

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 14

2010 年 3 月

大阪大学大学院工学研究科

大倉一郎，中野崇志

概要

ALST 研究レポート 8 『アルミニウム合金板摩擦接合継手の疲労特性』では、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において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。

本研究では、このフレットング疲労亀裂の発生を支配する応力を FEM 解析によって明らかにする。さらに、この応力に基づいた S - N 曲線を与える。

目次

第 1 章 序論	.....	1
第 2 章 疲労亀裂を発生させる応力	.....	6
2.1 影響因子	.....	6
2.2 FEM 解析	.....	6
2.3 ボルト軸力によって発生する σ_x と Δw	.....	9
2.4 引張力によって発生する σ_x , Δu , Δw	.....	17
第 3 章 σ_x に基づいた S - N 曲線	.....	28
第 4 章 結論	.....	36
参考文献	.....	37
付録 A 疲労試験結果	.....	38

第 1 章 序論

耐食性の高いアルミニウム合金を社会基盤構造物に適用することにより維持管理コストを低減することができる。既に、わが国ではアルミニウム歩道橋や歩道橋用アルミニウム床版が実用に供されている¹⁾。さらに、現在、アルミニウム合金を道路橋に適用することを目指して、道路橋用アルミニウム床版の開発が進められている^{2)~4)}。

道路橋用アルミニウム床版は、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。摩擦攪拌接合とは、1991年にイギリスの溶接研究所で開発された固相接合法の一種であり、現在、自動車、鉄道車両や航空機など多くの分野で使用されている。図 1.1 に示すように、互いに突合わされた一対のアルミニウム合金板の突合わせ面に鋼製の回転工具を挿入し、この回転により生じる摩擦熱によって、アルミニウム合金板に塑性流動を生じさせ、回転工具を突合わせ面に沿って移動させることにより、アルミニウム合金板が接合される。摩擦攪拌接合は MIG 溶接と比べて接合部の疲労強度が高いため⁵⁾、疲労が問題となる道路橋にアルミニウム合金を適用することが可能になる。しかし、建設現場で使用できる摩擦攪拌接合装置はまだ開発されていないため、建設現場の部材接合に鋼製高力ボルトによる摩擦接合継手が必要になる。

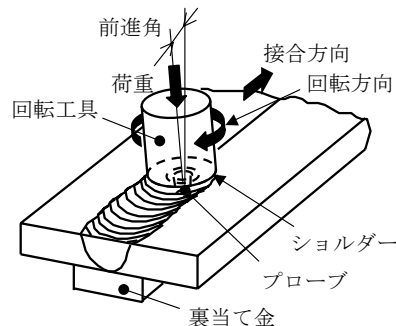


図 1.1 摩擦攪拌接合

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について、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、および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明らかにされた^{6),7)}。しかし、アルミニウム合金板摩擦接合継手の疲労に関しては、板の面と面の間に生じるこすれ、すなわちフレッティング疲労によるものであることが明らかにされたが、疲労亀裂の発生メカニズムは完全には解明されていない⁸⁾。

アルミニウム合金板摩擦接合継手の疲労強度を明らかにするために、図 1.2 に示すような鋼製高力ボルト摩擦接合継手の実寸大の試験体が製作され、疲労試験が行われた⁸⁾。試験体の押出型材と添接板はそれぞれ A6061S-T6 と A6061P-T651 である。鋼製高力ボルト M22 (F10T) に、道路橋示方書⁹⁾に規定される F8T の設計ボルト軸力 165kN の 1 割増し 182kN の初期導入軸力が与えられた。一つのせん断面における相対する両方の摩擦面または一方の摩擦面を、プラスト処理により Rz20 μ m 以上の粗面とす

ることにより、すべり係数を 0.45 にとることができる」と規定されているアルミニウム建築構造製作要領¹⁰⁾に従って、添接板の裏面（摩擦面）に Rz30～50 μm のブラスト処理が施された。母材にはブラスト処理が施されていない。

荷重範囲 $\Delta P=350\text{kN}$ 、応力比 $R=0.054$ の荷重条件に対して、約 35 万回の繰返し回数でウェブ添接板に疲労亀裂が発生した。疲労試験終了後の添接板の様子を図 1.3 に示す。疲労亀裂はボルト孔の縁ではなく、ボルト孔の周りの座金に接触する面および母材に接触する面に残された円形状の接触跡の縁に発生した。そして接触跡の縁には黒い粉が付着していた。この粉の成分は、ベーマイトと呼ばれるアルミニウム合金の水酸化物 $\text{AlO}(\text{OH})\cdot\text{H}_2\text{O}$ であった。座金と添接板の接触跡の縁および添接板と母材の接触跡の縁で、繰返し荷重による面と面のこすれが生じ、アルミニウム合金板の表面が磨耗することによって水酸化物の磨耗粉が生成される。ウェブ添接板に発生した疲労亀裂は、磨耗による表面損傷を伴うフレタィング疲労によるものであることが明らかにされた。

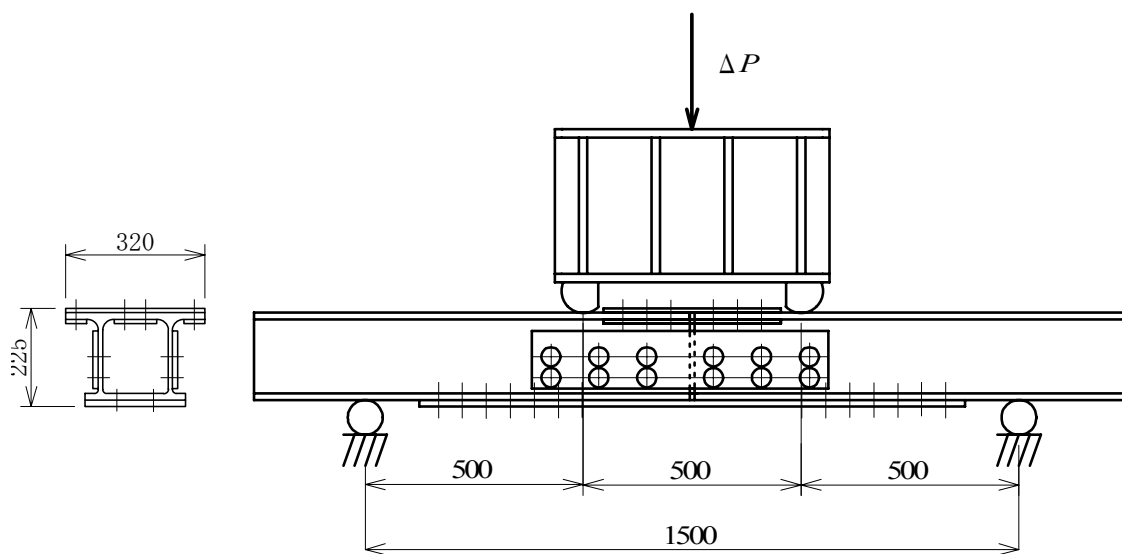
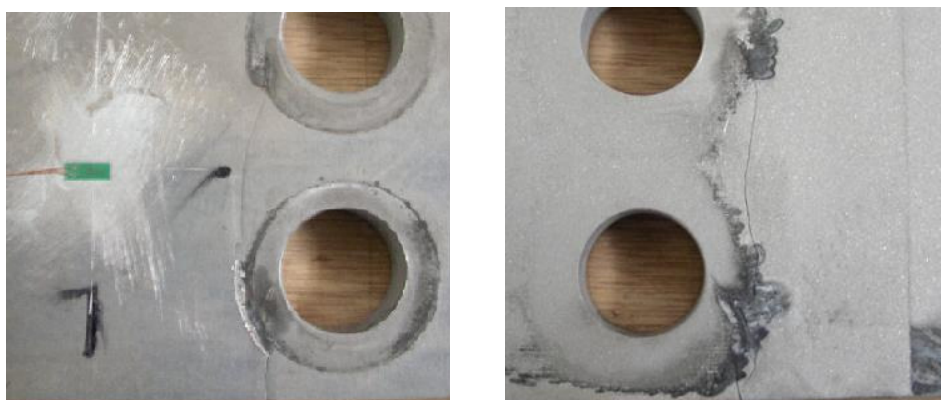


図 1.2 実寸大の試験体



(a) 座金と接触する面(添接板の表面)

(b) 母材と接触する面(添接板の裏面)

図 1.3 疲労試験終了後の添接板の状況

ボルト導入軸力，添接板の厚さ，応力比が疲労強度に与える影響を明らかにするために，図 1.4 に示す 1 列ボルトのアルミニウム合金板摩擦接合継手の疲労試験が行われた⁸⁾。8mm の厚さの母材に対して，4，6，8mm の 3 種類の厚さの添接板が考慮された。母材および添接板のアルミニウム合金は A6061P-T6 である。添接板の裏面（摩擦面）に Rz28~46 μm のブラスト処理が施された。鋼製高力ボルトは M20(F10T) であり，道路橋示方書⁹⁾に規定される F8T および F10T の設計ボルト軸力に対して，それぞれ 1 割増しの 146kN および 182kN の初期導入軸力が考慮された。

試験片に発生した疲労亀裂の例を図 1.5 に示す。この例は，座金と接触する添接板の表面に発生した疲労亀裂である。疲労亀裂はボルト孔の縁ではなく，継手の突合せ側の接触部の縁に発生している。接触部の縁には黒い粉が付着しており，前述の実寸大の試験体と同様に，疲労亀裂はフレットング疲労によるものである。

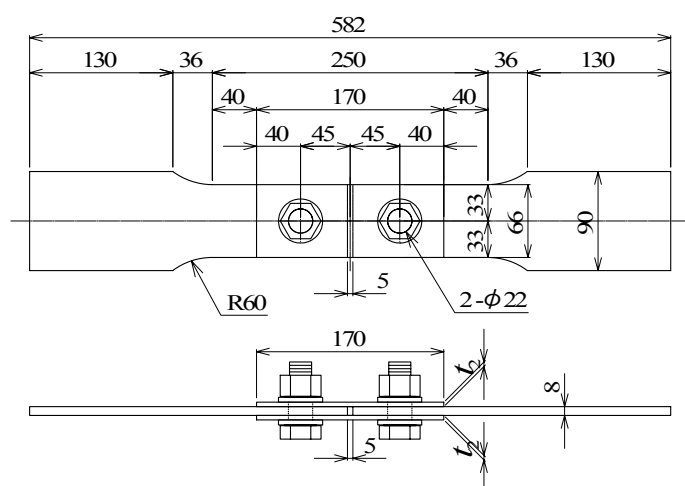


図 1.4 1 列ボルト試験片



図 1.5 座金と接触する添接板の表面に発生した疲労亀裂

継手を破断させた疲労亀裂は発生位置により 3 タイプに分類された。各亀裂タイプを図 1.6 に示す。図 1.6(a)のタイプ I の亀裂は，添接板の表面において，座金との接触部の縁上で，水平軸に対して，上下約 30° の位置の 2 箇所が発生する。各箇所から発生した亀裂の一方は荷重方向に対して直角な方向に

添接板の材縁に向かって伝播し、他方は接触部の縁に沿って伝播する。そして接触部の縁に沿って伝播する亀裂は、他方の発生箇所から伝播して来た亀裂とつながる。図 1.6(b)のタイプⅡの亀裂は、添接板の裏面において、母材との接触部の縁上で、水平軸に対して、上下約 40° の位置の 2 箇所が発生する。各箇所から発生した亀裂の一方は荷重方向に対して直角な方向に添接板の材縁に向かって伝播し、他方は接触部の縁に沿って伝播する。そして接触部の縁に沿って伝播する亀裂は、他方の発生箇所から伝播して来た亀裂とつながる。図 1.6(c)のタイプⅢの亀裂は、母材において、添接板との接触部の縁上で、水平軸に対して約 120° の位置に発生する。亀裂の一方は荷重方向に対して直角な方向に添接板の材縁に向かって伝播し、他方は接触部の内側をボルト孔に向かって伝播する。タイプⅢの亀裂は、図 1.6(c)に示すように、2 箇所から発生する場合と、どちらかの 1 箇所から発生する場合とがある。

