

SBHS400およびSBHS700製矩形断面鋼短柱の局部座屈挙動に関する実験的研究

山崎 諒介¹・小野 潔²

¹学生会員 早稲田大学大学院 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) 早稲田大学教授 創造理工学部社会環境工学科（〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1）

1. はじめに

軸圧縮力を受ける鋼板部材の耐力や座屈現象には幅厚比パラメータが支配的な影響を及ぼすことが既往の研究^{1), 2), 3)}から判明しており、道路橋の設計においても、幅厚比パラメータの関数である耐力曲線を用いて最大耐力を算定している⁴⁾。従来の許容応力度設計法では、設計に用いられる係数が安全率の1つのみであったため、軸力-軸方向変位曲線が非線形に至る過程やポストピーク領域の挙動などを設計に反映することは困難であったが、平成29年に道路橋示方書(以下「H29 道示」)が改定され、鋼部材に関しても部分係数設計法の導入が明文化された。これにより最大耐力以外の部材特性も部分係数に反映することが可能となり、設計の自由度が向上した。さらなる設計合理化のためにも、部材の弾塑性挙動を詳細に把握することが重要である。また、H29 道示には橋梁用高性能鋼材 SBHS(Steels for Bridge High-performance Structure)が新たに明記された。2008年に初めて JIS 化された SBHS⁵⁾は、従来鋼に比べ高い降伏点やじん性を持ち、溶接性、加工性、耐候性にも優れることから、設計合理化が期待されているが、現時点では耐力に関する情報が不足している。

このような背景を踏まえ、当研究室では SBHS400 および SBHS700 製の両縁支持板の局部座屈挙動を明らかにすべく、両鋼材を用いた矩形断面短柱の一軸単調圧縮載荷試験を実施した。本稿ではその実験結果を精査し、軸力-軸方向変位曲線が非線形に至る過程や局部座屈発生後の挙動を把握するとともに、面外変位の遷移に着目して局部座屈挙動に対する考察を行った。

2. 実験概要

(1) 実験供試体

(a) 使用した鋼材

SBHS400 と SBHS700 を用いて実験供試体を製作した。引張試験から得られた SBHS400 と SBHS700(板厚 9mm)の公称応力-公称ひずみ関係を図-1 に示す。実験結果を整理する際の降伏応力の値には下降伏点の値を採用した。板厚 6mm の SBHS700 の材料定数に関してはミルシートの値を採用し、今後引張試験を行う予定である。

(b) 構造諸元

供試体の構造諸元を表-1 に示す。両鋼材を用いて、幅厚比パラメータ R_R の値が異なる供試体を 3 体ずつ作成した。 R_R の値は式(1)により求めている。道路橋示方書では限界幅厚比パラメータを $R_R=0.7$ としていることを踏まえ、3 供試体の内訳は、限界幅厚比パラメータ近傍の供試体、 $R_R < 0.7$ の供試体、および $R_R > 0.7$ の供試体としている。具体的には R_R の値が 0.4, 0.7, 1.1 程度となるよう設計した。供試体名称の末尾の数字は各供試体の幅厚比パラメータの

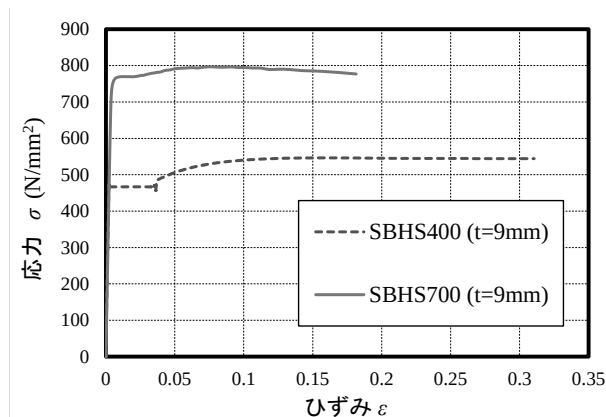


図-1 公称応力-公称ひずみ関係

表-1 供試体名称と構造諸元

	SBHS400			SBHS700		
	B04	B07	B11	B04	B07	B11
幅厚比パラメータ R_R	0.45	0.71	1.05	0.48	0.81	1.19
細長比パラメータ $\bar{\lambda}$	0.079	0.086	0.084	0.102	0.103	0.108
降伏応力 σ_y (N/mm ²)	483	483	483	767	828	828
有効長さ L (mm)	320	545	790	260	294	450
板厚 t (mm)	9	9	9	9	6	6
幅 b (mm)	160	252	372	134	147	213
L/b	2.0	2.2	2.1	1.9	2.0	2.1

