

6000系アルミニウム合金材の摩擦攪拌接合部の 設計疲労強度曲線

大倉 一郎¹

¹正会員 大阪大学准教授 大学院工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

要旨

本論文では、アルミニウム合金土木構造物に使用される 6000 系アルミニウム合金材の摩擦攪拌接合部の設計疲労強度曲線について述べる。最初に、摩擦攪拌接合部の接合線直角方向の設計疲労強度曲線の設定の仕方について説明する。次に、摩擦攪拌接合部の接合線方向の疲労強度には、母材の応力比、残留応力、接合部の 0.2%耐力が影響することを示す。最後に、摩擦攪拌接合部の接合線方向の設計疲労強度曲線を提案する。

キーワード：6000系アルミニウム合金、摩擦攪拌接合、設計疲労強度曲線、残留応力

1. 序論

アルミニウム合金製の土木構造物は、従来は圧延板をMIG溶接で連結することによって製作されたが、最近では、道路橋用アルミニウム床版に代表されるように、押出型材を摩擦攪拌接合で連結することによって製作されるようになってきた¹⁾。ここで摩擦攪拌接合とは、英国の溶接研究所で1991年に発明された接合法である。図-1に示すように、鋼製のツールを回転させながら母材の突合せ面に貫入し、ツールの回転によって生じた摩擦熱によって母材を塑性流動させ、ツールを接合線方向に移動させた後、アルミニウム合金が冷却することによって突合せ面が一体化される。摩擦攪拌接合は、攪拌されるアルミニウム合金が熔融状態にないので、固相接合法の一種である。現在、摩擦攪拌接合は、鉄道車両、船舶、自動車などの分野でも使用されている。

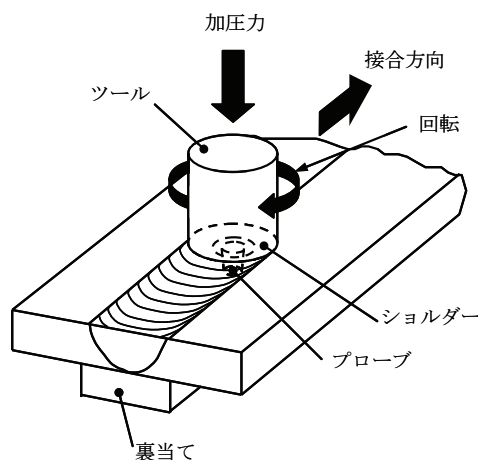


図-1 摩擦攪拌接合

日本アルミニウム協会は、「アルミニウム合金土木構造物の摩擦撈拌接合部の品質検査ガイドライン(2010年9月版)²⁾」(以後、QIFSWガイドラインと呼ぶ)を発刊し、アルミニウム合金製の土木構造物に用いられる摩擦撈拌接合の品質検査方法に関してガイドラインを示している。初版³⁾(旧名称「アルミニウム合金の摩擦撈拌接合部の品質検査指針(案)」,2004年発刊)では、アルミニウム合金製の歩道橋など、疲労の影響を受けない摩擦撈拌接合部に対してのみ、品質検査方法が規定されていた。その後、摩擦撈拌接合部の疲労強度が高いことが明らかにされ^{4),5)}、摩擦撈拌接合が道路橋用アルミニウム床版の試作⁶⁾に使用されたのを受けて、疲労に関する規定が設けられた改訂版⁷⁾(旧名称「アルミニウム合金土木構造物の摩擦撈拌接合部の品質検査指針(案)」が2008年に発刊された。

このQIFSWガイドラインの2008年版⁷⁾では、接合線直角方向に応力を受ける試験片の疲労試験の実施が品質検査方法の一つとして規定された。接合線方向に応力を受ける摩擦撈拌接合部の疲労強度が、接合線直角方向に応力を受ける摩擦撈拌接合部のそれより高いことが疲労試験^{4),8)}により示されたので、2008年版では、接合線方向に応力を受ける試験片の疲労試験の実施は規定されなかった。

他方、QIFSWガイドラインの2008年版⁷⁾では、摩擦撈拌接合部が疲労の影響を受ける場合、キッシングボンドを排除するために、両面摩擦撈拌接合を実施することが規定された。ここで、キッシングボンドとは、**図-1**に示す、従来の摩擦撈拌接合、すなわち片面摩擦撈拌接合において、プローブ先端の撈拌不足によって接合部の裏面に生じる接合不完全部である。キッシングボンドは、接合線直角方向に応力を受ける接合部の疲労強度を低下させる一因である。他方、両面摩擦撈拌接合とは、**図-2**に示すように、摩擦撈拌接合を行った後、被接合体を裏返して反対側からも摩擦撈拌接合を行う接合法である。両面摩擦撈拌接合による接合部の疲労強度は、キッシングボンドが排除されるので、片面摩擦撈拌接合による接合部のそれより高いと想定し、これを疲労試験によって実証することなく、両面摩擦撈拌接合がQIFSWガイドラインの2008年版⁷⁾に導入された。

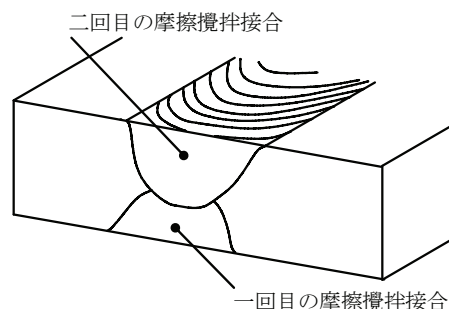


図-2 両面摩擦撈拌接合

その後、両面摩擦撈拌接合部の接合線方向から採取された試験片の疲労試験が実施され、その疲労強度が後述の**表-1**に示す摩擦撈拌接合部の接合線直角方向の設計疲労強度曲線(設計疲労限度と設計S-N曲線の総称)より低くなる試験片が存在することが明らかにされた⁹⁾。これを受けて、QIFSWガイドラインの2010年版²⁾には、接合線に作用する応力の方向に応じて、疲労試験を実施することが規定された。

摩擦撈拌接合部の接合線直角方向に生じる残留応力は小さな圧縮応力、接合線方向に生じる残留応力は接合部の0.2%耐力の半分程度の引張応力であることが明らかにされている¹⁰⁾。したがって、接合部に生じる引張残留応力が接合部の0.2%耐力に達していないので、アルミニウム合金材の摩擦撈拌接合部の疲労強度は応力比の影響を受ける。

摩擦撈拌接合部の接合線直角方向の疲労強度が疲労試験により明らかにされた^{4),5),11)}。これに基づいて、摩擦撈拌接合部の接合線直角方向の設計疲労強度曲線がALST研究レポートNo.6¹²⁾で提案され、これが、日本アルミニウム協会の「6000系アルミニウム合金土木構造物の母材および摩擦撈拌接合部の疲労設計ガイドライン(2010年9月版)¹³⁾」(以後、JAA疲労設計ガイドラインと呼ぶ)に採用された。

摩擦撈拌接合部の接合線方向に対しては接合部の0.2%耐力の半分程度の引張残留応力が生じ、さらに

6000系アルミニウム合金の接合部は強度低下を起こすので、母材と接合部に生じる応力範囲が同じであっても、両者の応力比は異なる。したがって、摩擦攪拌接合部の接合線方向の設計疲労強度曲線に対しては、接合部の強度低下と接合残留応力の影響が考慮されなければならない。

本論文では、最初に、摩擦攪拌接合部の接合線直角方向の設計疲労強度曲線を作成する。次に、摩擦攪拌接合部の接合線方向の疲労強度には、母材の応力比、残留応力、接合部の0.2%耐力が影響することを示す。最後に、摩擦攪拌接合部の接合線方向の設計疲労強度曲線を提案するとともに今後の検討課題について述べる。

2. 摩擦攪拌接合部の接合線直角方向の設計疲労強度曲線¹⁴⁾

(1) 疲労限度

平滑材の疲労限度に平均応力が与える影響は、それぞれ次式で与えられるGerber線、修正Goodman線、Sonderberg線で評価される¹⁵⁾。

$$\sigma_a = \sigma_{w0} \left[1 - \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_B} \right)^2 \right] \quad (1)$$

$$\sigma_a = \sigma_{w0} \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_B} \right) \quad (2)$$

$$\sigma_a = \sigma_{w0} \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_Y} \right) \quad (3)$$

