仕口補強円弧型制振ばねダンパの開発 (木造枠組のせん断試験および振動試験)

○正 松岡 太一(明治大), 工藤 道男(道光産業), 岡崎 泰男(秋田県立大)

Development of an Arc Shaped Spring Damper for Strengthening at Corner of Structure (Shear and Seismic Vibration Tests Using a Wood Frame)

Taichi MATSUOKA, Michio KUDO and Yasuo OKAZAKI

Dept. of Mechanical Engineering Informatics, School of Science and Technology, Meiji Univ.
1-1-1 Higashimita, Tama-ku, Kawasaki, Kanagawa, 214-5871 Japan

The authors develop a circular arc shaped spring damper in order to keep soundness and reduce damage wooden structure when the earthquake is happened. The spring damper is composed of viscoelastic material which is sandwiched by two steel plates. It is able to strengthen stiffness by the steel plates, and give a damping by viscoelastic material. The damper is available for not only wood houses, also old structures such as castles and temples, since it can be attached easily. In this paper, in order to confirm effects of bearing wall and vibration reduction under earthquake, shear strength tests and seismic vibration tests using a real scale bearing wall are carried out. A test frame of the bearing wall has 2.73 m high and 1.8 m wide. The test frame is horizontally loaded by using an actuator, and force and deformation are measured. Shear strength of the bearing wall is estimated. Next the test frame is horizontally shaken by earthquake using a shaking table. The response accelerations and relative displacements are measured, and the effect of vibration reduction is confirmed experimentally. Finally, a feasibility study about the spring damper is confirmed.

Key Words : Earthquake Resistant, Vibration Control, Damping, Damper, Damping Material, Bearing Wall

1. 結 言

大規模な地震が発生すると建物の倒壊や損壊が起き、それらは避難や減災の妨げになるだけでなくその後の復旧の影響にもなる。一般家屋に対する防災対策や耐震改修などは自治体からの援助もあるが、費用対効果から実質的にあまり進んでおらず、まだ十分な状態とは言えない。大被害をもたらす地震は地域や頻度によっても異なるが、改修を必要とする一般木造家屋は全体の半分以上である一千万戸以上に及ぶとされる。その対策の一つとして柱と梁の仕口部における補強がある。これまでも様々な耐震補強金具や、地震時の揺れを吸収することのできる耐力壁やダンパなどが実用化されている。しかし、前者は耐震補強には効果的であるが揺れを直接吸収しない、後者は制振には効果的であるが火災時の熱変形で材料が劣化し本来の性能を維持できないといった諸問題があった。これら二つの性能を併せもつ装置はあまり多くない。

そこで本研究では、木造建築物とくに既存家屋や寺社仏閣に対して地震時に柱と梁の損壊を防ぐ目的で、粘弾性材を用いた仕口補強円弧型制振ばねダンパを開発した⁽¹⁾⁽²⁾。本装置は柱と梁に固定され、円弧状に湾曲させた鋼板が剛性（復元力）の役割を果たすことで耐震性能を持たせ、かつ粘弾性材のせん断変形による減衰力が振動吸収の役割を果たすことで制振性能を併せ持ち、剛性のほとんどが鋼板で受けもつため熱による劣化がないのが特長である。これまでも、同じ目的で鋼板と粘弾性材を組み合わせた仕口ダンパが開発されているが、粘弾性材の変形方向や利用対象物が異なるものであった⁽³⁾⁽⁴⁾。著者らはこれまでに、開発した制振ばねダンパに使われる粘弾性材の抵抗力特性とせん断引張強度、ダンパ単体の抵抗力特性と耐久性、およびボルト引抜き強度をそれぞれ測定し、実用性を確かめた⁽⁵⁾⁽⁶⁾。本報では、実用化へ向けた検証として、耐震補強効果と振動低減効果を調べることを目的に実大の木造軸組を用いた面内せん断試験および地震波加振試験を行った。これにより本制振ばねダンパの壁倍率を求め、地震時における制振効果を実証した。最終的に、本制振ばねダンパの実現可能性を確かめた。

