

建設現場におけるマニピュレータ型鉄骨溶接ロボットの開発

鹿島建設株式会社

水谷 亮
横山 太郎
○ 菊地 望

1. はじめに

近年、建設就労者の高齢化と若年層の入職者不足に伴い、高度な技能を有する熟練溶接工の減少が懸念されている。一方で大型超高層ビルは多数計画されており、鉄骨溶接作業量の増加が見込まれている。そこで、溶接量が多い大型柱を対象として、全自動で高品質に現場溶接を行う「マニピュレータ型鉄骨溶接ロボット」を開発し、実用段階に至った(写真-1)。以下にその内容について示す。

2. システム概要

柱1本の溶接を全自動化することで溶接作業員を溶接場所から解放し、他業務との並行作業や多数のロボットの並行運用が可能となる。これにより溶接作業員の生産性向上が図れ、熟練溶接工不足の対応に貢献できる。

当ロボットは、小型軽量の6軸マニピュレータを使用し、柱周囲に設置したレール上で移動と溶接を繰り返して柱全周を自動で溶接するシステムである。マニピュレータに設置したセンサで接合部(開先形状)を計測して部位ごとに溶接条件を算出するため、鉄骨建て方の誤差を考慮でき、現場での全自動溶接を実現している。

図-1にロボット溶接のフローを示す。溶接に伴う一連の付帯作業もすべて自動化しているため、溶接作業員はロボットから離れて別の作業ができる。

図-2に当ロボットの運用の一例を示す。溶接作業員2名で溶接完了までに4日かかる超大型柱では、同じく2名が5セットのロボットを運用すると出来高は4日/1本から1日/1本と4倍になり、溶接作業員の生産性を大幅に向上できる。さらに昼休みや夜間もロボットに溶接させれば工期短縮にもつながる。



写真-1 マニピュレータ型鉄骨溶接ロボット

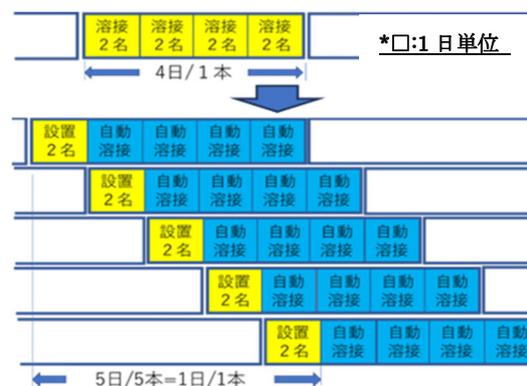


図-2 ロボット複数の運用パターン



図-1 自動フロー

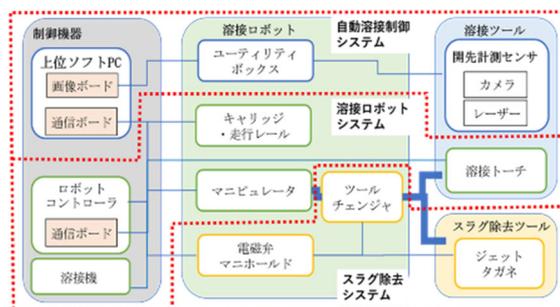


図-3 システム構成

図-3にシステムの構成を示す。当ロボットは「溶接ロボットシステム」、「自動溶接制御システム」、「スラグ除去システム」の3つのサブシステム、及びシステム養生・移設運搬設備から構成される。次章以降、これらについて説明する。

3. 溶接ロボットシステム

現場溶接ロボットで一般的な小型可搬式ロボットでは4面ボックス柱の角部の連続溶接は難しく、エンドタブや継部処理に溶接作業員の手作業が生じる。マニピュレータ型のロボットを使用することで角部でのトーチ姿勢変更のための複雑な動作ができ、4面ボックス柱角部の連続溶接が可能になるため、手作業がなくなり、全自動化を図れる。

