パイプと板材の摩擦圧接*

— 入熱量の推定と MAG 溶接法との比較 —

竹上 弘彰**, 篠田 剛***, 斎藤 忠****, 池尾 良一****, 菊地 幸宗****

Friction Welding of Pipe to Plate

— Estimate of Heat Input and Comparison with MAG Welding — *

by TAKEGAMI Hiroaki**, SHINODA Takeshi***, SAITO Tadashi****,
IKEO Ryoichi**** and KIKUCHI Yukimune****

In welding of a thin plate, welding deformation is a severe problem. It is difficult to correct the welding deformation after welding. Therefore, the welding deformation should be avoided before or during welding. As the welding deformation is generated by thermal cycle during welding, it is thought low heat input joining process is efficient to decrease the welding deformation. In this study, friction welding was proposed as lower heat input welding process than arc welding. MAG welding was also carried out to compare welding deformation and heat input. However, it is difficult to compare heat input between friction welding and arc welding. Because, there is no general heat input calculation in friction welding and does not define the weld line in friction welding. To compare the heat input directly, pipe circumference was assumed to weld line and calculated heat input by simplified heat input rate, which was proposed by authors.

The appearance of friction welded joint was sound and tensile tests revealed the fracture occurred at the base metal of plate. In friction welding, the deformation of plate was smaller than that in MAG welded joints. Heat input in friction welding was 10-30% in MAG welding by direct comparison for same dimension of joints. The time for welding was also smaller in friction welding. Friction welding is small deformation and efficiency process for joining of pipe and thin plate.

Key Words: Friction Welding, Welding Deformation, MAG Welding, Heat Input, Pipe, Thin Plate

1. 緒 言

溶接は、構造物の組立てに有効な接合法である。しかしながら、溶接部の局所的な加熱によって生じる溶接変形が問題となる。溶接変形は、溶接後に矯正することが困難であることから、その発生を防止することが重要となる。溶接変形を防止する方法として、溶接部の少ない設計を行うことや治具の使用、変形が少なくなる溶接順序の採用等が挙げられる¹⁾。溶接変形が金属への局所的な入熱によって生じることから、接合時の入熱量が少ない接合法の採用も、溶接変形を防止する手段の一つである。接合形状に制約があるものの、入熱量が少ない接合法としては、固相接合法である摩擦圧接法が挙げられる。

摩擦圧接法は、接合部材間の摩擦熱を利用する接合法である。一般的に、摩擦圧接法では接合界面の最高温度は部

材の融点以下である。また、比較的短時間の接合プロセスであることから、アーク溶接などの溶融溶接法に比べ入熱量の小さい接合法であると考えられる。アーク溶接の場合、溶接電流、溶接電圧および溶接速度を用いて単位長さあたりの入熱を算出することができる。しかしながら、摩擦圧接法では一般的な入熱計算法が無く、いくつかの計算手法が提案されているのみである^{2,3)}。また、摩擦圧接法では、アーク溶接における溶接線の定義ができないため、単位長さあたりの熱量を定義することができない。これらの理由から、摩擦圧接法とアーク溶接法の入熱量の直接比較は困難である。従って、同一部材の接合を行う際に、具体的に摩擦圧接法がアーク溶接に比べどの程度低入熱量で接合を行えるかは不明である。そこで、本研究では摩擦圧接法において溶接線を仮定することにより、アーク溶接法との熱量の直接比較を試みた。

本研究ではパイプと板材の接合を行った。接合は、摩擦圧接法と、アーク溶接である MAG 溶接法により行い、板材の変形量の比較を行った。また、パイプの円周をアーク溶接における溶接線とみなすことにより、摩擦圧接法において単位長さあたりの熱量を算出し、アーク溶接法との熱量の直接比較を検討した。

*原稿受付 平成 14 年 6 月 7 日 平成 13 年度春季全国大会で発表

**学 生 員 名古屋大学大学院 Student Member, Graduate student, Nagoya University

***正 員 名古屋大学工学研究科 Member, Faculty of Engineering, Nagoya University

****正 員 日本スタッドウェルディング(株) Member, Nippon Stud Welding Co., Ltd.

2. 実験方法

2.1 供試材および実験条件

パイプ材は直径 35.0 mm, 肉厚 3.5 mm の SKTM-13A 鋼材, 板材は $250 \times 250 \times t4.5$ の SS400 鋼材を用いた。板材は, 接合後の変形量の測定を容易にするためにこの大きさとし

