

(技術資料)

# 厚肉角形鋼管のロボット溶接部の品質確認

伊藤冬樹\*<sup>1</sup>・高田篤人\*<sup>2</sup>

## Characteristics of Robot Welding Joint with Heavy-thickness Press Columns

Fuyuki ITO・Shigeto TAKADA

### 要旨

超高層建築物などの柱材には、溶接組立箱形断面柱が一般的に採用されているが、溶接ロボットシステムの普及および厚肉・高強度の冷間プレス成形角形鋼管（プレスコラム）の開発により、板厚50 mm以下のプレスコラムの採用例が増加している。また、今後は板厚50 mmを超えるプレスコラムの採用増加も見込まれる。

本稿では、今後の採用検討時の一助となることを期待し、板厚50 mmを超えるプレスコラムのロボット溶接の基礎データについて報告する。積層計画、運転時間の試算などを紹介し、試験体を製作して確認した入熱・パス間温度履歴や溶接部の品質について述べる。溶接部では、安定かつ良好な機械的性質が得られていることが確認されている。

### Abstract

Box section columns assembled by welding are commonly used in ultra-high-rise buildings and other similar structures. With the widespread adoption of welding robot systems and the development of heavy-thickness, high-strength cold press-formed square hollow section columns (press columns), the application of press columns with a plate thickness of 50 mm or less is increasing. In the future, an increase in the use of heavy-thickness press columns exceeding 50 mm in thickness is expected.

This paper presents the fundamental data on the robot welding of press columns with a thickness of more than 50 mm. This technical information can assist decision-making when considering the adoption of robot welding in the future. The paper includes outlines of the build-up plans and the operation time estimation. It also describes the heat input, inter-pass temperature histories, and quality of the welding joint confirmed by fabricating trial works.

The results have shown that the welding joint has achieved reproducible and excellent mechanical properties.

### 検索用キーワード

柱, ダイアフラム, 冷間プレス成形角形鋼管, 鉄骨溶接ロボットシステム, 550 MPa級鋼材, 入熱, パス間温度

ま え が き = 近年、建築物の大型化に伴い、柱材の厚肉・高強度化が進んでいる。超高層建築物などの柱材には、4枚の鋼板を溶接して製作される溶接組立箱形断面柱（ボックス柱とも呼ばれる）が採用されることが一般的であった。いっぽう、鋼板を素材にして角形鋼管の角部をプレスにより成形した冷間プレス成形角形鋼管（以降プレスコラム）は、製造できる板厚や強度の制限などにより、これまで適用できる建築物の規模が限られていた。しかし、近年は厚肉（板厚60 mm）や高強度（550 MPa級、590 MPa級）のプレスコラムの開発、溶接ロボットシステムの対応などにより、超高層建築物においても溶接組立箱形断面柱ではなく、板厚45 mmや50 mmのプレスコラムの採用例が増加している。今後は板厚50 mmを超えるプレスコラムの採用増加も見込まれ、その際には、「ロボット溶接の適用板厚拡大対応」や「プレスコラムと梁の応力伝達を担う通しダイアフラムとの溶接部の品質確保」も施工上重要な課題の一つになる。

本稿では、実施工検討時の一助となることを期待し、板厚55 mmと60 mmの550 MPa級プレスコラムと通しダイアフラム溶接部のロボット溶接に関する基礎データについて報告する。

## 1. 冷間プレス成形角形鋼管の概要

当社は、これまで国内最大級の15,000 ton級プレス能力を有する佐々木製罐工業(株)と共同で、高強度や高機能なプレスコラムを開発してきた。プレスコラムの一覧を表1、製造可能寸法表を表2に示す。

プレスコラムには、溶接性や角部の冷間塑性加工による材質変動を考慮した化学成分の規定、降伏点およびシ

表1 高強度プレスコラムの機械的性質の主な規格値（佐々木製罐工業）

Table 1 Specification for mechanical properties of high-strength column (Sasaki Pipe & Tube Co., Ltd)

Brand name	YP or YS (MPa)	TS (MPa)	$\nu E_0$ (J)
SBCP385B SBCP385C	385~505	550~670	Straight part: $\geq 70$
SBCP385T SBCP385T-Z25	385~505	550~670	Straight part: $\geq 70$ Corner part: $\geq 70$
SBCP385TF* SBCP385TF-Z25*	385~505	550~670	Straight part: $\geq 70$ Corner part: $\geq 70$
SBCP440B SBCP440C	440~540	590~740	Straight part: $\geq 70$

