

木造2階建て建築物の耐震性評価について

—綾部市志賀郷公民館の起振器実験—

高谷富也¹・西川隼人²・西村良平³・清水嵩史⁴

要旨：木造2階建て建築物である綾部市志賀郷公民館の耐震性を評価するために、起振器を用いた振動実験を行った。本研究は、志賀郷公民館の耐震診断結果を踏まえて、起振器を用いた耐震性評価結果との比較検討を行ったものである。また、最近行われている木造建築物の微動計測による耐震性評価の妥当性を検討するために、起振器による振動実験結果との比較も併せて行った。

キーワード：公民館、起振器実験、共振振動数、上部構造評点、常時微動、伝達関数、耐震診断

1. はじめに

近年、耐震改修促進法¹⁾および改正耐震改修促進法²⁾の施行により、1981年以前に建てられた耐震性に問題があるとされる伝統的構法で建てられた木造建築物および在来軸組構法による古民家や木造住宅の耐震診断や補強改修等が行われてきている。

一般に、(財)日本建築防災協会発行の2004年³⁾または2012年改訂版「木造住宅の耐震診断と補強方法」⁴⁾に記載されている診断法に従って、上部構造評点を指標とした木造建築物の耐震診断を行うとともに、耐震補強を行っているのが現状である。

著者らは、これまでに古民家建築物を対象として、起振器を用いて木造建築物の固有振動数や減衰定数を求めるとともに、常時微動計測による固有振動数の推定を行っている^{5),6)}。

本研究では、昭和28年に建てられ、現在も使用されている木造2階建て建築物である綾部市志賀郷公民館を対象として、起振器を用いて木造建築物の固有振動数や減衰定数を求めるとともに、常時微動計測による固有振動数の推定を行ったものである。特に、起振器実験と常時微動計測から得られる固有振動数の比較検討を通じて、木造建築物の微動計測による耐震性評価の妥当性を調べたものである。

2. 対象とした綾部市志賀郷公民館について

Photo.1は、今回対象とした綾部市志賀郷公民館の道路に面した前景写真を示したものである。この木造建物は、昭和28年(1953年)に竣工されており、1階床面積が362.71m²、2階床面積が198.74m²の地上2階建て木造建築物である。現状の用途は公民館と診療所として使用されており、建物の後ろに平屋建ての診療所が併設されている。



Photo.1 Full view of Shigasato community center

現在、綾部市では志賀郷公民館の耐震補強を踏まえた利用を視野に入れた耐震改修工事を平成30年3月まで行っている。このため、著者らは耐震改修後においても起振器を用いた志賀郷公民館の耐震性評価の実施を予定している。

3. 起振器による志賀郷公民館の耐震性評価

3.1 起振器実験について

既に、参考文献5)において、起振器による木造建

1 舞鶴工業高等専門学校 建設システム工学科 教授

2 舞鶴工業高等専門学校 教育研究支援センター 第1技術部門主任(技術専門職員)

3 舞鶴工業高等専門学校 教育研究支援センター 技術職員

4 舞鶴工業高等専門学校 建設システム工学科 5年



Photo.2 Oscillation experimental full view (Oscillation direction : Long span direction)



(a) CH1: Long span direction(Ridge direction) (b) CH2: Long span direction(Ridge direction)
Photo.3 CH1 and CH2 installation on the second floor



(a) CH3: Long span direction(Ridge direction) (b) CH4: Long span direction(Ridge direction)
Photo.4 CH3 and CH4 installation on the first floor

建築物の共振振動数および減衰定数の測定について詳細に説明しているため、ここでは、概説するに留めておく。

振動実験の測定システムは計測部、起振部および解析部などから成っている。測定は、起振器(サンエス社製、永久磁石起振機 SSV-125, 最大加振力:490N, 振動数範囲 0.1~100Hz)によって固有振動数 3~10Hz のスイープ波加振を 360 秒間実施するとともに、サーボ型加速度計(ミットヨ社製, V405-BR, 測定範囲: $\pm 30\text{m/s}^2$, 振動数範囲: DC~400Hz)によって振動波形を記録する。起振機と加速度計で得られた波形から求めたスペクトルの比(伝達関数)から木造建築物の共振振動数を求める。続いて、求めた共振振動数を固有振動数とする正弦波加振によって木造住宅を振動させ、定常時に起振機を急停止させて得られた減衰自由振動波形から木造住宅の減衰定数を評価する。また、常時微動を測定して得られた波形から伝達関数を求め、起振器による振動で得られたものと比較する。

