湾曲状仕口ダンパーの耐震補強への適用に関する研究

A Study on Application to Seismic Retrofit with Arc-Shaped Dampers

中田裕喜*・島端嗣浩**・角掛久雄***・大内一****・島田功*****

Yuki NAKATA, Tsuguhiro SHIMABATA, Hisao TSUNOKAKE, Hajime OHUCHI and Isao SHIMADA

*学生会員 大阪市立大学大学院前期博士課程 都市系専攻 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138)

**正会員 工修 東電設計株式会社 土木本部 耐震技術部 (〒110-0015 東京都台東区東上野 3-3-3)

***正会員 工修 大阪市立大学大学院工学研究科助教 都市系専攻 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138)

****正会員 工博 大阪市立大学大学院工学研究科教授 都市系専攻 (同上)

*****フェロー会員 工博 (株)オガノ 技術企画室 (〒564-0052 大阪府吹田市広芝町 6 番 1 号)

Since significant damages during 1995 Kobe Earthquake, one of urgently needed countermeasures is to retrofit frame type timber structures. In responding, the authors have proposed Arc-Shaped Dampers with aluminum. In order to investigate seismic performance of the proposed damper installed at the beam column joint, cyclic loading tests were conducted focusing on hysteretic characteristics and effect of damping. Following results were obtained: 1) Maximum load in compression is smaller than that in tension and during 1/15 drift angle, rapid load increase is observed in tension. 2) the proposed damper has enough effect of damping over 1/30 drift angle. 3) In seismic response analysis, the proposed damper can make the maximum displacement reduced by a half.

Key Words : arc-shaped damper, frame type timber structure, beam column joint

1. はじめに

1995 年の兵庫県南部地震で様々な構造物が被害を受けたが、木造建築物にも甚大な被害が見られた。平成 17 年時点で木造住宅数は約 2450 万戸存在し、その中で既存不適格建築物（現在の耐震基準を満たさない建築物）は約 1000 万戸存在する。国の取り組みにより地震対策が行われてはいるが、まだ不十分である。今後発生する地震に対して被害を最小限に食い止めるためにも、耐震性能の向上は重要かつ急務である。

木造軸組構法建物¹⁾の柱と梁は、図-1.1 に示すように、ほぞを他方のほぞ穴に差し込み、柱と梁を貫通する穴に栓で補強するとともに金具で接合されている。そのため、柱・梁接合部（仕口）は剛接合とはならず、水平地震力に対して仕口の変形が大きくなり、その結果、木造軸組は図-1.2 に示すようなせん断変形が卓越するモードとなる。実際、過去の地震被害をみると、木造軸組構法建物は仕口の変形が大きくなって大破や倒壊等の被害が生じている。

仕口など主要構造部の損傷を防ぎ、架構の耐震性能の向上を図るため、仕口部分に制振ダンパーを設置す

ることは有効な方法の一つである。また、制振は軸組本来が持つ能力の減衰性を損なうことなく補強できる面でも有効である。これまで様々な制振ダンパー^{2), 3)}の開発が行われているが、これらに比較してより安価かつ簡易に作製できることを目標に、履歴減衰型の湾曲状制震ダンパーの開発を試みた。提案するダンパーは、塑性変形によるエネルギー吸収を期待することから、ダンパー全体を首尾よく塑性化させることが重要となる。そのため、幾何形状を湾曲にすることで座屈による性能低下を避けるだけでなく、モードを一定化し、また、曲げ応力による塑性域の広がりを確保する。

前年度に実施した軟鋼 (SS400) を用いた湾曲状仕口ダンパー（以下 SS400 ダンパー 図-1.3 参照）特性試験⁴⁾では、大きな部材角 (1/30, 1/15 rad) において減衰効果を十分期待できるという結果 (約 20~40%) が得られた。しかし、初期の部材角 (1/120, 1/60 rad) における減衰効果は、既存の粘弾性ダンパー²⁾が約 30%の減衰効果を有しているのに対し、SS400 ダンパーは 10%程度にとどまり、粘弾性ダンパーよりも減衰性能がかなり低い結果となった。そこで、本研究では湾曲状仕口ダンパーのさらなる改

