

SBHS700製 R付き箱型断面短柱の局部座屈挙動に関する実験的研究

山崎 諒介¹・Jing Nie¹・竹嶋 夏海²・岡田 誠司³・小野 潔⁴

¹学生会員 早稲田大学大学院 創造理工学研究科建設工学専攻 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)

²正会員 株式会社IHIインフラシステム (〒108-0023 東京都港区芝浦3-17-12)

³正会員 博士(工学) 株式会社IHIインフラシステム (〒108-0023 東京都港区芝浦3-17-12)

⁴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

1995年に発生した兵庫県南部地震において、矩形断面を有する2基の鋼製橋脚が倒壊した。図-1¹⁾はそのうちの1基の被害状況を写したものである。この鋼製橋脚は角溶接部の割裂により倒壊に至ったと推測されている。このような被害を防ぐ構造ディテールとして、角溶接部を冷間曲げ加工で代替した「R付き箱型断面」(図-2)が非常に有効であると考えられる。しかし、鋼材は曲げ加工を施すとシャルピー吸収エネルギーが低下し、ぜい性破壊しやすくなることが知られている^{2),3)}。

このような中で、近年登場した橋梁用高性能鋼材SBHS(Steels for Bridge High-performance Structure)⁴⁾は

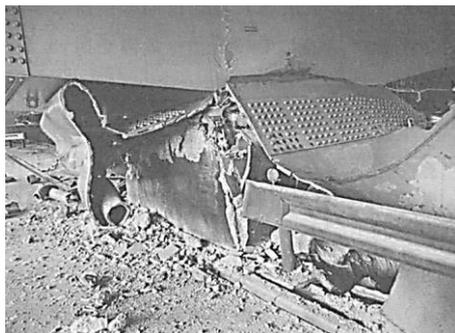


図-1 角部の割裂により倒壊した鋼製橋脚



図-2 R付き箱型断面

従来鋼よりも高いシャルピー吸収エネルギーを有し、曲げ加工を施しても十分なじん性を確保できる可能性があることが判明している⁵⁾。したがってSBHSを活用したR付き箱型断面部材の実現による鋼橋の耐震性向上が期待される。しかしながら、冷間曲げ加工部を有するSBHS製部材の耐荷力に関する研究は殆ど行われていない。

そこで本研究では、SBHS700製R付き箱型断面部材の局部座屈挙動の把握を目的として、比較的幅厚比パラメータの大きいSBHS700製R付き箱型断面短柱を製作し、一軸単調圧縮載荷試験を実施した。その結果を、過去に実施したSBHS700製矩形断面短柱の実験結果⁶⁾と比較しつつ、軸力と軸方向変位および面外変位の関係に着目し、局部座屈挙動に関する考察を加えた。

2. 実験概要

(1) 実験供試体概要

本研究で作製したR付き箱型断面短柱(B11R)と過去に圧縮試験を実施した矩形断面柱(B11)の構造諸元を表-1に示す。幅厚比パラメータ R_R の値は道路橋示方書⁷⁾の両縁支持板に関する以下の式(1)により算出した。その値は1.20と比較的大きい。

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

ここに、 k : 座屈係数 (=4.0)

ν : ポアソン比 (=0.3)

E : ヤング係数 (=200000) [N/mm²]

両供試体は同じ板(SBHS700, 板厚 6mm)を用いて作製し、高さや幅も同一である。降伏応力の値にはミ

表-1 供試体の構造諸元

| 供試体 | 降伏応力 σ_{y_mill} [N/mm ²] | 供試体長さ L [mm] | 幅(内寸) b [mm] | 板厚 t [mm] | 幅厚比 b/t | 幅厚比パラメータ R_R | 曲げ加工部内径 r [mm] | アスペクト比 L/b | 断面積 A [mm ²] |
|--------------|---|-------------------|-------------------|----------------|--------------|-------------------|---------------------|-----------------|-------------------------------|
| SBHS700_B11 | 828 | 450 | 213 | 6 | 35.5 | 1.20 | - | 2.1 | 5256 |
| SBHS700_B11R | 828 | 450 | 213 | 6 | 35.5 | 1.20 | 30 (5t) | 2.1 | 4916 |