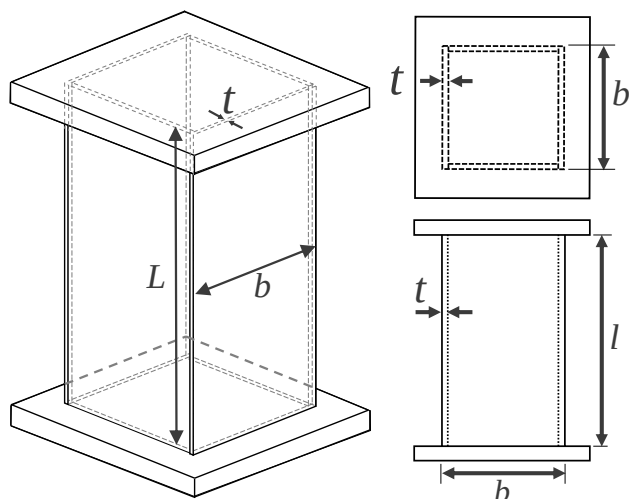


図-2 供試体模式図

値を表している。また、供試体の全体座屈を防ぐために各供試体の細長比パラメータは 0.06～0.11 程度に小さく設計してある。供試体の形状は図-2 に示すとおりである。4 枚の平板を端部で溶接し矩形断面短柱を構成している。また、各供試体の上端と下端には载荷のための鋼板を溶接している。いずれの供試体においても初期たわみは確認できなかった。残留応力に関しては各面両端部の溶接部付近において引張残留応力、中央部にほぼ一定の圧縮残留応力が作用していることが切断法による測定から判明している。⁶⁾

$$R_R = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E} \frac{12(1-\mu^2)}{\pi^2 k}} \quad (1)$$

ここに、 k : 座屈係数 (= 4.0)

μ : ポアソン比 (= 0.3)

(2) 実験方法

一軸の単調圧縮载荷試験を実施した。6 つの供試体の内、SBHS400-B07 と B11 の 2 供試体は 10MN 大型試験機を用いて载荷速度 0.01[mm/sec.]の変位制御の条件下で実施した。その他の 4 供試体は早稲田大学の大型二軸構造物評価装置(図-3)を用いて、载荷速度 0.005[mm/sec.]の変位制御の条件下で圧縮試験を行った。測定データはいずれも圧縮試験中に 2 秒間隔で測定した。軸圧縮力 P と軸方向変位 δ に加えて、供試体側面に設置した変位計で面外変位 δ_H を測定し、局部座屈挙動の把握を試みた。変位計の設置箇所は図-4 に示すとおりである。区別のため、供試体の 4 側面には A~D のラベルを付与している。軸方向変位 δ は供試体が軸方向に縮んだ場合に正とする。供試体上面の天板の裏側の四隅で測定し、4 つのデータの平均値を採用した。面外変位 δ_H は高さの異なる 3 断面において、A 面と C 面に変位計を設置して測定を行った。 δ_H の符号は供試体各面の外側に張り出す変形が生じた場合に正と定義した。

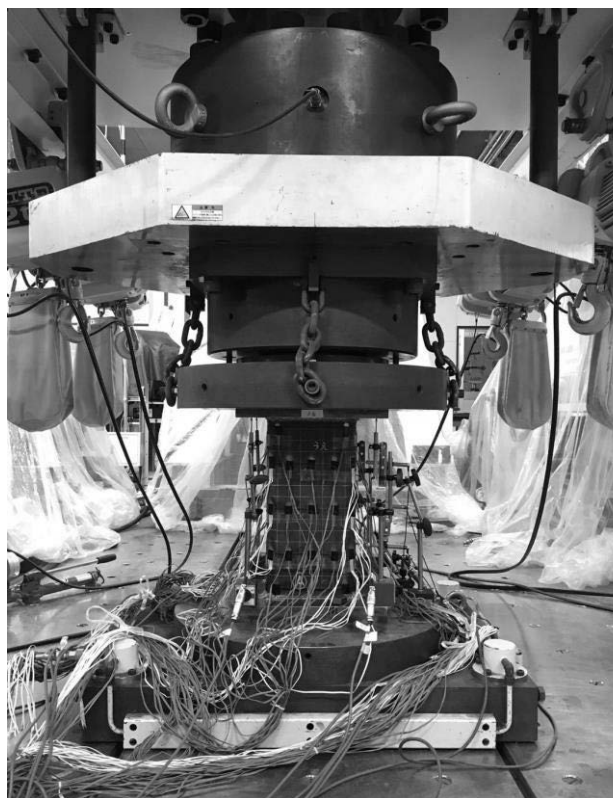


図-3 大型二軸構造物評価装置(早稲田大学)

