

柱現場溶接ロボットの開発と適用

宮 木 聡*¹ 伊 藤 源 昭*²
西 多 致*² 田 川 亮*³

要 旨

建設業におけるロボット開発の目的は、安全性と品質の確保、省力化・省人化、生産性の向上であり、多種多様なロボットが開発されているが、これらの目的を完全に達成させたものは少ないのが現状である。柱現場溶接ロボットの開発は工場溶接ロボットに比べると非常に難しい。この主な要因は、建設現場が未整備な作業環境であり、柱と柱の溶接接合は高い溶接技術が要求されるため、運転ソフトに膨大なデータを反映しなければならない。また、柱作業毎に段取り替えが必要となり、これが稼働率を大きく下げる要因となっている。

当社の溶接ロボットの開発は 1992 年にスタートし、数現場に適用しながら装置に改良を加え、現状では、2 号機改良型と 3 号機を実工事に適用している。本論では、これまでの溶接ロボット開発の経緯と今後の課題について述べる。また、溶接ロボットの効率について明らかにするために、工事現場での溶接作業の実態調査とその分析を行い、半自動溶接との比較検討を行った。その結果、ロボット溶接の作業効率の向上を図るには、準備・盛替時間を短縮することが必要であることを示した。

キーワード 柱現場溶接ロボット／段取り替え／稼働率／半自動溶接

目 次

- | | |
|-----------|--------------|
| 1. はじめに | 5. ロボット本体の開発 |
| 2. 開発方針 | 6. ロボット作業環境 |
| 3. 開発の経緯 | 7. 溶接作業の効率 |
| 4. 溶接作業手順 | 8. 今後の課題 |

DEVELOPMENT & APPLICATION OF COLUMN-FIELD-WELDING ROBOT

Satoshi MIYAKI
Kiwamu NISHITA

Motoaki ITOH
Ryoh TAGAWA

Synopsis:

The development of column-field-welding robot is more difficult than that of the shop-welding-robot. The reason is that column-field-welding robots are applied in disarranged circumstance under construction, welding joints are studded in a site and those robots have to be transferred horizontally and/or vertically. Column-to-column welding joints are full penetration single bevel grooves, which require high level welding techniques. Therefore welding robots need operation software with gigantic data. This development of welding robot has started 1992 and now advanced-2#, 3# are working at real site. This paper introduces the development and application of column-field-welding robot. On the other hand, a subject of column-field-welding is supposed improvement of operation and lowering of labor cost. This paper describes welding-cost from investigated result at real site, and compares column-field-welding robot with semi-automatic welding. From results, realization improvement of operation and lowering of labor cost needs for shorting of except for welding time are shown.

* 1 本店 建築エンジニアリング部 * 2 本店 建築部 * 3 横浜支店 新子安再開発作業所

1. はじめに

建設業におけるロボット開発の目的は安全性と品質の確保、省力化・省人化、生産性の向上であり、多種多様なロボットが開発されているが、これらの目的に合致したレベルに達したものは少ないのが現状である。

工場溶接ロボットは、既に自動車産業においては生産ラインの一部となり、鉄骨製造業では積極的に採用され、採用率は年々増加している。しかし、現場溶接ロボットの開発は工場溶接ロボットに比べると非常に難しい。この主な要因は現場が未整備な作業環境であり、柱と柱の溶接は高い溶接技術が要求されるため、運転ソフトに膨大なデータを反映しなければならない。また、作業毎に水平または垂直にロボットの移動が生じて、ロボット設置の段取り替えが必要となることである。特に、この段取り替えは稼働率を大きく下げる要因となっている。

当社の溶接ロボットの開発は1992年に開始し、1号機、2号機、2号機改良型、3号機を製作し、4面溶接ボックス(B.BOX)、角形鋼管(コラム)、円形鋼管(丸柱)の柱継ぎ手に適用している。これらの開発は、溶接品質の安定化、適用条件の拡大、作業時間の短縮を目的として、これまで5現場に適用しながら装置に改良を加えてきた。

本論では、3号機に至るまでの溶接ロボット開発の経緯を説明し、溶接ロボット装置と溶接ロボットの作業環境作りに関わる開発の主なポイント、今後の溶接ロボットの開発課題について述べる。

なお、現状では、2号機改良型と3号機のそれぞれ1セットを実工事に適用しているが、溶接ロボットを適用する際には、溶接作業の効率に関する課題が残っており、また、半自動溶接を採用した場合との違いは明確でない。そこで本論では、ロボット溶接と半自動溶接について、工事現場で行った溶接作業の実態調査から、作業時間の分析、溶接スピードと溶接コストの算定を行い、それらの比較検討を行う。

2. 開発方針

当溶接ロボットの主な開発方針を以下に示す。

- ①現場溶接作業をロボットと人の共同作業とする。
- ②溶接歪みを極力抑える方針から、2台のロボットを1セットとして、レール上を走行して対面溶接とする。
- ③オペレータは複数台のロボットを操作する。

