

# 超塑性Zn-Al合金を用いた伝統木造建築用制振ダンパーの開発

## Development of Superplastic Zn-Al Alloy Seismic Dampers for Traditional Wooden Structure

井上 泰彦\*1 櫛部 淳道\*2 楠 寿博\*3 栗原 嵩明\*1 高木 敏晃\*4  
Yasuhiko Inoue\*1 Atsumichi Kushibe\*2 Toshihiro Kusunoki\*3 Takaaki Kurihara\*1 Toshiaki Takagi\*4

### 梗概

伝統木造建築において、建物の外観・内観などの伝統様式を損なわず、限られたスペースで効率的に耐震性能を向上させる技術が求められている。このような背景から、伝統様式の構造的特徴である貫架構の仕口部に設置可能な、小型、軽量かつ可搬性・施工性にも優れた伝統木造建築用超塑性Zn-Al合金制振ダンパーを開発した。ダンパーの性能を確認するため、ダンパー単体性能確認試験および伝統木造架構における動的載荷試験・振動試験を実施した。これらから、ダンパーは小変形角から大変形角まで安定した性能を示し、ダンパーを設置した伝統木造架構においても大きな振動低減効果が得られることを確認した。

キーワード：超塑性Zn-Al合金，制振ダンパー，伝統木造建築，貫

### Summary

As a new kind of seismic materials, superplastic Zn-Al alloy has been studied and proposed. This alloy has a few advantages such as low work-hardening rate and high ductility over a conventional seismic material.

In this work, a superplastic Zn-Al alloy seismic damper is developed to improve the seismic performance of traditional wooden structure. In order to verify the effect of developed dampers, fundamental performance tests, dynamic loading tests and shaking table tests were carried out. Results of these tests indicate that this damper shows stable hysteresis loop from small to large deformation and a traditional wooden structure with this damper has large damping capacity.

Keywords: superplastic Zn-Al alloy, seismic damper, traditional wooden structure, penetration tie beam

## 1 はじめに

地震国である我が国では、中央防災会議において指摘されているように、東海・東南海・南海地震といった大地震がいつ起きてもおかしくない状況にあり、構造物を地震災害から守る耐震技術の高度化と普及が緊急の課題となっている。寺院、神社など伝統構法による木質構造物の耐震補強や新築・増改築建物の耐震設計を行う場合、在来工法である構造用合板壁や筋交いの増設等による方法では、建物の外観・内観などの伝統様式を損なうという課題がある。また、伝統木造建築は元来、変形性能に富んだ架構であり耐震性能を有するが、これらの補強ではその特性を活かしきれない。このような背景から、構造用合板壁や筋交いの増設を最小限に抑え、限られたスペースで効率的に耐震性能を向上させる技術が求められている。

近年、一般住宅も含む木質構造における耐震技術として、粘弾性体をエネルギー吸収部材とした制振ダンパー<sup>1)~3)</sup>や制振壁<sup>4)~6)</sup>の開発が盛んに行われ、実用化されている。粘弾性体は優れた変形性能を示す一方で、振動数依存性および温度依存性が大きい材料が多く、使用環境に性能が大きく影響されることや金属と比較して剛性が低いことから小型化が難しいなどの課題がある。

これまで著者らは新しい制振材料である室温で超塑性を発現するZn-Al合金<sup>7), 8)</sup>を用いた制振ダンパーを開発し、実用に供してきた<sup>9), 10)</sup>。室温超塑性Zn-Al合金は、室温において伸びが数百%に達するいわゆる超塑性変形が発現

\*1 技術研究所 研究員 Researcher, Research & Development Institute

\*2 技術研究所 主任研究員 博士(工学) Chief Researcher, Research & Development Institute, Dr. Eng.

\*3 技術研究所 主任研究員 博士(農学) Chief Researcher, Research & Development Institute, Dr. Agr.

\*4 ㈱コベルコ科研 事業開発室 博士(理学) Operation & Development Section, Kobelco Research Institute Inc., Dr. Sci.

する金属である。本合金は地震時に繰返し大変形を生じる制振ダンパー用の材料として十分な変形性能とエネルギー吸収能力を有する。また、一般的なアルミニウム合金と同等のヤング率や鋼材並みの強度を発揮する。したがって、Zn-Al合金を制振材料として活用することで、鋼材ダンパー並みのコンパクトなサイズで、粘弾性ダンパーのような広い吸収エネルギー領域を持つ制振ダンパーを実現することが可能である。

著者らは伝統様式の構造的特徴である貫架構の仕口接合部に着目し、柱-貫の仕口部に取付けることが可能な、小型、軽量かつ可搬性・施工性にも優れた伝統木造建築用超塑性Zn-Al合金制振ダンパーを開発した。本論文では、室温超塑性Zn-Al合金の特性と開発した制振ダンパーの機構およびダンパー部材単体性能確認試験、伝統木造架構による動的載荷試験・振動試験を実施した結果について報告する。

