

シーソー機構と粘性マスダンパーを組み合わせた 新しい制振構法

New passive control system using seesaw system with viscous mass dampers

新井 雄大*¹, 川島 学*¹, 平田 裕一*¹

YUDAI ARAI, MANABU KAWASHIMA, YUICHI HIRATA

細いロッドを層跨ぎに配してシーソー機構部にダンパーを集約設置した制振構法は、意匠計画を妨げにくい特徴があるが、小断面のロッドが相対的に柔な支持部材となり、ダンパーの減衰効果が低下する側面を同時にもつ。そこで、シーソー機構と粘性マスダンパーを組み合わせて、ロッドを柔バネ要素として同調効果を発揮し減衰性能を増幅できる新たな制振構法を提案する。本報では、提案構法の同調効果が得られるパラメータ設定の手法を示し、簡易モデルを用いた数値例題へ適用する。実固有値解析に基づくモデル縮約により諸元を設定し、提案構法は応答の増幅を効果的に抑えられることを確認した。
キーワード：シーソー機構、同調粘性マスダンパー、層跨ぎ、等価縮約モデル、刺激関数

The seesaw energy dissipation system offers advantages in structural design due to its use of slender rods and cross-floor installation. However, it suffers from reduced damper performance because of the low stiffness of the rods. By integrating this system with viscous mass dampers, the overall damping effect can be enhanced through a tuning mechanism. This paper demonstrates that the proposed system effectively suppresses response amplification by setting parameters using model reduction based on real eigenvalue analysis.

Keywords: Seesaw system, Tuned viscous mass damper, Cross-floor placement, Equivalent reduced model, Participation vector

1. はじめに

制振構造は、ダンパーによる振動エネルギーの吸収により主架構の損傷を抑制し、サステナブルな社会の実現に貢献できる技術である。シーソー機構、シーソー機構端部に設置されたダンパー、およびリンク材としてのロッドから構成された制振構法¹⁾(以降「本構法」、第2章で後述)は、架構の水平力をロッドやシーソー機構を介して鉛直方向に設置されたダンパーへと伝達させる。本構法は、ダンパーの集約配置が可能だけでなく、チェビシェフの近似直線運動機構に基づいた仕組み²⁾により小断面のロッドを層跨ぎで配することが容易という特徴を有する。これにより意匠計画への影響を小さくする効果やダンパー集約配置による設置台数の削減効果が期待でき、実大規模の振動実験^{1),3)}や実建物への実装^{4),5)}が報告されている。しかしながら、この構法の特徴であるロッドの小断面化は、ダンパーと直列関係である支持部材を相対的に柔な要素にすることと等しく、通常ダンパーを利用する場合は、ダンパーに実効的に生じる変形が低減され減衰効果が損なわれるという側面を併せもつ。

そこで、支持剛性を有効に活用するシステムである同調粘性マスダンパー(TVMD: Tuned Viscous Mass Damper)⁶⁾との組み合わせが打開策となり得る。TVMDは、慣性接続要素⁷⁾と粘性減衰要素を並列配置した機構である粘性マスダンパーに柔支持部材を直列に配置した数値モデルで表現でき、主架構の特性に応じたパラメータのチューニングにより同調効果が得られ、エネルギー吸収効果を増幅できるシステムである。これまでに簡易設計式の提

*¹ 技術研究所 技術開発推進部

案(例えば6,8)や実建物への適用(例えば9,10)がなされており、制振効果の高さが広く認知されている技術といえる。

本構法に粘性マスダンパーを組み込むと、ロッド剛性がTVMDの柔バネ要素としての役割を担うことができ、減衰効果を増大させる機能が期待できる。さらに、これまでのTVMDの柔支持部材は座屈の問題から単純な軸力材で実現することが難しく特殊な装置(例えば9,10)や大型な部材(例えば11,12)などの工夫がなされることが多かったが、ロッドに緊張力をあらかじめ導入し不安定現象である座屈を発生させないことで、TVMDとして同調させるために必要なロッド剛性が安定して得られ、軸力材として支持部材を構成できる。したがって、特殊な装置を必要とせずに比較的スレンダーな部材で柔支持剛性を実現できると考えられる。

本報では、この考えに基づき、シーソー機構と粘性マスダンパーを組み合わせた構法(以降、「同調型本構法」と呼称)を提案し、パラメータを設定する手法を示し、数値例題へ適用した結果を報告する。第2章では本構法の概要や力学特性に関する式の整理を行い、主架構1質点系のTVMDの最適同調式に適用できる等価縮約モデルへの変換する手法を示す。第3章では数値例題として、第2章で示した手法を主架構3質点系の簡易モデルに適用し、応答倍率を確認することで手法の特徴ならびに提案構法の効果を確認する。

