

繰り返しせん断力を受ける鋼腹板の弾塑性応答性状に関する実験

An Experimental Study on Elasto-Plastic Behavior of Steel Web Plates under Cyclic Shearing Force

酒造 敏廣*, 山田 宰**, 樋口 直紀***

Toshihiro MIKI, Osamu YAMADA and Naoki HIGUCHI

* 工博 大同工業大学 教授 工学部都市環境デザイン学科 (〒457-8532 名古屋市南区白水町 40)

** 工修 大同工業大学大学院 工学研究科博士後期課程在学中 (〒457-8532 名古屋市南区白水町 40)

*** 大同工業大学大学院 工学研究科修士課程建設工学専攻在学中 (〒457-8532 名古屋市南区白水町 40)

This paper studies the elasto-plastic collapse behavior of steel web plates. Fourteen web plates of the width-thickness ratio 35 to 154 are tested up to failure under the condition of cyclic shearing force with variable strain rate. Test results discuss the variation of shearing buckling wave and location of crack due to the plate slenderness and static and dynamic loading patterns. The stress-strain response by the loading with piecewise constant strain rates, unloading and relaxation demonstrates the relationship between the viscoplastic shearing overstress and strain rate.

Key Words : steel web plate, shear collapse, dynamic loading, strain rate, rigid frame, beam

キーワード: 鋼腹板, せん断崩壊, 動的載荷, ひずみ速度, ラーメン, はり部材

1. まえがき

鋼材の機械的性質は、ひずみ速度によって影響を受け、たとえば、降伏点上昇が顕著になること等がよく知られている^{1)~9)}。

酒造, 山田らは、兵庫県南部地震で被害を受けた鋼門形ラーメンに着目し^{10)~12)}、簡便な *Bi-Linear* タイプの応力-ひずみ曲線を基本にして、余応力理論^{13)~15)}に基づいた一軸粘塑性応力-ひずみ曲線を誘導し、ひずみ速度依存性を考慮した一、二層門形ラーメンの地震応答解析を行ってきた^{16), 17)}。そして、はり部材がせん断崩壊するとき、せん断耐力が小さいはり中間部では、塑性変形が局所的に大きくなるためにひずみ速度が著しく増大し、最大でせん断降伏ひずみの 100~300 倍/秒の高速で、かなり大きな塑性変形域まで応答する可能性があることを指摘した。

これまで、せん断力を受ける鋼板の繰り返し載荷実験^{18)~20)}や理論解析^{21), 22)}は多数実施されている。しかし、せん断座屈波形が顕著になり、繰り返しによる亀裂発生時までの動的応答性状を論じた研究は少ない。

以上のような研究背景のもとで、文献 23)では、純せん断力を高速載荷できるせん断力載荷治具を考案・試作

し、幅厚比 35~95 の鋼板の単調・繰り返し載荷実験を通じて、腹板の動的弾塑性応答の基本的性状について考察した。

本研究では、正方形の鋼腹板供試体 (計 14 体、幅厚比は 4 種類) を製作し、主として載荷速度に着目して、繰り返しせん断力を受けるときの弾塑性応答性状を実験的に明らかにしようとしたものである。すなわち、せん断変形角速度 (= ひずみ速度) による腹板の抵抗せん断力-せん断変形角曲線の変動、幅厚比によるせん断座屈たわみや亀裂発生状況の違い、及び、ひずみ速度によるせん断余応力の変動等を調べ、その弾塑性応答性状について考察する。

2. 実験概要

2.1 実験供試体

本研究では、せん断力が卓越する鋼製ラーメンのはり中間部腹板に着目している²³⁾。その際、フランジ・プレートは、剛度が大きく、腹板が非弾性域でせん断座屈変形を呈しても、弾性状態を保つとして実験的研究を進めている。

まず、せん断力を受ける鋼腹板の実験供試体を図 1 と

写真 1 に示す。1 辺が 200mm の正方形腹板の周辺にフランジプレートを溶接した構造としている。つぎに、供試体（計 7 種類）の内訳と製作に用いた鋼板の機械的性質等²³⁾を表 1、2 に示す。腹板の幅厚比は $b/t=35, 46, 63$ および 154 の 4 種類であり、文献 23)の実験供試体に 1.3mm 厚の供試体を追加した形となっている。1.3mm 厚の供試体は、3.2mm 厚鋼板から削り出して製作した。これは、せん断力を受ける周辺固定板の無次元幅厚比 R_f に換算すると $R_f=1.17$ である²⁴⁾。その他の供試体は $R_f=0.29\sim0.50$ の間にある。

2.2 実験装置

実験装置²³⁾は、図 2 と写真 2 に示すように、上下のアーム③、④と側辺ヒンジ治具⑤ 等からなる。この装置は、サーボアクチュエーターによる鉛直荷重 P （最大圧縮・引張力 500kN，最大ストローク ± 75 mm）をせん断力 S に変換する役割を持つ。供試体は、载荷治具のアームにフランジ・プレート一辺につき 6 箇所、計 24 本のボルトで取り付ける。腹板の 4 隅は、図中に示す 4 つの軸受の回転中心と一致させている。これにより、せん断力 S は剛なアームを通じて腹板とフランジ・プレートの溶接線に沿って作用し、実際のはり腹板に近い構造となっている。