## 2 室温超塑性Zn-Al合金

### 2.1 室温超塑性Zn-Al合金の概要

本開発において制振材料に用いた室温超塑性Zn-Al合金は、亜鉛が78重量%、アルミニウムが22重量%から構成される合金である。本合金は鋳塊にTMCP (Thermo-Mechanical Control Process) 処理と呼ばれる特殊な加工熱処理<sup>7)</sup>を施すことにより金属組織をnmオーダーまで微細化することで、通常は高温域でしか発現しない超塑性特性が室温でも発現することに特徴がある。Photo 1に本合金の典型的な組織写真を示す。アルミニウムリッチ相に囲まれた亜鉛リッチ相の結晶粒径が、nmオーダーに微細化されていることが確認される。

Photo 2にZn-Al合金の引張試験前後の試験片を示す。本合金は、一般的な鋼材とは異なり、延性が非常に大きく、均一で大きな伸びが室温でも得られる。Fig.1に本合金の累積塑性ひずみに対する最大応力の変化を極低降伏点鋼 (LY100) と比較して示す。本図に示すように、本合金はLY100に比べ加工硬化が極めて少なく累積塑性ひずみに対する応力の変化が安定しており、繰返し変形に対して性能が極めて安定しているという優れた特長を有する。したがって、本合金を用いた制振ダンパーは一度地震により塑性変形を生じて、発生応力がほとんど変化せず、設計当初の性能を維持しやすいメリットがある。さらに、本合金は有害、高価、希少な金属元素を含んでおらず、耐食性も良好な材料である。

### 2.2 室温超塑性Zn-Al合金の機械的性質

Fig.2~4に室温超塑性Zn-Al合金における引張圧縮繰返し載荷試験による応力とひずみの関係の例を示す。試験は完全両振り正弦波加振とし、Fig.2は振動数0.3Hz、ひずみ振幅±1.0%における温度依存性、Fig.3は試験体表面温度25℃、ひずみ振幅±1.0%における振動数依存性、Fig.4は振動数0.3Hz、試験体表面温度25℃におけるひずみ振幅依存性をそれぞれ

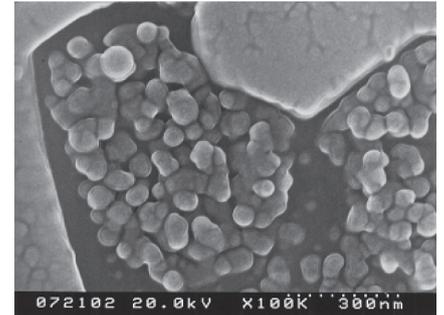


Photo 1 超塑性Zn-Al合金の組織写真  
SEM image of superplastic Zn-Al alloy



Photo 2 超塑性Zn-Al合金の延性  
Ductility of superplastic Zn-Al alloy

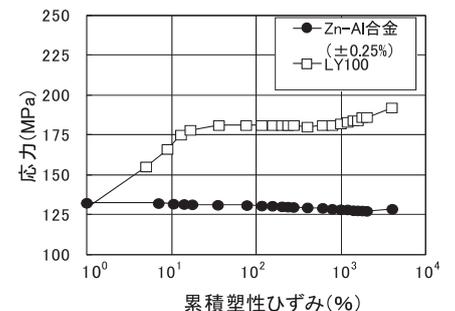


Fig.1 累積塑性ひずみと応力の関係  
Relationship between cumulative inelastic strain and stress

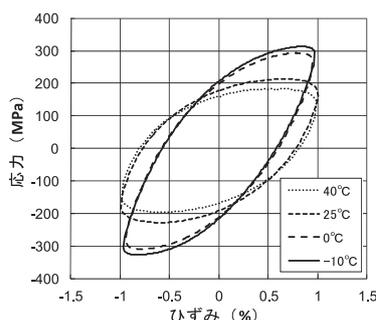


Fig.2 応力-ひずみ関係の温度依存性  
Temperature sensitivity of hysteresis

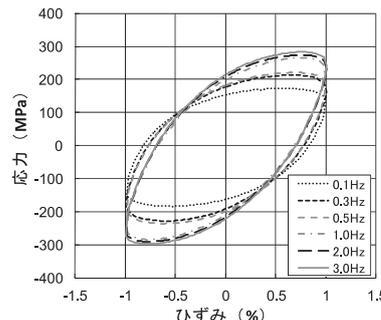


Fig.3 応力-ひずみ関係の振動数依存性  
Frequency sensitivity of hysteresis

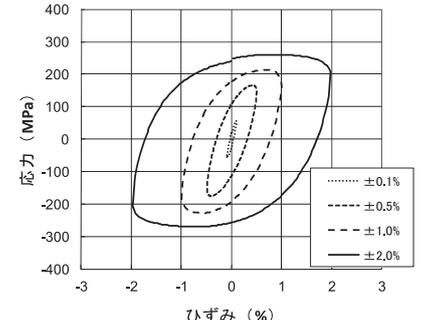


Fig.4 応力-ひずみ関係の振幅依存性  
Amplitude sensitivity of hysteresis

れ示す。

Fig.2, 3から本合金は履歴ループにおよぼす温度、振動数依存性があり、低温かつ高振動数ほど発生応力が大きくなる性質があることが分かる。また、Fig.4に示すように履歴ループの振幅依存性については、小振幅では粘弾性体に見られる一般的な楕円形を示し、大振幅では鋼材に見られるような紡錘形に近い挙動を示す。このように本合金は金属でありながら、その履歴ループは振動数・温度依存性の程度は少ないが粘弾性体にも似た挙動を示すことが大きな特徴である。

