

SBHS500からなる十字断面柱の終局強度に関する実験的研究

松村政秀¹・小野 潔²・中川翔太³

¹正会員 博（工） 京都大学大学院准教授 工学研究科（〒615-8540 京都市西京区京都大学桂）

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

³学生会員 大阪市立大学大学院工学研究科都市系専攻（〒558-8585 大阪府大阪市住吉区杉本3-3-138）

1. 研究背景および目的

“橋梁用高降伏点鋼板”として2008年にJIS規格化されたSBHSは板厚によらず一定な降伏強度が保証され、従来鋼に比べて加工性・溶接性にも優れることから、SBHSの活用により、より合理的かつ経済的な鋼橋建設の展開が期待される。これまでに、SBHSの材料特性、合理化橋梁への適用性、繰返しを受ける場合の構成則などが検討されている¹⁾⁵⁾。また、SBHSを補剛材として用いることによって補剛構造や補剛設計の合理化を図ることも期待されている⁶⁾⁷⁾。一方で、SBHSの幅広い活用を考えた場合、SBHSからなる自由突出板の耐荷力特性に関する実験データは不足していると思われ、耐荷力曲線の提案に向けた検討も必要である。

そこで、本研究では、SBHSからなる自由突出板の耐荷力曲線の設定に資する基礎データを得ることを目的として、SBHS（SBHS500）および従来鋼（SM490Y）からなる自由突出板を対象として圧縮力を漸増載荷する圧縮力載荷実験を実施し、最大荷重ならびに最大荷重以降の挙動を明らかにする。

2. 十字断面柱の圧縮実験

(1) 供試体の設計

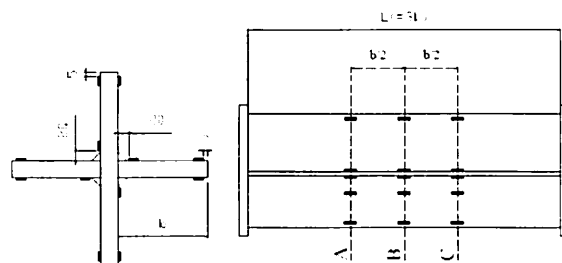
実験供試体には、図-1(a)に示すように、板幅 $2b+t$ （ t は板厚）の鋼板の両側から2枚の自由突出板（突出長 b ）を脚長6 mmの両側すみ肉溶接により接合して製作した十字断面柱を用いる。板厚 t は9 mmで一定とし、突出長 b を変化させることによって、降伏点の公称値を用いて算出される自由突出板の幅厚比パラメータ R_s （座屈係数 $k=0.425$ ）⁸⁾を0.4、0.7、1.0および1.4に設定する。十字断面柱の上下にはすみ

肉溶接により載荷板を接合し、載荷板面は切削加工により平面仕上げを施している。図-1(b)に示すように、供試体の高さ L は柱部材としての座屈が生じないよう、自由突出板の突出長 b の3倍に設定する。供試体サイズが小さい $R_s=0.4$ の場合には、載荷板との溶接が座屈波形に及ぼす影響も懸念されたため、 $L=4b$ の供試体も製作する。

表-1にはSBHS500およびSM490Yからなる計10体の実験供試体の断面諸元をまとめている。なお、実験供試体名は、使用鋼材がSBHS500で $R_s=0.4$ の場合にB04（SM490Yの場合にはM04）、供試体の高さ L が突出長 b の4倍のものは $_{4b}$ を付記している。

(2) 鋼材の材料特性

実験供試体の製作に用いたSBHS500およびSM490Yの2種類の鋼材の材料特性を得るためにJIS 5号試験片（各3体）を用いて材料試験を実施した。図-2には $\sigma/\sigma_{yU}-\varepsilon/\varepsilon_{yU}$ 曲線の一例を、表-2には主な材料試験結果（ロール方向）を示す。 σ_{yU} は上降伏点、 ε_{yU} は σ_{yU} に対応する降伏ひずみである。図-2に示すとおり、降伏に至り降伏棚を経るまでに両鋼材の $\sigma/\sigma_{yU}-\varepsilon/\varepsilon_{yU}$ 関係に顕著な差違は認められず、ひずみ硬化開始後の挙動が異なるため降伏比 σ_{yU}/σ_u が異なる。



