

常時微動観測に基づく動的耐震診断法

Dynamic Seismic Diagnosis Based on the Microtremor Observation

濱崎 大樹¹⁾ 鯉沼 優仁²⁾ 吉田 長行²⁾

Taiju Hamasaki, Masahito Koinuma, 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, concern about seismic performance of buildings has been increasing in Japan. However, it is an important social problem that there are a lot of buildings without sufficient earthquake resistance which were designed by old seismic standards. To solve this problem, some low-priced and simple technique that can estimate the structural characteristics of the building and obtain the basic data of seismic diagnosis has to be established. This research presents the new method to obtain the basic information of seismic diagnosis by measuring the dynamic behavior of buildings with microtremor observational devices. Genetic algorithm is used to identify the structural property as an optimized method.

Keywords : Dynamic seismic diagnosis, Microtremor, GA, H/V spectral ratio, RD method

1. はじめに

日本の建築関連法規は常にその時代に適応するように改正されてきている。建築基準法における過去の代表的な改正として 1981 年に行われたものがあり、これによって建築物はより大規模な地震においても人命を守るように設計されることを義務付けられた。この改正によって設けられた基準は新耐震基準と呼ばれ、これ以前のは旧耐震基準と呼ばれる。この 2 つの基準の差は 1995 年に発生した阪神・淡路大震災で明確に表れたと言われ、旧耐震基準で設計された建物の多くが倒壊した一方で、新耐震基準で設計された建物は大きな被害を免れている。1981 年以前に建築された建物でも適切な補強を施すことで十分な耐震性を得ることができるが、現在でも十分な耐震性を持たない建物が数多く残っていることが大きな社会問題となっている。

建築物の耐震性能を評価する手法として耐震診断が行われている。現在の日本で取り入れられている方法は建物の設計図面が必要であり、何らかの理

由でそれが紛失されている場合は現地調査により復元する必要がある。しかし、建物規模が大きくなるにつれてそれだけ多大な時間と費用が掛かることになる。また、各自治体で行われている住宅・マンション所有者に対する建物の耐震化に関するアンケートでは、耐震診断を実施しない理由として費用面の問題が上位に位置している。このような問題を解決するために、安価で簡易的に建物の構造概要を推定し、耐震診断の基礎資料を得ることができる手法の確立が求められている。その一つとして建物の常時微動を観測することにより振動特性を把握する方法がある。

本論の目的は、常時微動観測を用いて建物の振動特性を探ることで構造諸量を同定し、耐震診断の基礎的構造資料を得るプロセスを構築することである。

2. 研究過程

- (1) 建物の常時微動観測を行い高速フーリエ変換 (FFT)により時刻歴波形を周波数領域に変換し、

H/V スペクトル比を用いて雑音を消去する。

- (2) 時刻歴波形から RD 法により減衰定数、固有周期を算定する。また、剛性補強倍率の式より建物が適切に補強されているかを確認する。
- (3) 振動方程式に従い建物のモデル定式化を行う。
- (4) 遺伝的アルゴリズムにより周波数領域における観測値とモデルの同定を行い、評価関数に従い最適化を行う。
- (5) モデルの整合性を確認し同定の有効性を検討する。
- (6) 複数の建物の解析を通して、動的耐震診断法のプロセスを構築する。

