

建設工事における鉄骨現場溶接作業の自動化と課題 角形鋼管柱および溶接組立箱型断面柱の自動溶接工法の開発

梅津 匡一

建設工事現場における鉄骨溶接作業の技能者不足解消と生産性向上を図るべく汎用可搬型ロボットを用いた自動溶接工法を開発した。現場溶接の中でも特に高度な技量を要する冷間成形角形鋼管柱や溶接組立箱型断面柱を対象に、柱全周の溶接をロボットで行う工法を立案し、基本性能試験および現場施工にて所定の要求水準を満足できることを実証した。また、同工法の汎用化と建設業界への浸透を図るべく技術的課題や運用上の課題を把握した。

キーワード：技能者不足，鉄骨，溶接，自動化，ロボット，生産性向上

1. はじめに

(1) 背景と目的

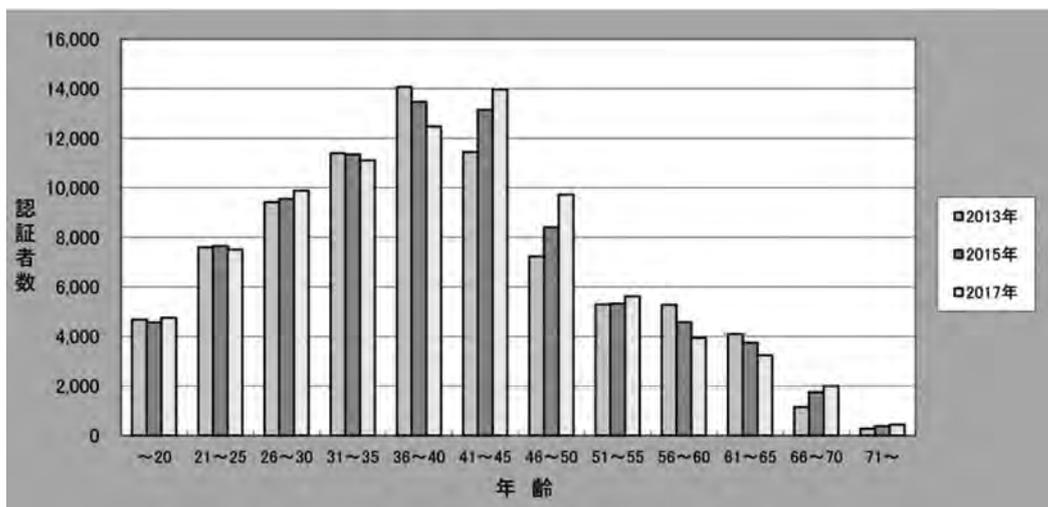
近年溶接技能者の高齢化が進んでおり、今後もこの傾向が続けば熟練者の離職増加に伴う優良技能者不足が懸念される（図—1）。優良技能者の不足は工程遅延を招くほか、品質に影響を及ぼすリスクもある。そこで著者らは、技能者不足を補填し将来も安定した品質や生産性を確保し続けることを目的に、汎用可搬型溶接ロボット（以下「ロボット」）を用いた鉄骨現場溶接の自動化を試みた。

本報では現場溶接の中でも特に高度な技量を要し、これまで自動化が困難であった冷間成形角形鋼管柱（以下「コラム」）、および溶接組立箱型断面柱（以下

「ボックス柱」）の継手溶接を対象としたロボット溶接工法（以下「本工法」）の概要、諸性能、並びに実用的課題について報告する。

(2) 本工法におけるロボットの位置付け

本工法におけるロボットの位置付けとして、従来の半自動溶接工法と本工法における作業手順および作業分担を表—1に示す。開先寸法計測と同計測値に基づく積層条件（層・パス数）と溶接条件（電流・電圧・溶接速度・入熱量・初期狙い位置）の演算処理をロボットが担うことで、溶接管理技術者の事前作業を効率化する。また継続的かつ反復的なトーチの運棒動作も自動化する。一方、溶接前後の検査、ロボット動作条件設定、ビード整形等、複雑な判断や技能を伴う作業を



