果から微動と地震動が共に空間的に変化し、地盤の不整形性による影響が大きいと思われるので、不整形地盤モデルで説明する必要がある。従って、本論文では、不規則地盤構造モデルを用いて、弾性波動論に基づく微動と地震動の波動シミュレーションを行い、両者の地盤特性(卓越周期、

HHスペクトル比, HVのスペクトル比)を比較することにより、観測事実の説明を試みた。

2. 不整形構造モデルの設定

計算用モデルはFig. 1に示す。地震被害が大きく変化する釧路気象台地区の南北断面地盤構造を参照しモデル化した。計算方法は境界要素法と薄層有限要素法のハイブリッド法である。垂直境界 $S^{(A)} (= \cup_{i=1}^N S_i^{(A)})$ と $S^{(B)} (= \cup_{i=1}^N S_i^{(B)})$ の間の不整形構造部分 $V (= \cup_{i=1}^N V^{(i)})$ に境界要素法を使用し、両端水平成層部分 $V^{(A)}$, $V^{(B)}$ には薄層有限要素法を使用する。不整形構造部分と水平成層部分が垂直境界により連結し、境界法による変位と応力と薄層有限要素法による変位と応力を垂直境界で一致させる。不整形部分の幅 W は500mである。地表面の要素間隔は2mで離散化する。モデルの最大深さ H は3750mである。不整形構造部分両端の垂直境界は要素間隔4m-20mで離散化する。領域 $V^{(1)}$ と $V^{(4)}$ の地表面の高度差は約50mである。地盤の物理定数はFig.1に示す。領域 $V^{(A)}$, $V^{(B)}$ の各層の物理定数はそれぞれ隣接する不整形領域のものと同じにする。

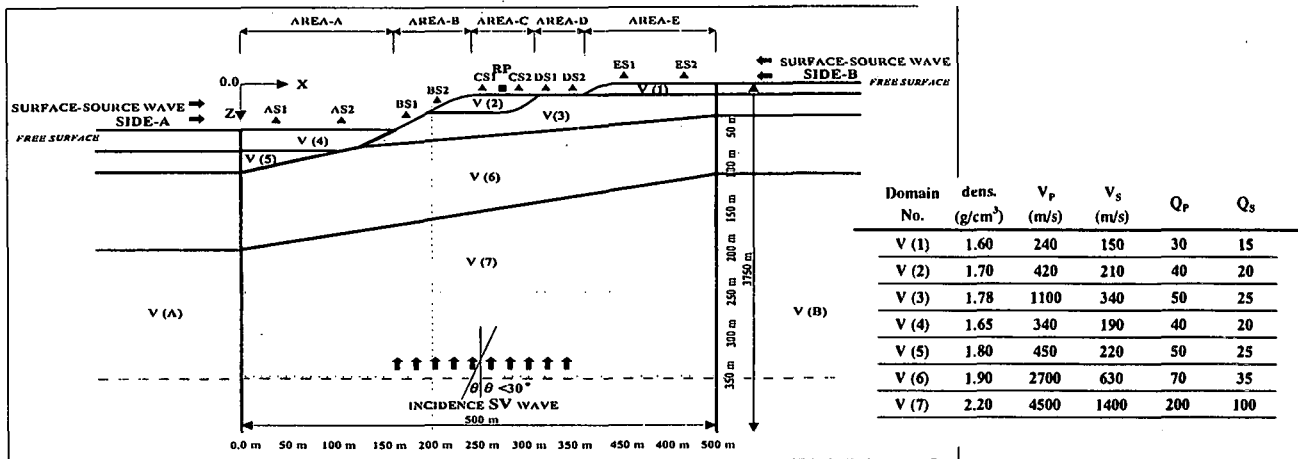


Fig.1 The two-dimension layered sediment model.

