常時微動計測による木造建物の最大変形推定手法の精度検証

ACCURACY VERIFICATION OF MAXIMUM DEFORMATION ESTIMATION METHOD FOR WOODEN STRUCTURE ON MICROTREMOR MEASUREMENT

西塔純人 ——— *1 杉野末奈 ——— *2
林 康裕 ——— *3

Sumito SAITO ——— *1 Mina SUGINO ——— *2
Yasuhiro HAYASHI ——— *3

キーワード：
常時微動計測, 被災度判定, 固有振動数

Keywords:
Microtremor measurement, Determination of the degrees of damage, Natural frequency

At the past paper, the relationship of natural frequency of microtremor measurement and maximum experienced deformation angle about low-rise houses was proposed. In this paper, it was conducted the accuracy verification of the aforementioned relationship, using the full scaled shaking table tests and the post-earthquake investigation, about Japanese conventional wooden structure and Japanese traditional wooden one. And, through investigation before and after the earthquake of a Japanese conventional wooden house, the effectiveness of the proposed relationship was confirmed.

1. はじめに

日本の住宅のうち多くを占める低層の住宅について、耐震化率の向上と被災後の継続利用可否判断の即時性の向上は、被害軽減と早期復旧を進める上で重要な課題である。著者らは、被災前の耐震診断法と被災後の被災度判定法への常時微動計測の適用に関する研究を行ってきた。

既報では、既存在来木造の耐震診断評価値と常時微動計測による固有振動数を用いた簡易評価値との関係について、簡易評価値に建築年代による接合部仕様の変化を考慮した低減率を加味することで良い相関が得られることを確認した¹⁾。次に、実際の地震において、軽量鉄骨造住宅の被災度と被災後の固有振動数の関係には相関性があることを確認した²⁾。さらに、在来木造・伝統木造の部分試験体、軽量鉄骨造の実大試験体の振動台実験結果を用いて、構法ごとの常時微動計測により算出した固有振動数と経験最大変形角の関係の評価式(f_m/γ_{max})を提案した³⁾。ただし、提案した評価式は、特定の実験結果によるものであり、より精度向上のために、適用例を増やす必要性を述べた。そこで本報では、E-Defense等で実施された在来木造・伝統木造の実大振動台実験結果および地震前後の調査結果を用いて、提案する評価式を適用し、その精度を検証する。

2. 提案評価式³⁾

既報では、構法ごとの経験最大変形角 γ_{max} と固有振動数 $f_0 \cdot f_m$ の関係について、杉野ら⁴⁾が示した式をもとに修正した、以下の評価式(1)を提案した。

$$f_m/f_0 = 1 / \{1 + (\gamma_{max}/\gamma_{0.5m})^{\alpha}\}^{0.5} \quad (1)$$

ここで、

f_0 : 初期(建設時)の常時微動計測による固有振動数(Hz)

f_m : 地震等経験後の常時微動計測による固有振動数(Hz)

γ_{max} : 経験最大変形角(rad)

$\gamma_{0.5m}$: $(f_m/f_0)^2=0.5$ となる経験最大変形角 γ_{max} (rad)

=0.009(軽量鉄骨造), 0.011(在来木造), 0.029(伝統木造)

α : f_m/f_0 の γ_{max} に対する低下勾配に関する係数=1.5

図1に、評価式(1)を構法ごとにプロットした結果を示す。

図1 f_m/f_0 - γ_{max} 関係

3. 実大振動台実験による精度検証

評価式(1)の妥当性を確認するために、E-Defenseで実施された実大振動台実験結果を用いた。対象とした実験は、在来木造と伝統木造の以下の2つの実験である。

- ① 在来木造: 平成19年「2階建て木造住宅(大安心の家)の耐震性能検証に関する実験」^{5,6)}
- ② 伝統木造: 平成22年「伝統木造軸組構法の耐震性能検証に関する実験」^{7,8)}

3.1 試験体概要

在来木造の実大振動台実験の試験体概要を以下に示す。実験は E-

¹⁾ 大和ハウス工業(株)総合技術研究所 研究員・博士(工学)
(〒631-0801 奈良市左京6丁目6番地2)

²⁾ 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 准教授・博士(工学)

³⁾ 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 教授・工博

¹⁾ Researcher, Central Research Laboratory, Daiwa House Industry Co., Ltd., Dr. Eng.

