

6000 系アルミニウム合金材の摩擦撹拌接合部の疲労強度に強度低下と残留応力が与える影響

大阪大学大学院 学生員 牧山大祐
大阪大学大学院 正会員 ○大倉一郎

1. はじめに

近年、軽量で耐食性に優れるアルミニウム合金が土木構造物に使用されるようになってきた¹⁾。このような状況を受けて、日本アルミニウム協会から「6000 系アルミニウム合金土木構造物の母材および摩擦撹拌接合部の疲労設計ガイドライン²⁾」が発刊された。同ガイドラインでは、接合線に対して直角な方向に応力を受ける摩擦撹拌接合部の疲労強度は、摩擦撹拌接合部の疲労試験結果に基づいて与えられているが、接合線方向に応力を受ける摩擦撹拌接合部の疲労強度は、MIG 溶接部の疲労強度で代用されている。そこで、本研究では、接合線方向に応力を受ける、6000 系アルミニウム合金材の摩擦撹拌接合部の疲労強度を与える。

2. 接合部の応力範囲と応力比

母材および接合部の応力-ひずみ関係は次式で与えられる³⁾。

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0.2}} \right)^n \quad (1)$$

$$n = \frac{\ln 2}{\ln \left(\frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_{0.1}} \right)} \quad (2)$$

ここに、 ε : ひずみ, σ : 応力, E : ヤング係数, $\sigma_{0.2}$: 0.2%耐力, $\sigma_{0.1}$: 0.1%耐力, n : ひずみ硬化パラメータ。

接合線方向に応力を受ける部材の母材と接合部に生じる応力-ひずみ関係を図 1 に示す。図 1 (b) に示すように、接合部の点 A_j には、摩擦撹拌接合によって引張残留応力 σ_{jr} が生じ、これによって、次式で与えられる引張残留ひずみ ε_{jr} が生じる。

$$\varepsilon_{jr} = \frac{\sigma_{jr}}{E} \quad (3)$$

図 1 (a) に示すように、荷重を最大荷重まで増加させると、母材の応力-ひずみ関係は原点 A から点 B に移動する。接合部の断面積は部材の全断面積と比較して小さいので、母材に生じるひずみと接合部に生じるひずみは等

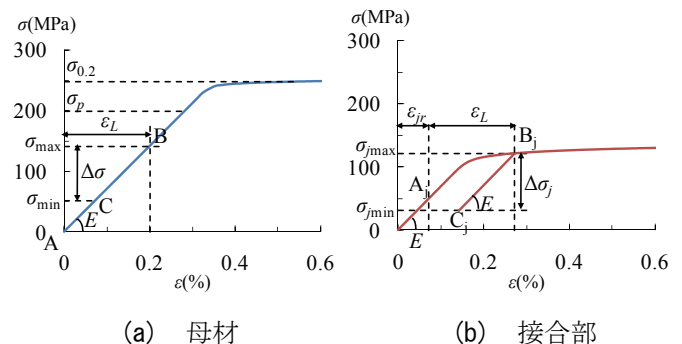


図 1 応力-ひずみ関係

しいと仮定すると、荷重によって母材に生じるひずみ ε_L と同じ大きさのひずみが接合部に生じる。したがって、図 1 (b) に示すように、接合部の応力-ひずみ関係は、点 A_j から点 B_j に移動する。点 B_j のひずみは式(1)より次式で与えられる。

$$\varepsilon_{jr} + \varepsilon_L = \frac{\sigma_{jmax}}{E} + 0.002 \left(\frac{\sigma_{jmax}}{\sigma_{j0.2}} \right)^{n_j} \quad (4)$$

ここに、 σ_{jmax} : 接合部に生じる最大応力, $\sigma_{j0.2}$: 接合部の 0.2%耐力, n_j : 接合部のひずみ硬化パラメータ。

図 1 (a) に示すように、荷重を除荷すると、母材の応力-ひずみ関係は点 B から点 C に移動する。 ε_L は、BC 間の応力範囲 $\Delta\sigma$ と応力比 R_n を用いて次式で与えられる。

$$\varepsilon_L = \frac{\Delta\sigma}{E(1-R_n)} \quad (5)$$

これに対して、図 1 (b) に示すように、接合部の応力-ひずみ関係は、傾き E の直線上を点 B_j から点 C_j に移動する。その後、荷重が繰返し載荷されると、母材の応力-ひずみ関係は、図 1 (a) の BC 間を変動し、接合部の応力-ひずみ関係は、母材と同じ応力範囲 $\Delta\sigma$ で、図 1 (b) の B_jC_j 間を変動する。したがって、接合部の応力範囲 $\Delta\sigma_j$ と応力比 R はそれぞれ次式で与えられる。

$$\Delta\sigma_j = \Delta\sigma \quad (6)$$

$$R = \frac{\sigma_{jmax} - \Delta\sigma}{\sigma_{jmax}} = 1 - \frac{\Delta\sigma}{\sigma_{jmax}} \quad (7)$$

キーワード：アルミニウム合金、摩擦撹拌接合、疲労強度、残留応力、強度低下

連絡先 〒565-0871 吹田市山田丘 2-1 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 TEL06-6879-7620

式(3), (5), (7)を式(4)に代入して次式を得る.

$$\sigma_{jr} + \frac{(R_n - R)\Delta\sigma}{(1 - R_n)(1 - R)} = 0.002E \left\{ \frac{\Delta\sigma}{\sigma_{j0.2}(1 - R)} \right\}^{n_j} \quad (8)$$

3. 母材の応力で表された接合部の疲労強度

摩擦撹拌接合部の設計疲労強度曲線を表1に示す^{2),4)}.

