棒の連続塑性曲げを利用した弾塑性ダンパの研究*

大 亦 絢 一 郎^{*1}, 谷 口 貴 也^{*2}

A Study on an Elastoplastic Damper Utilizing Continuous Plastic Bending of Thin Metal Rods

Kenichiro OHMATA and Takaya TANIGUCHI

In this paper, a new type of elastoplastic damper utilizing continuous plastic bending of thin metal rods is proposed in order to obtain an elastoplastic damper which yields damping even for a small displacement. The seismic responses of a piping system supported by the elastoplastic damper were calculated using a continuous system simulation language and the effects of the damper on the deflection of the piping system are discussed. The trial damper was made using a thin copper rod, and the resisting force characteristics and fatigue strength of the damper were measured. The seismic responses of an L shaped pipe supported by the trial elastoplastic damper were measured using an electrohydraulic shaking table. The experimental results were compared with the calculated results.

Key Words: Elastoplastic Damper, Metal Rod, Plastic Bending, Piping System, Seismic Response

1. ま え が き

近年, 免震構造物の減衰装置として, あるいは配管系の耐震用支持装置として, 金属材料の塑性変形を利用したいろいろなタイプの弾塑性ダンパが研究開発されてきた^{(1)~(4)}. 一般に弾塑性ダンパは, 構造が簡単で安価であり, 高温環境中においても使用できるなどの特長をもっている反面, 材料の弾性範囲であるような微小変位時には減衰作用をもたず, 大変位時の耐久性が低いなどの欠点をもっている.

本論文では, 微小変位時から減衰作用をもち, 大変位時でも比較的高い耐久性をもつ弾塑性ダンパを得ることを目的として, 細い金属棒の連続塑性曲げを利用した新しいタイプの弾塑性ダンパを提案する. この弾塑性ダンパによって支持された配管の地震応答解析を行って, 本弾塑性ダンパの制振効果を検討する. 次に, 本弾塑性ダンパを試作してその抵抗力特性および耐久性を実験によって調べる. さらにこのダンパをL字形配管に取付け, 電気・油圧式振動台による実地震波応

答実験およびこれに対応する地震応答解析を行って, ダンパの制振効果と地震応答解析の正しさを確認する.

2. 弾塑性ダンパの構造

本研究で提案する弾塑性ダンパの概念図とその主要部構造を図1および2に示す. 上下のロッドエンド①間に直線的な相対変位を与えると, ラック③とピニオン⑤を介してローラ⑦が回転する. このとき一方のローラは細い金属棒⑥を曲げ塑性変形させながら巻取っていき, 他のローラは細い金属棒を巻戻していくので, 弾塑性ダンパにはほぼ一定の抵抗力が発生する.

このときのダンパの抵抗力 F_s は, 棒の全塑性モーメントを M_p , 巻きつける棒の本数を n , ピニオンのピッチ円半径を r とし, 塑性関節理論を用いて計算すると次の式で与えられる.

$$F_s = \frac{2nM_p}{r} \dots\dots\dots (1)$$

式(1)の係数2は, 金属棒の塑性変形が二つのローラ上で起こることを意味する. しかし棒がピンと張られていなければ, 実際の F_s の値は式(1)より小さくなるが, これを解析的に求めることは難しいのでここでは近似的に次式のように表すことにする.

* 原稿受付 1995年10月16日.

^{*1} 正員, 明治大学理工学部 (〒214 川崎市多摩区東三田1-1).^{*2} 学生員, 明治大学大学院.

$$F_s = \frac{\alpha n M_p}{r} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 α は実験的に求まる係数である。棒の直径と降伏応力をそれぞれ d, σ_y とすると、全塑性モーメントは次式で与えられる。

$$M_p = \frac{d^3 \sigma_y}{6} \dots\dots\dots (3)$$

理想化したダンパの荷重・変位曲線を図3に示す。この

1	Rod end	5	Pinion
2	Fixed part	6	Metal rod
3	Rack	7	Roller
4	Linear guide		

Fig. 1 Elastoplastic damper

Fig. 2 Detail of the racks and the pinions

Fig. 3 Idealized force displacement curve

ときダンパは微小変位時から減衰効果をもつと考えられる。

3. 弾塑性ダンパで支持された配管の地震応答解析

3.1 運動方程式 最初に、本弾塑性ダンパで支持された L 字形配管の地震応答解析を行った。この L 字形配管の振動解析モデルを図4に示す。図4において、L 字形配管は質量のない長さの等しい板ばねでつながれた n 個の質点系に置き換えられており、弾塑性ダンパは配管の屈曲部 (i 番めの質点 m_i) に取付けられている。この L 字形配管が上下方向に地震入力加速度 $\ddot{z}$ を受けたときの運動方程式をマトリックス形で表すと次式のようなになる。

$$\{\ddot{u}\} = -[M]^{-1}([A]^{-1}\{u\} + \{F\}) - \{\ddot{z}\} \dots\dots (4)$$

