

柱現場溶接ロボットの適用

APPLICATION OF COLUMN-FIELD-WELDING ROBOT

大木典雄 — *1 伊藤昭浩 — *2
 児島又一 — *3 大内隆男 — *4
 伊藤源昭 — *5 西多 致 — *6
 米重 徹 — *7 脇屋 仁 — *8
 鬼頭武志 — *9

Norio OOKI — *1 Akihiro ITO — *2
 Mataiti KOJIMA — *3 Takao OOUTI — *4
 Motoaki ITOU — *5 Kiwamu NISITA — *6
 Tohru YONESIGE — *7 Hitoshi WAKIYA — *8
 Takesi KITOH — *9

キーワード:

産業用ロボット, 柱現場溶接ロボット, 鋼管コンクリート柱, ワイヤタッチセンシング, 完全溶け込みレ型突き合わせ溶接, 鉄骨建方, 鉄骨精度, 自動認識機能

Keywords:

Industrial robot, Colum-field-welding robot, Concrete filled steel tubuler column, Wire touch sensing, Full penetration single bevel welding, Steel flame erection, Erection precision, Automatic acknowledgement function

A column-field-welding robot was applied to joints of column-column in the construction of Anzen-Eisei-Sogou center (a provisional name) project.

This robot is composed of a pair of robots which can move with 5 axes and run symmetrically on the rail set around the column and measure automatically the shape grooves by touch sensing.

This paper describes results of the application of welding robot in this construction.

1 はじめに

我が国では、建築物の高層化、大型化に伴い、純鉄骨構造の柱・柱・柱・梁などの接合部は溶接工法が主流となり、鉄骨鉄筋コンクリート構造においても現場溶接が採用されつつある。

柱・柱の現場溶接は横向き姿勢であり、高度な熟練した技能が要求されている。また現場溶接は長時間の連続作業となり、苦渋作業の代表的なものである。さらに熟練溶接技能者の不足と高齢化が進んでいる状況下において、高い溶接品質を持ち、かつ低コストの現場溶接ロボットへのニーズが高くなっている。

建設産業の溶接ロボットの開発の歴史は浅く、1980年代にロボットメーカーが鉄骨組立用の工場溶接ロボットを製作し、その後現場溶接ロボットを開発している。'90年代に入るとロボットメーカーと総合建設業者による現場溶接ロボットの開発が活発化し、種々のタイプの現場溶接ロボットが出現し、現在8社の総合建設業者が現場溶接ロボットを実現場に採用し、開発を進めている。

本報告では、柱現場溶接ロボット（以下、溶接ロボットと称す）の概要、安全衛生総合センター（仮称）建築工事において溶接ロボットを柱・柱の現場接合に採用した施工結果と溶接ロボットに関して今後の課題と方向性について述べる。

2 溶接ロボットの概要

2.1 溶接ロボットの固有な問題点

(1) 移動型ロボット

ロボットの移動毎に自己座標の変更、制御の修正、ロボット装置

などの移設及び着脱作業が生じる。

(2) 未整備な作業環境

工事中の屋外作業条件下で、精密装置の運用が難しい。

(3) 高い性能要求

上記項目の理由により、高度なロボット技術が必要である。

2.2 溶接ロボットの開発

(1) 開発の流れ

この溶接ロボットの開発は'92年に全天候型自動ビル建設システムであるMCCS (Mast Climbing Construction System) の要素技術の1つとしてスタートし、1号機から2号機、2号機(改良型)と大幅な改良を行い、これまで3現場に適用し、49本の施工を実施した。

(2) 改良の目的と改良点

①溶接品質の安定

*電圧の安定化; 2次電源ケーブル長を50mから10m

*初層品質の安定化; オープン開先とし、吹き返しの防止

②適用条件の拡大

*対象ワークの追加; B. BOX、成形コラムに円形鋼管

*対象板厚の拡大; 最大50mmから最大80mm

③作業時間の短縮

*レールの盛替え作業の削減; 直行レールから環状レール

*装置重量の低減; 全体装置重量を約1500kgから約760kg

*装置移動の簡便化; 溶接装置の定置式から走行台車方式

*1 建設省関東地方建設局営繕部 営繕監督室長

*2 建設省関東地方建設局営繕部建築第一課 構造係長

*3 ㈱佐藤総合計画・構造技術系群構造 部長

*4 ㈱佐藤総合計画・構造技術系群構造

*5 前田建設工業㈱建築部建築技術開発 Gr. 部長
 (〒102-8151 東京都千代田区富士見2-10-26)

*6 前田建設工業㈱建築部建築技術開発 Gr. 副部長

*7 前田建設工業㈱関東支店芝安全センター(作) 所長

*8 前田建設工業㈱関東支店芝安全センター(作) 主任

*9 前田建設工業㈱建築部建築技術開発 Gr.

