

# 今後の鉄骨造を支える溶接技術

— 現場ロボット溶接工法による生産性と品質の向上 —

（株）大林組技術研究所構造技術研究部主任研究員 浅井 英 克

## 1. はじめに

建設業では中長期的に予測される技能労働者の減少や昨今の働き方改革を実現するため、あらゆる工種において生産性の向上が求められている<sup>1)</sup>。特に現場溶接作業を担う溶接技能者は高度な技能を要するために適格者が限られ、高齢化も進展している<sup>2)</sup>ことから、ロボットを用いた現場自動溶接技術（以下、現場ロボット溶接）の開発が急務となっている。

一般的な鉄骨造建物における現場溶接は、図-1に示す梁端部①~③と柱継手④~⑥の6種類に大別される。鉄骨製作工場における溶接では、溶接し易い向きに鉄骨部材をセットできるので、下向溶接などの品質を比較的確保し易い姿勢で溶接することが出来る。一方、鉄骨造建物の現場溶接では鉄骨製作工場と異なり、建入れされた鉄骨の部位に合わせた姿勢で溶接しなければならない。そのため、ロボットで柱・梁のあらゆる部位を現場溶接するためには、図-1の〔 〕に示す下向き、横向き、立向き、上向きの各姿勢に対する溶接技術が必要となる。

柱・梁の6種類の溶接部位のうち、①、④、⑤の溶接部位については、1990年代に現場ロボット溶接技術が実用化された<sup>例えば文献3、4)</sup>。しかし、高度な技量を要する梁ウェブの立向き溶接（同図③）や

梁下フランジの上向き溶接（同図②）については、技術の確立に至らなかった。また、同じ柱の横向き溶接でも、角形鋼管（同図⑥）の横向き溶接は、角部でロボットの速度変化が必要なためにロボット制御が難しく、実用化されていなかった。

また、1990年代の現場ロボット溶接技術では生産性（溶接歩掛）の面でも課題があった。当時は比較的大きな溶接ロボットを用いることが多かったため、ロボットの移動、昇降、セット、盛替などの準備作業に溶接作業時間全体の約60%を占める場合もあった<sup>5)</sup>。そのため、溶接準備時間の短縮と溶接歩掛の向上が実用上の大きな課題であった。

このような過去の課題を踏まえ、筆者らは持ち運びが便利な溶接ロボットを使用して生産性の向上に努めるとともに、実用化されていなかった図-1. ②、③、⑥の各部位に対する溶接技術の確立に取り組んだ。その結果、下向き、横向き、立向き、上向きの全溶接姿勢に対応可能で、鉄骨柱・梁の全ての現場溶接作業を自動化できる「現場ロボット溶接工法」（以下、本工法）を建設業界に先駆けて実用化した<sup>6)</sup>。

本稿では、本工法の開発経緯や概要・特長、溶接技能者と比較した利点や注意点について紹介したい。

## 2. 梁下フランジの上向きロボット溶接

上向き溶接は重力に逆らって溶接するため、一度に多くの量を溶接しようとする、溶融金属が凝固する前に落下する。全溶接姿勢の中で最も難しい溶接方法であり、基本姿勢である下向き溶接と比べれば一度に溶接できる量は限られ、良好な溶接が可能な条件を綿密に検討する必要がある。このため、試験施工を繰り返して上向きロボット溶接に適した電流、電圧、積層手順等の溶接条件を板厚ごとに定め、溶接品質の向上に努めた。最終的には、文献7)に示す施工試験によって溶接部が要求品質を満足することを確認し、実際の現場工事に適用した。

上向きロボット溶接の現場適用例を写真-1に示す。溶接ロボットは表-1のように重量が10kg未満の可搬型のものを使用した。作業環境に恵まれない工事現場においても、作業者はロボットを簡単に持ち運びすることができるため、過去の技術課題であった溶接準備時間を大幅に短縮できた。また、表-1の溶接ロボットで、図-1に示す6種類の溶接箇所を最終的にすべて溶接できるようになったため、溶接箇所ごとに異なるロボットを購入・保管する必要が無くなり、現場溶接工法としての汎用性も大幅に向

