

# 鉄骨加工に適用する方杖型式扇形ダンパーに関する研究

(その2 扇形ダンパー付ト字形架構の載荷実験)

玉井 宏章\*・村田 学\*\*・高松 隆夫\*・角屋 治克\*\*

(平成22年10月29日受付)

On Hystebetic dampers for steel buildings with bent steel plates

(Part2 Loading tests on T shaped frame with dampers)

Hiroyuki TAMAI, Manabu MURATA, Takao TAKAMATSU and Haruyoshi KADOYA

(Received Oct. 29, 2010)

## Abstract

In this paper, the static characteristics of the T shaped frame with bended steel damper were investigated by cyclic loading test. The test parameters were the methods of connections and the number of dampers. Also, one stovy-one bay frame with the damper is veryfied. to have enough safety for seven earthguake by use of calculation of vespouse and limit Capacity. The test result showed that the compressive strength. The plastic deformation capacity of the damper is enough for seven earthquake ground motion.

**Key Words:** *Steel damper, Vibration-controlled structures, Hysterestic properties, Beam-to-column connection*

## 1. はじめに

近年の制振構造の実用化に伴い、鋼材系、粘（弾）性系、摩擦系などのダンパーが開発されている。これらのダンパーの中では鋼材系のダンパーが比較的成本が抑えられるため広く普及しつつある。従来の鋼材系ダンパーは、エネルギー吸収を軸降伏により塑性化に期待するせん断パネル型のものが一般的である。

制振構造に使用する制振部材の種類は、実用に供されている制振部材の構造形式は、直接接合型、間接接合型、その他の3種に分類される（図1参照）。

直接接合型とは、層の上および下の主架構の制振部材を直結するものであり、層間変形を制振部材にほぼそのままに伝達できる。間接接合とは、層間変形を梁や束などの曲げ変形などを介して伝達するものであり、梁や束の変形に

より制振部材の変形が層間変形より小さくなる。その他としては、主架構の全体変形を利用したものや層間変形を増幅する機構を有するものがある。これらのダンパーを有効に動作させるためには、架構と大変形時においてもしっかり接合しておく必要がある。

ダンパーの取り付け方法については、間柱型、壁型、ブレース型などの取付方法が提案されている。

一般的にこれらの取付方法は開口部が塞がれるという建築計画上の問題点がある。

そこで筆者らは鋼板を折り曲げ成形した鋼材系履歴ダンパー（以下、扇形ダンパー）を、ピン接合された主架構の仕口部に取り付けることで開口部を確保でき、仕口部をピン接合とすることで変形性能を高め、ダンパー部分でエネルギーを吸収するシステムを提案した。

前報では扇形ダンパー単体の載荷試験を行ってその履歴

\* 広島工業大学工学部建築工学科

\*\* 岡部株式会社技術開発部

特性を示した。

本実験ではト字型の架構の隅角部に扇形ダンパーを設置した試験体を製作し、荷重実験を行うことで、柱梁接合部とダンパーとの応力伝達機構や履歴エネルギー吸収機構が良好に動作するかを検証する。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体

提案する扇形ダンパーの取付状況を図2に、詳細を図2に示す。このダンパーは厚さ6mmの鋼板を冷間加工により成形した折り曲げ部分を持ち、半径540mmの扇形状をした金物を接合添板を介して柱梁隅角部にボルト接合する形式となっている。折り曲げ部は均等に4カ所に曲げ折れ線加工しており、面外に約130mmの全振幅を与えている。表1に扇形ダンパーに用いた鋼材の素材試験結果を示す。

架構試験体を図2(a)～(d)に示す。全ての試験体において柱梁接合部は梁ウェブと柱フランジに取り付けたガ

セットプレートを高力ボルトにより接合している。柱梁接合部の高力ボルトが2本の試験体をRシリーズ、1本の試験体をPシリーズとし、それぞれ扇形ダンパーをつけた試験体(Nタイプ)と扇形ダンパーをつけない試験体(A

表1 ダンパー鋼板 (SN400B) の素材特性

$\sigma_y$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u$ N/mm <sup>2</sup>	$\epsilon_u$ %
289	443	27