図版出典「溶接関係の統計」（一般社団法人 日本溶接協会）

図—1 溶接技能者認証者数の年齢構成

表一 現場溶接の作業手順と作業分担区分

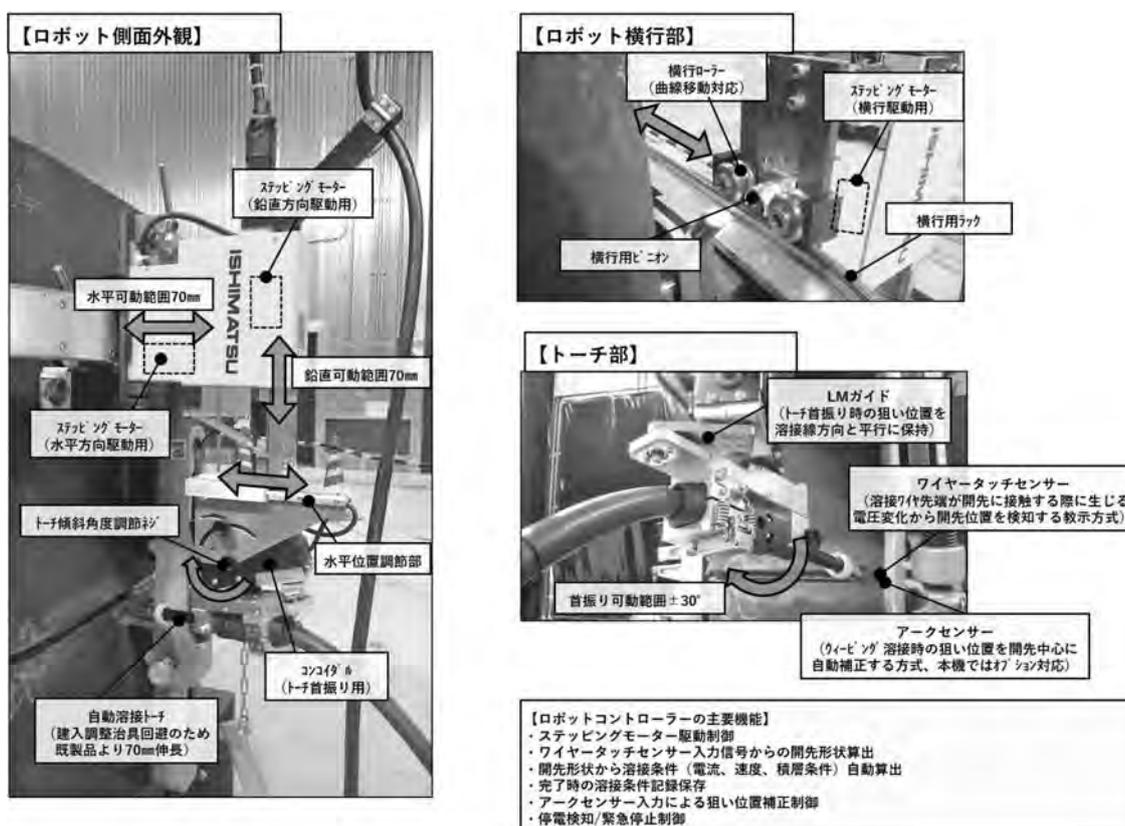
作業内容	半自動溶接（従来工法）		ロボット溶接（本工法）		
	溶接管理技術者	溶接工	溶接管理技術者	ロボット操作者	溶接ロボット
1. 溶接前の自主検査	○		○		
2. 開先清掃		○		○	
3. 使用機材の設置	○	○	○	○	
4. 溶接ロボットの動作設定	-	-		○	
5. 開先寸法の計測	○				○
6. 積層条件（層・パス数）の決定	○				○
7. 溶接条件（電流・速度等）の決定	○				○
8. 溶接ロボットの起動・停止命令	-	-		○	
9. 溶接実施		○			○
10. 積層・溶接条件の微調整（適宜）		○		○	
11. スラグ・スパッタの除去		○		○	
12. ノズル清掃・消耗部品の交換		○		○	
13. ビード不整箇所の整形		○		○	
14. 緊急対応（突風・故障など）		○		○	
15. 完了後の自主検査	○		○		