*1 Manager, Supervision Section, Government Buildings Dept., Kanto

Regional Construction Bureau, Ministry of Construction

*2 Assistant Manager, 1st. Building Div., Government Buildings Dept., Kanto Regional Construction Bureau, Ministry of Construction

*3 AXS Satou INC. Structural Engineer

*4 AXS Satou INC. Structural Engineer

*5 General Manager, Building Dept. Maeda Corporation

*6 Deputy General Manager, Building Dept. Maeda Corporation

*7 General Manager, Kantou Branch, Maeda Corporation

*8 Sub-Manager, Kantou Branch, Maeda Corporation

*9 Engineer, Building Dept. Maeda Corporation

2.3 溶接ロボットの概要

(1) 溶接ロボットの構成

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、レール、走行台車などから構成され、その構成を図1に、主な仕様を表1に、適用ワークの条件を表2に示す。

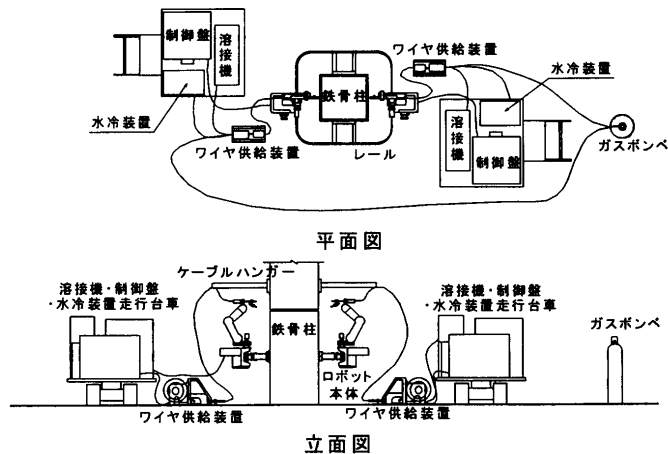


図1 溶接ロボットの構成

表1 溶接ロボットの仕様

ロボット本体	5軸直交座標系NCロボット
冷却方式	水冷式
溶接電源	16～42V
溶接電流	50～500A
溶接速度	1～100cm/min
適用ガス	80%Ar+20%CO ₂ 混合ガス、CO ₂ ガス
ワイヤ	YM28S (80%Ar+20%CO ₂)、SF-1 (CO ₂) 線径 φ1.4mm

表2 適用ワークの条件

対象柱	四面溶接ボックス	□500～□800mm
	角形鋼管	□500～□800mm
	丸形鋼管	φ500～φ800mm
板厚	四面溶接ボックス	16～80mm
	角形鋼管	16～36mm
	丸形鋼管	16～50mm
開先形状	開先角度	35°±0.5° (但し t>40mm) 35°±1.0° (但し t≤40mm)
	ルートギャップ	7～12mm
	ルートギャップ差	0～3mm
	ルートフェイス	0～1mm
	裏当て金の肌スキ	1～3mm
	目違い	t/10かつ3mm以下

(2) 本溶接ロボット本体

本溶接ロボットは2台1組で使用され、2台のロボット本体が柱に付けられたレール上を半周ずつ走行しながら、溶接作業を行う。

溶接ロボットは初層から仕上げ層まで自動溶接する機能の他にワイヤタッチセンシングによる開先形状の自動認識機能、溶接ワイヤ、シールドガス、冷却水、電圧・電流値などの異常時の自動停止機能などを有している。

溶接ロボットはマニュアル機能を持ち、異常時、オペレータが溶接ロボットの作業を停止して補助溶接又は補修溶接に使用できる。

(3) 走行用レール

4分割のレールであるが2分割で使うことができ、柱に付けた仮設アングルピースにレール架台をセットしてレールを載せる。

レールは2セット有り、溶接中に他のレールは次柱に設置される。

(4) 走行台車

走行台車はキャタピラ式であり、溶接ロボット本体、溶接電源、制御装置、水冷装置、レール、ケーブルなどを搭載して約380kgの重量であり、溶接ロボット本体に各1台、計2台である。

