

巨大地震に耐える新鋼材

— 長周期地震動に挑む材料設計 —

国立研究開発法人 物質・材料研究機構構造材料研究センター材料創製分野加工熱処理プロセスグループ主任研究員

吉中 奎貴

1. はじめに

マグニチュード8～9クラスの南海トラフ巨大地震や首都直下型地震などの発生が現実的なリスクとして認識される中、建築・土木構造物の被害低減において、制振ダンパーの果たす役割はますます重要となっている。また、近年注目を集める長周期地震動に対しては、これまで地震に強いとされてきた超高層ビルにおいても、共振による深刻な被害が生じる可能性が指摘されている。超高層ビルでは制振構造が採用されることが多く、巨大地震に伴う長周期地震動が発生した場合に制振ダンパーが健全性を維持できるか否かは、構造物全体の被害レベルや機能維持に直接的な影響を及ぼす。

制振ダンパーのうち鋼材ダンパーは、他種ダンパーと比較して、コスト、形状自由度、最大負担荷重、剛性付与といった点で優れた特長を有する。鋼材ダンパーは、地震時に心材として用いられる鋼材に積極的に塑性変形を生じさせ、その変形履歴に伴うエネルギー消費により地震応答を軽減する。すなわち、鋼材ダンパーは繰返し弾塑性変形を動作原理とするデバイスであり、金属疲労の発生が

本質的に避けられない。複数の巨大地震が比較的短期間に連続して起こる可能性も指摘されていることに加え、これらに伴う長周期地震動によって多数回の大幅変形までもが生じた場合、それに起因する疲労損傷は従来の鋼材ダンパーの耐久性を容易に超過しうる。

以上のように、鋼材ダンパーは他の制振ダンパーに対して優位な特長を持つ一方で、長周期地震動への対応技術としては疲労耐久性が課題となってきた。ここで、一般に金属疲労は、主として弾性範囲での変形が多数回（疲労寿命が 10^4 から 10^5 回以上）繰返されることによって生じる高サイクル疲労（弾性疲労）を指す場合が多い。一方、鋼材ダンパーでは巨視的な塑性変形を伴う、いわゆる低サイクル疲労（塑性疲労）が支配的となる。すなわち、鋼材ダンパーを、頻発する巨大地震や多数の余震、そして長周期地震動に対応可能な建築技術として発展させるためには、低サイクル疲労に対する耐久性の確保が極めて重要となる。

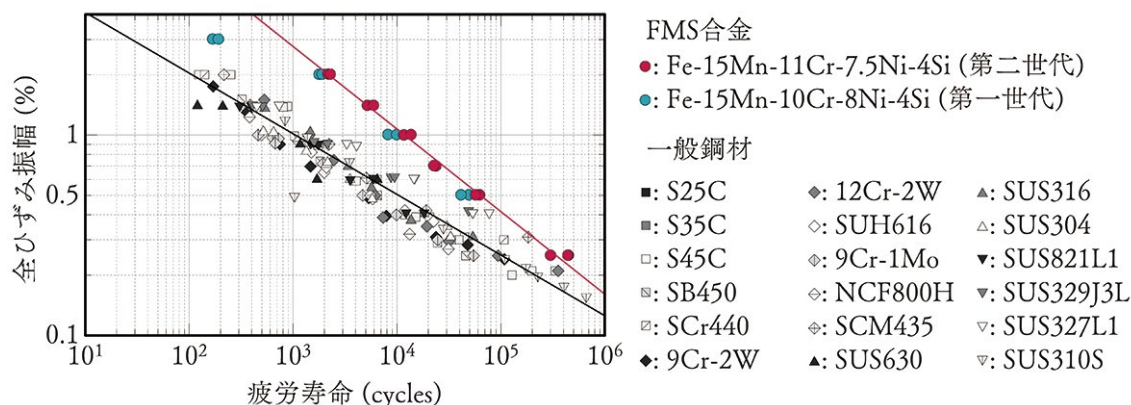
さらに、鋼材ダンパーを実構造物の一部として組込むためには、部材単体の性能のみならず、施工性や接合方法なども含めた総合的な観点が必要である。特

