

産経新聞社賞

世界最高峰の疲労特性を有する Fe-Mn-Si 系 新合金を用いた長周期・長時間地震動対応 制振ダンパーの開発

¹株式会社竹中工務店、²淡路マテリア株式会社、³独立行政法人物質・材料研究機構、
⁴日本高周波鋼業株式会社、⁵九州大学大学院

井上 泰彦¹ 千葉 悠矢² 澤口 孝宏³ 櫛部 淳道¹
梅村 建次¹ 水野 幸隆⁴ 杉村 誠一² 津崎 兼彰^{3,5}

1. 緒言

1995年に発生した阪神淡路大震災以降、特に超高層建物においては、図1に示すように地震・風などの振動への対策を考慮した制振構造が急速に普及してきた。制振構造は、地震時に、構造体中に適切に配置したエネルギー吸収部材である制振ダンパーに優先的に地震エネルギーを吸収させ、建物の揺れを軽減することで、主要構造部材(柱・梁)の損傷を最小限に留めることを目的とした構造形式である。

しかしながら、近年、発生が懸念される南海トラフ巨大地震などの大規模地震およびそれらに伴う長周期・長時間地震動による建築物の被害対策の重要性が社会的にも認識され[1]、図2に示すように低層建物と比較して長い固有周期(建物が振動しやすい周期)を有する超高層建物が共振し、大振幅かつ長時間継続して振動することにより、震源から遠く離れた広範囲な建築物にも大きな被害をもたらす可能性が指摘されるようになってきた。

さらに、東北地方太平洋沖地震では発生直後から4年経つ現在までに、これまでに経験のない多くの余震が観察されている[2]。

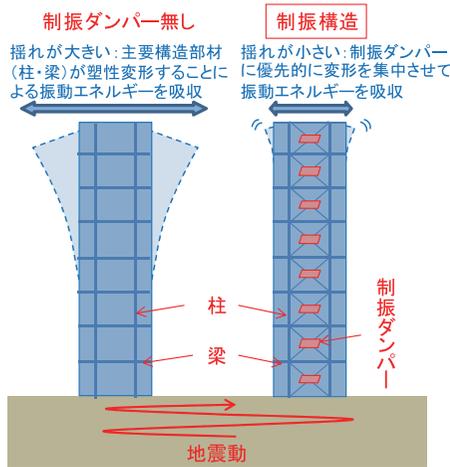


図1 制振構造

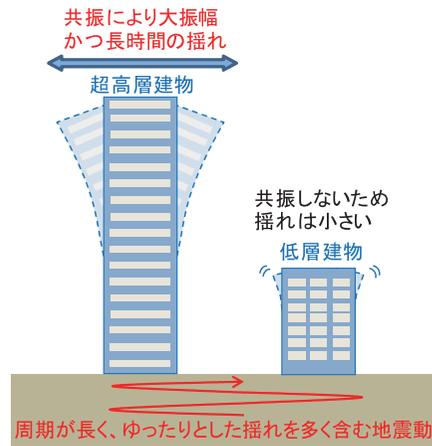


図2 長周期地震動による超高層建物の揺れ

したがって、従来の大地震対策に加えて、大振幅かつ多数回の繰り返し変形が生じる長周期・長時間地震動への対策も必要とする建物では、制振ダンパーに対する要求性能が飛躍的に高くなり、特に、低コスト、耐荷重の大きさ、高剛性などの観点から最も汎用的に使用されてきた鋼材系制振ダンパーが、疲労耐久性問題により使用が制限されるケースが生じている。そのため、合理的かつ経済性が高い制振建物を実現するうえで、より高性能な鋼材系制振ダンパーが求められていた。

このような背景から、我々は、既存の鋼材と比較して疲労耐久性を約10倍に高めた Fe-Mn-Si 系合金を創出し、それをを用いた世界初の長周期・長時間地震動に対応可能な鋼材系制振ダンパーを開発した。さらに、本技術を実際の超高層建物に適用し、適用箇所の疲労耐久性を大幅に向上させ、建物全体の性能バランスを改善することにより、複数回の大規模地震を経験してもメンテナンスフリーで使用できる制振建物を実現した。

2. 開発の背景と目標性能

制振ダンパーの種類としては、低降伏点鋼(通常の建築用鋼材よりも低強度な鋼材)の弾塑性変形を利用する鋼材ダンパー、粘性体やオイルの粘性抵抗力を利用した粘性ダンパーやオイルダンパーが代表的である。また、高層建物においては、耐震性能の冗長性やロバスト性を確保するため、単一の制振ダンパーシステムに頼らず、適材適所にこれらのシステムを使い分けて配置する設計手法が多く採用されてきた。

表1に制振構造物に利用される主要な制振ダンパーの特徴をまとめた。現状、長周期・長時間地震動対策としての制振技術は耐久性が必要とされるため、粘性ダンパー、オイルダンパーが中心となっている。これらのダンパーは耐久性に優れ、エネルギー吸収性能に富むが、低剛性で耐荷重が小さく、高コストなどの課題もある。一方、鋼材系ダンパーは金属疲労による耐久性不足が懸念されるため、長周期・長時間地震動対策として適していない。しかしながら、鋼材系ダンパーは、高剛性、耐荷重が大きい、低コストなど多くの利点があり、制振構造物の設計上欠かすことはできない。

