

常時微動測定による建物の振動特性の同定

Identification of Structural Vibration property by Microtremor Observation

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

The purpose of this study is to present the new process that identifies structural property of the buildings by the microtremor observation. The microtremor observation is said to be effective only in calm environment with little noise such as in late night after closing the buildings. Therefore we use H/V spectrum to delete noises from the observed data, and RD method to identify the natural frequency of the buildings. These methods enable us to find out the exact data even in the day time observation. The proposed methods can also reduce cost and time for the seismic judgment since the detail specification with many workloads is not needed, and effective also in case that the drawings are lost. Additionally, we can know the state of deterioration due to aging or long usage from the elongation of the natural frequency of the buildings.

Keywords : microtremor, identification problem, structural dynamics, GA, H/V spectrum, RD method

1. はじめに

近年、度重なる地震、耐震強度偽造事件、建築基準法の改定などにより世間の建物の建築への関心が高まっている。これから新しく建設される建物ならば設計基準に見合った設計がなされるが、既存の建物に対する安全性が問われている。それを確かめる方法として耐震診断が挙げられ、現在至る所で検査が行われている。

現在の耐震診断は、現地調査として予備調査、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、ひび割れや地盤調査等を行う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、現場で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、その一つとして建物の常時微動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。その関係を図1に示す。

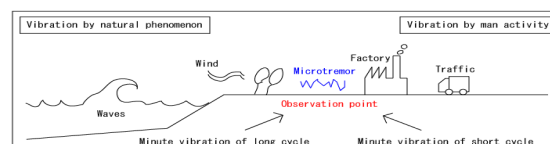


図1 常時微動の発生

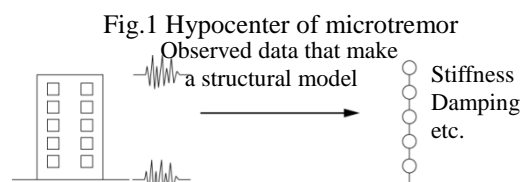


Fig.3 Process of research

図2 同定方法

Fig.2 Identification method

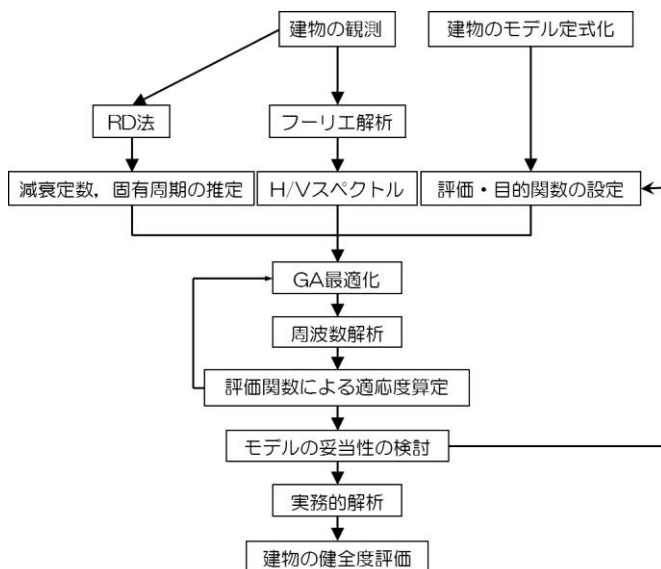
本研究の目的は、図2に示すように常時微動下の対象建物を観測し、得られたデータのみから建物の振動特性等を探り、構造諸量を同定するプロセスを構築することである。本プロセスによれば、耐震診断業務において、図面からデータを拾い計算用構造モデルにインプットする等の作業を短縮し、また、図面等の資料が得られない場合でも既存建物の耐震性を診断できる利点がある。

常時微動の短所として、観測は夜中の静穏時でないとい正確なデータが出ないことが挙げられる。それを補うものとして本研究はH/Vスペクトルを採用した。この手法によれば観測時の雑音を消去することができ、人々が行動している昼間であっても測定が可能になる。H/Vスペクトルの地盤への適用は広くなされてきているが、まだ建物に対してH/Vスペクトルを取り入れている研究は少ない。またH/Vスペクトルを適用したデータでもばらつきが見られるため、RD法を新たに採用し固有周期並びに減衰定数の推定を行う。

2. 研究過程

研究は図3に示すように観測と同時に建物のモデル化、評価関数と目標関数の設定を行う。その後遺伝的アルゴリズムで周波数領域における最適化を行い適応度算定するという流れを繰り返すことでモデルを推定し、妥当性の検討を行う。

