

令和 2 年 6 月 26 日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06530

研究課題名（和文）高強度鋼の素材疲労強度を加味した溶接継手部の疲労強度向上法の提案

研究課題名（英文）Enhancing fatigue strength of welded joints made of steels for bridge high performance structures by considering its beneficial fatigue limit

研究代表者

木下 幸治（kinoshita, koji）

岐阜大学・工学部・准教授

研究者番号：90452169

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：高強度鋼は切欠き感度が高いために、応力集中が起こる溶接部の疲労強度の確保が重要な課題である。本研究は、この課題の達成を目的とするものであり、高強度鋼の“素材疲労強度”を合理的に加味した疲労強度向上法の提示を目的とした。areaパラメータモデルを用いて想定される素材疲労強度の下限値を提案し、提案した高強度鋼の素材疲労強度をHFMI処理された疲労強度評価手法に反映することにより、現行の疲労設計コードで規定される素材疲労強度を考慮した場合と比較して、HFMI溶接継手の疲労試験データに対する評価精度を向上させた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高強度鋼材の素材疲労試験データ蓄積に加えてき裂起点のミクロ・フラクトグラフィを基に、areaパラメータモデルの適用性を証明し、素材疲労強度を新たに提案・反映してHFMI処理された溶接継手の疲労強度評価の高度化を実証した点は極めて実証的である。従来の統計的な寸法効果の検討の多くは小型試験体などの継手形状が限られた疲労試験データを基に、単一の継手寸法を説明変数とした単回帰統計モデルにより評価されてきたが、従来データベースをより幅広い継手形状を検討可能かつ「全世界型」に更新した上で重回帰統計モデルを基に寸法効果を再評価した点は実証的である。

研究成果の概要（英文）：For steel bridges, an application of high strength steels has been known one of the effective approaches on weight reduction and cost saving for construction and transportation. According to the requirements, steels for bridge high performance structures (SBHS) developed newly in Japan have been recently focused on the application due to its higher strength and beneficial weld ability and work ability. However, it has been known that fatigue strength of welded joints may be independent of the steel tensile strength of base metal, which results in difficulty of using high strength steels to steel bridges efficiently. Therefore, fatigue strength of welded joints made of high strength steels must be enhanced. The evaluation results based on a model proposed in a previous study considering a unique parameter of this study in terms of fatigue limit of SBHS700 base plate may provide a better evaluation for lower limit of the fatigue test results.

研究分野：破壊力学，構造工学，維持管理工学

キーワード：橋梁用降伏点鋼板 疲労試験 残留応力

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

鋼橋の軽量化や製作コストの低減の要求を背景に、国内はもちろん米国、中国、韓国等で高強度鋼を用いた多数の橋梁が建設されている。我が国では、近年新しい鋼材である橋梁用降伏点鋼板が開発され¹⁾、すでに降伏強度で 500MPa 級の SBHS (SBHS500) が東京ゲートブリッジに実用化されている。しかし、高強度鋼では切欠き感度が高いために、応力集中がおこり易い溶接部の疲労強度は小さくなる欠点がある。申請者が実施した試算によると、疲労強度向上が実現できない場合、SBHS500 以上の鋼材強度に見合う軽量化は難しく、普及の障害になっている。この欠点を補う技術として、図-1 に示すように鋼材強度上昇に伴い金属組織自体の疲労強度が高くなるといった、金属組織学的知見を合理的に加味した疲労強度向上法の開発が必須となる。

高強度の金属素材自体の疲労強度が高いことは従来知られており、高強度鋼の溶接部の疲労強度の把握や鋼材強度を加味した溶接部の止端形状改善や圧縮残留応力導入といった疲労強度向上に関する実証研究が進められてきた。しかし、判治ら²⁾のように、700MPa 級の SBHS (SBHS700) を用いた溶接継手の疲労実験を行ったが、通常の溶接継手と同等の疲労強度向上効果があるという共通の結果が報告されるに留まっている。また、700MPa 級の SBHS 鋼素材の十分な疲労強度データが存在せず、高強度鋼素材の疲労強度を最大限に活用した手法に関する普遍的なメカニズムの解明までには至っていない。これらの課題を解決させるためには、これまでに十分に議論されてこなかった「高強度鋼素材の疲労強度と素材疲労強度・溶接界面組織・残留応力との関係」の解明に踏み込む必要がある。

