

# 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

## DEVELOPMENT OF MULTI-LAYER WELDING ROBOT FOR FULL PENETRATION FLAT POSITION WELDING CONNECTION IN STEEL STRUCTURE AND A STUDY ON MECHANICAL PROPERTIES OF THE CONNECTION WELDED BY IT

中込 忠男<sup>\*1</sup>, 古屋 重彦<sup>\*2</sup>, 土橋 博明<sup>\*3</sup>, 軽部 正彦<sup>\*4</sup>, 山本 聖<sup>\*5</sup>  
*Tadao NAKAGOMI, Shigehiko FURUYA, Hiroaki TSUCHIHASHI,*  
*Masahiko KARUBE and Kiyoshi YAMAMOTO*

In steel structures, the full penetration multi-layer welding is used in a connection of beam flange and column one. We have developed a flat position multi-layer welding system by introducing a robot to the CO<sub>2</sub> gas shielded arc welding where semi-automatic welding has been used. In this paper, first we explain the structure of welding system, followed by the results of mechanical property test and a full-size cyclic bending test. These mechanical properties were compared with the semi-automatic arc welding zone welded by skilled welder to evaluate. From these experiments, we conclude that the welding robot can be used for welding of Beam-Column connections in steel structures.

**KEYWORDS:** *Welding robot, Full penetration, Beam to Column connection, Steel Pipe Structure*  
溶接ロボット, 完全溶け込み, 柱梁溶接接合部, 鋼管構造

### 1. まえがき

一般に鉄骨造建築物の製作・施工に溶接作業は欠かせない技術である。しかし、その作業現場は悪環境であり大変な肉体労働であることから、若年工の充足が不十分で熟練溶接工が高齢化し、現状のままでは近い将来に大きな問題となると考える。従って省人化・省力化の要求も高く、その一方で生産性向上と信頼性維持が望まれるところである<sup>3)</sup>。このような背景に対し溶接ロボットの導入による解決が幾つか試みられている<sup>4)</sup>が、建築鉄骨は溶接対象が大きくハンドリングが困難であり、溶接部が入り組みかつ一つの部材の中で離れて位置して部品精度・組立精度とも他の産業と比べて低い。その為に現状では、システム・制御方法とも煩雑になり、溶接ロボット適用の効果が薄いものとなっている。

筆者らは建築鉄骨に適用する観点から、手始めに溶接ロボットが現在の溶接作業方法に取り込み易く、効果が

大きい溶接方法・箇所として、柱梁溶接接合部フランジの完全溶込み突合せ溶接を対象として溶接ロボットに取り組んだ。梁貫通形式では一般的に、柱コア部分のフランジとダイアフラムの接合、ダイアフラムと梁フランジの接合、ブラケット仕口部分と柱シャフトの接合の3段階の手順で製作され、その溶接は同様に下向き多層溶接によって接合されている<sup>5)</sup>。このような状況と溶接ロボットが建築鉄骨で普及する条件<sup>6)</sup>として、単純で使い易かつ故障が無く、対性能比で安価であることを踏まえて、簡単な操作以外はロボットが一貫して溶接を行うレ形開先下向き多層溶接ロボットを開発した。

また角形鋼管構造は、その断面形状が二つの対称軸を持つために平面計画の柔軟性があり、柱部材に用いられることが多い。この構造では梁貫通型の仕口部形態をとる場合が多く、柱コア部の角形鋼管と水平ダイアフラムの完全溶込み突合せ溶接は、通常半自動溶接によって溶

本論文は参考文献1), 2) において発表したものをまとめ、考察を加えたものである。

<sup>\*1</sup> 信州大学工学部社会開発工学科 教授・工博

<sup>\*2</sup> 山梨県商工労働観光部

<sup>\*3</sup> (株)熊谷組

<sup>\*4</sup> 信州大学大学院工学系研究科 大学院生・工修

<sup>\*5</sup> ねじ武精工(株)

Prof., Dept. of Architecture and Civil Engineering, Faculty of Engineering, Univ. of Shinshu, Dr. Eng.  
Prefectural Office of Yamanashi  
Kumagai Gumi Co. Ltd.  
Graduate Student, Graduate School of Engineering, Univ. of Shinshu, M. Eng.  
Nejitake Seiko Co. Ltd.

接線の直線部分を先に溶接し、角部分(曲線部)は後から充填溶接される。このため曲線部分は健全な溶接を行うことが難しい。このような部分にあって、下向き溶接ロボットと溶接中にロボットの動きに合わせてコア部分を回転させる治具とを組み合わせ、コア全周を連続して溶接するシステムも開発した。

建築構造物の、信頼性の要求される部位を施工する溶接ロボットであるので、その溶接施工部分の性能について開発に併せて実験により確認する必要があると考えるが、一般には開発が先行しているのが現状であろう。

本報では、筆者らが開発した溶接ロボットの概要と多層溶接施工の手法を示すとともに、溶接ロボットの行った溶接部の力学的性能を確認するために溶接部の素材試験と溶接継手試験・破壊靱性試験・実大モデル繰り返し試験について、熟練溶接工による半自動溶接との比較検討の結果を報告し、溶接ロボット施工部の特性と施工時の問題点についての基礎資料を提示する。

## 2. 溶接ロボットシステムの概要

溶接ロボットシステムは、半自動溶接で標準的な $35^{\circ}$ レ型開先の突合せ溶接部(ルートギャップ7~9mm、ルートフェイス0~2mm)を対象として開発した。また、このロボットの特徴としてタッチセンサを持っており、それを利用することによって担当者によるロボットへの溶接部断面形状の入力など、面倒なデータ入力等を要しない。施工担当者は溶接部分に可搬な溶接ロボット本体を設置し、併せて溶接部始端・終端検出スイッチの調整を行う。それ以外の準備を必要としない。ロボット施工条件の設定を確認し、スタートスイッチが押された後は、多層溶接作業を終了まで人手を介すること無く自動的に行う。そのため施工担当者の時間的、体力的負担は少なく、複数台の同時使用や他の作業を同時に行うことが可能であり作業能率の向上が考えられる。また特に監視を必要としないために、熱やアーク光による施工担当者の疲労が軽減され、高品質の溶接が始業時から終業時まで安定して得られる。半自動溶接は溶接工の技量の差や体調によって施工部の性能がばらつくが、ロボットでは高水準の溶接を誰でも継続して行うことができる。

