

高電流埋もれアーク溶接を用いたすみ肉溶接施工試験

吉田 文久 西 拓馬 村上 良祐^{*1} 田中 剛^{*2} 恵良 哲生^{*3}

Fumihisa Yoshida, Takuma Nishi, Ryosuke Murakami, Tsuyoshi Tanaka, Tetsuo Era

概 要

高電流埋もれアーク溶接が、建築分野において実用化されてきている。埋もれアークは炭酸ガスをシールドガスに用いて、概ね 300A 以上の高電流条件下で発生するアーク現象で、溶込みが深く、狭開先の完全溶込み溶接や溶込みの深いすみ肉溶接が可能である。また、従来の炭酸ガスシールドアーク溶接に比べて、300A を超える高電流域においてもスパッタが少なく、安定したアークによる高い作業性により、パス数を削減することが可能である。このように高電流埋もれアーク溶接は高能率な溶接施工が期待できる一方で、溶接金属の強度・破壊靱性については不明な点が多く、技術資料の蓄積が必要である。

本研究では、高電流埋もれアーク溶接を用いたすみ肉溶接の溶接施工試験を行った。その結果、全ての試験体において深い溶込みが得られたことを確認した。また、大入熱による母材希釈が溶接部の機械的性質に影響を及ぼすことが分かった。

Welding Tests of Fillet Weld Using High-Current Buried Arc Welding

Abstract

High-current buried arc welding has been put into practical use in the construction field. The buried arc is an arc phenomenon generated under a high-current condition of approximately 300 A or more using carbon dioxide gas as a shielding gas. It can be used to weld with a deep penetration, and full penetration welding with narrow groove and fillet welding with deep penetration are possible. In addition, compared with conventional carbon dioxide gas-shielded arc welding, spatter is reduced even in a high-current region exceeding 300 A, and the number of passes can be reduced due to high workability by a stable arc. While high-current buried arc welding can be expected to achieve high-efficiency welding, there are many uncertainties about the strength and fracture toughness of the weld metal, and it is necessary to accumulate technical data.

In this study, a welding test of fillet welding using high-current buried arc welding was conducted. As a result, it was confirmed that deep penetration was obtained in all test specimens. It was also found that base metal dilution due to the large heat input affects the mechanical properties of the welds.

キーワード：埋もれアーク溶接，すみ肉溶接，溶接施工試験，マクロ試験，機械的性質，化学成分

^{*1} 大和ハウス工業 東北工場

^{*2} 神戸大学

^{*3} 株式会社ダイヘン

1. はじめに

高電流埋もれアーク溶接が、建築分野において実用化されてきている。埋もれアークとは、**図1**に示すような炭酸ガスをシールドガスに用いて概ね300A以上の高電流条件下でアーク長を短く保つことで、強いアーク力によって溶融池が凹状に押し下げられた空間（以下、埋もれ空間）に、ワイヤ先端が侵入した状態で発生するアーク現象のことを指す。埋もれアーク溶接は、溶込みが深く、狭開先の完全溶込み溶接や溶込みの深いすみ肉溶接が可能である。一方、埋もれ空間が不安定になりやすく、不規則な短絡が生じ、ビード形状が悪化するため、実用化には至っていなかった。

