

地震時の応答波形を用いた簡易的な木造住宅の固有周期の推定に関する検討*

秋田工業高等専門学校 田口 真衣, 寺本 尚史

1. はじめに

現在日本では、地震時に建物の応答データを用いてリアルタイムに損傷評価を行うヘルスマモニタリングの導入が進んでいる。損傷評価を行うにあたって、固有周期や減衰定数などを同定するモーダルパラメータ同定と剛性や減衰係数などを同定する物理パラメータ同定などのシステム同定に関する研究¹⁾²⁾³⁾が多くなされており、建築物への導入が進められている。一方でコスト面の問題から住宅のような低層建築物にはヘルスマモニタリングが適用されておらず、地震後の建物の損傷調査に時間を要している。本研究は、低層建築物を対象としたシンプルな損傷推定手法の検討を行うものであり、一質点系の振動方程式と観測された波形のみから固有周期を推定する手法を用いて、住宅を想定した一質点系の水平ばねモデル等の動的応答解析結果から固有周期を推定可能かどうかの検討を行う。

2. 振動方程式を用いた固有周期の推定手法

図1に示す一自由度系の水平ばねモデルの場合、ある時刻(i ステップ)における振動方程式は式(1)で表される。

$$ma_i + cv_i + kx_i = ma_{0i} \quad (1)$$

ここで、 a は応答加速度、 a_0 は入力加速度、 v は応答速度、 x は応答変位である。また、建物の固有のパラメータとして m が質量、 c が減衰係数、 k が剛性である。 ma の項は慣性、 cv の項は減衰、 kx の項は建物の復元力を表す。(1)式を質量 m で除すると(2)式となる。

$$a_i + \frac{c}{m}v_i + \frac{k}{m}x_i = -a_{0i} \quad (2)$$

ここで(3)式と(4)式をそれぞれ(2)式に代入すると、(5)式となる。

$$c = 2hm\omega \quad (3)$$

$$k = \omega^2 m \quad (4)$$

$$a_i + 2h\omega v_i + \omega^2 x_i = -a_{0i} \quad (5)$$

ここで h は減衰定数、 ω は角速度である。この運動方程式の連続する3ステップ分を抜き出し行列式に変換すると、(6)式のように表され、逆行列マトリクスを用いて式(7)のように変形できる。

$$\begin{bmatrix} a_i & v_i & x_i \\ a_{i+1} & v_{i+1} & x_{i+1} \\ a_{i+2} & v_{i+2} & x_{i+2} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 2h\omega \\ \omega^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -a_{0i} \\ -a_{0i+1} \\ -a_{0i+2} \end{pmatrix} \quad (6)$$

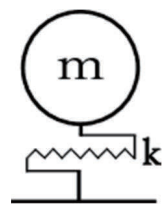


図1 水平ばねモデル

*Simple Estimation of the Natural Periods of Wooden Houses Using Seismic Response Waveforms from Dynamic Analysis by Mai Taguchi, Naofumi Teramoto

$$\begin{pmatrix} 1 \\ 2h\omega \\ \omega^2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} a_i & v_i & x_i \\ a_{i+1} & v_{i+1} & x_{i+1} \\ a_{i+2} & v_{i+2} & x_{i+2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} -a_{0i} \\ -a_{0i+1} \\ -a_{0i+2} \end{pmatrix} \quad (7)$$

(7)式より，3 ステップ分の入力加速度および応答加速度，速度，変位から減衰定数 h および角速度 ω を求めることができ，このうち ω から(8)式により固有周期 T を推定する。

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (8)$$

また T の推定は(7)式の 3 ステップ分の h および ω が同じ値の場合のみ可能となる。そのため弾塑性応答の場合，剛性が時間ごとに変化するため正確な推定値を得られないことから，(7)式の右辺に入力する数値は，各ステップの応答値ではなく(9)式に示す各ステップの増分値を用いる。

$$\begin{aligned} \Delta a_i &= a_i - a_{i-1} \\ \Delta v_i &= v_i - v_{i-1} \\ \Delta x_i &= x_i - x_{i-1} \\ \Delta a_{0i} &= a_{0i} - a_{0i-1} \end{aligned} \quad (9)$$

3. 検証に用いた解析モデルの概要

推定には，一質点系の水平ばねモデル(図 1)および一層の木造住宅をモデル化した動的解析の結果を用いた。

水平ばねモデルの復元力特性は弾性および弾塑性とし，弾塑性はバイリニアとトリリニアの各モデルを用いた。木造住宅モデルの解析には wallstat⁴⁾を用い，サンプル住宅をもとに作成した在来軸組構法の一層の住宅とした。モデルの概要を図 3 に示す。なお，水平ばねモデルの加振前の固有周期は 0.5s とし，木造住宅モデルは弾性時の荷重一変位関係の傾きから剛性を求め算出した。加振後の固有周期はいずれのモデルも荷重一変位関係のピークトゥピークの傾きから剛性を求め算出した。入力波はいずれも JMA 神戸波とした。

