常時微動H/Vスペクトル比を利用した 地震動推定法の構築に関する研究

村田 晶¹·山下 真和²·宮島 昌克³

 「正会員 金沢大学理工研究域環境デザイン学系 助教(〒920-1192 金沢市角間町) E-mail:murata@t.kanazawa-u.ac.jp
²金沢大学大学院自然科学研究科環境デザイン学専攻 M2(〒920-1192 金沢市角間町) E-mail:yama_masa_0215@yahoo.co.jp
³正会員 金沢大学理工研究域環境デザイン学系 教授(〒920-1192 金沢市角間町) E-mail:miyajima@t.kanazawa-u.ac.jp

日本では、常時微動を利用し地震動の推定を行う研究が行われている.特に、水平動のスペクトルを上 下動のスペクトルで除したH/Vスペクトルが利用して地震動の推定が行われているが、その多くは近傍の強 震観測データ同士の比較から、実際どの程度推定できているかは詳細な整合性を把握できていないのが現 状である.そこで、本研究では宮城県大崎市古川地区で行われている高密度地震観測網のデータを利用し、 地震観測点近傍での地震動推定の適用範囲を把握するとともに、推定精度の向上を試みた結果、今回試み た地震動推定式が最も観測値地震動に近いものになった.

Key Words : icrotremor observation, H/Vspectral ration, dence seismic network, correction factor

1. はじめに

地震被害に大きな影響を与えているものとして,対象 地区の地盤動特性,地震動特性,構造物特性が挙げられ る.すなわち地震が頻発する日本において,これらの実 態を把握することが,地震被害の原因究明や災害時の初 動計画,建設計画には不可欠である.地震動特性に関し てはパラメータとして震源特性,電波経路特性,サイト 増幅特性があり,これらを図-1に示す.これらを利用し 様々な地点での地震動を推定することが行われているが, まだまだ信頼性が高いとは言えない.

そこで本研究では観測が比較的安価に行うことができ る常時微動に注目して研究を行う.常時微動は、どこに でも存在していること、観測が簡単なことなどから、地 盤の動特性評価法として用いられている.また、常時微 動の振動の性状は場所によて異なっており、その特性を 利用して地盤構造の推定に利用することができる.常時 微動を利用した表層地盤の動特性を推定する研究は1950 年代後半から行われている^{10, 2)}.一般的に用いられてい た手法としては、1地点で得られた微動の水平動スペク トルの卓越周期に着目して、地盤のせん断振動に1次固 有周期を推定する方法である.しかし、この方法では得 られた水平動スペクトルには、観測点の地盤振動特性だ けではなく、周辺の振動源の特性が含まれており、必ず しも地盤の1次固有周期を推定しているとは言えない. このため、振動源の特性に依存しない地盤固有の情報を 微動から推定する必要が生じた.

中村、上野は観測された常時微動の水平動スペクトル を鉛直動スペクトルで除した振幅比(以下、HVスペクト ル比とする)を用いることで、周辺の振動源を除去した 地盤の固有周期推定法を提案した³.また、堀家は常時 微動のH/Vスペクトル比の周期特性がレイリー波のそれ を反映し、地盤動特性の推定に利用できる可能性を示し た⁴.また、時松、宮寺は短周期微動のH/Vスペクトル の比の周期特性がレイリー波の特性をよく反映している こと、およびH/Vスペクトル比が最大になる周期が地盤 の固有周期に一致する可能性を示した⁵.

地震動を推定する方法は、直接地震動観測により、空間変動を把握する方法が考案されているが、この方法で は地震の発生頻度が低いので効率が悪い.また、地表で の地震観測記録から計算した工学基盤での地震動を補間 し、対象地域での基盤から地表のまでの地盤増幅率を考 慮して、地表の地震動を推定する方法が考案されている が、この方法ではボーリングデータが必要となり、場所 が限られるという問題がある.

そこで、常時微動を利用した推定方法が提案されてい る.丸山らは[®]、地震観測点における地震記録と常時微 動観測結果に基づいて、近傍の地震観測点の加速度波形 およびフーリエスペクトルを推定し、実際の記録と比較 した.その結果、かなりの精度で推定が可能であること が確認できた.しかし,短周期成分に関しては,波形推 定が高い近似を示すのに対して,スペクトル推定は精度 が低下することがわかった.また,この研究では,基と なる地震観測点の近傍で地震動を推定しており伝播経路 を考慮していないため,少し離れた点で推定すると精度 が低下することがわかった.また,大熊ら⁷は,常時微 動HVスペクトル比を用いて1地点の地震記録から他点 における地震動を推定する手法について,速度応答スペ クトルを推定して水平動と上下動の増幅度などの実観測 データとの比較から,その利用可能性を検討した.その 結果,基準点が硬い地盤上の観測点である場合,山間部 や内陸部のように基準点の地盤構造に近い地盤に対して はよい推定結果が得られ,沖積層などが堆積する軟らか い地盤に対しては速度応答スペクトルが小さく推定され る傾向があることがわかった.

