

縦リブの剛性がハイブリッド鋼製短柱の耐力に及ぼす 影響に関する実験的研究

安宅俊樹¹・小野潔²・松村政秀³・岡田誠司⁴・加藤健太郎⁵

¹学会員 早稲田大学創造理工学術院 建設工学専攻 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)

²正会員 博士(工学) 早稲田大学創造理工学部教授 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)

³正会員 博士(工学) 京都大学大学院工学研究科准教授 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

⁴正会員 株式会社IHIインフラシステム開発部 (〒108-0023 東京都港区芝浦三丁目17番12号吾妻ビル)

⁵学会員 大阪大学大学院 工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

1. 研究背景および目的

橋梁はL2地震動のような大きな地震動に対しても所要の耐震性能を満足することが要求されている。鋼橋の耐震性能向上策として、ダンパー等の制震デバイスを採用することにより、地震時に発生する断面力を減少させることで、耐震性能を満足させるといった手法をとられることがある。他方、既設鋼トラス橋等の既設の鋼橋では構成される薄肉断面の幅厚比パラメータが大きい場合に、制震デバイスを活用しただけでは要求される耐震性能を満足できないことがある。従って、局部座屈強度の向上も併せて満足させる必要がある。

そのような状況下、橋梁用高降伏点鋼板SBHSがJIS化¹された。SBHSは高い降伏点、溶接容易性、じん性に富んだ新しい素材であり、鋼橋に使用することでより合理的かつ経済的な設計手法の可能性が期待されている。このような高性能の鋼材を薄肉断面を持つ橋脚等に耐震補強として活用することができれば、局部座屈強度に対する耐震性能の向上を図ることができる可能性がある。鋼板パネルの局部座屈強度を向上させる手法として、鋼板パネルに補剛材を追加設置することで対象部材の幅厚比パラメータを小さくする手法が挙げられる。さらに、耐震設計、耐震補強において要求される性能として単に局部座屈強度を向上させるだけでなく、耐力の上昇を抑え、変形能を伸ばすことが求められることがある。既往の研究²⁾によれば、ウェブ、フランジ面にSM400、縦リブにSBHS700を用いたハイブリッド構造を採用することにより、耐力の上昇を抑え変形能

表-1 SBHS700 と SM400 の機械的性質

	降伏応力(MPa)	引張強さ(MPa)
SM400	282	441
SBHS700	770	796

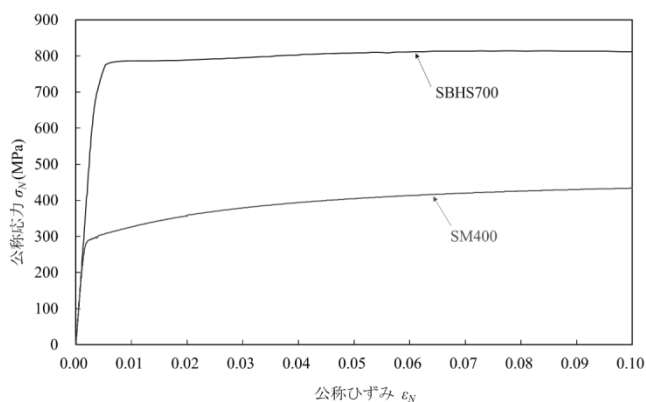


図-1 SBHS700 と SM400 の引張試験結果

を向上するといった耐震性能を実現する可能性が示されている。その一方で、縦リブの剛性が耐力および変形能に及ぼす影響に関する検討は行われておらず、その情報は乏しい。

そこで、本稿ではウェブ、フランジ面が従来鋼であるSM400で構成される鋼製短柱を対象とし、SBHSの中で最大の強度を持つ新素材SBHS700を補剛材として縦リブを導入した、ハイブリッド鋼製短柱の縦リブの剛性の異なる供試体の圧縮試験を行うことで、剛性の違いが耐力に及ぼす影響について検討を行った。

表-2 供試体寸法

	ウェブ			フランジ			リブ		
	厚さ t_w (mm)	幅 b_w (mm)	長さ l_w (mm)	厚さ t_f (mm)	幅 b_f (mm)	長さ l_f (mm)	厚さ t_r (mm)	幅 t_b (mm)	長さ l_r (mm)
UR_SM	6	300	500	6	300	500	-	-	-
R_B1	6	300	500	6	300	500	6	40	608
R_B2	6	300	500	6	300	500	9	60	608