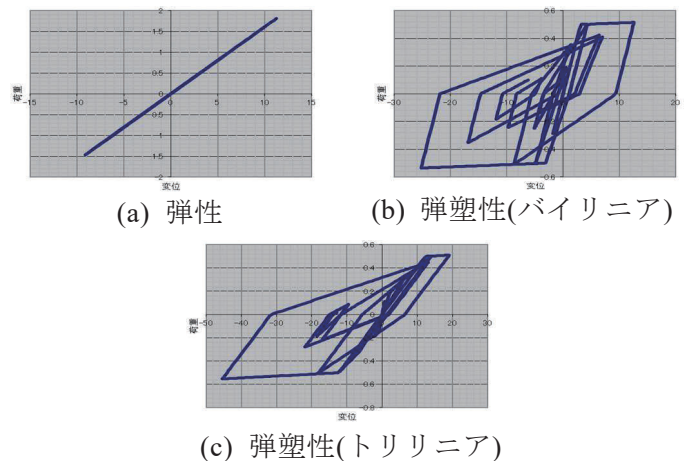


図 2 水平ばねモデルの概要

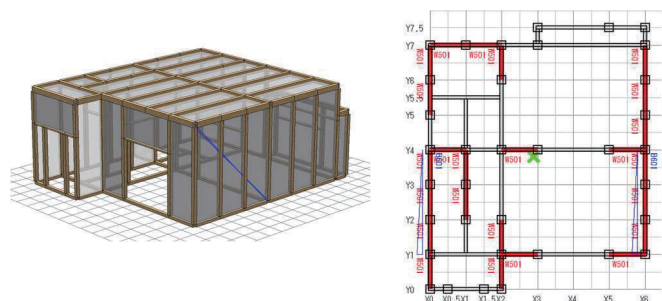


図 3 木造モデルの概要

4. 検証方法

検証方法については，各モデルの動的応答解析結果から得られた前後 3 ステップ分の応答値

および入力加速度を(7)式右辺に代入し、得られた固有周期 T と実際の固有周期の値を比較することにより推定値を検証する。なお、応答値のうち応答速度 v および応答変位 x については、応答解析で得た応答加速度 a を用いて平均加速度法における応答加速度と応答速度および応答変位の関係から算出した。ただし、木造住宅モデルにおいては **wallstat** を用いた応答解析から応答変位 x のデータのみ得ることができるため、応答速度 v および応答加速度 a は、応答変位 x を微分および二回微分したものを用いた。

3章で先述したように、この行列式のもととなる振動方程式では質量 m 、減衰係数 c 、剛性 k が同じ値の場合のみ推定が可能である。そのため、この行列式から得られる 1 、 $2h\omega$ 、 ω^2 の3つの推定値のうち、第一行の算出値が1から大きく外れた値になる場合、振動方程式の質量、減衰係数、剛性が一定である仮定が成立していない事となり不適切なデータと判断できる。これより、今回は得られた推定データを1の推定値が-1から3の範囲のものに絞り、範囲外のデータは除いたものを推定結果とした。

5. 検証結果

① 一質点系水平ばねモデル

水平ばねモデルの推定結果を図4(a)～(c)に示す。ここで、縦軸は構造物の固有周期の推定値を表し、加振前および加振後の固有周期も併せて示す。図4(a)の弾性においては推定値が加振前の値（初期固有周期）と一致した。図4(b)のバイリニア、図4(c)のトリリニアにおいても、最大耐力を超える応答がある前は推定値が初期固有周期と一致した。最大耐力を超える応答が生じた時点より後では、バイリニアでは初期固有周期と加振後の固有周期の間で変動を繰り返し、トリリニアは最大変位後の推定値が加振後の固有周期よりも若干小さい値で変動を繰り返した。これは、履歴ループの特性上、剛性が変わるタイミングで推定値が大きく変動するためである。またトリリニアの推定値が加振後の固有周期の値を下回っているのは、図5に示すように、最大変位後の剛性(実線)が最大変位時の剛性(点線)よりも大きくなっているためだと考えられる。バイリニアとトリリニアのいずれも、推定値が一定の値で上下を繰り返しており剛性の変化を捉えることができた。

② 木造住宅モデル

木造住宅モデルの推定結果を図6に示す。ここで、図6(a)は損傷が少ない応答(弾性)、同(b)は損傷が大きい応答(弾塑性)のものである。損傷が少ない応答は加振前の固有周期が0.27s、加

