異径丸棒の摩擦圧接に関する研究 (第 1 報)*

—摩擦圧接現象に及ぼす丸棒直径の差の影響について—

沖田 耕三**, 有年 雅敏**, 岸本和一郎**, 山田桑太郎***, 平 博 仁***

Study on the Friction Welding of Different Diameter Bars (Report 1)*

—Effect of Relative Difference of Bar Diameter on the Friction Welding Phenomenon—

by Kozo Okita**, Masatoshi Aritoshi**, Waichiro Kishimoto**,
Sotaro Yamada*** and Hirohito Hira***

Friction welding of different diameter bars is very important for practical applications. That is affected by the asymmetrical thermal conduction of friction heat and deformation, compared with the symmetrical behaviour of the friction welding of equi-diameter bars.

In this study, friction welding phenomenon of different diameter bars of stainless steel SUS 304 was studied.

The diameter of one bar was fixed as a standard, and the diameter of another bar was changed from the same diameter of the standard bar to large diameter enough to be considered as a plate, then the pair was friction welded. During friction welding, temperature of friction surface, friction torque and burn-off behaviour were examined.

Effect of the ratio of diameter of each bar, d/d_0 (d_0 =standard diameter, d =comparative diameter) on these friction welding behaviour was studied.

Experimental results were as follows;

- (1) From the observation of the macrophotograph of joints, deformation of comparative diameter bar decreases with increase of $d/d_0=1.75$ or above. This is the same state of stud to plate welding.
- (2) Steady state temperature of friction surface rises up with increase of d/d , and it is close to the constant value with the d/d_0 value of more than 2.
- (3) As for the friction torque, the initial torque is not so affected by d/d_0 , but steady torque and terminal torque increase with increase of d/d_0 becoming to constant when d/d_0 is more than 1.75.
- (4) Burn-off behaviours, for example, burn-off rate and total upset decrease with increase of d/d_0 , and these also become constant for d/d_0 above 1.75. These constant value is larger than half of the values at $d/d_0=1$.

1. 緒 言

複雑な形状の機械部品は、一体成型するよりも単純な形状で分割成型後接合して作成する方が、材料費、加工費を節限できる可能性がある。そしてこのことに対し、摩擦圧接は非常に有効な接合手段としての実績を持っている。この分野での摩擦圧接に要求される継手は、同一径の丸棒同士の継手はもとより、異径の丸棒の継手やその極端な形としての板と丸棒の継手も多い¹⁾。

異径の丸棒を摩擦圧接する場合、各部材への熱伝導や接合部の変形挙動は非対称となる。そのため同一径丸棒同士の摩擦圧接とは異なる接合挙動を示すことが経験的

には知られているが、これに関する研究報告例はない。

本研究は、異径丸棒の摩擦圧接と同一径丸棒の摩擦圧接との圧接挙動の差を明らかにすることを目的とするものである。すなわち、突き合わせる丸棒のうち一方の丸棒の径を一定とし、他方の丸棒の径を同一径からほぼ板に相当しうほど充分大きな径まで変化させて、摩擦圧接を行った。そしてこのような継手形状の変化の摩擦圧接挙動への影響、すなわち摩擦面の温度、摩擦トルクおよび、よりしろへの影響を調べ、これに対して継手の外観、断面マクロ観察結果および著者²⁾らによる同一径の丸棒の研究成果から考察を加えた。

2. 実験方法

供試材としては、溶体化処理されたオーステナイト系ステンレス鋼 SUS 304 を用いた。Table 1 はその化学成分を示す。突き合わせる丸棒のうち一方の径を 8 mm ま

*原稿受付 昭和55年9月1日

**正 員 兵庫県立工業試験場 Member, Industrial Research Institute of Hyogo Prefecture

***正 員 川崎重工業(株) Member, Kawasaki Heavy Industries Ltd.

Table 1 Chemical composition of stainless steel SUS304 used.

Material	Elements, %							
	Ni	Cr	C	Si	Mn	P	S	Mo
SUS304	8.18	18.56	0.07	0.39	1.87	0.034	0.015	0.31

Fig. 1 Shape of friction welding specimen. (Unit: mm) (The example of standard diameter $d_0=16$ mm, and d is choiced between d_0 and $3.2 d_0$)**Table 2** Friction welding conditions. (Marks are used as the symbols of welding conditions in subsequent figures.)

