

## モード制御システムにおける最適 D. M. 量 部分モード制御システムの提案

The optimum D.M. for mode control system

A proposal of partial mode control system

○登坂遼太郎<sup>3</sup>, 古橋剛<sup>2</sup>, 石丸辰治<sup>1</sup>

Ryotaro Tosaka<sup>3</sup>, Takeshi Furuhashi<sup>2</sup>, Shinji Ishimaru<sup>1</sup>

This paper shows a system that allows complete control of any mode by using Dynamic Mass. And we propose a partial mode control system. First, this shows the principle of partial mode control system. The following this describes the design considerations. Finally, this indicates that this system can reduce the response of the design example and proves the effectiveness of partial mode control system.

### 1 はじめに

振動工学において、低層・中層の構造物は一般的にせん断型モデルでモデル化するが、多くのモードと呼ばれる揺れ方が存在する。また、構造物全体の応答は時刻歴におけるモードごとの応答の足し合わせとなっているので、モードを制御することができれば、応答低減可能であることが既往の研究よりわかっている。

そこで、古橋・石丸によりダイナミック・マス（以降 D. M.）を用いた完全モード制御システムが提案された。しかし、このシステムは全層に D. M. を設置しなければならないため現実的には難しい。

また、設置層を減らしてもある程度モードを制御できるシステム、擬似モード制御システムも提案された（石丸・古橋）が、近似的な理論である点、完全にモードを制御できない点、設置層数とモードの関係が不明確な点などまだ改良できる余地を残している。

そこで、適当な D. M. を設置することで、任意の複数の高次モードを完全に制御できるシステム、部分モード制御システムを提案する。本論では部分モード制御システムの原理、設計上の留意点、設計例について述べる。

### 2 部分モード制御システムの原理

刺激係数は(1)式で表すことができるので、(2)式が成り立つ時、刺激係数 $\zeta_j=0$ となり任意のモードが制御できる。

$$\zeta_j = \frac{\mathbf{r}_j^T \mathbf{M}_0 \mathbf{i}}{\mathbf{r}_j^T \mathbf{M} \mathbf{r}_j} \quad (1) \quad \mathbf{r}_j^T \mathbf{M}_0 \mathbf{i} = 0 \quad (2)$$

ここで質量マトリックス $\mathbf{M}_0$ は対角マトリックスであるので、(3)式が成り立てば良いことになる。

$$\sum_{j=1}^n m_j r_j = 0 \quad (3) \quad j \omega^2 \mathbf{M} \mathbf{r}_j = \mathbf{K} \mathbf{r}_j \quad (4)$$

さらに、(3)式と固有値問題の方程式(4)式を解くことで、(5)～(7)式の理論式を導きだすことができる。

$$m' = \frac{k_s}{\omega^2} \quad (5) \quad \sum_{i=1}^n m_i r_i = 0 \quad (6)$$

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

\*n:質点数, s:D. M. 設置層 (既知)

\*i, j:層 (変数)

これらの理論式は、(5)式の $m'$ を解くことで任意のモードを制御する D. M. 量を算定することができる。

また、(7)式の $m'_i$ は元々設置されている D. M. であるが、D. M. 設置層 $s$ 層より上層の D. M. にのみ依存し、 $s$ 層より下層の D. M. には影響を受けないことが分かる。即ち、上層から順に D. M. 量を算定すれば、複数の D. M. 設置層を設け、複数のモードを制御することが可能となる。さらにこの時 D. M. 設置層数=制御モード数の関係が成り立ち、設計時の指標となる。

### 3 設計上の留意点

部分モード制御システムを設計で用いるためには、以下の3つの留意点を考慮する必要がある。

- ① 下層に集中させて D. M. を設置する。
- ② 上層から順に D. M. 量を算定する。
- ③ 高次モードから順に制御する。

D. M. は下層に集中させて設置すると、入力低減効果と呼ばれる建物に伝わる加速度を低減させる効果を得ることができる。そのため、応答制御を目的とする本研究において留意点①を考慮する必要がある。

また、前述した通り複数の D.M. 設置層を設け、複数のモードを制御する場合、留意点②を考慮する必要がある。

さらに、D.M. 設置層によっては制御できないモードが存在し、上層に設置するにつれて低次のモードを制御できなくなるという性質がある。そのため、留意点③を考慮しなければならない。

4. 設計例

Table1 に示す剛性比例減衰の構造物を考える。非制震時の 1 次周期 1.42s, 1 次粘性減衰定数 1.1% となっている (Table2 model A 参照)。

部分モード制御設計は、制御モードの決定、D.M. 設置層の決定、D.M. 量の算定の順に行う。なお、設計途中で設計者の判断や仮定がないため、制御モードを決定すれば機械的な作業で必要 D.M. 量を求めることができる。

