

金属材料の残留応力低減技術に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 27～平 29

担当チーム：材料資源研究グループ

研究担当者：中村 崇、富山 禎仁、西崎 到

【要旨】

本研究では、水門などに使用される土木用アルミ合金の接合部の応力腐食割れ対策として、引張り残留応力の小さい摩擦攪拌接合の有効性を検討した。その結果、接合方向の引張残留応力を抑制するには、接合速度を小さくすることが有効である可能性が示唆された。また、接合直角方向の残留応力については、圧縮残留応力が生じることが確認されており、これは従来溶接では見られない傾向であった。圧縮残留応力の付与は、応力腐食割れのみならず疲労破壊の対策にも有効なため、摩擦攪拌接合の有利性が認められた。

キーワード：土木用アルミ合金、応力腐食割れ、摩擦攪拌接合、残留応力

1. はじめに

金属の破壊形態のひとつに応力腐食割れによる損傷がある。応力腐食割れは力学的負荷と科学的環境の同時作用により材料中に割れが発生、成長する現象である¹⁾。応力腐食割れによる金属の破損は様々な環境下で現れ、またその進行は明確ではなく突然生じうる。例として組み立てられたばかりの鉄道車輪が、倉庫に保管された状態で、残留応力と腐食環境の要因により、瞬間的に破壊することがある²⁾。代表的な金属の破壊形態である疲労破壊やクリープ破壊の予測はある程度可能であるのに対し、突然生じうる応力腐食割れに対する部材寿命を予測するのはきわめて難しい。

本研究では、水門などへの利用が広まりつつある土木用アルミ合金の接合部（溶接部）の応力腐食割れの対策の一つとして、引張残留応力が小さい構造物の継手部の接合方法を検討した。アルミ合金製構造物の応力腐食割れに対する信頼性向上と、この方法による場合の品質検査方法の確立に資する情報を得ることを目標としている。

2. 低残留応力の接合方法の検討

2.1 摩擦攪拌接合とは

金属製の土木構造物は一般的な機械部品や電気製品に比べ大きいため、部材を接合させることで形成される。そのため、ほとんどの土木構造物は継手である接合部を有する。継手は、溶接で接合されることが多いが、従来溶接においては熱影響などにより静的強度が低下するとともに、継手に著大な引張残

留応力が印加される場合がある。その従来溶接に代わり、摩擦力を利用して部材を接合する摩擦攪拌接合(Friction stir welding/FSW)が土木用アルミ合金にも適用されるようになってきている³⁾。摩擦攪拌接合は、部材の接合面を突合せまたは重ね合わせ、その間に突起部のプローブを持った円筒形ツールを回転移動させ、摩擦発熱と材料流動により部材を接合する手法である。摩擦攪拌接合による接合部は、攪拌による組織の微細化などため高い静的強度を持つとともに、発生する引張残留応力が小さくなることが知られている。

2.2 摩擦攪拌接合による接合部の残留応力の測定

2.2.1 方法

FSW による接合部の残留応力を確認するため、接合実験を行い、接合後の試験片表面の残留応力を X 線装置により測定した。試料には、土木構造物に用いられるアルミ合金として、強度の高い耐食合金であり、耐海水性と高い低温特性も有する 5083-O を用いた。図-1 に接合実験に使用したツールの概観を示す。FSW のツールには、ショルダー径は $\phi 12\text{mm}$ 、プローブ部は JIS-M6 相当ねじ形状を有す $\phi 6\text{mm}$ のものを用いた。接合はツール回転速度と送り速度（接合速度）を変化させ行った。

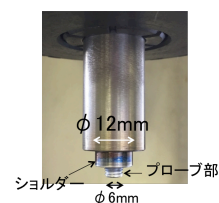


図-1 FSW に用いたツール外観

2.2.2 結果

図-2 に接合した試験片の例を示す。ワーク材は 60×200×4(t)mm の板材を 2 枚用い、ツールを約 160mm 送り、突合せ接合した。図中の赤の x マークは後に示す残留応力の測定部位である。

図-3、4 に残留応力の測定結果を示す。それぞれ、接合方向と接合直角方向の残留応力を示しており、正の値は引張残留応力、負の値は圧縮残留応力を示している。実験の結果から、接合方向の残留応力は引張方向となることが確認できた。また接合方向の残留応力は、約 160MPa の部位 5 を除いては、接合速度が 1mm/s の場合、残留応力は小さくなった。これに対して、接合速度が 5mm/s の場合、引張残留応力の値が大きくなる傾向にあった。これは、MIG 溶接で接合した際に生じる残留応力値より小さい傾向であった⁴⁾。したがって、5083-O の FSW において接合方向の引張残留応力を抑制するには、接合速度を小さくすることが有効である可能性が示唆された。

