

常時微動計測による釧路市内の建築物の振動特性

北原 昭男・藤原 悌三・鈴木 有・市川 信夫

VIBRATION CHARACTERISTICS OF BUILDINGS BY MICROTREMOR OBSAVATION IN KUSHIRO CITY

By *Akio KITAHARA, Teizo FUJIWARA, Tamotsu SUZUKI and Nobuo ICHIKAWA*

Synopsis

Structural damage of buildings occurred by 1993 Kushiro-oki Earthquake was relatively slight in comparison with the intensity of surface wave. The microtremor observation of the R/C school buildings and the wooden buildings in Kushiro city was carried out to make clear the above input-damage relation and the dynamic soil-structure interaction effects. This paper presents the observation results and the consideration for the relation between the damage level of structures and the dynamic interaction effects.

Because the natural frequency of buildings and the predominant frequency of soil-structure system were higher than the predominant frequency of surface soil of many sites in Kushiro city, the response of buildings did not show the remarkable growth. The response was also decreased at the natural frequency of buildings caused by the decreasing of input motion. These relation among above three frequencies correspond with the damage level of the buildings.

1. はじめに

1993年1月15日に発生した釧路沖地震では、釧路気象台で900 gal以上の加速度記録が観測されたのははじめとして非常に大きな強震記録が得られた。それに対して構造物の被害は、地盤の崩壊による全壊家屋が50棟程度発生したものの全般的には被害程度は小さかった。その主な原因としては、基盤地震動の振動数特性と各サイトの表層地盤の増幅特性、構造物の耐震性能などがあげられる。北原・藤原は釧路地域の表層地盤および木造住家、RC構造物を質点系にモデル化し、応答解析によって地震応答・構造的被害を求め、実際の被害分布と比較検討した。その結果、被害が少なかった原因として、構造物の耐震性能が比較的高かったこと、沖積層においては地盤の増幅度はそれほど大きくなかったことなどが明らかとなった。また、本手法によって軽微な被害についてもその分布をかなりの精度で再現できることが確認された^{1,2)}。RC造建物・木造建物の全体的な耐震性と被害に関しては文献3)にまとめられているが、これによると釧路地域の建物の耐震性は一般的に高かったと報告されている。一方、上記以外に注目される要因として、表層地盤と構造物の動的な相互作用の効果が考えられるが、これには地盤・構造物・地盤-構造物連成系のそれぞれの振動数特性の関係、構造物基礎に係わる逸散減衰や入力損失の効果などが含まれる。しかしながら、これらの効果については、構造物での観測記録が得られていないためあまり研究は行われていない。

このような動的相互作用の効果を種々の地盤条件のもとで明らかにするために、沖積低地や洪積台地に

建てられた18の学校校舎を対象として常時微動計測が行われた。これは、建築学会1993年釧路沖地震学術研究会のワーキンググループWG4（基礎と地盤の相互作用担当）とWG6（上部構造の耐震性担当）の合同調査として行われたものである。筆者らのグループはこの合同調査の一員として、3つのRC造小学校校舎の微動計測を行った。また、筆者らは釧路市域における木造建物の振動特性を把握することを目的に、5棟の建物に関して独自に常時微動計測を行った。本報告では、これらの計測結果をまとめると共に、計測結果と構造物の振動特性・地震被害との関連について考察を行う。

2. 常時微動計測の概要

本章では、RC造学校建物の常時微動合同計測および木造建物の微動計測についてその概要についてまとめる⁴⁾。

2.1 釧路市域におけるRC造学校建物の常時微動計測

1) 計測日時 1994年8月18日～20日

2) 計測チーム

大学：足利工業大学，関東学院大学，東京大学，東京理科大学，都立大学，京大防災研
建設会社：大林組，鹿島，大成建設，竹中工務店

3) 計測対象

釧路市域において釧路川以東の沖積低地上および洪積台地上に建てられた18校22校舎のRC造学校建物を対象とし，上記チームが7つのグループを作り3～4校舎ずつ担当した。対象とした学校のほとんどが3階建てであり，基礎は杭打ち基礎である。学校校舎を対象とした理由は，a) 釧路市域における一般的な低層建物であり固有周期が短周期であること，b) 平面的にも，構造的にも標準化されており比較がしやすいこと，c) 市域全体に適当な密度で存在しており，地盤と建物の関係について地域的な比較が可能であること，などがあげられる。

計測の対象とした小中学校の位置をFig. 1中の●印で示す。対象建物は釧路川以東の地域ではほぼ均等な分布となるように選定した。表層地盤としては，旧釧路川と釧路川に挟まれた地域は20mから厚いところでは70mを越える沖積層が存在している。一方，旧釧路川より東の地域では洪積台地（図中太線の内側）が広がっている。この地域の中には元は谷であったところを埋め立てた地区，火山灰の堆積物が表層を覆い軟弱な層となっている地区なども存在し複雑な地盤構成をしている。

京都大学防災研究所のチーム（藤原・北原・市川（以上防災研）・中治（京大大学院生））は旧釧路川以東の地区の湖畔小学校（図中R），武佐小学校（同K），城山小学校（同M）の3校を担当した。このうち，城山小学校と湖畔小学校は標高約30mの洪積台地上にあり，比較的硬い地盤の上に数mから10数mのれき混じりの柔らかい層が存在する。武佐小学校は湿地を埋立てた地盤上にあり，20m程度の軟弱な地盤上に建っている。3校共にRC造の3階建てであり，短辺方向（梁間方向）はほぼ10m，片廊下式の標準的な校舎である。例として城山小学校の外観をPhoto 1に示す。また，基礎は3校とも杭打ち基礎である。

釧路沖地震の被害に関しては，湖畔小学校では壁や柱にせん断きれつが発生したり，ガラスの破損，体育館のブレース破損，家具などの転倒・落下など，種々の被害が発生した。一方，城山小ではExp-Jのずれ・壁の剝離など軽微な被害のみであった。また，武佐小では周辺地盤が沈下したものの校舎には大きな被害は生じなかった。

