

FMS 鋼材を用いたレンズダンパーの開発

Development of Lens-type Shear Panel Damper Using Fe-Mn-Si-Based Steel

山崎 康雄*

金川 基**

Yasuo Yamasaki

Motoi Kanagawa

要 約

レンズダンパー (Lens-type Shear Panel Damper) (以下, LSPD) はパネル型の鋼材ダンパーであり, 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 系鋼材 (以下, FMS 鋼材) 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を評価した。その結果, 現在製品化されている LY225 材を用いた LSPD より FMS 鋼材を用いた方が, 優れたエネルギー吸収性能を発揮することを確認した。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 開発の背景および目的
- § 3. FMS 鋼材の材料特性
- § 4. レンズダンパーの加力実験
- § 5. まとめ

§ 1. はじめに

レンズダンパー¹⁾ (以下, LSPD) は, 1 枚の鋼材板の両面中央部に凹型レンズ形状の加工を施した履歴型ダンパーで, LSPD 推進協議会の 5 社 (西松建設株, 青木あすなろ建設株, 株ダット, 鉄建建設株および飛鳥建設株) が共同で研究開発を行っている。LSPD の形状を図-1 (a) に示す。LSPD 中央部に凹型の加工を施すことにより, パネル全体にひずみを分散させ, エネルギー吸収効率を高めている。また, 従来のせん断型パネルダンパー^{例えは²⁾} は, フランジが必要であるのに対して, LSPD はフランジが不要で薄く, 小型という特長を有する。S 造のオフィスビルにおいては, 図-1 (b) のように間柱型で設置すると, 開口を遮ることなく, 耐震性能を向上できる。既報では, RC 造中高層集合住宅への適用を目的に, 取付け方法の異なる 3 タイプの LSPD 付き RC 造方立壁を考案し, 静的加力実験を行いその有効性について報告した³⁾。

現在製品化されている LSPD の材質は, 高い変形性能

をもつ建築構造用低降伏点鋼材 LY225 を採用している。本報では, LSPD の更なるエネルギー吸収性能の向上を目的とし, 疲労特性に優れる Fe-Mn-Si 系鋼材 (以下, FMS 鋼材) を LSPD に適用するために実施した静的加力実験について報告する。



(a) LSPD の形状

(b) LSPD の適用例

図-1 レンズダンパーの概要

§ 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

* 技術研究所建築技術グループ

** 技術研究所建築技術グループ (現: 技術研究所)

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、短時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、LSPDにFMS鋼材を適用した試験体の加力実験を行った。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、エネルギー吸収性能を評価した。

§3. FMS 鋼材の材料特性

本研究で用いるFMS鋼材は、淡路マテリア㈱らによって制振ダンパー用に開発された新たな材料である^{4,5)}など。鉄系形状記憶鋼材の一種で、引張・圧縮の繰返し変形時の性能劣化が少なく疲労特性に優れるとされている。また、FMS鋼材は化学成分の最適化によって更に疲労特性が高められているとともに、連続鋳造による大量生産や一般建築用鋼材との溶接を可能としている。

FMS鋼材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、参考値としてLY225と建築構造用圧延鋼材SN400Bの引張試験結果を併せて示している。図-2より、FMS鋼材の応力度-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である。FMS鋼材はLY225やSN400Bと比べてひずみ硬化が大きく、破断までの伸び量は、LY225の40mmに対してFMS鋼材は60mmであり、1.5倍となっている。

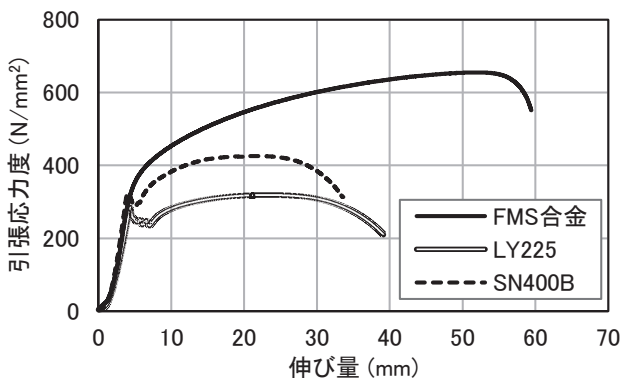


図-2 材料引張試験結果

各鋼材の機械的性質の規格値を表-1に示す。表-1より、FMS鋼材の降伏比（降伏耐力/引張強さ）の値は50%以下に規定されており、破断伸びの値はFMS鋼材（45%以上）のほうがLY225（40%以上）より1.25倍大きい値に規定されている。