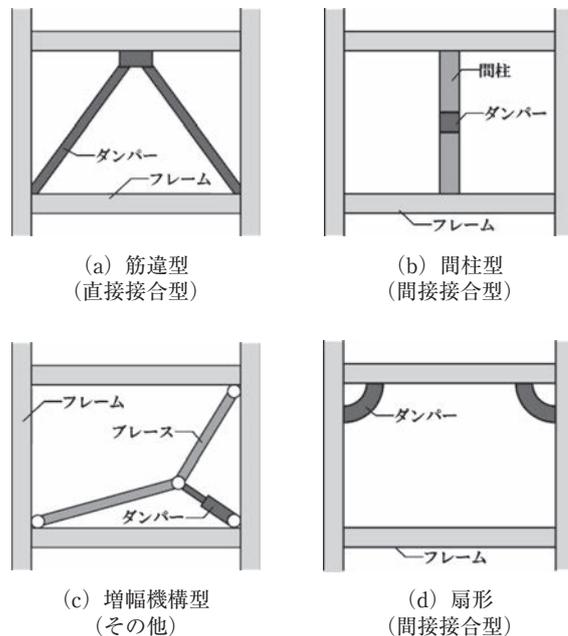


図1 制振部材の種類

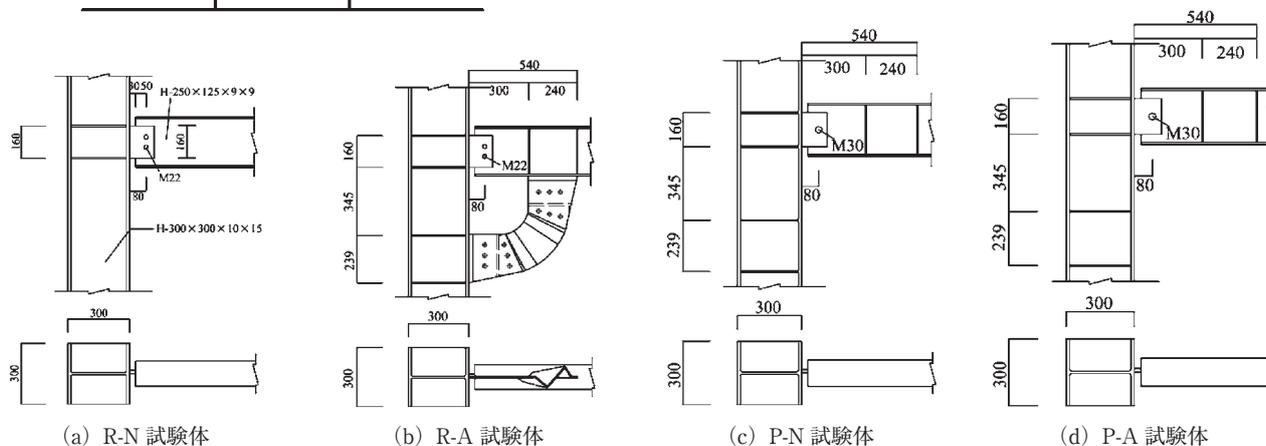


図2 架構試験体

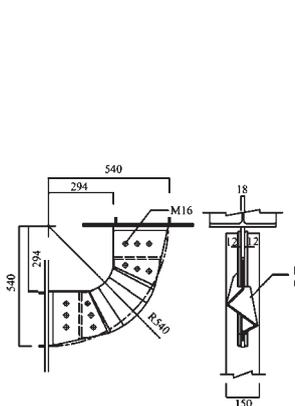


図3 扇形ダンパー詳細

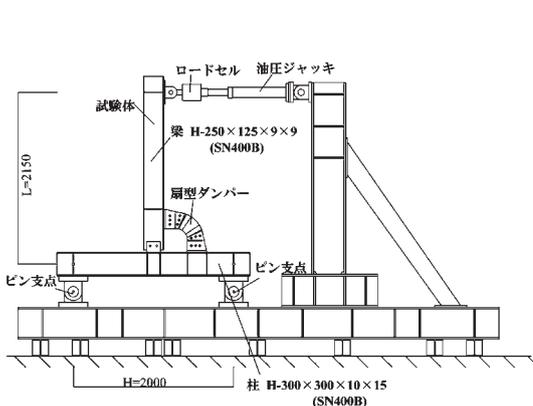


図4 荷重装置の概要

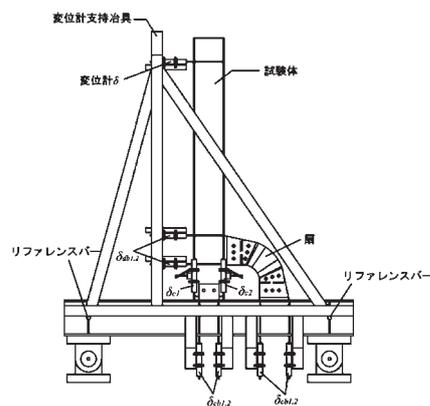


図5 変位計測道具

タイプ) の2タイプ、計4体の試験体を計画した。

2.2 加力装置と計測方法

図4に荷重装置を示す。反力フレームにピンを介してト字型の架構試験体の柱を設置し、油圧ジャッキで梁先端に水平方向強制変位  $\delta$  を与える。尚、加力点付近には、梁の横振れを防止するためにボールベアリングを用いた横振れ防止プレートを設置した。

