

振動計測に基づく伝統木造建物の部位別剛性及び質量の推定法

Method for Estimation of Partial Stiffness and Mass of Traditional Wooden Buildings Based on Vibration Measurement

佐々木俊彰¹・田淵敦士²・瀧野敦夫³・吉富信太⁴

Toshiaki Sasaki, Atsushi Tabuchi, Atsuo Takino and Shinta Yoshitomi

¹立命館大学大学院 理工学研究科環境都市専攻 博士課程前期課程 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Graduate Student, Ritsumeikan University, Graduate School of Science and Engineering

²京都府立大学大学院准教授 生命環境科学研究科環境科学専攻 (〒606-8522 京都市左京区下鴨半木町1-5)

Associate Professor, Graduate School of Life and Environmental Science, Kyoto Prefectural University

³奈良女子大学准教授 生活環境学部住環境学科 (〒630-8506 奈良県奈良市北魚屋東町)

Associate Professor, Nara Women's University, Faculty of Human Life and Environment

⁴立命館大学教授 理工学部建築都市デザイン学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Professor, Ritsumeikan University, Dept. of Architecture and Urban Design

This paper proposes a method to estimate partial stiffness, mass and damping ratio of buildings based on measurement of horizontal vibration caused by exciter. The proposed method assumes multi-floor and multi-plane 3D shear building model with flexible floor and determines stiffness of each structural plane and floor and masses of each location which minimizes the error between actually recorded transfer functions and simulated transfer functions of 3D shear model. The validity of the proposed method is demonstrated through example using actually recorded vibration data of old town office in Yosano town, Kyoto prefecture.

Keywords: vibration measurement, transfer function, mass estimation, flexible floor, excitation

1. はじめに

日本では近年頻発する大地震による古い建物の被害が生じ、今後発生が予想される大規模地震に対する既存建物の耐震性能評価がより重要となっている。これまでに建物の振動計測に基づいて構造物の固有振動数や建物の層剛性を推定する手法¹⁾²⁾が多く検討されている。さらに、立体せん断モデルを想定して、建物の部位別の剛性や減衰を推定する手法³⁾も提案されている。その一方で、古い木造建物に特有の床組が柔らかく変形し鉛直構面が異なる挙動をするという特徴に配慮した手法は十分に確立しているとは言えない。また、耐震性能評価で既知量として扱う各層質量が、古い建物では不明な場合もある。本稿では多構面立体柔床せん断モデルの部位別の剛性に加えて質量も推定可能な手法を提案し、京都府与謝野町旧加悦町役場庁舎(図1)の振動計測データを用いて妥当性を検討する。なお、伝統木造建物は微動時と地震時で建物の振動特性が異なるといった振幅依存性の課題に対して、静的水平加力実験により建物の各構造要素の復元力特性から建物全体の振動特性を推定する手法⁴⁾⁵⁾などが提案されている。本研究では微動計測による線形応答範囲を扱うため振幅依存性は直接扱わないが、床剛性を含む架構の立体的な構造特性の把握や、建物実情に応じた質量推定が可能となれば、耐震性能評価における精度向上につながる事が期待できる。

2. 振動計測対象及び振動計測方法

京都府与謝郡与謝野町に現存する伝統木造建物である旧加悦町役場庁舎（図1）を振動計測の対象とする。微動センサー（VSE15D）22台を地面、各階梁上および起振機に設置し、3台の収録装置（SPC52）で波形データを同期収録する（図2,3）。正弦波加振、スイープ波加振などの起振機を用いた加振時計測と、起振機を用いない微動計測に対する応答を計測する。計測対象建物の各階平面図及び、各センサーの設置場所は図4に示す。図4において、矢印はセンサーの加速度計測方向を表しており、その横にX軸、Y軸のそれぞれの通り番号を示している。本研究では、微動計測を2回、起振機を用いた正弦波加振はX軸、Y軸方向で各2回ずつ、スイープ波加振はX軸、Y軸、45度方向で各2回ずつ計測し、その計測データをもとに解析を行った。