図3 研究過程



3. 遺伝的アルゴリズム

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り図4の手順で同定が行われる^{[1][2]}。

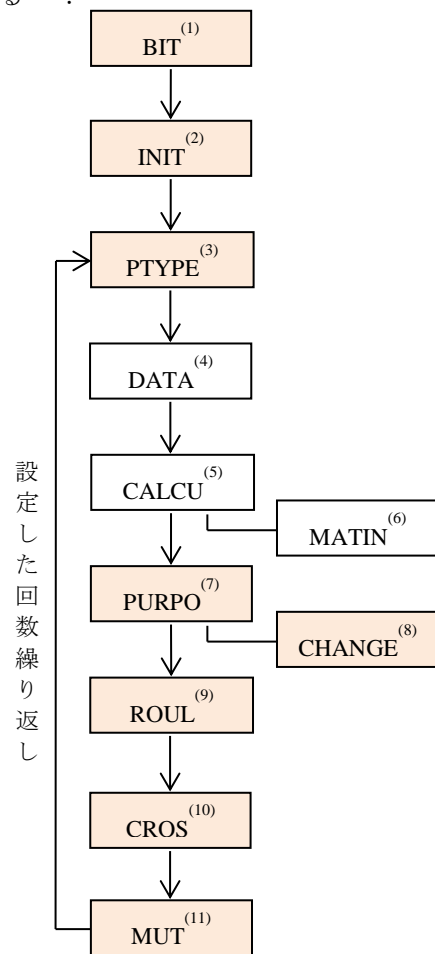


図4 遺伝的アルゴリズムによる同定過程

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
- ③ ～⑪が設定した回数繰り返される。

4. 常時微動測定

4.1 観測対象建物



図5 建物の外観

Fig.5 Externals of the building for observation

新宿区市ヶ谷田町に立地する法政大学市ヶ谷田町校舎(旧 62 年館)を対象として測定を行った(図 5)。地上 5 階地下 1 階建ての本校舎は、RC 造で 1962 年竣工され築 50 年が経過している。2008 年には改修工事が行われ、耐震壁が増設された。2008 年の 4 月から新しく開設した「デザイン工学部」の校舎として使用されている。

建物は平面、断面共にほぼ左右対称である。地下では、食堂・購買・教室、地上 1 階から 5 階では、教室・事務室として使われており、長手方向が 48m、短手方向で 21.6m ある。構造体としては地下 1 階から地上 5 階まで連続してある柱があるが、階によって寸法が異なる。構造体の主な寸法は、柱 750×750mm, 700×700mm, 600×600mm 大梁 850×350mm, 800×350mm 小梁 800×250mm, 750×250mm 耐震壁厚 300mm, 200mm, 150mm スラブ厚 120mm となっている。

本研究では長手方向を X 方向, 短手方向を Y 方向とする。

4.2 測定方法

水平 2 方向に加えて鉛直 1 成分の合計 3 成分を 1 地点において測定を行う。実測は建物の変位が時間軸により測定される。測定機器は、昭和測器の微小振動測定用機器, 3 軸微振動検出器 Model-2205 を使用した。

本研究の測定は 2013 年 11 月 23 日(土)(天気:晴れ) 9:30 からに行い、以下のように計 18 回の観測を行った。

- ① B1-FF×3 回 ②B1-1F×3 回 ③1F-2F×3 回
- ④ 2F-3F×3 回 ⑤3F-4F×3 回 ⑥4F-5F×3 回

1 回の観測は 15 分行っており、本研究ではそのうち最初の 2.5 分から 12.5 分までの 10 分間をデータとして使用する。測定したデ時間軸波形で表示されたグラフデータは FFT 変換(高速フーリエ変換)を行うことによって、時間領域から周波数領域へと変換させることができ^[3]、そうすることで時刻歴に含まれている振動数成分の検出が可能になる。フーリエスペクトルの卓越周波数は固有振動数とみなすことができるが、この状態では各階の周波数に対する変位量を表すものでしかない。目標関数はこれの変位応答倍率であるから、各階変位を地動で割ったものとなる^[4]。

4.3 H/V スペクトル

常時微動測定による観測データには雑音が多く含まれ特に昼間は交通や人通りが多く良いデータが観測できない。そのためこれまでには夜の静穏時に観測する必要があった。H/V スペクトル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。これにより雑音を消去することができ、昼間でも良好な観測を行うことができる^[5]。

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

R: 地表面と基盤の水平動の比

E: 地表面と基盤の上下動の比 Am: 増幅特性

つまり、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、次式のように地表だけの測定で推

定できることになる.

