

# 常時微動記録を用いた EK-WGI 法による建物の動特性の推定

## IDENTIFICATION OF DYNAMIC PROPERTIES OF A BUILDING BY THE EK-WGI METHOD ON MICROTREMOR RECORDS

星谷 勝\*・斉藤悦郎\*\*

By Masaru HOSHIYA and Etsuro SAITO

This paper studies an efficient method of identification of dynamic properties such as natural frequencies  $\omega^j$ , modal damping coefficients  $\beta^j$  and participation factors  $P_i^j$  at the  $i$ -th mass, of a multiple degree of freedom linear system on the bases of using microtremor records which are measured at the first floor and at the roof in a four-storey reinforced concrete building. The EK-WGI method which was previously proposed by the present authors is used for the solution of a system identification problem. As a result, dynamic properties of the first mode and the second mode can be estimated from this method. Then, it is found that this method is more useful tool for the identification than the response function which is a common approach to estimate dynamic properties.

### 1. はじめに

既存構造物の応答特性や動特性は、地震観測を行い、実挙動としてその特性をとらえていくことが最も好ましいものと思われる。しかしながら地震観測では、データ収集までの経済性や、観測期間等から特定の構造物に限られてしまう。そこで、より経済的に、また短期的にデータ収集が可能である動特性推定のための計測として、自由振動や起振機実験等の強制外力実験および常時微動測定が行われている。強制外力実験では、入力方向が明確であり、また入力波形も単純であることから、固有円振動数、減衰定数等の動特性値の推定が容易であるものと思われる。しかしながら、起振装置等が必要であり、地震観測と同様に、特定の構造物に限られてしまう。また入力の位置および単純化した波形であるために、実際と即さない点もある。常時微動では、振幅レベルが小さく、応答波形でも構造物の動特性を忠実に反映した波形以外のノイズも相当含まれているものと思われ、また入力も多入力であることから、構造物の動特性を抽出する

ことは、他の方法に比べ難しいものと思われる。しかしながら、常時微動測定は、他の方法と比べ容易で、短期間に測定でき、経済的であるといった大きな利点がある。以上の点から、常時微動波形から、構造物の動特性値をある程度抽出することができれば、既存構造物の動特性値のデータ収集に非常に有効な方法となるものと思われる。

地震波や常時微動波形のようなランダムデータでは、入力および応答波形を周波数領域に変換し、応答関数を求め、その形状から動特性の推定を行う。しかしながら、一般には、その形状が複雑で、動特性値をみつけにくいいため、スムージングを行う。固有円振動数に関しては、このスムージングのかけ方による影響はほとんどないものと思われるが、減衰に関しては、大きく影響を及ぼすため、一義的に推定することは難しいものと思われる。G. H. Mcverry<sup>1)</sup>は、周波数領域に変換したスムージングをかけない入出力データを最小2乗法を用いて動特性を推定する方法を提案した。そして建物で得られた1組の地震波形を用いて、動特性の推定を行っている。

本研究は、鉄筋コンクリート4階建校舎の常時微動測定を行い、この実測データを用いて、著者らが提案した線形多自由度系として状態方程式に組み込んだEK-WGI法<sup>3)</sup>から各次数の動特性(固有円振動数 $\omega^j$ 、モー

\* 正会員 Ph. D. 武蔵工業大学教授 土木工学科  
(〒158 世田谷区玉堤1-28-1)

\*\* 正会員 工修 フジタ工業(株)技術研究所  
(〒223 横浜市港北区大綱町74)

下減衰  $\beta^j$ ,  $i$  質点の刺激係数  $p_i^j$  の推定を試みたものである。EK-WGI 法<sup>1),2)</sup>は時系列解析法である制御理論の拡張カルマンフィルタに対して、重み付きのグローバルな繰り返しを併用したものである。

本文中の計測および解析手順は、以下のように構成されている。

- ① 2 台の換振器を用い、1 階床と屋上に対して常時微動測定を行った。
- ② ①の波形から得られる動特性の推定結果の検証用にここでは、1 階床と 4 階、1 階床と 3 階および 1 階床と 2 階の各組に対して常時微動測定を行った。ただしそれぞれの組間は、同時刻の計測ではない。
- ③ 1 階床と屋上の常時微動波形を用いて、EK-WGI 法から動特性の推定を行った。

④ ②で計測した検証用の波形から動特性の推定を行い、③で得られた推定結果との比較を行った。

⑤ ①および②の波形を用いて、周波数領域の伝達関数から動特性の推定を行い、EK-WGI 法からの推定結果との比較を行った。なお EK-WGI 法で推定される動特性値は 1 階床を入力とし、多自由度せん断ばり系でモデル化したときの等価動特性値である。