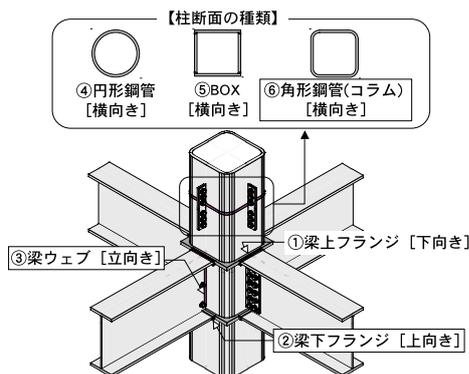


図-1 鉄骨造建物における現場溶接箇所



写真-1 梁下フランジの上向きロボット溶接状況

表-1 溶接ロボットの仕様

項目	仕様
型式	①IR-110MA もしくは ②IR-700MA
構造	直交可搬型
軸数	4軸
センシング方式	ワイヤタッチセンシング
寸法(重量)	①356H×222D×91H (8.5kg) ②222H×179D×91H (6.5kg)

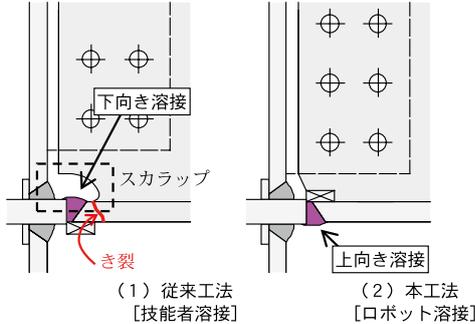


図-2 梁下フランジの溶接方法



写真-2 上向き溶接技量付加試験の溶接外観

上した。

上向きロボット溶接を例にして、現場溶接の現場生産性（溶接歩掛）、溶接品質、部材構造性能の面から本工法と技能者による現場溶接（以下、従来工法）を比較する。

### (1) 現場生産性の比較

鉄骨を実際に溶接する実溶接時間について、本工法と従来工法で大きな違いはない。溶接品質確保のため、入熱やパス間温度の上限が定められており、一度に過度な量の溶接を行うことが認められないためである。しかし、ロボット溶接ではロボットの運搬、セット、ティーチングなどの準備作業に技能者よりも多くの時間を要する。そのため、1台のロボットと1人の技能者を比較すると、準備を含めた全溶接時間はロボットの方が長くなり易い。一方、ロボット溶接では写真-1のように1人のオペレータが複数のロボットを操作することも可能である。この場合、オペレータ（ロボット溶接）と技能者という、作業員1人当りの生産性で比較すれば、ロボット溶接の方が高い生産性を実現することも可能である。

溶接の準備時間が全溶接時間に占める割合は部材断面（溶接量）によって異なり、またロボットの同時操作が可能な数は柱・梁の溶接部位や溶接環境によって変わる。そのため、過去の施工実績から施工条件に応じた溶接歩掛を設定し、これに基づく施工計画を策定した上で、現

場施工に臨んでいる。これまでの施工実績により、上向き溶接に関しては、技能者と同等の生産性を実現できることを確認できている。

### (2) 溶接品質の比較

本工法ではオペレータのロボット操作能力が溶接品質を左右する。そのため、現場施工前にオペレータを教育し、現場ロボット溶接技量付加試験に合格したオペレータのみが現場作業に従事することとしている。技量付加試験の結果から、ロボットと技能者の溶接品質を比較する。

写真-2にオペレータ（ロボット）と技能者が受験した上向き溶接技量付加試験の溶接外観を示す。技能者に対する技量付加試験は、ロボット溶接の不具合発生を想定したものである。ロボット溶接箇所の不具合が発生した場合、現状はロボットで補修溶接を行うのは難しい。そのため本工法適用時は、補修を想定して必ず1名以上の技能者を配置することとしており、写真-2の右列は補修用溶接技能者に対する技量確認として実施したものである。

