RD法による構造物のランダム振動時の減衰評価 EVALUATION OF DAMPING RATIOS OF RANDOMLY EXCITED BUILDINGS USING THE RANDOM DECREMENT TECHNIQUE

田村 幸雄*, 佐々木 淳**, 塚越 治夫***

Yukio TAMURA, Atsushi SASAKI and Haruo TSUKAGOSHI

In order to obtain the basic characteristics of the Random Decrement Technique, the numerical simulation of wind-induced vibration are conducted for single- and two-degree-of freedom systems with a given damping ratio. The effects of various parameters on the resultant damping ratio are examined, i.e. the number of superposition of samples, the value of the damping ratio, band width of band-pass filter and so on.

The Random Decrement Technique is applied for evaluation of damping ratios of full-scale buildings. The results suggest that the technique is very useful for evaluation of the damping ratios of actual buildings under random excitations.

Keywords : random decrement technique, damping ratio, random vibration

RD法, 減衰定数, ランダム振動

1. はじめに

超高層建築物の耐震, 耐風性能や居住性能の評価, あるいは塔状構造物の空力不安定振動の発現の有無などは, 減衰定数の値によって大きく影響される。制振装置の設計においても, 建築物そのものの減衰定数がどのような値であるかによって, その効果や制振装置に要求される性能が異なってくる。このように減衰定数を正しく見積もることは極めて重要であり, その予測精度を上げることは大いに必要なことである。しかし, 応答予測において固有振動数の同定と同等以上に重要なパラメータであるにもかかわらず, 設計時の減衰定数の値は, 例えば, 強震時のRC造で3%, S造で2%とされており, 値の信憑性について納得できるような議論は, 著者らの知る範囲では見当たらない。

理論的に減衰定数を見積もる方法がないため, 実測による評価がなされるが, 振幅依存性, 構造種別による変化, 地盤の影響など複雑な様相を呈する。このため, その変動係数は70%を超える場合もあり, バラツキは非常に大きい¹⁾。ランダム加振時の減衰定数の評価には, 1/2パワーバンド幅法や自己相関関数法などが用いられ

る。しかし, これらの減衰評価方法には, データの定常性がかなり厳密に要求されるなど, いくつか固有の問題があり, 報告されている実測値には, 信頼性が低いものもかなりある。通常は実際より大きめの値に評価される傾向にあると言われている²⁾。ちなみに, 固有振動数1 Hzで真の減衰定数が1%の場合に, 1/2パワーバンド幅法など共振曲線から減衰定数を推定したとき, 周波数分解能 Δf が0.01 Hzの場合の推定誤差は20%であり, 精度良く減衰定数を推定するためには, $\Delta f = 0.001$ Hz 刻み程度を必要とすると報告されている³⁾。

ところで, Jeary⁸⁾⁻¹⁰⁾は航空宇宙工学の分野で提案された Random Decrement Technique (以下, RD法) が地上構造物へ応用できることを述べている。しかし, RD法に対する詳細な記述はなく, 厳密な検討はされていない¹¹⁾。これ以外にRD法の応用例は見られず, 少なくとも土木, 建築の分野ではほとんど用いられていない。

しかし, このRD法では, スペクトル計算などの手間は必要なく, 単に常時微動や風応答などのランダムな時系列波形があれば, 容易に, かつ精度良く強制振動時の減衰定数を評価できる。また, 時系列波形が必ずしも

本論文は, 文献1)~6)の内容に加筆, 修正したものである。

* 東京工芸大学工学部建築学科 教授・工博

** 西松建設技術研究所 研究員・工修

*** 日建設計大阪構造事務所・工修

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Tokyo Institute of Polytechnics, Dr. Eng.

Research Engineer, Technical Research Institute, Nishimatsu Construction Co., Ltd., M. Eng.

Osaka Structural Engineering Office, NIKKEN SEKKEI Ltd., M. Eng.