に、鋼材ダンパーの優位性の一つである形状自由度を十分に活かすためには溶接接合が不可欠であり、材料の疲労耐久性ととともに、溶接部の信頼性が極めて重要な要件となる。

2. 疲労耐久性を改善する材料設計

一般に、疲労破壊過程は繰返し変形を受けることによって疲労き裂が発生、進展するプロセスとして理解されている。疲労き裂を疲労損傷の物理的実体として据え、その進展挙動を記述可能としたことは、破壊力学の最大の成果の一つである。一方で、き裂はあくまで繰返し変形の帰結として現れた一形態であり、金属疲労の本質は塑性変形であると捉える見方もある。もちろん、これら二つの立場は相互に排他的なものではないが、本研究開発は、どちらかといえば後者の「繰返し塑性変形」に着目する考え方に立脚している。

金属材料の塑性変形挙動を特徴づける典型的な指標は、強度（変形や破壊に耐えられる能力）と延性（破壊までにどれだけ変形を許容できるか）である。高サイクル疲労に対しては、疲労限度を設計



図－1 全ひずみ振幅と疲労寿命の関係

基準として用いることが多く、静的強度の向上に付随させて、疲労限度を高めることを目的とした試みが広く行われてきた。

一方、低サイクル疲労が問題となる場合には、通常、ひずみを基準とした整理が行われる。図-1は、全ひずみ振幅と疲労寿命の関係を示す ϵ -N曲線である。全ひずみは塑性ひずみ成分と弾性ひずみ成分の和を指す。なお、本稿では図-1以外のデータについても、疲労サイクル中の最大引張ひずみと最大圧縮ひずみの絶対値が等しい、ひずみ比-1の結果を示している。図-1中のモノクロで示したプロット群は、(国研)物質・材料研究機構(NIMS)が発行する疲労データシートから抜粋した一般鋼材の疲労試験結果である¹⁾。これらの鋼材は、引張強度が212MPaから1,267MPa、全伸びが16%から68%と、強度や延性が大きく異なる。しかし、図-1に示すように、疲労寿命には鋼種による差がほとんど認められない。このように、低サイクル疲労寿命には材質の影響がほとんど見られないというのが、従来の一般的な理解であった。

一方、図-1において色つきの丸印で示されるのが、筆者らのグループで開発した新鋼材、FMS合金(Fe(鉄)-Mn(マンガン)-Si(シリコン)合金)の結果²⁾である。FMS合金は一般鋼材に対して明らかに長寿命を示しているが、これは、塑性変形メカニズムの最適化によるものである。

金属疲労の本質を繰返し塑性変形に求める観点からは、疲労損傷の微視的メカニズムは、繰返し負荷に伴う変形の不可逆成分の累積として理解することができる。このような立場に立てば、変形の可逆性を高めることにより、疲労損傷の蓄積を抑制し、疲労寿命の改善が可能となると考えられる。これは、単に強度や延性に着目した従来の材料開発とは一線を画す発想である。筆者らはこれまでの研究において、引張と圧縮の変形を繰り返す際に、元々の結晶構造(原子の並び方の規則)から異なる結晶構造へ変化(相変態)することで変形が生じ、変形方向が反転すると結晶構造が元に戻る、可逆的な変形メカニズムが存在することを見出した³⁾。上述したFMS合金は、このような可逆的な変形メカニズムを発現させるように開発された新鋼材であり、図-1に示される通り、一般鋼材に対して卓越した低サイクル疲労耐久性を実現して

いる。FMS合金の設計においては、変形に伴って生じる結晶構造の変化が、元々の相と変形により生じる相のいずれか一方に偏ることなく、変形方向の反転に際して各相を互に行き来しやすい状態となるよう、二相間の熱力学的安定度のバランスに着目して化学成分を調整している。

