

強度低下と残留応力を考慮した
6000系アルミニウム合金材の摩擦攪拌接合部の疲労強度

ALST 研究レポート 19

2010年9月

大阪大学大学院工学研究科

大倉一郎，牧山大祐

概要

本研究では、6000系アルミニウム合金材の摩擦攪拌接合部の接合線方向に対して、接合部の応力比と母材の応力比の関係を与え、接合部の疲労強度を母材の応力で表す。接合部の強度低下および残留応力が、母材の応力で表された接合線方向の疲労強度に与える影響を明らかにする。さらに、母材の応力で表された接合部の接合線方向の疲労強度の算定式を与える。

目次

第1章	序論	1
第2章	接合部の疲労強度	2
第3章	強度低下と残留応力を考慮した接合部の疲労強度	5
	3.1 母材と接合部の応力－ひずみ関係	5
	3.2 接合線方向の残留応力	7
	3.3 接合部の応力範囲と応力比	8
	3.4 母材の応力で表された接合線方向の疲労強度	11
	3.5 アルミニウム床版試験体の疲労強度との比較	12
第4章	残留応力と母材の応力比が疲労強度に与える影響	13
第5章	接合線方向の疲労強度の算定式	15
	5.1 疲労限度	15
	5.2 S-N 曲線	19
第6章	結論	23
	参考文献	24
付録 A	アルミニウム床版試験体の疲労試験結果	25
付録 B	疲労強度の比較	30

第1章 序論

近年、耐用年数を考慮に入れたライフサイクルコストを重視する傾向から、社会基盤構造物に軽量で、耐食性に優れたアルミニウム合金の適用が期待されている。既に、アルミニウム合金製の歩道橋および歩道用アルミニウム床版が建設されており、今後、道路橋へのアルミニウム合金の適用が考えられる¹⁾。

歩道橋および歩道用アルミニウム床版では疲労の影響を考慮する必要はないが、道路橋では疲労の影響を考慮しなければならない。従来、アルミニウム合金材の接合にはMIG溶接が使用されてきたが、MIG溶接部の疲労強度は低いので、MIG溶接を用いた道路橋の設計は困難である²⁾。これに対して、近年使用されるようになってきた摩擦攪拌接合による接合部の疲労強度はMIG溶接部のそれより高い³⁾。したがって、アルミニウム合金製の道路橋の設計には摩擦攪拌接合が必須である。

このような状況を受けて、6000系アルミニウム合金土木構造物の母材および摩擦攪拌接合部の疲労設計ガイドライン⁴⁾（以下、FSW疲労設計ガイドラインと呼ぶ）が日本アルミニウム協会から発刊された。鋼材の溶接部には降伏応力に達する引張残留応力が生じるので、結果として、応力比の影響を考慮しないで、鋼材の溶接部の疲労強度は応力範囲のみで評価される。しかし、アルミニウム合金材の摩擦攪拌接合部の接合線直角方向には小さな圧縮残留応力が生じ、接合線方向には接合部の0.2%耐力の半分程度の引張残留応力が生じる^{3,5)}。したがって、摩擦攪拌接合部の疲労強度の評価には、接合線直角方向および接合線方向ともに応力比の影響が考慮されなければならない。

6000系アルミニウム合金は熱処理によって強度が高められているので、摩擦攪拌接合によって接合部は強度低下を起こす。しかし、接合線直角方向に対しては、荷重の作用によって母材に生じる応力と接合部に生じる応力は同じであるため、小さな圧縮の残留応力を無視すれば、母材と接合部の応力比は等しい。したがって、FSW疲労設計ガイドラインでは、小型試験片の疲労試験結果^{3), 6)-8)}に基づいて、接合線直角方向の疲労強度が規定されている。

これに対して、摩擦攪拌接合部の接合線方向に対しては、荷重の作用によって母材と接合部に生じるひずみは同じであるが、接合部が強度低下を起こすため、生じる応力の大きさは母材と接合部で異なる。さらに、接合部には引張の残留応力が存在するので、母材と接合部の応力比は異なる。現在、母材と接合部の応力比の関係は明らかにされていない。したがって、FSW疲労設計ガイドラインでは、IIW疲労設計指針⁹⁾における、MIG溶接による突合せ溶接部の溶接線方向の疲労強度で、摩擦攪拌接合部の接合線方向の疲労強度を代用している。

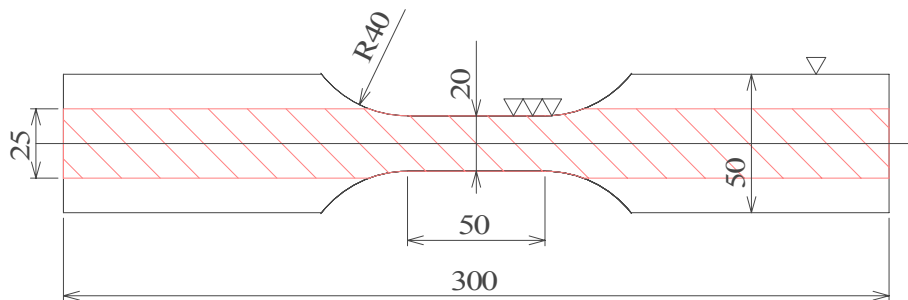
本研究では、6000系アルミニウム合金材の摩擦攪拌接合部の接合線方向に対して、接合部の応力比と母材の応力比の関係を与え、接合部の疲労強度を母材の応力で表す。接合部の強度低下および残留応力が、母材の応力で表された接合線方向の疲労強度に与える影響を明らかにする。さらに、母材の応力で表された接合部の接合線方向の疲労強度の算定式を与える。

第 2 章 接合部の疲労強度

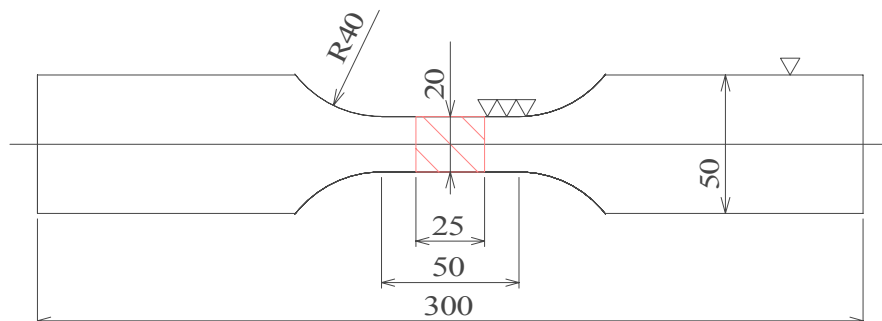
過去製作された実物大のアルミニウム床版試験体から切り出された小型試験片に対して疲労試験が実施された（付録 A 参照）。小型試験片は、図 1 に示すように、接合線方向に応力を受ける小型試験片 L と、接合線直角方向に応力を受ける小型試験片 T の 2 種類である。摩擦攪拌接合のショルダーの直径が 25mm であったので、ショルダーの回転跡の幅は 25mm である。図 1 (a) の小型試験片 L では、試験片の平行部の幅が 20mm であるので、ショルダーの回転跡の両脇にできるバリが試験片から削除されている。

小型試験片 T に対して応力比 R が -1, 0.1, 0.5 で疲労試験が実施された。小型試験片 L に対して、 R が 0.1 と 0.5 で疲労試験が実施されたが、その後、 $R=0.5$ に対する試験結果は、ロードセルが正しくない疲労試験機によるものであることが判明した。したがって、小型試験片 L に対する試験結果は $R=0.1$ に対するもののみが信頼できる。

$R=0.1$ に対する小型試験片 L と T の疲労強度の比較を図 2 に示す（数値データは付録 A の表 A.1 参照）。同図には、表 1 に示される、接合線直角方向の設計疲労限度と設計 S-N 曲線⁸⁾も描いてある。小型試験片 T の疲労強度が小型試験片 L の疲労強度より低いので、小型試験片 T の疲労強度は小型試験片 L の疲労強度を安全側に評価する。したがって、 $-1 \leq R \leq 1$ の範囲に対する小型試験片 L の設計疲労限度および設計 S-N 曲線に対して、表 1 に示される、接合線直角方向の設計疲労限度と設計 S-N 曲線を使用する。



(a) 小型試験片 L



(b) 小型試験片 T

図 1 小型試験片

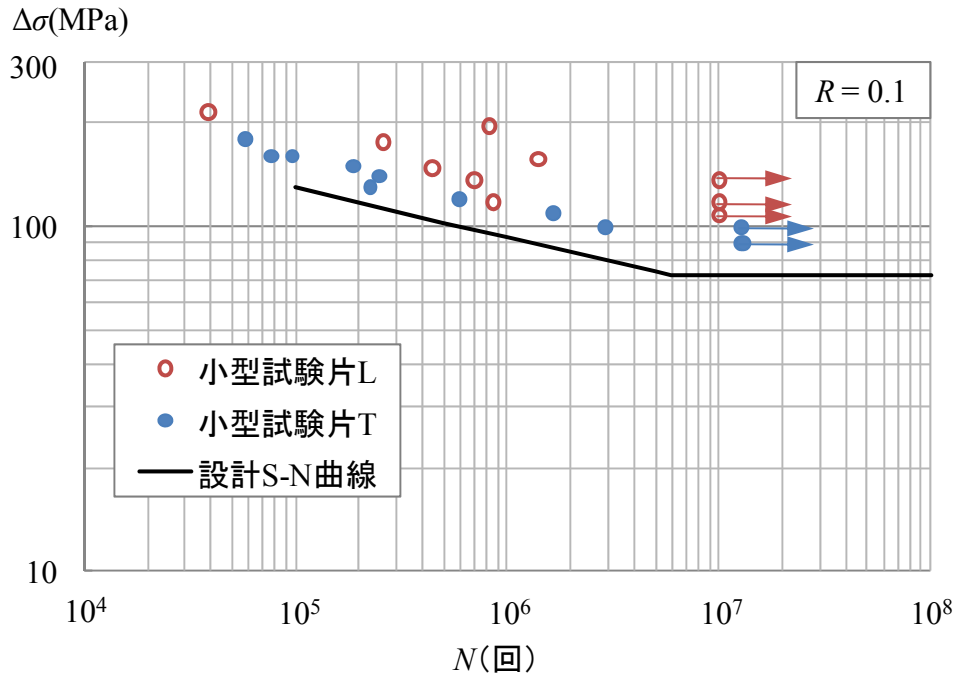


図2 小型試験片LとTの疲労強度の比較

表1 接合線直角方向の設計疲労限度と設計S-N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	
$-1 \leq R \leq 0.1$	$\Delta\sigma = \left(\frac{10^{20.486 - 6.38R}}{N} \right)^{\frac{1}{7.25 - 2.16R}}$
$0.1 < R \leq 0.5$	$\Delta\sigma = \left(\frac{10^{20.692 - 8.44R}}{N} \right)^{\frac{1}{7.25 - 2.16R}}$
$0.5 < R < 1$	$\Delta\sigma = \left\{ \frac{167(1-R)}{1.3089 - 0.3089R} \right\} \left(\frac{10^5}{N} \right)^{\frac{1}{m}}$ $m = \frac{0.8823}{\log \frac{4.0822 - 2.0822R}{2.3758 - 0.3758R}}$

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

表 1 で与えられる設計疲労限度と設計 S-N 曲線を図 3 に示す. 設計疲労限度と設計 S-N 曲線が交差する N の値は, $-1 \leq R \leq -0.1$ に対して R が大きくなるに従って減少するが, $-0.1 < R \leq 0.1$ に対して R が大きくなるに従って増加する. そして, 設計疲労限度と設計 S-N 曲線が交差する N の値は, $0.1 < R \leq 0.5$ に対して R が大きくなるに従って再び減少し, $0.5 < R \leq 0.8$ の対して R に関わらず一定となる. 設計 S-N 曲線の傾きは, $-1 \leq R \leq 0.5$ に対して R が大きくなるに従って急になり, $0.5 < R \leq 0.8$ に対して R が大きくなるに従って緩やかになる.

