

埋もれアークを用いた小径コラムの半自動高能率溶接法の開発

西村 健 吉田 文久 カク オツキン 福原 史^{*1} 矢澤 慧^{*1} 碓 陽介^{*1} 鈴木 真悟^{*1}
Ken Nishimura, Fumihisa Yoshida, Yixin Hao, Takashi Fukuhara, Satoru Yazawa,
Yosuke Ikari, Shingo Suzuki

概 要

埋もれアーク溶接は、溶込みが深く、能率向上のための狭開先の完全溶込み溶接が可能である一方で、アークが不安定になりやすく、溶接欠陥の発生やスパッタの大量発生などの問題が生じ、普及には至っていなかった。近年、これらの問題に対し、出力電圧を周期的に変化させる電圧振幅制御による埋もれアークの安定化技術が開発され、実用化されている。ただし、狭開先溶接に埋もれアークを用いることで初層の溶込みは確保しやすくなるが、高温割れの発生が懸念される。本研究では、冷間ロール成形角形鋼管の最小径150mm 角の最大板厚12mmを対象に、埋もれアーク溶接の深溶込みという特性を活用し、開先断面積を小さくすることでパス数低減を図った半自動高能率溶接法の溶接施工試験と構造試験を行い、JASS6等で規定される標準的な継手と同等の性能を有することを確認した。

Development of a Semi-Automatic High-Efficiency Welding Method for Small-Diameter Columns Using Buried Arc Welding

Abstract

Buried arc welding offers deep penetration and enables complete penetration welding with narrow grooves, improving efficiency. However, issues such as arc instability, welding defects, and excessive spatter have limited its adoption. Recently, a voltage amplitude control technique that stabilizes the buried arc by periodically varying the output voltage has been developed and put into practical use. However, while buried arc welding in narrow groove applications makes it easier to secure sufficient penetration in the root pass, it also raises concerns about the occurrence of hot cracking.

In this study, welding and structural tests were conducted on a semi-automatic high-efficiency welding method for cold-formed square steel tubes with a minimum column size of 150 mm and a maximum plate thickness of 12 mm. The method utilizes the deep penetration characteristic of buried arc welding to reduce the number of passes by minimizing the groove cross-sectional area. Welding and structural tests confirmed that this method achieves performance equivalent to that of standard joints specified in JASS 6 and other relevant standards.

キーワード：埋もれアーク，半自動溶接，狭開先，機械的性質，
塑性変形性能

^{*1} 大和ハウス工業 竜ヶ崎工場

1. はじめに

埋もれアーク溶接は、溶込みが深く、能率向上のための狭開先の完全溶込み溶接が可能である一方で、アークが不安定になりやすく、溶接欠陥の発生やスパッタの大量発生などの問題が生じ、普及には至っていなかった。近年、これらの問題に対し、株式会社ダイヘンにおいて、高電流埋もれアークを用いた高能率アーク溶接システム「D-arc」が開発された。D-arc は、電圧振幅制御による埋もれアークの安定化を実現し、高電流領域での深溶け込み、低スパッタの特徴に加えて高溶着溶接の特徴を併せ持つ、高能率の炭酸ガスアーク溶接を可能とした¹⁾。ただし、狭開先溶接に埋もれアークを用いることで初層の溶込みは確保しやすくなるが、高温割れの発生が懸念される。

一方、角形鋼管の T 継手の狭開先溶接において、半自動溶接については、ルートギャップ 5mm、開先角度 25 度を標準とする開先に対して溶接施工マニュアル²⁾が作成されているが、初層の溶込み不足が懸念されること、開先内の組立溶接は斫りが必要であり角形鋼管への適用に実質的なメリットが少ないこと等から実用化レベルに至っているとは言い難い。ロボット溶接については、開先角度 25 度を標準とする開先に対して溶接施工マニュアル³⁾（以下、「狭開先マニュアル」という）が作成され、溶接接合部は必要性能を十分満足するレベルにあることが確認されている。しかし、150 角や 200 角程度の小径コラムについてはロボット溶接機の規格外となることが多いことから、標準的な開先（ルートギャップ 7mm、開先角度 35 度）で半自動溶接とすることがほとんどである。

