

入力エネルギーによる擬似モード制御システムの性能評価

その2 部分モード制御システムの提案

Evaluating the performance of Pseudo Mode Control System by input energy

Part2: Proposal of Partial Mode Control System

○登坂遼太郎³, 石丸辰治¹, 古橋剛², 玉木龍³, 野村大輔⁴

*Ryotaro Tosaka³, Shinji Ishimaru¹, Takeshi Furuhashi², Ryu Tamaki³, Daisuke Nomura⁴

The previous paper presented a clear relationship between seismic performances of buildings and increase or decrease of D.M. from the viewpoint of input energy into a target structure. This paper analyzes D.M. controls a particular mode completely based on this. And this proposes a design method controls any mode completely, Partial Mode Control System.

2.1 はじめに

前報では, 秋山が提案する設計用 V_E スペクトルより求められる入力エネルギーにより擬似モード制御システムを定量的に評価し, 有効性を証明した. また, その入力エネルギーを性能の判断材料とすることで, 擬似モード制御システムにおける付加する D.M.量と性能の関係性を明確にした.

本報では, その関係性から判明した特定のモードのエネルギーを完全に制御する D.M.量について分析し, その分析を基に任意のモードを完全に制御する設計法を構築する.

2.2 エネルギーを完全に制御する D.M.量の分析

特定のモードのエネルギーを完全に制御する D.M.量について考える. 擬似モード制御システムの D.M.量をこのような値に調整することは, 特定のモードが極端に応答に影響を及ぼす場合などにおいて効果が発揮されると考えられる.

特定のモードのエネルギーがゼロとなる状態では, 前報(1-3)式がゼロとなるため, (2-1)式が成り立つ. この際, エネルギー換算速度 $V_{E,j}$ は前報 Figure1-4 より固有周期が 0(s)でない限りゼロにはならない為, 有効質量 m_j がゼロであることが分かり, (2-2)式が成り立つ. ここで, $r_j^T M r_j$ はゼロになり得ない為, 刺激係数 ζ_j をゼロとすることが特定のモードのエネルギーを完全に制御するための条件となることがわかる.

$$\frac{1}{2} \dot{m}_j V_{E,j}^2 = 0 \quad (2-1) \quad \dot{m}_j = \zeta_j^2 r_j^T M r_j = 0 \quad (2-2)$$

ζ_j : 刺激係数 r_j : 固有ベクトル M : $M_0 + M'$
 M_0 : 質量マトリックス M' : D.M.マトリックス

また, 刺激係数は刺激関数や応答値にも影響を与える係数である為, 特定のモードの刺激係数を完全に制御することは, 特定のモードのエネルギーのみならず, 刺激関数及び応答値においても完全に制御できる.

2.3 特定のモードを制御する D.M.量の理論式

上述した条件を満たす D.M.量を求める理論式を導く. 刺激係数は(2-3)式のように表すことができるので, ゼロとなる時(2-4)式が成り立つ. また, 質量マトリックス M_0 は対角マトリックスであるので, (2-4)式は(2-5)式に変形できる. さらに, (2-5)式と固有値問題の式(2-6)式を解くことで(2-7)式が導ける. ここで, (2-5)式及び(2-7)式が特定のモードを完全に制御する D.M.量 m'_s を求める理論式となる. なお, この理論式は m'_s の高次方程式となる為, 解が複数存在するが, 小さい解ほど高次のモードを制御する D.M.量となる. また, 高次方程式は代数的に解くことが困難であるが, コンピュータ (例えば Excel のゴールシーク機能など) を使えば容易に解を求めることができる.

$$\zeta_j = \frac{r_j^T M_0 i}{r_j^T M r_j} \quad (2-3) \quad r_j^T M_0 i = 0 \quad (2-4)$$

$$\sum_{j=1}^n m_j r_j = 0 \quad (2-5) \quad \omega_j^2 M r_j - K r_j = 0 \quad (2-6)$$

$$r_i = \begin{cases} 0 & (i < s) \\ 1 & (i = s) \\ r_{i-1} - \frac{\sum_{j=1}^{i-1} m_j r_j}{(k_i/k_s) m'_s - m'_i} & (i > s) \end{cases} \quad (2-7)$$

n: 質点数, m: 建物質量, k: 建物剛性, s: D.M.設置層

r: 固有ベクトル要素 (未知), m'_s : 第 s 層の D.M. (未知), m'_i : 設置済み D.M.

2.4 取付け部材剛性を考慮した理論式

特定のモードを制御する D.M.量を求める理論式を導いたが, 実際の構造物ではダンパーを設置する際, 取付け部材を介して接続するため, 取付け部材の剛性がダンパーの性能に大きく影響を与える. その為, (2-5)式及び(2-7)式より求めた D.M.量では特定のモードを完全に制御することはできない.