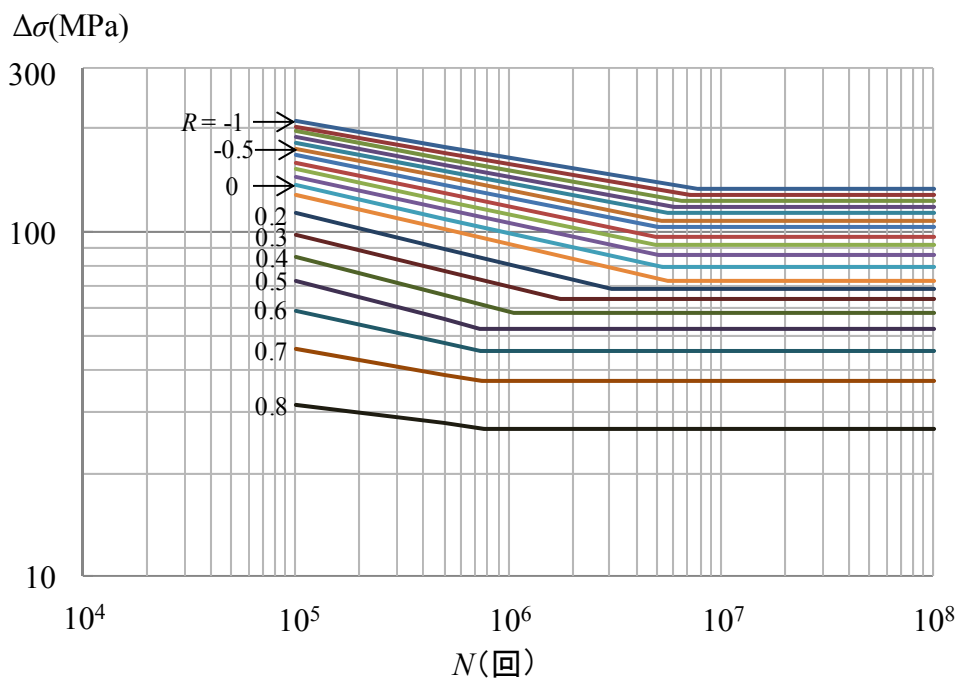


図 3 設計疲労限度と設計 S-N 曲線

第3章 強度低下と残留応力を考慮した接合部の疲労強度

3.1 母材と接合部の応力-ひずみ関係

過去実施された疲労試験で使用されたアルミニウム床版試験体のアルミニウム合金 A6005C-T5 の母材および接合部の接合線方向の応力-ひずみ関係を図4に示す⁵⁾。同図の曲線Aは次式で与えられる。

母材に対して

$$\begin{cases} \varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0.2}} \right)^n & (\sigma \leq \sigma_{0.2}) \\ \sigma = \sigma_{0.2} & (\sigma > \sigma_{0.2}) \end{cases} \quad (1)$$

接合部に対して

$$\begin{cases} \varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{j0.2}} \right)^{n_j} & (\sigma \leq \sigma_{j0.2}) \\ \sigma = \sigma_{j0.2} & (\sigma > \sigma_{j0.2}) \end{cases} \quad (2)$$

- ここに、 ε : ひずみ
 σ : 応力
 E : ヤング係数
 $\sigma_{0.2}$: 母材の0.2%耐力
 $\sigma_{j0.2}$: 接合部の0.2%耐力
 n : 母材のひずみ硬化パラメータの値
 n_j : 接合部のひずみ硬化パラメータの値

ひずみ硬化パラメータ n と n_j はそれぞれ次式により決定される。

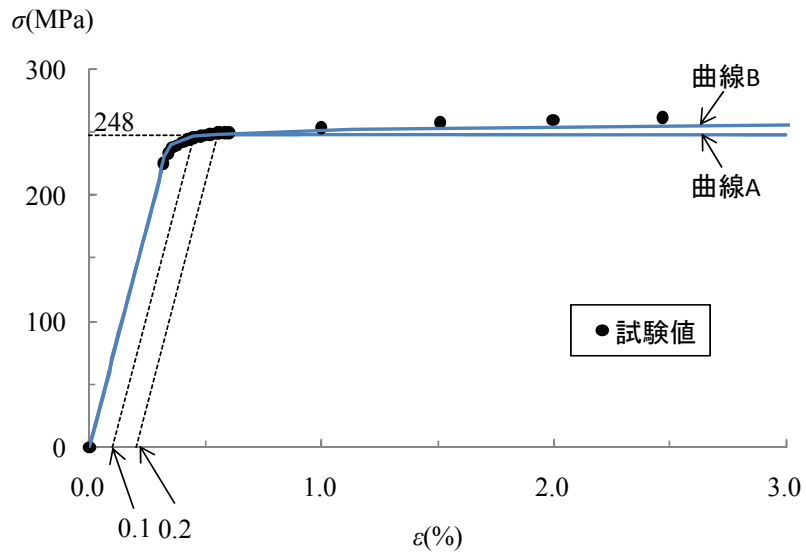
$$n = \frac{\ln 2}{\ln \left(\frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_{0.1}} \right)} \quad (3)$$

$$n_j = \frac{\ln 2}{\ln \left(\frac{\sigma_{j0.2}}{\sigma_{j0.1}} \right)} \quad (4)$$

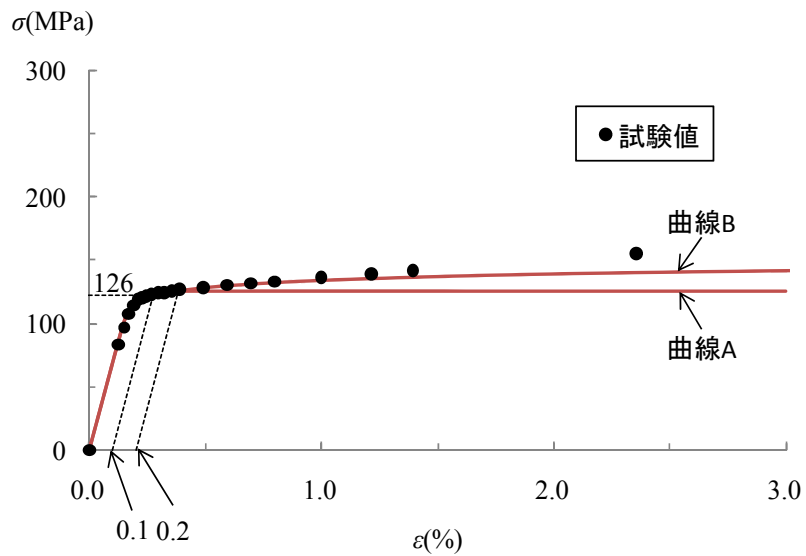
- ここに、 $\sigma_{0.1}$: 母材の0.1%耐力
 $\sigma_{j0.1}$: 接合部の0.1%耐力

式(1)と(2)は、アルミニウム合金構造物の耐荷力を算定する際に使用される応力-ひずみ関係である⁵⁾。式(1)と(2)の中のヤング係数、0.1%耐力、0.2%耐力、ひずみ硬化パラメータの値を表2に示す³⁾。図4の曲線Aは、0.2%耐力以下で試験値によく合っている。しかし、0.2%耐力以上では、曲線Aは水平線になるが、試験値はわずかに増加している。そこで式(1)と(2)の各式の下段の式を無視して、各式の上段の式を、0.2%耐力を超えても適用できると仮定して描いた曲線が曲線Bである。母材および接合部とも、曲線Bの方が曲線Aより試験値をよく近似している。したがって本研究では、母材および接合部の応力-ひずみ関係として、式(1)と(2)の各式の上段の式において、 $\sigma \leq \sigma_{0.2}$ および $\sigma \leq \sigma_{j0.2}$ の

適用範囲を削除したものとする。



(a) 母材



(b) 接合部

図4 母材と接合部の応力-ひずみ関係

表2 ヤング係数, 0.1%耐力, 0.2%耐力, ひずみ硬化パラメータの値

対象	E (GPa)	$\sigma_{0.1}$ または $\sigma_{j0.1}$ (MPa)	$\sigma_{0.2}$ または $\sigma_{j0.2}$ (MPa)	n または n_j
母材	70.7	246	248	85.6
接合部	69.1	122	126	21.5

3.2 接合線方向の残留応力

アルミニウム床版試験体の下フランジの摩擦攪拌接合部の接合線方向の残留応力³⁾を図5に示す(数値データは付録Aの表A.2参照)。アルミニウム床版試験体において、接合線方向に応力を受ける場合に対する接合部の疲労亀裂の発生位置に関する記録はない。接合線方向に応力を受ける接合部の疲労強度に関する最近の研究¹⁰⁾によれば、疲労亀裂はショルダーの回転跡の中央またはショルダーの両脇に生じるバリに生じることが明らかにされている。すなわち、接合部が接合線方向に応力を受ける場合、疲労亀裂はショルダーの直径以内に発生する。アルミニウム床版試験体の製作に使用された摩擦攪拌接合のショルダーの直径は25mmであったので、図5において、接合中心から左右12.5mm以内に生じる残留応力が重要である。この範囲の残留応力の最大値は48.9MPaである。

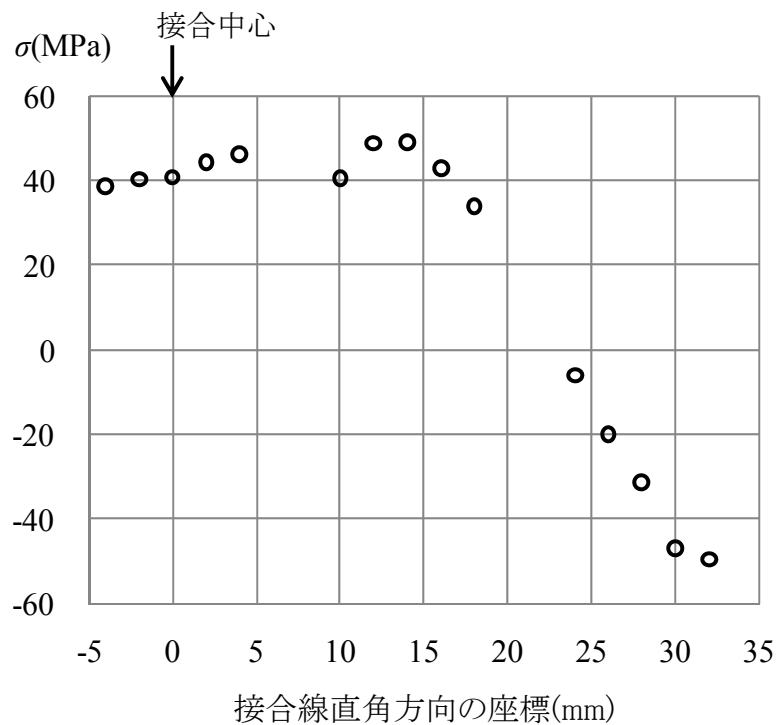


図5 アルミニウム床版試験体の接合線方向の残留応力

3.3 接合部の応力範囲と応力比

図6に示すように、接合部を有する部材が接合線方向に応力を受けている場合に対して、母材および接合部の応力-ひずみ関係を図7に示す。同図に描かれている応力-ひずみ関係は図4の曲線Bである。荷重が載荷されていないとき、母材の応力とひずみは図7(a)の原点Aにある。

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

$$\varepsilon_{jr} = \frac{\sigma_{jr}}{E} \quad (5)$$

ここに、 ε_{jr} : 接合部に生じる引張の残留応力に対する残留ひずみ

σ_{jr} : 接合部に生じる引張の残留応力

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7(b)の点 A_j にある。点 A_j のひずみは ε_{jr} である。荷重を最大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。母材に生じるひずみと接合部に生じるひずみは同じであるので、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、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(2)より次式が成立する。

$$\varepsilon_{jr} + \varepsilon_L = \frac{\sigma_{j\max}}{E} + 0.002 \left(\frac{\sigma_{j\max}}{\sigma_{j0.2}} \right)^{n_j} \quad (6)$$

