湾曲状仕ロ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 ¹⁰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





図-1.2 木造軸組のせん断挙動

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(1/120,1/60rad)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

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)							



図-1.3 軟鋼 (SS400) ダンパー

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載荷を行った.図に示 す変位 δ と *L* から部材角 $\theta=\delta/L$ (rad) を定義するが、



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回の正負交番載荷を行った. 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.

$$M = P \times L \tag{1}$$

$$\theta = \frac{L}{\delta} \tag{2}$$

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 の引張載 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)の〇部).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(1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ので,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.

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



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 する領域が拡がるためである.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,曲げ降伏領域が拡が 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、1/120~1/30 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 30~40%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/mm²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 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載荷過程(〇)の再現が不十分 である. また,引張時(こ)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、本解析で使用し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 での載荷において,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,そして,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 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



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.





) 軸組み設直认況 (り) り

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	0	0	0				
	0.7			0					
垢動粉 (Ц-)	1	0	\bigcirc						
抓到致 (ПZ)	1.5		0						
	2	0							
	3	\cap							



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,載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) 動的実験結果

動的実験結果の一例として,部材角が1/60 radの



柱断面:105×105 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 3.3×10⁻⁵kg)の上部の梁に,屋根の重量 を見立てた 3kN の重りを載荷する. 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, 7.9×10⁻⁴/9.8kg) 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





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 暦応答を示す.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.



- (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的実験より,得ら れた履歴特性は静的と同等である.
- (8)動的解析により、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

- 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―, 学芸出版社,2004
- 2)一ノ瀬博明ら: 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
- 4)中田裕喜:湾曲状軟鋼仕ロ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)