研究過程のフローを図 1 に示す。

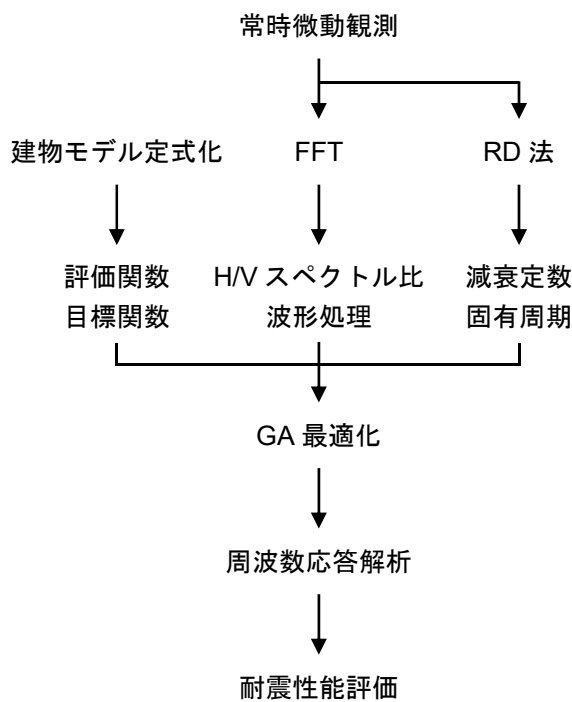


図 1 研究過程

Fig.1 Research Process

3. 遺伝的アルゴリズム

本論では最適化手法として遺伝的アルゴリズム (GA)を採用する[1][2]。概要を図 2 に示す。

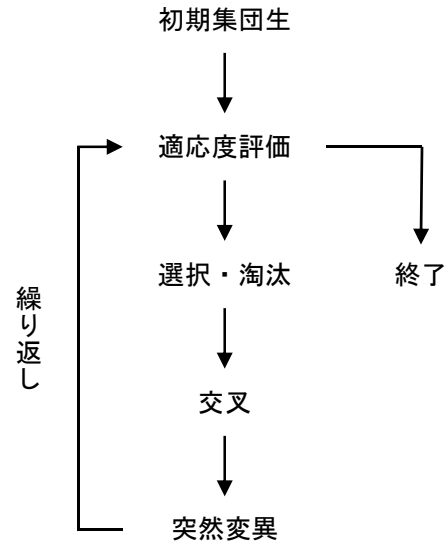


図 2 遺伝的アルゴリズムの過程

Fig.2 Process of GA

4. 常時微動観測

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。この振動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。

4.1 観測方法

水平 2 方向に加えて鉛直 1 方向の合計 3 成分の観測を各階 3 回ずつ行う。1 回の観測は 12 分間行い、そのうち前後 1 分ずつを除いた 10 分間を解析に使用する。振動のデータは時間領域で観測され、それを高速フーリエ変換により周波数領域に変換することで、各階の周波数ごとの変位を得る。本論の目標関数は絶対変位応答倍率であるためこれを地動で割ったものを用いる。

観測機器は昭和測器の微小振動測定用機器、3 軸微振動検出器 Model-2205 を使用する。

4.2 観測対象建物

本論では川越市立高中学校 B 棟を対象建物とする。建物の外観と概要を図 3、表 1 に示す[3]。



図 3 観測対象建物外観

Fig.3 Externals of the Building for Observation

表 1 建物概要

Table1 Outline of the Building

構造種別	RC 造
地上 / 地下 階建	4/0 階建
建物高さ	15.35 [m]
延床面積	793.8 [m ²]

この建物は埼玉県川越市所在の川越市立高階中学校内にある教室棟の1つであり、RC造地上4階建ての学校建築である。1970年の竣工から約45年が経過おり、2002年には改修工事を行い1階～3階の一部にプレースの増設がしてある。周辺環境は東西にそれぞれ国道254号線、川越街道が走っており交通量は比較的多いが、その周囲は閑静な住宅街であり、常時微動の観測に当たり障害となるような騒音および振動等は感じられなかった。なお、本論では長手方向をX方向、短手方向をY方向とする。

4.3 H/V スペクトル比

H/V スペクトル比とは、水平動と上下動スペクトルの比から固有振動数を推定する方法であり、地震波の一つである Rayleigh 波の影響を除去する方法として考案されたものである。これによれば、振動源の少ない深夜などの時間帯でなくても常時微動観測により雑音の少ないデータを得ることができる[4]。

Rayleigh 波の影響を除去するために、地表面と基盤の水平動の比 R に及ぼす Rayleigh 波の影響を地表面と基盤の上下動の比 E で見積もり、以下のように補正して増幅特性 A_m を推定する。

$$\begin{aligned}
 A_m &= R / E \\
 &= (A_{hs} / A_{hb}) / (A_{vs} / A_{vb}) \\
 &= (A_{hs} / A_{vs}) / (A_{hb} / A_{vb})
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

