

アルミニウム合金板摩擦接合継手の 設計 S-N 曲線

ALST 研究レポート 31

2013 年 9 月

大阪大学大学院工学研究科
吉野浩祐, 大倉一郎

概要

本研究は、「アルミニウム合金板摩擦接合継手の疲労特性」ALST 研究レポート, No.8, 2009 年 3 月および「アルミニウム合金板摩擦接合継手の疲労強度」ALST 研究レポート, No.14, 2010 年 3 月の疲労試験結果に基づいて、アルミニウム合金板摩擦接合継手の設計 S-N 曲線を作成する。

目次

第 1 章 序論	1
第 2 章 アルミニウム合金板摩擦接合継手の疲労試験結果	2
2.1 疲労亀裂の発生位置	2
2.2 S-N 曲線	6
第 3 章 アルミニウム合金板摩擦接合継手の設計 S-N 曲線	9
3.1 連結板の設計 S-N 曲線	9
3.2 母材の設計 S-N 曲線	13
3.3 設計 S-N 曲線の特徴	17
3.4 設計 S-N 曲線と疲労試験結果の比較	19
3.5 連結板と母材の必要板厚比	21
第 4 章 結論	23
参考文献	25

第1章 序論

2000年頃から、軽量かつ耐食性が高いことから、アルミニウム歩道橋や歩道用アルミニウム床版が建設されるようになってきた¹⁾。さらに、道路橋用のアルミニウム床版が開発され^{2),3)}、その試験施工が2011年に開始された⁴⁾。この様なアルミニウム合金土木構造物の建設においては、一般に、工場で輸送可能な大きさに部材が製作され、現場でそれらが組み立てられる。工場での製作には摩擦攪拌接合やMIG溶接が使用され、現場の組み立てには鋼製高力ボルトによる摩擦接合継手を使用される。

現在、我が国では、アルミニウム合金板摩擦接合継手の締結材に鋼製高力ボルトが使用される場合、異種金属接触腐食を防ぐために溶融亜鉛めっき鋼製高力ボルトが使用される⁵⁾。一般に使用される摩擦接合用鋼製高力ボルトはF10Tである。F10Tは熱処理により、その強度が得られ、焼き戻し温度は約430℃である。溶融亜鉛めっきは約500℃で実施されるので、めっきの際の熱影響によりF10Tの強度が保証されない場合があるため、溶融亜鉛めっき鋼製高力ボルトにはF8T相当の軸力が導入される。

近年、表面にフッ素樹脂皮膜が焼き付けられた鋼製高力ボルトが開発された^{3),6)}。このボルトは耐食性に優れ、フッ素樹脂皮膜によってアルミニウム合金板と鋼製高力ボルトが電氣的に絶縁されるので、両者間の異種金属接触腐食を防ぐことができる。フッ素樹脂コート鋼製高力ボルトの表面被膜の熱処理は150℃~200℃で実施されるので、フッ素樹脂処理を施す前と同じ等級の軸力をボルトに導入することができる。したがって、フッ素樹脂コート鋼製高力ボルトはF10Tとして使用することができ、これをアルミニウム合金板摩擦接合継手に用いると、溶融亜鉛めっき鋼製高力ボルトを使用する場合より、ボルト本数を減らすことができる。そこで、鋼製高力ボルトにF10Tの軸力が導入された場合に対して、摩擦面の表面粗さとすべり係数の関係、鋼製高力ボルトの軸力変化と温度変化の関係、鋼製高力ボルトの初期導入軸力とアルミニウム合金板の表面の変形特性の関係が調べられた^{7),8)}。

その後、鋼製高力ボルト摩擦接合継手を有する梁タイプの試験体の疲労試験が実施された。その結果、疲労亀裂はボルト孔の縁に発生するのではなく、ボルト孔周辺の連結板表面または母材表面にフレットング疲労亀裂が発生することが明らかにされた⁹⁾。さらに、引張試験片タイプの小型試験片の疲労試験により、ボルト導入軸力、連結板の厚さ、応力比がフレットング疲労強度に与える影響が調べられた^{9),10)}。

アルミニウム合金板摩擦接合継手のフレットング疲労亀裂の発生原因を究明するために、高力ボルトに導入された軸力によって、連結板と母材との界面に発生する面圧力、および作用荷重によって、亀裂発生点に生じる応力が有限要素法解析によって調べられた¹¹⁾。しかし、フレットング疲労亀裂の発生メカニズムの解明には至っていない。他方、現在、アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針作成検討委員会が土木学会に設置され、同指針の中のアルミニウム合金板摩擦接合継手の疲労設計に関する規定の作成が急がれている。

この様な状況で、本研究は、既往の疲労試験結果^{9),10)}に基づいて、アルミニウム合金板摩擦接合継手の設計S-N曲線を作成する。

第2章 アルミニウム合金板摩擦接合継手の疲労試験結果

2.1 疲労亀裂の発生位置

図 2.1 に示す，1 列ボルトのアルミニウム合金板摩擦接合継手に対して疲労試験が実施された^{9),10)}．母材の板厚は 8mm であり，連結板に対して 4mm，6mm，8mm の 3 種類の板厚が考慮された．母材および連結板に使用されたアルミニウム合金は，厚さが 4mm と 6mm の板に対して A6061P-T6，8mm の板に対して A6061P-T651 である．連結板の摩擦面（母材側）は，長辺の角を 1mm 面取りした後，材縁から 5mm 離れた，内側の部分がブラスト処理された．試験片に使用された鋼製高力ボルトは M20 であり，ボルト孔径は 22mm である．F8T および F10T のボルトの初期導入軸力は，道路橋示方書¹²⁾に規定される設計ボルト軸力の一割増しとし，それぞれ 146kN，182kN である．

疲労試験により，図 2.2 に示す，3 箇所疲労亀裂が発生した．これらの疲労亀裂は，いずれも，板の表面と表面がこすれ合って発生するフレットング疲労亀裂であった．3 箇所に発生した疲労亀裂は次の通りである．

タイプ I

この亀裂は，連結板の表面（座金側）において，ボルトの座金との接触部の縁上で，荷重方向に対して，突合せ側から約 30° の位置に発生する．一方の亀裂は，荷重方向に対して直角方向に，連結板の材縁に向かって伝播し，他方の亀裂は接触部の縁に沿って伝播する．

タイプ II

この亀裂は，連結板の裏面（母材側）において，母材との接触部の縁上で，荷重方向に対して，突合せ側から約 40° の位置に発生する．一方の亀裂は，荷重方向に対して直角方向に，連結板の材縁に向かって伝播し，他方の亀裂は接触部の縁に沿って伝播する．

タイプ III

この亀裂は，母材表面において，連結板との接触部の縁上で，荷重方向に対して，突合せ側から約 120° の位置，すなわち突合せ側とは反対の位置に発生する．一方の亀裂は，荷重方向に対して直角方向に，母材の材縁に向かって伝播し，他方の亀裂は，接触部の内側をボルト孔の縁に向かって伝播する．

疲労試験結果のまとめを表 2.1 に示す．

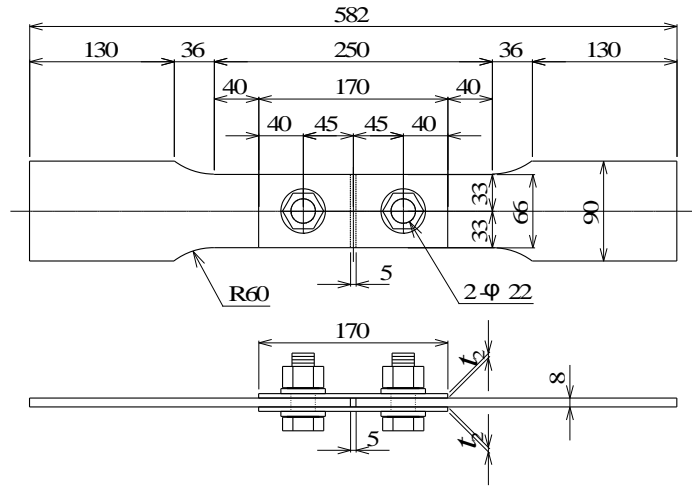
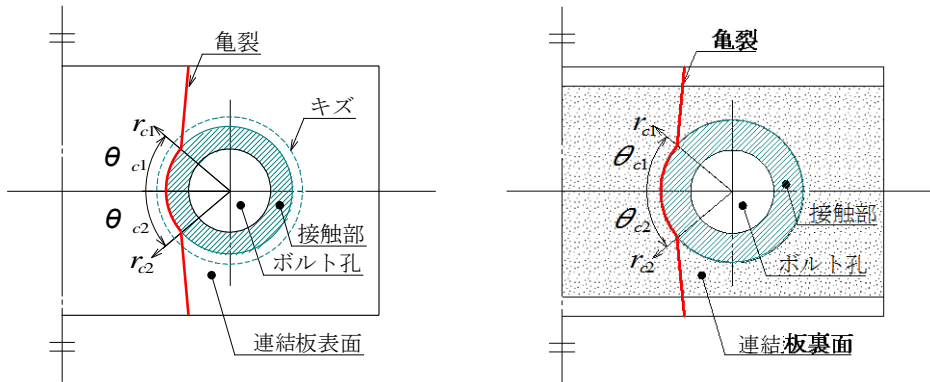
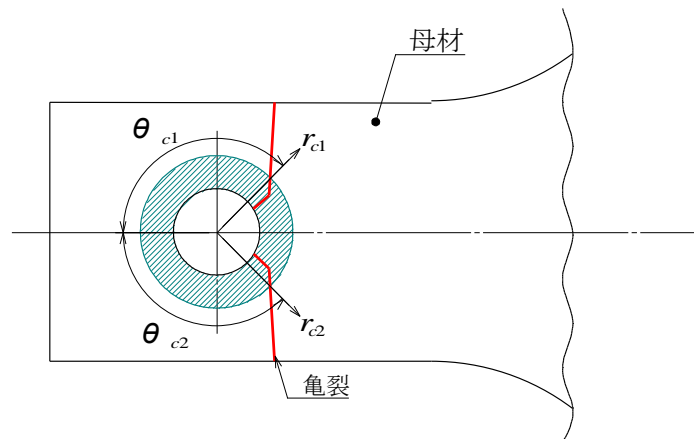


