様式第11 別紙2

建設技術研究開発費補助金 総合研究報告書

- (2)研究期間:平成29~30年度
- (3) 交付申請者名:廣畑幹人(大阪大学・准教授)
- (4)研究代表者名:廣畑幹人(大阪大学・准教授)
- (5) 共同研究者名:北根安雄(名古屋大学・准教授)
- (6) 補助金交付総額: 18,690,000円

(7) 技術研究開発の目的

鋼構造物の防食塗膜の更新において、既存の動力工具を用いた方法に比べ効率性や環境負 荷低減の観点から有用性が認められており、有機溶剤のような火気への配慮が必要な工法に 比べ有利となる加熱による塗膜剥離技術に注目する。既存の高周波誘導加熱装置とは異なる 特徴を有する熱源であるセラミックヒーターにより、ボルト継手や溶接継手など複雑な形状 を有する鋼橋の継手部の塗膜剥離に適した加熱方法を提案し、塗膜剥離プロセスの安全性向 上、自動化、高精度化、高効率化を実現する。

既存の高周波誘導加熱装置では継手部のボルト1本ずつにマニュアル操作で適用するの に対し、セラミックヒーターにより、多数のボルトと継手部全体を自動制御で加熱し安全か つ効率的に塗膜剥離できる技術を開発する。ボルトが50本以上使用される継手部の塗膜剥 離に要する時間を既存の高周波誘導加熱装置や塗膜剥離剤を用いた場合の50%まで短縮す る。

桁端部など部材が立体的に接合される溶接継手部においては、既存の高周波誘導加熱装置 では塗膜剥離の施工難度が高くなる。セラミックヒーターにより、複雑な形状を有する溶接 継手部に適応し、鋼材への熱影響や残留応力の変状も制御する塗膜剥離技術を開発する。マ ニュアル操作を基本とする既存の高周波誘導加熱装置では加熱時間が数秒長くなっただけ でも目標温度を 50~100℃超過する場合があるが、本研究で開発する自動加熱を基本とする 技術では温度管理精度を 25℃以内に抑制する。また、実構造物のスケールを想定した有限 要素解析モデルを構築し、塗膜剥離施工の条件探索を可能にするシミュレーション手法を提 案する。

(8) 技術研究開発の内容と成果

- 1. 高力ボルトの塗膜剥離技術
- 1.1 概要

まず,高力ボルト継手部に適するセラミックヒーターを用いた加熱装置を作製し、加熱実 験を行った。その後、作製した加熱装置を用いて塗膜剥離実験を行い、塗膜剥離の可否およ び施工性を確認した。さらに、ボルト頭頂部ひずみ計測実験を実施した。最後に、実施工を 想定し、作業効率・安全性を考慮した施工手順を提案した。

1.2 加熱装置の作製

鋼橋に使用される高力ボルト継手部を想定し、図-1 に示す実験供試体を作製した。寸法 205mm×160mm×9mm、材料 SS400 の母板を寸法 175mm×320mm×9mm、材料 SS400 の連結



図-1 供試体の形状および寸法

表-1 供試鋼材の機械的性質

部材	母板および 連結板	高力ボルト	座金	ナット
材質	SS400	F10T(M22)	F35 F10	
降伏応力(MPa)	245	900	490	
引張応力(MPa)	400	1000	690	



(a) 試作装置1





(c) 試作装置 3

板2枚で挟み込み、2行4列に配置された8個のF10T(M22)摩擦接合用六角高力ボルト セットで固定したものである。それぞれの鋼材の機械的性質¹⁾を表-1に示す。この供試体の 複雑な凹凸形状にも適応でき、目標加熱温度を超過しないよう高精度な温度管理が可能な加 熱装置の開発を試みた。

図-2 試作した加熱装置

約25mm×25mmのセラミック小片を組み合わせることで、3種類の加熱装置1、2、3を試作した。図-2(a)に示す加熱装置1は、ナットに八の字型に巻き付ける形状に構成したものである。図-2(b)に示す加熱装置2は、ボルトおよびナットの上から覆い被せるようなシートの形状に構成したものである。図-2(c)に示す加熱装置3は、それぞれのナット側面に巻き付ける形状に構成したものである。また、供試体に熱電対を取り付けることにより、温度をモニタリングしながら事前に設定した温度履歴を満足するよう入熱量を自動制御した。熱電対の設置箇所を図-3に示す。赤色で示したTC1~TC4、TC11、TC12はボルトの頭頂部およびねじ先端部、青色で示したTC5~TC8はナットの側面、緑色で示したTC9~TC10、TC13は連結板上の熱電対配置を表している。高力ボルト継手は300℃以上に加熱されると冷却後のボルト軸力低下,継手耐力の低下が生じるとされている²。このことから、目標加熱温度を250℃

と設定した。図-4 で示すように供試体全体を断熱材で被覆した後、試作したそれぞれの装置を設置して加熱実験を行い、得られた温度履歴をもとに温度管理精度を比較した。

それぞれの装置を用いた加熱実験から得られた温度履歴を図-5、図-6、図-7に示す。図-5 から、装置1による加熱では、熱電対ごとの温度のばらつきが比較的大きくなる結果となっ た。図-6から、装置2による加熱では、装置1の温度履歴に比べ熱電対ごとの温度のばら つきは小さくなった。しかし、ナット側面や連結板上などにおいて目標温度に達していない 箇所が存在した。図-7から、装置3による加熱では、熱電対ごとの温度のばらつきは装置1、 2に比べて小さく、安定した加熱が可能となった。ボルトおよびナットの温度差は非常に小 さく、連結板の加熱・非加熱両面および非加熱側のボルト頭頂部も250°C近くに達しており、 温度履歴を高精度に制御することができた。以上の結果から、図-2(c)に示す加熱装置3を高 力ボルト継手部における塗膜剥離実験に採用する。







図-4 断熱材による被覆



図-5 加熱装置1による温度履歴



図-7 加熱装置3による温度履歴

1.3 塗膜剥離実験

1.3.1 加熱条件の探索

装置3を用いて供試体を加熱し、塗膜剥離実験を実施した。なお、実験には図-1に示した供試体全面に重防食塗装系のC-5塗装系³⁾を施したものを使用した。塗装は図-8に示すような外観であり、薄い緑色を呈している。温度などの加熱条件をいくつか設定し、各条件下で塗膜剥離作業の施工性を比較することで、高力ボルト継手部における塗膜剥離に適した加熱条件の探索を試みた。

