副質量を有する建物制振用マスダンパに関する研究*

(第2報, 振動実験による制振性能の検討)

藤田 聡^{*1}, 河相 崇^{*2}, 下田 郁夫^{*3}
持丸 昌己^{*3}, 永井 潔^{*4}, 木本 幸一郎^{*4}

Impact Multi-Tuned Mass Damper for High-Rise Buildings against Destructive Earthquake Input

(2nd Report, Investigation of Performance of the System by Shake Table Tests)

Satoshi FUJITA, Takashi KAWAI, Ikuo SHIMODA,
Masami MOCHIMARU, Kiyoshi NAGAI and Koichiro KIMOTO

Vibration control techniques, such as TMD and AMD, have been widely introduced into the design of high-rise buildings to reduce vibrations due to wind and earthquakes. Although these systems are capable of attenuating vibrations against low-level input such as wind and weak earthquakes to a fairly perceptible r. m. s. vibration level, they can not function well for destructive earthquakes because these kinds of systems have their own design limitations mainly on the size of the mass utilized on the tops of buildings and on the stroke of the actuators or travel distance of the mass. A new type of multi-tuned mass damper has been developed to reduce the displacement of the primary mass by using impact forces produced by added mass. Accordingly dynamic tests using a shake table were carried out to confirm its performance. The damper was installed at the top of a 5-storey steel-framed building model of 5 400 kg in total mass. Overall mass of the system comprised from primary and added mass was 22.4 kg and it was equivalent to 0.47% of the first modal mass of the building. Then computer response analyses were conducted to simulate the performance of the system.

Key Words: Vibration Control, Multi-Tuned Mass Damper, Impact Force, High-Rise Building

1. ま え が き

現在, 高層建物には柔構造設計が適用されているが, 一般的に構造減衰が小さいため風や中小地震によって生じる振動によって共振しやすく, 周波数の低い振動を生じやすい。そこで, 居住性向上の観点からこれらの振動を低減する制振装置である動吸振器(Tuned Mass Damper: TMD)やアクティブマスダンパ(Active Mass Damper: AMD)の研究開発および実用化が進められている。これらの付加質量形の制振装置は通常建物頂部に設置されるため, 大地震入力に対しては質量不足, 駆動距離不足等により制振効果が期待できないのが現状である。

そこで, 著者らは付加質量を主質量, 副質量の2質量に分割して直列に配置し, 大入力時には衝撃力を応用することで, 制振性能を損なうことなく主質量の駆

動距離を抑制する構造の制振装置の研究開発を行っており, その基礎的検討を第1報⁽¹⁾で報告した。本報では, 大地震入力に対する制振効果を検討するために, 本制振装置を五層建物モデル試験体に設置し, 振動台実験を実施した。また, 非制振時やTMD設置時の制振性能を比較することにより, 衝撃力による効果を調査した。

ただし, 本研究で大入力レベルとして想定しているレベル2地震(地動最大速度: 0.5 m/s)を用いて振動実験を行うことは振動台の容量および実験用建物モデルの強度の観点からきわめて困難である。そこで, 低入力加速度で衝突現象を再現できる実験供試体を設計・製作し, 本来, 大地震時においてのみ生じる現象を模擬的に検討することとした。

2. 振動実験に用いた制振装置

図1, 2は, 実験に使用した制振装置である。主質量(Damper 1)上に副質量(Damper 2)を搭載した構造となっており, 各質量のばね要素にはコイルスプリング, 減衰要素には粘性せん断形ダンパを用いた。本実験で対象とした制振装置を分類すれば, 主質量に副質量を

* 原稿受付 1995年7月20日。

^{*1} 正員, 東京電機大学工学部 (〒101 東京都千代田区神田錦町2-2)。

^{*2} 学生員, 東京電機大学大学院。

^{*3} 正員, オイレス工業(株) (〒252 藤沢市桐原町8)。

^{*4} (株)間組技術研究所 (〒305 つくば市刈間字西向515-1)。

$$-c_4(\dot{x}_4 - \dot{x}_3) - k_4(x_4 - x_3) = -m_3 \ddot{z}_H \quad \cdots (5)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_2(x_2 - x_1)$$

$$-c_3(\dot{x}_3 - \dot{x}_2) - k_3(x_3 - x_2) = -m_2 \ddot{z}_H \quad \cdots (6)$$

$$m_1 \ddot{x}_1 + c_1 \dot{x}_1 + k_1 x_1 - c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1)$$