## 2. EK-WGI 法の概説<sup>1)~3)</sup>

拡張カルマンフィルタ<sup>5)</sup>は、式(1)、(2)に示した状態方程式と観測方程式を基本式としている。

$$dX_i/dt = f(X_i, t) + G(t)w_i \dots \dots \dots (1)$$

$$y_{ik} = h(X_{ik}, t_k) + v_{ik} \dots \dots \dots (2)$$

ただし、 $w_i, v_{ik}$  : ガウス白色雑音、 $E[w_i] = 0, E[v_{ik}] = 0, E[w_i w_i^T] = Q(t)(t - \tau), E[v_{ik}, v_{il}] = R(t_k) \delta_{kl}, E[\cdot]$  : 期待値、 $\delta_{kl}$  : クロネッカデルタ関数、 $X_i, X_{ik}$  : システムの状態変数ベクトル、 $y_{ik}$  : 観測ベクトルである。

そして、任意の初期ベクトル  $X_0$  と任意の真の値と誤差の共分散行列  $P_0$  を与えれば、観測データを順次取り込み、最適推定値  $\hat{X}(t_k | t_k)$  を順次修正するアルゴリズムである。EK-WGI 法<sup>1),2)</sup>は、この拡張カルマンフィルタアルゴリズムを用いて得られる継続時間  $t_s$  時の  $\hat{X}(t_s | t_s), P(t_s | t_s)$  の値を初期値として与え、再び拡張カルマンフィルタアルゴリズムを繰り返す方法である。そしてこのグローバルな繰り返しにおいて、初期値と最終値の最適推定値が等しくなった値または、 $\bar{\theta}$  の値が最小になった繰り返し時を安定した最適推定値として判断するものである(図-1)。なお各グローバルは繰り返し時の初期値として用いる  $P(t_s | t_s)$  の値は、重み  $W$  を付加している。常時微動波形では、状態量として組み込まれた応答波形(ここでは、応答速度および応答加速度)の初期値が継続時間内の振幅と比較して、地震波のように小さいとは限らない。このためにここでは、図-

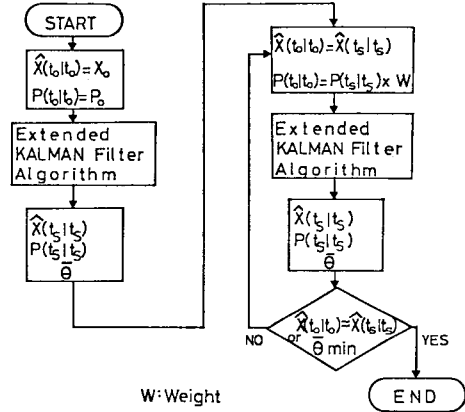


図-1 EK-WGI 法のフローチャート

1 の  $\hat{X}(t_0 | t_0) = \hat{X}(t_0 | t_{-1}), P(t_0 | t_0) = P(t_0 | t_{-1})$  と置き換えて計算を行った。また本計算では、出力波形が 1 本のみであるため、評価値  $\bar{\theta}_{min}$  は  $\gamma_{1min}$  として置き換えた。

$$q_{ik} = y_{ik} - h_i(\hat{X}(t_k | t_k), t_k) \dots \dots \dots (3)$$

$$\gamma_1 = \frac{\sum_{k=1}^s q_{ik}^2}{\sum_{k=1}^s y_{ik}^2} \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 $h_i(\cdot)$  :  $h(\cdot)$  の要素、 $y_{ik} : y_{ik}$  の要素、 $s$  : 波形の離散化個数である。

次に多自由度系として状態方程式に組み込んだ各モード次数の運動方程式<sup>3)</sup>は、式(5)である。

$$\ddot{\xi}_i^j + 2\beta^j \omega^j \dot{\xi}_i^j + (\omega^j)^2 \xi_i^j = -p_i^j \ddot{x}_0 \dots \dots \dots (5)$$

$$p_i^j = u_i^j \delta^j \dots \dots \dots (6)$$

$$z_i = \sum_{j=1}^n \xi_i^j \dots \dots \dots (7)$$

ここで、 $\omega^j$  :  $j$  次の固有円振動数、 $\beta^j$  :  $j$  次のモード減衰、 $\delta^j$  :  $j$  次の刺激係数、 $u_i^j$  :  $j$  次の  $i$  質点での固有ベクトルの要素、 $p_i^j$  :  $j$  次の  $i$  質点での刺激係数、 $z_i$  :  $i$  質点での応答変位である。

なお、推定する動特性は、 $\omega^j, \beta^j, p_i^j$  である。

## 3. 常時微動計測

測定対象建物は、武蔵工業大学 8 号館である。この建物は、鉄筋コンクリート 4 階建校舎であり、外形寸法は、長辺 56 m、短辺 11 m、高さ 16.5 m である(図-2)。また基礎は、木杭( $\phi = 16$  cm,  $l = 16$  m)に支持されたフーチング基礎となっている。常時微動測定は、昭和 58 年 10 月 4 日深夜に行った。計測には、図-3 に示した応答特性をもつ換振器(MTDH-IC)を 2 台用いた。そして換振器から得られた速度に比例したデータは、増幅器を通し、微分して加速度に比例したデータに変換した後、40 Hz のローパスフィルタを介してアナログデータレコーダーに収録した(図-4)。40 Hz のローパスフィル

