弾性架構と粘弾性ダンパーをもつ多質点構造における 全体減衰系への置換法

－振動数に依存する制振構造の等価周期・等価減衰の評価法とその精度 その2－

GLOBAL DAMPING MODEL OF MULTI-MASS SYSTEM HAVING ELASTIC FRAME AND VISCOELASTIC DAMPER

－ Evaluation rule and its accuracy for equivalent period and damping of
frequency-dependent passive control systems Part 2－

大熊 潔*, 笠井和彦**

Kiyoshi OKUMA and Kazuhiko KASAI

This paper discusses accuracy of a global damping model for approximate analysis of the structural system with viscoelastic damper. The model utilizes equivalent period and damping ratio of the system specifically determined at the resonant state, and, unlike the original system, it possesses neither frequency-dependency nor localized damping mechanism. By using different ground motion records, accurate time-history analyses are conducted using numerous multi-mass systems with the dampers, and the results compared to those using their global damping models. With some modifications depending on the damper type, the global damping model is found to produce reasonably accurate results, thereby warranting its extended use for a conventional response spectrum analysis or simplified time history analysis.

Keywords : viscoelastic damper, frequency sensitivity, equivalent period, equivalent damping ratio, global damping model, multi-mass system

粘弾性ダンパー, 振動数依存性, 等価周期, 等価減衰定数, 全体減衰モデル, 多質点システム

1. はじめに

1.1 背景

構造物の等価な周期と減衰、および地震応答スペクトルに基づく応答予測法や構造設計法が、最近、様々に展開されている¹⁾。

特定の入力での応答のみを予測する時刻歴解析手法と対比し、スペクトルによる手法は、その過程において入力特性・構造特性・応答の間の広範な関連性を示すことができ、構造物の挙動の包括的な把握を促すという重要な利点をもつ。ただし、一般に解の精度は時刻歴解析より低く、その改善のためには、まず等価周期・減衰定数の評価精度をできるだけ向上させることが肝要である。

一方、近年適用例が増えた速度依存型の粘弾性ダンパーをもつ制振構造では、粘弾性ダンパーの振動数依存性により、実際には周期・減衰定数が地震の振動数成分により刻々と変化するため、これを考慮した新しい等価周期、減衰定数の概念と評価法が必要となる。

粘弾性体を用いた有限要素からなる全体減衰モデルの研究は1970年代から機械・航空工学で始まっている。Changらは建物の解析に初めてこれを採用したが1次周期からの特性値の算定に限られていた²⁾。筆者らは、粘弾性ダンパーの振動数依存性と高次モードの関連について多質点で初めて検証を行った³⁾。また、3次元振動モードを多数もち、かつ、短周期な構造でモードが近接している空間構造モデルを用いて実数モードでの適合状態を示した⁴⁾。その後、一質点系で各構成材の剛性比・等価周期・地震入力を多様化させた検証を行い、地震応答時は定常状態よりも減衰定数が低下することを示した修正法と建物が短周期である場合の修正法により高精度

なモデル作成方法を提案した⁵⁾。また、一質点系で粘弾性ダンパー部の剛性と粘性をKelvin体で近似したものをを用いて双方の振動数特性の違いを明らかにした^{6),7)}。しかし、筆者らの今までの検討でも、多質点系において幅広い周期帯、減衰定数の大小での包括的な検討が出来ていない状況である。

1.2 等価周期・等価減衰定数に基づく全体減衰モデル

速度依存型の代表例として、図1(a)に粘弾性ダンパーを有する多質点系粘弾性システムを示す。粘弾性システムは、フレーム剛性と並列に粘弾性ダンパーをもつ。図1(a)は局所減衰機構を示していることになるが、構造全体の等価な剛性と粘性係数、あるいは固有値

図1 多質点系粘弾性システム(a)と全体減衰モデル(b)

* 住友スリーエム(株)コンストラクションマーケット事業部

** 東京工業大学建築物理研究センター 教授・Ph. D.

Construction Markets Division, Sumitomo 3M Ltd.

Prof., Structural Engineering Research Center, Tokyo Institute of Technology, Ph. D.

としての等価周期と減衰定数で表すことは、図 1(b)のごとく全体減衰系に置換することを意味する。この様な「全体減衰モデル」は、速度依存型ダンパーに属する粘弾性ダンパーの制振効果を包括的に表しスペクトルによる応答予測や実数モードを用いたモード解析の適用も可能にするため簡易な応答評価や設計にとって有用である³⁾⁻⁵⁾。

1. 3 本論文の目的と概要

全体減衰モデルは、固有周期・減衰定数が外乱中に一定値と設定されるため、簡便な手法で解析できる。一方、1.1 節で述べた様に、局所に粘弾性ダンパーをもつ構造は振動数に依存するため、それらが外乱中に変化すると言える⁵⁾⁻⁸⁾。その程度は、建物階数(建物周期)、フレーム(架構)特性、各階のダンパー投入量(図 1(a))などの構成要素特性と地震動の振動数成分によることが、筆者らの一質点系での多様な検討によって述べられている⁵⁾⁻⁸⁾。本論文では多質点系においてこれらを包括的に議論し、モデル化の精度評価と修正を行う。

以上より、本論文の目的は、振動数依存性をもつ粘弾性ダンパーを用いた多質点制振構造に対し、等価周期・等価減衰定数の評価法を示し、それにより全体減衰モデルの精度を、広範囲な周期特性をもつ建物を使用し、かつ、フレームの層剛性分布・減衰特性・入力特性の多くの組み合わせを用いて検討することである。また、簡便性の追求の為、実数モードに限定して議論を進めることにする。

2 章では、粘弾性ダンパーの動的特性を説明し、3 章では、既往研究³⁾⁻⁴⁾における全体減衰モデルの精度を確認する。4 章では、3 章で確認された既往の全体減衰モデルの誤差の発生原因を探索し、修正全体減衰モデルを提案する。5 章では、修正全体減衰モデルの弾性架構における精度検証を行なう。6 章では、スペクトル法を用い、変位・ダンパー力・層せん断力の算出を行い、厳密解との精度確認を行なう。7 章では、追加検討として、やや塑性化する架構における精度を確認し、さらに、弾性架構において大きな粘弾性ダンパーを使用したときのダンパーの振動数依存性の影響についても言及する。

なお、粘弾性ダンパーは線形と仮定する。弾性架構の場合のモデル化に主眼をおき、架構がやや塑性化した場合も含めてその有効性を示す。塑性化や履歴形状の影響や複素モードの考慮などの幅広い検討は今後の課題とする。

2. 多質点システムでの粘弾性システムの動的特性

2. 1 粘弾性ダンパーの貯蔵剛性と損失係数

本論文では、楕円型履歴をもち剛性・粘性が振幅に依存しない、線形粘弾性ダンパーを対象とする。図 2 は粘弾性ダンパーに与えた円振動数 ω の正弦波変形 $u_{di}(t)$ と定常時におけるダンパー力 $F_{di}(t)$ を示すものである(i は階番号 $i=1\sim N$)。楕円の履歴曲線において最大変形 u_{d0i} に達した時の割線剛性をダンパー貯蔵(弾性)剛性 $K'_{di}(\omega)$ 、変形が 0 と u_{d0i} の時それぞれにおける力の比、つまり楕円の太さを表す特性値をダンパー損失係数 $\eta_{di}(\omega)$ と定義する。これ以後 (ω) は ω への依存性を示すことにする。また厳密解を得る評価法を式(1)で示す⁹⁾。

