鉄粉添加フラックスを用いた大入熱サブマージアーク 溶接の溶融池現象と適正溶接条件*

阪口 修一**, 山口 忠政**, 中野 善文**

Behavior of Molten Metal and Optimum Welding Conditions of High Heat Input Submerged Arc Welding with Flux Containing Iron Powder*

by Shuichi Sakaguchi**, Tadamasa Yamaguchi** and Yoshifumi Nakano**

The effect of the addition of iron powder to agglomerated flux on welding performance and the optimum welding conditions for high heat input welding were investigated. The main conclusions obtained follow:

- (1) The addition of iron powder to flux increases the deposition rate and improves welding operability.
- (2) The arc of leading electrode was generated at a lower point of molten metal between leading and trailing electrodes rather than at its top. The penetration depth was influenced by the ratio of the area of groove to that of molten metal on which leading arc is generated.
- (3) The cross sectional profile of the bead was influenced by the current ratio of the trailing electrode to that of the leading. The optimum ratio for avoiding weld defects ranged between 0.70 and 0.80.
- (4) The flux containing iron powder together with the selection of optimum welding conditions enabled the tandem wire one pass submerged arc welding for 60 mm thick plates.

Key Words: Submerged arc welding, Flux containing iron powder, Behavior of molten metal

1. 緒 言

1980年代後半から1990年前半にかけて到来した建築ブームにより、建築用鉄骨の需要が大幅に増大した。これに対応するため、生産効率の向上を目指した溶接の自動化・高能率化が検討されてきた。とりわけ、ビルの高層化や大空間の創出のために需要の増加した厚物ボックス柱角継手溶接の高能率化は、大きな問題であった。

厚物ボックス柱角継手の溶接には、当初 CO_2 溶接とサブマージアーク溶接を併用した方法が適用されたが、1970年代後半には造船分野で広く採用されていた鉄粉を添加した焼成型フラックスの適用や、長いルートフェイスの開先を大電流溶接条件で深溶込み溶接する方法の適用が検討された。その結果、1980年代には板厚40 mmまで片面1パスサブマージアーク溶接法が採用されるようになった¹⁾。

さらに、1980年代末に到来した建築ブームにより急増した厚物ボックス柱の需要に対応して、専用の鉄粉添加フラックスの適用と溶接機の導入などの設備の整備が進められ、最近では板厚50 mm以上の厚物ボックス柱の片面1パスサブマージアーク溶接施工が一般的に採用されるようになった。

多電極サブマージアーク溶接による高能率化と適正溶接条件に関する検討は、造船の板継ぎ溶接やUOE鋼管のシーム溶接を対象に試みられている²⁻⁵⁾。特に造船分野では、片面1パス溶接に鉄粉添加フラックスを用いて溶着速度を向上させて溶接入熱を抑える手法が、以前から一般的に用いられ、また鉄粉を開先に散布したりワイヤに吸着させて利用する方法も試みられている^{6,7)}。しかし溶接入熱が40 kJ/mmを越えるような、いわば超大入熱

サブマージアーク溶接に関する溶接現象の検討例はほとんどない。

また、サブマージアーク溶接におけるアークの発生状況や溶融金属の挙動については、X線透視装置を用いた検討が数多く行われている⁸⁻¹⁰⁾が、フラックスへの鉄粉添加や開先内での溶融池およびアーク発生状態はこれまで検討されていない。

そこで本研究では、大入熱サブマージアーク溶接に対する鉄粉添加フラックス適用の効果と角継手を模擬した開先内での溶融池挙動観察および断面マクロ形状に対する溶接条件の影響に関する検討を行った。

2. 実験方法

2.1 供試材

供試鋼板として厚さ50~60 mmのSM490B鋼板を用いた。溶接材料としては、化学組成が同一で、直径4.8および6.4 mmの低炭素-2%Mn系の溶接ワイヤと、32% SiO_2 -32%MgO-10%CaO系フラックスをベースに鉄粉を添加した焼成型フラックスを用い、鉄粉添加量は25%を標準とした。Table 1および2に、供試鋼板および溶接材料の化学組成を示す。

2.2 溶接装置

溶接は垂下特性の交流アーク溶接用電源を用いて行い、溶融池挙動の観察には定格1000 Aの電源を、その他

Table 1 Chemical compositions of the base plates used.

