

(技術資料)

# 建築現場における横向柱継自動溶接の新制御方法

鈴木将史\*1・河田純一\*1・川崎博文\*2・石崎圭人\*1

## New Control Method of Automatic Horizontal Column Joint Welding at Construction Sites

Masafumi SUZUKI・Junichi KAWATA・Hirofumi KAWASAKI・Keito ISHIZAKI

### 要旨

建築現場では将来的な人手不足が懸念されており、現場溶接の自動化ニーズは高く、大手建設会社らを筆頭に自動化技術の開発が進められている。小型可搬型溶接ロボットはその特徴から、現場溶接でも適用が広がっており、角形鋼管柱の突合せ溶接では専用のレールを用いて自動溶接を行う。しかし、板厚やコーナ部の曲率半径が異なる角形鋼管柱への適用は、ビード形状の不整や融合不良欠陥の発生といった溶接品質の課題がある。また、専用レールの設置に要する作業時間の増加も人手不足の観点で課題となっている。本稿では、これらの課題を解決することを目的として開発したロボットの新しい制御方法と周辺機器について紹介する。実験室での検討後、実際の建築現場へ適用し、これらの課題解決に効果的であることを確認した。

### Abstract

Concerns over future labor shortages at construction sites have heightened the need for automation in on-site welding, with development efforts being spearheaded by major general contractors. Thanks to their unique features, compact, portable welding robots are increasingly being applied to on-site welding tasks, including automatic welding on dedicated rails for butt joint welding of square steel pipe columns. However, when applied to square steel pipe columns with varying plate thicknesses and corner radii, challenges arise in welding quality, such as irregular bead shapes and incomplete fusion defects. Additionally, the labor-intensive installation of special rails contributes to longer work times, exacerbating labor shortages. This paper introduces a new robot control method and peripheral equipment developed to address these issues. Laboratory studies, followed by field application on actual construction sites, have confirmed the effectiveness of this solution in overcoming the challenges faced during welding operations.

### 検索用キーワード

建築現場, 横向柱継溶接, 小型可搬型溶接ロボット, 自動化, ソリッドワイヤ, トーチ角補正, 速度制御

まえがき = 溶接を取り巻く環境は、少子高齢化、若年層の入職率低下に加え、政府が推進している働き方改革の影響を受けて大きく変化しており、その結果、溶接工不足が大きな社会課題となっている。建設業の溶接においても同様であり、とくに現場溶接では、溶接技能者の確保が年々難しくなっており、技能継承の遅れや溶接部の品質安定性の低下が懸念されている。そのため、現場溶接ではロボット適用による能率化、省力化、品質安定化が検討されている。なかでも冷間成形角形鋼管（以下、コラムという）の周囲に、曲率のついたロボット走行用のガイドレール（以下、レールという）を設置し、小型可搬型溶接ロボットを用いた柱継自動溶接を行う例がある<sup>1)</sup>。いっぽう、当社の検討では、レールの曲率中心と、コラムの曲率中心が異なる非同心条件では溶接品質が確保できない場合があることを確認しており、その課題解決に取り組んだ。

## 1. 現場柱継溶接の自動化技術

### 1.1 技術課題

図1は現場柱継溶接において、小型可搬型溶接ロボットを複数台使用した際の適用イメージである。コラム

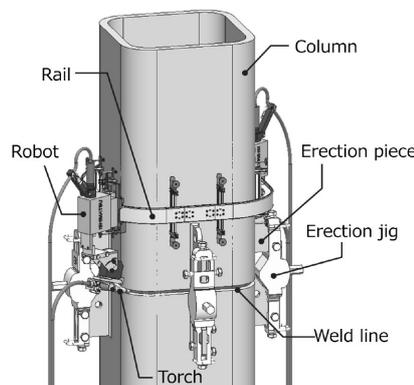


図1 現場柱継溶接イメージ

Fig.1 Image of column joint welding at construction sites

柱は図面どおりの精度を得るため、溶接などによる固定が完了するまでの間、エレクトロニクスおよび建方治具を用いて仮固定されている。ロボット適用時は、溶接線から一定の距離に平行となるようにレールを設置し、そのレール上をロボットが走行することで溶接が可能となる。溶接時には熱ひずみによる変形を軽減するため、ロボットを複数台設置し、対面で同時に溶接することが多い。