すなわち、地表と基盤のそれぞれの H/V スペクトル比によって、より確からしい増幅特性が推定できる。さらに、基盤の H/V スペクトル比が広い周波数範囲で概ね 1.0 となる観測事実を考慮すると、表層地盤の増幅特性は、次の式(2)のように地表だけの測定で推定できることになる。

$$A_m \cong (A_{hs} / A_{vs}) \tag{2}$$

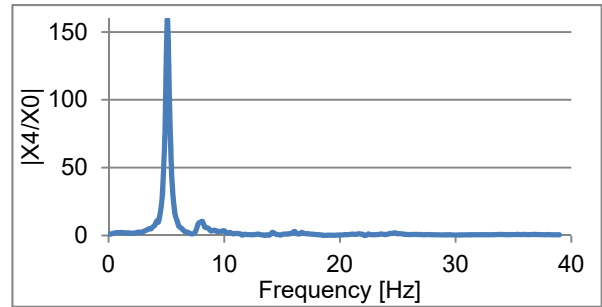


図 4 水平動スペクトル

Fig.4 Horizontal Spectrum

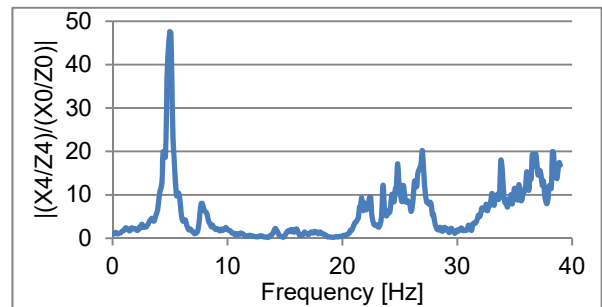


図 5 H/V スペクトル比

Fig.5 H/V Spectral Ratio

図 4 は水平動のスペクトルであり、図 5 は水平動を上下動で割った H/V スペクトル比である。両者を比較すると、H/V スペクトル比は雑音が減り、2 次以降のピークも明確に目視できるようになっている。

4.4 RD 法

建物頂部における常時微動の応答 $X(t)$ は、建物の自由振動 $D(t)$ とランダムな外力 $R(t)$ による強制振動との和で表現することができる。

$$X(t) = D(t) + R(t) \tag{3}$$

この場合、応答 $X(t)$ の時系列波形(図 6)を $t=0$ に極大値となるように並べ時刻歴を重ね合わせると、 $\sum Xi(t)$ のうちランダムな極大値 Pi の和 $\sum Pi(t)$ を初期振幅とする自由振動波形(図 7)となり次式で表せる[5]。

$$\sum Di(t) = (\sum Pi) \exp(-h\omega t_0) \cdot \cos\sqrt{(1-h^2)\omega t_0} \quad (4)$$

この手法は RD 法と呼ばれ、本論ではこれを用いて対象建物の減衰定数および固有周期を算定する。

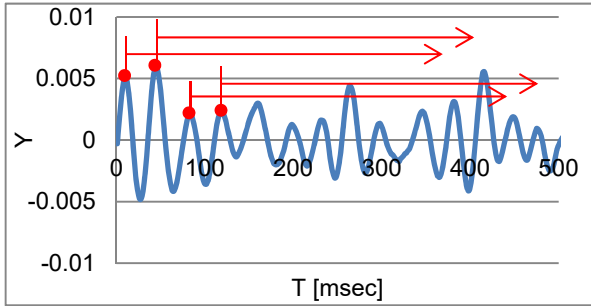


図 6 時刻歴波形

Fig.6 Time History Waveform

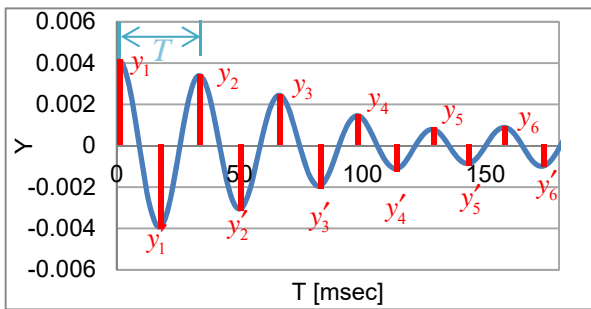


図 7 RD 法による時刻歴波形

Fig.7 Time History Waveform by RD Method

RD 法の適用にあたっては適切なフィルタを施すことで各次の減衰定数、固有周期が算定できると推測される。本論では周波数応答波形から各ピーク付近に狭帯域のバンドパスフィルタを施したのちに RD 法を適用する。観測データは建物の最上階である 4 階のものを使用し、重ね合わせするデータの時間長は各極大値から 5 秒間とする。

