

繰り返しせん断を受ける低降伏点鋼板の塑性変形性能

上野谷 実* 中村 雅樹* 中之前 英之**

Ductility of Low-Yield Steel Panels under Cyclic Shear

Minoru UENOYA* Masaki NAKAMURA* and Hideyuki NAKANOMAE**

ABSTRACT

Three different steel materials are tested which are a mild steel (SM400, nominal yield stress 235MPa), a low-yield steel (LY100, nominal 0.2% offset yield stress 100MPa) and a new type of low-yield steel made in Fukuyama University (FLS(R), nominal 0.2% offset yield stress 135MPa).

Under the monotonic loading, the two low-yield steel materials have undergone more than 80% radian shear distortion angle before fracture, and they also demonstrated significant ductility compared to the axial loading. Under the cyclic loading, hysteretic curves in shear are obtained experimentally and compared them for the shape of the section and the aspect ratios of the shear panels. The cyclic shear strength and ductility are discussed for the three materials and compared them from the energy dissipative point.

キーワード：繰返しせん断，低降伏点鋼，塑性変形性能，エネルギー吸収量

Keywords: Cyclic Shear, Low-Yield Steels, Ductility, Energy Dissipation

1. まえがき

1995 年の兵庫県南部地震では橋梁の鋼製支承が多大な被害を受けた。その後、新設橋梁ではゴム支承を用いて反力分散や長周期化を図り、上部工慣性力を低減する方法が一般的となった。しかし、長周期化に伴い水平移動量は増加し、桁遊間の増大や伸縮装置の大型化などの問題が生じた。そこで、支承の水平移動量を抑え、上部工慣性力を低減する制震装置としてせん断パネル型ダンパーを用いた機能分離型鋼製支承が注目されている。せん断パネル型ダンパーは低降伏点鋼を用いたパネル

がせん断変形することにより地震エネルギーを吸収し、橋梁に作用する地震力を低減させる[1-4]。常時およびレベル1地震時までは固定であり、レベル2地震時にはせん断塑性変形の履歴減衰により地震エネルギーを吸収する。

本研究ではせん断パネル型ダンパーに適する鋼材の検討をする目的で、普通鋼 SM400、低降伏点鋼 LY100、福山大学で開発された耐震用新鋼材 FLS(R)について単調および繰返しせん断試験を行い、断面形状、アスペクト比および材質が強度、塑性変形性能およびエネルギー吸収性能へ及ぼす影響について考察する。

*建設環境工学科

**大学院土木工学専攻

2. 実験概要

試験片に使用された SM400, LY100, FLS(R)の引張試験結果を図 1 および表 1 に示す。なお, FLS(R)の(R)は熱処理を行う前の鋼材であることを表す。せん断実験の载荷装置を図 2 に示す。せん断による変位は試験片の中央部の試験部分(以下, せん断パネルと呼ぶ)左右に測定点を設け, 画像測定器を用いて計測した。せん断パネルの形状は図 3 に示すように正方形(アスペクト比 $\alpha=1$)または長方形(アスペクト比 $\alpha=2$)であり, 断面形状は矩形断面または I 形断面であり, ウェブ厚およびフランジ厚は 1mm である。

表 1 材料の引張特性

鋼種名	降伏応力 σ_y (MPa)	引張強さ σ_u (MPa)	全伸び ε_u (%)	降伏 せん断変位 δ_y (mm)
SM400	280	446	39	0.032
LY100	78*	244	53	0.010
FLS(R)	132*	430	64	0.016