上記のように常時微動のHVスペクトル比を利用し地 震動の推定が行われているが、その多くは近傍の強震観 測点データ同士での比較をもって整合性をとっており、 実際に適用した場合どの程度推定できているかという詳 細な整合性を把握できていない、そこで本研究では宮城 県大崎市古川地区で行われている高密度地震観測網のデ ータを利用し、地震観測点近傍での地震動推定の適用範 囲を把握するとともに、推定精度の向上を試みる.



2. 宮城県大崎市古川地区のおける常時微動観測 結果

本研究では、宮城県大崎市古川地区を対象として常時 微動観測を行なった.古川地区では地震動の高密度観測 が行われており、それらのデータと常時微動観測結果を 利用することで、既往のものよりも高密度に地震動推定 の適用結果を把握できるとともに、より制度の高い推定 方法を構築できることが期待できる.

(1) 宮城県大崎市古川地区高密度観測プロジェクト⁸⁾

2011年3月11日に発生した東北太平洋沖地震により宮

城県大崎市古川地区は家屋の被害,液状化の被害がみら れた(図-2). しかしながら同地区内において,被害の程 度にばらつきがあり,地震動特性にも違いがあったと予 測できる.

今回のように狭い範囲では震源からの伝搬経路特性に よる違いは無視できるものであり、地域内での浅層地盤 構造の差により地震動特性の違いがうまれたと考えられ る.しかしながら、既設の強震計のみでは地震動特性の 違いを評価するには不十分であるため、大崎市古川高密 度地震観測プロジェクトにより地震動の観測を行う試み が進められている.現在では、36点の地震観測器が設置 されており(図-3)、観測網は被害の多かった地域とK-NET及び気象庁観測点を含む地域をおよそ200m程度の 距離でカバーをしている.



(2) 観測点のH/Vスペクトル比

図-4に観測した常時微動からH/Vスペクトル比を算出 し卓越周期を判読したものを示す.ここでは面的に視覚 化するためにスプライン補間したものを記している. 青線で囲まれている範囲は被害が集中した箇所を表し ている.常時微動HVスペクトル比の卓越周期を地盤の 1次固有周期と近似できるならば、周期が大きくなるほ ど軟弱な地盤といえる.そこで被害が集中した箇所をみ てみると、固有周期が比較的大きく出た観測点もあった. しかしながら、常時微動を利用した地盤特性の把握だけ では地震被害との相関性が取れているとはいえず、地震 動特性の推定も求められる結果となった.



図-4 常時微動H/Vスペクトル比の卓越周期

3. 地震動推定法の構築

地震被害の原因解明には地震動特性の把握も必要となってくる.地震動推定に関しては様々な研究が行われてきたが、その多くは近傍の強震観測点データ同士での比較をもって整合性をとっており、実際に適用した場合どの程度推定できているかという詳細なデータを把握できていないのが現状である.

そこで,ここでは宮城県大崎市古川高密度地震観測プロジェクトで観測された強震データと常時微動データを 用いて,地震動推定法の各補正係数の検証及びモデル化 を試みる.

また,今回検証に用いた地震動を表-5に示す.地震動の選定にあたっては,マグニチュード5.0以上及びK-NET 古川において計測震度3.0以上を観測した地震動を抽出 した.

表-1 検証に用いた地震動

	地電左進	震源位置		毒液の大	ラガーエー い
	地展中代	震央北緯	震央東経	展線体で	49_71_F
1	2012/3/27	39.80	142.33	21	6.6
2	2012/8/30	38.40	141.91	60	5.6
3	2012/11/24	38.21	141.79	57	5.2
4	2012/12/7	38.02	143.87	49	7.3
5	2013/4/17	38.46	141.62	58	5.9
6	2013/8/4	38.16	141.80	58	6.0

(1) 既往の地震動推定法

本研究では、原田ら⁹が提案した推定法を検証対象と する.そこでは、「地震動と常時微動HVスペクトル比 は等しく、かつ2地点の地表面鉛直地震動のスペクトル 特性は等しい」というように2地点間の地震動や常時微 動HVスペクトル特性を単純にモデル化されていたもの を、「地震動と常時微動のHVスペクトル比は完全に等 しいものではなくほぼ等しい.そして2地点間距離が近 い場合でも地表面鉛直地震動のスペクトル特性は異なる」 といった観測事実をできるだけ考慮し、定式化されてい る.定式を以下に示す.