ここで、鉛直荷重 P 、鉛直変位 Δ （ $\equiv$ 軸受間の鉛直変位 δ ）、腹板の作用せん断力 S 、せん断応力 τ 、および、せん

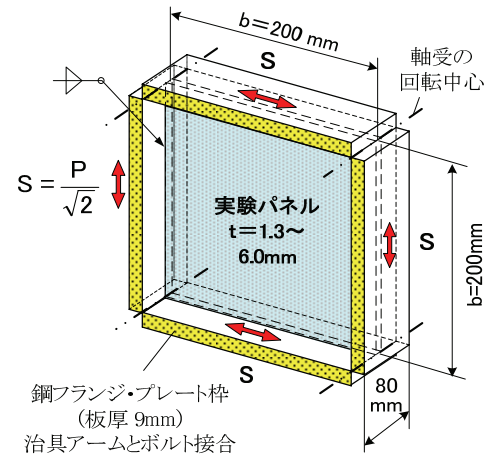


図 1 せん断力を受ける鋼腹板の実験供試体

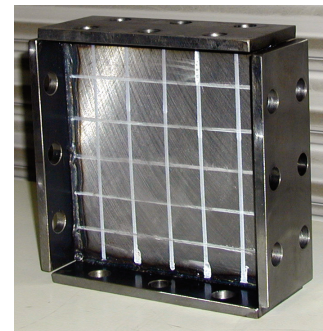


写真 1 実験供試体

表 1 準静的・動的せん断力を受ける鋼腹板供試体と载荷条件

項目 供試体	無次元 幅厚比 R_f	板 厚 別	供 試 体 数	降伏 せん断 ひずみ γ_y	降伏 鉛直 変位 δ_y (mm)	加振 振動数 f (Hz)	最大変位振幅等		最大変形速度等		
							鉛直変位 (軸受間) δ_m (mm)	せん断 変形角 γ (rad)	鉛直速度 (軸受間) $\dot{\delta}$ (mm/sec)	せん断変形角速度 $\dot{\gamma}$ (rad/s)	$\dot{\gamma}/\gamma_y$ (1/s)
1- DvCc-35	0.29	A	3	0.00228	0.322	1.5×10^{-4} ~0.51	± 5.15	-0.0356 ~0.0331	0.003 ~10.6	2.1×10^{-5} ~0.075	0.009 ~33
2- DvCc-46	0.37	B	2	0.00213	0.301	4.9×10^{-5} ~0.62	± 5.15	-0.0365 ~0.0359	0.001 ~12.7	7.1×10^{-6} ~0.090	0.003 ~42
3- DvCc-63	0.50	C	2	0.00217	0.307	4.9×10^{-5} ~0.63	± 5.15	-0.0397 ~0.0391	0.001 ~13	7.1×10^{-6} ~0.092	0.003 ~42
4- SM-154	1.17	D	1	0.00217	0.307	—	—	—	—	—	—
5- SCc-154			1			0.003	± 5.15	± 0.0392	0.11	0.0008	0.4
6- SCi-154			1			0.003	$2\delta_y$, ずつ振幅を漸増		—	—	—
7- DsCc-154			1			1.0	± 5.15	± 0.0392	32.3	0.228	106
8- DrCc-154			1			1.0	± 5.15	± 0.0384	20.6	0.146	67
9- DvCc-154			2			4.9×10^{-5} ~0.65	± 5.15	-0.0403 ~0.0414	0.001 ~13.3	7.1×10^{-6} ~0.094	0.003 ~43
10- SM-35	0.29	A	1	0.00228	0.322	—	—	—	—	—	—
11- SCi-35			1			0.003	$2\delta_y$, ずつ振幅を漸増		—	—	—
12- SM-46	0.37	B	1	0.00213	0.301	—	—	—	—	—	—
13- SM-63	0.50	C	1	0.00217	0.307	—	—	—	—	—	—
14- SCi-63			1			0.003	$2\delta_y$, ずつ振幅を漸増		—	—	—

注1)供試体の表記方法：[番号]-[Dv：動的ランブ波(変動速度)，Ds：動的正弦波(一定速度)，Dr：動的ランブ波(一定速度)，S：準静的)

[M：単調载荷，Cc：定振幅の繰り返し载荷，Ci：漸増振幅]-[幅厚比]

2)せん断力を受ける鋼板の無次元幅厚比： $R_f = (b/t)\sqrt{11.1r_y/(k_s\pi^2E)}$ ， $k_s=14.58$ （周辺固定のせん断座屈係数）

3) 供試体 No.10~14 は文献 23)で実験を実施済み。

表 2 鋼板の機械的性質²³⁾ (SS400)

項目 鋼板	実測 板厚 t (mm)	降伏点 σ_y (MPa)	せん断 降伏点 τ_y (MPa)	引張 強度 σ_b (MPa)	ε_H (%)	伸び (%)
A: 6.0mm	5.79	319	184	446	2.02	37.8
B: 4.5mm	4.34	298	172	466	1.44	37.4
C: 3.2mm	3.19	304	175	441	1.01	36.8
D: 1.3mm	1.30	304	175	441	1.01	36.8

注 1) ε_H : ひずみ硬化開始点のひずみ, 2) ヤング係数 $E=2.06 \times 10^5$ MPa, ポアソン比 $\nu=0.28$, せん断弾性係数 $G=8.07 \times 10^4$ Mpa

断変形角 γ の間には, 次の関係が成り立つ.

$$S = P / \sqrt{2} \quad (1)$$

$$\tau = S / b / t \quad (2)$$

$$\gamma = \sqrt{2} \delta / b \quad (3)$$

2.3 せん断力の載荷方法

実験では, せん断力を以下のように載荷した (表 1 参照) .

1) 単調載荷実験 (準静的)

鉛直変位 δ (軸受間), せん断変形角 γ をゆっくりと一方向に漸増させる準静的単調載荷実験を行う.

2) 繰り返し載荷実験 (準静的)

i) 変位振幅 δ_m を一定にした定変位振幅の準静的繰り返し載荷実験を行う. δ_m は, 降伏変位 δ_y の 15~20 倍を目安に設定する.

ii) 変位振幅を徐々に増加させていく漸増変位振幅の準静

的繰り返し載荷実験を行う. 降伏せん断ひずみ ($=\tau_y/G$) の 2 倍に相当する鉛直変位 $2\delta_y$ を増分の目安とした.