*0.2%耐力

図 3(b)および図 3(d)に示す I 形断面ではフランジのせん断応力を無視してウェブのみの断面積で平均せん断応力を計算する。試験片名称は「SM400-R1」を例にとると, 「鋼材名-断面形状(矩形断面:R, I 形断面:I), アスペクト比(正方形:1, 長方形:2)」と表される。図 4 に示す矩形断面せん断パネルの平均せん断応力 τ_R , I 形断面せん断パネルの平均せん断応力 τ_I および平均せん断ひずみ γ は式(1), 式(2) および式(3)により定義される。また, 繰り返しせん断試験に用いた降伏せん断変位 δ_y は式(4)により定義される。降伏せん断ひずみ γ_y は式(5)により定義される。

$$\tau_R = \frac{Q}{A_R} \dots \dots \dots (1)$$

$$\tau_I = \frac{Q}{A_I} \dots \dots \dots (2)$$

$$\gamma = \tan^{-1} \frac{\delta}{b} \dots \dots \dots (3)$$

$$\delta_y = \gamma_y \cdot b \dots \dots \dots (4)$$

$$\gamma_y = \frac{\tau_y}{G} \dots \dots \dots (5)$$

ここで, Q : せん断パネルに作用するせん断力, A_R : 矩形断面せん断パネルのウェブ断面積, A_I : I 形断面せん断パネルの断面積, δ : せん断変位, b : ウェブ幅, τ_y : 降伏せん断応力($\sigma_y/\sqrt{3}$), G : せん断弾性係数である。

繰り返しせん断は, 変位制御で静的に载荷した。繰り返し

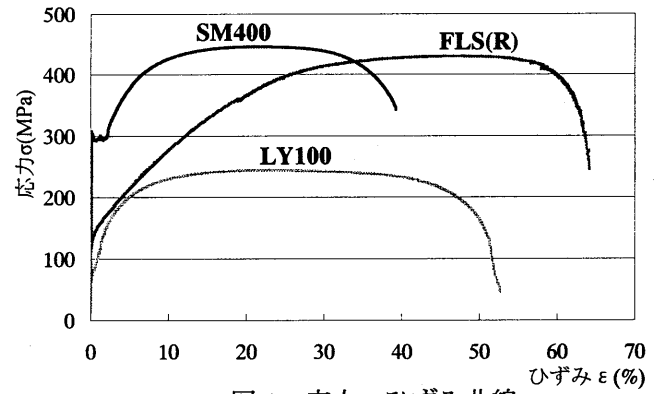


図 1 応力 - ひずみ曲線

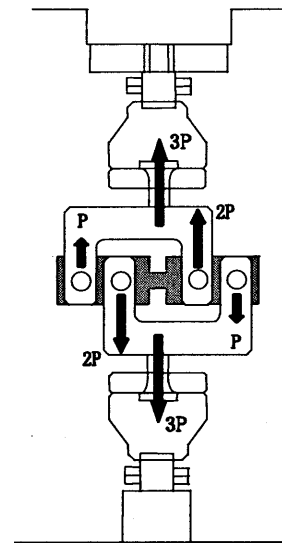
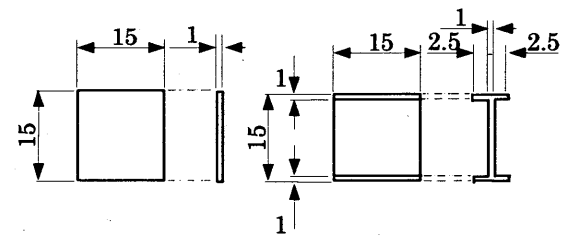
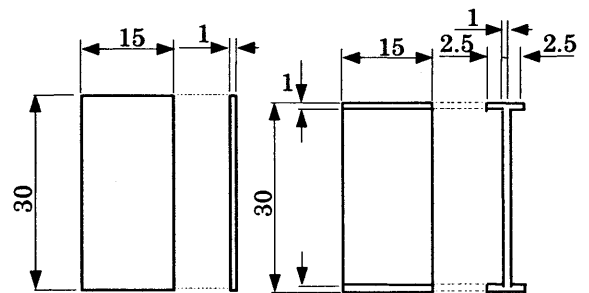


図 2 载荷装置



(a) 矩形断面 ($\alpha=1$)

(b) I 形断面 ($\alpha=1$)



(c) 矩形断面 ($\alpha=2$)

