

# FMS 合金を用いたレンズダンパーの開発

## Development of Lens Shear Panel Damper Using Fe-Mn-Si-Based Alloy

川瀬 晶子<sup>※1</sup>  
Shouko Kawase

久保田 雅春<sup>※1</sup>  
Masaharu Kubota

山崎 信宏<sup>※2</sup>  
Nobuhiro Yamazaki

波田 雅也<sup>※3</sup>  
Masaya Hada

諸沢 柁治<sup>※3</sup>  
Masaharu Morosawa

石渡 康弘<sup>※4</sup>  
Yasuhiro Ishiwata

山崎 康雄<sup>※5</sup>  
Yasuo Yamasaki

### 【要旨】

レンズダンパー（以下、LSPD）はパネル型の制震ダンパーであり、凹レンズ形状の切削加工によりパネル全体にひずみが分散されるため、繰り返しの変形に強く、エネルギー吸収性能が高い。

筆者らは、LSPD の更なるエネルギー吸収性能の向上を目的として、疲労特性に優れるとされる Fe-Mn-Si 系合金（以下、FMS 合金）を LSPD に適用するために加力実験を行った。実験結果から材料特性に合わせた最適な凹レンズ形状を選定して、LSPD のエネルギー吸収性能の評価手法を構築し、「LSPD 設計・製作マニュアル」にまとめて、(株)日本 ERI にて構造性能評価を取得した。

本報では、FMS 合金を用いた LSPD の加力実験結果およびエネルギー吸収性能の評価手法について報告する。

【キーワード】 レンズダンパー FMS 合金 エネルギー吸収性能 平均累積塑性変形倍率 せん断ひずみ

### 1. はじめに

LSPD は、地震時の建物の応答変形を抑制し、建物の被害を軽減させるために、LSPD 推進協議会の 5 社（当社、青木あすなろ建設(株)、(株)ダット、鉄建建設(株)、西松建設(株)）が共同開発したパネル型の制震ダンパーである。LSPD の中央に凹レンズ状の切削加工を施すことで、パネル全体にひずみを分散させ、エネルギー吸収性能を高めている。

現在製品化されている LSPD は、高い変形性能をもつ建築構造用低降伏点鋼材 LY225 を用いており、2022 年 8 月末時点で新築および耐震補強の鉄骨造建物 10 件で採用されている。

### 2. 開発の背景および目的

LSPD は、地震力を受け塑性変形を生じることによって地震エネルギーを吸収する。エネルギー吸収量が限界値を超えると、LSPD が所定の性能を発揮できなくなるため、LSPD の交換が必要となる。

建物の構造設計の際には、1 回の大地震（建物の供用期間中に一度遭遇する可能性のある程度の地震）に耐えられるよう LSPD の形状や基数を決定するケースが多い。しかしながら、2016 年の熊本地震では、最大震度 6 強および 7 の地震が複数回発生したことから、建物の安全性を確保

するためには、短期間で大地震が複数回発生するケースを考慮した対策が必要であると考えられる。

そこで、筆者らは LSPD の更なるエネルギー吸収性能の向上を目的として、FMS 合金を LSPD に適用するために加力実験を行った。実験結果から材料特性に合わせた最適な凹レンズ形状を選定し、LSPD のエネルギー吸収性能の評価手法を構築した。

### 3. FMS 合金の材料特性

FMS 合金は、鉄系形状記憶合金の一種で、変形性能が高いうえに、引張・圧縮の繰り返し変形時の性能劣化が少なく、疲労特性に優れるとされる<sup>1), 2)</sup>など。