当ロボットはレール上をマニピュレータが移動、柱全周を8ブロックに分けて溶接と移動を繰り返すことで、柱1本の多層盛り溶接を全自動で行う(写真-2、図-4)。

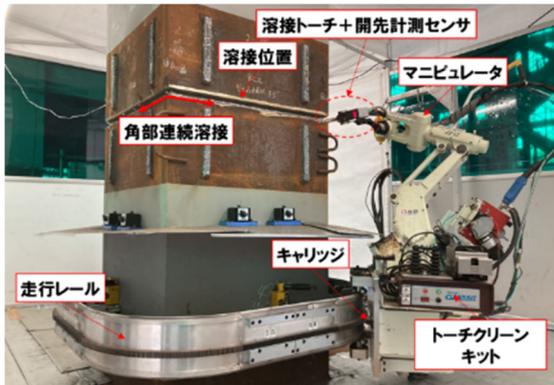


写真-2 溶接ロボットシステム外観

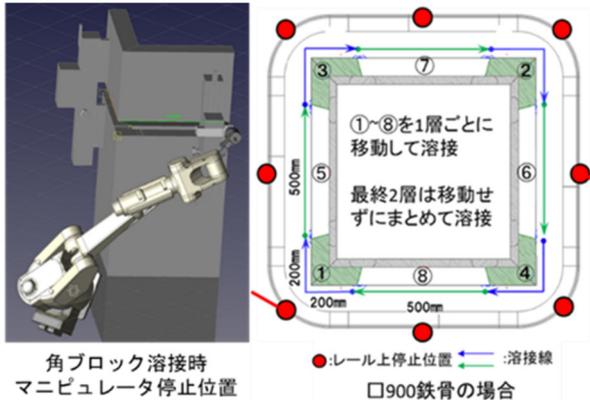


図-4 溶接区間とマニピュレータ停止位置

3.1 マニピュレータ

レール上を移動させることでマニピュレータを小型化、約30kgと軽量なためデッキプレート上での取り回しも良好である。一方で可搬重量は3kgと小さいため、トーチやセンサ、ツールチェンジャなどのエンドエフェクタは軽量化に努めた。

3.2 走行レール

マニピュレータはレールに沿って設置されたラックとキャリッジ内部のピニオンギアにより移動する。走行レール(写真-3)は角丸型で、4つのコーナーピースと直線ピースで構成している。直線ピースの長さや数を変更することで異なる大きさの鉄骨柱に対応できる(図-5)。マニピュレータで

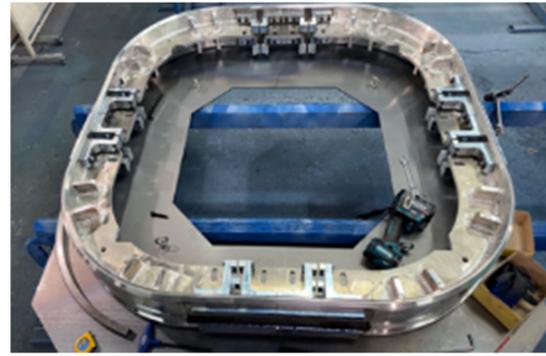


写真-3 角丸レール本体

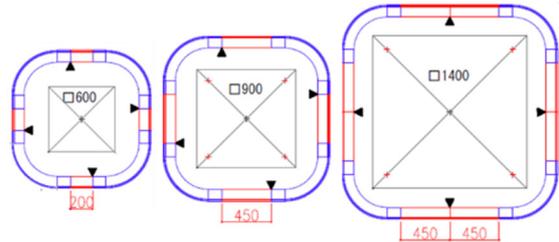


図-5 異なる鉄骨サイズへの対応

溶接するため、1種類のコーナーピースで角部が立った4面ボックス柱でも角部にRがついたコラム柱でも対応できる。

レールはアルミ製で1ピース10kg程度のため人力での組立も容易である。レール受け材の上にレールを載せて固定する。レールの位置決め調整作業をなくすよう、ボルトを入れて締めこむだけで組立精度を確保できるような工夫をしている。