まず,地震動と常時微動のH/Vスペクトル比を完全に 一致させるように,次式のような補正係数を定義する.

$$\beta_{O} = \frac{1_{c_{Omax}}(H_{V})_{O}^{M}}{(H_{V})_{O}^{E}} , \quad \beta_{E} = \frac{1_{c_{Emax}}(H_{V})_{O}^{M}}{(H_{V})_{E}^{E}} \quad (3-1)$$

ここで、下添字は地点を示し、強震観測点には 0, 推定 点にはを付けて区別するものとする.上添字は、常時微 動を E, 地震動を M とし、どちらの物理量であるかを 示す.また、c_{Omax}、c_{Emax}は常時微動 H/V スペクトル比の 最大振幅を表す.

これらの補正係数を用いることで,推定点の水平地震 動スペクトル振幅は次式のように表される.

$$H_{E}^{E} = \frac{\beta_{O}}{\beta_{E}} \gamma_{E/O} \frac{\frac{1}{c_{Emax}} (H/V)_{E}^{M}}{1/c_{omax}} H_{O}^{M} H_{O}^{E} \qquad (3-2)$$
$$\gamma_{E/O} = \frac{V_{E}^{E}}{V_{O}^{E}} \qquad (3-3)$$

式(3-2)では補正係数 β_E および γ_{E0} は両地点の強震記録と 常時微動記録が必要であり、モデル化が必要である.

(2) *β*_Eのモデル化

原田らりは β の周期0.1~2秒の間で平均値を計算し β_E の モデル化を試みた.その平均値はおおよそ0.1~0.4の間 の値となり、これらの地点ごとの補正係数の全体の平均 を計算すると約0.3となる.原田らりはこの平均値0.3を用 いたが、中村ら¹⁰は、近傍観測点同士の β には正の相関 があることに注目し、K-NET観測点の地震動記録と常時 微動記録のH/Vスペクトル比から補正係数を求め、その 周期0.1秒~2秒間の平均値を推定点 β_E とした.

本研究では、推定点におけるβ平均値は、基準となる K-NET観測点のβ平均値に対して地盤情報ごとの補正を することにより近似できると考え、宮城県大崎市古川で の地震記録及び微動記録をサンプルとして学習データを 作成し、ニューラルネットワークプログラムにより推定 点におけるβεの算出を試みる.具体的には、基準点の地 盤情報とβ平均及び推定点の地盤情報を入力層とし、ま た推定点のβ平均を出力層とする教師データを作成し学 習プログラムを作る.その学習プログラムを用いて、基 準点の地盤情報とβ平均値及び推定点の地盤情報だけで 推定点の β_E を算出する.地震毎に、K-NET観測点を基準 とし各地点の補正係数 β_E を推定した結果を図-5に示す. 図-5より、学習プログラムによる推定結果は、推定点の β 平均を基準点であるK-NET観測点の β 平均で近似するよ りもより精度よく推定できていることが分かる.



図-5 β平均値の実測値と推定値の比較

(3) YEOのモデル化

丸山ら[®]は2地点間の距離が近い場合,地表面鉛直地震動のスペクトル特性は同じものとして地震動推定法を提案した.それに対して原田ら[®]は,鉛直地震動特性を異なるものとして,強震観測点と推定点の地盤条件の違い により鉛直地震動スペクトル比が2種類に分類されることを示した.ここで,地盤条件の違いは常時微動HVスペクトル比のピーク周期で判断する.すなわち常時微動 HVスペクトル比のピーク周期を地盤の1次固有周期と 近似できるならば観測点の地盤の方が推定点の地盤より も硬いという場合は,地震観測点における常時微動HV スペクトル比の卓越周期が推定点における常時微動HV スペクトル比の卓越周期が推定点における常時微動HV スペクトル比の卓越周期よりも小さい場合である.また 逆の場合,観測点の地盤の方が推定点の地盤よりも軟ら かい場合である.

