

摩擦攪拌接合 2024-T3 アルミ合金の構成式

岡山理科大学 ○横山 隆 中井賢治

Constitutive Modeling of Friction Stir Welded 2024-T3 Aluminum Alloy

Takashi YOKOYAMA and Kenji NAKAI

1 緒 言

本研究では、2024-T3 アルミ合金 FSW 突き合わせ継ぎ手（以下、継ぎ手と省略）の面内横方向引張り試験から決定した全体的な応力-ひずみ関係とその接合部の板厚方向の圧縮試験から決定した局所的な応力-ひずみ関係の関連性を考察した。即ち、2024-T3 アルミ合金 FSW 継ぎ手の面内横方向引張り応力-ひずみ特性とその接合部の板厚方向圧縮応力-ひずみ特性を決定して、両者の関連を真応力-真ひずみ関係に基づいて比較した。さらにそれらの真応力-真ひずみ関係を、Ramberg-Osgood 構成式¹⁰⁾を用いて定式化した。この FSW 継ぎ手接合部の構成式は、継ぎ手の強度設計データとして有効である。

2 実験方法と手順

2.1 FSW 継ぎ手 変位制御型の摩擦攪拌接合機（日立設備エンジニアリング社製：2D-FSW）によって 2024-T3 アルミ合金継ぎ手を製作した。母材（神戸製鋼製）の形状寸法は、長さ 360mm、幅 230mm、板厚 3.18 mm であり、製作した FSW 継ぎ手の写真を Fig.1 に、使用した接合条件を Table 1 示す。

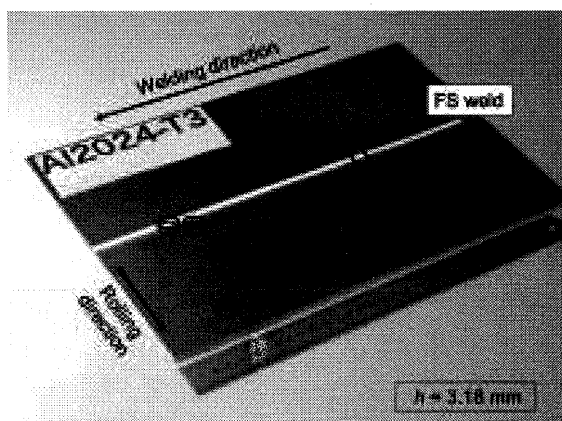


Fig. 1 Picture of FS welded AA2024-T3 butt joint and specimen locations

Table 1 FSW parameters used for AA2024-T3

Rotational speed (rpm)	Welding speed (mm/min)	Tool tilt angle (deg.)
1000	350	3

2.2 面内横方向引張り試験 基本的な引張り特性の測定に使用した母材と FSW 継ぎ手の平板試験片の形状を、Fig. 2 に示す。継ぎ手の平板試験片は接合方向と垂直方向で接合界面が、そのゲージ長さの中央に位置するように機械的加工により採取した (Fig.1 参照)。この継ぎ手

の平板試験片の形状は、JIS 6 号試験片 (JIS Z 2201-1980) に準拠している。母材試験片は板幅の制約上、そのほぼ半分の形状寸法とした。インストロン試験機による継ぎ手の面内横方向引張り試験では、接合部のみの応力-ひずみ特性を評価するために、ゲージ長さを工具肩部の直径 (12mm) にほぼ等しい 12.5mm の動的伸び計を使用した。一方、母材自体の引張り試験では同じ動的伸び計でゲージ長さ 25mm として使用した。クロスヘッド速度 1mm/min の引張り試験から得られた母材および FSW 継ぎ手の引張り公称応力-公称ひずみ関係の比較を Fig. 3 に示す。

