

平成 30 年 6 月 13 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14297

研究課題名(和文) 鋼橋の補修溶接を支援する小型・可搬型高周波誘導加熱による予熱・後熱システムの開発

研究課題名(英文) Development of heat treatment system by small and portable induction heating device for repair weld of steel bridge

研究代表者

廣畑 幹人(Hirohata, Mikihiro)

名古屋大学・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) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：腐食や疲労により損傷した土木鋼構造物を補修する際、補修部材の取付けにはボルト接合が適用されることが多い。重量増加、狭隘部での施工難度といったボルト接合の課題を解決するため、本研究では、溶接を適用することを想定する。溶接を補修に適用する場合、ボルト接合と比較して重量増加が少なく、穿孔の工程が省略できる。また、狭隘な部位での施工性が良好である。ただし、溶接入熱に伴う残留応力が補修部材の力学性能に悪影響を及ぼすことが想定される。この残留応力を低減するため、現場で使用できる小型・可搬型の高周波誘導加熱装置による熱処理の適用性を検討するため、一連の実験および数値シミュレーションを実施した。

研究成果の概要(英文)：It is general that bolting is applied on repair and reinforcement of steel structures damaged by corrosion or fatigue. Bolting as a repair joining method has demerits like as weight increase and difficulty of work at narrow part. This study assumes application of welding on repair and reinforcement of steel structures because welding may control the weight increase and have better workability at narrow part compared with bolting. However, welding residual stress possibly affects the structural performance of repaired members. Therefore, heat treatment by small and portable induction heating device for reduction of welding residual stress was investigated in this study. A series of experiment and numerical analysis was performed on patch joints simulating repair on damaged steel structural members. In this repair welding, a method for reducing residual stress by the portable induction heating device was proposed.

研究分野：構造工学，鋼構造学，溶接工学

キーワード：鋼橋 補修 溶接 残留応力 熱処理

1. 研究開始当初の背景

腐食や疲労により損傷した鋼構造部材に対する補修方法の一つとして、鋼板の当て板補修が広く用いられる。接合強度のばらつきが小さいこと、施工管理が容易であることなどから、当て板の接合方法として現在は主に高力ボルトによる接合が採用されている。しかし、健全部への穿孔、ボルト、ナット分の重量の増加、狭隘部での施工難度などが問題となる場合がある。特に、前述のように腐食が発生しやすい桁端部などの狭隘部では、ボルトによる当て板の接合が困難となる。そこで、異なる接合方法として溶接の適用が考えられるが、既設構造物の損傷部位を補修する際の現場溶接では、工場での新規部材製作に比べ施工難度が高く、適切な溶接条件でないと溶接欠陥や割れが生じる可能性がある。また、補修後の継手部における疲労き裂の発生や局所的な加熱冷却による変形、残留応力の発生などが問題となる。さらに、一般に溶接継手部の不連続性に基づく応力集中や溶接残留応力が疲労強度の低下に影響を及ぼすことが明らかになっている。以上のことから、当て板補修に溶接が用いられる例は少ないのが現状であるが、穿孔作業が不要でボルトなどの分の重量増加がないこと、狭隘部での施工性が良いことなどの観点から、補修部位によっては溶接による接合が有利な場合があると考えられる。ただし、溶接による補修を適用するうえでは、溶接の品質を確保し、補修部材の力学性能に及ぼす残留応力を抑制することが必要となる。

2. 研究の目的

本研究では、溶接による補修作業を支援することを目的に、特に溶接残留応力を低減するため、現場で使用できる小型・可搬型の高周波誘導加熱装置の適用性を検討した。すなわち、狭隘で複雑な構造でも適用できる加熱装置を用いて補修溶接部の熱処理を行い、被補修部の残留応力を抑制するための熱処理条件を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

