

最適化手法を用いた建物の振動特性に関する研究：常時微動から推定する構造同定

小祝, 碧 / KOIWAI, Midori / 吉田, 長行 / 濱崎, 大樹 /
YOSHIDA, Nagayuki / HAMASAKI, Taiju

(出版者 / Publisher)

法政大学情報メディア教育研究センター

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学情報メディア教育研究センター研究報告

(巻 / Volume)

27

(開始ページ / Start Page)

61

(終了ページ / End Page)

67

(発行年 / Year)

2013

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00008993>

最適化手法を用いた建物の振動特性に関する研究

—常時微動から推定する構造同定—

A Study on Structural Vibration Property by Optimization Method

—Structural Identification from Microtremor—

小祝 碧¹⁾ 濱崎 大樹¹⁾ 吉田 長行²⁾

Midori Koiwai, Taiju Hamasaki, Nagayuki Yoshida

¹⁾ 法政大学大学院デザイン工学研究科建築学専攻

²⁾ 法政大学デザイン工学部建築学科

In recent years, people's concern about earthquake-proof is increasing from the reason of falsification of earthquake-resistance data and a great earthquake disaster etc. The purpose of this study is to build the process that identifies structure quantity by the microtremor observation data. On this method, we can reduce cost and time, and that seismic judgment without drawing and specification. Additionally, we can know a state of deterioration due to aging or long usage. The observed structure is the low-rise story of '58 building at Ichigaya campus of Hosei University. This paper develops a new process on structural identification.

Key Words : Microtremor, Identification problem, Structural dynamics, GA

1. はじめに

近年、耐震強度偽装事件や建築基準法の改定や大震災等の影響で耐震への社会的関心が高まっている。

耐震診断は、予備調査として建物概要の調査、現地にて設計図書との整合性の確認、修繕履歴等の有無を確認する現地調査等を行い、その後建物の劣化状況を目視調査、竣工年度から推測するコンクリート強度の調査等を行う1次調査、ひび割れ調査、地盤調査等を行う2次調査、そして必要に応じて配筋状況や部材断面性能、材料強度の再評価等の精密調査へと続き、建物の耐震性の評価が行われる。しかし、古い建物では、資料の紛失や老朽化がしばしば生じ、また、施工段階での変更やミスから実際には資料と異なる条件で竣工された可能性もある。そこで現場に赴き、建物を実測することにより実験的に耐震診断する手法の確立が求められており、その1つの手法として常時微動観測を利用するものがある。

常時微動とは、地盤や構造物が地震時でなくても常に人間の感覚では感じ取れないほど微小に揺れて

いることであり、風や火山活動などの自然現象や、車や電車、工場などの人間活動により生ずるものである (Fig.1)。

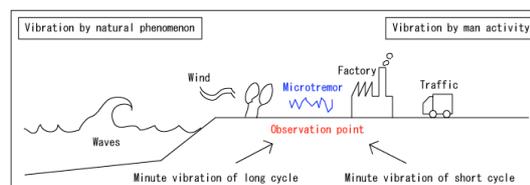


図1 常時微動の発生

Fig.1 Hypocenter of microtremor

本研究の目的は、常時微動下の対象建物を観測し、得られたデータのみから建物の振動特性等を探り、構造諸量を同定するプロセスを構築することである (Fig.2)。本プロセスによれば、耐震診断業務において、図面からデータを拾い計算用構造モデルにインプットする等の作業を短縮し、また、図面等の資料が得られない場合でも既存建物の耐震性を診断できる利点がある。

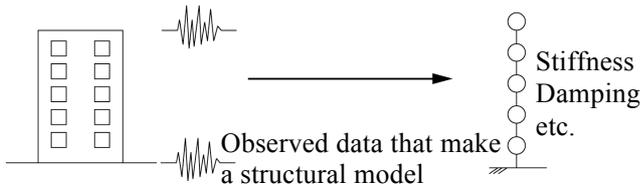


図2 同定方法

Fig.2 Identification method

2. 同定モデル

2.1 多質点せん断モデル

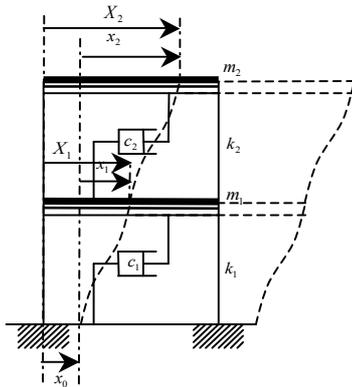


図3 地震動が加わる時の建物

Fig.3 Model of coseismic building

建物に地震動が加わる時の振動方程式は以下のよう
に表せる^{[1][2]}.

