

SBHS700を用いたハイブリッド鋼製短柱の 耐荷力に関する実験的研究

岡島 研¹・竹嶋 夏海²・松村 政秀³・内藤 英樹⁴・岡田 誠司⁵・宮下 剛⁶・小野 潔⁷

¹学生会員 早稲田大学大学院創造理工学研究科（〒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) 熊本大学工学部土木建築学科教授（〒860-8555 熊本県熊本市中央区黒髪2-39-1）

⁴正会員 博士(工学) 東北大学大学院工学研究科准教授（〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06）

⁵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）

⁶正会員 博士(工学) 長岡技術科学大学大学院工学研究科准教授（〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町1603-1）

⁷正会員 博士(工学) 早稲田大学創造理工学部社会環境工学科教授（〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1）

1. はじめに

我が国の道路橋の鋼製橋脚の耐震設計法は1995年に発生した兵庫県南部地震での甚大な被害を踏まえて、弾性域での耐力のみを考慮した設計法から塑性域での耐力および変形能を考慮した設計法へと移行した。これに伴い塑性域における耐力と変形能の組合せの自由度を高めることを目的として、矩形断面柱において従来鋼製のウェブフランジ面にSBHSなどの高強度鋼製の縦リブを設置するハイブリッド構造の検討がなされている。SBHSとは近年登場した橋梁用高降伏点鋼板¹⁾を指し、従来鋼よりも高い降伏点、溶接容易性、高じん性などが特徴である。SBHSを鋼橋へ使用することで、合理的かつ経済的な設計につながると期待されている。

既往の研究^{2), 3)}では、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を向上させるといった耐震性能を実現する可能性が示されている。しかしSBHS製の縦リブを複数本ずつ設置したハイブリッド鋼部材の研究は不足している。また縦リブにSBHSを用いた既往の研究^{2), 3)}では、いずれもウェブフランジに圧縮力が直接載荷される供試体を用いており、ウェブフランジに加えて縦リブに圧縮力が直接載荷される供試体を用いた研究は実施されていない。

そこで本研究ではSM400製のウェブフランジにSBHS700製の縦リブを各面2本ずつ設置したハイブリッド鋼製短柱と同寸法のSM400製ホモジニアス鋼製短柱の計2体の供試体について、一軸圧縮試験を実施した。実験から得られた軸力-軸方向変位関係、

面外変位やひずみの遷移、座屈モードに着目し、SBHSを用いたハイブリッド鋼部材の耐荷力に関するデータを収集する。また縦リブが直接載荷されることによる影響について考察を加えた。

2. 実験供試体および実験方法

(1) 実験供試体

本実験はウェブフランジ、縦リブともにSM400を使用したホモジニアス鋼製短柱（以下、「ホモジニアス」という）と、ウェブフランジにSM400、縦リブにSBHS700を用いたハイブリッド鋼製短柱（以下、「ハイブリッド」という）の2体を用いて実施した。両供試体ともウェブ面、フランジ面、縦リブは溶接によって接合されている。

使用鋼材の引張試験結果で得られた機械的性質を表-1に示す。同表中の降伏応力は降伏点の値とした。またSBHS700はSM400と比較して高い降伏応力、降伏比を有することが確認できる。

図-1に供試体概要図を、表-2に供試体の構造諸元を示す。両供試体は同じ寸法であり、各ウェブフランジ面に2本ずつ溶接されている縦リブの鋼種が違うのみである。端部での座屈を防ぐために供試体の上下端には補剛区間を設けており、テストパネル区間は供試体全長から補剛区間長を差し引いて区間長 L としている。

表-1 使用鋼材の機械的性質

	降伏応力 σ_y (N/mm ²)	引張強さ σ_u (N/mm ²)	降伏比
SM400	302	465	0.65
SBHS700	813	848	0.96

縦リブのひずみゲージは先端（自由端）から 10mm のところに設置し、先端寄りとした。図中の r_1 , r_2 は縦リブ位置を、 i は板パネル内側もしくは縦リブ右側を意味する。