図1 旧加悦町役場庁舎外観（東面・南面）



図2 微動センサー・起振機・収録装置

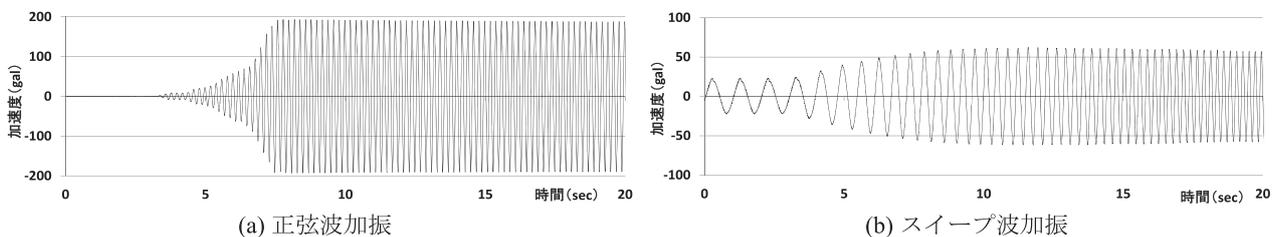


図3 起振機波形データ

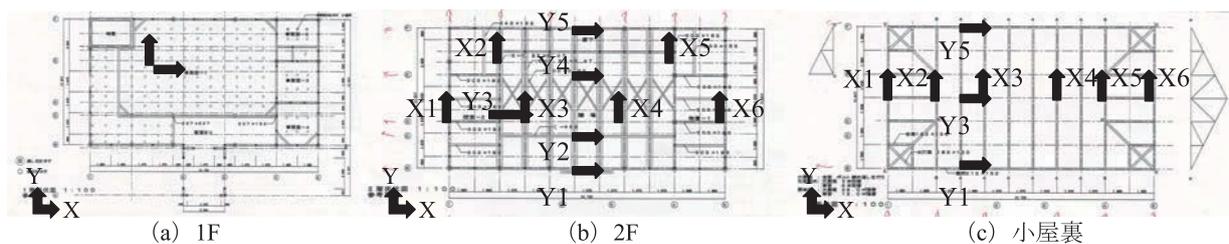


図4 各階センサー配置図

3. 伝達特性の推定

微動計測波形データをフーリエ変換して求めた、地動入力に対する応答の比率を表す伝達関数のグラフを図5に示す。伝達関数のピークから建物の持つ固有振動数を推測する。グラフより、X軸方向では4.8～5.3Hz、Y軸方向では4.2～4.5Hzと6.7～7.2Hzの間で柔床的な挙動に起因する応答増幅が確認されたため、この範囲がそれぞれの方向の固有振動数である。また、伝達関数のアニメーションを作成することにより、特に各層、各構面の立体的な振動性状に着目した考察を行う。図6は、アニメーションの中で最も振動挙動が大きい振動数における図を示している。図6より、正弦波加振においては加振方向のみに対する単純な振動性状を示しているが、微動やスイープ波加振時においては、各通りが個別に振動する複雑な振動性状が確認され、建物の柔らかい床構造が明らかとなった。

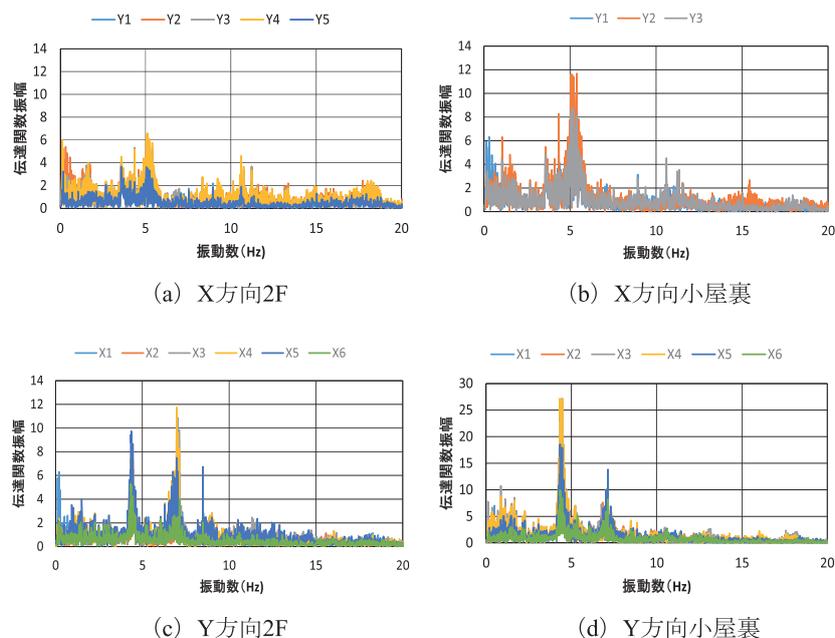


図5 伝達関数

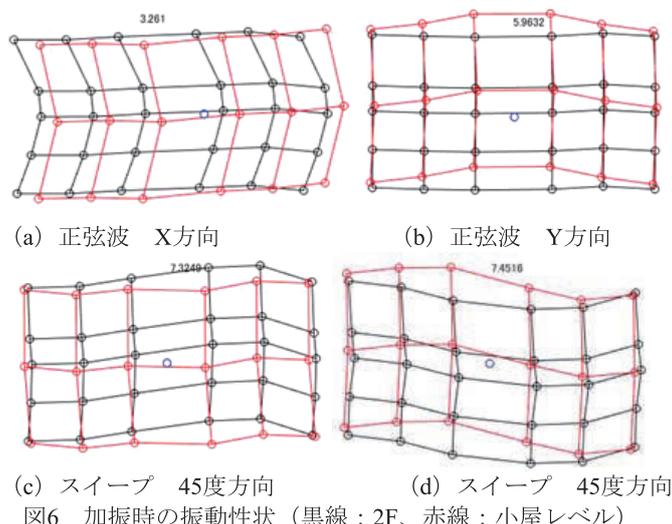


図6 加振時の振動性状 (黒線：2F、赤線：小屋レベル)

4. 加振実験に基づく質量・剛性・減衰の推定

(1) 伝達関数を用いた質量・剛性・減衰の推定方法

一般的な耐震性能の把握には、建物質量を既知とすることが多い。しかしながら本研究で扱うような柔床で複雑な挙動をする建物については、そもそも各部位の質量を与えることが困難である。そこで、本研究では建物の振動計測データから各構面や床要素の剛性、減衰に加えて質量も推定可能な手法を提案する。関連する既往のシステム同定法では質量を既知として扱い剛性や減衰を求めるものが多いのに対し、本研究では応答観測データを用いて得られる伝達関数をターゲットとし、質量、剛性、減衰を変化させて得られる伝達関数とターゲットとの誤差が最小になるような質量、剛性、減衰を求める。