さらに、Fig.2, 3に示されるように、切片応力（ひずみ0%時）におよぼす温度依存性と振動数依存性は小さく概ね同程度の値となり、ひずみ振幅±0.5%において得られた吸収エネルギー量を各試験温度で整理したFig.5の例のように、同一のひずみ振幅において種々の温度や振動数に対してエネルギー吸収量の変動が非常に小さいという性質を有する。

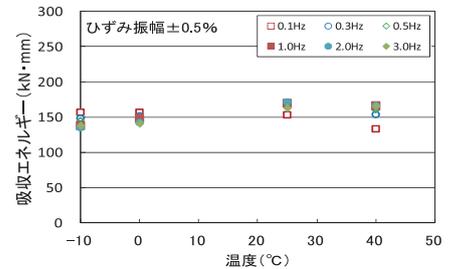


Fig.5 吸収エネルギーの温度依存性  
Temperature sensitivity of absorbed energy

### 2.3 室温超塑性Zn-Al合金の振動数・温度依存性の評価

制振ダンパーの使用環境を模擬した条件である温度-10~40℃、振動数0.1~3.0HzのZn-Al合金引張圧縮繰返し载荷試験結果について最小自乗法による回帰分析を実施した結果から、Zn-Al合金に発生する最大ひずみ時の発生応力 $\sigma_{\epsilon_{max}}$ におよぼす温度と振動数の依存性を等価に表現するパラメータとして(1)式のように振動数・温度補正係数 $\alpha$  (以下、補正係数 $\alpha$ とする)を定義した。

$$\alpha = \alpha_f \times \alpha_T = \frac{0.1218 \ln F + 1}{0.1218 \ln F_s + 1} \times \frac{-0.0098T + 1.1474}{-0.0098T_s + 1.1474} \quad (1)$$

補正係数 $\alpha$ は、振動数変化による補正係数 $\alpha_f$ と温度変化による補正係数 $\alpha_T$ の積により与えられる。このとき、最大ひずみ時における発生応力 $\sigma_{\epsilon_{max}}$ は(2)式により表現できる。

$$\sigma_{\epsilon_{max}} = \alpha \times \sigma_{\epsilon_{max_s}} \quad (2)$$

ここで、 $F_s$  (Hz) および $T_s$  (°C) は任意の基準振動数および基準温度であり、このときの最大ひずみ時の発生応力が $\sigma_{\epsilon_{max_s}}$ である。Table 1に $F_s = 1\text{Hz}$ ,  $T_s = 15^\circ\text{C}$ とした場合の各振動数、温度における補正係数 $\alpha$ を例として示す。補正係数 $\alpha$ は $\sigma_{\epsilon_{max}}$ に対する温度と振動数の影響の大きさを表す。例えば、 $\alpha = 1.24$ となる $F = 1.0\text{Hz}$ ,  $T = -10^\circ\text{C}$ と $F = 2.0\text{Hz}$ ,  $T = 0^\circ\text{C}$ の条件においては、振動数と温度がZn-Al合金の $\sigma_{\epsilon_{max}}$ に与える影響は等価であることを意味する。(1)式と(2)式から、実験データとして既に得られている基準となる条件から、任意の条件における最大ひずみ時の発生応力を推定することが可能となる。この回帰式の妥当性については、Fig.6に示すように、様々な温度と振動数の組合せにおいてほぼ同一の補正係数 $\alpha$ を与える履歴ループを各々比較したグラフにおいても明らかである。特筆すべきは、Zn-Al合金は同じ振幅において補正係数 $\alpha$ が同一となる条件においては、 $\sigma_{\epsilon_{max}}$ のみならずループ形状までも概ね一致していることである。これは吸収エネルギー $\Delta W$ がほぼ同一であることを意味しており、 $\sigma_{\epsilon_{max}}$ と $\Delta W$ が同一であるため、本合金の等価粘性減衰定数 $heq$ は(3)式により推定できる。

$$heq = \frac{1}{\alpha} \times heq_s \quad (3)$$

ここで、 $heq_s$ は基準となる条件 $F_s$  (Hz),  $T_s$  (°C) におけるZn-Al合金の等価粘性減衰定数である。

これらのZn-Al合金素材の振動数、温度依存性は、次に述べる開発したZn-Al合金ダンパーにおいても適用可能であり、Zn-Al合金ダンパーは温度-10~40℃、振動数0.1~3.0Hzの範囲中において、任意の振動数、温度条件における履歴特性値を推定することができる。

Table 1 振動数・温度補正係数 $\alpha$ の例  
Equivalent parameter between frequency and temperature,  $\alpha$

		振動数 (Hz)					
		0.1Hz	0.3Hz	0.5Hz	1.0Hz	2.0Hz	3.0Hz
温度 (°C)	-10℃	0.90	1.06	1.14	1.24	1.35	1.41
	0℃	0.83	0.98	1.05	1.15	1.24	1.30
	15℃	0.72	0.85	0.92	1.00	1.08	1.13
	25℃	0.65	0.77	0.83	0.90	0.98	1.02
	40℃	0.54	0.64	0.69	0.76	0.82	0.86

