

# 低サイクル疲労特性に優れた Fe-Mn-Si 系合金の製造技術開発と建築用制振ダンパーへの応用

千葉悠矢<sup>\*1)</sup> 大塚広明<sup>\*2)</sup> 天野 智<sup>\*1)</sup> 犬塚純平<sup>\*2)</sup>  
 岩崎祐二<sup>\*3)</sup> 井上泰彦<sup>\*1)\*\*</sup> 本村 達<sup>\*2)\*\*</sup> 櫛部淳道<sup>\*3)\*\*</sup>  
 澤口孝宏<sup>\*1)\*\*\*</sup> 中村照美<sup>\*2)\*\*\*</sup>

## 1. 背景・開発の経緯

地震頻発国の日本では地震に対する備えが重要なことは言うまでもない。建物の地震対策として地震時の変形を集中的に受けることで主要構造物の損傷を抑える制振ダンパー、中でもコスト・耐荷重・生産性の観点から鋼材系制振ダンパーが多く使われているが、2011年の東日本大震災では、震源地から離れた首都圏の超高層ビルで長周期地震動が続き、2016年の熊本地震では震度7の地震の翌日同震度の余震が起るなど、繰返し弾塑性変形に対する耐久性(耐低サイクル疲労特性)に優れた鋼材ダンパーの要求度が高まっている。

著者らは Fe-Mn-Si 系形状記憶合金の変形誘起マルテンサイトの可逆変態を利用し、低サイクル疲労寿命を従来鋼よりも10倍以上に飛躍的に高めた Fe-15Mn-10Cr-8Ni-4Si 合金(mass%, 以降 FMS 合金)を開発<sup>(1)</sup>、2014年、特殊鋼の製造設備で溶製、圧延した本合金を芯材に用いた溶接構造のないせん断パネル型鋼材ダンパーを J P タワー名古屋に適用した<sup>(2)</sup>。しかし同設備による製造は 10 t と小規模であり、また広幅の圧延板を製造することが困難であったため、より低コストで量産でき広幅の圧延が可能な製造方法として、ステンレス鋼の連続製造設備と厚板製造設備を用いた製造体制

の確立が必要であった。また、制振装置として最も汎用的な座屈拘束ブレースダンパー(塑性化部の断面が平型、および十字型)を製造するため、建築構造用鋼材との溶接、FMS 合金同士の溶接を可能とする溶接材料および溶接技術の開発、さらに建築分野における普及のためには、同合金板の国土交通大臣認定(基準強度 270 N/mm<sup>2</sup>)を取得することが必須であった。

## 2. 連続製造からの FMS 合金圧延板の製造

FMS 合金は Cr 量が 10 mass% と多く、ステンレス鋼に近いが、Mn と Si を同時に多量に含む鋼種はないため、連続製造可否判断のため、一旦溶融させ凝固した際の強度・延性を調べた。その結果、製造時の引抜きに十分耐え得ると判断し、60 t のステンレス鋼連続製造設備で溶解・铸造を行い、厚さ 8~34 mm × 幅 1400~1600 mm × 長さ 6~10 m の圧延板を JIS G 4304 の板厚基準内で製造することに成功した(図 1, 2)。表 1 に代表的な圧延板の機械的特性、シャルビ



図 1 FMS 合金連続製造スラブ。厚さ 140 mm × 幅約 1300 mm × 長さ約 10 m  
 図 2 FMS 合金圧延板。厚さ 22 mm × 幅 1600 mm × 長さ約 10 m

表 1 連続製造プロセスで製造した FMS 合金圧延材の各種特性。

板厚(試験片)	0.2%耐力 N/mm <sup>2</sup>	引張強さ N/mm <sup>2</sup>	伸び	シャルビー 吸収エネルギー(0°C)	疲労寿命 (ひずみ振幅±1.0%)
8 mm (JIS 5号)	295	655	67 %	143 J (サブサイズ)	13,780 cycles
12 mm (JIS 5号)	284	671	66 %	354 J	13,344 cycles
16 mm (JIS 5号)	283	678	67 %	386 J	14,230 cycles
23 mm (JIS 1A号)	285	661	54 %	371 J	12,556 cycles
28 mm (JIS 1A号)	290	673	60 %	354 J	12,039 cycles
34 mm (JIS 1A号)	289	652	58 %	347 J	11,670 cycles

\* 淡路マテリア株式会社：1)課長，2)部長

\*\* 日鉄ステンレス株式会社：1)主幹，2)主幹，3)主幹研究員

\*\*\* 株式会社竹中工務店：1)主任研究員，2)研究主任，3)研究部長

\*\*\*\* 国立研究開発法人物質・材料研究機構：1)グループリーダー，2)ステーション長(現財団法人日本溶接協会)