減衰定数 h の算出方法は次式による。 $\ln d$ は対数減衰率と呼ばれる。

$$d = \frac{y_1}{y_2} = \frac{y_2}{y_3} = \dots \quad (\text{片振幅})$$

$$= \frac{y_1 + y_1'}{y_2 + y_2'} = \frac{y_2 + y_2'}{y_3 + y_3'} = \dots \quad (\text{全振幅}) \quad (5)$$

$$= e^{h\omega T'} = e^{2\pi m \omega / \sqrt{1-h^2}}$$

$$h \approx \frac{\ln d}{2\pi} \quad (6)$$

4 階における 3 つの観測データからそれぞれ 40.96 秒を抜き出し、各値を求め平均値を算出する。

X 方向は $h=0.021(2.1\%)$ 、固有周期 $T=0.202$ [s]

Y 方向は $h=0.025(2.5\%)$ 、固有周期 $T=0.195$ [s] 以上を各方向値として採用する。

5. 周波数応答解析

5.1 解析手法

ここでは周波数領域における応答倍率による解析を行う。周波数応答解析は、時刻歴応答による解析に比べ、固有周期などの建物特性が探りやすい利点を持つ。

本論では、目標関数から評価関数を求め、遺伝的アルゴリズムを用いて最適化を行う。目標関数には、計算領域が小さく簡易的な解析が可能である多質点せん断モデルと、1 次元質点系において、部材要素を増やさず 2 方向変位とねじれを考慮し 3 次元表現を行った 3 自由度 1 軸モデルの 2 種類を用いる。まず対象建物図面から質量および各方向の剛性を算出する。その後、観測値を用いて解析をすることで諸量の同定を行う。

また、解析には剛性パラメータ型と剛性倍率パラメータ型を用いる。剛性パラメータ型は各階の剛性を探索することで未知の剛性を追い込むことができる。すなわち、図面がなく構造の詳細が不明な状況においても解析することができる手法である。剛性倍率パラメータ型は既知の剛性に対する倍率を探索することで建物の劣化状況を判定することができる。よって、図面が存在する場合のみ有効な手法である。

5.2 目標関数(多質点せん断モデル)

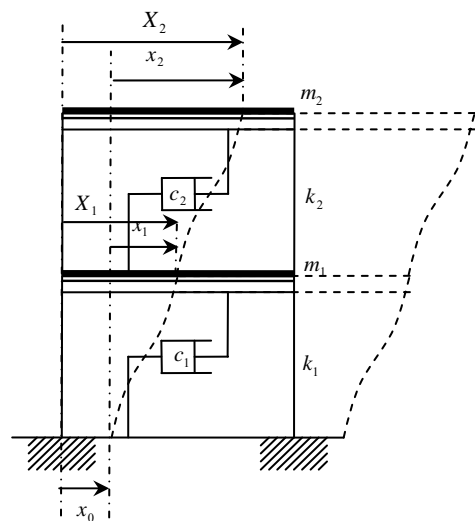


図 8 地震時の建物モデル

Fig.8 Model of Coseismic Building

図8に示すような質量マトリクス[M]、減衰マトリクス[C]、剛性マトリクス[K]を有する建物に地震動が加わるとき、振動方程式は以下のように表せる。

$$[M]\{\ddot{x}_j\}+[C]\{\dot{x}_j\}+[K]\{x_j\}=-[M]\{\ddot{x}_0\} \quad (7)$$

$\{x_j\}$: j層の相対変位

$\{x_0\}$: 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、地面の変位および微分値は次式のように表すことができる。

$$x_0 = x_0 e^{i\omega t}, \dot{x}_0 = x_0 i\omega e^{i\omega t}, \ddot{x}_0 = -x_0 \omega^2 e^{i\omega t} \quad (8)$$

