

# 鉄骨架構に適用する方杖形式扇型ダンパーに関する研究

## (その1 扇型金物の加力試験)

玉井 宏章\*・高松 隆夫\*・村田 学\*\*・角屋 治克\*\*

(平成21年10月30日受理)

### On Hysteretic dampers for steel buildings with bent steel plates

(Part1 Loading tests on bent steel plate)

Hiroyuki TAMAI, Takao TAKAMATU, Manabu MURATA and Haruyoshi KADOYA

(Received Oct. 30, 2009)

#### Abstract

In this paper, the static characteristics of the hysteretic dampers with bended steel plates were investigated by cyclic loading test using partial specimens. The test parameters were the methods of connections and the number of dampers. The test results showed that the hysteretic properties of this dampers were stable and the tensile strength was stronger than the compressive strength.

**Key Words:** Steel damper, Vibration-controlled structures, Hysteretic 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座屈拘束型<sup>1),3)</sup>や、せん断降伏による塑性化に期待するせん断パネル型のもの<sup>2),4),5)</sup>が一般的である。

変形性能を実に向上させる塑性化形式が用意されると、判振構造のメニューが増え望ましいと考えられる。また、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と接合しておく必要がある。

ダンパーの取付方法については、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。そこで筆者らは図1に示す鋼板を折り曲げて成型した鋼材系履歴ダンパーを、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を確保できる構造形式を提案する。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である。

提案する鋼材ダンパーは鋼板に折り曲げ部分を設け、その折曲げ部分の板要素が曲げ降伏することによるエネルギー吸収を期待するものである。このような塑性化機構のダンパーはダンパー単体にも大きな塑性変形性能が期待できる。

#### 2. 折り曲げ成形鋼板バンパー

提案する折り曲げ成形鋼板ダンパーの機構を図1に詳細を図2 (a), (c)-(e)に示す。

扇形の鋼板に4ヶ所を均等に折り曲げ折れ線加工したものをエンドプレートや接合添板を介して柱梁隅角部に高力

\* 広島工業大学工学部建築工学科

\*\* 岡部株式会社

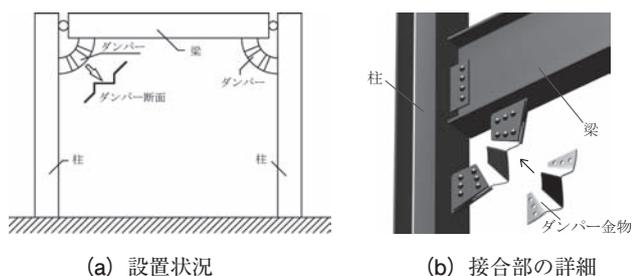


図1 折り曲げ成形鋼板ダンパー

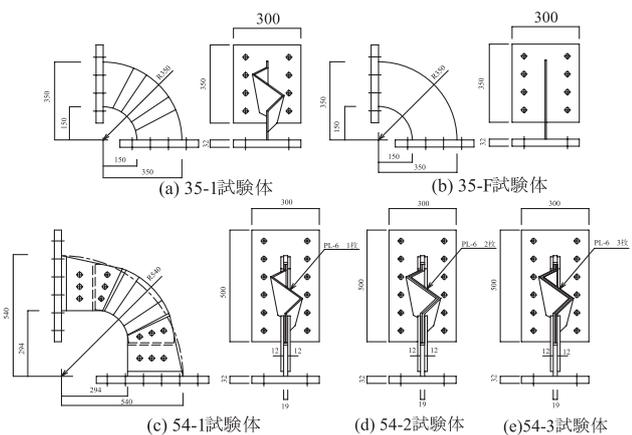


図2 折り曲げ成形鋼板ダンパー（試験体一覧）

ボルト接合するようになっている。

地震時による柱梁隅角部の変形により折り曲げ部分の4折線に塑性ヒンジ線が生じ、圧縮・引張時とも安定したエネルギー吸収を行える機構を有している。折り曲げ深さを十分にとることによって大きな塑性変形性能が期待できる。また柱梁接合部を梁ウェブのみをボルト接合するピン接合とすれば架構全体に大変形時においても鉛直力を十分に支える構造システムを構築することができる。