ここで $\{\ddot{u}\}$ は相対加速度ベクトル、 $\{u\} (= \{y\} - \{z\})$ は相対変位ベクトル、 $\{F\}$ は抵抗力ベクトル、 $[A]$ は影響係数マトリックス、 $[M]$ は質量マトリックスを表し、それぞれ次式のように与えられる。

$$\{u\} = \{u_1, \dots, u_n\}^T, \{y\} = \{y_1, \dots, y_n\}^T$$

$$\{z\} = \{z, \dots, z\}^T$$

$$[A] = \begin{bmatrix} A_{11} & \dots & A_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ A_{n1} & \dots & A_{nn} \end{bmatrix}$$

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & & & 0 \\ & \ddots & & \\ & & m_i + m_d & \\ & & & \ddots \\ 0 & & & & m_n \end{bmatrix}, \{F\} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ f_i \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \dots\dots (5)$$

ここで、 m_i はダンパ取付部の質量、 m_d はダンパ可動部の質量を表し、 f_i は式(2)で与えられたダンパの抵抗力 F_s に等しい。

3.2 解析結果 式(4)および(5)を連続系シミュレーション言語(FUJITSU SLCS 5)を用いてプロ

Fig. 4 Analytical model

グラムし、最大加速度を 0.5, 1, 2, 3 および 4 m/s^2 に基準化した Imperial Valley 地震(1940) El Centro NS 成分および日本海中部地震(1983)秋田港 NS 成分を入力したときの配管の応答を計算した。計算は、配管を 9 質点系に置き換え、4 番めの質点(配管の屈曲部)に弾塑性ダンパが取付けられていると仮定し、四次の固定間隔ルンゲ・クッタの倍精度積分法を用いて行った。

計算に用いた配管およびダンパの諸元を表 1 に示し、弾塑性ダンパの抵抗力が $F_s=200, 300, 400 \text{ N}$ の場合の 2, 4 および 7 番めの質点の最大相対変位の値

Table 1 Numerical conditions

Pipe	Material	STPG42
	Outside diameter	139.8 mm
	Wall thickness	6.6 mm
	Length l_1	4900 mm
	Length l_2	7700 mm
	Mass per meter	21.7 kg/m
	1st natural frequency	4.3 Hz
Damper	Resisting force F_s	200, 300, 400 N

Fig. 5 Maximum deflection curves

を表 2 に示す。表 2 から、最も効果的なダンパの抵抗力 F_s の値は入力加速度が大きくなるほど増大すること、および配管屈曲部の最大たわみはダンパを取付けない場合の 1/15~1/50 に低減することがわかる。

(a) El Centro (1940) NS

(b) Akita (1983) NS

Fig. 6 Response waves at the corner of the pipe

Table 2 Maximum deflections of the pipe at the points 2, 4 and 7

Condition of the damper		(mm)	Maximum input acceleration $ \ddot{z} _m (\text{m/s}^2)$									
			El Centro (1940) NS					Akita (1983) NS				
			0.5	1	2	3	4	0.5	1	2	3	4
Without damper	u_2		1.471	2.942	5.833	8.825	11.76	3.444	6.899	13.77	20.66	27.55
	u_4		5.510	11.01	22.03	33.05	44.07	12.94	25.87	51.75	77.63	103.5
	u_7		2.180	4.360	8.719	13.08	17.43	5.173	10.34	20.69	31.04	41.39
With damper	$F_s = 200(\text{N})$	u_2	0.061	0.127	0.512	1.069	2.056	0.070	0.140	0.308	1.033	1.738
		u_4	0.152	0.363	1.450	3.577	7.410	0.193	0.453	1.035	3.536	6.191
		u_7	0.356	0.649	1.380	2.100	3.514	0.214	0.441	0.913	1.957	3.157
	$F_s = 300(\text{N})$	u_2	0.057	0.129	0.253	0.767	1.165	0.071	0.129	0.289	0.462	1.101
		u_4	0.144	0.349	0.670	2.175	3.976	0.187	0.392	0.913	1.552	3.774
		u_7	0.320	0.687	1.326	2.068	2.622	0.226	0.413	0.882	1.369	2.181
	$F_s = 400(\text{N})$	u_2	0.082	0.122	0.255	0.458	1.023	0.086	0.140	0.279	0.447	0.616
		u_4	0.226	0.304	0.726	0.954	2.900	0.229	0.386	0.905	1.498	2.069
		u_7	0.372	0.711	1.298	1.933	2.758	0.243	0.427	0.881	1.362	1.825

また、 $F_s=300\text{ N}$ のダンパを取付けた場合とダンパなしの場合の配管の最大たわみ曲線と配管屈曲部の応答波形をそれぞれ図5および6に示す。図5から、配管が地震を受けたとき一次の振動モードが最も顕著であるので、配管屈曲部にダンパを取付けるのが最も効果的であるといえる。

4. 実験

4.1 弾塑性ダンパの抵抗力特性 試作した弾塑性ダンパの構造を図7に示す。本ダンパは、モジュール1 mm、ピッチ円直径35 mm、歯数35のピニオン4個、長さ500 mmのラック2本、直径50 mmのローラ2個および直径2 mm または3 mm の銅棒1本から成っている。