連続したものである必要はなく、振幅依存性のある場合でも、応答レベルごとにデータを選択利用することにより、振幅依存性などの検討もできる。したがって、従来の減衰定数評価方法と比較して、定常性の要求はそれほど厳密ではない。以上のような利点を持つことから、その有効性は極めて高いと考えられる。本論文は、風による振動時、あるいは常時微動時の構造物の減衰評価にRD法を適用するために、その基本的事項を検討し、2, 3の実例を示したものである。ただし、地震時などの非定常性の強い場合は除く。

2. RD法の原理

簡単のため、次式のように固有円振動数 ω_0 、減衰定数 ζ の1質点系に、期待値ゼロのランダム確率過程である外力 $F(t)$ が作用するものとする。

$$\ddot{X} + 2\zeta\omega_0\dot{X} + \omega_0^2 X = F(t) \quad (1)$$

この場合の応答 X の一般解は、周知のとおり、自由振動解 $D(t)$ (余関数) と、ランダムな外力 $F(t)$ による強制振動解 $R(t)$ (特解) の和の形で表される。つまり、

$$X = D(t) + R(t) \quad (2)$$

ただし、

$$D(t) = A \exp\{(-\zeta + i\sqrt{1-\zeta^2})\omega_0 t\} \quad (3)$$

$$R(t) = \int_0^t F(\tau) h(t-\tau) d\tau \quad (4)$$

である。ここで、 A は初期条件によって決まる任意の定数であり、 $h(t)$ は単位衝撃応答関数である。

応答 X の期待値は、

$$E[X] = E[D(t)] + E[R(t)] \quad (5)$$

であり、自由振動解 $D(t)$ と強制振動解 $R(t)$ のそれぞれの期待値の和となる。ランダム応答成分 $R(t)$ の期待値は、

$$E[R(t)] = \int_0^t E[F(\tau)] h(t-\tau) d\tau \quad (6)$$

であるから、外力 $F(t)$ が期待値ゼロの確率過程、つまり、

$$E[F(\tau)] = 0 \quad (7)$$

であるならば、

$$E[R(t)] = 0 \quad (8)$$

となる。

ところで、図—1に示すように、応答 X の時系列の標本が数多く存在するものとしよう。通常の減衰定数の範囲では、構造物の応答は固有円振動数 ω_0 の狭帯域ランダム過程となる。この時、応答 X の時系列波形を $t=0$ において極大値をとるように並べ、これを図のように時刻軸を揃えて重ね合わせれば、和 $\sum X_i(t)$ のうち、ランダム成分の和 $\sum R_i(t)$ は(8)式よりゼロに近づき、自由振動成分の和 $\sum D_i(t)$ のみが残る。したがって、この重ね合わせ波形は、次式のように、ランダムな極大値 P_i の和 $\sum P_i$ を初期振幅とする自由振動波形となる。

図—1 RD法の原理

$$\sum X_i(t) = \sum D_i(t) = (\sum P_i) \exp(-\zeta^* \omega_0 t) \cdot \cos \sqrt{1-\zeta^2} \omega_0 t \quad (9)$$

定常でエルゴディックの場合は、アンサンブル平均 $E[\cdot]$ を時間平均で置き換えることができる。したがって、上記のアンサンブル平均的重ね合わせを、時間軸方向に極大値を1つずつずらしながら重ね合わせることに置き換えて考えることもできる。その際、重ね合わせによってランダム応答成分が消えるのであれば、必ずしも連続した記録でなくてもよい。

3. 研究方法

RD法の基本的な特性を把握するため、まず真の減衰定数が既知である1質点系および2質点系のモデルによって、風による振動の数値シミュレーションを行い、重ね合わせ個数、減衰定数の値、あるいはサンプルの重ね合わせ方などの影響、バンドパスフィルターの効果、多自由度系への適用等について検討した。風による振動の数値シミュレーションは田村ほか¹²⁾と同様の方法で行った。

