

振動特性の近い構造物同士の連結制振システムに関する研究
 Study on connection control on vibration system
 between the near structures of vibration properties

西村 漢² 古橋 剛¹ 高林 正和³
 Kan Nishimura² Takeshi Furuhashi¹ Masakazu takabayashi³

The Coupled Vibration Control system controls tow structures by using a fixed point theory which is applied to a TMD system. But, in the characteristics of the system, there is the range that it cannot control by the combination of similar structures of vibration properties. In this paper, it is aimed for the suggestion of the Coupled Vibration Control system for the similar structure of vibration properties.

1. はじめに

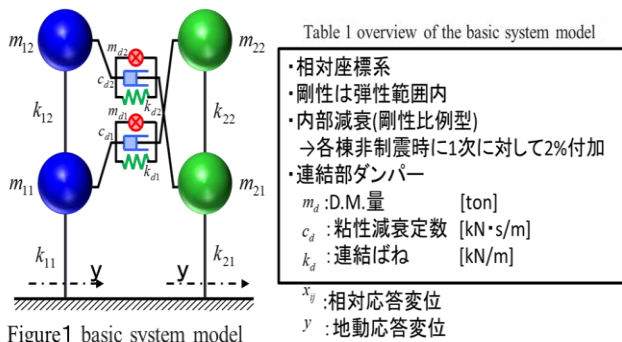
1995年の兵庫県南部地震や2011年の東北地方太平洋沖地震など、多大な被害をもたらす地震は後を絶たない。我が国における建築物の耐震技術は、地震により生じた構造物の被害内容やその時々での最新の研究成果や知見を得ながら更新され続けている。その中の一つである連結制震システムとは、並列する二つ以上の構造物間をダンパーによって連結することで、両棟の制震性能を向上させるものである。層間ダンパーや同調系ダンパーに代わる制震手法として背戸ら¹⁾によって提案されており、代表的なものとしては2001年に完成した東京都中央区晴海の「晴海アイランド・トリトンスクエア」で実用化に成功している。

連結制震システムでは、TMDシステムに応用された定点理論²⁾を、連結する構造物自体の相互作用に利用することで、両棟を効率よく制御することが出来る。しかし、得られる制震性能は構造物の振動特性によるため、設計上の自由度が極端に小さいなどの問題点があった。その問題点を解決したのが、岩波や蔭山らによる連結部にダンパーとばねを併用する方法³⁾や、油野らによるダイナミック・マス(以下D.M.)ダンパーを併用する方法⁴⁾である。これらにより、建物の振動特性に関係なく、連結ばねやD.M.のみの調節で合理的な連結制震を設計できるようになった。

しかし、連結制震システムの特性上、振動特性の近い構造物の組み合わせでは、制御できない範囲がある。そこで、本論文では、振動特性の近い構造物の連結制震システムの提案を目的としている。

2. 基本系モデル概要

Figure1 に示す 2 質点系の基本系モデルを用いて検討を行い、Table1 に基本系モデルの概要を示す。



本論文では、振動特性の近い構造物を対象とするため、今回は、 i 棟の j 層目が等しい諸元($m_{ij}=m_{i+j}$, $k_{ij}=k_{i+j}$ ($i=1, j=1, 2$))となっているものとする。提案する連結制震システムは、Figure1に示す1層目と2層目を連結することで、連結部ダンパーの効果を発揮させる。

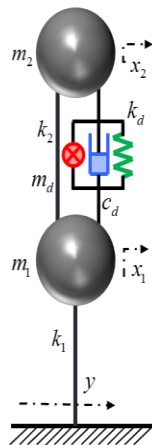


Figure 2 contracted basics system model

Table2 Setting of the coefficient

$\omega_1^2 = \frac{k_1}{m_1}$	$\omega_2^2 = \frac{k_2}{m_2} \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2 = \omega_{12}^2$
$v_m = \frac{m_2}{m_1}$	$\mu_k = \frac{k_2}{k_1}$ $\frac{c_d}{m_1} = 2h\omega_1$
$\tau_k = \frac{k_d}{k_1}$	$\eta_m = \frac{m_d}{m_1}$ $\alpha = \frac{1}{v_m} + 1$
$\lambda = \frac{\omega}{\omega_1}$: 入力振動数比

Figure1 の基本系モデルは、前述の通り同層の諸元が等しいことから、Figure2 のモデルのように縮約して考えることができる。また、Table2 のように係数の設定をする。

