

3 電極高速サブマージアーク溶接法について

High Speed Welding Process by Three-Electrode Submerged-Arc

赤 秀 公 造*

Kozo Akahide

阿 草 一 男*

Kazuo Agusa

浮 辺 輝 男**

Teruo Ukibe

坪 井 潤一郎***

Junichiro Tsuboi

Synopsis:

In the submerged-arc welding process, welding speed can be increased proportionally to the number of electrodes. The increased speed, however, entails an increasing number of welding variables to be controlled, thus resulting in uncertainty in the formation of bead.

With a view to establishing a high-current, high-speed welding technique using 3-electrode submerged-arc, this paper considers particular functions of each electrode, and then studies some specific welding conditions for a possible application to seam welding of linepipe.

The results obtained confirm the feasibility of high-current, high-speed welding and reveal that properly selected welding conditions prevent the occurrence of undercut even in high-current and that upper limit of welding speed is limited by a shortage of deposited metal.

1. ま え が き

溶接の自動化、能率化などに対する要請に対処して、種々の溶接熱源を用いた専用溶接法の開発や、多極溶接法の研究が各所で盛んに行われている。

サブマージアーク溶接は、代表的な自動溶接法として各種構造物の製作に広く応用されているが、その多極化は大別して造船分野での厚板の片面1パス溶接と、造管分野などでの比較的薄いもの的高速溶接で進められており、両者ともにより高効率を目的とした3電極溶接が脚光を浴びている。しかし、溶接を高速度で行う場合には瞬間的

に良好なビードを形成させなければならず、その安定性の点において、3電極溶接法はまだ完全に確立された技術とはいえない現状にある。

パイプのシーム溶接に3電極法を実用化している例は比較的少なく、日本ではまだ2電極法が用いられている。高速サブマージアーク溶接における多極化に際しての障害は、装置の大型化もその一つであるが、ビード形成が溶接条件に著しく影響され、条件因子の増加にともなうそれらの相互作用が解明されていないことにある。これまで、アークの電流位相によりビード形状が変化すること¹⁻³⁾が知られている程度であり、溶接施工は試行錯誤的に行われている。

3電極高速サブマージアーク溶接技術を確立す

* 技術研究所溶接研究室主任研究員

** 技術研究所溶接研究室

*** 技術研究所溶接研究室室長・工博

る目的で、高速溶接での各電極の作用機能をビードオンプレートの実験から考察し、それにもとづきパイプのシーム溶接における具体的条件を検討した。

2. 3 電極溶接における電極の作用機能

多電極溶接での溶接条件は、いろいろの因子が錯綜しているため規則的に決めるのが困難である。溶接条件の決定には、適正な溶込み深さと溶着量がえられて、かつ内部および表面に欠陥が発生しないことが必要となる。これらをすべて満足するには、単電極では、溶接条件選定に自由度が少なく、板厚、開先形状が与えられればおのずから電流、電圧、速度の組合せが決まる。しかし、多電極の場合には、各電極にそれぞれ特別な機能を分担させることができるから、現象を十分に理解して各電極の作用を把握しておけば、合理的か

つ効果的に最適条件を選ぶことができる。

2.1 実験方法

SS-41を素材とした外径 800mm、肉厚 20mm、長さ 3 m のパイプ内面に、開先なしの状態です溶接条件を変化してビード置き溶接した。供試溶接材料は熔融型フラックス KF-50 とワイヤ KW-36 の組合せであり、溶接機は **Photo. 1** に示すような移動台車ブーム形式のパイプ溶接用実験機である。溶接条件は **Table 1** を基本として、先行極（以下L極）の電圧および中間極（以下M極）と後行極（以下T極）の電流、電圧をおのおの単独に変化させて、それらのビード形状におよぼす影響を調べた。なお、電源の極性は3極ともにACとし、電流位相はL極とT極を同相、M極をこれらに対して90°差とした。アース位置は溶接開始側のパイプ下面とし、溶接時のパイプ初期温度は常温（約20°C）とした。

ビード寸法はビード中央部の3カ所から横断面マクロ試験片を採取して測定した。

2.2 L 極の作用

L極電圧とビード形状の関係を **Fig. 1** に示す。電圧の上昇でアーク長さが増大しアーク力が低下するため、溶込み深さは通常減少する⁴⁾が、本実験ではこの傾向はほとんど認められなかった。