次に、これらの結果を参考にして、強風時および常時微動時の実測データを解析し、実際の構造物の減衰定数を評価した。

なお、減衰定数の推定値 ζ^* は、図—1のように重ね

合わせ波形の極大値を結ぶ包絡線を指数関数 $\exp(-\zeta^* \omega_0 t)$ で最小 2 乗近似して求めた。また、予測精度を評価する指標として、減衰定数の推定値 ζ^* の真の値 ζ に対する誤差率 σ^* を用い、これを以下のように定義した。ただし、 n は同一条件で評価した減衰定数の推定値の個数である。

$$\sigma^* = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\zeta_i^* - \zeta)^2}}{\zeta} \dots\dots\dots (10)$$

4. 1 質点系への RD 法の適用

4.1 1 質点系モデル

想定した外力は、高さ 10 m における平均風速が 15 m/sec の風方向の変動風力である。図-2 にシミュレートされた風方向の変動風力のパワースペクトル密度の一例を示す。

想定した 1 質点系モデルの固有振動数 f_0 ($=\omega_0/2\pi$) を 0.2 Hz, 0.3 Hz, 0.4 Hz, 0.5 Hz, 1.0 Hz, 5.0 Hz の 6 種類に変化させ、減衰定数 ζ を 0.1 %, 0.2 %, 0.5 %, 1.0 %, 2.0 %, 5.0 %, 10 % の 7 種類に変化させて、これらの影響を検討した。図-3 にシミュレートされた変位および加速度応答波形の一例 (固有振動数 $f_0=1.0$ Hz, 減衰定数 $\zeta=1.0$ %) を示す。

(a) 変位

(b) 加速度

図-3 1 質点系の時系列応答波形の一例 ($f_0=1.0$ Hz, $\zeta=1.0$ %)

(a) 変位

(b) 加速度

図-4 重ね合わせ個数 N による波形の変化 ($f_0=1.0$ Hz, $\zeta=1.0$ %)

4.2 解析結果とその考察

(1) 重ね合わせ個数 N の影響

連続した時系列波形を、データの重複がないように数多くの小サンプルに分割し、これらを重ね合わせた。その際、各小サンプルの初期値 P_i は、絶対値の小さい極

図-2 風方向の変動風力のパワースペクトル密度

図-5 重ね合わせ個数 N の推定減衰定数 ζ^* に与える影響 ($f_0=1.0$ Hz, $\zeta=1.0$ %) 図-6 減衰定数 ζ の値そのものの推定減衰定数 ζ^* に与える影響 ($f_0=1.0$ Hz)

大値にならないように、連続する3個の極大値の最大値とした。真の減衰定数 ζ は1.0%，小サンプルの長さ T は固有周期 T_0 ($=1/f_0$) の10倍の10 secとした。

図-4に重ね合わせ波形 $\sum X_i(t)$ の重ね合わせ個数 N による変化の一例を示す。(a)の変位波形の場合、 $N \approx 500$ 個程度でもあまりきれいな自由減衰波形とならないが、(b)の加速度波形の場合は $N \approx 100$ 個以上あれば、見かけ上ほぼきれいな自由減衰波形となる。図-5に推定された減衰定数 ζ^* と重ね合わせ個数 N の関係を示す。(a)の変位波形の場合、 $N \approx 500$ 個以上なければ誤差率 σ^* を20%以内に納めることができないが、(b)加速度波形の場合、 $N \approx 200$ 以上で誤差率 σ^* を20%以内に納めることができる。これは変位波形の場合、低振動数成分の寄与が大きく、その影響が消えるためには、多くの重ね合わせ個数を必要とするためである。また、

減衰定数の推定を正側の極大値のみによって行っているため、図-4から推定できるように、減衰定数の値が大きく見積もられる結果となった。

(2) 減衰定数 ζ の値そのものの影響

真の減衰定数 ζ を0.1%，0.2%，0.5%，1.0%，2.0%，5.0%，10%に変化させ、その影響をみた。図-6は真の減衰定数 $\zeta=2.0$ %と5.0%の場合の加速度波形の例である。

