

報告 常時微動・強震記録を用いたRC造建築物の振動特性評価法の検討

中村 友紀子^{*1}・飯塚 豪彦^{*2}・清水 秀則^{*2}・山田 雅行^{*3}

要旨：鉄筋コンクリート造 5 階建て学校建物内において強震観測を実施してきた。また、常時微動の観測、人力加振による建物の振動観測などを実施しており、それらの記録から建物固有周期、減衰定数などを求めた。また、一箇所の観測による建物固有周期同定の可能性として H/V スペクトルを用いて、既往の手法による上部と下部、または地表の記録との伝達関数によるものと比較した。この手法の妥当性を検討するために強震観測を実施している建物の外に 7 棟の建物においても常時微動測定を実施した。今回実施した建物では概ね近い周期となった。

キーワード：鉄筋コンクリート構造、強震観測、微動観測、固有周期

1. はじめに

建築物の振動特性、とくに固有周期を把握するために、建物内において観測した常時微動や地震観測記録をもちいた事例は多くある。観測記録から、建物の耐震健全性を評価するヘルスマonitoringの手法も検討されつつある。筆者らは、5 階建て鉄筋コンクリート造校舎において、屋上階と一階での強震観測を継続しており、2004 年新潟県中越地震、2007 年新潟県中越沖地震を含む約 60 個の地震での記録を得た¹⁾。その後、2008 年には、隣接する地表にも観測点を設置し、その後 4 個の小地震を観測した。一方、常時微動観測も実施してきた²⁾。本論では、それらの記録から得た建物振動特性、具体的には、固有周期と地震記録の大きさとの関係、ランニングスペクトルを用いた建築物の固有周期の変動、そして減衰定数などを検討した。

次に、建物上部の記録の水平成分フーリエスペクトルを鉛直成分のフーリエスペクトルで除したスペクトル比である H/V スペクトルも算定した。地盤震動特性の評価方法として常時微動観測記録を用いる場合、H/V スペクトルによる方法がある。この手法は単点での観測で評価できるため多く実施されている。建物についても H/V スペクトルにより振動特性が推定できるとすると、最上階一箇所でのセンサー設置で記録が得られることになり、地震によって被災した場合に、最上階一か所のセンサーにより地震後の常時微動を観測し、その記録から求めた固有周期を地震前のものと比較することで剛性の変化、損傷の程度を推定できることになる。

一般に建物の固有周期を推定する際には、一階もしくは地表の記録と建物上部の記録の伝達関数より推定している。このためには最小で 2 箇所のセンサーが必要と

なる。また、H/V スペクトルの建築物への適用性について述べた既往の研究³⁾では、H/V スペクトルの建物上部と下部の比である H/V の伝達関数を用いて検討しているが、その物理的意味については言及されていない。本論では、後述の既往の研究⁴⁾に基づく H/V スペクトルの解釈を念頭において、建物上部の一か所の観測による建物振動特性の把握の為の試みとして、建物上部の H/V スペクトルのピーク周期と従来の建物上部と下部のフーリエスペクトル比の伝達関数から読み取れる固有周期とを比較した。

建物を対象として H/V スペクトルで振動特性を把握することに理論的解釈は別途検討が必要であるが、地盤工学分野においては、地盤の H/V スペクトルに関して、実体波によるものか表面波によるものかなどいくつかの考え方があり、本研究では、建物の H/V スペクトルの理論解釈には今後の検討が必要であるが、既往の研究⁴⁾の結果を参考に建物の固有周期の推定に適用できると仮定し、その可能性を検討した。

また、H/V スペクトルに関しては強震観測を実施している建物以外の 5 棟の鉄筋コンクリート造および 2 棟の鉄骨鉄筋コンクリート造校舎においても常時微動観測を実施して、地表、一階に対する屋上階の震動の伝達関数を求めると同時に屋上階の記録の H/V スペクトルを用いた固有周期の同定を試みた。

2. 対象建物

対象建物は、新潟大学自然科学研究科環境生命棟と新潟大学自然科学研究科情報理工棟、新潟大学工学部 A 棟、A2 棟、B 棟、C 棟、C2 棟、E 棟である。以降、棟名のみで記載する。環境生命棟は地上 7 階建て SRC 造、情報理

*1 千葉大学大学院工学研究科 准教授 博(工) (正会員)