図5に変位計測治具を示す。荷重の計測は油圧ジャッキ先端に取り付けたロードセルから水平荷重  $P$  を、変位の計測は梁先端の水平方向変位  $\delta$  を、扇形ダンパーと梁との接合部回転角  $\theta_{db}$ 、扇形ダンパーと柱との接合部回転角  $\theta_{dc}$  及び柱と梁との接合部回転角  $\theta_{cb}$  を求めるために、各接合部スチフナ位置のスチフナ方向変位  $\delta_{db1}, \delta_{db2}, \delta_{dc1}, \delta_{dc2}, \delta_{cb1}, \delta_{cb2}$  を計測した。これらの変位計測に用いた変位計は、柱両端のリファレンスバーに設置した図6の支持治具によって支持されている。従って不動点は柱両端となっている。また、柱梁接合部の相対回転角  $\theta_{c1}$  及び扇形ダンパーの相対回転角  $\theta_d$  を求めるために相対変位  $\delta_{c1}, \delta_{c2}$  及び  $\delta_{dd}$  を、扇形ダンパー中央の構面外変位  $\delta_{d0}$  を計測した。歪計測は図6に示す位置について計測し、扇形ダンパーの折り曲げ部の歪と柱梁の各部の歪の値から曲げモーメント、せん断力を計測した。

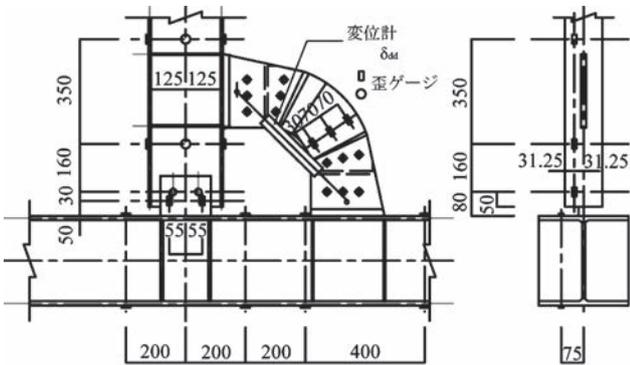


図6 歪ゲージ貼付位置

これらの計測諸量から図7 (b) に示すせん断力  $Q$  と層間変形角  $R$  を次式で求めた。

$$Q = \frac{P \cdot L}{H} \dots\dots\dots (1)$$

$$R = \frac{\delta}{L} \dots\dots\dots (2)$$

ここに  $L$  は梁の長さ、 $H$  は梁の高さである。

また、図6に示す回転角を次式で求めた。

$$\theta_d = \frac{\delta_{dd} \cdot \cos 45^\circ}{l_{dd}} \dots\dots\dots (3, a)$$

$$\theta_{cb} = \frac{\delta_{cb1} - \delta_{cb2}}{l_{cb}} \dots\dots\dots (3, b)$$

$$\theta_{dc} = \frac{\delta_{dc1} - \delta_{dc2}}{l_{dc}} \dots\dots\dots (3, c)$$

$$l_{dd}=690\text{mm}, l_{cb}=160\text{mm}, l_{dc}=240\text{mm}$$

2.3 加力プログラム

荷重プログラムを図8に示す。荷重は層間変位角  $R$  により制御した。荷重プログラムは弾性試験 (実験E)、漸増振幅繰返荷試験 (実験I) 及び定振幅繰返荷試験 (実験S) の3種類とした。