²⁾ Assoc. Prof., Dept. of Architecture and Architectural Eng., Kyoto Univ., Dr. Eng.

³⁾ Prof., Dept. of Architecture and Architectural Eng., Kyoto Univ., Dr. Eng.

Defenseにて2008年1月8日(1日目)、1月10日(2日目)に実施された。試験体は在来木造軸組構法住宅2階建ての試験体であり、1日目の試験体は品確法の耐震等級3(損傷・倒壊)の試験体、2日目の試験体は同一の試験体の一部筋かいを撤去し、耐震等級2程度とした試験体である。

伝統木造の試験体概要を以下に示す。実験は、同じくE-Defenseにて実施され、大きく4種類の試験体がある。No.1・No.2の試験体は平屋建てとし、No.3・No.4の試験体は2階建てとした。

No.1・No.2の試験体は2011年1月6日～7日に実施している。No.3・No.4の試験は1月13日～14日に実施している。

耐震要素は、No.1～No.3では乾式土壁パネルを採用、No.4は湿式の土壁が採用されている。No.3は柱脚固定式、No.4は柱脚がフリー(柱脚が礎石上に固定されていない)としている。

a) 在来木造

b) 伝統木造 (No. 1・No. 2)

c) 伝統木造 (No. 3)

d) 伝統木造 (No. 4)

図2 試験体外観

3.2 評価手法

対象とする試験はともに、常時微動計測を実施しているものの、概ね試験開始前と試験終了後に実施しており、加振ごとには実施していない。そこで、微振動時の固有振動数の算出には、各加振前後5秒程度の、ほぼ振動台の入力がないデータを活用し、1階床レベルと2階床レベルで計測した加速度波形を用いる。ここで、加振データ最後の5秒のバンドパスフィルターを通した加速度波形より算出した最大変位は、在来木造で0.04～0.11mm(1層高さ2959mm)、伝統木造で0.16～0.59mm(1層高さ2858mm)と十分に微小とみなせる変位であることを別途確認している。

上記のように短いデータの場合、周波数伝達関数等のノンパラメトリック法による固有振動数の算出はバラツキが大きいと判断し、パラメトリック法であるAR法(MEM法)を用いた。AR法はBurgによるアルゴリズムを用いた。

算出過程を以下に示す。まず、1・2階床の加速度波形よりAR法

を用いてPSDを推定する。次に、各PSDよりフーリエスペクトル比を算出し、スペクトルのピークを読み取ることで、1次固有振動数を算出した。ここで、AR法の次数 m を決定する必要があるが、既往文献⁹⁾を参考とし、式(2)より $m=40\sim50$ とした。

$$m < (2\sim3)N^{0.5} \quad (2)$$

ただし、 m は次数、 N はデータ数(=1,000)

算出結果の例を図3に示す。算出結果は明瞭なピークを示しており、同手法による固有振動数の算出精度が高いことを示している。

図3 各試験体のフーリエスペクトル比

3.3 比較結果

1) 在来木造

在来木造の実大振動台実験結果を用いて、提案する $f_m\sim\gamma_{max}$ の精度について検証する。経験最大変形角 γ_{max} は1層の経験最大変位(試験体中央部)を1層の高さで除した値としている。

2種類の試験体(耐震等級3、耐震等級2)の試験結果と $f_m\sim\gamma_{max}$ との関係を図4に示す。 γ_{max} は、1層の経験最大変形角を1層の高さで除した値とした。

提案評価式(式(1))は、層間変形角 $1/200\sim1/50\text{rad}$ に対し近似させている。この変形領域において既往の研究³⁾では合板や筋かいを耐力壁にもつ場合で γ_{max} が1割程度の誤差であった。本実験においても、各試験体の γ_{max} と評価式は1割程度の誤差であり、提案評価式が妥当であることを示している。ただし、耐震等級2のY軸方向については、最大6割程度 γ_{max} を過小に評価している。この要因として、耐力壁の撤去や偏心率の影響(耐震等級3→2で1階Y方向偏心率0.07→0.18(基準法上0.02→0.14))などが考えられるが詳細な検討は今後の課題とする。

