

最適化手法を用いた建物の同定問題

Identification Problem of Structure by Optimization Method

秋元 一成¹⁾ 吉田 長行²⁾

Kazunari Akimoto and 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

This study proposes the identification method based on the dynamic characteristics of the structure, which is measured by the microtremor observational instrument. There are two advantages on this method: We will be able to make a structural model, 1) without drawings and specifications, and 2) considering the aging of the structure and the defects in construction. The proposed method makes it possible to evaluate the stiffness of multi-mass structural system by using the observational data and the genetic algorithm as optimization method.

Keywords : GA, Optimization Method, Microtremor, Identification Problem, Structural dynamics

1. はじめに

近年の耐震偽造問題や建築基準法の改定、耐震診断・耐震補強の活発化といった社会的背景から、耐震設計の在り方が見直されている。中でも耐震診断では多くの場合、図面等の資料から数値を抜き出した上で検討用計算を実施する。しかし、古い建物では、資料の老朽化や紛失がしばしば生じ、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いる。

地盤や構造物は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。これは「常時微動」と呼ばれ、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じるものである (Fig.1)。

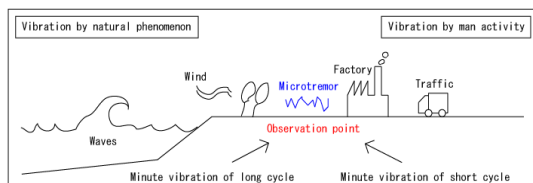


Fig.1 Hypocenter of microtremor

本研究の目的は、常時微動観測機器を用いて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にある (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などの作業を短縮し、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。

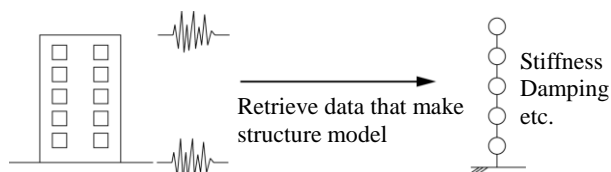


Fig.2 Method of identification

2. 観測手法

2.1 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 年館である。本館は隣接する 55 年館と共に、大江宏設計の戦後のモダン建築の名作である。千代田区富士見に立地する SRC 造地上 7 階建

(低層棟は地上 3 階建)の本校舎はその名のとおりに 1958 年に竣工された建物である。58 年館は 55 年館 (1955 年竣工)と並び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。



Photo 1 The exterior of the building for observation

2.2 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ノイズに過ぎなかった。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。常時微動観測の具体的な方法については、文献[5]を参照されたい。



Photo 2 Three Axis Vibrograph

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)。観測波は、様々な周期をもった調和波の重ねである。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。

3. 解析手法

3.1 目標関数

建物に地震動が加わる時の振動方程式は以下のよう表せる。

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

$[M], [C], [K]$: mass, damping, stiffness matrices

$\{x_j\}$: displacement vector in time(layer j)

$\{\ddot{x}_0\}$: acceleration vector in time(ground)

式(1)の詳しい誘導については文献[1], [2]を参照されたい。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以下のように表せる。

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

同様に建物の変位は次のように表せる。

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

これらを式(1)に代入し、整理すると

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

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

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

上式で各要素の絶対値を取ったものを下式とする。

$$\left\{ \begin{matrix} x_j \\ x_0 \end{matrix} \right\} = \{h(\omega)\} \quad (6)$$