近年、株式会社ダイヘンにおいて、埋もれ空間を安定化させる溶接技術²⁾の開発が進められ、埋も

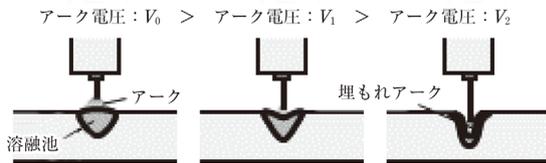


図1 埋もれアークの形成イメージ

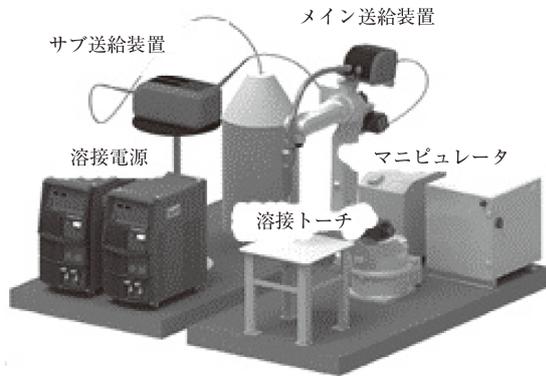


図2 D-Arc ロボット溶接システム

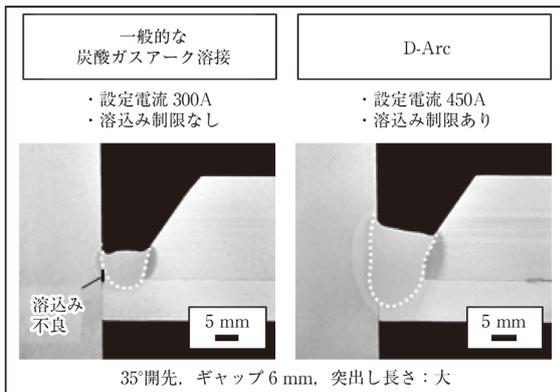


図3 D-Arc ロボット溶接システムの適用例

れアークの実用化が可能となってきた³⁾。**図2**に2017年に株式会社ダイヘンが製品化したロボット溶接システム「D-Arc」の例を示す。本システムは、厚板溶接の高能率化を目的として開発され、埋もれアーク現象を安定化することで実用化されたシステムである。当初はロボット溶接における高能率化を狙って開発された溶接法ではあるが、2018年より半自動仕様も市場に投入されている。

その深い溶込みを活かして、**図3**に示すように多層盛溶接における初層の溶込み不良などの欠陥を防止できるとともに、ルート間隔の狭い溶接も可能となる。また、従来の炭酸ガスシールドアーク溶接法に比べて、300Aを超える電流域での低スパッタ性能と安定したアークによる高い作業性により、40kJ/cmでの入熱条件でもパス数を約40%程度低減させることが可能である。半自動溶接においても高能率化を実現することから、多層盛溶接の求められる溶接作業において「働き方改革」を実現する新たな炭酸ガスシールドアーク溶接法として期待される。

このように高電流埋もれアーク溶接では、深い溶込みと低スパッタ性能を活かした高能率の溶接施工が期待できる。一方、溶接金属の強度・破壊じん性については、不明な点が多く、技術資料の蓄積が望まれる。

本報では、高電流埋もれアーク溶接の原理の概要およびすみ肉溶接（下向き溶接）を対象としたパイロット試験の結果⁴⁾について紹介する。

2. 高電流埋もれアーク溶接「D-Arc」の概要

一般的な定電圧特性の溶接電源を用いて500Aを超える高電流条件下における埋もれアーク現象を、ハイスピードビデオカメラで観察した例を40ms間抽出して示すと**図4**のようになる。埋もれ空間の

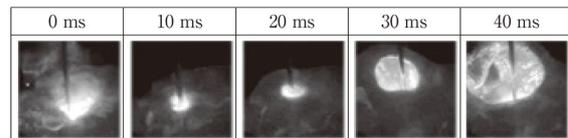


図4 高電流埋もれアーク溶接の不安定挙動

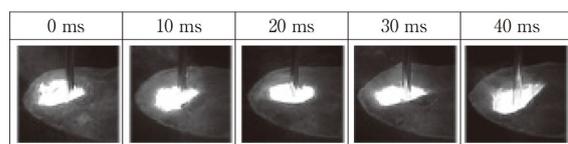


図5 電圧制御による埋もれアーク安定化の例

開口部が大きく不規則に揺動し、非常に不安定なアークおよび溶融池の挙動を示す。開口部の揺動はワイヤとの短絡による大粒のスパッタを発生させ、不規則な溶融池の挙動はビード端部の不揃いや溶込み不安定化の原因となる。