本稿では、図7の壁と床で構成される立体柔床せん断モデルを対象とする。X通り数、Y通り数、層数をそれぞれ n_x 、 n_y 、 n_z とし、第 i 層の第 yl 通りの壁剛性を $k_{yi}^{[yl]}$ 、第 xj 通りの壁剛性を $k_{xi}^{[xj]}$ 、第 xj スパン第 yl スパンの単位床長さあたりの床剛性を $G_i^{[xj,yl]}$ とする。質点を各通り交点に設け、第 i 層の第 yl 通り第 xj 通り交点の質量を $m_i^{[xj,yl]}$ とする。

各鉛直構面は、各層の x 通りあるいは y 通り上に配置し、各鉛直構面要素は、各層の各通り上に含まれる構面の性能の総和を一つの要素として表すものとする。第 i 層、第 yl 通り上の鉛直構面の x 方向剛性と減衰係数をそれぞれ $k_{xi}^{[yl]}$ 、 $c_{xi}^{[yl]}$ 、第 xj 通り上の鉛直構面の y 方向剛性と減衰係数をそれぞれ $k_{yi}^{[xj]}$ 、 $c_{yi}^{[xj]}$ とする。

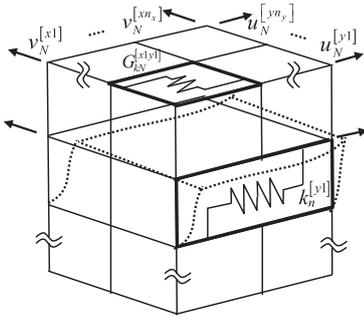


図7 対象モデル

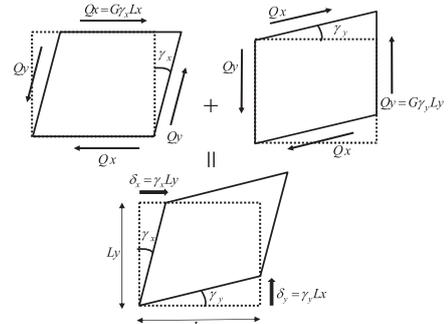


図8 柔床水平変形モデル

x 軸および y 軸方向のせん断力 $Q_{Wkxi}^{[yl]}$ 、 $Q_{Wkyi}^{[xj]}$ は以下ようになる。

$$Q_{Wkxi}^{[yl]} = k_{xi}^{[yl]} (u_i^{[yl]} - u_{i-1}^{[yl]}) \quad (1)$$

$$Q_{Wkyi}^{[xj]} = k_{yi}^{[xj]} (v_i^{[xj]} - v_{i-1}^{[xj]}) \quad (2)$$

一方、 x 軸および y 軸方向の減衰によるせん断力 $Q_{Wcxi}^{[yl]}$ 、 $Q_{Wcyi}^{[xj]}$ は以下ようになる。

$$Q_{Wcxi}^{[yl]} = c_{xi}^{[yl]} (u_i^{[yl]} - u_{i-1}^{[yl]}) \quad (3)$$

$$Q_{Wcyi}^{[xj]} = c_{yi}^{[xj]} (v_i^{[xj]} - v_{i-1}^{[xj]}) \quad (4)$$

床要素は、各層の各スパンに設置する。第 i 層、第 xj スパン、第 yl スパンに設置された床要素のせん断剛性と減衰係数をそれぞれ $G_{ki}^{[xj,yl]}$ 、 $G_{ci}^{[xj,yl]}$ とする。右上添え字の $[\]$ は床要素の設置場所を表すものとする。図 7 右は、第 i 層、第 xj スパン、第 yl スパンに配置された床要素の変形時の様子を示す。床要素の単位長さあたりのせん断剛性を $G_{ki}^{[xj,yl]}$ とし、 x 方向、 y 方向の長さは $L_{xi}^{[xj,yl]}$ 、 $L_{yi}^{[xj,yl]}$ とする。図 8 のように、 x 軸および y 軸方向せん断変形によるせん断変形角をそれぞれ $\gamma_{xi}^{[xj,yl]}$ 、 $\gamma_{yi}^{[xj,yl]}$ 、 x 軸および y 軸方向のせん断力を $Q_{Fkxi}^{[xj,yl]}$ 、 $Q_{Fkyi}^{[xj,yl]}$ とする。 γ_x 、 γ_y が同時に生じた状態のせん断力は以下ようになる。

$$Q_{Fkxi}^{[xj,yl]} = G_{ki}^{[xj,yl]} L_{xi}^{[xj,yl]} (\gamma_{xi}^{[xj,yl]} + \gamma_{yi}^{[xj,yl]}) \quad (5)$$

$$Q_{Fkyi}^{[xj,yl]} = G_{ki}^{[xj,yl]} L_{yi}^{[xj,yl]} (\gamma_{xi}^{[xj,yl]} + \gamma_{yi}^{[xj,yl]}) \quad (6)$$