写真-2を見ると、ロボットと技能者では溶接外観がかなり異なる。写真-2右列の溶接技能者の溶接外観はすべて検査基準を合格しているが、溶接ビードの形状に個人差が多く見られ、溶接表面の凹凸が大きい。一方、ロボットが施工した写真-2左列の溶接ビードは非常に滑らかで、オペレータによらず一律な溶接

外観である。ロボットを活用することで、現場溶接の品質安定と技量の平準化を実現できる。

一般に建築工事の完全溶込み溶接部には、第三者による外観検査と超音波探傷検査が求められる。本工法の上向きロボット溶接については、これまでに梁下フランジの形状としては最大で板厚60mm、幅1,100mm、箇所数として累計300近い適用実績がある。そのすべてについて第三者検査に合格しており、安定的な現場品質が得られている。

### (3) 部材構造性能の比較

通常、梁下フランジの現場溶接は技能者が下向きで行うが、ウェブが溶接を邪魔するため、図-2.(1)に示すスカラップと呼ばれる孔をウェブに設ける。これにより、ウェブの左右から下フランジとウェブの交差部を溶接でき、下フランジ全線の完全溶込み溶接が可能となる。しかし、このスカラップは地震時にき裂の起点となり易く、変形能力の低下を招く点が阪神・淡路大震災（1995）以来の課題であった<sup>8)</sup>。

一方、本工法では下フランジを上向きで溶接する。これにより、スカラップが無くとも下フランジの完全溶込み溶接が可能になる。地震時に弱点となるスカラップを無くすことで、地震時のき裂発生を抑制できる。本工法を用いた現場溶接型鉄骨梁の構造実験を実施したところ、地震時の変形能力に優れるとされるノン



(1) ロボット

(2) 技能者

写真-3 梁ウェブの立向き溶接状況

スカラップ工法（工場溶接型鉄骨梁）と同等の変形能力であった<sup>7)</sup>。

このように、本工法の上向き溶接は、従来工法に比べて溶接品質の向上のほか、梁部材の耐震性向上も期待できる。

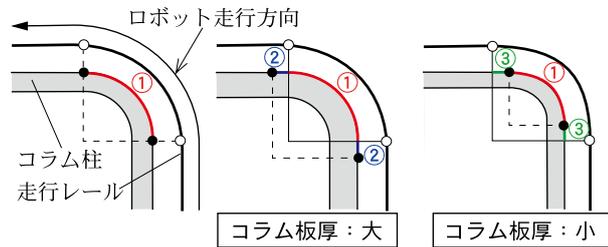
### 3. 梁ウェブの立向きロボット溶接

梁ウェブの立向き溶接も上向き溶接と同様、一度に多くの量を溶接しようとすると、垂れなどの不具合が発生する。そのため、試験施工を繰り返して立向きロボット溶接に適した溶接条件を板厚ごとに定め、施工試験によって溶接部が要求品質を満足することを確認した。施工試験の詳細は文献9)を参照されたい。

立向きロボット溶接の現場施工状況を技能者と比較しながら写真-3に示す。梁断面はBH-1500×600×28×40であり、28mm厚のウェブを高さ約1300mmの範囲で下から上に向かって現場溶接した。ロボット溶接では、写真-3.(1)のように走行レールを設置することで、約1300mmの範囲を下から上まで連続的に溶接できる。一方、写真-3.(2)に示す技能者では、約1300mmの高さを連続溶接することは難しい。そのため、高さ方向に数回に分けて立向き溶接を行う必要がある。写真-3に示すような大断面の部材は溶接量が多く、本工法では全溶接時間に占める溶接準備時間の割合が小さくなる。また、前述のようにロボットは連続的に溶接できるため、大断面部材の溶接では生産性の面でロボットが優位性を発揮しやすい。

上向き溶接と同様に、ロボットと技能者の溶接品質を比較してみる。技能者の溶接外観は写真-3.(2)のように良好であるが、ロボットは写真-3.(1)のように技能者以上に滑らかで良好なビードを得られる。写真-2に示した上向き溶接と考え合わせれば、上向き溶接、立向き溶接という高度な技量を要する溶