図4 $f_m\sim\gamma_{max}$ (在来工法)

2) 伝統木造

伝統木造の平屋・2階建て試験結果と f_m - $\gamma_{\max}$ の精度の検証を行う。

2種類4仕様の試験仕様に対し、試験結果の f_m - $\gamma_{\max}$ を図5に示す。経験最大変形角 $\gamma_{\max}$ は1層の経験最大変位を1層の高さで除した値としている。

1層の試験体(No.1・No.2)と2層崩壊形となった試験体(No.3短手方向)を除けば、いずれの試験体も提案式に対し、概ね提案式と概ね合致している。提案式では、1層崩壊を仮定しているため、2層崩壊となった試験体No.3短手方向では提案式から実験値が乖離したと考えられる。

最大変形角の推定値からの差異は、最大層間変形角1/50rad以上の結果をみると、1層試験体で約6~7割以上に評価しており、2層試験体のうちNo.3長手方向・No.4で約3~+4割程度のばらつきとなった。

図5 f_m - $\gamma_{\max}$ (伝統木造)

3.4 まとめ

以上の結果より、比較的剛性が高く、1層崩壊仮定に近い在来木造では偏心が小さい場合、提案式が概ね適合した。それに対し、剛性の低い伝統木造では、1層の試験体や1層崩壊仮定から外れる試験体については、提案式が過大評価となり、1層崩壊仮定に近い2層試験体については、概ね提案式が適合した。

4 地震後調査による精度検証

ここでは2018年大阪府北部の地震(Mj=6.1)における在来木造を例として、提案する評価式の精度を検証する。

4.1 調査対象

対象とした建物の概要を以下に示す。調査は、地震前の2011年5月と地震後の2018年7月に実施した。

- ・所在地：大阪府高槻市南平台
- ・用途：専用住宅
- ・構造形式：木造軸組構法、大壁構法(土壁+モルタル外壁)
- ・建築年：1972年(新築), 1994年(増築)
- ・床面積：1階 111.54 m², 2階 45.15 m²
- ・階高：1階 2.6m, 2階 2.6m

図6 調査建物概要

調査建物の外観を図6に示す。調査建物は、防災科学技術研究所の強震観測網K-NET高槻(観測点コードOSK002)の約1km北西に位置する。

図7にK-NET高槻の S_a - S_d 曲線を示す。観測データは、EW成分が大きく、地震時の等価固有振動数が3.5Hz以下の建物では $S_d=3\sim 5$ cm(1/100~1/60rad)程度と考えられ、1次設計時の変形を超えている可能性が高く、被災度区分判定基準で示される「小破」程度の損傷がみられる可能性が高い。

図7 S_a - S_d スペクトル(K-NET高槻)

4.2 調査・計測

1) 目視調査

2011年5月に実施した調査(地震前調査)では、住宅の耐震診断をすることを目標とし、建物仕様を確認するための調査を行った。2018年7月に実施した調査(地震後調査)では、地震後の損傷度を把握するための建物の外観・内観調査を行い、損傷箇所をチェックし記録した。

地震前調査でも、基礎・外壁にクラックは一部みられ、地震後調査ではそれらのクラックの伸長や新規のクラックが多くみられた。内装の損傷としては、1階では和室部分で柱の壁の隙間や隅部の欠け等がみられた。リビング・客間等では、ビニルクロス系の仕上げ材のため、切れなどは少なく隅部のクロスのよじれ程度であった。また、1階の被害に比べ、2階の内装などの被害が比較的少ない。

2) 耐震診断結果

地震前調査で実施した耐震診断結果を表1に示す。調査は「2012年改訂版 木造住宅の耐震診断と補強方法」¹⁰⁾の精密診断法1により行った。地震力の算出には、基準法施行令第88条に準じた精算法を用いた。耐震診断結果によると、2階X(東西)方向がやや評価が低