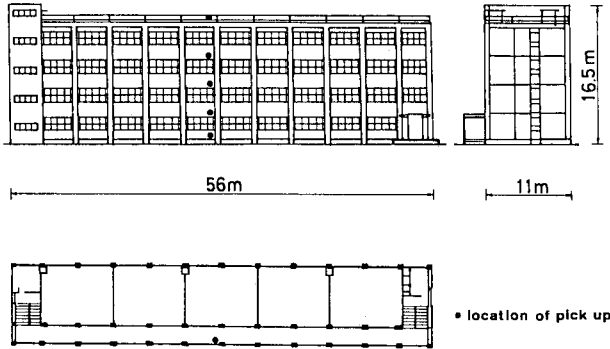


図-2 RC 4階建校舎

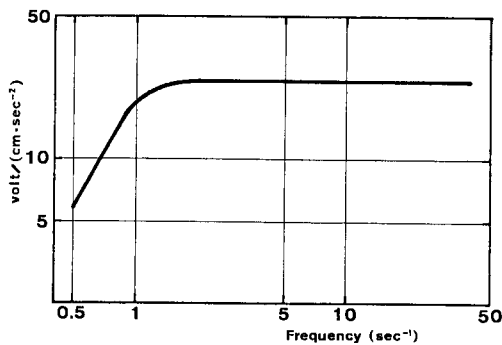


図-3 換振器の動特性

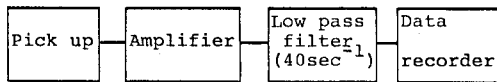


図-4 計測システム

ターを介した理由は、微動の加速度波形では高周波のノイズが大きすぎるためである。計測位置は、1階床と屋上および検証システムに用いる1階床と4階、1階床と3階、1階床と2階である(図-2)。また計測方向は建物の剛性が高い長辺方向とした。なお以後文中の1次モード、2次モードとは、長辺方向の1次、2次モードである。各組の計測継続時間は、5分間とした。次に波形処理システムを示す。得られたアナログデータは、サンプリング間隔0.01s、12bitでA・D変換を行った。デジタル化されたデータは、最小2乗法を用いて直線により、基準線の補正を行った。EK-WGI法に用いる継続時間は、各組とも0.01s×1500=15sとし、周波数領域での解析は、0.01s×2048=20.48sとした。

なお1階床と屋上、1階床と4階、1階床と3階および、1階床と2階から得られた各組の入出力常時微動波形から動特性の推定を行うが、表、図および文中では、各組から得られた動特性値をそれぞれ、屋上、4階、3階、2階から得られた動特性値と、簡略化した表現とした。

また図および表中の屋上の付号は、5階として表現した。

#### 4. 動特性の推定

##### (1) EK-WGI法による推定

図-5は、1階床と屋上の常時微動波形および屋上と1階床との相対応答波形を示した。本方法の出力データは、相対応答として表現されているため、屋上の波形から1階床の波形を差し引いて、相対応答とした。まず建物が等価な1自由度系であるものとしたときの動特性を推定する。拡張カルマンフィルターに必要な任意の初期条件は、表-1に示す値を用いた。ただし  $P(t_0|t_{-1})$  は、対角要素のみ表中の値を用い、その他の要素は0.0とした。また各グローバルな繰り返し時の重みは、100.0とし、状態方程式に付加するノイズの分散値  $Q(t)$  および観測方程式に付加するノイズの分散値  $R(t)$  はそれぞれ0.0、 $10^{-4}$  (4.(2)に説明)とした。これらの条件による各グローバルな繰り返し時の動特性値および評価値  $\gamma_i$  の収斂過程を図-6に示した。図の0回目のグローバルな繰り返し時の値は、表-1に示した動特性の初期条件である。1回のグローバルな繰り返

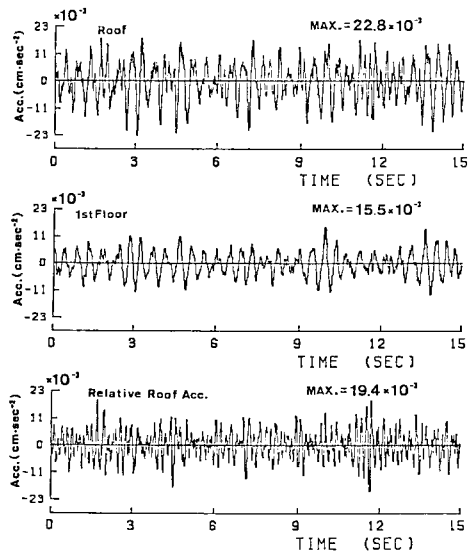


図-5 常時微動波形(1階床と屋上)

