
厚物ボックス柱角継手の高能率サブマージアーク溶接技術

High-Efficiency Submerged Arc Welding for Corner Joint of Box Shaped Columns

阪口 修一(Shuichi Sakaguchi) 山口 忠政(Tadamasa Yamaguchi) 中野 善文
(Yoshifumi Nakano)

要旨：

厚肉ボックス柱の角継手を対象にしたサブマージアーク溶接に使用するフラックスへの鉄粉添加の影響と2電極溶接の適正条件について検討した。(1)フラックスへの鉄粉添加は溶着速度を向上させ、溶接中のスラグの吹上げの抑制により作業性を改善した。(2)溶接金属の形状は主に先行極に対する後行極の電流比によって変化し、0.70～0.80の範囲が最適条件であった。(3)鉄粉添加フラックスと適正溶接条件を用いることにより、板厚60mmまでの1パス溶接施工技術および板厚60mmを超える場合の2段開先を用いた2層盛溶接法による高能率施工技術を開発した。

Synopsis：

The effects 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 are as follows: (1) The addition of iron powder to flux increases the deposition rate and improves welding operability. (2) The cross sectional profile of the bead was influenced by the current ratio of the trailing electrode to the leading one. The optimum range of the ratio for avoiding the weld defect is ranging between 0.70 and 0.80. (3) The use of flux-containing iron powder together with the optimum welding conditions enabled the development of the high-efficiency welding techniques such as the tandem-wire one-pass submerged arc welding for the plates not thicker than 60 mm and the two pass welding for those thicker than 60 mm.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

厚物ボックス柱角継手の高能率サブマージアーク溶接技術*

川崎製鉄技報
26 (1994) 4, 163-167

High-Efficiency Submerged Arc Welding for Corner Joint of Box Shaped Columns



阪口 修一
Shuichi Sakaguchi
技術研究所 鋼材研究
部強度・接合研究室
主任研究員(課長補)



山口 忠政
Tadamasa Yamaguchi
鉄鋼企画・営業本部
溶接棒営業部 主任部
員(部長補)



中野 善文
Yoshifumi Nakano
技術研究所 鋼材研究
部長(部長)・Ph.D

要旨

厚肉ボックス柱の角継手を対象にしたサブマージアーク溶接に使用するフラックスへの鉄粉添加の影響と2電極溶接の適正条件について検討した。(1) フラックスへの鉄粉添加は溶着速度を向上させ、溶接中のスラグの吹き上げの抑制により作業性を改善した。(2) 溶接金属の形状は主に先行極に対する後行極の電流比によって変化し、0.70~0.80の範囲が最適条件であった。(3) 鉄粉添加フラックスと適正溶接条件を用いることにより、板厚60mmまでの1パス溶接施工技術および板厚60mmを超える場合の2段開先を用いた2層盛溶接法による高能率施工技術を開発した。

Synopsis:

The effects 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 are as follows: (1) The addition of iron powder to flux increases the deposition rate and improves welding operability. (2) The cross sectional profile of the bead was influenced by the current ratio of the trailing electrode to the leading one. The optimum range of the ratio for avoiding the weld defect is ranging between 0.70 and 0.80. (3) The use of flux-containing iron powder together with the optimum welding conditions enabled the development of the high-efficiency welding techniques such as the tandem-wire one-pass submerged arc welding for the plates not thicker than 60 mm and the two pass welding for those thicker than 60 mm.

1 緒 言

ボックス柱角継手の溶接施工には、一般的に2電極サブマージアーク溶接法が用いられ、板厚40mmまでの板厚に対しては片面1パス施工が適用されてきた。しかし、1980年代後半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するため、専用の鉄粉添加フラックスや3電極サブマージアーク溶接の適用による1パス施工適用限界板厚の向上が試みられてきた。最近では板厚50mm程度の厚物ボックス柱の1パスサブマージアーク溶接施工が広く採用されるようになってきている。