走行台車のフラットデッキプレートおよび合成デッキプレート上走行試験を行い、走行の安全性を確認した。図2 走行試験の試験体、写真1に走行試験状況を示す。

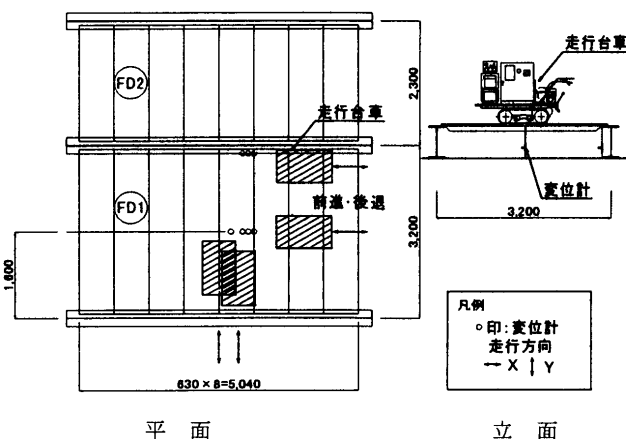


図2 走行試験の試験体

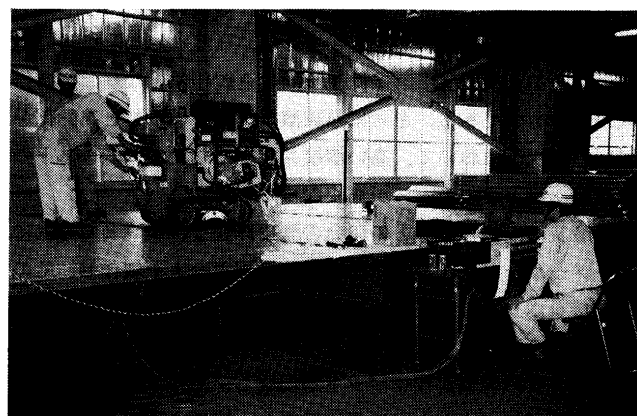


写真1 走行試験状況

3. 溶接ロボットの現場適用

3.1 適用の目的

ごく近い将来、少子化の時代に突入する状況下において、建設産業ではさらに熟練溶接技能者の不足と高齢化が進むことが予想されている。この問題に対して溶接ロボットの採用は必須であり、今後溶接ロボットを普及させる上での問題点を把握するために当工事に適用した。