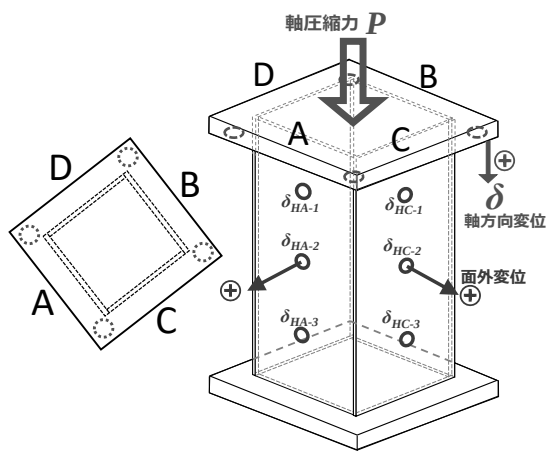


図-4 変位計配置図

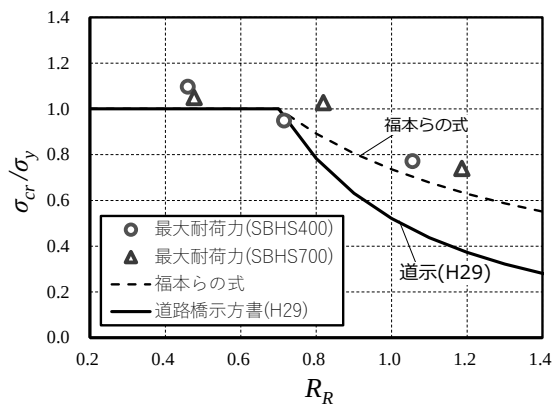


図-5 最大耐力(実験値)と基準耐力曲線

3. 圧縮試験結果

(1) 最大耐力

図-5 は実験結果から得られた最大耐力を、福本らによる周辺単純支持板の平均値強度⁷⁾および、道路橋示方書で規定されている軸圧縮を受ける両縁支持板の基準耐力曲線⁵⁾と同図中に記したものである。 $R_R > 0.7$ の領域における各曲線は以下の式(2)と式(3)で与えられる。

福本らの式 (1990) ($R_R > 0.7$)⁷⁾

$$\sigma_{cr}/\sigma_y = \left(\frac{0.7}{R_R}\right)^{0.86} \quad (2)$$

基準耐力曲線 ($R_R > 0.7$, H29 道示)⁵⁾

$$\sigma_{cr}/\sigma_y = \left(\frac{0.7}{R_R}\right)^{1.83} \quad (3)$$

本稿で対象とした6供試体の最大耐力は、いずれも耐力曲線近傍またはその上方にプロットされ

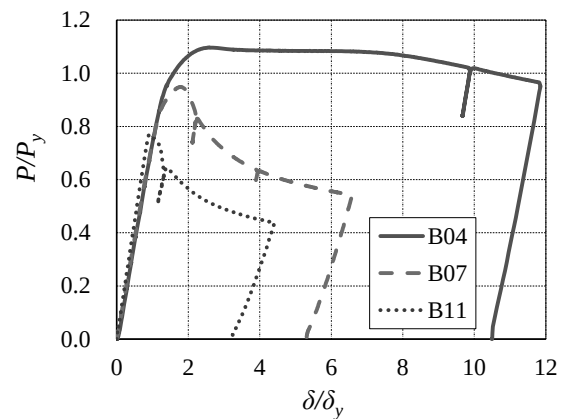


図-6 軸力-軸方向変位関係(SBHS400)

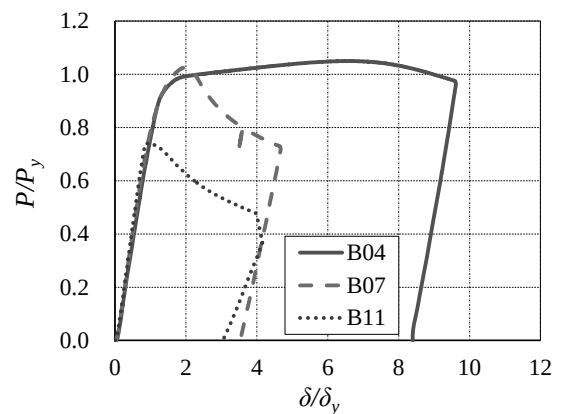


図-7 軸力-軸方向変位関係(SBHS700)

た。ゆえに SBHS400 および SBHS700 製の両縁支持板に関しても既往の耐力曲線を用いて耐力を算定できる可能性が示された。

(2) 軸力-軸方向変位関係

圧縮試験から得られた軸力-軸方向変位曲線を鋼種ごとに整理したものを図-6と図-7に示す。SBHS700_B11の圧縮試験では溶接部に割れが生じたため、直後に载荷を終了した。グラフの縦軸の値と横軸の値はそれぞれ、各鋼材の降伏荷重 P_y と軸方向降伏変位 δ_y で除すことによって無次元化している。図-8は、図-6および図-7を幅厚比パラメータごとに整理したものである。図-8(a)より、B04の2供試体は降伏荷重付近で非線形化した後に最大荷重に至り、非線形化後も荷重が降下することなく変位が増大してゆく粘り強い挙動であった。図-8(b)より、B07の2供試体は降伏荷重に到達する前に非線形化し、その後降伏荷重付近で最大荷重点を迎え、荷重が降下した。図-8(c)より、B11の2供試体はいずれも降伏荷重に到達せず、明確な非線形化が生じる前に最大荷重点を迎え、直後に荷重が降下していることが分かる。

