# FMS 合金製 U 形ダンパー (I<sup>2</sup>RUD - アイラッド-)の構造性能

Structural Performance of FMS Alloy U-Shaped Damper [I<sup>2</sup>RUD]

坂本 啓太\*1 Keita Sakamoto **阿部隆英**<sup>\*\*1</sup> Takahide Abe

# 【要旨】

近年,我が国では地震が頻発しており,今後も南海トラフ巨大地震や首都直下型地震などの被害が甚大となる地 震発生が懸念されている.著者らは、地震発生後も継続して建物を使用することが肝要であると考え、地震応答変 形の低減が可能な新たな履歴ダンパー「I<sup>2</sup>RUD<sup>®</sup>」を考案した. I<sup>2</sup>RUD は、疲労強度が高いFe-Mn-Si 系合金製の U 形ダンパーである.このような特徴から I<sup>2</sup>RUD は、構造性能確認として実施した実験によって、大変形時にも安 定した履歴性状を示すと共に十分な繰返し性能を有することを確認した.

本報では、はじめに I<sup>2</sup>RUD の概要および特徴を示し、その後実験概要および実験結果について述べる. 最後に、 実験結果を基に設計で使用する設計モデルについて提案する.

【キーワード】 継続使用性 制震 履歴ダンパー FMS 合金 静的変位漸増載荷 設計モデル

# 1. はじめに

近年,我が国では地震が頻発しており,今後も南海ト ラフ巨大地震や首都直下型地震などの被害が甚大となる 地震発生が懸念されている.特に社会インフラの重要な 拠点となる建築物は,地震発生後も大きな修繕を行うこ となく継続して使用することが重要である<sup>1)</sup>.

著者らは柱梁などの躯体の損傷を抑制するために、地 震応答変形を低減する制震装置の研究開発を行っている <sup>2</sup>/<sup>3</sup>).本研究開発においては、U形に曲げ加工した Fe-Mn-Si系合金<sup>4</sup>(以下,FMS 合金と称す)の板材(以下、ダ ンパー材と称す)を上下方向から鋼板で挟み込んだ形状 の履歴ダンパー「FRUD(アイラッド)」を新たに考案し た(図-1参照).

本報では、IPRUDの概要および特徴を示し、構造性能 確認のために行った実験概要および結果を示す.



# 2. FMS 合金材の特徴

ダンパー材に使用するFMS合金は、ステンレス系の合 金であり、既に実用化されている材料である.また、非常 に高い靭性能および繰返し性能(疲労寿命)を有する材 料で、制震ダンパー用として開発されたものである<sup>4</sup>.

FMS合金の機械的性質は、0.2%耐力がSN400材と同程 度であるが、引張強さは650N/mm<sup>2</sup>を超える程の高強度に 達する. さらに、破断時の伸びが50%を超えるほどの靭性 能があることが最大の特徴である<sup>4)</sup>. 加えて、一般的な鋼 材の10倍程度の繰返し性能を有することも特徴である<sup>4)</sup>.

## 3. I<sup>2</sup>RUDの概要

図-1に示すように、I<sup>P</sup>RUDは2つのダンパー材を上下に 設けた拘束プレートで挟み込み、高力ボルトで緊結した 単純な構成である.ダンパー材の幅方向の中央にはスリ ット加工が施されている.



<sup>1.</sup>技術研究所 研究開発 G 第四研究室



図-4 試験体形状および寸法

表一1 試験体諸元一覧

	ガンパー拒回	ガンパー拒屈	が、パー曲げ古汉		ガンパー青キ	がパー暗毛さ	フリットに	
試験体名	クンハー板序	クシハー放幅	クンハー曲り直住	R/T	クノハー同さ	クノハー加茂さ	ヘリジド幅	載荷方法
	T(mm)	W(mm)	R(mm)		H(mm)	L(mm)	S(mm)	
T8W80R36+	0	80	36	4.5	52	60	6	漸増載荷
T8W80R36-	0	80						漸減載荷
T8W100R36+	Q	100	26	4.5	52	60	6	漸増載荷
T8W100R36-	0	100	50					漸減載荷
T12W80R48+	12	80	48	4	72	60	8	漸増載荷
T12W80R48-	12							漸減載荷

図-2にPRUDの挙動を示す.PRUDの地震時の挙動は、 ダンパー材が上下拘束プレートにより拘束されているた め、図-2(a)に示すような既往のダンパーのような曲げ 変形が生じず、図-2(b)に示すように並進方向にのみ変 形する.また、変形と共に応力集中する断面位置が移動 するため、一部に累積ひずみが集中することがなく、大 変形時にも荷重低下しない.

