

## IH(電磁誘導加熱)による鋼橋の塗膜除去工法

○岡部次美<sup>1)</sup>吉川 博<sup>2)</sup>小野秀一<sup>3)</sup>中村順一<sup>4)</sup>

### 1. はじめに

鋼橋の塗装塗替えにおける素地調整についてはグラインダ等を用いた3種ケレンが一般的であるが、再塗装後の耐久性を考慮するとより高いグレードのケレンが求められる。従来から用いられる高いグレードのものとしては、ブラストや塗膜剥離剤を用いた工法が挙げられるが、これらは騒音、粉じんの発生、廃材処理などの課題がある。これらに対応するものとして、北欧で大型船舶の塗膜剥離に用いられているIH(電磁誘導加熱)による塗膜除去工法(以下、「IH塗膜除去工法」と称す。)がある。

本稿では、IH塗膜除去工法の鋼橋への適用性を検討することを目的として、基礎的塗膜除去性能、加熱による鋼材への影響及び裏面の塗膜への影響、加熱条件等を把握するための各種試験(高力ボルト部加熱試験を含む。)を行ったので、それらの結果について報告する。

### 2. 工法および装置の概要

IH塗膜除去工法とは、図-1に示すように、IH塗膜除去装置の加熱ヘッドにより鋼材表面を加熱することで塗膜と鋼板を剥離させ、その後スクレーパなどを用いて塗膜を除去する工法である。加熱範囲は加熱ヘッドの直下のみで、塗膜が剥離する鋼板温度は、メーカー公称値で140~240℃と言われており、鋼材に対して影響の無い範囲の加熱である。



- 特長・加熱後、すぐに塗膜除去可能
- ・粉塵、騒音がほとんど発生しない
  - ・剥離した塗膜のみを容易に回収可能

図-1 塗膜剥離のイメージと特長

1) 首都高メンテナンス東東京株式会社 技術部長

〒103-0015 東京都中央区日本橋箱崎町 41-12

2) 首都高メンテナンス東東京株式会社 技師長

3) 一般社団法人日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所 研究第二部 次長

〒417-0801 静岡県富士市大淵 3154

4) 株式会社ナブコ 代表取締役

〒135-0042 東京都江東区木場 2-20-3

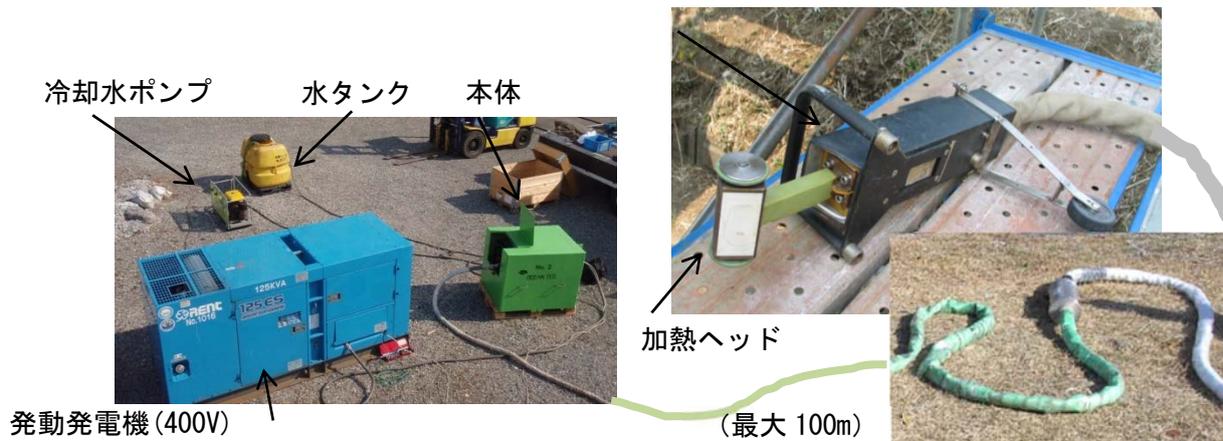


写真-1 電磁誘導加熱式塗膜除去装置の構成

本装置による塗膜除去の特長は、加熱後、すぐに塗膜除去が可能であり、作業時には粉塵や騒音がほとんど発生しない（発動発電機の作動音が騒音と言える程度）こと、剥離した塗膜のみを容易に回収することが可能であることなど、従来のグラインダ工法やプラスト工法などと比べて、作業環境や周辺環境への負荷が小さい工法であると言える。

写真-1 に I H 塗膜除去装置の構成を示す。今回実験に用いた装置は、ノルウェーの RPR Technologies 社のもので、本体および本体にケーブルで接続されるコンデンサ、加熱ヘッドで構成される。これらの他には電源（400V、150kVA 程度）と冷却装置が必要である。また本体と加熱ヘッドまでの距離は最大 100m まで対応が可能である。