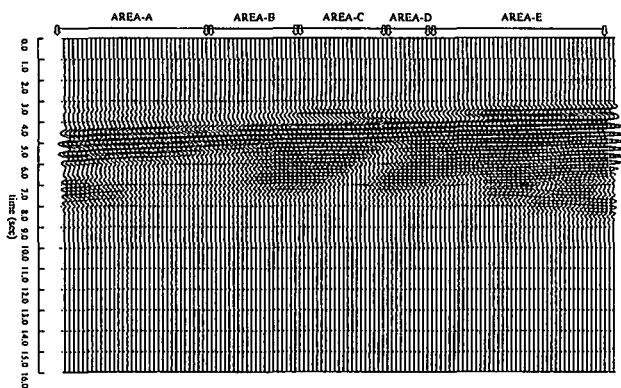


Fig.2 Horizontal wavefield due to horizontal surface force.

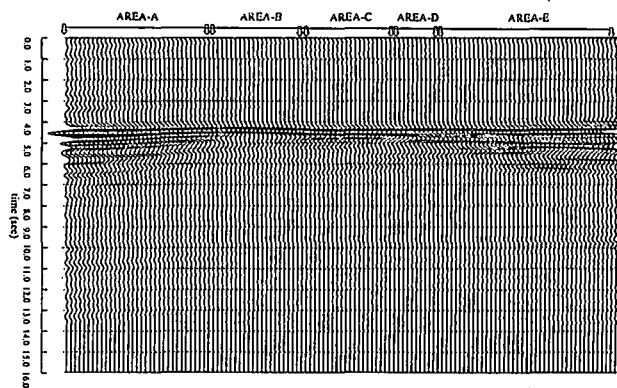


Fig.3 Horizontal wavefield due to plane SV wave incidence.

3. 地表震源の加振方法及び地震波の入力

地震動の震源について、工学的に最も重要な平面SV波の入射として設定する。入射角は $\theta \leq 30^\circ$ 。一方、地表震源として点震源を採用する。加振点はモデルの両端垂直境界外側部分 $V^{(A)}$ 、 $V^{(B)}$ の地表面に設定する。実際の微動源における力は、水平方向と上下方向に作用する可能性が考えられるので、各加振点において水平方向及び上下方向に単位力加振を行う。水平方向と上下方向の加振比率はどの程度が現実的かが不明であるが、ここでは単純に同レベルとした。計算は12.5Hzまでの周波数成分を対象にする。検討する周波数領域は観測データの解析周波数範囲に合わせ、0.5Hz-10.0Hzとする。入射波はRicker waveletとButterworth特性のフィルター⁴⁾を通したWaveletを使用する。本論文では地表震源による波動を地表震源波（微動と見なす）、下部に入射する平面波による地表面の応答を地震動と称する。

Fig.2はSIDE-B (Fig.1参照)での水平加振による不整形部分における水平成分(X)の変位応答波形を示す。変位応答の振幅値は最大振幅で無次元化表示する。不整形部分は地盤条件によって5つのAREA (AREA-A,

AREA-B, AREA-C, AREA-D, AREA-E)を分割される。各AREA毎に深部構造が同じにも係わらず、表層構造による狭い範囲内で特に振幅がかなり変化することがわかる。Fig.3は垂直に入射する平面P-SV波による波形を示す。地表震源波波形の空間変動のパターンも地震波波形の空間変動のパターンもよく一致する。

4. 地表震源の安定性検討

地表震源の安定性検討は地震動と比較する地表震源波から推定されたパワースペクトル、HH比及びHV比が主に地盤の影響によって生じるかどうかを検証することである。具体的には、震源の影響として震源の加振方向を変えて地表震源波に及ぼす影響を検討する。また、伝播経路の影響として地下構造による非対称な伝播経路の地表震源波に及ぼす効果を検討する。以下の議論の中で、5つのAREAから得た5つの代表的なサイトについて議論する。

Fig.4は震源の影響に関する検討結果の例を示す。SIDE-A側での水平方向と上下方向加振によるものである。太線は水平方向加振によるスペクトル、細線は上下方向加振によるスペクトルを示す。左から順に卓

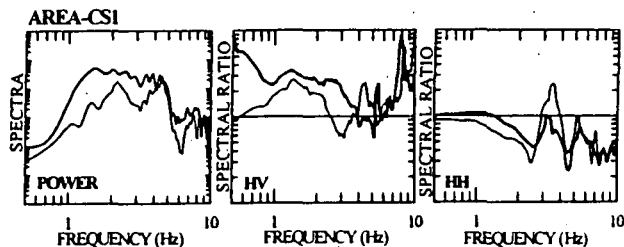


Fig.4 Effect of surface force direction.

