高減衰ゴムダンパを用いた高層建物の制振に関する研究*

(第1報, 高層建物モデルを用いた振動実験と応答解析)

藤田 聡^{*1}, 藤田 隆史^{*2}, 古屋 治^{*3}
森川 尚一^{*4}, 水津 洋二^{*4}

Vibration Control of High-Rise Buildings Using High-Damping Rubber Damper (1st Report, Shaking-Table Test and Response Analysis)

Satoshi FUJITA, Takafumi FUJITA, Osamu FURUYA,
Shoichi MORIKAWA and Yoji SUIZU

Research and development of a new type of high-damping rubber damper for high-rise buildings/structures to mitigate earthquake or wind-induced structural response is described in this paper. Tall buildings/structures can undergo excessive structural deflexions, at their resonant frequencies, due to excitation from strong earthquake motion or wind effects. Also, for weak earthquakes, which occur several times a year in Japan, or for weak wind, it is considered that the structural aseismic comfort will be strongly needed in the near future. The high-damping rubber damper developed in this study dissipates energy sufficiently, and the responses of the building are significantly reduced.

Key Words: Vibration Control, High-Damping Rubber Damper, Earthquake, Wind-Induced Vibration

1. ま え が き

近年, 地震や風により高層建物や塔状構造物などの建築物に生じる振動を効果的に抑制する制振構造の研究開発が盛んに行われている^{(1)~(3)}。制振構造は, 一般的に建物の頂部(あるいは最上階)に付加的な質量を設け, それを駆動するときの反力を利用して振動を抑制するマスダンパ方式(パッシブ/アクティブ)の物と, 建物各層間に付加的な減衰装置を設けて振動エネルギーを吸収する形式の物に大別される。いずれの形式の制振構造を採用する場合にも, 居住性向上等の観点から, 常時吹く風や年に数回は生じる弱・中小地震(建物の層間変形量は小さい)に対して十分な制振効果を発揮する装置であることはもちろんのこと, 大地震(強風)時における当該建物の耐震性(耐風性)を向上させ, その安全性を高めることの可能な装置であることが望ましい。

これらの要求性能を満たすべく, 著者らは本研究において建物層間設置方式の低剛性・高エネルギー吸収能を有する高減衰ゴムダンパを新たに開発している。本報では, 上記の観点から, 本ダンパを用いた制振構造建物モデルに対して,

(1) 耐震性向上を目的とする, 地震動が50 kine (=0.5 m/s)を超える大(地震)入力に対する制振性能

(2) 居住性向上を目的とする, 微小入力(建物の層間変形は非常に小さい)に対する制振効果を検証するために実施した振動実験および応答解析について報告する。

2. 高減衰ゴムダンパ

2.1 高減衰ゴムダンパ 図1は実験に用いた高減衰ゴムダンパである。本ダンパは, SEBS(スチレン-エチレン-ブタジエン-スチレン)系高分子材料を主要な成分とする特殊な低硬度高減衰ゴム材を使用している。今回の実験では, $70 \times 70 \times 10^3$ mmの寸法を有するゴム板を鋼板の間にサンドイッチ状にはさみ込み, 90°C で約15分間加圧接着する構造を採用した。同寸法の物に対して 130°C で約60分間の加圧接着を要する一般的な加硫高減衰ゴム材と異なり, 本高減衰ゴム材は未加硫状態において使用することに特徴がある。

* 原稿受付 平成4年12月21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} 正員, 東京大学生産技術研究所(●106 東京都港区六本木7-22-1)。

^{*3} 学生員, 東京電機大学大学院。

^{*4} 正員, (株)ブリヂストン研究開発第2本部(●187 小平市小川東町3-1-1)。

一般に層間設置方式のダンパは、地震などにより当該建物に変形が生じた場合、ダンパ自体の変形によりエネルギーを吸収するが、同時に、当該建物に剛性を付加することになるため、当然のことながら低剛性かつ高減衰能を有する材料を選択することが望ましい。

図2(a), (b)は各々、本未加硫高減衰ゴム材と通常の加硫高減衰ゴム材(ここでは、一例として積層ゴムなどに使用するものを示す)のせん断弾性係数 G と損失係数 $\tan \delta$ をひずみに対して比較した材料試験結果である。本高減衰ゴム材が極めて低剛性で高減衰能を有していることが本図より示されるが、特に、微小変形領域においてせん断弾性係数(剛性)が大幅に増大するようなことがないため、微小振幅入力に対する制振性能に悪影響を及ぼすことは少ないものと考えられる。

