

## シート状セラミックヒーターを用いた鋼橋の補修溶接援用システムの構築 Development of assist system using sheet ceramic heater for repair welding of steel bridges

名古屋大学 助教 廣畑 幹人

### (研究計画ないし研究手法の概略)

#### 1. はじめに

近年，社会基盤構造物の劣化・損傷が顕在化してきているが，鋼橋においては，腐食および疲労が劣化・損傷の主な要因となっている．鋼橋の腐食による減厚および疲労き裂に対する補修補強方法として，あて板などの新たな部材を接合する工法が用いられることが多い．その接合方法として，現状ではボルト接合が採用されることが多いが，ボルト接合では健全部に穿孔する必要があることや施工後の重量が増加するなどのデメリットがある．これに対し，溶接の適用が考えられるが，既設構造物への溶接では，死荷重や部材の拘束の下で溶接することとなり，工場での新規構造物の製作時に比べ溶接の品質が劣る可能性がある．

本研究では，鋼橋の補修溶接の品質向上を目的に，補修現場においても簡便に使用できるシート状セラミックヒーターによる溶接後熱処理を行うことを検討した．既設鋼橋の部材への補修溶接を想定し，荷重作用下の部材に対するあて板溶接を行い，荷重が作用したままでセラミックヒーターによる溶接後熱処理（応力除去焼鈍）が実施できるか否かを検討した．さらに，熱弾塑性解析による溶接および熱処理のシミュレーションを行い，熱処理過程で変化する応力の挙動を明らかにした．

#### 2. 実験およびシミュレーション

##### 2.1 溶接施工実験

実験供試体を図-1に示す．高さ200mm，フランジ厚12mm，ウェブ厚8mmのH形鋼（SM400A）を幅100mmに切断し，フランジにジグ取付け用のボルト孔を設けた．ジグを介して高力ボルトのナットを締め付けることで供試体の長さ方向に一定の荷重を与える構造とした．荷重は供試体の中央に貼付けたひずみゲージの値により管理した．供試体に500 $\mu$ のひずみ（応力100MPa相当）を付与した状態で，75mm $\times$ 75mm，板厚9mmのSM400Aをあて板とし，CO<sub>2</sub>半自動溶接（電流120A，電圧20V，速度3.0mm/s）でH形鋼のウェブの中央にすみ肉溶接した．荷重の方向と一致する供試体長さ方向の2辺を先行して溶接し，室温まで冷却した後に荷重に直交する方向の2辺を溶接した．溶接終了後，荷重を負荷したまま供試体にひずみゲージを貼付け，ボルトを取り外して除荷し，ゲージ周辺を切断し解放されるひずみから残留応力を測定した（応力弛緩法）．

一方，荷重を負荷しないH形鋼のみの供試体にも同様にあて板溶接を実施し残留応力を測定した．

##### 2.2 応力除去焼鈍実験

溶接終了後の供試体に対し，荷重を負荷した状態で応力除去焼鈍するため，あて板周辺のみを局部的に加熱できるシート状セラミックヒーター（図-2）を用いた．供試体に熱電対を取付け，応力除去焼鈍に要求される加熱・冷却速度（425 $\square$ 以上の領域で220 $\square$ /hr以下）および

保持条件（600℃で1時間保持）を制御した<sup>1)</sup>。

### 2.3 熱弾塑性解析によるシミュレーション

有限要素法に基づく熱弾塑性解析により，上述の溶接施工実験および応力除去焼鈍実験をシミュレーションした．解析モデルを図-3に示す．解析には，汎用有限要素解析ソフトABAQUS Ver. 6.13を用いた．8節点ソリッド要素を用いて供試体および荷重載荷用のジグをモデル化した．材料の機械的性質および物理定数の温度依存性ならびに応力除去焼鈍における高温クリープ特性は既往の文献<sup>2,3)</sup>を参照して決定した．

解析ではH形鋼とジグは剛結し，実験と同様，ボルトに軸力を負荷することでH形鋼に100MPaの応力を作用させた．その状態から，あて板の溶接を模擬した解析を実施した．溶接金属に相当する入熱要素を逐次生成する機能により熱源の移動を考慮し，入熱要素に溶接条件から求まる物体熱流束を与えた．

一方，応力除去焼鈍の過程については，ヒーターの設置位置に相当する面から熱流束を与え，実験で供試体に熱電対を取り付け測定した温度履歴を再現できるように熱流束の大きさを調整した．

