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4報, 実大ダンパの加力実験とその制振性能の検討)

藤田 聡^{*1}, 古屋 治^{*2}, 藤田隆史^{*3}, 水津 洋二^{*4}
笠原 康宏^{*4}, 寺本 隆幸^{*5}, 北村 春幸^{*6}Vibration Control of High-Rise Buildings Using
High-Damping Rubber Damper(4th Report, Loading Tests of Full-Size Cylinder Type High-Damping Rubber
Damper and Examination of Its Vibration Control Performance)Satoshi FUJITA, Osamu FURUYA, Takafumi FUJITA, Yoji SUIZU,
Yasuhiro KASAHARA, Takayuki TERAMOTO and Haruyuki KITAMURA

Many vibration control systems, which are divided into a mass damper system and a storey-installation damper system, for habitability or seismic-safety improvement in high-rise buildings have been developing in recent years. However, a passive energy absorbing system will be the most ideal devices if we consider to reduce the structural responses against the various levels of inputs such from traffic induced vibration to destructive vibration. This study has been developed the vibration control system of an energy absorbing type used the high-damping rubber as a vibration control material. We had already cleared experimentally and analytically that the high-damping rubber damper has stable damping performances in wide vibration area through the various loading tests and the shaking table tests. In this paper, the fundamental performances and the vibration control effects of the full-size high-damping rubber damper which was made from the results up to this time is described.

Key Words: Vibration, Control, High-Damping Rubber Damper, Loading Tests, Seismic Response Analysis

1. ま え が き

近年, 高層建物における居住性や耐震安全性の向上を目的とする各種の制振装置が実用化され始めている⁽¹⁾. 制振装置は, 付加質量搭載形式と層間エネルギー吸収形式に大別されるが, 一般に付加質量搭載形式に関しては, 搭載質量やその駆動距離の制限から建物の居住性向上を対象としたものが多い. このため, 居住性の向上から巨大地震時の耐震安全性向上までといった広範囲の振動領域での制振効果を期待する場合, 層間エネルギー吸収形式が最も有効なものになると考えられる. そこで, 本研究では, 制振材料として国内で独自に開発された極めて高い減衰を有する低硬度高減衰ゴム材料を用いた層間エネルギー吸収形式の制振装置に関する研究開発を目的とする. 本装置は, 高

層/超高層建物や比較的断面積の小さな建物を対象とし, 当該建物における居住性向上や耐震安全性向上の要因となる地震や風あるいは交通振動等の外乱により生じる大きささまざまな振幅の振動の低減を性能目標とする. 本研究ではすでに実験供試体を用いたさまざまな加力実験や振動実験から, 高減衰ゴムダンパが開発目標となる微小なせん断ひずみ振幅振動から過大なせん断ひずみ振幅振動までの領域で安定した減衰性能を有することを実験的, 解析的に明らかにしている^{(2)~(4)}.

本論文は, これまでの研究結果をもとに設計・試作した実規模高減衰ゴムダンパに対して実施した加力実験, および本実験結果より作成したダンパ解析モデルを用いた地震応答解析からその制振性能を検討する. 実験では, 実大規模高減衰ゴムダンパの力学特性の調査とともに本ダンパの設計に用いた設計特性式⁽⁹⁾の有効性を検討した. また, 地震応答解析では, 現実に近い超高層建物を想定した40層せん断形建物モデルにダンパ解析モデルを適用した際の地震応答解析を行い, 高減衰ゴム材料を制振材料として用いた本ダンパの実用化に関する有効性を評価した.

* 原稿受付 1997年3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, 東京都立工業高等専門学校(〒140 東京都品川区東大井1-10-40).*³ 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).*⁴ 正員, (株)ブリヂストン免震・制振技術開発部(〒244 横浜市戸塚区柏尾町1).*⁵ 東京理科大学工学部(〒162 東京都新宿区神楽坂1-3).*⁶ (株)日建設計東京本社(〒112 東京都文京区後楽1-4-27).

