半能動制御形防振器で支持された配管の 振動台による地震応答試験*

下 田 博 一** 大 亦 絢 一 郎** 岡 本 文 明***

Shaking Table Tests of a Piping System Supported by a Semiactive Damper

Hirokazu SHIMODA, Kenichiro OHMATA and Fumiaki OKAMOTO

The present report is concerned with the results of shaking table tests of L-shaped piping supported by the semiactive damper which the authors have developed for piping systems. The damper is composed of a ball screw, a disk brake and piezoelectric actuators. The brake force is controlled corresponding to seismic responses of the piping or input accelerations. L-shaped piping of length 3 m×3 m and outer diameter 60.5 mm is used as a piping model in shaking table tests. Both ends of the L-shaped piping are rigidly attached to the shaking table through supporting walls. The semiactive damper is attached between the bent section of the piping and the shaking table. Input accelerations used here are EL Centro (1940) NS and Akita (1983) NS normalized to be 2 m/s² at the maximum acceleration. The results may be summarized as follows: (1) The deflection of the L-shaped piping can be reduced successfully by the semiactive damper. (2) The semiactive damper has the effect of vibration suppression even by simple control method such as on-off control or proportional control. (3) The results of shaking table tests of the piping agree approximately with the calculated results.

Key words: shaking table test, vibration suppression, seismic response control, earthquake-proof device, semiactive damper, L-shaped piping, piping system, piezoelectric actuator, ball screw

1. は じ め に

一般の配管系に対する耐震用防振器としては、コスト面における優位性から油圧防振器が広範囲に使用されている。一方、高温・放射線雰囲気などにさらされることの多い火力・原子力発電所や化学プラント等においては、巨大地震発生時の配管系の安全性、信頼性が最重要課題であり、防振器の耐震性能の向上とともに、耐環境性能ならびにメンテナンスフリー化に対する要求が一段と厳しくなっている。メカニカルスナッチは、耐熱性、保守性に優れた剛支持形の耐震装置であり、従来より原子力発電所等において多用されてきたが、構造の簡素化、低価格化を伴ったこれ以上の性能向上には限界があることから、近年になって、防振器により積極的に減衰を付与し、配管を柔構造のまま振動を抑制しようとする気運が見られる¹⁾。した

がって、高温・放射線雰囲気中における配管系を対象とした耐震装置の開発ならびにその性能向上を図るためには、今後さらに防振器をアクティブコントロールタイプとし²⁾、制御技術、アクチュエータ技術、センシング技術等の積極的な応用が不可欠であり、精密工学分野からのアプローチも重要なポイントになるうかと考える。

本研究の目的は、高温・放射線雰囲気中におかれた配管系を対象とし、構造が簡単で地震応答抑制効果に優れた防振器を開発することにある。現在までのところ、振動台を用いた配管用防振器の性能試験は数多く行われているが、そのほとんどがパッシブタイプの防振器に関するものである。本研究では、セミアクティブタイプの防振器により支持した配管の地震応答について振動台による検証試験を実施するものであり、この点も本研究の特色として挙げられる。

前報³⁾では、圧電アクチュエータを用いたディスクブレーキおよびボールねじから成る半能動制御形防振器を提案し、この防振器をL字形配管に取り付けたときの地震応答についてシミュレーションを行った。

* 原稿受付 平成5年1月21日

** 正 会 員 明治大学理工学部 (川崎市多摩区東三田1-1-1)

*** JR 東日本 (東京都千代田区丸の内1-6-5)

①Base, ②Load column, ③Ball nut, ④Ball bearing, ⑤Screw shaft, ⑥Brake disk, ⑦Piezoelectric actuator, ⑧Brake lever, ⑨Brake shoe, ⑩Bracket, ⑪Linear motion bearing

Fig. 1 Structure of the semiactive damper

本報では、前報で提案した防振器を試作するとともに、この防振器で支持されたL字配管を電気油圧式振動台に取り付け、振動台に地震波を入力したときの配管の地震応答試験を実施した。また、前報で述べたシミュレーション結果との比較を行うとともに、防振器に対する制御方法を種々に変化させることで、本防振器における地震応答抑制効果と制御条件との関係についても検討を行ったので、これらの結果について報告する。