く、損傷しやすいとされ、前述のように 2 階にも内装被害がみられた結果と一致する。

表 1 耐震診断結果概要

階	方向	保有耐力 $Q_d(kN)$	必要耐力 $Q_r(kN)$	評点 Q_d/Q_r	偏心率 R_e
2	X	24.24	27.45	0.88	0.11
	Y	30.04		1.09	0.06
1	X	76.95	73.15	1.05	0.09
	Y	76.71		1.04	0.03

2) 振動計測

地震前と地震後の常時微動計測結果を表 2 にまとめる。計測位置は、玄関土間と階段上の 2 箇所とした。いずれの方向も、1 次固有振動数の低下がみられ、X（東西）方向の低下が大きい。

表 2 地震前後の常時微動計測による 1 次固有振動数

	地震前	地震後
	2011 年 5 月	2018 年 7 月
X（東西）方向	4.94 Hz	4.25 Hz
Y（南北）方向	6.38 Hz	6.15 Hz

3) 被災度判定

3-1) 被災度区分判定基準による判定

現在、被災建物の継続的な利用の可否を判定する基準となっている「2015 年改訂版 再使用の可能性を判定し、復旧するための震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針／（一財）日本建築防災協会」¹⁰⁾の「木造建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針」を参照し、経験最大変形角による被災度区分判定を実施し、軽微～小破と判断した。（表 3）

3-2) 常時微動計測による被災度判定

ここでは、常時微動計測結果(表 2)に基づき、地震時の経験最大変形角 γ_{max} を提案式(1)により算出する。その結果、X 方向は $\gamma_{max}=1/182rad$ 、Y 方向は $\gamma_{max}=1/505rad$ となった。

この結果は、表 3 に示す被災度区分判定に基づく結果に対し、経験最大変形角 γ_{max} をやや小さく評価しており、被災度が「軽微」の第 3 項目（経験最大層間変形角 $\sim 1/120rad$ ）程度の値である。

つぎに、在来木造は時間経過とともに部材間の接合の緩みなどで、初期剛性が低下することが考えられるため、初期の固有振動数 f_0 の補正を試みた。既往の研究¹⁾で導いた既存在来木造の常時微動による固有振動数 f_m と建築年の近似式（調査件数 76 件）を用いて、2011 年と 1972 年の固有振動数 f_m の比率が約 1.2 倍と算定した。その結果を用いて、初期の固有振動数 f_0 を 1.2 倍した時 ($f_0 \rightarrow f_0'$ 、ただし $f_0'=1.2f_0$) の結果を図 9 に示す。この結果では、X 方向 $1/94rad$ 、Y 方向 $1/135rad$ となっており、被災度区分判定の結果と類似する結果となった。したがって、常時微動計測による固有振動数を用いて被災度判定を行い、被災度区分判定の結果と類似させるためには、初期の固有振動数 f_0 を建築年に応じて割り増しすることで、実用性を増すことができるものと考えられる。