図2 粘弾性体ダンパーの履歴曲線

$$K'_{di}(\omega) = G \frac{1+ab\omega^{2\alpha}+(a+b)\omega^\alpha \cos(\alpha\pi/2)}{1+a^2\omega^{2\alpha}+2a\omega^\alpha \cos(\alpha\pi/2)} \frac{A_{si}}{d_i}$$

$$\eta_{di}(\omega) = \frac{(-a+b)\omega^\alpha \sin(\alpha\pi/2)}{1+ab\omega^{2\alpha}+(a+b)\omega^\alpha \cos(\alpha\pi/2)} \quad (1a,b)$$

ここで、 $A_{si}=i$ 階の粘弾性体せん断面積、 $d_i=i$ 階の粘弾性体厚さである。本論文ではアクリル系材料(住友 3M 製 ISD111)を用いた粘弾性ダンパーとしている(付録 1 参照)。

2. 2 粘弾性システムの貯蔵剛性と損失係数

前頁の図 1a に示す多質点制振構造において、ダンパーとブレース、フレームは直列、並列に配置されているため、これら構成部材の水平方向剛性を $K'_{di}(\omega)$ 、 K_{bi} 、 K_{fi} とする^{5),6)}。断りが無い限りブレース、フレームは弾性とし、純せん断型の多質点システムとしている。ダンパー・ブレースの直列結合体を付加系と名付ける(図 1a)。付加系(added component)は振動数依存し、その貯蔵剛性、損失係数を $K'_{ai}(\omega)$ 、 $\eta_{ai}(\omega)$ と呼び、式(2a-c)で表す⁵⁻⁷⁾。

$$K'_{ai}(\omega) = \frac{K'_{di}(\omega)K_{bi}}{K'_{di}(\omega)+K_{bi}/\Gamma_{bi}(\omega)}, \quad \eta_{ai}(\omega) = \frac{\eta_{di}(\omega)}{1+[1+\eta_{di}^2(\omega)]K'_{di}(\omega)/K_{bi}}$$

$$\Gamma_{bi}(\omega) = 1 + \frac{\eta_{di}^2(\omega)}{1+K_{bi}/K'_{di}(\omega)} \quad (2a-c)$$

システム(図 1a)は付加系とフレームの並列結合であり、その貯蔵剛性、損失係数 $K'(\omega)$ 、 $\eta(\omega)$ は、式(3a,b)として表される⁵⁻⁷⁾。

$$K'(\omega) = K_{fi} + K'_{ai}(\omega), \quad \eta(\omega) = \eta_{ai}(\omega) / (1 + K_{fi}/K'_{ai}(\omega)) \quad (3a, b)$$

2. 3 粘弾性システムの等価周期

図 1a のシステム基礎部が円振動数 ω の正弦波加速度を受けるとする。多質点粘弾性システムをマトリックスで表現し、システムの固有円振動数を $\omega_j(\omega)$ とすると式(4)^{3),4)}

$$[K'(\omega) - \{\omega_j(\omega)\}^2 M] \phi_j = 0 \quad (4)$$

ここで $\omega = \omega_j(\omega)$ を共振状態と定義し、共振時の $\omega_j(\omega)$ の値を ω_j として、これを「共振振動数 ω_j 」と呼ぶ。また、 $2\pi/\omega_j$ (sec)を「共振周期 T_j 」と呼ぶことにする。本論ではこの共振周期 T_j を等価周期とする。

式(4)の ϕ_j は弾性の制振構造の j 次の共振振動数とモードベクトルであり($j=1, 2, 3, \dots$)、 M は制振構造の質量マトリックスである。

この ω_j の計算方法は式(5)により求め、 (q) は収斂計算の番号である($q=1, 2, \dots$)。数回の繰り返し計算により解を求めることが出来る(式 5)。

$$[K'(\omega_j)^{(q)} - \{\omega_j^{(q+1)}\}^2 M] \phi_j^{(q+1)} = 0 \quad (5)$$

3. 既往の全体減衰モデルの作成方法と精度検証

3. 1 一次の等価周期(等価振動数)を使用した全体減衰モデルの作成

剛性マトリックスを 1 次共振振動数 ω_1 の等価振動数(等価周期 $2\pi/\omega_1$)として定義すると式(6)の様に表せる^{3),4)}

$$[K'(\omega_1) - \{\omega_j\}^2 M] \phi_j = 0, \quad K'(\omega_1) = K_f + K'_a(\omega_1) \quad (6a, b)$$

式(6b)の剛性マトリックス K' は ω_1 を使用し固定値として、式(6a)より高次の共振振動数 ω_j と高次モードベクトル ϕ_j を算出する。

共振時の減衰定数 h_j はモード歪エネルギー法により式(7)の様に表すことが出来る。また、右辺は $\phi_j^T M \phi_j = 1$ を用いて $\phi_j^T (K'(\omega_1) \phi_j) = \phi_j^T (\omega_j^2 M \phi_j) = \omega_j^2$ となる。また、 $\Delta\phi_{ij}$ は層間のモード差を表す。

$$h_j = \frac{\pi \sum_{i=1}^N \eta_{ai}(\omega_i) K'_{ai}(\omega_i) \{\Delta\phi_{ji}\}^2}{2\pi \phi_j^T K'(\omega_i) \phi_j} = \frac{\sum_{i=1}^N \eta_{ai}(\omega_i) K'_{ai}(\omega_i) \{\Delta\phi_{ji}\}^2}{2\{\omega_j\}^2} \quad (7)$$

また、構造減衰を h_0 と表すと粘弾性ダンパーがもたらす付加減衰定数 h_j との和がシステム全体の減衰定数 h_{eqj} となる(付録2 参照)⁵⁾。
 $h_{eqj} = h_0 + 0.92 \cdot h_j$ (8)

3.2 全体減衰モデルの精度検討に用いる地震波と制振架構

日本免震構造協会 (JSSI) により設計された現実的な 4, 10, 20 階の架構を用いる¹²⁾。表1に架構の1次固有周期 T_{f1} と各建物高さ H を示す。さらに、フレーム特性について S 型、L 型、U 型、JSSI 型の 4 種架構を考える(付録3)。よって計 12 種の架構 [= (3 種高さ) × (4 種フレーム特性)] を用いる。架構の粘性は、1 次、2 次の固有周期 T_{f1} , T_{f2} で構造減衰 $h_0 = 2\%$ を満たす Rayleigh 減衰型とした。

表1 非制振架構の
1次固有周期(T_{f1})と建物高さ(H)

