伝達マトリクス法による建築構造システムの局所的減衰評価に関する研究

LOCAL DAMPING ESTIMATION OF BUILDING STRUCTURAL SYSTEMS
BY MEANS OF TRANSFER MATRIX TECHNIQUE

山田 聖 治*, 西 谷 章**

Seiji YAMADA and Akira NISHITANI

In estimating the motion characteristics of a building, the modal decomposition technique is frequently employed. However, it doesn't fit to the estimation of those of subsystems in a building structural system. This paper focuses on the damping estimation of such subsystems. By means of the transfer matrix method, a structure is divided into a number of substructures, which then are to be identified. A standing wave arisen inside a structure is decomposed into forward and backward moving waves in virtue of the wave propagation theory. Then, a local damping factor is estimated from the forward moving wave. This damping factor is regarding the local information, which the modal analysis cannot deal with. To demonstrate the validity of the proposed method, numerical simulations are conducted with respect to four-story building models subjected to random white noise excitations.

Keywords : Local damping, Wave propagation, Transfer matrix, Random excitations, Structural health monitoring
局所的減衰, 波動伝播, 伝達マトリクス, ランダム加振, 構造ヘルスモニタリング

1 はじめに

振動解析の一手法に伝達マトリクス法^{3, 4)}がある。伝達マトリクス法では、質点・剛性・減衰などの構造システムの構成要素をサブシステムに分け、サブシステム相互の関係をマトリクス表記する。この方法は、任意の2点間の関係をマトリクスによって表すことができるので、モード解析⁵⁾では困難な構造物の局所的な解析に適用が可能であり、振動制御にも利用されている⁶⁾。

建築構造物の振動は、地震・風などの外乱が作用することにより発生する。振動を発生させる原因となる外乱は、波動として建築構造物に付加され、構造物内部を伝播する⁷⁻¹⁰⁾。よって、外乱を波動として扱い、構造物内部の波動の伝播特性を認識することは、構造システムの制御¹¹⁾において非常に有用となる。

以上の観点から、本論文では、波動理論と伝達マトリクス法を用いて、建築構造物の局所的減衰を評価することを目的としている。波動理論と伝達マトリクス法を構造物に適用した論文としては、福和ら^{12, 13)}のものがある。これらの論文では、伝達マトリクス法の適用に適した線状周期構造物を扱い、離散解析時の最適な質量行列作成法について検討している。本研究においては、建築構造シ

ステムにおける局所的な減衰を示す指標として「層間伝達減衰比」を導入する。「層間伝達減衰比」は、伝達マトリクス法と波動理論をもとに建築構造物に発生する定常波を進行波と後退波に分解したうえで、ある層と次の層の進行波の振幅比から算出されるエネルギー損失率を1自由度系の減衰自由振動におけるエネルギー損失率に換算して決定される。

提案する「層間伝達減衰比」は、ひとつの層から次の層への減衰を表しているため、局所的な減衰を的確に判断することができる。また、「層間伝達減衰比」と周波数の関係から、各モードの粘性減衰比間の関係を明らかにすることもできる。本論文では、「層間伝達減衰比」により建築構造システムの局所的な減衰状況の把握が可能であることを示す。この指標をもとにすることで、制振効果の確認や構造ヘルスモニタリングへの将来的な応用も期待できる。

2 層間伝達減衰比の定式化

2.1 伝達マトリクスによる構造物の分離

伝達マトリクスを用いて、建築構造物をサブシステムに分離するが、本研究ではサブシステムとして層を採用し、「層間伝達減衰比」を定式化する。 $(i-1)$ 階床の上部から i 階床の上部までを i 層と

本論文は、日本建築学会大会で発表した内容(文献[1, 2])をもとに、あらたな計算により加筆・修正を加えたものである。

* 早稲田大学理工学部建築学科 助手・修士(工学)

** 早稲田大学理工学部建築学科 教授・Ph. D.・工学博

Research Assoc., Dept. of Architecture, Waseda Univ., M. Eng.

Prof., Dept. of Architecture, Waseda Univ., Ph. D., Dr. Eng.

