

脈動観測による上海平野の地盤震動特性 ——スペクトル比(H/V)のピーク周波数と基盤岩深度との関係——

赤松 純平・李 文芸・盛川 仁・斉藤 秀雄・羅 奇峰
陶 能付・亀田 弘行・章 在壙・藤原 悌三

VIBRATIONAL CHARACTERISTICS OF SOIL SEDIMENTS IN THE SHANGHAI PLAIN INFERRED FROM MICROSEISMS ——ON RELATIONSHIP BETWEEN PEAK FREQUENCIES OF SPECTRAL RATIO, H/V, AND DEPTH TO BEDROCK——

By Junpei AKAMATSU, Wenyi LI, Hitoshi MORIKAWA,
Hideo SAITOU, Qifeng LU, Nengfu TAO,
Hiroyuki KAMEDA, Zaiyong ZHANG and Teizou FUJIWARA

Synopsis

Under the context of IDNDR, a project entitled "Seismic Risk Assessment of Urban Facilities in A Sedimentary Region Affected by River Route Changes" was conducted by DPRI, Kyoto University and State Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, China. The subjects include microzonation of the Shanghai region based on microseism observations. Brief reports were given for microseism observations, geological setting of the Shanghai plain, basic characteristics of microseisms at various soil sites and a reference rock site. To evaluate ground vibrational characteristics, spectral ratios of horizontal components to vertical ones, H/V, were examined. All the H/Vs had sharp peaks, which varied with site location. A linear relation between peak periods of H/V and the depth to bedrock was obtained. Applicability of H/V to microzoning of sedimentary regions was discussed.

1. はじめに

「国際防災の十年 (IDNDR)」に関連する文部省特別事業「東アジア (インドネシア・中国) における自然災害の予測とその防御に関する研究 (平成3～5年度)」の分担課題「河道変遷の影響を考慮した都市施設の地震危険度に関する研究」が防災研究所と同济大学 (中国上海) との間で進められた。この共同研究の全体計画は揚子江の流域に発達している上海市とその周辺都市域の地震防災を目的に都市施設の地震危険度を総合的に評価しようとするものであるが、本論は上海平野の地盤震動特性に対する河道変遷と地盤生成時期の違いの影響を脈動観測により調査した結果の概略報告である。

厚い堆積層 (土質地盤) に立地する都市域の地震危険度評価の研究において、地盤の震動特性に基づくマイクロゾーニングはその基礎資料として重要であることは論を待たない。土質地盤による地震波増幅作用とその卓越周波数は上海市およびその周辺地域の都市計画にとっての緊急課題となっている。これは、その発展形態が超高層建築物や長大橋等固有周期の長い土木建築構造物や地下鉄網の整備等の近代的な都市施設の建設を伴った都市再開発であることと、上海平野が揚子江の厚い第四紀の堆積層で構成され、しかも地下水

位が数百 Km の内陸部にまでほぼ地表近くにあるいわば 0 m 地帯の軟弱層で構成されているという事情に関係する。

京都大学防災研究所都市施設耐震システム研究センターでは、これまで、堆積地盤のマイクロゾーニングに脈動（周期約 1 秒以上の長周期微動）を適用する方法を開発研究してきた¹⁾。この方法は、基準の基盤岩上と調査対象地域の地盤上との脈動の同時観測から得られるスペクトル比を統計的に評価し、地震時地盤増幅特性を推定するもので、京都盆地をテストフィールドとして詳細な議論を行ってきた。さらに地質条件の異なる種々の地盤に対する適用性を検討するため、1989 年ロマプリエタ地震被害地域²⁾や大阪港湾埋立地³⁾、釧路平野⁴⁾においても観測を行いその有効性を検証してきた。

上海平野は基準とすべき基盤岩の露出が内陸部の余山（She-Shan）地域のみであり、これまで開発してきた方法を直接適用する上で考慮すべき問題がある。

例えば、地盤/岩盤のスペクトル比より地盤増幅率を推定するためには、基準観測点と地盤上観測点との間の距離が最大 60Km 以上に及ぶため、波動伝播に伴う距離減衰を考慮する必要があるが、サンフランシスコ地域で実施したような離れた基盤岩上での観測により減衰特性を吟味する²⁾ことが不可能であることが挙げられる。