3.FMS合金の溶接割れを抑制する材料設計

図-1に示したFMS合金のうち、青色で示されているものはFe-15Mn-10Cr-8Ni-4Si(質量%)の公称組成を有する。本稿ではこれを第一世代FMS合金と呼ぶ。本合金を心材として用いる長周期地震動対策としての鋼材ダンパーは、2015年に名古屋市のJPタワー名古屋において始めて実装された⁴⁾。これを皮切りに、いくつかの高層建築あるいは大型展示場などで用いられるなど、長周期地震動対策に貢献してきている。

一方で、Mnを多量に含む鋼材は溶接条件が厳しくなる場合が多く、凝固割れを生じる恐れがある。凝固割れの生じやすさ(凝固割れ感受性)は、凝固過程における相変態挙動、すなわち凝固モードに強く依存する⁵⁾。溶接金属の凝固過程において、凝固が開始される際に初めて晶出する相と、その後の相変態挙動が適切に制御され、凝固末期における液相の連続性や溶質元素の過度な偏析を生じにくいような凝固モードとすることが、凝固割れ感受性の低減において重要となる。また、そのような凝固モードを生じる化学成分を選ぶことが、ここでの溶接性に配慮した材料設計の基本的な考え方である。

第一世代FMS合金の開発においては、母材の組成は必ずしも凝固割れ感受性が

考慮されてはいなかった。ただし、専用の溶接ワイヤ(母材とは異なる組成である)を新規に開発し、母材とワイヤが溶け合って形成される溶接組織を適切に制御することにより、溶接施工による実構造物への適用を可能としてきた。このように、第一世代FMS合金は、優れた低サイクル疲労耐久性を実現するとともに、溶接材料の工夫によって実用上の課題を克服し、長周期地震動対策技術としての有効性を示してきた材料である。

一方で、FMS合金の長周期地震動対策としての活用をさらに推進し、より幅広い構造形式や施工条件への汎用的適用を可能とするためには、低サイクル疲労耐久性を担保する変形メカニズムを維持しつつ、同時に溶接時の凝固割れ感受性を低減する材料設計を行い、母材自体を溶接に適した成分値として完成させることが不可欠であった。

そのような考えに基づいて開発したのが、第二世代FMS合金であるFe-15Mn-11Cr-7.5Ni-4Si(質量%)である⁵⁾。第一世代と比較して、Crを微増させ、Niを微減させることにより、適切な凝固モードが発現するように成分設計を行っている。図-2は、第一世代FMS合金と第二世代FMS合金の溶接継手部の観察像である。第一世代FMS合金では凝固割れが認められるのに対し、第二世代FMS合金では割れは観察されない。上述したように、第一世代FMS合金においても溶接条件を工夫することで割れを生じさせずに溶接施工が可能であるが、第二世代FMS合金では、材料設計の段階から凝固割れ感受性が低減できていることがわかる。さらに、図-1に赤色で示すように、第二世代FMS合金の疲労耐久性は第一世代と同等のレベルを保持している²⁾。

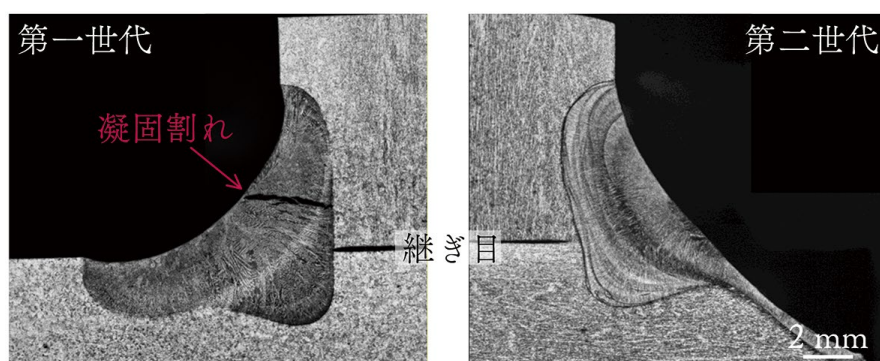


図-2 FMS合金の溶接継手

4. 第二世代 FMS 合金の疲労特性

本章では新たに開発した第二世代 FMS 合金の疲労特性について述べる²⁾。

疲労特性について説明する前に、第二世代 FMS 合金の引張特性について表-1 にまとめる。また、図-3 に応力とひずみの関係を示す。第二世代 FMS 合金は、オーステナイト鋼に大別され、降伏点 (0.2%耐力) は低いが、大きく加工硬化する材料である。延性に富み、破断伸びは 70%程度まで達する。