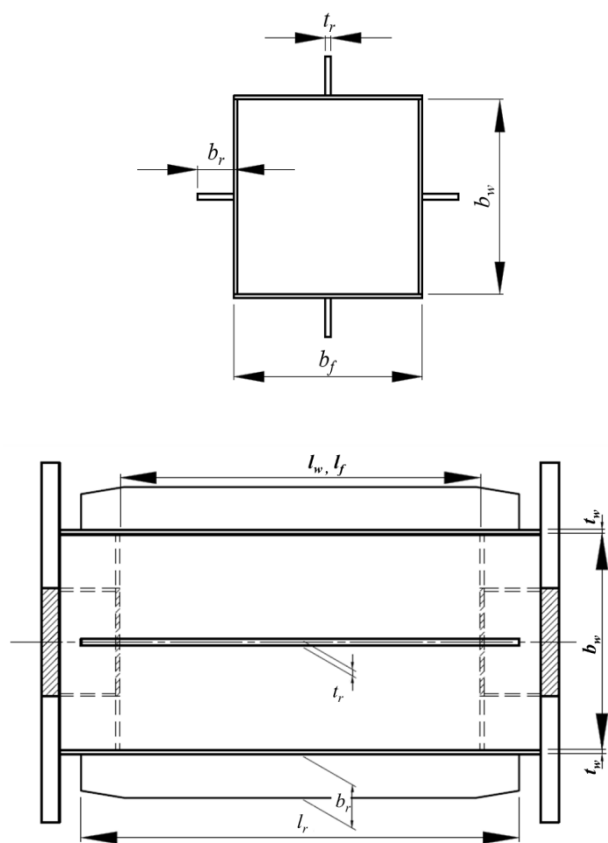


図-2 供試体寸法 断面図と側面図

2. 実験供試体および実験方法

補剛板の耐力を評価するため、供試体は補剛板 2 体と、比較のため無補剛板 1 体の合計 3 体を用いて圧縮試験を実施した。それぞれの供試体の概要を以下に示す。

- ・UR_SM：ウェブ、フランジ面が SM400 で構成された無補剛のホモジニアス鋼製短柱
- ・R_B1, R_B2：ウェブ、フランジ面が SM400 で構成され、SBHS700 による縦リブで補剛されたハイブリッド鋼製短柱

各供試体のウェブ面、フランジ面、縦リブは溶接により接合されている。図-1 に供試体を用いた SM400 と SBHS700 の応力-ひずみ関係を表す。表-1 はミルシートに記載する SM400 の機械的性質と既往の引張試験²⁾による SBHS700 の機械的性質を表す。同表より、SBHS700 は SM400 に対して降伏点で 2.7