実験Eは層間変位角  $R$  の振幅を 1/1000 として2サイクル繰返す荷重を、実験Iは  $R$  の振幅を 1/400, 1/200,

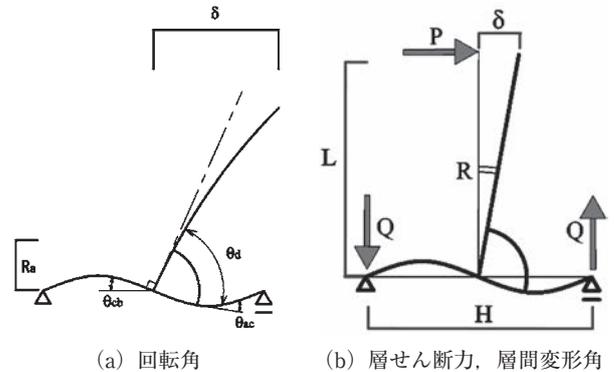


図7 歪ゲージ張付位置

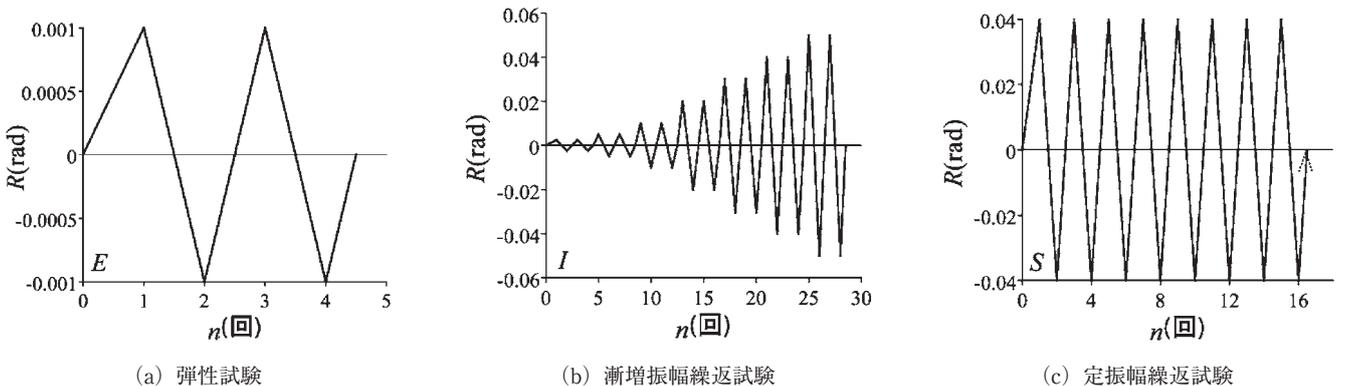


図8 荷重プログラム

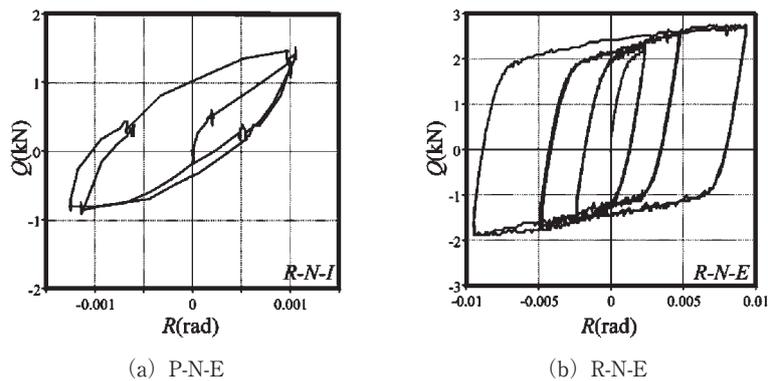


図9 弾性実験(実験E)の結果

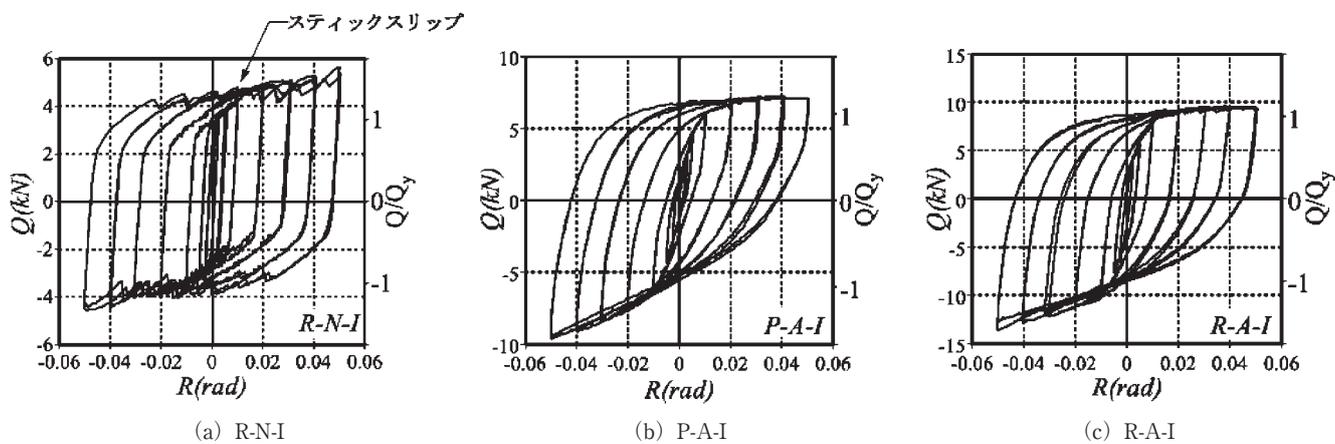


図10 層せん断力-層間変形角関係(実験I)