	T_{f1} (sec)	H (m)
4階	0.640	18.0
10階	2.012	42.0
20階	3.704	82.0

これらの多質点制振構造に、スペクトル特性は共通だが位相特性の異なる 5 種の模擬地震波を用いた時刻歴解析で検証する。模擬地

震波は、八戸 EW, El Centro NS, Taft N111E, JMA 神戸 NS の位相特性をもつものと BCJ-L2 波の計 5 種であり、これらの擬似速度スペクトル S_{pv} は中・長周期領域でほぼ一定であり $S_{pv}(h=0.02) = 140 \text{ cm/s}$ となるよう入力レベルを設定している¹¹⁾。表2に示す粘弾性システムの設計値は、日本免震構造協会が提案している性能曲線を用いて最大層間変形角が 1/125 になるように EXCEL を用いて計算したものである¹³⁾。今回の設計は文献12の様に、設計時点でモードの影響を考慮しない為、2 回目の算定値を使用していない(1 回目の算定値を使用している)。尚、 $K_{bi}/K_{fi}=10$ としている。粘弾性システムの時刻歴解析には、筆者らの厳密モデルを用いた⁹⁾。これは式(1)の振動数依存性をもつため、温度 20°C において少なくとも 0.01Hz~300 Hz で精確であり(付録1)、従ってその数値積分結果を厳密解つまり粘弾性システムの実際の応答とみなすことにする。全体減衰モデルは図1(b)の様にモード時刻歴解析を行い、重合せにより得た。

3.3 既往の全体減衰モデルの精度

ここでは、4 階、10 階、20 階建物の粘弾性システムと既往の全体減衰モデルの双方について時刻歴応答解析から得た最大層間変形角の結果を示す(紙面の関係で図は層間変形角と記す)。図3は4階建物に BCJ-L2 を入力したものである。4 層建物は 1 次の等価周期、等価減衰定数を使用した一般化変位から 1 次の固有モードのみ用いて各層の変形を算出している(後述 4.2 節)。よって、高次モードの一般化変位の重ね合わせは行っていない。しかし、建物特性によらず最大層間変形角は非常に良い一致をしていることが図3から解る。図4は、4 種の 4 階建物に 5 地震波を入力した最大層間変形角の平均値と標準偏差である。図4より、4 階建物の最大層間変形角は地震波の違いおよび建物特性に関わらず非常に良い一致を示していることが解る。図5は 10 階建物に BCJ-L2 を入力したものである。10 層建物は 3 次モードまでの等価周期、等価減衰定数を使用した一般化変位から重ね合わせを行っている(後述 4.2 節)。概ね建物特性によらず最大層間変形角は良い一致をしていることが解るが、図6よ

表2 設計された粘弾性システムの等価周期と等価減衰定数

	$K'_{di}(\omega_i)/K_{fi}$	T_{fi} (sec)	h_{eqj}
4階	S型	0.63, 0.24, 0.14	0.04, 0.04, 0.04
	L型	0.60, 0.22, 0.13	0.08, 0.05, 0.05
	U型	0.61, 0.25, 0.15	0.05, 0.07, 0.08
	JSSI	0.62, 0.23, 0.14	0.04, 0.04, 0.04
10階	S型	2.00, 0.71, 0.43	0.08, 0.08, 0.09
	L型	1.78, 0.66, 0.40	0.11, 0.07, 0.09
	U型	1.83, 0.72, 0.44	0.08, 0.11, 0.11
	JSSI	1.83, 0.70, 0.43	0.08, 0.07, 0.08
20階	S型	3.38, 1.30, 0.80, 0.58, 0.45	0.08, 0.08, 0.08, 0.09, 0.10
	L型	3.32, 1.22, 0.74, 0.53, 0.41	0.09, 0.06, 0.07, 0.08, 0.09
	U型	3.40, 1.34, 0.83, 0.60, 0.47	0.07, 0.09, 0.10, 0.11, 0.12
	JSSI	3.38, 1.29, 0.79, 0.57, 0.45	0.08, 0.07, 0.08, 0.09, 0.09

図3 粘弾性システムと全体減衰モデルの層間変形角 (4 階建物 BCJ-L2 入力)

図5 粘弾性システムと全体減衰モデルの層間変形角 (10 階建物 BCJ-L2 入力)

図4 粘弾性システムに対する全体減衰モデルの層間変形角の比 (左から S, JSSI, L, U 型 4 階建物 5 地震波入力)

図6 粘弾性システムに対する全体減衰モデルの層間変形角の比 (左から S, JSSI, L, U 型 10 階建物 5 地震波入力)

図7 粘弾性システムと全体減衰モデルの層間変形角
(20階建物 BCI-L2入力)

図8 粘弾性システムに対する全体減衰モデルの層間変形角の比
(左からS, JSSI, L, U型 20階建物 5地震波入力)

り5地震波の解析精度に±20%程度の誤差が確認された為、4章で修正を検討することにする。

同様に、図7は20階建物にBCI-L2を入力したものであり、こちらは5次モードまでの等価周期、等価減衰定数を使用した一般化変位から重ね合わせを行っている(後述4.2節)。建物特性にもよるが、最大層間変形角が上部階で多大な誤差を生じているものがある。また、図8より5地震波での解析精度で40%程度の誤差を生じているものがある為、10階建物と同様に4章で修正を検討することにする。

4. 既往の全体減衰モデルの誤差の原因探求と修正法の提案

4.1 粘弾性システムのモード分解の試み

前節で、10階、20階建物の既往の全体減衰モデルが誤差を生じていることが解った。4章では、モデル設定時の誤差の原因を確認することで、既往の全体減衰モデルの修正方法を検討する。

粘弾性ダンパーは振動数に依存し、かつ、粘弾性システムも振動数に依存することは既に述べたが、ここでは3.1節で記した剛性マトリックス $\mathbf{K}'(\omega_1)$ により求めたモードベクトル ϕ_j で粘弾性システムの変位ベクトル $\mathbf{u}$ が構成されていると仮定し、粘弾性システムのモード分解を試みる。一般化変位を $\mathbf{q}$ とすると式(9a)のように表せる。

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} \beta_1 \phi_{11} & \beta_2 \phi_{12} & \cdots & \beta_j \phi_{1j} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \beta_1 \phi_{i1} & \beta_2 \phi_{i2} & \cdots & \beta_j \phi_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1(t) \\ q_2(t) \\ \vdots \\ q_j(t) \end{bmatrix} \quad \beta_j = \frac{\sum_{i=1,N} m_i \phi_{i,j}}{\sum_{i=1,N} m_i \phi_{i,j}^2} \quad (9a, b)$$

式(9a)の右辺第1項は刺激関数 Φ を表しており、式(9b)の β_j は刺激係数である。刺激関数 Φ の逆行列を作成することで、一般化変位 $\mathbf{q}$ を求めることが出来る。

$$\mathbf{q} = \Phi^{-1} \mathbf{u} \quad (10)$$

図9は、S型20階の粘弾性システムにBCI-L2を入力したものを式(10)から求めた1次から5次モードまでの一般化変位 $\Phi^{-1}\{\mathbf{u}_i(t)\}$ の時刻歴と全体減衰モデルの一般化変位である。双方を比較すると

粘弾性システムの一般化変位の周期と全体減衰モデルの周期は良く一致していることが解った。この結果、粘弾性システムで仮定した剛性マトリックス $\mathbf{K}'(\omega_1)$ から求めた高次の ω_j, ϕ_j の精度が良好であることが応答波形からも確認出来た。しかし、2次モード以上において全体減衰モデルの一般化変位の最大値は粘弾性システムより大きく、これは、システム全体の等価減衰定数 $h_{eq,j}$ (式(7))が過少であったと考えられる為、次節以降で更なる確認を行う。