川崎製鉄では、サブマージアーク溶接におけるフラックスへの鉄粉添加の効果と適正溶接条件の検討を行うとともに、ボックス柱角継手用の大入熱溶接用鉄粉添加フラックスKB-50Iを開発し、本溶接法の普及に寄与してきた。

本報では、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特徴と2電極1パス溶接の適正条件の検討を行うとともに、1パス施工法の適用範囲を超える極厚継手の高能率サブマージアーク溶接技術について紹介する。

2 ボックス柱角継手のサブマージアーク溶接用溶接材料

2.1 フラックスへの鉄粉添加の効果

サブマージアーク溶接においては、鉄粉を用いて溶着速度を向上させ溶接入熱を抑える手法はかなり以前から用いられている。鉄粉を開先に散布あるいはワイヤに吸着させて添加する方法が考案されているが^{2,3)}、国内では鉄粉をフラックスの原料の一つとして用いる方法が一般的である。

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。Fig.1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。添加量の増加にしたがって溶着速度が向上しており、鉄粉の利用は溶接効率の改善に効果的であることが分かる。

鉄粉添加の効果として、溶着速度向上のほかに、大入熱溶接時の溶接作業性の改善効果が注目される。すなわち、被溶接物の板厚が増し、1パス溶接に必要な入熱が増大すると、溶接中にガスや溶融スラグの吹き上げが激しく起こるようになり、溶接作業を連続して行うことが困難になる。従来の大入熱溶接用焼成型フラックスを用

* 平成6年8月24日原稿受付

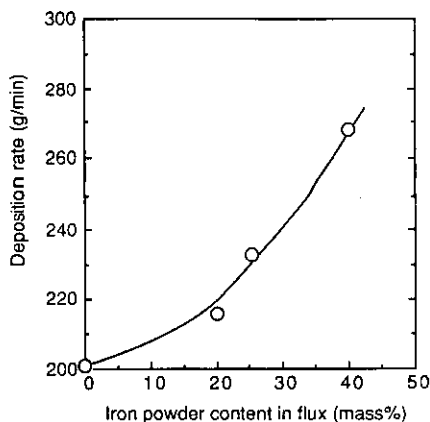


Fig. 1 Effect of iron powder content in flux on deposition rate

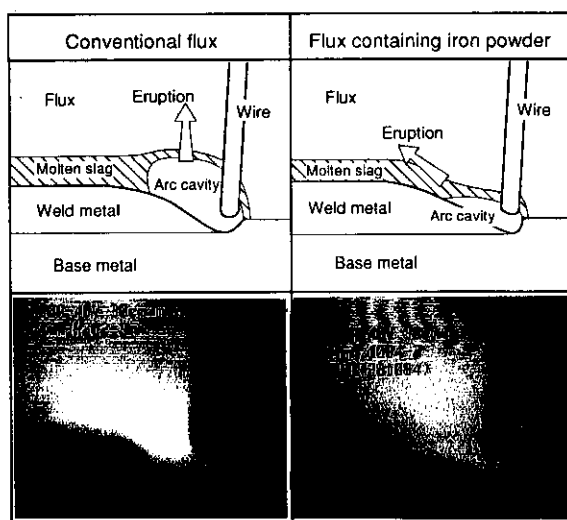


Photo 1 Effect of iron powder addition to flux on the arc suppression

いた場合の限界の一つは、このような溶接作業性の劣化であった。このような吹き上げの発生に対するフラックスへの鉄粉添加の影響をX線透過装置⁹⁾を用いて検討した。

Photo 1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を、鉄粉添加の有無について比較して示す。鉄粉を添加していない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の吹き上げ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、アークの緊縮による吹き上げ現象の抑制により溶接作業性を改善し、溶接入熱限界を拡大する。このアークの緊縮は、鉄粉添加によるフラックスの嵩比重の増加とアークの冷却効果⁹⁾によるものと考えられる。

2.2 フラックス組成の選定

サブマージアーク溶接ビードの外観はフラックス組成によって大きく左右され、大入熱溶接用には一般的に耐火性に優れた融点の高いスラグ系が適当と考えられる。そこでフラックスの主成分系として従来から大入熱溶接用フラックスに採用されている SiO_2 - MgO - CaO 系を用い、この主成分の組成比を変化させてスラグの融点を