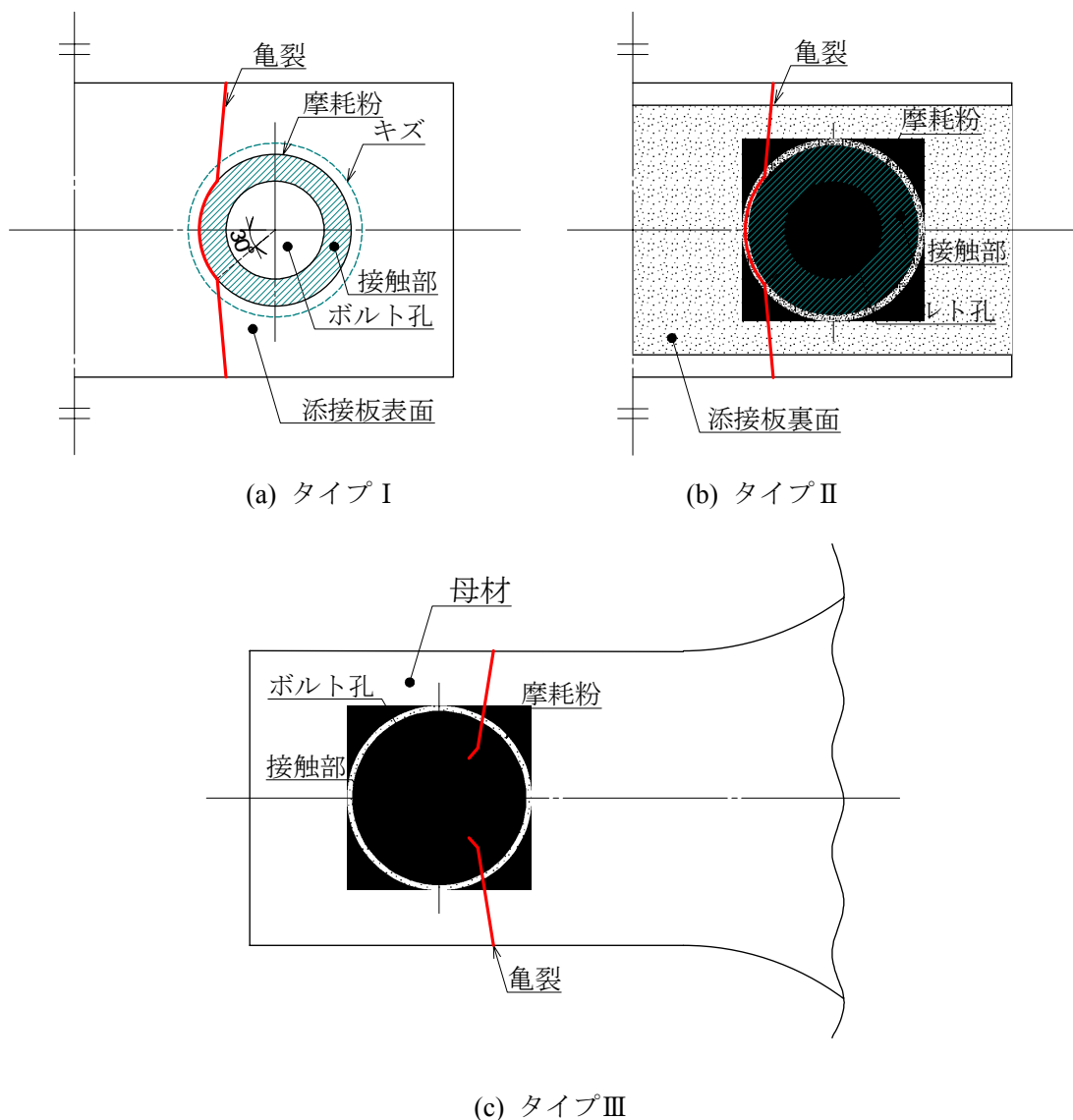


図 1.6 疲労亀裂のタイプ

1 列ボルトのアルミニウム合金板摩擦接合継手の疲労試験によって、ボルトの初期導入軸力が F8T と

F10T で疲労強度に違いがないことが示された。しかし疲労亀裂の発生メカニズムはまだ完全には解明されていない。本研究は、疲労亀裂を発生させる応力を明らかにし、この応力に基づいた S-N 曲線を与えることを研究目的とする。

第 2 章 疲労亀裂を発生させる応力

2.1 影響因子

図 1.6 の各タイプの疲労亀裂に対して、亀裂の発生位置における、亀裂の伝播方向に対して直角方向の応力が亀裂の発生を支配する応力である。そこで、座金と添接板との接触部の縁および添接板と母材との接触部の縁に生じる荷重方向の応力 σ_x を調べる。

さらに、フレット疲労には亀裂の発生位置近傍で、面と面がこすれる度合いも亀裂発生に影響すると考えられる。2.4 節で述べるように、引張力を受けるアルミニウム合金板摩擦接合継手は図 2.1 に示す変形を示す。このとき、座金と添接板との接触部および添接板と母材との接触部は、摩擦により固着しているが、接触部の外側では各面は離れて水平方向に変位する。面と面の水平方向の変位差 Δu が大きくなれば、面と面がこすれる度合いも大きくなり、疲労亀裂が発生しやすくなると考えられる。しかし、 Δu が大きくても、面と面の隙間 Δw が大きくなると、こすれる度合いは小さくなり、疲労亀裂は発生しにくくなると考えられる。

接触部の縁に生じる応力 σ_x ，その近傍の面と面の水平方向の変位差 Δu ，面と面の隙間 Δw を FEM による 3 次元弾性解析によって調べ、疲労亀裂を発生させる応力を明らかにする。

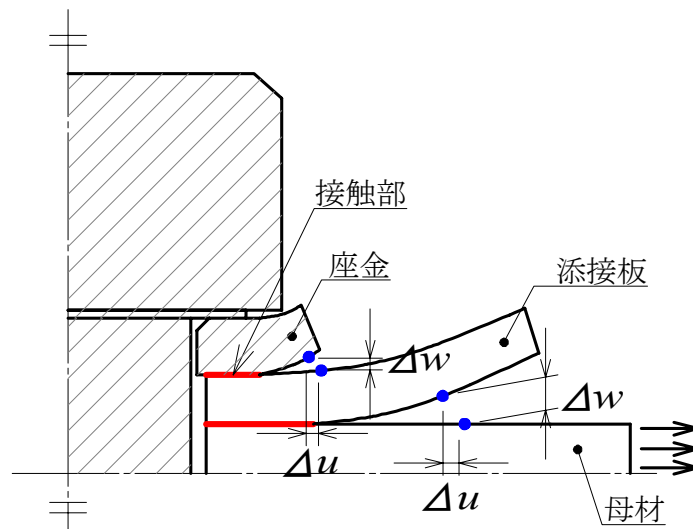


図 2.1 Δu および Δw

2.2 FEM 解析

ボルト軸力および引張力により接触部の縁に生じる応力 σ_x ，その近傍の面と面の水平方向の変位差

Δu ，面と面の隙間 Δw を調べるために，汎用有限要素法プログラム Diana¹¹⁾による 3次元弾性解析を行う．解析対象は，図 2.2 に示すように，第 1 章で述べた 1 列ボルト試験片である．解析対象のボルト孔周辺の寸法を図 2.3 に示す．試験片に用いられた鋼製高力ボルトは M20(F10T)であり，ボルト孔径は 22mm である．座金の内縁は面取りされているため，ボルトまたはナットの座と座金の接触部は d_1 から d_2 までである．

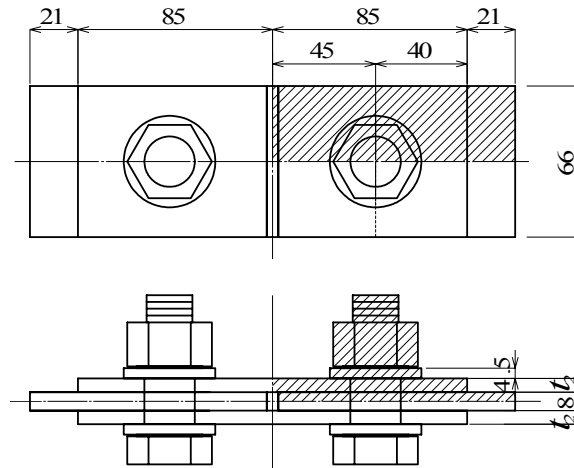
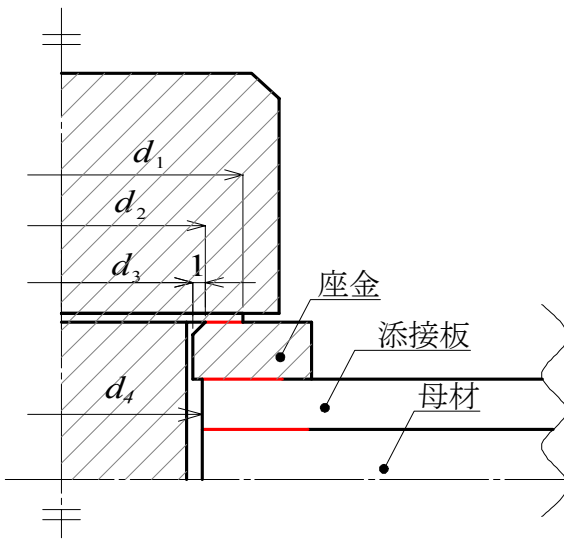


図 2.2 解析対象



ボルト 呼び径	d_1 (mm)	d_2 (mm)	d_3 (mm)	d_4 (mm)
M20	29	23	21	22

図 2.3 ボルト孔周辺

試験片の対称性を考慮して，図 2.2 においてハッチングが施された部分を図 2.4 に示すように要素分割する．同図の上段の図に示すように， $x=0$ の面， $y=0$ の面， $z=0$ の面に対称性の境界条件を与える．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．ボルトおよびナットは解析結果に影響しないと考え，2.3 節で述べるように，ボルトの座と接する座金の上面にボルト軸力を等分布荷重として与える．座金の内縁の面取りは解析結果に影響を与えないと考えられるので，これを考慮

しない。

図 2.4 の下段左図に示すように、ボルト孔の中心に円柱座標系 (r, θ, z) の z 軸をおいて、 $11 \leq r \leq 25 \text{ mm}$ の領域の要素を細かくしている。1 要素の大きさは、 r 方向（放射方向） 0.5 mm 、 θ 方向（円周方向） 0.54 mm ($r = 11 \text{ mm}$) $\sim 1.22 \text{ mm}$ ($r = 25 \text{ mm}$)、 z 軸方向（板厚方向） 0.5 mm である。