アーク溶接での溶込み機構は点弧による直接溶融と溶鋼を介した熱伝導による間接溶融にわけることができ、**Fig. 2** はアーク直下の状態を模式的に示したものである。(A)では、アーク下に溶鋼

Table 1 Welding parameters in this test

Pole	Wire inclination (deg)	Welding current (A)	Arc voltage (V)	Welding speed (cm/min)	Wire spacing (mm)
L	0	1 450	35	250	22
M	15*	1 200	50		20
T	35*	1 000	50		

* Wires were inclined in the direction of travelling

L : Leading

M : Middle

T : Trailing

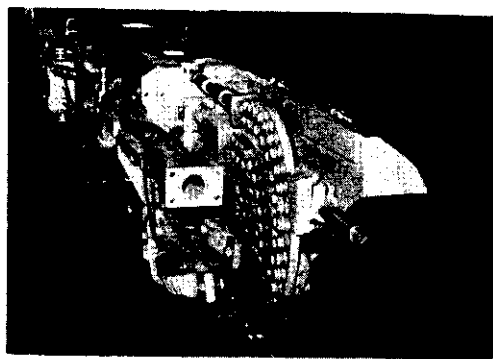


Photo. 1 Three-electrode submerged-arc welding head

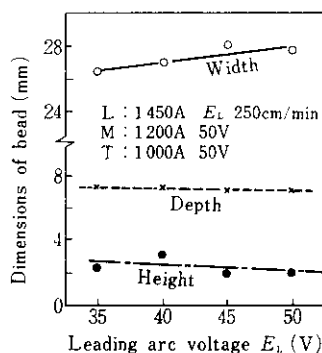
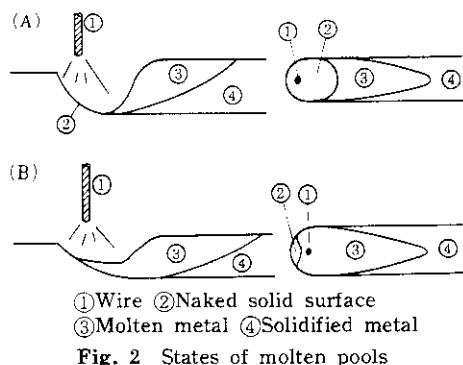


Fig. 1 Relation between bead shape and leading arc voltage



が存在せず、母板はアークで直接熔融され、生成した熔融金属は電磁圧力やプラズマ気流の圧力などで溶融池後方に飛ばされている。このような溶融池の状態は高電流・高速の場合に生じやすい。(B)では、溶鋼上にアークが点じており、母板への熱伝達は溶鋼を介して間接的に行われる。アーク直下でのくぼみはアークの動圧と溶鋼の水頭圧が釣り合って形成されるとすると、アーク電圧が高いほど浅くなる。すなわち、この場合アーク直下に存在する溶鋼の厚みが大きくなるため、板厚方向への熱伝達が十分には行われず溶込みは減少する。いっぽう、ビード形状からいえば(A)では溶融池後方への強い溶鋼流が形成され、ハンピング状のビードになりやすい。したがって、単電極での正常ビードでは(B)の状態であークが発生していると考えられ、このことがアーク電圧と溶込み深さの一般的な関係を与えている。

つぎに高速3電極溶接での溶融池を考えてみる。溶鋼の流れをサブマージアークに似せたオープンアーク溶融池の観察結果⁵⁾から、L極のアーク直下では Fig. 2 (A)のように固体面が露出していると推定できる。Photo. 2は速度2 m/minで溶接中にT, M極を順次消弧したときのビードを

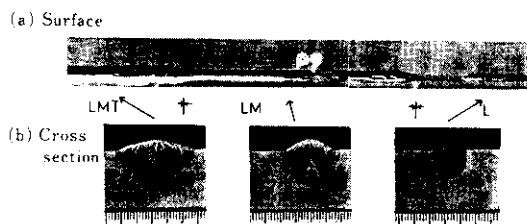


Photo. 2 Welds made with one, two, and three electrodes submerged-arc welding heads

示すもので、M極を消弧した直後のL極ビード部では、溶鋼はアーク後方に流されてM極の溶鋼池に吸収されている。このことから、L極アークは母板固体面に直接発生してドリリング現象に似た溶込み作用をもっていることがわかる。また、L極溶融金属はM極のそれと合体するため、L極は溶込み以外のビード形成に直接関係しない。したがって、L極の機能はドリリング作用であり、その条件選定にあたっては電流値で所要溶込み量を調節するようにすればよく、電圧をとくに考慮する必要はない。