$$[M]\{\ddot{x}_j\} + [C]\{\dot{x}_j\} + [K]\{x_j\} = -[M]\{\ddot{x}_0\} \quad (1)$$

$[M]$, $[C]$, $[K]$: 質量, 減衰, 剛性マトリクス
 $\{x_j\}$: j 層の相対変位
 $\{\ddot{x}_0\}$: 地面の加速度

ここで, 地震動の変位が周期的に変化する時間 t
の関数であるとする式(2)になる.

$$x_0 = x_0 e^{i\omega t}, \quad \dot{x}_0 = x_0 i\omega e^{i\omega t}, \quad \ddot{x}_0 = -x_0 \omega^2 e^{i\omega t} \quad (2)$$

同様に建物の変位は式(3)になる.

$$x_j = x_j e^{i\omega t}, \quad \dot{x}_j = x_j i\omega e^{i\omega t}, \quad \ddot{x}_j = -x_j \omega^2 e^{i\omega t} \quad (3)$$

これらを式(1)に代入し, 整理すると

$$(-\omega^2 [M] + i\omega [C] + [K])\{x_j\} e^{i\omega t} = \omega^2 [M]\{x_0\} e^{i\omega t} \quad (4)$$

$$\{x_j\} = [-\omega^2 [M] + i\omega [C] + [K]]^{-1} [M]\{1\} x_0 (\omega^2)$$

$$\left\{ \frac{x_j}{x_0} \right\} = [-\omega^2 [M] + i\omega [C] + [K]]^{-1} [M]\{1\} \omega^2 \quad (5)$$

この各要素の絶対値をとり

$$\left\{ \frac{x_j}{x_0} \right\} = \{h(\omega)\} \quad (6)$$

式(6)は各階の相対応答倍率を表す. 本研究では各階
での絶対変位を扱うため, j 層での絶対変位 X_j を用
いて表すと次式になる.

$$\left\{ \frac{X_j}{x_0} \right\} = \left\{ \frac{x_j + x_0}{x_0} \right\} = \{[h(\omega) + 1]\} = \{H(\omega)\} \quad (7)$$

X_j : 絶対変位

$\{H(\omega)\}$: 応答倍率

本研究では, 式(7)を多質点せん断モデルの同定に用
いる目標関数とする.

2.2 3自由度1軸モデル

定式化は多質点せん断モデルと同様である.

$$[\bar{M}]\{\ddot{X}\} + [\bar{C}]\{\dot{X}\} + [\bar{K}]\{X\} = -[\bar{M}]\{\ddot{X}_0\} \quad (8)$$

$$\{X\} = \begin{Bmatrix} X \\ Y \\ \Theta \end{Bmatrix}, \{X_0\} = \begin{Bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ \Theta_0 \end{Bmatrix}, [\bar{M}] = \begin{bmatrix} [M_x] & 0 & 0 \\ 0 & [M_y] & 0 \\ 0 & 0 & [I] \end{bmatrix}$$

$$, [\bar{C}] = \begin{bmatrix} [C_x] & 0 & 0 \\ 0 & [C_y] & 0 \\ 0 & 0 & [C_\theta] \end{bmatrix}, [\bar{K}] = \begin{bmatrix} [K_x] & 0 & 0 \\ 0 & [K_y] & 0 \\ 0 & 0 & [K_\theta] \end{bmatrix}$$

X : X 方向変位, Y : Y 方向変位, Θ : ねじれ角
式(8)より

$$\left\{ \frac{X}{X_0} \right\} = [-\omega^2 [\bar{M}] + i\omega [\bar{C}] + [\bar{K}]]^{-1} [\bar{M}]\{1\} \omega^2 \quad (9)$$

この各要素の絶対値をとり

$$\left\{ \frac{x_j}{x_0} \right\} = \{h(\omega)\} \quad (10)$$

式(10)は各階の相対応答倍率を表す. 本研究では各
階での絶対変位を扱うため, j 層での絶対変位 X_j を
用いて表すと次式になる.

$$\left\{ \frac{X_j}{x_0} \right\} = \left\{ \frac{x_j + x_0}{x_0} \right\} = \{[h(\omega) + 1]\} = \{H(\omega)\} \quad (11)$$

(11)式は各層の絶対増幅率応答倍率を表し, これを
本研究では3自由度1軸モデルの同定に用いる目標
関数とする.