ここに、 σ_a : 応力振幅
 σ_m : 平均応力
 σ_{w0} : $\sigma_m=0$ に対する応力振幅で表された疲労限度
 σ_B : 引張強度
 σ_Y : 降伏応力

応力振幅 σ_a と平均応力 σ_m はそれぞれ次式で定義される。

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} = \frac{\Delta\sigma}{2} \quad (4)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} = \frac{1+R}{2(1-R)} \Delta\sigma \quad (5)$$

ここに、 $\Delta\sigma$: 応力範囲 ($=\sigma_{\max} - \sigma_{\min}$)
 σ_{\max} : 上限応力
 σ_{\min} : 下限応力
 R : 応力比 ($=\sigma_{\min} / \sigma_{\max}$)

式(1)~(3)から分かるように、Gerber線、修正Goodman線、Sonderberg線は、材料の引張強度または降伏応力を因子として有する。 σ_a と σ_m をそれぞれ縦軸と横軸に取った疲労限度線図上にこれらの線を描くと、一般に、鋼の平滑材の疲労限度は、修正Goodman線より上にプロットされる¹⁵⁾。アルミニウム合金においても、A6005C-T5の平滑材の疲労限度は、修正Goodman線の上にプロットされる¹¹⁾。

摩擦攪拌接合部には余盛りが生じないので、摩擦攪拌接合部はMIG溶接部より格段に滑らかである。さらに、キッシングボンドが排除された摩擦攪拌接合部には初期亀裂が存在しない。したがって、摩擦攪拌接合部の疲労限度は、接合部の引張強度または0.2%耐力が用いられたGerber線、修正Goodman線、Sonderberg線によって評価できることが予想される。

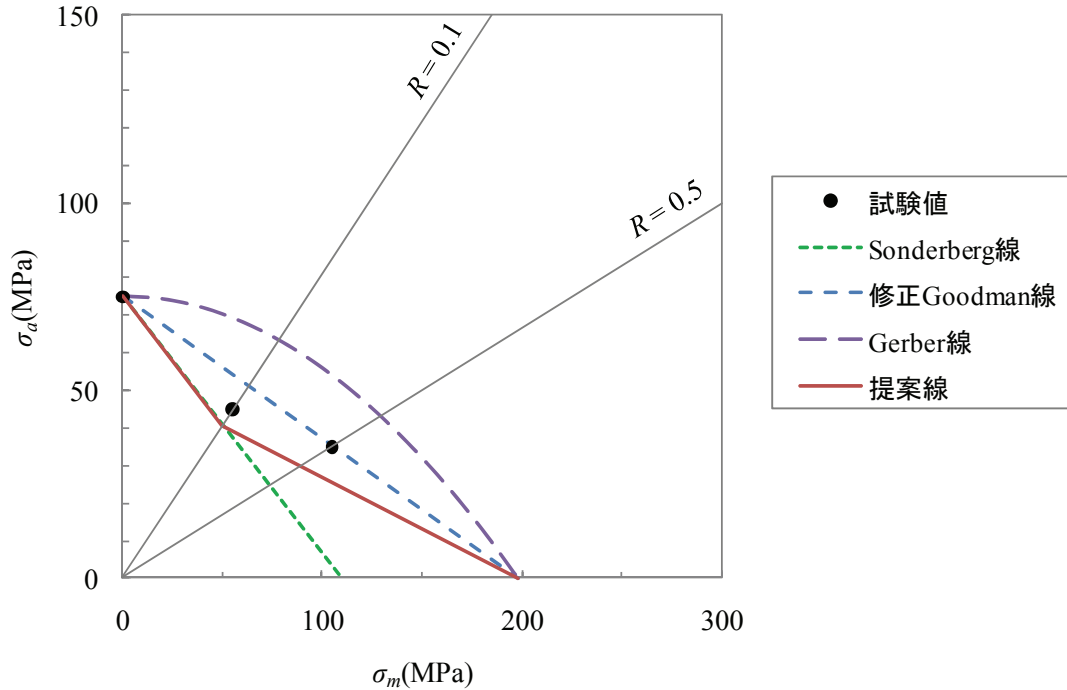


図-3 疲労限度線図

過去の疲労試験¹¹⁾ (後述の図-7 に示す平板形材試験片 T に対する試験結果) で得られた疲労限度に対する σ_a と σ_m の関係を図-3 に示す. $R=0.1$ に対する試験値は Sonderberg 線に近いが, $R=0.5$ に対する試験値は修正 Goodman 線の線上にある. したがって, 疲労限度に対して, 実線で示すように, $-1 \leq R \leq 0.1$ に対しては Sonderberg 線, $0.1 < R \leq 1.0$ に対しては, Sonderberg 線と $R=0.1$ の直線の交点と, 水平軸上の接合部の引張強度 σ_{jB} を結んだ直線を採用する.

図-3 の $-1 \leq R \leq 0.1$ の実線は, σ_Y の代わりに接合部の 0.2%耐力 $\sigma_{j0.2}$ が用いられた式(3)に式(4)と(5)を代入し, $\Delta\sigma$ を $\Delta\sigma_{caf}$ とおいて次式で与えられる. ここで $\Delta\sigma_{caf}$ は応力範囲で表された疲労限度である.

$$\Delta\sigma_{caf} = \frac{(1-R)\Delta\sigma_{w0}}{1-R + \frac{1+R}{2} \frac{\Delta\sigma_{w0}}{\sigma_{j0.2}}} \quad (6)$$

ここに, $\Delta\sigma_{w0}$: $R=-1$ に対して応力範囲で表された疲労限度 ($=2\sigma_{w0}$)

他方, 図-3 の $0.1 < R \leq 1.0$ の実線は次式で与えられる.

$$\sigma_a = \frac{9(\sigma_{jB} - \sigma_m)}{\frac{\sigma_{jB}}{\sigma_{j0.2}} \left(\frac{9\sigma_{j0.2}}{\sigma_{w0}} + 11 \right) - 11} \quad (7)$$

式(4)と(5)を式(7)に代入し, $\Delta\sigma$ を $\Delta\sigma_{caf}$ とおいて, $\Delta\sigma_{caf}$ と R の関係が次式で与えられる.

$$\Delta\sigma_{caf} = \frac{2A(1-R)\sigma_{jB}}{1-R + A(1+R)} \quad (8)$$

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

(2) S-N 曲線

S-N 曲線は次式で与えられる.

$$\log N = \log c - m \log(\Delta\sigma) \quad (9)$$

ここに, N : 繰返し回数

c, m : 定数

$-1 \leq R \leq 0.5$ に対して, 式(9)の m と R の関係は次式で与えられる¹¹⁾.

$$m = 7.25 - 2.16R \quad (10)$$

過去の疲労試験結果¹¹⁾ (後述の図-7 の平板形材試験片 T に対する試験値) に最小自乗法を適用して得られる $\log c$ と R の関係を図-4 に示す. 疲労試験は $R = -1, 0.1, 0.5$ の三つの応力比に対して行われた.

図-4 のプロット間を次式の直線で補間する.

$$\log c = 20.886 - 6.47R \quad (-1 \leq R \leq 0.1) \quad (11)$$

$$\log c = 20.904 - 6.65R \quad (0.1 < R \leq 0.5) \quad (12)$$

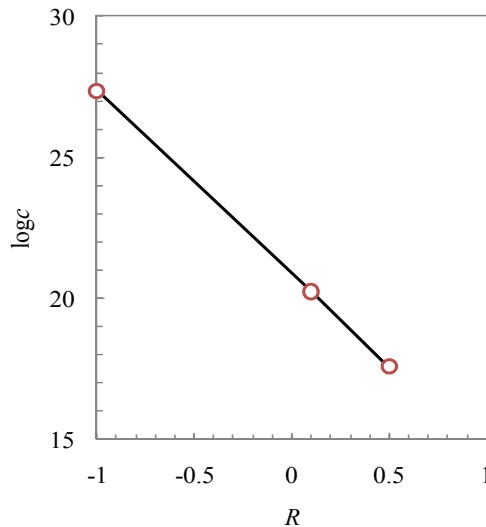


図-4 $\log c$ と R の関係

繰返し回数 $N = 1.0 \times 10^5, 5.0 \times 10^5, 1.0 \times 10^6$ に対する σ_a と σ_m の関係を図-5 に示す. この関係は, 所定の疲労寿命 N に対して, 式(9)~(12)が与える $\Delta\sigma$ を, 式(4)と(5)を用いてそれぞれ σ_a と σ_m に変換することにより与えられる. 所定の疲労寿命 N に対する σ_a と σ_m の関係を時間限度といい, 図-5 を時間限度線図と呼ぶ. 図-5 には, 式(6)と(8)によって与えられる疲労限度も描いてある.

