

令和 3 年 6 月 16 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04331

研究課題名(和文)高性能鋼の特性を活用した構造ディテールの開発による矩形断面鋼部材の高じん性化

研究課題名(英文) Improvement of ductility of rectangular cross-section steel members by using high performance steel.

研究代表者

小野 潔 (ONO, Kiyoshi)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：60324802

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：橋梁用高性能鋼であるSBHSの特性を活用することで、矩形断面鋼部材の角部から溶接部をなくして曲げ加工鋼板とした矩形断面鋼部材の提案を行うため、曲げ加工後のSBHSのシャルピー吸収エネルギーの評価、実験および解析により耐荷力の評価を実施した。その結果、SBHSを使用した角部を曲げ加工鋼板とした鋼部材について、曲げ加工後もシャルピー吸収エネルギーが高いことを示すと同時に、その軸圧縮強度の耐荷力評価法の提案を行うことで、提案する構造の実現可能性を示している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で提案した、高性能鋼の特性を活用して角部から溶接部を無くして曲げ加工鋼板とした構造ディテールは、今後発生することが指摘されている東南海地震等の巨大地震に対しても、角部の溶接部が破壊することによって発生する鋼部材の倒壊を防止できる構造であるため、国土強靱化に資するものである。よって、本研究は高性能鋼の特性を活用した新たな構造の実現可能性を示すと同時に、橋梁の地震に対する安全性を高める上で有用な情報を与えているため、学術的意義や社会的意義の高い研究であると言える。

研究成果の概要(英文)：It is thought that rectangular cross-section steel members with cold-formed corner parts are effective for preventing the fracture of welding at corner parts in the huge earthquakes. In order to propose this type of structures by using high performance steel 'SBHS', the Charpy absorbed energy of cold-formed corner parts and the load-carrying capacity of the targeted structures were investigated. The results of Charpy impact tests indicated that Charpy absorbed energy at cold-formed corner parts is sufficiently high judging from the values specified in the design specifications for high bridges. The information on the load-carrying capacity was obtained by the experimental and numerical results and the evaluation method was proposed. Consequently, results obtained in this study indicate the feasibility of the targeted structures.

研究分野：鋼構造，橋梁工学

キーワード：高性能鋼 シャルピー吸収エネルギー 高じん性 耐荷力 曲げ加工 ひずみ時効 SBHS

1. 研究開始当初の背景

近い将来、東海地震、東南海地震等の巨大地震が発生する可能性が高いことが指摘されている。橋梁の耐震設計法は逐次改定され、橋梁の耐震性能は向上してきているものの、設計で想定した地震力より大きな力が橋梁に作用する危険性も否定できない。そのような場合でも、橋梁には座屈等の損傷は許容しても、橋梁全体の倒壊につながる致命的な損傷は防ぐ必要がある。兵庫県南部地震では2基の矩形断面鋼製橋脚が倒壊している。図-1.1 に倒壊した鋼製橋脚のうち、1基の鋼製橋脚の例を示す [出典：建設省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、平成7年12月]。倒壊した鋼製橋脚については、当時の設計地震力より非常に大きな力が鋼製橋脚に作用したことで、図-1.2 に示す矩形断面の角部の溶接部が破断したことが倒壊の原因であると推測されている。このような致命的な破壊形態を防ぐには、図-1.3 に示すように、角部から溶接部をなし、曲げ加工鋼板とした構造ディテールを採用することが非常に有効である。しかしながら、鋼板は曲げ加工されると、塑性変形（塑性ひずみ）を受けることで降伏応力等の機械的性質も変化するとともに、ひずみ時効により破壊じん性（シャルピー吸収エネルギー）が低下して脆くなることが報告されている。