### 2. 1 溶接ロボットの構成

開発した溶接ロボットの構成を図1に示す。ロボット本体・制御装置・溶接電源・ワイヤー送給装置・モニター用パソコンで構成されている。

溶接ロボット本体は、溶接トーチ用直交座標軸3軸と溶接部断面を測定するタッチセンサ用の上下方向のみ独立な1軸から構成され、パルスモータによって駆動される。図2に溶接ロボット本体の概略を示す。適用する梁

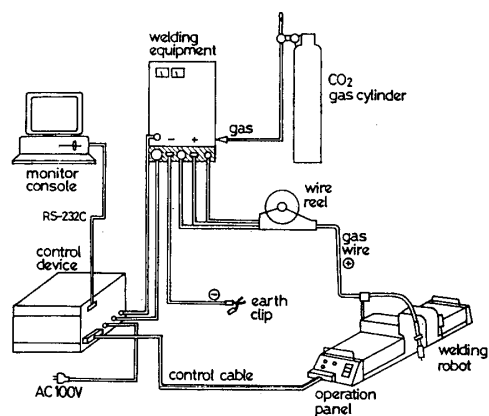


図1 溶接ロボットシステムの構成

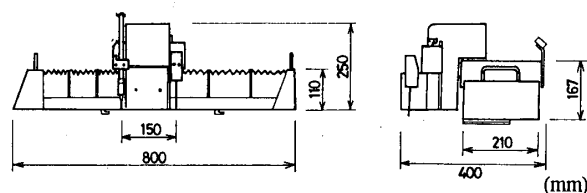


図2 溶接ロボット本体の概要

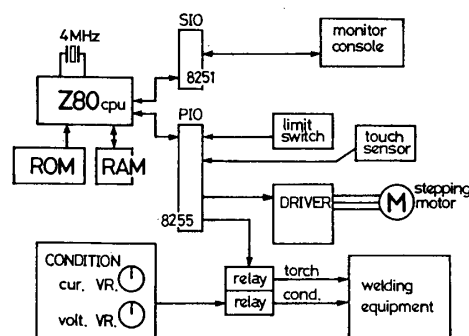


図3 制御装置の構成

フランジ厚・梁幅程度にロボット動作範囲を限定した。溶接箇所へ持ち運び、溶接対象に直接取り付けられるために約20kgの軽量小型に製作してある。溶接時には断面形状によってウィービングを行っている。ウィービングパターンは、一般的に用いられている台形パターン<sup>7)</sup>ではなく矩形パターンを用いている。

制御装置内部にはボードコンピュータ・入出力ボード・パルスモータドライバ・溶接条件設定器等が組み込まれている。制御装置の構成を図3に示す。CPUはZ80 (4MHz)×1を用い、システムの制御プログラムは、読み出し専用メモリ (ROM) に書き込まれている。CPUは多層溶接の制御と溶接部断面形状測定の制御の他、ロボット本体の動作や溶接電源の制御・モニター用パソコンへのデータ送信等の全てを行なっている。溶接電流・電圧は条件設定器を並列に設置し、入出力ボードを介してリレーにより条件を切り換えている。条件設定器の各条件は試行錯誤の末に決定したものであり、原則として固定であ

る。一次側電流・電圧の変動等に際して、電流・電圧は施工担当者の判断で微調整が可能であるが、初期導入時や設備変更時以外には操作の必要はない。

一般に断面形状の測定を行わない溶接ロボットでは、断面形状データの入力やティーチング等を行い、数多くの溶接施工記録を基に構築された溶接条件データベースを用いて溶接条件を設定し、積層パス数に基づくオープンループ制御で溶接施工される<sup>8)</sup>。開発した溶接ロボットでは、多層溶接時の各パス毎にタッチセンサーによって断面形状を測定し、数多くの1層溶接ビード形状と多層溶接積層形状の記録データを基に作成した溶接条件設定アルゴリズムによって、実際に積層された溶接ビード断面形状の特徴点(2.2にて後述)に注目して溶接条件を設定する。そのため、溶接箇所毎にデータベースを参照し溶接施工条件を設定する方法に比べ、多くのコンピュータハードウェアを要しないので、ボードコンピュータで全ての制御が十分に可能となっている。

溶接電源・ワイヤ送給装置は、建築鉄骨で一般に使用されているCO<sub>2</sub>半自動溶接用のものを外部から制御できるように改造して使用している。

モニター用パソコンは、ロボットがセンシングにより得た開先形状やビード断面形状・溶接条件をディスプレイ上に表示したり、必要に応じてディスクに保存する場合に使用される。このデータを用いて、溶接後に積層状態の確認や溶込み形状の推定ができ、溶接施工管理の貴重な資料として利用が可能である。これらのデータ管理を行わない場合は不用である。

角形鋼管下向き溶接用ロボットシステムは、水平ダイアフラムと角形鋼管の柱コア部分の全周溶接を、全周にわたり連続して下向き溶接できるように下向き直線溶接ロボットとワーク回転治具を組み合わせ、多層溶接中にロボットから制御できるように構成されている。角型鋼管の曲線部分の溶接では、溶着量が多く、突合せ溶接のため入熱量が大きいことから、水平ダイアフラムが溶接部側に変形してしまうことが多い<sup>6)</sup>。この変形が起これると水平ダイアフラムと梁フランジの突合せ溶接時に障害となってしまう。全周溶接ロボットシステムでは回転治具によるダイアフラム隅角部の拘束によってこの変形が防止され、溶接中に回転させて連続溶接することによって曲線部も良好な溶接が行われる。

## 2. 2 多層溶接方法

多層溶接のフローチャートを図4に示す。溶接ロボットは、まず全ての溶接作業に先立ち対象溶接部の断面形状を測定する。その測定データを基に、溶接部開先形状の特徴点であるPA, PB, PC点(図5)を抽出する。これらの点から母材板厚・ルートギャップ・開先角度等の情報が自動的に得られる。断面形状が終了条件を満たしてい