3. 遺伝的アルゴリズムによる推定

本論文では、同定に用いる最適化手法として遺伝的アルゴリズム (GA) を採用する。

遺伝的アルゴリズムは、「ある問題に対してランダムに発生させた個体を評価し、評価の高いものからその性質を子孫へ引き継がせた新しい個体を作る」という進化のプロセスを経ることにより最も適応度の高い解を導くという手法である^[5]。

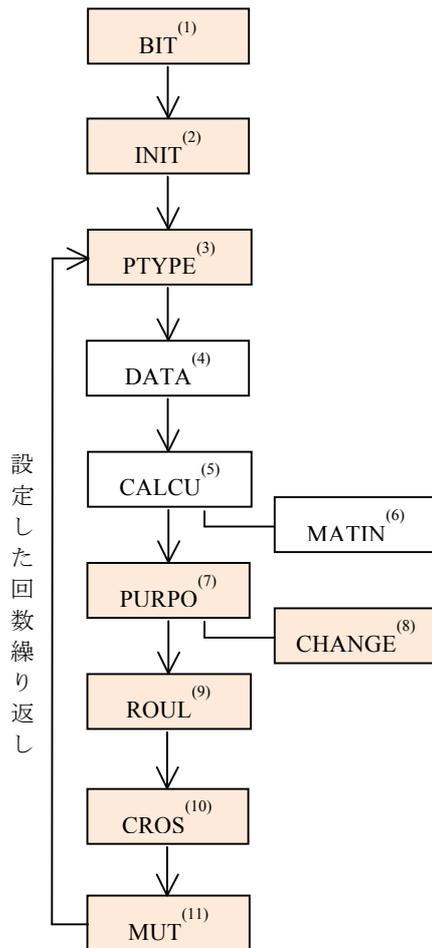


図4 遺伝的アルゴリズムによる同定過程

Fig. 4 Identification process by GA

(1)BIT・・・初期設定

世代数, 個体数, ビット数の設定

(2)INIT・・・初期集団の発生

パラメータの乱数を発生させる

(3)PTYPE・・・パラメータの設定

2進コードから10進数への変更

(4)DATA・・・解析値の初期データ, 観測地の設定

(5)CALCU・・・目標関数の作成

(6)MATIN・・・逆行列の計算

(7)PURPO・・・適応度の評価

各個体に適応度を与える

(8)CHANGE・・・並び替え

パラメータを適応度の高い順に並び替え

(9)ROUL・・・ルーレット戦略

適応度に比例した割合で個体を選択

(10)CROS・・・交叉, エリート戦略

染色体を組み替えて子を作る

(11)MUT・・・突然変異

遺伝子を一定の確率で変化させる

4. 模擬観測同定解析

実測した建物の観測データには様々な雑音が混ざっており, 複雑な波形を示している. そこで実際の建物を解析する前に, 単純な模擬観測モデルを用いて同定手法を検討する.

4.1 評価関数

同定は, 目標関数とモデル応答関数の差を評価関数として, これを最小化することによってなされる^[4].

$$\varepsilon_{ji} = \tilde{h}_j(\omega_i) - h_j(\omega_i) \quad (12)$$

$h_j(\omega_i)$: 模擬観測データから求めた応答倍率

$\tilde{h}_j(\omega_i)$: 解析モデルの応答倍率

差の総和を各階 j についてまとめると次のようになる.

$$\prod_j = \sum_{i=1}^n \varepsilon_{ji} = \sum_{i=1}^n \left| \tilde{h}_j(\omega_i) - h_j(\omega_i) \right| \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (13)$$

本論では, 式(13)が同定に用いる評価関数である.