2.2 予備的加力実験 振動実験に先立ち、高減衰ゴムダンパの復元力特性を予備的に調査するため

図1 実験に用いた高減衰ゴムダンパ

(a)

(b)

図2 せん断弾性係数と損失係数

に、図3に示す実験装置に本ダンパ1体を装着し、正弦波加力実験を実施した。ここでは、ダンパのせん断剛性の変位振幅依存性と減衰力の速度依存性をおもに検討し、本ダンパを建物モデルに装着した際の制振性能を簡易的に評価できる解析モデルの作成を目的とする。

ダンパの復元力特性を等価ばね定数 K_D と減衰係数 C_D を用いて評価する。これらの値は、図4に示すような任意の振幅 X_m の復元力特性ループに対して、以下のように算出する。

$$K_D = F_m / X_m \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$C_D = F_0 / v_{\max} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 F_m は最大荷重を、 F_0 は荷重切片の値(最大減衰力)で $v_{\max}$ はこの時の速度(最大速度)である。

図5は、0.2~1.0 Hzの加力振動数範囲における等価ばね定数の振幅依存性を示したもので、実験結果は振動実験結果に対応させるため2体分で示してある。剛性は、微小振幅領域から振幅の増大とともにゆるやかに減少し、せん断ひずみ50%(振幅5mm)以上の領域においてはほぼ一定となる。また、振動数依存性も認められるが、振幅が増大するにつれその差は減少する。したがって、比較的大きな変形が想定される大入力時には線形剛性モデルで対応できるが、居住性向上を目的とする小変形領域ではその非線形性を考慮する

図3 静的加力実験装置

図4 復元力特性ループに対する等価ばね定数、減衰力の算出方法

必要がある。また、想定される建物層間変形に対してどの程度のゴム厚を設定するかにより、線形モデルによる設計対応範囲が異なってくるため、この点に関しては本ダンパの破断強度を含めて別途詳細に検討する予定であり、その結果については次報において報告する。

図6は、最大減衰力の速度依存性を示している。本ダンパの減衰力特性は線形粘性減衰のそれに極めて近いものであり、ほぼ速度に比例するものであることが確認された。これらの実験結果をもとに、後述する地震応答解析においては、本ダンパの復元力特性として、振幅依存性を考慮した剛性 K_D [式(3)]と減衰係数 C_D [式(4)]を仮定した。実験結果と比較のため、これらを図5, 6に実線を用いて示すが、両者ともよい一致を示していると思われる。

$$K_D = 1.0 \times 10^6 \{1.2 \exp(-7.0 \times 10^2 |x|) + 1\} \text{ N/m} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$C_D = 6.5 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{s/m} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 x はせん断変形量を示す。

3. 実験装置および実験方法

図7は実験に用いた5層の高層建物モデルで、図8に示すように、総高さ3580 mm、総質量6029 kgの鉄骨造モデルである。建物の各次固有振動数は1次が2.52 Hz、2次が7.50 Hz、3次が12.0 Hz、4次が15.5 Hzであるが、5次に関しては振動実験においては確認できなかった。

振動実験は正弦波加振、地震波加振(ともに水平一

図5 ダンパ剛性の変位振幅依存性

図6 減衰力の速度依存性

方向加振)をダンパのある場合(各層2体設置, 図8参照), ない場合に対して実施した。実験に用いた地震波はEl Centro NS(Imperial Valley地震, 1940年), Taft NS(Kern County地震, 1952年), 八戸NS(十勝沖地震, 1968年)の3波, そしてBand-Passed White Noise (1-25 Hz)の計4波である。

計測は, 図8に示すように, 振動台と建物各スラブの加速度, 建物の各層間変位を制振性能評価のため測定した。また, 加振中のダンパの復元力特性を直接把握するため, ダンパ取付部に生じるひずみを計測し, ダンパに加わる力を求めた。さらに, 加振時のダンパの温度上昇を熱電対を用いて測定した。

4. 実験結果および解析結果

4.1 解析モデル ここでは, 式(3), (4)に示した剛性と減衰係数によって本ダンパの復元力特性を表し, 建物モデルを線形5自由度モデルとしてRunge-Kutta-Gill法により地震応答解析を実施する。以下に運動方程式を示す。

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = -M\ddot{z}_H \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに,

$$X = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5]^T, \quad I = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]^T$$

