

ボーリング坑を利用した微動および強震動 の地表／地中同時観測結果

荏本孝久¹・山本俊雄²・栗山利男³・岩楯敏広⁴

¹正会員 工博 神奈川大学助教授 工学部 (〒221-8686 横浜市神奈川区六角橋 3-27-1)

²正会員 神奈川大学助手 工学部 (〒221-8686 横浜市神奈川区六角橋 3-27-1)

³正会員 工修 ㈱構造計画研究所 営業技術部 (〒164-0011 東京都中野区中央 4-5-3)

⁴正会員 工博 東京都立大学教授 大学院 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

微動の観測結果を用いて地盤震動特性(卓越周期, 増幅率)を正確に抽出することは, 耐震設計や被害予測に重要である. 本研究ではボーリング坑を利用して, 微動および強震観測を工学的基盤と地表面レベルで同時に行い, 地盤の波動伝達関数および卓越周期を算定するとともに, これら観測結果の H/V スペクトル解析により微動および地震動による地盤振動特性を比較検討した. 観測地点は逗子市における強震観測地点を対象とし, ボーリングに伴って P S 検層を実施した. 以上の微動および強震観測結果の比較検討から, 工学的基盤と表層の推積地盤の P, S 波速度のコントラストが明確な地盤構造をもつ逗子観測点では, 微動の H/V スペクトル比により地盤震動特性(卓越周期, 増幅率)を正確に抽出することは可能であることがわかった.

Key Words: Site Effects, Transfer Function, H/V Spectra, Microtremor, Strong Motion

1. はじめに

強震あるいは微動の観測結果を用いて地盤震動特性(卓越周期, 増幅率)を正確に抽出することは, 耐震設計や被害予測のためのサイスミック・マイクロゾーニングに重要である. 近年, この地盤震動特性を抽出する際に, 地表面での微動観測記録のみを用いて算定される H/V スペクトルを利用する方法が提案されている. 微動観測は簡便で安価であることが最大のメリットであるが, 一方で震動源と伝搬過程が特定しにくいという点に, 外乱の影響を受けやすいために観測時間帯により周期特性や振幅特性が変動し, 地盤構造を反映した固有の地盤振動特性を抽出しにくいことが指摘されている. このため, 長時間にわたる連続観測による平均化や H/V スペクトルを用いることが行われている. H/V スペクトルは, 地表面で観測される微動の水平成分と上下動成分のスペクトル比により算定されるもので, 微動を構成する主要な波群が表面波(レーリー波)であり, 地盤構造が局所的に水平多層構造で基盤と表層地盤に明瞭な速度勾配のコントラストがあることを重要な前提条件としている.

本研究は, ボーリング坑を利用して地中—地表の微動および強震動の同時観測をとおして, 地表／地中のスペクトル比および地表の H/V スペクトルを算定し比較検討した. さらに, 地盤調査結果から地盤モデルを作成し, 1次元の地盤振動解析による伝達関数との比較も行った. それらの結果から, H/V スペクトルの有用性とその適用限界などについて, 基礎的な検討を行うことを目的としている. なお, 観測地点は明瞭なコントラストがあり地盤構造が明確で強震観測を実施している逗子に設定した.

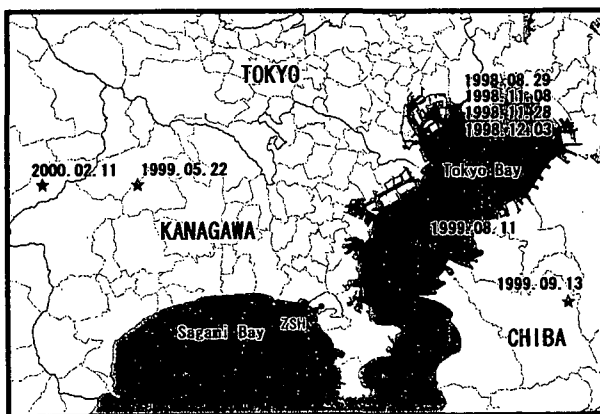


図-1. 観測地点 (ZSH) 位置と震央分布

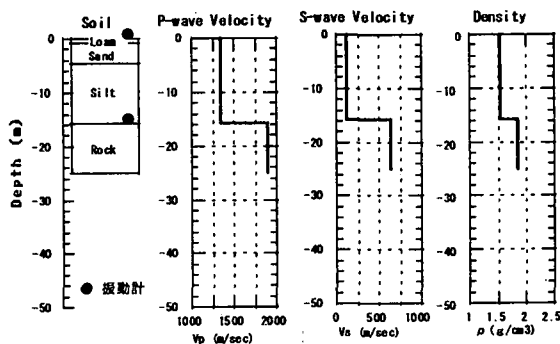


図-2. 観測地点の地盤構造

2. 観測地点の地盤

(1) 地盤の概要

本研究では、神奈川県逗子市における観測地点の地盤を対象として実施した。逗子市は三浦半島の付け根に位置している。市内を東西に横切る形で田越川が流れ、流域は比較的軟弱な沖積低地となっており、その層厚が場所によって変化している。地形は全体として、東西方向には緩やかな傾斜となり南北方向には谷地形が形成されている。観測点位置(ZSH)を図-1中に示す。

