高強度・厚肉鉄骨柱への現場ロボット溶接工法の適用

浅　井　英　克　　鈴　井　康　正
大　塚　英　郎　　白　井　嘉　行
（東京本店建築事業部）　（東京本店建築事業部）

Application of Site Robot Welding Method to High-Strength and Thick Steel Column

Hidekatsu Asai　Yasumasa Suzui
Hideo Otsuka　Yoshiyuki Shirai

Abstract

In recent years, the use of high-strength and thick steel materials has been increasing, especially in high-rise buildings. To save labor and ensure the quality of site welding, we examined the applicability of Obayashi's "Site Robot Welding Method" to high-strength and thick steel columns. The results of this study are as follows: 1) The welded parts produced by this method satisfied the required mechanical properties. 2) As a result of on-site application to high-strength and thick RHS columns, a good welding quality was obtained. 3) Combined with the previous report, this method applied up to 550 N/mm^2 class steel for beams and up to 590 N/mm^2 class steel for the RHS and BOX columns.

概　　要

現場溶接作業の省力化・省人化のため，大林組は鉄骨柱・梁の様々な現場溶接作業を自動化できる「現場ロボット溶接工法」を建設業界に先駆けて開発し，実用化した。一方，近年は高層建物を中心に高強度鋼材の利用が増加しており，特に高強度・厚肉鉄骨柱への適用拡大が求められている。そこで本工法で高強度・厚肉鉄骨柱を溶接し，溶接部の各種検査・試験を通して本工法の適用性を検討した。得られた結果を以下に示す。1) 本工法を用いた高強度・厚肉鉄骨柱の溶接部は外観が良好であり，溶接部に必要な各種機械的性質を満足した。2) 本工法を 550N/mm^2 級厚肉コラム柱に適用した結果，良好な溶接品質が得られ，溶接技能者と同等以上の溶接歩掛を実現できた。3) 既報の結果と合わせ，本工法の適用範囲は梁に関して最高 550N/mm^2 級鋼まで，柱のうちコラム柱・BOX 柱に関して最高 590N/mm^2 級鋼まで拡大できた。

1.　はじめに

建設業では中長期的に予測される技能労働者の減少や昨今の働き方改革を実現するため，あらゆる工種で生産性の向上が求められている[1)]。特に現場溶接作業を担う溶接技能者は高度な技能を要するために適格者が限られ，高齢化も進展している。このため，従来の現場溶接作業に代わる，あるいは補完する施工技術の開発が急務となっている。

このような背景のもと，筆者らは現場溶接作業の省力化・省人化を目指し，鉄骨柱・梁の様々な現場溶接作業を自動化できる「現場ロボット溶接工法」（以下，本工法）を建設業界に先駆けて開発，実用化した（Photo 1参照）。工事現場におけるロボット溶接は，鉄骨製作工場でのロボット溶接とは異なり，建入された鉄骨の部位に合わせた姿勢で溶接しなければならない。適材適所の溶接技術が必要なため，本工法では同一のロボットで下向き，横向き，立向き，上向きの全姿勢に対応する溶接技術を確立し，あらゆる現場溶接の自動化を実現した。

一方，近年は高層建物を中心に高強度鋼材の利用が増加しており，その対応が求められている。特に，柱は梁

(1) 梁下フランジの上向き溶接

(2) 梁ウェブの立向き溶接

(3) 角形鋼管柱の横向き溶接

Photo 1　現場ロボット溶接工法の適用状況
Application Status of Site Robot Welding Method

に比べて高強度で，厚肉となるケースが多い。このような高強度・厚肉鉄骨柱の溶接には高度な溶接技量や施工管理が求められ，溶接技能者には大きな肉体的負担が生じる。これに対して，溶接ロボットは高い施工再現性を有するため，事前に適切な溶接手順や溶接条件を定めれば，難度の高い現場溶接の品質安定化や現場溶接作業の省力化・省人化に大きな効果を発揮し得る。高強度・厚肉鉄骨柱への適用は，本工法の特長を生かす最適な溶接対象の一つと言える。