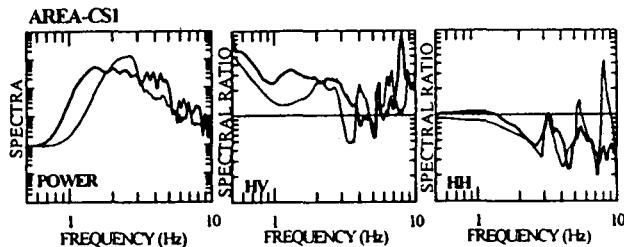


Fig.5 Effect of propagation path.

卓越周波数, HV比, HH比の比較結果である。水平方向と上下方向加振のパワースペクトルの卓越周波数が異なることが分かる。一方, 水平方向と上下方向加振のHV比は, ほぼ同じ変化傾向を示し, 約1.5Hzで両者の卓越周波数が一致する。また, 両者のHH比もほぼ一致する。Fig.5は非対称な伝播経路の地下構造に関する検討結果を示す。SIDE-AとSIDE-B両側での水平加振によるものである。太線はSIDE-Aでの加振によるスペクトル, 細線はSIDE-Bでの加振によるスペクトルを示す。両側加振のパワースペクトルの卓越周波数が異なることが分かる。両者のHV比は, ほぼ似た形をしている。また, HH比も一致する。

以上の計算結果から, 低周波数の地表震源波のパワースペクトルは観測点近傍の地質の影響より震源スペクトルや伝播経路の地下構造に強く影響されることがわかる。地表震源波のパワースペクトルのピークは必ずしも地盤の卓越周波数を反映してないと考える。一方, HV比はパワースペクトルに比べ, 震源の影響の除去と伝播経路の地下構造の違いによる影響を減少させるのにかなり効果があることがわかる。即ち, 卓越周波数の推定法としてHV比はパワースペクトルより妥当である可能性がある。また, HHは震源や伝播経路の地下構造にあまり影響されない。そこで, 地表震源波のHV比と地震動のパワースペクトルの卓越周波数, HH比及びHV比と地震動のスペクトル比が一致するかどうかを検討する。

5. 地震動と地表震源波の地盤特性の比較

Fig.6はSIDE-A側で水平と上下加振による地表震源波HV比と垂直入射するP-SV地震動水平成分パワースペクトルの卓越周波数の比較結果を示す。観測点の位

置はFig.1に黒三角で示す。細線が地震動, 太線が地表震源波を示す(以下同様)。すべてのAREAで, HV比の卓越周波数は1.5Hzに存在し, 地震動の卓越周波数と一致する。高周波数の卓越周波数については, 全体的に両者の一致がよくない。SIDE-B側での比較結果も, 同様である。

Fig.7はSIDE-A側での加振による地表震源波と地震動のHH比の比較結果を示す。地表震源波のスペクトル比として水平と上下加振によるものの平均値を使用する。観測点間のスペクトル比を見ると, 観測点毎に大きく変化することが確認できる。両者のスペクトル比は, AREA-Aを除いて, ほぼ全周波数領域で一致することがわかる。SIDE-B側での比較結果同様である。

Fig.8はSIDE-A側での水平加振による地表震源波と地震動(入射角が 30°)のHV比の比較結果を示す。2.0Hz-10Hz間の周波数領域では, 両者のスペクトル比の変化傾向及び絶対値がほぼ一致することが分かる。また, 水平成層部分の観測点では, 複雑な地盤構造上に位置する観測点より, スペクトル比がよく一致するよう見える。

