

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3月15日現在

機関番号：33401  
 研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2009～2011  
 課題番号：21560601  
 研究課題名（和文） 微動H/Vスペクトル比の建築物への適用性に関する研究  
 研究課題名（英文） Study on Application of H/V Spectral Ratio to Buildings  
 研究代表者  
 野路 利幸（NOJI TOSHIYUKI）  
 福井工業大学・工学部・教授  
 研究者番号：70387398

研究成果の概要（和文）：本研究は、簡便で精度よい建物の振動特性推定法の開発を目的とする。このため、中高層建築において微動測定および強風時振動測定を行った。また、1自由度系ラーメン模型を用いて模型地盤および実地盤において微動測定を行った。これらの結果、地盤の卓越成分と建物の固有振動数が近接しない場合は、微動 H/V スペクトル比は建物の振動特性の推定に有効であることを示した。

研究成果の概要（英文）：The objective of this study is improvement of simple and highly accurate estimation method to obtain vibration characteristics of buildings. To achieve this objective, microtremor measurements were carried out in mid-to-high-rise buildings and SDOF frame model. As a result, it was showed that H/V spectra are effective in the estimation of vibration characteristics of buildings in case that predominant frequency of ground is not near to natural frequency of buildings.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,000,000	600,000	2,600,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学、建築構造・材料

キーワード：地震防災、常時微動、H/V スペクトル比

1. 研究開始当初の背景

(1) 実建物において固有振動数や減衰定数を的確に把握することは、設計値の確認という観点とともに、建物の経年劣化や大地震を受けた場合の損傷を評価する建物モニタリングの指標として、ますます重要になってきている。

(2) 建物の振動特性の把握法として、最も簡便な手法は常時微動測定による方法である。しかしながら、常時微動は種々のノイズの要

因により、季節、時間帯によって大きく変動する。また、建物の振動特性を精度よく把握するためには、一般に地盤と建物上部を同時測定し、その間のスペクトルの比をとることが必要である。したがって、建物上部1点の常時微動測定で、精度の高い波形解析結果が得られれば非常に有用である。

(3) 1点における微動測定では、近年地盤において、より精度の高い結果が得られるとして、微動 H/V スペクトル比が日本をはじめ諸外国

でも適用例が非常に増えている。この方法は、微動の水平成分と上下成分のスペクトルの比をとることにより、季節、時間帯によらず安定した結果が得られるとされている。

## 2. 研究の目的

(1) 本研究は、簡便でより精度の高い建物の振動特性推定法の開発を目的とする。  
 (2) 具体的には、種々の地盤における微動測定波形の速度フーリエスペクトル（以下、速度フーリエ）、フーリエスペクトル比（以下、スペクトル比）、H/V スペクトル比（以下、建物 H/V）の3つのスペクトルの比較検討から、建物 H/V の有効性とその限界を明らかにし、振動特性評価法の確立を図る。

## 3. 研究の方法

(1) 中高層学校建築の微動測定およびやや強風時振動測定

中高層学校建築を対象に、速度フーリエ、建物 H/V、スペクトル比の日変動、風速による変動を比較検討した。

測定対象とした建物は、福井市内に建つ地上 8 階建ての建物 1 と地上 16 階建ての建物 2 の2つの大学校舎である。測定は3台のポータブル振動計を用いて、建物および周辺地盤で加速度を測定した。サンプリング時間刻みは  $\Delta t=0.01$  秒、測定時間は、微動測定では 10 分間、強風時測定では 30 分間である。波形の解析条件は、解析個数  $N=4096$ 、 $0.2\text{Hz}$  Parzen ウィンドウで、解析は7波について行い、その平均をとった。

(2) 模擬地盤におけるラーメン模型の微動測定

1 自由度系ラーメン模型を用いて、おもに模擬地盤において微動測定を行い、スペクトル特性を比較検討した。

図 1 に実験概要図を示す。模型は鉄板と鋼ばねから成る 1 層 1 スパンのラーメンである。ラーメン模型の減衰機構には粘弾性体を使用し、( ) 内の減衰定数  $h$  を目安に① D1 ( $h=0.01$ )、② D2 ( $h=0.05$ )、③ D3 ( $h=0.10$ ) の3ケースを設定した。