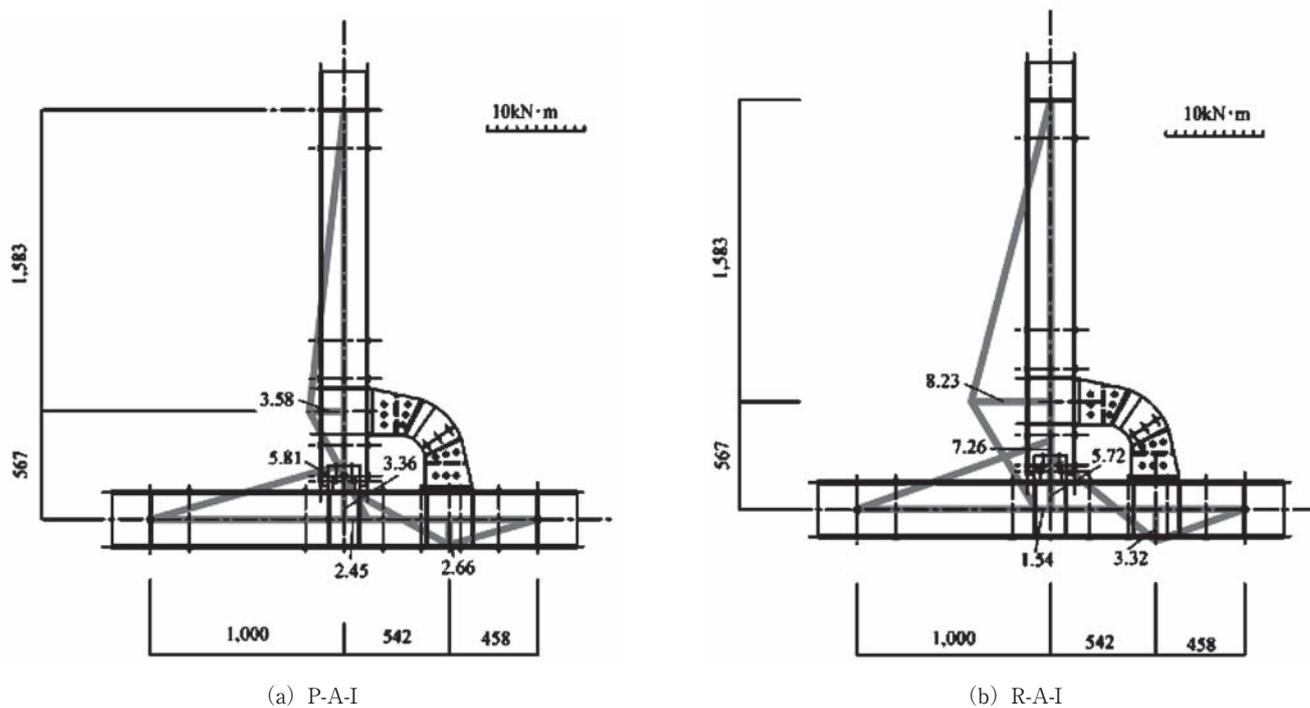


図11 曲げモーメント分布(R-A-I試験体, R=0.01rad)

