

5. Fe-Mn-Si 系合金を用いたレンズダンパーの開発

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

諸沢 征治* 波田 雅也 * 竹内 健一**

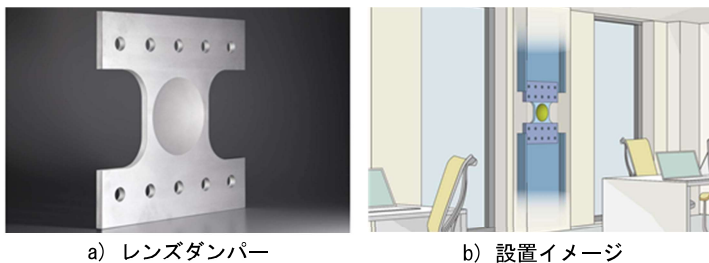
—概要—

「レンズダンパー」とは、一枚の低降伏点鋼材パネルの中央部両面に凹レンズ形状の加工を施し、パネルのひずみ集中を緩和させることでエネルギー吸収性能を高める間柱型の制震ダンパーである(図1)。当社は、2015年4月にレンズダンパー推進協議会(当社を含む主要5社)に参入し、保有技術のひとつとして、レンズダンパーの更なる改良改善と応用技術の開発に取り組んでいる。

当社らは、レンズダンパーのエネルギー吸収性能をさらに高めることを目的として、LY225よりも低サイクル疲労特性に優れるとされているFe-Mn-Si系合金(以下、FMS合金)を用いた加力実験を行った。本報では、FMS合金レンズダンパーの最適レンズ形状とエネルギー吸収性能について示す。

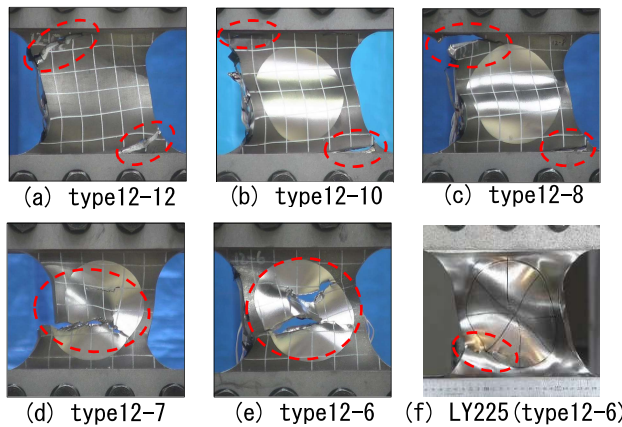
—技術的な特長—

レンズダンパーはフランジのない一枚板であるため、取付けや地震後の交換が容易である。また、筋交型の制震ダンパーのように開口部を塞ぐことの無い間柱型で設置できるため、新築建物にも適用し易い特長がある。FMS合金を適用したレンズダンパーの加力実験の結果、FMS合金レンズダンパーの最適レンズ形状はtype12-8(板厚:12mm、中央凹部の板厚:8mm)であった。また、振幅が小さく繰返し回数が多い場合、従来のレンズダンパー(材質:LY225)よりFMS合金レンズダンパーの平均累積塑性変形倍率 $\bar{\gamma}$ が大きく、優れたエネルギー吸収性能を発揮した。



a) レンズダンパー b) 設置イメージ

図1 レンズダンパーの概要



(a) type12-12 (b) type12-10 (c) type12-8 (d) type12-7 (e) type12-6 (f) LY225 (type12-6)

写真1 最終破壊状況

表1 平均累積塑性変形倍率

試験体名	最大荷重 [kN]	サイクル数	エネルギー吸収量 W [kJ・m]	平均累積塑性変形倍率 $\bar{\gamma}$
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
LY225	288	13 (-)	207	691

