

連結板の厚さがアルミニウム合金板
摩擦接合継手の疲労強度に与える影響

ALST 研究レポート 35

2014 年 2 月

大阪大学大学院工学研究科
吉野浩祐, 大倉一郎

概要

本研究では、アルミニウム合金板摩擦接合継手のフレット疲労亀裂の発生点に生じる応力を FEM 解析によって求める。この応力を用いて S-N 曲線を与え、連結板の厚さがアルミニウム合金板摩擦接合継手の疲労強度に与える影響を明らかにする。

目次

第 1 章 序論	.....	1
第 2 章 導入ボルト軸力によって生じる応力と変形	.....	2
2.1 固着領域と擦れ領域	.....	2
2.2 FEM による軸対称解析	.....	4
第 3 章 外力によって生じる応力と変形	.....	12
3.1 三次元 FEM 解析	.....	12
3.2 亀裂発生点の局部応力	.....	19
第 4 章 局部応力に基づいた S-N 曲線	.....	25
第 5 章 連結板の厚さが疲労強度に与える影響	.....	29
第 6 章 結論	.....	32
参考文献	.....	33

第1章 序論

フレットニング（こすれ）疲労亀裂がアルミニウム合金板摩擦接合継手に発生することが明らかにされ¹⁾、「アルミニウム合金板摩擦接合継手の設計 S-N 曲線²⁾」（ALST 研究レポート, No.31）で、引張試験片タイプの小型試験片の疲労試験結果^{1),3)}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 曲線が与えられた。

本研究では、アルミニウム合金板摩擦接合継手のフレットニング疲労亀裂の発生点に生じる応力を FEM 解析によって求める。この応力を用いて S-N 曲線を与え、連結板の厚さがアルミニウム合金板摩擦接合継手の疲労強度に与える影響を明らかにする。

第2章 導入ボルト軸力によって生じる応力と変形

2.1 固着領域と擦れ領域

アルミニウム合金板摩擦接合継手においては，ボルトの座金表面と連結板表面，および母材表面と連結板表面が，繰返し荷重によって擦れ合うことによって，板表面に疲労亀裂（フレットング疲労亀裂）が発生する¹⁾．疲労試験¹⁾³⁾で用いられた引張試験片タイプの疲労試験片を図2.1に示す．鋼製高力ボルトはM20（F10T）であり，ボルト孔の直径は22mmである．母材の板厚は8mmであり，連結板の板厚 t_2 に対して4，6，8mmが考慮された．試験終了後の連結板と母材の様子を図2.2に示す．各図に見られるように，板表面に残っている接触跡は，リング状の黒い粉〔ペーマイトと呼ばれるアルミニウム合金の水酸化物であり，粒径が小さく，光が反射されず吸収するために黒く見える¹⁾〕が付着している領域と，その内側の部分に分けられる．内側の部分は，接触する面と面が導入ボルト軸力によって発生した摩擦力により完全に固着している．リング状の黒い粉が付着している領域では，繰返し荷重によって面と面が擦れ合うことにより黒い摩耗粉が発生する．本研究では前者を「固着領域」，後者を「擦れ領域」，両領域を合わせて「接触領域」と呼ぶ．フレットング疲労亀裂は擦れ領域に発生する．

図2.2から分かるように，固着領域と擦れ領域の境界は明瞭である．疲労試験終了後に計測された，連結板と母材の界面および座金と連結板の界面に対して，ボルト孔の中心から固着領域と擦れ領域の境界，すなわち固着領域縁までの距離を表2.1に示す¹⁾． r_{A1} は，連結板と母材の固着領域縁までの距離を示し， r_{B1} は，座金と連結板の固着領域縁までの距離を示す．固着領域と擦れ領域の境界は明瞭であるが，擦れ領域の外側は次第に消滅しており，図2.2からは判別できない．そこで，本研究では，導入ボルト軸力によって，座金と連結板の界面，および連結板と母材の界面がそれぞれ離間する位置を擦れ領域縁または接触領域縁とする．

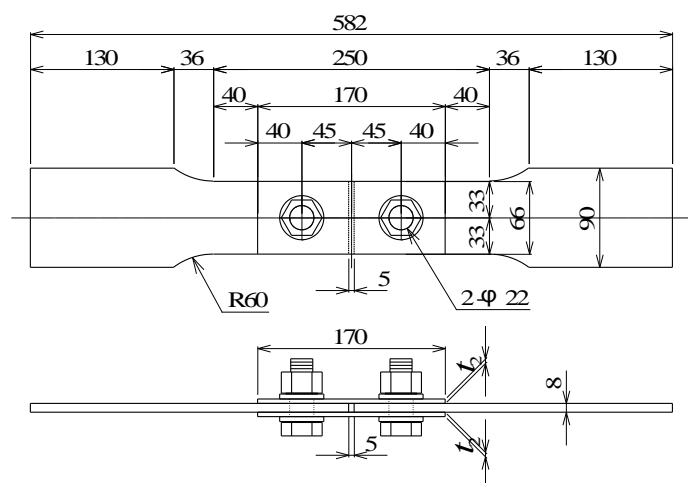
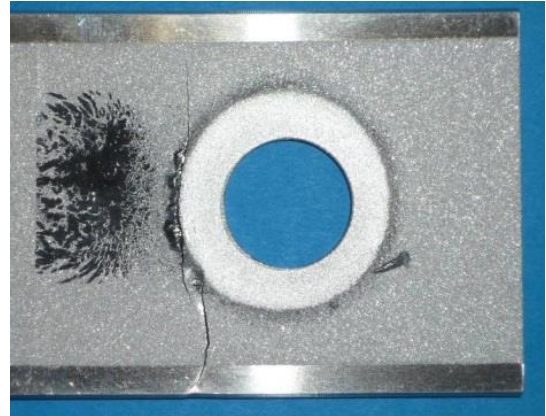


図 2.1 疲労試験片



(a) 連結板（座金側の面）



(b) 連結板（母材側の面）



(c) 母材

図 2.2 疲労試験終了後の連結板と母材の様子

表 2.1 ボルト孔の中心から固着領域縁までの距離

t_2 (mm)	r_{A1} (mm)	r_{B1} (mm)
4	18.8	17.1
6	19.7	17.4
8	21.1	17.3

2.2 FEMによる軸対称解析

擦れ領域縁を求めるために、汎用有限要素法プログラム DIANA⁴⁾を用いて、導入ボルト軸力に対するボルト締結部の軸対称解析を行う。図 2.1 の疲労試験片で使用されたボルトの寸法^{1),3)}を表 2.2 に示す。座金の厚さは 4.5mm である。解析対象は、図 2.3 に示すように、疲労試験片の片側の締結部を軸対称体にモデル化したものである。座金の内縁は面取りされており、ボルトの座と座金の接触部は 3mm である。連結板の半径 40mm および母材の半径 61mm は、後の図 2.7 に示すように、座金と連結板の界面、および連結板と母材の界面がそれぞれ離間する位置より、十分に大きい値である。ボルトおよびナットは解析結果に影響しないと仮定して、これを考慮してない。軸対称の回転軸、すなわち z 軸をボルト孔の中心にとり、半径を r で表すと、 $0\text{mm} \leq r \leq 11\text{mm}$ の範囲がボルト孔に当たる。上下対称の境界条件を $z=0$ に与える。道路橋示方書⁵⁾に規定されている F8T および F10T の設計導入軸力の 1 割増し $P_{re}=146\text{kN}$ および 182kN のボルト軸力を、次式に従って等分布荷重 p として座金の上面に与える。

$$p = \frac{P_{re}}{\frac{\pi}{4} \{ (d_2)^2 - (d_3)^2 \}} \quad (1)$$

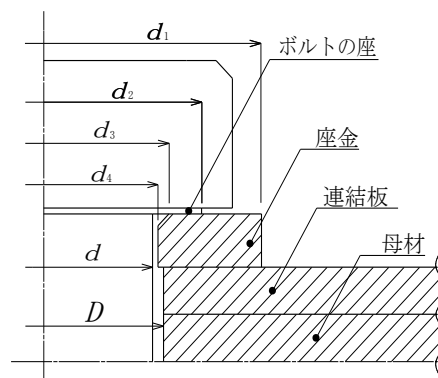
ここで、 d_2 と d_3 は表 2.2 に示す直径である。

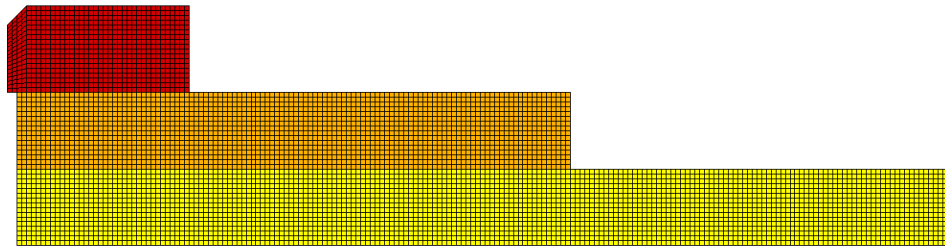
解析対象の材料定数を表 2.3 に示す。座金の弾性係数とポアソン比は、それぞれ 200GPa と 0.3 とする。母材の板厚は 8mm で一定であるが、疲労試験片ごとにロットが異なるため材料定数が異なる。母材および連結板の弾性係数とポアソン比の値は引張試験から得られたものである¹⁾。板厚 6mm の連結板は引張試験が実施されていないので、弾性係数とポアソン比をそれぞれ 70GPa と 0.3 としている。

要素分割を図 2.4 に示す。有限要素は 8 節点アイソパラメトリック軸対称ソリッドリング要素 (DIANA の要素タイプ Q8AXI) 。1 要素の大きさは、 $0.1\text{mm} \times 0.1\text{mm}$ である。

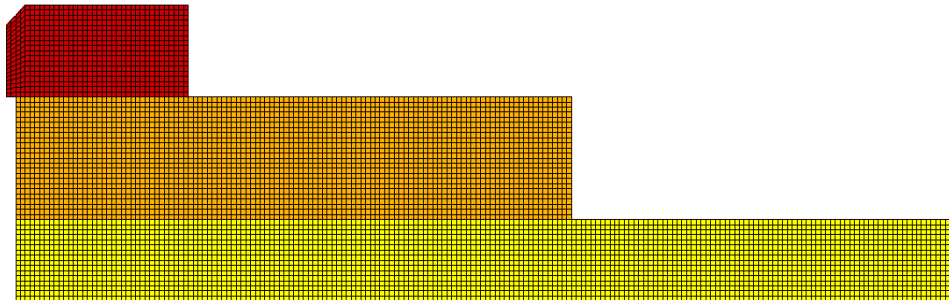
表 2.2 ボルトの寸法

d (mm)	d_1 (mm)	d_2 (mm)	d_3 (mm)	d_4 (mm)	D (mm)
20	40	29	23	21	22

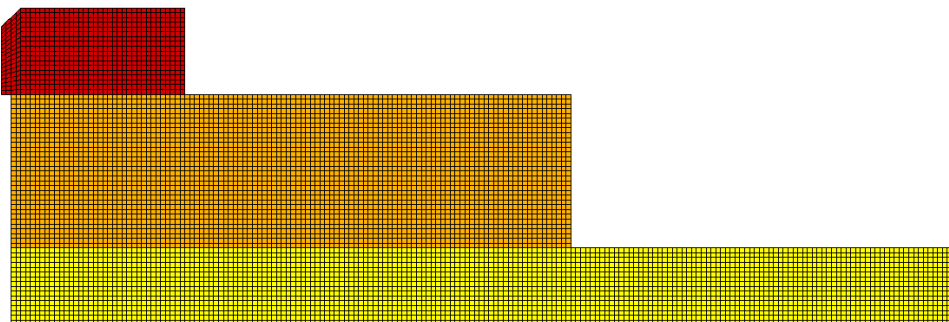




(a) $t_2=4\text{mm}$



(b) $t_2=6\text{mm}$



(c) $t_2=8\text{mm}$

図 2.4 要素分割

F10T の導入ボルト軸力に対する解析結果を以下に述べる。

図 2.4(a) の $11.5\text{mm} \leq r \leq 14.5\text{mm}$ の範囲に対して、座金と連結板の界面、および連結板と母材の界面の節点を共有させ、 $14.5\text{mm} \leq r$ の範囲の節点を重複させた場合に対する解析結果を図 2.5 に示す。変形倍率 20 倍で表している。座金と連結板、および連結板と母材がそれぞれ交差している。そこで、交差した界面の重複節点を内側から順番に、一つずつ共有節点にして再計算を行い、界面の交差がなくなるまでこの操作を繰り返す。界面が交差しなくなった解析結果を図 2.6 に示す。板厚ごとのボルト孔周辺の変形を図 2.7 に示す。変形倍率 50 倍で表している。

ボルト孔の中心から連結板と母材の擦れ領域縁までの距離 r_{A2} 、およびボルト孔の中心から座金と連結板の擦れ領域縁までの距離 r_{B2} を表 2.4 に示す。表 2.1 に記載の、連結板と母材の固着領域縁までの距離 r_{A1} 、および座金と連結板の固着領域縁までの距離 r_{B1} の値も表 2.4 に再掲してある。さらに、表 2.4 の数値に基づいて作成された、固着領域縁および擦れ領域縁と連結板の厚さの関係を図 2.8 に示す。図 2.8(a)

に示すように、座金と連結板の界面の固着領域縁 r_{B1} と擦れ領域縁 r_{B2} は、連結板の厚さの変化に対する変動が小さい。図 2.8 (b) に示すように、連結板と母材の界面の固着領域縁 r_{A1} と擦れ領域縁 r_{A2} は、連結板の厚さが大きくなるに従ってそれぞれ増加する。

F8T の導入ボルト軸力に対しても、座金と連結板の界面、および連結板と母材の界面がそれぞれ離間する位置は同じになる。したがって、F8T の導入ボルト軸力に対する r_{A1} , r_{A2} , r_{B1} , r_{B2} の値は表 2.4 のそれと同じである。