表-1 機械的性質の規格値

材料名	降伏耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	降伏比 (%)	破断伸び (%)
FMS鋼材	270~330	620~720	≤50	45≤
LY225	205~245	300~400	≤80	40≤
SN400B	235~335	400~510	≤80	18≤

§4. レンズダンパーの加力実験

4-1 最適凹レンズ形状の検討および選定

FMS鋼材を用いた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。

(1) レンズ中央部の断面形状

レンズ中央部の断面積算出の概念図を図-3に示す。中央部断面積 (A) は、式(1)のように矩形断面（板厚 (T) と有効幅 (d) の積）から両面の弓形断面を差し引くことで算出できる。また、式(1)における弓形断面部の扇形半径 (r) と中心角 (θ) は、板厚 (T) と中央部板厚 (t) およびレンズ部外径 (φ) を用いて式(2)と式(3)で与えられる。

$$A = d \times T - 2 \times r^2 / 2 (\theta - \sin \theta) \tag{式(1)}$$

$$r = \phi^2 / (8 \times (T - t) / 2) + ((T - t) / 2) / 2 \tag{式(2)}$$

$$\theta = 2 \times \arcsin (\phi / (2 \times r)) \tag{式(3)}$$

ここで、

A：中央部断面積 (mm²) d：有効幅 (mm)

T：板厚 (mm) r：弓形断面部の扇形直径 (mm)

φ：レンズ部外径 = 130 (mm) t：中央部板厚 (mm)

θ：弓形部の扇形中心角 (rad)

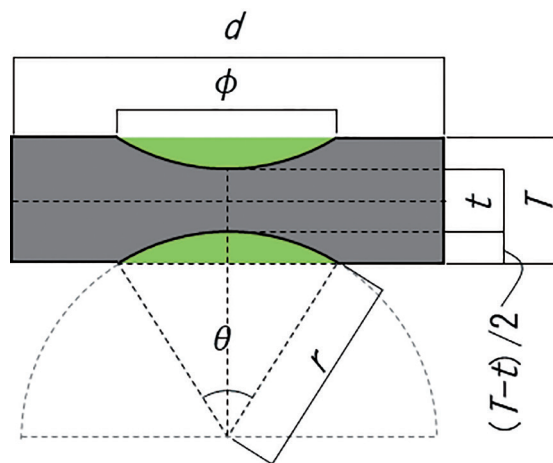


図-3 レンズ中央部の断面積算出の概念

(2) 試験体

試験体諸元を表-2、試験体形状を図-4に示す。試験体の板厚 (T) は12mmとし、中央部板厚 (t) が6, 7, 8および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およびtype12-10とした。更に凹レンズ形状の有無による比較のため、凹レンズ形状の無い試験体 type12-12も対象とした。

その他の寸法は、LY225を用いたT=12mm, t=6mm

の LSPD (以下, LY225_type12-6) と同じく, 凹レンズ形状の直径 (ϕ) = 130 mm, フィレット (R) = 48 mm, 有効幅 (b) = 156 mm, 有効せい (h) = 156 mm とした。

試験体の設計降伏荷重 (F_y) は, FMS 鋼材の降伏耐力の下限值 270 N/mm^2 を $\sqrt{3}$ 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。

表-2 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 F_y (kN)
type12-12	12	12	292
type12-10		10	265
type12-8		8	238
type12-7		7	224
type12-6		6	211

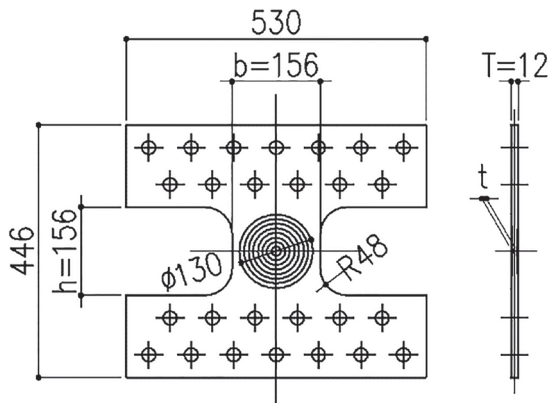


図-4 試験体形状 (単位: mm)