表1 主要な制振ダンパーの特徴比較

制振ダンパー種類	鋼材系ダンパー	粘性ダンパー	オイルダンパー
耐久性	△ (長周期地震動には対応できない)	○	○
エネルギー吸収性能	○	◎	◎
建物への剛性付与	○	×	×
耐荷重	○ (コンパクトな断面で大荷重を発生可能)	△	△
価格	◎	△	△

このような背景から、図3に模式的に示すように、鋼材系ダンパーの利点である高剛性、耐荷重の大きさ、低コストを活かし、疲労耐久性にも優れる理想的な性能を有する鋼材系制振ダンパーの開発を目標とした。

開発目標に対して、我々は既存鋼材より圧倒的に優れた疲労耐久性を有する新材料を開発するという独自のアプローチから、世界初の長周期・長時間地震動対応の鋼材系制振ダンパーの開発と実用化に挑戦した。

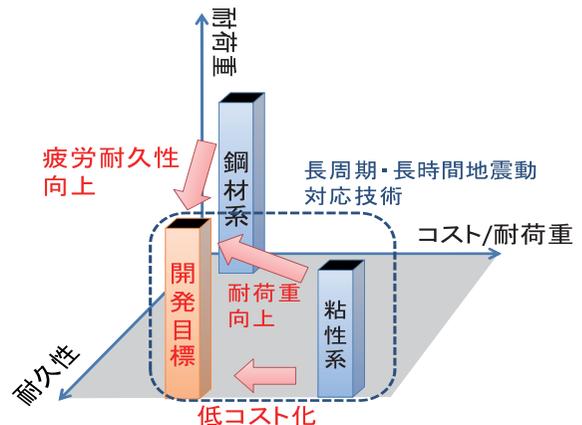


図3 開発目標のイメージ

3. 疲労耐久性に極めて優れた Fe-Mn-Si 系新合金の開発

一般的な鋼材において、同一ひずみ条件に対する疲労寿命は、鋼材種によらずほぼ一定である [3]。同一ひずみ条件において、既存鋼材を凌駕する疲労耐久性を得るためには、従来と異なる全く新しい発想が求められた。そこで、我々は、以下に述べるように Fe-Mn-Si 系合金 (以下 FMS 合金と呼ぶ) で発見した新しい変形メカニズムが疲労耐久性を改善できる可能性に着目し、既存鋼材を大幅に上回る疲労耐久性を有し、かつ比較的安価に製造・加工ができる新しい FMS 合金の研究開発に取り組んだ。

3.1 FMS 合金の歴史と本研究開発の着想

1982年に単結晶 Fe-30Mn-1Si 合金において非常に大きな形状回復ひずみを示すことが世界で初めて報告された [4]。FMS 合金は他の形状記憶合金と比べて圧倒的に低コストであり、大型部材に適用可能な“鉄系”の形状記憶合金として注目を集めた。その後、形状記憶効果は多結晶でも確認され [5]、形状記憶特性、相変態挙動などの基礎研究と共に、実用化も視野に入れて成分最適化と耐食性改善 [6]、加工熱処理による特性改善 [7] などの研究開発が進められた。実際に、FMS 合金の変形後に加熱すると初期形状に回復する性質を利用して、クレーンゲーター用レールの締結部材として実用化されている [8]。

FMS 合金の形状記憶効果は、変形により FCC 構造のオーステナイト (γ) 相から相変態した HCP 構造のマルテンサイト (ϵ) 相が加熱により逆変態する可逆変形過程で生じる。これに対して、我々は FMS 合金を制振ダンパーに適用することを想定し、引張圧縮変形下の変形組織変化を調査した結果、可逆的な結晶構造変化が、温度変化でなく外力の反転 (引張 \rightarrow 圧縮) によっても生じることを発見した。図4は、段階的な引張・圧縮変形を施した Fe-28Mn-6Si-5Cr-0.5NbC 合金表面を原子間力顕微鏡 (AFM) により観察した結果である [9]。図より、引張誘起された ϵ 相 (図中1-5) がその後の圧縮変形により逆変態していることが分かる (図中6-8は圧縮誘起された ϵ 相)。このような組織変化は、図5に示すように、引張・圧縮に対応する原子のせん断変位が、その後の繰り返し引張圧縮変形によっても可逆的に生じることを示唆するものである。この新しい変形メカニズムの発見により、我々は、FMS 合金は外力による変形に対して、本質的に繰り返し変形に対する耐久性に優れると予測し、

