

## 第5章 現状の課題と今後の展望

第4章において、IH塗膜剥離の一般的な施工に関する注意点を示した。この注意点を考慮することで、基本的なIH塗膜剥離施工を行うことができるものと考えられる。しかし、現状では、IH塗膜剥離が作業員に及ぼす影響、周辺環境に及ぼす影響、構造物の各種性能に及ぼす影響について十分な検討がなされていない部分がある。また、剥離する塗膜の種類や膜厚、構造物の部位や板厚に応じた適切な施工条件についても体系的に整理する必要がある。さらに、IH塗膜剥離による合理的な施工を行うために、その適用範囲を明確化するための継続的な検討が必要とされている。

ここでは、IH塗膜剥離に関する現状の課題を幾つか列挙するとともに、今後の展望について述べる。

### 5.1 IH塗膜剥離施工における温度管理方法

本書では、随所に渡りIH塗膜剥離における温度管理の重要性を示している。理想的には、鋼材の機械的性質の変状がない範囲で塗膜を適切に剥離することができる温度を目標値として設定すべきである。塗膜の種類や厚さ、構造物の部位や板厚に応じて目標加熱温度は異なるが、IH塗膜剥離のための一般的な鋼材温度の目標値として、本書では150℃～250℃を提示している。しかし、実際のIH塗膜剥離施工においては、塗膜表面温度や鋼材の表面温度を精度良く計測、管理することは容易ではない。

まず、放射温度計等で塗膜表面温度を計測する場合、鋼材の表面温度は塗膜表面温度よりも高くなっていることに注意を要する。IHの特性上、内部鋼材の発熱が塗膜に伝達し、塗膜内部を伝導した熱により塗膜の表面温度が上昇する。塗膜表面温度によりIH塗膜剥離の施工を管理しようとする場合は、塗膜の種類や厚さ、鋼材の板厚に応じて塗膜表面温度と鋼材の表面温度の関係を確認しておくことが望ましい。

一方、塗膜を一部除去して鋼材の表面温度を計測する際にも、注意すべき事項がある。図-5.1.1に示すようにコイルを含むヘッドの先端に放射温度計を取り付け[5.1]、コイルを移動させながら鋼材を加熱するIH装置を使用する場合、移動しているコイルの直下の鋼材の表面温度を計測するのではなく、コイルが通過する直前あるいは通過した直後の鋼材の表面温度を計測することになる。IHの特性上、コイルが近接する時に急速に温度が上昇し、その後すぐに温度が低下するため、瞬間的な最高温度を計測することは困難である。従って、温度制御や過加熱防止機能を作動させる場合には、応答速度が速い機器を用いる必要があるほか、コイルの中心と放射温度計の狙い位置の離隔およびコイルの移動速度を考慮して、放射温度計による計測結果からコイル中心の温度を推定したり、高温側にバイアス設定(例えば、計測温度より30～50℃程度、高温側に表示)することが可能な機器を選定したりすること等が有効と考えられる。コイル部に取り付けられる放射温度計は小型、軽量であることが求められるが、安価で汎用性が高いが計測精度が十分でないものもある。例えば図-

5.1.2[5.2]に示すように、近年の放射温度計は高精度化や小型化が進んでいるため、要求される精度に応じ、最適化は当然ながら、適宜、最新化を図ることが好ましい。放射温度計ではなく、熱電対を鋼材に取り付けて温度計測を行う場合も、交流電流を印加したコイルが近接すると熱電対の計測データにノイズが含まれることが多い。ノイズの影響を極力小さく抑えるため、図-5.1.3に示すように熱電対を縫り合わせて使用することで、ねじれた部分で起電力がそれぞれ逆向きに発生し、起電力がノイズを打ち消しあう現象を利用することが有効である。また、温度計測機器には極力ノイズが含まれにくいものを選定する、高周波電源装置からデータロガーを遠ざけるといった工夫が必要となる。



図-5.1.1 IHヘッド（加熱コイル）の先端に設置された温度計モジュール[5.1]