次に地動を Figure2 と同様に設定し、縮約基本系モデルにおける応答倍率曲線を誘導する。このときの振動方程式は、以下のようになる。

$$(M + M_d)\ddot{X} + C_d\dot{X} + (K + K_d)X = -M_i\ddot{Y} \quad (1)$$

ただし、 $M = \begin{bmatrix} m_2 & \\ & m_1 \end{bmatrix}$ (2) $M_d = \begin{bmatrix} m_d & -m_d \\ -m_d & m_d \end{bmatrix}$ (3)

$C_d = \begin{bmatrix} c_d & -c_d \\ -c_d & c_d \end{bmatrix}$ (4) $k = \begin{bmatrix} k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_1 + k_2 \end{bmatrix}$ (5)

$k_d = \begin{bmatrix} k_d & -k_d \\ -k_d & k_d \end{bmatrix}$ (6)

$$x_1 = X_1 e^{i\omega t}, x_2 = X_2 e^{i\omega t}, x_3 = X_3 e^{i\omega t} \quad (7)$$

系が定常振動すると仮定し、各変位を(7)式のように表した。ここで、基礎の変位 Y に対する相対変位 X_1, X_2 を求めると次式のようなになる。また、Table2 に示すように、入力振動数 ω と主系の振動数 ω_1 の関係を振動数比 $\lambda = \omega/\omega_1$ と設定している。

$$\left| \frac{X_1}{Y} \right| = \sqrt{\frac{C^2 + E^2}{A^2 + B^2}}, \left| \frac{X_2}{Y} \right| = \sqrt{\frac{D^2 + E^2}{A^2 + B^2}} \quad (8)$$

$$\text{ただし } A = (1 + a\eta_m)\lambda^4 - \left\{1 + \frac{\eta_m}{v_m} + a(v_m\omega_{12} + \tau_k)\right\}\lambda^4 + \omega_{12} + \frac{\tau_k}{v_m} \quad (9)$$

$$B = -2h\left\{a\lambda^3 - \frac{1}{v_m}\lambda\right\}i \quad (10)$$

$$C = (1 + a\eta_m)\lambda^4 - a(v_m\omega_{12} + \tau_k)\lambda^2 \quad (11)$$

$$D = -2ha\lambda^3i \quad (12)$$

$$E = (1 + a\eta_m)\lambda^4 - \{1 + a(v_m\omega_{12} + \tau_k)\}\lambda^2 \quad (13)$$

Figure3 の応答倍率曲線は、(8)式より描いたものである。h=0 のときの応答倍率と h=∞ の応答倍率に交点が存在している。これは Den Hartog による定点理論²⁾において、減衰に関係なく不動な「定点」とされている。Figure3 より、本検討モデルでは、計 3 個の定点が存在していることがわかる。ここでは定点を短周期側から P, Q, R と定義する。ダンパーのみを付加した際の応答倍率曲線を Figure 3 (a) に、ダンパーと D.M. を並列した際の応答倍率曲線を Figure 3 (b) にそれぞれ示す。本検討モデルでは、連結部に D.M. 量 m_d や連結ばね k_d を入れることによって、固有周期を操作し、定点の位置を調節する。Figure 3 (b) のように D.M. を付加したモデルでは、連結部の D.M. 量 m_d を増やすことによって固有周期を伸ばすことができる。また、逆の性質を持つ k_d は固有周期を短くすることができる。

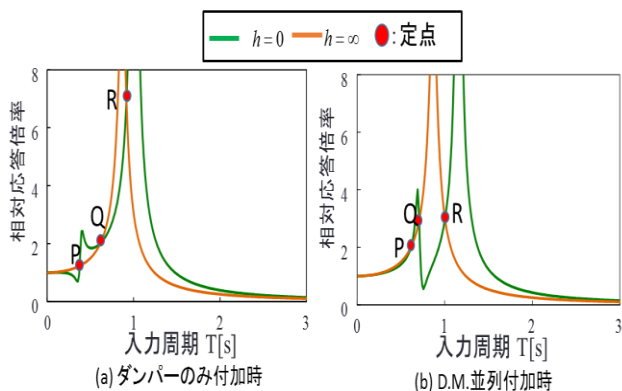


Figure 3 response magnification curve

3. 時刻歴応答解析

基本系モデルに対し、時刻歴応答解析を用いて有効性を検討していく。入力地震動は、El Centro 1940 NS, BCJ-L2, JMA-KOBE 1995 NS の 3 波を使用する。基本系モデルに対し、原波で入力し弾性範囲内で検討する。

