

ロボットを活用した現場溶接技術の開発

浅井 英 克 鈴 井 康 正
 大 塚 英 郎 白 井 嘉 行
 (東京本店建築事業部) (東京本店建築事業部)

Development of Site Welding Technology Using a Robot

Hidekatsu Asai Yasumasa Suzui
 Hideo Otsuka Yoshiyuki Shirai

Abstract

In site welding of steel structure, there is a demand for welding construction technology with high productivity and stable quality. The authors have developed a “Site robot horizontal welding” technique for square steel pipe columns, in addition to the previously developed “Site robot overhead welding” technique for bottom beam flanges. As result of conducting welding construction test and applying the both techniques to actual construction, we could conclude the following. 1) Weld zones welded by site robot horizontal welding fulfilled required mechanical properties. 2) All of weld zones welded by the both techniques passed visual and ultrasonic examinations on the construction site. 3) Site robot welding to upper and lower beam flanges and columns of various shapes became practical by this development.

概 要

鉄骨造の現場溶接工事では溶接技能者不足に対応するため、生産性が高く、高品質な溶接施工技術が求められている。大林組は両課題の解決策として現場ロボット溶接技術の開発を進めており、既の下フランジの現場上向ロボット溶接技術を開発した。今回、現場ロボット溶接技術のさらなる適用拡大を目指し、コラム柱の継手をロボットで自動溶接する現場横向ロボット溶接技術を開発した。溶接施工実験を行い、実工事に適用した結果、以下を確認できた。1) 横向ロボット溶接した溶接部の機械的性質は必要性能を満足した。2) 梁下フランジの現場上向ロボット溶接技術とコラム柱の現場横向溶接技術を実工事に適用した結果、第三者による溶接部の外観検査・超音波検査は全数合格し、良好な溶接品質を安定的に確保できた。3) 本開発により、梁の上下フランジと柱(円形鋼管, BOX, コラム)の現場ロボット溶接が実用化できた。

1. はじめに

少子高齢化や若年層の入職率低下による建設技能労働者の中長期的な減少・不足が予測されている。国土交通省中央建設業審議会の資料¹⁾によれば、2014年に341万人いた建設技能労働者が2025年には216万人に減少するため、約90万人の新規入職者が必要であると推計している。ただし実際にこれだけの新規入職者を確保することは困難と考えられ、技能労働者不足を補完する新技術が強く求められている。

鉄骨造建物の施工現場では、特にPhoto 1(1)に示す現場溶接技能者が不足しており、その対策が求められている。さらに、現場溶接はその品質の良否が建物の耐震性に直結することを考えると、溶接技能者を補完するだけでなく、高い品質を安定的に確保できる技術が求められる。特に巨大地震の発生が予見される現在²⁾などにおいては、耐震性の観点から溶接品質の良否が非常に重要である。

筆者らは現場溶接作業の省力化と溶接品質の安定化を実現するため、ロボットによる現場溶接(以下、現場ロボット溶接)の適用拡大を進めている。これまでに梁下フラ



(1) 技能者による手動溶接 (従来技術)



(2) ロボットによる自動溶接 (開発技術)

Photo 1 鉄骨梁の現場溶接
Site Welding to Steel Beam

ンジをロボットで上向溶接する現場溶接工法(Photo 1(2)参照)を開発し、成果を既報³⁾で報告した。本工法は、ロボットの活用による溶接作業の省力化と溶接品質の安定化のほか、鉄骨梁の耐震性を向上させる点が特長である。従来の技能者による下フランジの下向溶接では、フランジとウェブの交差部にスカラップ(Fig. 1(1)参照)と呼ばれる孔を設ける必要があるが、地震時にはスカラップから早期にき裂が発生し、耐震性を低下させる点が問題となっていた⁴⁾。一方、下フランジを上向溶接する本工法ではスカラップが不要となる(Fig. 1(2)参照)。その結果、地震時のき裂発生が抑制でき、耐震性は「累積塑性変形倍率」というエネルギー吸収能力を評価する指標において従来の約2倍に向上した³⁾。

ところで鉄骨の現場溶接工事全体を見ると、柱梁接合部以外にも柱継手の溶接作業量が多い。そのため、柱の現場溶接がロボットで自動化できれば、現場溶接作業を大きく省力化・省人化し得る。