図 2.1 疲労試験片



(a) タイプ I (連結板表面)

(b) タイプ II (連結板裏面)



(c) タイプ III (母材)

図 2.2 疲労亀裂の発生位置

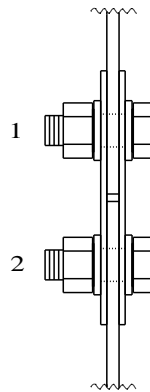
表 2.1 疲労試験結果のまとめ

試験片	t_2 (mm)	P_{re} (kN)	R	$\Delta\sigma_1$ (MPa)	破断までの 载荷回数	ボ ルト *2	亀 裂 タ イ プ	連結板		母 材	r_{c1} (mm)	θ_{c1} (°)	r_{c2} (mm)	θ_{c2} (°)
								ナット 側	ボルト 頭側					
FA-1	4	146	0.1	150	141003	1	I	●	—	—	15.3	45.0	15.5	29.6
FA-2				100	466578	1	I	●	—	—	15.6	29.0	—	—
						1	I	—	◎	—	17.9	28.5	17.2	31.1
FA-3				70	1772431	1	I	◎	—	—	16.6	38.1	—	—
						2	I	◎	—	—	17.9	35.0	16.6	28.6
						1	I	—	●	—	17.5	20.3	15.9	24.6
FA-4	50	7123640	2	I	—	●	—	17.5	32.3	16.8	18.7			
FA-5	40	20000000* ¹	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
FB-1	4	146	-1	150	564181	2	II	●	—	—	17.2	45.0	17.9	52.0
						1	I	—	◎	—	16.6	36.8	16.0	26.5
FB-2				100	1688630	2	II	●	—	—	18.9	38.4	18.2	45.0
						2	I	—	◎	—	16.9	37.3	—	—
FB-3				70	8382698	2	I	●	—	—	17.5	16.9	17.9	27.3
						2	II	—	◎	—	19.7	43.0	—	—
FC-1	4	182	0.1	150	105086	1	I	●	—	—	17.3	23.5	18.1	34.0
FC-2				100	572011	1	I	◎	—	—	17.0	30.0	16.8	38.7
						2	I	○	—	—	17.0	23.2	16.4	32.0
						1	I	—	◎	—	17.6	31.4	—	—
FC-3				70	1903905	2	II	◎	—	—	19.4	32.9	18.0	36.7
						2	I	—	●	—	18.0	43.3	17.6	36.8
FC-4				50	7532218	2	I	●	—	—	17.0	37.1	18.6	39.3
						2	I	—	◎	—	18.2	26.0	—	—
FD-1	4	182	0.5	80	578977	1	I	●	—	—	16.0	29.1	16.0	26.7
						2	I	◎	—	—	18.8	31.9	—	—
						1	I	—	◎	—	17.1	26.5	17.1	28.3
FD-2				50	2148014	2	I	—	●	—	20.3	20.3	20.1	18.3
						1	III	—	—	◎	15.2	150.4	—	—
FD-3				40	8473525	2	I	◎	—	—	17.5	20.6	18.8	30.1
	1	I	○			—	—	18.2	34.5	—	—			
	1	II	—			●	—	19.0	46.4	20.3	37.7			
FD-4	30	25000000* ¹	2	—	—	○	—	—	—	—				

表 2.1 疲労試験結果のまとめ (その2)

試験片	t_2 (mm)	P_{re} (kN)	R	$\Delta\sigma_1$ (MPa)	破断までの 载荷回数	ボルト *2	亀裂 タイプ	連結板		母材	r_{c1} (mm)	θ_{c1} (°)	r_{c2} (mm)	θ_{c2} (°)
								ナット 側	ボルト 頭側					
FE-1	6	182	0.1	150	268339	1	III	—	—	●	18.6	111.1	18.8	123.4
FE-2				120	602623	2	III	—	—	●	19.3	116.0	—	—
FE-3				100	893511	2	III	—	—	●	17.2	119.2	—	—
						2	IV*3	—	◎	—	—	—	—	—
FE-4				70	4034636	2	I	●	—	—	17.4	29.3	18.0	23.7
						2	I	—	◎	—	17.1	13.6	17.6	32.1
FF-1	8	182	0.1	150	307785	1	III	—	—	◎	21.3	120.9	—	—
2						III	—	—	●	18.5	131.0	—	—	
FF-2				150	270908	2	III	—	—	●	19.2	118.1	—	—
FF-3				100	1050673	1	III	—	—	◎	21.8	127.1	—	—
						2	III	—	—	●	21.0	123.9	19.4	118.4
FF-4				90	2333636	1	III	—	—	●	21.3	128.5	19.6	129.9
	1	IV*3	◎			—	—	—	—	—	—			
	1	IV*3	—			◎	—	—	—	—	—			
FE-5	80	9678502	2	III	—	—	●	22.4	120.9	—	—			
FF-6	70	10000000*1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		

ここに、 t_2 : 連結板の厚さ、 P_{re} : 初期導入軸力、 R : 応力比、 $\Delta\sigma_1$: 母材の応力範囲.



*1 : 記載の繰返し回数において試験片が未破断

*2 : 1 は上のボルト, 2 は下のボルト

*3 : 図 2.2 に示す, タイプ III の疲労亀裂が連結板とこすれることにより発生した連結板の疲労亀裂

● : 試験片を破断させた疲労亀裂

◎ : 試験片を破断させていないが, 板厚方向に貫通した疲労亀裂

○ : 板厚未貫通の表面亀裂

r_{c1} , θ_{c1} , r_{c2} , θ_{c2} : 図 2.2 に示す, ボルト孔中心を原点とする極座標で表した疲労亀裂の発生位置

2.2 S-N 曲線

初期導入軸力 P_{re} が S-N 関係に与える影響を図 2.3 に示す。応力比は $R=0.1$ である。連結板の厚さ t_2 は 4mm である。母材の応力範囲 $\Delta\sigma_1$ を縦軸に採っている。発生した疲労亀裂は全てタイプ I である。初期導入軸力 P_{re} の大きさの違いを○と●で区別している。初期導入軸力 $P_{re}=146\text{kN}$ と 182kN に対する S-N 関係はほぼ同じであるので、F8T と F10T の初期導入軸力の違いによる疲労強度の違いはない。

S-N 曲線は次式で与えられる。

$$\log N = \log c - m \log(\Delta\sigma_1) \quad (2.1)$$

ここに、 N ：繰返し回数、 $\Delta\sigma_1$ ：母材の応力範囲、 m と $\log c$ ：定数。

図 2.3 に描かれた直線は、 $\log(\Delta\sigma_1)$ を独立変数、 $\log N$ を従属変数として、式(2.1)に最小二乗法を適用することによって決定された平均寿命に対する S-N 曲線、すなわち平均 S-N 曲線である。S-N 曲線の m と $\log c$ の値を表 2.2 に示す。さらに同表には次式で計算される、任意の $\log(\Delta\sigma_1)$ に対する $\log N$ の標準偏差 ξ_N も示されている。

$$\xi_N = \left[\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n \left\{ \log N_i - \log c + m \log(\Delta\sigma_{i,1}) \right\}^2 \right]^{0.5} \quad (2.2)$$

ここに、 $\Delta\sigma_{i,1}$ と N_i ：それぞれ、試験片 i の母材の応力範囲と繰返し回数、 n ：破断した試験片の総数。

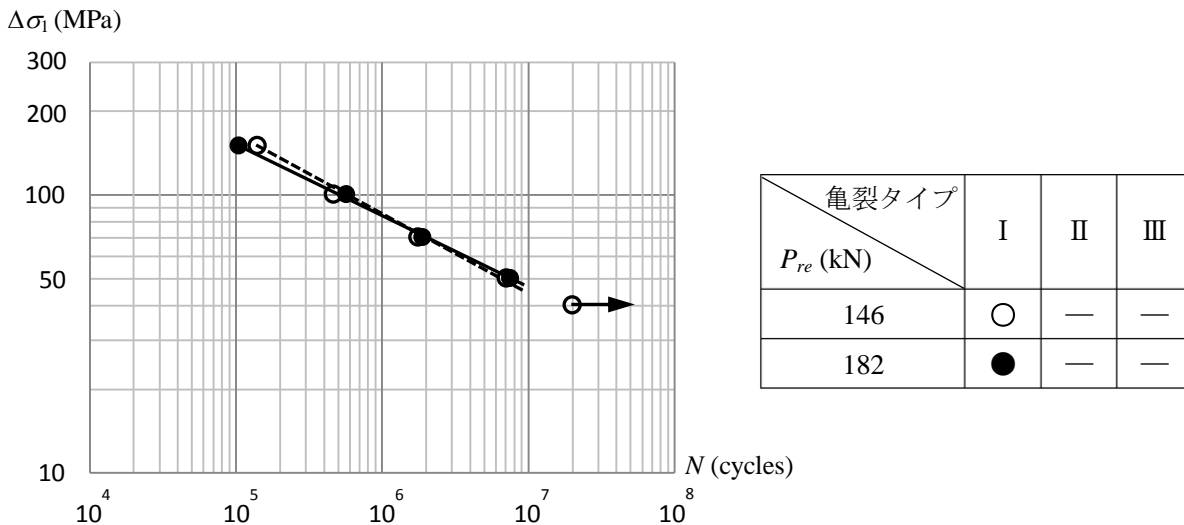


図 2.3 初期導入軸力 P_{re} が S-N 関係に与える影響

表 2.2 m , $\log c$, ξ_N の値

P_{re} (kN)	R	t_2 (mm)	m	$\log c$	ξ_N
146	0.1	4	3.595	12.919	0.069
182			3.848	13.411	0.039