溶接管理技術者やロボット操作者（以下、「操作者」）が担う。

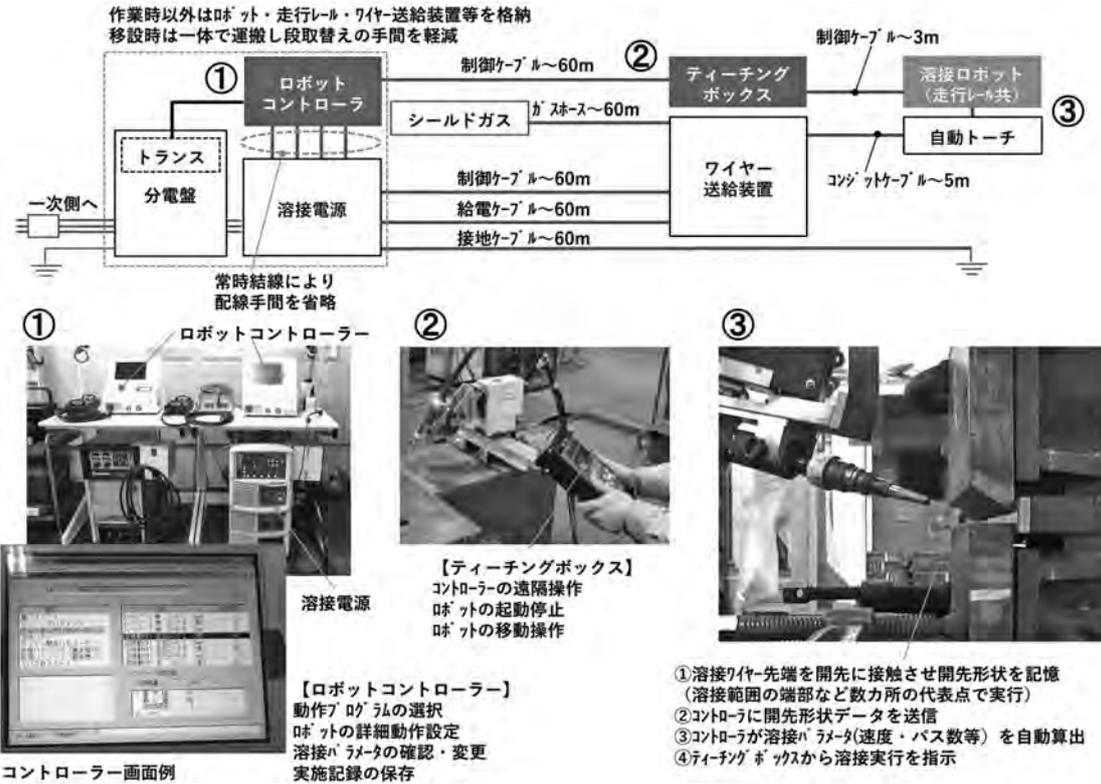
このように、本工法はロボットによる作業の全自動化を指向するものではなく、人間とロボットが相互補完的に作業を遂行することで、現場溶接作業一連の生産性向上を図るものである。

2. ロボット概要

本工法では鉄骨製作工場等において豊富な導入実績を有する汎用可搬型ロボットを採用した。図一2にロボットの各部詳細を示す。採用理由としては、i) 軽量小型で現場における運搬・設置が容易であるこ



図一2 溶接ロボット各部詳細



図一3 溶接ロボットシステム構成

と、ii) 全ての溶接姿勢で使用可能であること、iii) 開先裕度が大きく鉄骨誤差に追従できること、iv) 開先計測や積層条件算出を自動化でき利便性が高いことが挙げられる。

本工法のシステム構成を図一3に示す。半自動溶接において用いられる溶接電源、ワイヤー送給装置に加え、ロボット本体、走行レール、操作用ティーチングボックス、制御用コントローラ（コンピューター）で構成される。本システム移設時における運搬・配線手間の軽減や機器の損傷防止に配慮し、機材一式をユニット化し一体で水平移動や揚重が行える構成とした。

3. 本工法の特徴

(1) 仮固定治具の回避による初層溶接への適用

写真一1に示すように溶接前の柱鉄骨は仮固定治具（以下、「治具」）で連結されているが、治具と干渉する範囲ではロボットを使用できないため、従来はi) 初層から治具撤去までは溶接工が施工する、或いはii) 治具に干渉しない範囲をロボットで溶接し治具撤去後に残りの範囲を溶接工、またはロボットで施工する必要があった。このような工法では作業効率が低下するうえ、ビード継目箇所が多く欠陥発生リスクが高まる。そこで本工法では、写真一2に示すようにロボッ

トが自動でトーチ部分を傾斜させ、治具を回避しながら連続溶接する機構を導入することで、初層からのロボット溶接適用を実現した。



写真一1 溶接前のコラム外観と仮固定治具



写真一2 仮固定治具の回避溶接機構

(2) コラム隅角部における平面部と曲面部の連続溶接

コラムの隅角部は曲面形状となっているが、既往の汎用可搬型ロボットでは、図-4に示すようにそれぞれの範囲を個別に溶接する必要があった。平面部では溶接速度と等速でロボットが移動するが、曲面部ではロボット移動速度が溶接速度よりも速く、平面部と曲面部の境界付近で複雑な速度制御を要するためである。

しかし、汎用可搬型ロボットでは同一パス内で移動速度の切り替えを行う事例はなかった。

そこで本工法では、平面部と曲面部の境界位置において連続的なビードを形成可能な速度制御方式を導入することにより、図-5に示すような平面部と曲面部の連続溶接を実現した。本方式の採用により治具の有無にかかわらず、広範囲を1パスで連続的に溶接することが可能となった。