まず、塗膜剥離に適した加熱温度を探索する。鋼材への熱影響を抑制する観点から、加熱 温度は可能な限り低いことが望ましい。そこで前節での加熱実験の設定温度であった250℃ に加えてそれよりも低い温度となる 150℃、200℃の加熱を行った。加熱条件および塗膜剥 離の条件を表-2 に示す。加熱プログラムは温度履歴の安定性を考慮してそれぞれ 30 分で 150℃、40分で200℃、60分で250℃と設定している。加熱実験同様、断熱材で供試体全体 を被覆して加熱を行う。実験により得られた温度履歴を加熱温度150℃、200℃、250℃の順 に図-9、図-10、図-11に示す。なお、実験途中で熱電対が接触不良となり最後まで温度履歴 が得られなかった場合は図には示していない。温度履歴より、全ての条件で温度を高精度に 制御することができたと言える。加熱終了後、断熱材と加熱装置を取り外し、スクレーパー およびワイヤブラシを用いて塗膜を剥離した。塗膜剥離後の供試体外観を加熱温度 150℃、 200℃、250℃の順に図-12 に示す。塗膜の除去程度を明示するため1つのボルトセットおよ びその周辺のみを拡大して示す。図-12(a)から、150℃に加熱した場合はボルトやナット、そ の周辺部で塗膜が薄く残り、金属光沢が現れるまで剥離することはできなかった。次に図 -12(b)から、200℃に加熱した場合はボルト周辺部においては塗膜が残る部分が存在したも のの、ボルトおよびナット部の塗膜は金属光沢が現れるまで剥離することができた。図-12(c) から、250℃に加熱した場合、ボルトやナット部だけでなくその周辺部においても塗膜をほ とんど残すことなく金属光沢が現れるまで剥離することができた。



図-8 供試体の塗装外観

	A-2 加点はより室族が確不日					
	目標温度(℃)	加熱時間(分)	目標温度到達後			
	150	30	塗膜剥離			
	200	40	塗膜剥離			
250		60	塗膜剥離			
	200	40	10 分間 200℃を保持 した後、塗膜剥離			
	200	40	120℃まで外気冷却 した後、塗膜剥離			

表-2 加熱および塗膜剥離条件





温度履歴 (250℃) 図-11



(a) 150°C

(b) 200°C

(c) 250°C

塗膜剥離後の供試体外観(加熱後すぐ塗膜剥離) 図-12

続いて、目標温度到達後の温度管理によって塗膜剥離作業の施工性に違いが生じるかを検 証した。200℃に加熱後 200℃を 10 分間維持、200℃に加熱後 120℃まで外気冷却の 2 パター ンを設け、断熱材で被覆後それぞれの加熱プログラムを実行した。得られた温度履歴を図-13、 図-14に示す。加熱プログラム終了後、同様に断熱材と加熱装置を取り外し、スクレーパー とワイヤブラシを用いて塗膜を剥離した。塗膜剥離後の供試体表面の様子をボルトセットお よびその周辺のみを拡大して図-15に示す。いずれのパターンもボルト周辺部においては塗 膜が残る部分が存在したものの、ボルトおよびナット部の塗膜は金属光沢が現れるまで剥離 できた。200℃に加熱後すぐに塗膜を剥離した場合と比較して、塗膜剥離の程度や施工性に ほとんど相違はなかった。また、200℃に加熱した場合の塗膜剥離実験で剥離した塗膜片の 写真を図-16に示す。固体の塗膜が帯状に剥がれていることが確認でき、廃棄物となる剥離 した塗膜の回収は既存の方法に比べ容易であると言える。











図-16 剥離した塗膜片

(a) 10 分間 200°Cを保持

(b) 200℃に加熱後、120℃ まで外気冷却

図-15 塗膜剥離後の供試体外観 (加熱後の温度を管理し、塗膜剥離)



図-17 剥離した塗膜片の拡大写真 (300 倍)

まて	「外気冷却	
外観		
ווד	沙.咕크(家代)	

衣-5 ICP-MS 分析 結果				
	濃度	(ppb)		
元素名	サンプル1	サンプル2		
Cr	< 0.1	< 0.1		
Mn	< 0.1	< 0.1		
Fe	0.3	0.2		
Co	< 0.1	< 0.1		
Ni	< 0.1	< 0.1		
Cu	< 0.1	< 0.1		
Zn	43.3	25.7		
Ag	< 0.1	< 0.1		
Cd	< 0.1	< 0.1		
In	< 0.1	< 0.1		
Sn	< 0.1	< 0.1		
Pb	< 0.1	< 0.1		

表-3 ICP-MS 分析結果

1.3.2 剥離した塗膜片の元素分析

図-16 の塗膜片の最下層膜部分をマイクロスコープで 300 倍に拡大撮影した写真を図-17 に示す。黒色で一部光沢が見られる部分が最下層膜である。この最下層膜を一部採取し、 ICP-MS (Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometry) による分析を行った。この分析に よって塗膜片の最下層膜に存在する元素を特定し、塗装全体のうち、どの層まで剥離できて いたのかを供試体に施した C-5 塗装系の構成成分から確認すした。ICP-MS による剥離した 塗膜の最下層膜の分析結果を表-3 に示す.いずれのサンプルからも Zn が最も多く検出され た。C-5 塗装系の構成成分のうち Zn を多量に含む層は防食下地すなわち塗装最下層のジン クリッチペイントであることから、図-17 に見られる最下層膜はジンクリッチペイントであ ると考えられる。

1. 4 加熱による高力ボルトの緩み有無に対する検討

本章における実験により、作製した加熱装置を用いて高力ボルト継手部の塗膜剥離が可能 であることを確認した。しかし、塗膜剥離だけでなく、加熱によって高力ボルト継手として の性能が低下しないことを保証する必要がある。そのため、加熱および塗膜剥離実験に用い たいくつかの供試体に対し、加熱により高力ボルトに緩みが発生していないかを検討する実 験を行った。 1. 4.1 高力ボルト頭頂部の解放ひずみ計測実験

高力ボルトが正常に締結されているとき、図-18(a)左図の青色の矢印が示す向きに軸力が 発生する。ボルトの頭頂部は軸力によって凹状に変形する⁴⁾。締付けを解放すると変形が解 消されボルト頭頂部は平らな形状に戻る。締結状態のボルトの頭頂部にひずみゲージを取り 付け、締付けを解放すると、締付け解放前後の形状の相対的な変化量が解放ひずみとして検 出される。高力ボルトに緩みが発生している場合、図-18(b)左図に示すように軸力が低下す る⁵⁾ため頭頂部の凹状変形は正常な締結時に比べ小さくなる。このとき締付けを解放すると、 締付け解放前後の形状の差異が小さくなるため、それに伴い解放ひずみは小さくなると予想 される。このようなボルト頭頂部の解放ひずみの違いが加熱の有無により発生するのかを検 証した。

実験には、加熱を行っていない供試体(以下、非加熱供試体と称す)および前述の加熱および塗膜剥離実験に用いた供試体のうち150℃、200℃、250℃にそれぞれ加熱した供試体の計4種類を使用した。各供試体の8個の高力ボルト頭頂部に図-19に示す二軸ひずみゲージを取り付けて高力ボルトの締付けを解放し、二方向のひずみの平均値(解放ひずみ)を求めた。同様にして得た高力ボルト8個分の解放ひずみの平均値をその供試体における解放ひずみとした。高力ボルトの締付け解放にはトルクレンチを用いた。各供試体の高力ボルト解放ひずみ計測の結果および非加熱供試体の解放ひずみに対する各温度に加熱した供試体の解放ひずみの変化量を図-20に示す。なお、これらの供試体は作製時期(ロット)がやや異なるものがあり、作製時期が同じ供試体どうしを比較し変化量を算出することとした。すなわち、非加熱供試体1に対する150℃に加熱した供試体、非加熱供試体2に対する200℃に加熱した供試体の解放ひずみおよびその変化量を算出した。