3. 開発の経緯

溶接ロボットの1号機から3号機に至る開発の変遷について、表-1に仕様の流れを示す。また、1号機から3号機の各装置の柱への配置状況を図-1～4に、溶接ロボットを採用した工事の状況を写真-1～4に示す。柱現場溶接ロボットは、ロボット本体、溶接電源、制御装置、水冷装置、ワイヤ供給装置、操作端子盤、レールから構成されている。これらの項目の開発の変遷については5章に詳細を示す。

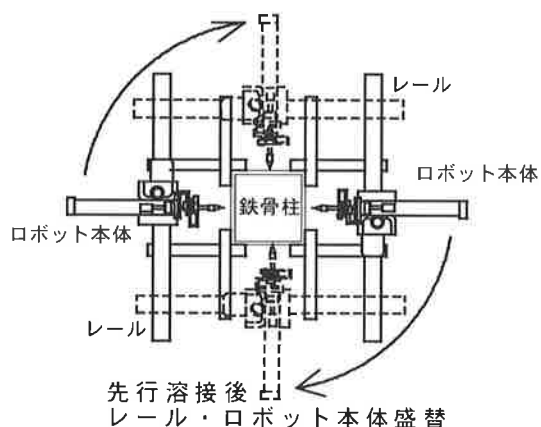


図-1 溶接ロボット1号機

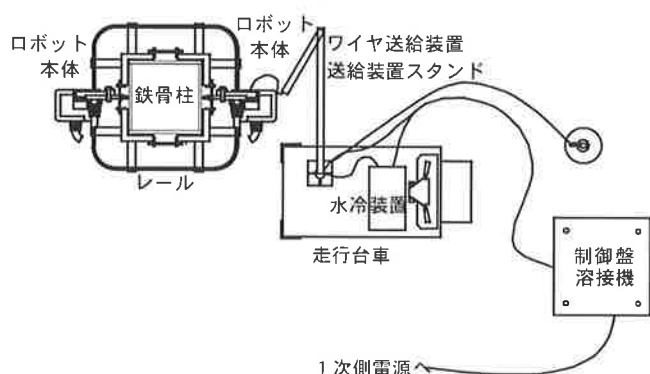


図-2 溶接ロボット2号機

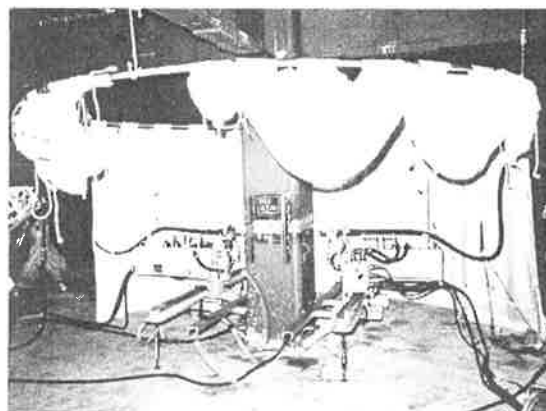


写真-1 溶接ロボット1号機外観

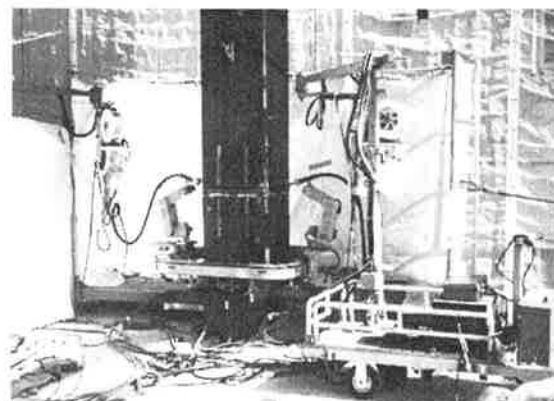


写真-2 溶接ロボット2号機外観

表-1 ロボット仕様の変遷

項 目	1号機	2号機	2号機改良型	3号機
対象ワーク	B.BOX,コラム	B.BOX,コラム,丸柱		
柱サイズ	B.BOX	□500 ~ □900	□500 ~ □800	
	コラム	□500 ~ □900	□500 ~ □800	
	丸 柱	---	○-500 ~ ○800	
板 厚(t)	B.BOX	19 ~ 50mm	19 ~ 80mm	
	コラム	19 ~ 50mm	19 ~ 36mm	
	丸 柱	---	19 ~ 50mm	19 ~ 80mm
開先角度	$35^{\circ} \pm 0.5^{\circ}$	$35^{\circ} \pm 0.5^{\circ}$ $t > 40$ $35^{\circ} \pm 1.0^{\circ}$ $t \leq 40$		
型 式	5軸多関節直交座標型			
溶接電源	15 ~ 42V	16 ~ 42V		
溶接電流	60 ~ 500A	50 ~ 500A		
溶接速度	1 ~ 100cm/min			
ウィーピングパターン	自動発生			
ルートギャップ	8 ~ 12mm	7 ~ 12mm		4 ~ 16mm
ルートギャップ差	0 ~ 3mm			
センシング	レーザー	ワイヤタッチ		
シールドガス	CO ₂ , Ar/80%+CO ₂ /20%			
走行レール	直線型	環状型(盛替不要)	レール架台簡略化	
台 車	なし	タイヤ型(水冷装置, ワイヤ装置搭載)	キャタピラ型(制御盤,溶 接電源,水冷装置搭載)	2台→1台
動作範囲	120cm	60cm, 仮設足場上で可能		
2次電源ケーブル長	50m		10m(電圧の安定化)	
操 作		自己判断機能の追加	マニュアル機能追加, 補修・追加溶接対応	