また、地盤モデルは下記の4ケースを設定した。ここで、 $f_g$  は卓越振動数である。

- ① G1 (実地盤、 $f_g=0.6$ 、 $1.5\text{Hz}$ )
- ② G2 (8 階建ての 8F 長辺、 $f_g=2.1\text{Hz}$ )
- ③ G3 (16 階建ての 15F 長辺、 $f_g=1.2\text{Hz}$ )
- ④ G4 (4 階建ての 4F 長辺、 $f_g=3\sim 4\text{Hz}$ )

それぞれ G1 は実地盤であり、G2 はラーメン模型の固有振動数に比較的近接した地盤を、G3 はラーメン模型よりも長周期の地盤を、G4 はラーメン模型よりも短周期の地盤を模している。なお、実地盤の G1 は風の影響を受けて正常な測定結果が得られなかった。

実験は 6 台のサーボ型加速度計を地盤上 (GL)、ラーメン模型下部 (1F)、ラーメン模型上部 (RF) に設置し、自由振動試験および常時微動測定を行った。測定波形は加速度で、プリアンプ、AD 変換器を通してノートパソコンに記録した。サンプリング時間刻みは  $\Delta t=0.01$  秒、測定時間は 15 分である。実験実施時期は平成 22 年 9 月中旬であり、気温は  $28\sim 31^\circ\text{C}$  であった。

測定した常時微動の加速度波形を FFT 解析し、各スペクトルを求めた。解析条件は解析個数  $N=4096$ 、 $0.2\text{Hz}$  Parzen ウィンドウで、解析は 8 波について行い、その平均をとった。

(3) 実地盤におけるラーメン模型の微動測定  
 前項で示したラーメン模型を用いて、実地盤において微動測定を行い、スペクトル特性を検討した。写真 1 に実験状況を示す。

減衰機構は前項と同じで、D1、D2、D3 の3ケースを設定した。ただし、土埃や温度の影響で、測定時の減衰定数は目標よりも小さく、かつ、かなりばらつきを生じた。実験方法も前項とほぼ同一であるが、微動の測定時間は 10 分間とした。実験実施時期は平成 23 年 8 月～9 月であり、かなり高温の時期であった。なお、風の影響を受けないように、ラーメン模型はベニヤ合板の角型の箱で覆った。実験実施時期の箱内の温度は  $32\sim 47^\circ\text{C}$  であった。解析方法も前項とほぼ同じであるが、解析は 7 波について行い、その平均をとった。

地盤は、福井市内における過去の常時微動測定結果をもとに、市内平野部 (FUT、YSN、NSN、MNT1、MNT2) および山際部 (SMK、SMM) の7地点とした。平野部の表層地盤の卓越振動数  $f_g$  は  $1.4\sim 1.7\text{Hz}$  であり、ラーメン模型の固有振動数に比較的近接している。他方、

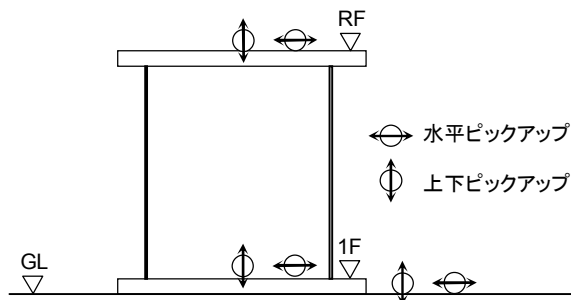


図 1 実験概要図



写真 1 実験状況

山際部の卓越振動数は4~5Hzであり、ラーメン模型の固有振動数よりもかなり高い。

なお、信号成分が小さいことによるSN比の悪さや土埃の付着による減衰機構の不安定さにより、山際部のSMK、SMMの測定は不調であった。したがって、解析結果は平野部の5地点について述べる。

#### 4. 研究成果

##### (1) 中高層学校建築の微動スペクトル特性

##### ① 微動スペクトルの日変動

図2に24時間測定(6時間おき)におけるスペクトル解析結果の例として、建物1長辺の8Fの速度フーリエおよび建物H/V、8F/GLのスペクトル比の日変動を示す。速度フーリエは時間によって変動し、日中(12、18時)で大きな振幅となる。他方、建物H/V、スペクトル比は時間的変動が少なく、特にスペクトル比は安定している。スペクトル比における1次振動数成分のピーク(以下、1次ピーク)は2.1Hzである。