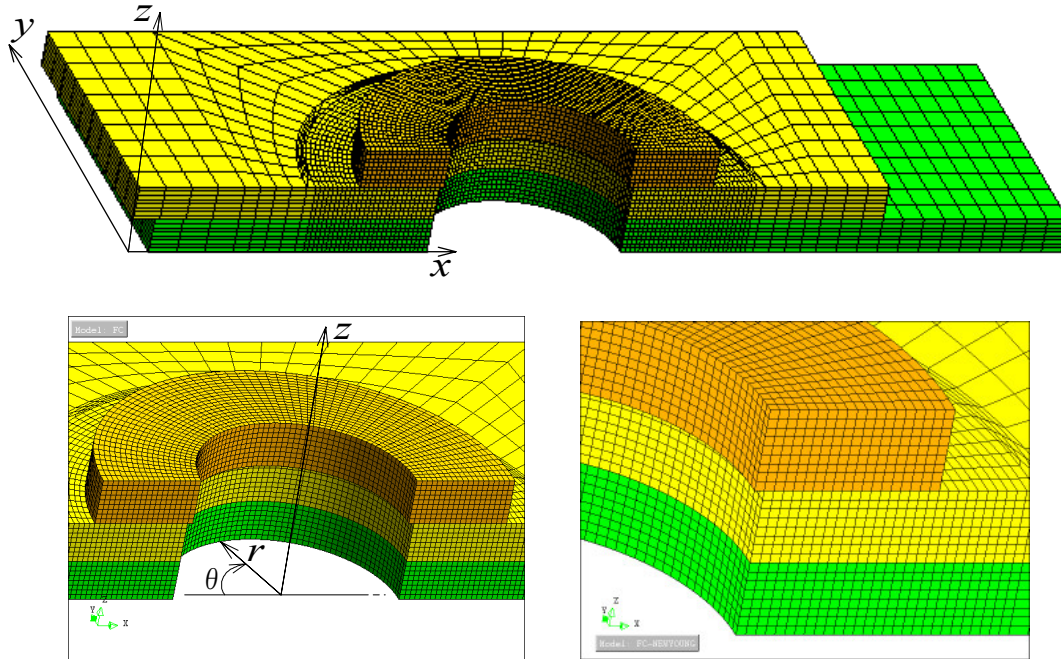
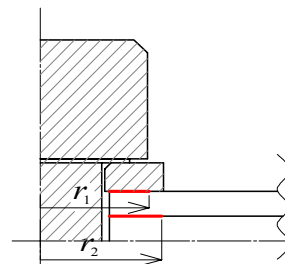


図 2.4 要素分割

座金と添接板の接触部の半径 r_1 および添接板と母材の接触部の半径 r_2 の値を表 2.1 に示す。ここで試験片においては、ボルトの中心と円孔の中心が完全には一致していないので、接触部の磨耗粉の帯の内縁の直径を水平方向、鉛直方向、 $\pm 45^\circ$ 方向で計測し、これら 4 方向の計測値の平均値の半分を r_1 と r_2 としている。FEM 解析では、ボルト孔の中心を中心として半径 r_1 または半径 r_2 の円の内側の、面と面の節点を共有節点とし、各円の外側を重複節点とする。

表 2.1 接触部の半径 r_1 と r_2

添接板 t_2 (mm)	r_1 (mm)	r_2 (mm)
4	17.1	18.8
6	17.4	19.7
8	17.3	21.1



解析モデルの諸元を表 2.2 に示す。添接板の板厚によって 3 通りの解析モデルを考慮する。母材および添接板のヤング係数およびポアソン比の値は引張試験から得られたものである⁸⁾。座金および板厚 6mm の添接板は、引張試験が実施されていないので、座金のヤング係数とポアソン比をそれぞれ 200GPa と 0.3 とし、添接板のヤング係数とポアソン比をそれぞれ 70GPa と 0.3 としている。 r 方向（放射方向）の 1 要素の大きさが 0.5mm であるので、解析モデルにおける r_1 と r_2 の値は、表 2.1 の値を 0.5mm 単位で丸めている。

表 2.2 解析モデルの諸元

板厚(mm)			ヤング係数(GPa)			ポアソン比			接触部の半径	
座金	添接板	母材	座金	添接板	母材	座金	添接板	母材	r_1 (mm)	r_2 (mm)
4.5	4	8	200.0	72.2	71.0	0.3	0.33	0.33	17.0	18.5
	6			70.0	71.3		0.3	0.32		19.5
	8			71.3	71.3		0.32	0.32		21.0

2.3 ボルト軸力によって発生する σ_x と Δw

図 2.5 に示すように、F10T の設計導入軸力の 1 割増し、 $P_{re}=182\text{kN}$ のボルト軸力を、次式で計算される $p=743\text{MPa}$ の等分布荷重として、座金の内径 10.5mm からボルトの座に相当する半径 14.5mm の領域に作用させる。

$$p = \frac{\text{初期導入軸力}}{\text{接触部の面積}} = \frac{P_{re}}{\pi \left\{ (d_1/2)^2 - (d_2/2)^2 \right\}} = 743\text{MPa} \quad (2.1)$$

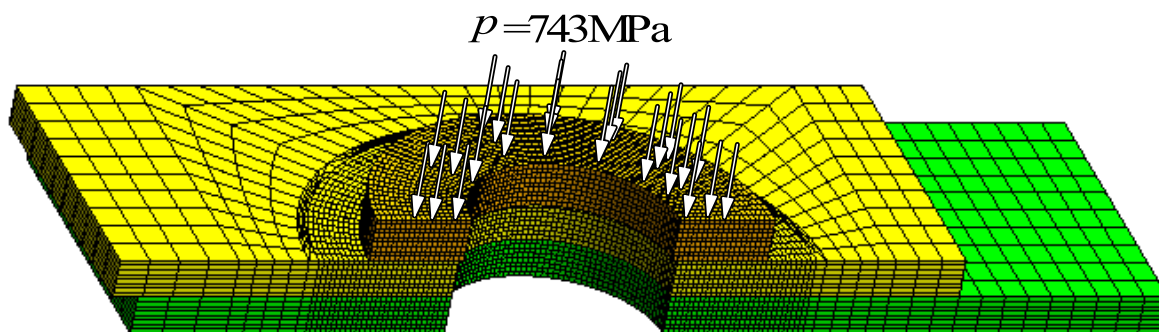


図 2.5 ボルト軸力の作用

板厚 4mm の添接板に対するボルト孔周りの変形を図 2.6 に示す。座金と添接板の間および添接板と母

材の間に隙間が生じている。図 2.7 に示す座標系を用いて、面と面の隙間 Δw の x 軸方向分布を図 2.8 に示す。 $-11 \leq x \leq 11 \text{ mm}$ の範囲はボルト孔に当る。

図 2.8 の各図で、接触部の外で Δw が負の値をとっている。これは、座金と添接板および添接板と母材が接触部の外で交差していることを示している。この交差を無くすために、 r_1 と r_2 の値を、 r 方向の 1 要素の大きさ 0.5 mm ずつ増加させて FEM 解析を行い、面と面が交差しないような最小の値を求める。得られた r_1 と r_2 の値を表 2.3 に示す。 r_1 の値は、添接板の板厚に関係なくほぼ一定であるが、 r_2 の値は、添接板の板厚が大きくなるに従って増加する。得られた r_1 と r_2 の各値は、表 2.1 の計測値より大きい。添接板の裏面で、接触部の磨耗粉の帯の幅が明瞭に計測できる添接板の中央側（母材突合せ側）の磨耗粉の帯の幅は約 2 mm である。したがって、FEM 解析で得られた半径 r_2 は、磨耗粉の帯の外縁に近い。

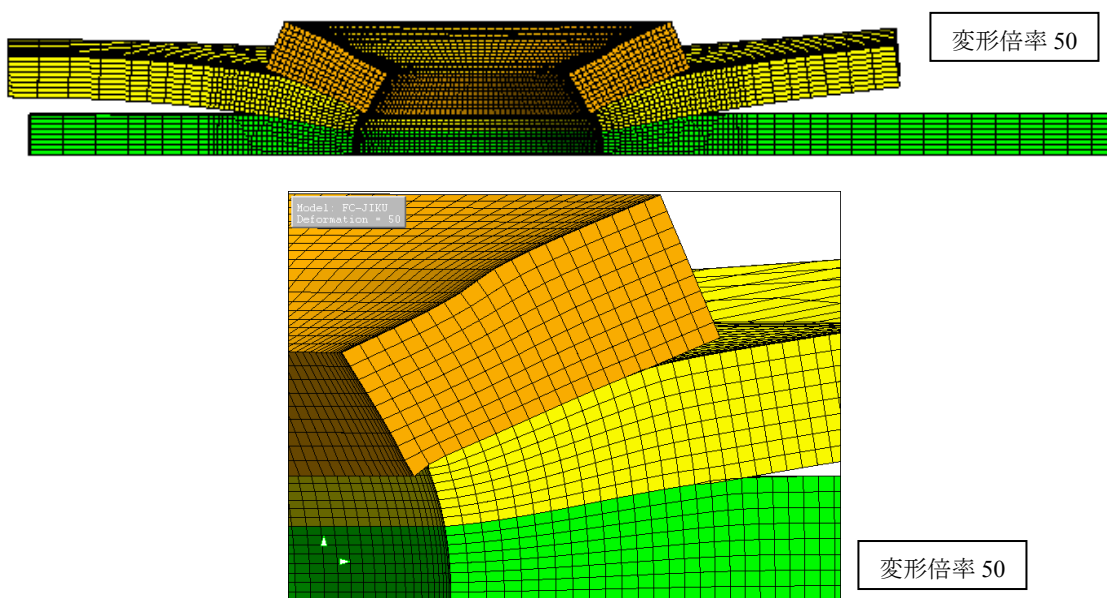


図 2.6 ボルト軸力によって発生するボルト孔周りの変形（板厚 4 mm の添接板）

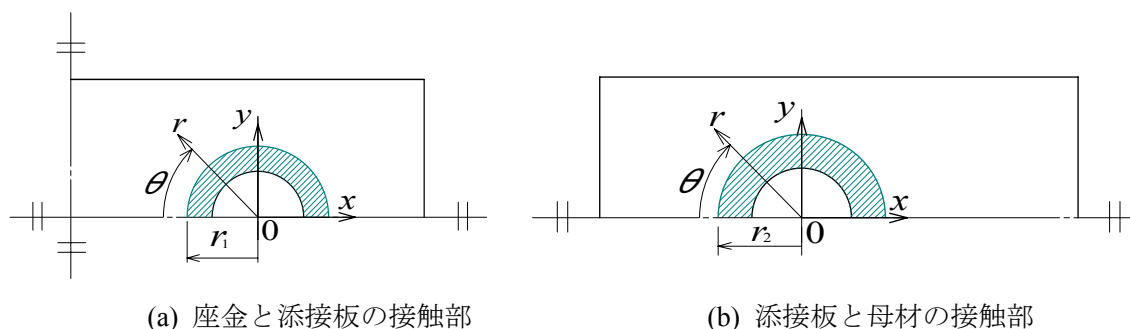
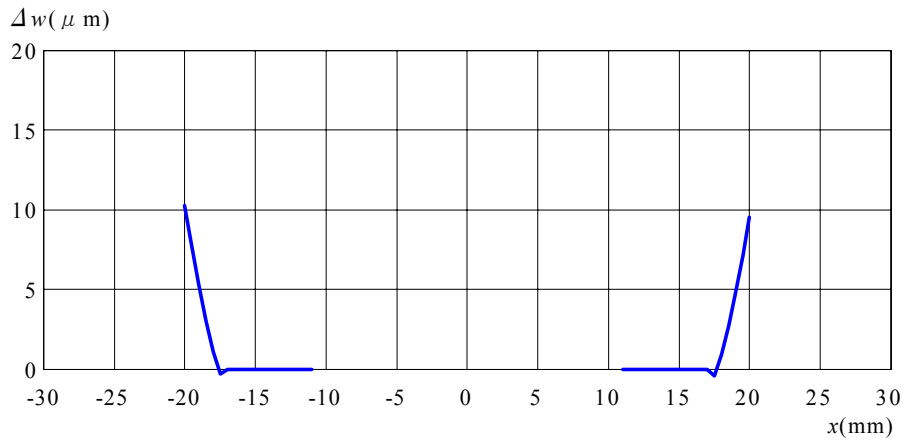
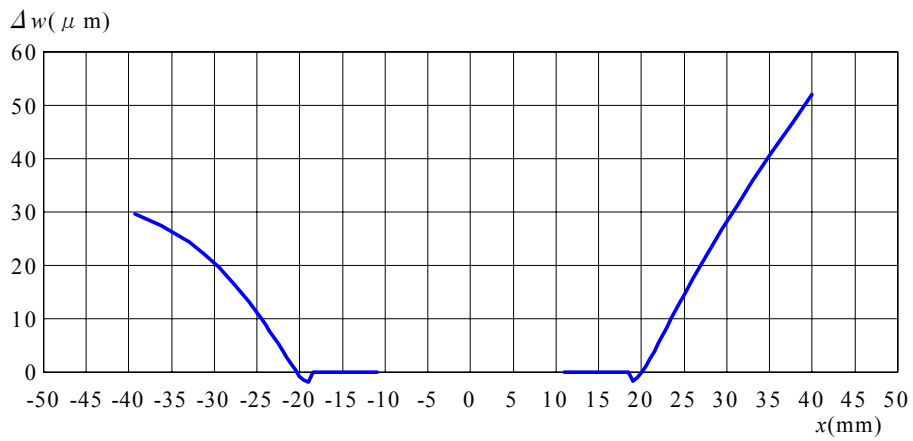


図 2.7 座標系



(a) 座金と添接板の接触部



(b) 添接板と母材の接触部

図 2.8 Δw の x 軸方向分布 (板厚 4mm の添接板)

表 2.3 接触部の半径 r_1 と r_2

添接板 t_2 (mm)	r_1 (mm)	r_2 (mm)
4	17.5	19.5
6	18.0	21.5
8	18.0	23.5

表 2.3 の接触部の半径の値に対して得られるボルト孔周りの変形を図 2.9, Δw の x 軸方向分布を図 2.10 に示す. 図 2.10 には, 板厚 6mm, 8mm の添接板に対する結果も示してある. 添接板の板厚が大きくなるに従って, 座金と添接板の Δw および添接板と母材の Δw は小さくなる. 添接板と母材の Δw は, 添接板の右端が自由端であるため, 右側 (引張力の作用側) の値が左側 (母材突合せ側) の値より大きくなる.

