

建物のパッシブ振動制御の極配置法に基づく統一的理解
 Unified Understanding of Passive Vibration Control for Buildings Based on Pole Allocation

○池田芳樹・松本祐輝

○Yoshiki IKEDA, Yuki MATSUMOTO

For a building with a passive control system, an inverse problem is formulated based on the pole allocation method in control theory. The structural system is simplified as a three-degree-of-freedom lumped-mass damped shear model. Through the selection of appropriate model parameters, the simplified model can represent an earthquake-resistant structure, a base-isolated structure, an interstory-isolated structure, or a controlled structure with a tuned mass damper or viscous dampers. The natural frequencies and corresponding damping ratios in the three vibration modes are set as the initial control targets for the performance-based design. The newly introduced closed-form expression explains how the model parameters are related to the control target and generally proves the trade-off relationship in the passive control effect. Numerical examples demonstrate that pole allocation is arbitrary in selecting a solution. Nevertheless, only a limited solution can be applied to an actual building.

1. はじめに

3 質点 3 自由度系 (3DOF) セン断振動型モデルに極配置法を適用して、建物のパッシブ振動制御を共通に支配する基本式を導いている。同様の基本式は、はじめに中間層免震の複雑な動特性を理解する目的で導かれ¹⁾、次に基礎免震と同調型マスダンパ (TMD) による振動制御を理解するためにも導かれた^{2), 3)}。その際、基礎・中間層免震では免震層のみに減衰があるモデルが、TMD ではマスダンパのみに減衰があるモデルが用いられた。制御法ごとに減衰の位置が異なるモデルであり、基本式はモデルごとに個別に誘導されていた。

本報告は、すべての質点間に剛性と減衰を並列に配置した一般性の高いモデル (図 1) を扱い、耐震構造や層間ダンパを含めたパッシブ振動制御全般を、統一的に支配する基本式が存在することを証明している。数値解析では、新たに考察可能となった層間ダンパの動特性に焦点を絞っている。

2. 極配置法によるパッシブ振動制御の表現

図1のモデルが地震を受ける際の運動方程式は、

$$\begin{bmatrix} m_U & 0 & 0 \\ 0 & m_I & 0 \\ 0 & 0 & m_D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_U \\ \ddot{x}_I \\ \ddot{x}_D \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_U & -c_U & 0 \\ -c_U & c_U + c_I & -c_I \\ 0 & -c_I & c_I + c_D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_U \\ \dot{x}_I \\ \dot{x}_D \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_U & -k_U & 0 \\ -k_U & k_U + k_I & -k_I \\ 0 & -k_I & k_I + k_D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_U \\ x_I \\ x_D \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_U & 0 & 0 \\ 0 & m_I & 0 \\ 0 & 0 & m_D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \ddot{y}_0 \quad (1)$$

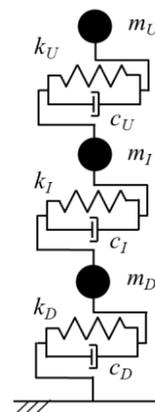


図1 3DOF解析モデル

となる。 m_U , m_I , m_D は各質点の質量, k_U , k_I , k_D は各層のせん断剛性, c_U , c_I , c_D は各層の減衰係数, x_U , x_I , x_D は各質点の固定端に対する相対変位, \ddot{y}_0 は地動加速度である。

極配置で目標とする3つ振動モードの固有円振動数とモード減衰比をそれぞれ ω_i と h_i とおくと、系の特性方程式を介して次式が得られる。

$$\frac{h_U}{\omega_U} + \frac{h_I}{\omega_I} + \frac{h_D}{\omega_D} = \frac{h_1}{\omega_1} + \frac{h_2}{\omega_2} + \frac{h_3}{\omega_3} = \sum_{i=1}^3 \frac{h_i}{\omega_i} \quad (2)$$

ここで、 ω_U , ω_I , ω_D は、各層を取り出した際の単独の固有円振動数, h_U , h_I , h_D はそれらに対応する層の減衰比である。

3 つの極を指定すると上式の右辺の値が決まる

から、極配置はその制約下で各層の剛性と減衰をどう割り振るかという問題になっている。式(2)は、各層の特性を表現するパラメータ間のトレードオフ関係を前報¹⁾³⁾よりも一般的に表現している。なお、左辺の固有振動数と減衰比を対象層よりも上部を剛にした場合で定義しても、同様の式が成立することも確認している。