3. 実験結果

(1) 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-4 に示す。ハイブリッドはホモジニアスと比較して最大荷重 P_{max} が 1.42 倍、最大荷重時変位 δ_m が 1.13 倍増加した。また P_{max} 後の荷重低下については、ホモジニアスの方が緩やかであった。一方、縦リブが直接载荷されないハイブリッド供試体を用いた既往の研究では、ホモジニアス供試体に対して耐力の上昇を抑えつつ変形能のみを向上させる結果が得られている²⁾。本研究との耐力の違いについて、これは本実験のハイブリッド供試体では縦リブが直接载荷されることで軸力が分担されやすい構造であること、また縦リブが高強度であるため供試体全体で負担できる軸力が増加したことによる差異と考えられる。

(2) 残留たわみ

実験後の両供試体テストパネル区間の残留たわみ図（倍率 3 倍）を図-5 に示す。ホモジニアスについて、補剛板全体としては縦リブの先端が引張となる方向へ変形し、中央部で凸となるモードがみられた。さらに板パネル中央部と縦リブの上下端部で局部座

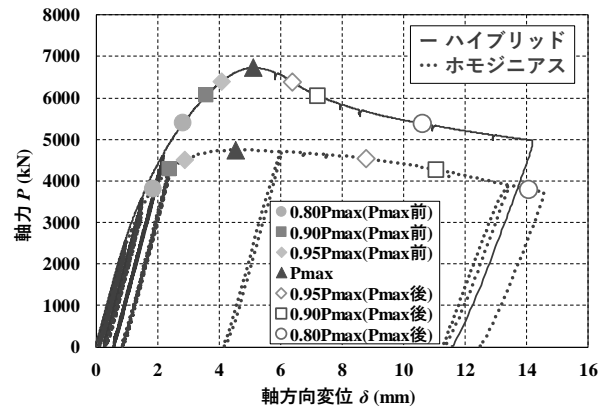
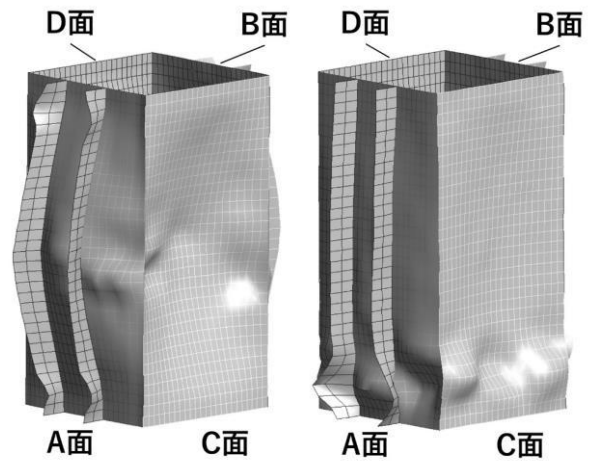
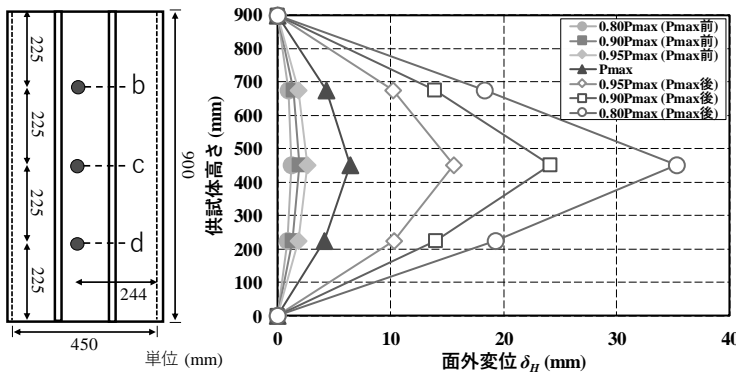