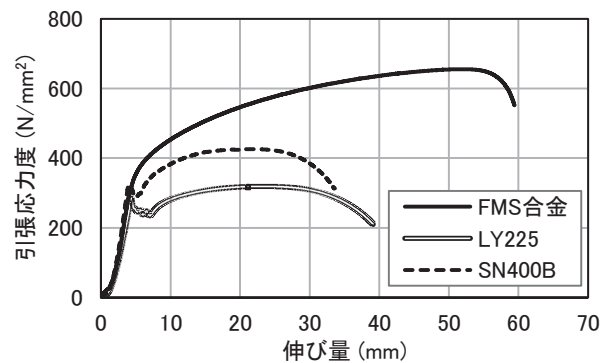


図-1 材料引張試験結果

1. 技術研究所 研究開発 G 第四研究室  
5. 西松建設株式会社

2. 日本 Casting 株式会社

3. 青木あすなろ建設株式会社

4. 鉄建建設株式会社

FMS合金の材料引張試験結果（応力度 - 変位関係）を図-1に示す。図中には、参考値としてLY225と建築構適用圧延鋼材SN400Bの引張試験結果を併せて示している。FMS合金はLY225やSN400Bと比較して荷重の上昇が大きい。また、破断までの伸び量は、LY225の40mmに対してFMS合金は60mmであり、1.5倍となっている。

#### 4. レンズダンパーの加力実験

##### 4.1 最適凹レンズ形状の選定

###### (1) 試験体および実験方法

FMS合金を用いたLSPDの最適な凹レンズ形状を選定するために加力実験を行った。試験体諸元を表-1、加力装置を図-2、試験体形状を図-3に示す。

試験体の板厚 (T) は 12mm とし、中央部板厚 (t) が 6, 7, 8, 10mm の 4 通りとなるよう凹レンズ形状を設定した。試験体名は T および t に応じて、type12-6, type12-7, type12-8, type12-10 とした。type12-12 は比較のために

表-1 試験体諸元

試験体名	板厚 T (mm)	中央部 板厚 t (mm)	設計 降伏荷重 Fy (kN)
type12-12	12	12	292
type12-10		10	265
type12-8		8	238
type12-7		7	224
type12-6		6	211

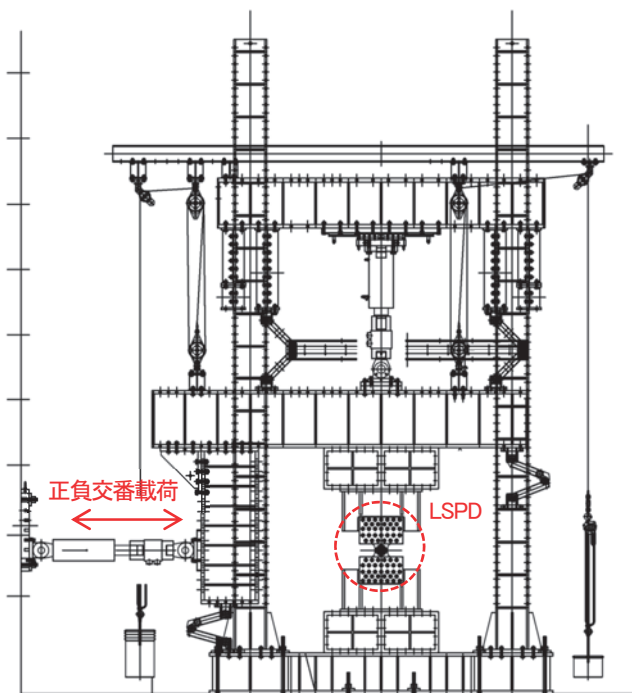


図-2 加力装置

作成した凹レンズ形状の無い試験体を表す。

その他の寸法は、LY225を用いた T=12mm, t=6mm の LSPD<sup>3)</sup> (以下、LY225\_type12-6) と同じく、凹レンズ形状の直径 (φ) =130mm, フィレット (R) =48mm, 有効幅 (b) =156mm, 有効せい (h) =156mm とした。

試験体の設計降伏荷重 (Fy) は、FMS合金の降伏耐力の下限值 270N/mm<sup>2</sup> を√3で除した降伏せん断応力度に、中央断面積を乗じて算出した値とした。

鉛直方向の制御は、荷重 0kN 一定とした。水平方向の制御は、変位制御の正負交番载荷 (一定振幅 20mm) とした。

###### (2) 実験結果

各試験体の最終破壊状況を写真-1に示す。type12-12, type12-10, type12-8 ではいずれも、フィレット部に生じた亀裂が進展して破断に至った。一方、type12-7, type12-6 では、中央部に生じた亀裂が進展して破断に至った。

