

# 長野県北部地震における常時微動H/Vスペクトル比を用いた地震動推定と地震破壊力指標評価

村田 晶<sup>1</sup>・堀川 翔平<sup>2</sup>・宮島 昌克<sup>3</sup>

<sup>1</sup>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

<sup>2</sup>金沢大学大学院自然科学研究科環境デザイン学専攻 (〒920-0941 金沢市旭町2-3-29)  
E-mail:shorikawa1130@gmail.com

<sup>3</sup>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@se.kanazawa-u.ac.jp

2011年3月12日に長野県北部の新潟県との県境付近で直下型地震が発生した。東方地方太平洋沖地震の次の日であったためマスメディアで取り上げられることも少なかったが、気象庁の暫定値で、震源深さ10km、マグニチュード(M)6.6の最大震に続き、M5以上の余震が2回続くなど、大きな地震災害となった。長野県栄村は山間部に位置しており、場所によって被害の程度はさまざまであり、地震動にも違いがあったと考えられる。このように情報の少ない地区では地震動を推定する必要があるというのが現状である。本研究では、地震によって甚大な被害を受け、地震に関する情報が限られている長野県栄村の横倉地区及び青倉地区を対象地区とし、建物被害をもたらした要因を解明することを目的とする。

**Key Words :** *microtremor observation, H/V spectral ratio, Nagano-Ken-Hokubu Earthquake, acceleration response spectrum*

## 1. はじめに

2011年3月12日に長野県北部の新潟県との県境付近で直下型地震が発生した。東方地方太平洋沖地震の次の日であったためマスメディアで取り上げられることも少なかったが、気象庁の暫定値で、震源深さ10km、マグニチュード(M)6.6の最大震に続き、M5以上の余震が2回続くなど、大きな地震災害となった。幸いにも地震による死者はでなかったが、多くの建物に被害が生じた。とりわけ、長野県では栄村の被害が大きく、被害数は、人的被害は軽傷者数10人、住家被害をみれば、全壊が33棟33世帯70人、半壊が169棟174世帯437人、一部損壊が480棟509世帯1203人となり、また、非住家の被害では全壊154棟、半壊129棟となっている。また、その他にも橋梁被害や斜面崩壊などがみられ、被害は甚大なものとなった。

地震被害に大きな影響を与えるものとして、対象地区の地盤動特性および地震動特性などが挙げられる。すなわちこれらの実態を把握することが、地震被害の原因解明のためには不可欠である。現在、地震動特性に関しては、国内各種の強震観測網により、多くの情報が得られ

るようになったが、地震計設置の空間的密度はまだまだ低く、これでは震源近くの地震動特性の分布を把握することは非常に困難である。とくに、住家に大きな被害が生じた栄村では、近傍の地震観測記録は栄村役場の地震計による本震記録のみであり、この地区の地震動特性には不明な部分が多い。栄村は山間部に位置しており、場所によって被害の程度はさまざまであり、地震動にも違いがあったと考えられる。このように情報の少ない地区では地震動を推定する必要があるというのが現状である。

常時微動は比較的簡単に観測が可能であるため、これを利用して表層地盤の動特性を推定しようとする研究が1950年代後半から行われている<sup>1), 2)</sup>。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、地盤のせん断振動の1次固有周期を推定する方法である。しかし、この方法から得られた水平動スペクトルには、観測点の地盤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性が生じた。

中村、上野は観測された常時微動の水平動スペクトル



図-1 研究対象地区および周辺状況

を鉛直動スペクトルで除した振幅比（以下、**H/V**スペクトル比とする）を用いることで、周辺の振動源特性を除去した地盤の固有周期推定法を提案した<sup>3)</sup>。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<sup>4)</sup>。また、時松、宮寺は短周期微動の**H/V**スペクトル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<sup>5)</sup>。

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、対象地点での基盤から地表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。しかし、この方法では基盤から地表の地震動を推定するときにボーリングデータなどの地盤情報が必要である。観測地点では地盤の情報はボーリングデータなどにより入手することができるが、それ以外の場所では地盤情報が未知であるかあるいはボーリング調査自体に困難が伴うためどこでも適用できるとは限らないという問題がある。

そこで、第3の方法として常時微動を利用した推定方法が考案されている。常時微動は観測が簡便であるため、地震動を推定する方法として適している可能性がある。

大熊らは、常時微動**H/V**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<sup>6)</sup>。

