

令和 4 年 4 月 14 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04577

研究課題名(和文) 鋼床版垂直補剛材と縦リブ間の狭隘領域における溶接残留応力分布の解明と耐疲労性向上

研究課題名(英文) Welding Residual Stress and Fatigue Performance Improvement in Narrow Part between Vertical Stiffener and Longitudinal Rib of Steel Plate Deck

研究代表者

廣畑 幹人(Hirohata, Mikihiro)

大阪大学・工学研究科・准教授

研究者番号：50565140

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、疲労き裂の発生が多く報告されている道路橋鋼床版を対象に、特に狭隘な構造の床版端部の垂直補剛材と縦リブの間の領域について、溶接残留応力の性状を解明するとともに耐疲労性の向上を目的とした。対象とする構造をモデル化した小型供試体に対し、局所加熱により溶接残留応力が低減されることを熱弾塑性解析シミュレーションを通じて確認した。溶接のままと局所加熱を施した状態の供試体を用いて疲労実験を実施した。その結果、局所加熱した供試体の疲労寿命が溶接のままに比べ大きく向上する傾向が得られた。なお、疲労寿命の向上効果は作用する繰返し外力の条件の影響を強く受けることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究結果により、局所加熱による溶接残留応力の低減が道路橋鋼床版の端部垂直補剛材とデッキプレートのまわし溶接部に適用可能であることが明確になった。また、局所加熱による残留応力の低減が疲労寿命の向上効果にどのように寄与するのかを明らかにしたことは学術的に大きな意義を有する。また、既存の疲労寿命向上技術と、本研究で注目した局所加熱の疲労寿命向上効果を比較することで、その位置づけを明確にしたことは、実用化に対する具体的な知見を示したものであり、その社会的意義は大きいと言える。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to clarify the characteristics of welding residual stress and to improve fatigue resistance of steel bridge decks in which fatigue cracks are prone to occur, especially in the region between vertical stiffeners and longitudinal ribs at the edge of narrow slabs. Thermal elastic-plastic analysis was performed on a small specimen modeling the target structure to confirm that local heating reduces welding residual stresses. Fatigue tests were performed on the specimens as welded and with local heating. As a result, the fatigue life of the locally heated specimen tended to be significantly longer than that of the as-welded specimen. It was found that the effect of fatigue life improvement was strongly influenced by the condition of cyclic external loads.

研究分野：構造工学

キーワード：溶接 残留応力 疲労 局所加熱

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

社会基盤構造物の経年劣化，損傷が顕在化してきており，適切な維持管理，補修補強により構造物の長寿命化を図ることの重要性が強く認識されるようになってきている．鋼構造物においては，腐食による部材断面の欠損と疲労き裂の発生，進展が主たる損傷として挙げられる．疲労損傷に関しては，特に都市部道路高架橋などに使用される鋼床版の疲労き裂発生事例が多数報告されている．

鋼床版に発生する疲労き裂は多種多様であるが，デッキプレートと縦リブの溶接部(図-1)，縦リブと横リブの溶接部(図-1)，縦リブの突合せ溶接部(図-1)，垂直補剛材とデッキプレートの溶接部(図-1)などで疲労き裂の発生事例が多いことが知られている．デッキプレートと縦リブの溶接部から発生し，デッキプレート板厚方向に進展するき裂については，床版下面からの検出が困難であり，き裂がデッキプレートを貫通した場合に路面陥没の原因となるなど交通に及ぼす影響が大きく，これまで，耐疲労性の向上やき裂の補修方法に関する数多くの検討がなされてきている．

一方，橋軸直角方向の床版端部における垂直補剛材とデッキプレートの溶接部(図-1)においても，疲労き裂の発生事例が数多く報告されている．このき裂についても対策工法が幾つか提示されているが，より簡便で有効な技術の確立が望まれている．このき裂発生個所の構造的特徴として，図-2に示すように，デッキプレートと垂直補剛材のまわし溶接部と，デッキプレート端部の縦リブの溶接線が非常に近接していることが挙げられる．一例として，その間隔は30～100mm程度であり，極めて狭い領域に溶接線が複雑に配置されている場合がある．そのため，疲労き裂発生，進展に大きな影響を及ぼす因子の一つである溶接残留応力が複雑に分布していることが予想される．しかし，方向の異なる複数の溶接線が近接する場合に，どのような，どの程度の溶接残留応力が生じるかは不明である．また，作用外力による応力についても，垂直補剛材と縦リブの互いの拘束により高い応力集中が発生することが予想されるが，その応力集中の程度については不明である．