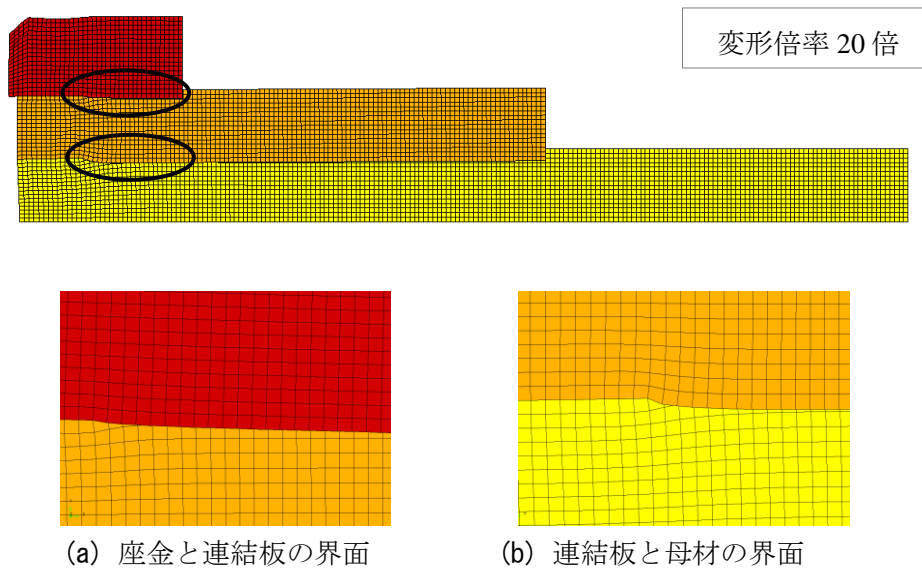


図 2.5 ボルト孔周辺の変形 ($t_2=4\text{mm}$)

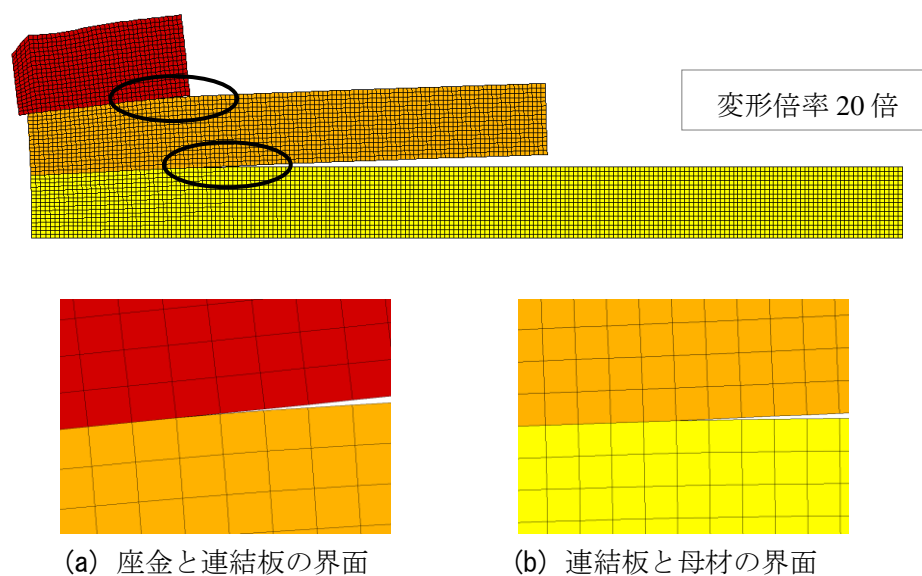


図 2.6 界面が交差しなくなったときのボルト孔周辺の変形 ($t_2=4\text{mm}$)

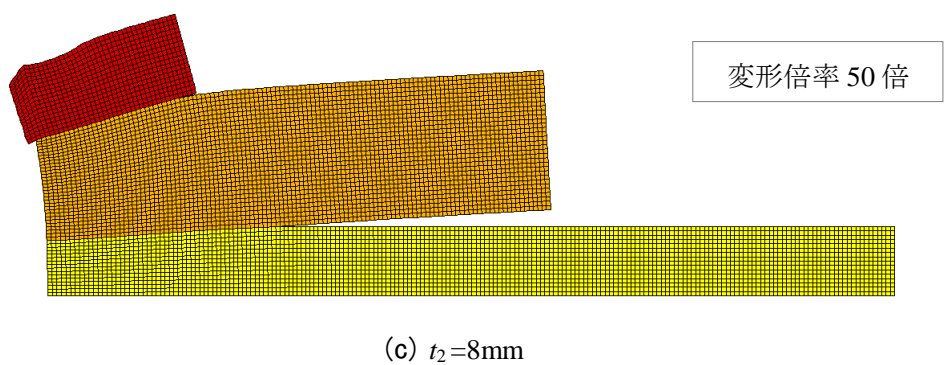
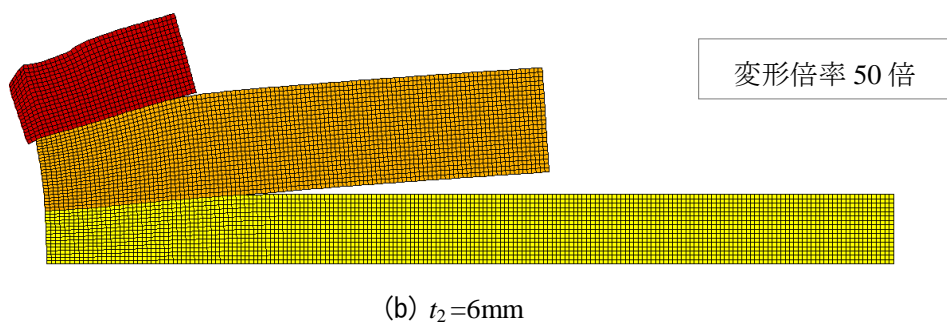
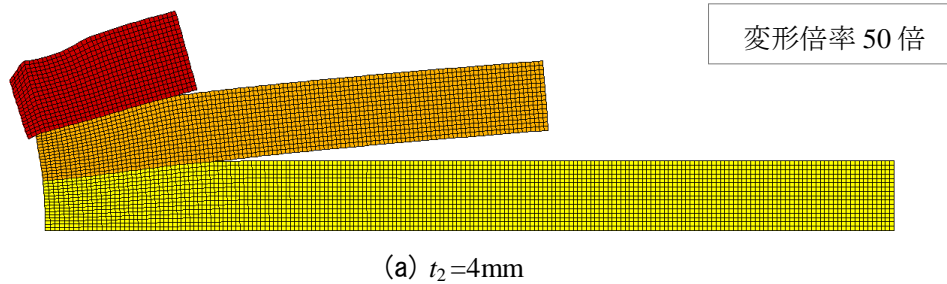
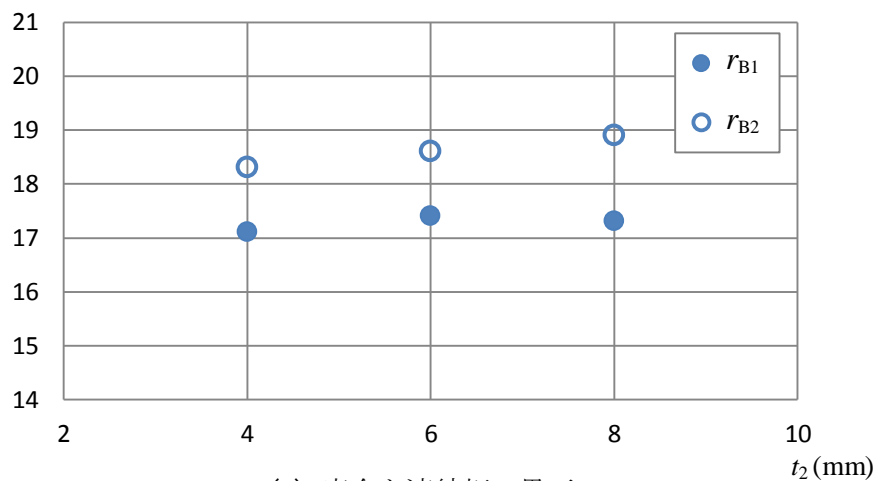


図 2.7 ボルト孔周辺の変形

表 2.4 r_{A1} , r_{B1} , r_{A2} , r_{B2} の値

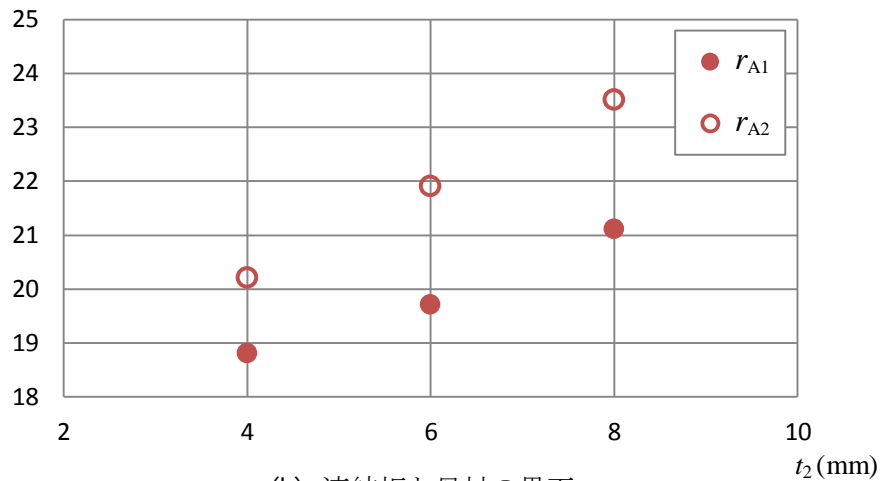
t_2 (mm)	連結板と母材の界面		座金と連結板の界面	
	r_{A1} (mm)	r_{A2} (mm)	r_{B1} (mm)	r_{B2} (mm)
4	18.8	20.2	17.1	18.3
6	19.7	21.9	17.4	18.6
8	21.1	23.5	17.3	18.9

r_{B1} , r_{B2} (mm)



(a) 座金と連結板の界面

r_{A1} , r_{A2} (mm)

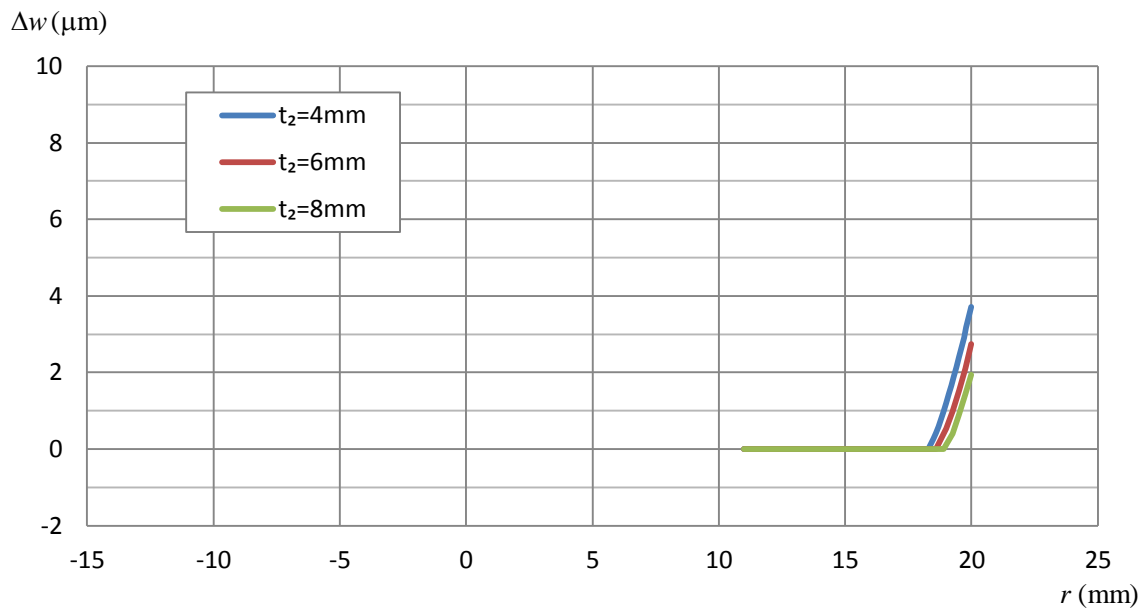


(b) 連結板と母材の界面

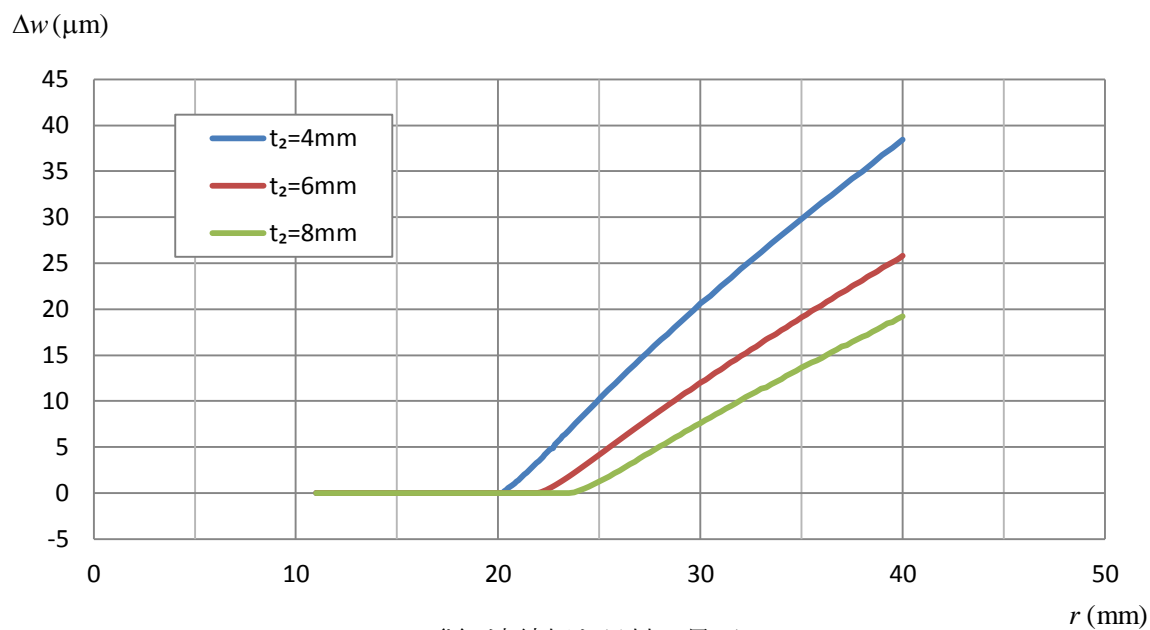
図 2.8 固着領域縁および擦れ領域縁と連結板の厚さの関係

F10T の導入ボルト軸力に対して、座金と連結板の界面の隙間および連結板と母材の界面の隙間 Δw を図 2.9 に示す。連結板の厚さが大きくなるに従って、各界面の隙間 Δw は小さくなる。