良を行い、その力学特性と効果を確認するために実験および解析を行った。本論文は、1) ダンパーのみに着目した要素特性試験、2) 木造軸組みに組み込んだ部分模型試験、そして 3) 軸組みフレームに組み込んだ地震応答解析から構成される。

2. 湾曲状仕口ダンパーの要素特性

2.1 実験概要

本研究では、著者らが考案した SS400 のダンパー⁴⁾を基本として、図-2.1 に示す 2 種類の型式のダンパーを提案する。初期の部材角 ($1/120$, $1/60\text{rad}$) における減衰効果を改良するための方法の一つに、降伏値が低い材料を用いることが挙げられる。そこで、降伏値が低く、十分な伸び (公称値 40%) が期待でき、そして比較的安価なアルミニウム (JIS 1070-O) を選定した。また、アルミニウム板とゴムを充填したダンパー (以下総称して合成ダンパーと呼ぶ) についても検討を行なった。充填ゴムは内外アルミニ

ウム板との合成効果の確保、およびダンパーの形状保持を主目的としている。用いた供試体を表-2.1 に示すが、充填ゴムの種類は、ウレタン (硬度 90°, 硬度 60°), 低反発ゴムの 3 種類、接着剤はエポキシ樹脂系とアクリル系の 2 種類を用いて実験を行う。なお、SS400 ダンパーでは 2 本の異なる形状のダンパーであったが、製作の観点から同心円状のみとした。また、引張時に内外アルミニウム間隔が大きく開き、充填ゴムを介した接着が難しいため、合成ダンパーの中央部にステンレスを挟み、ボルト接合した。ただし、充填ゴムの無いダンパー (AL-N) に関してはステンレスおよびボルトは用いず、当初より非合成とした。一方、端部は丁番 (材質: SS400) を用いて回転ピン構造とした。これは SS400 ダンパーでは端部を固定板と溶接で固定していたが、伸び能力の確保が難しいためである。ダンパーの寸法について、ダンパー半径は空間利用性や景観等を考慮し、また既存のダンパーを参考に 200mm とし、断面は地震を想定した時のダンパーが負担 (を期待) する荷重から決定した。

実験方法は図-1.2 のようなせん断変形を再現できるように、図-2.2 に示すような、ダンパーを設置した加力フレームの下部ヒンジ部に静的に強制鉛直変位 δ を与えることで正負交番载荷を行った。図に示す変位 δ と L から部材角 $\theta = \delta/L$ (rad) を定義するが、

表-2.1 供試体概要

供試体名	充填ゴム	接着剤
AL-N	無し	無し
AL-U90-E	ウレタン (硬度90°)	エポキシ系 (クイックメンダー)
AL-U90-M	ウレタン (硬度90°)	アクリル系 (MOS7)
AL U60 M	ウレタン (硬度60°)	アクリル系 (MOS7)
AL-L-M	低反発ゴム	アクリル系 (MOS7)

与える変位振幅は、木造建物の耐震性能¹⁾を参考に、部材角を 1/120 (0.0083), 1/60 (0.0167), 1/30 (0.0333), 1/15 (0.0667) rad とした。ただし、それぞれの部材角で、各 3 回の正負交番载荷を行った。なお、ダンパー本体の計測については、ダンパーにかかる荷重の軸線位置での荷重方向変位、同直交方向変位、および湾曲部等のひずみを測定した。

2.2 実験結果

(a) モーメント-部材角関係

実験より得られたモーメント-部材角関係例 (AL-N, AL-U-90-E 供試体) を図-2.3 に示す。ここで、図の縦軸のモーメント、横軸はダンパーの部材角で、(1), (2)式で定義する。

$$M = P \times L \quad (1)$$

$$\theta = \frac{L}{\delta} \quad (2)$$

なお、部材角について、ダンパーにかかる荷重の軸線位置での荷重方向変位 (図-2.2 の丸で囲んだ変位計) から算出しているが、加力フレーム上下端のピンの遊びやフレームの変形等により、与えた部材角よりも小さくなっている。

