

# インフラ鋼構造物の維持管理, 補修補強における熱加工技術の適用



技術解説

廣畑 幹人\*

Application of Thermal Processing Technologies to Maintenance, Repair and Reinforcement of Steel Infrastructures

Key Words : Infrastructures, Steel bridge, Corrosion, Fatigue, Welding, Thermal processing

## はじめに

我が国では、1960年代から1970年代の高度経済成長期に数多のインフラ構造物（道路、橋梁、トンネルなど）が建設され、物流、交通の基盤を形成してきた。これらのインフラ構造物の老朽化、高経年化が社会問題として認識されるようになってきている。現在の経済状況から、老朽化したインフラ構造物を廃棄して新設するのではなく、適切な補修、補強を施して維持管理していくことが重要視されている。構造物の種類、劣化および損傷の状況に応じた様々な補修補強技術、維持管理技術が日夜研究されており、インフラの長寿命化を目指した精力的な取り組みが実施されている。代表的なインフラ構造物である橋梁に注目すると、一般に使用されている材料はコンクリートと鋼である。筆者が研究対象としている材料は鋼であり、鋼橋の主な劣化、損傷の要因は腐食と疲労である。鋼橋には塗装や金属被覆などの防食が施されているが、沿岸域など厳しい腐食環境に設置される鋼橋は腐食損傷が進行しやすい(図-1)。また、都心部など重交通環境に設置される鋼橋では、疲労き裂の発生、進展が多数報告されている。腐食による部材断面の減少、疲労き裂に対し、補強部材の取り付けが施工されるケースが多々あるが、部材の接合方法として高力ボルトが広く採用されている。高力ボルト接合は施工事例が多く信



図-1 鋼橋の腐食状況

頼性が高い技術であるが、既設鋼橋の補修補強においては、健全部に穿孔する必要があること、ボルトや添接板による重量増加があること、狭隘な部分では施工難度が高くなることなどが課題として挙げられる。これに対し筆者は、異なる接合技術として溶接の適用性について研究を実施してきている。溶接の場合、健全部への穿孔は不要であり、重量増加が少ない。また、狭隘部での施工性が高く、ボルト接合のデメリットをカバーできる可能性がある。一方、入熱による材料劣化、変形および残留応力の発生などのデメリットがあり、特に補修のための溶接部から割れやき裂が生じることが懸念され、補修補強には溶接がほとんど採用されていないのが現状である。構造物の損傷状況に応じて、適材適所に接合方法を取捨選択できるようにするのが合理的であると考え、鋼橋の補修補強、維持管理における溶接の適用性検討を研究活動の軸に据えている。また、溶接に限らず、溶断、曲げ、熱処理などの熱加工は鋼材の最大の特徴であると考え、種々の熱加工技術を活用して鋼橋の長寿命化を実現する技術について研究を実施している。



\* Mikihito HIROHATA

1980年5月生まれ  
大阪大学大学院 工学研究科 地球総合工学専攻博士後期課程 (2008年)  
現在、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 准教授  
博士(工学) 専門/構造工学, 鋼構造, 溶接  
TEL : 06-6879-7598  
E-mail : hirohata@civil.eng.osaka-u.ac.jp

本稿では、筆者が取り組んでいる鋼構造物における溶接接合部の性能評価に関する幾つかの研究の内容を紹介する。また、溶接に限らず、熱加工技術を鋼橋の補修補強、維持管理に適用するための研究事例を紹介する。

### 溶接力学現象のシミュレーション

溶接力学現象を有限要素法によりシミュレーションする方法として、熱弾塑性解析が用いられる。熱弾塑性解析は一般に非定常熱伝導解析と弾塑性応力解析から構成され、近年の汎用ソフトウェアでは時間増分（解析ステップ）ごとに温度と変位を連成させて解くことができるようになっている。また、溶融した溶接金属が凝固し逐次供給される過程も、要素生成機能を用いて再現することができる。

新しい溶接プロセスとして注目されているレーザー・アークハイブリッド溶接による変形解析の例を図-2に示す<sup>1)</sup>。深溶込み、高速溶接が可能なハイブリッド溶接では入熱量が少なく、角変形はアーク溶接の場合に比べ小さく抑えられる。実験で得られた溶接変形を解析により精度よく再現できており、熱弾塑性解析が鋼構造物材製作時の溶接変形予測に有用なツールとなる可能性を結果は示唆している。