当て板補修を模擬した継手モデルを対象に実験および熱弾塑性解析を行い、小型の高周波誘導加熱装置を用いた熱処理により補修溶接部の残留応力を低減する手法を提案した。

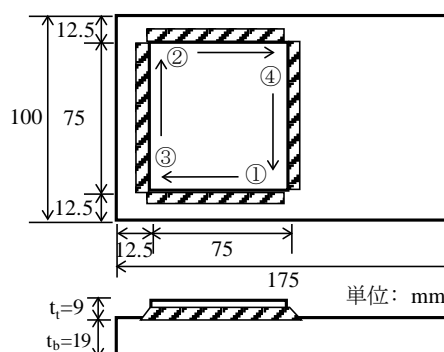
4. 研究成果

(1) 溶接継手モデル

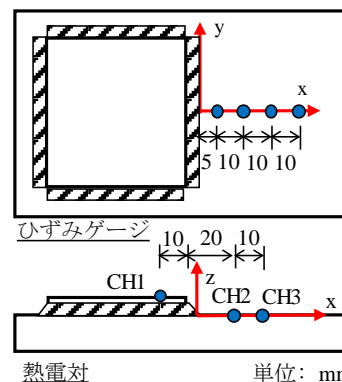
本研究では、形状が当て板継手に類似していることから、JIS Z 3154 に規定される重ね継手溶接割れ試験を基に供試体を作製した。実験に用いた供試体寸法および溶接順序を図-1 に示す。100 mm×175 mm×19 mm の母板と 75 mm×75 mm×9 mm の当て板をすみ肉溶接により接合した。

当て板と母板には SM400A、溶接ワイヤに

は JIS Z 3211 YGW12 に規定される引張強度 490 MPa 級の材料を使用した。当て板の溶接順序については、はじめに当て板の四隅を組立溶接により固定し、その後片側 1 パスのすみ肉溶接を実施した。また、各パス間において 10~15 分の冷却時間を設け、供試体が室温まで冷却されてから各ビードが溶接されるようにした。入熱量は 400 J/mm (電流 $I=100$ A、電圧 $E=20$ V、溶接速度 $v=4.5\sim 5.0$ mm/s) とし、CO₂ 半自動アーク溶接により溶接を行った。溶接中は図-1 示す位置に貼付した熱電対により温度履歴の測定を行った。また、溶接終了後、常温まで冷却した供試体の溶接ビード④近傍に二軸ひずみゲージを貼付した。コンターマシンを用いてひずみゲージ周辺を一边 10 mm 程度の小片に切り出し、切断に伴い解放されるひずみから残留応力を測定した。



(a) 形状および寸法



(b) 熱電対およびひずみゲージ位置

図-1 実験供試体

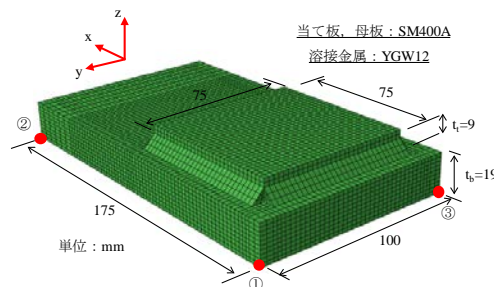


図-2 熱弾塑性解析モデル

(2) 熱弾塑性解析によるシミュレーション

熱弾塑性解析による当て板溶接実験のシミュレーションを実施した。作成した有限要素モデルを図-2に示す。解析モデルの作成には汎用有限要素解析ソフト Abaqus Ver. 6.14を使用し、8節点低減積分ソリッド要素を用いた。物理定数および機械的性質については既往の研究を参考にし、実験で用いた鋼板の特性を考慮した温度依存データを使用した。また、力学的境界条件としてモデルの剛体運動のみを拘束し、熱的境界条件として外表面から空気中への熱伝達を考慮した。

溶接金属（入熱要素）の形状は、当て板溶接実験で得られた溶接ビードの断面マクロ写真を参照して決定した。アーク熱源の移動による溶接金属の供給を再現した。

当て板溶接実験および熱弾塑性解析により得られた最終パス④本におけるCH1からCH3の温度履歴の比較を図-3に示す。実験結果と解析結果がよく一致することが図より確認できる。

当て板溶接実験および熱弾塑性解析により得られたx軸方向の応力分布を図-4に示す。母板上表面の応力を実線、当て板部分における当て板と母板それぞれの板厚方向の平均応力を破線で示している。また、赤色が σ_x 、青色が σ_y を表している。図より、解析結果は実験値の範囲内に概ね収まっており、溶接線近傍の残留応力を精度よくシミュレーションできていることがわかる。

