

中小鋼橋維持管理のための低コスト塗装更新技術の提案

大阪大学大学院工学研究科 地球総合工学専攻 社会基盤工学部門 准教授 廣畠幹人

1. はじめに

市町村が維持管理する中小鋼橋において、腐食損傷が進行し防食の更新が要求されるものが数多く存在する。建設年代の古い鋼橋の塗装には下塗りに鉛が使用されているものが多く、塗装の塗替えに際し劣化した旧塗膜を剥離しようとすると、鉛の飛散防止等の厳格な規制により、防護、養生に要する費用が膨大になる。維持管理予算が潤沢でない市町村レベルでは、塗膜剥離剤やプラスト等を用いた塗膜剥離工事を行うことが経済的、技術的に困難であり、劣化した鋼橋の塗装更新が深刻な課題となっている。これに対し、市町村でも実施できる簡便かつ安価な方法で、中小鋼橋の塗膜剥離および塗装更新のための技術が求められる。これに対し、粉塵の飛散、廃棄物量の抑制を可能にする高周波誘導加熱（Induction Heating, IH）による塗膜剥離^{1, 2)}に注目する。IHは、近年、施工事例が増えつつある塗膜剥離工法の一つであるが、積算等の体系が構築されていないためにコストを適切に算出する方法がなく、予算の潤沢な大規模工事において採用されている。本研究では、スパン 10~15m 程度の中小規模の鋼橋においても IH による塗膜剥離を選択肢として整備することを念頭に、IH による入熱が中小規模の鋼橋部材の耐荷性能に及ぼす影響を明らかにするための一連の検討を実施した。

2. 研究の方法

申請者らはこれまで、IH による塗膜剥離のための条件探索に資するツールとして、IH による塗膜剥離のための加熱を有限要素法に基づく熱弾塑性解析によりシミュレーションする方法を構築してきた³⁾。本研究では、このシミュレーション方法を活用して、鋼橋部材の一部をモデル化し、供用下において IH による塗膜剥離のための入熱を施した場合の部材の耐荷性能を検討した。

3. 解析モデル

3.1 解析モデルの形状、寸法および境界条件

本研究では、鋼橋の部材を構成する板要素を抽出し、解析の対象とした。例えば、図-1 に示すような箱型断面部材の 1 パネルを考え、部材軸方向長さを 1135 mm、幅 400 mm、板厚 12 mm とし、図-2 に示すモデルを作成した。力学的境界条件は実構造とは異なるが、板状の構造部位の解析における一般的な境界条件として、4 辺単純支持とした。メッシュサイズは 5 mm × 5 mm である。材料 (SS400) 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^{4, 5)}。熱的境界条件は空気中への熱伝達を考慮した。なお、初期たわみおよび溶接残留応力は考慮していない。このパネルの幅厚比パラメータを式(1)により計算する。

$$R = \frac{1}{\pi} \frac{b}{t} \sqrt{\frac{12(1-\mu^2)}{k}} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \quad (1)$$

ここに、 R は幅厚比パラメータ、 b は板幅 (mm)、 t は板厚 (mm)、 μ はポアソン比、 k は座屈係数、 σ_y は鋼材の降伏点 (MPa)、 E はヤング率 (MPa) である。