3) 繰り返し載荷実験 (動的)

i) 上記 2) i) で仮定した変位振幅のもとで, 振動数 $f=1$ Hz の正弦波,

$$\delta = \delta_m \sin(2\pi ft) \quad (4)$$

で変位制御の動的繰り返し載荷実験を行う. この場合, 軸受間変位速度 $\dot{\delta}$ と実験パネルのせん断変形角速度 $\dot{\gamma}$ は, 次式で求められる.

$$\dot{\delta} = \frac{d\delta}{dt} = 2\pi f \delta_m \cos(2\pi ft) \quad (5a)$$

$$\dot{\gamma} = \sqrt{2} \dot{\delta} / b \quad (6)$$

ii) 上記 2) i) で仮定した変位振幅のもとで, 振動数 $f=1$ Hz のランプ波で動的繰り返し載荷実験を行う.

この場合, 速度 $\dot{\delta}$ は次のように計算できる.

$$\dot{\delta} = 4\delta_m f \quad (5b)$$

また, $\dot{\gamma}$ は式(6)で計算できる.

4) 載荷速度を階段状に増加させた動的載荷実験

負荷, 除荷, 及び, 応力緩和の組み合わせで, 鉛直変位 Δ の時刻歴を設定して, 定変位振幅の動的繰り返し載荷実験を行う. ひずみ速度による抵抗せん断応力の変動を定量的に調べることが目的である. 図 3 は鉛直変位 Δ の入力例である. 負荷, 除荷および応力緩和 (ホールド) の設定は, 図中に示すとおりである. 変位 Δ を一定に保つホールド時間は, せん断応力が静的載荷の状態まで十分に低下することを考慮して設定している.

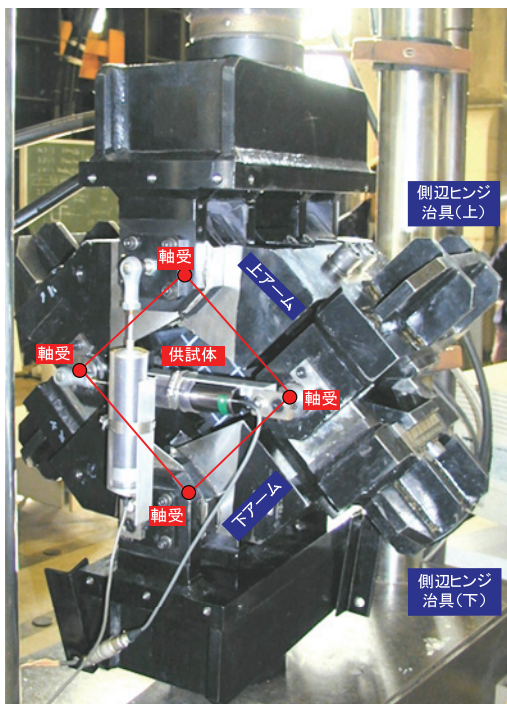


写真 2 腹板のせん断力載荷装置

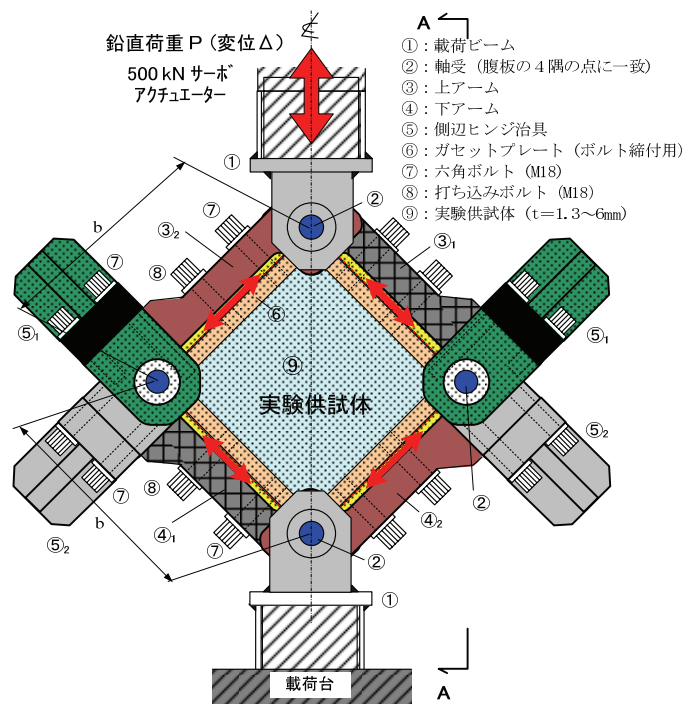


図 2 せん断力の載荷治具

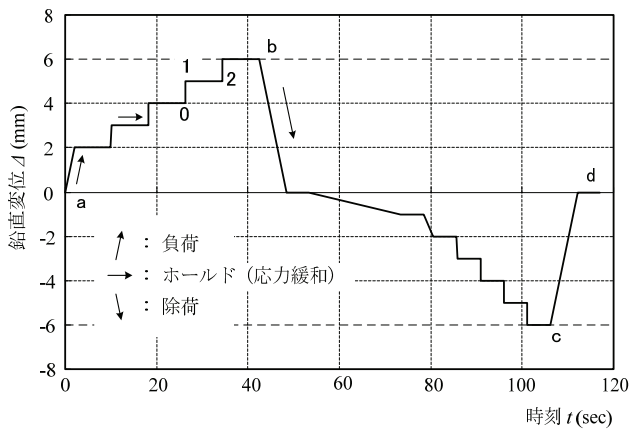


図3 入力変位 Δ の時刻歴の例

本研究では、ひずみ速度の影響は、抵抗せん断応力の静的曲線からの上昇分として捉え、それを余応力 τ_x (overstress) と定義して調べることにした。図3に対応するせん断応力 τ の時刻歴応答例を図4に示す。余応力は、たとえば、ホールド開始点1と次の変位負荷開始点2の間のせん断応力の差となる。

2.4 実験治具の精度確認

1 Hz の動的等価波を載荷して、非弾性域でせん断座屈を起こした供試体 (No.7) の実験結果から、腹板の対角線の伸縮を測る縦・横軸受間の変位の関係を調べた (写真2参照)。その結果を図5に示す。

この図からわかるように、腹板の2つの対角線の変位応答は正負にほぼ対称になっている。横変位の応答は縦変位よりもわずかに小さくなる傾向がある。これは、載荷速度が大きい場合、横変位の応答が縦変位に比べてやや遅れることを意味する。静的載荷で同様な関係を調べた文献(23)の結果と上記の結果を合わせると、静的・動的実験においてせん断力が腹板の相対する二辺にほぼ等しく作用していると言える。