2. 制振ばねダンパの構造

本研究で開発した仕口補強円弧型制振ばねダンパ（以下ダンパ）を図1に示す。本ダンパは幅55 mmの外側板厚6 mmおよび内側板厚3.2 mmの二枚の円弧状鋼板と、厚さおよそ2 mmのスチレン系の粘弾性材から成る。コーチスクリューボルト4本によって柱と梁の仕口に取付けられる。揺れにより2枚の円弧状鋼板が変形し、それぞれの曲率が変わることによって中間層の粘弾性材がせん断変形する。熱による剛性低下がなく鋼板の復元力に加え粘弾性材の減衰力を併せ持つことにより、振動を吸収するだけでなく耐震補強の役割も同時に担うことが可能である。本装置に用いた粘弾性材および構造の詳細は既報に記載してあるので本報では省略する⁽⁵⁾。

3. 木造軸組を用いた面内せん断試験

耐震補強効果を調べるために、実大の木造軸組を用いた面内せん断試験を行った。試験については、鉛直構面及び水平構面の剛性と許容せん断耐力を算定するための試験方法⁽⁷⁾を準拠しタイロッド式で行った。試験に用いた木造枠組の種類を図2に示し、それぞれ以下の3種類である。

- (a) 筋かい・ダンパ併用型耐力壁
- (b) ダンパ型耐力壁
- (c) 従来の筋交い型耐力壁

Fig. 1 Design diagram of the arc shaped spring damper

Fig. 2 Test frame types of the bearing wall

Fig. 3 Force-displacement curves of the test frame with braces

Fig. 4 Force-displacement curve of the test frame without brace

なお、(a)および(c)は4本、(b)は1本用意した。これら耐力壁は高さ $h = 2.73$ m、長さ $L = 1.82$ m、柱、梁、土台は 105×105 mm の杉材、筋交いは 45×90 mm、間柱は 30×105 mm の杉材である。柱と梁は山形プレート、筋交いは筋交いプレートによって固定されている。アクチュエータによって梁を水平方向に加力し、仕口部の変形角が $1/600$, $1/450$, $1/300$, $1/200$, $1/150$, $1/100$, $1/75$, $1/50$ rad となるように繰り返し変形させた。同一変形段階での繰り返し数は3回である。力が最大荷重の80%の荷重に低下するまで、もしくは変形角が $1/15$ rad に達するまで試験を行った。筋かい・ダンパ併用型耐力壁(a)の結果を図3に、およびダンパ型耐力壁(b)の結果を図4に示す。これらの結果から得られる降伏耐力 P_y 、終局耐力 P_u 、最大荷重 P_{max} 、および真のせん断変形角 $1/150$ rad 時の耐力 P_{150} を表1にまとめて示す。終局耐力の評価耐力および最大荷重の評価耐力を以下の式で再計算した。

$$P'_u = P_u \times 0.2 \times \sqrt{2\mu - 1} \quad (1)$$

$$P_{\max}' = \frac{2}{3} P_{\max} \quad (2)$$

ここで、 μ は塑性率とする。それぞれ4つの評価耐力の平均値 V_{avg} から、信頼水準 75%の 50%下側許容限界値 V_{50} を以下の式で求めた。

$$V_{50} = V_{\text{avg}} (1 - CV \times 0.383) \quad (3)$$

ここで、 CV は評価耐力の変動係数である。短期基準せん断耐力値 P_0 は上述 4 値の中から一番低い値（表 2 の下線箇所）を抽出する。短期許容せん断耐力 P_a は

