

鋼種の異なる腹板を有する箱形断面柱の繰返しせん断性能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
 錦城護謨(株) 正社員 阿草 英正 (株)アーキ 正会員 ○長川 英哲

1.はじめに

門形鋼製橋脚に地震力が作用する場合、繰返し作用するせん断力により鋼製橋脚の柱ウェブの数パネルに形成される斜張力場を積極的に利用して、大きな塑性変形性能を発揮できるような構造システムを新たに開発しようとするものである。剛性を上げずに鋼製橋脚の耐震性を向上させる 1 つの方法として、せん断力が卓越する箇所（パネル）にせん断リンクデバイス部分を設けることにより、ウェブで地震エネルギー吸収させることが考えられる。ここでは、中間 2 パネルのウェブ厚がフランジ厚の 1/2 の場合について、ウェブの鋼種に普通鋼(SM400)、低降伏点鋼(LY100)およびステンレス鋼(SUS304)を用いた 3 種類の補剛箱形断面柱供試体において繰返しせん断载荷実験を行い、強度、塑性変形性能について考察する。

2.供試体および実験方法

供試体は図-1 に示すように、高さ 1800mm で 4 パネルからなる正方形補剛箱形断面柱である。柱の断面形状は 450×450mm であり、上下パネル(P1,P4)は普通鋼(SM)を使用し、板厚 12mm である。また、中間パネル(P2,P3)のフランジは普通鋼(SM)の板厚 7mm を使用し、そのウェブ面は板厚 3.5mm で、SM,LY および SUS の鋼種を使用する。柱基部から 450mm 間隔にダイヤフラムを設置し、板幅を等分するように 150mm 間隔で縦リブを配置した供試体 3 体を製作した。それぞれ供試体のウェブの鋼種により SM3.5,LY3.5,SUS3.5 と呼ぶ。ただし、SUS は板厚 3.5mm の鋼材がなく、市販されている板厚 3.0mm の鋼材を使用している。

図-2 に载荷装置を示す。実験は一定軸力のもと、両端固定の供試体頂部に繰返し水平载荷を変位制御で準静的に行った。基本変位は、図-3 に示すように正方形のウェブが純せん断を受けて変形するとき、対角線方向変位 δ_1 と δ_2 の和をせん断変位 δ と呼び式 (1) で定義する。そしてウェブが純せん断で降伏するときの対角線方向変位を δ_{y1} と δ_{y2} とし、その和を降伏せん断変位 δ_{y0} とし、式(2.3)で定義する。実験で用いた降伏せん断変位 δ_y は、ウェブ 1 パネルでの降伏せん断変位 δ_{y0} をウェブパネルの枚数倍として、式(4)で定義する。今回は後の実験で SM 鋼との比較を行うために SM 鋼の降伏せん断変位を用いて繰返し载荷を行った。表-1 に示す SM3.5 のウェブに対する $\delta_y=5.58\text{mm}$ を片振り幅とした両振り载荷を $\pm 1 \delta_y$ 、 $\pm 2 \delta_y$ 、 $\pm 3 \delta_y$ 、・・・のように行った。

図-4 に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-1 材料特性

供試体名	σ_y (MPa)	P_y (KN)	N (KN)	Q_p (KN)	δ_{y0} (mm)	δ_y (mm)	板厚実測値
SM3.5	290	3891	583	514	1.39	5.54	3.5
SUS3.5	298	3708	556	172	1.42	5.69	3.0
LY3.5	117	1560	234	199	0.56	2.24	3.4

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 = \sqrt{2} \gamma h \cdots (1) \quad \delta_{y0} = \delta_{y1} + \delta_{y2} = \frac{\sqrt{2} \tau_{yw} h}{G} \cdots (2) \quad \delta_y = 4 \delta_{y0} \cdots (3)$$

ここで、 δ_{y0} ：1 パネルでの降伏せん断変位、 δ_y ：実験で用いる降伏せん断変位、 σ_{yw} ：ウェブの降伏応力、 τ_{yw} ：ウェブのせん断降伏応力、 γ ：せん断ひずみ、 G ：せん断弾性係数、 h ：パネル高さ、 τ_y ：せん断応力、 N_y ：軸方向降伏荷重、 N ：鉛直荷重、 Q_p ：塑性せん断力