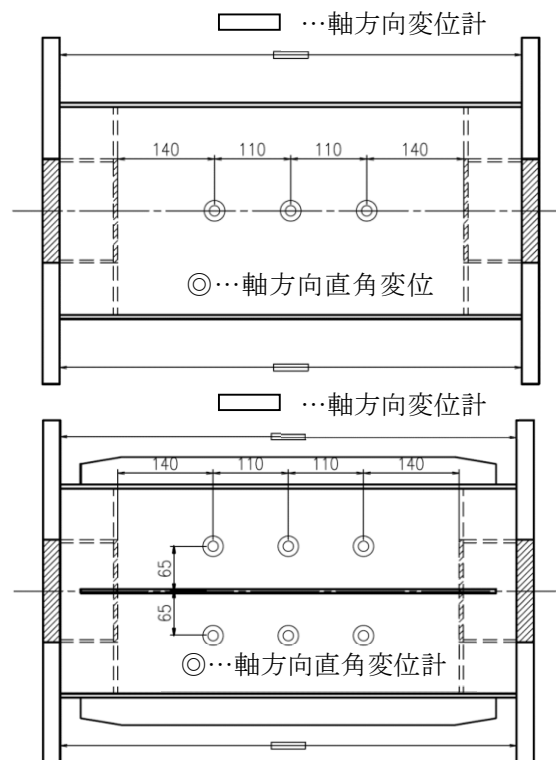


図-3 無補剛板と補剛板の変位計設置箇所

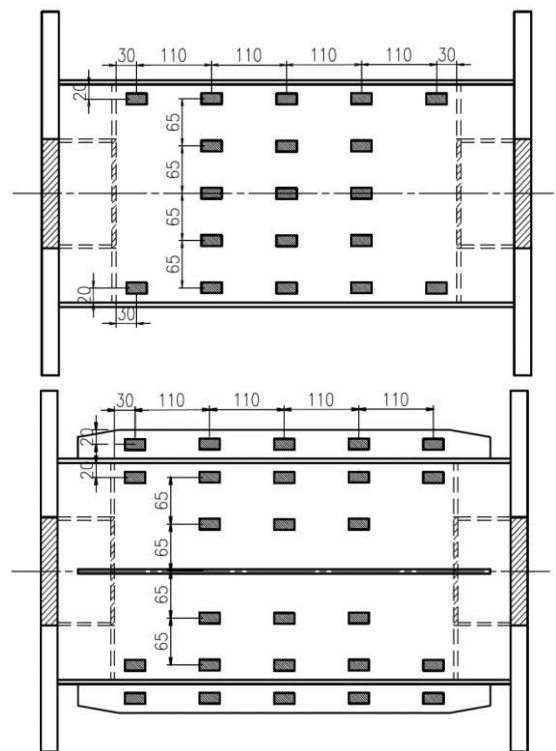


図-4 無補剛板と補剛板の変位計設置箇所

倍程度、引張強度で 1.8 倍程度大きい値を示していることがわかる。また、表-2 は各供試体の寸法、図-2 は各供試体概略図を示す。本研究で用いた 3 体の供試体は正方矩形断面(312mm×312mm)を有しており、全体座屈を防ぐため供試体の細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ が 0.05 以下となるように断面寸法の決定を行った。供試体 UR_SM については、局部座屈が発生し、縦リブ追加による局部座屈防止を目的とした補強が必要となるような断面とするため、ウェブおよびフランジの幅厚比パラメータが、道示 II³⁾で規定される両縁支持板の限界幅厚比パラメータ($R_R=0.7$)よりも大きい幅厚比パラメータ($R_R=1.0$)を有する断面寸法とした。供試体 R_B1、R_B2 については、フランジおよびウェブに縦リブを設置することで幅厚比パラメータが限界幅厚比パラメータより小さくなり($R_R=0.49$)、座屈強度が降伏強度を上回るようになっている。道路橋示方書³⁾に規定される R_R 、 $\bar{\lambda}$ の定義式を、以下の式(2.1)、(2.2)に示す。

$$R_R = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \times \frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 k_R} \quad (2.1)$$

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \cdot \frac{l}{r} \quad (2.2)$$

ここに、 b :板パネルの幅、 E :鋼材の弾性係数($=2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$)、 σ_y :鋼材の降伏点、 k_R :座屈係数($k_R=4n^2$)、 n :補剛材で区切られるパネル数、 μ :ポアソン比($=0.3$)、 r :断面二次半径、 l :有効座屈長

さらに、ウェブ、フランジ面では端部での座屈を防ぐため、ダイアフラムおよび補剛部材を設置している。従って、計測するテストパネル区間は全供試体長さから端部での補強区間を差し引いた供試体長さ l としている。これらの供試体に設置した各ひずみゲージ、変位計の設置箇所を図-3、図-4 に示す。変位計に関しては UR_SM には変位が生じやすい供試体中央部に設置した。R_B1 と R_B2 には供試体中央部に縦リブが導入されているために、変位計は中央部に近い 2 列目と 3 列目に変位計を設置した。各ひずみゲージは、図-5、図-6 に示すようにナンバリングを行った。ひずみゲージは隣り合う第 1 面、第 2 面に、変位計を第 3 面に設置した。また、縦リブでの応力状態を正確に把握するため、同図のように縦リブには左右にひずみゲージを設置した。これらの供試体を用いて、実験は早稲田大学が所有する 5000kN 大型構造物試験機により、変位制御の条件のもと、およそ 0.005mm/sec の載荷速度で軸方向圧縮試験を行った。試験前には弾性域内で予備載荷を行い、各辺に均等に圧縮力が加わっていることを確認し、本載荷試験を行った。実際の供試体および実際の圧縮試験の様子を図-7 に示す。