小型放射温度計 IR-SAB の基本仕様

寸法	Φ50 × 170 mm
センサ質量	約 0.7 kg
測定径	Φ4 – 100 mm
測定距離	200 – 5000 mm
測定レンジ	0 – 1000 °C（低温用）
測定精度	±2°C（200°C未満） 測定値の±1%（200°C以上）

図-5.1.2 小型放射温度計の例（CHINO IR-SAB）[5.2]

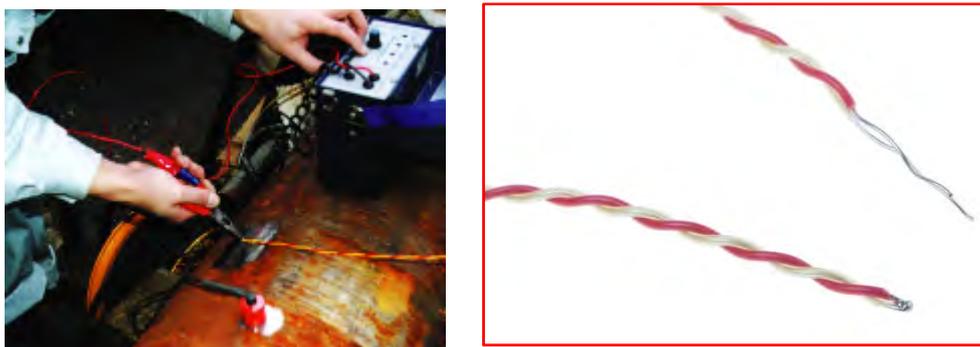


図-5.1.3 熱電対の撻り合わせによるノイズ対策

Ⅱ 塗膜剥離の施工現場において、施工対象となる部材全ての温度を計測することは多大な労力を要する。特に、熱電対を取り付けて鋼材の表面温度を計測しながら塗膜剥離施工を行うことは効率的ではない。実施工前に、放射温度計や熱電対を用い所定の精度が保証された温度計測を行いながらⅡ装置の移動速度等の条件を設定し、設定した条件に基づいて実際の塗膜剥離施工を行うといった方法が実用的と考えられる。その際に、温度チョークや示温ラベルを併用して、設定した条件が順守されているかを確認する等、合理的な温度管理方法確立が必要である。

## 5.2 IH 塗膜剥離による変形、応力の生成機構

IH 塗膜剥離では、局所的かつ急速な加熱により鋼材が熱膨張する。加熱された鋼材はその後の冷却過程において収縮する。加熱部の膨張と収縮を、その周辺の常温部が拘束することで、鋼材には変形（ひずみ）と応力が生じることになる。鋼 I 桁を模擬した供試体を用い、IH 塗膜剥離の加熱による変形を計測した既往の研究[5.3]では、図-5.2.1 に示すように高さ 1950 mm、長さ 2700mm、厚さ 9 mm のウェブ鋼板を IH 装置により加熱する実験を実施している。150°Cあるいは 200°Cを目標として IH 装置のコイルを移動させ加熱する実験であるが、コイルを含むヘッドの幅で下から上に向かって加熱を行い、間隔を設けずに隣接する部位を連続して加熱した場合、ウェブに 3mm 程度の面外変形が生じたことが報告されている。

