

# 繰返しせん断を受けるハイブリッド型箱形断面柱の 弾塑性挙動に関する実験的研究

上野谷 実\* 中村 雅樹\* 福本 喩士\* 白川 祐樹\*\*

Experimental Study on Elastic-Plastic Behavior of  
Hybrid Box Columns under Cyclic Shear

Minoru UENOYA\* Masaki NAKAMURA\* Yuhshi FUKUMOTO\* and  
Yuhki SHIRAKAWA\*\*

## ABSTRACT

This paper presents an experimental investigation on the hysteretic behavior of stiffened box columns having two longitudinal ribs under constant compressive thrust combined with cyclic shear loads at the column top. The low-yield web panels behave like dissipative zones of shear link to resist earthquake actions. Four specimens are of four square web panels of 450 mm side. Thicknesses of web panels are 3.5mm and 7mm, and thickness of flange is 7mm. The webs are made of mild steel (SM400) or low-yield steel (LY 100), and the flanges are made of mild steel.

Hysteretic curves in shear are obtained experimentally and compared them for different steel and thickness of web panels. The cyclic shear strength and panel ductility are discussed and compared them from the energy dissipative point.

キーワード：補剛箱形柱，低降伏点鋼，繰返しせん断強度，エネルギー吸収，ダクティリティー

Keywords: Stiffened box column, Low-Yield Steel, Cyclic Shear Strength, Energy Dissipation, Ductility

## 1. はじめに

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震において、被害を受けた鋼製橋脚の中に図1に示すようなラーメン鋼製橋脚の梁部においてX形の座屈波形を示し、比較的軽微な損傷に留まったものが発見された。これは横梁ウェブの弾塑性せん断座屈が先行し、大きな地震エネルギーをウェブが吸収したと考えられる。このことから鋼構造物の場合、鋼の特性である変形性能（ダクティリティー）を有効に活用すれば過大な地震エネルギーを吸収し、構造物の致命的な損傷や倒壊を回避できると考えられる。また、従来の研究によると、過

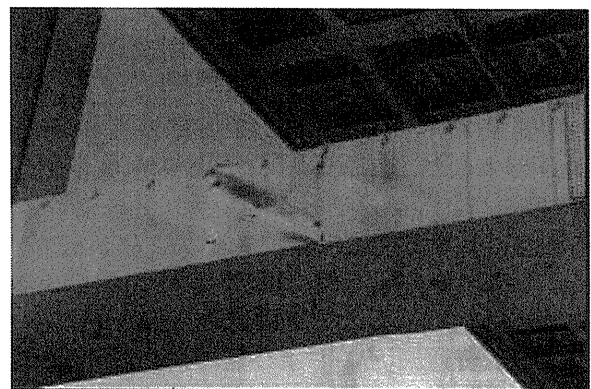


図1 東神戸大橋横梁部の局部せん断座屈

\*建設環境工学科 \*\*工学研究科土木工学専攻

大な地震エネルギーは曲げ塑性ヒンジのみではなく、ブレース構造の配置方法やせん断パネルの構造によって吸収するせん断塑性ヒンジが効果的であることが明らかにされている<sup>[14]</sup>。このことから、せん断パネルの構造により過大な地震エネルギーを吸収し、大きな変形性能を確保できるような構造システムが考えられる。ここではこれを『せん断塑性リンク』と呼ぶ。せん断塑性リンクの必要条件としては、フランジを健全に保ち、ウェブが大きく塑性変形しエネルギーを吸収する。

本研究では水平力を受ける門形ラーメン橋脚の柱において、曲げモーメントがゼロになり、せん断力が卓越する部分にせん断塑性リンクの導入を想定してせん断載荷実験を行う。せん断を受ける柱においてウェブに用いる鋼種が普通鋼(SM)と低降伏点鋼(LY)の場合および異なる板厚について、座屈挙動、塑性変形性能およびエネルギー吸収性能についてハイブリッド型せん断塑性リンクの特性を考察する。

## 2. 供試体

### 2.1 試体寸法

図2に示すように、実験に用いた供試体は、1パネルの幅、高さが450mm計4パネル(P1~P4)からなる正方形箱形断面柱で全長は1800mmである。箱形断面を形成するために基部から450mm間隔に板厚7mmのダイアフラムを配置している。

4パネルのうち

柱の中間2パネル(P2, P3)はせん断塑性リンク部分(以下せん断パネルと呼ぶ)、上下2パネル(P1, P4)は補強パネル部分である。フランジおよびウェブの補剛は長手方向に板厚7mm、幅67mmのリップにより供試体の幅を3分割するように150mm間隔で補剛している。本実験では、せん断パネルのウェブに普通鋼(SM)および低降伏点鋼(LY)の材料特性の異なる2種類をそれぞれ使用する。それ以外は全て普通鋼(SM)を使用している。繰り返し