応力比 R が S-N 関係に与える影響を図 2.4 に示す。連結板の厚さ t_2 は 4mm である。 R の大きさの違いを○, ●, △で区別し, 発生した疲労亀裂のタイプを黒色 (タイプ I) と青色 (タイプ II) で区別している。前述したように, 初期導入軸力の大きさの違いによって疲労強度が変わらないので, $R=0.1$ に対しては $P_{re}=146\text{kN}$ と 182kN の試験結果を一つにまとめている。 $R=-1$ に対して $P_{re}=146\text{kN}$, $R=0.5$ に対して $P_{re}=182\text{kN}$ で疲労試験が実施されている。 R が大きくなるに従って, 疲労強度は低下する。 $R=0.1$ の場合, タイプ I の疲労亀裂だけが発生しているが, $R=-1$ と 0.5 の場合, タイプ I と II の疲労亀裂が発生している。 $R=-1$ と 0.5 の各応力比において, タイプ I と II のプロット点は同一の直線上に分布している。各応力比に対する S-N 曲線の m , $\log c$, ξ_N の値を表 2.3 に示す。各応力比に対する平均 S-N 曲線を図 2.4 に示す。傾き m は応力比 R に依らず, 互いに近い値をとる。

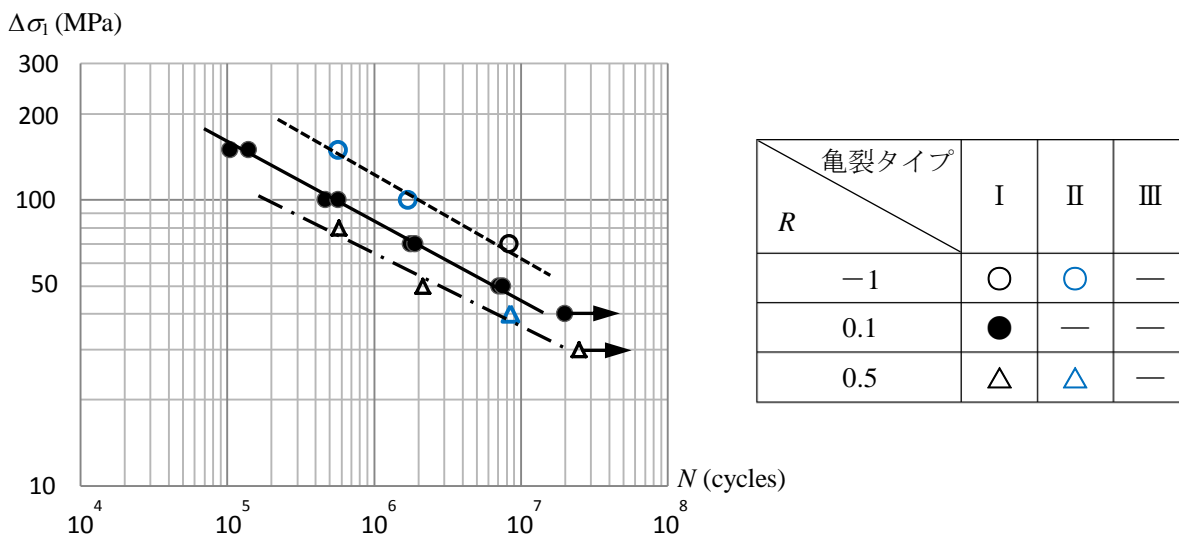
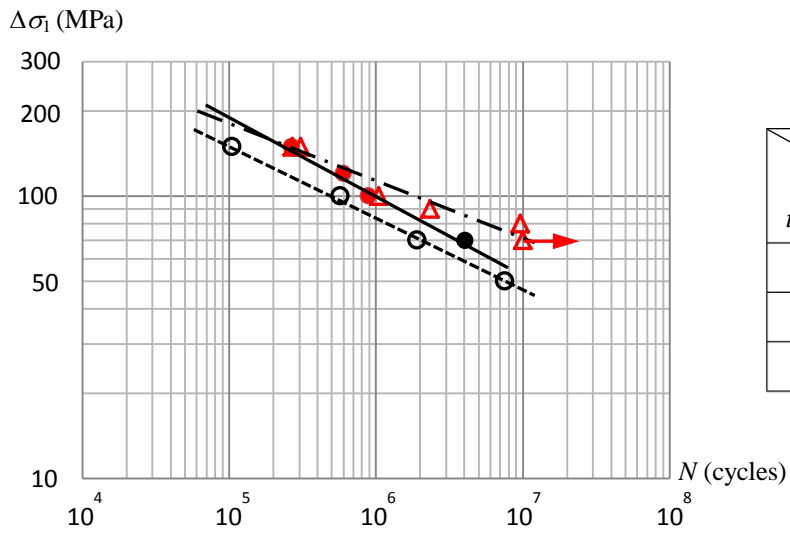


図 2.4 応力比 R が S-N 関係に与える影響

表 2.3 m , $\log c$, ξ_N の値

R	t_2 (mm)	m	$\log c$	ξ_N
-1	4	3.595	13.521	0.122
0.1		3.726	13.172	0.053
0.5		3.882	13.074	0.181

連結板の厚さ t_2 が S-N 関係に与える影響を図 2.5 に示す。応力比は $R=0.1$, 初期導入軸力は $P_{re}=182\text{kN}$ である。連結板の厚さ t_2 の違いを○, ●, △で区別し, 発生した疲労亀裂のタイプを黒色 (タイプ I) と赤色 (タイプ III) で区別している。連結板が厚くなるに従って, 疲労強度は上昇する。連結板の厚さが 4mm のとき, タイプ I の疲労亀裂だけが発生し, 連結板の厚さが 8mm のとき, タイプ III の疲労亀裂だけが発生している。すなわち, 連結板が厚くなると, 疲労亀裂の発生位置が連結板から母材へ移る。連結板の各厚さに対する S-N 曲線の m , $\log c$, ξ_N の値を表 2.4 に示す。各厚さに対する平均 S-N 曲線を図 2.5 に示す。連結板の厚さが 8mm に対する S-N 曲線の傾きは, 他の厚さと比較して勾配が小さくなる。



亀裂タイプ t_2 (mm)	I	II	III
4	○	—	—
6	●	—	●
8	—	—	△

図 2.5 連結板の厚さ t_2 が S-N 関係に与える影響

表 2.4 m , $\log c$, ξ_N の値

t_2 (mm)	R	m	$\log c$	ξ_N
4	0.1	3.848	13.411	0.039
6		3.546	13.122	0.065
8		5.316	16.914	0.228

第3章 アルミニウム合金板摩擦接合継手の設計 S-N 曲線

3.1 連結板の設計 S-N 曲線

2.2 節で述べたように、連結板に発生するタイプ I と II の疲労亀裂の S-N 関係は同一の分布として扱うことができる。したがって、タイプ I と II の疲労亀裂をまとめて連結板の疲労亀裂と以後呼ぶ。連結板の疲労亀裂の S-N 関係を図 3.1 に示す。同図の縦軸には、連結板の応力範囲 $\Delta\sigma_2$ を採っている。図 3.1 は図 2.4 に似ているが、両者の違いは、応力比 $R=0.1$ で、連結板の厚さ $t_2=6\text{mm}$ に対する疲労試験結果が図 3.1 に追加されていることである。応力比 R が大きくなるに従って、疲労強度は低下する。

次式で与えられる平均 S-N 曲線を図 3.1 に示す。

$$\log N = \log c_2 - m \log(\Delta\sigma_2) \quad (3.1)$$

ここに、 N ：繰返し回数、 $\Delta\sigma_2$ ：連結板の応力範囲、 m と $\log c_2$ ：定数。

$\log(\Delta\sigma_2)$ を独立変数、 $\log N$ を従属変数として、式(3.1)に最小二乗法を適用することによって得られる m と $\log c_2$ の値を表 3.1 に示す。同表には次式で計算される、任意の $\log(\Delta\sigma_2)$ に対する $\log N$ の標準偏差 ξ_{2N} も示されている。

$$\xi_{2N} = \left[\frac{1}{n_2 - 2} \sum_{i=1}^{n_2} \{ \log N_i - \log c_2 + m \log(\Delta\sigma_{i,2}) \}^2 \right]^{0.5} \quad (3.2)$$

ここに、 $\Delta\sigma_{i,2}$ と N_i ：それぞれ、試験片 i の連結板の応力範囲と繰返し回数、 n_2 ：連結板で破断した試験片の総数。

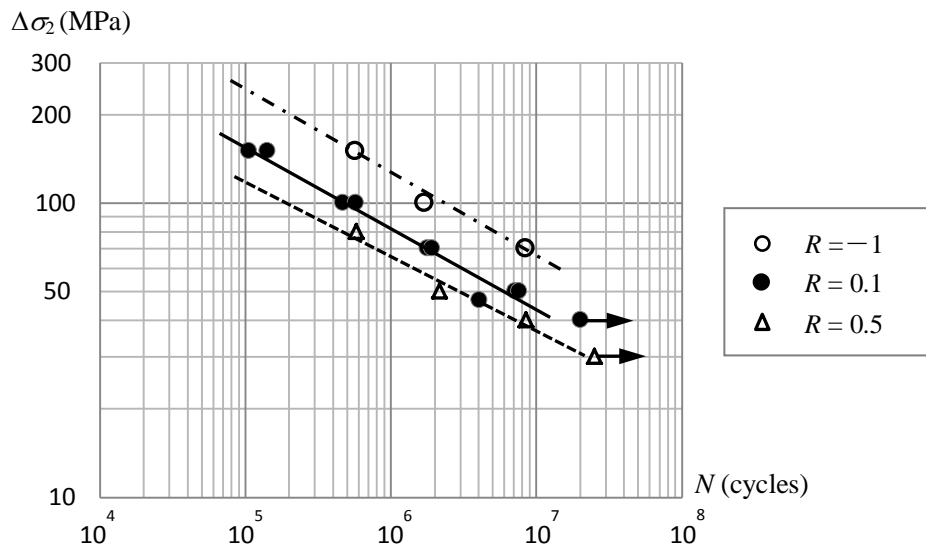


図 3.1 連結板の S-N 関係

表 3.1 $m, \log c_2, \xi_{2N}$ の値

R	m	$\log c_2$	ξ_{2N}
-1	3.598	13.521	0.122
0.1	3.547	12.795	0.122
0.5	3.881	13.074	0.181