建築計画には開口部が大きくとれる他、ボルト接合によって取付けるので、補修・修理が容易に行える。

### 3. 載荷試験方法

折曲げ成形鋼板ダンパーの性状を調査するために載荷試験を行った。以下に載荷試験方法を示す。

#### 3.1 試験体

図2に試験体、表1に試験体一覧を示す。試験体は、厚さ6mm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350mmの扇形状をした金物（以下ダンパー金物）をエンドプレートに溶接接合した試験体（35シリーズ）と、ダンパー金物とエンドプレートにガセットプレートを溶接した金物を高力ボルト接合することで扇形状の半径を約540mmとした試験体（54シリーズ）の2種類を用意した。35シリーズはダンパー金物を1枚溶接した試験体と扇形状がダンパー金物と同様の形状を持つ平板を溶接した試験

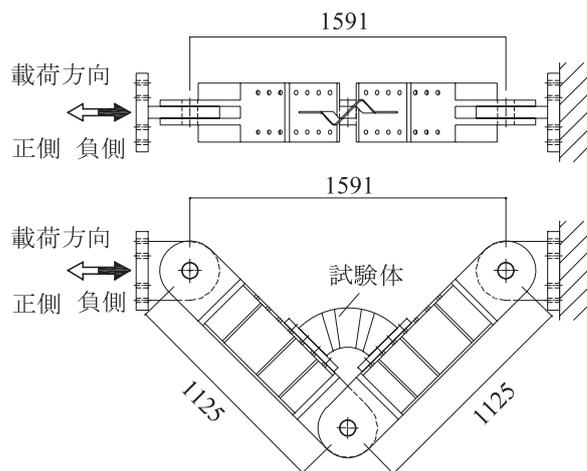


図3 載荷治具の詳細

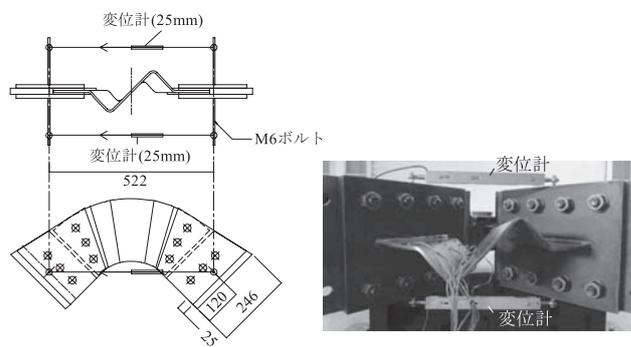


図4 変位計測治具

体の計2体、54シリーズはダンパー金物1枚を高力ボルト摩擦接合した試験体、2枚重ねて摩擦接合した試験体、3枚重ねて摩擦接合した試験体の3体、計5体の試験体を用いた。扇半径を350mmと540mmとすることで扇半径によるダンパー金物の力学性状への影響を確認する。また、ダンパー金物を複数取り付けした試験体を用い、ダンパー金物の数量を増加したときダンパー部分の性能が線形的に増加することを確認する。更に、平板の試験体を用いることでダンパー金物の平板部分に関する面外座屈等の力学挙動を確認する。表2にダンパー金物の素材試験結果を示す。

#### 3.2 載荷プログラムおよび測定方法

試験装置は図3. に示すように各接点をピン接合としたV字形の治具を用い、V字の隅角部に試験体を設置する。片方の端部ピンを固定し、もう片方の端部ピンにジャッキを用いて載荷を行うことで、中央部ピンを回転中心とする曲げモーメントMを試験体に作用させる。変位の計測は図4に示す。試験体両部の相対変位を表と裏の変位系で計測し平均した後、隅角部の回転角 $\theta$ に換算した。荷重の計測はジャッキ先端のロードセルで行いピン部の抵抗曲げモーメントに換算した。ひずみの計測は図5に示すよう各試験体について折線上表裏の円周方向直ひずみを箔ひずみゲージで計測した。載荷プログラムは正負漸増繰返し載荷