図-18 高力ボルトの締付け解放模式図



(a) 正常に締結された高力ボルト



(b) 緩みが発生した高力ボルト



図-19 二軸ひずみゲージ





150°Cに加熱した場合解放ひずみは約3%増加し、200°Cおよび250°Cに加熱した場合は解 放ひずみがそれぞれ約1.2%および5.7%減少する結果となった。しかし、高力ボルト締付け の施工において各高力ボルトの導入軸力にはばらつきが3%程度発生するという調査結果の があり、本実験の供試体の導入軸力にも個体差があると考えられる。実験の誤差の影響を想 定し、200°Cおよび250°Cに加熱した結果から、加熱により解放ひずみは減少する傾向があ ることが予想される。

1. 4. 2 熱弾塑性解析

上述の実験により計測した加熱による解放ひずみの増減が、ボルト軸力とどのように対応 しているのかを明らかにする必要がある。そこで、有限要素法に基づく熱弾塑性解析によっ て、加熱と解放ひずみおよびボルト軸力の詳細な対応関係の把握を試みた。解析により誤差 や個体差の影響を受けることなく、実験結果を力学的メカニズムに基づき再現することがで きる。まず、解析モデルの妥当性を検討した。次に、加熱の前後における高力ボルト頭頂部 ひずみおよびボルト軸力の変化を再現した。

解析の対象は150℃、200℃、250℃にそれぞれ加熱した供試体である。解析モデルは供試 体における高力ボルトの締付けと加熱装置による加熱を再現することを目的として、対称性 を考慮し簡単のため 1/8 対称モデルとした。次に、解析条件を表-4 に示す。母板、連結板は SS400、高力ボルトおよび座金はそれぞれ F10T (M22)、F35 とする。高力ボルトは 4 節点 ソリッド要素(四面体要素)とし、座金、母板、連結板をそれぞれ 8 節点ソリッド要素(六 面体要素)とした。有限要素解析コード Abagus 6.14 を用い、温度-変位連成解析を行った。 解析モデルの全体図および各部材の要素分割の詳細を図-21 に示す。また、図-22 に示すよ うに対称面には対称条件を満足するように境界条件を与えた。鋼材の物理定数の温度依存性 は実験に基づく既往の研究⁷⁾を参照し、図-23(a)に示す数値を使用した。また、鋼材の機械 的性質の温度依存性については高力ボルト継手の耐火性などに関する既往の研究 2.8から得 られた図-23(b)に示す高温時強度を使用した。それぞれの鋼材どうしの接触面にはマスター スレーブ法による接触設定を行った。接触摩擦にはクーロンモデルを使用し、ペナルティ法 により摩擦力の算定を行った。ここで、高力ボルト摩擦接合の接合面について道路橋示方 書・同解説 ⁹、鉄道構造物等設計標準・同解説 ¹⁰では鋼材表面の黒皮を除去し 0.4 のすべり 係数が確保されるよう処理を行うことが推奨されている。しかし、供試体作製の過程で接合 面処理を行っていないことから、供試体においては黒皮を接合面とした。実験のシミュレー ションを行う目的から、解析モデルにおける接触面の摩擦係数は AASHTO¹¹⁾を参考に 0.33 とした。

部材	母板および 連結板	高力ボルト	座金		
材質	SS400A	F10T (M22)	F35		
要素	8 節点ソリッド要素	4節点ソリッド要素	8 節点ソリッド要素		

表-4 解析条件



図-21 解析モデルのメッシュ分割



図-22 解析モデルの境界条件



図-23 材料定数の温度依存性

以上に示した解析モデルを用いて、加熱装置による高力ボルト継手供試体の加熱実験の再 現解析を行った。解析のフローは1)強制変位によるボルト軸力の導入、2)外表面からの一 様な熱流束の導入、3)加熱の停止と冷却となる。まず、図-24に示すように各ボルト軸部最 下面に軸方向の強制変位を与えた。このとき、解放ひずみ計測実験において得られた非加熱 供試体の解放ひずみと同程度のひずみがボルト頭頂部に発生するように調節した。以降ステ ップ3)まで、高力ボルトの締結を意味する変位の拘束は継続する。次に、2.2節の加熱実験 の均一で安定した加熱に近似するよう熱量の大きさを調節しモデルの外表面に表面熱流束 を与えた。温度履歴は30分で150℃、40分で200℃、60分で250℃の3種類とした。断熱 材による被覆は、図-25に示す断熱材の熱伝達特性¹²⁾をモデル外表面に与えることで再現し た。最後に、表面熱流束の導入を停止し、十分な時間幅を設定して常温程度に冷却した。こ のとき、外気冷却を再現するためモデル外表面には空気への熱伝達特性¹²⁾を与えた。周囲 温度は実験時の気温を参考に27℃とした。

強制変位を調整し、解析モデルの加熱前のボルト頭頂部ひずみを非加熱2供試体の解放ひずみ計測結果とほぼ一致させた。それに伴い発生するボルト軸力は258kNとなった。なお、 ボルト頭頂部ひずみおよびボルト軸力は解析モデルにおける2個のボルトの平均値とした。 高力ボルトには締付け時の目標とすべき導入軸力として標準ボルト軸力が定められている。



これは鋼構造接合部設計指針が規定する設計ボルト軸力を十分に確保するための軸力であ り、設計ボルト軸力を 1.1 倍したものである 5。本研究で用いる F10T (M22) における設計 ボルト軸力および標準ボルト軸力はそれぞれ 205kN、226kN である。解析により得られたボ ルト軸力は、標準ボルト軸力の約 1.14 倍と近い値を示しており、作成した解析モデルによ って実験のボルト軸力を再現できる可能性が示された。次に、それぞれの加熱プログラムを 実行し、得られたボルト頭頂部ひずみの履歴を図-26(a)に示す。ボルト頭頂部ひずみは加熱 によって大きく変化し、200℃、250℃の加熱では一時的に逆向きのひずみにまで達するが、 冷却に伴い元の値近くまで回復するという挙動を示した。しかし、最終的には150℃、200℃、 250℃の加熱後のボルト頭頂部ひずみはそれぞれ 0.018%、0.35%、0.91%減少する結果とな った。ボルト頭頂部ひずみは加熱温度の上昇に従い減少する傾向を示した。ボルト頭頂部ひ ずみ変化量の解析結果は実験結果よりも小さくなったが、実験誤差を考慮すれば解析結果は 概ね妥当であると言える。さらに、ボルト軸力の履歴を図-26(b)に示す。ボルト頭頂部ひず みと同様に、加熱によってボルト軸力は一時的に大きく減少し、冷却に伴って元の値近くま で回復するという挙動を示した。しかし、最終的に 150℃、200℃、250℃の加熱でボルト軸 力はそれぞれ0.84%、1.6%、2.8%減少した。ボルト頭頂部ひずみと同様に、加熱温度の上昇 に従い軸力が減少する傾向を示した。また、加熱温度による減少量はボルト頭頂部ひずみよ

加熱温度(°C)	150	200	250		
ボルト頭頂部ひずみ変化量(%)	-0.018	-0.35	-0.91		
ボルト軸力変化量(%)	-0.84	-1.6	-2.8		