2. 提案する制振構法の概要とパラメータの設定手法

(1) シーソー機構と粘性マスダンパーを組み合わせた構法の構成と解析モデル

本構法は、下部がピン接合され回転方向に自由度をもつシーソー機構部、シーソー両端部に設置されたダンパー、およびシーソー端部から架構へと架け渡されるロッドから構成されている。図-1(a)に示すように架構が水平変形したときにロッドを介してシーソー機構部がピンを中心に回転し、シーソー端部の鉛直変位の分だけダンパーに鉛直変形を生じさせ、ダンパーがエネルギー吸収効果を発揮する仕組みである。当システムは複数層を跨いでロッドを配することにより、複数層の変位を1箇所のシーソー機構部に集約できるため、少ないダンパー台数で制振効果を得られるという特徴がある。

a) シーソー機構部における荷重および変形の関係

本構法を付加した架構が水平変形を生じたときの変形図を図-1(a)に、そのときのシーソー機構部に発生する力の関係を図-1(b)に示す。なお、図中の F_0 は荷重、 δ_0 は変形であり、右下添え字 D はダンパー、 R はロッド、添え字なしは本構法の全体の諸元を示す。また、 $(\hat{\cdot})$ (ハットつき)は各装置の1本あたりの軸方向の荷重・変形を意味し、 (\cdot) (ハットなし)は水平方向1箇所へ集約置換した荷重・変形(図-2にて後述)を意味する。本報で用いる変数には、これらの表記のルールを適用する。ここでは、田川ら¹³⁾により示されたシーソー機構部の回転が微小領域における荷重と変形の関係を整理する。なお、左右のロッドには十分な初期引張軸力が導入されており、圧縮力が生じずに2本の対が常に軸剛性を保持するとみなす。

図-1(a)に示すロッドの軸方向および水平方向の荷重 \hat{F}_R 、 F_R と変形 $\hat{\delta}_R$ 、 δ_R の関係は、2本の対を考慮して、

$$F_R = 2 \cos \alpha \hat{F}_R, \quad \delta_R = \hat{\delta}_R / \cos \alpha \tag{1),(2)}$$

で表せる。ここに、 α : 微小変形時のロッドと水平面のなす角である。式(1),(2)より、

$$F_R / \delta_R = 2 \cos^2 \alpha \cdot \hat{F}_R / \hat{\delta}_R \tag{3}$$

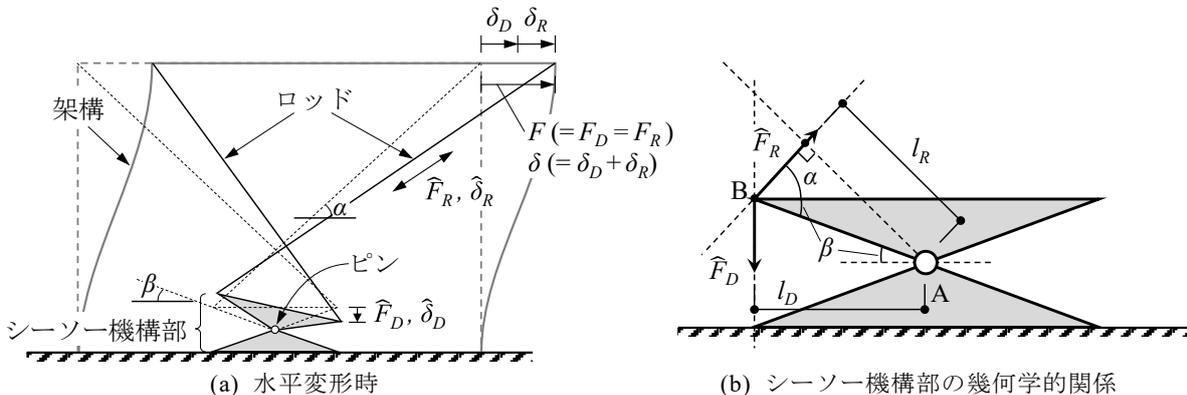


図-1 シーソー機構部における荷重と変形

が成り立ち、ロッド水平方向の剛性は F_R/δ_R と等価であることから、 $\cos^2 \alpha$ により軸方向の諸元から変換できる。一方、図-1(b)のシーソー機構部の幾何学的関係に着目すると、同図に示す l_D および l_R は、ピン A とシーソー端部 B 間の長さ \overline{AB} 、 α および \overline{AB} と水平面のなす角 β を用いて次式のように表せる。

$$l_D = \overline{AB} \cos \beta, \quad l_R = \overline{AB} \sin(\alpha + \beta) \tag{4),(5)}$$

式(4),(5)および A におけるモーメントのつり合い ($\widehat{F}_D l_D = \widehat{F}_R l_R$) より、ダンパーの軸方向および水平方向の荷重 \widehat{F}_D 、 F_D の関係は、式(1)と同じく 2 本の対を考慮すると、

$$F_D = \frac{2 \cos \alpha \cos \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \widehat{F}_D \tag{6}$$

と表せる。なお、ここではロッドとダンパーの水平方向の荷重は直列の関係により等しい ($F_D = F_R$) ことを利用した。軸方向を水平方向へと置換する係数 $f_s = \cos \alpha \cos \beta / \sin(\alpha + \beta)$ を定義すると式(6)は次式に書き換えられる。

$$F_D = 2f_s \widehat{F}_D \tag{7}$$

また、ダンパーの軸方向および水平方向の変形 δ_D 、 δ_D の関係は、文献 13)により次式のように導出されている。

$$\delta_D = \widehat{\delta}_D / f_s \tag{8}$$

式(7),(8)の関係を利用すると、以下の式が成り立つ。なお、 $\dot{(\)}$ 、 $\ddot{(\)}$ はそれぞれ 1 階、2 階微分を意味する。

$$F_D / \delta_D = 2f_s^2 \cdot \widehat{F}_D / \widehat{\delta}_D, \quad F_D / \ddot{\delta}_D = 2f_s^2 \cdot \widehat{F}_D / \ddot{\widehat{\delta}}_D \tag{9}$$