4.2 模擬解析モデルに対する雑音

実測した建物の観測データには様々な雑音が混ざっており, 応答倍率は滑らかなグラフにならない. そこで, 模擬観測モデルの応答倍率に雑音(振幅をランダムに $-30\% \sim +30\%$ 変化)を入れ, 同定を行う.

$$\{H(\omega)\}^* = N \cdot \{H(\omega)\} \quad (14)$$

$\{H(\omega)\}^*$: 雑音ありの目標関数

$\{H(\omega)\}$: 雑音なしの目標関数

N : 雑音係数 ($-30\% \sim +30\%$)

4.3 平滑化

地震動のデータそのものの雑音を取り除くために行う処理を平滑化という。その中でも比較的簡単な処理方法として、対称点の前後にバンド幅を設定し、その3つの値を平均し新たなデータとする移動平均法がある。

□加重移動平均法

移動平均法の中でも、単純な平均化ではなく対称点の重みを大きくする手法が加重移動平均法である。この方法は上記の単純移動平均法よりエッジを保つことができるメリットを持つ。本論ではこの手法を採用し、対称点から1/2、その前後の点から1/4ずつの値を加算、新たなデータとする。

4.4 模擬観測解析結果

解析モデルを Fig.5 に示す。遺伝的アルゴリズムに用いる諸量は Table 1 に記載する。

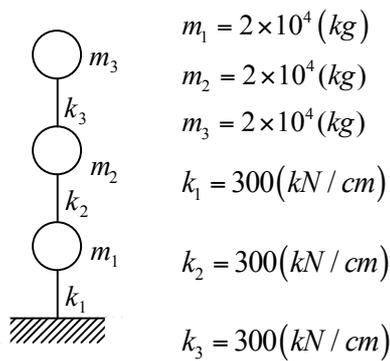


図5 3質点モデル

Fig.5 Model 3 mass points

表1 遺伝的アルゴリズムに用いる諸量

Table 1 Various quantities of GA

世代数	1000
個体数	10
ビット数	16
質点数	3
各質量(kg)	2×10^4
減衰定数	0.05
周波数	100
刻みの間隔	1

□剛性パラメータ型

剛性値を個体数分ランダムに発生させることにより、各質点の剛性値を追い込む。図面のない建物でも適用できるが探索範囲が大きい為、解が収束しづらいという欠点がある。

$$parameter : k_{xi}, k_{yi}, k_{\theta i} \quad (i = 1, n) \quad (15)$$

a) 応答倍率グラフ

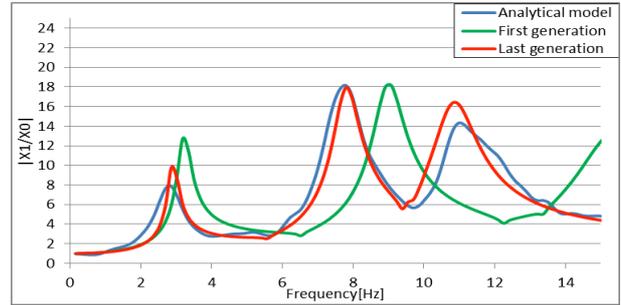


図6 スペクトル比較(X1/X0)

Fig.6 Comparison of spectra (X1/X0)

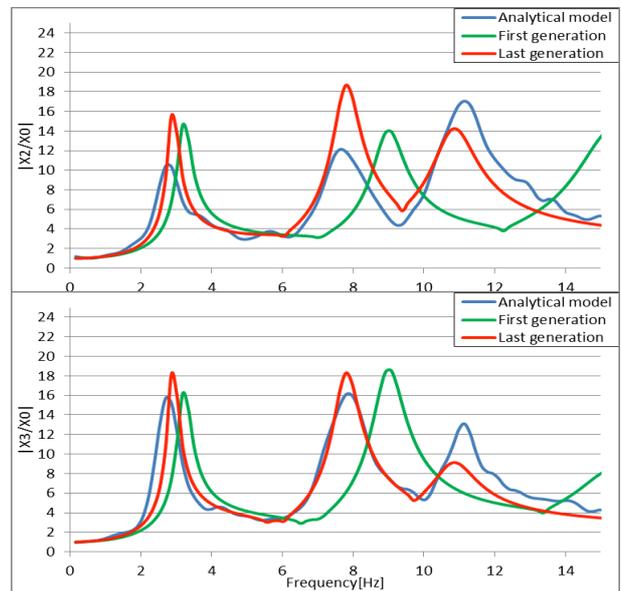


図8 スペクトル比較(X3/X0)

