

低層建物を対象とした動摩擦を原理とする制震装置の開発

田淵 順 加藤雅士 穂積秀雄 佐伯暢人

(平成17年10月31日受理)

Development of Friction-Damping Vibration Control Device for Low-Rise Buildings

Jun TABUTI Masashi KATO Hideo HOZUMI Masato SAEKI

Damage to buildings in Japan during large earthquakes is seen mostly in low-rise buildings which tends to resonate with the earthquake ground motion. In this paper, a novel vibration control device that utilizes frictional forces is presented aimed towards application in low-rise buildings. Figure 1 shows a diagram of the installed damping device. The proposed vibration control device, as shown in the detailed drawing in Figure 2, has a structure in which contact with the beam occurs through the action of spring force alone, such that when the building is deformed in an earthquake, damping occurs through the action of frictional forces. In order to evaluate the device, vibration experiments were carried out on a miniature model, as shown in Figure 3. The investigation aimed to: 1) ascertain the appropriate rigidity for the parts on which the damping device is to be installed, 2) analyze the suitable spring tensions and frictional forces, and 3) evaluate the damping effects and construct a vibration model. The results confirmed that the vibration control device confers significant damping in the natural period range of low-rise buildings. In addition, in operation of the device, there is no obvious resonance point in the natural period range.

Keyword: friction damper, vibration experiments, equivalent damping factor

1. はじめに

木質構造をはじめとする低層建物は、一般に地震動の卓越周期と共振しやすい固有周期を有し、過去の大地震で多大な被害を受けている。この被害の低減の一手法として、新築建物、既存建物の双方に取り付けが容易で廉価な制震装置が望まれている。

本研究は、滑り摩擦力を利用した新しい減衰装置を開発し、地震動との共振時における

大学院工学研究科 大学院生 博士後期過程

大学院工学研究科 大学院生 博士前期過程

建築学科 教授

機械制御システム工学科 教授

応答低減が可能な制震システムを構築することにある。考案した減衰装置は、その取り付け例を Fig.1 に示したように、ばね張力を介して土台もしくは上階の梁下部に接して設置される。Fig.2 に示したように、装置は摺動する摩擦面を持ち、地震動により建物に層間変位が生じるときに、上下階の変位差を利用して摩擦減衰効果を発揮するものである。

摩擦力を利用した減衰装置は、既に若干の装置^{1), 2)}が開発されているが、いずれも簡便なものではなく高層建築や大規模建築を対象としたもので、住宅等にはコスト面の観点などから不向きと考えられるものである。本報は、既報³⁾の装置を改良し、立体骨組で震動実験を行った結果について報告するものである。

2. 実験方法

2.1. 試験骨組および減衰装置

縮小立体モデル（以下、試験骨組）と震動実験装置の概要を Fig.3 と Fig.4 に示す。試験骨組は、鉄骨で立体骨組を構成していて、柱は柱脚を固定、柱頭は反曲点を想定したピン接合としている。この柱は、H-100×100×50×5 および H-125×60×6×8 である。また、柱間を結ぶ床材は補剛材付きの 22mm 厚の鋼板である。減衰装置を取り付ける部材（以下、装置取付部材）は、試験骨組と装置取付部材の剛性比を実験変数としたことから、断面二次モーメントが多岐にわたるように、H-100×47×5×7 から H-125×125×6.5×9 のロール H もしくはビルト H としている。

Fig.4 の写真に示した減衰装置は、ばね張力の調節で摩擦面抗力ひいては摩擦力を調節できる。またばねは、将来、木質構造に適用することを想定し、木材のクリープによるばね張力の変動を僅少とすることを意識して、十分長いばねを用いている。また、ばね張力を定着する定着板には移動装置を設けて、摺動時のばね張力を一定と

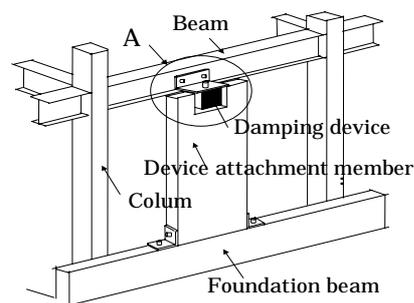


Fig.1 Diagram showing attachment of the damping device.