本ダンパの一端を振動台上に、他端をロードセルを

1	Rod end	5	Metal rod
2	Fixed part	6	Frame
3	Roller	7	Rack
4	Pinion		

Fig. 7 Trial elastoplastic damper

Fig. 8 Experimental apparatus

Fig. 9 Resisting force characteristics

Fig. 10 Results of the fatigue life tests

介して反力壁に固定し、振動台に振動数 1 Hz、振幅 5~20 mm の正弦波状変位を与えて、変位と抵抗力のリサージュ波形を測定した。変位の測定はインダクタンス形変位計を用いて行った。実験装置を図 8 に示し、実験結果を図 9 に示す。図 9 から本ダンパはほぼ図 3 のような剛塑性抵抗特性をもつことがわかる。この場合の α の値は、 $d=2$ mm のときで 1.32、 $d=3$ mm のときで 1.16 であった。これは銅棒が太い場合ほど、巻戻し側のローラ付近で銅棒がたるむためである。

4.2 弾塑性ダンパの耐久性 次に、図 8 に示した実験装置を用い、弾塑性ダンパに振幅 2~20 mm の正弦波状変位を与えて、銅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。実験結果を図 10 に示す。図 10 からわかるように、銅棒が破断するまでの繰返し数は正弦波の振幅が大きくなるほど低下するが、振幅 15 mm 以上ではほぼ一定になる。したがって

Fig. 11 Experimental apparatus

Fig. 12 Force displacement curve

Table 3 Experimental condition of the pipe

Material	STPG42
Outside diameter	60.5 mm
Wall thickness	5.5 mm
Length ℓ_1	3000 mm
Length ℓ_2	3000 mm
Mass per meter	7.65 kg/m
1st natural frequency	5.2 Hz

Table 4 Maxima of the response

	El Centro (1940) NS		Akita (1983) NS	
	Experiment	Simulation	Experiment	Simulation
Input acceleration	$ \ddot{z} _m$ 2.0 m/s ² 	$ \ddot{z} _m$ 2.0 m/s ² 	$ \ddot{z} _m$ 2.0 m/s ² 	$ \ddot{z} _m$ 2.0 m/s ²
Without damper	$ u_s _m$ 6.87 mm 	$ u_s _m$ 6.87 mm 	$ u_s _m$ 10.9 mm 	$ u_s _m$ 8.74 mm
With damper	$ u_s _m$ 1.79 mm 	$ u_s _m$ 2.16 mm 	$ u_s _m$ 2.12 mm 	$ u_s _m$ 2.47 mm

(a) El Centro (1940) NS

(b) Akita (1983) NS

Fig. 13 Response waves (with damper)

て、本弾塑性ダンパは大変位時の耐久性に優れたダンパであるといえる。

4・3 実地震波応答実験 図 11 に示すように、本弾塑性ダンパで支持された L 字形配管を電気-油圧式振動台に取付け、最大値を 2 m/s^2 に基準化した Imperial Valley 地震(1940) El Centro NS 成分および日本海中部地震(1983)秋田港 NS 成分を上下方向に入力して、配管屈曲部の相対変位をインダクタンス形変位計を用いて測定した。また、ダンパで支持しない場合の配管屈曲部相対変位も同様に測定し、これらに対応するシミュレーション結果と比較した。

実験で用いた配管の諸元を表 3 に示す。シミュレーションで用いたダンパの抵抗力特性には、実験で得られた抵抗力特性(図 9)を図 12 のように近似したものをを用いた。実験結果の最大値およびダンパ取付時の応答波形をシミュレーション結果とあわせて表 4 および図 13 に示す。

この結果、本ダンパで支持された L 字形配管屈曲部の相対変位は、ダンパで支持しない場合に比べて、約 $1/4 \sim 1/5$ に低減し、本ダンパの制振効果が確かめられた。また、シミュレーション結果は実験結果と似た傾向を示し、シミュレーションの正しさが確認された。

5. ま と め

本研究では、棒の連続塑性曲げを利用した新しいタイプの弾塑性ダンパを提案した。試作した弾塑性ダンパは微小変位時から減衰効果をもち、大変位時においても比較的高い耐久性をもつことが実験によって確かめられた。また、このダンパを L 字形配管の耐震支持装置に用いた場合の実地震波に対する応答をシミュレーションと実験の両面から検討した結果、本ダンパは十分な制振効果をもつことが確認された。またシミュレーション結果は実験結果とよく似た傾向を示した。

なお、振動実験は明治大学振動実験解析棟で行われたことを付記する。

文 献

- (1) 小林博栄, 材料の弾塑性を利用した制振装置の開発, 機論, **53** 492, C(1987), 1766-1772.
- (2) 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), 機論, **54** 507, C(1988), 2624-2627.
- (3) 大亦純一郎・中村陽一, V 形材を用いた弾塑性ダンパの研究(第 1 報), 機論, **57** 542, C(1991), 3152-3157.
- (4) 大亦純一郎・中村公一・砂子田勝昭, 薄板の連続塑性曲げを利用した弾塑性ダンパの研究, 機論, **60** 573, C(1994), 1583-1588.