

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

野路 利幸*・山岸 邦彰**・澤田 義博***・安井 譲****

Dynamic Characteristics of Mid-to-High-Rise School Buildings in Fukui City Based on Microtremor Measurements

Toshiyuki NOJI, Kuniaki YAMAGISHI, Yoshihiro SAWADA
and Yuzuru YASUI

Microtremor measurements were carried out in six school buildings in order to obtain dynamic characteristics of mid-to-high-rise buildings in Fukui City. As a result, the natural frequencies, the natural modes and the relationship between natural frequency of soil-structure-interaction system f and natural frequency of upper structure system f_0 of these buildings were obtained. The relationship between building height H and primary order natural period T was approximately $T=0.016H$.

Keywords: Microtremor measurement, school building, Fourier spectrum, spectral ratio

1. はじめに

建物の耐震性に関わる基本指標として、固有振動数や減衰定数は最も基本となる構造特性である。したがって、実建物においてこれ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、ますます重要になるものと考えられる。

実建物の振動特性把握に関しては、過去全国各地の多くの建物で固有振動数や減衰定数などの実測が行われてきた。振動特性の把握法は、強制振動試験、自由振動試験、常時微動測定などがあるが、最も簡便な常時微動測定によるものが多い。実測された結果は構造種別毎に統計的に分析されている^{1), 2)}。

他方、こうした実測は、福井県内では福井平野などにおいて地盤の振動特性把握を目的としたものは実施されているものの、建物については行われていない。このような背景から、筆者らは福井市内の主に低層の学校建築を対象に常時微動測定を実施し、固有振動数などの振動特性を把握するとともに、公共建物等の振動特性データベースを構築するためにデータ蓄積を行ってきている^{3)~5)}。本研究はこの一環として、福井市内の中高層の学校建築において常時微動測定を実施し、波形解析結果から建物の振動特性を把握するものである。

* 建築学科 ** 金沢工業大学 *** (財)地震予知総合研究振興会 **** 土木環境工学科

2. 微動測定概要および波形解析方法

2.1 測定対象建物

測定対象建物は、福井市内に建つ中層～高層の6つの学校校舎である。

建物Aは、鉄筋コンクリート造（以下、RC造）、地上5階・地下なし、軒高21.1mの事務・教室棟である。建物Bは、鉄骨鉄筋コンクリート造（以下、SRC造）・一部RC造、地上8階・地下1階、軒高30.0mの事務・会議室・教室棟である。8階床以下はエキスパンションジョイントを介して他の校舎とつながっている。建物Cは、SRC造、地上8階・地下1階、軒高32.0mの事務・図書館・教室棟である。8階床以下はエキスパンションジョイントを介して他の校舎とつながっている。建物Dは、SRC造・一部RC造、地上8階・地下なし、軒高29.6mの研究棟である。3階以下はエキスパンションジョイントを介して講堂棟とつながっている。建物Eは、RC造、地上6階・地下なし、軒高23.1mの教室棟である。屋上階までエキスパンションジョイントを介して他の校舎とつながっている。建物Fは、SRC造・一部RC造、地上16階・地下なし、軒高58.4mの教室・事務・会議室・研究棟である。8階床以下はエキスパンションジョイントを介して他の校舎とつながっている。以上の6つの建物は近接した敷地にあり、地盤条件は類似していると推定される。

2.2 微動測定方法

図1に測定概要図を、写真1、2に校舎内および地盤における測定状況を示す。測定は3台のポータブル振動計（GPL-6A3P）を用いて、建物および周辺地盤で加速度を測定した。測定成分は、短辺方向・長辺方向の水平2成分、鉛直1成分の計3成分である。測定ケースは、建物各階および地盤を対象とした「鉛直展開」と、上層階のねじれを対象とした「水平展開」とした。サンプリング時間は $\Delta t=0.01$ 秒、測定時間は原則として10分間である。各振動計はGPSによって同期をとった。