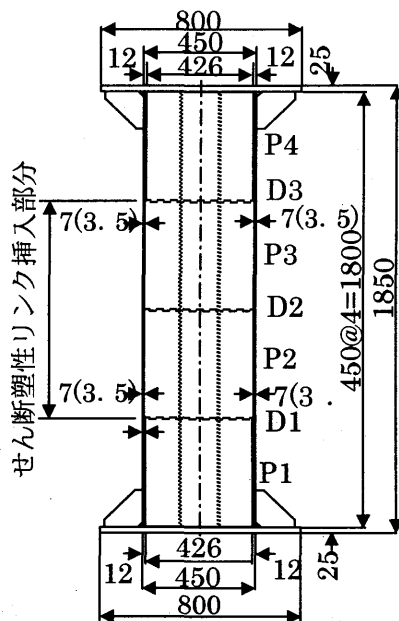


図2 供試体

載荷実験はフランジ厚、ウェブ厚を共に7mmにした等断面供試体と、ウェブ厚をフランジ厚の1/2の3.5mmにした供試体について行った。4体の供試体をそれぞれSM7, LY7, SM3.5, LY3.5とし、記号のSMおよびLYはウェブに用いた鋼材名を表し、数字はせん断パネルのウェブ厚を表している。

### 2.2 材料特性

本実験に使用する鋼材は普通鋼(SM)、低降伏点鋼(LY)、の2種類(以下、SM, LYと表記する)である。これら2種類の応力-ひずみ曲線を図3に示す。SMは降伏点が高く引張強さは400MPa以上であるが伸びの少ない鋼材である。LYは降伏点が高く、伸びは50%以上といった性能を持ち、地震時のエネルギー吸収性能に優れ建築用のダンパーやブレース材として用いられている鋼材である。

本学で行った鋼材の繰り返しせん断実験におけるせん断特性を図4に示す<sup>[1]</sup>。各供試体の降伏せん断変位はせん断パネルが全てSMで構成されている供試体SM7, SM3.5の降伏せん断変位を基準にする。従って、せん断特性もSMの降伏せん断変位を基準にする。そのため、サイクル毎に与えるせん断変位量を増分させた繰り返しせん断実験をもとに、SMとほぼ同じ降伏せん断変位でLYのせん断実験を行った結果の包絡線を示す。その結果から両鋼材のせん断特性を表1に示す。

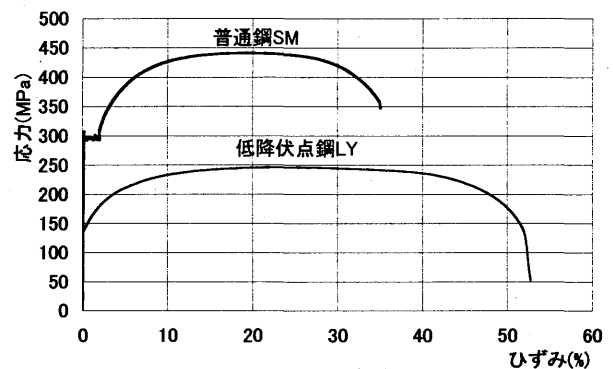


図3 引張試験結果

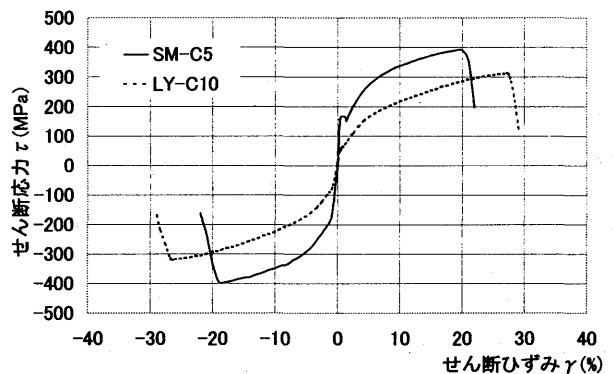


図4 繰り返しせん断実験の包絡線

表1 材料のせん断特性

鋼種	$\delta_y$ (mm)	$\tau_y$ (MPa)	$\tau_u$ (MPa)	$\gamma_u$ (%rad)	$\tau_{uSM}$	$\gamma_{uSM}$
SM400	0.06	169	396	19.8	1	1
LY100	0.05	54	309	26.1	0.8	1.3

$\delta_y$ : 降伏せん断変位,  $\tau_y$ : 降伏せん断応力,  
 $\tau_u$ : 最大せん断応力,  $\gamma_u$ : 最大せん断ひずみ

3. 実験方法

本実験で用いた荷重装置を図5に示す。本実験では、一定鉛直荷重のもと繰り返し水平荷重を変位制御で静的に作用させる。せん断パネル中央で曲げモーメントがゼロになり、せん断力が卓越する荷重方法とするために、供試体頂部に水平荷重を回転させず平行移動させるパンタグラフを載荷板の上部に取り付け、載荷板を平行移動させる建研式荷重方法を採用した。図6に水平荷重Pを供試体中央高位置に作用させたときの曲げモーメント図とせん断力図を示す。

