在来工法木造住宅の振動特性と耐震診断評点との関係

RELATIONSHIP BETWEEN DYNAMIC CHARACTERISTICS AND SEISMIC DIAGNOSIS FOR CONTEMPORARY TIMBER HOUSES

入江康隆 — * 1 野俣善則 — * 2

Yasutaka IRIE — * 1 Yoshinori NOMATA — * 2

キーワード：
在来工法木造住宅, 建設現場調査, 常時微動測定, 固有振動数, 減衰定数, 層間揺れ角, 耐震診断

Keywords:
Contemporary timber house, Construction site survey, Microtremor measurement, Natural frequency, Damping coefficient, Torsional angle between upper and lower floors, Seismic diagnosis

In order to apply the results of microtremor measurements and construction site surveys to seismic diagnosis of contemporary timber houses, we investigate the relation between dynamic characteristics and seismic diagnosis. The main results obtained from these investigations are as follows.

Timber houses having large translational frequency and damping coefficient, are estimated high quality from the viewpoint of seismic diagnosis. The torsional angle between upper and lower floors, and the torsional frequency of timber houses have a slight correlation with the grade of seismic diagnosis.

1. はじめに

耐震診断では, 既存の木造住宅を対象にして, 耐力要素や接合部などの各仕様から終局強度時の耐震性能を評価している¹⁾。しかし, 既存住宅では, これらの耐震診断の対象となる要素は仕上げ材の下に隠れているため, 仕様の多くが不明であり正確な評価をするのは困難である。一方, 建物の振動特性を求める方法に, 常時微動波形を用いる方法があり, これは既存住宅においても容易に可能なので, この結果を耐震診断に応用ができれば好都合である。

このような意図で, 既存木造住宅の常時微動測定結果から耐震診断への応用を目指した研究に, 例えば文献2),3)がある。これらの対象住宅は, 文献2)では238棟, 文献3)では244棟(微動測定は5棟)と資料数は多いが, 住宅個々の情報量が不足なものが多いため診断結果と振動特性(並進固有振動数)との関係は大きくばらつき良い相関は得られていない。筆者等は, 十年来, 住宅の建設現場調査, および常時微動測定を行っている⁴⁾が, 質量調査まで含む正確な調査とはいえず, また, 常時微動も揺れ成分までを含めた十分な測定ではなかった。

本論文は, 資料不足による耐震診断の不確かさを, 詳細な常時微動測定により補うための基礎資料を提供するものである。この際, 建築年による使用材料の劣化, 仕様・工法に関する不確かな情報から生じる診断のバラツキを排除するため, もともと既存住宅を対象とする耐震診断を, 新築住宅のみに限定する。また, 同一建設現場を数度訪問することで, 柱梁寸法, 筋交い, 合板の取り付け, その他の部材の種類, 数量, さらに施工方法までを綿密に調査する。ところで, 耐震診断は, 住宅の保有水平耐力の診断のみで, 減衰性能に関する評価は行っていないが, 耐震診断評点は間接的に減衰性能も含めた耐震性能を表す総合指標とみなし, 診断結果と常時微動測定から得られる振動特性との関係を求める。これらの住宅について, 質量, 壁配置などの基礎情報, および振動特性と耐震診断評点との間の相関関係を検討することで, 建設現場調査, 常時微動測定の耐震診断への活用を目指すとするものである。

2. 調査・測定住宅概要

(1)住宅概要

宇都宮市内の在来工法木造住宅を対象として, 同一現場を数度訪れ, 部材レベルの詳細な現場調査を行った。調査期間は2007年9月から2008年11月の延べ43日。その内, 竣工間近の8棟で常時微動測定を行った。調査住宅の概要を, 表1に示す。質量 M_{RF}, M_2, M_1 は, 構成部材の材積に材種を考慮した密度を掛けて求め, 階高中央を境に床位置, 小屋位置にまとめたものである。

(2)測定概要

測定サンプリング周波数は100Hzで, 測定時間は約10分である。住宅の並進, 揺れ, および地盤の振動特性を得る目的で, 図1に示す換振器配置による12ch同時測定を行った。

