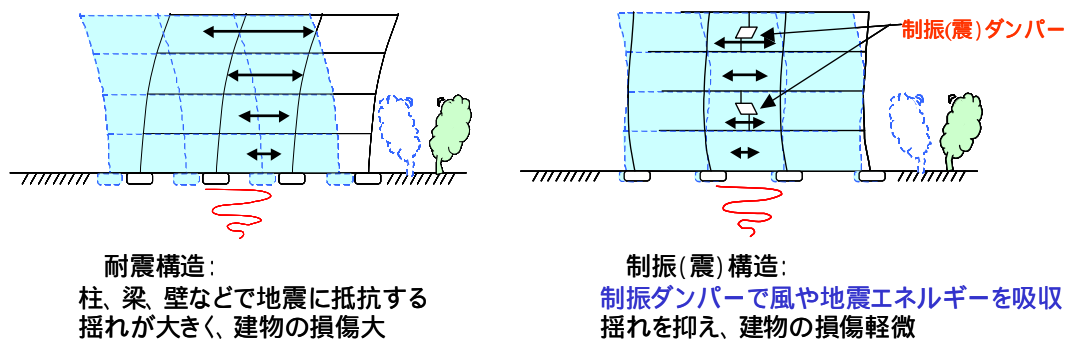


強風や地震に対して安心・安全な居住空間を実現する 室温超塑性亜鉛アルミ合金制振ダンパーの開発と実用化

櫛部淳道	株式会社竹中工務店技術研究所
西村 章	株式会社竹中工務店九州支店設計部
高木敏晃	株式会社神戸製鋼所 材料研究所
南 知幸	神鋼メタルプロダクツ株式会社
瀧川順庸	大阪府立大学大学院工学研究科
楨井浩一	株式会社神戸製鋼所 技術開発本部
東 健司	大阪府立大学大学院工学研究科

1. 緒言

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、建築構造物の耐震技術の高度化と普及が緊急の課題となっている。特に、戸建住宅においては、新築住宅の耐震性は向上しているものの、1981年の建築基準法改正前に建築されたいわゆる既存不適格住宅が今なお1000万戸以上も存在しており、これらの耐震補強改修が急務となっている。一方、1995年に発生した兵庫県南部地震以降、特に超高層ビルでは、揺れを低減するための制振ダンパーを組み込んだ制振構造物が急速に普及してきており、耐振（震）技術の高度化とともに、建物内での居住性の観点から、風などによる比較的小さな揺れに対しても制振効果を発揮する制振技術へのニーズが高まってきている⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾。図1に通常の耐震構造と制振（震）構造の違いを示す。



*用語としては、慣用的に風や地震による揺れを含む場合には制振、
地震の揺れに主眼を置く場合には制震と表記する

図1 耐震構造と制振（震）構造の違い

制振ダンパーは、地震時に建物が揺れはじめると、柱や梁といった主要構造部材よりも先に弾塑性変形することで、地震のエネルギーを吸収して揺れを低減する機能を有しており、地震後も

柱や梁の主要構造部材を弾性変形内にとどめるという役割を担う重要部材である。

現在、粘弾性材料のせん断変形を用いたダンパーや、低降伏点鋼を用いたダンパーなどがすでに商品化されている。しかしながら、粘弾性ダンパーは、金属に比べて強度が低く小型化が難しいため、設置費用が高価になるといった課題がある。また、金属系制振ダンパーとして使用実績が多い低降伏点鋼を用いたダンパーは、塑性変形時に、鉄鋼材料では避けがたい加工硬化を生じる欠点があり、設計当初の性能を維持できなくなり、損傷の程度によっては、地震後に点検、交換を行なう必要がある。主要構造部分の損傷を守れたとしても、ダンパー自体の被災後の調査、交換が必要であれば、復旧費用は莫大なものになってしまう。

大地震後も完全メンテナンスフリーで使用できる制振ダンパーを作ることはいかなるものか？この課題を解決する理想的な制振材料として、室温で超塑性を発現する材料であれば可能性があると考えた。そこで、材料室温で超塑性を発現するナノ結晶組織を有する Zn-Al 合金を開発するとともに、工業的な製造プロセスを確立し、その合金を用いた世界初のビル用軸力ブレース型制振ダンパーを開発した。性能検証を積み重ね、実プロジェクトへ世界で初めて適用することができた。現在、さらに技術を波及させるため、本合金を利用した木造用制振ダンパーの実用化開発にも取り組んでいる。本稿では、合金の特性、ダンパーの制振性能、およびプロジェクト適用事例について述べる。