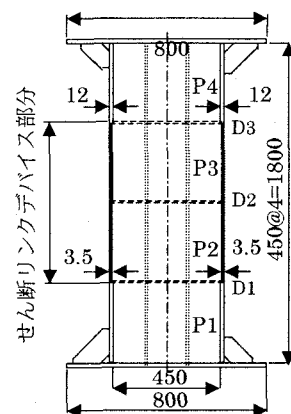


図-1 供試体

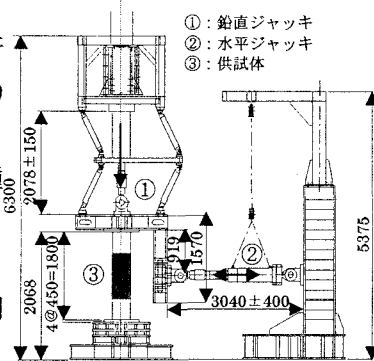


図-2 载荷装置

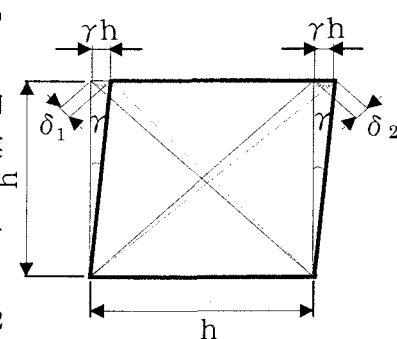


図-3 降伏せん断変位

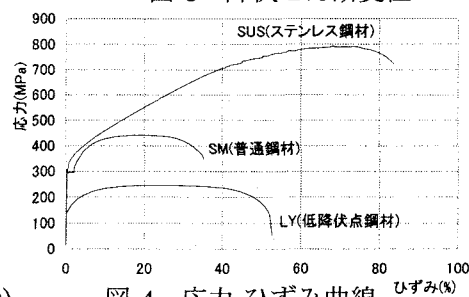


図-4 応力-ひずみ曲線

3.実験結果および考察

図-5 に供試体 SM3.5, LY3.5 および SUS3.5 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 $Q_{pSM3.5}$ 、横軸はせん断変位 δ を SM3.5 の降伏せん断変位 $\delta_{ySM3.5}$ で無次元化している。

図-6 にせん断力-せん断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せん断力の絶対値の平均を結んだ各供試体の包絡線(SM3.5 で無次元化)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、横軸はせん断変位 δ を SM3.5 の降伏せん断変位 $\delta_{ySM3.5}$ で無次元化している。

最大せん断強度は SM3.5 が SUS3.5 および LY3.5 よりそれぞれ 1.1 倍および 1.5 倍大きくなっている。材料の引張試験では SUS 鋼は SM 鋼より強度が大きいにもかかわらず SUS3.5 の強度が SM3.5 より小さくなっている。これは SUS3.5 の実測ウェブ板厚が SM3.5 の板厚より 17% 小さいことによる。そこで同じ板厚に対する強度の比較をするために SUS3.5 の強度を板厚の比に応じて換算すると、最大せん断強度は SUS3.5 が SM3.5 および LY3.5 よりそれぞれ 1.1 倍および 1.6 倍大きくなる。

最大せん断強度時の塑性変形性能は SUS3.5 が SM3.5 および LY3.5 よりそれぞれ 1.3 倍および 1.1 倍大きい。すべての供試体において、ウェブのせん断座屈が始まっても強度は上昇するが、SM3.5 および LY3.5 はフランジの塑性変形が始まる 12~13 δ_y の前後に最大せん断強度に達し、その後は低下する。SM3.5 は LY3.5 および SUS3.5 に比べ延性が劣るために大きなクラックが生じやすく、その後の強度低下が著しい。これに比べて、SUS3.5 はウェブのせん断座屈やフランジの塑性変形クラックが生じてでも耐荷力はほぼ横ばいの傾向を示している。これは SUS3.5 のひずみ硬化が他の鋼種より大きいことが原因と考えられる。最大せん断強度の 95% 耐力へ低下したときの変形性能でも SUS3.5 が SM3.5 および LY3.5 よりそれぞれ 1.3 倍および 1.2 倍となり、SUS3.5 が最も優れている。