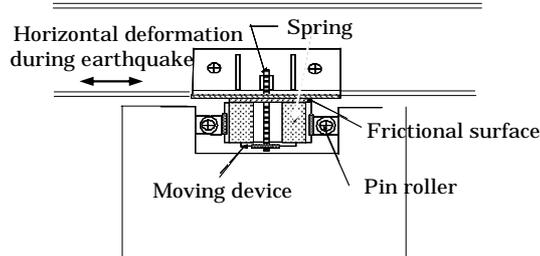


Fig.2 Detail of the damping device from part A.

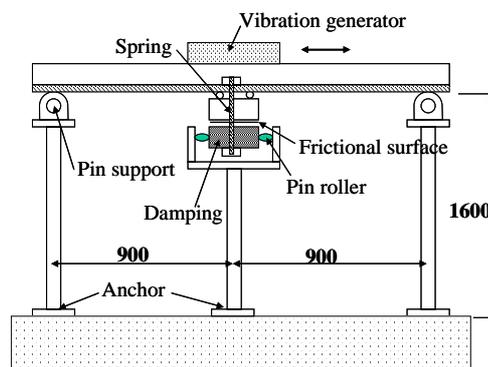


Fig.3 Schematic of the Vibration experiment apparatus

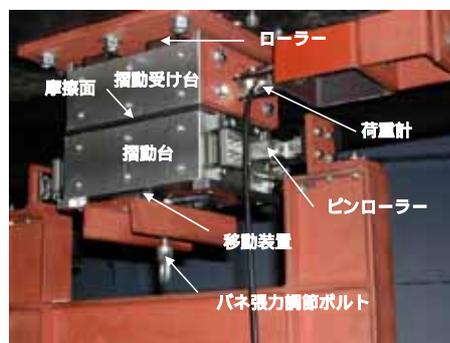


Fig.4 Detail of damping device

している。装置は、鉛直方向に移動できるローラーを介して装置取付部材に取り付けている。摺動受け台は、Fig.3 の A の荷重計で摩擦力を計測するために設けたもので、実用に供する装置では不要なものである。

実験変数は、試験骨組の剛性と質量（骨組名称 A, Bw, B, Cw）、装置取付部材の剛性（部材名称 P1～P8）およびばね張力（50N, 150N, 250N）である。減衰装置の摩擦面の構成は実験変数とせず、ポリカーボネイト - ステンレスの一種類としている。摩擦面には焼成材などを用いる事例があるが、ここでは、極めて簡単に入手ができ、かつ耐久性があって、また静止摩擦係数と滑り摩擦係数の差が小さいといわれている上記の組み合わせとしている。

実験は、減衰装置を取り付けない、すなわち装置取付部材と試験骨組が何ら接合されていない基本タイプ（P0 と称する）と、装置を稼動させたタイプおよび装置取付部材と試験骨組をピン接合としたピンタイプである。ピンタイプは、既存建物の一部材を装置取付部材としたとき、改修前の耐震性能と装置が稼動したときの性能を比較することをねらいとしている。

2.2. 計測および実験方法

計測は、摩擦力とばね張力を荷重計で、試験骨組の床位置での変位、および床と摺動台との相対変位を変位計で計測している。また床と装置取付部材頂部に加速度計を配置している。なお実験後の考察によると、摩擦力計測値は、別途実施した摩擦係数計測実験との比較から、摺動受け台に作用した慣性力が無視できないことが判明している。

実験は、振動実験のほかに、試験骨組の剛性を確認する静的加力実験、試験骨組自体の減衰定数と固有周期を確認する自由震動実験およびスウィープアウト試験を行った。

振動実験は、床の時刻歴応答変位が正弦波となるように起振している。すなわち、起振機での加力は、厳密な意味で必ずしも正弦波ではなく、減衰装置から摩擦力として与えられる周期的な外力を補正しながらの加振である。しかし、本報告ではその影響は小さいとして、以下の考察では、起振機から与えられる外力が正弦波であるとして、次式で与えている。ここに、 m は起振機のスライド重錘の質量である。

$$F(t) = F \cos pt = mp^2 \cos pt$$

3. 実験結果

試験骨組の剛性を Table1 に示す。表中 k_0 は基本タイプ、 k_p はピンタイプ、 k_r は装置取付部材単独の剛性である。 k_r/k_0 は取付部材の剛性と骨組の剛性の比であり、以後これを簡単に取付部材剛性比と呼ぶことにする。

Fig.5 は、震動実験結果の一例として、B-P3-150N-2.43Hz-0.3G の時刻歴応答変位を示したものである。この試験名は、基本タイプ B - 装置取付部材 P3 - ばね張力 150N - 加振周波数 2.43Hz - 加振加速度 0.3G をとっている。図中、相対変位は床を基点として減衰装置の変位を測定した