3. 実験結果と考察

3.1 繰り返し載荷の実験結果

(1) 漸増変位振幅の繰り返し載荷実験 (準静的)

漸増変位振幅の繰り返し載荷実験結果から、鋼板のせん断応力 τ -せん断変形角 γ の履歴曲線を図6にまとめる。また、実験終了後の状況を写真3に示す。ここで、幅厚比35と63の実験結果は文献(23)から引用している。

この図からわかるように、No.6, 14のように幅厚比が大きくなると、塑性化後のせん断座屈が顕著になり、変位振幅が大きくなると変位反転点の直後に抵抗せん断力の低下が著しくなっている。これは、写真に示すように、繰り返し載荷により、対角線上にせん断座屈によるたわみが生じ、腹板中央部に亀裂が生じるためである。No.6の場合は、板中央に亀裂は生じておらず、板中央から少し離れた位置から亀裂が生じ始めている。この点は3.3で

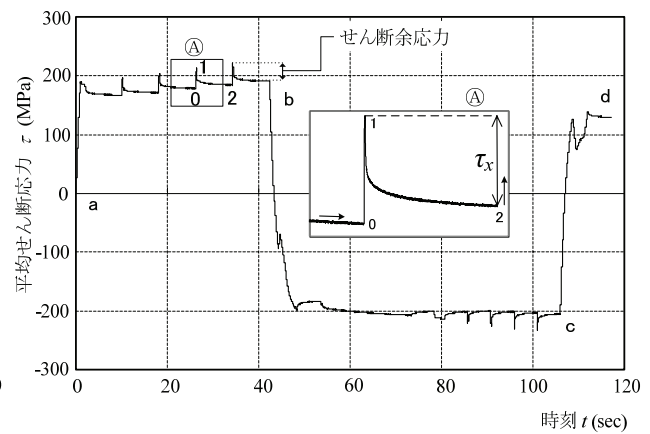
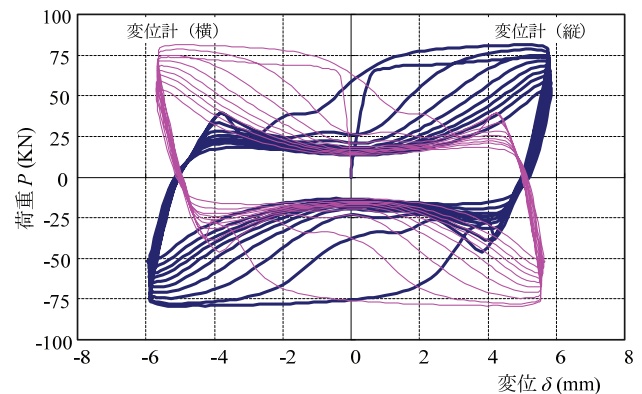
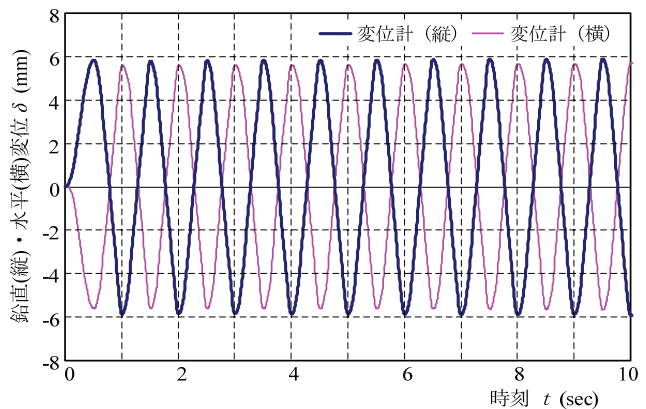


図4 せん断応力 τ の時刻歴応答例



(a) 荷重 P と縦・横の軸受間変位 δ の関係



(b) 縦・横の軸受間変位 δ の時刻歴応答

図5 縦横軸受間変位の対称性

考察する。

(2) 定変位振幅の繰り返し載荷実験

$b/t=154$ の供試体 No.4, 5, 7 および 8 の静的・動的実験から得られた τ - γ 履歴曲線を図7に比較する。また、実験後の腹板の塑性変形の状況を写真4に示す。

この図からわかるように、静的・動的載荷にかかわらず、いずれの供試体でも、せん断変形角の増大により斜張力場が形成され、スリップ型の履歴ループが現れている。図中に示した座屈たわみの図を参照すると、各ループの変位反転点以降に座屈たわみは蝶型になり、抵抗せ

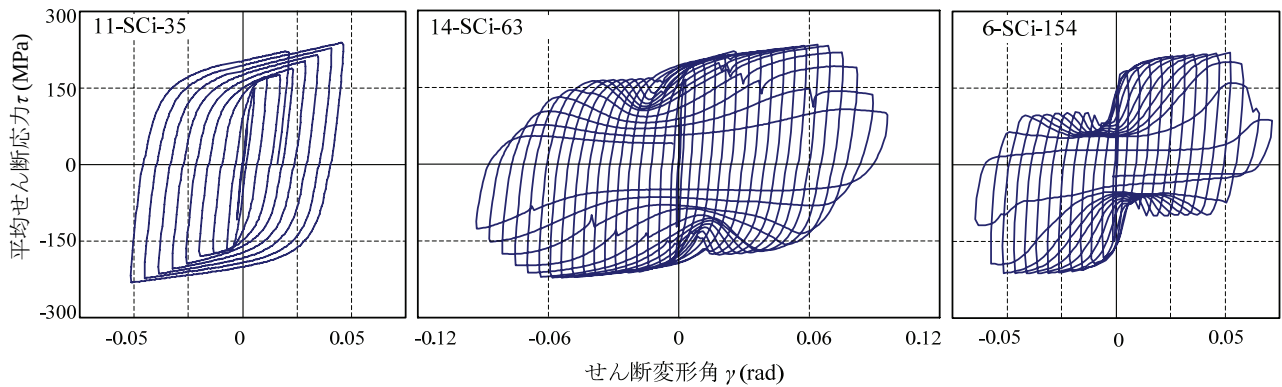
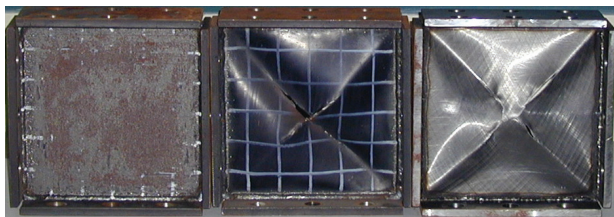