*2 新潟大学大学院自然科学研究科 大学院生

*3 株式会社ニュージェック 技術開発グループ

工棟は地上8階建てSRC造である。工学部A2棟は地下1階、地上5階建て、A棟、B棟、C棟、E棟は地上5階建て、C2棟は地上4階建てである。工学部棟は全てRC造である。図-1に周辺地図を示す。□部分が地表観測地点となっている。

E棟は1982年12月竣工の地上5階建て、杭基礎、桁行(以下EW)19.8m、梁間(以下NS)14.8mのほぼ整形な鉄筋コンクリート造建物で、隣接する校舎とはエキスパンションジョイントで区切られている。2001年から1階の図書室内と屋上階のペントハウス床にアカシ社GPL-6A3P(以後、地震計)を設置、対象建物と隣接している実験棟横の地表上に2008年から地震計を設置し継続的に地震観測を行っている。建築棟・実験棟1階天井伏図および地震計設置位置を図-2に示す。1階は○、屋上階は△、地表上の設置位置を□で表した。

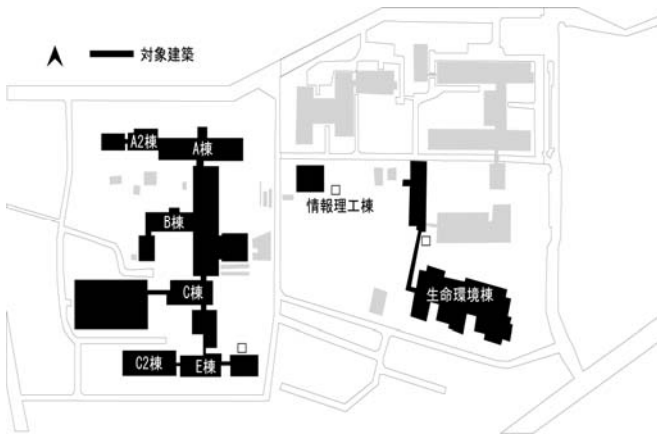


図-1 新潟大学自然科学研究科周辺地図

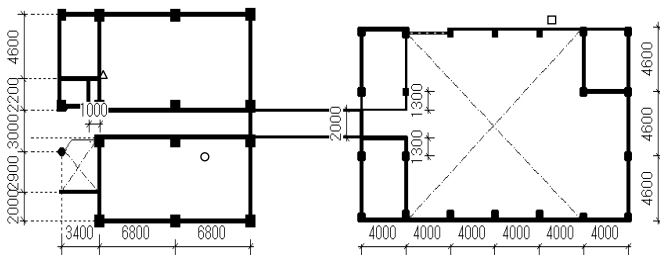


図-2 建築棟・実験棟1階天井伏図と地震計設置位置

3. 地震動観測記録から求める建物周期の検討

2004年中越地震、2007年能登半島地震、2007年中越沖地震、そして2010年4月16日と5月10日に観測された地震の加速度時刻歴データを用いて解析を行った。固有周期を同定するために、伝達関数を算定する。地震動に対してFFT(高速フーリエ変換)を行い、バンド幅はそれぞれ0.6HzのParzenウィンドウを施し周波数領域で平滑化した⁵⁾。

図-3に地震計を設置して以降、観測された地震と固有周期の相関図を示す。固有周期は各地震の全時間帯のフーリエスペクトルについて1階に対する屋上階の比

率がピークとなる周期を読み取ったものである。図中にはそれぞれNS、EW方向の近似曲線とその式を示すが、多くの観測事例と同様に加速度が大きくなる程、周期が伸びる傾向があるが非常に相関は低く、特に小地震ではばらつきが大きい。

図-4に2010年4月16日観測の記録について加速度時刻歴波形と各時刻での固有周期を示す。時刻歴波形のうち解析対象時間を10.24秒として、2.56秒づつ移動したランニングスペクトルから読み取った固有周期を示している。この地震では1階・地表ともに記録が得られた為、頂部のスペクトルの1階に対する比から求めた周期(RF/GL)、地表のスペクトルに対する比から読み取った周期(RF/FL)の双方の周期を示した。時刻105秒、150秒付近でRF/GLから読み取ったピーク周期が、他の時刻に比べて短く、RF/FLから読み取った周期に近くなっているが、0.3秒付近でもピークはみられた。初期微動時は安定している固有周期も主要動の付近では固有