接合部に生じる上限応力 σ_{\max} は, 接合部の引張強度 σ_{JB} を越えない. したがって, $\sigma_{\max} = \sigma_m + \sigma_a$ であるから, σ_a と σ_m の関係は次の制限を受ける.

$$\sigma_a + \sigma_m \leq \sigma_{JB} \quad (13)$$

式(13)で等号が成立する場合の σ_a と σ_m の関係を超える時間限度は存在しないので, 図-5 において, その部分を破線で示してある.

図-5 において, $-1 \leq R \leq 0.1$ および $0.1 < R \leq 0.5$ の各区間において, σ_a と σ_m の関係はほぼ直線である. 疲労限度に関する提案線では, $\sigma_a = 0$ のとき $\sigma_m = \sigma_{JB}$ である. したがって, $0.5 < R \leq 1.0$ に対する時間限度と

して、次式で与えられる、 $R = 0.5$ の直線上の点と座標 $(\sigma_{jB}, 0)$ を結んだ直線を採用する。

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{jB} - \sigma_m}{2\sigma_{jB} \left(\frac{N}{c_{0.5}} \right)^{\frac{1}{6.17}} - 3} \quad (14)$$

ここに、 $c_{0.5}$: $R = 0.5$ に対する c の値

さらに、式(4)と(5)を式(14)に代入して、 $0.5 < R \leq 1.0$ に対するS-N曲線が次式で与えられる。

$$\Delta\sigma = \frac{(1-R)\sigma_{jB}}{2R-1 + (1-R)\sigma_{jB} \left(\frac{N}{c_{0.5}} \right)^{\frac{1}{6.17}}} \quad (15)$$

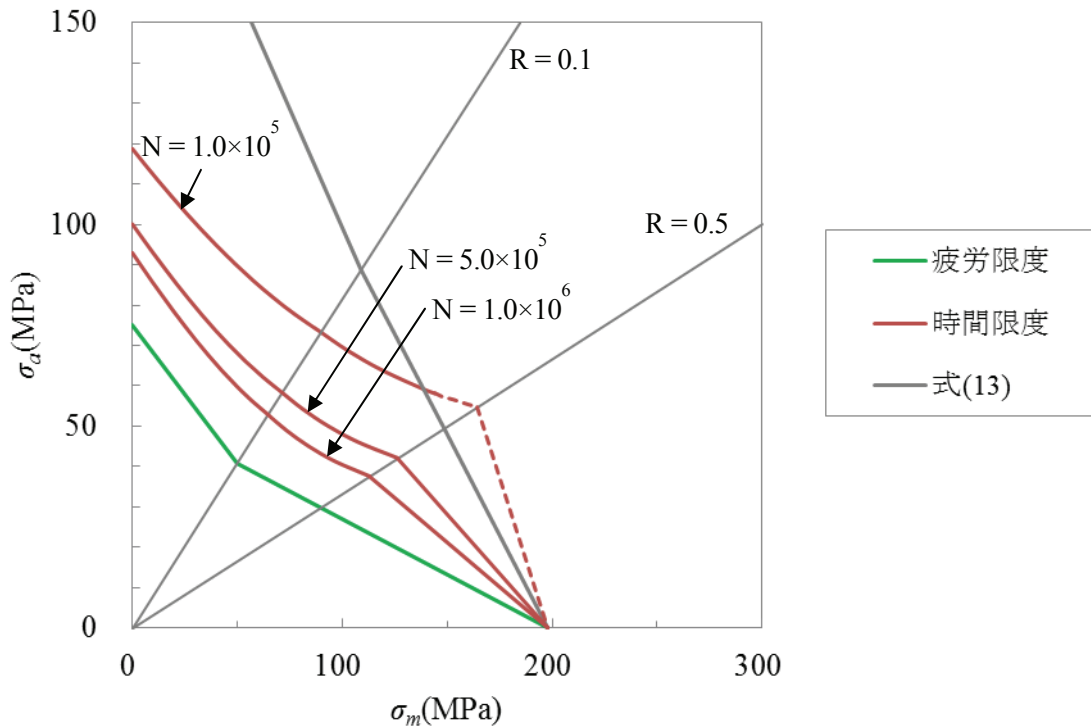


図-5 時間限度曲線

応力比 R が0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9に対する疲労強度曲線, すなわち式(8)が与える疲労限度と式(15)が与えるS-N曲線を図-6に示す. 各応力比に対するS-N曲線は図上でほぼ直線である. したがって, 次に述べるように, $N = 10^5$ に対する点および式(15)が疲労限度 $\Delta\sigma_{caf}$ に交差する点の間を直線で近似する.

式(15)が疲労限度 $\Delta\sigma_{caf}$ に交差する繰返し回数は, 式(8)と(15)を等置して, 繰返し回数 N について解いて, 次式で与えられる.

$$N_2 = c_{0.5} \left(\frac{1+3A}{2A\sigma_{jB}} \right)^{6.17} \quad (16)$$

ここに、 N_2 : 式(15)が疲労限度 $\Delta\sigma_{caf}$ に交差する繰返し回数

式(16)から分るように、式(15)が疲労限度 $\Delta\sigma_{caf}$ に交差する繰返し回数は応力比 R に依存しない。

繰返し回数10万回と N_2 の間を式(9)の形式で与えられるS-N曲線で近似した場合の m と c の値がそれぞれ次式で与えられる。

$$m = \frac{\log \frac{N_2}{10^5}}{\log \frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\sigma_{caf}}} = \frac{\log \left\{ \frac{c_{0.5}}{10^5} \left(\frac{1+3A}{2A\sigma_{jB}} \right)^{6.17} \right\}}{\log \frac{1-R+A(1+R)}{2A \left\{ 2R-1+(1-R)\sigma_{jB} \left(\frac{10^5}{c_{0.5}} \right)^{\frac{1}{6.17}} \right\}}}$$
(17)

$$c = 10^5 (\Delta\sigma_1)^m = 10^5 \left\{ \frac{(1-R)\sigma_{jB}}{2R-1+(1-R)\sigma_{jB} \left(\frac{10^5}{c_{0.5}} \right)^{\frac{1}{6.17}}} \right\}^m$$
(18)

ここに、 $\Delta\sigma_1$ ：繰返し回数 10^5 に対する応力範囲 (MPa)