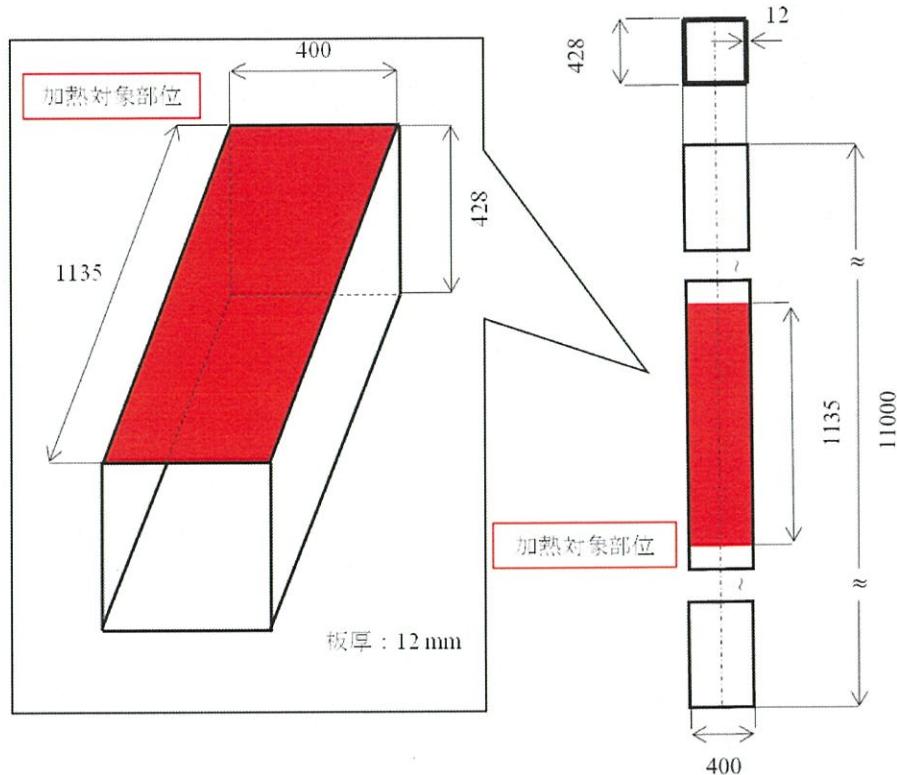


図-1 解析対象部材

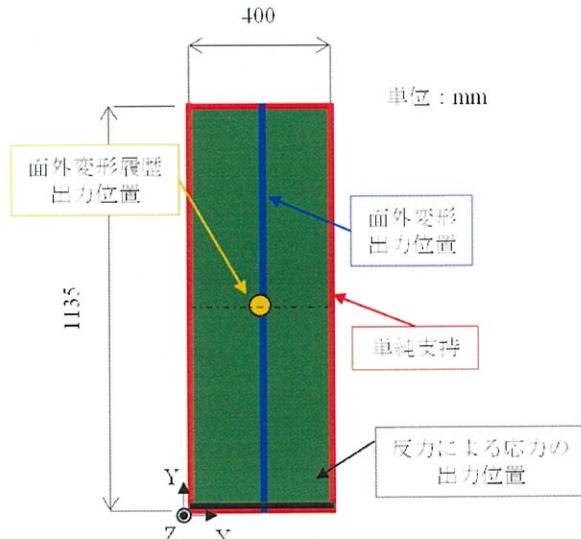


図-2 解析モデル

パネルの幅 $b=400$ mm, 板厚 $t=12$ mm, ポアソン比 $\mu=0.3$, 4辺単純支持の座屈係数 $k=4.0$, SS400 の基準降伏点 $\sigma_y=235$ MPa, 常温時のヤング率 $E=206000$ MPa を代入すると幅厚比パラメータ $R=0.59$ となる。IH による塗膜剥離では鋼材を約 250 °Cまで加熱する^{1, 2)}。ヤング率および降伏点は温度により変化することが知られており、既往の文献^{4, 5)}による温度依存型の機械的性質では 250 °Cにおけるヤング率 $E=194348$ MPa および降伏点 $\sigma_y=183$ MPa となり、これらの値を用いると、 $R=0.54$ となる。これらの幅厚比パラメータの値はいずれも弾性座屈が発生しない範囲にあり、値の差もさほど大きくない。すなわち 250 °Cの加熱に対し、パネルの座屈に対する抵抗が著しく低下する可能性は低いと考えられる。

