

ウェブに低降伏点鋼を用いた箱型断面柱の繰返し弾塑性挙動に関する実験的研究

福山大学 正会員 上野谷 実 福山大学 正会員 中村 雅樹
(株) ブリッジ・エンジニアリング 正会員 ○中澤 公宏

1.はじめに

近年わが国では巨大地震が頻繁に発生し、多くの構造物が被害を受けた。構造物の耐震性能は部材の強度および塑性変形性能の影響を強く受ける。本研究では、曲げ塑性ヒンジ形成による崩壊が一般的である門形ラーメン鋼製橋脚の柱の基部を想定して、5パネルからなる正方形箱型断面柱の基部1パネルのウェブに普通鋼(SM)および耐震用新鋼材(FLS)を用い、フランジとウェブの板厚およびリブ本数が異なる供試体において、繰返し水平載荷を行う。その結果より、曲げを受ける柱の座屈挙動、強度、変形性能およびエネルギー吸収量について考察する。

2.供試体および実験方法

供試体は図-1に示すように、1パネルの幅および高さが450mm、全長2250mmで5パネルからなる正方形箱型断面柱で、柱の基部1パネル(P1)が塑性リンク部分、上4パネル(P2~P5)が補強パネル部分であり、基部から450mm間隔に板厚6mmのダイヤフラム(D1~D4)を配置している。本研究では、曲げ載荷を行うため上側3パネル(P3~P5)は降伏しない断面形状にして、下側2パネル(P1~P2)のみ変化させて実験を行った。上側3パネルは、フランジおよびウェブに板厚6mmのSM鋼を用い、フランジとウェブに150mm間隔でリブを2本配置している。供試体は上側3パネルと同じ形状の供試体SM6-6-2-2と、ウェブに板厚4.5mmのFLS鋼、フランジに板厚6mmのSM鋼を用い、フランジとウェブに75mm間隔でリブを5本配置している供試体FLS6-4.5-5-5と、ウェブに板厚4.5mmのFLS鋼、フランジに板厚9mmのSM鋼を用い、リブはフランジに75mm間隔で5本、ウェブに150mm間隔で2本配置している供試体FLS9-4.5-5-2の3体を製作した。

図-2に載荷装置図を示す。実験は一定鉛直荷重のもと、繰返し水平載荷を変位制御で静的に行った。基本変位は図-3に示すように、供試体基部が鉛直荷重と水平荷重による曲げを受けて降伏するときの載荷点における水平変位を降伏水平変位 δ_y と定義する。ここで、降伏水平荷重 H_y および鉛直荷重 N はそれぞれ式(1)および式(2)により与えられる。降伏水平変位 δ_y は供試体の基部を固定端とする片持ばりとして、はり理論による降伏水平変位 δ_{yM} とせん断変位 δ_{yS} の和を δ_y と定義し、式(3)、(4)および(5)により与えられる。今回の実験はSM6-6-2-2との比較を行うためにSM6-6-2-2の降伏水平変位 $\delta_y=14.14\text{mm}$ を片振り幅とした両振り載荷を $\pm 1\delta_y$ 、 $\pm 2\delta_y$ 、 $\pm 3\delta_y$ 、…と漸増するように強制変位を与えて実験を行った。

表-1に各供試体のパラメータを示す。

表-1 各供試体のパラメータ

供試体名	σ_y (MPa)	τ_y (MPa)	N_y (kN)	N (kN)	H_y (kN)	δ_{yM} (mm)	δ_{yS} (mm)	δ_y (mm)
SM6-6-2-2	398	230	4951	743	252	12.67	1.47	14.14
FLS6-4.5-5-5	149	86	2388	258	278	13.28	0.65	13.93
FLS9-4.5-5-2	149	86	2547	283	360	13.19	0.81	14.20

ここで、 H_y :降伏水平荷重、 σ_m :曲げ応力、 I :断面2次モーメント、 h :供試体高さ、 b_f :フランジ幅、 N :鉛直荷重、 σ_y :降伏応力(FLS:0.2%耐力)、 A :全断面積、 δ_{yM} :理論上の降伏水平変位、 E :弾性係数、 τ :せん断応力、 G :せん断弾性係数、 A_w :ウェブの断面積、 δ_{yS} :せん断変位、 δ_y :降伏水平変位である。