表1 試験体一覧

試験体名	扇半径	金物形状	金物枚数
35-1	350	折り曲げ鋼板	1
35-F	350	平板	1
54-1	540	折り曲げ鋼板	1
54-2	540	折り曲げ鋼板	2
54-3	540	折り曲げ鋼板	3

表2 素材試験結果

	YP ( $N/mm^2$ )	TS ( $N/mm^2$ )	EI (%)	YR (%)
P1-6	308	443	27.0	69.5

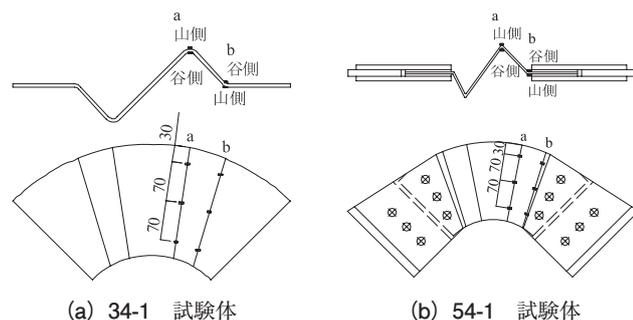


図5. 歪ゲージの貼付位置

とし、降伏回転角  $\theta_y$  の 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20 倍を正負 2 回ずつ繰返すことを基本とする载荷サイクルとした。降伏回転角  $\theta_y$  は試験体と同じ半径、幅及び板厚を持つ板要素が引張降伏するときの変形に対応した回転角とした。

#### 4. 実験結果と考察

図6に各試験体の曲げモーメント  $M$ -回転角  $\theta$  関係の履歴曲線を示し、図7に各試験体の骨格曲線を示す。表2に実験結果一覧を示す。図8には34-1, 54-1試験体の引張・圧縮時における最大ひずみ分布を示す。写真1には35-F, 54-1, 54-2試験体の引張時および圧縮時の変形状を以下の項目について考察を示す。

##### ○履歴特性

ダンパー金物を用いた試験体は全て  $20\theta_y$  まで荷重が低下することなく安定した履歴曲線を描いているが、引張側と圧縮側の履歴性状が異なり、変形が発展するのに従って引張側の荷重が圧縮側の荷重に比べて大きく上昇する傾向が見られる。引張側においては変形が進展すると折れ曲がり部が徐々に平板に近づいていき、試験体の抵抗機構が折れ曲がり部の曲げ抵抗から板要素の引張抵抗に近づいていくため、荷重が大きく上昇すると考えられる。圧縮側においては試験体の抵抗機構が折れ曲がり部の曲げ抵抗によるもので、折れ曲がり部に塑性ヒンジが形成されるため荷重が大きく上昇せずに変形が進むと考えられる。

表3 実験結果一覧

試験体名	载荷方向	$\epsilon K$ ( $kN \cdot m / rad$ )	$\epsilon M_y$ ( $kN \cdot m$ )	$\epsilon M_{max}$ ( $kN \cdot m$ )
35-1	+	1070	7.8	11.3
	-	1130	-7.0	-8.6
35-F	+	77000	82.3	125
	-	78000	-58.9	-64.4
54-1	+	1150	12.5	21.5
	-	1150	-10.1	-15.6
54-2	+	1900	29.7	41.4
	-	2350	-18.7	-30.8
54-3	+	3000	39.8	60.5
	-	3800	-24.6	-42.9