2. 防振器と試験装置の概要

試作した半能動制御形防振器の構造と主要寸法を図1に、また防振器を振動台に取り付けたときの外観を図2に示す。地震応答試験に際しては、防振器のベース①が床（振動台）に、ロードコラム②が配管に取り付けられる。いま、床と配管の間に相対変位が生じたとすると、ナット③は直線方向に運動し、アンギュラ玉軸受④で固定されたねじ軸⑤およびブレーキディスク⑥が回転運動する。ディスクブレーキは積層型圧電素子⑦、ブレーキレバー⑧、ブレーキシュー⑨から構成されている。ここで、ナットに働く偏荷重の影響を除去し、ボールねじを円滑に運動させる目的から、ボールねじのナットはブラケット⑩を介して直動転がり軸受⑪により案内されている。そこで、圧電素子に所定の電圧を印加すれば、ブレーキシューがブレーキディスクに押し付けられ、回転軸系に対し制動トルクを発生させることができる。

振動台にL字配管を設置し、配管屈曲部に防振器を取り付けた状態を図3に示す。ただ

Fig. 2 Appearance of the semiactive damper

し、本研究は壁に設置したL字配管の水平方向振動を想定したものであるが、実験装置の構造上の制約から、床（振動台）に設置したL字配管を垂直方向に加振することにした。

L字配管の材質はSTPG 42で、一辺の長さが3 m、外径は60.5 mmである。ただし、振動台のテーブル上面の寸法が1.5 m×1.5 mであるため、I形鋼（200 mm×150 mm）を用いた配管支持台を作製し、振動台上から水平方向に1.5 mだけオーバハングさせている。ここで、配管支持台の曲げ剛性は配管と比

Fig. 3 L-shaped piping on the shaking table

Table 1 Specifications of the damper and the L-shaped piping

Damper	
Lead of ball screw	10 mm
Moment of inertia	548 kg・mm ²
Radius of brake disk	50 mm
Coefficient of friction	0.3
Piezoelectric actuators	
Displacement	30 μ m/100 V
Force	3 430 N/100 V
Dimension	10×10×36 mm
L-shaped piping	
Material	STPG 42
Young's modulus	208 GPa
Outer diameter	60.5 mm
Wall thickness	5.5 mm
Length	3 m×3 m
Weight per length	7.46 kg/m

較して約 120 倍に設計されている。あらかじめ、正弦波および地震波を用いて振動台を垂直方向に加振した際の配管両端部（配管固定部）の応答変位を実測したところ、両者の差異は 5% 以下であり、配管支持台が十分な剛性を有することを確かめた。

振動台は、垂直・水平同時加振の可能な電気・油圧サーボ方式を採用した 2 次元振動台であるが、本実験では垂直方向にのみ加振する。振動台の最大載荷重量は 1 000 kg、加振周波数範囲は DC～50 Hz である。また、垂直方向に対してはストローク ± 75 mm、最大速度 400 mm/s、最大加速度 2 G までのランダム波出力が可能である。また、加振機とテーブルの連結部およびテーブルの運動はすべて静圧軸受で案内されており、入力波形の再現精度は高い。なお、防振器ならびに L 字形配管の諸元は表 1 にまとめて示す。

3. 防振器の各種性能試験

地震応答試験に先だち、ブレーキ装置の各種性能ならびに防振器の抵抗力特性について実験を行った。

本防振器のブレーキ装置に用いた圧電アクチュエータに対しては、ブレーキシューとブレーキディスク間に存在するブレーキギャップを上回るだけの発生変位と、防振器として有効なブレーキ力を得るための発生力が同時に要求される。

まず、ブレーキギャップを 0 μ m、10 μ m、25 μ m に変化させながら、圧電アクチュエータの印加電圧とブレーキシュー先端における発生ブレーキ力の関係を調べた結果を図 4 に示す。配管用防振器に対しては、平常時における抵抗力の少なさと地震発生時における

Fig. 4 Braking force of the disk brake **Fig. 5** Braking torque of the disk brake

拘束力の大きさが同時に要求されるので、ブレーキギャップは常時維持され、しかもできるだけ小さい値が望ましい。したがって、環境から受ける温度変化や各部品の組立精度を考慮すれば、設定可能な最小すきまは 10 μ m 程度と考えられる。図 4 の測定から、ブレーキギャップを 10 μ m に設定した場合、圧電アクチュエータの定格電圧 100 V に対して 17 N のブレーキ力の得られることがわかる。そこで、ブレーキギャップを 10 μ m に一定とした状態で、ディスクブレーキの制動トルクの測定を行ったところ、図 5 の結果を得た。この結果に基づいて、ブレーキシューとブレーキディスク間の摩擦係数を求めると $\mu \approx 0.3$ なる値が得られたので、以下に述べるシミュレーションでは摩擦係数としてこの値を用いることにした。

