



【研究の目的】鋼橋の防食塗装は、その性能を維持するために定期的な塗替えが必要であり、維持管理における重要な管理項目となっている。塗替えでは、防食機能を確保するために、劣化、損傷した旧塗膜を除去した後に、新規の塗装を施す必要がある。旧塗膜を除去する方法としては、一般に、動力工具、ブラスト、塗膜剥離剤を使用する方法が採用されているが、作業で生じる騒音や粉塵、作業中の安全性確保、除去した塗膜や作業で使用した副資材の廃棄物処理、塗膜を除去する作業効率などに種々の課題がある。

これらの課題に対し、高周波誘導加熱（Induction Heating: IH）を利用した旧塗膜の除去（以下、IH 塗膜除去）が試験的に実施されている[1, 2]。IH 塗膜除去では、塗膜を除去する鋼材に高周波電流を通電したコイルを近接し、電磁誘導作用で鋼材表面に渦電流を生じさせる。渦電流のジュール熱により鋼材表面を 140~240°C に加熱して塗膜と鋼材の接合面を破壊し、スクレーパー等の工具で塗膜をシート状に一度で剥離することが可能である。IH 塗膜除去は、動力工具やブラストを用いる場合に比べて騒音、粉塵の発生が少ない。また、引火性のあるガス等は生じず、廃棄物も除去した塗膜のみしか生じないことから、前述した課題の解決方法として注目されている。鋼橋の IH 塗膜除去においては、橋梁本体部材である鋼材を加熱するため、過度に加熱すると変形や残留応力が生じ、耐荷性能に影響を及ぼすことが懸念される[2, 3]。一般的には、一定時間内に加熱する面積を少なくすると変形が小さくなるが、作業効率を低下させる要因となることから、加熱順序や加熱範囲は慎重に計画する必要がある。トラス橋では、加熱時の変形に対する知見が不足しており、特に、引張軸力部材として設計されている斜材等は、加熱により設計的に考慮されていない圧縮力が作用することが部材の安全性を低下させる懸念がある。本研究では、トラス橋の引張部材として設計された比較的剛性の小さな斜材に着目し、IH 塗膜除去の適用性拡大を目的として、実構造物を用いた実験的方法により、加熱が斜材の変形に及ぼす影響について基礎的検討を実施した。

【内容、手法】本研究で対象としたトラス橋は、沖縄自動車道の億首川橋（上り線）P11~A2 で、橋長 290 m の 3 径間連続鋼上路式平行弦プラットトラス橋であり、高速道路等で一般的なトラス橋である（図 1）。着目した斜材は、図 2 に示す I 断面引張部材として設計され、斜材の中で最も断面の小さい U3~D4（U17~D18, D18~U19, D32~U33 も同断面）である。

塗膜除去に使用した IH 塗膜剥離装置は、出力 50 kW、誘導加熱ヘッドの幅 200 mm の機材である。加熱長 2270 mm に対して、加熱作業者が誘導加熱ヘッドを持ち替えることなく加熱可能な距離の上限が 1.5 m 程度であることから、対象部位を上側 1135 mm と下側 1135 mm に二分して加熱する計画とした。具体的な加熱順序を図 3 に示す。上側半分の加熱が完了した後、続けて下側半分の加熱する。断面方向には、U3 側から見て時計回りに連続して行い、フランジや腹板の材片裏表を続けて加熱しないように、1 周目はフランジ外面、2 周目はフランジ内面を加熱する。なお、一連の予備試験の結果より誘導加熱ヘッドの移動速度を 2.5~3.0 m/min とした。この条件により、図 4 に示すように塗膜はスクレーパーでシート状に剥離することができた。

加熱時の鋼材表面と塗膜表面の最高温度は、赤外線放射温度計のほか、示温ラベルと温度チョークの罫書き線により合計 8 箇所測定した。赤外線放射温度計による塗膜表面の温度は 80~95°C 程度であった。示温ラベルでは、加熱後に塗膜表面は 95°C まで、鋼材表面は 170°C までの温度感知部分に変色していた。温度チョークは、加熱後に 150°C 以下の罫書きが融解し、175°C の罫書きは少し融解していた。これらより、鋼材表面の温度は 175°C 程度まで加熱され、塗膜表面の温度は 100°C 程度になったことを確認した。

加熱前後の斜材の変形量は、上弦材と下弦材のガセットプレート間に基準用ワイヤを張り、斜材のフランジ縁と基準用ワイヤの離れ量を測定した。測定位置は、左右フランジの加熱順序の上側上端、上側と下