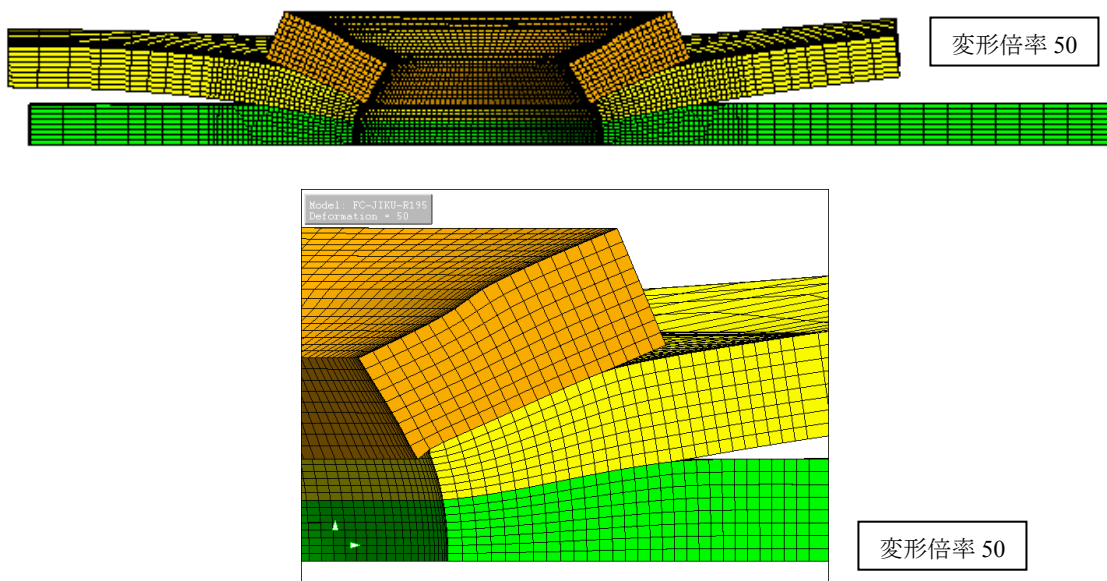
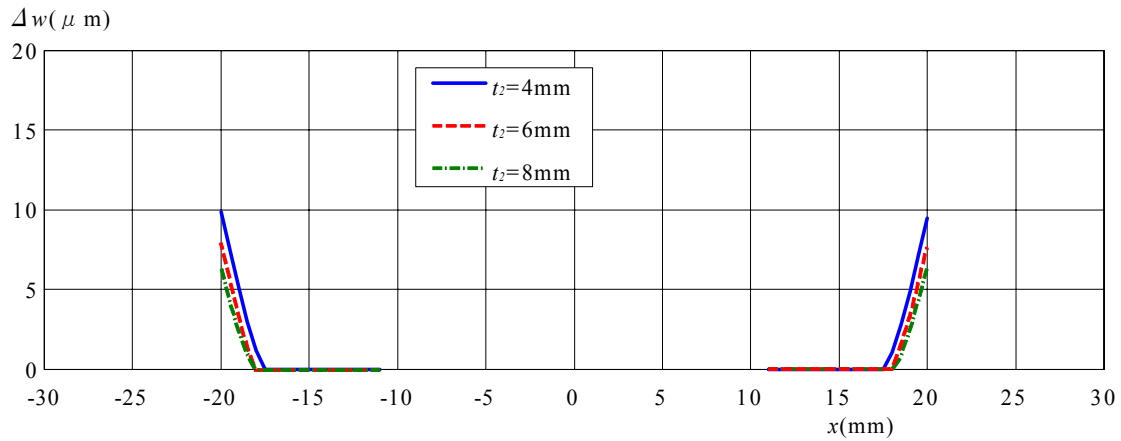
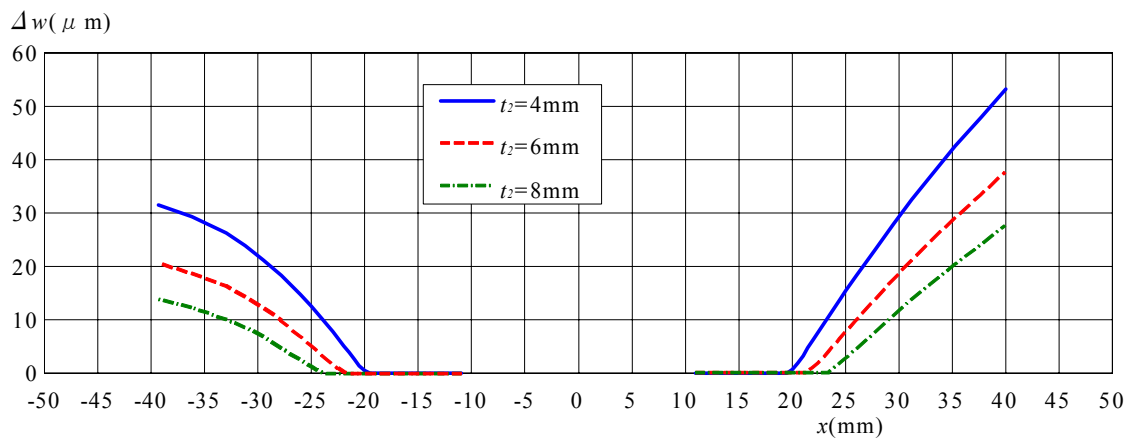


図 2.9 ボルト軸力によるボルト孔周りの変形 (板厚 4mm の添接板)



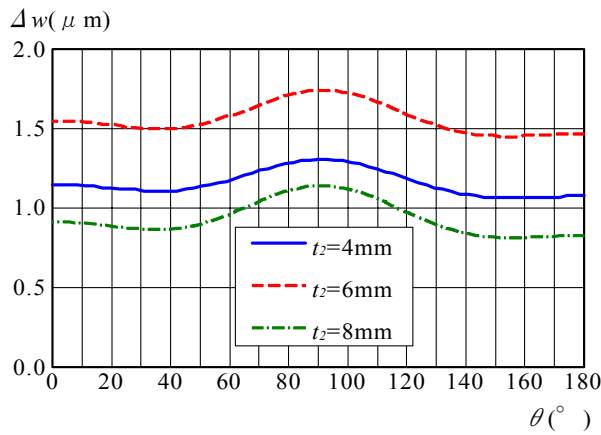
(a) 座金と添接板の接触部



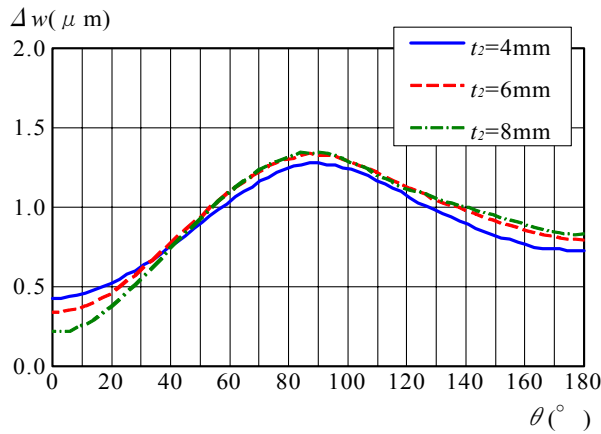
(b) 添接板と母材の接触部

図 2.10 Δw の x 軸方向分布

Δw の θ 方向分布を図 2.11 に示す。座金と添接板の接触部の Δw の値は、 $r = r_1 + 0.5 \text{ mm}$ の節点 (r_1 から 1 要素外側の節点) で算出される値であり、添接板と母材の接触部の Δw の値は、 $r = r_2 + 0.5 \text{ mm}$ の節点 (r_2 から 1 要素外側の節点) で算出される値である。