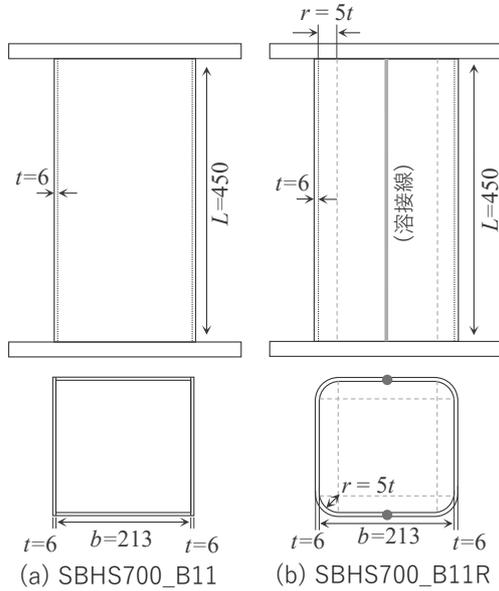


図-3 各供試体の平面図・断面図

ルシートの値を採用しており、今後引張試験を実施予定である。したがって本稿における R_R の値は暫定的なものであり、今後の引張試験の結果によって変わる可能性があることを断っておく。

各供試体の寸法および断面形状は図-3 に示すとおりである。供試体の上端と下端には荷重のための鋼板を溶接した。矩形断面柱(B11)は4枚の平板を端部で溶接しており、溶接箇所は正方形断面の四隅に位置する。それに対し R 付き箱型断面柱(B11R)は、内径 30mm(=5t)の冷間曲げ加工を施したコの字型の板を向かい合わせに溶接することで箱型断面を成しており、溶接線が平板部の中央に位置している。

溶接位置の違いにより B11 と B11R の残留応力分布は大きく異なることが切断法による実験から判明している⁸⁾。B11R の溶接線を有する平板部の中央付近に引張残留応力が生じている点が特徴的であり、最大耐荷力にも影響を与える可能性が考えられる。

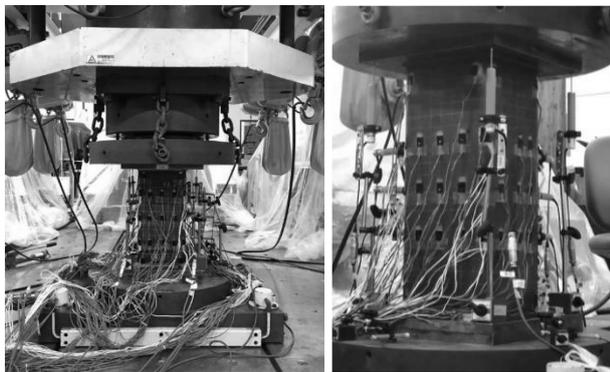


図-4 荷重装置(a)と実験の様子(b)

(2) 実験方法

早稲田大学の大型二軸構造物評価装置(図-4)を用いて、荷重速度 0.005[mm/sec.]の変位制御の条件下で一軸単調圧縮荷重試験を実施した。試験中、各測定値はいずれも 2 秒間隔で測定した。ロードセルの値を軸圧縮力 P として記録し、図-5 のように配置した変位計によって軸方向変位 δ および面外変位 δ_H を計測した。軸方向変位 δ は供試体が軸方向に縮んだ場合を正とし、供試体上面に溶接した天板の四隅で測定した値の平均値を採用した。面外変位 δ_H は供試体を軸方向に 4 等分する 3 断面で測定し、供試体の外側に張り出す変形を正と定義している。本稿では B11R の溶接線のある面を「W」(Welded)、溶接線の無い面を「N」(Not-welded)と呼ぶことにする。B11 はウェブとフランジで区別する。