ここに、 $\sigma_{j\max}$: 接合部に生じる最大応力

母材の応力-ひずみ関係における比例限 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7(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。そこで最大荷重に対して母材に生じる応力を σ_{\max} とすると、 σ_{\max} は次の制限を受ける。

$$\sigma_{\max} \leq \sigma_p = 0.8\sigma_{0.2} \quad (7)$$

図7(a)と(b)の比較から分るように、母材の応力-ひずみ関係は比例限 σ_p 以下で直線であるが、接合部の応力-ひずみ関係は曲線である。

式(7)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。

$$\varepsilon_L = \frac{\sigma_{\max}}{E} \quad (8)$$

式(5)と(8)を式(6)に代入して次式を得る。

$$\frac{\sigma_{jr}}{E} + \frac{\sigma_{\max}}{E} = \frac{\sigma_{j\max}}{E} + 0.002 \left(\frac{\sigma_{j\max}}{\sigma_{j0.2}} \right)^{n_j} \quad (9)$$

σ_{\max} は次式で表される。

$$\sigma_{\max} = \frac{\Delta\sigma}{1 - R_n} \quad (10)$$

ここに、 $\Delta\sigma$: 母材に生じる応力範囲

R_n : 母材の応力比

σ_{\min} : 最小荷重に対して、母材に生じる最小応力

σ_{\max} は式(7)の制限を受けるので、式(10)の $\Delta\sigma$ は次の制限を受ける。

$$\Delta\sigma \leq \sigma_p(1 - R_n) = 0.8\sigma_{0.2}(1 - R_n) \quad (11)$$

式(10)を式(9)に代入して次式を得る。

$$\frac{\sigma_{jr}}{E} + \frac{\Delta\sigma}{E(1 - R_n)} = \frac{\sigma_{j\max}}{E} + 0.002 \left(\frac{\sigma_{j\max}}{\sigma_{j0.2}} \right)^{n_j} \quad (12)$$

荷重を最大荷重まで载荷した後、最小荷重まで除荷すると、図7(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7(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 $\Delta\sigma$ を与える繰返し荷重が载荷されると、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範囲 $\Delta\sigma_j$ と応力比 R_j はそれぞれ次式で与えられる。

$$\Delta\sigma_j = \Delta\sigma \quad (13)$$

$$R_j = \frac{\sigma_{j\max} - \Delta\sigma}{\sigma_{j\max}} = 1 - \frac{\Delta\sigma}{\sigma_{j\max}} \quad (14)$$

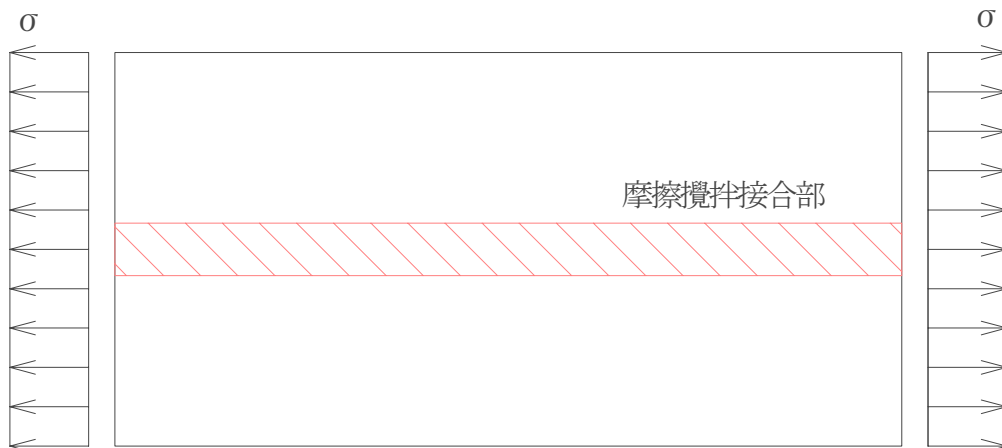
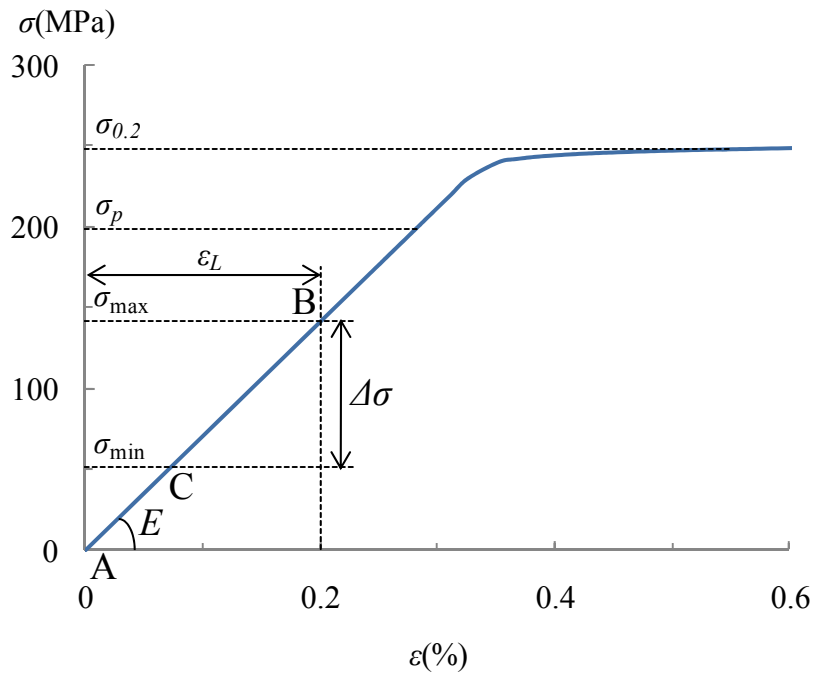
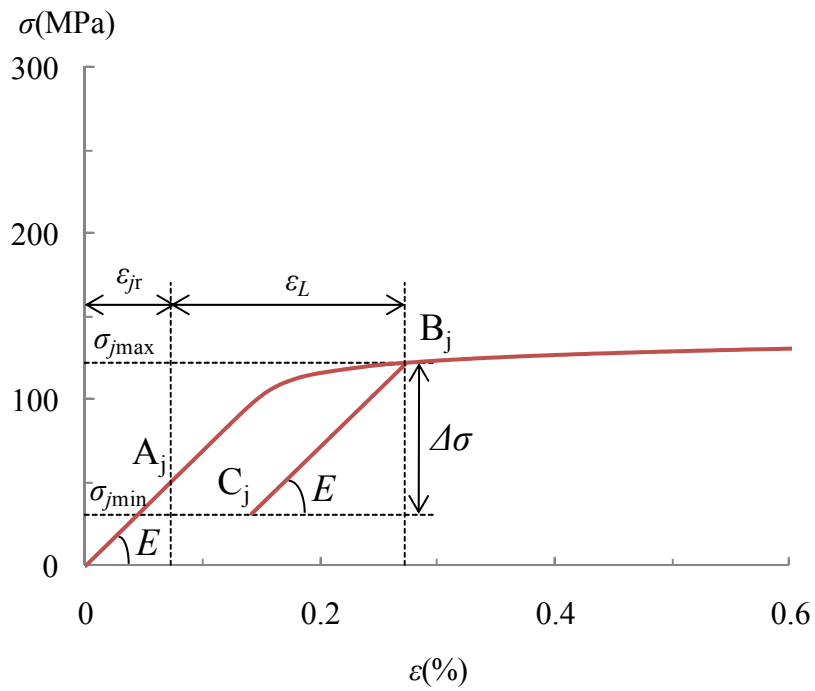


図6 接合線方向に応力を受ける摩擦攪拌接合部



(a) 母材



(b) 接合部

図7 母材と接合部の応力-ひずみ関係

3.4 母材の応力で表された接合線方向の疲労強度

式(14)で与えられる接合線方向の応力比 R_j を表 1 の各式の応力比 R に用いることにより、接合線方向の疲労強度を母材の応力で表すことができる。

$\Delta\sigma$ を $\Delta\sigma_{caf}$ に置き換えた式(14) の R_j を、表 1 の設計疲労限度を与える各式の R に代入して次式を得る。

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

$$\sigma_{j\max} = 166.9 - 1.1858\Delta\sigma_{caf} \quad (15)$$

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

$$\sigma_{j\max} = 98.0 - 0.2368\Delta\sigma_{caf} \quad (16)$$

$\Delta\sigma$ を $\Delta\sigma_{caf}$ に置き換えた式(12)に、式(15)または式(16)の $\sigma_{j\max}$ を代入して次式を得る。

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

$$\frac{\sigma_{jr}}{E} + \frac{\Delta\sigma_{caf}}{E(1-R_n)} = \frac{166.9 - 1.1858\Delta\sigma_{caf}}{E} + 0.002 \left(\frac{166.9 - 1.1858\Delta\sigma_{caf}}{\sigma_{j0.2}} \right)^{n_j} \quad (17)$$

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

$$\frac{\sigma_{jr}}{E} + \frac{\Delta\sigma_{caf}}{E(1-R_n)} = \frac{98.0 - 0.2368\Delta\sigma_{caf}}{E} + 0.002 \left(\frac{98.0 - 0.2368\Delta\sigma_{caf}}{\sigma_{j0.2}} \right)^{n_j} \quad (18)$$

表 1 の設計 S-N 曲線を与える各式の R に式(14)の R_j を代入し、 N について解いて次式を得る。

$0 < \Delta\sigma < 0.5\sigma_{j\max}$ ($0.5 < R_j < 1$) に対して

$$N = 10^5 \left(\frac{167}{\sigma_{j\max} + 0.3089\Delta\sigma} \right)^m \quad (19)$$

ここに、
$$m = \frac{0.8823}{\log \frac{\sigma_{j\max} + 1.0411\Delta\sigma}{\sigma_{j\max} + 0.1879\Delta\sigma}}$$

$0.5\sigma_{j\max} \leq \Delta\sigma < 0.9\sigma_{j\max}$ ($0.1 < R_j \leq 0.5$) に対して

$$N = \frac{10^{12.252+8.44\frac{\Delta\sigma}{\sigma_{j\max}}}}{(\Delta\sigma)^{5.09+2.16\frac{\Delta\sigma}{\sigma_{j\max}}}} \quad (20)$$

$0.9\sigma_{j\max} \leq \Delta\sigma \leq 2\sigma_{j\max}$ ($-1 \leq R_j \leq 0.1$) に対して

$$N = \frac{10^{14.106+6.38\frac{\Delta\sigma}{\sigma_{j\max}}}}{(\Delta\sigma)^{5.09+2.16\frac{\Delta\sigma}{\sigma_{j\max}}}} \quad (21)$$

式(12)において、任意の値を $\sigma_{j\max}$ に与えて $\Delta\sigma$ の値が算出される。 $\sigma_{j\max}$ と $\Delta\sigma$ の値を式(19)~(21)の各式に代入して、 N の値が求まる。

3.5 アルミニウム床版試験体の疲労強度との比較

アルミニウム床版試験体を用いた疲労試験で採用された母材の応力比 R_n は 0.1 であった。したがって式(17)の R_n に 0.1 を用い、 σ_{jr} に 48.9 MPa を代入する。さらに、式(17)の E 、 $\sigma_{j0.2}$ 、 n_j に表 2 の接合部の値を用いて、数値計算を行うことにより、 $\Delta\sigma_{caf}$ に対して 52.5MPa を得る。

式(12)の R_n に 0.1、 σ_{jr} に 48.9 MPa を用い、さらに式(12)の E 、 $\sigma_{j0.2}$ 、 n_j に表 2 の接合部の値を用いて得られた σ_{jmax} と $\Delta\sigma$ の値を式(19)～(21)に代入して得られる S-N 曲線を図 8 に示す。同図には、疲労限度 52.5MPa およびアルミニウム床版試験体の疲労試験結果も記載されている（数値データは付録 A の表 A. 3 参照）。疲労限度以下の応力範囲で疲労亀裂が発生した試験体がなく、S-N 曲線が与える寿命は試験値より短寿命である。したがって、母材の応力で表された接合線方向の疲労強度は実構造物の疲労強度を安全側に評価する。