3.2 工事概要

工事概要を表3に示す。

3.3 建物の形状

本建物の柱キープランを図3、軸組図を図4に示す。

本建物のC2、C3柱は8階床まで鋼管コンクリート柱が採用されている。地上部柱断面リストを表4に示す。

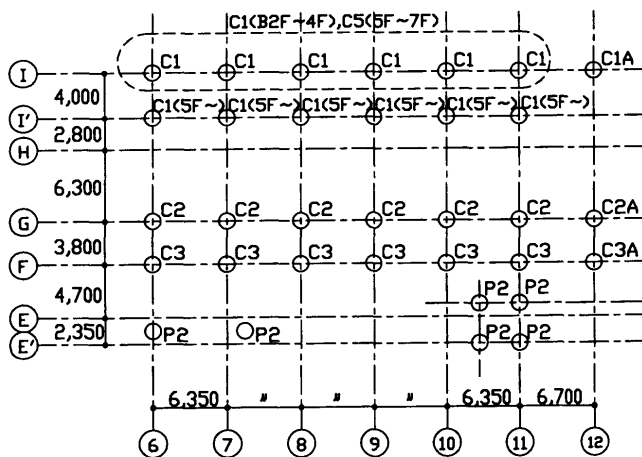


図3 柱キープラン

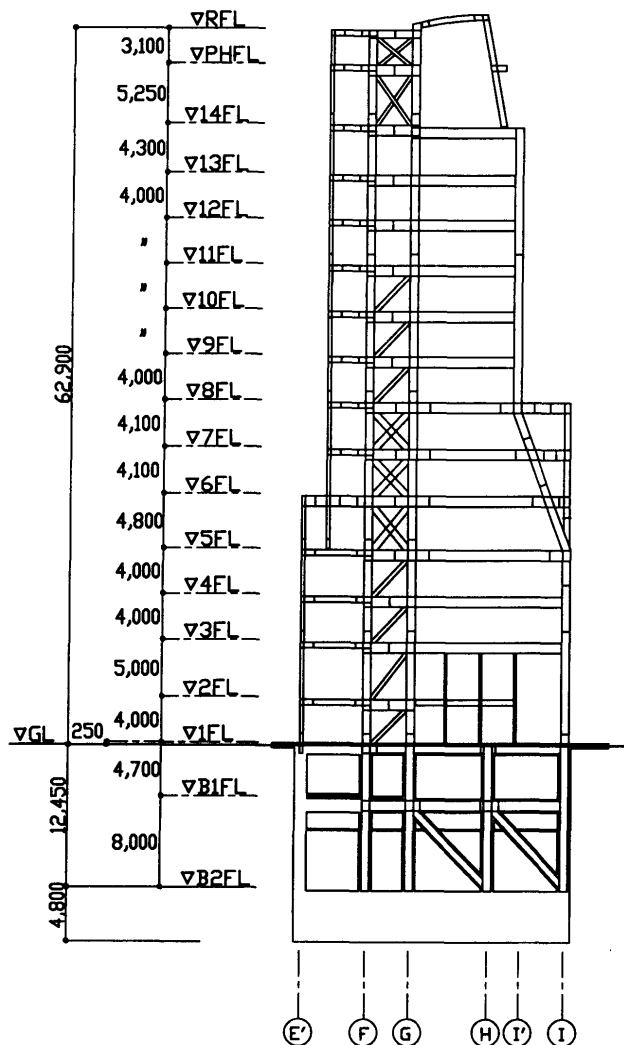


図4 軸組図

4. 溶接ロボット技量試験

現場施工に先立ち、溶接ロボットの性能確認を目的として溶接ロボット技量試験を実施した。この試験の概要と結果について以下に述べる。

表3 工事概要

工事名称	安全衛生総合センター（仮称）建築工事
工事場所	東京都港区芝5丁目35番1号
発注者	建設省 関東地方建設局
設計	建設省 関東地方建設局 営繕部建築第一課 株式会社 佐藤総合計画
監理	建設省 関東地方建設局 営繕部営繕監督室 株式会社 佐藤総合計画
施工	（建築）前田・長谷工・石原特定建設工事共同企業体
工期	1996年9月13日～1999年10月末（予定）
建物用途	庁舎
敷地面積	6,273.0m ²
建築面積	2,744.7m ²
延床面積	20,743.9m ²
建物階数	地下2階 地上14階
高さ	軒高62.9m 最高軒高64.55m
構造種別	主体構造 地下2階～地下1階 SRC造 地上1階～地上14階 S造

表4 地上部柱断面リスト（四面溶接ボックス柱）

節	階	C1	C2	C3
8	PH階	—	□-700×700×28	□-700×700×28
	14階	—	□-700×700×28	□-700×700×28
節	13階	□-700×700×28	□-700×700×28	□-700×700×28
7	12階	□-700×700×28	□-700×700×28	□-700×700×28
節	11階	□-700×700×28	□-700×700×28	□-700×700×28
6	10階	□-700×700×28	□-700×700×32	□-700×700×32
節	9階	□-700×700×28	□-700×700×32	□-700×700×32
5	8階	□-700×700×36	□-700×700×40	□-700×700×40
節	7階	□-700×700×36	□-700×700×40	□-700×700×40
4	6階	□-700×700×36	□-700×700×45	□-700×700×45
節	5階	□-700×700×36	□-700×700×45	□-700×700×45
3	4階	□-700×700×40	□-700×700×50	□-700×700×50
節	3階	□-700×700×40	□-700×700×50	□-700×700×50
2	2階	□-700×700×40	□-700×700×55	□-700×700×55
節	1階	□-700×700×40	□-700×700×55	□-700×700×55

（1）試験概要

溶接ロボットの技量試験は日本建築学会「鉄骨工事技術指針・工事現場施工編」に準拠して行い、試験体は本工事の設計図書に指定する材料と開先形状を採用し、図5に開先形状、図6に溶接ロボット技量試験の試験体を示す。

溶接ロボットを扱うオペレータの資格についてはJASS-6『JIS Z 3001またはJIS Z 3841の「基本となる級」以上の溶接技術検定試験に合格した有資格者とする』に則り、横向きの専門級有資格者とし、ロボットメーカーのオペレータ教育を受講させた。

実際の現場作業では1名のオペレータが1セットの溶接ロボットを運転するが、この試験では2名のオペレータが各1台の溶接ロボットの操作を担当し、それぞれのオペレータが担当した部分について溶接全線の外観検査および超音波探傷試験と機械的試験を行った。