表-1 初期条件

	$x_1(\xi_5^{(1)})$	$x_2(\xi_5^{(1)})$	$x_3(\beta^{(1)})$	$x_4(\omega^{(1)})$	$x_5(p_5^{(1)})$
$X(t_0 t_{-1})$	0.0	0.0	0.01	10.0	1.0
$P(t_0 t_{-1})$	1.0	1.0	100.0	100.0	100.0

Note  $w = 100.0$ ,  $\omega^{(1)} = \text{rad/sec}$

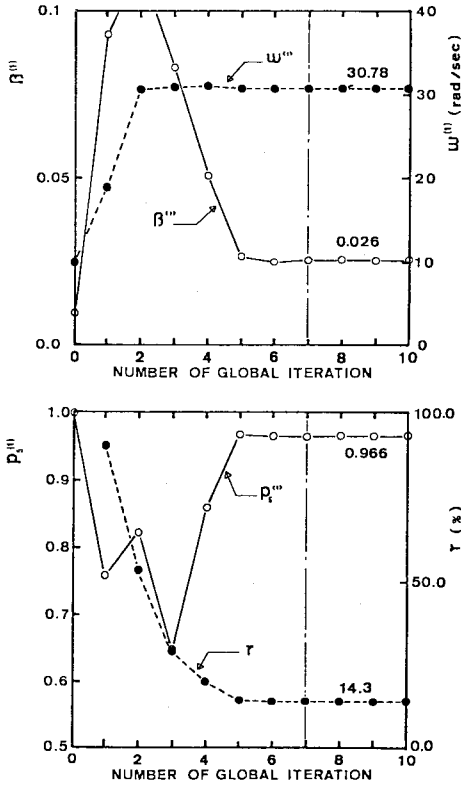


図-6 EK-WGI法の収斂過程

し、すなわち拡張カルマンフィルタアルゴリズムのみでは、 $\omega^{(1)}=18.90$  rad/s,  $\beta^{(1)}=0.931$ ,  $p_5^{(1)}=0.760$ ,  $\gamma_1=90.78\%$  となり、ここで用いた初期条件の影響が強く残っていることがわかる。そしてEK-WGI法を用いれば、グローバルな繰返しにより $\gamma_1$ の値は徐々に減少し、7回目以後では、 $\omega^{(1)}=30.78$  rad/s,  $\beta^{(1)}=0.026$ ,  $p_5^{(1)}=0.966$ ,  $\gamma_1=14.3\%$ とそれぞれ一定値となり、安定した最適推定値であるものと判断できる。本図の収斂過程からも本方法の有効性が示されているものと思われる。この収斂過程は、初期条件および観測方程式に付加するノイズの分散値および重みにより変化する。しかしながら収斂結果には影響はない。ただし極端な条件を用いた場合には、推定値が安定しない場合や、収斂結果の動特性値が工学的に意味のない値として推定される場合がある。次に2自由度系に状態方程式を拡張する。まず、1自由度系で得られた動特性値を固定(対応する $P(t_0|t_0)$ の対角要素を0.0とする)して、2次モードに対する動特性値をラフに推定する(表-2, 2自由度系(1))。このときの2次に対応する $\hat{X}(t_0|t_0)$ ,  $P(t_0|t_0)$ の初期条件は、表-1の値を用いた。そして、これから得られた2次の動特性値および1次の動特性値を初期条件にして、再び1次、2次に対する動特性値の

表-2 動特性の推定結果

Estimated parameters and $\gamma_1$	Single degree of freedom system	Two degree of freedom system	
		(1)	(2)
$\beta^{(1)}$	0.026	0.026	0.028
$\omega^{(1)}$	30.78	30.78	30.64
$p_5^{(1)}$	0.966	0.966	0.942
$\beta^{(2)}$	—	0.356	0.341
$\omega^{(2)}$	—	87.00	85.75
$p_5^{(2)}$	—	-0.343	-0.372
$\gamma_1$	14.3	9.6	9.1

Note  $\omega^{(j)}$ ; rad/sec,  $\gamma_1$ ; per cent

推定を行う(表-2, 2自由度系(2))。この方法により、2次の動特性値のみばかりでなく、1次の動特性値も改良されて推定されることがわかる。また評価値 $\gamma_{1min}$ は、1自由度系で14.3%、2自由度系では9.1%となり、2自由度系では、より出力波形(相対応答加速度)に類似していることがわかる。また評価値 $\gamma_1=9.1\%$ の値は、定義式(4)からも明らかなように、観測出力波形とほぼ類似した波形を推定されていることを意味しており、2次モードまでを考慮すれば、その応答量をほぼ表現できることがわかる。3自由度系に拡張した状態方程式では、図-6に示したような安定領域が現われず、本入出力波形からでは、3次に対する動特性の推定が難しいものと判断した。この理由としては、ノイズの問題、2台の換振器の動特性の相違の問題、同定システムのモデル化の問題等が考えられる。