図3に建物1長辺の24時間測定における、6時の値で基準化した1次ピークの高さの比 $A_1$ および1次振動数 $f_1$ の日変動を示す。1次ピークの高さは、速度フーリエでは時間に伴う変動があるのに対して、建物H/Vおよびスペクトル比では時間による変動幅は小さくほぼ一定である。他方、1次振動数は時間による変動はあまりない。ただし、スペクトル比では速度フーリエ、建物H/Vよりも高めの値を示す。これは地盤あるいは周辺建物の振動特性の影響とも考えられるが、今後の検討課題である。

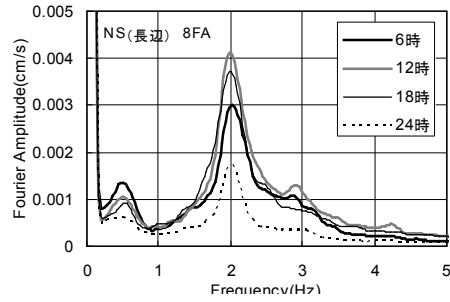
1次ピークの高さおよび1次振動数における以上の傾向は、建物1の短辺および建物2においても同様であった。なお、過去の測定結果を参照すると、両建物とも1次振動数は測定期日によって数%の違いがある。

以上の結果から、1次振動数は各スペクトルとも時間による変動はほとんどないこと、1次ピークは速度フーリエは時間によって変動するが、建物H/V、スペクトル比では変動が小さいことが明らかになった。

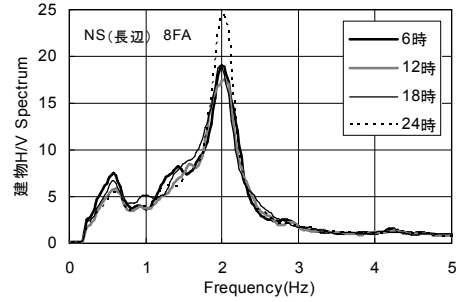
##### ② 風速によるスペクトル変動

図4にやや強風時の測定結果の例として、建物2短辺における15Fの速度フーリエおよび建物H/V、15F/GLのスペクトル比を示す。ここで、凡例の数値は、例えば090908は2009年9月8日を、(1)、(2)は測定時刻の違いを表している。強風時の10分間平均風速は6.9~7.3m/s、風向は南または北が主である(福井地方气象台による)。ここではこの測定を「やや強風時」測定と称する。

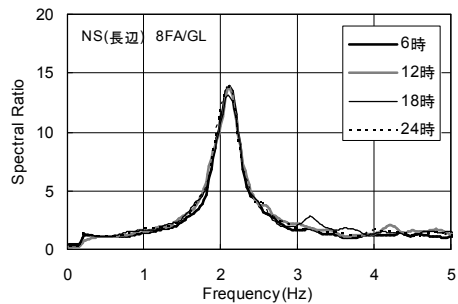
090911(6時)は平均風速が約2m/sであり、これを通常時とする。速度フーリエでは、通常時に比べてやや強風時は大きな振幅となる。建物H/V、スペクトル比も速度フーリエ



(1) 速度フーリエスペクトル

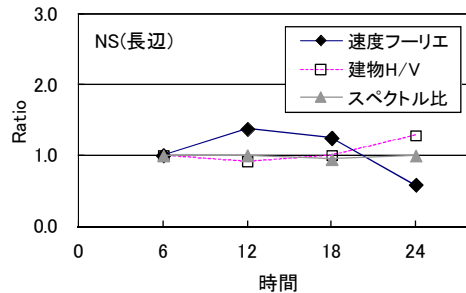


(2) 建物H/Vスペクトル比

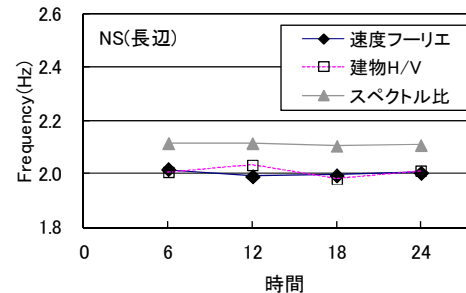


(3) スペクトル比

図2 24時間測定結果(建物1長辺)