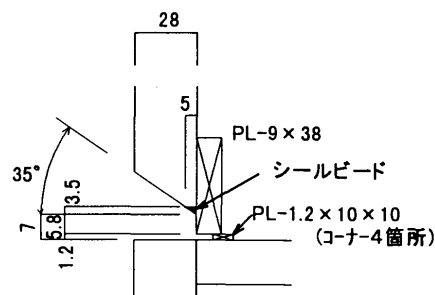


図5 開先形状

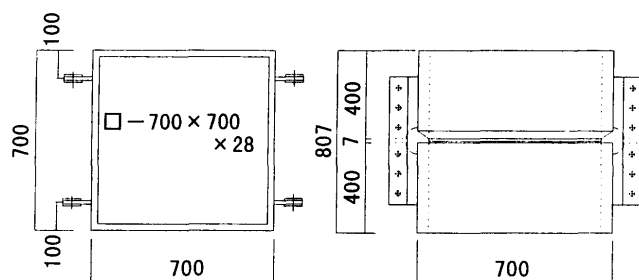


図6 溶接ロボット技量試験の試験体

(2) 試験結果

上記の試験結果は全てについて合格であった。溶接ロボット技量試験結果を表5に示す。コーナー部のマクロ試験片を写真3に示す。

表5 溶接ロボット技量試験結果		単位: N/mm ²	
試験・検査項目		オペレータA	オペレータB
非破壊試験	外観検査	合格	合格
	超音波探傷試験	合格	合格
	マクロ試験	合格	合格
破壊試験	引張試験	破断強度 584	589
	試験	破断位置 母材	母材
	表曲げ試験	合格	合格
	裏曲げ試験	合格	合格
	側曲げ試験	合格	合格

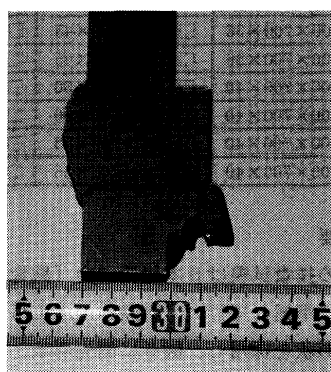


写真2 コーナー部のマクロ試験片

5. 溶接ロボット施工

5.1 準備作業

作業開始時の準備作業は装置などの養生シートの除去、電源の入力とガスボンベの開弁、2次電源ケーブル、制御ケーブル、ガスホースの接続、装置類の点検などの作業である。前日の作業終了状態によってはロボット本体とレールなどの取付け作業が加わり、この作業時間は70分から90分であった。

溶接完了後、次柱の準備作業（段取り替え）は1次電源ケーブルと1次ガスホースの引き回し、2次電源ケーブルと制御ケーブルなどの脱着、ロボット本体とレールなどの取外し・取付け、走行台車の移動などの一定作業である。走行台車の移動時間を除く段取り替え時間は60分から75分であった。

5.2 溶接作業

(1) 溶接手順

実施した溶接作業の溶接手順を図7に示し、溶接作業状況を写真

3に示す。この溶接作業はオペレータ1名と手元1名で行った。

(2) オペレータの主な作業

- * 溶接ロボットの適用可否の判断
- * 溶接ロボットの設置および操作
- * 溶接ロボットエラー発生時の対応
- * 溶接状況の監視
- * 溶接欠陥の発生防止および欠陥補修