(3) ボックス柱の隅角部溶接への適用

ロボットを用いたボックス柱の施工事例は既に報告されているが、隅角部については施工の難易度が非常に高く、部分的に溶接技能者が施工する必要があった。隅角部を含む全周をロボットのみで施工する方法としては、i) 前述したコラム隅角部と同様の連続溶接方法、ii) 2台のロボットを用いてパスごとに接合

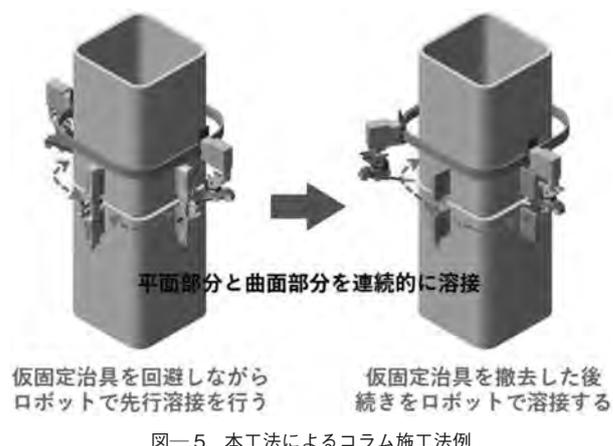


図-5 本工法によるコラム施工法例

する方法、iii) 一面の隅角部を初層から最終層まで溶接した後、これに直交する未溶接面の隅角部を初層から最終層まで溶接する方法が挙げられる。

しかし i) ではロボット動作制御と溶接方法のいずれも難易度が極めて高く、ii) では接合タイミングの難易度や作業効率の低下が懸念されたため、ロボットのみで合理的に施工するためには、iii) の施工方法が適切であると判断した。具体的には図-6に示すように、柱隅角部の開先内に専用セラミックタブを設けロボット溶接にて整形なビード端部が得られるようにした。また、良好な溶け込みを確保するため、通常の始末端部溶接時よりも入熱が大きくなるよう適切なロボット制御パラメータを抽出した。

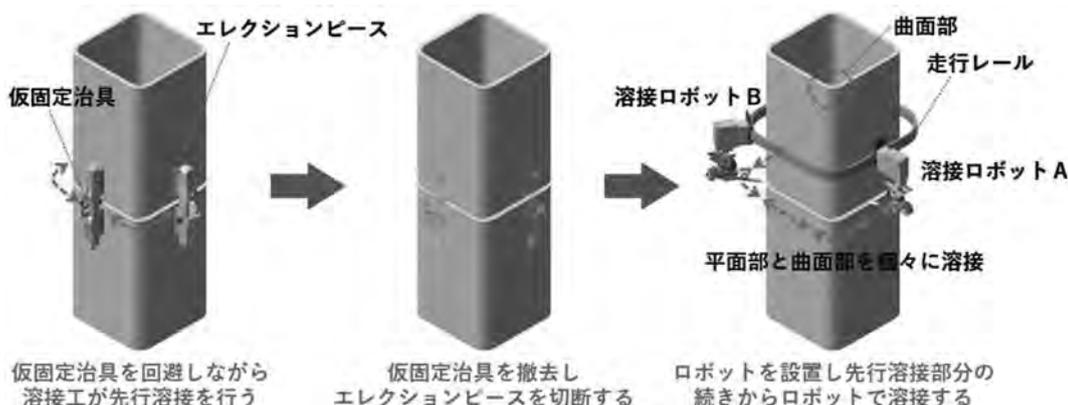


図-4 既往ロボットによるコラム施工法例



図-6 ボックス柱隅角部用セラミックタブを用いた施工例

4. 施工方法

本工法によるコラム，ボックス柱の施工手順例を以下に述べる。人員構成はいずれも溶接管理技術者1名（適宜立会い），および操作者1名であり，ロボットは柱1本につき2台使用する。

(1) コラムの施工方法

図一七にコラムの施工法2例を示す。施工法①は，治具が取り付けられた状態で，隣接する治具間の範囲（全周の約4分の1）を初層から数層溶接する（治具を撤去可能な溶接量は施工条件により異なる）。この際，溶接による柱の変形を抑制するため2台のロボットで同一パスを対面溶接する。次に2台のロボットを残りの未溶接範囲に移設し同様に初層から数層溶接する。ここで治具を撤去した後に2台のロボットで半周ずつ対面溶接しながら最終層まで仕上げる（治具を撤去可能な溶接量は施工条件により異なる）。施工法①を採用する場合，溶接範囲ごとに初期設定と開先計測を行う必要があるが，施工完了時のビード継目が2箇所になるため，欠陥発生リスクの低減に有効である。