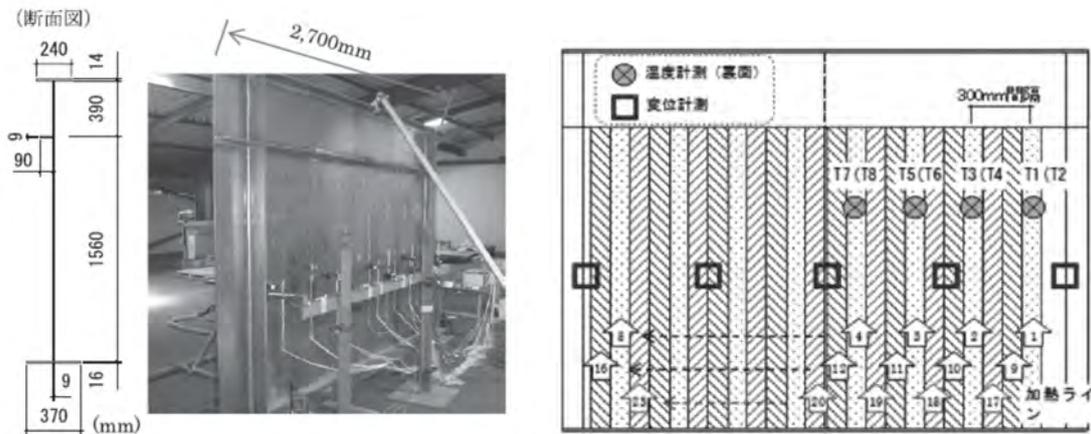


図-5.2.1 I 桁を模擬した試験体の加熱実験[5.3]



図-5.2.2 プレートガーダーウェブの加熱および面外変形の計測[5.4]

また、実施工においても、図-5.2.2 に示すように加熱中にプレートガーダーのウェブに面外変形が生じた事例が報告されている[5.4]。この報告では、IH 塗膜剥離の加熱中に生じた最大 7.8mm のウェブの面外変形は、冷却後には概ね元の状態に回復したとされているが、加熱の条件や構造物の特徴（形状、寸法）が異なる場合、どの程度の変形が生じ、その変形

がどの程度まで戻るのかは明らかではない。また、変形は視覚的に確認できるが、IH 塗膜剥離の加熱で部材にどのような応力が発生するのか、その応力が構造物の性能にどの程度の影響を及ぼすかについても不明な点が多い。IH 塗膜剥離施工を安全に行うために、IH 塗膜剥離による変形、応力の生成機構を明らかにすることが重要である。

一方、IH 装置を用いて小型の鋼板供試体を加熱し、加熱により生じる面外変形と残留応力を計測する実験が行われている[5.5]。この研究では、図-5.2.3 に示すように幅 200mm、長さ 290mm、板厚 9mm、12mm、25mm の鋼板を IH 装置で加熱する実験を行い、熱弾塑性解析による実験のシミュレーションを実施している。塗膜厚さを再現するために鋼板の上にガラス板を敷設し、ガラス板の上で IH 装置のコイルを移動させ、鋼材の表面温度として 150°C~250°C を目標として鋼板を加熱した。塗膜厚さに見立てた離隔(ガラス厚)と鋼板の厚さによる面外変形および残留応力の傾向の違いを検討した結果によれば、加熱面が高温となり膨張した後、冷却過程で大きく収縮するため、図-5.2.4(a)に示すように加熱面の裏側方向に凸となる面外変形が生じた。板厚が薄いほど、IH 装置と鋼板の離隔が小さいほど面外変形は大きく、板厚 9mm の場合に 0.4mm~0.8mm 程度の面外変形が生じた。残留応力については、冷却過程において加熱部の収縮が周辺部に拘束されるため、図-5.2.4(b)に示すように加熱部に最大 200N/mm<sup>2</sup> 程度の引張応力が生じた。これに釣り合うため、隣接する非加熱部には-20~-80N/mm<sup>2</sup> の圧縮応力が生じた。さらに、加熱部の引張応力の大きさや分布形状は、IH 装置のコイル形状や装置の移動速度の影響を大きく受けることが確認された。