次に、ブレーキ装置の応答性を調べるために、圧電アクチュエータに正弦波状の電圧を印加してブレーキシュー先端の応答変位を測定した結果を図 6 に示す。これより、ブレーキの 1 次共振点は 440 Hz であり、この共振振動数は、ブレーキ装置に用いた変位拡大機

Fig. 6 Resonance curve of the disk brake

Fig. 7 Time histories of resistance force

構（拡大率：2.5倍）の1次共振点におおむね一致している。また、一般的に地震波の振動数成分は20 Hz程度までを考えれば十分であることを考慮して、制御系におけるA/D、D/A変換時間を10 ms（100 Hz）に設定することにした。

防振器のベースを振動台に、ロードコラムをロードセルを介して反力壁に固定して、振幅1 mm、振動数4 Hzの正弦波状変位加振を行い、防振器の抵抗力特性の測定を行った。図7は抵抗力の時刻歴波形を表し、図8は変位と抵抗力のリサージュ波形を表す。また、図中の実線および破線はそれぞれ実験値およびシミュレーション値を表す。これらの結果ならび前報で述べた地震発生時の防振器に働く抵抗力のシミュレ

Fig. 8 Lissajous' figure of resistance force/displacement

ーション結果から、試作した防振器が十分な抵抗力を有することが確かめられた。ただし、リサージュ波形における実験値およびシミュレーション値間の形状の不一致、すなわちボールねじのナットがその運動方向を反転する際に生じる波形の丸みは、ボールねじや軸受部分のがたによる影響が表れているものと思われる。

4. 地震応答試験

本防振器におけるブレーキ力 F_b の制御条件としては、前報の結果を参考にして以下の4通りとした。

- (1) $F_b = \begin{cases} 10 \text{ N} & (|\dot{u}_6| \geq 0.0005 \text{ m/s}) \\ 0 \text{ N} & (|\dot{u}_6| < 0.0005 \text{ m/s}) \end{cases}$
- (2) $F_b = \begin{cases} 10 \text{ N} & (|\ddot{y}_H| \geq 0.1 \text{ m/s}^2) \\ 0 \text{ N} & (|\ddot{y}_H| < 0.1 \text{ m/s}^2) \end{cases}$
- (3) $F_b = 4000 \times |\dot{u}_6| \text{ N}$
- (4) $F_b = 0.25 \times |\ddot{y}_H| \text{ N}$

ここで、 $|\dot{u}_6|$ および $|\ddot{y}_H|$ はそれぞれL字形配管の屈

Fig. 9 Measuring and controlling system

曲部の相対速度および入力地震加速度（振動台の加振加速度）の絶対値を表し、 u の添字 6 はシミュレーションを行う際に、11 個の質点系に置き換えた L 字配管の屈曲部における質点番号を表している。また、上述した制御条件において、(1), (2) はオン・オフ制御に相当し、(3), (4) は比例制御に相当している。

地震応答試験に用いた計測・制御システムは図 9 に示す。制御条件 (1), (3) の場合は、ボールねじのねじ軸先端に取り付けたタコジェネにより振動台と配管との相対速度が計測され、制御条件 (2), (4) の場合は、振動台に取り付けた加速度ピックアップにより入力地震加速度が計測される。これらの計測量は、パソコンを用いて A/D 変換した後、所定のしきい値もしくは比例定数を用いて圧電アクチュエータに印加する電圧を計算し、さらに D/A 変換の後、ブレーキ用パワーアンプに入力される。また、防振器の性能を評価する目的から、配管屈曲部の相対変位、防振器に働く抵抗力および配管屈曲部の加速度もあわせて計測した。

試験結果の一例として、振動台に Imperial Valley 地震 (1940) El centro NS 成分を最大 2 m/s^2 に基準化して入力し、制御条件 (3) および (4) を用いたときの、相対変位、抵抗力、ブレーキ力の時刻歴波形をそれぞれ図 10 および図 11 に示す。ここで、地震波は NS 方向成分を用いているが、前述したように壁に対する水平加振を床（振動台）に対する垂直加振に置き換えているので、地震波は垂直方向に入力した。また、ブレーキ力は圧電アクチュエータに印加した電圧に対して図 4 の結果を適用して求めた値を表す。これらの結果から、配管の応答変位は防振器を取り付けなかった場合と比較して $1/20 \sim 1/30$ に低減されており、配管の曲げ変形の抑制に対して防振器が有効に働いていることが確かめられた。また、今回の地震応答試験により得られた結果と前報で述べたシミュレーション結果はよく一致しており、シミュレーションの妥当性が検証された。