### 3. 塗膜除去性能確認試験および模擬試験体加熱試験の概要

鋼橋への適用性を確認するため、まず、A系塗装が施された試験体を用いて、基本的な塗膜除去性能の確認試験を行った。性能確認試験では、塗膜の剥離性能を確認するとともに、施工速度、鋼板や塗膜の温度を熱電対等によって計測した。また、塗膜除去後の再塗装への影響や裏面の塗膜への影響についても目視観察や付着強度試験によって調査した。その後、薄板での加熱条件の検討を行うため、鋼 I 桁橋への適用を想定して、鋼 I 桁模擬試験体を用いて、加熱試験を行った。

#### 3. 1 塗膜除去性能確認試験

##### (1) 試験体

試験体は実橋から撤去した鋼製橋脚を用いた。試験体の板厚は、部位によって  $t=12\text{mm}$ 、 $t=21\text{mm}$  および  $27\text{mm}$  であり、それぞれの部位で試験を行った。試験体とした鋼製橋脚は、しゅん功が昭和 55 年であり、しゅん功図書や事前調査で塗装が 8 層見られたことから、A系塗装の上に 2 層追加されたものと推測される。また裏面はタールエポキシ樹脂塗装である。鋼製橋脚の既存塗膜の膜厚は、表面（加熱面）がおおよそ  $330\mu\text{m}$  で、裏面はおおよそ  $360\mu\text{m}$  であった。

(加熱状況)



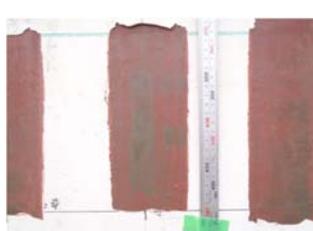
(塗膜剥離状況)



剥離させた塗膜  
(塗膜が板状に剥離)



写真-2 塗膜除去試験状況



(1) 下塗りの残存



(2) 2種ケレン相当

写真-3 塗膜除去後の仕上がり状況

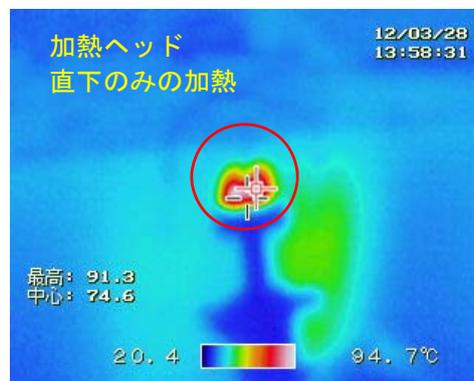


写真-4 加熱時の温度分布

## (2) 加熱装置の設定

加熱装置には、加熱ヘッドの移動速度に応じて出力電圧が自動で増減されるプログラムが組み込まれており、状況に応じて数十パターンあるプログラムの中から選ぶことになっている。本試験では、事前にいくつかの設定で予備試験を行い、塗膜の剥離状況等から、適切と考えられるプログラムを選定した。

## (3) 塗膜除去性能確認試験結果

### ① 塗膜除去性能

塗膜除去試験時の状況を写真-2 に示す。加熱後、スクレーパによって塗膜が板状に剥離されていることが確認される。

塗膜剥離後の鋼材表面は、写真-3 に示すように、下塗りと考えられる塗膜が残存している。これはスクレーパの刃先が鋭利でなかったために残存したものと考えられ、残存塗膜の膜厚は 30~40  $\mu\text{m}$  であった。そこで、グラインダを掛けたところ簡単に鉄肌が現れた。よって加熱によって塗膜が鋼板から剥離していたものと考えられ、本工法で簡単な研削工具の併用により 2 種ケレン相当が可能であることが確認された。

②温度測定結果

塗膜除去試験時における塗膜表面の温度を赤外線カメラによって確認したところ、写真-4 に示すように、加熱範囲は局所的であり、加熱ヘッドの直下のみが加熱されていることが確認された。また、熱電対によって計測した鋼板表面の鋼板温度と板厚の関係については、図-2 に示すとおり鋼板温度は板厚に関係なく一定、あるいは僅かに板厚が大きくなるにしたがって低下する傾向が見られる。施工速度と鋼板温度については、図-3 に示すとおり加熱装置の出力電圧が施工速度に比例して上昇する間は、鋼板温度は概ね一定となる傾向が見られる。また出力電圧が施工速度に関わらず一定である場合は、バラツキはあるが施工速度の増加とともに鋼板温度は低下する傾向が見られた。すなわち、出力電圧が一定の条件では、施工速度が増加すると加熱不足となる可能性が考えられる。