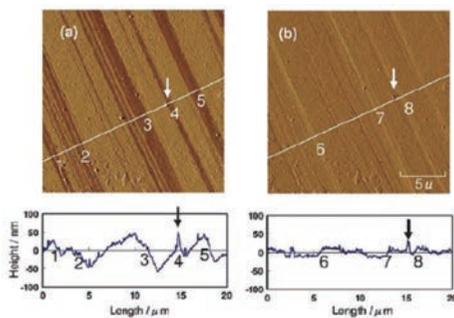


図4 FMS 合金の引張圧縮変形時における AFM 像 [9]
(a) 引張2.7%、(b) 引張後圧縮 -0.6%

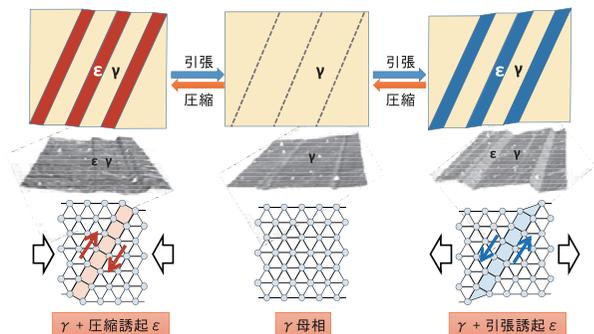


図5 応力誘起による可逆変形機構の模式図

FMS 合金の疲労耐久性に関する研究を開始した。

3.2 疲労耐久性改善と大型材製造技術の確立を目指した FMS 合金の成分設計

FMS 合金のユニークな引張圧縮変形挙動は、その後、他の成分でも確認でき、疲労耐久性に優れていることも確かめられた。例えば、Fe-28Mn-5Si-5Cr-1Al 合金は、従来の鋼材の数倍程度の低サイクル疲労寿命を示す[10, 11]。さらに、FMS 合金の疲労特性は化学成分を制御することにより飛躍的に改善できることも次第に明らかになってきた。

図6は、FMS 合金の塑性変形メカニズムに Si、Al 濃度が及ぼす影響を利用して、塑性変形メカニズムの疲労特性への影響を調査した結果である。図6(a)は Si、Al 濃度を連続的に変化させた Fe-30Mn-(6-x)Si-xAl 合金 (x=0, 1, 2, 3, 4, 5, 6) の低サイクル疲労寿命を示す。FMS 合金は比較材 SUS304 よりも疲労寿命が長く、なかでも、Fe-30Mn-4Si-2Al 合金において飛びぬけて優れた疲労寿命が得られた。図6(b)に示す後方散乱電子解析 (EBSD) 法による組織観察の結果、 γ 相と ϵ 相が混在するとき最良の疲労寿命が発現する [12]。これは、前節で示した引張圧縮変形下の可逆的変態が繰り返し発生するためと考えられる。

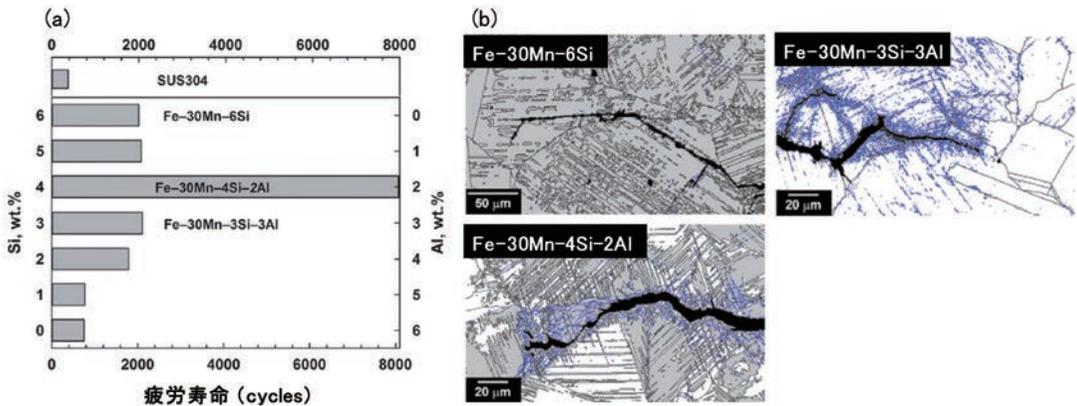


図6 Fe-30Mn-(6-x)Si-xAl 合金の疲労特性と塑性変形メカニズムの関係[12]
(a)低サイクル疲労寿命 (b)疲労破断後のき裂周辺で観察した EBSD 相分布図
(白色部分は γ 相、グレー部分は ϵ 相、青色部分は低角粒界をそれぞれ表す。)

以上の知見をもとに、我々は FMS 合金の低サイクル疲労寿命改善のための成分設計指針を構築し、実用化を目指した合金設計に取り組んだ。既存の FMS 合金は蒸気圧が高い Mn を 28~30mass% も含むため、大型電気炉溶解が困難であり、ダンパー用大型素材の製造や量産に不向きであるという課題があった。そこで、Mn 濃度を電気炉溶解が可能なレベルまで低下させ、 γ 相と ϵ 相の相安定性や溶質原子が変形特性に及ぼす影響を予測して成分を最適化し、新しい制振材料として Fe-15Mn-4Si-10Cr-8Ni 合金の開発に成功した [13]。従来比約 1/2 となる低 Mn 組成合金の開発により、一般的な設備である大型電気炉による溶解が可能となり、制振ダンパーの実現に必要な大型素材の大量生産技術を確立することができた。図7に本開発に用いた制振ダンパー用大型圧延材 (後述する 1500 × 1200 × 16mm の制振ダンパー材を 2 枚加工可能なサイズ) の写真を示す。