なお、圧延材であるワーク母材の残留応力も測定しており、その表面の接合方向および接合直角方向の残留応力はそれぞれ 81 MPa と 1 MPa、裏面はそれぞれ 40 MPa と 4 MPa であり、圧延による圧縮応力の残留が確認された。また、接合直角方向の残留応力については、圧縮残留応力が生じることが確認されており、これは MIG 溶接等の従来溶接では見られない傾向であった。圧縮残留応力の付与は、応力腐食割れのみならず疲労破壊の対策にも有効なため、FSW による接合の有利性がこの点でも確認できた。

2.3 FSW の解析モデル

5083-O 材の FSW 中の諸現象を調査するために、FEM による熱-構造連生解析によるシミュレーションモデルの構築を行った⁵⁾。その結果の一例を図-5 に示す。このモデルを発展することで、加工後の残留応力予測も可能となると考える。

3. まとめ

本研究では、土木用アルミ合金の応力腐食割れ対策として、引張残留応力に注目し、引張り残留応力の小さい摩擦攪拌接合の有効性を検討した。接合方向の引張残留応力を抑制するには、接合速度を小さくすることが有効である可能性が示唆された。また、接合直角方向の残留応力については、圧縮残留応力が生じることが確認された。圧縮残留応力の付与は、応力腐食割れのみならず疲労破壊の対策にも有効なため、摩擦攪拌接合の有利性が認められた。

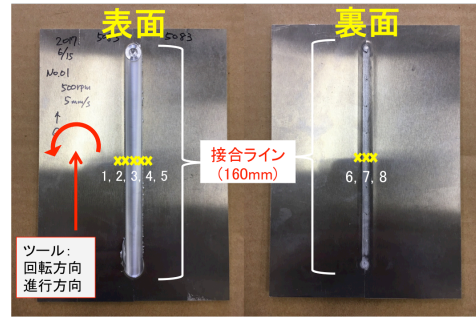


図-2 FSW での接合部

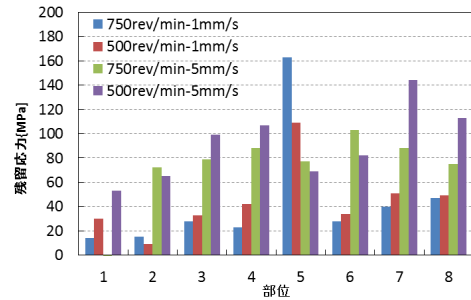


図-3 残留応力の測定結果(接合方向)

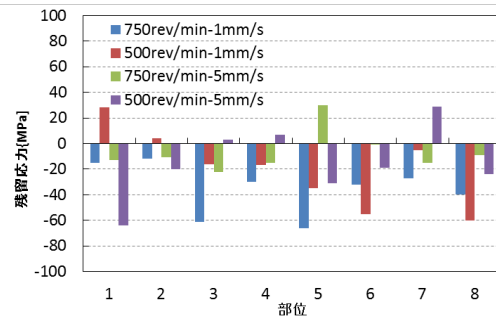


図-4 残留応力の測定結果(接合直角方向)

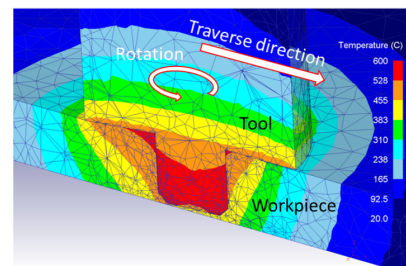


図-5 FSW の数値解析例

参考文献

- 1) (社)日本機械学会：機械工学辞典, 2007.
- 2) 吉田亨：破断面の見方、日刊工業社、2005
- 3) アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針(案), 土木学会鋼構造委員会, 2015.
- 4) 大倉一郎, 長尾隆史, 石川敏之, 荻澤亘保, 大隅心平, 土木学会論文集 A, Vol.64, No.4, pp.789-805, 2008.
- 5) T. Nakamura, I. Nishizaki et al., Friction Stir Welding of Non-Heat-Treatable, High-Strength Alloy 5083-O, Metals, 8(4), 208, 2018. ; doi:10.3390/met8040208