

6000 系アルミニウム合金の摩擦攪拌接合部の設計 S-N 曲線

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

平成 5 年の道路構造令の改正により設計自動車荷重が 196kN から 245kN に変更された。この設計自動車荷重の変更に対処するために、コンクリート床版の厚さを増さなければならない道路橋もあり、そのような道路橋では、床版の厚さ増加にともなう重量増加によって、鋼桁および下部工を補強しなければならない場合が生じる。これに対して、コンクリート床版の代わりに、摩擦攪拌接合 (以下 FSW) で製作されたアルミニウム床版¹⁾の適用が考えられている。アルミニウム床版の母材および図-1 に示すような接合線直角方向に応力を受ける FSW 部に対して設計 S-N 曲線が提案されている²⁾。しかし、提案された設計 S-N 曲線は疲労限度が過度に安全であり、さらに応力比が 0.5 から 1.0 の範囲に対して設計 S-N 曲線が規定されていない。そこで、本研究ではアルミニウム床版に用いられる 6000 系アルミニウム合金の FSW 部の設計 S-N 曲線を新たに提案する。

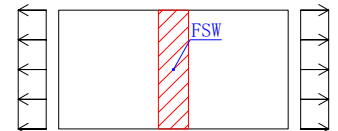


図-1 接合線直角方向に
に応力を受ける FSW 部

2. 設計疲労限度

FSW 部の疲労限度線図を図-2 に示す。 σ_a と σ_m は、それぞれ応力振幅と平均応力を表している。過去に提案された疲労限度²⁾は Sonderberg 線 (応力比 R が -1 に対する疲労限度 σ_{w0} と 0.2% 耐力 $\sigma_{j0.2}$ を結んだ直線) を採用している。しかし、 $R=0.5$ に対する疲労限度は修正 Goodman 線 (応力比 R が -1 に対する疲労限度 σ_{w0} と引張強度 σ_{JB} を結んだ直線) の上にあり、Sonderberg 線から離れている。したがって、 $-1 \leq R \leq 0.1$ に対して Sonderberg 線、 $0.1 < R \leq 1$ に対して $R=0.1$ の直線上の点と水平軸上の FSW 部の引張強度 σ_{JB} を結んだ直線を疲労限度として新たに提案する。これらの関係を応力範囲と応力比で表すと次式になる。

$$-1 \leq R \leq 0.1 \text{ に対して} \quad \Delta\sigma_{caf} = \frac{(1-R)\Delta\sigma_{w0}}{1-R + \frac{(1+R)}{2} \frac{\Delta\sigma_{w0}}{\sigma_{j0.2}}} \quad (1)$$

$$0.1 < R \leq 1 \text{ に対して} \quad \Delta\sigma_{caf} = \frac{2(1-R)A\sigma_{JB}}{1-R + (1+R)A} \quad (2)$$

$$A = \frac{9}{\frac{\sigma_{JB}}{\sigma_{j0.2}} \left(\frac{18\sigma_{j0.2}}{\Delta\sigma_{w0}} + 11 \right) - 11}$$

ここに、 $\Delta\sigma_{caf}$: 応力範囲で表された疲労限度

$\Delta\sigma_{w0}$: $R=-1$ に対する応力範囲で表された疲労限度

設計疲労限度で用いる引張強度 σ_{JB} 、0.2% 耐力 $\sigma_{j0.2}$ 、 $R=-1$ に対する設計疲労限度 $\Delta\sigma_{w0a}$ ²⁾を表-1 に示す。 σ_{JB} と $\sigma_{j0.2}$ は、アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針案³⁾に規定される値である。表-1 の値を式(1)と(2)に代入して、設計疲労限度として次式を得る。

$$-1 \leq R \leq 0.1 \text{ に対して} \quad \Delta\sigma_{caf} = \frac{133(1-R)}{1.6786 - 0.3214R} \quad (3)$$

$$0.1 < R \leq 1 \text{ に対して} \quad \Delta\sigma_{caf} = \frac{99.0(1-R)}{1.2966 - 0.7034R} \quad (4)$$