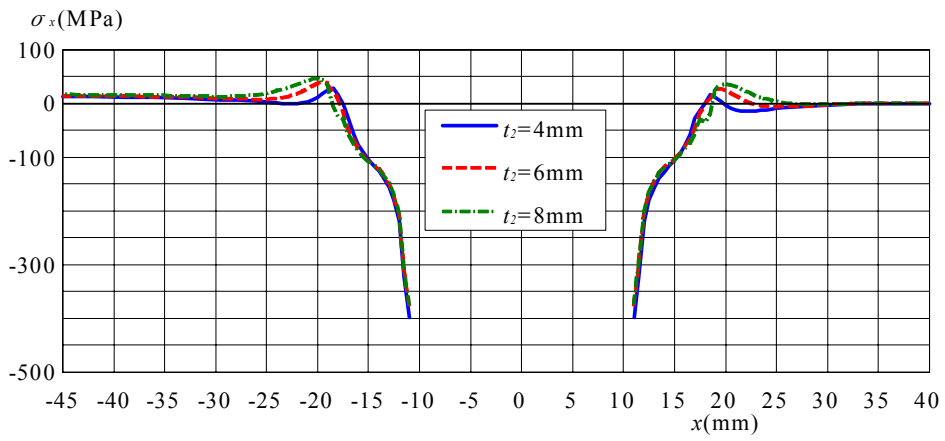
(a) 座金と添接板の接触部



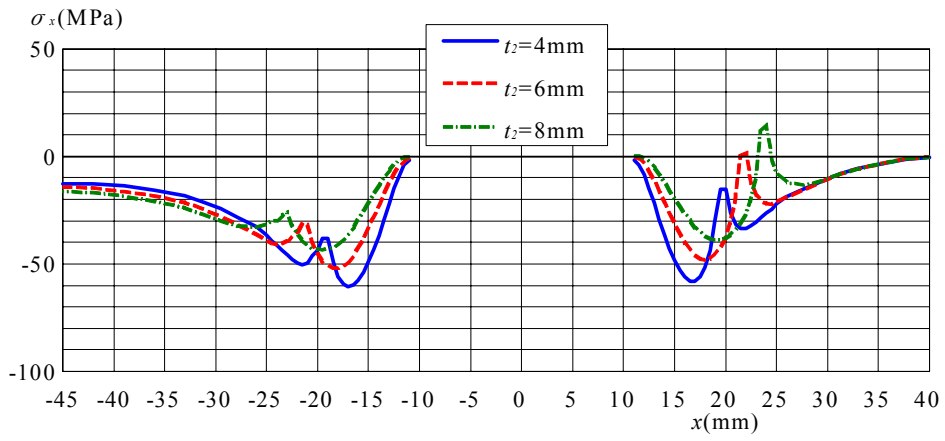
(b) 添接板と母材の接触部

図 2.11 Δw の θ 方向分布

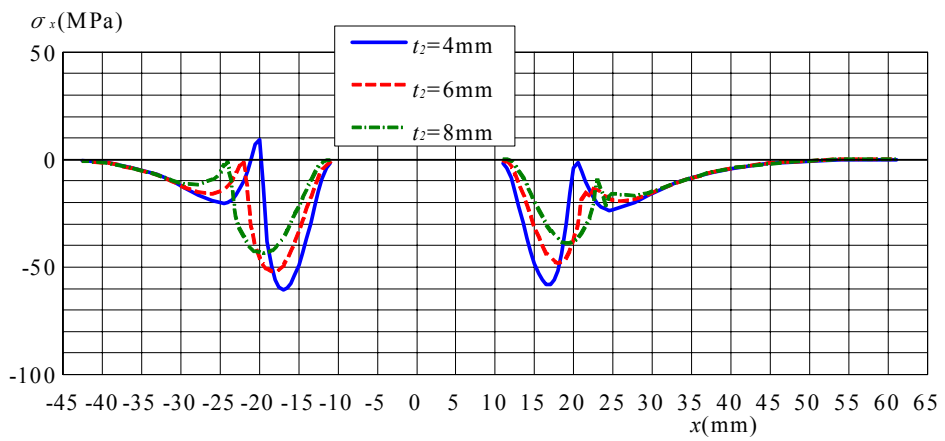
σ_x の x 軸方向分布を図 2.12 に示す。添接板表面では $r = r_1 + 0.5 \text{ mm}$ の位置で σ_x が極大値をとり、添接板裏面と母材では $r = r_2 + 0.5$ の位置で σ_x が極大値をとる。これらの位置における σ_x の θ 方向分布を図 2.13 に示す。同図(a)より、タイプ I の亀裂が発生する $\theta = 30^\circ$ の位置の σ_x は最大で約 20MPa の引張応力である。同図(b)より、タイプ II の亀裂が発生する $\theta = 40^\circ$ の σ_x は約 20MPa の引張応力である。同図(c)より、タイプ III の亀裂が発生する $\theta = 120^\circ$ の σ_x は約 75MPa の引張応力である。



(a) 添接板表面

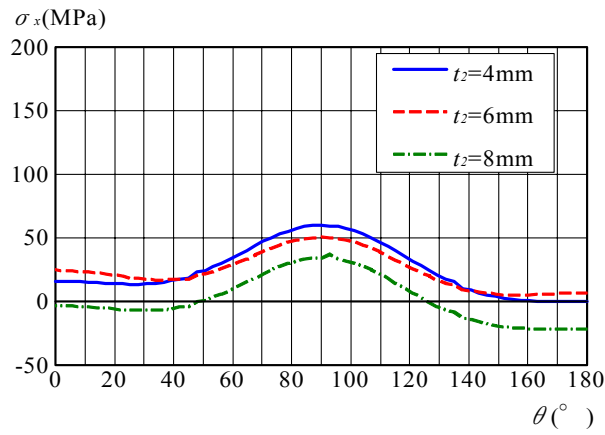


(b) 添接板裏面

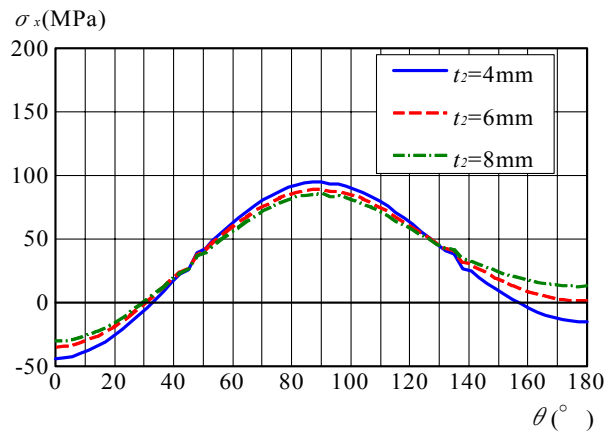


(c) 母材

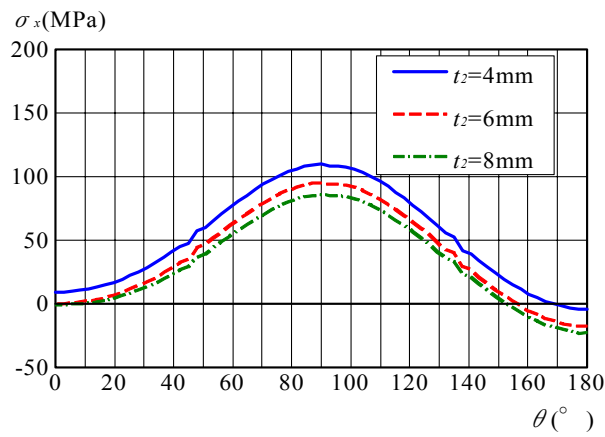
図 2.12 σ_x の x 軸方向分布



(a) 添接板表面



(b) 添接板裏面



(c) 母材

図 2.13 σ_x の θ 方向分布

2.4 引張力によって発生する σ_x , Δu , Δw

図 2.14 に示す母材の材端に $\sigma=100\text{ MPa}$ が作用する場合に対するボルト孔周りの変形を図 2.15 に示す。

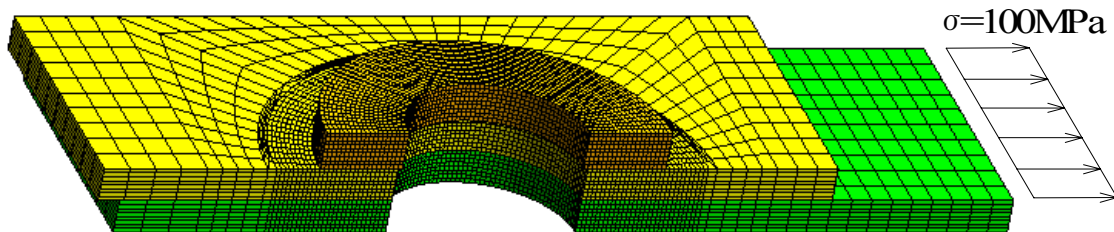


図 2.14 引張力の作用

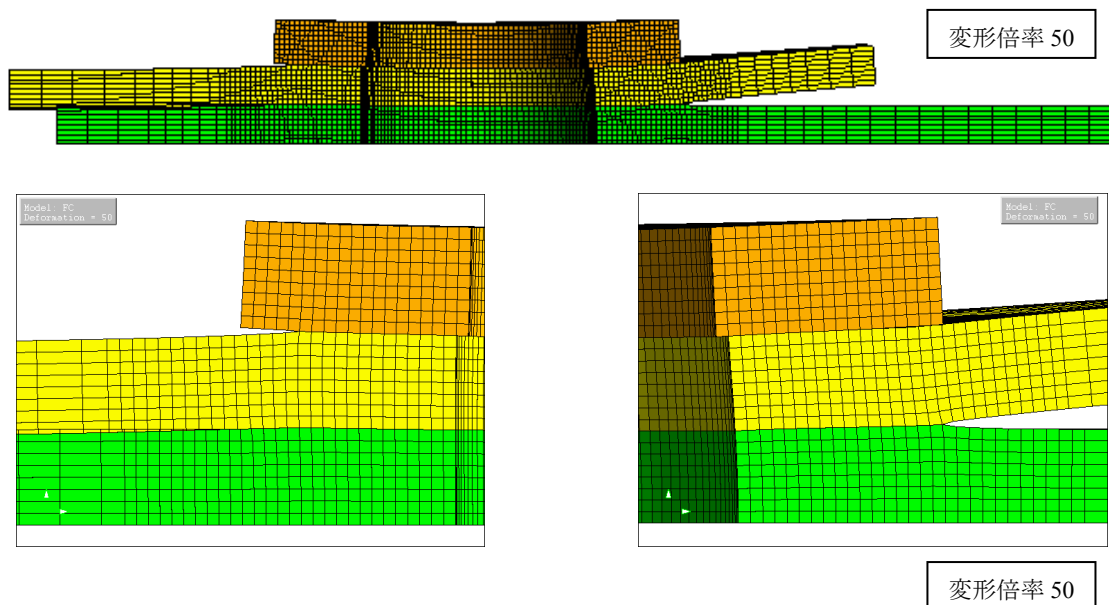
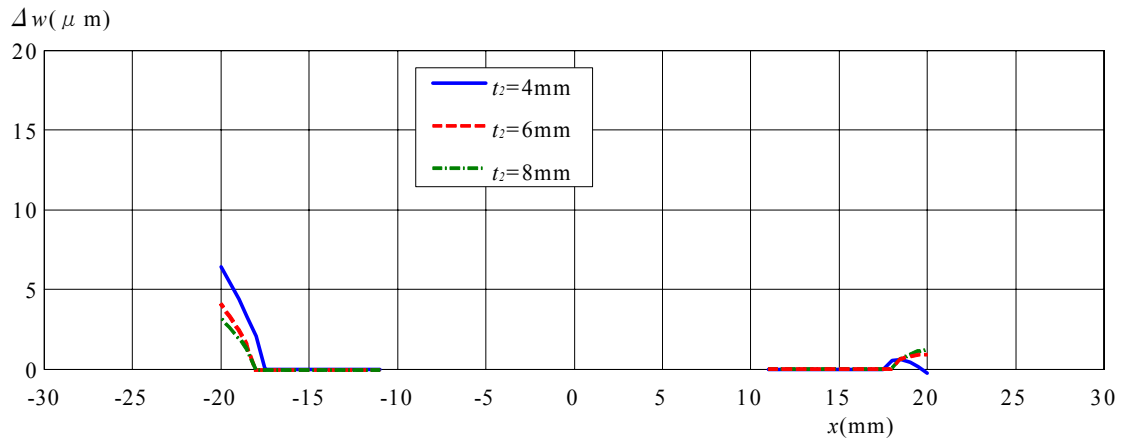
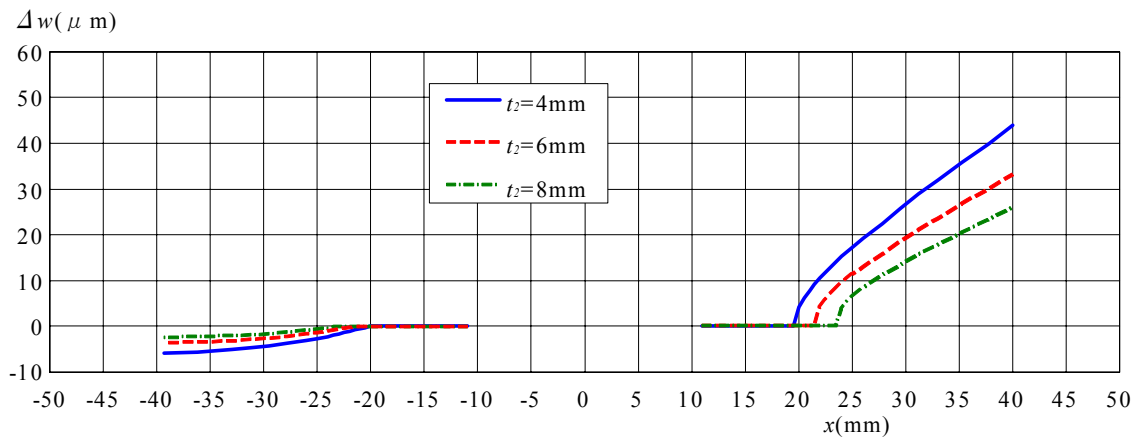


図 2.15 引張力によって生じるボルト孔周りの変形

Δw の x 方向分布を図 2.16 に示す。図 2.16(b) から分かるように、添接板は、右側で母材から離れ、左側で母材と交差する。実際にはボルト軸力も作用しているので、図 2.10 で示されたボルト軸力によって生じる変形を図 2.16 の変形に重ね合わせた結果を図 2.17 に示す。添接板の左側は母材と交差しなくなる。

