

称号及び氏名	博士（工学） 櫛部 淳道
学位授与の日付	2010年3月31日
論文名	「室温超塑性 Zn-Al 合金を用いた建築用メンテナンスフリー制震ダンパーの開発と実用化」
論文審査委員	主査 東 健司
	副査 沼倉 宏
	副査 森 茂生
	副査 瀧川 順庸

論文要旨

地震国である我が国では、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、建築構造物における耐震技術の高度化と普及が喫緊の課題となっている。1995年に発生した兵庫県南部地震は、建築・土木構造物に未曾有の被害をもたらすとともに、6400名を超える犠牲者を出す大惨事となった。これを契機として、「制震ダンパー」を建築構造物のフレームに組み込み、地震時の揺れを低減する制震構造物が大きな注目を集めるようになった。制震ダンパーは、地震時に弾塑性変形することで、地震エネルギーを主に熱エネルギーとして吸収し、柱や梁などの主要構造体を弾性変形内に留める機能を有する。したがって、大地震後は制震ダンパーだけは点検・交換することを前提としてきた。現在、最も汎用的に使用されている低降伏点鋼を用いた金属系制震ダンパーも、鋼材の宿命として加工硬化、ひずみ劣化が生じるため点検・交換が必須であった。しかしながら、震災後15年を経過した現在、制震ダンパーに要求される性能は高度化し、地震後も点検・交換をしないで継続使用できるメンテナンスフリー制震ダンパーへの強いニーズが生まれている。このような背景には、大地震後に制震ダンパーを点検・交換する際に、実際には構造物の壁などの内装を撤去して現状復旧する必要があり、相当の復旧工事費用や復旧期間を要することが挙げられる。企業にとっては地震後の事業継続性に大きな問題を与えることに繋がるこのような問題にたいして、地震

後も制震ダンパーの性能がほぼ設計当初のままに維持され、建築構造物の制震性能が保証できる、所謂メンテナンスフリー制震ダンパーが実現できれば画期的な技術となる。

そこで、このような課題を抜本的に解決するための新しい制震材料として、「高い延性を有し」、「加工硬化が少なく」、「金属と振動吸収性能に優れる粘弾性体の利点を兼備する」などの特長を有する室温超塑性 Zn-Al 共析合金の利用を着想し、本研究では、大地震後もメンテナンスフリーで使用できる室温超塑性 Zn-Al 合金制震ダンパーの開発とその実用化を目的とした。

本論文は五章で構成されるもので、各章の概要は以下の通りである。

第一章では、研究の背景として建築構造物における各種制震技術について概説し、制震ダンパーのメンテナンスフリー化が実現できることによるメリットを具体的に示し、本研究の意義と目的を明確化した。開発ターゲットは、高層ビル用制震ダンパーおよび木造用制震ダンパーとした。また、目的達成のための課題として、「室温超塑性 Zn-Al 合金の低サイクル疲労特性と破壊機構の解明」、「工業生産プロセスによる室温超塑性 Zn-Al 合金大型部材の創製」、「制震ダンパーとしての機能を発現するための最適形状設計」と定め、開発の方向性を示した。

第二章では、室温超塑性 Zn-Al 合金の制震材料としての適用可能性を判断することを目的に、圧縮引張交番繰返しによる低サイクル疲労試験を実施することで、破壊機構に関する考察を行った。供試材は、平均結晶粒径 $1.2\ \mu\text{m}$ の Zn-Al 合金押出材と、ECAE (Equal-Channel Angular Extrusion) プロセスにより平均結晶粒径を $0.5\ \mu\text{m}$ にまでさらに微細化させた押出材である。低サイクル疲労試験は、非超塑性領域 (ひずみ速度 $10^{-1}\ \text{s}^{-1}$) と超塑性領域 (ひずみ速度 $10^{-3}\ \text{s}^{-1}$) において、弾塑性領域の種々のひずみ振幅にて行い、試験温度は $303\ \text{K}$ 一定とした。Zn-Al 合金は、高強度鋼 (S35C、SNM439) や Ti-6Al-4V 合金などに比べ、優れた低サイクル疲労特性を示した。さらに、超塑性領域と非超塑性領域での低サイクル疲労特性を比較検討した結果、超塑性領域における低サイクル疲労特性は明らかに優れており、き裂進展速度が著しく遅いことを明らかにした。次に、レーザー顕微鏡により試験片表面におけるき裂密度の増加とその後の飽和挙動を調査した。超塑性領域では非超塑性領域に比べ、き裂密度が高い繰返し数まで増加し続けた後、飽和することがわかった。以上のことと変形後の組織観察により、超塑性領域では超塑性変形の付随調整機構が疲労き裂先端における応力緩和機構として作用して、き裂進展速度が遅くなることや、仮にき裂先端領域において微小空洞が生成しても均一分散して生成するため、微小き裂の枝分かれ現象によるき裂進展速度の鈍化により長い低サイクル疲労寿命を示すことを明らかにした。