する。Fig.1に示す多層のせん断型モデルが周波数 $f(\text{Hz})$ で振動しているとする。 i 層の状態量ベクトル $\mathbf{Z}_i$ として変位 x_i とそれに対応するせん断力 Q_i を採用する。

Fig.2のように、 i 層の質点 m_i をとりだせば、質点上部の状態量 $[x_i^U \quad Q_i^U]^T$ と質点下部の状態量 $[x_i^L \quad Q_i^L]^T$ の関係は、 $x_i^U = x_i^L$ および

$$Q_i^U = -m_i \omega^2 x_i^L + Q_i^L \quad (1)$$

ただし、 $\omega = 2\pi f$

であることから、以下のようになる。

$$\begin{bmatrix} x_i^U \\ Q_i^U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -m_i \omega^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i^L \\ Q_i^L \end{bmatrix} \quad (2)$$

これが質点 m_i の下部の状態から上部の状態への伝達を表す関係式であり、式(2)右辺の係数マトリクスが格点マトリクスとなる。

次に、Fig.3のように、 i 層をとりだして考えれば、 $Q_i^L = Q_{i-1}^U$ であり、Kelvin 型モデルを仮定すると変位の関係式は、

$$x_i^L = x_{i-1}^U + \frac{1}{k_i + j c_i \omega} Q_{i-1}^U \quad (3)$$

ただし、 $j = \sqrt{-1}$

となって、以下の関係が導かれる。

$$\begin{bmatrix} x_i^L \\ Q_i^L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{k_i + j c_i \omega} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{i-1}^U \\ Q_{i-1}^U \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(4)がKelvin型モデルを仮定したときの質点 m_{i-1} の上部の状態から質点 m_i の下部の状態への伝達を表す関係式であり、式(4)右辺の係数マトリクスが格間マトリクスである。

式(2),(4)より、質点 m_{i-1} の上部の状態から質点 m_i の上部の状態への伝達マトリクス $\mathbf{U}_i$ は、格点マトリクスと格間マトリクスの積で表され、次式のようになる。

$$\begin{bmatrix} x_i^U \\ Q_i^U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{k_i + j c_i \omega} \\ -m_i \omega^2 & 1 - \frac{m_i \omega^2}{k_i + j c_i \omega} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{i-1}^U \\ Q_{i-1}^U \end{bmatrix} \quad (5)$$

ただし、式(5)は i 層に外力が働いていない場合である。 i 層に外力が存在する場合、式(1)は、

$$Q_n^U = -m_n \omega^2 x_n^L + Q_n^L - f_i \quad (6)$$

となって、 i 層の伝達マトリクスのは以下のようになる。

$$\begin{bmatrix} x_i^U \\ Q_i^U \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{k_i + j c_i \omega} & 0 \\ -m_i \omega^2 & 1 - \frac{m_i \omega^2}{k_i + j c_i \omega} & -f_i \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{i-1}^U \\ Q_{i-1}^U \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

ここに、 f_i は i 層に作用する外力である。

また、Maxwell 型モデルを仮定すると式(4)は、

Fig. 1 Shear structure model representing a multi-story building

Fig. 2 Displacements and shear forces with respect to the mass m_i

Fig. 3 Displacements and shear forces between the masses m_i and m_{i-1}

$$\begin{bmatrix} x_i^L \\ Q_i^L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{k_i + j c_i \omega} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{i-1}^U \\ Q_{i-1}^U \end{bmatrix} \quad (8)$$

となる。式(8)がMaxwell型モデルを仮定したときの質点 m_{i-1} の上部の状態から質点 m_i の下部の状態への伝達を表す関係式である。

式(2),(8)より、Maxwell型モデルの伝達マトリクス $\mathbf{U}_i$ は、次式のようになる。

$$\begin{bmatrix} x_i^U \\ Q_i^U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{k_i + j c_i \omega} \\ -m_i \omega^2 & 1 - \left(\frac{m_i \omega^2}{k_i} + \frac{m_i \omega^2}{j c_i \omega} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{i-1}^U \\ Q_{i-1}^U \end{bmatrix} \quad (9)$$