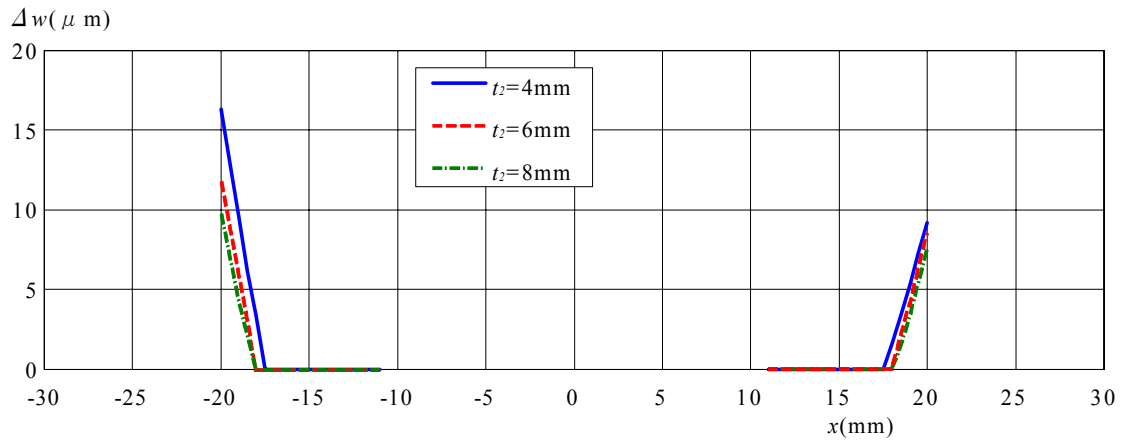


(a) 座金と添接板の接触部

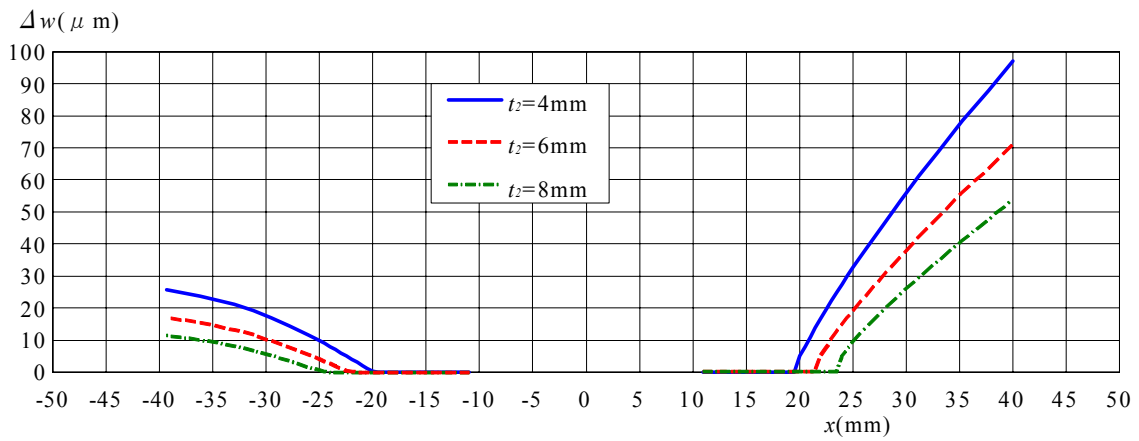


(b) 添接板と母材の接触部

図 2.16 Δw の x 方向分布



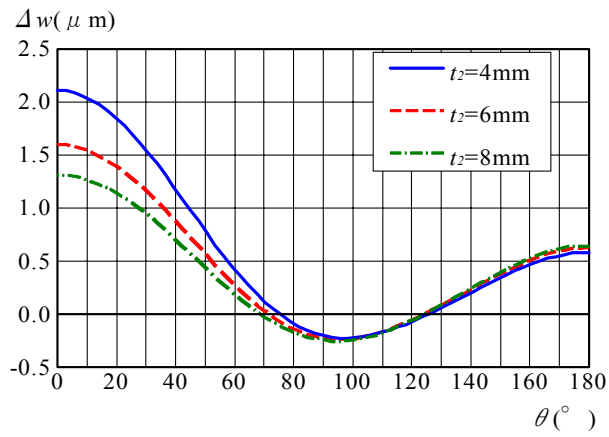
(a) 座金と添接板の接触部



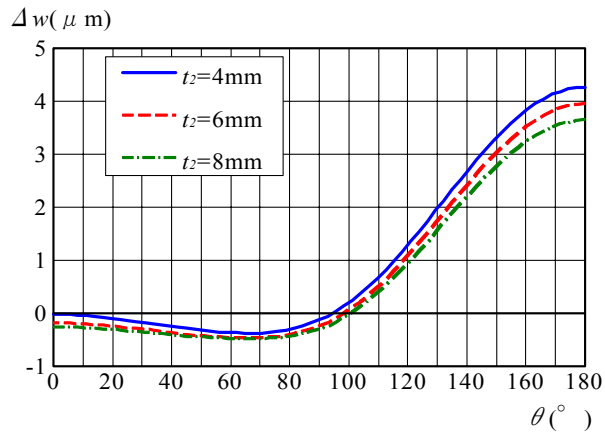
(b) 添接板と母材の接触部

図 2.17 Δw の x 方向分布 (ボルト軸力を考慮)

引張力によって生じる Δw の θ 方向分布を図 2.18 に示す. 図 2.11 で示されたボルト軸力によって発生する値を図 2.18 の分布に重ね合わせた結果を図 2.19 に示す. 図 2.19(b)から分るように, 添接板と母材の隙間は θ が大きくなるに従って大きくなる.

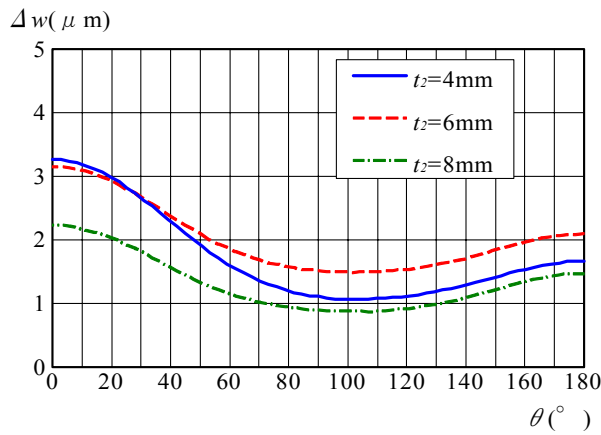


(a) 座金と添接板の接触部

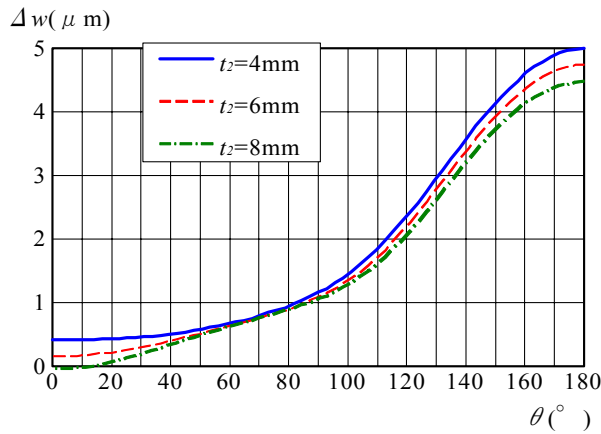


(b) 添接板と母材の接触部

図 2.18 Δw の θ 方向分布



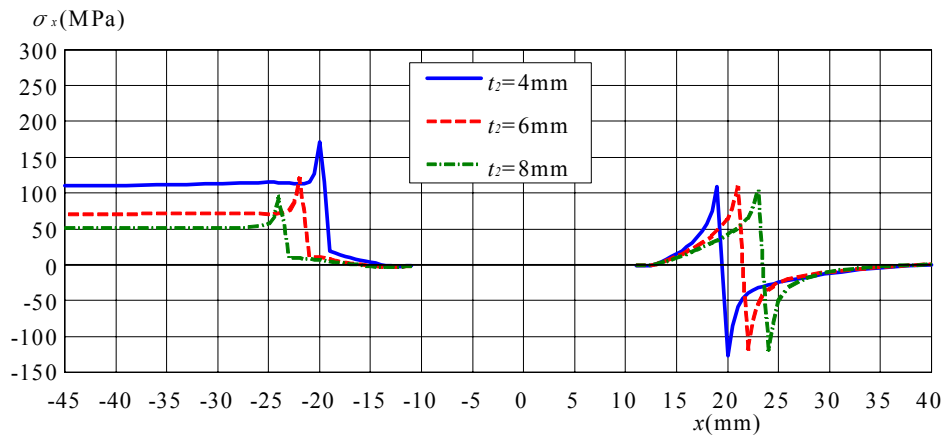
(a) 座金と添接板の接触部



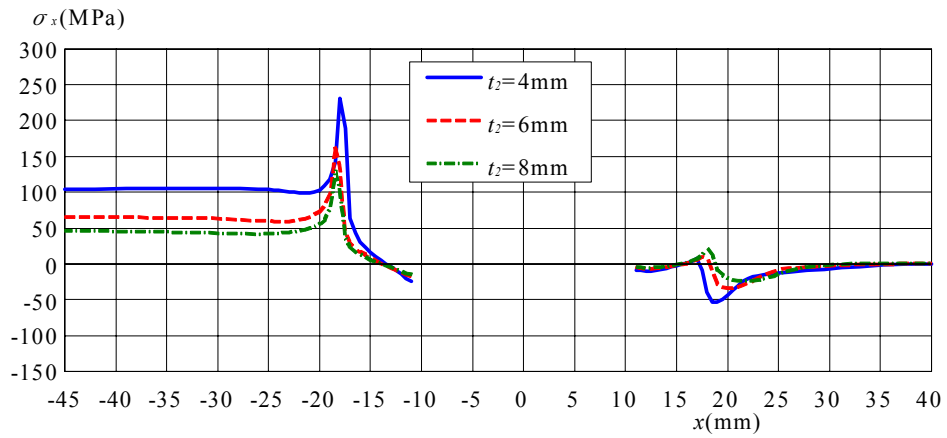
(b) 添接板と母材の接触部

図 2.19 Δw の θ 方向分布 (ボルト軸力を考慮)

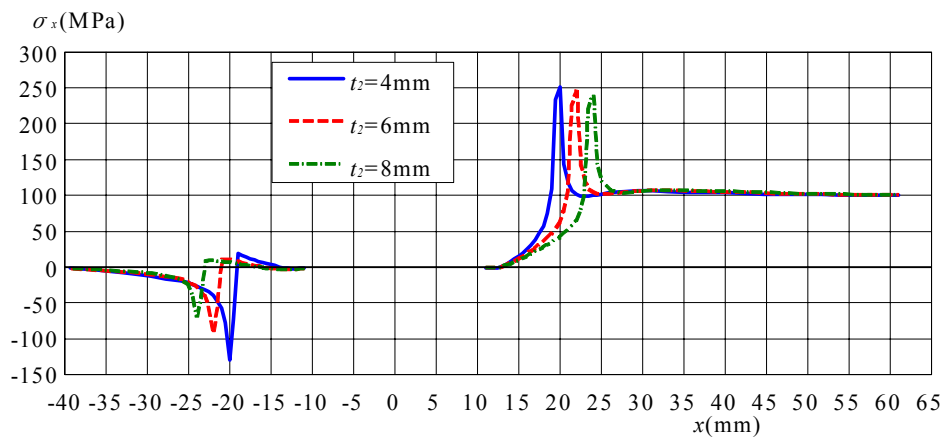
σ_x の x 方向分布を図 2.20 に示す. 図 2.20(a)と(b)から分るように, 添接板の σ_x の値は, 接触部を少し離れると, 左側では添接板の公称応力 ($t_2=4\text{mm}$ に対して $\sigma_2=100\text{MPa}$, $t_2=6\text{mm}$ に対して $\sigma_2=67\text{MPa}$, $t_2=8\text{mm}$ に対して $\sigma_2=50\text{MPa}$) にほぼ等しくなり, 右側では 0 になる. 図 2.20(c)から分るように, 母材の σ_x の値は, 接触部を少し離れると, 左側では 0 になり, 右側では母材の公称応力 100MPa にほぼ等しくなる.