この問題を解決するため、デジタルインバータ溶接機の特徴を活かして電流域ごとに外部特性を最適化し、新たに開発した電圧振幅制御により、高電流埋もれアーク現象の安定化に成功した⁹⁾。この安定化技術は、設定電圧を約 100Hz で周期的に変化させており、低電圧設定区間では溶融池底部を加熱しながら溶滴を鉛直下向きに移行させて溶融金属を供給し、高電圧設定区間ではアークを溶融池壁面に向けることで埋もれ空間が崩落しないように支え、図 5 に示すように開口部の不規則な揺動を抑えることに成功している。さらに、ワイヤ先端が溶融池に囲まれることで発生したスパッタの多くが溶融池にトラップされ、外部への飛散や母材への付着も抑制できる。

3. 溶接施工試験

3.1 試験体

建築鉄骨において、すみ肉溶接は主にせん断力を伝達する溶接継手として広く用いられている。板厚が大きくなり、伝達すべき応力が大きくなると、必要なのど厚も大きくなる。そこで、板厚が 19mm 以上になると 60° の開先を設けて正三角形の深溶込みのすみ肉溶接とすることが多い。一般には、母材のせん断降伏を溶接部のせん断降伏に先行させるため、すなわち、両側ののど厚の和が母材板厚を上回るようにするため、板厚の 1/3 の深さの開先が設けられる。

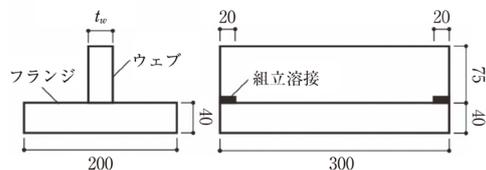


図 6 試験体形状

表 1 試験体一覧

試験体名	ウェブ板厚 t_w [mm]	開先		溶接ワイヤ	フランジ板厚 t_f [mm]
		角度 ϕ [°]	深さ d [mm]		
① t16-w18-n	16	無		YGW18 (1.4mm)	40
② t25-w18-n	25	無			
③ t28-w18-k	28	60	6		
④ t40-w18-k	40	60	7		
⑤ t25-w11-n	25	無			
⑥ t40-w11-k	40	60	7		

高電流埋もれアーク溶接の溶込みが深いという長所を生かせば、開先加工が不要または開先深さの小さい深溶込みのすみ肉溶接を実現できる可能性がある。そこで、すみ肉溶接を対象としたパイロット実験を行った。

試験体形状は図 6 に示す T 継手である。T 継手のフランジの板厚は 40mm、幅は 200mm、ウェブの高さは 75mm、溶接長は 300mm である。実験因子はウェブの板厚 (16mm, 25mm, 28mm, 40mm) および溶接ワイヤの種類 (YGW18, YGW11) で、表 1 に示す 6 体について試験を行った。なお、ウェブの板厚 t_w が 25mm 以下の場合では開先なしとし、28mm 以上の場合では 60° の開先を設けた。溶接は T 継手の両側について行い、先行溶接側を A、後行溶接側を B で表す。

3.2 溶接条件

溶接はロボット溶接により行った。試験体を 60° 傾け、下向き姿勢で 1 パスの溶接を行った。溶接速度を一定とし、板厚に応じて電流および電圧を変化させた。入熱量は、37~59kJ/cm であり、通常の炭酸ガスシールドアーク溶接に比べて、入熱量が大きい溶接となっている。

4. 試験結果

4.1 マクロ試験

図 7 にマクロ試験結果の例を示す。全ての試験体において、溶込みが深く、開先深さ以上の深い溶込みの部分溶込み溶接と見なすことができる。試験体① ($t_w=16$ mm) では不溶着部が残らず、ウェブ全厚にわたって完全に溶込んでいる。試験体④ ($t_w=40$ mm) の B 側には、溶接部の柱状晶の会合部に高温割れと推定される割れが発生している。電流が高く溶接金属の深さ H と幅 B の比 H/B が大きくなったことが割れの要因の一つと考えられる。割れ防止の対策としては、電流を下げ、溶接速度を