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_5 \end{bmatrix}$$

図7 5層鉄骨構造高層建物モデル

$$C = \begin{bmatrix} c_1 + C_{D1} + c_2 + C_{D2} & -c_2 - C_{D2} & 0 & 0 & 0 \\ -c_2 - C_{D2} & c_2 + C_{D2} + c_3 + C_{D3} & -c_3 - C_{D3} & 0 & 0 \\ 0 & -c_3 - C_{D3} & c_3 + C_{D3} + c_4 + C_{D4} & -c_4 - C_{D4} & 0 \\ 0 & 0 & -c_4 - C_{D4} & c_4 + C_{D4} + c_5 + C_{D5} & -c_5 - C_{D5} \\ 0 & 0 & 0 & -c_5 - C_{D5} & c_5 + C_{D5} \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} k_1 + K_{D1} + k_2 + K_{D2} & -k_2 - K_{D2} & 0 & 0 & 0 \\ -k_2 - K_{D2} & k_2 + K_{D2} + k_3 + K_{D3} & -k_3 - K_{D3} & 0 & 0 \\ 0 & -k_3 - K_{D3} & k_3 + K_{D3} + k_4 + K_{D4} & -k_4 - K_{D4} & 0 \\ 0 & 0 & -k_4 - K_{D4} & k_4 + K_{D4} + k_5 + K_{D5} & -k_5 - K_{D5} \\ 0 & 0 & 0 & -k_5 - K_{D5} & k_5 + K_{D5} \end{bmatrix}$$

ここで、 x_i は i 層の振動台に対する相対変位、 m_i は振動台から i 番めの質量、 c_i 、 k_i は各々 i 層の建物モデルの減衰係数と剛性、 C_{Di} 、 K_{Di} は各々 i 層に設置される高減衰ゴムダンパの剛性と減衰係数、 z_H は振動台の変位である。なお、今回の実験においては、建物モデル、ダンパともに1層から5層まですべて等しい剛性、減衰を有するものとして設計、製作した。

4・2 正弦波および地震波に対する制振性能 図9は入力加速度一定(1 m/s^2)の場合の建物モデル各質量の応答加速度と各層間変位をダンパの有無で比較した共振曲線である。ただし、ダンパなしの場合は1次共振点における応答が過大となるため、この近傍では入力を低減し、系は線形であるとみなし、応答倍率をもとに整理した。1次共振点での応答はダンパを装着することにより 51.4 m/s^2 から 2.73 m/s^2 へと大幅に低減され、また2次モード以上の高次共振応答は実験では確認されないほど抑制された。なお、1次モード

減衰比は実験結果より約18%と求められるが、ダンパの剛性が各層間に付加されたため、本系の1次固有振動数は非装着時の 2.52 Hz から 2.90 Hz へと上昇した。一般に、この種の層間ダンパは建物に剛性を寄与するが、建物剛性の過大な変化は建物の設計自体にとっては好ましくなく、使用するダンパ容量の設定には細心の注意を要する必要があるため、今後この点に関して検討を行う予定である。ただし、図2にも示したように、本ダンパの剛性はその減衰能に比較して極めて低い値となっているため、高層建物制振用の層間ダンパとしては、基本的に有利な特性を有していると考えられる。

図10はEl Centro NS波加振時の応答を制振/非制振時で比較したものである。入力加速度を 1.2 m/s^2 から振動台の加振能力限界である 6.8 m/s^2 まで漸次増大させた際の建物モデル各質量の最大応答加速度と最大応答変位(振動台からの相対変位)を示している。た

図8 実験供試体と計測箇所

図9 応答加速度と層間変位に関する共振曲線

だし、ダンパなしの場合の結果については、実際には 1 m/s^2 を加振目標にして得られた結果を、対応するダンパありの場合の入力レベルに一致させるような入力比で結果を線形倍したものである。

比較的ひん繁に生じる小規模の地震から壊滅的な被害が想定される巨大地震[最大速度レベルが 50 kine ($\approx 5 \text{ m/s}^2$) 以上]に相当する入力に対して、ダンパを装着することにより、いずれの応答量も $1/2 \sim 1/3$ へ低減している。また、ダンパ装着時の応答は、入力加速度が 5 m/s^2 程度まで、ほぼ入力の大きさに比例して

増大しているが、このことは本ダンパの減衰力特性が線形粘性減衰のそれに極めて近いことを改めて示すものである。なお、この特性は制振性能上のみならず、制振構造建物を設計する際に基本的には線形設計で対応するという利点となると考えられる。なお、図中の破線は応答解析結果で、図 11 の応答解析波形例にも示すとおり、入力加速度が 5 m/s^2 程度までの範囲において非常に良好な一致を示しており、予備的加力実験において提案した線形粘性減衰仮定の妥当性が、振動実験によっても確認された。