ここで、

$$\gamma_{xi}^{[xj,yl]} = (u_i^{[xj,y(l+1)]} - u_i^{[xj,yl]}) / L_{xi}^{[xj,yl]} \quad (7)$$

$$\gamma_{yi}^{[xj,yl]} = (v_i^{[xj,y(l+1)]} - v_i^{[xj,yl]}) / L_{yi}^{[xj,yl]} \quad (8)$$

x 、 y 軸方向の変位を用いて、床要素の荷重変形関係は次式で表される。

$$Q_{Fkxi}^{[xj,yl]} = G_{ki}^{[xj,yl]} \left\{ \frac{L_{xi}^{[xj,yl]}}{L_{xi}^{[xj,yl]}} (u_i^{[xj,y(l+1)]} - u_i^{[xj,yl]}) + (v_i^{[xj,y(l+1)]} - v_i^{[xj,yl]}) \right\} \quad (9)$$

$$Q_{Fkyi}^{[xj,yl]} = G_{ki}^{[xj,yl]} \left\{ (u_i^{[xj,y(l+1)]} - u_i^{[xj,yl]}) + \frac{L_{yi}^{[xj,yl]}}{L_{xi}^{[xj,yl]}} (v_i^{[xj,y(l+1)]} - v_i^{[xj,yl]}) \right\} \quad (10)$$

単位長さあたりのせん断減衰係数 $G_{ci}^{[xj,yl]}$ に関するせん断力は、(9)、(10)式同様に以下のように表現される。

$$Q_{Fcxi}^{[xj,yl]} = G_{ci}^{[xj,yl]} \left\{ \frac{L_{xi}^{[xj,yl]}}{L_{xi}^{[xj,yl]}} (u_i^{[xj,y(l+1)]} - u_i^{[xj,yl]}) + (v_i^{[xj,y(l+1)]} - v_i^{[xj,yl]}) \right\} \quad (11)$$

$$Q_{Fcyi}^{[xj,yl]} = G_{ci}^{[xj,yl]} \left\{ (u_i^{[xj,y(l+1)]} - u_i^{[xj,yl]}) + \frac{L_{yi}^{[xj,yl]}}{L_{xi}^{[xj,yl]}} (v_i^{[xj,y(l+1)]} - v_i^{[xj,yl]}) \right\} \quad (12)$$

第 i 層、第 yl 通りの自由度に対応する x 方向の運動方程式は次式となる。

$$m_{xi}^{[yl]} \ddot{u}_i^{[yl]} + \sum_{j=1}^{n_x-1} \left\{ (Q_{Fkxi}^{[xj,y(l-1)]} - Q_{Fkxi}^{[xj,yl]}) + (Q_{Fcxi}^{[xj,y(l-1)]} - Q_{Fcxi}^{[xj,yl]}) \right\} + (Q_{Wkxi}^{[yl]} - Q_{Wkxi}^{[yl+1]}) + (Q_{Wcxi}^{[yl]} - Q_{Wcxi}^{[yl+1]}) = -m_{xi}^{[yl]} \ddot{u}_g \quad (13)$$

$$m_{xi}^{[yl]} = \sum_{j=1}^{n_x} m_i^{[xj,yl]} \quad (14)$$

ここで、左辺第1項は第 yl 通りに存在する質点に作用する慣性力の x 方向への和、第2項は第 yl 通りの左右の床面に作用する復元力と減衰力の x 方向への和、第3、4項は第 yl 通りの第 i 層の上下層に作用する復元力と減衰力を表す。

同様に第 i 層、第 xj 通りの自由度に対応する y 方向の運動方程式は次式となる。

$$m_{yi}^{[xj]} \ddot{y}_i^{[xj]} + \sum_{l=1}^{n_x-1} \left\{ \left(Q_{Fkyi}^{[x(j-1),yl]} - Q_{Fkyi}^{[xj,yl]} \right) + \left(Q_{Fcyi}^{[x(j-1),yl]} - Q_{Fcyi}^{[xj,yl]} \right) \right\} + \left(Q_{Wkyi}^{[xj]} - Q_{Wky(i+1)}^{[xj]} \right) + \left(Q_{Wcyi}^{[xj]} - Q_{Wcy(i+1)}^{[xj]} \right) = -m_{yi}^{[xj]} \ddot{y}_g \quad (15)$$

$$m_{yi}^{[xj]} = \sum_{l=1}^{n_x} m_i^{[xj,yl]} \quad (16)$$

全自由度の運動方程式をまとめて次式で表す。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{y}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{y}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{y}(t) = \mathbf{r}f(t) \quad (17)$$