表-5 解析によるボルト頭頂部ひずみおよび軸力変化量



因-27 医两种切形状的より引任

りもボルト軸力のほうが大きくなった。加熱前後におけるボルト頭頂部ひずみおよび軸力の 変化量を表-5に示す。

この加熱温度によるボルト軸力の減少傾向は、高力ボルト継手のすべり耐力に影響を与える可能性があるが、所定の標準ボルト軸力が導入されている場合、加熱装置による加熱を行っても設計ボルト軸力を下回ることはなく、高力ボルト継手の性能は保たれる。また、既往の研究³⁾から、ボルト軸力の低下が30%の場合でも、すべり耐力に大きな影響はないことが結論付けられている。これらのことから、塗膜剥離のための加熱が高力ボルト継手の性能に与える影響は大きくないと判断できる。

1.5 実施工を想定した塗膜剥離実験

ここまで、各種の基礎的実験には図-1 に示す小型の供試体を用いてきた。しかし、実橋 梁に使用される高力ボルト継手の規模は供試体に比べ大きい。開発した加熱装置を用いて作 業効率や安全性などを考慮した具体的な施工手順を考案するためには、実施工を想定し、よ り大きな規模で実験を行う必要がある。そこで、新たに図-27 に示す大型の実験供試体を作 製した。大型実験供試体は、寸法 940mm×470mm×9mm、材料 SS400 の母板を寸法 840mm×470mm×9mm、材料 SS400 の連結板 2 枚で挟み込み、9 行 6 列に配置された 54 個の F10T (M22) 摩擦接合用六角高力ボルトセットで固定したものである。また橋梁側面の高 力ボルト継手を想定し、寸法 150mm×500mm×9mm、材料 SS400 の鋼板を台座とし、供試体 が自立するよう固定した。供試体表面には C-5 塗装系の塗装を施した。この大型実験供試体 を用いて具体的な施工手順の提案を試みる。

図-28 加熱装置

図-29 断熱材による被覆

小型供試体での加熱実験のように、供試体全体を被覆、加熱した後に塗膜剥離を行う場合、 加熱装置を取り除くことで経過時間とともに供試体の冷却が進行するため、作業に取り掛か る順番が遅い箇所ほど塗膜剥離作業の施工性が低くなる可能性がある。そこで、図-28に示 す大型供試体に適した加熱装置を作製した。高力ボルトセット1行分(6個)に装着する形 とし、図-29に示すように1行ごとに断熱材で覆い加熱し、塗膜剥離作業を行う。目標温度 に達するまでに要する加熱時間を利用し、加熱が完了している箇所の塗膜剥離を並行して行 うことで作業の効率化を図る。しかし、加熱と塗膜剥離を同時進行させることで加熱箇所付 近での塗膜剥離作業を余儀無くされる場合がある。およそ 200℃にまで達する加熱部分と隣 接する箇所の塗膜剥離作業は安全上可能か否かを検証する必要がある。さらに、加熱してい る一部分のみ被覆するため、断熱材の効果が小さくなる可能性があり、均一で安定した温度 管理が可能かどうかを確認する必要がある。

まず,熱電対を図-30に示す位置に設置し、加熱装置を3台用いた塗膜剥離実験を実施した。図-31に示す合計4工程で実験を行った。供試体模式図左側の数字は高力ボルトの行番号を表す。温度管理精度を向上させるため、加熱装置どうしが干渉し合わないよう、加熱箇所どうしが2行分以上離れるように配置した。また、装置を取り付け加熱箇所のみ断熱材で被覆した。加熱目標は30分で200℃とし、3回に分けて加熱を行った。塗膜剥離には小型供試体での実験と同様のスクレーパーおよびワイヤブラシを使用した。

図-31 加熱装置3台による塗膜剥離の実施工程

工程番号	1	2	3 4	
加熱および 塗膜剥離の 様子				
作業内容 および 作業時間 (分)	加熱:30	剥離:10 装置設置:10 加熱•剥離:30	剥離:10 装置設置:10 加熱•剥離:30	剥離:20
経過時間 (分)	30	80	130	150

表-6 加熱装置3台による塗膜剥離の実施状況

工程ごとの加熱および塗膜剥離の実施状況を表-6 に示す。加熱装置の設置時間を含め、4 工程を150分で終了した。本実験から得られた温度履歴を図-32 に示す。図-32(a)に示す TC1 と TC2、TC7 と TC8、TC13 と TC14 はそれぞれ工程 1 で加熱した 1、4、7 行目の熱電対の 温度履歴を表す。図-32(b)に示す TC3 と TC4、TC10、TC15 と TC16 はそれぞれ工程 2 で加 熱した 2、5、8 行目の熱電対の温度履歴を表す。図-32(c)に示す TC5 と TC6、TC11 と TC12、 TC17 と TC18 はそれぞれ工程 3 で加熱した 3、6、9 行目の熱電対の温度履歴を表す。図中 の破線はそれぞれの熱電対設置箇所の加熱が終了した時点を表す。加熱過程で温度が上昇し にくい箇所もあったが、ほぼ全ての熱電対が要求した時間設定で正確に目標温度である 200°Cに達し、温度履歴を高精度に管理することができた。

塗膜剥離作業は、耐熱性素材の軍手を装着し作業を行うことで安全上問題なく行うことができた。しかし、加熱部分を断熱材で被覆すると、断熱材が一定の厚みを持つため隣接する行の高力ボルトに接し、加熱装置および断熱材の寸法上塗膜剥離作業が不可能となる箇所が多く存在した。さらに、加熱時間30分の中で3行分(18個)すべての高力ボルトの塗膜剥離を行うことは作業効率上困難であり、工程2、工程3においては10分の作業時間を追加した。これらのことから、全工程を通し十分な塗膜剥離を行うことはできなかった。

図-32 加熱装置3台による温度履歴

図-33 加熱装置2台による塗膜剥離の実施工程

続いて、加熱装置2台を用いた塗膜剥離実験を実施した。図-33に示す合計5工程で実験 を行った。加熱装置3台での実験結果から、高精度に温度管理を行えることが確認できたた め、加熱箇所どうしを1行分以上離していれば問題ないものとして配置した。加熱目標は 30分で200℃とし、4回に分けて供試体の加熱を行った。なお、施工性の比較のため8行目 のみ加熱および塗膜剥離作業は実施しないものとする。加熱装置3台での実験とは異なり、 加熱装置および断熱材の設置箇所と塗膜剥離作業箇所が隣接しないように計画し、作業効率 の向上を試みた。熱電対は図-30に示す位置とした.