- ①：コラム柱、走行レールとも角部
- ②：コラム柱は角部、走行レールは平板部
- ③：コラム柱は平板部、走行レールは角部
- コラム柱の円弧開始点    ○ 走行レールの円弧開始点



(1) 角部が同心円

(2) 角部が非同心円

図-3 角形鋼管の角部と走行レールの関係

接姿勢において、ロボットは技能者と同等以上に良好な溶接品質を得ることができると言える。

本工法の立向きロボット溶接については、これまでに梁ウェブの形状としては最大で板厚28mm、せい1,700mmに適用し、箇所数として累計100近い適用実績がある。そのすべてで第三者検査に合格しており、上向き溶接と同様に、安定的な現場品質が得られている。

### 4. 角形鋼管柱の横向きロボット溶接

角形鋼管柱（図-1.⑥）は円形と直線の複合断面のため、過去に実用化された円形鋼管柱やBOX柱の現場横向きロボット溶接<sup>4)</sup>と異なり、以下の技術的課題①～③があった。

#### ①角形鋼管柱と走行レールが同心円の場合

角形鋼管柱は図-3のように平板部と角部で構成される。平板部では走行レール位置でのロボットの移動距離とトーチ先端の溶接施工長さが同一のため、ロボットを一定の速度で制御できる。しかし、角部では走行レール位置でのロボットの移動距離がトーチ先端での溶接施工長さよりも長くなるため、平板部から角部に差し掛かる付近でロボットを加速さ

せる必要がある。

#### ②角形鋼管柱と走行レールが非同心円の場合

BCP規格の角形鋼管柱の角部は、板厚の3.5倍の外側半径で製作される。角形鋼管柱の板厚・径ごとに走行レールを製作・保管するのは不経済のため、任意の円弧半径の走行レールであらゆる角形鋼管柱を溶接しようとすると、図-3.(2)のように角形鋼管柱と走行レールの円弧開始位置が異なるため、さらに綿密な制御が要求される。

#### ③柱継手のエレクションピースの取扱い

鉄骨建て方の際、柱の建込み時にはエレクションピースと呼ばれる組立材が柱に取り付く（後述の写真-4参照）。エレクションピース内側の柱継手部分を可搬型ロボットが溶接するのは難しく、溶接手順に工夫を要する。

筆者らは、まず上記①、②の技術課題を解決するため、円弧半径R200mmの走行レールを用いて、板厚の異なる種々の角形鋼管柱に対する試験施工を行い、走行レールと角形鋼管柱の円弧関係に応じたロボットの制御条件を定めることとした。次に上記③の解決策として、(a)最初に角部を溶接の初層から最終層まで先行溶接し、(b)エレクションピースを撤去した後、(c)平板部を溶接する



(1) ロボット溶接状況

(3) 技能者溶接状況

(2) 溶接外観（ロボット）

(4) 溶接外観（技能者）

写真-4 角形鋼管柱の横向き溶接状況

手順を考案した。

これら一連の手順による溶接品質を確認するため、施工試験を行って必要な品質基準を満足することを確認した。施工試験の詳細は文献10)を参照されたい。

角形鋼管柱に対する横向きロボット溶接工法の現場適用状況を写真-4。(1)に示す。柱断面は口-600×600×22 (BCP325材)であり、本工事では2台のロボットを柱の対向に配置して、2台同時に溶接した。

溶接手順は前述のように、まず柱の角部を溶接し、エレクトロードを撤去した後、柱の平板部を溶接することとした(写真-4。(1))。施工の結果、溶接外観は写真-4。(2)のように角部、平板部ともに良好であった。また、第三者による外観検査、超音波探傷検査はいずれも全数合格した。角形鋼管柱の横向きロボット溶接は円弧を描くコラム角部の施工性が課題であったが、実際の現場工事において良好な溶接品質を確保できた。

本工事では技能者も柱継手の溶接を行っており、技能者の溶接状況を写真-4。(3)、その溶接外観を写真-4。(4)に示す。写真-4。(2)と(4)を比較すると、いずれの溶接外観も良好であり、優劣は見られなかった。角形鋼管柱の横向き溶接において、ロボットは技能者と同等の溶接外観を確保できると言える。