4) 計測方法

以下は，防災研チームの計測方法について記す。他のチームもほぼ同様の機器構成・計測方法であった。

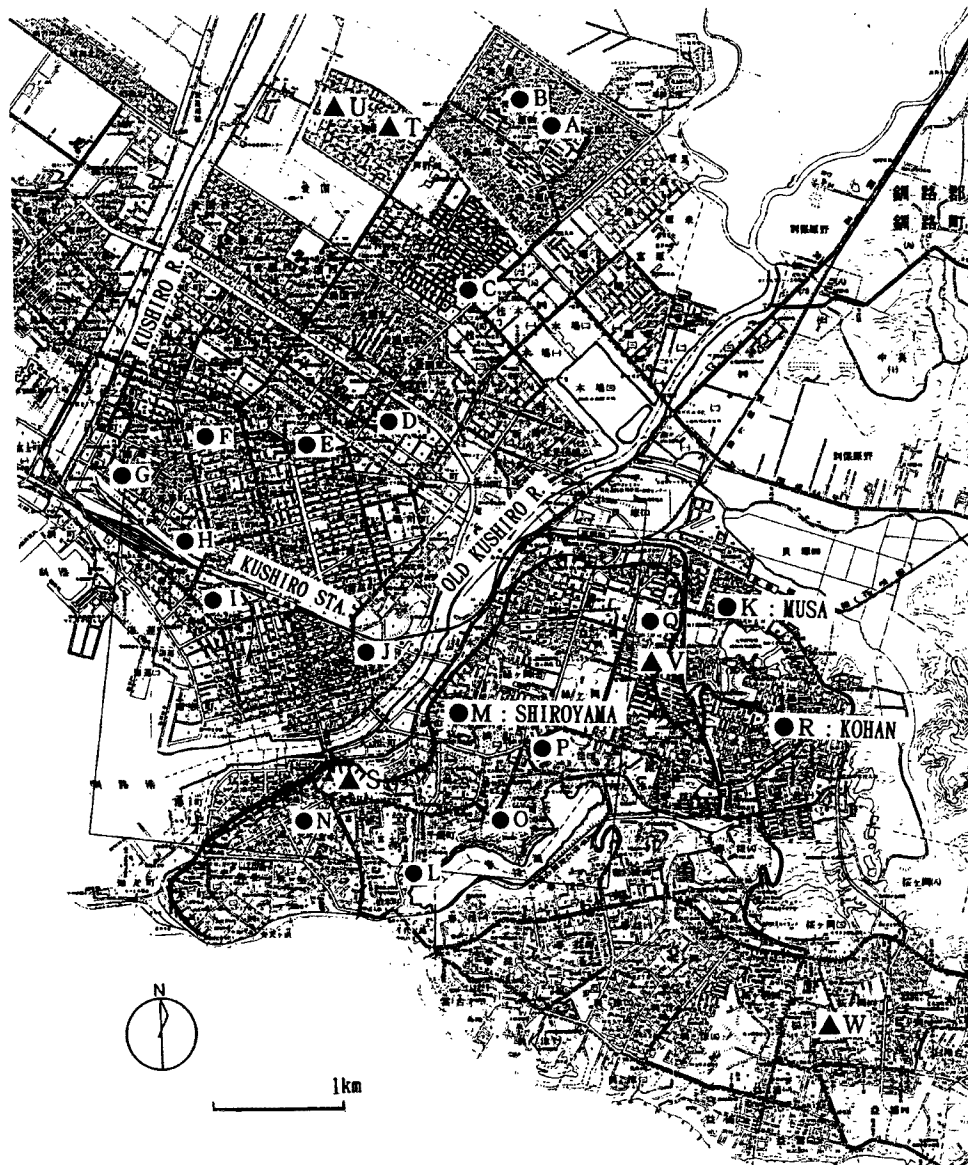


Fig. 1. Location of the school buildings and the wooden buildings for microtremor observation

計測には東京測振製 SPC-35 E を使用した。これは、Photo 2 に示すように、サーボ型速度計のピックアップと、アンプ・A/D 変換器・ノートパソコンをトランクの中に組み込んだポータブルタイプの本体から構成される。他の機器を接続することなしに計測結果をリアルタイムでコンピュータのハードディスクへ格納することのできる非常に簡便な計測システムである。総合特性としては、速度について 1 Hz ないし 20 Hz の間でフラットな特性を持っていることを確認した。

計測は、構造物の 1 階床、最上階床、地表面の 3 点の同時計測を行うこととし、長辺方向（桁行）および短辺方向（梁間）のそれぞれについて 15 分間水平動を計測した。A/D 変換の時間刻みは 0.01 秒とした。建物の計測点としては、校舎の中でエクspansion で区切られた比較的整形（長方形）に近い部分を選び、そのほぼ中央になる点を選んだ。また、地表面の計測点は建物の振動の影響を避けるためできるだけ建物より離すこととした。

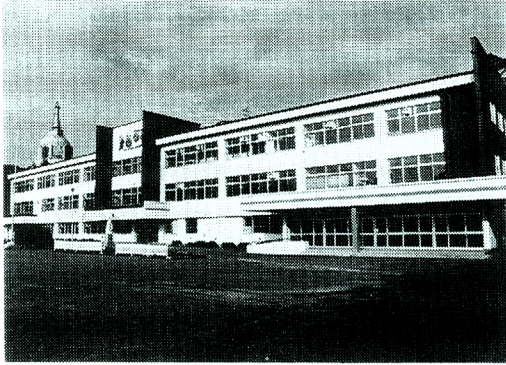
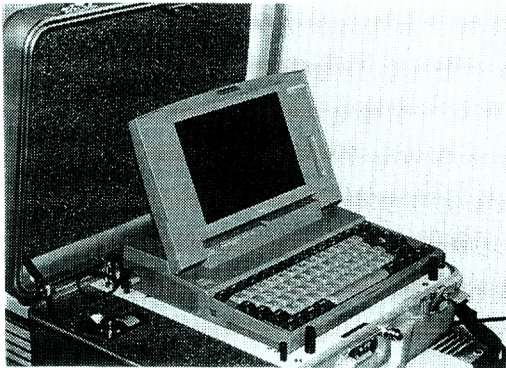


Photo 1. Shiroyama elementary school

Photo 2 (a). Observation system
(Main system)Photo 2 (b). Observation system
(Pick-up)

5) データ処理の方法

計測されたデータより、フーリエ変換を用いて1階床・最上階床・地表面のフーリエスペクトルおよび各計測点の間の伝達関数を求める。スペクトル処理の方法としては、1回のフーリエ変換のデータ数を2048点とし、オーバーラップなしで30回のアベレージングを行い、平均的なスペクトルを求めた。この際、対象とする振動数範囲は30 Hzまでとし、フィルターはかけなかった。

2.2 釧路市域における木造建物の常時微動計測

- 1) 計測日時 1994年8月22日～23日
- 2) 計測チーム 藤原・北原(以上防災研)・鈴木(金沢工大)・平野(滋賀職業能力開発短大)
- 3) 計測対象

以下に示す5棟を対象として微動計測を行った。対象建物を **Fig. 1** 中の▲印で示す。

- ・サイト S: 気象協会 (**Photo 3**)

900 gal を越える加速度記録が得られた釧路気象台の敷地内に建てられてた平屋の建物である。建築年は1960年代であり、30年ほど前に建てられたかなり古い建物である。釧路沖地震では外壁などに大きな亀裂が生じるなどかなりの被害を生じた。

- ・サイト T: モデルハウス (**Photo 4**)

釧路における最も新しい住宅地の1つである文苑に建設されたばかりの2階建住宅で、高い耐震性を売り物として建設されたものである。文苑は釧路沖地震の際に液状化の発生が伝えられた美原や芦野地区の西隣に位置し、周辺地区と同様に湿地帯を埋め立てて造成された住宅地である。



Photo 3. Wooden building
(Nusamai : site S)

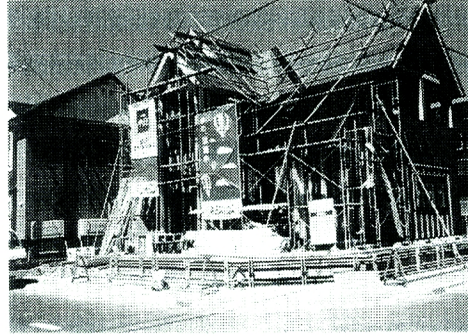


Photo 5. Wooden building
(Fumizono 2 : site U)

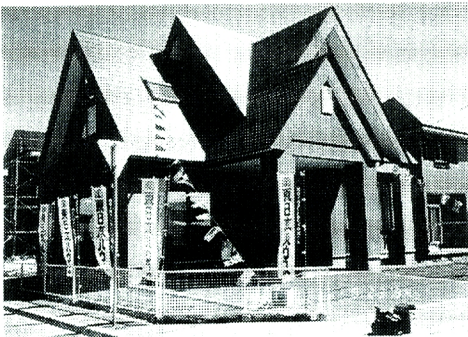


Photo 4. Wooden building
(Fumizono 1 : site T)