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

これが H/V スペクトルである.
 以下により観測データの H/V スペクトルを用いない雑音を多く含むデータ(図 6)と, H/V スペクトルを用いたデータ(図 7)を比較するとその成果がよくわかる.

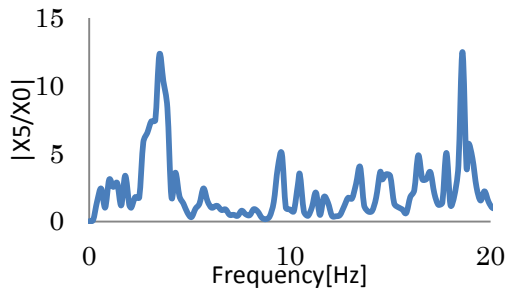


図 6 観測データ
 Fig.6 Observation data

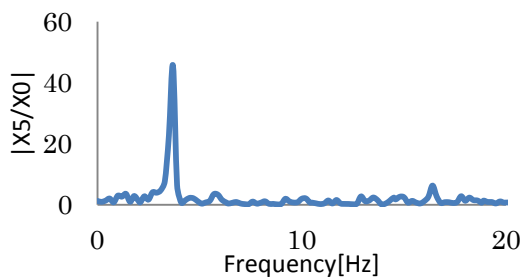


図 7 H/V スペクトルによる観測データ
 Fig.7 Observation data of H/V Spectral Ratio

4.4 RD 法

4.3 節により固有振動数を抽出することはできたが, データによってばらつきが見られた. RD 法は観測データの時刻歴応答から固有周期, 減衰定数を推定する方法である.

建物頂部における常時微動の応答 $X(t)$ を建物の自由振動 $D(t)$ とランダムな外力 $F(t)$ による強制振動 $R(t)$ との和で表現できると仮定した場合, 応答 $X(t)$ の図 8 のような時系列波形を $t=0$ 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 $\sum Pi(t)$ を初期振幅する自由振動波形となり次式で表せる^[6].

$$\sum Di(t) = (\sum Pi) \exp(-h\omega t_0) \cdot \cos \sqrt{(1-h^2)}\omega t_0 \quad (3)$$

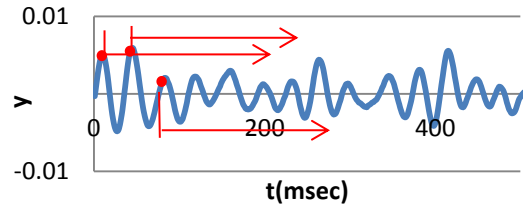


図 8 時刻歴応答
 Fig.8 Time history

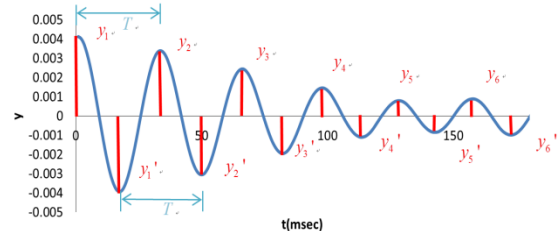


図 9 RD 法による時刻歴応答
 Fig.9 Time history by RD method

図 9 より固有周期 (T) を推定できる.

またこれまで減衰定数は一般の RC 造建築が 2%~7%とされるのを参考に 5%と仮定して使用してきたが, 本研究では RD 法から推定された減衰定数を用いる. 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.

$$\begin{aligned} d &= \frac{y_1}{y_2} = \frac{y_2}{y_3} = \dots \dots \dots \quad (\text{片振幅}) \\ &= \frac{y_1 + y_1'}{y_2 + y_2'} = \frac{y_2 + y_2'}{y_3 + y_3'} = \dots \dots \dots (\text{全振幅}) \quad (4) \\ &= e^{h\omega T'} = e^{2\pi\omega / \sqrt{1-h^2}} \end{aligned}$$

$$h \approx \frac{\ln d}{2\pi} \quad (5)$$

今回 RD 法により 300 回の重ね合わせを行ったが, 減衰定数は 1%~15%程度のばらつきがみられた. 固有周期はほぼ一定に近いが, 本研究では図 9 の極大値 8 個を平均して各値を推定する. 今後重ね合わせ回数を増やすなどの検討が必要である.