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。

また、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<sup>7)</sup>。

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。

本研究では、地震によって甚大な被害を受け、地震に関する情報が限られている長野県栄村の横倉地区及び青倉地区を対象地区(図1)とし、建物被害をもたらした要因を解明することを目的とする。まず、それぞれの地区で比較的容易に実施が可能な常時微動観測を行い、その結果と近傍の地震動記録および伝播経路特性を考慮して、対象地区の地震動を推定する方法が考案されているので、その方法を用いて対象地区の地震動を推定する。次に、その推定地震動から算出した地震破壊力と悉皆調査で得られたデータとを対比することにより地震動と建物被害の相関について検討する。

## 2. 栄村における常時微動観測及び**H/V**スペクトル解析

地震被害が甚大であった栄村の横倉地区、青倉地区の常時微動観測と**H/V**スペクトル結果について示す。常時

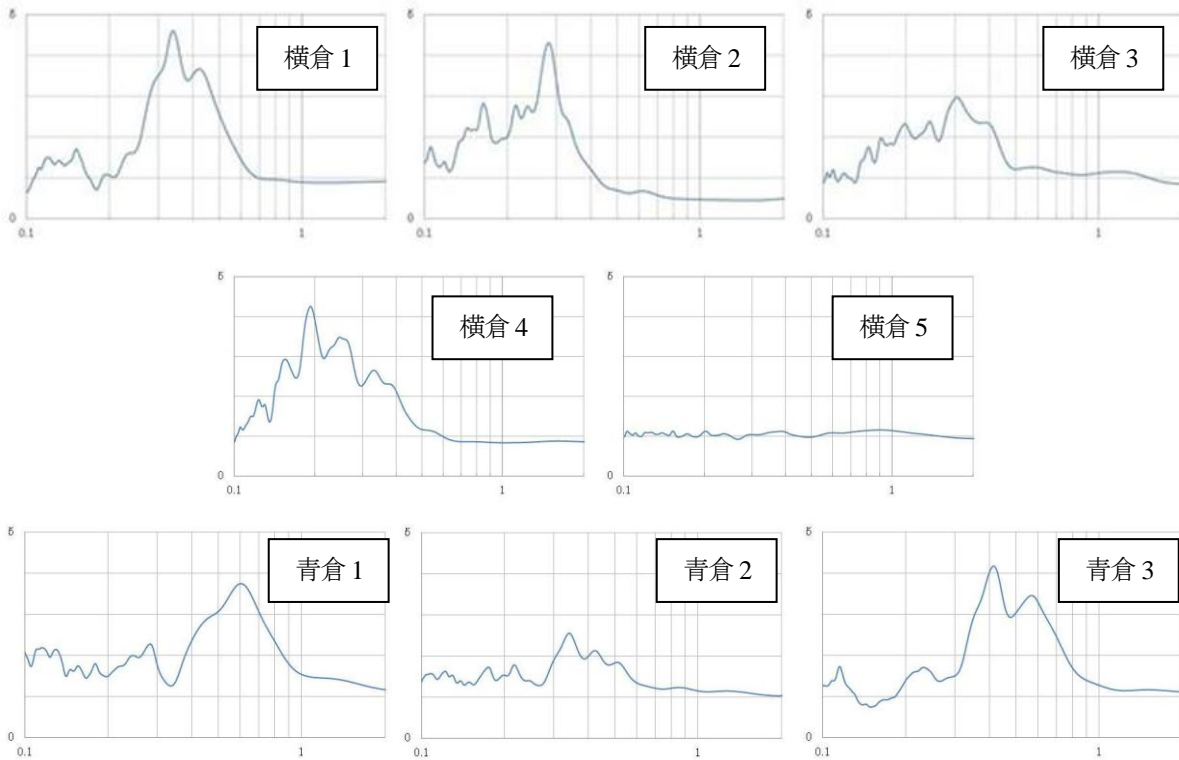


図-3 観測地点におけるH/V スペクトル比

微動観測については、各測点20分間、サンプリング振動数100Hzとし、微動が安定している部分4096ポイント（40.96秒）を1単位とする10個のデータファイルを作成する。これら10個の時間領域のデータファイルを加算平均し、0.4HzのParzen Windowにより平滑化する。観測地点を図-2に示す図に示すようにいずれの地区も千曲川左岸にあり、図の上部に向かって標高が高くなるような地形となっている。