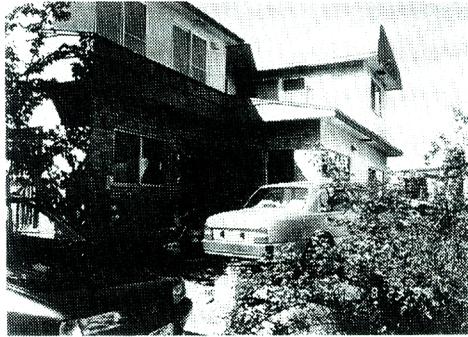


Photo 6. Wooden building
(Midorigaoka : site V)

・サイト U：建設中の住宅（**Photo 5**）

Tと同じ文苑に建設中の2階建住宅で、ほぼTのモデルハウスと同様の形状をしている。計測時点では軸組および外壁の下地が完成した状態であった。

・サイト V：M邸（**Photo 6**）

昭和52年に建築され、3年前に一部増築された2階建住宅である。地盤崩壊によって多くの建物が被害を受けた地点（緑ヶ岡6丁目）のすぐ近傍に位置する。この地域は洪積台地の東の縁端部であり、緩やかな斜面状の地形をなしている。釧路沖地震では、この建物には大きな被害はなかったものの、周辺の地盤は大きな変状を引き起こし大きな被害が発生した住家も多かった。

・サイト W：U邸（**Photo 7**）

比較的硬い地盤上に位置する桜ヶ岡5丁目に建てられた2階建住宅で、建築年は昭和51年である。釧路沖地震では周辺一帯を含め、構造的被害は軽微であった。

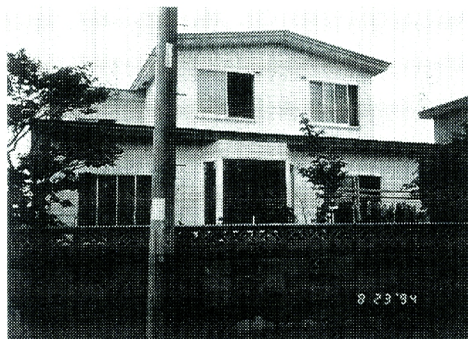


Photo 7. Wooden building
(Sakuragaoka : site W)

4) 計測方法

使用機器、計測方法は学校建物の場合と同じである。計測点は地表、1階床および小屋梁の上の3点とし、長辺方向、短辺方向別に15分間の3点同時計測を行った。

5) データ処理方法

計測されたデータについては、学校建物の場合と同様の手法で処理を行った。

3. RC造学校建物の微動計測結果および振動特性に関する考察

3.1 防災研グループによる微動計測の結果

2章に記した方針に従って、湖畔小学校、城山小学校、武佐小学校に関して各計測点の速度記録のフーリエスペクトルおよび計測点間の伝達関数を求めた。Fig. 2～Fig. 4には各学校の桁行(長辺)方向および梁間(短辺)方向の振動に関して、上段より地表面(GL)・1階床(1F)・最上階床(3F)のフーリエスペクトル、地表面と1階床(1F/GL)・1階床と最上階床(3F/1F)の伝達関数を示す。また、Table 1には、これらの図より読みとった地盤の卓越振動数、建物の固有振動数、地盤-建物連成系の卓越振動数をまとめた。以下にこれらの図表より読みとれる振動特性について記す。

a) 地表面のスペクトル

湖畔小学校と城山小学校は双方とも標高30m程度の洪積台地上に位置する。しかし、湖畔小では表層は4m程度のやや柔らかい地盤の下は強固な地盤が続くのに対し、城山小では15m以深までN値10～20程度のやや柔らかい層が続く。武佐小はこの台地の下の旧湿地帯を埋め立てた地盤上に建っており、15m以深までN値1から10程度のかかなり柔らかい地盤が続く。地盤の卓越振動数を地表のフーリエスペクトルより読みとると湖畔小で6.7Hz程度、武佐小で1.8Hzとなった。城山小では他の2地点と比べると微動レベルが極めて低く、また付近に機器等があり計測が困難であったが、他の振動数の関係から総合的に判断すると、地盤の1次の卓越振動数は3.2Hzであると考えられる。このように考えると、3校の卓越振動数の大小関係は、上述の表層地盤の柔らかさの程度と一致する傾向を示していることがわかる。

b) 1階に対する最上階の伝達関数

建物の固有振動数は1階に対する最上階の伝達関数のピークより求められる。武佐小の梁間方向が9.1Hzとやや小さかったが、それ以外は12Hz～17Hz程度のほぼ同程度の値を示している。伝達関数のピークの値は3つの学校とも3～4程度の値を示した。また、桁行方向と梁間方向との比較では、城山小で梁間方向の方が高く、また、武佐小、湖畔小では桁行方向が高いなど、明らかな傾向は見られなかった。

c) 建物最上階のスペクトル

各学校の各方向共に、最上階のスペクトルにはかなり明瞭なピークが見られた。ピークは建物のサイトにより差があり、湖畔小では4Hz付近に鋭いピークを持つのに対し、城山小では8～9Hzにピークを持っている。この卓越振動数は建物-地盤連成系の卓越振動数に相当するものと考えられる。また、武佐小ではピークが複数あるが、その他の卓越振動数(建物単独、地盤など)を考慮しながら総合的に判断すると連成系の卓越振動数は6～9Hzと推測される。湖畔小の4Hzについては、振動の性状から判断して、ロッキングの振動数と考えた方が良くもしいない。いずれの場合も表層近傍の地盤の軟弱さと基礎構造との関係によるものと考えられる。また、連成系の卓越振動数は、湖畔小を除いて、地盤の卓越振動数と建物の固有振動数の中間の値を示している。

d) 被害との関連

上記の振動性状と被害の関連については以下のように考えられよう。

釧路沖地震における工学的基盤面レベルでの地震動の卓越振動数は4Hz程度と考えられるが、武佐小では地盤の卓越振動数がそれよりもかなり低く、地表動があまり増幅されなかった。また、建物・連成系とも振動数は高く応答は増幅されにくい関係にあった。そのために地盤変状のみが生じ構造物の被害が少なかった。また、城山小では地表動の増幅はやや大きかったかもしれないが、構造物関連の振動数がともに地表動の卓越振動数よりも高いため応答が増幅されにくく、また、表層地盤の塑性化により地表動の振