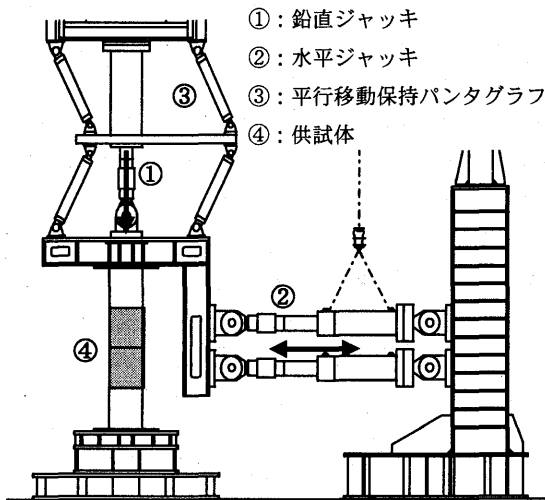


図5 荷重装置

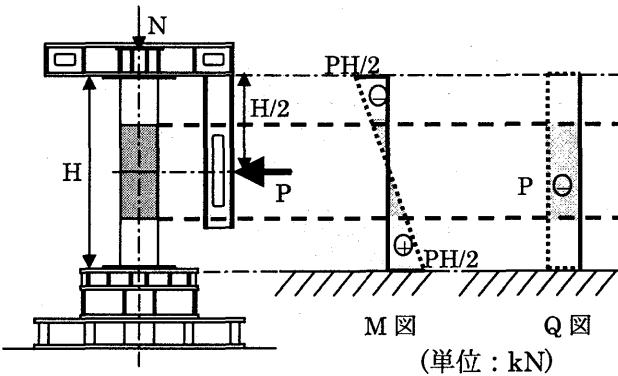


図6 供試体の曲げモーメントとせん断力

図7に示すように、ウェブがせん断を受け変形するときの対角線方向変位 $\delta_1$ と $\delta_2$ の和をせん断変位 $\delta$ と呼び、式(1)で定義する。更に、せん断パネル(ウェブ)が純せん断で降伏するときの対角線方向変位を $\delta_{y1}$ と $\delta_{y2}$ とし、その和を降伏せん断変位 $\delta_{y0}$ と呼び、式(2)で定義する。

実験で用いた降伏せん断変位 $\delta_y$ は、各パネルの降伏せん断変位 $\delta_{y0}$ の和とし、式(3)より計算する。また、鉛直荷重Nは式(4)、(5)より求める。

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 = \sqrt{2} \gamma h \dots \dots \dots (1)$$

$$\delta_{y0} = \delta_{y1} + \delta_{y2} = \frac{\sqrt{2} \tau_{yw} h}{G} \dots \dots \dots (2)$$

$$\delta_y = 4 \delta_{y0} \dots \dots \dots (3)$$

$$N_y = \sigma_y A \dots \dots \dots (4)$$

$$N = 0.15 N_y \dots \dots \dots (5)$$

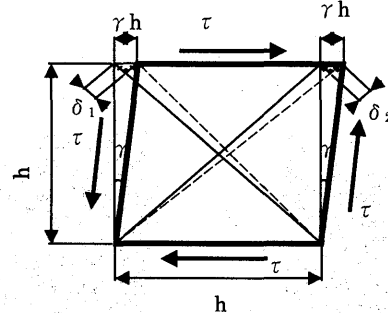


図7 降伏せん断変位

ここで $\sigma_{yw}$ :ウェブの引張降伏応力,  $\tau_{yw}$ :ウェブの降伏せん断応力,  $\gamma$ :せん断ひずみ, E:弾性係数, G:せん断弾性係数,  $\nu$ :ポアソン比, h:パネル高さ,  $N_y$ :軸方向降伏荷重,  $\sigma_y$ :降伏応力, A:全断面積である。

本実験では、LYをSMと比較するため、各供試体の鉛直荷重および降伏せん断変位はせん断パネル全てがSMで構成されている供試体SM7およびSM3.5の鉛直荷重および降伏せん断変位を基準にし、LY7の供試体にはSM7の値を、LY3.5の供試体にはSM3.5の値を使用した。表2に各供試体のパラメータ $\delta_y$ を示す。

表2 降伏せん断変位 $\delta_y$

供試体	$\sigma_y$ (MPa)	$\tau_y$ (MPa)	$N_y$ (kN)	N (kN)	$Q_p$ (kN)	$\delta_{y0}$ (mm)	$\delta_y$ (mm)
SM7	292	169	4717	708	1044	1.4	5.58
LY7	141	81	2247	337	509	0.67	2.69
SM3.5	290	167	3892	584	514	1.39	5.54
LY3.5	117	68	1560	234	199	0.56	2.24

#### 4. 実験結果および考察

##### 4.1 座屈挙動

図8にSM7およびLY7, 図9にSM3.5およびLY3.5の実験終了後の供試体崩壊写真を示す. ウェブ厚とフランジ厚が7mmである供試体SM7およびLY7は, ウェブのせん断座屈よりフランジの曲げ座屈が先行し, 圧縮側となるフランジにたわみが生じている.