図6 漸増振幅荷の繰り返し実験による履歴曲線



(a)11-SCi-35 (b)14-SCi-63 (c)6-SCi-154

写真3 漸増振幅の繰り返し荷実験の供試体

せん断応力が繰り返し毎に低下している。9サイクル目で降伏せん断応力のおよそ25%程度にまで低下している。また、 τ - γ 曲線の弾性勾配は、荷重速度に関わらずほぼ一致している。最大せん断変形角速度 $\dot{\gamma}$ =約 $106\gamma_y/\text{秒}$ の正弦波 (No.7) と $\dot{\gamma}$ =約 $67\gamma_y/\text{秒}$ のランプ波 (No.8) では、最初に非弾性域に入るとき、せん断降伏点が静的荷重の No.4, 5 のそれよりも約10%大きくなっている。しかし、それ以後は、正弦波とランプ波荷重、および、動的と静的荷重のループ間で、抵抗せん断応力に特段の大きな差異は見られない。

3.2 荷重速度を階段状に増加させた動的荷重実験

一つの履歴ループの中で、荷重、除荷および応力緩和を仮定し、ひずみ速度によって抵抗せん断応力がどのように増減するかを調べた (図3 参照)。ここでは、幅厚比 $b/t=35\sim154$ の供試体 No.1, 2, 3 および 9 について、せん断変形角速度を $0.003\gamma_y/\text{秒}\sim43\gamma_y/\text{秒}$ の間で変化した実験を行った。なお、以下の考察において、 N は繰

り返し荷重による履歴ループの番号を意味し、実験開始から最初の変位反転点までを0サイクルとしている。

(1) せん断応力 τ -せん断変形角 γ 曲線の変動

せん断応力 τ とせん断変形角 γ の実験曲線から、最初のループ ($N=0\sim1$) の結果を図8(a)に示す。また、 $N=14\sim15$ のときの τ - γ 曲線の一部を拡大して同図(b)に示す。

まず、同図(a)から、各供試体の処女履歴ループでは、変位をホールドしたときに、応力がほぼ静的曲線の位置まで下がっていることがわかる。

つぎに、同図(b)から、除荷弾性域から非弾性域に入った後に、幅厚比が大きくなると、抵抗せん断応力の落ち込みが大きいことがわかる。また、 $N=14\sim15$ で仮定し

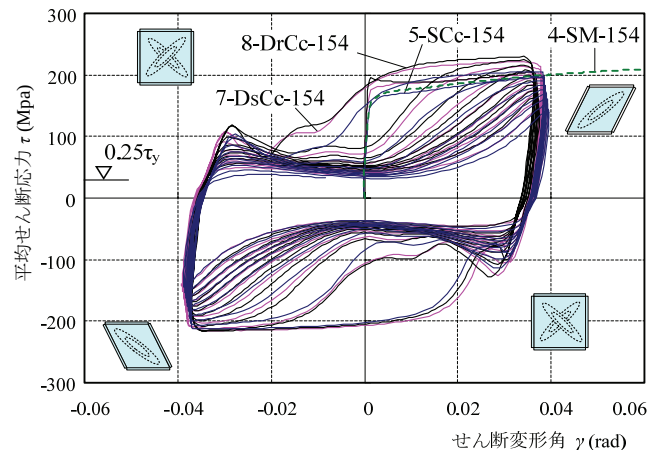
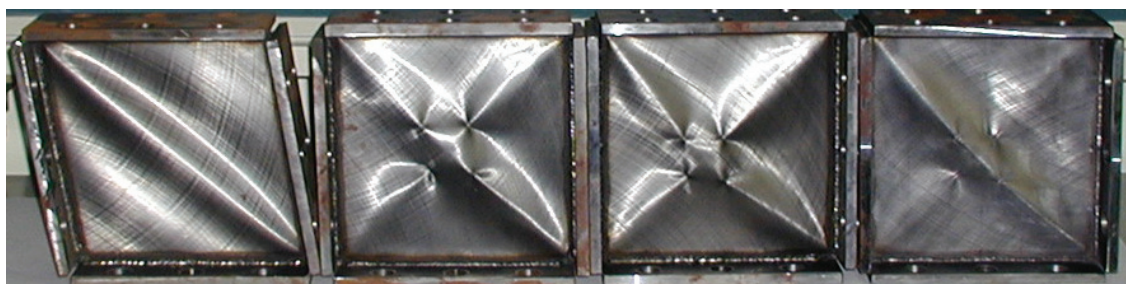


図7 静的・動的履歴曲線の比較 ($b/t=154$)