ダンパー材はFMS合金を使用しているため,繰返し変 形性能にも優れている.さらに、ダンパー材の板厚、板幅 および曲げ直径を変化させることで、剛性や耐力を自由 に設定できることから、様々な構造体への適用が可能な ダンパーである.

図-3に鉄筋コンクリート造(以下, RC造)における PRUDの適用例を示す.図-3に示す幅は100mm程度で あるため、PRUDはRC造の壁の中に納まる大きさであ る.この特長を活かして、二次壁の構造スリットを配置 する部位にI<sup>2</sup>RUDを設置した場合、居室の専有面積を減 少させずに制震建物とすることが可能となる.

## 4. 載荷実験

## 4.1 試験体概要

図-4に試験体形状および寸法を示し、表-1に試験体 諸元一覧を示す. 試験体は、ダンパー材、上下拘束プレー トおよび接合ボルトで構成されている. 試験体パラメー タはダンパーの形状と載荷方法とした. T=8mmのダンパ

## 表-2 使用材料の特性値

#### (a) ダンパー

却は	使用社判	0.2%耐力	降伏ひずみ	引張強さ	伸び
미니까	使用物料	(N/mm <sup>2</sup> )	(μ)	$(N/mm^2)$	(%)
ダンパー	FMS合金(T=8)	281.5	-	652.4	67.2
	FMS合金(T=12)	276.8	-	658.9	69.4

(b) 拘束プレート

部位	使田材料	0.2%耐力	降伏ひずみ	引張強さ	ヤング係数
1919년	(C/11414)	$(N/mm^2)$	( <i>µ</i> )	$(N/mm^2)$	$(N/mm^2)$
拘束 プレート	SM490(T=12)	416.5	1910	560.1	204313

 一形状は、W=80mm、100mmの2通り、曲げ直径RはTの4.5
倍(R/T=4.5)とし、T=12mmのダンパー形状は、W=80mm、 R/T=4.0とした.また、ダンパー材の幅方向中央に設ける スリット幅Sは、それぞれT=8mmの試験体はS=6mm、 T=12mmの試験体はS=8mmとした.

上下拘束プレートは、厚さ12mmの鋼板を用いており、 加力装置の固定治具と直接緊結するためのボルト孔も含 む形状とした.また、ダンパー材と拘束プレートを接合 するボルトは、高力ボルトによる摩擦接合とし、両者間 にズレが生じないようにした.なお、高力ボルトの径は 12mmとした.載荷方法は各試験体に対し、正負交番変位 漸増載荷(以下、漸増載荷と略記する)と正負交番変位漸 減載荷(以下、漸減載荷と略記する)とした.



図-6 水平変位計測位置

漸増	載荷	漸減載荷		
変位δ	回数	変位δ	回数	
±0.5mm	2回	±0.5mm	2回	
±1mm		±45mm		
±3mm	3回	±30mm		
±5mm		±20mm		
$\pm 10 \text{mm}$		±15mm	20	
±15mm		±10mm	3回	
±20mm		±5mm	]	
±30mm		±3mm		

表-3 加力サイクル

表-4 ダンパー最大荷重 Pmax 一覧

±1mm

シャート ク	ダンパー荷重(kN)					
武职14名	P <sub>max</sub> (正側)	P <sub>max</sub> (負側)	$\Delta P_{max}$	ave $\Delta P$ max		
T8W80R36+	77.4	-71.8	5.5			
T8W80R36-	77.3	-77.2	0.1			
T8W100R36+	97.4	-98.0	0.6	17		
T8W100R36-	95.4	-97.6	2.2	1./		
T12W80R48+	114.2	-112.9	1.3			
T12W80R48-	114.8	-115.4	0.6			

## 4.2 使用材料

 $\pm 45 \text{mm}$ 

表-2に使用材料の特性値を示す.2章で述べたことと 重複するが、ダンパー材に使用するFMS合金は、0.2%耐 力がSN400材と同程度であるが、引張強さは650N/mm<sup>2</sup>を 超える材料であり、伸びが50%を超える靱性能を有する. また、拘束プレートの鋼種はSM490とした.