図-4 は、第二世代 FMS 合金の疲労寿命が、一般鋼材に対して各ひずみレベルでどの程度向上しているかを寿命比とし

て示したものである。ここでは、図-1 に示した一般鋼材の ε - N 関係の近似曲線 (図中の実線) から求めた寿命を基準としている。図-4 に示す通り、第二世代 FMS 合金はひずみレベルが大きいくほど一般鋼材に対する寿命比が大きくなり、例えば全ひずみ振幅が 1% では 11 倍、2% では 20 倍もの耐久性が得られている。

第1章で述べた通り、鋼材ダンパーは弾塑性変形履歴によるエネルギーの吸収と散逸により、地震の揺れを減衰させる。すなわち、鋼材のエネルギー吸収能力は各サイクルにおける応力とひずみの関係を表す、ヒステリシスループにより理解できる。図-5 (a) は、各ひずみレベル

において、寿命の半分のサイクル数におけるヒステリシスループである。いずれのひずみレベルにおいても紡錘形のループを描いており、安定したエネルギー吸収性能を有することがわかる。また、図-5 (b) は、全ひずみ振幅 1% における、各繰返し数におけるヒステリシスループである。同図の通り、破断の直前を除き、紡錘形のループが継続的に得られており、第二世代 FMS 合金は、その長寿命にわたり優れたエネルギー吸収性能を維持できることを示している。

図-5 (b) をよく見てみると、各サイクルにおける最大 / 最小応力は繰返し数の増加に伴い大きくなっている。すなわち、硬化している。このように、金属材料は繰返し弾塑性変形を生じると、繰返し数に伴い硬化 (あるいは軟化) する。これを、繰返し硬化・軟化と呼ぶ。繰返し硬化・軟化挙動は部材の発生応力に影響するから、設計上、重要な疲労挙動で