表 3 被災度区分判定に基づく判定

経験最大層間変形角				～1/300	～1/200	～1/120	～1/60	～1/45	～1/20	1/20 超
被災度				軽微			小破	中破	大破	倒壊
柱	筋かい			—	—	—	—	—	—	折損
	筋かい			—	—	—	—	はらみ	座屈	複数座屈
外装材	外壁	サッシ・窓張り	横張	—	—	釘の浮き	開口部割れ	開口部割れ、一部浮き	開口部割れ、上下に通る	開口部割れ、上下に通る複数
			縦張	—	—	開口部割れ、目地のズレ	開口部割れ、目地のズレ	開口部割れ、目地のズレ	開口部割れ、目地のズレ	開口部割れ、目地のズレ
		ラス下地 モルタル塗り	開口部割れ、小の割れ	開口部割れ、小の割れ	開口部割れ、小の割れ	開口部割れ、小の割れ	開口部割れ、小の割れ	開口部割れ、小の割れ	開口部割れ、小の割れ	開口部割れ、小の割れ
			開口部等	—	—	サッシ・窓部分外れ	サッシ・窓部分外れ	サッシ・窓部分外れ	サッシ・窓部分外れ	サッシ・窓部分外れ
	土塗り (大壁)	間柱部にひび	間柱部にひび	間柱部にひび	間柱部にひび	間柱部にひび	間柱部にひび	間柱部にひび	間柱部にひび	
		開口部等	—	—	サッシ・窓部分外れ	サッシ・窓部分外れ	サッシ・窓部分外れ	サッシ・窓部分外れ	サッシ・窓部分外れ	
	内装	クロス貼り等の大壁	隅角部	—	隅角部しわ	隅角部しわ	隅角部しわ	隅角部しわ	隅角部しわ	隅角部しわ
			開口部	開口部割れ、部分的な割れ	開口部割れ、部分的な割れ	開口部割れ、部分的な割れ	開口部割れ、部分的な割れ	開口部割れ、部分的な割れ	開口部割れ、部分的な割れ	開口部割れ、部分的な割れ
		ラス下地 しっくい塗	—	—	柱壁に目地のズレ	柱壁に目地のズレ	柱壁に目地のズレ	柱壁に目地のズレ	柱壁に目地のズレ	柱壁に目地のズレ
			土塗り (真壁)	隅角部、貫部分にひび	隅角部、貫部分にひび	隅角部、貫部分にひび	隅角部、貫部分にひび	隅角部、貫部分にひび	隅角部、貫部分にひび	隅角部、貫部分にひび
開口部等			—	—	—	—	—	—	—

図 8 固有振動数 $f_0 \cdot f_m$ と推定経験変形角 γ_{max} の関係

図 9 固有振動数 $f_0' \cdot f_m$ と推定経験変形角 γ_{max} の関係 ($f_0'=1.2f_0$)

5 まとめ

本研究では、既往の研究³⁾で示した常時微動計測による固有振動数の低減率 f_m/f_0 (f_0 :初期(建設時)の固有振動数, f_m :地震等経験後の固有振動数)により推定される地震等被災時の経験最大変形角 γ_{max} と、在来木造・伝統木造の実大振動台実験時の γ_{max} との相関を検討した。ま

た、実際の地震前後の在来木造の調査・測定結果より提案式の有効性を被災度区分判定と比較し検証した。得られた知見を以下に示す。

・在来木造の実大振動台実験について、1層崩壊仮定が成り立つ2層建物の試験体について、提案式による $\gamma_{\max}$ と実験による $\gamma_{\max}$ は偏心が小さい場合、よい相関が得られた。

・伝統木造の実大振動台実験について、2層崩壊となる2層建物の試験体と1層建物の試験体について、提案式による $\gamma_{\max}$ は実験による $\gamma_{\max}$ に対し過大に評価する結果となった。

・地震前後の調査により、既往の住宅に適用する場合、計算に用いる初期の固有振動数 f_0 を計測時の築年数に応じて割増をすることで被災度区分判定による $\gamma_{\max}$ と概ね適合した。

以上の知見により、偏心が小さく、1層崩壊仮定が成り立つ2層の既存在来木造に適用する場合、 f_0 を建築年に応じて割り増しを行い、被災後に f_m を計測することで被災度区分判定と相関する $\gamma_{\max}$ を推定可能であることを示した。