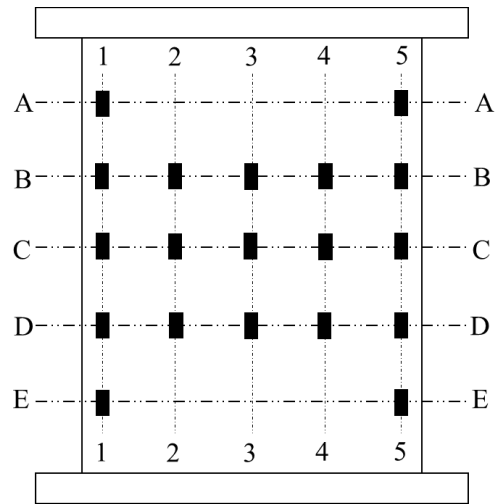


図-5 無補剛版のひずみゲージナンバリング

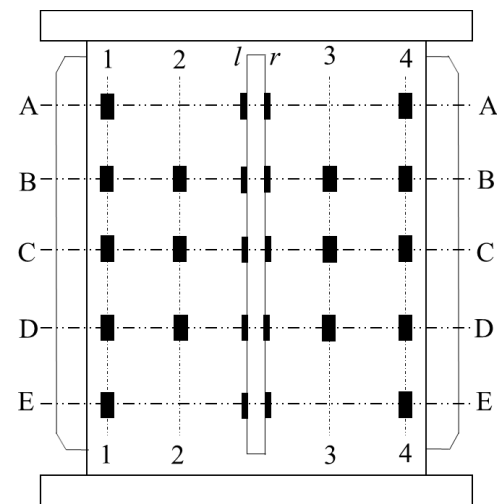


図-6 補剛版のひずみゲージナンバリング

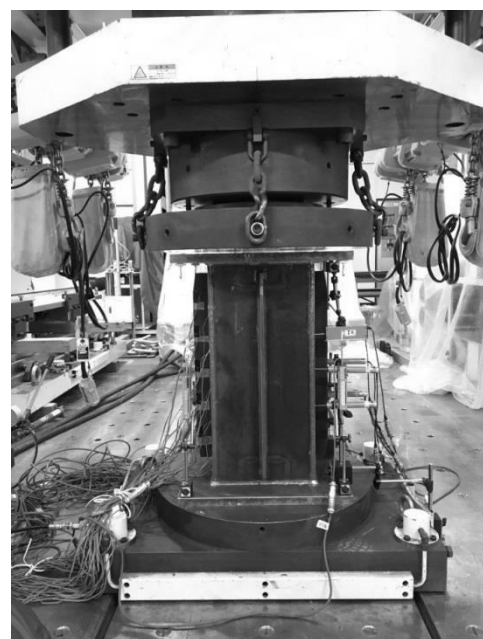


図-7 圧縮試験の状況

3. 実験結果

(1) P - δ 関係

図-8に軸方向に設置した4つの変位計が示した値の平均の変位 δ と載荷荷重 P の P - δ 関係を表す。R_B1, R_B2は試験装置の関係上、最大耐力が確認される前に圧縮試験を中断した。UR_SMは最大耐力1563kNに至った後、急激に耐力が減少している。これはUR_SMの幅厚比パラメータ($R_R=1.0$)が比較的大きいために降伏よりも先に座屈が生じ応力-変位関係の影響を受けない挙動となったことが考えられる。

これに対し、R_B1, R_B2 に関しては、載荷初期段階(およそ 1500kN)において UR_SM と同様の挙動を示し、滑らかに耐力が上昇した。しかし、その挙動に着目すれば、耐力は更に上昇したと考えられる。R_B1 は 2630kN の最大耐力を発揮し、UR_SM と比べ約 1.7 倍の耐力上昇が確認された。一方、R_B2 では 2835kN の最大耐力が観測され、R_B2 は UR_SM と比べ約 1.8 倍程度耐力が上昇したことが確認された。これは縦リブの導入により、幅厚比パラメータ($R_R=0.49$)が小さくなり、座屈強度が上昇したことに起因している。また、同図から 2 つのハイブリッド鋼製短柱が示した挙動において、剛性の違いによる耐力の差は小さいことがわかる。