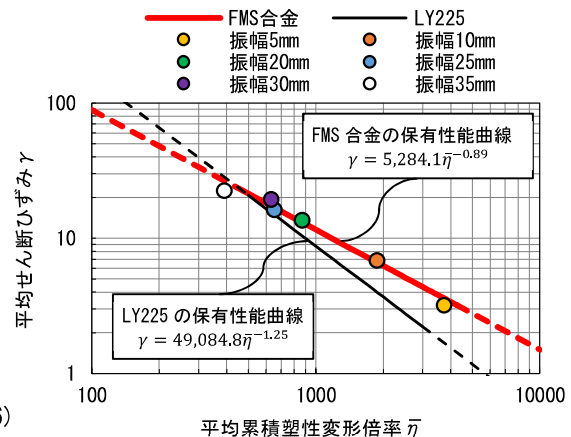


図2 保有性能曲線

※本報の内容はレンズダンパー推進協議会(主要5社:青木あすなろ建設、鉄建建設、飛鳥建設、西松建設、ダット、および日本大学理工学部海洋建築工学科 北嶋圭二 教授)の共同研究による成果の一部であり、日本建築学会学術講演会概観集(pp.529-534、2022.9)にて発表済みである。

*技術研究所 構造研究部 **東京建築本店 設計部

Fe-Mn-Si 系合金を用いたレンズダンパーの開発

Development of the lens shear panel damper using Fe-Mn-Si-Based alloy

○諸沢 柁治*

波田 雅也*

竹内 健一**

Masaharu MOROSAWA

Masaya HADA

Kenichi TAKEUCHI

ABSTRACT The lens shear panel damper is a panel-type seismic damper. Strain is dispersed over the entire panel by cutting a concave lens shape, so it is resistant to repeated deformation and has high energy absorption performance.

In order to further improve the energy absorption performance of the lens shear panel damper the authors conducted a loading experiment to apply an Fe-Mn-Si-Based alloy (hereinafter referred to as FMS alloy), which is said to have excellent fatigue properties, to the lens shear panel damper. Based on the experimental results, we selected the optimum concave lens shape according to the material properties, checked the energy absorption performance of the lens shear panel damper.

In the report, we report the results of loading experiments of lens shear panel damper using FMS alloy and the energy absorption performance.

Keywords: レンズダンパー, Fe-Mn-Si 系合金, 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
Lens Shear Panel Damper, Fe-Mn-Si-Based Alloy, Energy Absorption Performance, Mean Cumulative Plastic Deformation Ratio, Shear Strain

1. はじめに

レンズダンパーは、一枚の低降伏点鋼材パネルの中央部両面に凹レンズ形状の加工を施し、パネルのひずみ集中を緩和させることでエネルギー吸収性能を高めるパネル型の制震ダンパーである(図1)。当社は、2015年にレンズダンパー推進協議会(当社を含む主要5社)に参入し、保有技術のひとつとして、レンズダンパーの更なる改良改善と応用技術の開発に取り組んでいる。

先行研究¹⁾では、レンズダンパーの素材として変形性能に優れている建築構造用低降伏点鋼材(LY225等)を用いており、ダンパー単体およびS造、あるいはRC造間柱にダンパーを取り込んだ状態での構造特性を明らかにしている。また、2023年3月竣工予定の当社新社屋(TCGビル)には、2サイズ(type18-9, type19-9.5, 材質:LY225)のレンズダンパーが15基採用されている。

一方で、迫り来る海溝型巨大地震や長周期・長

時間地震動に対する安全性と地震後の建物継続使用といった多様なニーズに対応するため、レンズダンパーの更なるエネルギー吸収性能の向上が必要となる場合がある。

そこで、レンズダンパーのエネルギー吸収性能を更に高めることを目的として、LY225よりも低サイクル疲労特性に優れているとされるFe-Mn-Si系合金(以下、FMS合金)に着目した。

本報では、FMS合金を用いたレンズダンパーに加力実験を行い、FMS合金レンズダンパーの最適レンズ形状およびエネルギー吸収性能と先行研究¹⁾のLY225との比較について示す。



図1 レンズダンパーの3Dパース

*技術研究所 構造研究部 **東京建築本店 設計部

※本報の内容はレンズダンパー推進協議会(主要5社:青木あすなろ建設、鉄建建設、飛鳥建設、西松建設、ダット、および日本大学理工学部海洋建築工学科 北嶋圭二 教授)の共同研究による成果の一部であり、日本建築学会学術講演会梗概集(pp.529-534、2022.9)にて発表済みである。

2. FMS 合金の材料特性

FMS 合金は、鉄系形状記憶合金の一種で、引張・圧縮の繰返し変形時の性能劣化が少なく、疲労特性が優れるとされる^{2),3)}。

FMS 合金と LY225 の材料引張試験結果（応力度-変位関係）を図 2 に示す。図中には、参考として建築構造用圧延鋼材 SN400B の試験結果を併せて示している。図 2 より、FMS 合金の応力度-変位関係は、LY225 や SN400B と異なり、明瞭な降伏点や降伏棚を持たないラウンドハウス型の形状を示す。また、FMS 合金は LY225 と比較して最大荷重が 2 倍ほど大きく、破断までの伸び量は LY225 の 1.5 倍となった。