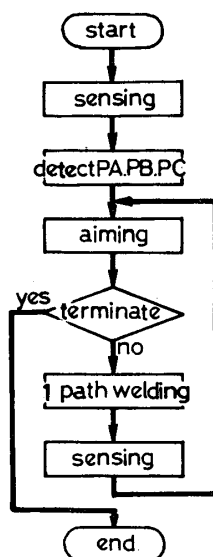


図4 多層溶接の

フローチャート

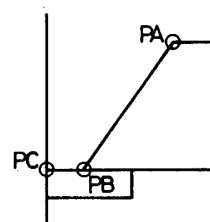


図5 溶接開先断面の特徴点

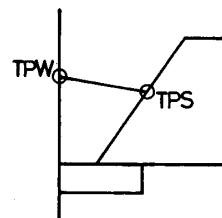


図6 ビード断面形状の特徴点

る場合は多層溶接を終了し、それ以外の場合は断面形状データから、ビード断面形状の特徴点であるTPS, TPW点(図6)を抽出し、この2つの点と先に得られた開先形状から溶接狙い位置・溶接ウィービング幅・溶接電流・アーク電圧・溶接速度を設定する。この設定に溶接パス数は関係しない。溶接条件設定に基づいて1パスの溶接を行うと、ロボットは断面形状を再度測定し、その測定データを基に多層溶接を終了するまで、何回でもTPS, TPW点の抽出以降を繰り返す。断面形状センシングに要する時間は、板厚25mmのレ型開先突き合わせ溶接部において25秒程度である。

溶接ロボットは1パス溶接毎にセンシングを行うため、パス間の時間が長くなり、パス間温度が上がりやすく、連続溶接等によって生じる溶着金属結晶粒の異常成長による力学的性能の劣化が起これにくい<sup>9)</sup>。アルゴリズムによって、溶接断面形状に応じた溶接条件を設定するため、多層溶接途中からの施工や溶接対象の変化に追従することが、特に配慮せずに自動的に行われる。またアルゴリズムの構成にあたっては、拡張性に気を配り、僅かな変更でルートギャップや開先角度に追従できるよ

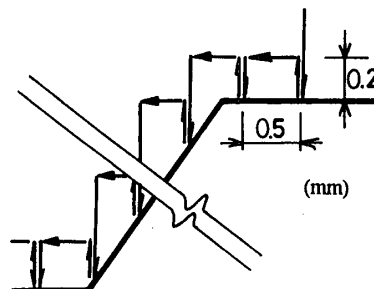


図7 ステッキセンシング模式図

うに構成されている。

角型鋼管下向き溶接ロボットシステムでは、直線部と回転治具を協調動作させた曲線部の溶接で、溶接条件(電流,電圧,速度)を変えて、溶融池先行の防止や余盛形状の適正化を図っている。

## 2. 3 溶接断面測定方法

開発した溶接ロボットは、タッチセンサを用いて動作範囲内をステッキセンシング<sup>10)</sup>し、動作方向と接触点座標から、溶接対象の断面形状を判断・測定する。図7にその動作の模式図を示す。図8は測定したビード断面形状をモニタ用パソコンに表示したものの一例である。開先形状・溶接ビード断面形状が明瞭に示されている。図中の矢印はトーチ狙い位置を示している。一溶接ビード中の二つの矢印は、ウィービングの幅を示している。

タッチセンサには、構造が単純な専用の接触プローブ型タッチセンサ<sup>11)</sup>を用いている。このセンサはワイヤアース型タッチセンサに比べて、断面形状の測定精度が高く、また多層溶接中のパス間等、測定対象が高温の場合であっても、同じ精度で安定した測定が可能である。断面形状測定用のセンサには、PSD (Position Sensitive Device :位置検出素子) や CCD (Charge Coupled Device :電荷結合素子) 等を用いた非接触式光学センサ等<sup>12)</sup>もあるが、測定対象の温度が低温から高温まで変化する中で、安定した高精度の断面形状測定を安価に実現できない。また他のアークセンサや倣いセンサ等<sup>13)</sup>では、溶接部断面形状を測定するには適していないので、多層溶接中に溶接ビードの積層状況等をフィードバックすることが困難であり、溶接部で異常が起きて対処できず、溶接工による溶接部の監視が不可欠である。開発した溶接ロボットでは、実際に行われている溶接の積層状況を多層溶接途中に把握し、次パスの溶接の制御に反映するため、溶接中の溶接対象の変化・溶接中断後の再施工・溶接時トラブルによる1パス欠落等の対処が特別な対応をせずに容易にできる。

## 3. 下向き直線溶接ロボットの溶接部性能

### 3. 1 実験概要

下向き直線溶接ロボットによる溶接部と熟練溶接工による溶接部の力学的性能を比較検討するために、SM490 鋼を用いた試験材に突き合わせ溶接を行い、それぞれについて衝撃試験・硬さ試験・溶接十字引張試験・破壊靱性試験を行った。その開先形状と溶着金属の積層状態を図9に示す。また供試鋼板の機械的性質と化学成分を表1に、施工時の溶接条件を表2に示す。溶接に際し、溶接部に付着した水分が無くなる程度の予熱を行った。半自

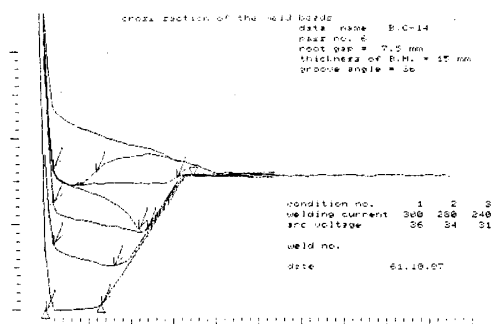


図8 多層溶接時のビード断面形状

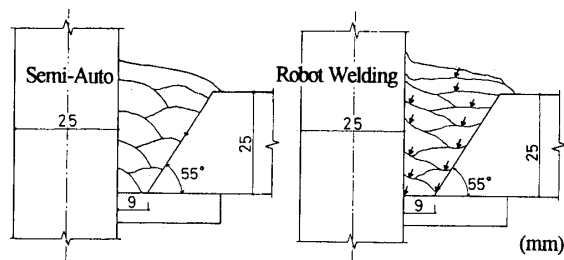


図9 溶着金属の積層状況

表1 供試鋼材の機械的性質と化学成分

Shape	Yield Stress (N/mm <sup>2</sup> )	Tensile Strength (N/mm <sup>2</sup> )	Elongation After Fracture (%)	Chemical Composition (%)						
				C	Si	Mn	Cu	Cr	P	S
PL-25	343	519	30	16	35	145	15	15	19	6
PL-50	333	529	33	18	38	148	-	-	23	7