Table 1 Friction welding conditions

P_1 [MPa]	57.7, 101.1
u_1 [mm]	3.5, 5.0
P_2 [MPa]	121.3
t_2 [s]	5.0
N [rpm]	2000, 2800, 3600

Table 2 MAG welding conditions

V [V]	18, 20, 22, 23
I [A]	130, 160, 190, 240
v [cm/min]	20, 30, 40

Fig. 1 Schematic illustration of jig for steel plate

た。接合前に, 板材表面の黒皮をグラインダーにより除去した。

摩擦圧接は, 日東制機(株)製ブレーキ式縦型摩擦圧接装置を用いて行った。本装置はサーボモータ制御の摩擦圧接装置である。摩擦圧接条件は Table 1 に示す。摩擦圧接は, 摩擦圧力 P_1 , 摩擦寄り代 u_1 , 回転数 N を変化させ, アプセット圧力 P_2 およびアプセット時間 t_2 は固定して行った。摩擦寄り代を, 十分な継手性能が得られると考えられる 3.5 mm 以上とし, 圧力および回転数を変化させ入熱量を変化させた。MAG 溶接は, $\phi 1.2$ mm のワイヤを用いて水平すみ肉溶接で行った。MAG 溶接条件を Table 2 に示す。この溶接条件は, 溶接電圧 V , 溶接電流 I および溶接速度 v を, 脚長が 4 mm 程度になる条件を基準に, 入熱量が変化するように設定した。

接合した継手に関して, 外観および接合部の断面観察を行った。また, 継手性能の評価として引張試験を行った。引張試験は, パイプ材上端に試験片把握用の丸棒を溶接し, 板材側を $100 \times 100 \times t4.5$ に加工して行った。

2.2 板材変形量の測定

摩擦圧接および MAG 溶接では, Fig. 1 に示す治具を用いて板材を保持した。板材を治具に固定せず, 自由変形可能とするため, 治具上板の四隅に板材回転防止用のストッパーを設けるのみとした。摩擦圧接ではこの治具を固定側とし, MAG 溶接ではターンテーブルに治具を取り付け, 接合を行った。

摩擦圧接および MAG 溶接ともに, 差動変位計を用いて接合中の板材の変形過程を測定した。測定位置は Fig. 1 に示した。また, 板材裏面のパイプ接合部を基準高さとして板材各部の接合前後の高さを測定し, その差を変形量として求めた。

3. 実験結果および考察

3.1 接合結果

Fig. 2 に, 摩擦圧接および MAG 溶接による代表的な継手外観を示す。摩擦圧接法では, パイプ材にばりが形成された。Table 1 に示したほぼ全ての条件で良好な継手外観が得られた。接合界面にはわずかに回転面移動現象によると思われる中間層が見られた。回転数が 2000 rpm で摩擦圧力 P_1 が 57.7 MPa の条件では, 接合面の一部に未接合部が見られた。一方, MAG 溶接法では, 3 mm から 7 mm の脚長となった。ほぼ等脚長となるビードが得られたが, 低溶接速度ではたれ落ちによる不等脚長が見られた。

板材裏面には入熱による変色, いわゆる裏焼け現象が見られた。この裏焼けは, 摩擦圧接および MAG 溶接の両接合法で見られ, 接合部の裏面にあたる部分にリング状になった。裏焼けのリングの幅は, MAG 溶接法の方が摩擦圧接に比べ大きくなった。これは, MAG 溶接法の入熱量が大

Fig. 2 Appearance of friction and MAG welded joints

きく、板材裏面の温度が摩擦圧接に比べ高くなったためであると考えられる。

3.2 変形量の比較

Fig. 3 に、接合後の板材の変形量を比較した写真を示す。左側が摩擦圧接、右側が MAG 溶接による継手である。ガラス板上に試験片をのせ、反射像により変形を比較しやすくして写真撮影した。両継手で変形が確認できるが、摩擦圧接継手の変形量は MAG 溶接継手に比べ半分程度であることがわかる。

