

34. IH装置を用いた加熱による鋼溶接部の疲労寿命向上に関する 基礎的検討

名古屋大学大学院
名古屋大学大学院
名古屋大学大学院
日本橋梁株式会社

○中村 将章
Aung May Phyo
廣畑 幹人
小西 日出幸

1. はじめに

橋梁に代表される社会基盤構造物の高経年化に伴い、多数の損傷や劣化の事例が報告されている。鋼構造物においては、疲労き裂の発生と腐食による部材の板厚減少が主たる損傷の要因となっている^{1,2)}。疲労き裂は応力集中の度合いが大きい溶接部において発生することが多く、き裂が主部材まで進展すると構造物の機能や安全性の低下をもたらす。このため、疲労き裂の発生を防止する技術に関する研究が広く実施されてきている。例えば、溶接部に局所的な塑性変形を与え、周辺の母材が変形を拘束することで溶接部に圧縮残留応力を導入するピーニングに関する研究などが実施されている^{3),4),5)}。一方、通常の溶接材料を用いると、溶接時の冷却過程における溶接金属の収縮を周辺の母材が拘束することで引張残留応力が生じるが、冷却過程の比較的低温の領域で変態膨張する特徴を有する低温変態溶接材料と呼ばれる特殊な材料を用いることで、溶接部に圧縮残留応力を生成させる方法も検討されている⁶⁾。いずれの方法も、溶接部の残留応力が疲労寿命に大きく影響することから、溶接部の引張残留応力を圧縮に転じさせ疲労寿命の向上を図るものである。しかしながら、ピーニングなどの機械的処理方法では、溶接部を直接打撃する必要があり狭隘で複雑な継手に対しては施工難度が高くなる問題がある。また、開発段階にある低温変態溶接材料は圧縮残留応力導入効果が得られる反面、非常に硬い性質を有し、疲労以外の特性や施工性に課題があり実施工への本格的な適用には至っていないのが現状である。

これに対し、本研究では異なる残留応力制御方法として、溶接部近傍を加熱し、付加的な残留応力を溶接部に重畳させることで残留応力分布を制御することを考える。そのための熱源として、高周波誘導加熱装置（Induction Heating, IH）を採用した。IH装置は、電流を印加したコイルを鋼部材に接近させ、誘導電流を部材に発生させその抵抗

熱で鋼材自身の温度を上昇させる方法である。この方法では数秒程度の短時間で鋼材の温度を上昇させることができる^{7),8),9)}。IH装置では、ピーニングなどの機械的処理方法が適用できない狭隘で複雑な溶接継手に対しても残留応力を制御できる可能性があり、既設構造物に対する疲労寿命向上技術の選択肢となり得るものと考えられる。本研究では、IH装置による溶接部近傍の加熱により溶接残留応力を制御し、溶接部の疲労寿命を向上させる手法の有用性を検証するための基礎的検討を実施した結果を報告する。

2. 実験方法

2.1 実験供試体

本研究では、鋼橋において疲労き裂の発生事例が多い面外ガセット溶接継手を供試体として用いた。供試体の形状および寸法を図-1に示す。板厚12mmのSM400A鋼板（降伏応力：293MPa，引張強度：441MPa）を用い、幅300mm，長さ540mmのベースプレートに幅80mm，長さ120mmのガセットプレートをCO₂半自動溶接（溶接ワイヤ：490MPa級，直径1.2mm）で接合した。

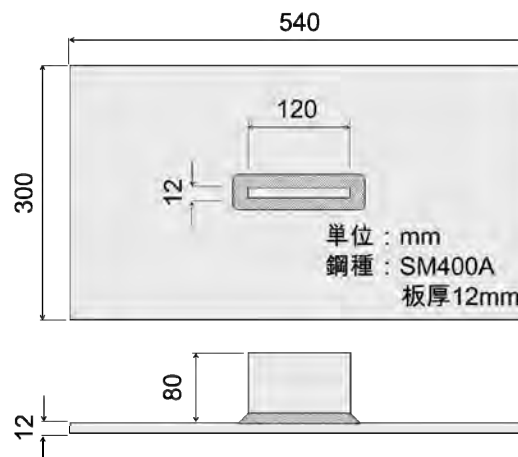
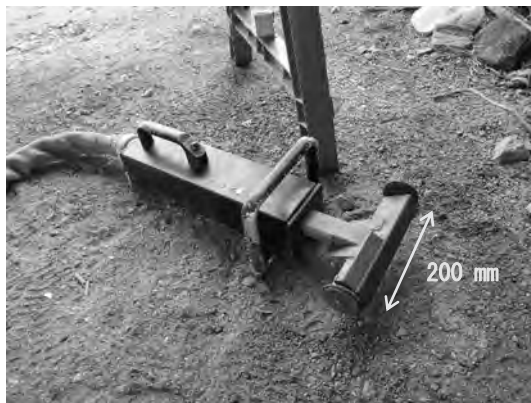


