

支承復元力と組み合わせた慣性質量ダンパーの橋梁制震への適用

清水建設（株） 正会員 ○林 大輔 磯田 和彦 滝本 和志 吉武 謙二
 清水建設（株） フェロー会員 丹 博美
 首都高速道路（株） 正会員 和田 新 右高 裕二

1. はじめに

レベル2地震に対する高い耐震性能を確保するため、慣性質量ダンパーを用いた同調型制震デバイスを高架橋に適用する検討を行った。2自由度系モデルに対するダンパーの最適諸元を求め、それを参考に設計・製作したダンパーを加振実験により性能評価した。

2. 慣性質量ダンパー

本研究で対象とする慣性質量ダンパーとは、ダンパーの軸方向変位を錘の回転力に変換し、そのトルクを制御力として利用する装置である¹⁾。図1のようにボールナットの境界条件が、ボールねじ軸周りの回転が自由かつ軸方向に変位が拘束されている場合、ボールねじに軸方向の変位 x が生じると、軸方向の加速度 $\ddot{x}$ に応じてトルク T が回転錘に作用する。これを軸方向力 F に変換するとその力は式(1)で表される。

$$F = \left(\frac{2\pi}{L_d} \right) T = \left(\frac{2\pi}{L_d} \right) I_\theta \ddot{\theta} = \frac{\pi^2 D^2}{2L_d^2} m \ddot{x} = \psi \ddot{x} \quad \dots\dots\dots (1)$$

式(1)よりダンパーに生じる反力は、ボールねじとボールナットに生じる相対加速度に比例した大きさである。このときダンパー反力を慣性力としてとらえると、見かけの質量として慣性質量 ψ が定義できる。つまり錘の回転効果により、錘の質量 m が錘の径 D とねじのリード L_d に応じて、慣性質量 ψ にまで増幅されることになる。一般的に同調質量ダンパーの質量が構造物に対して大きいほど制震効果は高くなる。慣性質量ダンパーは、適用する構造物に自重による過大な負荷を与えることなくダンパー自重の数百～数千倍の質量効果を

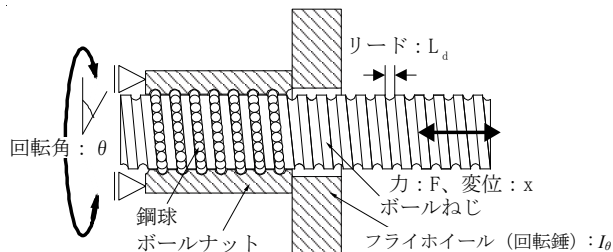


図1 回転慣性質量ダンパーの基本構造

発揮できるため、高い制震効果が期待できる。

3. 支承復元力と組み合わせた同調型制震

本研究では、慣性質量ダンパーを弾性支承や構造物の剛性と組み合わせ、橋軸方向の同調型制震機構とする。また、TMDと同様に減衰器としてオイルダンパーを併用する。

図2に示すような弾性支承で支持される橋梁の2質点系モデルを考える。ここで、 m_1 ：橋脚の有効質量、 m_2 ：上部工質量、 k_1 ：橋脚の等価水平剛性、 k_2 ：弾性支承の水平剛性、 ψ_d ：慣性質量ダンパーの慣性質量、 c_d ：オイルダンパーの減衰係数である。なお、構造物の減衰については考慮しない。橋脚下端が、加速度 $\ddot{x}_0$ で加振されるとき、式(2)の運動方程式が成立する。

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = F \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$M = \begin{bmatrix} m_2 + \psi_d & -\psi_d \\ -\psi_d & m_1 + \psi_d \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} c_d & -c_d \\ -c_d & c_d \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 + k_1 \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} x_2 \\ x_1 \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} 0 \\ k_1 x_0 \end{bmatrix}$$

この時、 $m_2 \gg m_1$ とすると、入力に対する上部工の加速度の比として式(3)の応答倍率が得られる。

$$\frac{\ddot{X}_2}{\ddot{X}_0} = \frac{X_2}{X_0} = \frac{(\xi^2 \bar{\mu} - 1) \bar{k} - i \xi \bar{c}_d \bar{k}}{\{\xi^2 \bar{\mu} (\xi^2 - \bar{k}) - \xi^2 (\bar{k} + 1) + \bar{k}\} - i \xi \bar{c}_d (\bar{k} - \xi^2)} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $\bar{m} = m_1 / m_2 = 0$, $\bar{k} = k_1 / k_2$, $\bar{\mu} = \psi_d / m_2$,

$$\omega_{02}^2 = k_2 / m_2, \xi = \omega / \omega_{02}, \bar{c}_d = c_d / \sqrt{m_2 k_2}, h_d = \bar{c}_d / 2$$