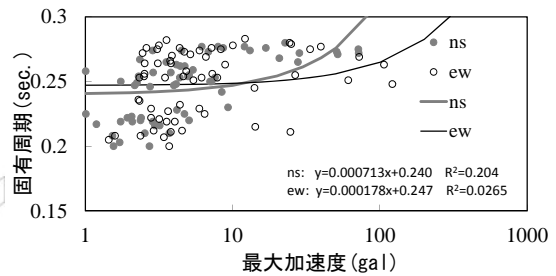


図-3 固有周期と最大加速度の関係

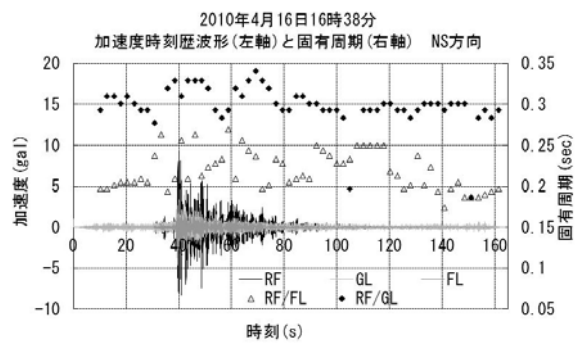


図-4 加速度時刻歴波形と固有周期

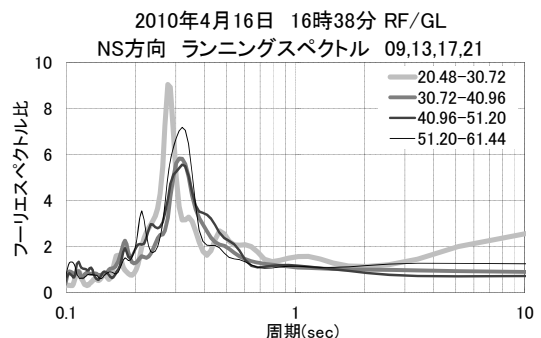


図-5 2010年4月16日の地震記録の伝達関数

周期が伸びている。そして主要動が収まるにつれて固有周期はばらつくようになり、主要動が終わると再び最初の固有周期に戻っている。図 - 5 に RF/GL の伝達関数のランニングスペクトルを示す。解析対象時間を 10.24 秒間として、開始時刻を 10.24 秒ずつ移動した。主要動時（時刻 40 秒前後）は伸びる傾向が読み取れる。

4. 減衰定数

減衰定数は $1/\sqrt{2}$ 法によって算定した。2004 年中越地震、2007 年能登半島地震、2007 年中越沖地震の余震を含めた 7 つの地震波を用いた。常時微動は 2009 年 9 月 16 日と 2010 年 1 月 6 日のデータを使用した。中越地震と中越沖地震と能登半島地震で観測した地震波を 20.48 秒間隔で分割し、主要動を除いた 30 個の分割記録を用い、フーリエ変換しフーリエスペクトルを求めた。分割した地震記録はフーリエ変換を行い 0.6Hz のバンド幅で平滑化して RF/FL を求めた。その伝達関数から $1/\sqrt{2}$ 法により減衰定数を算定した。結果を図 - 6 に示す。また図 - 7 では屋上階で観測した最大加速度と減衰定数の結果を示す。図 - 6 では NS 方向では強震記録と常時微動に大きな開きが見られるが EW 方向では見られない。図 - 7 では屋上階の最大加速度と減衰定数の関係は加速度と減衰定数では相関はほとんどない。