角形鋼管柱の現場横向きロボット溶接の生産性について、直近の適用物件では、技能者と同等の生産性を実現できるようになってきたものの、施工条件によっては生産性が技能者に及ばないケースもあ

る。角形鋼管柱の現場溶接は多くの鉄骨造建物に存在し、また現場溶接量も多い。ロボットによる施工省力化が最も期待できる溶接箇所と言え、生産性向上を中心に技術改良を進めながら、引続き積極的に適用していきたい。

## 5. おわりに

本稿では、現場ロボット溶接工法の開発と適用を通して、現場溶接作業の自動化に向けた筆者らの取組みを紹介した。

現在、ロボットを用いた現場溶接技術は一部のゼネコンを中心に実用化が進められている。一方、この技術を広く普及させるには、運用方法やオペレータ資格のあり方(誰がロボットを保有し、あるいはオペレータを教育するのか?)、施工要領の標準化、適用範囲の拡大など<sup>11)</sup>、解決すべき課題は少なくない。

冒頭に示したように、建設業では技能労働者不足への対策として、生産性向上に寄与する技術の開発が喫緊の課題である。本工法においては、発注者、設計者、工事関係者等への説明と調整を図りながら、現場溶接作業の有力な省力化・省人化技術として、引続き普及、発展に努めていきたい。

### 《共同執筆者》

- 大塚英郎：(株)大林組東京本店建築事業  
部品質管理部 担当部長  
白井嘉行：(株)大林組東京本店建築事業  
部品質管理部 副課長  
鈴木康正：(株)大林組技術研究所 主席  
技師

### 【参考文献】

- 1) 中央建設業審議会・社会資本整備審議会産業分科会建設部門：第19回基本問題小委員会 配布資料「建設産業をめぐる現状と課題」, 2018. 2. 13  
<https://www.mlit.go.jp/common/001221442.pdf>
- 2) (社)日本溶接協会：溶接関係の統計-溶接技能者認定者の年齢構成-, 2020. 3. 31時点  
<http://www-it.jwes.or.jp/statistics/statistics4.jsp>
- 3) 中込, 古屋, 土橋, 軽部, 山本：建築鉄骨用柱梁仕口部多層完全溶け込み下向溶接ロボットの開発とその溶接部の力学的性能の検討, (社)日本建築学会構造系論文集, 第456号, pp. 59-67, 1994. 2
- 4) 吉田, 広本, 原田, 上村, 和田：鉄骨柱自動溶接ロボットの開発, 鋼構造論文集, 第1巻4号, pp. 81-86, 1994. 12
- 5) 施工技術の自動化-建設ロボットへのアプローチ-, 建築技術, No509, pp. 67-150, 1993. 1
- 6) 浅井, 大塚, 白井, 鈴木：現場ロボット溶接工法の開発・適用と高度化-現場溶接の省力化に向けた取組み-, 第18回建設ロボットシンポジウム, 2018. 9. 13
- 7) 白井, 大塚, 浅井, 鈴木：上向ロボット溶接を用いてスカラップ周囲の応力集中を緩和した現場溶接型鉄骨梁, (社)日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅲ, pp. 731-734, 2015. 9
- 8) (社)日本建築学会他：阪神・淡路大震災調査報告, 建築編-3 鉄骨造建築物, 1997. 10
- 9) 白井, 大塚, 浅井, 鈴木：梁ウェブに対する現場ロボット溶接技術の開発と適用, (社)日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp. 11-12, 2018. 9
- 10) 白井, 大塚, 浅井, 鈴木：コラム柱に対する現場ロボット溶接技術の開発と現場適用, (社)日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp. 995-996, 2017. 8
- 11) (社)日本建築学会 材料施工委員会：建築鉄骨ロボット溶接の過去・現在・未来-先端技術を使いこなすための道筋-, 日本建築学会大会パネルディスカッション資料, 2019. 9