(2) 地盤調査結果と地盤モデル

地盤調査は、土質区分、N値およびサスペンション法によるPS検層、密度検層が実施され、図-2に示す結果が得られる。図-2により、実測した逗子の地盤構造は、深度16mを境に明確なコントラストが存在していることがわかる。

(3) 伝達関数

観測地点である逗子小学校の地盤モデルを用いて、1次元の重複反射理論による地震応答解析を実施し、地表／地中間の伝達関数を計算した。伝達関数は、図-7中に示す通りであり、1次の卓越周期は約0.5秒であり、2次の卓越周期は約0.18秒を示している。地盤構造が極めて単純であるため、高次の固有周期を含めて周期特性は明瞭である。

3. 地中—地表同時微動観測

(1) 観測方法および観測結果

微動同時観測は1998年8月に実施された記録を用いた。図-2中に示すボーリング坑中の工学的基盤と地表面にそれぞれ水平2成分、鉛直1成分（合計6成分）の速度型地震計を設置して観測した。サンプリング間隔0.01秒で10分間観測した。観測は、表-1に示すように1998年8月21日午前4時から、翌22日午前7時まで1時間毎に16回実施した。地震計の周期特性については、地表1.0秒、坑中2.0秒の動コイル型速度計を使用した。

表-1. 微動観測記録のリスト

観測番号	年月日	時刻	観測時間	観測条件	観測位置
Z01-B&S	1998.08.21	16:00	10分間	短周期	地中&地表
Z02-B&S	1998.08.21	17:00	10分間	短周期	地中&地表
Z03-B&S	1998.08.21	18:00	10分間	短周期	地中&地表
Z04-B&S	1998.08.21	19:00	10分間	短周期	地中&地表
Z05-B&S	1998.08.21	20:00	10分間	短周期	地中&地表
Z06-B&S	1998.08.21	21:00	10分間	短周期	地中&地表
Z07-B&S	1998.08.21	22:00	10分間	短周期	地中&地表
Z08-B&S	1998.08.21	23:00	10分間	短周期	地中&地表
Z09-B&S	1998.08.22	0:00	10分間	短周期	地中&地表
Z10-B&S	1998.08.22	1:00	10分間	短周期	地中&地表
Z11-B&S	1998.08.22	2:00	10分間	短周期	地中&地表
Z12-B&S	1998.08.22	3:00	10分間	短周期	地中&地表
Z13-B&S	1998.08.22	4:00	10分間	短周期	地中&地表
Z14-B&S	1998.08.22	5:00	10分間	短周期	地中&地表
Z15-B&S	1998.08.22	6:00	10分間	短周期	地中&地表
Z16-B&S	1998.08.22	7:00	10分間	短周期	地中&地表

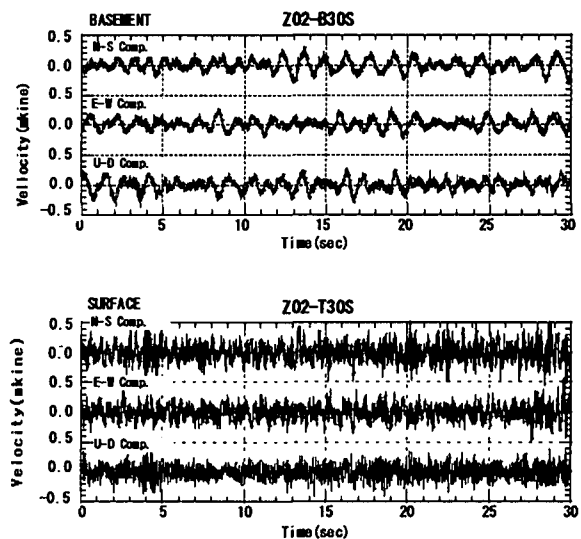


図-3. 微動観測記録の一例

解析方法は、微動観測記録から振幅の安定した20.48秒を選出し、FFTによりフーリエスペクトルを算出した。また、解析の際にParzen's Window (0.3Hzバンド幅)を数回施し平滑化処理を行っている。観測記録の一例を図-3に示した。