図-1.1 倒壊した鋼製橋脚

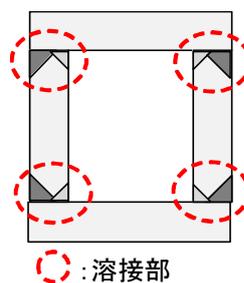


図-1.2

2. 研究の目的

近年、橋梁用の高性能鋼である SBHS が JIS に規定された。SBHS の特徴として、高強度（降伏点が高い）、高じん性（シャルピー吸収エネルギーが高い）等がある。著者らの既往の研究 [Daiki Kitazume, Kiyoshi Ono, Kengo Anami, Takumi Kawachi, Tetsuya Iida: Charpy Impact Tests with Test Specimens Made with Small-size Cores, Proceedings of 9th International Symposium on Steel Structures, pp.291-294, 2017] で、SBHS のシャルピー吸収エネルギーが従来鋼と比較して非常に高いことが判明している。よって、SBHS では曲げ加工後でも道路橋示方書で要求するシャルピー吸収エネルギーを満足する可能性が高いと考えられる。そこで、本研究では、鋼部材を高じん性化することで、巨大地震に対しても橋梁が倒壊するといった致命的な損傷に至ることを防ぐため、高性能鋼 SBHS のシャルピー吸収エネルギーが非常に高いという特性を活用し、矩形断面鋼部材の角部から溶接部をなくして曲げ加工鋼板とした構造ディテール（図-1.3）を有する矩形断面鋼部材の実現を目指す。

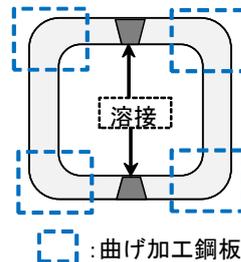


図-1.3

本研究では、SBHS のうち、SBHS400 を主対象に検討を実施した。角部を曲げ加工鋼板とした構造ディテールを実現するためには、曲げ加工後でも、鋼材のシャルピー吸収エネルギーが所定の値以上であることが大前提となる。そこで、最初に、SBHS400 に曲げ加工を施し、シャルピー吸収エネルギーの評価を行った。また、角部に曲げ加工鋼板を使用した矩形断面鋼部材を実現するには、その耐荷力評価法を提案することが必要である。そこで、矩形断面鋼部材の耐荷力特性のうち、基本的な耐荷力特性のひとつである軸圧縮強度の評価を行った。

3. 研究の方法

本研究では、SBHS のうち、SBHS400 を主対象に検討を実施した。

角部を曲げ加工鋼板とした構造ディテールを実現するためには、曲げ加工後でも、鋼材のシャルピー吸収エネルギーが所定の値以上であることが大前提となる。そこで、最初に、SBHS400 に曲げ加工を施し、シャルピー吸収エネルギーの評価を行った。また、角部に曲げ加工鋼板を使用した矩形断面鋼部材を実現するには、その耐荷力評価法を提案することが必要である。そこで、矩形断面鋼部材の耐荷力特性のうち、基本的な耐荷力特性のひとつである軸圧縮強度の評価を行った。

以下に、曲げ加工部のシャルピー吸収エネルギー、角部に曲げ加工鋼板を使用した矩形断面鋼部材の軸圧縮強度の評価のために行った具体的な研究の方法を示す。

(1) 曲げ加工鋼板のシャルピー吸収エネルギーの評価

ひずみ時効によるシャルピー吸収エネルギーの変化を調べるため、板厚 45mm の SBHS400 の

鋼板の曲げ加工を行い、曲げ加工部の頂点部から試験片を製作した。また、比較のため、曲げ加工を実施していない同一の鋼板からも試験片を製作した。曲げ加工の曲げ半径（内径）は、道路橋示方書で規定される最小の曲げ半径である板厚 t の 5 倍の $5t$ とした。そして、曲げ加工をしていない鋼板、曲げ加工をした鋼板、いずれの鋼板に対しても板厚方向の 3 箇所（内側、中心、外側）から試験片を製作した。ひずみ時効の影響を調べるため、曲げ加工後 39 日、182 日、365 日に、試験温度 0°C 、 -60°C でシャルピー衝撃試験を実施した。なお、従来鋼との比較のため、板厚 45mm の SM520C についても、SBHS400 と同様に、試験片を製作してシャルピー衝撃試験を実施した。