本稿では，本工法のこれまでの開発成果を整理するとともに，高強度・厚肉鉄骨柱への適用拡大に向けた取組みを報告する。

2.　本工法の開発経緯とこれまでの成果

ロボットを用いた現場溶接技術は1990年代に開発が始まり，現場溶接の一部に適用されてきた。Photo 2はその一例であり[2]，ビル自動施工システムの要素技術として，溶接組立箱形断面柱（以下，BOX 柱）の継手をロボットで横向き溶接したものである。しかし，当時は Photo 2のように比較的大きな溶接ロボットを用いることが多く，ロボットの移動，セット，盛替などの準備作業に多くの時間を費やし，十分に生産性を向上するまでに至らなかった。また溶接機材が大きいと台車に載せて床面を移動させる必要があり[2]，現場溶接時に床スラブが未打設の場合には適用上の大きな制約となった。

さらに当時はロボットの溶接可能部位が限定されていた点も課題であった。鉄骨造建物の現場溶接は Fig. 1に示す A～F の6種類に大別される。このうち，「A_梁上フランジ」に対する下向き溶接技術や，「D_円形鋼管柱」と「E_BOX 柱」に対する横向き溶接技術は1990年代に実用化された[3),4)]。一方，高度な技量を要する「B_梁下フランジ」に対する上向き溶接技術，「C_梁ウェブ」に対する立向き溶接技術，さらに円弧と矩形の複合形状でロボット制御が難しい「F_コラム柱」（角形鋼管柱）に対する横向き溶接技術は実用化されていなかった。

このような過去の事例と課題を踏まえ，筆者らは持ち運び易い“可搬型溶接ロボット”を使用し，同一の溶接ロボットを用いて様々な現場溶接作業を自動化する現場技術の開発を目指した。Table 1 を用いて開発経緯を説明する。Table 1 は本工法の適用部位と鋼材の強度区分・最大板厚を整理したものであり，Table 中の最大板厚は外観検査や超音波探傷検査（以下，UT 検査）のほか，溶接部のマクロ試験や溶接金属引張試験などの各種機械試験を通して溶接部性能を確認した板厚の最大を表す。

開発初期は鉄骨造建物で多用される490N/mm^{2}級鋼材での利用拡大を図るべく，新たに溶接技術①～③[5)~7)]を確立することとした。これにより，適用部位の制約を大きく低減できた。その後，近年の高強度鋼材の利用増加や部材断面の大型化への対応が求められ，梁については最高550N/mm^{2}級鋼材に対する溶接技術④～⑤[8)]，柱のうち BOX 柱とコラム柱については最高590N/mm^{2}級鋼材に対する溶接技術⑥～⑨[9)~10)]を順に開発した。この結果，強度区分や板厚に関する制約を低減でき，適用範囲が大きく広がった。

ところで実際の工事では，Table 1の最大板厚を超える板厚への適用を求められる場合がある。このような場合は事前に施工試験を行い，外観検査や UT 検査で所定の判定基準を満足することを確認してから現場適用してい