振動数1Hz, 温度15℃を基準とする

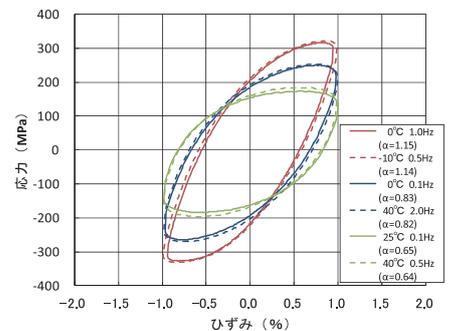


Fig.6  $\alpha$ と履歴ループ形状の関係  
Relationship between  $\alpha$  and hysteresis

### 3 超塑性Zn-Al合金制振ダンパー

#### 3.1 超塑性Zn-Al合金制振ダンパーの機構および形状

伝統木造建築用超塑性Zn-Al合金制振ダンパーの形状および接合部への取付状況の例をPhoto 3に示す。本ダンパーは超塑性Zn-Al合金部材および取付金物により構成され、伝統木造建築の柱-貫の仕口部に取り付ける仕様である。地震時に木造架構が曲げ変形することで生じる仕口の角度変化によりZn-Al合金部に変形が導入され、地震エネルギーを吸収する。Zn-Al合金制振ダンパーの形状は、木架構が有するしなやかな変形を損なわないために、柔らかい木架構にあわせた円弧形状の曲げダンパーとしている。このようなダンパーの機構とすることで面外座屈を抑制し、座屈補剛部材を必要としない、低コスト、シンプルかつコンパクトなダンパーを実現した。ダンパーと取付金物はピン接合されており、ダンパーの変形を阻害せず均一な曲げ変形が得られ、取付金物は柱と貫にボルト接合で簡易に施工できる。

伝統木造建築用としてZn-Al合金制振ダンパーは、Photo 4に示すR80タイプダンパーとR145タイプダンパーの2種類あり、それぞれ柱と貫の仕口部のディテールによって使い分ける。R80タイプはR145タイプより小型であり、小さなスペースに取付けられ、R145タイプはPhoto 3からも見られるように、楔を有する柱-貫の仕口部においても楔の打ち直し・交換も可能なディテールとしている。なお、R80タイプとR145タイプダンパーは履歴特性値が概ね同様になるように設計している。

#### 3.2 単体性能確認試験

Zn-Al合金制振ダンパーの性能を確認するために、ダンパーの単体性能確認試験を実施した。性能確認試験は、Fig.7に示す柱と梁の仕口を模擬したL字型の鉄骨治具を用いてアクチュエータにより水平方向に加振を行い、治具の回転中心から500mmの高さにおける発生荷重と回転角を計測することで評価する。これにより、ダンパーが取付く接点回りの曲げモーメントと回転角の関係が得られる。加振は正弦波漸増载荷とし、回転角はダンパーの円弧の曲率が小さくなる側を負（圧縮側）、その逆側の変形を正（引張側）とする。

Fig.8に例として、R145タイプダンパーを振動数1Hz、ダンパー表面温度13℃で正弦波加振した代表的な変形角における曲げモーメントと回転角の関係を示す。ここで、履歴ループは引張側と圧縮側を平均して示している。これは、本ダンパーは架構の中で対称に2個1組での使用を想定しており、この時、ダンパーに発生する荷重は引張力と圧縮力が均等になると考えられるため、設計上の利便性を考慮した。

ダンパーの履歴ループは、Zn-Al合金素材の引張圧縮繰返し载荷試験で見られたように小振幅では粘弾性体に似た楕円形を示し、大振幅では鋼材に見られるような紡錘形に近い挙動を示す。このように本制振ダンパーは金属でありながら、その履歴ループは粘弾性体にも似た挙動を示す。よって、本ダンパーは小振幅領域からエネルギー吸収が可能であると同時に、大振幅領域では鋼材系ダンパーのように大きなエネルギー吸収が得られるという特徴が確認された。