Fig. 1 Full-size high-damping rubber damper used for loading tests

2. 実大規模高減衰ゴムダンパ

2.1 実大規模高減衰ゴムダンパの構造 図1は、実験に用いた実大規模高減衰ゴムダンパである。本ダンパは、その開発目標の一つとして、ダンパを取付けるための部材を必要とせずブレース材などのようにダンパ本体を直接構造体に取付けることができる構造を考えている。このため、その形状をシリンダ状にし、建物のさまざまな部位への装着を可能にする構造とした。また、実際の建物への設置時での取付等を考慮し、外径150 mm、全長1200 mm程度となるように市販の配管用炭素鋼管を用いて製作した。ダンパ両端にはユニバーサルジョイントを使用し軸直角方向変形時の建物への剛性寄与を抑制する構造を採用した。さらに、両端ジグの内径をシャフト外径に接するようにすることでシャフト自重による高減衰ゴムの圧縮変形とせん断変形時のシャフト傾斜を避ける構造となっている。ダンパ内に充てんした高減衰ゴム材料の形状寸法は、建物の階高：4 m、最大層せん断変形角：1/200を想定し、これにより算出される最大層せん断変形量20 mmが高減衰ゴム材料のせん断ひずみ100%相当になるようゴム厚の設計を行った。以上の観点から選択した配管用炭素鋼管より、高減衰ゴム材料の形状寸法は外径155.2 mm、ゴム厚20.45 mmとした。また、ゴム長さは最大減衰力の目標値を98 kNとして1000 mmに設定した。

2.2 基本特性調査実験の概要 図2は、加力実験装置である。加力実験装置は、最大荷重196 kN、最大加振振幅200 mmの油圧アクチュエータを使用した。ダンパは、鉛直に設置した状態で、加振周波数一定のもとで加振振幅を増大させる変位制御による正弦波加力実験を行った。計測に関しては、ダンパの復元力をアクチュエータ内蔵のロードセルで、また、ダンパの変形量をジグとアクチュエータ支持部との間に設置した変位計により計測した。なお、実験中のダンパの温度依存性に注意するため、シリンダ下部と中部

Fig. 2 Schematic view of loading tests equipment

Fig. 3 Restoring force characteristic

に熱電対を装着し実験中の温度を計測した。実験中の環境温度は、実験室内のエアコンディショナーにより20°Cを目標に管理した。

2.3 実大規模高減衰ゴムダンパの基本特性 図3に、実験結果の一例として加振周波数0.2 Hzにおいてせん断ひずみ振幅をパラメータとした場合の復元力特性を示す。復元力特性はこれまでの研究段階で用いた実験供試体同様、だ円形状を示し、また、せん断ひずみ振幅の増大に伴って復元力切片の値が比例的に増大する線形粘性減衰特性に近い特性が示されている。せん断ひずみが100%付近に増大した場合では、

復元力切片に若干低下が認められ粘性減衰仮定の適用が困難であるが、エネルギー吸収に関しては履歴減衰的に吸収していることから実際の使用では制振効果への影響はないものと考えられる。

図4は、周波数をパラメータとした剛性のせん断ひずみ振幅依存性である。図4中、プロットが実験値を、実線および点線が第2報で導出した設計特性式⁽³⁾より算出した設計特性を示している。剛性は、せん断ひずみ振幅が増大するに従い緩やかに低下するものの、大変形領域での極端な低下や、積層ゴム等に使用する加硫高減衰ゴム材料で見られるような微小変位領域での大幅な剛性の増大は認められない。また、本ダンパの剛性は、建物に使用する構造材料の剛性と比較して建物設計時にはほぼ無視できる程度のものである。このため、制振建物設計時には基本的にダンパの減衰に関する設計が必要であると考えられる。設計特性式より算出された特性は、実際のものよりも周波数依存性を過大に表しているが、定性的には実験値を表現していると思われる。

図5は、減衰係数のせん断ひずみ振幅依存性である。減衰係数は、せん断ひずみ50%以上でやや低下する傾向が認められるものの、ほぼ一定とみなせる特性

Fig. 4 Displacement dependency on stiffness

Fig. 5 Displacement dependency on damping coefficient

である。大せん断領域での特性の低下傾向は、本ダンパが過大なせん断ひずみ振幅領域で履歴ダンパ的な特性を示すことに起因すると考えられる。なお、実験より得られたダンパの減衰係数の特性は、設計特性値と良好な一致が示され、設計特性式の有効性を示す結果となった。

以上のように、実大規模ダンパの力学特性は、基本的に線形として扱うことができるものと想定し、以下の地震応答解析では高減衰ゴムダンパの解析モデルを線形ダンパモデルとして用いることとした。