SM7は圧縮側となるフランジのダイアフラムD1, D3付近のリブ間で曲げによる座屈が見られる. また, せん断リンク部分の強度が高く, リンク部以外のパネルP1, P4パネルのフランジに損傷が見られた.

LY7はパネルP3のウェブ全体にリブ間でせん断座屈波形を示す斜め方向のたわみが見られる. フランジについては, ダイアフラムD1, D3付近のリブ間に曲げによる座屈が見られ, ウェブの座屈が生じるあたりからパネルP3のフランジの座屈が急激に進展し, 「く」の字の変形を生じた. これは曲げおよび軸力による圧縮力が集中したことで変形したものと思われる.

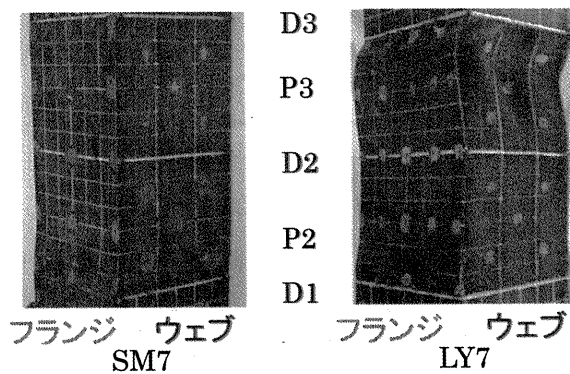


図8 ウェブ厚7mmの供試体の崩壊写真

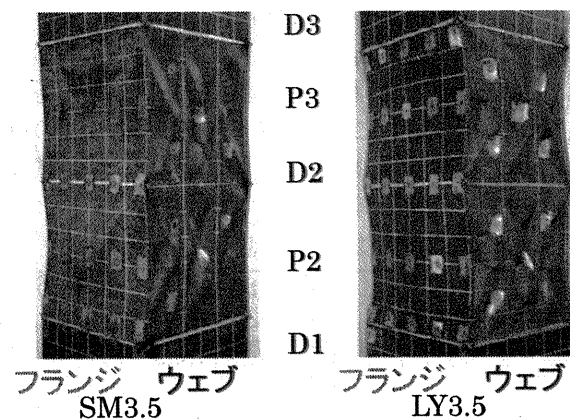


図9 ウェブ厚3.5mmの供試体の崩壊写真

ウェブ厚をフランジ厚の1/2の3.5mmにした供試体SM3.5およびLY3.5において, 両供試体ともウェブパネルのリブ間でせん断座屈波形を示す対角線方向へのたわみが生じた. また, フランジはウェブの変形に巻き込まれるように大きくウェブ側に塑性変形している.

SM3.5はパネルP2の西ウェブに1つの大きなクラックが生じ, 载荷を停止してもせん断変位は284mm ( $51\delta_y$ の変位に相当する)まで進んでしまい, 実験を再開しても変形が大きすぎることからここで実験を終了した. LY3.5は小さなクラックが30個以上に発生した. クラック発生後の最大せん断力からの $13\delta_y$ までほぼ強度低下は一定で, クラック発生後も急激ではなく, LY鋼のせん断特性であるひずみ硬化の影響により緩やかに低下したと考えられる.

##### 4.2 せん断力-せん断変位履歴曲線

図10にウェブ厚がフランジ厚と同じ供試体SM7およびLY7のせん断力-せん断変位履歴曲線を示す. 縦軸はせん断力 $Q$ をSM7の降伏せん断力 $Q_{pSM7}$ で無次元化し, 横軸はせん断変位 $\delta$ をSM7の降伏せん断変位 $\delta_{ySM7}$ で無次元化している.

供試体SM7は $1\delta_y$ で843kNに達し, その後は変位を増すごとに増加しせん断変位133.9mm ( $24\delta_y$ )で最大せん断力1546kNに達した. 荷重の増え方と変位の伸び方を見ると, 約1200kNに到達してから少ない荷重で変位が伸び始めたことから, フランジが座屈したものと考えられる.

供試体LY7は474kNで $1\delta_y$ で474kNに達し, サイクルを増すごとにせん断力は増加し, 151mm ( $27\delta_y$ )で最大せん断力1007kNに達した. せん断力の増加割合を見ると,  $2\delta_y \sim 14\delta_y$ まで平均25kNの増加に対し,  $17\delta_y \sim 27\delta_y$ まで平均12kNと増加割合が減少している. LY7ではフランジのダイアフラムD1, D2付近で曲げによる座屈が $22\delta_y$ から始まっている.