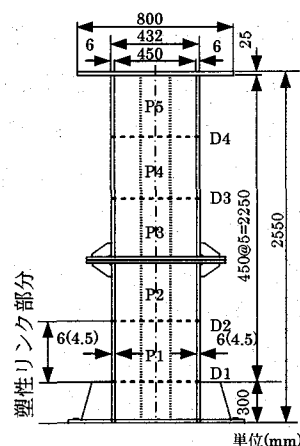


図-1 供試体

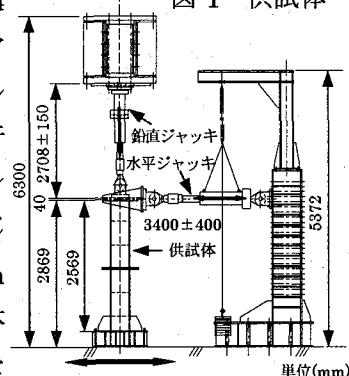
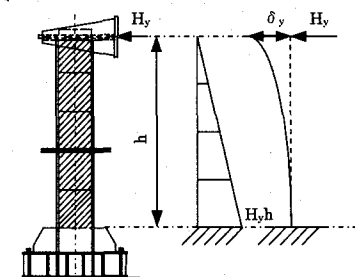


図-2 載荷装置

図-3 曲げモーメント
およびたわみ図

$$H_y = \frac{2\sigma_m I}{hb_f} \quad \dots (1)$$

$$N = 0.15 \sigma_y A \quad \dots (2)$$

$$\delta_{yM} = \frac{H_y h^3}{3EI} \quad \dots (3)$$

$$\delta_{yS} = \frac{H_y h \tau}{GA_w} \quad \dots (4)$$

$$\delta_y = \delta_{yM} + \delta_{yS} \quad \dots (5)$$

3.実験結果および考察

図-4 に各供試体に用いた鋼材の引張試験による応力-ひずみ曲線を示す。

表-2 に各供試体の座屈挙動を示す。たわみはリブ本数が 2 本の供試体 SM6-6-2-2 の場合、リブ間で生じたたわみがサイクルを増すにつれて大きくなり、リブ間の局部座屈により崩壊した。リブ本数が 5 本の供試体 FLS6-4.5-5-5 および FLS9-4.5-5-2 の場合、リブ間が狭いためリブ間で生じたたわみは大きく広がらず、最終的にはフランジパネル全体のたわみが大きくなり、フランジパネルの全体座屈により崩壊した。

図-5 に各供試体の水平荷重-水平変位履歴曲線を示す。縦軸は水平荷重 H を SM6-6-2-2 の降伏水平荷重 H_{ySM} で、横軸は水平変位 δ を SM6-6-2-2 の降伏水平変位 δ_{ySM} で無次元化している。

図-6 に水平荷重-水平変位履歴曲線の各サイクルの正と負の最大変位点における水平荷重の絶対値の平均を結んだ各供試体の包絡線を示す。強度に関しては FLS9-4.5-5-2, FLS6-4.5-5-5, SM6-6-2-2 の順に大きい。変形性能に関しては FLS6-4.5-5-5 および FLS9-4.5-5-2 が SM6-6-2-2 より 1.74 倍と優れている。これは、FLS6-4.5-5-5 および FLS9-4.5-5-2 のリブ本数が SM6-6-2-2 より多いためにリブ間の局部座屈が生じにくく、剛性も大きいことから面外たわみおよび塑性域が広範囲に広がり急激な強度低下が生じなかったと考えられる。また、FLS9-4.5-5-2 は他の供試体よりフランジの板厚が 1.5 倍ほど厚く、剛性が大きいために強度が増したと考えられる。