2. 室温超塑性 Zn-Al 合金

本制振ダンパーで使用する室温超塑性亜鉛アルミ合金は Zn-22wt%Al 合金であり、「超塑性」という言葉からも連想されるように、室温でも水飴のように伸びる金属材料である。この性質は金属組織をナノレベルに微細制御することで得られ、学術的にも非常に価値のある合金である。

これまで超塑性材料として知られている Zn-Al 合金は、200 以上の高温域において、超塑性を発現することが実験室レベルで報告されていた⁽⁶⁾。また、理論的には、結晶サイズを微細化することにより、超塑性発現温度を低下、あるいは発現ひずみ速度を高速化できることは知られていた⁽⁷⁾。しかし、工業的に製造された材料において、室温で超塑性を発現したという報告はなく、著者らは、Zn-22wt%Al 合金のインゴットに加工熱処理を段階的に行う、いわゆる TMCP (Thermo-mechanical Control Process)

技術を用いて結晶粒を微細化し、室温においても超塑性が発現する合金を開発した。このような工業的な製造プロセスを採用し、合金を量産化することに世界で初めて成功した⁽⁸⁾。

図 2 に Zn-Al 合金の室温静的引張試験前後の試験片の例を、表 1 にその物性値を示す。極低降伏点鋼と比較して、ヤング率は約 1/3、密度は約 2/3 である。本合金の組織写真は、図 3 に示すように、周辺のアルミ相に囲まれた亜鉛相の結晶粒径が nm オーダーに微細化されている。



図 2 超塑性変形の様子

表 1 Zn-Al 合金の物性値

ヤング率	密度	融点
67 GPa (205 GPa)	5.14 g/cm ³ (7.86 g/cm ³)	382 (1,535)

() 内は極低降伏点鋼の値を参考に記載

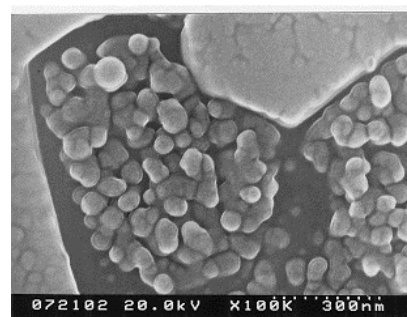


図 3 Zn-Al 合金の組織

図4に、Zn-Al合金の降伏強度、引張強度と伸びのひずみ速度依存性を示す。超塑性材料の特徴である高いひずみ速度感受性を示し、ひずみ速度が高くなるにつれて強度は高くなり、伸びは低下する。大地震時にダンパーに加わる最大ひずみ速度は0.1/s程度であり、このひずみ速度域でも引張強度は300MPa程度、伸びは50%以上で、従来の極低降伏点鋼と同等以上の強度、延性を示していることがわかる。

図5に、累積ひずみに対する応力推移を示すが、極低降伏点鋼が、累積ひずみ100%程度まで著しく加工硬化するのに対し、Zn-Al合金は、応力がほぼ一定であり、制振効果の安定性に極めて優れることがわかる⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。