3.3 キャリッジ

角丸レールの走行時は曲線と直線を通るため、レールの曲率が変わってもギアの噛込みやバックラッシュが発生せず、高精度に位置決めができるキャリッジを開発した。図-6に示すように、直線部の走行時はキャリッジとレールは平行だが、曲線部の走行時は斜めになりピニオンギアとガイドの間を広くする必要があるので、ピニオンギア支持フレームを揺動させてレール外側方向に変位できる機構とした。ピニオンギアをコイルバネでラックに押し当ててバックラッシュをなくすことでマニピュレータの位置決め精度を向上し、溶接ワイヤ先端の狙い精度を確保している。

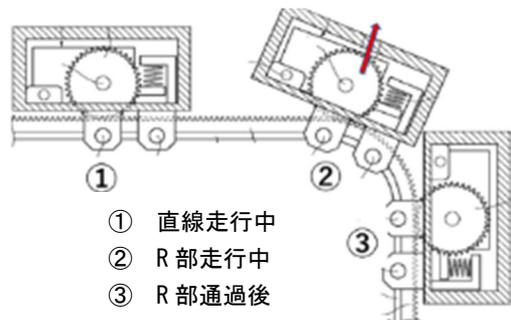


図-6 ギャップ調整機構

4. 自動溶接制御システム

一般の工場溶接ではティーチングプレイバックで溶接が可能だが、現場溶接の場合は建て方誤差を含むため、開先形状が一定ではない(図-7)。当システムでは、このような各鉄骨の施工状況(鉄骨の目違いや傾きなど)に対して、各々の開先形状に合わせたパスや溶接条件で溶接することで、建築現場での全自動溶接を実現している。

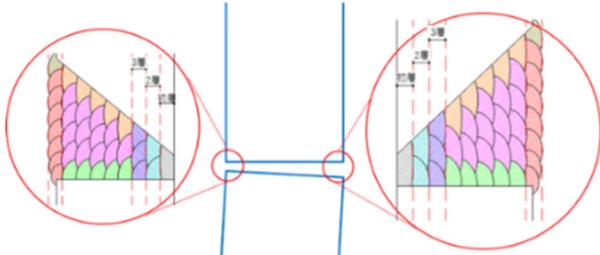


図-7 施工状況によって異なる開先形状

制御フローを図-8に示す。ロボットを設置して位置決めを行った後から、レール移動、開先計測、溶接条件算出、溶接、層、ブロック毎溶接、1パス溶接、トーチクリーンを自動で実行する。

ハードウェアは制御用PCと開先センサなどで構成されており、実際の開先形状を開先センサで計測して積層計画及び溶接条件の算出を自動で行い、算出した溶接条件等を基にロボットに溶接を実行させる。

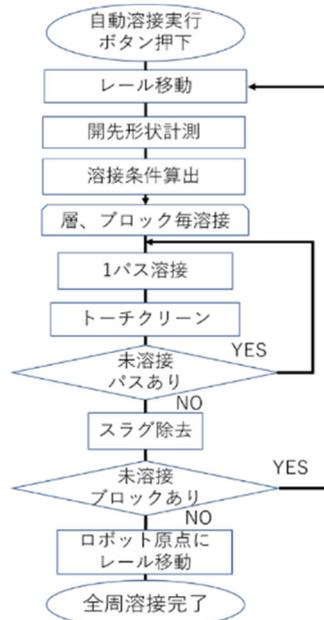


図-8 制御フロー

4.1 開先センシング

マンピュレータに設置した開先センサを使って開先形状を取得し、特徴点を抽出することで開先形状をデータ化する(写真-4)。溶接品質を確保するため狙い位置は1mm以下の位置決めを要求され、光切断法によりその精度を確保している。

