特集

ニッポンのものづくりを支える生産現場の知恵—創意と工夫による溶接・接合技術の追求—

第II部 現代ニッポンの産業分野における生産現場の知恵

橋梁の溶接・接合技術にかかわる 生産現場力*

安田 修^{**}，永木 勇人^{**}

安田 修

永木 勇人

Welding Technologies for Production of Bridges*

by YASUDA Osamu^{**} and NAGAKI Hayato^{**}

キーワード

コスト縮減，品質確保，新技術提案力，疲労損傷，特性要因図，極厚板，現場溶接，
狭間先溶接，超音波探傷検査

1. ま え が き

橋梁工事は公共工事の一部であり，国や地方公共団体などから発注されるものが大半を占め，公共工事発注量の毎年削減の方針を受け，橋梁工事においても毎年約3%の発注量削減が続いている．ピーク時の橋梁発注トン数は約80万トンであり，2005年度の発注量は約40万トンといわれており，約2倍の過剰な生産能力を有することになる．また，従来は指名競争入札方式が一般的であったが，最近は一般競争入札で発注されることが多くなった．この結果，発注単価の低落が著しく，発注者は単価下落による品質低下を危惧している．品質低下を防止するため，平成17年3月にいわゆる「品質確保法」が制定され，品質確保がなされ，技術力の高い橋梁メーカーに発注したいという発注者の要求は高い．そのため現在は，新規発注橋梁に対しては橋梁メーカーからのVE提案や総合評価方式に対応できる技術提案力が橋梁メーカーに強く求められている．すなわち従来のように，最低応札価格の会社に必ずしも発注されるのではなく，技術提案と価格を総合的に数値評価し，価格は高くても優れた提案をした会社に発注されるという逆転現象もすでに少数ながら発生している．

一方，架設後30～40年以上を経過した交通量の多い橋梁においては，疲労損傷を中心とした耐荷力の減少と性能の低下が続いているので，今後，補修・補強対策が強く求められている．その結果，平成14年度に道路橋示方書（以下，H14道示という）の大幅な改定がなされ，疲労設計を全面的に適用することになり，従来よりかなり高い技術・品質が要求されている．

また，一方では，部材数削減によるコスト縮減を図る

意味もあり，上記の道示において，橋梁に適用されるすべての鋼種の適用最大板厚が50mmから100mmに一挙に拡大され，従来より極厚板に対する高い溶接技術が求められるようになった．

このような背景を踏まえて現在の橋梁メーカーに求められているのは、『コスト縮減』と『疲労耐久性を含めた新規橋梁の品質確保』である．以下の各項で橋梁メーカーがその製作・架設工程の中で，橋梁の中核技術である溶接技術を中心として，いかに、『コスト縮減』と『品質確保』に傾注しているかという現状と今後の課題について述べる．

2. 製品概要及び使用材料

2.1 製品概要

橋梁はそのスパン（支間長）に応じて，標準的な橋梁タイプが決まっており，その代表的な橋梁タイプ・支間長を図1¹⁾に示す．

2.2 橋梁の使用材料

橋梁の使用材料の大半は鋼材であり，ごくわずかなものではあるが，耐食性と軽量性に優れたアルミニウム橋梁も現存する．橋梁など大型構造物における鋼材の材質とその板厚範囲を図2²⁾に示す．この図からわかるように，橋梁は材質，板厚ともに大型鋼構造物の中では最高のものであり，発注量は船舶などに比較して少ないものの，日本の代表的な重厚長大産業であるといえる．一般的な橋梁（支間250m以下）の主要材料として適用される鋼材は，最高材質はSM570，最大板厚は100mmであり，裸使用の耐候性鋼材（W材）も最近は増加している．なお，特殊性能を付与した，耐ラメラレーテア鋼材，冷間曲げ加工保証材，予熱低減材，大入熱対策鋼，高耐候性鋼材，LP鋼板（長手方向に連続的に板厚が変化する鋼材），降伏点一定鋼などがその目的に応じて使用され設計面，製作面での性能向上，コスト縮減および品質確保に貢献してい