ここで $\ddot{\mathbf{y}}(t)$ 、 $\dot{\mathbf{y}}(t)$ 、 $\mathbf{y}(t)$ は各構面自由度方向の加速度、速度、変位で構成される応答ベクトル、 \mathbf{r} は外力作用方向を表すベクトル、 $f(t)$ は外力を表し、地動による慣性力あるいは、起振機の質量 m と加速度 $a(t)$ の積で算定される起振機外力を表す。 \mathbf{M} は $m_i^{[xj,yl]}$ で構成される質量行列、 \mathbf{K} は $k_{xi}^{[yl]}$ 、 $k_{yi}^{[xj]}$ 、 $G_i^{[xj,yl]}$ で構成される剛性行列。減衰行列 \mathbf{C} は1次固有円振動数 $\omega^{(l)}$ および1次減衰定数 $h^{(l)}$ を用いて $\mathbf{C} = (2h^{(l)}/\omega^{(l)})\mathbf{K}$ で表される剛性比例減衰を仮定する。(17)式をフーリエ変換し次式を得る。

$$-\omega^2 \mathbf{M}\mathbf{Y}(\omega) + i\omega \mathbf{C}\mathbf{Y}(\omega) + \mathbf{K}\mathbf{Y}(\omega) = \mathbf{r}F(\omega) \quad (18)$$

(18)式より入力 $F(\omega)$ に対する応答 $\mathbf{Y}(\omega)$ の伝達関数 $\mathbf{H}(\omega)$ は以下のように得られる。

$$\mathbf{H}(\omega) = \frac{\mathbf{Y}(\omega)}{F(\omega)} = \mathbf{A}^{-1}(\omega)\mathbf{r} \quad (19)$$

$$\mathbf{A}(\omega) = -\omega^2 \mathbf{M} + i\omega \mathbf{C} + \mathbf{K} \quad (20)$$

推定対象の未知パラメータである質量 $m_i^{[xj,yl]}$ 、壁剛性 $k_{xi}^{[yl]}$ 、 $k_{yi}^{[xj]}$ 、床剛性 $G_i^{[xj,yl]}$ 、1次減衰定数 $h^{(l)}$ をまとめて $\boldsymbol{\theta}$ とする。伝達関数はパラメータ $\boldsymbol{\theta}$ の関数として $\mathbf{H}(\omega, \boldsymbol{\theta})$ と表せる。パラメータ $\boldsymbol{\theta}$ の正解値を $\bar{\boldsymbol{\theta}}$ 、伝達関数の正解値を $\bar{\mathbf{H}}(\omega)$ とすれば、理論上は $\mathbf{H}(\omega, \boldsymbol{\theta})$ が正解値 $\bar{\mathbf{H}}(\omega)$ と一致するのはパラメータ $\boldsymbol{\theta}$ が、正解値 $\bar{\boldsymbol{\theta}}$ と一致するときのみである。したがって、 $\mathbf{H}(\omega, \boldsymbol{\theta})$ と $\bar{\mathbf{H}}(\omega)$ の誤差が0となるときのパラメータ $\boldsymbol{\theta}$ として、正解値 $\bar{\boldsymbol{\theta}}$ を求めることができる。実用場面では、建物の振動計測データを用いて求めた伝達関数を正解値 $\bar{\mathbf{H}}(\omega)$ とみなして、 $\mathbf{H}(\omega, \boldsymbol{\theta})$ を適合させるターゲットとする。 $\boldsymbol{\theta}$ の推定問題は、 $\boldsymbol{\theta}$ を変数として、(21)式で評価されるターゲット伝達関数 $\bar{\mathbf{H}}(\omega)$ と $\mathbf{H}(\omega, \boldsymbol{\theta})$ の誤差 $E(\boldsymbol{\theta})$ を目的関数とする、一般的な最適化問題の枠組みに帰着できるため、汎用的な最適化アルゴリズムを利用して数値解析的に解くことが可能となる。なお、本稿では1次減衰定数をパラメータとしているが、各要素ごとの減衰係数をパラメータとすることも可能である。

$$\mathbf{e}(\omega, \boldsymbol{\theta}) = |\bar{\mathbf{H}}(\omega) - \mathbf{H}(\omega, \boldsymbol{\theta})| \quad (21)$$

$$E(\boldsymbol{\theta}) = \sum_{\omega=\omega_l}^{\omega_h} \left(\mathbf{e}^T(\omega, \boldsymbol{\theta}) \mathbf{e}(\omega, \boldsymbol{\theta}) \right) \quad (22)$$

(2) 数値例題を用いた提案手法の妥当性検証

提案手法の妥当性を、図9に示す加悦町役場庁舎に類似した2層モデルに対する数値例題で検証する。構面は X1~X6, Y1~Y5 とし、1F は全構面に壁があり、2F は Y2, Y4 構面には壁がない。推定対象の質量は48個、X方向壁剛性8個、Y方向壁剛性は12個であり、設定した正解値を図9に示す。床構面剛性は階ごとに同じ剛性値を有するようにグルーピングする。2Fの床中央に設置した質量25kgの起震機に2章の45度方向のスweep加振時(90秒で1~20Hzに変化)の実測加速度(収録500Hz)を与えた時刻歴応答解析を行い、得られた各自由度の応答を実測値とみなす。起震機荷重の作用方向ベクトル \mathbf{r} は図10における X3、X4 通りの Ch 成分を $\sqrt{2}/4$ 、Y3 通りの Ch 成分を $1/\sqrt{2}$ とする。伝達関数の誤差は1.5~20Hzの範囲で評価し、各自由度の応答レベルの違いは正解の伝達関数の平均値で正規化する。誤差最小化において、Matlab toolbox