このため、新しい試みとして、上下動成分によるアレー観測と 3 成分観測とを組合せ、脈動からレーリー波成分を分離して地盤震動特性を吟味する方法を採用した。

我国においては、表層地質の地震波動への影響（ESG: Effects of Surface Geology on Seismic Motions）の研究が精力的におこなわれている⁵⁾が、この観点からも上海平野における観測事例は重要な資料となり得ると思われる。特に最近、微動の水平動成分と上下動成分とのスペクトル比（H/V）を地震工学的に利用する方向での研究が各方面で推進されている⁶⁾。アレー観測のデータ解析は現在進行中であるので、本論では主に上海平野の脈動の H/V と基盤岩深度との関係について報告する。

なお、「河道変遷の影響を考慮した都市施設の地震危険度に関する研究」の総合的議論については、文部省特別事業報告書 Part3; Project E-1 “Seismic Risk Assessment of Urban Facilities in A Sedimentary Region”⁷⁾を参照されたい。

2. 上海平野の地質概要と観測方法

上海平野は最近の数百年間に発達した楊子江のデルタ地域である。

Fig. 1 にボーリング資料により作成された第四紀堆積層の厚さの分布図を示す。基盤岩は上海市南西方向の余山（SHE）地域に露出するのみで、その深度は楊子江河口に向かって緩やかに増加している。上海市付近でやや浅く 200m 程度、河口付近で 360m 以上である。余山には、中国国家地震局の上海市地震観測所が設置されており、種々の地震観測・磁気観測等の地球物理学的観測の重要施設となっている。

脈動観測は 1992 年、1993 年のいずれも 11 ～ 12 月に実施された。余山観測所横坑内に長周期 3 成分地震計から成る基準観測点を設置して、脈動の時間的变化を監視し、平野部を観測車で移動しながら余山との同時観測を実施した。観測場所の位置を Fig. 2 に示す。地盤上では、長周期 3 成分による観測を 21 地点、その内、4 地点では 3 成分に上下動成分 3 台（1993 年は 5 台）を組み合わせたアレー観測を行った（Fig. 2, ◎印）。地盤上の観測点は、同済大学に於て地質条件やボーリング資料に基づいたマイクロゾーニングの研究が進められていた⁸⁾ことから、その結果と脈動観測結果とを比較検討する目的でなるべく着岩しているボーリングサイトの近傍が選定された。

観測装置は岩盤上の余山、地盤上とも可搬型の速度型換振器（PELS-73）に高周波数の雑微動成分を除去するためのハイカットフィルターを備えた直流増幅器とデジタルレコーダを組み合わせたものである。余山では遮断周波数 1 Hz のローパスフィルタの出力記録を 10Hz のサンプリング周波数により、毎時正時開始の 15 分間記録を自動的に得るようにレコーダの動作をプログラムしておき、それに合わせて地盤上での観