また、図3に各点で観測された常時微動のH/Vスペクトル比を示す。一般的にH/Vスペクトル比の卓越周期は観測地点の地盤硬さに関係しており、卓越周期が短いほどその点の地盤は硬く、長いほど軟らかくなる。横倉地区をみても、横倉5では卓越周期がみられなかったが、ほかの観測点では0.2～0.3秒付近で卓越していることが分かる。また、青倉地区では青倉1が0.6秒、青倉2が0.3秒、青倉3が0.4秒付近で卓越がみられる。したがって青倉地区でみれば、青倉1観測点の地盤が軟らかく、一方で青倉2観測点の地盤は硬いということになる。

### 3. 長野県北部地震における地震動推定と地震破壊力指標による評価

#### (1) 常時微動観測記録を用いた地震動推定手法

地震動を簡易的に推定するために、地震観測が実施さ

れているA地点の観測記録とその地点での常時微動観測の結果、ならびに地震観測が実施されていない任意のB地点における常時微動観測の結果よりB地点の地震動を推定する方法を以下で説明する。

両地点における地震動のフーリエスペクトルは下記のように示される。

- ・A地点における地震動のフーリエスペクトル

$$O_A(f) = S_A(f) \times P_A(f) \times G_A(f)$$

- ・B地点における地震動のフーリエスペクトル

$$O_B(f) = S_B(f) \times P_B(f) \times G_B(f)$$

ここで、

$S_A(f), S_B(f)$ : 地点AおよびBに及ぼす震源特性

$P_A(f), P_B(f)$ : 地点AおよびBまでの伝播経路特性

$G_A(f), G_B(f)$ : 地点AおよびBにおけるサイト増幅特性