\*Exempt from design addendums

\*<sup>1</sup> 建設技術部 \*<sup>2</sup> 溶接事業部門 技術センター 溶接システム部

表2 SBCP385, SBCP385T, SBCP385TF, SBCP440の製造可能寸法(佐々木製鐵工業)

Table 2 Manufacturable size for SBCP385, SBCP385T, SBCP385TF, SBCP440 (Sasaki Pipe & Tube Co., Ltd)

Thickness (mm)	19	22	25	28, 32, 36	40	45	50	55	60
Diameter (mm)									
400									
450									
500									
550									
600									
650~1,000									
1,050	※								
1,100									
1,150									
1,200		※							
1,250									
1,300									
1,350				※					
1,400				※					

※Only SBCP385, SBCP385T, SBCP385TF

ャルピー吸収エネルギーなどの機械的性質の規定、板厚公差などの寸法の規定が厳しく定められている。そのため、製鋼、鑄造、圧延などの各工程で、化学成分、圧延温度、圧延方法などをきめ細かく管理している。また、鋼管製造時のプレス工程においても板厚、外径に応じたプレス条件などの設定・管理を厳密に実施している。

鋼板は、厚肉化・高強度化すると、強度確保のために炭素当量(以下、 $C_{eq}$ という)が高くなるため溶接性が低下することが一般的である。 $C_{eq}$ を高めることなく強度を確保するために、TMCP(Thermo Mechanical Control Process, 以下TMCPという)技術<sup>1)</sup>等の熱処理技術を活用し、プレスコラムの素材となる鋼板の厚肉化・高強度化と良好な溶接性を両立させている。

また、鋼板は冷間塑性加工を受けるとじん性が劣化する。一例として、参考文献2では種々の鋼材を調査した結果、破面遷移温度の上昇は、予ひずみ10%では20~50℃、予ひずみ20%では30~60℃であることが示されている<sup>2)</sup>。破面遷移温度の上昇は、0℃近傍のじん性低下を意味する。そのため、冷間塑性加工を受けた角部で高じん性を保証する場合、冷間塑性加工によるじん性の低下を見越して鋼板を製造する必要がある。

さらに、鋼板には高じん性に加えて、強度(高引張強度、低降伏比)や優れた溶接性も完備することが求められる。これらの要求に応えるために、圧延とその後のTMCP条件の厳格管理を行っている。

## 2. 鉄骨溶接ロボットシステムの概要

当社のアーク溶接ロボット「ARCMAN™シリーズ」は多層盛溶接機能に特長があり、建築鉄骨、造船、橋梁、建設機械、鉄道車両などの分野で数多く活用され、溶接自動化に貢献している。生産性向上、溶接品質安定化の

効果に加え、近年では人手不足や作業環境改善などのニーズから適用が拡大している。

その中で建築鉄骨の製作工場(以下、鉄骨ファブという)のロボット溶接適用対象は鉄骨造の柱や梁部材であり、大型かつ厚板である。鉄骨ファブでは製作コストの低減や短納期対応のために、溶接工程の省人化、自動化に業界全体が積極的に取り組んできたこともあり、溶接ロボットが広く普及している。とくに、当社「ARCMAN™シリーズ」は鉄骨溶接ロボットシステムにおいてトップシェアを有している。

鉄骨ファブの工場溶接を対象とした鉄骨溶接ロボットシステム(図1)には、次のような特長がある。①アーク溶接ロボットとして多層盛溶接に必要な溶接電源、溶接トーチ、溶接ワイヤ供給装置、水冷循環器などの機器、溶接継手の位置ずれや溶接時の変形に対応するための複数のセンシング機能を有している。②システムとして長時間無人運転のために、ワイヤ切断、ノズル清掃、スラグ除去、溶接チップ交換などの自動装置を搭載している。③鉄骨ワークの一品一様の形状寸法に対して、ロボットの教示をすることなく運転できる自動プログラミングソフトウェアがシステムに組込まれている。④対象のワークの形状や大きさに応じてロボットの位置を溶接する位置へ到達させる移動装置、溶接部材を把持してロボットの溶接動作と同期回転するポジションナなどの大型周辺装置と組み合わせることができる。

鉄骨溶接の中でも、とくにプレスコラムと通しダイアフラムの溶接継手は、角部を回転しながら連続溶接できることから、ロボットによる高能率化、品質安定化の効果が高い。現在では1ワークに2台のロボットで溶接する複数継手同時溶接も一般的に用いられており、さらなる生産性向上が進んでいる。