さらに、 i 層に外力が存在する場合の伝達マトリクスのは以下のようになる。

$$\begin{bmatrix} x_i^U \\ Q_i^U \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{k_i} + \frac{1}{j c_i \omega} & 0 \\ -m_i \omega^2 & 1 - \left(\frac{m_i \omega^2}{k_i} + \frac{m_i \omega^2}{j c_i \omega} \right) & -f_i \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{i-1}^U \\ Q_{i-1}^U \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

式(5),(7)あるいは式(9),(10)の関係より、各層の状態ベクトルから Kelvin 型、Maxwell 型モデルに対応する各層の伝達マトリクスが計算できる。層間を伝播する波の関係を求めるために、次節において、波動理論を適用し、「層間伝達減衰比」を定式化する。

2.2 層間伝達減衰比の定式化

構造物に作用する力は、波動として構造物内部を伝播する。伝播する波は、境界に達すると、境界条件に応じて通過する進行波と反射する後退波に分かれる。強制加振が正弦波であれば、進行波と後退波は互いに干渉しあい、定常波を生じる。つまり、正弦波加振された構造物の内部では、常に進行波と後退波が存在している。これらの波は、構造物内部を伝播する波である。

i 層の進行波と後退波の複素振幅 w_i^+ , w_i^- を要素とする波動ベクトルを $\mathbf{W}_i$ と表す。このとき $(i-1)$ 層の波動ベクトル $\mathbf{W}_{i-1}$ と i 層の波動ベクトル $\mathbf{W}_i$ の関係は、波動の伝達マトリクス $\mathbf{A}_i$ を介して、

$$\mathbf{W}_i = \mathbf{A}_i \mathbf{W}_{i-1} \quad (11)$$

となる。波動の伝達マトリクス $\mathbf{A}_i$ を、状態量ベクトル $\mathbf{Z}_i$ を波動ベクトル $\mathbf{W}_i$ に変換するマトリクス $\mathbf{\Gamma}$ を用いて以下のように表す。

$$\mathbf{A}_i = \mathbf{\Gamma} \mathbf{U}_i \mathbf{\Gamma}^{-1} \quad (12)$$

ただし、 $\mathbf{U}_i$ は $(i-1)$ 層から i 層への伝達マトリクスであり、Kelvin 型モデルでは式(5),(7)、Maxwell 型モデルでは式(9),(10)となる。 $\mathbf{A}_i$ の対角成分を $\lambda_i, \hat{\lambda}_i$ 、 $\mathbf{\Gamma}$ の列成分を γ_1, γ_2 とすると、

$$\begin{bmatrix} \lambda_i & 0 \\ 0 & \hat{\lambda}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_1 & \gamma_2 \end{bmatrix} \mathbf{U}_i \begin{bmatrix} \gamma_1 & \gamma_2 \end{bmatrix}^{-1} \quad (13)$$

であり、結局、

$$\begin{cases} \lambda_i \gamma_1 &= \gamma_1 \mathbf{U}_i \\ \hat{\lambda}_i \gamma_2 &= \gamma_2 \mathbf{U}_i \end{cases} \quad (14)$$

と書きかえることができる。これは、行列 $\mathbf{U}_i$ の固有値問題である。したがって、式(11)は、

$$\begin{bmatrix} w_i^+ \\ w_i^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{(-\alpha-j\beta)} & 0 \\ 0 & e^{(\alpha+j\beta)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_{i-1}^+ \\ w_{i-1}^- \end{bmatrix} \quad (15)$$

ここに、

$$\begin{cases} \alpha &= \text{Re}(\ln \lambda_i) \\ \beta &= \text{Im}(\ln \lambda_i) \end{cases} \quad (16)$$