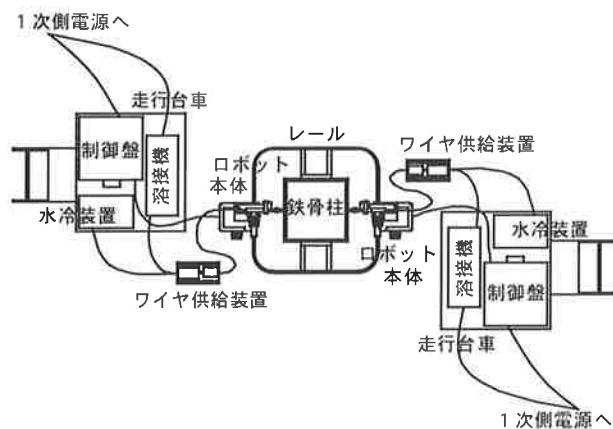


図-3 溶接ロボット2号機改良型

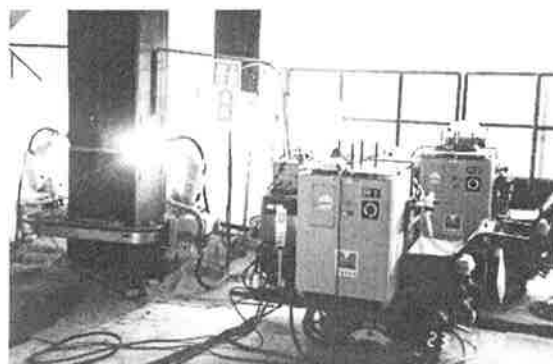


写真-3 溶接ロボット2号機改良型外観

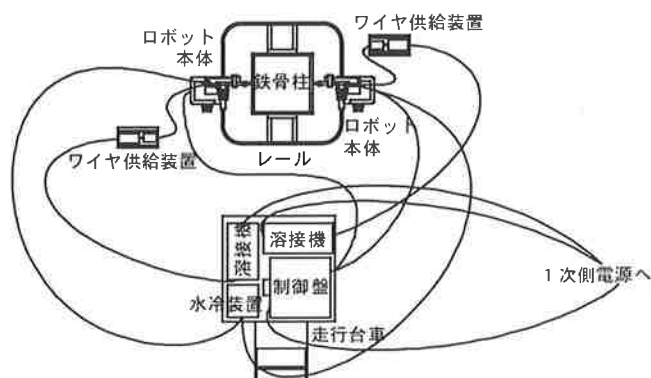


図-4 溶接ロボット3号機

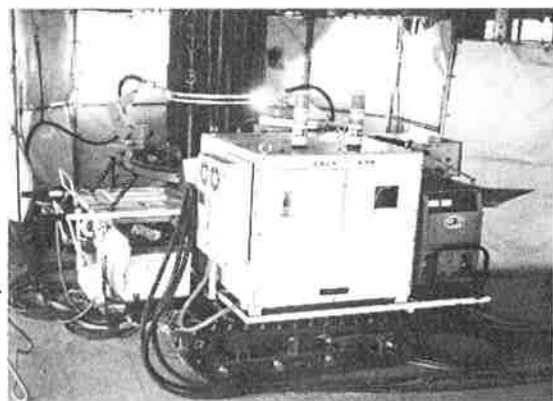


写真-4 溶接ロボット3号機外観

4. 溶接作業手順

溶接ロボットの溶接作業は、以下に示す要領で行い、その手順を図-5に示す。

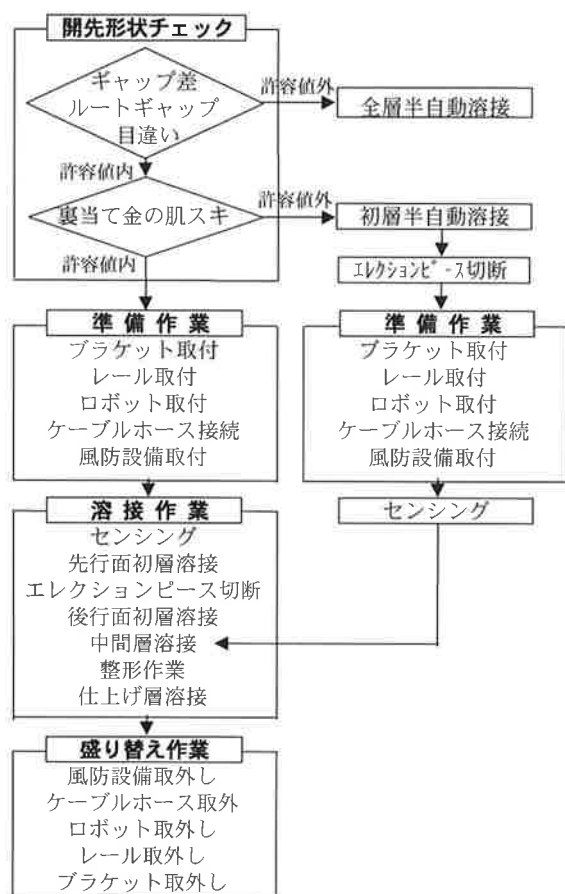


図-5 溶接作業手順のフロー

(1) 開先形状チェック

溶接ロボットの適用性を確認するために、溶接定規などを使い、ルートギャップ、ギャップ差、目違い、裏当て金の肌スキの開先精度をチェックする。溶接ロボットの仕様の許容値を外れる場合、全て全層半自動溶接、または初層のみ半自動溶接で行う。

(2) 準備作業

柱に予め付けたアングルピースにレール架台をセットして、レールを取り付けた後、ロボットを取り付ける。次に、電源と制御ケーブル、及びガスと冷却水のホースを接続する。溶接作業ができる状態になると風防設備を取り付ける。

(3) 溶接作業

操作端子板に柱の種類と板厚を入力し、ワイヤタッチセンシングにて開先形状と柱寸法を測定する。初層以降のスラグ除去は、CO₂のシールドガスを使う場合は1層毎に、Ar+CO₂の場合は2層目毎に行う。中間層溶接作業後、溶接面をチェックし、必要に応じてグラインダー

などで溶接面を整形してから仕上げ溶接を行う。

(4) 盛り替え作業

準備作業の逆の順で取り外し作業を行い、溶接装置などを走行台車に積んで次柱へ移動する。

5. ロボット本体の開発

5.1 センシング