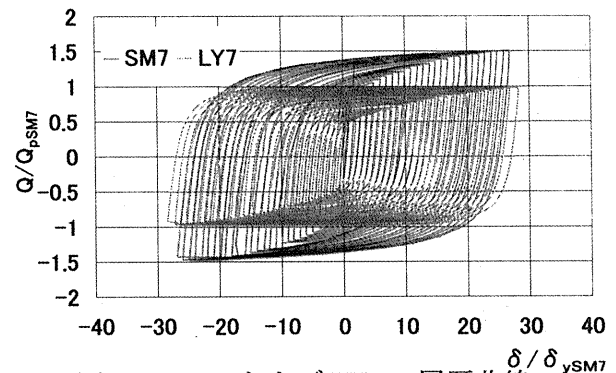


図10 SM7およびLY7の履歴曲線

図 11 にウェブ厚がフランジ厚の 1/2 の供試体 SM3.5 および LY3.5 のせん断力-せん断変位履歴曲線を示す。縦軸はせん断力  $Q$  を SM3.5 の降伏せん断力  $Q_{pSM3.5}$  で無次元化し、横軸はせん断変位  $\delta$  を SM3.5 の降伏せん断変位  $\delta_{ySM3.5}$  で無次元化している。

供試体 SM3.5 は、正荷重から負荷重(負荷重から正荷重)に移行する時、せん断変位の原点(A 点)を境に強度が上昇する傾向(B 点)が見られる。これは、ウェブにおける座屈波形がせん断変位原点で反転するからと思われる。除荷すると再載荷時に形成した斜張力場は消失しつつ、再載荷によるもう 1 方向への斜張力場が形成できていないため強度上昇はなく、せん断変位原点を境に再載荷により斜張力場が発生し強度上昇したと思われる。更に、座屈波形が反転する部分では十字型のシワが生じ、サイクルを増すごとにそのシワが大きなクラックとなり、変位制御できなくなったと思われる。6  $\delta_y$  からウェブで座屈が生じたが強度低下は見られない。しかし、12  $\delta_y$  から斜張力場作用によりフランジがウェブ側に塑性変形し始めると、強度低下が見られた。これは斜張力場のアンカーの役割をするフランジが降伏によりウェブ側に変形したために、強度が低下したと考えられる。

供試体 LY3.5 はせん断変位の原点(A 点)を境に再載荷による斜張力場の発生にともなう強度上昇(B 点)がみられる。また、座屈波形が反転する部分ではたわみが生じクラックが発生し、フランジへの斜張力場作用が減少し、せん断変位の原点を境に強度上昇していた現象が見られなくなった。また、LY3.5 では数多くのクラックが生じているにも関わらず、強度低下は最大せん断力から緩やかな傾向を示している。これは、LY の材料特性である著しいひずみ硬化により強度低下が緩やかになったと考えられる。10  $\delta_y$  からウェブで座屈が生じたが、強度低下は見られず、SM3.5 と同じく 13  $\delta_y$  から斜張力場作用によりフランジがウェブ側に変形する現象が現れてから強度低下が始まった。

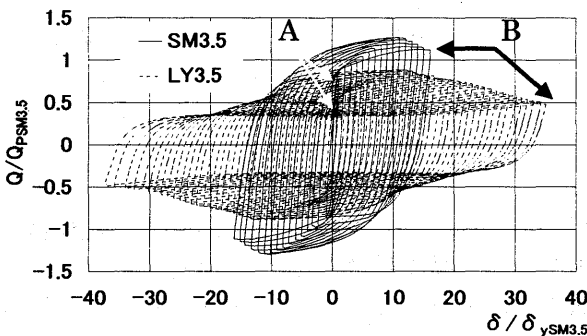


図 11 SM3.5 および LY3.5 の履歴曲線

#### 4. 3 包絡線

図 12 に供試体 SM7, LY7, SM3.5 および LY3.5 の包絡線を示す。縦軸はせん断力  $Q$  を SM7 の降伏せん断力  $Q_{pSM7}$  で無次元化し、横軸はせん断変位  $\delta$  を SM7 の降伏せん断変位  $\delta_{ySM7}$  で無次元化している。

ここで図中の記号は、F:フランジの座屈開始、w:ウェブの座屈開始、f:フランジの塑性変形開始、w:ウェブの座屈開始、C:クラックの発生をそれぞれ示している。

図 12 より、供試体 SM7 は 1  $\delta_y$  で 843kN に達し、その後は変位を増すごとに増加し、24  $\delta_y$  (133.9mm) で最大せん断力が 1546kN に達した。供試体の座屈はフランジ面が 11  $\delta_y$  ~ 12  $\delta_y$  でダイアフラム D1 および D3 付近の圧縮側に生じ、また、ウェブ面では 16  $\delta_y$  ~ 17  $\delta_y$  でそれぞれ生じ始めた。SM7 においては、せん断塑性リンク部の強度が高く、柱上下パネルの固定端の溶接線にそってクラックが発生し、補剛リブにも座屈が生じた。