(2) ひずみと面外変位

図-9, 図-10にUR_SMの示したひずみの推移、各載荷段階での面外変位の成長を示す。横軸はひずみ ε をSM400の降伏ひずみ ε_y で除した $\varepsilon/\varepsilon_y$ 、縦軸はひずみゲージ設置位置の断面を表す。紙面の都合上、ひずみの値はE面1列目の示した降伏に至るまでのひずみ推移図、降伏以降のひずみ推移図のみを取り上げる。図-9のグラフより、UR_SMの示したひずみは最大荷重(1.0 P_{max} : 1563kN)に至るまで一様に生じ、最大耐力以降の急激な耐力低下に伴い、ひずみも大きく

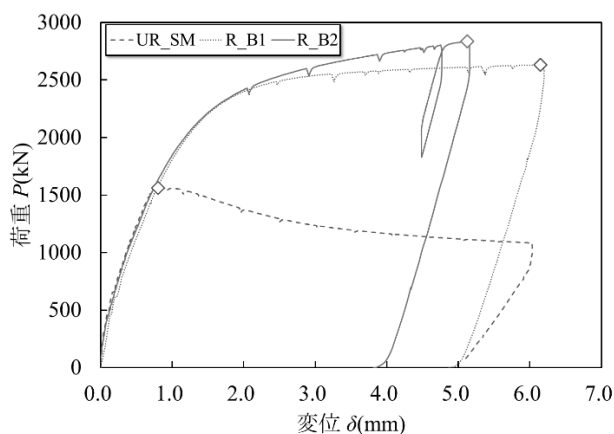


図-8 各供試体の示した荷重-変位関係

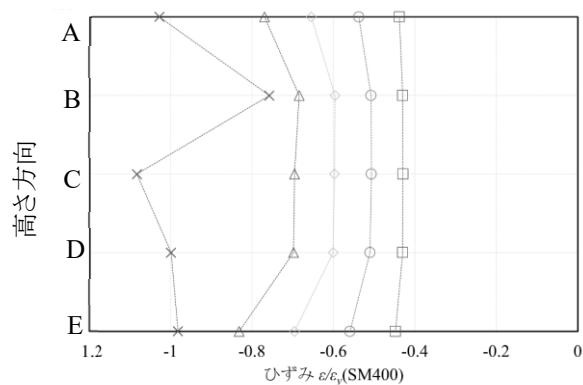


図-9 R_SM 最大耐力に至るまでのひずみの推移と各載荷段階での面外変位

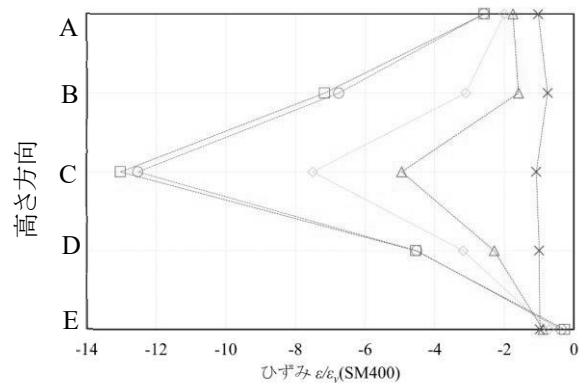
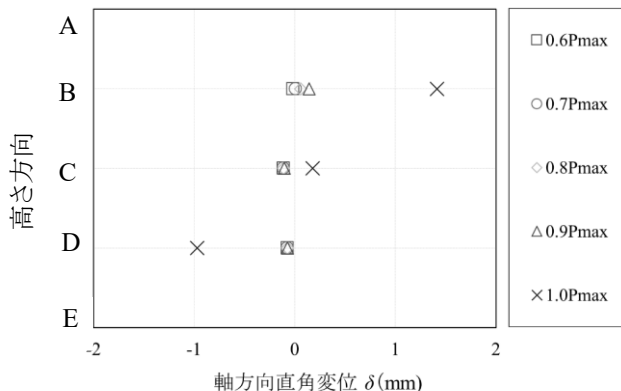
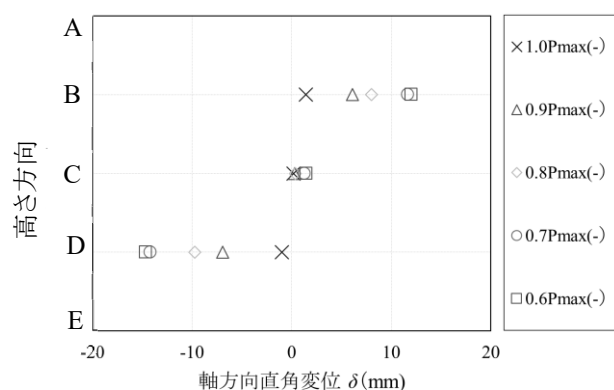