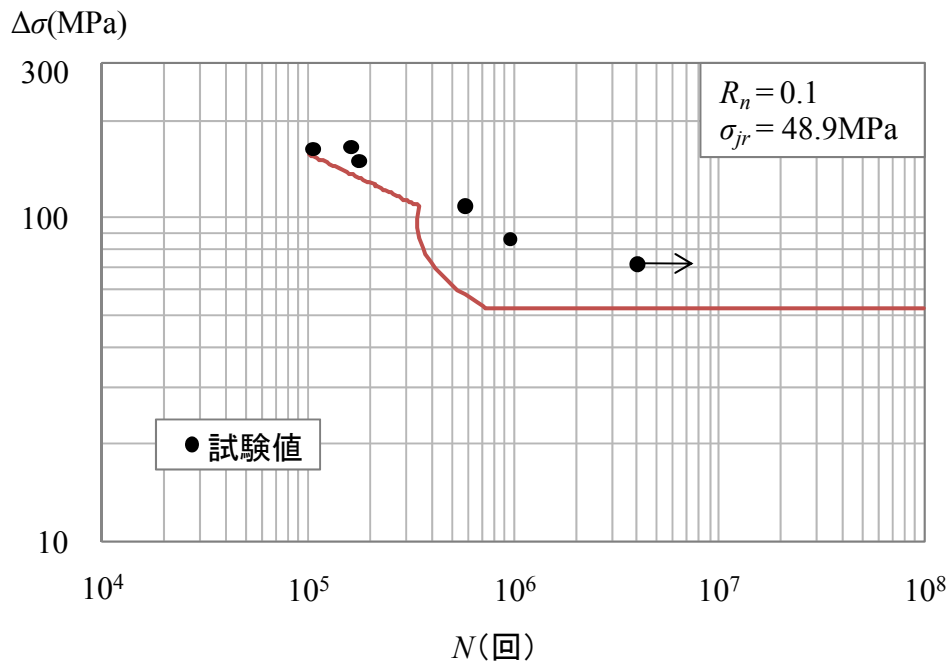


図 8 母材の応力で表された接合線方向の疲労強度

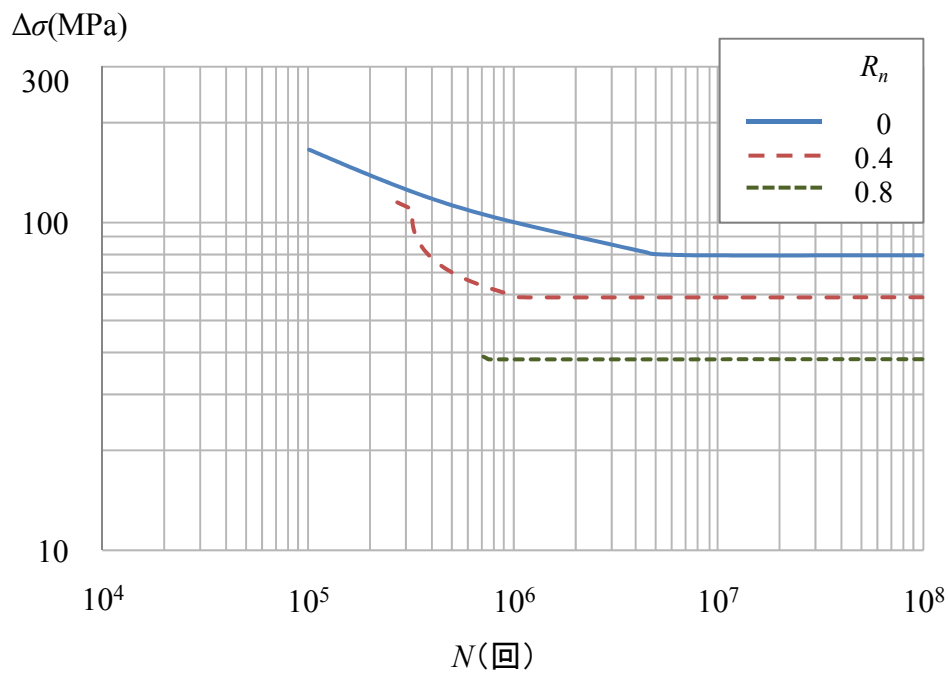
第4章 残留応力と母材の応力比が疲労強度に与える影響

残留応力と母材の応力比が、母材の応力で表された接合線方向の疲労強度に与える影響を調べる。残留応力に対して $\sigma_{jr}=0, 63, 126\text{MPa}$ を考慮する。これらの値は、接合部の0.2%耐力126MPaの0, 0.5, 1倍に相当する。母材の応力比に対して $R_n=0, 0.4, 0.8$ を考慮する。これらの σ_{jr} と R_n の組合せに対して、式(12)および式(17)~(21)が与えるS-N曲線を図9に示す。式(12)および式(17)~(21)の $E, \sigma_{j0.2}, n_j$ に対して表2の接合部の値を用いている。図9の各図において、 $R_n=0.4$ と 0.8 に対するS-N曲線が左側で途切れているのは、式(11)の $\Delta\sigma$ に対する制限による。

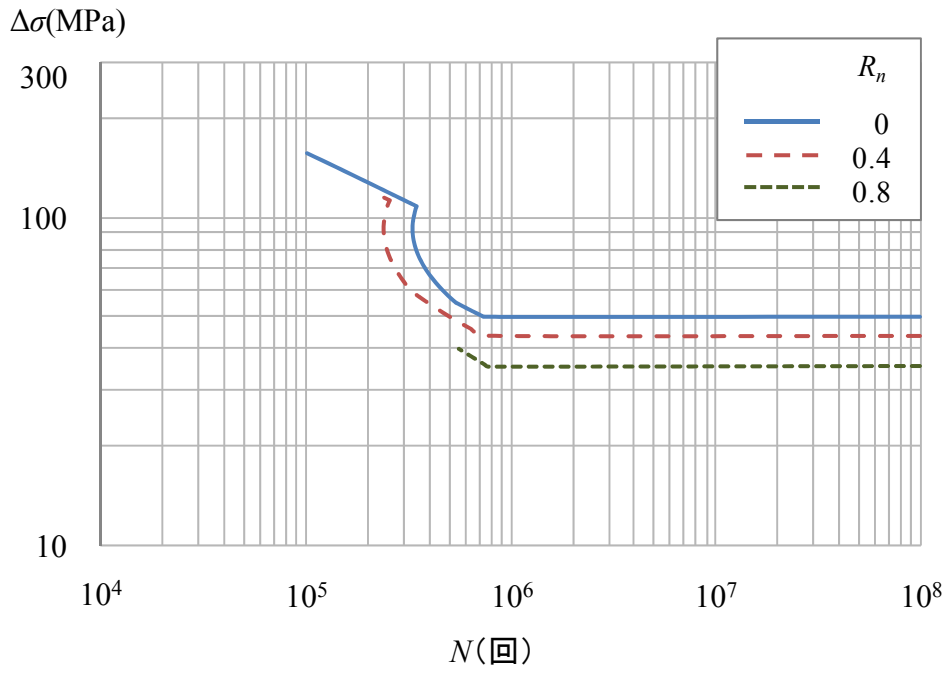
図9の各図において、 R_n が大きくなるに従って疲労強度が低下する。したがって実物大のアルミニウム構造物の疲労試験によって得られる疲労強度は、その疲労試験で採用された応力比以下に対しては安全側の評価を与えるが、採用された応力比を越える場合は安全側の評価を与えない。

図9(a)が示すように、 $\sigma_{jr}=0\text{MPa}$ の場合、 R_n に関する疲労強度の変化が大きい。図9(c)が示すように、 $\sigma_{jr}=126\text{MPa}$ の場合、 R_n に関する疲労強度の変化は小さい。

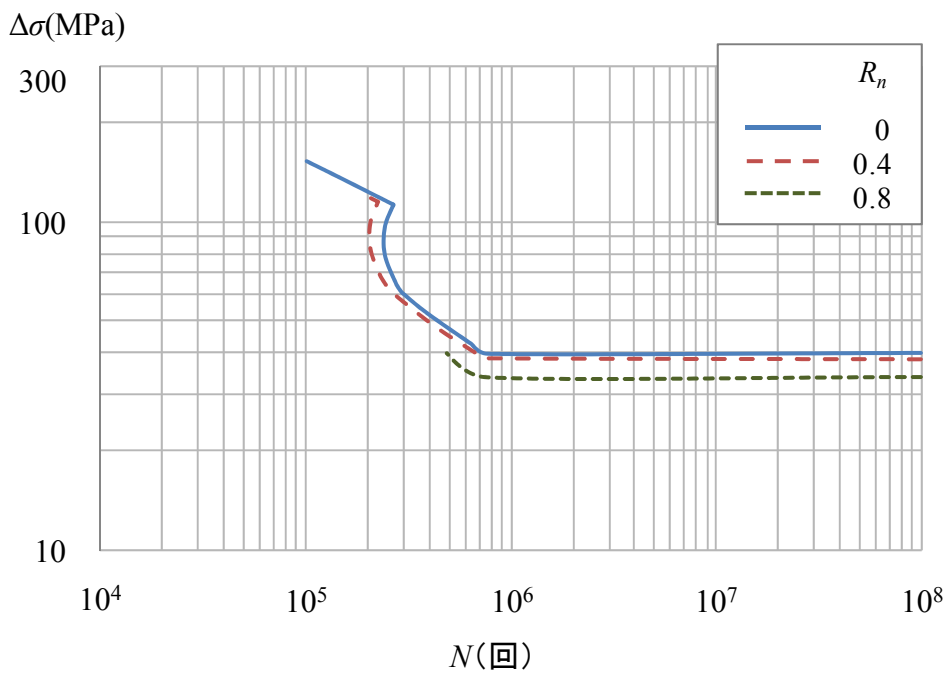
以上より、母材の応力で表された接合線方向の疲労強度は、残留応力が大きくなるに従って低下し、残留応力の増加とともに母材の応力比に対する疲労強度の変化は小さくなる。



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



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



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

図9 残留応力と母材の応力比が疲労強度に与える影響

第5章 接合線方向の疲労強度の算定式

母材の応力で表された接合線方向の疲労強度を得るためには複雑な数値計算を必要とする。実務設計では、接合線方向の疲労強度を容易に算定できることが重要である。そこで本章では、母材の応力で表された接合線方向の疲労強度の算定式を与える。

5.1 疲労限度

式(17)と(18)が与える $\Delta\sigma_{caf}$ と σ_{jr} の関係を実線で図10に示す。両式の E 、 $\sigma_{j0.2}$ 、 n_j に対して表2の接合部の値を用いている。 $\Delta\sigma_{caf}$ と σ_{jr} の関係は $\sigma_{jr} = 126\text{MPa}$ で極値を取る放物線形状を示すので、 $\Delta\sigma_{caf}$ と σ_{jr} の関係に対して次式を仮定する。

$$\Delta\sigma_{caf} = a(\sigma_{jr} - 126)^2 + b \quad (22)$$

ここに、 a 、 b : 係数

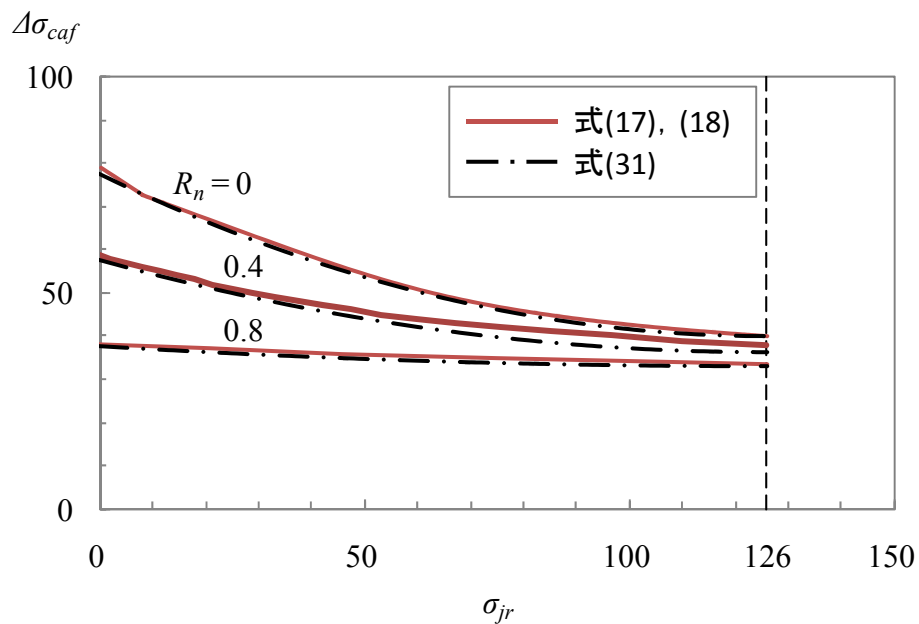


図10 $\Delta\sigma_{caf}$ と σ_{jr} の関係

最初に、係数 b の値を決定する。式(22)を式(17)に代入し、 $\sigma_{jr} = 126\text{MPa}$ と置いて次式を得る。

$$\frac{126}{E} + \frac{b}{E(1-R_n)} = \frac{166.9-1.1858b}{E} + 0.002 \left(\frac{166.9-1.1858b}{\sigma_{j0.2}} \right)^{n_j} \quad (23)$$