ARCMAN™鉄骨溶接ロボットシステムは、柱に用いられるプレスコラムの大径化・厚肉化・高強度化に対応するため、最大重量30 tonを把持する大型ポジションナ、40 mmを超える厚板を溶接するためのソフトウェアを開発し、ラインナップを図ってきた。



図1 鉄骨溶接ロボットシステムの一例

Fig.1 Example of steel structure welding robot system

### 3. 溶接施工試験による特性評価

#### 3.1 ロボット溶接による試験体の製作

板厚55 mmと60 mmの550 MPa級プレスコラムと通しダイアフラム溶接部のロボット溶接に関する基礎データを取得するために、実物大の溶接施工試験体を製作した。

試験体の組立模式図を図2、試験体形状とサイズを図3に示す。試験に用いたプレスコラムの辺長は850 mmであり、板厚は55 mmと60 mmである。プレスコラムの板厚が55 mmの場合はダイアフラムの板厚を55 mmとし、プレスコラムの板厚が60 mmの場合はダイアフラムの板厚を60 mmとした。

使用材料を表3に示す。プレスコラムとダイアフラムには550 MPa級鋼材であるSBCP385BとKCL A385Cを使用し、溶接ワイヤにはJIS Z 3312 G59JA1UC3M1T規格材であるMG-60R(N) φ 1.2 mm、シールドガスにはCO<sub>2</sub>を用いた。溶接ロボットには当社製ARCMAN™鉄骨溶接ロボットシステムを適用した。溶接ワイヤの選定は、SBCP385Bを製造する佐々木製罐工業(株)が作成した「SBCP385溶接施工指針」に沿ったものである。この指針では、「冷間成形における加工硬化により角部の降伏点および引張強度が素材である鋼板より上昇して

いることを考慮して、使用する溶接材料を選定することが望ましい」としており、適用する溶接材料として「JIS Z 3312 G59JA1UC3M1T」が例示されている。

溶接管理条件を表4に示す。予熱は実施せず、入熱は30 kJ/cm以下、パス間温度は250℃以下となるように管理した。入熱とパス間温度の管理値は上述した「SBCP385溶接施工指針」に沿ったものである。この管理値も、角部の降伏点および引張強度の上昇の影響を考慮して、検討されたものである。

開先角度は35°、ルートギャップ（以下、RGという）は4 mm、10 mmの2条件を設定した。この条件は、ARCMAN™鉄骨溶接ロボットシステムの推奨適用範囲の下限および上限にあたる。RGがダイアフラムの左右で異なる非対称試験体の施工も実施し、左右とも所定の溶接金属形状が確保できることを確認している。

積層計画を図4に示す。板厚55 mmでは15層34パス、板厚60 mmでは16層40パスである。

参考として、ロボット溶接の運転時間の試算結果を図5に示す。この試算では、RGを7 mmとして当社製ARCMAN™鉄骨溶接ロボットシステムに付属する運転時間の試算機能を用い、辺長・板厚を変化させている。運転時間は板厚55 mmでは7.9 h、板厚60 mmでは8.8 hとなる。