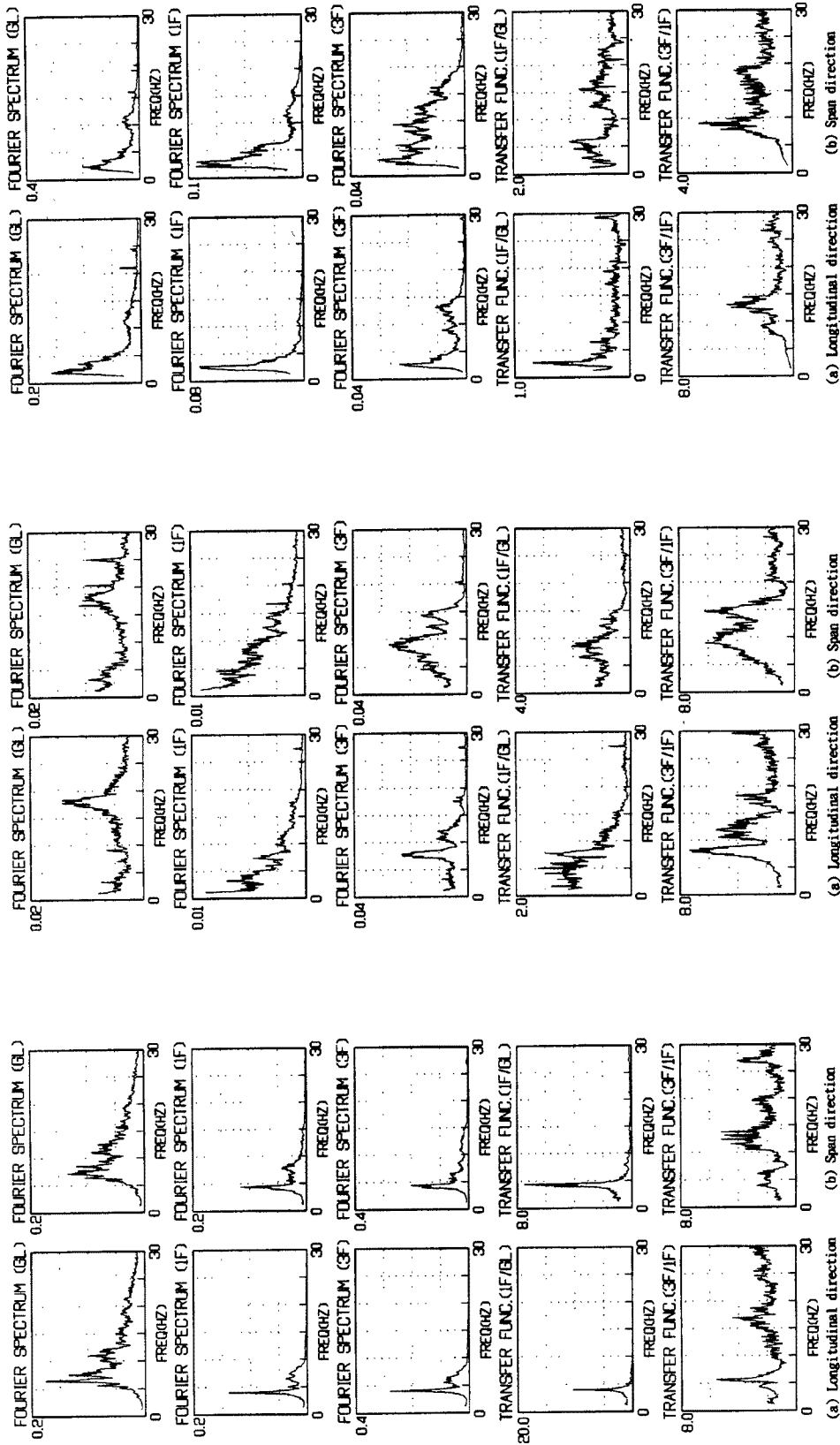


Fig. 4. Fourier spectra and transfer functions of school building (Musa : site K)

Fig. 3. Fourier spectra and transfer functions of school building (Shiroyama : site M)

Fig. 2. Fourier spectra and transfer functions of school building (Kohan : site R)

Table 1. Predominant (natural) frequency of school buildings

School	Predominant / Natural Frequency (Hz)			
	Soil	*	Building	Soil-Building (Coupled)
Musa	1.8	X	13.0	9.1
		Y	9.1	5.7
shiroyama	3.2	X	11.8	7.7
		Y	14.8	9.0
Kohan	6.7	X	16.8	(4.2)
		Y	13.2	(4.3)

* Direction X: Longitudinal Y: Span

動数は低下する方向にあり、応答が進行する要素がなかったため、被害が小さかったものと考えられる。一方、湖畔小では表層地盤の卓越振動数が塑性化の進行により基盤動と共振しやすい関係にあったこと、また、その振動数が連成系の振動数とほぼ一致し、建物応答が増大したことにより被害が大きくなったものと考えられる。

以上の考察は微動計測結果すなわち微小な振幅レベルでの性状をもとにしたものである。被害の程度の差には、地盤や構造物の塑性化の影響など、より大きな応答レベルでの問題も影響していよう。しかしながら、揺れはじめの振動数相互の関連はその後の応答に大きな影響を及ぼすことは明らかであり、このような考察を行うことは非常に有意義なことであるものと考えられる。

3.2 調査グループ全体での計測結果及びワーキンググループでの考察

ここでは、合同調査のグループ全体の計測結果およびこれに関して筆者らを含めたワーキンググループで行われた考察の概要についてまとめる。詳しくは文献4)を参照されたい。

1) 地盤の卓越振動数と地盤構造

Table 2には計測地点の地盤構造と微動計測による地盤の卓越振動数を示す。各表中、最上段が計測による卓越振動数で、以下、a: N値が10以下となる深さ、b: N値が40以上となる深さ、c: 沖積層基底深さ、およびN値40以下の層の平均N値を示している。また、各サイトの位置はFig. 1を参照されたい。

卓越振動数は沖積低地では0.8から1.8 Hz程度の地点が多い。一方、洪積台地では3 Hzより10 Hz程度までばらついているが、いずれも沖積地よりは高い数値を示している。これらの結果はこれまでに釧路市域で行われた計測の記録^{5,6)}とも良く対応している。また、沖積地では、沖積層の基底までの深さが振動

Table 2. Characteristics of surface soil of all observation site

(a) Site on Alluvium

Site	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
Frequency (Hz)	1.5	1.0	1.2	1.3	1.2	0.8	1.8	0.8	0.9	3.7	1.8
Depth (m)	a: N < 10	6	5	—	6	6	—	—	—	1	6
	b: N > 40	7	7	—	—	—	6	9	—	8	7
	c: Base	33	38	43	48	63	58	63	48	38	23
Average N value	7	10	—	20	13	34	29	—	29	26	8

(b) Site on Diluvium

Site	L	M	N	O	P	Q	R
Frequency (HZ)	4.4	3.2	6.3	10.0	11.1	3.7	6.7
Depth (m)	a: N < 10	3	5	5	—	4	—
	b: N > 40	5	25	10	7	12	—
	c: Base	—	—	—	—	—	—
Average N value	4	17	17	6	21	—	12

数に大きく影響していることがわかる。洪積台地においても N 値が 40 以上になる深さが浅いと振動数も高くなる傾向を示している。

2) 地盤および連成系の卓越振動数の関係

Fig. 5 (a) には地盤の卓越振動数と連成系の卓越振動数との関係を示す。図中、点線で囲ったものは洪積台地上の建物の結果である。連成系の卓越振動数は各構造物で 2 Hz から 10 Hz の間にばらついている。ただし、これと地盤の卓越振動数との関係を見ると、地盤に対する連成系の振動数比 r はある程度以上の厚さの沖積層上では 2 以上を示すものが多いのに対し、洪積台地上では 0.5 から 2.0 の間の値を示し明らかにサイトによる傾向の差が表れている。特に、大きな被害の生じた釧路工業高校の建物 (P) の振動数比は 0.5 程度と非常に低い値であった。