平板の試験体 35-F は引張側において  $10\theta_y$  まで荷重の低下は見られなかったが、圧縮側においては  $20\theta_y$  の一回目の载荷時に全体座屈が発生し荷重が低下した。座屈発生後は引張側ではスリップ形状の履歴曲線を描き、圧縮側は座屈による耐力低下の後、ほぼ一定の耐力を保持したまま変形が増大し、変形が増大とともに除荷剛性の低下が見られた。35-F は圧縮側においても著しく耐力が低下したため  $10\theta_y$  の载荷サイクル終了時に実験を終了した。座屈後にほぼ一定となる耐力の値が約  $20kN \cdot m$  となっている。これは 35-1 の最大耐力の約 2 倍の値であり、ダンパー金物の平板部分における面外座屈の発生を考慮する必要はないと考えられる。

##### ○降伏耐力・初期剛性最大耐力

表2から降伏耐力  $\epsilon M_y$  は骨格曲線における接線剛性が初期剛性  $\epsilon K$  の  $1/3$  となるときのモーメントの値とした。35-1 と 54-1 を比較すると、 $\epsilon M_{max}$  の比は 1.51, 1.45 となっており、扇半径の比である 1.51 とほぼ同じ比となっているが、 $\epsilon K$  の比は 1.07, 1.02,  $\epsilon M_y$  の比は 1.27, 1.15 となり扇半径の比より小さい比となっている。54-1 と 54-2 について  $\epsilon K$  の比が 1.65, 2.04,  $\epsilon M_y$  の比が 2.37, 1.87,  $\epsilon M_{max}$  の比が 1.93, 1.98 となり、54-1 と 54-3 について  $\epsilon K$  の比が 2.61, 3.30,  $\epsilon M_y$  の比が 3.19, 2.42,  $\epsilon M_{max}$  の比が 2.82, 2.75 となっている。同じダンパー金物を重ねて増加させていくとほぼ比例的に耐力及び剛性が増加していくことが確認できた。引張側と圧縮側を比較すると  $\epsilon K$  は負側の方が大きくなる傾向が見られ、 $\epsilon M_y$  と  $\epsilon M_{max}$  は正側の方が大きくなる傾向が見られる。負側の  $\epsilon K$  が正側に比べて大きくなる傾向は特に 54-2 と 54-3 が顕著である。

54-2 と 54-3 はダンパー金物が重ね合わされているため圧縮時にはダンパー金物同士の摩擦抵抗が働くが、引張時にはダンパー金物同士に摩擦抵抗がほとんど働かないため、負側の  $\epsilon K$  が正側に比べて大きくなると考えられる。35-1 と 35-F を比較すると剛性、耐力ともに 35-F の方が

