

プロジェクト 1

6061 アルミニウム合金の摩擦攪拌接合継手の高温クリープ特性

金子純一（機械工学科）

1. 緒言

固相接合の一種である摩擦攪拌接合（friction stir welding, FSW）は酸化防止対策を要しないことから、アルミニウム合金の接合に適しており、種々の合金において信頼性の高いすぐれた特性の継手が得られている⁽¹⁻³⁾。そのため、わが国でも鉄道車両や船舶などのアルミニウム部材の接合にすでに適用されている。しかし、高温域における FSW 継手の機械的特性や組織の安定性については、ほとんど明らかにされていないのが現状である。平成 15 年度においては、A6061 合金厚板を母材に選び、その FSW 継手の高温における機械的特性をクリープ試験により評価し、母材のそれと比較検討した。FSW 継手からなるアルミニウム構造物を高温下で使用する際の基礎的な指針を得ることを目的とした。

2. 実験方法

供試材には、厚さ 20mm の A6061P-T651 アルミニウム合金厚板を用いた。合金組成は、0.98%Mg, 0.58%Si, 0.27%Cu, 0.25%Cr, 0.41%Fe である。母材の常温での引張特性は、耐力 297MPa, 引張強さ 328MPa, 伸び 20% である。FSW は、幅（圧延方向）150mm, 長さ（圧延直角方向）1100mm に切断した板を長さ方向の側面で互いに突合わせて、200mm/min の速度で行った。FSW 継手材は、ほぼ 20mm の厚さ全体にわたって接合されており、X 線透過試験により接合欠陥のないことを確かめた。

用いたクリープ試験片は図 1 に示すように、全長 120mm, 平行部直径 10mm, 標点距離 50mm である。つかみ部には M18 のねじを切った。なお、FSW 継手試験片は、接合部が標点間中央に位置するように加工した。用いた試

験機は、てこ式の一定荷重方式の引張クリープ試験機で、試験中のクリープひずみは、試験片左右に取り付けた 2 個のダイヤルゲージで読み取り、両者の平均値から求めた。試験は原則として破断に至るまで行ったが、破断までに長時間を要する試験条件の場合は定常クリープが確認された段階で試験を中止した。試験条件を表 1 に示す。母材及び継手材ともに各条件で最低 2 本の試験片を行い、試験結果に差が認められた場合は、3 本目の試験片を行った。試験片が試験温度に達してから 20h その温度に保持して熱的平衡状態としてから荷重をかけて、クリープ試験を開始した。試験温度は試験片に接触させたシース熱電対により測定し、試験中の温度変動を±3K 以内に保った。

3. 実験結果と考察

FSW 継手の接合部断面の硬さ分布の測定結果を図 2 に示す。図中で line 1 は工具挿入面近傍、line 3 は板面中心層、line 5 は裏面近傍であり、裏面に近づくほど接合部幅が減少している。母材は T651 調質であるため、約 100HV の硬さまで時効硬化されており、接合部の硬さはこれよりかなり低くなっている。FSW によって塑性変形を受けた接合部は約 75HV の一定の硬さを示しており、接合部両側の熱影響部で 60HV 以下の最低硬さを示している。

母材と FSW 継手材のクリープ曲線の一例として、試験荷重 150kgf 一定とし、試験温度を 573K および 623K としたときの試験結果を図 3 に示す。これより、クリープ破断ひずみの大部分はくびれ発生後に起こる加速クリープ段階で比較的短時間のうちに生じていること、定常クリープ段階がクリープ破断時間の大部分を占めること、遷移クリープ（または一次クリープ）の段階がほとんど認められないこと、な

どがわかる。また、FSW 継手材は母材に比べてクリープ破断時間が短く、両条件ともに約 1/5 の時間でクリープ破断している。定常クリープ速度も、母材に比べて継手材で大きい値を示している。これらより、母材に比べて継ぎ手材のクリープ変形速度が大きく、したがってクリープ強度が低いことがわかる。クリープ破断伸びは、FSW 継手材は母材に比べてやはり小さいが、両者の差は破断時間の差ほどは大きくない。また、試験温度が 573K から 423K に上昇すると、母材および継手材の破断伸びはほぼ平行に増加している。なお、FSW 継手材はすべて接合部でクリープ破断が起こったが、十分な断面収縮をとまなう延性破壊であった。