である。震源特性は同一と仮定できることから  $S_A(f) = S_B(f)$  とする。よって両地点のフーリエスペクトル比は、

$$\frac{O_B(f)}{O_A(f)} = \frac{P_B(f)}{P_A(f)} \times \frac{G_B(f)}{G_A(f)}$$

と表すことができる。以上より、B地点における地震動のフーリエスペクトルは、

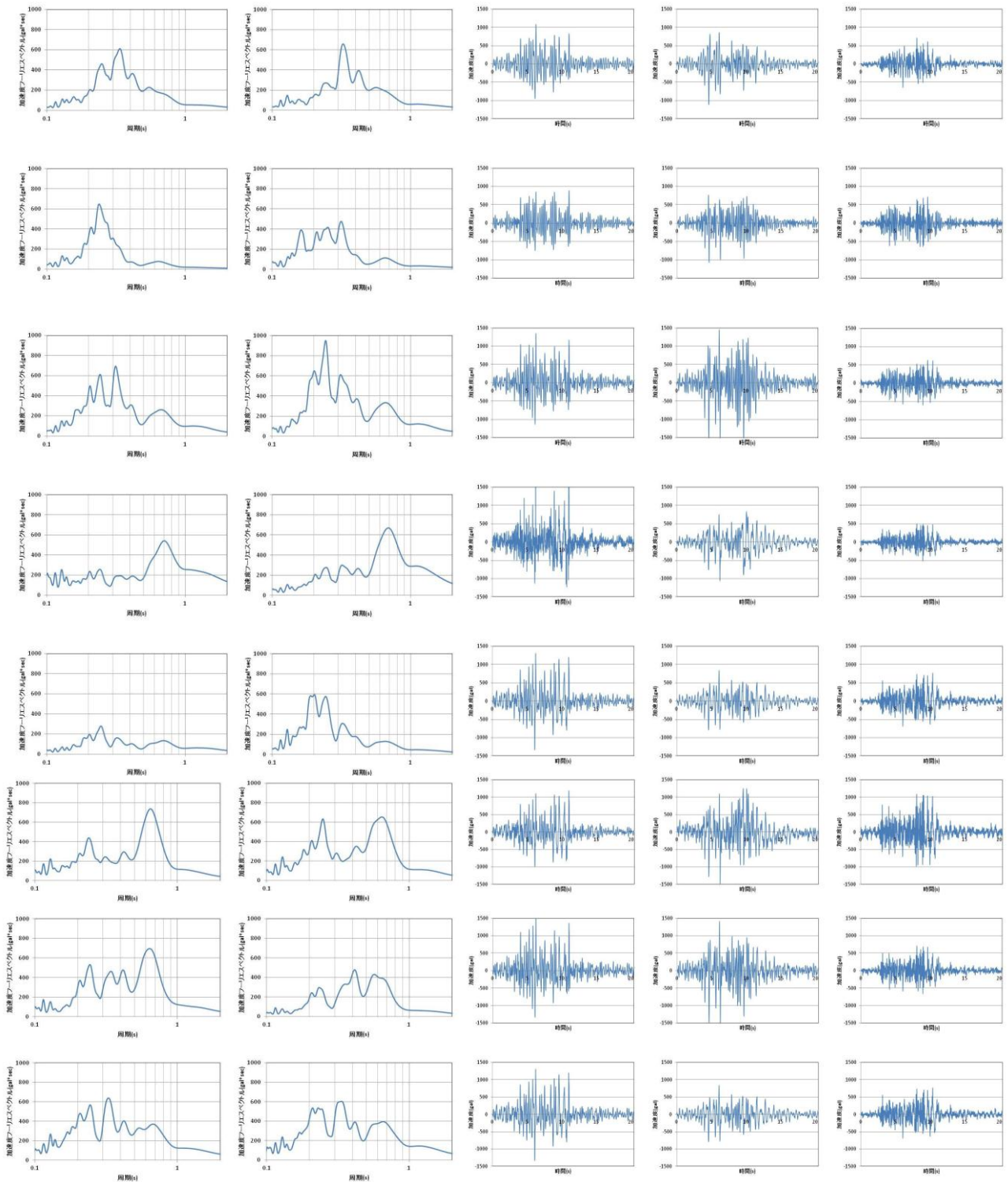


図-4 推定加速度フーリエスペクトル及び推定地震動加速度波形  
(上から横倉 1~5, 青倉 1~3)

$$O_B(f) = \frac{P_B(f)}{P_A(f)} \times \frac{G_B(f)}{G_A(f)} \times O_A(f)$$

となる。

また、伝播経路特性  $P(f)$  は次式で示される。

$$P(f) = \frac{1}{X} \exp\left(\frac{-\pi f X}{Q(f) V_S}\right)$$

$X$  は断層最短距離距離、 $Q(f)$  は伝播経路における  $Q$  値、 $V_S$  は伝播経路におけるせん断波速度である。

次に、サイト増幅特性  $G(f)$  の比は A 地点と B 地点の常

表-1 横倉地区・青倉地区におけるSI値とFSIv値

	横倉1	横倉2	横倉3	横倉4	横倉5	青倉1	青倉2	青倉3
最大加速度(PGA)	1380	1301	2204	1751	2425	1834	2281	1557
スペクトル強度(SI値)	302	288	413	302	239	297	360	290
疲労速度応答スペクトル強度(FSIv値)( $\times 10^5$ )	4.6	4.7	12.1	4.5	2.2	4.5	8.1	4.0

