金属棒の連続塑性曲げを利用した弾塑性ダンパーの建物内機器への適用

AN APPLICATION OF AN ELASTOPLASTIC DAMPER UTILIZING CONTINUOUS PLASTIC BENDING OF THIN METAL RODS TO EQUIPMENT IN A BUILDING

荒川利治 — *1

大亦絢一郎 — *2

Toshiharu ARAKAWA — *1

Kenichiro OHMATA — *2

キーワード:

弾塑性ダンパー, 塑性ヒンジ理論, 金属棒, 地震応答, 床応答スペクトル

Keywords:

Elastoplastic damper, Plastic hinge theory, Thin metal rod, Earthquake response, Floor response spectrum

An elastoplastic damper utilizing continuous plastic bending of thin metal rods, which are made of aluminum, copper, or steel, is developed. This new type of the damper is composed of two racks, four pinions, some thin metal rods, two rollers which wind the rods around, and guide rollers. The resisting force characteristics and fatigue strength of the damper were measured using a shaking table. And the elastoplastic damper is applied to the equipment in a building on purpose to decrease seismic responses. The application range of this damper by using floor response spectra is discussed.

1. はじめに

免震装置用減衰機構の一つに弾塑性ダンパーがある。弾塑性ダンパーは、構造が単純で安価なこと、維持管理が容易なこと、熱などの環境による影響が少ないこと、特性の経年変化が少ないこと、などの優れた特徴を持っている。これまでに、免震建物のダンパーとして、弾塑性ダンパーが多く用いられてきている。ループ鋼棒ダンパー¹⁾、直線鋼棒ダンパー²⁾、U字型弾塑性ダンパー³⁾などはその例である。一方、機器免震用あるいは配管系用の弾塑性ダンパーに関する研究・開発も広く行われている^{4)~6)}。しかし、一般に、弾塑性ダンパーは、微小変位時の減衰性が少なく、耐久性はあまり優れていない。

筆者らは、ラック、ピニオンおよびローラを用いて、細い金属棒を巻き取り、その金属棒を連続的に塑性曲げ変形させるタイプの弾塑性ダンパー⁷⁾を開発した。本報告では、この新しいタイプの弾塑性ダンパーに関する構造を説明する。次に、弾塑性ダンパーを試作して、動的な実験を行うことにより抵抗力特性および耐久性を調べる。さらに、床応答スペクトルを用いて、建物内床上の機器、装置等の地震応答低減を目的とする本弾塑性ダンパーの適用性を検討するものである。

2. 弾塑性ダンパーの構造

開発した弾塑性ダンパーの構造を図1に示す。左右のロッドエンド間に相対直線運動を与えると、ラックとピニオンにより、ピニオンに取り付けられた2個のローラが図2のように回転する。このとき金属棒は3個のガイドローラにガイドされて確実に一方のローラから送り出され、他方のローラに巻き取られる。金属棒がローラか

図1 弾塑性ダンパーの構造

図2 金属棒の連続塑性曲げのメカニズム

*1 明治大学理工学部建築学科 助教授・工博
(〒214-8571 川崎市多摩区東三田1-1-1)

*2 明治大学理工学部機械情報工学科 教授・工博

*1 Assoc. Prof., Dept. of Architecture, School of Science and Technology, Meiji Univ., Dr. Eng.

*2 Prof., Dept. of Mechanical System Science and Engineering, School of Science and Technology, Meiji Univ., Dr. Eng.

ら離れる点およびローラに接触し始める点の2箇所で連続的に塑性曲げ変形が生じて、ダンパーには次式で与えられる抵抗力 F_s が発生する。

$$F_s = 2 n M_p / r \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 M_p : 棒の全塑性モーメント、 n : 棒の本数、 r : ピニオンのピッチ円半径を表す。棒の直径、降伏応力を d , σ_y とすると、全塑性モーメント M_p は次式で与えられる。

$$M_p = d^3 \sigma_y / 6 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、棒が常に塑性変形するためには、ローラの半径 R を、