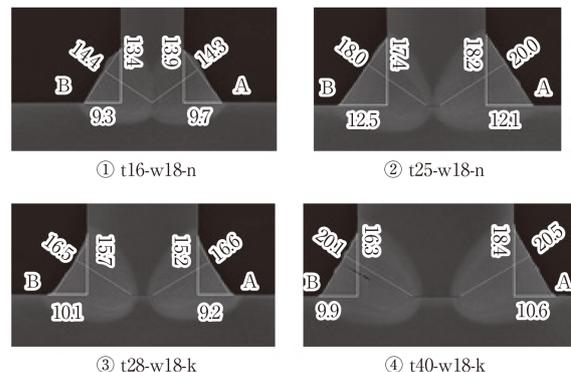


図 7 マクロ試験結果 (数字は脚長とのど厚 mm)

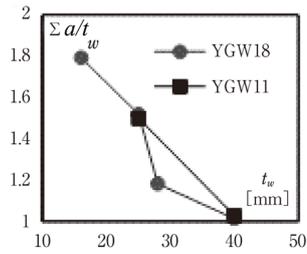


図8 のど厚とウェブ板厚の関係

調整することにより H/B を小さくすることが考えられる。

マクロ試験結果より溶接部ののど厚を測定した。のど厚は不溶着部の先端から溶接部の止端を結ぶ直線までの距離とした。各試験体ののど厚の和 Σa とウェブ板厚 t_w の比とウェブ板厚 t_w との関係を図8に示す。板厚の増加にともない $\Sigma a/t_w$ は減少するが、 $t_w=40\text{mm}$ の場合でも $\Sigma a/t_w$ は1.0を上回っている。4.2節に示す溶接金属の強度を考えると、T継手のせん断強度は、母材側で決定することになる。

マクロ試験結果より溶接金属の希釈率（母材溶融面積／溶接金属断面積）を求めた。希釈率は、ウェブ板厚によらず 54～58%の大きい値となっており、溶接金属の半分以上を母材溶融部が占めている。

4.2 機械的性質

(1) 引張試験

溶接金属より引張試験片を採取し、引張試験を行った。試験結果を表2に示す。一般に入熱量が大きくなると溶接部の強度が低下することが知られている。本試験では、最大 59kJ/cm の入熱量で溶接しているが、溶接ワイヤによらず降伏点で 500N/mm^2 程度以上、引張強さで 600N/mm^2 以上の高い値が得られている。既往の炭酸ガスシールドアーク溶接の試験結果の例から見ると不思議なほど高い値となっている。

(2) シャルピー衝撃試験

溶接金属よりシャルピー衝撃試験片を採取し、 0°C で衝撃試験を行った。試験結果を表3に示す。溶接金属の吸収エネルギーは、YGW18の場合では $47\sim 81\text{J}$ 、YGW11の場合では $32\sim 61\text{J}$ となり、SN490B材の吸収エネルギーの規定値である 27J を上回るが、炭酸ガスシールドアーク溶接の下限⁶⁾に近い値となっている。

4.3 化学成分

溶接金属の化学成分分析を行った。鋼材および

溶接ワイヤのミルシートに記載された化学成分と併せて試験結果を表4に示す。

図9の(1)に溶接金属、母材および溶接ワイヤのCの成分含有量を示す。溶接ワイヤのC含有量が $0.03\sim 0.04\%$ であるのに対して、溶接金属のC含有量は $0.10\sim 0.11\%$ と大きく増加している。通常の炭酸ガスシールドアーク溶接においても主に母材

表2 引張試験結果

試験体名	溶接ワイヤ	降伏点 σ_y [N/mm ²]	引張強さ σ_u [N/mm ²]	伸び EL [%]
① t16-w18-n	YGW18	519	614	24
② t25-w18-n		542	638	30
③ t28-w18-k		499	626	26
④ t40-w18-k		542	647	30
⑤ t25-w11-n	YGW11	501	607	31
⑥ t40-w11-k		506	624	13*