(3) 荷重方法

荷重装置は, 日本大学理工学部大型構造物試験センター内の通称建研式加力装置を用いた。加力装置を図-5に示す。L字ビームはパンタグラフ機構により水平に維持される。水平力は反力壁に取り付けた油圧ジャッキ (+2,000 kN, -1,000 kN) により変位制御で荷重し, 軸力は加力フレーム内の鉛直油圧ジャッキ (+2,000 kN, -1,000 kN) により 0 kN になるよう荷重制御で荷重した。鉛直油圧ジャッキ上面にはスライド支承を設けてあり, 軸力は試験体の水平変位を追随し, 常に試験体柱頭図心位置に作用させた。水平方向の荷重パターンは, 振幅 $\pm 20 \text{ mm}$ 一定の正負交番繰返し荷重とし, レンズダンパーの耐力が規格降伏荷重の F_y を下回るまで荷重した。

(4) 実験結果

各試験体の荷重 - 変形関係を図-6に, 実験結果一覧を表-3に示す。各試験体の最終破壊状況を写真-1に示す。また, 各試験体の実験状況を記す。

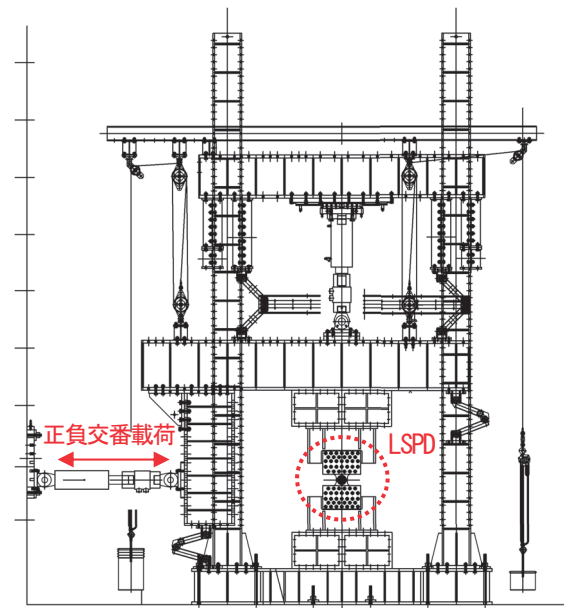


図-5 加力装置

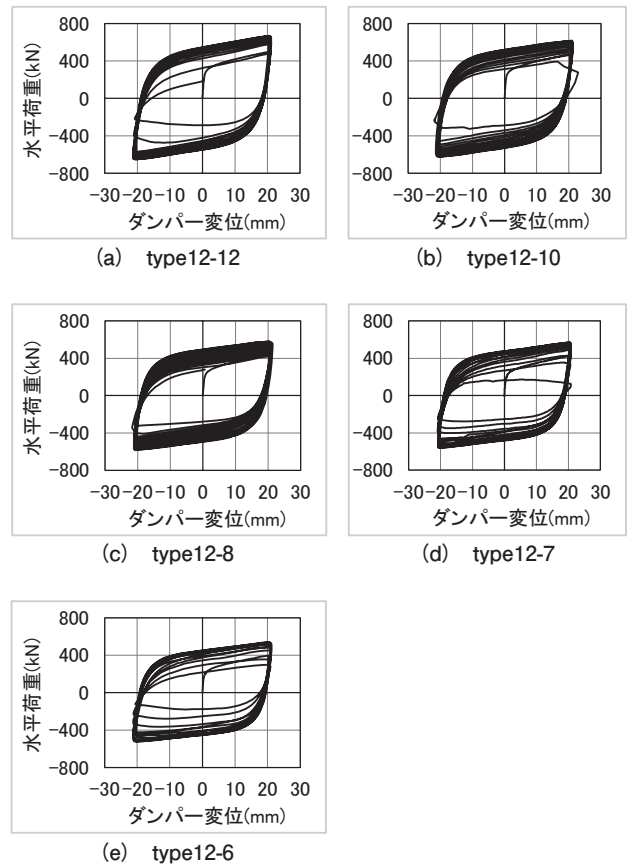


図-6 荷重 - 変形関係 (最適形状選定用)

a) type12-12 水平荷重は, 6 サイクル目正側で 668 kN (F_{max}) に達し, 15 サイクル目負側で $F < F_y$ となった。亀裂は, 13 サイクル目負側からフィレット部に生じた。

b) type12-10 水平荷重は, 5 サイクル目負側で -624 kN (F_{max}) に達し, 16 サイクル目負側で $0.7 F_{max}$ まで低下した。16 サイクル目負側の最大変形時に水平荷重が大きく低下したため, F_y までの実験を行っていない。亀裂

は、13 サイクル目負側からフィレット部に生じた。

c) type12-8 水平荷重は、5 サイクル目負側で -582 kN (Fmax) に達し、20 サイクル目負側で Fy まで低下した。亀裂は、16 サイクル目負側からフィレット部に生じた。