図 12 は、地震波加振の各入力波について、各々の最大入力時における建物モデル各質量の最大応答加速度および最大応答変位を制振/非制振で比較したものである。本ダンパを適用することで、いずれの地震波の場合も、建物の応答加速度は約 $1/2$ から $1/3$ に減少し、また応答変位は約 $1/3$ から $1/4$ に減少しており、このような強地震動に対する十分な制振効果が得られている。

なお、加振中、熱電対を用いてダンパの温度上昇を測定したが、El Centro NS 6.77 m/s^2 加振において、 25.9°C から 26.3°C へと 0.4°C の温度上昇を記録したものが最大であった。一般的に、本ダンパのように、粘弾性的な特性を有する材料は、その力学的特性の温度依存性が大きいと考えられるが、今回の実験で計測された温度変化範囲内でのダンパとしての特性変化はいっさい認められなかった。ただし、実用に際しては、環境温度変化によって生じる諸力学的特性の変化を設計

図 10 El Centro NS 波加振時の制振性能

図 11 地震応答波形例(実験結果と解析結果の比較)

時に十分に考慮する必要がある。そこで現在、本ダンパに対して、恒温槽を用いた加力実験を実施しており、減衰や剛性等の温度依存性に関する詳細な検討結果については次報において報告する。

図13はEl Centro NS 6.77 m/s^2 加振時のダンパの復元力特性である。ダンパに加わる力は、ひずみゲージによって測定したひずみを別途、本ダンパに対して

静的加力試験を実施することで校正し導出した。復元力特性はだ円状のループを描き、極めて粘性減衰力特性に近い特性であることが再確認できる。また、剛性に関しては変位振幅が小さいほど、ヒステリシスループの傾きが大きくなっていることから、図5に示した結果と同様に振幅依存性のあることが示された。本実験では、建物各層に設置するダンパの容量をすべて等

図12 制振性能

図13 高減衰ゴムダンパの復元力特性例

図 14 微小振幅振動入力に対する制振性能

しくしたため、当然のことながら、大きな層間変位の生じる下層ほど、大きなヒステリシスループを描いている。対象とする建物にとって最適なダンパ容量および各層への分配量を設計時に把握することは極めて重要な問題であり、今後、この点に関しても検討を加えていく予定である。

4.3 微小振幅動に対する制振性能 以上で検討した制振性能は、基本的に、建物に大きな層間変形が生じるような大レベルの地震入力に対する、すなわち耐震性向上の観点からのものであった。しかし、通常吹いている風や発生頻度の高い弱地震動に対する制振効果、すなわち居住性の向上を期待するためには、小さな層間変形量に対しても効果のあるダンパを使用することが条件となる。そこで、今回の実験では、加速度数 gal ($=\text{cm/s}^2$)、絶対変位振幅 10 数ミクロンオーダの微小振幅動入力に対する制振効果も調査した。

図 14 は上記のレベルの微小振幅動に対する制振性能を示したものである。このような極めて小さな振幅の振動入力に対しても、本ダンパを装着することにより応答加速度、応答変位はそれぞれ非装着時の約 1/2 程度に低減した。実用上、この制振性能はダンパ取付精度等に依存するものとなるが、本ダンパは基本的には微小振幅振動領域から弱風あるいは弱地震そして強地震動までの幅広い範囲での振動エネルギー吸収能力を有していることを確認した。

5. あとがき

本報では、著者らが開発した高減衰ゴムダンパを高層建物に適用した場合の制振性能を、振動実験、応答解析により検討した。本ダンパは数 10 ミクロンといった非常に小さな振幅の振動から、速度レベルで 50 kine 以上という大地震までの幅広い振動に対して良好な制振効果を示し、また、その減衰力特性は線形粘性減衰力特性に極めて近いものであることを確認した。今後は、本ダンパの実用化を目指し、おもに下記の点について検討していく予定である。

- (1) 減衰力と復元力特性の温度依存性および繰返し特性の明確化とダンパの設計法。
- (2) 実大サイズのダンパ試作とその加力実験。
- (3) ダンパの最適容量とその各層最適分配法。

最後に、本研究を実施するにあたり、御協力いただいた東京大学生産技術研究所 嶋崎 守氏ならびに元東京電機大学学生、上原眞佐雄氏、江本健吾氏、山家弘行氏に感謝の意を表する。

文 献

- (1) 藤田, 機械の研究, 53-495, C (1991), 2310.
- (2) 吉田・ほか 2 名, 機論, 53-495, C (1987), 2310.
- (3) Zhang, R-H., ほか 2 名, *Int. J. Earthqu. Engng. Struct. Dyn.* 18 (1989), 389.