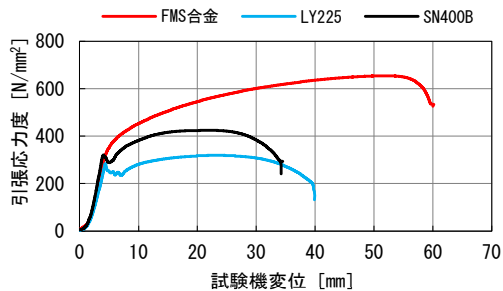


図 2 材料引張試験結果

3. レンズダンパーの加力実験

3.1 最適レンズ形状の検討

(1) 実験条件

FMS 合金レンズダンパーの最適レンズ形状を確認するために、先行研究¹⁾で性能を確認している LY225 と同じ条件で加力実験を行った。

試験体諸元を表 1 に示す。(a)～(e)が中央部板厚を変えた FMS 合金、(f)は従来の LY225(type12-6)の諸元である。試験体板厚 T は 12mm とし、中央部板厚 t が 6、7、8、10mm の 4 通りとなるようにレンズ形状を決定した。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 は比較のために作成したレンズ形状のない試験体である。

加力装置を図 3、試験体形状を図 4 に示す。鉛直方向の制御は、荷重 0kN 一定とし、水平方向の制御は、変位制御の正負交番載荷とした。

(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、LY225 ではい

表 1 試験体諸元

試験体名	材料名	形状	板厚 T [mm]	中央部板厚 t [mm]	有孔高さ h [mm]	中央部断面積 A [mm ²]	設計降伏荷重 Fy [kN]	設計剛性 K [kN/mm]
(a) type12-12	FMS合金	type12-12	12	12	156	1872	292	171
(b) type12-10		type12-10		10		1699	265	
(c) type12-8		type12-8		8		1525	238	
(d) type12-7		type12-7		7		1439	224	
(e) type12-6		type12-6		6		1352	211	
(f) LY225	LY225	type12-6		6		1352	160	

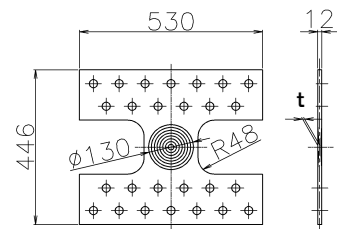


図 4 試験体形状

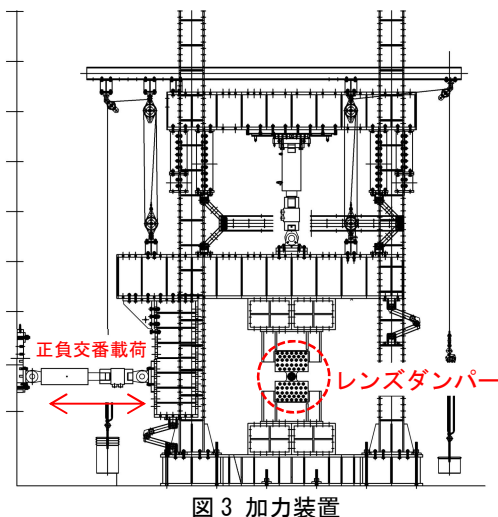
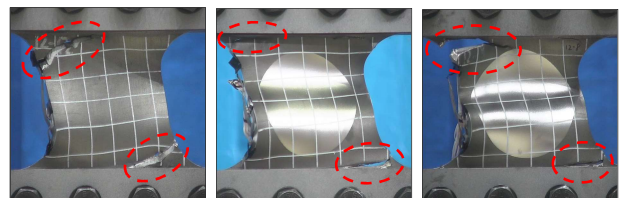
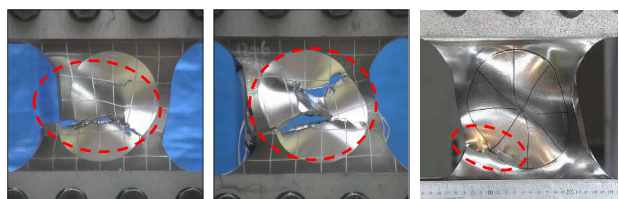