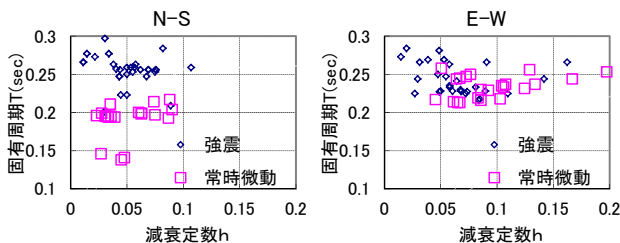


図 - 6 減衰定数と固有周期の相関図

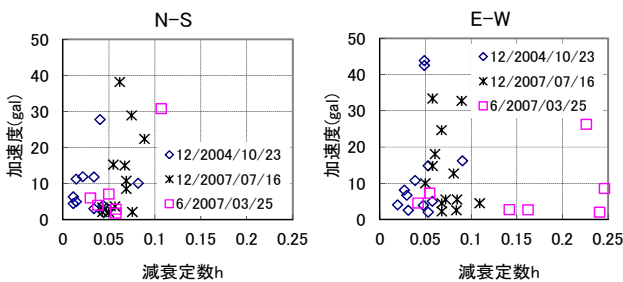


図 - 7 屋上階最大加速度と減衰定数

5. H/V スペクトルと伝達関数

5.1 測定方法及び解析概要

環境生命棟、情報理工棟は 2010 年 11 月 30 日、工学部 A 棟、A2 棟、B 棟、C 棟、C2 棟は 2010 年 12 月 4 日に観測を実施した。地表と 1 階、屋上階にて地震計の感度を 200 倍に上げ、微動観測時間を 13 分 30 秒とし、微動

観測を実施した。サンプリング周波数は 100Hz である。なお、A2 棟に関しては地下 1 階に地震計を設置して観測した。

工学部各棟は同一地表面上にあると仮定し、実験棟の加速度計を各棟における地表の観測に使用して 3 台同時に観測した。環境生命棟、情報理工棟については屋上階と 1 階、屋上階と地表と 2 台で 2 回に分けて観測した。

微動観測を同時に観測させるために加速度計それぞれで GPS にて時刻補正を行い、同時刻に観測開始となるようにして観測した。

また、E 棟では 1 ヶ月に 2 回、定期的に微動観測を行った。本年度では 2010 年 6 月から 11 月まで上記と同様の手法により観測を行い、観測データを解析に用いた。

本年度では各棟で観測した加速度時刻歴波形を 40.96 秒ずつに区切り 19 個の記録を解析対象とした。

加速度時刻歴データを FFT 解析により、フーリエスペクトルの平均波形を求めた。この平均波形から大きく外れた波形を除いたものの平均をスペクトルとした。

FFT 解析時にはバンド幅 0.4Hz の Parzen ウィンドウを施し周波数領域で平滑化した。

2009 年度に実施した人力加振による振動についても同様とした。記録は静止中（自由振動時）のみを対象として、40.96 秒間の記録 7 個を使用した。

5.2 解析結果

1 階に対する屋上階のフーリエスペクトル比（以下、RF/FL）、地表に対する屋上階のフーリエスペクトル比（以下、RF/GL）の伝達関数を求めた。

図 - 8 に常時微動観測結果を、図 - 9 に人力加振時（文献 2）の伝達関数と H/V スペクトル波形を示す。

図 - 8 をみると H/V スペクトルのピーク周期は、多くで RF/GL の伝達関数と近い周期でピークを示しているが、1 月、10 月、11 月の記録では RF/FL の伝達関数のピークの周期との両方の周期でピークがある。新潟では秋から冬季にかけて常時微動振幅が大きくなる傾向がありフーリエスペクトル比と H/V スペクトルのピークも大きい時に、RF/GL のスペクトル比のピーク周期だけでなく、RF/FL のスペクトル比のピーク周期においても H/V スペクトルのピークが生じていると考えられる。図 - 9 の人力加振時での H/V スペクトルと RF/GL の波形は共に 0.27 秒付近で卓越している。また 0.1 秒付近の小さなピークも RF/GL と H/V スペクトルは同じ傾向を示している。

次に各建物における微動観測結果を図 - 10 に示す。

情報理工棟や環境生命棟の 7 階・8 階建ての建物は伝達関数と H/V スペクトルのピークが明瞭にあらわれている。情報理工棟では RF/GL と H/V スペクトルは 0.55 秒付近と近い結果を示した。これに対して、4~5 階建ての工学部棟のスペクトル比を見ると C2 棟や A 棟の伝達関