表-1 第二世代 FMS 合金の引張特性

ヤング率	0.2%耐力	引張強さ	全伸び	一様伸び	絞り
187 GPa	260 MPa	717 MPa	69.6%	61.3%	68.3%

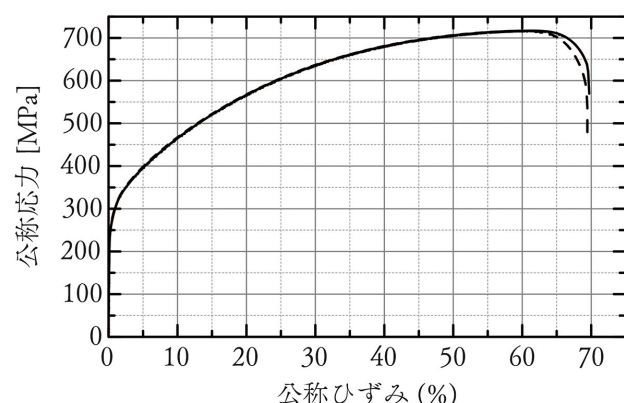


図-3 第二世代 FMS 合金の応力-ひずみ曲線

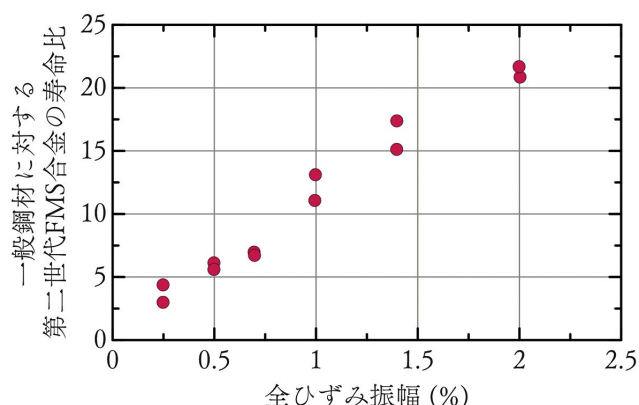


図-4 一般鋼材に対する第二世代 FMS 合金の疲労寿命比

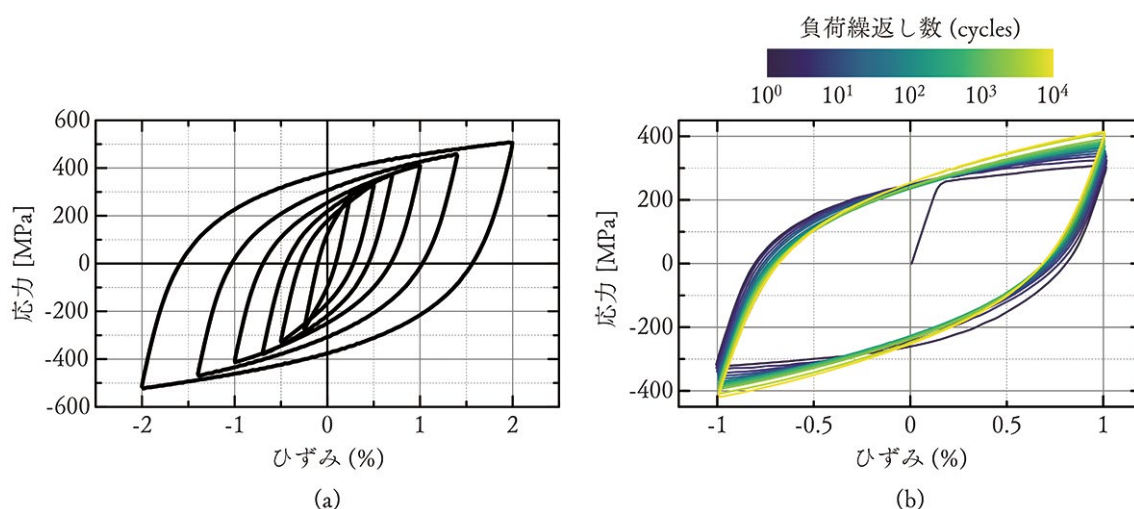
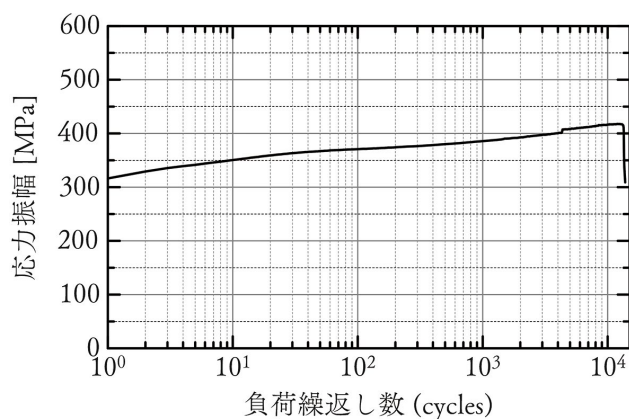
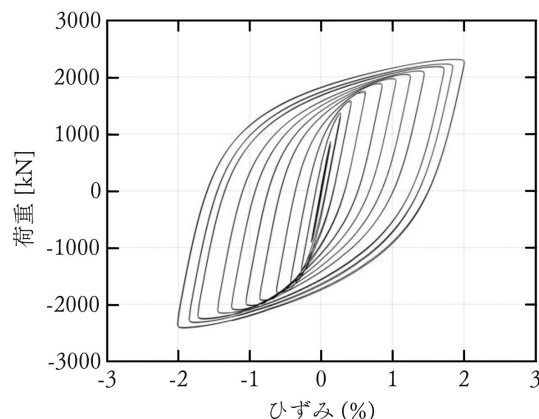


図-5 第二世代 FMS 合金のヒステリシスループ: (a) 疲労寿命の半分の繰返し数における各ひずみレベルでのヒステリシスループ、(b) 全ひずみ振幅 1% における各繰返し数でのヒステリシスループ



