

## 論文・報告

# BOX 柱極厚角継手部へのエレクトロスラグ溶接法の適用

Application of Electroslag Welding Process for Thick Corner Joint of Built-up BOX Column

津山 忠久 \*1  
TSUYAMA Tadahisa

南部 志朗\*2  
NANBU Shiro

辻 巧 \*3  
TSUJI Takumi

高層ビルの柱に用いられる 4 面箱型断面柱、通称 BOX 柱に採用されるスキンプレートは高層化等に伴って極厚化し、角継手の溶接量は著しく増大する。四国工場ではサブマージアーク溶接法による 1 パス施工の適用が難しい板厚 60mm を超える BOX 柱角継手向けにエレクトロガスアーク溶接法を開発、板厚 80mm までを 1 パス溶接可能な高能率施工を行ってきた。しかし本溶接法には 2 つの大きな課題があり、改善を強く求められてきた。これらの解決のために BOX 柱角溶接向けのエレクトロスラグ溶接法を新たに開発した。本施工法適用により溶接の連続性が劇的に改善することで溶接品質が向上、加えて大幅な低コスト化を達成した。本報では新施工法の概要、従来法との比較および溶接部の機械的性質等について紹介する。

キーワード：BOX 柱、角溶接、エレクトロガスアーク溶接法、エレクトロスラグ溶接法、溶融スラグ

## 1. はじめに

高層ビル等の柱に用いられる箱型断面柱（以下、BOX 柱）は、建築物の高層化に伴って高強度かつ極厚のスキンプレートが採用されることが多い。BOX 柱は 4 枚のスキンプレートと内蔵されるダイアフラムから構成されるが、スキンプレートの極厚化は BOX 柱に 4 線ある角継手の溶接量を著しく増大させる。板厚 60 mm 未満の BOX 柱角継手部に採用される主な施工法は 2 電極サブマージアーク溶接による 1 パス溶接であり非常に高能率な施工法が適用されているが、板厚 60 mm 以上では 1 パス溶接の採用が難しい。これは 2 電極サブマージアーク溶接法のほぼ限界板厚条件であるために安定した溶接品質が得られにくいことが理由の一つとして挙げられる。さらに、阪神淡路大震災以降、柱-梁継手部のみならず角継手にも高い機械的性質が求められることもあり、入熱量が増大しやすい極厚継手の 1 パス溶接は溶接部の靱性確保が難しくなる。弊社では従来、板厚 60 mm 以上の BOX 柱角継手部の施工は炭酸ガスシールドアーク溶接法による下盛り溶接を行った後に 2 電極サブマージアーク溶接法で仕上げ溶接を行う混用施工法を採用してきた。本施工法は各パスの入熱量を低く抑えることができることで良好な溶接部機械的性質が得られる一方で、非常に多パス施工となるために多大な工数が必要であることが大きな課題であった。また、近年、工数低減と溶接部機械的性質確保を目的に 2 電極サブマージアーク溶接法を用いた少パス多層盛り施工法も開発され<sup>1)</sup>、高能

率な施工法として採用されつつある。しかしながら、低温割れ防止のための予熱および後熱作業が不可欠なこと、ライン化された BOX 柱製作工程においてサブマージアーク溶接機を長時間占有し、BOX 柱製作ラインの流れを阻害してしまうこと等が課題である。

弊社では約 10 年前にスキンプレート板厚 60~80 mm の角継手を 1 パス溶接可能な 2 電極エレクトロガスアーク溶接法を開発し、高能率・高品質・高い機械的性質を同時に満足する施工法として実用化した<sup>2~4)</sup>。本施工法は BOX 柱を建てて設置し、BOX 柱コーナーを做って走行レール不要で自走可能な自社開発の溶接台車 2 台にそれぞれ 2 本トーチを配置、立向姿勢で角継手 2 溶接線を同時溶接することで高能率な施工を可能とした。これまで多くの物件に採用してきたが、エレクトロガスアーク溶接の特性上大きな課題が存在した。そこでこれら課題を全て解決すべくエレクトロスラグ溶接を採用することとし、BOX 柱極厚角継手向けの新たな施工法として確立したので紹介する。

## 2. エレクトロガスアーク溶接法の課題

エレクトロガスアーク溶接法には大きく二つの課題があると考えている。一つは大量に発生するスパッタとヒュームである。BOX 柱角溶接線は長く、エレクトロガスアーク溶接法を適用した場合の溶接時間は 3 時間に及ぶこともある。この間多量に発生するスパッタは各電極のチップや水冷摺動銅板のシールドガス吹出し口に付着するため溶接中はオペレータが随時除去しているが、完