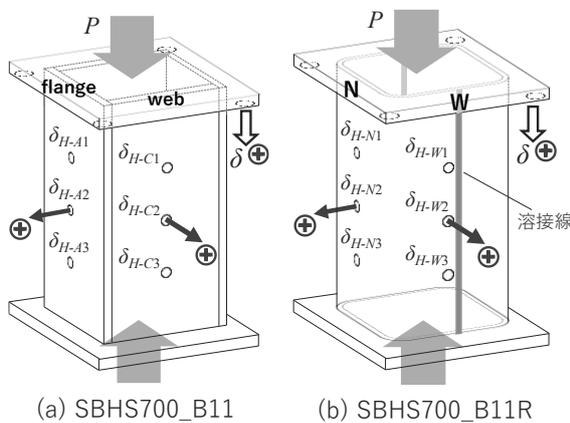


図-5 変位計配置図

3. 実験結果

(1) 最大耐荷力および軸力-軸方向変位関係

圧縮試験から得られた軸力-軸方向変位関係を図-6 に示す。まず、最大耐荷力に着目すると、B11R の方がやや断面積が小さいものの、最大荷重は B11 を上回る結果となった。考えられる原因を以下に述べる。

- 断面内における溶接位置の違いに起因して、B11R の W 面の耐荷力が上昇した可能性がある。溶接線を有する W 面の中央付近には引張の残

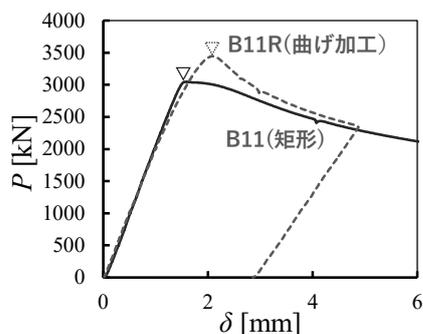
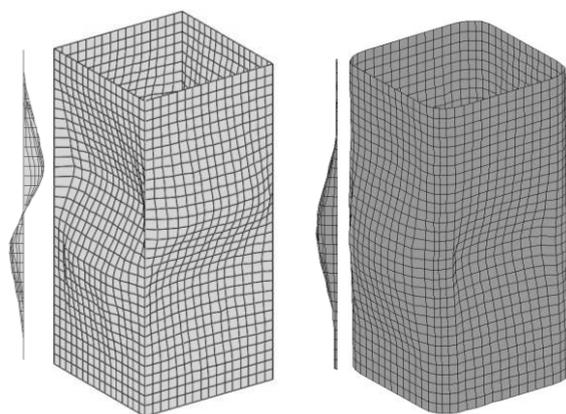
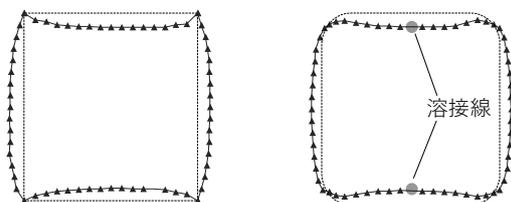


図-6 軸力-軸方向変位関係



(a) SBHS700_B11 (b) SBHS700_B11R

図-7 残留たわみ測定結果(たわみ倍率2倍)



(a) SBHS700_B11 (b) SBHS700_B11R

図-8 残留たわみ測定結果(断面図)

留応力が作用しており、この近傍に作用する圧縮応力は緩和される。また、溶接線部分は板厚が局部的に大きくなっている(最厚部で板厚の2倍程度)ため、曲げ剛性が上昇し、比較的たわみにくいと考えられる。加えて、溶接線(溶材)自体の強度が母材より高い可能性も考えられる。

- 鋼材が冷間曲げ加工に伴う予ひずみを受けた場合、降伏強度や引張強度が上昇することが報告されており^{9),10)}、B11Rの角部も平板部と比べて強度が上昇している可能性がある。しかしながら、SBHS700においても同様に強度上昇が生じるかは定かではなく、今後引張試験によって明らかにしていく必要がある。
- 図-7に示すようにB11では軸方向にsine半波2波に近い波形が生じたが、B11Rでは軸方向の中央よりやや下方で1波のみが生じた。この軸方向の波数の違いが耐荷力に影響している可能性がある。また、図-8は最も残留たわみの大き