## 4.3 加力方法

図-5に加力装置を示し、図-6に水平変位計測位置 を示す.加力は、水平方向への正負交番載荷とし、加力治 具に水平方向に取付けた油圧ジャッキで押し引きを行っ た.また、ダンパーの鉛直変位は一定とするため、加力治 具の左右下端に水平方向のみ摺動するリニアガイドを設 けた.

ダンパー荷重Pは、油圧ジャッキの先端に水平方向に取 付けたロードセルで計測した. さらに、ダンパーによる 鉛直方向の荷重は、左右のリニアガイドの下部に設けた ロードセルで計測した. ダンパーの水平変位δは、拘束 プレート間の相対変位とし、上拘束プレートの水平変位 δから下拘束プレートの水平変位 δ2を引いた値とした.

**表**-3に漸増載荷および漸減載荷の加力サイクルを示 す.漸増載荷および漸減載荷共に $\delta = \pm 0.5$ mmで載荷した 後,漸増載荷は $\delta = \pm 1$ mmから $\delta = \pm 45$ mmまで段階的に $\delta$ を増大させ、漸減載荷においては、 $\delta = \pm 45$ mmから $\delta = \pm 1$ mmまで $\delta$ を減少させる加力サイクルとした。

## 5. 実験結果

**表**-4にダンパー最大荷重 $P_{max}$ 一覧を示し,図-7にP- $\delta$ 関係を示す.表-4より,WもしくはTが大きくなれ ば、 $P_{max}$ が大きくなることがわかる.また,正側と負側に おける $P_{max}$ の差 $\Delta P_{max}$ の最大値は5.5kN, $\Delta P_{max}$ の平均値  $ave \Delta P_{max}$ は1.7kN であった.試験体の中で $\Delta P_{max}$ が最も大 きい値を示した試験体 T8W80R36+の $P_{max}$ に対する $\Delta P_{max}$ の比 ( $P_{max}$ (負側) /  $\Delta P_{max}$ )は0.077 であり,0.1 を下回 った.このことから,正側と負側で大きな荷重差は生じ ないことがわかる.

図-7には、それぞれ漸増載荷と漸減載荷の違いを示 している.履歴ループ形状に多少のばらつきがあるもの の、ダンパー性能としては、どちらの載荷方法も概ね一 致していると考えられる.

以上より、*△Pmax*が小さく、載荷方法による履歴ループが 概ね一致していることから、I<sup>2</sup>RUDは安定した履歴形状を 示すダンパーであると言える.

# 6. ダンパーの設計モデル

試験体T8W80R36+, T8W100R36+およびT12W80R40+ の3タイプについて、ダンパーの設計モデルを提案する. 図-8に示すようにダンパーの設計モデルは、トリリニア 型とする.また、表-5に設計モデルの諸元を示す. 実験結果のP -  $\delta$ 関係を基に第1折れ点および第2折れ点を 設定する.第1折れ点の設計降伏変位 $\delta_{db}$ は、実験で剛性が 低下し始めた±2mmとし、設計用ダンパー降伏荷重 $F_{db}$ は 実験結果から表-5に示す値に設定した.また、最大荷重 到達変位 $\delta_{dmax}$ は±10mmとし、この時の設計用ダンパー最 大荷重 $F_{dmax}$ は、5.1節で述べた $P_{max}$ も考慮して、 $P_{max}$ の0.85以下となるようにモデル化した.図-9に実験値 と設計モデルの比較を示す.同図より、実験値は設計モデ ルより大きい履歴を推移していることから、設計モデルは十 分に安全を有したモデルとした.



