論文および報告

Al の MIG 熔接条件に関する一報告*

— 5mm 板の隅肉熔接 —

内 田 彰**

A Study of Welding Variables of MIG Arc Method*

— T-fillet Weld of 5mm Thick. Al Plate —

By A. Uchida**

Abstract

In the welding experiment of T-fillet weld of 5mm thick aluminum plates, the penetrations, deformations and leg lengths were plotted with $I/\sqrt{v}$ or $\sqrt{I/v}$ as parameters in abscissas. In order to obtain the most reasonable welding schedule we must consider it under the defining factors and limits shown in Fig. 9. In our case, using 1/16" ϕ electrode wire, the comparatively high current range ($I=240-280A$, $v=70-110$ cm/min, $I/\sqrt{v}=0.20-0.22 \times 10^3$ A/(cm/sec)^{1/2}, $l=4.5-5.5$ mm) is considered preferable.

I ま え が き

筆者等はさきに MIG 熔接法による耐食性 Al 合金の薄板についての熔接試験を行ったが¹⁾, それにひきついで T 型隅肉熔接について若干の試験を行った。一般に MIG 熔接法についてはすでに多くの試験研究がなされたが, しかしこれらを概観するならば, 最も合理的にして良い熔接結果を得んとするには, なお二三の検討されるべき問題点が残っているように思われる。すなわち, 種々の文献等に表示された例を比較参照しても, それから知られる熔接条件には若干の巾があって, 比較的大きな電流と早い熔接速度またはその反対との二様の撰択の可能性がみられる。自動熔接においては熔接速度は, それだけを切り離して言えば, かなり広い範囲に変化することができる。従って熔接条件としては単に熔接電流や熔接速度の経験的数値を与えるだけでなく, 熔接速度と熔接電流を組にした変数に対して熔接結果がどのようになるかをなるべく組織的に検討することが望ましいと思われた。

また MIG 熔接は, 殊に電流が大きい場合には特徴的な形状の深い熔込を有することが知られている²⁾。従って隅肉熔接のような場合, 一種の深熔込熔接という考えでやった方がよいのかどうかということも, 一般に検討されるべき一つの問題であろう。

以下の試験はさし当り 5mm 厚の一種類の板に限られており, 未だ広汎なものではないが, 以上の見地で一応若干のデータを得ることに努めたものである。

II 熔接結果に影響する諸変数に対する考察

熔接の質的な問題を別とすれば, 熔接の結果を規定するものは熔着金属の大きさおよび形状, ならびに母材の変形—隅肉では主に収縮と角変化またはやせ馬—である。鋼の普通の熔接の場合, 熔込深さ, ビード巾, 角変化, 横収縮等については渡辺教授等^{3), 4)}の詳細な研究があり, すべて $(I/\sqrt{v})$ の函数で表わされることが示されている。また山内氏等⁵⁾は理論的考察と多くの実験結果を吟味して, 角勾配については $I/(h^{3/2}v^{1/2})$, 熔込率については $I/(h^{1/2}v^{1/4})$ または $I/(hv^{1/2})$, 熔着重量については $I/v^{1/2}$ をパラメーターとして実験を整理できることを示している。

従って筆者等は MIG 法によるアルミニウムの隅肉熔接における横収縮, やせ馬, とけ込等を測定して $I/\sqrt{v}$ をパラメーターとして結果を整理してみることを一つの目標とした。また本試験では電極線の太さが一種類に限られているので, その熔込率はほとんど電流に比例し, 熔着効率は 100% 近いから, 単位時間の熔着量は I に比例し, 従って脚長およびのど厚は断面形状がほぼ相似と仮定すれば, $(I/v)^{1/2}$ に比例すべきである。

渡辺教授の研究によれば一般の場合の熔込みは

$$d/h = J \frac{I/h}{(vh)^{1/2}} \text{ で表わされるが, 深熔込棒では,}$$

$d/h = J \frac{I/h}{(vh)^{1/2}} + \alpha$ となることが指摘されている。(熔接協会ディープフィレット委員会が出した式では $Pu = a + bv + cI/\sqrt{v}$, Pu は §4. Fig. 6 中の Ps' と同じ。) 他方 MIG 熔接では特殊な熔込断面形状を有することが既に知られているが, 特にその "finger-type penetration" は電極から高速でとび出す小熔粒のいわば射撃によって熔融池表面が

* 原稿受付 昭和33年7月31日 (昭和33年度熔接学会秋季学術講演会において発表)