センシングの仕様は、1号機ではレーザーセンシングを採用したが、このレーザーセンシングは開先部の状態やロボット装置のノイズによる測定誤差が大きかった。そこで、2号機からはワイヤタッチセンシングに変更することでこの問題を解決した。表-2にこの仕様を示す。なお、コラム柱のセンシングでは、コーナー部の測点を増やしてセンシング精度を高めた。

表-2 ワイヤタッチセンシングの仕様

制御周期	0.1 秒
検出時点	接触時
電流値	300V
電圧値	5mA

5.2 初層溶接

初層溶接は、溶接ロボットにおいても溶接欠陥が生じ易く、電流・電圧値、トーチの溶接棒のねらい位置、開先部の金属温度、シールドビードの形状、錆止め塗装、溶接ガスの吹き返しが主な溶接欠陥因子と考えられる。特に、溶接ガスの吹き返しによる溶接欠陥が多かったため、種々の室内実験を経て、裏当て金の下に10mm角のプレートをつけてガス抜きをつくり、2号機以降はオープン開先として対処した。

5.3 ルートギャップ

ルートギャップに対しては、溶接ロボットの許容幅の拡大と鉄骨精度の向上を計った。

ルートギャップの大幅な変動は、溶接ロボットの積層パターンを変えることになり、2台のロボット間でパス数が異なることが生じる。この場合、丸柱ではロボットの走行速度に違いが生じて、2台のロボット同士で衝突が起こる結果となる。従って、許容幅の拡大としては、3号機ではルートギャップを7～12mmから4～16mmに拡大して、一部ソフトの変更を行い、さらに衝突防止機能を設けた。なお、鉄骨精度に関する方策は6章に記す。

5.4 マニュアル操作

1号機では、開先形状や溶接外観によって生じる追加溶接や欠陥部分の補修溶接を半自動溶接で行ってきたが、2号機以降では、溶接ロボットで追加溶接と補修溶接を行うためにマニュアル操作機能を随時追加した。

5.5 カスケード部（溶接部ジョイント）

ロボット溶接の溶接順序は、1号機では、直線型レールであるために、最初にエレクションピースの無い面を初層から仕上げ層まで溶接した。次に、エレクションピースの切断後、レールおよびロボットを90度移設して、残りの面を初層から仕上げ層まで溶接を行った。このカスケード部では整形作業が必要であり、発生した溶接欠陥の大部分がこのカスケード部分に集中した。