本報は現場ロボット溶接の汎用化に向けた取組状況を報告するものである。まず現場ロボット溶接技術の適用拡大に向けた技術課題を整理する。次に、課題解決に向けて重要なコラム柱の横向ロボット溶接技術の開発状況を報告する。最後に、現場ロボット溶接に関するこれまでの開発技術を実際の現場工事に適用して、安定的な溶接品質を実現した施工事例を紹介する。

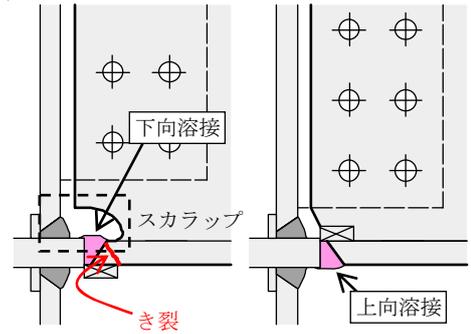
2. 現場ロボット溶接の課題と開発方針

鉄骨の現場溶接にロボットを活用することで、溶接作業の省力化や省人化、溶接品質の安定が期待できるにも関わらず、広く普及するまで至らない理由の一つに、ロボットの現場溶接箇所が制限される点がある。鉄骨の現場溶接箇所は梁と柱の部材種別、柱の断面形状に応じてFig. 2の①～⑥に大別される。H形鋼を柱に使用する場合もあるが、直線状の鋼板だけで構成される点で「⑤BOX」と同等の施工性と考えられ、ここでは割愛する。①～⑥の各溶接箇所に対する現場ロボット溶接の現状の技術課題を説明する。

2.1 梁端の現場ロボット溶接

「①梁上フランジ」をロボット溶接する場合、溶接方法は下向溶接となるが、これは文献⁵⁾などでロボット溶接技術が確立されている。一方、「②梁下フランジ」をロボット溶接する場合、現状では技能者と同様に下向で溶接することは難しい。理由として、ウェブが溶接線を分断するため、Fig. 1(1)のスカラップをウェブに設けたとしても、分断箇所の溶接が現状の可搬式ロボットでは難しい点がある。これを回避するために、下側から下フランジを上向溶接することが考えられるが、ロボットによる上向溶接の施工例はほとんど見られない^{例え⁶⁾}。

また、せいが比較的大きな梁を現場溶接する場合、「③梁ウェブ」をボルトで柱に仮固定して、梁ウェブと柱を



(1) 技能者による溶接 (従来技術) (2) ロボットによる溶接 (開発技術)

Fig. 1 下フランジ溶接方法の比較
Comparison of Welding Method to Bottom Flange

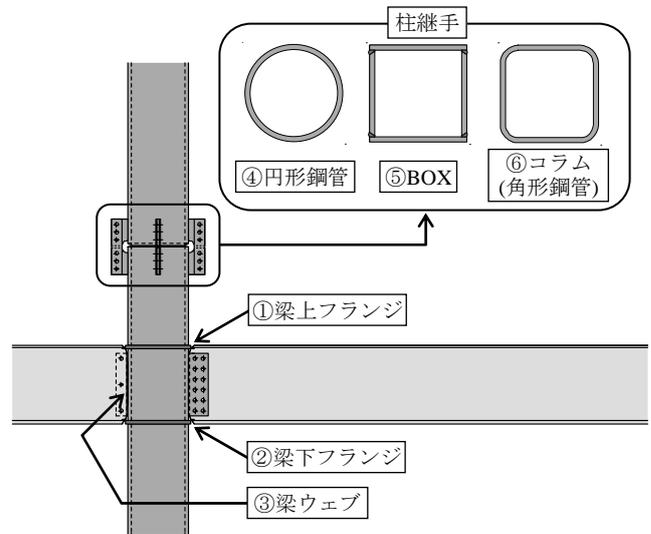


Fig. 2 鉄骨現場溶接箇所の分類
Classification of Steel Site Welding Places

溶接する場合がある。通常、技能者は立向で溶接するが、これをロボットで溶接した施工例は見られない。

2.2 柱継手の現場ロボット溶接

柱継手も梁端と同一仕様のロボットで溶接可能であり、「④円形鋼管」と「⑤BOX」については、文献⁷⁾などでロボットによる現場溶接例がある。しかし使用頻度が高い「⑥コラム」については、現場ロボット溶接の施工例がほとんど見られない。「④円形鋼管」と「⑤BOX」は円形状のみ、あるいは直線状のみの鋼材で構成されるため、溶接中はロボットを一定の速度、溶接角度で制御できる。他方、「⑥コラム」は平板部と角部でロボットに要求される速度、溶接角度が異なるため、両部を跨ぐ際のロボット制御が難しく、技術の確立に至っていない。