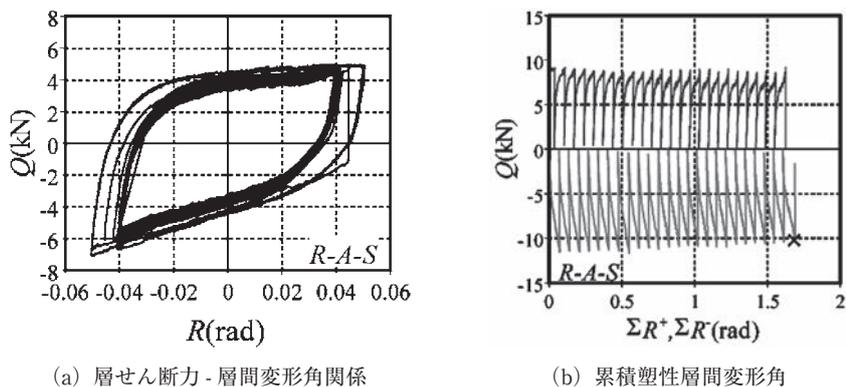


図 12 定振幅試験（実験 S, 試験体 R-A-S）の結果

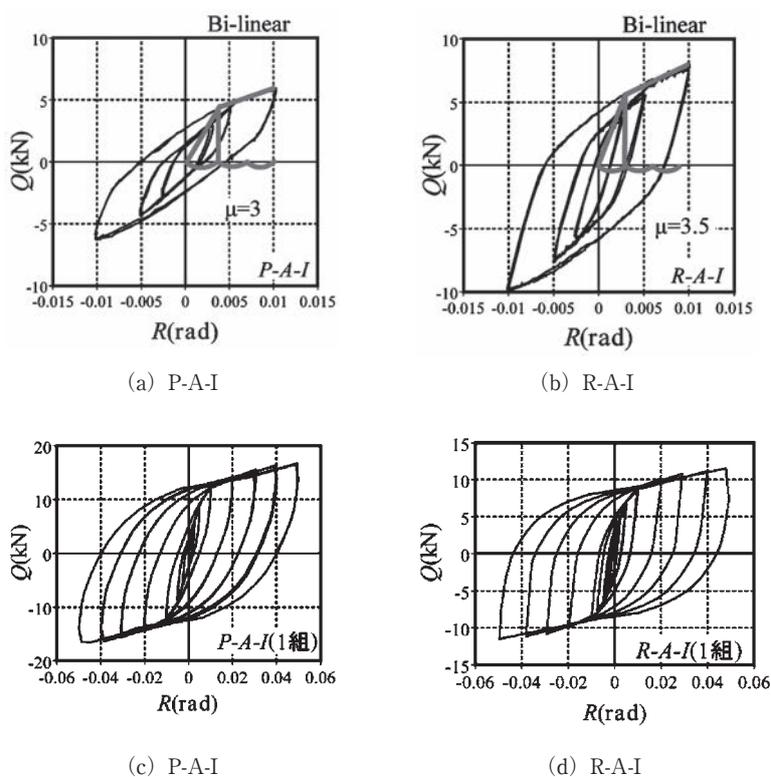


図 13 両端にダンパーを取り付けた層せん断力 - 層間変形角関係

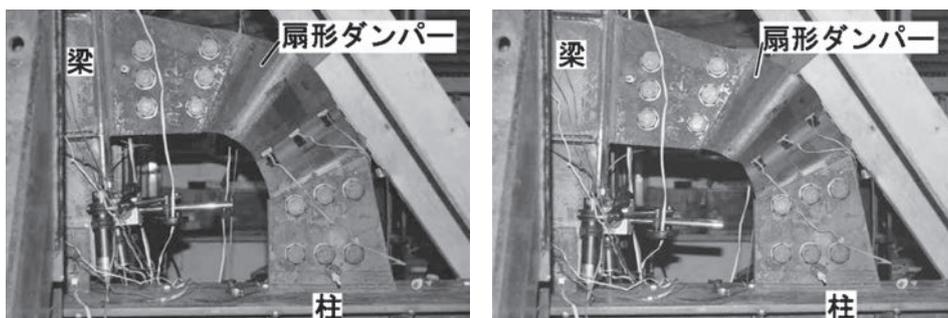


写真 1 扇ダンパーの変形状況（実験 I,  $R = \pm 0.04\text{rad}$ , 試験体 PA-I）

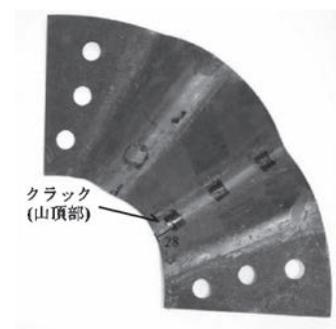


写真 2 定振幅試験における破壊状況

1/100, 1/50, 1/33, 1/25, 1/20 とし各振幅で2サイクル繰返す载荷を、実験SはRの振幅を1/25の定振幅とし、ダンパーに亀裂が生じるまで繰返し载荷を行う。ダンパーのないP-N及びR-N試験体は実験IとEを、ダンパー付きのP-A及びR-A試験体は実験Iを、R-A試験体については実験Iの後に実験Sを载荷した。

### 3. 実験結果とその考察

実験Eの結果を図9に、実験Iの結果を図10, 11及び写真1に、実験Sの結果を図12, 写真2にそれぞれ示す。図9, 10, 12(a)には層せん断力 $Q$ -層間変形角 $R$ の関係を示す。特に図10には右縦軸に圧縮時の扇形ダンパーの耐力で無次元化した層せん断力 $Q/Q_y$ を併せて示す。図12(b)には扇ダンパー付き架構の累積塑性せん断変形角を正側 $\sum R^+$ 、負側 $\sum R^-$ に分けて、これらと $Q$ との関係を示す。図中の×は扇形鋼板中央山部に亀裂が生じた時点を示している。写真2にはその試験体の破壊状況を示す。

図13には1層1スパン架構の左右隅角部に扇形ダンパーを取り付けた時の層せん断力-層間変形角の関係を、実験Iの結果(P-A-I, P-A-L)から作成したものを、層間変形角が1/100rad以内のものを(a), (b)に5/100radまでのものを(c), (d)に分けて示す。いかに各項目に分けて考察を示す。