供試体 LY7 は 1  $\delta_y$  で 474kN に達し、サイクルを増すごとにせん断力が増加し、27  $\delta_y$  (151mm) で最大せん断力 1007kN に達した。供試体の座屈はフランジ面で 22  $\delta_y$  ~ 23  $\delta_y$ 、ウェブ面では 24  $\delta_y$  ~ 25  $\delta_y$  付近でウェブパネルのリブ間に生じた。28  $\delta_y$  を過ぎると、フランジにおいて曲げによる座屈が生じ、荷重低下が始まった。これは軸力および曲げによる圧縮力によるものと考えられる。

供試体 SM3.5 は 1  $\delta_y$  で 423kN に達しサイクルを増すごとに載荷荷重は増加し、11  $\delta_y$  で最大せん断力 656kN に達した。ウェブが 10  $\delta_y$  付近でリブ間にせん断座屈波形である対角線方向へのたわみを生じ、フランジは 12  $\delta_y$  付近でパネルの両端がウェブ側に巻き込まれるように大きく塑性変形した。フランジの変形後、荷重低下が始まり、16  $\delta_y$  で P2 の西ウェブにクラックが生じ、載荷を停止し荷重を一定に保持してもせん断変位が 284mm (51  $\delta_y$  の変位に相当する) まで増加した。実験を再開しても変形が大きすぎるためここで実験を終了した。

供試体 LY3.5 は 1  $\delta_y$  で 262kN に達し、サイクルを増すごとに載荷荷重は増加して、13  $\delta_y$  で最大せん断力 448kN に達した。供試体の座屈は、ウェブが 7  $\delta_y$  ~ 8  $\delta_y$  付近でせん断座屈波形を示す対角線方向へのたわみが生じた。またフランジは 13  $\delta_y$  付近からパネル両端がウェブ側に巻き込まれるように大きく塑性変形している。フランジの塑性変形以降、荷重は低下し 36  $\delta_y$  で実験を終了した。22  $\delta_y$  付近ではクラックが発生したにもかかわらず荷重の低下は緩やかな傾向を示した。これは、LY が延

性に優れる鋼材であることが原因と考えられる。

ここで、ウェブ厚がフランジ厚と同じ供試体 SM7 および LY7 とウェブ厚がフランジ厚の 1/2 の供試体 SM3.5 および LY3.5 で比較する。ウェブ厚 7mm の供試体の場合、フランジおよびウェブの座屈が進展しても強度は緩やかな上昇傾向を示すが、ウェブ厚が 3.5mm の供試体の場合、ウェブのせん断座屈後の強度上昇は見られるがフランジの塑性変形が始まると強度は低下する。これは、ウェブ厚がフランジの 1/2 の 3.5mm と薄い場合、ウェブ厚 7mm の供試体に比べ座屈によるウェブの面外たわみが大きくなるためにフランジの塑性変形が大きくなり、強度が低下すると考えられる。

次に、ウェブ厚 3.5mm の繰り返しせん断荷重について比較する。表 3 より最大せん断力  $Q_{max}$  を見みると、材料のせん断特性と同じ性能をあらわしており、LY よりも SM の強度が大きく、SM は LY の 1.46 倍の強度がある。変形性能の場合は、実験が終了した時点でのせん断変位で比較すると、LY の変形性能は優れているといえるが、構造物としては強度が低下した位置での比較は意味をなさない。したがって、最大せん断力  $Q_{max}$  におけるせん断変位  $\delta_{max}$  および最大せん断力  $Q_{max}$  が 95% に低下したせん断力  $Q_{95}$  でのせん断変位  $\delta_{95}$  で比較する。 $\delta_{max}$  で比較すると、LY は SM の 1.18 倍とわずかに変形性能が優れている。また、 $\delta_{95}$  で比べてみても 1.13 倍となり、LY は SM に比べて変形性能にわずかながら優れている。また、 $Q_{max}$  から  $Q_{95}$  の強度低下を傾きで比較すると LY は SM の傾きに対して緩やかになっていることがわかる。フランジの変形により強度低下が生じた場合でも、ウェブのひずみ硬化により、強度低下が緩やかになると考えられる。

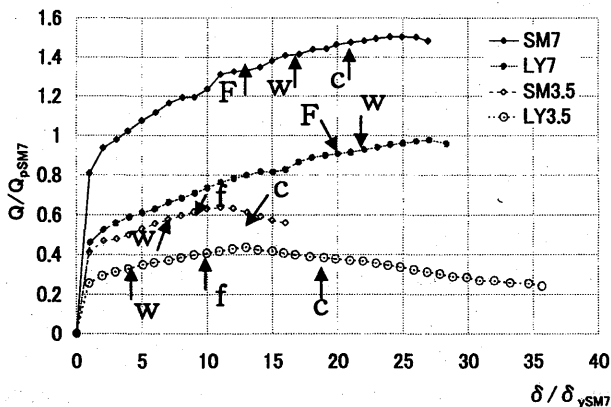


図 12 履歴曲線の包絡線

表 3 および表 4 に各供試体の強度、変形性能の比較を示す。表 3 および表 4 より、最大せん断強度は SM7 および SM3.5 が LY7 および LY3.5 よりそれぞれ約 1.5 倍程度となり、ウェブが SM 鋼の供試体の強度が大きくなっている。最大せん断強度時の塑性変形性能は、LY7 および LY3.5 が SM7 および SM3.5 よりそれぞれ約 1.1 および 1.2 倍大きくなっている。