の内点法を用い解の打切り誤差は 10^{-14} とする。推定対象パラメータの初期解は質量 3ton、壁剛性 10000kN/m、床剛性 1000kN/m、減衰定数 0.02 とする。図 10 には実測データにより得られたターゲット伝達関数及び誤差最小化により推定された伝達関数を示す。伝達関数は荷重(kN)に対する加速度応答(m/s^2)とする。表 1 には最適パラメータとして推定された質量、剛性、減衰定数の正解値との誤差を示す。図 10、表 1 より、伝達関数の誤差最小化に基づいて、ターゲット伝達関数に適合する伝達関数が求められ、その結果質量、剛性とも最大 1%程度の誤差で正解値の推定ができていいることがわかる。

(3) 実測データを用いた検討

旧加悦町役場庁舎の 45 度方向のスweep加振時 (90 秒で 1~20Hz に変化) の実測データ (収録 500Hz) を用いて、前節と同様な設定でパラメータ推定を行う。起震機の設定および最適化の変数や解析条件の設定は前節と同様とする。伝達関数の誤差は 3~15Hz の範囲で評価し、推定対象パラメータの初期解は質量 0.5ton、壁剛性 5000kN/m、床剛性 1000kN/m、減衰定数 0.02 とする。図 11 には実測データにより得られたターゲット伝達関数及び誤差最小化により推定された伝達関数を示す。図 12 には最適パラメータとして推定された質量を白丸、剛性を太線で表し、表 2 には推定値を示す。

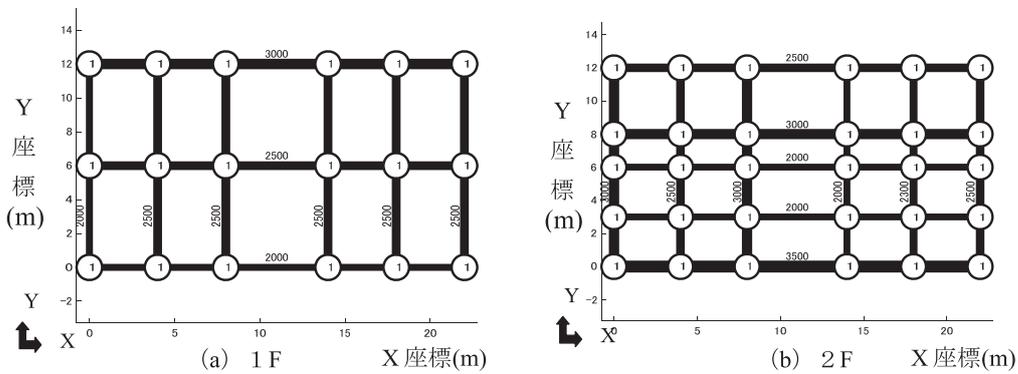


図9 数値例題モデル (剛性：黒線、質量：白丸)

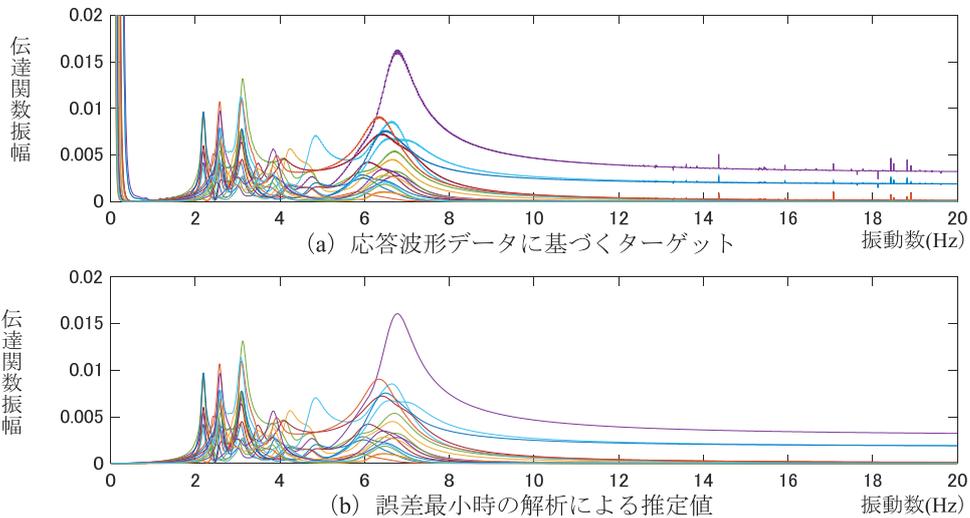


図10 伝達関数の誤差最小化結果 (数値例題)

表1 推定された各構面剛性、質量、減衰定数の誤差 (数値例題)

質量 (ton)	FLOOR	DIRECTION	X1	X2	X3	X4	X5	X6
			1F	Y5	0.4%	0.4%	0.3%	0.3%
		Y4	0.4%	0.4%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%
		Y3	0.5%	0.3%	0.1%	0.1%	0.5%	0.4%
		Y2	0.2%	0.3%	0.2%	0.1%	0.3%	0.2%
		Y1	0.6%	0.8%	0.5%	0.6%	0.6%	0.5%
	2F	Y5	-0.1%	0.3%	-0.1%	0.0%	0.1%	-0.2%
		Y3	-0.2%	0.1%	-0.1%	-0.1%	0.0%	-0.2%
		Y1	-0.2%	0.1%	0.1%	0.0%	0.1%	0.0%
	ky (kN/m)	2F	1.1%	0.8%	0.7%	0.4%	0.2%	0.2%
		1F	0.7%	0.7%	1.0%	0.2%	0.1%	0.3%
	kx (kN/m)	2F	0.8%	-	1.1%	-	0.2%	
		1F	1.2%	1.0%	0.8%	0.4%	0.2%	
G (kN/m)	2F	0.0%						
	1F	0.0%						
	h1	0.0%						