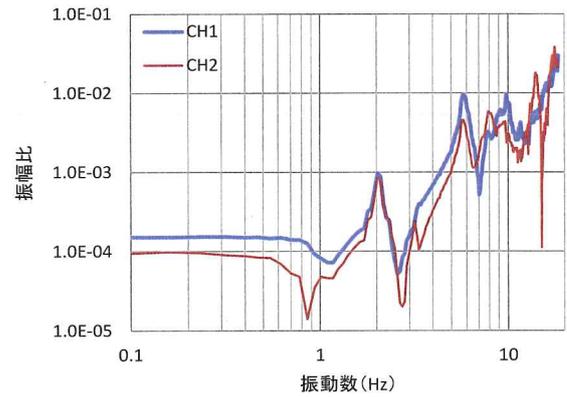
3. 2 起振器および加速度計の設置について

Fig. 1 は綾部市より提供して頂いた耐震診断に関する報告書⁷⁾に記載してあった平面図を修正し、起振器や加速度計の設置位置を示したものである。2階に起振器を設置し、加速度計 CH1 と CH2 をそれぞれ2階の南西と北西の位置に設置している。また、1階には南西に CH3 を、玄関横に CH4 を設置している。CH4 は、起振器と同時に計測を行う微動計測の際にスペクトル比として求める地盤の振動を計測するものである。なお、CH0 は起振器に取り付けた加速度計を示している。Photo. 2 は2階における起振器と計測機器周辺の振動実験風景を示したものである。また、上述した4つの加速度計の設置風景を、Photo. 3 および Photo. 4 に示しておく。

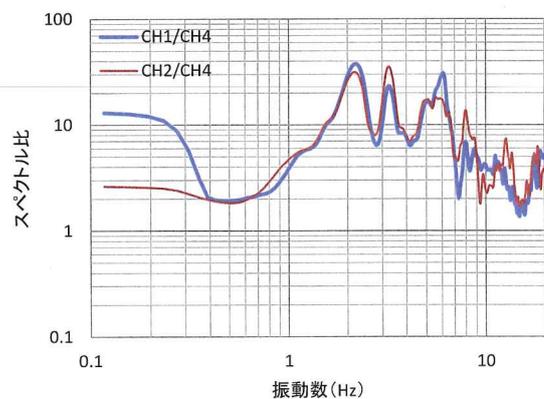
3. 3 起振器による実験結果

(1) 長辺方向(桁行方向)

Fig. 2(a)は、長辺方向(桁行方向)の起振器実験において用いた CH1 および CH2 の加速度計で計測された振動数と振幅比(起振器の加速度計 CH0 に対する CH1 または CH2 との比)の関係、すなわち伝達関数を示したものである。一方、Fig. 2(b)は、長辺方向(桁行方向)の微動計測において用いた CH1 および CH2 の加速度計で計測された振動数と振幅比(玄関設置の加速度計 CH4 に対する CH1 または CH2 との比)の関係、すなわちスペクトル比を示したもので



(a) Oscillation



(b) Microtremor

Fig. 2 Transfer function of long span direction

Table 1 Natural frequency of long span direction (Oscillation case, unit: Hz)

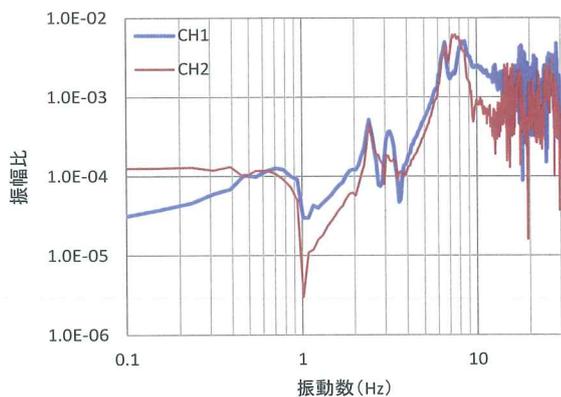
	第1次	第2次	第3次
CH1	2.03	5.78	9.77
CH2	2.03	3.20	5.78