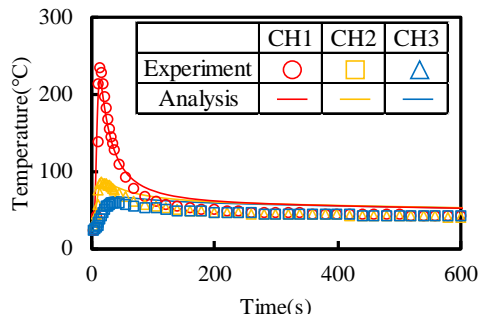


図-3 温度履歴

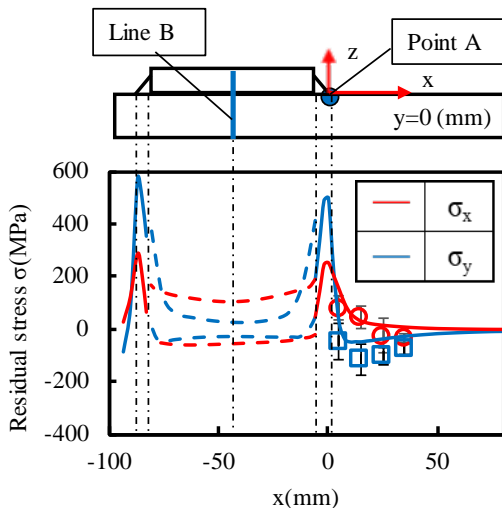


図-4 残留応力

(3) 熱処理による残留応力の低減

溶接残留応力の有効な処理方法の一つとして溶接後熱処理 (Post-Weld Heat Treatment) が挙げられる。溶接後熱処理は溶接部を適当な温度に保持し、残留応力を除去する方法である。金属は高温になると降伏点が著しく低下し、それにより塑性ひずみが生じやすくなる。また、降伏点以下においても応力をかけた状態で高温に放置すると、クリープ変形により応力が緩和する方向に塑性ひずみが生じる現象が起こる。これらのメカニズムにより、溶接部を適当な高温に保持することで残留応力を除去することが可能である。

溶接後熱処理方法の種類は炉内加熱と局部加熱のいずれかに分類される。土木構造物のように大型で構造物全体を加熱炉内で熱処理することが困難な場合や、継手を現場で溶接する際には一般に後者が用いられる。局部加熱による熱処理では、被熱処理部の溶接部を中心とした所定の範囲を、帯状電気ヒータや高周波誘導コイルなどの加熱装置を用いて、所定温度で所定時間加熱を行う。しかし、局部的な加熱は構造物中に温度差を生じさせることになり、新たな残留応力を発生させる可能性があるため、加熱範囲や保温方法などの施工条件に注意する必要がある。

本研究では、残留応力の低減方法として溶接後熱処理に注目し、高周波誘導加熱装置を使用した。高周波誘導加熱では、まず、加熱用コイルに交流電流を印加し、金属（被加熱部）に電流を誘起する磁界を発生させ、金属内に渦電流を誘起させる。この渦電流と金属の電気抵抗によりジュール熱が発生し、金属が自己発熱するという仕組みである。したがって、加熱用コイルではなく被加熱部自体が発熱するため、熱損失が小さく加熱効率が高い。また、外部から被加熱部へ熱を加える必要がないため、作業現場の温度上昇や排ガスの排出を防ぐことが可能であり、クリーンな熱源として注目されている。さらに、現場における溶接後熱処理では、加熱領域や時間、温度を精度よくコントロールすることが求められるが、加熱コイルの形状の自由度や高周波電源の出力制御により容易な温度管理が可能といった利点からも、高周波誘導加熱装置が現場での熱処理に適していると考えられる。

本研究では、JIS Z 3700に規定される局部加熱による溶接後熱処理方法に基づいて後熱処理実験を実施した。実験に用いた供試体寸法は図-1と同様とし、溶接ままの供試体と熱処理供試体の結果を比較した。

加熱コイルは図-5に示す100 mm×200 mmのものを使用し、母板下面より加熱を行った。実験中は図-6に示すように供試体の周囲を厚さ約25 mmの断熱材で覆い、空気中への放熱を遮断した。また、貼付した熱電対により供試体の温度をモニターし、外部信号により出力電源を制御することで、加熱速度をコントロールした。