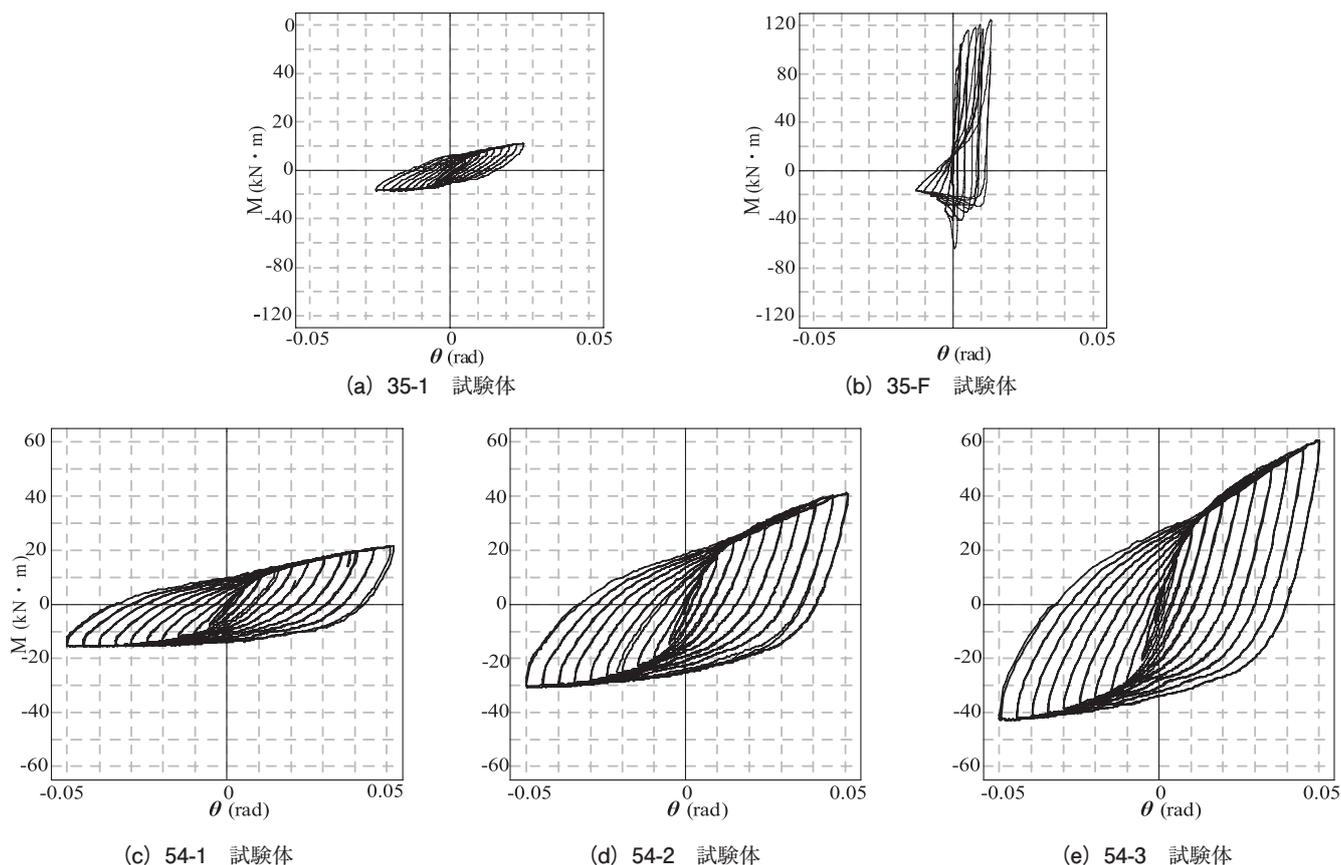


図6 抵抗モーメント、M－回転角 $\theta$ 、関係

著しく大きい値を示している。

○面外変形状

写真1から54-1および54-3は引張側においては変形が進展すると折れ曲がり部が徐々に平板状に近づいていき、試験体の抵抗機構が折れ曲がり部の曲げ抵抗から板要素の引張抵抗に近づいていくため、荷重が大きく上昇すると考えられる。圧縮側においては試験体の抵抗機構が折れ曲がり部の曲げ抵抗によるので、折れ曲がり部に塑性ヒンジが形成されるため荷重が大きく上昇せずに変形が進むと考えられる。54-3のダンパー金物同士のすき間に注目すると、引張側においては全体的にすき間がみられダンパー金物同士には摩擦抵抗が働いていないことが確認できる。圧縮側においては折れ曲がり部のすき間は大きくなるが、折れ曲がり部と折れ曲がり部の間の平板部分は密着しており、この部分で摩擦抵抗が働いていると考えられる。

○歪性状

図8から歪の値は、実験結果から得られた履歴曲線より作成した骨格曲線において回転角 $\theta$ が約1/100となるときの値とした。35-1,54-1ともに外側の折れ曲がり部分bに比べて内側の折れ曲がり部分aの歪が著しく大きくなっており、折れ曲がり部分aが局部的に大きく塑性変形しているこ

とが確認できる。いずれの折れ曲がり部分においても、引張時は折れ曲がり部分の山側に圧縮歪が発生し谷側に引張歪が発生しており、圧縮時は折れ曲がり部分の山側に引張歪が発生し、谷側に圧縮歪が発生している。ダンパー金物は折れ曲がり部分の板要素が曲げられることで降伏して塑性化していると考えられる。折れ曲がり部分aにおいて35-1,54-1とともに圧縮時は、山側と谷側で歪の絶対値が同程度となっているが、引張時は山側よりも谷側の方が歪の絶対値が大きくなっている。圧縮時は折れ曲がり部分が曲げ抵抗しているのに対して、引張時は折れ曲がり部分が曲げ抵抗だけでなく引張抵抗の影響が出ていると考えられる。