図7 ダンパー用大型圧延材

3.3 FMS 新合金の疲労耐久性と機械的特性

図8に開発した Fe-15Mn-4Si-10Cr-8Ni 新合金の低サイクル疲労試験結果を既存のダンパー用鋼材である低降伏点鋼 (LY225) における結果と併せて示す。ダンパーとして使用する場合に想定する幅広いひずみ範囲において、FMS 新合金は LY225 の約10倍に達する極めて高い疲労寿命を実現した。これは実用金属材料としては世界最高峰の疲労耐久性である。

図9に FMS 新合金の引張試験における応力ひずみ曲線を示す。FMS 合金の応力ひずみ曲線は降伏点を持たないラウンドハウス型形状を示す。引張特性は圧延方向に因らず等方的な性質を示す。このため、引張圧縮変形のみならずせん断変形、曲げ変形等を利用した制振ダンパーにも適した素材特性を有すると言える。また、表2に示すように建築用鋼材に必要な塑性変形性能を示す降伏比や伸びも建築用鋼材 (例えば、建築構造用圧延鋼材 SN490C 材 ($6 \leq t \leq 16\text{mm}$) 規格値は降伏比80% 以下、伸び17% 以上) と比べて優れる。

さらに、シャルピー衝撃値は $-100 \sim 100^\circ\text{C}$ の広い温度範囲で 200J 以上 (SN490C 材規格値は 0°C で 27J 以上) と極めて高い靱性を示す。他には、非磁性のため電磁環境でも使用可能であり、Cr、Ni の効果により耐食性にも優れているなどの特性も確認している。これらの優れた特性により、開発した FMS 新合金は将来的に建築分野を超え、幅広い分野での応用が期待できる材料である。

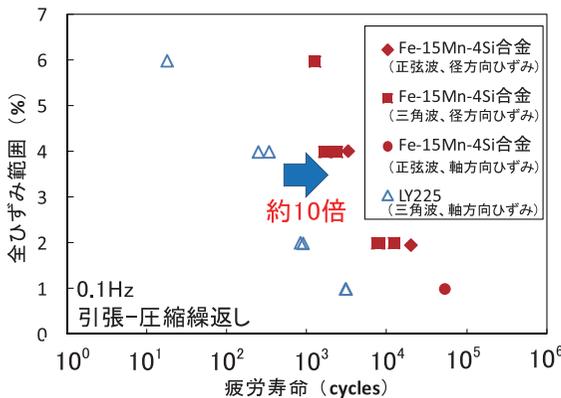


図8 FMS 新合金の低サイクル疲労特性

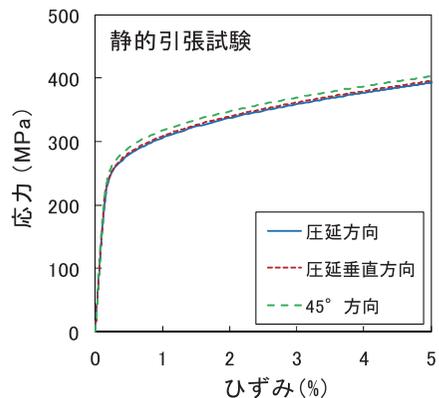


図9 FMS 新合金の応力ひずみ曲線

表2 FMS 新合金の機械的性質(3方向における引張試験の平均値)

0.2% 耐力	引張強さ	降伏比	伸び	試験片
283MPa	673MPa	42.0%	76.7%	JIS 5号

※降伏比(= 0.2% 耐力 / 引張強さ)

4. Fe-Mn-Si 系新合金を用いた長周期・長時間地震動対応制振ダンパーの開発

4.1 素材の疲労耐久性を最大限に活かした FMS 合金制振ダンパーの設計

図10に FMS(Fe-15Mn-4Si-10Cr-8Ni) 合金制振ダンパーの概要を示す。ダンパーは、その上下間に生じるせん断変形に対して、心材(エネルギー吸収部材)に使用した FMS 合金の弾塑性変形により制振効果を発揮するせん断パネル型制振ダンパーである。ダンパーの発生荷重は想定最大変形角1/25rad 時に約4,000kN であり、鋼材系ダンパーのなかでも最大級の荷重を負担できる。

FMS 合金心材は端部を R 形状とすることにより、発生荷重のコントロールを行うと同時に、大変形時における荷重伝達の要となる補剛板と心材とのボルト接合部の信頼性を向上させている。

ここで、心材の変形量がある限界を超えると、部材が面外方向にはらみ出す“座屈”が生じる。大きな座屈の発生は部材耐力の低下やひずみ集中による早期破断を招き、素材本来のポ