クリープ破断後の試験片の長さ方向の伸びひずみの分布の一例を母材と継手材について示したのが図 4 である。両者とも加速クリープ段階で生じるくびれ伸びが大きく、大きい断面収縮をとまなう破断しており、定常クリープ段階までに生じる一様伸びは比較的小さい。また、断面収縮率は、母材より継手材のほうがむしろ大きい。したがって、継手材の接合部は、母材部に比べてクリープ強度が低く、そこで優先的にクリープ変形を起こして破断に至るが、きわめて高い延性を示している。これは主として、FSW 施工時に導入される塑性変形によって接合部に微細結晶粒組織が生成して、高温域での塑性流動応力が母材より低くなるためと思われる。

各試験温度における定常クリープ速度の応力依存性を示したのが図 5 である。いずれの試験条件でも、継手材の定常クリープ速度が母材より 10 倍以上大きくなっている。573K では応力増加にとまなう母材と継手材の定常クリープ速度の差が大きくなっているが、それ以外の試験温度では両者の差は小さくなる傾向が認められる。

各試験温度におけるクリープ破断時間の応力依存性を図 6 に示す。すべての試験条件において継手材のクリープ破断時間が母材のそれより短いことがわかる。試験温度が高いほど定常クリープ速度が増加するため、クリープ破断時間の応力依存性も顕著にあらわれている。また、同一試験温度で応力を増加させると、母材と継手材のクリープ破断時間の対数の差は減

少する傾向を示す。

以上より、実験を行ったすべての条件において、FSW 継手材は母材に比べて定常クリープ速度が大きく、クリープ破断時間が短い。これは FSW 継手接合部が微細結晶粒組織になっており、高温において低い応力で塑性流動するためと思われる。以上の実験結果は、FSW 継手からなるアルミニウム合金構造物を高温荷重下で使用する場合に十分注意すべき点であると考えられる。

4. 結 言

6061-T651 アルミニウム合金厚板材の摩擦攪拌接合による継手の高温クリープ変形挙動を母材と比較した結果を要約すると以下の通りである。

(1) FSW 継手材は母材に比べて 1/50 から 1/5 の短いクリープ時間で破断する。

(2) FSW 継ぎ手材のクリープ破断伸びは母材に比べて小さいが、クリープ破断時間のような大きな差はない。

(3) FSW 継ぎ手の定常クリープ速度はすべての試験条件下で母材に比べて大きい。

(4) FSW 継ぎ手材はすべての試験条件において接合部で大きい断面収縮をとまなう延性破断した。

参考文献

- (1) Proceedings of 1st International Symp. on Friction Stir Welding, Thousand Oaks, CA., USA, (June, 1999).
- (2) Friction stir welding and processing, K. Jeta et al., eds., TMS, (2001).
- (3) Friction stir welding and processing II, K. Jeta, et al., eds., TMS, (2003).

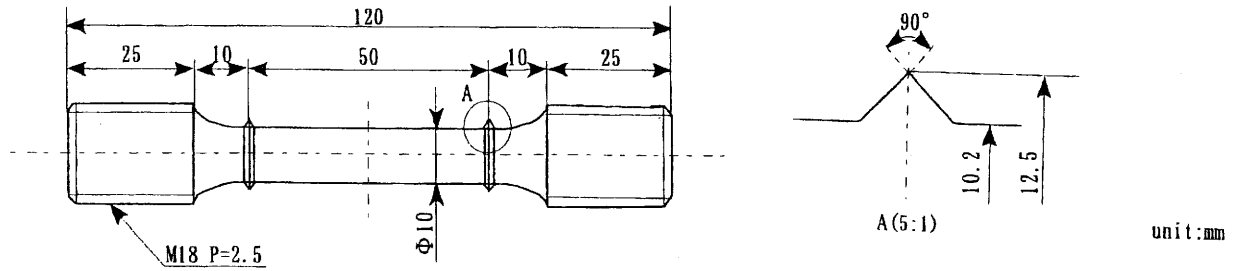


図 1：クリープ試験片の形状寸法

表 1：クリープ試験条件

Creep stress MPa	Creep load kgf	Temperature (K)			
		573	623	673	723
31.22	250	○	○		
24.99	200		○		
18.73	150	○	○	○	
12.49	100		○	○	○
9.36	75			○	○