この関係は、次項にて示す本構法に粘性マスダンパーを組み込んだ構法における諸元の水平方向変換の際に用いる。式(9)より、 f_s^2 はダンパー諸元（減衰係数や慣性質量など）を軸方向から水平方向へと変換する係数として扱うことができる。

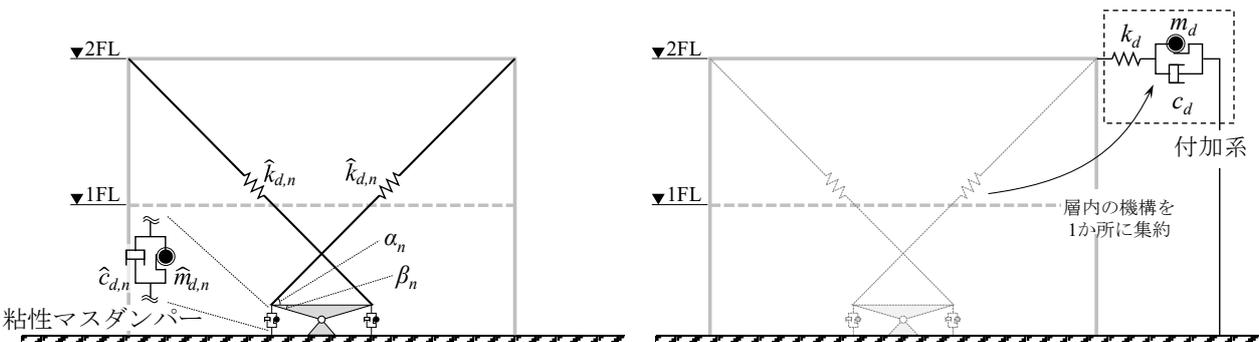
b) 本構法に粘性マスダンパーを組み込んだ同調型制振構法

ここまでで整理した関係を用いて本構法を軸方向部材で表現する数理モデル（図-2(a)）から層内の機構を 1 つに集約した水平方向のモデルへと置き換えると図-2(b)のように表せる。なお、図-2(a)中の n は、層内に同様の制振装置が複数基あることを想定し、 n 番目の諸元であることを意味する。

図-2(b)のように装置を集約すると、ロッドはダンパーに対して直列に接続されたバネとして作用することが明快となる。そこで、同図のようにダンパー部にダッシュポットと慣性接続要素の並列系でモデル化される粘性マスダンパーを設置すれば、ロッドが粘性マスダンパーに直列接続された支持部材としての役割をもち、ダンパーを含めた本構法が TVMD と同じ数理モデル⁶⁾となる（図-2(b)）。すなわち、ロッドとダンパーのパラメータを同調効果が発揮されるようにチューニングすることで、ロッドの剛性を TVMD の柔バネ要素として利用し、高いエネルギー吸収効果が見込める。

以降では TVMD としての効果をもつ同調型本構法全体を水平方向に置換した 3 要素モデルを図-2(b)に示すように付加系と称す。ロッドの水平方向の剛性を k_d 、粘性マスダンパーの減衰係数を c_d 、慣性質量を m_d としたときの付加系のモデル化は、前項の式の整理を踏まえて、次式のように軸方向の諸元から算出できる。

$$k_d = F_R / \delta_R = \sum_n 2\widehat{k}_{d,n} \cos^2 \alpha_n, \quad c_d = F_D / \dot{\delta}_D = \sum_n 2\widehat{c}_{d,n} f_{s,n}^2, \quad m_d = F_D / \ddot{\delta}_D = \sum_n 2\widehat{m}_{d,n} f_{s,n}^2 \tag{10),(11),(12)}$$



(a) 部材方向モデル (b) 水平方向置換モデル
 図-2 同調型本構法を付加した架構の数理モデル (2 層目に設置した場合)

(2) 定点理論に基づく最適同調設計式

齊藤らの既往手法⁶⁾により提案された最適同調式は、主架構を非減衰系の1質点系とみなしたモデルに対して定点理論に基づき、最適同調および最適減衰を満たす条件を定式化したものである。主架構が多質点系でモデル化された場合には主架構を1質点系へと縮約し、さらに層跨ぎ設置をする場合は付加系に生じる変形や荷重を適切に評価することで既往手法⁶⁾の適用が可能である。

図-3(a)は、主架構をN質点の多質点系モデルとみなし、任意の層間に層跨ぎ形式で付加系を配置したときの全体系のモデルである。同図の m, c, k および u はそれぞれ主架構の質量、減衰係数、剛性および基礎からの相対変位であり右下添え字は層番号である。また、 u_a は付加系に生じる変形、 u_d は付加系の中のダッシュポット部に生じる変形である。この多質点系モデルを、既往式⁶⁾が適用できるように変換したモデルが図-3(b)であり、任意のモードを選択して等価モデルへの縮約が可能である。以降ではこのモデルを等価縮約モデルと呼び、各諸元の変数の右下添え字の末尾に eq を付け足して記す。なお、図-3(b)中の ψ は次節にて後述する付加系における等価縮約モデルへの変換係数である。