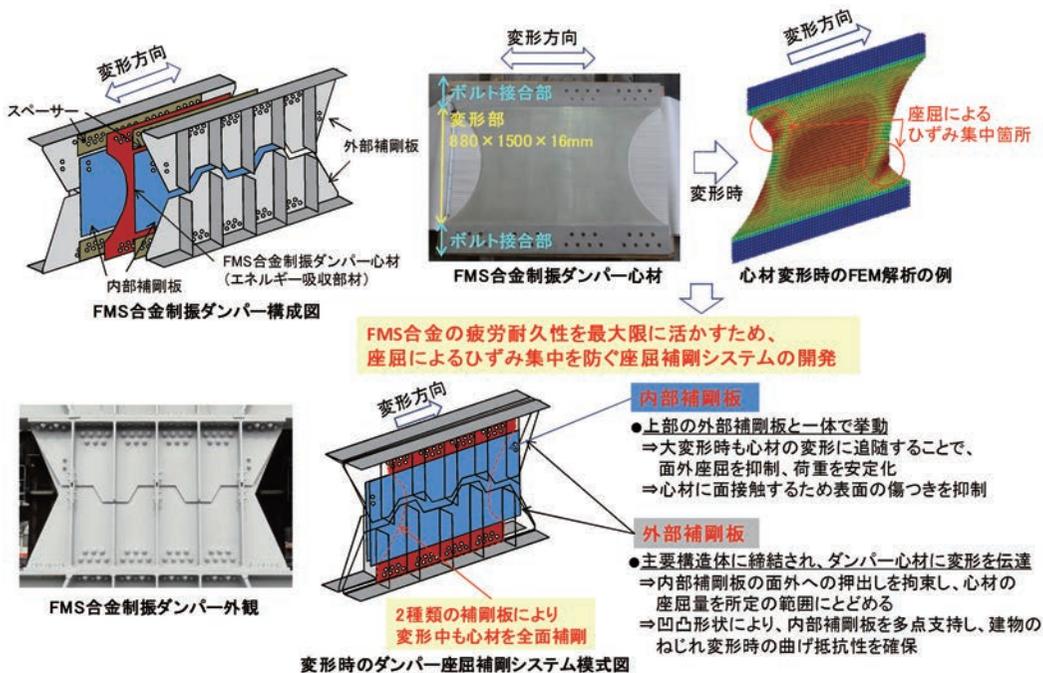


図10 FMS 合金制振ダンパーの概要

テンシヤルが十分に發揮できない。このため、制振ダンパーには心材の座屈を防止する座屈補剛機構が必要となる。FMS 合金の優れた疲労耐久性を活かすことを最大限に配慮し、変形中も心材の変形を阻害せずに、変形部を二重の補剛板により全面補剛し続ける従来にない独創的な座屈補剛システムを開発し、FMS 合金制振ダンパーに適用した。

4.2 動的加力試験による性能確認

開発した FMS 合金制振ダンパーの変形性能と疲労耐久性能を確認するため動的加力試験を実施した。試験体は、実大の FMS 合金制振ダンパーに対して FMS 合金心材の変形部高さ、幅、板厚がそれぞれ1/2倍サイズの相似形の試験体(以下1/2モデル試験体と呼ぶ)を用いた。1/2モデル試験体は実大ダンパーの最大発生荷重約4,000kN に対して1/4倍の荷重約1,000kN を発生する。

4.2.1 加力システムと試験体

図11に本動的加力試験の加力システムと試験体写真を示す。加力装置は最大荷重容量2,000kN 級の大型動的アクチュエータを用いて、加力用鉄骨梁を介して水平変位を加えてせん断変形を試験体に入力する。1/2モデル試験体のボルト接合部、座屈補剛部材の設計余裕度については実大サイズダンパーとほぼ同等とした。本加力システムにより、開発した FMS 合金制振ダンパーの変形性能と疲労耐久性能を確認するために、漸増載荷試験、低サイクル疲労試験および長周期・長時間地震動を模擬した地震波入力試験を実施した。

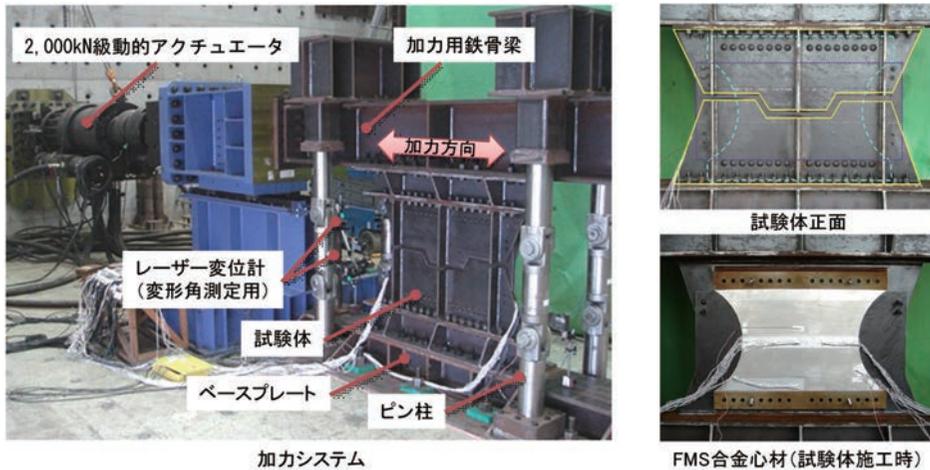


図11 加力システムと試験体写真

4.2.2 漸増載荷試験(変形性能の確認)