③再塗装および加熱裏面側の塗膜への影響

I H加熱による塗膜除去後に再塗装を行い、塗膜の付着強度試験を行った。

その結果、付着強度は  $8.8\text{N}/\text{mm}^2$  であったことから、本工法で除去した後の再塗装には問題はない。

加熱後の裏面側塗膜の付着強度については、板厚 12mm のケースで、未加熱時  $11.7\text{N}/\text{mm}^2$  であった箇所が加熱後  $4.6\text{N}/\text{mm}^2$  と約 4 割程度に低下した。基準値  $2\text{N}/\text{mm}^2$  を満足するが、裏面の塗膜に少なからず影響を与えることが確認された。

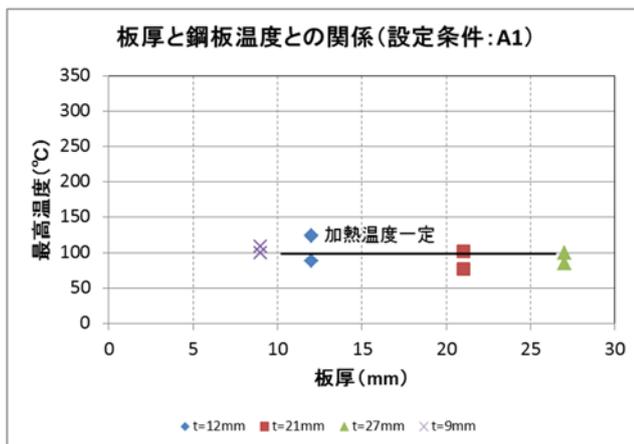


図-2 板厚と鋼板温度の関係

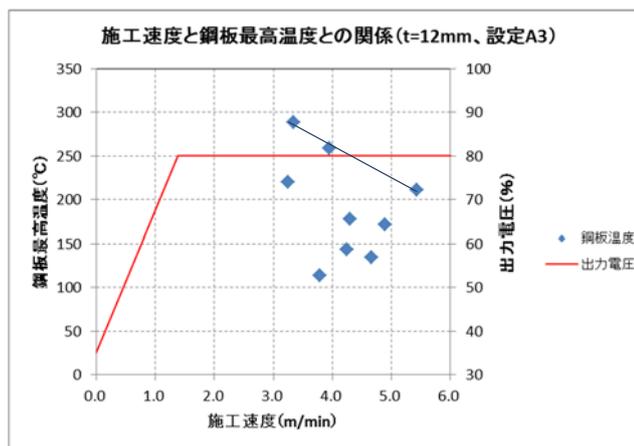
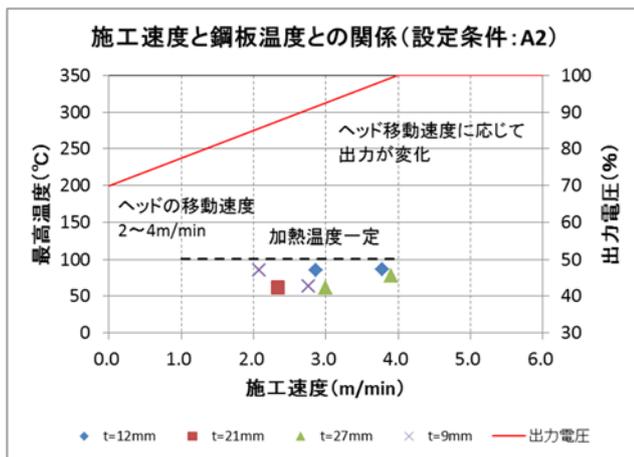


図-3 施工速度と鋼板温度の関係

④加熱による鋼材への影響

鋼板（板厚 12mm）の温度計測時に 200℃を超過した箇所において、断面マクロ組織調査（204℃）、およびビッカース硬度調査（289℃）を行った。その結果、鋼材組織および硬さには何ら変化は認められなかったことから、鋼材への熱影響は無いものと考えられる。

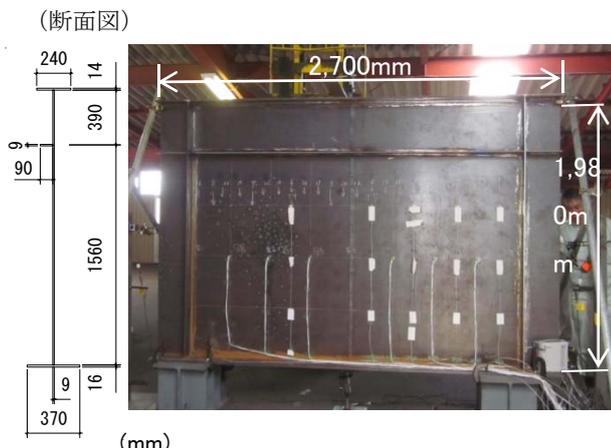


図-4 鋼 I 桁模擬試験体

3. 2 模擬試験体加熱試験

塗膜除去性能確認試験では、板厚が 12mm と薄いケースで加熱裏面側の塗膜への影響が確認された。また、薄板への加熱によって、鋼板の変形も懸念されたことから、薄鋼板を対象とした加熱試験を行って温度挙動を把握し、加熱方法を検討するための基礎試験を行った。

