

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 29 日現在

機関番号：92503

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009 年度～2011 年度

課題番号：21560513

研究課題名（和文）：

微動を用いた地盤構造評価指標の作成と入力地震動の評価技術への反映

研究課題名（英文）：

Estimation of evaluation index for ground structure using microtremore and reflection to an evaluation procedure of the seismic input motion

研究代表者：池田 隆明(IKEDA TAKAAKI)

飛鳥建設株式会社・技術研究所・室長

研究者番号：40443650

研究成果の概要（和文）：

構造物の設計用入力地震動の設定のためには、構造物の建設地点における地盤構造の評価が必要である。そこで、比較的簡易に計測が可能な微動を用いて、地盤構造を評価する方法の検討を行った。その結果、微動の H/V スペクトルは地盤や構造物の動的特性を表現する方法として有効であることが分かった。また、H/V スペクトルの方向特性についての貴重なデータを収集することができた。

研究成果の概要（英文）：

For the setting of the input ground motion of the seismic design, evaluation of the ground data at construction site is vitally important. Therefore we examined the ground data evaluation method using the microtremore. As a result, the H/V spectrum of the microtremore was effective as an evaluation method of ground data.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2010 年度	600,000	180,000	780,000
2011 年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：地震防災、微動、設計用入力地震動、地震応答解析

1. 研究開始当初の背景

超高層建築物などの重要構造物の耐震設計では、地震応答解析により構造物の耐震性能の検証が行われる。以前は過去に観測された地震動の振幅を調整し、入力地震動としていたが、1995 年兵庫県南部地震では、震源破壊の指向性効果と地盤構造の影響により、極めて振幅が大きく、かつ特徴的な波形（周期 1 秒程度のパルス波形）が生成され、多くの構造物に甚大な被害を与えた。この教訓か

ら、耐震設計に用いる入力地震動には、構造物の建設地点の地震環境と地盤条件を考慮する必要があることが明らかにされた。

これに対応するためには、震源破壊により生成された地震波が、岩盤・地盤を伝播し表層地盤を経て地表に到達する状況を考慮する必要がある(図 1)。しかし、これらを一度に評価することは困難なため、せん断波速度(V_s)が 400m/s 以上の基盤、いわゆる工学的基盤での地震動を作成し、それよりも浅い表

層地盤の地震時挙動は別途地盤の地震応答解析により算出するが多い。

表層地盤の地震時挙動は複雑で、地盤の非線形性や多次元的地盤構造を詳細に考慮する必要がある。そのため、地盤構造に応じた解析手法（一次元/多次元）を選定するとともに、適切な地盤物性を設定する必要がある。しかし、中規模以下の構造物に対しては十分な地盤調査が行われることは少なく、限定されたデータからこれらを判断することが多いのが現状である。この判断は時に構造物の耐震性を過小評価している可能性があり、大地震による審判を受ける前に、学術的知見に基づいた客観的な判断手法の確立が必要である。特に、超高層建築物のような大規模構造物の耐震性能評価に目が奪われがちであるが、中規模以下の構造物は構造物の大部分を占めることから、これらの構造物の耐震性評価手法の確立は早急に解決すべき課題である。

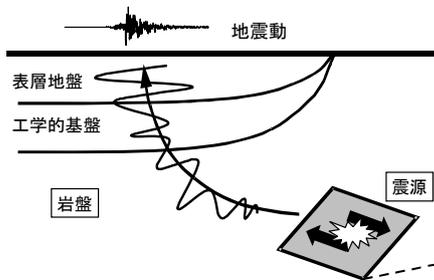


図1 地震動の生成と伝搬

2. 研究の目的

構造物の設計用入力地震動を適切に設定するためには、表層地盤の地震時挙動を適切な評価する必要がある、そのためには地盤の詳細な特性データとそれに基づく地震応答解析が要求される。

地盤の二次元解析および三次元解析は多大な時間と労力が要求されるため、設計用入力地震動の精度を担保する上で必須であれば行う必要があるが、地盤特性からより低次元での解析で精度が確保できるのであれば、より低次元の解析を行うことが工学的に有効である。