(2) 地表／地中スペクトル比

図-4(a), (b)は地表での計16回の観測記録のフーリエスペクトルを地中のフーリエスペクトルで除して、スペクトル比を算出した結果である。図中のスペクトル比はN-S, E-W成分と水平2成分の相乗平均である2次元スペクトルである2DH成分およびU-D成分についての結果を示したものである。

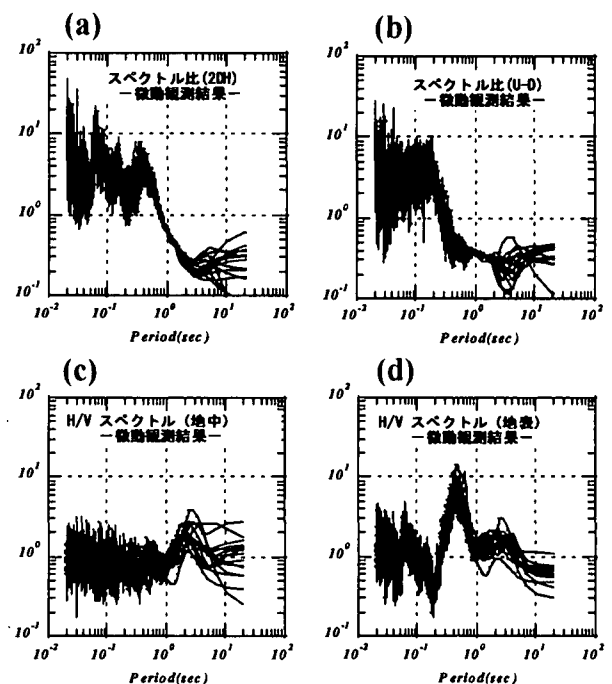


図-4. 微動観測記録の解析結果

図-4(a), (b)は、それぞれ 2DH 成分および U-D 成分の 16 観測記録によるスペクトル比の算定結果を重ね合わせた結果である。図-4(a)によれば、0.1 秒より短周期の成分を除くと、約 0.4~0.5 秒と約 0.14 秒の 2 つのピークが認められる。また、図-4(b)によれば、明瞭なピークは認められないが、0.2 秒より短周期領域でスペクトル比は約 2~3 倍程度の値を示している。

(3) H/V スペクトル

図-4(c), (d)は、地表 (T) および地中 (B) の観測記録に対して、それぞれ 2DH 成分を U-D 成分のフーリエスペクトルで除して H/V スペクトルを算出したものを示したものである。地中および地表とも H/V スペクトルは、16 記録とも共通した特性を示し、それぞれの H/V スペクトルの平均値で見ると、図-4(c)に示した地中 (B) では約 2.5 秒付近に小さなピークが認められるが、短周期成分には、顕著なピークが認められない。一方、図-4(d)に示した地表の H/V スペクトルでは、約 0.4~0.5 秒と約 0.07 秒付近にピークが認められるが、0.1 秒以下のピークを無視すれば顕著なピークは約 0.4~0.5 秒の 1 つのみが明瞭に現れる結果を示している。

4. 地表—地中同時強震観測

(1) 観測方法および観測結果

強震観測は図-2 のボーリング坑を利用して、微動観測同様に坑中の工学的基盤と地表面にそれぞれ水平 2 成分、鉛直 1 成分 (合計 6 成分) 加速度型強震計を設置し、1998 年 8 月より強震観測が行われている。地中および地表で同時に観測された強震記録は 8 記録あり、地震の震源情報は表-2 のとおりである。これらの強震記録に対して S 波主要動部から 20.48 秒を抽出し、微動と同様な処理によりフーリエスペクトルを算出した。強震観測記録の一例を図-5 に示す。

(2) 地表／地中スペクトル比

図-6(a), (b)は、解析に使用した 8 地震について、それぞれ地表での観測記録のフーリエスペクトルを地中のフーリエスペクトルで除してスペクトル比を算出したものである。スペクトル比は、N-S, E-W, 2DH および U-D 成分について算出した。図-6(a), (b)は、それぞれ 2DH および U-D 成分について、スペクトル比の結果を 8 地震について重ね合わせたものである。2DH 成分の場合には明瞭なピークが認められ、表層地盤構造に対応した周期特性を示している。一方、U-D 成分では明瞭なピークは認められず、微動観測結果と同様に約 0.2 秒以下の短周期領域でスペクトル比は約 2 倍程度の値を示している。