L極の機能をこのように考えれば、前述の実験でL極電圧が溶込み深さに関係しなかったことについてはつぎのように説明できる。低電圧での高エネルギー密度と強いアーク力は溶込みを増加させるのに有効であるが、ドリリングによる溶込みの生成は移動アークの照射時間、すなわちアークの作用径にも大きく影響される。したがって、高電圧にした場合にはエネルギー密度の低下をアークの作用時間の増大が補って、溶込み深さはアーク電圧に関係なく一定値となったと考える。

以上のことを確かめるため、アーク直下に固体面が現出するように6°傾斜の昇り単電極溶接で、電圧を変化させた場合のビード形状を調べた。Fig. 3が1200A、200cm/minでの電圧とビード形状の関係であり、電圧に比例してビード幅(すなわちアーク径)が増大したが、溶込み深さはFig. 1の実験と同様に電圧に関係なく一定であった。また、電流 I が1200Aで、電圧 E を28, 35

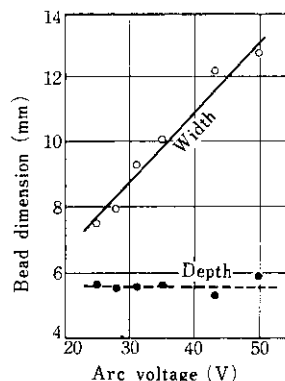


Fig. 3 Relation between bead shape and arc voltage (Arc current: 1200A, welding speed: 200cm/min)

Vとし、速度 v を55~300cm/minに変化させて溶込み深さを調べた結果が Fig. 4 である。この場合、アーク径として Fig. 3 のビード幅 w を用い、エネルギー密度 $4IE/\pi w^2$ とアークの照射時間 w/v

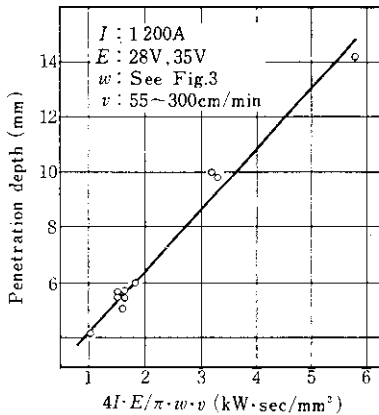


Fig. 4 Relation between penetration depth and arc energy given (I : arc current E : arc voltage, w : bead width, v : welding speed)

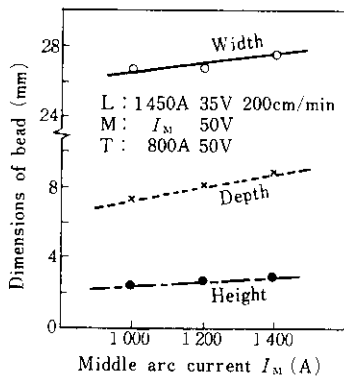


Fig. 5 Relation between bead shape and middle arc current

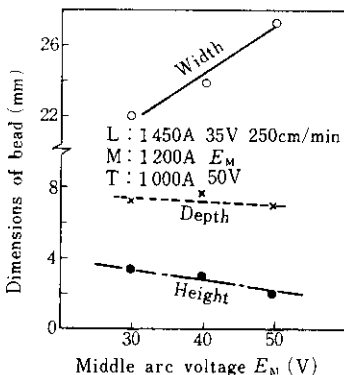


Fig. 6 Relation between bead shape and middle arc voltage

の積で溶込み深さを整理すると両者は比例関係にある。このことは先述の推定が妥当であることを示している。

以上の結果から、3電極高速溶接ではL極アーク下に溶鋼が存在せず、アークは直接母板固体面に点じドリリング作用をしているといえる。

2.3 M極の作用

Fig. 5 はM極電流によるビード形状の変化を示している。ビード幅および溶込み深さは電流に比例して漸増の傾向を示し、M極は電流値がL極以下であるにもかかわらず溶込み作用をもっていることがわかる。