微動の H/V スペクトル（水平方向[H]と鉛直方向[V]の微動のスペクトルの比）は地盤や構造物の動的特性を表現する方法として多くの分野で活用されている。H/V スペクトルについての解釈は複数あるが、H/V スペクトルが、レイリー波の水平と鉛直方向の振幅比であると考えれば、水平成層構造の場合、同一地点での H/V スペクトルには方向性は見られず、地盤構造が複雑になるにつれて徐々に方向性が現れてくるはずである。既往の研究では、同一地点における地震動の H/V スペ

クトルと、微動の H/V スペクトルには相関性があることが明らかになっている。そのため、この H/V スペクトルの方向による差異は、地盤の多次元構造を表していると考えられることができるため、この差異から地盤の構造特性を評価する指標を明らかにする。

3. 研究の方法

研究は以下の3ステップから実施する。

- ①微動観測
- ②全方位 H/V スペクトルの評価
- ③H/V スペクトル指標の評価
- ④入力地震動設定方法の評価

(1) 微動観測

地盤構造が明らかになっている地点において、微動観測を行い、その地点における地盤と微動との関係を検討する。微動観測地点においては、地震動記録も必要となることから、地震観測が行われている地点とする。

本研究では、実際に地震動記録が観測された地震の震源近傍サイトとして、九州北部地域（2005年福岡県西方沖の地震）、能登半島地域（2007年能登半島地震）、および2011年東北地方太平洋沖地震）において液状化を含む地盤被害が見られた東京湾沿岸地域の3地域を観測サイトとした。具体的には、防災科学技術研究所の K-NET と KiK-net の地震観測点とし、東京湾沿岸地域では KiK-net の地震観測点が無い場合、東京都港湾局が実施している地震観測点（夢の島、新有明、品川）を加えた。

図2に観測地域及び微動観測地点を、写真1に計測状況の一例を示す。

微動観測に用いた機器は、東京測振株式会社製の SPC51 と VSE15 である。微動は速度振幅で計測し、サンプリング振動数 100Hz、計測数は 30,000 データ（300秒間）とする。表1に観測機器の仕様を示す。