一方、溶接のシミュレーションでは開先形状をモデル化するために立体要素を用い、板厚方向に複数の層に要素分割する必要がある。また、溶接の進行を再現するために溶接線方向に多数の要素分割を行い、溶接金属部に逐次入熱するために解析ステップが膨大になる。このような特徴に起因し、一般に熱弾塑性解析には多大な計算時間を要する。この種の課題を解決する方法として、図-3に示すように立体要素ではなく平面要素（シェル要素）を用いてモデルを構成し、開先形状による板厚方向の入熱分布を考慮した溶接金属部の理想化を行うことで、計算時間を大幅に短縮する方法を提案している。板厚12 mm、長さ340 mmの3パス突合せ溶接のシミュレーションにおいて、シェル要素を用いることで立体要素を用いた場合に比べ計算時間を86%短縮することができた<sup>2)</sup>。このような理想化は、解析対象が大きくなるほど計算時間の短縮効果が高くなるため、大型構造物の製作時に溶接変形をリアルタイムで予測したいといったニーズに応え得るものと期待される。

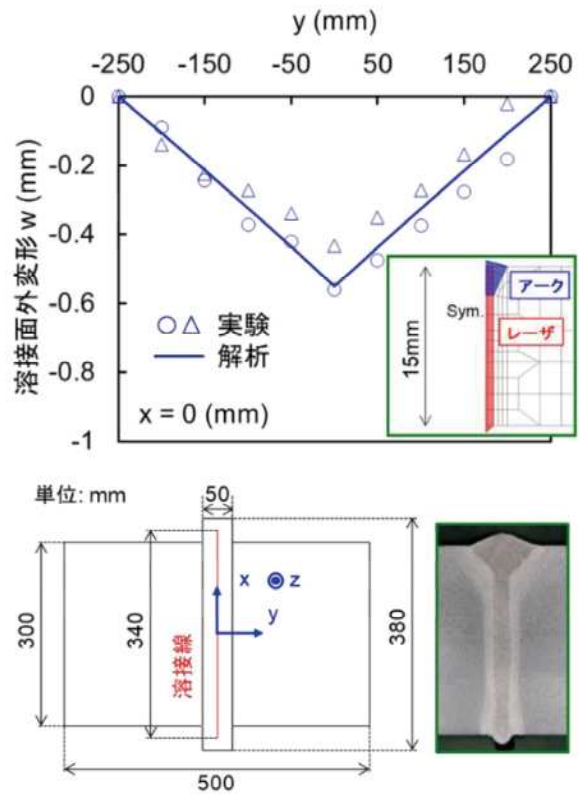


図-2 ハイブリッド溶接による変形解析の例

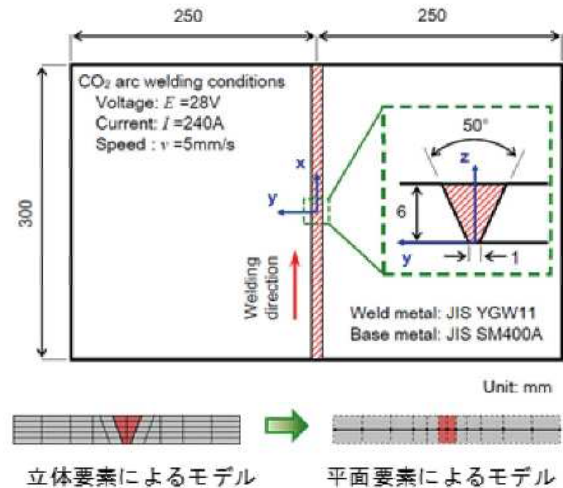


図-3 平面要素による溶接シミュレーションモデル

### 高周波誘導加熱を利用した鋼橋の維持管理と長寿命化

鋼橋に施される防食塗装は供用中に劣化するため、適切な時期に更新（塗替え）する必要がある。防食塗装の更新において、錆や旧塗膜を十分に除去しなければ新規塗装の性能が発揮されないことが知られており、旧塗膜の除去、剥離は重要な工程と位置づけられている。塗膜剥離には動力工具やブラスト、



図-4 IHによる塗膜剥離

有機系の剥離剤などが利用されるが、騒音や粉塵、廃棄物の処理など種々の課題を抱えている。これに対し、高周波誘導加熱 (Induction Heating: IH) を利用した防食塗膜の剥離<sup>3,4)</sup>が新たに注目されている (図-4)。短時間で高温に達するIH装置を用いた鋼橋の塗膜剥離では、適切な施工条件を選定しなければ過剰な加熱により鋼材の機械的性質の変状、変形および応力の発生が懸念される。これに対し、IHによる塗膜剥離施工のシミュレーション方法を構築し、塗膜剥離に適したIH装置の移動速度や加熱順序を検討している<sup>5)</sup>。