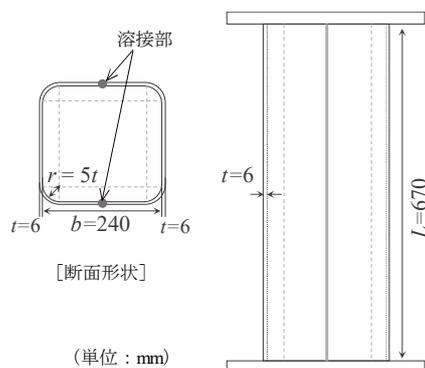


図-3.1 供試体

(2)角部を曲げ加工鋼板とした矩形断面鋼部材の軸圧縮強度の評価

角部を曲げ加工鋼板とした矩形断面鋼部材の軸圧縮強度に関する情報を得るため、軸圧縮試験を行った。供試体の鋼種は SBHS400、曲げ加工部の曲げ加工半径（内径）は板厚 6mm の 5 倍である 30mm とした。図-3.1 に供試体の構造諸元を示す。

なお、実験だけで、角部を曲げ加工鋼板とした矩形断面鋼部材の軸圧縮強度を評価することは困難である。そこで、シェル要素を用いた弾塑性有限変位解析（以下、「解析」という）により、角部を曲げ加工鋼板とした矩形断面鋼部材の耐荷力に関する情報を得た。

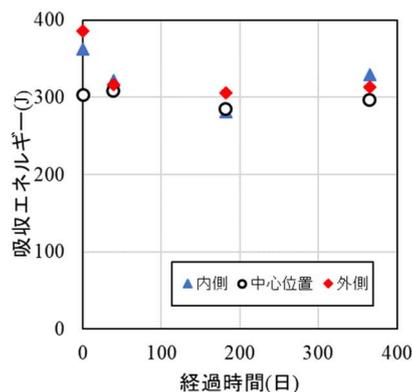


図-4.1 シャルピー吸収エネルギー

4. 研究成果

(1)SBHS の曲げ加工鋼板のシャルピー吸収エネルギーの評価

SBHS400 の鋼板の曲げ加工部の内側、中心位置、外側の各位置から、それぞれ 3 本ずつ採取した試験片について、試験温度 0°C におけるシャルピー吸収エネルギーの 3 本の試験片の平均値と曲げ加工後の経過日数の関係を図-4.1 に示す。なお、経過日数が「0」は曲げ加工を実施していない部分の内側、中心位置、外側から、それぞれ 3 本ずつ採取した試験片のシャルピー吸収エネルギーの平均値である。図-4.1 に示すように、曲げ加工後約 1 年が経過したシャルピー吸収エネルギーは、内側と外側で減少はしているものの、内側、板厚中心、外側のいずれの位置においても 300J 程度の非常に高い値を示していることがわかる。よって、SBHS400 は曲げ加工後も高いシャルピー吸収エネルギーを示すため、角部を曲げ加工鋼板とした構造ディテールの実現可能性を示すデータ得られた。

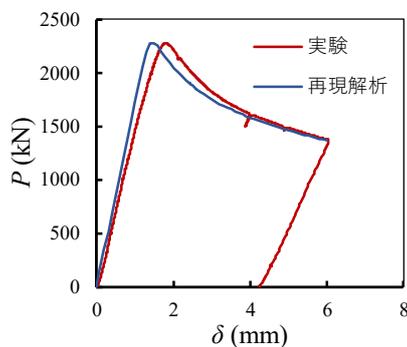
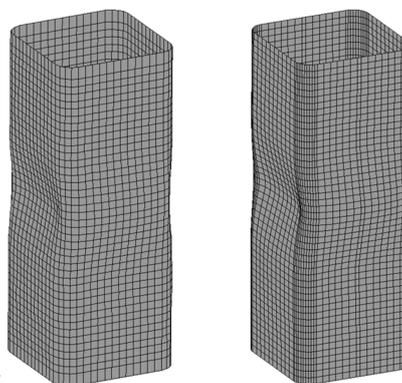