各試験体の荷重-変形関係を図-4、最大荷重を表-2に示す。いずれの試験体も紡錘形の安定した履歴特性を持ち、tが小さいほど、最大荷重は小さな値となった。

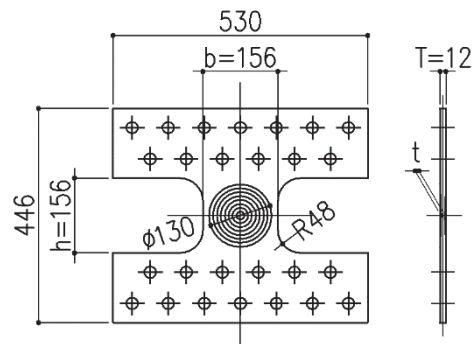
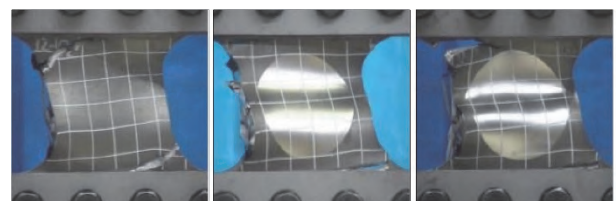
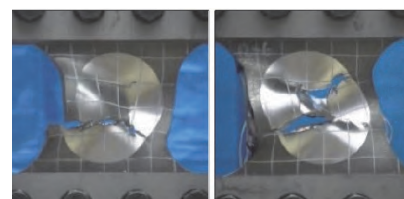


図-3 試験体形状



(a) type12-12 (b) type12-10 (c) type12-8



(d) type12-7 (e) type12-6

写真-1 最終破壊状況

### (3) 最適凹レンズ形状の検討

評価点に至るまでの平均累積塑性変形倍率 ( $\bar{\eta}$ ) を指標として、LSPD の最適凹レンズ形状を検討した。ここで、評価点は、1 サイクルの正負最大荷重が  $F_y$  まで低下した点と定義する。また、 $\bar{\eta}$  は、評価点に至るまでのエネルギー吸収量 ( $W$ ) の 1/2 を、 $F_y$  と設計降伏変位 ( $\delta_y$ ) の積で除すことで無次元化した値と定義する。 $\delta_y$  は  $F_y$  を一次剛性 ( $k_1$ ) で除した値とし、実験結果から  $k_1$  は 171kN/mm とした。

各試験体の  $\bar{\eta}$  を表-2 に示す。type12-8 の  $\bar{\eta}$  が 871 で最大となったことから、FMS 合金を用いた LSPD では、type12-8 の凹レンズ形状が最適であると判断した。

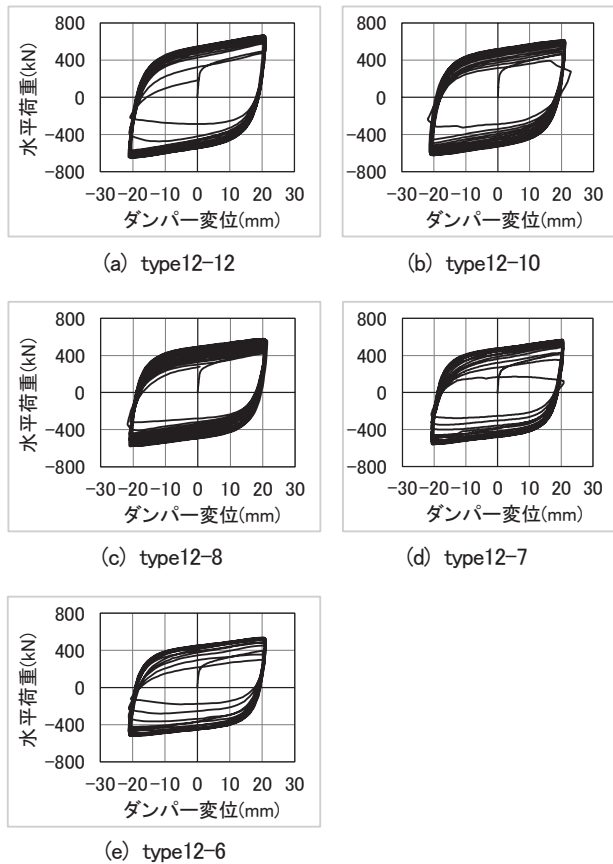


図-4 荷重-変形関係 (最適形状選定用)

表-2 平均累積塑性変形倍率 (最適形状選定用)