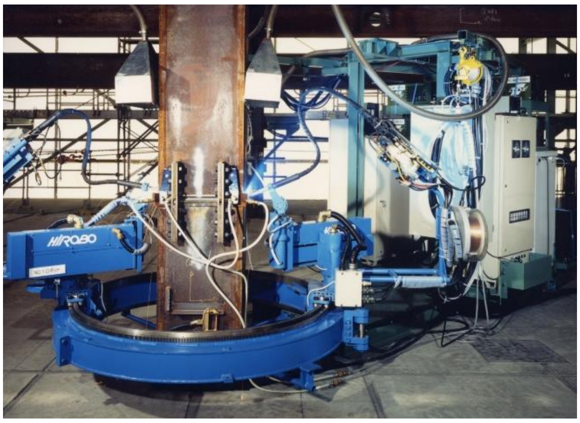


Photo 2　1990 年代の現場ロボット溶接例[2)]
Example of Site Robot Welding in the 1990s

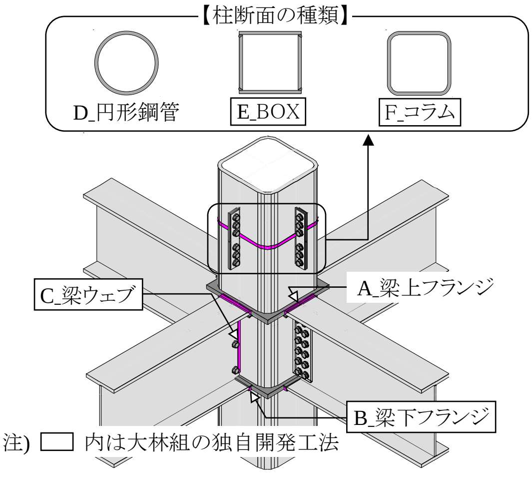


Fig. 1　本工法による柱・梁の溶接可能部位
Weldable Parts of Column and Beam by This Method

Table 1　本工法の開発経緯
Development Results of This Method

適用部位		溶接姿勢	鋼材の強度区分と最大板厚		
			490N/mm^{2}級	550N/mm^{2}級	590N/mm^{2}級
梁	B_下ﾌﾗﾝｼﾞ	上向き	①40mm[5)]	④40mm[8)]	－
	C_ウェブ	立向き	③40mm[7)]	⑤40mm[8)]	－
柱	E_BOX	横向き	－	⑧80mm[10)]	⑨80mm[10)]
	F_コラム		②36mm[6)]	⑥50mm[9)]	⑦50mm[9)]

注）①～⑨は開発順序

る。例えば，520N/mm^2級鋼材を使用した60mm 厚の梁下フランジに対する適用要望に対しては，Table 1④の溶接技術を60mm 厚の鋼材に適用した施工試験を行い，外観検査・UT 検査に合格することを確認してから現場施工に臨んだ[8]。現場施工の結果，第三者による外観検査・UT検査の結果は良好であった。

以上のように，溶接部性能確認試験に基づく施工要領の整備と，工事の個別条件に応じた施工試験による補完により，現在では様々な溶接部位や幅広い鋼種・板厚に本工法を適用することが可能である。

3.　高強度･厚肉鉄骨柱に対する適用技術の開発

高強度鉄骨柱は高層建物で使用される場合が多く，溶接部には高い性能や品質が求められる。そのため，施工試験や溶接部機械試験にて溶接部が必要な強度やじん性などを有していることを確認する必要がある。特に閉鎖断面の厚肉鉄骨柱では溶接ビードの継ぎ部に欠陥が発生し易く，注意が必要である。本章では，550N/mm^2 級コラム柱（Table 1 の⑥）と 590N/mm^2 級 BOX 柱（Table 1 の⑨）への適用に向けた本工法の開発状況を報告する。

3. 1　550N/mm^2級コラムの施工試験[9]

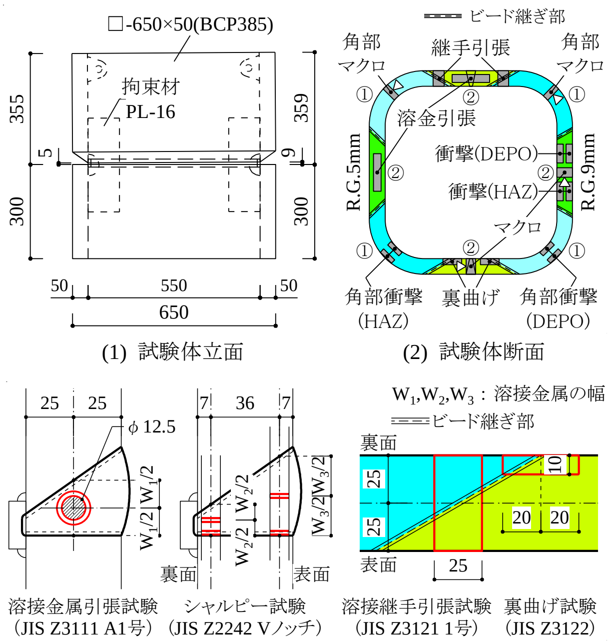
3. 1. 1　試験概要　試験体は柱－柱継手の溶接部を模擬した部分試験体であり，Fig. 2に試験体形状を示す。柱の形状（種類）は建築構造用550N/mm^2級冷間プレス成形角形鋼管□-650×50（BCP385）とした。試験体は建て方時の施工誤差の影響を考慮するため，上部柱を1方向に傾けて，4面のうち1面のルートギャップ（R.G.）を5mm，その反対面のルートギャップを9mmとした。ロボットによる横向溶接状況をPhoto 3(1)に示す。溶接手順は最初に4箇所の角部（Fig. 2(2)の①）を2台のロボットで順に対角で先行溶接した後，平板部（Fig. 2(2)の②）をロボットで後行溶接し，最後に先行溶接と後行溶接のビード継ぎ部をグラインダで整形することとした。溶接ワイヤは冷間加工による角部の強度上昇を考慮して[11]，590N/mm^2級ソリッドワイヤ59JIS Z3312 G59JA1UC 3M1T（ワイヤ径1.2 φ）とし，入熱は平板部・角部とも30kJ/cm以下，パス間温度は250℃以下とした。積層の一例として，ルートギャップ9mm面の後行溶接部は10層51パスであった。