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こととし、次のように書き換える。

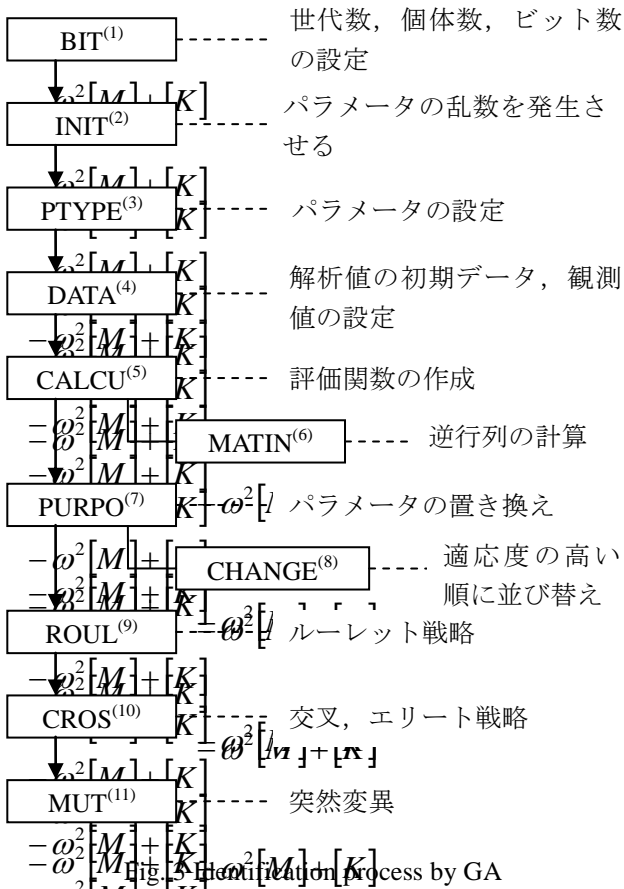
$$\begin{aligned} \left\{ \begin{matrix} X_j \\ x_0 \end{matrix} \right\} &= \left\{ \begin{matrix} x_j + x_0 \\ x_0 \end{matrix} \right\} \\ &= \{h(\omega) + 1\} \\ &= \{H(\omega)\} \end{aligned} \quad (7)$$

X_j : absolute displacement

$\{H(\omega)\}$: amplification ratio

本研究では、式(7)を同定のための目標関数とする

3.2 同定手法



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最小化することによってなされる。

$$\varepsilon_{ji} = h_j(\omega_i) - \tilde{h}_j(\omega_i) \quad (8)$$

$$\prod_j = \sum_{i=1}^n \varepsilon_{ji} = \sum_{i=1}^n |h_j(\omega_i) - \tilde{h}_j(\omega_i)| \quad (9)$$

(j = 1, 2, ..., m)

$h_j(\omega_i)$: amplification ratio(observation)

$\tilde{h}_j(\omega_i)$: amplification ratio(analysis)

\prod_j : discriminant in this study

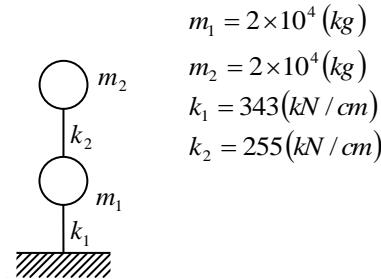
ここで、式(9)は評価関数であり、これを最小化する建物の層剛性を遺伝的アルゴリズム (GA) により探索する。そのフローチャートをFig.3に示す。また、遺伝的アルゴリズムの具体的な手法と適用法については、文献[3], [4]を参照されたい。

4. 解析結果

4.1 模擬観測モデル

実際に扱う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、直接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。解析モデルを Fig.4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。



$m_1 = 2 \times 10^4 \text{ (kg)}$
 $m_2 = 2 \times 10^4 \text{ (kg)}$
 $k_1 = 343 \text{ (kN/cm)}$
 $k_2 = 255 \text{ (kN/cm)}$

Fig.4 Analytical model

Table 1 Analytical data

The number of generations	1000
Population size	100
The number of bits	16
The number of masses	2
Each mass(t)	20
Damping factor	0.05
Sampling frequency	1000