表 3.1 に示すように、傾き m は応力比 R に依らず互いに近い値をとっている。疲労設計においては、S-N 曲線の傾き m に大きな違いがなければ、疲労設計が煩雑になることを避けるために、応力比 R は一定であることが望まれる。そこで、本研究では、疲労試験片の数が最も多い、 $R=0.1$ の $m=3.547$ を $R=-1$ と 0.5 の傾きに対しても適用する。 $R=-1$ と 0.5 の場合の傾き m を 3.547 に固定して、最小二乗法を適用して得られる結果を表 3.2 に示す。同表には次式で計算される、任意の $\log(\Delta\sigma_2)$ に対する $\log N$ の標準偏差 ξ_{2N} も示されている。

$$\xi_{2N} = \left[\frac{1}{n_2 - 1} \sum_{i=1}^{n_2} \{ \log N_i - \log c_2 + m \log(\Delta\sigma_{i,2}) \}^2 \right]^{0.5} \quad (3.3)$$

ここに、 $\Delta\sigma_{i,2}$ と N_i : それぞれ、試験片 i の連結板の応力範囲と繰返し回数、 n_2 : 連結板で破断した試験片の総数。

ここで、表 3.2 の $R=0.1$ に対する $m, \log c_2, \xi_{2N}$ の値は表 3.1 の値と同じである。

本研究では、次式によって疲労寿命のばらつきを考慮する。

$$\log c_{2a} = \log c_2 - 2\xi_{2N} \quad (3.4)$$

ここに、 $\log c_{2a}$: 疲労寿命のばらつきを考慮して、 $\log c_2$ を低下させた値。

式(3.4)が与える $\log c_{2a}$ の値を表 3.2 に示す。

表 3.2 $m, \log c_2, \xi_{2N}, \log c_{2a}, \Delta\sigma_{2caf}$ の値

R	m	$\log c_2$	ξ_{2N}	$\log c_{2a}$	$\Delta\sigma_{2caf}$ (MPa)
-1	3.547	13.421	0.085	13.251	57.8
0.1	3.547	12.795	0.122	12.551	36.7
0.5	3.547	12.495	0.127	12.241	30.0

次式に示すように、式(3.1)の $\log c_2$ を $\log c_{2a}$ に置き換え、さらに同式の $\Delta\sigma_2$ を許容応力範囲 $\Delta\sigma_{2a}$ に置き換えて、連結板の設計 S-N 曲線が次式で与えられる。

$$\log N = \log c_{2a} - 3.547 \log(\Delta\sigma_{2a}) \quad (3.5)$$

ここに、 N : 繰返し回数、 $\Delta\sigma_{2a}$: 連結板の許容応力範囲。

式(3.5)が与える設計 S-N 曲線を図 3.2 に示す。設計 S-N 曲線は試験値の下限付近を通過している。

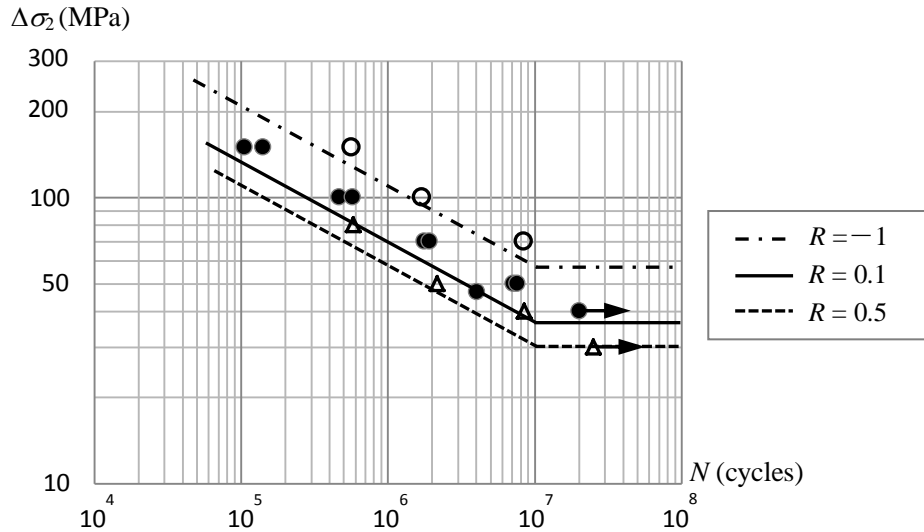


図 3.2 連結板の設計 S-N 曲線

表 3.2 の $\log c_{2a}$ と R の関係を図 3.3 に示す. $\log c_{2a}$ と R の関係はほぼ直線である. したがって, $R = -1$, 0.1, 0.5 の各応力比に対する $\log c_{2a}$ の値を直線補間することにより, 両者の関係に対して次式を得る.

$$\log c_{2a} = -0.636R + 12.615 \quad (-1 \leq R \leq 0.1) \quad (3.6)$$

$$\log c_{2a} = -0.775R + 12.629 \quad (0.1 \leq R \leq 0.5) \quad (3.7)$$

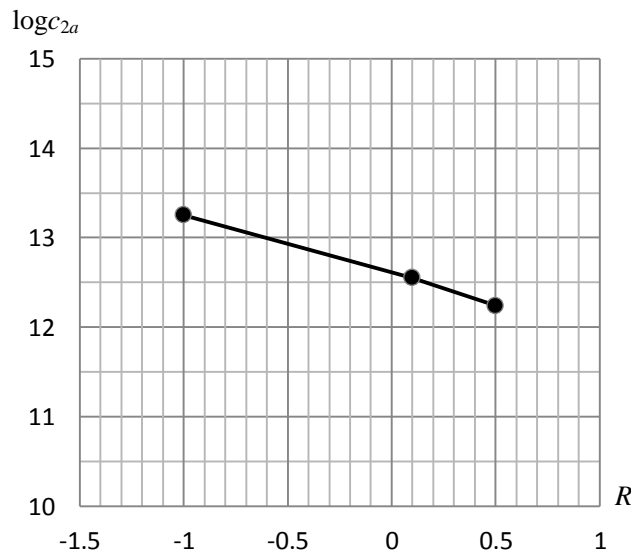


図 3.3 $\log c_{2a}$ と応力比 R の関係

式(3.6)と(3.7)を式(3.5)に代入して, 連結板の設計 S-N 曲線として次式を得る.

$$\log N = 12.615 - 0.636R - 3.547 \log(\Delta\sigma_{2a}) \quad (-1 \leq R \leq 0.1) \quad (3.8)$$

$$\log N = 12.629 - 0.775R - 3.547 \log(\Delta\sigma_{2a}) \quad (0.1 \leq R \leq 0.5) \quad (3.9)$$

次に、連結板の疲労限度 $\Delta\sigma_{2caf}$ について考察する．疲労試験において、疲労限度を決定するに十分な試験結果がない．そこで、本研究では、繰返し回数 $N=10^7$ に対して、連結板の設計 S-N 曲線が与える疲労強度を疲労限度とする．式(3.8)と(3.9)に $N=10^7$ を代入して、 $\Delta\sigma_{2caf}$ と R の関係式として次式を得る．

$$\Delta\sigma_{2caf} = 10^{1.5830-0.1793R} \quad (-1 \leq R \leq 0.1) \quad (3.10)$$

$$\Delta\sigma_{2caf} = 10^{1.5870-0.2185R} \quad (0.1 \leq R \leq 0.5) \quad (3.11)$$

式(3.10)と(3.11)が与える $\Delta\sigma_{2caf}$ と R の関係を図 3.4 に示す．両者の関係はほぼ直線関係にあるので、両者の関係は次式で近似される．

$$\Delta\sigma_{2caf} = -19.20R + 38.65 \quad (-1 \leq R \leq 0.1) \quad (3.12)$$

$$\Delta\sigma_{2caf} = -16.73R + 38.41 \quad (0.1 \leq R \leq 0.5) \quad (3.13)$$

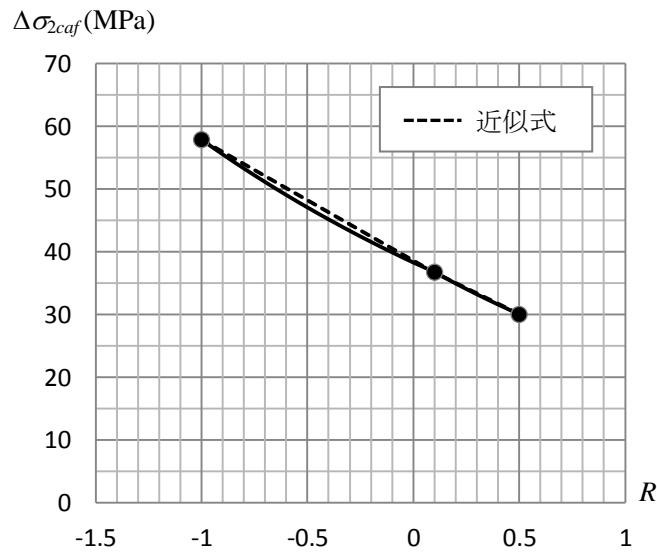


図 3.4 疲労限度 $\Delta\sigma_{2caf}$ と応力比 R の関係

$R=-1, 0.1, 0.5$ の各応力比に対する $\Delta\sigma_{2caf}$ の値を表 3.2 に示す．図 3.2 に示すように、 $R=0.1$ と 0.5 の各場合において、破断しなかった試験片の疲労強度が疲労限度より上にある．

疲労設計において、母材に生じる応力のみならず、連結板に生じる応力に対しても疲労照査することは煩雑になるので、連結板の設計 S-N 曲線および疲労限度を母材の設計 S-N 曲線および疲労限度として表すことについて考える．

本研究が扱う摩擦接合継手は、母材の両面に連結板を重ねるので次式が成立する．

$$t_1\Delta\sigma_1 = 2t_2\Delta\sigma_2 \quad (3.14)$$

ここに、 t_1 ：母材の厚さ、 t_2 ：連結板 1 枚の厚さ、 $\Delta\sigma_1$ ：母材に作用する応力範囲、 $\Delta\sigma_2$ ：連結板に作用する応力範囲．