Grade	Thickness (mm)	C	Si	Mn	P	S	Nb	Ti
SM490B	50	0.13	0.42	1.45	0.014	0.003	0.018	0.020
SM490B	60	0.15	0.36	1.30	0.006	0.002	0.015	0.011

Table 2 Chemical composition of wire used.

Grade	Diameter (mm)	C	Si	Mn	P	S
S502-H	4.8, 6.4	0.06	0.01	1.95	0.015	0.004

*原稿受付 平成6年7月27日 平成3年度秋季全国大会で発表、平成3年12月溶接法研究委員会で発表。

**正 員 川崎製鉄 Member, Kawasaki Steel Corp.

Table 3 Welding conditions used for measuring deposition rate.

Electrode dia.(mm)	Current (A)	Voltage (V)	Speed (mm/min)	Heat input (kJ/mm)
6.4	1000-2000	30-50	190-600	7.7-23

Fig. 1 Method for observing the behavior of molten pool using an X-ray intensifier system.**Table 4** Welding conditions used for observing the behavior of molten pool.

	Electrode dia.(mm)	Electrode inclination(deg.)	Current (A)	Voltage (V)	Speed (mm/min)	Heat input (kJ/mm)
Leading	4.8	-5	1000	32	30	12.8
Trailing	4.8	5	800	40		

Distance between L and T electrodes : 20, 60 mm

Table 5 Conditions used for observing the profile of weld metal.

Test No.	Leading electrode		Trailing electrode		Speed (mm/min)	Heat input (kJ/mm)
	Current (A)	Voltage (V)	Current (A)	Voltage (V)		
1-4	2300	38	1600-2000	50-52	210-250	450-490
5-6	2600	40	1900-2000	55	220-240	470-550

Electrode diameter : 6.4mm

Groove angle : 35°

Root face : 15mm

の実験には先行極に定格1500 A × 2 台、後行極には定格1000 A × 2 台の電源を並列運転して用いた。2 電極溶接を行う場合の結線は、先行極と後行極の位相差が120°となる逆V結線とした。

2.3 溶着速度の測定

板厚50 mm の SM490B 鋼板を用いて単電極溶接による平板溶接を行い、単位時間当たりの溶着量を測定し、鉄粉添加フラックスを用いた場合の溶着速度に対する溶接条件の影響を検討した。Table 3 に溶接条件範囲を示す。電極は溶接面に対して垂直とし、チップ-母材間距離は80 mm とした。溶接電流と電圧を一定にして、溶接速度を変化させた場合および溶接電流・速度を一定にして溶接電圧を変化させた場合について検討した。

2.4 溶融池現象の観察

平板を用いたアーク発生状況の観察に加えて、多量の溶融金属が電極後方に生成する大入熱溶接におけるアークの発生状況を検討するために、V開先を模擬した試験片を用いたX線透視観察を行った。Fig. 1 にX線透視観察に用いた試験片形状を示す。試験片の厚さが増すとX線透視像のコントラストが低下して観察が困難となるが、薄いと溶け落ちを生じて溶接ができなくなる。ここでは、V開先部分を板厚12 mm の鋼板とし、直径4.8 mm

の溶接ワイヤを用いて、入熱12.8 kJ/mm で溶接を実施した。Table 4 に溶接条件を示す。

2.5 適正溶接条件の検討

板厚50~70 mm の突合せ継手を用い、大入熱溶接時のビード形状に及ぼすフラックスへの鉄粉添加の影響および適正溶接条件の検討を行った。Table 5 に溶接条件を示す。直径6.4 mm のワイヤと鉄粉添加フラックスを用いた2電極サブマージアーク溶接を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 フラックスへの鉄粉添加の影響

3.1.1 溶着速度

Fig. 2 に、溶着速度に及ぼすフラックスへの鉄粉添加量の影響を示す。フラックスに添加された鉄粉は、溶接により溶融して溶着金属に移行し、溶着速度を向上させる。溶着速度は添加量の増加にしたがって向上しており、

Fig. 2 Effect of iron powder content in flux on deposition rate. **Fig. 3** Effect of welding speed on deposition, wire feed and slag formation rates.