Table 1 Stiffness of frames for vibration tests

		N/mm				
		P1	P3	P4	P5	P8
A ko=85.2	kp	103	123	135	156	325
	kr	17.6	38.0	50.6	71.0	237.0
	kr/ko	0.21	0.45	0.59	0.83	2.78
Bw ko=173		P1	P3	P5		
	kp	190	211	241		
	kr	18.3	37.2	67.0		
B ko=172		P1	P2	P3	P4	P5
	kp	196	201	211	224	241
	kr	17.4	24.8	37.2	48.2	67.0
Cw ko=576		P5	P6	P7	P8	
	kp	684	723	797	822	
	kr	67.8	124	183	237	
	kr/ko	0.12	0.22	0.32	0.41	

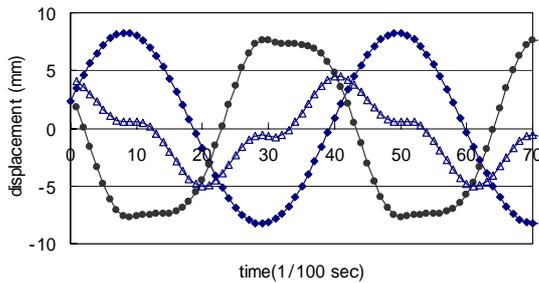


Fig.5 Time history response displacement

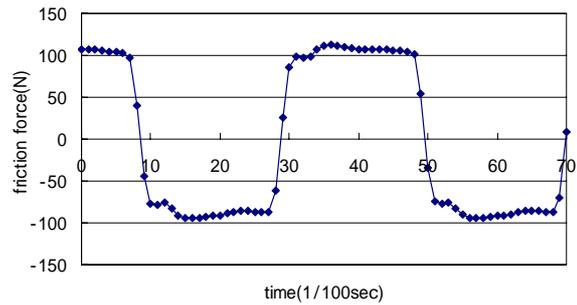


Fig.6 Time history response friction force

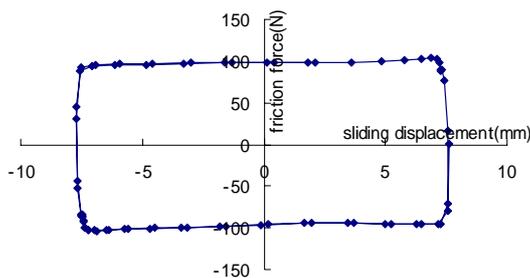


Fig.7 Relationship between friction force and sliding displacement

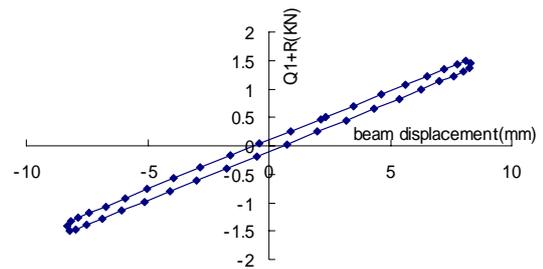


Fig.8 Restoring force characteristic of frame

もので、減衰装置の変位は、床の変位から装置の変位を減じて求めた絶対変位である。

Fig.6 は、Fig.4 の荷重計で計測した摩擦力を時刻歴で示したものである。この摩擦力の正負は、減衰装置と床の相対速度の正負と一致している。また、Fig.7 は摩擦力 - 相対変位関係を示したものである。Fig.8 は、試験骨組の復元力特性を示したもので、縦軸は床の変位に剛性を乗じた値にその変位時の摩擦力を加えて算出している。このループが囲む面積が摩擦力による消費エネルギーを示している。

4. 考察

4.1. 減衰装置を用いないときの共振点の変位応答倍率

Table2 は、基本タイプ (P₀) とピンタイプ (P1 ~ P8) の共振点での応答変位倍率 A/s および試験骨組自体が有する減衰定数 h_0 を示したものである。ここに A は応答片振幅で、 s は静的加力による変位である。 s 、 h_0 は、次式により求めている。

$$\delta_s = F/k_0$$

$$2h_0 = 1/(A/\delta_s)$$

Table2 から、試験骨組の固有周期は 0.27 秒 ~ 0.58 秒で、開発目的である低層建物の固有周期の範囲にあることが分かる。なお、固有周期は共振点での加振周波数としている。