M極のアーク電圧とビード形状の関係が Fig. 6 であり、電圧が高いほどビード幅は増加し、溶込み深さは減少する。

Fig. 5, 6 の実験結果および2電極での溶融池観察⁵⁾ などから、M極の溶込み作用はつぎのように考えることができる。M極アーク近傍での溶融池の状態を推定すると Fig. 7 のようになり、L, M極間で両極の溶融金属は衝突し、その位置で溶接線に直角方向への熱伝達が行われビード幅が増大する。このとき溶鋼は流速を急激に低下させられるが、M極アークの外側をすり抜けて後方へ流される。また、M極アーク下の溶鋼は温度が高いため粘性が小さく、プラズマ気流の圧力などで容易に周囲に押しやられるから、アーク直下には比較的薄い層の溶鋼しか存在せず、M極にも溶込み作用が生じると考えられる。

Photo. 2 (b)においてL, M極によるビードが半円状で母板表面に2次溶融がみられないことから、M, T極間によどみがなく、ここでの表面の流れはT極からM極に向っていると考えられる。このことは前述の擬サブマージアーク溶融池の観察⁵⁾ によっても確認されている。

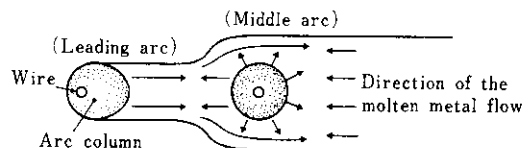


Fig. 7 Metal flow in molten pool by three-electrode submerged-arc welding

以上のことから、M極は深さおよび幅方向への溶融作用によりビード形状の調整を行い、さらにそのアーク力でL極からの溶鋼の流速を低下させ、T極での最終的ビード形成を容易にする重要な機能をもっているといえる。したがって、M極の電極角度とL、M極間の距離および電流比などを適正に選定する必要がある。

3 電極高速溶接でみられる特異な現象の一つとして、Photo. 3 に示すような表面欠陥の発生がある。この欠陥はオーバーラップと鋳ばりの中間的なものである（以下この欠陥をオーバーラップという）。ビードを詳細に観察してみるとオーバーラッ



Photo. 3 Overlap bead

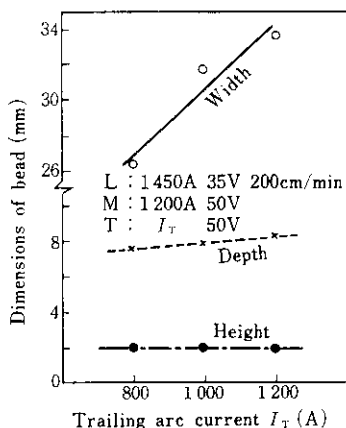


Fig. 8 Relation between bead shape and trailing arc current

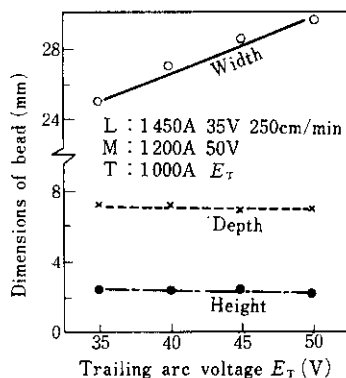


Fig. 9 Relation between bead shape and trailing arc voltage

プはL、M極間で発生しており、その位置での溶鋼流の衝突で最終ビードより外側まで飛散し急冷された大粒のスパッタがその原因であると考えられる。したがって、M極によるL極溶鋼流の減速はT極でのビード形成上重要であるが、オーバーラップの発生しない程度におさえる必要があり、このことはさらにL極の溶接電流に限界を与える。

2.4 T 極の作用

T極の溶接電流およびアーク電圧とビード形状の関係が Fig. 8, 9 であり、溶接電流およびアーク電圧の増加につれてビード幅は比例的に増加し、溶込み深さとビード高さはほとんど変化しない。Photo. 2 で明らかなように、L、M極でのビードにT極の熱源が加わるとビード幅は著しく増加するが、これはビード横断面での溶鋼の対流作用によると考えられる。なお、T極直下での溶鋼の流速は比較的小さく、またT極より後方での溶融池はおだやかで、よどみになっていると推定できる。

以上の結果から、T極の作用はL、M極で生成された溶鋼を再加熱することにより母板を2次的に溶融せしめ、アンダカットを防止し、平滑なビードを形成することにあると考えられる。