(1) 1次ピークの高さ  $A_1$



(2) 1次振動数  $f_1$

図3 24時間測定の変動(建物1長辺)

ほどではないが、振幅が大きくなる傾向にあり、ばらつきもやや大きくなる。1次振動数成分のピークは1.0Hzである。

図5に風速の違いによる1次ピークの高さ $A_1$ 、1次振動数 $f_1$ の変動の例として、建物2短辺の結果を示す。1次ピークの高さは各スペクトルの24時間測定における平均値で基準化したものである。

風速の違いによる各スペクトルの特徴は以下のとおりである。速度フーリエでは短辺(NS)、長辺(EW)とも風速の増加に伴ってピーク振幅が大きくなる。建物1では風方向・風直角方向で大きな差は認められなかったが、建物2では風方向である短辺で顕著であった。建物H/V、スペクトル比は、建物1ではばらつきはあるが、ほぼ一定であったのに対し、建物2では風速の増加に伴ってやや大きくなる傾向を示した。1次振動数は建物1では風速の増加による変化は顕著に認められなかったが、建物2では風速の増加に伴ってわずかに低下する傾向がみられた。

以上より、ピーク振幅は、速度フーリエでは風速の違いによって大きく変動するが、建物H/Vでは比較的変動が小さいという結果が得られた。

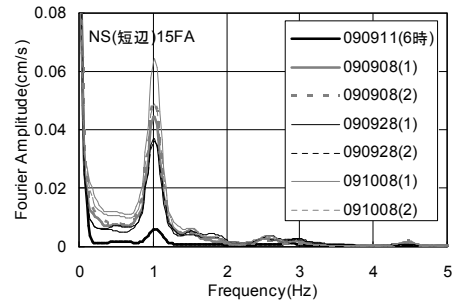
(2) 模擬地盤におけるラーメン模型の微動スペクトル特性

#### ① 微動スペクトル特性

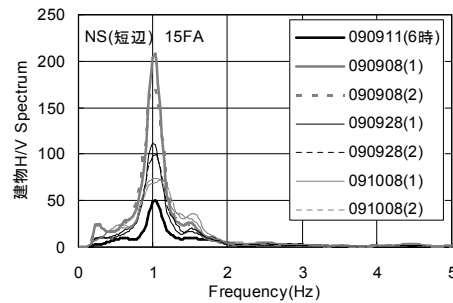
図6に微動測定結果のスペクトルの例として、地盤ケースG3の場合のRFの速度フーリエおよび建物H/V、RF/GLのスペクトル比を示す。スペクトル比はラーメン模型の卓越成分の特性のみを表しており、どの地盤ケースでもほぼ一定である。他方、速度フーリエおよび建物H/Vは地盤の卓越成分の影響を受け、2つのピークを示す。また、減衰が大きくなると、ラーメン模型の卓越振動数が高振動数側にずれるとともに、スペクトルのピーク高さが低くなることわかる。

図7に地盤ケースG3について、減衰定数とラーメン模型の卓越振動数およびスペクトルピーク高さの関係を示す。地盤の卓越振動数がラーメン模型の固有振動数よりも低いG3では、固有振動数は減衰定数に比例して増加し、各スペクトルから得られる値はほぼ同一である。ピーク高さは減衰定数に反比例し、スペクトル比とH/V比はほぼ一定の関係にある。この関係は、地盤の卓越振動数がラーメン模型の固有振動数よりも高いG4でも同一の傾向を示す。他方、地盤の卓越振動数とラーメン模型の固有振動数が近接している地盤ケースG2では、速度フーリエおよび建物H/Vの卓越振動数はスペクトル比によるものとは異なり、地盤の影響が顕著となる。また、ピーク高さは地盤とラーメン模型との共振により、スペクトル比と大きく乖離する。