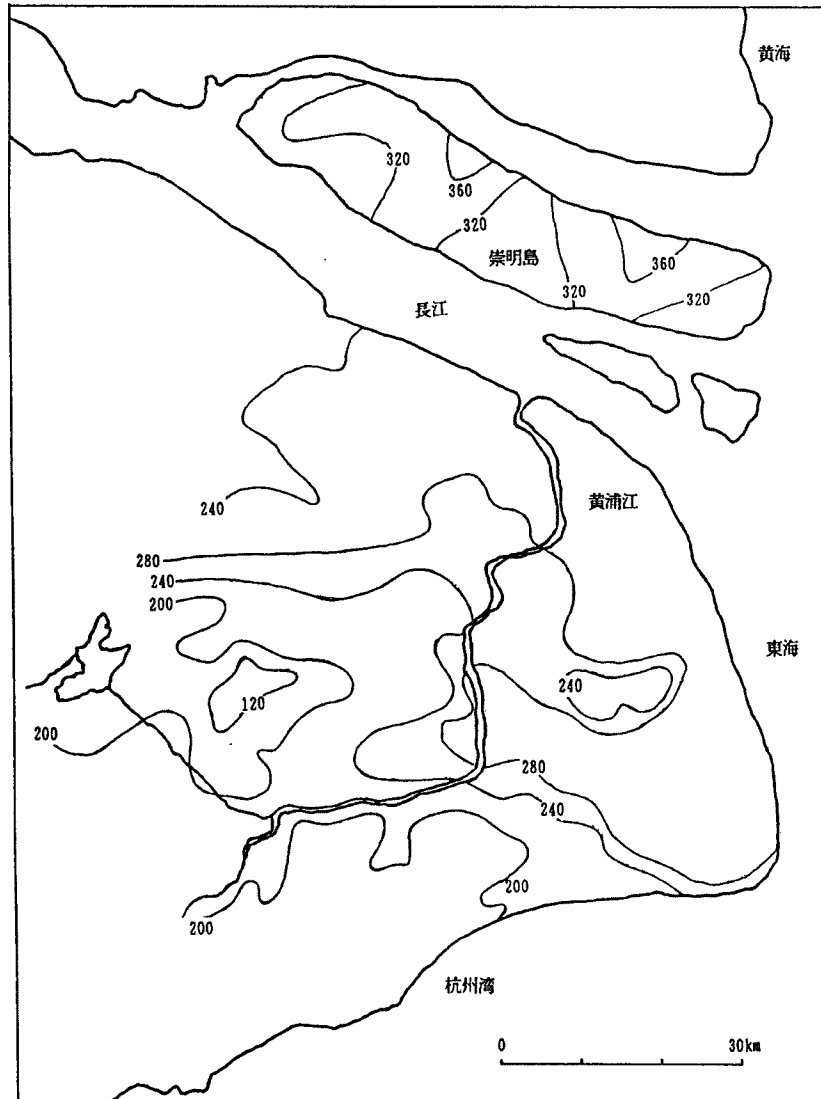


Fig. 1 Distribution of thickness of the Quaternary sediments in the Shanghai plain.

測（通常15分を2回）を実施した。地盤上の3成分観測の記録条件は増幅器の増幅率以外は余山と同じである。**Fig. 3**に地盤上の記録例（速度波形）を示す。軟弱な地盤を反映して、水平動成分の振幅が上下動成分のそれより大きい。

3. 解析結果

脈動を用いて地盤震動特性を議論する方法として実用化されている主なものとして、レーリー波の位相速度の分散から速度構造を求め、構造から増幅率を計算する方法、地盤/基盤岩のスペクトル比から直接地震波増幅特性を推定する方法などが一般的であろう⁹⁾。また、レーリー波の振幅特性、 H/V 、は速度構造を反映するから、短周期の微動の H/V と構造との関係が議論されている¹⁰⁾。ここでは、先に述べた観点から脈動の H/V についての解析結果を述べる。

Fig. 4は岩盤上（SHE）におけるスペクトルの時間的変化である。同一時間の水平動成分のスペクトルと上下動成分のその形は似ており、それぞれ単一のピークを有している。これらの性質は岩盤上で観測さ