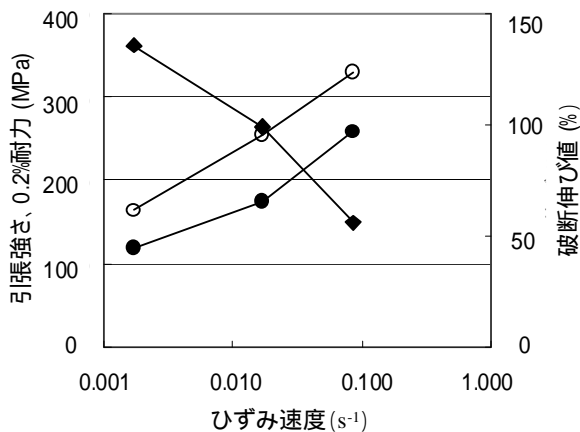


図4 引張強度、0.2%耐力、伸びのひずみ速度依存性

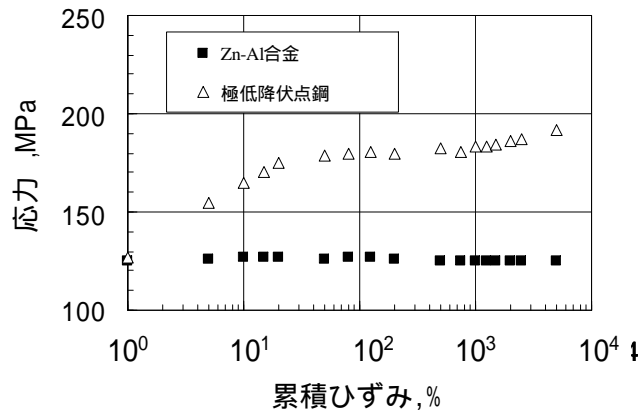


図5 累積ひずみに対する応力の推移

3. Zn-Al合金制振ダンパー開発のための課題

Zn-Al合金は、上記のように、変形性能に優れ、加工硬化が極めて少ないなど、制振材料として理想的な性質を有するが、そのポテンシャルを最大限引き出す制振ダンパーとして実用するには、従来の金属系制振ダンパーの構造を踏襲し、素材のみを単純に代替する方法では対応できず、以下の問題を解決する必要がある。

溶接が非常に困難である（溶接熱によりナノ結晶組織が壊れ、延性、疲労特性が劣化する）

加工硬化しない超塑性材料は、応力集中箇所があると局部的に塑性変形が進行し、早期破断につながるためダンパーの形状に工夫が必要（加工硬化しない制振材料としての利点が逆に欠点にもなる）

板材のみ製造可能（鋼材のようにH形鋼などの複雑な断面部材を製造できない）

そこで、上記の制約条件を回避しながら、ダンパーの機構を検討し開発に取り組んだ。

4. ビル用軸力ブレース型制振ダンパーの開発

4.1 技術の概要

本合金の特長である超塑性特性を最大限発揮させる形状として、軸力型ブレースタイプを考案した。このタイプの制振ダンパーは、地震応答解析により、建物の揺れの周期とダンパーの変形量から Zn-Al 合金に生じるひずみ速度を正確に把握できるため、超塑性材料の特長である変形応力のひずみ速度感受性が大きいことを積極的に利用し、様々な応力レンジでエネルギー吸収能力を発揮できると考えたためである。しかし、地震時には引張・圧縮の繰返し変形を受けるため、Zn-Al 合金板材の圧縮変形時における座屈変形（特に、圧縮時に素材が簡単に曲がりくねり、力を負担できなくなる）を防止する補剛機構が必要になる。したがって、制振ダンパーの構造は、図 6 の詳細図中の赤色の斜線部に示すように、Zn-Al 合金板材を溝型鋼で挟み込み、引張・圧縮変形に滑らかに追従する特殊なスライド機構を有する座屈補剛治具と一体化する構造とした⁽¹¹⁾。封入されている Zn-Al 合金の変形部（平行部）の断面寸法は、板幅 210mm、板厚 17.1mm、長さ 700mm である。この部材は、機械加工を多用することで、寸法精度良く製作され、1mm 前後の微小振幅においても確実に Zn-Al 合金部に変形が伝達されるため、大地震のみならず風にいたるまで、建物に生じる幅広い外力に対応した制振効果を実現している。

図 7 に正弦波にて加振を行なった制振ダンパーの荷重 ひずみ関係を示す。ひずみは、ダンパーの変形量と、Zn-Al 合金の平行部長さから換算した。加振周波数は、高さ 100m 級の鉄骨造超高層ビルの揺れの周期を想定し 0.33Hz（周期 3 秒）とした。最大荷重は 1000 kN を超え、ビル用ダンパーとして必要な出力が得られている。また、いずれの振幅領域でも、安定したループを描いており、このループの面積が地震のエネルギー吸収量に対応することから、安定したエネルギー吸収特性を持つことがわかる。このループには、超塑性金属材料の特長が顕著に現れており、小振幅領域では早期に塑性化し、粘弾性体に似た挙動を示す。