したがって、母材の設計 S-N 曲線が与える許容応力範囲および疲労限度をそれぞれ $\Delta\sigma_{1a}$ 、 $\Delta\sigma_{1caf}$ で表すと、連結板の設計 S-N 曲線が与える許容応力範囲 $\Delta\sigma_{2a}$ および疲労限度 $\Delta\sigma_{2caf}$ は、これらと次の関係を有する．

$$\Delta\sigma_{2a} = \frac{t_1}{2t_2} \Delta\sigma_{1a} \quad (3.15)$$

$$\Delta\sigma_{2caf} = \frac{t_1}{2t_2} \Delta\sigma_{1caf} \quad (3.16)$$

式(3.15)を式(3.8)と(3.9)に代入して、連結板の設計 S-N 曲線は、母材のそれとしては次のように与えられる。

$$\log N = 12.615 - 0.636R + 3.547 \log \frac{2t_2}{t_1} - 3.547 \log(\Delta\sigma_{1a}) \quad (-1 \leq R \leq 0.1) \quad (3.17)$$

$$\log N = 12.629 - 0.775R + 3.547 \log \frac{2t_2}{t_1} - 3.547 \log(\Delta\sigma_{1a}) \quad (0.1 \leq R \leq 0.5) \quad (3.18)$$

式(3.16)を式(3.12)と(3.13)に代入して、連結板の疲労限度は、母材のそれとしては次のように与えられる。

$$\Delta\sigma_{1caf} = \frac{2t_2}{t_1} (-19.20R + 38.65) \quad (-1 \leq R \leq 0.1) \quad (3.19)$$

$$\Delta\sigma_{1caf} = \frac{2t_2}{t_1} (-16.73R + 38.41) \quad (0.1 \leq R \leq 0.5) \quad (3.20)$$

式(3.17)～(3.20)から分かるように、母材の応力で表示された、連結板の許容応力範囲は、板厚比 t_2/t_1 が大きくなるに従って、見かけ上大きくなる。

3.2 母材の設計 S-N 曲線

母材に発生したタイプⅢの疲労亀裂の S-N 関係を図 3.5 に示す。同図の縦軸には、母材の応力範囲 $\Delta\sigma_1$ を採っている。同図は、第 2 章の図 2.5 で示した、タイプⅢの疲労亀裂が発生した試験片（連結板の厚さが 6mm と 8mm の試験データ）を一つにまとめたものである。応力比 R は 0.1 である。タイプⅢの疲労亀裂を母材の疲労亀裂と以後呼ぶ。

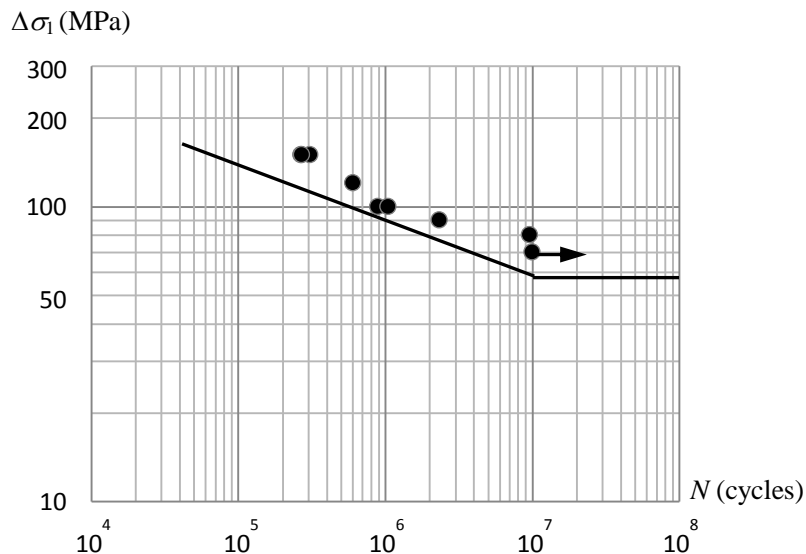


図 3.5 母材の S-N 関係

母材の疲労亀裂に対する S-N 曲線が次式で与えられる。

$$\log N = \log c_1 - m \log(\Delta\sigma_1) \quad (3.21)$$

ここに、 N ：繰返し回数、 $\Delta\sigma_1$ ：母材の応力範囲、 m と $\log c_1$ ：定数。

$\log(\Delta\sigma_1)$ を独立変数、 $\log N$ を従属変数として、式(3.21)に最小二乗法を適用して得られる m と $\log c_1$ の値を表 3.3 に示す。同表には次式で計算される、任意の $\log(\Delta\sigma_1)$ に対する $\log N$ の標準偏差 ξ_{1N} も示されている。

$$\xi_{1N} = \left[\frac{1}{n_1 - 2} \sum_{i=1}^{n_1} \{ \log N_i - \log c_1 + m \log(\Delta\sigma_{i,1}) \}^2 \right]^{0.5} \quad (3.22)$$

ここに、 $\Delta\sigma_{i,1}$ と N_i ：試験片 i の母材の応力範囲と繰返し回数、 n_1 ：母材が破断した試験片の総数。

表 3.3 m , $\log c_1$, ξ_{1N} , $\log c_{1a}$, $\Delta\sigma_{1caf}$ の値

R	m	$\log c_1$	ξ_{1N}	$\log c_{1a}$	$\Delta\sigma_{1caf}$ (MPa)
0.1	5.225	16.684	0.206	16.272	59.5

前節と同様に、疲労試験結果のばらつきを次式によって考慮する。

$$\log c_{1a} = \log c_1 - 2\xi_{1N} \quad (3.23)$$

ここに、 $\log c_{1a}$ ：疲労寿命のばらつきを考慮して、 $\log c_1$ を低下させた値。

式(3.23)が与える $\log c_{1a}$ の値を表 3.3 に示す。次式に示すように、式(3.21)の $\log c_1$ を $\log c_{1a}$ に置き換え、さらに同式の $\Delta\sigma_1$ を許容応力範囲 $\Delta\sigma_{1a}$ に置き換えて、母材の設計 S-N 曲線が次式で与えられる。

$$\log N = \log c_{1a} - 5.225 \log(\Delta\sigma_{1a}) \quad (3.24)$$

ここに、 N ：繰返し回数、 $\Delta\sigma_{1a}$ ：母材の許容応力範囲。

式(3.24)が与える設計 S-N 曲線を図 3.5 に示す。設計 S-N 曲線は試験値の下限付近を通過している。

図 3.5 に示すように、母材の疲労試験データは応力比 $R=0.1$ に限られている。次に、 $R=-1$ と 0.5 に対して設計 S-N 曲線を作成する。

母材の疲労限度 $\Delta\sigma_{1caf}$ に対して、前節の連結板の疲労限度の設定の仕方と同様に、繰返し回数 $N=10^7$ に対して、母材の設計 S-N 曲線が与える疲労強度を疲労限度とする。 $N=10^7$ を式(3.24)に代入して得られる値を表 3.3 に示す。図 3.5 に示すように、破断しなかった試験片の疲労強度が疲労限度より上にある。

連結板において、 $R=0.1$ の疲労限度に対する $R=-1$ の疲労限度の比率および $R=0.1$ の疲労限度に対する $R=0.5$ の疲労限度の比率を、母材の $R=-1$ と 0.5 の疲労限度に適用する。すなわち、表 3.4 に示すように、母材の $R=-1$ の疲労限度は $\Delta\sigma_{1caf}=(57.8/36.7) \times 59.5=93.7\text{MPa}$ であり、 $R=0.5$ の疲労限度は $\Delta\sigma_{1caf}=(30.0/36.7) \times 59.5=48.6\text{MPa}$ である。さらに、表 3.4 に示す、 $R=-1$ と 0.5 に対する $\log c_{1a}$ の値は次式によって与えられる。

$$\log c_{1a} = 7 + 5.225 \log(\Delta\sigma_{1caf}) \quad (3.25)$$

ここで、 $\Delta\sigma_{1caf}$ は、 $R=-1$ と 0.5 に対して、それぞれ 93.9MPa , 48.6MPa である。式(3.25)は、 $R=-1$ と 0.5 の S-N 曲線の傾きが、 $R=0.1$ の S-N 曲線の傾き $m=5.225$ と同じであることを仮定している。

表 3.4 m , $\Delta\sigma_{1caf}$, $\log c_{1a}$ の値

R	m	$\Delta\sigma_{1caf}$ (MPa)	$\log c_{1a}$
-1	5.225	93.7	17.302
0.1	5.225	59.5	16.272
0.5	5.225	48.6	15.813

応力比 $R=-1, 0.1, 0.5$ に対する母材の設計 S-N 曲線を図 3.6 に示す.

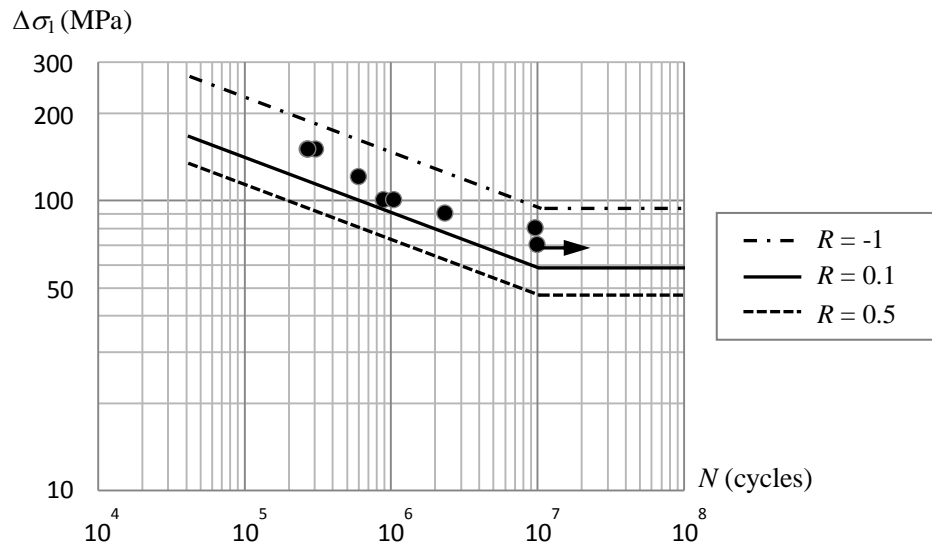


図 3.6 母材の設計 S-N 曲線

$\log c_{1a}$ と応力比 R の関係を図 3.7 に示す. $\log c_{1a}$ と R はほぼ直線関係にある. したがって, $R=-1, 0.1, 0.5$ の各応力比に対する $\log c_{2a}$ の値を直線補間することにより, 両者の関係に対して次式を得る.