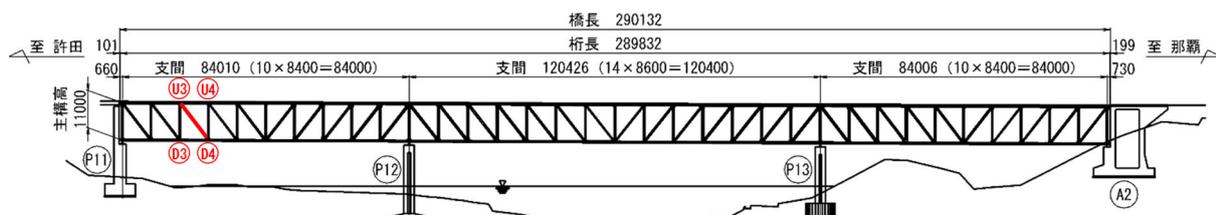


図1 対象としたトラス橋

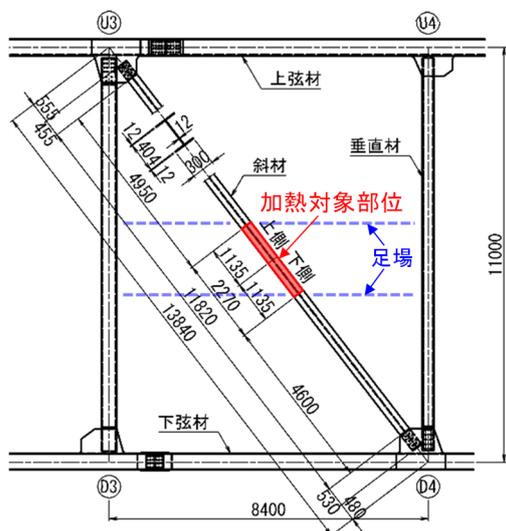


図2 着目した斜材と加熱対象部位

側の境、下側下端の計6箇所とし、斜材の面内と面外の変形量を測定した。測定頻度は、加熱前、加熱直後（完了後）、温度低下後（常温到達後で加熱完了から5時間経過）の3回とした。

加熱順序 1~24 の加熱が完了した加熱直後は、橋軸直角方向に左フランジが 2 mm と右フランジが 1 mm の変形が生じていた。橋軸方向は右フランジの下側が 1 mm 変形しているが他の測定箇所に変形は生じておらず、橋軸方向へはほとんど変形していなかった。橋軸方向の変形量が小さい理由としては、腹板は斜材の部材軸上にあり、熱膨張しても斜材を曲げ変形させる力が作用しにくいことが考えられる。温度低下後は、橋軸直角方向に左フランジが 1 mm の変形を残していたが、橋軸方向は変形量がゼロであり加熱前の状態に戻っていた。

これらの結果では、左フランジと右フランジの橋軸直角方向変形量に 1 mm の差が生じている。フランジは外面を先行して加熱しているため、フランジの張出部が加熱により内側に変形したことも考えられる。しかしながら、変形量はフランジ張出部先端で測定しており、斜材断面全体の変形であるか、あるいはフランジ材片の板厚方向のそり等による変形であるかは判別が困難である。また、加熱作業途中の変形量も測定していないため、加熱作業の進行に伴う変形の変化については不明である。変形量の測定では、フランジと腹板の接合部も測定しておくことなどに加えて、経時的な斜材断面全体の計測を検討する必要がある。斜材の