■ スペクトル比較

初期世代のデータによる固有振動数は目標値と一致しないが、最終世代では良好な固有値が見られる (Fig.5, 6)。

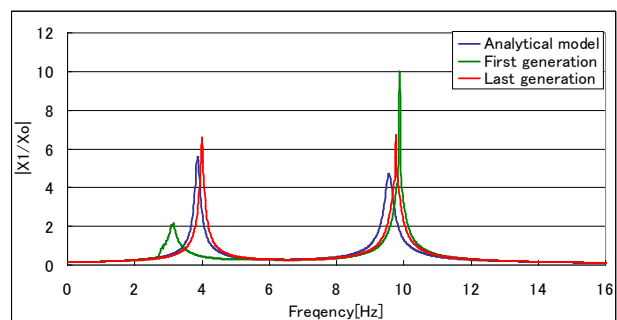


Fig.5 Comparison of spectra (1000th generation X_1/X_0)

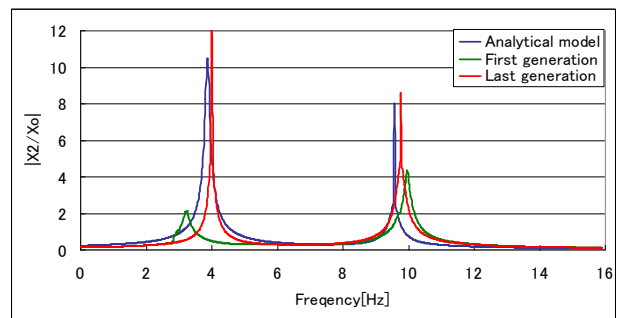


Fig.6 Comparison of spectra (1000th generation X_2/X_0)

■世代による適合率の変化

初期世代では適合率が約 28%であるが、最終世代では約 82%に達している (Fig. 7)。

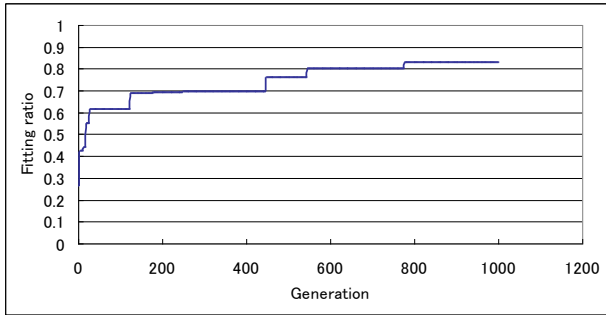


Fig.7 Changes of fitting ratio (1000th generation)

■パラメータ値

模擬観測データを作成し、層剛性を未知数として GA による解析を行った結果、Table 2 に示すように十分良好な推定値が得られた。

Table 2 Rigidity of each story

	k_1	k_2
Analytical model(kN/cm)	343	255
Identification value(kN/cm)	355	259

5.2 実測値観測モデル

ここではその模擬観測データを実測データに置き換え同様に解析する。解析前、既知の建物データは Fig.8 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 3 に記載する。

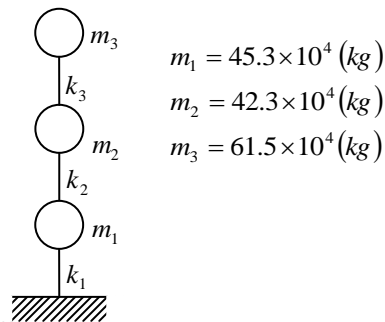


Fig.8 Structural model of the building 58

Table 3 Analytical data

The number of generations	500
Population size	100
The number of bits	16
The number of masses	3
Each mass(t)	$m_3=6.15$ $m_2=4.23$ $m_1=4.53$
Damping factor	0.05
Sampling frequency	1000

■スペクトル比較

観測では2Hz, 6Hz, 8.5Hz付近に顕著なピークがある。本モデルによる同定では、初期世代から多少シフトして最終世代で観測値に近づくが、これ以上、全くフィッティングを改善できない。一方、前節の模擬観測モデルでは、目標関数に雑音がないこともあるが、ピーク周波数は高い精度で、同定されている。このことは、観測で捉えた3個のピーク周波数が、3質点のせん断系モデルによってすべて同定できる固有周期でない可能性を示している。

