

令和元年6月24日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H06098

研究課題名(和文) 局所熱処理による鋼構造部材の残留応力場の制御と耐荷・耐疲労性能の向上技術

研究課題名(英文) Improvement of Load-carrying Capacity and Fatigue Performance of Steel Structural Members by Residual Stress Control with Local Heat Treatment

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) 8,400,000円

研究成果の概要(和文)：高周波誘導加熱やセラミックヒーターなどの簡易な熱源を用いた現場で実施できる熱処理により、鋼構造部材の耐荷性能、耐疲労性能に悪影響を及ぼす溶接残留応力を、部材の各種性能にとって有利となるような応力分布に転換させる方法を提案した。各種熱源を用いた熱処理による最適加熱条件を特定するための実験と、熱弾塑性解析によるシミュレーションを実施した。さらに、熱処理による耐荷性能、耐疲労性能の向上効果を確認するための載荷実験および疲労実験を実施した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

セラミックヒーターを用いた熱処理により、圧縮力を受ける部材の残留応力を除去する技術を提案し、残留応力の除去により耐荷性能が向上する効果を確認した。また、この熱処理過程をシミュレーションする方法を構築し、実構造部材に対して熱処理条件を探索するためのツールとして提示した。また、高周波誘導加熱装置を用いた熱処理により、繰り返し荷重を受ける部材の耐疲労性能を向上する熱処理方法を提示した。鋼橋において疲労損傷の多いカバープレート構造および面外ガセット構造に対し、残留応力の除去により耐疲労性が向上する効果を確認した。これらの結果は鋼橋部材の機能向上ならびに維持管理に資する有意義な技術を提供するものである。

研究成果の概要(英文)：Simple heat sources such as high frequency induction heating and ceramic heaters can be used for on-site heat treatment. Using these heat sources, a method was proposed for converting the residual welding stress that adversely affects the load-bearing and fatigue-resistance performance of steel structural members into a stress distribution that is advantageous for various performances of the members. Experiments to identify the optimum heating conditions by heat treatment using various heat sources and simulations by thermal elastic-plastic analysis were performed. Furthermore, loading tests and fatigue tests were conducted to confirm the improvement effects of load resistance and fatigue resistance by heat treatment.

研究分野：構造工学

キーワード：鋼構造 溶接 残留応力 熱処理

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

鋼構造部材の接合に使用される溶接では、溶接部の局所的な加熱と冷却による膨張、収縮を周辺の常温の部位が拘束することで溶接終了後に残留応力が生成される。一般的な鋼材では、溶接部の近傍には材料の降伏応力に近い引張応力が溶接線方向に生じ、同じ断面内ではこの引張応力につり合うための圧縮応力が母材部に生じることが知られている。また、溶接線に直交する方向についても、降伏応力には達しないまでも 100~200MPa の引張応力が生じることが知られている。部材の耐荷力を低下させる圧縮残留応力の影響については国内外で盛んに研究がなされ、その成果が取りまとめられてきた。日本および各国における圧縮部材の設計曲線(耐荷力曲線)はこの圧縮残留応力の影響を考慮して設定されている。一方、溶接部においては疲労き裂の発生・進展に引張残留応力が影響を及ぼすため、この引張残留応力を制御し耐疲労性を向上させるための研究が国内外で積極的に実施されている。一般に、部材の耐荷性能、耐疲労性能に悪影響を及ぼす溶接残留応力であるが、これを制御すれば部材の各種性能を向上させることが可能とされている。通常、端部が溶接された鋼板では端部に引張残留応力が生じ、中央部に圧縮残留応力が生じる。この鋼板が圧縮荷重を受ける場合には残留応力は耐荷力を低下させる方向に作用する。しかし、逆に端部に圧縮応力、中央部に引張応力が存在する鋼板では、残留応力は耐荷力を向上させる方向に作用し、残留応力のない鋼板よりも耐荷力が向上するとされている。また、耐疲労性については、ピーニング処理などで溶接止端部に圧縮残留応力を導入することで、溶接のままよりも疲労寿命が延びることが知られている。すなわち、残留応力(内部応力)を部材にとって有利な分布に制御することができれば、耐荷性能や耐疲労性能が向上させられる可能性がある。しかし、部材全体の残留応力を任意の分布状態に制御することは極めて困難である。上述のピーニング処理では溶接止端部の狭い領域に圧縮応力を導入できるが、板厚内部の深い領域まで圧縮応力が導入できる訳ではない。また、溶接部は狭隘で複雑な構造であることが多く、ピーニング処理工具を溶接部に当てるのが難しい場合もある。部材全体の残留応力を変化させる方法としては、部材全体を加熱炉で一様に 600 程度に加熱し徐冷する応力除去焼鈍があるが、この方法では部材全体の残留応力が消失するものの、引張応力や圧縮応力の任意の分布を生成させることは不可能である。

2. 研究の目的

本研究では、高周波誘導加熱装置やシート状セラミックヒーターなどの簡易な熱源を使用して部材を局所的に加熱・冷却することで、部材の構造性能にとって有利となるような残留応力分布を自在に生成する方法を提案する。これらの熱源を用いた熱処理であれば、部材を広域的にも局所的にも加熱することができる。熱伝導を利用することで、狭隘、複雑で工具が届かない部位や板厚内部に対しても処理が可能である。小型で可搬性の高い簡易な熱源を使用するので、新規部材の製作および既設構造物の補修補強・維持管理の現場でも適用できる。ただしそのためには、部材のどの部分をどの程度加熱・冷却すれば、どのような残留応力が生成されるのかを明確に予測することが不可欠である。すなわち、圧縮荷重を受ける部材の耐荷力を向上させるために有効な引張残留応力の分布や、疲労き裂の発生・進展を抑制するために有効な圧縮残留応力の分布とそれらの導入方法を明らかにする必要がある。本研究では、部材にとって有利な残留応力分布を自在に生成することで、部材の耐荷性能および耐疲労性能を向上させる熱処理技術を構築することを目的とする。