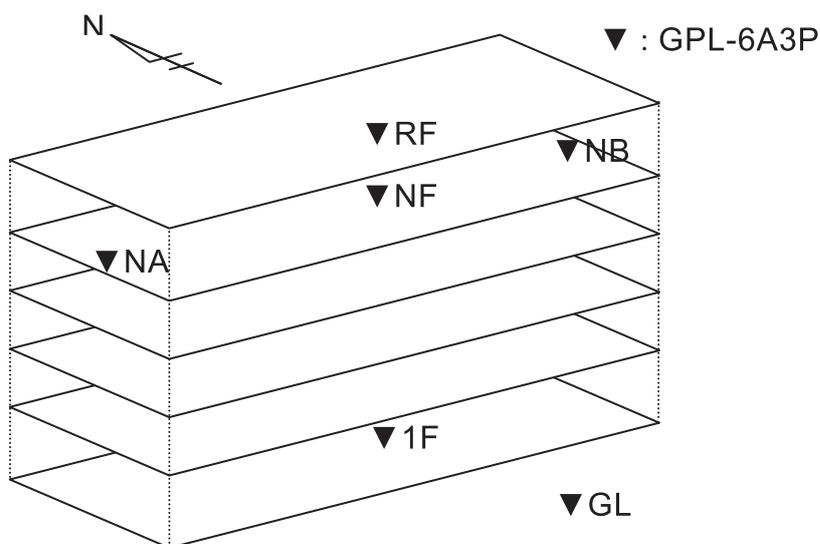


図1 測定概要図



写真1 測定状況（建物）



写真2 測定状況（地盤）

2.3 波形解析方法

測定した加速度波形のうちノイズ成分の少ない部分を FFT 解析し、建物各位置、地盤の速度フーリエスペクトル（以下、速度フーリエ）およびそれらの間のスペクトルの比（以下、スペクトル比）、上層階床の両端部における加速度波形の差分のフーリエスペクトル（以下、ねじれスペクトル）、上層階における水平／上下のフーリエスペクトル比（以下、建物 H/V スペクトル比）などを求めた。解析条件はデータ個数 $N=2048$ 、解析時間 $T=20.48$ 秒、バンド幅 0.2Hz の Parzen ウィンドウである。解析は 10～15 波について行い、その平均をとった。

3. 微動測定結果

3.1 各建物の振動特性

(1) 建物 A

図 2 に建物 A の RF/GL および RF/1F のスペクトル比、5 階床のねじれスペクトルを示す。ここで、スペクトル比において、RF/GL は「上部構造＋スウェイ＋ロッキング」から成る全体系の振動特性を表し、RF/1F はスウェイ成分を除いた「上部構造＋ロッキング」の振動特性を表す。ただし、長辺方向は一般に建物高さに比べて建物幅が大きいので、ロッキング成分は小さいと思われる。以後、前者から得られる固有振動数を全体系固有振動数 f 、後者から得られる固有振動数を上部構造系固有振動数 f_0 とする。また、先に述べたように上層階床の両端部における差分のフーリエスペクトルは建物のねじれ成分を表すため、ねじれスペクトルと称する。