*: 標点外で破断した。

表3 シャルピー衝撃試験結果

試験体名	試験温度 [°C]	吸収エネルギー [J]			
		1	2	3	平均
① t16-w18-n	0	77	54	58	63
② t25-w18-n		56	47	47	50
③ t28-w18-k		75	56	67	66
④ t40-w18-k		50	59	81	63
⑤ t25-w11-n	0	42	38	32	37
⑥ t40-w11-k		56	61	61	59

表4 化学成分 (mass %)

材種		ウェブ板厚 [mm]	C	Si	Mn	P	S	Mo
鋼材	SN490B	16	0.18	0.36	1.26	0.013	0.003	-
		25	0.17	0.35	1.30	0.015	0.004	-
		28	0.16	0.42	1.44	0.012	0.005	-
		40	0.16	0.42	1.44	0.012	0.005	-
溶接ワイヤ	YGW18	-	0.03	0.79	1.87	0.011	0.008	0.14
	YGW11	-	0.04	0.72	1.64	0.014	0.008	-
溶接金属	YGW18	① 16	0.10	0.37	1.21	0.013	0.005	0.07
		② 25	0.10	0.40	1.29	0.013	0.006	0.07
		③ 28	0.10	0.41	1.26	0.013	0.005	0.07
		④ 40	0.10	0.42	1.26	0.014	0.005	0.08
	YGW11	⑤ 25	0.11	0.32	1.16	0.014	0.006	0.01
		⑥ 40	0.10	0.37	1.17	0.015	0.005	0.02

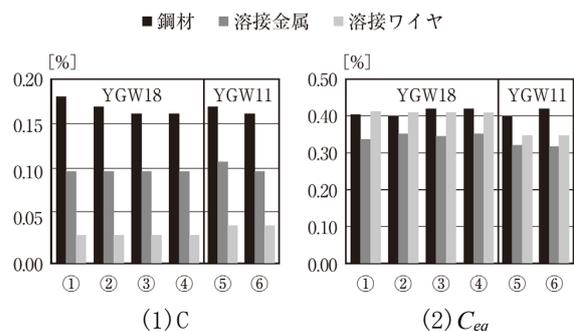
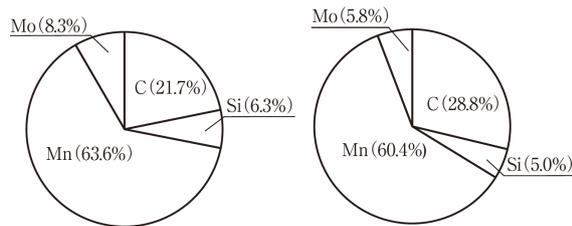


図9 化学成分 (mass %)



(1) t=40mm, HI=35kJ/cm (2) ④t40-w18-k

図 10 Ceq に占める各元素の割合

からの希釈によって C 含有量は増加するが、せいぜい溶接ワイヤの 2 倍程度の増加に留まる⁷⁾。一方、埋もれアーク溶接では、2.5~3.3 倍に増加している。これは、希釈率の増大にともなうものと考えられる。溶接金属の C 含有量は、溶接ワイヤと母材のおおむね平均値となっている。

溶接金属、母材および溶接ワイヤの炭素当量 Ceq を下式により略算的に算定した。

$$C_{eq} = C + Si/24 + Mn/6 + Mo/4 \dots\dots\dots (1)$$

図 9 の (2) に Ceq の算定結果を示す。溶接金属の Ceq は、YGW18 では 0.34%程度、YGW11 では 0.31%程度であり、溶接ワイヤの Ceq に対して YGW18 では 85%程度、YGW11 では 90%程度に減少している。一方、炭酸ガスシールドアーク溶接では、入熱量 25~35kJ/cm の溶接条件に対して、溶接金属の Ceq は溶接ワイヤの値の 80%程度に低下することが報告されている⁷⁾。高電流埋もれアーク溶接では、入熱量が大きいにもかかわらず、Ceq の低下は炭酸ガスシールドアーク溶接の場合よりも小さい。この主な原因は、希釈率が大きく、C 含有量が増加したためと考えられる。