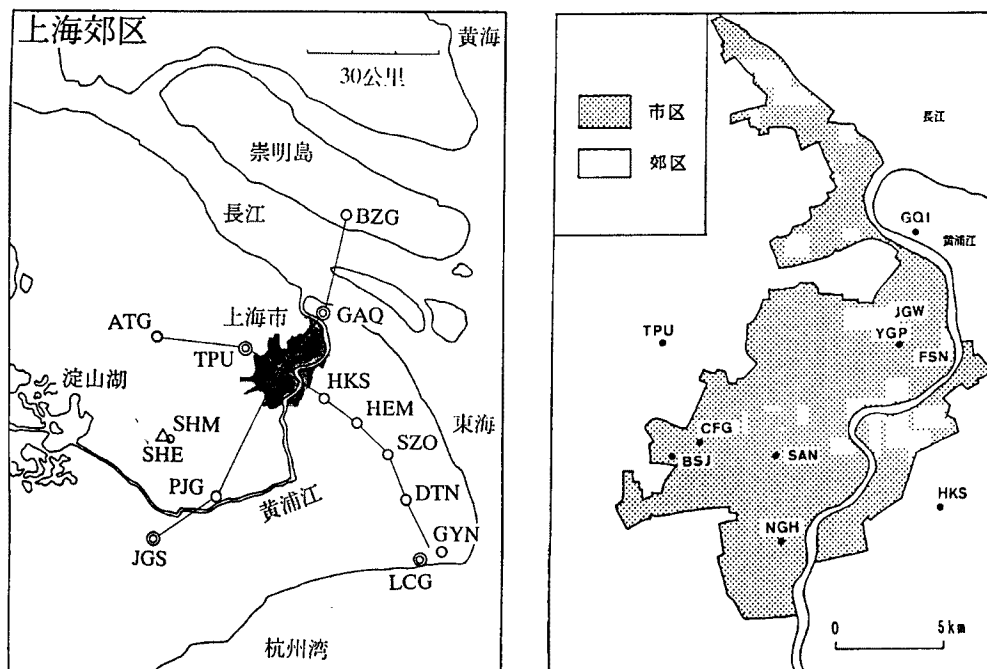


Fig. 2 Location of observation sites for microseisms in the Shanghai plain. $\odot$ denotes the array site, and $\triangle$, the rock site at the She-Shan Seismological Observatory (SHE).

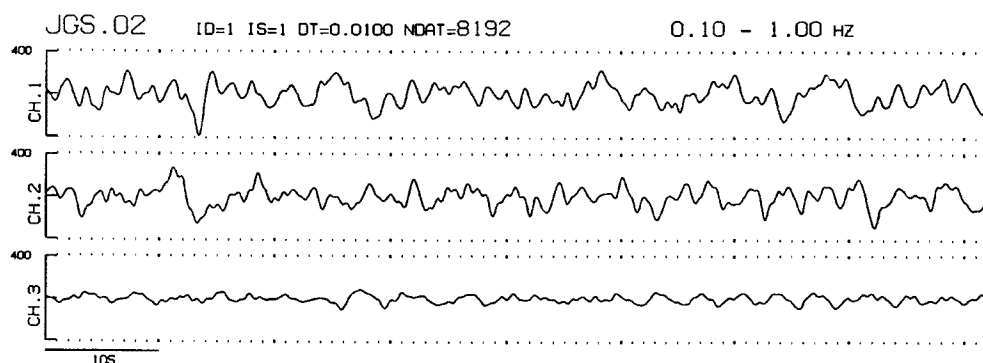


Fig. 3 An example of microseisms observed at a soil site. Ground velocity seismograms of 0.1-1.0Hz are shown.

れる脈動の一般的性質である。また、ピークの周波数は0.3Hzから0.2Hzへと時間的に変化しているが、これは主に東シナ海、南シナ海の波浪の状態に関係するものであろう。

Fig. 5に各観測点のスペクトルとH/Vの例を示す。岩盤上のSHEでは比の値は広い周波数範囲にわたってほぼ1である。地盤上では多くの地点で、上下動成分は0.2Hzから高周波数域に向けて振幅は一旦減衰するが、0.4~0.5Hzからは増大する。水平動成分は上下動成分より低周波数域から増大している。

これらの周波数特性とその上下動成分による違いは、京都盆地やサンフランシスコ湾岸地域の地盤上での脈動の性質と類似しており、地盤の軟弱さ、基盤岩の深さ等に依存する地盤震動特性を表すと考えられる。

地盤上のH/Vは水平動成分の山と上下動成分の谷の周波数がずれているため、顕著なピークを示す。ピーク周波数は各地点共NS/UD, EW/UDともほぼ同じであり、0.02~0.05Hzの精度で読み取れる。

この様にして求めたピーク周波数と基盤岩深度との関係を**Fig. 6**に示した。図ではピーク周波数を周期に置きかえて表示してある。また、基盤岩深度は観測点近傍のボーリングの着岩深度である。この図から周