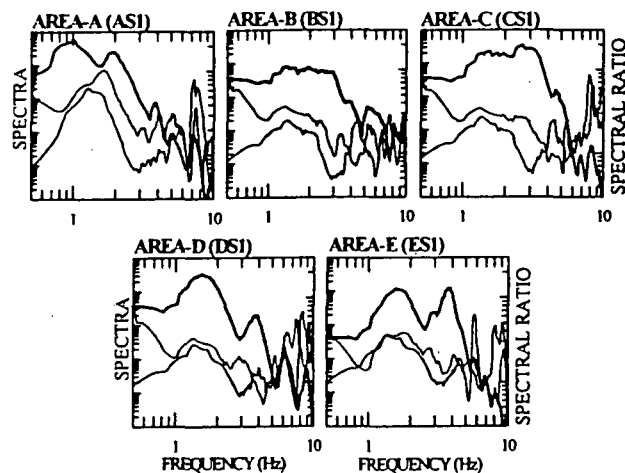


Fig.6 Comparison of the predominant frequency.

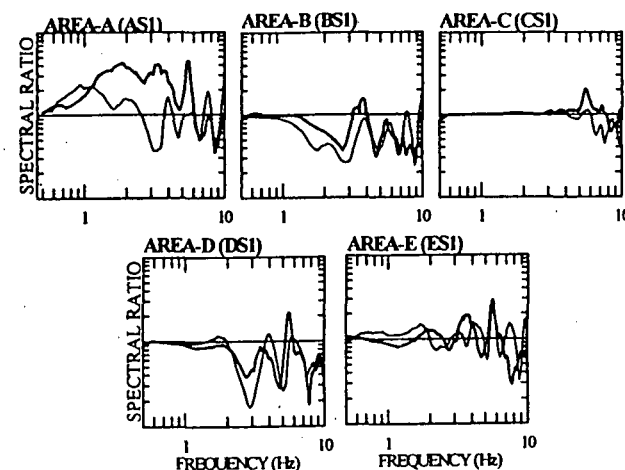


Fig.7 Comparison of the HH ratios.

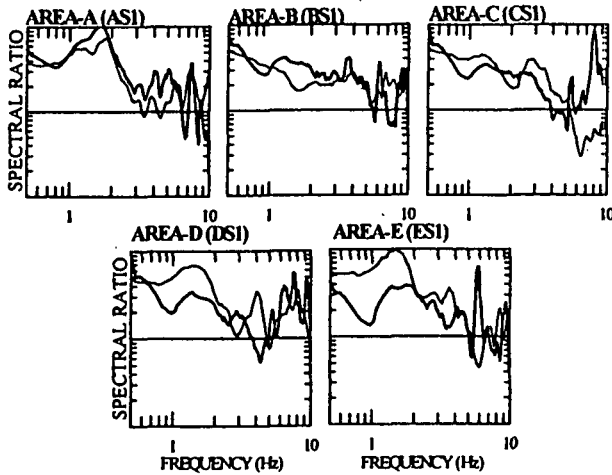


Fig.8 Comparison of the HV ratios.

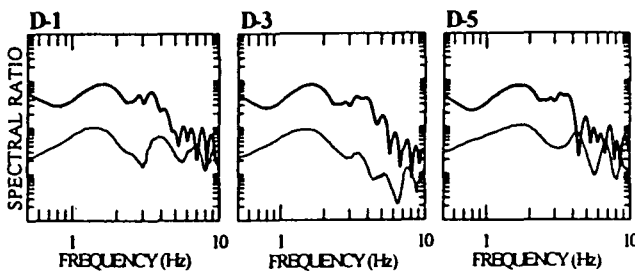


Fig.9 Comparison of the predominant frequency for the hard model.