(a) 断面図（計測断面 B） (b) 側面図

図-1 供試体形状・記号とひずみゲージの貼付位置

表-1 供試体の断面諸元

(a) 設計値

供試体名	鋼材	σ_y N/mm ²	R_s	t mm	h mm	L mm	λ
B04	SBHS500	500.0	0.40	9.00	44.60	133.80	0.052
B04_4b	SBHS500	500.0	0.40	9.00	44.60	178.40	0.069
B07	SBHS500	500.0	0.70	9.00	78.10	234.30	0.054
B10	SBHS500	500.0	1.00	9.00	111.60	334.80	0.056
B14	SBHS500	500.0	1.40	9.00	156.20	468.60	0.056
M04	SM490Y	355.0	0.40	9.00	53.00	159.00	0.044
M04_4b	SM490Y	355.0	0.40	9.00	53.00	212.00	0.059
M07	SM490Y	355.0	0.70	9.00	92.70	278.10	0.046
M10	SM490Y	355.0	1.00	9.00	132.40	397.20	0.047
M14	SM490Y	355.0	1.40	9.00	185.40	556.20	0.048

(b) 計測値

供試体名	鋼材	σ_s N/mm ²	R_s	t mm	h mm	L mm	λ
B04	SBHS500	560.2	0.42	9.23	44.81	132.64	0.054
B04_4b	SBHS500	560.2	0.43	9.12	45.21	177.45	0.072
B07	SBHS500	560.2	0.74	9.20	78.47	233.38	0.057
B10	SBHS500	560.2	1.06	9.13	111.37	334.13	0.059
B14	SBHS500	560.2	1.47	9.19	155.73	468.00	0.060
M04	SM490Y	438.9	0.43	9.19	53.16	157.69	0.048
M04_4b	SM490Y	438.9	0.43	9.13	53.19	210.76	0.064
M07	SM490Y	438.9	0.76	9.15	92.75	277.27	0.050
M10	SM490Y	438.9	1.08	9.09	132.23	395.50	0.051
M14	SM490Y	438.9	1.52	9.12	185.40	555.30	0.052

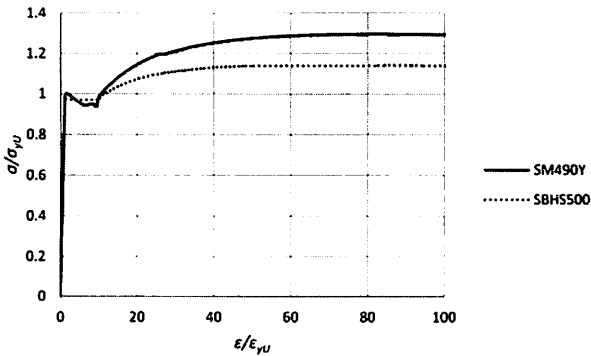
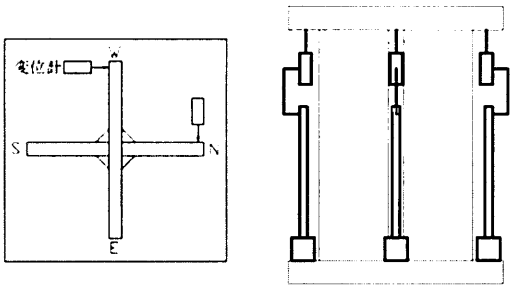


図-2 $\sigma/\sigma_{yU}-\varepsilon/\varepsilon_{yU}$ 曲線

表-2 材料試験結果 (ロール方向)

名前	上降伏点	下降伏点	引張強さ	降伏比 (上降伏点)	降伏比 (下降伏点)
単位	σ_{yU} (N/mm ²)	σ_{yL} (N/mm ²)	σ_u (N/mm ²)	σ_{yU}/σ_u	σ_{yL}/σ_u
SBHS500	560.2	537.9	637.7	0.88	0.84
SM490Y	438.9	412.1	572.2	0.77	0.72



(a) 断面図 (計測断面 B) (b) 側面図

図-3 変位計の設置位置

(3) 計測項目

図-1には実験供試体への一軸ひずみゲージの貼付位置、図-3には変位計の設置位置を示す。ひずみゲージは、計測断面A～Cの自由突出板パネル先端の表裏および付け根位置付近に貼付し、座屈発生を検知および予備載荷時の4枚の板パネルに対する荷重分担の確認に用いる。各板パネルにはN, E, S, Wの記号を付しており、変位計は各板パネル端の鉛直方向に4本、計測断面Bの板パネルNとWの面外方向に2本取り付ける。