以上より

・ X 方向

固有周期 T_x は, 0.32[s](= 3.13Hz)

減衰定数 h_x は, 0.028(2.8%)

・ Y 方向

固有周期 T_y は, 0.25[s](= 4.0Hz)

減衰定数 h_y は, 0.045(4.5%)

とそれぞれ推定される。

本研究では、RD法で推定した固有振動数を対象建物の固有振動数とし、H/Vスペクトルはこれに近いデータを選択し採用した。

5. 対象建物解析

5.1 解析手法

解析手法として本研究では周波数領域における応答倍率による解析を行う。

本研究では、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する。

5.2 同定モデル

建物のモデル化をし、目標関数を設定する。

・多質点せん断モデル(図10)

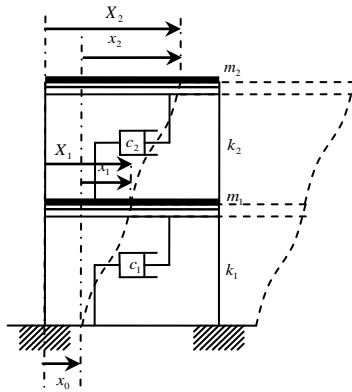


図10 地震動が加わる時の建物

Fig.10 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。

$$[M]\{\ddot{x}_j\} + [C]\{\dot{x}_j\} + [K]\{x_j\} = -[M]\{\ddot{x}_0\} \quad (6)$$

$[M], [C], [K]$: 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(7)式になる。

$$x_0 = x_0 e^{i\omega t}, \quad \dot{x}_0 = x_0 i\omega e^{i\omega t}, \quad \ddot{x}_0 = -x_0 \omega^2 e^{i\omega t} \quad (7)$$

同様に建物の変位は式(8)になる。

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

これらを式(6)に代入し、整理すると

$$(-\omega^2[M] + i\omega[C] + [K])\{x_j\} e^{i\omega t} = \omega^2[M]\{x_0\} e^{i\omega t} \quad (9)$$

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

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

この各要素の絶対値をとり

$$\begin{Bmatrix} |x_j| \\ |x_0| \end{Bmatrix} = \{h(\omega)\} \quad (11)$$

式(11)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。

$$\begin{Bmatrix} |X_j| \\ |x_0| \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} |x_j + x_0| \\ |x_0| \end{Bmatrix} = \{|h(\omega) + 1|\} = \{H(\omega)\} \quad (12)$$

X_j : 絶対変位

$\{H(\omega)\}$: 応答倍率

本研究では、式(12)を多質点せん断モデルの同定に用いる目標関数とする。

5.3 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]。

$$\varepsilon_{ji} = \tilde{h}_j(\omega_i) - h_j(\omega_i) \quad (13)$$

$h_j(\omega_i)$: 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式になる。

$$\Pi_j = \sum_{i=1}^n \varepsilon_{ji} = \sum_{i=1}^n |\tilde{h}_j(\omega_i) - h_j(\omega_i)| \quad (j=1, 2, \dots, m) \quad (14)$$