3) 地盤の卓越振動数と建物の固有振動数との関係

Fig. 5 (b) には地盤の卓越振動数と建物の固有振動数との関係を示す。建物の固有振動数は 12 ~ 13 Hz を中心にばらついているが、それほど大きな差は生じていない。ただし、釧路工業高校の建物の振動数は 5 Hz 程度と、他のものに比べると低かった。桁行と梁間方向の振動数の差については、ほとんどの建物で大きな差は見られなかった。建物の固有振動数と地盤の卓越振動数との関係でも、振動数比は沖積地では 4 から 10 の値を示すのに対し、洪積台地上では 1 から 4 程度である。釧路工業は 0.5 という低い値となった。

4) 建物の固有振動数と連成系の卓越振動数との関係

Fig. 5 (c) には建物の固有振動数と連成系の卓越振動数との関係を示す。建物の固有振動数と連成系の

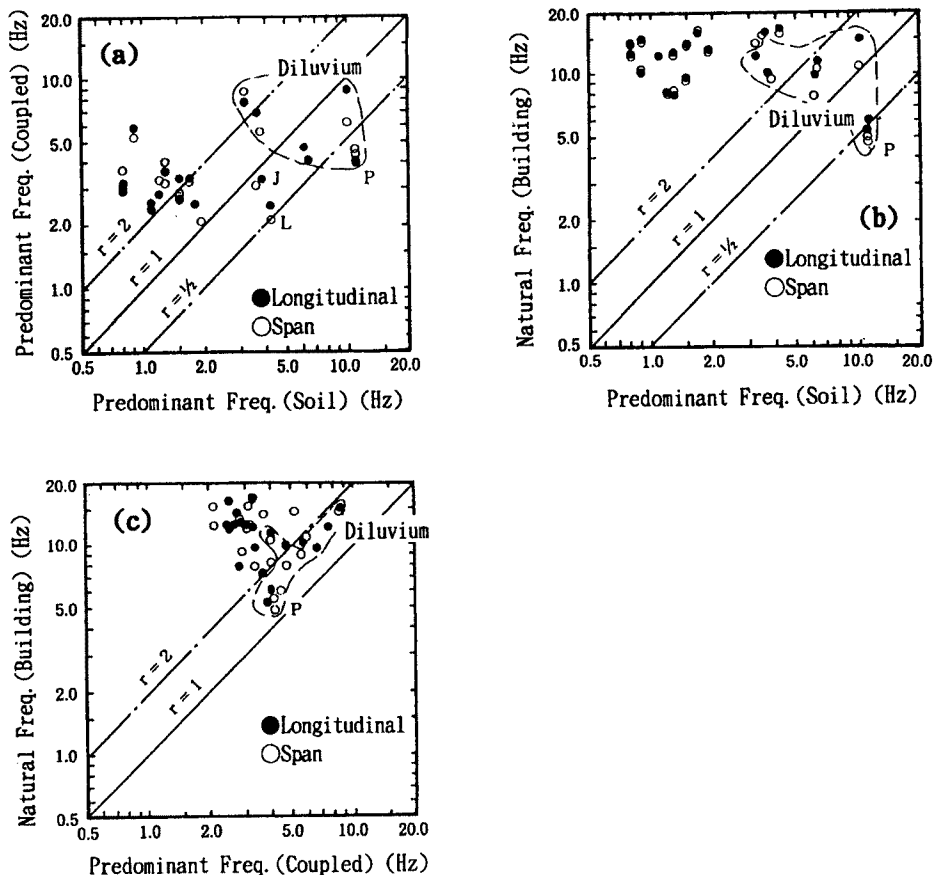


Fig. 5. Relation among predominant (natural) frequencies of all school buildings

卓越振動数の関係を見ると、すべての建物で連成系の振動数がかなり低くなった。すなわち、もし連成系の振動数で振動したとしても、構造物自身はほとんど応答せず剛体として振る舞うことを意味する。この関係も上記2つの関係と同様の傾向を示し、連成系に対する建物の振動数比は沖積低地では2から4、洪積台地では1.5から2と明らかな差が生じた。

5) 建物への入力低減

実際の建物への有効入力を厳密に評価することは困難であるので、ここでは、地盤と1階床の伝達関数を用いて建物への入力低減効果を便宜的に評価する。具体的には、伝達関数における応答倍率が0.5となる振動数を指標として評価することとした。Fig. 6 (a), (b)にはこの振動数と連成系の卓越振動数および建物の固有振動数との関係を示す。

連成系との関係では、洪積台地では振動数比は0.5から1程度、沖積低地では0.5から3程度となった。振動数比が大きくなる（振動数が離れる）ほど入力低減が生じやすいことは明らかであり、この結果からは連成系の振動数域でも沖積低地の一部の建物では入力低減されることがわかる。一方、建物の固有振動数との関係では、ほとんどの場合で振動数比が1以上となっており、この振動数域ではほぼすべての建物で入力低減が起こっているものと考えられる。また、この関係でも沖積低地の方が振動数比が高くなる傾向を示し、入力低減の効果も大きくなっていることがわかる。

6) 計測結果と被害程度との関連

地盤と構造物・連成系の振動数の関係より、基本的には地盤の卓越振動数と連成系あるいは構造物の振動数は離れており共振しにくい関係にあること、建物の固有振動数と連成系の卓越振動数との関係も同様であり連成系の振動数では構造物自身はほとんど応答せず剛体として振る舞うこと、などが明らかになった。また、沖積低地では振動数相互の関係はかなり離れており、釧路沖地震において沖積地では特に被害が小さかったことに対応する。一方、洪積台地では沖積低地よりは振動数が接近する傾向を示した。すなわち、洪積台地上では振動数の関係が近いこと共振しやすく、また応答も増大する傾向にある。とくに、釧路工業高校や湖畔小学校など、地盤に対する振動数比が1以下の建物では地盤の塑性化に伴って地盤の卓越振動数が低下し、ますます共振しやすくなる状況が生じることとなる。実際に釧路沖地震では、沖積低地よりは洪積台地上での被害が大きく、また、同じ洪積台地上でも釧路工業や湖畔小に被害が多かった。

入力低減に関しても、建物の固有振動数の領域では有効に働いており、応答の低減に効果的であった。また、これらの関係も沖積低地の方がより有利な状況にあった。

上記の考察より、上述の動的な相互作用（卓越振動数・固有振動数の関係、入力低減）によって実際の被害程度（応答の程度）のかなりの部分を説明できることが明らかとなった。

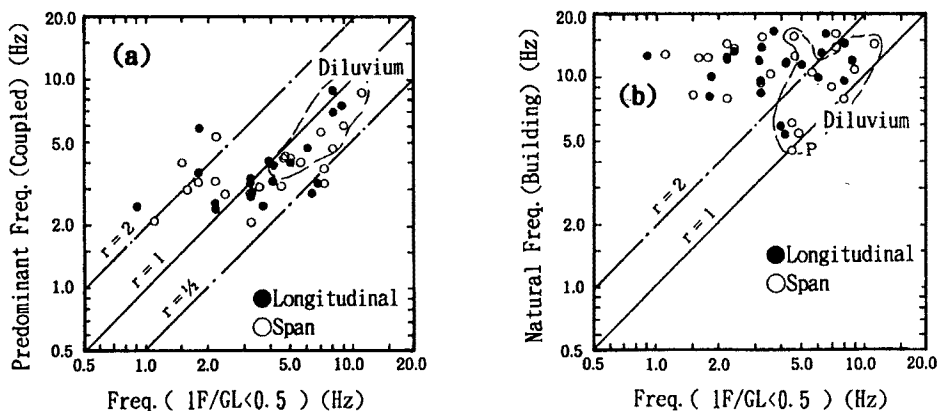


Fig. 6. Relation between predominant (natural) frequency and frequency for effective input motion