そこで、著者らは冷間ロール成形角形鋼管の最小径 150mm 角の最大板厚 12mm を対象に、D-arc の深溶込みという特性を活用し、開先断面積を小さくすることでパス数低減を図った半自動高能率溶接法の溶接施工試験、材料試験、構造試験を行い、JASS6 等で規定される標準的な接合部と同等の性能を有することを確認した。また、これらの試験結果等をもとに、（一財）日本建築センターで評定を取得した。本報では、本溶接の溶接施工試験結果、構造試験結果について報告する。なお、対象とした開先は図 1 に示す通り、ルートギャップ（以下、「R_G」という場合がある）4mm、開先角度 35 度、ルート面 0mm である。これは、板厚が 12mm 程度の場合、開先角度を小さくするよりルートギャップを小さくする方が開先断面積を小さくできるためである。

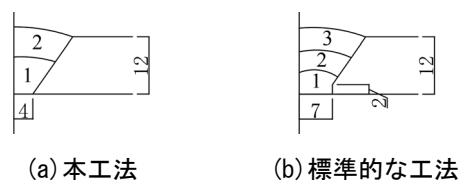


図 1 開先寸法と積層図

2. 本溶接施工試験

2.1 試験計画

本溶接の適正な溶接条件設定のため、以下の 3 段階で実施した。

Phase1 では、初層の溶接条件設定を目的に、溶接電流、溶接電圧、ルートギャップをパラメータとして、本溶接初層の高温割れ発生状況を確認した。本工法では、コラム開先内の組立溶接を再溶融できる溶込み深さの確保が要求される一方で、溶込みを深くすると高温割れの発生が懸念され、これらの相反する要求を両立する条件の設定が必要である。

Phase2 では、最終層の溶接条件設定を目的に、ノズルの仕様をパラメータとして、溶込み深さと窒素含有量を確認した。本工法では初層の溶込み深さの確保のため溶接電流を低下させない必要があり、例えば、ワイヤの突出しを短く保つように小径ノズルを用いることや、ノズル先端からチップを突出させることが考えられる。しかし、これらの仕様とした場合、最終層の窒素含有量が多くなり、ブローホール発生と脆化が懸念される。一方で、半自動溶接の能率向上のためには、初層と最終層の溶接条件は同一であることが望ましく、初層と最終層のどちらの要求も両立する条件の設定が必要である。

Phase3 では、Phase1 と Phase2 により決定した溶接条件で製作された試験体について材料試験を行い溶接部の機械的性質等を確認したが、本報では紙面の都合で割愛する。

2.2 Phase1（初層の溶接条件設定）

2.2.1 試験内容

図 2 に試験体図、表 1 に溶接条件、表 2 に試験パラメータを示す。また、図 3 に表中のノズルチップ間距離 D_{nc} の定義を示す。試験体は、ベースプレートと角形鋼管の T 継手を模擬したもので、ベースプレートと裏当て金、柱フランジを模擬したプレートと裏当て金を開先の外で溶接して組み、開先内の中央を 40mm 程度組立溶接した。ベースプレートの左右にプレートを取り付け、1 つの試験体の左右で異なる技能者が施工を行った。溶接電流、溶接電圧、

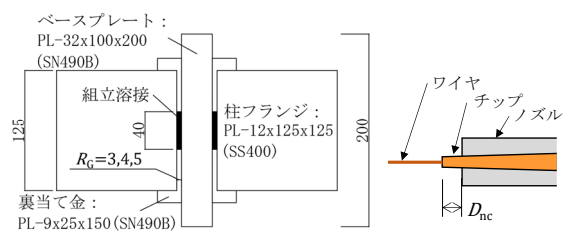


図2 試験体図 (Phase1)