本論では、式(14)が同定に用いる評価関数である。

5.4 観測値解析

本節では前述の GA による同定解析によって層剛性を算出し、図面より推定される層剛性と比較する。

5.4.1 対象建物データ

対象建物である市ヶ谷田町校舎のデータを図 11 のように記し、解析には Table 1 の各諸量を用いる。

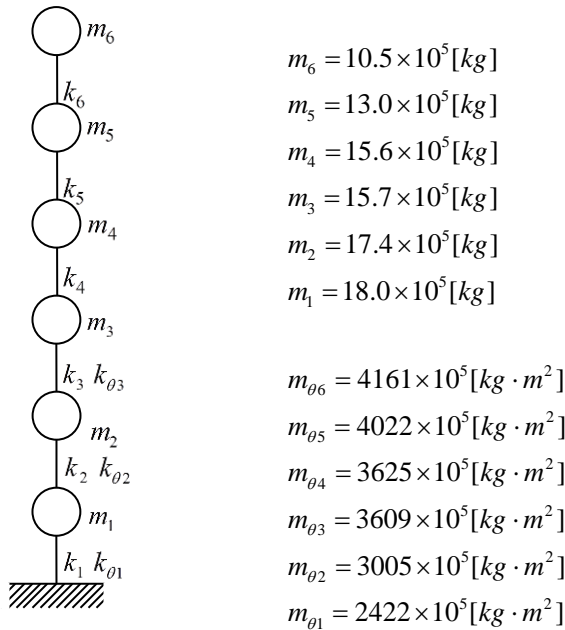


図 11 6 質点モデル

Fig.11 Model 6 mass point

表 1 遺伝的アルゴリズムに用いる諸量

Table 1 Analytical data

Amount of generation	1000
Amount of individual	10
Amount of bit	16
Matrix size	6
Each mass(t)	$m_1 = 1802$ $m_2 = 1742$ $m_3 = 1570$ $m_4 = 1563$ $m_5 = 1301$ $m_6 = 1049$
Damping factor	$h_x = 0.028$ $h_y = 0.045$
Count of frequency	150
Step size of frequency	1

5.4.2 解析結果

本節では、多質点せん断モデルの Y 方向の解析結果を図 12~17、表 2 に示す。

■ 応答倍率グラフ(Y 方向)

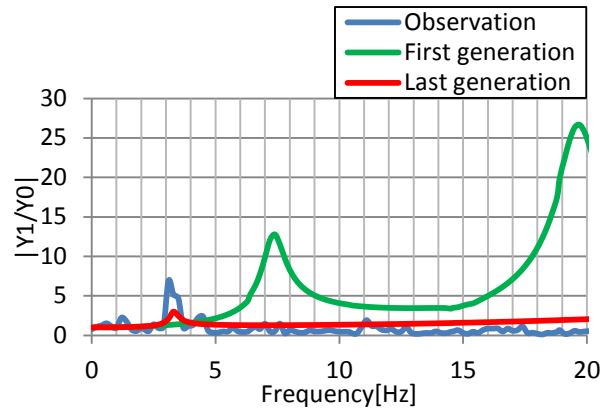


図 12 スペクトル比較(Y_1/Y_0)

Fig.12 Comparison of spectra (Y_1 / Y_0)

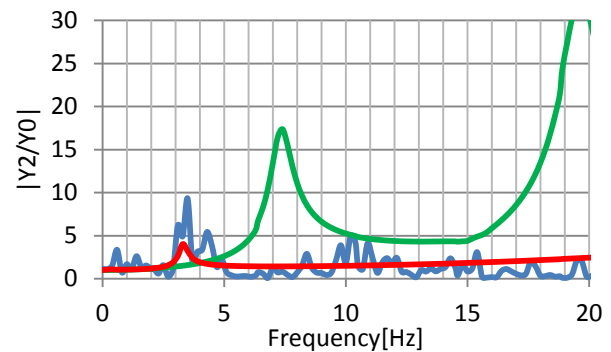


図 13 スペクトル比較(Y_2/Y_0)

Fig.13 Comparison of spectra (Y_2 / Y_0)

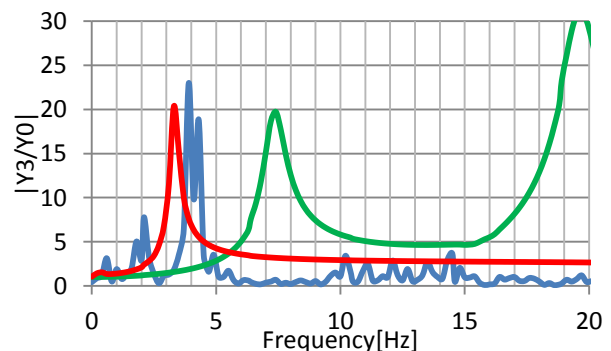


図 14 スペクトル比較(Y_3/Y_0)

Fig.14 Comparison of spectra (Y_3 / Y_0)

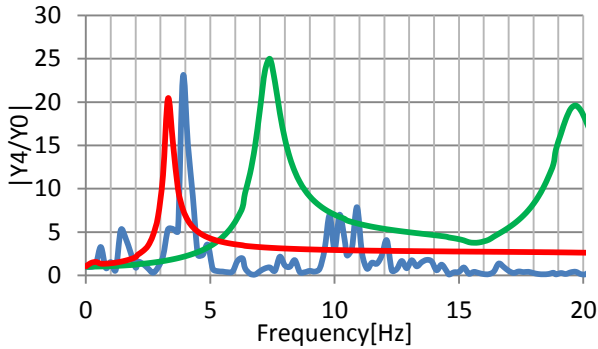


図 15 スペクトル比較(Y_4/Y_0)