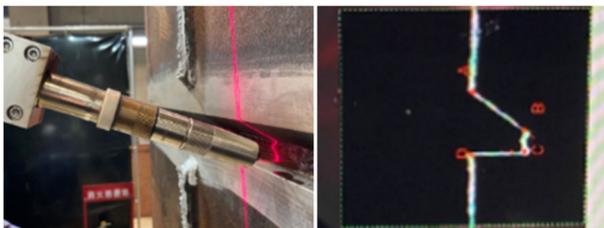


写真-4 計測状況

4.2 溶接条件算出アルゴリズム

熟練溶接工のノウハウに基づいて溶接条件などを算出するアルゴリズムを開発した。当アルゴリズムでは、センサで取得した開先形状からパス計画と溶接条件計画を行う。

パス計画では、計測した開先形状から積層数および各層でのパス数、及び各パスの狙い位置を決定する(図-9、写真-5)。

溶接条件計画では、各パスの断面積を元に溶接電流、電圧、溶接速度等を算出する。なお開先の目違いや開き方などによって1パス中でもパス断面積は異なるため、複数区間に分割して溶接条件を生成している。

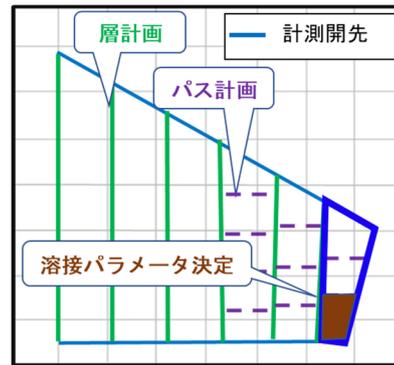


図-9 パス計画アルゴリズム

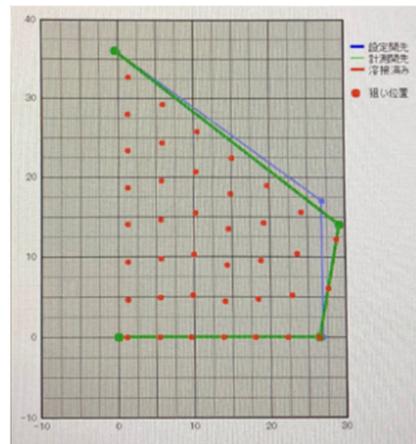


写真-5 狙い位置計画

4.3 溶接パラメータの調整

上記のアルゴリズムを元に、溶接品質を確保するためのパラメータの調整を行った。特に溶接継ぎ目には融合不良などの溶接欠陥が発生しやすく、また鉄骨角部では余盛不足やビード垂れ、アンダーカットが発生しやすい。

パラメータ調整を行うにあたっては定量的に形状を把握できる3Dハンディスキャナを使用した。従来からの、溶接外観が「痩せている」「太っている」といった定性的評価や、溶接ゲージによるピンポイント計測では、定量的で的確な対策を決める

ことは難しい。3D スキャナで各層ごとの形状を取得して積層状況を定量的に把握し、これを超音波探傷 (UT) や溶接条件と照らし合わせて分析することで、欠陥の位置や原因を特定して効果的な対策を打つことができた (図-10, 11)。

このように、溶接パラメータ調整と UT や外観検査、機械試験に加え、3D スキャナによって積層経過を把握することで、当ロボットの溶接品質のエビデンスを確保している。

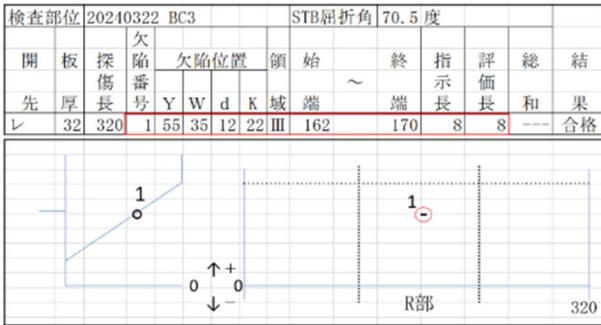


図-10 超音波探傷検査 (UT)