3.2 入熱方法

上述したパネル状のモデルに対し、インダクションヘッドの幅 100 mm の加熱装置（図-3）を用いた加熱を想定した。加熱順序を図-4 に示す。Y 方向（部材軸方向）に下端（Y=0 mm）から上端（Y=1135 mm）へと加熱領域を移動させた。左端部 ($0 \leq X \leq 100$) を加熱した後に、作業者および装置の移動時間を想定して 20 秒の冷却時間を設け、連続して隣接部分 ($100 < X \leq 200$) を加熱する。これを右端部 ($300 < X \leq 400$) まで繰り返し、400 mm の幅に対し 100 mm ずつ 4 回の加熱を行った。

既往の研究³⁾で構築した方法を基本として、装置の移動に合わせて装置直下の部分から鋼板に表面熱流束を与える、鋼板表面の温度が 250°C 程度になるように入熱量を調整した。

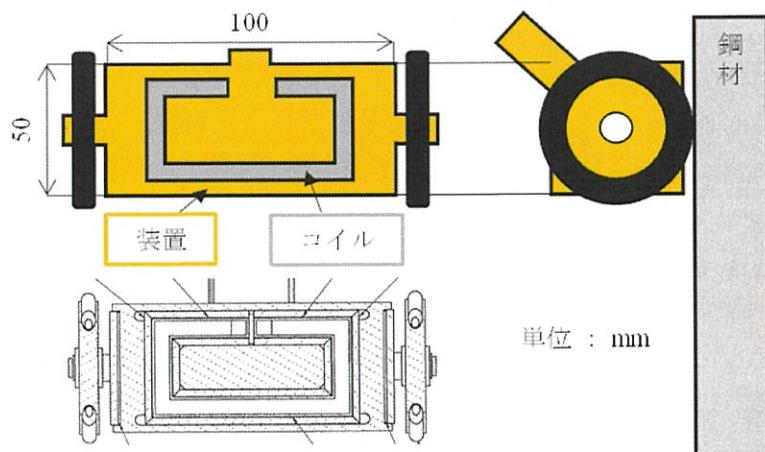


図-3 加熱装置

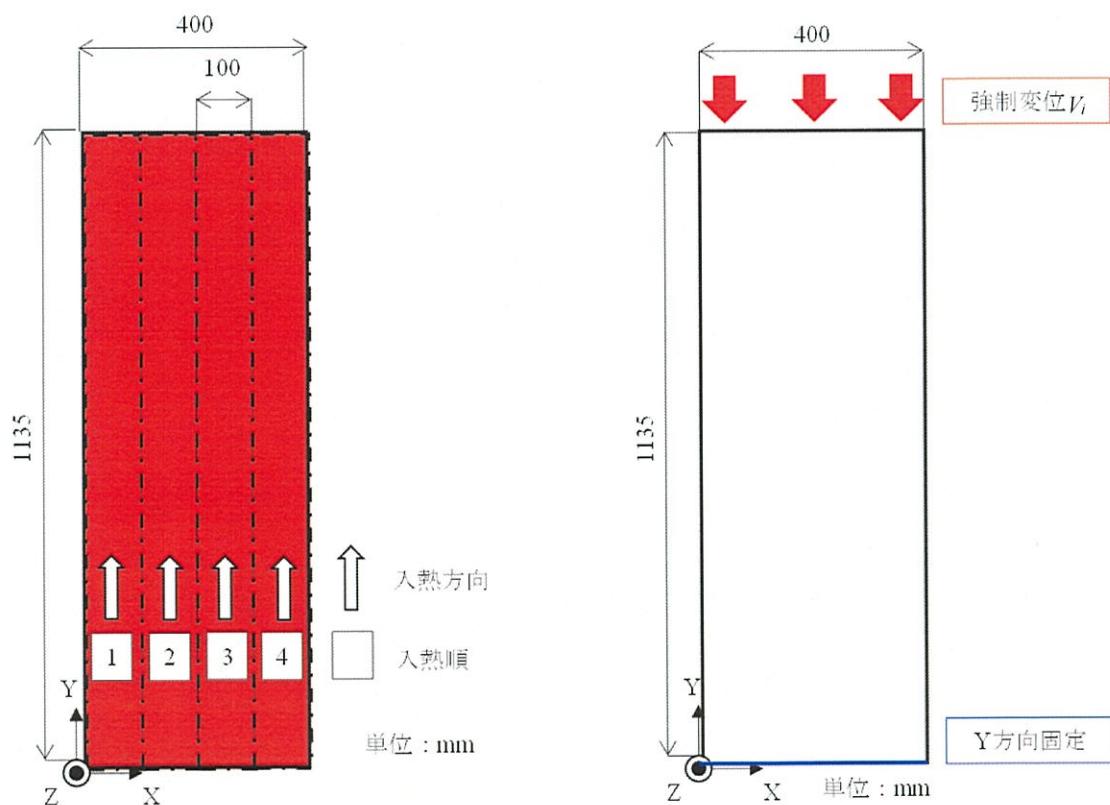


図-4 解析モデル

図-5 載荷条件

3.3 載荷条件

IH による塗膜剥離施工を行う際、最も安全であると考えられるのが、荷重が作用していない状態での施工である。しかし、施工において車両の活荷重や死荷重等を取り除くためには、通行規制やジャッキアップ等が必要であり、高いコストや交通への負荷が生じる。そのため、一般的には荷重作用下で塗膜剥離施工が実施されているが、部材の耐荷性能に及ぼす影響については不明な点が多い。施工中の荷重が部材の耐荷性能に及ぼす影響を検討するため、パネルに一定の圧縮応力が作用した状態で加熱するシミュレーションを行う。解析モデルに対する載荷条件の概要を図-5 に示す。Y=1135 mm の辺に、面内方向に一定の強制変位を付与することで、圧縮応力を負荷する。作用させる圧縮応力の値に応じて強制変位を式(2)により算出し、圧縮応力を負荷した状態で加熱する。