#### 3.1 柱梁の接合状況

図9, 11より柱と梁を高力ボルト1本で接合した場合は $Q$ が非常に小さくピン接合とみなすことができ、高力ボルト2本で接合した場合は小振幅では2.8kN程度の耐力を有する半鋼接合となることがわかる。

#### 3.2 扇形ダンパーの復元力特性

図10から扇形ダンパーを取り付けている試験体は安定した履歴曲線を描くこと、また、扇形ダンパーを取り付けた試験体は引張側と圧縮側では引張側の耐力が大きく、非対称の紡錘形の復元力特性を示す。

写真1からこの非対称紡錘形の復元力は、扇形ダンパーが変形によって伸び、鋼板面内の引張抵抗の増大により耐力が上昇するためと考えられる。また、用いた扇形ダンパーの弾性限層間変形角は1/200程度であることがわかる。

#### 3.3 エネルギー吸収性能と破壊性状

図12より $R=1/25$ と大きな層間変形角の振幅で23サイクルまで安定した非対称紡錘型の復元力特性を有すること、累積塑性層せん断変形角 $\sum R^+$ 、 $\sum R^-$ は1.5 radに達し、十分なエネルギー吸収能力を有すること、クラックは中央山部の概嘆から中心に向けて進展することから、この折り曲げ加工に工夫を要することがわかる。

本ダンパーは折り曲げ加工のみで溶接を伴わないのでサイクル疲労寿命を確保しやすいと考えられる。

#### 3.4 曲げモーメント分布

図11より高力ボルト1本で接合した場合は、扇形ダンパーを取り付けた場合も接合位置で曲げモーメントは0を維持する。高力ボルト2本では、接合位置での曲げモーメントは0とはならないもののその値は小さい。

#### 3.5 弾性限層間変形角と塑性率

図11より1層1スパンの左右架構の隅角部に扇形ダンパーを設置すれば、復元力特性は左右対称となる。また層

表2 必要諸元

$A$ m <sup>2</sup>	$m$ kg	$h$ mm
36	32400	3500

表3 損傷限界時応答

$S_A$ cm/s <sup>2</sup>	$S_D$ cm	$T$ s
216	1.75	0.14

表4 安全限界時応答

$S_A$ cm/s <sup>2</sup>	$S_D$ cm	$\mu$	$h_e$	$T$ s
392	12.2	1.83	0.115	0.61

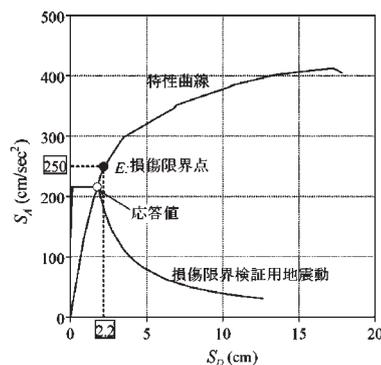
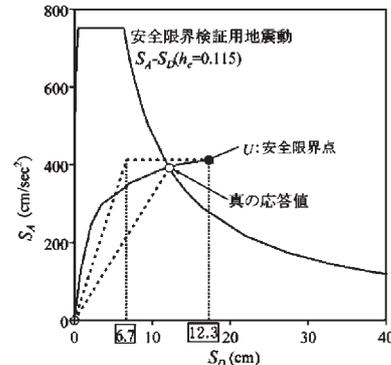
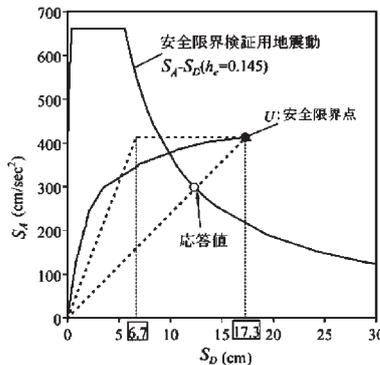


図14 損傷限界検証図



(a) 等価線形系の応答値

(b) 真の応答値

図15 安全限界検証図

間変形角が 1/100rad の時に塑性率は 3 程度となっていることがわかる。

#### 4. 限界耐力計算法によるダンパーの有効性の検付

図 13 の 1 層 1 スパン架構の P-A-I 試験体の結果を用いて、扇形ダンパーの効果を検述する。想定架構の諸元を表 2 に示す。1 構面（柱 2 本）での負担床面積を  $36m^2$ 、単位床面積重量を  $900kg/m^2$  とした。階高は 3500mm とした。この 1 構面に扇形ダンパーを 12 組取り付け（ $n=12$ ）とする。限界耐力計算に用いる加速度表示した荷重  $\alpha$  と代表変位  $\delta$  との関係は次式で算定できる。

$$\delta = R \cdot h \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに  $\delta$  : 層間変位

