研究論文

6061アルミニウム合金と SUS304ステンレス鋼の
摩擦圧接継手の静的強度越智 秀* · 小川 恒一** · 山本 義秋***
橋永 繁毅**** · 菅 泰雄***** · 大西 忠一*****Static strength of friction welded joint of 6061 aluminum
alloy to SUS304 stainless steelHiizu OCHI*, Koichi OGAWA**, Yoshiaki YAMAMOTO***
Shigeki HASHINAGA****, Yasuo SUGA***** and Tadakazu OHNISHI*****

Friction welding of A6061 aluminum alloy to SUS304 stainless steel was conducted. The joint efficiency was estimated from tensile strength, bending strength and torsional strength. The results are as follows. (1) The softened area of A6061 in joints welded at high forge pressures was narrow compared with the joint welded at low forge pressure, because the softened area was expelled into the color under the action of forge pressure. The joint strength depends on the width of the softened A6061 area. (2) Tensile strength of smoothed and notched specimens increased with forge pressure. Maximum joint efficiencies of these joints were about 87% and 93%, and fracture of the smooth and notched specimens showing the maximum efficiencies occurred in the softened A6061 area and at the weld interface, respectively. (3) Bending strength of joints welded at forge pressures not less than 80 MPa was almost saturated and maximum joint efficiency obtained was about 30%. (4) Torsional strength increased with forge pressure. The maximum joint efficiency obtained was about 75%, and joints with the maximum efficiency fractured in the softened A6061 area.

Keywords: friction welding, joint strength, 6061 aluminum alloy, SUS304 stainless steel, dissimilar joint

(Received April 23, 1996)

1. 緒 言

従来より、鋼（炭素鋼、ステンレス鋼など）と1050工業用純アルミニウム（以下、A1050とする）は摩擦圧接により容易に接合できることから、この種の異種継手はトランジションピースや印刷機のガイドローラなどに用いられている^{1),2)}。しかし昨今、A1050をより高強度材であるアルミニウム合金に代えた構造用異種継手の要望が高まってきた。この種の異材継手は、添加元素が接合を阻害したり³⁾、界面にぜい弱な金属間化合物が形成されるため^{4)~8)}接合が困難である。そのため、これらに関する研究報告は少ない^{9),10)}。そこで本研究では、この種の異材継手のなかでも比較的接合の容易な組合せ³⁾であるステンレス鋼と6061アルミニウム合金の摩擦圧接を試み、圧接した継手の引張り、曲げおよびねじりの静的強度について検討した。

2. 実験方法

本研究において用いた被圧接材は、直径16 mmで供給された6061-T6 アルミニウム合金（以下、A6061とする）および SUS304オーステナイト系ステンレス鋼である。それらの化学成分と機械的性質を Table 1 および Table 2 に示す。これらの供試材から Fig. 1 に示す圧接母材を作製し、プレーキ式の実験用摩擦圧接機を用いて時間規制で圧接した。圧接した継手は、すべて室温で96 hの溶接後熱処理を施した後、硬さ試験および各種の強度試験を行った。引張り、曲げおよびねじりの強度試験はすべて室温下で、Fig. 2 に示す形状、寸法に機械加工した試験片を用いて行った。なお、環状切欠き付き試験片の切欠き位置は、圧接界面である。また、比較のために A6061母材も同一形状の試験片に加工して、以下に示す方法で各強度試験を行った。

* 大阪工業大学共同研究センター（大阪市）。Joint Research Center, Osaka Institute of Technology (Osaka-shi, Osaka).

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

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

**** 摂南大学大学院（寝屋川市）。Graduate Student, Setsunan University (Neyagawa-shi, Osaka).

***** 慶應義塾大学理工学部（横浜市）。Faculty of Science and Technology, Keio University (Yokohama-shi, Kanagawa).

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

Table 1 Chemical composition of the base materials (mass%)

Material	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al	C	P	S	Ni
A6061	0.59	0.16	0.20	0.01	0.95	0.06	0.01	0.01	Bal	—	—	—	—
SUS304	0.25	Bal	—	1.71	—	18.75	—	—	—	0.06	0.033	0.026	8.26

Table 2 Mechanical properties of the base materials

Material	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)
A6061	299	319.8	17.7
SUS304	579	765	39

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

引張試験は、インストロン万能試験機を用いてクロスヘッド移動速度 $0.0167 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ で行った。環状切欠き付き試験片の引張強さは、最大荷重を切欠き底部断面積で割って算出した。