原田ら⁹は鉛直地震動スペクトル比の平均的周期特性 を次式のような簡単な関数式で近似しモデル化した.

$$\gamma_{E/O}^{I} = \frac{1 + 4e^{-5T}}{1 + 20e^{-20T}} , \quad \gamma_{E/O}^{II} = \frac{1}{\gamma_{E/O}^{I}} \quad (3-4)$$

ここで、Tは周期(s)である.また、観測点の地盤が硬い 場合の鉛直地震動スペクトル比を $\gamma_{E/0}^{I}$ 、観測点の地盤 が軟らかい場合の鉛直地震動スペクトル比を $\gamma_{E/0}^{I}$ とする.

一方で中村ら¹⁰は式3-4でのモデル化では鉛直地震動 スペクトル比のばらつきを考慮していないことを指摘し, 地点ごとのモデル化を以下のように定式する.

$$\gamma_{E/O}^{I} = \left(\frac{1 - c'_{max}}{2}\right) \left[\frac{e^{\left[T/T_{g} - 1\right]} - e^{-\left[T/T_{g} - 1\right]}}{e^{\left[T/T_{g} + 1\right]} - e^{-\left[T/T_{g} + 1\right]}}\right] + \left(\frac{c'_{max} + 1}{2}\right), \quad \gamma_{E/O}^{II} = \frac{1}{\gamma_{E/O}^{I}} \qquad (3-5)$$

$$T_g = MAX(T_o, T_E)$$

 $c'_{max} = \gamma_{E_{o}}(90\%) = 1.2 \times c_{max} + 1.6$

$$c_{max} = MAX(\frac{c_{0_{max}}}{c_{E_{max}}}, \frac{c_{E_{max}}}{c_{0_{max}}})$$

この2つを検証した結果,式(3-5)のほうが誤差は小さくなり,以上より,本研究の地震動推定では式(3-5)を γ_{F0} のモデル化として適用する.

4. 地震動推定法の検証

本章では宮城県大崎市古川の地震動記録および常時微 動記録をもとに、学習プログラムによる β_E のモデル化と 中村ら¹⁰により提案された γ_{E0} の有意性を確認する.す なわち上述の β_E 、 γ_{E0} を適用し式(3-5)により地震動推定 を行う.ここでは比較対象として、丸山ら⁶¹による「地 震動と常時微動HVスペクトル比は等しく、かつ2地点 の地表面鉛直地震動のスペクトル特性は等しい」という ように2地点間の地震動や常時微動HVスペクトル特性 を単純にモデル化した推定法を丸山推定式、原田ら¹⁰に より提案された β_E (β_E =0.3)、 γ_{E0} (式(3-4))を適用した推定 法を原田推定式、本研究での推定法を本研究推定式とす る.

(1) 地震動の検証結果

(a) スペクトル振幅の比較

各推定法による推定結果と地震動記録との比較したも のを図-6に示す.図より,丸山推定式ではフーリエスペ クトルが過大評価されていることが分かる.それに比べ て原田推定式及び本研究推定式は最大振幅が地震動記録 のものと近い値となっており,またその2つを比べてみ ても本研究推定式の方がより精度よい推定結果となった. しかしながら,卓越周期は多少のずれがみられる.これ は常時微動と地震動のフーリエスペクトルが完全には一 致しないことや,強震により地盤の非線形化が起こり, 地震動記録のフーリエスペクトルが高周期側に移動した 可能性が考えられる.もちろん,強震に対しては地盤の 非線形化を完全に考慮することは必要になるが,そもそ も常時微動観測結果を利用した地震動推定は簡便である ことが利点である.それを考慮すれば1次近似としては 許容範囲であると考えられる.

次に、各地点の推定結果から最大振幅と卓越周期を判 読し比較したものを図-7、8に示す.図から分かるよう に、各推定点においても丸山推定式での推定は最大振幅 を過大評価していることがわかる.また、本研究推定式 での推定結果は他の推定式に比べ、より良い精度で最大 振幅の評価をすることができた.



は考慮されていない. 地震動推定に際しては各地点の位 相特性が問題に挙げられ, もちろん今後考えていかなけ ればならないことではあるが,本研究では地震動推定の 簡便さに重きを置き,基準点の位相特性と同じであると 仮定する. したがってここでは,基準としたK-NET観測 点の位相特性をそのまま利用した.

推定した加速度波形と観測地震動との比較を図-9に示 す.図に示されている観測地震動波形の最大加速度は 58(gal)である.それに対して,丸山,原田,本研究推定 式で推定した加速度波形の最大加速度はそれぞれ45(gal), 38(gal),58(gal)となり,本研究推定式がより良い精度で 推定されている.また,波形形状に関しても,本研究推 定式での推定波形の方がより観測地震動波形に近いもの となった.次に各地点での観測地震動及び推定地震動の 最大加速度の比較を図-10に示す.図に示すように,概 ね丸山,原田推定式により推定した最大加速度よりも, 本研究の推定式で推定した最大加速度の方が観測地震動 の最大加速度に近い値となった.