$$V_i = \frac{\sigma_{ic}}{E} \times l \quad (2)$$

ここに、 V_i は変位 (mm)、 σ_{ic} はパネルに負荷する圧縮公称応力 (MPa)、 E はヤング率 (MPa)、 l は部材軸方向の長さ (mm) である。

パネルに負荷する圧縮応力 (以降、初期圧縮応力と称し、圧縮の値を正とする) $\sigma_{ic} = 0$ MPa, 50 MPa, 100 MPa, 150 MPa とし、鋼のヤング率 $E = 206000$ MPa、部材軸方向の長さ $l = 1135$ mm を代入し、各応力レベルに対応する強制変位をそれぞれ、 $V_i = 0$ mm, 0.28 mm, 0.55 mm, 0.83 mm とした。なお、加熱終了後 10000 秒の冷却時間を設け、更にパネル面内方向の強制変位を増加させた。加熱中ならびに加熱後の載荷過程における Y=0 mm の辺の面外方向反力を断面積で除して求めた応力を作用応力 $\bar{\sigma}$ とし、パネルの圧縮挙動および耐荷性能を評価する。

4. 解析結果および考察

4.1 加熱中および冷却後の面外変形

幅方向中央、長さ方向中央の位置で出力した面外変形履歴を図-6 に示す。4 回の加熱時 (①～④)、温度上昇に伴い表面の体積が膨張し、表面に対し凸 (正方向) の変形が生じた。時間経過とともに表面の熱は熱伝導により拡散し、表面は温度低下により収縮、裏面は温度上昇により膨張したことで、全てのモデルで裏面に対し凸となる面外変形の傾向が得られた。初期圧縮応力が 0 MPa の場合は加熱中の面外変形が -0.83 mm であったのに対し、初期圧縮応力が、50 MPa, 100 MPa, 150 MPa の場合は面外変形が -1.07 mm, -1.27 mm, -1.40 mm となり、初期圧縮応力の増加に伴い面外変形の絶対値が大きくなつた。