Table 2 Natural frequency of long span direction (Microtremor case, unit: Hz)

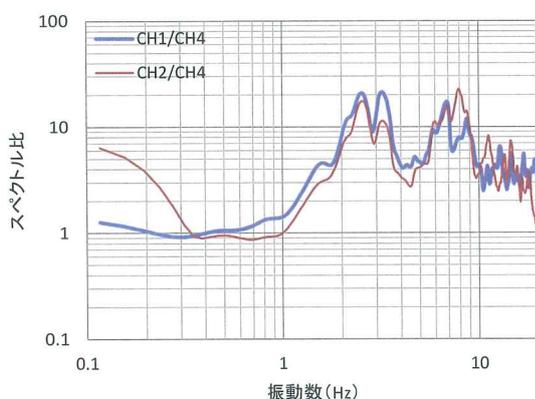
	第1次	第2次	第3次
CH1	2.19	3.24	6.09
CH2	2.19	3.24	5.63

Table 3 Damping coefficient for long span and short span directions

	Long span	Short span
CH1	2.04%	1.62%
CH2	2.09%	1.47%



(a) Oscillation



(b) Microtremor

Fig.3 Transfer function of short span direction

Table 4 Natural frequency of short span direction
 (Oscillation case, unit: Hz)

	第1次	第2次	第3次
CH1	2.42	3.20	6.56
CH2	2.42	3.05	6.56

Table 5 Natural frequency of short span direction
 (Microtremor case, unit: Hz)

	第1次	第2次	第3次
CH1	2.54	3.20	6.91
CH2	2.58	3.24	6.95

ある。また、Table 1 および Table 2 は Fig. 2 に示す起振器および微動計測から求められた第1次～第3次固有振動数の結果をまとめたものである。さらに、Table 3 は長辺方向および短辺方向にそれぞれの第1次固有振動数で共振振動させた場合に計測された減衰定数を示したものである。減衰定数が大きくなれば、地震による建築物の揺れが早期に弱まる

ことを示している。

CH1 および CH2 における第1次固有振動数は2.03Hz にピークが見られ、CH1 の第2次固有振動数とCH2 の第3次固有振動数が一致していることがわかる。しかしながら、第2次と第3次の固有振動数は異なる値となっており、CH1 は南西側の2階隅に設置されており、CH2 が設置された北東側廊下隅における剛性の違いによるものと考えられる。このため、CH2 には1階の調理場による剛性の違いに起因すると考えられる「ねじれ振動」の影響が表れたものと思われる。

一方、微動計測結果においてはCH1 の固有振動数とCH2 のそれが一致している傾向が見られる。また、起振器による固有振動数と微動計測による固有振動数と異なる値となっており、微動計測による固有振動数が多少高くなっていることがわかる。この傾向は、これまで行ってきた起振器と微動計測からの結果と同じ傾向を示している。Table 3 に示した長辺方向のCH1 の第1次固有振動数2.03Hz で共振振動させた場合に計測された減衰定数として、CH1 とCH2 はそれぞれ2.04%および2.09%の値となっている。これらの起振器および微動計測結果より、耐震性が非常に低いため、「震度6強」または「震度7」の地震動が生じた場合には、倒壊の危険性が考えられる。

また、後述する短辺方向のCH1 の第1次固有振動数2.42Hz で共振振動させた場合に計測された減衰定数として、CH1 とCH2 はそれぞれ1.62%および1.47%の値となっている。これは、Fig.1 に示す平面図からも明らかなように、CH2 の方が1階の調理場がある構造の影響を受けて剛性の違いが表れたものと考えられる。したがって、減衰定数の値が小さいため、強震動を受けた場合の揺れが早期に弱まりにくいことが考えられる。

(2) 短辺方向 (梁間方向)

Fig.3 は、短辺方向 (梁間方向) の起振器実験および微動計測から得られたCH1 およびCH2 の加速度計で計測された伝達関数を示したものである。また、Table 4 および Table 5 は Fig.3 に示す起振器および微動計測から求められた第1次～第3次固有振動数の結果をまとめたものである。