図-1 実験供試体



(a) IH装置主機



(b) インダクションヘッド

図-2 IH装置（防食塗装剥離用）

2.2 加熱装置

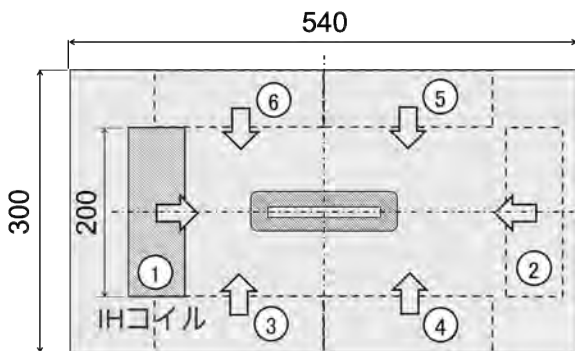
本研究では、鋼橋の防食塗装剥離用の IH 装置（図-2）を利用して供試体の溶接部近傍を加熱した。この装置は400 Vの IH ユニット用発電機と200 Vの冷却水供給ユニット用発電機を有し、20 mのケーブル先端に可搬型のインダクションヘッドを取り付けたものである。インダクションヘッドの幅は200 mmであり、電流を印加したコイルを鋼材に近接させると鋼材に誘導電流による抵抗熱が生じ、数秒から1分未満の通電で鋼材の温度を300 °C程度まで上昇させることができる⁹⁾。

2.3 加熱条件

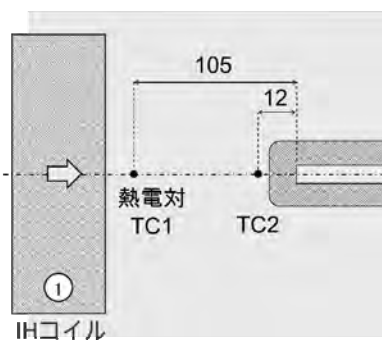
IH装置による供試体の加熱順序および熱電対位置を図-3に示す。幅200 mmのインダクションヘッドを供試体端部から溶接部に向かって、約14 mm/sで移動させながら加熱した。加熱は図の①～⑥の順に実施し、非接触温度計と供試体に取り付けた熱電対（TC1 および TC2）により温度を管理した。加熱においては鋼材の機械的性質の変状が生じない温度¹⁰⁾として、250 °C を目標とした。

