

擬似モード制御による D. M. 同調システムに関する研究
その 1 擬似モード制御手法

Research on Tuned Dynamic Mass System by Pseudo Mode Control
Part 1 A Method of the Pseudo Mode Control

○増井智彰³, 石丸辰治¹, 秦一平², 安松哲生⁴

*Tomoaki Masui³, Shinji Ishimaru¹, Ippei Hata², Tetsuo Yasumatsu⁴

Full mode control is the name of a method to perfectly suppress seismic responses of higher modes other than the first mode. "Pseudo Mode Control" is the name of a method to suppress the responses of a few modes such as the second and third modes, etc. This paper reports that these mode control methods are achieved by using tuned dynamic mass systems.

1-1. はじめに

現在までに、D.M.を用いた設計手法として、「①.TMDの概念を利用するもの」¹⁾²⁾(以降、D.M.モード制御法)と「②.モード制御の概念を利用するもの」³⁾⁴⁾が提案されている。①はD.M.と直列に連結されたばねによって発生する新たな振動モード(以降、D.M.モード)を構造体のモードと同調させることによって応答低減を図るものである。しかし、場合によってはD.M.モードが構造物本来の振動モードと重なったり、本来の2次モードの周期よりも短くなったりすることがある。また、新たな振動モードの発生により、地震動の入力エネルギーを増大させる場合も考えられる。

一方、②は構造物が有している高次モードの発生を抑制するものであり、①のような困難は避けられると考えられる。ただし、高次モードの発生を完全に抑制するという意味での「完全モード制御」では、必要となるD.M.量は非常に大きくなる。工学的には2次から数次のモードの発生をある程度抑制することが出来れば、設計上大きな利益となることは言うまでもない。

そこで、本研究では2次から数次のモードの抑制を目的とした「擬似モード制御」を提案する。本報その1では、擬似モード制御の概要及びその有用性を示す。その2では、制震装置の取付け部材の剛性(以降、取付け部剛性)を考慮した擬似モード制御について論じる。

1-2. モード制御手法

1-2-1. 完全モード制御³⁾

対象となる8質点系モデルの各層にD.M.を直接配置した完全モード制御モデル(Model A)をFigure 1-1に示す。このモデルの振動方程式は次式のようになる。

$$M \ddot{x} + K x = -M \eta \ddot{y} \quad (1-1)$$

M, K は質量, 剛性マトリクス, x は変位ベクトル, η は外乱の分配ベクトル, y は入力加速度である。

ここで, r_j を j 次のモードベクトルとすれば, 刺激係数 ζ_j は(1-2)式のようになる。

$$\zeta_j = \frac{r_j^T M \eta}{r_j^T M r_j} \quad (1-2)$$

(1-2)式より, r₁ = η とすれば, ζ₁ = 1.0 となり, 1次モード以外の刺激係数は, モードベクトルの直交性からゼロになる。つまり, 外乱の分配ベクトル η を1次モード形と完全に一致させることで完全モード制御が可能となる。

1-2-2. 擬似モード制御⁴⁾

次に, Figure 1-2 に示す8質点系モデルの下部4層にD.M.を直接配置したモデル(Model B)を対象とする。この場合, 5層以上は, D.M.である m_d の計算が無いため, 縮小して(1-3)式のように表すことが出来る。そのため, 2次から数次のモードに限って考えれば, 外乱の分配ベクトル η を1次モード形に近似して仮定することで, 擬似的にモード制御が可能となる。以上より, 各質量 m_i は既知であるので, (1-4)式から, 未知数のD.M.量を求めることが出来る。

$$\eta = M^{-1} \begin{Bmatrix} m_4 \\ m_3 \\ m_2 \\ m_1 \end{Bmatrix} \rightarrow M \hat{\eta} = M \begin{Bmatrix} \hat{\eta}_4 \\ \hat{\eta}_3 \\ \hat{\eta}_2 \\ \hat{\eta}_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} m_4 \\ m_3 \\ m_2 \\ m_1 \end{Bmatrix} \quad (1-3)$$

$$\begin{Bmatrix} m_{d4} \\ m_{d3} \\ m_{d2} \\ m_{d1} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} (\hat{\eta}_4 - \hat{\eta}_3) & & & \\ -(\hat{\eta}_4 - \hat{\eta}_3) & (\hat{\eta}_3 - \hat{\eta}_2) & & \\ & -(\hat{\eta}_3 - \hat{\eta}_2) & (\hat{\eta}_2 - \hat{\eta}_1) & \\ & & -(\hat{\eta}_2 - \hat{\eta}_1) & \hat{\eta}_1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} m_4(1 - \hat{\eta}_4) \\ m_3(1 - \hat{\eta}_3) \\ m_2(1 - \hat{\eta}_2) \\ m_1(1 - \hat{\eta}_1) \end{Bmatrix} \quad (1-4)$$

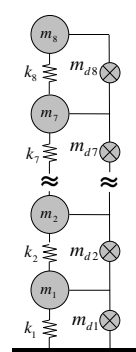


Figure 1-1 Model A

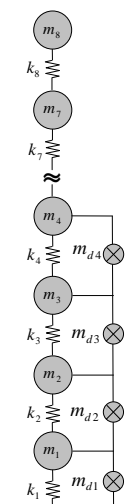


Figure 1-2 Model B

1-3. モード制御手法の検討

1-3-1. 対象モデル概要

対象モデルは、非制震モデルと完全モード制御モデルである Model A, 擬似モード制御モデルである Model B の 3 モデルとする。非制震モデルのパラメータ及び固有値解析結果を Table 1-1, 1-2 に示す。また、刺激関数を Figure 1-3(a)に示す。なお、全てのモデルに対して、内部減衰はレーリー減衰で 1 次, 2 次にそれぞれ 2% で与えている。