$$P_a = P_0 \times \alpha \quad (4)$$

として、 α は耐力に影響を及ぼす係数で本件では 1 とした。これらを用いて壁倍率は以下の式で与えられる。

$$\text{壁倍率} = P_a \times \frac{1}{1.96} \times \frac{1}{L} \quad (5)$$

壁倍率とは耐力壁の単位長さにかかる水平基準耐力 1.96 kN に対する静的な割合を示す。筋交い・ダンパ併用型耐力壁の壁倍率は（4.98 を用いると）1.39，ダンパ型耐力壁は（同 0.817）0.229，筋交い耐力壁は（同 3.44）0.97 となることから、同様の試験方法で行った筋交い型耐力壁に比べ 0.42 大きな値が得られた。このことから、概ね 40% 増の補強を期待でき、本ダンパの耐震補強効果が証明された。また、ダンパ型耐力壁は、筋交いなしの軸組のみの壁倍率を 0 と見なして比べた場合およそ 23% 増となった。一方、1/15 rad の変形角に至るまで装置に取付けられたコーチスクリューボルトが木材から外れないのが確認されたことから、ボルトの引抜き強度も高いことがわかり補強としても有用であることが本試験からも立証できた。なお、ダンパを評価する手段として本試験方法を用いたが、結果として通常耐力壁（筋交いが片方 1 本で断面積が小さい）よりもかなり低い壁倍率になったことを付記する。

Table 1 Experimental results of shear strength tests

Frame type		P_y	P_u	P_u'	$P_{\max}$	$P_{\max}'$	P_{150}
(a) Dampers installed with braces	No.1	6.68 kN	10.26 kN	4.48 kN	11.45 kN	7.63 kN	6.28 kN
	No.2	7.05 kN	12.70 kN	8.01 kN	13.95 kN	9.30 kN	8.42 kN
	No.3	9.35 kN	14.15 kN	6.57 kN	15.50 kN	10.3 kN	8.06 kN
	No.4	6.75 kN	9.70 kN	3.82 kN	10.50 kN	7.00 kN	8.09 kN
	V_{avg}	7.46 kN	—	5.72 kN	—	8.57 kN	7.71 kN
	CV	0.17	—	0.34	—	0.18	0.13
	V_{50}	6.97 kN	—	<u>4.98 kN</u>	—	7.98 kN	7.34 kN
(b) Dampers installed without brace	No.1	2.64 kN	3.51 kN	1.01 kN	3.95 kN	2.63 kN	0.885 kN
	V_{avg}	2.64 kN	—	1.01 kN	—	2.63 kN	0.885 kN
	CV	0.20	—	0.20	—	0.20	0.20
	V_{50}	2.44 kN	—	0.936 kN	—	2.43 kN	<u>0.817 kN</u>
(c) Conventional bearing wall	No.1	6.11 kN	8.73 kN	3.90 kN	10.50 kN	7.00 kN	6.87 kN
	No.2	5.64 kN	9.05 kN	3.46 kN	10.25 kN	6.83 kN	7.04 kN
	No.3	4.23 kN	6.58 kN	2.80 kN	7.95 kN	5.30 kN	6.71 kN
	No.4	5.40 kN	5.46 kN	5.04 kN	8.20 kN	5.47 kN	5.85 kN
	V_{avg}	5.33 kN	—	3.80 kN	—	6.15 kN	6.62 kN
	CV	0.15	—	0.25	—	0.14	0.08
	V_{50}	5.04 kN	—	<u>3.44 kN</u>	—	5.82 kN	6.41 kN

4. 木造軸組を用いた地震波加振試験

前章と同じ構造と寸法の木造軸組を用いて、地震時の振動低減効果を調べるために地震波加振試験を行った。図5に示すように振動台の中央に木造軸組の土台を固定した。梁の両側面は固定壁からの支持梁に取付けられた球面軸受によって面外方向に動かないように支持されている。梁の中央にはおよそ 100 kg の重錘を積載した。試験に用いた木造軸組の種類を図6に示し、それぞれ以下の6通りである。

- (a) 筋交い・ダンパ併用型耐力壁
- (b) 筋交い・ダンパ併用型耐力壁，対角線上仕口部にダンパ取付
- (c) 従来の筋交い型耐力壁
- (d) ダンパ型耐力壁
- (e) ダンパ型耐力壁，対角線上仕口部にダンパ取付
- (f) 筋交いなし軸組のみ