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てクロスヘッド移動速度 $0.0167 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ で行った。圧接継手を試験する場合には、パンチの荷重点が圧接界面に位置するようにした。曲げ強さはみかけの曲げ強さを σ_b とし、次式で求めた¹¹⁾。

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

ここで、 $P_{\max}$ は最大荷重 (N)、 l は支点間距離 (45.7 mm)、 d は試験片直径 (11 mm) である。

ねじり試験は、ねじり速度 $5.5^\circ \cdot \text{s}^{-1}$ で行い、ねじり強さは次式で求めた¹²⁾。

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

ここで、 T は最大ねじりトルク (N·m)、 d は試験片直径 (11 mm) である。

3. 結果と考察

予備実験において、設定した摩擦圧力 P_1 (MPa)、アブセット圧力 P_2 (MPa)、摩擦時間 t_1 (s)および回転数 N (s^{-1})の主要な4種の圧接因子のなかで、継手強度に及ぼす影響はアブセット圧力が最も顕著であった。そこで、摩擦圧力30 MPa、摩擦時間2s、回転数 66.7 s^{-1} 、ブレーキ時間0.3 sおよびアブセット時間10 s一定にして、アブセット圧力を40 MPaから280 MPaに変化させて継手を作製し、それらの強度試験を行った。

Smoothed tensile and torsional test specimen

Notched tensile test specimen

Bending test specimen

Fig. 2 Shape and dimensions of test specimen. (unit: mm) **Fig. 3** Changes in tensile strength and total burn-off quantity with forge pressure.

平滑試験片および環状切欠き付き試験片の引張強さとアブセット圧力との関係を、全寄りしろ量と合わせてFig. 3に示す。平滑試験片の場合、アブセット圧力が大きくなるに伴い引張強さは大きくなり、最終的に約280 MPa (A6061の母材強さ320 MPaに対する継手効率約87%)の一定値に飽和する。代表的な引張試験後の継手

Fig. 4 Appearance of smoothed tensile test specimens and their fractured surfaces after tensile tests.

の外観および SUS304側破面の様相を Fig. 4 に示す。図に示すように、破断位置はアブセット圧力40 MPa で圧接界面、80~160 MPa で A6061 側である。6000 系の熱処理合金は、溶接部が溶接熱によって軟化する欠点があり¹³⁾、本実験の継手も熱影響による軟化部で破断したと考えられる。また、アブセット圧力200 MPa 以上では圧接界面付近で破断しているが、SUS304破面全面にアルミニウム合金が付着していることから、圧接界面近傍の A6061 の熱影響による軟化部で破断したと判断できる。このように、アブセット圧力80 MPa 以上の継手では、アブセット圧力が大きくなるに伴い破断位置が圧接界面に近くなる傾向がみられた。代表的な継手の A6061 側の硬さ分布を Fig. 5 に示す。アブセット圧力40 MPa で圧接した継手では、軟化領域がかなり広い。これは、アブセット圧力が小さいため A6061 の軟化部がばりとして排出されなかったためと考えられる。このことは、アブセット圧力の低い継手ほど全寄りしろが小さいことに対応している。この場合の継手は、アブセット圧力が低いために圧接が不完全で、界面の引張強さは低いと考えられる。一方、アブセット圧力120 MPa で圧接した継手では、アブセット圧力40 MPa の場合に比べ軟化領域が狭いにもかかわらず母材破断している。これは、アブセット圧力40 MPa の場合に比べて接合が比較的良好であったためである。さらにアブセット圧力を高くすると、軟化部がばりとなって排出されるため軟化領域はさらに狭くなる。したがって、アブセット圧力が大きい継手では母材の軟化領域が狭くなるため、破断位置が圧接界面近傍に近づいたものと考えられる。

一方、環状切欠き付き試験片の場合、全般的に引張強さは平滑試験片に比べ大きく、最大引張強さは約315 MPa (A6061 の母材強さ340 MPa に対する継手効率率約

Fig. 5 Hardness distributions in friction welded joint.