式(23)が与える b と R_n の関係を実線で図 11 に示す。この実線は、 $R_n = 0$ に対して $b = 39.8\text{MPa}$ である。

$\Delta\sigma_{caf}$ は式(11)の制限を受ける。したがって、式(22)の $\Delta\sigma_{caf}$ を式(11)の $\Delta\sigma$ に代入し、 $\sigma_{jr} = 126\text{MPa}$ と置いて、さらに、 $\sigma_{0.2}$ に対して表 2 の母材の値 248MPa を用いて、 b に対する制限として次式を得る。

$$b \leq 198.4(1-R_n) \quad (24)$$

式(24)で等号が成立する場合を破線で図 11 に示す。破線と式(23)が与える実線は $R_n = 0.84$, $b = 32.7\text{MPa}$ で交差する。

$R_n = 0$, $b = 39.8\text{MPa}$ の点と $R_n = 0.84$, $b = 32.7\text{MPa}$ の点を結んだ直線が次式で与えられる。

$$b = -8.45R_n + 39.8 \quad (25)$$

式(25)が与える b と R_n の関係を一点鎖線で図 11 に示す。一点鎖線は、式(23)が与える実線の近傍を通過するので、係数 b に対して式(25)を採用する。

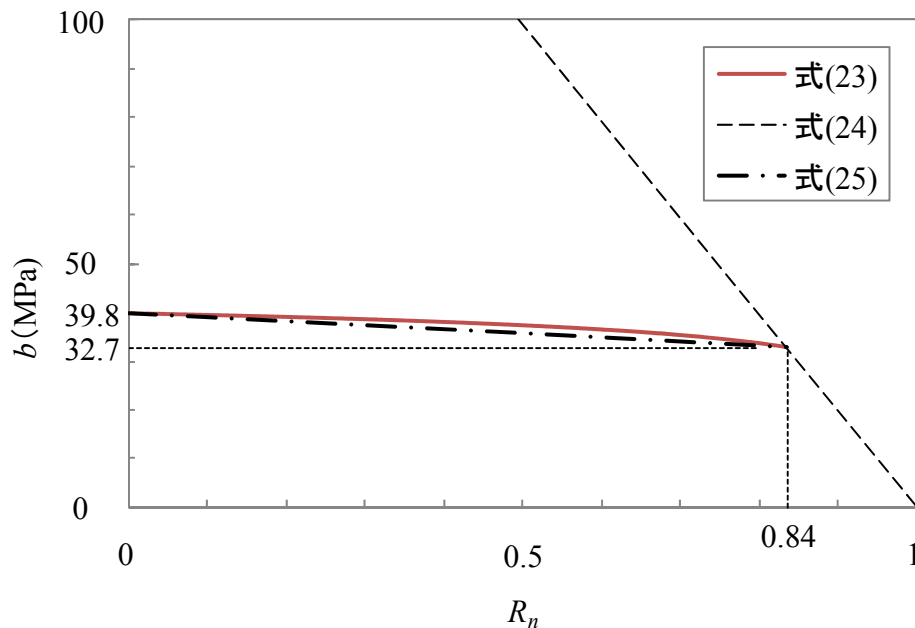


図 11 b と R_n の関係

次に、係数 a の値を決める。式(25)を式(22)に代入して、 $\sigma_{jr} = 0$ と置いて次式を得る。

$$\Delta\sigma_{caf} = 15786a - 8.45R_n + 39.8 \quad (26)$$

式(26)を式(17)と(18)に代入して、さらに $\sigma_{jr} = 0$ と置いて次式を得る。

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

$$\frac{15786a - 8.45R_n + 39.8}{E(1 - R_n)} = \frac{-18826a + 10.0R_n + 119.7}{E} + 0.002 \left(\frac{-18826a + 10.0R_n + 119.7}{\sigma_{j0.2}} \right)^{n_j} \quad (27)$$

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

$$\frac{15786a - 8.45R_n + 39.8}{E(1 - R_n)} = \frac{-3579a + 2.00R_n + 88.6}{E} + 0.002 \left(\frac{-3579a + 2.00R_n + 88.6}{\sigma_{j0.2}} \right)^{n_j} \quad (28)$$

式(27)と(28)が与える a と R_n の関係を実線で図12に示す。 $0 \leq R_n \leq 0.1$ の範囲に対する曲線Bは式(28)から与えられ、 $R_n \geq 0.1$ の範囲に対する曲線Aは式(27)から与えられる。曲線AとBは $R_n = 0.10$ 、 $a = 0.00213$ で交差する。

$\Delta\sigma_{caf}$ は式(11)で制限を受ける。したがって、式(26)を式(11)に代入し、 $\sigma_{jr} = 0$ と置いて、さらに、 $\sigma_{0.2}$ に対して表2の母材の値 248 MPa を用いて、 a に対する制限として次式を得る。

$$a \leq 0.00996 - 0.01194 R_n \quad (29)$$

式(29)で等号が成立する場合を破線で図12に示す。破線と曲線Aは $R_n = 0.81$ 、 $a = 0.00028$ で交差する。

$R_n = 0.10$ 、 $a = 0.00213$ の点と $R_n = 0.81$ 、 $a = 0.00028$ の点を結んだ直線が次式で与えられる。

$$a = -0.00261R_n + 0.00239 \quad (30)$$

式(30)が与える a と R_n の関係を一点鎖線で図12に示す。一点鎖線は、曲線AとBの近傍を通過するので、係数 a に対して式(30)を採用する。

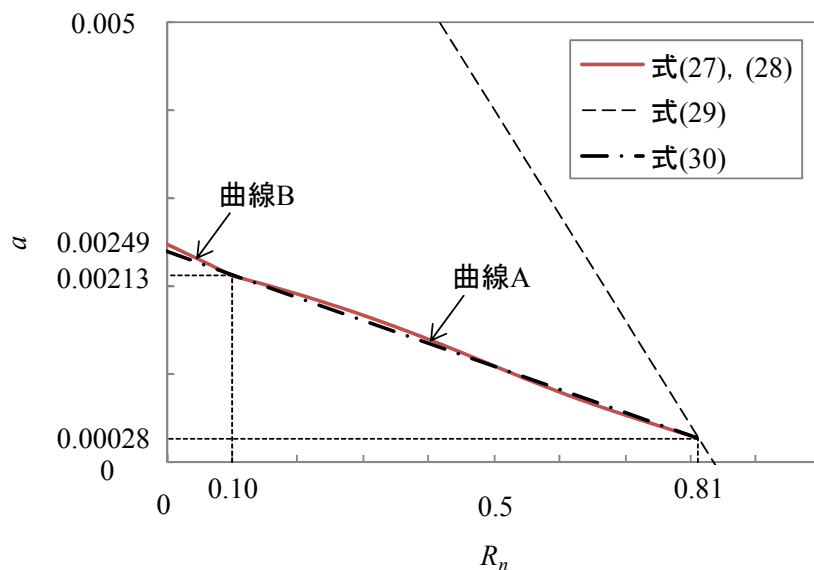


図12 a と R_n の関係

式(25)と(30)を式(22)に代入して、 $\Delta\sigma_{caf}$ と σ_{jr} および R_n との関係は次式で近似される。

$$\Delta\sigma_{caf} = (-0.00261R_n + 0.00239)(\sigma_{jr} - 126)^2 - 8.45R_n + 39.8 \quad (31)$$

ここで、 $0 \leq \sigma_{jr} \leq 126 \text{ MPa}$ である。

$\Delta\sigma_{caf}$ は式(11)の制限を受ける。したがって、式(31)を式(11)に代入し、さらに、 $\sigma_{0.2}$ に対して表 2 の母材の値 248MPa を用いて、 R_n の制限として次式を得る。図 13 に式(32)で等号が成立する場合の R_n と σ_{jr} の関係を示す。

$$R_n \leq \frac{0.00239(\sigma_{jr} - 126)^2 - 158}{0.00261(\sigma_{jr} - 126)^2 - 190} \quad (32)$$

式(31)が与える $\Delta\sigma_{caf}$ と σ_{jr} の関係を一点鎖線で図 10 に示す。一点鎖線は、式(17)と(18)が与える実線をよく近似している。

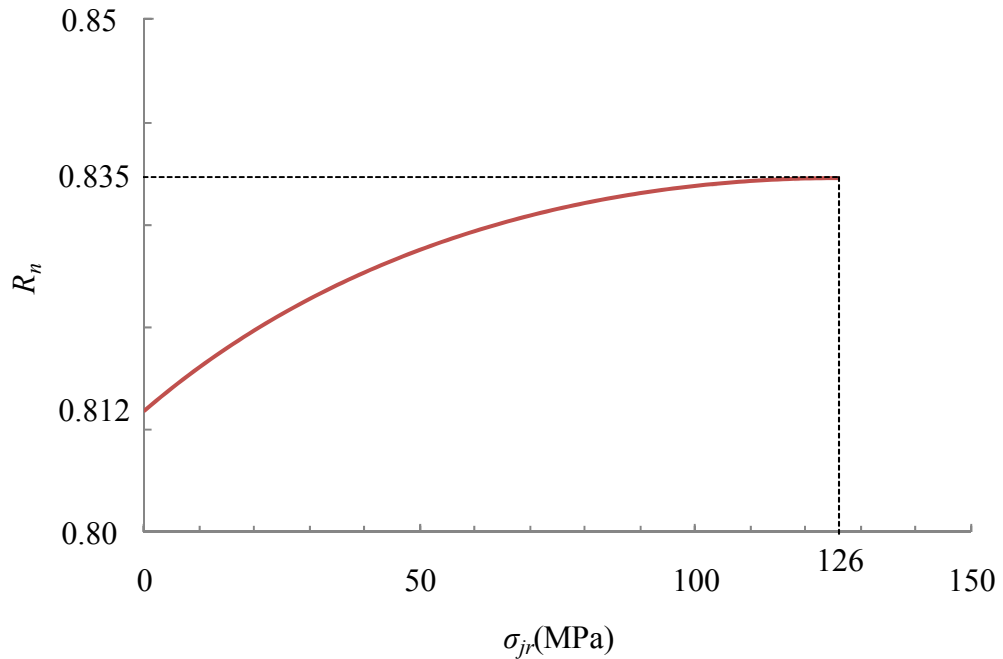


図 13 R_n と σ_{jr} の関係

5.2 S-N 曲線

第4章の図9の各図で与えられたS-N曲線に対する接合部の応力比 R_j と応力範囲 $\Delta\sigma$ の関係を、破線、一点長鎖線、二点長鎖線で図14に示す。両者の関係は式(12)と(14)で与えられる。 $\Delta\sigma$ の取得値の範囲は次の通りである。