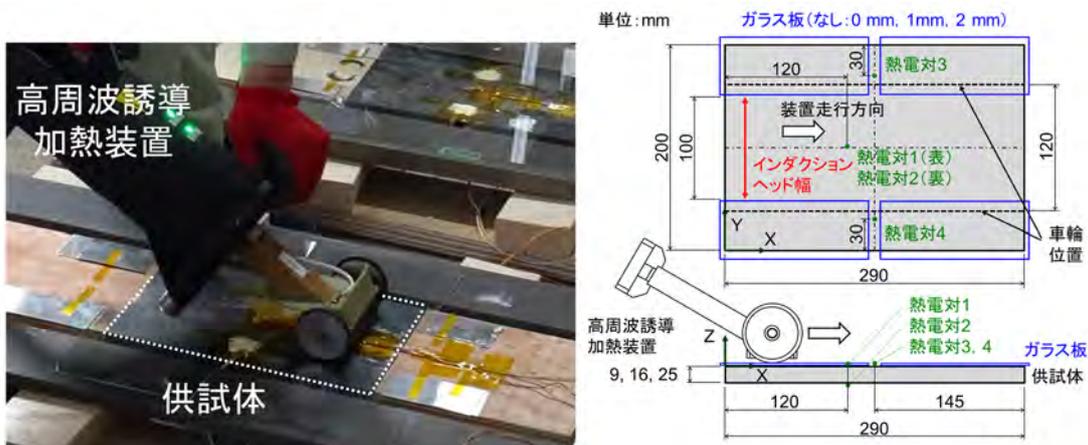


図-5.2.3 小型鋼板の加熱実験[5.5]

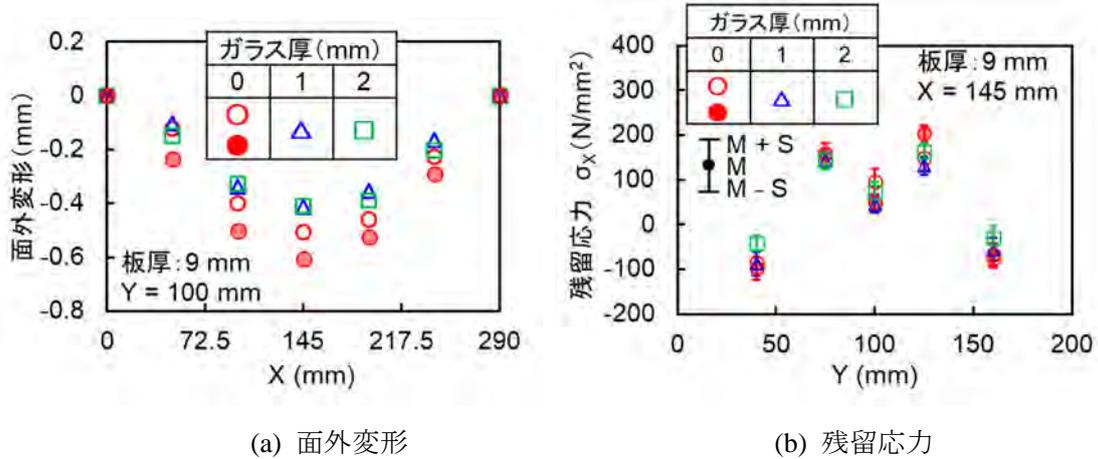


図-5.2.4 小型鋼板の加熱実験で生じた変形と残留応力[5.5]

IH 塗膜剥離で生じる変形，応力の大きさや傾向は，加熱条件，構造物の形状や板厚によって種々異なる．加熱による高い引張応力が溶接部近傍に生じた場合には疲労耐久性に影響を及ぼす可能性がある．圧縮力を受けるトラス斜材等では，加熱により生じる圧縮応力が座屈耐力に影響を及ぼす可能性がある．疲労耐久性や座屈耐力等，IH 塗膜剥離による変形，応力が構造物の性能に与える影響については未検討の部分が多く，今後，より具体的な検討を継続することが必要である．また，試験施工や実験により変形および応力の計測データを蓄積することや，上述のようなシミュレーション技術を活用し変形および応力の予測を行うことで，構造物の各種性能に与える影響を抑える施工条件を確立することが望まれる．

### 5.3 ボルト継手に対する IH 塗膜剥離の適用

鋼構造物における高力ボルト継手部は、部材間の荷重を伝達する重要な役割を担っている。大型の構造物では、1つの継手部に多数の高力ボルトが配置され、ボルト頭部やナットが複雑で立体的な凹凸形状を呈している。ボルト単体においても、頭部やネジ部の表面は平坦ではなく、ボルト継手は一般部に比べ防食塗装が施しにくい部位と認識されている。そのため、一般部に比べボルト継手の防食が早期に劣化し、腐食が進行しやすい傾向がある。ボルト継手部の劣化した塗膜やさびを除去して塗替えを行う際、動力工具、ブラスト、塗膜剥離剤のいずれを用いるとしても、ボルト継手の形状の複雑さにより塗膜やさびの除去が容易ではない。そのため、ボルト継手に塗替え塗装を施しても、再びボルト継手の塗装が早期に劣化する場合がある。