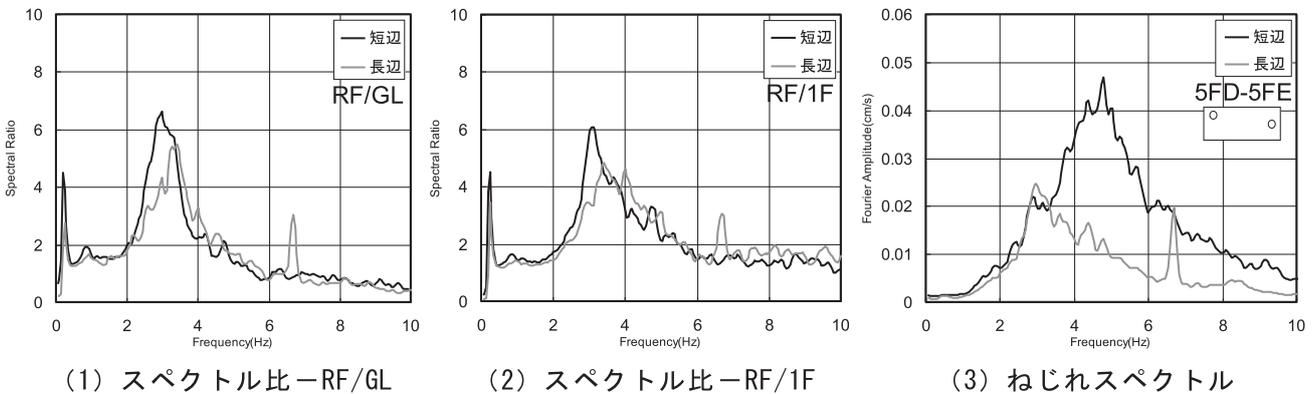


図 2 測定結果（建物 A）

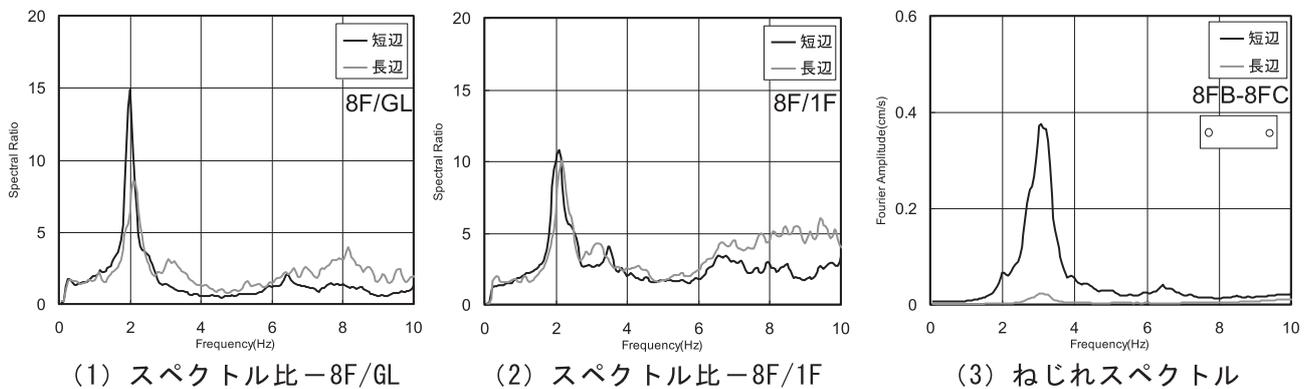


図 3 測定結果（建物 B）

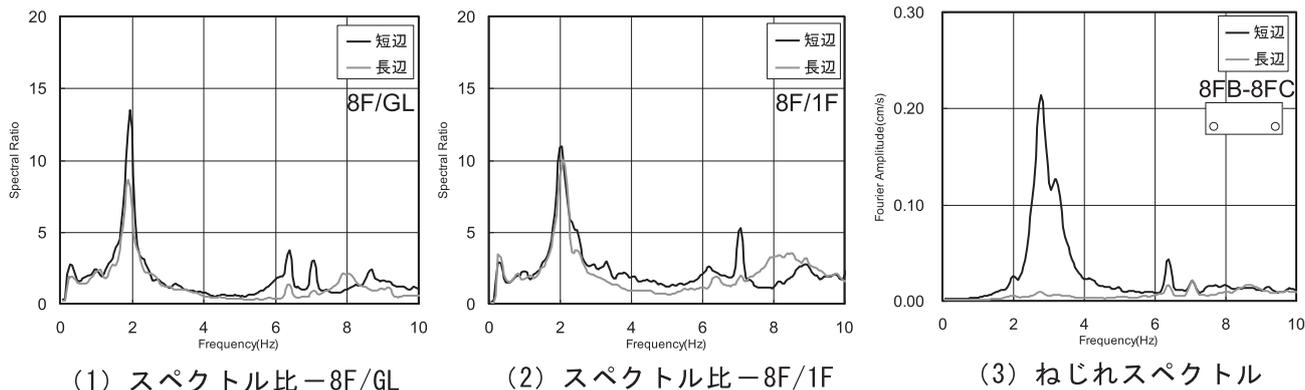


図4 測定結果 (建物C)