図3 ノズルチップ間距離

表1 溶接条件 (Phase1)

溶接ワイヤ	Φ1.2mm(YGW18)
溶接姿勢	下向
溶接電流	380~400A
溶接電圧	38~42V
ガス流量	30L/min
ノズル形状	ストレート
ノズル外径	20mm
D_{nc}	+15mm

表2 試験パラメータ (Phase1)

溶接電流(A)	380	380	400	380	400
溶接電圧(V)	38	40	40	42	42
R_G (mm)	3	4	5	4	5

ルートギャップをパラメータに、組立溶接ビードのある開先を初層のみ溶接を行った。本溶接には定格出力電流 500A の D-arc モードを有するダイヘン社製の半自動溶接機を用いた。ノズルは市販の 500A 低使用率用の外径 20mm のストレート形状とした。チップは市販のチップボディで延伸し、チップをノズルから 15mm 突出した ($D_{nc}=+15mm$) 状態とした。これは、ワイヤの突出しが短くなり電流が上がることで、溶込みは深くなり、高温割れにとっては不利側の条件になると考えたからである。

高温割れ発生状況の確認は組立溶接ビードの中央で行った。

2.2.2 試験結果

表3に各溶接条件での高温割れの発生状況、写真1に断面のマクロ写真を示す。 $R_G=3mm$ と4mmでは40V以下では高い頻度で高温割れが生じた。

表3 試験結果一覧 (Phase1)

溶接電流	380A		380A		400A		380A		400A	
溶接電圧	38V		40V		40V		42V		42V	
技能者	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
$R_G=3mm$	×	×			×	×				
$R_G=4mm$	×	※1	×	×	×	×	○	※2	○	○
$R_G=5mm$	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○

【凡例】○：高温割れ無 ×：高温割れ有



※1 高温割れ有



※2 高温割れ無

写真1 断面のマクロ写真

一方、電圧を 42V とすることで $R_G=4mm$ と 5mm では高温割れを防止できた。これは、ルートギャップを大きくしたことはもちろんのこと、電圧を上げることでアーク長を長くして凸形のビード形状を抑え、溶接ビード幅に対するビード高さの比 H/W が改善されたためであると考えられる。埋もれアークを用いた狭開先溶接ではその特長を積極的に活用するために電圧を下げる傾向にあると考えられるが、初層では逆に高温割れ発生リスクが高まるため、適切な電流と電圧の設定が必要である。ただし、電圧を上げるとアンダーカット等の溶接欠陥にも留意する必要がある。

2.3 Phase2 (最終層の溶接条件設定)

2.3.1 試験内容

図4に試験体図、表4に本溶接条件、表5に試験パラメータを示す。組立溶接はコラム四面の平板部中央に溶接長 40mm で行った。本溶接は 2.2 節と同じ溶接機を用い、ノズルの仕様をパラメータに最終層まで行った。ノズルは市販の 500A 低使用率用の外径 20mm のストレート形状と外径 16mm のテーパ形状とした。試験には3体の試験体を供し、計12面に対して4種のパラメータでそれぞれ $N=2$ または4とした。溶接電流と電圧は 2.2 節の結果から、初層と最終層ともに 380A と 42V とした。溶接施工手順は、冷間成形角形鋼管設計・施工マニュアル⁴⁾で示される斜め保持しない通しダイアフラム溶接施工例を参考に図5の通りとした。

溶込み深さ d と窒素含有量の確認は、組立溶接ビードが存在したコラム四面の平板部中央ですべて行った。 d は図6に示す狭開先マニュアルと同様の寸法とした。図7に窒素含有量の測定点を示す。

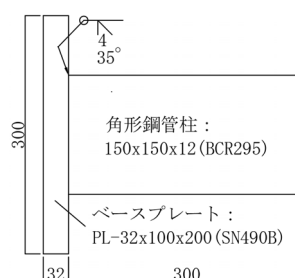


図4 試験体図 (Phase2)