$$R < E I / M_p \quad \dots\dots\dots (3)$$

に設計することが必要となる。ここで、 E : 棒のヤング係数、 I : 棒の断面二次モーメントを表す。

一方、ピニオンの回転中心におけるモーメントの釣合から、

$$F_s \cdot r = f_s \cdot R \quad \dots\dots\dots (4)$$

となる。

本弾塑性ダンパーの弾性域における剛性 ke を、金属棒が2個のローラと接する2点間の金属棒における軸方向の弾性歪により定めれば、弾性剛性 ke は(5)式で与えられる。

$$ke = (R / r)^2 (n A E / L) \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 A : 棒の断面積、 L : ローラ間の距離を表す。

3. 抵抗力特性

$R=25\text{mm}$, $r=17.5\text{mm}$, $L=80\text{mm}$, $n=1$ の弾塑性ダンパーを製作した(写真1, 写真2)。水平振動台を用いて、この弾塑性ダンパーの抵抗力特性(履歴曲線)に関する測定を行った。変位と抵抗力の測定には、それぞれインダクタンス型変位計とロードセルを用いた。直径2mm($\phi 2$)と3mm($\phi 3$)の銅棒(C1100)あるいは $\phi 3$ のアルミニウム棒(AA1100)を用いた弾塑性ダンパーに、振動数1Hz、振幅5mm, 10mm, 15mm, 20mmの正弦波を与えたときの履歴曲線を図3に示す。使用した銅棒およびアルミニウム棒のヤング係数 E , 降伏応力 σ_y は、それぞれ104GPa, 235MPaおよび70GPa, 105MPaである。理論式(1)から求まる本弾塑性ダンパーの抵抗力 F_s は、この実験

写真1 試作した弾塑性ダンパー

写真2 弾塑性ダンパーの主要部

図3 弾塑性ダンパーの履歴曲線 (振動数1Hzの正弦波加振)

により得られた履歴曲線に基づく抵抗力にほぼ一致していることがわかる。弾性剛性 ke については、微小変位では若干異なるものの、(5)式がほぼ妥当であることが確認できる。

本弾塑性ダンパーにガイドローラを用いている理由は、使用する金属棒が太くなるとその金属棒がローラにぴったりと巻き付かずに、金属棒にたるみが生じることで、抵抗力特性が理論値よりも低下してしまうことを防止するためである。ガイドローラを取り付けない場合の抵抗力特性は、 $\phi 2$ あるいは $\phi 3$ の銅棒を用いた実験においては、理論式(1)に比較して、60%程度となっていた。なお、振動時に金属棒のたるみを防止するためには、ローラへの金属棒の取り付け位置に関して、巻き付け長さを長くすることが有効である。

4. 耐久性

抵抗力の測定と同じ実験装置を用いて、本弾塑性ダンパーの耐久

性を調べた。本弾塑性ダンパーに振動数1Hz、振幅5mm、10mm、15mm、20mmの正弦波を与え、金属棒が破断するまでの繰返し数と最大抵抗力の関係を測定した。 $\phi 2$ と $\phi 3$ の銅棒あるいは $\phi 3$ のアルミニウム棒についての実験結果を図4に示す。振動振幅が大きい場合ほど本弾塑性ダンパーの最大抵抗力は大きくなった。振動振幅が小さい場合にはローラに巻き取られる金属棒の接触が僅かに不完全な状態での振動となり、理論式(1)よりも小さい抵抗力特性を示している。また、連続塑性曲げによる金属棒の寿命によって決定される本弾塑性ダンパーの耐久性は、金属棒の材質にはあまり関係せず、500～1000サイクル程度であることがわかった。地震用の制振ダンパーとしては十分な実用性を有している。金属棒における塑性化した部位での歪量は一定であることから、振動振幅が耐久性に与える影響はほとんどなかった。

図4 弾塑性ダンパーの耐久性（振動数1Hzの正弦波加振による繰返し数と最大抵抗力）

図5 建物内機器・装置への適用

図6 建物モデルの刺激関数

表1 建物モデルの固有振動数 (Hz)