検討した減衰定数 ζ の範囲では、 $\zeta=0.5$ %と $\zeta=5.0$ %の場合に誤差率 σ^* が若干大きめの結果となったが、全般的に顕著な差は見られず、減衰定数 ζ の値の影響はあまり大きくないようである。

(3) サンプルの重ね合わせ方による影響

サンプルの重ね合わせ方についても、いくつかの方法を検討した。ここでは(1)、(2)と同様に、連続する

3個の極大値の最大値を始点としてデータが重複しないように重ね合わせる方法（アンサンブル平均型）と、毎極大値を始点としてデータを1ピークずつずらせながら重複させて重ね合わせる方法（時間平均型）を比較した。ここでアンサンブル平均型の名称は、小サンプルが同じ時系列波形から採られており、小サンプルの長さもそれほど大きくないことを考えると適切でない面もあるが、後者の時間平均型との対応からこのような名称で区別した。真の減衰定数 ζ は1.0%，小サンプルの長さ T （時間平均型の場合は、単に減衰評価を行う際の波形の長さ）は固有周期 T_0 の10倍の10 secとし、加速度波形についてのみ検討した。

図一7に結果を示す。なお、図中の横軸には、任意の重ね合わせ個数 N に必要な記録の合計時間を併記する。時間平均型は、誤差率 σ^* を20%以内に納めるのに重ね合わせ個数 N を1000個以上必要とし、アンサンブ

ル平均型では（1）で述べた結果と同様に、 $N=200$ 個以上で誤差率 σ^* が20%以内となる。前者は後者の見かけ上5倍の重ね合わせ個数を必要とする。しかし、必要な記録の合計時間は、時間平均型ではデータを重複して重ねているため、アンサンブル平均型の半分で済む。この例のように応答が定常なランダム過程である場合には、時間平均型も十分有効であることが分かる。

（4）固有振動数 f_0 の影響

固有振動数 f_0 を0.2 Hz ($T_0=5.0$ sec)、1.0 Hz ($T_0=1.0$ sec)、5 Hz ($T_0=0.2$ sec)と変化させ、加速度波形を用いてその影響をみた。真の減衰定数は1%，小サンプルの長さ T はそれぞれの固有周期 T_0 の10倍とし、サンプルの重ね合わせは時間平均型とした。

0.2 Hzと5.0 Hzの場合の減衰定数の推定結果を図一8に示す。0.2 Hz、5.0 Hz共に重ね合わせ個数 N が1000～2000個あれば誤差率 σ^* が20%以内に納まって

図一7 サンプルの重ね合わせ方の推定減衰定数 ζ^* に与える影響 ($f_0=1.0$ Hz, $\zeta=1.0$ %)

図一8 固有振動数 f_0 の推定減衰定数 ζ^* に与える影響 ($\zeta=1.0$ %)

図—9 バンドパスフィルターのバンド幅の推定減衰定数 ζ^* に与える影響 ($f_0=1.0$ Hz, $\zeta=1.0$ %)

おり、固有振動数の違いはあまり影響がない。したがって、このような定常なランダム波である風応答の場合の誤差率 σ^* は、記録の合計時間よりも、重ね合わせ個数 N の方により依存すると考えて良さそうである。

(5) バンドパスフィルターのバンド幅の影響

変位波形について、バンドパスフィルターを用いて、低振動数成分を除去し、必要な重ね合わせ個数を低減することを試みた。用いたバンドパスフィルターは、最も簡単な矩形の数値フィルターであり、フーリエスペクトル値の不要な部分を1/1000にカットするものである。バンド幅は、応答変位のスペクトルが極大値をとる固有振動数 $f_0=1.0$ Hzを中心として、その前後に ± 0.03 Hz, ± 0.05 Hz, ± 0.1 Hz, ± 0.3 Hz, ± 0.5 Hzと設定した。真の減衰定数 ζ は1.0%，小サンプルの長さ T は固有周期 T_0 の10倍の10 sec, サンプルの重ね合わせ方法はアンサンプル平均型である。