工程ごとの加熱および塗膜剥離の実施状況を表-7 に示す。装置の設置時間を含め、5 工程 を 174 分で終了した。本実験から得られた温度履歴を図-34 に示す。図-34(a)に示す TC1 と TC2、TC5 と TC6 はそれぞれ工程 1 で加熱した 1、3 行目の熱電対の温度履歴を表す。図-34(b) に示す TC9 と TC10、TC13 と TC14 はそれぞれ工程 2 で加熱した 5、7 行目の熱電対の温度

表-7 加熱装置2台による塗膜剥離の実施状況

履歴を表す。図-34(c)に示す TC3 と TC4、TC17 はそれぞれ工程 3 で加熱した 2、9 行目の熱 電対の温度履歴を表す。図-34(d)に示す TC7 と TC8、TC11 と TC12 はそれぞれ工程 4 で加 熱した 4、6 行目の熱電対の温度履歴を表す。図中の赤色の破線はそれぞれの熱電対設置箇 所の加熱が終了した時点を表す。加熱箇所を 1 行分離れるよう配置することでほぼ全ての熱 電対が要求した時間設定で正確に目標温度である 200℃に達し、温度履歴を高精度に管理す

図-35 塗膜剥離後の供試体

ることができた。さらに、加熱装置および断熱材の設置箇所と塗膜剥離作業箇所が隣接しないよう計画したことで施工性が向上した。塗膜剥離実験後の大型供試体の外観を図-35 に示す。1 工程の加熱時間 30 分の中で全工程を通し十分に塗膜剥離を行うことができた。加熱装置3台を使用した場合と比較して、工程数が増加した分、総作業時間は長くなったものの、施工性や塗膜剥離の程度を考慮すると、本実験では加熱装置2台を使用した場合のほうが施工に適していたと言える。

1.6 まとめ

高力ボルト継手部における塗膜剥離に適するセラミックヒーターを用いた加熱装置を開 発し、その実用可能性について検討した。さらに実施工を想定し、作業効率、安全性を考慮 した施工手順の検討を行った。得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 高力ボルト継手部に対し、ナット側面に巻き付ける形状に構成した加熱装置を用いる ことで、温度のばらつきが比較的小さく安定した加熱が可能であることを確認した。
- (2) 作製した加熱装置を用いて、C-5 塗装系の塗装を施した高力ボルト継手供試体を 200℃に加熱することで、ボルトおよびナット部の塗膜を剥離することができた。また、200℃に加熱後 10 分間維持、200℃に加熱後 120℃まで外気冷却してから塗膜を剥離したが、塗膜剥離作業の施工性に違いは生じなかった。さらに、ICP-MS による分析結果より、塗膜剥離後金属光沢が目視で確認できた箇所は、塗装最下層であるジンクリッチペイントまで全ての塗膜が剥離できていたと思われる。
- (3) 高力ボルト頭頂部の解放ひずみ計測実験および熱弾塑性解析の結果から、加熱により 高力ボルトの軸力は減少する傾向があることが分かった。しかし、施工時の標準ボル ト軸力が確保されている場合、摩擦接合の性能を維持するために最低限必要とされる 設計ボルト軸力を下回るほどの軸力の減少は確認されなかった。
- (4) 9行6列の計54個の高力ボルトを有する供試体を用いて、30分で200℃に加熱するプログラムを設定し、高力ボルト1行分を加熱できる装置を2台用使用して塗膜剥離の実施工を想定した実験を実施した。加熱に要する時間を活用し、すでに加熱が完了した箇所の塗膜剥離を順次行うことで作業を同時進行する施工方法を提案した。また、加熱装置および断熱材の設置箇所と塗膜剥離する箇所を隣接させないことで施工性を確保する方法を提案した。

2. 溶接継手部の防食塗装剥離技術

2.1 概要

溶接継手部に適するセラミックヒーターを用いた加熱装置を作製し、供試体に対して加熱 実験を行った。その後、作製した加熱装置を用いて塗膜剥離実験を行い、塗膜剥離の可否お よび施工性を確認した。さらに、面外変形と残留応力の変化について計測を行うとともに、 熱弾塑性解析により加熱が供試体の変形および残留応力に及ぼす影響を明らかにした. 最後 に、圧縮実験と弾塑性有限変位解析によるシミュレーションを行い、耐荷性能の変状の有無 について検討した。

2.2 加熱装置の作製

図-36 に示すようなプレートガーダー橋桁端におけるフランジ、ウェブ、垂直補剛材の交差部を想定し、図-37 に示す実験供試体を作製した。寸法 600mm×300mm×6mm、材料 SM400A のウェブ1枚に、寸法 200mm×300mm×19mm、材料 SM400A のフランジ2枚を上下に溶接した。そして、ウェブ上に寸法 600mm×77mm×9mm、材料 SM400A の垂直補剛材を2枚溶接したものである。溶接材料(ワイヤ)は YGW12 である。それぞれの鋼材の機械的性質を表-8 に示す。この供試体における2面および3面交差部のような狭隘な形状にも適応する加熱装置の開発を試みた。

図-36 鋼橋桁端の模式図

図-37 供試体の形状および寸法

6

主。	細れの総誌的性好
1X-0	亚門121 マノ1茂11成日リ111 貝

部材	フランジ	フランジ ウェブ 補剛材		溶接ワイヤ
材質	SM400A			YGW12
降伏応力(MPa)	350	356	307	460
引張応力(MPa)	503	507	471	540

高力ボルト継手部における加熱装置と同様に、約25mm×25mmのセラミック小片を組み 合わせることで2種類の加熱装置1、2を試作した。試作した2種類の装置をそれぞれ図-38 に示す.図-38(a)、図-38(b)に示す装置1は、供試体に覆せるような1枚のシート状に構成し たものである。図-38(c)に示す装置2は、部材の交差部に沿うように柱状に構成したもので ある。また、供試体に熱電対を取り付け、温度をモニタリングしながら事前に設定した温度 履歴を満足するよう入熱量を自動制御した。熱電対の配置を図-39 に示す。赤色で示した TC1~TC6 はフランジ面上、青色で示した TC8~TC10、TC12~TC14、はウェブ面上、緑色で 示した TC7、TC11 は補剛材面上の熱電対配置である。なお、TC1~TC4、TC8 と TC12 は溶 接ビード上であるが、ここではそれぞれフランジ面上、ウェブ面上と表記した。装置は熱電 対の配置と対応する図-40 に赤色で示す箇所に設置した。高力ボルト継手供試体における加 熱実験と同様に、まずは加熱の標達成温度を250℃とし、TC1 を入熱量制御用熱電対とし、 加熱プログラムを60分で250℃に設定した。図-41 に示すように供試体全体をそれぞれ断熱 材で被覆した後、試作した装置により加熱実験を行い、加熱実験から得られる温度履歴をも とに温度管理精度を比較した。

(a) 装置1の外観

図-38 試作した加熱装置

(c) 設置した装置2の外観

図-39 熱電対の配置

図-40 加熱装置の設置箇所

図-41 断熱材による被覆

図-42 加熱装置1による温度履歴

それぞれの装置による加熱時の温度履歴を図-42、図-43に示す。図-42から、装置1による加熱では熱電対ごとの温度のばらつきが大きく、一部の熱電対は目標温度に到達しない結果となった。一方、図-43から、装置2による加熱では装置1に比べ熱電対ごとの温度のばらつきは小さくなり、溶接ビード上におい概ね目標温度に到達した。この結果から、装置2を用いることで温度履歴を制御することができたと判断し、装置2を溶接継手部における塗膜剥離実験に採用する。