Fig.3 および Table 4 より、CH1 およびCH2 における第1次固有振動数は2.42Hz にピークが見られ、CH1 とCH2 の第3次固有振動数が一致していることがわかる。しかしながら、CH1 とCH2 の第2次の固

有振動数は多少異なる値となっている。これは CH1 が南西側の 2 階隅に設置されており, CH2 が設置された北東側廊下隅における剛性の違いによるものと考えられる。

一方, Fig. 3 および Table 5 より, 微動による固有振動数の結果は, Table 4 に示す起振器による結果に比べてやや高い値を示していることがわかる。また, Table 3 に示した短辺方向の CH1 の第 1 次固有振動数 2.42Hz で共振振動させた場合に計測された減衰定数として, CH1 と CH2 はそれぞれ 1.62% および 1.47% の値となっている。これは, Fig. 1 の 1 階平面図の右側下に位置する平屋建ての診療所 (図面には示されていない) の影響が表れたものと推察され, CH1 の減衰定数がやや大きくなったものと考えられる。これより, 長辺方向に比べて短辺方向の振動は揺れが弱まる程度が小さいことがわかる。

(3) 考察

Fig. 2 および Fig. 3 に示す起振器および微動計測から算定された伝達関数より, いずれの場合においても, 長辺方向の固有振動数が短辺方向のそれに比べて小さくなっており, 短辺方向に比べて長辺方向の剛性が小さいことが分かる。これは, Fig. 1 に示す平面図からも明らかなように, 短辺方向に比べて長辺方向における壁が少ないことによる壁量の違いや 1 階の調理場および診療所の併設が木造建築物である公民館の剛性に表れているものと考えられる。しかしながら, Table 3 に示されている減衰定数からは, 長辺方向の減衰定数に比べて短辺方向の減衰定数がやや小さいものとなっており, 長辺方向における揺れが早期に弱まることが分かる。これは, 木造建築物の構法などに起因しているものと考えられることから, 今後, 伏図をもとに構法の観点から減衰定数の違いを考察する必要がある。

(4) 志賀郷公民館の耐震診断結果

綾部市より提供して頂いた耐震診断に関する報告書⁷⁾によれば, 精密診断法による志賀郷公民館の耐震診断結果である上部構造評点は, Table 6 に示す値となっている。この表より, 上部構造評点 0.27 のため, 対象の志賀郷公民館は「震度 6 強」または「震度 7」の地震動に対して, 「倒壊する可能性が高い」ことがわかる。なお, Table 6 に見られる X 方向および Y 方向は, それぞれ Fig. 1 に示す短辺方向および長辺方向を意味している。また, 精密診断法による上部構造評点は, 次式により評価される。

$$\text{上部構造評点} = \frac{\text{保有耐力 (kN)} \quad {}_{ed}Q_u}{\text{必要耐力 (kN)} \quad Q_r} \quad (1)$$

ここに, ${}_{ed}Q_u$ は保有耐力を, Q_r は必要耐力を意味する。

一般に, 精密診断法 (保有耐力診断法) における保有耐力 Q_r の算定においては, 建築基準法施行令第 88 条の 2 に準じて求めるもので, 地震係数, 振動特性係数, 層せん断力分布係数, 標準せん断力分布係数, 各階の重量, 形状割増, 軟弱地盤割増が考慮される。また, 精密診断法 (保有耐力診断法) における保有耐力 ${}_{ed}Q_u$ の算定においては, 無開口壁耐力, 有開口壁耐力, 剛性率による低減係数, 偏心率と床の仕様による低減, 劣化度が考慮される。

ところで, 起振器および微動計測より得られた第 1 次固有振動数と精密診断法による上部構造評点には明らかな違いが見られることがわかる。この原因としては, 精密診断法が志賀郷公民館の後方に併設された平屋建て診療所を外して行われたためと考えられる。一方, 起振器および微動計測では平屋建て診療所を外して実験を行っていない。この違いについては, 今後木造架構モデルを用いた地震時倒壊解析を通じて明らかにしたいと考えている。