なお，(a)，(c)，(d)は面内せん断試験と同じ型だが，本試験用に新造したものである。地震波は，兵庫県南部地震（1995）神戸海洋気象台南北成分を最大加速度 4 m/s^2 に基準化，同 6 m/s^2 ，インペリアルバレー地震（1943）エルセントロ南北成分を同 5 m/s^2 ，日本建築センター（BCJ）模擬人工波 L2 型を同 4 m/s^2 の3種類4通りで，試験はそれぞれ3回ずつ振動台によって加振した。地際および梁の絶対加速度および絶対変位を測定し，応答波形におけるピーク値を同一試験毎に抽出した。その最大値および最小値を表2に示し，また神戸波およびエルセントロ波の絶対加速度と相対変位の応答波形を図7に示す。

相対変位は軸組のみの場合に比べ，ダンパ型耐力壁(d)で $1/2 \sim 2/5$ 程度，ダンパ型耐力壁(e)で $2/3 \sim 3/4$ 程度に低減している。変形角 $1/30 \text{ rad}$ 相当の水平層間変位が $91 \text{ mm} (= h \times 1/30)$ であることから，それらを上回ることがな

Fig. 5 Shaking test setup

Fig. 6 Test frame types of the bearing wall

Table 2 Maximum and minimum values of seismic vibration tests

Input wave	Type	Input acc.		Top acc.		Base disp.		Top disp.		Relative disp.	
		Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
JMA Kobe 4 m/s ²	(a)	3.67	3.68	4.56	4.64	47.7	48.4	48.7	49.3	3.6	3.7
	(b)	3.67	3.69	4.61	4.62	46.9	48.0	48.9	49.3	3.2	4.8
	(c)	3.66	3.69	4.60	4.62	46.6	48.2	48.8	49.4	3.4	4.4
	(d)	3.50	3.58	7.56	7.64	47.3	48.3	78.9	81.3	35.7	37.5
	(e)	3.42	3.44	7.84	7.96	50.4	50.9	90.7	94.2	59.7	61.0
	(f)	3.40	3.44	8.17	8.58	45.6	46.7	106.1	110.5	82.8	92.5
JMA Kobe 6 m/s ²	(a)	5.66	5.69	7.19	7.25	77.7	79.2	80.8	80.9	6.8	8.6
	(b)	5.67	5.74	7.05	7.14	78.6	79.7	80.0	80.4	6.9	7.5
	(c)	5.66	5.70	6.64	6.68	78.1	80.1	79.6	80.4	6.7	6.8
	(d)	5.34	5.41	9.63	10.08	84.1	87.0	107.2	110.7	49.9	54.3
	(e)	5.42	5.47	11.93	12.04	78.9	81.7	115.2	117.1	71.3	79.3
	(f)	4.66	4.73	8.70	8.81	72.0	73.4	114.5	125.0	105.6	113.9
El Centro 5 m/s ²	(a)	5.66	5.69	7.19	7.25	77.7	79.2	80.8	80.9	6.8	8.6
	(b)	5.67	5.74	7.05	7.14	78.6	79.7	80.0	80.4	6.9	7.5
	(c)	5.66	5.70	6.64	6.68	78.1	80.1	79.6	80.4	6.7	6.8
	(d)	5.34	5.41	9.63	10.08	84.1	87.0	107.2	110.7	49.9	54.3
	(e)	5.42	5.47	11.93	12.04	78.9	81.7	115.2	117.1	71.3	79.3
	(f)	4.66	4.73	8.70	8.81	72.0	73.4	114.5	125.0	105.6	113.9
BCJ-L2 4 m/s ²	(a)	3.88	3.91	10.19	10.25	94.0	94.8	99.9	100.0	8.5	9.5
	(b)	3.88	3.94	10.01	10.10	92.6	93.9	98.0	99.8	7.2	9.1
	(c)	3.96	3.99	9.14	9.21	93.9	95.1	98.7	99.1	5.9	7.4
	(d)	5.07	5.12	8.07	8.14	92.7	92.9	114.9	116.4	44.0	45.9
	(e)	4.84	4.88	6.82	6.85	93.1	94.4	109.5	109.8	55.5	57.5
	(f)	4.87	4.91	5.70	5.80	89.3	90.0	111.5	111.7	80.0	81.9

acc. [m/s²], disp. [mm]