Fig.8 Comparison of spectra (X3/X0)

b) 適合率

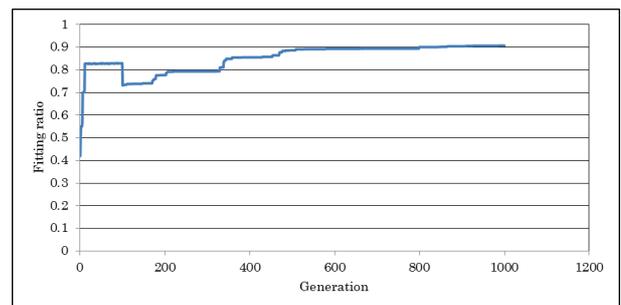


図9 適合率

Fig.9 Changes of fitting ratio

c)剛性の比較

表 2 各層の剛性比較

Table 2 Rigidity of each story

	k_1	k_2	k_3
Analytical model (kN/cm)	300.0	300.0	300.0
Identification value (kN/cm)	289.2	294.7	312.5

□剛性倍率パラメータ型

剛性値が既知の場合，係数 α, β, γ を個体数分ラン

ダムに発生させ，剛性に掛け合わせることにより，各質点の係数と実際の剛性値を追い込む．図面が存在することが前提となるが，解が収束しやすく，建物が設計時に比べどの程度劣化しているかを知ることができる．

Parameter: $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i (i = 1, n) \alpha_i k_{xi}, \beta_i k_{yi}, \gamma_i k_{\theta i}$ (16)

a) 応答倍率グラフ

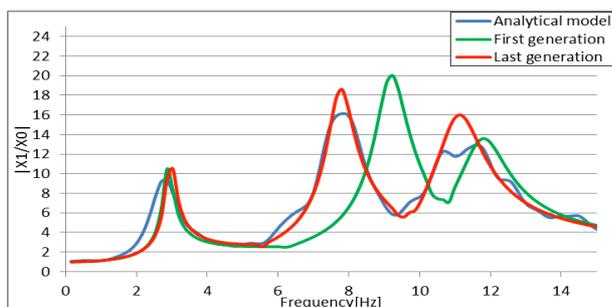


図 10 スペクトル比較(X_1/X_0)

Fig.10 Comparison of spectra (X_1/X_0)

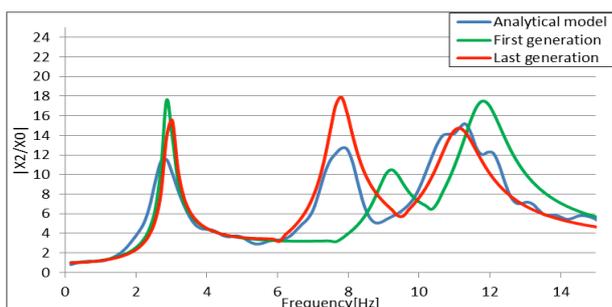


図 11 スペクトル比較(X_2/X_0)

Fig.11 Comparison of spectra (X_2/X_0)

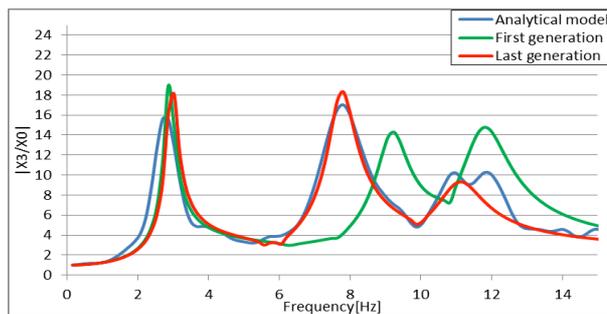


図 12 スペクトル比較(X_3/X_0)

Fig.12 Comparison of spectra (X_3/X_0)

b)適合率

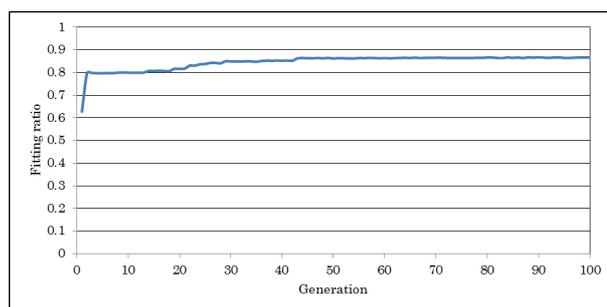


図 13 適合率

Fig.13 Changes of fitting ratio

c)剛性の比較

表 3 各層の剛性比較

Table 3 Rigidity of each story

	k_1	k_2	k_3
Analytical model (kN/cm)	300.0	300.0	300.0
Identification value (kN/cm)	299.9	299.9	300.0
	$\alpha_1 = 0.99$	$\alpha_2 = 0.99$	$\alpha_3 = 1.00$