Fig. 4 に摩擦圧接中の板材の変形過程を示す。変形量は接合面側への変形を正とした。変形は、摩擦開始直後から始まっていることがわかる。摩擦過程で変形量は増加し続け、摩擦過程終了時に最大となる。その後、アプセット過程開始、つまり冷却開始と同時に正方向への変形は停止し、変形が戻り始める。変形量の減少はアプセット過程終了後も続き、ある程度の変形量を残して変形が止まる。この時の最終的な変形量は、接合後の測定による板材の変形量とほぼ一致した。アプセット過程終了直後に一度変形量が大きくなっているのは、摩擦圧接終了後にパイプ材がチャックから開放される時に、反動により板材が動いたためである。MAG 溶接の場合も変形が戻る現象が見られたが、測定を行う場所により変形が戻り始めるタイミングが異なっていた。これは、MAG 溶接では摩擦圧接法のように接合面全体が同時に発熱するのではなく、熱源が移動するため、パイプ円周の各部の入熱の時期が異なるためであると考えられる。

3.3 引張試験結果

引張試験の結果、どちらの接合法による継手においても

Fig. 3 Comparison of welding deformation between friction and MAG welded joints

Fig. 4 Deformation process in friction welding

Fig. 5 Result of tensile test of friction welded joint

良好な継手強度を示した。しかしながら、摩擦圧接法と MAG 溶接法では、破断形態に大きな違いが見られた。摩擦圧接継手の引張試験では、Fig. 5 に示すように、板材部分でせん断破壊した。せん断はパイプ接合部の最外周に沿った円周形状で生じた。この場合、接合界面では破断は見られなかった。この時の破断荷重を板材のせん断強度等を用いて検討した結果、板材の引張強度以上の継手強度が得られていると考えた。これに対し、MAG 溶接継手では、引張試験用に溶接した丸棒の溶接部で破断した。この場合も、破断荷重から、母材強度を上回っていると考えた。このように破断位置が異なったのは、両接合法の接合面の違いであると考えられる。摩擦圧接継手では、基本的にパイプ断面が接合面となる。この接合面は十分な強度を有しているため、板材部分の接合部外側で円周状にせん断破壊したものと考えられる。これに対し、MAG 溶接継手では、余盛が形成されるため、すみ肉脚部による接合面積が大きくなる。本実験では、引張試験の際に接合部の加工を行っていないため、接合面積の小さい丸棒溶接部での破断となったと考えられる。

摩擦圧接、MAG 溶接継手において、母材強度と同等以上と考えられる強度が得られた。これにより、Table 1 および 2 の条件で良好な継手を作成できると考え、これらの条件を用いて両接合法の熱量比較を行った。

3.4 入熱量の比較

3.4.1 摩擦圧接法と MAG 溶接法の熱量比較

摩擦圧接法とアーク溶接法の熱量の直接的な比較はあまり行われていない。アーク溶接法では熱源の移動経路を溶接線として定義し、入熱は単位長さあたりの値として算出することが可能である⁴⁾。これに対し、一般的な中実丸棒の摩擦圧接は、Fig. 6 (a) に示すように摩擦面での発熱であり、溶接線が存在しない。このため、アーク溶接法のような単位長さあたりの熱量を算出することができず、両者の

Fig. 6 Definition of weld line in friction welding of pipe specimen

熱量を直接比較することが困難であった。そこで、摩擦圧接法においても仮想的に溶接線を定義することにより、アーク溶接法との熱量比較を行うことを考えた。

本研究では、パイプ材の接合を行った。パイプ材の摩擦圧接では、Fig. 6 (b) に示すように円周形状の摩擦面となる。この円周を溶接線と仮定することにより、摩擦圧接法と MAG 溶接法の熱量の直接比較を行った。MAG 溶接法の入熱は一般的にアーク溶接法の入熱計算に用いられている次式により算出した。

$$Q = 60 \frac{\eta VI}{v}$$

ここで、 Q : 入熱 (J/cm)、 η : 熱効率、 V : 溶接電圧 (V)、 I : 溶接電流 (A)、 v : 溶接速度 (cm/min) である。熱効率は 0.8 とした。

摩擦圧接法では、入熱計算の一般的な手法が確立されていないため、ここでは本研究室で提案している簡易入熱速度計算法を用いて熱量を算出した。次に、この簡易入熱速度計算について述べる。

3.4.2 簡易入熱速度計算

本研究室では、摩擦圧接における入熱に着目し、簡単な仮定と部材の変形量から、単位時間、単位面積あたりの入熱量を計算入熱速度として定義し、継手の評価に用いてきた⁵⁾。しかし、この入熱速度の算出には融点直下までの部材の高温強度式が必要であり、数値積分を含んだ非線形連立方程式を解かなければならない。そこで、計算入熱速度を簡略化した簡易入熱速度を定義した⁶⁾。簡易入熱速度は電卓で計算することが可能であり、摩擦圧接を行う現場ですぐ

$$J_{sim} = J_f + \frac{1}{2} J_b$$

$$= \frac{c \rho T_f u}{t_1} + \frac{c \rho T_f}{2 \eta} \sqrt{\frac{\pi \kappa}{t_1}}$$