(a) 添接板表面



(b) 添接板裏面



(c) 母材

図 2.20 σ_x の x 軸方向分布

座金と添接板の接触部および添接板と母材の接触部において、図 2.21 に示すように、接触部から 1 要素外側の節点と節点の x 軸方向の変位差を Δu で表す。左図に示す座金と添接板の接触部の Δu は、座金側の節点の変位から添接板側の節点の変位を引いた値であり、右図に示す添接板と母材の接触部の Δu は、母材側の節点の変位から添接板側の節点の変位を引いた値である。

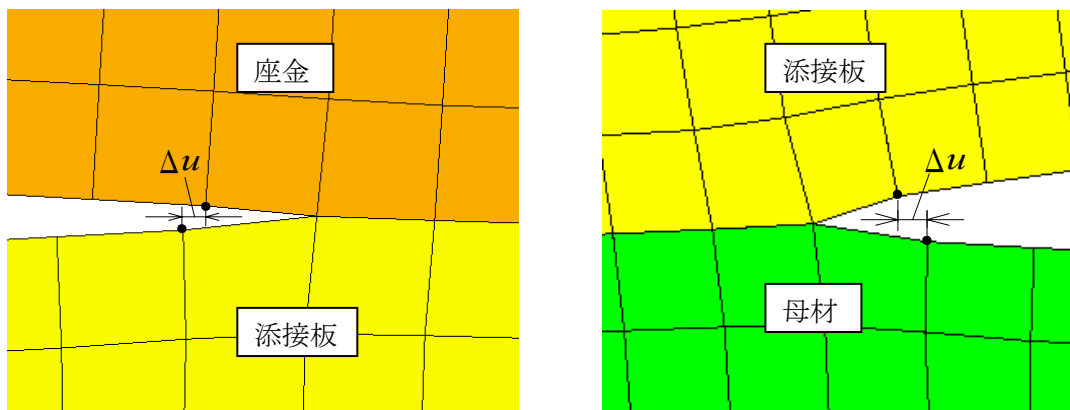


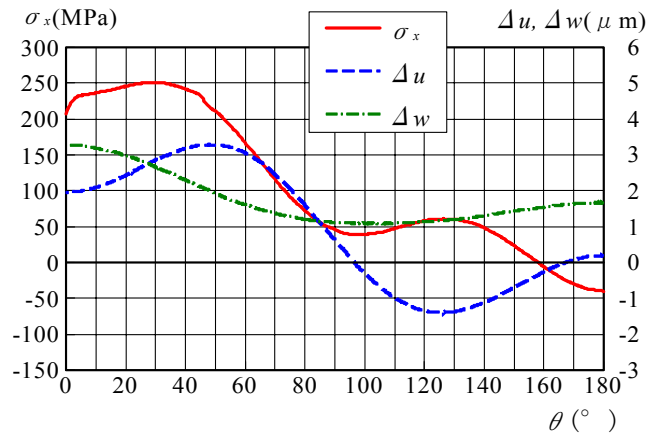
図 2.21 x 軸方向の変位差 Δu

σ_x , Δu , Δw の θ 方向分布を図 2.22～2.24 に示す。 σ_x は、接触部から 1 要素外側の節点の値である。 Δw の分布は図 2.19 と同じである。同一の板厚の添接板に対して、図 2.23 と 2.24 の Δu の分布および Δw の分布はそれぞれ同じである。

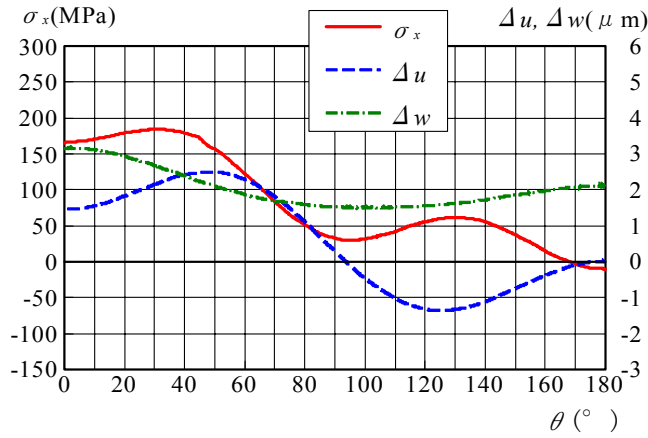
図 2.22 の各図から分るように、添接板表面では、 $\theta=30^\circ$ で σ_x が最大値をとり、この近傍で Δw が小さく、 Δu が大きい。第 1 章で述べたように、タイプ I の亀裂は $\theta=30^\circ$ で発生した。したがって、 $\theta=30^\circ$ の位置の σ_x の値がタイプ I の亀裂を発生させる応力である。

図 2.23 の各図から分るように、添接板裏面では、 $\theta=40^\circ$ で σ_x が最大値をとり、この近傍で Δw が特に小さく、 Δu がかなり大きい。第 1 章で述べたように、タイプ II の亀裂は $\theta=40^\circ$ で発生した。したがって、 $\theta=40^\circ$ の位置の σ_x の値がタイプ II の亀裂を発生させる応力である。

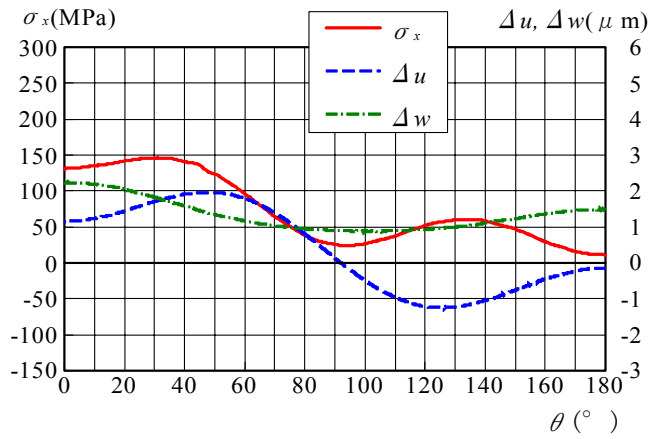
図 2.24 の各図から分るように、母材表面では、 $\theta=155^\circ$ で σ_x が最大値をとる。しかし第 1 章で述べたように、タイプ III の亀裂は $\theta=120^\circ$ の位置に発生した。 $\theta=155^\circ$ の近傍では Δw が大きく、面と面がこすれる度合いが小さい。しかし、 $\theta=120^\circ$ の位置では Δw が小さく、 Δu が最大値をとるため、 $\theta=120^\circ$ の位置は面と面がこすれる度合いが大きかったことが推察される。したがって、タイプ III の亀裂を発生させる応力は、 $\theta=155^\circ$ の位置の σ_x ではなくて、 $\theta=120^\circ$ の位置の σ_x であると考えられる。



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

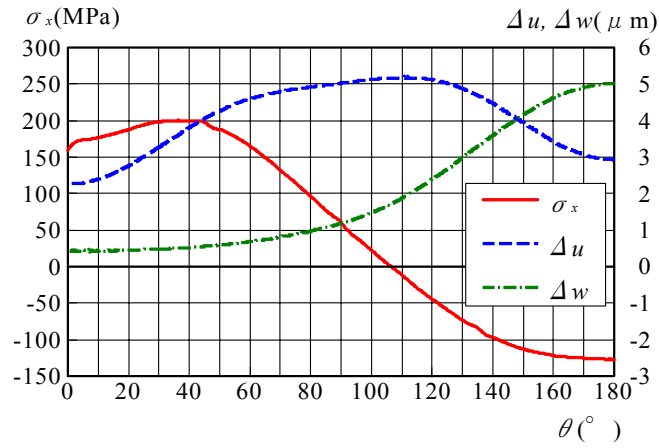


(b) $t_2 = 6\text{mm}$

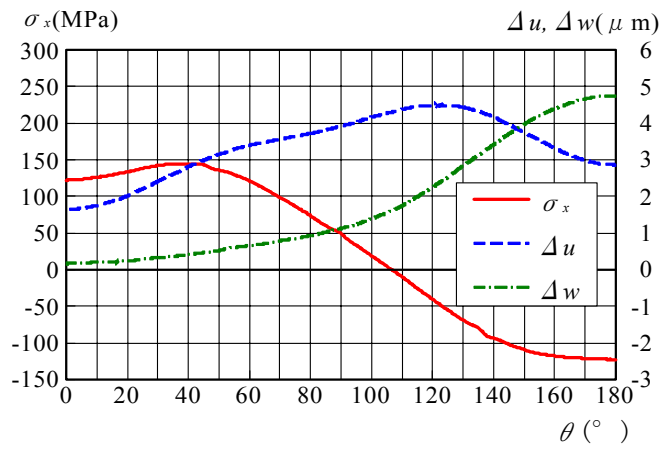


(c) $t_2 = 8\text{mm}$

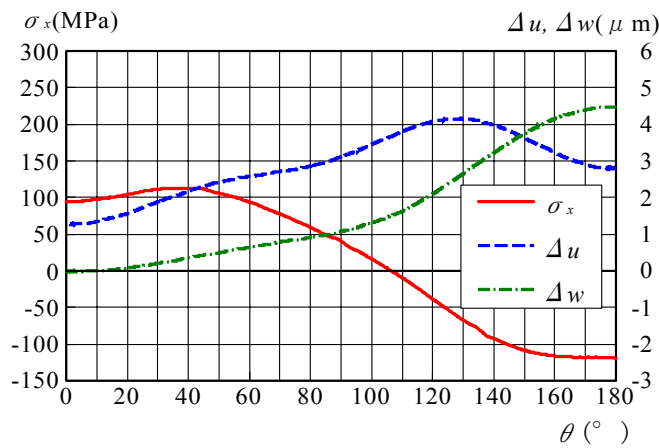
図 2.22 添接板表面の σ_x , Δu , Δw の θ 軸方向分布



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

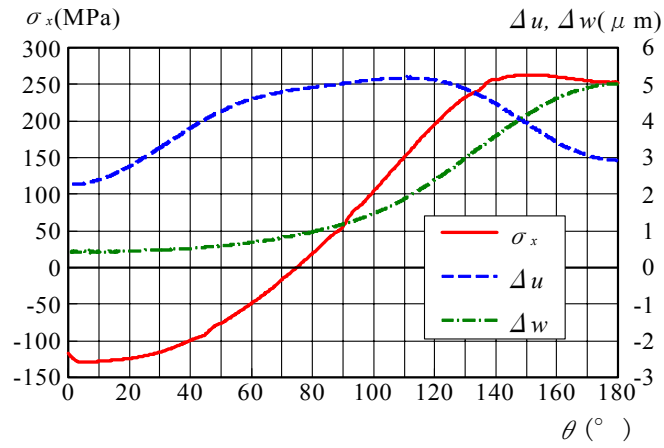


(b) $t_2 = 6\text{mm}$

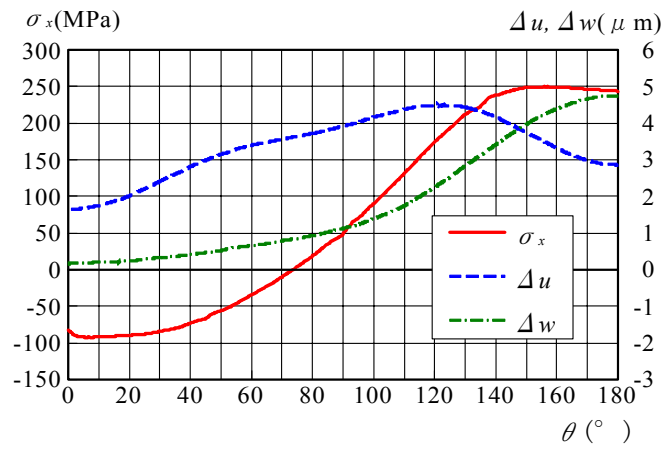


(c) $t_2 = 8\text{mm}$

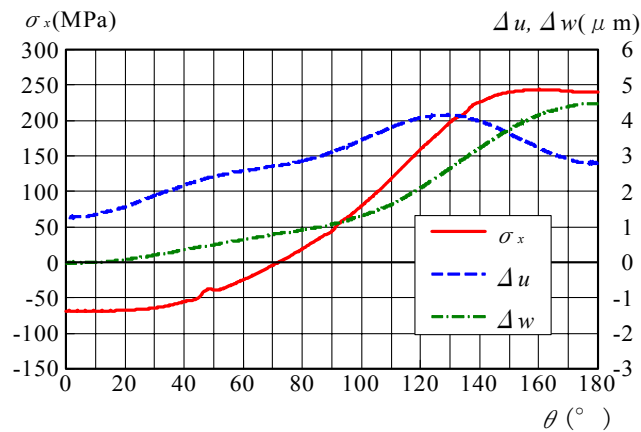
図 2.23 添接板裏面の σ_x , Δu , Δw の θ 方向分布



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



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



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

図 2.24 母材表面の σ_x , Δu , Δw の θ 方向分布

母材の公称応力 σ_1 に対する亀裂発生位置の応力 σ_x の比 $k_x (= \sigma_x / \sigma_1)$ の値を表 2.4 に示す. 表中の k_{xI} , k_{xII} , k_{xIII} は, それぞれタイプ I, タイプ II, タイプ III の亀裂に対応する k_x である. 添接板の板厚が大きくなるに従って k_x は低下する.