図-4 軸力-軸方向変位関係

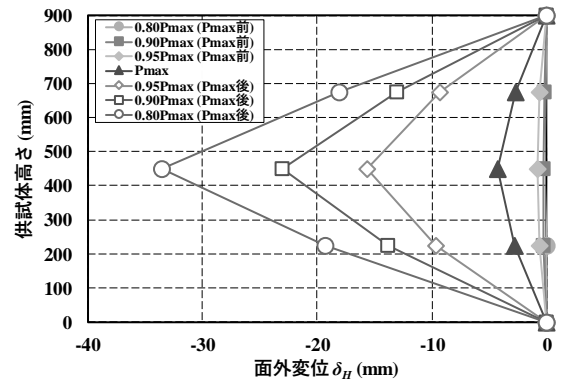


(a) ホモジニアス (b) ハイブリッド

図-5 残留たわみ図（倍率 3 倍）

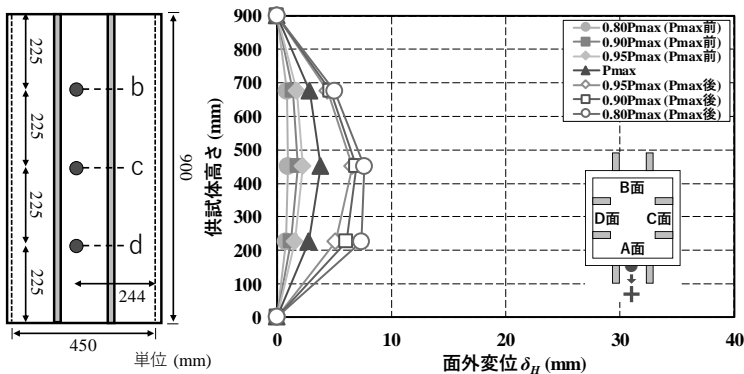


(a) A 面

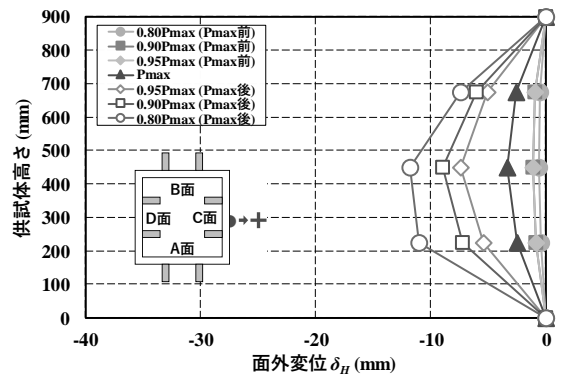


(b) C 面