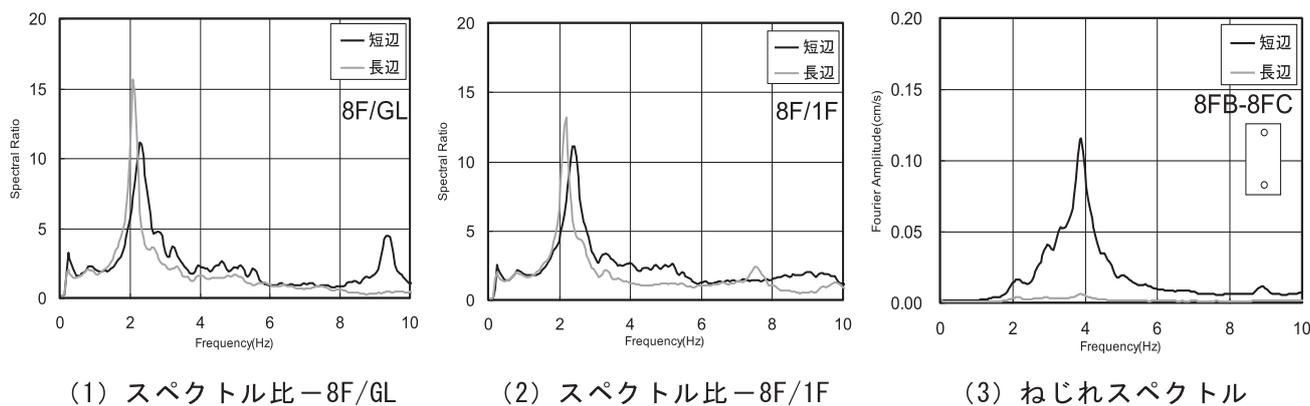


図5 測定結果 (建物D)

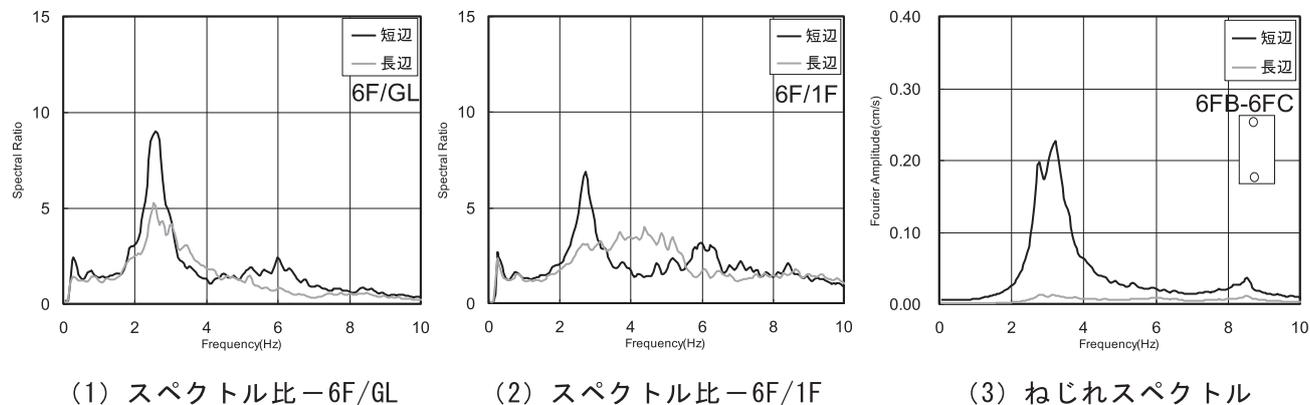


図6 測定結果 (建物E)

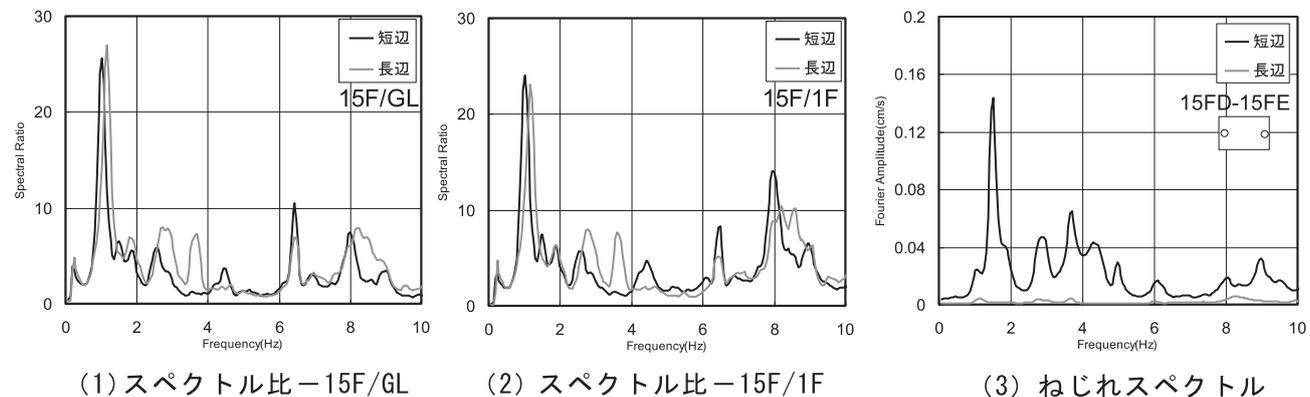


図7 測定結果 (建物F)