表2 溶接条件

Welding	Welding Current	Arc Voltage	Welding Speed	Gas Flow Rate	Wire Extension	Inter-Pass Temperature
Semi-Auto	300A-350A	25V-39V	50cm/min~70cm/min	30l/min	20mm	230°C-250°C
Robot	200A-300A	28V-36V	50cm/min	25l/min	25mm	200°C-250°C

preheat: 50°C; post heat: Nothing

動溶接は最良の溶接条件を溶接工の判断で決定して施工した。ロボット溶接に比べて、入熱・パス間温度とも高い溶接条件となった。共に溶接後の超音波探傷試験で欠陥が無いことを確認している。

### 3. 2 衝撃試験

試験片形状はJIS Z 3111 4号試験片を用い、ノッチ断面が溶着金属・BOND部・熱影響部に位置するように各20体採取した。試験結果は近似遷移曲線式(1)・式(2)<sup>14)</sup>に最小2乗法によって近似した。試験結果と近似遷移曲線を図10に示す。また近似式の諸係数とその0°C換算値

$$vE = \frac{vE_{shelf}}{2} \left( 1 + \tanh(\alpha(T - vT_{re})) \right) \quad \dots(1)$$

$vE_{shelf}$ : Shelf Energy  
 $\alpha$ : Energy Coefficient  
 $vT_{re}$ : Transition Temp.

$$B = 50 \left( 1 - \tanh(\beta(T - vT_{rs})) \right) \quad \dots(2)$$

$\beta$ : Fracture Coefficient  
 $vT_{rs}$ : Transition Temp.

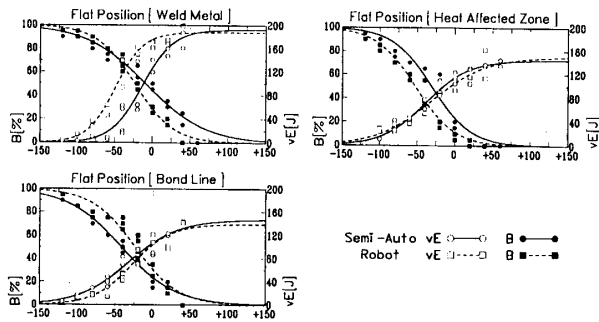


図 10 衝撃試験結果と近似遷移曲線

を表 3 に示す。溶着金属部と熱影響部で、ロボット溶接の遷移温度がより低く良好な結果である。0°C での吸収エネルギーと脆性破面率を見ても同じ傾向である。これはロボット溶接部の入熱・パス間温度が半自動溶接部に比べて低いためであると考えられる。何れにしても 98J を超えた値となっており、ロボット溶接は一般の建築鉄骨での要求性能を十分に満たしていると考えられる。

### 3. 3 ビッカース硬さ試験

溶接部の硬度は、ビッカース硬さ試験器を用いて試験荷重 9.8N・負荷時間 30 秒で測定した。測定位置と硬度分布を図 11 に示す。ロボット溶接部が溶着金属・熱影響部において、半自動溶接よりやや高い硬度を示している。最高硬さは、共に熱影響部で 230Hv 程度であり、良好な溶接であると考えられる。

表 3 近似遷移曲線式の諸係数と 0°C 換算値

		Energy			Fracture		Convert at 0°C	
		Transition Temp.	Coefficient	Shelf Absorbed Energy vEshelf	Transition Temp.	Coefficient	Absorbed Energy vE	Percent Brittle Fracture B
Weld Metal	Semi-Auto	-13.4°C	0.0243	193J	-9.4°C	0.0127	127J	44.1%
	Robot	-49.0°C	0.0272	188J	-23.5°C	0.0196	176J	28.5%
HAZ	Semi-Auto	-38.2°C	0.0174	145J	-30.9°C	0.0192	115J	23.5%
	Robot	-30.7°C	0.0137	151J	-52.7°C	0.0192	105J	11.6%
Bond	Semi-Auto	-32.4°C	0.0132	147J	-41.8°C	0.0140	107J	23.7%
	Robot	-27.6°C	0.0198	139J	-23.6°C	0.0174	104J	30.5%

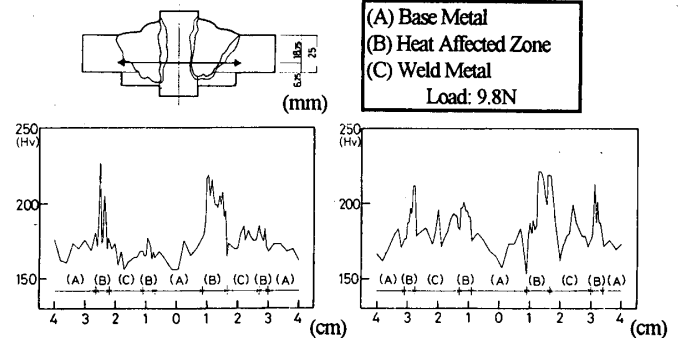


図 11 ビッカース硬さ試験結果

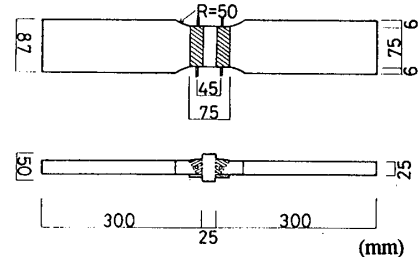


図 12 溶接十字試験体形状

### 3. 4 溶接十字引張試験

試験体形状を図 12 に示す。鉄骨構造の柱梁接合部をモデル化し、柱フランジ相当部の長さを梁フランジ相当部の板厚の 2 倍とした。標点間距離は 45mm として、標点上にスタッドを溶接し変位計を取り付け測定した。載荷速度は毎分 0.03% (弾性域)、0.2% (塑性域) とした。両溶接部とも、3 体を試験した。その荷重-変位関係を図 13 に、試験結果の平均を表 4 に示す。全ての試験体が梁フランジ相当部の母材で破断した。ロボット溶接された試験体は半自動溶接のものに比べて、破断時の変位が少なくなっている。これは溶着金属部の硬度が高いため標点外母材部分の歪の割合が増え、変位として現れていないものであると考える。破断後の溶接部を観察したが、欠陥・亀裂等の異常は見られなかった。