((d) I 形断面 ($\alpha=2$))

(単位: mm)

図 3 せん断パネルの断面とアスペクト比

しせん断载荷の基本変位は SM400 のせん断パネルが純せん断によって降伏する時の降伏せん断変位 δ_y を片振幅とし、 $+1\delta_y, -1\delta_y, +2\delta_y, -2\delta_y, \dots, +n\delta_y, -n\delta_y$ と漸次振幅を増加させながら $\pm 1\delta_y$ の変位増分で载荷を行った。

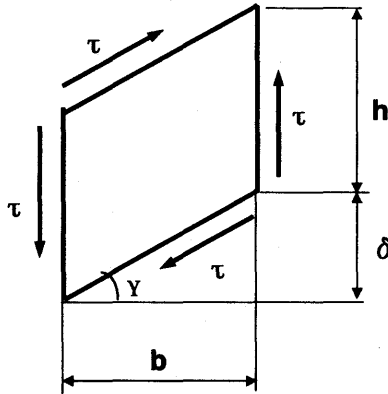


図4 せん断変位

3. 実験結果および考察

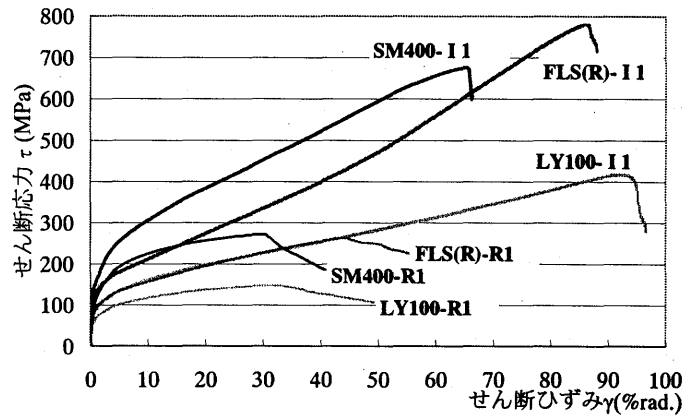
最大平均せん断応力をせん断強度、最大平均せん断応力時の平均せん断ひずみを塑性変形性能と定義する。全ての試験片はせん断パネルの隅角部にクラックが発生した。せん断パネルはクラックの発生時に最大強度に達し、その後クラックの進展により崩壊した。

3. 1 せん断パネルの座屈挙動

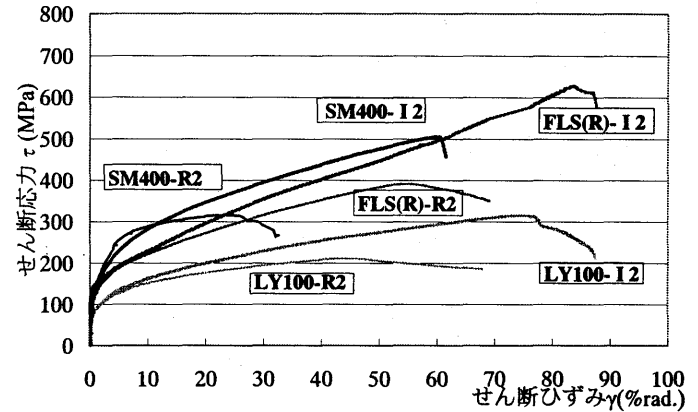
単調载荷の τ - γ 曲線を図5に示す。また、繰り返しせん断载荷の包絡線を図6に示す。図5および図6において、試験片名称が四角の枠で囲まれた試験片はせん断パネルに座屈が生じたことを表す。全てのせん断パネルの幅厚比は15である。座屈に対するアスペクト比の関係を比較すると、単調载荷の場合、矩形断面パネルとI形断面パネルともにアスペクト比2において座屈が生じた。また、繰り返し载荷の場合、矩形断面パネルはアスペクト比2において座屈が生じたが、I形断面パネルは座屈が生じなかった。これは、単調载荷と繰り返し载荷の場合、繰り返し载荷は交番荷重によって変形が元に戻るため座屈が生じにくくなったものと考えられる。