3. 3 電極高速溶接条件の選定

3.1 気孔に対する検討

溶接速度の上限を与える主要因として(1)気孔、(2)アンダカット、(3)溶着量、(4)溶込み深さなどが考えられる。

気孔はおもにフラックスや母材に付着した水分、有機物などに起因し、溶接速度を低下させることによりその防止が可能である場合が多い。パイプ工場では、フラックス乾燥などの前処理を十分に行えるから、気孔の発生源は大部分排除できる。したがって、造管時の溶接では基本的には気孔によって速度限界が与えられることはないと考えられる。しかし、造管工程上の特異性からくる下記のような気孔が発生する危惧があるので、これについて検討した。

当社のUOパイプの溶接は、Oプレス終了後(1)外面全長の仮付けCO₂アーク溶接、(2)内面サブマージアーク溶接、(3)外面サブマージアーク溶接、の順に行うが、このうち内面溶接ビードに条件によっては多数の気孔が発生する場合がある。この気孔はルート部から発生すること、同じ溶接条件でもあとから溶接する外面ビードやビードオンプレート溶接では発生しないことなどの特徴がある。したがって、その発生原因は仮付けビードと内面ビード相互の溶込み不良にあると推定される。そこで、内面溶接条件を一定とし、仮付け条件を3種類に変えた場合の気孔の発生状況を調べた。

試験はFig. 10の開先をもったAPI X60鋼板をフラックスKF-X (32×200メッシュ)とワイヤKW-36 (4.8mm径)で溶接して行った。試験溶接条件をTable 2に示す。

Photo. 4は溶接部の横および縦断面のマクロ組織である。600cm/minの2電極CO₂アーク(No.1)と4mmφの被覆アーク(No.3)で仮付けした場合には、仮付けビードの溶込みが浅いため開先ルート部が未溶融のまま残存していた。これらの場合、内面ビードにはその縦断面にみられるように気孔が発生し、とくに被覆アークによる仮付けの場合にそれが著しかった。いっぽう、速度を400cm/minに低下して深溶込みを図ったCO₂アーク(No.2)では、仮付けビードと内面ビードが完全にオーバーラップしており、内面ビードに溶接欠陥は全く発生

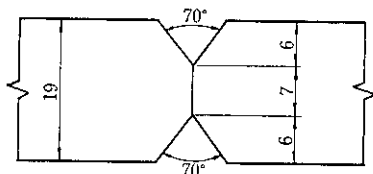


Fig. 10 Joint design for 19mm thick plate

Table 2 Submerged-arc welding parameters

Pole	Wire dia (mm)	Welding current (A)	Arc voltage (V)	Welding speed (cm/min)
L	4.8	1 400	35	230
M		1 150	45	
T		700	45	

しなかった。

以上の結果から、この種の気孔は仮付けビードと内面サブマージアーク溶接ビードで閉じられた未溶融ルート面に存在する気体がアーク熱で膨張し、内圧が高まり溶融状態の内面ビードのルート部から逸脱しようとして発生したものと考えられる。したがって、この気孔を防止するには、仮付けビードと内面ビードがたがいに重なるように、とくに所要溶込み深さに考慮をはらって溶接条件を選定する必要がある。

3-2 アンダカットに対する検討

高速化するためには高電流が必要となるが、一般的には、Fig. 11⁶⁾に示すように高電流になるほどアンダカットが発生しやすくなり、限界溶接速度は低下する。

アンダカットを防止するには、M極アークの方向と大きさおよびT極の熱量が重要である。

Fig. 12はL極の電流を1 000および1 400 A、T極の電流をL極の50%にして、M極電流を変化させたときのアンダカット発生率およびビード幅を示している。M極電流が小さい場合には、L、M

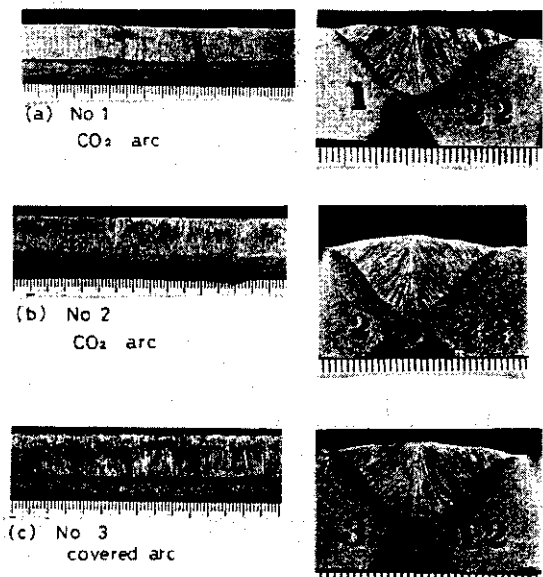


Photo. 4 Effect of relative penetratvov of submerged-arc (inside) and tack (outside) weld on occurrence of porosity