一方、大振幅領域では、塑性化応力が高くなるため、鋼材系ダンパーの挙動に近づく。荷重が 1000 kN 時には、Zn-Al 合金の応力は約 300MPa に達しており、低降伏点鋼材並みの強度を発生する。本制振ダンパーは、小断面で大きな減衰力を得ることができるため、同じ出力で比較すると、極低降伏点鋼ダンパーよりも加工硬化がなく、エネルギー吸収レンジが広いという点での優位性がある。さらに、粘弾性

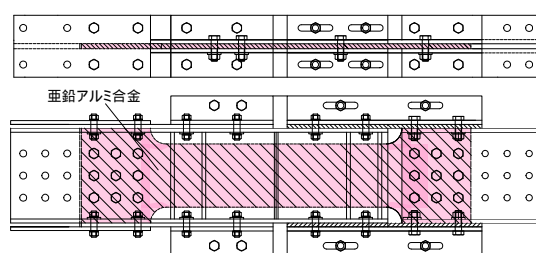


図 6 ダンパーの機構詳細

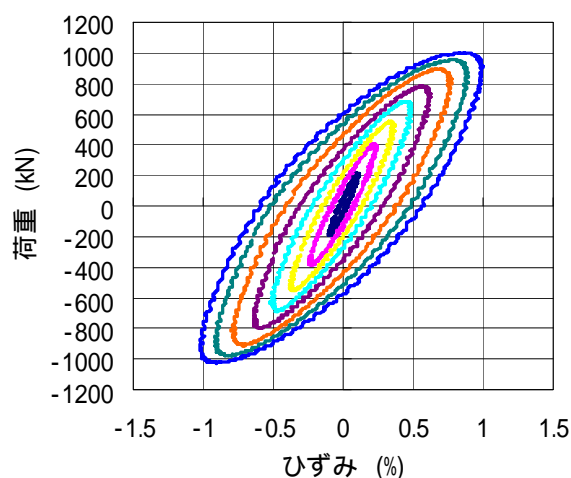


図 7 制振ダンパーの荷重 ひずみ関係

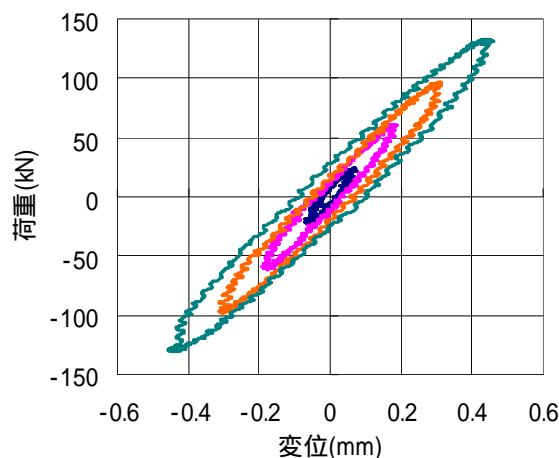


図 8 微小振幅での変位-ひずみ関係

ダンパーに比べ圧倒的に小型化できる点や、オイルダンパーのような定期点検が不要という点で、技術適用メリットが期待される。これらのメリットは、超塑性材料が「金属材料と粘弾性体の性質を兼備する」ことに由来する。

図 8 に、風揺れを想定した微小振幅での荷重 ひずみ関係を示す。振幅 0.5mm 以下の極めて小さな振幅に対してもループを描いており、エネルギー吸収性能があることがわかる。これらは、室温超塑性 Zn-Al 合金が有する、強度のひずみ速度依存性をうまく引き出した結果である。

以上より、大地震のみならず風にいたるまで、幅広い制振効果を発揮する制振ダンパーであるといえる。

4.2 地震波入力実験

制振ダンパーとしての耐久性を評価するため、想定する建物において地震時に本制振ダンパーに生じる地震波形を入力し、耐久性を評価した。地震波は、制振ダンパーに連結した、2000 kN アクチュエーターから入力した。試験状況を図 9 に示す。

発生時に制振ダンパーに生じる地震波形については、表 2 に示すように、「極稀地震（大地震）」を 1 回（120 秒）、次に稀に発生する中規模の地震「稀地震」を 5 回（60 秒×5 回）、最後に再び「極稀地震（大地震）」を 1 回（120 秒）入力し、最初と最後の「極稀地震」の結果を比較した。