その他、IHを利用して溶接部近傍を比較的低温で局所的に加熱し、溶接部に圧縮残留応力を導入する技術を検討している<sup>6)</sup>。すなわち、既に引張残留応力が生じている溶接部の近傍を局所的に加熱することで膨張させ、この膨張を周辺の低温領域に拘束させることで圧縮応力を導入する。IH装置では、板厚12 mmの鋼板の一部を40秒程度で350℃まで加熱することができ、図-5に示すように面外ガセット継手まわし溶接部の引張残留応力 (母材の降伏応力程度) をほぼゼロにまで低減させることができた。このような残留応力の低減により、溶接部の疲労寿命が2~5倍程度向上した。IHによる残留応力低減技術は、グラインダ仕上げやピーニング処理が適用できない狹隘部や溶接ルート部の疲労き裂防止に活用できるものと期待される。

#### リベット接合における残留応力の生成機構

既設リベット橋においては、リベット頭部の腐食や緩みなどの損傷が報告されており、損傷したリベ

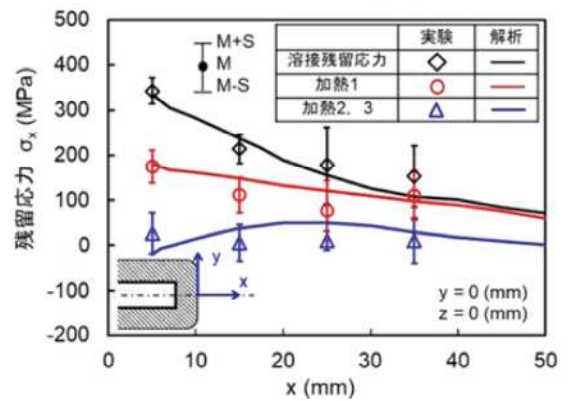
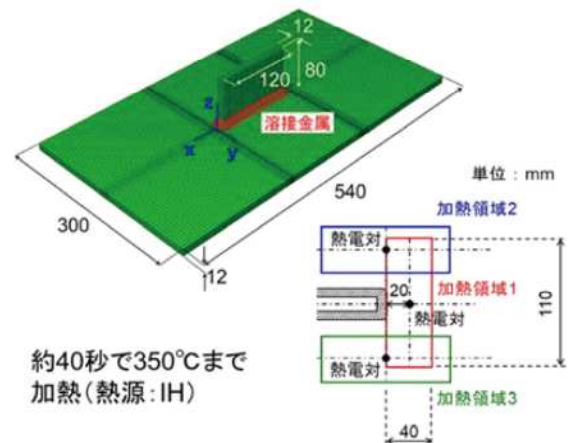


図-5 IHを用いた局所加熱による残留応力低減

ットの補修が必要とされる場合がある<sup>7)</sup>。しかし、リベットを打鉄できる技術者の高齢化、技術者数の減少により、新規リベットの施工および損傷したリベットの補修が困難となっている。そのため、損傷したリベットを除去し、高力ボルトに置換する補修方法が一般に採用されている<sup>8,9)</sup>。この方法では、リベットと高力ボルトが混在する継手となるが、リベット単独の継手に比べ遜色ない強度が確保される。しかし、リベット継手には、高力ボルト継手や溶接継手と比べると緩みやすべりが発生しないこと、防食塗装の耐久性が高いこと、疲労の影響が少ないことなど維持管理上の種々のメリットがあり、損傷したリベットを新しいリベットで置換する補修方法にも利点があると言える。

一方、既設リベット橋の中には、その存在感、技術的特徴などから歴史的価値が評価されているものがある<sup>10)</sup>。例えば、土木学会の選奨土木遺産である永代橋 (大正13年着工, 大正15年竣工)、清州橋 (大正14年着工, 昭和3年竣工) や、重要文化財に指定されている長浜大橋 (昭和10年竣工) などがあ

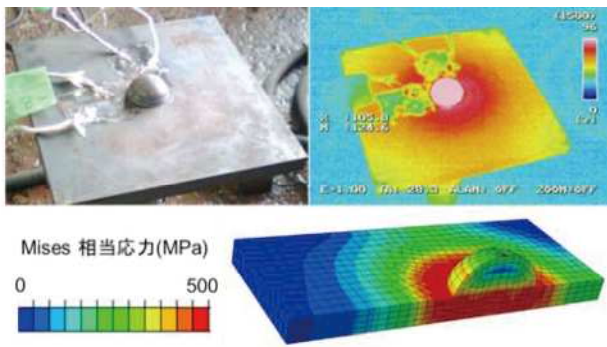


図-6 リベット接合のシミュレーション

るが、損傷したリベットをボルトに置換すると、景観、技術継承の観点から構造物の歴史的価値が低下することが懸念される。そのため、損傷したリベットを新規リベットで置換する補修技術を構築しておくことは重要と考えられる。