かった断面の計測結果である。角部付近の残留たわみの形状が異なることから、有効幅の捉え方を今後検討する必要があると考える。

以上に述べたようにB11Rの耐荷力の上昇には様々な要因が考えられるため、引き続き検討を行う。

また、軸力-軸方向変位曲線の概形に着目すると、最大荷重到達後の荷重の降下に明確な違いが見られ、B11の方が荷重の降下が緩やかであった。ポストピーク領域の挙動はB11の方が粘り強いと言える。

(3) 局部座屈挙動

次項の図-9および図-10には(a):軸力-軸方向変位関係と(b)(c):面外変位遷移図を対応させて示した。これらは最大荷重前後の面外変位の進展の様子を表している。荷重は最大荷重 P_{max} で無次元化し、変位は最大荷重時の軸方向変位 $\delta_{P_{max}}$ で無次元化した。図-9(c)より、B11のウェブにおいて、 P_{max} 以前は軸方向中央において面外変形が生じており、 P_{max} 以後の波形とは異なる。面外変形が生じ始めた時点での波形と、最終的な座屈モードは必ずしも一致しないようである。また、図-10(b)(c)に着目すると、N面とW面の面外変形は概ね対称に進展しており、溶接線の有無によって面外変位量に明確な差は生じていない。

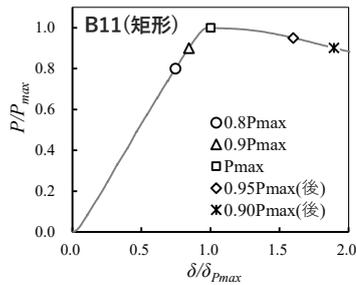
4. 本研究のまとめ

本研究では比較的幅厚比パラメータの大きいSBHS700製R付き箱型断面短柱の一軸単調圧縮荷試験を実施した。同じ材料および寸法で作製した矩形断面柱に関する既往の実験結果と比較しつつ局部座屈挙動に関する考察を行い、以下のような結果が得られた。

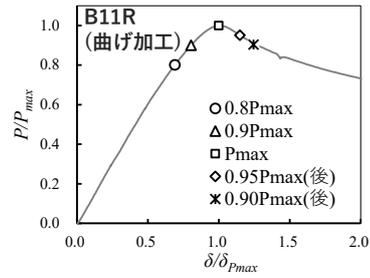
- 最大耐荷力はR付き箱型断面柱の方が高い結果となった。この原因として残留応力分布の違いや冷間曲げ加工に伴う角部の強度上昇、座屈モードや有効幅の違いなど、複数の要因が考えられ、引き続き検討を要する。
- 最大荷重点に至った後の荷重の降下は、矩形断面の方が緩やかであった。
- 面外変形が生じ始めた時点での波形と、最終的な座屈モードは必ずしも一致しない。
- R付き箱型断面柱において、平板部中央の溶接線の有無によって面外変位量に明確な差は生じなかった。

今後は曲げ加工を施したSBHSの機械的性質を調査するとともに、実験と解析の双方によりR付き箱型断面の耐荷力に関するデータを蓄積していく。

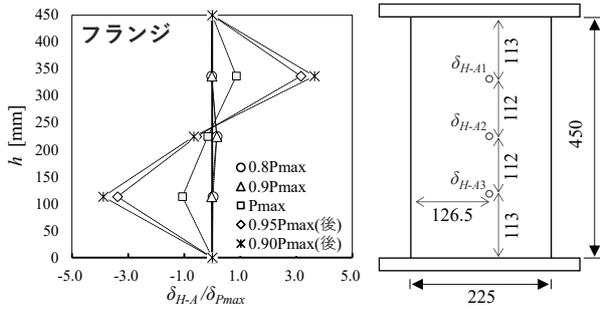
謝辞：本研究は、(一社)日本鉄鋼連盟の鋼構造研究・教育助成事業によって実施したものであります。ここに記し、謝意を表します。