なお、極稀地震とは、500 年に一度程度発生する大地震、稀地震とは 50 年に一度程度発生する中地震のことを言う。初回の極稀地震波入力時におけるダンパーの荷重-変形関係を図 10 に示す。

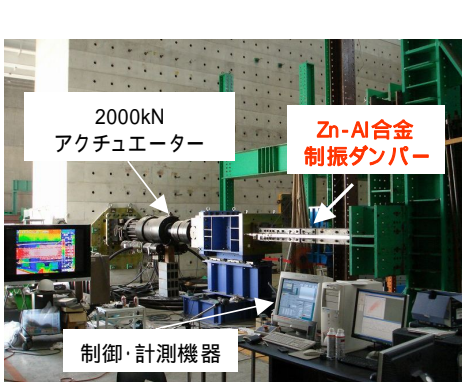


図 9 実験状況

表 2 地震波入力順序

地震波	時間 (秒)
極稀地震 1回目	120
稀地震	60
稀地震	60
稀地震	60
稀地震	60
稀地震	60
極稀地震 2回目	120

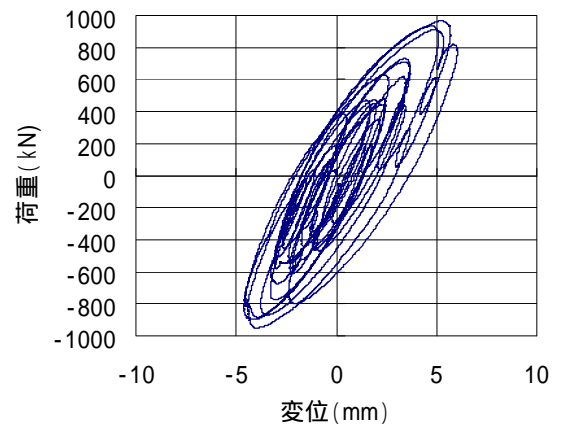


図 10 極稀地震 1 回目の荷重-変位関係

図 11 は、表 2 の加力メニューにおいて、初回の極稀地震および最後の極稀地震における、加振後 40 秒間のダンパーの荷重変化を比較したものである。2 回の極稀地震波を入力したにもかかわらず、荷重曲線が区別できないほど重なっており、極稀地震の発生頻度（500 年に 1 回程度）から考えても、制振性能が安定しているので、十分な安全率を有することが明らかである。

このことは巨大地震後も初期性能を完全に維持できること、すなわち被災後も交換不要なメンテナンスフリー制振ダンパーであることを意味する。このような性能は、従来技術である鋼材系

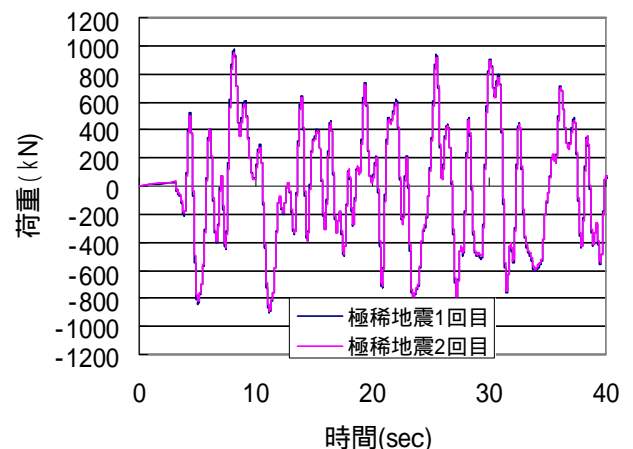


図 11 極稀地震波入力時の発生荷重の比較

制振ダンパーでは実現が不可能であり、本制振ダンパーにおける合金心材の座屈の抑制機構とともに、加工硬化が極めて少ない超塑性 Zn-Al 合金の特長が引き出された結果である。

4.3 プロジェクト適用事例

本制振ダンパーを世界初適用したアイランドタワースカイクラブは、福岡県東区香椎照葉 3 丁目の人工島アイランドシティに建設された九州最高層の集合住宅である。地下 1 階、地上 42 階、塔屋 1 階の 3 棟の超高層集合住宅を 3 箇所のスカイガーデンで連結した、世界にも類を見ない形状の免震・制振構造建物であり、福岡市の遠くからでも臨めるシンボルタワーとして話題性のある建物となっている。本建物の外観を図 12 に示す。