F8T の導入ボルト軸力に対する結果は、図 2.9 に示す界面の隙間 Δw を 0.8 倍したものになる。



(a) 座金と連結板の界面



(b) 連結板と母材の界面

図 2.9 界面の隙間 Δw

F10Tの導入ボルト軸力に対して、座金と連結板の界面および連結板と母材の界面に生じる接触面圧力 σ_z の分布を、それぞれ図2.10(a), (b)に示す。図2.10(a)に示すように、座金と連結板の接触面圧力 σ_z は、連結板の厚さに依存せずほぼ同じ分布を示す。図2.10(b)に示すように、連結板と母材の接触面圧力 σ_z は、連結板の厚さが大きくなるに従って半径方向に広がり、ボルト孔の縁に生じる σ_z は低下する。

F8Tの導入ボルト軸力に対する結果は、図2.10に示す接触面圧力 σ_z の値を0.8倍したものになる。

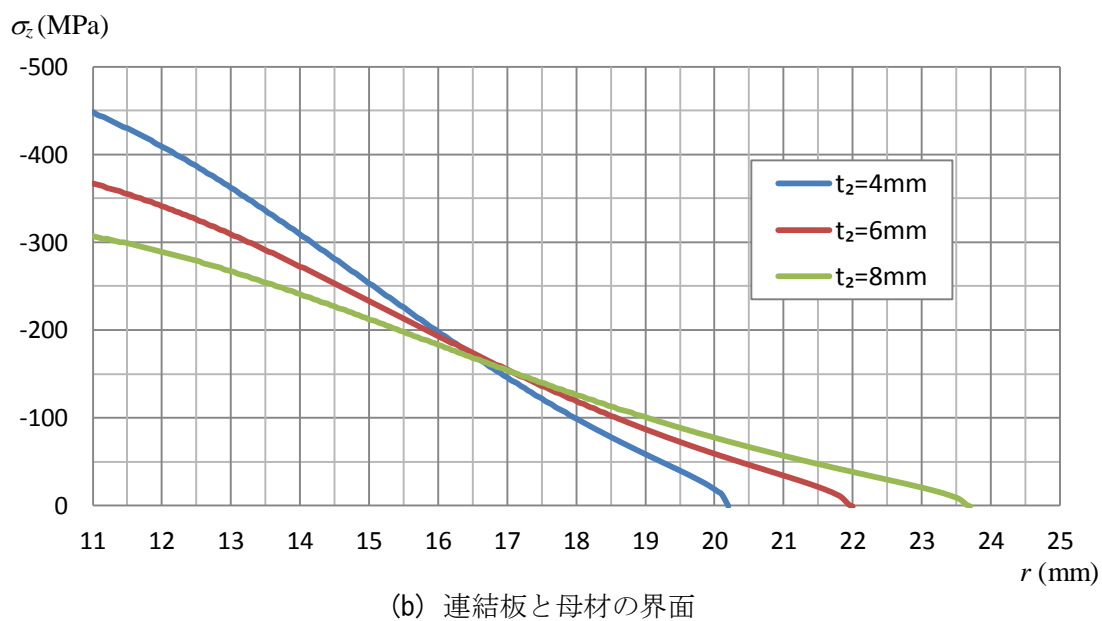
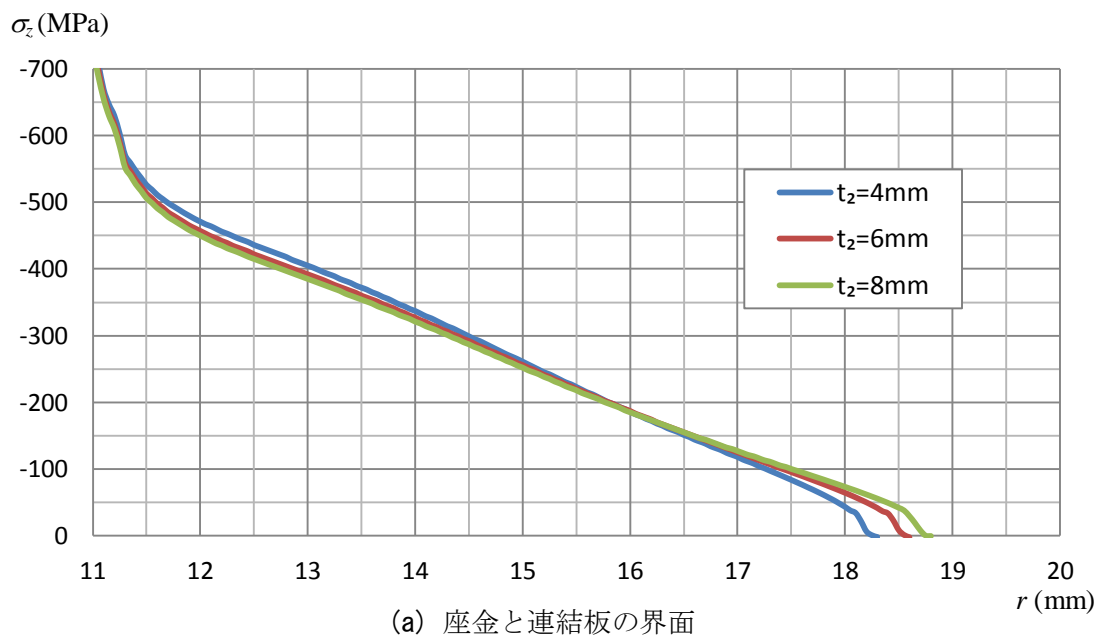


図2.10 接触面圧力 σ_z

第3章 外力によって生じる応力と変形

3.1 三次元 FEM 解析

図 2.1 の疲労試験片の母材の材端に引張力を作用させ、連結板と母材の擦れ領域および座金と連結板の擦れ領域に生じる応力と変形を、立体要素を用いた三次元 FEM 解析によって調べる。解析対象は、図 3.1 の斜線で示すように、疲労試験片^{1),3)}の 4 分の 1 である。要素分割を図 3.2 に示す。疲労試験片から切り出された切断面に対称の境界条件を与える。解析対象の材料定数に対して表 2.3 に示す値を用いる。FEM 解析には汎用有限要素法プログラム DIANA⁴⁾を用い、使用した有限要素は、8 節点立体要素 (DIANA の要素タイプ HX24L) である。ボルトとナットは解析結果に影響しないと仮定して、これを考慮していない。座金の内縁の面取りも解析結果に影響しないと仮定して、これを考慮していない。図 3.3 の座標系を参照して、座金と連結板の界面および連結板と母材の界面に対して、 $17\text{ mm} \leq r \leq 24\text{ mm}$ の範囲の要素の大きさは $0.1\text{ mm} \times 0.6\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$ ($r=17\text{ mm}$) から $0.1\text{ mm} \times 0.8\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$ ($r=24\text{ mm}$) である。 r が大きくなるに従って、円周方向の弦長が少しずつ大きくなる。座金と連結板の界面および連結板と母材の界面において、固着領域の節点を共有させる。擦れ領域内の摩擦係数に対して 0 を仮定して、擦れ領域の節点を重複節点とし、重複節点の z 軸方向の変位は同じとし、水平方向の変位は自由とする。引張応力 $\sigma_1=100\text{ MPa}$ を母材の材端に作用させる。

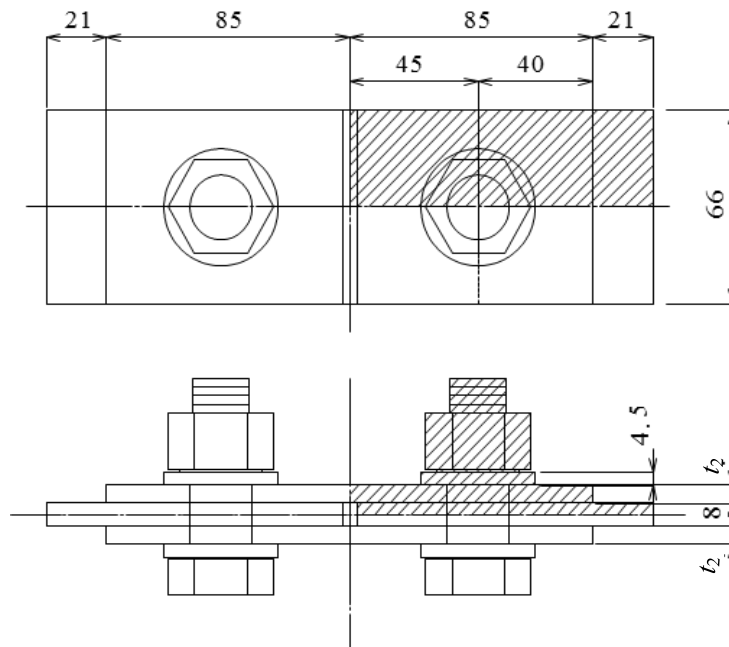
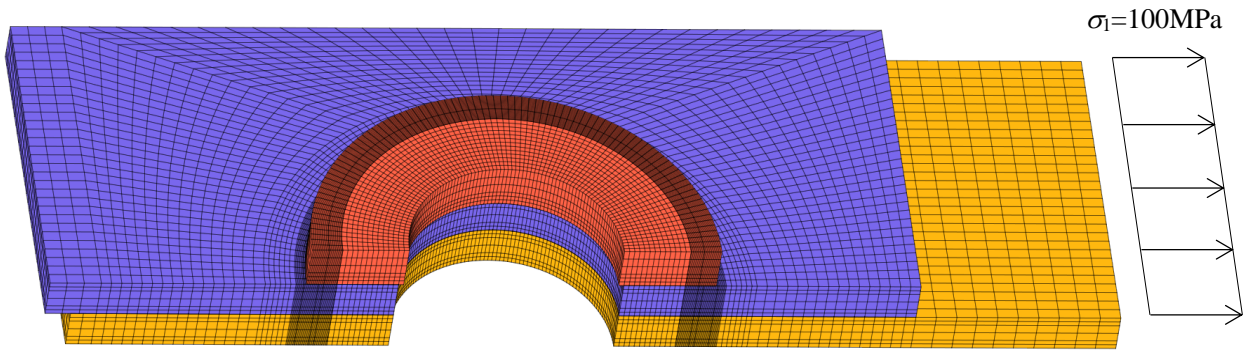
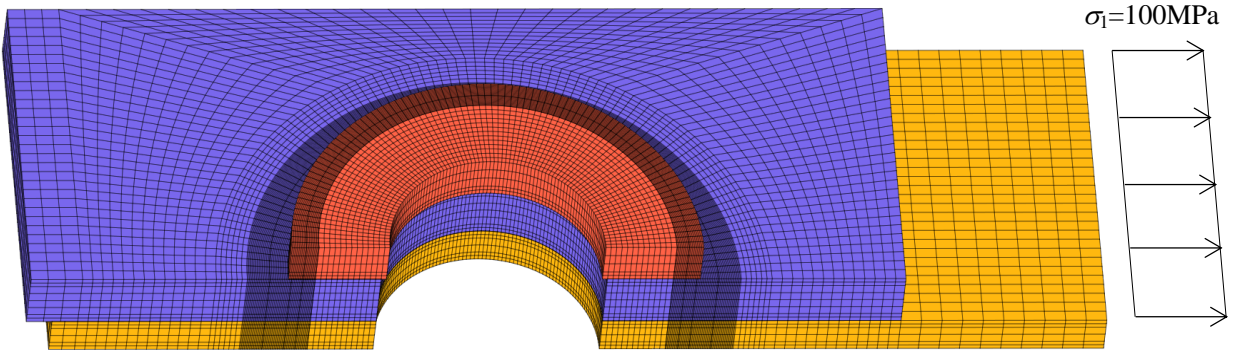