\*1 川田工業㈱鋼構造事業部四国工場生産開発課 課長

\*2 川田工業㈱鋼構造事業部四国工場製造課 係長

\*3 川田工業㈱ 執行役員鋼構造事業部四国工場長

表 1 エレクトロガスアーク溶接法の課題

電極先端へのスパッタ付着

ビード不整


完全に除去することはほぼ不可能であり、電極先端にスパッタ等が付着することで生じる予期できないワイヤ送給停止、すなわち溶接停止が課題であった(表 1)。弊社ではこの課題に対してシールドガスに Ar-CO<sub>2</sub> 混合ガスを用いてスパッタ発生量を低減させる試み<sup>4)</sup>を行ったが、溶け込みが小さくなる等の課題があり採用には至らなかった。

もう一つの課題はワイヤに含まれるフラックスが溶融スラグとして溶融金属上に溜まり続けることである。溶融スラグの一部はビード表面で固化して排出されるが、排出される量よりもワイヤからの供給量が多いために溶融スラグは増え続ける。溶融スラグが過度に溜まるとアーク不安定が生じたり、アークによってスラグが跳ねて電極先端に付着して稀にワイヤ送給停止が生じたり、水冷摺動銅板のシールドガス吹き出し口を塞いでシールドガスの流れを阻害する等のため、溶接中に随時溶融スラグ排出を行う必要がある。排出作業は水冷銅板を一時的に僅かに傾けて流出させる手法を採用していたが、この作業が難度・頻度とも高くオペレータ負担であった。また、溶融金属も同時に僅かに排出されてしまうことでビード表面の形状が乱れる(表 1)。このため後工程でビード表面の仕上げ作業が必須となっており、この仕上げ工数の低減が求められていた。

### 3. BOX 柱角継手向けエレクトロスラグ溶接法

上記課題を全て解決する施工法として BOX 柱極厚角継手向け 2 電極エレクトロスラグ溶接法を開発し<sup>5)~9)</sup>、弊社四国工場へ導入した。

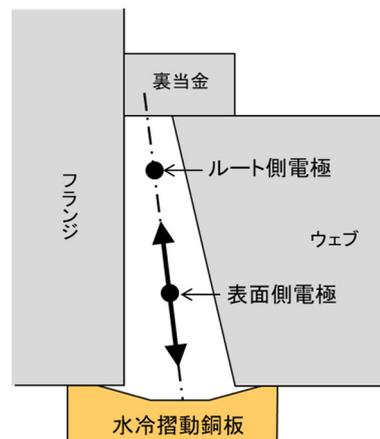


図 1 開先形状と電極他配置



写真 1 エレクトロスラグ溶接法による施工の様子

エレクトロスラグ溶接法は BOX 柱に内蔵されるダイアフラムに広く採用される溶接方法である。原理的には溶融スラグの抵抗発熱を利用するもので、溶融スラグ浴へ送給されたワイヤから通電した電流によって溶融スラグが高温となり、ワイヤが溶融して溶接金属が形成される立向溶接法である。非常に安定した溶接法であることから自動溶接法として確立されており、ダイアフラムの溶接においては 1 名のオペレータが複数の溶接線を同時に施工することが可能な高能率施工法で、内ダイアフラムを有する BOX 柱の製作に欠かせない。アークが発生しないのでオペレータの安全性向上および作業環境改善にも寄与する。ダイアフラムの溶接には一般に 1 電極式が用いられるが、BOX 柱極厚角継手への適用においては

2 電極式とした。以下に本施工法の概要と特徴を示す。

### (1) 施工法の概要

本施工法の概要を以下に示す。開先形状と電極他配置図を図 1 に、工場内専用設備における施工の様子を写真 1 に示す。

- ① BOX 柱を建ててセット
- ② スキンプレート板厚 60～80 mm を 1 パス施工
- ③ 2 電極式（ルート側電極を固定，表面側電極をウェブ板厚方向に揺動）
- ④ 開先角度 15° の狭開先レ型開先採用（裏当金有）
- ⑤ 従来施工法である 2 電極エレクトロガスアーク溶接法専用設備（BOX 柱架台および溶接台車等）を改造無で流用
- ⑥ 角溶接線 2 線を同時溶接
- ⑦ シールドガス不要