** 正員, 鉄道技術研究所 Member, Railway Technical Research Institute.

押し下げられる結果であることを、鋼の場合について A. R. Muir⁶⁾ が指摘しており、またこの部分は熔着金属と母材との混合が均一でないこと、および鋼では脱酸が完全でも、この部分には気孔を生じ易いことが示されている。

MIG 溶接においてはある種の小気孔は避け難いとみられているが（たゞし最近塩素ガスによってそれを除き得るという報告がでた）、Houldcroft 等⁷⁾は速い溶接速度を用いて気孔を微小な分散したものとよめることを推奨しているが、その根拠は未だ一般に認められるほど充分ではないようである。本試験では後述のように、気泡性についてはあまり成績がよくなかったが、一応 Houldcroft⁹⁾ の空隙率の評価法にならったやり方で評価を試みた。アーク電圧についてはさらに別途に考えるべき変数であるが、本報告ではそこまでは及んでいない。

III 試 験 条 件

母材は市販 2S 材（一部 3S）の 5 mm 板であり Fig. 1 のような大きさとし、またガンを固定して試料を移動するために Fig. 2 に示したような真鍮製の車付き溶接台に拘束具を用いて拘束した（flat position）。溶加電極線はすべて 2S 1/16"φ を使用したが、この太さのものに対する溶接電流の実用的下限は 130 A、上限は 300 A である⁸⁾。またアルゴン流量も 40 cfh (1/2" ノズル使用) の一定とした。溶接装置は前報¹⁾と全く同様のものである。

種々の文献のデータおよび電極熔融量の測定結果⁸⁾を参考にして、計画試験条件として Table 1 のように撰んだ。計算脚長は隅肉が二等辺三角形になるものと仮定して線の熔融量から計算したものであり、アーク電圧は 23~24 V を標準とした。溶接速度の値が端数であるのはストロボに

Fig. 1 Size and signification of the plate to be welded in the test

Fig. 2 Jig and fitting for welding test

よって速度を監視したからで、それぞれ使用したストロボ放射線の11本、14本、18本、23本、28本等に対応している。

試験板上のガンの高さは Fig. 2 に示した通りである。電極線にはリールのくせがあるから先端が正しい溶接線を離れないためには、突出長さをなるべく短く振ぶことが必要であった。またその先端の延長は板の稜線に向うようにして行った。垂下特性の溶接機を使用するため、実際に行われた溶接条件は Table 1 とは僅か異なっている。試料数は 2S 材18組 (No. 1-18)、3S 材 3 組 (No. 20-22) で

Table 1 Planned Welding Schedule for the Experiment (Al-2S, 5 mm Plate & 1/16"φ Wire, T-fillet, Flat Positioned). Figures in () show test specimens' numbers.

Current	Estimated leg length (mm) & $[I/\sqrt{v}]$ ($10^3\text{A}/(\text{cm}/\text{sec})^{1/2}$)					
	140 A	170 A	200 A	230 A	260 A	300 A
Welding Wire feed speed v	$C\frac{1}{4}=111\text{mm}^3/\text{s}$	$E=131\text{mm}^3/\text{s}$	$G=158\text{mm}^3/\text{s}$	$I\frac{1}{2}=182\text{mm}^3/\text{s}$	$K=210\text{mm}^3/\text{s}$	$L=240\text{mm}^3/\text{s}$
112cm/m=1.867 cm/s					4.74 [0.190]	5.08 [0.219] (20)
88.6cm/m=1.476cm/s		4.21 [0.140]	4.62 [0.165]	4.96 [0.190] (7)	5.33 [0.214] (8)	5.70 [0.247] (18)
68.6cm/m=1.142cm/s		4.79 [0.159] (5)	5.26 [0.187] (3)	5.65 [0.215] (4)	6.05 [0.243] (15)	
53.6cm/m=0.894cm/s		5.41 [0.180] (1)	5.95 [0.212] (2)	6.38 [0.243] (9)		
44.3cm/m=0.738cm/s	5.53 [0.163] (22)	6.15 [0.198]				

Table 1 中に記してあるが、ほかに若干の予備試験も行った。

試験材料の前処理については、板は普通の方法でアルカリ洗滌をしたほか、熔接前にブラッシングを行った。電極線は Airco 製品 2S. c-finished で、熔接前に四塩化炭素ベンゼン、脱脂綿で拭拭したが、数年間保存されていたものであったためか、処理不十分の憾があり、そのため後の結果に記すように気孔のやゝ多い熔接になったものと思われる。処理については例えば鈴木氏等の研究¹⁰⁾(ANP 材)に詳しいが、本試験では特に検討はしなかった。