極間での溶鋼の衝突が弱く溶融池後方への溶鋼流が強すぎるために、またM極電流が大きい場合には、L, M極での衝突による溶鋼流の乱れが著し

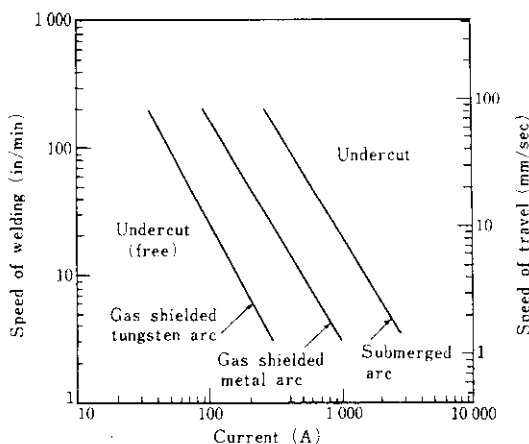


Fig. 11 Maximum speed-current relationships for undercut free welding⁶⁾

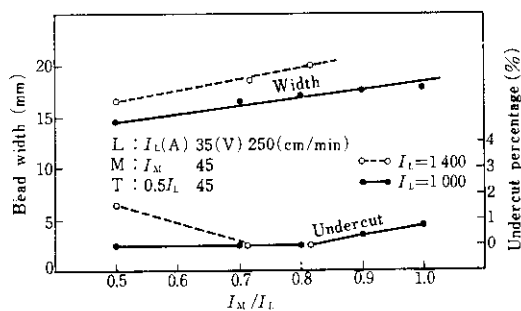


Fig. 12 Relation between bead shape and I_M/I_L (I_L : leading arc current, I_M : middle arc current)

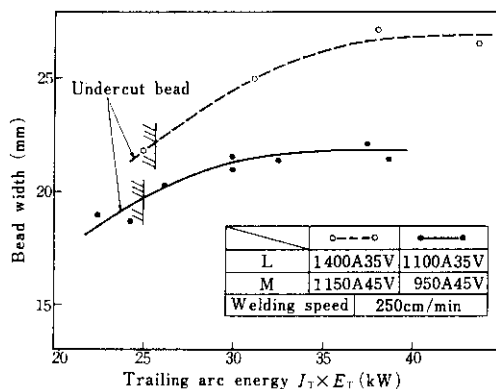


Fig. 13 Relation between bead shape and trailing arc energy given (I_T : trailing arc current, E_T : trailing arc voltage)

いたためにアンダカットが発生しやすくなったと考えられる。したがって、M極の電流値はL極の80%程度に選定することが望ましい。

T極アーク下では溶鋼の流れは比較的緩やかで、アークの熱量でビード幅方向への対流を生じさせればアンダカットを減少しうると考えられる。Fig. 13はL極電流を1100および1400 A, M極電流をL極の80%とし、T極の電流と電圧を変化させてそれらがビード形成におよぼす効果を調べた結果である。熱量の増加にしたがって2次溶融作用によりビード幅は増大するが、その増加率は徐々に減少し一定ビード幅を示すようになる。アンダカットは2次溶融作用の増加につれて減少し、ビード幅が一定値に達するよりもやや少ない熱量で完全に防止できる。したがって、T極の溶接条件はビード幅が飽和する熱量を与えるように選定することが望ましい。この場合、アーク電圧を45Vとすると、電流値はL極の約60%になる。

以上により、3電極高速溶接でアンダカットを防止するための基準溶接条件としてTable 3が得られた。

Table 3 Standard welding parameters of three-electrode submerged-arc welding

Pole	Welding current (A)	Arc voltage (V)
L	I_L	35
M	$0.8 I_L$	45
T	$0.6 I_L$	45

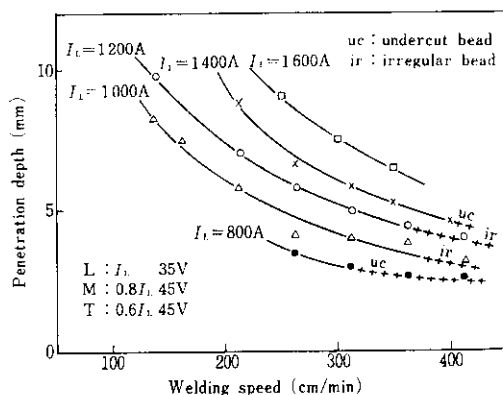


Fig. 14 Relation between bead shape and welding speed

Table 3 の条件で、L 極の電流 I_L を変化したときのビード表面状況、および溶込み深さと溶接速度の関係を調査した結果が Fig. 14 である。 I_L