H29道示には、「 $R_R < 0.7$ の領域では降伏強度付近で

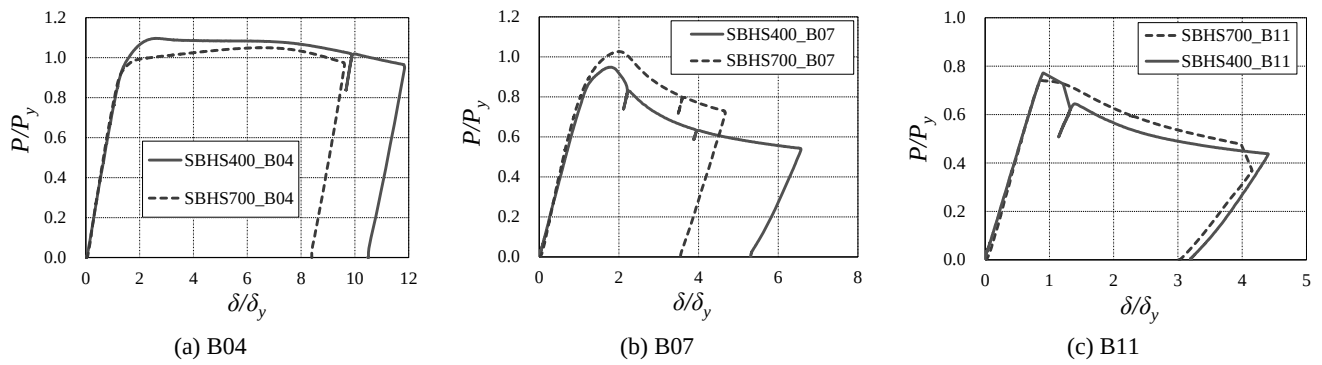


図-8 軸力-軸方向変位関係(幅厚比パラメータごと)

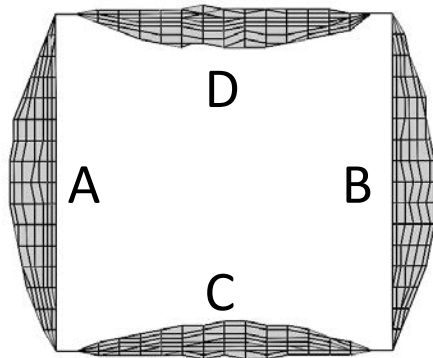


図-9 面外変形の対称性
(残留たわみ測定結果 SBHS400_B04 平面図)

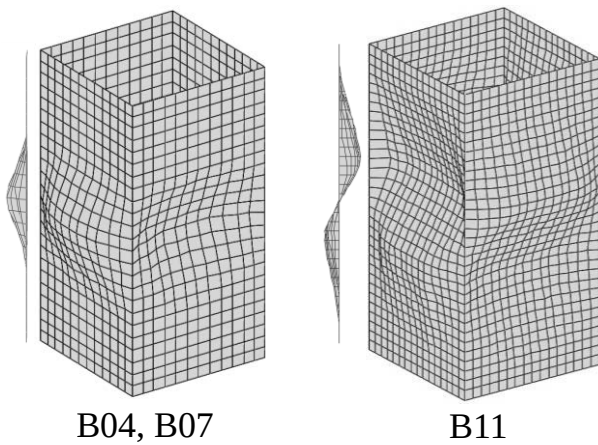
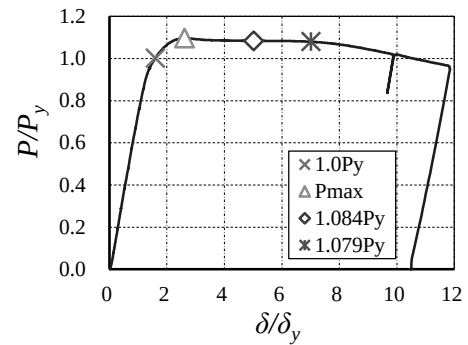


図-10 面外変形の波形

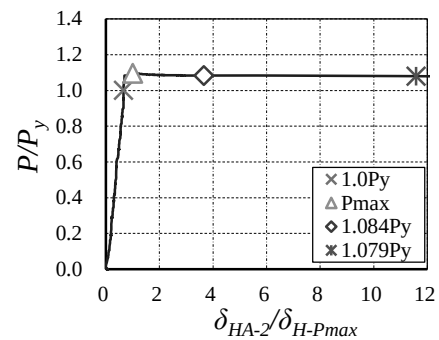
軸方向変位に非線形性が生じ可逆性を失い、 $R_R > 0.7$ の領域では降伏強度に達する前に軸方向変位に非線形性が生じ、ほぼ同時に部材としての最大強度に達する」と記述されており⁵⁾、本稿で対象とした実験結果の軸力-軸方向変位曲線の特徴はH29道示の記述に合致している。

(3) 局部座屈挙動

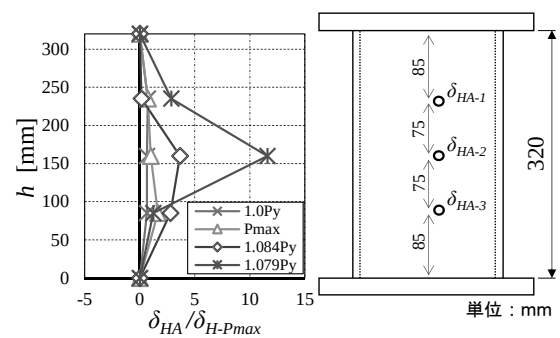
圧縮試験後の残留変形や、面外変位の遷移に着目し、局部座屈挙動を把握する。面外変形は供試体各面の外側に張り出した場合に正とする。図-9に示す