Standard diameter d_0 (mm)	Friction pressure P_1 (kg/mm ²)	Forge pressure P_2 (kg/mm ²)	Friction speed N (r.p.m.)	Friction time t_1 (sec)	Forge time t_2 (sec)	Brake timing t_3 (sec)	Marks
8	6	12	2400	8	4	0.4	▲
	12	18	2400	4	4	0.4	●
	6	12	3200	8	4	0.4	△
	12	18	3200	4	4	0.4	○
16	6	12	2400	20	6	0.4	▲
	12	18	2400	10	6	0.4	●
	6	12	3200	20	6	0.4	△
	12	18	3200	10	6	0.4	○

たは、16 mm の 2 種類とし、これを基準として他方の丸棒の径をそれと同一から約 3.2 倍まで相対的に変化させた。以後、基準とする径を基準径 d_0 、相対的に変化させる径を比較径 d と呼ぶことにする。Fig. 1 は基準径 $d_0=16$ mm のときの試験片の形状を示す。摩擦圧接のさい基準径側の丸棒を固定し、比較径側の丸棒を回転させた。なお基準径および比較径の丸棒とも、圧接機のつかみなどの制約のため、突合せ部から長さ 20 mm の部分のみを所定の径とし、他の部分は 19 mm とした。基準径側の丸棒には、摩擦トルク測定のために長さ 30 mm のキー溝が掘られている。

ブレーキ式の摩擦圧接機を用いて圧接を行った。圧接条件は、各基準径について摩擦圧力 P_1 とアプセット圧力 P_2 の加圧力の組合せを ($P_1=6$ Kg/mm², $P_2=12$ Kg/mm²) と ($P_1=12$ Kg/mm², $P_2=18$ Kg/mm²) との 2 段階、回転数 N を 2400 r.p.m と 3200 r.p.m との 2 段階とし、加圧力に応じて摩擦時間 (t) を設定した Table 2 の 4 条件を用いた。そして表の右端の記号を、各圧接条件を示す記号として今後の図表で用いることにした。

▲, ●は回転数 2400 r.p.m で前者が ($P_1=6$ kg/mm², $P_2=12$ kg/mm²), 後者が ($P_1=12$ kg/mm², $P_2=18$ kg/mm²) を示す。そして△, ○は回転数が 3,200 r.p.m で同様の加圧力のものである。なお回転停止のさい、ブレーキ式では制御している圧力および回転数を急激に変化させなければならないが、その変化状況が非常に圧接挙動に影響を与えることが知られている^{3,4)}。そこで本実験では、すべてクラッチを切った後も、0.2 秒摩擦圧力を負荷し、その後直ちにアプセット圧力に切りかえ 0.2 秒後にブレーキを動作させるという一定の操作を行った。

摩擦圧接中の摩擦面温度、摩擦トルクおよび、よりしろの挙動を測定し、電磁オシログラフで記録した。摩擦面温度の測定は、2 色温度計を用いて摩擦面外周部の表面温度を非接触で測定する方法を用いた。別の実験²⁾でこの測定法は非常に応答性よく摩擦面の温度変化を測定できることを確かめている。また継手の外観および断面マクロ観察を行った。そして実験結果は比較径 d と基準径 d_0 との比 d/d_0 で整理した。

3. 実験結果

3.1 断面マクロ観察

Fig. 2 は、摩擦圧接条件 $P_1=12$ kg/mm², $P_2=18$ kg/mm², $N=2,400$ r.p.m を一定として接合した種々の d/d_0 の値の異径丸棒の圧接継手の断面マクロ写真を示す。基準径 8 mm, 16 mm とともに $d/d_0=1$ の同一径丸棒の圧接では、摩擦面は平面であり、両方の丸棒から対称なバリが形成されている。しかし一方の径が少し大きくなった $d/d_0=1.25$ の継手では基準径側丸棒のバリに比べて比較径側丸棒から押しだされたバリは小さい。そして、摩擦面は中心軸近傍で基準径丸棒が比較径丸棒側へ傾域を広げた凸の曲面となっている。 $d/d_0>1.75$ の継手では、バリが形成されているのは小さい基準径側の丸棒のみで、大きな比較径側の丸棒はほとんど変形していない。そして、摩擦面は $d/d_0=1.25$ の継手と同様に曲面である。そして基準径 8 mm の $d/d_0>1.75$ の継手では、摩擦面が基準径丸棒側へ移動しているのが観察される。