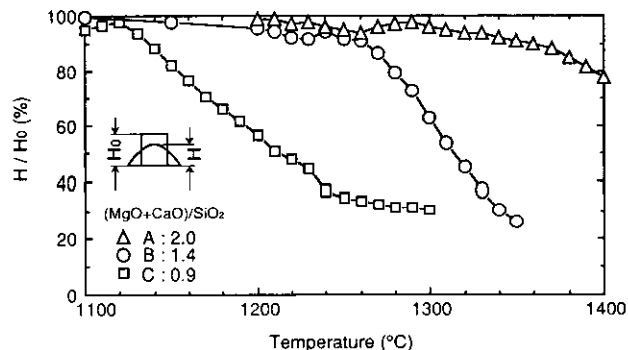


Fig. 2 Effect of the content ratio of $(\text{MgO}+\text{CaO})/\text{SiO}_2$ on the melting behavior of the welding slag

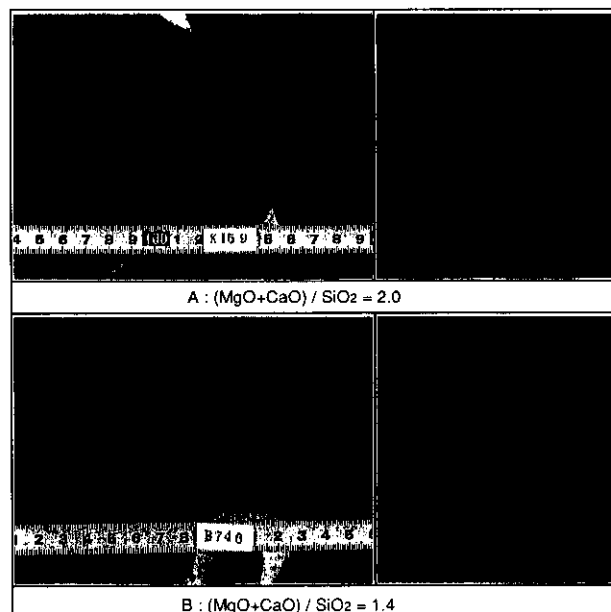


Photo 2 Effect of the content ratio of $(\text{MgO}+\text{CaO})/\text{SiO}_2$ on the bead appearance (left) and cross sectional macrostructure (right)

調整した。**Fig. 2**に、ボタンテストによりスラグの軟化挙動に対する $(\text{MgO}+\text{CaO})/\text{SiO}_2$ 比の影響を検討した結果を示す。軟化挙動は、ボタン高さの温度変化を初期の高さに対する比 (H/H_0) の変化として評価した。**Photo 2**に、フラックス A および B を用いて板厚 60 mm の 1 パスサブマージアーク溶接を行ったときのビード外観を示す。**Fig. 2**に示したように、 $(\text{MgO}+\text{CaO})/\text{SiO}_2$ 比が大きい方がボタンの高さが溶融して低くなるスラグの溶融温度が高く、大入熱溶接時のスラグ生成量を抑制し、ビード外観を整えるのに適していると考えられる。しかし、この比が大きくなりすぎるとビードが凸型になったりあるいはビード幅が狭くなるなどの不都合を生じるため、ここではこの比が 1.4 以下のフラックスを標準として調整した。

3 1 パスサブマージアーク溶接における適正溶接条件

厚鋼板の大入熱 1 パス溶接部に発生しやすい欠陥としては、溶込み不足、凝固割れ、融合不良およびビード外観不良などが考えられる。溶込み不良、凝固割れのような内部欠陥が発生すると、ボックス

Table 1 Welding conditions used for studying the profile of weld metal

Thickness	(mm)	70
Groove angle	(deg)	35
Root face	(mm)	15
Leading electrode	2 300A 38V	2 600A 40V
Trailing electrode	1 600-2 000A 50-52V	1 650-1 900A 55V
Speed	(mm/min)	210-250
Heat input	(kJ/mm)	45-49

