研究論文

7075アルミニウム合金摩擦圧接継手の曲げおよびねじり強さ

小川 恒一*・山口 博*・山本 義秋**・北浦 堅一***

Bending and torsional strength of friction welded joint of 7075 aluminum alloy

Koichi OGAWA*, Hiroshi YAMAGUCHI*, Yoshiaki YAMAMOTO** and Kenichi KITaura***

High strength aluminum alloy A7075 was friction welded under three forging pressures, while other friction welding conditions were kept constant throughout the welding cycle. Friction welded joints were offered to destructive test for evaluating the bending and torsional strength. The maximum joint efficiencies were 80.2, 98.4 and 104.8% in bending test, torsion test with smoothed specimen and that with notched specimen, respectively. In bending test and torsion test with notched specimen fracture occurred at the transition layer between the interfacial layer and the deformed zone of welded joints, while it occurred in softened zone near the transition zone in torsion test with smoothed specimen.

Keywords: friction welding, bending strength, torsional strength, joint efficiency, 7075 aluminum alloy

(Received September 21, 1993)

1. 緒 言

摩擦圧接法は他の溶接法に比べ接合部に気孔や割れなど溶接欠陥の少ない健全な継手の作製が可能で、一般の溶接法の適用が困難な材料に対し有効な接合法である。これまで、鋼材に関する摩擦圧接継手の強度データは数多く報告されているが¹⁾、他方 Al 合金（とくに A7075 合金）に関する報告は一部を除いて^{2)~6)}、いまだ十分に提供されているとはいえない。こうしたことから、今後の摩擦圧接法の適用上、各種のアルミニウム合金と種々の部材形状に応じた適切な圧接条件とその継手性能に関するデータの蓄積が求められている。

前報⁷⁾において、著者らの一部はブレイキ式のもとで摩擦圧接した7075合金の継手性能（引張強さ）に及ぼす圧接条件の影響を分散分析法により検討した。そして、実験条件範囲内ではアプセット圧力が継手効率に最も有意に作用するという結果を得た。そこで本報においては、アプセット圧力を変化させて摩擦圧接した3種類の7075合金継手の曲げ、ねじりの静的強度特性について調べた。

2. 実験方法

2.1 供試材

本研究に用いた供試材は、Al-Zn-Mg-Cu系合金A7075押出し丸棒材φ20 mmである。供試材の化学成分および引張特性をそれぞれTable 1およびTable 2に示す。同供試材からFig. 1に示すような圧接面直径15 mm、全長100 mmの圧接母材を作製した。

2.2 圧接継手の作製と圧接部の様相

摩擦圧接は前報⁷⁾と同様、ブレイキ式のもとでTable 3に示す3種類の圧接条件で行った。同表には、実験で得られた寄りしろと引張強さ（すべて界面破断）も示した。

ここで、3種類の圧接条件で作製された継手を、それぞれアプセット圧力の増加順に(A), (B), (C)の記号を付して呼ぶ。なお、作製された継手にはすべて室温で1か月の自然時効を施し、その後、組織観察と曲げ、ねじりの静的強度試験を行った。

2.3 強度試験方法

曲げ、ねじりの静的強度試験はすべて室温下で、以下

* 大阪府立大学総合科学部（堺市）。College of Integrated Arts and Sciences, University of Osaka Prefecture (Sakai-shi, Osaka).

** 摂南大学工学部（寝屋川市）。Faculty of Engineering, Setsunan University (Neyagawa-shi, Osaka).

*** 大阪府立大学工学部（堺市）。Faculty of Engineering, University of Osaka Prefecture (Sakai-shi, Osaka).

Table 1 Chemical compositions of base material (mass%)

Material	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Ti+Zr	Al
A7075-T6	0.11	0.24	1.8	0.06	2.4	0.20	5.7	0.02	0.030	R

Table 2 Tensile properties of base material

Material	Proof stress $\sigma_{0.2}$ (MPa)	Tensile strength σ_B (MPa)	Elongation ϵ (%)
A7075-T6	635.0	675.2	8.8

Fig. 1 Shape and dimensions of base material (unit: mm).