3. 実験結果

3.1 温度履歴

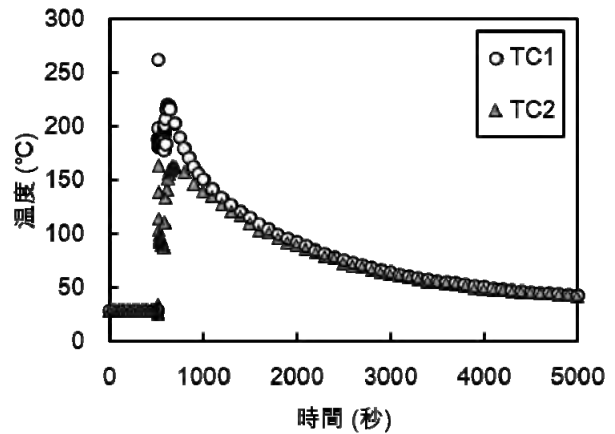


(a) 加熱順序

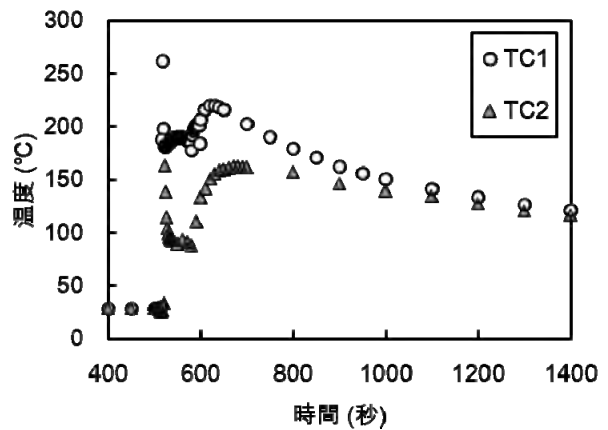


(b) 熱電対位置

図-3 供試体の加熱順序および熱電対位置

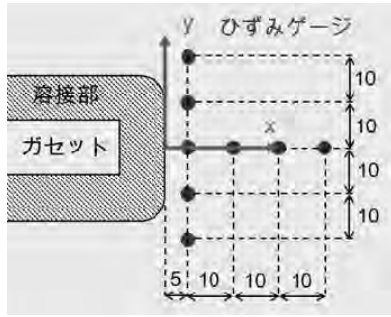


(a) 全過程

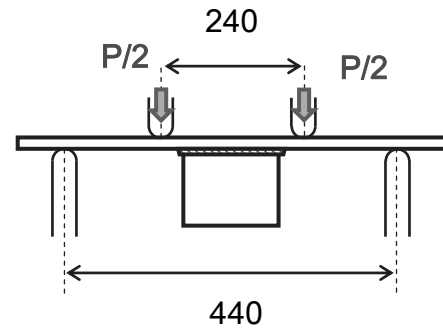


(b) 高温時

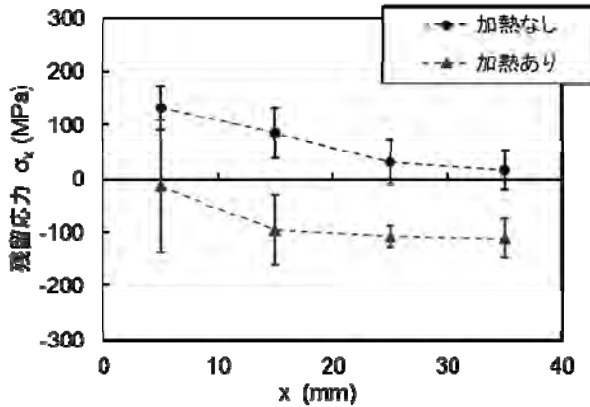
図-4 温度履歴



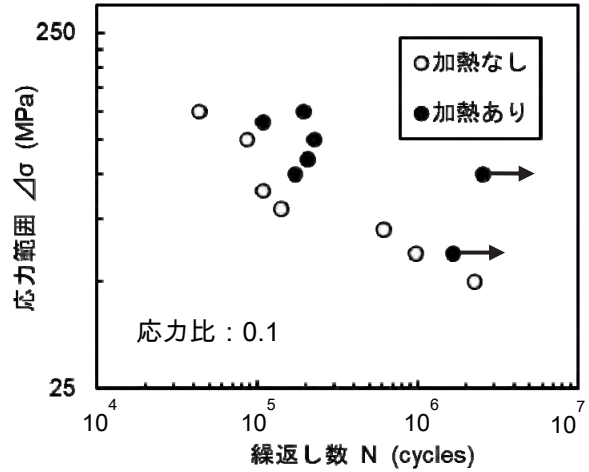
(a) 測定位置



(a) 4点曲げ载荷方法

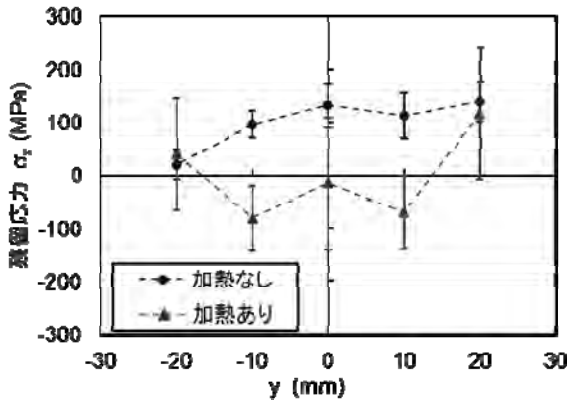


(b) x 軸に沿う方向の応力分布



(b) 疲労寿命

図-6 疲労実験結果



(c) y 軸に沿う方向の応力分布

図-5 残留応力測定結果

このような加熱順序を設定した理由について、①側のまわし溶接部を対象に説明する。まず、①の加熱により、被加熱部を膨張させる。この膨張を被加熱部周辺の温度の低い部分が拘束するため、被加熱部に圧縮応力が導入されると考えた。その後、冷却過程では引張応力が生じると予想されるが、加熱前に導入されていた溶接による引張残留応力の値よりも低減されることを期待した。③～⑥の加熱では、加熱から冷却後に被加熱部には引張残留応力が生じ、この引張残留応力に対し合うように被加熱部からやや離れた位置に圧縮応力が生じると予想されるため、この圧縮応力

がまわし溶接部に重畳されることを期待した。

熱電対により計測した温度履歴を図-4に示す。図-4(a)は加熱から冷却終了までの全過程であり、図-4(b)は加熱過程を中心に高温時を抽出し示している。ガセットプレートから離れた位置に取り付けた熱電対 TC1 の直上近傍をコイルが通過する時に温度が約 260°C に達した。まわし溶接止端部に取り付けた熱電対 TC2 では、コイルが近接した時の温度は約 160°C であった。これは、インダクションヘッド加熱面の縁端部はコイルがなく、TC2 の近傍では溶接ビード部が十分に加熱できていないためと思われる。②以降の加熱は TC1 および TC2 の位置の温度にほとんど影響しなかった。