3. 1. 2　非破壊検査結果　溶接外観をPhoto 3(2)に示す。溶接外観は平板部，角部，ビード継ぎ部ともに良好であり，溶接部の形状はJASS6[12]の管理許容差以内であった。また，超音波探傷検査はUT規準[13]の「引張応力が作用する溶接部」の判定基準に合格した。

3. 1. 3　溶接部機械試験結果　Fig. 2(2)，(3)に示す位置から試験片を採取し，溶接部の各種機械試験を行った。

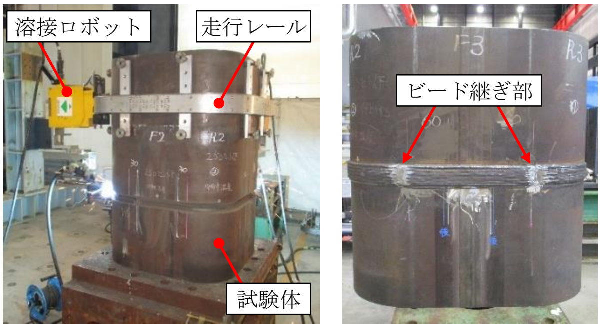
（1）　マクロ試験：　Photo 4(1)にマクロ断面例を示す。平板部，角部ともに溶け込みは良好で1mmを超える欠陥はなく，JASS6付則8の承認試験判定基準に合格した。

（2）　溶接金属引張試験：　平板部から採取した2試験片について，降伏点はσ_y=660～665N/mm^2，引張強さはσ_u=715N/mm^2，破断伸びはEL=24%であり，溶接ワイヤの規格値（500N/mm^2≦σ_y，590≦σ_u≦790N/mm^2，16%≦EL）を満足した。



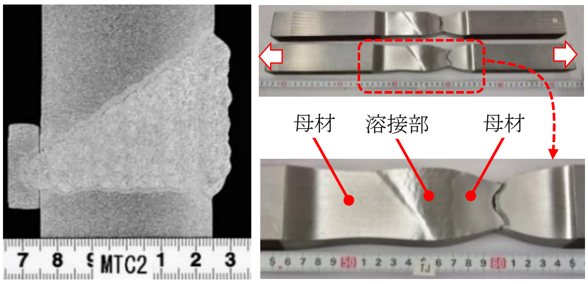
(1) 試験体立面　(2) 試験体断面
(3) 機械試験片採取位置

Fig. 2　コラム柱試験体形状および機械試験片採取位置
RHS Column Specimen Shape and Mechanical Test Piece Collection Position



(1) 施工状況（先行溶接）　(2) 溶接外観

Photo 3　コラム柱の施工試験状況
Construction Test Status of RHS Column



(1) マクロ試験（角部）　(2) 溶接金属引張試験

Photo 4　コラム柱溶接部の機械試験結果例
Example of Mechanical Test Results for RHS Column Welds

（3）　溶接継手引張試験：　Photo 4(2)にビード継ぎ部から採取した2試験片の破断状況を示す。溶接部には欠陥や亀裂が見られず，いずれも母材破断した。継手の引張強さはσ_u=620～628N/mm^{2}であり，母材規格値（550≦σ_u≦670N/mm^2）を満足した。

（4）　シャルピー衝撃試験：　平板部・角部の溶接金属部（以後，DEPO）と熱影響部（以後，HAZ）から，それぞれ3体ずつ試験片を採取した。試験温度0℃でのシャルピー値（3体平均）は81～217Jであり，高靭性を期待できる0℃70Jの判定値[14)]を満足した。