図 12 アイランドタワースカイクラブ建物外観

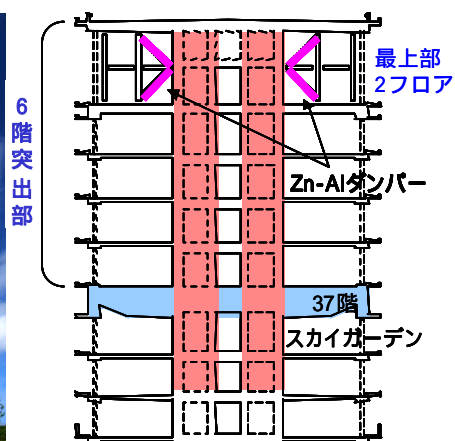


図 13 ダンパー取付位置

2005 年 6 月に事業コンペが開催され、2006 年 6 月に工事着工、2008 年 8 月に竣工に至った。本建物は、各棟の縦横比（アスペクト比）が 1 : 7 というスレンダー形状であり、地震力低減が最重要テーマとなった。本制振ダンパーは、小型で高い減衰力が得られることや、強風にも地震にも制振性能を発揮できるため、図 13 に示す、最上部のスカイガーデン（37 階）から突出する 6 階分のうち、特に、建物のデザイン上、風や地震に対する揺れの増幅（むち振り現象）が激しい上層 2 層の揺れを低減することを主目的に設置された。1 棟あたり 4 基のダンパーを最上層 2 層に配置し、3 棟で計 24 基のダンパーを設置している。

図 14 に、ダンパーの設置状況を示す。



図 14 ダンパーの取付状況

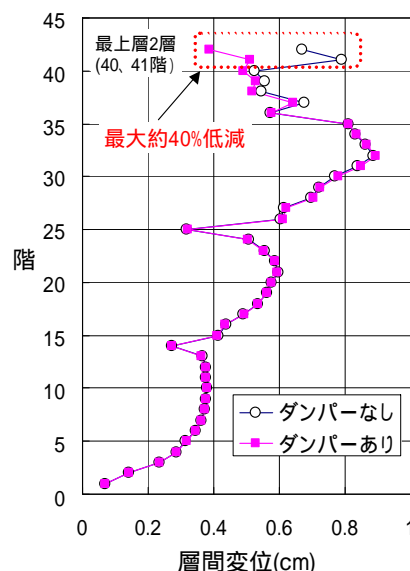


図 15 揺れ（層間変位）の低減効果

前述の実験結果に基づき、代表的な、建物の耐震設計用の地震波であるエルセントロ波（L2）による地震応答解析では、図 15 に示すように、本制振ダンパーは、当初の目的通り、突出する 6 階の揺れ幅（層間変位）を最大約 40%も低減できる結果が得られている。

5 . 木造用 Zn-Al 合金制振ダンパーの開発

5.1 技術の概要

本制振ダンパーは、一般木造住宅、歴史的な木造建築物、および伝統木造建築の耐震性向上を目的として開発した超塑性合金による曲げ型仕口ダンパーである。既存住宅においても、壁や筋交いの増設などの大掛かりな周辺工事が不要で設置できるように小型化すること、さらに、低コスト化を実現するため複雑な座屈補剛機構を必要としない曲げ型ダンパーとした⁽⁴⁾⁽⁵⁾。その外観写真を図 16 に示す。

本制振ダンパーは、取付金具を含めても 130mm 角に納まるサイズであり、狭小なスペースに取付けることが可能である。電動工具を用いて、木ネジ 20 本で柱、梁に締結する。小型軽量であるためハンドリングも良く、施工実験では、1 箇所あたり、6～8 分で取付け可能であることを確認している。図 17 に、地震における本制振ダンパーの機能概念図を示す。柔らかい木造架構の特性にあわせて形状設計されており、地震時の柱-梁仕口部の回転角の変化によりダンパーが変形することで地震エネルギーを吸収し、建物の揺れを低減できる。