表-2 に示すように、座屈による最大面外たわみは SM3.5, LY3.5 および SUS3.5 とともに東西ウェブパネル P2, P3 のリブ間で生じた。また、フランジはウェブの座屈に巻き込まれるようにウェブ側に塑性変形を生じた。

図-7 に各供試体の累積エネルギー吸収量を SM3.5 の弾性限エネルギー吸収量 $\Delta E_{SM3.5}$ で無次元化して示す。縦軸は累積エネルギー吸収量 $\Delta / \Delta E_{SM3.5}$ 、横軸はせん断変位 $\delta / \delta_{ySM3.5}$ である。最大せん断強度時の累積エネルギー吸収量で比較すると、SUS3.5 が SM3.5 および LY3.5 よりそれぞれ 1.4 倍および 1.2 倍となり、SUS3.5 が最も大きい。

4.まとめ

供試体 SM3.5, LY3.5 および SUS3.5 とともにウェブのせん断座屈が先行するが、フランジの塑性変形が始まる。12~13 δ_y の前後で最大せん断強度に達し、その後強度は低下する。SM3.5 は LY3.5 および SUS3.5 に比べ延性が劣るために大きなクラックが生じやすく、その後強度低下が著しい。最大せん断強度の 95% 耐力へ低下したときの変形性能は、SUS3.5 が最も優れている。

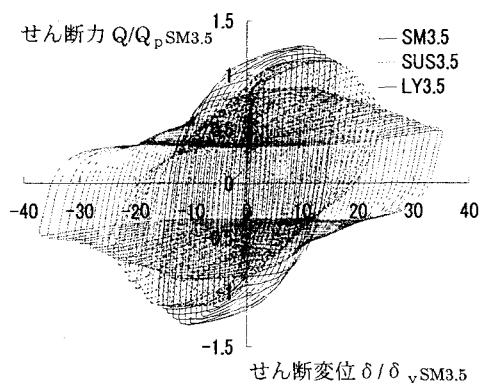


図-5 せん断力-せん断変位履歴曲線

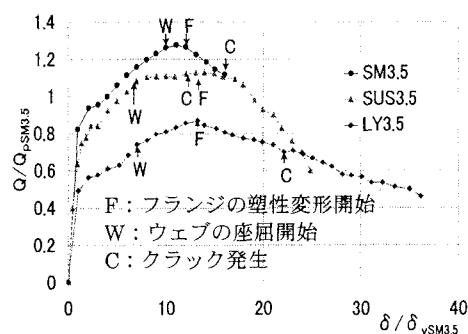


図-6 包絡線

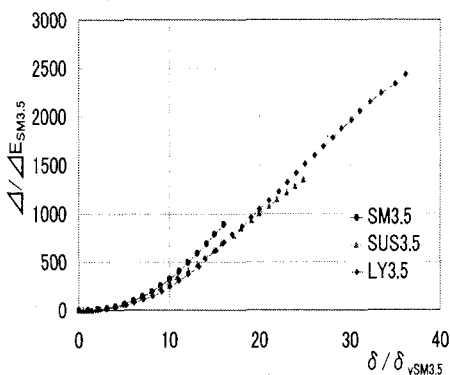


図-7 累積エネルギー吸収量

表-2 各供試体の座屈挙動

供試体名	パネル	座屈開始 せん断力 (kN)	座屈開始 変位	クラック 発生変位	最大面 外たわ み(mm)	最終せん断 変位
SM3.5	フランジ	P3	-656	-12 δ_y	—	12.9
		P2	646	12 δ_y	—	21.5
	ウェブ	P3	563	10 δ_y	—	22.6
		P2	563	10 δ_y	-16 δ_y	23.5
SUS3.5	フランジ	P3	463	13 δ_y	—	18.9
		P2	463	13 δ_y	—	14.1
	ウェブ	P3	410	7 δ_y	15 δ_y	32.2
		P2	-436	7 δ_y	-15 δ_y	-15.9
LY3.5	フランジ	P3	-448	-13 δ_y	—	28.4
		P2	447	13 δ_y	-22 δ_y	20.7
	ウェブ	P3	412	-7 δ_y	22 δ_y	-19.9
		P2	412	8 δ_y	—	-20.5