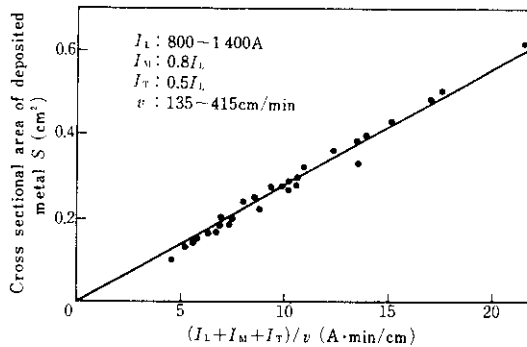


Fig. 15 Relation between deposited metal and $(I_L + I_M + I_T)/v$

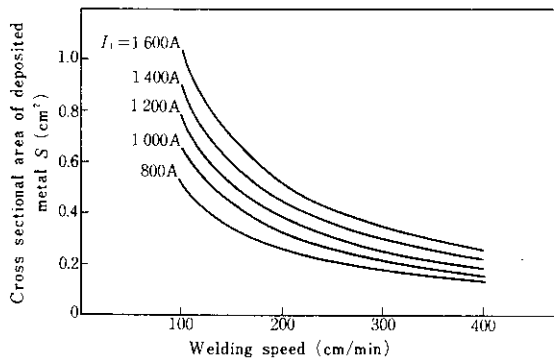


Fig. 16 Relation between deposited metal and welding speed

が 1600 A でも溶接速度 350 cm/min でアンダカットが発生せず、L 極を著しく高電流にしても M および T 極の作用で限界速度は低下しないことが明らかになった。

なお、300 cm/min 程度的高速溶接となれば電極ワイヤ送給の不安定性がアンダカットの発生原因となるため、溶接機の制御特性についても考慮する必要がある。

3.3 溶着量に対する検討および溶接条件の決定

ここでは、溶着量と溶接速度の関係について検討した。ワイヤ突出し部でのジュール熱やアークプラズマの輻射熱などを無視すれば、単位時間あたりのワイヤ溶融量は電流に比例する。いま、単位溶接長あたりの溶着量をビード横断面の面積に置き代えて考えてみる。

Fig. 15 は L 極電流 I_L を 800~1400 A, M, T 極電流をそれぞれ $0.8 I_L$, $0.5 I_L$ とし、速度 v を 135~415 cm/min の範囲でビードオンプレート溶接したときの溶着鋼の横断面積 S (cm²) と電流、速度の関係であり、 S は(1)式で表わせる。

$$S = 2.7 \times 10^{-2} (I_L + I_M + I_T)/v \quad (1)$$

(1) 式の関係を用いれば、Table 3 の基準条件で I_L を与えたときの S と v の関係が Fig. 16 に示すように求まる。

Table 4 Estimated critical welding speeds for various grooves

		Groove depth a (mm)						Groove angle (deg)
		2	4	6	8	9	10	
G^* (mm ²)		3	11	25	45	57	70	70
$G + R^{**}$ (mm ²)		28	36	50	70	82	95	
Welding speed (cm/min)	$I_L = 1200A$	275	220	155	110	95	80	
	$I_L = 1400A$	330	250	180	130	110	95	
G^* (mm ²)		4	16	36	64	81	100	90
$G + R^{**}$ (mm ²)		29	41	61	89	106	125	
Welding speed (cm/min)	$I_L = 1200A$	270	190	130	85	75	60	
	$I_L = 1400A$	315	220	150	100	85	70	