以上のことから、高強度である SBHS 鋼素材の疲労強度を加味した疲労強度向上メカニズムが解明できれば、最適な止端形状、残留応力改善手法、溶接材の選択や溶接条件の決定が理論的に行えるようになり、SBHS700 の適用が大きく広がると考えられる。

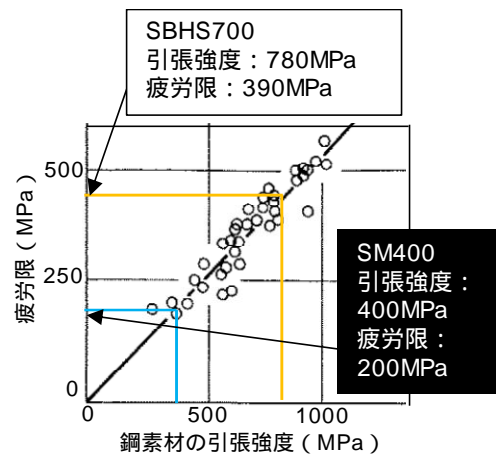


図-1 鋼素材強度と疲労限の関係

(SBHS700 はこれまで未検討のため推定値であった)

2. 研究の目的

以上の問題意識を踏まえ、本研究では、高強度鋼の“素材疲労強度”を合理的に加味した疲労強度向上法の提示を目的とする。具体的には、700MPa 級の橋梁用高降伏点鋼板 (SBHS700) を用いた溶接継手について、疲労強度評価、溶接部の金属組織の解析、破断部の母材強度の推定、溶接残留応力の評価を総合して、高強度鋼の“素材疲労強度”を加味した高周波機械的衝撃処理 (HFMI 処理) などの疲労強度向上手法を対象とした、疲労強度向上メカニズムを解明する。素材疲労強度、溶接残留応力と金属組織に着目した解析は申請者が確立した独自のものである。

3. 研究の方法

本研究では、本研究期間を通じて、主に以下の二つの研究を実施してきた。

(1) 高強度鋼素材疲労強度の提案に基づく HFMI 処理された溶接継手の疲労強度評価法の高精度化

我が国で近年開発された高強度鋼材の一つである降伏強度 700MPa 級と 500MPa 級の SBHS (SBHS700 と SBHS500) の素材疲労強度を疲労試験と微小欠陥理論に基づく $\sqrt{\text{area}}$ パラメータモデルにより明らかにした。そして、それら素材疲労強度を反映させた疲労損傷発生位置の局部応力・強度等をベースとした HFMI 処理された疲労強度評価手法の高精度化を実証した。

(2) 寸法効果の統計的再評価に基づく HFMI 処理された溶接継手の疲労強度評価法の高精度化
複数の国際的な既往の疲労試験データベースに、わが国の研究を含む最新の疲労試験結果を統合した「全世界型データベース」を構築した。その上で、寸法効果を適切に検討可能な小型試験体から実寸大レベルの継手形状の標本の収集・スクリーニングを実施し、ダミー変数を導入した重回帰統計モデルにより寸法効果を再評価し、新たに見出した寸法効果を反映させた疲労設計曲線をベースとした HFMI 処理された疲労強度評価の高精度化を実証した。

4. 研究成果

(1) 高強度鋼素材疲労強度の提案に基づく HFMI 処理された溶接継手の疲労強度評価法の高精度化

高強度鋼材 (SBHS500 及び 700) の素材疲労強度を提案するとともに、それらを反映させた HFMI 処理された溶接継手の疲労強度評価法の精度向上の検証により、以下の成果を得た。

疲労試験、および走査型顕微鏡を用いた疲労破壊の起点となった初期欠陥寸法 (area) の正確な同定を行い、 $\sqrt{\text{area}}$ パラメータモデルを用いて SBHS500 及び 700 の素材疲労強度を定量的に