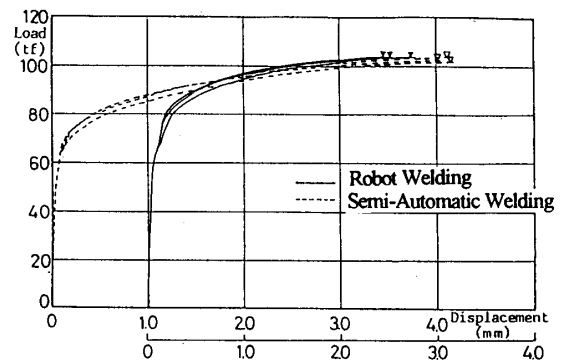


図 13 荷重-変位関係

表 4 溶接十字試験結果

Welding	Yield Stress	Tensile Strength	Elongation After Fracture	Rupture Load
Semi-Auto	367N/mm <sup>2</sup>	540N/mm <sup>2</sup>	9.59%	91.0tf
Robot	423N/mm <sup>2</sup>	544N/mm <sup>2</sup>	5.78%	89.6tf

### 3. 5 破壊靱性試験

試験体形状と採取位置を図 14 に示す。ここで破壊靱性試験体は通常の機械加工による予亀裂でなく、溶接部の実際の破壊起点を考慮して溶接部に不溶着部分を作り予亀裂とし、溶接ルート部分をそのまま亀裂先端とした。載荷速度は載荷点変位で毎分 1.3mm とした。ここで

表 5 破壊靱性試験結果

	J-value at when Brittle fracture occur Jc			J-value at when Crack Start to Propagate Ji
Temperature	-70°C	-45°C	-20°C	15°C
Semi-Auto	7.0kgf/mm	87.4kgf/mm	56.0kgf/mm	9.9kgf/mm
Robot	5.0kgf/mm	8.2kgf/mm	88.7kgf/mm	7.4kgf/mm

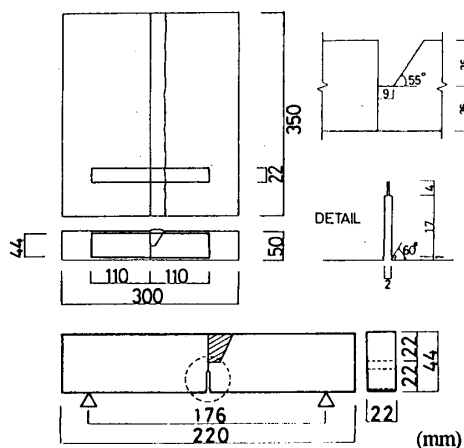


図 1 4 破壊靱性試験体

$J_I$ は交流電位差法によって求めた。また  $J$  値は J.R.Rice の簡便式を用いて計算した。試験は、 $J_I$  については +15°C で、 $J_c$  は -70°C, -45°C, -20°C で、各温度 2 体の試験を行った。図 1 5 に荷重-載荷点変位関係を、表 5 に試験結果の平均を示す。各試験温度において、半自動溶接による試験体の最大荷重が上回っている。また  $J$  値も、-20°C を除いた温度で半自動溶接による試験体が高くなっている。同じように予亀裂を与えた過去の実験結果 16) との比較を図 1 6 に示す。過去の結果と比べ、ロボット溶接の遷移温度が -30°C 程度と十分に低く、通常的环境温度では十分な性能を有していると考ええる。

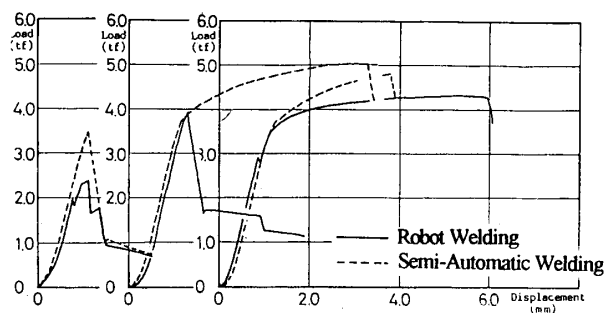


図 1 5 荷重-載荷点変位関係

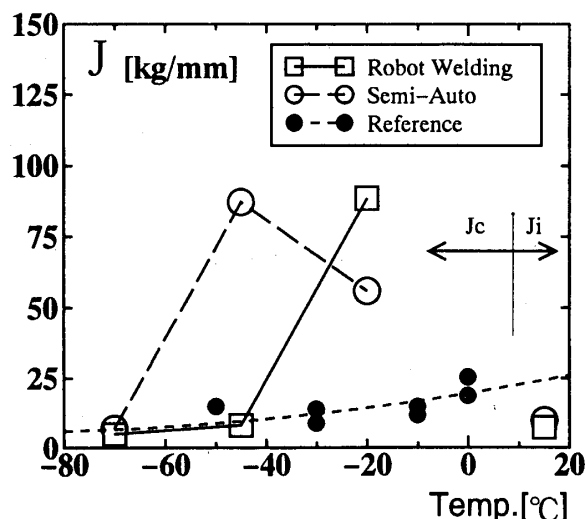


図 1 6 J 値の温度依存性

### 3. 6 まとめ

溶接ロボットの施工部について半自動溶接と比較した結果つぎのようなことがわかった。

- 1) 衝撃試験結果は、半自動溶接に比べ溶接ロボットがより良好な結果を示した。
- 2) ビッカース硬さは、ロボット溶接部が若干高くなったが、共に良好な溶接であると考ええる。
- 3) 溶接十字試験は、ロボット溶接が半自動溶接と同程度の力学的性能を示した。
- 4) 破壊靱性試験結果は、ロボット溶接がやや低い結果となったが、過去の実験結果と比較して問題がない十分な値を示した。

表 6 供試鋼材の機械的性質と化学成分

Shape	Yield Stress (N/mm <sup>2</sup> )	Tensile Strength (N/mm <sup>2</sup> )	Elongation After Fracture (%)	Chemical Composition (%)							
				C	Si	Mn	Cu	Cr	P	S	
				×100					×1000		
□-300×300×16	343	441	41	16	5	58	-	-	16	5	
PL-32	265	431	30	17	20	65	-	-	19	10	
□-250×250×12	314	441	42	17	1	68	-	-	18	9	
PL-36	274	441	26	17	16	57	-	-	24	15	