Development of Fe-Mn-Si Alloy Manufacturing Technology with Excellent Low Cycle Fatigue Characteristics and Application to Vibration Damping Dampers for Construction; Yuya Chiba\*, Hiroaki Otsuka\*, Satoshi Amano\*\*, Junpei Inutsuka\*\*, Yuuji Iwasaki\*\*, Yasuhiko Inoue\*\*\*, Susumu Motomura\*\*\*, Atsumichi Kushibe\*\*\*, Takahiro Sawaguchi\*\*\*\* and Terumi Nakamura\*\*\*\* (\*Awaji Materia Co., Ltd., \*\*Nippon Steel Stainless Steel Corp., \*\*\*Takenaka Corp., \*\*\*\*NIMS.)

2023年9月27日受理[doi:10.2320/materia.63.60]

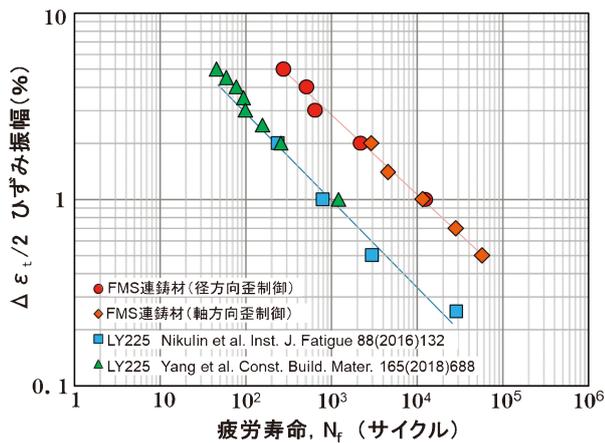


図3 FMS合金圧延板の低サイクル疲労寿命(LY225と比較)。

一吸収エネルギー、ひずみ振幅 $\pm 1.0\%$ の低サイクル疲労寿命の一例を示す<sup>(3)</sup>。

本方法で製造した厚さ8~34mmのFMS合金圧延板全13枚21か所のひずみ振幅 $\pm 1.0\%$ の引張圧縮試験での低サイクル疲労寿命は10,730~17,711回(平均13,556回)であり、小量溶解(数十kg)で製造した同合金と同等の疲労寿命を有する。

同設備で製造した厚さ23mmの圧延板でひずみ量 $\pm 0.5\sim\pm 5.0\%$ までの低サイクル疲労試験を行った。高ひずみ側( $\pm 2.0\sim\pm 5.0\%$ )では試験片が座屈しないように砂時計型試験片を用いて径方向ひずみ制御で行い、低ひずみ側( $\pm 0.5\sim\pm 2.0\%$ )では丸棒試験片を用いて軸方向ひずみ制御で行った。ひずみ振幅を $\Delta\epsilon_t/2$ 、寿命を $N_f$ とし両対数でプロットすると直線になり、従来材のLY225(低降伏点鋼)、FMS合金いずれもManson-Coffin則が成り立つ。FMS合金は、 $\pm 5.0\%$ の高ひずみまでLY225に比べ約10倍の疲労寿命が得られた(図3)。

機械的特性については、これまで製造した59枚の圧延板を調査した結果、L方向の0.2%耐力の平均値は286MPa、各データは規格値内ではほぼ $\pm 3\sigma$ の範囲に正規分布し、安定した機械特性値を有する圧延板の製造が出来、指定建築材料としての国土交通大臣認定取得に必要な工業製品として安定な品質の製品を製造できることを確認した。引張強さ、シャルピー吸収エネルギーについても同様であった。

### 3. 溶接技術の開発とダンパー製造

制振装置として最も汎用的な座屈拘束ブレースダンパーには、塑性化部(FMS合金芯材)の断面が平型と十字型のものがある。それぞれの設計例を図4<sup>(4)</sup>、図5<sup>(5)</sup>に示す。いずれのブレースも、芯材(FMS合金)は塑性化部(中央平行部)と両端の接合部(拡幅部)から成る。平型断面ブレースの場合、建物との接合部には建築構造用鋼材(SN490B)のリブを隅肉溶接する。一方、十字型断面ブレースでは芯材(FMS合金)同士を隅肉溶接する必要があり、塑性化部は、芯材と同様の疲労耐久性が必要なため、溶接部もFMS合金と同様の疲労耐久性が求められる。