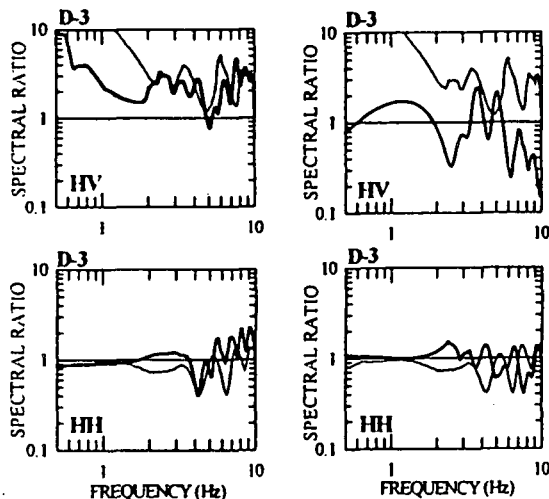


Fig.10 Comparison of the HH, HV ratios for the hard model.

6. 固い地盤での結果

Fig.1に示すモデルの領域 $V^{(1)}-V^{(5)}$ 浅い部分を一つ表層にまとめ、S波速度を420m/sとした地盤モデルを用いて計算した。軟らかい地盤と異なる結果を得た。Fig.9はSIDE-Aでの加振による地表震源波と地震動のパワースペクトルの結果を示す。地表震源波のパワースペクトルは比較的安定し、地震動の卓越周波数とほぼ一致することがわかる。Fig.10はSIDE-Aでの水平加振及び上下加振による両者のスペクトル比を示す。

左側が水平加振によるもの、右側が上下加振によるものである。表面震源の加振方向にHH比とHV比が大きく影響されるが、加振方向を水平とした場合の方が地震動のスペクトル比と対応することがわかる。

7. まとめ

地震動と微動の波動シミュレーションによる推定した地盤特性の比較を行い、以下のことが確認できた。

- ① 地表震源波のパワースペクトルは震源（加振方向）や伝播経路の地下構造に強く影響されているが、HV比は殆ど影響されず、比較的安定である。地表震源波のHV比の一次卓越周波数は地震動の一次卓越周波数とほぼ一致する。高次の卓越周波数では両者の一致度がよくない。
- ② 地表震源波のHH比は震源（加振方向）や伝播経路の地下構造と関係なくほぼ一定である。地表震源波のHH比は地震動のHH比とほぼ一致することが確認できる。
- ③ 地表震源波のHV比は2.0Hz以上の周波数領域では震源（加振方向）や伝播経路の地下構造の影響がすくない。地表震源波のHV比は地震動のHV比の形状と値とほぼ一致することが確認できる。

以上の結論(1)は堆積地盤で得られたHV比の方がパワースペクトルより地震動と一致するとの観測結果を説明できる。一方、固い地盤での結果は洪積地盤で微動と地震動とも4.0Hzに共通な卓越周波数が現れることと整合すると思われる。結論(2)は直径数100m程度範囲内では、微動のHH比が地震動とほぼ一致するとの観測結果と対応する。また、高周波数領域（このモデルでは7.0Hz以上の周波数領域）になると、数値計算結果では、地表震源波と地震動のHH比との対応は悪くなる。この結果は釧路JSKA観測アレイで得られた高周波数領域（5.0Hz以上の周波数領域）では微動のHH比が地震動と一致しないとの観測結果と対応する様に見える。また、結論(3)は、微動と地震動のHV比はほぼ一致するとの観測結果と対応する。

参考文献

- 1) 趙 伯明・堀家正則・竹内吉弘・川瀬博：微動と地震動から推定された地盤特性の比較，地震，Vol. 2, No.50, pp. 67-87, 1997.
- 2) 趙 伯明・堀家正則・竹内吉弘：微動から推定された地盤特性のうち何が利用できるか，建築学会構造系論文集，第509号，pp. 69-75, 1998.7.
- 3) Zhao, B. M., M. Horike, Y. Takeuchi: Reliability of Estimation of Seismic Ground Characteristic by Microtremor Observation, Pro. of the 11th European Conf. on Earthq. Eng., 1998.8.
- 4) 齊藤正徳：漸化式ディジタル・フィルターの自動設計，物理探鉱，Vol.31, No.4, pp.112-118, 1978.