5. 実測値同定解析

5.1 対象建物

本論で同定対象とする建物は法政大学市ヶ谷富士見キャンパス 58 年館低層棟である．58 年館は 1958 年の竣工から半世紀以上経過し，近年建替えの計画も出ている．その理由の一つは，耐震診断により指摘された強度不足である．しかしながら，階により天井高(階高)や壁の配置が異なり，一概に建物全体の強度不足とは言えず，各階に於いて強度判定を行い，それに基づいて的確に補強することも一つの解決策といえる．本研究では，その足がかりを得るため，中庭側に隣接した低層棟 (Photo 1) を対象に検討を試みる．



写真 1 対象建物の外観

Photo 1 The exterior of the building for observation

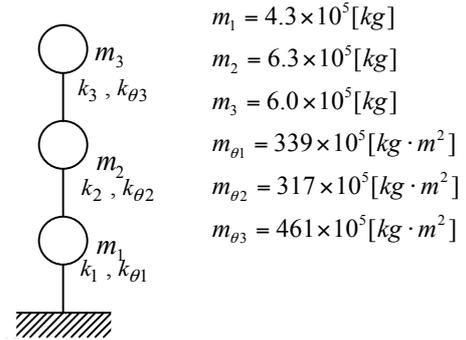


図 13 3 質点モデル

Fig.13 Model 3 mass point

- $m_1 = 4.3 \times 10^5 [kg]$
- $m_2 = 6.3 \times 10^5 [kg]$
- $m_3 = 6.0 \times 10^5 [kg]$
- $m_{\theta 1} = 339 \times 10^5 [kg \cdot m^2]$
- $m_{\theta 2} = 317 \times 10^5 [kg \cdot m^2]$
- $m_{\theta 3} = 461 \times 10^5 [kg \cdot m^2]$

5.2 常時微動観測

常時微動は 19 世紀末頃にはすでに知られていたが、当時は地震観測時に測定される雑音とされていた。しかし、後の研究で常時微動から地盤や建物の振動特性（剛性，減衰特性など）を抽出することができるようになった^[6]。

実測は建物の変位・速度・加速度が時間軸により観測される（Photo 2）。



写真 2 常時微動観測機器

Photo 2 Three Axis Vibrograph

観測波は、様々な周期をもった調和波の重合である。これを高速フーリエ変換(FFT)によって周波数領域の情報に変換し、各階の周波数変位応答関数を得る。本論で同定に用いる目標関数はこの各階変位を地動で割った変位応答倍率である。

5.3 観測値解析結果

本解析では多質点せん断モデルの他に 3 自由度 1 軸モデルを使用した。解析前、既知の建物データは Fig.13 に示す通りである。遺伝的アルゴリズムに用いる諸量は Table 4 に記載する。

表 4 遺伝的アルゴリズムに用いる諸量

Table 4 Various quantities of GA

世代数	1000
個体数	10
ビット数	16
質点数	3
各質量(kg)	$m_1 = 4.3 \times 10^5$ $m_2 = 6.3 \times 10^5$ $m_3 = 6.0 \times 10^5$
減衰定数	0.05
周波数	100
刻みの間隔	1

□観測値スペクトルによる解析

a) 応答倍率グラフ

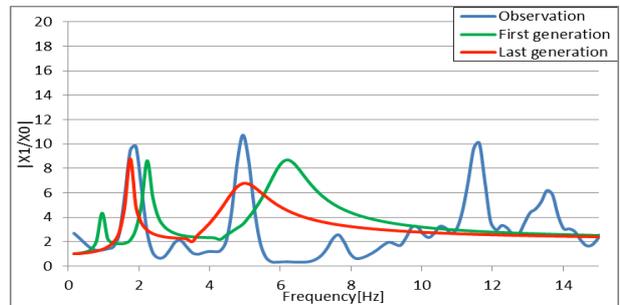


図 14 スペクトル比較(X_1/X_0)

Fig.14 Comparison of spectra(X_1/X_0)