（5）　裏曲げ試験：　ビード継ぎ部2箇所から裏曲げ試験片を採取した。1試験片に0.5mmの欠陥が1か所観察されたものの，他の試験片は無欠陥であった。曲げ後の欠陥サイズは3.0mm以下であり，JASS6付則8の承認試験判定基準に合格した。

以上より，本工法を用いた550N/mm^{2}級厚肉コラム柱の溶接部は，溶接部に必要な各種機械的性質を満足することを確認できた。

3. 2　590N/mm^{2}級 BOX 柱の施工試験[10)]

3. 2. 1　試験概要　試験体は柱－柱継手の溶接部を模擬した部分試験体であり，Fig. 3に試験体形状を示す。柱の形状（種類）はBOX-600×80（SA440B）とした。試験体は建て方時の施工誤差の影響を考慮するため，上部柱を1方向に傾けて，4面のうちF4面のルートギャップを5mm，反対のF2面のルートギャップを9mmとした。ロボットによる横向溶接状況をPhoto 5(1)，溶接手順を以下に示す。最初にBOX柱の4箇所の角部にタブを設置し，F1面とF3面（Fig. 3(2)水色部分）を2台のロボットで先行溶接した。先行溶接終了後にタブを除去し，先行溶接端部のカスケード面を電動工具で整形した。次に，F2面およびF4面（Fig. 3(2)の黄緑部分）を1台のロボットで順に後行溶接した。最後に先行溶接と後行溶接が交わる角部付近の溶接ビード表面を電動工具で仕上げた。角部を整形するための付加溶接等は行わなかった。溶接ワイヤは590N/mm^{2}級ソリッドワイヤJIS Z3312 G59JA1UC 3M1T（ワイヤ径1.2φ）とし，入熱は30kJ/cm以下，パス間温度は350℃以下とした。施工時の最高気温は約11℃であり，本施工試験では予熱を行わなかった。積層の一例を示すと，テーパーギャップであるF1面（先行溶接）は16層111パスであった。

3. 2. 2　非破壊検査結果　溶接外観をPhoto 5(2)に示す。溶接外観は平板部，角部ともに良好であり，溶接部の形状はJASS6の管理許容差以内であった。また，超音波探傷検査はUT規準の「引張応力が作用する溶接部」の判定基準に合格した。

3. 2. 3　溶接部機械試験結果　Fig. 3(2)，(3)に示す位置から試験片を採取し，溶接部の各種機械試験を行った。

（1）　マクロ試験：　Photo 6(1)にマクロ断面例を示す。平板部，角部ともに溶け込みは良好で1mmを超える欠陥はなく，JASS6付則8の承認試験判定基準に合格した。

（2）　溶接金属引張試験：　平板部から採取した3試験

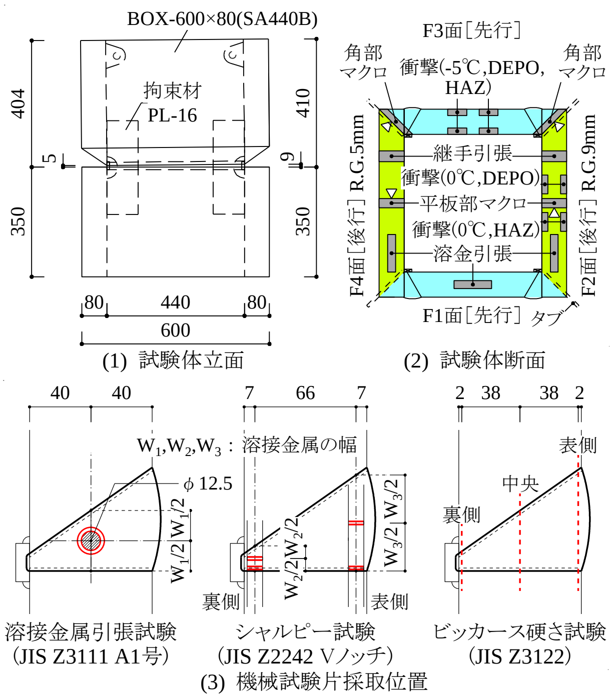
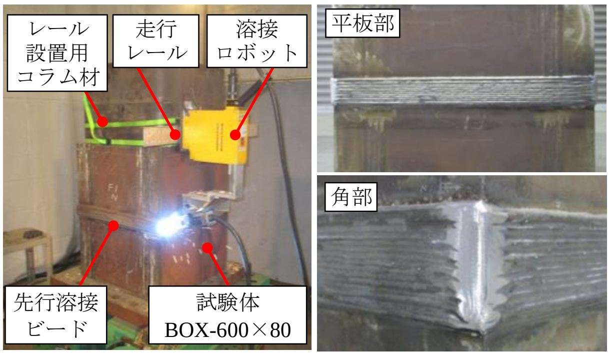
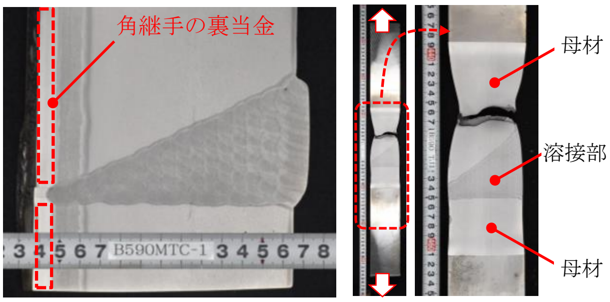