制振ダンパーに必要とされる幅広い変形範囲で安定した変形性能を有することを確認するために、最大規模の地震時を想定した変形角1/25rad までの漸増載荷試験を実施した。

図12に漸増載荷試験により得られた荷重-変形角関係を示す。加力条件は長周期地震動と超高層建物の共振を想定した周期5秒の正弦波で、振幅条件ごとに3サイクル連続加力とした。座屈や破断による不連続な荷重の低下は見られず、小変形角から大変形角まで安定し

た荷重-変形角関係が得られることから、履歴ループ(ループが囲む面積がエネルギー吸収量を表す)も安定している。これらより、制振ダンパーとして優れた変形性能とエネルギー吸収性能を確認できた。

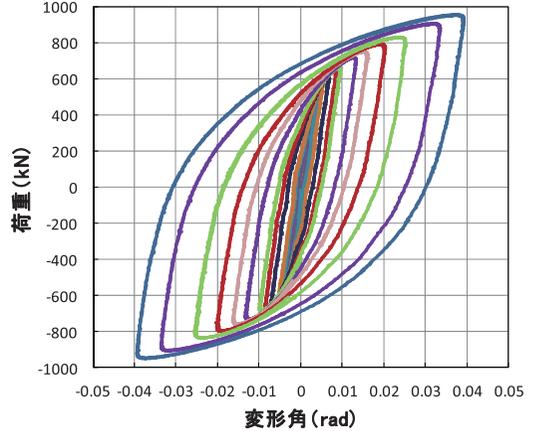


図12 漸増载荷時の荷重 - 変形角関係

4.2.3 低サイクル疲労試験(疲労耐久性能の確認)

FMS 合金制振ダンパーの疲労耐久性能を明らかにするため、代表的なせん断変形角 1/100、1/50、1/25rad における一定ひずみ振幅繰り返しによる低サイクル疲労試験を実施した。試験は漸増载荷試験と同様に周期5秒の正弦波加振として、繰り返し変形中に生じる最大荷重から1サイクルの最大荷重が10%低下した回数を疲労寿命とした。図13に低サイクル疲労試験結果を示す。また、図中に比較として、既存の鋼材系せん断パネル型ダンパーの文献値 [14, 15] をプロットした。ここでは、せん断パネルの疲労特性に影響を与える幅厚比 d/t (d : パネル変形部高さ、 t : 板厚) を概ね同等とした比較としている。開発ダンパーは既存の鋼材系ダンパーと比較して極めて優位な疲労寿命を有することが分かる。

優れた制振ダンパーの特性として、設計強度を維持するという観点から繰り返し変形時の耐荷重の安定性が求められる。図14に本試験で得られた繰り返し回数と各サイクルで得られた最大および最小荷重の関係を示す。繰り返しによる硬化は非常に緩やかであり、疲労寿命付近までほぼ発生荷重が変化せず、安定した変形性能を発揮する。

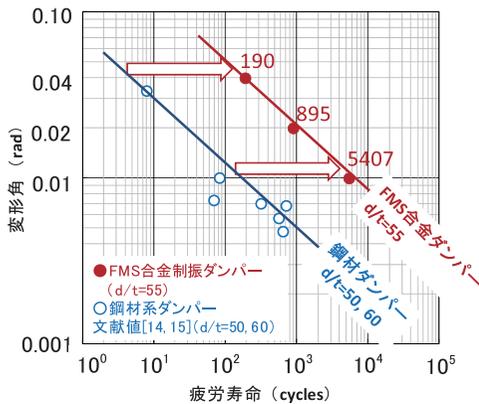


図13 FMS 合金制振ダンパーの低サイクル疲労特性

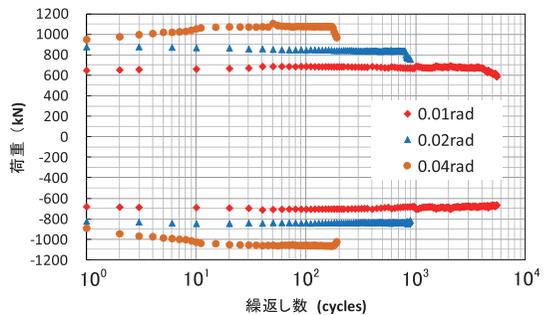


図14 繰り返し数に対する最大・最小荷重の推移

これらの結果より、FMS合金の優れた疲労特性を最大限に活かした疲労耐久性能と繰返し変形による性能安定性を有する理想的な制振ダンパーを実現できた。

4.2.4 長周期・長時間地震動を想定した地震波入力試験(地震波応答性能と耐久性の確認)