4.2. 減衰装置稼動時の変位応答倍率

試験骨組 B、ばね張力 150N の応答変位倍率を Fig.9 に示す。図中 \square は基本タイプ P₀ の応答倍率、 \circ は P1 ~ P5 の装置取付部材に試験骨組をピン接合したピンタイプの応答倍率、 \triangle は対応する装置取付け部材に減衰装置を取り付けた場合の応答倍率である。実線は減衰装置がないときの理論共振曲線であり、破線はスウィープアウト試験の結果を示したものである。なお、図の横軸は、装置取付部材がないときの固有周期で

加振周期を除している．従って $\rho/\omega = 1$ ではない位置にプロットされているが，いずれも共振点である．

取付部材の剛性が P3 部材の剛性より高いとき，減衰装置稼働時の変位応答倍率は，基本タイプあるいはピンタイプのそれらの約 1/3 以下となっていて，顕著な減衰効果が認められる．また，スイープアウト試験の結果が示すように，応答曲線はなだらかで制震構造特有の特徴を示している．

4.3. 実験変数が変位応答倍率に与える影響

ここでは，取付部材剛性比とばね張力が応答変位倍率に与える影響を考察する．

Fig.10 は，試験骨組 B を 2.43Hz で加振したときの応答変位倍率を示している．図の横軸は取付部材剛性比 k_p/k_o で，P1, P2, P3, (P4), P5 の取付部材に対応している．図中には基本タイプ（図の縦軸上の点）およびピンタイプの応答変位倍率を併せて示している．ばね張力が 50N の場合には，応答倍率も大きく，また加振力の大きさに依存している．150N および 250N のばね張力では大きな減衰効果を示しているが， k_p/k_o が 0.2 以下では効果が小さい．なお，50N の場合のように応答倍率が大きい時の摩擦力 - 相対変位関係が矩形ではなく，不整形な形となっている．何らかの不安定現象が生じたものと考えている．

試験骨組の固有周期は 0.27 秒から 0.58 秒であった．Fig.11 と 12 は，応答倍率に与えるばね張力の影響を，取付部材剛性比が 0.2 と 0.4 について示したものである．横軸は，固有周期すなわち試験骨組の違いを示している．

応答変位倍率が装置がないときの 1/3 以下となるのは，剛性比が 0.2 でばね張力 250N のとき，また剛性比が 0.4 でばね張力 150N 以上であった．このような組み合わせの場合，応答変位倍率は，試験骨組の固有周期に依存していない．

Table 2 Response magnification factor of displacement and damping factor

		P0	P1	P3	P4	P5	P8
		A	1.73(0.58)	1.86(0.54)	2.04(0.49)	2.14(0.47)	2.28(0.44)
	Hz	11.5	13.8	10.2	9.1	11.0	2.4
	A/(mm)	33.3	41.4	32.0	31.4	43.8	19.6
	A/ s	0.015	0.0121	0.0156	0.0159	0.0114	0.0255
	ho						
		P0	P1	P3	P5		
		Bw	2.10(0.48)	2.19(0.46)	2.28(0.44)	2.46(0.41)	
	Hz	15.4	9.7	14.6	16.6		
	A/(mm)	27.2	17.1	25.8	24.3		
	A/ s	0.0184	0.0292	0.0194	0.0206		
	ho						

		P0	P1	P2	P3	P4	P5
		B	2.43(0.41)	2.48(0.40)	2.53(0.40)	2.63(0.38)	2.68(0.37)
	Hz	8.7	10.0	9.3	12.1	12.1	12.7
	A/(mm)	30.4	40.0	37.9	34.7	36.9	41.6
	A/ s	0.017	0.013	0.013	0.014	0.014	0.012
	ho						
		P0	P5	P6	P7	P8	
		Cw	3.70(0.27)	3.85(0.26)	4.05(0.25)	4.33(0.23)	4.41(0.23)
	Hz	8.83	8.5	8.7	7.5	6.3	
	A/(mm)	34.1	34.0	36.8	34.7	30.4	
	A/ s	0.0147	0.0147	0.0136	0.0144	0.0164	
	ho						