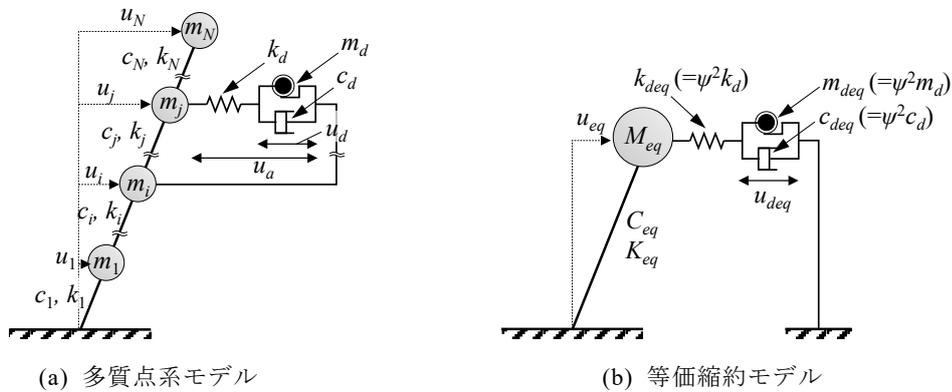


図-3 同調型本構法を付加した架構の質点系モデル

等価縮約モデルの各諸元の計算方法は次節で記すこととし、ここでは等価縮約モデルにおける付加系の最適同調条件および最適減衰を満足する式を示す。前述したように、非減衰系の1質点系モデルに同調粘性マスダンパーを付加した際の最適設計式は、定点理論に基づき変位応答倍率の2つの定点の高さが等しく、かつ定点において極大値となるようにするという条件から、次式のように付加系の最適同調振動数比 β^{opt} (最適同調条件) および減衰定数 h_d^{opt} (最適減衰) が提案されている⁶⁾ ($0 \leq \mu_{eq} \leq 0.25$)。

$$\beta^{opt} = \frac{1 - \sqrt{1 - 4\mu_{eq}}}{2\mu_{eq}}, \quad h_d^{opt} = \frac{\sqrt{3(1 - \sqrt{1 - 4\mu_{eq}})}}{4} \tag{13),(14}$$

$$\mu_{eq} = \frac{m_{deq}}{M_{eq}}, \quad \beta^{opt} = \frac{\omega_d}{\omega_1} = \sqrt{\frac{k_d}{m_d} \cdot \frac{M_{eq}}{K_{eq}}}, \quad h_d^{opt} = \frac{c_d}{2\sqrt{m_d k_d}} \tag{15),(16),(17}$$

ここに、 ω_d : 付加系の固有円振動数 ($= \sqrt{k_d/m_d}$)、 ω_1 : 主架構の1次固有円振動数であり、1次モード以外の同調を考える際には ω_1 を任意の次数の固有円振動数へと読み替えて計算する。

(3) 等価縮約モデルへの変換手法

図-3(a)に示した付加系を有する多質点系モデルを運動方程式に基づき、図-3(b)の等価モデルへと縮約する手法を示す。多質点系の主架構の質量、粘性減衰係数、および剛性マトリクスは座標変換マトリクス \mathbf{T} (式(23))を用いて次式のように表せる。なお、 $(\cdot)^T$ は転置、 $\text{diag}(\cdot)$ は対角行列を表す。

$$\mathbf{M} = \text{diag}(m_1, \dots, m_N) \tag{18}$$

$$\mathbf{C} = \mathbf{T}^T \mathbf{C}_0 \mathbf{T}, \quad \mathbf{C}_0 = \text{diag}(c_1, \dots, c_N) \tag{19), (20}$$

$$\mathbf{K} = \mathbf{T}^T \mathbf{K}_0 \mathbf{T}, \quad \mathbf{K}_0 = \text{diag}(k_1, \dots, k_N) \quad (21), (22)$$

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & & & \\ -1 & 1 & & \\ & \ddots & \ddots & \\ & & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

本報では、同調型本構法は高さ方向に1箇所のみ設置することとし、設置個所に応じて変位ベクトルから付加系に入力される変形 u_a に変換する役割をもつ係数ベクトル \mathbf{I} (式(28)参照) を次式のように定義する。

$$\mathbf{I} = \{I_1, \dots, I_p, \dots, I_N\}^T, \quad I_p = \begin{cases} 0 & \text{for } p \neq i, p \neq j \\ -1 & \text{for } p = i \\ 1 & \text{for } p = j \end{cases} \quad (24), (25)$$

なお、 $i \in [0, N)$ は付加系の下端側が接続する層番号、 $j \in (i, N]$ は上端側の層番号である。なお、 $i = 0$ は付加系の下端が基礎に接続されている場合である。 \mathbf{I} の具体的な設定例は後述図-4を参照されたい。付加系のせん断力を F_a とおき、変位ベクトル \mathbf{u} ($= \{u_1, \dots, u_N\}^T$)、入力加速度 \ddot{u}_g 、および入力の影響係数ベクトル \mathbf{r} ($= \{1, \dots, 1\}^T$) を用いると、主架構の運動方程式は、