式(15)は、層から層へ波が伝達する関係を表現しており、進行波と後退波の関係は独立となる。以下では進行波についてのみ検討

Table 1 Building models for numerical examples

	story	Model				
		A	K1	K2	C1	C2
m [kg]	1-4	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6
c_i (N/(m/s))	4	37.5	37.5	37.5	39.375	41.25
	3	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0
	2	82.5	82.5	82.5	86.625	90.75
	1	105.0	105.0	105.0	105.0	105.0
k_i (N/m)	4	9000	8100	9000	9000	9000
	3	9000	9000	9000	9000	9000
	2	9000	8100	8100	9000	9000
	1	9000	9000	9000	9000	9000

し、「層間伝達減衰比」を定義する。式(15)において、 w_i^+ は複素振幅であり、両辺に $e^{j\omega t}$ を乗じて、進行波のみを取り出すと、

$$w_i^+ e^{j\omega t} = e^{(-\alpha-j\beta)} w_{i-1}^+ e^{j\omega t} \quad (17)$$

と表現される。式(17)に示した進行波のエネルギー消費量を1質点系における減衰自由振動のエネルギー消費量と対応させる。1質点減衰系モデルに初期変位を与えた時の減衰自由振動において、エネルギー損失率 ψ_f は以下のように表される。

$$\psi_f = 1 - \exp\left(\frac{-4\pi\zeta_m}{\sqrt{1-\zeta_m^2}}\right) \quad (18)$$

ここに、 ζ_m は粘性減衰比であり、時間に関する減衰率である。一方、進行波のエネルギー損失率 ψ_w は、進行波の式(17)から次のようになる。

$$\psi_w = 1 - \exp\left(\frac{-4\pi\alpha}{\beta}\right) \quad (19)$$

よって、式(18)、(19)で算出した2つのエネルギー損失率を比較し、進行波の減衰率 ζ_p を ζ_m に換算すると、

$$\zeta_p = \frac{\frac{\alpha}{\beta}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\alpha}{\beta}\right)^2}} \quad (20)$$

式(20)が本論文で提案する「層間伝達減衰比」である。本指標は、入力正弦波の周波数によって値が変化するので、対象構造物に印加する周波数ごとに「層間伝達減衰比」を算出できる。

3 シミュレーションによる確認

3.1 減衰型による層間伝達減衰比の差異

本論文で提案する層間伝達減衰比から、各モードの粘性減衰比間の関係が明らかとなることを確認するために、Table 1に示す4層モデル Model A に対して、Kelvin 型と Maxwell 型を仮定した場合の2層と4層の層間伝達減衰比の値を Figs.4,5に示す。

これらの図からわかるように、層間伝達減衰比は周波数に対して、Kelvin 型では増加し、Maxwell 型では減少する。このように、層間伝達減衰比と周波数の関係から、各モードの粘性減衰比間の関係を明らかにすることができる。ただし、一般の構造物では、減衰の型が一つで表現できるとは限らず、どのようなタイプの減衰が支配的であるかを示す指標として用いることになる。

Fig. 4 Local equivalent damping ratios based on Kelvin model

Fig. 5 Local equivalent damping ratios based on Maxwell model

3.2 層間伝達減衰比による局所的減衰状況の把握

次に、層間伝達減衰比によって局所的な減衰状況が推定できることを確認するために、Table 1に示す4層モデルを Kelvin 型と仮定して、パラメータ変動による層間伝達減衰比の増減を理論値によって比較する。

Model A を基本のモデルとし、Model A からパラメータが変動したモデルとして K1, K2, C1, C2 の4つのモデルを設定する。Model K1, K2 は剛性を減少させたモデルであり、Model A と比べそれぞれ2,4層および2層のみの k を10% 減少させている。また、Model C1, C2 は減衰を増加させたモデルであり、Model A と比べそれぞれ2,4層の c を5% および10% 増加させている。

Model K1, K2, C1, C2 それぞれのモデルに対して求めた層間伝達減衰比の2層と4層について、Model A のそれと比較した図を Figs.6~9に示す。これらの図において、実線で示されたものが Model A、点線で示されたものが各モデルである。以上の図から、剛性低下あるいは減衰増加のどちらの場合も、層間伝達減衰比