### (2) 本施工法の特徴

本施工法の特徴を従来施工法である 2 電極エレクトロガスアーク溶接法と比較し，下記に示す。

- a) スパッタおよびヒューム発生抑制による溶接品質向上

エレクトロスラグ溶接法はスパッタおよびヒューム発生がほとんどない。そのため前述した電極先端へのスパッタ付着がほぼ皆無となることでスパッタを起因とするワイヤ送給が停止することは無くなり，結果溶接中断が生じなくなり溶接連続性が劇的に改善した。またスパッタおよびヒュームがほとんどないことおよびアーク発生がないことはワイヤ狙い位置の視認性も向上するため，溶接品質が向上する。写真 2 では，健全な溶接金属部および母材と裏当金への十分な溶け込みが得られていることが確認できる。

- b) スラグ排出作業不要

エレクトロガスアーク溶接では邪魔な存在であった溶融スラグ浴は，エレクトロスラグ溶接では溶接維持のために逆に必要となる。エレクトロスラグ溶接ではソリッドワイヤを用いておりワイ

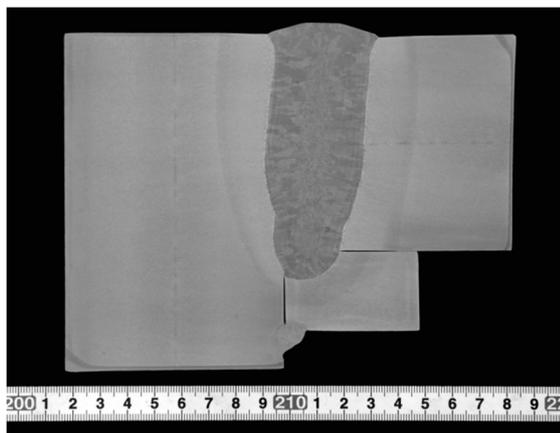


写真 2 溶け込み形状 (板厚 80 mm)



写真 3 ビード外観

ヤからのフラックス供給は無いため，溶接維持のためのスラグ浴形成には溶接開始前にフラックスを投入する。溶融スラグはビード表面で固化して連続的に少量ずつ排出されるため，その減少分を補って適正な深さのスラグ浴を維持するために溶接中に随時フラックスを補給する必要があるが，エレクトロガスアーク溶接のように溶融スラグを排出する必要はない。したがって，この排出作業が不要となることでオペレータ負担は大幅に低減した。

- c) 美しいビード外観

本施工法で得られたビード外観を写真 3 に示す。溶融スラグ排出作業が不要となることでビード表面の不整が生じることが無くなり，美しいビードが得られているのが分かる。また，水冷摺動銅板に溝加工を行うことで適正な余盛高さとなめらかな止端形状が得られる。これらにより溶接後のビード仕上げ工程が不要となり，大幅な工数低減が可能となった。

## 4. 各種鋼材を用いた溶接部の機械的性質

本施工法は極厚鋼材の 1 パス施工であるために大入熱施工となるため，溶接部機械的性質低下が懸念される。そこで BOX 柱に採用される建築鉄骨用鋼材を用いた確認実験を行ったので結果の一例を示す。

実験概要を表 2 に示す。用いた鋼材は板厚 80 mm の 590, 550 および 490 MPa 級で，入熱量 (650～700 kJ/cm) を考慮して全て高 HAZ 靱性鋼とした。溶接材料は日鉄溶接工業(株)製のエレクトロスラグ溶接用ソリッドワイヤ 3 種類 (YM-60E, YM-55HF, YM-55S) およびフラックス (YF-15I) を用いた。機械試験片採取

表 2 溶接部機械試験の実験概要

使用鋼材	板厚	80mm
	鋼材強度	590,550,490MPa
	鋼材種	高HAZ靱性鋼
溶接材料	ワイヤ	YM-60E, YM-55HF, YM-55S(1.6mmφ)
	フラックス	YF-15I
機械試験	溶接金属部丸棒引張試験, シャルピー衝撃試験(DEPO,BOND,HAZ)	

位置深さはすべて  $t/4$ 、シャルピー衝撃試験片ノッチ位置は DEPO, BOND, HAZ (BOND +1 mm, BOND +3 mm) とした。

溶接金属部引張試験結果を表 3 に、シャルピー衝撃試験結果を鋼材種別に図 2~4 に示す。表 3 より、大入熱溶接であるにも関わらず溶接金属 0.2%耐力および引張強さは母材規格値を全て満足する良好な結果が得られていることが分かる。550, 490 MPa 鋼にはそれぞれ 2 種類の溶接材料を用いたが、いずれの組み合わせにおいても母材規格値を満足する高い強度が得られており、これらは同板厚のダイヤフラム溶接時の溶接金属部強度よりもかなり高いと言える。