ス柱角継手の場合には内側からの補修ができないために、大変な労力を要することになる。したがって、このような内部欠陥の発生を極力防止するような溶接条件を選定する必要がある。

溶接金属の溶込み深さは、先行極の電流および溶接速度によって支配され⁹⁾、アークの発生状態の影響を受ける。したがって、開先角度に応じた先行極電流の確保が重要であるが、アークの発生状態は先行極と後行極の電流比や電極配置により変化する。さらに、凝固割れや融合不良防止のためにも、電流比や電極配置により溶接金属の断面形状を整えることが重要である。そこで、Table 1 に示す板厚 60 mm の 1 パス溶接条件を用いて、溶接金属断面形状に及ぼす後行極と先行極の電流比 (I_T/I_L) および極間距離の影響を検討した。

Fig. 3 に溶接金属断面形状に及ぼす後行極と先行極の電流比 (I_T/I_L) の影響を示す。溶接金属断面形状は、表面ビード幅 (W) に対する表面下 30 mm における断面の幅 (W_c) の比により評価し、ビード幅および溶込み深さを測定した。電流比が小さい場合は板厚中央部の細い断面形状となり、融合不良や凝固割れが生じやすくなる。欠陥は (W_c/W) < 0.4 の場合に生じている。(W_c/W) > 0.4 とするためには、後行極電流と先行極電流の比を 0.70 以上にすることが必要である。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 0.70~0.80 程度に設定することで良好な断面形状が得られる。

極間距離は溶融池の状態を変化させる因子である。深溶込み型の大入熱 2 電極サブマージアーク溶接の場合にはセミワンプール状態で溶接が進むように (後行極の位置を先行極が形成する溶融地の中央にする) 設定して凝固割れを防止する必要がある⁷⁾。ここでは、表面下 60 mm (W_b) と表面下 30 mm (W_c) の断面の幅の比 (W_b/W_c) により評価した。

Fig. 4 に、1 パスサブマージアーク溶接金属の (W_b/W_c) に及ぼす極間距離の影響を示す。極間を極端に短くした場合には (W_b/W_c) の比が大きくなり、ビード形状がいわゆる梨割れを生じやすい形状になる傾向がある。しかし、ビード断面形状に対しては、電流比は極間よりも大きな影響を及ぼし、電流比が適切な場合には欠陥は生じなかった。

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で板厚 60 mm の 1 パス溶接が可能である。Table 2 に板厚 60 mm の 1 パス溶接条件を、Photo 3 に断面マクロ組織の一例を示す。

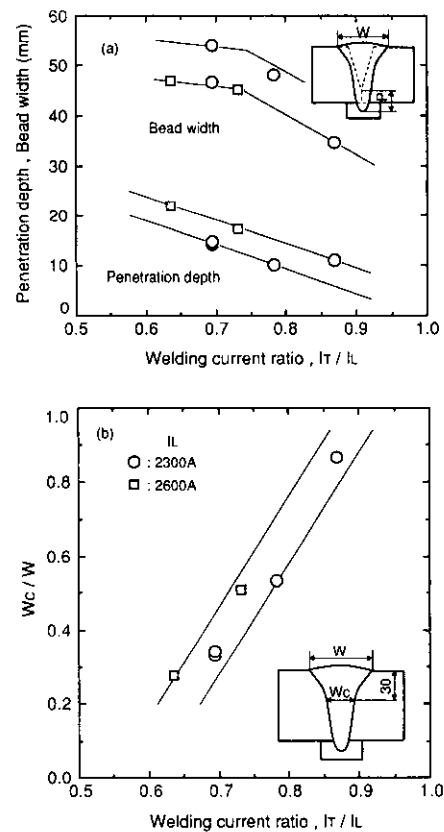


Fig. 3 Effect of the ratio of the trailing current to the leading current on the profile of the weld metal