2.3 開発方針

以上より、現場ロボット溶接技術の適用拡大には「②梁下フランジ」の上向溶接技術、「③梁ウェブ」の立向溶接技術、「⑥コラム」の横向溶接技術の確立が不可欠

である。これを踏まえ、まず「②梁下フランジ」の現場上向ロボット溶接技術の開発に着手し、既報3)で報告した成果を得た。次に、溶接作業量の多い「⑥コラム」の横向ロボット溶接技術の開発に着手した。3章ではその開発状況を報告する。

3. コラム柱の横向ロボット溶接技術の開発

3.1 技術課題

前述のように、円形鋼管やBOX柱などの円形状や直線状の鋼板だけで構成される断面と異なり、コラム柱は円形と直線の複合断面のため、ロボットの制御が複雑になる。コラム柱横向ロボット溶接の技術課題を説明する。

(1) コラムと走行レール角部が同心円時 コラム柱はFig. 3に示すように、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移動距離とトーチ先端の溶接施工長が同一のため、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移動距離がトーチ先端の溶接施工長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。コラム柱と走行レールの円弧中心が同一となる同心円の場合でも、平板部と角部を跨ぐ位置でロボット速度を変化させる制御が必要となる。

(2) コラムと走行レール角部が非同心円時 さらに、コラム柱は板厚によって角部の円弧半径が異なる点を考慮する必要がある。例えば、BCP材は板厚 t の3.5倍の外側半径で製作される。コラムの板厚ごと、さらには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コラムを溶接しようとする、Fig. 3(2)のように走行レールとコラムの円弧が非同心円となる。その場合、平板部から角部、あるいは角部から平板部の溶接では2箇所の円弧開始点を通過するため、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用の鋼材が柱に取り付く(後述のPhoto 7参照)。エレクションピースは施工上必要なものであるが、現状ではエレクションピース内側の柱継手部分を可搬式のロボットが溶接するのは難しく、ロボット溶接とエレクションピース撤去の手順に工夫を要する。

3.2 施工試験概要

前節(1)(2)の技術課題を解決するため、任意の円弧半径を有する走行レールを用いて、板厚の異なる種々のコラム柱に対する試験施工を行い、走行レールとコラム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。また前節(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)平板部を溶接する施工手順を考案した。溶接部の品質確認のために実施した溶接施工試験の概要を説明する。

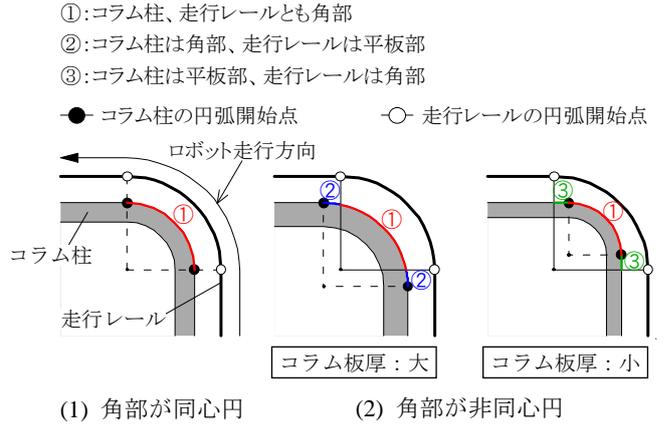


Fig. 3 コラム柱角部と走行レールの位置関係
Physical Relationship between Column Corner and Travelling Rail

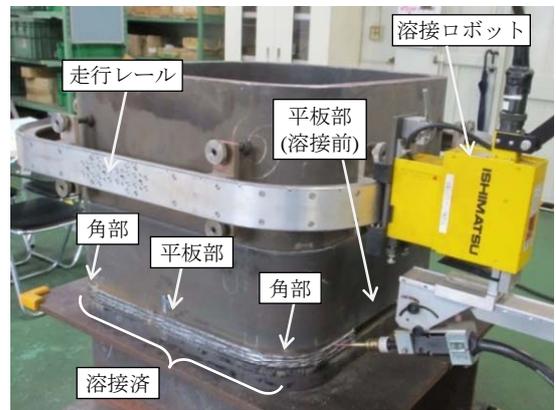


Photo 2 横向ロボット溶接施工試験
Horizontal Robot Welding Construction Test

Table 1 コラム柱の機械的性質 (ミルシート値)
Mechanical Properties of Column (Mill Sheet Value)