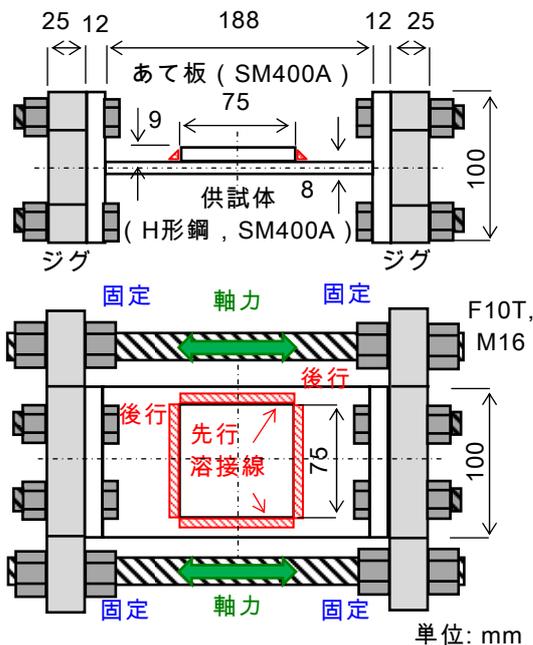


図-1 実験供試体



図-2 セラミックヒーターによる応力除去焼鈍

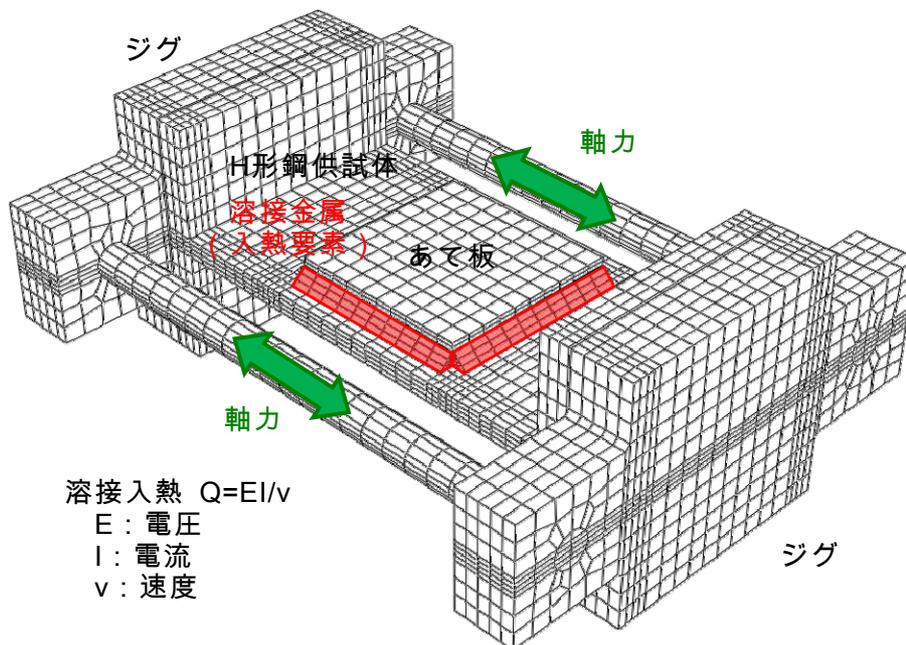


図-3 熱弾塑性解析モデル

### 3. 実験結果およびシミュレーション結果

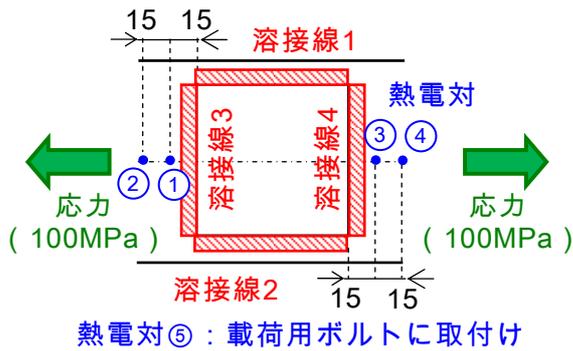
#### 3.1 荷重作用下の溶接で生じる残留応力

実験および熱弾塑性解析により得られた溶接過程の温度履歴を図-4に示す。実験結果と解析結果は良く一致しており、溶接過程の熱伝導状態が解析により高精度に再現できている。また、荷重用のボルトの温度はほとんど上昇しておらず、溶接中に荷重用のボルトの剛性が低下し荷重が抜けていることはないものと判断できる。

実験および熱弾塑性解析により得られた溶接残留応力の分布を図-5に示す。本研究では、拘束の度合いがより高い後行の溶接線に対し、これに直交する方向、すなわち荷重が作用する