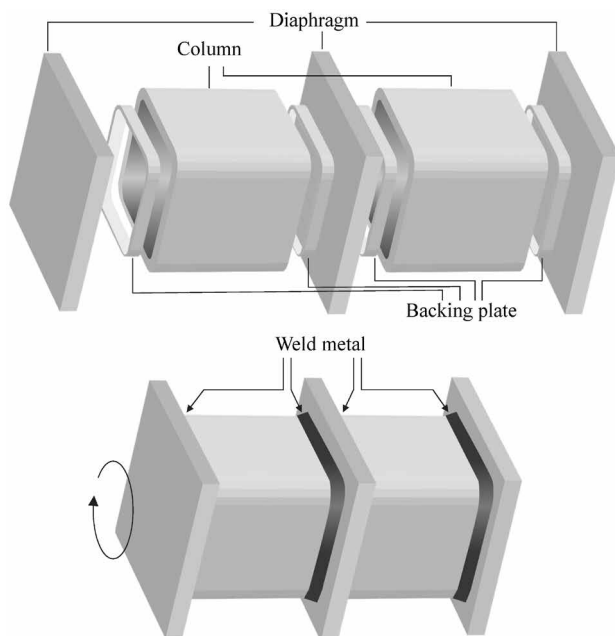


図2 試験体の組立模式図  
Fig.2 Schematic diagram of trial work assembly

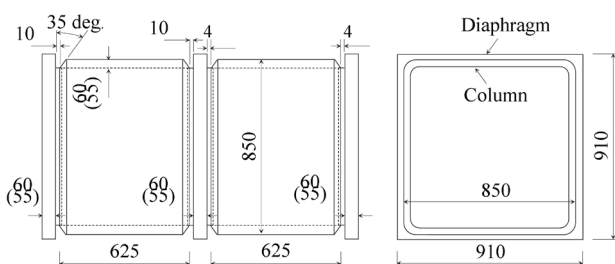


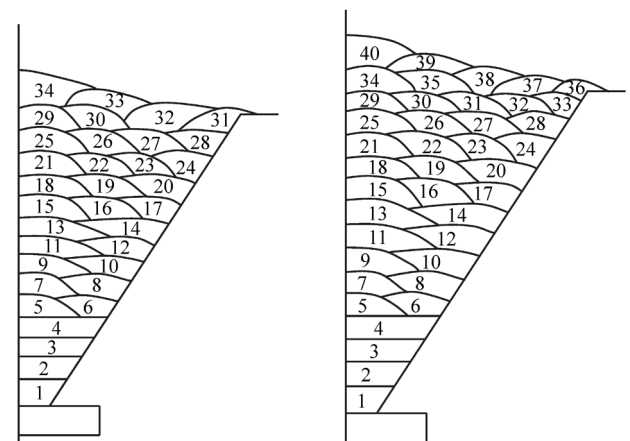
図3 試験体形状とサイズ（単位：mm）  
Fig.3 Shape and dimensions of trial work (Unit: mm)

表3 使用材料  
Table 3 Materials

Column	SBCP385B
Diaphragm	KCL A385C
Welding wire	TRUSTARC™ MG-60R(N)

表4 溶接管理条件  
Table 4 Welding conditions

Pre heat (°C)	Heat input (kJ/cm)	Maximum interpass temperature (°C)	Root gap (mm)	Groove angle (deg.)
—	≤30	≤250	4, 10	35



a) 板厚:55 mm  
a) Thickness:55 mm

b) 板厚:60 mm  
b) Thickness:60 mm

図4 積層計画  
Fig.4 Build-up plans



### 3.2 パス間温度の計測結果

入熱・パス間温度の記録を図6に示す。板厚55 mm, 60 mmとも、管理条件の上限に近づきやすいRG10 mmの結果を示している。なお、板厚60 mmでは2日間に分けて施工を行った。板厚55 mm, 60 mmともパス間温度の上昇は緩やかであり、上層では頭打ちとなっている。本試験体の形状では、パス間温度250℃以下の管理に伴う溶接待ち時間は発生しないと想定される。

### 3.3 プレスコラムー通しダイアフラム溶接部の特性

溶接金属の溶込み状態などを確認するために撮影した断面マクロ写真を図7に示す。平板部・角部とも割れや溶込み不良などは観察されなかった。

断面マクロ写真から観察される余盛高さやフランク角を表5に示す。余盛高さは、板厚55 mmの試験体では15.2~19.5 mm, 板厚60 mmの試験体では17.3~19.0 mmであった。板厚やRGに関わらず(一社)日本建築学会発行の「建築工事標準仕様書6 鉄骨工事」に示されている余盛高さの管理許容差を満足している。また、溶接止端部の応力集中に影響を及ぼすとされるフランク角は134~159°であり、平板部・角部とも滑らかで、オーバーラップはなかった。

板厚60 mmの試験体 (RG10 mm) の溶接金属引張試

験結果を表6に示す。試験片は、平板部・角部とも参考文献3を参考にして、外表面から5.5 mmの位置、板厚中央、内表面から5.5 mmの位置を中心に採取した(図8)<sup>3)</sup>。試験片形状は、JIS Z 3111のA2号試験片とした。溶接金属の引張強度は、平板部では676~711 MPa, 角部では667~698 MPaであった。平板部に比べて角部がわずかに低い値を示しているが、いずれも供試プレスコラムの引張強度の規格値「550 MPa以上」を満足している。