J_{sim} : Simplified heat input rate of pipe, J/mm²/s
 J_f : Heat input rate of flash, J/mm²/s
 J_b : Heat input rate of base metal except flash, J/mm²/s

Fig. 7 Calculation model of simplified heat input rate

求め、指標とすることができる。

Fig. 7に簡易入熱速度 J_{sim} の計算モデルおよび定義式を示す。同図はアプセット圧力 P_2 加圧終了時の試験片の状態を示している。このとき、ばりの部分の入熱速度 J_f と、ばりを除く母材の入熱速度 J_b は互いに独立したものとし、これらの和を簡易入熱速度 J_{sim} と定義し、次式で示す。

$$J_{sim} = J_f + \frac{1}{2} J_b$$

$$= \frac{c\rho T_f u}{t_1} + \frac{c\rho T_f}{2\eta} \sqrt{\frac{\pi\kappa}{t_1}}$$

ここで、 c ：比熱 (J/kg/K)， ρ ：密度 (kg/mm³)， T_f ：ばりの温度 (K)， t_1 ：摩擦時間 (s)， κ ：熱拡散率 (mm²/s)， η ：熱効率である。計算では、ばりの温度 T_f は 1373 K，熱効率 η は 1 とした。

中実丸棒の摩擦圧接においては、簡易入熱速度計算により妥当な値が得られることが、接合直後の継手の保有熱量を実測した結果との比較で明らかになっている⁶⁾。しかしながら、パイプ材のような円形断面以外の部材に適用する検討は行われておらず、計算結果の妥当性については不明である。そこで、パイプ材の摩擦圧接における簡易入熱速度計算の妥当性を調べるためにカロリーメータにより摩擦圧接直後の継手の保有熱量の実測を行い、計算値との比較を行った。摩擦過程終了直後の保有熱量を測定するために、アプセット圧力を加えずに継手をカロリーメータに投入した。その後、水温の変化を計測し、保有熱量を算出した。

Fig. 8にパイプ材と板材の摩擦圧接における、摩擦入熱量の実測値と計算値の比較を示す。実測値との単位をそろえるため、簡易入熱速度に接合中のパラメータ変化曲線より読み取った摩擦時間とパイプ材断面積を乗じて、計算入熱量とした。簡易入熱速度計算結果から求めた入熱量とカロリーメータによる実測値を比較した場合、若干実測値が小さくなる傾向はあるものの両者に大きな差は無く、入熱評価の指標として用いることができると考えられる。単位をそろえるため、MAG溶接法との入熱量比較には、先程求めた計算入熱量をパイプ円周長で除した値を用いた。

3.4.3 熱量の比較結果

Fig. 9に、摩擦圧接法とMAG溶接法の入熱を比較した結果を示す。図中に、それぞれの接合法での入熱量の分布を示す。単純に比較して、摩擦圧接法がMAG溶接法に比べ熱量の小さい接合法であることがわかる。引張試験において十分な継手強度が得られた接合条件において入熱の比較を行った場合、摩擦圧接法の入熱はMAG溶接法の約10～30%となった。また、接合パラメータが異なるため単純な比較は困難であるが、摩擦圧接法ではMAG溶接法に比べ接合条件変化に対する入熱変化が小さくなった。

接合時間に関しても摩擦圧接法では短くなっている。今回用いた条件では、摩擦圧接法における入熱時間である摩擦時間は、1.4 sから8.1 sであり、これにアプセット時間を加えても、15 s程度で接合が完了する。摩擦圧接法では、摩

Fig. 8 Calculated and measured heat input

Fig. 9 Heat input range for two processes

擦時間が2 sから4 s程度の条件においても十分な接合強度が得られており、実際には10 s以内の接合が可能であると考えられる。これに対し、MAG溶接法では最大で30 s程度の溶接時間である。このように、摩擦圧接法はMAG溶接法に比べ効率の良い接合法であることがわかる。

3.5 入熱量と変形量の関係

入熱量と溶接変形量には密接な関係があると考えられる。前節で、摩擦圧接法はMAG溶接法に比べ非常に少ない入熱で接合可能であることがわかった。そこで、入熱量と変形量の関係について検討した。Fig. 10に、入熱と変形量の関係を示す。変形量は、接合後に測定したものを角度に換