一方、非超塑性領域では、ある程度の寿命は確保できるが、主き裂が発生すると、そ

の主き裂の進展速度が速いため、超塑性領域よりも早期に破壊に至ることが明らかになった。このように、室温超塑性 Zn-Al 合金の低サイクル疲労破壊機構の解明により、制震材料として適用できる妥当性を明らかにした。

第三章では、本合金を引張-圧縮変形させる軸力材として用いた超高層ビル用制震ダンパーの開発と実用化について検討した。本制震ダンパーの目標スペックは、圧縮側および引張側とも最大発生荷重が約 1000 k N、最大ひずみ振幅は従来の金属系ダンパーの約 2 倍の±1.0%と定めた。はじめに、工業的な TMCP (Thermo-Mechanical Control Process) 技術で製造する大型部材において、いかに安定した品質を確保するかが重要な課題となった。そこで、微量の合金成分の調整、鋳造技術の改良を行った。その結果、幅 380mm、厚さ 20mm の断面を有する大型圧延材においても、初期ひずみ速度を $1.7 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ とした引張試験において、引張強さ 240 MPa 以上、約 100 %の破断伸び値を示し、使用を想定する高ひずみ速度域での伸び性能改善に成功した。

本制震ダンパーの実用化を達成するための次の課題は、加工硬化が極めて少ない Zn-Al 合金板材の圧縮変形時の座屈を抑制し、局所的なひずみ集中による不安定破壊を回避するダンパー機構の実現である。そこで、平行部長さが 700 mm、板幅 210 mm、板厚 17.1 mm の Zn-Al 合金材を C 形状のチャンネル鋼材で包み込み、さらに圧縮変形中の過大な面外変形を防止し、荷重の低下を防ぐ独自のスライド形の座屈補剛機構を有する実大制震ダンパーを考案した。性能評価実験は鉄骨造の高層ビル（階高約 100 m）の振動固有周期を想定し、0.33Hz の正弦波による動的加力実験を 0.2%~1.0%の幅広いひずみ振幅で実施した。本開発の実大制震ダンパーは、強風による揺れを想定した低振幅から大地震を想定した高振幅まで幅広いひずみレンジで安定したエネルギー吸収性能を有し、±1.0%の低サイクル疲労試験においても約 500 サイクルまで破断せず、十分な耐久性を示した。次に、実大制震ダンパーに、大地震と余震を想定した模擬地震波を繰返し入力する実験を行った結果、本制震ダンパーはひずみ履歴に依存せず性能変化がほとんど無く、大地震後もメンテナンスフリーで使用できる性能を有することを明らかにした。さらに、本実大制震ダンパーにて得られた荷重-変形関係が、バネとダッシュポットの並列モデル（ケルビン・フォークトモデル）で精度良く近似できることを明らかにし、このモデルを実構造物に適用した地震応答解析の結果、ダンパー設置階において大地震時に最大 40 %程度の振動低減効果が期待できることを示した。これらの結果、本制震ダンパーは九州最高層の集合住宅に 24 基適用され、世界で初めて実用化することができた。

第四章では、本技術を木造住宅にも展開することを目的に、木造用制震ダンパーの開発と実用化を実施した。我が国には、耐震性に問題があるとされる既存不適格木造住宅

が約 900 万戸以上存在しており、制震ダンパーによる高性能な耐震補強技術が求められている。しかしながら、振動固有周期が短く、小刻みに振動する木造建物では、大断面の Zn-Al 合金を必要としない反面、超塑性特性をより高速化する課題があった。そのため、先に実施した鋳造プロセスの改善に加えさらに押出比条件の最適化により、ビル用制震ダンパーに使用する板材に比べ、組織がより均一な Zn-Al 合金押出材を作製した。その結果、ダンパーの使用想定範囲に近い $8.3 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ の高ひずみ速度域においても、引張強さ 280 MPa 以上、100 % 程度の破断伸び値を得ることができ、性能を改善できた。