Fig. 4 Effect of voltage on deposition, wire feed and slag formation rates.

Fig. 5 Effect of iron powder addition on eruption in high heat input SAW.

Table 6 Conditions used for welding 50 mm thick plates.

Electrode dia. (mm)	Current (A)	Voltage (V)	Speed (mm/min)	Heat input (kJ/mm)
(L)6.4	2100	36	240	357
(T)6.4	1700	46		

Groove angle; 35° Root face; 3mm

鉄粉の利用は溶接の高効率化に効果的であることがわかる。

Fig. 3 に、溶接電流・電圧を一定とした場合の溶着速度に及ぼす溶接速度の影響を示す。溶接速度が遅くなり溶接入熱を大きくすると、フラックス消費速度が大きくなり、溶着速度も若干増加する。

Fig. 4 に、溶接速度および電流を一定とした場合の溶着速度に対する溶接電圧の影響を示す。溶接電圧の増加に伴いワイヤ送給速度は減少するが、フラックス消費速度は増加し、溶着速度がほぼ一定となっている。

以上のように、鉄粉のフラックスへの添加は、溶接電流・電圧が一定、すなわちワイヤ送給速度が一定の条件下でも、フラックス消費速度の増加により、金属成分の移行速度が変化して、溶着速度に影響を与える。これが、鉄粉添加フラックスの特徴である。特にフラックス消費速度の大きい 300 mm/sec 以下の低溶接速度の条件で効

Fig. 6 Effect of iron powder addition on the penetration in high heat input SAW.

Fig. 7 Effect of iron powder addition to flux on contraction of arc cavity.

果的であり、溶接電圧の変化に伴うワイヤ送給速度の変化に匹敵する寄与をもたらすことが明らかになった。

3.1.2 溶接作業性

Fig. 5 に板厚 50 mm の 1 パス溶接中のスラグ吹き上げ状況を、鉄粉添加の有無について比較して示す。この時の溶接条件を Table 6 に示す。大電流かつ低速の条件の大入熱溶接においては、鉄粉を含まないフラックスを用いると、電極直下より激しくガスや溶融スラグの吹き上げを生じて溶接作業性が著しく劣悪であるのに対して、鉄粉添加フラックスを適用した場合にはこのような吹き上げが効果的に抑制されている。Fig. 6 に、この溶接で得られた継手の継手断面マクロ組織を示す。フラックスへの鉄粉添加により余盛りが高くなるとともに、溶込みが深くなっている。

Fig. 7 に、平板を用いて単電極溶接を行った場合のアーク発生状況の観察例とその模式図を、鉄粉添加の有無について比較して示す。通常のフラックスを用いた場合、アーク空洞が膨らみ、電極直下からガス吹きが頻繁に生じるのに対して、鉄粉添加フラックスではアーク空洞が緊縮し、吹き上げは溶融金属の揺動に伴い、溶融池後方に向けて発生する様子が観察された。

フラックスへの鉄粉添加は、このような現象を通じて大入熱溶接中に生じるガスや溶融スラグの吹き上げ現象を抑制して溶接作業性を改善し、溶接入熱限界を拡大する。

このアークの緊縮の原因としては、鉄粉添加による嵩比重の増加やアークの冷却効果などが考えられる¹¹⁾。しかし、嵩比重の増加は鉄粉を 25% 添加したのもでも高々 2 割程度であり、吹き上げを生じる場合にフラックスの