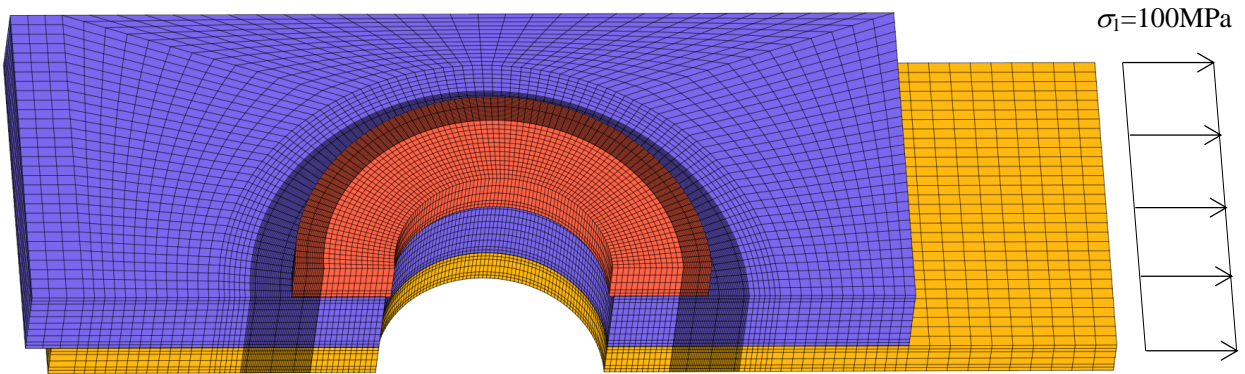
図 3.1 解析対象



(a) $t_2=4\text{mm}$



(b) $t_2=6\text{mm}$



(c) $t_2=8\text{mm}$

图 3.2 要素分割

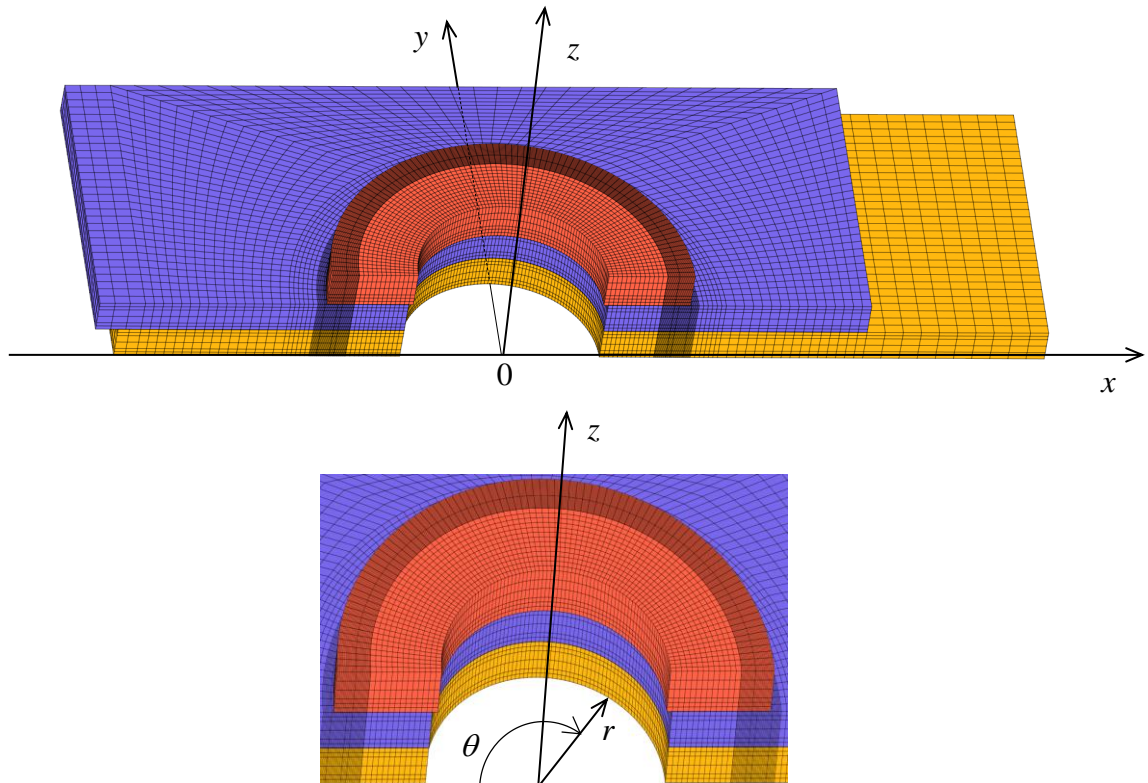


図 3.3 座標系

解析対象の $y=0$ の断面の変形を図 3.4 に示す. 変形倍率 50 倍で表している. さらに, 図 3.4(c) の母材の材端側の座金と連結板の界面および連結板と母材の界面の擦れ領域の変形を図 3.5 に示す.

$y=0$ の断面の各界面の隙間 Δw を図 3.6 に示す. 図 3.6(b) に示すように, 連結板と母材の界面の突合せ側において Δw が負の値をとっている. 実際の摩擦接合継手には導入ボルト軸力による変形も生じている. 図 2.9 に示す, F10T の導入ボルト軸力によって各界面に生じる隙間を, 図 3.6 の界面の隙間に重ね合わせた結果を図 3.7 に示す. 図 3.7(b) に示すように, 連結板と母材の界面の突合せ側の Δw の値は正となり, 両者は交差しない. F8T の導入ボルト軸力に対しても, 両者は交差しない.

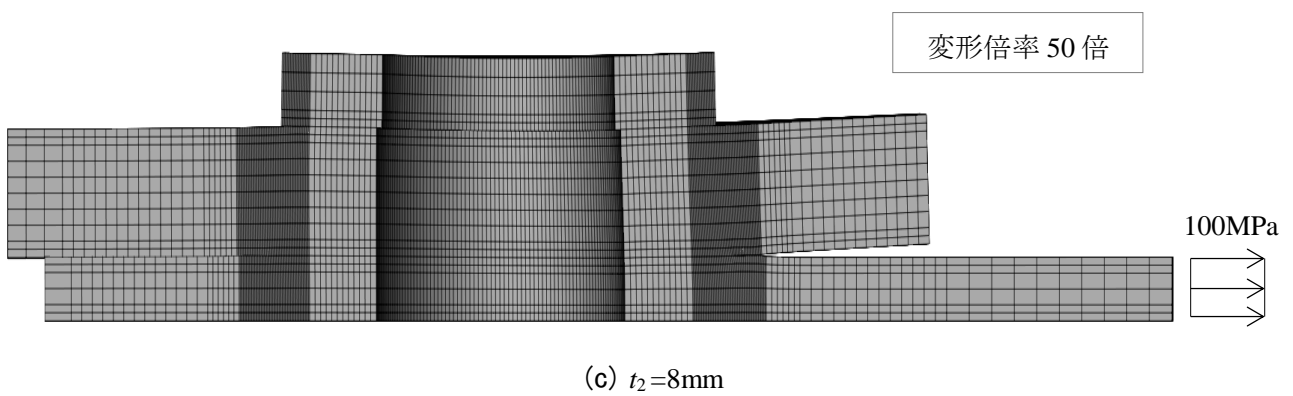
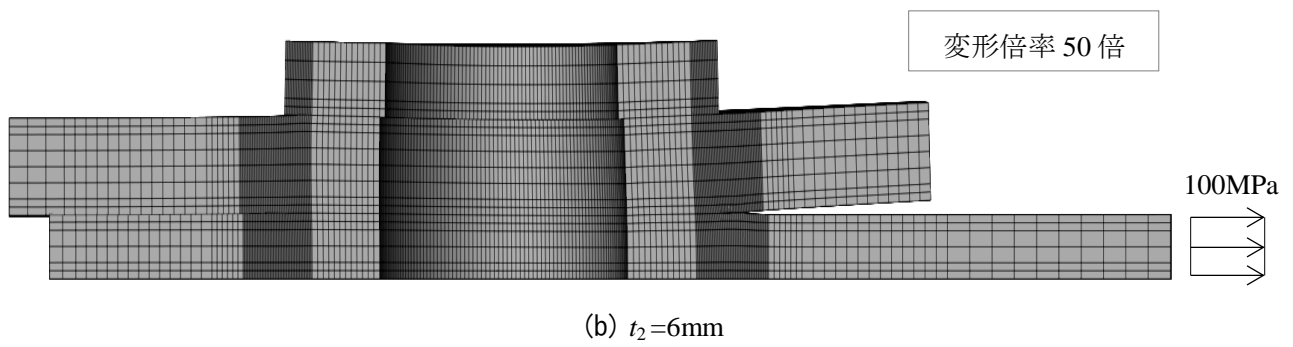
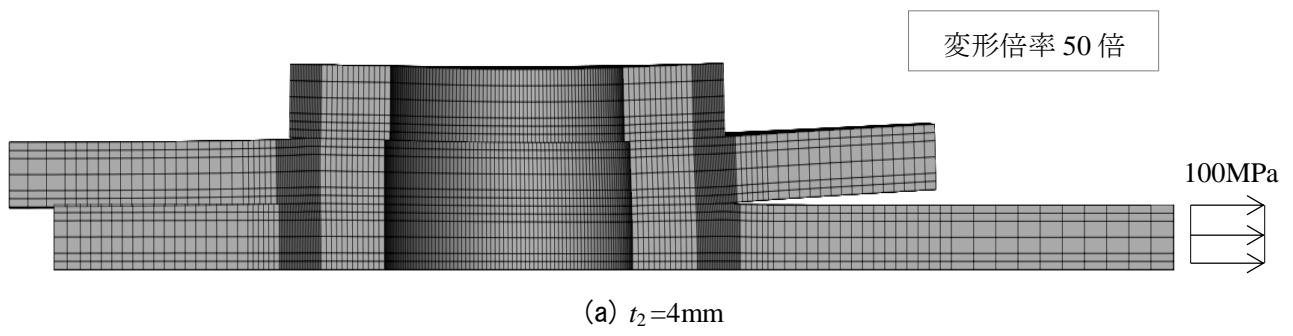
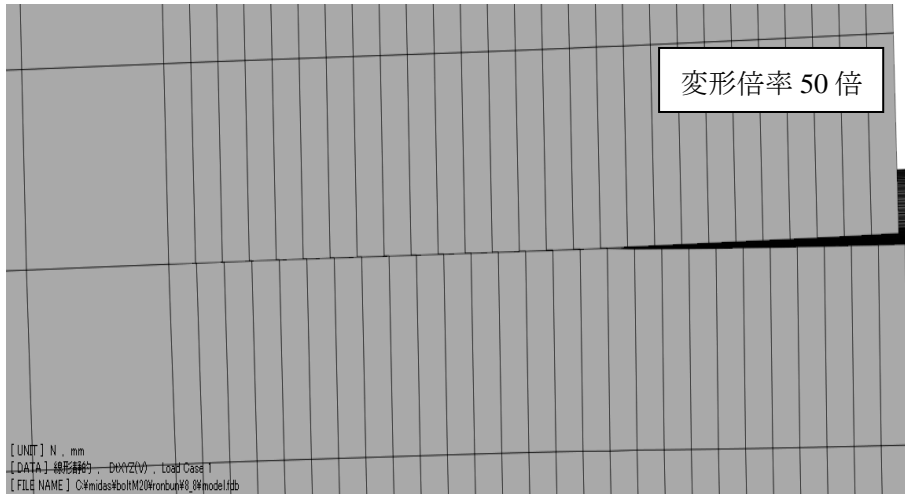
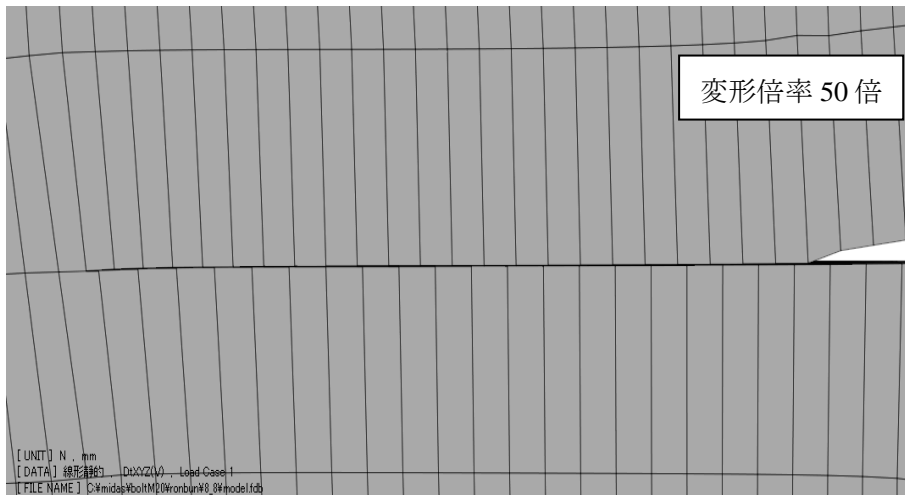


図 3.4 解析対象の $y=0$ の断面の変形

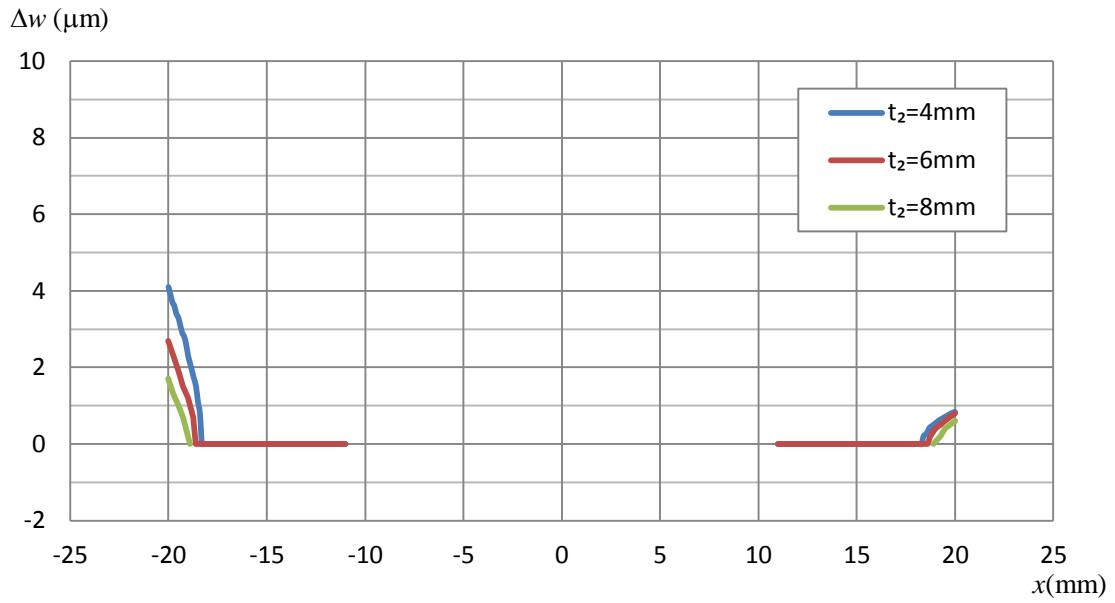


(a) 座金と連結板の界面

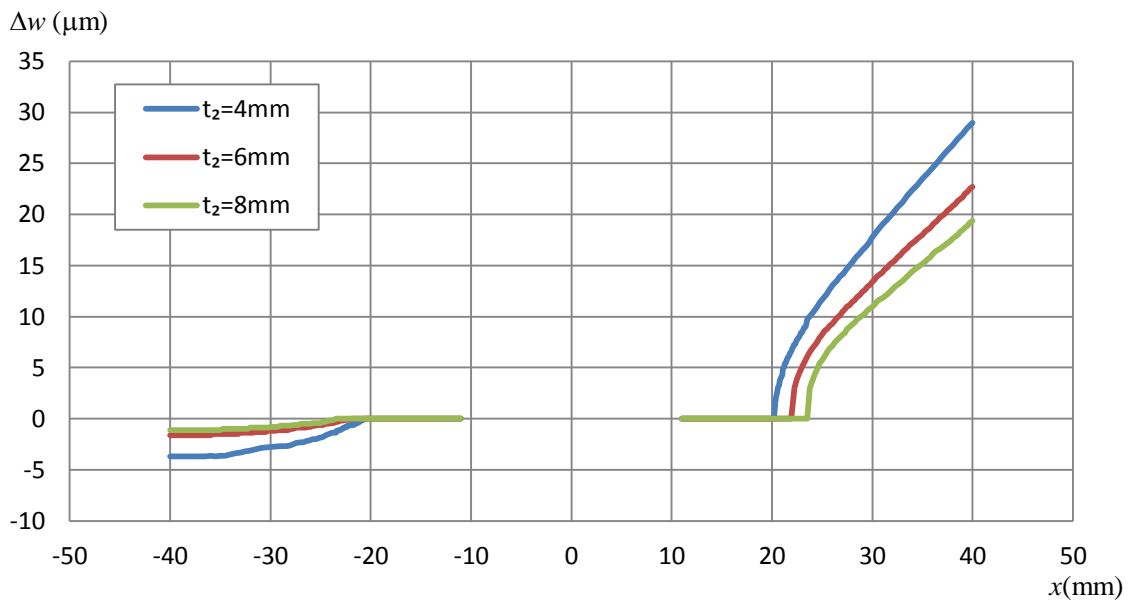


(b) 連結板と母材の界面

図 3.5 擦れ領域の変形 ($t_2=8\text{mm}$)



