特集

新生ニッポンを築く新産業創成への挑戦

第II部 新生ニッポンを築く業界構想と溶接の役割

橋梁(日本橋梁建設協会)*

上野 康雄**

Bridge(Japan Bridge Association)*

by AGANO Yasuo**

キーワード

鋼橋, 日本橋梁建設協会, 維持管理, 橋梁用高降伏点鋼板, 疲労, 補修, 補強

1. はじめに

これまで建設されてきた多くの橋梁は、高度経済成長期の産業・経済を下支えてきた一方で、橋梁の使用環境の変化、高経年化によりそれらの損傷や機能劣化が問題となっている。さらには、少子高齢化、人口減少社会、熟成されたインフラ整備の現状を勘案すると、橋梁の総発注量は少ない値で推移することが予想され、長期的にも大幅な発注量の増加は見込められない。その一方で、良いものを安くかつ短納期で施工する低コスト・高品質化への要求は強く求められている。

鋼橋鋼桁の工場継手はほぼ100%が溶接継手である溶接構造物であり、現場継手においても高力ボルトでは対応できない継手や景観上の要求から、溶接接合が適用されている。一方、既設橋梁では、維持管理において補修補強への溶接の適用が求められており、溶接技術の役割は重要性を増している。

本稿では、橋梁を取り巻く状況、鋼橋の技術動向と溶接の果たす役割について述べる。なお、本稿での記述は、日本橋梁建設協会(以下、橋建協と示す。)の代表的な見解を示しているが、著者の個人的な見解が一部に含まれており、予めご了承ください。

2. 鋼橋を取り巻く状況

2.1 鋼橋の受注実績

鋼橋の受注実績を図1に示す¹⁾。平成21年度の鋼橋の受注量は約30万トンであり、平成7年の約90万トンに比べ約1/3まで減少している。日本の厳しい財政事情等を考慮す

ると、今後もこの傾向は変わらずに橋梁製作会社間での激しい競争が続くものと推測される。

2.2 東日本大震災

東日本大震災では、重要な社会基盤である橋梁にも多大な被害が発生し、現在も高速道路、直轄国道において復旧活動が実施されている。また、三陸自動車道では復興道路、東北横断自動車道では復旧支援道路として交通の整備が行われている²⁾。

橋建協で実施した橋梁被害調査報告³⁾では、調査した橋梁の約8割は無傷であるとの報告があり、阪神・淡路大震災後に行った耐震補強工事が一定の成果を挙げたものとしている。地震による損傷事例を図2に示す。地震による被害では主構造部材には大きな損傷は見られず、古い鋼製支承および伸縮装置等に多くの破損が確認された。一方、津波による被害では、橋梁の流出、部材や高欄などの破損が発生し、我々の想定をはるかに超えた被害が確認された。今回の大地震を踏まえ、更なる耐震性能向上に向けた取り組みと津波に対する対応が要求されている。また、緊急補修工事等では、一時的に仮設部材が鋼桁に取付けられるなど、腐食あるいは塗膜のある高経年鋼材への溶接となり、これらに対する溶接技術が求められている。

2.3 橋梁の維持管理

戦後の高度経済成長期に架けられた多くの橋梁は、建設後30年から50年以上経過しており、それらの高経年化が進行している。建設後50年以上経過する道路橋の割合を表1に示す⁴⁾。15m以上の道路橋(平成22年度)は約15.5万橋であり、平成22年では約8%(12,500橋)であるのに対し、20年後の平成42年では約53%(82,100橋)にまで増加する。今後、橋梁の機能不全による通行止めあるいは通行規制の増加、疲労・腐食などの損傷劣化による橋梁の破壊・崩壊などが懸念される中、適切で効率的な維持管理が求められている。維持管理において補修補強技術の果たす役割は大きく、中でも溶接技術に対する期待とその役割は近年一層大

*原稿受付 平成24年10月7日

**正 員 日本橋梁建設協会(片山ストラテック株式会社) Member, Japan Bridge Association (KATAYAMA STRATECH CORP.)

図1 橋種別受注実績

図2 東日本大震災による損傷事例

きなものとなっている。

国土交通省では、損傷が深刻化して初めて大規模な修繕を実施する「事後保全」から定期点検を行い損傷が深刻化する前に修繕を実施する「予防保全」を推進している。そのため、地方公共団体が「事後保全」から「予防保全」に円滑に転換するための財政および技術支援を実施している。