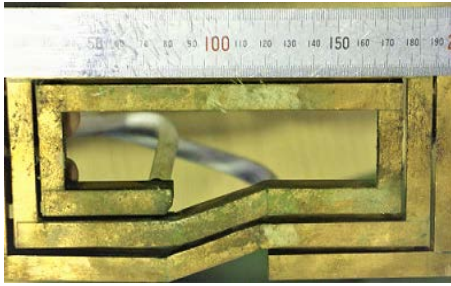


図-5 加熱コイル

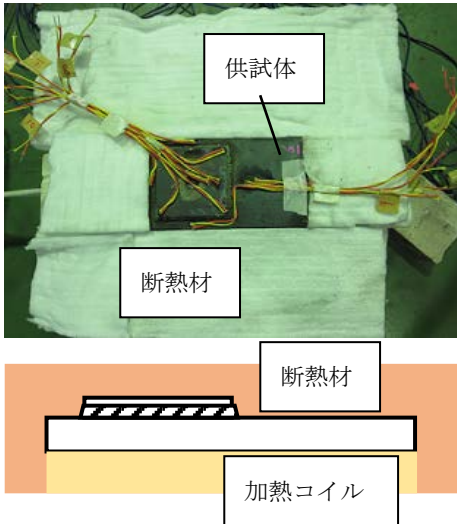


図-6 熱処理実験状況

一方、図-2に示す熱弾塑性解析モデルを用いて溶接後熱処理シミュレーションを実施した。本節で行うシミュレーションは、溶接パートと熱処理パートの2つに分かれている。溶接パートでは図-3に示す温度履歴を再現する溶接入熱をシミュレーションした。熱処理パートでは、後熱処理実験から得られた温度履歴を解析モデルに与えた。すべての温度測定点において温度履歴がほぼ一致していたため、後熱処理中は供試体内の温度が同様であったと考え、解析モデルでは節点温度を境界条件として与えることによって実験の温度履歴を再現した。また、熱処理パートでは、温度400℃以上で発生するクリープひずみを新たに導入した。

実験および熱弾塑性解析により得られた熱処理後におけるx軸方向の残留応力分布を図-7(a)に示す。母板上表面の応力を実線、当て板部分における当て板と母板それぞれの平均応力を破線で示している。図より、解析結果は実験値の範囲内に概ね収まっており、後熱処理による応力の低減を精度よくシミュレーションできていることがわかる。

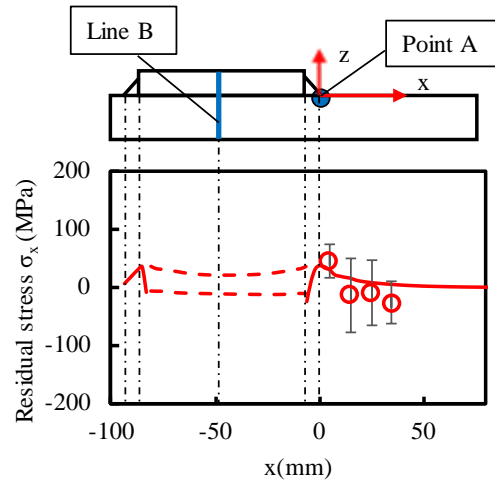
熱処理供試体と溶接ままの供試体の応力分布の比較を図-7(b)に示す。溶接後熱処理により、溶接止端部 (Point A) の引張応力は約250 MPaから約38 MPaとなり、約85%低減

された。次に、当て板中央部 (Line B) に着目する。当て板の平均応力は、約100 MPaから約22 MPaとなり約78%低減された。母板の平均応力は、約50 MPaから約12 MPaとなり約76%低減された。

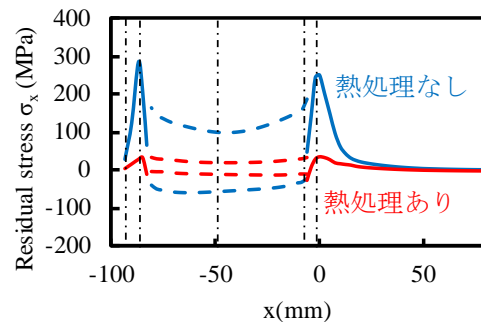
以上より、高周波誘導加熱を用いた局部加熱による後熱処理は、溶接止端部のみならず、当て板および当て板に覆われた部分の母板に発生する応力の低減にも効果的であることが明らかとなった。