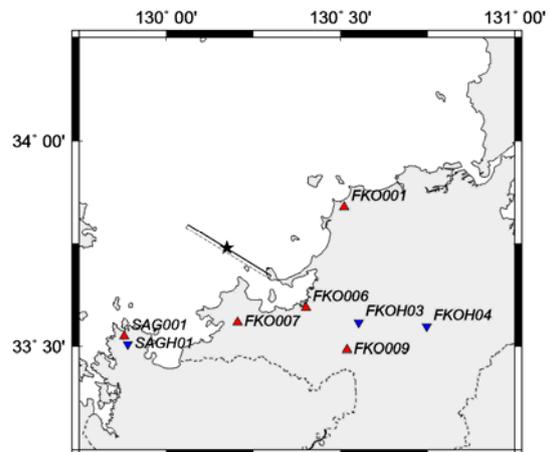


図2 九州北部地域における微動計測地点

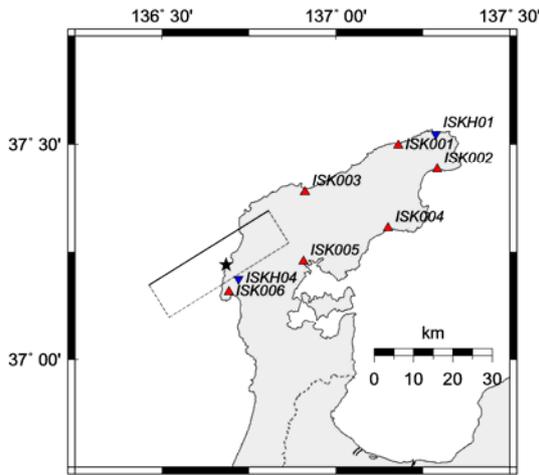


図3 能登半島地域における微動計測地点

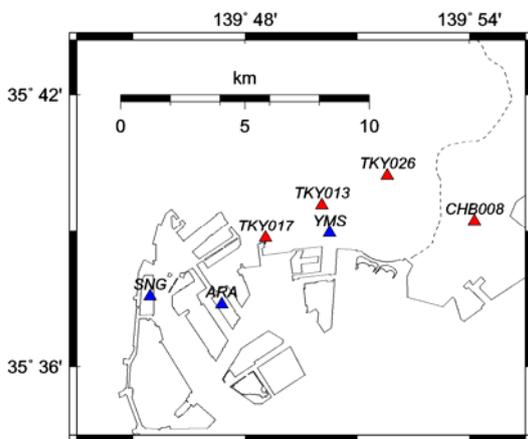


図4 東京湾沿岸地域における微動計測地点



写真1 微動観測状況

表1 微動計測機器の仕様

種類	項目	仕様
微動計	VSE15D	サーボ型速度計
		分解能：10 μ cm/s 感度：Low: 100V/m/s High: 1000V/m/s
記録部	SPC51	FS：±0.1m/s(±10kine)
		分解能：0.3×10 ⁻⁵ m/s

(2) 全方位 H/V スペクトルの評価

計測された微動データを使用し、全方位 H/V スペクトルを算出する。全方位 H/V スペクトルでは、水平二方向のデータを用いて、1度刻みでの水平動微動を作成(合成)する。実際には、0度～180度まで角度を計算する。H/V スペクトルには、0.2HzのParzenウィンドウを作用させ、平滑化を行う。

(3) H/V スペクトル指標の計算

計測された微動データを使用し、全方位 H/V スペクトル指標 (I_{HV}) を算出する。式(1)に I_{HV} の算出方法を示す。

$$I_{HV} = \int_{t1}^{t2} (S_{HV-U}(t) - S_{HV-L}(t))^2 dt \quad (1)$$

ここで、 I_{HV} は全方位 H/V スペクトル指標、 $t1, t2$ は対象とする周期(秒)の下限と上限、 $S_{HV-U}(t), S_{HV-L}(t)$ は全方位 H/V スペクトルの上限および下限値とする。本検討では、 $t1=0.5$ 秒、 $t2=2.0$ 秒とする。また、 $S_{HV-U}(t)$ および $S_{HV-L}(t)$ は、0～180度の範囲全体における下限値と上限値とする。

(4) 入力地震動設定方法の評価

H/V スペクトル指標を使用し、当該地点の地盤の地震応答解析が、一次元解析が可能かどうかを判断する。一次元解析では困難と考えられる場合については、全方位 H/V スペクトルを使用した補正方法を評価する。

4. 研究成果

(1) 微動観測

①九州北部地域

九州北部地域で微動測定を実施した地点を表2に示す。K-NETが5地点、KiK-netが3地点である。FK0006は埋立地であり、地盤が軟弱である。表中の固有周期は、式(2)に従い、地盤のせん断波速度から算出した値である。Tは固有周期(s)、 H_i と V_{si} はi層目の層厚(m)とせん断波速度(m/s)である。

$$T = 4 \sum_{i=1}^n \frac{H_i}{V_{si}} \quad (2)$$

表2 九州北部地域の微動観測点

地点	観測網	固有周期	
FK0001	玄海	K-NET	0.38s
FK0006	福岡	K-NET	0.49s
FK0007	前原	K-NET	0.30s
FK0009	筑紫野	K-NET	0.22s
FKOH03	宇美	KiK-net	0.06s
FKOH04	嘉穂	KiK-net	0.45s
SAG001	鎮西	K-NET	0.07s
SAGH01	鎮西	KiK-net	0.03s

②能登半島地域

能登半島地域で微動測定を実施した地点を表3に示す。K-NETが7地点、KiK-netが2地点である。ISK005は河川沿いの軟弱な地点であり、固有周期も約0.8秒と長い。

表3 能登半島地域の微動観測点

地点	観測網	固有周期
ISK001	大谷 K-NET	0.14s
ISK002	正院 K-NET	0.53s
ISK003	輪島 K-NET	0.17s
ISK004	能都 K-NET	0.54s
ISK005	穴水 K-NET	0.79s
ISK006	富来 K-NET	0.16s
ISK010	金沢 K-NET	0.17s
ISKH01	珠洲 KiK-net	0.13s
ISKH04	富来 KiK-net	0.02s