RF/GL では、短辺方向で 3.0Hz 付近に、長辺方向で 3.3Hz 付近にピークを示し、これらが全体系の 1 次固有振動数と推定される。RF/1F では、短辺方向で 3.1Hz に、長辺方向ではややピークの形は崩れているが 3.4Hz 付近にピークを示し、これらが上部構造系の 1 次固有振動数と思われる。ねじれスペクトルでは、短辺方向の差分で 4.8Hz 付近にピークを示し、ねじれ 1 次固有振動数と推定される。短辺、長辺、ねじれとも高次成分は明瞭に現れていない。

(2) 建物 B

図 3 に建物 B の波形解析結果を示す。8F/GL では、短辺方向で 2.0Hz 付近に、長辺方向で 2.1Hz 付近にシャープなピークを示し、これらが全体系の 1 次固有振動数と推定される。8F/1F では、短辺方向で 2.1Hz に、長辺方向では 2.2Hz 付近にピークを示した。本建物は地下 1 階を有しているが、測定の都合上 1 階床上で測定したため、この値は実際の上部構造系の 1 次固有振動数よりもやや高めになっているものと考えられる。しかし、ここではこの値を上部構造系の 1 次固有振動数とする。ねじれスペクトルでは、短辺方向の差分で 3.1Hz 付近にピークを示し、ねじれ 1 次固有振動数と推定される。なお、短辺、長辺とも 6Hz 強に 2 次成分と推定される小さなピークがあるが、明確ではない。

(3) 建物 C

図 4 に建物 C の波形解析結果を示す。8F/GL では、短辺方向で 1.95Hz 付近に、長辺方向で 1.9Hz 付近にシャープなピークを示し、これらが全体系の 1 次固有振動数と推定される。8F/1F では、短辺方向で 2.05Hz に、長辺方向では 2.2Hz 付近にピークを示した。本建物も建物 B と同様に地下 1 階を有しているが、測定の都合上 1 階床上で測定したため、この値は実際の上部構造系の 1 次固有振動数よりもやや高めになっているものと考えられる。ねじれスペクトルでは、短辺方向の差分で 2.8Hz 付近にピークを示し、ねじれ 1 次固有振動数と推定される。なお、短辺、長辺とも 6.3Hz 付近に 2 次成分と推定されるピークがある。

(4) 建物 D

図 5 に建物 D の波形解析結果を示す。8F/GL では、短辺方向で 2.3Hz 付近に、長辺方向で 2.1Hz 付近にシャープなピークを示し、これらが全体系の 1 次固有振動数と推定される。8F/1F では、短辺方向で 2.4Hz に、長辺方向では 2.2Hz 付近にピークを示し、これらが上部構造系の 1 次固有振動数と思われる。ねじれスペクトルでは、短辺方向の差分で 3.9Hz 付近にピークを示し、ねじれ 1 次固有振動数と推定される。なお、短辺、長辺、ねじれとも高次成分は明瞭に現れていない。

(5) 建物 E

図 6 に建物 E の波形解析結果を示す。6F/GL では、短辺・長辺方向とも 2.6Hz 付近にピークを示し、これらが全体系の 1 次固有振動数と推定される。6F/1F では、短辺方向で 2.8Hz 付近にピークを示し上部構造系の 1 次固有振動数と思われるが、長辺方向では明確なピークを示さない。これはエキスパンションジョイントを介して隣接する棟の影響を受けたためと考えられる。ねじれスペクトルでは、短辺方向の差分で 2 山のピークを示すが、ねじれ 1 次固有振動数は約 3.0Hz と推定される。なお、短辺、長辺、ねじれとも高次成分は明瞭に現れていない。

(6) 建物 F

図 7 に建物 F の波形解析結果を示す。15F/GL および 15F/1F のスペクトル比はほぼ同じ形状を示し、短辺・長辺とも高次までのピークが明確に認められる。また、短辺方向の差分でもいくつかのピークが明瞭に現れており、高次までのねじれ成分を示している。表 1 に図 7 から読み取った固有振動数を設計値と比較して示す。1 次固有振動数は、短辺、長辺、ねじれで、それぞれ 1.03、1.17、1.51Hz であり、短辺、長辺の実測値は設計値に比べて 2 割程度高い。これは微小振動状態では外壁等の 2 次部材の剛性が寄与しているためと推定される。