Fig. 10 Relationship between deformation angle and heat input

算して示した。摩擦圧接法は、MAG 溶接法に比べ入熱、変形量共に小さく、ばらつきが小さいことがわかる。

摩擦圧接における変形量は 0.5° 以内であるのに対し、MAG 溶接法における変形量は 0.3° から 1.4° 程度の範囲であった。 0.5° の変形の場合、パイプ材外周から 100 mm の点の変形量が 0.87 mm に相当し、 1.4° では 2.4 mm に相当する。全体的に、MAG 溶接法の変形量は摩擦圧接法における変形量に比べ大きくなっているが、摩擦圧接法と同程度の変形量になっている場合がある。次に、この点について考察する。

接合面での入熱量が大きいほど板材裏面との温度差は大きくなり、変形量が大きくなると考えられるが、入熱量が過大な場合、熱伝導により逆に裏面との差が減少すると考えられる。Fig. 10 において入熱量が大きいにもかかわらず変形量が小さくなっているのは、入熱量が過大であると考

えられる。そこで、MAG 溶接法の変形量を脚長 4.5 mm を境界として分類した。その結果、図中で□印で示した脚長が 4.5 mm 以下の条件では、摩擦圧接法に比べ入熱量が大きく、変形量も大きいことがわかった。本実験では、板厚 4.5 mm の鋼板を用いており、板厚以上の脚長は不適切であると考えられる。以上より、適切な接合条件の下では、摩擦圧接法は低入熱量の接合法であり、入熱による変形が小さくなることがわかった。

4. 結 言

- (1) パイプの円周を溶接線と仮定することにより、摩擦圧接法と MAG 溶接法の接合中の入熱量を直接比較することができた。摩擦圧接法は MAG 溶接法に比べ接合中の入熱が小さく、MAG 溶接法の約 10 ~ 30 % の入熱量であった。
- (2) 簡易入熱速度計算により、パイプと板材の摩擦圧接における入熱量を概算することができた。
- (3) 摩擦圧接法により、パイプ材と板材の接合を行うことができ、板材のせん断強度以上の継手強度を得ることができた。
- (4) 摩擦圧接および MAG 溶接による接合で、板材に入熱による変形を生じた。摩擦圧接法では、MAG 溶接法に比べ変形量が小さくなった。

参 考 文 献

- 1) JWS: 溶接・接合便覧, Maruzen, (1990), 38 (in Japanese)
- 2) K. Okita, M. Aritoshi and H.H. Hira: Effect of Heat Balance at Interface on Friction Welding of Equi-Diameter Bar Joints, J. JWS, 51-2 (1982), 134-141. (in Japanese)
- 3) T. Sawai, K. Ogawa, H. Yamaguchi, H. Ochi, Y. Yamamoto and Y. Suga: Effect of heat input on joint performance in 6061 aluminum alloy friction welding, Journal of Japan Institute of Light Metals, 50-10 (2000), 505-511. (in Japanese)
- 4) JWS: 溶接・接合便覧, Maruzen, (1990), 7 (in Japanese)
- 5) T. Shinoda, S. Endo and K. Tanada: Friction Welding of Cast Iron and Stainless Steels, Quar. J. JWS, 14-2 (1996), 248-254. (in Japanese)
- 6) T. Shinoda: Simplified Calculation of Heat Input of Friction Welded Joints, Prep. Nat. Meet. JWS, 61 (1997), 268-269. (in Japanese)

平成 14・15 年度編集委員

(委員長) 南 二三吉, (副委員長) 池内 建二

(委 員) 浅井 知, 稲垣 正壽, 井上 好章, 小川 和博, 片山 聖二, 北側 彰一, 小林 順一
才田 一幸, 阪口 修一, 高橋 邦夫, 田川 哲哉, 田中 学, 土屋 和之, 塚本 進
中塚 康雄, 平田 好則, 細井 宏一, 道場 康二, 望戸 實

溶 接 学 会 論 文 集 第21巻 第2号

平成 15 年 5 月 1 日印刷

平成 15 年 5 月 5 日発行

編集兼発行者 鈴木 正文

東京都千代田区神田佐久間町 1 の11

印刷所 日本印刷出版株式会社

大阪市福島区吉野 1 の 2 の 7

発行所 社 団 法 人 溶 接 学 会

101-0025 東京都千代田区佐久間町1の11

電話 03 (3253) 0488 (代)

FAX 03 (3253) 3059

振替口座 00180-7-143434番