施工法②は隣接する治具間の範囲を初層から最終層まで対面溶接し，次に残りの未溶接範囲を同様に初層

から最終層まで溶接する方法である。ビード継目が4箇所になるため慎重な継目品質管理が必要となるが，施工法①よりも開先計測の回数が少ないため作業効率が高くなる。ビード継目の品質については第5章にて詳細に報告するが，適切な欠陥防止措置を遵守する限り高い省力効果を期待できる施工法である。

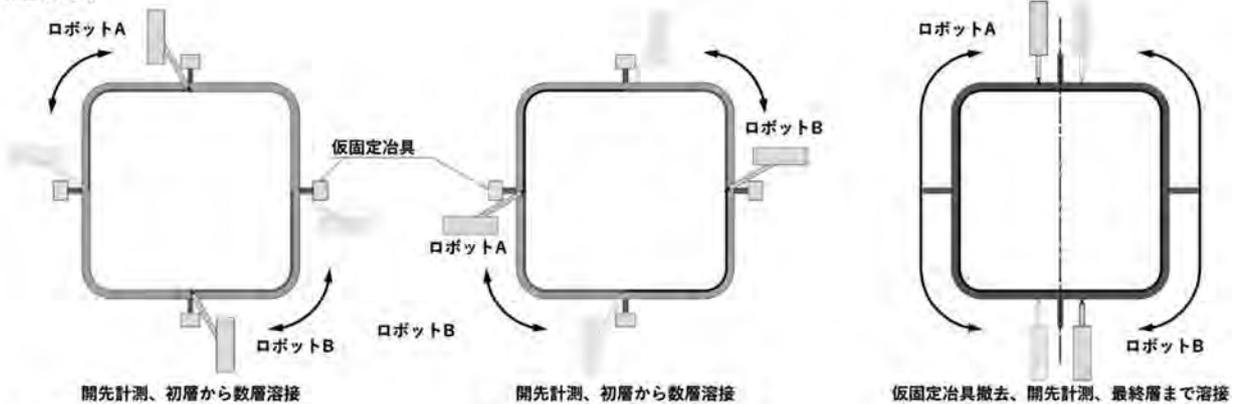
(2) ボックス柱の施工方法

図一八にボックス柱の施工例を示す。施工法③は治具近傍から柱隅角部までの範囲（一面の約半分の範囲）を初層から最終層まで対面溶接する。隅角部の開先内には第3章3節で触れたセラミックタブを予め設置しておく。次に同一面の未溶接範囲を前手順と同様に対面溶接し，完了後にセラミックタブを撤去する。

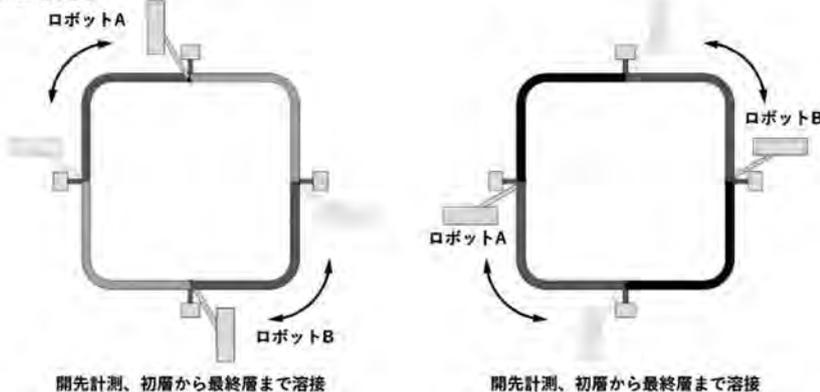
この際ビード端部の形状を確認し，必要に応じてグラインダー等で整形する。治具を撤去した後2台のロボットを未溶接面にそれぞれ移設し，初層から最終層まで対面溶接を行う。

先行する施工面の治具付近2箇所と隅角部4箇所にビード継目を生じるため，コラムと同様の欠陥防止措置（第5章参照）を必要とするが，全溶接範囲をロボットのみで施工可能である。またコラムに比べて開先計測等の準備作業が簡潔であるため高い作業効率を確保できる。