4. 木造建物の微動計測結果および振動特性に関する考察

4.1 木造建物の常時微動計測による振動特性

学校校舎の場合と同様に、2章に記した方針に従って、Fig. 1 に示した5つの木造建物に関して速度記録のフーリエスペクトルおよび計測点間の伝達関数を求めた。RC造学校校舎に比べると木造住宅の基礎の全重量に占める割合は非常に小さい。また住宅では地面と1階床との間の剛性は非常に高くほぼ剛と言って良い。そのため、地表面と1階床はほぼ等しい振動性状を示した。そこで、ここでは地表面および小屋組の振動のフーリエスペクトルおよび1階床に対する小屋組の伝達関数に着目することとした。Fig. 7～Fig. 11には各建物毎の長辺方向および短辺方向の振動に関して、上段より地表面（GL）・小屋組

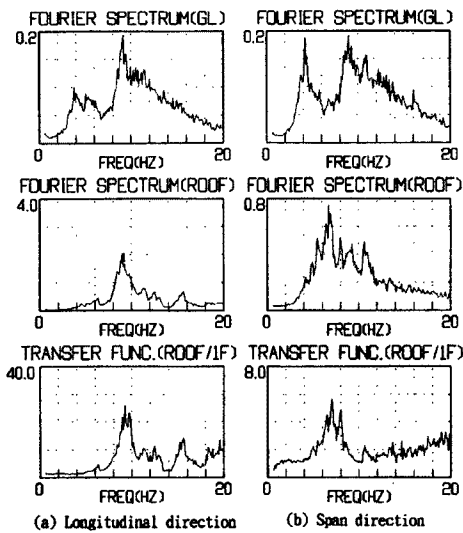


Fig. 7. Fourier spectra and transfer functions of wooden building (Nusamai: site S)

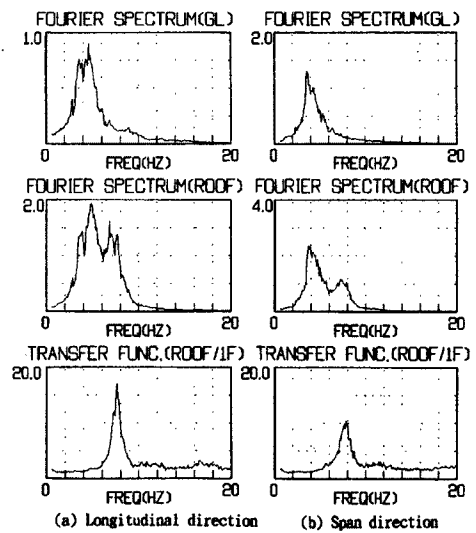


Fig. 8. Fourier spectra and transfer functions of wooden building (Fumizono: site T)

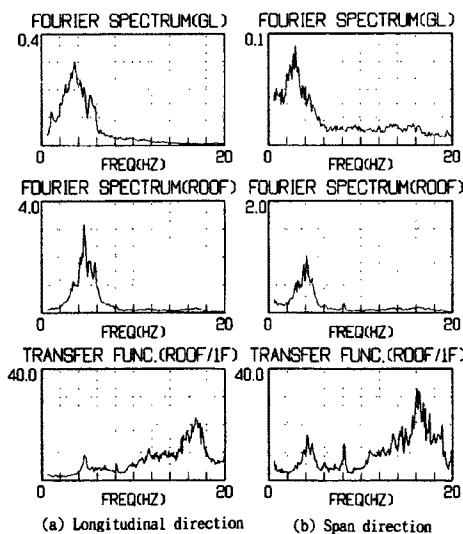


Fig. 9. Fourier spectra and transfer functions of wooden building (Fumizono: site U)

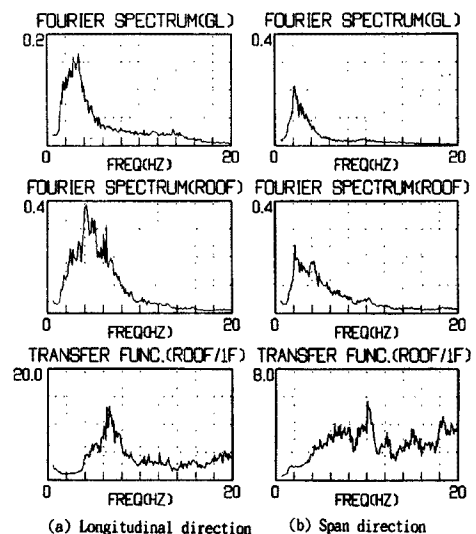


Fig. 10. Fourier spectra and transfer functions of wooden building (Midorigaoka: site V)

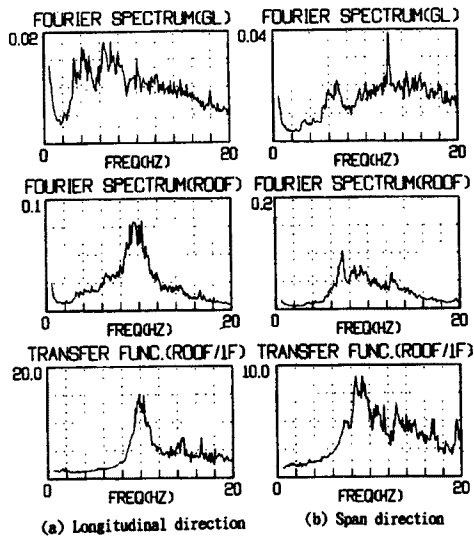


Fig. 11. Fourier spectra and transfer functions of wooden building (Sakuragaoka: site W)

(ROOF) のフーリエスペクトルおよび1階床と小屋組 (ROOF/1F) の伝達関数を示す。また、Table 3には、これらの図より読みとった地盤の卓越振動数、建物の固有振動数をまとめた。以下にこれらの図表より読みとれる振動特性について記す。

a) 地盤の卓越振動数と地盤特性

気象協会の建物 (サイト S) は標高 30 m 程度の洪積台地上に位置する。地表付近には 15 m 程度の深さに N 値 50 以上の硬い地層が存在する。地表の振動のフーリエスペクトルは建物の影響と考えられるピークを除くと 4~5 Hz 付近に明瞭なピークが見られる。M 邸 (V) は同じ台地の東縁の斜面を造成した地盤に建てられている。スペクトルはやはり明瞭な1つのピークを持ちその値は 2~3 Hz であった。また、U 邸 (W) も同じ洪積台地上にあるが、気象台からは南東にかなり離れており、海岸線も近いため表層は 5 m 程度である。微動のレベルは他の地点に比べると非常に小さい。スペクトルはかなりなだらかな形状をしており、そのピークは明確ではないが 4~8 Hz 程度にある。また、それよりも高い振動数においても相対的にかなり大きなパワーを持っている。一方、文苑 (T, U) は湿原を埋め立てて造成された地盤である。付近のボーリングデータは得られていないため表層地盤の構成はわからないが、周辺の美原地区のボーリングデータを見ると、地表より 10~15 m 程度は N 値 20 以下の柔らかい地層が続いている。スペクトルは明瞭なピークを持っており、その振動数は 2.8~4.2 Hz にある。