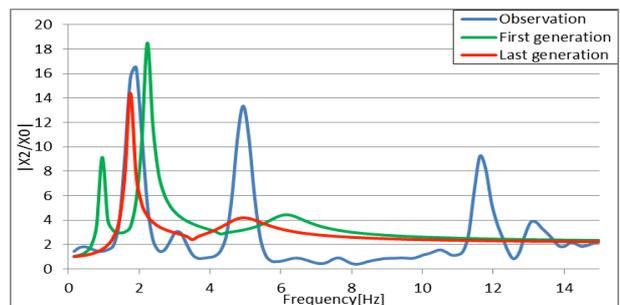
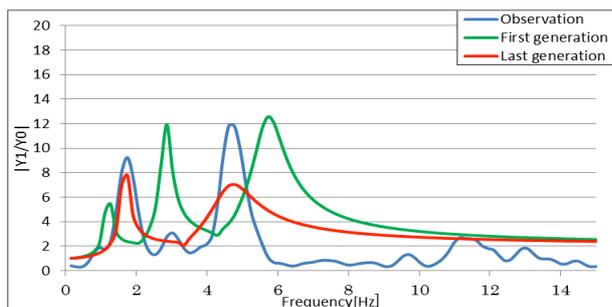
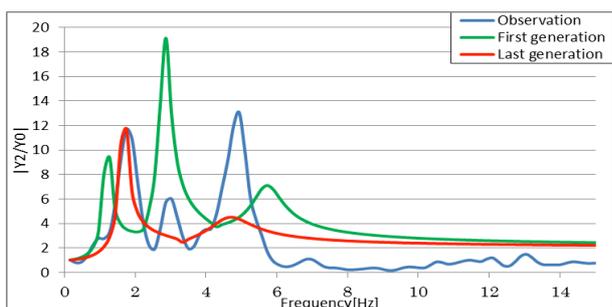


図 15 スペクトル比較(X_2/X_0)

Fig.15 Comparison of spectra(X_2/X_0)

図 16 スペクトル比較(Y_1/Y_0)Fig.16 Comparison of spectra(Y_1/Y_0)図 17 スペクトル比較(Y_2/Y_0)Fig.17 Comparison of spectra(Y_2/Y_0)

b)適合率

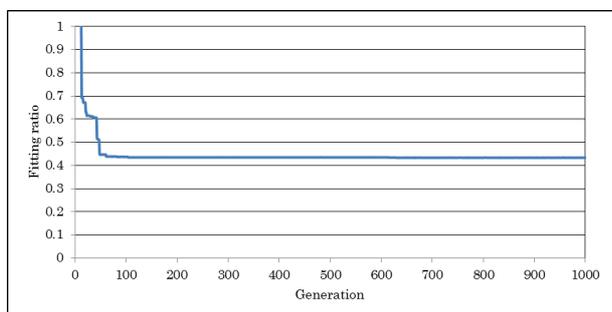


図 18 適合率

Fig.18 Changes of fitting ratio

c)剛性の比較

表 5 理論上と解析結果による剛性比較

Table 5 Comparison of Identification and theoretical result

		k_1	k_2	k_3
Theoretical result(kN/cm)	X	4913.0	4006.0	1055.0
	Y	4814.0	3107.0	879.0
Identification value(kN/cm)	X	2702.4	1121.2	160.0
	Y	2198.2	1165.0	429.0

6. 結論・展望

□模擬観測解析

模擬データと GA の最終値は、ほぼ一致している

が、平滑化を行ったことから多少応答値が小さくなり、適合率が下がっている。しかし、剛性もほぼ一致しているため本研究で示したモデル化、評価関数、最適化手法は妥当であると判断できる。

□実測値解析

1 次固有値についてはほぼ一致しているが、誤差もあり現段階では完全な同定プロセスの構築ができているとは言えない。剛性も一致しておらず、適合率も低下している。今後の課題を以下のようにまとめる。

- ・観測値同定の改良
- ・減衰のパラメータ化
- ・他の平滑化方法の検討
- ・他の建築物への順応性の確認

参考文献

- [1] 戸川隼人著：有限要素法による振動解析，サイエンス社，1981.
- [2] 柴田明德著：最新耐震構造解析 第 2 版，森北出版株式会社，1981.
- [3] 大崎順彦著：新・地震動のスペクトル解析入門，鹿島出版社，1994
- [4] 高橋健太郎：遺伝的アルゴリズムによる地盤の同定，広島大学大学院工学研究科修士論文，1999.
- [5] 古田均，杉本博之著：遺伝的アルゴリズムの構造工学への応用，森北出版株式会社，1997
- [6] 秋元一成，吉田長行：最適化手法を用いた建物の同定問題，法政大学情報メディア教育研究センター研究報告，Vol.26，2012.