図－6 全ひずみ振幅 1 %における第二世代FMS合金の繰返し硬化曲線



図－7 第二世代FMS合金ブレース縮小試験体における漸増載荷試験結果

ある。図－6に全ひずみ振幅 1 %における、繰返し数と応力振幅の関係を示す。同図の通り、極初期のみ著しい硬化が生じ、それ以降は破断まで緩やかに硬化する傾向が認められた。このような、繰返し硬化が飽和せず、極めて緩やかに硬化し続ける挙動は第一世代 FMS 合金と共通した傾向である。なお、繰返し硬化挙動の微視的メカニズムについては、変形により生じる相変態との関係を既報²⁾において指摘している。少し内容に触れると、前述した通り FMS 合金は可逆的な相変態を生じるように設計されているが、実際には、変形相は完全には元に戻らず、少しずつ残留する。変形相は元々の相を分断するように形成され、平均粒径を低下させる。このような繰返し変形に伴う組織の微細化が硬化を生じると提案している。

ここまでは、第二世代 FMS 合金の素材としての疲労特性について紹介してきた。一方、これまでに第二世代 FMS 合金に対して溶接を行い、溶接金属の疲労特性についても調査を行っている⁶⁾。前述した通り、第一世代 FMS 合金では、母材の組成のままでは凝固割れの懸念があるため、溶接組織の組成を凝固割れが生じにくい範囲に入れるために、母材とは異なる組成のワイヤを用いて溶接を行っていた。一方、第二世代 FMS 合金は、母材の組成自体が凝固割れ感受性を低減するように設計されたものであり、母材と同じ組成を有するワイヤによる施工が可能である。この場合、理想的には溶接金属も母材、ワイヤと同じ組成となる。

このようにして形成される溶接金属が、優れた疲労特性を発揮できるかを検証するために、第二世代 FMS 合金に対し同一

組成の溶接ワイヤを用いた隅肉溶接を行い、溶接部から切出した試料に対して全ひずみ振幅 1 %における疲労試験を実施した。その結果、母材の疲労寿命は 9,351 サイクル、溶接金属の疲労寿命は 5,740 サイクルとなった。なお、母材の疲労寿命が図－1に示したものとやや異なるのは、溶接部の幾何学的制約により、採取できた疲労試験片が小型になったことが影響していると考えられる。ここで、母材は試験片採取前に熱処理を行っているために低角粒界の割合が低かったのに対して、溶接金属については溶接ままの組織であるために、低角粒界の割合が高かった。このような、組織学的な条件の違いが、溶接金属における疲労寿命の低下を招いた可能性がある。しかしながら、母材にはやや届かないとはいえ、溶接金属においても依然として高い水準の疲労耐久性を得られることが確かめられた。

5. 第二世代 FMS 合金ブレースダンパー

4章では素材あるいは溶接金属の疲労特性について紹介した。本章では、実際に第二世代 FMS 合金を用いて作製した、溶接組立て制振ブレースの性能評価結果について述べる^{7～10)}。

制振ブレースの作製には長板が必要となることから、母材を連続铸造プロセスにより第二世代 FMS 合金を製造した。また、溶接ワイヤには、前述した溶接金属に関する疲労試験と同様に、母材と同じ組成のものを用いた。試験体の断面形状は H 形とし、MIG 溶接により組み立てた。疲労試験は、縮小試験体（次の実大ブレースに対して断面積比で約 7 割としたもの）と実大試験体に対して行った。縮小

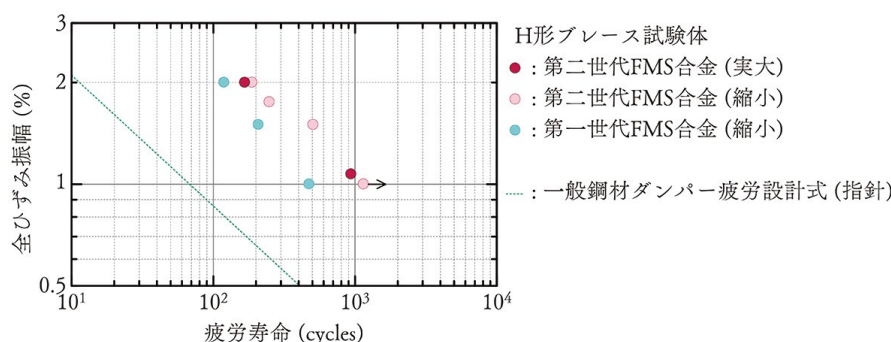
試験体により疲労寿命曲線（ ϵ -N 曲線）を取得し、実大試験体に対する試験により縮小試験体によって得られたデータの妥当性を検証した。なお、実大ブレースの試験には極めて大きな載荷能力が求められたため、カリフォルニア大学サンディエゴ校の動的加力装置（Seismic Response Modification Device:SRMD）を用いた。