表1 摩擦撹拌接合部の設計疲労強度曲線

設計疲労限度	
$-1 \leq R \leq 0.1$	$\Delta\sigma_{caf} = \frac{133(1-R)}{1.6786 - 0.3214R}$
$0.1 < R \leq 1$	$\Delta\sigma_{caf} = \frac{99.0(1-R)}{1.2966 - 0.7034R}$
設計 S-N 曲線	
$-1 \leq R \leq 0.1$	$\Delta\sigma = \left(\frac{10^{20.486-6.38R}}{N} \right)^{\frac{1}{7.25-2.16R}}$
$0.1 < R \leq 0.5$	$\Delta\sigma = \left(\frac{10^{20.692-8.44R}}{N} \right)^{\frac{1}{7.25-2.16R}}$
$0.5 < R < 1$	$\Delta\sigma = \left\{ \frac{167(1-R)}{1.3089 - 0.3089R} \right\} \left(\frac{10^5}{N} \right)^{\frac{\log \frac{4.0822-2.0822R}{2.3758-0.3758R}}{0.8823}}$

表1の設計疲労限度を与える各式と, $\Delta\sigma$ を $\Delta\sigma_{caf}$ に置き換えた式(8)から R を消去して, 母材の応力で表された接合部の疲労限度 $\Delta\sigma_{caf}$ が次式で与えられる.

$0 \leq \Delta\sigma_{caf} < 72.7$ MPa に対して

$$\sigma_{jr} + \frac{\Delta\sigma_{caf}}{1 - R_n} = 166.9 - 1.1858\Delta\sigma_{caf} + 0.002E \left(\frac{166.9 - 1.1858\Delta\sigma_{caf}}{\sigma_{j0.2}} \right)^{n_j} \quad (9)$$

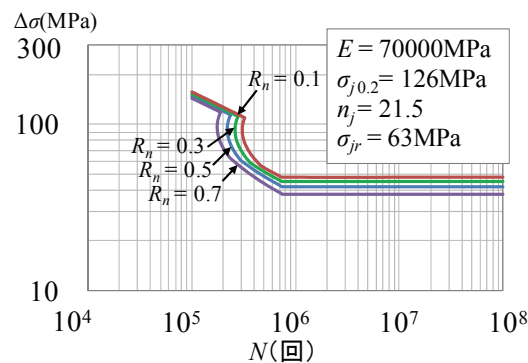
$72.7 \leq \Delta\sigma_{caf} \leq 133$ MPa に対して

$$\sigma_{jr} + \frac{\Delta\sigma_{caf}}{1 - R_n} = 98.0 - 0.2368\Delta\sigma_{caf} + 0.002E \left(\frac{98.0 - 0.2368\Delta\sigma_{caf}}{\sigma_{j0.2}} \right)^{n_j} \quad (10)$$

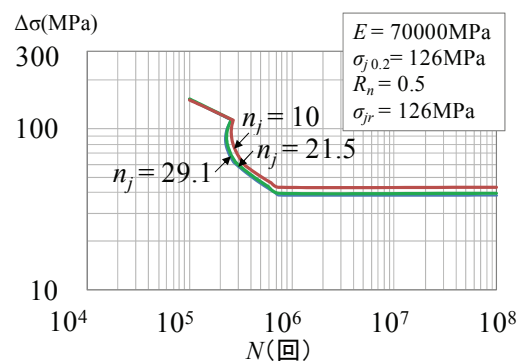
さらに, 表1の設計 S-N 曲線を与える各式と, 式(8)から R を, 数値計算により消去することにより, 母材の応力 $\Delta\sigma$ で表された接合部の S-N 曲線が与えられる.

4. 各種因子が疲労強度に与える影響

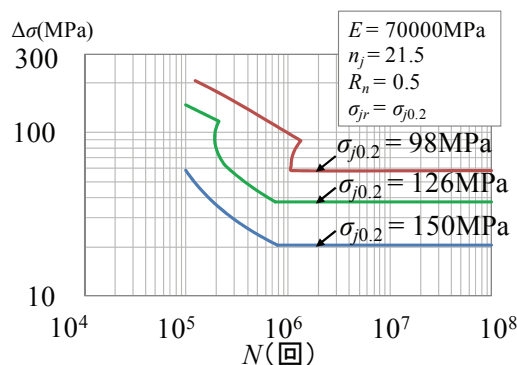
各種因子が疲労強度に与える影響を図2に示す. 図2(a)より, R_n が大きくなるに従って疲労強度は低下する. 図2(b)より, n_j が大きくなると疲労強度は低下するが, $n_j = 21.5$ と 29.1 の曲線はほぼ同じである. 図2(c)より, $\sigma_{j0.2}$ が大きくなるに従って疲労強度は低下する.



(a) R_n の影響



(b) n_j の影響



(c) $\sigma_{j0.2}$ の影響

図2 各種因子が疲労強度に与える影響

【参考文献】

- 1) 鋼構造委員会: 21 世紀の建設材料 アルミニウム合金の可能性, 土木学会平成 22 年度全国大会研究討論会, 研-06 資料, 2010.
- 2) 日本アルミニウム協会 土木構造物委員会: 6000 系アルミニウム合金 土木構造物の母材および摩擦撹拌接合部の疲労設計ガイドライン, 2010 年 9 月版, 2010.
- 3) 大倉一郎, 他: 構造用アルミニウム合金の応力-ひずみ関係および接合によって発生する残留応力の定式化, 土木学会論文集 A, Vol.64, No.4, pp.789-805, 2008.
- 4) 日本アルミニウム協会 土木構造物委員会: アルミニウム合金土木構造物の摩擦撹拌接合部の品質検査ガイドライン, 2010 年 9 月版, 2010.