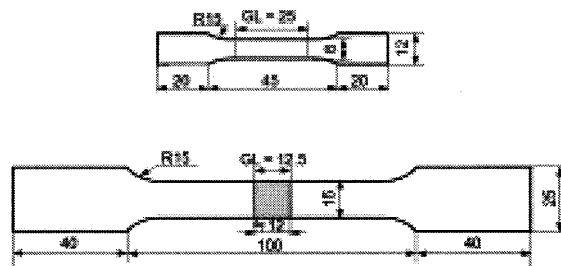


Fig. 2 Geometries of tension specimens

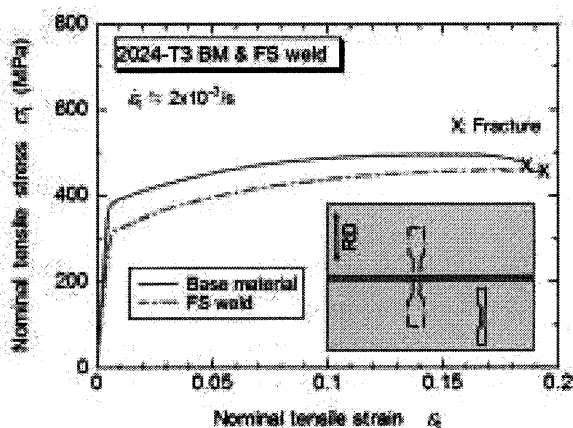


Fig. 3 In-plane nominal tensile stress-strain curves for base material and FS weld

2.3 板厚方向圧縮試験 母材, HAZ 部, ナゲット部 (WN) の板厚方向から円柱状圧縮試験片を機械加工により採取した (Fig. 1 参照)。圧縮試験片形状については、ASTM E9-89a 規格の推奨細長比 $h/d = 1.5 \sim 2.0$ とするのが望ましいが、母材の板厚 (3.18mm) が薄いので、この細長比を満足するように直径を小さく機械加工することは困難である。そのため、やむを得ず試験片を 2 枚重ねて細長比 $h/d = 1.2$ となるように、直径 $d (= 5.30 \text{ mm})$ と

決定した。母材、HAZ 部、ナゲット部から採取した円柱状試験片（細長比=1.2）について、クロスヘッド速度 1mm/min でひずみ約 10%まで負荷し除荷したときの圧縮公称応力—公称ひずみ関係を、Fig.4 に示す。この関係から母材、HAZ 部、ナゲット部の順番に、流動応力の低下が見られる。

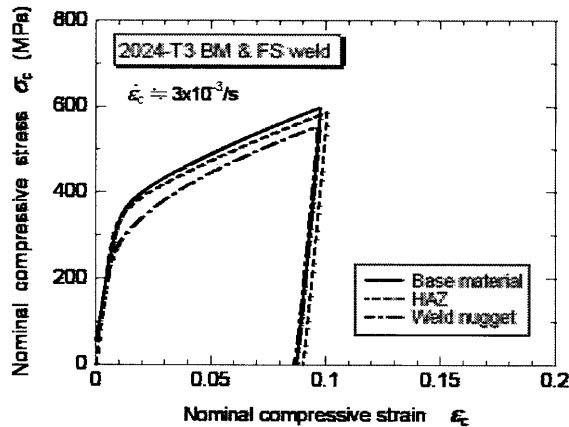


Fig. 4 Though-thickness nominal compressive stress-strain curves for base material, HAZ and weld nugget

2.4 Ramberg-Osgood 構成式の決定 面内横方向引張り試験（母材、継ぎ手接合部）および板厚方向圧縮試験（母材、HAZ 部、ナゲット部）から決定された公称応力—公称ひずみ特性を定式化するために、まず引張りの公称応力 σ_t と公称ひずみ ε_t （添字 t で引張りを示す）を次の関係により、それぞれ真応力と真ひずみに変換する。

$$\bar{\sigma}_t = \sigma_t(1 + \varepsilon_t), \quad \bar{\varepsilon}_t = \ln(1 + \varepsilon_t) \quad (1)$$

ここで、 $(\bar{\quad})$ はそれぞれの真値を示す。公称の圧縮応力 σ_c と圧縮ひずみ ε_c （圧縮を添字 c で示す）に対しては、上記の変換式はつぎのようになる。

$$\bar{\sigma}_c = \sigma_c(1 - \varepsilon_c), \quad \bar{\varepsilon}_c = -\ln(1 - \varepsilon_c) \quad (2)$$

ただし、引張と圧縮の試験結果を同じ応力—ひずみ軸上で比較するため、便宜上圧縮応力（ひずみ）も正として表記する。つぎに、構成式として次の Ramberg-Osgood 構成式を採用する。

$$\bar{\varepsilon}(\bar{\sigma}) = \frac{\bar{\sigma}}{E} + \left(\frac{\bar{\sigma}}{H} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (3)$$