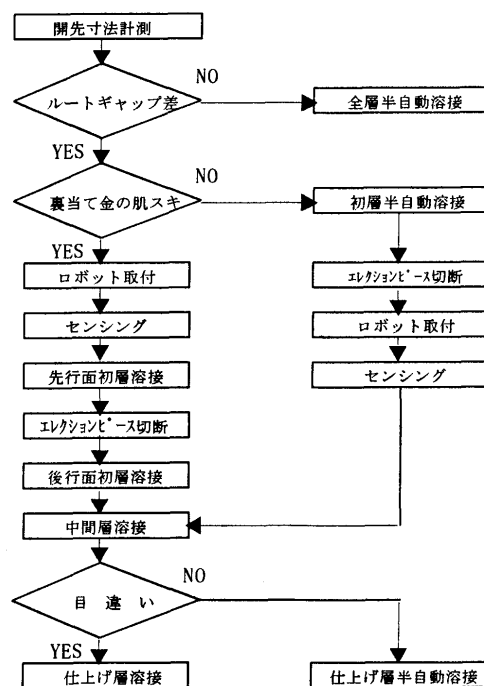


図7 溶接作業手順

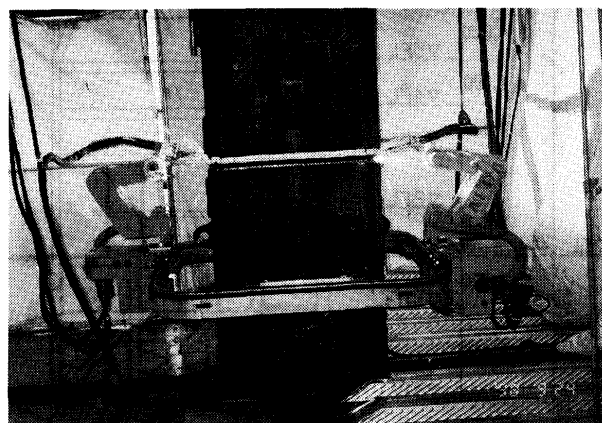


写真3 溶接作業状況

5.3 走行台車の移動

当現場の床は合成デッキプレートであり、キャタピラ式走行台車の安全性は走行試験で確認してある。走行台車の移動の際、デッキプレートの溝に直行方向と梁部分では型枠用合板を敷いてデッキプレートを養生した。しかし、工事時の環境であり、デッキプレート上に鉄筋、仮設物、張った状態の鉄骨歪み直しワイヤなどの障害物があり、それらの盛替えや迂回をして移動したために、約3分の移動時間が数時間に延びるケースがあった。

5.4 現場養生

(1) 雨養生

作業期間中、例年になく雨天日が多く、湿度が高い日が続いた。このために溶接ワイヤなどの品質管理の他に、コンピュータを内蔵する制御装置、ロボット本体などを作業後にシートで覆い、雨養生の管理に留意した。

(2) 防風養生

溶接ロボットのシールドガスは80%Ar+20%CO₂混合ガスを使用し、許容最大風速は2m/secであり、風に対する養生は不可欠である。本工事では簡易な防風スクリーンと養生シートを併用した。しかし、この防風設備は平面的に大きく、突風による上からの風の巻き込みが生じたために強風時、鉄骨柱に付けられた梯子用ピースを利用して上から局所的防風養生を行った。

安定した溶接品質を得るには局所的防風と防風スクリーンの併用が非常に効果的である。

5.5 安全管理

溶接ロボットには、施工階の分電盤から200および100ボルトの1次ケーブル、走行台車から2次ケーブルなどの配線があり、その点検と電動グラインダーなどの電動工具に対して作業前点検を実施した。

2台の走行台車の移動は、事前にデッキプレートの栓溶接および開口部周りの状況を確認してから走行した。

6. 施工結果

6.1 施工実績

(1) 溶接データ

溶接作業は平成10年7月中旬～平成10年9月末間に実施し、この溶接ロボットを5節から7節の柱・柱継ぎ手箇所約22%に当たる12箇所に応用した。

溶接作業中の溶接データを表6に、設計と実測の溶接金属の溶着量(6mm換算溶接長)を表7に示す。

表6から、実測値は設計値を上回り、最大28%増である。この増加要因は鉄骨製品精度および鉄骨建方精度が考えられ、大きな溶接時間及びコストの増加となっている。

従って、工場における鉄骨の製作精度管理と現場における鉄骨建方精度管理が課題となる。

(2) 作業時間

準備作業時間と溶接作業時間を図8に示す。

1) 準備作業時間(段取り替え時間)

準備作業時間は、溶接柱に対して5.1節に示す作業時間などの合計時間である。

5.3節に示す理由で、移動時間は準備作業時間に含めていない。

準備作業時間は最低60分から最大90分となり、平均73分であった。これは朝から準備作業をスタートするケースが大部分であり、例年になく雨天日が多かったために、走行台車の雨養生の取り外し作業、配線などの作業を全て行ったことにより予定以上に時間がかかった。

この準備作業時間(段取り替え時間)は柱サイズの大小に関わらずほぼ同じと考えられる。下記に示す溶接作業時間に対する段取り

替え時間の割合は板厚40mmで32～47%、板厚32mmで40～58%となる。柱サイズが少なくなると、段取り替え時間の割合は大きくなり、溶接ロボットの稼働率が下がる結果となる。稼働率を上げるためには、段取り替え時間の短縮が重要課題である。

2) 溶接作業時間

溶接作業時間はタッチセンシング、初層から仕上げ層、溶接スラグ除去、グラインダーなどによる補修、補修溶接までの合計時間である。

溶接作業時間は板厚40mm柱で平均190分、板厚32mm柱で平均154分、板厚28mm柱で平均176分であった。雨のために3本の柱(板厚28mm)の溶接作業が中断した結果、溶接時間が板厚32mmより多くかかった。