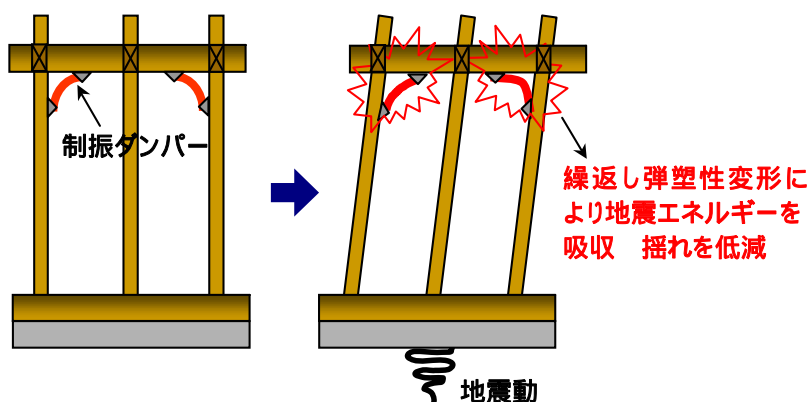
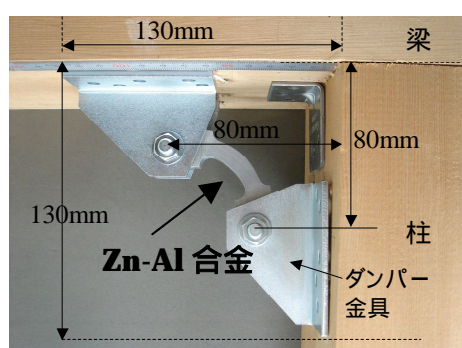


図 16 木造用 Zn-Al 合金制振ダンパー 図 17 木造用 Zn-Al 合金制振ダンパーの機能概念図

5.2 木造用制振ダンパーの効果

本ダンパーの補強効果は、図 18 に示す標準的な日本家屋の単位木造フレーム（910mmW × 2730mmH）の動的加力実験（正弦波 1Hz）などにより確認している。フレームのみ（ダンパーなし）の実験結果を図 19 に示し、柱頭柱脚 4 箇所にダンパーを取りつけた時の実験結果を図 20 に示す。これらの結果を比較すると、ダンパー設置により、フレームの剛性、耐力、エネルギー吸収能力が顕著に増加することがわかる。

本制振ダンパーによる耐震補強工法は、通常の壁や筋交いの増設に比べ、周辺工事が大幅に低減できる

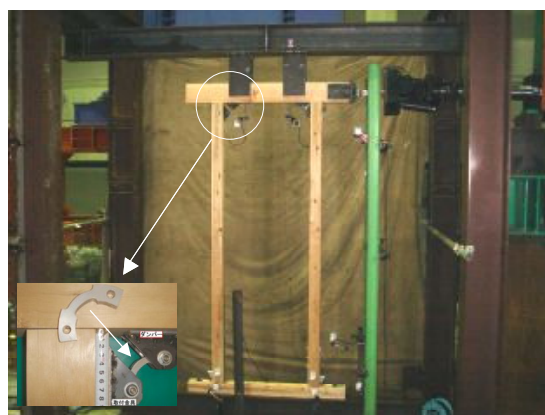


図 18 木造フレームの動的加力実験

ため、短工期で、低コストな耐震補強工事が可能になる。地震に対して、メンテナンスフリーで使用できる耐久性を確認できたため、現在、既存木造住宅の試験施工を実施中であり、耐震性が不足する1150万戸におよぶ既存不適格木造住宅の耐震性向上に大きく寄与することを最終目標とし、開発の最終段階に入っている。