$$-k_2(x_2 - x_1) = -m_1 \ddot{z}_H \quad \cdots (7)$$

(2) ストッパに副質量が衝突していない場合 ($|x_{d2} - x_5| < \varepsilon$) は、式(1)と(3)は以下に示ようになるが、式(2)および式(4)~(7)に変更点はない。

$$m_{d2} \ddot{x}_{d2} + c_{d2}(\dot{x}_{d2} - \dot{x}_{d1}) + k_{d2}(x_{d2} - x_{d1}) = -m_{d2} \ddot{z}_H \quad \cdots (1)'$$

$$m_5 \ddot{x}_5 + c_5(\dot{x}_5 - \dot{x}_4) + k_5(x_5 - x_4)$$

$$-c_{d1}(\dot{x}_{d1} - \dot{x}_5) - k_{d1}(x_{d1} - x_5) = -m_5 \ddot{z}_H \quad \cdots (3)'$$

ここで、 $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_{d1}, x_{d2}$ は建物各層とマスダンパ各質量の振動台に対する相対変位、 $m_1, m_2, m_3, m_4, m_5, m_{d1}, m_{d2}$ は建物各層とマスダンパの質量、 $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_{d1}, k_{d2}, c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_{d1}, c_{d2}$ は建物モデルおよびマスダンパのばね定数と減衰係数、 k_{ST}, c_{ST} はストッパのばね定数と減衰係数、 ε はストッパと副質量 m_{d2} 間の距離、 z_H は地動変位である。なお、(2)の場合は、MTMD の運動方程式である。

3.2 ストッパ位置の決定 まず、IMTMD におけるストッパと副質量 m_{d2} 間との距離 ε を決定する。実験で用いる五層試験体の層間変形量が線形限度となる地動最大加速度 0.7 m/s^2 の El Centro NS 波 (Impe-

(a) Max. response (b) RMS response

Fig. 5 Confirmation of the stopper position

rial Valley 地震：1940 年) を用いて応答性状を調査した。総ダンパ質量に対する副質量の質量比 $r = m_{d2}/(m_{d1} + m_{d2}) = 0.1, 0.3, 0.5$ の場合に対し、ストッパの減衰比 ζ_{ST} およびストッパの剛性 f_{ST} をパラメータとしてストッパ位置を検討した。図5(a), (b)は、各質量比におけるストッパ位置に対する建物頂部加速度、主質量および副質量変位の最大応答値と RMS 応答値の関係を示したものである。ストッパ位置の値を小さくすることにより主質量の変位は効果的に抑制されるが、制振性能は若干低下する傾向が認められる。そこで、ここでは TMD, MTMD と同等な制振性能を示し、かつ、その範囲で主質量の変位(ダンパストローク)が最小となる $\varepsilon = 0.05 \text{ m}$ を採用した。なお、今回の実験では、装置製作上の都合により、質量比を $r = 0.3$ とした。

3.3 ストッパ剛性と減衰比の決定 次に、3.2 項で決定したストッパ位置を固定し、ストッパの減衰比、剛性を決定する [式(8), (9)参照]。図6(a), (b)は、各減衰比におけるストッパ剛性に対する建物頂部加速度、主質量および副質量変位の最大応答値と RMS 応答値の関係を示したものであり、非制振時、TMD 装着時、MTMD 装着時の結果も併記した。

ストッパ減衰が増加すると各ダンパの応答変位は若

(a) Max. response (b) RMS response

Fig. 6 Confirmation of the stopper stiffness and damping ratio

干低減するが、その変化量は少ないものであり、設計上の減衰比の若干の差に対する応答変化はきわめて小さいものと考えられる。またストップパ剛性の変化に関しても影響はあまり見られなかった。よって主質量の最大変位を効果的に抑制するという観点からは、設計余裕を大きくとることが可能となる。今回は、実験上の制約から実現可能な範囲で各諸元を決定する必要があるため、ここでは次の値を用いることにした。

$$f_{ST} = \sqrt{k_{ST}/m_{a2}}/2\pi = 5.0 \text{ Hz} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\zeta_{ST} = c_{ST}/2\sqrt{m_{a2}k_{ST}} = 4.0 \quad \dots\dots\dots (9)$$