図 2~4 に示すシャルピー衝撃試験結果によると、DEPO 部の 0℃吸収エネルギーは 60 J 以上を示す良好な結果であった。特に 550 MPa 鋼と YM-60E および YM-55HF, 490 MPa 鋼と YM-55HF の組み合わせでは 140 J を超える値を示した。BOND 部においては 590 MPa 鋼の場合にフランジ側において 50 J のやや低値が確認された。HAZ 部ではいずれの鋼材においても 80 J 以上の良好な値を示しており、高 HAZ 韌性鋼の効果が見られる。また、全ての鋼材の共通点として、フランジ側とウェブ側の BOND, HAZ 部 0℃吸収エネルギーにあまり差が生じていないことが挙げられる。フランジ側でのシャルピー衝撃試験片の採取は板厚方向、いわゆる

表 3 溶接金属部の引張試験結果

鋼材強度	溶接材料	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	絞り (%)
590MPa	YM-60E	473	679	19	70
550MPa	YM-60E	487	695	27	69
	YM-55HF	461	629	24	69
490MPa	YM-55HF	502	672	23	66
	YM-55S	402	532	29	71

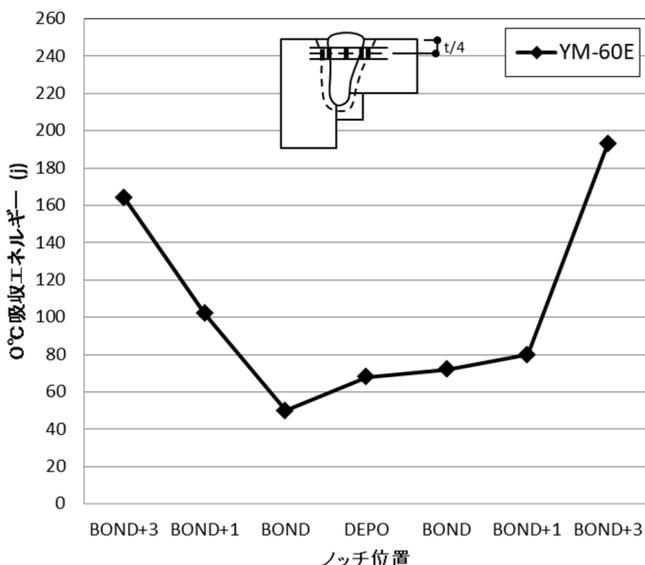


図 2 590 MPa 級鋼材におけるシャルピー衝撃試験結果

Z 方向となるために吸収エネルギーは低値となりやすい。特に、厚板の板厚中央近傍ではこの傾向が顕著となるが、本施工法ではフランジ側の開先を取っていないことに加え、水冷摺動銅版により溶接部が冷却された効果によって熱影響部の幅が狭くなり、試験片ノッチ位置が板厚表面近傍に位置したことがフランジ側で低値を示しにくい理由の一つと考えられる。なお、この傾向は前施工法であるエレクトロガスアーク溶接法でも確認されている。

以上のように、高 HAZ 韌性鋼を用いたときの角継手エレクトロスラグ溶接部の機械的性質は、建築鉄骨で要求される一般的なスペック（例えば強度：母材規格値以上、0℃吸収エネルギー：47 J 以上）を満足する結果であり、ダイヤフラム溶接に一般に用いられているエレクトロスラグ溶接材料を適用できることが明らかとなった。本施工法は 2 電極かつ厚鋼板 1 パス施工の大入熱溶接であるにも関わらず良好な結果が得られた理由としては、