(1) 試験体

試験体は、図-4 に示すようにウェブ厚 9mm、ウェブ高さ 1,950mm、長さ 2,700mm の鋼 I 桁模擬試験体とした。

試験体には上・下フランジ、ウェブ面には水平・垂直補剛材も取り付けられている。また、本試験では、IH加熱による温度分布（熱伝導状況）を把握することを主目的としていることから、試験体への塗装はしていない。

(2) 試験方法

IH加熱による加熱範囲は、加熱ヘッド直下のみであるが、熱は鋼材を伝導していくとともに、放熱までにある程度の時間が必要のため、連続的に加熱していくと鋼板温度が必要以上に上昇することが予想される。また同時に、裏面の温度も上昇することが考えられる。このようなことから、熱伝導および放熱がある程度進み、鋼板の温度が低下した後に次の加熱に入る必要があると考え、加熱は間隔（距離および時間）を空けて行うこととした。

本試験では、加熱間隔や加熱温度が、鋼板温度や鋼板の変形に及ぼす影響を確認するため、加熱条件をパラメータとした。加熱手順は、図-5 に示すように、加熱ライン「1」から順に 300mm 間隔で「23」までとした。鋼板の温度は、図-5 に示すように、熱電対を 8 箇所（T1～T8）に取り付けて連続的に計測した。加熱は試験体下方から上方に向かって行った。

加熱間隔 300mm については、加熱ヘッドの幅が 100mm であることから、図-5 に示したように、加熱間隔を 300mm とすることで、例えば加熱ライン「1」の時は加熱直下の温度が計測でき、加熱ライン「9」の場合は、加熱位置からの距離が T1(T2)で 100mm、T3(4)が 200mm で温度計測が可能となり、加熱位置からの距離による温度の把握ができることを考慮した。

加熱温度および加熱間隔は次の 3 条件とした。

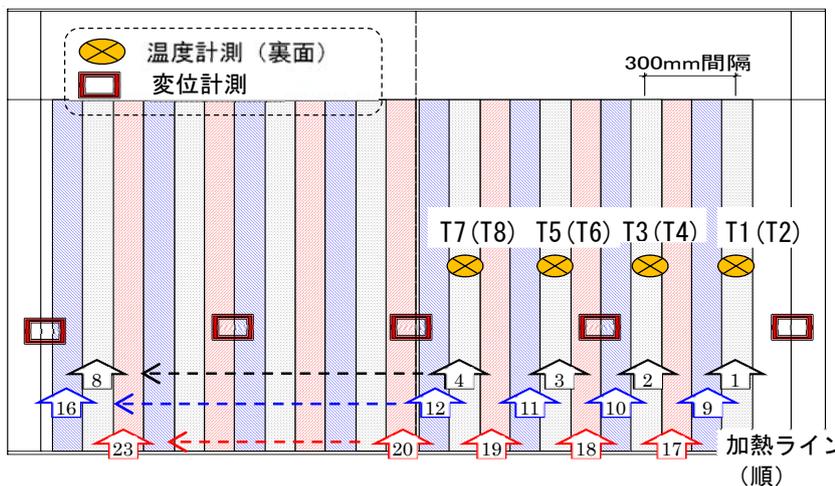


図-5 加熱順と計測位置図



写真-5 計測および加熱状況

- 条件①:加熱温度 150℃、30 秒間隔
- 条件②:加熱温度 150℃、連続
- 条件③:加熱温度 200℃、30 秒間隔

ここで、加熱温度とは加熱ヘッド通過直後・直近の鋼板温度であり、加熱ヘッドの移動速度を調整しながら、非接触温度計によって所定の温度となるように確認しながら加熱した。また、「30 秒間隔」とは例えば加熱ライン「1」を加熱した後、次の加熱ライン「2」の加熱を開始するまでの時間を 30 秒とすることを示し、「連続」は対象加熱ライン間を連続して加熱することを示す。

計測状況および加熱試験状況を写真-5 に示す。写真に示すように、ウェブの変形は加熱裏面側に変位計を取り付けて計測した。

### (3) 試験結果

#### ① 加熱の影響範囲

加熱条件①における T1 および T3 の温度経時変化を図-6 に示す。ライン 1 を加熱している影響は T3 には現れておらず、ライン 9 加熱の時は 100mm 離れた T1 に温度上昇が見られるが、200mm 離れた T3 には変化は見られない。さらにライン 17 加熱の時は 100mm 離れた T3 に温度上昇は見られるが T1 に変化は無い。したがって、加熱位置から 200mm 離れると加熱の影響を受けないことが分かる。