(3) H/V スペクトル

図-6(c), (d)は、地表 (S) および地中 (B) の 8 地震の観測記録に対して、微動の場合と同様にして、それぞれ 2DH 成分を U-D 成分のスペクトルで除して計算した H/V スペクトルを示したものであり、8 地震に対する計算結果を重ね合わせた結果を示している。図-6(c), (d)によれば、それぞれ地中、地表の H/V スペクトルを示す

が、両者には明瞭な差異が認められる。すなわち、地中の H/V スペクトルには明瞭なピークが認められないのに対して、地表の H/V スペクトルでは約 0.4~0.5 秒に明瞭なピークが認められている。

表-2. 強震観測記録のリスト

年月日	時刻	マグニチュード	東経(°)	北緯(°)	深さ(km)
1998.08.29	8:46	5.1	140.1	35.6	67
1998.11.08	21:40	4.6	140.1	35.6	78
1998.11.28	0:23	4.3	140.1	35.6	67
1998.12.03	5:15	4.2	140.1	35.6	67
1999.05.22	9:48	4.1	139.2	35.5	23
1999.08.11	18:28	4.0	139.8	35.4	62
1999.09.13	7:56	5.0	140.1	35.3	77
2000.02.11	20:57	4.2	139.0	35.5	18

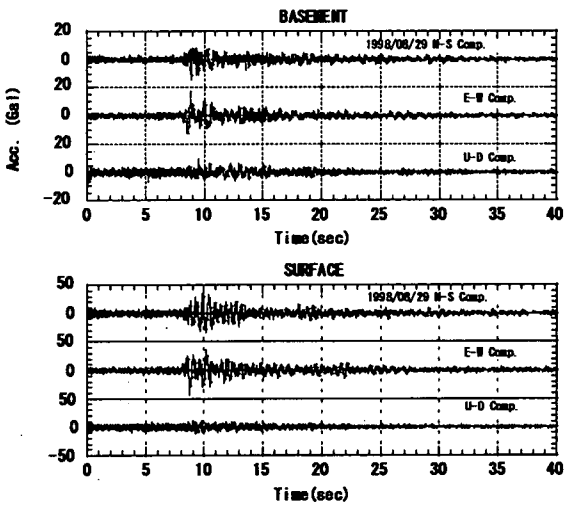


図-5. 強震観測記録の一例」(1998 年 8 月 29 日)

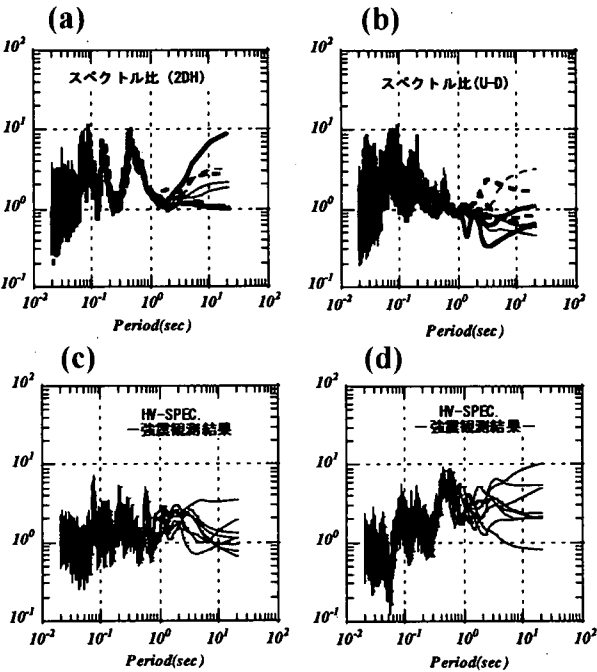


図-6. 強震観測記録の解析結果

5. 微動および強震観測結果の比較

図-7に微動および強震記録について、本研究において解析したスペクトル比およびH/Vスペクトルと観測地点の地盤モデルを用いて理論的に計算した1次元の伝達関数との比較を示す。図-7(a)は、微動を用いた場合の結果であり、図-7(b)は強震記録を用いた場合の結果である。強震観測では、重複反射理論を用いて算出した伝達関数によるS波増幅特性とH/Vスペクトルの平均値及びスペクトル比の周期特性がよく似た傾向を示している。一方、微動観測においては、H/Vスペクトルは算出したS波増幅特性と比較的よく一致するが、スペクトル比ではH/Vスペクトルや伝達関数と対応しない結果を示している。