式(3)に対し、定点理論²⁾を適用すると構造物に対するダンパーの最適質量比 $\bar{\mu}_{opt}$ が定められる(図3, 式(4))。

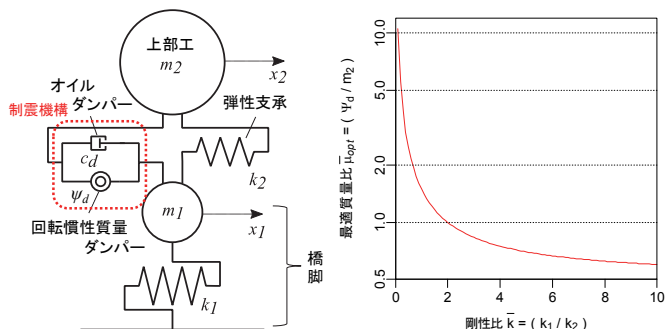


図2 2自由度モデル

図3 最適慣性質量比

キーワード 回転慣性質量, 同調型制震, 定点理論, 高架橋, 耐震性向上

連絡先 〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17 清水建設（株）技術研究所 TEL03-3820-8475

この時、減衰 c_d に関わらず応答倍率が式 (5) となる定点点 ξ_p, ξ_Q が存在し、応答倍率のピーク (最大) を定点点 ξ_p, ξ_Q での条件として最適減衰比が得られる (図 4)。

$$\bar{\mu}_{opt} = \frac{\bar{k} + 2}{2\bar{k}} \dots\dots\dots (4) \quad \left| \frac{\ddot{X}_2}{\ddot{X}_0} \right| = \sqrt{\frac{\bar{k} + 2}{\bar{k}}} \dots\dots\dots (5)$$

以上が、定点点理論から求められる最適パラメータである。最適パラメータでの応答倍率を図 5 に示す。非制震の場合では、構造物の固有振動数付近で上部工の応答が著しく増幅されるのに対し、ダンパーを取り付けることで応答倍率が大きく低減することがわかる。

4. ダンパーの性能評価試験

ここでは、実際に製作したダンパーの性能評価試験について述べる。対象とした構造条件および数値解析より決定したダンパー諸元を表 1 に示す。

性能評価は、慣性質量ダンパー単体の動的加振試験にて行う。ダンパーの片端を固定した状態で、片端に正弦波加振を行う。この時、ダンパーの荷重-変位関係は図 6 のような軌跡を描き、最大・最小変位時の 2 点を結んだ直線の傾き b と履歴ループの面積 W から慣性質量ダンパーの等価慣性質量 ψ_{eq} と等価減衰係数 C_{eq} を評価することができる (式 (6), (7))。

$$\psi_{eq} = \frac{F}{\ddot{x}} = \frac{F}{(2\pi f)^2 x} = \frac{b}{(2\pi f)^2} \dots\dots\dots (6) \quad C_{eq} = \frac{W}{2(\pi \cdot a)^2 \cdot f} \dots\dots\dots (7)$$

式 (2) では、制震装置の減衰はオイルダンパーのみとし、慣性質量ダンパーの減衰は無視しているが、実際には摩擦等の影響により慣性質量ダンパーも若干の減衰を有する。したがって、それを把握した上でオイルダン

パーと組み合わせる必要がある。

図 7 に実験より得られた慣性質量ダンパーの荷重-変位関係の一例を示す。慣性質量ダンパーは、相対加速度に比例した反力が生じるため、荷重 - 変位関係は右肩下がりの傾きを示す。各加振振動数において、式 (6)、式 (7) の操作を実施した結果を図 8、図 9 に示す。等価慣性質量及び等価減衰係数は、それぞれ実験模型の質量、臨界減衰定数との比で整理した。加振振動数によらず、ほぼ一定の質量比 (平均 : 0.60, 目標 : 0.62) が得られており、ダンパーとして安定した性能を確保していることが確認できる。また減衰については、ダンパー 2 台設置した場合で目標の 10% 程度の減衰定数を慣性質量ダンパーが有していることを確認した。