制御条件を上述した 4 通りに変化し、さらに入力地震波として日本海中部地震 (1983) 秋田港 NS 成分を加えたときの応答変位 u_6 、加速度 $\ddot{y}_6$ および抵抗力

Fig. 10 Time histories of u_6 , F_s and F_b (Control condition (3))

Fig. 11 Time histories of u_6 , F_s and F_b (Control condition (4))

F_s の最大値を表 2 にまとめて示す。ここでは、試験条件による防振器の制振性能を比較する目的から、ブレーキ力の大きさは、防振器に働く最大抵抗力がほぼ同じになるよう設定されている。これらの結果から、

Table 2 Maxima of relative displacement, acceleration and resistance force

Control condition		El Centro (1940) NS			Akita (1983) NS		
		$ u_6 _{\max}$ $\times 10^{-3}$ m	$ \dot{y}_6 _{\max}$ m/s ²	$ F_s _{\max}$ N	$ u_6 _{\max}$ $\times 10^{-3}$ m	$ \dot{y}_6 _{\max}$ m/s ²	$ F_s _{\max}$ N
Without damper	Exp.	4.7	9.98		8.5	10.34	
	Cal.	5.3	7.27		6.6	8.57	
Output force of an actuator N							
① $F_b = \begin{cases} 10 & (\dot{u}_6 \geq 0.0005 \text{ m/s}) \\ 0 & (\dot{u}_6 < 0.0005 \text{ m/s}) \end{cases}$	Exp.	0.20	2.38	45.3	0.29	2.56	45.7
	Cal.	0.14	2.20	52.3	0.21	2.89	52.3
② $F_b = \begin{cases} 10 & (\dot{y}_H \geq 0.1 \text{ m/s}^2) \\ 0 & (\dot{y}_H < 0.1 \text{ m/s}^2) \end{cases}$	Exp.	0.29	2.39	44.9	0.37	2.54	45.3
	Cal.	0.28	2.20	50.8	0.29	2.21	45.4
③ $F_b = 4000 \times \dot{u}_6 $	Exp.	0.15	2.38	43.2	0.19	2.52	42.9
	Cal.	0.11	2.00	50.2	0.15	1.99	49.8
④ $F_b = 0.25 \times \dot{y}_H $	Exp.	0.25	2.40	42.3	0.30	2.54	43.3
	Cal.	0.23	1.99	51.0	0.27	2.00	48.4

いずれの制御条件を用いた場合でも、またいずれの地震波を入力した場合でも、配管の応答変位は十分に抑制されており、本報のようにオン・オフ制御や比例制御のような簡単な制御方法を採用した場合であっても、制振効果の大きいことが確かめられた。また、制御条件による制振効果の違いを比較した場合、制御条件(1)、(3)の方が制御条件(2)、(4)より優れており、また、比例制御の方がオン・オフ制御より優れているのがわかる。したがって、本防振器においては、配管の相対応答速度による比例制御が最も適していることが明らかとなった。

5. む す び

圧電アクチュエータを用いた半能動制御形防振器を試作し、これをL字形配管に取り付けたときの地震応答について振動台による検証試験を実施するとともに、前報で述べたシミュレーション結果との比較を行った。

得られた結果をまとめると以下の通りである。

- (1) 半能動制御形防振器を試作するとともに、その特性を調べたところ、わずかなブレーキ力であっても配管用防振器として十分な抵抗力が得ら

れた。

- (2) 振動台による地震応答試験を実施した結果、本防振器の有効性ならびに前報で述べたシミュレーションの妥当性が検証された。
- (3) 本防振器を用いて配管の応答変位を抑制する際、制御条件としては、配管の相対応答速度による比例制御が適している。

終わりに、防振器の製作に際してご協力いただいた黒田精工(株)に感謝の意を表するとともに、本研究の地震応答試験が明治大学理工学部振動実験解析棟において実施されたことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 浪田芳郎, 重田政之, 好永俊昭, 後藤伸穂, 川畑淳一: 弾塑性形配管支持装置の配管系への適用に関する研究(第2報, 支持配管系振動特性試験のシミュレーション解析), 日本機械学会論文集, C編, 55, 514 (1989) 1341.
- 2) 小島宏行, 長屋幸助, 新山文彦, 永井克己: 速度フィードバック形電磁ダンパによるはり状構造物の振動制御, 日本機械学会論文集, C編, 51, 472 (1985) 3235.
- 3) 下田博一, 岡本文明, 大亦絢一郎: 圧電アクチュエータを用いた半能動制御形防振器による配管の地震応答抑制, 精密工学会誌, 58, 12 (1992) 2111.