3. 2 単調せん断载荷

図5(a)より、正方形せん断パネルにおいてI形断面パネルは矩形断面パネルよりせん断強度および塑性変形性能が著しく大きい。これは、せん断パネルの隅角部におけるクラックの発生が上下端のフランジにより抑えられたためであると考えられる。せん断強度および塑性変形性能において、SM400ではI形断面パネルは矩形断面パネルよりそれぞれ約2.4倍および約2.2倍大きく、LY100ではそれぞれ約2.7倍および約3.0倍大きく、FLS(R)ではそれぞれ約3.0倍および約1.9倍大きい。

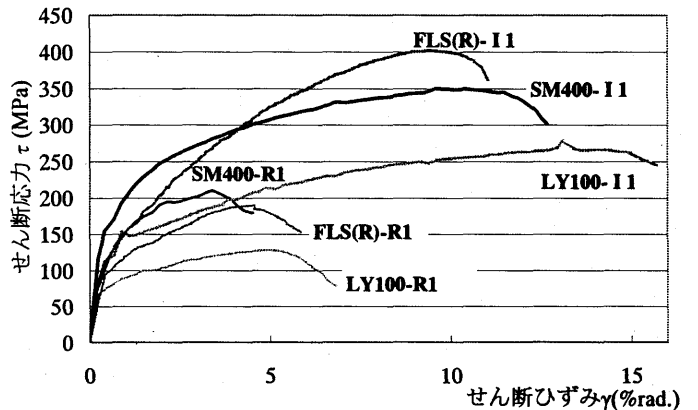


(a) 正方形パネル（矩形断面, I形断面）

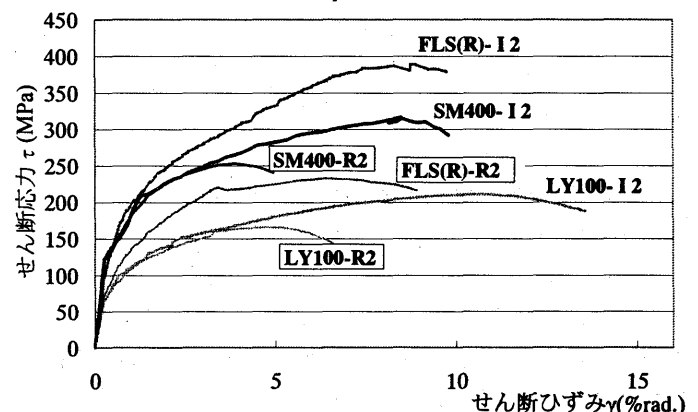


(b) 長方形パネル（矩形断面, I形断面）

図5 単調せん断载荷の τ - γ 曲線



(a) 正方形パネル（矩形断面, I形断面）



(b) 長方形パネル（矩形断面, I形断面）

図6 繰り返しせん断载荷の包絡線

図5(b)より、長方形せん断パネルにおいてI形断面パネルは矩形断面パネルよりせん断強度および塑性変形性能が大きい。これは、正方形せん断パネルの場合と同様に、クラックの発生がフランジにより抑えられたためであると考えられる。せん断強度および塑性変形性能において、SM400のI形断面パネルは矩形断面パネルよりそれぞれ約1.6倍および約2.0倍大きく、LY100ではそれぞれ約1.5倍および約1.9倍大きく、FLS(R)ではそれぞれ約1.6倍および約1.5倍大きい。

図5(a)および図5(b)より、矩形断面の長方形せん断パネルは正方形せん断パネルよりせん断強度が大きい。これは、長方形せん断パネルは正方形せん断パネルよりもせん断応力分布が均一化されるため、ひずみ硬化による強度増加が大きくなると考えられる。