表 3 繰り返しせん断強度の比較

供試体	$Q_p$ (kN)	$Q_{ex}$ (kN)	$Q_{max}$ (kN)	$Q_{95}$ (kN)	$\frac{Q_{ex}}{Q_p SM}$	$\frac{Q_{max}}{Q_p SM}$	$\frac{Q_{95}}{Q_p SM}$
SM7	1044	834	1546	—	0.80	1.48	—
LY7	509	474	1007	—	0.45	0.96	—
SM3.5	514	423	656	623	0.82	1.28	1.21
LY3.5	199	261	448	426	1.31	0.87	0.83

$Q_p$ : 塑性せん断力,  $Q_{ex}$ : 実験の  $1 \delta_y$  でのせん断力,  $Q_{max}$ : 最大せん断力,  $Q_{95}$ :  $Q_{max}$  の 95% に低下したときのせん断力,  $Q_p SM$ : SM7 の  $Q_p$ ,

表 4 繰り返しせん断変形性能の比較

供試体	$\delta_y$ (mm)	$\delta_{max}$ (mm)	$\delta_{95}$ (mm)	$\frac{\delta_{max}}{\delta_{y, SM7}}$	$\frac{\delta_{95}}{\delta_{y, SM7}}$
SM7	5.58	133	—	23.8	—
LY7	2.69	151	—	27.1	—
SM3.5	5.54	61.4	74.7	11.0	13.4
LY3.5	2.24	72.4	84.3	13.1	15.1

$\delta_y$ : 降伏せん断変位,  $\delta_{max}$ :  $Q_{max}$  におけるせん断変位,  $\delta_{95}$ :  $Q_{max}$  の 95% に低下したときのせん断変位,  $\delta_{y, SM7}$ : SM7 の  $\delta_y$

#### 4.4 エネルギー吸収量

エネルギー吸収量は、地震時に構造物が地震力をどの程度吸収、散逸できるかという耐震性能を評価する上で最も重要な指標である。せん断力-せん断変位履歴曲線において、各サイクル毎の履歴ループの面積が、そのサイクルにおける部材のエネルギー吸収量を示している。また、サイクル毎のエネルギー吸収量を加算していったものを累積エネルギー吸収量として示す。

図 13 にエネルギー吸収量を示す。縦軸はエネルギー吸収量  $\Delta$  を SM7 の弾性限エネルギー吸収量  $\Delta_{ESM7}$  で無次元化し、横軸は降伏せん断変位  $\delta_y$  を SM7 の降伏せん断変位  $\delta_{y, SM7}$  で無次元化したものを示している。

図 14 に累積エネルギー吸収量を示す。縦軸は累積エネルギー吸収量  $\Delta$  を SM7 の弾性限エネルギー吸収量  $\Delta_{ESM7}$  で無次元化した値を示し、横軸は降伏せん断変位  $\delta_y$  を SM7 の降伏せん断変位  $\delta_{y, SM7}$  で

無次元化している。ここで、図中の○は最大せん断力点、 $f$ はフランジの塑性変形開始を示している。

図 13 および図 14 より、それぞれ各供試体の包絡線から最大せん断力時でのエネルギー吸収量を鋼材の違いについて比較する。ウェブ厚 7mm の供試体 SM7 は最大せん断力 1546kN でエネルギー吸収量が 230kNm および累積エネルギー吸収量が 2486kNm となり、LY7 は最大せん断力 1007kN でエネルギー吸収量が 193kNm および累積エネルギー吸収量が 2299kNm となり、SM7 が LY7 それぞれより 1.19 倍および 1.08 倍大きくなる。一方、ウェブ厚 3.5mm の供試体 SM3.5 は最大せん断力 656kN でエネルギー吸収量が 40kNm および累積エネルギー吸収量が 198kNm となり、LY3.5 は最大せん断力 447kN でエネルギー吸収量が 38kNm および累積エネルギー吸収量が 221kNm となり、エネルギー吸収量は SM3.5 が LY3.5 より 1.05 倍大きくなるが、累積エネルギー吸収量は LY3.5 が SM3.5 より 1.12 倍大きくなる。これは、LY 鋼が変形性能およびひずみ硬化に優れるため、最大せん断力時のせん断変位が SM3.5 より大きいためと考えられる。更に、最終的な累積エネルギー吸収量は、LY3.5 が SM3.5 より 2.73 倍大きくなり、LY 鋼が変形性能に優れるためエネルギー吸収量が大きくなったと考えられる。また、各サイクルごとのエネルギー吸収量は実験開始から崩壊に至るまで LY7 および LY3.5 が SM7 および SM3.5 を上回ることはなかった。これは、SM 鋼の強度が LY 鋼より大きいためと考えられる。