く、ダンパの振動低減効果は充分表れている。また、筋交い・ダンパ併用型耐力壁(a)(b)の場合、ダンパの有無に関わらずダンパ型耐力壁(d)(e)に比べて相対変位は3~8%程度と大幅に低減されたが、梁の加速度は、筋交い・ダンパ併用型(a)(b)の方が高くなっている。これは筋交いの剛性が高いために本試験ではダンパの変形が少なく、振動低減効果が顕著に表れずに、地際加速度がそのまま伝達したためと思われる。なお、筋交い・ダンパ併用型耐力壁(a)と(b)には大きな違いは見られなかった。梁の加速度低減は仕口部の変形が関係していると見られ、試験に用いた地震波の中では神戸波においてダンパの低減効果が大きく表れている。これは、地震波の卓越振動数が比較的lowく、軸組が変形しやすかったためと考えられる。

5. 結 語

本研究では、開発した仕口補強用の円弧型制振ばねダンパを実大の木造軸組を用いて面内せん断試験および地震波加振試験を行い、本ダンパの壁倍率および制振効果を調べ、実現可能性を実証した。主な結果は以下の通りである。

- (1) 木造枠組を用いた面内せん断試験を行い、筋交い・ダンパ併用型耐力壁の壁倍率は 1.39、ダンパ型耐力壁は 0.23、および筋かい型耐力壁は 0.97 となった。このことからダンパを取付けることによって約 40%増の耐震補強効果が得られる。また、コーチスクリューボルトが変形角 1/15 rad 以上でも抜けないため、補強としても有用である。
- (2) 木造軸組を用いた地震波加振試験を行い、ダンパを取付けることによって梁と地際の層間変位を半分以下、および変形角 1/30 rad 以下に低減することがわかった。また、地震波の卓越振動数が比較的lowい神戸波入力時でダンパの優れた振動低減効果が得られた。

Fig. 7 Response waveforms of seismic vibration test

謝 辞

本研究は 2009 年度科学技術振興機構地域イノベーション創出総合支援事業重点地域研究開発推進プログラム
地域ニーズ即応型の支援を受けたことを付記する。

文 献

- (1) 工藤道男, 建築物の免震工法, 日本国特許第 4110291 号 (2008).
- (2) 松岡太一, 工藤道男, 岡崎泰男, 菅野秀人, “地震対策用仕口補強制振ばねダンパの開発”, 日本建築学会学術講演梗概集 B-2, No. 21431 (2007), pp. 861-862.
- (3) 岩佐裕一, 榎原健一, “仕口タイプ粘弾性ダンパーの開発 (その 1 概要と性能確認試験)” 日本建築学会学術講演梗概集 B-2, No. 21490 (1999), pp. 979-980.
- (4) 関谷英一, 他 5 名, “板バネと粘弾性体を用いた鉄骨仕口制振システムの開発 (その 1 ~ 5)”, 日本建築学会学術講演梗概集 B-2, No. 21401~21405 (2007), pp. 801-810.
- (5) 松岡太一, 工藤道男, 遠藤紘, “仕口補強円弧型制振ばねダンパの開発”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 75, No. 752 (2009), pp. 1209-1210.
- (6) T. Matsuoka, M. Kudo and H. Endo, “Arc Shaped Spring Damper for Strengthening at Corner of Structure”, Proc. 13th Asia Pacific Vibration Conference, No. 11 (2009).
- (7) 日本住宅・木材技術センター, 木造軸組工法住宅の許容応力度設計 (2008 年版), p. 565.