2.4 海外プロジェクトの推進

国内市場が減少傾向にある中、アジア、アフリカ等の地域ではインフラ整備への大きな需要が見込まれている。これらの需要を取り組むため、トップセールスの実施、相手国に対する人材育成、個別企業では対応困難なリスク等に支援を行うなど、官民一体となった取り組みを行っている。道路の分野では、インド、ベトナム、フィリピン等の道路整備プロジェクトについて、その計画段階から建設、運営・維持管理に至るまで幅広く相手国との係りをもつなど、積極的に海外展開を推進している⁵⁾。但し、海外橋梁は規模が大きく、受注環境が熾烈で、工事内容の変更・延

表1 建設後50年以上経過する道路橋の割合

	平成22年度	平成32年度	平成42年度
道路橋 ※約15万5千橋 (橋長15m以上)	約8% 12,400橋	約26% 40,300橋	約53% 82,150橋

図3 カントー橋

期等がよくあるため、どの企業も慎重に行動している現状がある。

代表的な海外プロジェクトの一例として、ベトナムのカントー橋を図3に示す⁶⁾。カントー橋は、ベトナム南部を流れるメコン河最大の支流ハウ川に架かる、全長1,010m、中央径間550mの内中央部210mが鋼床版箱桁、その他は主塔も含めてコンクリート構造からなる複合斜張橋である。本橋は、2010年の3月30日に竣工し、2010年の4月24日に開通している。鋼桁製作上の規定に関して、製作一般は道路橋示方書が適用されているが、溶接に関してはAWS (American Welding Society) の基準が適用されており、WPQT (Welding Procedure Qualification Test) の実施が義務付けられている。また、溶接の検査は、全てエンジニアの立会のもと行われ、検査シートへのエンジニアのサインによって合格となった。なお、鋼桁の製作は地元の工場で行い、鋼床版デッキプレートとUリブの溶接ではUリブ板厚の80%の溶込みが規定されていた。溶接技術者は、AWSなどの国際基準・規格の理解およびIWE (International Welding Engineer) などの国際資格の取得に向けた取り組みが必要となっている。

2.5 日本橋梁建設協会（橋建協）の取り組み

橋建協では、「橋建協 五つの誓い」（図4 参照）をもとに、5つの重点活動テーマ（人材教育、保全事業、環境、安全・安心、海外事業）を選定し、それに基づき鋼橋に関する協会活動を展開・実施している⁷⁾。また、「橋の相談室」を設けて、発注者、コンサルタント会社など様々な分野の方から設計・製作・架設に関する相談を受けたり、東日本大震災では、震災翌日から災害対策本部を立ち上げ、被災橋梁の調査、緊急補修、応急復興工事にも対応している。

3. 鋼橋の技術動向と溶接の果たす役割

3.1 橋梁用高降伏点鋼板への取り組み

橋梁用高降伏点鋼（Steels for Bridge High Performance Structure以下、SBHS 鋼と示す。）は、橋梁の国際競争力の強化を目的に産学共同で開発した橋梁用高性能鋼の一つであり、2008年11月には JIS G3140:2008 として4規格（SBHS500, SBHS500W, SBHS700, SBHS700W, Wは耐候性仕様）、2011年11月には2規格（SBHS400, SBHS400W, Wは耐候性仕様）が追加制定された。SBHS 鋼は、最新の鋼材の TMCP（制御圧延・冷却）技術を駆使して、従来鋼である SM570, HT780 と比較して、高強度・高靱性で、溶接性・加工性に優れた鋼材である。従来鋼よりも降伏強度

図4 橋建協 五つの誓い

図5 東京ゲートブリッジ

を高くし、予熱を省略あるいは低減することが可能であり、鋼重の削減と製作コストの低減が可能となる。国土交通省関東地方整備局発注の「東京ゲートブリッジ」（図5 参照⁸⁾）では、SBHS 鋼が採用され、2012年2月に供用を開始した。本橋は、トラス構造の格点が全溶接で、スマートできれいな景観を呈し、高力ボルトがないため腐食に強く、維持管理の面からライフサイクルコストの低減に寄与できるものと期待されている⁹⁾。そのため、今後、SBHS 鋼の適用は増加していくことが予想され、橋梁製作会社では溶接施工試験を行い、溶接方法、溶接条件、溶接品質等の施工確認を行っている。