表 7 溶接条件

		Welding Current	Arc Voltage	Welding Speed	Gas Flow Rate	Wire Extension
Semi-Auto	Straight Part	260A~80A	38V	24cm/min~73cm/min	30l/min	20mm
	Corner Part	140A~160A	30V	9cm/min		
Robot	Straight Part	240A~300A	32V~36V	50cm/min	25l/min	25mm
	Corner Part	190A~240A	26V~30V	6cm/min~11cm/min		

preheat: Nothing, post heat: Nothing

### 4. 角形鋼管全周溶接ロボットの溶接部性能

#### 4. 1 実験概要

角形鋼管全周溶接について、ロボット溶接部と半自動溶接部の力学的性能を比較するために、それぞれの溶接部について超音波探傷試験・溶接部マクロ試験・ビッカース硬さ試験・シャルピー衝撃試験を行い、その結果と実大モデル繰り返し実験の結果を基に、両溶接部を直接比較した。使用鋼材は SS-400 材とした。その機械的性

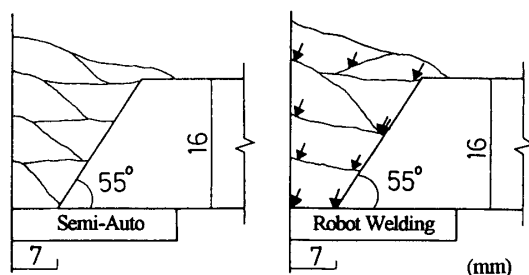


図 1 7 溶着金属の積層状況

質と化学成分を表6に示す。溶接施工時の溶接条件を表7に、そしてその積層状態を図17に示す。溶接ワイヤーには、通常の施工に準じて JIS Z 3312 YGW-11 規格品を用いた。

#### 4. 2 超音波探傷試験

マクロ試験体とシャルピー衝撃試験片を採取する溶接部について超音波探傷を行った。試験には直線部・曲線部とも接触面が平面の斜角探触子を用いた。その結果、ロボット溶接の直線部分に欠陥は認められなかった。全周溶接開始点で若干のエコーがあったが、欠陥指示長さは5mm以下であり問題ないとする。曲線部分では、母材板厚16mmに対して深さ17.9mm付近から一様にエコーが認められた。これは溶着金属内の欠陥ではなく、水平ダイヤフラムと裏当金の隙間による反射エコーであるとする。かわって半自動溶接では、直線部と曲線部を分けて溶接するためにその交差付近で若干の欠陥によるエコーが認められた。両溶接とも総じて直線部は、エコー高さに応じた欠陥評価長さ、あるいはその総和について、日本建築学会の超音波探傷試験合格規準を満足した。曲線部については規準が適用できないので、合否の判定は行っていない。

#### 4. 3 マクロ組織

試験片は全周溶接部の図18に示す位置から採取した。超音波探傷試験で裏当金の隙間と思われたロボット溶接の曲線部分は、実際には裏当金への溶け込み不足による欠陥であることが確認された。また同じくロボット溶接の曲線部では一層目と二層目の境界で母材への溶け込みが少なく、欠陥となる可能性が大きいことが観察された。ロボット溶接では半自動溶接に比べて最終ビードの溶着量が多く、曲線部で部分的なオーバーラップの傾向が確認された。これは直線部から曲線部へ溶接を連続させるときに、曲線部で溶融池が先行しがちになりやすいためとする。これら不具合となる可能性が高い点については多層溶接条件設定アルゴリズムの若干の調整によって対応が十分可能なので対策を講じた。一方、半自動溶接の直線部と曲線部の交差付近の欠陥は、スラグの巻き込みであることが確認された。

#### 4. 4 ビッカース硬さ試験

硬さ試験はマクロ試験片を用いて、前章と同様の方法で行った。その測定位置と硬度分布を図19に示す。全ての試験体で溶着金属が母材の硬度を上回っているが、曲線部の母材は角形鋼管製作時に大きな塑性変形を受けているために、直線部の母材より硬度が高い。最高硬さは半自動溶接が240Hv程度、ロボット溶接が230Hv程度と僅かながらロボット溶接部の硬度が低い。これは溶接