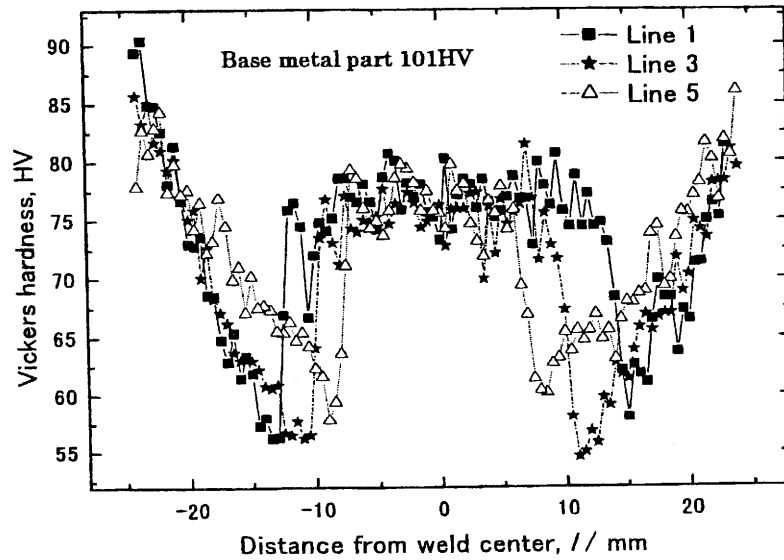


図 2：摩擦攪拌接合部の硬さ分布

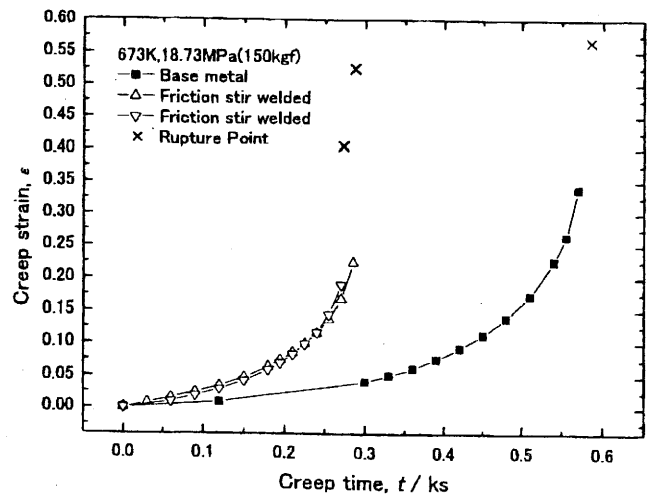
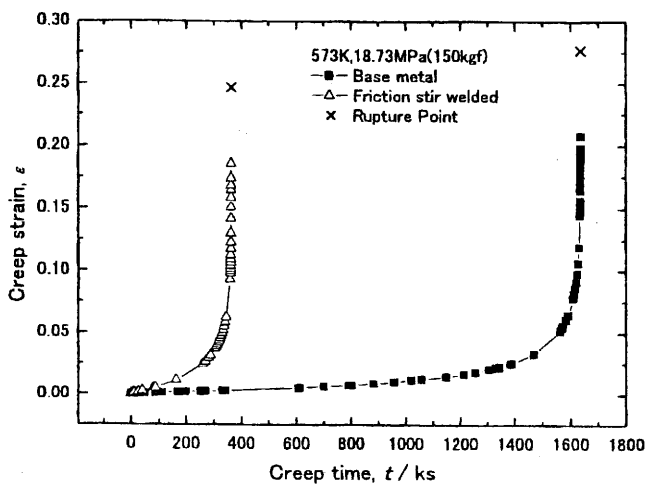