散布量をこの程度増しても、鉄粉添加フラックスを用いるほどの抑制効果はない。一方、アークの冷却効果を期待できる鉄粉添加フラックスを用いても散布量が少なければやはり吹き上げを生じるなど、この現象の機構を明確にするにはさらに詳細な検討が必要である。

3.2 大入熱溶接における溶融池現象の観察

Fig. 8 に、極間距離20 mm、開先角度30° の場合のX線透視観察例とその模式図を示す。アーク直下付近では、溶融金属は先行電極の後方に盛り上がり揺動しており、先行電極のワイヤ先端は溶融金属の盛り上がりよりも低い位置で点孤している。

Fig. 8 X-ray image and its illustration of molten pool made by tandem SAW with flux containing iron powder.

Fig. 9 Effect of groove angle on shape and position of arc cavity.

Fig. 9 に、電極間距離が20および60 mm の場合の溶融池挙動に対する開先角度の影響を、30° および40° について示す。いずれの場合も先行極のワイヤ先端は溶融金属より低い位置で点孤しているが、開先角度の狭い方が溶融金属の盛り上がりが高くなり、アークは開先底部より離れた位置でより多く溶融金属側に発生するようになり、開先面に直接発生する部分が少なくなる。

Fig. 10 に、X線透視装置による観察を行った試験片の断面マクロ組織を示す。開先角度30° の場合にはほとんど溶込みがないのに対して、40° では5 mm 程度の溶込みが得られている。溶接金属の溶込み深さは、溶接電流に比例して増加するとされているが、アークが溶融金属にも発生する場合には、露出開先面へのアーク発生率にも比例すると考えられており³⁾、溶込み深さの確保にはアークを直接開先面に発生させることが重要であること

Fig. 10 Cross sectional macrostructure of the specimens welded for X-ray intensifier observation.

Fig. 11 Schematic illustration of molten pool and cross sectional view of decanted molten pool.

がわかる。

3.3 溶接金属の凝固過程と適正溶接条件

Fig. 11 に、板厚40 mm の1パス条件で溶接中に、クレータ部の溶接金属を溶け落として除去したクレータ部の断面マクロ組織を、その断面推定図とともに示す。この結果から、溶接金属の形成は次のような過程を経て進行するものと考えられる。

① 先行極アークのガウジング作用による開先底部が溶融して、溶込み深さが決まる。

② 先行極と開先底部の溶けてできた溶融金属が、後行極の通過前に一部凝固して溶接金属の下部を形成する。

③ 後行極は開先内で溶融金属の上に点弧し、凝固進行中の溶接金属に対して入熱を加え、凝固方向を上向きに変化させて、凝固割れの発生を防止する。

④ 後行極通過後、生成した溶融金属の揺動および対流により、開先端部が溶融してビード幅が広がる。

⑤ 溶融金属および溶融スラグが揺動しながら凝固する。

したがって、溶込みは先行極のアーク発生状態によ

(a) Penetration depth and bead width

(b) Bead width ratio, W_c/W

Fig. 12 Effect of ratio of trailing current, I_T , to leading current, I_L , on profile of weld metal.

Table 7 Conditions used for welding 60 mm thick plates.

Electrode dia.(mm)	Current (A)	Voltage (V)	Speed (mm/min)	Heat input (kJ/mm)
(L)6.4	2300	38	200	521
(T)6.4	1800	48		

Groove angle:35°. Root face:3mm

Fig. 13 Cross sectional macrostructure of SAW corner joint of 60 mm thick plate.