すなわち，鋼床版のデッキプレートと端部垂直補剛材の溶接部における疲労き裂については，各種因子の影響が複雑であり，き裂の予防や補修に対して，これらの因子の影響の度合いを明確にする必要がある．さらに，極めて狭隘な部位であるため，これまでに提案されている止端処理やピーニングなどのき裂対策は施工が困難な場合があり，狭隘で複雑な部位に対して簡便で有効なき裂対策技術の確立が望まれる．

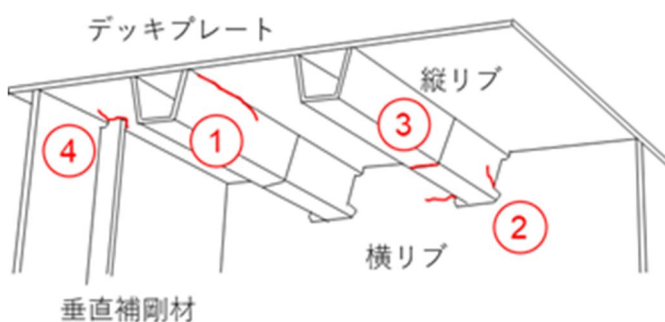


図-1 鋼床版の疲労き裂発生位置

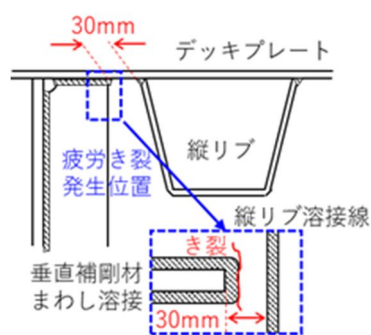


図-2 端部垂直補剛材と縦リブ近接領域の構造

## 2. 研究の目的

上述のように、鋼床版のデッキプレートと端部垂直補剛材の溶接部は、狭い領域に垂直補剛材と縦リブの溶接線が複雑に配置されているため、溶接残留応力がどのように分布しているのか、どの程度の応力集中が発生するかが不明である。そこに、主としてデッキプレートの面外曲げによる圧縮応力が繰返し作用することで発生するき裂に対し、簡便かつ有効なき裂の予防対策技術を提案することを本研究の目的とする。その技術として、比較的低温の局所加熱による溶接残留応力制御技術の有効性を検証する。

## 3. 研究の方法

溶接部における疲労き裂予防技術として、機械的打撃を与えて局所的な塑性変形を発生させ、溶接部に圧縮残留応力を導入するピーニングの有効性が知られており、ピーニングによる疲労き裂の予防に関する研究が積極的に実施されている。しかし、本研究で対象とする鋼床版端部の垂直補剛材と縦リブが近接する領域は、狭隘で複雑な構造のためピーニングのような機械的打撃による工法の適用が容易ではない。これに対し、機械的打撃ではなく局所的な加熱により鋼材を熱膨張させ、これが周

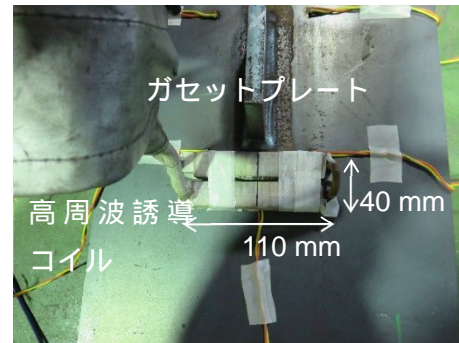


図-3 高周波誘導加熱装置による  
面外ガセット溶接部の加熱状況

辺に拘束されることで圧縮応力が生じるメカニズムを利用し、対象とする溶接部近傍に圧縮残留応力を付与する技術の適用を検討する。この技術は、申請者が既往の研究において提案し有用性を検証しているものであり、面外ガセット溶接部については引張残留応力が低減されることを明らかにしている。この時に用いた熱源は図-3 に示す高周波誘導加熱装置であり、溶接部近傍を 300 程度に加熱すれば圧縮残留応力が導入されることを確認している。本研究で対象とする狭隘な溶接部に対し局所加熱による残留応力の制御が可能か否かを検証するとともに、局所加熱による残留応力制御効果が得られるか、また、溶接部の残留応力の制御により疲労寿命が改善されるかを一連の施工実験および疲労実験により明らかにする。