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} + \mathbf{I}F_a = -\mathbf{M}\mathbf{r}\ddot{u}_g \quad (26)$$

と表せ、 F_a は付加系内の力の釣り合いより式(27)のように表せる。式(27)中の u_a は式(28)で表現される。

$$F_a = m_d \ddot{u}_d + c_d \dot{u}_d = k_d (u_a - u_d), \quad u_a = \mathbf{I}^T \mathbf{u} \quad (27), (28)$$

以上より、図-3(a)の付加系を含む多質点系モデルの系全体の運動方程式は次のように表せる。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} & 0 \\ 0 & m_d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{u}} \\ \ddot{u}_d \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C} & 0 \\ 0 & c_d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{u}} \\ \dot{u}_d \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K} + \mathbf{I}^T k_d & -\mathbf{I} k_d \\ -\mathbf{I}^T k_d & k_d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u} \\ u_d \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} \mathbf{M} & 0 \\ 0 & m_d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{r} \\ 0 \end{Bmatrix} \ddot{u}_g \quad (29)$$

式(29)の $N+1$ 自由度の運動方程式から、任意のモードを対象として図-3(b)に示す2自由度系の運動方程式を導出する。文献14)を参考に、主架構のみの実固有値解析より得られる刺激関数を利用した式変換を以下で行う。 s 次モードの等価モデルへと縮約することとし、 s 次モードの運動方程式を考える。これ以降では、 s 次モードの諸元には左下添え字 s を付けて表記する。一般に局所的に減衰性能を付加すると全体系が非比例減衰系となるが、ここでは付加系の荷重 F_a による主架構のモード形の変化が無視できる程度であると仮定する。 s 次の変位ベクトル ${}_s \mathbf{u}$ は、実固有値解析により得られる諸元を用いて、 ${}_s \mathbf{u} = {}_s \beta_s \phi_s u_{eq}$ (${}_s \beta_s$: s 次刺激係数、 ${}_s \phi_s$: s 次固有モード ($= \{\phi_{s1}, \dots, \phi_{sN}\}^T$)、 ${}_s u_{eq}$: s 次等価変位) と表せることより、式(28)は s 次モードでは、

$${}_s u_a = \mathbf{I}^T {}_s \beta_s \phi_s u_{eq} \quad (30)$$

と書き換えられる。変形比率を維持して等価モデルへと縮約するため、式(30)と同様に ${}_s u_d = \mathbf{I}^T {}_s \beta_s \phi_s u_{deq}$ も導ける。以上の関係を踏まえ、式(29)の第1, 2式のそれぞれの両辺の各項に左から ${}_s \beta_s \phi_s^T$ 、 $\mathbf{I}^T {}_s \beta_s \phi_s$ を乗じると、

$$\begin{bmatrix} {}_s \beta_s^2 \phi_s^T \mathbf{M}_s \phi_s & 0 \\ 0 & (\mathbf{I}^T {}_s \beta_s \phi_s)^2 m_d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} {}_s \ddot{u}_{eq} \\ {}_s \ddot{u}_{deq} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} {}_s \beta_s^2 \phi_s^T \mathbf{C}_s \phi_s & 0 \\ 0 & (\mathbf{I}^T {}_s \beta_s \phi_s)^2 c_d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} {}_s \dot{u}_{eq} \\ {}_s \dot{u}_{deq} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} {}_s \beta_s^2 \phi_s^T \mathbf{K}_s \phi_s + (\mathbf{I}^T {}_s \beta_s \phi_s)^2 k_d & -(\mathbf{I}^T {}_s \beta_s \phi_s)^2 k_d \\ -(\mathbf{I}^T {}_s \beta_s \phi_s)^2 k_d & (\mathbf{I}^T {}_s \beta_s \phi_s)^2 k_d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} {}_s u_{eq} \\ {}_s u_{deq} \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} {}_s \beta_s \phi_s^T \mathbf{M} \mathbf{r} & 0 \\ 0 & (\mathbf{I}^T {}_s \beta_s \phi_s)^2 m_d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix} \ddot{u}_g \quad (31)$$

が成り立つ。1次モードに同調させることを前提とし、 $s = 1$ として以降では s を省略して表記する。また、 $\psi = \mathbf{I}^T \beta \phi$ の定義を導入する。 ψ は付加系の設置端部における刺激関数の差の意味をもつ。式(31)は ψ を用いると、

$$\begin{bmatrix} M_{eq} & 0 \\ 0 & \psi^2 m_d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_{eq} \\ \ddot{u}_{deq} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{eq} & 0 \\ 0 & \psi^2 c_d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_{eq} \\ \dot{u}_{deq} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{eq} + \psi^2 k_d & -\psi^2 k_d \\ -\psi^2 k_d & \psi^2 k_d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_{eq} \\ u_{deq} \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} M_{eq} & 0 \\ 0 & \psi^2 m_d \end{bmatrix} \mathbf{r}' \ddot{u}_g \quad (32)$$