## ② 加熱間隔の影響

同じ加熱温度 150℃で加熱間隔の異なる条件①, ②の鋼板温度の推移を図-7に示す。連続加熱（条件②）では 30 秒間隔（条件①）と比べ高い温度が保持された状態となることを見て取れる。したがって、鋼板を高温に曝す時間を短くするためには、ある程度の間隔を持って加熱することが必要である。

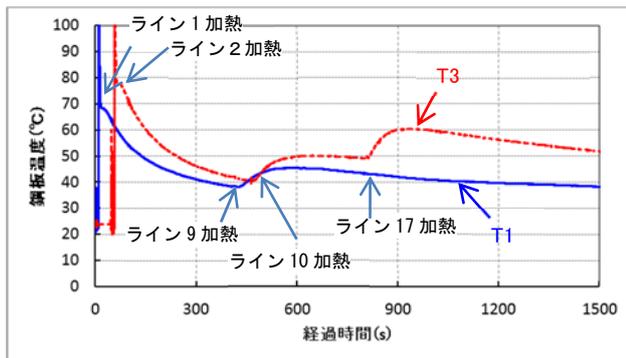


図-6 加熱位置と鋼板温度の変化（条件①）

## ③ 鋼板裏面温度への影響

条件①（150℃加熱、30 秒間隔）および条件③（200℃加熱、30 秒間隔）の加熱時の鋼板裏面温度の変化を図-8に示す。加熱温度を 150℃とした条件①では裏面の最高温度は 80℃程度であったのに対して、加熱温度を 200℃とした条件③では 120℃近くまで上昇することが確認された。また、条件③では、常に裏面も高温の状態が続いていることに加え、近接部を加熱した際に再度 80℃程度に上昇している。

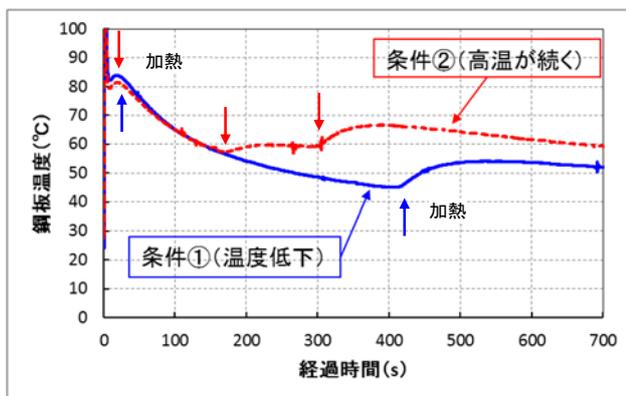


図-7 加熱間隔と鋼板温度の推移

この結果から、鋼箱桁外面の塗膜除去を想定すると、タールエポキシ樹脂塗装のように耐熱温度が 80℃程度と低い塗装が内面に塗布されていると、条件③のように高温で加熱すると裏面も高温になり、内面の塗装を損傷させてしまう可能性があることが明らかとなった。

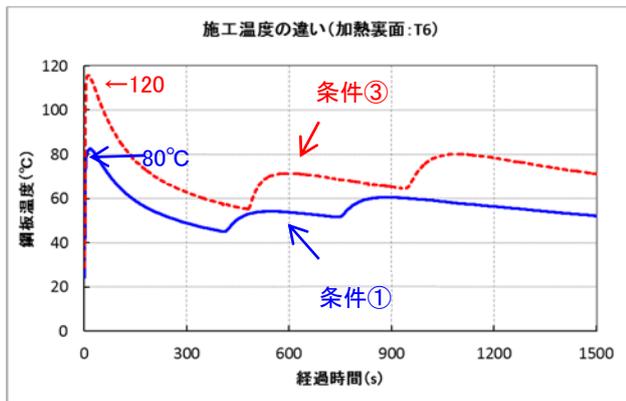


図-8 加熱裏面の鋼板温度

図-9には、加熱後の鋼板表面と裏面温度の経時変化を示す。このグラフから、

加熱後 7～8 秒後には表裏の温度がほぼ同じとなっていることが分かる。鋼箱桁のように加熱位置に対する裏面の温度管理を行うには、加熱後 7 秒後程度の表面温度を計測することで裏面温度を推定できることを示しており、すなわち過加熱状態になっていないかどうかは加熱表面の温度計測結果から確認できる。