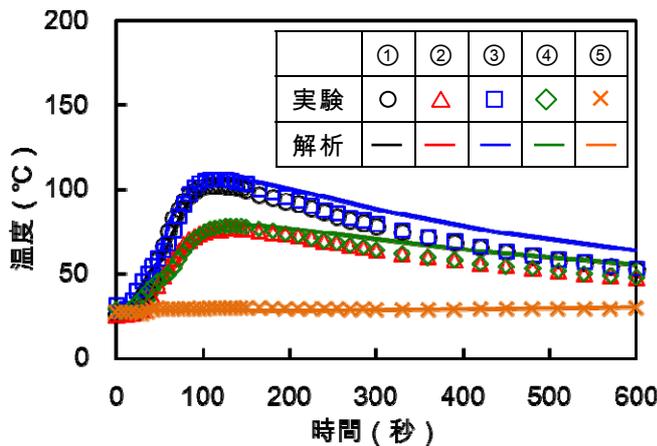
方向の応力成分に注目する。後行の2本の溶接線のうち、最後に溶接される溶接線の止端近傍の残留応力を示している。

無荷重の場合、溶接止端から5mm離れた位置には約174MPaの引張残留応力が生じていた。荷重作用下で溶接した場合、同じ位置での残留応力は約277MPaとなっていた。溶接終了後に除荷および拘束を解放すると、残留応力は約115MPaに減少した。無荷重の場合の溶接残留応力に比べ、荷重作用下で溶接した場合の除荷後の残留応力が小さくなった。この理由は、引張荷重作用下の溶接では、冷却過程における供試体の収縮が拘束されるが、溶接後にこの拘束を解放すると供試体が収縮し圧縮応力が作用するためと考えられる。一方、荷重なしおよび荷重負荷状態で溶接した場合の残留応力および除荷後の応力分布が熱弾塑性解析により精度良く再現できていることを確認した。