(2) 応答関数との比較

図-7は、式(8)から求めた応答関数<sup>6)</sup>にHanningのwindow<sup>6)</sup>を10回かけてスムージングを行ったものである。

$$|H_{xy}(f)| = |G_{xy}(f)| / G_x(f) \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 $G_x(f)$ : 入力(x)の片側スペクトル密度関数、 $|G_{xy}(f)|$ : 入力(x), 出力(y)の片側スペクトル密度関数の絶対値、 $|H_{xy}(f)|$ : 応答関数の絶対値。

また表-3は、応答関数のスムージング回数による固有円振動数、減衰定数の推定値の変化を示したものである。減衰定数は、 $1/\sqrt{2}$ 法<sup>6)</sup>を用いて推定した。1次の固有円振動数は、スムージング回数によってほとんど変化せず、30.85~29.72 rad/sとなり、EK-WGI法で推定した1次の固有円振動数30.64 rad/sと非常によく一致することがわかる。しかしながら、2次の固有円振動に関しては、明確なピークが現われておらず、その判断は難しいものと思われる(図-7)。次に減衰定数について比較する。減衰定数に関しては、表-3からも明らかなように、スムージング回数による影響をかなり受ける。

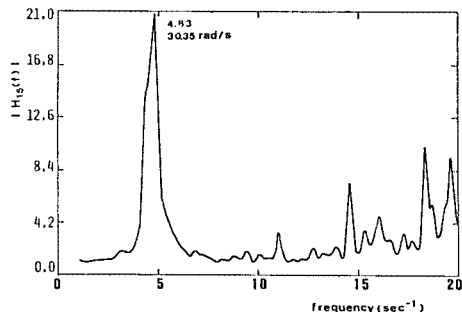


図-7 応答関数 (1階と屋上)

表-3 スムージング回数による動特性推定結果の変化

Hanning window N	$\omega(1)$	$\beta(1)$
0	30.85	0.003
1	30.85	0.012
2	30.85	0.013
4	30.79	0.030
6	30.72	0.045
8	30.54	0.049
10	30.35	0.058
20	29.97	0.065
30	29.72	0.069

$\omega(1)$  ; rad/sec  
 N ; cycles

ここでは、0～30回のスムージングに対して、0.003～0.069と変化した。このため、応答関数から減衰定数を推定するためには、スムージング回数に関する定量的な評価が明確でないことから、経験的に推定する以外には方法がないと思われる。以上のように応答関数からは、1次の減衰定数でさえ一義的に推定することはできない。EK-WGI法から推定された1次の減衰定数と、表-3とを対比すると、2～4回のスムージング回数に相当している。

このような応答関数のスムージング回数による動特性の変化の傾向は、EK-WGI法からでも説明ができる。図-6、表-2の結果は、状態方程式に付加するノイズの共分散値を0.0として計算を行った。この理由は、建物を完全な等価1自由度モデルおよび2自由度モデルのシステムに適合させた場合に対して動特性を求めたことを意味している。状態方程式にノイズを付加した場合には、モデルと実際のシステムとの相違をノイズによって許容して、より観測波形に適合させようとすることを意味している。図-8は、観測方程式のノイズの共分散値

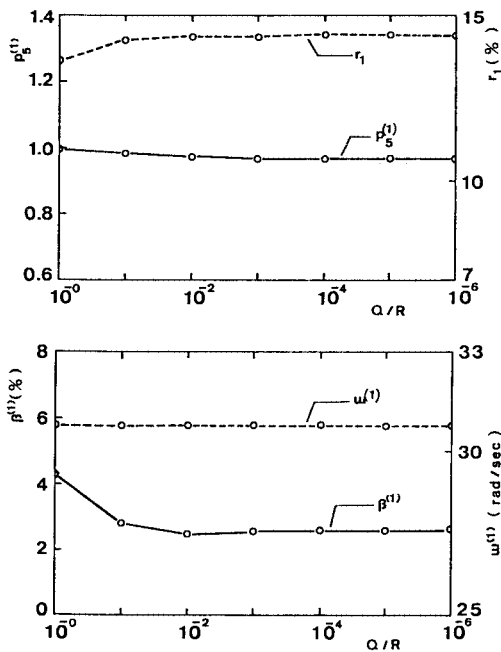


図-8 ノイズ比(Q/R)による動特性の推定結果の変化

$R(t_k)$ と、状態方程式のノイズの共分散値  $Q(t)$  の比  $Q/R$  ( $R(t_k), Q(t)$  は時間によって一定であるものと仮定した。)を横軸にとり、動特性値の変化および  $\gamma_1$  の変化を示したものである。ここで、 $Q/R$  が一定であれば、 $Q$  および  $R$  の値に関係なく、動特性の推定結果は等しくなる。このことは数値的に確認している。観測方程式に付加したノイズの共分散値を一定とすれば、 $Q/R$  の値が大きくなるに従いモデル化したシステムは多少ぼやけてもよいことを意味している。図-8より、 $Q/R$  の値が大きくなるに従い、減衰定数は徐々に大きくなり、 $\gamma_1$  は徐々に小さくなる傾向となる。一方固有円振動数の値はほとんど変化しない。 $\gamma_1$  の値が徐々に小さくなることは、より観測波形に適合できたこととなる。以上の  $Q/R$  の値による推定された動特性値の変化の傾向から、 $Q/R$  の値を大きくすることは、スムージング回数をふやしたことと対応できることがわかる。