AL-U90-E は圧縮、引張とも AL-N より大きなモーメントが生じていた。しかし、約 0.05 rad の引張载荷時にゴムとアルミニウムの接着剤がはがれたのが目視確認できた (写真-2.1(b)の○部)。その結果、2 ループ目以後の引張時では AL-N と類似した履歴となった (図-2.3 の○部)。なお、引張時最大モーメントが AL-N より若干大きくなっているのは湾曲部中央位置でのボルト(M5)の接合の効果によるものと考えられる。一方、圧縮時では常にほぼ一定のモーメントが大きくなっているため、部材角の大きさによらず合成効果が期待できる履歴となった。

その他の合成ダンパーについても、若干の耐力の差異はあるものの、AL-U90-E とほぼ同様の履歴を示し、1/15 rad の引張時にゴムとアルミニウムが剥がれ、圧縮時は合成効果により AL-N よりも大きなモーメントが生じる結果となった。

(b) 等価粘性減衰定数

それぞれの部材角における第 2 サイクルのモーメント-部材角関係から等価粘性減衰定数を算出した。通常、等価粘性減衰定数は 1 サイクルにおける損失エネルギーと弾性歪エネルギーの比で表されるが、湾曲状ダンパーの場合、引張と圧縮で大きく履歴が異なるため、図-2.4 のように引張と圧縮で分けて次式で算出した。

$$h_{eq} = \frac{(\text{損失エネルギー})}{2\pi \times (\text{弾性歪エネルギー})} \quad (3)$$

図-2.5 に結果を示す。凡例の SS400 は SS400 ダンパーの結果であり、粘弾性とは鴻池組により開発された、仕口部設置型のゴムのせん断変形を利用した粘弾性ダンパーで、その結果を参考として示す。

図より、等価粘性減衰定数はどの供試体において

図-2.3 モーメント-部材角関係

写真-2.1 1/15 rad 载荷時

図-2.4 等価粘性減衰定数の算出方法

も引張時は $1/30$ rad まで上昇し、その後は減少する傾向にある。この原因は、引張時は部材角が大きくなるにつれ軸引張力の影響が大きくなり、弾性回復する領域が広がるためである。逆に、圧縮時はどの供試体も部材角が大きくなるにつれ等価粘性減衰定数の値は大きくなる。これは、曲げ降伏領域が広がるためである。

次に AL-N と AL-U90-E とを比較する。まず引張側においては、 $1/120 \sim 1/30$ rad の部材角までは AL-U90-E の方が減衰定数が大きい。が、 $1/15$ rad ではほぼ同じ値となった。これはゴムが剥がれたことにより合成効果が失われたためである。その他の合成ダンパーも AL-U90-E と同様にゴムが剥がれたため $1/15$ rad では AL-N とほぼ同じ値となった。圧縮側においては、AL-U90-E は $1/120$, $1/60$ rad で AL-N を上回り、 $1/30$ rad 以降、逆転している。写真-2.1(b) の圧縮側を見ると、中央部で内外のアルミニウムの隙間が無くなっている。つまり、部材角が大きくなると AL-N の剛性が低下するために生じる現象と考えられる。他の合成ダンパーと AL-N の関係も AL-U90-E と類似した結果となった。

SS400 ダンパーと比較すると、AL-U90-E の圧縮時の $1/15$ rad を除いてアルミニウムのダンパーのほうが大きくなった。よって減衰効果の観点から、提案したダンパーは SS400 ダンパーを改良できたと言える。

最後に既往の粘弾性ダンパー³⁾と比較すると、圧縮時の $1/30$ rad では同程度の減衰効果が得られているものの、その他では下回る結果となった。しかし、 $1/30$, $1/15$ rad においては制震ダンパーの目標性能を $30 \sim 40\%$ 減衰と考えると、結果は同等もしくはそれ以上であり、大きい部材角に対しては有用と考えられる。