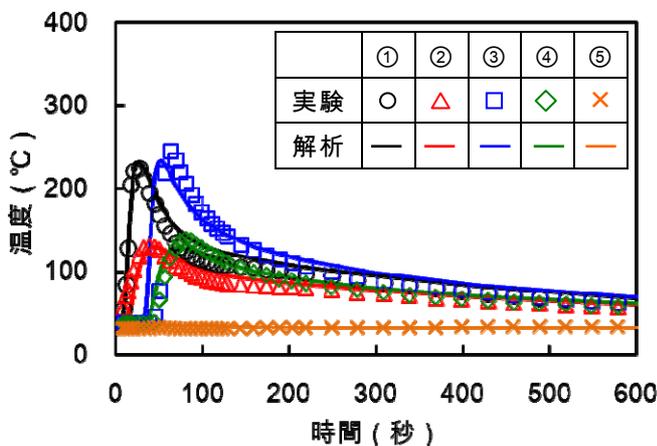


熱電対⑤：荷重用ボルトに取付け

(a) 熱電対の取付け位置



(b) 溶接線1, 2の溶接時



(c) 溶接線3, 4の溶接時

図-4 溶接過程の温度履歴

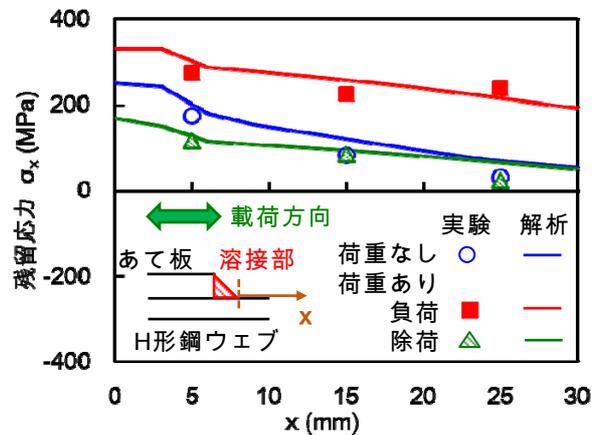


図-5 溶接残留応力の分布

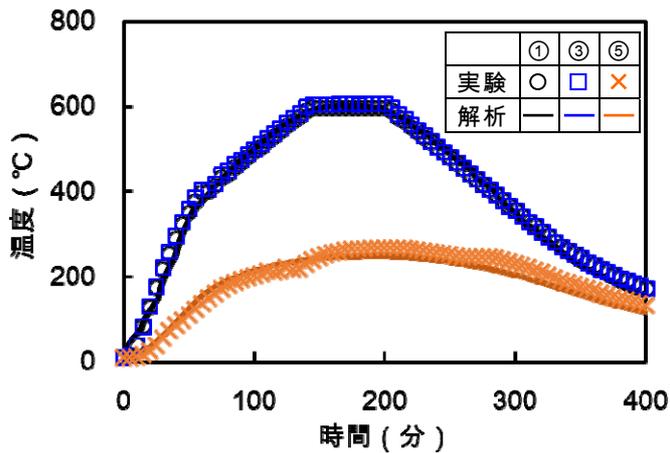


図-6 応力除去焼鈍過程の温度履歴

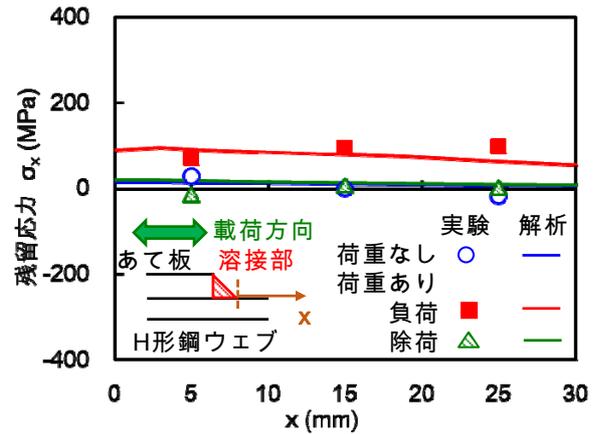


図-7 焼鈍後の応力分布

### 3.2 荷重作用下における応力除去焼鈍の適用性

応力除去焼鈍の過程における温度履歴を図-6に示す．シート状セラミックヒーターの入力は、溶接線3および4の止端から約10mm離れた位置に取り付けた熱電対①および③の温度により制御した．これにより、応力除去焼鈍に必要な温度履歴（加熱・冷却速度：425°C以上の領域で220°C/hr以下，600°Cで1時間保持）<sup>1)</sup>を高精度に制御することができた．また，载荷用のボルトに取り付けた熱電対⑤から，焼鈍中のボルトの温度は最高約320°Cであり，焼鈍中のボルトの剛性の低下はさほど大きくない<sup>4)</sup>ことを確認した．一方，焼鈍の温度履歴を熱弾塑性解析により再現することができた．

焼鈍後の残留応力分布を図-7に示す．無荷重状態で溶接した供試体を焼鈍した場合，残留応力は約30MPaに緩和された．応力100MPaに相当する荷重作用下で溶接し，そのまま焼鈍した供試体には約71MPaの応力が残留した．その後，除荷および拘束を解放すると応力は-13MPa程度になった．荷重作用下での応力除去焼鈍では，溶接残留応力は荷重の影響を受けることなく緩和されることが分かった．

#### （実験調査によって得られた新しい知見）

- (1) 本研究で用いたシート状セラミックヒーターを適用することで，既設構造物の補修溶接部を局部的に焼鈍できる可能性を一連の結果は示唆していた．
- (2) 本研究で提示した熱弾塑性解析によるシミュレーション手法を用いることで，対象となる構造物の応力除去焼鈍に必要な入熱条件を事前に検討することができ，その効果も予測可能であることが分かった．
- (3) 既設構造物の補修では，荷重および拘束の下で溶接および応力除去焼鈍を行うことになる．無荷重の場合の溶接残留応力に比べ，荷重作用下で溶接した場合の除荷後の残留応力が小さくなることを示した．この理由は，引張荷重作用下の溶接では冷却過程における供試体の収縮が拘束されるが，溶接後にこの拘束を解放すると供試体が収縮し圧縮応力が作用するためと考えられる．
- (4) 荷重作用下での応力除去焼鈍では，作用荷重による応力は除去されないが，溶接残留応力は荷重の影響を受けることなく緩和されることが分かった．

## 参考文献

- 1) 日本規格協会：溶接後熱処理方法 JIS Z 3700, 2009.
- 2) 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.
- 3) 西原利夫, 平 修二, 田中吉之助, 大南正瑛：軟鋼のクリープ限の簡易決定法, 日本機械学会論文集（第1部）第24巻143号, pp. 434-440, 1957.
- 4) 古平章夫, 藤中英生, 高田 司：高力ボルトの高温時及び加熱冷却後の強度, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.117-118, 2000.

## （ 発 表 論 文 ）

廣畑幹人, 伊藤義人：荷重作用下における鋼部材へのあて板溶接で生じる残留応力および応力除去焼鈍に関する研究, 応用力学シンポジウム2015, 2015年5月（投稿中）.