Fig. 3　BOX 柱試験体形状および機械試験片採取位置
BOX Column Specimen Shape and Mechanical Test Piece Collection Position



(1) 施工状況（後行溶接）　(2) 溶接外観

Photo 5　BOX 柱の施工試験状況
Construction Test Status of BOX Column



(1) マクロ試験（角部）　(2) 溶接金属引張試験

Photo 6　BOX 柱溶接部の機械試験結果例
Example of Mechanical Test Results for BOX Column Welds

片の降伏点はσ_y=686～717N/mm^2，引張強さはσ_u=705～723N/mm^2，破断伸びはEL=26～27%であり，溶接ワイヤの規格値（500N/mm^2≦σ_y，590≦σ_u≦790N/mm^2，16%≦

(1) ロボット溶接状況　(2) 溶接外観（本工法）　(3) 溶接外観（溶接技能者）

Photo 7　高強度コラム柱への適用例
Application Example to High-Strength Column

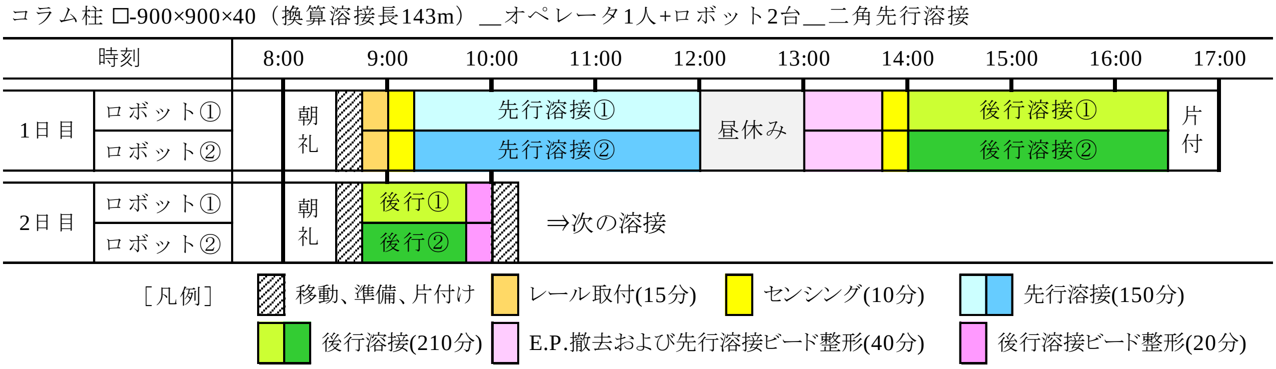


Fig.4　本工法の現場溶接スケジュール例
Example of Site Welding Schedule of This Method

EL）を満足した。

(3)　溶接継手引張試験：　Photo 6(2)に平板部から採取した試験片の破断状況を示す。溶接部には欠陥や亀裂が見られず，いずれも母材破断した。継手の引張強さは σ_u=648～649N/mm² であり，母材規格値（590≦σ_u≦740N/mm²）を満足した。