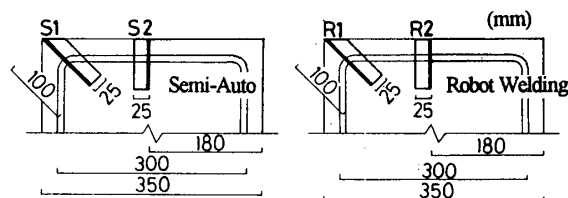


図18 マクロ試験体採取位置

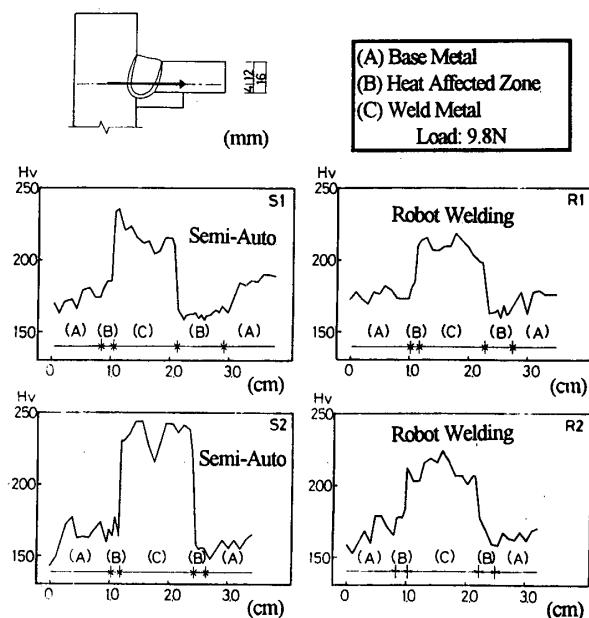


図19 ビッカース硬さ試験結果

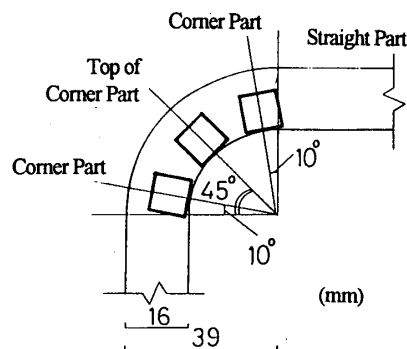


図20 シャルピー試験体採取位置

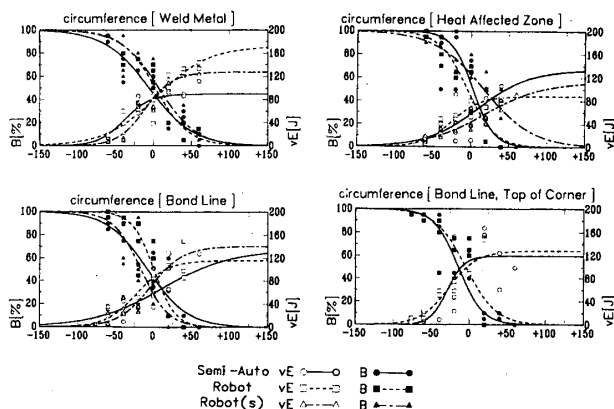


図21 衝撃試験結果と近似遷移曲線

ロボットが、曲線部もワーク回転治具と協調動作させて直線部から連続して溶接を続けるために、溶接電流・電圧を低くしているからであると考え。硬度分布からは適正な溶接であると考え。

#### 4. 5 シャルピー衝撃試験

試験片は、半自動溶接・ロボット溶接の曲線部分とロボット溶接の直線部分からノッチ断面が溶着金属部・BOND部・熱影響部に位置するように各16体採取した。特に曲線部の頂点からはBOND部を16体採取した。試験片の採取位置を図20に示す。試験結果は前章と同様の方法で整理した。試験結果と近似遷移曲線を図21に、その諸係数を表8に示す。角形鋼管の曲線部分では、何れの採取位置でも、遷移温度・吸収エネルギー(0℃)・脆性破面率(0℃)の全てにおいて、ロボット溶接が半自動溶接より良好な値を示している。ロボット溶接では、熱影響部から採取した試験片を除いて、直線部分と曲線部分が同等の値を示している。これは溶接を連続して行うために均質な溶接が行われるためであると考え。全般に、熱影響部では母材の靱性の影響を受け、やや劣る値となった。同様の傾向がBOND部でもみられる。試験片破面を観察すると、ロボット溶接の曲線部分のBOND部では溶接の層間溶け込み不足による溶接線方向に一樣な筋状の欠陥、半自動溶接の曲線部分のBOND部では充填溶接始末端で母材や溶着金属間での溶け込み不足による面状の欠陥が、破面から幾つか観察された。

#### 4. 6 実大モデル繰り返し実験

試験体は図22に示すような一般的な鉄骨建築物の柱継手部分をモデル化したもので、角形鋼管の直線部方向から載荷するS型と、曲線部方向から対角線方向に載荷するD型の2体である。各試験体とも比較のために片側をロボット溶接、もう一方を半自動溶接としている。試験体は、図23に示す実構造物の層間変形角を考慮した正負交番繰り返し載荷によって破壊に到らせた。両試験体の荷重変位関係を図24・図25に示す。共に層間変形角1/25付近で、角形鋼管の座屈により載荷を終了した。破壊後、全ての溶接部に欠陥・亀裂等の異常は認められなかった。

#### 4. 7 まとめ

全周多層溶接ロボットの施工部について半自動溶接と比較した結果つぎのようなことがわかった。

- 1)ビッカース硬さ試験では、ロボット溶接部が半自動溶接部より若干低い結果となった。
- 2)ロボット溶接では一樣できれいな溶接ビードが簡単に得られるが、一方で半自動溶接の様な部分的な欠陥ではなく、溶接長全体にわたる線状の欠陥となり

表8 近似遷移曲線式の諸係数と0℃換算値

		Energy			Fracture		Convert at 0°C	
		Transition Temp.	Coefficient	Shelf Absorbed Energy v/Shear	Transition Temp.	Coefficient	Absorbed Energy vE	Percent Brittle Fracture B
Weld Metal	Semi-Auto*	-38.2°C	0.0289	90J	-5.4°C	0.0172	81J	43.4%
	Robot	51°C	0.0147	172J	2.9°C	0.0227	80J	53.3%
	Robot(S)	-10.9°C	0.0278	127J	7.4°C	0.0202	82J	57.4%
H.A.Z.	Semi-Auto*	9.9°C	0.0148	134J	2.7°C	0.0352	58J	54.8%
	Robot	-25.4°C	0.0264	88J	-4.7°C	0.0269	70J	43.8%
	Robot(S)	17.9°C	0.0129	114J	17.4°C	0.0154	44J	63.1%
Bond	Semi-Auto*	12.0°C	0.0112	135J	-7.2°C	0.0191	59J	43.2%
	Robot	-21.8°C	0.0248	117J	0.9°C	0.0338	87J	51.6%
	Robot(S)	-3.7°C	0.0234	141J	-16.1°C	0.0280	76J	28.9%
Bond Top of Corner	Semi-Auto*	-28.8°C	0.0455	120J	-14.2°C	0.0313	111J	29.1%
	Robot(S)	-26.7°C	0.0270	128J	-4.3°C	0.0250	104J	44.6%

\*: Semi-Auto, Robot Corner Part, Robot(S) Straight Part

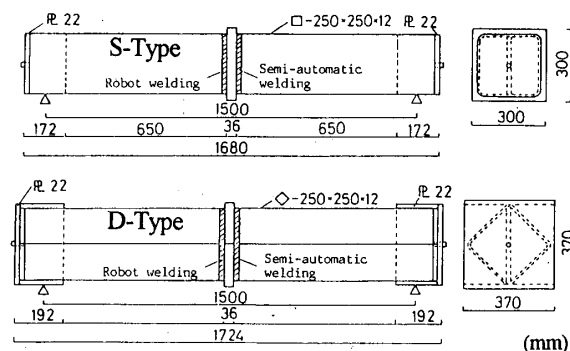


図22 実大モデル試験体

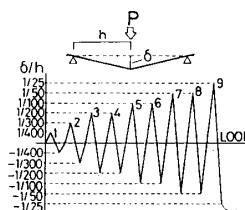


図23 繰り返し載荷計画

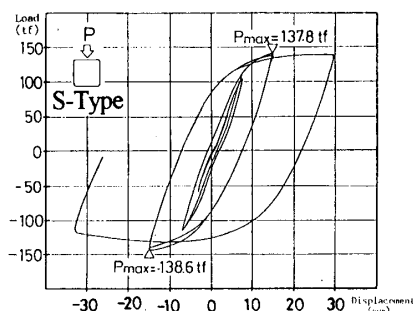


図24 荷重-載荷点変位関係 (S型)