### 5. 推定結果の検証<sup>9)</sup>

EK-WGI法に組み込んだ基本式は、式(5)の運動方程式であるため、入力および任意の質点  $i$  での応答波形を用いて、 $j$  次の動特性を求めることができる。このことから、入力と何点かの質点の出力波形から動特性の推定を行い、 $\omega^{(j)}, \beta^{(j)}$  に関して同じ推定結果が得られれば、その動特性値はより信頼性が高いものと考えられる。入力および何点かの質点の出力波形から推定された動特性値の比較を、動特性推定結果の検証システムと呼ぶ。

ここでの検証用入出力波形は、1階床と4階、1階床と3階および1階床と2階の各組の常時微動波形とした(図-9, 10, 11)。これらの図の波形は、図-5と同様に、出力波形、入力波形および相対応答波形の順に示した。1自由度系の等価モデルとした場合のそれぞれの階に対する推定結果および $\gamma_1$ を表-4に示した。また4.の結果も同表に示してある。初期条件は表-1の値を用いた。ただし動特性値に対する初期条件は、4.での推定結果を用いた。各階から推定された $\omega^{(1)}$ は、ほぼ同様な値となり、本建物の $\omega^{(1)}$ の推定値は、信頼性が高いものと推察される。しかしながら $\beta^{(1)}$ に関しては、屋上、4階で

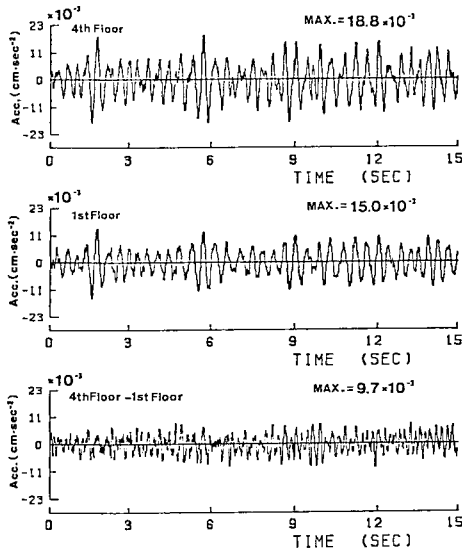


図-9 常時微動波形 (1階床と4階)

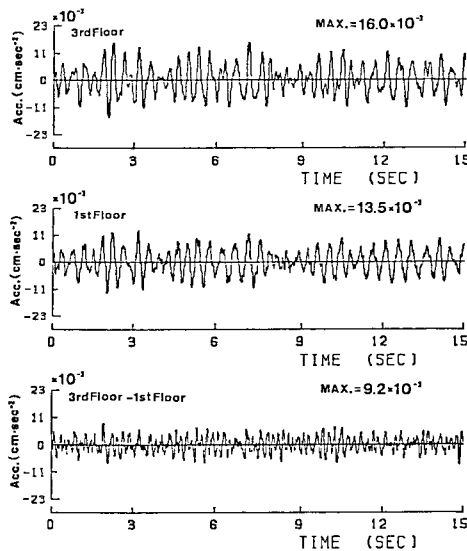


図-10 常時微動波形 (1階床と3階)

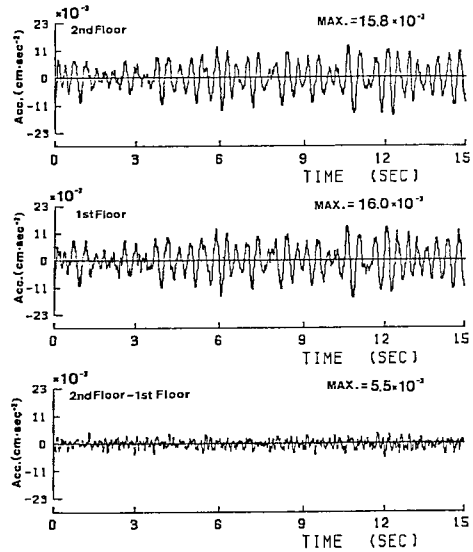


図-11 常時微動波形 (1階床と2階)

表-4 1自由度系等価モデルでの検証

Floor	$\beta^{(1)}$	$\omega^{(1)}$	$P_5^{(1)}$	$\gamma_1$
5th (roof)	0.026	30.78	0.966	14.3
4th	0.027	30.25	0.650	16.6
3rd	0.054	30.32	0.490	23.1
2nd	0.069	31.34	0.160	44.7