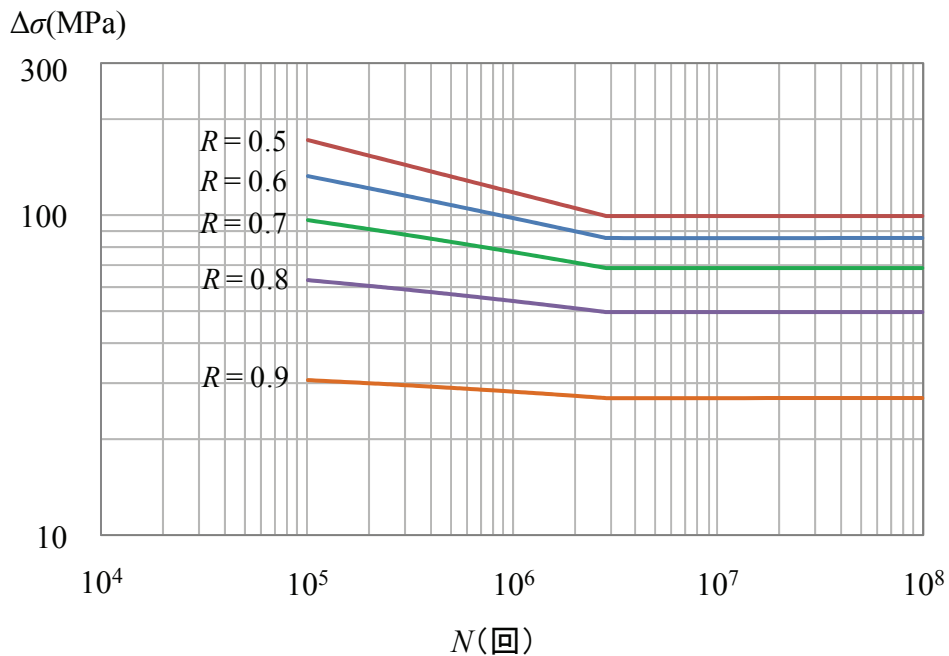


図-6 疲労強度曲線

(3) 設計疲労強度曲線

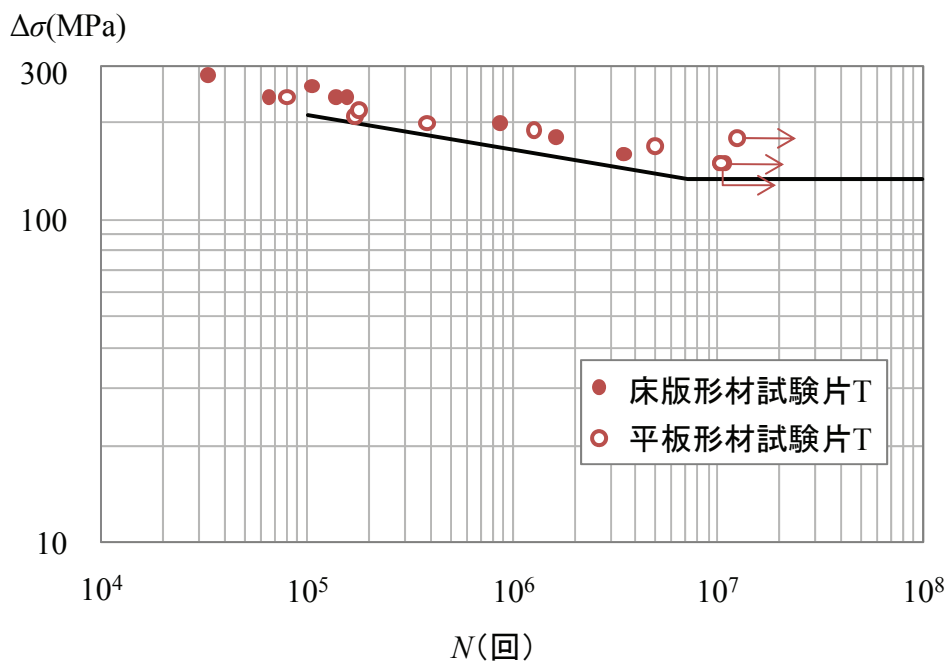
式(6), (8), (11), (12), (17), (18)の $\log c$ と $\Delta\sigma_{w0}$ に対して、試験値のバラツキ ($\log N$ に関する標準偏差の2倍)を考慮した値、さらに、 σ_{jB} と $\sigma_{j0.2}$ に対して、アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針案¹⁶⁾ (以後、JAA 指針と呼ぶ)で規定される、A6005C-T5 (後述の表-2 参照) に対する値を用いて、表-1 に示す設計疲労強度曲線が与えられる。

表-1 摩擦攪拌接合部の接合線直角方向の設計疲労強度曲線

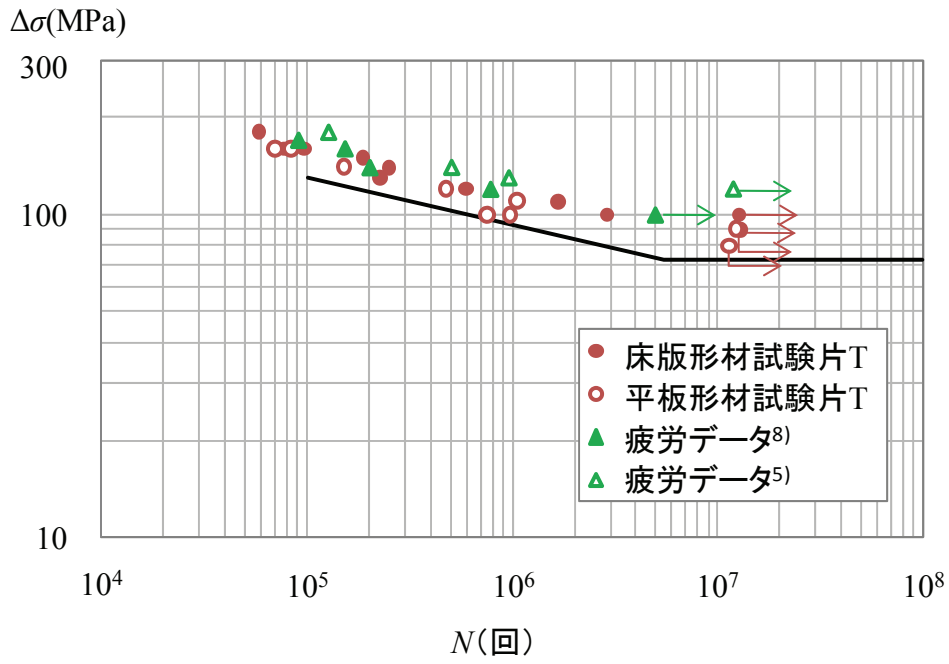
設計疲労限度	
$-1 \leq R \leq 0.1$ ($72.7 \leq \Delta\sigma_{caf} \leq 133$)	$\Delta\sigma_{caf} = \frac{133(1-R)}{1.6786 - 0.3214R}$
$0.1 < R \leq 1$ ($0 \leq \Delta\sigma_{caf} \leq 72.7$)	$\Delta\sigma_{caf} = \frac{99.0(1-R)}{1.2966 - 0.7034R}$
設計 S-N 曲線 ($N \geq 10^5$)	
$-1 \leq R \leq 0.1$	$\Delta\sigma = \left(\frac{10^{20.486-6.38R}}{N} \right)^{\frac{1}{7.25-2.16R}}$
$0.1 < R \leq 0.5$	$\Delta\sigma = \left(\frac{10^{20.692-8.44R}}{N} \right)^{\frac{1}{7.25-2.16R}}$
$0.5 < R < 1$	$\Delta\sigma = \left\{ \frac{167(1-R)}{1.3089 - 0.3089R} \right\} \left(\frac{10^5}{N} \right)^{\frac{1}{m}}$ $m = \frac{0.8823}{\log \frac{4.0822 - 2.0822R}{2.3758 - 0.3758R}}$