リベット打込み時の熱的・力学的挙動について不明な点が多く、これを明らかにするため、熱弾塑性解析を利用してリベット打込み時の熱伝導状態と残留応力を解析する方法(図-6)を検討している<sup>11)</sup>。

### 高経年鋼材とその溶接部の材料特性調査

高経年橋梁に使用されていた鋼材や溶接部(図-7)をサンプルとして採取し、高経年鋼材の材料特性や溶接性を調査することで、既設鋼橋への溶接補修の適用可能性を探索する研究<sup>12)</sup>も実施している。特に、既設鋼橋では補修対象となる部材表面に錆や塗膜が固着している場合があり、現場ではこれらを十分に除去できないことが想定される。部材表面に錆や塗膜が残存した状態でも健全な溶接継手が製作できるか否かを実験的に検討した<sup>13)</sup>。表面に残留する錆や塗膜が溶接継手の性能に及ぼす影響は小さく、グラインダなどの動力工具による研磨で、健全な溶接継手を作製するための表面処理が実現できることを示した。

### おわりに

溶接、熱加工は鋼構造物の製作だけでなく、インフラ構造物の維持管理および補修補強における重要な技術である。安全、安心で効率的なインフラ構造物の維持管理、補修補強に資する研究を継続していきたいと考えている。

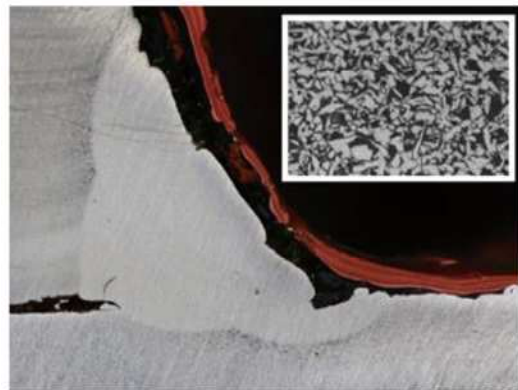


図-7 経年橋梁鋼材の溶接部観察

### 参考文献

- 1) 盛岡空矢, 廣畑幹人, 松本直幸, 猪瀬幸太郎: レーザ・アークハイブリッド溶接による突合せ継手の変形および残留応力生成挙動, 溶接構造シンポジウム 2019, pp. 408-413, 2019. 12.
- 2) HIROHATA Mikihiro and ITOH Yoshito: A Simplified FE Simulation Method with Shell Element for Welding Deformation and Residual Stress Generated by Multi-pass Butt Welding, International Journal of Steel Structures, Vol. 16, No. 1, pp. 51-58, 2016. 3.
- 3) 小西日出幸, 井俣俊也, 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, 第54巻第6号, pp. 18-23, 2020. 6.
- 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, 第51巻第7号, pp. 14-20, 2017. 7.
- 5) 桐畑光生, 廣畑幹人, 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巻, pp. 707-714, 2019. 11.
- 6) 廣畑幹人, Aung May Phy, 阿二一慶: 高周波誘導加熱装置を用いた局所加熱によるすみ肉まわし溶接継手の残留応力低減, 土木学会論文集A1(構造・地震工学), Vol. 76, No. 1, pp. 29-40, 2020. 1.
- 7) 国立文化財機構, 東京文化財研究所: 鉄構造物の保存と修復, 未来につなぐ人類の技 18, 2018. 8.

- 8) 木村元哉, 中村太士, 松井繁之: 腐食桁におけるリベットの継手強度と高力ボルト置換に関する基礎的研究, 構造工学論文集, Vol. 55A, pp. 880-888, 2009. 11.
- 9) 小松靖朋, 中上貴裕, 柚本真介, 小林 茂, 松本崇志, 山口隆司: リベット継手の高力ボルト置き換えによる補修・補強工法に関する実験的研究, 鋼構造論文集, 第22巻, 第85号, pp. 1-14, 2015. 3.
- 10) 鋼構造委員会 歴史的鋼橋の補修・補強に関する調査小委員会: 歴史的鋼橋の補修・補強マニュアル, 土木学会, 2006. 11.
- 11) 末廣大地, 廣畑幹人, 中山太士: リベット継手の残留応力生成機構に関する解析的検討, 鋼構造論文集, 第27巻, 第107号, pp. 87-95, 2020. 9.
- 12) 廣畑幹人: 経年橋梁に使用された鋼材の材料特性および溶接性に関する基礎的検討, 鉄と鋼, Vol. 103, No. 11, pp. 629-635, 2017. 11.
- 13) 植下淳史, 廣畑幹人, 中山太士: 経年鋼材の溶接継手特性に及ぼす表面処理条件の影響, 鉄と鋼, Vol. 106, No. 9, pp. 640-650, 2020. 9.