Note  $\omega^{(1)}$ ; rad/sec,  $\gamma_1$ ; per cent

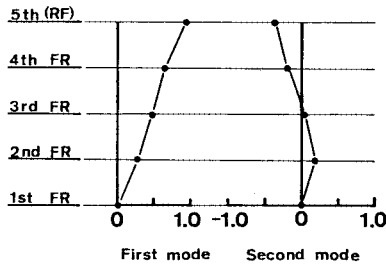
表-5 2自由度系等価モデルでの検証

Floor	$\beta^{(1)}$	$\omega^{(1)}$	$P_1^{(1)}$	
5th (roof)	0.028	30.64	0.942	
4th	0.027	30.25	0.650	
3rd	0.058	29.98	0.483	
2nd	0.032	29.44	0.274	
Floor	$\beta^{(2)}$	$\omega^{(2)}$	$P_1^{(2)}$	$\gamma_1$
5th (roof)	0.341	85.75	-0.372	9.1
4th	0.320	80.65	-0.206	11.7
3rd	0.218	87.24	0.032	6.7
2nd	0.194	81.68	0.170	3.0

Note  $\omega^{(1)}, \omega^{(2)}$ ; rad/sec,  $\gamma_1$ ; per cent

は同様な値として推定されたが、3階、2階では、それぞれ5.4%、6.9%と大きな値として推定された。また $\gamma_1$ に関しては、屋上、4階、3階、2階の順に大きな値となった。この傾向は、応答波形に、高次に対する1次モードの含まれる割合が下階ほど小さくなり、1自由度系の等価モデルでは、適合しなくなるためであると思われる。2自由度系等価モデルにおける各階での

推定結果および4.の結果を表—5に示した。 $\omega^{(1)}$ は各階ともほぼ同様な値となり、また $\beta^{(1)}$ は、3階での推定結果を除けば、ほぼ同様な値となることわかる。2次の動特性に関しては、多少ばらつくが、 $\beta^{(2)}$ で19.4%～34.1%、 $\omega^{(2)}$ では80.65 rad/s～87.24 rad/sと推定された。以上より、4.で推定された動特性値( $\omega^{(1)}, \omega^{(2)}, \beta^{(1)}, \beta^{(2)}$ )はほぼ妥当なものと推察される。また、3自由度系等価モデルに対して同様に各階の動特性の推定を行ったが、推定値の安定領域は生じなかった。次に前章では考察を省いた $p_i^{(j)}$ であるが、同次数の各階の $p_i^{(j)}$ は、式(6)からモードに比例した値となる。 $p_i^{(j)}$ を1次および2次に対してプロットした図が図—12である。この図から、1次、2次に対するモードが明確に表現されているものと思われる。



図—12 モード図

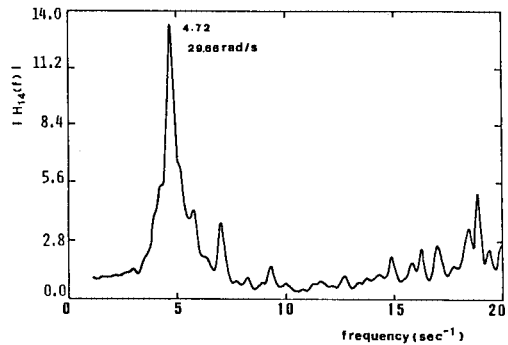
次に各階の応答関数から、上述と同様な考察およびEK-WGI法からの推定結果との比較を行う。各階に対する応答関数は、図—13～15に示した。これらの図は、図—7と同様にHanningのWindowを10回かけてスムージングを行ったものである。また表—6は、応答関数にかけるスムージング回数による各階の1次の動特性値の変化を示したものである。同表から、1次の固有円振動数は、EK-WGI法から得られた各階の1次の固有

表—6 スムージング回数による動特性推定結果の変化(1次)

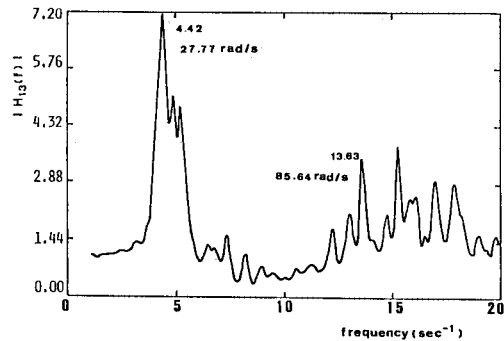
Hanning window N	$ H_{14}(f) $		$ H_{13}(f) $		$ H_{12}(f) $	
	$\omega(1)$	$\beta(1)$	$\omega(1)$	$\beta(1)$	$\omega(1)$	$\beta(1)$
0	29.34	0.005	28.02	0.005	30.28	0.004
1	29.28	0.020	28.02	0.013	30.66	0.011
2	29.72	0.025	28.02	0.017	30.41	0.015
4	29.59	0.028	27.71	0.026	30.54	0.024
6	29.59	0.030	27.77	0.031	30.60	0.030
8	29.59	0.034	27.65	0.039	30.47	0.036
10	29.66	0.036	27.77	0.045	30.16	0.042
20	29.53	0.050	27.77	0.091	30.03	0.052
30	29.59	0.060	27.77	0.089	30.03	0.058