3. 地震応答解析

3.1 解析モデル 図6は、地震応答解析に用いた建物モデルとダンパ解析モデルである。建物モデルは、超高層建物を想定した高さ160m、階高4mの極めて現実に近い特性を有するモデルであり、その一次固有周期は4秒である。解析では、40質点系せん断形建物モデルとして取扱い、建物の剛性分布は、1階が1.0に対して40階が0.5の割合になるよう設定し、その中間層は線形補間で配分するものとした。なお、解析上、建物モデルは弾性として用いている。また、構造減衰は、剛性比例形減衰とし、一次モード減衰比を1.0%に設計した。実大系高減衰ゴムダンパの解析モデルは、先の加力実験結果をもとに作成した。まず、ダンパの剛性に関しては、図4が示すように構造剛性に対して極めて小さいことから、振幅および周波数の依存性を無視し実験結果の平均値である4.5 MN/mとした。次に、ダンパの減衰係数は、第2報で導出した設計特性式にダンパの形状係数を代入し、さらに、本建物の1次固有振動数を用いることで、周波数依存性を無視できるものと仮定した。なお、本ダンパが有する温度依存性に関しては環境温度が管理された室内

• 40-storey building model

- Structure height: 160 m
- Sectional size: 40 × 40 m
- Storey - height: 4.0 m
- Each floor - mass: 980,000 kg
- Structural stiffness distribution

- 1st modal damping ratio: 1.0 %

• Storey - installation type damper model

- Stiffness: $K_D = 4.5 \text{ MN/m}$
- Damping coefficient: $C_D = 2.5 \text{ MNs/m}$

Fig. 6 Analytical model of building and damper

Table 1 Comparison of responses on top floor in each input wave

Number used of dampers	El Centro NS 2.5 m/s ² Input				Artificial Earthquake 1.38 m/s ² Input			
	0	10	20	30	0	10	20	30
max. acc. m/s ²	2.18	1.22	1.07	0.961	2.81	2.14	1.32	1.62
rms acc. m/s ²	0.595	0.361	0.284	0.247	0.820	0.585	0.457	0.376
max. disp. mm	2.19	1.17	0.965	0.815	2.86	2.05	1.65	1.24
rms disp. mm	0.602	0.344	0.256	0.211	0.835	0.57	0.421	0.330

への設置を仮定し、環境温度を 20°C とした。これより、ダンパの減衰係数は、2.5 MNs/m とした。

3・2 地震応答解析 地震応答解析では、建物各層に設置するダンパ数をパラメータとし、各層に 10, 20, 30 体設置する場合の制振効果を検討した。入力波は、El Centro NS 波(Imperial Valley 地震, 1940 年)と高層/超高層建物の設計用に作成された長周期領域における速度応答スペクトルがほぼ一定の値になる設計用人工地震動⁽⁵⁾⁽⁶⁾である。なお、本解析では、建物の耐震健全性の観点となるレベル 1 (最大速度 25 cm/s) 相当に入力波を線形倍して用いた。数値積分法には、耐震工学でよく用いられている Runge-Kutta-Gill 法により地震応答解析を行った。なお、運動方程式を以下に示す。

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = -[M]\{1\}\ddot{z}_H$$

$$[C] = [C_s] + [C_D]$$

$$[K] = [K_s] + [K_D]$$

ただし、

$[M]$: 質量マトリックス (40×40)

$[C]$: 減衰マトリックス (40×40)

$[K]$: 剛性マトリックス (40×40)

$[C_s]$: 構造減衰マトリックス (40×40)

$[C_D]$: 高減衰ゴムダンパ減衰マトリックス (40×40)

$[K_s]$: 構造剛性マトリックス (40×40)

$[K_D]$: 高減衰ゴムダンパ剛性マトリックス (40×40)

$\{x\}$: 変位ベクトル (40×1)

$\ddot{z}_H$: 入力地震加速度

図 7 は、El Centro NS 波 2.5 m/s² と設計用人工地震波 1.38 m/s² をそれぞれ入力波とした場合の最上階の応答加速度と層間変位の時刻歴応答波形である。なお、ここでは解析結果の一例として各層に高減衰ゴムダンパを 30 体設置した際の結果を示している。結果が示すように、高減衰ゴムダンパの設置により各応答波形が低減されており、視覚的にその制振効果を見ることができる。また、表 1 は、本解析結果より得られる最上階での応答に関して、最大値と RMS 値を用いてそれぞれまとめたものである。結果より、El