図9 粘弾性システムの応答変位から求めた一般化変位 $\Phi^{-1}\{\mathbf{u}_i(t)\}$ と全体減衰モデルの一般化変位の比較 (S型20階, BCI-L2入力)

4.2 高次モードと1次モードの変形比率

今まで等価周期は、1次の共振振動数を使用し、全体減衰モデルの剛性マトリックス $\mathbf{K}'(\omega_1)$ を作成し、これを固定して高次の共振振動数 ω_j と高次モードベクトル ϕ_j を算定した。この精度が良好であることは、4.1節の応答波形からも確認出来た(図9)。しかし、3章で確認された様に、4階を超える建物で全体減衰モデルの応答結果に誤差が生じていることが解った。また、誤差は特に上層階で顕著であった。よって、本節では、1次モードに対する高次モードの影響を確認することにする。

まず、ダンパー付きシステムの全体減衰モデルを作成し、それぞれのモード次数におけるモード変形を求める。具体的には、本論の流れの様に1次共振周期を等価周期とした剛性マトリックス $\mathbf{K}'(\omega_1)$ を作成し(式(6b))、固有値解析を行い各次数の共振振動数 ω_j と固有モードベクトル ϕ_j を求める。その後、式(11)より解析対象の地震波の変位応答スペクトル S_d よりj次モード(今回はj=5以下の値になる)での各階の層間変形の絶対値 Δu_{ij} を求める。

$$|\Delta u_{ij}| = |\beta_j \cdot \Delta \phi_j \cdot S_d(T_j, h_{eq,j})| \quad (i: \text{階番号 } 1 \sim N, j: \text{モード次数}) \quad (11)$$

次に、1次モード変形における式(11)の値を基準として、式(12)を用いて高次モード変形の比を求める。

$$\lambda_{ij} = \frac{|\Delta u_{ij}|}{|\Delta u_{i1}|} \quad (j=1 \text{ のときは } \lambda_{i1}=1 \text{ となる}) \quad (12)$$

4階建物は3章でも全体減衰モデルの精度が良好であったが、図10左より高次モードの影響が少ないことが確認出来、修正の必要が無いことがこの図からも説明出来る。図10中央と右の10,20階建物では、高次モードの変形が無視出来ない階があることが解る。全体を通して、高次

モードの変形が1次モードとの比率において0.5倍を超えるモード次数は無視出来ると言える。よって、10階建物は3次モードまで、20階建物は5次モードまでを考慮し精度検証を行うことにする(後述5.3節)。

図10 1次モードに対する高次モードの層間変形の比率 λ_{ij} (S型 左から4階、10階、20階建物 BCI-L2 入力)

4.3 全体減衰モデルの修正方法

4.2節で対象建物の階数によって、検討に必要なモード次数の決定方法を述べた。4.1節では、剛性マトリックス $K'(\omega_1)$ から求めた高次の ω_j, ϕ_j の精度が良好であることを示した。しかし、全体減衰モデルの一般化変位が粘弾性システムに対して大きく、システム全体の等価減衰定数 h_{eqj} (式(7)) が過少であったと考えられる。よって、式(7)の修正を提案する。

式(13)と式(7)の違いは、分子の付加系損失係数 η_{ai} と付加系貯蔵剛性 K_{ai} へモード次数に合わせた ω_j を代入することである。

$$h_j^* = \frac{\pi \sum_{i=1}^N \eta_{ai}(\omega_j) K'_{ai}(\omega_j) \{\Delta\phi_{ij}\}^2}{2\pi \phi_j^T K'(\omega_1) \phi_j} = \frac{\sum_{i=1}^N \eta_{ai}(\omega_j) K'_{ai}(\omega_j) \{\Delta\phi_{ij}\}^2}{2\{\omega_j\}^2} \quad (13)$$

$$h_{eqj}^* = h_0 + 0.92 \cdot h_j^* \quad (14)$$

この理由として、粘弾性システムの中で粘弾性ダンパーが減衰部材としての寄与率が大きいため、粘弾性ダンパーの振動数依存性を考慮した等価減衰定数 h_{eqj}^* を設定しないと全体減衰モデルの精度が確保出来ないことになる(式(14)は付録2参照)。7.2節で後述するが、大きな粘弾性ダンパーを入れたシステムにおいても粘弾性ダンパーが振動時にシステム全体の剛性変化に大きな影響を与えないことを確認している。

5. 修正全体モデルの精度検証

5.1 修正全体減衰モデルの緒元

表3に修正全体減衰モデルの等価周期と等価減衰定数を示す。修正は、4.2節で述べた様に2次モード以上の高次モードを用いる10階と20階建物のみ修正を行う。式(13),(14)から計算された等価減衰定数 h_{eqj}^* の値が、表2に比べて表3で増加していることが解り、20階建物の5次モードでは2倍程度の違いになっていることが解る。

表3 修正全体減衰モデルの等価周期と等価減衰定数

		$K'_{di}(\omega_1)/K_{fi}$	T_j (sec)	h_{eqj}^*
10階	S型	0.20	1.84, 0.71, 0.43	0.08, 0.13, 0.13
	L型	0 ~ 0.35	1.78, 0.66, 0.40	0.11, 0.11, 0.11
	U型	0 ~ 0.88	1.83, 0.72, 0.44	0.08, 0.17, 0.18
	JSSI	0 ~ 0.31	1.83, 0.70, 0.43	0.08, 0.11, 0.11
20階	S型	0.20	3.38, 1.30, 0.80, 0.58, 0.45	0.08, 0.12, 0.16, 0.19, 0.22
	L型	0 ~ 0.38	3.32, 1.22, 0.74, 0.53, 0.41	0.09, 0.09, 0.13, 0.16, 0.19
	U型	0 ~ 0.79	3.40, 1.34, 0.83, 0.60, 0.47	0.07, 0.15, 0.19, 0.23, 0.27
	JSSI	0 ~ 0.48	3.38, 1.29, 0.79, 0.57, 0.45	0.08, 0.11, 0.14, 0.18, 0.20

5.2 20階建物のモード分解による精度確認

ここでは、表3の緒元を用いて4.1節で説明したモード分解を行うことにより、各次数における修正全体減衰モデルの精度を確認する。

図11は、S型20層建物を確認したものであるが、図9と比較して2次モード以上で修正全体減衰モデルの一般化変位が非常に良く改善されていることが解る。よって、4.3節で述べた等価減衰定数 h_{eqj}^* の修正により、全体減衰モデルが修正出来たと言える。

S型建物は、表3の $K'_{di}(\omega_1)/K_{fi}$ の値が一定、すなわち、フレーム剛性に比例的に粘弾性ダンパー剛性が付与されており、比例減衰となっている。これに対してL型とU型は、フレーム剛性を補う形で粘弾性ダンパーの剛性を利用しているため、フレーム剛性に対して非比例的なダンパー配置となっており、非比例減衰となっている。本論では、実数モードを用いた全体減衰モデルについて述べているので、以下で非比例減衰に対する修正全体減衰モデルの精度について確認する。