そこで、2号機から環状型レールを採用し、カスケード部の溶接品質を安定化させるために溶接順序を変更して、最初にエレクションピースの無い面を初層溶接する。次に、エレクションピースの切断後、残りの面の初層を溶接した後に、中間層から仕上げ層まで溶接を行う。この結果、カスケード部の整形作業を無くしている。これらの溶接順序を表-3に、カスケード部の横断面形状を表-4に示す。

表-3 溶接順序

	初層溶接	中間・仕上溶接
1号機 コラム B.BOX		
2-3号機 B.BOX		
2-3号機 コラム		
2-3号機 丸柱		

表-4 カスケード部の断面形状

1号機	
2-3号機	

5.6 ロボット装置

溶接ロボットの装置は、各々2台のロボット本体、制御盤、溶接電源、冷却装置、ワイヤ供給装置、操作端子盤、レールから構成されている。表-1のロボット仕様の変遷に示すように、装置の集約化と縮小化を行ってきて、

結果として3号機では、1台の走行台車に2台分のロボット装置を載せて移動できるようにした。また、1次および2次電源ケーブル、制御ケーブルガスおよび冷却水ホースなどの接続のワンタッチ化を行い、準備作業および盛り替え作業の時間を短縮した。

走行レールについては、2号機以降では直線型を環状型レールとして、レールの盛り替えを不要とした。さらに、2号機改良型ではレール架台を簡略化することで作業性を改善した。また、2号機以降では、動作範囲を120cmから60cmすることで作業性を改善し、仮設足場上で適用可能なようにした。

また、2号機改良型以降では、溶接電源を走行台車に載せることにより、2次電源ケーブルの長さを50mから10mにして、電圧の安定化により溶接品質を安定化させた。またケーブルの引き回し作業を軽減した。

6. ロボット作業環境

6.1 鉄骨精度

溶接ロボットの性能の許容範囲に、柱の鉄骨精度(製作精度および建て方精度)をすべて納めることは難しいが、鉄骨精度の確保は、溶接ロボットを現場で活用する上で必要不可欠な条件となる。従って高精度な鉄骨精度を得るために建て入れ調整治具と3次元トータルステーションを用いた鉄骨建て方精度計測システムを開発した。図-6に鉄骨建て方精度計測システムの概要を示す。

この工法では鉄骨歪み直しのワイヤが無いために、すべての柱に溶接ロボットが適用でき、またワイヤによって走行台車の移動が妨げられることも無い。

この鉄骨建て方精度計測システムで行った場合と、在来工法で行った場合の溶接長さの比較を図-7に示す。図では、6mm換算の設計溶接長に対する実測溶接長の比を示した。設計溶接長に比べ実測溶接長は在来工法の場合で22%増、鉄骨建て方精度計測システムの場合で4%増であることが判る。

上記の溶接長の比較結果は、柱の鉄骨精度が現場溶接の、溶接時間の短縮、溶接コストに大きく影響していることを示している。

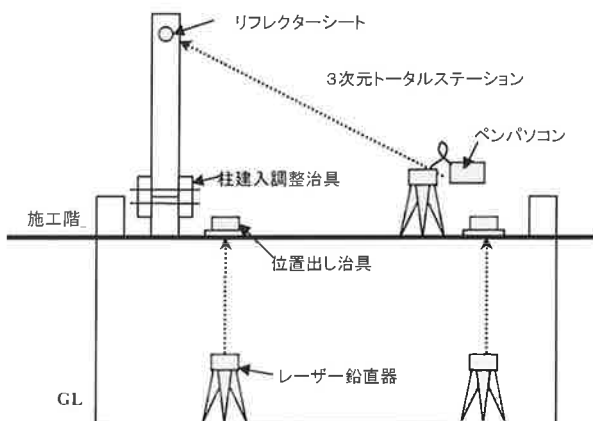


図-6 鉄骨建て方精度計測システム

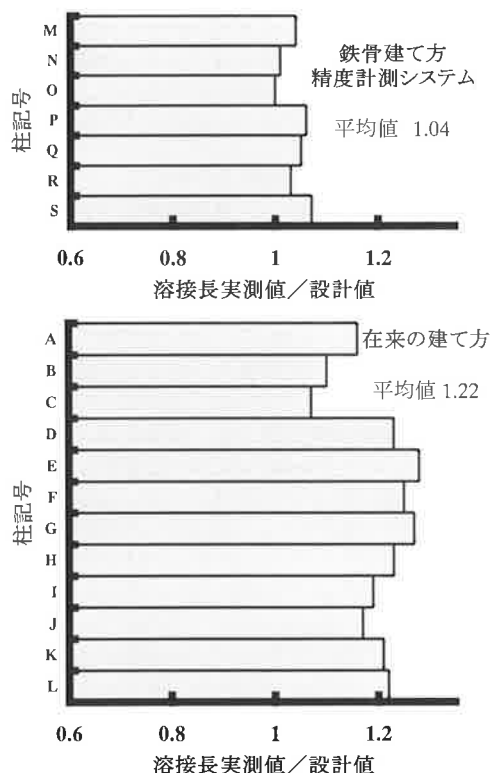


図-7 建て方の違いによる溶接長さ

6.2 風防設備

溶接ロボットを使用できる最大風速は2m/sec以下であるため、十分な風防設備が必要となる。風防設備としては、簡易な風防スクリーンと局所風防装置を併用する。の1例を示す。