3.2 鋼橋の疲労対策

鋼橋は、建設当時の予想を上回る通行車両の増加と大型化等に伴い、鋼製橋脚隅角部および同支点直下のダイヤフラム、鋼床版橋梁などの溶接接合部において多数の疲労き裂が確認されている。このことより、2002年度版の道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編¹⁰⁾（以下、道路橋示方書と示す。）では、鋼橋の耐久性の向上を図るため、疲労の影響を考慮することが規定され、2012年版の道路橋示方書¹¹⁾では、疲労設計の充実化を図るため、疲労設計の章が新たに設けられた。なお、溶接に関わる疲労強度等級向上策の一つとして止端仕上げがある。止端仕上げ形状は、これまで明確に示されていなかったが、2012年版の道路橋示方書では、止端仕上げの曲率半径は3mm以上と規定された。橋建協に於いても止端仕上げの研究に取り組み、道路橋示方書改定の一役を担った。図6は、法政大学と橋建協との共同研究において実施した面外ガセット溶接継手における止端曲率半径が3mm以上の場合の疲労試験結果である。これらの結果では、疲労強度等級は非仕上げよりも1等級向上することが示されている¹²⁾。また、これらの研究成果に合わせて、溶接止端仕上げの施工方法や仕上げ程度の明確化、注意点などを施工的な観点からとりまとめ、より実際の施工に即した「溶接止端仕上げの手引き」を作成した。

鋼床版橋梁の疲労損傷対策は、近年の大きな課題の一つとなっているが、それらに対する原因究明と補修補強方法

図6 面外ガセット溶接継手における止端曲率半径が3mm以上の場合の疲労試験結果

表2 補修補強作業時の溶接継手の荷重状態

溶接継手の状態	現場の状態	継手状態	問題点
無荷重下	<ul style="list-style-type: none"> ・ベントの設置 ・通行止め		<ul style="list-style-type: none"> ・低温割れ
静的荷重下	<ul style="list-style-type: none"> ・通行止め		<ul style="list-style-type: none"> ・低温割れ ・変形 ・座屈
変動荷重下	<ul style="list-style-type: none"> ・ベントの設置なし ・通行止めなし		<ul style="list-style-type: none"> ・低温割れ ・変形 ・座屈 ・溶接欠陥* ・高温割れ

*溶接欠陥は、溶接割れを除く、ブローホール、オーバーラップ、融合不良等を示す。

等の検討は、様々な研究開発機関で進められており、橋建協でも自主的に研究を進めている。溶接関連では、疲労き裂を除去するための溶接補修技術、鋼床版デッキプレートとUリブの溶接溶込み量を計測するための超音波探傷技術、疲労強度を改善するための超音波衝撃処理（UIT：Ultrasonic Impact Treatment）技術などが挙げられる。

3.3 供用下における溶接補修技術

損傷した橋梁は、損傷状態、交通事情、環境などを考慮して、最適な工事を選定する必要がある。日本の厳しい経済・交通事情を考慮すると、架け替えよりも安価に施工できる補修補強の重要性が増してきている。鋼橋の補修補強に注目すると、鋼床版、鋼製橋脚隅角部などの疲労損傷において、当て板を用いた高力ボルト接合が一般に広く適用されている。一方、溶接施工は溶接品質の信頼性の低さから極力さけるべきとされており、ほとんど適用されていない¹³⁾。近年、溶接は長足の進歩を遂げており、補修補強における溶接施工もその選択肢の一つとして技術開発が要求されている。鋼橋の供用下における溶接は、部材の取付け補強や損傷部の補修に適用されるが、表2に示すように補修補強作業時の溶接継手の荷重状態を、① 無荷重下での溶接、② 静的荷重下での溶接、③ 変動荷重下での溶接の3つに分類することができる。その中でも変動荷重下における溶接は交通規制を行わない状態で溶接施工を行うため、静的荷重に加え、振動および溶接部の開口変位によるアンダーカット、融合不良、割れなどの溶接欠陥が発生し易くなり、最も厳しい溶接作業環境となる。この場合、特に、溶接部の開口変位による高温割れへの対応技術が求められる。また、溶接においては、作用荷重以外にも、高経年鋼材の溶接性、天候および作業空間などにも配慮する必要がある。近年、ルートギャップの開口変位に着目した炭酸ガス半自動溶接による繰り返し荷重下の溶接を行い、高温割れの発生および溶接品質に関する基礎的研究が行われてい

図7 レーザ溶接技術を用いたすみ肉溶接継手のマクロ組織

る^{14), 15)}。

供用中の首都高速道路の鋼製橋脚支点直下の上フランジとダイヤフラムの溶接部に発生した疲労き裂にティグ溶接が適用されたことが報告されている¹⁶⁾。また、都市高速道路の鋼床版橋梁のデッキプレートとUリブ溶接部のビードを貫通するき裂に対しても、補修方法の一つとして、溶接補修が求められている。