(a)4-SM-154

(b)5-SCc-154

(c)7-DsCc-154

(d)8-DrCc-154

写真4 静的・動的実験の供試体

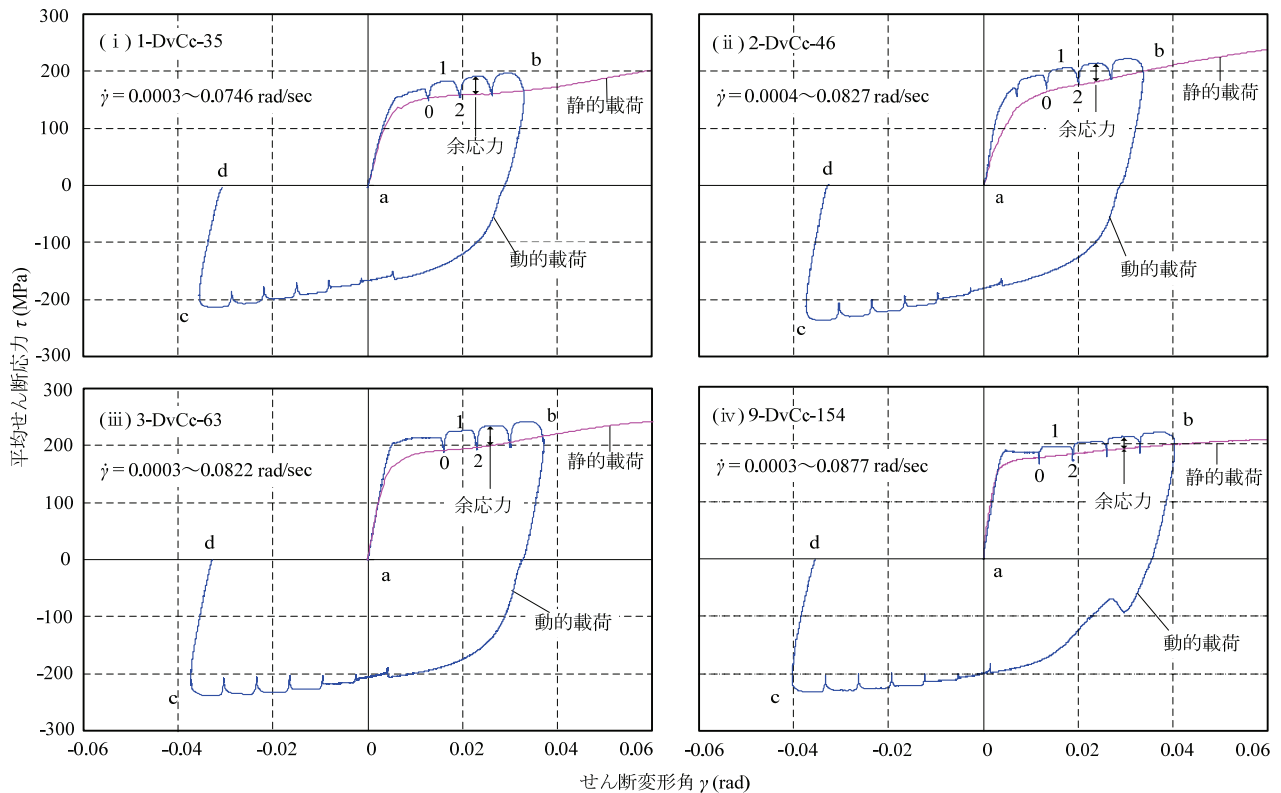


図 8(a) セン断応力 τ とせん断変形角 γ の実験曲線 ($N=0 \sim 1$)

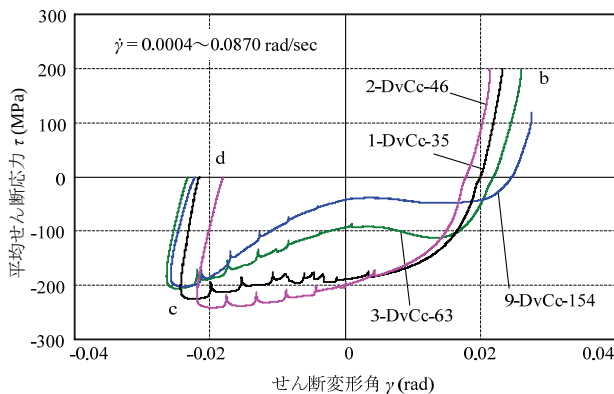


図 8(b) τ - γ の実験曲線 ($N=14 \sim 15$)

たひずみ速度は同図(a)の場合とほぼ同程度であるが、せん断余応力は、同図(a)の処女履歴ループのときに比べて小さくなっている。この原因としては、せん断座屈を伴うスリップ型の履歴曲線の発現（幅厚比が大きいとき）やひずみ硬化による抵抗せん断応力の上昇（幅厚比が小さいとき）等が関係しているように考える。

(2) ひずみ速度によるせん断余応力の変動

上記(1)の履歴曲線を分析して、ひずみ速度の影響を調べた。せん断変形角速度 $\dot{\gamma}$ によるせん断余応力 τ_x の変動を図 9 にまとめる。ここで、 τ_x は降伏せん断応力 τ_y で無次元化している。

図中の実線と破線は、ひずみ速度による余応力の変動を表す次式によって実験結果を近似したものである^{13)~17)}。

$$\tau_x = S \cdot n \cdot \text{Log}_e \left\{ 1 + \left(\frac{\dot{\gamma}}{\sqrt{3}\dot{\epsilon}_*} \right)^{1/n} \right\} \quad (7)$$

ここで、 S , n , $\dot{\epsilon}_*$: 材料に依存する定数、 $\dot{\gamma}$: セン断変形角速度である。

この図からわかるように、初めて非弾性域に入る $N=0$ ループでは、幅厚比にかかわらず余応力 τ_x が大きくなっている。 $b/t=154$ で $\dot{\gamma}=0.1\text{rad/s}$ のとき、 τ_x は降伏せん断応力 τ_y の約 17% となっている。一方、 $N=1$ 以降は、 $N=0$ のときと比べて、 τ_x は τ_y の約 10% に留まっている。また、幅厚比が大きくなるにつれて余応力のばらつきが大きくなる傾向にある。これは、幅厚比が大きい腹板に特有な抵抗せん断応力の落ち込みと亀裂発生に起因するものと考えられる。

3.3 腹板の亀裂進展パターン

供試体 No.14, 8 の腹板の亀裂発生状況を調べるため、中心部を拡大して、対角線方向の座屈たわみのスケッチと合わせて、写真 5 に示す。

同写真(a)からわかるように、 $b/t = 63$ の腹板では、板中心の対角線上に亀裂が生じて、頂点に向かって進展している。これは、腹板の対角線方向に 1 半波形のたわみ波形が生じる場合に相当する。