【施工法①】



【施工法②】



（備考）
 施工法①～③のいずれの場合も，治具を撤去可能な溶接量を構造計算により予め算出しておく必要がある。

図一七 コラム施工手順例

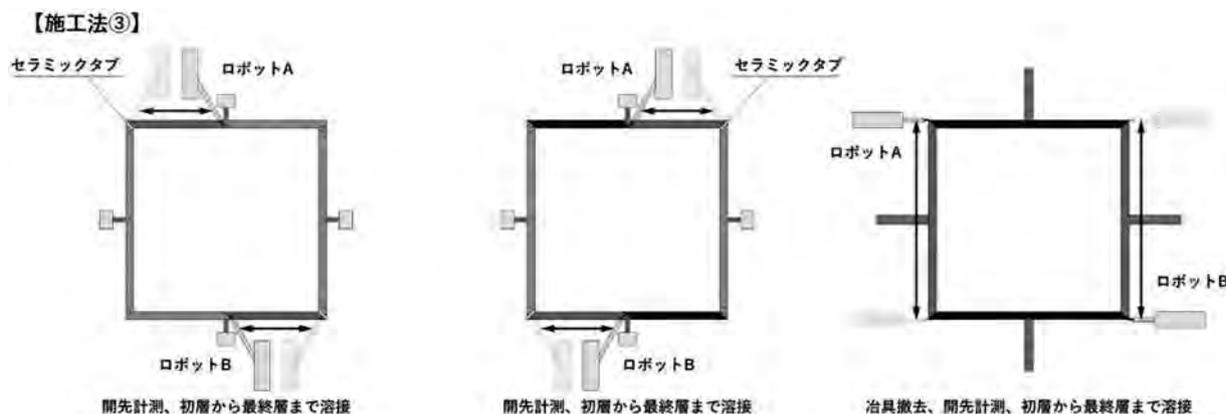


図-8 ボックス柱施工手順例

5. 溶接品質

本工法による品質確保性能を検証するため実大溶接試験を行い第三者検査機関による非破壊検査、および機械試験を実施した。490 N/mm²級鋼材（板厚 28 mm, 突き合わせレ型 35° 開先, ルート間隔 7 mm）における試験結果の一例を表-2 および写真-3 に示す。いずれも良好な試験結果が得られており、本工法にて半自動溶接と同等の品質を確保できると言える。

但し、ビード継目の初層付近では微小な欠陥を生じ

やすい点に留意が必要である。これは、継目部の余盛が僅かに高く直上層との溶け込みが不十分な場合に生じやすい欠陥である。従って、ビード継目部分（各パスの始末端部）の施工時には、以下の方策を実施することが重要である。

- i) 凸ビードの発生を防止し十分な溶け込みが確保されるよう適切な溶接条件を設定する。
（溶接条件は開先計測後に自動設定されるため、必要に応じて設定値を修正する。）
- ii) ビードに凹凸が生じた場合はグラインダー等で表

表-2 機械試験結果一覧

試験種別	引張試験	衝撃試験				曲げ試験	
試験方法	JIS Z 2241	JIS Z 2242				JIS Z 3122	
試験片	A1 号	V ノッチ (10 mm × 10 mm × 55 mm)				裏曲げ	
特性値	引張強さ	試験温度	吸収エネルギー			曲げ性	
			個々	平均			
単位	MPa	℃	J			曲げ率：r = 2 t	
許容値	≥ 490	0	-		≥ 70	備考による	
結果	573	0	141	115	142	133	欠陥無し
判定	合格	合格				合格	
備考	・曲げ試験の許容値は以下の通りとする。 ①長さ 3.0 mm を超える割れがないこと ② 3.0 mm 以下の割れの合計が 7.0 mm 以下のこと ③ 0.2 mm を超えるブローホール及び、割れの合計個数 10 個以下のこと ④溶け込み不良及びスラグ巻き込みの著しいものがないこと						

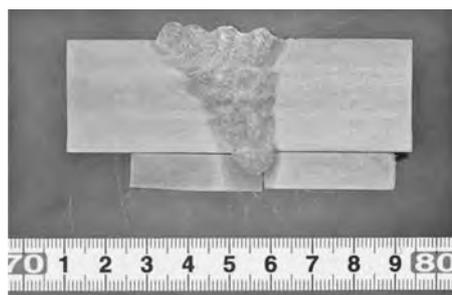


写真-3 断面マクロ画像（左）および放射線透過試験画像（右）

面を平滑に整形する。

また現場施工（溶接長延べ約 450 m）において、第三者検査機関による外観、超音波探傷検査にていずれも合格しており、実用上問題ないことを確認した。

ボックス柱については、490 N/mm² 級鋼材（板厚 40 mm, 突き合わせレ型 35° 開先, ルート間隔 7 mm）にてコラムと同様の実大溶接試験を実施し、外観検査および超音波探傷検査にて隅角部の品質を評価した。外観、超音波探傷検査のいずれも合格であったが、隅角部に関してはコラムのビード継目と同様の欠陥抑止対策を施す必要がある。

6. 生産性

本工法による省力効果を把握するため現場施工の所要時間を集計した。施工対象の鉄骨柱は同一現場、同一工区内のコラム継手 5 箇所（BCP325, □ 800 × 28, レ型 35° 開先）であり、操作者 1 名（JIS Z3841 にて規定する溶接技能者資格 SA-3H を保有）およびロボット 2 台にて操作指導員立会いの下で施工した。施工方法はいずれも施工法①（第 4 章 1 節参照）を採用した。以下に示す作業種別毎に所要時間を分単位で計測した。但し休憩および天候不良等による作業中断は集計対象外とした。