$$\log c_{1a} = -0.937R + 16.365 \quad (-1 \leq R \leq 0.1) \quad (3.26)$$

$$\log c_{1a} = -1.147R + 16.386 \quad (0.1 \leq R \leq 0.5) \quad (3.27)$$

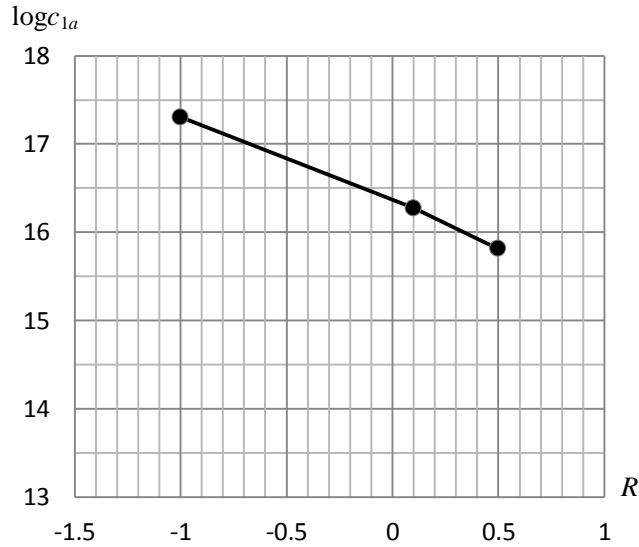


図 3.7 $\log c_{1a}$ と応力比 R の関係

式(3.26)と(3.27)を式(3.24)に代入して、母材の設計 S-N 曲線として次式を得る.

$$\log N = 16.365 - 0.937R - 5.225 \log(\Delta\sigma_{1a}) \quad (-1 \leq R \leq 0.1) \quad (3.28)$$

$$\log N = 16.386 - 1.147R - 5.225 \log(\Delta\sigma_{1a}) \quad (0.1 \leq R \leq 0.5) \quad (3.29)$$

$N=10^7$ を式(3.28)と(3.29)に代入して、母材の疲労限度 $\Delta\sigma_{1caf}$ と R の関係式として次式を得る.

$$\Delta\sigma_{1caf} = 10^{1.7923-0.1793R} \quad (-1 \leq R \leq 0.1) \quad (3.30)$$

$$\Delta\sigma_{1caf} = 10^{1.7964-0.2195R} \quad (0.1 \leq R \leq 0.5) \quad (3.31)$$

式(3.30)と(3.31)が与える $\Delta\sigma_{1caf}$ と R の関係を図 3.8 に示す. 両者の関係はほぼ直線関係にあるので, 両者の関係は次式で近似される.

$$\Delta\sigma_{1caf} = -31.08R + 62.59 \quad (-1 \leq R \leq 0.1) \quad (3.32)$$

$$\Delta\sigma_{1caf} = -27.20R + 62.20 \quad (0.1 \leq R \leq 0.5) \quad (3.33)$$

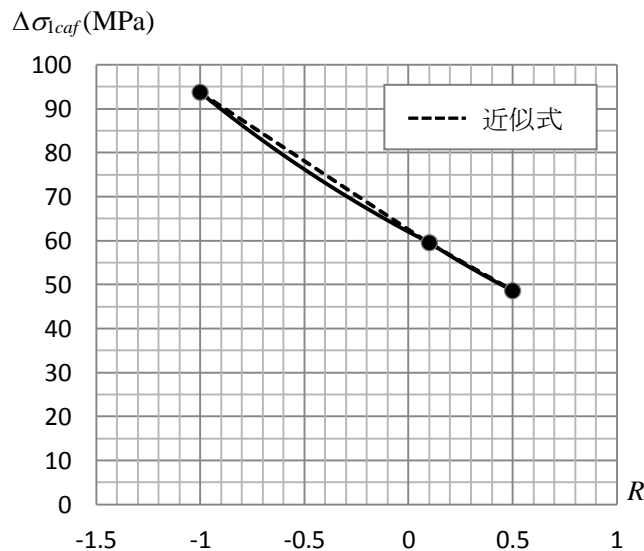
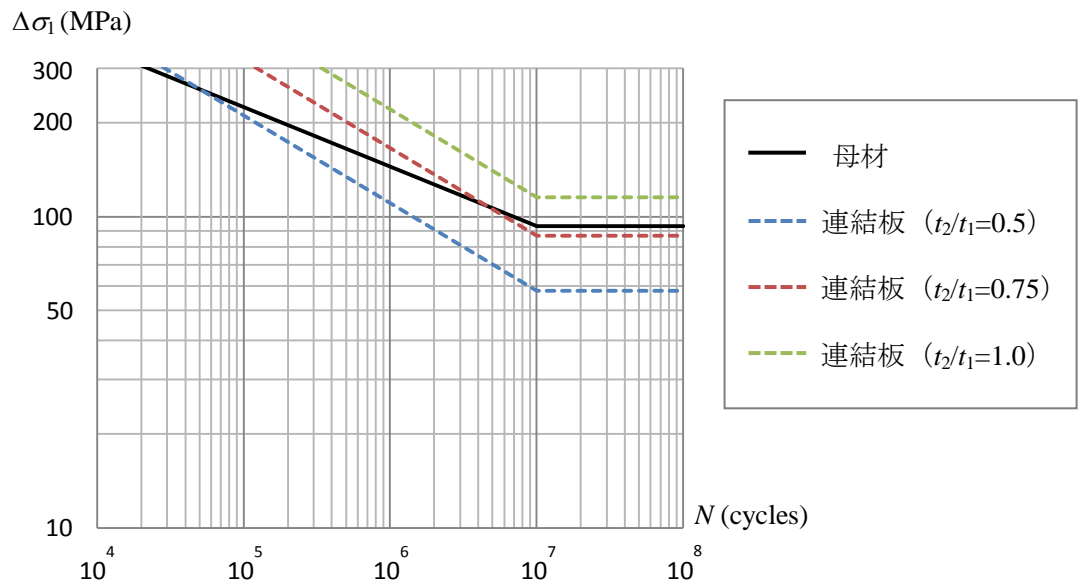


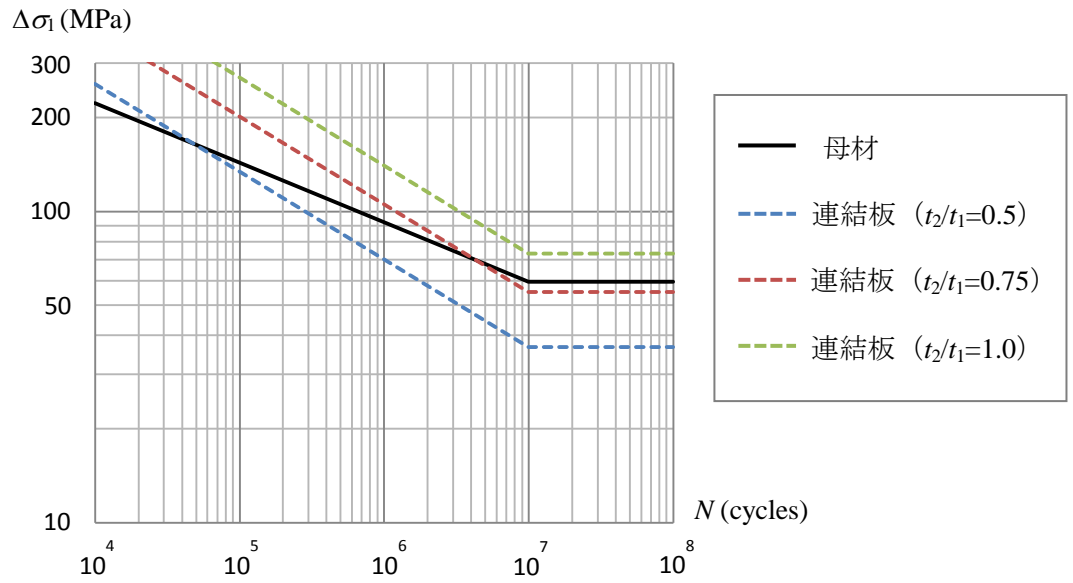
図 3.8 疲労限度 $\Delta\sigma_{1caf}$ と応力比 R の関係