図12は、L型20階建物にBCI-L2を入力した結果であるが、1次から3次モードまでは、一般化変位の最大変形の精度が良いことを確認した。4次、5次モードの最大変位は誤差を生じているが、応答周期は1次から5次まで適合状況が非常に良いことが確認出来た。

図11 粘弾性システムの応答変位から求めた一般化変位 $\Phi^{-1}\{u_i(t)\}$ と修正全体減衰モデルの一般化変位の比較 (S型20階、BCI-L2 入力)

図12 粘弾性システムの応答変位から求めた一般化変位 $\Phi^{-1}\{u_i(t)\}$ と修正全体減衰モデルの一般化変位の比較 (L型20階、BCI-L2 入力)

次に図 13 であるが、こちらは U 型 20 階建物に BCJ-L2 を入力した結果である。こちらも 1 次から 3 次モードまでは、一般化変位の最大変位の精度が良いことを確認した。また、L 型と同様 4 次、5 次モードの最大変位は誤差を生じているが、応答周期の適合状況が良いことが確認出来た。5.3 節でも示すが、L 型、U 型の様な非比例減衰の建物でも修正全体減衰モデルを用いて、変位を精度良く計算が出来ることが解った。

図 13 粘弾性システムの応答変位から求めた一般化変位 $\Phi^{-1}\{u_i(t)\}$ と修正全体減衰モデルの一般化変位の比較 (U 型 20 階、BCJ-L2 入力)

5.3 10階建物、20階建物の精度検証

ここでは、10 階、20 階建物でモード時刻歴解析を行った修正全体減衰モデルの最大層間変形角の結果を示す。

図 14 は 10 階建物の修正全体減衰モデルに BCJ-L2 を入力したものである。3.3 節の図 5 と比較すると建物性状に影響されず非常に良い精度であることが確認出来た。また、図 15 は 5 地震波で解析精度を確認したものであるが、3.3 節の図 6 と比較すると上層階における

図 14 粘弾性システムと修正全体減衰モデルの層間変形角 (10 階建物 BCJ-L2 入力)

図 15 粘弾性システムに対する修正全体減衰モデルの層間変形角の比 (左から S, JSSI, L, U 型 10 階建物 5 地震波入力)

標準偏差が改善されていることが解る。同様に、図 16 は 20 階建物の修正全体減衰モデルに BCJ-L2 を入力したものである。3.3 節の図 7 と比較するとこちらも建物性状に影響されずに良く改善出来ていることが確認出来、特に 10 階以上の上層階が著しく改善出来ている。また、図 17 は 5 地震波で解析精度を確認したものであるが、3.3 節の図 8 と比較するとこちらも上層階における平均値および標準偏差の双方が改善されていることが解る。この結果より、10 階建物は 3 次モードまでを使用し、20 階建物は 5 次モードまで使用(4.2 節)した修正全体減衰モデルは高精度な解析結果をもたらすことを確認した。

また、モード時刻歴からの精度の良いダンパー力 $F_d (=F_a)$ の算定方法は文献 5 の式(4)を用いて 1 次の共振振動数 ω_1 使用した付加系剛性 $K'_{ai}(\omega_1)$ 、付加系粘性係数 $C'_{ai}(\omega_1)$ を算出し $F_{ai}(t) = K'_{ai}(\omega_1) \Delta u_i(t) + C'_{ai}(\omega_1) \dot{\Delta u}_i(t)$ より求める。また、層せん断力は、 $F_i(t) = F_{ai}(t) + K_{fi} \Delta u_i(t)$ で求められ、ダンパー力、層せん断力も良好な精度であることを確認している。 $\Delta u_i(t)$ は層間変形、 $\dot{\Delta u}_i(t)$ は層間速度の時刻歴を表している。

図 16 粘弾性システムと修正全体減衰モデルの層間変形角 (20 階建物 BCJ-L2 入力)

図 17 粘弾性システムに対する修正全体減衰モデルの層間変形角の比 (左から S, JSSI, L, U 型 20 階建物 5 地震波入力)

6. スペクトル法を用いた精度検証

前節までは、モード時刻歴解析により修正全体減衰モデルの変位応答の精度を検証してきた。ここでは、スペクトル法を用いて 10 階、20 階建物の応答精度の確認を行うことにする。紙面の都合上 4 階建物の結果は割愛するが、スペクトル法を用いても精度は良好であった。

6.1 スペクトル法による応答変位の検証

応答変位であるが、式(15)に示す様に層間変形の最大値 $\Delta u_{i \max}$ を粘弾性システムと比較するため、変位応答スペクトル S_d を用い SRSS (二乗和平方根)により算出する。ちなみに今回の対象建物は、モードが近接していないので SRSS と CQC 法の精度はほぼ同等であった。

$$\Delta u_{i \max} = \sqrt{\sum_{j=1}^N (\beta_j \cdot \Delta \phi_{i,j} \cdot S_d(T_j, h_{eq,j}^*))^2} \quad (15)$$

図 18 は 10 階建物の修正全体減衰モデルに BCJ-L2 を入力した S_d から算出した最大層間変形角である。5.3 節の図 14 と比較すると建物性状に影響されず、ほぼ同等な結果であることが確認出来た。また、図

19 は 5 地震波で解析精度を確認したものであるが、5.3 節の図 15 と比較すると SRSS の評価値は高次モードの影響を受ける低層および上層階において標準偏差が増加したが、精度は±15%程度であった。

同様に、図 20 は 20 階建物の修正全体減衰モデルに BCJ-L2 を入力した S_d から算出した最大層間変形角である。5.3 節の図 16 と比較すると低層および上層階において最大層間変形角の SRSS の評価値の精度が劣っている。図 21 に模擬 Taft N111E を入力した S_d から算出した最大層間変形角を示している。SRSS の評価値は、Taft 波などの既存波からの模擬地震波では高い精度であったが BCJ-L2 が特異な傾向を示した。これは一般化変位の 1 次と 2 次が、45.5s 付近で双方最大値でない極大値を取り、モード時刻歴ではこれが足し合わせ

図18 スペクトル法による修正全体減衰モデルの層間変形角
(10 階建物 BCJ-L2 入力)

図19 スペクトル法による修正全体減衰モデルの層間変形角の比
(左から S, JSSI, L, U 型 10 階建物 5 地震波入力)

図20 スペクトル法による修正全体減衰モデルの層間変形角
(20 階建物 BCJ-L2 入力)

図21 スペクトル法による修正全体減衰モデルの層間変形角
(20 階建物 模擬 Taft N111E 入力)

られることで特に上層階の解析結果が良好になっていた。しかし、SRSS は同時刻の計算ではないので、これ以降、20 階建物は BCJ-L2 を省いた模擬地震の 4 地震波、さらに実地震波 3 波(El Centro NS 1.5 倍, JMA 神戸 NS, Taft N111E 2.8 倍)合計 7 波で議論を進めることにする。5 模擬地震波の

図22 実地震波でのスペクトル法の層間変形角 (S 型 20 階建物)