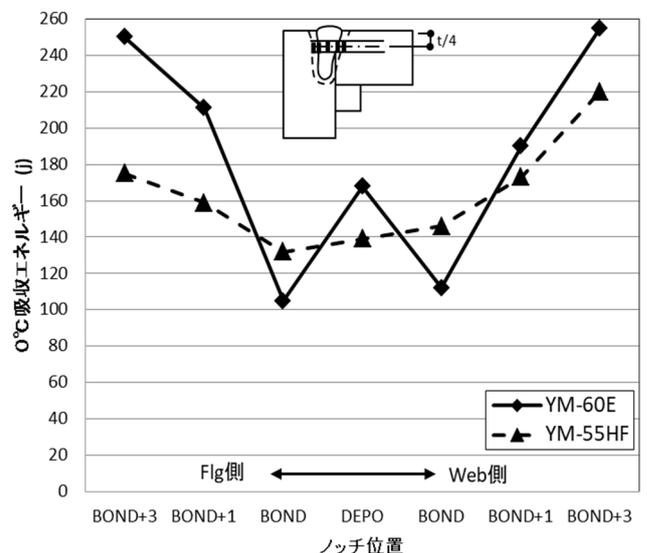


図 3 550 MPa 級鋼材におけるシャルピー衝撃試験結果

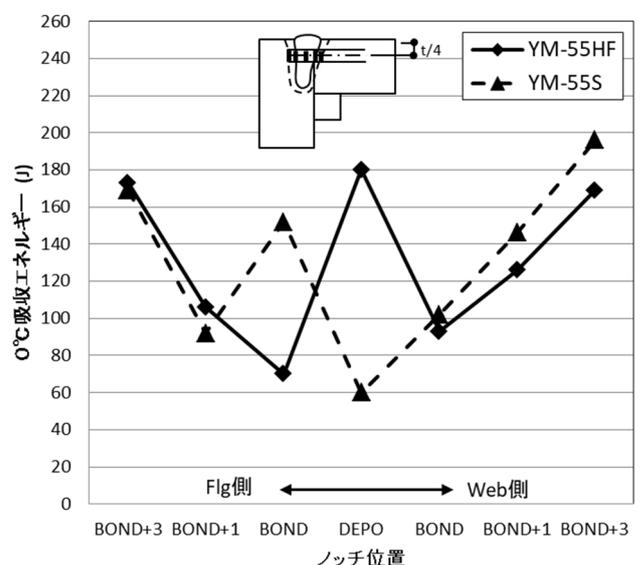


図 4 490 MPa 級鋼材におけるシャルピー衝撃試験結果

水冷摺動銅版により溶接部および鋼材を常に冷却していること、狭開先化およびワイヤ送給速度の高速化により入熱量を低減できていること（板厚 60 mm で比較するとダイアフラム溶接比で約 35%低減）が挙げられる。本結果より、BOX 柱極厚角継手への 2 電極エレクトロスラグ溶接法の適用可能性を証明できた。

## 5. おわりに

BOX柱極厚角継手への2電極エレクトロスラグ溶接法の特徴と溶接部機械的性質等について紹介した。本施工法は従来施工法であるエレクトロガスアーク溶接法の課題を全て解決し、品質・能率・性能・コストを非常に高いレベルで同時に満足する施工法である。今後はより自動化を高め、オペレータレス施工を目指して開発を行う予定である。

### 参考文献

- 1) 湯田ら：極厚ボックス角継手 SA440) への多層盛りサブマージアーク溶接の検討，日本建築学会学術講演梗概集，pp. 1045-1046，2014. 9.
- 2) 津山，栗山：タンデムエレクトロガスアーク溶接法を用いた極厚角継手高能率施工法の検討(第 2 報)，溶接学会全国大会講演概要，Vol. 83，pp. 362-363，2008. 9.
- 3) 津山：タンデムエレクトロガスアーク溶接法の建築鉄骨への適用，溶接技術，Vol. 55，pp. 107-111，2007.
- 4) 南部：極厚 BOX 柱角溶接へのエレクトロガスアーク溶接の適用 PART2，鉄骨建設業協会 第 7 回技術発表会，2015.
- 5) 特許 第 6152203 号
- 6) 津山，福本，荻野，浅井：高能率エレクトロスラグ溶接施工法の開発 第 1 報，溶接学会全国大会講演概要，Vol. 103，pp. 384-385，2018. 9.
- 7) 津山，福本，荻野，浅井：箱型断面柱極厚角接手部の高能率施工法の開発，溶接学会溶接法研究委員会，2018.11.
- 8) 津山，南部，辻：エレクトロスラグ溶接法を用いた高能率施工法の開発，溶接技術，Vol.67，pp.51-55，2019.1
- 9) T. Tsuyama, S. Nanbu, T. Tsuji, Y. Ogino, A. Asai : High productive Electroslag welding process for thick corner joint of built-up BOX column, The72nd IIW Annual Assembly 2019, Doc. XII-2439-19.