$$\Delta\sigma_{caf} \leq \Delta\sigma \leq 198.4(1 - R_n) \quad (33)$$

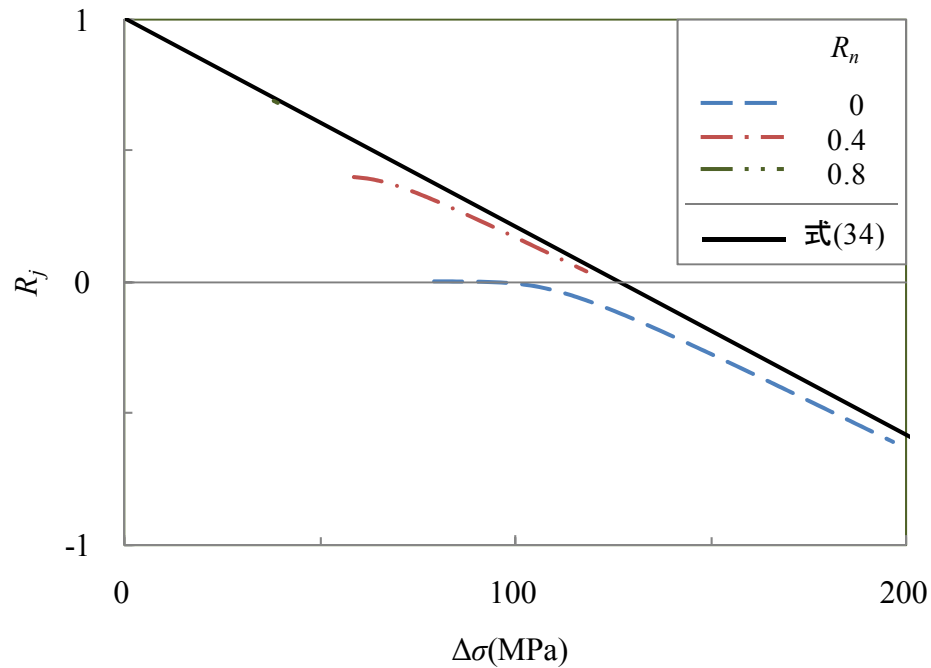
式(33)の上限は式(11)の制限に対するものである。

ここで、次式で定義される接合部の応力比について考える。

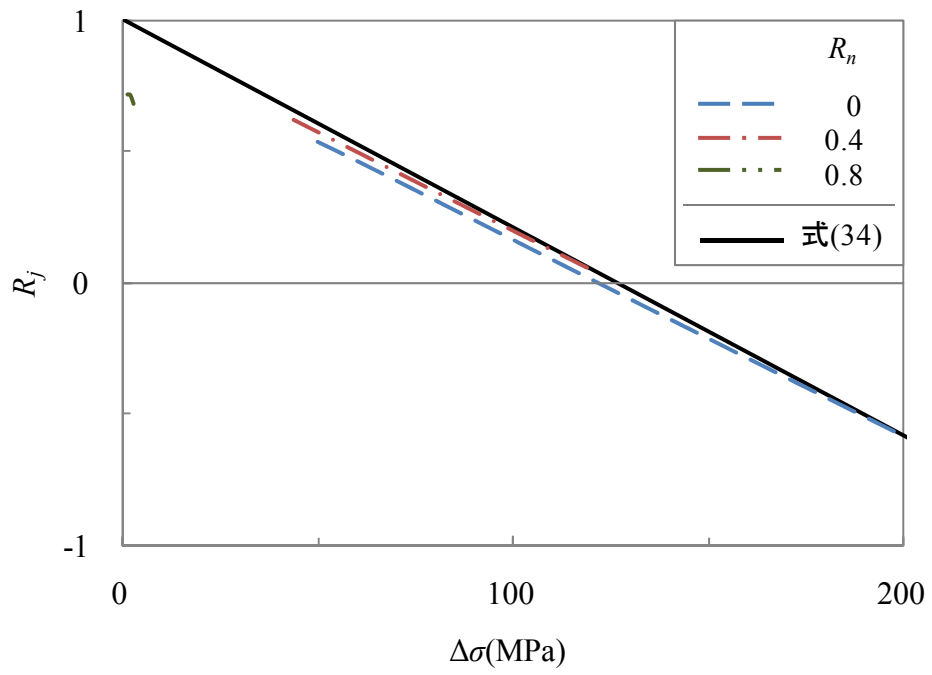
$$R_j = 1 - \frac{\Delta\sigma}{\sigma_{j0.2}} \quad (34)$$

式(34)は、式(14)の σ_{jmax} の代わりに接合部の0.2%耐力 $\sigma_{j0.2}$ を用いている。

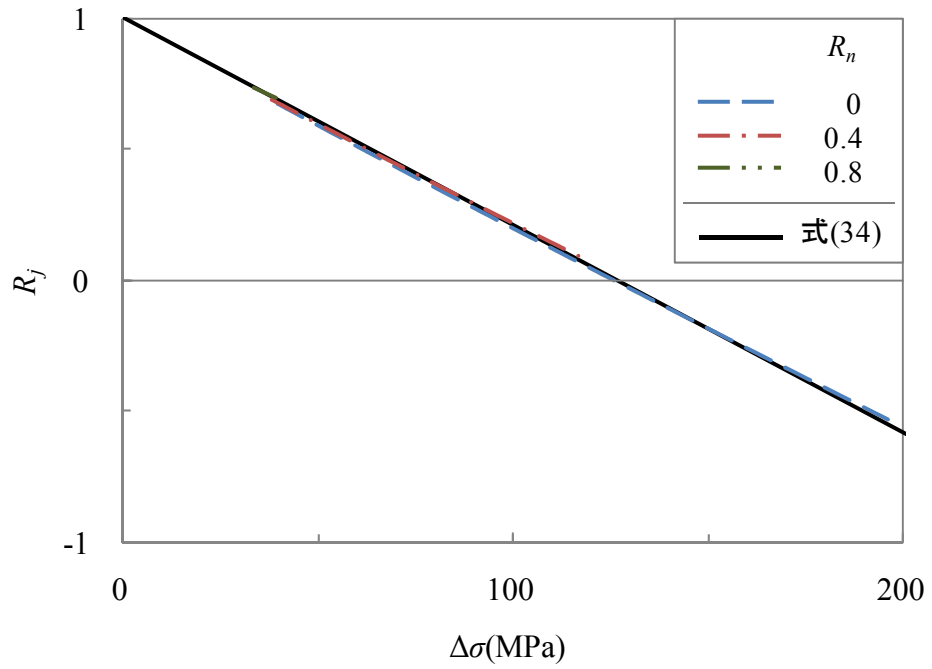
式(34)が与える R_j と $\Delta\sigma$ の関係を実線で図14に示す。図14(a)から分るように、式(34)が与える応力比は、式(12)と(14)が与える応力比より高い。応力比が高い疲労強度は、応力比が低い疲労強度より低くなる。図14(b)と(c)の場合、すなわち $\sigma_{jr} = 63\text{MPa}$ と $\sigma_{jr} = 126\text{MPa}$ の場合、式(12)と(14)が与える応力比は、式(34)が与える応力比に近い。したがって、接合部の応力比に対して、式(14)の代わりに式(34)を使用することを考える。



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



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



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

図 14 $\Delta\sigma$ と R_j の関係

式(34)の $\sigma_{j0.2}$ に表2の接合部の0.2%耐力の値126MPaを用いた R_j を、表1の設計S-N曲線を与える各式の R に代入して次式を得る。

$0 < \Delta\sigma < 63.0$ MPa ($0.5 < R_j < 1$) に対して

$$N = 10^5 \left(\frac{167}{126 + 0.3089\Delta\sigma} \right)^m \quad (35)$$

ここに, $m = \frac{0.8823}{\log \frac{126 + 1.0411\Delta\sigma}{126 + 0.1879\Delta\sigma}}$

$63.0 \leq \Delta\sigma < 113.4$ MPa ($0.1 < R_j \leq 0.5$) に対して

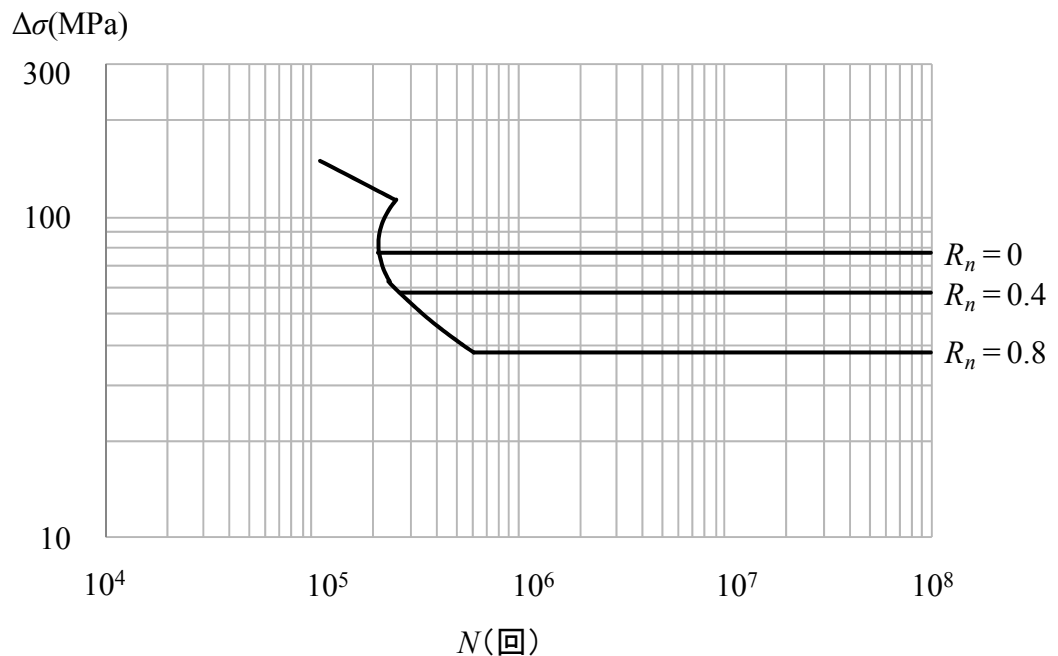
$$N = \frac{10^{12.252 + 0.0670\Delta\sigma}}{(\Delta\sigma)^{5.09 + 0.0171\Delta\sigma}} \quad (36)$$

$113.4 \leq \Delta\sigma \leq 252.0$ MPa ($-1 \leq R_j \leq 0.1$) に対して

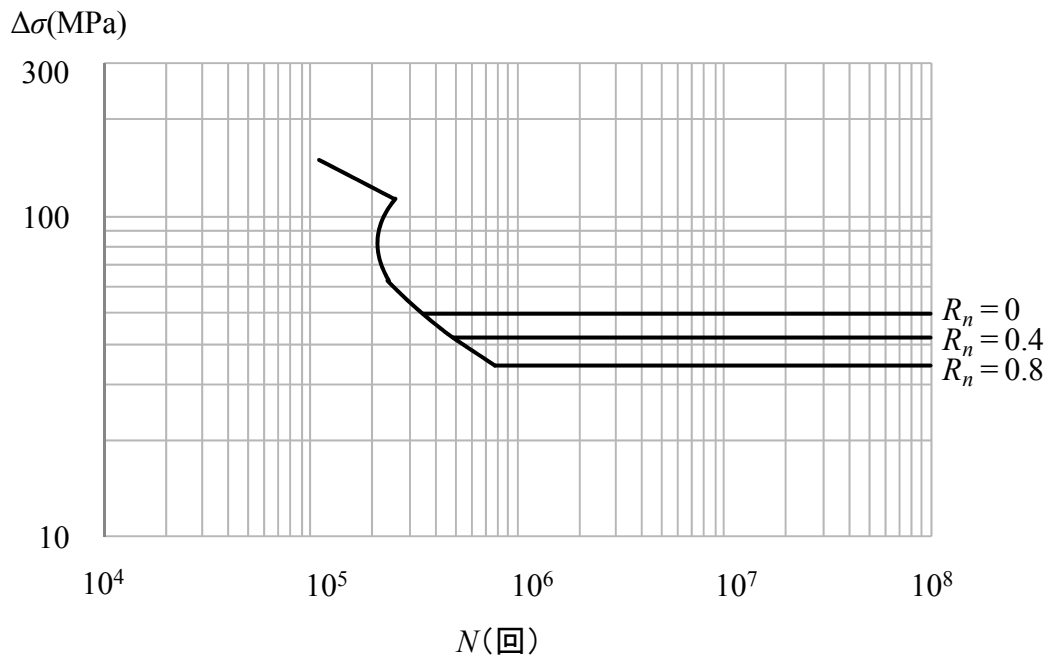
$$N = \frac{10^{14.106 + 0.0506\Delta\sigma}}{(\Delta\sigma)^{5.09 + 0.0171\Delta\sigma}} \quad (37)$$