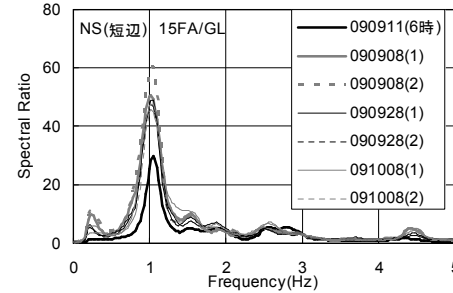
#### ② 建物H/Vピーク高さの特性



(1) 速度フーリエスペクトル

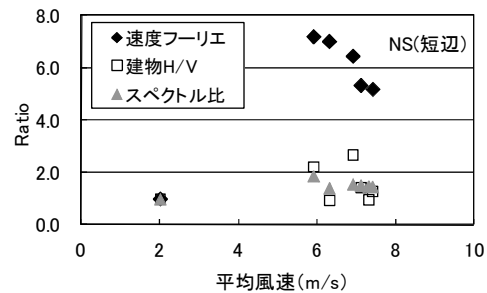


(2) 建物H/Vスペクトル比

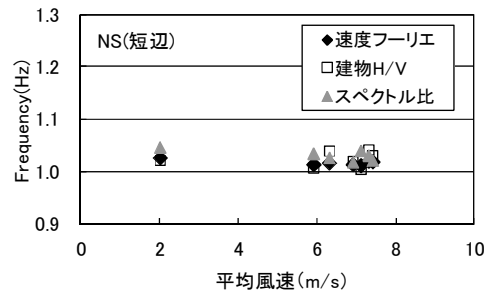


(3) スペクトル比

図4 やや強風時測定結果 (建物2 短辺)



(1) 1次ピークの高さ  $A_1$



(2) 1次振動数  $f_1$

図5 やや強風時測定の変動 (建物2 短辺)

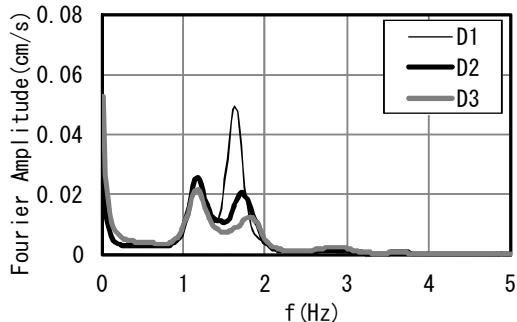
図8にスペクトル比ピーク高さ ( $A_{SP}$ ) - 建物 H/V ピーク高さ ( $A_{HV}$ ) 関係を示す。地盤の卓越振動数とラーメン模型の固有振動数が離れている地盤ケース G3、G4 では両者はほぼ直線関係にあり、それぞれ  $A_{HV}=1.54A_{SP}$ 、 $A_{HV}=1.29A_{SP}$  で近似される。他方、地盤の卓越振動数とラーメン模型の固有振動数が近接している地盤ケース G2 では、共振によって建物 H/V ピーク高さは過大になる。

以上より、地盤の卓越振動数とラーメン模型の固有振動数が近接していない場合には、建物 H/V ピーク高さからスペクトル比ピーク高さを推定できる可能性があると考えられる。

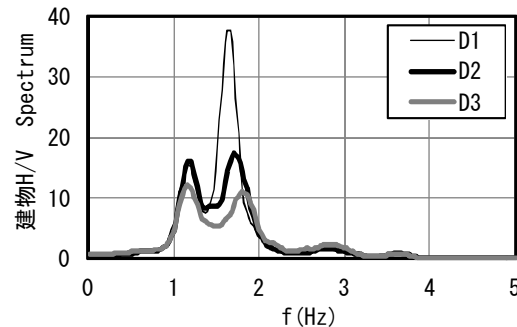
(3) 実地盤におけるラーメン模型の微動スペクトル特性

①微動スペクトル特性

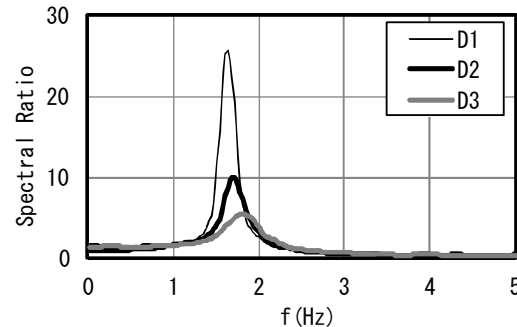
スペクトル比がラーメン模型の応答特性を表すのに対し、速度フーリエおよび建物 H/V は地盤の影響を受けた応答特性である。地盤ケース FUT、NSN、MNT1 は、地盤の卓越振動数とラーメン模型の固有振動数が離れ