SRSS の結果は S_{pv} を一定に設定している為、入力地震波は違うが図 20 と図 21 の SRSS の結果は概ね同様である。しかし、粘弾性システムの最大層間変形角は入力地震波で違いが生じることがこれらの図から解る。また、図 22 に実地震波の El Centro NS 1.5 倍と JMA 神戸 NS の S 型 20 層建物における最大層間変形角を示すが SRSS の評価値が実地震波でも精度が良く算定出来ていることが解る。

図 23 は BCJ-L2 を除いた 7 地震波で解析精度を確認したものである。5.3 節の図 17 と比較するとこちらも高次モードの影響を受ける低層および上層階において平均値および標準偏差の双方の変動が増加しているが、精度は±20%程度を確保している。これによって、精度の良いスペクトル法による変位解析手法を提案することが出来た。

図23 スペクトル法による修正全体減衰モデルの層間変形角の比
(左から S, JSSI, L, U 型 20 階建物 7 地震波入力)

6.2 スペクトル法によるダンパー力、層せん断力の検証

当節では精度の良いダンパー力と層せん断力の算定方法について検討する。まず、ダンパー力について考えるが前節で層間変形は SRSS より算出した。ダンパー力も各モード次数の和として考えることにする。ダンパー力の一般式は式(16)で表される⁵⁾。また式(16)は、 j 次の共振振動数 ω_j を用いたときのダンパー力になる。

$$F_{di,j} = F_{ai,j} = \sqrt{1 + \eta_{ai}(\omega_j)^2} K'_{ai}(\omega_j) \Delta u_{i,j \max} \quad (16)$$

各モードのダンパー力の最大値

は、同時刻とは限らないので、ここでも SRSS を用いて各層のダンパー力の最大値を計算する(式(17))。

$$F_{di \max} = \sqrt{\sum_{j=1}^N (F_{di,j})^2} \quad (17)$$

図 24 に上記で説明した内容でダンパー力を計算した結果を示す。10 階、20 階建物ともに、式(17)で計算されたダンパー力は粘弾性

図24 ダンパー力の計算
(左図 10 階、右図 20 階 S 型建物 模擬 Taft 波入力)

ダンパー力に近い値を取っていることが解る。この結果から、スペクトル法におけるダンパー力は式(17)を用いて各モードからのダンパー力の重畳をしたものから算出できることが解った。

次に、層せん断力 V_i であるが、一般式は式(18a)と表され⁵⁾、層せん断力の最大値も SRSS を用いて式(18b)と表せる。

$$V_{ij} = \sqrt{1 + \eta_i(\omega_j)^2} K'_{fi}(\omega_j) \Delta u_{ij \max}, \quad V_{i \max} = \sqrt{\sum_{j=1}^N (V_{ij})^2} \quad (18a,b)$$

層せん断力はフレーム剛性 K_{fi} と付加系剛性 K'_{ai} の並列系で成り立っている。よって、フレーム(架構)の分担力が加わる為、粘弾性ダンパーの振動数依存性による荷重変動の影響が低くなる。例えば S 型 20 階建物の場合、粘弾性ダンパーとフレームの剛性比を 1 次で $K'_{di}(\omega_1)/K_{fi} = 0.2$ で設定しているが、5 次では粘弾性ダンパーの振動数依存性により式(1a)から $K'_{di}(\omega_5)$ が約 5 倍になることにより $K'_{di}(\omega_5)/K_{fi}$ は約 1.0 となる。しかし、図 25 の模擬 Taft 波の一般化変位の最大値は、1 次で 46cm で 5 次で 2.3cm と 0.05 倍であるので、粘弾性ダンパーの振動数依存性による荷重変動の影響は低い。よって、各次の考慮をする必要が無いと言える。

従って、層せん断力は簡便化の為、1 次の共振振動数 ω_1 を用いた式(19)により求めることを提案する。

$$V_{i \max} = \sqrt{1 + \eta_i(\omega_1)^2} K'_{fi}(\omega_1) \Delta u_{i \max} \quad (19)$$

図 25 に式(18)と式(19)から求めた層せん断力を示す。10 階、20 階建物ともに、式(19)で計算された層せん断力は粘弾性システムの層せん断力に近い値を取っていることが解る。この結果から、層せん断力は式(19)を用いて良好な精度で算出できることが解った。

紙面の都合上、ダンパー力と層せん断力の検討地震波による平均値と標準偏差の図は割愛するが、ダンパー力は SRSS で求めた最大層間変形角の精度と概ね同様で 10 階建物で $\pm 15\%$ 程度であった。20 階建物では特に上層部で精度が悪化し最大 $\pm 30\%$ 程度であり、中間層以下であれば $\pm 20\%$ 程度の精度であった。層せん断力は概ねダンパー力と傾向は一致するが 10, 20 階建物の双方においてダンパー力よりも高精度であった。これは上述の様に粘弾性ダンパーの荷重寄与率が低くなる為である。

7. 追加検討項目

7.1 弾塑性フレームを有するシステムに関する考察

この節では、実数モードを使用する本論文において弾性時のモード形状を使用し続けて、やや塑性化する弾塑性フレームを有するシステムにおいて修正全体減衰モデル(4.3 節)の精度を確認することを目的とする。粘弾性ダンパーを有する 10 階、20 階で各階にダンパーが配置されている S 型フレームを用いて、3.2 節で述べた BCJ-L2 を含む 5 種の模擬地震波と実地震波 2 波(EI Centro NS 1.5 倍, Taft N111E 2.8 倍)それぞれにおいて塑性率が約 2 となるフレーム耐力を設定した(全 14 フレーム)。理由は実務設計に有益な情報を提供する為である。尚、フレームの 2 次剛性比 $p=0.2$ のバイリニア型とした。図 26(a)(b)に 10 階と 20 階の粘弾性システムで 7 地震波による塑性率の平均値を示す。全 14 フレームを用いた粘弾性システムは、どれも塑性率

$\mu=2$ 程度になることを示した。

修正全体減衰モデルの作成方法であるが、文献 15 では 1 次モードのみ塑性化後モードを作成し、2 次以降の高次モードは弾性モードを使用し続けた場合の精度について述べている。本論では、塑性率 2 程度に対して言及するのでモードベクトルは弾性時のものを使用し続け、1 次モードの一般化変位のみフレーム塑性時のエネルギー

吸収による減衰定数を式(20a)により付加する¹¹⁾。よって 1 次モードのトータル減衰定数は式(20b)として表される。今回の対象が塑性率 2 程度で検討している為、塑性による 1 次周期の伸びは考慮せず T_1 を使用し続けた。2 次モード以上は塑性を考慮せず、周期は表 3 の弾性時周期 T_j を用い、減衰定数も表 3(式(14))の値を使用し続けた。

$$h_{PL1} = \frac{2}{\mu \pi p} \ln \frac{(1-p+p\mu)}{\mu^p} (\mu > 1), \quad h_{total1} = h_{eq1}^* + h_{PL1} \quad (20a,b)$$