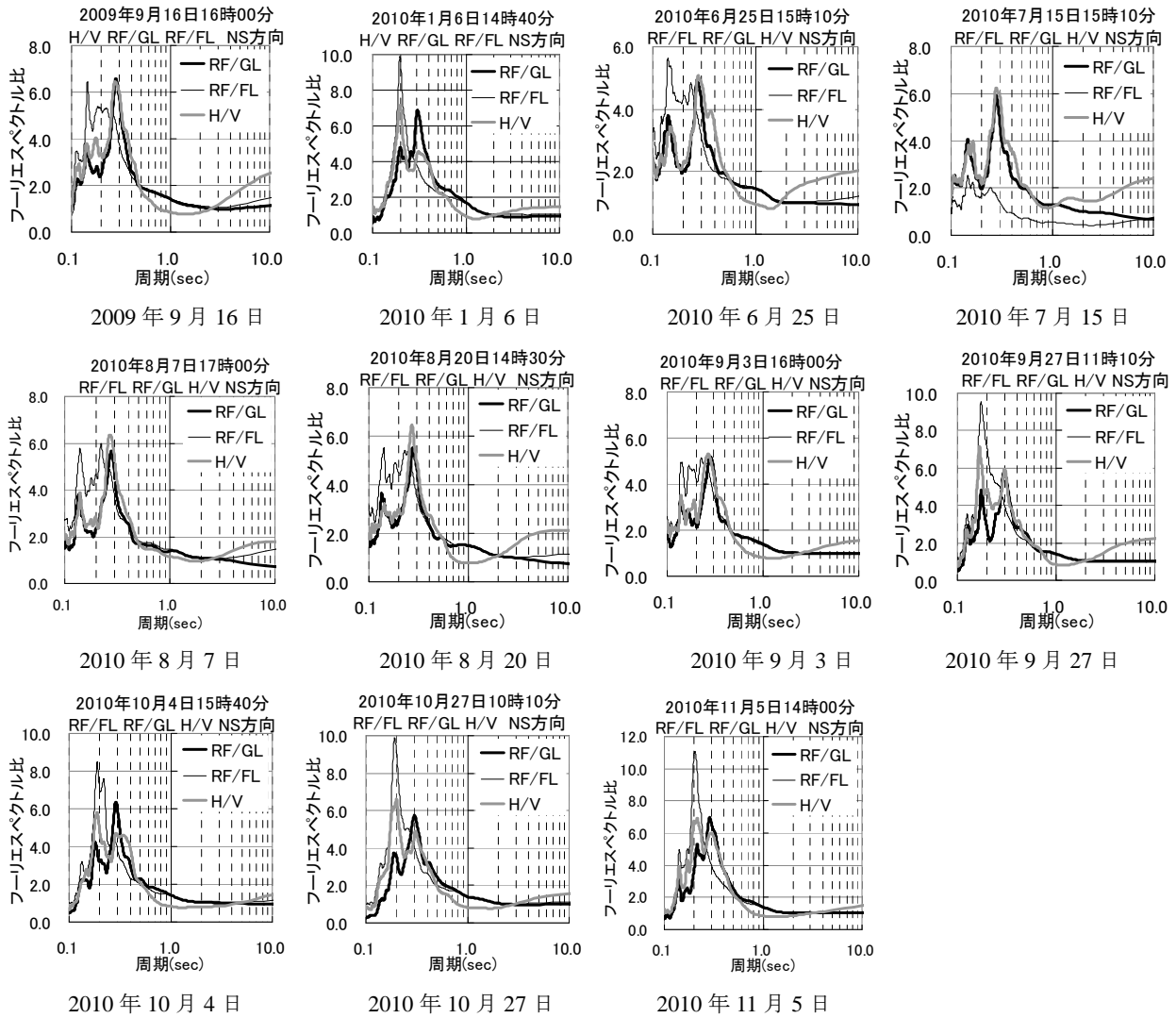


図 - 8 工学部E棟の微動観測結果 (2009年9月16日~2010年11月5日)