(1) 速度フーリエスペクトル



(2) 建物 H/V スペクトル比



(3) スペクトル比 (RF/GL)

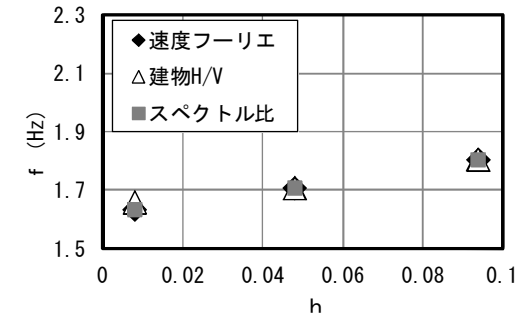
図6 スペクトル特性 (G3)

ている、あるいは、地盤 H/V が明確な卓越成分を示さない場合である。これらのケースでは、速度フーリエおよび建物 H/V はスペクトル比と比較的相似のスペクトル形状を示す。

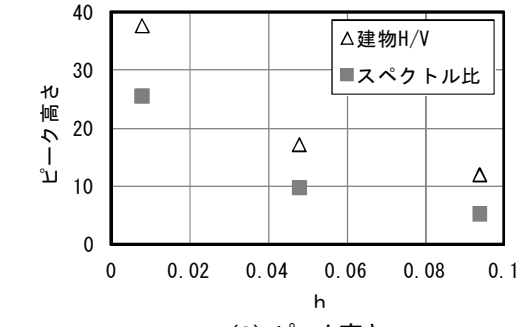
他方、地盤の卓越振動数がラーメン模型の固有振動数に近接している YSN、MNT2 では、計測時間の違いによって変動があるが、速度フーリエおよび建物 H/V はスペクトル比と相似の形状を示さない。

図9に地盤ケース YSN について、減衰定数とラーメン模型の卓越振動数およびスペクトルピーク高さの関係を示す。卓越振動数は減衰が増すにつれて漸増し、若干ばらつきはあるが、各スペクトル間で有意な差は見られない。他方、ピーク高さは減衰が増すにつれて反比例して低くなる傾向を示し、スペクトル比と大きく乖離する。

以上の結果から、地盤の卓越振動数と建物の固有振動数が近接していない場合は、建物 H/V は建物の振動特性の推定に有効であると考えられる。他方、両者が近接して共振状態



(1) 卓越振動数



(2) ピーク高さ

図7 ラーメン模型の卓越振動数とピーク高さ (G3)

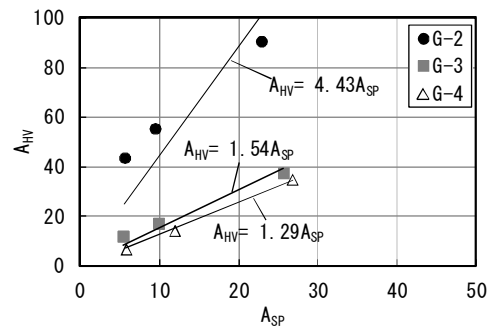
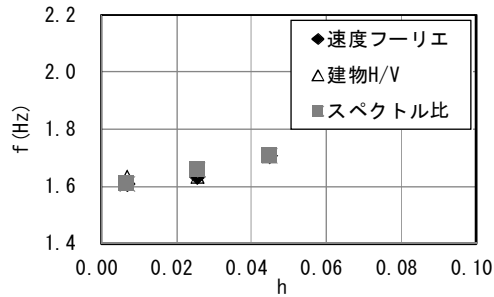


図8  $A_{SP}$ - $A_{HV}$  関係

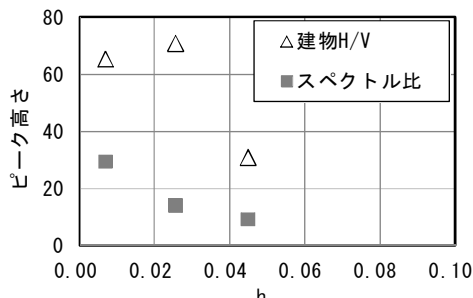
となる場合は、適用に注意する必要がある。

②建物 H/V ピーク高さの特性

図 10 にスペクトル比ピーク高さ ( $A_{SP}$ ) - 建物 H/V ピーク高さ ( $A_{HV}$ ) 関係を示す。地盤の卓越成分の影響を強く受けない FUT、NSN、MNT1 ではほぼ直線関係にあるのに対して、共振状態にある YSN、MNT2 では建物 H/V ピーク高さ  $A_{HV}$  は過大となる。以上の結果は地盤の卓越成分の影響を強く受けない、すなわち、地盤の卓越振動数と建物の固有振動数が離れている場合には、 $A_{HV}$  から  $A_{SP}$  を推定できることを示唆している。