図 3 加力装置



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



(d) type12-7 (e) type12-6 (f) LY225 (type12-6)

写真 1 最終破壊状況

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-変位関係を図5に示す。図5より、いずれの試験体も紡錘系の安定した履歴曲線を描き、tが小さいほど、最大荷重は小さくなった。また、FMS合金は、LY225に比べてひずみ硬化による荷重上昇が大きいことがわかった。

平均累積塑性変形倍率 $\bar{\eta}$ を指標として、レンズダンパーの最適レンズ形状を検討した。 $\bar{\eta}$ は、評価点に至るまでのエネルギー吸収量Wの1/2を、降伏荷重 F_y と設計降伏変位 δ_y の積で除することで無次元化した値と定義する。評価点は、実験全体での最大荷重 F_{max} に対して、1サイクルの正

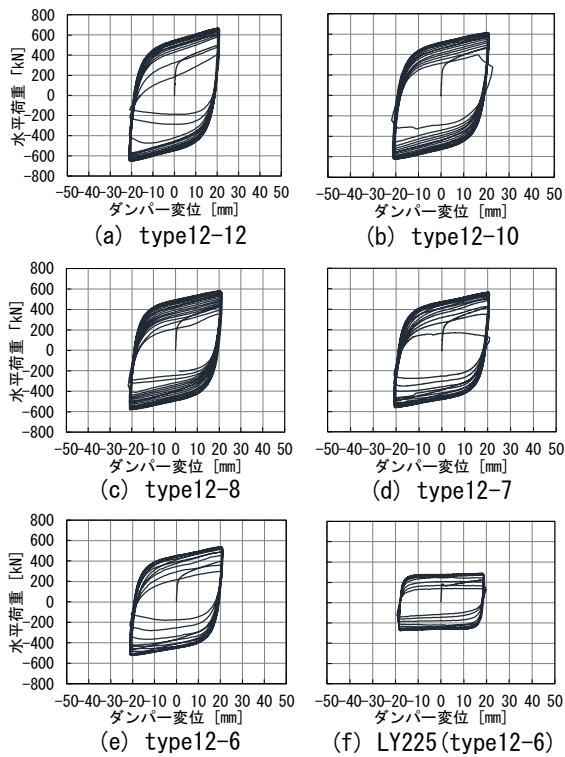


図5 荷重-変位関係(最適形状選定用)

表2 平均累積塑性変形倍率(最適形状選定用)

試験体名	最大荷重 [kN]	サイクル数 (+:正荷重側 -:負荷重側)	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
LY225	288	13 (-)	207	691

負最大荷重が F_y 以下まで低下した点とする。 δ_y は、 F_y を設計剛性 K で除した値とした。

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合金を用いたレンズダンパーでは、type12-8のレンズ形状が最適であることがわかった。

3.2 エネルギー吸収性能の検討

(1) 実験条件

type12-8のFMS合金レンズダンパーについて、振幅ごとの $\bar{\eta}$ を確認する加力実験を行った。振幅は、5mm、10mm、20mm、30mm、35mmの6通りとした。実験方法は3.1と同じとした。

(2) 実験結果

FMS合金(type12-8)の振幅ごとの荷重-変位関係

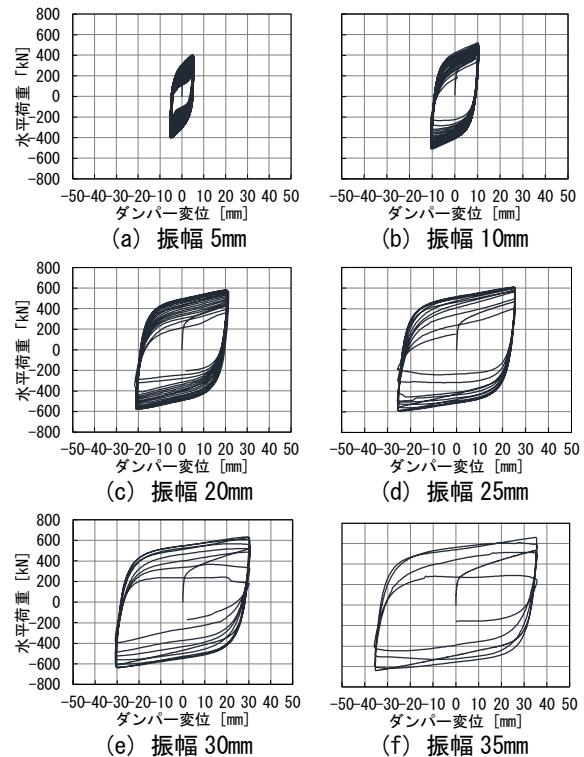


図6 荷重-変位関係(エネルギー吸収性能評価用)