(a) Response acceleration (El Centro NS)

(b) Response relative displacement (El Centro NS)

(c) Response acceleration (Artificial Earthquake)

(d) Response relative displacement (Artificial Earthquake)

Fig. 7 Time history responses in top floor

Centro NS 波を入力波とした場合、建物の応答加速度に関しては、各層 30 本設置で、最大応答加速度を 44% に、RMS 応答加速度を 41% に、また、最大応答層間変位を 37% に、RMS 応答層間変位を 34% に低減している。次に周波数特性から El Centro NS 波よりも低次での各モードが励起されやすい設計用人工地震動を入力波とした解析結果では、制振効果が若干低下

するものの、先の解析条件同様各層に30本設置した場合、最大応答加速度を58%に、RMS 応答加速度を49%に、最大応答層間変位を43%に、RMS 応答層間変位を58%に低減している。

図8は、各入力波での解析結果を、各層に設置するダンパ数をパラメータとして示したものである。各結果とも、左図が各層の最大応答加速度、右図が各層の最大層間変位を示している。結果より、各層への設置ダンパ数の増大で制振効果が大きくなっていることがわかる。しかしながら、その制振効果は、表1からもわかるように、設置ダンパ数の増大と比例関係にはなく層間設置形制振装置の効果的な配置方法が存在するものと考えられる。このことは、図9に示す復元力特性においても確認できる。本図は、各層30本設置時の解析における1, 10, 20, 30, 40層でのダンパ単体の復元力特性を示したものである。図が示すように、今回の解析では各層に等本数のダンパを設置したため、低高層間でのダンパのエネルギー吸収量に大きな差が見受けられる。このように、層間設置形制振装置を用いる場合、制振建物の設計段階で当該建物に使用する制振装置の総数や設置個所に制限がある場合、効率のよい配置方法を検討し、より経済的かつ効率的な制振効果を得ることが望ましいと考えられる。なお、解析では、同様の解析条件でモード解析を行い、各層に高減衰ゴムダンパを30体設置することにより建物の一次モード減衰比を3.5%程度上昇させることが可能であることを確認している。

(a) El Centro NS 250 gal input

(b) Artificial Earthquake 138 gal input

Fig. 8 Maximum responses in each storey

Fig. 9 Restoring force in each floor

4. 結 言

本報では、実大規模の高減衰ゴムダンパに関する加力実験と、実験結果をもとに作成した高減衰ゴムダンパの解析モデルおよび40層せん断形建物モデルを用いた地震応答解析から、高減衰ゴムダンパの実用化に関して評価した。得られた結果を要約すると以下のようになる。

(1) 実大規模高減衰ゴムダンパの剛性および減衰係数に関する力学特性は、ほぼ線形と見なすことができ、また、広範囲のせん断領域で安定した減衰効果を期待できる。

(2) 装置の基本特性は設計値と良好な一致を示し、第2報で導出した設計特性式が形状係数に依存せず十分有効である。

(3) 地震応答解析より、各層に30体の高減衰ゴムダンパを設置した場合、いずれの入力波に対しても、最上階の応答加速度、応答変位を1/2程度に抑制することが示された。

これより、本研究により設計・試作された実大規模

高減衰ゴムダンパは、十分実用に供し得る制振性能を有することを明らかにした。また、地震応答解析では、実大規模高減衰ゴムダンパを各層に30体設置することで建物の一次モード減衰比を3.5%程度上昇させることが可能であることも確認した。

謝 辞

最後に、本研究を実施するにあたり、ご協力いただいた元東京電機大学学生 小川敦司氏、柏倉航氏、海保稔氏に感謝の意を表する。

文 献

- (1) 例えば、藤田隆史・ほか7名, 第9回日本地震工学シンポジウム論文集, Vol.2, (1994), 2005-2010.
- (2) 藤田聡・ほか4名, 機論, **59**-565, C(1994), 2636-2642.
- (3) 藤田聡・ほか4名, 機論, **61**-585, C(1995), 1885-1890.
- (4) 藤田聡・ほか6名, 機論, **64**-617, C(1997), 86-91.
- (5) 北村春幸・ほか3名, 日本建築学会講演梗概集, (1995), 287-288.
- (6) 山根尚志・ほか3名, 日本建築学会講演梗概集, (1995), 289-290.