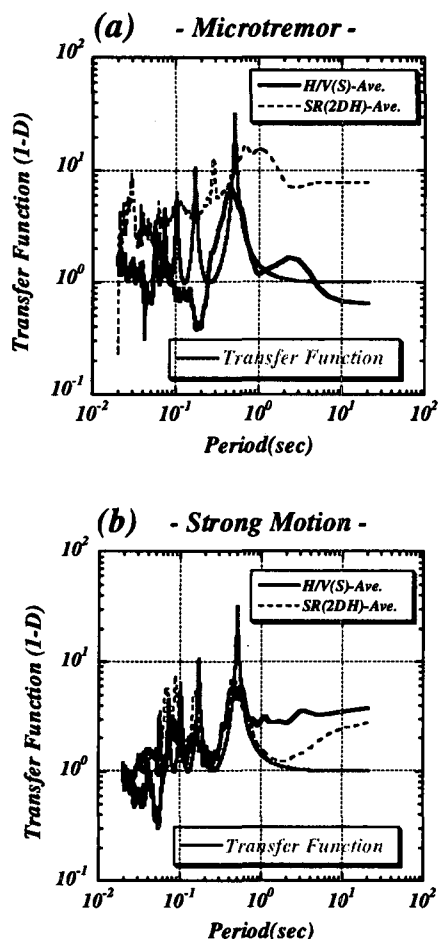


図-7. スペクトル比, H/Vスペクトル
および伝達関数の比較

6. まとめ

本研究では微動と強震動の地中—地表の同時観測結果から地盤振動特性を比較検討した。以上の結果、以下の結論が得られた。

①微動場所である逗子小学校は、比較的堅固な工学的基盤の上に軟弱な表層地盤が堆積した、単純な地盤構造であり、その速度構造のコントラストは極めて明瞭である。

②地中と地表で同時に観測された16回の微動観測記録のスペクトル特性は、それぞれほぼ同様な特性を示し、地表の水平2成分のスペクトルでは、表層地盤の増幅効果により約0.4~0.5秒に明瞭なピークが認められた。これは、地表/地中の水平動スペクトル比および、H/Vスペクトルの解析結果においても明瞭に認められた。

③地中と地表で同時に観測された8地震の強震観測記録のスペクトル特性は、地震の震源位置、マグニチュードなどによりスペクトル特性は、それぞれ異なった結果を示したが、地中のスペクトル特性に対し、地表のスペクトル特性は、微動の場合と同様に約0.4~0.5秒で顕著なピークが認められ、表層地盤の増幅効果によるものと思われる。また、高次の約0.14秒にも同様なピークが認められた。これは、地表/地中の水平動スペクトル比およびH/Vスペクトルの解析結果においても明瞭に認められた。

④微動および強震観測結果による地表/地中の水平動スペクトル比および、H/Vスペクトルの平均スペクトルを算出し、理論的な1次元重複反射理論によるS波増幅(伝達関数)と比較した結果、強震観測記録を用いた結果では、それぞれ良く一致する周期特性を示した。一方、微動観測結果を用いた結果では、スペクトル比は伝達関数と一致しない結果を示しているが、H/Vスペクトルでは伝達関数と比較的良く対応し、特に1次の卓越周期に対しては、良く一致する結果が得られた。

この結果、工学的基盤と堆積地盤のP、S波速度のコントラストが明確な逗子の地盤構造では、微動のH/Vスペクトル比による増幅特性の推定は基本モードについてはほぼ妥当であることがわかった。微動のメリットはいつでもどこでも比較的簡単に測定できることである。このため、今後も微動を利用して地盤の地震応答や地下構造を推定する調査・研究は、益々増加するものと思われる。従って、今後は新たな微動の利用法や解析手法の研究と同時に、より信頼性の高い結果を得るために、異なる地盤構造に対するこの種の計算手法(H/Vスペクトル)の適用限界を明らかにする研究も重要であると思われる。

参考文献

- 1) 瀬尾和大:「地震時の地盤振動特性評価のための微動の活用に関する研究」, 平成5年度~平成7年度科学研究費補助金研究成果報告書, 1997年3月
- 2) Navarro, M. et al., "Microtremor Measurements and its application to Seismic Microzoning of Almeria City, Southern Spain", Proceedings of 11th European Conference on Earthquake Engineering, CD-ROM, Oct. 1998.
- 3) 堀家正則:「微動の研究について」, 日本地震学会, 1999年
- 4) 荏本孝久, 鈴木紀生 他:「ボーリング坑を用いた工学的基盤及び地表面での微動同時観測」, 日本建築学会大会, 1999年9月
- 5) T. Enomoto et al.: "Study on Microtremor Characteristics Based on Simultaneous Measurement Between Basement and Surface Using Borehole", 12WCEE, CD-ROM, Feb. 2000