ただし、偏心のある建物・2層崩壊となる建物に関する検討、在来木造以外の構法の建築年と固有振動数の関係のデータ蓄積については今後の課題である。

謝辞

本報では国立研究開発法人防災科学技術研究所強震観測網の強震観測データを用いております。また、同研究所「ASEBI」より貴重な実験データを活用させていただいております。ここに、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Saito S, Kitakura T, Saratani A, Hayashi Y : Study on simple seismic performance evaluation of existing wooden house by micrometer test, AIJ Journal of Technology and Design, Vol. 22, No.50, pp61-65, 2016.2
西塔純人, 北倉友佳, 更谷安紀子, 林康裕 : 微動計測を用いた既存木造軸組構法住宅の簡易耐震性能評価に関する研究, 日本建築学会技術報告集, 50号, pp61-65, 2016.2
- 2) Saito S, Nishimura K, Maeda T, Hayashi Y : Study on natural frequency of light-gauge steel house damaged by earthquake, AIJ Journal of Technology and Design, Vol.23, No.54, pp513-516, 2017.6
西塔純人, 西村健, 前田珠希, 林康裕 : 被災した軽量鉄骨造住宅の固有振動数に関する調査研究, 日本建築学会技術報告集, 54号, pp513-516, 2017.6
- 3) Saito S, Sugino M, Hayashi Y : Evaluation of deformation dependency of primary natural frequency decrease rate of low-rise houses by microtremor measurement, Journal of Structural and Construction Engineering (Transaction of AIJ), Vol. 84, No.757, pp343-350, 2019.3
西塔純人, 杉野未奈, 林康裕 : 常時微動計測による低層住宅の1次固有振動数低下率の変形依存性評価 在来木造、軽量鉄骨造および伝統木造について, 日本建築学会構造系論文集, 第84巻, 第757号, pp343-350, 2019.3
- 4) Sugino M, Takiyama N, Onishi Y, Hayashi Y : Maximum response evaluation of traditional wooden buildings based on amplitude dependency of natural frequency, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 77 No. 672, pp197-203, 2012.2
杉野未奈, 多幾山法子, 大西良広, 林康裕 : 固有振動数の振幅依存性に基づく伝統木造建物の最大応答予測法, 日本建築学会構造系論文集, Vol.77, No.672, pp197-203, 2012.2

- 5) Hayashi T, Fukuda Y, Mori T, Shimizu H, Isoda H, Komatsu K, An experimental study on full scale shaking table test of conventional wood house by E-Defense, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Struct. III, pp135-136, 2008.9

林貴寛・清水秀丸・福田康彦・五十田博・森拓郎・小松幸平, E-ディフェンスを用いた実大木造住宅の耐震性能に関する実験, 日本建築学会学術講演梗概集 C-1, 構造III, 2008.9

- 6) Website of ASEBI at E-Defense, NIED, Project : Experiments on verification of seismic performance of a two-story wooden house, <https://www.edgrid.jp/datas> (accessed 2018-6-12)

国立研究開発法人防災科学技術研究所「ASEBI」より課題名「2階建て木造住宅（大安心の家）の耐震性能検証に関する実験」, <https://www.edgrid.jp/datas> (参考 2018-6-12)

- 7) Report on the Committee for seismic design method and performance verification experiment of traditional construction method, 2010 MLIT subsidy report, NPO Green Archipelago Network, 2011.3

平成 22 年国土交通省補助事業報告書 伝統的構法の設計法及び性能検証実験検討委員会報告書 平成 23 年 3 月 特定非営利活動法人 緑の列島ネットワーク

- 8) Website of ASEBI at E-Defense, NIED, Project : Experiment on seismic performance verification of traditional wooden Frame construction, <https://www.edgrid.jp/datas> (accessed 2018-6-12)

国立研究開発法人防災科学技術研究所「ASEBI」より課題名「伝統的木造軸組構法の耐震性能検証に関する実験」, <https://www.edgrid.jp/datas> (参考 2018-6-12)

- 9) Spectral Analysis, Mikio Hino, Asakura Publishing, 2009
スペクトル解析, 日野幹雄, 朝倉書店, 2009

- 10) Japan Building Disaster Prevention Association : Seismic Investigation of Wooden House, Seismic precise diagnosis and reinforcement method of wooden houses (revised edition), 2012.6

2012 年改訂版 木造住宅の耐震診断と補強方法, (一財)日本建築防災協会, 国土交通省大臣指定耐震改修支援センター

- 11) Japan Building Disaster Prevention Association : Guideline of Damage degree classification criterion and restoration technology on earthquake disaster building, 2015.12

2015 年改訂版 再使用の可能性を判定し、復旧するための震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針, (一財)日本建築防災協会

[2020 年 2 月 5 日原稿受理 2020 年 4 月 13 日採用決定]