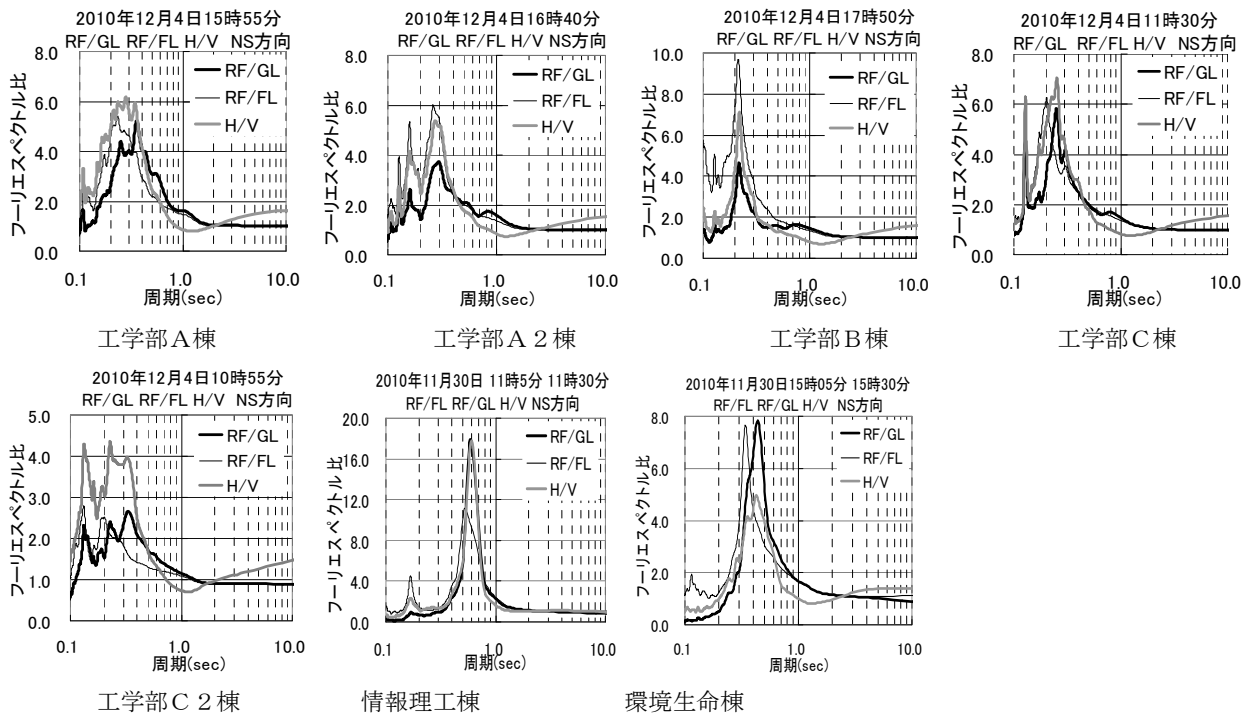


図 - 10 各建物での微動観測結果

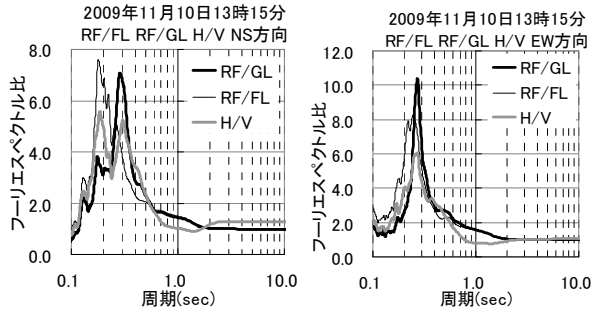


図 - 9 人力加振時の観測結果

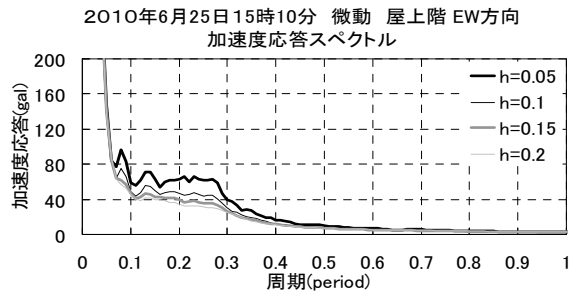


図 - 11 常時微動記録の加速度応答スペクトル

表 - 1 RF/GL と H/V (RF) の固有周期表 NS 方向

		NS				EW			
		RF/GL		H/V(RF)		RF/GL		H/V(RF)	
		最大	2番目	最大	2番目	最大	2番目	最大	2番目
情報理工棟	H22.11.30	0.436	/	0.427	/	0.369	0.488	0.369	0.512
環境生命棟		0.594	/	0.601	/	0.500	/	0.506	/
A棟	H23.12.4	0.23	0.133	0.325	0.228	0.225	/	0.224	/
A2棟		0.25	/	0.253	/	0.295	/	0.286	/
B棟		0.356	0.251	0.281	0.344	0.356	0.25	0.271	0.344
C棟		0.293	/	0.273	/	0.310	0.159	0.261	0.171
C2棟		0.217	/	0.219	/	0.281	/	0.251	/
E棟	H21.9.16	0.281	/	0.275	/	0.258	/	0.258	/
	H21.11.10	0.286	/	0.186	0.303	0.271	/	0.269	/
	H22.1.6	0.279	/	0.273	/	0.254	/	0.258	/
	H22.6.25	0.271	/	0.277	/	0.253	/	0.256	/
	H22.7.15	0.279	0.147	0.279	0.164	0.259	0.210	0.247	0.21
	H22.8.7	0.279	0.138	0.269	0.139	0.245	0.113	0.250	0.113
	H22.8.20	0.277	/	0.269	/	0.245	/	0.254	/
	H22.9.3	0.281	/	0.271	/	0.247	/	0.248	/
	H22.9.27	0.299	0.168	0.168	0.299	0.281	/	0.275	/
	H22.10.4	0.288	0.189	0.201	0.288	0.274	/	0.268	/
H22.10.27	0.300	0.19	0.199	0.304	0.284	/	0.279	/	
H22.11.5	0.288	0.203	0.200	0.299	0.279	/	0.273	/	