## 7. 結論

本報では、FMS 合金製 U 形ダンパー「I<sup>2</sup>RUD」の概要 および特徴を示し、変位漸増漸減載荷の加力装置および 加力サイクルについて報告した. I<sup>2</sup>RUD は靭性能が高い FMS 合金を使用しており、ダンパー荷重 *P*-ダンパー水平 変位δの履歴曲線は、安定した挙動を呈した.以下に、得 られた知見についてまとめて列記する.

- 1) 履歴ループおよび最大荷重は,板幅T,板厚Wが大き くなるほど大きくなる.
- 2) 漸増載荷と漸減載荷では、ダンパー最大荷重に大きな 違いはみられなかった.
- 3) 正側と負側のダンパー最大荷重の差 △ Pmaxが小さく, 載 荷方法による履歴ループが概ね一致していることから,



図-8 ダンパーのモデル化



(a) T8W80R36+



(b) T8W100R36+



(c) T12W80R40+

図-9 実験値と設計モデルの比較

#### 表-5 設計モデルの諸元

	記号	T8W80R36+,-	T8W100R36+,-	T12W80R40+,-	
設計用ダンパー降伏荷重(kN)	$F_{dy}$	32	40	40	
設計用ダンパー最大荷重(kN)	F dmax	58	78	90	
F <sub>dmax</sub> / F <sub>dy</sub>	-	1.81	1.95	2.25	
設計降伏変位(mm)	$\delta_{dy}$		2.0		
最大荷重到達変位(mm)	$\delta_{dmax}$	10.0			
設計最大変位(mm)	$\delta_{max}$	45			
一次剛性(kN/mm)	$k_{I}$	16	20	20	
二次剛性(kN/mm)	<i>k</i> <sub>2</sub>	3.25	4.75	6.25	
$k_2 / k_1$	-	0.203	0.238	0.313	
三次剛性	<i>k</i> 3	0.0001	0.0001	0.0001	

I<sup>2</sup>RUDは安定した履歴形状を示すダンパーであると言える.

# 【参考文献】

- 国土交通省住宅局,防災拠点等となる建築物に係る機 能継続ガイドライン(新築版),平成30年5月
- 2) 坂本啓太,阿部隆英,久保田雅春,FMS 合金製 U 形ダンパーの構造性能に関する実験的研究 -その 1 ダンパーの構造性能に関する実験的研究 -その 1 ダンパー概要および変位漸増載荷実験概要-,日本建築学会大会学術講演梗概集,構造IV,pp.319-320,2023.7
- 3) 久保田雅春,坂本啓太,阿部隆英,FMS 合金製 U 形ダンパーの構造性能に関する実験的研究 -その 2 変位 漸増載荷実験結果-,日本建築学会大会学術講演梗概 集,構造IV,pp.321-322,2023.7
- 4) Yasuhiko Inoue, Atsumichi Kushibe, Kenji Umemura, Yasunori Mizushima, Takahiro Sawaguchi, Terumi Nakamura, Hiroaki Otsuka and Yuya Chiba : Fatigue-Resistant Fe-Mn-Si-based Alloy Seismic Dampers to Counteract Long-period Ground Motion, Japan Architectural Review, January vol. 4 No.1 (2021)76–87C

**Summary** Japan has been subject to more frequent earthquakes in recent years. There are concerns for major earthquakes, like a Nankai Trough Mega Earthquake or a Metropolitan Earthquake in the near future. The authors believe it is essential that buildings can function after an earthquake and have devised a new hysteretic damper, the  $I^2$ RUD®, which can reduce seismic response deformation. The I2RUD is a U-shaped damper made of a Fe-Mn-Si alloy that offers high fatigue strength. The results of experiments performed to confirm structural performance show that these characteristics of  $I^2$ RUD allow it to exhibit stable hysteresis properties, even when subjected to large deformations, in addition to exhibiting sufficiently high cyclic performance.

This report provides an overview and the characteristics of  $I^2$ RUD, then describes the experiment and the results. Finally, it proposes a design model based on the experimental results that can be used at the design stage.

Key Words: Continued usability, Damping, Hysteretic Damper, FMS Alloy, Static Translational Gradual Load, Design Model