図-6 面外変位遷移図（ホモジニアス）



(a) A 面



(b) C 面

図-7 面外変位遷移図（ハイブリッド）

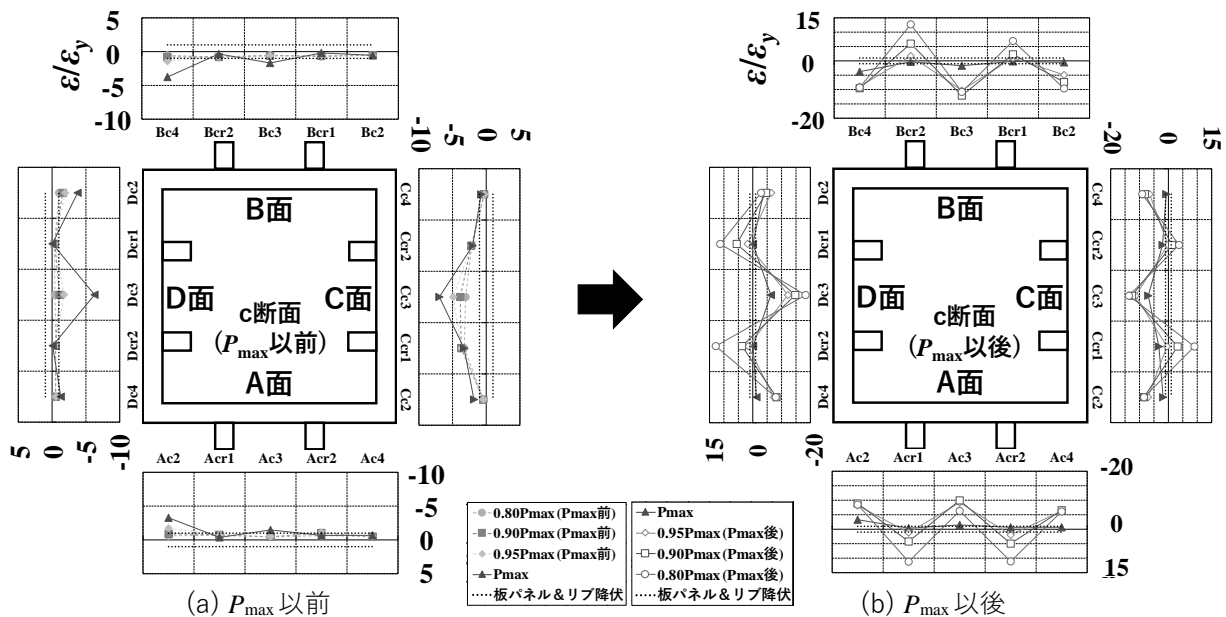


図-8 ひずみ遷移図 (ホモジニアス c 断面)

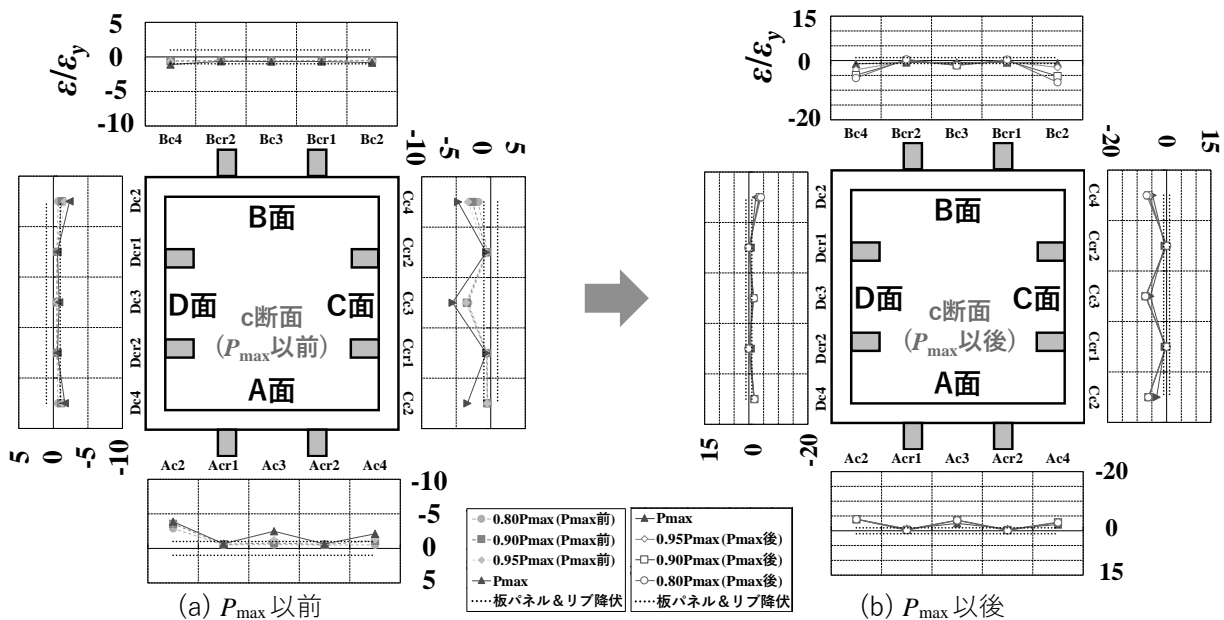


図-9 ひずみ遷移図 (ハイブリッド c 断面)