表4 溶接条件 (Phase2)

溶接ワイヤ	Φ1.2mm(YGW18)
溶接姿勢	下向
溶接電流	380A
溶接電圧	42V
ガス流量	30L/min
ノズル形状	ストレート、テーパ
ノズル外径	16, 20mm
D_{nc}	-1, +10, +15mm

表 5 試験パラメータ (Phase2)

ノズル仕様	ノズル形状	ノズル外径	D_{nc}	N 値
①	ストレート	20mm	+15mm	2
②	ストレート	20mm	+10mm	2
③	テーパ※	16mm※	-1mm	4
④	ストレート	20mm	-1mm	4

※テーパ部先端外径 16mm (ストレート部外径 20mm)

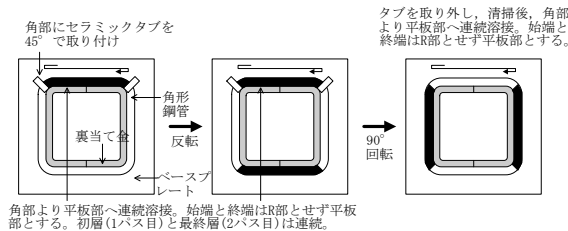


図 5 溶接施工手順

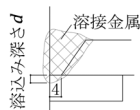


図 6 溶込み深さ

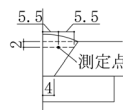


図 7 窒素含有量測定点

2.3.2 試験結果

図 8 に試験結果を示す。図中に溶込み深さ d と窒素含有量の値を併記する。また、写真 2 に溶込みの浅いノズル仕様④の $d=1.7\text{mm}$ と③の $d=2.2\text{mm}$ の溶込み状況を示す。 $d=1.7\text{mm}$ のマクロ写真が不鮮明で判定しにくいものの、 $d=2.2\text{mm}$ は組立溶接ビードが本溶接初層で再溶融されており、本溶接条件で組立溶接ビードは再溶融可能と考えられる。UT は全て合格で、高温割れも確認されなかった。ノズルからチップを突出することやテーパ形状のノズルを使用することで、ワイヤの突出しが短くなり溶接電流が上がるため、溶込みは深くなった。

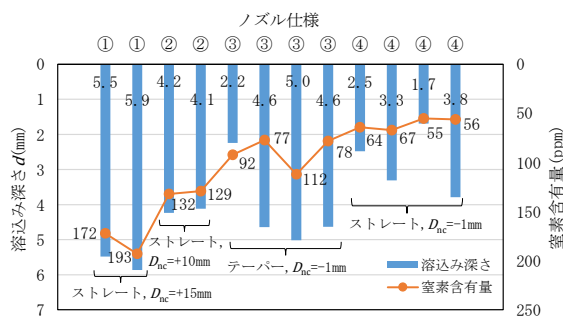
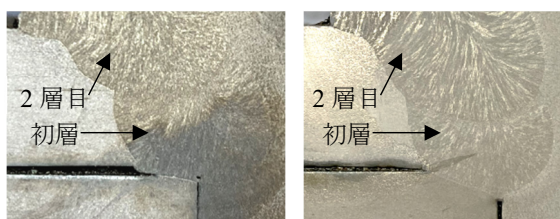


図 8 溶込み深さと窒素含有量の比較



(a) 仕様④ $d=1.7\text{mm}$

(b) 仕様③ $d=2.2\text{mm}$

写真 2 本溶接初層の溶込み状況

窒素含有量については、チップの突出しを長くすることで増加することを確認した。チップの突出しが長くなると、ノズルが溶接面から離れシールドガスの流速が小さくなり、シールド性が低下したためと考えられる。テーパノズルでは、ストレートノズルに比べてシールドの範囲が狭くなることから、含有量が若干増加したが、最大 112ppm で問題ないと考えられる。一方、 $D_{nc}=+15\text{mm}$ とした場合には、172ppm と 193ppm となり、ブローホール発生と靱性の低下が懸念されるため、シールド性に配慮が必要である。なお、Phase3 で実施したシャルピー衝撃試験では $D_{nc}=+15\text{mm}$ の場合、シャルピー値の低下が確認された。