板厚	鋼種	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	破断伸び (%)	降伏比 (%)
36	BCP325	412	533	31	77

試験体はBCP325材の□-700×700×36を用いたコラム柱の溶接継手部であり、施工試験状況をPhoto 2に示す。また、コラムの機械的性質(ミルシート値)をTable 1、施工試験と溶接部機械試験の項目をTable 2に示す。溶接ワイヤはJIS Z 3312 YGW18とし、文献8)にない、パス間温度は平板部が350℃以下、角部が250℃以下、入熱は平板部が40kJ/cm以下、角部が30kJ/cm以下を管理値とした。施工の結果、入熱の測定値は平板部が最大約19kJ/cm、角部が最大約21kJ/cmであった。施工手順は前記(a)~(c)に従い、先行する角部の溶接端部をカスケード状にビード形成し、後行する平板部の溶接は先行部のビード形状に合わせてビードを繋げることにした。

3.3 施工試験結果

施工試験、機械試験の結果一覧をTable 2に示す。各検査・試験項目の結果概要を説明する。

Table 2 検査・試験項目および結果一覧
Inspection・Test Items and Test Results

検査・試験	位置	数量	結果
外観検査	該当箇所全て		良好
UT検査	該当箇所全て		良好
マクロ試験	平板部	1	良好
	角部	1	良好
	ビード繋ぎ部	1	微細キズ検出
シャルピー衝撃試験	平板部 (表層2mm)	1組	Ave. 165J (163J,165J,168J)
溶接金属引張試験	平板部 (t/4)	1	YP=530N/mm ² TS=587N/mm ²
溶接継手引張試験	ビード繋ぎ部 (全断面)	3	1) TS=556N/mm ² 2) TS=562N/mm ² 3) TS=557N/mm ²

(1) 外観検査 Photo 2の「溶接済」箇所のように、溶接外観は全般的に良好であり、「日本建築学会：建築工事標準仕様書 JASS6 鉄骨工事」⁹⁾の検査基準に従えば、いずれも限界許容差以内であった。

(2) 超音波探傷検査(UT検査) 平板部と角部の溶接ビード繋ぎ部の一部でいわゆる合格キズが検出されたものの、平板部、角部、ビード繋ぎ部ともに、UT規準¹⁰⁾の「引張応力が作用する溶接部」の判定基準に合格した。

(3) マクロ試験 マクロ試験結果をPhoto 3に示す。平板部、角部ともに有害な欠陥はみられず、良好な溶込みが確認出来た。一方、Photo 3(3)では不鮮明であるが、ビード繋ぎ部には微細な融合不良が確認された。

(4) シャルピー衝撃試験 JIS Z2242に従い、試験温度0°Cでシャルピー衝撃試験を行った。試験片は平板部の溶接金属中央部で、表層2mmの位置から採取した。Table 2より、3試験片の平均値は165Jであり、また個々のばらつきは少なく、安定した衝撃値であった。

(5) 溶接金属引張試験 JIS Z2242に従い、A1号試験片を用いて溶接金属の引張試験を行った。Table 2より、降伏点は530N/mm²、引張強さは587N/mm²であり、Table 1に示す母材の材料試験値を上回った。

(6) 溶接継手引張試験 「(2) 超音波探傷検査(UT検査)」の結果を踏まえ、Photo 2に示す施工試験体の放射線透過試験を行ってビード繋ぎ部のきず位置を確認し、きずが最も入るような3箇所から溶接継手試験片を採取した。Photo 4に試験結果例を示す。本試験片には若干のきずが観察されるものの、いずれも母材破断した。また、3試験片の引張強さはTable 2より556、562、557N/mm²であり、Table 1に示す母材の引張強さ以上の値を得た。

3.4 開発成果

- コラム柱横向ロボット溶接の開発成果を以下に示す。
- ・ ロボットを用いた場合でもコラム柱の継手部を全般的に良好な品質で溶接できた。
 - ・ ロボットの制御条件を新たに工夫して、任意径の