$\Delta\sigma_{caf}$ と $\Delta\sigma$ の単位 : MPa

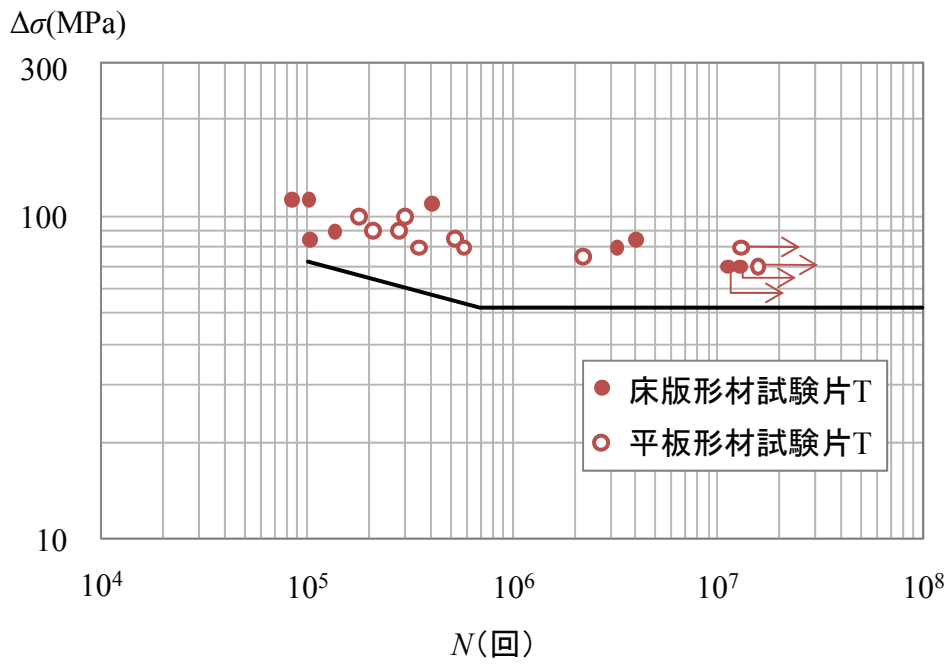
設計疲労強度曲線と試験結果との比較を図-7に示す。床版形材試験片 T と平板形材試験片 T の結果は文献 4), 11), さらに図-7(b)の $R=0.1$ に対しては, 文献 5), 8) から引用した試験結果も示してある。各図で, 設計疲労限度曲線が試験結果の下限値付近を通過していることが分かる。



(a) $R = -1$



(b) $R = 0.1$



(c) $R = 0.5$

図-7 設計疲労強度曲線と試験値の比較

3. 摩擦攪拌接合部の接合線方向の設計疲労強度曲線

(1) 母材の応力比と接合部の応力比の関係¹⁴⁾

1. で述べたように、QIFSW ガイドラインの2010年版²⁾では、応力が作用する方向に対応して、摩擦攪拌接合部の疲労試験を実施することが規定されている。すなわち、応力が作用する方向に対応して、摩擦攪拌接合部の疲労試験片を3本作製し、3本の試験片の疲労寿命が、表-1の $R = 0.1$ に対する設計S-N曲線が与える疲労寿命より長く、その内の2本の疲労寿命が、この設計S-N曲線に対応する平均S-N曲線が与える疲労寿命より長くなることが規定されている。したがって、QIFSW ガイドラインの2010年版²⁾の品質検査を満足する摩擦攪拌接合部の接合線方向の疲労強度は、表-1の設計疲労強度曲線を満足する。

6000系アルミニウム合金は熱処理合金であるため摩擦攪拌接合部は強度低下を起こす。したがって、接合線方向に生じる母材の応力範囲と接合部の応力範囲が同じであっても、母材に生じる上限応力と下限応力は接合部に生じるそれらと異なり、母材の応力比と接合部の応力比も異なる。

QIFSW ガイドラインの2010年版²⁾の品質検査で使用される疲労試験片は、摩擦攪拌接合による強度低下を起こした接合部分のみから成る小型試験片であり、残留応力を有さない。したがって、接合部の強度低下と残留応力を考慮して、表-1の設計疲労強度曲線を母材の応力比で表す必要がある。次に、母材の応力比と接合部の応力比の関係について考察する。

母材と接合部の応力-ひずみ関係は次式で与えられる¹⁰⁾。

母材に対して、

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0.2}} \right)^n \quad (19)$$

接合部に対して、

$$\varepsilon_j = \frac{\sigma_j}{E} + 0.002 \left(\frac{\sigma_j}{\sigma_{j0.2}} \right)^{n_j} \quad (20)$$

ここに、 ε と σ : それぞれ母材に生じるひずみと応力
 ε_j と σ_j : それぞれ接合部に生じるひずみと応力
 E : ヤング係数
 $\sigma_{0.2}$ と $\sigma_{j0.2}$: それぞれ母材と接合部の0.2%耐力
 n と n_j : それぞれ母材と接合部のひずみ硬化パラメータの値

摩擦攪拌接合部の接合線方向に応力を受ける部材の母材と接合部の応力-ひずみ関係をそれぞれ図-8(a)、(b)に示す。荷重が載荷されていないとき、母材の応力とひずみは図-8(a)の原点Aにある。

接合線方向には、摩擦攪拌接合によって引張残留応力 σ_{jr} が生じる。この残留応力に対する残留ひずみ ε_{jr} は次式で与えられる。

$$\varepsilon_{jr} = \frac{\sigma_{jr}}{E} \quad (21)$$

ここに、 ε_{jr} : 接合部に生じる引張残留応力に対する残留ひずみ
 σ_{jr} : 接合部に生じる引張残留応力

荷重が載荷されていないとき、接合部の応力とひずみは図-8(b)の点A_jにある。点A_jのひずみは ε_{jr} である。荷重を上限荷重まで増加させると、母材の応力とひずみは原点Aから点Bに移動する。ここで、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、接合部の応力とひずみは点A_jから点B_jに移動する。点B_jでは式(20)より次式が成立する。

$$\varepsilon_{jr} + \varepsilon_L = \frac{\sigma_{j\max}}{E} + 0.002 \left(\frac{\sigma_{j\max}}{\sigma_{j0.2}} \right)^{n_j} \quad (22)$$

ここに、 $\sigma_{j\max}$: 接合部に生じる上限応力

母材の応力-ひずみ関係の比例限 σ_p は、これまで、慣習的に0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ の0.8倍とされている。図-8(a)に示すように、 $\sigma_p = 0.8\sigma_{0.2}$ 以下では応力-ひずみ関係は直線である。そこで上限荷重に対して母材に生じる上限応力 σ_{\max} は次の制限を受ける。

$$\sigma_{\max} \leq \sigma_p = 0.8\sigma_{0.2} \quad (23)$$

式(23)の制限を受ける σ_{\max} に対して、母材に生じるひずみ ε_L は次式で与えられる。

$$\varepsilon_L = \frac{\sigma_{\max}}{E} \quad (24)$$

式(21)と(24)を式(22)に代入して次式を得る。

$$\sigma_{jr} + \sigma_{\max} = \sigma_{j\max} + 0.002E \left(\frac{\sigma_{j\max}}{\sigma_{j0.2}} \right)^{n_j} \quad (25)$$

荷重を上限荷重まで載荷した後、下限荷重まで除荷すると、図-8(a)において、母材の応力とひずみは点Bから点Cに移動する。これに対して、接合部の応力とひずみは、図-8(b)に示すように、ヤング係数 E の直線上を点B_jから点C_jに移動する。その後、母材に対して応力範囲が $\Delta\sigma$ の繰返し荷重が載荷されると、母材の応力とひずみはBC間を変動し、接合部の応力とひずみは、母材と同じ応力範囲 $\Delta\sigma$ でB_jC_j間を変動する。したがって、接合部の応力比 R は次式で与えられる。

$$R = \frac{\sigma_{j\max} - \Delta\sigma}{\sigma_{j\max}} = 1 - \frac{\Delta\sigma}{\sigma_{j\max}} \quad (26)$$

式(26)を $\sigma_{j\max}$ について解いて次式を得る。

$$\sigma_{j\max} = \frac{\Delta\sigma}{1-R} \quad (27)$$

他方、母材の上限応力 σ_{\max} は、母材に生じる応力比 R_n を用いて、次式で与えられる。

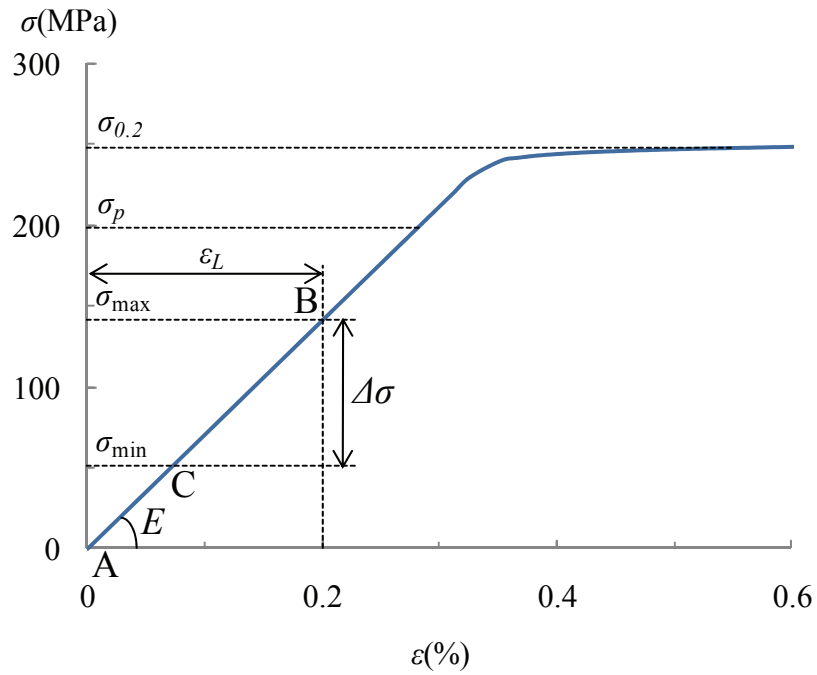
$$\sigma_{\max} = \frac{\Delta\sigma}{1-R_n} \quad (28)$$