3.2 摩擦圧接挙動について

Fig. 3 は摩擦圧接パラメータの制御状況とそれに対応した圧接挙動、すなわち摩擦面の温度、摩擦トルクおよびよりしろの変化の測定結果例を模式的に示す。丸棒接触時の急激なトルクの変動による圧接機への負荷を軽減するため、この実験では接触後の 1 秒間 $P_0=1$ kg/mm² で加圧してから、本来の摩擦圧力 (P_1) で加圧した。その結果摩擦トルクには初期時に 2 つのピーク (T_i' , T_i) が生じている。この 2 つの値のうち、 P_1 で加圧した

Fig. 2 Macrophotographs of different diameter bar friction welds.

(Welding condition ; $P_1 = 12 \text{ kg/mm}^2$, $P_2 = 18 \text{ kg/mm}^2$, $N = 2400 \text{ rpm}$)

Fig. 3 An example of the parameter control of friction welding and the corresponding behaviour of the temperature of friction surface, friction torque and displacement.

P_1 ; Friction pressure
 P_0 ; Pre-friction pressure
 P_2 ; Forge pressure
 t_0 ; Pre-friction time
 N ; Friction speed
 t_1 ; Friction time
 t_2 ; Forge time
 $S.S.T$; Steady state temperature of friction surface
 T_i ; Initial torque for $P_0 = 1 \text{ kg/mm}^2$
 T_t ; Initial torque measured
 T_{st} ; Steady torque
 T_t ; Terminal torque
 δ ; Burn-off rate
 δ_2 ; Upset
 δ_1 ; Burn-off
 δ_t ; Total upset

ときに生ずる T_i を初期トルクとして測定した。この値は純粋な意味での初期トルクではない。しかし、予備的な加圧なしに直接 P_1 を加圧すると、その真の初期トルクは表面粗さや面の傾きなどに非常に影響をうけて測定結果がばらつくのでこの値を測定することにした。

初期トルクの後摩擦時間の経過に伴ない、摩擦トルクは減少して一定値に近づく。また摩擦面の温度は急激な

上昇後一定値となる。摩擦よりしろも同様により速度が一定値に近づいていく。これらの各々を定常トルク (T_{st})、定常温度 ($S.S.T$)、定常より速度 (δ) と呼び、それらへの d/d_0 の影響を調べた。そして回転停止のさい摩擦トルクには最終トルクの大きなピークがあらわれ、よりしろも、これまでの摩擦よりしろ (δ_1) に大きなアップセットよりしろ (δ_2) が加算される。 $\delta_1 + \delta_2$ は全よりしろ (δ_t) である。これらの値も測定し d/d_0 の

影響を調べた。

3.3 摩擦面の定常温度におよぼす d/d_0 の影響

突き合わせた丸棒の直径の比 d/d_0 と摩擦面の定常温度との関係を Fig. 4 に示す。(A)が基準径 $d_0=8$ mm, (B)が $d_0=16$ mm の結果である。摩擦面の温度は圧接条件

に依存している。すなわち摩擦面の温度は、回転数が大きく、摩擦圧力が小さなほど高温となり (Δ)、逆に回転数が小さく、しかも摩擦圧力が大きなほど ($\bullet$)、低くなる。そして、圧接条件を一定とし、比較径 d を大きくしてゆくと、接合部の温度は徐々に上昇してある温度

Fig. 4 Effect of the ratio of diameter of each bar, d/d_0 , on the steady state temperature of friction surface.
(A) $d_0=8$ mm ϕ (B) $d_0=16$ mm ϕ

Fig. 5 Effect of d/d_0 on initial torque, steady torque and terminal torque.

- (A) Initial torque. ($d_0 = 8$ mm ϕ)
 (B) Initial torque. ($d_0 = 16$ mm ϕ)
 (C) Steady torque. ($d_0 = 8$ mm ϕ)
 (D) Steady torque. ($d_0 = 16$ mm ϕ)
 (E) Terminal torque. ($d_0 = 8$ mm ϕ)
 (F) Terminal torque. ($d_0 = 16$ mm ϕ)

Fig. 6 Effect of d/d_0 on burn-off rate.