図-43 加熱装置2による温度履歴

2.3 塗膜剥離実験

上述の通り採用した加熱装置を用いて供試体を加熱し、塗膜剥離実験を実施した。実験に は図-37に示した供試体全面に対し重防食塗装系のC-5塗装系を施したものを使用した。塗 装は図-44に示すような外観であり、薄い緑色を呈している。高力ボルト継手部を200℃以 上に加熱することでC-5塗装系の塗膜剥離が可能であったことから、溶接継手部においても 200℃に加熱することで同様に塗膜剥離が可能であると考えられる。そこで、目標加熱温度 を200℃とした。しかし、高力ボルト継手供試体の加熱実験における温度履歴に比べると、 溶接継手供試体の加熱実験における温度履歴にはばらつきが大きかった。供試体全体ではな く、あくまで溶接部近傍のみの加熱および塗膜剥離を基本とするものであるが、より安定し た温度管理を目的として加熱速度を低下させ、加熱プログラムは60分で200℃に設定した。 熱電対の配置を図-45に示す。赤色で示したTC1~TC4、TC7~TC10、TC13~TC14、TC19~TC22 はフランジとウェブまたは補剛材の交差部溶接ビード上、青色で示したTC5~TC6、 TC11~TC12、TC17~TC18、TC23~TC24 はウェブと補剛材の交差部溶接ビード上の熱電対配 置である。さらに、装置を2台同時に使用し、図-46の下フランジ上面の赤色で示した位置 に装置を配置することで、直接加熱されない箇所を含め下フランジとウェブおよび補剛材が 交差する位置の溶接ビード近傍の領域に対し塗膜剥離を試みた。

加熱実験と同様に断熱材で供試体全体を被覆し、装置を設置して加熱を行った。得られた ウェブ面およびフランジ面の温度履歴をそれぞれ図-47、図-48に示す。なお、実験途中で熱 電対が接触不良となり、最後まで温度履歴が得られなかった場合は図には示していない。温 度履歴より全ての熱電対において温度のばらつきは小さく、加熱側・非加熱側ともに温度履 歴を高精度に制御することができたと言える。加熱終了後、断熱材と加熱装置を取り外し、

図-44 供試体の塗装外観

図-46 加熱装置の設置箇所

図-47 ウェブ面の温度履歴

図-48 フランジ面の温度履歴

(a) 加熱側

(b) 非加熱側

図-49 塗膜剥離後の供試体外観(溶接ビード部を拡大)

スクレーパーおよびワイヤブラシを用いて塗膜を剥離した。塗膜剥離後の供試体外観を図 -49に示す。塗膜の除去具合を明示するため溶接ビード部を拡大して示す。加熱側・非加熱 側ともに溶接ビード部およびその周辺部の塗膜を金属光沢が現れるまで剥離することがで きた。 2. 4 加熱による変形・残留応力の変化

上述の実験により、作製した装置を用いて溶接継手部に対し高精度な温度管理の下、塗膜 剥離が可能であることを確認した。この技術の実用性を高めるため、塗膜剥離だけでなく、 加熱によって構造部材としての性能が低下しないことを保証する必要がある。まず、加熱前 後での供試体の面外変形を測定し、加熱による変形の有無を検証する。次に残留応力を計測 し、局所的な加熱による残留応力の変化の有無を確かめる。さらに、熱弾塑性解析によるシ ミュレーションを行い、解析モデルの妥当性を確認するとともに実験による残留応力の計測 箇所以外での応力分布を把握する。これらの結果から、加熱による供試体の変状有無につい て検討する。

2.4.1 面外変形の測定

作製した装置による加熱および冷却の過程で供試体は膨張・収縮する。この影響を受け、 供試体に変形が生じるか否かを確認するため、加熱前後での面外変形の測定を行った。部材 の外辺両端に緊張した水糸を固定することで形成した直線に対し、部材の面外方向への変形 量を実測した。測定の対象はウェブおよび補剛材とし、それぞれ外辺上の3点で測定を行っ た。測定点は図-50に示す150mmの等間隔の3点とした。また、測定を行ったウェブおよ び補剛材上の辺を A~D と名付ける。

面外変形測定結果を表-9に示す。加熱による変形はいずれも1mm以内に留まる結果となった。この結果は測定器具の目盛りを目視により判断したものであり、測定精度は高いとは言い難いが、少なくとも1mm程度の範囲を超える規模での面外変形が発生していないことが確認された。

2.4.2 残留応力の計測

塗膜剥離のための加熱の場合、加熱温度は 200℃であり比較的低温であるが、局所的な入 熱により内部応力が働き供試体の残留応力の分布が変化する可能性がある。意図しない残留 応力が発生することで構造部材の性能を低下させる可能性がある。そこで、供試体の残留応 力を計測し、加熱の有無による残留応力の変状の把握を試みた。

図-50 面外変形の測定点および辺の名称

辺	変形向き	測定高さ (mm)	加熱前 (mm)	加熱後 (mm)	加熱による変形 (mm)	
		15	2.0	2.0	0.0	
А	Bの向きに凸	30	2.0	1.0	-1.0	
		45	1.5	0.5	-1.0	
	A の向きに 凸	15	0.5	0.0	-0.5	
В		30	1.0	0.0	-1.0	
		45	0.5	0.5	0.0	
	Dの白キに	15	1.0	1.0	0.0	
С	D の回さに 凸	30	1.0	1.0	0.0	
		45	0.5	0.5	0.0	
		15	0.0	0.0	0.0	
D	Cの向きに凸	30	0.0	0.0	0.0	
		45	0.5	0.5	0.0	

表-9 面外変形測定結果

計測には X 線回折法を用いた¹⁴。加熱した供試体と加熱していない供試体(以下,加熱 供試体,非加熱供試体と称す)それぞれにおける特定箇所の残留応力を計測した。図-51 に 示す位置で計測を行った。計測点数はウェブ面上に計6点、補剛材面上に計4点とし、装置 形状の制約のなかで計測できる最も加熱位置に近い部分に計測点を設けた。計測する応力方 向は供試体の長手方向とする。また、塗装した供試体には C-5 塗装系を施す際に素地調整の ためにブラスト処理が行われており、表面には圧縮残留応力が付与されている。X 線回折法 は鋼材表面の残留応力を計測するため、この圧縮残留応力が本来の加熱による残留応力の変 状把握を阻害する可能性がある。そこで、塗装を施していない供試体を用いて、塗膜剥離実 験における加熱プログラムと同様の加熱を行い、加熱前後の残留応力を計測した。

残留応力の計測結果を図-52 に示す。加熱供試体、非加熱供試体を比較して、残留応力の 差異はウェブ面、補剛材面ともにほとんど見られなかった。

2.4.3 熱弹塑性解析

加熱供試体、非加熱供試体の計測点における残留応力の値が明らかになったが、計測点だけでなく供試体全体における応力分布を把握し、分布そのものに差異がないことを確かめる必要がある。そこで、有限要素法に基づく熱弾塑性解析により、加熱と残留応力の対応関係の把握を試みた。

まず、解析モデルの妥当性を検討し、次に、塗膜剥離実験のシミュレーションを行い、加熱の前後における残留応力の分布の変化を再現した。有限要素解析コード Abaqus 6.14 を用い、温度-変位連成解析を行った.解析モデルは実験供試体と同様の寸法を持つものとした。フランジ、ウェブ、補剛材はともに SM400A、溶接ビードは YGW12 とし、ミルシートの値から機械的性質を設定した。フランジ、ウェブ、補剛材および溶接ビードはそれぞれ 8 節点ソリッド要素(六面体要素)とし、供試体の要素分割の詳細を図-53 に示す。物理定数の温度依存性は高力ボルト継手の解析モデルと同様の値を使用した。また、鋼材の機械的性質の温度依存性については、実験に基づく既往の研究⁷⁾⁸⁾を参照した。代表としてフランジおよび溶接ワイヤの応力-ひずみ関係の温度依存性を図-54 に示す。