表1 住宅概要

住宅No.	屋根葺き材	床面積(m ²)		質量(kN・s ² /m)		
		S ₂	S ₁	M _{RF}	M ₂	M ₁
1	瓦葺き	89.85	124.66	22.2	26.66	84.63
2	スレート葺き	68.59	66.52	8.91	11.45	51.57
3	瓦葺き	57.55	91.5	10.97	18.73	75.7
4	ガルバリウム鋼板	46.37	46.37	6.83	8.47	33.38
5	瓦葺き	104.34	110.14	16.79	18.82	74.68
6	ガルバリウム鋼板	71.22	71.22	9.11	12.65	50.27
7	ガルバリウム鋼板	64.1	90.8	6.86	16.62	52.08
8	ガルバリウム鋼板	72.87	72.87	9.23	13.16	52.16

¹⁾ 宇都宮大学大学院学際先端システム学専攻 准教授・工博
(〒321-8585 宇都宮市陽東7-1-2)

²⁾ 宇都宮大学 技術専門職員

¹⁾ Assoc. Prof., Dept. of Advanced Interdisciplinary Sciences, Utsunomiya Univ., Dr. Eng.

²⁾ Technical Official, Utsunomiya Univ.

3. 木造住宅の振動特性

(1) 波形, スペクトル, スペクトル比

住宅 No.5 について, 測定波形とそのフーリエスペクトル, スペクトル比および位相差とを図2に示す。図中, θ_1 , θ_2 , ϕ_{12} は, 前ページの図3に示すように, θ_1 , θ_2 は, 各階において両端部の水平変位の差を換振器間距離で除して求めた1階, 2階の平面内振れ角, ϕ_{12} は, 各階平面内振れ角の差により建物端部で生じる振れ変形を階高で除して次式により求めた層間振れ角である。

$$\phi_{12} = (\theta_2 - \theta_1) \frac{l_y}{2 \times h_1} \quad (1)$$

解析は静穏な1区間20.48秒を6区間用いて行った。住宅の応答は測定サイトの状況の影響を受ける。そこで, サイトごとの1階での並進応答波形の大きさを揃えることにする。すなわち, 各サイトにおいて約120秒間の測定波形を用い, ピーク時刻毎の振幅値の平均から1階平均振幅を求め, これらの比率で, 式(1)で得られた結果を除すことでサイト間の入力の大さの補正を行った(表2()内の値)。スペクトルの平滑化はバルゼンのウィンドウ幅を0.2Hzとして行った。

(2) 並進固有振動数

スペクトル比(2階/1階)において卓越している振動数より, ロッキングを含む建物固有振動数を求めることができる。この振動数を建物系固有振動数と称して求めた。スペクトルの卓越が不明確な場合には, 位相遅れが $\pi/2$, または $-\pi/2$ 程度になる振動数を目安にして定めた(図2の上から5, 6段目の図参照)。

(3) 振れ固有振動数

図2の7,8段目の θ_1 , θ_2 のスペクトル, および ϕ_{12} のスペクトルと位相差から, 13.9Hz附近から, 1, 2階が $\pi/2$, または $-\pi/2$ の位相差になり位相が乱れることから, この振動数を振れ固有振動数と定めた。

(4) 減衰定数

減衰定数は, 並進波形のスペクトル比の卓越振動数における曲線から, $1/\sqrt{2}$ 法を用いて求めた。

以上のようにして求めた振動特性の結果を, 表2にまとめて示す。対象住宅8棟における平均値は, 並進固有振動数7.5Hz, 振れ固有振動数10.1Hz, 層間振れ角 2.8×10^{-8} rad., 減衰定数2.7%であった。

4. 木造住宅の振動特性と診断評点の関係

(1) 木造住宅の耐震診断

日本建築防災協会発行「木造住宅の耐震診断と補強方法¹⁾」の中「精密診断法1(保有耐力診断法)」に従い, 図面や現場調査の情報に基づき, 住宅8棟の耐震診断を行った。

診断評点の算出に際しては, さまざまな要因を考慮し低減係数をかけるが, 対象住宅が新築なので, 偏心率による低減のみを考慮する。耐力要素の評価は, 文献¹⁾で規定されている壁強さ係数に基づく。

(2) 住宅の基礎情報の活用

住宅の振動特性と耐震診断評点との関係を検討する前に, 振動特性に密接な関係がある住宅の基礎情報(床面積, 質量, 耐力壁の配置バランスなど)と振動特性との関係について, まとめる。

1階床面積に対する2階床面積の比(S_2/S_1), 2階床位置質量に対する小屋位置質量の比(M_{RF}/M_2)と並進固有振動数との関係を, それぞれ, 図4, 図5に示す。図4からは, 相関はほとんど見られない。図

図2 波形, スペクトル, スペクトル比(住宅No.5 短辺)