③東京湾沿岸地域

東京湾沿岸地域で微動測定を実施した地点を表4に示す。K-NETが4地点、東京都港湾局の観測点が3地点である。TKY013、TKY017、TKY026は地盤調査が行われておらず、固有周期が不明である。東京都港湾局の観測地点は地盤調査は実施されているが、せん断波速度は得られていない。

表4 東京湾沿岸地域の微動観測点

地点	観測網	固有周期
CHI008	浦安 K-NET	0.62s
TKY013	砂町 K-NET	-
TKY017	辰巳 K-NET	-
TKY026	宇喜田 K-NET	-
SAA	新有明 東京都	-
SNG	品川 東京都	-
YMS	夢の島 東京都	-

(2)全方位 H/V スペクトルの評価

①九州北部地域

図5,6にFK0006とFK0H04の全方位H/Vスペクトルを示す。FK0006は1Hzを超えた付近での卓越が見られる。0~120度の範囲はほぼ同じ振動数領域に卓越が見られるが、120~180度はピークがやや高い振動数側に移行する。FK0H04については、H/Vスペクトルの方向性は特に強くないと考えられる。

②能登半島地域

図7,8にISK005とISK006の全方位H/Vスペクトルを示す。両地点とも方位によってピークの現れ方が異なり、やや方向性が表れた傾向になっている。

③東京湾沿岸地域

図9,10にCHB008とTKY017の全方位H/Vスペクトルを示す。両地点とも方位によるH/Vスペクトルの差は大きくないと考えられる。

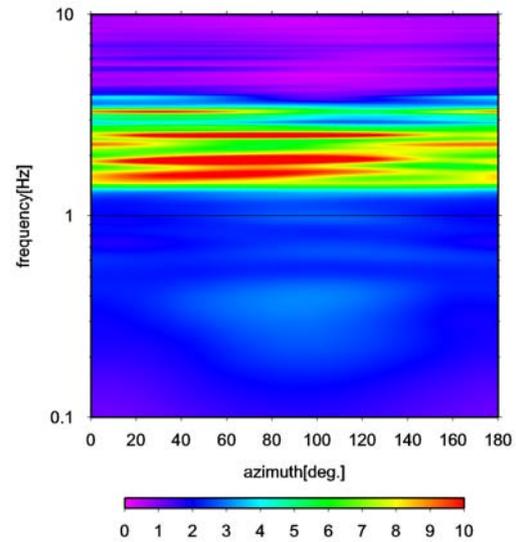


図5 全方位 H/V スペクトル(FK0006)

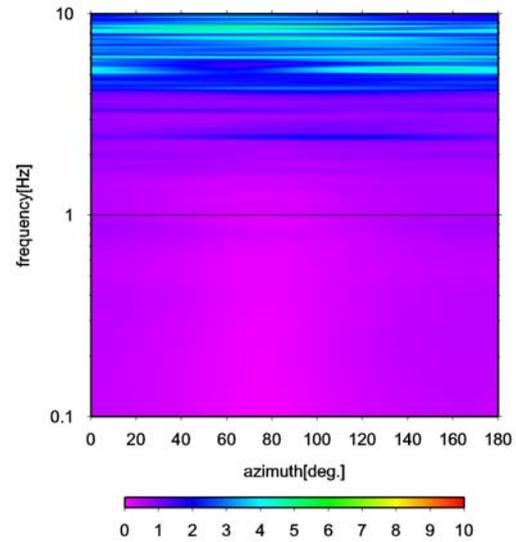


図6 全方位 H/V スペクトル(FK0H04)

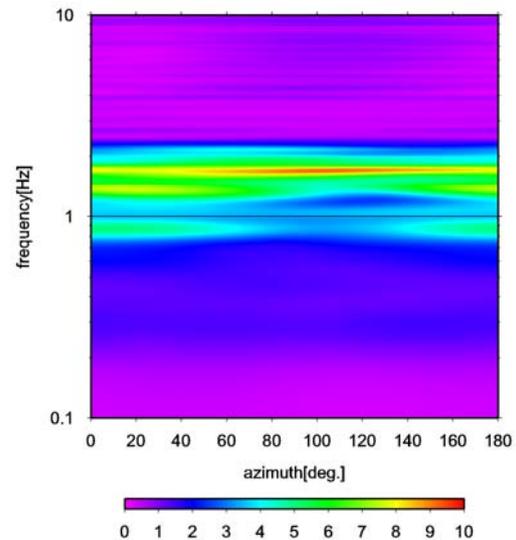


図7 全方位 H/V スペクトル(ISK005)