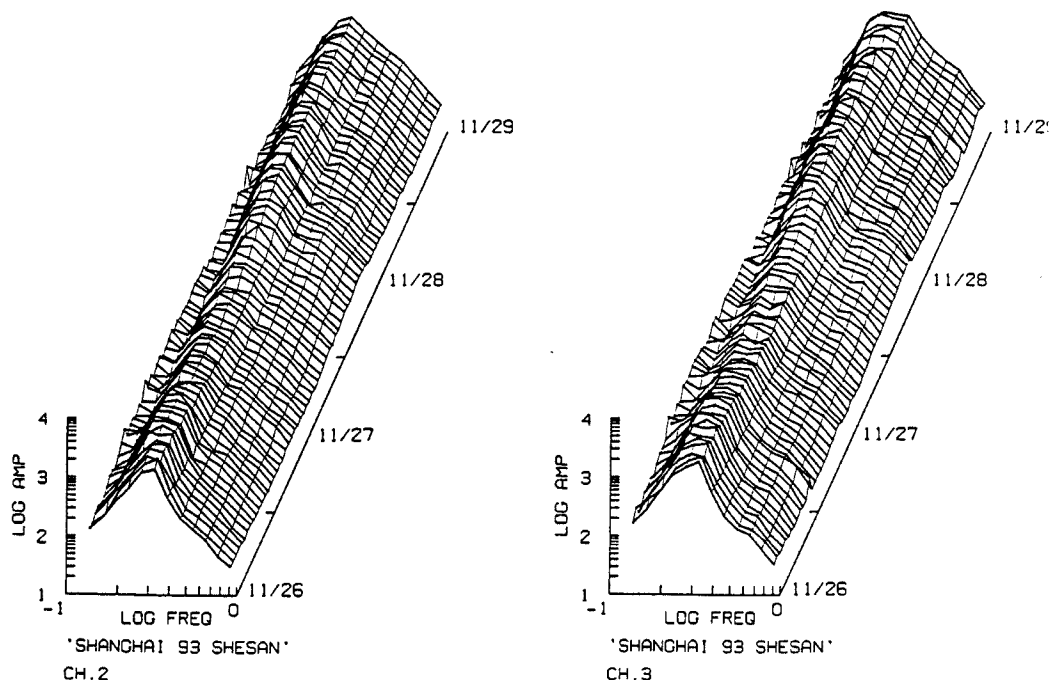


Fig. 4 Temporal variation of microseism spectra observed at the rock site, SHE.

期と基盤深度とに良好な直線の関係のあることが判る。

4. 議 論

岡田 (1965) は 2 層構造を伝播するレーリー波の振幅と周期の関係を上層のポアッソン比の関数として詳細に議論した¹¹⁾。また, Suzuki (1933) は下層の剛性率を固定し, 上層の剛性率をパラメータとして M11 モードの H/V の周期特性を示している¹²⁾。彼らの結果では, 群速度極小 (Airy phase) の周波数の前後で H/V は極大・極小を示す。Fig. 6 に示された上海平野における地盤上の H/V は彼らの議論によるレーリー波の H/V の性質に類似の形状を有している。これは, 脈動が海の波浪の圧力変化により励起されるレーリー波を主成分とすると考えられていることと調和的である。またラブ波が含まれているにしろ, レーリー波の水平動成分の excitation function とラブ波のそれとが類似していれば, 脈動の H/V がレーリー波の H/V に比の値は異なるが周波数特性は類似することが期待される。これらに関しては, 今後検討する予定である。

地盤上の各サイトにおいて, ピーク周波数は NS/UD, EW/UD とほぼ同じである (Fig. 6)。一方, 京都盆地やサンフランシスコ湾岸地域では地盤による脈動の増幅特性が水平 2 成分間で系統的な差異を示した。すなわち, 盆地や湾の長軸方向に平行な成分は垂直な成分に比べ増幅率が大きい (周波数に依存)。これは, 基盤岩の 3 次元構造に関係すると解釈されている。このことから, 上海平野での H/V の水平 2 成分に差異の無いことは, 考慮すべき基盤岩形状の横方向の不均質や堆積層の物性の異方性がほとんど無いことを示していると考えられる。