$R_n = 0, 0.4, 0.8$ に対して、式(12)と式(17)~(21)が与える母材の応力で表された接合線方向の疲労限度およびS-N曲線と、式(31)と式(35)~(37)が与えるそれらの比較は付録Bに示す。

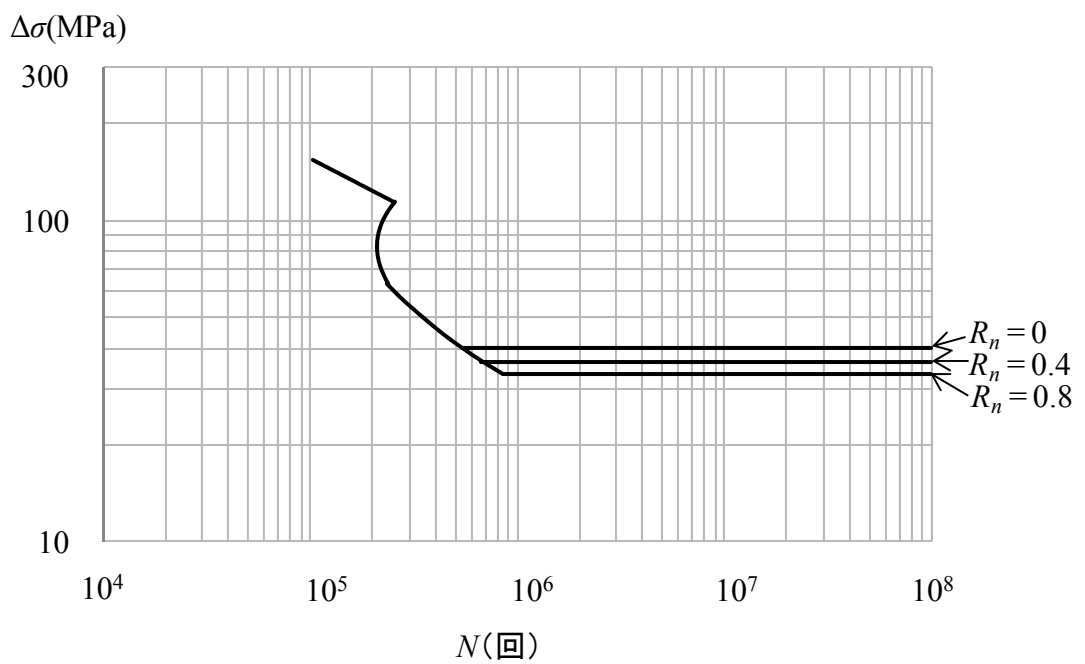
式(31)が与える疲労限度および式(35)~(37)が与えるS-N曲線を図15に示す。疲労限度は σ_{jr} と R_n の値に応じて異なるが、S-N曲線は σ_{jr} と R_n の値に関わらず一つの曲線である。



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



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



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

図 15 接合線方向の S-N 曲線

第 6 章 結論

本研究では、6000系アルミニウム合金材の摩擦攪拌接合部の接合線方向の疲労強度に、接合部の強度低下と残留応力が与える影響を明らかにした。本研究で得られた主な結論を以下に示す。

- (1) 摩擦攪拌接合部の応力比と母材の応力比の関係を与え、接合線方向の疲労強度を母材の応力で表した。
- (2) 母材の応力で表された摩擦攪拌接合部の接合線方向の疲労強度は、残留応力が大きくなるに従って低下するが、残留応力の増加とともに母材の応力比に対する変化は小さくなる。
- (3) 実物大のアルミニウム構造物の疲労試験によって得られる疲労強度は、その疲労試験で採用された応力比以下に対しては安全側の評価を与えるが、応力比を越える場合は安全側の評価を与えない。
- (4) 母材の応力で表された摩擦攪拌接合部の接合線方向の疲労強度の算定式を次のように与えた。

疲労限度	
$0 \leq \sigma_{jr} \leq 126$ $R_n \leq \frac{0.00239(\sigma_{jr} - 126)^2 - 158}{0.00261(\sigma_{jr} - 126)^2 - 190}$	$\Delta\sigma_{caf} = (-0.00261R_n + 0.00239)(\sigma_{jr} - 126)^2 - 8.45R_n + 39.8$
S-N 曲線	
$0 < \Delta\sigma < 63.0$	$N = 10^5 \left(\frac{167}{126 + 0.3089\Delta\sigma} \right)^m$ $m = \frac{0.8823}{\log \frac{126 + 1.0411\Delta\sigma}{126 + 0.1879\Delta\sigma}}$
$63.0 \leq \Delta\sigma < 113.4$	$N = \frac{10^{12.252 + 0.0670\Delta\sigma}}{(\Delta\sigma)^{5.09 + 0.0171\Delta\sigma}}$
$113.4 \leq \Delta\sigma \leq 252.0$	$N = \frac{10^{14.106 + 0.0506\Delta\sigma}}{(\Delta\sigma)^{5.09 + 0.0171\Delta\sigma}}$

- σ_{jr} : 摩擦攪拌接合部に生じる残留応力(MPa)
 $\Delta\sigma_{caf}$: 疲労限度(MPa)
 R_n : 母材の応力比
 $\Delta\sigma$: 応力範囲(MPa)
 N : 繰返し数(回)

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) 大倉一郎，萩澤亘保，岩田節雄，北村幸嗣：アルミニウム橋実現のための技術開発，軽金属，54 巻 9 号，pp.380-387，2004.
- 3) 大倉一郎，萩澤亘保，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.
- 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母材および摩擦攪拌接合部の疲労設計ガイドライン，2010 年.
- 5) 大倉一郎，長尾隆史，石川敏之，萩澤亘保，大隅心平：構造物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.
- 6) 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攪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.
- 7) 萩澤亘保，大倉一郎：アルミニウム合金 A6005C-T5 の母材と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.
- 8) 大倉一郎，牧山大祐，萩澤亘保：アルミニウム合金 A6005C-T5 の母材と摩擦攪拌接合部の設計 S-N 曲線，ALST 研究レポート，No.6，2009.
- 9) IIW: Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components, IIW Fatigue Recommendations XIII-1965-03/XV-1127-03, 2004.
- 10) 大倉一郎，牧山大祐：両面摩擦攪拌接合された摩擦攪拌接合部の疲労強度，ALST 研究レポート，No.17，2010.

付録 A アルミニウム床版試験体の疲労試験結果³⁾

図 A. 1 に示す断面形状を有するアルミニウム合金 A6005C-T5 の中空押出型材を，図 A. 2 に示すように，平行に並べ，上下のフランジ同士を摩擦攪拌接合で連結することにより，図 A. 3 に示す床版パネル試験体が製作された。そして，図 A. 4 に示すように，この床版パネル試験体を切断することにより，試験体 C が製作された。他方，図 A. 5 に示すように，長さ 1.7m の押出型材 2 本から成る試験体 B が製作された。

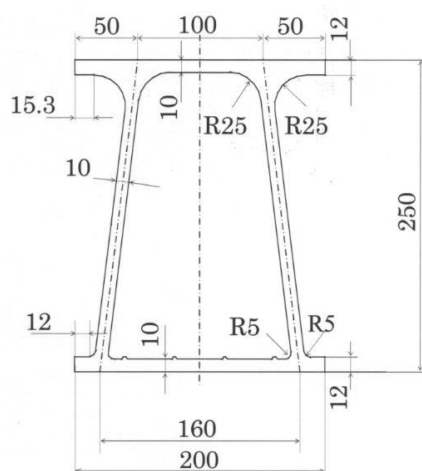


図 A. 1 中空押出型材

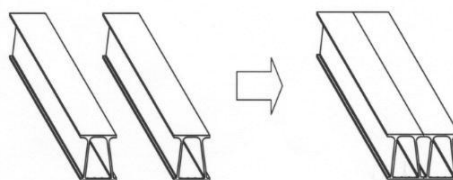


図 A. 2 摩擦攪拌接合による製作

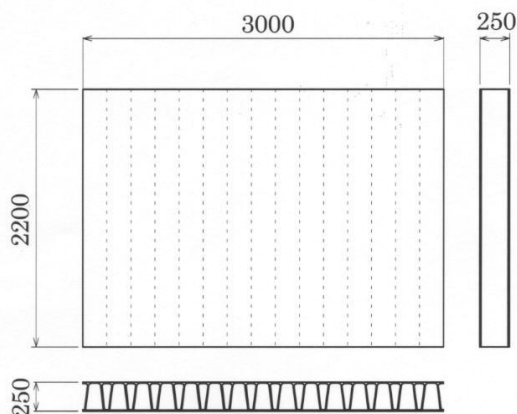


図 A. 3 床版パネル試験体

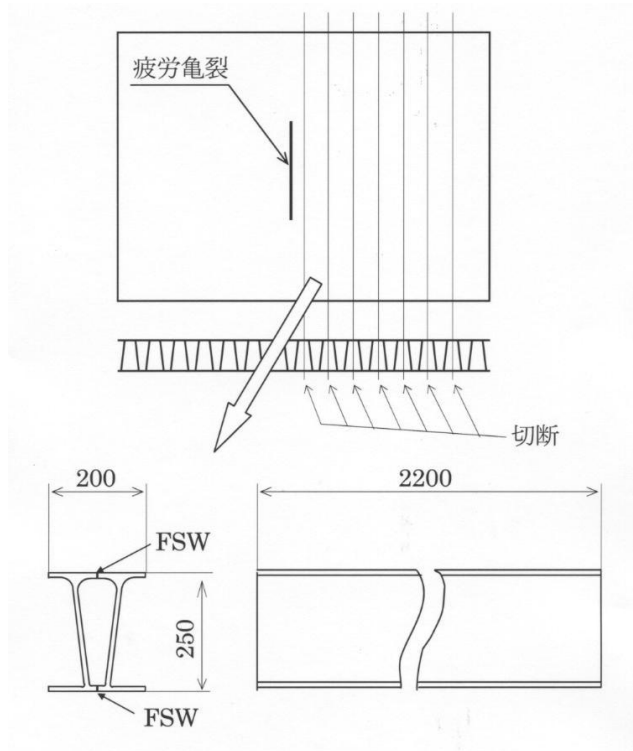


図 A.4 試験体 C

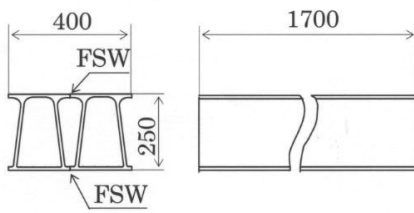


図 A.5 試験体 B

試験体 B から、本文の図 1 に示す形状を有する小型試験片が採取され、疲労試験が行われた。その結果を表 A. 1 に示す。

表 A. 1 小型試験片の疲労試験結果 (R=0.1)

(a) 小型試験片 L

応力範囲 (MPa)	繰返し回数	破断の有無
216	3.90×10^4	
176	2.60×10^5	
148	4.40×10^5	
137	7.00×10^5	
196	8.20×10^5	
118	8.60×10^5	
157	1.40×10^6	
108	1.00×10^7	未破断
118	1.00×10^7	未破断
137	1.00×10^7	未破断

(b) 小型試験片 T

応力範囲 (MPa)	繰返し回数	破断の有無
180	5.81E+04	
160	7.72E+04	
160	9.69E+04	
150	1.87E+05	
130	2.25E+05	
140	2.50E+05	
120	5.92E+05	
110	1.66E+06	
100	2.89E+06	
100	1.27E+07	未破断
90	1.27E+07	未破断
90	1.30E+07	未破断

試験体 B の接合部に発生している残留応力を知るために、試験体の長手中央の上下フランジの外表面に 5 連 2 軸ゲージが貼付され、切断法により応力を解放して残留応力が測定された。接合部の接合線方向の残留応力を表 A. 2 に示す。

表 A.2 接合線方向の残留応力

接合中心からの座標(mm)	残留応力 (MPa)
-4	38.7
-2	40.4
0	40.8
2	44.5
4	46.2
10	40.5
12	48.9
14	49.0
16	42.9
18	33.8
24	-6.0
26	-20.1
28	-31.2
30	-47.1
32	-49.5