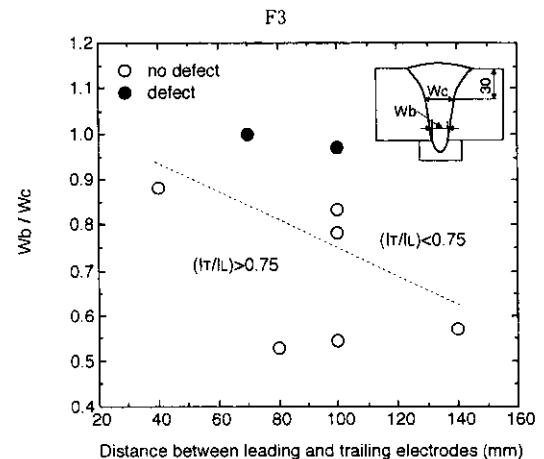
Fig. 4 Effect of distance between leading and trailing electrodes on the ratio of W_b/W_c

Table 2 Welding conditions used for 60-mm-thick plates

Thickness	(mm)	60
Groove angle	(deg)	35
Root face	(mm)	3
Leading electrode	2 300A-38V	
Trailing electrode	1 800A-48V	
Speed	(mm/min)	200
Heat input	(kJ/mm)	52
Distance L-T	(mm)	100

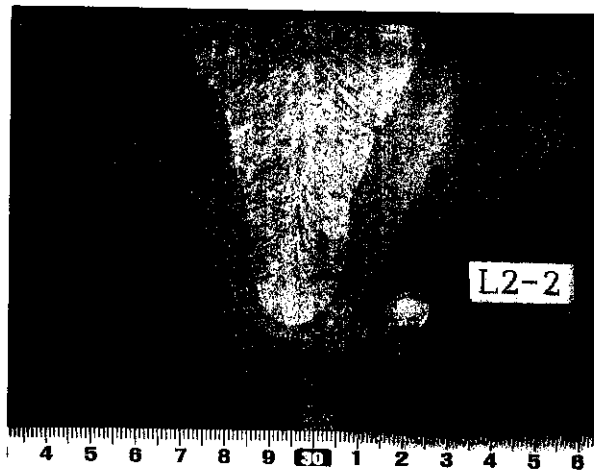


Photo 3 Cross sectional macrostructure of one pass SAW corner joint of 60-mm-thick plates

4 高能率多層サブマージアーク溶接

2電極サブマージアーク溶接による1パス溶接の適用板厚は、溶融金属の先行を防止するために溶接速度の下限があるため60mm程度が限界であり、これを超える板厚については多層溶接を行う必要がある。このような場合には、従来からGMAWで下盛りを行い、その後にサブマージアーク溶接で仕上げる多層溶接法が採用されてきた。しかし、これは著しく能率が悪いので、1パス溶接条件をもとに2層盛サブマージアーク溶接法を開発した。

2層盛サブマージアーク溶接において懸念される内部欠陥は、初層の凝固割れと初層ビード止端部のスラグ巻き込みである。

凝固割れの防止には、C、Pなどの割れ感受性を高める元素を低減するのみならず、ビード高さ(P)に対するビード幅(W)を広くすることが有効であると考えられる。そこで、1パス溶接と同じ35°のV開先に15~43 kJ/mmの入熱で初層ビードを溶接し、凝固割れに及ぼすビード形状の影響を検討した。

凝固割れに影響するビード形状は最終凝固部分であると考えられることから、後行極による溶込みを基準として評価した。

Fig. 5に凝固割れの発生に及ぼすW/Pの影響を示す。凝固割れの発生したビードはW/Pが0.6以下となっており、最終凝固部分の形状の適正化により凝固割れの防止が可能である。この形状は溶接条件と開先形状により変化するが、実施工では割れの発生しにくい開先形状を採用して確実に割れを防止することが重要である。そのためには、開先断面積の増大を抑制しつつビード幅を広くできる2段開先の適用が効果的である。