(4)　シャルピー衝撃試験：　平板部のDEPOとHAZから，それぞれ3体ずつ試験片を採取した。試験温度0℃でのシャルピー値（3体平均）は138～281Jであり，高靱性を期待できる0℃70Jの判定値[14]を満足した。また，試験温度-5℃でのシャルピー値（3体平均）は79～253Jであり，溶接ワイヤの規格値（-5℃，47J以上）を満足した。

(5)　ビッカース硬さ試験：　マクロ試験片を用いて，表側・板厚中央・裏側の3ライン上のビッカース硬さを測定した（Fig. 3(3)）。ビッカース最高硬さは裏側ライン上の288Hvであり，JASS6付則8.承認試験の判定基準（350Hv以下）を満足した。

以上より，本工法を用いた590N/mm²級厚肉コラム柱の溶接部は，溶接部に必要な各種機械的性質を満足することを確認できた。

4.　高強度・厚肉鉄骨柱への現場適用

3.1節の溶接部性能確認試験結果を基に550N/mm²級厚肉コラム柱に対する施工要領を定め，実際の鉄骨工事に

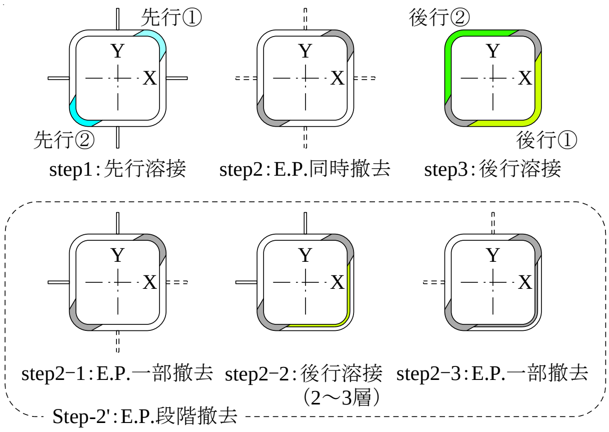


Fig. 5　コラム柱の溶接手順例
Example of RHS Column Welding Procedure

本工法を適用した。適用状況をPhoto 7(1)に示す。本工事では柱1本をオペレータ1人・ロボット2台の体制で溶接することとした。柱の断面（鋼種）はコラム□-900×40（BCP385）であり，溶接ワイヤは3.1節と同じ590N/mm²級ソリッドワイヤ59JIS Z3312 G59JA1UC 3M1T（ワイヤ径1.2ϕ）とした。入熱は平板部・角部とも30kJ/cm以下，パス間温度は250℃以下とした。

Photo. 7(2)と(3)に本工法と溶接技能者（AW検定有資格者）による溶接外観を示す。Photo. 7(2)と(3)の比較から，本工法による溶接外観は溶接技能者と同等以上に良好であった。また第三者検査は外観検査，UT検査ともに合格

した。本工法は高強度・厚肉コラム柱の現場溶接において，良好な品質を確保できることを確認できた。

現状の生産性として，本工法の溶接歩掛について検討する。Fig. 4にコラム柱□-900×40に対する溶接スケジュール例を示す。本溶接スケジュールはFig. 5に示すように，2台のロボットでコラム柱の二角を先行溶接し（step1），エレクションピース（以後, E.P.）を撤去した後（step2），残りの部分を後行溶接（step3）する二角先行施工の例である。コラム柱□-900×40の隅肉サイズ6mmに換算した溶接長（以下，単に溶接長）は143mであり，Fig. 4の1日目と2日目の溶接時間の配分から，本工法の1日目の溶接歩掛は120m程度の溶接長となる。一方，溶接技能者の歩掛について見ると，当社工事での平均的な1日当りの溶接長は70～80mであり，本工事のように比較的大きなコラム柱□-900×40では1日当りの溶接長が100m以上となる。溶接歩掛は本工法と溶接技能者のいずれにおいても部材断面に依存するが，本工事の結果から，本工法ではオペレータ1人・ロボット2台の体制で，溶接技能者1人と同等以上の溶接歩掛を発揮し得ると言える。