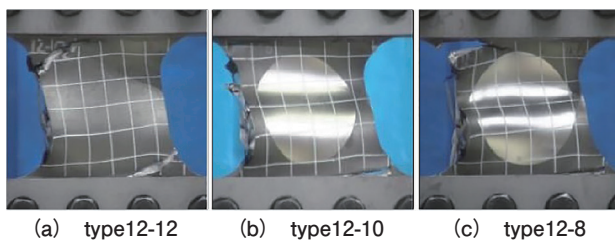
d) type12-7 水平荷重は、8 サイクル目正側で 570 kN (Fmax) に達し、16 サイクル目正側で F < Fy となった。亀裂は、13 サイクル目負側からレンズ中央部に生じた。

e) type12-6 水平荷重は、7 サイクル目正側で 540 kN (Fmax) に達し、13 サイクル目負側で F < Fy となった。亀裂は、11 サイクル目正側からレンズ中央部に生じた。

type12-7 および type12-6 は、中央部に生じた亀裂が進展して破断に至った。一方、type12-12、type12-10 および type12-8 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。いずれの試験体も紡錘形の安定した履歴特性を持ち、試験体の中央部板厚 (t) が小さいほど、最大荷重は小さい値となった。

表-3 実験結果一覧 (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



(d) type12-7 (e) type12-6
写真-1 最終破壊状況

(5) 最適凹レンズ形状の検討

FMS 鋼材を用いたレンズダンパーのエネルギー吸収

性能を評価する指標は、累積エネルギー吸収量を基準化した平均累積塑性変形倍率 ($\bar{\eta}$) とする。平均累積塑性変形倍率の概念を図-7 に、定式を式(4)に示す。

平均累積塑性変形倍率 ($\bar{\eta}$) は、繰返し载荷で吸収した LSPD の累積エネルギー吸収量 (W) を定常 1 ループと仮定し、W の 1/2 (正荷重片側に換算) を、設計降伏荷重 (Fy) と設計降伏変位 (δ_y) の積で除して無次元化した値である¹⁾。

$$\bar{\eta} = W / (2 \times F_y \times \delta_y) \tag{4}$$

ここで、

$\bar{\eta}$: 平均累積塑性変形倍率

W: 累積エネルギー吸収量 (mm²)

Fy: 規格降伏荷重 (kN)

δ_y : 設計降伏変位 ($\delta_y = F_y / k_1$) (mm)

k1: 1 次剛性 (171 kN/mm)

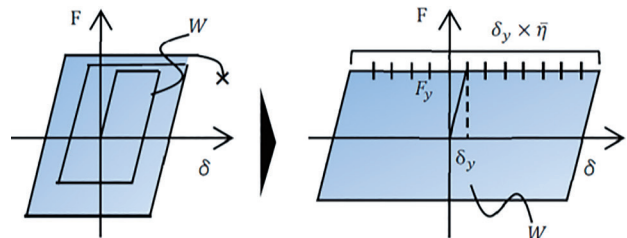


図-7 平均累積塑性変形倍率 ($\bar{\eta}$) の概念図

各試験体の累積エネルギー吸収量 (W) は、図-6 に示した荷重-ダンパー変位関係の履歴面積を用いる。規格降伏荷重 (Fy) は、それぞれの試験体の断面積に FMS 鋼材の降伏耐力規格値である 270 N/mm² を乗じ、 $\sqrt{3}$ で除することにより求める。降伏変位 (δ_y) は、Fy を剛性で除した値を用いることとした。なお、 $\bar{\eta}$ 算出時の剛性は各試験体で大きな差異がみられないこと、いずれの試験体も LY225 材を用いたレンズダンパーの規格剛性 171 kN/mm より大きいことから、LY225 材のレンズダンパーの規格剛性 171 kN/mm を用いた。

各試験体の $\bar{\eta}$ を前掲の表-3 に示す。サイクル数、エネルギー吸収量 (W) とともに type12-6 が最小、type12-8 が最大であり、試験体中央部の板厚の差が影響していると考えられる。 $\bar{\eta}$ は type12-8 が 871 で最大である。この結果から FMS 鋼材を用いた LSPD では、type12-8 の凹レンズ形状が最適であると判断した。

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

最適形状と判断した 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、35 mm の 6 通りとした。その他の実験方法は、最適形状の選定時と同様とした。振幅ごとの荷重-変形関係を図-8、実験結果の一覧を表-4 に示す。