本設計では、地震動の影響が特に大きい 2, 3, 4 次モードを制御することにする。なお、1 次モードはモード制御範囲外である。また、前述した通り D.M. 設置層数=制御モード数の関係が成り立つので、留意点①を考慮することで D.M. 設置層は 1~3 層と決まる。さらに、理論式 (5)~(7) 式を用い、留意点②、③に考慮し、高次モードから順に制御する D.M. 量を上層から順に算出すると Table1 の D.M. 量が得られる。

非制震モデル model A と部分モード制御システムを用いたモデル (D.M. 直付け) model B を比較する (Figure1 及び Table2 参照)。Figure2 は model A, B の刺激関数 (1 次~4 次) の比較、Figure3 は model A, B の応答値の比較 (BCJ-L2) を示している。

Table1 model parameter and D.M. parameter

FL	質量 (ton)	1層間		D.M. (ton)
		減衰係数 (kN·s/m)	初期剛性 (kN/m)	
10	1000.0	4000.0	800000.0	0.0
9	1000.0	4000.0	800000.0	0.0
8	1000.0	4000.0	800000.0	0.0
7	1000.0	4250.0	850000.0	0.0
6	1000.0	4250.0	850000.0	0.0
5	1000.0	4250.0	850000.0	0.0
4	1000.0	4500.0	900000.0	0.0
3	1000.0	4500.0	900000.0	7105.9
2	1000.0	4500.0	900000.0	9631.5
1	1000.0	4500.0	900000.0	12714.0

Table2 Eigenvalue

model A			model B		
次数	T(s)	h	次数	T(s)	h
1次	1.4172	0.0111	1次	1.5049	0.0104
2次	0.4847	0.0324	2次	0.7468	0.0210
3次	0.2956	0.0531	3次	0.6500	0.0242
4次	0.2148	0.0731	4次	0.5583	0.0281
5次	0.1731	0.0908	5次	0.3234	0.0486
6次	0.1471	0.1068	6次	0.2110	0.0744
7次	0.1301	0.1207	7次	0.1611	0.0975
8次	0.1201	0.1308	8次	0.1338	0.1174
9次	0.1129	0.1391	9次	0.1196	0.1314
10次	0.1079	0.1456	10次	0.1112	0.1413

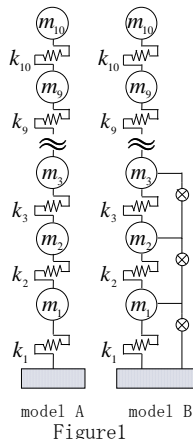


Figure2 では理論式より算定した D.M. 量を付加することで、設計通り 2, 3, 4 次モードが完全に制御されていることがわかる。また、Figure3 では、部分モード制御システムを用いることにより応答が低減されていることがわかる。

このように、理論通りの結果を示し、このシステムが有効であることがわかる。

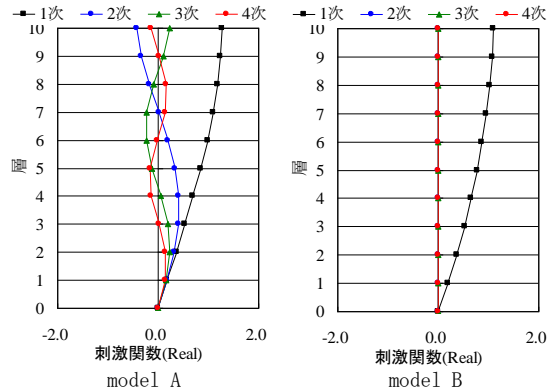


Figure2 Modal participation function

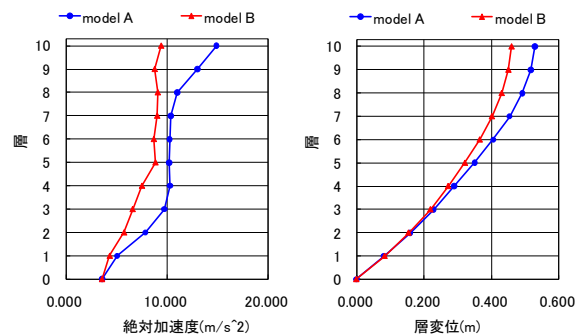


Figure3 Result of response analysis

5. まとめ

部分モード制御システムが理論的に成立していることを示し、本システムを用いれば、任意の複数の高次モードを完全に制御できることを示した。

また、理論式を解くことにより D.M. 量を算定できることを示し、その際 D.M. 設置層数=制御モード数の関係が成り立ち、設計指標となることを示した。

さらに設計例にて応答低減できることを示し、部分モード制御システムの有効性を示した。

【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: 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, 第 55-62 巻, 第 576 号, 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: 慣性接続要素による応答制御に関する研究その 2, 日本建築学会構造系論文, 第 83-90 巻, 第 601 号, 2006. 3