\*1 溶接事業部門 技術センター \*2 コベルコ ROBOTiX (株) 第二事業部

図2はレールの設置状況（コーナ部の一部）を上面から見た模式図である。レールをコラム柱に設置する場合、一般的には図2(a)に示すように、レールコーナ部の曲率中心とコラムコーナ部の曲率中心が一致する、同心条件となるように設置する。この場合、レールとコラム表面までの距離は常に一定となる。さらに、溶接速度（=ワイヤ先端速度）を一定とする場合、レールコーナ部走行時のロボット走行速度はコラムコーナ部の曲率半径とレールコーナ部の曲率半径の比で算出される。そのため、ロボット走行速度を制御しやすく、良好な溶接品質が得やすい。建築構造用冷間プレス成形角形鋼管の一つであるBCP325のコラムコーナ部の曲率半径は、板厚を*t*として3.5*t*と規定<sup>2)</sup>されている。そのため、板厚が変わると、コラムコーナ部の曲率半径が変化し、同じ幅のコラムであれば曲率中心位置が変化する。したがって、同心条件でレールを設置する場合には、レールの曲率半径もしくは直線部の長さなどを変化させた複数の種類のレールを用意する必要がある。また、板厚が小さい場合、コラムコーナ部の曲率半径も小さくなり、レールの曲率半径との比が大きくなる。その結果、ロボットがレールコーナ部を走行する際の速度が上昇し、速度限界が問題になる場合がある。

前述したレール設置の煩雑さや速度限界の懸念の解消を目的に、図2(b)に示すような非同心条件でレールを設置する方法が考えられる。一般的に、均一な溶込みやビード形状を得るためにはトーチとコラムのなす角は一定とした方がよい。同心条件の場合には、上面から見た時のトーチ角度はコラムに対して常に垂直となるが、図2(b)の場合、ロボットがレールコーナ部に滞在する区間において、トーチ角度が後進角、前進角に変化する。それにより、ワイヤ先端の溶接速度や狙い位置、アークの指向性が変化し、溶込みやビード形状が不均一となる。その結果、図3に示すような凹凸や垂れといったビード形状の不整が発生し、ひいては融合不良などの欠陥発生の可能性がある。

## 1.2 角度補正技術

非同心条件での設置では、ロボットがレールコーナ部へ進入した時からコラムに対してトーチ角度が垂直でなくなる。1.1節で述べたトーチ角度による影響を解消す

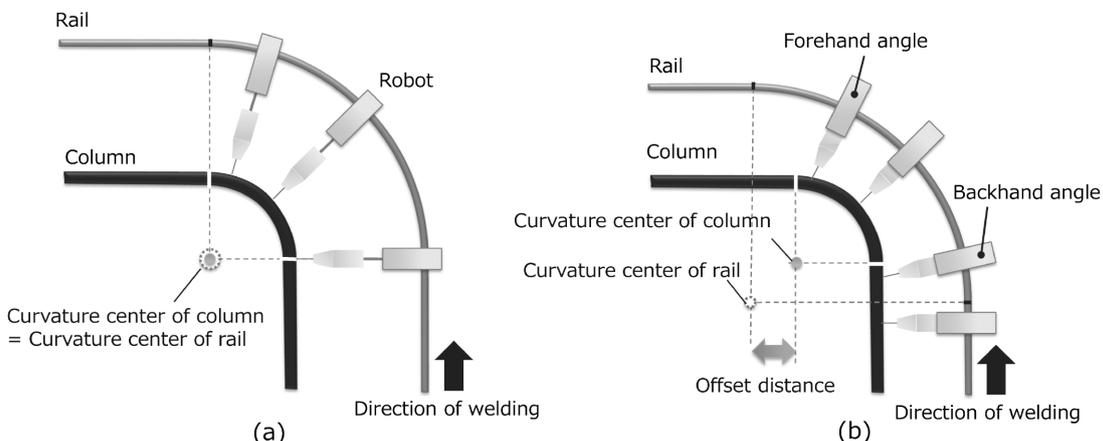


図2 レール設置状況の模式図 (a) 同心条件, (b) 非同心条件  
Fig.2 Schematic illustration of rail installation (a) Concentricity condition, (b) Unconcentricity condition