3. 研究の方法

溶接残留応力が存在する鋼構造部材に対し、新たに任意の残留応力分布を生成させるために適した加熱装置を選定すると共に、熱処理を行うための条件を特定する。まず一つ目の熱源として、シート状セラミックヒーターを用いた熱処理により、溶接残留応力を消失させて部材の耐疲労性能を向上させる技術を構築する。このヒーターは、小型のセラミック片を組み合わせて形状および寸法を自在に決定できる。また、自動温度制御装置により、対象物を一様に加熱、冷却することに長けており、応力除去焼鈍に適した熱源である。しかし、本研究で目指すのは単に残留応力を消失させるだけでなく、引張、圧縮の応力を任意の分布で新たに生成する技術である。そのため、局所的に急速加熱ができる高周波誘導加熱装置も合わせて使用する。高周波誘導加熱の原理は、加熱対象物である鋼部材に近接させたコイルに通電することで、鋼部材に誘導電流を生じさせ、その発熱を利用して加熱するものである。小型のコイルを鋼部材に近接させ通電すれば、その近傍を数秒から十数秒で 500°C 以上に加熱することができる。部材の中で温度差が生じ、加熱部の膨張と収縮を周辺部が拘束することで残留応力が発生するメカニズムから考えれば、局所的な急速加熱が行える高周波誘導加熱装置は本研究の目的に合致した熱源と考えられる。

広範囲を均等に加熱できるシート状セラミックヒーターと、局所的な急速加熱が可能な高周波誘導加熱装置を組み合わせて、鋼部材に任意の残留応力分布を生成させるための条件を特定する。そのためには、加熱の位置と範囲、加熱温度と保持時間など、多数のパラメトリックな検討が必要であるが、この検討を実験的に行うには膨大な時間を要するため、有限要素法による非定常熱伝導解析・熱弾塑性解析を駆使して効率的に検討を進める。シミュレーションにより、どの部分をどのように加熱すればいかなる残留応力分布が生じるのかを高精度に予測できるため、目標とする残留応力分布を得るための加熱条件をシミュレーションにより模索し、その加熱条件が実際に 2 種類の加熱装置を用いて再現できるか否かを検証する。

部材の耐荷性能および耐疲労性能を向上するための残留応力分布を生成する熱処理方法を構築した後、その方法を適用して実際に載荷実験用および疲労実験用の供試体を作製する。熱処理により残留応力分布を制御した供試体と、溶接のまま熱処理を適用しない供試体の耐荷力および疲労寿命を比較し、それぞれの性能がどの程度向上するかを定量的に明らかにする。

4. 研究成果

セラミックヒーターを用いた熱処理については、無補剛箱型断面供試体を溶接により作製し、外面からヒーターを近接させ 600°C 程度に加熱、保持することで残留応力を低減する方法を提示した。また、熱弾塑性解析によりこの熱処理を再現するモデルを構築し、その妥当性を検証した。残留応力を低減した供試体の圧縮耐荷力は、熱処理なしの供試体に比べ耐荷性能が向上することを確認した。

一方、高周波誘導加熱装置を用いる技術として、面外ガセット継手を対象に、ガセットプレート周辺を 350°C 程度に加熱することで、残留応力を低減する方法を提示した。この方法では、高周波誘導加熱装置により急速に加熱され膨張する部分を周辺部が拘束することで圧縮残留応力が導入されるメカニズムを熱弾塑性解析により検証した。また、最適加熱温度の探索にも本解析手法が適用でき、対象構造の寸法や形状が異なる場合も効率的な検討が可能になる。残留応力の低減により、加熱なしの場合に比べ疲労寿命が長くなることを疲労実験に基づき確認した。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件) 「全て査読有」

- (1) May Phyo Aung, Mikihito Hirohata: Numerical Study on Post-weld Heat Treatment of Non-stiffened Welded Box Section Member, International Journal of Steel Structures, doi 10.1007/s13296-019-00230-6, 2019.3 .
- (2) May Phyo Aung, Hirohata Mikihito: Effect of PWHT with Sheet-type Ceramic Heater on Compressive Behaviors of Non-stiffened Welded Steel Box Columns, World Journal of Engineering and Technology, 6, pp.50-67, 2018.1.
- (3) May Phyo Aung, Masaaki Nakamura, Mikihito Hirohata: Characteristics of Residual Stresses Generated by Induction Heating on Steel Plates, Metals, Vol. 8, No. 25, doi: 10.3390, 2018.1.

〔学会発表〕(計 2 件)

- (1) AUNG May-Phyo, HIROHATA Mikihito and KITANE Yasuo: Improvement of Residual Stress on Gusset Welded Joints by Heat Treatment with Induction Heating, Ninth International Conference on Advances in Steel Structures (ICASS'2018), P-137, Hong Kong, China, 2018.12.
- (2) MAY Phyo Aung, HIROHATA Mikihito : Applicability of Sheet-type Ceramic Heater for PWHT on Welded Steel Structural Members, 溶接構造シンポジウム 2017 , pp.365-368 , 2017.12

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6 . 研究組織

(1)研究分担者：該当なし

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）：

(2)研究協力者：該当なし

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。