(4) 載荷方法

まず、弾性範囲内で予備載荷を実施する。この予備載荷では、各板パネルの側面に貼付したひずみゲージの値を参照し、4枚の板パネルに均等に荷重が作用するように供試体の位置を微調整し、実験供試体の設置位置を決定する。この後、一度除荷してイニシャル計測を実施した後、本載荷実験を実施する。本載荷実験では、圧縮力を漸増させて最大荷重を得た後、最大荷重の85%程度まで荷重低下が認められるまで載荷を継続し、最大荷重後の挙動および実験終了後の座屈変形状況を観察する。なお、載荷実験の実施には大阪大学工学部が所有する5,000 kN圧縮力載荷装置を用いる。

3. 実験結果

図-4は使用鋼材の違いに、図-5は R_s の違いにそれぞれ着目してプロットした $P/P_{yU}-u/u_{yU}$ 関係を示す。表-3に主な実験結果をまとめている。ここで、荷重および変位は材料試験より得られた上降伏点 σ_{yU} を用いて算出される降伏荷重 P_{yU} ($=A \times \sigma_{yU}$, A : 十字断面柱の断面積) および降伏変位 u_{yU} ($=L \times \varepsilon_{yU}$) で除して無次元化している。また、 P_u は最大荷重、 u_u は最大荷重時の軸方向変位であり、軸方向変位は鉛直方向に設置した4本の変位計の計測値の平均値である。なお、材料試験において、一般に上降伏点は載荷速度により変動すること、ひずみ硬化開始直前の応力が顕著に低下したものの何体か見受けられたことから、表-3には、上降伏点 (添字U), 降伏棚における平均値 (添字A), および下降伏点 (添字L) を用いて無次元化した結果も載せている。降伏棚における平均値は、降伏棚範囲における最大値と最小値の平均値である。

図-4および図-5より、 $R_s=0.4$ (実験供試体M04, B04, M04_4bおよびB04_4b) では、降伏荷重に到達した後も荷重が再び上昇し、最終的には座屈変形が