I形断面の正方形せん断パネルは長方形せん断パネルよりせん断強度が大きい。これは、I形断面ではフランジのせん断応力を無視してウェブのみの断面積で平均せん断応力を計算している。しかし、ウェブの降伏後には、フランジがかなりの強度を受け持つ。正方形せん断パネルの強度はウェブに対するフランジの断面積が相対的に大きいために、長方形せん断パネルより大きくなると考えられる。ちなみに、フランジを含めた全断面でせん断応力を計算すると、正方形せん断パネルと長方形せん断パネルのせん断強度はほぼ等しくなる。

以上より、単調荷重の場合、ひずみ硬化によるSM400およびFLS(R)のせん断強度の上昇割合はほぼ等しく、LY100より著しく大きい。最終的なせん断強度はI形断面パネルのFLS(R)が最大となる。

3.3 繰返しせん断荷重

図6(a)より、正方形せん断パネルにおいてI形断面パネルは矩形断面パネルよりせん断強度および塑性変形性能が著しく大きい。これは、単調荷重の場合と同様に、クラックの発生がフランジにより抑えられたためであると考えられる。せん断強度および塑性変形性能において、SM400のI形断面パネルは矩形断面パネルよりそれぞれ約1.7倍および約2.4倍大きく、LY100ではそれぞれ約2.0倍および約2.6倍大きく、FLS(R)ではそれぞれ約2.2倍および約2.0倍大きい。

図6(b)より、長方形せん断パネルにおいてI形断面パネルは矩形断面パネルよりせん断強度および塑性変形性能が大きい。これは、単調荷重の場合と同様に、クラックの発生がフランジにより抑えられたためであると考えられる。せん断強度および塑性変形性能において、SM400のI形断面パネルは矩形断面パネルよりそれぞれ約1.2倍および約2.0倍大きく、LY100ではそれぞれ約1.3倍および約2.2倍大きく、FLS(R)ではそれぞれ約1.7倍および約1.5倍

大きい。

図6(a)および図6(b)より、矩形断面の長方形せん断パネルは正方形せん断パネルよりせん断強度が大きい。これは、単調荷重の場合と同様に、長方形せん断パネルは正方形せん断パネルよりもせん断応力分布が均一化されるため、ひずみ硬化による強度増加が大きくなると考えられる。

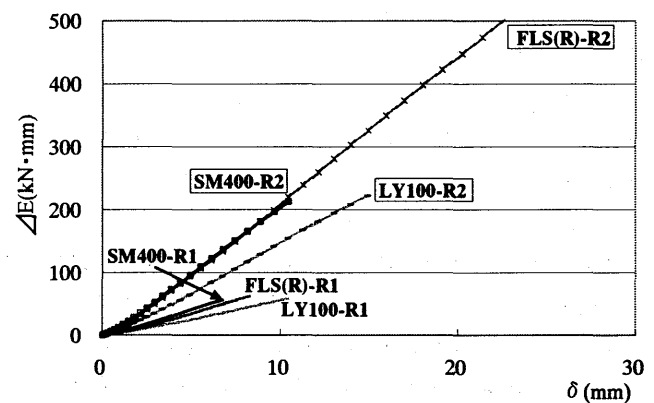
I形断面の正方形せん断パネルは長方形せん断パネルよりせん断強度が大きい。これは、単調荷重の場合と同様に、フランジを含めた全断面で計算すると、ほぼ等しくなる。

図5および図6より、単調荷重と繰返し荷重を比較すると、同じせん断ひずみに対して繰返し荷重は単調荷重よりせん断応力が著しく大きい。これは、繰返し荷重は単調荷重よりひずみ履歴が著しく長くなり、ひずみ硬化の影響が大きくなる。これによって、せん断応力が大きく増加したと考えられる。