式(27)と(28)を式(25)に代入して、母材の応力比 R_n と接合部の応力比 R の関係が次式で与えられる。

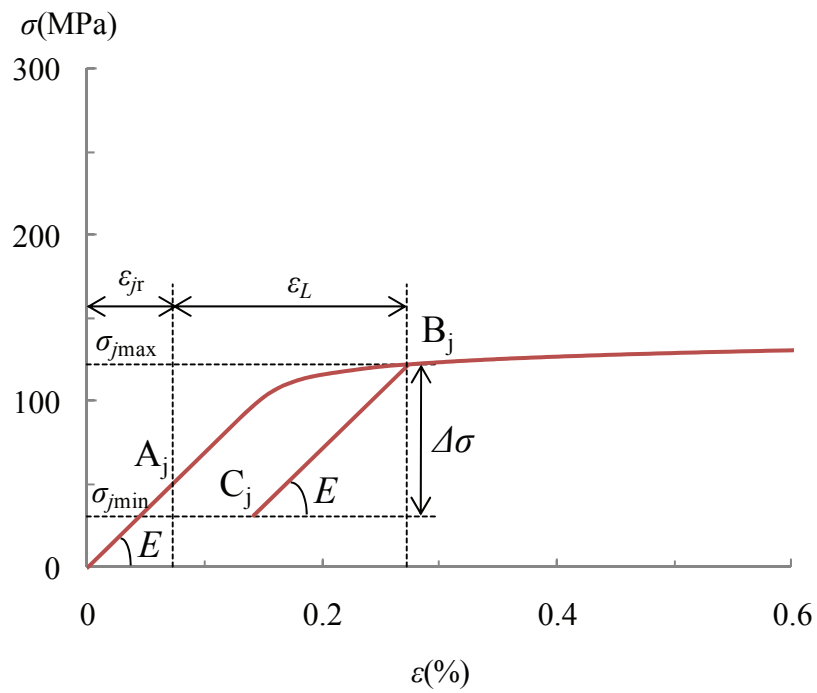
$$\sigma_{jr} + \left(\frac{1}{1-R_n} - \frac{1}{1-R} \right) \Delta\sigma = 0.002E \left\{ \frac{\Delta\sigma}{\sigma_{j0.2}(1-R)} \right\}^{n_j} \quad (29)$$

式(28)の σ_{\max} は式(23)の制限を受けるので、 $\Delta\sigma$ は次の制限を受ける。

$$\Delta\sigma \leq \sigma_p(1-R_n) = 0.8\sigma_{0.2}(1-R_n) \quad (30)$$



(a) 母材



(b) 摩擦撹拌接合部

図-8 母材と摩擦撹拌接合部の応力-ひずみ関係

(2) 疲労強度曲線¹⁴⁾

式(29)の $\Delta\sigma$ を $\Delta\sigma_{caf}$ に置き換え、さらに、表-1 の設計疲労限度を与える各式の R を、式(29)の R に代入して次式を得る。

$0 \leq \Delta\sigma_{caf} < 72.7$ MPa ($0.1 < R \leq 1$) に対して、

$$\sigma_{jr} + \frac{\Delta\sigma_{caf}}{1-R_n} = 166.9 - 1.1858\Delta\sigma_{caf} + 0.002E \left(\frac{166.9 - 1.1858\Delta\sigma_{caf}}{\sigma_{j0.2}} \right)^{n_j} \quad (31)$$

$72.7 \leq \Delta\sigma_{caf} \leq 133$ MPa ($-1 \leq R \leq 0.1$) に対して、

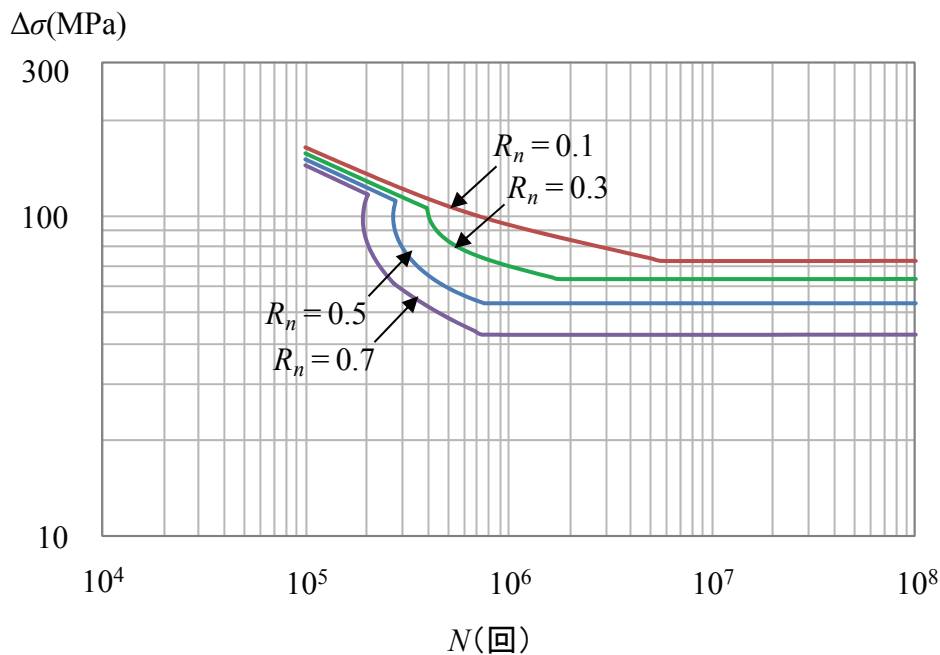
$$\sigma_{jr} + \frac{\Delta\sigma_{caf}}{1-R_n} = 98.0 - 0.2368\Delta\sigma_{caf} + 0.002E \left(\frac{98.0 - 0.2368\Delta\sigma_{caf}}{\sigma_{j0.2}} \right)^{n_j} \quad (32)$$

ここに、 $\Delta\sigma_{caf}$, $\sigma_{j0.2}$, σ_{jr} , E の単位 : MPa

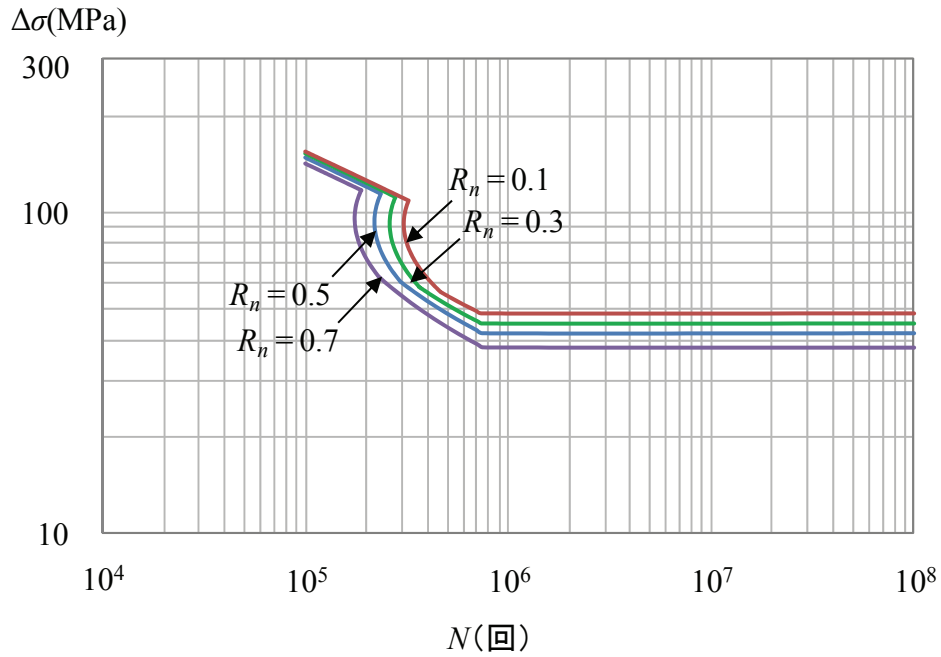
式(31)と(32)の各式を数値計算で解くことにより、摩擦攪拌接合部の接合線方向の疲労限度が母材の応力と与えられる。