(A) $d_0 = 8$ mm ϕ (B) $d_0 = 16$ mm ϕ

に漸近してゆく。この傾向は圧接条件および基準径によらずあらわれている。

3.4 摩擦トルクにおよぼす d/d_0 の影響

Fig. 5(A), (C), (E) は、基準径を 8 mm とした継手の摩擦圧接における、初期トルク、定常トルクおよび最終トルクと d/d_0 の関係を示すものであり、Fig. 5(B), (D), (F) は、基準径を 16 mm とした場合の同様の各トルクと d/d_0 の関係を示すものである。なお定常トルクは初期トルクや最終トルクよりはるかに小さいので、縦軸の単位をそれらの 4 倍とした。

摩擦トルクは、3 種 (初期、定常、最終) のトルクとも、加圧力が大きく、回転数が小さいと最も大きく

(●)、その逆が最も小さい (△)。初期トルクは圧接条件が同一ならば基準径 8 mm および 16 mm の結果とも d/d_0 によらず、ほぼ一定値をとる。それに対して定常トルクおよび最終トルクは、基準径および圧接条件によらず d/d_0 の増加とともに増加し、そして $d/d_0 > 1.75$ である一定値へ漸近する。

3.5 より速度およびよりしろにおよぼす d/d_0 の影響

Fig. 2 の断面マクロ観察にみられるように d/d_0 が増加すると径の大きな比較径側が変形しがたくなことから、より速度およびよりしろが減少することが考えられる。Fig. 6 はより速度と d/d_0 の関係を示すものであ

Fig. 7 Effect of d/d_0 on burn-off and total upset.

Table 3 Comparison of burn-off behaviour between half of the values of $d/d_0=1$ and values of d/d_0 over 1.75.

d_0		8 (mm)				16 (mm)			
Welding condition		○	●	△	▲	○	●	△	▲
δ	$1/2 \delta (d/d_0=1)$	0.34	0.34	0.30	0.30	0.70	0.70	0.40	0.40
	$\delta (d/d_0>1.75)$	0.62	0.62	0.56	0.56	0.89	0.89	0.44	0.40
δ_1	$1/2 \delta_1 (d/d_0=1)$	1.2	1.1	2.1	2.2	3.0	3.4	2.7	3.3
	$\delta_1 (d/d_0>1.75)$	2.1	1.8	4.0	4.1	5.5	6.8	4.7	5.8
δ_2	$1/2 \delta_2 (d/d_0=1)$	5.8	7.7	4.2	5.5	2.7	3.6	3.5	4.4
	$\delta_2 (d/d_0>1.75)$	7.4	9.6	4.5	5.9	2.0	2.8	4.2	5.0
δ_t	$1/2 \delta_t (d/d_0=1)$	7.0	8.8	6.3	7.7	5.7	7.0	6.2	7.7
	$\delta_t (d/d_0>1.75)$	9.5	11.4	8.5	10.0	7.5	9.6	8.9	10.8

る。全体に加圧力が大きいと、より速度は大きい。そして、 d/d_0 が増加するとより速度は減少し、 $d/d_0>1.75$ ではほぼ一定値となる。なおこの Fig. 6 は回転数 2400 r.p.m の圧接条件の結果のみを示しているが、加圧力条件の同一な 3200 r.p.m の結果も、Fig. 6 のプロットと重なっている。

Fig. 7 は、回転数 2400 r.p.m とした 2 つの圧接条件における摩擦よりしろおよび全よりしろの測定結果である。Fig. 7 より、摩擦よりしろおよび全よりしろとも、Fig. 6 のより速度の結果と同様に、 d/d_0 が 1.75 までそれらの値は減少し、それ以上では、ほぼ一定値をとる。回転数 3200 r.p.m の圧接条件における結果でも、この傾向は同様であった。

このように、 d/d_0 が大きくなると、より速度、よりしろとも d/d_0 によらずほぼ一定値をとる。これは、Fig. 2 の $d/d_0=2$ の断面マクロ写真にみられるように、大きな比較径側の丸棒は変形せず、小さな基準径側の丸棒のみから、バリが形成される状態に対応するものとおもわれる。同一径丸棒の圧接では両方の丸棒から対称にバリが形成されるが、そのうちの一方の丸棒のより挙動と、この異径丸棒の圧接で一方のみからバリが形成される場合のより挙動とを比較した。すなわち Table 3 に示すように、 $d/d_0=1$ における $\delta, \delta_1, \delta_2, \delta_t$ の $1/2$ 値と $d/d_0>$