2.3 解析モデル

非合成ダンパー AL-N 供試体を対象に、汎用解析ソフト FINAL を用いて解析を行う。解析モデルを図-2.6 に示すが、対称性を考え $1/2$ モデルとしている。

アルミニウムはファイバー要素、丁番(SS400)は四辺形要素を用いる。なお、アルミニウムと丁番とは剛結とした。アルミニウムの材料特性は図-2.7 に示すバイリニアでモデル化した。丁番(SS400)は弾性係数が 200000 N/mm^2 の弾性材としている。加力フレームは剛な Beam 要素でモデル化した。また、幾何・材料非線形を考慮するが、降伏後のひずみ硬化は移動硬化則に従うものとした。

境界条件は図-2.6 に示すが、図の赤矢印位置で強制変位を与え、変位制御による漸増解析を行った。

2.4 解析結果

(a) モーメント-部材角関係

式(1), (2)で算出されるモーメント-部材角関係を

図-2.8 モーメント-部材角関係

図-2.8 に示す. 図より実験と解析は初期剛性を含め, ほぼ一致している. しかし, 本解析は引張から圧縮へ移行する際の除荷・荷重過程 (○) の再現が不十分である. また, 引張時 (●) における剛性の回復現象の再現が十分でない. 圧縮時において, 写真-2.1 (a) のように外側と内側のアルミニウムが接触するが, 本解析で使ったソフトは接触現象を考慮できないため, 差異が生じた可能性がある. また, 供試体のほうではピンの遊びや丁番とアルミニウムが完全には剛結では無いこと, 加工誤差等が考えられる. しかし, これらを除き, 解析は実験結果を再現できている.

(b) 塑性域分布

塑性域分布を図-2.9 に示す. この図は, 1/120 rad, 1/15 rad の載荷において, 最大圧縮時の軸方向応力分布であり, それぞれの湾曲部の最外縁について示している. 図の左から, 外側のアルミニウムの最外縁, 内側の最内縁となっている. 応力分布において塑性域は線で示し, 一線は丁番とアルミニウムが結合している領域を示している. 軸線より右側は正, 左側は負の分布である. 図中の□は実験でのひずみゲージ位置を表しており, 塑性ひずみに達している場合は■で示している.

図-2.9 塑性域分布

図-2.10 等価粘性減衰定数

図-2.9 において, 解析結果は最外縁のアルミニウムは丁番と近い要素から, そして, 最内縁は湾曲部の頂部から徐々に降伏しているのが確認できる. また, 実験と解析との塑性域は概ね対応しており, さらに 1/15 rad の載荷時は広範囲に渡って塑性化していることが確認できる. また, 図は示していないが, 引張時においても実験と解析の塑性域が対応していることが確認できた.

(c) 等価粘性減衰定数

解析をもとに等価粘性減衰定数を算出し, 実験と比較したものを図-2.10 に示す. この図より引張, 圧縮ともに類似した結果となった.

3. 軸組みへの適用

3.1 実験概要

図-3.1 に示す木造軸組み部分模型を用いて, 適用性を検討する. 図-1.1 の栓や金具は適宜設置されるものだが, 今回は栓や金具は無く, ほぞのみで接合したものを想定して実験を行った. 軸組みにはひのきを用いた. 端部は M5 のドリルねじ, または M6 の鋼棒を用いて写真-3.1 に示す鋼製治具を用いて試験機に取り付ける. 図-3.1 (a) に示す長ほぞは一方を大きく突き抜けているが, 抵抗するのは実質 120

図-3.1 供試体概要

mm 部分までである。図-3.1 (b) に示す短ほぞは長さが 60 mm で、一方を突き抜けていない。

次にダンパーについて、ダンパーの在庫状況から、アルミニウムダンパーの充填ゴムがウレタン(硬度 90°), 接着剤に MOS7 を用いたダンパーを適用した。

実験パラメータは、ほぞの種類とダンパーの有無、載荷方法とした。ほぞが長い場合と短い場合それぞれでダンパーを設置したものとししないものの、計 4 種類で静的載荷実験を行なった。また、短いほぞの軸組みにダンパーを設置したものについては動的載荷実験も行った。なお、それぞれの実験に用いた木造軸組は異なるものである。実験パラメータについてまとめたものを表-3.1 に示す。