④ 加熱による変形量

加熱によるウェブの面外変形を図-10 に示す。変形量は高温で加熱した「条件③」、連続で加熱した「条件②」が大きく、通常加熱・30 秒間隔で加熱した「条件①」が最も変形量は小さくなる結果となった。

このことから、鋼板温度が高いままとならないように、適切な温度でかつ適度な間隔で加熱する必要がある。

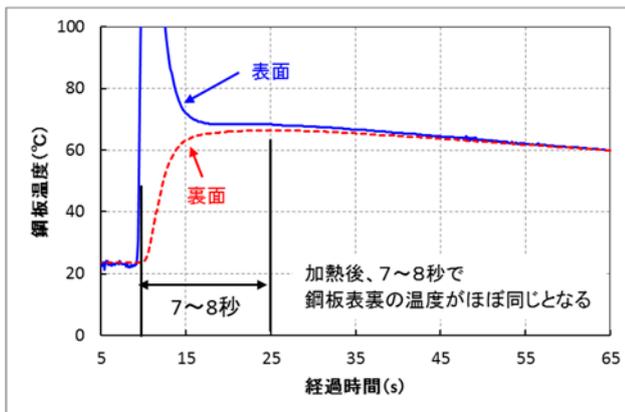


図-9 鋼板表裏面の温度変化

4. ボルト部加熱試験の概要

鋼橋は一般に薄肉鋼板で構成され、溶接または高力ボルト摩擦接合によって接合・組立が行われている。文献 1) には、F11T 高力ボルトの加熱温度と加熱後のボルト軸力低下量の関係が示されており、これによると加熱温度が 300°C 程度までは軸力の低下はほとんど見られない結果となっている。本検討で対象としている IH 加熱は、鋼材の表面を瞬間的に加熱しているため、ボルト軸力の低下はほとんどないと推定されるものの、IH 加熱による高力ボルト軸力の低下が無いかどうかの確認はされていない。

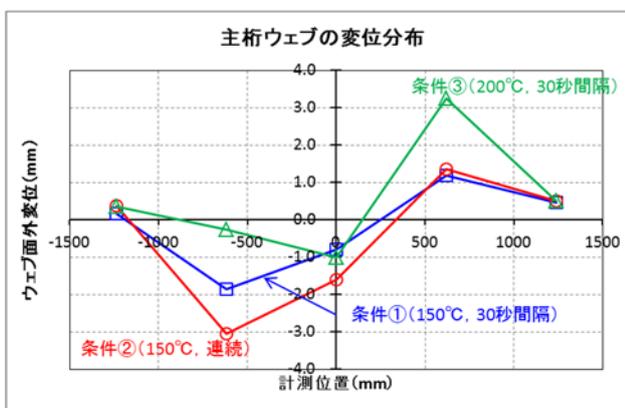


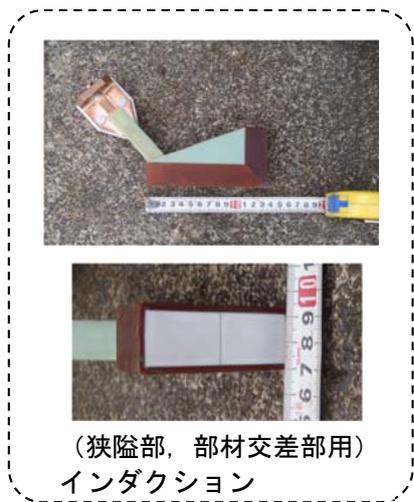
図-10 ウェブの面外変形量

そこで、高力ボルト締め付け試験体を用いて、高力ボルトを加熱した後の残存軸力を計測し、IH 加熱によるボルト軸力の低下の有無を確認する加熱試験を行った。

また本試験では、写真-6 に示すように、オプションとして用意されている狭隘部や部材交差部に用いる小型加熱ヘッドや、ボルト部専用の加熱ヘッドなどの中から、ボルト部専用加熱ヘッドを用いた。

(1) 事前調整

ボルト部の加熱試験に先立ち、実際に塗装されたボルト部に対して IH 加熱を行い、塗膜の除去が可能な条件を確認した。その確認試験の状況を写真-7 に示す。ここでは、ボルト部専用加熱ヘッドをボルト頭部、ナット部に被せて 1～3 秒の加熱を行い、塗膜が除去できる条件は、出力 60% で 2 秒以上の加熱が必要であることが分かった。よってその後のボルト継手部加熱試験では、この条件を目安にして試験を行った。



(狭隘部、部材交差部)  
インダクション



(ボルト部専用加熱ヘッド)

写真-6 各種加熱ヘッド



(加熱状況)



(塗膜除去後の状況)



(ボルト頭部)



(ナット部)