3. 構造試験 (曲げ試験)

3.1 試験内容

柱部材としての適用の妥当性を確認するため、柱脚とベースプレートの溶接部について、柱角部が最外縁となる載荷を行い、本工法と標準的な工法の構造性能を比較した。

図 9 に試験体図、表 6 に試験パラメータ、

表 7 に本溶接条件、

表 8 に使用材料の機械的性質を示す。溶接止端部のグラインダ仕上げは無しとした。狭開先マニュアルでは初層部近傍の溶接欠陥よりコラム側溶接止端部が破壊起点となることが指摘されており、溶接電流が高く凸形のビードとなることでフランク角が小さくなりやすい $D_{nc}=+15\text{mm}$ を不利側と考えた。なお、同マニュアルでは、溶接金属のシャルピー値がコラム部材より低くても、溶接金属方向への脆性破壊が発生する可能性は低いともされている。

図 10 に試験体のセットアップ状況を示す。試験体は反力床に PC 鋼棒で固定された鉄骨架台上に 4-M30 (F10T) の高力ボルトを用いて固定した。高力ボルトの締め付けトルクは 100N・m 程度とした。これは、柱脚施工時のトルク値の目安で実状の固定度に近づけるためであり、半剛の条件としている。試験時の過大な剛体変位を避けるため、試験体設置後にベースプレートの側面にずれ止め治具を鉄骨架台にボルトで接合した。載荷は試験体の頂部に対し反力壁に固定された水平ジャッキを用いて行った。載荷履歴は、狭開先マニュアル等と同様に柱の全塑性モーメント M_p に対応する弾性回転角の計算値 θ_p を用いて、予備加力として $0.5\theta_p$ を 1 回、次に θ_p の 2, 4, 6, 8 倍の変形量を各 2 回与える正負交番繰返しとした。

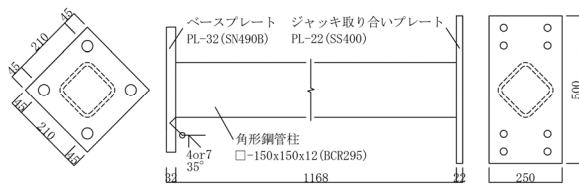


図 9 試験体図(構造試験)

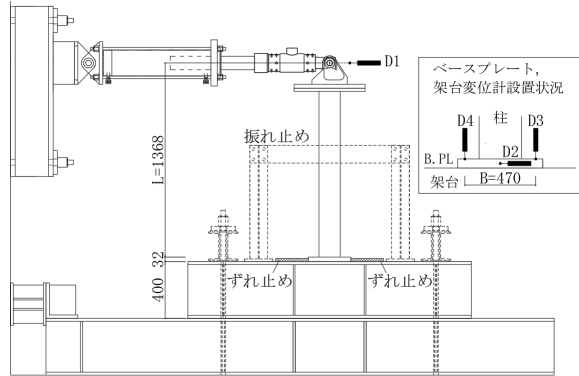


図 10 試験体セットアップ

表 6 試験パラメータ(構造試験)

試験体	R_c (mm)	モード	パス数
G4D	4	埋もれアーク	2
G7N	7	通常	3

表 7 溶接条件(構造試験)

試験体	G4D	G7N
溶接ワイヤ	$\Phi 1.2$ mm(YGW18)	$\Phi 1.2$ mm(YGW18)
溶接姿勢	下向	下向
溶接電流	380A	350A
溶接電圧	42V	35V
ガス流量	30L/min	25L/min
ノズル形状	ストレート	ストレート
ノズル外径	20mm	20mm
D_{nc}	+15mm	-1mm