著者らはFMS合金と一般鋼材、FMS合金同士それぞれ

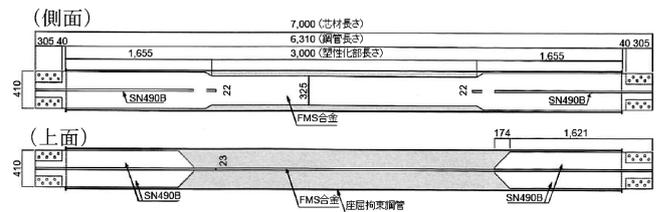


図4 平型断面ブレース型制振ダンパー設計例<sup>(4)</sup>。

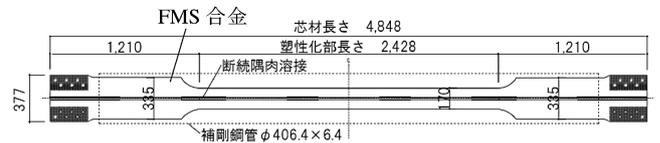


図5 十字型断面ブレース型制振ダンパー設計例<sup>(5)</sup>。

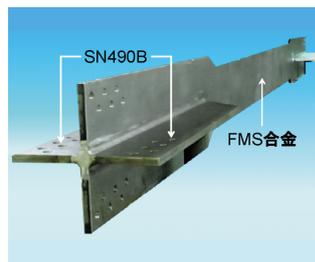


図6 平型断面ブレース芯材。

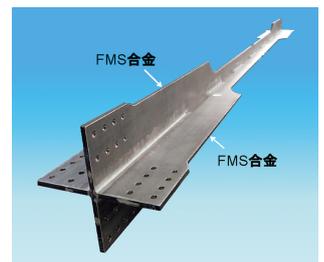


図7 十字型断面ブレース芯材。

の溶接に適した溶接材料および溶接技術を開発した<sup>(6)</sup>。前者は接合部としての強度が、後者は塑性変形に追従すること、かつ両者とも溶接金属が高温割れを起こさないことが求められる。前者については、溶接金属の凝固モードがFAモード(初相フェライトが晶出した後共包晶反応でオーステナイトが晶出、フェライト+オーステナイト2相で凝固完了)となるような成分の溶接材料である。後者については、凝固はAモードながら、溶接条件の最適化により高温割れを抑制することに成功し、おのおの図6(平型断面)および図7(十字型断面)に示すダンパー芯材を製造することが可能となった。

### 4. ブレースダンパー実大加力試験

図4に示す平型断面ブレースダンパーの繰返し加力試験を最大荷重容量3,000kN級の軸載荷装置を用いてひずみ振幅 $\pm 0.5\%$ における低サイクル疲労試験を実施し、疲労耐久性を確認した。試験は、既存の鋼材系ブレースの疲労寿命の約2倍となる繰返し数1,000サイクルを上限に、荷重速度は最大1mm/sec程度で実施した。繰返しによる最大荷重の変化は図8に示すように非常に緩やかで、1,000サイクルまでほぼ発生荷重が変化せず、優れた疲労耐久性および発生荷重の安定性を有することを確認した<sup>(4)(7)</sup>。

次に図5に示す十字型断面ブレースダンパーの繰返し加力試験を上記と同じ試験機でひずみ振幅 $\pm 1.5\%$ における低サイクル疲労試験を実施し、疲労耐久性を確認した。繰返しによる最大荷重の変化は図9に示す通りで、疲労寿命(荷重が最大荷重の80%まで低下した時点のサイクル数)は356回であり<sup>(5)</sup>、従来鋼材ブレースの平均値<sup>(7)</sup>の7倍以上であった。

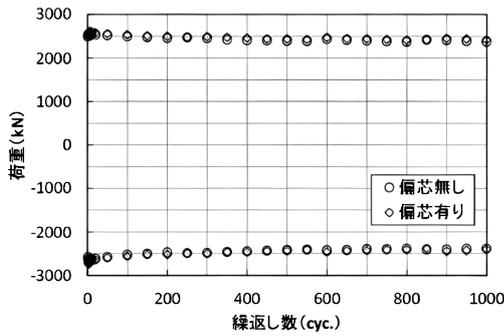


図8 繰返し数に対する最大・最小荷重の推移<sup>(4)</sup>。  
平型断面ダンパーひずみ振幅±0.5% (試験は1000  
回で終了)