建物モデル	15層	10層	5層
1st mode	0.92	1.23	2.09
2nd mode	2.56	3.52	6.13
3rd mode	4.27	5.99	11.36

表2 弾塑性ダンパーの諸数値

Damper	R (mm)	r (mm)	L (cm)	d (mm)	ke (kN/cm)	F_s (N)
X	20.0	16.0	14	2.4	49.5	93.1
Y	24.0	17.5	10	2.2	70.1	65.6
Z	30.0	20.0	9	1.8	98.0	23.8

表3 剛性 ke , 抵抗力 F_s を変化させた場合

Damper	ke (kN/cm)	F_s (N)
Y-Fs05	70.1	32.8
Y-Fs15		98.4
Y		65.6
Y-ke05	35.1	
Y-ke15	105.2

図7 弾塑性ダンパーの復元力特性

5. 建物内機器への適用

地震応答の低減を目的として、建物内床上の設備機器、精密装置あるいは配管系への本弾塑性ダンパーの適用性を、地震応答解析によって検討する。図5に示すように、本弾塑性ダンパーとばね k からなる免震装置で支持された床上の機器、装置系を1質点系に置換し、この1質点系に関するイクイップメント応答から本弾塑性ダンパーの有用性を考察する。1質点系の振動特性を変動させた床応答スペクトルを作成して、本弾塑性ダンパーを適用したことによる加速度応答、変位応答、等価減衰定数を評価する。

平面形状が同一な5層、10層、15層の3建物モデルを設定した(図6, 表1)。これら建物モデルの基礎部に、速度で基準化した El Centro 1940 NS (Elce), 八戸港湾 1968 NS (Hach), 東北大学 1978 NS (Toho) の地震動を入力し、1次モードに対して1%の内部粘性減衰を仮定した弾性応答により建物モデル第 N 層の床応答波を作成した。この床応答波を入力波として、1質点系(質量 m ; 200kg, 減衰定数1%)のイクイップメント応答解析を行った。

弾塑性ダンパーの諸数値を具体的に設定して、その剛性 ke , 抵抗力 F_s を表2に示す。次に、表3のように ke , F_s を系統的に変動させて、入力地震動、入力レベル、建物モデルを変化させた場合の応答低減効果、および本弾塑性ダンパーの適用範囲を、床応答スペクトルによって検討する。なお、弾塑性ダンパーの抵抗力-変位関係は、

図8 10層モデル最上層での加速度床応答スペクトル(建物基礎部30kine入力時)

図9 10層モデル最上層での変位床応答スペクトル(建物基礎部30kine入力時)

a) 加速度

b) 変位

図10 弾塑性ダンパーの剛性・抵抗力を変化させた場合の床応答スペクトル (10層モデル最上層, Elce: 30kine入力時)

a) 5層モデル

b) 15層モデル

図12 建物モデル別最上層での加速度床応答スペクトル (Elce: 30kine入力時)

a) 加速度評価

b) 変位評価

図11 入力レベルを変化させた場合の等価減衰定数 (10層モデル最上層, Elce入力時, Damper-Y)

抵抗力特性の実験結果よりも吸収エネルギーを若干過大評価することになるが、図7に示すようなバイリニア型の復元力特性とした。

10層モデル最上層床上的の質点系に、表2の弾塑性ダンパーを取り付け、加速度床応答スペクトルを求めて、図8に示す。どの入力地震動の場合も、建物モデル1次固有振動数と2次固有振動数のスペクトルの谷間以外では、広い範囲に渡って弾塑性ダンパーによる応答低減効果を確認することができる。図9に示す変位床応答スペクトルにおいても、全振動数領域に渡って弾塑性ダンパーによる応答低減効果が確認できた。特に、建物モデルの1次固有振動数付近においては、イクイップメント応答をかなり低減できることが明らかとなった。

10層モデル最上層床上的の質点系に、表3の弾塑性ダンパーを取り付け、床応答スペクトルを求めて、図10に示す。加速度応答、変位応答ともに弾塑性ダンパーの剛性 k_e を変化させることで、スペクトル上のピークの位置が移動している。また、抵抗力 F_s を高くすることで、広い振動数領域に渡って応答の低減が見られた。