(a) 座金と連結板の界面



(b) 連結板と母材の界面

図 3.6 $y=0$ の断面の各界面の隙間 Δw

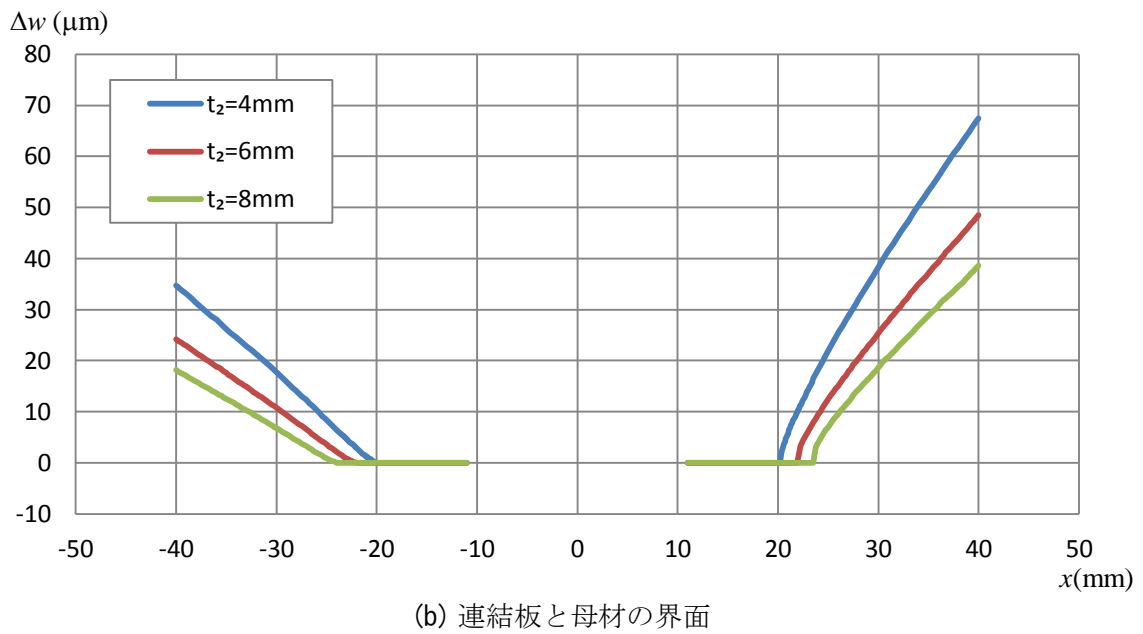
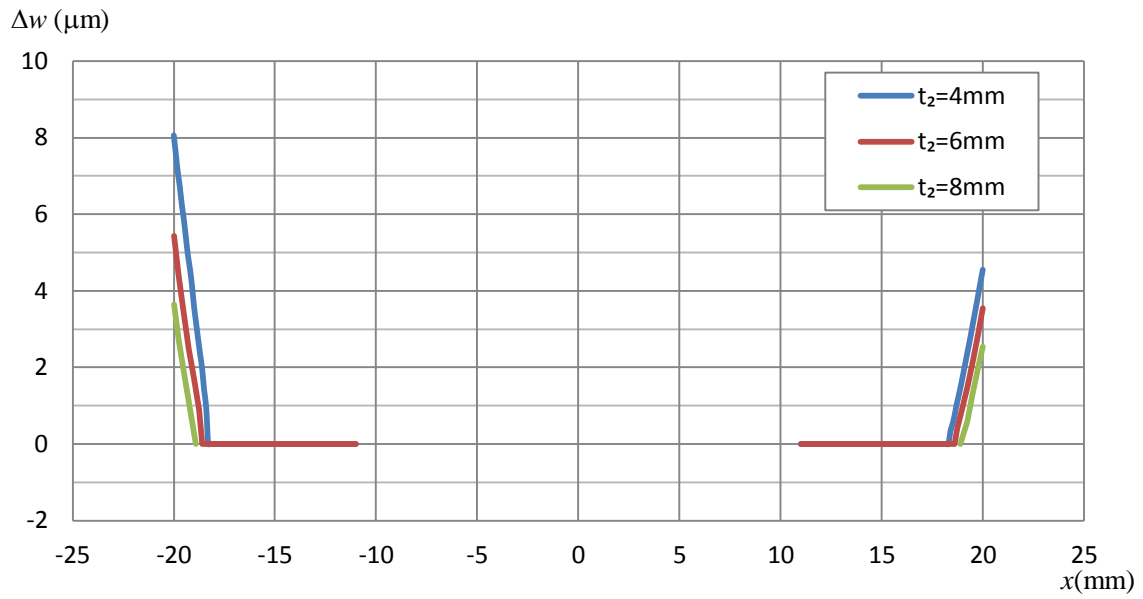


図 3.7 導入ボルト軸力によって補正された $y=0$ の断面の各界面の隙間 Δw

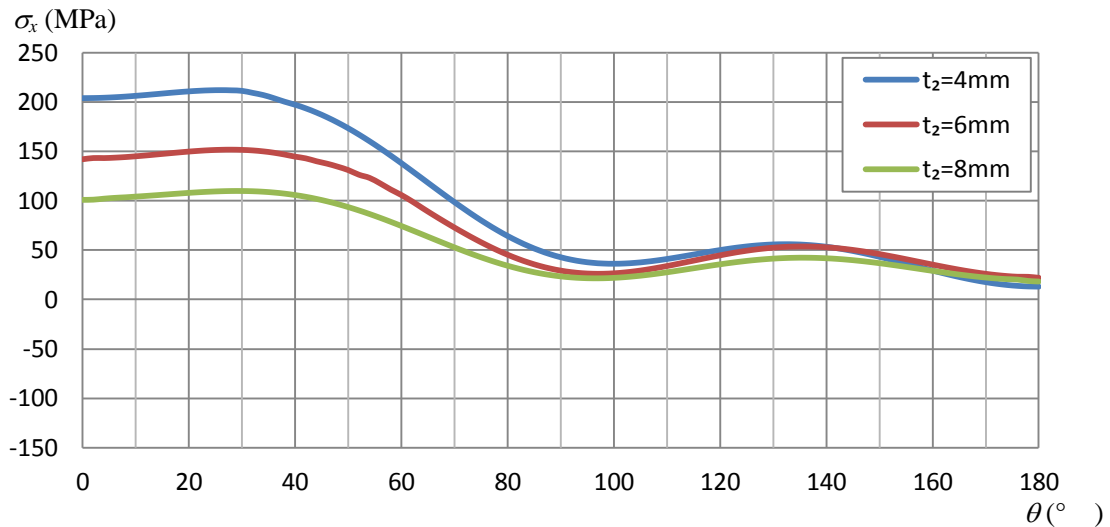
3.2 亀裂発生点の局部応力

フレット疲労亀裂は擦れ領域に発生し、荷重の作用方向に対して直角方向に伝播する¹⁾。したがって、擦れ領域に生じる、荷重の作用方向、すなわち x 軸方向の応力が疲労亀裂の発生を支配する。連結板表面（座金側）、連結板裏面（母材側）、母材表面の各擦れ領域の幅の中央に生じる x 軸方向の応力 σ_x の円周方向分布を図 3.8 に示す。

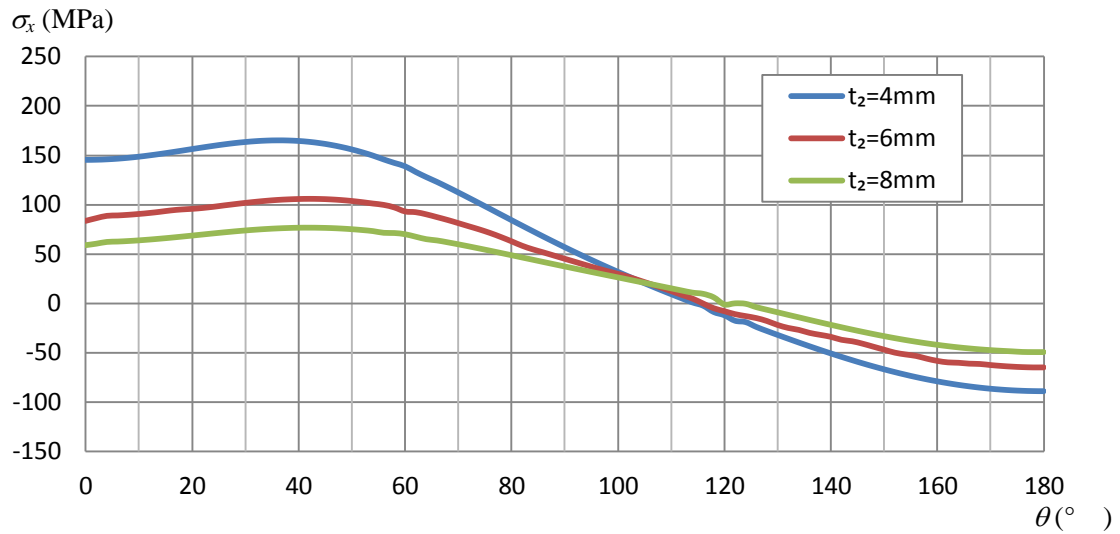
図 3.8(a) に示すように、連結板表面（座金側）では $\theta=30^\circ$ で σ_x が最大値をとる。疲労試験¹⁾において、座金直下の連結板表面に生じる亀裂、すなわちタイプ I の亀裂は約 30° の位置に発生した。したがって、 $\theta=30^\circ$ の位置の σ_x の値がタイプ I の亀裂を発生させた局部応力と言える。

図 3.8 (b) に示すように、連結板裏面（母材側）では $\theta=40^\circ$ で σ_x が最大値をとる。疲労試験¹⁾において、連結板裏面に生じる亀裂、すなわちタイプ II の亀裂は約 40° の位置に発生した。したがって、 $\theta=40^\circ$ の位置の σ_x の値がタイプ II の亀裂を発生させた局部応力であると言える。

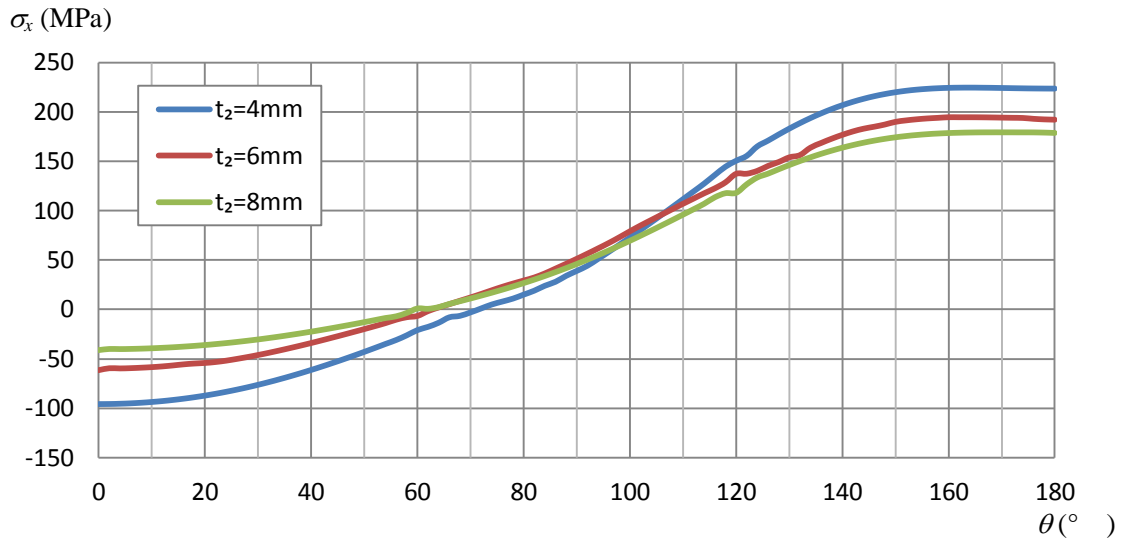
図 3.8(c) に示すように、母材表面では $\theta=160^\circ$ で σ_x が最大値をとる。しかし、疲労試験¹⁾において、母材表面に生じる亀裂、すなわちタイプ III の亀裂は約 120° の位置に発生した。すなわち、 σ_x が最大値をとる角度と亀裂が発生する角度が異なる。タイプ III の亀裂の発生には、擦れ領域の連結板と母材の界面の変位差が関与していることを本節の後半で述べる。