Fig. 7 は PS 検層による堆積層の S 波速度分布である。この例では, 20m 深まで 100m/s 程度, 80m 深程度までは 220 ~ 230m/s, それ以深では基盤岩まで漸増するが 500m/s 以下である。京都盆地の堆積層が, 例えば京大宇治構内で深さ 5m 程度以深で 600m/s 以上であるのに比べ著しく遅い S 波速度を有していることが注目される。各観測点近傍のボーリング土質試験の結果からも類似の傾向が示されている。このように, 堆積地盤と基盤岩とのインピーダンス比の大きいことが H/V に単純な形状を与えたものと推察される。

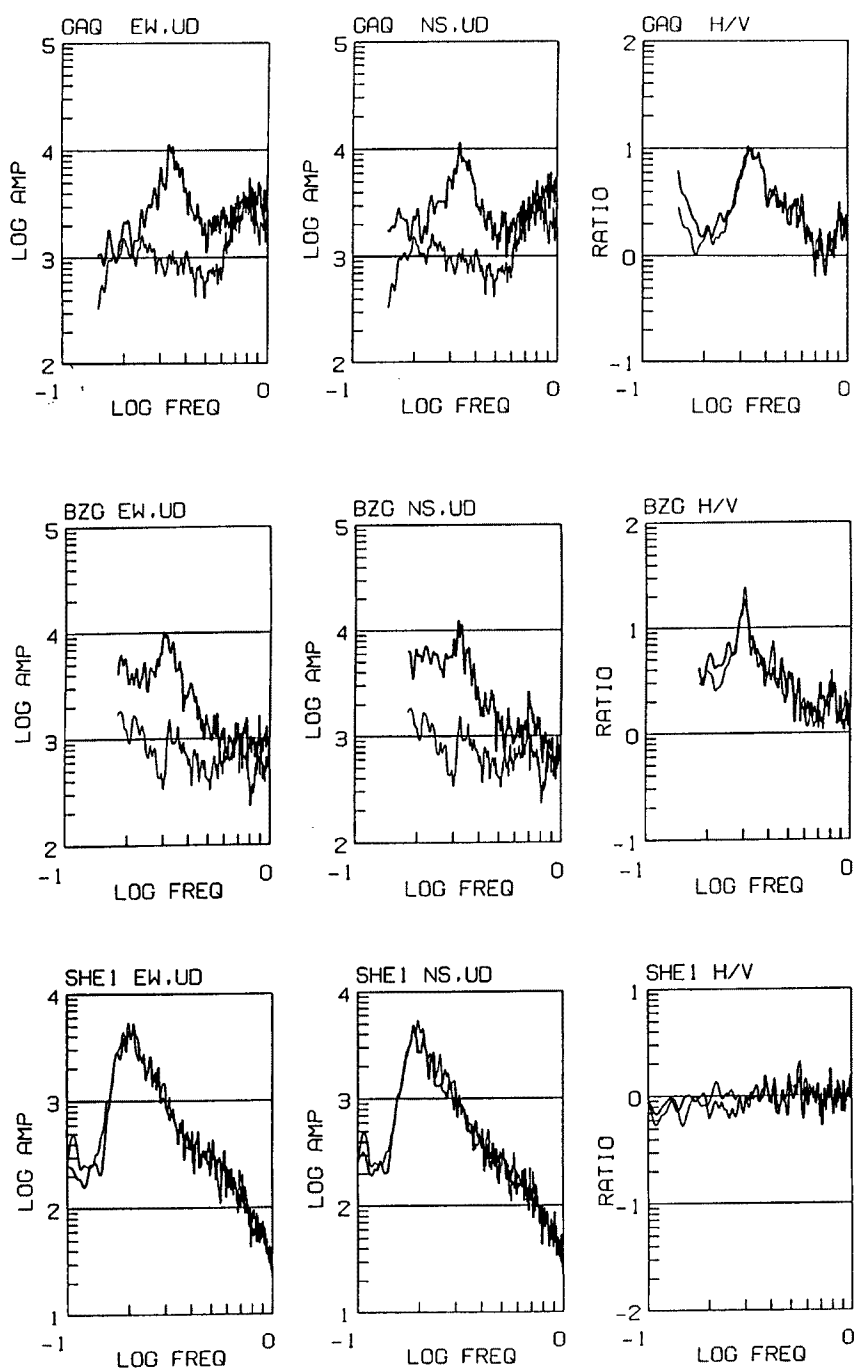


Fig. 5 Examples of microseism spectra and their spectral ratios (H/V) at soil sites and the rock site. Note the remarkable peaks in H/V ratios.

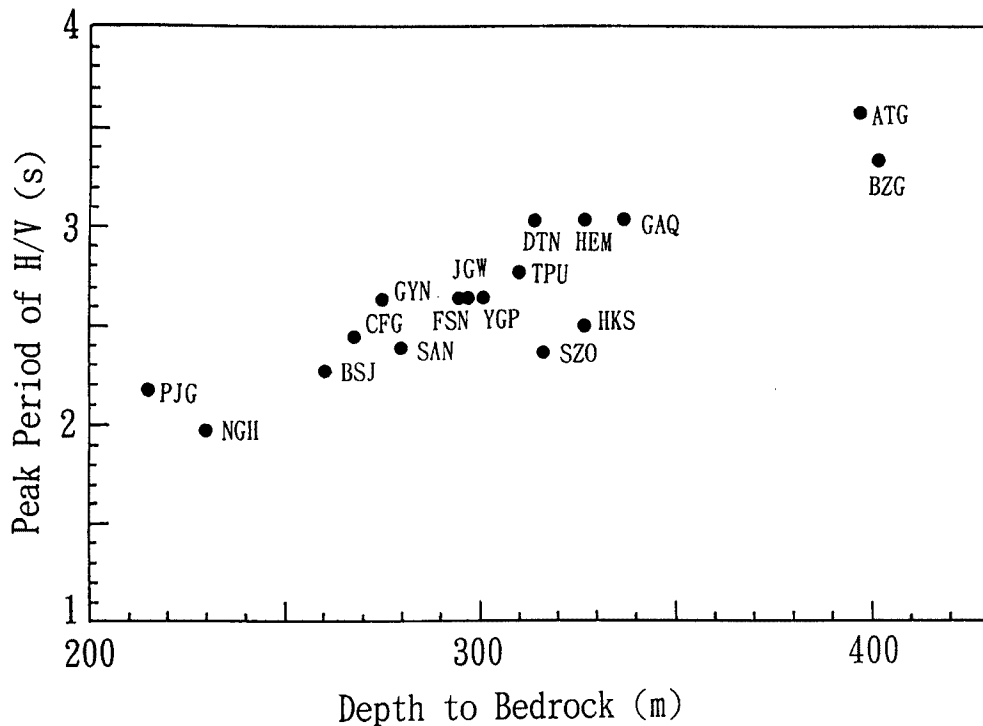


Fig. 6 Relation between the peak periods of H/V and the depth to bedrock. Note the linear relationship between them.

Fig. 6 では、H/V のピーク周期と基盤岩深度とに良好な線形の関係が認められた。このことは、H/V によりボーリング資料の無い地点においても基盤岩の深度を推定できることを示しており、上海平野のマイクロゾーニングに有効に利用できるものと思われる。

6. まとめ

上海平野の地盤震動特性の資料とするために、脈動の水平動成分と上下動成分のスペクトル比 (H/V) をしらべた。H/V には以下の性質がある。

(1) H/V の周波数特性はサイトにより形状が変化するが、いずれもシャープなピークを有しており、ピーク周波数が識別できる。

(2) ピーク周波数は水平2成分 (NS/UD, EW/UD) において同じであり、各地盤サイトで基盤岩形状の横方向の不均質や堆積層の物性の異方性がほとんど無いと考えられる。