以上をまとめると、地盤の卓越振動数は表層地盤の構成 (特に軟弱さ) に応じて変化しており、相対的に地盤の硬い桜ヶ岡 (W) が最も高く、次いで気象台 (S) が高い値を示した。洪積台地上と沖積地盤上では明らかな差が見られたが、洪積台地上でも緑ヶ岡の造成地ではかなり低い値を示し、台地上でも局所的には表層地盤が軟弱な地域が存在することがわかる。逆に湿原地帯であった文苑でもそれほど低い値を示さず、サイト V より高い振動数を示した。サイト W のみはスペクトルはなだらかな性状を示し、高い振動数の成分も相対的に多く持っていた。

以上をまとめると、地盤の卓越振動数は表層地盤の構成 (特に軟弱さ) に応じて変化しており、相対的に地盤の硬い桜ヶ岡 (W) が最も高く、次いで気象台 (S) が高い値を示した。洪積台地上と沖積地盤上では明らかな差が見られたが、洪積台地上でも緑ヶ岡の造成地ではかなり低い値を示し、台地上でも局所的には表層地盤が軟弱な地域が存在することがわかる。逆に湿原地帯であった文苑でもそれほど低い値を示さず、サイト V より高い振動数を示した。サイト W のみはスペクトルはなだらかな性状を示し、高い振動数の成分も相対的に多く持っていた。

Table 3. Predominant (natural) frequency and wall area index of wooden buildings

House (Site)	Natural Frequency (Hz)				Wall Area Index (cm/m ²)	
	Soil (Observed)	*	House (Observed)	House (Estimated)	1 F	2 F
S	4.1-5.0	X	9.5	1.3 (3.3)	6.3 (42.4)	—
		Y	7.0	1.9 (3.9)	13.1 (58.1)	—
T	3.8-4.2	X	7.7	2.9 (3.0)	73.7 (80.7)	99.6 (108.7)
		Y	7.8	3.0 (3.1)	73.9 (86.7)	94.7 (99.6)
U	2.8-3.5	X	4.5	—	43.7 (55.2)	86.8 (105.1)
		Y	4.1	—	43.1 (52.1)	81.5 (96.5)
V	2.3-3.1	X	6.7	1.5 (2.5)	19.5 (51.0)	52.2 (101.1)
		Y	7.5	1.5 (2.3)	19.3 (47.3)	29.5 (56.5)
W	4.5-6.8	X	10.1	1.4 (2.1)	15.9 (38.5)	32.2 (68.3)
		Y	9.0	1.4 (1.9)	15.6 (30.7)	56.5 (114.6)

* Direction X: Longitudinal Y: Span

b) 建物の固有振動数

建物の固有振動数を1階に対する小屋組の伝達関数のピークより求める。最新の住宅であるモデルハウス(T)では伝達関数は極めて明瞭なピークを持ち、固有振動数は桁行、梁間方向とも7.7 Hz程度であった。また、およそ20年前に建てられたM邸(V)、U邸(W)でも固有振動数はそれぞれ6.7～7.5 Hz、9～10 Hzと高い値を示した。わが国の一般的な構法による2階建住宅の微動計測による固有振動数は4～6 Hzに分布することが明らかになっており⁷⁾、これと比較すると釧路市域の建物は他地域に比べかなり高い固有振動数を持っていることが明らかである。この理由としては屋根が軽いこと、壁の量が多く壁剛性が高いことなどがあげられる。

文苑で建設中であった建物(U)の伝達関数は、局所的な剛性がまだ十分ではないためいくつかのピークを持っているが、小屋組のスペクトルなどを参照すると固有振動数は4.1～4.5 Hzと読みとれる。完成後の建物(T)とはほぼ同様の構法・形状であるためこれと比較すると、固有振動数はおよそ0.5～0.6倍となっている。水平剛性に関する要素で2つの建物での主要な差は外壁の有無であり、上記の固有振動数の差は内外壁の下地・仕上げ材の剛性に関する寄与がかなり大きいことを示唆している。

平屋である気象協会の建物(S)の固有振動数は桁行で9.5 Hz、梁間で7 Hzであった。かなり古い建物ではあるが上述の建物とほぼ同等の値を示した。これは平屋であり鉄板屋根であることから、載荷重量が小さかったためと考えられる。

4.2 建物の壁率と振動特性の関係

微動計測で得られた振動特性と実際の建物の耐震性能との関連を調べるため、木造建物の耐震性を規定する唯一の尺度とも言える壁率を各建物について平面図を参照して求めた。壁率とは、耐震壁の壁長さに壁の種類による倍率(壁倍率)をかけたものを各方向毎の壁について合計し、その値を床面積で割ったものである。木造住宅の耐震設計は、このようにして求められた壁率が基準値を満たすかどうかを基本として為される。Table 3中にはこのようにして求めた壁率を各方向毎、1・2階毎に示した。また、基本的には壁率の算定は基準法で定められた耐震壁のみについて行われるが、前述の通りその他の壁も地震に対して有効に作用していることが考えられるため、ここでは規定外の壁を含めた壁率も求めかっこ内に記した。

壁率はすべての建物について1階よりも2階の方が大きかった。所用壁率は1階の方がかなり大きいことを考えあわせると、耐震的には1階の方が弱いことが明らかである。そこで、1階の壁率を見ると、20年近く前に建てられた気象協会(S)およびU邸(W)、M邸(V)は平米あたり20 cm以下とかなり小さかった。基準法で定められた壁率の規定値は、平屋で平米あたり11 cm、2階建の1階で29 cmであり、上記3つの建物はほとんどこの基準を満たしていない。しかしながら、規定外の壁を含めて考えると、壁率は規定値の1.5倍から4倍程度となり、十分な耐震性を持っていると言える。他地域に比べ固有振動数が高いこと、およびこの地域の住宅の構法からすると、この地域の建物は規定外の壁まで含めた壁率で評価する方が良いものと考えられる。新しい建物である文苑のモデルハウス(T)は規定内の壁だけでも十分な壁率を持っており、近年の建物の耐震性の高さを示している。

建物の固有振動数には、壁の剛性以外にも屋根の重量や各階での重量・剛性の分布などが影響するため、壁率との単純な比較はできない。筆者らはこれまでに木造住宅の動的特性を壁率を基にしてモデル化し、応答解析を行ってきた⁸⁾。また、この手法を用いて釧路沖地震による釧路市域の建物の応答・被害分布を求めてきた¹⁾。ここではこのモデルを用いて前述の壁率より動的モデルを求め、その初期剛性などを用いて各建物の固有振動数を推定しTable 3に併せて示した。左の数字は規定内の壁率から求めた振動数、かっこ内は規定外の壁を含んだ壁率より求めた振動数である。

ここでは前述の理由により規定外の壁を含んだ壁率より求めた固有振動数と、計測によって得られた固有振動数の比較を行う。両者の関係をFig. 12に示す。解析モデルは応答の全領域を4折れ線で近似して