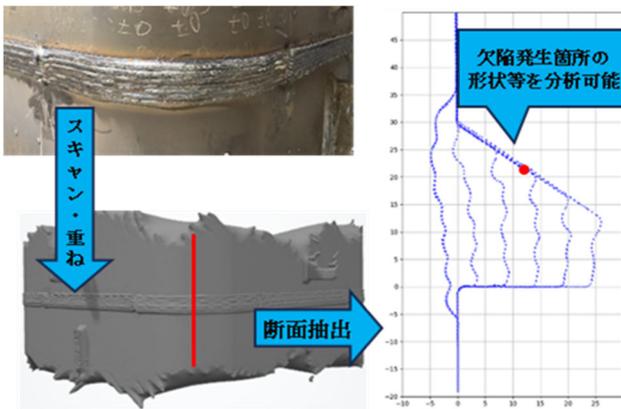


図-11 積層状況の分析

5. スラグ除去システム

当ロボットは溶接コストの面から通常の鉄骨溶接と同じくソリッドワイヤと CO2 ガスを使用して、溶接欠陥を防ぐため各層ごとにスラグを除去する必要がある。今回、当スラグ除去システムを開発・実装したことで前述のフロー (図-1) の全自動化を実現し、溶接作業員が溶接場所から離れられることとなった。

今回、ツールチェンジャを用いて溶接トーチとスラグ除去装置 (ジェットタガネ) を持ち替え、マンピュレータでスラグを自動除去する構成とすることで装置をコンパクトにしている。スラグ除去時のタガネ動作は溶接パスより生成しており、溶接ビードに沿ってタガネ先端を接触させながら移動することで、ビード上のスラグを効率的に除去する。

5.1 基本設計、構想

スラグ除去を自動化するにあたり、レール上に

別の装置を設ける方法を検討したが、現場設置作業に時間がかかることやコストが高くなることから不採用とし、前述のツールチェンジ方式を採用した (写真-6)。なお、当方式の実現には以下2点の課題があった。

- ・マンピュレータに取付けるツールチェンジャとスラグ除去装置や溶接トーチ+センサを合わせて可搬重量 3 kg に収めなければならない
- ・マンピュレータの破損及び過負荷によるエラーを防ぐため、スラグ除去時の振動・衝撃を抑えなければならない

これらの課題を解決するため、以下の部品選定や PoC、振動・衝撃吸収機構の開発を行った。

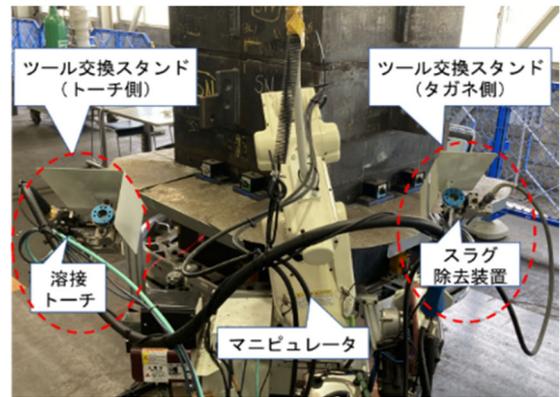


写真-6 スラグ除去システム概観

5.2 ツールチェンジャ

市販のツールチェンジャを比較・検討し、軽量 (0.24 kg) ながら可搬重量 10 kg のツールチェンジャを採用した (写真-7)。キャリアッジに電磁弁マニホールドを設置し、ロボットコントローラからの信号により自動でツール交換及びタガネの作動・停止をしている。自動ツール交換は繰り返し試験を行っており、連結不良などの不具合は発生せず、良好にツール交換ができることを確認している。