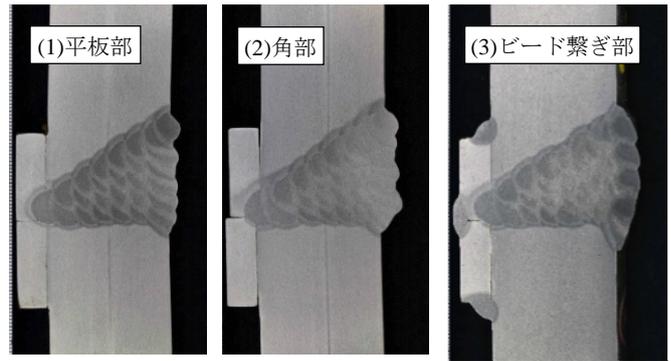


Photo 3 マクロ試験結果
Macro Test Results

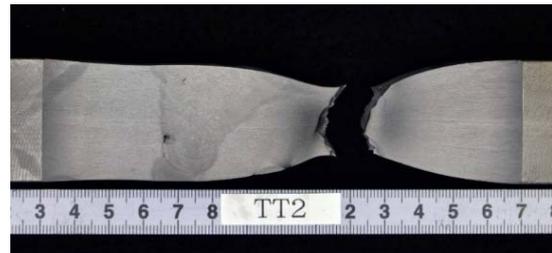


Photo 4 溶接継手引張試験結果例
Example of Weld Joint Tensile Test Results

角部用走行レール1種類と、複数の平板部用走行レールを組み合わせることで、様々な径・板厚のコラム柱をロボット溶接できた。

- ・ 柱エレクションピースを考慮した溶接手順を考案し、施工・機械試験で溶接品質を確認した。

4. ロボット溶接の現場適用と品質確保

4.1 ロボット溶接オペレータの育成事例

現場ロボット溶接技術の適用報告に先立ち、ロボットオペレータの育成事例について紹介する。ロボットは施工再現性が高く、試験室で定めた通りの溶接条件・手順で施工すれば、工事現場でも安定的な溶接品質を得られる可能性が高い。そのため、品質確保の鍵となるのは、ロボットの適正な操作による溶接管理である。現在、溶接技能者の技量を担保するAW検定試験¹¹⁾では、工事現場を対象としたロボット溶接オペレータ資格が無い。そのため、プロジェクトごとにロボット溶接オペレータの技量付加試験を実施して、工事に従事するオペレータの操作技術と溶接管理能力を担保することになっている。

他方、ロボット溶接は高度な溶接技量をロボットが担うことで、より多くの技能者が品質の高い溶接を安定的に行えることを目標にする。そのため、ロボットオペレータに高度な溶接技量を要求することは、本開発の趣旨にそぐわない。

以上を考慮して、現在、ロボットオペレータに要求する資格は、JIS Z 3841「半自動溶接技術検定における試験方法およびその判定基準」におけるSA-2FもしくはSA-

3Fとしている。

本事例は、溶接ロボットを扱った経験のない、上記資格を有する6名の溶接技能者をロボットオペレータとして訓練したもので、4.2節に示す現場上向ロボット溶接の現場適用3件目に向けて実施したものである。最初に溶接ロボットメーカーの技術者が6名の技能者に溶接ロボットの取扱いや溶接部の品質管理技術を約2時間かけて指導した。その後、下フランジとウェブを部分的に模擬したFig. 4のようなT字形試験体でロボットによる上向溶接の操作を訓練した。工事を担当したファブリケータの品質管理責任者によると、「2~3体まではロボットメーカー技術者に操作を逐次教わりながら訓練したが、5体目ぐらいからは一人でロボットを操作できるようになった。さらに習熟を重ね、7~8体訓練すれば、技量付加試験を受験できるレベルに達した。」とのことである。

技量付加試験は工事監理者立会のもと、Fig. 4に示す試験体を用いて行った。技量付加試験の判定項目は、AW検定試験を参考に以下の項目とした。

- (a) 溶接前処理、教示操作、溶接中検査
- (b) 外観検査
- (c) 放射線透過試験
- (d) 溶接部引張試験
- (e) 表曲げ試験
- (f) マクロ試験
- (g) シャルピー衝撃試験