マスダンパの見掛けの減衰比 ζ_{d1} 、 ζ_{d2} は第1報⁽¹⁾の検討結果より、

$$\zeta_{d1} = c_{d1}/2\sqrt{m_{a1}k_{d1}} = 0.05 \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$\zeta_{d2} = c_{d2}/2\sqrt{m_{a2}k_{d2}} = 0.10 \quad \dots\dots\dots (11)$$

である。非減衰系でダンパ部の一次固有振動数が建物一次固有振動数に一致するように設計した見掛けのダンパ剛性 $f_{d1} = \sqrt{k_{d1}/m_{a1}}/2\pi$ 、 $f_{d2} = \sqrt{k_{d2}/m_{a2}}/2\pi$ について、ダンパ部に減衰を加えた場合には、さらにダンパ剛性をそれぞれ補正係数で割り f'_{d1} 、 f'_{d2} とし、建物一次加速度共振点の二つの極大値が等しくなるように微調整した。

$$f'_{d1} = f_{d1}/(1+0.009) \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$f'_{d2} = f_{d2}/(1+0.009) \quad \dots\dots\dots (13)$$

4. 実験および応答解析結果

4.1 実験の概要 五層建物試験体に制振装置を搭載し、加振実験を実施した(図3参照)。五層建物試験体の諸元を表1に、マスダンパの諸元を表2に示す。加振方法は水平一軸で、非制振時に試験体の変形

が線形限度内になるように加振を行った。また、建物一次モード質量は4543 kgであり、これに対する二質量マスダンパの総質量比は0.47%である。2質量を固定し、TMDとして使用する場合に、五層試験体一次固有振動数に最適同調させるためのばね定数の調整が困難であったため、質量を約1割(2.0 kg)付加した。

Table 1 Specification of the building model used for the tests

	1st Storey	2nd Storey	3rd Storey	4th Storey	5th Storey
Storey mass m_n kg	1067	1067	1067	1067	1147
Mode	1st Mode	2nd Mode	3rd Mode	4th Mode	5th Mode
Natural frequency Hz	2.02	5.91	9.39	12.1	13.7
Modal damping ratio	0.0046	0.0011	0.0022	0.0010	0.0010
Participation factor	0.339	0.320	0.230	0.113	0.0275

Table 2 Specification of the mass damper system used for the tests

	Actual value
TMD Mass $M (=m_{a1}+m_{a2})$ kg	22.374
TMD Natural frequency Hz	2.0
TMD Damping ratio ζ_d	0.046
Primary mass m_{a1} kg	14.975
Primary mass Natural frequency Hz	2.8
Primary mass Damping ratio ζ_{d1}	0.05
Added mass m_{a2} kg	6.503
Added mass Natural frequency Hz	2.8
Added mass Damping ratio ζ_{d2}	0.10
Stopper position ϵ m	0.05
Stopper Natural frequency f_{ST} Hz	5
Stopper Damping ratio ζ_{ST}	4

Fig. 7 Measured performance of the IMTMD against El Centro NS Input (0.7 m/s²)

Fig. 8 Measured performance of the IMTMD against Hachinohe EW input (0.29 m/s^2) Fig. 9 Measured time history responses against El Centro NS input (0.7 m/s^2)

したがって建物一次モード質量に対する TMD の総質量比は 0.52% へと増大しているため、制振性能上、二質量ダンパに比べ若干有利なものとなっていると考えられる。

各応答の測定は、サーボ形センサと差動トランス形

変位計、動ひずみ形加速度計、ロードセルを用いて振動台および五層試験体の各層の加速度、絶対速度、絶対変位、制振装置主質量および副質量の加速度、相対変位、副質量がストッパに衝突する力を計測した。また、データ記録時のサンプリングタイムは 10 ms であ

Table 3 Damping ratio modified for simulation

	Design	Simulation
Primary mass Damping ratio ζ_{d1}	0.05	0.07
Added mass Damping ratio ζ_{d2}	0.10	0.13
Stopper Damping ratio ζ_{st}	4	0.50

る。

4.2 実験結果 図7は、El Centro NS波(最大加速度 0.7 m/s^2)加振に対する各制振装置設置時の応答変位、応答加速度の最大値およびRMS値を非制振時と比較したものである。従来の制振装置であるTMDに比べ、MTMDは最大応答値が若干大きくなっているものの、RMS応答値に関しては、ほぼ同等であり、良好な制振性能を示した。また主質量の最大応答変位は約69%に低減できた。IMTMDは、衝撃力を発生するものの、最大応答値、RMS応答値のいずれにおいても他の制振装置と同等以上の制振性能を示し、さらに主質量の最大応答変位はTMDに比べて約33%に、MTMDに比べて約48%に低減できた。