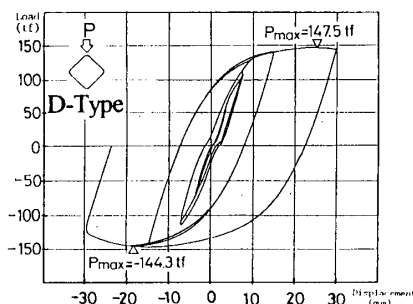


図25 荷重-載荷点変位関係 (D型)



やすいことが衝撃試験片の破面から観察された。

- 3)実大モデル繰り返し試験で、ロボット溶接部が半自動溶接部に遜色ない力学的性能を有していることが確認された。

## 5. 結語

開発した溶接ロボットの下向き直線溶接部と角形鋼管構造の柱梁接合部コア部分の全周溶接について、以下のことがわかった。

- 1)開発した溶接ロボットによる溶接部と熟練溶接工の半自動溶接部とを一連の実験により比較検討した結果、同程度の力学的性能を持ち、建築鉄骨の溶接部として何等支障がないと考える。
- 2)ロボット溶接はロボットの持つ特性から一様できれいなビードが安定して形成され、それにかかる溶接技術者の負担が極端に少なく、技量に依らない。
- 3)半自動溶接では溶接工の技量や体調・心理状態によって施工部分の力学的性能がばらつくが、ロボット溶接では高水準の溶接を誰でも継続して行うことができる。
- 4)ロボットによる角形鋼管の全周溶接は、半自動溶接で直線部と曲線部の交差部付近に発生しやすい欠陥を、連続して溶接することにより防いでいる。
- 5)溶接ロボットは1パス溶接毎に断面形状の測定を行うためにパス間時間が長くなり、パス間温度が上がりにくい。そのため連続溶接等によって生じ易い、溶着金属結晶粒が大きくなることによる力学的性能低下が起こりにくい。

謝辞 研究開発には山梨県工業技術センターの中山信一氏・清水誠司氏・斉藤修氏に多大なるご協力を頂いたのでここに感謝致します。

## 参考文献

- 1)青木博文、中込忠男、古屋重彦、斉藤修、清水誠司、中山信一、山本成治、土橋博明：CO<sub>2</sub>アーク溶接ロボットによる突合せ溶接部の力学的性能の検討、日本建築学会大会学術講演梗概集 pp.817~818, 1986.8
- 2)青木博文、中込忠男、古屋重彦、斉藤修、清水誠司、山本成治、山本美佐夫、山川広行、西山勝、鈴木孝義：CO<sub>2</sub>アーク溶接ロボットによる鋼管多層全周溶接部の力学的性能の検討、日本建築学会大会学術講演梗概集 pp.1037~1038, 1987.10
- 3)野村博一：製造業における脱技能化の現状と対策、溶接学会誌 第61巻第1号, pp.15~18, 1992.1
- 4)和田宏一、南渚夫：橋梁・鉄骨産業における脱技能化の展開、溶接学会誌 第61巻第1号, pp.37~41, 1992.1
- 5)ロボット技術編集委員会：建築鉄骨用アーク溶接ロボット 第5章建築鉄骨におけるアーク溶接ロボット適用拡大のための課題と対策の現状、鉄鋼技術(STRUTEC) pp.44~47, 1990.8
- 6)ロボット技術編集委員会：建築鉄骨用アーク溶接ロボット 第4章鉄骨溶接におけるアーク溶接ロボット適用の現状、鉄鋼技術(STRUTEC) pp.60~63, 1990.5
- 7)野沢正彦：アーク溶接ロボットの現状 4 アーク溶接ロボットの諸機能(溶接機との連動機能)、溶接学会誌 第51巻第9号, pp.730~734, 1982
- 8)村上集、山本直樹、関野昭幸：溶接ロボットの将来 II これからの溶接ロボット ティーチングレスロボット、溶接学会誌 第62巻第1号, pp.23~29, 1993
- 9)中込忠男、矢部喜堂、金本秀雄、横山重和、軽部正彦：鋼構造溶接接合部における溶着金属の強度に及ぼすパス間温度の影響に関する検討、日本建築学会構造工学論文集 vol.36B, pp.333~340, 1990.3
- 10)関野昭幸：ロボット溶接におけるセンサシステムの応用例、溶接学会誌 第60巻第1号, pp.74~80, 1991
- 11)井手栄三、藤村浩史：溶接プロセスにおけるセンシング技術の現状、溶接学会誌 第60巻第2号, pp.121~126, 1991
- 12)飯島剛平、上田澄広：In Process Controlのためのセンシング技術(3) 種々のセンサ応用技術、溶接学会誌 第60巻第2号, pp.139~145, 1991
- 13)荒谷雄：In Process Controlのためのセンシング技術(1) アークセンサの基礎と実際、溶接学会誌, 第60巻第2号, pp.127~132, 1991
- 14)藤本盛久、藤盛紀明、中込忠男、矢部喜堂、石川登：鉄筋コンクリート用棒鋼のシャルピー衝撃特性、日本建築学会論文報告集 第346号, pp.9~19, 1984.12
- 15)藤本盛久、中込忠男、金鍾洛：交流電位差法による SM50A 鋼の破壊靱性値 J<sub>i</sub> と溶接部の靱性試験片について：日本建築学会大会学術講演梗概集 pp.1001~1002, 1985.10
- 16)藤本盛久、橋本篤秀、中込忠男、松村弘道、松下真治、金鍾洛、松崎一明：鋼構造柱はり溶接接合部の脆性破壊に関する実験的研究 その 5 材料試験・破壊靱性試験及び溶接部の硬度：日本建築学会大会学術講演梗概集 pp.1595~1596, 1984.10

(1993 年 6 月 10 日原稿受理, 1993 年 12 月 7 日採用決定)