基本系モデルに対して、最適設計を行っていく。今回、使用する基本系モデルの諸元を Table3 に、基本系モデルの非連結時の固有値解析結果を Table4 に示す。

Table 3 specifications of the study model

FL	質量	減衰係数	剛性	MODE	固有周期 [s]	減衰定数
	[ton]	[kN·s/m]	[kN/m]			
2	200.0	121.8	19000.0	1次	1.01	0.02
1	200.0	134.6	21000.0	2次	0.39	0.05

Table 4 eigenvalue analysis results (non-consolidated)

Figure 4 に基本系モデルに対して、最適設計を行った際の 2 層目の相対変位応答倍率曲線を示す。Figure 4(a) ダンパーのみ付加時と Figure4 (b) D.M. 並列付加時を比較すると、ピーク時の応答倍率が 6 倍から 3 倍とほぼ半分の値になっていることがわかる。

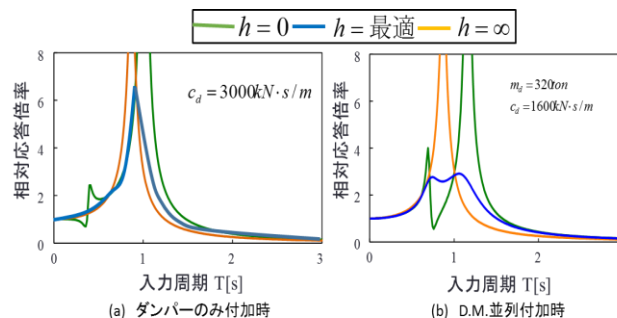


Figure 4 optimal design at the time of the response magnification curve (second layer)

最適設計をした際の基本系モデルの複素固有値解析結果をそれぞれ Table5 に示す。ダンパーのみを付加した際は、最適減衰条件を満たした時に過減衰になっていることがわかる。一方、D.M. を並列して付加した際は、周期が伸长し過減衰になっていないことがわかる。

Table 5 complex eigenvalue analysis results

MODE	ダンパーのみ不可		D.M.並列付加	
	固有周期 [s]	減衰定数	固有周期 [s]	減衰定数
1次	0.98	2.35	1.12	0.18
2次	0.93	0.10	0.73	0.14
3次	0.43	1.04	0.40	0.08
4次	0.40	0.06	0.31	0.05

Figure 5 に入力地震動 3 波を入力した際の時刻歴応答解析結果を示す。どの地震波においても、非制震時と比べ応答低減できていることが確認できる。また、ダンパーのみを付加したモデルよりも D.M. を並列させて付加したモデルの方が、より応答低減できていることが確認できる。

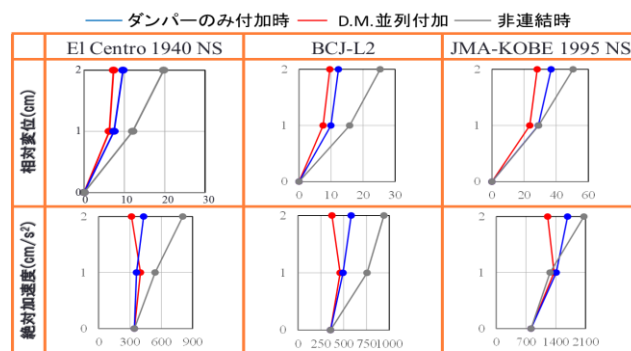


Figure 5 time history analysis results (縦軸: 層)

4. まとめ

本論文では、従来の連結制震では、制震効果を十分に期待できない振動特性の近いモデルに対し、連結ダンパーを異なる層と連結し、検討を行った。検討結果から、十分な連結制震の効果が得られることを示した。

参考文献

- 1) 背戸一登：『構造物の振動制御』，コロナ社，1965
- 2) Den Hartog, J. P., Mechanical Vibrations, 4th ed., McGraw-Hill, 1956
- 3) 岩浪孝一，鈴木浩平，背戸一登：ダンパとばねで連結された並列構造物の制振法，日本機械学会論文集(C編)，No.93-0355, pp.69-74, 1993 年10 月
- 4) 油野球子：D.M. を用いた連結制震システムに関する基礎的研究，日本大学大学院理工学研究科修士論文，2011.3