(a) 連結板表面（座金側）



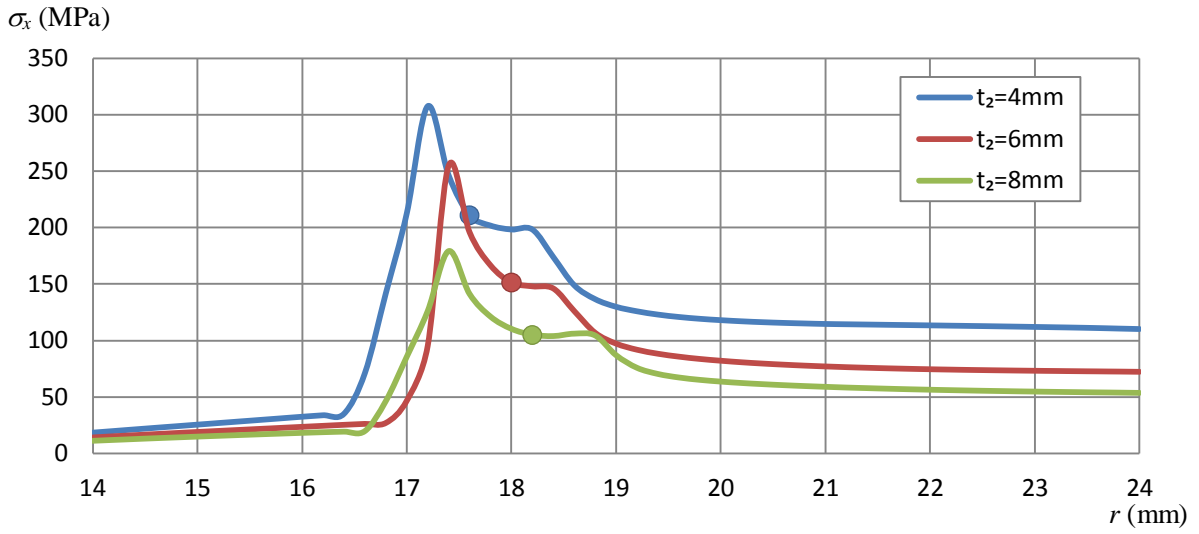
(b) 連結板裏面 (母材側)



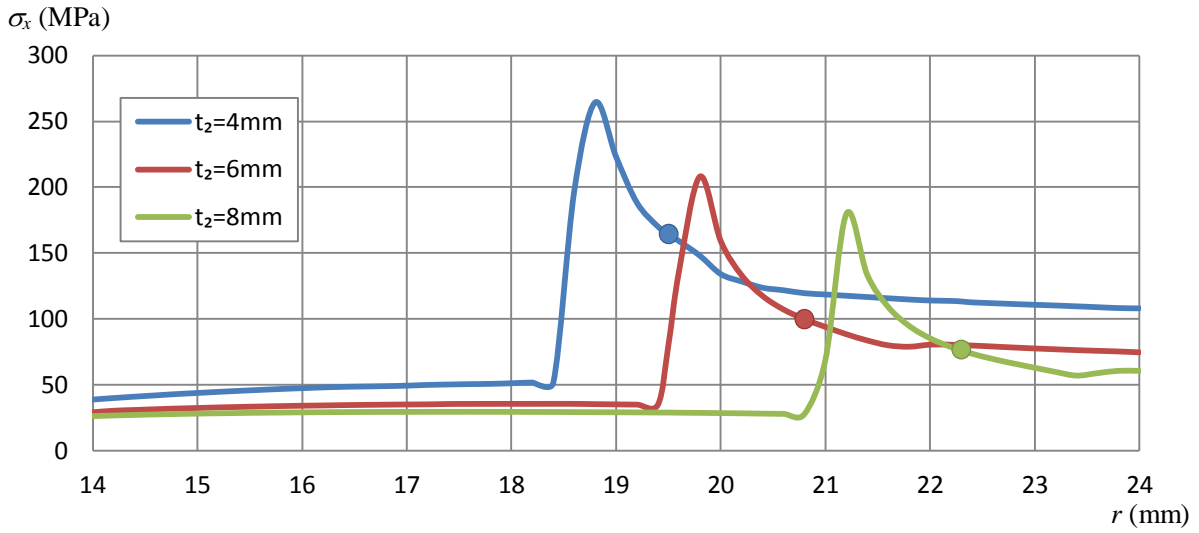
(c) 母材表面

図 3.8 σ_x の円周方向分布

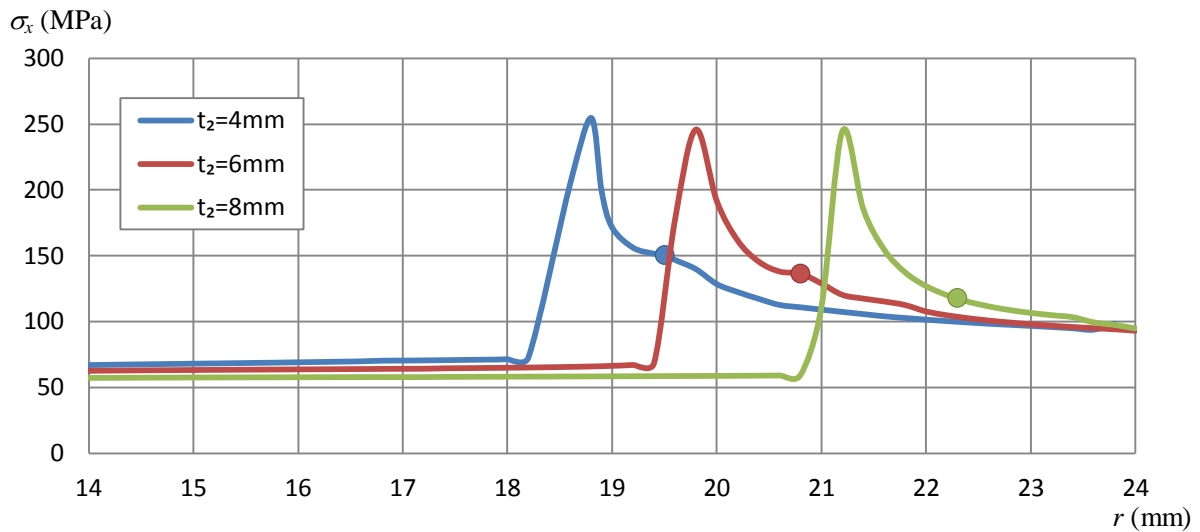
連結板表面 (座金側) の σ_x に対して, $\theta=30^\circ$ の半径方向に沿う分布, 連結板裏面 (母材側) の σ_x に対して, $\theta=40^\circ$ の半径方向に沿う分布, 母材表面の σ_x に対して, $\theta=120^\circ$ の半径方向に沿う分布を, それぞれ 図 3.9 (a), (b), (c) に示す. 各図において, 擦れ領域の幅の中央に生じる応力を中塗りの丸で表している. σ_x は, 固着領域縁で最大値をとり, そこから急激に減少して, 連結板または母材の公称応力に近づく.



(a) 連結板表面 ($\theta=30^\circ$)



(b) 連結板裏面 ($\theta=40^\circ$)



(c) 母材 ($\theta=120^\circ$)

図 3.9 σ_x の半径方向に沿う分布

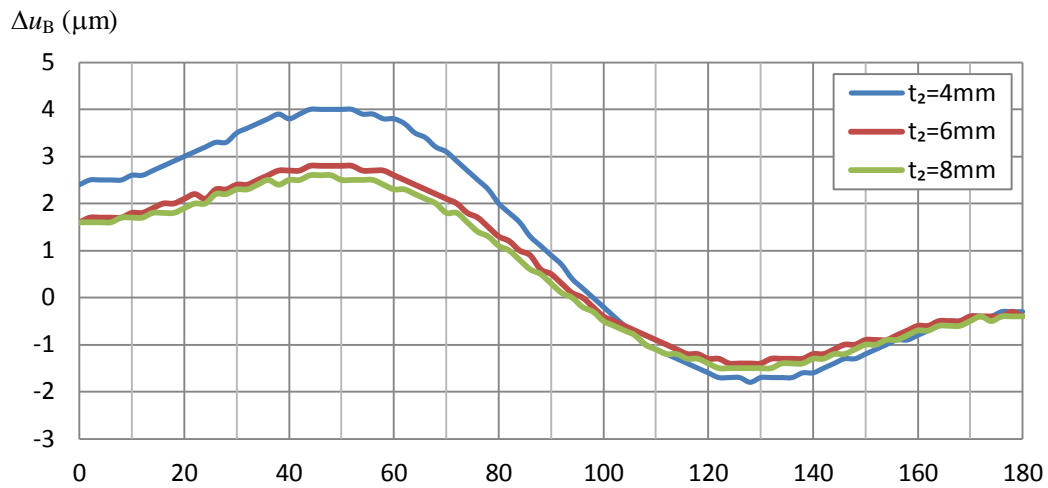
フレット疲労亀裂は界面が擦れ合うことによって起こされる．そこで，次式で定義される，擦れ領域の界面の水平変位差を調べる．

$$\Delta u_A = (\text{母材側の節点の水平変位}) - (\text{連結板側の節点の水平変位}) \quad (2)$$

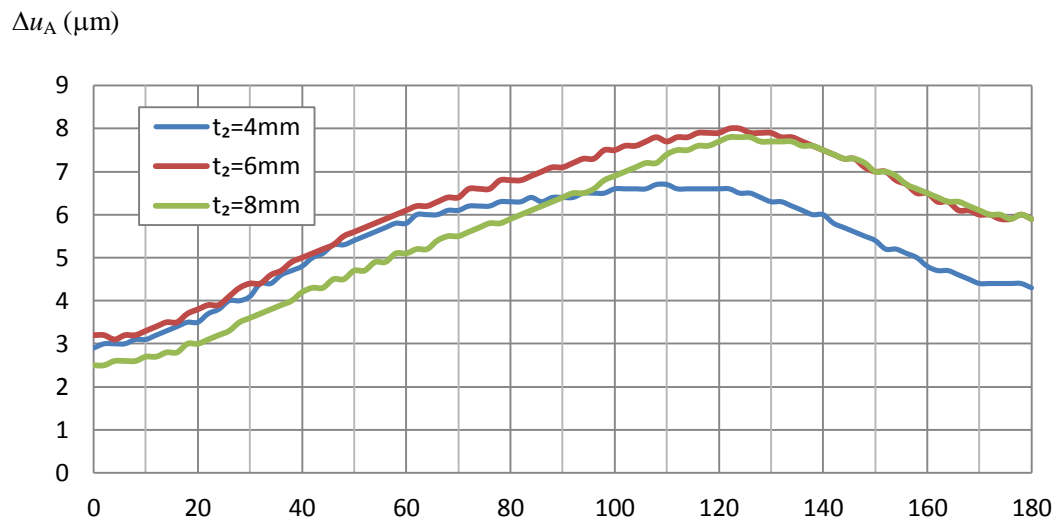
$$\Delta u_B = (\text{座金側の節点の水平変位}) - (\text{連結板側の節点の水平変位}) \quad (3)$$

ここに， Δu_A ：母材と連結板の界面の水平変位差， Δu_B ：座金と連結板の界面の水平変位差

座金と連結板および母材と連結板の各擦れ領域の幅の中央に生じる Δu_B と Δu_A の円周方向分布を，それぞれ図 3.10(a)，(b)に示す．図 3.10(a)に示すように， Δu_B は $\theta=40^\circ$ から 50° で最大値をとり，連結板の厚さが大きくなるに従って減少する．図 3.10(b)に示すように， Δu_A は $\theta=120^\circ$ 付近で最大値をとる．したがって，タイプⅢの亀裂は， σ_x が最大となる位置ではなく，擦れの度合いが最大となる位置に亀裂が生じたと推察する．



(a) 座金と連結板の界面



(b) 母材と連結板の界面

図 3.10 Δu_B と Δu_A の円周方向分布

連結板表面（座金側）の Δu_B に対して、 $\theta=30^\circ$ の半径方向に沿う分布，連結板裏面（母材側）の Δu_A に対して、 $\theta=40^\circ$ の半径方向に沿う分布，母材表面の Δu_A に対して、 $\theta=120^\circ$ の半径方向に沿う分布を，それぞれ図 3.11 (a), (b), (c)に示す．各図は，擦れ領域縁までの分布を示し，擦れ領域の幅の中央に生じる水平変位差を中塗りの丸で表している．