評価可能である事実を証明した。

我が国の疲労設計コードに規定される部材表面の品質管理値が最大表面粗さ 50μm 以下であることを利用し、√area パラメータモデルを用いて想定される素材疲労強度の下限值を提案した。

提案した高強度鋼の素材疲労強度を HFMI 処理された疲労強度評価手法に反映することにより、現行の疲労設計コードで規定される素材疲労強度を考慮した場合と比較して、HFMI 溶接継手の疲労試験データに対する評価精度を著しく向上させた(図-2)。

以上から、高強度鋼材の素材疲労強度の提案は、HFMI 処理された疲労強度改善効果をより精微に評価し、かつその効果を最大限にすることが可能であると結論づけた³⁾。本成果を基に、将来的には圧縮残留応力導入技術の疲労強度改善効果に起因するパラメータも多角的に分析することで、それらの技術にも応用可能な汎用性の高い強度評価手法が可能になることが期待される。

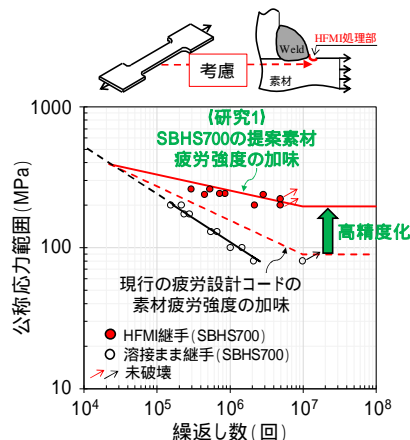


図-2 HFMI 溶接継手の疲労強度評価手法の高精度化

(2)寸法効果の統計的再評価に基づく HFMI 処理された溶接継手の疲労強度評価法の高精度化

全世界型データベースに用いて統計的に寸法効果を再評価した結果を加味した新たな溶接まま設計曲線を基に、HFMI 処理の IIW 疲労強度評価法の精度向上の検証により、以下の成果を得た。

欧州構造基準(Eurocode)の疲労強度区分の規定に用いられたバックグラウンドデータを含む国際的な既往のデータベースに、我が国の研究を中心とした近年の疲労試験結果を統合し、1958 年から 2019 年までのデータを網羅した全世界型かつ最新の疲労試験データベースを構築した。

それに対して、寸法効果を検討するための幅広い継手サイズの標本を重複・不適・エラーデータに注視しながら収集・スクリーニングした上で、ダミー変数を導入した重回帰分析を行った。その結果により、付加板長さ、板厚、主板幅の全ての寸法効果を考慮する疲労強度を、高度に予測可能な関係式を定式化した。

主板幅を含む関係式から算出された新たな溶接まま継手の疲労設計曲線を利用することにより、HFMI 溶接継手の疲労試験データの下限值に相当する 95%非破壊確率曲線に対する HFMI 処理の IIW 疲労強度評価法の精度を向上させた(図-3)。

以上のように、HFMI 処理された溶接構造物の疲労強度を精微に評価するには、継手の付加板長さ、板厚、主板幅のサイズバランスによる寸法効果を関係式から考慮した上で疲労設計曲線を決定することが重要であることを示した(参考文献 4)申請者を中心とする欧州研究者との共同研究)。当該研究は、現在申請者が定式化した寸法効果の関係式を基に、各国疲労設計コードの抜本的な見直しを実施しており、世界共通の新疲労強度区分の確立への展開が期待される。