へと変換できる。ここに、 M_{eq} : 等価質量 ($= \beta^2 \phi^T \mathbf{M} \phi$)、 C_{eq} : 等価粘性減衰係数 ($= \beta^2 \phi^T \mathbf{C} \phi$)、 K_{eq} : 等価剛性 ($= \beta^2 \phi^T \mathbf{K} \phi$)、および \mathbf{r}' : 影響係数ベクトル ($= \{1, 0\}^T$) である。式(32)は等価縮約モデルに次式の関係を入れた時の運動方程式にほかならない。

$$m_{deq} = \psi^2 m_d, \quad c_{deq} = \psi^2 c_d, \quad k_{deq} = \psi^2 k_d \quad (33), (34), (35)$$

したがって、等価縮約モデルの付加系諸元を、式(33),(34),(35)により計算することで、文献(6)により提案された主架構1質点系をベースとした最適設計式の適用が可能となる。上式を踏まえると、ダンパーの慣性質量比は多質点系モデル(μ)と等価縮約モデル(μ_{eq})で異なり、次式の関係がある。

$$\mu = \frac{m_d}{M_{eq}} = \frac{1}{\psi^2} \cdot \frac{m_{deq}}{M_{eq}} = \frac{\mu_{eq}}{\psi^2} \tag{36}$$

式(36)より、多質点系モデルの質量比 μ 、および応答低減効果との関連の強い質量比 μ_{eq} の間には ψ が介在しており、 ψ が大きいほど応答低減に寄与する慣性質量効果を効率的に増大させることができると解釈できる。なお、ここまでの式の導出で用いた仮定は、同調型本構法の付加により主架構のモード形が変化しないことであるため、質量比が過大なケースなどダンパー力によりモード形に位相差や変形バランスに変化が生じる場合は、変位応答倍率の極大値(定点)が等しくなるという特性をもたない可能性があることを補足する。

以上の手法を用いることで、同調型本構法を層跨ぎ配置した多質点系モデルであっても等価縮約モデルと変位応答倍率が一致しており、定点理論に基づいて変位応答倍率における同調対象モードの振動数前後の2点で極大値の高さを揃えられることが期待される。次章では、簡易モデルを用いた数値例題を行い多質点系モデルに本手法を適用した結果を示す。

3. 数値例題

(1) 検討対象建物と付加系配置パターン

主架構は3層の鉄骨造建物を想定した3質点系でモデル化する。各層の質量を 3.0×10^5 kg、剛性は第1層から4000, 3000, 2000 kN/cmとなる台形分布で与えた。非減衰系の1次固有周期は0.43 s (固有円振動数 $\omega_1 = 14.62$ rad/s)であり、主架構の内部粘性減衰は、1次減衰定数が2%、2次減衰定数が4%となるようにレイリー型減衰係数マトリクスで与えた。付加系の配置パターンは図-4(a)-(c)に示す3ケースを対象とし、各ケースの係数ベクトル \mathbf{I} は同図中に示している。次節では、これらのCase 1~3のモデルに等価縮約モデルの慣性質量比 $\mu_{eq} = 0.02, 0.05, 0.10$ を与え、式(13),(14)によるパラメータ設定を実施する。

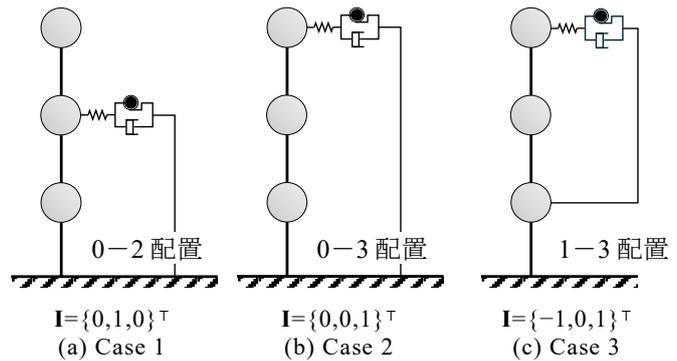


図-4 同調型本構法の配置パターン

(2) 最適設計の実施

前述の簡易モデルに対し、主架構のみの実固有値解析より1次モードにおける M_{eq} , C_{eq} , K_{eq} ならびに配置パターンごとに ψ を計算し、対象の μ_{eq} を解析変数として式(13),(14)により得られる比 β^{opt} および h_d^{opt} より、等価縮約モデルにおける m_{deq} , c_{deq} および k_{deq} を式(15),(16),(17)を用いて算出する。その後、式(33),(34),(35)によって等価縮約モデルの付加系諸元(m_{deq} , c_{deq} , k_{deq})から多質点系モデル(m_d , c_d , k_d)の諸元へと変換する。この手順により図-3(a)に示した多質点系モデルのパラメータが全て揃う。