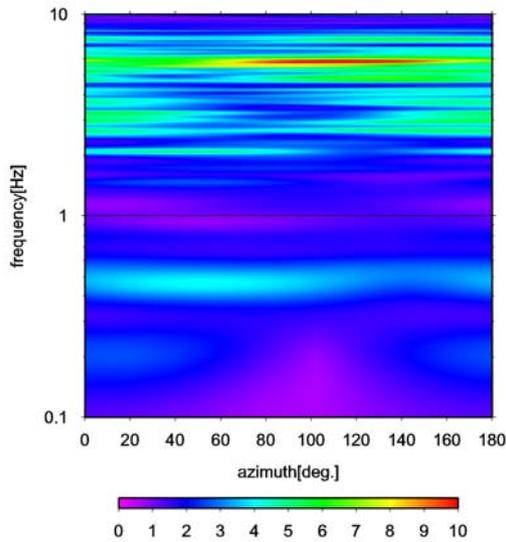


図 8 全方位 H/V スペクトル (ISK005)

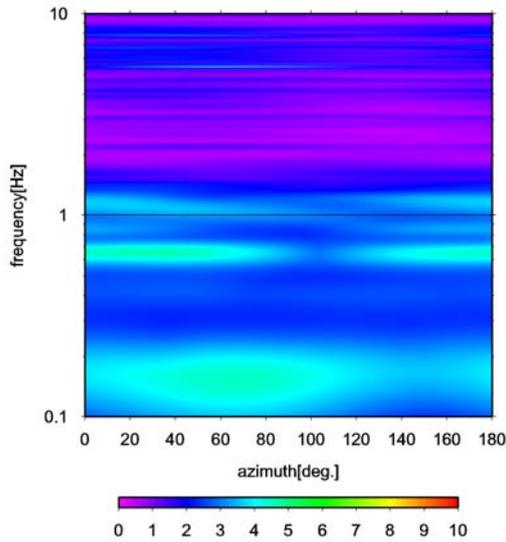


図 9 全方位 H/V スペクトル (CHB008)

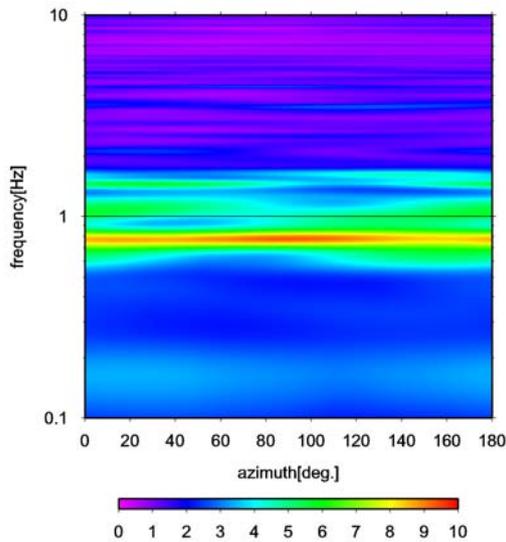


図 10 全方位 H/V スペクトル (TKY017)

(3) H/V スペクトル指標の計算

式(1)に従い各地点での全方位 H/V スペクトルから算出した H/V スペクトル指標を図 11 に示す。

全方位 H/V スペクトルに方向性が見られた FK0006 の H/V スペクトル指標は比較的大きく、方向性が見られなかった CHB008 の H/V スペクトル指標は小さく、全方位 H/V スペクトルにみられる特性を、当該指標で表わすことができると考えられる。また、TKY017 は全方位 H/V スペクトルには方向性が見られなかったが、H/V スペクトル指標は 1.0 を超え比較的大きい。図 10 を詳細にみると、今回 H/V スペクトル指標の対象とした 0.5~2.0 秒 (0.5~2.0 Hz) に限定すると、1 Hz を少し超えた付近の振動数領域において方向性が見られる。そのため、全方位 H/V スペクトルは振動数領域全体としての傾向を、H/V スペクトル指標は対象範囲を狭めることにより、局所的な特性を評価することができると考えられる。