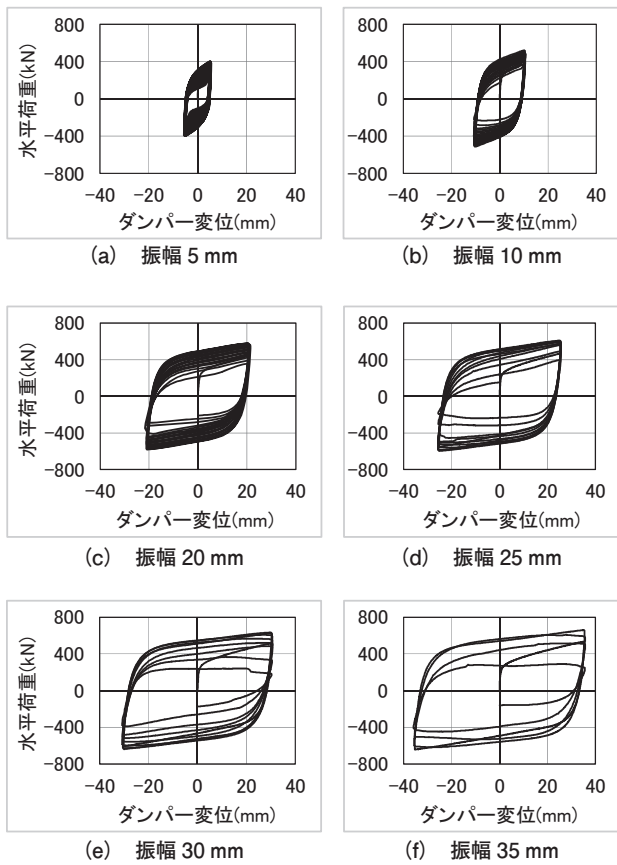


図-8 荷重-変形関係 (エネルギー吸収性能評価用)

表-4 実験結果一覧
(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

(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 (γ) 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、 γ は振幅を $h=156$ mm で除した値とする。前掲の表-4 に示した $\bar{\eta}$ を○印、保有性能曲線を実線で図-9 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¹⁾ を破線で示す。 $\gamma \leq 21.3\%$ 即ち振幅が 33.2 mm 以下の範囲では、type12-8 の $\bar{\eta}$ が LY225_type12-6 の $\bar{\eta}$ 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。

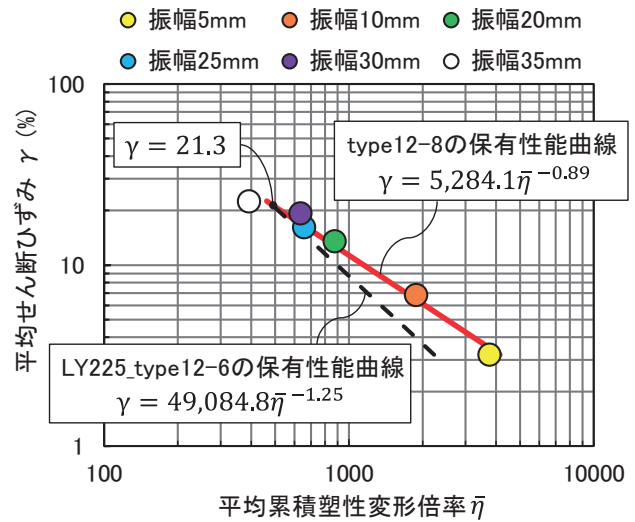


図-9 保有性能曲線

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 ($\bar{\eta}_c$) 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 ($\bar{\eta}_s$) 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。

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 $\bar{\eta}$ が最大となった。このことから、FMS 鋼材を用いた LSPD では、type12-8 の凹レンズ形状が最適であると判断した。

type12-8 の実験結果を基に、 γ と $\bar{\eta}$ 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 33.2 mm 以下の範囲では FMS 鋼材を用いた 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。

保有性能曲線その他、FMS 鋼材 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。

謝辞. 本研究は、レンズダンパー推進協議会 (西松建設 (株)、青木あすなろ建設 (株)、(株)ダット、鉄建建設 (株) および 飛鳥建設 (株)) にて、実施した研究成果の一部である。また、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。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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
- 2) 日本免震構造協会: パッシブ制振構造設計・施工マニュアル第 3 版, 2013. 11
- 3) 小寺, 山崎, 高橋: 中高層集合住宅へのレンズダンパー適用方法の提案 (その 1) レンズダンパーを取付けた RC 造間柱の構造実験, 西松建設技報, vol. 41, 2018
- 4) 大沢ほか: Fe-Mn-Si 系鋼材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
- 5) 井上ほか: せん断パネル型 Fe-Mn-Si 系鋼材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