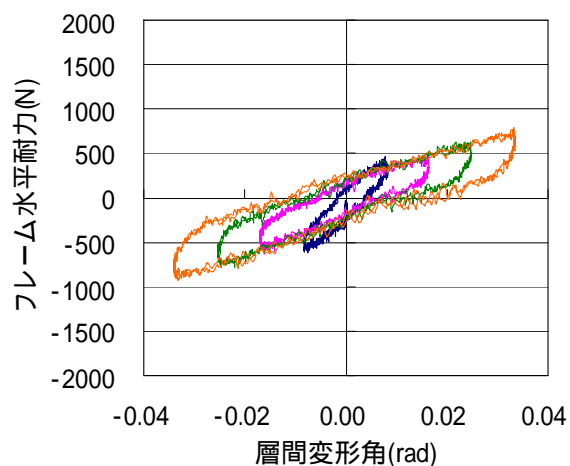


図 19 フレームのみの層間変形角と水平耐力の関係

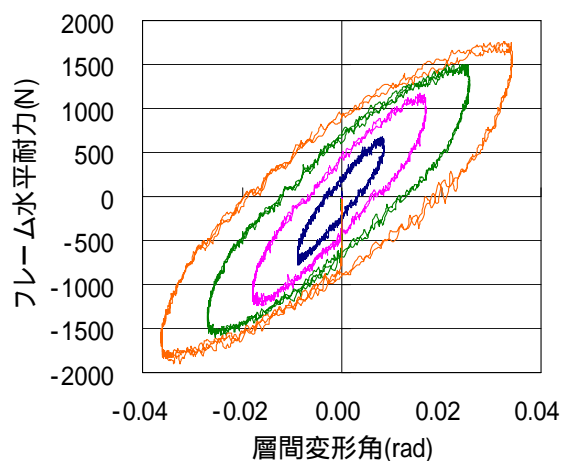


図 20 ダンパーを 4 箇所取付時のフレームの層間変形角と水平耐力の関係

6. おわりに

本稿では、室温超塑性 Zn-Al 合金を用いた世界初のメンテナンスフリー制振ダンパーの開発と実用化について述べた。本研究は、ナノ結晶組織を有する室温超塑性合金が、制振材料として理想的な性質を有することに着目し、制振ダンパーに展開した独創的な技術である。合金の量産技術を確立することで建築分野に適用しうる大型部材の製造を可能としたこと、超塑性材料そのものの「変形性能」、「低加工硬化性」、「粘弾性挙動」といった物性そのものを活用したこと、合金性能を最大限に生かす制振ダンパーの形状設計技術など、各々の研究課題に挑戦した結果として実現できた世界初の技術である。今後とも、さらなる技術開発を推進し、一般の高層ビルにとどまらず、伝統木造建築、文化財建築、一般戸建木造住宅への耐震補強分野へと技術の適用範囲を広げ、地震国である日本において、安全・安心な居住空間を実現するために貢献していきたい。

7. 謝辞

本研究の一部は、(独)科学技術振興機構(JST)による研究助成を受け実施したものである。木造用制振ダンパーの開発にあたり、京都大学大学院工学研究科建築工学専攻上谷宏二教授には、共同研究者として多大なご尽力を頂きました。また、素材開発から、制振ダンパーの実用化にいたるまで、数多くの方に多大なご尽力を頂きました。関係者に深く感謝申し上げます。

参考文献

- (1) Somekawa et al. : Proceedings of Architectural Institute of Japan , Vol.3 (1999), p.871.
- (2) Iwata et al.: Proceedings of Architectural Institute of Japan, Vol.3 (1999), p.937.
- (3) K.Tanaka et al.: Journal of Struct Constr.Eng. , No.509,(1998), p.159.
- (4) K.Ohi et al.: Journal of Struct Constr.Eng. , No.538 ,,Dec.2000 ,p.171.
- (5) Y.Nakata et al.:Symposium Proceedings of Passive Controlled Structure(2001) ,p87.
- (6) Y. Motohashi, T.Shibata and M.Miyagawa:Journal of Japan Institute of Light Metals, 33 (1983), 270
- (7) Watanabe H, Mukai T, Mubuchi M, Higashi K. High-strain-rate superplasticity at low temperature in a ZK 61 magnesium alloy produced by powder metallurgy. Scripta Materialia 1999; 41: 209-213.
- (8) 槇井浩一,上田宏樹、岡田徹、加藤稔、三村裕一、田淵勝道:神戸製鋼技報,51(2001),34
- (9) A. Kushibe, K. Makii ,L.F.Chang, T. Tanaka, M.Kohzu,K. Higashi, Mater.Sci.Forum.475-479(2005) 3055.
- (10) 櫛部淳道、青木和雄、槇井浩一、高木敏晃、瀧川順庸、東健司,まてりあ 45 No.2 p94 (2006)
- (11)高木敏晃、南 知幸、櫛部淳道、瀧川順庸、東健司,まてりあ 48 No.2 p88 (2009)