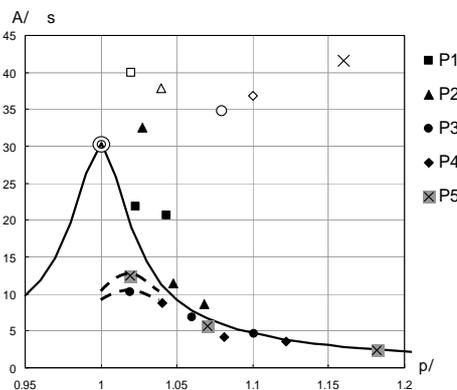


Fig.9 Response magnification factor of displacement

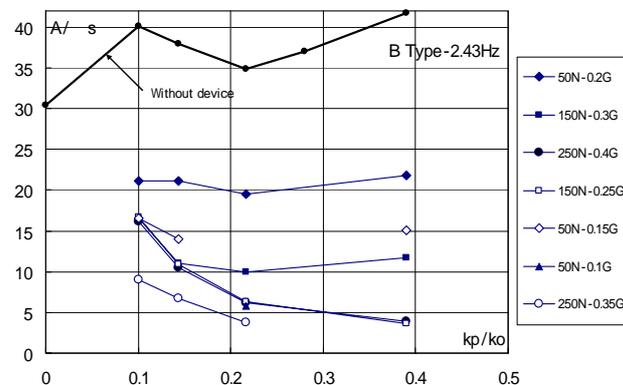


Fig.10 Relationship between response magnification factor of displacement v.s. frame stiffness-device attachment member stiffness ratio

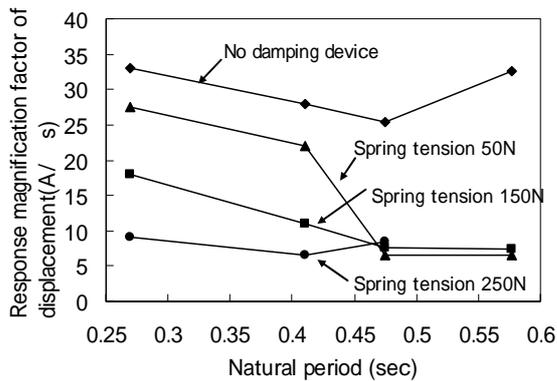


Fig.11 Relationship between response magnification factor of displacement v.s. natural period ($k_p/k_0=0.2$)

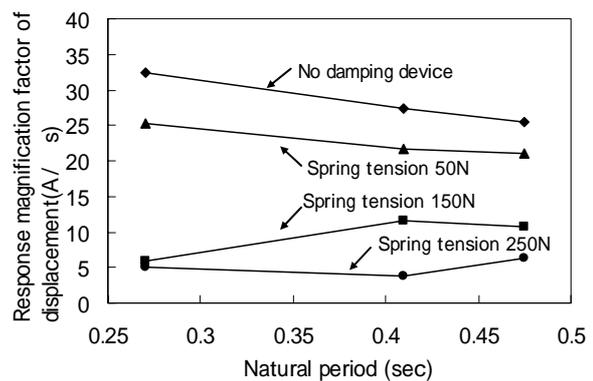


Fig.12 Relationship between response magnification factor of displacement v.s. natural period ($k_p/k_0=0.4$)

5 . まとめ

本研究で以下のことが明らかとなった .

- 1) 減衰装置が大きく効果を発揮する取付部材剛性比が存在する . そのときの共振曲線は , 一般にいわれる制震構造の特徴であるなだらかな曲線となる .
- 2) 応答変位倍率が装置がないときの 1/3 以下となるのは , 取付部材剛性比が 0.2 以上でばね張力が 250N , 剛性比が 0.4 の場合で 150N 以上であった .
- 3) 試験骨組の固有周期は 0.27 秒 ~ 0.58 秒にあった . この範囲では , 減衰効果は固有周期に依存しなかった .
- 4) 試験に用いた減衰装置は廉価で , 試験骨組への組み込みも容易であった .

謝辞 本研究の研究費の一部は , 平成 16 年度学内共同研究費によった . ここに記して謝意を表します .

参考文献

- 1) 社団法人日本免震構造協会編 : パッシブ制振構造設計・施工マニュアル第 2 班 , pp.227-pp.242 , 2005 年 9 月
- 2) 飯田仲男 , 高田啓一 , 片山尚人 : 建築物の制振用摩擦ダンパーの開発 , 技術史住友金属 , Vol.143 , 7 , 1991 年
- 3) 田淵 順 , 穂積秀雄 : 低層建物を対象とした摩擦減衰による制振措置の性能評価実験 , pp.197-pp.202 , 鋼構造年次論文報告集 , 第 12 巻