(4) 残留応力の低減が耐荷性能に及ぼす影響

溶接後熱処理による圧縮残留応力の低減が当て板溶接継手の圧縮挙動に及ぼす影響について検討を行うため、圧縮実験を実施した。これまでの検討で用いた供試体をもとに、当て板の寸法を75 mm×75 mm×9 mm、母板の寸法を250 mm×100 mm×19 mmとした。また、実構造物において、腐食による減厚などが生じた箇所への当て板補修を想定し、母板中央に65 mm×65 mm×9.5 mmの減厚領域を設けた。溶接後熱処理による残留応力の低減効果を検討するため、溶接ままの供試体と熱処理供試体をそれぞれ用いて比較を行った。当て板の溶接条件は表-1に、後熱処理条件は表-2に示すものと同じである。また、図-8に示すように、当て板中央の水平変位、ジグ上部の鉛直変位 (2箇所) を計測した。



(a) 熱処理供試体



(b) 熱処理有無の比較

図-7 熱処理残留応力分布

実験から得られた荷重-変位関係を図-9 に示す。溶接ままの供試体 (As-weld) の最大荷重は約 402 kN, 熱処理供試体 (PWHT) では約 416 kN であり, 残留応力の約 67~79% の低減による最大荷重の増加は約 3.5% であった。したがって, 当て板溶接で生じた残留応力の低減は, 最大荷重の向上にはほとんど寄与しないことがわかる。本実験で得られた結果は, 既往の研究に示されている, 残留応力が静的強度に及ぼす影響は小さいという傾向と一致している。これは, 残留応力はそれぞれの断面において自己平衡 (引張応力と圧縮応力が釣り合っている) しており, 残留応力を有する材料が静的荷重によって全断面降伏するための荷重が, 残留応力のない場合と等しいためであると考えられる。

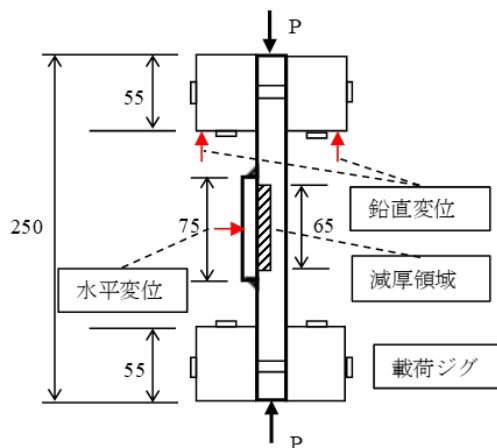


図-8 圧縮荷重載荷方法

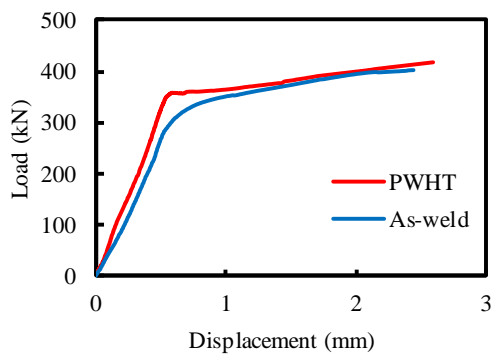


図-9 荷重 - 変位関係

また, 熱処理供試体は約 360 kN で降伏しているのに対し, 溶接ままの供試体では降伏が不明確であり, 比較的小さい荷重域で水平および鉛直剛性の低下が観察された。これは, 母板に発生した圧縮残留応力により, 鋼材の降伏点以下のレベルの外部荷重において断面の一部が降伏したためと考えられる。

以上より, 熱処理による当て板継手の残留応力低減は, 母板の降伏を遅らせるのに効果的であることが明らかになった。しかし, 現場での熱処理では, 部材全体を一様な温度に加熱することは困難である。また, 周辺部材の拘束により当て板部分に変形が生じる可

能性があるため, 適切な熱処理条件による加熱が必要不可欠である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

報告書作成時点において, 国内雑誌への投稿 1 件を予定している。

[学会発表] (計 2 件)

- (1) 勝田裕仁, 廣畑幹人: 当て板溶接で生じる残留応力の特徴と熱処理による応力低減に関する研究, 日本材料学会東海支部第 12 回学術講演会, 107, 2018.3.
- (2) 勝田裕仁, 廣畑幹人: 当て板継手の耐荷性能に及ぼす溶接残留応力の影響, 第 20 回応用力シンポジウム, 2018.5.

[図書] (計 0 件)

該当なし。

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

該当なし。

○取得状況 (計 0 件)

該当なし。

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

廣畑幹人 (名古屋大学 大学院工学研究科 准教授)

研究者番号: 50565140

(2) 研究分担者

該当なし。

(3) 連携研究者

該当なし。

(4) 研究協力者

該当なし。