3. 設計 S-N 曲線

FSW 部に対する S-N 曲線は次式で与えられる。

$$\log N = \log c - m \log (\Delta\sigma) \quad (5)$$

ここに、 N : 繰返し回数

$\Delta\sigma$: 応力範囲

m, c : 定数

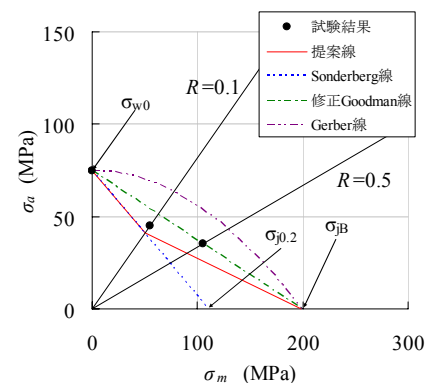


図-2 疲労限度線図

表-1 σ_{JB} 、 $\sigma_{j0.2}$ 、 $\Delta\sigma_{w0a}$ の値

σ_{JB} (MPa)	$\sigma_{j0.2}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{w0a}$ (MPa)
167	98	133

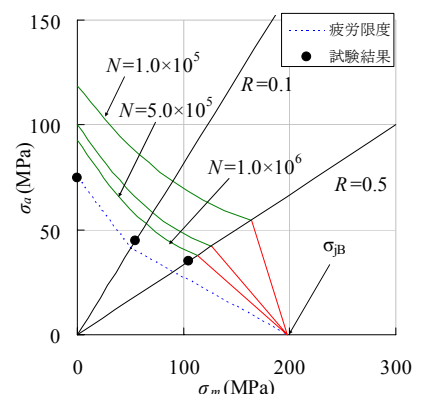


図-3 時間限度線図

キーワード：アルミニウム合金、摩擦攪拌接合、疲労限度、設計 S-N 曲線

連絡先 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 TEL06-6879-7618

m と R の関係は次式で与えられる²⁾.

$$m = 7.25 - 2.16R \quad (6)$$

さらに、平均寿命を与える $\log c$ と R の関係を表-2 に示す²⁾.

式(5)から得られる、ある繰返し回数 N に対する応力振幅 σ_a と平均応力 σ_m の関係、すなわち FSW 部の時間限度線図を図-3 に示す. 時間限度は $-1 \leq R \leq 0.1$ と $0.1 < R \leq 0.5$ の各場合ではほぼ直線である. したがって、 $0.5 < R < 1.0$ に対して、 $R=0.5$ の直線上の点と水平軸上の FSW 部の引張強度 σ_{jB} を結んだ直線を時間限度として採用する. この関係を式(5)の形式で与えられる S-N 曲線で表した場合、 m と R の関係および c と R の関係は、それぞれ次式で与えられる.

$$m = \frac{\log \left\{ \frac{c_{0.5}}{10^5} \left(\frac{1+3A}{2A\sigma_{jB}} \right)^{6.17} \right\}}{\log \frac{1-R+(1+R)A}{2A \left\{ 2R-1+(1-R)\sigma_{jB} \left(\frac{10^5}{c_{0.5}} \right)^{\frac{1}{6.17}} \right\}}} \quad (7)$$

$$c = 10^5 \left\{ \frac{(1-R)\sigma_{jB}}{2R-1+(1-R)\sigma_{jB} \left(\frac{10^5}{c_{0.5}} \right)^{\frac{1}{6.17}}} \right\}^m \quad (8)$$

ここに、 $c_{0.5}$: $R=0.5$ に対する c の値

平均寿命を与える S-N 曲線を $\log N$ に関する標準偏差の 2 倍だけ負方向に移動させた曲線、すなわち設計 S-N 曲線で用いられる $\log c_a$ と R の関係を表-3 に示す²⁾. c_a を式(5)の c に代入して、 $-1 \leq R \leq 0.5$ に対する設計 S-N 曲線が次式で与えられる.