表6 溶接データ

溶接層	電流(A)	電圧(V)	速度(cm/分)	ガス流量(l/分)	入熱量(KJ/cm)
初層	200～330	25～31	22～30	35～40	11.3～14.0
中間層	200～330	25～31	22～36	35～40	6.7～14.5
仕上げ層	140～240	25～28	30～45	35～40	4.0～8.7

表7 設計と実測の溶接金属の溶着量(6mm換算溶接長)

柱記号	板厚(mm)	柱サイズ(mm)	実測開先寸法(mm)	実測値(m)	設計値(m)	実測値/設計値
5C7F	40	□700	10.4	151.7	130.4	1.16
5C7G	40	□700	9.0	143.9	130.4	1.10
5C10G	40	□700	8.4	139.9	130.4	1.07
6C7F	32	□700	11.2	110.6	89.9	1.23
6C6G	32	□700	12.3	115.5	89.9	1.28
6C7G	32	□700	11.5	112.0	89.9	1.25
6C7G	32	□700	12.0	114.4	89.9	1.27
6C9G	32	□700	11.5	110.6	89.9	1.23
6C10G	32	□700	11.1	108.9	89.9	1.19
7C6G	28	□700	9.9	85.0	72.4	1.17
7C7G	28	□700	10.6	87.7	72.4	1.21
7C8G	28	□700	9.1	87.7	72.4	1.21

注) 実測開先寸法; 実測ルートギャップ値の平均値
実測値; 実測開先寸法に基づく溶着量
設計値; 設計開先寸法に基づく溶着量

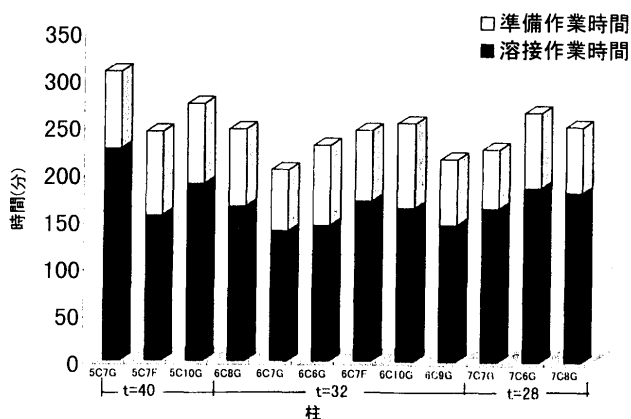


図8 準備作業時間と溶接作業時間

6.2 溶接品質

(1) 外観検査

一般に溶接ロボットを用いた横向きの完全溶け込みレ型突き合わせ溶接では、仕上げ層(最終層)下端にビードの垂れ落ちが生じやすい。本工事のロボット溶接においては、写真4に示すように非常に美しいビードが得られ、外観検査はすべて合格であった。

一部の柱ではオペレータが溶接ロボットが仕上げ層の作業に入る前に、中間層のビードの垂れ落ち部分、コーナー部の不成形部分をグラインダーなどで補修作業を行っている。

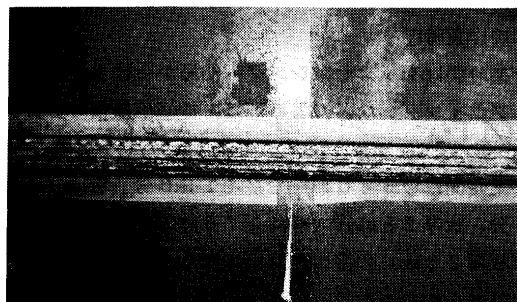


写真4 溶接外観

(2) 超音波探傷試験

溶接ロボットの検査箇所数は合計144箇所であり、超音波探傷試験の合格率は97.2%であった。通常の半自動溶接と比較しても良好であった。欠陥は4箇所であり、すべて下側柱面の融合不良であった。その原因はねらい位置のずれであり、これはタッチセンシング精度と建方精度に起因している。

6.3 溶接コスト

柱サイズが□700、板厚32に対する溶接コストの構成を半自動溶接と溶接ロボットについて図9に示す。半自動溶接は人件費が74%を占め、機械損料がわずか7%であるが、ロボット溶接は人件費54%と少ないが、機械損料25%と約3倍となっており、機械損料が大きな割合を占めている。なお、機械損料は溶接稼働日のみとしている。