他方、表-1 の設計 S-N 曲線を与える各式と式(29)から数値計算により R を消去することにより、摩擦攪拌接合部の接合線方向の S-N 曲線が母材の応力と与えられる。

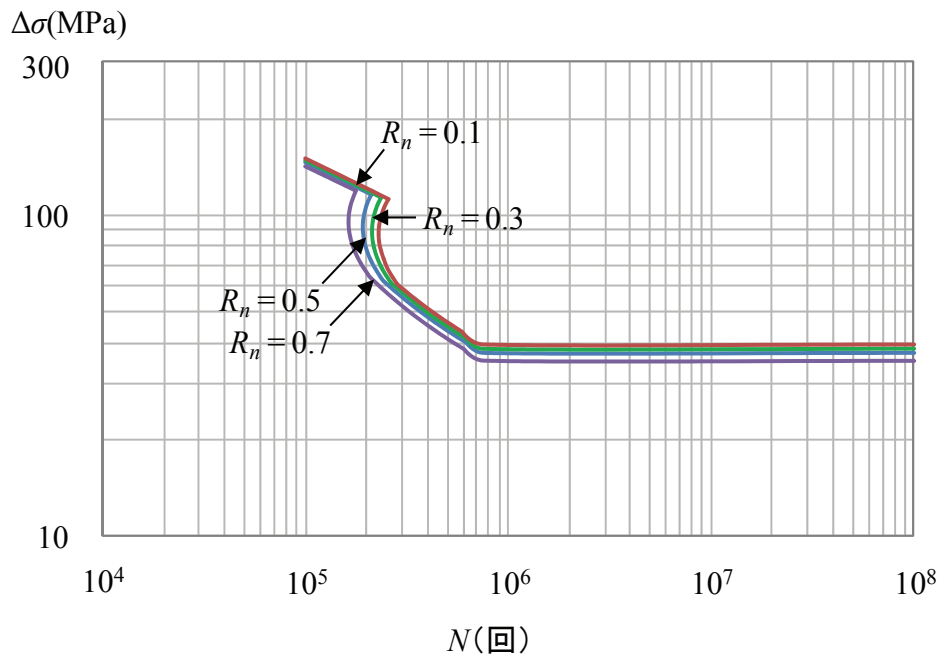
式(31)と(32)および表-1 の設計 S-N 曲線と式(29)が与える疲労強度曲線を図-9 に示す。式(29), (31), (32)の E , $\sigma_{j0.2}$, n_j に、それぞれ 70GPa, 126MPa, 21.5 を用いている。図-9 の各図は、残留応力 σ_{jr} の大きさによって異なり、 $\sigma_{jr}=0, 63, 126$ MPa は、それぞれ、 $\sigma_{j0.2}=126$ MPa に対して 0, 0.5, 1 倍である。 R_n が大きくなるに従って、疲労強度曲線は低下するが、 σ_{jr} が大きくなるに従って、 R_n が疲労強度曲線に与える影響は小さくなる。



(a) $\sigma_{jr}=0$ MPa



(b) $\sigma_{jr}=63 \text{ MPa}$



(c) $\sigma_{jr}=126 \text{ MPa}$

図-9 母材の応力比と残留応力が疲労強度曲線に与える影響

接合部の0.2%耐力が疲労強度曲線に与える影響を図-10に示す。式(29), (31), (32)の E , n_j , R_n に、それぞれ70GPa, 21.5, 0.5を用いる。接合部の0.2%耐力 $\sigma_{j0.2}$ に対して98MPa, 126MPa, 150MPaを考慮し、残留応力 σ_{jr} に対して $\sigma_{j0.2}$ を用いる。図-10から分かるように、 $\sigma_{j0.2}$ が大きくなるに従って疲労強度は低下

する。

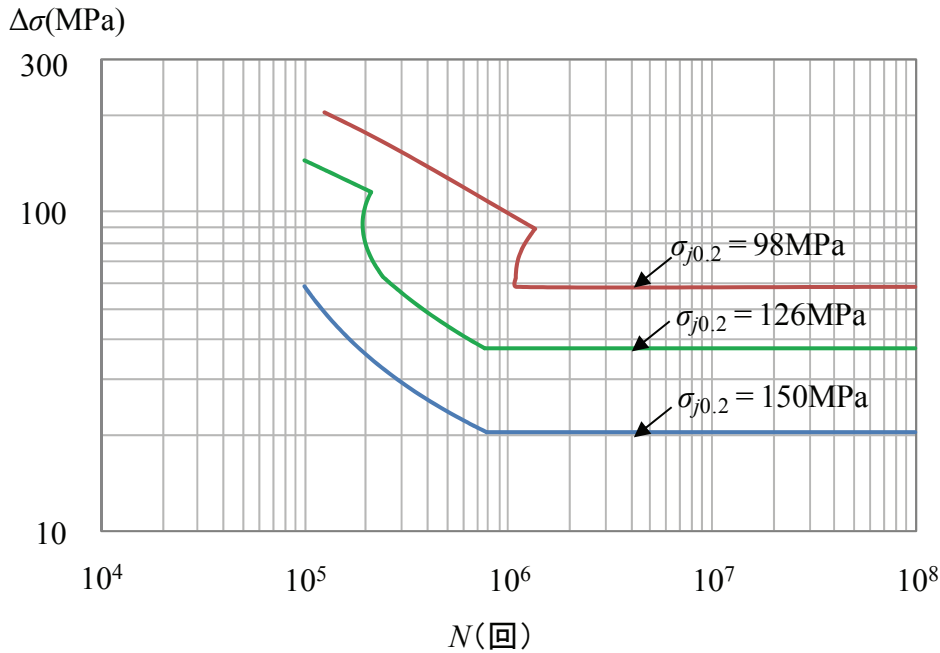


図-10 接合部の0.2%耐力が疲労強度曲線に与える影響

(3) 設計疲労強度曲線

図-9 と 10 に示すような複雑な形状を示す疲労強度曲線は設計実務での使用に向かない。そこで、設計実務での使用に適す、摩擦攪拌接合部の接合線方向の設計疲労強度曲線を次に提案する。

図-8(b)から分かるように、摩擦攪拌接合部の接合線方向に発生する引張残留応力 σ_r が大きくなるに従って、接合部に生じる上限応力 σ_{max} は接合部の 0.2%耐力 $\sigma_{j0.2}$ に近づく。したがって式(26)で与えられる、接合部に生じる応力比 R は次式に近づく。

$$R = 1 - \frac{\Delta\sigma}{\sigma_{j0.2}} \quad (33)$$

式(33)の $\Delta\sigma$ を $\Delta\sigma_{caf}$ に置き換えた式を式(8)に代入して、 $\Delta\sigma_{caf}$ について解いて次式を得る。

$$\Delta\sigma_{caf} = \frac{2A}{1-A} (\sigma_{jB} - \sigma_{j0.2}) \quad (34)$$

式(34)は、接合部の引張強度 σ_{jB} と 0.2%耐力 $\sigma_{j0.2}$ 、さらに $R = -1$ に対する疲労限度 $\Delta\sigma_{w0}$ を含む。JAA 指針¹⁶⁾で規定されるアルミニウム合金 A6005C-T5 と A6061-T6 の σ_{jB} と $\sigma_{j0.2}$ の値を表-2 に示す。これらの値と $\Delta\sigma_{w0}$ に対して、試験値のバラツキ ($\log N$ に関する標準偏差の 2 倍) を考慮した値 133MPa¹⁴⁾ を式(34) に代入して得られる $\Delta\sigma_{caf}$ の値およびこの値に対応する応力比の値を表-2 に示す。A6061-T6 の $\Delta\sigma_{caf}$ が A6005C-T5 のそれより低いので、56 MPa を摩擦攪拌接合部の接合線方向の設計疲労限度として採用する。