はじめに、縮小試験体に関する試験結果について述べる。

まずは、繰返し変形応答を確認するために、全ひずみ振幅を 0.1 % から 2 % まで漸増させる試験（漸増載荷試験）を行った。各ひずみ振幅における繰返し回数は 3 回とした。得られた荷重とひずみの関係は図－7の通りである。図－5で母材に関して示したヒステリシスループと同様に、紡錘形の安定した応答が見られた。

次に、疲労寿命の測定結果を図－8に示す。同図には、比較対象として、第一世代 FMS 合金を用いて作製された、縮小試験体の結果も併せて示されている（水色）。また、「鋼構造制振設計指針¹¹⁾」で示される一般鋼材を用いた制振ブレースの平均的な寿命特性を破線で示している。図－8に示される通り、第二世代 FMS 合金ブレース（桃色）は、一般鋼材に対し明らかに長寿命であり、さらに、第一世代 FMS 合金ブレースよりも優れた耐久性を示した。例えば、全ひずみ振幅 1 % において比較すると、一般鋼材ブレースの疲労寿命が 69 回、第一世代 FMS 合金ブレースが 475 回であるのに対して、第二世代 FMS 合金ブレースは 1,150 回以上（未破断のまま試験打ち切り）の疲労寿命を有する。

次に、縮小試験体の結果を受け、実大



図－8 第二世代FMS合金ブレースの疲労寿命

ブレースに対する試験結果について述べる。

実大ブレースは試験を実施できる機会（SRMDの使用可能時間）が限られていたことから、図－7と同様の漸増載荷試験と、全ひずみ振幅1%および2%における疲労試験のみを実施した。漸増載荷試験の結果については、図－7の縮小試験体と類似した紡錘形の安定した応答が得られたことのみを述べて省略する。疲労寿命の測定結果は、図－8に赤色で他のブレースの結果と併せて示した。同図に示される通り、全ひずみ振幅が2%の場合には、縮小試験体と同等の結果が得られており、1%の場合には、縮小試験体が未破断であるため直接的な比較はできないものの、概ね8割以上の耐久性を示している。このことから、縮小試験体の結果に対して適切な安全率を設定することで、実大ブレースの信頼性を十分確保することができることが確認された。

以上のように、第二世代FMS合金は、ブレース形状においても安定したエネルギー吸収性能を有し、卓越した疲労耐久性が得られることが確かめられた。また、実大ブレースに対しては別途、地震応答を想定したランダム波入力試験も実施しており、複数回の大規模な長周期地震動に対しても、エネルギー吸収性能を保持し続け、十分な疲労耐久性を有することを併せて確認している。

6. おわりに

本稿では、長周期地震動に対応可能な鋼材ダンパーを実現するFMS合金の材料設計の考え方と、溶接性を考慮した第二世代FMS合金の開発とその疲労特性、そして、実構造部材レベルでの性能検証結果を紹介した。

第二世代FMS合金は、変形および凝固

プロセスの双方に着目した材料設計により、低サイクル疲労への耐久性と溶接適合性という、鋼材ダンパーに重要な要件を同時に満足する材料である。特に、微視的メカニズムの制御を通じて実大ブレースの性能を大きく向上させることを示した点は、一見、スケールの隔たりのある材料設計と構造部材の性能との密接な関係を示すものとして重要である。