図—9に $f_0 \pm 0.03$ Hz, $f_0 \pm 0.5$ Hzの場合の、推定された減衰定数 ζ^* と重ね合わせ個数 N の関係の例を示す。 $f_0 \pm 0.5$ %の場合は、重ね合わせ個数 $N \geq 200$ 個以上で誤差率 σ^* を20%以内に納めることができ、真の減衰定数に近いものが得られた。しかし、 $f_0 \pm 0.03$ Hzでは減衰定数を小さく見積もってしまい、バンド幅があまり狭すぎると、減衰定数が過小評価されることが分かる。高周波数成分は、対象とする振動数成分に比べてパワーがあまり大きくない限り、アンサンプル平均によって消えやすいので、あまり無理にカットすることは好ましくない。変位波形の場合は、低周波数成分を十分にパワーの落ちたところ（少なくともフーリエスペクトル値で1/10以下のところ）でカットすることが望ましいようである。

(6) 風直角方向応答への適用

図—10に示すような、0.25 Hz付近にパワースペクト

図—10 風直角方向の変動風力のパワースペクトル密度

ル密度のピーク値を有する風直角方向の変動風力を用いて応答解析を行い、加速度波形を用いて風直角方向応答の適用性を検討した。固有振動数 f_0 は0.2 Hz, 0.3 Hz, 0.4 Hz, 0.5 Hz, 1.0 Hzの5種類に変化させた。真の減衰定数 ζ は1.0%，小サンプルの長さ T はそれぞれの固有周期 T_0 の10倍とし、サンプルの重ね合わせは時間平均型とした。

図—11に $f_0=0.2$ Hz, 0.3 Hzの場合の重ね合わせ個数 N と誤差率 σ^* の関係を示す。0.2 Hz, 0.3 Hz共に重ね合わせ個数 N が2000個以上で誤差率 σ^* を20%程度以内に納めることができ、共振振動数付近の応答についても風方向応答時と何ら変わることなく、精度良く減衰定数を評価できることが分かった。

図—11 風直角方向応答における固有振動数 f_0 の推定減衰定数 ζ^* に与える影響

5. 2 質点系への RD 法の適用

5.1 2 質点系モデル

想定した 2 質点系モデルは、1 次モードと 2 次モードの振動数比 f_2/f_1 が 1.2, 2.0, 3.0, 4.0 の 4 種類とした。減衰は剛性比例型とし、1 次モードの減衰定数 ζ_1 を 1.0 % とした。表—1 にモデルの諸元を示す。

5.2 解析結果とその考察

解析の対象としたのは、頂部質点の加速度応答波形であり、小サンプルの長さ T は対象とする振動モードの固有周期の 10 倍、サンプルの重ね合わせは時間平均型とした。図—12 にシミュレートされた加速度応答波形の一例（振動数比 $f_2/f_1=2.0$ ）を示す。

(1) 1 次の減衰定数評価に対する重ね合わせ個数 N の影響

図—13 に振動数比 $f_2/f_1=2.0$ の場合の、推定された 1 次の減衰定数 ζ_1^* と重ね合わせ個数 N の関係を示す。重ね合わせ個数 $N=2000$ 以上で誤差率 σ^* を 20 % 以

内に納めることができる。

(2) 1 次の減衰定数評価に対する振動数比 f_2/f_1 の影響

重ね合わせ個数 N を十分に大きい 10000 個に設定し、振動数比 f_2/f_1 が 1.2, 2.0, 3.0, 4.0 の場合の、1 次モードの減衰定数を検討した。