るため、まずトーチ角度をコラムに垂直にする補正方法を検討した。なお、使用したロボットはトーチ角度を溶接線方向に沿って傾け、前進角・後進角と変化させる機構を有しており、トーチ角度の補正に利用した。

コラムの板厚・サイズの情報およびレールとの位置関係などの情報を基に、特定のロボット位置におけるトーチとコラムに垂直な方向との角度差を幾何学的に算出し、角度補正式を導出した。なお、説明にあたり、レールの曲率中心を原点としたXY座標系を用いる。

まず、図4(a)に示すように、ロボットがレールコーナ部に位置し、かつ、ワイヤ先端がコラムの直線部に位置する場合を領域Iとし、ロボットが領域I内のA点に位置する場合を考える。この場合、錯角の関係から、ロボットのレール上の回転角分（以下、レール回転角という）、トーチを前進角方向へ補正すればよい。レール回転角を $\theta_r$ 、トーチ角補正量を $\theta_c$ と置くと、

$$\theta_c = \theta_r \dots \dots \dots (1)$$

と表される。

つぎに、図4(b)に示すように、ロボットがレールコーナ部に位置し、かつ、ワイヤ先端がコラムコーナ部に位置する場合（領域IIとする）を考える。ロボットがB点に位置する場合、コラム曲率中心とレール曲率中心の差分（オフセット距離と定義）をそれぞれ $d_1$ 、 $d_2$ 、レールの曲率半径を*r*とすると、トーチ角補正量 $\theta_c$ は、

$$\theta_c = \tan^{-1} \frac{\tan \theta_r - \left( \frac{r \sin \theta_r - d_2}{r \cos \theta_r - d_1} \right)}{1 + \tan \theta_r \left( \frac{r \sin \theta_r - d_2}{r \cos \theta_r - d_1} \right)} \dots \dots \dots (2)$$

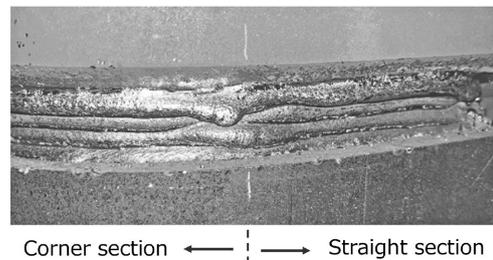


図3 ビード形状の不整  
Fig.3 Irregularity of weld bead

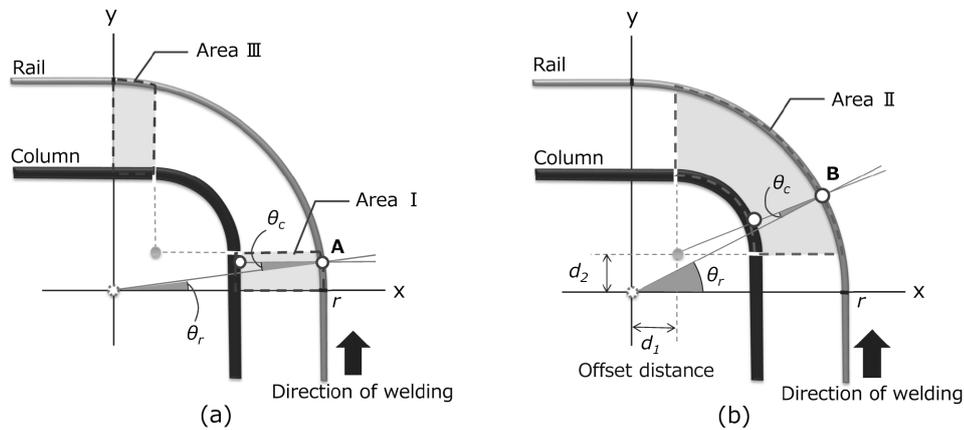


図4 角度補正量の算出 (a) コラム直線部 領域I、III、(b) コラムコーナ部 領域II  
 Fig.4 Calculation of angle compensation (a) Column straight section Area I and III, (b) Column corner section Area II