また、図 11 の 10Hz までのピークに対応する振動数における伝達関数を平面図形式で表示したものを、実測について図 13、解析で求めたものについて図 14 に示す。振幅の小さい点について特性の異なるところも見られるが、振幅の大きな点の性状はおおむね対応しており、伝達関数の特徴はとらえられているといえる。

推定されたパラメータは外壁が重くて剛性も高いという傾向があり、定性的には実際の建物プランの特徴と対応している。定量的な傾向としては、対象物件の図面データから概算で積算した質量は 1F、2F それぞれ約 102ton、57ton に対し、本研究での推定質量は表 2 より、1F、2F それぞれ約 20ton、11ton であり、図面からの積算の 1/5 程度である。こうした差の生じる原因としては、ターゲット伝達関数の問題か、解析モデルの問題が考えられる。本稿では起震外力に対する加速度応答伝達関数を用いており、実際よりも外力を小さく見積もるか応答加速度を大きく見積もるとターゲット伝達関数が正解より大きく評価され、それに適合させると質量と剛性は反比例して小さくなる。解析モデルによる原因としては、床剛性については層ごと、減衰定数については建物全体という拘束を設けたため、これが結果に影響している可能性もある。例えば図 11 の伝達関数の形状から、解析の方が減衰を大きく見積もっている可能性があり、パラメータを増やすか誤差の評価方法を変えるなどで結果が改善される可能性がある。定量的な精度については今後の課題とする。