表—2 に推定された減衰定数 ζ_1^* を示す。どのモデルも推定された減衰定数と真の減衰定数との差は 20 % 程

図—13 重ね合わせ個数 N の推定減衰定数 ζ_1^* に与える影響
(振動数比 $f_2/f_1=2.0$, $\zeta_1=1.0\%$)

表—1 2 質点系解析モデル

振動数比 f_2/f_1	固有振動数 (Hz)		減衰定数 (%)	
	1 次	2 次	1 次	2 次
	f_1	f_2	ζ_1	ζ_2
1.2	0.84	1.01	1.00	1.20
2.0	0.81	1.61	1.00	2.00
3.0	0.85	2.54	1.00	3.00
4.0	0.86	3.39	1.00	3.96

図—12 加速度応答波形の一例（振動数比 $f_2/f_1=2.0$ ）

表—2 1 次の推定減衰定数 ζ_1^*

振動数比 f_2/f_1	真の減衰定数 ζ_1 (%)	推定減衰定数 ζ_1^* (%)
1.2	1.00	1.15
2.0	1.00	0.97
3.0	1.00	1.22
4.0	1.00	1.03

(時間平均型, 重ね合わせ個数 $N=10,000$ 個)

(a) 原スペクトル

(b) ハイパスフィルターをかけた場合

図—14 2質点の応答加速度のフーリエスペクトル (振動数比 $f_2/f_1=2.0$)表—3 ハイパスフィルターをかけて算出した2次の推定減衰定数 ζ_2^*

振動数比 f_2/f_1	真の減衰定数 ζ_2 (%)	推定減衰定数 ζ_2^* (%)
1.2	1.20	4.12
2.0	2.00	2.03
3.0	3.00	2.83
4.0	3.96	3.75

(時間平均型, 重ね合わせ個数 $N=10,000$ 個)

度以下であり, 振動数比 $f_2/f_1=2.0$, および1次モードと2次モードの振動数が最も離れている振動数比 $f_2/f_1=4.0$ の場合の差は3%しかない。

(3) 2次の減衰定数評価に対するバンドパスフィルターの影響

バンドパスフィルターを用いて, 2次振動数成分を採り出し, 2次モードの減衰定数評価を試みた。ピーク振動数 f_2 よりも低周波数側の成分については, フーリエスペクトルの1次振動数成分との谷間の位置よりも低い成分のフーリエスペクトル値をすべて $1/1000$ に落とした。図—14に原スペクトルとハイパスフィルターをかけた後のフーリエスペクトルの一例 (振動数比 $f_2/f_1=2.0$) を示す。

表—3に推定された減衰定数 ζ_2^* を示す。推定された減衰定数 ζ_2^* と真の減衰定数 ζ_2 との差は, 1次モードと2次モードの振動数が非常に近い振動数比 $f_2/f_1=1.2$ の場合を除けば10%以下であり, 通常の構造物の水平振動のように振動数が十分に分離している場合には, 非常に良い精度で高次の減衰定数も評価できることが分かった。

6. 実際の構造物へのRD法の適用

RD法によって実測記録を解析し, 実構造物の減衰評価を試みた。重ね合わせは時間平均型とし, 重ね合わせ個数 N は, 減衰定数の評価精度のばらつきが20%程度になる $N=2000$ 個とした。なお, 実測記録では, 高周波数成分をフィルターでカットした場合でも, ある程度高周波ノイズが残ることがあり, 重ね合わせ波形の $t=0$ での値だけは, 純粋な固有振動数成分のみの自由減衰波形の初期値より必ず大きめの値となる。よって, 以降実測記録を解析する場合は, 重ね合わせ波形の最初の1サイクル分を無視して減衰定数を推定することとする。

6.1 T電波塔の強風時ランダム応答

対象とした波形は, T電波塔 (トラス鉄塔, 塔体平面約 18×18 m, 高さ200 m, X, Y方向とも1次固有振動数 $f_1=0.48$ Hz) の強風時の加速度応答波形である。なお, 時系列波形のピーク評価の精度を上げるため, スプライン補間により実測記録の時間刻みを0.2 secから0.1 secに補正 (1周期当たりのデータ個数は約20個) して用いた。