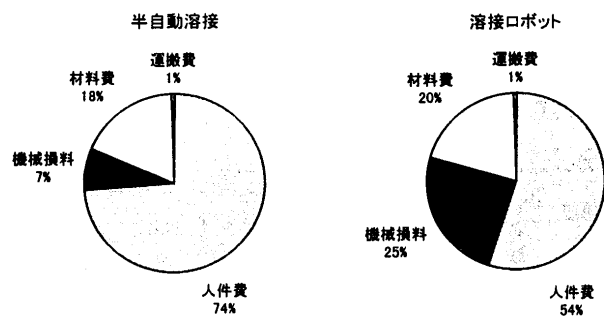


図9 溶接コストの構成

7. 今後課題と方向性

7.1 溶接ロボットの溶接性能

(1) 自己判断機能

現状ではオペレータが溶接ロボットの仕事を管理して、溶接ロボットの仕事の不具合を見つけだし、必要に応じて補修、成形加工を行っている。しかし、オペレータが看過してしまう場合もあり、今後、ロボット自身に自己判断させて溶接中の不具合を検出させるべきである。そのためには、アーク発生時に使用できる検出装置の開発が必要である。

(2) 許容範囲の拡大

現状の溶接ロボットは、溶接技能者に比べるとその作業の許容範囲は狭い。現場の鉄骨精度を勘案すると溶接ロボットの作業の許容

範囲を広くすることが必須である。

7.2 鉄骨精度

現場に於ける鉄骨接合部の精度は現場溶接の品質、作業能率を大きく左右することになる。この鉄骨精度は鉄骨部材の製品精度と3次元的な鉄骨建方精度の組み合わせであり、厳しい精度管理が要求される。従って、鉄骨製作メーカーの製品管理と現場の鉄骨建方管理の総合的な鉄骨精度管理が必要である。そのために、3次元的な鉄骨建方精度計測システムを導入し、良い結果が得られた例がある。

7.3 溶接コスト

(1) 溶接作業量

オペレータ1人当たりの溶接作業量を大幅に上げるためには、溶接ロボット装置の軽量化とコンパクト化によって、段取り時間を短縮して稼働率を上げ、また溶接ロボットの操作を簡便にすることで、オペレータの取り扱い台数を増加させることが必要である。

(2) オペレータ資格

溶接ロボットのオペレータ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、現状では横向き溶接有資格者にすることが多い。今後、溶接ロボットのオペレータを対象とした新たな資格制度が望まれる。

(3) リース化

鉄骨工事に於ける溶接作業日数は、例えば18日建方サイクル(1層3節)のケースで3日から4日であり、一般的には残りの日数の機械損料負担が発生する。従って溶接ロボットの稼働率を上げることが必須となる。しかし、1社で複数台の溶接ロボットを保有して採算ベースに合わせることは難しいと考えられ、溶接ロボットを普及させる最適手段としてリース化が望まれる。

8. おわりに

溶接ロボットを本工事に採用して、12箇所の柱・柱継ぎ手溶接を行った。その溶接品質は有資格の溶接技能者による溶接品質と同等以上であり、特に溶接ロボットの溶接ビード外観は半自動溶接と比較して美麗であることが確認できた。

今後、溶接ロボットを建設現場に普及させるための課題は、「溶接ロボットの溶接性能」を更に上げ、鉄骨製品精度と鉄骨建方精度を合わせた「鉄骨精度」の向上が必要であり、その「溶接コスト」を在来工法の価格に近づける方策を早急に見つけ出すことである。

謝 辞

ロボットメーカーの日立造船(株)と鉄骨製作メーカーの松尾橋梁(株)の方々に協力を得たことを謝意します。

参考文献

- 1) 社団法人日本原子力産業会議原子力システム研究懇話会編「原子力と先端技術」P1~P17
- 2) 社団法人日本溶接協会ロボット溶接研究委員会編「建築鉄骨における溶接ロボットの現状と展望」P117~P164
- 3) 片野彦一(西松建設(株))・脇坂達也((株)大林組)・篠崎徹(戸田建設(株))・滝本隆(株)・((社)建築業協会)「建設作業のロボット化に関する調査研究」・Questionnaire on Robotization in Building Week for Chartered Architects
- 4) 西多致;「新型現場溶接ロボットの開発—一般鉄骨造ビルへの適用」'98-8月号鉄鋼技術P51~P55 鋼構造出版(株)

[1998年10月19日原稿受理 1999年2月8日採用決定]