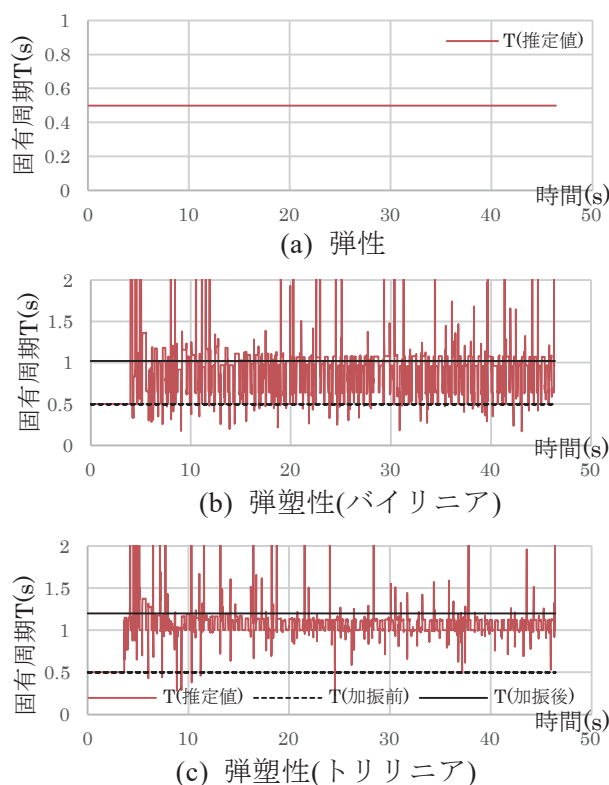


図4 水平ばねモデルの推定結果

振後の固有周期が 0.31s である。推定結果は多少の変動が生じたが、比較的良好に一致した。最大加振後（4秒以降）の推定値を平均したところ 0.37s となり、加振後の固有周期よりもやや大きい値となった。また損傷が大きい応答は加振前の固有周期が 0.46s 、加振後の固有周期が 0.70s である。損傷が少ない応答に比べて全般的に推定値が大きく変動しており、特に建物に大きな損傷を受けた時点より後で、推定値が上昇したのに加え変動幅が大きくなった。建物が損傷を受けた事を推測することは可能だったものの、一質点系水平ばねモデルのように推定値が一定にならず、グラフから固有周期を明確に判断することは困難であり、上下の仕方も複雑で剛性の変化をとらえきることができなかった。

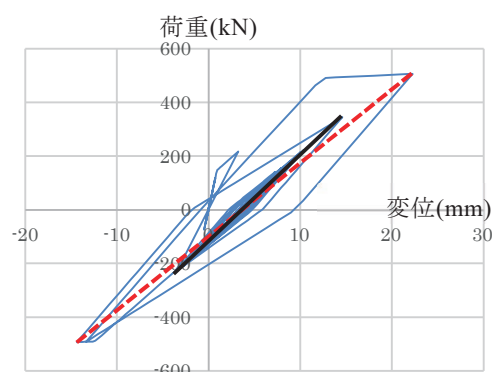


図5 荷重—変位関係(トリリニア)

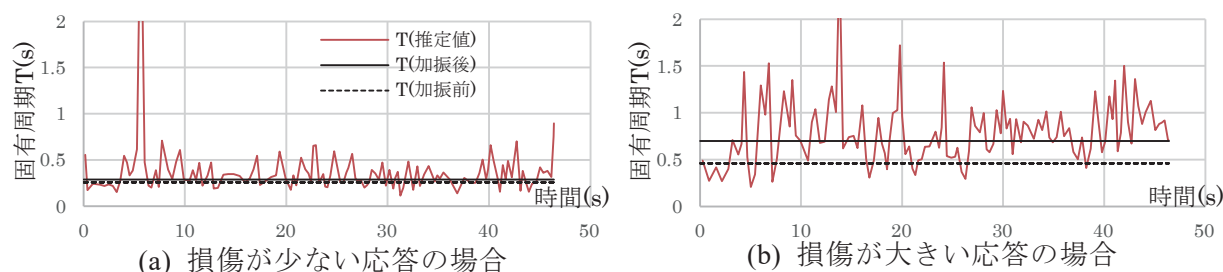


図6 木造住宅モデルの推定結果

6. まとめ

本研究では、一質点系の振動方程式と観測された波形から非常にシンプルに固有周期を推定する手法を考案し、動的応答解析結果を用いて、固有周期を推定可能かどうかの検討を行った。その結果、一質点系水平ばねモデルにおける推定は、弾性・弾塑性ともに比較的精確に行うことができた。一方で、木造住宅モデルでは、損傷が少ない応答は比較的良好に推定できたが、損傷の大きい応答は変動が大きく、グラフから明確に推定することは困難であった。今後は応答変位が大きい時間を中心に荷重—変位関係1ループごとに対応する固有周期と照らし合わせるなどの確認を行い細かく挙動を検討する。

参考文献

- 1) 鈴木悠，三田彰：少数の加速度センサを用いた出力のみによる建物の層間変形角推定手法，日本建築学会構造系論文集 第81巻，pp1062~1070(2016.7)
- 2) 吉本怜毅，三田彰：多入力多出力モデルに基づく建築構造パラメタのオンライン同定，日本建築学会構造系論文集 第574号，pp39~44(2003.12)
- 3) 濱本卓司，森田高市，勅使川原正臣：複数モードの固有振動数変化を用いた多層建築物の層損傷検出，日本建築学会構造系論文集 第560号，pp93~100(2002.10)
- 4) 瀧野敦夫，植松千陽，中川貴文：倒壊解析シミュレーションに基づく木造住宅の地震被害度の推定，日本地震工学会論文集 第19巻，pp368~370(2019)