3.2 残留応力測定

加熱前および加熱後の供試体のまわし溶接部近傍にひずみゲージを貼り付け、ゲージ周辺を切断し解放されるひずみを計測することで、残留応力を測定した(応力弛緩法)。得られた残留応力分布を図-5に示す。測定結果は2つの供試体の2箇所のまわし溶接部の応力の平均値および標準偏差を示している。すなわち、1つのデータは4つの測定値の平均値である。また、ここではまわし溶接止端部に沿って発生する疲労き裂を想定し、き裂発生および進展に影響を及ぼす x 方向の応力成分

に注目する。まわし溶接部近傍に生じていた引張残留応力が、IH 装置による加熱後に低減し圧縮に転じている傾向が確認された。

3.3 疲労実験

加熱前および加熱後の供試体を用いて 4 点曲げ疲労実験を実施した。4 点曲げ载荷状況を図-6(a)に示す。なお、まわし溶接止端部から 5 mm 離れた位置にひずみゲージを貼り付け、繰返し载荷時のひずみ振幅をモニターした。止端部に疲労き裂が発生、進展するとひずみ振幅が初期値から減少するため、この減少率が 5 %に達した時点を実験における疲労寿命と定義した。疲労実験結果を図-6(b)に示す。IH 装置を用いて加熱した供試体は、加熱なしの供試体に比べ耐疲労性が向上した。応力範囲が 125MPa 以下の条件では、加熱した供試体の疲労寿命は加熱なしの場合の 1.6~2.6 倍程度となった。また、1 体だけではあるが、応力範囲 100MPa の場合は、加熱した供試体は 250 万回以上の繰返し荷重荷を行ってもき裂が発生しなかった。耐疲労性の向上は加熱による引張残留応力の低減に起因するものと推察されるが、残留応力の低減メカニズムについては実験のみでは検証が困難である。よって、熱弾塑性解析によるシミュレーションを実施し、IH 装置による加熱が残留応力に及ぼす影響を検討する。

4. 熱弾塑性解析によるシミュレーション

4.1 解析モデルおよび解析方法

IH 装置を用いた溶接部近傍の加熱が溶接残留応力に及ぼす影響を検討するため、有限要素法に基づく熱弾塑性解析を実施した。解析モデルを図-7に示す。汎用有限要素解析ソフト ABAQUS Ver. 6.14 を使用し、8 節点ソリッド要素を用いてモデルを構築した。材料の機械的性質および物理定数の温度依存性は既往の文献を参照した^{11),12)}。なお、本解析では溶接入熱ではなく IH 装置による加熱