3.3 設計 S-N 曲線の特徴

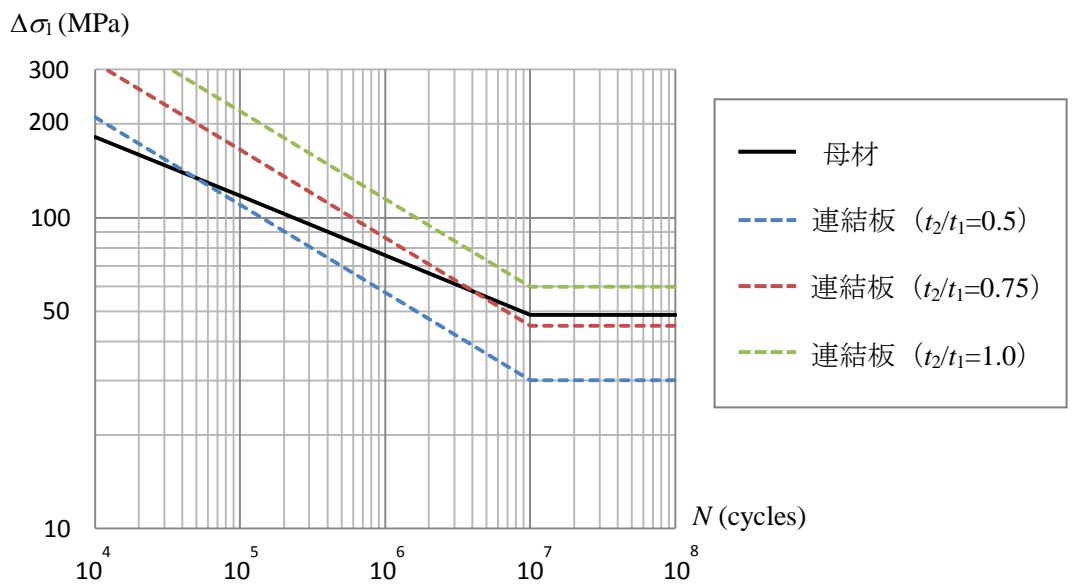
母材の設計 S-N 曲線[式(3.28), (3.29), (3.32), (3.33)]および連結板の設計 S-N 曲線[式(3.17)~(3.20)]が与える関係を図 3.9 に示す. 母材の設計 S-N 曲線と疲労限度は, 板厚比 t_2/t_1 に依らず変化しないが, 連結板のそれらは, 板厚比 t_2/t_1 が大きくなるに従って上昇する. 継手全体としての許容応力範囲は, 母材および連結板が与える許容応力範囲のどちらか低い方である. 図 3.9 に示すように, $t_2/t_1=0.5$ と 0.75 に対する連結板の設計 S-N 曲線は母材の設計 S-N 曲線と交差する. したがって, 継手全体としての許容応力範囲は, 設計疲労寿命の大きさによって, 母材または連結板の設計 S-N 曲線によって与えられる. $t_2/t_1=1.0$ の場合, 連結板の設計 S-N 曲線と疲労限度が母材のそれらより上にあるので, 継手全体としての許容応力範囲は, 母材の設計 S-N 曲線と疲労限度によって与えられる.



(a) $R=-1$



(b) $R=0.1$



(c) $R=0.5$

図 3.9 母材および連結板の設計 S-N 曲線

3.4 設計 S-N 曲線と疲労試験結果の比較

母材および連結板の設計 S-N 曲線と疲労試験結果を比較することにより，得られた設計 S-N 曲線の妥当性を調べる．疲労試験片の母材の厚さ 8mm に対して，4mm，6mm，8mm の厚さの連結板が考慮されたので，母材と連結板の板厚比 t_2/t_1 は 0.5，0.75，1.0 である．

応力比 $R=-1$ に対して，設計 S-N 曲線と疲労試験結果の比較を図 3.10 に示す．試験結果は○で表され，疲労亀裂は連結板だけに発生した．連結板の設計 S-N 曲線がプロット点の下を通過している．

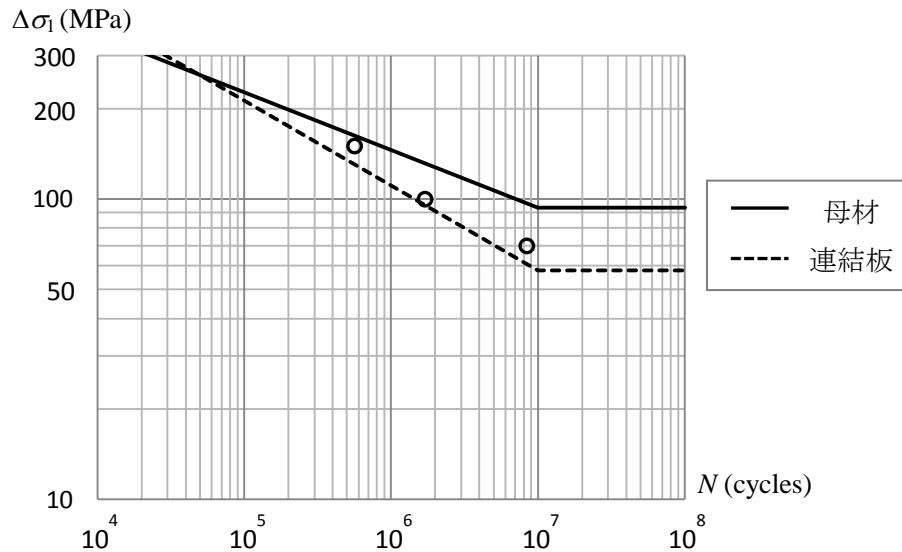


図 3.10 設計 S-N 曲線と疲労試験結果の比較 ($R=-1$, $t_2/t_1=0.5$)

応力比 $R=0.1$ に対して，設計 S-N 曲線と疲労試験結果の比較を図 3.11 に示す．母材に発生した疲労亀裂は●，連結板に発生した疲労亀裂は○で示してある．図 3.11 (a) に示すように，板厚比 $t_2/t_1=0.5$ の場合，発生した疲労亀裂はすべて連結板であり，連結板の設計 S-N 曲線がプロット点の下を通過している．図 3.11 (b) に示すように，板厚比 $t_2/t_1=0.75$ の場合，約 100 万回の繰返し回数以下では母材に疲労亀裂が発生し，約 400 万回の繰返し回数では連結板に疲労亀裂が発生している．前者に対しては，母材の設計 S-N 曲線がプロット点の下を通過している．後者に対しては，プロット点の上を連結板の設計 S-N 曲線が通過している．図 3.11 (c) に示すように，板厚比 $t_2/t_1=1.0$ の場合，発生した疲労亀裂はすべて母材であり，母材の設計 S-N 曲線がプロット点の下を通過している．

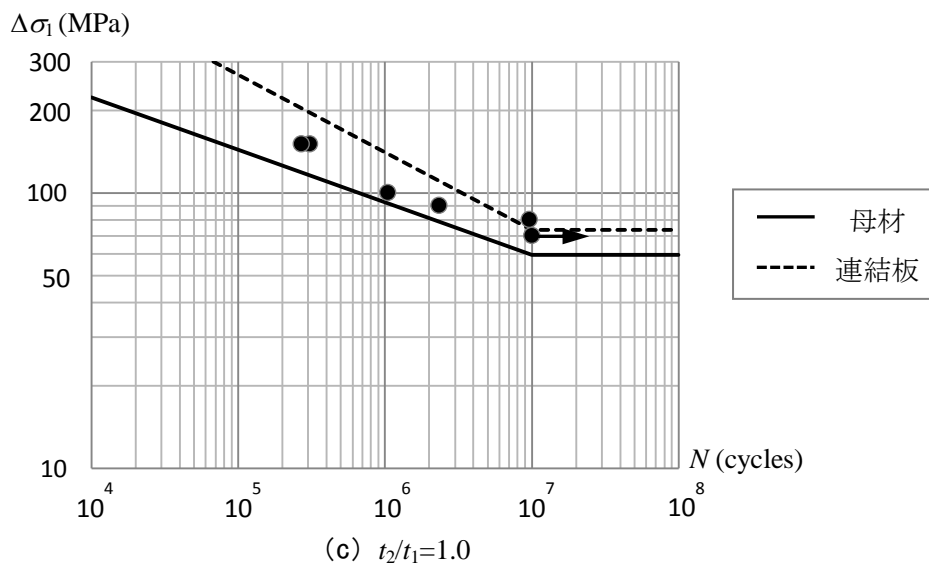
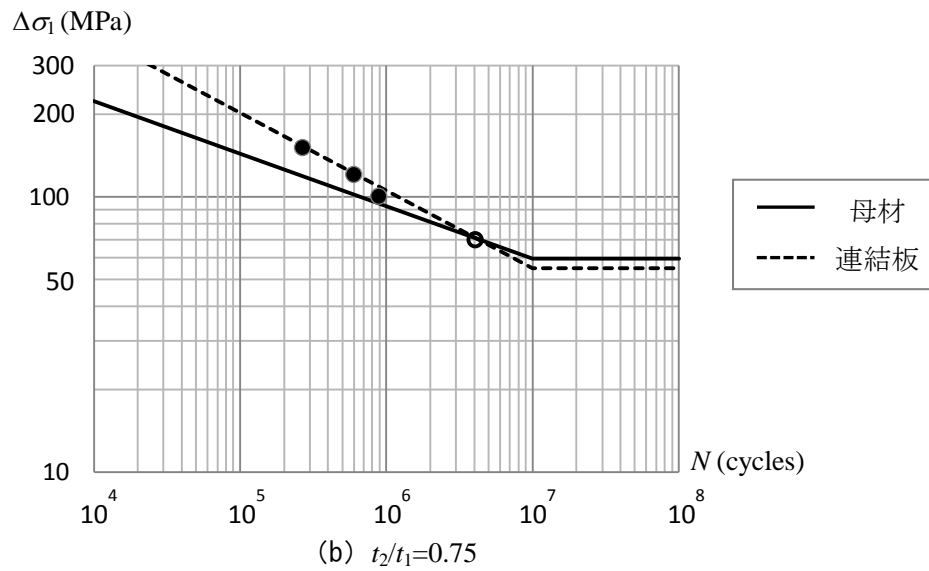
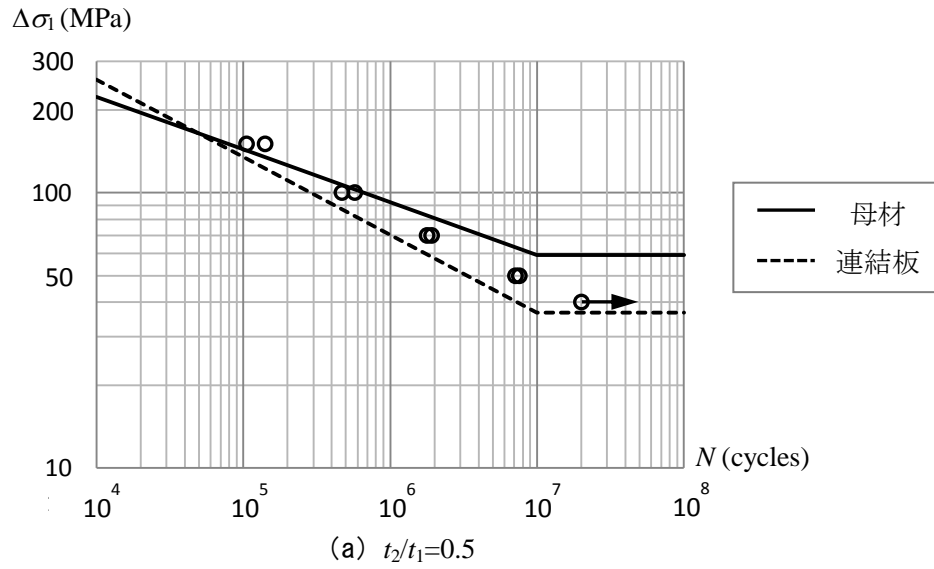