(1) 卓越振動数



(2) ピーク高さ

図 9 スペクトルの卓越振動数とピーク高さ (YSN)

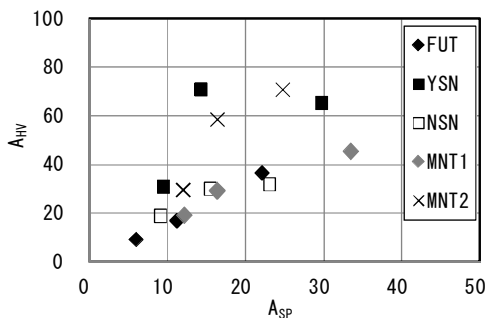


図 10  $A_{SP}$ - $A_{HV}$  関係

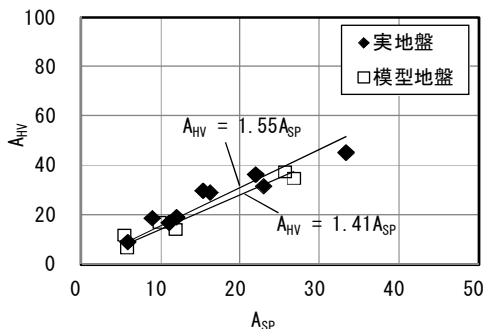


図 11  $A_{SP}$ - $A_{HV}$  関係 (実地盤と模型地盤の比較)

図 11 に地盤とラーメン模型が共振状態にない場合の実地盤 (FUT、NSN、MNT1) の  $A_{SP}$ - $A_{HV}$  関係と、(2)で述べた模擬地盤 (G3、G4) の  $A_{SP}$ - $A_{HV}$  関係を比較して示す。両者の関係は、実地盤においては  $A_{HV}=1.55A_{SP}$ 、模擬地盤においては  $A_{HV}=1.41A_{SP}$  で近似され、 $A_{HV}$  は  $A_{SP}$  の約 1.5 倍となる。このことから、建物 H/V は建物の減衰特性を推定できる可能性を有していると思われる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① 野路利幸、山岸邦彰、澤田義博、安井謙、常時微動測定にもとづく福井市の中高層学校建築の振動特性、福井工業大学紀要、査読有、第 40 号、2010、180-187

[学会発表] (計 5 件)

- ① 野路利幸、山岸邦彰、澤田義博、福井市の中高層学校建築の微動スペクトル特性、日本建築学会北陸支部研究報告集、2010、41-44
- ② 野路利幸、山岸邦彰、澤田義博、福井市の中高層学校建築の微動スペクトル特性、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2、2010、25-26
- ③ 野路利幸、山岸邦彰、澤田義博、ラーメン模型による建物の微動スペクトル特性に関する研究、日本建築学会北陸支部研究報告集、2011、107-110
- ④ 野路利幸、山岸邦彰、澤田義博、ラーメン模型による建物の微動スペクトル特性に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2、2011、381-382
- ⑤ 野路利幸、山岸邦彰、澤田義博、ラーメン模型による建物の微動スペクトル特性に関する研究 (その 2)、日本建築学会北陸支部研究報告集、2012

6. 研究組織

(1) 研究代表者

野路 利幸 (NOJI TOSHIYUKI)  
福井工業大学・工学部・教授  
研究者番号：70387398

(2) 研究分担者

山岸 邦彰 (YAMAGISHI KUNIAKI)  
金沢工業大学・建築・環境学部・准教授  
研究者番号：70553189

(3) 連携研究者

澤田 義博 (SAWADA YOSHIHIRO)  
地震予知総合研究振興会、地震防災調査研究部・部長  
研究者番号：90293662