同様に建物の各値は次式のように表すことができる。

$$x_j = x_j e^{i\omega t}, \dot{x}_j = x_j i\omega e^{i\omega t}, \ddot{x}_j = -x_j \omega^2 e^{i\omega t} \quad (9)$$

これらを式(7)に代入し整理すると

$$\begin{Bmatrix} x_j \\ x_0 \end{Bmatrix} = [-\omega^2 [M] + i\omega [C] + [K]]^{-1} [M] \{1\} \omega^2 \quad (10)$$

本論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 を用いると

$$\begin{Bmatrix} X_j \\ x_0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} x_j + x_0 \\ x_0 \end{Bmatrix} = \{H(\omega)\} \quad (11)$$

式(11)は各層の絶対増幅率応答倍率を表し、これを多質点せん断モデルの目標関数とする。

5.3 評価関数

最適化は、目標関数によって求められた応答倍率と微動観測によって得られた応答倍率の差を評価関数とし、これを最小化することによってなされる。

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

$\tilde{h}_j(\omega_i)$: 目標関数によって求められた応答倍率

$h_j(\omega_i)$: 常時微動観測によって得られた応答倍率

この差の総和を各階 j についてまとめると

$$\prod_j = \sum_{i=1}^n \varepsilon_{ji} = \sum_{i=1}^n |\tilde{h}_j(\omega_i) - h_j(\omega_i)| \quad (13)$$

$(j=1, 2, \dots, m), (i=1, 2, \dots, n)$

となる。

本論ではこの式(13)を評価関数として用いる。

5.4 探索範囲

解析においては複数の階数を持った建築の剛性をパラメータとするため、解の探索範囲を幾分か絞り込むことができる。本論では次の2種類の方法を提案し、より探索範囲が絞られる下階拘束型を採用する。

5.4.1 下階拘束型

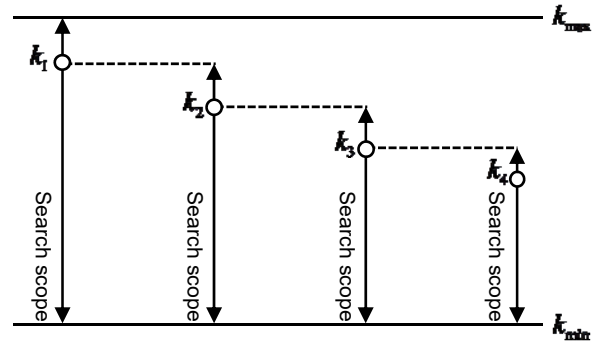


図9 下階拘束型

Fig.9 Restriction Type by the Floor Below

地上における建築物の剛性は、1階が最大であり上の階ほど小さくなっていくのが一般的である。よって、ある階の剛性はそれより下階の剛性より大きくなる。この仮定をもとに、図9に示すように下階の剛性により各階剛性の探索範囲を絞り込む。

5.4.2 最下階拘束型

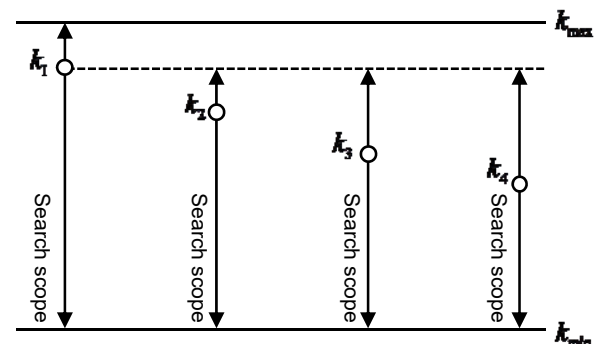


図10 最下階拘束型

Fig.10 Restriction Type by the Bottom Floor

2階以上の階での剛性がほぼ同程度に設計された場合、劣化状況によってはある階の剛性が下階のそ

れを上回ることも考えられる。この仮定により、図 10 に示すように、最下階の剛性より各階剛性の探索範囲を絞り込む。

5.5 解析結果

解析に用いる対象建物の諸量および遺伝的アルゴリズムの入力データを図 11、表 2 に示す。なお各方向剛性は D 値法で求めたため、若干安全側に求まっていることが推測される。