表 8 使用材料の機械的性質

材料	規格	降伏点又は耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)
角形鋼管	BCR295	405	501	31
溶接ワイヤ	YGW18	575	650	26

回転角 θ_m は式(1)、式(2)により算出した。柱脚部曲げモーメント M_m は荷重に載荷点からベースプレート端までの距離 (1368mm) を乗じた値とした。

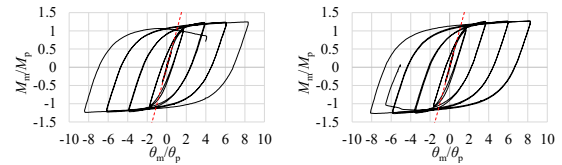
$$\theta_m = (D1 - \phi \cdot L - D2) / L \quad (1)$$

$$\phi = (D3 - D4) / B \quad (2)$$

3.2 試験結果

3.2.1 荷重変形関係

図 11 に M_p および θ_p で無次元化した柱脚部曲げモーメント M_m/M_p と回転角 θ_m/θ_p の関係を示す。図中の赤点線は弾性剛性の計算値である。履歴挙動は両者で同様であり溶接仕様による差はない。



(a) G4D (b) G7N
図 11 荷重変形関係

3.2.2 最大耐力と破壊状況

表 9 に試験結果一覧、写真 3 に破壊状況を示す。最終履歴は、荷重低下が生じた載荷履歴と定義した。また、写真は破壊状況が顕著になるまで載荷を継続した後のものである。冷間成形角形鋼管柱の繰返し曲げ試験データベースに関する既往の研究⁵⁾では、45 度方向載荷で軸力無し、溶接止端部に対するグラインダ仕上げ無のケースでは耐力上昇率 eM_{max}/M_p (eM_{max} : 最大耐力, M_p : 全塑性耐力) は 1.2~1.5 程度となっている。文献 5) の基準化幅厚比の範囲は 0.64~1.89 で、本試験の 0.56 は範囲外となるが、本工法においても同等の結果が得られている。

いずれの試験体でも柱角部溶接止端部の亀裂が母材方向に進展し板厚を貫通し荷重低下した。

3.2.3 塑性変形性能

表 10 に塑性変形倍率 $e\eta_s$ と累積塑性変形倍率 $e\eta_A$ を示す。また、図 12 に $e\eta_A$ の算出に用いた柱脚部曲げモーメント M_m/M_p と累積変形 $\Sigma\theta_m/\theta_p$ の関係を示す。図中の点線は荷重低下が生じた載荷履歴で累積変形には含めない。各倍率は狭間先マニュアルと同じ方法で算出した。

表 10 には文献 6) で示されるランク I の柱の各変形倍率の必要値も併記するが、いずれの試験体も必要値を満足する。また、文献 5) では、45 度方向載荷で軸力無し、溶接止端部に対するグラインダ仕上げ

表 9 試験結果一覧

試験 体	最大耐力				最終履歴	破壊 状況
	正側		負側			
	eM_{\max} (kNm)	eM_{\max} / M_p	eM_{\max} (kNm)	eM_{\max} / M_p		
G4D	154.7	1.24	154.0	1.24	8.0 θ_p 正側 2 回目	溶接部 破断
G7N	158.2	1.27	158.2	1.27	8.0 θ_p 負側 2 回目	溶接部 破断



(a) G4D



(b) G7N

写真 3 破壊状況

表 10 試験結果一覧

試験体	塑性変形倍率 $\epsilon\eta_s$			累積塑性変形倍率 $\epsilon\eta_A$			
	正側	負側	文献 6)	正側	負側	合計	文献 6)
G4D	8.6	9.6	8.4	39	45	84	28
G7N	8.6	9.0		51	43	94	