IV 試験結果

(1) 外 観

外観写真の一例を Photo. 1 に示した。この試験では隅肉は必ずしも常に等脚的にいかなかったが、これは電極尖端が時々熔接線をはづれたためであって、flat 位置では

(a) $I=225, 220A$; $v=53.6\text{cm/min}$

(b) $I=297, 300A$; $v=88.6\text{cm/min}$

Photo. 1 The weld appearances of some specimens

電極尖端が板の稜線に向くようにしたこと自体は妥当であるように思われた。

Table 1 において $I/\sqrt{v} < 0.18 \times 10^3$ (アーク電圧 20V では約 0.17×10^3 , 25V では 0.185×10^3 (それぞれ No. 10 および No. 13)) では熔込が不十分であり、ビードが丸くかつ不整になって不適当であった。また電流 300A ではしばしば大きな吹穴を生じた。それらの間の条件では概ね良好な形状の隅肉が得られたが、われわれの場合、一般に表面気泡がやゝ多く生じた。黒粉その他は、例えば Needham 等²⁾のビード試験による報告に付け加えるべきものはない。

(2) 変 形

a) 収 縮

Fig. 2 に示したような拘束はおさえ板の切溝が熔接に直角方向であったため、収縮に対しては必ずしも拘束が完全ではなかった憾があるが、相対的傾向を調べるには大過ないと考えられる。Fig. 1 中に示したような各野書線間の距離を 1, 2, 3 の各

Fig. 3 Contraction of the welded base plate

横断線に沿って熔接前後にコンパレータで測定した。一例を Fig. 3 に示したが、収縮の大部分は c-e 間で起り、b-c, e-f 間でなお僅か収縮があり、a-b, f-g 間では逆にきわめて僅か伸びを示している。また 1, 2, 3 の各位置での収縮はほとんど同じときもあり、かなり違っているときもあり、その変化は一定の傾向はない。そこでこの試験では b-f 間の収縮量を 1, 2, 3 の三つの位置で測定した平均をもって横収縮量としてこれを縦軸に、 $I/\sqrt{v}$ を横軸にとってプロットしたグラフを Fig. 5 に示してある。

b) やせ馬 (角変化)

定盤上のダイヤルゲージを滑らせて、板の曲り変形を測定した例は Fig. 4 の如くである。材料の節約のために板巾がやゝ足りないきらいはあるが、細部の問題はさておいて、本試験では b-f を結ぶ線から d までの高さをとってかりにやせ馬量とした。この場合も 1, 2, 3 の三つの位置における平均をとり a) と同様にして Fig. 5 に示した。

(3) 熔込、ビード断面形状

前の試料の野書線 1, 2, 3 の各位置で切断研磨し、断面形状を調べた。熔込形状の代表的なものは例えば、Fig. 6 に示す如くであって、熔込深さとしては図中の Ps_1 , Ps_2 , Ps' , Pb_1 , Pb_2 , Pr 等をとることができる。実際には R

Fig. 4 Angular deformation of the welded base plate

Fig. 5 Contractions and angular deformations of the welded base plate plotted with the parameter $(I/\sqrt{v})$

点の位置が明瞭には定め難いことや、両側の脚長が完全に等しくなるようにすることは困難なのでこれらの単独の値には誤差あるいはバラツキが入りやすい。

Fig. 6 Typical profile of fillet weld by MIG arc welding

Fig. 7 (a) (b) は $1/2 (P_{s1} + P_{b1})$ と Pr の実測結果を $I/\sqrt{v}$ に対してプロットしたものである。前者は比較的バラツキが少く、この範囲では直線に近い関係であることが認められるが、後者はバラツキがひどくて $I/\sqrt{v}$ をパラメーターとして表すのは不適当であることが判る。従って試みに I , $I^2/\sqrt{v}$ 等をパラメーターとしてプロットした結果、これらの中では $I^2/\sqrt{v}$ によるのが最もバラツキが少いことが判明した。(Fig. 7-(c))。たゞし前述のように Pr の測定自体に少しあいまいさがあるから、なお吟味の余地は少くないかもしれない。また 300 A の点だけがとび離れているのは、5 mm 板に対してはこのような深い熔込では裏面、すなわち板厚の影響を考えなければならないから他と同様に扱えなくなるのは当然であろう。