各検討ケースにおける1次モード付近での変位応答倍率を図-5に示す。横軸の ω は入力円振動数であり、実線が多質点系モデルの各層の変位応答倍率である。破線は、ダンパー付加によるモード形の変化が微小であるという等価モデルへ縮約時に用いた仮定が成り立っているとみなしたときの変位応答倍率であり、等価縮約モデルの変位応答伝達関数に主架構の刺激関数 $\beta\phi$ を乗じた伝達関数 $\mathbf{H}(i\omega)$ (式(37))の絶対値で求める。なお、 i は虚数単位($i^2 = -1$)である。

$$\mathbf{H}(i\omega) = \beta\phi \left\{ \mathbf{r}^T (-\bar{\mathbf{M}}\omega^2 + i\bar{\mathbf{C}}\omega + \bar{\mathbf{K}})^{-1} (-\bar{\mathbf{M}}\mathbf{r}'\omega^2) \right\} \tag{37}$$

$$\bar{\mathbf{M}} = \begin{bmatrix} M_{eq} & 0 \\ 0 & \psi^2 m_d \end{bmatrix}, \quad \bar{\mathbf{C}} = \begin{bmatrix} C_{eq} & 0 \\ 0 & \psi^2 c_d \end{bmatrix}, \quad \bar{\mathbf{K}} = \begin{bmatrix} K_{eq} + \psi^2 k_d & -\psi^2 k_d \\ -\psi^2 k_d & \psi^2 k_d \end{bmatrix} \tag{38),(39),(40)}$$

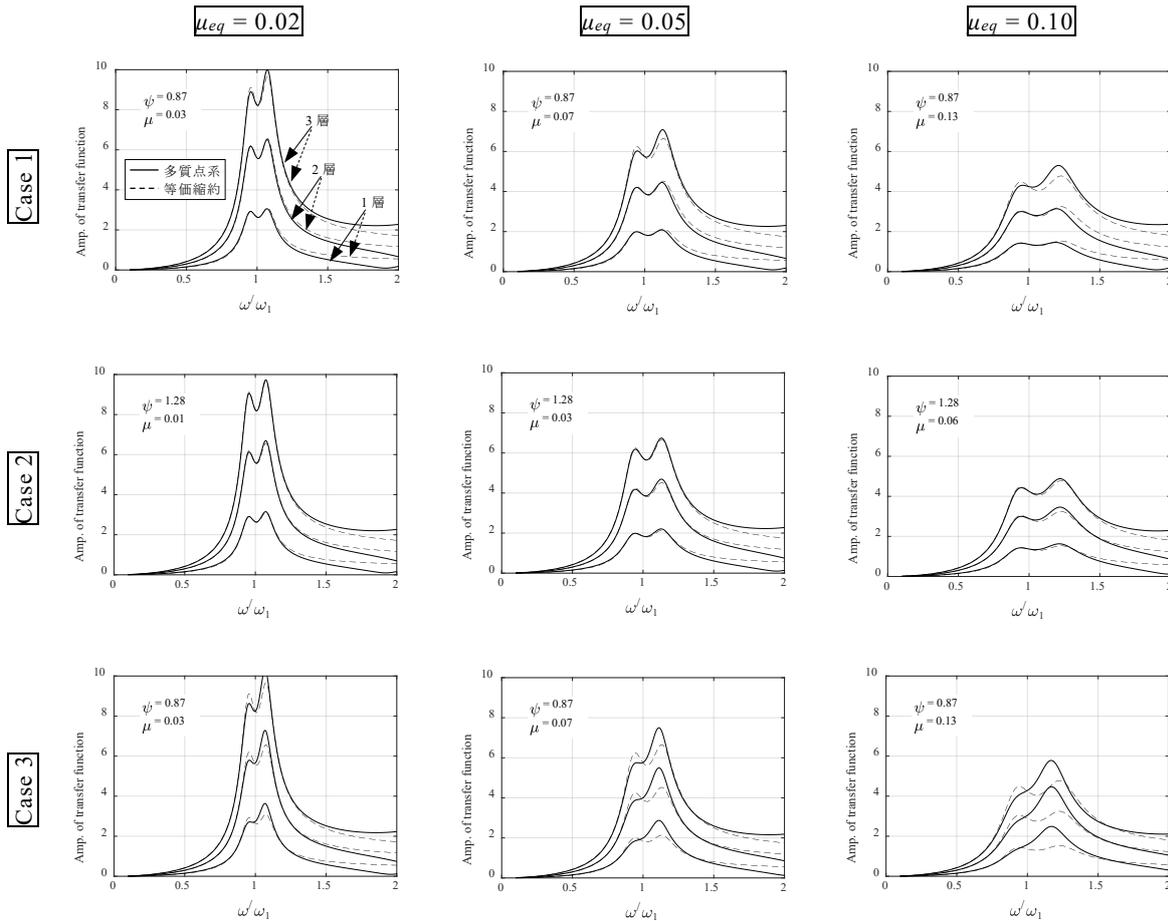


図-5 変位応答倍率の比較

図-5より Case 1と Case 2は、 μ_{eq} によらず等価縮約モデルと多質点系モデルの変位応答倍率が1次モード付近で良い対応を示しており、等価縮約モデルにより多質点系モデルの応答倍率を表現できているといえる。その結果、多質点系モデルにおいても極大値の高さが揃うという本手法で期待されていた特性を有している。Case 3では、いずれの μ_{eq} においても両者の応答倍率がやや乖離する結果となり、多質点系モデルの応答倍率は2つの極大値の高さにやや差が生じる結果であった。これは、本手法では無視できると仮定していた付加系設置による主架構のモード形の変化の影響が大きくなっているためであると考えられる。特に μ_{eq} が大きいケースで応答倍率の乖離が顕著にみられた。このように、質点間に付加系を架け渡した Case 3は、期待されていた特性はやや崩れていたものの、1次モード付近での応答低減効果の観点からみると十分な効果をもつといえる。