要素：8 節点ソリッド要素

力学的境界条件：剛体変位のみ拘束

熱的境界条件：空气中への熱伝達

物性値：温度依存型

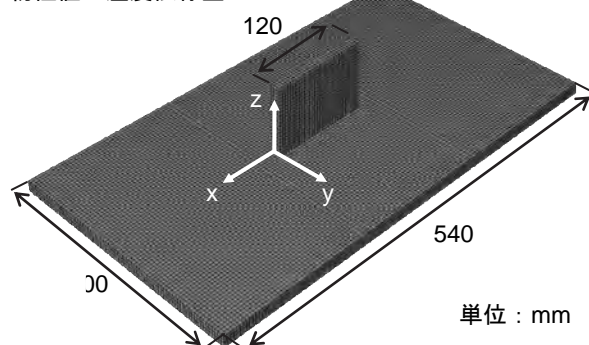
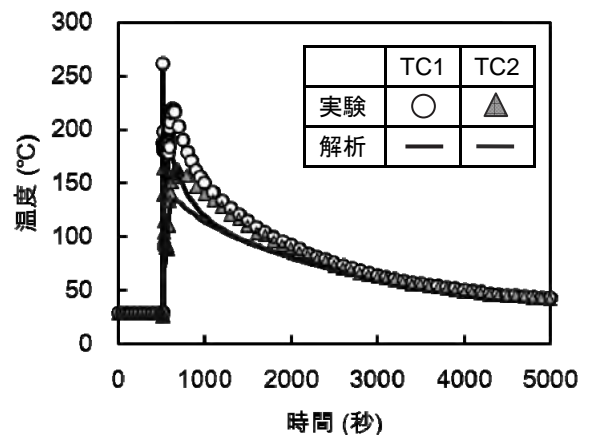


図-7 熱弾塑性解析モデル

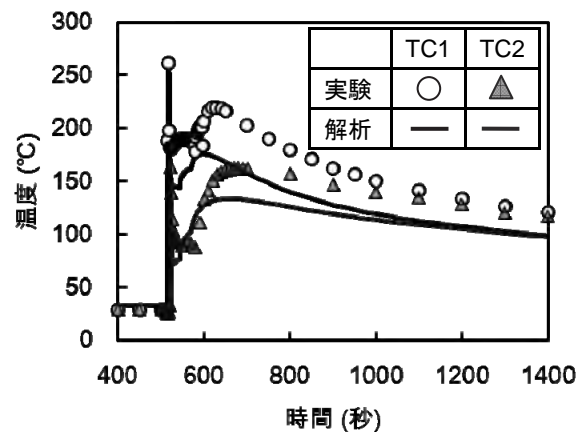
に注目する。このため、溶接ビードはモデル化せず、溶接ビードに相当する位置の要素表面から仮想的な大きさの熱流束を与え、溶接残留応力分布を簡易に再現した。その後、図-3(a)に示す IH 装置による加熱順序を模擬し、モデル表面の幅 200 mm の範囲に対し図の①~⑥の順に入熱を与えた。入熱量の大きさは図-4に示す実験で得られた温度履歴が再現できるように調整し決定した。

4.2 解析結果

IH 装置による加熱順序を模擬した温度履歴の再現結果を図-8に示す。熱電対 TC1 および TC2 で測定した温度履歴に比べ解析はやや温度が低い、その傾向は概ね再現することができた。また、溶接部近傍の残留応力分布の解析結果を図-9に示す。本解析では、溶接の過程は簡素化し仮想的な入熱を与えたが、溶接部近傍の溶接線直交方向の応力成分 σ_x の分布傾向を概ね再現することができた。また、IH 装置による加熱を模擬した入熱を解析モデルに与えることで、溶接により生じた引張残留応力が約 50 MPa 低減される傾向が再現できた。解析では実験結果に比べ残留応力の低減効果が小さいが、これは、図-8の温度履歴の比較でも示されるように、解析で与えた入熱量が小さかったことが原因と推察される。