Photo 3 伝統木造建築用超塑性Zn-Al合金ダンパーの取付け状況例  
Superplastic Zn-Al alloy seismic damper



Photo 4 ダンパーの種類  
(R145タイプ, R80タイプ)  
R145 type and R80 type damper

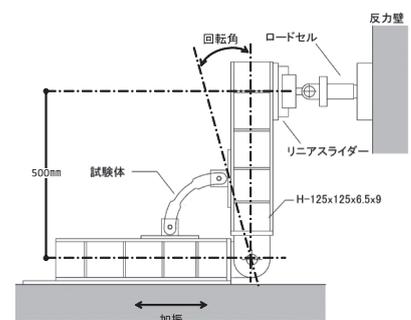


Fig.7 加振装置の模式図  
Schematic image of test equipment

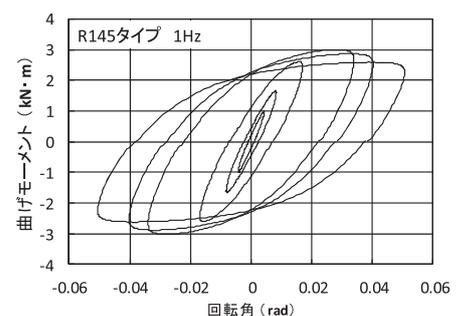


Fig.8 曲げモーメントと回転角の関係  
Relationship between bending moment and rotation angle

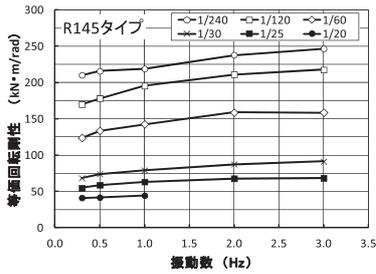


Fig.9 等価回転剛性の振動数依存性  
Frequency sensitivity of equivalent rotational stiffness

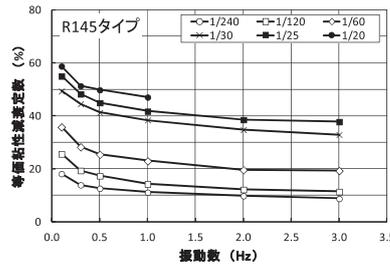


Fig.10 等価粘性減衰定数の振動数依存性  
Frequency sensitivity of equivalent viscous damping factor

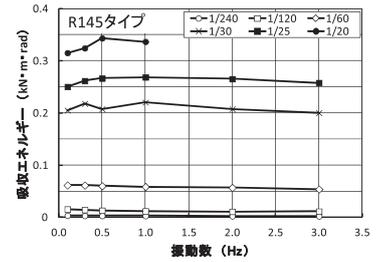


Fig.11 吸収エネルギーの振動数依存性  
Frequency sensitivity of absorbed energy

Fig.9～11にR145タイプダンパーの各回転角における等価回転剛性、等価粘性減衰定数、吸収エネルギーの振動数依存性について示す。これらの結果から、等価回転剛性、等価粘性減衰定数は振動数に依存して変化することが見られる。しかし、Zn-Al合金素材の結果と同様に、吸収エネルギーは振動数に依存せずほぼ一定であり、制振ダンパーとして幅広い振動数で安定した性能を発揮できていることを確認した。

また、2.3節に示したZn-Al合金素材の振動数・温度補正係数 $\alpha$ を本制振ダンパーに適用し、基準となる条件を $F_s=1\text{Hz}$ 、 $T_s=13^\circ\text{C}$ としてFig.10に示すデータについて、各回転角および振動数における等価粘性減衰定数を予測した。Fig.12に等価粘性減衰定数の実測値と予測値の関係を示す。

Fig.12から、ダンパーの等価粘性減衰定数の実測値と予測値は概ね一致していることが分かる。よって、補正係数 $\alpha$ はZn-Alダンパーにおける等価粘性減衰定数の予測にも適用可能であることが確認された。

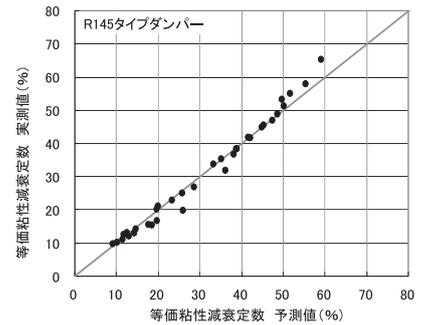


Fig.12 等価粘性減衰定数の実測値と予測値の関係  
Relationship between measured equivalent viscous damping factor and predicted one

#### 4 実大伝統木造架構における本制振ダンパーの性能評価

##### 4.1 伝統木造架構の実大動的載荷試験

R80タイプダンパーを設置した伝統木造建築の性能を評価するために伝統木造架構の実大動的載荷試験を実施した。

Table 2に主な試験体仕様および諸元を示す。試験体は2本の柱と貫によって構成される1スパン1構面であり、柱、貫および楔の樹種はカナダ檜である。また、Case 1はダンパーを設置しない伝統木造軸組架構の試験体で、Case 2はR80タイプダンパーを4個設置した同架構の試験体である。Fig.13にCase 2の場合の試験体を示し、Fig.14にR80タイプを設置した接合部の詳細を示す。

Case 1, Case 2試験体を用いて、荷重-層間変形角関係を測定し、その差異より伝統木造建築架構中におけるZn-Alダンパーの効果を確認した。

試験は試験体を振動台上に設置し、柱頭部を反力壁に対し固定し、ア

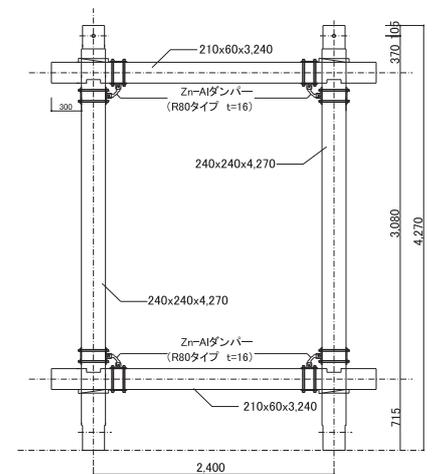


Fig.13 試験体図面 (Case 2)  
Details of specimen

Table 2 試験体仕様および諸元  
Parameter of specimen

試験体	試験体スパン	加力点間距離	材料	柱断面	貫断面	楔	ダンパー
Case 1	2400 mm	4245 mm	カナダ檜	240×240 mm	210×60 mm	ラップ型楔	なし
Case 2	2400 mm	4245 mm	カナダ檜	240×240 mm	210×60 mm	ラップ型楔	4箇所 (R80タイプ)