写真-5に、局所風防装置の1例を示すが、この装置は上下方向からの風に有効である。

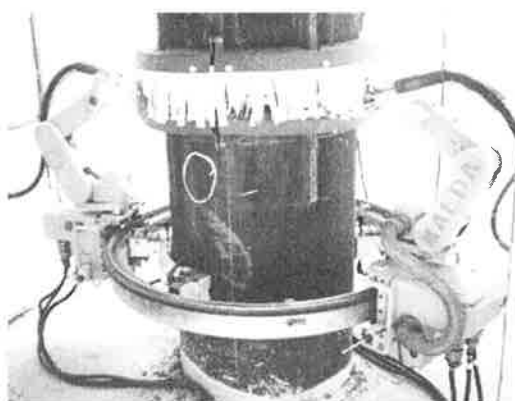


写真-5 局所風防装置

7. 溶接作業の効率

溶接ロボットのコストを決める主な要因は、溶接スピード、柱サイズ(溶接長)、損料(溶接ロボットの価格)、オペレータの操作技能・管理技術である。

ここでは、実工事現場で行った溶接作業時間を基に、柱現場溶接ロボットの溶接コストを試算し、それらの結

果を半自動溶接と比較する。また、現状のシステム内での溶接作業の効率化をはかるための方策を示す。

7.1 作業調査

作業調査の方法は、図-8に示した溶接作業手順に沿って、作業項目を①取付・取外、②半自動溶接、③スラグ除去、④EP切断、⑤センシング、⑥ロボット溶接の6項目に分類し、それぞれに費やした時間を測定した。

調査を行った溶接ロボットは、現在稼働中の溶接ロボット2号機改良型と3号機についてである。また調査を行った柱は、溶接ロボットの場合、外径 ϕ -700mm、板厚20~24mm、合計19本、半自動溶接の場合は、柱ごとで作業時間に差がないことを確認し、代表的な柱数本を調査した。

7.2 作業調査結果

図-9に、各作業項目の作業時間(溶接ロボット2セットを2名のオペレータで操作)を示す。ロボット溶接による

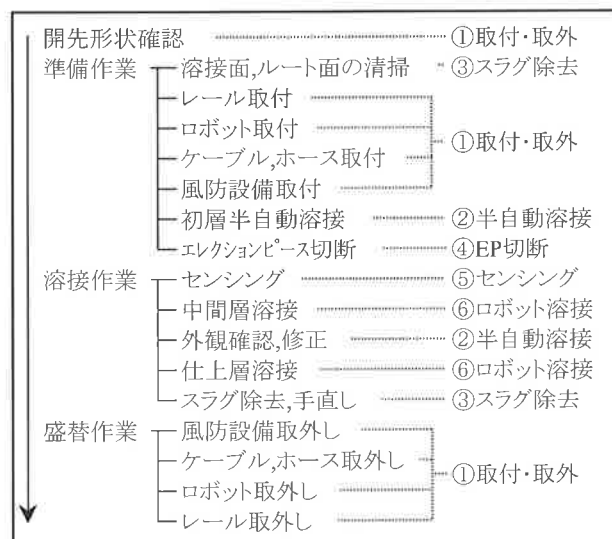


図-8 溶接作業の手順と分類

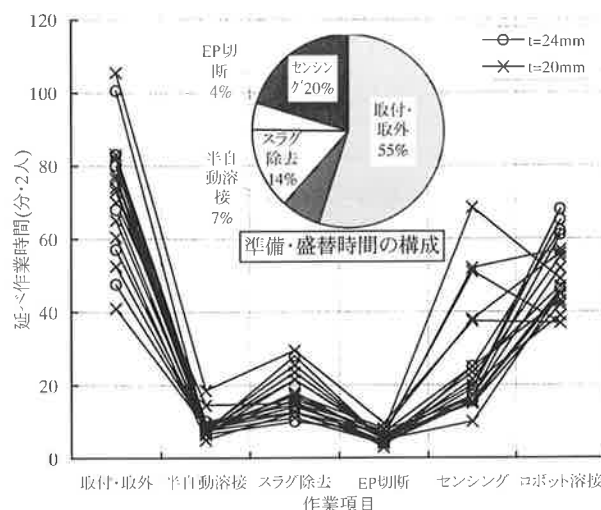


図-9 各作業項目の作業時間

自動溶接時間(中間・仕上層溶接)を除いた準備・盛替時間(取付・取外,半自動溶接,スラグ除去,EP切断,センシングの総和)の平均値は131分であり,そのうち取付・取外が55%,センシングが20%を占めている。