写真-7 ツールチェンジャ

5.3 振動・衝撃吸収機構

タガネの振動・衝撃を吸収してマンピュレータの破損や異常停止を防止しなが

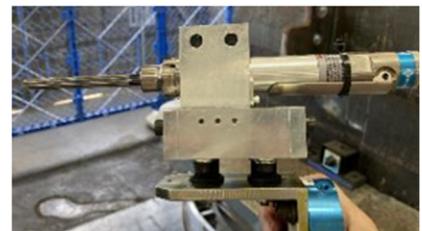


写真-8 振動・衝撃吸収機構

ら、常にタガネを溶接ビードに軽く接触させておく機構を開発した(写真-8)。ゴムでタガネ支持ブロックをマウントしてピッチ・ヨー方向の衝撃、荷重を吸収し、バネ機構によってスラグ剥離時のタガネ前後方向の振動・衝撃を吸収する。

5.4 スラグ除去性能の実証

スラグの剥離性を確認したうえで当スラグ除去システムをロボットシステムに実装。一連の自動溶接フローを動作させて、システムの動作と除去性能の実証を行った(写真-9、写真-10)。表-1に実証条件の一例を示す。ビードの隙間には一部スラグが残存したが、続く層の自動溶接においてもスラグ巻き込み等の欠陥は発生せず、剥離性が十分であることを確認した。

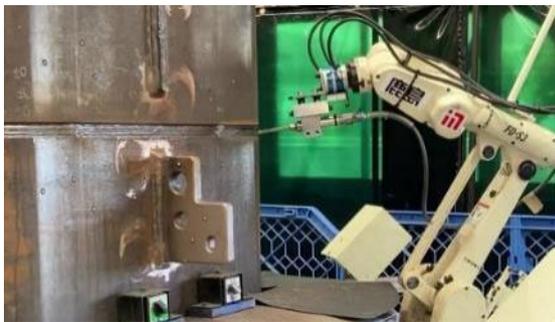


写真-9 スラグ除去状況



写真-10 スラグ除去後外観

表-1 スラグ除去条件一例

	最上段パス	中段パス	最下段パス
タガネ移動速度 (cm/min)	120	120	120
タガネ角度 (°)	0	10	10

6. システム養生・移設運搬設備

以上のように全自動溶接は完成しても、ロボットの準備や移設に時間が掛かったり、風の影響による欠陥で補修が発生したりすると、実運用は難しい。そのため、今回はロボット開発と並行して実運用のための付帯設備の開発も行っている。

6.1 システム養生

当マニピュレータは産業用ロボットに該当するため、ロボットを囲う安全柵やインターロックが必要になる。一方、全自動溶接では監視人無しでも最終層まで安定した品質で溶接できることが重要で、風をシャットアウトしてブローホールなど

の欠陥を未然に防ぐ必要がある。これに雨からロボットを守る要求も加えて、現場溶接用のシステム養生を開発した。

しかし、養生システムの設置撤去、移設はクリティカルとなるため現場運用上の大きな弱点であり、短時間でできる必要がある。そこで、これらを満たすテ

ント式システム養生を開発した(図-12、写真-11)。折畳み式骨組み、天幕、はめ込み式の側壁パネルやシートなどで構成され、作業員2名で簡単に設置できる。図-12の左右2分割のユニットをそのまま運搬して隣接柱に移設することで、約30分で盛替えをすることができた。

6.2 ロボット移設台車

ロボットの設置・撤去についてもクリティカルになるため短時間で行う必要があり、コーナーレールとロボットを一体で移設することで、作業の簡素化を図っている(写真-12)。