図-53 解析モデル

図-54 応力一ひずみ関係

以上に示した解析モデルを用いて、溶接継手供試体の加熱実験の再現解析を行った。解析 のフローは 1) 溶着金属要素の生成と入熱領域の進行による部材の溶接、2) 常温までの冷 却、3)加熱装置設置表面への一様な熱流束の導入、4)常温までの冷却となる。まず、部材 同士が接する箇所について、物体熱流束を導入した溶着金属の要素を逐次生成し、溶接を再 現した。このとき、溶接し終えた要素の入熱を無効化することで熱源の通過を表現した。モ デル外表面には空気への熱伝達特性を与えた。この手法を用いて、溶接の挙動を精度よく再 現できることが分かっている¹²⁾。次に、溶接を終了し、十分な時間幅を設定して供試体を 常温程度に冷却する。さらに、塗膜剥離実験の均一で安定した加熱に近似するよう熱量の大 きさを調節しモデルの外表面に表面熱流束を与えた。入熱領域は加熱装置が供試体に接して いた面と対応させた。加熱装置による温度履歴は 60 分で 200℃とし、断熱材による被覆は、 使用した断熱材の熱伝達特性をモデル外表面に与えることで再現した。断熱材は高力ボルト 継手供試体における実験と同じものを使用したため、熱伝達特性も同一とした。なお、モデ ルの表面温度の確認は図-45 に示す熱電対 TC1~TC24 の配置に従って行った。最後に、表面 熱流束の導入を停止し、再び十分な時間幅を設定して常温程度まで冷却した。このとき、外 気冷却を再現するためモデル外表面には再び空気への熱伝達特性を与えた。周囲温度は実験 時の気温を参考に20℃とした。

まず、解析により得られた温度履歴を実験と比較し図-55 に示す。代表して TC1~TC4 の 比較を示す。図は目標加熱温度に到達した直後までの温度履歴を示す。TC1~TC4 だけでな く、すべての熱電対において両者は概ね一致したため、加熱装置による供試体の加熱を再現 できたと言える。次に、供試体の高さ 140mm における長手方向(Z軸方向)残留応力の解 析結果を計測結果とともに図-56 に示す。ウェブ面上の残留応力は解析結果と計測結果が概 ね一致した。補剛材面の残留応力は、実験値が最大で約 1.6 倍の圧縮となり一致しなかった が、溶接線から離れるに従い圧縮応力が増加するという共通の傾向が見られた。また、解析 結果から、ウェブ面上および補剛材面上ともに加熱の前後で残留応力がほぼ変化しておらず、 計測結果と同様の傾向を示した。さらに、供試体の面外変形について確認したところ、加熱 の前後での変化はいずれの点でも 1mm 以下であり、実験結果と同様の傾向となった。これ らのことから、作成した解析モデルによって実験の挙動を再現できる可能性が示された。ま た、加熱装置による 200℃の加熱が鋼部材の残留応力分布に与える影響はほとんどないと言 える。

図-56 残留応力計測結果と解析の比較(Z=140mm)

2.5 圧縮実験

これまでの各種実験において、加熱による面外変形および残留応力の変化がほとんど見られないことが示された。また、作成した解析モデルにおいても同様の傾向が確認できた。ここでは、供試体に対し静的単調載荷圧縮実験を行い、加熱による耐荷性能の変化の有無につ

いて検討する。また、解析モデルによる実験のシミュレーションを行い、実験および解析結 果の整合性を確認する。最後に、解析モデルにおいて実橋梁を想定した境界条件を設定し、 実験とは異なる条件下での溶接継手部の加熱による耐荷性能への影響について検討する。 2.5.1 実験

加熱供試体、非加熱供試体それぞれに対し、静的単調載荷圧縮実験を行った。実験には図 -57 に示す油圧式万能試験機を用いた。加熱供試体は塗膜剥離実験を行ったものを使用し、 非加熱供試体には C-5 塗装系が施されたものを使用した。供試体は加熱・非加熱で2体ずつ の計4体である。供試体Z軸方向に対して単調に載荷を行い、上フランジの下面に変位計 を設置して鉛直変位の測定を行った。

載荷実験終了後の供試体の変形モードをそれぞれ図-58 に示す。また、実験により得られた供試体の荷重-変位関係をそれぞれ図-59 に示す。最大荷重は加熱供試体においてそれぞれ906kNおよび882kN、非加熱供試体においてそれぞれ881kNおよび866kNとなり、すべて同様の挙動を示した。載荷後の供試体外観から、非加熱供試体1については、変形のモードが異なる個体であったが、加熱の有無によって荷重-変位関係の差異はほとんど見られなかった。このことから、加熱による供試体の耐荷性能の変化はないと考えられる。

図-57 油圧式万能試験機

(a) 非加熱供試体

(b) 加熱供試体 図-58 載荷後の変形モード

図-60 実験と解析による荷重一変位関係の比較

2.5.2 弹塑性有限変位解析

上述の解析で用いた図-53 に示すモデルを使用し、圧縮実験の再現解析を行った。解析の フローは計 5 ステップとし、ステップ 4)までは上述の解析手法と同様であり、加熱および 冷却の条件は同一である。本解析ではさらに、ステップ 5)として上フランジ面に対してモ デルの Z 軸方向下向きに強制変位を与え、単調圧縮載荷を行った。ただし、非加熱供試体 における解析はフロー中のステップ 3)である熱流束の導入を取り除いた上で行った。

加熱・非加熱モデルの荷重-変位関係を図-60に示す。なお、実験結果は加熱・非加熱供 試体それぞれ一体ずつを代表して示す。変形モードは加熱・非加熱のモデルともに実験結果 に類似した。解析結果も同様に実験の挙動を良く再現しており、最大荷重は加熱・非加熱に おいてそれぞれ 878.2kN および 878.3kN となり実験結果に近い値となった。また、加熱・非 加熱のモデルにおいて荷重-変位関係はほぼ一致しており、加熱が供試体の耐荷性能に与え る影響がないことを示す根拠となり得る。

図-61 境界条件のパターン

2.5.3 境界条件の検討

実施した各種解析から、作製した解析モデルを用いて加熱による溶接継手供試体の一連の 挙動を再現することができたと言える。しかし、一般に実橋梁の桁などは供試体をX軸の 方向(橋軸方向)に延長した形状となっている.また、床版などによってZ軸方向の変位が固 定される可能性がある。このような実橋梁における境界条件は供試体と大きく異なるため、 供試体の実験および解析結果のみからは加熱による影響を十分に評価できているとは言え ない。そこで、供試体の解析モデルに新たな境界条件を設定することで、実橋梁を想定した 加熱のシミュレーションを行い、加熱による耐荷性能への影響についての検討を試みた。