解析結果として多質点せん断モデル X 剛性倍率パラメータ型と、多質点せん断モデル X/V 剛性倍率パラメータ型の応答倍率グラフ(図 12~15,17~20)、適合率(図 16,21)および剛性の比較(表 3,4)を示す。

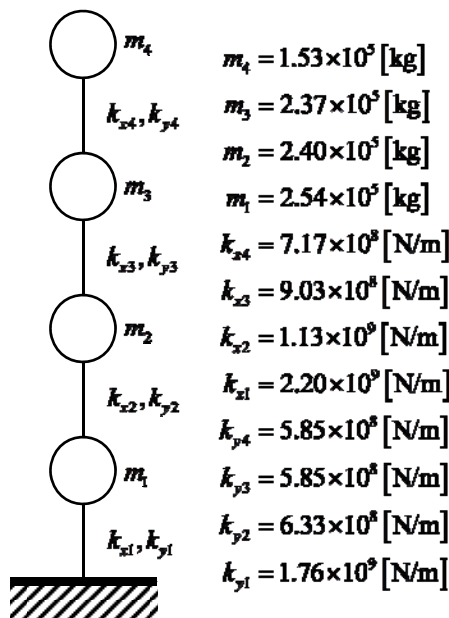


図 11 4 質点モデルの質量および剛性
Fig.11 Mass and Stiffness of 4 Mass Point Model

表 2 GA 入力データ
Table2 GA Input Data

Number of generations	1000
Number of individuals	20
Number of bits	16
Damping constant	$h_x = 0.021$ $h_y = 0.025$
Frequency analytical range [Hz]	0~39.03
Frequency interval [Hz]	0.01