図-9 観測値地震動波形と各測定地震動波形の比較

(b) 加速度波形の比較

先程推定した各地点の加速度フーリエスペクトルから フーリエ逆変換により加速度波形を求める.推定式では 各地盤の周期特性を考慮しているが、位相特性に関して



図-10 各観測点における最大加速度の比較

(c)おわりに

常時微動のHVスペクトル比を利用した地震動推定は 多く行われているが,既往の地震動推定の多くは近傍の 強震観測点データ同士での比較をもって整合性をとって おり,実際に適用した場合どの程度推定できているかと いう詳細なデータを把握できていないのが現状である. したがって本研究では,宮城県大崎市古川地区で行われ ている高密度地震観測網のデータを利用し,地震観測点 近傍での地震動推定の適用範囲を把握し,また精度の向 上も試みた.

補正係数β_Eに関しては学習プログラムを利用した推定の可能性を示し、またγ_{EO}に関しては中村ら¹⁰により提案されたモデル化が十分に適用できることが分かった. これを踏まえ地震動推定をしたところ、提案した地震動推定法が既往のものよりも、フーリエスペクトルの最大振幅をよりよく推定できていることが分かった.また、振幅形状は似たものになったものの、周期に関しては少しずれが生じたが、1次近似としては許容できる範囲とした.しかしながら、強震時における地盤の非線形化を考慮しておらず、また近傍の観測地震動と推定点の位相特性は同じであると仮定し、加速度波形を算出しているなど推定方法には課題がある. 謝辞:本研究を進めるにあたり,K-NETおよびKiK-net観 測記録を使用させていただきました.また,古川地区の 常時微動観測と古川高密度地震観測プロジェクトのデー タ利用につきましては東京工業大学 盛川 仁 教授, 京都大学 後藤 浩之 助教はじめとした関係各位にご 協力いただきました.ここに記して謝意を表します.

参考文献

- Aki, K.: Space and Time Spectra of Stationary Stochastic Waves, with Special Reference to Microtremors, Bulletin, Earthquake Research Institute, 35, pp.415-457, 1957.
- Kanai, K. and Tanaka, T.: On microtremor WI, Bulletin, Earthquake Institute, 39, pp.97-114, 1961.
- 中村 豊,上野 真:地表面震動の上下動成分と水 平動成分を利用した表層地盤特性推定の試み,第7 回日本地震工学シンポジウム講演集,pp.265-270, 1986.
- 4) 堀家正則:微動の位相速度及び伝達関数の推定,地 震第2輯,第32巻,pp.425-442,1980.
- 5) 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報告集,第439号,pp.81-87,1992.
- 丸山喜久・山崎文雄:常時微動の H/V スペクトル比 を用いた地震動推定法の提案,土木学会論文集, No.675/I-55, pp.261-272, 2001.4.
- 7) 大熊裕輝,松岡昌志:宮崎県における常時微動 H/V スペクトル比を用いた地震動の推定,土木学会論文 集,No.696/I-58, pp.261-272, 2002.1.
- 大崎市古川高密度地震観測プロジェクト, http://sn.catfish.dpri.kyoto-u.ac.jp/index.html, 2014 年 1 月 31 日アクセス
- 原田隆典,中村真貴,王宏沢,斉藤将司:強震観測 点の記録と常時微動 H/V スペクトル比を利用した近 傍の未観測点の強震動推定法,応用力学論文集, Vol.11, pp.595-602, 2008.
- 10) 中村真貴,原田隆典,市村彰,王宏沢,齊藤将司: 常時微動 H/V スペクトル比を利用した強震観測点近傍の地震動推定法,第30回土木学会地震工学研究発表会論文集.

PRESUMPTION OF SEISMIC MOTION BY USING THE H/V SPECTRAL OF MICROTREMOR

Akira MURATA, Masakazu YAMASHITA and Masakatsu MIYAZIMA

I estimate the seismic motion by using microtremor measurement. There are many studies which are estimating earthquake ground motion using the H/V spectral ratio of microtremor. In their, microtremor measurements were conducted to estimate site response characteristics of the seismic observation stations and other locations. The horizontal to vertical Fourier spectral ratios were calculated for seismic records and microtremor, and their similarity was confirmed. I measured microtremor, analyzed this and calculated the horizontal-to-vertical Fourier spectral. And, I deciphered superior cycles, and classified grounds. I studied interrelation between these results and real damage.