また,全作業時間の柱ごとでのばらつきは大きく,これは取付・取外とセンシング作業時間のばらつきによる。

取付・取外時間は,台車移動とケーブル類の引き回し作業の時間が柱ごとで大きく異なり,現場環境によって左右されることが明らかとなった。また,レールの据え付け精度が確保されず,取付をやり直した場合があった。

センシングについては,5本が鉄骨建て方精度に起因するプログラムの入力処理に38-69分と時間がかかり,それ以外は10-20分程度であった。

溶接時間は板厚が厚くなると溶接長さが長い分,数分程度長くなっている。

なお,それ以外の作業時間については,大きな違いは見られなかった

7.3 溶接作業の流れ

ロボット溶接作業の特徴は,ロボットによる自動溶接作業中に,作業員が次柱の準備・盛替えを行えることである。また,この準備・盛替時間は板厚に関係なく一定であると想定した場合,溶接作業の流れは表-5のように示される。

また,図-10に作業時間の構成を板厚32mmの場合について示すが,ロボット溶接の場合,半自動溶接に比べて準備・盛替時間が長いことが判る。

これらの図表から,ロボット溶接では,板厚が厚くなるに従い溶接作業の効率が上がることが判る。また,この溶接外時間を短くすることが溶接スピード(単位時間あたりの6mm換算溶接長さ)を速くすることになり,コスト低減が図れることを示している。

7.4 溶接コスト

作業調査による作業時間を基に,板厚をパラメータとした溶接コストを算定し,半自動溶接とロボット溶接の比較をする。

図-11に,半自動溶接に対するロボット溶接の溶接コストの比較を,柱の板厚ごとに示す。溶接コストは,柱1本あたりの材料費,機械損料,人件費の総和とした。

ロボット溶接の溶接コストは,板厚32mmで半自動溶接と同等となり,板厚32mmより板厚が厚くなるに従い低減されることが判る。また,図中には,現状で実現可能と考えられる準備・盛替時間を90分とした場合を示すが,この準備・盛替時間の短縮によりコスト低減が図れることが判る。

現状のシステムでの準備・盛替時間を少なくするためには,作業環境の整備,ロボットの誤差吸収範囲の拡大,ロボット装置取付・取外の簡略化,プログラムの改良によるロボットの自己判断機能の拡張が必要と考える。

図-12に溶接コストの構成を板厚32mmの場合について

て示す。半自動溶接では人件費が73%,機械損料はわずかに5%であるのに対して,ロボット溶接では人件費が45%,機械損料は31%と半自動溶接の6倍程度と大きくなっている。従って,ロボット溶接の溶接コストを下げるには,溶接ロボットの価格を下げるのが有効であることが判る。

表-5 板厚の違いによる作業の流れ

柱サイズ	柱	溶接機	準備	溶接	盛替,準備	溶接
○-700 ×22	①	2号機(改)	準備	溶接		
	②	3号機		準備	溶接	
	③	2号機(改)			盛替,準備	溶接
	④	3号機				盛替,準備 溶接
○-700 ×32	①	2号機(改)	準備	溶接		
	②	3号機		準備	溶接	
	③	2号機(改)			盛替,準備	溶接
	④	3号機				盛替,準備 溶接

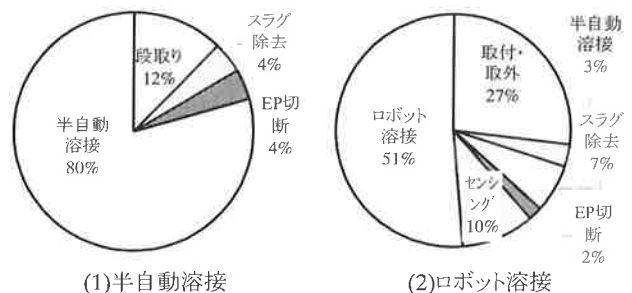


図-10 作業時間の構成(○-700mm, 板厚 32mm)

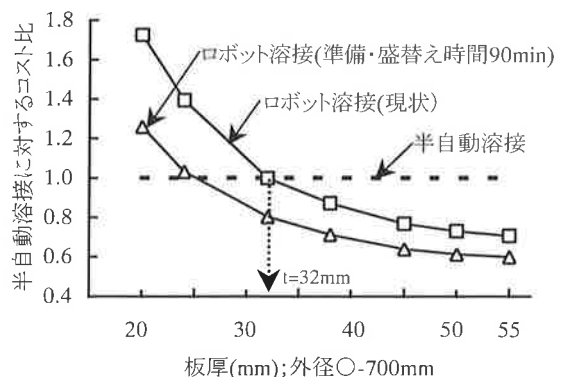


図-11 溶接コストの比較

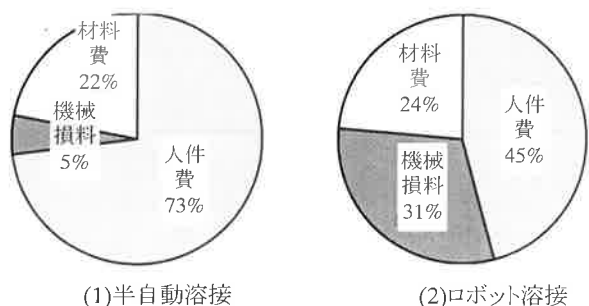


図-12 溶接コストの構成(○-700mm, 板厚 32mm)