屈が生じていることがわかる。一方、ハイブリッドについて、補剛板全体としての変形はホモジニアスと比較して小さくなった。板パネル、縦リブにおける局部座屈はいずれも下端部に集中するモードとなった。

(3) 面外変位遷移

図-6, 7 に示す P_{max} および P_{max} の 0.95 倍, 0.90 倍, 0.80 倍の荷重時の面外変位遷移図より、両供試体とも補剛板全体として縦リブ先端が引張となる方向へ変形している。ホモジニアスでは、図-6 より計測した 3 箇所について常に中央で凸となるモードで変形が進んでいた。一方、ハイブリッドでは、図-7 より

P_{max} 以前は中央で凸のモードで、 P_{max} 以後は上部と比較して下部の変形が増加するモードで変形が進み、 P_{max} を境に変形モードが変化していることが分かる。またホモジニアスと比較して、いずれの測定箇所においても P_{max} 以後の各荷重時における面外変位が小さくなっている。この原因として、前節の図-5(b) で確認できるようにテストパネル下端部での局部座屈が集中した分、それより上部に位置する測定箇所付近の変形が小さくなったことが考えられる。

(4) ひずみ遷移

図-8 にホモジニアスの、図-9 にハイブリッドの供

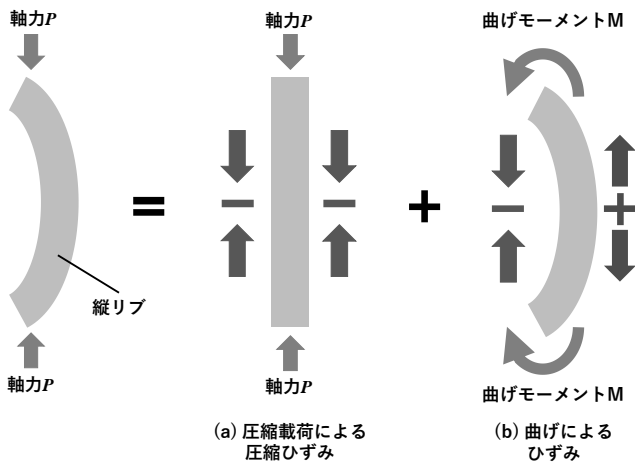


図-10 縦リブの変形とひずみの関係の模式図

試体高さ方向 c 断面における P_{max} および P_{max} の 0.95 倍、0.90 倍、0.80 倍の荷重時のひずみの遷移図を示す。なお、ハイブリッドにおいて変形が顕著であったテストパネル下端部におけるひずみについて、本実験ではデータが取れていないため、ここではホモジニアスとハイブリッドの双方でデータが取れている c 断面（テストパネル中央断面）での比較としている。縦軸はひずみ ε を降伏ひずみ ε_y で除した $\varepsilon/\varepsilon_y$ 、横軸はひずみゲージ位置を表す。 ε は板パネル外面と内面の平均ひずみもしくは縦リブの左右面の平均ひずみを表し、 ε_y は使用鋼材の降伏ひずみを表す。 ε_y の値はハイブリッドの縦リブに対してのみ SBHS700 の値を用いており、それ以外は SM400 の値としている。ひずみゲージ位置は図-3 下のナンバリングに基づき、板パネルは表側の、縦リブは左側のゲージ名称で代表している。したがって各断面において板パネル 3 箇所 \times 4 面 = 12 箇所と縦リブ 2 箇所 \times 4 面 = 8 箇所の計 20 箇所のひずみを示す。また各図は同一断面内のひずみを P_{max} 以前（左側の(a)）と P_{max} 以後（右側の(b)）で $\varepsilon/\varepsilon_y$ のスケールが異なるグラフに分けていることに注意されたい。