図-10 R_SM の最大耐力以降のひずみの推移と各載荷段階での面外変位



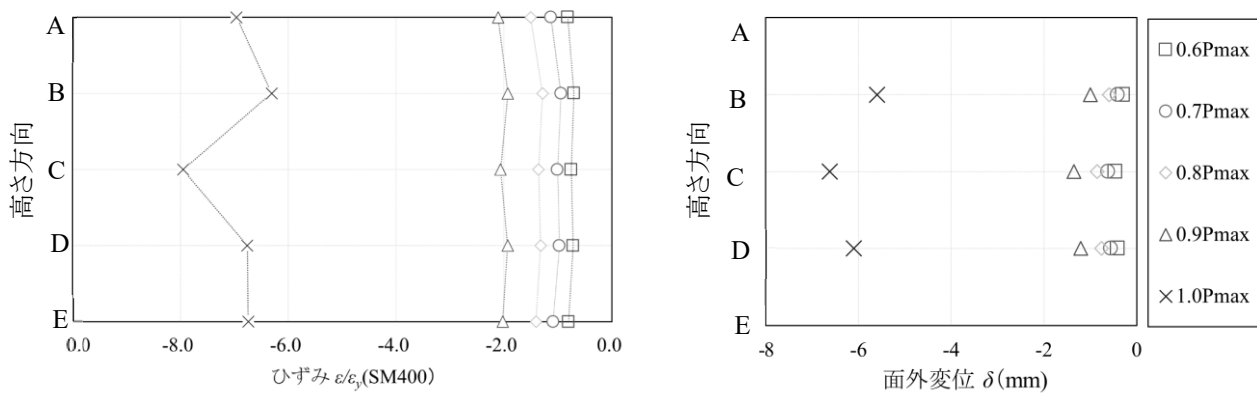


図-11 R_B1 の最大耐力までのひずみ(E 面第 1 列)の推移と各载荷段階の軸方向垂直変位(第 2 列)

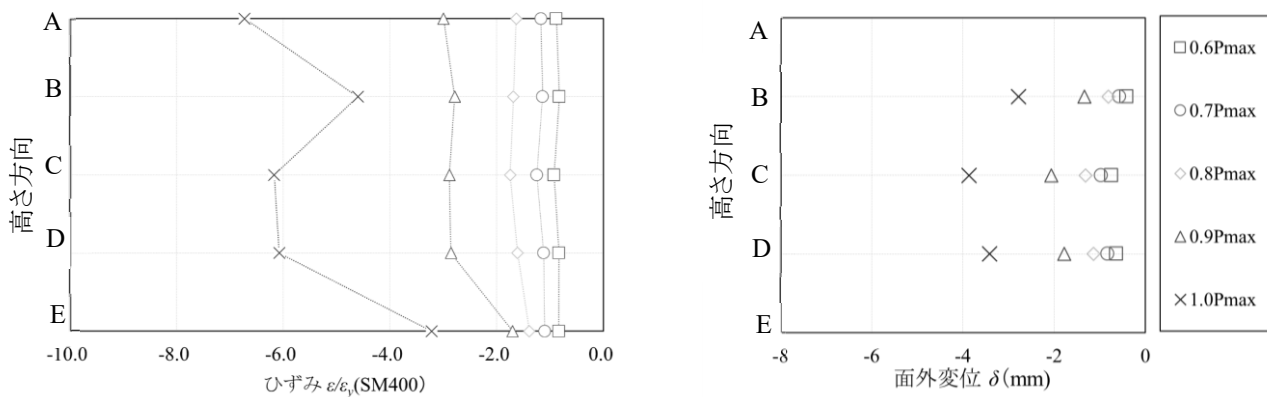


図-12 R_B2 の最大耐力までのひずみ(E 面 第 1 列)の推移と各载荷段階の軸方向垂直変位(第 2 列)