$\omega^{(1)}$ ; rad/sec, N; cycles

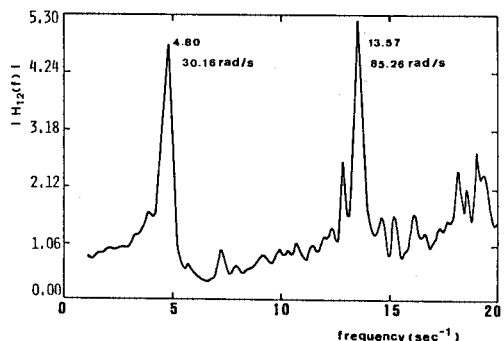
円振動数に比較して、ばらつくがほぼ同様な値として推定されることがわかる。また減衰定数に関しては、表—3と同様にスムージング回数により変化するため、定量的に決めることは難しいものと思われる。3階、2階では、図—14、15から明らかなように2次に関してより明確なピークが現われているものと思われ、図—14、15を対比させ、同様なピーク位置の固有円振動数を2次の固有円振動数として判断した(表—7)。この値は、EK-WGI法から推定された2次の固有円振動数とほぼ一致することがわかる。



図—13 応答関数(1階床と4階)



図—14 応答関数(1階床と3階)



図—15 応答関数(1階床と2階)

表一 7 スムージング回数による動特性推定結果の変化 (2次)

Hanning window N	$ H_{13}(f) $		$ H_{12}(f) $	
	$\omega^{(2)}$	$\beta^{(2)}$	$\omega^{(2)}$	$\beta^{(2)}$
0	85.58	0.002	85.45	0.002
1	85.77	0.002	85.45	0.004
2	85.77	0.004	85.58	0.005
4	85.58	0.005	85.39	0.008
6	85.58	0.007	85.39	0.010
8	85.64	0.009	85.39	0.011
10	85.64	0.010	85.26	0.012
20	85.70	0.014	85.39	0.017
30	85.77	0.020	85.51	0.019

$\omega^{(2)}$ ; rad/sec , N ; cycles

## 6. ま と め

本研究は、鉄筋コンクリート4階建校舎の常時微動測定を行い、この実測データを用いて、筆者らが提案した線形多自由度系として状態方程式に組み込んだEK-WGI法から、各次数の固有円振動数、モード減衰および $i$ 質点の刺激係数の推定を試みたものである。ここでは、1組の入出力波形として建物1階床と屋上の常時微動波形を用い、本方法から1次、2次に対する動特性値を推定できることが明らかになった。本方法との推定値の比較のため、同じ波形を用いて、周波数領域の応答関数から動特性値の推定を行った。この結果、1次の固有円振動数に関しては明確なピークが現われ、推定することができたが、2次に関しては明確なピークが現われず推定できなかった。また、減衰定数に関しては、応答関数にけるスムージング回数により変化してしまうため、一義的に推定することはできないものと判断した。

以上より、本方法による動特性の推定は、現在一般的に行われている周波数領域での推定法に比べ、有効であることが明らかになった。また検証用に用いた、1階床と4階、1階床と3階および1階床と2階のそれぞれの組の常時微動波形から推定された1次、2次に対する固有円振動数、減衰定数はほぼ一致し、1階と5階から推定された動特性値はほぼ妥当なものと判断できた。なお本研究では、常時微動の加速度波形を用いたが、一般には、高周波ノイズを多く含むことから、変位または速度波形として計測する機会が多い。本方法は、1組の入出力速度波形に対しても定式化が可能である。また今後、本方法を組み込んだ、簡易動特性推定のための計測システムを開発する予定である。

最後に、本研究を遂行するにあたり、計測およびデータ整理に協力いただいた武蔵工業大学修士2年の丸山取君をはじめ、応用力学研究室の皆様へ感謝致します。

## 参 考 文 献

- 1) 星谷 勝・斉藤悦郎：拡張カルマンフィルターを用いた同定問題の各種振動系への応用、土木学会論文報告集, No. 339, pp. 59 ~ 67, 1983-11.
- 2) 星谷 勝・斉藤悦郎：液状化を伴う地盤の等価線形化、土木学会論文報告集, No. 340, pp. 59 ~ 65, 1983-12.
- 3) 星谷 勝・斉藤悦郎：線形多自由度系の動特性の推定、土木学会論文報告集, No. 344 / I-1.
- 4) Graeme H. Mcverry : Structural identification in the frequency domain from earthquake records, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 8, pp. 161 ~ 180, 1980.
- 5) Jazwinski, A.H. : Stochastic processes and filtering theory, Academic Press, 1970.
- 6) J. S. ベンダット, A. G. ピアソル著, 得丸英勝訳：ランダムデータの統計的処理, 培風館.
- 7) 田治見宏：建築振動学, コロナ社.

(1984. 1. 17・受付)