道路橋示方書では、トラス部材腹板の面外変形許容誤差を以下の式(3)で与えている⁶⁾。

$$\delta_f = \frac{h}{250} \quad (3)$$

ここに、 δ_f はトラス部材腹板の面外変形許容誤差 (mm)、 h は腹板高 (mm) である。

パネルの腹板高 (本論文ではパネルの幅) $h = 400$ mm を代入すると、 $\delta_f = 1.6$ mm となった。すべての初期圧縮応力レベルで、加熱中の面外変形は許容誤差範囲内となつた。

加熱後、常温までの冷却過程では面外変形が徐々に小さくなつた。冷却終了後の 10000 秒の時点における面外変形の値は、初期圧縮応力 0 MPa, 50 MPa, 100 MPa, 150 MPa のケースに対しそれぞれ -0.67 mm, -0.92 mm, -1.10 mm, -1.19 mm となつた。

加熱後 10000 秒の冷却時間を設けた後、幅方向中央で出力した残留面外変形のモードを図-7 に示す。

残留面外変形の最大値は初期圧縮応力 0 MPa, 50 MPa, 100 MPa, 150 MPa に対しそれぞれ-0.8 mm, -0.9 mm, -1.1 mm, -1.3 mm 程度となつた。これらは式(3)許容誤差範囲内である。ところで、変形の最大値は中央 ($Y=568$ mm) ではなく上端 ($Y=1135$ mm) 近傍である。初期圧縮応力 0 MPa では $Y=705$ mm, 50 MPa では $Y=715$ mm, 100 MPa では $Y=810$ mm, 150 MPa では $Y=860$ mm で変形が最大となつた。本解析では、下端から上端へと加熱領域を移動させている。下端近傍が加熱される時は、上端近傍に加熱されていないため拘束が大きくなる。一方上端近傍が加熱される時は、下端近傍は既に加熱されているため、拘束が小さくなつたと考えられる。したがつて変形の最大値は中央ではなく、 $Y=705\sim860$ mm になつたと考えられる。