(3) H/V のピーク周波数とボーリング資料による基盤岩深度とには良好な相関関係がある。この関係はボーリング資料のない地点での基盤岩深度の推定に利用できる。

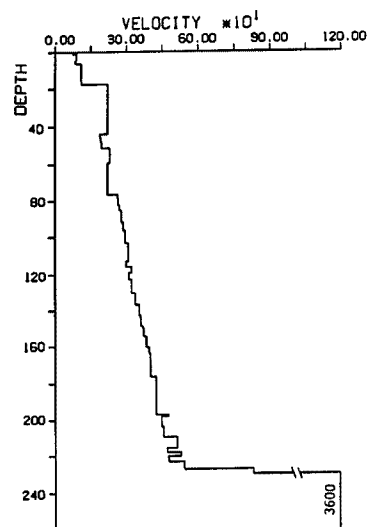


Fig. 7 An example of distribution of S-velocity of soil sediments obtained with PS logging.

謝 辞

観測に際し上海佘山地震観測所の皆様には計測器の設置や記録の取り替えなど全面的な協力を得た。1992 年の観測には当時本学大学院工学研究科の安井 洋氏, 理学研究科の井上昌弘氏が参加した。同済大学からは Yang-gang Feng 講師の他, 大学院学生 of Jiixin Wang, Rongjie Gu の各氏, また, 1993 年の観測には, Feng 氏と学生 of Yang-qiang Zhang 氏が参加した。これらの方々に深く感謝します。

参考文献

- 1) Akamatu, J., M. Fujita and K. Nishimura: Vibrational characteristics of microseisms and their applicability to microzonation in a sedimentary basin, *J. Phys. Earth*, Vol. 40, 1992, pp.137-150.
- 2) Akamatu, J., M. Fujita, H. Kameda, M. Celebi and R. D. Borchardt: Assessment of the effects of local geology using long-period microtremors and the 1989 Loma Prieta Earthquake motions, U. S. Geological Survey, Open-File Report, No. 92-214, 1992/京都大学防災研究所都市耐震センター研究報告別冊第 6 号, 1991.
- 3) 赤松純平: 微動観測による大阪湾埋立地の地盤震動特性 (予察), 京都大学防災研究所都市耐震センター研究報告, 第 7 号, 1993, pp.33-45.
- 4) 赤松純平・西村敬一・尾上謙介・駒澤正夫・盛川 仁: 浦幌層群 (釧路市東部春採湖岸) を基準とする脈動の地盤による増幅特性とブーゲー重力異常との関係, 地震時の地盤震動特性評価のための微動の活用に関する研究 (平成 5 年度科学研究費補助金研究成果報告書 (課題番号 05558047)), 1994, pp.159-162.
- 5) Japanese Working Group on ESG: Proceedings of the National Symposium on Effects of Surface Geology on Seismic Motion, 1989.
- 6) A-1 長周期微動共同観測グループ: 釧路市内の広域を対象とした長周期微動の同時観測, 地震時の地盤震動特性評価のための微動の活用に関する研究 (平成 5 年度科学研究費補助金研究成果報告書 (課題番号 05558047)), 1994, pp.33-54.
- 7) Li, W., J. Akamatsu and N. Tao: Microzonation of Shanghai Region by Microseism Observation and Its Application, Research Report for Natural Hazard Reduction and Mitigation in the East Asia (Project E-1), 1994, pp.9-20.
- 8) 同済大学結構理論研究所: 上海市地震小区域図集, 1992.
- 9) 堀家正則: 微動の研究について, 地震(3), 第 46 巻, 1993, pp.343-350.
- 10) 野越三雄・五十嵐 亮: 微動の振幅特性 (その 2), 地震(3), 第 24 巻, 1971, pp.26-40.
- 11) 岡田 広: 分散性レーリー波の変位と周期との関係, 地震(3), 第 18 巻, 1965, pp.204-218.
- 12) Suzuki T.: Amplitude of Rayleigh Waves on the Surface of Stratified Medium, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, Vol.11, 1933, pp.187-195.