$$-1 \leq R \leq 0.1 \text{ に対して} \quad \Delta \sigma = \left(\frac{10^{\frac{20.486-6.38R}{N}}}{N} \right)^{\frac{1}{7.25-2.16R}} \quad (9)$$

$$0.1 < R \leq 0.5 \text{ に対して} \quad \Delta \sigma = \left(\frac{10^{\frac{20.692-8.44R}{N}}}{N} \right)^{\frac{1}{7.25-2.16R}} \quad (10)$$

式(7)と(8)の $c_{0.5}$ に $c_{0.5a}$ ($= 10^{16.47}$) を代入し、 σ_{jB} 、 $\sigma_{j0.2}$ 、 $\Delta \sigma_{w0}$ に表-1 の値を代入して、 $0.5 < R < 1$ に対する設計 S-N 曲線が次式で与えられる.

$$0.5 < R < 1 \text{ に対して} \quad \Delta \sigma = \left\{ \frac{167(1-R)}{1.3089-0.3089R} \right\} \left(\frac{10^5}{N} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (11)$$

$$m = \frac{0.8628}{\log \frac{2.1859-1.1859R}{1.3089-0.3089R}} \quad (12)$$

4. 設計 S-N 曲線と疲労試験結果の比較

$R=-1$, 0.1 , 0.5 に対する設計 S-N 曲線と疲労試験結果との比較を図-4 に示す. 設計 S-N 曲線が疲労試験結果の下限付近を通過していることが分かる.

参考文献

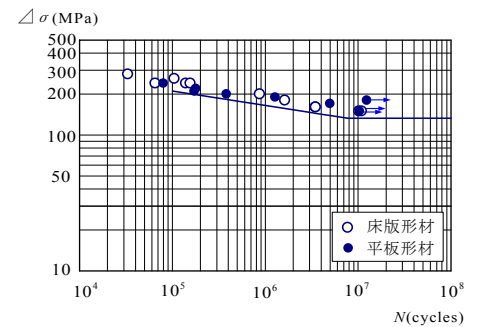
- 1) 大倉一郎, 萩原亘保, 鳴尾亮, 戸田均: 摩擦攪拌接合で製作されたアルミニウム床版の疲労特性, 土木学会論文集, No.703/I-59, pp.255-266, 2002.
- 2) 萩澤亘保, 大倉一郎: アルミニウム合金 A6005C-T5 の母材と摩擦攪拌接合部の疲労強度に応力比が与える影響, 土木学会論文集 A, Vol.65, No.1, pp.117-122, 2009.
- 3) 日本アルミニウム協会: アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針案(第1次改訂試案), 1998.

表-2 平均寿命を与える $\log c$ と R の関係

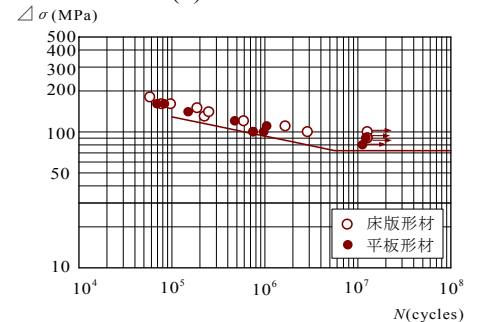
$-1 \leq R \leq 0.1$	$0.1 < R \leq 0.5$
$\log c = 20.886 - 6.47R$	$\log c = 20.904 - 6.65R$

表-3 $\log c_a$ と R の関係

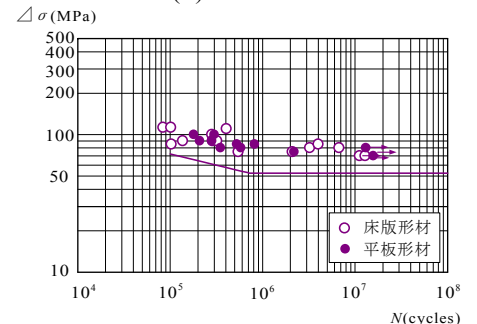
$-1 \leq R \leq 0.1$	$0.1 < R \leq 0.5$
$\log c_a = 20.486 - 6.38R$	$\log c_a = 20.692 - 8.44R$



(a) $R = -1$



(b) $R = 0.1$



(c) $R = 0.5$

図-4 設計 S-N 曲線と試験結果との比較