図-7 に各供試体の累積エネルギー吸収量を示す。水平荷重-水平変位履歴曲線において各サイクル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。縦軸は累積エネルギー吸収量 Δ を弾性限エネルギー吸収量 Δ_{ESM} で、横軸は水平変位 δ を降伏水平変位 δ_{ySM} で無次元化している。最終的な累積エネルギー吸収量は FLS9-4.5-5-2, FLS6-4.5-5-5, SM6-6-2-2 の順に大きく、FLS6-4.5-5-5 および FLS9-4.5-5-2 がそれぞれ SM6-6-2-2 の 2.41 倍, 2.94 倍となった。FLS9-4.5-5-2 の累積エネルギー吸収量が増えた原因は、フランジの板厚が他の供試体より厚くリブ本数も 5 本で剛性が高いため強度が大きく、変形性能に優れているからだと思われる。このことより、累積エネルギー吸収量はフランジの剛性および変形性能により大きく左右されることが考えられる。

4.まとめ

実験結果から以下のことが明らかになった。

(1) 座屈挙動および崩壊モードについて

本実験の範囲ではフランジの座屈が先行し、フランジおよびウェブのリブが 2 本の場合、柱はフランジパネルのリブ間に生じる局部座屈により崩壊する。フランジおよびウェブのリブが 5 本の場合、柱はリブ間の局部座屈が抑えられるためにフランジパネルの全体座屈により崩壊する。

(2) 柱の強度、変形性能およびエネルギー吸収量について

フランジのリブ本数を増やすことによって、柱の強度および変形性能は大きく向上する。また、累積エネルギー吸収量は強度および変形性能に優れた FLS9-4.5-5-2 が最も大きくなる。

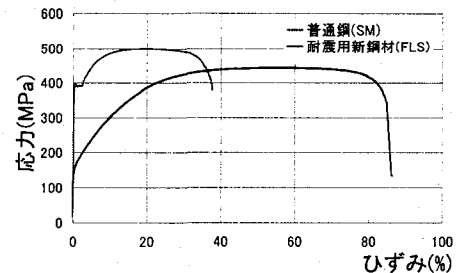


図-4 応力-ひずみ曲線

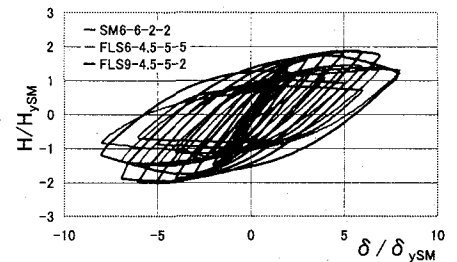


図-5 水平荷重-水平変位履歴曲線

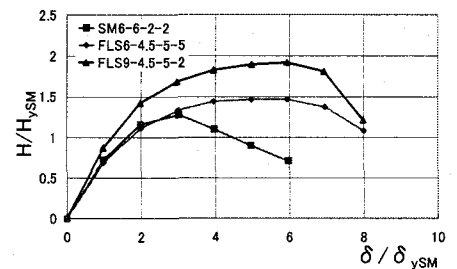


図-6 包絡線

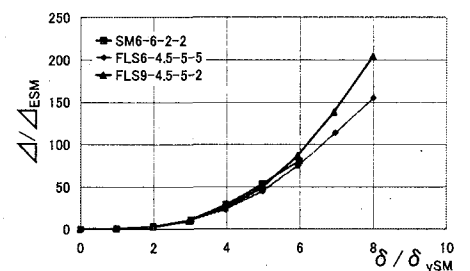


図-7 累積エネルギー吸収量

表-2 各供試体の座屈挙動

供試体名	パネル	座屈開始	荷重(kN)	クラック発生変位	最大面外たわみ(mm)	最終変位
SM6-6-2-2	フランジ	P1	271	6 δ_y	16.2	6 δ_y
	ウェブ	P1	322	6 δ_y	22.3	
FLS6-4.5-5-5	フランジ	P1	323	-6 δ_y	20.0	8 δ_y
	ウェブ	P1	323	-6 δ_y	8.5	
FLS9-4.5-5-2	フランジ	P1	460	-6 δ_y	51.4	8 δ_y
	ウェブ	P1	460	-6 δ_y	-30.8	