(a) 軸力-軸方向変位関係



(b) 軸力-面外変位関係



(c) 面外変位遷移図と変位計設置箇所

図-11 局部座屈挙動(SBHS400_B04)

ように、全体に共通して、供試体の4面のうち、対面同士では面外変形の方法や大きさが概ね一致する。一方で、隣接面同士では対称的な変形が生じていた。例えばA面が凹んだ場合、隣のC面における同箇所の変形は凸であった。また、図-10は軸方向の面外

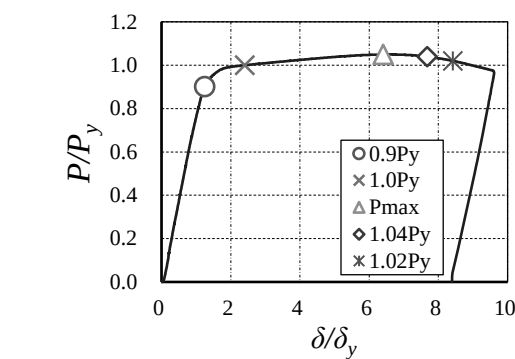
変形の波形の違いを示している。B04とB07の4供試体の各面では、軸方向の中央付近に概ねsine半波の面外変形が観測されたのに対し、B11の2供試体では各面に凹凸の双方が生じ、sine1周期分の波形に近い面外変形が確認された。こうした波形の違いと、耐荷力および軸力-軸方向変位関係の特性との関連を論じるには実験供試体数が不足しており、さらなる実験データの蓄積が必要だと考える。

続いて各供試体の面外変位の進展と軸力-軸方向変位曲線との対応を図-11から図-17に示す。各図は(a):軸力-軸方向変位関係、(b):軸力-面外変位関係、(c):面外変位遷移図と変位計設置箇所、により構成されている。面外変形に関しては、各供試体の最大

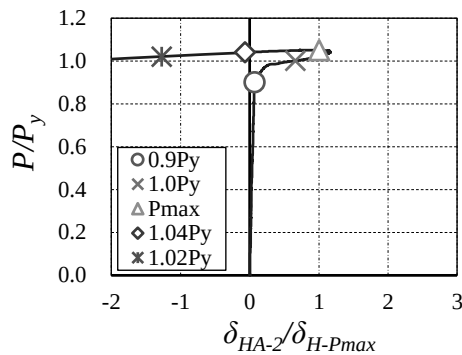
荷重時における最大の面外変位量の値 δ_{H-Pmax} で除すことによって無次元化した。軸力-面外変位関係は、各面から面外変位の値を一つ選んで作成し、面外変位が非線形に至る様子を表している。このとき、B04とB07の供試体では高さ方向の中央の変位計の値を、B11の供試体では正方向に最大の面外変位が観測された変位計の値を代表として用いた。

1) B04の供試体の局部座屈挙動

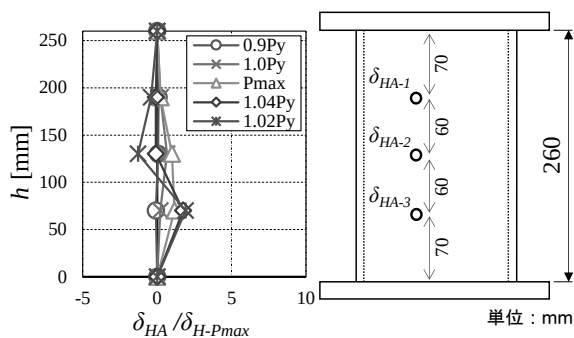
図-11から図-13について考察を行う。いずれの供試体も、軸力-軸方向変位関係と軸力-面外変位関係は共に降伏荷重付近で非線形化している。面外変形に関して、SBHS700_B04では他の供試体と異なる特徴が見られた。まず、隣接面であるA面とC面の変形が非対称であった。さらに図-12(b), (c)より、A面は一旦外側に張り出した後に変位方向が反転し内側へ凹んでいたことが判明した。このA面の特徴的な挙動は軸力-軸方向変位関係が非線形化した後も荷重が上昇し続けたことと関連していると考えているが、変位の方向が反転した原因は特定できていない。また、図-11(c)の δ_{HA-3} においても $1.084P_y$ と $1.079P_y$ の間において、それまでとは逆の方向に面外変形が進展している。以上のことから、軸方向に単調荷重を行う場合であっても、面外変形は必ずしも一方向に単調増加するわけではないという知見が得られた。