93%) である。また、破断位置は Fig. 6 に示すようにいずれも圧接界面である。これは、応力集中の大きい圧接界面に切欠きを入れ、圧接界面近傍で強制的に破壊させたため、A6061 の軟化部で破断した平滑試験片の場合よりも引張強さが大きくなったものであろう。なお、アブセット圧力の大きい継手ほど、引張破面の外周部に厚くアルミニウム合金が付着しており、アブセット圧力が大きくなると外周部が特に良好に接合されることがわかる。

曲げ試験の結果を Fig. 7 に、代表的な継手の試験後の様相を Fig. 8 に示す。アブセット圧力40 MPa では、接合が不完全であるため曲げ強さは小さく、圧接界面で破断している。一方、アブセット圧力80 MPa 以上の継手では、曲げ強さは175~200 MPa (A6061 の母材強さ666 MPa に対する継手効率率約26~30%) である。また、アブセット圧力80 MPa の場合には曲げ角度が大きく A6061 の軟化部で破断し、アブセット圧力120 MPa 以上の場合には曲げ角度が小さく圧接界面近傍で破断する。

Fig. 6 Appearance of notched tensile test specimens and their fractured surfaces after tensile tests.

Fig. 7 Changes in bending strength with forge pressure.

Fig. 9 Changes in torsional strength and torsional failed angle with forge pressure.

Fig. 8 Appearance of bending tested specimen.

これらのことから、曲げ試験にも A6061 の軟化領域が大きく影響していると考えられる。

ねじり試験の結果を Fig. 9 に、代表的な継手の試験後の外観およびねじり破面の様相を Fig. 10 に示す。ねじり強さは、アプセット圧力が大きくなるに伴い大きくなる傾向がみられ、アプセット圧力 240 MPa 以上でねじり強さ 260 MPa (A6061 の母材強さ 345 MPa に対する継手効率約 75%) の一定値に飽和する。また、アプセット圧力 80 MPa 以上の継手では、角変位は主に A6061 の軟化部で生じ、アプセット圧力が大きくなるに伴いねじ

Fig. 10 Appearance of torsional tested specimen and fractured surface.

れ角は小さくなり、破断位置は圧接界面に近くなる。この結果は、引張試験と同様であり、アブセット圧力が大きい継手ほど軟化領域が狭くなることに起因したと考えられる。

このように、引張り、曲げおよびねじりの静的強度には、A6061の熱影響による軟化領域が大きく影響を及ぼすことは明らかである。すなわち、アブセット圧力を大きくして軟化領域を狭くすると継手強度は高くなるが、軟化領域がある程度まで狭くなると継手強度は一定値に飽和する。また、A6061の軟化領域が狭い継手ほど、破断位置が圧接界面近傍に近づく。

4. 結 言

SUS304ステンレス鋼と6061アルミニウム合金を摩擦圧接し、引張り、曲げおよびねじりの強度試験を行い、以下の結果を得た。

- (1) アブセット圧力を大きくすると、圧接部からA6061の軟化部がぼりとなって排出されるため、アブセット圧力が小さい継手に比べA6061側の軟化領域が狭くなる。この軟化領域の幅が継手強度に大きく影響する。
- (2) 引張試験では、平滑試験片および環状切欠き試験片いずれもアブセット圧力が大きいほど引張強さは大きくなり、最大継手効率はその約87%および93%であった。また、そのときの破断は平滑試験片の場合はA6061母材部で、環状切欠き試験片の場合は圧接界面で生じた。

(3) 曲げ試験では、アブセット圧力80 MPa以上で曲げ強さは飽和する。この場合の最大継手効率は約30%であった。

(4) ねじり試験では、アブセット圧力が大きいほどねじり強さは大きくなる。最大継手効率は約75%で、破断は圧接界面近傍の母材部で生じた。

参 考 文 献

- 1) 日本機械学会編：最新接合加工技術とその応用，日刊工業新聞社，(1993)，307.
- 2) 摩擦圧接データシート編集委員会：摩擦圧接データシート集，摩擦圧接協会，(1992)，13.
- 3) 今泉重威：軽金属溶接，22 (1984)，408.
- 4) 菊池迪夫，武田裕正，諸住正太郎：軽金属，34 (1984)，165.
- 5) 蓮井 淳，小川正幸，田中英樹：溶接学会誌，46 (1977)，858.
- 6) 川勝一郎，北山誠二：日本金属学会誌，40 (1976)，96.
- 7) R. Lison and J. F. Stelzer: Weld. J., 58 (1979), 306.
- 8) M. H. Scott and I. F. Squires: Brit. Weld. J., No. 3 (1966), 151.
- 9) 越智 秀，小川恒一，山本義秋，菅 泰雄：材料，45 (1996)，459.
- 10) 森井 泰，二松敬治，青山芳夫：軽金属溶接，15 (1977)，457.
- 11) 須藤 一：材料試験法，内田老鶴園新社，(1980)，p. 61.
- 12) 同上，p. 70.
- 13) 例えば，溶接学会編：溶接・接合技術，産報出版，(1993)，204.