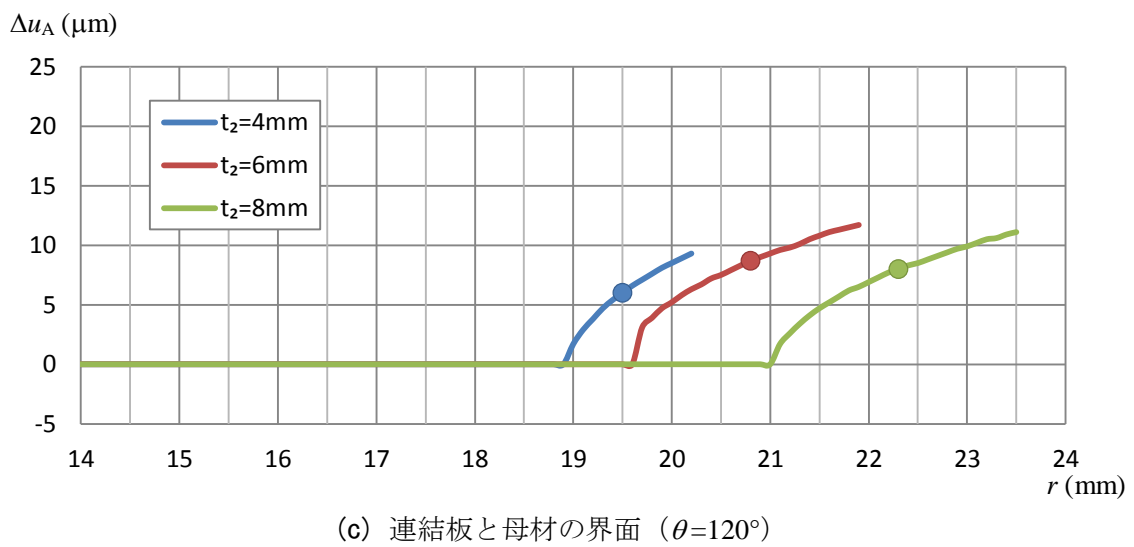
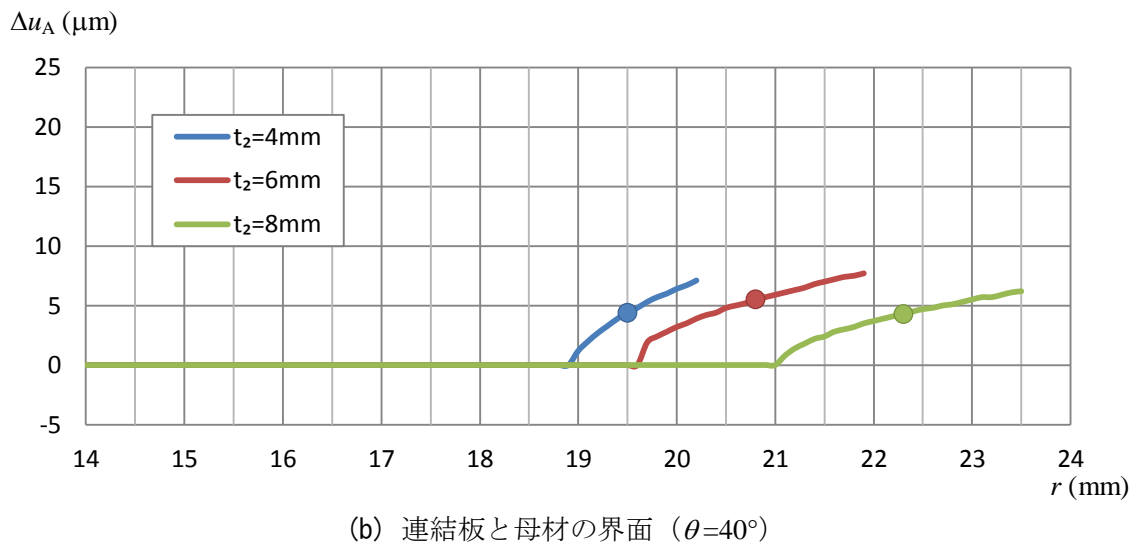
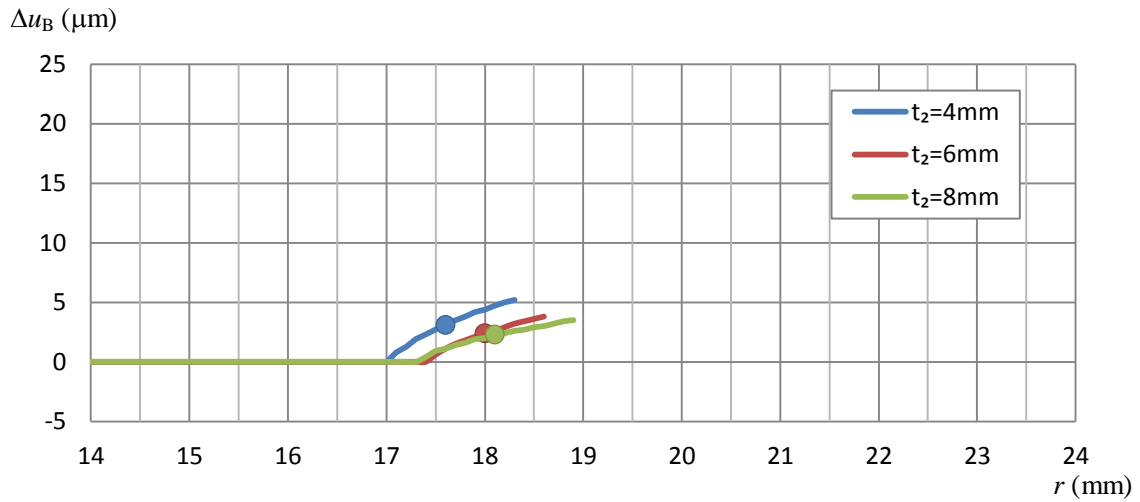


図 3.11 Δu_A と Δu_B の半径方向に沿う分布

第 4 章 局部応力に基づいた S-N 曲線

フレット疲労亀裂の発生点に対する応力集中係数を次のように定義する。

$$K_{xI} = \frac{\sigma_{xI}}{\sigma_2} \quad (4)$$

$$K_{xII} = \frac{\sigma_{xII}}{\sigma_2} \quad (5)$$

$$K_{xIII} = \frac{\sigma_{xIII}}{\sigma_1} \quad (6)$$

ここに、 K_{xI} 、 K_{xII} 、 K_{xIII} ：それぞれ、タイプ I、II、III の亀裂に対する応力集中係数、 σ_{xI} 、 σ_{xII} 、 σ_{xIII} ：それぞれ、タイプ I、II、III の亀裂発生点に生じる応力、 σ_1 と σ_2 ：それぞれ、母材と連結板の公称応力（作用力を断面積で除した値）。

図 3.9(a)、(b)、(c) の中塗りの丸が示す応力を、それぞれ σ_{xI} 、 σ_{xII} 、 σ_{xIII} に用いて得られる応力集中係数の値を表 4.1 に示す。さらに、応力集中係数 K_{xI} 、 K_{xII} 、 K_{xIII} と連結板の厚さ t_2 の関係を図 4.1 に示す。 K_{xI} と K_{xII} は変動が小さく、それぞれの平均値は 2.19 と 1.59 である。 K_{xIII} は t_2 が大きくなるに従って低下し、両者の関係は次式で近似される。

$$K_{xIII} = -0.11t_2 + 2.05 \quad (7)$$

表 4.1 応力集中係数 K_{xI} 、 K_{xII} 、 K_{xIII} の値

t_2 (mm)	K_{xI}	K_{xII}	K_{xIII}
4	2.11	1.62	1.62
6	2.27	1.59	1.37
8	2.20	1.55	1.18

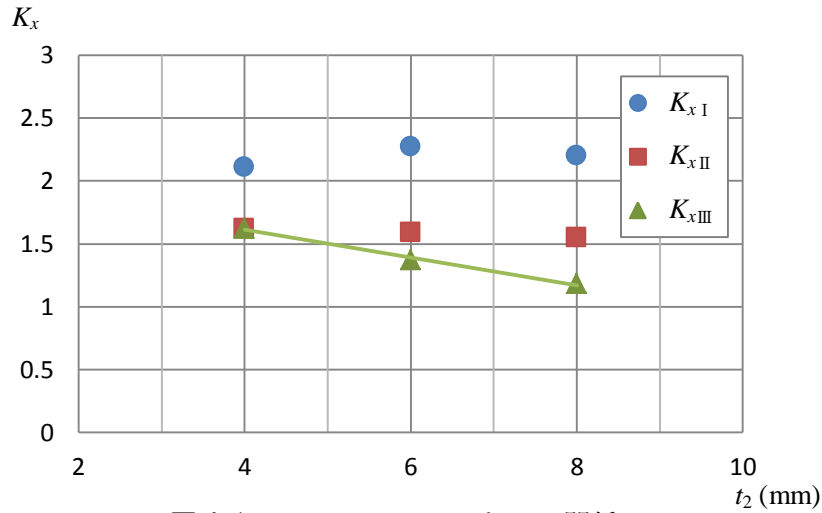


図 4.1 K_{xI} , K_{xII} , K_{xIII} と t_2 の関係

既往の疲労試験結果^{1),3)}の中で、応力比 $R=0.1$ に対する結果を表 4.2~4.4 に示す。タイプ II の亀裂が発生した試験片は少なかったため、タイプ II の亀裂は取り扱っていない。初期導入軸力 P_{re} の大きさの違いが疲労強度に与える影響はないことが示されている²⁾。さらに、次式で与えられる、亀裂発生点に生じる応力範囲 $\Delta\sigma_{xI}$ と $\Delta\sigma_{xIII}$ の値も記している。

$$\Delta\sigma_{xI} = K_{xI} \Delta\sigma_2 \quad (8)$$

$$\Delta\sigma_{xIII} = K_{xIII} \Delta\sigma_1 \quad (9)$$

ここに、 $\Delta\sigma_1$ と $\Delta\sigma_2$: それぞれ、母材と連結板の公称応力範囲。

表 4.2 タイプ I の亀裂

t_2 (mm)	P_{re} (MPa)	$\Delta\sigma_1$ (MPa)	$\Delta\sigma_2$ (MPa)	K_{xI}	$\Delta\sigma_{xI}$ (MPa)	繰返し回数 N (cycles)
4	146	150	150	2.11	316.5	141003
		100	100		211.0	466578
		70	70		147.7	1772431
		50	50		105.5	7123640
4	182	150	150		316.5	105086
		100	100		211.0	572011
		70	70		147.7	1903905
		50	50		105.5	7532218
6	182	70	46.7	2.27	106.0	4034636

表 4.3 タイプⅢの亀裂

t_2 (mm)	P_{re} (MPa)	$\Delta\sigma_1$ (MPa)	K_{xIII}	$\Delta\sigma_{xIII}$ (MPa)	繰返し回数 N (cycles)
6	182	150	1.37	205.5	268339
		120		164.4	602623
		100		137.0	893511
8	182	150	1.18	177.0	307785
		150		177.0	270908
		100		118.0	1050673
		90		106.2	2333636
		80		94.4	9678502

表 4.4 未破断の試験片

t_2 (mm)	P_{re} (MPa)	$\Delta\sigma_1$ (MPa)	$\Delta\sigma_2$ (MPa)	K_{xI}	K_{xIII}	$\Delta\sigma_{xI}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{xIII}$ (MPa)	繰返し回数 N (cycles)
4	146	40	40	2.11	1.62	84.4	64.8	20000000
8	182	70	35	2.20	1.18	77.0	82.6	10000000

亀裂発生点の応力範囲 $\Delta\sigma_x$ ($=\Delta\sigma_{xI}$ または $\Delta\sigma_{xIII}$) に基づいた S-N 関係を図 4.2 に示す. 同図には次式で与えられる安全側の S-N 曲線も描いてある.

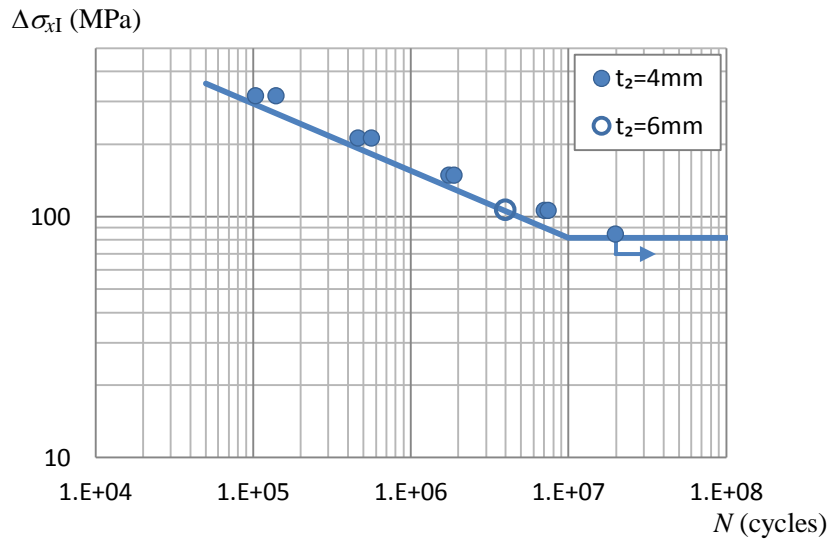
$$\log N = \log c - 2\xi_N - m \log(\Delta\sigma_x) \quad (10)$$

ここで, m と $\log c$ は, $\log(\Delta\sigma_x)$ を独立変数, $\log N$ を従属変数として, 最小二乗法を適用することによって与えられる. ξ_N は, 任意の $\log(\Delta\sigma_x)$ に対する $\log N$ の標準偏差である.

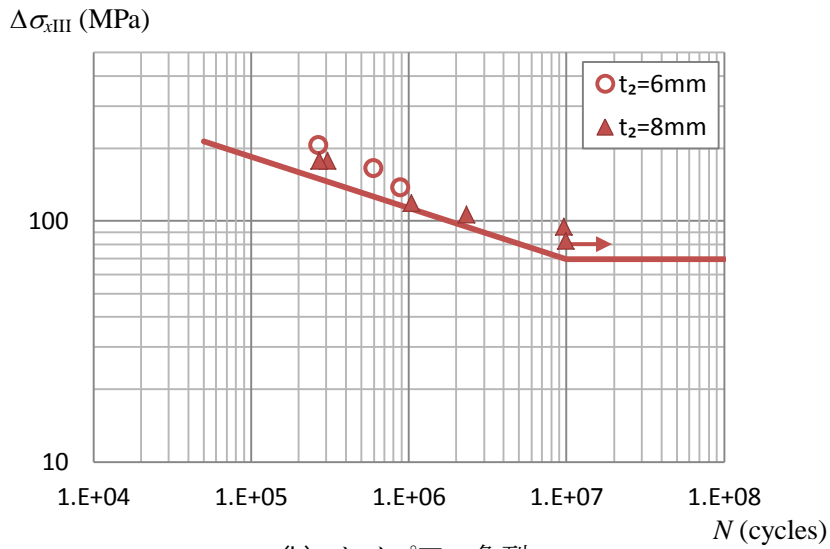
$$\xi_N = \left[\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n \{ \log N_i - \log c + m \log(\Delta\sigma_{x,i}) \}^2 \right]^{0.5} \quad (11)$$

ここに, N_i と $\Delta\sigma_{x,i}$: それぞれ, 試験片 i の繰返し回数と亀裂発生点に生じる応力範囲, n : 試験片の総数.