(a) 軸力-軸方向変位関係

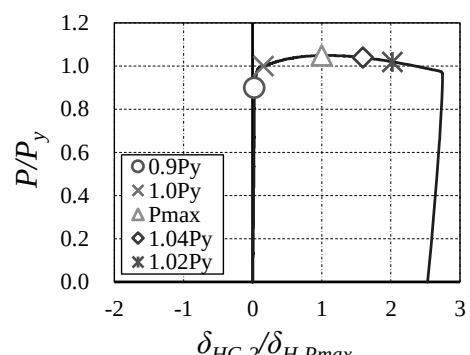


(b) 軸力-面外変位関係

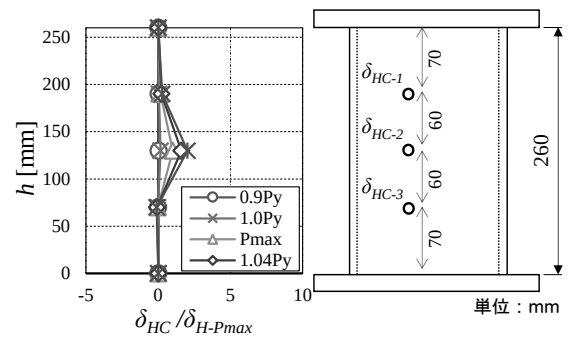


(c) 面外変位遷移図と変位計設置箇所

図-12 局部座屈挙動(SBHS700_B04 A面)

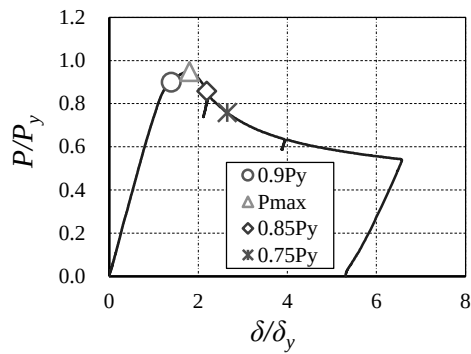


(b) 軸力-面外変位関係

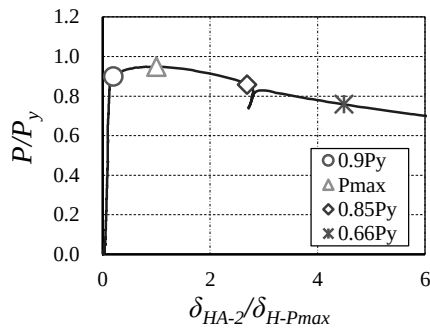


(c) 面外変位遷移図と変位計設置箇所

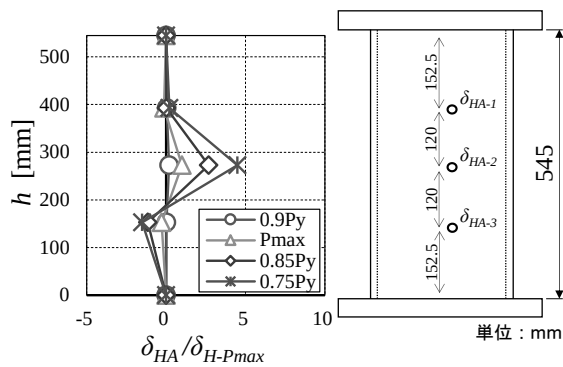
図-13 局部座屈挙動(SBHS700_B04 C面)



(a) 軸力-軸方向変位関係

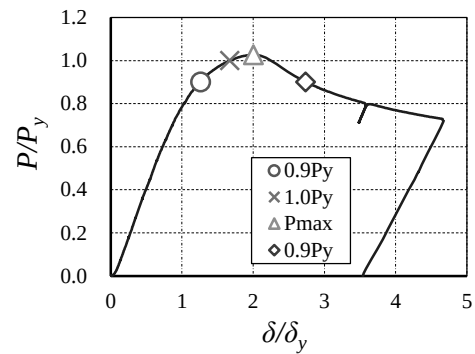


(b) 軸力-面外変位関係

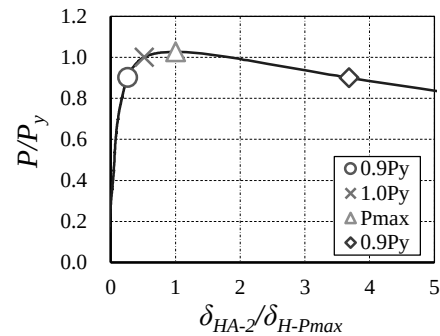


(c) 面外変位遷移図と変位計設置箇所

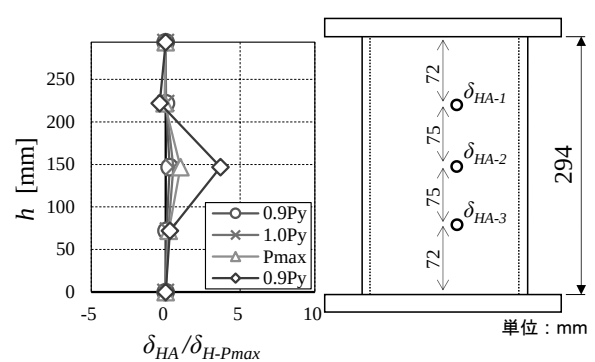
図-14 局部座屈挙動(SBHS400_B07)