(a) 全過程



(b) 高温時

図-8 実験および解析による温度履歴の比較

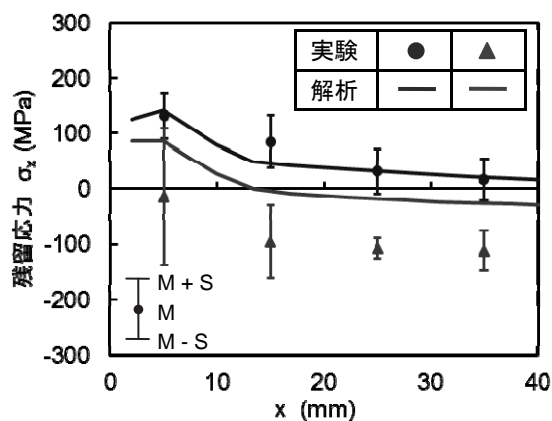
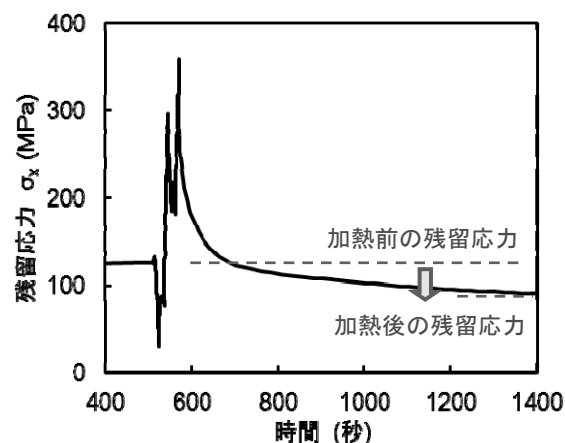
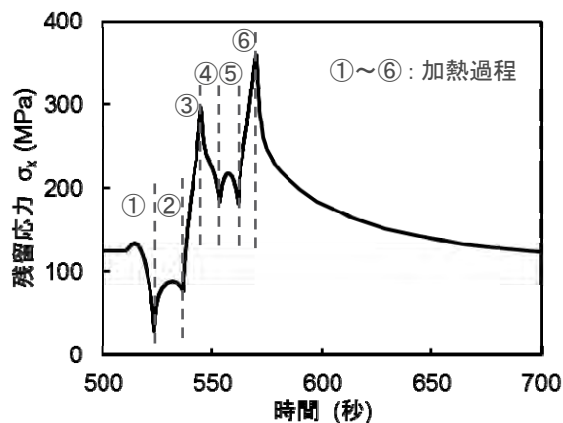


図-9 実験および解析による残留応力の比較



(a) 加熱—冷却過程



(b) 加熱過程

図-10 溶接部に相当する要素の応力履歴

IH装置を用いた加熱により溶接残留応力が変化した理由について検討するため、①側(図-3(a)の左側)のまわし溶接部に注目し、溶接部に相当する要素($x = 2 \text{ mm}$, $y = 0 \text{ mm}$, 鋼板表面側の要素)の溶接線直交方向の応力成分 σ_x の履歴を図-10に示す。①の加熱過程において、引張応力が低下していることが分かる。これは、3.1で述べたように被加熱部の熱膨張を周辺の低温部が拘束し、非加熱部に圧縮応力が作用すると想定し加熱した結果

の妥当性を示唆している。その後、②の加熱過程では①側はほとんど温度上昇しない。この間に①側の非加熱部は冷却するとともに収縮し、周辺がこれを拘束することで再び応力は上昇する。しかし、被加熱部と周辺の温度差は①の加熱過程の間よりも小さくなっているため、応力の上昇割合はさほど大きくない。続いて、③~⑥の加熱では、冷却後に被加熱部に生じると想定される引張残留応力に対しつり合うように被加熱部からやや離れた位置に圧縮応力が生じると予想し、この圧縮応力がまわし溶接部に重畳されることを期待した。しかし、最終的な被加熱部がまわし溶接部に近付きすぎたため、圧縮応力がまわし溶接部に効果的に重畳されず応力の低減効果がさほど得られなかったと推察される。しかし、加熱前の溶接による引張残留応力の値からは加熱後は応力が低減されており、定性的ではあるが実験による応力低減の傾向が説明できると考えられる。

今後は、入熱方法の再検証により解析精度の向上を目指すとともに、まわし溶接部の引張残留応力をより効果的に低減させるための最適な加熱条件(温度、位置)を明確にすることを課題とする。