*原稿受付 平成18年11月29日

**正 員 高田機工株式会社 Member, TAKADAKIKO CO., LTD.

図1 橋梁形式ごとの適用支間

図2 大型鋼構造物の鋼材強度レベルと最大板厚の傾向

る。一方、SM570を越えるHT690、HT780材は世界最大の長大橋梁である本州四国連絡橋で大量に使用され、わが国の橋梁溶接技術の高さを世界に示すことができたことは特筆されるべきである。また、最近、(社)日本鉄鋼連盟より引張強さ570および780 N/mm²クラスの高強度、高靱性、低予熱、高耐ラメラレーテア性、高耐候性などの優れた性能を持つ熱加工制御鋼の「降伏点500 N/mm²および降伏点700 N/mm²溶接構造用圧延鋼材」が制定され、近々、長大橋梁に適用されようとしている。

2.3 橋梁の溶接材料

橋梁の溶接材料としては、被覆アーク溶接棒、ガスシールドアーク溶接用ソリッドワイヤ・コアードワイヤ、サブマージアーク溶接用ワイヤ・フラックスなどが使用されている。これらの溶接材料にはそれぞれ一般鋼用と耐候性鋼用とがあり、その性能に応じて使用区分がなされている。橋梁におけるこれらの溶材の使用割合は、被覆アーク溶接棒が約5%、サブマージアーク溶接用ワイヤ・フラックスが10%程度、ガスシールドアーク溶接用ソリッドワイヤ・コアードワイヤは約80%以上であると推定さ

れ、半自動、自動・ロボット溶接など、適用範囲が最も広いガスシールドアーク溶接用ワイヤが主体である。ガスシールドアーク溶接に対してはCO₂及びArガスはおのおの、JISK1106 液化二酸化炭素およびJISK1105 アルゴンが使用されているが、一般的には安価なCO₂が使用されている。現場片面裏波溶接に使用される裏当材にはJIS規格はないが、フラックスを固化したものやセラミック製のものが使用されている。

3. 適用される溶接・接合プロセス

橋梁の製作は主に工場で、架設は現場サイトで実施され、橋梁の製作・架設における重要技術である溶接は工場溶接と現場溶接に区分される。

3.1 工場溶接

橋梁には前述のように多種多様な形式があるが、その多くは箱桁橋（鋼床版を含む）と鈑桁橋（I桁）であり、トラス橋やアーチ橋は箱桁の、また、斜張橋や吊橋の上部工は箱桁またはトラスの応用として考えることができる。ここでは、箱桁、鈑桁について、その製作の流れを図3～4に示す。各溶接プロセスにおける、技術的な留意点を以下に述べる。

(1) 箱桁の組立・溶接

箱桁製作工程のうち、組立・溶接工程に絞って以下に述べる。

i) 縦リブ組立

この工程では、CO₂ガスシールド8電極自動組立装置（図5）を使用して、4本の縦リブを同時にフランジに能率的に組み立てている。縦リブの本溶接のすみ肉溶接サイズが6～9 mmとあまり大きくないことと組立溶接の低温割れを防止する意味から、組立溶接サイズは必要最小限の大きさ（4 mm以下）になるよう管理している。

ii) 縦リブ溶接

図3 箱桁の製作の流れ

図4 鋳桁の製作の流れ

この工程では、 CO_2 ガスシールド8電極自動溶接装置(図-6)を使用して、4本の縦リブを同時にフランジに能率的に溶接している。縦リブの本溶接はすみ肉溶接サイズが6～9mmとあまり大きくないが水平すみ肉溶接となるので、縦リブ側のアンダーカットや、フランジ側のオーバーラップが生じないように、ワイヤの狙い位置やワイヤ角度に注意して施工している。H14 道示改定により、Uリブ(板厚6, 8mm)の部分溶込み溶接については疲労強度確保の観点から、溶込み深さがUリブ板厚の75%以上あることが求められている。

iii) 補剛材組立

この工程では、 CO_2 半自動アーク溶接によって施工している。補剛材の本溶接のすみ肉溶接サイズが4～9mmと比較的小さくウェブの板厚も14mm以下と小さく組立溶接の低温割れの危惧がないため、組立溶接サイズは必要最小限の大きさ(4mm以下)になるよう管理している。

iv) 補剛材溶接

この工程はツイントーチのガスシールドアークすみ肉溶接NCロボット(図7)で施工している。シールドガスは一般的にはその経済性から CO_2 を適用しているメーカーが多いが弊社では、90%Ar, 10% CO_2 の混合ガス(MIG溶接)を使用し、比較的大電流(380A)で、高溶着速度が得られる特殊溶接電源を使用している。これにより低スパッターで、ビード外観が美しく、比較的高速度(550mm/min)の溶接を実現している。

v) 箱桁組立溶接

この工程では、 CO_2 ガスシールド半自動溶接を使用して、フランジとウェブ、またそれらとダイヤフラム・横リブとを組立てている。

vi) 箱桁溶接

この工程では、半自動ガスシールドアーク溶接を中心に、フランジとウェブ、またそれらとダイヤフラム・横リブとの溶接を施工している。

箱桁組立から箱桁溶接にいたる工程では、部材が非常

図5 箱桁の縦リブ組立

図6 箱桁の縦リブ溶接

図7 箱桁の補剛材溶接

図8 箱桁の溶接

図9 I桁の首溶接

(a) 鈑桁上フランジ (下向, 板厚 78 mm)