一方、同写真(b)の $b/t = 154$ の腹板では、亀裂は、板中央から少し離れた位置で 4 箇所が発生し、腹板の対角線方向に進展していることがわかる。これは、腹板の対角線直角方向に 3 半波形のたわみが現れることに起因する

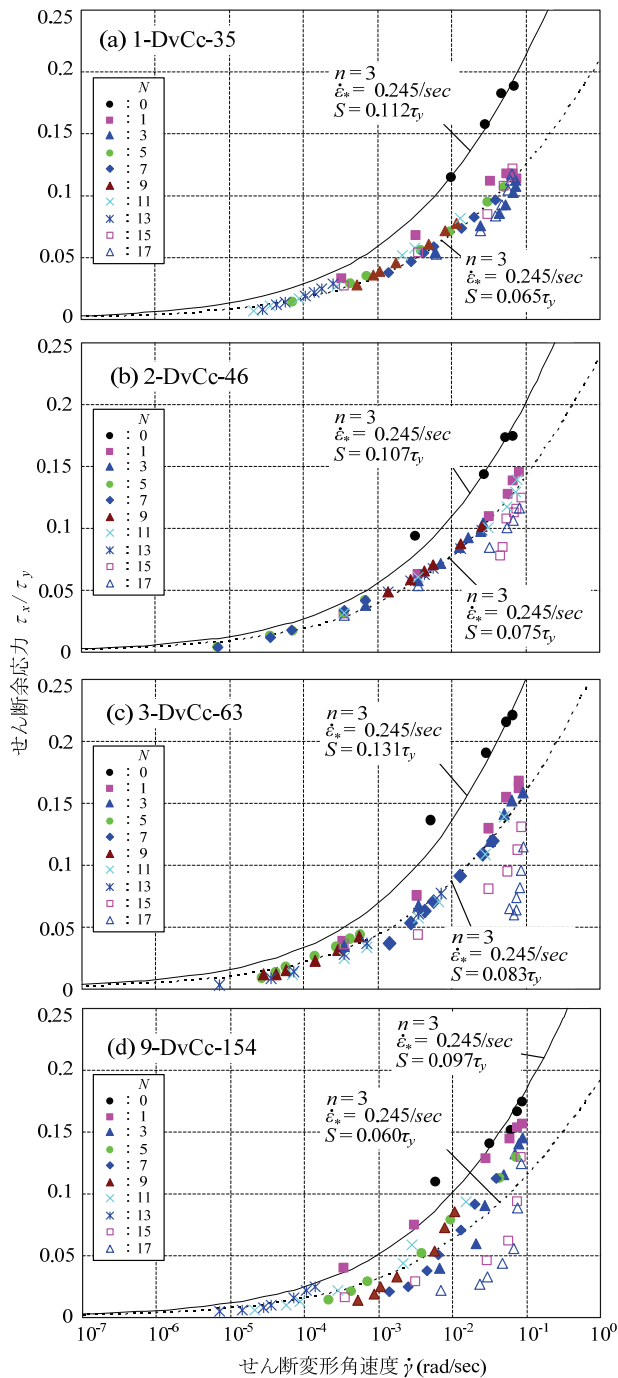


図9 せん断変形角速度 $\dot{\gamma}$ とせん断余応力 τ_x との関係

(挿入図を参照)．交番载荷時には，中心部から少し離れた二つの対角線上でたわみの凹凸が変化し，その位置で亀裂が生じたものと考えられる．

4. まとめ

本研究は繰り返しせん断力を受ける鋼腹板の弾塑性応答性状を実験で調べたものである．

本研究で得られた結論は以下のとおりである．

- 1) 腹板のせん断応力 τ -せん断変形角 γ の実験曲線は，幅厚比が大きい場合には，抵抗せん断応力の落ち込みが

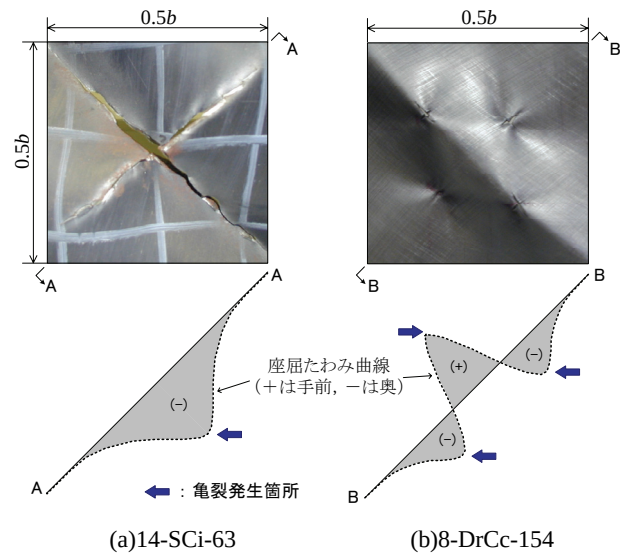


写真5 腹板の亀裂発生状況

大きくなるスリップ型，幅厚比が小さい場合には安定した紡錘型の履歴曲線となった．

- 2) 幅厚比が大きい腹板に，漸増変位振幅の条件で繰り返し载荷した場合，せん断座屈モードが変化して座屈たわみが著しくなり，腹板中央部の亀裂の発生後は，繰り返し毎の抵抗せん断応力の低下が大きくなった．
- 3) 定変位振幅の繰り返し载荷実験においては，弾性域から非弾性域に入る最初の降伏点付近の挙動を除くと，動的・静的载荷による τ - γ 曲線の差異は小さかった．
- 4) 载荷速度を階段状に増加させたとき，抵抗せん断応力の静的曲線からの上昇分を指すせん断余応力は，せん断変形角速度をパラメータとして指数関数的に大きくなった．
- 5) せん断余応力は，最初の変位反転点前の処女履歴ループにおいて最も大きく現れる．そして，それ以降のせん断余応力は処女履歴ループのときよりも小さくなる．
- 6) 上記 5)の原因としては，せん断座屈を伴うスリップ型の履歴曲線の発現や，ひずみ硬化による抵抗せん断応力の上昇等が関係していると考えられる．
- 7) 繰り返し载荷を受ける腹板では，せん断座屈たわみの対角線直角方向の半波形数の違いによって，板中央から亀裂が生じる場合と，中央から少し頂点よりの位置から亀裂が生じる場合がある．