Photo 5に溶接外観を示すが、いずれの受験者においても非常に良好な外観である。その他項目を含めた判定の結果、受験者6名のうち4名が合格した。残りの2名は(a)~(f)の判定項目はすべて合格したものの、シャルピー衝撃試験値が不合格となった。シャルピー衝撃試験は試験温度0℃で3体の平均値が70J以上を合格としたが、6名の結果(3体の平均値)は次のとおりであった。なお、以下の①~⑥はPhoto 5に対応する。

①141J, ②69J, ③106J, ④123J, ⑤102J, ⑥64J

受験者が全員合格するまでには至らなかったものの、ロボット溶接の経験がない溶接技能者でも数日の訓練で現場施工が可能なレベルに達し得ることが確認でき、現場ロボット溶接は汎用性が高い溶接技術と言える。

4.2 梁下フランジの上向ロボット溶接の適用

梁下フランジの上向ロボット溶接技術を地下1階、地上9階建の事務所建物に適用した。適用状況をPhoto 6に示す。本工事は上向ロボット溶接技術の現場適用3件目であり、過去2件の適用状況は文献12)で紹介している。

ロボット溶接を適用した主要な梁断面はSN490B材のH-550×250×12×22であり、本工事では上フランジの下向溶接を技能者が行い、下フランジの上向溶接をロボットが行った。溶接外観はPhoto 6(2)に示すように、全般的に良好であった。本工事では158箇所の下フランジに現場上向溶接を適用した。その結果、第三者による外観検査・超音波探傷検査は、JASS6⁸⁾の鉄骨精度検査基準に従い、全数合格した。過去2件の下フランジの現場ロボット上向溶接と同様、良好な溶接品質を安定的に確保できた。