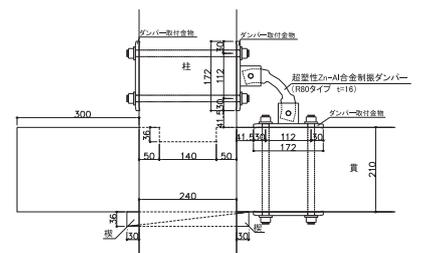


Fig.14 R80タイプダンパーを設置した接合部詳細  
Details in joint region with R80 type damper

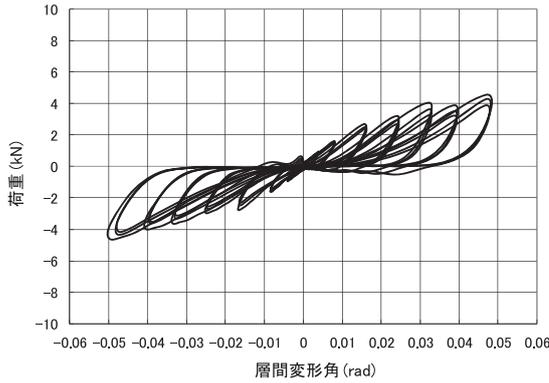


Fig.15 荷重－層間変形角関係 (Case 1)  
Relationship between load and story drift angle without Zn-Al alloy dampers

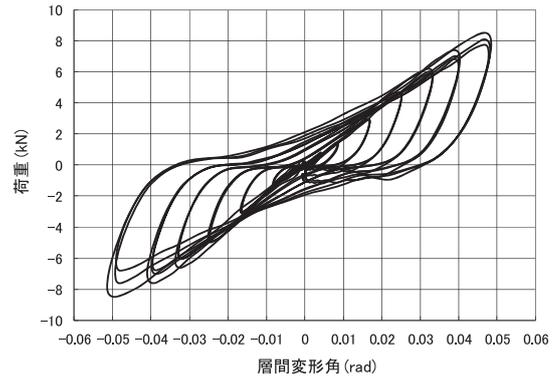


Fig.16 荷重－層間変形角関係 (Case 2)  
Relationship between load and story drift angle with Zn-Al alloy dampers

クチュエータを介して振動台から柱脚部に強制変位を与えることにより実施した。振動数1.0Hzの正弦波加力により漸増載荷試験を実施した。各加力ステップにおける繰返し数は3サイクルとした。また、本動的載荷試験はCase 1, Case 2の順に実施した。柱部材はCase 1, Case 2の試験において同じ部材を継続して使用し、楔、貫については試験ケースごとに交換した。なお、楔はフレーム載荷中に大きく抜け出しても再打ち込みの処置は行わなかった。

Fig.15, 16に本動的載荷試験から得られた加振ステップごとの荷重－層間変形角関係を示す。Fig.15からダンパーを設置しない、Case 1の架構においては、柱、貫材の割れやめり込みおよび楔の抜け出しなどにより生じた仕口部のすきまに起因して、変形中に荷重が増減せずに変形角が推移するいわゆるスリップ挙動が見られる。これに対して、Fig.16に見られるようにダンパーを設置することにより変形角0rad近傍における復元力を付加できており、木造架構のスリップ挙動を抑制できていることを確認した。

荷重と層間変形角の関係からCase 1, 2における漸増載荷時の等価回転剛性、等価粘性減衰定数および吸収エネルギーを導出した。

Fig.17にCase 1, 2における層間変形角と等価回転剛性の関係を示す。1/120radまでの小振幅においては、ダンパーを付加していないCase 1の等価回転剛性が大きい。これは柱、貫ともに新しい材料を用いたCase 1に対して、Case 2は貫、楔のみを交換し、柱材は再利用しているため、柱材の僅かなつぶれ等の損傷によって、接合部の初期剛性が低下したためであると考えられる。1/40rad以上の大きな振幅領域においては、4箇所ダンパーを設置したCase 2はCase 1と比較して、安定して40%程度の剛性を付加する効果がある。

Fig.18にCase 1, 2における層間変形角と等価粘性減衰定数の関係を示す。Case 2においては、層間変形角の増加につれて、等価粘性減衰定数が大きくなり、Case 1と比較して最大2倍以上の増加が見られた。

Fig.19にCase 1, 2における層間変形角と吸収エネルギーの関係を示す。等価粘性減衰定数と同様の傾向を示し、層間変形角が大きくなるにつれて、Case 2における吸収エネルギーが増加する。層間変形角1/20radにおいて、Case 1の結果と比較して4倍程度のエネルギー吸収量を示す。

以上の結果から、貫架構の仕口部にZn-Alダンパーを設置することにより、効果的に剛性と減衰が付加されることが分かった。

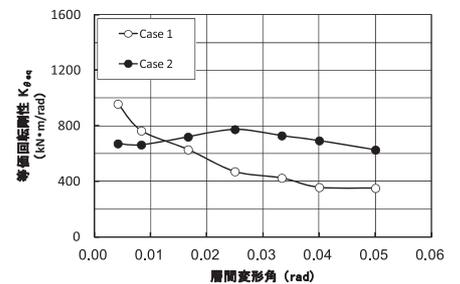


Fig.17 層間変形角と等価回転剛性の関係  
Equivalent rotational stiffness as a function of story drift angle