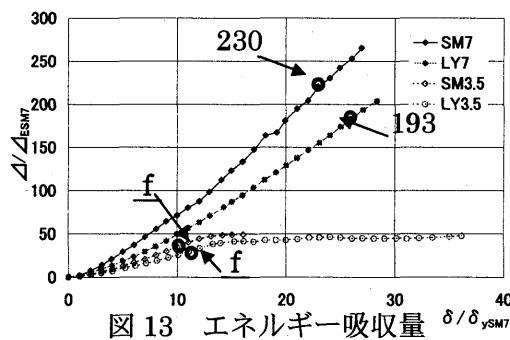


図 13 エネルギー吸収量

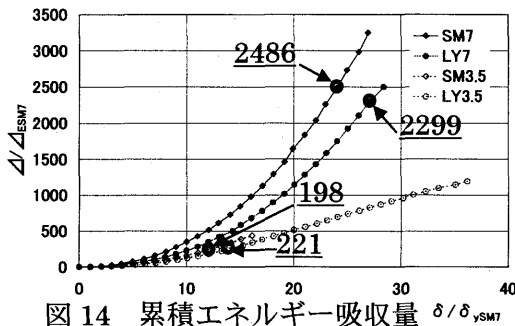


図 14 累積エネルギー吸収量  $\delta/\delta_{VSM7}$

次に、ウェブ厚の違いにより最大せん断力時のエネルギー吸収量を比較すると、SM7 および LY7 は SM3.5 および LY3.5 よりそれぞれ 5.77 倍および 5.11 倍大きくなる。このことから、ウェブ厚が厚いほどせん断リンク部の強度が大きくなり、同じせん断変位に対してもエネルギー吸収量は大きくなると考えられる。また、ウェブ厚 3.5mm の供試体で見られるようにフランジの強度低下によりエネルギー吸収量の傾きはほぼ水平の傾向を示す。従って、エネルギー吸収量はフランジの強度により決まると考えられる。以上のことから、ひずみ硬化および変形性能に優れた LY 鋼をウェブに用いれば SM 鋼より大きなエネルギー吸収性能が得られると考えられる。しかし、ウェブ厚が薄いと斜張力場によるフランジの塑性変形によりエネルギー吸収量が減少するために、エネルギー吸収性能はフランジの強度の影響を受けると考えられる。

## 5. まとめ

本研究では門形ラーメン鋼製橋脚の柱にせん断塑性リンク導入を想定し、両端固定の箱形断面中に一定鉛直荷重のもと繰り返し水平力を載荷する実験を行った。その結果、せん断塑性リンクの力学的特性について以下のことが明らかになった。

### a) 座屈挙動

- ①ウェブに 7mm の SM を用いた供試体はせん断リンク部の強度が高く上下パネルが損傷する。
- ②ウェブ厚 7mm の供試体はフランジの座屈が先行し、その後ウェブが座屈するためフランジを健全に保てない。
- ③ウェブに 3.5mm の SM を用いた供試体は、座屈およびクラック発生後の強度低下が著しい。

### b) 変形性能

ウェブに 3.5mm の SM, LY を用いた供試体の場合、LY を用いた供試体の変形性能が SM を用いた供試体より 1.18 倍とわずかに優れる。

### c) エネルギー吸収性能

ウェブに 3.5mm の LY を用いた供試体の場合、最大せん断力時および終局時において SM を用いた供試体より累積エネルギー吸収に優れる。

以上のことから、せん断リンクのウェブに LY を用いる場合、強度は SM を用いた供試体より劣るが、変形性能およびエネルギー吸収性能に優れる。また、鋼材の変化だけでなくウェブのせん断特性にあったフランジおよびウェブ厚の関係を適切に選択すれば、SM を用いた供試体より強度および塑性変形性能に優れたせん断リンクとして機能する。

なお、本実験は福山大学構造・材料開発センターの大型構造実験室で行った。

#### 参考文献

[1] Y. Fukumoto , M. Uenoya , M. Nakamura and T. Takaku :Ductility of Plate Girder Panels under Cyclic Shear ,Proceedings of the 6th International Colloquium on Stability and Ductility of Steel Structures(SDSS '99), Romania, pp.283-290, 1999.9.

[2] 福本昤士, 上野谷実, 中村雅樹, 小林泰男 : 繰り返しせん断を受けるプレートガーダーの変形

能に関する研究, 福山大学工学部紀要, Vol. 23, pp. 27-36, 1999. 10.

[3] 福本昤士, 上野谷実, 中村雅樹, 小林泰男 : 繰り返しせん断を受けるプレートガーダーの強度と変形能, 構造工学論文集, Vol. 46A, pp. 143-150, 2000. 3.

[4] M. Uenoya, Y.Fukumoto, M.akamura and S. Ishida : Cyclic Shear Behavior of Low-yield Steels by New Shear Test Procedure, Proceedings of First International Conference on Advances in Experimental Structural Engineering (AESE-1), Nagoya, Japan, pp. 183-188, 2005.7.