に示す方法で行った。曲げ試験は3点曲げ試験用治具を装着したインストロン万能試験機を用い、クロスヘッド移動速度 1 mm/min で行った。圧接継手を曲げ試験する場合には、ポンチの荷重点が圧接界面に位置するようにした。なお、曲げ強さ σ_b は次式より求めた。

$$\sigma_b = 8P_{\max}l / (\pi d^3) \quad (1)$$

ここで、 $P_{\max}$ は最大荷重 (N) で、 l は支点間距離 (84 mm), r はポンチ先端半径 (16 mm), d は試験片直径 (14 mm) である。

ねじり試験はねじり速度 0.2 deg/s で行った。ねじり試験では平滑試験片と、圧接界面に環状切欠きを施した環状切欠き付試験片の両者を用いた。ねじり強さ τ_t は次式より求めた。

$$\tau_t = 16 T / (\pi d^3 \cdot 10^3) \quad (2)$$

ここで、 T は最大ねじりトルク (Nm) で、 d は試験片直径 (平滑試験片では 14 mm, 環状切欠き付試験片では 13 mm) である。Fig. 2 に静的強度試験に用いた試験片の形状、寸法を示す。

3. 実験結果とその考察

3.1 圧接部の様相と硬さ分布

各圧接継手の軸中心付近の微視的様相を Fig. 3 に示す。図より、各継手の圧接界面には摩擦による急加熱と激しい塑性流動によって部材の一部が混練し、繊維状組織の見られない微細な組織が存在し (本論文ではこれを界面層と呼ぶ)、この界面層の領域がアプセット圧力の増加に伴い狭くなる。この界面層の線分析を行ったところ、Zn, Mg, Cu などの主要合金元素の分布は母材と同様であった。この界面層に隣接して母材の繊維状組織が

Table 3 Welding conditions and burn off quantities

Welding factor		Symbol		
		A	B	C
Friction pressure	P_1 (MPa)	50	50	50
Forging pressure	P_2 (MPa)	50	100	150
Friction time	t_1 (s)	3.0	3.0	3.0
Forging time	t_2 (s)	10	10	10
Rotating speed	N (rpm)	3000	3000	3000
Heating upset	δ_1 (mm)	5.2	5.2	5.2
Forging upset	δ_2 (mm)	6.4	8.0	10.1
Tensile strength	σ_B (MPa)	407.1	514.3	496.4

Fig. 2 Shape and dimensions of bending and torsional test specimens (unit: mm).

外周部にねじられた変形域が存在する。また、界面層と変形域との中間に、繊維状組織が界面に平行に変化している部分がある。この部分を遷移部と呼ぶ。これらの様相を模式的に Fig. 4 に示す。

Fig. 5 に圧接後 1 か月間の自然時効後の各圧接継手の硬さ分布を示す。硬さは軸中心と軸中心から半径方向に 6 mm 離れた位置でそれぞれ界面から軸方向に測定した。界面での硬さはすべての継手で母材値 (HV166) より低い値となり、界面から離れるに伴い熱影響部でさらに低下した後、最軟化部を経て原質部に向かって次第に高くなる。硬さの最低値と軟化域の幅はほとんど同一

Fig. 3 Microphotographs of friction welded joint.

Fig. 4 Schematic diagram of friction welded joint.

であるが、アプセット圧力の増加に伴い最軟化部が界面方向に移動するか(C),あるいは最軟化部から原質部へ向かう硬さの勾配がゆるやかになるか(C),または原質部近くの硬さの低下が小さく、最軟化部近くで急激に大きくなるなど(B)の傾向が見られる。

3.2 曲げ強さ

Fig. 6 に曲げ試験の結果を示す。図中の破線は母材の値である。圧接継手の曲げ強さは、全般的に母材より低い値であり、アプセット圧力の増加に伴い継手(B)で高い値を示すが、圧力の高い(C)では逆に低下する。また、母材は破断直前までほとんど変形せず、継手は熱軟化のため若干の変性を生じ、(A), (C), (B)の順にその変形量は少なくなった。すなわち、曲げ強さの大きい継

(a) Joint A

(b) Joint B

(c) joint C

Fig. 5 Hardness distributions of friction welded joint.

手ほど変形量は少なく、これは界面と最軟化部との距離、および軟化域の様相に起因するものと推測される。なお、最大曲げ強さにおける継手効率は継手(B)で得られ、その値は80.2%である。

曲げ破断箇所の微視的様相の一例として、母材と継手(B)の破断部の光学顕微鏡写真を Fig. 7 に示す。母材の場合には、引張応力に垂直な破壊と軸長手方向の繊維状組織に沿う破壊が連結している。一方、継手の場合には、き裂は遷移部に沿って進展している。Fig. 8 に母材および継手(B)の曲げ破面の SEM 写真の一例を示す。母材は垂直破断した部分、継手は破面の中心部である。母材ではディンプル破面と擬へき開破面が、継手では全体に細かいテラスからなるテラス・ウォール形態の破面が特徴的に観察される。

Fig. 6 Change in bending strength with forging pressure.

Fig. 7 Fractured sections in bending test (base material and joint B).