図 3.11 設計 S-N 曲線と疲労試験結果の比較 ($R=0.1$)

応力比 $R=0.5$ に対して，設計 S-N 曲線と疲労試験結果の比較を図 3.12 に示す．試験結果は○で表され，疲労亀裂は連結板だけに発生した．連結板の設計 S-N 曲線がプロット点の下を通過している．

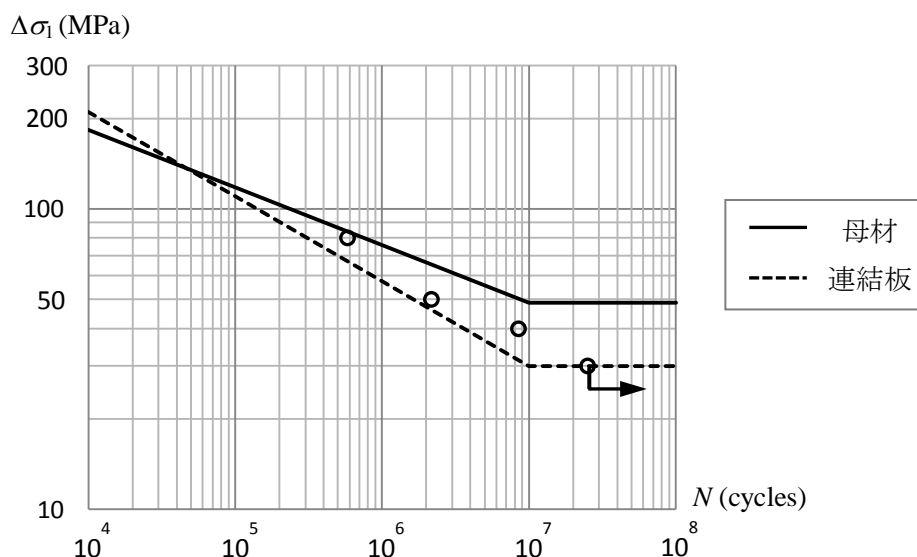


図 3.12 設計 S-N 曲線と疲労試験結果の比較 ($R=0.5$, $t_2/t_1=0.5$)

以上より，母材と連結板の設計 S-N 曲線は，疲労試験結果を適切に評価しているといえる．

3.5 連結板と母材の必要板厚比

3.3 節で述べたように，板厚比 t_2/t_1 に依存して母材と連結板の設計 S-N 曲線が交差する場合が生じる．疲労設計において，異なる設計 S-N 曲線を使用するのは，疲労設計を煩雑にするので避ける必要がある．次に，継手全体として一つの設計 S-N 曲線を与えることについて考える．

連結板の設計 S-N 曲線の勾配は母材のそれより大きいので，連結板の疲労限度が母材のそれより大きくなれば，連結板の設計 S-N 曲線も母材のそれより上に位置する．

式(3.19)と(3.32)および式(3.20)と(3.33)をそれぞれ等置することにより，連結板の疲労限度と母材の疲労限度が等しくなるときの連結板と母材の板厚比が次式で与えられる．

$$\frac{t_2}{t_1} = \frac{-15.54R + 31.30}{-19.20R + 38.65} \quad (-1 \leq R \leq 0.1) \quad (3.34)$$

$$\frac{t_2}{t_1} = \frac{-13.60R + 31.10}{-16.73R + 38.41} \quad (0.1 \leq R \leq 0.5) \quad (3.35)$$

式(3.34)と(3.35)が与える板厚比 t_2/t_1 と応力比 R の関係を図 3.13 に示す．板厚比 t_2/t_1 は応力比 R に依らずほぼ一定値 0.81 をとる．したがって，板厚比 t_2/t_1 を 0.81 以上とすることにより，疲労亀裂は母材だけに発生し，その設計 S-N 曲線と疲労限度は，式(3.28)，(3.29)，(3.32)，(3.33)で与えられる．

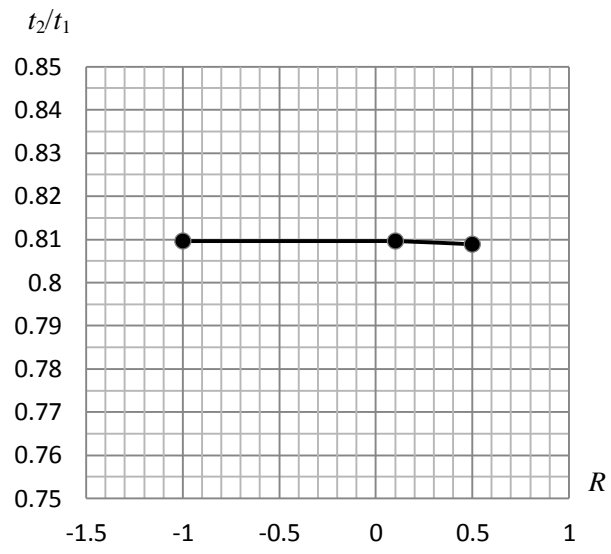


図 3.13 板厚比 t_2/t_1 と応力比 R の関係

第4章 結論

本研究では、既往の疲労試験結果^{9),10)}に基づいて、アルミニウム合金板摩擦接合継手の設計 S-N 曲線が作成された。本研究で得られた主な結論を以下に示す。

- (1) 母材および連結板の設計 S-N 曲線と疲労限度を表 4.1 に示す。連結板に生じる応力に対して作成された設計 S-N 曲線と疲労限度が母材に生じる応力で表されたので、表 4.1 (b) に示すように、連結板の設計 S-N 曲線と疲労限度には板厚比 t_2/t_1 が導入される。表 4.1 の設計 S-N 曲線と疲労限度は、ボルトの導入軸力が F8T と F10T の両方に適用できる。継手全体としての許容応力範囲は、母材および連結板が与える許容応力範囲のどちらか低い方である。

表 4.1 設計 S-N 曲線と疲労限度

(a) 母材

設計 S-N 曲線	
$-1 \leq R \leq 0.1$	$\log N = 16.365 - 0.937R - 5.225 \log(\Delta\sigma_{1a})$
$0.1 \leq R \leq 0.5$	$\log N = 16.386 - 1.147R - 5.225 \log(\Delta\sigma_{1a})$
疲労限度	
$-1 \leq R \leq 0.1$	$\Delta\sigma_{1caf} = -31.08R + 62.59$
$0.1 \leq R \leq 0.5$	$\Delta\sigma_{1caf} = -27.20R + 62.20$

(b) 連結板

設計 S-N 曲線	
$-1 \leq R \leq 0.1$	$\log N = 12.615 - 0.636R + 3.547 \log \frac{2t_2}{t_1} - 3.547 \log(\Delta\sigma_{1a})$
$0.1 \leq R \leq 0.5$	$\log N = 12.629 - 0.775R + 3.547 \log \frac{2t_2}{t_1} - 3.547 \log(\Delta\sigma_{1a})$
疲労限度	
$-1 \leq R \leq 0.1$	$\Delta\sigma_{1caf} = \frac{2t_2}{t_1} (-19.20R + 38.65)$
$0.1 \leq R \leq 0.5$	$\Delta\sigma_{1caf} = \frac{2t_2}{t_1} (-16.73R + 38.41)$

$\Delta\sigma_{1a}$: 許容応力範囲 (単位 : MPa)

$\Delta\sigma_{1caf}$: 疲労限度 (単位 : MPa)

R : 応力比

N : 繰返し回数

t_1 : 母材の厚さ

t_2 : 連結板の厚さ

- (2) 連結板の設計 S-N 曲線と疲労限度は、板厚比 t_2/t_1 が大きくなるに従って上昇し、板厚比 t_2/t_1 が 0.81 以上の場合、連結板の設計 S-N 曲線と疲労限度が母材のそれらより上に位置する。したがって、板厚比 t_2/t_1 が 0.81 以上の場合、表 4.1(a) の母材の設計 S-N 曲線と疲労限度が継手全体の設計 S-N 曲線と疲労限度になる。

本研究では、限られた試験データに基づいて設計 S-N 曲線が作成された。今後、母材と連結板の板厚、ボルト径、ボルト本数がフレット疲労強度に与える影響を明らかにし、本研究で作成された設計 S-N 曲線の適用範囲を明らかにしなければならない。

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，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疲労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.
- 3) 日本アルミニウム協会 土木構造物委員会：道路橋用アルミニウム床版を用いた鋼桁橋－設計・製作・施工ガイドライン，2011.
- 4) アルミニウム橋研究会：蒲原ケミカル橋，<http://alst.jp/str/bridge/kanbara.htm>
- 5) 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・製作指針案 第1次改訂試案，1998.
- 6) 土木学会：高力ボルト摩擦接合継手の設計・施工・維持管理指針（案），2008.
- 7) 萩澤亘保，大倉一郎：鋼製高力ボルトで締結されたアルミニウム合金板摩擦接合継手のすべり係数と鋼製高力ボルトの軸力低下，ALST 研究レポート，No.7，2009.
- 8) 大倉一郎，萩澤亘保，長尾隆史：アルミニウム合金板摩擦接合継手における鋼製高力ボルトの軸力低下，構造工学論文集，Vol.56A，pp.827-837，2010.
- 9) 大倉一郎，西田貴裕：アルミニウム合金板摩擦接合継手の疲労特性，ALST 研究レポート，No.8，2009.
- 10) 大倉一郎，中野崇志：アルミニウム合金板摩擦接合継手の疲労強度，ALST 研究レポート，No.14，2010.
- 11) 吉野浩祐，大倉一郎：アルミニウム合金板摩擦接合継手のフレッティング疲労亀裂発生に影響する因子，第67回年次学術講演会講演概要集，土木学会，I-272，2012.
- 12) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，I 共通編 II 鋼橋編，2012.