1-3-2. 完全モード制御(Model A)

D.M.を全層に直接配置し、完全モード制御した Model A について検討を行う。完全モード制御に必要な D.M.量を Table 1-3 に示す。また、固有値解析結果を Table 1-4 に示す。また、刺激関数を Figure 1-3(b)に示す。同図より、全ての高次モードが完全に消えていることが分かる。

1-3-3. 擬似モード制御(Model B)

Model B では、下部4層に D.M.を配置しているため、下部 4 層の外乱の分配ベクトル η を 1 次モード形に近似させ、(1-4)式により各層の D.M.量を求める。求めた D.M.量を Table 1-3 に示す。また、固有値解析結果及び刺激関数をそれぞれ Table 1-4, Figure 1-3(c)に示す。

Table 1-3, Figure 1-3 より、Model B は Model A と比較して、D.M.の設置層数及び総量が半分程度であるが、十分に高次モードが抑制されていることが分かる。また、非制震モデルと比較すれば、高次モードが大幅に低減されていることが分かる。

Figure 1-4 に非制震, Model A, Model B の相対変位応答倍率曲線を示す。同図より、Model A は、高次モードが完全に消えて、1 質点系の挙動を示していることが分かる。Model B は、高次モードが若干現れているが、1 質点系に近い挙動を示しているといえる。このことから、完全モード制御により高次モードを全て消さなくても、擬似モード制御により擬似的に 1 質点系に置換することで、高次モードの影響を大幅に低減出来ることが分かる。

1-4. まとめ

本研究で提案する擬似モード制御手法の概要及びその有用性を示した。それにより、外乱の分配ベクトル η を 1 次モード形に近似させることで、D.M.の設置層数及び総量を半分程度に減らしてもモード制御の構築が可能となることを示した。

次報その 2 では、取付け部剛性を考慮した場合の擬似モード制御について論じる。

Table 1-1 モデルパラメータ

FL	質量 (ton)	剛性 (kN/m)
8	1.0	160.0
7	1.0	180.0
6	1.0	205.0
5	1.0	225.0
4	1.0	250.0
3	1.0	270.0
2	1.0	295.0
1	1.0	315.0

Table 1-2 固有値(非制震)

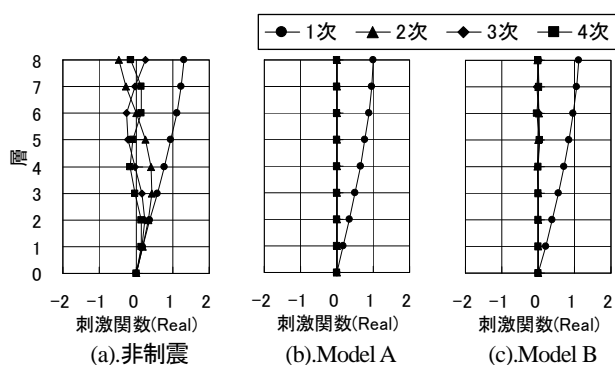
モード	T(sec)	h
1次	2.100	0.020
2次	0.763	0.020
3次	0.472	0.027
4次	0.350	0.034
5次	0.287	0.041
6次	0.250	0.047
7次	0.223	0.052
8次	0.198	0.058

Table 1-3 D.M.量

FL	D.M.量(ton)	
	Model A	Model B
8	0.00	—
7	0.56	—
6	1.61	—
5	3.13	—
4	5.27	1.18
3	7.88	3.28
2	11.26	6.59
1	15.08	11.21

Table 1-4 各モデルの固有値

モード	Model A		Model B	
	T(sec)	h	T(sec)	h
1次	2.360	0.018	2.241	0.019
2次	1.375	0.009	1.178	0.011
3次	1.228	0.010	0.961	0.014
4次	1.074	0.012	0.758	0.017
5次	0.912	0.014	0.564	0.022
6次	0.741	0.017	0.397	0.031
7次	0.557	0.022	0.290	0.040
8次	0.351	0.034	0.239	0.049



(i) 刺激関数(1 次~4 次モード)

Figure 1-3 各モデルの刺激関数

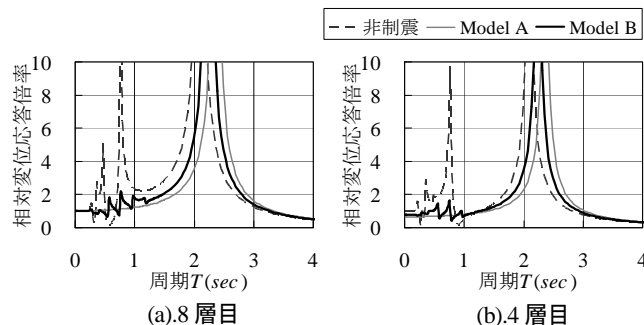


Figure 1-4 各モデルの相対変位応答倍率曲線

参考文献

[1] 石丸辰治, 三上淳治 他: 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, 第 75 巻 第 652 号, pp.1105-1112, 2010.6
 [2] 石丸辰治, 秦一平 他: 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, 第 75 巻, 第 654 号, pp.1455-1464, 2010.8
 [3] 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
 [4] 石丸辰治, 秦一平 他: 擬似モード制御による 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, 第 661 号, pp509-517, 2011.3