(b) 橋脚梁ウェブ (立向, 板厚 63 mm)

図10 現場溶接部のマクロ写真

に大きく (図8), また狭隘な箱内面の作業が多いため自動溶接やロボット溶接が適用できないことが現状の大きな課題である。将来は, 例えば, 歩行溶接ロボットなどによる内面溶接の効率化が期待される。

(2) 鈑桁の組立・溶接

i) I桁組立

この工程では, 鈑桁のフランジとウェブを自動的にローラーで送り込み両者を密着しながら, ツイン2セットの電極を有する4電極ガスシールドアーク溶接装置で連続的に自動I組立溶接を施工している。I桁自動組立装置では特に上向きすみ肉溶接は溶接サイズとビード形状の管理に留意している。

ii) I桁首溶接

この工程には, 上下フランジに対して, ツインタンドムサブマージアーク溶接の全自動溶接装置 (図9) を適用し, 能率的に施工している。最近の2主鈑桁のフランジは, 特に極厚板 (50~80mm) となり, 溶接サイズ6~15mmと非常に大きくなっている。そこで弊社では, サイズが12mmまでは1パスで, サイズが13~15mmでは, 2~3パスで能率よく施工できる溶接条件を確立し施工している。

iii) 補剛材の組立・溶接

この工程は箱桁の場合とほぼ同じである。

(3) 橋脚の組立・溶接

橋脚の製作は箱桁製作の応用ではあるが, 一般の箱桁より, i) 板厚が大きく (30~80mm), ii) 部材長が小さく, iii) 阪神淡路大震災以降は特に完全溶込みを要求されるT継手, 角継手が増大した。また, 箱組立以降の工程では,

ロボットや自動溶接の適用が困難で, ほとんどのT継手, 角溶接継手は半自動アーク溶接を適用せざるを得ない状況であり, 施工能率が悪く, 品質確保にもかなりの高い管理レベルが必要な工程である。特に, 隅角部はフランジ, ウェブ, ダイヤフラムの3線交差部が発生しフランジまたはウェブの交線のダイヤフラム板厚該当部分は開先部が空洞となり, 従来の方法では溶接も, 超音波探傷検査も困難となり, 疲労強度上の弱点になる。そこで, 3線交差部の対策として, 近年は, 開先形状を特別に工夫し, 又, 溶接作業者を特別に訓練し, ほとんど無欠陥に近い状態にまで品質管理レベルを向上させている。今後は現在の開先角度 (45~55°) より狭開先の安定した完全溶込み溶接技術を開発することが求められる。また, 超音波探傷検査も一般的なパルス反射法ではなく, 探傷能率の良いフェイズドアレイ探傷法などの規格化・開発が待たれる。

3.2 現場溶接

従来は橋脚と鋼床版橋梁にほぼ限定されていた現場溶接は, 近年, 箱桁や鈑桁にも拡大されてきた。現在も橋梁の現場接合の大半は高力ボルト摩擦接合 (以下 HTB) であるが, i) 橋脚の場合, 道示の改定により極厚板が増加し, 従来の HTB では継手強度に不安がある, ii) 鋼床版橋梁の場合, HTB のボルト頭が舗装を傷つけやすく耐久性に問題があるなどの理由により, 現場溶接が適用されることが多い。また, iii) 箱桁や鈑桁も近年, 極厚板化が進み現場溶接適用橋梁が増えている。現場溶接は HTB に比較して, i) 施工期間が長い, ii) 品質管理が一般的に困難, iii) 天候に左右されやすい, iv) 実際の施工コスト

が高い、などの欠点を持つものの、HTB に比較して、十分な品質管理がなされた場合は、i) 現場溶接継手は継手効率も高く、信頼性が高い、ii) 厚板、極厚板であっても、継手強度は十分であるなどの特徴を有するため、今後も現場溶接の適用は増加していくものと推定される。