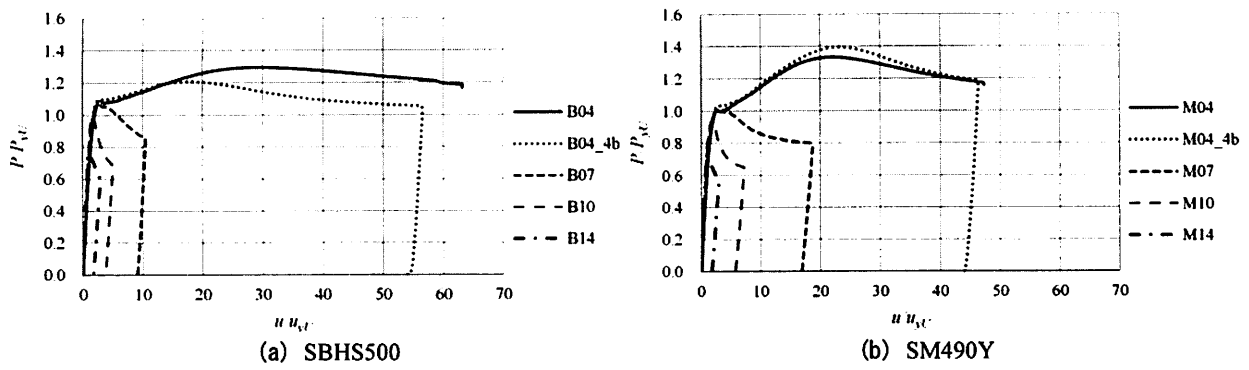


図-4 荷重-軸方向変位（鋼材ごと）

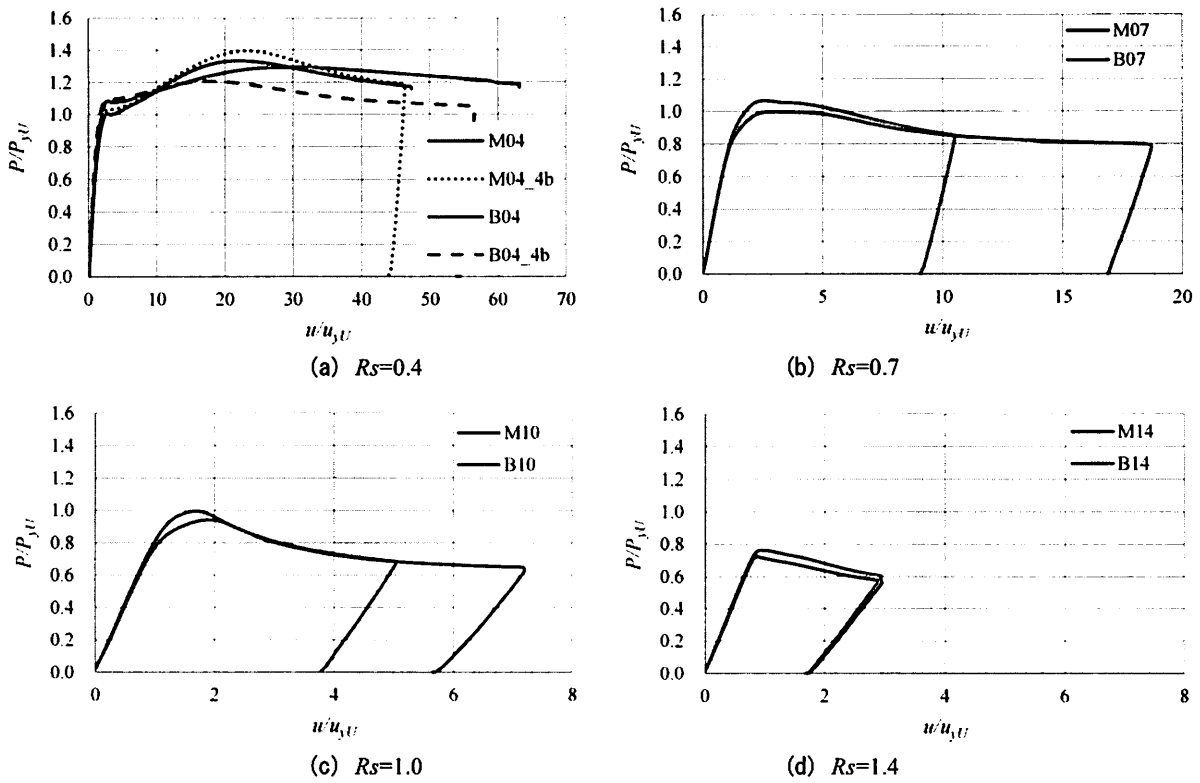


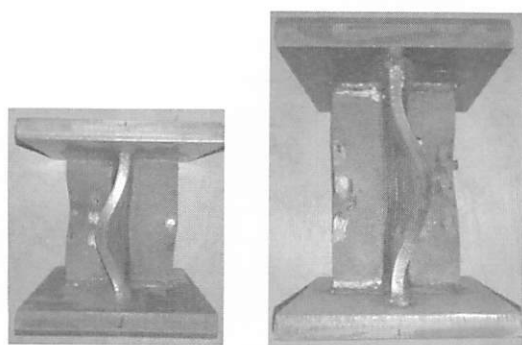
図-5 荷重-軸方向変位（ R_s ごと）

表-3 主な実験結果

供試体名	P_u/P_{yt} (mm)	u_u/u_{yt} (mm)	P_u/P_{yt} (mm)	u_u/u_{yt} (mm)	P_u/P_{yt} (mm)	u_u/u_{yt} (mm)
B04	1.29	28.96	1.35	30.16	1.34	29.95
B04_4b	1.20	18.33	1.26	19.10	1.25	18.95
B07	1.07	2.51	1.11	2.61	1.10	2.60
B10	1.00	1.68	1.04	1.75	1.03	1.74
B14	0.76	0.94	0.79	0.98	0.79	0.97
M04	1.33	22.14	1.42	23.57	1.40	23.29
M04_4b	1.39	23.05	1.48	24.55	1.47	24.25
M07	1.00	2.96	1.06	3.15	1.05	3.11
M10	0.94	1.90	1.00	2.03	0.99	2.00
M14	0.72	0.87	0.77	0.92	0.76	0.91

生じたため最大荷重を得た。 P_u/P_{yt} は降伏比の小さいSM490Yが大きい値を示した。供試体高さ（ $L=3b$ or $4b$ ）に着目すると、B04では $3b$ 、M04では $4b$ の最大荷重が大きく、鋼種の違いにより降伏荷重以降の

荷重-鉛直変位関係に差違が認められた。これは、図-6に示すように、供試体高さが異なると載荷板との溶接が座屈変形を拘束する程度も影響していると考えられるが、図-5(a)に示すように $u/u_{yt} < 15$ の範囲