3.3 ねじり強さ

Fig. 9に平滑試験片と環状切欠き付試験片によるねじり試験の結果を示す。平滑試験片による継手のねじり強さはいずれも破線で示した母材値よりも幾分低い値であり、アプセット圧力の増加に伴い若干増大する傾向がある。これは曲げ強さの場合と逆の傾向を示している。平滑試験片でのねじり強さの最大継手効率は継手(C)で得られ、その値は98.4%である。母材と継手のねじり試験後の変形状態の一例として平滑試験片をFig. 10に示す。母材の場合には平行部全域にわたってほぼ均一に角変位しているが、継手の場合には圧接界面近傍がほとんど角変位していない。これは、界面層が急加熱と激しい塑性流動、および急冷却によって微細化するなどの加工

Fig. 8 SEM images of fractured surface in bending test.

Fig. 9 Change in torsional strength with forging pressure.

Fig. 10 Test specimens twisted in torsion test with smoothed specimen.

Fig. 11 SEM images of fractured surface in torsion test.

変質を受け、伸びがなくなったためと思われる。したがって、母材の破断が任意の位置であるのに対し、継手ではねじり変形領域内の最軟化部近傍で破断する。ねじり破断位置はアプセット圧力の増加により圧接界面に近づく傾向がある。さらに、アプセット圧力の増加に伴いねじり強さが増加するのは、原質部近くの硬さ変化が若干ゆるやかになったことに起因するものと推測される。

Fig. 11に母材および圧接継手(A)のねじり破面のSEM写真を示す。母材、継手とも破面は平坦なせん断破面で、破面内にリップ状破面が観察される。一方、環状切欠き付試験片による圧接部のねじり強さは母材のそれを若干上回り、アプセット圧力の増加に伴いやや低下し、継手(C)は母材値よりも若干低くなる。なお、環状切欠き付試験片による最大継手効率は継手(A)で得られ、その値は104.8%である。Fig. 12に母材および継手(B)の破断面の様相を示す。母材の場合には、き裂は試験片の軸に垂直に進展しているが、継手の場合には、き裂はまずノッチ底から入り、次いで界面層に沿う遷移部に進展し、軸中心に近づくに従い界面層から遠ざかる。これは、き裂が最軟化部まで繊維組織に沿って進行したことを示している。Fig. 13に母材と継手のねじり破断面外周部付近のSEM写真の一例を示す。母材の破面は平滑試験片で観察されたものと同様な破面である。一方、継手の場合にはアプセット圧力の増加に伴い破面全体が平

Fig. 12 Fractured sections in torsion test.

坦になり、母材で観察されたリップ状破面がみられるようになる。圧接界面のねじり強さがアプセット圧力の増加に伴い低下する原因として、軸中心から半径方向に屈曲する繊維状組織の流れ方向の変化が(A)、(B)、(C)の順に著しくなり、ねじりなどのせん断破壊ではこの組織の流れに沿って破壊が進行し、しかも最軟化部が界面に近づく傾向にあることも一因と考えられる。

4. 結 言

圧接条件の中で、アプセット圧力のみを変化させて摩擦圧接した7075合金摩擦圧接継手の曲げおよびねじり試験を行い、以下の結果を得た。

- (1) 継手の曲げ強さはアプセット圧力の増加に伴い増大するが、アプセット圧力があまり高すぎると逆に低下する。曲げ強さにおける最大継手効率は80.2%である。
- (2) 平滑試験片によるねじり試験の結果、母材の場合のねじり変形は平行部にわたって一様に生じるが、継手の場合には界面がまったく変形せず、変形は界面から若干離れた箇所において生じる。また、継手のねじり強さ

Fig. 13 SEM images of fractured surface in torsion test with notched specimen.

は母材のそれよりもわずかに低く、アプセット圧力の増加に伴いわずかに増加する傾向にある。平滑試験片における最大継手効率は98.4%である。他方、継手界面に環状切欠きを入れた場合のねじり強さは母材のそれよりも高く、アプセット圧力の増加に伴いやや低下する傾向にある。そして、最大継手効率は104.8%である。

(3) 継手の曲げ破断および環状切欠き付ねじり試験におけるねじり破断は、界面層と変形域の境界に相当する遷移部で生じた。一方、平滑試験片による継手のねじり破断は、遷移部に隣接する最軟化部近傍で生じた。

参 考 文 献

- 1) たとえば、蓮井 淳，福島貞夫：金属材料技術研究所研究報告，7-3 (1964)，194-207.
- 2) 杉山禎彦：住友軽金属技報，**11** (1970)，256.
- 3) 加藤数良，時末 光：軽金属，**34** (1984)，325.
- 4) 加藤数良，時末 光：軽金属，**44** (1990)，351.
- 5) 中山英明，小川恒一，花野元哉，大植義夫，大平和昭：軽金属溶接，**20** (1982)，1.
- 6) 小川恒一，中山英明，大植義夫，森本富雄，蓮井淳：軽金属溶接，**25** (1987)，6.
- 7) 小川恒一，上田 淳，加賀精一，山口 博：軽金属，**41** (1991)，504.