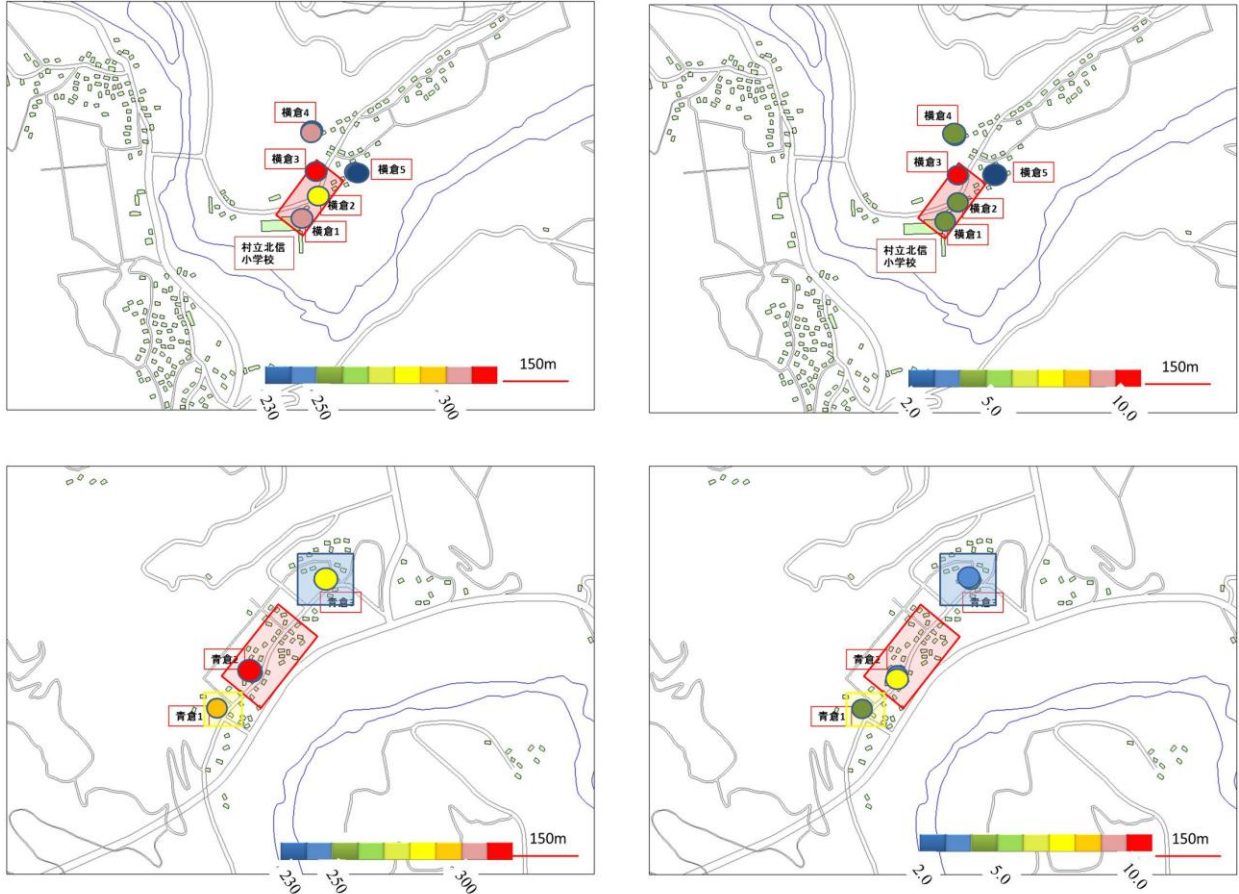


図-5 地震破壊力指標(左:SI値、右FSIv値)と被害状況との比較(上:横倉地区、青倉地区)

時微動のHVスペクトル比の比で近似できる。

よって、

$$\frac{G_B(f)}{G_A(f)} = \frac{H_B(f)}{H_A(f)} \frac{V_B(f)}{V_A(f)}$$

と考える。ここで、 $H_A(f), H_B(f)$ はA地点およびB地点における常時微動の水平動のスペクトル、 $V_A(f), V_B(f)$ はA地点およびB地点における常時微動の上下動のスペクトルである。

以上のように、伝播経路特性とサイト増幅特性を求めたものから任意のB地点における地震動のフーリエスペクトルが算出され、その値をフーリエ逆変換することにより加速度が算出される。

## (2) 栄村役場地震計の観測記録を用いた青倉・横倉地区の地震動推定

横倉地区、青倉地区の推定加速度フーリエスペクトル及び、推定地震動加速度波形を図-4に示す。なお、本研究では位相特性は考慮しておらず、栄村役場地震計で観測された地震記録と同一のものとしている。図から分かるように、推定加速度フーリエスペクトル特性には違いがみられた。横倉地区では被害の大きかった横倉1~3で0.2秒~0.4秒にピークがみられる一方で、青倉地区では、被害が大きく出た地点では0.7~0.8秒程度のピークがみられる結果となった。しかし、横倉5では青倉の地点と同様な特性を示しているが、それほど大きな被害は出なかった。

また、PGAは横倉地区では1300~2425gal、青倉地区では1557~2281galとなりある程度の違いが出たものの被害との相関はあまりみられない結果となった。しかしなが

ら栄村役場地震計で観測された本震記録よりも両地点での地震動は全体的に大きく、被害との相関は調和的であった。

### (3) 地震破壊力指標を用いた木造建物被害評価

ここではスペクトル強度(SI 値)及び、応答振幅の繰り返しによる構造物の疲労破壊に着目した地震動破壊力指標である疲労速度応答スペクトル強度(FSIv 値)<sup>12)</sup>に着目し木造被害との関係をみていく。