木造用制震ダンパーの機構は、ビル用制震ダンパーとは異なり、複雑な座屈補剛機構を用いず、かつ小型で低コストであることが要求されたため、柱と梁の交差部(仕口)に設置でき、剛性の低い木造フレームに適するように円弧形状を有する曲げ形式の小型制震ダンパーとした。曲げ型制震ダンパーは、繰返し変形時における応力状態が複雑となるため、局所的なひずみ集中を回避しひずみ分布がほぼ均一となる最適形状を、有限要素法により定めた。木造の振動固有周期に概ね相当する 1.0Hz および 2.0Hz の正弦波による動的加力実験を行った結果、本制震ダンパーは効果的に木造フレームの剛性と耐力を上昇させ、エネルギー吸収性能を付与できることを確認した。次に、制震効果を確認するため、実大の木造立体フレームを振動台上に設置して、実地震波の入力実験を行った。この結果、ダンパーは破壊を生じず、大地震時に最大 40% 程度の優れた振動低減効果が得られることを実証した。これらの成果は、竣工後 80 年経過した建物の耐震補強工事にて実用化することができた。さらに、本制震ダンパーは従来の壁、筋交の増設を行う耐震補強方法に比べ、コストパフォーマンスに優れることも実証できた。

第五章では、一連の研究により得られた研究成果を総括し、本技術の今後の展望を示した。

審査結果の要旨

兵庫県南部地震を契機に、柱や梁などの主要構造体の損傷を回避できる制震ダンパーを組み込んだ構造物が普及した。さらに我が国では、大地震後の事業継続性の観点から、メンテナンスフリー制震ダンパーへの強いニーズが生まれている。このような課題を抜本的に解決するための新しい制震材料として、室温超塑性 Zn-Al 合金の制震材料への適用を着想し、その建築用メンテナンスフリー制震ダンパーの開発と実用化を目標とした。

本論文では、以下に述べるような研究成果を得ている。

- ①. 超塑性領域および非超塑性領域での室温低サイクル疲労試験を行うことで、制震材料としての妥当性を評価した。その結果、いずれの領域においても加工硬化が少な

く極めて安定しており、特に、超塑性領域における疲労寿命は、鉄鋼材料やチタン合金よりも優れていることを明らかにした。また、超塑性領域での疲労き裂先端における応力緩和機構として、超塑性変形の付随調整機構が関与しており、その結果、優れた低サイクル疲労寿命が得られることを明らかにした。

- ②. 建築部材に使用できる室温超塑性 Zn-Al 合金の大断面部材の工業的な製造プロセスを確立するため、まず性能低下を誘発する材料組織学的課題を明らかにし、次に鑄造段階における冷却速度の制御、有害不純物元素の特定、熱処理条件の最適化などを検討した結果、微細均一な組織を有する大型ビレットを製造することが可能となり、さらに使用を想定する高ひずみ速度域での伸び性能を改善することができた。
- ③. 室温超塑性 Zn-Al 合金の性能を最大限発揮させるため、ビル用制震ダンパーの補剛機構として、板材の圧縮変形中の座屈変形を防止して荷重の低下を防ぐ構造の開発を行った。また、木造用制震ダンパーとしては、柱と梁の交差部(仕口)に設置でき、剛性の低い木造フレームに適するように円弧形状を有する曲げ形式の採用、および変形部の局所的なひずみ集中を回避でき、ひずみ分布がほぼ均一となる最適形状の設計開発を実施した。
- ④. 実大制震ダンパーの性能を、実際の使用条件を模擬した正弦波入力実験、低サイクル疲労試験、模擬地震波入力試験、および振動台実験等の各種動的加力実験実験により評価した。その結果、いずれの制震ダンパーもメンテナンスフリーで使用できる耐久性と性能安定性を示し、かつ優れた振動低減効果を発揮できることを実証した。

これら一連の研究成果により、ビル用制震ダンパーおよび木造用制震ダンパーは、それぞれ九州最高層の集合住宅と、竣工後 80 年を経過した木造住宅の耐震補強工事に適用され、世界初の技術として実用化できた。本研究成果は、超塑性材料の今後の新たな産業利用の可能性を拓くものであり、また、申請者が自立して研究を行うに十分な能力と学識を有することを証したものである。学位論文審査委員会は、本論文の審査ならびに学力確認試験の結果から、博士（工学）の学位を授与することを適当と認める。