このような種々の課題から、ボルト継手に対して IH 塗膜剥離を適用するニーズは高く、図-5.3.1 に示すように既存の IH 装置ではボルトの形状に適合した環状のコイルを取り付けられるものがある[5.6]。また、図-5.3.2 に示すようにボルトの塗膜剥離に特化した IH 装置も開発されている[5.7]。



図-5.3.1 ボルト用の加熱コイル[5.6]



図-5.3.2 ボルト専用の IH 装置[5.7]



図-5.3.3 狭隘部，部材交差部用のコイルと添接板の塗膜剥離状況[5.6]

さらに，図-5.3.3 に示すように比較的小型の長形状のコイルを取り付けることで，添接板におけるボルト配列の狭隘な隙間部分の塗膜剥離が可能である[5.6].

技術的にはボルトおよび継手部の塗膜剥離に対する IH 装置の適用は可能であるものの，塗膜剥離のための加熱がボルト軸力および継手のすべり耐力に及ぼす影響については不明な点が多い．実施工においてはボルト継手に対し IH 塗膜剥離が積極的に適用されていないのが現状であるが，発注者と受注者との協議ならびに施工試験等により個別に加熱条件を設定し，ボルト継手に IH 塗膜剥離を採用している事例も蓄積されつつある[5.7].

ボルト軸力に及ぼす誘導加熱の影響を検討した既往の研究[5.8]では，塗膜剥離のための温度域としてナット表面を 200℃から 250℃の範囲で加熱した場合に，高力ボルトの軸力が低下する傾向が確認されている．加熱直前における 3 本のボルト軸力の平均値 216.4 kN に対し，加熱による軸力低下量は 11.9 kN であった．すなわち，加熱によるボルト軸力の低下量はもとのボルト軸力の 5.5%程度であり，この研究では塗膜剥離のための温度では加熱がボルト軸力に及ぼす影響は小さいとしている．同様の実験を実施した他の研究においても，塗膜剥離のための温度域での加熱によるボルト軸力の低下の割合は，加熱前のボルト軸力に対し 2~4%程度[5.6]，あるいは 4~7%程度[5.9]であったことが報告されている．高力ボルトは，締付け後のリラクセーションの影響を考慮して設計ボルト軸力の 10%増の軸力を導入することとされている[5.10]．設計ボルト軸力に対する実際の導入ボルト軸力の余裕に対し，塗膜剥離のための加熱によるボルト軸力の低下量が問題となるレベルであるかどうか，また，実施工においてボルト継手に対し IH 塗膜剥離を適用する際には，構造物ごとに検討，評価する必要がある．

以上のように，加熱によりボルト軸力が低下する傾向は実験的に確認されているが，どのようなメカニズムでボルト軸力が低下するのか，詳細については十分な検討がなされていない．また，加熱が直接的にボルト軸力に与える影響を明らかにすることはもとより，高力ボルト継手としてのすべり耐力に与える加熱の影響についても，検討が必要である．高力ボルト継手に対する IH 塗膜剥離の適用のためには，加熱によりボルト軸力が低下する機構を明確にし，継手の性能に及ぼす影響を抑えることのできる加熱条件を確立する必要がある．

#### 5.4 熱影響を受け残置された塗膜の耐久性

構造物の一部の塗膜が劣化していて、IH 塗膜剥離を部分的に適用する場合には、塗膜剥離部に近接する領域の既存塗膜の性能が熱影響により劣化しないことを確認する必要がある。また、桁の上にコンクリート床版が設置されている構造で、桁下から上フランジに対し IH 塗膜剥離を行う場合には、コンクリート床版が劣化しないことを確認する必要がある。