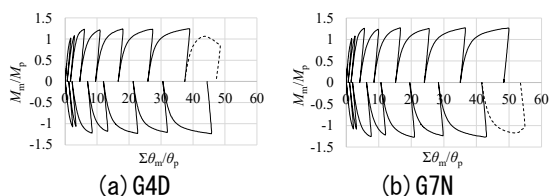


図 12 荷重変形関係

無のケースの場合 $\epsilon\eta_A$ は 56~155 となっており、同等の結果が得られている。ただし、前述の通り本試験の基準化幅厚比はデータベースの範囲外である。比較的幅厚比の小さい既往の研究⁷⁾では等価幅厚比の逆数 $1/\alpha$ が 3.71 と 3.87 の場合、 $\epsilon\eta_A$ はそれぞれ 118 と 116 となっている。本試験の $1/\alpha$ は 3.23 であることから、文献 7) と比較しても同等の結果が得られている。

以上より、本工法は柱部材として十分な塑性変形能力を有していると考えられる。

4. まとめ

角形鋼管柱□-150x12(BCR295)を対象に、ルートギャップ 4mm、開先角度 35 度、ルート面 0mm の開先とした場合の埋もれアークを用いた完全溶込み溶接部の各種試験を行い、以下のことを確認した。

- (1) 本溶接の溶接電流 380A、溶接電圧 42V とすることで、本溶接初層で組立溶接ビードを再溶融させること、高温割れ発生を抑えることが可能である。一方、溶接電圧 40V 以下では高温割れ発生の頻度が高くなる。
- (2) (1) を本溶接条件とした柱脚とベースプレートとの接合部は、標準的な工法と同等の最大耐力と塑性変形性能を有する。一方、チップの突出しによりシールド性が悪いことが原因と考えられる窒素含有量の増加を確認した。

以上から、本工法を用いて適切に溶接施工された接合部は JASS6 等で規定される標準的な接合部と同等の性能を有し、角形鋼管柱とベースプレートや

通しダイアフラム等の接合部に適用しても問題ないと考えられる。

本工法では高温割れの発生を抑制する観点から、極端に狭開先化せず、溶接電流は 380A 程度に抑え、電圧も 42V と比較的高く設定したため、埋もれアークによる深溶込みを積極的に活用できているとは言いがたい。今後の課題として、埋もれアークの特長を活かした高能率溶接法や接合部の開発等が挙げられる。

謝 辞

本研究にあたり、(株)ダイヘン関係各位には多大なるご協力をいただいた。ここに記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 馬場勇人：高電流埋れアークを用いた厚板高能率溶接法の開発，溶接学会誌，Vol.86，No.7，pp.510-514，2017.10
- 2) 全国鐵構工業協会技術委員会：25 度レ形開先溶接施工マニュアル，2006.10
- 3) 日本鋼構造協会：25 度狭開先ロボット溶接マニュアルー冷間成形角形鋼管と通しダイアフラム接合部への適用ー，2013.10
- 4) 日本建築センター：2018 年版冷間成形角形鋼管設計・施工マニュアル，2018.2
- 5) 中川治彦，水落亮輔，鈴木一弁，中野達也，聲高裕治：冷間成形角形鋼管の溶接・加工品質の向上と施工合理化に関する研究（その 5）冷間成形角形鋼管柱の繰返し曲げ試験データベース，日本建築学会大会学術講演梗概集（東北），pp.65-66，2018.9
- 6) 建設省建築研究所，鋼材倶楽部：角形鋼管設計研究会研究報告書～鉄骨造柱材としての要求性能と保有性能の面からみた冷間成形コラムの評価～，1993.11
- 7) TRAN VIET HA，宗川陽祐，増田浩志，中野達也：溶接部の破壊により限界付けられる冷間成形角形鋼管柱の変形性能評価（その 2）小径コラム部材の繰返し載荷実験，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），pp.65-66，2015.9

執筆者紹介



西村 健
修士（工学）

ひとこと

住宅・建築を問わず、自社ファブを持つメリットを最大化できる技術開発に挑戦していきます。