折れ曲がり成形鋼板を用いた履歴ダンパーは引張側と圧縮側で異なる力学挙動を示しており、実際の設計で用いる場合は図1に示すように2組のダンパーを設置し、各ダンパーに圧縮力と引張力がそれぞれ同時に作用するように考慮する必要がある。

5. 結論

折れ曲がり鋼板を用いた履歴ダンパーについて単体の正負漸増繰り返し載荷実験を行い、以下の知見が得られた。

- 1) ダンパー金物は圧縮載荷時に比べて引張載荷時の耐力が大きくなる傾向がある。
- 2) 引張側に比べ圧縮側の初期剛性が大きくなる傾向があ

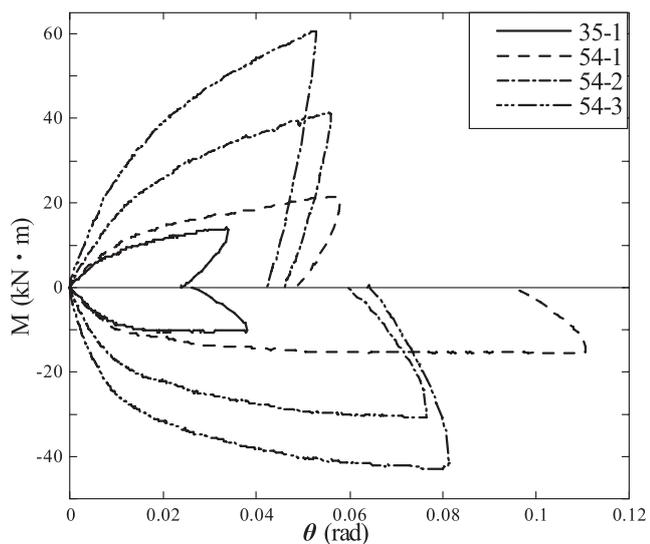


図7 抵抗モーメントM-回転角θの骨格曲線

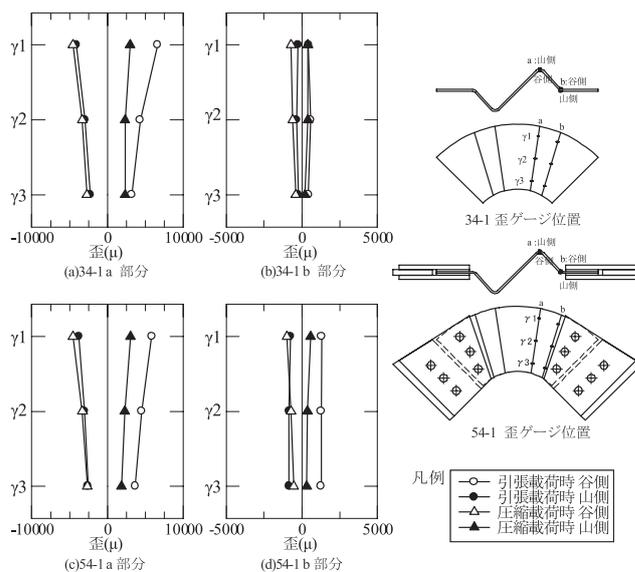
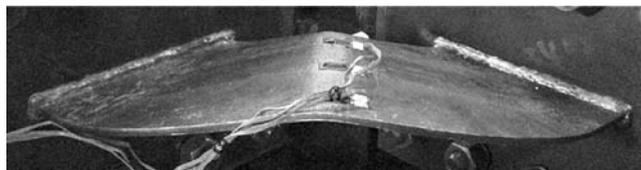
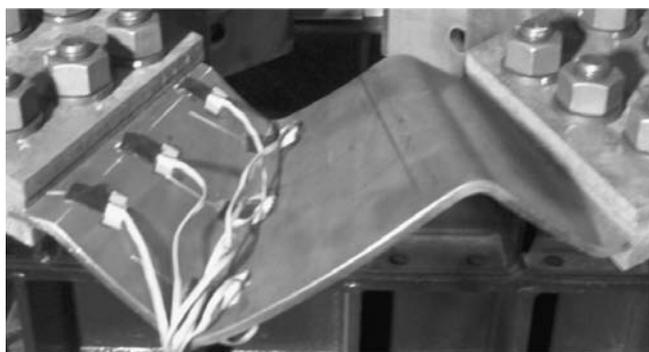