横倉地区、青倉地区で推定した地震動から算出した SI 値、FSIv 値を表 - 1 に示す。また、先に算出した地震動破壊力指標と定性的な被害程度との比較を図 - 5 により行う。左の SI 値は青色の 230 から始まり、赤になるにつれて値が大きくなる。また FSIv 値は青色の 2.0 から始まり赤色になるにつれて大きくなっていく。被害の度合いは悉皆調査をもとに色分けし、比較的大きな被害が出たところをから赤、黄、青色の順番となっている。横倉地区では観測点横倉 1~3 付近で大破と判断された住家が多く、また青倉地区では観測点青倉 3 付近ではあまり大きな被害が出なかった一方で、青倉 2 付近では被害度が大きかったということが特徴である。また、破壊力指標と比較すると、横倉では横倉 3 をはじめ、横倉 1,2 で SI 値、FSIv 値が大きな値が算出されている。これは周辺の被害との比較をすればある程度の相関は取れているといえる。また、被害の少なかった横倉 5 では SI 値 FSIv 値の値も算出された結果は小さかった。青倉地区では被害があまり大きく出なかった青倉 3 では地震動も小さく、また地震破壊力指標も他と比べ小さな値となった。その一方で、青倉 2 周辺では大きな被害が出た住家が多くあったが SI 値、FSIv 値ともに他の観測点よりも大きな値を示していることが分かった。

## 4. 結論

本研究では、長野県北部地震において大きな被害を受けた、横倉地区、青倉地区を対象地区として、建物被害要因の解明のため、地震動推定を行った。

まず、それぞれの地区で比較的容易に観測が可能な常時微動観測を行い、H/V スペクトル比を算出した。次に、常時微動 H/V スペクトル比を地盤増幅特性としてきんじするという、常時微動観測の結果及び近傍の地震動記録を用いて対象地区の地震動を算出することができる、ごく簡易的な推定方法を用いて対象地区の地震動を推定した。

推定結果をみると、同一地区においても異なった振動特性がみられた。また栄村地震計で観測された本震記録よりも横倉、青倉両地区の地震動の方が大きかったこと

を解析的に示した。また地震破壊力に着目し、推定地震動から各々のスペクトル強度、疲労速度応答スペクトル強度を算出した。その結果、地震破壊力と被害の度合いはある程度の相関がとれていることを示した。

**謝辞：**本研究を進めるにあたり、SK-NET、K-NET、KiK-net 観測記録を使用させていただきました。また、現地の観測記録については、(株)日本工営中央研究所の秦吉弥氏のご協力をいただきました。ここに記して謝意を表します。

### 参考文献

- 1) Aki, K. : Space and Time Spectra of Stationary Stochastic Waves, with Special Reference to Microtremors, Bulletin, Earthquake Research Institute, 35, pp. 415-457, 1957.
- 2) Kanai, K. and Tanaka, T. : On microtremor VIII, Bulletin, Earthquake Institute, 39, pp. 97-114, 1961.
- 3) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 大町達夫, 紺野克昭, 遠藤達哉, 年縄 巧: 常時微動の水平動と上下動のスペクトル比を用いる地盤周期推定方法の改良と適用, 土木学会論文集, No. 489, I-27, pp. 251-260, 1994.
- 9) 鶴来雅人: 2007 年能登半島地震の能登有料道路盛土崩壊現場における地震動推定について, 2008. 2.
- 10) 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.
- 11) 境有紀, 他: 1999 年台湾集集地震に基づいた建物被害を予測する地震動の破壊力指標の検討, 日本建築学会構造系論文集, 第 549 号, pp. 43-50, 2001. 11.
- 12) 北川輝: 能登半島地震における地震破壊力指標と建物被害との関係, 金沢大学学士学位論文, 2010

(?)

## PRESUMPTION OF SEISMIC MOTION BY USING THE H/V SPECTRAL OF MICROTREMOR AT NAGANO-KEN HOKUBU EARTHQUAKE

Akira MURATA, Shohei HORIKAWA and Masakatsu MIYAJIMA

I estimate the seismic motion in Nagano 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.