1.75 における $\delta, \delta_1, \delta_2, \delta_t$ の値とを比較した。

まず、より速度 δ について比較した。基準径が 8 mm のとき、 $\delta (d/d_0>1.75)$ は、 $1/2 \delta (d/d_0=1)$ に比べて非常に大きく約 2 倍に近い圧接条件もある。このことは同一径の丸棒の圧接時に両方の部材から形成されるバリの単位時間あたりの量と、 $d/d_0>1.75$ の異径丸棒圧接時に基準径側のみから形成されるバリの単位時間あたりの量がほぼ等しいことを意味する。基準径 16 mm の場合は、両者には、8 mm の結果ほどの差はなく、特に摩擦圧力が小さいと、両者はほぼ一致した値を示す。

摩擦よりしろ δ_1 は、時間変化する δ の積分値である。基準径 8 mm では、 $\delta (d/d_0>1.75)$ と $1/2 \delta (d/d_0=1)$ との比と、 $\delta_1 (d/d_0>1.75)$ と $1/2 \delta_1 (d/d_0=1)$ との比はほぼ近い値を示すが、基準径 16 mm ではその比は大きく異った。この原因は 8 mm の場合は d/d_0 によらず δ が一定に達する時間が等しいが、16 mm の場合は d/d_0 によって δ が一定に達する時間が異なるためであった。

またアプセットよりしろ δ_2 は、基準径 8 mm の○、●の圧接条件である程度 $\delta_2 (d/d_0>1.75)$ が $1/2 \delta_2 (d/d_0=1)$ より大きいだけで、他の結果は、両者に大きな差は認められない。このことは、同一丸棒の圧接におけるアプセットよりしろは、 $d/d_0>1.75$ の異径丸棒圧接時のその約 2 倍であることを意味する。

δ_t は、 δ_1 と δ_2 の和である。そして、 $1/2 \delta_1 (d/d_0=1)$ と $\delta_1 (d/d_0>1.75)$ の差が大きいため、 $\delta_t (d/d_0>1.75)$ は $1/2 \delta_t (d/d_0=1)$ よりかなり大きい。

4. 考 察

以上の実験結果により、異径丸棒の摩擦圧接においては、突き合わせた丸棒の直径の比が摩擦圧接挙動に大きな影響を与えることがわかった。すなわち、一方の径を一定とし、他方の径を大きくしてゆくと、摩擦面が曲面となり、摩擦面温度は上昇して摩擦トルクのうち定常トルクおよび最終トルクは増加する。また、より速度は継

手全体としては減少するが、小さな径側の丸棒のみの、より速度に着目した場合、Table 3の結果から、同一径丸棒の一方のみの値よりも増加していることが考えられる。そして、直径の比が、 d/d_0 が1.75以上になると、それらはある一定値に漸近している。これらの現象について定性的に検討した。

Fig. 3 から、摩擦開始後すぐ、 T_{ss} , δ , S.S.T. が一定値となるが、これは、摩擦面近傍で一種の定常状態が起っており、そこでの単位時間あたりの摩擦熱発生とその消失がバランスを保っているものとおもわれる。熱の消失が、熱の伝達によって軟化した領域を外周部へバリとして熱を含んだまま押しだすことによってなされると仮定する。すると同一径丸棒の場合は、両方の丸棒からのバリ形成による熱の発散が期待できるが、異径丸棒の場合は、大きな径側は変形しにくく、小さな径側のみから多量のバリを形成しなければならないことになる。このことは、Table 2 のより速度 $\dot{\delta}$ の結果で、 $\dot{\delta}$ ($d/d_0 > 1.75$) が、 $\frac{1}{2} \dot{\delta}$ ($d/d_0 = 1$) より大きなことと対応している。