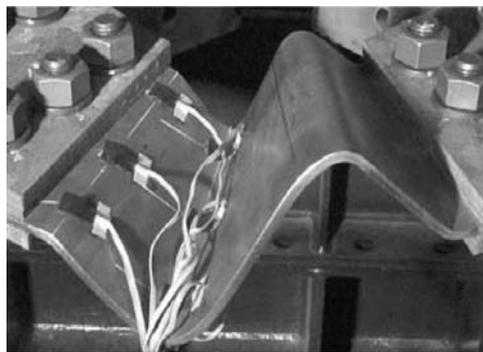
図8 最大ひずみの分布



(a) 35-F 圧縮荷時 ( $\theta = -0.013\text{rad}$ )



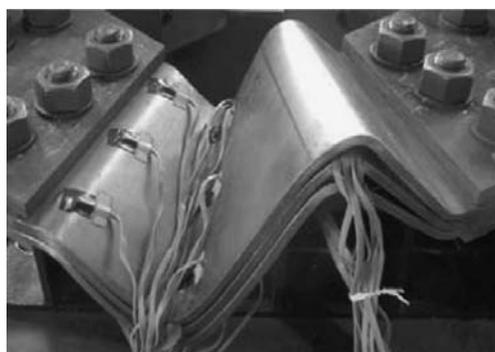
(b) 54-1 引張荷時 ( $\theta = 0.05\text{rad}$ )



(c) 54-1 圧縮荷時 ( $\theta = -0.05\text{rad}$ )



(d) 54-3 引張荷時 ( $\theta = 0.05\text{rad}$ )



(e) 54-3 圧縮荷時 ( $\theta = -0.05\text{rad}$ )

写真1 最大振幅時の変形性状

り、ダンパー金物を重ねた場合この傾向が顕著に見られる。

- 3) ダンパー金物は安定したモーメント回転角関係の履歴曲線を示す。
- 4) ダンパー金物の扇部半径を大きくすることで剛性及び耐力が大きくなり、ダンパー金物を複数枚重ね合わせて使用することで金物枚数にほぼ比例して剛性及び耐力が大きくなることを確認できた。
- 5) ダンパー金物の耐力は平板の面外座屈耐力に比べ十分に小さく、ダンパー金物の平板部分における面外座屈については特に考慮する必要はない。

今後の以下の検討課題について実験およびFEM解析により検討していく予定である。

- 1) 柱梁接合部にダンパー金物を取り付けた試験体を用いた実験を行い、柱梁接合部にダンパー金物を取り付けた場合の力学性状を確認する。
- 2) FEM解析により塑性化領域が大きくなるように最適な形状を検討する。
- 3) 定振幅繰返し載荷実験を行い、ダンパー金物の疲労特性を確認する。

#### 参考文献

- 1) 藤森盛久, 和田章, 佐伯英一郎, 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, 花井正実: 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梗概集(東北), pp.1447-1450,1991.9.
- 3) 井上一朗, 澤泉紳一, 東畑泰夫, 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, 花井正実: 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梗概集(北陸), pp.1337-1338,1992.8.
- 5) 三山剛司, 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梗概集(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, 波形鋼板耐震壁の力学性状に関する研究その1, その2, 日本建築学会学術講演梗概集, C-1分冊, p.1123-1126, 2006.9.