試験体名称	最大荷重 (kN)	サイクル数	エネルギー吸収量 $W$ (kN・m)	平均累積塑性変形倍率 $\bar{\eta}$
type12-12	668	15 (-)	526	527
type12-10	624	16 (-)	516	628
type12-8	582	20 (-)	577	871
type12-7	570	16 (+)	451	762
type12-6	540	13 (-)	360	691

### 4.2 エネルギー吸収性能の検討

#### (1) 累積塑性変形倍率の確認

type12-8 について、振幅ごとの  $\bar{\eta}$  を確認するために加力実験を行った。振幅は、5, 10, 20, 25, 30, 35mm の 6 通りとした。実験方法は、4.1 と同じとした。振幅ごとの荷重-変形関係を図-5、評価点に至るまでの  $\bar{\eta}$  を表-3 に示す。

#### (2) エネルギー吸収性能の評価

type12-8 のエネルギー吸収性能は、平均せん断ひずみ ( $\gamma$ ) と  $\bar{\eta}$  の関係を近似した回帰式である保有性能曲線により評価した。ここで、 $\gamma$  は振幅を  $h=156\text{mm}$  で除した値とする。

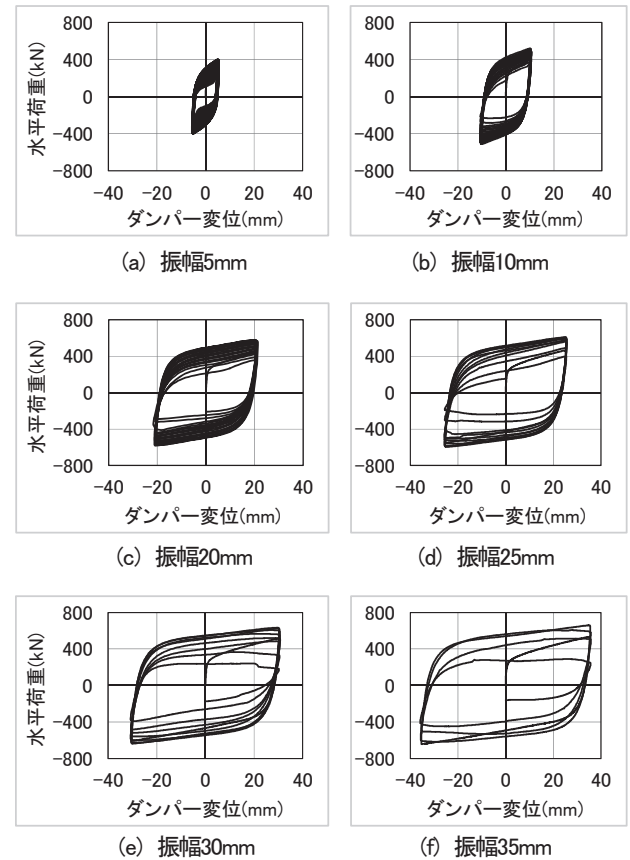


図-5 荷重-変形関係 (エネルギー吸収性能評価用)

表-3 平均累積塑性変形倍率 (エネルギー吸収性能評価用)

試験体名称	振幅 (mm)	サイクル数	エネルギー吸収量 $W$ (kN・m)	平均累積塑性変形倍率 $\bar{\eta}$
type12-8	5	488 (+)	2477	3739
	10	94 (+)	1244	1878
	20	20 (-)	577	871
	25	12 (-)	434	654
	30	10 (+)	419	632
	35	5 (-)	258	390