3.2 1 次固有振動数のまとめ

表 2 に 1 次固有振動数の一覧を、図 8 に全体系 1 次固有振動数 f と上部構造系 1 次固有振動数 f_0 の関係を示す。1 次固有振動数は、短辺方向では、全体系で 1.03~3.0Hz、上部構造系で 1.03~3.1Hz、 f/f_0 は 0.95~1.0 である。長辺方向では、全体系で 1.17~3.3Hz、上部構造系で 1.17~3.4Hz、 f/f_0 は 0.88~1.0 である。また、ねじれの 1 次振動数は 1.51~4.8Hz に分布している。

なお、減衰については、測定対象建物が建物 A 以外はエキスパンションジョイントを介して他の建物とつながっており、その干渉によって減衰を過大評価する可能性

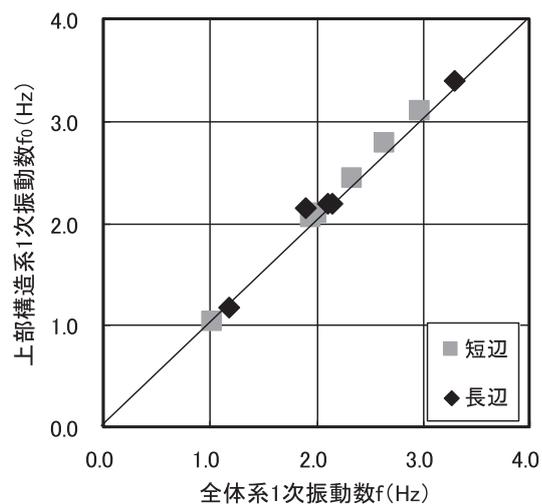


図 8 $f-f_0$ 関係

表 1 固有振動数 (建物 F)

方向	1次			2次	3次
	f(Hz)	f_0 (Hz)	f/f_0	f(Hz)	f(Hz)
短辺(NS)	1.03 (0.87)	1.03	1.0	2.59 (1.87)	4.5 (3.18)
長辺(EW)	1.17 (0.95)	1.17	1.0	2.88 (2.05)	4.7 (3.52)
ねじれ	1.51	-	-	3.71	5.0

注:()内は設計値

表 2 1 次固有振動数一覧

建物	短辺(NS)			長辺(EW)			ねじれ
	f(Hz)	f_0 (Hz)	f/f_0	f(Hz)	f_0 (Hz)	f/f_0	f(Hz)
建物A	3.0	3.1	0.97	3.3	3.4	0.97	4.8
建物B	2.00	2.10	0.95	2.14	2.20	0.97	3.08
建物C	1.95	2.05	0.95	1.90	2.15	0.88	2.78
建物D	2.34	2.44	0.96	2.10	2.20	0.95	3.91
建物E	2.64	2.78	0.95	約2.6	-	-	約3.0
建物F	1.03	1.03	1.0	1.17	1.17	1.0	1.51

注1) f: 全体系の1次固有振動数 f_0 : 上部構造系の1次固有振動数

注2) 建物C、Dの f_0 は、測定の都合上1階床での測定のためやや高い値となっている。

があるため、評価しなかった。

図9に軒高Hと1次固有振動数fの関係を示す。前者では軒高が高くなるにつれて1次固有振動数は双曲線状に小さくなる傾向にある。他方、後者では軒高が高くなるにつれて1次固有周期は大きくなる比例関係にあり、短辺では $T=0.0162H$ 、長辺では $T=0.0153H$ で近似される。この測定結果は、既往のRC系建物の回帰結果 $T=0.015H$ とほぼ整合する²⁾。

図11に軒高とスペクトル比における1次成分のピーク高さ A_{SP} の関係を示す。軒高が高くなるにつれて A_{SP} は高くなる傾向にあり、両者の関係は、短辺で $A_{SP}=0.42H$ 、長辺で $A_{SP}=0.39H$ で近似される。図12に軒高と建物H/Vスペクトル比における1次成分のピーク高さ A_{HV} の関係を示す。ばらつきは大きいですが、軒高が高くなるにつれて A_{HV} は高くなる傾向を示す。ただし、定量的に論じるには今後データを蓄積する必要がある。なお、建物H/Vスペクトル比の詳細については文献6)を参照されたい。