* G : Cross sectional area of groove

** R : Cross sectional area of reinforcement (25mm²)

必要溶着量は開先と余盛形状によって定まり、余盛を一様に幅 25mm、高さ 2mm の三角形と仮定すると、Fig. 16 から各種開先に対する溶接速度の上限値が Table 4 に示すように推定できる。開先深さ a が 4mm 以下では、開先面積 G をうめるに要する溶着量は、Fig. 16 から I_L を 800A とし、330cm/min 以上の条件に相当することがわかる。したがって、この場合には溶接条件を決めるのに溶着量の大小を考慮しなくてもよい。 a が 6mm 以上では、開先角度によって溶接速度が大きく変化し、また a が 8mm 程度では、その 1mm の減少が約 20% の速度向上につながる。これらのことから、高速溶接を行うためには開先角度および深さの厳密な加工管理が必要となる。

また、Fig. 14 の結果から電流による溶込み深さの変化を推定すると、速度 150cm/min 前後で溶込み深さは 100A あたり約 0.7mm の増減になる。したがって、高電流で溶接を行うことは、深溶込みによる開先断面積の減少、および溶着量の増加の 2 つの理由から高速化にきわめて有効である。

以上により、条件を適正に選べば溶接速度はアンダカット発生よりも溶着量不足のために制限されることが明らかである。 I_L を 1400A とし、上述の推定に実験による修正を加えて得た各板厚ごとの標準溶接条件は Table 5 となる。板厚 9mm 以下で電流を減少させたのは、溶込みが深すぎるために溶落ちが発生するためである。この条件によれば、高速、高能率に安定した 3 電極サブマージアーク溶接を行うことができる。

4. ま と め

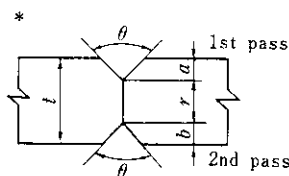
パイプのシーム溶接に適用することを目的として、3 電極サブマージアークによる高速溶接法について検討し、つぎの結果がえられた。

(1) L 極アークは母板固体面に点じドリリング作用をしている。したがって、L 極の電流値は所要溶込み深さに応じて選定すればよく、この場合アーク電圧の影響を比較的考慮しなくともよい。

(2) M 極の作用は L 極からの溶鋼流を減速させてビード形状の予備調整を行うことにある。した

Table 5 Typical welding parameters for three-electrode submerged-arc

Plate thickness (mm)	Groove *				Welding condition **						
	θ (deg)	a (mm)	b (mm)	r (mm)	Leading		Middle		Trailing		Speed (cm/min)
					Current (A)	Volt. (V)	Current (A)	Volt. (V)	Current (A)	Volt. (V)	
6	90	2	2	2	1 000	35	800	45	600	45	280
9	90	2	3	4	1 200	35	950	45	720	45	280
12	90	3	4	5	1 400	35	1 150	45	840	45	230
16	70	5	5	6	1 400	35	1 150	45	840	45	200
19	70	6	6	7	1 400	35	1 150	45	840	45	180
22	70	7	7	8	1 400	35	1 150	45	840	45	150
25	70	8	8	9	1 400	35	1 150	45	840	45	135



** Wire dia. : L4.8
 (mm) M4.8
 T4.8
Wire extension : L40
 (mm) M45
 T45
Wire angle : L 0
 (deg) M15
 T35

がって、L極に対するM極の電流比や電極角度の選定が重要である。

(3) T極の作用はアンダカットの防止と平滑なビードの最終的形成である。したがって、T極に適正な熱量を与える必要がある。

(4) 溶接条件を適当に選定することにより、高電流でもアンダカットの発生を防止でき、この場

合の基準としてはL極で $I_L(A)$, 35(V), M極で $0.8 I_L(A)$, 45(V), T極で $0.6 I_L(A)$, 45(V)がよい。

(5) 溶接速度はアンダカット発生よりも溶着量不足によって制限され、高電流にするほど深溶込みによる開先面積の減少と溶着量の増加によって高速化が可能である。

参 考 文 献

- 1) G. D. Uttrachi, J. E. Messina: Welding J., 47 (1968) 6, 475
- 2) 木谷, 豊岡, 宇滝: 溶接学会溶接法研究委員会資料 SW 139—68, (1968)
- 3) 伊藤, 山内: 溶接学会溶接アーク物理研究委員会資料 70—100, (1970)
- 4) 赤秀, 浮辺, 阿草: 川崎製鉄技報, 4 (1971) 3, 492
- 5) 坪井, 赤秀, 阿草, 浮辺: 溶接学会溶接法研究委員会資料 SW 652—74, (1974)
- 6) T. N. Jayarajan, C. E. Jackson: Welding J., 51 (1972) 8, 377 S