- A. 準備作業：ケーブル配線、機材運搬設置、養生、開先清掃等、溶接前自主検査、片付清掃
- B. 開先計測：ロボット動作設定、開先計測実行、積層条件および溶接条件の確認・調整
- C. 溶接作業：溶接、スラグ除去、ノズル清掃、パス間温度確認、消耗品交換、不整ビードの整形
- D. 付随作業：治具撤去など溶接に直接関係しない（必ずしも操作者が行う必要のない）作業

集計結果を図 9 に示す。総所要時間は初回以降徐々に短縮される傾向が見られたため、操作者の習熟効果が得られたと判断できる。特に C ではロボット操作の円滑化に加え溶接条件やトーチ位置の微調整作業もスムーズに行われるようになり、最終的には所要時間が約 50 分短縮された。また B も操作者には馴染みの薄い作業であったが、ロボット操作方法や確認要点的習熟により所要時間が約 30 分短縮された。

一方 A ではロボット・走行レール設置のような定常作業に加えて、雨天後の開先乾化作業など非定常作業も発生したため、所要時間は 40 分から 120 分とばらつきが見られた。また、1 箇所の柱継手を複数日にわたって施工すると、養生や機器の再設置・点検など重複作業が発生するほか、ロボット復旧時の誤操作な

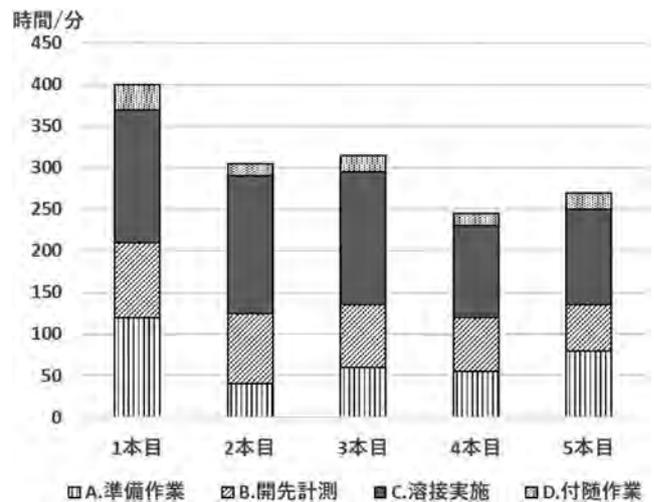


図 9 作業区別の所要時間集計結果

ど不慮の作業中断を招く恐れもあるため、可能な限り当日内に最終層までの溶接を完了させることが望ましい。

本施工結果による 1 日当たり（実働 6.5 時間）の施工数量は柱 1 ～ 1.2 本であり、溶接長では約 71 ～ 85 m/日（隅肉 6 mm 換算）、ロボット 1 台当たり 36 ～ 43 m/日の歩掛であった。著者らの試算では半自動溶接と同等以上の生産性を得るためには、ロボット 1 台当たり約 70 m/日以上、すなわち本施工時と同規格のコラムを 1 日 2 本以上施工する必要がある。しかし、外径が細く板厚が薄い柱ほど準備作業に要する時間の割合が高くなり歩掛が低下する。従って本工法にて生産性向上を図るためには、太径で板厚が厚い柱へ優先的に適用するなど継手 1 箇所の施工数量が比較的多い柱を適用対象とすることが有効である。また、機材移設の手間が少ない機材配置や配線経路を計画することで、溶接作業以外の所要時間を短縮することも重要である。

ボックス柱については現場施工実績がまだ無く、実大溶接試験（B □ 1000 × 40, レ型 35° 開先, 第 4 章 2 節に記載の施工法③を採用）の実績を基に歩掛を算出した。結果は約 166 m/日（隅肉 6 mm 換算）、ロボット 1 台当り 83 m/日であり、太径で極厚の柱継手では半自動溶接以上の生産性が期待できることを確認した。

以上の結果を整理すると、本工法により歩掛や生産性の課題を克服するためには次の方策が有効と考えられる。

- ① 操作者の事前訓練による本工法への習熟（操作指導者と熟練溶接技能者が適宜立会う）
- ② 1 箇所当りの施工数量が多い柱継手へ適用し当日内に施工完了させる（溶接長 140 m/箇所以上を推奨）
- ③ 合理的機材配置・配線計画による非溶接時間の短縮