Fig. 6 Comparison of local equivalent damping ratios between Models A and K1

Fig. 7 Comparison of local equivalent damping ratios between Models A and K2

Fig. 8 Comparison of local equivalent damping ratios between Models A and C1

Fig. 9 Comparison of local equivalent damping ratios between Models A and C2

Table 2 Natural frequencies and damping ratios of model buildings

	Mode	Model				
		A	K1	K2	C1	C2
f (Hz)	1	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2
	2	9.3	9.1	9.3	9.3	9.2
	3	14.0	14.0	14.0	14.0	14.0
	4	15.0	14.0	14.0	15.0	15.0
ζ	1	0.10	0.099	0.10	0.099	0.10
	2	0.23	0.22	0.22	0.23	0.23
	3	0.32	0.35	0.34	0.33	0.34
	4	0.48	0.50	0.49	0.51	0.53

が増加することがわかる。そして、Figs.6,7からパラメータ変動箇所のための層間伝達減衰比が変化すること、Figs.8,9から減衰のパラメータ変動量の大小に応じて層間伝達減衰比の変化量が異なることがわかる。また、図示していないが、パラメータ変動を設定していない1層と3層では、Model Aとそれぞれのモデルの層間伝達減衰比が完全に一致している。さらに、剛性増加あるいは減衰低下を仮定したモデルでは層間伝達減衰比は減少し、剛性のパラメータ変動量を変化させたモデルと減衰のパラメータ変動箇所の数を変えたモデルにおいても、前述と同様の傾向が得られた。つまり、パラメータ変動箇所のための層間伝達減衰比が、パラメータ変動の量に応じて変化することがわかる。

ただし、現状では、層間伝達減衰比のみから減衰・剛性のどちら(あるいはその両方)に変化が生じたかを判断するのは必ずしも簡単ではない。しかし、3.1で示したように、層間伝達減衰比によりあらかじめどのようなタイプの減衰が支配的であるかを特定することは可能である。したがって、補遺に示す関係より減衰・剛性の値を算出することができ、建築構造物の振動解析・制振システム設計の指標や構造ヘルスモニタリングへの将来的な応用が可能になることが期待できる。

Table 2に、モード解析より求めた各モードの固有振動数および粘性減衰比を示す。Table 2において、それぞれのモデルの固有振動数・粘性減衰比ともにModel Aからのずれが見られるが、これ

らの値のみから、局所的な層の変動を特定することは困難である。ただし、1次のモード粘性減衰比が10%程度のモデルを設定しているのは、4で行う2つのタイプの推定シミュレーションにおいて、変位応答の層間の振幅差・位相差が与える影響を明確にするためである。

4 層間伝達減衰比の推定手法

4.1 正弦波加振による推定

前章までで層間伝達減衰比が定式化され、その効果を確認することができた。本章では、層間伝達減衰比の推定手法を検討する。層間伝達減衰比は、定常波を進行波と後退波に分解することが前提であるから、最上層への正弦波加振による手法を用いる。

具体的な推定手順は以下のようである。

- (i) 各層の変位応答 x_i を観測する、
- (ii) 式(1),(6)を最上層から順次計算することで各層のせん断力 Q_i を算出する、
- (iii) 式(5),(7)あるいは式(9),(10)に x_i, Q_i を代入することで伝達マトリクス U_i を決定する、
- (iv) 式(16)から α, β を計算する、
- (v) 式(20)から層間伝達減衰比を推定する。

以上の手順により、前述のModel AをKelvin型と仮定して層間伝達減衰比の推定を行う。最上層に入力される正弦波は、周波数 f (Hz) で、振幅1(cm)の正弦波 $y = \sin(2\pi f)$ とし、周波数 f を0~12(Hz)まで0.4(Hz)ごとに変化させる。出力としては、全ての層の変位を計測し、サンプリング時間間隔 Δt を0.001(s),0.0001(s)の2種類とした。