鈑桁や箱桁のウェブ等、比較的薄い鋼板に対し IH 塗膜剥離を適用する場合、片面を加熱している間に裏面（非加熱面）の温度も上昇する。非加熱面の温度上昇の度合いは入熱条件と板厚によって異なるが、既往の実験では、板厚 9 mm の鋼板の片面を 150°C~200°C に加熱した場合、裏面の温度が 80°C~120°C まで上昇した結果が報告されている。箱桁等では、桁の外側のみ塗膜を剥離し、内側の塗装は保持するケースが多いため、外側に対する IH 塗膜剥離が内側の塗装の性能に影響を及ぼさないように注意する必要がある[5.6]。塗装の種類や鋼板の板厚に応じて、近隣の領域や裏面の塗装への影響を考慮した加熱条件を確立することが求められる。

一方、IH 塗膜剥離では、鉛系の防食下地やジンクリッチペイントは剥離の対象とならないため、IH 塗膜剥離を行った後もこれらは残存することになる。素地調整の程度によっては、ブラストや動力工具でこれらの防食下地まで除去したうえで塗替え塗装を行う必要があるが、IH 塗膜剥離の後に残存する防食下地の上から塗替え塗装を行う場合には、熱履歴を受けた防食下地の性能が低下していないことを確認する必要がある。既往の研究[5.11]では、C 塗装系の塗替えに IH 塗膜剥離を適用し、無機ジンクリッチペイントの防食下地を残置した状態で塗替え塗装した試験体に対して腐食促進試験と付着力試験を実施し、残置した防食下地が塗替え塗装に与える影響を検討している。この研究では、C-5 塗装系の塗膜を IH 装置により塗膜剥離し、防食下地である無機ジンクリッチペイントを残して素地調整した後に新たな防食下地として有機ジンクリッチペイントを施し Rc-II 塗装系にした鋼板は、通常の Rc-I 塗装系を施した鋼板と同程度の耐久性を有することを示している。また、一連の検討結果から、IH 装置による加熱がジンクリッチペイントの犠牲防食性能に与える影響は小さいことを示している。防食下地にジンクリッチペイントを施した塗装を適用した実橋部材に対し、塗装後 27 年経過した時点で IH 塗膜剥離を実施した研究[5.12]では、IH 塗膜剥離後に残存する無機ジンクリッチペイントの防食下地の性能を評価する実験を実施している。実験結果によれば、IH 塗膜剥離を実施した後の無機ジンクリッチペイントの膜厚、付着力はともに健全な状態が保持されていた。すなわち、IH 塗膜剥離は防食下地である無機ジンクリッチペイントを安定して残存させることができ、残存させた無機ジンクリッチペイントを塗替え塗装の一部として活用できる可能性を示している。

この種の実験データの蓄積を継続することで、IH 塗膜剥離後の塗替え塗装の耐久性が明らかになり、IH 塗膜剥離とその後の塗替え塗装の合理的な選択が可能になることが期待される。また、IH 塗膜剥離後に残置された防食下地をそのまま活用し、残置された防食下地の上に直接、塗替え塗装を行う等、新しい簡便な塗替え塗装系の開発も期待される。

## 5.5 IH塗膜剥離の適用拡大に向けた実務上の課題

### (1) IH塗膜剥離の施工条件の明確化と施工に関する基礎的情報の蓄積

前述のように、IH塗膜剥離を合理的に適用するにあたっては種々の技術的課題があるが、その他、実務的にも検討を継続すべき課題がある。例えば、塗膜剥離の方法を選択するための基礎的情報として、塗膜の種類や膜厚、構造物の部位や板厚等、IH塗膜剥離の利用が有効となる施工条件を明確化することが望まれる。定性的には、ブラストや動力工具、塗膜剥離剤では剥離が困難な1000 $\mu\text{m}$ を超えるような厚膜に対してはIH塗膜剥離が有効になるとされているが、IH塗膜剥離が適用可能な具体的な膜厚のレベルや塗膜の種類を明示する必要がある。また、IH塗膜剥離の施工実績を積み重ね、施工コストや環境負荷の定量評価が可能になるようなデータを蓄積していく必要がある。