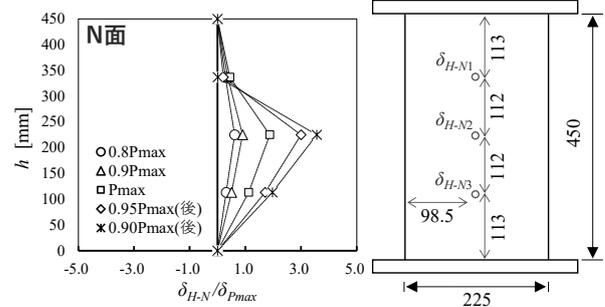
(a) 軸力-軸方向変位関係(B11)



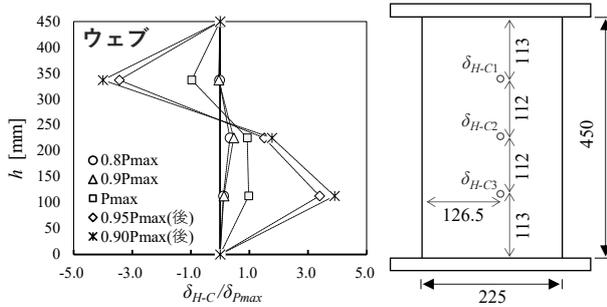
(a) 軸力-軸方向変位関係(B11R)



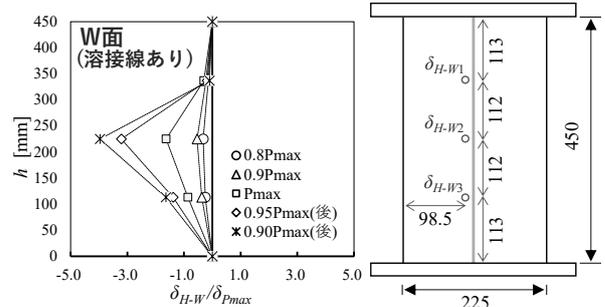
(b) 面外変位遷移図(B11・フランジ)



(b) 面外変位遷移図(B11R・N面)



(c) 面外変位遷移図(B11・ウェブ)



(c) 面外変位遷移図(B11R・W面)

図-9 局部座屈挙動(SBHS700_B11)

図-10 局部座屈挙動(SBHS700_B11R)

参考文献

- 1) 兵庫県南部地震道路橋震災対策委員会：兵庫県南部地震における道路橋の被災に関する調査報告書，p105，1995.
- 2) 堀川浩甫：冷間塑性加工に伴う構造用鋼材のひずみ時効脆化，土木学会論文報告集，第300号，1980.8.
- 3) 本間 宏二，三木 千壽，征矢 勇夫，笹尾 英弥，奥村 健人，原修 一：冷間加工を受けた構造用鋼材の歪み時効と冷間曲げ加工の許容値に関する研究，土木学会論文集，No.570/I-40，1997.7.
- 4) JIS G 3140：2011. 橋梁用高降伏点鋼板.
- 5) Jing Nie et al.： Mechanical Properties and Charpy Absorbed Energy of SBHS400，29th International Ocean and Polar Engineering Conference， ISOPE，2019.
- 6) 山崎諒介，小野潔：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，第23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.313-320，2020.11.
- 7) 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，p95，2017.
- 8) 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-75.
- 9) Abdel-Rahman, Nabil & K. S. Sivakumaran： Material Properties Models for Analysis of Cold-Formed Steel Members. Journal of Structural Engineering，vol. 123，no. 9，pp. 1135-1143，1997.
- 10) Lam, S.S.E., et al.： Load-Carrying Capacities of Cold-Formed Steel Cut Stub Columns with Lipped C-Section. Thin-Walled Structures，vol. 44，no. 10，pp. 1077-1083，2006.