5. まとめ

本研究より得られた結論を以下にまとめる。

- ① 橋梁の支承部に、慣性質量ダンパーを減衰と組み合わせる適用する場合のダンパーの最適諸元と最大応答倍率を定点点理論により示した。
- ② ボールねじ機構を用いた慣性質量ダンパーとオイルダンパーを組み合わせることで、所定の性能をもつ制震デバイスが製作できることを確認した。

参考文献

- 1) 磯田和彦他：回転慣性質量ダンパーを組み合わせた応答低減機構による 1 質点系振動モデルの応答特性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集 Vol.74, No.642, pp.1469-1476, 2009.
- 2) J.P. Den Hartog: Mechanical Vibrations 4th ed, McGraw-Hill, New York, 1956.
- 3) 滝本和志他：橋梁制震に用いる慣性質量ダンパーの振動台実験による制震効果の確認, 土木学会第 71 回年次学術講演会概要集, 2016.

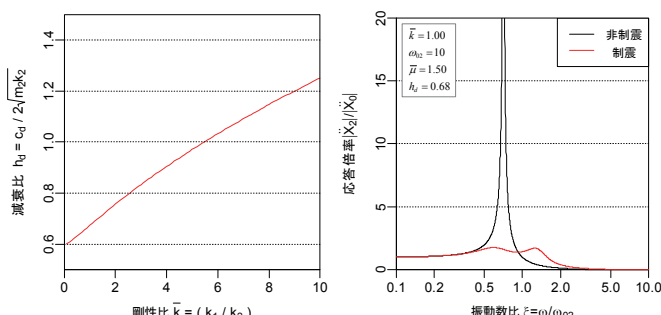


図 4 最適減衰比

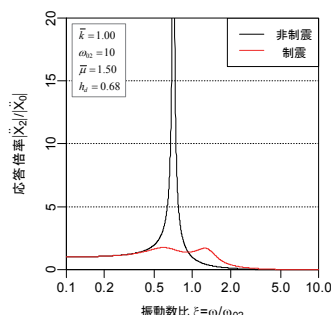


図 5 最大応答倍率

表 1 ダンパーの設計条件

実験模型		
上部工質量	m_s	48.3 ton
支承剛性	k_2	4.50E+03kN/m
水平剛性 (橋脚)	k_1	2.80E+04kN/m
剛性比	$\bar{k}$	6.22
固有振動数	f_s	1.35 Hz
制震ダンパー (慣性質量ダンパー+オイルダンパー)		
慣性質量	ψ_d	15.0 ton / 台
慣性質量比	$\bar{\mu}_d$	0.62 (式 (4) : 0.66)
減衰係数	C_d	3.0 kN/(cm/sec)/台
減衰比	h_d	0.64 (図 4 : 1.02)

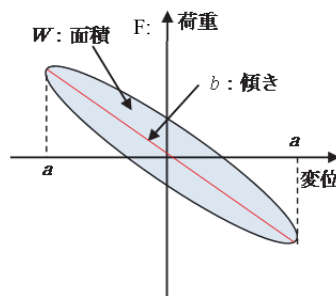


図 6 評価方法

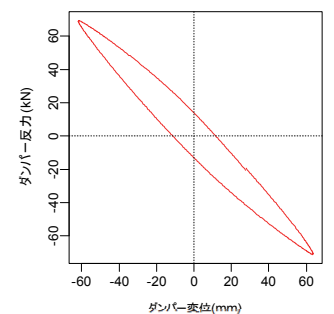


図 7 荷重 - 変位関係 (1.4Hz)

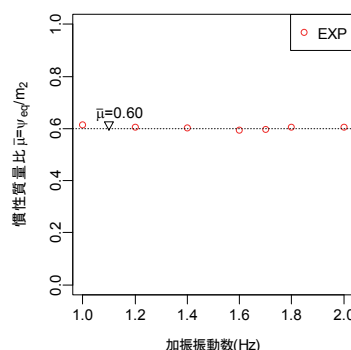


図 8 慣性質量比 (2 台)

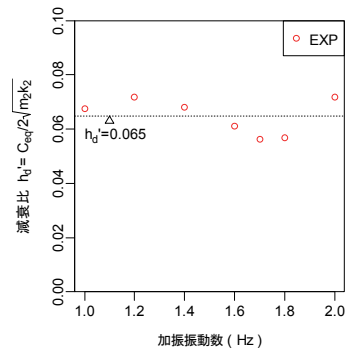


図 9 減衰定数 (2 台)