以上より、本報で示した手法は実固有値解析時の刺激関数でパラメータ設定ができるという簡易的な手順でありながら十分に同調効果を得られるパラメータを設定することができ、本報で提案した同調型本構法は応答の増幅を効果的に低減できると考えられる。

4. まとめ

シーソー機構、ダンパー、およびリンク材としてのロッドから構成される制振構法¹⁾(「本構法」)に粘性マスダンパーを組み込み、ロッドに同調粘性マスダンパーの柔バネ要素としての機能をもたせて減衰効果を増大させる新たな制振構法(「同調型本構法」)を提案した。同調型本構法を層跨ぎして配した際に、齊藤ら⁶⁾によって提案された主架構1質点系の最適同調条件を満たす設計式を適用する手法を示し、簡易モデルによる数値例題により本手法の特徴を確認した。本報での検討は限られた範囲であるものの、以下の成果を得た。

- ① 提案した制振構法を多質点系に層跨ぎしたモデルを、多質点系の運動方程式および主架構における同調対象モードの刺激関数を用いることによって、等価モデルへと縮約した。この等価縮約モデルを介すること

で、主架構1質点系の最適同調条件を満たすパラメータを算出できる手法を示した。

- ② 主架構を3質点系とした簡易モデルを用いて、同調型本構法の配置箇所および慣性質量比を解析変数とした数値例題を行った。全体の傾向としては、1次モードに同調する付加系のパラメータを設定した場合には、等価縮約モデルと多質点系の応答倍率は良い対応を示していたが、質点間に付加系を架け渡す配置形式では両者の応答倍率がやや乖離しており、応答倍率の極大値の高さに若干の差が生じた。これは、付加系設置により主架構のモード形が変化したことにより起因していると考えられた。
- ③ いずれの検討例も付加系により応答増幅を十分に抑えられていることから、実固有値解析時の刺激関数を用いる簡易的な手順で同調効果を得られるパラメータが設定でき、提案した同調型本構法が応答増幅を効果的に低減できることを確認した。

参考文献

- 1) 三井住友建設株式会社：多層階の揺れを一括して制御する「揺動制震システム」の実用化に目処、<https://www.smcon.co.jp/topics/2020/03311300/>、2025.7.14 参照
- 2) 田川浩, 高金賀：近似直線運動機構に基づくU形ダンパー付き制振構造, 日本建築学会構造系論文集, No.648号, pp.443-451, 2012.2
- 3) Yuichi Hirata, Hiroshi Tagawa, Manabu Kawashima, Hiroyuki Harada : Experimental study on practical application of seesaw system, Proceedings of the fib Symposium of Concrete Structures, pp.2067-2076, 2021
- 4) 三井住友建設株式会社：「揺動制震システム」を実物件に初適用, <https://www.smcon.co.jp/topics/2022/09091300/>, 2025.7.14 参照
- 5) 川島学, 新井雄大：シーソー機構を用いた制振構造を適用した3階建て鉄骨造建物の地震応答再現解析 その1 建物概要および地震時記録の分析, 日本建築学会大会(九州) 学術講演梗概集, 構造II, 2025.9
- 6) 斉藤賢二, 栗田哲, 井上範夫：慣性接続要素を利用した線形粘性ダンパーによる一質点構造の最適応答制御と Kelvin モデル化手法に関する考察, 構造工学論文集 53B, pp.53-66, 2007.3
- 7) 古橋剛, 石丸辰治：慣性接続要素によるモード分離慣性接続要素による応答制御に関する研究 その1, 日本建築学会構造系論文集, No.576, pp.55-62, 2004.2
- 8) 石丸辰治, 秦一平, 三上淳治, 公塚正行：付加剛比による D.M.同調システムの簡易設計法, 日本建築学会構造系論文集, No.654, pp.1455-1464, 2010.8
- 9) 吉江慶佑, 宇田川貴章, ジロン・ニコラ：新宿住友ビルの制振改修—全体曲げ変形を制御する新たな制振構造—, 鉄構技術, pp.36-37, 2021.4
- 10) 人見泰義, 井澤保一, 西川大介：新砂プラザ 制振補強, MENSIN, No.107, pp.17-22, 2020.1
- 11) 木田英範, 中南滋樹, 斉藤賢二, 五十子幸樹, 井上範夫：実大加振実験に基づく同調粘性マスダンパーの解析モデルに関する検証, 構造工学論文集 56B, pp.137-146, 2010.3
- 12) 石田琢志, 桑素彦, 今泉祐樹, 川又哲也, 本多仁：片持ち柱支持した同調粘性マスダンパーの実大振動実験, 戸田建設技術研究報告, No.42, 2016.11
- 13) Jae-Do Kang, Hiroshi Tagawa: Seismic response of steel structures with seesaw systems using viscoelastic dampers, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 42, pp.779-794, 2013.4
- 14) 金子健作：下部構造の変位低減に着目した中間層免震構造の多目的地震応答制御, 日本建築学会構造系論文集, No.718, pp.1869-1879, 2015.12