図8は、八戸EW波(十勝沖地震：1968年、最大加速度 0.29 m/s^2)加振に対する各制振装置設置時の応答変位、応答加速度の最大値およびRMS値である。卓越周期の長い地震波に対しても良好な制振性能を示し、かつダンパストロークもTMDに比べMTMDは約64%、IMTMDは約33%に、またMTMDに比べIMTMDは約50%に低減できており、その有効性を検証した。

図9に、El Centro NS波(最大加速度 0.7 m/s^2)加振に対する非制振時および各制振装置設置時の時刻歴応答波形を示す。どの制振装置を使用した場合でも、良好な制振性能を示しているのは当然のことながら、主質量の最大応答変位はMTMD、IMTMDと低下していることが示されている。IMTMDは衝撃力を応用しているため、建物応答加速度への悪影響が懸念されたが、この件に関しては実験においては認められなかった。

4.3 応答解析結果 応答解析の入力波として振動実験で計測した振動台の加速度を用いてシミュレーションを実施した。数値解析法には数値積分法のRunge-Kutta-Gill法を用い、計算刻み時間は1msとした。図10に実験結果と解析結果の比較を示す。式(8)~(13)で設定した諸値を用いてシミュレーションを実施した場合、建物への制振性能に関しては良好な一致を示したが、主質量、副質量の加速度およびストップに加わる衝撃力の大きさはストップ減衰比の値に

Fig. 10 Comparison between simulation and experiment (Input : El Centro NS)

Fig. 11 Simulated reaction force produced by the IMTMD and the MTMD (Input : El Centro NS)

敏感に反応するため、図 10 には、ダンパ部の減衰比を表 3 のように変更した計算結果を示した。中でもストップ減衰比の値を大きく変更しているが、これは粘性せん断形ダンパと衝突用バッファの変位依存性を考慮していないためであると考えられ、実用時には減衰比を適切に評価し、ストップ部の強度設計を行わなければならないと思われる。ただし、主構造物の制振性能自体には影響は及ぼさないことが実験および解析から判明した。

また、ストップに副質量を衝突させることにより主質量駆動距離を低減でき、かつ他の制振装置と同等な制振性能を得られる理由として以下のことが挙げられる。図 11 に示すように IMTMD の主質量の反力 F_1 とストップの反力 F_2 の合力 F_{IMTMD} 、MTMD の主質量の反力 F_{MTMD} を比較すると、IMTMD の主質量の反力 F_1 は、MTMD のものに比べて小さく、ストップの反力 F_2 が加わることで MTMD と同等な反力が得られる。このことは、副質量がストップに衝突することにより、過大な衝撃力が建物本体に伝わることを示すものである。また、IMTMD の場合、主質量の反力が小さいことから推察できるように、その駆動距離は効果的に抑制されるものと考えられる。なお、衝突現象に関する詳細な検討は、次報以降において引き続き検討する予定である。

5. あ と が き

本報では、第 1 報⁽¹⁾ の解析結果の妥当性を検証するために五層建物試験体を用い、振動台加振実験を実施した。以下に結論を要約する。

マスダンパを主質量と副質量に分割し、さらに衝撃力を応用することにより

(1) 従来の制振装置と同等な制振性能を確保することができた。

(2) 主質量の最大駆動距離を従来の制振装置の 1/3 程度に低減できることを確認した。

よって、本制振装置は主構造物の耐震健全性の向上を目的とした制振装置として成立することが検証された。また、その応答は解析により十分に再現しうることを確認した。

今後は本装置の実用化を目指し、以下の項目について検討し、報告する予定である。

(1) ストップ距離をせばめた際に、カオス的挙動を示すことがあることを第 1 報⁽¹⁾ にて報告したが、この点に関して明確にし、本装置のより詳細な設計法を確立する。

(2) 実建物に適用した際の制振性能を応答計算により把握する。

(3) 居住性向上の観点から、副質量のアクティブ制御化を図る。

最後に、本研究を実施するにあたり御協力いただいた元東京電機大学学生の渋谷真氏、坂口忍氏、小松沢聡氏に感謝の意を表する。

文 献

- (1) 藤田聡・ほか 5 名, 副質量を有する建物制振用マスダンパに関する研究(第 1 報), 機論, 61-587, C(1995), 2800-2805.