次に隅肉の実際の脚長であるが、ふくらみのために前に示した計算値 ($l = 0.402(I/v)^{1/2} \text{ mm}$) より小さくなることは当然であるが、実験範囲では $I/\sqrt{v}$ のごく小さい所を除き、ふくらみ (h) はほぼ適正な程度に留まっているから、Fig. 8 のように $(I/v)^{1/2}$ と大体直線関係を維持している。この直線から下へ著しく離れている点は $I/\sqrt{v} < 0.18 \times 10^3$ のものである。なお Pl. 2 と 3 はそれぞれ隅肉の横断面および縦断面のマクロ写真 (HF 腐蝕) の数例を示し

Fig. 7 Penetrations plotted with $I/\sqrt{v}$ or $I^2/\sqrt{v}$ as abscissas

Fig. 8 The measured mean leg-lengths of the fillet welds plotted with $(I/v)^{1/2}$

たものである。

(4) 気孔性

気孔性の評価は、Houldcroft 等のやり方⁹⁾にならない、さらに簡単のために気孔の大きさの分類を 5 種類に留め (Table 2), 次式によって「空隙率」を求めた。

熔融金属の断面積…………… a (mm^2)

その中の S 番の気孔の数…………… n_s

単位容積中の S 番の気孔数…………… $N_s = n_s / (d_s' \cdot a)$

S 番の気孔の容積…………… $V_s = \pi/6 \cdot d_s'^3$ (mm^3)

空隙率(% Voids) = $\sum N_s V_s \times 100 = n_s / a \cdot (\pi/6 \cdot d_s'^2) \times 100$

上式で示されたものは厳密には真の空隙をあたるものではないが、一つの評価の尺度として使い得るものと考えら

Table 2 The Classification of Pores

Size No.	Range of diameter	Index for calculating % voids	
	d_s (mm)	d_s'	$\pi/6(d_s')^2$
1	0.05~0.14	0.1	0.0052
2	0.15~0.24	0.2	0.0209
3	0.25~0.34	0.3	0.0471
4	0.35~0.44	0.4	0.0834
5	0.45~0.54	0.5	0.1308

(a) 193A, 23.3V :
 $v=53.6\text{cm/min}$
(No. 11-y-1)

(b) 235A, 22.8V
 $v=88.6\text{cm/min}$
(No. 7-y-3)

(c) 240A, 23.6V
 $v=88.6\text{cm/min}$
(No. 16-y-1)

(d) 297A, 24.7V
 $v=88.6\text{cm/min}$
(No. 18-y-3)

Photo. 2 The typical macro-sections of the fillet welds
れる。

本試験では前に述べたように線材の前処理が不十分であったと思われるため、比較的気泡が多く、かつ試料数が多くないため、熔接条件との間に系統的な関係を求めるには不適であった。実測の結果は、空隙率は小さいもので約0.5% (No. 15-x), 最大で約5% (No. 4-x)であり、大部分は約1~2%であった。気孔の所在はサイズ番号1またはそれ以下はほぼ全面に分散しており、サイズ2, 3等は表面に近い部分または母材との境に近い部分に多く、3, 4, 5等の大きなものは Toe に近い部分に多く生じた。(Photo. 2(a) 参照) またしばしばルート部に気孔恐らく管状を生じるのが見られた。また熔接条件との関係についてみると—これは試料数が少ないため不確ではあるが—200~240A ではサイズ番号4, 5等が少なくな、または160~180A 又は240~280A すなわち比較的低い電流かまたはは

(a)
264A, 23.1V, 88.6cm/min
(No. 17-x-4)

(b)
300A 25.0V 88.6cm/min
(No. 18-x-4)

(c)
296A 24.7V 112cm/min
(No. 20-y-4)
(Plate-3S)

Photo. 3 The longitudinal macro-sections of deep
fillet specimens

比較的高い電流のいずれかの方が大きな気孔が少い。300A 以上では、Needham 等²⁾が示しているように、熔接中クレターに生ずる深い凹み (finger-type penetration) が熔融金属によって完全に埋められないために生ずると考えられる不規則で大きな空洞を生じ易いことが確かめられた。