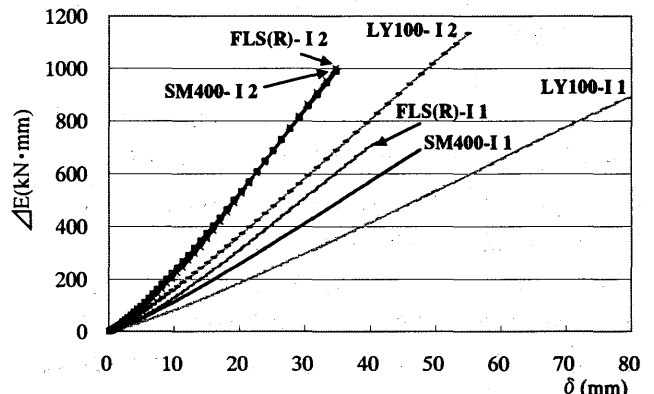
以上より、繰返し荷重の場合、ひずみ硬化による強度上昇は、単調荷重と異なり、FLS(R)、SM400、LY100の順に大きくなり、最終的なせん断強度はI形断面パネルのFLS(R)が最大となる。

3.4 累積エネルギー吸収量

繰返しせん断荷重における履歴曲線の各サイクル毎の内側の面積をそのサイクルのエネルギー吸収量と定義する。また、サイクル毎のエネルギー吸収量をせん断強度まで累積したものを累積エネルギー吸収量と定義する。繰返しせん断荷重の累積エネルギー吸収量を図7に示す。



(a) 矩形断面パネル（正方形，長方形）



(b) I形断面パネル（正方形，長方形）

図7 繰返しせん断荷重の累積エネルギー吸収量

図 7(a) および図 7(b)より，正方形せん断パネルにおいて I 形断面パネルは矩形断面パネルより累積エネルギー吸収量が著しく大きく，SM400，LY100 および FLS(R)はそれぞれ約 10.3 倍，約 11.6 倍および約 9.0 倍大きい。

図 7(a) および図 7(b)より，長方形せん断パネルにおいて I 形断面パネルは矩形断面パネルより累積エネルギー吸収量がかかなり大きい，正方形せん断パネルほど大きな差異はない。SM400，LY100 および FLS(R)はそれぞれ約 3.6 倍，約 5.2 倍および約 2.0 倍大きい。

以上より，塑性変形性能および累積エネルギー吸収量は I 形断面の長方形せん断パネルにおける LY100 が最も優れている。

4. まとめ

本研究では，SM400，LY100 および FLS(R)のせん断パネルについて単調および繰り返しせん断試験を行った。断面形状は矩形断面および I 形断面であり，パネル形状は正方形(アスペクト比 1)および長方形(アスペクト比 2)である。その結果，強度，塑性変形性能およびエネルギー吸収性能について次のことが明らかになった。

- (1) 繰り返し載荷の場合，ひずみ硬化による強度上昇は FLS(R)，SM400，LY100 の順に大きく，最終的なせん断強度は FLS(R)の I 形断面パネルが最大となる。

- (2) I 形断面パネルはせん断パネルの隅角部におけるクラックの発生が上下端のフランジにより抑えられるために，塑性変形性能およびエネルギー吸収性能が矩形断面パネルよりも著しく向上する。
- (3) 塑性変形性能および累積エネルギー吸収量は I 形断面の長方形せん断パネルが最も優れている。

参考文献

- [1] 藤本利昭，稲井栄一，富田将弘，極低降伏点鋼を用いたせん断型パネルダンパーの履歴挙動に関する研究，鋼構造論文集第 13 巻第 49 号，2006 年 3 月。
- [2] 佐合大，谷一成，谷中聡久，小池洋平，鶴野禎史，姫野岳彦，低降伏点鋼板を用いたせん断パネル型ストッパー，土木学会第 61 回年次学術講演，平成 18 年 9 月。
- [3] 鈴井康正，高橋泰彦，品部裕児，和田肇充，土屋博訓，極低降伏点鋼を利用した履歴ダンパーの構造性能に関する実験的研究，鋼構造年次論文報告書第 5 巻，1997 年。
- [4] M.Uenoya, Y.Fukumoto, M.Nakamura, 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.