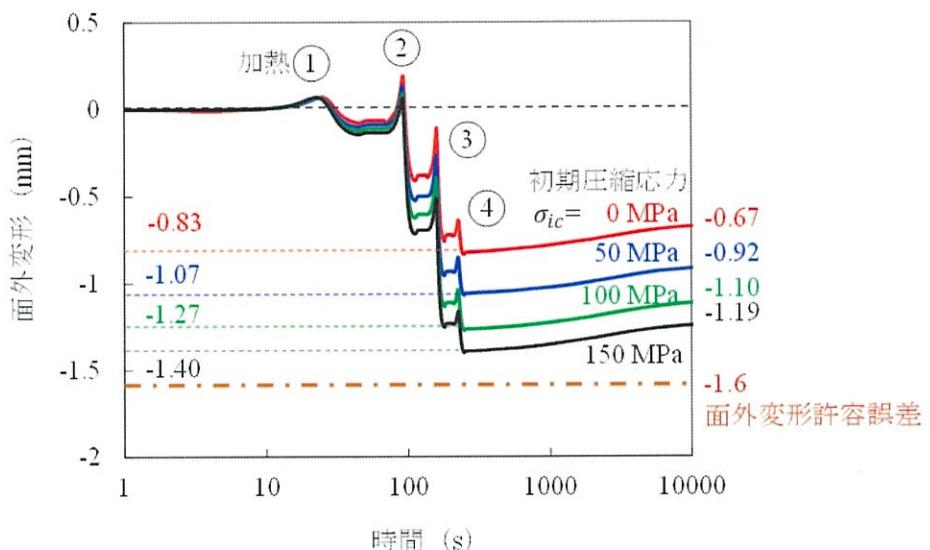


図-6 面外変形の生成履歴

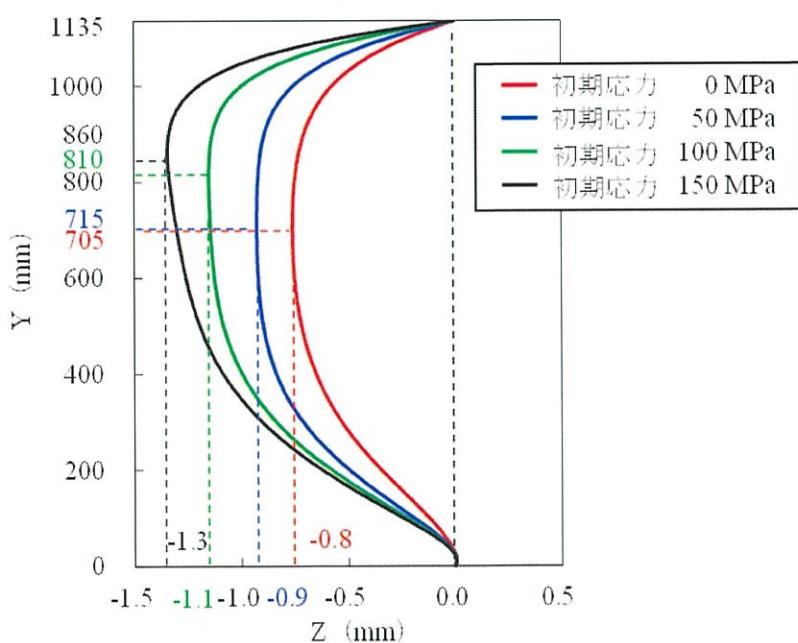


図-7 残留面外変形のモード

4.2 加熱中の応力および冷却後の残留応力

$Y=0$ mm の辺で出力した Y 方向の反力から求めた応力（作用応力 σ , 圧縮を正とする）の履歴を図-8 に示す。加熱中, 温度上昇に伴いパネル表面の体積が膨張し, この膨張に対する反力として作用応力が上昇する。20 秒の冷却時間による温度低下で加熱部は収縮し, 作用応力も減少する。これを 4 回繰り返した結果, 初期圧縮応力 0 MPa, 50 MPa, 100 MPa, 150 MPa に対しそれぞれ作用応力が最大 63 MPa, 91 MPa, 132 MPa, 170 MPa となった。初期圧縮応力 0 MPa では 4 回の加熱中の作用応力が上昇したが, 初期圧縮応力 50 MPa, 100 MPa, 150 MPa では作用応力が減少する傾向を呈した。

許容応力度設計における SS400 の局部座屈に対する許容応力度は 140 MPa である。本解析において, 初期圧縮応力 0 MPa, 50 MPa, 100 MPa では加熱中の作用応力が局部座屈に対する許容応力度よりも小さな値をとり, 作用応力の観点からトラス部材腹板としての性能を満たしていると考えられる。一方, 初期圧縮応力 150 MPa の場合は加熱前の時点での作用応力が局部座屈に対する許容応力度を超過しており, 加熱中の作用応力は最大 170 MPa に達した。

道路橋示方書では, 4 辺単純支持鋼板の耐荷力曲線を式(4)で与えている⁶⁾.

$$\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_y} = \begin{cases} 1.0 & (R \leq 0.7) \\ \frac{0.5}{R^2} & (0.7 < R) \end{cases} \quad (4)$$

ここに, σ_{cr} は座屈応力 (MPa), σ_y は降伏応力 (MPa), R は幅厚比パラメータである。SS400 の基準降伏点 $\sigma_y=235$ MPa, 幅厚比パラメータ $R=0.54$ (250 °C) あるいは 0.59 (常温) を代入すると, 座屈応力 $\sigma_{cr}=\sigma_y=235$ MPa となり, 初期圧縮応力 150 MPa の場合の加熱中の作用応力は, 座屈応力および基準降伏点よりも小さい。初期圧縮応力が局部座屈に対する許容応力度よりも大きくなるのは, 腐食に伴い断面が欠損し板厚が減少した場合には想定されるが, 一般には生じない状態である。ただしそれでも本解析の範囲では作用応力が基準降伏点の 72 %程度であり, 座屈発生の可能性は低いと考えられる。