またスラグ巻き込みは、初層ビード止端部に食い込んで残留したスラグが次層の溶接で溶融せずに残ることにより発生する。したがって、初層ビード止端部での溶接金属および溶融スラグと開先とのなじみが問題であると考えられる。そこで、この初層止端部の食い込み深さに対する2段目の開先角度の影響を検討した。Fig. 6に止端部の食い込み量に対する2段目の開先角度の影響を示す。開先角度の大きい方が食い込みが浅くなり、スラグ巻き込みの防止に効果的である⁸⁾。

以上のような検討により、2段開先を用いた大入熱2層盛りサブマージアーク溶接による板厚60mm以上の厚肉継手の高能率溶接が可能となった。Table 3に、板厚70mmの2層溶接条件を、Photo 4に断面マクロ組織の一例を示す。

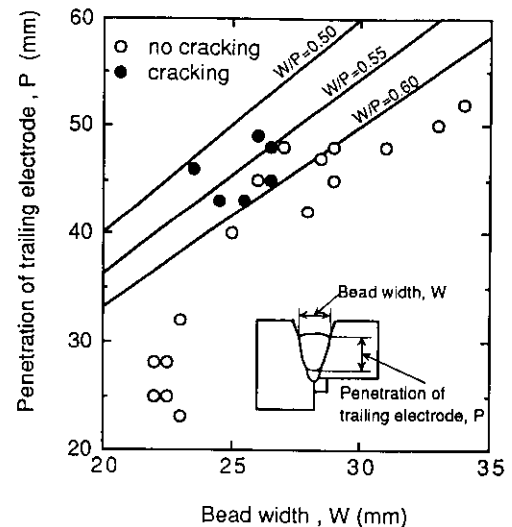


Fig. 5 Effect of the ratio, W/P , on the solidification cracking

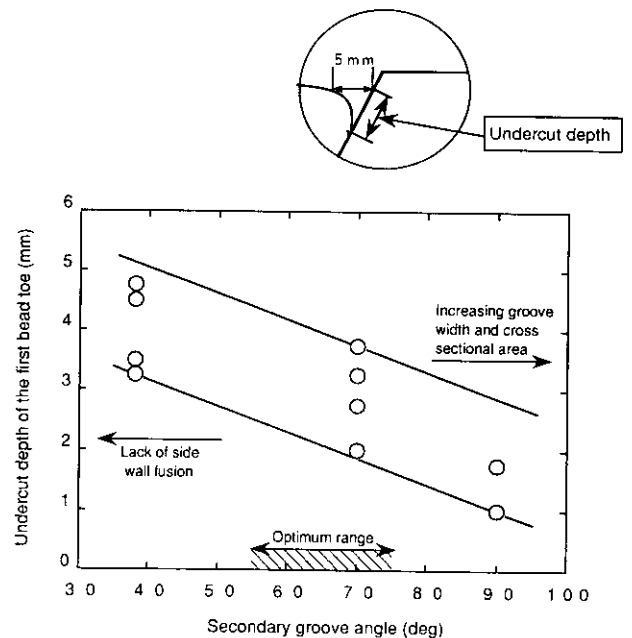


Fig. 6 Effect of groove angle on undercut depth

Table 3 Welding conditions used for 70-mm-thick plates

Thickness (mm)	70	
Groove angle (deg)	35+55	
Root face (mm)	3	
Pass	1	2
Leading electrode	2 300A-38V	1 200A-42V
Trailing electrode	1 700A-48V	1 200A-42V
Speed (mm/min)	215	195
Heat input (kJ/mm)	47	31
Distance $L-T$ (mm)	100	100

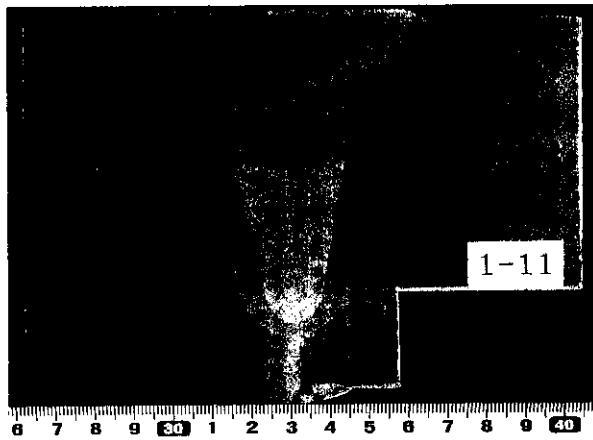


Photo 4 Cross sectional macrostructure of two pass SAW corner joint of 70-mm-thick plates