と表され、ロボットがコーナ部の中央を超えてからも領域IIに滞在する場合は式(2)の補正式を用いる。

さらに、ロボットがレール上を前進し、再びワイヤ先端がコラム直線部へと進入した際(領域IIIとする)には、式(1)と同様の考え方から、トーチ角補正量 $\theta_c$ は

$$\theta_c = \theta_r - 90^\circ \dots\dots\dots (3)$$

と表される。

図5は、22mmt×700mm×700mmのコラムに曲率半径250mmのレールをコラム表面(直線部)から86.5mm離して設置し、溶接速度が一定(300mm/min)とした際のトーチ角補正量を示す。領域Iではトーチを前進角方向へ補正し、その後、領域IIに進入した時点より、トーチ角補正量はマイナス、すなわち後進角方向へと変化する。ちょうどコーナ中央部で補正量はゼロとなるが、トーチを垂直に維持するため、後進角の補正を行う。このようにトーチ角度をコラムに常に垂直となるように補正させることで、不均一となりやすいコーナ部における溶接金属の形成を均一化している。

### 1.3 走行速度制御技術

溶接後のビード形状を均一にするためには、溶接速度も重要な要素である。1.2節で述べたトーチ角補正を導入した場合、ロボットの走行速度を従来と同一とすると、トーチ角補正を実施している区間において溶接速度が変化してしまう。したがって、トーチ角補正によるワイヤ先端の移動量も考慮し、ロボットの走行速度を制御する必要がある。

図5と同条件にてトーチ角補正を実施した際のロボットの走行速度を図6に示す。直線部では、ロボット走行速度=溶接速度(300mm/min)で走行する。領域Iではトーチ角は前進角方向の変化となるため、ワイヤ先端速度は増加する傾向となる。したがって、領域Iではロボット走行速度を減少させている。また、領域IIでは、トーチ角補正が後進角方向の補正をする影響に加え、ロボットは溶接線より外側を移動するため、ロボットの走行速度は大きく変化させる必要がある。

このようにトーチ角補正制御とロボットの走行速度を制御することにより、非同心条件においても、トーチ角がコラムに垂直な状態かつ一定の溶接速度となり、良好

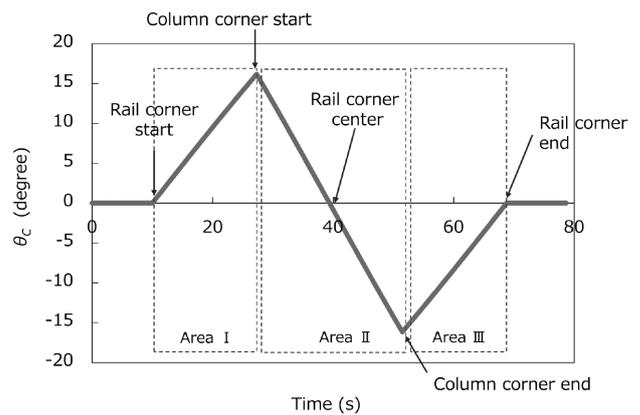


図5 トーチ角補正量  
 Fig.5 Torch angle correction amount

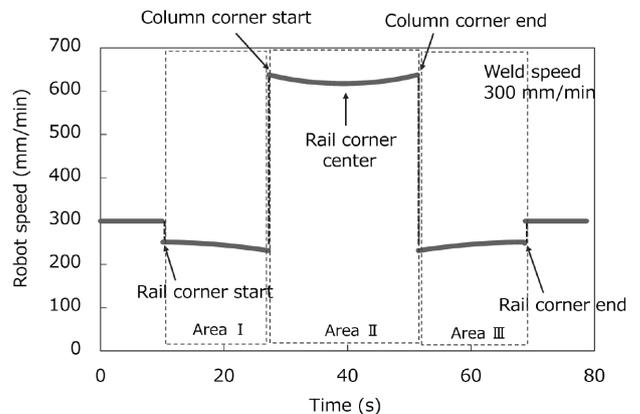


図6 ロボット走行速度  
 Fig.6 Robot speed

な溶接品質が得られる。

補足として、レールコーナ部においては、レールとコラム表面との距離は逐次変化する。しかし、ロボットに位置を教示するセンシング動作時にその距離を計測し、補正しており、溶接時の突出し長さはおおよそ一定となる。

### 1.4 溶接試験結果

トーチ角補正および走行速度制御技術(以下、本技術という)を搭載したロボットを用いて、実験室で板厚の異なる複数の試験体に溶接を行った。表1に試験条件を示す。

図7に36mmtの溶接後ビード外観を示す。図3に示

表1 試験条件 (実験室)  
Table 1 Test conditions (Lab.)