### (2) 装置、設備に関する状況の改善

現状、IH装置を保有、運用する会社や団体の数は増加しつつあるが、今後も社会基盤構造物の更新の需要が増大することが予想される状況においては、個社、各団体での設備の充実に限らず、国内全体として装置、設備の拡充を図っていくことが望まれる。IH装置の台数確保のためには、装置の小型化や低価格化のための技術開発が必要である。また、不具合の生じた機器を迅速に修理できるメンテナンス体制の確立も必要である。一方、装置や設備の状況改善だけでなく、装置を使用するオペレーターや作業員の養成も重要な課題であり、IH装置の特性や施工上の注意事項を理解し、適切な施工が行える人材を育成するための体制を構築していくことが望まれる。

### (3) 小規模構造物への適用

現状では、IH塗膜剥離は比較的規模の大きい構造物に適用される事例が多い。国や道路会社が発注する大規模な工事では、塗膜剥離から素地調整および塗替え塗装まで、作業用足場の確保や養生シートの設置等が一貫して行われる。規模の小さい地方自治体では、塗替え塗装に必要な作業足場や養生等が予算を圧迫するため、可能な限り簡便な方法が望まれる。

5.4で述べたようなIH塗膜剥離と簡便な塗替え塗装の組合せが実現することで、更新工事の費用を低減することができれば、大規模構造物に限らず、小規模橋梁等にもIH塗膜剥離の適用が拡大するものと期待される。

参考文献

- [5.1] 小西日出幸, 井隼俊也, 福島夏樹, 松井隆行, 早矢仕正尚, 廣畑幹人: 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, 54 巻 6 号, pp.18-23, 2020
- [5.2] 株式会社チノーホームページ, プロセス用放射温度計 IR-SA series カタログ, <https://service.chino.co.jp/file.jsp?id=850>
- [5.3] 小野秀一, 渡辺真至: 電磁誘導加熱による鋼橋の塗膜除去工法に関する研究, 建設機械施工, Vol. 66, No. 5, pp. 101-104, 2014
- [5.4] 小西日出幸, 鈴木直人, 田中正裕, 鮫島力, 西谷朋晃, 廣畑幹人: 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, 51 巻 7 号, pp.14-20, 2017
- [5.5] 中原智法, 桐畑光生, 廣畑幹人, 二上稜太, 古市亨: 塗膜剥離のための高周波誘導加熱が鋼構造部材の変形および残留応力に及ぼす影響, 構造工学論文集, Vol. 68A, pp. 528-542, 2022
- [5.6] 岡部次美, 吉川博, 小野秀一, 中村順一: IH (電磁誘導加熱) による鋼橋の塗膜除去工法, Structure painting, Vol. 42, pp. 2-10, 2014
- [5.7] いよ技研株式会社ホームページ, [http://iyogiken.com/contents/heat\\_red.html](http://iyogiken.com/contents/heat_red.html)
- [5.8] 笹嶋純司, 白水晃生: 誘導加熱が高力ボルト軸力に与える影響について, YBDH グループ技報, No. 46, pp. 80-83, 2017
- [5.9] 中原智法, 廣畑幹人, 近藤慎介: 高力ボルト継手に対する高周波誘導加熱による塗膜剥離実験, 鋼構造年次論文報告集, 第 29 巻, pp. 100-109, 2021
- [5.10] 土木学会鋼構造委員会: 鋼構造シリーズ 15 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
- [5.11] 笹嶋純司, 山浦明洋, 安聡一郎, 白水晃生, 北根安雄: 誘導加熱式塗膜剥離工法を適用した C 系塗替え塗装の腐食劣化特性に関する基礎的研究, 防錆管理, Vol. 66, No. 6, pp. 211-216, 2022
- [5.12] 佐野優里奈, 島崎祥登, 松原拓朗, 政門哲夫, 稲葉 圭亮, 久保真由: IH 塗膜除去工法にて残存させた無機ジンクリッチペイントに関する検討, 土木学会第 78 回年次学術講演会講演概要集, V-636, 2023