東日本大震災を契機に、長周期地震動の問題が広く認識されるようになり、以降、長周期地震動階級の設定や、最近では緊急地震速報の発表基準にも加えられるなど、制度の整備が進められている。技術面においては、FMS合金の開発は鋼材ダンパーを長周期地震動へ対応可能な建築技術へと展開させた。そして、第二世代FMS合金の開発により溶接施工性の問題が改善され、より汎用性の高い技術として前進しつつある。第二世代FMS合金の社会実装に向けては、材料生産体制の構築をはじめ、実務的に解決しなければならない課題が残されているが、本稿で示した材料設計指針や特性評価結果、実大レベルでの検証結果は、実用化へ向けた重要な技術基盤である。

FMS合金は建築物への適用を考えて開発された材料であるが、鋼構造系インフラ等、幅広い適用可能性を秘めた高性能鋼材である。いわば、溶接部において優れた疲労耐久性を実現する本材料技術が、建築や土木、その他さまざまな分野で顕在化する溶接部の疲労という致命的な問題を解決する手がかりとなることを期待している。その第一歩としても、まずは制振ブレースとしての本材料の適用を着実に進め、その有効性をさらに明確にしていきたい。併せて、材料科学的観点からの金属疲労メカニズムの理解の深化にも継続的に取り組む。

【参考文献】

- 1) 疲労データシート：
<https://fds.nims.go.jp/>
物質・材料研究機構(NIMS)、2025年5月28日アクセス
- 2) F. Yoshinaka, T. Sawaguchi, T. Nagira, S. Takamori, S. Emura, and Y. Inoue, Low cycle fatigue and microstructures of Fe-15Mn-11Cr-7.5Ni-4Si alloy, Materials Science and Engineering: A, 949 (2026) 149457.
- 3) T. Sawaguchi, Y. Tomota, F. Yoshinaka, and S. Harjo, Evidence supporting reversible martensitic transformation under cyclic loading on Fe-Mn-Si-Al alloys using in situ neutron diffraction, Acta Materialia, 242 (2023) 118494.
- 4) Y. Inoue, A. Kushibe, K. Umemura, Y. Mizushima, T. Sawaguchi, T. Nakamura, H. Otsuka, and Y. Chiba, Fatigue-resistant Fe-Mn-Si-based alloy seismic dampers to counteract long-period ground motion, Japan Architectural Review, 4(2020)76-87.
- 5) F. Yoshinaka, T. Sawaguchi, S. Takamori, T. Nakamura, G. Arakane, Y. Inoue, S. Motomura, and A. Kushibe, Development of ferrous-based weldable seismic damping alloy with prolonged plastic fatigue life, Scripta Materialia, 197 (2021) 113815.
- 6) T. Nagira, T. Nakamura, F. Yoshinaka, T. Sawaguchi, and Y. Inoue, Microstructure and mechanical properties of gas arc-welded Fe-Mn-Si seismic damping alloy, ISIJ International, 64(2024) 1705-15.
- 7) 井上泰彦、本村達、櫛部淳道、梅村建次、柳樂知也、吉中奎貴、新組成FMS合金を用いた溶接組立制振ブレースの性能評価 その1 材料特性評価、日本建築学会大会学術講演集 (2025).
- 8) 本村達、佐藤恭章、井上泰彦、櫛部淳道、梅村建次、柳樂知也、吉中奎貴、新組成FMS合金を用いた溶接組立制振ブレースの性能評価 その2 溶接組立部材を用いた低サイクル疲労試験、日本建築学会大会学術講演集 (2025).
- 9) 佐藤恭章、井上泰彦、本村達、櫛部淳道、梅村建次、柳樂知也、吉中奎貴、新組成FMS合金を用いた溶接組立制振ブレースの性能評価 その3 実大ブレースの低サイクル疲労試験、日本建築学会大会学術講演集 (2025).
- 10) 梅村建次、井上泰彦、渡井一樹、佐藤恭章、本村達、櫛部淳道、柳樂知也、吉中奎貴、新組成FMS合金を用いた溶接組立制振ブレースの性能評価 その4 実大ブレースの地震応答試験、日本建築学会大会学術講演集 (2025).
- 11) 日本建築学会、鋼構造制振設計指針、(2014).