5 高能率サブマージアーク溶接金属の機械的性能

Table 4 に、板厚 60 mm, 70 mm の SM 490 B 鋼を用いて作成した角継手の溶接条件と溶接金属の機械的性能の一例を示す。溶接材料には、鉄粉添加フラックス KB-50I と 2%Mn 系溶接ワイヤ KW-50 を用い、先行極に大電流を用いた溶接条件を適用することにより、板厚 60 mm の場合には 1 パス溶接、また板厚 70 mm では 2 層盛溶接により溶接継手を作製した。試験片は $t/4$ (t : 板厚) から採取し、引張試験は A 2 号 (JIS Z 3111) で行い、靱性は 0°C

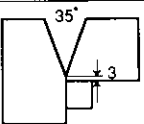
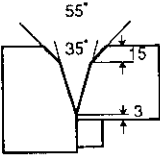
でのシャルピー吸収エネルギー (3 本の平均値) を示した。いずれの溶接金属も、 $TS \geq 490$ MPa, $vE_0 \geq 27$ J で十分な特性を有している。

6 結 言

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特徴と高能率溶接の適正溶接条件についての検討を行い、以下の結論を得た。

- (1) フラックスへの鉄粉添加は溶着速度を向上させ、鉄粉の添加量が多いほど溶着量は増加する。
- (2) 鉄粉添加フラックスの適用は溶接作業性を効果的に改善する。これはアーク空洞の緊縮により溶接中のスラグの吹き上げが抑制されるためである。
- (3) スラグの軟化温度は、 $(MgO+CaO)/SiO_2$ の組成比で調整でき、この比が 1.4 以下のフラックスを用いた大入熱サブマージアーク溶接ビードの外観は良好であった。
- (4) 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先行極に対する後行極の電流比によって変化する。電流比が低い場合は融合不良や凝固割れが生じやすく、一方高い場合にはビード幅、溶込み深さが減少する傾向がある。
- (5) 上記の検討結果から、2 電極サブマージアーク溶接による 1 パス溶接施工が適正組成の鉄粉添加フラックスと条件を組み合わせることにより板厚 60 mm まで適用できる。
- (6) 板厚 60 mm を超える極厚継手には、2 段階開先を用いた 2 層盛サブマージアーク溶接法による高能率施工が可能である。

Table 4 Mechanical properties of weld metal made by high efficiency SAW

Thickness (mm)	Groove profile	Pass	Welding conditions	Speed (mm/min)	Heat input (kJ/mm)	YS (MPa)	TS (MPa)	El (%)	vE_0 (J)
60		1	2 300A-37V 1 800A-48V	210	49	377	551	33	35
70		1	2 300A-38V 1 700A-48V	205	50	381	510	34	52
		2	1 200A-42V 1 200A-42V	209	29				

参 考 文 献

- 1) 山口修一、赤秀公造、滝沢章、阿草一男、永易正光、西村 誠：川崎製鉄技報，8(1975)1，116
- 2) 赤秀公造：溶接技術，19(1971)10，98
- 3) K. J. Rodgers, J. C. Lochhead: Welding Journal, 66(1987)10，21
- 4) 赤秀公造、浮辺輝男、坪井潤一郎：溶接学会誌，50(1981)5，520
- 5) 牛尾誠夫：溶接技術，37(1989)11，170
- 6) 赤秀公造、浮辺輝男、坪井潤一郎：溶接学会誌，50(1981)9，938
- 7) 赤秀公造、阿草一男、浮辺輝男、坪井潤一郎：溶接学会誌，50(1981)12，1165
- 8) 阪口修一、山口忠政、志賀千晃、中野善文：溶接学会講演概要，(1992)51，76