(a) M04 (b) M04_4b

図-6 実験終了後の変形

ではその影響はほとんど認められなかった。図-5(b)に示すように、 $R_s=0.7$ （実験供試体M07およびB07）では、降伏荷重付近で座屈が発生し最大荷重を得た。最大荷重後の荷重低下は他の供試体に比べ緩やかであった。図-5(c)および(d)に示すように、 $R_s=1.0$ および $R_s=1.4$ （実験供試体M10、B10、M14およびB14）では、降伏荷重に達する以前に座屈が発生し最大荷重が計測された。また、 $R_s=0.7$ 、 1.0 および 1.4 では鋼種が異なっても、最大荷重および最大荷重以降の荷重-鉛直方向変位関係に顕著な差異は認められず、SBHS500からなる自由突出板の耐荷力挙動は従来鋼と同等であることが確認できた。このとき、 $R_s=0.7$ 、 1.0 、 1.4 では降伏あるいは座屈発生まで板パネルには面外方向変位がほとんど生じず、最大荷重直前に面外方向変位が急増した。なお、別の機会に詳述したいと考えているが、 $R_s=0.4$ では全ての板パネルの面外方向変位の進展が必ず一致していないものも観察され、この点も $u/u_y > 15$ の範囲の耐荷力挙動に影響したと考えられる。

4. まとめ

本研究では、自由突出板の幅厚比パラメータ R_s を0.4、0.7、1.0および1.4に設定し、SBHS500およびSM490Yからなる十字断面柱の圧縮実験を実施した。得られた主な結論は次のとおりである。

- 1) R_s が小さい場合（ $R_s=0.4$ ）には、降伏荷重に至った後、再び荷重が上昇し最大荷重を迎えた。降伏変位の15倍以降で荷重-鉛直方向変位関係に供試体高さの違いによる影響が認められた。
- 2) R_s が大きい場合（ $R_s=0.7$ 、 1.0 、 1.4 ）には、自由突出板の座屈により最大荷重が決定され、鋼種の違いによる最大荷重、最大荷重以降の荷重-鉛直方向変位関係に顕著な差異は認められず、SBHS500からなる自由突出板の耐荷力挙動は従来鋼と同等

であることが確認できた。

今後、残留応力や面外方向変位の計測結果を含め、実験結果を別の機会に詳述したいと考えている。また、パラメトリックな解析により詳細な検討を進める予定である。

謝辞：本研究の実施は、一般社団法人日本鉄鋼連盟により支援を受けたことを付記する。

参考文献

- 1) 南 邦明, 三木千壽, 糟谷 正, 鶴田敏也, 渡部義之：橋梁用高性能鋼BHS500の衝撃特性および破壊靱性の評価, 土木学会論文集A, Vol.63, No.1, pp.142-152, 2007.
- 2) 岡田 淳, 村上琢哉, 川畑篤敬：橋梁用高性能鋼材の活用による連続剛性2主1桁橋の長支間化に関する検討, 土木学会論文集F, Vol.63, No2, pp.141-155, 2007
- 3) 新しい高性能鋼材の利用技術調査研究報告書—SBHS500(W), SBHS700(W)の設計・製作ガイドライン（案）—, 土木学会, 2009
- 4) 野阪克義, 奥井義昭, 小室雅人, 宮下 剛, 野上邦栄, 長井正嗣：SBHSを用いた鋼I桁の耐荷力特性に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.59A, pp.70-79, 土木学会, 2013.3
- 5) K. Hamamura, K. Ono, M. Matsumura, T. Tarui, S. Koda: An experimental study on mechanical properties of SBHS700 and application of SBHS700 to stiffened plates, EASEC13, 2013.9
- 6) 浜村圭太, 小野 潔, 松村政秀, 垂井敬寛, 幸田真也：SBHS700を縦リブに使用したハイブリッド鋼製短柱の耐力および変形能に関する実験的研究, 第16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, 土木学会地震工学委員会, pp.391-394, 2013.7
- 7) 安積恭子, 小野 潔, 松村政秀, 岡田誠司：SBHS700を縦リブに用いたハイブリッド鋼製橋脚の耐力および変形能に関する実験的研究, 平成27年度土木学会関西支部年次学術講演会, I-7, 2015.5
- 8) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説, II.鋼橋編, 2012.3