Fig.15 Comparison of spectra (Y_4/Y_0)

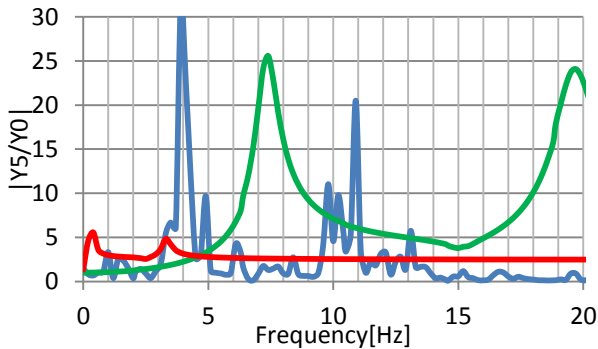


図 16 スペクトル比較(Y_5/Y_0)

Fig.16 Comparison of spectra (Y_5/Y_0)

■適合率

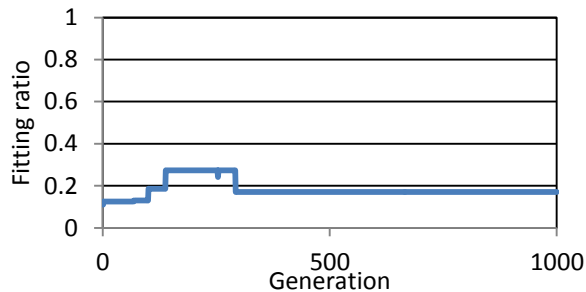


図 17 適合率

Fig.17 Changes of fitting ratio

■剛性の比較

表 2 各層の剛性比較

Table 2 Rigidity of each story

Analytical model (kN/cm)	$k_{y1} =$	$k_{y2} =$	$k_{y3} =$
	681494	303348	452898
Identification value (kN/cm)	$k_{y4} =$	$k_{y5} =$	$k_{y6} =$
	425436	409900	335478
Analytical model (kN/cm)	$k_{y1} =$	$k_{y2} =$	$k_{y3} =$
	968505	749950	10437
Identification value (kN/cm)	$k_{y4} =$	$k_{y5} =$	$k_{y6} =$
	965621	13733	341115

6. 結論・展望

□H/V スペクトルについて

雑音を消去する手法として非常に有効であるといえる。しかし、雑音が消去でき 1 次ピークは容易に確認することができたが、夜間静穏時の測定には見られた 2 次以降のピークが見られない。

H/V スペクトルは地盤面では多く扱われているが、建物に適用されている例はまだ少ない。他の建物での有用性を検討していくと共に、2 次以降のピークの算出方法が必要である。

□RD 法について

測定した時点での建物の固有周期を推定する手法として非常に有効であるといえる。H/V スペクトルでは、良好なデータを得られたが固有周期にばらつきが見られたため、RD 法を用い固有周期を一意に算出できた。

本研究では減衰定数の推定も行ったが、1%~15%とばらつきが見られたため正確な減衰定数を推定するためには、重ね合わせの回数を増やすなどの更なる検討が必要であると考えられる。

□観測値解析について

■H/V スペクトル, RD 法の導入によって、常時微動測定を昼間に行ったにも関わらず、非常に良好な観測データが得られた。これまで雑音を消去するために平滑化を行ってきたが、H/V スペクトルによるデータをさらに平滑化したものがよりスペクトルが一致し、良好な結果を得られた。

■多質点せん断モデルでは、1 次ピークのスペクトルはほぼ一致しているが、D 値法で求めた剛性と GA で得られた剛性には大きな差が見られる。観測値は地盤のばねや減衰を反映したものである。これに対し、GA に用いる解析モデルは基礎固定である。この違いが適切な同定を難しくしている原因と考えられる。今後は地盤と建物の動的相互作用を考慮したモデルによる同定法を検討する必要がある。

また今後、他の建物でも測定を行い、対象データの蓄積を行うことにより検討を深めて行く予定である。

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) 大崎順彦, “新・地震動のスペクトル解析入門”, 鹿島出版社, 1994年
- 4) 小祝碧, 濱崎大樹, 吉田長行, “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—”, 法政大学情報メディア教育研究センター研究報告, Vol.27, 2013年
- 5) 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
http://www.sdr.co.jp/papers/200801_basic_structure_hv.pdf#search='H%2FV'
- 6) 田村幸雄, 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