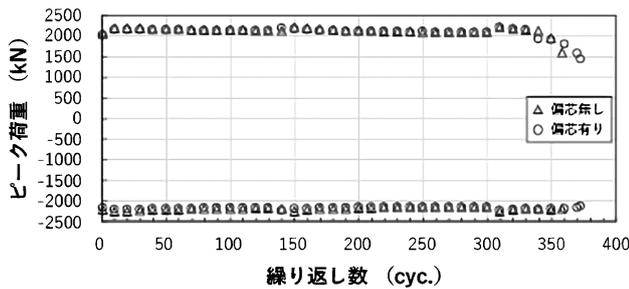


図9 繰返し数に対する最大・最小荷重の推移<sup>(5)</sup>。  
十字型断面ブレースダンパーひずみ振幅±1.5%



図10 愛知県国際展示場  
に実装された平型断面ブレース。



図11 中日ビルに実装された十  
字型断面ブレース。

## 5. 適用状況

接合部を建築構造用鋼と溶接した平型断面ブレースダンパー(芯材長さ約6m)は愛知県国際展示場(2019年竣工)に16基実装され(図10)<sup>(8)</sup>、FMS合金同士を溶接した十字型断面ブレースダンパー(芯材長さ5~6m)は中日ビル(2023年竣工)に32基が実装された(図11)。後者では、断面積増大により最大負荷荷重が増大し、従来鋼ダンパーを使用する場合に比べ設置数の低減にも寄与した<sup>(9)</sup>。

## 6. 材料認定, 特許, 新規開発状況

近年、適用件数増に伴い連続製造による製造実績が増えた

ため、本合金の一般材料認定の審査を申請し、2022年11月、建築基準法第37条2号指定建築材料として国土交通大臣認定を取得した(MSTL-0584, 基準値270 N/mm<sup>2</sup>)。特許については、国内第6182725号, 第6887642号, 欧州EP2940175, 韓国10-2144708が登録されている。また、本合金を使用したレンズダンパー<sup>®</sup>については日本ERI<sup>株</sup>により構造性能評価書が発行され(ERI-K21006)<sup>(10)</sup>、さらに、砂時計型<sup>(11)</sup>、H形<sup>(12)</sup>、U形<sup>(13)</sup>等様々な形状の制振ダンパーの性能試験が行われるなど本合金を用いたダンパーの開発が活発に行われている。

## 7. まとめ, 将来展望

金属材料の低サイクル疲労寿命が従来材の10倍になるという特筆すべきFMS合金を長周期地震動や巨大地震に対応した制振ダンパーとして世の中に普及させるべく、著者らは、同厚板の量産製造技術、普通鋼との溶接技術、およびFMS合金同士の溶接技術を確立し、さらに同厚板の国土交通大臣認定を取得した。これにより、建築事業者、設計者は、FMS合金を用いたせん断パネル型、ブレース型等、様々な形状の制振ダンパーを選択できるようになった。今後は超高層ビルの大型ブレースダンパーだけでなく、中低層ビルやマンション向け、一般住宅向けパネルダンパー等への普及が期待でき、さらに、土木・橋梁や他産業向けにも活用展開が期待される。

## 文 献

- (1) T. Sawaguchi, I. Nikulin, K. Ogawa, K. Sekido, S. Takamori, T. Maruyama, Y. Chiba, A. Kushibe, Y. Inoue and K. Tsuzaki: *Scr. Mater.*, **99**(2015), 49-52.
- (2) T. Sawaguchi, T. Maruyama, H. Otsuka, A. Kushibe, Y. Inoue and K. Tsuzaki: *Mater. Trans.*, **57**(2016), 283-293.
- (3) 大塚広明, 千葉悠矢, 澤口孝宏, 高森 晋, 櫛部淳道, 梅村建次, 井上泰彦: 日本金属学会秋期講演大会(2018), J76.
- (4) 梅村建次, 櫛部淳道, 井上泰彦, 水島靖典, 大塚広明, 千葉悠矢, 中村照美, 澤口孝宏: 日本建築学会梗概集(2018), 731-732.
- (5) 大須賀史朗, 河登健太郎, 櫛部淳道, 井上泰彦, 本村 達, 石田高義, 鶴ヶ野翔平, 梅村建次: 日本建築学会梗概集(2020), 943-944.
- (6) 中村照美, 澤口孝宏: 日本建築学会構造工学論文集, **67B**(2021), 633-641.
- (7) 日本建築学会, 鋼構造制振設計指針(2014), 37-38.
- (8) 櫛部淳道, 井上泰彦, 梅村建次, 中村照美, 澤口孝宏, 大塚広明, 千葉悠矢: 溶接技術, **2**(2020), 60-66.
- (9) 竹中工務店プレスリリース(2023.9.26).
- (10) レンズダンパー推進協議会プレスリリース(2022.9.2).
- (11) 飯田智裕, 木下貴博, 井上泰彦, 花井厚周, 黒川雄太, 本村達, 曾根孝行, 山本雅史: 日本建築学会梗概集(2021), 21262.
- (12) 井上泰彦, 河登健太郎, 吉野翔太, 本村 達, 梅村建次, 櫛部淳道: 日本建築学会梗概集(2023), 21158.
- (13) 坂本啓太, 阿部隆英, 久保田雅春: 日本建築学会梗概集(2023), 21160.