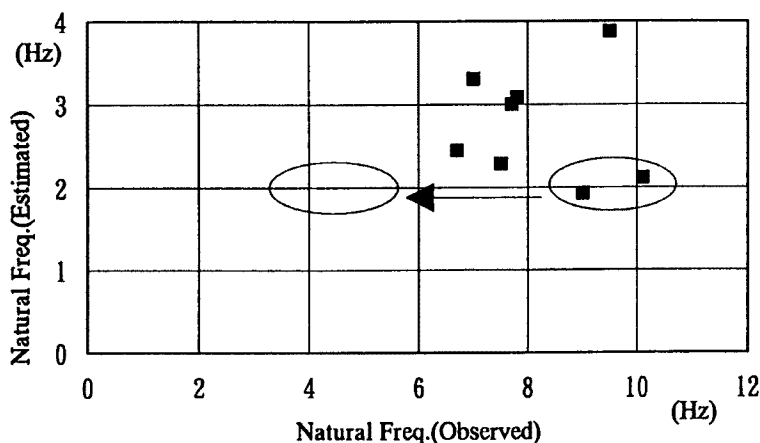


Fig. 12. Relation between observed natural frequency and estimated natural frequency

いるため、初期剛性もある程度変形の進んだ領域で設定せざるを得ない。そのため、微動計測による振動レベルに比べると、大きな変形レベルでの固有振動数を求めていることになり、その振動数は一般的には計測値より小さくなる。しかし、両者の関係はU邸(W: 図中楕円で囲った値)を除いて高い相関を示した。

U邸については、壁率が他の建物より小さいのに対し、計測された固有振動数は逆にかなり高い値を示している。伝達関数を見ると大きなピークは9～10 Hzにあるが、このサイトの地表動は前述の通り高い振動数にパワーを持っているため、2次の振動数で振動している可能性がある。試しに1次と2次の固有振動数比が計算と計測で等しいと仮定し、また計測された振動数を2次であるとする、1次の固有振動数は左の楕円内に移動し、他の建物との関係は調和的なものとなる。

両者の関係はほぼ原点を通る直線で近似され、その傾きは2～3程度である。この関係より、個々の建物の壁率を調査できない場合でも、微動計測による固有振動数を用いて筆者らのモデルの初期剛性をこの関係より求め、これより動的モデルの概略を設定することができるものと考えられる。しかし、精度を上げるためには、より多くの、またより異なった建物について同様の調査を行い、データを蓄積していくことが必要となろう。

4.3 振動特性と被害との関連

上記の振動性状と被害の関連については以下のように考えられる。

釧路沖地震における工学的基盤面レベルでの地震動の卓越振動数は4 Hz程度と考えられるが、気象協会(S)では地盤の卓越振動数はほぼ等しく、入力地震動は他の地区より増幅され大きな加速度がかかった。加えて建物が古く簡易な構造であったため、接合部など構造細部に弱点があり、壁を中心に被害が発生した。しかし、平屋で屋根が軽いこと、壁がある程度入っていたことなどにより大きな被害が出るにはいたらなかった。

文苑(T)では地盤の卓越振動数がそれよりも低く地表動があまり増幅されなかった。また、建物の耐震性が高かったことにくわえ、建物の固有振動数が高かったため応答は増幅されにくい関係にあった。この建物は実際には釧路沖地震の際には存在しなかったが、周辺の美原・芦野地区でも被害が小さかったことの説明にもなるものと考えられる。

M邸(V)でも表層地盤はかなり軟弱であり、基本的にはBと同様に振動による構造被害は発生しにくい関係にあったものと考えられる。しかし、周辺の洪積地盤では地震動の増幅がかなりあったものと考えられ、その上にある軟弱層が変状を引き起こし地盤に係わる被害が発生したものと考えられる。

U 邸 (W) では軟弱地盤が薄く、卓越振動数も高く、基本的には表層地震動は増幅される関係にあったものと考えられる。しかしながら、実際の構造的被害は小さかった。その理由の1つとして地盤の卓越振動数が建物の固有振動数よりかなり高かったため、建物が共振しなかったことが考えられる。特に U 邸ではやや建物が柔らかかったために、地盤の卓越振動数が2次振動に近かったことも考えられる。2次振動で揺れた場合、1次振動より増幅度は小さく、また2次の振動モードでは1次よりも層間変形が小さくなるため、被害は発生しにくいものと考えられる。このように考えると、前述した U 邸における微動計測による振動特性と壁率関係とも調和的となる。

5. ま と め

本研究では、建築学会釧路沖地震学術研究会の合同調査として行われた釧路市域の小中学校を対象とした常時微動計測の結果についてまとめた。また、5棟の木造建物についても同様に常時微動計測を行い、木造建物の振動特性を明らかにした。さらに、計測結果と構造物の振動特性・地震被害との関連について考察を行った。得られた結果について以下にまとめて示す。

- 1) 学校建物については、建物の固有振動数は各校ともほぼ同程度の値となったが、地盤および連成系の卓越振動数は各サイトで異なったものとなった。基本的には地盤の卓越振動数は建物および連成系の振動数よりも低く、共振は起こりにくい関係にあり、釧路沖地震の際に被害が小さかったことと一致した。但し、洪積台地上では沖積低地と比べるとこれらの振動数相互の関係が近くなり、中には建物・連成系の振動数が地盤より低くなる建物も存在した。これらの建物については実際にも被害が発生しており、計測結果により被害発生状況をよく説明できることが明らかとなった。
 - 2) 木造建物については、建物の固有振動数はこれまでの計測結果に比べるとかなり高い値を示し、この地域の建物の剛性が一般の建物より高いことが明らかとなった。ほぼすべての建物が地盤の卓越振動数より高い振動数を持っているため、沖積低地では特に共振は起こりにくい状況にあり、この計測結果は実際の被害状況とも一致した。建物の壁率との比較により、この高い振動数は内外の壁の量の多さに起因すること、壁率より求めた推定振動数と計測振動数が良い相関を示すことなどが明らかとなった。
- 最後に、学校の計測を行うに当たっては釧路市教育委員会、各学校の関係者に、木造建物の計測を行うに当たっては北海道建築士会釧路支部、東日本ハウスおよび各建物の関係者の方々に多大なご協力をいただいた。また、現地計測およびデータ整理には2章に記した平野・中治両氏にお手伝いをいただいた。ここに記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 北原昭男・藤原悌三：地震時における構造被害・室内被害の分布特性およびその評価に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第458号，1994，pp.39-48.
- 2) 北原昭男・藤原悌三：1993年釧路沖地震による居住空間の被害の分布特性及びその評価に関する研究，京都大学防災研究所年報，第36号B-1，1993，pp.135-148.
- 3) 久野雅祥・鈴木 有：釧路市内のRC構造物・木造建物の耐震性と被害に関する検討，日本建築学会「1993年釧路沖地震に関する総合シンポジウム」資料，1994，pp.103-112.
- 4) 犬飼伴幸：釧路市内の学校建物の常時微動測定，日本建築学会「1993年釧路沖地震に関する総合シンポジウム」資料，1994，pp.93-102.
- 5) 松岡昌志・翠川三郎：1993年釧路沖地震における釧路市内の地震動強さ（その2 常時微動特性について），日本建築学会学術講演梗概集，構造I，1993，pp.3-4.

- 6) A-1 短周期グループ：釧路市内の広域を対象とした短周期微動の同時観測，平成 5 年度文部省科学研究費－試験研究 B 研究成果報告書，1994，pp.13-31.
- 7) 鈴木 有・安田雄三：在来構法木造建物の耐震性能評価に関する実験的検討，第 7 回日本地震工学シンポジウム講演集，1986，pp.1393-1398.
- 8) 北原昭男・藤原悌三：都市における建築構造物の地震被害推定に関する基礎的研究(その 1)－木造構造物の地震応答推定－，京都大学防災研究所年報，第 31 号 B-1，1988，pp.105-126.