表2 振動特性のまとめ

住宅No.	並進固有振動数(Hz)		振れ固有振動数(Hz)	1階平均振幅(比率)		平均層間振れ角(補正値)		減衰定数(%)	
	短辺	長辺		(10 ⁻⁶ m)		(10 ⁻⁸ rad.)		短辺	長辺
1	6.4	5.8	9.0	0.021	(0.11)	1.377	(12.05)	2.1	2.2
2	6.1	7.5	9.0	0.021	(0.11)	1.377	(12.05)	2.9	1.6
3	7.2	7.9	11.2	0.102	(0.55)	3.403	(6.20)	2.8	3.0
4	4.9	5.9	9.1	0.563	(3.04)	3.251	(1.07)	1.1	1.2
5	9.2	8.0	13.9	0.063	(0.34)	1.557	(4.54)	3.1	2.9
6	10.1	8.9	8.4	0.085	(0.46)	2.590	(5.66)	3.3	2.7
7	7.9	8.9	11.4	0.319	(1.72)	1.805	(1.05)	4.0	3.8
8	7.0	8.4	7.9	0.143	(0.77)	5.699	(7.38)	3.1	3.4
平均	7.4	7.7	10.1	0.185	(1.00)	2.812	(2.81)	2.8	2.6

図4 床面積比と固有振動数

図5 建物質量比と固有振動数

5 から、質量比が1に近くなるほど、すなわち総2階に近づくほど、固有振動数が低くなる傾向が認められる。

そこで、この建物質量比と精密診断評点（以降、単に診断評点）との関係を求めて、図6に示す。これによると、質量比が1（総2階建て）に近づく、診断評点が下がる傾向にあることが分かる。

以上のように、パラツキはあるが、住宅の1、2階の質量比の違いは診断評点に影響を及ぼす。これ以外にも影響を及ぼす要因として考えられるのは、屋根葺き材料、住宅規模（床面積）、1、2階の用途（1階居間で2階個室群、あるいはその逆）などがある。これらの要因のうち、振動特性、診断評点に最も影響を及ぼすと考えられる屋根葺き材料の違いで対象住宅を区分し、瓦葺き住宅は3棟のみと少ないことから、非瓦葺き住宅5棟についてのみ振動特性と診断評点との関係を求める。以下の図において、図中の数字は住宅番号に対応し、近似直線は非瓦葺き住宅のみについての関係を示す。

(3)並進固有振動数と診断評点の関係

並進方向固有振動数と診断評点との関係を図7に示す。短辺および長辺方向ともに、固有振動数が大きい住宅ほど、診断評点が高くなる傾向が見られる。図中の近似直線は、実線が1階、破線が2階についての関係を表し、相関係数は0.53～0.94と高い。並進方向固有振動数と1階における診断評点の関係式を、以下に示す。ちなみに、屋根葺き材料を区別せず、全8棟で求めた相関係数は、0.47～0.82であった。

$$[\text{短辺}] I_f = 0.42 \times f - 0.56 \quad \text{相関係数:0.94} \quad \text{---(2)}$$

$$[\text{長辺}] I_f = 0.27 \times f + 0.46 \quad \text{相関係数:0.73} \quad \text{---(3)}$$

$$I_f: \text{診断評点}, \quad f: \text{並進方向固有振動数(Hz)}$$

(4)減衰定数と診断評点との関係

精密診断では、建物の減衰性能に関する評価は行っていない。しかし、「はじめに」でも述べたように、耐震診断評点を建物の耐震性能を表す総合指標と考え、この評点と減衰定数との関係を求め、図8に示す。短辺および長辺方向ともに、減衰定数が大きい住宅ほど、診断評点が高くなる傾向が見られる。図中の近似直線は、実線が1階、破線が2階の診断評点で、相関係数は0.63～0.89と高い。減衰定数と1階における評点の関係式を、以下に示す。ちなみに、全8棟で求めた相関係数は、0.32～0.78であった。

$$[\text{短辺}] I_h = 50.12 \times h + 0.98 \quad \text{相関係数:0.63} \quad \text{---(4)}$$

$$[\text{長辺}] I_h = 37.17 \times h + 1.63 \quad \text{相関係数:0.86} \quad \text{---(5)}$$

$$I_h: \text{診断評点}, \quad h: \text{減衰定数}$$

(5)偏心率と揺れ固有振動数との関係

偏心率と揺れ固有振動数との関係を、図9に示す。揺れ固有振動数には、短辺、長辺の区別はないが診断評点は短辺、長辺の区別をしているので、図は短長辺で別々に表示している。短辺方向非瓦2階においては、相関は見られないが、その他の場合には、偏心率の低下に伴い、揺れ固有振動数が大きくなる傾向が見られるが、相関係数は高くない。ちなみに、屋根葺き材料を区別しないで求めた相関係数は0.36～0.49であった。