変化し、ばらつきを持つように分布した。特に、B-B断面、C-C断面、D-D断面に大きなひずみが生じていることがわかる。図-11の各変位計が示した面外変位から、これらの断面では座屈による面外変位が大きく観測された箇所であり、変位の成長に伴い、大きなひずみの変化が生じたものと考えられる。

他方、図-11よりR_B1のウェブ、フランジ面で生じたひずみに着目すると、R_B1の最大耐力はUR_SMよりも約1.7倍程度大きいにも関わらず、最大耐力時のひずみはUR_SMよりも小さい結果となった。同様に、図-12よりR_B2についてもUR_SMよりも約1.8倍程度大きい荷重が载荷されている一方で、ウェブ、フランジ面に生じたひずみは、UR_SMとR_B1よりも小さい結果となった。これは、縦リブを導入することにより、幅厚比パラメータが小さくなることにより、面外変形が生じにくい構造となっていることに起因していると考えられる。加えて、R_B1、R_B2ともに0.9 P_{max} から1.0 P_{max} に荷重が増加した際に、ひずみの値が大きく変化していることがわかる。各载荷段階の面外変位の図と比較すれば、面外変位も同様にその値が変化していることがわかる。面外変位の急上昇に伴い、ひずみの値が大きく変化したものと考えられる。

図-13、図-14 は第 r 列と第 l 列の縦リブに生じたひずみを平均したグラフである。図-13 を参照すると、R_B1 ではひずみの推移は各载荷段階での変化率はほぼ一定であるが、0.9 P_{max} から 1.0 P_{max} へ荷重が増加した際に、ひずみが大きくマイナスからプラスへと推移したことが読み取れる。これは軸力により、一様に縮んでいた各面に面外変形が生じることで、曲げによる引張の力が加わり、その値がプラスになったことが原因であると考えられる。また、図-14 より R_B2 では剛性が大きいため、0.6 P_{max} に至るまではひずみの推移は小さいものの、0.7 P_{max} 以降の各载荷荷重に対するひずみの変化は徐々に上昇し、縦リブでのひずみが大きく変化していることがわかる。図-15、図-16 は R_B1、R_B2 の各 B-B 断面のひずみゲージが示した値を表す。各ひずみの値は第 1 列～第 4 列は SM400 の降伏応力、第 r 列、第 l 列は SBHS700 の降伏応力で除している。同図から、ウェブ、フランジ面 (SM400) では降伏が生じているが、縦リブ (SBHS700) では降伏が生じていないことがわかる。B-B 断面以外のすべての面でも縦リブは降伏に至らず、最大で降伏応力の 63%のひずみが生じていたことが確認された。