(a) 軸力-軸方向変位関係



(b) 軸力-面外変位関係



(c) 面外変位遷移図と変位計設置箇所

図-15 局部座屈挙動(SBHS700_B07)

2) B07の供試体の局部座屈挙動

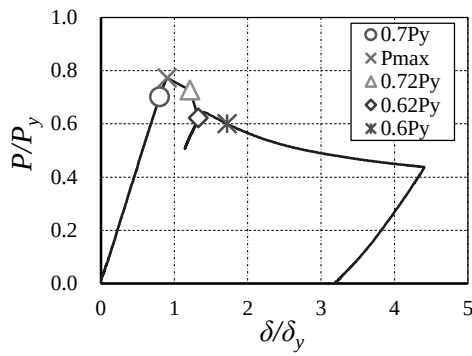
図-14と図-15について考察する。図-14(a)と図-15(a)を比較した場合、SBHS700_B07のみ最大荷重点が降伏荷重を上回っており、ポストピークにおける荷重の降下もSBHS400_B07と比べて小さい。両供試体ともに最大荷重点以降の面外変形の進展が顕著である。

3) B11の供試体の局部座屈挙動

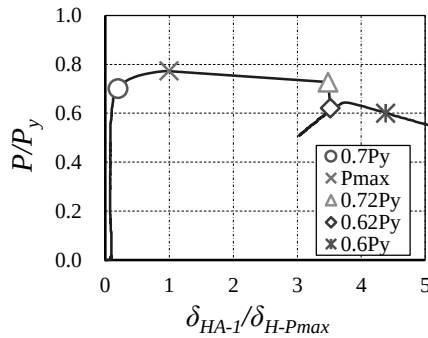
図-16と図-17について考察する。図-16の P_{max} と $0.72P_y$ および $0.72P_y$ と $0.62P_y$ の間には測定点が存在せず、本実験における実験値の測定間隔である2秒間以内に荷重と面外変形が急変していたことが判明した。図-16(a)と図-17(a)より、最大荷重点に至るまで軸力-軸方向変位関係には明確な非線形性が見られない。一方で、図-16(b)と図-17(b)より、軸力-面外

変位関係は最大荷重点を迎える直前で非線形化している。したがってB11の供試体のように、 $R_R > 0.7$ の領域においては、軸力-面外変位関係の非線形化は最大荷重点が目前に迫ることの判断材料の一つになり得るが、本実験で扱ったB11の2供試体にしか当てはまらない可能性もあるため、引き続き実験データを収集し、検証する必要があると考えている。

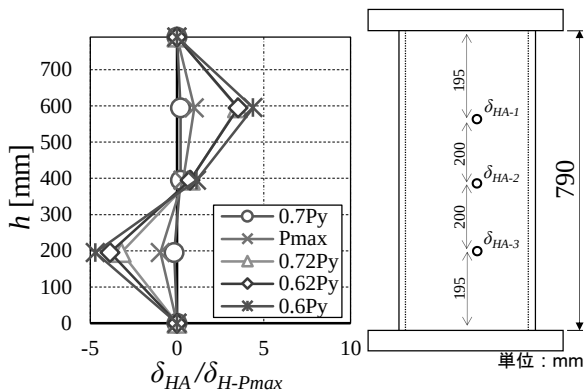
最後に、軸圧縮力を受ける両縁支持板の面外変形に関するH29道示の記述と、実験結果を比較する。H29道示には「 $R_R < 0.7$ の領域では降伏強度付近で軸方向変位や面外変位に非線形性が生じ可逆性を失い、 $R_R < 0.7$ の領域では降伏強度に達する前に軸方向変位や面外変位に非線形性が生じ、ほぼ同時に部材としての最大強度に達する」と記述されている⁵⁾。実験結果は図-11(b)、図-12(b)、および図-13(b)より、 $R_R < 0.7$