図-4.2 軸力-軸方向変位関係

(2) 角部を曲げ加工鋼板とした矩形断面鋼部材の軸圧縮強度の評価

角部を曲げ加工鋼板とした矩形断面鋼短柱の供試体の軸力-軸方向変位 (P - δ) 関係を図-4.2 に示す。

また、解析により角部を曲げ加工鋼板とした矩形断面鋼材の軸圧縮強度を把握するため、実験結果と解析結果との比較による解析手法の妥当性の検証を実施した。解析の実施にあたっては、供試体の挙動をより適切に再現するため、曲げ加工部、平板部から試験片を製作して引張り試験を実施して応力-ひずみ関係の情報を得るとともに、軸圧縮試験で



(a)実験 (b)解析

図-4.3 残留面外変位

用いた供試体と同じ溶条件で製作した供試体を使用して切断法で残留応力を測定した。そして、それら情報を解析モデルに反映して解析を実施した。図-4.2には、解析から得られる軸力-軸方向変位関係も示す。図-4.2より、解析結果は実験結果を精度良く再現出来ていることがわかる。また、図-4.3に実験および解析から得られる残留面外変位を示す。図-4.3より、解析結果は実験結果の残留面外変位を適切に再現していることがわかる。この妥当性を確認した解析手法により、幅厚比パラメータを変化させて解析モデルを作成し、解析を実施した。なお、いずれの解析モデルについても、角部の曲げ加工の半径(内径)は $5t$ としている。図-4.4に実験結果、解析結果と耐荷力曲線を比較したものを示す。図-4.4に示す耐荷力曲線は、福本らの研究

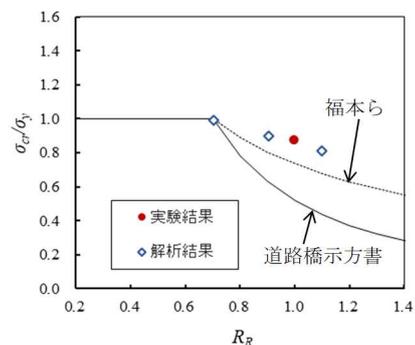


図-4.4 耐荷力曲線との比較

福本秀士(研究代表者):鋼骨組構造物の極限強度の統一評価に関する総合研究,平成元年度科学研究費補助金(総合研究A.研究課題番号62302940)研究成果報告書,1990],道路橋示方書(平成29年11月)で示される両縁支持板の耐荷力曲線である。図-4.4より、既往の耐荷力曲線で安全側に角部を曲げ加工鋼材とした鋼部材の軸圧縮強度を評価できる可能性があることがわかる。

(3)角部を曲げ加工鋼材とした矩形断面鋼部材の実現

本研究では、SBHSのうちSBHS400を主対象に、角部を曲げ加工鋼板とした矩形断面鋼部材の実現のため、(1)に示す曲げ加工後のシャルピー吸収エネルギーの評価、(2)に示す軸圧縮強度の評価を行った。その結果、角部を曲げ加工鋼板とした矩形断面鋼部材の実現可能性を示した。なお、今後は、解析や実験による研究を進め、SBHS700およびSBHS400への適用性に関する詳細な検討、適用可能な曲げ加工半径の拡大、より適切な耐荷力評価法の提案を行う予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 山崎諒介, NIE Jing, 竹嶋夏海, 岡田誠司, 小野潔
2. 発表標題 角部に冷間曲げ加工を施したSBHS400 製箱型断面鋼短柱の弾塑性挙動に関する実験的研究
3. 学会等名 令和3年度全国大会 第76回年次学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 D. KITAZUME, J. NIE, K. ONO, K. ANAMI, T. MIYASHITA, Y. MISHIMA and T. IIDA
2. 発表標題 CHARPY ABSORBED ENERGY OF COLD PRESS-BENT STEEL PLATES MADE OF SM520C
3. 学会等名 16th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

http://www.ono-lab.sci.waseda.ac.jp/	
---	--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	穴見 健吾 (ANAMI Kengo) (30272678)	芝浦工業大学・工学部・教授 (32619)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	宮下 剛 (MIYASHITA Takeshi) (20432099)	長岡技術科学大学・工学研究科・准教授 (13102)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関