5.6.1 せん断モデル X 剛性倍率パラメータ型

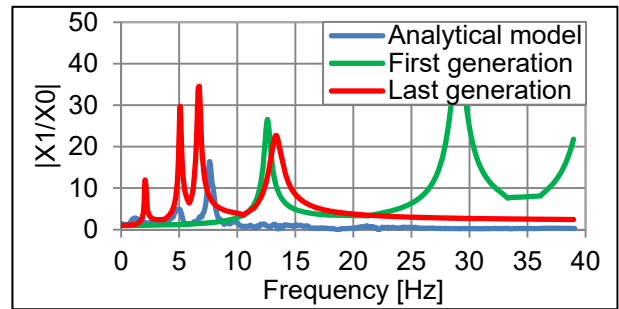


図 12 スペクトル比較
Fig.12 Comparison of Spectrum

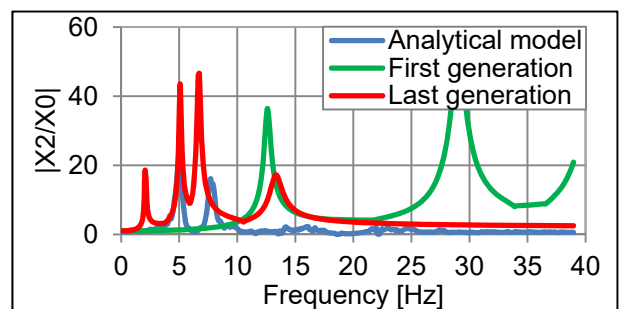


図 13 スペクトル比較
Fig.13 Comparison of Spectrum

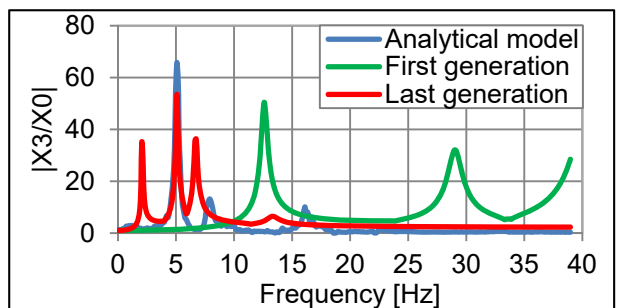


図 14 スペクトル比較
Fig.14 Comparison of Spectrum

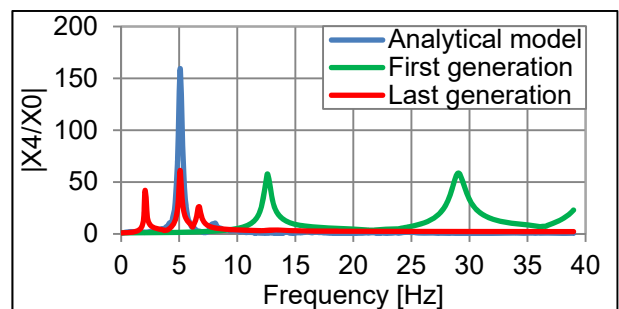


図 15 スペクトル比較
Fig.15 Comparison of Spectrum

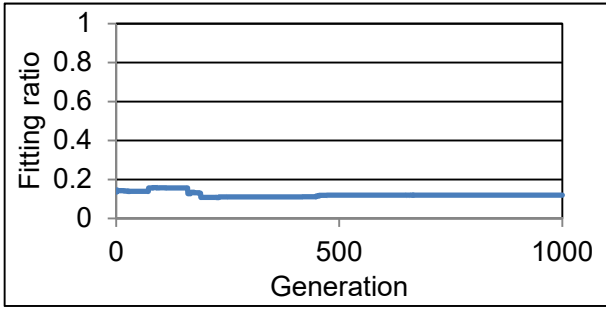


図 16 適合率の推移

Fig.16 Changes of Fitting Ratio

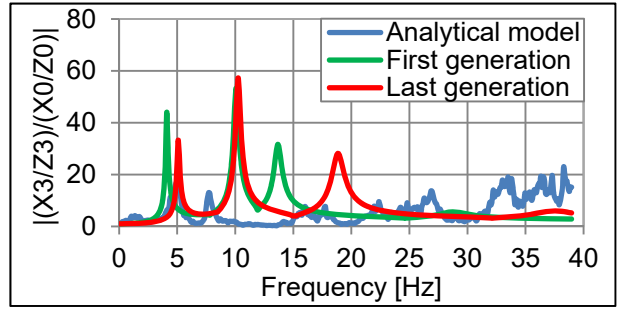


図 19 スペクトル比較

Fig.19 Comparison of Spectrum

表 3 剛性比較

Table3 Comparison of Stiffness

Analytical model [N/m]	$k_{x1} = 2.20 \times 10^9$	$k_{x3} = 9.03 \times 10^8$
	$k_{x2} = 1.13 \times 10^9$	$k_{x4} = 7.17 \times 10^8$
Identification value [N/m]	$k_{x1} = 9.19 \times 10^8$	$k_{x3} = 1.07 \times 10^8$
	$\alpha_1 = 0.42$	$\alpha_3 = 0.12$
	$k_{x2} = 5.54 \times 10^8$	$k_{x4} = 8.87 \times 10^7$
	$\alpha_2 = 0.49$	$\alpha_4 = 0.12$