3.3 1次振動モード

図13に速度フーリエスペクトル振幅およびバンドパスフィルタ波形のピーク振幅から読み取った建物Dの1次振動モードを示す。バンドパスにおけるバンド幅は、1次振動数を中心に約1Hzとした。速度フーリエによるものとバンドパスフィルタ波形によるものは低層部ではやや違いが

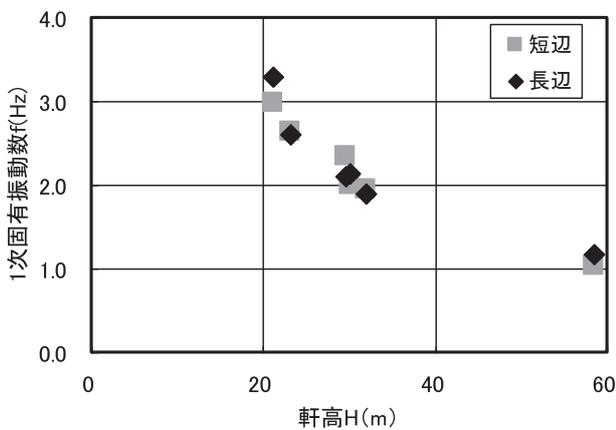


図9 軒高と1次固有振動数の関係

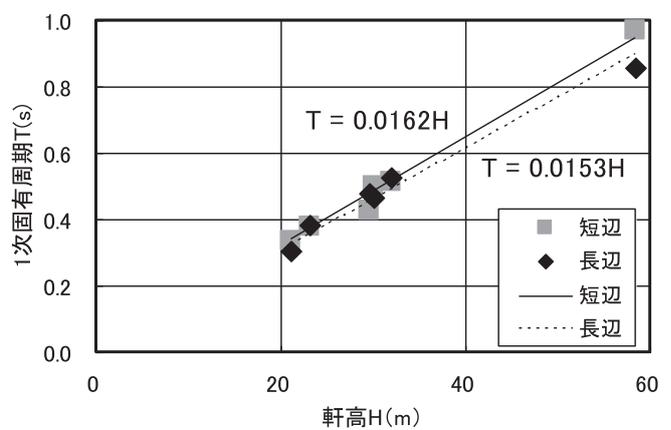


図10 軒高と1次固有周期の関係

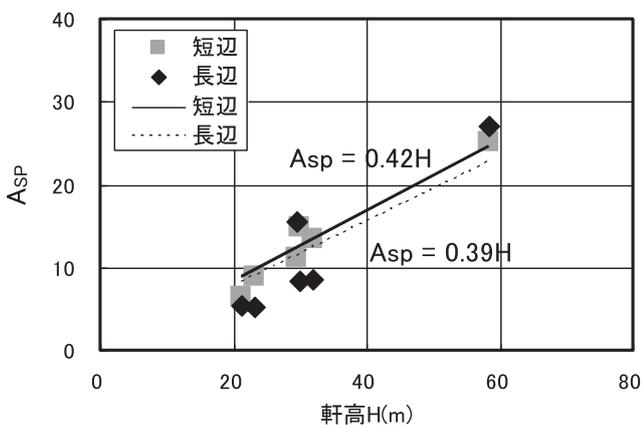


図11 軒高- A_{SP} の関係

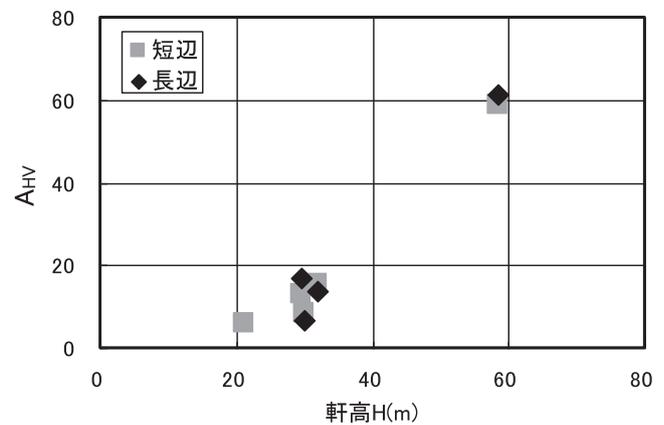


図12 軒高- A_{HV} の関係

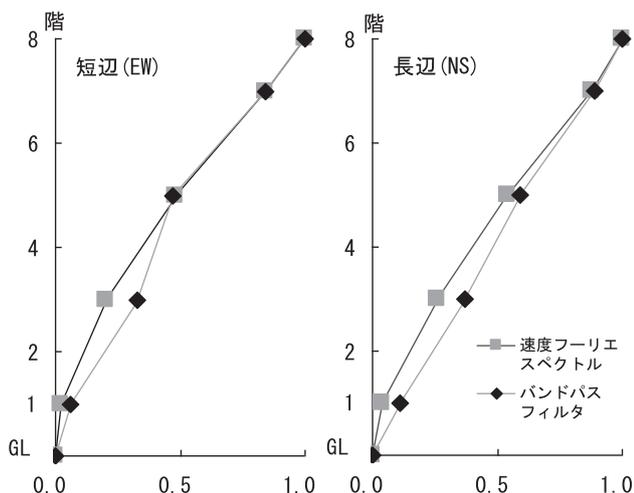


図 13 1次振動モード（建物 D）

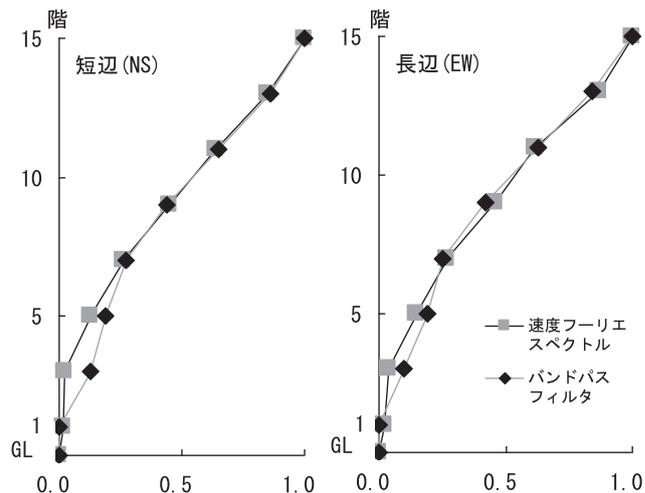


図 14 1次振動モード（建物 F）

あるが全体的には類似している。1次振動モードは、短辺方向ではやや曲げ型の傾向を示すのに対し長辺方向では直線状である。また、図 14 に建物 F の 1次振動モードを示す。短辺、長辺ともやや曲げ型の振動モードを示す。

4. むすび

実建物における振動特性の把握を目的に、福井市内の 6 つの中高層学校建築において常時微動測定を行った。微動波形の解析から、以下の知見を得た。

- (1) 各建物の全体系 1 次固有振動数、上部構造系 1 次固有振動数、ねじれ 1 次固有振動数を把握した。また、高層の建物 F については高次の固有振動数も明らかにした。