(6)偏心率と層間揺れ角との関係

偏心率と層間揺れ角との関係を、図10に示す。偏心率が大きい住宅ほど、層間揺れ角が大きくなる傾向が見られる。相関係数は、0.17～0.54と高くない。ちなみに、全8棟で求めた相関係数は、0.40程度であった。

図6 建物質量比と診断評点

図7 並進固有振動数と診断評点

図8 減衰定数と診断評点

図9 揺れ固有振動数と偏心率

(7) 偏心率, 層間捩れ角, 捩れ固有振動数と診断評点の関係

捩れ振動に関して, (5), (6) で検討した偏心率, 層間捩れ角, 捩れ固有振動数と評点の関係を, 図 11 ~ 図 13 に示す。いずれの図からも, 高い相関性は読み取れない。図 11 については, 例えば No. 6 は, 西, および, 北面にはほとんど開口部がなく耐力壁が張りめぐらされているため, 偏心率は大きい, 診断評点は高い, No. 4 は, 耐力壁の配置バランスが良いので壁量はそれほどでもなく診断評点は低いなど, 様々であるためである。図 12 については, 層間捩れ角の大きさは, 感覚的には耐力壁量に反比例するので, 診断評点は小さくなるものと予想したが, そのような結果にはなっていない。図 13 については, 捩れ固有振動数の高さは捩れにくさの指標となり, その結果が診断評点に反映されるものと考えたが, 図 13 左の 1 階においては, そのような結果になっていない。

5. まとめ

建設中の住宅 8 棟について, 図面, 詳細な現場調査と竣工間近の常時微動測定から, 振動特性と精密診断の診断評点との関係を求めた結果, 以下のことが分かった。

- (1) 並進固有振動数が大きい住宅ほど, 診断評点は高い(図 7)。
- (2) 減衰定数が大きい住宅ほど, 診断評点は高い(図 8)。
- (3) 捩れ振動特性の指標である偏心率, 層間捩れ角, 捩れ固有振動数と診断評点の間の有意な関係は認められない。(図 11, 12, 13)。

上記(1), (2)については, すでに報告があり, 著者等も確認している。これについては, 診断評点のバラツキが小さいので, 高い相関性を得ることができた。(3)については以下のような理由が考えられる。

まずは, 調査棟数が 8 棟と少なかったこと。次に, ここでは, 単独の振動特性と住宅の総合評価を示す診断評点との 1 対 1 の関係にしか着目していないこと, すなわち, 複数の要因との関係にも着目する必要があること。さらに, 対象住宅の同質性, すなわち, 屋根葺き材料, 床面積, 床面積比, 質量比, 1, 2 階の用途 (1 階居間, 2 階個室群) などがまちまちであったことなどである (表 1)。また, 捩れの詳細な測定を意図しながら, 屋階, すなわち, 小屋裏構面での測定が, 現場状況, 危険などの理由からできなかったことで, 層間捩れを 1 階床と 2 階床間で評価せざるをえなかったことも一因である。

今後は, 調査棟数を増やすとともに, 同規模で同質の住宅について資料を揃えた検討を行い, 診断評点との間にさらに精度の高い関係を求めるべく, 継続して研究を行っていくつもりである。

謝辞

測定, 調査を許可してくださった施主の方々, および, 測定, 調査に参加した研究室の大学院生, 学部生に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 木造住宅の耐震診断と補強方法, (財) 日本建築防災協会, 2004.
- 2) 田端千夏子, 大橋好光: 微動測定とその耐震診断への応用の可能性, 日本建築学会構造系論文集, 第 616 号, pp141-147, 2007 年 6 月.
- 3) 馬場章子, 藤田香織, 饗庭佐, 佐藤弘美: 神田地区における既存木造戸建て住宅の耐震性能評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1 構造Ⅲ, pp263-264, 2006. 9
- 4) 入江康隆: 建設段階に伴う 2 階建て在来工法木造住宅の振動特性の変遷, 構造工学論文集, Vol. 44B, pp463-470, 1998. 3

図 10 偏心率と層間捩れ角

図 11 偏心率と診断評点

図 12 層間捩れ角と診断評点

図 13 捩れ固有振動数と診断評点

[2009 年 6 月 19 日原稿受理 2009 年 8 月 28 日採用決定]