図 10 に Ceq に占める各元素の割合の例を示す。図 10 の (1) は炭酸ガスシールドアーク溶接 (板継手 t=40mm, 入熱量 HI=35kJ/cm) の場合⁷⁾であり、図 10 の (2) は試験体 t40-w18-k の場合である。埋もれアーク溶接では C 含有量の占める割合が大きく増加していることが分かる。

4.4 考察

高電流埋もれアーク溶接では、入熱量が大きいにもかかわらず溶接金属の強度は高い。これは、希釈による C 含有量の増加およびフランジ板厚が 40mm と大きく 1 パス溶接による冷却時間が短かったことによると考えられる。一方、溶接金属の吸収エネルギーは低い値に留まった。これは、希釈による C 含有量の増加および Mo 含有量の低下によるじん性改善効果の低下や、大入熱による冷却時間

の増加によるものと考えられる。ただし、主にせん断力の伝達を目的とするすみ肉溶接継目では、ぜい性破壊が問題となることはないので、母材規格値の 27J 以上を確保できれば良いと考える。

5. おわりに

高電流埋もれアーク溶接法の原理の概要およびすみ肉溶接を対象としたパイロット試験の結果を紹介した。建築鉄骨における溶接施工の高効率化を図る上で、高電流埋もれアーク溶接法は、強力なツールとなり得る。一方、溶接金属の機械的性質に対する母材希釈の影響が、炭酸ガスシールドアーク溶接の場合よりも大きい。使用する溶接ワイヤおよび母材との相性等も考えられる。溶接施工試験に基づく技術資料を蓄積し、溶接部に要求される性能を考え、適材適所に採用することは、鉄骨工事に大きいメリットを与えると考える。

謝辞

本報は月刊「溶接技術」2022 年 2 月号に掲載された論文「高電流埋もれアーク溶接を用いた溶接施工試験」を再構成したものである。本研究にあたり、神戸大学大学院工学研究科の田中剛教授ならびに株式会社ダイヘン 溶接・接合事業部研究開発部の恵良哲生博士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る。

参考文献

- 1) 溶接学会: 新版 溶接・接合技術特論, 産報出版株式会社, p.48, 2005.3
- 2) 馬場勇人: 高電流埋もれアークを用いた厚板高能率溶接法の開発, 溶接技術, Vol.86, No.7, pp.510-514, 2017.10
- 3) 馬場勇人, 森大輔, 恵良哲生, 松下和憲, 田中学: 高電流埋もれアークを用いた厚板高能率溶接システム「D-Arc」の開発, 溶接技術, Vol.69, No.8, pp.92-96, 2021.8
- 4) 吉田文久, 田中剛, 濱田菜緒, 西拓馬, 渡邊崇哉: 高電流埋もれアーク溶接を用いたすみ肉溶接の施工試験(その 1, その 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東海), pp.581-584, 2021.9
- 5) 馬場勇人, 塩崎英男, 恵良哲生, 上山智之, 田中学: 高電流埋もれアークの安定化, 溶接学会全国大会講演概要, No.98, pp.170-171, 2016
- 6) 向井昭義, 中野利彦, 岡本晴仁, 森田耕次: 建築構造用マグ溶接ワイヤの検討, 鋼構造論文集, Vol.7, No.26, pp.13-25, 2000.6
- 7) 西田祐三, 田淵基嗣, 田中剛, 倉持貢, 中野利彦: 冷却時間と化学成分を考慮した YGW18 を用いる場合の溶接金属の強度評価式, 鋼構造論文集, Vol.14, No.53, pp.33-48, 2007.3

執筆者紹介



吉田 文久
博士（工学）

ひとこと

建設業における生産性は、決して高いとは言えません。様々な革新的技術を社会実装することで、生産性を高めることが重要であると考えています。