ホモジニアスについて、図-8(a), (b)より板パネルのひずみは荷重を通じて圧縮側にひずみが増加している。一方、縦リブのひずみは P_{max} 以前では圧縮側に、 P_{max} 以後では引張側にひずみが増加している。そして $0.8P_{max}$ (P_{max} 後) 時点では断面内の全測定箇所が引張側の降伏ひずみに達している。このような部材によるひずみ変化の相違について考察する。そもそも本実験の供試体は縦リブが直接荷重される構造となっており、圧縮荷重の初期段階ではいずれの部材にも一様に圧縮ひずみが発生する状態にある。そのため縦リブ先端のひずみについて面外変位が小さい P_{max} 以前では、図-10(a)のように圧縮荷重による圧縮ひずみが卓越している。一方、 P_{max} 以後では図-10(b)のように中央で凸となる面外変位の増加に伴い縦リブが曲がることで先端に働く引張応力も増

加し、引張ひずみが卓越するようになったと考えられる。

ハイブリッドについて、図-9(a)より P_{max} 以前はホモジニアス同様、板パネル、縦リブともに全測定箇所でも圧縮ひずみが増加している。一方、図-9(b)より P_{max} 以後の板パネル、縦リブのひずみの変化量がホモジニアスと比較して小さいことがわかる。この原因として、板パネルについては図-7 からも確認できるように、 P_{max} 以後の c 断面での面外変位量がホモジニアスと比較して小さくなったことが考えられる。また縦リブについては、板パネルの面外変位量が小さくなった分、縦リブ先端に働く引張応力も小さくなり、引張ひずみの変化量が小さくなったと考えられる。また $0.8P_{max}$ (P_{max} 後) 時点まで、いずれの測定箇所においても縦リブは降伏ひずみに達しなかった。これは前述したように c 断面での縦リブ先端に働く引張応力がホモジニアスほど大きくなかったことに加えて、縦リブに高強度な SBHS700 を用いることで降伏強度が大きくなったことによるものと考えられる。

4. 本研究のまとめ

本研究では SBHS700 を縦リブに用いたハイブリッド鋼製短柱の一軸圧縮試験を実施した。本実験結果に関して、既往の実験結果を踏まえた上で考察を行い、以下のような結果が得られた。

- ・ ハイブリッドの方が高い最大荷重が得られた。これは高強度の縦リブに圧縮力が直接荷重されることが原因と考えられる。また最大荷重後の荷重低下はホモジニアスの方が緩やかであった。
- ・ 残留たわみ図よりハイブリッドとホモジニアスで座屈モードが異なるが、いずれの供試体でも板パネルおよび縦リブの局部座屈がみられた。
- ・ ハイブリッドは最大荷重以後、測定箇所における面外変位がホモジニアスと比較して小さくなった。これは測定範囲外である下端部に局部座屈が集中するモードが影響していると考えられる。
- ・ テストパネル中央断面において、ホモジニアスでは最大荷重以後、板パネル、縦リブともに降伏ひずみに達した。一方、ハイブリッドでは最大荷重以後も縦リブは降伏ひずみに達しなかった。またハイブリッドはホモジニアスと比較して板パネル、縦リブともに最大荷重以後のひずみの変化が小さい結果となった。

今後は縦リブへの荷重方法や縦リブの幅厚比パラメータに着目し、さらなる実験と解析の双方によりハイブリッド鋼製短柱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す。また本実験には熊本大学大学院 鶴田峻真氏，安宅直希氏，早稲田大学大学院 山崎諒介氏，スタピットシラネー氏（現 八千代エンジニアリング），地疋進之介氏（現 NEXCO 中日本）のご協力をいただきました。ここに記して，謝意を表します。

参考文献

- 1) JIS G 3140 : 2011. 橋梁用高降伏点鋼板.
- 2) 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講演論文集，pp.391~394，2013.7.

- 3) 安宅俊樹・小野潔・松村政秀・岡田誠司・加藤健太郎：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，第 19 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.135~140，2016.7.
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋・鋼部材編，2017.