長周期・長時間地震動を想定した地震波入力試験は、図15に示す長周期成分を多く含む約300秒の極稀地震(500年に1回程度発生する大地震)想定波形を用いて実施した。加力は表3に示す順番に極稀地震波形とそれを50%に低減した稀地震(50年に1回程度発生する中地震)想定波形を3回ずつ入力し、FMS合金制振ダンパーの地震波応答性能と耐久性を確認した。

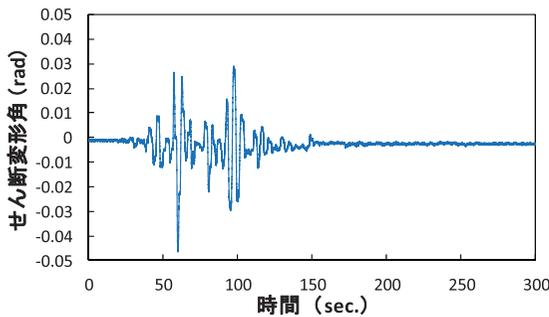


図15 ダンパーに入力される極稀地震波形

表3 地震波入力試験の加力条件

加力順序	入力地震波
Step1	稀地震波(50%)
Step2	極稀地震波(100%)
Step3	極稀地震波(100%)
Step4	稀地震波(50%)
Step5	稀地震波(50%)
Step6	極稀地震波(100%)

図16に1回目と3回目の極稀地震波入力時の荷重-変形角関係を示す。ランダム波形である地震波入力時も安定したエネルギー吸収を示し、数回の極稀地震を経験しても発生荷重およびエネルギー吸収性能がほとんど変化しない極めて優れた地震波応答性能と長周期・長時間地震動に対応可能な優れた疲労耐久性を確認できた。

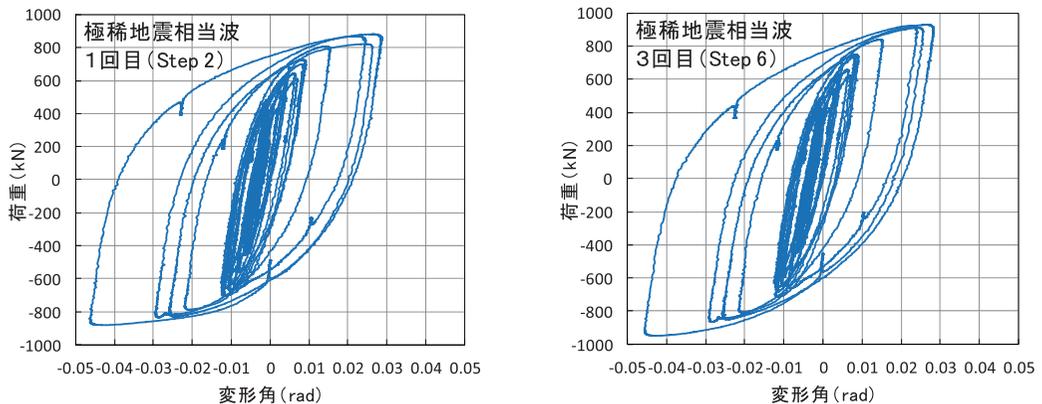


図16 極稀地震波入力時における荷重-変形角関係

図17に全ての加力終了後における FMS 合金心材の写真を示す。FMS 合金心材はき裂や大きな座屈等は見られず、健全な状態であり、開発した座屈補剛システムの効果も確認できた。

以上より、FMS 合金制振ダンパーは複数の大規模な長周期・長時間地震動を経験しても安定した性能を維持できる疲労耐久性を有する世界初の鋼材系制振ダンパーとしての性能を実証できた。



図17 加力終了後の FMS 合金心材の写真

4.3 JP タワー名古屋への適用

図18に開発した FMS 合金制振ダンパーを適用した JP タワー名古屋の外観パース、図19に制振装置配置図(長手方向軸組図)を示す。本建物は、高さ196mの超高層オフィスビルであり、固有周期5秒の長周期建物となる。災害時の事業継続を目標として、地震・暴風に対応した4種類の制振装置で構成したハイグレード制振建物である。FMS 合金制振ダンパーは、図19に赤枠で示す低層階(1~4階)に16基適用した。