図 27 は S 型 20 階建物へ実地震波の EI Centro NS 1.5 倍で塑性率が 2 程度になる様に設定した粘弾性システムを用いて、3 次までモード分解したものと修正全体減衰モデルの一般化変位を比較したものである。1 次の一般化変位には、架構が弾性時の粘弾性システムの時刻歴も載せているが、フレームの塑性化によるエネルギー吸収を減衰定数として増加させた今回の提案は(図 27 の太い破線)は一般化変位の最大値が架構弾性時より小さくなり、やや塑性化するフレームをもつ粘弾性システムの一般化変位の最大値を模擬出来ていることが解る。また、塑性率 2 程度であれば、今回の提案の様に弾性周期を使用し

図 27 やや塑性化するフレームを持つ粘弾性システムの応答変位から求めた一般化変位 $\Phi^{-1}\{u_i(t)\}$ と修正全体減衰モデルの一般化変位の比較 (S 型 20 階建物, EI Centro NS 1.5 倍入力)

図 28 やや塑性化するフレームを持つ粘弾性システムと修正全体減衰モデルの層間変形角(a)と 7 地震波での層間変形角の比(b) (S 型 20 階建物)

続けても周期のズレが少ないことも確認出来た。2 次以上の修正全体減衰モデルは弾性時の周期と減衰定数を用いているが、こちらも粘弾性システムの一般化変位の最大値を模擬出来ていると言える。

図 28(a)は 20 階建物の最大層間変形角であり、階毎の分布を確認している。図 28(b)は 7 地震波から得た層間変形の比を示している。図 28(b)から、モード時刻歴は±20%以内の精度であり、SRSS の評価値の精度は 20 階を除けば±25%以内であった。同様に図 29(a)は 10 階建物の最大層間変形角であり、図 29(b)は 7 地震波から得た層間変形の比を示している。図 29(b)からモード時刻歴は±20%以内の精度であり SRSS の評価値の精度も±20%程度であった。

10 階、20 階の結果より、入力によらず塑性率 2 程度のフレームを有する場合、修正全体減衰モデルの解は、弾性時よりも精度は劣るが、モード時刻歴を用いれば±20%程度の解を得られることが解った。

図 29 やや塑性化するフレームを持つ粘弾性システムと修正全体減衰モデルの層間変形角(a)と 7 地震波での層間変形角の比(b) (S 型 10 階建物)

7. 2 大きな粘弾性ダンパーを有する弾性フレームに関する考察

この節では、弾性フレームに大きな粘弾性ダンパーを有する場合を検討する。粘弾性ダンパーは振動数依存性をもち、剛性と粘性が変化する。4.4 節で等価減衰定数をモード次数に合わせて粘弾性ダンパーの剛性と粘性の変化を取り入れる修正を提案した。しかし、そこで使用した高次の ω_j, ϕ_j は、一次の共振振動数 ω_1 を用いて作成した剛性マトリックス $K'(\omega_1)$ を使用し続けている。従って、当節では、大きく振動数の変化の影響を受けると考えられる大きな粘弾性ダンパーを有するシステムを用いて、固定されている剛性マトリックス

図 30 大きなダンパーをもつ粘弾性システムの応答変位から求めた $\Phi^{-1}\{u_i(t)\}$ と修正全体減衰モデルの一般化変位の比較 (S 型 20 階、BCJ-L2 入力)

$K'(\omega_1)$ から求めた高次の ω_j, ϕ_j 精度の確認、および、高次の ω_j, ϕ_j を用いて計算した等価減衰定数の精度を確認することを目的とする。

粘弾性ダンパー剛性と弾性フレームの剛性比は $K_{d1}/K_{f1}=2$ として今までの検討の 10 倍としている。粘弾性ダンパーの量は 3.2 節で説明した手法で設計している。今までの検討の結果より、粘弾性ダンパーの影響が解り易い、剛性比例型の S 型フレーム、剛性非比例型の L 型と U 型を用いて、高次の ω_j, ϕ_j の精度と等価減衰定数の精度を確認する為、モード時刻歴にて検証を行う。尚、当節のみ $K_{d1}/K_{f1}=\infty$ として粘弾性ダンパーの振動数依存性の影響を受けやすいシステムとしている。

まず、4.1 節で説明したモード分解を行うことにより、各次数における修正全体減衰モデルの精度を確認する。図 30 は、S 型 20 層建物に BCJ-L2 を入力したものである。全体的に粘弾性システムと修正全体減衰モデルの応答周期が非常に良く一致していることが確認出来、これにより、固定されている剛性マトリックス $K'(\omega_1)$ から求めた高次の ω_j, ϕ_j の精度が良好であることが確認出来た。最大変形において 3 次モード以降で誤差を生じている。この理由として文献 5 と 7 でも示したが、減衰定数が高い為、粘弾性システムも修正全体減衰モデルも入力地震波に同調して振動していることを FFT による振動数分析から確認した。これによって図 30 の 3 次以降の応答周期は、修正全体減衰モデルの設定周期よりも長いことが確認出来、かつ、粘弾性システムの応答周期とも合う理由となる。図 31 で示す S,L,U 型の最大層間変形角の比からも精度が良好であることが解る。これは、4.2 節の式(12)でも確認したが、高減衰の為、3 次以上の高次モードの寄与率が低いことによるものである。よって、粘弾性ダンパーの量は本論で検討した少量から大量まで、影響を受けずに修正全体減衰モデルが適用可能であることが解った。

また、スペクトル法による最大層間変形角の精度確認も行ったが、6.1 節で示した精度とほぼ同等であることも確認している。

図 31 層間変形角の比 (S 型 20 階 BCJ-L2 入力)

8. おわりに

線形粘弾性ダンパーをもつ多質点制振構造の等価周期・等価減衰定数を与え、実数モードによる全体減衰モデルの作成法を示した。架構特性、階数、等価周期、入力地震動などを様々想定し、モデルの精度を検討した。以下が結論である。

- (1) 多質点の粘弾性システムは、粘弾性ダンパーが振動依存性を有する為、高次モードの影響を受ける。10 階以上の建物の場合は、既往の等価減衰定数では誤差を生じることが解った。従って全体減衰モデルを修正することを検討した。また、4 階程度の短周期建物の場合、既往の全体減衰モデルは良好な精度であった。
- (2) 何次モードまでの影響を考慮するべきかを検討する為に、高次モードと 1 次モードの層間変形の比率を利用する方法を提案した。今回の検討では 4 階建物は 1 次のみ、10 階建物は 3 次まで、20 階建物は 5 次モードまでの考慮が必要であった。また、必要な高次モードの影響を加味して粘弾性ダンパーの振動数依存性を考慮した等価減衰定数の算定が必要であることを示し、これを用いた修正全体減衰モデルの作成方法を提案した。

- (3) 剛性マトリックスは1次モードの粘弾性ダンパーの特性を使用し続ける。よって、修正全体減衰モデルは、等価減衰定数のみを変更するものである。この精度が確保されていることを確認する為に、粘弾性システムの応答変位から一般化変位を評価する方法をモード時刻歴解析から提案した。それと修正全体減衰モデルの一般化変位の時刻歴波形が応答周期、最大変形ともに良く一致することを示した。また、修正全体減衰モデルのモード時刻歴解析は、弾性時の20階建物までの最大層間変形角を高精度に計算することが可能である。
- (4) フレームが弾性的場合、修正全体減衰モデルを用いたスペクトル法での精度検証を行った。モード時刻歴と比べるとやや精度は低下するが、±20%程度の精度は確保していた。簡便で有益なスペクトル解析への応用の可能性を示した。
- (5) フレームが弾塑性の場合、最大塑性率が2程度であれば、弾性モードを使用し続けてもモード時刻歴を用いれば±20%程度の解が得られることを示した。
- (6) 大きな粘弾性ダンパーを用いた弾性フレームにおいて修正全体減衰モデルの精度を確認したが、粘弾性ダンパーが大きくても初期に設定した剛性マトリックスから計算された固有振動数、固有モードは使用可能であり、応答精度も確保されていた。よって今回検討したダンパー量では適用可能であることを確認した。