写真-7 ボルト部の塗膜除去

## (2) 加熱試験体

試験体は、図-11 に示すように厚さ 16mm の鋼板を 2 枚重ね、M22 の摩擦接合用高力六角ボルト (F10T) を用いて接合したものとした。ボルトの首下長さは 70mm のものを使用した。また、鋼板はボルトを 9 本用いて接合するが加熱してひずみ変化を測定するものは、そのうちの No. 1~5 の 5 本とした。

なお、本試験では、IH加熱によるボルト温度と軸力の計測を主目的としていることから、ボルト部への塗装はしていない。

## (3) 軸力計測方法

ボルトへのひずみゲージ貼付位置および温度計測用の熱電対の貼付位置を図-12 に示す。図に示すように、ボルトの軸力計測は、ボルト頭部に貼付したひずみゲージによって計測し

たひずみと導入軸力との関係から軸力を求める方法とした。

ただし、このようにボルトに貼付したひずみゲージによる計測では、ボルトを加熱した際にひずみゲージが破損する恐れがあるため、IH加熱時のひずみ変化を直接測定することは困難である。

よって本試験におけるIH加熱によるボルト軸力の低下の有無は、加熱前のボルト締め付け時のひずみ値と、加熱後にひずみゲージを貼り替えた上で、ボルトを緩めた際のひずみ値とを比較することで評価することとした。さらに、ボルトの締め付け直後にはリラクゼーションによって軸力が若干低下することが考えられるため、IH加熱を行う前（24時間以上前）にボルトの締め付けを行っておき、リラクゼーションによるひずみ変化を把握しておくこととした。

以上のことから、加熱前後のボルト軸力の変化量は、所定の軸力を導入した際のひずみ量からリラクゼーションにより低下した分を差し引いた分を初期軸力とし、加熱後のボルト緩め時のひずみから求めた軸力を対比することで求めることとした。

なお、加熱後の残存軸力を求める際には、ボルトを緩めた時に計測されたひずみ変化量に相当する軸力を、ボルト軸力計にセットしてボルトを締めながら確認することとした。（図-13）