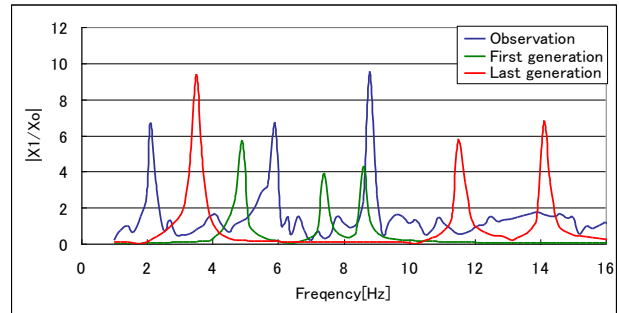


Fig.9 Comparison of spectra (500th generation X_1/X_0)

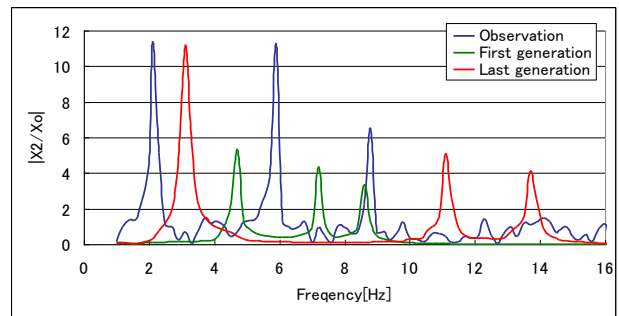


Fig.10 Comparison of spectra (500th generation X_2/X_0)

■世代による適合率の変化

Fig.11 によれば、初期世代では適合率は約 10%だが、最終世代では約 20%となっている。適合率のこのような低さは、先に説明したせん断質点系による同定モデルでは表現できない振動特性が観測建物のデータに含まれていることが原因と思われる。

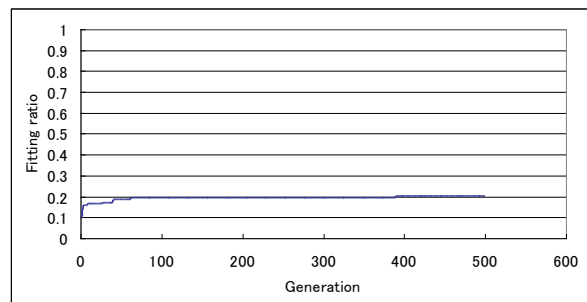


Fig.11 Changes of fitting ratio (500generation)

■パラメータ値

同定結果は不十分であるが、最終世代で得られたパラメータ値によれば、第2層の剛性が強く、第1層(ピロティ部)の剛性が第2層に比べ弱い事がわかる。第3層は無柱の大教室であるため、その他の層と比較して層剛性は著しく低いといえる。図面データに基づいて両端固定柱の水平剛性から求めた各層剛性の値(Theoretical result)と比べると、剛性分布の特性はほぼ捉えられている (Table 4)。

Table 4 Comparison of Identification
and theoretical result

	k_1	k_2	k_3
Theoretical result(kN/cm)	973	1485	440
Identification value(kN/cm)	1292	1893	306

6. 結論・今後の展望

本研究で建物の構造同定プロセスを構築し、検討した結果、せん断質点系モデルで表現できる建物の固有周期の算定では良好な結果が得られた。

しかしながら、以下のような問題点が明らかになった。

- ・せん断質点系ではモデル化できない構造に対しても対応できるモデルの採用が必要である。例えば、振れを考慮した1次元モデルが有望である。多少、同定が難しくなるが、3次元モデルの検討も必要である。

- ・増幅率のフィッティングに誤差が大きい。減衰パラメータの導入法を再検討する必要がある。例えば、モード減衰の導入 (Rayleigh 減衰のパラメータ設定) や、ピーク周波数による同定と増幅率の同定を分離した2段階最適化などが考えられる。

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] 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.
- [4] 伊野慎二：波動透過境界の最適化に関する研究，法政大学大学院工学研究科修士論文，2008.
- [5] 秋元一成，吉田長行：常時微動観測による建物の同定問題，法政大学情報メディア教育研究センター研究報告，Vol.23，2010.