3.4 次世代の溶接技術

次世代の溶接技術として、レーザー溶接技術、摩擦攪拌接合が挙げられる。

レーザー溶接は、航空機、自動車、重電プラント等に適用

され、レーザ発振器によって作られた波長と位相がそろった光をレンズ、ミラーで細く絞って照射することによって母材を加熱・溶融し接合する方法である。

レーザ熱源は、従来のアーク溶接と比較して高エネルギー密度でビード幅の狭く深溶込み溶接が可能であり、溶接速度が速く、熱影響部が狭く、溶接変形が少ない高品質で高能率な溶接が可能である。その一方で、エネルギー（発振）効率が低く、装置およびメンテナンス費が高いなど、橋梁単独の専門メーカーが購入することは非常に難しいのが現状である。レーザ溶接技術を用いたすみ肉溶接継手のマクロ組織を図7に示す¹⁷⁾。レーザ溶接技術の適用例として、レーザホットワイヤ溶接法では、都市高速道路の合成床版の鋼パネル部材への適用¹⁷⁾、レーザ・アークハイブリッド溶接法では歩道のマウントアップ部の鋼製パネルのリブ材の溶接¹⁸⁾が報告されている。いずれも溶接後のひずみが小さく、溶接後の矯正工程を省略することが可能であり、製作コストを低減できる溶接技術として注目されている。

摩擦撚拌の接合技術は、鋼橋ではなく融点の低いアルミニウム合金の歩道橋に多く適用されている¹⁹⁾。摩擦撚拌接合は、回転する接合ピンの摩擦熱による塑性流動・撚拌を利用した固相接合法であり、従来のミグ溶接法と比較して、溶接部の軟化、気泡（ブローホール、ピット）、変形や残留応力の発生を著しく低減できる。他産業ではアルミニウムと鋼材との接合が実用化され、鋼材同士の接合技術の開発も行われており、今後の技術動向を注視する必要がある。

4. おわりに

鋼橋を取り巻く環境は一層厳しさを増す中、橋梁用高性能鋼板の溶接技術、疲労耐久性向上技術、溶接補修技術など、新設・既設橋梁ともに溶接技術の果たす役割は増している。今後、溶接管理者・技能者の高齢化や溶接技術・技能の伝承を含めて、種々の問題解決に向けた取り組みを通

して、溶接技術の安全性および信頼性を高めて行く所存である。

参考文献

- 1) 日本橋梁建設協会：統計，(2011)。
- 2) 国土交通省：インフラ・交通の着実な復旧・復興，国土交通白書，(2012)，12-16。
- 3) 日本橋梁建設協会：橋梁被害調査報告書，(2011)。
- 4) 国土交通省：社会資本の的確な維持管理と更新，国土交通白書，(2012)，98。
- 5) 国土交通省：我が国の経験・技術を活かした国際展開支援・国際協力，国土交通白書，(2012)，269-271。
- 6) 日本橋梁建設協会：虹橋，75 (2011)，38-45。
- 7) 日本橋梁建設協会：虹橋，76 (2012)，3。
- 8) 日本橋梁建設協会：虹橋，76 (2012)，76。
- 9) 例えば，三木ら：トピックス Part1 座談会 東京ゲートブリッジに適用された新技術とその波及効果，土木学会誌，97-3 (2012)，128-130。
- 10) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編，(2002)。
- 11) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編，(2012)。
- 12) 日本橋梁建設協会：溶接止端仕上げの手引き，(2012)。
- 13) 日本道路協会：道路橋補修・補強事例集 (2009年度版)，(2009)，74-75。
- 14) 上野，李，藤平，金：繰返し荷重下における溶接施工性の検証－供用下における鋼橋の溶接による補修補強に関する研究－，溶接学会論文集，28-4 (2010)，436-442。
- 15) 上野，李，藤平，金：繰返し荷重下における溶接補修法の提案－供用下における鋼橋の溶接による補修補強に関する研究－，溶接学会論文集，29-4 (2011)，267-273。
- 16) 鷹羽新二：TIG溶接による鋼製橋脚支点直下のき裂補修溶接，高田機工技報，23 (2008)，64-67。
- 17) 猪瀬，杉野，松本，大脇，大畑：レーザホットワイヤすみ肉溶接の開発と都市高速橋梁への適用，IHI技報，52-1 (2012)，59-63。
- 18) 猪瀬，大脇，中西，宮地，藪野，小川：レーザ・アークハイブリッド溶接の歩道部鋼床版部材への適用，土木学会 第63回年次学術講演会，(2008)，815-816。
- 19) 大倉一郎：摩擦撚拌接合のアルミニウム橋への適用，平成23年度財団法人溶接接合工学振興会 第22回セミナー，(2011)，101-106。