3. 層間ダンパの基本的性質

極配置法で数学的に得られる解には任意性があるが⁴⁾、複数の解のうち実建物に適用できる解は限られると考えられる。図2は、3質点の質量が同じという条件で振動数比 $b = \omega_2 / \omega_1$ と $c = \omega_3 / \omega_1$ を変動させ、解の存在領域を調べている。 c が 3.74 以上で解が存在している。解が2組ある灰色の領域が大部分を占め、4組ある赤色の領域はきわめて狭い。一般に実建物の層剛性は上層ほど低くなるため、この剛性分布を満たす解が少なくとも一つ存在する領域を黒色の格子で示す。さらに、層単独の固有振動数の低下が直下の層の20%以内にある解の領域を青色で示す。その重心は黒点である。目標とする極を満たす層の固有振動数の組み合わせは複数存在するが、実建物の特性に整合する解は限られていることが理解できる。

図2から b が 2.60 の場合を取り出し、層単独の固有振動数を目標とする1次固有振動数で除した無次元振動数で解の様相を調べる(図3)。解は c が 3.75 以上の領域で存在する。数字1と2は二組の解を意味し、同一の数字が一組の解を構成している。黒色、赤色、青色の丸印は、それぞれ最上層、中間層、最下層の固有振動数比である。

モード形を調べた結果、解1は3質点の振幅を調整して指定した3つの固有振動数を得ているが、解2は最上質点と中間質点の振幅を調整して1・2次モードで指定した固有振動数をまず得て、次に3質点で3次モードの固有振動数を得ていた。そして、解1が一般的な実建物に対応していた。

この解1を減衰の観点から調べてみると、目標とする極を層の減衰を負にして達成している解があり、減衰の観点から実建物に整合する解はさらに絞られることが分かった。

4. まとめ

パラメータ調整により、耐震構造、基礎免震、中間層免震、TMD や層間ダンパによる振動制御

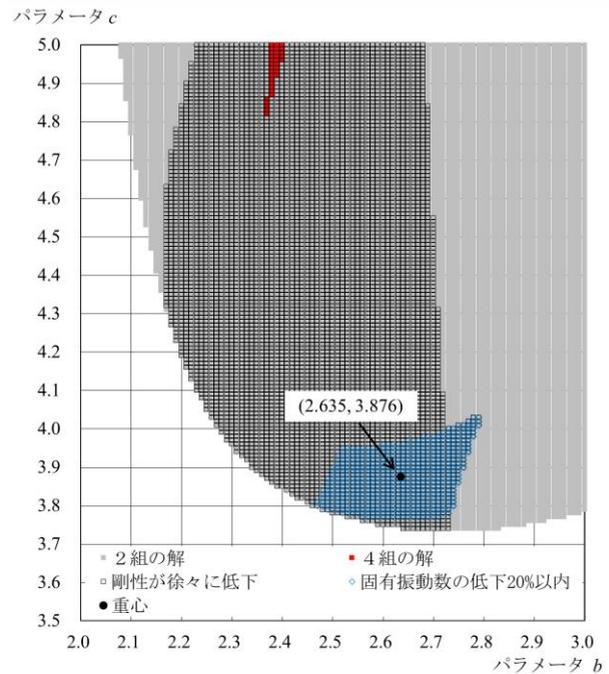


図2 極配置法による解の存在領域

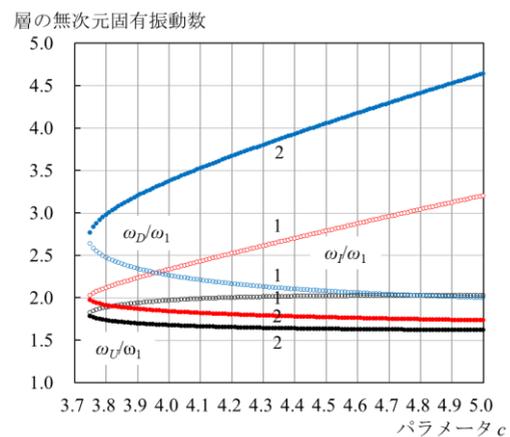


図3 層の無次元固有振動数 ($b=2.60$ の場合)

を表現できる3DOFモデルに極配置法を適用して、設計目標とするモード特性とモデルの関係に統一的な基本式が存在することを明らかにした。数学的に得られる解には任意性があるが、実建物の特性と整合する解の存在領域は制約されていた。

参考文献

- 1) Ikeda Y.: Fundamental equation based on pole allocation for interstory seismic isolation of buildings, *Structural Control and Health Monitoring*, Vol.28, No.3, 19 pages, 2021
- 2) 池田：建物の基礎免震、中間層免震および同調型マスダンパによる制振の統一的理解、京都大学防災研究所年報、第64号B, pp.21-39, 2021
- 3) 松本、池田：基礎免震、中間層免震および同調型マスダンパによる制振の統一的理解、日本建築学会近畿支部研究発表報告集、第61号、構造系, pp.341-344, 2021
- 4) Wonham W.M.: On pole assignment in multi-input controllable linear system, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol.12, No.6, pp.660-665, 1967