A6061-T6 の $\Delta\sigma_{caf} = 56$ MPa に対応する応力比 $R = 0.477$ を表-1 の設計 S-N 曲線に代入して次式を得る。

$$\Delta\sigma = \frac{478}{N^{0.161}} \quad (35)$$

式(35)は、最も高い応力比に対する S-N 曲線であり、これを摩擦攪拌接合部の接合線方向の設計 S-N 曲

線として採用する。

設計疲労限度 56 MPa と式(35)の設計 S-N 曲線から成る設計疲労強度曲線と試験値との比較を図-11 に示す。試験値は、アルミニウム床版の疲労試験結果である⁴⁾。さらに図-11 には、JAA 疲労設計ガイドライン¹³⁾で規定される、摩擦攪拌接合部の接合線方向の設計疲労強度曲線も示してある。この設計疲労強度曲線は、IIW 疲労指針¹⁷⁾で規定される、MIG 溶接による突合せ溶接部の接合線方向に応力を受ける場合に対する設計疲労強度曲線であり、摩擦攪拌接合部の疲労試験結果に基づくものではない。

図-11 から分かるように、試験値の疲労限度は提案曲線に近いが、試験値の S-N 関係は JAA 疲労設計ガイドラインの曲線に近い。摩擦攪拌接合部の接合線方向の設計疲労強度曲線を決定するためには、摩擦攪拌接合で製作された実寸大のアルミニウム合金部材の疲労強度データ・ベースを今後構築する必要がある。そして、疲労強度を得るための疲労試験は、0.477 より高い応力比で実施されなければならない。

表-2 σ_B , $\sigma_{0.2}$, $\Delta\sigma_{caf}$, R の値

アルミニウム合金	σ_B (MPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{caf}$ (MPa)	R
A6005C-T5	167	98	58	0.406
A6061-T6	177	108	56	0.477

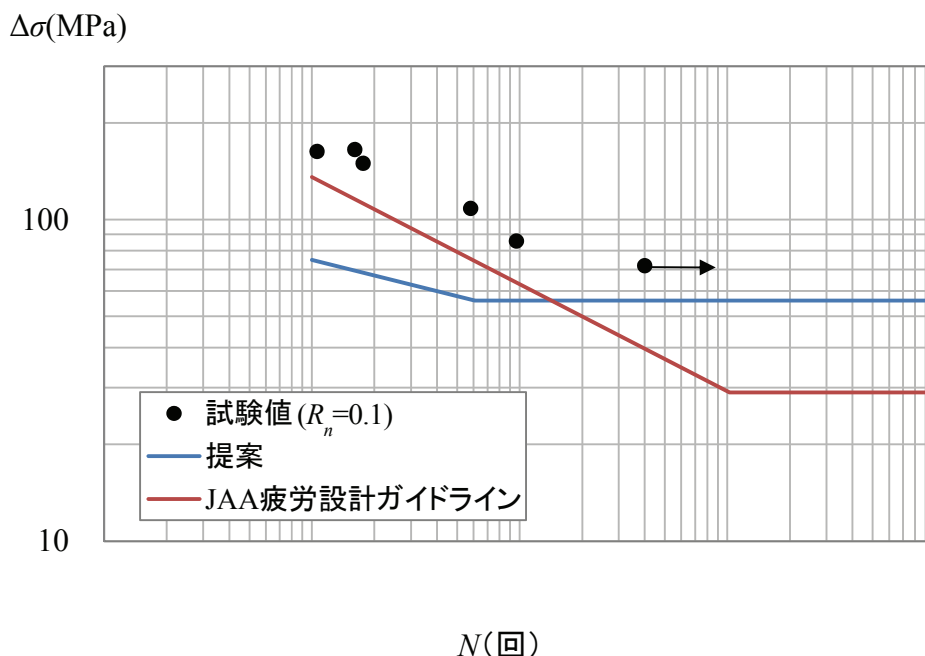


図-11 設計疲労強度曲線と試験値との比較

4. 結論

摩擦攪拌接合部には余盛りが生じないので、摩擦攪拌接合部は MIG 溶接部より格段に滑らかである。さらに、キッシングボンドが排除された摩擦攪拌接合部には初期亀裂が存在しない。したがって、MIG 溶接部の疲労寿命は亀裂の伝播寿命に支配されるが、摩擦攪拌接合部の疲労寿命は亀裂の発生寿命に支配される。摩擦攪拌接合部の接合線直角方向の設計疲労限度が、平滑材の疲労限度を評価する際に使用される Gerber 線および修正 Goodman 線を考慮して設定された。

摩擦攪拌接合部の接合線方向の疲労強度には、母材の応力比、残留応力、接合部の 0.2%耐力が影響する。理論的に誘導した式が与える疲労強度曲線は複雑な形状を示し、設計実務での使用に向かない。そこで、

設計実務での使用に適す設計疲労強度曲線を提案した。摩擦撹拌接合部の接合線方向の設計疲労強度曲線を決定するためには、摩擦撹拌接合で製作された実寸大のアルミニウム合金部材の疲労強度データ・ベースを構築する必要があること、そして、疲労強度を得るための疲労試験は、0.477 より高い応力比で実施されなければならないことを指摘した。

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：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.
- 3) 日本アルミニウム協会 土木構造物委員会：アルミニウム合金の摩擦撹拌接合部の品質検査指針（案），2004.
- 4) 大倉一郎，萩澤亘保，鳴尾亮，戸田均：摩擦撹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.
- 5) 萩澤亘保，大倉一郎，花崎昌幸，大西弘志，佐藤正典：アルミニウム合金材の母材と摩擦撹拌接合部の疲労強度に腐食が与える影響，土木学会論文集 A，Vol.62，No.3，pp.478-488，2006.
- 6) 大倉一郎，長尾隆史，萩澤亘保：アルミニウム床版の移動トラックタイヤ載荷試験による疲労耐久性評価，構造工学論文集，Vol.56A，pp.1217-1226，2010.
- 7) 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指針（案），2008.
- 8) Kainuma, S., Katsuki, H., Iwai, I. and Kumagi, M.: Evaluation of fatigue strength of friction stir butt-welded aluminum alloy joints inclined to applied cyclic stress, International Journal of Fatigue, Vol.30, Issue 5, pp.870-876, 2008.
- 9) 大倉一郎，牧山大祐：両面摩擦撹拌接合で接合された摩擦撹拌接合部の疲労強度，ALST 研究レポート，No.17，2010.
- 10) 大倉一郎，長尾隆史，石川敏之，萩澤亘保，大隅心平：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.
- 11) 萩澤亘保，大倉一郎：アルミニウム合金 A6005C-T5 の母材と摩擦撹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.
- 12) 大倉一郎，牧山大祐，萩澤亘保：アルミニウム合金 A6005C-T5 の母材と摩擦撹拌接合部の設計 S-N 曲線，ALST 研究レポート，No.6，2009.
- 13) 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.
- 14) 大倉一郎，牧山大祐：6000 系アルミニウム合金材の摩擦撹拌接合部の設計疲労強度曲線，ALST 研究レポート，No.21，2011.
- 15) 日本材料学会 疲労部門委員会：初心者のための疲労設計法，pp.21-22，2004.
- 16) 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設計・製作指針（第 1 次改定試案），1998.
- 17) IIW: Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components, IIW Fatigue Recommendations XIII-1965-03/XV-1127-03, 2004.