（4）加熱条件

先述の事前調整の結果、加熱出力 60% で 2 秒以上の加熱によって塗膜を剥がせることが確認されたことから、加熱条件としては次の 2 通りとした。また、加熱

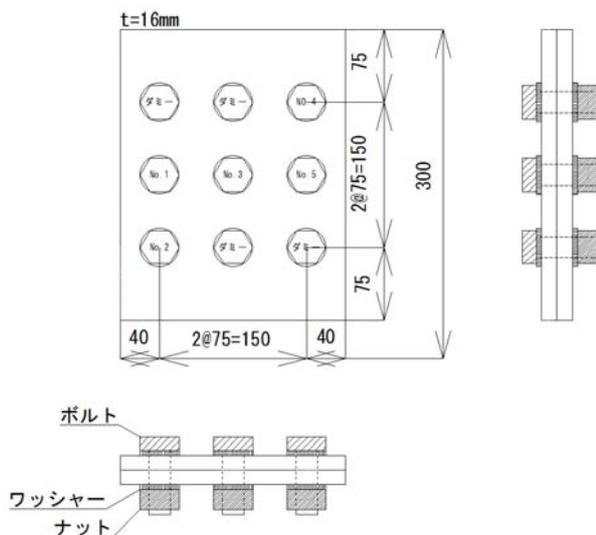


図-11 ボルト加熱試験体

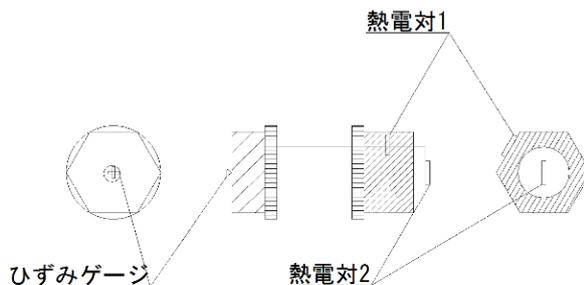


図-12 ひずみゲージおよび熱電対貼付位置

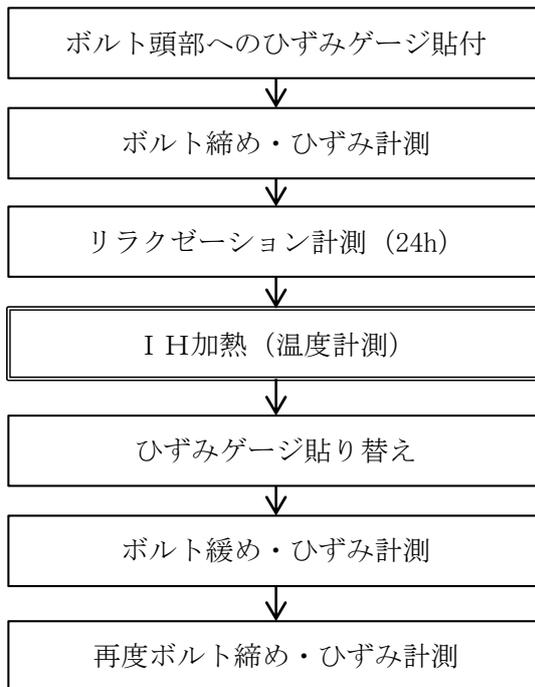


図-13 ボルト加熱試験フロー



写真-8 ボルト加熱試験状況

はボルト頭部とナットの両側を同条件で行った。

条件①：出力 60%，加熱時間 2 秒（3 本）

条件②：出力 60%，加熱時間 3 秒（2 本）

（5）試験結果

① 加熱前後のボルト軸力の変化

ボルト加熱試験状況を写真-8 に、試験結果を表-1 に示す。表に示すボルト軸部温度は、ナット加熱時のナット側ボルト軸の最大温度を示している。加熱時間の違いによってボルト軸部の温度が異なっており、3 秒加熱では、軸部が 117℃または 130℃に上昇した。加熱前後のボルト軸力の変化量は、2 秒加熱時が平均で 3.3kN、3 秒加熱時に平均 7.5kN の低下となっており、いずれも数%の低下であり、軸力に変化は無いと言える範囲であると考えられる。

② 過剰な IH 加熱がボルトに及ぼす影響

参考として、過剰な IH 加熱を行った場合を想定した加熱試験を行った。その結果を写真-9、写真-10 に示す。写真-9 は IH 加熱を出力 80% で 3~5 秒間行っている状況を示しており、加熱中に煙が発生したり、センサーを固定している結束線や接着材が焼けてしまったりしており、過剰な加熱であったことが分かる。写真-10 は出力 80%

表-1 ボルト加熱試験結果

		No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
加熱条件	出力(%)	60				
	時間(sec)	2			3	
ボルト軸部温度(℃)		84	90	80	117	130
軸力(kN)	加熱前	213	204	192	218	185
	加熱後	201	204	194	205	183
	差	-12	0	2	-13	-2
	平均	-3.3			-7.5	



写真-9 IH加熱による煙発生やリード線の焼け



写真-10 過剰な IH 加熱でナットが変色

で 2 秒間の I H 加熱した後のナットを示すが、加熱により変色してしまっている状況が見て取れる。このときのボルト軸力の計測は行っていなかったため、軸力に影響があったかどうかは不明であるが、これらは明らかに加熱のしすぎであったと考えられる。I H 加熱ではごく短時間で高温に加熱されるため、加熱条件の設定には注意が必要であるとともに、加熱時間の確実な管理が必要であることが分かった。

なお、先に示した加熱出力 60%、加熱時間 3 秒ではボルト・ナットに過加熱による変色は生じていなかったことを確認している。

## 5. まとめ

I H 塗膜除去工法を鋼橋に適用することを目的に試験を行った結果、特にウェブのように薄い鋼板部や高力ボルト部でも加熱条件を適切に設定することで、本工法の鋼橋への適用が可能であることが確認された。

以下に、各種試験で得られた結果をまとめる。

- ① I H 塗膜除去工法は 2 種ケレン相当の塗膜除去性能を有している。
- ② I H 塗膜除去工法を適用しても再塗装に及ぼす影響はない。
- ③ 塗膜剥離作業前後の裏面側塗膜の付着強度が低下する結果が得られた。基準値は満たしているが、耐久性については要検討である。
- ④ 鋼材の組織や硬さに変化は無かったことから鋼材への熱影響は無いものと考えられる。
- ⑤ I H 加熱は局部的であり、加熱位置から 200mm 以上離れると加熱の影響は小さい。
- ⑥ 連続的に I H 加熱を行うと鋼板温度は高温となったまま保持され、加熱温度が高い場合には裏面の塗膜に悪影響を及ぼす可能性がある。また、I H 加熱による鋼板の変形も大きくなる可能性がある。
- ⑦ 鋼板裏面の温度は、I H 加熱後一定の時間が経過すると表面の温度と同等になることから、表面の温度を管理することで裏面の温度管理も可能である。
- ⑧ I H 加熱による高力ボルトの軸力変化について試験を行った結果、軸力が低下すること無く、高力ボルト部の塗膜を除去できる条件（出力 60%、3 秒加熱）を把握することができた。
- ⑨ 高力ボルト部は加熱ヘッドをボルト・ナット部に固定して加熱することから、加熱時間の管理を確実に行わないと過剰な加熱になりやすい。

### 参考文献

- 1) 日本建築学会：高力ボルト接合設計施工ガイドブック，2003