(a) 軸力-軸方向変位関係

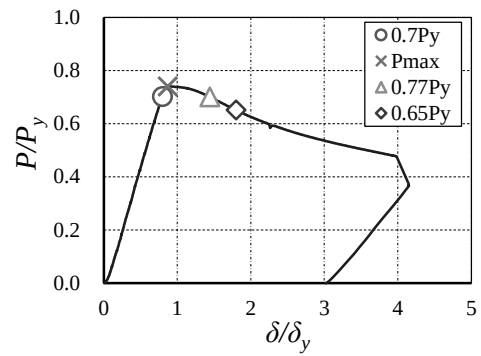


(b) 軸力-面外変位関係

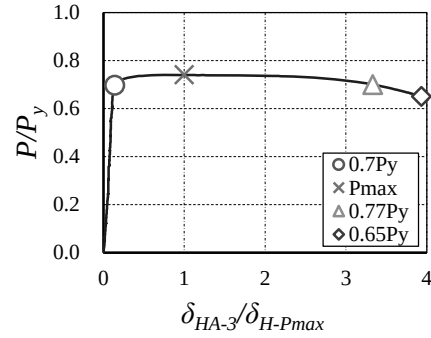


(c) 面外変位遷移図と変位計設置箇所

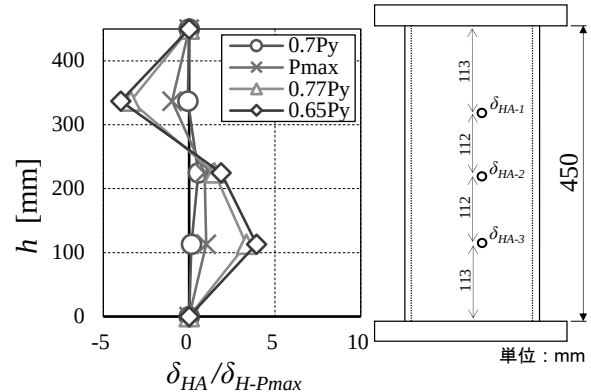
図-16 局部座屈挙動(SBHS400_B11)



(a) 軸力-軸方向変位関係



(b) 軸力-面外変位関係



(c) 面外変位遷移図と変位計設置箇所

図-17 局部座屈挙動(SBHS700_B11)

の供試体では降伏荷重付近で軸力-面外変位関係が非線形化している。また、図-16(b)、図-17(b)より、 $R_R > 0.7$ の供試体では降伏荷重に到達する前に軸力-面外変位関係が非線形化し、直後に最大荷重点を迎えている。以上のことから、本稿で考察したSBHS製両縁支持板の実験結果は、面外変形に関しても、H29道示の記述に合致している。

4. 本研究のまとめ

SBHS製の両縁支持板の局部座屈挙動を明らかにすべく、SBHS400および700製鋼短柱の一軸単調圧縮荷重試験を実施し、本稿にて実験結果を考察した。その結果、H29道示の記述に沿う部材特性が確認さ

れた。すなわち、軸圧縮力を受けるSBHS製両縁支持板の部材特性は、限界幅厚比パラメータ $R_R \approx 0.7$ を境に明確な違いを示した。 $R_R < 0.7$ の領域では降伏強度付近で軸方向変位および面外変位に非線形性が生じた後に最大荷重点を迎え、非線形化後も粘り強く荷重に抵抗した。一方 $R_R > 0.7$ の領域では、降伏荷重に達する前に、軸方向変位に明確な非線形性が生じることなく最大荷重点を迎え、直後に荷重が降下した。ただし、面外変位には、最大荷重点を迎える前に非線形性が見られた。また、SBHS製両縁支持板の最大耐荷力の算定に関しても、H29道示に記載されている両縁支持板の基準耐荷力曲線を適用できる可能性があることが分かった。

SBHSを用いた鋼部材の耐荷力に関するデータは

現段階でも不足していることに加え、本稿で扱うことが出来たデータも各幅厚比パラメータごとに2体ずつのみであり、面外変形の波形と耐荷力との関係や、B04の供試体で面外変位方向が反転した原因等、考察が及んでいない点が残されている。今後も実験データを蓄積し、SBHS製部材の特性を明らかにしてゆく。

謝辞：本研究の一部は、(一社)日本鉄鋼連盟の鋼構造研究・教育助成事業によって実施したものであります。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 奥村敏恵, 西野文雄, 長谷川彰夫 : 箱形断面柱の局部座屈強度, 土木学会論文報告集, 第 205 号, 1972. 9
- 2) 宇佐美勉, 福本嘯士, 青木徹彦 : 溶接箱形断面柱の局部座屈と全体座屈の連成強度に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 第 308 号, 1981.4
- 3) Yuhshi Fukumoto & Yoshito Itoh : Basic Compression Strength of Steel Plates from Test Data, Proc. of JSCE, No. 344/I-1, April, 1984.
- 4) 公益社団法人日本道路協会 : 道路橋示方書・同解説 II 鋼橋・鋼部材編, pp.30-36, p74, pp.93-99, pp.114-115, 2017.
- 5) JIS G 3140 : 2011. 橋梁用高降伏点鋼板
- 6) Zhuoran Zhu, Shranay Sthapit, Jing Nie & Kiyoshi Ono : RESIDUAL STRESSES OF BOX-SECTION STUB-COLUMNS MADE OF SBHS700, Japan Society of Civil Engineers 2020 Annual Meeting, I-37.
- 7) 鋼骨組構造物の極限強度の統一評価に関する総合的研究 平成元年度科学研究費補助金(総合研究 A)研究成果報告書, 研究代表者 福本嘯士, 1990.
- 8) Kotaro Sobajima, Kiyoshi Ono, Takeshi Miyashita & Seiji Okada : AN EXPERIMENTAL STUDY ON LOCAL BUCKLING STRENGTH OF WELDED BOX SECTION STUB-COLUMNS MADE OF SBHS400, Proc. of 16th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-16), 2019.12.
- 9) 傍島 広太郎, 篠崎孝樹, 小野 潔, 宮下 剛, 岡田 誠司 : 比較的幅厚比の大きい SBHS400 を用いた両縁支持板の耐荷力特性に関する実験的研究, 第 21 回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.1-4, 2018.7.
- 10) 土木学会 : 座屈設計ガイドライン[改訂第 2 版], 2005, pp.152-154, pp.158-162.