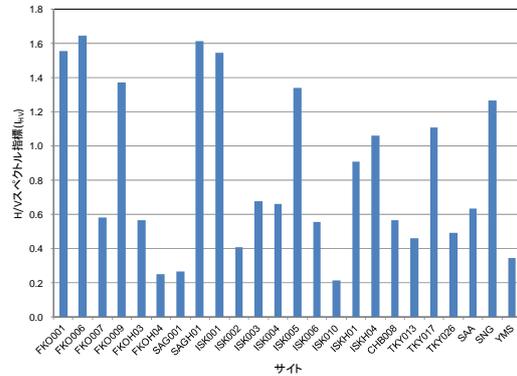


図 11 サイト別の H/V スペクトル指標

(4) 入力地震動設定方法の評価

H/V スペクトル指標が小さい地点では、地盤の地震応答解析に一次元解析が適用できると判断する。一方、H/V スペクトル指標が大きい場所では、地盤が複雑で地盤の地震応答解析には一次元解析が困難と判断する。後者の場合、地盤の二次元解析を行うことになるが、ここでは下記の方法により一次元解析結果に式(3)に示す補正係数(周波数領域)を乗じる方法を提案する。

$$C(f) = HV_{\max}(f) - HV_{\min}(f) \quad (3)$$

ここで $C(f)$ は一次元解析結果に乘じる補正係数、 HV_{\max} と HV_{\min} は全方位 H/V スペクトルの最大値と最小値、 f は振動数である。

今後、H/V スペクトル指標の定量的な評価と提案した補正方法の妥当性の詳細な検証が必要である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

- ①池田隆明・釜江克宏・入倉孝次郎、経験的グリーン関数法を用いた震源のモデル化と地盤の非線形性を考慮した地震動評価、2005年福岡県西方沖の地震と2007年能登半島地震への適用、日本建築学会構造系論文集、査読有、第76巻、第665号、2011、1253-1261
- ②池田隆明、小長井一男、片桐俊彦、鉛直アレー地震観測記録を用いた2011年東北地方太平洋沖地震における東京湾臨海部の地震時挙動の検討、土木学会論文集A1(構造・地震工学) Vol.67(2011), No. 4, [特]地震工学論文集, Vol.32、2011(登載決定)
- ③池田隆明、小長井一男、片桐俊彦、2011年東北地方太平洋沖地震における東京湾臨海部の鉛直アレー地震観測記録、第31回土木学会地震工学研究発表会講演論文集、2011、(CD-ROM)
- ④T. Ikeda, K. Konagai and T. Katagiri, Earthquake behavior of the surface layer at Tokyo bay area during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake using the downhole array observation records, Proceedings of the "One Year after 2011 Great East Japan Earthquake. - International Symposium on Engineering Lessons Learned from the Giant Earthquake -", 2012, (DVD-ROM)

〔学会発表〕(計3件)

- ①池田隆明、小長井一男、沼田淳紀、高津茂樹、微動アレー観測を用いたパキスタン北部地震の震源近傍地点の地盤構造調査、土木学会、2010年9月2日、北海道大学
- ②池田隆明、小長井一男、釜江克宏、高瀬裕也、地震観測記録を用いた地盤の非線形特性の推定、土木学会、2011年9月8日、愛媛大学
- ③池田隆明、小長井一男、片桐俊彦、清田隆、地盤の非線形地震応答解析による2011年東北地方太平洋沖地震における東京湾臨海部の地震時挙動の検討、土木学会、2012年9月6日、名古屋大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

池田 隆明 (IKEDA TAKAAKI)
飛鳥建設株式会社・技術研究所・室長
研究者番号：40443650

(2) 研究分担者

紺野 克昭 (KONNO KATSUAKI)
芝浦工業大学・工学部・教授
研究者番号：40276457

(3) 連携研究者

高瀬 裕也 (TAKASE YUYA)

飛鳥建設株式会社・技術研究所・研究員
研究者番号：30515911