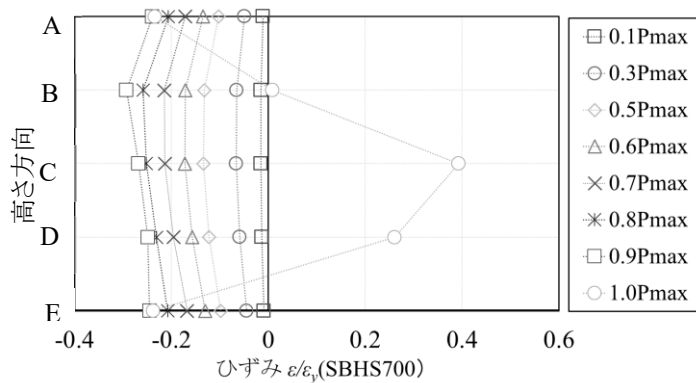


図-13 R_B1 リブの平均のひずみ

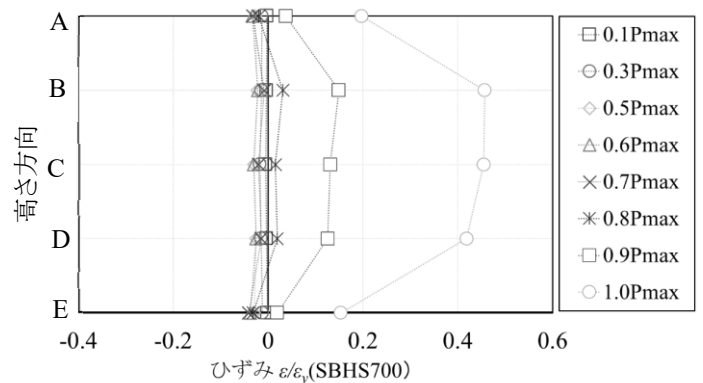


図-14 R_B2 リブの平均のひずみ

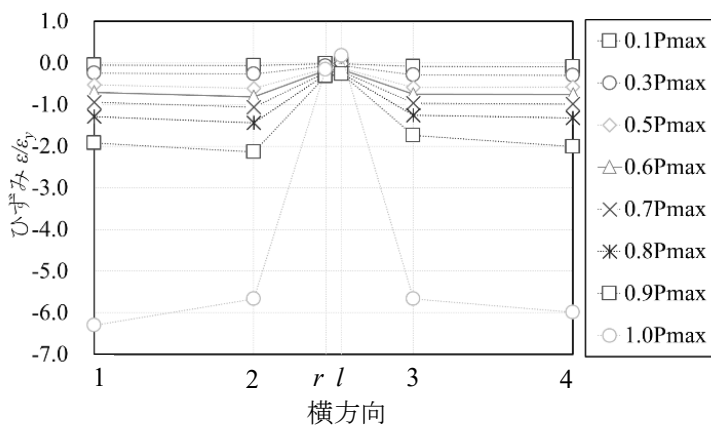


図-15 R_B1 B-B断面のリブ (E面) のひずみ

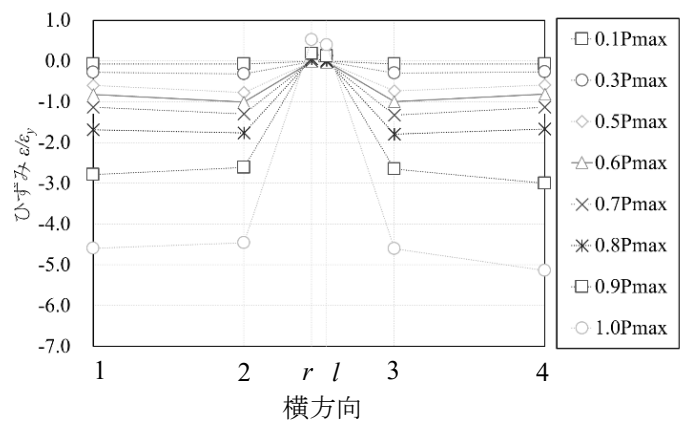


図-16 R_B2 B-B断面のリブ (E面) のひずみ

(3) 面外変形

UR_SMでは高さ方向にsine半波2波の座屈モードが確認された。同図からN面S面ではB-B断面では外側に凸、C-C断面を節とし、D-D断面に内側に凹な変形が生じ、E面W面では逆にB-B断面では外側に凸、C-C断面を節とし、D-D断面に外側に凹な変位が進み、隣り合う面は直角を保つように面内外変位が生じた。これに対し、R_B1、R_B2では、高さ方向にsine半波1波の座屈モードが観測され、NSEW面全ての面で面外に変位が生じた。試験後の供試体の状況を図-17、図-18に示す。

4. 結論

本研究では、軸圧縮試験により、縦リブの剛性がハイブリッド鋼製短柱の耐力に及ぼす影響を考察した。SBHS700を縦リブとして導入することで、耐力性能の向上を図ることができるが、剛性の違いによる差は小さいことがわかった。今後は実験的研究と解析的研究により、耐力だけでなく変形能にも着目し検討を行っていく予定である。



図-17 UR_SMの残留変形 図-18 R_B2の残留変形

謝辞: 本研究は、JSPS研究費 25420483によって実施したものです。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) JIS G 3140: 橋梁用高降伏点鋼板, 2012.
- 2) K.HAMAMURA, K.ONO, M.MATSUMURA, T.TARUI and S.KODA: AN EXPERIMENTAL STUDY on MECHANICAL PROPERTIES of SBHS700 to STIFFENED PLATES, Proceedings of the 13th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, 2013.
- 3) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編, 2014.