上述したように, 起振器や微動計測結果から得られた第 1 次固有振動数や減衰定数の値および精密診

Table 6 Diagnosis of Shigasato community center

方向	階	必要耐力 Q_r (kN)	保有耐力 ${}_{ed}Q_u$ (kN)	充足率 ${}_{ed}Q_u/Q_r$	判定
X 方向	2 階	112.20	42.00	0.37	倒壊する可能性が高い
	1 階	217.12	59.95	0.27	倒壊する可能性が高い
Y 方向	2 階	112.20	38.09	0.33	倒壊する可能性が高い
	1 階	217.12	62.09	0.28	倒壊する可能性が高い

断法による耐震診断結果からも、対象の志賀郷公民館の木造建築物は「倒壊する可能性が高い」ことを示しており、起振器および微動による耐震性評価結果を裏付けるものとなっていることがわかる。

4. アレイ計測による志賀郷公民館の地盤特性評価

著者らは、起振器実験の際に、Photo. 5に示すような加速度計を同心円上(半径1mと3m)に設置したアレイ計測により志賀郷公民館付近の表層地盤の位相速度を求め、地盤特性を評価した。微動アレイ計測における位相速度の解析法としてアレイの中心点に計器を設置しないCCA法(Center-less Circular Array)⁸⁾を用いた。CCA法の特徴は従来の手法に比べて低周波数の位相速度推定精度が高いことにある。アレイ計測より得られた位相速度をFig. 4に示す。同図を見ると、20~30Hzでは位相速度が150~200m/s程度であり、極表層では軟弱な地盤が堆積しているものと考えられる。しかし、20Hzを境に急激に位相速度が大きくなり、14Hzの位相速度が400m/sとなることから、固い地盤が地表付近に存在している可能性がある。以上の位相速度の考察から、志賀郷公民館の地盤が良好であることが窺える。



Photo. 5 Array observation

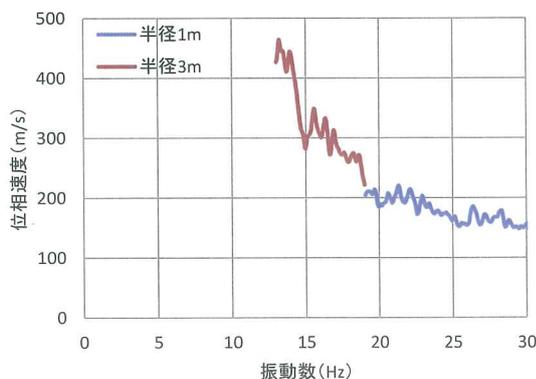


Fig. 4 Phase velocity of microtremor

5. まとめ

対象とした木造建築物の強震時における耐震性を評価するために、木造建築物を起振器で揺らし木造建築物が最も揺れやすい振動数、いわゆる固有振動数を測定した。同時に、微動計測を実施して、起振器を使用せず固有振動数を算出することが可能かどうかの検討も行った。また、木造建築物の揺れが弱まる程度を表す減衰定数を起振器による振動実験結果から算出した。さらに、アレイ計測を通じて、対象の木造建築物周辺地盤の増幅特性を算出した。その結果、次に示す事項が明らかとなった。

- 1) 起振器実験および微動計測から得られた伝達関数より、対象とした木造建築物の長辺方向(桁行方向)の剛性が、短辺方向(梁間方向)に比べて小さい。これは、長辺方向に比べて短辺方向における壁が多く存在すること、および1階の調理室と平屋建て診療所の併設による壁量の違いが剛性に表れているものと考えられる。
- 2) 起振器実験から得られた減衰定数より、長辺方向(桁行方向)の減衰定数に比べて短辺方向(梁間方向)の減衰定数が小さく、長辺方向(桁行方向)における揺れが多少早期に弱まる。短辺方向は長辺方向に比べて耐震性は高いと考えられるが、揺れが早期に弱まらないことを示している。これは、長辺方向における壁量の多さと木造建築物の構法に起因しているものと考えられる。
- 3) 起振器実験および微動計測から得られた伝達関数より、木造建築物の長辺方向(桁行方向)における第1次固有振動数の値は、CH1およびCH2ともに、起振器実験および微動計測が一致した。しかしながら、第2次および第3次固有振動数は一致しなかった。これは、1階の調理場と平屋建て診療所の併設による剛性の違いに起因すると考えられる「ねじれ振動」の影響を受けたものと考えられる。
- 4) 一般診断法(精密診断法)による上部構造評点を踏まえた結果、長辺および短辺方向ともに「震度6強」または「震度7」の地震動に対して、1階の上部構造評点が0.28および0.27となっており「倒壊する可能性が高い」ことが判明しており、これは起振器および微動計測結果より得られた第1次固有振動数の値を裏付けるものとなっている。
- 5) 起振器および微動計測より得られた第1次固有振動数と精密診断法による上部構造評点に