ここで、上式の第 1 項目が弾性ひずみ成分 ε_e を、第 2 項目が塑性ひずみ成分 ε_p を示す。E はヤング率、定数 H と n は、それぞれひずみ硬化係数（強度係数）とひずみ硬化指数を示す。式(3)の第 2 項を $\bar{\sigma}$ について書き直すと、以下の関係式が得られる。

$$\bar{\sigma} = H \bar{\varepsilon}_p^n = H \left(\bar{\varepsilon} - \frac{\bar{\sigma}}{E} \right)^n \quad (4)$$

母材および継ぎ手接合部の 2 本の面内横方向引張り公称応力—公称ひずみ関係（Fig. 1）を、式(1)を使用して真応力—ひずみ関係に変換後、塑性域から約 100 組の座標点 $(\bar{\varepsilon}, \bar{\sigma})$ を選択し、塑性真ひずみ成分 $\bar{\varepsilon}_p$ を求め、引張り真応力 $\bar{\sigma}_t$ との関係を図対数グラフ上にプロットした結果を、○（母材）および△（接合部）で Fig.4 に示す。この測定データに対して、最小二乗法により直線をあて

はめた結果を、実線と破線で示す。それぞれの線の傾きがひずみ硬化指数 n であり、 $\bar{\varepsilon}_p = 1.0$ での真応力 $\bar{\sigma}_t$ の値が強度係数 H となる。Ramberg-Osgood 構成式によるプロット値と母材および継ぎ手接合部の引張り真応力—真ひずみ関係との比較を、Fig.5 に示す。それぞれの降伏点近傍の折れ曲がり点の前後とくびれ発生以後（Ramberg-Osgood 構成式は成立しない範囲）を除いて、両者の真応力—真ひずみ関係はよく一致していることがわかる。

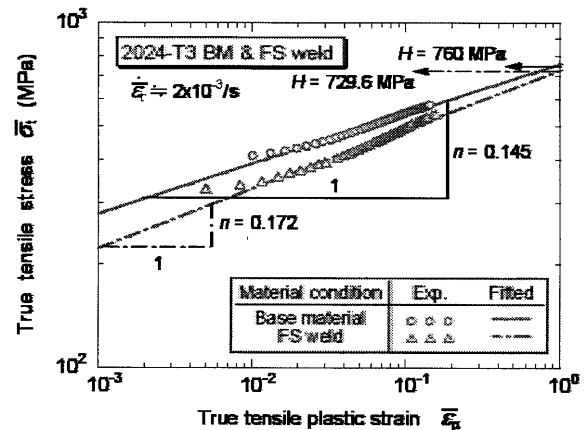


Fig. 5 Determination of constants H and n for Ramberg-Osgood equation for base material and Fs weld

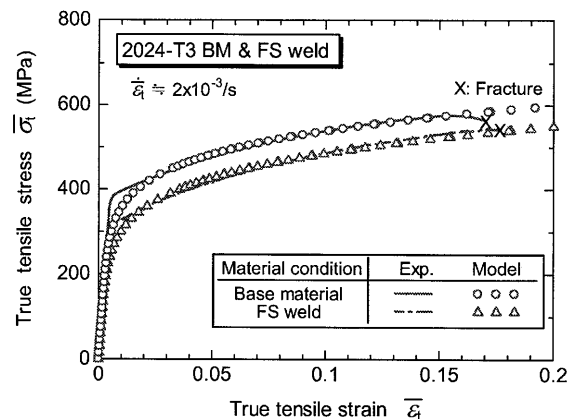


Fig. 6 Measured true in-plane transverse tensile stress-strain curves and Ramberg-Osgood plots for base material, and FS weld

3 結 論

- 母材の面内横方向引張り真応力—真ひずみ関係とその板厚方向圧縮真応力—真ひずみ関係は、ひずみの増大とともに流動応力レベルはほぼ一致するので、板厚方向圧縮試験から面内横方向引張り応力—ひずみ特性を推測することが可能である。
- 継ぎ手接合部（ナゲット部+TMAZ 部）の面内横方向引張り真応力—真ひずみ関係とナゲット部のみの板厚方向圧縮真応力—真ひずみ関係は、ほぼ一致する。
- 継ぎ手の板厚方向の圧縮流動応力レベルは、その横断面の硬度分布から予想されるように、母材>HAZ 部>ナゲット部の順となる。
- 母材および継ぎ手接合部の面内横方向引張り応力—ひずみ関係およびそれらの板厚方向圧縮応力—ひずみ関係は、Ramberg-Osgood 構成式により精度よく定式化することができる。