Column thickness	22 (mmt)	36 (mmt)
Column curvature radius	77 (mm)	126 (mm)
Shielding gas [flow]	100%CO <sub>2</sub> [25(L/min)]	
Wire	JIS Z 3312 YGW18 (1.2 mm)	
Current/ Voltage	220~250 (A) / 25~29(V)	
Welding speed	200~400 (mm/min)	
Extension	20 (mm)	
Groove	Single bevel 35 (°) Gap 7 (mm)	
Rail radius	250 (mm)	
Distance between rail and column*	86.5 (mm)	
Offset distance	86.5 (mm)	37.5 (mm)

\*Actually between rail straight section and column straight section



図7 本技術適用後ビード外観の一例 (36 mmt)

Fig.7 Examples of bead appearance after application of this technology (36 mmt)

したようなビード不整は発生せず、凹凸感の少ないビードが得られた。いっぽうで、長手方向の溶着量の不均一が確認された。実際にはレールの加工精度、設置精度、ロボットをレールに連結するための台車の車輪による影響などがあり、溶着量が不均一となる場合がある。それらの要因を整理し、実験室での溶接結果との比較から、ロボットの速度変化に関するパラメータを計算し、適正化することで、全体的な溶着量の均一化を図った。適正化後のパラメータを用いて、表1と同等の試験条件にて溶接した結果を図8 (a) (b) に示す。レールコーナ部の前後領域について、ビードが均一となり、美しいビード外観を得た。

さらに、コーナ部のロボット走行速度に関して、ロボットの機械的な速度限界も考慮が必要である。1.1節で述べたように、コラムからの距離が離れるほどロボット走行速度は上昇する。ロボットが速度限界を超過すると、指示どおりに速度が出ず、溶着量が増加傾向となり、場合によってはビードの垂れなどが生じる。しかし、本技術を用いて非同心条件で設置することで、従来法と比較してレールをコラムに近づけることが可能となるため、ロボット走行速度限界に対する裕度を得られる。パラメータの調整にはロボット走行速度も含まれており、コーナ部の一部で速度を増加させる制御も導入している。部分的にロボット走行速度上限に達する可能性があるが、レールとコラムとの距離を小さくしたことによって得られた裕度範囲内でパラメータを調整し、速度限界以下で施工できるようにした。図9に速度調整後のロボット走行速度を示す。とくに溶着量の不均一が発生し

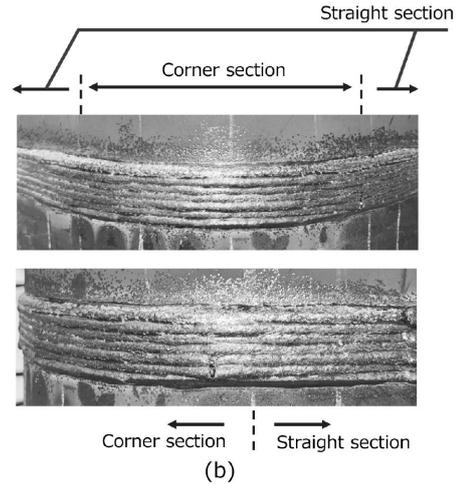
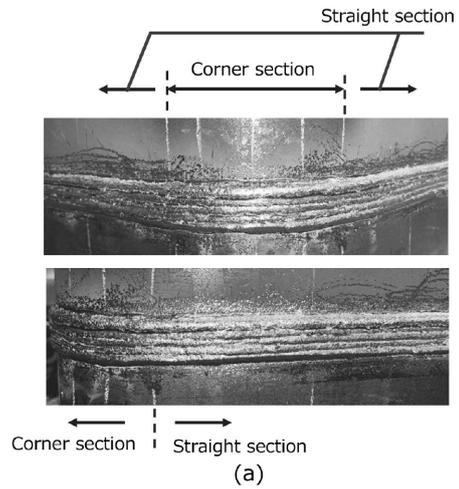