8. 今後の課題

8.1 溶接ロボットの操作性

(1) 教 示

ロボット操作を容易にするためにオペレータにエラー処理要領を指示する機能が必要である。

(2) 欠陥検出

ロボット溶接では欠陥が生じると、その欠陥が連続して発生することが多い。アーク発生中において、ブローホールなどの欠陥や溶接形状の不具合を検出して、溶接を即中断する機能が必要である。この結果、オペレータが複数台のロボットを容易に扱えることになる。

(3) 入熱量管理

今後、溶接ロボットによって短時間に現場溶接を行うことが可能となると考えられる。この場合、高い溶接品質を確保するために入熱量管理の機能が必要である。

(4) オペレータの資格

溶接ロボットのオペレータの資格は、建築工事標準仕様書 JASS6 では基本級の有資格者であるが、溶接ロボットの溶接品質はオペレータの操作技能と管理技術に左右されることが多く、新しい資格制度が望まれる。

8.2 ロボット本体

(1) 制御盤

2 台ロボットの制御機能が独立して 1 台の制御盤に納められているが、2 台を統括する制御が必要である。

(2) センシング

センシング時間の短縮が必要であるが、柱の種類、板厚、開先角度のみを入力してセンシングを無くすることが望まれる。

(3) 溶接装置

写真-4 で示した 3 号機の走行台車は 530kg で移動には 2 人作業となっている。溶接装置は、メーカーが異なる各種機器を集めて組み立てた装置であることがその改造・改良をスムーズに行うことを難しくしているが、更に各装置の集約・一体化により縮小化を図り、1 人で作業にする必要がある。

(4) 接続部

1 次および 2 次電源ケーブル、制御ケーブル、ガスホース、水冷ホースが各 2 本、合計 10 本の接続と、レールおよびトーチの設置に使う 18 本のボルト接続部を全てワンタッチ化する必要がある。

8.3 開先角度

現在の 35℃の開先角度を狭くすることは、特に厚板の溶接作業効率を上げる有力な手段であり、そのためには狭開先用の水冷トーチの開発が必要となる。

8.4 損料と溶接ロボットの価格

現場における鉄骨建て方期間の溶接ロボット使用率は約 30% 前後であり、未使用期間も損料負担すると、機械損料の率は大幅に上がる結果となる。今後溶接ロボットのリース化を図らなければならない。

9. おわりに

現在、現場溶接ロボット作業は、「人とロボットの共同作業」で行っているが、今後、人の作業を縮小してロボットの作業を拡大することを目指している。そのためには、新たな技術と現場管理システムの導入が必要であり、関係する方々のご理解とご協力をお願いしたい。

柱現場溶接ロボット開発でロボットメーカーの日立造船(株)、ファブリケータの坂本工業(株)、福田工業(株)の方々に協力を得たことを謝意します。

参考文献

- 1) 大木典雄・伊藤昭昭・小島又一・大内陸男・伊藤源昭・西多致・米重徹・脇屋仁・鬼頭武志：柱現場溶接ロボットの適用，日本建築学会技術報告集第 8 号，pp.41-46，1996.6
- 2) 西多致：新型現場溶接ロボットの開発—一般ビルへの適用—，鉄鋼技術'98-8 月号，鋼構造出版(株)，pp.51-55
- 3) 伊藤源昭・西多致・押井秀夫・西田正彦：柱現場溶接ロボットの開発，建設機械 11 月号，405 Vol.34，No11，pp.53-57，1998.11
- 4) 鬼頭武志・早坂善彦・杉田利男：鉄骨柱溶接ロボットの開発と適用，溶接技術'99-1 月号，産報出版(株)，pp.83-89
- 5) 西多致・伊藤源昭・仁ノ平栄・鬼頭武志：柱現場溶接ロボットの開発と適用，日本建築学会 第 13 回建築施工ロボットシンポジウム予稿集，pp.45-52，2000.1
- 6) 西多致・伊藤源昭・藤岡敏雄・宮木聡：柱現場溶接ロボットの開発と適用，日本ロボット工業会，第 8 回建設ロボットシンポジウム，pp.275-282，2000.7
- 7) 宮木聡・伊藤源昭・西多致・藤岡敏雄：柱現場溶接ロボットの適用例，日本建築学会大会学術講演梗概集(材料施工 A-1)，2000.9 (投稿中)