5. まとめ

IH装置による溶接部近傍の加熱により溶接残留応力を制御し、溶接部の疲労寿命を向上させる手法の有用性を検証するための基礎的検討を実施した。得られた主な知見を以下に示す。

- (1) 面外ガセット溶接継手を対象にIH装置による加熱を施し、まわし溶接部近傍の引張残留応力を低減する加熱順序を提示するとともに、その妥当性を検証した。
 - (2) 4点曲げ疲労実験を行った結果、まわし溶接部近傍を加熱した継手は無加熱の継手に比べ耐疲労性が向上した。本研究では、溶接部近傍のひずみ振幅が初期値から5%低下した時点疲労寿命と定義したが、応力範囲が125 MPa以下の条件では、加熱した供試体の疲労寿命は加熱なしの場合の1.6~2.6倍程度となった。また、1体だけではあるが、応力範囲100 MPaの場合は、加熱した供試体は250万回以上の繰返し载荷を行ってもき裂が発生しなかった。
 - (3) IH装置による加熱が残留応力の低減に及ぼす影響を検証するため、熱弾塑性解析によるシミュレーションを実施した。まわし溶接部の引張残留応力が低減される機構を解析により定性的に説明することができた。
- 今後は、入熱方法の再検証により解析精度の向上を目指すとともに、まわし溶接部の引張残留応力をより効果的に低減させるための最適な加熱条件(温度、位置)を明確にすることを課題とする。

参考文献

- 1) 玉越隆史・横井芳輝・石尾真理：全国規模の道路橋点検データに基づく鋼橋の劣化の特徴，鋼構造論文集，Vol. 21，No. 82，pp.99-113，2014
- 2) 横山薫・小西拓洋・三木千壽：鋼橋の疲労損傷と補修事例のユーザー参加型データベースの構築とその分析，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol. 73，No. 1，pp. 126-145，2017
- 3) 森影康・中西克佳・伊木聡・中野隆：母材打撃ハンマーピーニングによる溶接継手の疲労強度向上機構，溶接学会論文集，Vol. 33，No. 2，pp. 111-117，2015
- 4) 島貫広志：超音波衝撃処理による溶接継手の疲労寿命向上効果に及ぼす影響因子，溶接学会誌，Vol. 85，No. 2，pp.10-18，2016
- 5) 崎野良比呂・吉川健一・佐野雄二・角谷利恵・金裕哲：レーザピーニングを大型構造物に適用するための基礎的検討，溶接学会論文集，Vol. 31，No. 4，pp.231-237，2013
- 6) 志賀千晃・平岡和雄：低変態温度溶接材料を利用したの高張力鋼溶接部疲労強度向上技術，溶接学会誌，Vol. 85，No. 8，pp.10-28，2016
- 7) 岡部次美・吉川博・小野秀一・中村順一：IH（電磁誘導加熱）による鋼橋の塗膜除去工法，日本橋梁・鋼構造物塗装技術協会第17回技術発表大会予稿集，2014
- 8) 柿添智之・瀧本一也・中山太士・坂本達朗・廣畑幹人：鋼鉄道橋の塗膜除去に対する高周波誘導加熱の適用性検討，鋼構造年次論文報告集，Vol. 24，pp.723-728，2016
- 9) 小西日出幸・鈴木直人・田中正裕・鮫島力・西谷朋晃・廣畑幹人：許田高架橋補修工事におけるIH装置による塗膜剥離工法の適用，橋梁と基礎，第51巻第7号，pp.14-20，2017
- 10) 土木学会鋼構造委員会 火災を受けた鋼橋の診断補修技術に関する研究小委員会：火災を受けた鋼橋の診断補修ガイドライン，土木学会鋼構造シリーズ24，2015
- 11) 中川弘文，鈴木弘之：鋼梁の崩壊温度，鋼構造論文集第6巻第22号，pp. 57-65，1999
- 12) 金 裕哲，李 在翼，猪瀬幸太郎：すみ肉溶接で生じる面外変形の高精度予測，溶接学会論文集第23巻第3号，pp. 431-435，2005

謝辞

本研究の一部は，一般社団法人日本建設機械施工協会平成27年度研究開発助成を受けて実施した。ここに記して謝意を表す。