R : 層間変形角

h : 階高

$$Q = f \cdot n \quad \dots\dots\dots (5, a)$$

$$\alpha = \frac{Q}{m} \quad \dots\dots\dots (5, b)$$

ここに、Q : 層せん断力

f : 1 組の荷重

n : 扇形ダンパーの組数

$\alpha$  : 水平加速度

m : 質量

設計用地震動は、地域は広島（地域係数  $Z=0.9$ ）の第一種地盤に建設するとして算定する。上式と仮定した設計用地震動から限界耐力計算法を用いて、損傷限界と安全限界について本ダンパー付架構の検証を行った。

検証結果を損傷限界について図 14、表 3 に、安全限界について図 15、表 4 に示す。

図 14、15 は、設計用加速度応答一変位応答スペクトルに本架構の荷重一変位関係を示したものである。

表 3.4 には、本架構の真の加速度応答  $S_A$ 、変位応答  $S_D$ 、塑性率  $\mu$ 、等価減衰定数  $h_e$  と等価周期  $T$  を示す。

これらの結果から、一構面 12 組の扇ダンパーを設置することにより、応答は損傷限界点、安全限界点を越えることはなく、中小地震に対しては使用性を、極大地震に対しては安全性を十分に担保しうることがわかる。

#### 5. まとめ

本研究では扇形鋼板ダンパーを取り付けたト字型試験体の加力試験を行い、扇形鋼板ダンパー付架構の力学的性能を検証した。

得られた知見は以下の通りである。

1) 弾性限層間変形角は 1/200 程度いないとなる。

2) 非対称紡錘型の復元力特性を持つ。

3) 層間変形角が 1/100 時に塑性率が 3 程度となる。

4) 限界累積塑性層せん断変形角は 1.5rad 程度あり十分なエネルギー吸収性能を持つ。

5) 完用的な設置枚数の扇ダンパーによって中小地震に対しては使用性を、大地震に対しては安全性を担保する設計が可能である。

扇形鋼板ダンパーは柱梁隅角部左右に設置されることから 2 つ合わせた層せん断力一層間変形角関係は完全な Bilinear 型となるので非対称紡錘型であるための設計上の複雑さは全くない。

またエネルギー吸収性能が良いことから、より低靱性と思われる高強度鋼を用いて耐力が設計上得られ易い金物も製作しうると考えられる。

#### 参考文献

- 1) 藤森盛久, 和田章, 佐伯栄一郎, 渡辺厚, 人見泰義: 鋼管コンクリートにより座屈を拘束したアンボンドブレースに関する研究, 構造工学論文集, vol.34B, pp.249-258, 1988. 3.
- 2) 玉井宏章, 竹中啓之, 中野孝司, 小島修, 近藤一夫, 花井正美: 低降伏応力度鋼板を用いた K 型ブレース制振装置に関する研究 (その 1, 2), 日本建築学会大会学術講演便概集 (東北), pp.1447-1450, 1991. 9.
- 3) 井上一郎, 澤泉紳一, 東畑泰義, 井ノ上一博: アンボンド平鋼ブレース内臓コンクリート壁の座屈補鋼設計, 日本建築学会構造系論文報告書, 第 432 号, pp.41-49, 1992. 2.
- 4) 竹中啓之, 國末晃寛, 中野孝司, 玉井宏章, 近藤一夫, 花井正美: 低降伏応力度鋼板を用いた K 型ブレース制振装置に関する研究 (その 3 制振装置付架構模型実験の概要), 日本建築学会大会学術講演便概集 (北陸), pp.1337-1338, 1992. 8.
- 5) 三山剛史, 田中清, 平澤光春: 極低降伏点鋼を用いた制振構造に関する研究 (その 1, 2), 日本建築学会大会学術講演便概集 (関東), pp.593-596, 1993. 9.
- 6) 麻生直木, 相澤覚, 池田崇, 金子洋文他 4 名: 波型鋼板耐震壁の力学性状に関する研究その (1, 2), 日本建築学会大会学術講演便概集, C-1 分冊, pp.1123-1126, 2006. 9.
- 7) 玉井宏章, 高松隆夫, 村田学, 角屋治克: 折り曲げ成形鋼板を用いた履歴ダンパーの開発, 鋼構造年次論文報告集第 17 巻, pp.133-140, 2009. 11.
- 8) 玉井宏章, 高松隆夫, 村田学, 角屋治克: 鉄骨架構に適用する方杖形式扇ダンパーに関する研究 (その 1 扇型金物の加力試験), 広島工業大学紀要研究編第 44 巻,

pp.151-156, 2010. 2.

の構造関係技術基準解説書, pp.415-447, 2007. 8.

9) 国土交通省住宅局建築指導課監修, 2007年版建築物