提供：株式会社日本設計

図18 JP タワー名古屋外観

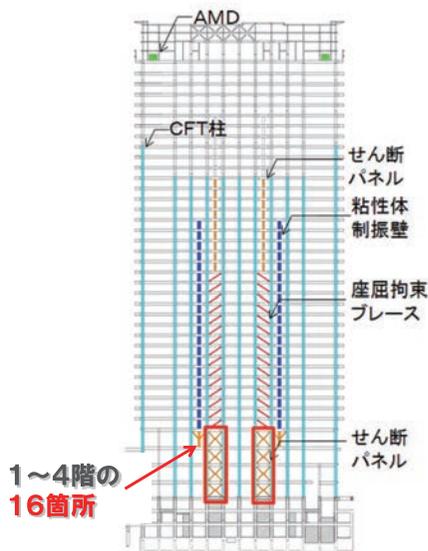


図19 制振装置配置図

1~4階のせん断パネル部は階高が一般階と比べて高いため、地震時に大きな変形が集中し、せん断パネルに大きなせん断変形が生じる。このため、せん断パネルの疲労耐久性に関する余裕度が他の階に比べて不足している、すなわち建物全体の耐震性能がこれらの階で決まっていることが課題であった。該当箇所に長周期・長時間地震動を経験しても交換が不要な性能余裕度を発揮できる FMS 合金制振ダンパーを適用することで、疲労耐久性を向上さ

せ、建物全体の性能バランスを改善し、複数回の大規模地震を経験してもメンテナンスフリーで使用できる制振建物を実現した。図20に該当箇所へのFMS合金制振ダンパーの取付け状況を示す。



図20 FMS合金制振ダンパーの取付け状況

5. 結 言

世界最高峰の疲労特性を有するFe-Mn-Si系合金およびそれを用いたせん断パネル型制振ダンパーを開発した。また、世界初の長周期・長時間地震動に対応できる鋼材系制振ダンパーとしてJPタワー名古屋に適用し、疲労耐久性を向上させ、建物全体の性能バランスを改善し、複数回の大規模地震を経験してもメンテナンスフリーで使用できる制振建物の実現に成功した。本技術に関しては素材特許出願済みであり、材料認定の取得、製造・加工技術の標準化・展開も進んでいる。

将来的に、本技術はFMS合金の溶接技術の開発による補剛システムの簡易化、生産量の増加などにより更なるローコスト化が十分可能であり、高付加価値技術としてさらなる展開を図っていきたい。また、今回の開発では、FMS合金を制振ダンパー用の構造材料として使用したが、本合金の安定した機械的性質、磁性特性、耐食性、その他の優れた性能を活かし、建築を超えて多くの産業で活用され、多分野で汎用的な材料として利用されるように用途拡大に努めたい。

6. 謝 辞

本研究開発の一部は、NEDO 産業技術研究助成事業「鉄系形状記憶合金の制振特性を利用した建築用制振ダンパーの開発」の一部として実施したものである。また、新合金開発と実用化に関して、物質・材料研究機構中期計画プロジェクト「社会インフラの復旧、再生に向けた構造材料技術の開発」耐震耐火構造材料サブテーマの一部として実施したものである。関係各位に深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 中央防災会議防災対策推進検討会議南海トラフ巨大地震対策検討WG, 南海トラフ巨大地震対策について(最終報告), 2013年5月。
- [2] 気象庁ホームページ, 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震余震活動の状況, http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/2011_03_11_tohoku/yukan.pdf
- [3] 幡中憲治, 日本機械学会論文集, 50A (1984) 831.
- [4] A. Sato, E. Chishima, K. Soma and T. Mori, *Acta Metall.*, 30 (1982) 1177.
- [5] M. Murakami and H. Suzuki, *Trans. ISIJ*, 27 (1987) 3 B87.
- [6] H. Otsuka, H. Yamada T. Maruyama, H. Tanahashi, S. Matsuda and M. Murakami, *ISIJ Int.*, 30 (1990) 674.
- [7] H. Otsuka, M. Murakami and S. Matsuda, *MRS Int' l. Mtg. on Adv. Mats.*, 9 (1989) 451.
- [8] T. Maruyama, T. Kurita, S. Kozaki, K. Andou, S. Farjami and H. Kubo, *Mater. Sci. Technol.* 24 (2008) 8, 908.
- [9] T. Sawaguchi, P. Sahu, T. Kikuchi, K. Ogawa, S. Kajiwara, A. Kushibe, M. Higashino and T. Ogawa, *Scripta Mater.*, 54 (2006) 1885.
- [10] 井上泰彦, 櫛部淳道, 澤口孝宏, 丸山忠克, 日本建築学会大会学術講演梗概集(2014) 865.
- [11] 櫛部淳道, 井上泰彦, 澤口孝宏, 丸山忠克, 日本建築学会大会学術講演梗概集(2014) 867.
- [12] I. Nikulin, T. Sawaguchi and K. Tsuzaki, *Mat. Sci. Eng., A* 587 (2013) 192.
- [13] T. Sawaguchi, I. Nikulin, K. Ogawa, K. Sekido, S. Takamori, T. Maruyama, Y. Chiba, A. Kushibe, Y. Inoue and K. Tsuzaki, *Scripta Mater.*, 99 (2015) 49.
- [14] 関根誠司, 品部祐児, 高橋泰彦, 日本建築学会学術講演梗概集 C-1 (1996) 807.
- [15] 泉満, 可児長英, 成原弘之, 小倉桂治, 川又康博, 細沢治, 日本建築学会学術講演梗概集 C, (1992) 1333.