は明らかな違いが見られる。この原因は、精密診断法が志賀郷公民館の後方に併設された平屋建て診療所を外して行われたものと考えられる。一方、起振器および微動計測では平屋建て診療所を外して実験を行っていないためである。

今後、志賀郷公民館の耐震改修工事が終了した際には、改めて耐震改修の妥当性を検証するために、起振器を用いた耐震性評価実験を行いたい。また、著者らが行ってきている柱、梁、壁から構成される木造架構モデルを用いた地震時倒壊解析⁹⁾を通じて、より詳細に志賀郷公民館の耐震性の評価を明らかにするとともに、耐震改修の妥当性についても地震時倒壊解析を通じて検証したいと考えている。これについては、稿を改めて報告したい。

謝辞：最後に、綾部市教育委員会教育部社会教育課 学び推進・青少年担当の三本木紀子様には、お忙しい時期に対象とした志賀郷公民館における起振器実験および微動計測へのご協力を頂き、紙面を借りて感謝の意を表します。

参考文献：

1) 国土交通省:耐震改修促進法(平成7年12月), 1995.

- 2) 国土交通省:改正耐震改修促進法(平成18年1月), 2006.
- 3) (財)日本建築防災協会:2004年改訂版「木造住宅の耐震診断と補強方法」, 2004.
- 4) (財)日本建築防災協会:2012年改訂版「木造住宅の耐震診断と補強方法」, 2012.
- 5) 高谷富也, 西川隼人, 西村良平:起振器を用いた木造古民家住宅の耐震性評価について, 舞鶴工業高等専門学校紀要, 第51号, pp.31-41, 2016.
- 6) 高谷富也, 西川隼人, 西村良平, 平野竜一朗:起振器を用いた木造古民家住宅の耐震性評価について -小浜西組における町並み資料保存館を対象として-, 舞鶴工業高等専門学校紀要, 第52号, pp.29-38, 2017.
- 7) 綾部市:志賀郷公民館 耐震診断・補強計画報告書 精密診断法1方法1による, 2017.3.
- 8) 長郁夫, 多田卓, 篠崎祐三:極小微動アレイによる浅部地下構造探査法の提案-CCA法による超分解能の利用-, 日本地震学会秋季大会講演予稿集, 142, 2006.
- 9) Tomiya Takatani and Hayato Nishikawa : Seismic Collapsing Behaviour of Three-story Wooden House under Strong Earthquake Ground Motion, Journal of Civil Engineering and Construction (ISSN: 2051-7769, eISSN: 2051-7777), 2015.

(2018.1.12 受付)

EVALUATION OF SEISMIC PERFORMANCE OF SHIGASATO COMMUNITY CENTER BY VIBRATION OSCILLATION SYSTEM

Tomiya TAKATANI, Hayato NISHIKAWA, Ryohei NISHIMURA and Takashi SHIMIZU

ABSTRACT : In order to evaluate seismic performance of an old Japanese-style structure, Shigasato community center, Ayabe city, against a strong earthquake motion with the Japan Meteorological Agency of “6 upper” or “7” seismic level, an oscillation vibration for this structure was conducted. In this paper, seismic diagnosis of this Japanese-style structure was carried out, and also the predominant frequencies and damping coefficients for both long span and short span directions were evaluated from an oscillation vibration experiment. In addition, the predominant frequencies for both long span and short span directions were done from the microtremor observation. A validity of microtremor observation to seismic performance evaluation of an old Japanese-style wooden structure was discussed based on the oscillation vibration experiment results.

Key Words : Community center, Oscillation vibration, Predominant frequency, Upper structural index, Microtremor, Transfer function, Seismic diagnosis