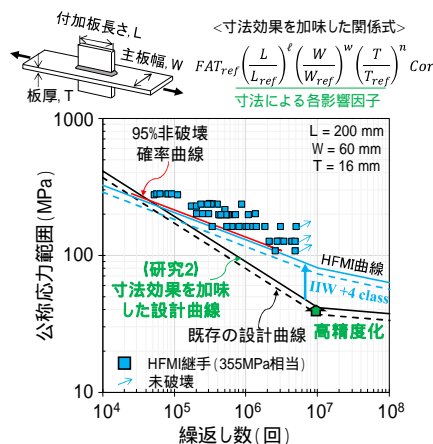


図-3 HFMI 溶接継手の IIW 疲労強度評価法の高精度化

<参考文献>

- 1) 三木ら：橋梁用高性能鋼材 (BHS500, BHS700) の提案, 土木学会論文集, No.738/I-64, 2003.
- 2) 判治ら：橋梁用高降伏点鋼板(SBHS)を用いた溶接継手の疲労特性, 構造工学論文集, Vol.60A, 2014.
- 3) Yuki Ono and Koji Kinoshita : Enhancing fatigue strength of welded joints using SBHS700 by hammer peening with ICR apparatus and UIT, 2nd IIW Annual Assembly and International Conference 2019, XIII-2814-19, pp.1-12.
- 4) Yuki Ono, Claudio A. Pereira Baptista, Koji Kinoshita and Alain Nussbaumer : A reanalysis of fatigue test data for longitudinal as-welded gusset joints, 72nd IIW Annual Assembly and International Conference 2019, XIII-2817-19, pp.1-31.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 5件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 K. Kinoshita and Y. Ono	4. 巻 63
2. 論文標題 1. Fatigue strength evaluation of under-matched welded joints made of 800MPa class steel based on the local strain approach	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Welding in the World	6. 最初と最後の頁 1329-1338
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1007/s40194-019-00762-9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Y. Ono and K. Kinoshita	4. 巻 18
2. 論文標題 Examination on fatigue limit and crack growth characteristic of SBHS700 base metal	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Steel Structure	6. 最初と最後の頁 1098-1106
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1007/s13296-018-0061-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Y. Ono and K. Kinoshita	4. 巻 1
2. 論文標題 Fatigue strength improvement of welded joints using SBHS700 by applying ICR treatment	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Maintenance, Safety, Risk, Management and Life-Cycle Performance of Bridges	6. 最初と最後の頁 2205-2212
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 K. Kinoshita, Y. Banno, Y. Ono, S. Yamada, and M. Handa	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Fatigue Strength Improvement and Fatigue Crack Closure by Portable Pneumatic Needle-Peenig Treatment on Welded Joints	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Steel Structure	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1007/s13296-018-0153-4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 K. Kinoshita, Y. Banno, Y. Ono, S. Yamada, and M. Handa	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Fatigue strength improvement of welded joints of existing steel bridges by Shot-Peening	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Steel Structure	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1007/s13296-018-0140-9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 井上一磨, 木下幸治	4. 巻 26
2. 論文標題 試験体形状・寸法が溶接継手に生じる残留応力に及ぼす影響	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 鋼構造年次論文報告集	6. 最初と最後の頁 781-788
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 小野友暉, 加藤瑳那子, 木下幸治	4. 巻 26
2. 論文標題 areaパラメータモデルを用いたSBHS500鋼母材における疲労限度に関する検討	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 鋼構造年次論文報告集	6. 最初と最後の頁 789-795
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 小野友暉, 木下幸治	4. 巻 25
2. 論文標題 SBHS700鋼母材の疲労強度と疲労き裂進展特性	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 鋼構造年次論文報告集	6. 最初と最後の頁 648 652
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 木下幸治, 鈴木元啓, 小野秀一	4. 巻 25
2. 論文標題 溶接部の残留応力に試験体形状・寸法が及ぼす影響	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 鋼構造年次論文報告集	6. 最初と最後の頁 638 641
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 木下幸治, 阪野裕樹, 秋山竜馬, 半田充	4. 巻 25
2. 論文標題 疲労き裂を有する溶接継手部へのピーニング処理による効果	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 鋼構造年次論文報告集	6. 最初と最後の頁 642 647
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計2件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 Yuki Ono and Koji Kinoshita
2. 発表標題 Enhancing fatigue strength of welded joints using SBHS700 by hammer peening with ICR apparatus and UIT
3. 学会等名 72nd IIW Annual Assembly and International Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuki Ono, Claudio A. Pereira Baptista, Koji Kinoshita and Alain Nussbaumer
2. 発表標題 A reanalysis of fatigue test data for longitudinal as-welded gusset joints
3. 学会等名 72nd IIW Annual Assembly and International Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
--	---------------------------	-----------------------	----