同継手の試験温度0℃におけるシャルピー衝撃試験結果を表7に示す。試験片は、平板部・角部とも外表面から7 mm内側の位置を中心に採取し、ノッチ位置は、ダ

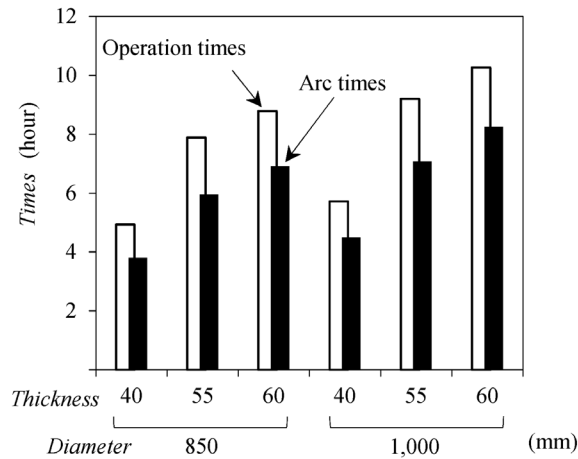


図5 ロボット溶接の運転時間の試算結果

Fig.5 Estimated results of robot operation time

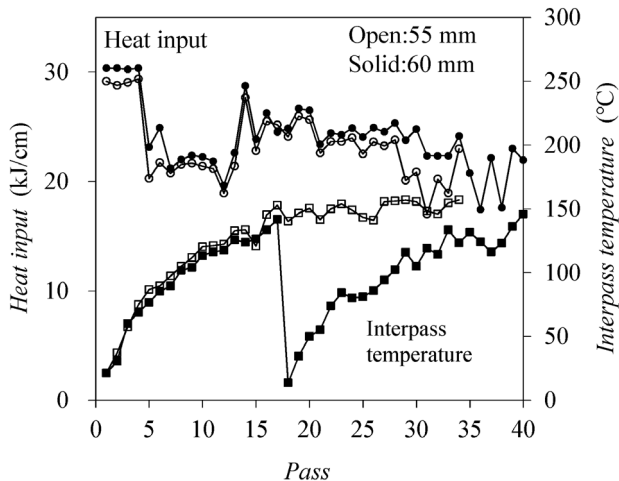


図6 溶接入熱とパス間温度実績

Fig.6 Heat input and interpass temperature records

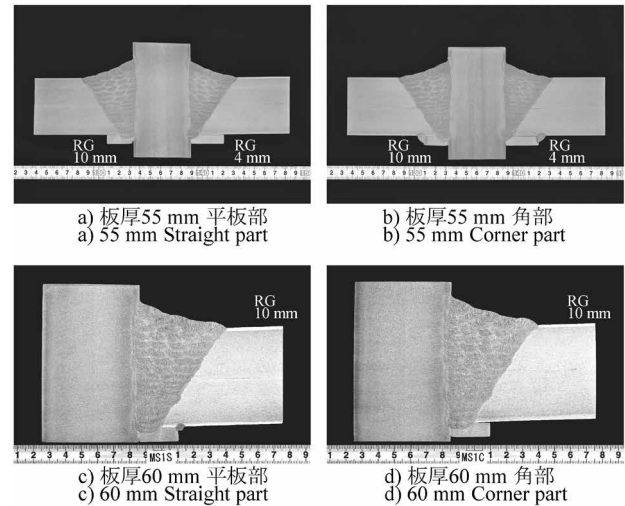


図7 溶接部の断面マクロ写真

Fig.7 Macrostructures for welding joints

表5 余盛高さおよびフランク角

Table 5 Excess weld metal and flank angle for weld metal

	Thickness: 55mm		Thickness: 60mm	
	Straight part	Corner part	Straight part	Corner part
Excess weld metal <sup>*1</sup> (mm)	15.2 <sup>*3</sup> 17.6 <sup>*4</sup>	16.5 <sup>*3</sup> 19.5 <sup>*4</sup>	17.3	19.0
Criteria	10 ~ 22		10 ~ 20.75	
Flank angle <sup>*2</sup> (°)	150 <sup>*3</sup> 159 <sup>*4</sup>	153 <sup>*3</sup> 158 <sup>*4</sup>	135	134
Criteria	—		—	

<sup>\*1</sup> Excess weld metal <sup>\*2</sup> Flank angle <sup>\*3</sup> RG4mm <sup>\*4</sup> RG10mm

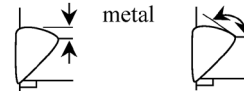


表6 溶接金属の引張試験結果

Table 6 Tensile test results for weld metals

Test position	Straight part				Corner part			
	YP (MPa)	TS (MPa)	El. (%)	YR (%)	YP (MPa)	TS (MPa)	El. (%)	YR (%)
Outer	611	676	30	90	597	667	30	90
Center	663	711	29	93	640	698	31	92
Inner	640	703	30	91	638	697	30	92
Criteria	≥ 385	≥ 550	—	—	≥ 385	≥ 550	—	—