そこで、取付け部材剛性を考慮しても特定のモードを完全に制御する D.M. 量を求める理論式を導く。取付け部材剛性を考慮する場合においても、考慮しない場合と同様に、刺激係数がゼロとなるのが特定のモードを制御するための条件となるので、(2-5)式及び(2-6)式を解くことにより理論式は導ける。なお、(2-6)式の質量マトリックス及び剛性マトリックスは取付け部材剛性を考慮したマトリックスとなる。(2-5)式及び(2-6)式より(2-8)式が導ける。

$$r_i = \begin{cases} 0 & (i < s) \\ 1 & (i = s) \\ r_{i-1} - \frac{\sum_{j=1}^{i-1} m_j r_j \left(1 - \frac{(k_i/k_{di})m'_{di}}{(k_i/k_s)(1+k_s/k_{ds})m'_{ds}} \right)}{\frac{k_i}{k_s} \left(1 + \frac{k_s}{k_{ds}} \right) m'_{ds} - \left(1 + \frac{k_i}{k_{di}} \right) m'_{di}} & (i > s) \end{cases} \quad (2-8)$$

n: 質点数, m: 建物質量, k: 建物剛性, s: D.M. 設置層, k_d : 直列部材剛性
r: 固有ベクトル要素(未知), m'_{ds} : 第 s 層の D.M.(未知), m'_{di} : 設置済み D.M.

ここで(2-5)式及び(2-8)式が取付け部材剛性を考慮して特定のモードを完全に制御する D.M. 量 m'_{ds} を求める理論式となる。なお、(2-8)式は取付け部材剛性 k_{ds} 及び k_{di} が無限大の時に(2-7)式と一致するため、(2-7)式を包含する式となっている。また、(2-5)式及び(2-8)式は、取付け部材剛性を考慮しない場合と同様に m'_{ds} の解が複数存在するが、小さい解ほど高次のモードを制御する D.M. 量となり、コンピュータを使えば容易に解を求めることができる。

2.5 理論式を多層に用いるための留意点

上述した理論式は 1 つの層に D.M. を設置し、1 つのモードを完全に制御する D.M. 量を求める理論式であるが、実際の設計では複数層に D.M. を設置し、複数のモードを同時に制御することが求められる。そこで、上述した理論式を繰り返し用い、任意の複数のモードを同時に制御することを考える。

まず、(2-8)式において m'_{di} は設置済みの D.M. であるが、求める D.M. 量 m'_{ds} は、第 s 層より上層の m'_{di} のみに依存し、第 s 層より下層の m'_{di} には影響を受けないことがわかる。つまり、D.M. 量を計算後に、D.M. 設置層より上層の D.M. 量が増えるとモード制御が崩れるが、下層の D.M. 量が増えても、モード制御は崩れないということである。したがって、上層から順に D.M. 量を算定すれば、上述した理論式を繰り返し用い、任意の複数のモードを同時に制御することができる。

また、D.M. は付加すると構造物の固有周期が延びる性質があり、モードの入れ替わりが起きることがあるため、制御するモードを把握することが困難である。

しかし、最下層から連続させて D.M. を設置し、さらに高次モードから順に制御することで、D.M. 量が多い方から順番に (s+1) 次モード、(s+2) 次モード、…、n 次モード (s: D.M. 設置層) を制御する D.M. 量となるという性質が成り立ち、意図したモードを制御することができる。

以上より、理論式を繰り返し用いて任意の複数のモードを完全に制御する為の留意点をまとめると以下のとおりとなる。

複数のモードを制御する為の留意点

- ・上層から順に D.M. 量を算定する。

任意のモードを制御する為の留意点

- ・最下層から連続させて D.M. を設置する。

- ・上層ほど高次モードを制御する D.M. 量を用いる。

2.6 任意のモードを完全に制御する設計の手順

以上示した理論式及び設計上の留意点より、取付け部材剛性を考慮した任意のモードを完全に制御する設計が可能となる。本報ではこの設計法を部分モード制御システムと呼称する。

部分モード制御システムによる制震設計の手順は以下に示す通りである。なお、設計手順 II において、制御するモードの分だけ D.M. を設置する層が必要となる。

I 取付け部材剛性の決定

II 制御するモードの決定

III 理論式より各層の D.M. 量を算定

2.7 まとめ

本報では、前報で示した擬似モード制御システムにおける付加する D.M. 量と性能の関係性より判明した特定のモードのエネルギーを完全に制御する D.M. 量について分析し、その分析を基に取付け部材剛性を考慮して任意のモードを完全に制御する設計法、部分モード制御システムを構築した。

次報では、高層免震建築物を対象に部分モード制御システムによる制震設計を行い、部分モード制御システムの有効性を示す。

2.8 参考文献

- [1]古橋剛, 石丸辰治: 慣性接続要素によるモード分離, 日本建築学会構造系論文集 第 576 号, pp.55-62, 2004.2
- [2]古橋剛, 石丸辰治: 慣性接続要素による多質点振動系の応答制御, 日本建築学会構造系論文集 第 601 号, pp.83-90, 2006.3
- [3]秋山宏: エネルギーの釣合に基づく建築物の耐震設計 技報堂出版