数と H/V スペクトルのピークは明瞭にあらわれていない。A2 棟は H/V スペクトルのピーク周期は RF/FL の方が RF/GL より近い値となっている。要因として傾斜地に建設されているため建物最下階が地下 1 階となっていることなどが考えられる。表 - 1 に各記録のフーリエスペクトルの伝達関数・H/V スペクトルから読み取った固有周期を示す。それぞれ NS 方向と EW 方向の屋上階の地表に対するフーリエスペクトル比である RF/GL と H/V スペクトルの固有周期は概ね一致している。しかし、RF/GL で 1 次と 2 次のピークが H/V の 2 次と 1 次のピークになっている。この現象については、屋上階 UD 成分が 1 次の固有周期付近で卓越しているために、除したときピークを打ち消す結果になったことが原因であると考えられる。

5.3 加速度応答スペクトル

各棟の屋上階で観測された常時微動と地震波から加速度応答スペクトルにより固有周期が読み取れるか検討した。線形加速度法により $\beta = 1/6$ にして計算し、減衰

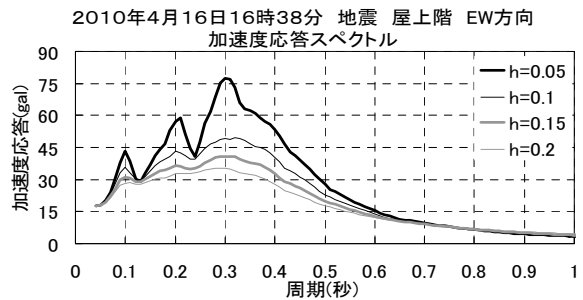


図 - 12 地震記録の加速度応答スペクトル

定数は $h=0.05 \sim 0.2$ まで 0.05 刻みで算定した⁶⁾。結果を図 - 11, 図 - 12 に示す。常時微動のスペクトルは減衰定数を変動させても、屋上階の微動観測データだけでは加速度応答スペクトルからピークを読み取ることは難しいが、地震動では $h=0.05, h=0.1$ では 0.3 秒で、ピークを見ることができる。

5.4 ランニングスペクトル

3 章に述べたランニングスペクトルの結果を受け、H/V スペクトルにより地震動でも固有周期を同定できるか検討する。2007 年能登半島地震、2007 年中越沖地震、そして 2010 年 4 月 16 日と 5 月 10 日に観測された地震の加速度時刻歴データを用いて解析を行った。

ランニングスペクトルを求めるために加速度時刻歴波形を 10.24 秒のデータにし、開始時刻を 2.56 秒ずつ移動してもとめた。

観測された地震波のフーリエスペクトルは、バンド幅がそれぞれ 0.6Hz の Parzen ウィンドウを施し周波数領域で平滑化した。

H/V スペクトルから地震動時の固有周期も H/V スペクトルにより求められるのか検討する。

H/V スペクトルのランニングスペクトル比を図 - 13 に、時系列の固有周期と加速時刻歴波形を図 - 14 に示す。

図 - 13 は図 - 5 と同じ時刻に区切って求めている。H/V スペクトル比のランニングスペクトルを見ると、ピークが安定せず 0.2~0.3 秒でばらついている。これは H/V スペクトルは屋上階のみの地震波を用いて算定している