謝辞：本研究を実施するにあたり，平成 14～15 年度と 16～17 年度の科学研究費補助金・基盤研究 C，平成 16～17 年度の大同工業大学・研究奨励金，および，平成 18 年度と同・研究奨励金（以上，研究代表者 酒造敏廣）の補助を受けた．ここに記して謝意を表します．

参考文献

- 1) Manjone, M.: Influence of rate of strain and temperature on yield stresses of mild steel, *Journal of Applied Mechanics*,

- Vol.11, pp.211-218, 1944.
- 2) Bonder, S.R. and Symonds, P.S.: Plastic deformation in impact and impulsive loading of beams, *Proc. of the Second Symposium on Naval Structural Mechanics*, Rhode Island, USA, pp.488-500, 1960.
 - 3) Perzyna, P.: The constitutive equations for rate sensitive plastic materials, *Quarterly Journal of Applied Mathematics*, Vol.20, pp.321-332, 1963.
 - 4) Hashmi, M.S.J.: Strain rate sensitivity of a mild steel at room temperature and strain rate of up to 100000/s, *Journal of Strain Analysis*, Vol.15, No.4, pp.201-207, 1980.
 - 5) 若林 實, 中村 武, 吉田 望, 岩井 哲, 渡辺幸広: 構造部材の挙動に及ぼす載荷速度の影響に関する実験的研究—鋼ばりの曲げモーメント—曲率関係—, 日本建築学会大会学術講演概要集 (関東), pp.1043~1044, 1979年9月.
 - 6) 吹田啓一郎, 金多 潔, 甲津功夫, 安富正佳: 高速繰返し荷重下における鋼構造接合部の復元力特性, 日本建築学会構造系論文集, No.463, pp.95~104, 1994年9月.
 - 7) Chang, K.C., Sugiura, K. and Lee, G.C.: Rate-dependent material model for structural steel, *Journal of Engineering Mechanics*, Proc. of ASCE, Vol.115, No.3, pp.465-474, March 1989.
 - 8) Perzyna, P.: Fundamental problems in viscoplasticity, *Journal of Advances in Applied Mechanics*, Vol.9, pp.243-377, 1966.
 - 9) Chang, K.C. and Lee, G.C.: Strain rate-effect on structural steel under cyclic load, *Journal of Engineering Mechanics*, Proc. of ASCE, Vol.113, No.9, pp.1292-1301, Sept. 1987.
 - 10) 酒造敏廣, 山田 宰: セン断崩壊型はり部材を有する鋼2層門形ラーメンの非弾性地震応答解析, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.45A, pp.227~234, 1999年3月.
 - 11) 山田 宰, 酒造敏廣: セン断崩壊型はり部材を有する鋼製ラーメンの崩壊メカニズム, 第25回地震工学研究発表会・講演概要, E2-5, pp.953~956, 1999年7月.
 - 12) 酒造敏廣, 山田 宰: はり崩壊型門形ラーメンの崩壊メカニズムと非弾性地震応答性状に関する研究, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.46A, pp.663~673, 2000年3月.
 - 13) Manzacchi, G.M.E.: The effect of strain rate on steel structures, MSc Dissertation, *Civil Engineering Department, Imperial College of Science, Technology and Medicine*, August 1991.
 - 14) Izzuddin, B.A. and Fang, Q.: Rate-sensitive analysis of framed structures, Part I: Model formulation and verification, *An International Journal of Structural Engineering and Mechanics*, Vol.5, No.3, pp.221-237, 1997.
 - 15) Malvern, L.E.: The propagation of longitudinal waves of plastic deformation in a bar of material exhibiting a strain-rate effect, *Journal of Applied Mechanics*, ASME, Vol.18, No.2, pp.203-208, June 1951.
 - 16) 酒造敏廣: セン断崩壊型はり部材を持つ鋼門形ラーメンの非弾性地震応答に及ぼすひずみ速度の影響, 構造工学論文集, Vol.47A, 土木学会, pp.771~782, 2001年3月.
 - 17) 酒造敏廣: ひずみ速度を考慮したはり崩壊二層門形ラーメンの非弾性地震応答解析, 第26回地震工学研究発表会・講演概要, 土木学会, G2-5, pp.1001~1004, 2001年8月.
 - 18) 高橋泰彦, 品部祐児: セン断降伏型薄板鋼板の復元力特性に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, No.494, pp.107~114, 1997年4月.
 - 19) 佐々木康人, 田中 清, 山口種美, 鈴木孝彦: 極低降伏点鋼制震パネルの動的履歴特性に及ぼすひずみ速度の影響に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), pp.805~806, 1997年9月.
 - 20) 武田八郎: セン断パネルの非弾性交番座屈実験, 鋼構造年次論文報告集, 第2巻, JSSC, pp.1~8, 1994年11月.
 - 21) 天野麻衣, 渡辺智彦, 宇佐美勉, 葛漢彬: 繰返しせん断力を受ける鋼板の強度と変形能, 第3回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集, 土木学会, pp.57~62, 2000年1月.
 - 22) 葛西昭, 渡辺智彦, 宇佐美勉, Chusilp, P.: セン断力を受ける無補剛箱形断面部材の強度と変形能, 土木学会論文集, No.703/I-59, pp.129~140, 2002年4月.
 - 23) 酒造敏廣, 事口壽男, 今井慎吾: 動的せん断力を受ける鋼腹板の弾塑性性状に関する基礎的実験, 第12回鋼構造年次論文報告集, 日本鋼構造協会, pp.107~114, 2004年11月.
 - 24) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, 丸善, 1996年12月.

(2006年9月11日受付)