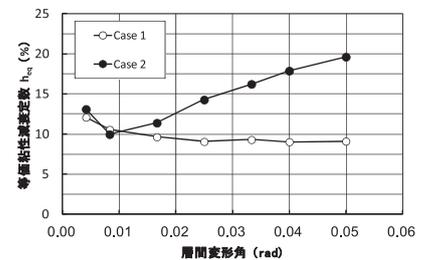


Fig.18 層間変形角と等価粘性減衰定数の関係  
Equivalent viscous damping factor as a function of story drift angle

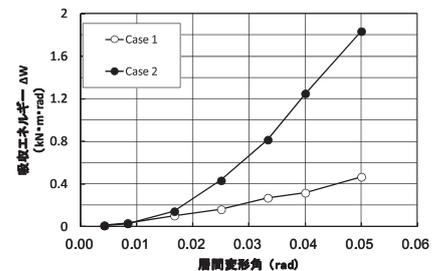


Fig.19 層間変形角と吸収エネルギーの関係  
Absorbed energy as a function of story drift angle

## 4.2 伝統木造建築架構の実大振動台実験

R145タイプダンパーを設置した伝統木造建築の性能を評価するために建築基準法告示適合波（設計用極稀地震波）入力による伝統木造軸組架構の振動試験を実施した。

Table 3に主な試験体仕様および諸元を示す。試験体は2本の柱と頭貫、

飛貫、内法貫、足固めによって構成される1スパン1構面であり、柱、貫の樹種はカナダ檜で、楔はケヤキである。Case 1はダンパーを設置しない伝統木造軸組架構の試験体で、Case 2は内法貫上面2箇所と足固め下面2箇所にR145タイプダンパーを設置した試験体である。Fig.20にCase 2の場合の試験体を示し、Fig.21にR145タイプダンパーを設置した接合部の詳細を示す。

試験は屋根の重さを模擬した40kNの錘を載せた各試験体を振動台上にセットし、極稀地震波をさらに125%に増幅した波を120秒間入力し、ダンパー設置の有無による振動低減効果を評価した。また、本振動試験はCase 1, Case 2の順に実施した。楔、内法貫、足固めはケースごとに交換した。なお、楔は、抜け出しを小さく抑えるために楔を打ち込んだ後、対になる楔同士をステンレスワイヤーロープで連結する抜け出し拘束楔を用いた。フレーム載荷中において楔の再打ち込みの処置は行わなかった。

Fig.22に本振動試験から得られた層せん断力-層間変形角関係を示す。ここで層せん断力とは、錘に取り付けた加速度計で把握された応答加速度に重量（40kN）を乗じた値である。結果から、ダンパーの設置により木造フレームの剛性と耐力向上に大きく寄与していることが分かる。また、ダンパーを設置したCase 2において、Case 1と比較して変形角0rad近傍における復元力を付加できており、木造架構のスリップ挙動を抑制することができている。

Fig.23はFig.22を時刻歴で示したものである。制振ダンパーの設置により、最大で50%以上の振動低減効果が得られている。

以上の結果からランダムな波の繰返しにより告示波（極稀）入力時においても、ダンパーを取り付けない試験体と比較して、復元力および剛性が上昇し、加力波入力時の応答変位を大幅に低減することが分かった。

Table 3 試験体仕様および諸元  
Parameter of specimen

試験体	試験体スパン	加力点間距離	材料	柱断面	貫断面（内法貫、足固）	楔	ダンパー
Case 1	2000 mm	4630 mm	カナダ檜	220×220 mm	220×60 mm	抜け出し拘束楔（ケヤキ）	なし
Case 2							4箇所（R145タイプ）

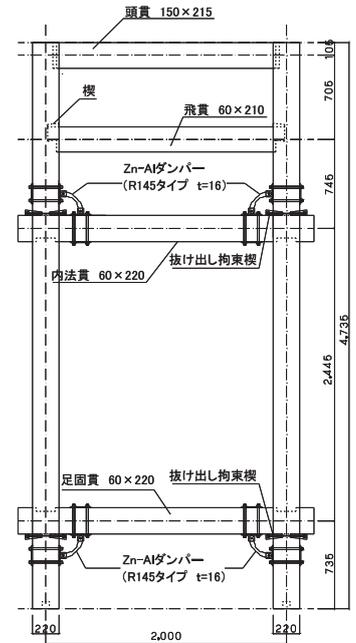


Fig.20 試験体図面 (Case 2)  
Details of specimen

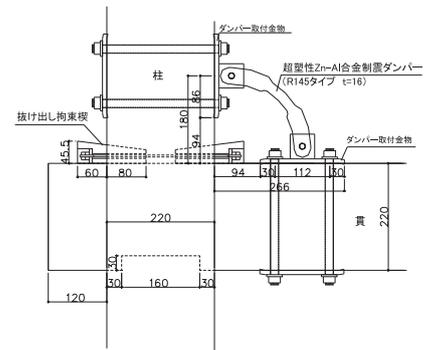


Fig.21 R145タイプダンパーを設置した接合部詳細  
Details in joint region with R145 type damper

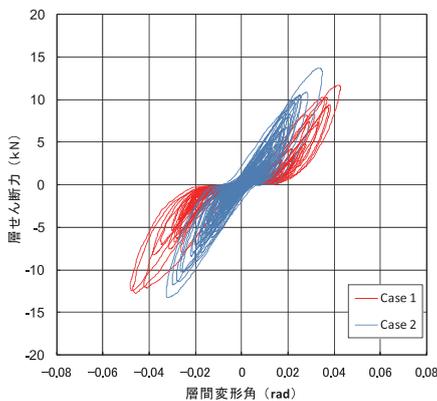


Fig.22 層せん断力-層間変形角関係  
Relationship between story shear force and story drift angle