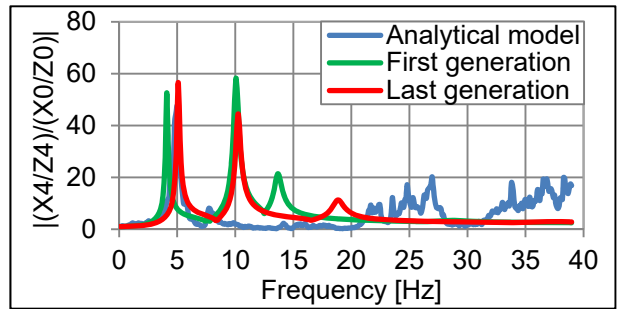


図 20 スペクトル比較

Fig.20 Comparison of Spectrum

5.6.2 せん断モデル X/V 剛性倍率パラメータ型

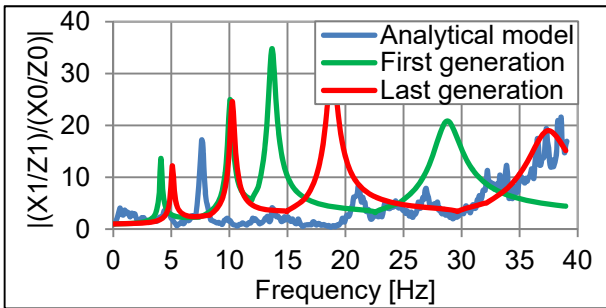


図 17 スペクトル比較

Fig.17 Comparison of Spectrum

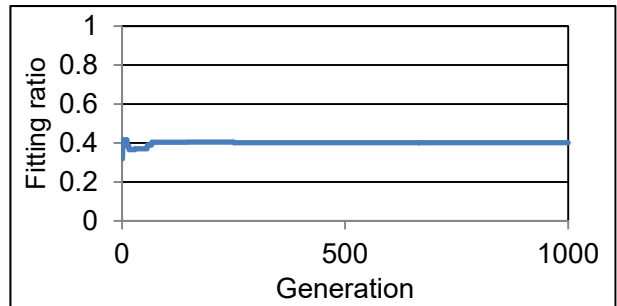


図 21 適合率の推移

Fig.21 Changes of Fitting Ratio

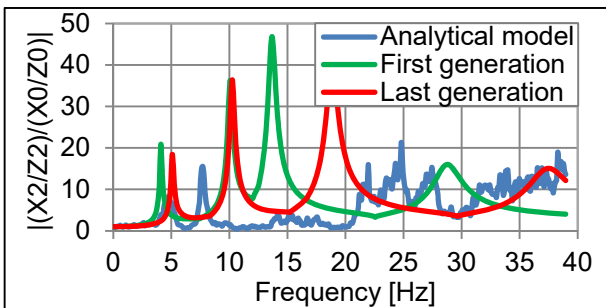


図 18 スペクトル比較

Fig.18 Comparison of Spectrum

表 4 剛性比較

Table4 Comparison of Stiffness

Analytical model [N/m]	$k_{x1} = 2.20 \times 10^9$	$k_{x3} = 9.03 \times 10^8$
	$k_{x2} = 1.13 \times 10^9$	$k_{x4} = 7.17 \times 10^8$
Identification value [N/m]	$k_{x1} = 6.25 \times 10^9$	$k_{x3} = 1.14 \times 10^9$
	$\alpha_1 = 2.85$	$\alpha_3 = 1.26$
	$k_{x2} = 4.91 \times 10^9$	$k_{x4} = 2.05 \times 10^8$
	$\alpha_2 = 4.33$	$\alpha_4 = 0.29$

6. 結論

1. 常時微動観測

観測対象建物は比較的シンプルな構造であり、観測条件も静穏であったため良好な常時微動のデータを得ることができた。また、本論では微動データの10分間を取り出すことによって安定したスペクトルを解析に用いることができた。一定の時間長以降では周波数領域のスペクトルの形は変化しなかったため、建物ごとの適切な時間長を見つけることで観測時間の短縮に繋げることができる。

2. RD法

1次の固有周期、減衰定数は各方向で妥当な値を算出することができる。しかし、2次以降の値を求める際にはフィルタによってばらつきが出る結果となる。今後の課題である。

3. H/Vスペクトル比

水平動のみのデータに比べX,Y方向ともにスペクトルのピークが強調されるため、有効な雑音消去法だと言える。本論では階ごとに1か所でのみの観測しか行わなかったが、複数の位置で観測を行い、H/Vスペクトル比と常時微動の観測位置の関係を明らかにする必要がある。

4. 周波数応答解析

多質点せん断モデルの解析では適合率が40%程度に落ち着くが、解である剛性はおおむね良好な値を算出することができる。これはH/Vスペクトル比と、本論で導入した探索範囲の拘束が有効に働いた結果だと言える。

参考文献

- [1]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年
- [2]古田均,杉本博之、"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年
- [3]鯉沼優仁,町田明音、"常時微動観測による建物の振動特性に関する研究—川越市立高階中学校 B棟—"、法政大学デザイン工学部卒業論文、2014年
- [4]中村豊、"H/V スペクトル比の基本構造"、物理探査学会地震防災シンポジウム、2008年
- [5]田村幸,佐々木淳,塚越治夫、"RD法による構造物のランダム振動時の減衰評価"、日本建築学会構造系論文報告集第454号 pp.29-38、1993年