ちなみに, $1/2$ パワーバンド幅法で得た30ケースの1次モードの減衰定数 ζ_1 は0.6%~1.6%にばらつき, その平均は約0.91%であった。

図—15に重ね合わせ波形の一例を示す。これより得られた減衰定数 ζ_1^* は約0.72%である。

図—15 重ね合わせ波形 (T電波塔, 加速度波形)

図—16 応答レベル A_{rms} の違いによる減衰定数 ζ^* の変化
N 塔, 加速度波形

6.2 N 塔の強風時ランダム応答

対象とした波形は、N 塔（S 造、塔体平面約 5×5 m、高さ 42 m、X、Y 方向とも 1 次固有振動数 $f_1 = 1.07$ Hz）の強風時の加速度応答波形である。この場合、低風速から高風速にわたって記録が数多く計測されており、応答レベルごとに減衰定数を評価することができた。

マンパワー加振による自由減衰振動実験から得られた 1 次モードの減衰定数 ζ_1 は約 0.93 %（初期振幅約 0.79 mm）である¹³⁾。

図—16 に応答レベル（加速度 rms 値 A_{rms} ）による推定減衰定数 ζ^* の変化を示す。横軸は重ね合わせ個数 $N = 2000$ 個ごとの応答加速度の rms 値である。応答レベル A_{rms} が増加するに従って、減衰定数も増加する傾向にあり、ほぼ $\zeta^* \propto A_{rms}^{(0.17)}$ の関係がある。なお、図—16 には田村ほか¹³⁾のマンパワー加振による自由減衰振動実験の値を併記しており、RD 法によって算定した減衰定数の変化の延長線上にあり、ほぼ対応しているものと考えられる。このように、RD 法を用いることによって、応答レベルの違いを考慮した減衰評価が可能であることが分かった。

6.3 H 塔の常時微動

微風時で、かつ当該建物内での工事などの作業が停止している状態での常時微動を測定し、その時系列波形に対し、RD 法を用いて 1 次、2 次および 3 次モードの減衰評価を行った。対象とした波形は、H 塔（S 造、塔体平面約 6.3×22 m、高さ 87 m）の常時微動波形（速度波形）である。図—17 に常時微動波形のフーリエスペクトルの一例を示す。2 次および 3 次モードの減衰定数を評価する際に用いたバンドパスフィルターのカットオフ周波数は、対象とする振動数を中心に、その前後のフーリエスペクトルが谷間となるように設定した。そして、その間以外のフーリエスペクトル値をすべて $1/1000$ に落とした。

図—17 常時微動のフーリエスペクトル（H 塔、速度波形）

図—18 重ね合わせ波形（H 塔、速度波形）

表—4 各次モードの固有振動数 f_n と推定減衰定数 ζ_n^*

次数	1 次	2 次	3 次
固有振動数 f_n (Hz)	1.03	3.44	5.91
推定減衰定数 ζ_n^* (%)	0.28	0.74	2.09

マンパワー加振による自由減衰振動実験から得られた 1 次モードの減衰定数 ζ_1 は約 0.38 % と非常に小さい。

図—18 に重ね合わせ波形を示し、表—4 に推定された各次の減衰定数の値を示した。図—18(a) (b) (c) から分かるように、RD 法によって抽出された高次モードの自由減衰波形も、比較的きれいな減衰波形となっている。図—18(a) の重ね合わせ波形によって、推定した常時微動時の 1 次減衰定数 0.28 % は、自由減衰振動実験から推定した 0.38 % より更に小さい値になっており、振幅の影響が出ているものと考えられる。推定された減衰定数は、表—4 に示すように高次になるに従い増加している。ちなみに、1 次の減衰定数 ζ_1^* に対する高次の減衰定数 ζ_n^* の比を

$$\frac{\xi_n^*}{\xi_1^*} = \left(\frac{f_n}{f_1} \right)^{\beta_n} \dots\dots\dots (11)$$