橋梁の現場溶接は HTB より、実施工コストが高いので、今後は狭開先溶接の開発、溶接ロボットの適用、多電極化などにより、コスト縮減、工期短縮、脱技能化を図ることが必須な技術である。

代表的な現場溶接部のマクロ写真を図10に示す。

4. 溶接・接合作業の状況

溶接技術において重要な管理項目のひとつに、溶接作業者の技術レベルの管理がある。弊社の溶接作業者には JISZ3801, 3841 の手溶接技術検定及び半自動溶接の中板・厚板の下向・立向姿勢の溶接資格を、また、組立溶接作業者には、手溶接技術検定または半自動溶接の中板の下向姿勢の溶接資格を全員に取得させている。毎年のこれらの資格の取得・更新には大きなコストと時間を要しているが、溶接継手の品質保証の第一歩として重要な工程である。

一般的な橋梁工場の溶接作業者の人数は約59人、その内、協力会社の溶接作業者の人数は約26人で、その比率は、44%である。

また、過去10年間で比較すると、現在では一般的な橋梁工場における溶接工程の自動化、NC ライン化、ロボット化はかなり進んでいるといえる。しかし、現在の適用溶接方法で比較すると、被覆アーク溶接5%程度、サブマージアーク溶接10%程度であり、残りの大半は半自動、自動、ロボットによるガスシールドアーク溶接である。したがって、半自動アーク溶接を自動溶接に含めなければ、溶接自動化率は50%程度ではないかと推定される。この意味で、半自動アーク溶接では、今後さらに、コスト縮減を計るためには、大溶着化・低スパッター化・溶接面清浄度の鈍感化などが重要なテーマである。またロボット溶接の完全無人化および夜間無人長時間作業化も今後の重要な課題である。

5. 溶接・接合のプロセス管理

溶接技術は、安易に考えれば、一見「どんな部位、どんな継手にも容易に使用できる」と錯覚させる魅力・魔力を持った技術であり、その結果、橋梁の疲労現象・建

築の靱性問題など多くの構造物でトラブルが発生している。即ち、溶接工程は、ISO で「特殊工程」と認定しているように、他の製造工程と比較して管理すべきパラメータが格段に多く、その管理に細心の注意が必要である。溶接品質保証のための特性要因図は種々テキストに掲載されているが、実際の溶接管理項目はこの要因図よりはるかに多い。例えば、橋梁の現場溶接で一般的に使用されているウィービング装置付きの自動ガスシールドアーク溶接装置での溶接条件要因には、溶接電流、電圧、溶接速度の他にワイヤの狙い位置、同角度、ワイヤエクステンション、ノズル高さ、ウィービングの回数・幅・高さ・ビード左右・中央での停止時間など非常に多いことが分かる。それほどに、溶接現象は複雑で奥の深いものである。また、これらの要因が品質に与える影響は、これらの要因を単純に加えたものではなく、各要因の掛け算で考えるべきである。即ち、ひとつの要因が不適切であると、他の要因が適切であっても、溶接結果は大幅に品質が低下するからである。なお、弊社では、溶接施工条件の確立のために重要な溶接施工試験や技量試験を工場の一隅で行うのではなく、専用の設備を有する技術研究所でこれらの試験を実施し、実工事に反映している。

また、弊社では工場の溶接管理技術者には WES1 級または特別級の資格を、溶接作業長にも WES1 級を、溶接作業者にも基本的には WES2 級の資格を持たせて、溶接技術・知識の教育とともに責任感の育成にも努めている。

6. 終わりに

現在は、以上に述べたように、橋梁の発注方法、橋梁製作・架設技術の激変期にあり、溶接技術をはじめとして、以下のような大きな技術革新・技術変革を橋梁メーカーは成し遂げていくことが肝要である。①橋梁の発注量減少、発注単価の下落に対して、コスト縮減のための技術改革、生産技術・設備の高度化、無人化、②高経年橋梁の疲労損傷の発生に対する、補修・補強技術の向上と新設橋梁における溶接品質の向上、③発注者の技術重視傾向に対して、VE 提案などによる新技術提案力の向上、④板厚の極厚化・現場溶接の増大に対して、溶接の狭開先化、大溶着化、ロボット化、タンデム化

参考文献

- 1) '06デザインデータブック, (社)日本橋梁建設協会, 15.
- 2) 佐藤邦彦: 溶接強度ハンドブック, 理工学社, 1-2.