実験方法は加力フレームでの要素実験と同様に、軸組みを正負交番載荷機に設置し、軸組みの下部のヒンジ部に静的もしくは動的に強制変位 δ を与えることで載荷を行った。静的実験に関して、与える強制変位はその部材角を 1/120 (0.0083), 1/60 (0.0167), 1/30 (0.0333), 1/20 (0.05) rad とした。ただし、それぞれの部材角で、各 3 回の正負交番載荷を行った。動的実験に関しては、静的実験と同様の供試体を用い、表-3.2 に示すように周波数と振幅を実験パラメータとした。実験パラメータは不規則であるが、これは振動数と部材角によっては載荷装置と軸組みとのバランスの関係上、計測が不可能なものがあったためである。

(a) 軸組み設置状況 (b) 端部

写真-3.1 軸組み端部

表-3.1 実験パラメータ

供試体名	ほぞの長さ	ダンパー	載荷方法
LW	長	無	静的
AL-LW	長	有	静的
SW	短	無	静的
AL-SW	短	有	静的
AL-SW-D	短	有	動的

表-3.2 動的載荷パラメータ

部材角 (rad)	1/120	1/60	1/30	1/20
0.5	○	○	○	○
0.7			○	
1	○	○		
1.5		○		
2	○			
3	○

(a) LW

(c) SW

(b) AL-LW

(d) AL-SW

図-3.2 モーメント-部材角関係

3.2 実験結果

(a) 静的実験結果

図-3.2 に式(1), (2)で算出されるモーメント-部材角関係を示す。LW について、約 0.02 rad まではモーメントが上昇しないスリップ型の履歴となった。これは、仕口部分での遊びが大きかったためである。実際、柱と梁を接合する際、簡単にほぞ穴に入れることができた。次に、AL-LW について、履歴は逆 S 字型に近く、エネルギー吸収少ない履歴を示した。この原因は図-3.2(a)から部材角が 0.02rad 以上ではほぞの回転剛性が大きく、ほぞに力が流れ、履歴特性に影響を与えたと考えられる。なお、この試験体の場合、柱と梁をほぞで接合する際にほとんど遊びが生じていなかった。

次に、SW について、長いほぞと比較するとモーメントはほとんど生じない結果となった。このことから、この軸組みはほぼ回転ピンであると考えられる。モーメントが安定していないのは、ほぞの梁中へのめり込みとすべりによるものと考えられる。実際、载荷中は常にほぞ部できしみ音が観察された。最後に、AL-SW について、AL-LW と比較するとエネルギー吸収が期待できる履歴となった。

(b) 動の実験結果

動の実験結果の一例として、部材角が 1/60 rad の

図-3.3 モーメント-部材角関係

図-3.4 解析概要 (単位: mm)

時のモーメント-部材角関係を図-3.3 に示す。1/60 rad で振動数を変えて実験を行なったところ、振動数による影響はほとんど見られなかった。また、静的実験と比較しても、履歴特性に大きな違いは見られない。ここでは示していないが、他の計測変位やひずみにおいても類似した傾向を示した。なお、表-3.2 に示す、1/60rad 以外の部材角と振動数においても同様に、静的実験と類似した履歴が得られた。

3.4 動的解析による軸組への適用についての検討

2.3, 2.4 項で妥当性の確認できたモデルを用い、木造軸組みフレームへの適用を解析的に検討する。図-3.4 に概要を示す。図に示す単位フレーム⁵⁾ (単位体積質量 $3.3 \times 10^{-5} \text{kg}$) の上部の梁に、屋根の重量を見立てた 3kN の重りを载荷する。この軸組みと AL-N および SS400 ダンパー (アルミニウム、丁番 (SS400) の単位体積質量 2.6×10^{-4} , $7.9 \times 10^{-4}/9.8 \text{kg}$) を仕口に設置したもので時刻暦応答解析 (ニューマーク β 法) を行う。この解析では SS400 ダンパーは剛性を AL-N の場合と等価になるよう設定した。解析に用いた地震波は、図-3.5 に示す神戸海洋気象台より提供されている兵庫県南部地震 (1995 年 M7.3) の NS 波を用いた。解析は Lumped mass model とし、幾何・材料非線形を考慮する。