なお, E.P.撤去の可否は, 溶接施工時の安全性検討に基づいて判断され，特に地震荷重に対する検討が重要となる。本工法でFig. 5上図の二角先行施工「step1⇒step2⇒step3」の溶接手順が可能なのは，E.P.をすべて撤去したstep2において，X方向・Y方向の地震荷重を先行溶接①および②で負担可能な場合である。一方，溶接施工時の地震荷重は柱の負担重量や周辺骨組の拘束などによって変わり，先行溶接①・②だけで地震荷重を負担するのが難しい場合もある。その場合はFig. 5下図step2'のようにE.P.の撤去を段階的に行い，E.P.と溶接部の複合断面で地震荷重を負担させる。この場合，施工時間はFig. 4より1～2時間程度多く要する。仮にstep2'の二角先行段階施工でも地震荷重を負担することが難しい場合は, Fig. 2(2)のように4箇所の角部を先行溶接する四角先行施工を採用し, 仮設時の安全性を確保できる溶接手順で溶接している。

5. まとめ

550N/mm²級コラム柱および590N/mm²級BOX柱に対する溶接施工試験，溶接部機械試験，現場適用を通して，高強度･厚肉鉄骨柱に対する本工法の適用性を検討した。得られた結果を以下に示す。

1) 溶接部性能確認試験の結果，本工法を用いた高強度・厚肉鉄骨柱の溶接部は外観が良好であり，溶接部に必要な各種機械的性質を満足した。
2) 本工法を550N/mm²級厚肉コラム柱に現場適用した結果，良好な溶接品質が得られることを確認した。また，オペレータ1人・ロボット2台の施工体制で，溶接技能者と同等以上の生産性を達成できたことを確認した。
3) 既報の結果と合わせ，本工法は梁に関して最高550N/mm²級鋼まで，柱のうちコラム柱とBOX柱に関して最高590N/mm²級鋼まで適用可能となった。

本工法はこれまでに20件近い建物に適用し，様々な溶接姿勢で技能者と同等以上の良好な溶接品質が得られることを確認してきた。今後は，溶接手順の合理化による歩掛向上に注力し，現場溶接の品質確保と省力化・省人化を実現する汎用的な工法として，引続き普及・展開に努める予定である。

参考文献

1) 中央建設業審議会・社会資本整備審議会産業分科会建設部門：第 19 回基本問題小委員会 配布資料「建設産業をめぐる現状と課題」, 2018.2.13 (http://www.milt.go.jp/common/001121700.pdf)
2) 汐川，大川，森：全自動ビル建設システムの開発，大林組技術研究所報, No.49, pp. 1-6, 1994.8
3) 中込，古屋，土橋，軽部，山本：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，日本建築学会構造系論文集，第 456 号, pp.59-67, 1994.2
4) 吉田，広本，原田，上村，和田：鉄骨柱自動溶接ロボットの開発，鋼構造論文集，第 1 巻 4 号, pp.81-86, 1994.12
5) 白井，大塚，浅井，鈴井，他：上向ロボット溶接を用いてスカラップ周囲の応力集中を緩和した現場溶接型鉄骨梁 その 1～2，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造Ⅲ, pp. 731-734, 2015.9
6) 白井，大塚，鈴井，浅井：コラム柱に対する現場ロボット溶接技術の開発と現場適用例，日本建築学会大会学術講演梗概集，材料施工, pp. 995-996, 2017.8
7) 白井，大塚，浅井，鈴井：梁ウェブに対する現場ロボット溶接技術の開発と適用，日本建築学会大会学術講演梗概集，材料施工, pp. 11-12, 2018.9
8) 大塚，白井，浅井，鈴井：550N/mm² 級鋼材に対する梁端現場ロボット溶接技術の開発 その 1～2，日本建築学会大会学術講演梗概集，材料施工, pp. 1155-1158, 2019.9
9) 大塚，白井，浅井，鈴井：高強度厚肉角形鋼管柱に対する現場横向ロボット溶接技術の開発 その 1～2，日本建築学会大会学術講演梗概集，材料施工，pp. 657-660, 2020.9
10) 大塚，白井，浅井，鈴井：高強度厚肉溶接組立箱形断面柱に対する現場横向ロボット溶接技術の開発 その 1～2，日本建築学会大会学術講演梗概集，材料施工, pp.635-638, 2021.9
11) 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
12) 日本建築学会：建築工事標準仕様書 JASS6 鉄骨工事, 2018
13) 日本建築学会：鋼構造建築溶接部の超音波探傷検査規準・同解説, 2018
14) 日本建築センター：鉄骨梁端溶接接合部の脆性的破断防止ガイドライン・同解説, 2006