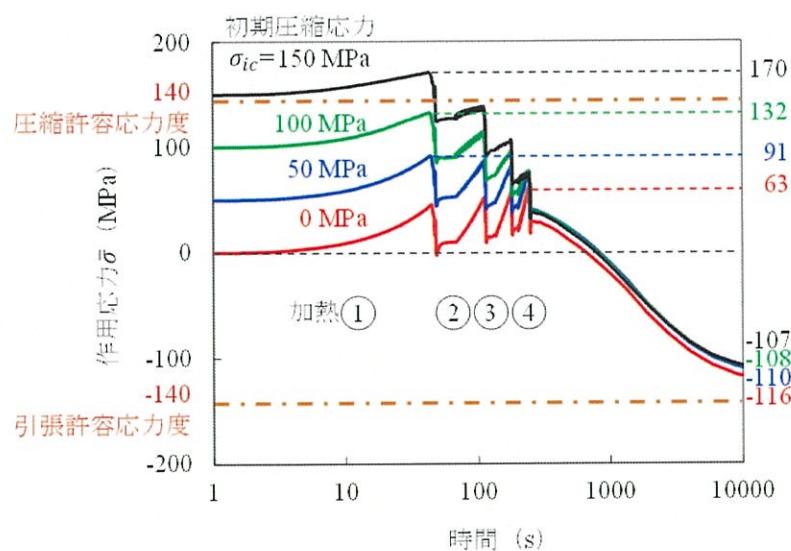


図-8 作用応力の履歴

4.3 冷却後の耐荷性能評価

本解析で得られた作用応力と面内方向ひずみ（パネル初期長さに対する面内方向変位の割合）の関係を図-9に示す。初期圧縮応力 0 MPa, 50 MPa, 100 MPa, 150 MPa に対し最大応力はそれぞれ、201 MPa, 191 MPa, 191 MPa, 185 MPa となった。以降、最大応力を圧縮強度と定義する。全ての初期圧縮応力において、SS400 の基準降伏点 235 MPa と比較すると、圧縮強度はこれを下回った。また、初期圧縮応力が大きい程、圧縮強度が低下した。初期圧縮応力が大きくなる程、残留面外変形および残留応力が大きくなるため、圧縮強度が低下したと考えられる。しかし、全ての初期圧縮応力の条件で圧縮強度は圧縮許容応力度である 140 MPa よりも大きく、圧縮部材としての基本的耐荷性能を満たしていると考えられる。

5.まとめ

本研究では、IH による塗膜剥離施工の適用範囲拡大を念頭に、圧縮部材を簡易にモデル化したパネルを対象とし、IH による加熱を熱弾塑性解析によりシミュレーションした。供用下での加熱が部材の耐荷性能に及ぼす影響を検討するため、一連の解析的検討を実施した。得られた主な知見を以下に示す。