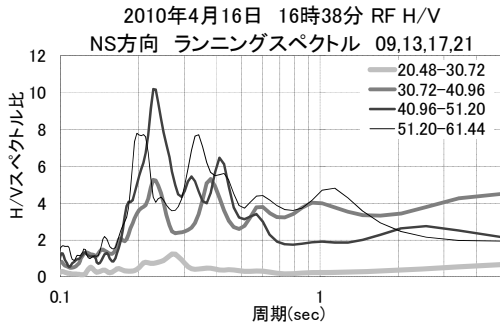


図 - 13 地震記録のランニングスペクトル

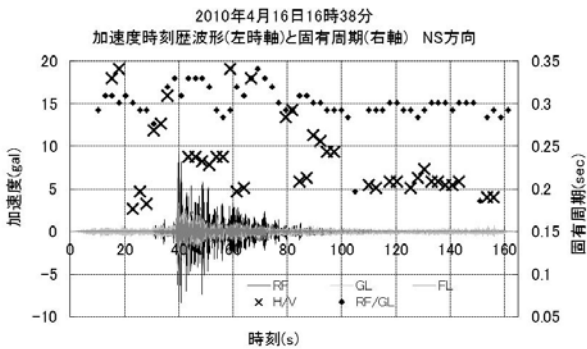


図 - 14 加速度時刻歴と各時刻のスペクトルによる固有周期

ため、地震動そのものの振動の影響が大きいことや、上部構造の周期や地盤と建物連成系の周期双方でピークが生じている可能性がある」と推測している。

図 - 14 の H/V スペクトルでは初期微動時の固有周期は安定しているが、主要動が始まると最低 0.2s～最大 0.5s までばらついており、図 - 13 の結果と同様に固有周期が伝達関数と比べてばらつく傾向にあった。

6. まとめ

新潟大学工学部棟での強震観測結果、および大学院環境生命棟、情報理工棟、新潟大学工学部棟を対象に常時微動観測結果をまとめた。H/V スペクトルの常時微動と人力加振、地震動について伝達関数と結果を比較し、妥当性を検討した。並んで、新潟大学工学部 E 棟の振動特性を把握のために減衰定数、およびランニングスペクトルによる周期の時間変化を検討した。以下にまとめを示す。

- (1) 常時微動・人力加振により求めた伝達関数と H/V スペクトルの固有周期は一致する傾向にあった。

- (2) 伝達関数と H/V スペクトルの固有周期は今回の観測の範囲では高い建物ほどより近い値となった。
- (3) 加速度応答スペクトルでは地震記録では周期のピークを確認できるが、常時微動の屋上階の観測結果からは固有周期を同定することは困難であった。
- (4) 地震動のランニングスペクトルを伝達関数にして固有周期を求めた結果、固有周期は加速度によって影響を受け、大きくなるほど伸びる傾向にあった。
- (5) H/V スペクトルの固有周期は地震動ではロッキングの影響から求めることは出来なかった。
- (6) 減衰定数は NS 方向では強震記録と常時微動に大きな開きが見られるが EW 方向では見られない。
- (7) 屋上階の最大加速度と減衰定数の関係を見ると加速度と減衰定数の相関はみられない。

参考文献

- 1) 飯塚豪彦ほか：新潟大学における鉄筋コンクリート造建物の強震記録と振動性状 日本建築学会学術講演梗概集, pp557-pp558, 2009. 8
- 2) 小日向健太：微動測定に基づく実在 RC 造建物の振動特性の評価, 新潟大学工学部建築学コース卒業論文, 2009
- 3) 野路, 澤田, 山岸：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, pp. 151-152, 2008. 9
- 4) 長尾毅, 山田雅行, 野津厚：常時微動 H/V スペクトルを用いたサイト増幅特性の経験的補正に関する研究, 土木学会, 構造工学論文集 Vol.56A, 2010, pp324-pp333
- 5) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, 1994
- 6) 柴田明德：最新 耐震構造解析 第2版, 森北出版, 2003

謝辞：本報告における観測、データ整理には新潟大学工学部建築学コース石田淳基氏の協力を得た。ここに記して謝意を表します。