7. 本工法の採用基準

建設現場における工法は一般的に施工者責任により決定されるが、実績が少ない新技術の採用については設計者や工事監理者(プロジェクトによっては発注者)の理解が必要になる場合がある。本工法についても、当面はプロジェクト毎に採否判断を行うことが予想されるが、判断根拠として参照すべき採用基準類は整備されていない。そこで著者らは本工法の採用条件として、i) ロボットの信頼性、ii) 操作者の適格性、iii) 施工条件への適合性を公正かつ客観的に示すことを提言する。以下に本工法採用基準の一例を示す。

- i) 一般社団法人日本ロボット工業会による建築鉄骨ロボット型式認証を取得したロボットの使用。
- ii) 一般社団法人日本溶接協会による建築鉄骨ロボット溶接オペレータの資格保有者、又は溶接技能者資格(JIS SA-3H)保有者によるロボット操作。
- iii) 現地施工と同様の施工条件、合否判定基準による模擬施工試験の実施。

i) はロボット単体の性能を認証する制度でありロボット製造事業者が取得する。開発着手当初は工場溶接を対象とする認証取得機種のみであったが、本工法にて採用したロボットは後に角形鋼管柱の現場継手溶接に対応した型式認証を取得しており、現場溶接においてもロボットの信頼性が担保された。

ii) の建築鉄骨ロボット溶接オペレータは、型式認証を取得したロボットの操作技能者を認証する資格制度である。受験者は予めロボット製造事業者による特別教育を受講し、本工法の施工要領を習得していることが前提であるため、必ずしも溶接技能者である必要はない。また溶接技能者資格(SA-3H)は鉄骨柱(厚板)の横向き溶接従事者が保有する資格である。現場溶接の専門知識を有しているため、ロボット操作方法さえ習得すれば、本工法による一連の施工や自主管理を適切に行うことができる。初回適用プロジェクトでは前者が、2件目では後者がロボット操作に従事し、いずれも良好な施工結果が得られることを実証済みである。従って、操作者の適格性を判断する手法として、専門機関による上記資格制度の活用が有効であると言える。

iii) の模擬施工試験では、AとBの要件を満たすロボットと操作者により実際の施工と同じ条件(鉄骨仕様、施工手順、管理基準等)で問題なく施工可能か総合的に確認する。本工法の適用環境はプロジェクト毎に異なるため、プロジェクト固有のリスクを事前に把握する意味でも重要な位置付けの試験である。同試

験の結果を基に、本工法の施工要領や管理方法が妥当かを客観的に評価することができる。但し施工実績を多く蓄積し、本工法の信頼性を同試験が省略可能な水準まで更に高めていくことも重要な課題である。

以上の採用基準はあくまで一例だが、工事監理者等による採用承諾条件の明確化に資すると考えられる。

8. おわりに

本工法の導入により、鉄骨の現場溶接作業において従来自動化が困難であったコラム全周溶接やボックス柱隅角部溶接へのロボット適用が実現した。これにより一般的な鉄骨現場溶接継手のほぼ全部をロボットで溶接することが可能となった。性能試験や現場施工を通じ所定の要求水準を満たす品質を確保できることを実証したが、歩掛や生産性の面で課題が顕著になり、操作者の現地施工への習熟や経験蓄積の重要性を認識した。本工法が十分な導入効果を発揮するためには、適用条件や施工中の溶接部良否に応じて適切な施工方法やロボット使用方法を選択できる技能の習得が重要である。従って、そうした技術指導に従事する新たな職能の創出、ロボット操作指導要領の整備、施工管理基準の策定など、運用実施体制の充実化が急務と言える。

今後は発注者や工事監理者に対して本工法の効能と信頼性を説明し導入機会の増進に努めると共に、関連事業者との連携を強化し施工実績の蓄積と業界への浸透を推進する所存である。発展途上の技術ではあるが、本報が技能者不足対策と生産性向上という喫緊の課題に対する解決の一助となれば幸いである。

JICMA

《参考文献》

- 1) 「溶接関係の統計」, 一般社団法人日本溶接協会 (<http://www-it.jwes.or.jp/statistics/statistics2.jsp>)
- 2) 吉田康之他, 「鉄骨柱の現地横向きロボットの開発」, 三菱重工技報 Vol.32 No.6 (1995-11)
- 3) 「鋼構造建築溶接部の超音波探傷検査規準・同解説(第4次改訂版)」, 日本建築学会(2008)
- 4) 「建築工事標準仕様書 JASS6 鉄骨工事(第8次改訂版)」, 日本建築学会(2015)
- 5) 梅津匡一, 「建築鉄骨の現場溶接におけるロボット溶接工法の開発と課題」, 溶接技術 2017年3月号

【筆者紹介】

梅津 匡一(うめつ きょういち)
大成建設㈱
本社建築総本部・生産技術推進部
課長