## 4. 研究の成果

鋼床版の端部垂直補剛材とデッキプレートの接合部を想定したすみ肉まわし溶接部に対し、高周波誘導加熱装置を用いた局所加熱により残留応力の分布を変化させて疲労耐久性を向上させる技術に注目した一連の検討を実施した。局所加熱により残留応力を低減させ、すみ肉まわし溶接継手の疲労耐久性を向上させるために有効となる载荷条件を探索するための基礎的な解析を実施し、その妥当性を実験的に確認した。得られた主な知見を以下に示す。

- (1) 高周波誘導加熱装置を用いて面外ガセット継手のすみ肉まわし溶接部を局所加熱した既往の実験を対象に、熱弾塑性解析による簡易的なシミュレーションを実施した。溶接部を囲う領域を 35 秒で 350 °C まで局所加熱する状態を解析し、残留応力が低減される過程を再現した。
- (2) 溶接のままの状態（加熱なし）と、溶接後に局所加熱を施した状態（加熱あり）から、既往の研究における 4 点曲げ疲労実験の载荷条件を単調载荷で模擬したシミュレーションを実施した。まわし溶接中央の止端部に位置する要素に注目し応力とひずみの履歴を抽出し、最大応力、最小応力およびそれらの中間値である平均応力を求めた。止端部に引張応力、圧縮

応力のいずれが作用する場合でも，対象とした全ての公称応力範囲に対し，加熱なしのモデルに比べ加熱ありのモデルの方が平均応力が低くなった．

- (3) 止端部に引張応力が作用する場合に比べ，圧縮応力が作用する場合の方が加熱なしと加熱ありのモデルの平均応力の差は大きかった．公称応力範囲が大きくなるにつれ，この平均応力の差は小さくなるが，加熱なしのモデルに比べ加熱ありのモデルの方が平均応力の差の減少の割合が小さかった．
- (4) 本解析結果の範囲では，まわし溶接止端部に引張応力が作用する場合に比べ，圧縮応力が作用する場合の方が，相対的に広範な荷条件（公称応力範囲）下で，局所加熱により残留応力を低減させ疲労耐久性を向上させる効果が得られる可能性が示唆された．
- (5) (4)の有効性を検証する目的で，鋼床版デッキプレートと端部垂直補剛材の溶接部を簡易的に模擬した供試体を作製し，局所加熱実験およびまわし溶接止端部に圧縮応力が作用する荷条件で4点曲げ疲労実験を実施した．まわし溶接部に引張応力が作用する既往の研究の荷条件に比べ，圧縮応力が作用する本研究の荷条件の方が，局所加熱を施し残留応力を低減させることにより疲労寿命向上効果が得られる公称応力範囲が相対的に広くなることを示した．
- (6) すみ肉まわし溶接部に局所加熱を施し，残留応力を低減させることで疲労耐久性向上効果が得られるか否かは，対象部位の作用応力状態（引張あるいは圧縮，応力の大きさ）の影響を大きく受ける．局所加熱による残留応力低減を実構造物に適用するには，施工の可否，疲労耐久性向上効果の有無を考慮して対象部位を選定することが重要となる．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 廣畑幹人, 阿二一慶, 鈴木俊光, 小西英明	4. 巻 77-3
2. 論文標題 局所加熱による残留応力の低減がすみ肉まわし溶接継手の疲労耐久性に及ぼす影響	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 土木学会論文集A1 (構造・地震工学)	6. 最初と最後の頁 475-488
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejseee.77.3_475	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3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 HIROHATA Mikihiro, ANI Kazunori, SUZUK Toshimitsu, KONISHI Hideaki
2. 発表標題 Application of local heating for reduction of welding residual stress in steel structural members
3. 学会等名 The 73rd Annual Assembly and International Conference on Welding, International Institute of Welding (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 阿二一慶, 廣畑幹人, 鈴木俊光
2. 発表標題 溶接線近接領域における残留応力分布に関する基礎的検討
3. 学会等名 2020年度土木学会関西支部年次学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 阿二一慶, 廣畑幹人, 鈴木俊光, 小西英明
2. 発表標題 鋼床版の端部垂直補剛材における局所加熱による残留応力低減効果の検証
3. 学会等名 溶接学会令和2年度秋季全国大会
4. 発表年 2020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
--	---------------------------	-----------------------	----

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