図8 パラメータ適正化後のビード外観  
(a) 板厚 22 mmt, (b) 板厚 36 mmt

Fig.8 Bead appearance after parameter optimization  
(a) Colum thickness 22 mmt, (b) Colum thickness 36 mmt

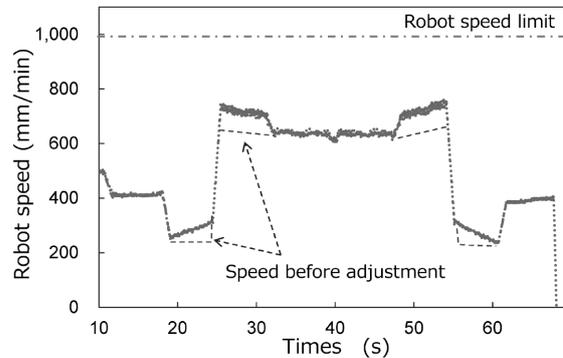


図9 ロボット走行速度のログデータ

Fig.9 Log data of robot speed

やすいレールコーナからコラムコーナの前後領域について、速度を変化させている。図8 (a) で示した22 mmtと同等の試験体に対して、溶接品質の確認を実施した。超音波探傷試験<sup>3)</sup>では溶接線全線に欠陥は検出されず、図10に示すマクロ観察でも、コーナ部、直線部に欠陥なく十分な溶込みが得られた。また、直線部において、シャルピー衝撃試験および硬さ試験にて性能を確認した結果を表2に示す。平均吸収エネルギーは171 J、ピッカース硬さから算出した推定引張強さは706 MPaであり、いずれも建築鉄骨溶接部の機械的性質<sup>2)</sup>を満足することを確認した。

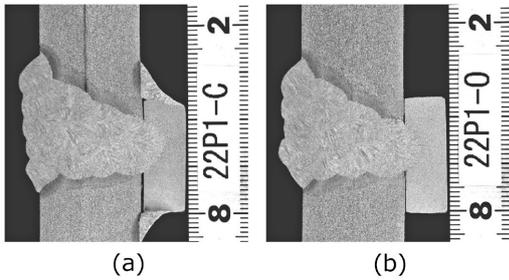


図10 マクロ写真 (a) コーナ部, (b) 直線部  
Fig.10 Macrostructure (a) Corner, (b) Straight

表2 22 mm t 試験体直線部における機械的性質  
Table 2 Mechanical properties of 22 mm t test piece in straight section

Item	Absorbed energy (Test temperature: 0°C)	Vickers hardness
Section	Straight	
Ave.	171 (J)	223 (HV)
Converted TS	-	709 (MPa)

## 2. 本技術の適用範囲

本技術を適用可能なコラムの板厚とサイズを表3に示す。コラム種に応じて、それぞれBCR (建築構造用冷間ロール成形角形鋼管) は板厚16 mm t ~ 25 mm t, BCP は板厚16 mm t ~ 40 mm t まで適用可能である。従来技術の場合、板厚の変化によってコラムの曲率半径が変化するため、板厚毎に複数のレールが必要であるが、本技術であればオフセット距離が変化することで一つのレールで複数の板厚へ適用可能である。同じサイズのコラムであれば、適用範囲内の板厚に対して二種類のレールのみでカバー可能となる。現在はR200のレールが一般的であるが、サイズの大きいR250のレールを用いることで、40 mm t の板厚まで適用可能となる。ただし、表3は、

表3 本技術の適用範囲  
Table 3 Applicability range of this technology

Thickness (mm)	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1,000
12												
16												
19												
22												
25												
28												
32												
36												
40												

BCR・BCP Production range<sup>4)</sup>
 BCP Production range<sup>4)</sup>
 Applicability range