本弾塑性ダンパーを取り付けた質点系の応答を、粘性型ダンパーに置換した場合と等価な減衰定数を求めて、図11に示す。変位評価では、全振動数領域において20%以上の等価減衰定数となっていた。

建物モデル別の最上層での加速度床応答スペクトルを図12に示す。建物が高層であるほど、床応答スペクトルの形状は平滑化され、広い振動数領域に渡って応答の低減効果を確認することができる。

6. まとめ

金属棒を連続的に塑性曲げ変形させるタイプの弾塑性ダンパーを提案・試作し、その抵抗力特性および耐久性を実験的に調べた。さらに、免震装置で支持された機器、装置系を想定して、建物内床上の質点系にこの弾塑性ダンパーを取り付けた場合の応答低減効果についての解析的な検討を行った。明らかになった事項をまとめると次の通りである。

- 1) 既存の弾塑性ダンパーと異なり、本弾塑性ダンパーは微小振幅時から十分な減衰性が発揮できる。
- 2) 抵抗力特性は、理論値にほぼ一致する。
- 3) 耐久性は、金属棒の材質、振動振幅にはあまり関係せずに、500～1000サイクル程度であることがわかった。
- 4) 建物内の機器、装置、配管系等への本弾塑性ダンパーの適応性について、建物の振動特性、質点系の質量・振動数の各設計条件に基づいた検討を行い、十分な実用性があることを示した。

謝 辞

本報告は1998-99年度の文部省科学研究費(基盤研究 B, 課題番号10450206)によるものの一部である。実験、解析にあたり、谷口貴也氏、金子智則氏、石川俊宏氏、沼田 穰氏から多大な協力を得たことを記して謝意を表します。

注 記

本報告は、日本建築学会の1999年度学術講演会において発表した

内容⁸⁾を加筆、再構成したものである。

文 献

- 1) 多田英之, 酒井 章, 安藤勝利, 高山峯夫: 免震構造に関する実物実験(その5) 弾塑性バネ型減衰装置について, 日本建築学会学術講演梗概集, 構造系, pp.1493-1494, 1984.
- 2) 武田寿一, 岡田 宏, 角田智彦, 中村 獄, 関松太郎, 内田 壱, 寺村 彰: 構造物の免震に関する研究(その6. 実大ダンパーの静的実験), 日本建築学会学術講演梗概集, B, pp.485-486, 1985.
- 3) 村本道哉, 曾田五月也, 渡辺 聡: 弾塑性ダンパーを用いた免震構造に関する研究(その1) U字型弾塑性ダンパーに関する検討, 日本建築学会学術講演梗概集, B, pp.615-616, 1991.
- 4) 小林博栄: 材料の弾塑性を利用した制振装置の開発, 日本機械学会論文集(C編), 53-492, pp.1766-1772, 1987.
- 5) 浪田芳郎, 重田政之, 川畑淳一, 好永俊昭, 後藤伸穂: 弾塑性型配管支持装置の配管系への適用に関する研究(第1報), 日本機械学会論文集(C編), 54-507, pp.2624-2627, 1988.
- 6) 大亦絢一郎, 中村陽一: V形材を用いた弾塑性ダンパの研究(第1報), 日本機械学会論文集(C編), 57-542, pp.3152-3157, 1991.
- 7) 大亦絢一郎, 荒川利治, 谷口貴也: 金属棒の連続塑性曲げを利用した弾塑性ダンパの研究(改良型ダンパおよび複合ダンパの場合), 日本機械学会論文集(C編), 64-621, pp.1549-1554, 1998.
- 8) 荒川利治, 大亦絢一郎, 沼田 穰: 金属棒の連続塑性曲げを利用した弾塑性ダンパーの研究(その1. 弾塑性ダンパーの構造と基本性状, その2. 建物内設備機器等への適用), 日本建築学会学術講演梗概集, B-2, pp.931-934, 1999.

[1999年10月19日原稿受理 2000年2月2日採用決定]