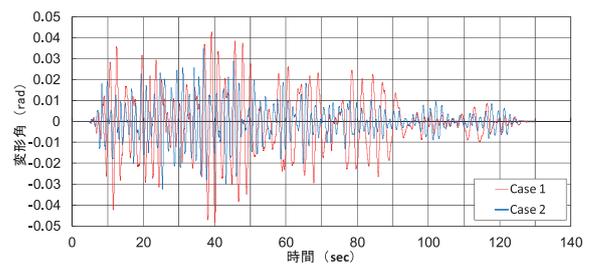


Fig.23 変形角の時刻歴  
Story drift angle time histories with and without Zn-Al alloy dampers

## 5 まとめ

伝統木造建築の代表的な構造様式である貫架構の仕口部にも取付けることが可能な小型、軽量かつ可搬性・施工性にも優れた超塑性Zn-Al合金制振ダンパーを開発した。その性能を確認するため部材の単体性能確認試験および伝統木造架構による実大動的載荷試験・振動試験を実施し、これらの試験から以下の知見を得た。

- 1) 伝統木造建築用Zn-Al合金制振ダンパーは振動数0.1Hz～3.0Hzにおいて、小変形角から大変形角まで安定した曲げモーメント-回転角関係を示す。
- 2) 伝統木造建築用Zn-Al合金制振ダンパーは振動数0.1Hz～3.0Hzにおいて、等価回転剛性、等価粘性減衰定数に振動数依存が見られるが、吸収エネルギーは振動数に依存せずにはほぼ一定である。また、Zn-Al合金素材の引張圧縮載荷試験により得られた振動数・温度依存性の等価性を評価可能なパラメータにより、開発した制振ダンパーの振動数・温度依存性の関係も評価可能である。
- 3) 実大伝統木造架構に取り付けたZn-Alダンパーはスリップ挙動を抑制し、復元力と吸収エネルギーがともに増加し、層間変形角1/20radにおいて4倍程度のエネルギー吸収量を示す。
- 4) 実大伝統木造架構振動試験により、R145タイプダンパーを4箇所を設置することで、最大で50%以上の振動低減効果が得られる。

## 参考文献

- 1) 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」，日本建築学会大会学術講演梗概集B-1，pp.979-980，1999
- 2) 野島千里，榎原健一，鎌田輝男：「高分子材料を用いた仕口補強材の開発と検証実験：その1 木造軸組への適用」，日本建築学会大会学術講演梗概集C-1，pp.499-500，2010
- 3) 古田智基，加奈森聡，中尾方人：木造住宅向け制震金物の性能評価，日本建築学会大会学術講演梗概集C-1，pp.317-318，2006
- 4) 長野みなみ，五十田博，篠原昌寿，服部学：「粘弾性体ダンパーを用いた制震壁の繰り返し実験と性能評価」，日本建築学会大会学術講演梗概集C-1，pp.477-478，2009
- 5) 梶川久光，三津橋歩，六車典子，杉本健一，青井秀樹，青木謙治：「高耐力・高剛性木質接着パネル耐力壁の開発」，日本建築学会技術報告集，第35号，pp.151-155，2011
- 6) 陶器浩一，源田考司，北村義也：「ガラス制振壁を用いた伝統木造建物の耐震改修」，日本建築学会技術報告集，第24号，pp.119-123，2006
- 7) K. Makii, Y. Seki, A. Kushibe and K. Higashi, Realizing High Strain Rate Superplasticity at Room Temperature using Thermo Mechanical Controlling Process, The Fourth Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing (PRICM4) (The Japan Institute of Metals, 2001) pp.1977-1978 (2001).
- 8) A. Kushibe, T. Tanaka, Y. Takigawa, K. Higashi, Low Cycle Fatigue Behavior of Zn-22Al Alloy in Superplastic Region and Non-Superplastic Region, International Journal of Modern Physics B, Vol. 22, Nos. 31&32, 5477-5482 (2008).
- 9) A. Kushibe, Y. Takigawa, K. Higashi, K. Aoki, K. Makii and T. Takagi, Application of High-Strain-Rate Superplastic Zn-Al Alloy to Seismic Dampers and its Optimised Shape Design, Materials Science Forum, Vols.551-552, pp.583-589 (2007).
- 10) 高木敏晃，南知幸，櫛部淳道，瀧川順庸，東健司：「室温超塑性Zn-Al合金の開発と制震ダンパーへの適用」，まてりあ，日本金属学会，第48巻，第2号，pp.88-90，2009