疲労限度 $\Delta\sigma_{x,caf}$ ($=\Delta\sigma_{xI,caf}$ または $\Delta\sigma_{xIII,caf}$) は, 繰返し回数 $N=10^7$ を式(10)に代入して与えられる応力範囲としている. m , $\log c$, ξ_N , $\Delta\sigma_{x,caf}$ の値を表 4.5 に示す. タイプ I の亀裂は連結板の厚さが 4mm と 6mm で発生し, タイプⅢの亀裂は連結板の厚さが 6mm と 8mm で発生する.



(a) タイプ I の亀裂



(b) タイプ III の亀裂

図 4.2 亀裂発生点の応力範囲に基づいた S-N 関係

表 4.5 m , $\log c$, ξ_N , $\Delta\sigma_{x,caf}$ の値

亀裂のタイプ	m	$\log c$	ξ_N	$\Delta\sigma_{x,caf}$ (MPa)
I	3.598	14.069	0.094	81.8
III	4.724	16.108	0.202	69.5

第5章 連結板の厚さが疲労強度に与える影響

式(8)の $\Delta\sigma_{xI}$ を式(10)の $\Delta\sigma_x$ に代入して、タイプIの亀裂に対して、連結板の公称応力範囲 $\Delta\sigma_2$ で表されたS-N曲線が次式で与えられる。

$$\log N = \log c - 2\xi_N - m \log(K_{xI}) - m \log(\Delta\sigma_2) \quad (12)$$

さらに、連結板の公称応力範囲で表されたタイプIの亀裂の疲労限度 $\Delta\sigma_{2caf}$ が次式で与えられる。

$$\Delta\sigma_{2caf} = \frac{\Delta\sigma_{xI,caf}}{K_{xI}} \quad (13)$$

表4.5に示す、タイプIの亀裂に対する m 、 $\log c$ 、 ξ_N 、 $\Delta\sigma_{xI,caf}$ の値および $K_{xI} = 2.19$ を式(12)と(13)に代入して次式を得る。

$$\log N = 12.655 - 3.598 \log(\Delta\sigma_2) \quad (14)$$

$$\Delta\sigma_{2caf} = 37.2 \quad (15)$$

応力比 $R=0.1$ に対して、既往の研究²⁾で提案されたタイプIの亀裂の設計S-N曲線と疲労限度を次式に示す。

$$\log N = 12.552 - 3.547 \log(\Delta\sigma_2) \quad (16)$$

$$\Delta\sigma_{2caf} = 36.7 \quad (17)$$

式(14)と(15)が与えるS-N曲線と、式(16)と(17)が与える設計S-N曲線の比較を図5.1に示す。両者はほぼ一致している。これは、タイプIの亀裂に対する応力集中係数 K_{xI} が連結板の厚さに対する変動が小さいためである。図4.1に示すように、タイプIIの亀裂に対する応力集中係数 K_{xII} も連結板の厚さに対する変動が小さい。したがって、タイプIとIIの亀裂の疲労強度に対して、連結板の厚さが与える影響はない。

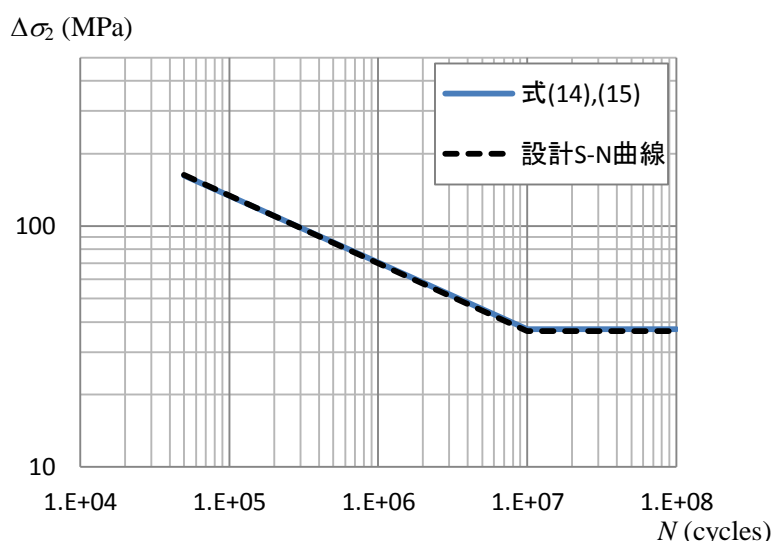


図5.1 タイプIの亀裂に対するS-N曲線の比較

式(9)の $\Delta\sigma_{xIII}$ を式(10)の $\Delta\sigma_x$ に代入して、タイプIIIの亀裂に対して、母材の公称応力範囲 $\Delta\sigma_1$ で表されたS-N曲線が次式で与えられる。

$$\log N = \log c - 2\xi_N - m \log(K_{x_{III}}) - m \log(\Delta\sigma_1) \quad (18)$$

さらに，母材の公称応力範囲で表されたタイプⅢの亀裂の疲労限度 $\Delta\sigma_{1caf}$ が次式で与えられる．

$$\Delta\sigma_{1caf} = \frac{\Delta\sigma_{x_{III},caf}}{K_{x_{III}}} \quad (19)$$

表 4.5 に示す，タイプⅢの亀裂に対する m ， $\log c$ ， ξ_N ， $\Delta\sigma_{x,caf}$ の値および式(7)を式(18)と(19)に代入して次式を得る．

$$\log N = 15.704 - 4.724 \log(-0.11t_2 + 2.05) - 4.724 \log(\Delta\sigma_1) \quad (20)$$

$$\Delta\sigma_{1caf} = \frac{69.5}{-0.11t_2 + 2.05} \quad (21)$$

式(20)と(21)が示すように，タイプⅢの亀裂の S-N 曲線と疲労限度は，連結板の厚さ t_2 が大きくなるに従って上昇する．式(20)と(21)が与える S-N 曲線と試験値の比較を， $t_2=6\text{mm}$ と 8mm の板厚に対してそれぞれ図 5.2(a)，(b)に示す．

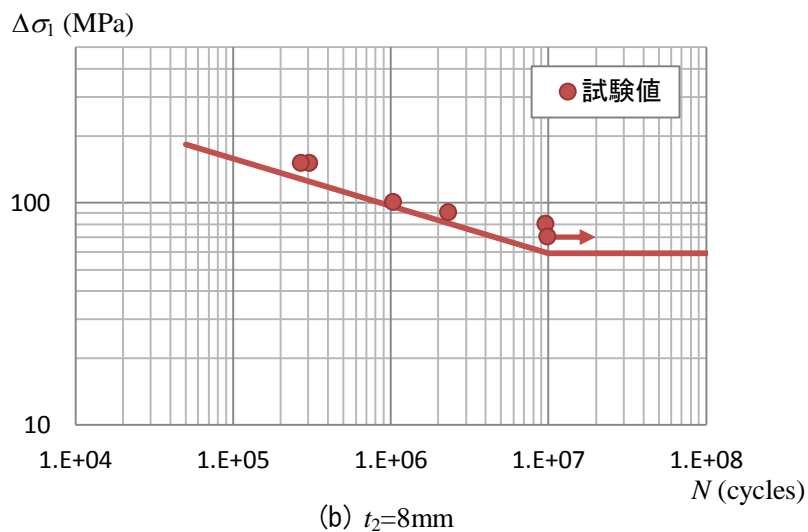
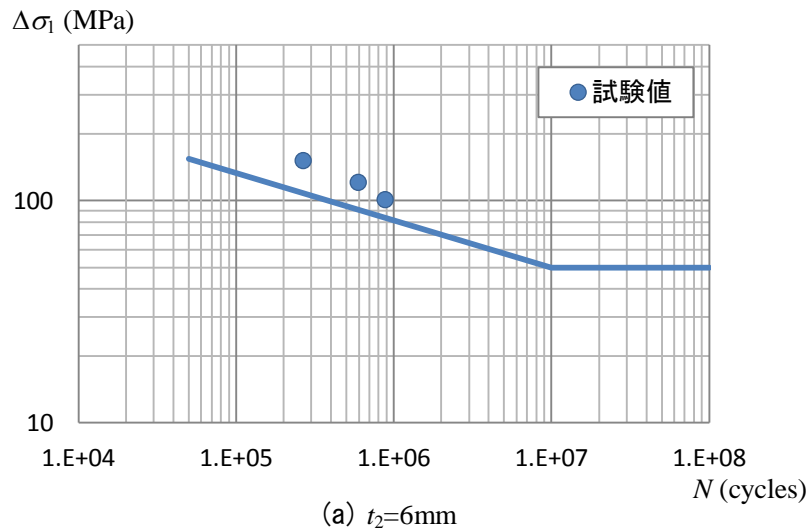


図 5.2 S-N 曲線と試験値の比較

応力比 $R=0.1$ に対して、既往の研究²⁾で提案されたタイプⅢの亀裂の設計 S-N 曲線と疲労限度を次式に示す。

$$\log N = 16.271 - 5.225 \log(\Delta\sigma_1) \quad (22)$$

$$\Delta\sigma_{1caf} = 59.5 \quad (23)$$

$t_2=6\text{mm}$ と 8mm に対して、式(20)と(21)が与える S-N 曲線と、式(22)と(23)が与える設計 S-N 曲線の比較を図 5.3 に示す。設計 S-N 曲線は、 $t_2=6\text{mm}$ に対する S-N 曲線より高い位置にある。設計 S-N 曲線と $t_2=8\text{mm}$ に対する S-N 曲線を比較すると、疲労限度は一致するが、 $N \leq 10^7$ の範囲では、設計 S-N 曲線が、 $t_2=8\text{mm}$ に対する S-N 曲線より低い位置にある。したがって、連結板の厚さを母材の厚さ以上にすれば、設計 S-N 曲線と疲労限度は、タイプⅢの亀裂の疲労強度を安全側に評価する。

既往の研究²⁾では、連結板と母材の板厚比 t_2/t_1 (t_2 : 連結板の板厚, t_1 : 母材の板厚) を 0.81 以上とすれば、継手全体としての設計 S-N 曲線が母材の設計 S-N 曲線で与えられることを示した。しかし、前述したように、連結板の厚さが母材の厚さ以上の場合、設計 S-N 曲線と疲労限度は、タイプⅢの疲労強度を安全側に評価する。したがって、アルミニウム合金板摩擦接合継手に対して、継手全体としての設計 S-N 曲線を母材の設計 S-N 曲線で与えることができる板厚比 t_2/t_1 を 1 以上に修正する。ただし、疲労試験結果は、母材の厚さが 8mm に限られるので、設計 S-N 曲線の適用範囲は、厚さが 8mm 前後の母材に限られる。

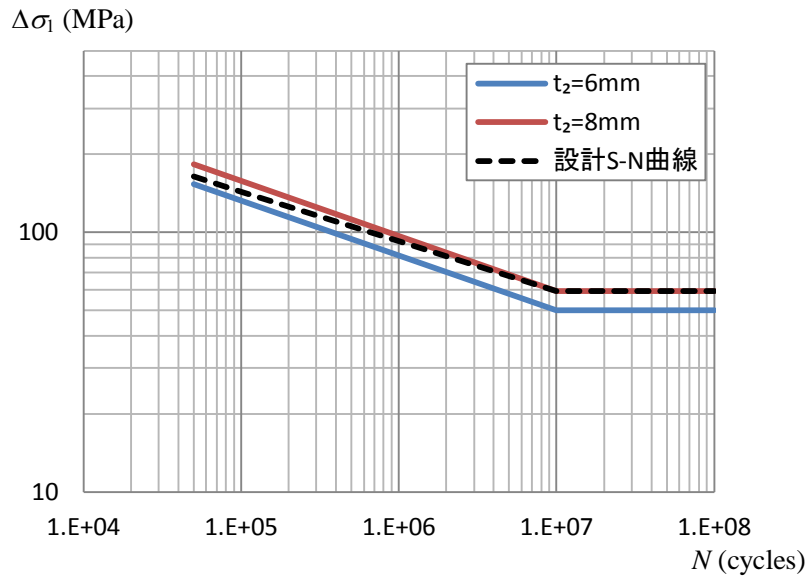


図 5.3 タイプⅢの亀裂に対する S-N 曲線の比較

第6章 結論

本研究では、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の発生点に生じる応力を FEM 解析によって求めた。この応力を用いて S-N 曲線を与え、連結板の厚さがアルミニウム合金板摩擦接合継手の疲労強度に与える影響を明らかにした。本研究で得られた主な結論は次の通りである。

- (1) タイプⅠの亀裂（座金直下の連結板表面に生じる亀裂）とタイプⅡの亀裂（連結板裏面に生じる亀裂）に対して、亀裂発生点の応力集中係数は連結板の厚さに対する変動が小さい。したがって、タイプⅠとⅡの亀裂の疲労強度に対して連結板の厚さの影響はない。
- (2) タイプⅢの亀裂（母材表面に生じる亀裂）に対して、亀裂発生点の応力集中係数は連結板の厚さが大きくなるに従って低下する。したがって、タイプⅢの亀裂の S-N 曲線と疲労限度は、連結板の厚さが大きくなるに従って上昇する。
- (3) 既往の研究²⁾で提案されたタイプⅢの亀裂に対する設計 S-N 曲線と疲労限度は、連結板の厚さが母材の厚さ以上のとき、疲労強度を安全側に評価する。したがって、アルミニウム合金板摩擦接合継手に対して、継手全体としての設計 S-N 曲線が母材の設計 S-N 曲線で与えることができる連結板と母材の板厚比を 1 以上に修正する。ただし、疲労試験結果は、母材の厚さが 8mm に限られるので、設計 S-N 曲線の適用範囲は、厚さが 8mm 前後の母材に限られる。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 吉野浩祐, 大倉一郎: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, No.31, 2013.
- 3) 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.
- 4) TNO Building and Construction Research : DIANA, Release 9.4.4, Delft, Netherland, 2013.
- 5) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説, I 共通編 II 鋼橋編, 2012.