- (1) 実構造部材では、塗膜剥離施工中にも荷重が作用している。この状態を、初期圧縮応力として 0 MPa, 50 MPa, 100 MPa, 150 MPa を付与することにより再現した。初期圧縮応力が 0 MPa の場合は加熱中の面外変形が -0.83 mm であったのに対し、初期圧縮応力が 50 MPa, 100 MPa, 150 MPa の場合は面外変形がそれぞれ -1.07 mm, -1.27 mm, -1.40 mm となった。初期圧縮応力の増加に伴い面外変形の絶対値が大きくなつたが、いずれも許容誤差圏内であった。
- (2) 加熱中の作用応力は初期圧縮応力 0 MPa, 50 MPa, 100 MPa に対しそれぞれ最大 63 MPa, 91 MPa, 132 MPa となり、局部座屈に対する許容応力度 140 MPa よりも小さかつた。初期圧縮応力 150 MPa では作用応力が 170 MPa となつたが、基準降伏点の 72 %程度であり、座屈発生の可能性は低いと考えられる。
- (3) 加熱終了後 10000 秒の冷却時間を設け、更にパネル面内方向の強制変位を増加させた。初期圧縮応力 0 MPa, 50 MPa, 100 MPa, 150 MPa に対し、最大応力（圧縮強度）はそれぞれ、201 MPa, 191 MPa, 191 MPa, 185 MPa となつた。圧縮強度は基準降伏点よりも低いが、圧縮許容応力度よりは大きいため、IH による塗膜剥離後も圧縮部材としての基本的耐荷性能を満たしていると考えられる。

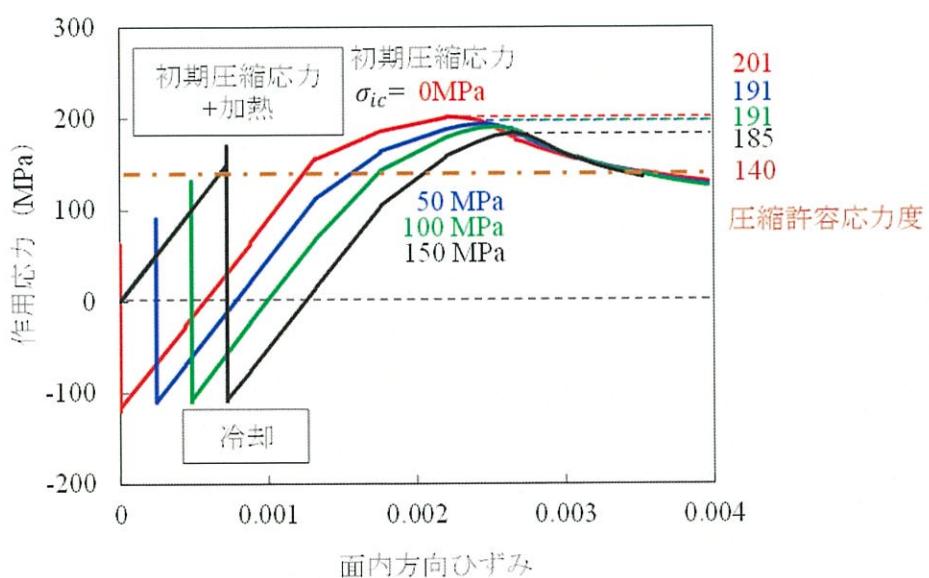


図-9 作用応力とひずみの関係

本研究で対象とした程度の寸法の部材では、IHによる塗膜剥離のための加熱が部材の耐荷性能に及ぼす影響が小さい可能性が示唆された。今後、解析結果の妥当性を検証するための実験を行うとともに、種々の寸法、境界条件を設定した解析によりデータを蓄積することで、中小規模の鋼橋部材を含め IHによる塗膜剥離施工の適用拡大に繋がるものと期待される。

参考文献

- 1) 小西日出幸, 鈴木直人, 田中正裕, 鮫島 力, 西谷朋晃, 廣畠幹人: 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 卷第 7 号, pp.14-20, 2017.
- 2) 小西日出幸, 井隼俊也, 福島夏樹, 松井隆行, 早矢仕正尚, 廣畠幹人: 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, 第 54 卷第 6 号, pp.18-23, 2020.
- 3) 桐畠光生, 廣畠幹人, 小西日出幸: 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 卷, pp.707-714, 2019.
- 4) 中村弘文, 鈴木弘之, 橋梁の崩壊温度, 鋼構造論文集, 第 6 卷, 第 22 号, pp.57-65, 1996.
- 5) 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 卷, 第 3 号, pp.431-435, 2005.
- 6) 道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編, 社団法人日本道路協会, 2012.