推定された2層と4層の層間伝達減衰比と理論値をFigs.10,11に示す。図においては、実線で示したものが理論値、◇の印で示したものが推定値である。これらの図から、正弦波加振による手法では、細かいサンプリング時間間隔が必要であると判断できるが、1次モードの粘性減衰比が10%のモデルに0.0001[s]を用いても推定精度にはばらつきが存在している。さらに、対象モデルの減衰が小さい場合、推定精度はさらに悪化する可能性がある。したがって、精度良くするために可能な限りサンプリング時間間隔を細くする必要があるが、実在構造物への適用を考えると現実的な手法ではない。

4.2 ランダム加振による推定

4.1で行った、せん断力の逐次計算や伝達マトリクスの推定に正弦波加振時の変位応答を直接用いる手法では、推定精度やサンプリング時間間隔などの観点から現実的な手法とは言いがたい。これは、変位応答の層間の振幅差・位相差が微小となるような周波数領域では、振幅差・位相差への観測誤差の影響が大きく、これらの値が大きく影響する層間伝達減衰比の推定値が悪化する傾向にあるからである。

そこで、各層の変位応答 x_i の観測値を直接推定に用いるのではなく、得られた観測データからコンプライアンス $G(j2\pi f)$ を推定した上で、4.1に示した手順(i)における各周波数の x_i を決定する。コンプライアンスの推定においては、ランダム(ホワイトノイズ)加振とし、著者らが既報¹⁴⁾で用いたように、観測された入出力

Fig. 10 Local equivalent damping ratios estimated from sinusoidal input excitations with sampling time 0.001s for Model A

Fig. 11 Local equivalent damping ratios estimated from sinusoidal input excitations with sampling time 0.0001s for Model A

Fig. 12 Local equivalent damping ratios estimated from random input excitations with sampling time 0.01s for Model A

データを線形回帰モデルで表現し、最小二乗法によって推定する。

$$G(j2\pi f) = \frac{X(j2\pi f)}{F(j2\pi f)} \quad (21)$$

ここに、 $X(j2\pi f)$ は各層の変位応答、 $F(j2\pi f)$ は強制入力を表している。 $F(j2\pi f)$ は、たとえば AMD を利用した加振であれば、AMD の動きと AMD の質量が既知であるとみなすことができるので、上式から各周波数に対する各層の複素振幅が推定できる。したがって、この推定値をもとに手順 (ii) から (v) を行うことで、層間伝達減衰比を推定することができる。解析にするにあたっては、全ての層の加速度応答を出力とし、サンプリング時間間隔を 0.01(s)、データ個数 512、線形回帰モデルの次数を 10 次とした。得られた 2 層と 4 層の推定値と理論値との比較を Fig.12 に示す。この図において、実線で示したものが各層の理論値、◇の印で示したものが各層の推定値であり、推定値が理論値と高い精度で合致していることがわかる。

5 まとめ

建築構造システムの局所的な減衰に着目し、波動理論と伝達マトリクス法を適用することで、サブシステムの減衰を評価する「層間伝達減衰比」を提案した。この層間伝達減衰比は減衰の型によって周波数との関係が変化する指標であり、どのようなタイプの減衰が支配的であることを示す指標となりうる。また、パラメータ変動を想定した建物モデルに対して層間伝達減衰比を求めた結果から、変動の大小や変動箇所の数にかかわらず変動を感知できることを示した。

また、最上層でのホワイトノイズ加振による層間伝達減衰比の推定手法を示した。せん断力の逐次計算や伝達マトリクスの推定に正弦波加振時の変位応答を直接用いる手法では、サンプリング時間・推定精度における問題から、実用性にかけるきらいがある。そこで、ランダム加振の観測データからコンプライアンスを推定する手法を採用することで、サンプリング時間・推定精度における問題を解決した。

ただし、現状では、提案した層間伝達減衰比だけから、減衰の型が未知の状況で、減衰・剛性のどちら（あるいはその両方）に変化が生じたかを判断するのは必ずしも簡単ではない。しかし、層間伝達減衰比によりあらかじめどのようなタイプの減衰が支配的であることを特定すれば、補遺に示すように減衰・剛性の値を算出することができ、建築構造物の振動解析・制振システム設計の指標や構造ヘルスマonitoring への将来的な応用が可能になることが期待できる。