図 A.6 に示すように、試験体 B と C の両端をローラー支持し、中央の 100mm の幅に荷重を載荷することにより、実寸大のアルミニウム床版試験体の疲労試験が実施された。試験体 B の支持間隔は 1500mm、試験体 C の支持間隔は 2000mm である。応力比は 0.1 である。試験体の下フランジ下面の接合部に、接合線に対して直角方向に疲労亀裂が発生し、これが試験体を横断する方向に伝播し、最終的に脆性破壊によって試験体が二つに破断した。試験体 B と C の疲労試験結果を表 A.3 に示す。

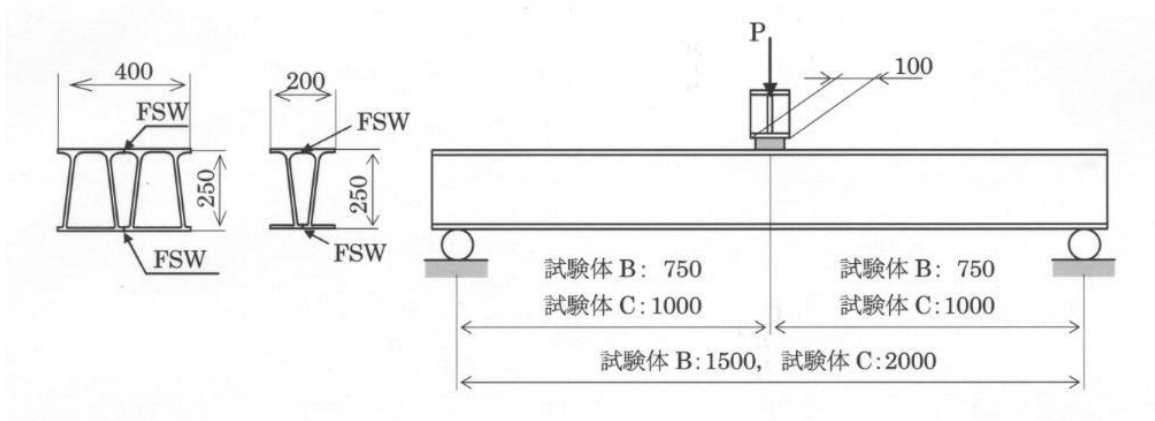


図 A.6 試験体 B と C の疲労試験

表 A.3 アルミニウム床版試験体の疲労試験結果 ($R_n=0.1$)

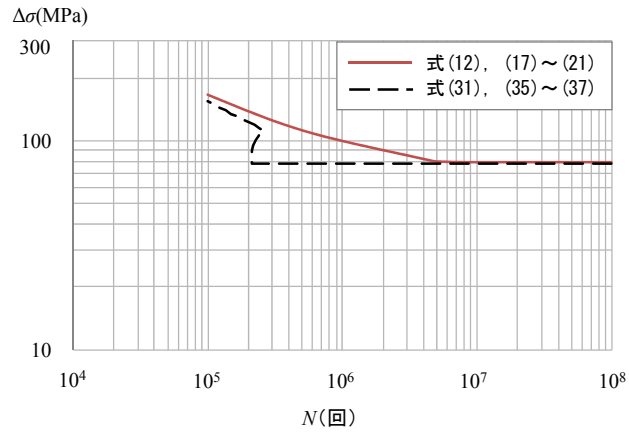
応力範囲 (MPa)	繰返し回数	破断の有無
108.2	5.81×10^5	
165.2	1.61×10^5	
149.7	1.77×10^5	
85.6	9.65×10^5	
71.8	400×10^6	未破断
162.7	1.06×10^5	

付録 B 疲労強度の比較

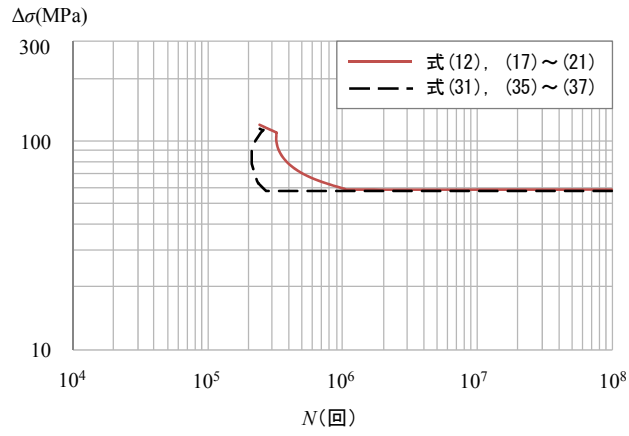
式(12)と式(17)~(21)が与える、母材の応力で表された接合線方向の疲労限度および S-N 曲線と、式(31)と式(35)~(37)が与えるそれらの比較を図 B. 1~B. 3 に示す。

図 B. 1~B. 3 から分かるように、式(31)が与える疲労限度は、式(17)と(18)が与える疲労限度に近い。

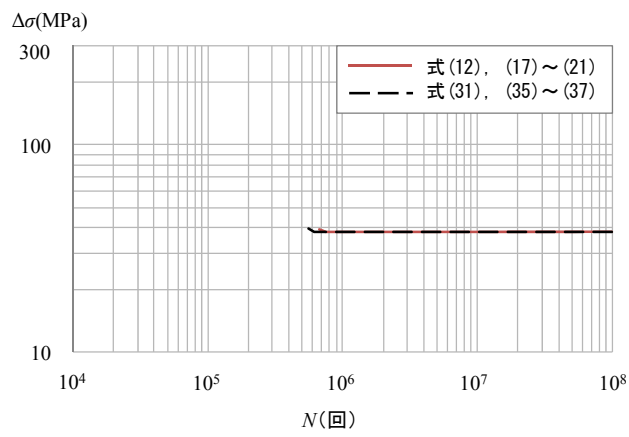
図 B. 1 と B. 2 から分かるように、式(35)~(37)が与える疲労寿命は、式(12)と式(17)~(21)が与える疲労寿命より短い。図 B. 3 から分かるように、式(35)~(37)が与える疲労寿命は、式(12)と式(17)~(21)が与える疲労寿命に近い。このように、式(35)~(37)が与える S-N 曲線は、残留応力が大きくなるに従って、式(12)と式(17)~(21)が与える S-N 曲線に近づく。



(a) $R_n = 0$

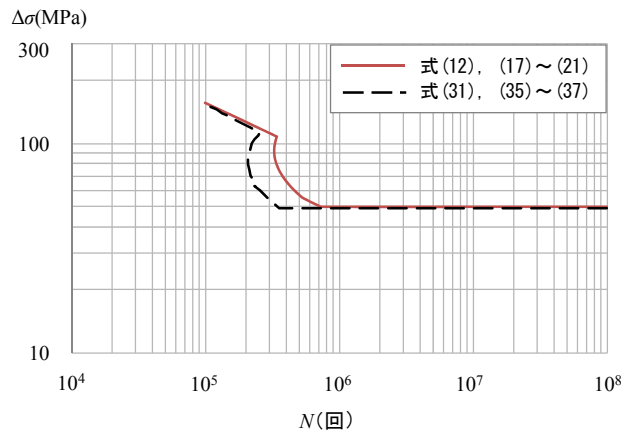


(b) $R_n = 0.4$

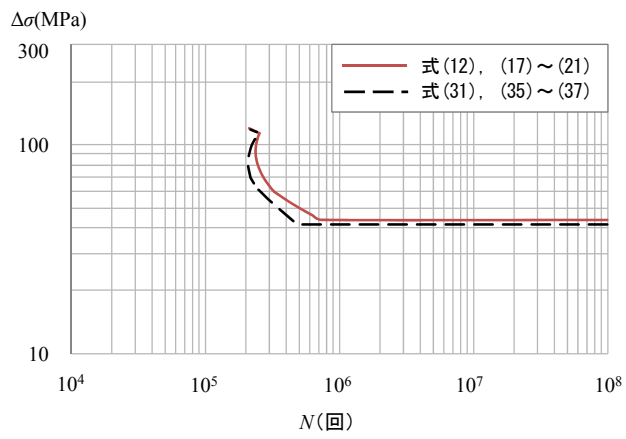


(c) $R_n = 0.8$

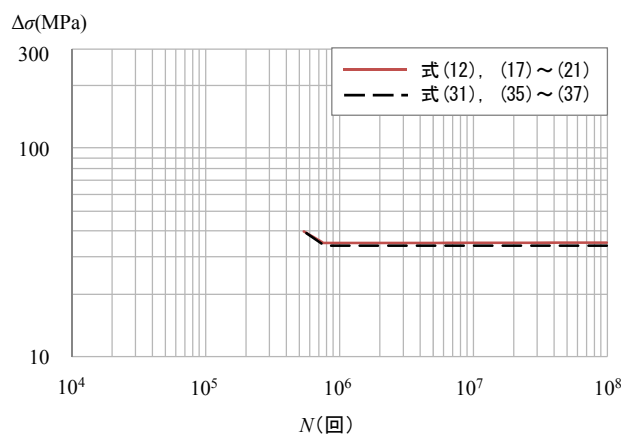
図 B.1 $\sigma_{jr} = 0$



(a) $R_n = 0$

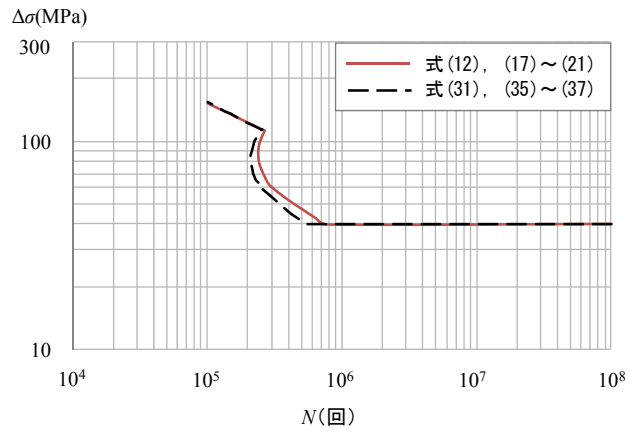


(b) $R_n = 0.4$

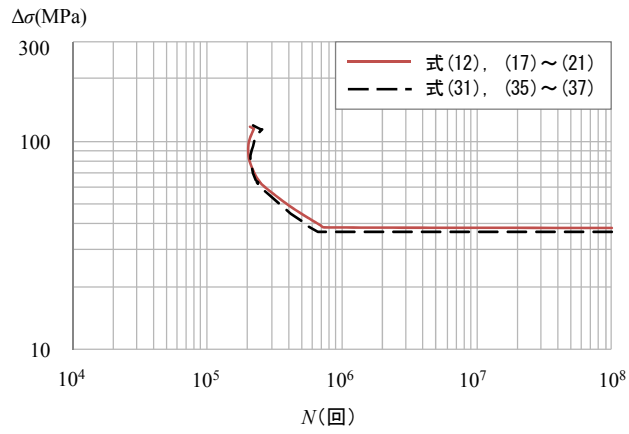


(c) $R_n = 0.8$

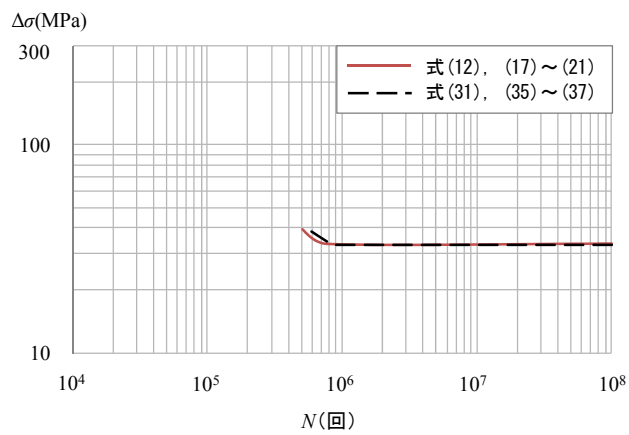
図 B. 2 $\sigma_{jr} = 63 \text{ MPa}$



(a) $R_n = 0$



(b) $R_n = 0.4$



(c) $R_n = 0.8$

図 B.3 $\sigma_{jr} = 126 \text{ MPa}$