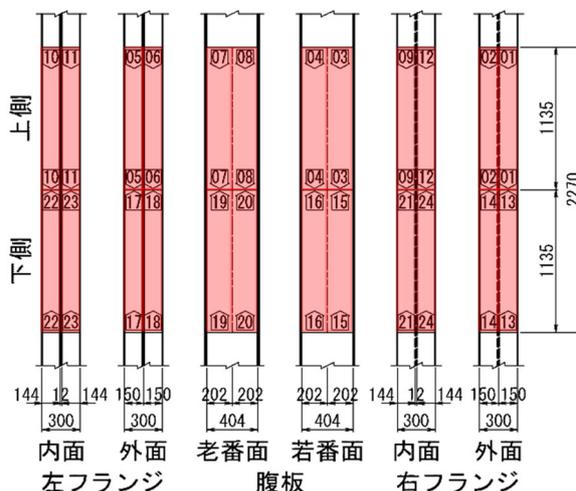


図3 加熱順序



図4 塗膜剥離状況

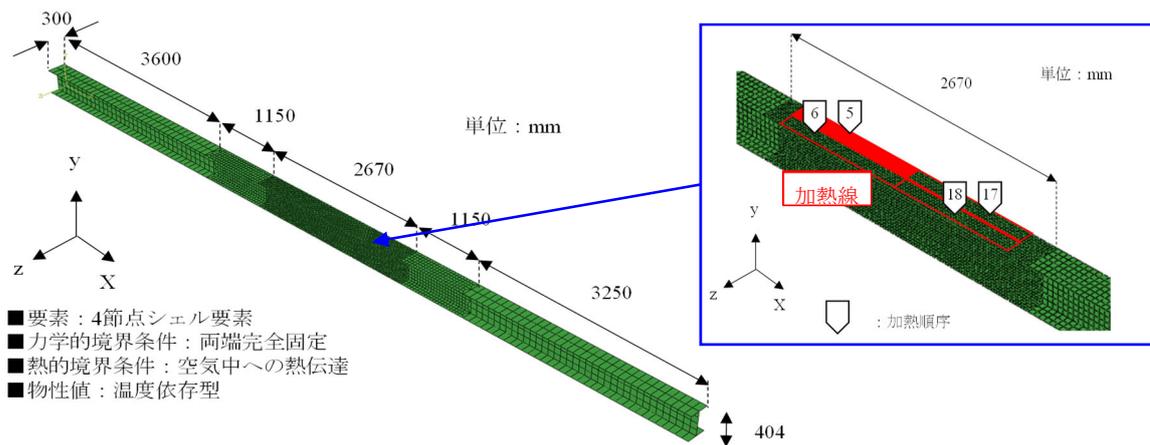


図5 熱弾塑性解析モデル

許容変形量に関しては、鋼橋の部材精度として、部材長  $L$  の圧縮材の曲がり量  $L/1000$  の規定がある[4]。加熱時の変形量は  $L/5000$  以下 ( $L \doteq 11.8 \text{ m}$  : ガセットプレート間の斜材長) で小さく、残留変形量も僅かであるため、選定した加熱順序等の条件は妥当であることが確認された。

上述の実構造部材に対する温度測定および変形計測では、現場の制約等により詳細な検討が困難であった。このため、熱弾塑性解析によるシミュレーション[5]を行い、本施工の妥当性について補足的検討を実施した。解析モデルを図5に示す。トラス部材の上下フランジは長さ 11820 mm、幅 300 mm、厚さ 12 mm であり、ウェブ（高さ 404 mm）とフランジの溶接は考慮せず完全に結合されているものとした。解析モデルはシェル要素で作成し、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て決定した[6, 7]。力学的境界条件は部材の両端を完全固定し、熱的境界条件は空気中への熱伝達を考慮した。メッシュサイズは入熱部には  $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$  を採用した。入熱方法は図5に示すように各加熱線に対してそれぞれ一度で入熱を行うこととし、IH 装置の移動速度を考慮して入熱時間を定めた。入熱量については、同じ IH 装置を用いて実施した既往の実験および解析を参考に、 $1.2 \text{ J/mm}^2$  を表面熱流束として与えた[5]。入熱時間終了後は、実験において次の加熱線に作業が移行するまでの時間を考慮し、各加熱線の作業間に冷却時間を設けた。

実験による加熱順序（図3）を模擬し、加熱線1～24に対し順次入熱を行った。各加熱線の入熱が他の加熱線の温度に及ぼす影響は小さかったため、代表として加熱線18（下側断面、上フランジ外面）の加熱線内の平均温度の履歴を図6に示す。加熱線内を一度に入熱する方法で得られる平均温度であるため、実部材の温度状態とは異なるものの、平均温度の最高値は  $136^\circ\text{C}$  であった。これは、実験で得られた示温ラベルおよび温度チョークによる最高温度の推定結果 ( $150^\circ\text{C} \sim 175^\circ\text{C}$ ) に比べやや低いが、局所的な温度上昇や実験における温度測定精度を考慮すれば、概ね妥当な温度範囲を示していると考えられる。

解析により得られたフランジ変形量は  $1.0 \times 10^{-3} \text{ mm}$  よりも小さかった。実験では、変形計測精度として 1 mm 程度の誤差が含まれるが、実際には加熱による変形はほとんど生じていなかった可能性が示唆される。部材長さ方向中央断面のウェブ中央位置において、上側加熱終了後、下側加熱終了後および完全冷却後の部材軸方向応力を図7に示す。上側加熱、下側加熱終了直後は、加熱部の熱膨張が周辺に拘束されるために  $-50 \text{ MPa} \sim -60 \text{ MPa}$  の圧縮応力が生じたが、完全冷却後の応力はほぼ零となった。引張部材であり設計上は圧縮力に対する抵抗を考慮していない断面であるが、加熱中の圧縮応力による座屈や過大な変形が生じることはなかった。

【成果、新たな知見】トラス橋の引張斜材に着目し、IH 塗膜除去の適用性を検証することを目的として、IH 塗膜除去に伴う加熱が斜材の変形に及ぼす影響を明らかにするための一連の基礎的検討を実施した。