本研究は、早稲田大学特定課題研究 (99A-228) による補助を受けました。

補遺

減衰の型が既知の場合、それぞれの減衰の型に応じた式によって i 層の減衰 c_i と剛性 k_i が算出できる。

Kelvin 型の場合, 式 (5) より以下のようになる。

$$\begin{cases} k_i = \operatorname{Re} \left\{ \frac{Q_{i-1}^U}{x_i^U - x_{i-1}^U} \right\} \\ c_i = \operatorname{Im} \left\{ \frac{Q_{i-1}^U}{x_i^U - x_{i-1}^U} \right\} / \omega \end{cases} \quad (\text{A1})$$

ただし, $\operatorname{Re}\{\cdot\}, \operatorname{Im}\{\cdot\}$ は, それぞれ $\{\cdot\}$ の実部, 虚部を表す。

また, Maxwell 型の場合, 式 (9) より以下のようになる。

$$\begin{cases} k_i = \left[\operatorname{Re} \left\{ \frac{x_i^U - x_{i-1}^U}{Q_{i-1}^U} \right\} \right]^{-1} \\ c_i = \left[\omega \operatorname{Im} \left\{ \frac{x_i^U - x_{i-1}^U}{Q_{i-1}^U} \right\} \right]^{-1} \end{cases} \quad (\text{A2})$$

参考文献

- 1) 清水幹, 山田就康, 西谷章: 波動理論を用いた制震構造物の各層減衰比の同定, 日本建築学会大会学術講演論文集構造 II, pp.797-798, 1997
- 2) 山下大, 山田聖治, 西谷章: 各層ごとの減衰率評価による構造モニタリング, 日本建築学会大会学術講演論文集構造 II, pp.759-760, 1998
- 3) E.C. ベステル, F.A. レキー: マトリクス法による振動解析, プレイン図書出版, 1978
- 4) 山川宏, 大西哲也: 逐次伝達マトリクス法による大規模構造物の動的応答解析, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.48, No.429, pp.672-681, 1982
- 5) 長松昭男: モード解析入門, コロナ社, 1993
- 6) 背戸一登: 動吸振器による多自由度系の制振 (第 1 報, 動吸振器の設計理論), 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.50, No.458, pp.1962-1969, 1984
- 7) Doyle, J. F.: Wave Propagation in Structures: Spectral Analysis Using Fast Discrete Fourier Transforms, Second Edition, Springer-Verlag New York Inc., 1997
- 8) Flotow, A. H. von: Disturbance Propagation in Structural Networks, Journal of Sound and Vibration, Vol.106(3), pp.433-450, 1986
- 9) Mead, D.J.: A New Method of Analyzing Wave Propagation in Periodic Structures; Applications to Periodic Timoshenko Beams and Stiffened Plates, Journal of Sound and Vibration, Vol.104, pp.9-27, 1986
- 10) 徳岡辰雄: 波動論, サイエンス社, 1985
- 11) 田中信雄, 菊島義弘: 柔軟ばりの曲げ波制御に関する研究 (アクティブ・シンク法の提案), 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.56, No.522, pp.351-359, 1990
- 12) 福和伸夫, 勝倉裕, 中井正一, イグサタケル: 伝達行列法を用いた線状周期構造物の振動特性に関する研究-1 次元連続体と集中質点で構成される周期構造の波動伝播特性に関する基礎的考察, 日本建築学会構造系論文報告集, No.421, pp.101-108, 1991
- 13) 福和伸夫, 勝倉裕, 中井正一: 離散解析モデルにおける波動の分散性と最適整合質量比の提示, 日本建築学会構造系論文報告集, No.433, pp.83-90, 1992
- 14) 西谷章, 山田聖治: AMD を利用した制御対象の同定に基づく H^∞ 制振システム再設計, 日本建築学会構造系論文報告集, No.516, pp.65-71, 1999

(1999年10月10日原稿受理, 2000年2月17日採用決定)