新たに設定する境界条件は、i) X 軸方向変位の拘束、ii) Z 方向変位の拘束,iii) これらの 両方同時の拘束の3種類とした。境界条件i)は、モデルがプレートガーダー橋の桁端部であ ることを想定した上で、水平方向の変位に着目した。図-36より、解析モデルのX 軸に垂直 な二面に関して一方は解放となるが、残り一方はX 軸方向に部材が延長されており、変位 がほとんど発生しないと考えられる。これより,図-61(a)に赤色で示す面でX 軸方向の変位 を拘束した。境界条件iiは、モデルが同様にプレートガーダー橋の桁端部であることを想 定した上で、鉛直方向の変位に着目した。図-36より、解析モデルのZ 軸に垂直な二面に関 して一方は支承に支持され、残り一方は床版により固定される。二面ともZ 軸方向には変 位がほとんど発生しないと考えられるため、図-61(b)に青色で示す面でZ 軸方向の変位を拘 束した。境界条件iii は水平・鉛直方向の変位拘束をともに考慮し、図-61(c)に示すように境 界条件i, ii を同時に与えた。

境界条件 iii、iii を与えたそれぞれの加熱・非加熱モデルに対し、上述と同様の手法で解 析を行った。解析により得られた境界条件 i、ii、iii の加熱・非加熱モデルの荷重-変位関 係を,供試体モデルの解析結果とともに図-62 に示す。境界条件 i を設定した場合、加熱の 有無で最大荷重に約 6.7%の最も大きな差が生じた。しかし、変形モード、荷重-変位曲線 はともに加熱・非加熱のモデルでほとんど差異はなかった。実橋梁を想定した境界条件下で の供試体の解析モデルにおいて、加熱による耐荷性能への影響はないと言える。このことか ら、プレートガーダー橋の桁端部において加熱装置を用いた塗膜剥離を行う場合も、部材の 耐荷性能に影響はないと考えられる。

図-62 各境界条件における荷重-変位関係

2.6 まとめ

本章では、鋼橋桁端部を想定した溶接継手における塗膜剥離に適する加熱装置を開発し、 その実用可能性について各種実験および解析から検討した。本章で得られた結果を以下にま とめる。

- (1) 鋼橋桁端部を想定した溶接継手供試体に対し、鋼板の交差部に沿うように柱状に構成した加熱装置を用いることで、温度のばらつきは比較的小さく、安定した加熱が可能であることを確認した。
- (2) 作製した加熱装置を用いて、C-5 塗装系の塗装を施した溶接継手を 200℃に加熱することで、フランジ・ウェブ・垂直補剛材の交差部およびその周辺部の塗膜を剥離することができた。幾何学的不整の観点から、供試体のウェブおよび補剛材辺上において、加熱前後の面外変形を測定した。変形はいずれも 1mm 以内に留まる結果となった。
- (3) 材料的不整の観点から、残留応力の計測実験および熱弾塑性解析を行なった。加熱供試 体、非加熱供試体を比較して、残留応力分布の大きな変化は見られなかった。
- (4) 圧縮実験および弾塑性有限変位解析の結果から、加熱供試体と非加熱供試体を比較して、 荷重-変位関係に大きな差異は見られなかった。加熱による変形および残留応力の変化 が小さかったため、供試体の圧縮挙動に及ぼす加熱の影響がほとんどないことが示された。
- (5) 実橋梁を想定した境界条件を設定したモデルに対する解析においても、圧縮挙動の大き な変化は見られなかった。塗膜剥離のための加熱は鋼橋桁端部の耐荷性能にはほとんど 影響しないと考えられる。以上のことから、溶接継手部の塗膜剥離において、作製した 加熱装置が適用可能であると判断した。

参考文献

- 1) 日本工業規格: JIS B 1186、2013
- 2) 土木学会鋼情造委員会:鋼構造シリーズ24火災を受けた鋼僑の診断補修ガイドライン、 土木学会、2015
- 日本道路協会橋梁委員会 鋼橋小委員会 鋼橋塗装・防食 WG:鋼道路橋防食便覧、日本道路協会、2014年.
- 4) 佐藤祐輔、鈴木康夫:頭部ひずみと軸部ひずみに基づく高力ボルトの軸力測定精度、第 39回土木学会関東支部技術研究発表会、2012年
- 5) 土木学会鋼構造委員会:高力ボルト摩擦接合継手の設計・施工・維持管理指針(案)、 土木学会、2006年
- 6) 西村昭、田井戸米好、瀬良茂、穂積重臣、三谷哲夫:現場締め高力ボルト軸力のばらつ きについて、土木学会論文報告集、第180号、1-9、1970年
- 7) 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、431-435、2005年
- 8) 尾崎文宣、鈴木弘之:梁に高力ボルト継手を持つ鋼架構の崩壊温度、日本建築学会構造 系論文集、547、207-214、2001 年
- 9) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説 II鋼橋編、2002年
- 10) 鉄道総合技術研究所:鉄道構造物等設計基準·同解説「鋼·合成構造物」、2009 年
- 11) AASHTO: Standard Specifications for Highway Bridges、1994年.
- 12) 森博啓、廣畑幹人:溶接後熱処理による熱履歴が鋼部材の応力緩和および変形挙動に及 ぼす影響、土木学会論文集 A2,第73巻、第2号、2017年
- 石原靖弘、小林剛、狩野正人、亀井正博、谷平勉:経年による軸力低下とばらつきが高 カボルト摩擦接合の終局耐力に及ぼす影響、土木学会論文集、763、VI-63、33-42、2004 年
- 14) 日本材料学会: JSMS-SD-5-02 X 線応力測定法標準(鉄鋼編)、2002 年

(9) 成果の刊行に関する一覧表

刊行書籍 又は 雑誌名 (巻号数、論文名)	刊行年月日	刊行・発行元	原著者
土木学会第73回年次学術講演会講演概 要集(I-024、加熱による鋼橋高力ボル ト継手部の防食塗膜剥離技術に関する 基礎的検討)	H30. 08	土木学会	廣畑幹人、 北根安雄、 小西日出幸

(10) 成果による知的財産権の出願・取得状況

知的財産権の内容	知的財産権の 種類・番号	出願年月日	取得年月日	権利者
なし。				

(11) 成果の実用化 ※の見通し ※論文発表や現場試行ではなく実業務での社会実装

ボルト継手、溶接部ともに供試体レベルでの塗膜剥離施工性が検証できたが、現場試行 のプロセスを経てさらなる実用性を確認した後に、実務への適用が可能と考える。すなわ ち、成果の実用化に向けては未解決の課題があり、実用化の見通しは十分ではない。今後、 撤去済みの橋梁を用いて試験施工を行う計画があり、試験施工の結果を精査したうえで実 用化を目指していく。具体的な課題として、実構造物の足場上での作業安全性、施工時間、 コストに関する検証が必要である。また、剥離した塗膜片の回収と処理に関する検討も必 要と考える。

(12) その他

土木学会第73回年次学術講演会において当該研究の内容を発表し、優秀講演賞を受賞した。また、国土交通省近畿地方整備局近畿技術事務所主催の「ふれあい土木展 2018」において、関西土木リーグ(研究パネル展示)に出展し、奨励賞を受賞した。本イベントは一般向けに公開されたものであり、本研究開発の内容を広く周知する機会を得た。