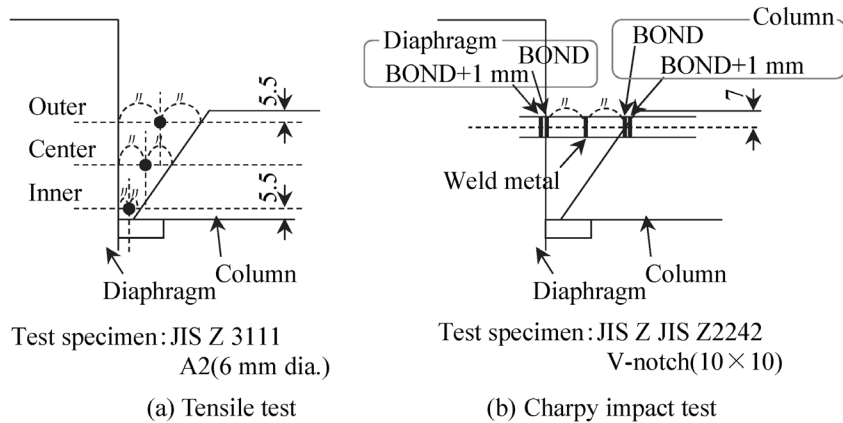


図8 試験片採取位置  
Fig.8 Positions of specimens

イアフラム側のBOND, BOND + 1 mm, DEPO中央, プレスコラム側のBOND, BOND + 1 mmの5箇所とした(図8)。いずれの試験位置でも70 Jを超える安定した値が確保できている。

同継手の表面下2 mmの位置における硬さ試験結果を図9に示す。低温割れ(遅れ割れ, 水素割れ)が発生しやすくなる硬さの目安値として知られているビッカース硬さ(HV)が350を超える値は母材熱影響部も含めて認められなかった。

表7 シャルピー衝撃試験結果  
Table 7 Charpy impact test results

Test position	Straight part $vE_0$ (J)				Corner part $vE_0$ (J)			
	Each.			Ave.	Each.			Ave.
Diaphragm BOND+1 mm	195	176	168	180	182	240	235	219
Diaphragm BOND	216	250	166	211	266	261	212	246
Weld metal	145	131	138	138	126	174	180	160
Column BOND	190	168	150	169	190	182	161	178
Column BOND+1 mm	197	233	89	173	190	240	216	215
Criteria	—			≥27	—			≥27

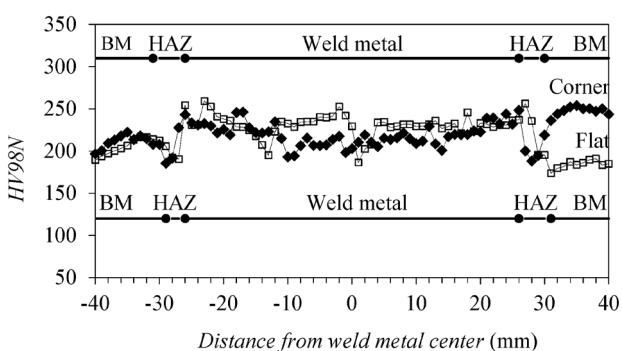


図9 硬さ試験結果  
Fig.9 Hardness distribution test results

### 3.4 まとめ

板厚55 mmと60 mmのプレスコラムと通しダイアフラム溶接部のロボット溶接試験を実施し, 基礎データとして, 入熱・パス間温度実績, 溶接部の特性等を報告した。溶接部では優れた断面形状と機械的性質が得られていることを確認した。

むすび=鉄骨ファブでの利便性や物件での採用のしやすさ向上のため, 現状は一般的な400 MPa級および490 MPa級, 板厚9~40 mmの範囲で建築鉄骨溶接ロボット型式認証を取得している。今後は, 550 MPa級, 板厚60 mm以下のプレスコラムの範囲に対して前記認証を取得したいと考えている。

### 参考文献

- 1) 大宮良信ほか. R&D神戸製鋼技報. 2009, Vol.59, No.1, p.40-45.
- 2) 堀川浩甫. 土木学会論文集. 1980, No.300, p.13-20.
- 3) 小泉好成ほか. 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1 材料施工. 2019, p.1141-1142.