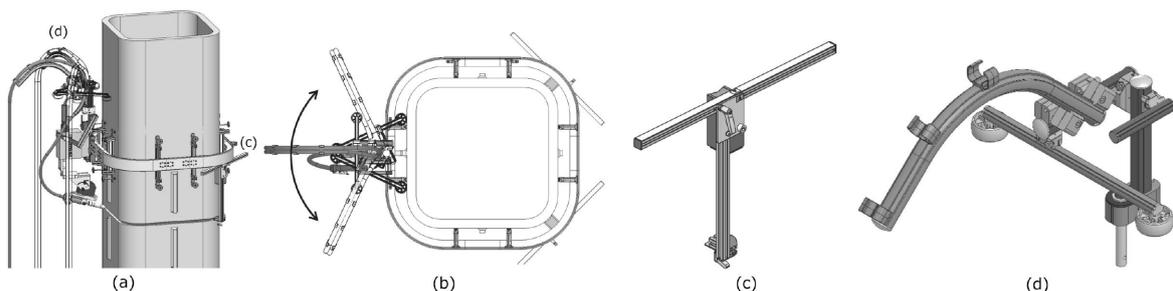


図11 周辺機器一例 (a) 使用時イメージ, (b) 上面図, (c) レール設置簡易治具, (d) ケーブルサポート治具  
Fig.11 Example of Peripherals (a) Image when used, (b) Top view, (c) Rail installation jig, (d) Cable support jig

現場でコラムの固定用に用いられるエレクトロニクスや建方治具などとの干渉を考慮しておらず、セッティングとして実現可能な範囲を示しているため、実際に現場適用可能な範囲とは異なる場合がある。

## 3. 周辺機器の開発

生産性向上のためには柱当たりの溶接に要する時間を短くすることが有効である。大型の多関節ロボットを建築現場で用いる際には、レールの設置などに多くの人手と時間が必要となることが多く、自動溶接の課題となっている。小型可搬型の溶接ロボットにおいても、少しでも付帯作業に要する時間を削減するための治具を新たに製作した。さらに現場環境で起こりやすいケーブルの引っ掛かりなどによる外乱を軽減できる治具も合わせて製作した。図11 (a) に製作した周辺機器の使用イメージを示す。また、図11 (b) に設置状態での上面図を示す。後述するレール設置簡易治具はレール設置時、ケーブルサポート治具は溶接時に使用するが、説明の都合上同時に示している。

### 3.1 レール設置簡易治具

図11 (c) に開発したレール設置簡易治具を示す。治具下方の爪部を開先にかけて、マグネットでコラムに固定することで、レール高さの位置決めをする。この治具をコーナ部4か所すべてに設置し、その後コの字型などに分割したレールを載せ、再度連結し、レールをコラムに固定する。固定後は治具を取り外して完了となる。従来の治具では直線部ごとに二つ (合計八つ) 設置が必要であったが、設置個所をコーナ部とすることで、必要数を削減でき、従来より設置時間の短縮を可能とした。さらにレールの安定性が増すため、作業人員の削減効果も期待できる。

### 3.2 ケーブルサポート治具

一般的にロボットに接続されているトーチケーブルはロボット把持部から地面に垂れるように接続されていることが多い(図1)。現場環境では、床面の突起部などにケーブルが引っかかり、その振動や張力がワイヤ先端に伝わることで溶接線が振れ、品質低下につながる場合がある。そこで図11(d)に示すケーブルサポート治具を考案した。本治具は、トーチケーブルをロボット上部へ迂回させる構造とし、さらに上部ケーブル保持部が滑らかに回転するため、外力が加わった際に、ケーブルへの負荷が軽減され、ワイヤ先端への影響を抑えることができる。

### 4. 本技術の現場適用例

建築現場にて、BCP325 16 mm $t$  × 600 mm × 600 mm のコラム柱へ本技術を適用した例を紹介する。なお、本技術の効果を確認するため、先行溶接は従来施工とし、後行溶接にのみ本技術を適用した。さらに適用時には3章で紹介した周辺機器を用いた。

#### 4.1 溶接施工条件

溶接条件を表4に示す。

#### 4.2 施工方法

今回適用した現場での施工手順について図12に示す。初めに先行溶接として、従来の施工法においてコラム柱の対面2角のコーナ部(①)へ溶接を実施し、その後残部(②)へ本技術を適用し、後行溶接を行った。なお、エレクションピースおよび建方治具は先行溶接後に取り除いた。

表4 試験条件(現場)  
Table 4 Test conditions (Field)