図 3：摩擦攪拌接合継手と母材のクリープ曲線

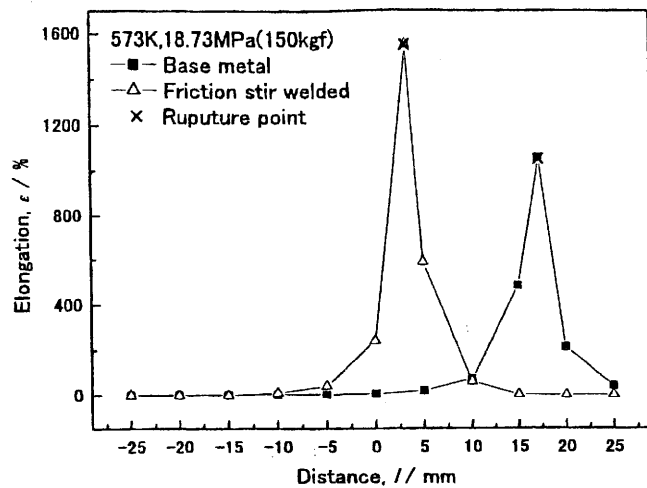


図 4 : 摩擦攪拌接合継手と母材のクリープ破断後の伸びひずみの分布

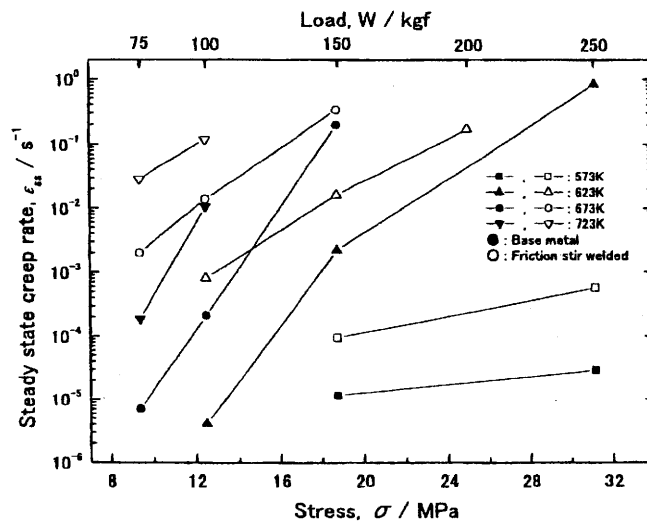


図 5 : 摩擦攪拌接合継手と母材の定常クリープ速度の応力依存性

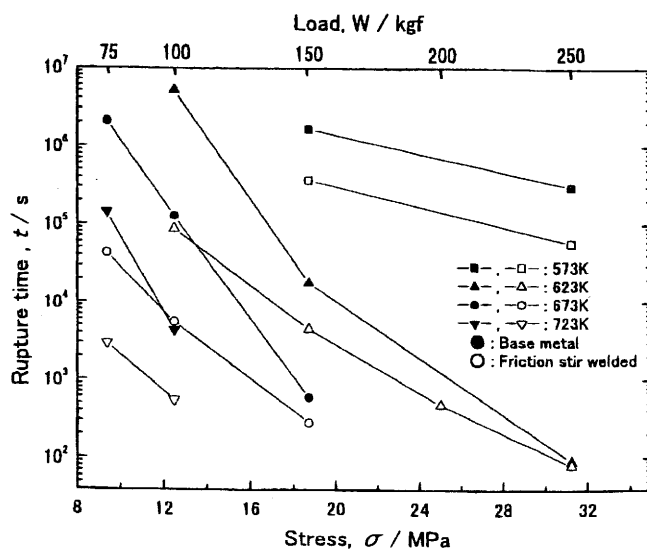


図 6 : 摩擦攪拌接合継手と母材のクリープ破断寿命の応力依存性