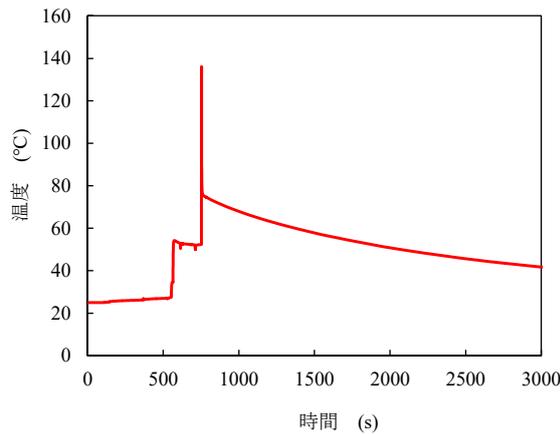


図6 加熱線 18 の平均温度履歴

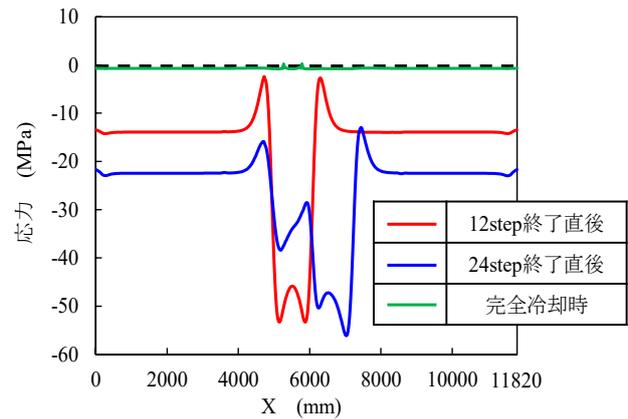


図7 部材軸方向の応力

- (1) 除去する旧塗膜の塗膜厚等の状態により，IH 塗膜除去による加熱作業時の最適な誘導加熱ヘッドの移動速度が異なることから，予備試験を実施して移動速度を選定した．予備試験で決定したヘッドの移動速度による加熱を実施した場合，加熱時の鋼材表面の最高温度は 175°C程度であり，鋼材の材質に影響を及ぼすような過度の加熱が生じていないことを確認した．
- (2) 加熱直後のトラス橋の斜材の変形量は 2 mm 程度（部材長 L の L/5000 以下）で小さく，温度低下後は概ね加熱前の形状に戻ることを確認した．この結果から，引張部材として設計されているトラス橋の斜材は，IH 塗膜除去による加熱を実施した場合において，変形による耐荷性能への影響は小さいと考えられる．
- (3) 実施工を模擬した熱弾塑性解析によるシミュレーションを実施した．装置の移動を考慮せず，各加熱線に一度に入熱する方法により，各加熱線内の平均温度が最高で 136°Cとなることを確認した．
- (4) 解析におけるフランジ変形量は  $1.0 \times 10^{-3}$  mm よりも小さく，実際には加熱による変形はほとんど生じていなかった可能性が示唆された．加熱中の部材には -50MPa～-60MPa の圧縮応力が生じたが，完全冷却後の応力はほぼ零となった．引張部材であり設計上は圧縮力に対する抵抗を考慮していない断面であるが，加熱中の圧縮応力による座屈や過大な変形が生じることはなかった．

【今後の方向性，予定】本解析では，部材および入熱方法のモデル化に精度向上の余地があるものの，実際のトラス斜材に適用した施工条件の妥当性および安全性を示す補足的データが得られたと言える．今後は，解析手法の高精度化により，実施工に先立って適切な装置の移動速度や加熱順序などの条件を選定できる技術の確立に向けて検討を継続する．

【参考文献】

- [1] 小西，鈴木，田中，鮫島，西谷，廣畑：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，Vol.51(7)，pp.14-20，2017.7
- [2] 小西日，井隼，福島，松井，早矢仕，廣畑：市川橋における IH 装置による塗膜剥離の試験施工，橋梁と基礎，Vol.54(6)，pp.18-23，2020.6
- [3] 岡部，吉川，小野，中村：IH（電磁誘導加熱）による鋼橋の塗膜除去工法，橋梁・鋼構造物塗装，pp.2-10，2014.9
- [4] 公益社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説，20.7.2 部材精度，pp.522-523，2017.11
- [5] 桐畑，廣畑，小西：高周波誘導加熱による塗膜剥離施工シミュレーションに関する検討，鋼構造年次論文報告集，第 27 巻，pp.707-714，2019.11
- [6] 金，李，猪瀬：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.431-435，2005.8
- [7] 中川，鈴木：鋼梁の崩壊温度，鋼構造論文集，第 6 巻，第 22 号，pp.57-65，1996.6