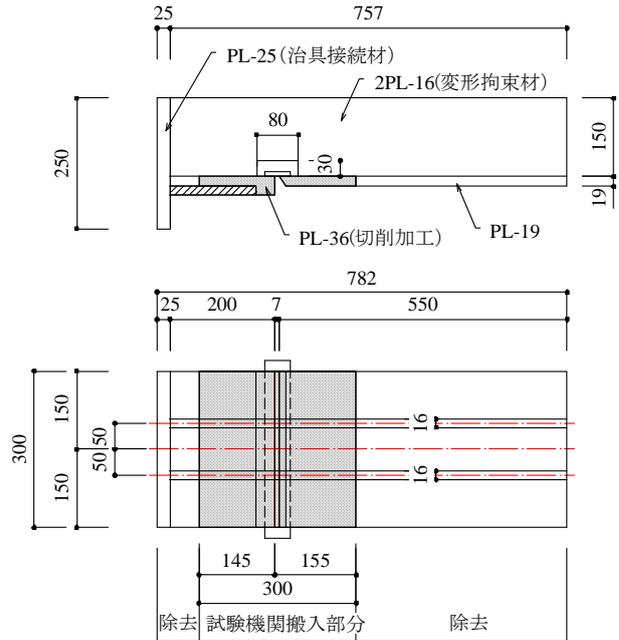


Fig. 4 技量付加試験体形状
Ability Addition Test Specimen

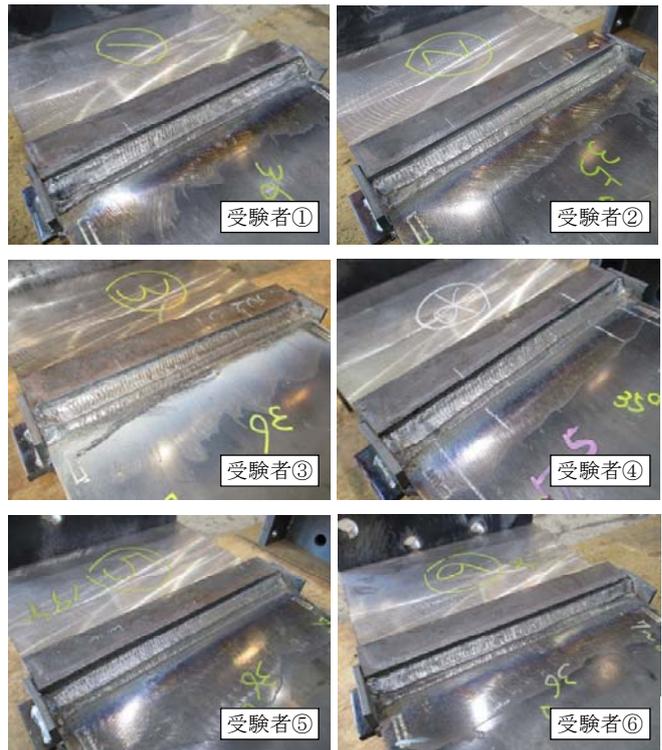


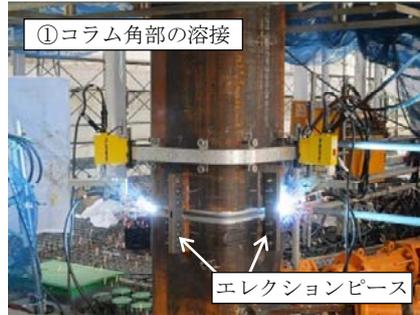
Photo 5 現場上向ロボット溶接の技量付加試験結果
Ability Addition Test Results of Site Overhead Robot Welding

4.3 コラム柱の横向ロボット溶接の適用

4.2節のプロジェクトにおいて、柱の横向ロボット溶接技術を現場適用した。適用状況をPhoto 7に示す。柱断面はBCP325材の□-600×600×22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。



(1) 溶接状況



(1) 溶接状況



(2) ビード外観

Photo 6 ロボット溶接適用状況
(梁下フランジの上向溶接)

Application Situation of Robot Welding
(Overhead Welding to Beam Lower Flange)



(2) ビード外観

Photo 7 ロボット溶接適用状況 (コラム柱の横向溶接)

Application Situation of Robot Welding (Horizontal Welding to Column)

溶接手順は3.2節で示したように、柱の角部を最初に溶接し、エレクションピース撤去後、柱の平板部を溶接した。本工事では柱2本(8溶接面)の継手に横向ロボット溶接を適用したところ、溶接外観はPhoto 7(2)に示すように、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、JASS6[®]の鉄骨精度検査基準に従い、全数合格した。

コラム柱の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、実工事においても良好な溶接品質を確保できることが確認できた。

5. まとめ

現場ロボット溶接技術の適用拡大に向け、既報の梁下フランジ上向ロボット溶接技術の他、今回新たにコラム柱の横向ロボット溶接技術を開発した。さらに、両溶接技術を現場適用した結果、第三者による外観検査・超音波探傷検査は全数合格し、良好な溶接品質が確認できた。

一連の開発技術により、鉄骨柱・梁の現場溶接箇所のうち、梁の上下フランジと柱継手の現場ロボット溶接技術は実用化できたものとする。

今後は、残りの梁ウェブの立向溶接に対するロボットの適用性を検討するとともに実工事での適用を促進し、現場溶接技能者不足下での省力化と品質確保を両立する技術として普及に努める予定である。

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13回基本問題小委員会 参考資料「建設業を取り巻く情勢・変化」, 2016年3月2日 (<http://www.milt.go.jp/common/001121700.pdf>)
- 2) 政府地震調査研究推進本部 地震調査委員会：全国地震動予測地図2017年版 地図編 確率論的地震動予測地図, 2017.4 (http://www.jishin.go.jp/main/chousa/17_yosokuchizu/yosokuchizu2017_chizu_2.pdf)
- 3) 浅井英克, 鈴井康正, 大塚英郎, 白井嘉行：下フランジをロボットで上向溶接する現場ノンスラップ工法の開発. 大林組技術研究所報, No80, 2016.12
- 4) 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
- 5) 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, 日本建築学会構造系論文集, 第456号, pp.59-67, 1994.2
- 6) 横田, 丸山, 岩田, 湯田, 栗山：鉄骨柱×梁現場溶接継手を対象とした上向き溶接工法の開発, 鉄構技術, pp.40-45, 2003.5
- 7) 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
- 8) 建築研究所：2008年版 冷間成形角形鋼管設計・施工マニュアル, 2008.12
- 9) 日本建築学会：建築工事標準仕様書 JASS6 鉄骨工事, 2007.2
- 10) 日本建築学会：鋼構造建築溶接部の超音波探傷検査規準・同解説, 2008.3
- 11) AW検定協議会HP, 2017.7 (<http://www.aw-kentei.gr.jp>)
- 12) 白井, 大塚, 鈴井, 浅井：梁下フランジをロボットで上向溶接した現場溶接工法の実施例, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp.1165-1166, 2016.8