摩擦面の温度は、この熱収支に依存していると考えられる。もし異径丸棒の摩擦圧接で d/d_0 にかかわらず、発生熱量がほぼ等しいとすると、異径丸棒圧接時の小さな径側のバリは、同一径丸棒の圧接時の両方の丸棒分に相当する量を形成されなければならない。すると異径丸棒圧接時のより速度 $\dot{\delta}$ が、同一径丸棒圧接時のより速度 $\dot{\delta}$ ($d/d_0 = 1$) より小さいと、熱が蓄積され、温度が上昇することになる。このことは、Fig. 6において d/d_0 が増加すると $\dot{\delta}$ が小さくなっているが、Fig. 4 でそれに対応して摩擦面温度が上昇している傾向と一致する。

また、異径丸棒の圧接の場合に、摩擦面が曲面になる理由を検討した。異径丸棒の圧接時、摩擦面に発生する熱は、小さな径の側ではほぼ回転軸に沿った方向に、一次元に伝達されるが、大きな径の側では、それに加えて円周方向へも伝達される。そのため外周部では、熱伝導の非対称性があらわれ、温度分布のピークが丸棒側へ少し入った位置となることが考えられる⁵⁾。また、大きな径側の摩擦面の中心部では、高温部をバリとして、外周部に押しだしたいため、温度が一層上昇することが考えられる。この2つのことから、摩擦面は、高温の塑性変形しやすい面に適合するように、中心部では大きな径の側へ、外周部では小さな径の側へ移動し、凸状となるものとおもわれる。このように摩擦面が凸状になると、摩擦面積が増加するため、摩擦トルクが増加することが

考えられる。このことは、Fig. 5 の定常トルクおよび最終トルクの d/d_0 依存性に対応している。なお、初期トルクが d/d_0 に依存していないのは、圧接の初期であり、熱伝導を進行していないため、 d/d_0 にかかわらず、摩擦面はそのとき平面であったとおもわれる。ところで $d/d_0 > 1.75$ の異径丸棒の摩擦圧接では、圧接条件が同一ならば、摩擦面の温度、摩擦トルクおよびよりしろは、比較径 d の大きさに依存しない結果が得られた。このことはオーステナイト鋼 SUS 304 の場合、 $d/d_0 > 1.75$ 異径丸棒の圧接は、無限板と丸棒とを圧接することと同様にみなすことができることを意味するものである。

5. 結 論

オーステナイト系ステンレス鋼、SUS 304 の異径丸棒の摩擦圧接を行い、継手形状のおよぼす摩擦圧接現象への影響を検討した。すなわち一方の径を基準として、一定の値 d_0 とし、他方の径を基準の径と同一から約3.2倍までの間で選択した。そして同一圧接条件としたときの摩擦トルクおよびより挙動(よりしろおよび速度)挙動におよぼす異径丸棒直径比 d/d_0 の影響を調べた。

得られた結果は以下のとおりである。

- (1) d/d_0 が増加すると、摩擦面は大きな径の側にむかって凸型となる。そして、大きな側のバリは減少してゆき、 $d/d_0 > 1.75$ では大きな径の側は変形しない。
- (2) 摩擦面の温度は、継手形状にかかわらず、摩擦開始後急激に上昇し、3～4秒後には一定の温度に達する。この定常温度の一定値は圧接条件が同一であれば、 d/d_0 が大きくなるにつれて高温側へ移行する。
- (3) 初期トルクは同圧接条件であれば、 d/d_0 に依存しない。しかし、定常トルクおよび最終トルクは d/d_0 に依存している。それらの値は d/d_0 の増加に伴い増加するが、 $d/d_0 > 1.75$ では、ほぼ一定値になる。
- (4) より速度、摩擦よりしろ、全よりしろは、同一圧接条件であれば、 d/d_0 の増加に伴ない減少し、 $d/d_0 > 1.75$ ではほぼ一定値になる。

参 考 文 献

- 1) 中村 *摩擦圧接の応用* 溶接技術27-8 (1979) 15-18
- 2) 沖田, 有年 *オーステナイト系ステンレス鋼の摩擦圧接に関する研究(6)* 本会全国大会講演概要27集447 (1980)
- 3) 蓮井, 福島 *摩擦圧接の研究(第1報)* 本誌36-6 (1967) 628-632
- 4) 沖田, 有年 *オーステナイト系ステンレス鋼の摩擦圧接に関する研究(5)* 本会全国大会講演概要27集446 (1980)
- 5) 摩擦圧接研究会編 *摩擦圧接* コロナ社 (1979) 23