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	振幅 [mm]	サイクル数 (+:正荷重側 -:負荷重側)	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

係を図6に、 $\bar{\eta}$ を表3に、保有性能曲線 η を図7に示す。保有性能曲線とは、平均せん断ひずみ γ と $\bar{\eta}$ の関係を近似した回帰式である。なお、 γ は各試験条件の最大振幅を $h=156\text{mm}$ で除した値とする。

図7中の○印がFMS合金の $\bar{\eta}$ 、実線(赤)が保有性能曲線である。実験結果を外挿する範囲は破線で示している。図中には比較のために、先行研究 η で作成したLY225(type12-6)の保有性能曲線を実線(黒)で示す。図7より、FMS合金の保有性能曲線は、一定振幅载荷の結果と良い相関性を示した。各々の材質での最適形状で保有性能曲線を比較すると、振幅35mmではFMS合金とLY225の $\bar{\eta}$ が同程度の値であり、载荷振幅が小さくなるほどFMS合金の $\bar{\eta}$ がLY225の $\bar{\eta}$ を上回っており、FMS合金の方が小さな振幅(およそ $\gamma \leq 20\%$)において、優れたエネルギー吸収性能を発揮した。

レンズダンパーの設計では、この保有性能曲線に基づく γ ごとの $\bar{\eta}$ をレンズダンパーの「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設計等の構造計算」による計算結果から算出した $\bar{\eta}$ をレンズダンパーの「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。

4. まとめ

4.1 本報の知見

本報で得られた知見を以下に示す。

(1) FMS合金とLY225の材料引張試験結果よ

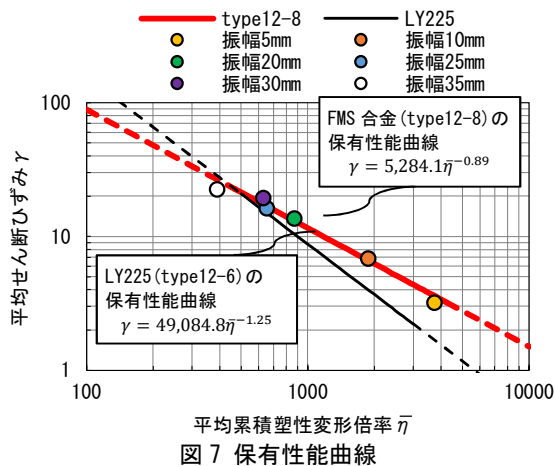


図7 保有性能曲線

り、FMS合金の応力度-変位関係は、LY225やSN400Bと異なり、明瞭な降伏点や降伏棚を持たないラウンドハウス型の形状を示す。また、FMS合金は、LY225と比較して最大荷重が約2倍大きく、破断伸びが約1.5倍大きかった。

(2) 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 $\bar{\eta}$ が最大となった。このことから、FMS合金レンズダンパーの最適形状がtype12-8であることがわかった。

(3) FMS合金(type12-8)とLY225(type12-6)の保有性能曲線を比較した結果、小さな振幅(平均せん断ひずみ $\gamma \leq 20\%$)において、FMS合金の方が優れたエネルギー吸収性能を発揮することがわかった。

4.2 今後の展開

保有性能曲線の他、FMS合金レンズダンパーの設計を行う上で必要となる性能値を「レンズダンパー(LSPD)設計・製作マニュアル」にまとめ、レンズダンパー推進協議会の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、レンズダンパー推進協議会では、FMS合金レンズダンパーを製品ラインナップに加え、レンズダンパー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。

【参考文献】

- 1) 名取、北嶋 他：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.
- 2) 大沢 他：Fe-Mn-Si系合金制震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.
- 3) 井上 他：せん断パネル型Fe-Mn-Si系合金制震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.
- 4) 建築研究所監修：鋼構造物へのエネルギー法活用マニュアル 第1版、技報堂、2008.9