- (2) 軒高と 1 次固有周期の関係は $T \approx 0.016H$ で表され、既往の測定結果と整合する。
- (3) 軒高とスペクトル比の 1 次ピーク高さは $A_{SP} \approx 0.4H$ で近似される。
- (4) 建物 D と建物 F について 1 次振動モードを把握した。

謝辞

本研究にあたり、平成 21 年度福井工業大学建築学専攻卒研究生安藤圭介・小野慎介・小幡恭介の各氏から多大なご協力をいただきました。また、本研究は、一部平成 21 年度科学研究補助金基盤研究 (C) によって実施しました。ここに記して深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：構造物の振動実験、1978 年、2) 日本建築学会：構造物の減衰、2000 年、3) 野路他：常時微動測定にもとづく福井市の学校建築の振動特性、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2、pp.227-228、2006 年 9 月、4) 野路他：常時微動測定にもとづく福井市の学校建築の振動特性（その 2）、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2、pp.593-594、2007 年 8 月、5) 野路他：常時微動測定にもとづく福井市の学校建築の振動特性（その 3）、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2、pp.561-562、2009 年 8 月、6) 野路他：微動 H/V スペクトル比の建築物への適用性、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2、pp.151-152、2008 年 9 月

(平成 22 年 3 月 31 日受理)