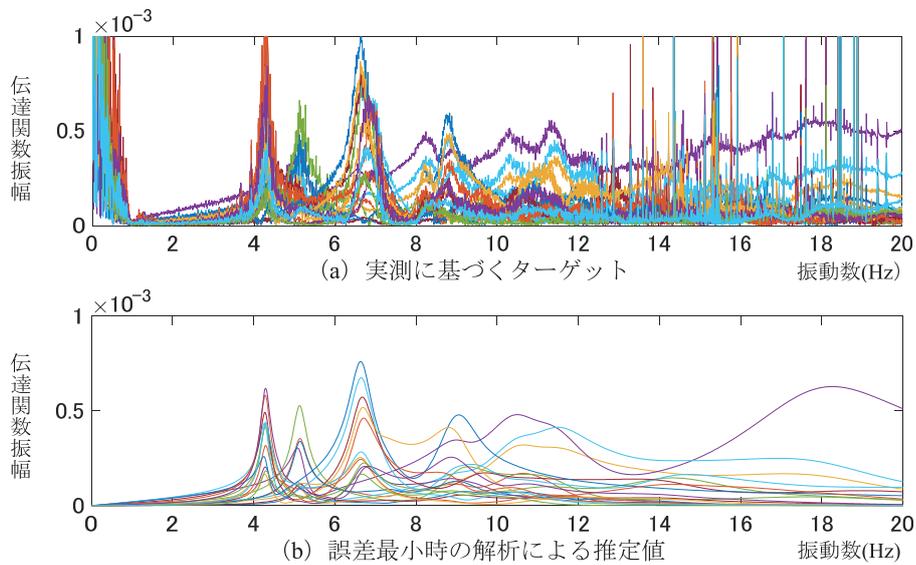


図11 伝達関数の誤差最小化の結果

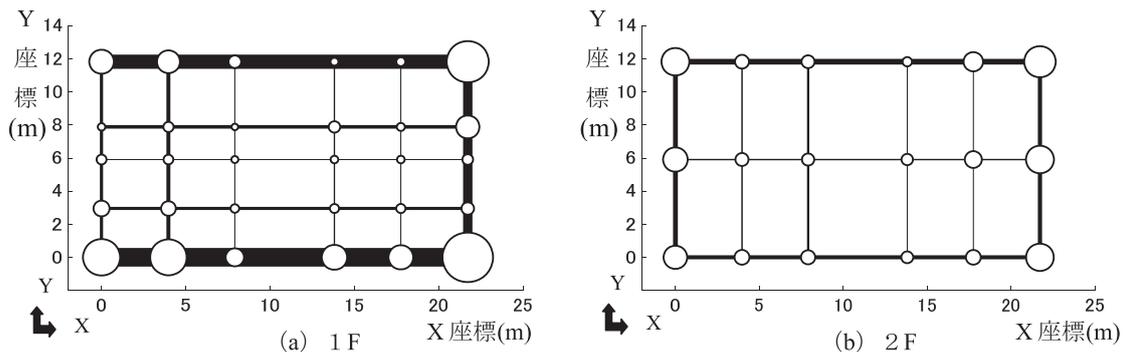


図12 推定された剛性（太線）および質量（白丸）

表2 推定された各構面剛性、質量、減衰定数

		X1	X2	X3	X4	X5	X6		X1	X2	X3	X4	X5	X6			
		質量(ton)	1F	Y5	0.96	0.85	0.26		0.10	0.13	2.82	ky(kN/m)	2F	8057	2535	3873	478
		Y4	0.09	0.17	0.07	0.21	0.11	0.87		1F	5365	6643	761	2259	1694	15578	
		Y3	0.16	0.15	0.08	0.09	0.09	0.18			Y1	Y2	Y3	Y4	Y5		
		Y2	0.41	0.35	0.12	0.13	0.14	0.25		kx(kN/m)	2F	6850	-	2433	-	9596	
		Y1	2.19	2.14	0.54	1.03	0.97	4.06		1F	31333	5263	41	6016	23878		
	2F	Y5	1.25	0.31	0.27	0.14	0.61	1.60		G(kN/m)	2F	930					
		Y3	0.97	0.28	0.24	0.21	0.46	1.25		1F	288						
		Y1	0.89	0.36	0.33	0.23	0.36	1.23		h1	0.029						

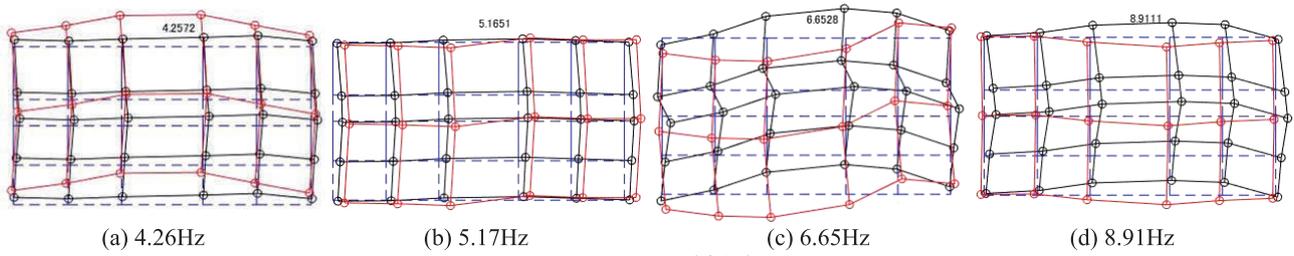


図13 モード図 (実測)

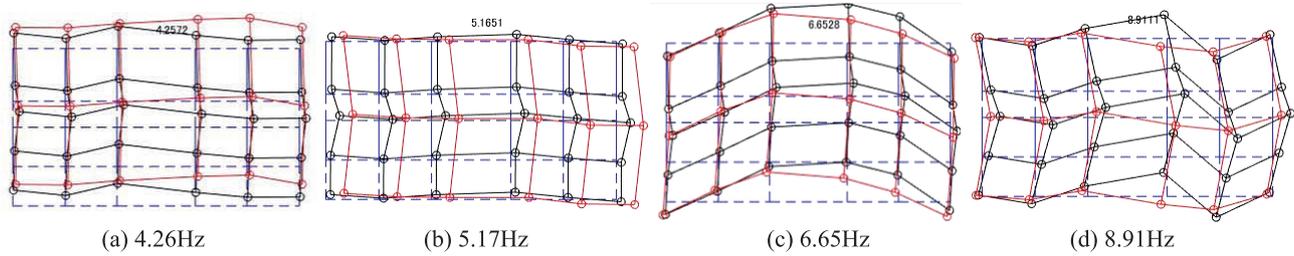


図14 モード図 (解析)

5. まとめ

本研究では、起振機と多数の微動計を用いた振動測定実験による京都府与謝野町旧加悦町役場庁舎の固有振動数及び質量、剛性、減衰定数の推定を試みた。得られた結果は以下の通りである。

- (1) 微動計測時の伝達関数から、X軸方向では4.8～5.3Hz、Y軸方向では4.2～4.5Hzと6.7～7.2Hzの間で柔床的な挙動に起因する応答増幅が確認された。
- (2) 起振機による加振時計測に基づく質量、剛性、減衰の推定法を提案した。
- (3) 実測データを適用することで、建物の特徴と対応した結果が得られ、提案手法の妥当性が確認された。

謝辞： 本研究実施にあたり旧加悦町役場庁舎耐震改修検討委員会より貴重な情報を頂戴した。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 新居藍子, 林康裕, 森井雄史, 井田祥子, 鈴木祥之：常時微動計測から推定される京町家の振動性状, 日本建築学会構造系論文集, 第613号, pp.43-50, 2007.
- 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, 第77巻, 第672号, pp.197-203, 2012.
- 3) K.Shintani, S.Yoshitomi and I.Takewaki : Direct linear system identification method for multi-story three-dimensional building structure with general eccentricity, *Frontiers in Built Environment (Specialty Section: Earthquake Engineering)*, Volume 3, Article 17, 2017.
- 4) 佐藤弘美, 松田昌洋, 藤田香織, 腰原幹雄, 坂本功：現地実験による伝統的木造住宅の構造性能に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第602号, pp.187-194, 2006.
- 5) 小野徹郎, 亀山義比古, 井戸田秀樹, 佐藤篤司, 菅野貴孔：実伝統木造社寺建築物の水平加力実験及び復元力特性, 日本建築学会構造系論文集, 第612号, pp.117-123, 2007.