と表したときの β_n の値は、2 次モードに対して $\beta_2 = 0.81$ 、3 次モードに対して $\beta_3 = 1.15$ となり、高次の減衰定数は、ほぼ振動数比に比例して大きくなっている。

7. まとめ

風による振動や常時微動などのランダム応答へ RD 法を適用する際の基本的なパラメータを整理し、その影響について検討した。その結果、風による振動時の減衰評価の際に必要な重ね合わせ個数と誤差の関係、重ね合わせ方の影響、変位波形や高次振動に対するバンドパスフィルターの効果とバンド幅の影響などが明らかになった。また、実測波形への適用についても、応答レベルで波形を選択して利用することにより、減衰定数の振幅依存性の評価ができることや、高次モードの減衰評価に対しても、その有効性が示された。なお、RD 法の場合、定常性の要求はそれほど厳密ではないが、強震記録のような非定常性の強い応答に対して適用が可能であるかどうかは明確でない。

謝 辞

観測データの収集にあたり御協力頂きました運輸省東京航空局殿、田無タワー(株)殿、(株)風工学研究所殿、ならびに大成建設(株)浅見 豊氏に、深く感謝の意を表します。また、本論文を作成するにあたり、多大なる御協力頂きました(株)梓設計 高坂隆一氏、ならびに(株)琢建築構造設計 佐藤民夫氏に心より感謝致します。

参考文献

- 1) 田村幸雄，佐々木淳，塚越治夫：ランダムな外力による強制振動時の減衰評価（パフエティング振動時の減衰定数について），日本風工学会誌 No. 47, pp. 93～94, 1991
- 2) 田村幸雄，佐々木淳，塚越治夫：RD 法による構造物の

減衰評価，日本建築学会大会学術講演梗概集（東北）構造 I, pp. 809～810, 1991

- 3) 田村幸雄，佐々木淳，佐藤民夫：RD 法による構造物の減衰評価（その 2 パフエティング振動している 1 質点系への適用），日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸）構造 I, pp. 1149～1150, 1992
- 4) 田村幸雄，佐々木淳，佐藤民夫：RD 法による構造物の減衰評価（その 3 パフエティング振動している 2 質点系への適用），日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸）構造 I, pp. 1151～1152, 1992
- 5) 田村幸雄，高坂隆一，佐々木淳，佐藤民夫：RD 法による構造物の減衰評価（その 4 実測された常時微動波形への適用），日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸）構造 I, pp. 1153～1154, 1992
- 6) 田村幸雄，佐々木淳，佐藤民夫，高坂隆一：RD 法による強風時の構造物の減衰評価，第 12 回風工学シンポジウム論文集, pp. 303～308, 1992
- 7) Haviland, R. : A Study of the uncertainties in the fundamental translational periods and damping values for real buildings, Evaluation of Seismic Safety of Buildings, Report 5, National Science Foundation, 1976
- 8) Jeary, A. P. : Damping in tall buildings—mechanism and a predictor, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 14, 1986
- 9) Jeary, A. P. : The dynamic behaviour of tall buildings, PhD. Thesis, University College London, UK, 1981
- 10) Jeary, A. P. : Integrity monitoring of buildings, International Conference on tall buildings, Hong Kong and Shanghai, 1988
- 11) Jeary, A. P. : Personal communication, 1990
- 12) 田村幸雄，和田 章，大越俊男，川村 満：高層建物の風外力に対する時系列応答解析について，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）構造 I, pp. 143～144, 1988
- 13) 田村幸雄，小杉美樹夫，西村 功：空港管制塔の風による応答（その 1 強風時の挙動），日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿）構造 I, pp. 1479～1480, 1987

(1993 年 4 月 10 日原稿受理，1993 年 10 月 6 日採用決定)