(5) その他

Photo. 3 に示すように、一般に温度勾配の方向に巨大な柱状晶を示すが、特に(b)のように深い 'finger-type penetration' の部分では急凝固のため、母材熔加金属の混合が一樣でなく、等温線の方向すなわち柱状晶と直角の方向に成分濃度の差による縞が見られる。また 'finger-type' の熔込の底は比較的不整であることが判る。これらは軟鋼の母材にステンレスのビードをおいた場合について既に Muir⁶⁾ が示している所であって、アルミニウムの場合も全く同様であることが認められたわけである。また試料の No. 12 にだけルート部にやや顕著なクラックが認められた。

V ま と め

MIG 熔接において熔接条件を撰定するには、次のような限定条件が存在することになる。

1. 下限電流 (threshold current), $1/16\phi\text{Al} : I > 130\text{A}$
2. 上限電流 (defective current), " : $I < 300\text{A}$
3. 設計脚長 $(I/v)^{1/2}$
4. 適正有効熱入力 $5\text{mmAl} : I/\sqrt{v} > 0.18 \times 10^3 (\text{fillet})$

これらを図で示せば Fig. 9 のようになる。図中の平均脚

Fig. 9 Available welding condition defined by welding factors and variables

長 l は Fig. 8 における実験値 ($l=0.5(I/v)^{1/2}-1.75$) によって計算したものである。以上の限定条件の下にさらに気孔性、熔込形状、熔接歪、作業性、および場合によっては熱影響による材質の変化等を考慮して適当な熔接条件を求めるのが、考え方としては合理的なやり方であろう。

以上について、5 mm 厚 Al (2S) 板および 1/16"φ Al (2S) 電極線使用の連続隅肉熔接における実測データは既述の通りであるが、それらをまとめて実験の範囲で結論的なものを述べるならば次のようになる。

1. 熔接条件は例えば Fig. 9 に示したような限定条件によって撰ぶべきであるが、§4 の Fig. 5, 7, 8 および気孔性に関するデータは限られた場合についてとはあるが、熔接条件の合理的な設定と変形の程度の評価に寄与し得てであろう。

2. 本試験においては気孔性に関する結果は不十分ではあるが、Toe の近くに生じ易い大きな気泡を避けるためには、比較的低い電流領域かまたは高い電流領域のいずれかをを用いた方がよいようである。5 mm 板においては前者は隅肉脚長が必然的に過大になる (Fig. 9) から、この場合はガンをなるべくセットするかまたはガイド等を用いて、

比較的高い方の電流領域 240~280 A, 早い熔接速度 70~110 cm/min, ($I/\sqrt{v}=0.20\sim0.22\times 10^3$, $l=4.5\sim5.5$ mm) を使用することが合理的であると考えられる。

3. finger-type penetration は巾が狭くて等脚隅肉の場合 P_s' (Fig. 6) には比較的寄与が少く、底が不整であり、熔融状態における金属の混合が様でなく、またしばしば大きな空洞の原因となり易い等から、少なくともあまり厚くない板の隅肉熔接では有用なものと思えない方がよいと考えられる。

なお、本報告の試験は一系列のものに限られており、特に §1, 2 に論じたような問題点の充分な攻究に対しては、データが少く、板厚も薄すぎる憾がある。さらにアルミ合金の異なる板厚、線径、材質およびアーク長さについてのデータが増えることが希望しいと思われる。終りに種々御意見をいただいた中根室長、実験についてその協力に負う所の極めて多い萩原健三氏に感謝する次第である。

文 献

- 1) 内田, 萩原; 熔接学会誌 Vol. 25 ('56) No. 12, p. 660.
- 2) Needham, Smith; British W.J. 1958 No. 2, p. 66.
- 3) 渡辺, 佐藤; 熔接学会誌 Vol. 24 ('55) No. 12, p. 34
- 4) 同 上; 同 上 Vol. 26 ('57) No. 4, p. 33; その他
- 5) 山内, 中井; 日立造船技報 Vol. 16 ('55) No. 1; No. 2,
- 6) Muir; British W.J. 1957 No. 7 p. 323.
- 7) Houldcroft & Smith, Process Variables and Porosity in S.A.A. Welding, BWRA Symposium, 1955.
- 8) 内田, 萩原; 熔接学会誌 Vol. 26 ('57) No. 11, p. 11.
- 9) Houldcroft & Smith, British W.J. 1955 No. 2, p. 67.
- 10) 鈴木, 村瀬; 熔接学会誌 Vol. 25 ('56) No. 10, p. 521; 同 No. 11, p. 621.