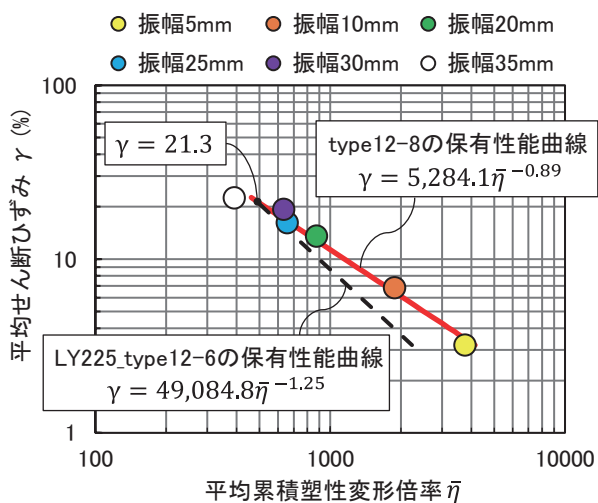


図-6 保有性能曲線

表-3に示した $\eta_c$ を○印、保有性能曲線を実線で図-6に示す。図中には比較のために、筆者らが過去の研究で作成したLY225の最適形状のLSPD (LY225\_type12-6)の保有性能曲線<sup>3)</sup>を破線で示す。 $\gamma \leq 21.3\%$ 即ち振幅が33.2mm以下の範囲では、type12-8の $\eta_c$ がLY225\_type12-6の $\eta_c$ を上回っており、type12-8の方が優れたエネルギー吸収性能を発揮することを確認した。

LSPDの設計では、この保有性能曲線に基づく保有平均累積塑性変形倍率( $\eta_c$ )をLSPDの「保有性能」とし、時刻歴応答解析や「エネルギーの釣合いに基づく耐震計算等の構造計算(平成17年国土交通省告示第631号)」による計算結果から算出した必要平均累積塑性変形倍率( $\eta_s$ )をLSPDの「必要性能」として、保有性能 $\geq$ 必要性能となることを確認することとした。

## 5. まとめ

本報で得られた結果を以下に示す。

①凹レンズ形状の異なる試験体で加力実験を行った結

果、type12-8の $\eta_c$ が最大となった。このことから、FMS合金を用いたLSPDでは、type12-8の凹レンズ形状が最適であると判断した。

②type12-8の実験結果を基に、 $\gamma$ と $\eta_c$ の関係から保有性能曲線を作成した。type12-8とLY225\_type12-6の保有性能曲線を比較し、振幅が33.2mm以下の範囲ではFMS合金を用いたtype12-8の方が優れたエネルギー吸収性能を発揮することを確認した。

保有性能曲線の他、FMS合金LSPDの設計を行う上で必要となる性能値を「LSPD設計・製作マニュアル」にまとめ、LSPD推進協議会の5社共同で、日本ERI(株)にて2022年3月25日付で構造性能評価を取得した。今後、LSPD推進協議会では、FMS合金LSPDを製品ラインナップに加え、LSPDの更なる普及に向けて、新築・耐震改修を問わず展開を図っていく。

**謝辞：**本研究を遂行するにあたり、日本大学理工学部大型構造物試験センターの柳崎尚輝技師および北嶋研究室の皆様にご多大なご協力をいただきました。本紙面をお借りして感謝の意を表します。

## 【参考文献】

- 1) 大沢ほか: Fe-Mn-Si系合金制振ダンパーの開発と超高層建物への適用(その1~5), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.101-110, 2016.8
- 2) 井上ほか: せん断パネル型Fe-Mn-Si系合金制振ダンパーの動的加力試験(その1~2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.759-762, 2019.9
- 3) 名取,北嶋ほか: レンズ形状を有するせん断パネルダンパーの開発(その1~15), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.835-842, 2013.8, pp.851-864, 2014.9, pp.763-766, 2019.9, pp.921-924, 2020.9

**Summary** The lens shear panel damper (hereafter LSPD) is the panel type vibration control damper jointly developed by five companies of the LSPD conference (our company, Asunaro Aoki Construction Co., Datto, Tekken Corporation, and Nishimatsu Construction Co.), is resistant to repetitive deformation, and has high energy absorption performance because the concave lens shape provided to the central part of panel by machining disperses strain all over the panel.

We focused on the Fe-Mn-Si base alloy (hereafter FMS alloy) that is said to offer excellent fatigue characteristics in order to further improve the energy absorption performance of LSPD. We conducted pressing experiments in order to apply the FMS alloy to LSPD, selected the optimum concave lens shape from the experiment results, and built the evaluation technique for the energy absorption performance of LSPD.

This paper reports the results of LSPD pressing experiments using the FMS alloy and the evaluation technique for the energy absorption performance.

**Key Words :** Lens Shear Panel Damper, Fe-Mn-Si-Based Alloy, Energy Absorption Performance, Average Cumulative Plastic Deformation Ratio, Shear Strain