参考文献:

- 例えば 笠井和彦, 伊藤浩資, 渡辺厚: 等価線形化手法による一質点弾塑性構造の最大応答予測法, 日本建築学会構造系論文集, 571号, pp.53-62, 2003.9
- Chang, K. C., Soong, T. T., Lai, M. L., and Nielsen, E. J. "Development of a design procedure for structures with added viscoelastic dampers." Proc., ATC 17-1, Applied Technology Council., 1993.
- 笠井和彦, 大熊潔: 粘弾性ダンパー制振構造の近似解析法(その1, 2) 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2 分冊, pp. 1002-1004, 1999.9
- 笠井和彦, 元結正次郎, 大木洋司: 水平地震動を受ける空間構造への粘弾性ダンパーの適用と応答性状に関する一考察, 日本建築学会構造系論文集, 第561号, pp.125-135, 2002.11
- 笠井和彦, 大熊潔: 振動数に依存する制振構造の等価周期・等価減衰の評価法とその精度(弾性架構と粘弾性ダンパーやオイルダンパーをもつ一質点構造における全体減衰率への置換法), 日本建築学会構造系論文集, 第580号, pp.51-59, 2004.6
- 笠井和彦, 大熊潔: Kelvin 体による線形粘弾性ダンパー簡易モデル化と精度に関する考察(その1: 弾性・弾塑性フレームを持つ一質点制振構造の場合), 日本建築学会構造系論文集, 550号, pp.71-78, 2001.12
- 笠井和彦, 大熊潔: 線形粘弾性ダンパーの Kelvin モデル化手法における精度改良に関する考察(外乱振動数成分の粘弾性体特性への影響を付加的に考慮したモデル) 構造工学論文集 Vol.48B, pp.545-553, 2002.3
- 笠井和彦, 岩崎啓介: 様々な形式の制振構造における自由度縮約法と水平バネ系への変換法, 日本建築学会構造系論文集, 605号, pp.37-46, 2006.7
- 笠井和彦, 寺本道彦, 大熊潔, 所健: 粘弾性体の温度・振動数・振幅依存を考慮した構成則(その1: 線形領域における温度・振動数依存のモデル化), 日本建築学会構造系論文集, 543号, pp.77-86, 2001.5
- 笠井和彦, 所健: 粘弾性体の温度・振動数・振幅依存を考慮した構成則(その2 温度上昇および歪・歪速度がもたらす非線形性のモデル化), 日本建築学会構造系論文集, 第561号, pp.55-63, 2002.11
- 笠井和彦, 伊藤浩資: 弾塑性ダンパーの剛性・降伏力・塑性率の調節による制振構造の応答制御手法, 日本建築学会構造系論文集, 第595号, pp.45-55, 2005.9
- 笠井和彦, 湊直生, 川鍋佳史: 粘弾性ダンパーの等価剛性の調節による制振構造の応答制御手法, 日本建築学会構造系論文集, 第610号, pp.75-83, 2006.12
- パッシブ制振構造 設計・施工マニュアル 第2版 第2刷, 社団法人 日本免震構造協会(JSSI) 2007.7
- 笠井和彦, 川鍋佳史: 粘性減衰・履歴減衰を併用する構造における動的特性と地震最大応答の等価線形予測法, 日本建築学会構造系論文集, 第

591号, pp.43-51, 2005.5

- 15) 大場麻弥, 森保宏: 地震動のスペクトル特性と部材耐力の不確定性を考慮した鋼構造骨組の最大変位応答および簡易応答評価手法に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第628号, pp.859-866, 2008.6

付録1 粘弾性体の評価式(式1)について

参考文献9で述べられているが、式(1)における粘弾性体評価式の係数は、アクリル系粘弾性体(住友3M ISD111)を用いた場合、基準温度20°Cで $G=3.92$ (N/cm²), $a_{ref}=5.6 \times 10^{-5}$, $b_{ref}=2.10$, $\alpha=0.558$ となる。これらを式(1)に代入して得た $K_d'(\omega)$, $\eta_d(\omega)$ 曲線も図A1に示す。式(1)は、少なくとも0.01~300Hzの範囲で、実験結果とよく一致していることから、式(1)を本粘弾性体の20°Cでの実際の振動数依存性と定義する。

図A1 アクリル系粘弾性体の振動数依存性と式(1)の評価式の精度

付録2 粘弾性システムのランダム応答時の減衰定数について

参考文献5で述べているが、粘弾性システムの減衰定数の定式化は正弦波入力による定常応答において定義されている(式(7), 式(13))。図A2は構造減衰の無い1質点粘弾性システムを0.1秒刻みで周期0.1~3.0秒の30システムを作成し、かつ、粘弾性ダンパーの使用量により減衰定数の違う4タイプ、入力地震波4波の計480ケースの全てにおいて、ランダム応答時の等価減衰定数の傾向を統計的に検討したものである。すなわち、粘弾性システムに対し、最大変位が同値になるような1質点全体減衰モデルの等価減衰定数を、逆算的に求めたものである。この逐次収斂的に求めた等価減衰定数を図A2の縦軸に示している。よって、図A2より、ランダム応答時の減衰定数は、定常状態での減衰定数と比べて0.92倍になっていることが解る。

図A2 最大変位を適合させる1質点全体減衰モデルの減衰評価

付録3 4種の架構特性について

参考文献12でも示されているが、本論中で用いたS型、L型、U型、JSSI型について解説する。図A3に1例として10階建物の4種の架構特性を示す。S型は A_i 分布に基づく層せん断力分布 Q_i に対して、架構剛性 K_{fi} が比例的なものであり、ダンパーの配置としては剛性比例型減衰となる。L型は下層で架構剛性 K_{fi} が足りないものとなる。逆にU型は上層で架構剛性 K_{fi} が足りないものとなる。JSSI型は日本免震構造協会が設計された架構剛性 K_{fi} が現実的なものとなっている。L型、U型、JSSI型のダンパー配置は、剛性非比例型減衰となっていることが特徴となる。

図A3 10階建物の4種架構特性(左からS型, L型, U型, JSSI型)

訂正) 文献5)の式(10)中の分母の符号が誤っていたのでここで訂正する。

$$\text{誤: } T_g = 0.05 T_g + (0.25 T_g - 0.05 T_g) / (1 - e^{-6-40 \varepsilon_n})$$

$$\text{正: } T_g = 0.05 T_g + (0.25 T_g - 0.05 T_g) / (1 + e^{-6-40 \varepsilon_n})$$

(2009年7月10日原稿受理, 2009年10月27日採用決定)