て支配され、後行極のアークによる溶込みの増大は期待できない。前節で述べたように、後行極の存在は溶融金属を前方に押し戻し、先行極アークが開先面に直接発生する割合を少なくして溶込みをむしろ減少させる働きをする。また、開先面が溶融金属の対流により溶融して幅が広がった後ゆっくり凝固するため、ビードの幅や外観は溶融金属の揺動に大きく影響される。したがって、溶融池を覆うフラックスの融点などの物性値や、散布量の変化などによる吹き上げの発生度合いなどがビード外観の良否に大きく影響すると思われる。

凝固割れや融合不良の防止のためには、溶接金属の断面形状を後行極位置の適正化と溶接条件により整えることが重要である¹²⁾が、大入熱溶接における溶接金属の断面形状は、先行極と後行極の電流比によって変化する。Fig. 12 に、Table 5 に示す大電流条件を用いて溶接した場合の、溶接金属のビード幅、溶込み深さおよび断面形状に及ぼす電流比の影響を示す。断面形状は、ビード幅、溶込み深さおよび表面のビード幅 (W) に対する表面下 30 mm 位置での断面の幅 (W_c) の比により評価した。電流比が小さいと板厚中央部の細い断面形状となり、融合不良や凝固割れを生じやすくなる。欠陥は (W_c/W) < 0.4 の場合に生じており、(W_c/W) $\geq$ 0.4 とするためには電流比を 0.7 以上にする必要がある。一方、電流比が大きくなると、ビード幅が狭くなり溶込み量も減少する傾向がある。したがって、この場合には電流比を 0.7~0.8 に設定することで比較的良好な断面形状が得られる。

以上のような検討結果に基づいた適正溶接条件を設定することにより、2 電極サブマージアーク溶接法による板厚 60 mm の 1 パス溶接が可能となった。

Table 7 に板厚 60 mm の 1 パス溶接条件を、Fig. 13 に断面マクロ組織の一例を示す。

4. 結 言

鉄粉添加フラックスを用いたサブマージアーク溶接の

特徴と、超大入熱2電極1パス溶接の溶融池挙動と適正溶接条件についての検討を行い、以下のことを明らかにした。

1) 鉄粉添加フラックスの適用は、溶着速度の向上と溶接作業性の改善に効果がある。溶着速度に対する鉄粉の寄与は、鉄粉の添加量が多いほど、また溶接速度が遅いほど増加する。鉄粉添加フラックスの適用により、溶接中のスラグの吹き上げが抑制されて溶接作業性が改善される。

2) 2電極サブマージアーク溶接のX線透視観察により、先行極で生成した溶融金属が極間で盛り上がり揺動している様子が観察され、溶融金属とアークの発生位置が先行極の電圧安定性及び溶込み深さに影響する。

3) 2電極サブマージアーク溶接における溶接金属の形状は電流比によって変化し、先行極電流に対して後行極電流が低い場合、融合不良や凝固割れを生じやすくなる。一方、高い場合にはビード幅、溶込み深さが減少する。

4) 鉄粉添加フラックスを用いた大入熱サブマージア

ーク溶接法の特徴と適正条件の検討を行い、板厚60 mmの2電極1パス溶接施工が可能であることを明らかにした。

参考文献

- 1) 和田：溶接学会誌，59 (1990) 6，514-521.
- 2) 有川：溶接技術，17 (1969) 6，21-24.
- 3) 赤秀，浮辺，坪井：溶接学会誌，50 (1981) 9，938-944.
- 4) 平林，平，市之瀬：溶接学会誌，50 (1981) 4，379-386.
- 5) 藤森，北村，品田：溶接学会全国大会講演概要，38 (1986)，196-197.
- 6) 赤秀：溶接技術，19 (1971) 10，99-105.
- 7) K.J. Rodgers and J.C. Lochhead；Welding Journal，66 (1987) 10，21-27.
- 8) 赤秀，浮辺，坪井：溶接学会誌，50 (1981) 5，520-524.
- 9) 野村，杉谷，辻：溶接学会誌，51 (1982) 9，767-775.
- 10) 山内，稲葉：高温学会誌，12 (1986) 2，68-74.
- 11) 牛尾：溶接技術，37 (1989) 11，170-175.
- 12) 赤秀，阿草，浮辺，坪井：溶接学会誌，50 (1981) 12，1165-1170.