Column thickness	16 (mm $t$ )
Column curvature radius	56 (mm)
Shielding gas [flow]	100%CO <sub>2</sub> [45 (L/min)]
Wire	JIS Z 3312 YGW18 (1.2 mm)
Current/ Voltage	220~260 (A)/25~31 (V)
Welding speed	200~400 (mm/min)
Extension	20 (mm)
Groove	Single bevel 35 (°) Gap 7(mm)
Rail radius	200 (mm)
Distance between rail and column*	86.5 (mm)
Offset distance	57.5 (mm)

\*Actually between rail straight section and column straight section

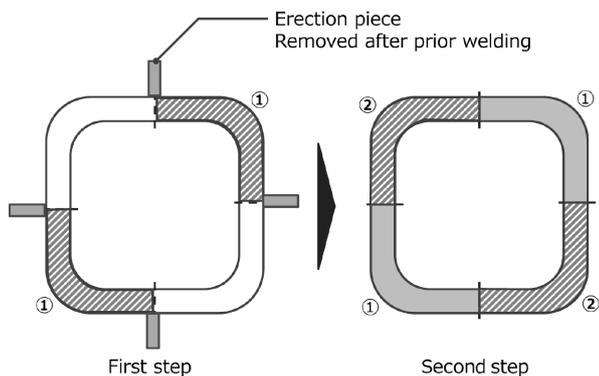


図12 適用現場における施工手順  
Fig.12 Construction procedures at the application site

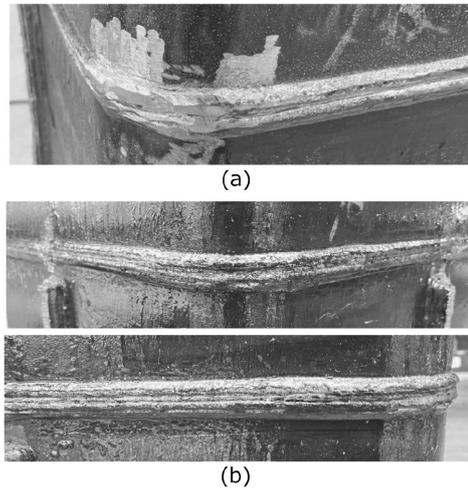


図13 現場適用時のビード外観 (a) 従来施工, (b) 本技術適用  
Fig.13 Bead appearance at construction site  
(a) Conventional construction, (b) Application of this technology

#### 4.3 溶接結果

従来施工でのビード外観を図13(a)に示す。コーナ部で余盛過大となり、グラインダなどでの手直しが必要であった。いっぽう、図13(b)に示す本技術適用後のビード外観は、コーナ部直線部境界でのビードは均一であり、全体として美しいビード外観を得た。

従来施工のように、16 mm $t$ という薄い板厚へ同心条件で設置する場合、コラムとレールとの距離は150 mmとなり、1.1節で述べたようにロボットの速度限界に達している可能性がある。本技術適用をすることで、その距離を狭めた設置ができ、安定した溶接が実現できる。本技術を用いた溶接後のビードは、グラインダによるビード成形は不要と判断され、超音波探傷試験<sup>3)</sup>、外観検査も合格であった。

現場溶接においても安定した溶接品質が得られ、さらには美しいビード外観により、作業者の負担軽減、作業時間の低減効果が期待される結果を得た。

むすび=本稿では、ロボットを用いたコラム柱の現場柱継溶接におけるコーナ部の品質安定化および作業効率化を目的に新たに開発した制御手法および周辺機器類を紹介した。本技術を用いることで、非同心条件においても溶接線全体において良好なビード外観が得られ、従来施工で発生していたコーナ部の補修作業の削減が期待できる。さらには周辺機器の使用により、作業効率を向上させる効果が期待される。お客様現場での試用も開始しており、本技術の適用実績を積み上げ、溶接工不足という社会課題の解決に貢献していく所存である。

#### 参考文献

- 1) 浅井英克ほか. 大林組技術研究所報. 2017, No.81.
- 2) 一般社団法人日本鉄鋼連盟. 日本鉄鋼連盟製品規定. 建築構造用冷間プレス成形角形鋼管(BCP235, BCP325). MDCR 0003-2017.
- 3) 一般社団法人日本建築学会. 鋼構造建築溶接部の超音波探傷検査規準・同解説. 2018.
- 4) 一般社団法人日本鉄鋼連盟. 建築構造用冷間成形角形鋼管BCRとBCP. 2020-08.