またロボット移

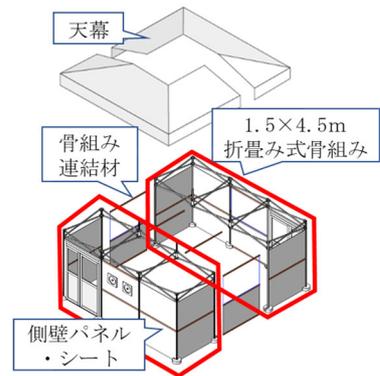


図-12 システム養生

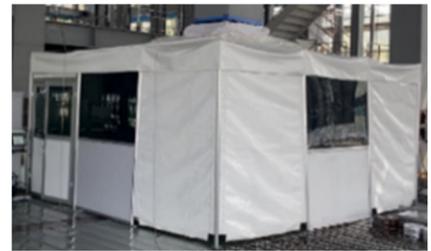


写真-11 システム養生



写真-12 盛替え状況

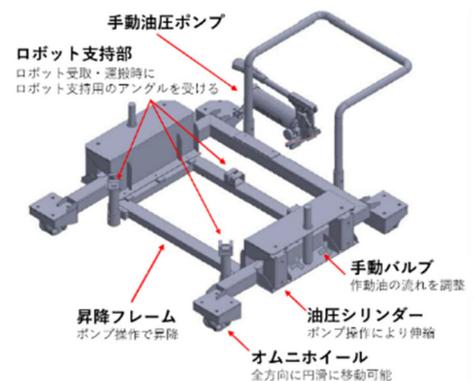


図-13 ロボット移設台車

設時はデッキプレート上を移動する必要があり、専用の台車を開発した（図-13）。オムニホイールで全方位へ水平移動ができるため設置時のロボットの位置調整が容易で、ロボットの設置や移設をスムーズに行うことができる。

7. 施工実績

グループ会社による施工体制を構築し、2020年から現在までに順次機能を追加しながら4現場で実施に適用した。これまでに適用した柱の仕様を表-2、図-14に示す。角の立った4面ボックス柱だけでなく、角部がR形状のコラム柱にも適用してきた。コラム柱は板厚ごとにRが異なるが、自動溶接制御システムによる自動パス計画とオペレータの複雑な動きにより、いずれも良好な結果を得ている。

表-2 適用した柱のスペック

断面形状	4面ボックス柱	コラム柱
柱サイズ(mm)	□800, □900	□700, □800
板厚(mm)	25, 28, 40	28, 36

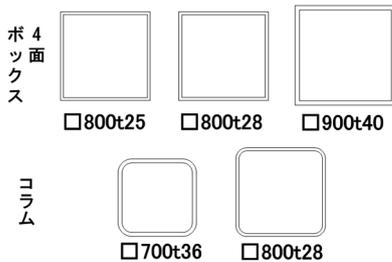


図-14 柱断面図

図-15は□800mm、板厚36mmの柱を溶接した際の積層計画の例である。1溶接ブロック全体の開先形状を基に計画するため、同じ板厚でも施工状況等によってパス数は異なる。

自動溶接中の状況を写真-13、溶接外観を写真-14に示す。計測、溶



図-15 積層計画図



写真-13 自動溶接中の状況



写真-14 溶接外観



図-16 ロボット適用対象の柱

接、スラグ除去などの付帯作業を含めた一連のフローを繰り返して、現場における柱全周を自動で溶接している。自動溶接の品質においても、UTや外観検査とともに全て合格し、熟練溶接技能者と同水準の品質を確保できることを確認した。

なお、図-16の現場適用では、当ロボット1セットを溶接作業員2名で運用した。システム養生とロボットシステムを水平移動で移設し、ロボットによる自動溶接をする。これを繰り返して、実現場の建て方工程の中でも複数の柱の連続施工が十分であることを実証した。

8. まとめ

建て方誤差を伴う現場の開先形状に対応でき、スラグ除去まで自動化した柱1本を全自動で溶接するロボットを開発した。また当ロボットを効果的に使用するための養生システムや移設機器なども同時に開発した。施工体制を構築して4現場の実施に当ロボットを適用、各種の柱仕様で熟練溶接工と同等の品質であることを確認した。

今後はt80mm以上の厚板や超大型柱、狭開先などでの実証・評価を行って当ロボットの適用拡大を図っていく予定である。また、当ロボットはビル建築の現場溶接のみでなく、その他の現場溶接を要する工事、サイトプレファブなどの鉄骨加工などへの展開も期待できると考えている。

引き続き、システムの改良と現場適用を進めて生産性向上を図り、熟練溶接工不足への対応に貢献していきたい。