ほぞのモデルについて、ほぞは抜け出しがないものと考え並進バネは剛とし、回転バネのみ考慮した。図-3.6⁵⁾ に示すモーメント-部材角関係とし、復元力特性は木造建物の耐震性能を参考に、スリップ型の

図-3.5 兵庫県南部地震 (N-S 波)

図-3.6 回転バネの特性

図-3.7 荷重-部材角関係

モデル¹⁾とした。軸組みは弾性 beam 要素を用い、弾性係数は杉の値⁵⁾ (5551 N/mm²) とした。

3.2 解析結果

図-3.7 に上部の梁にかかる水平荷重-部材角関係を示す。なお、部材角の定義は図-3.8 に示す。ダンパーを設置したものは補強により耐力が高くなるとともにエネルギー吸収が期待できる履歴特性を示した。また、アルミニウムダンパーは SS400 ダンパーよりも、応答を低減できた。次に、図-3.9 には時刻歴応答を示す。図中に限界部材角¹⁾ (1/15rad) を示しており、無補強の場合には初期段階で倒壊に至る可能性がある。一方、ダンパーを設置することにより最大応答部材角が約 50%低減し、倒壊を防ぐことができる結果となった。また、残留変形量も大きく改善することができている。

以上より、大地震に対しては、提案したダンパーを適用することは効果的であると考えられる。

4. 結論

- (1) 曲げ応力の卓越する圧縮時は降伏域の拡がりが大きく、軸引張応力の卓越する引張時より減衰効果は大きい。
- (2) アルミニウムダンパーは SS400 ダンパー以上の減衰効果が得られた。
- (3) AL-U90-E は 1/120～1/60rad において AL-N 以上の減衰効果が得られた。しかし、1/15 rad では他の合成ダンパーも含め、ゴムとアルミニウムがはがれたため、実構造への適用にはさらに検討が必要である。
- (4) 制震ダンパーの目標性能を 30～40%減衰と考えると、大きな部材角(1/30 rad, 1/15 rad)では同等もしくはそれ以上であり、減衰効果が期待できる。
- (5) 木造軸組み部分模型に組み込んだ実験では、長ほぞの場合、ほぞの剛性が非常に大きいため、ダンパーによるエネルギー吸収効果が期待できない履歴となった。

図-3.8 部材角の定義

図-3.9 時刻歴応答部材角

- (6) 一方、短ほぞの場合、長ほぞに比べると剛性が低いことにより、ダンパーによるエネルギー吸収効果が期待できる。
- (7) 実際の固有振動数を考慮した動の実験より、得られた履歴特性は静的と同等である。
- (8) 動的分析により、単位フレームに AL-N を設置すると最大応答部材角を約 50%低減することができる。また、残留変形も低減することもできる。
- (9) SS400 ダンパーよりも AL-N ダンパーの方が軸組みの最大応答部材角、残留変位ともに低減することができる。

参考文献

- 1) 木造軸組構法建物の耐震設計マニュアル編集委員会：伝統構法を生かす木造耐震設計マニュアルー限界耐力計算による耐震設計・耐震補強設計法一，学芸出版社，2004
- 2) ノ瀬博明ら：仕口タイプ粘弾性ダンパーの開発その 3.性能確認試験(3)，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2，pp.317-318，2001
- 3) 株式会社鴻池組ら：建築技術性能証明評価概要報告書ー仕口ダンパーによる木造軸組耐震補強構法一，財団法人 日本建築総合試験所，2001
- 4) 中田裕喜：湾曲状軟鋼仕口ダンパーの特性試験と解析，大阪市立大学工学部土木工学科卒業論文，2007
- 5) 荒巻真二ら：せん断変形する構造物用制震ダンパーの解析モデル，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.427-428，2006

(2008 年 4 月 14 日 受付)