表 2.4 k_x の値

t_2 (mm)	k_{xI}	k_{xII}	k_{xIII}
4	2.51	2.00	1.99
6	1.84	1.44	1.77
8	1.46	1.12	1.62

第3章 応力 σ_x に基づいたS-N曲線

第1章で述べた1列ボルトのアルミニウム合金板摩擦接合継手の疲労試験結果⁸⁾を付録Aに示す。付録Aで、試験片FE-4, FF-5, FF-6は新たに疲労試験を実施した結果である。亀裂発生位置の応力範囲 $\Delta\sigma_x$ と繰返し回数 N を表3.1~3.3に示す。表中の R は応力比であり、 k_{xI} , k_{xII} , k_{xIII} の値は表2.4で与えられたものである。亀裂発生位置の応力範囲 $\Delta\sigma_x$ は次式で計算される。

$$\Delta\sigma_x = k_x \Delta\sigma_1 \quad (3.1)$$

ここに、 $\Delta\sigma_1$ ：母材の公称応力範囲

付録Aに示すように、添接板の厚さが4mmの試験片では、タイプIの亀裂によって破断した試験片とタイプIIの亀裂によって破断した試験片の疲労強度が、母材の公称応力範囲 $\Delta\sigma_1$ によって同一の疲労強度として表すことができることが示されている⁸⁾。したがって表3.1に示すように、同一の $\Delta\sigma_1$ に k_{xI} と k_{xII} の値を乗じ、それぞれタイプIとIIの亀裂の亀裂発生位置の応力範囲 $\Delta\sigma_{xI}$, $\Delta\sigma_{xII}$ としている。

表3.1 タイプIとIIの亀裂

R	t_2 (mm)	P_{re} (kN)	$\Delta\sigma_1$ (MPa)	k_{xI}	k_{xII}	$\Delta\sigma_{xI}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{xII}$ (MPa)	繰返し 回数 N (Cycles)		
0.1	4	146	150	2.51	2.00	376.5	300.0	141003		
			100			251.0	200.0	466578		
			70			175.7	140.0	1772431		
			50			125.5	100.0	7123640		
	4	182	150			376.5	300.0	105086		
			100			251.0	200.0	572011		
			70			175.7	140.0	1903905		
			50			125.5	100.0	7532218		
	6	182	70			1.84	1.44	128.9	100.9	4034636
	0.5	4	182			80	2.51	2.00	210.4	160.0	578977
50				125.5	100.0	2148014				
40				100.4	80.0	8473525				
-1	4	146	150	2.51	2.00	376.5	300.0	564181		
			100			251.0	200.0	1688630		
			70			175.7	140.0	8382698		

表 3.2 タイプⅢの亀裂

R	t_2 (mm)	P_{re} (kN)	$\Delta\sigma_1$ (MPa)	k_{xIII}	$\Delta\sigma_{xIII}$ (MPa)	繰り返し 回数 N (Cycles)
0.1	6	182	150	1.77	265.5	268339
			120		212.4	602623
			100		177.0	893511
	8	182	150	1.62	243.0	307785
			150		243.0	270908
			100		162.0	1050673
			90		145.8	2333636
			80		129.6	9678502

表 3.3 未破断の試験片

R	t_2 (mm)	P_{re} (kN)	$\Delta\sigma_1$ (MPa)	k_{xI}	k_{xII}	k_{xIII}	$\Delta\sigma_{xI}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{xII}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{xIII}$ (MPa)	N (Cycles)
0.1	4	146	40	2.51	2.00	1.99	100.4	80.0	79.6	20000000
0.1	8	182	70	1.46	1.12	1.62	101.9	78.4	113.4	10000000
0.5	4	182	30	2.51	2.00	1.99	75.3	60.0	59.7	25000000

応力範囲 $\Delta\sigma_x$ に基づいた S-N 関係を図 3.1~3.3 に示す。各図には、次式で与えられる安全側の S-N 曲線も示してある。

$$\log N = \log c - 2\xi_N - m \log(\Delta\sigma_x) \quad (3.2)$$

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自乗法を適用することによって決められる。 ξ_N は任意の $\log(\Delta\sigma_x)$ に対する $\log N$ の標準偏差であり、次式で与えられる。

$$\xi_N = \left[\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n \{ \log N_i - \log c + m \log(\Delta\sigma_{xi}) \}^2 \right]^{0.5} \quad (3.3)$$

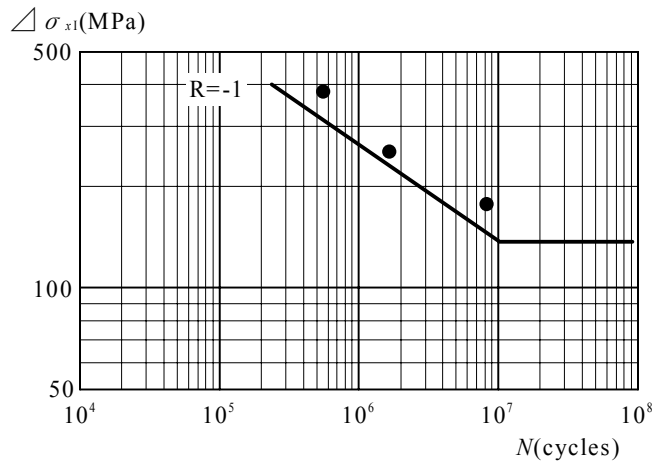
ここに、 N_i と $\Delta\sigma_{xi}$: それぞれ、一つの試験片の繰返し回数と応力範囲

n : 試験片の総数

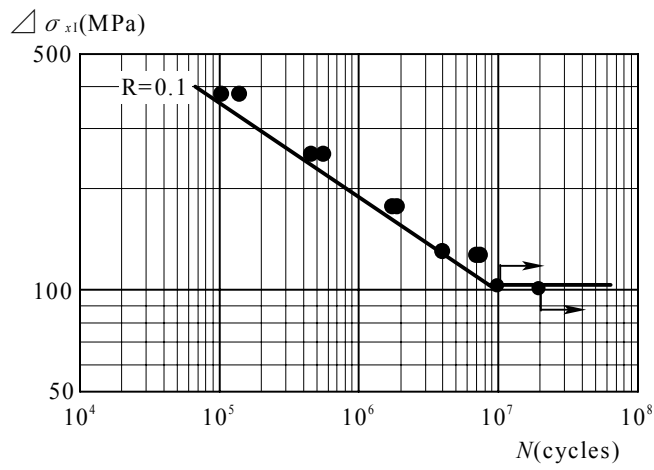
表 3.2 のタイプⅢの亀裂において、 $t_2=8\text{mm}$ で $\Delta\sigma_1=80\text{MPa}$ の試験結果は、 $\Delta\sigma_1$ が 80MPa より大きい試験結果の分布から大きく外れているため、最小自乗法を適用する際に除外している。

疲労限度 $\Delta\sigma_{xcaf}$ は、破断した試験片の下限以下で、繰返し回数が 10^7 以上で破断しなかった試験片の応力範囲の上限としている。ただし、 10^7 以上の繰返し回数で破断しなかった試験片がないタイプⅠとⅡの $R=-1$ に対する $\Delta\sigma_{xcaf}$ は、 $N=10^7$ に対して式(3.2)が与える $\Delta\sigma_x$ の値を代用している。

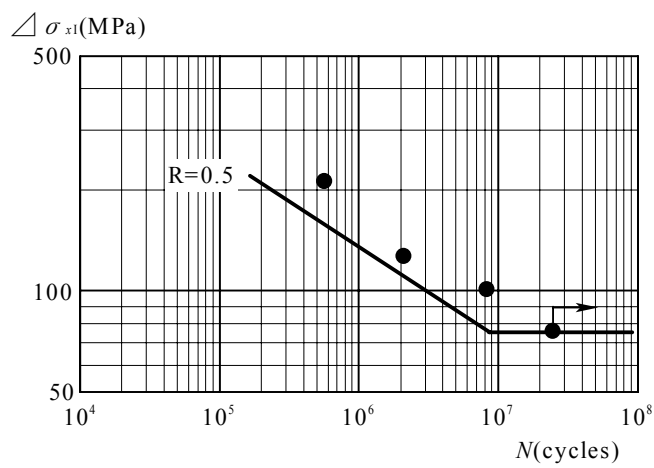
各タイプの亀裂に対する m 、 $\log c$ 、 ξ_N 、 $\Delta\sigma_{xcaf}$ の値を表 3.4 に示す。



(a) $R = -1$

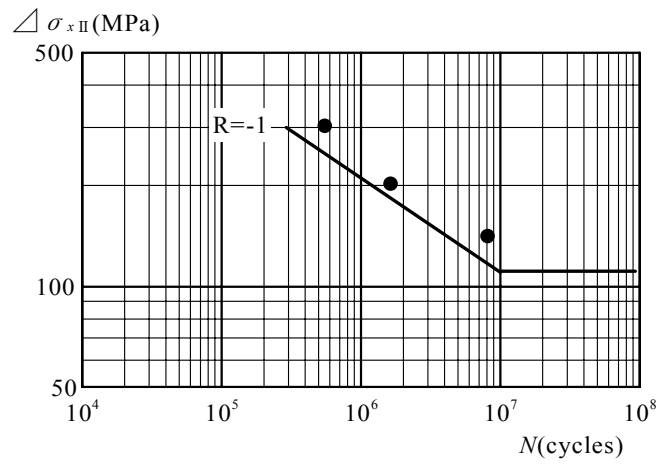


(b) $R = 0.1$

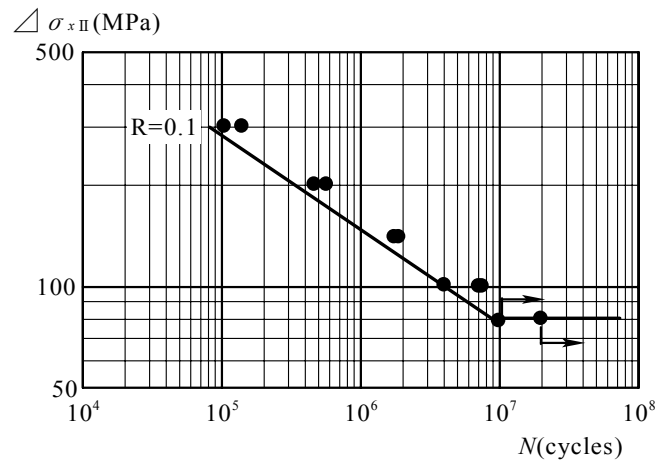


(c) $R = 0.5$

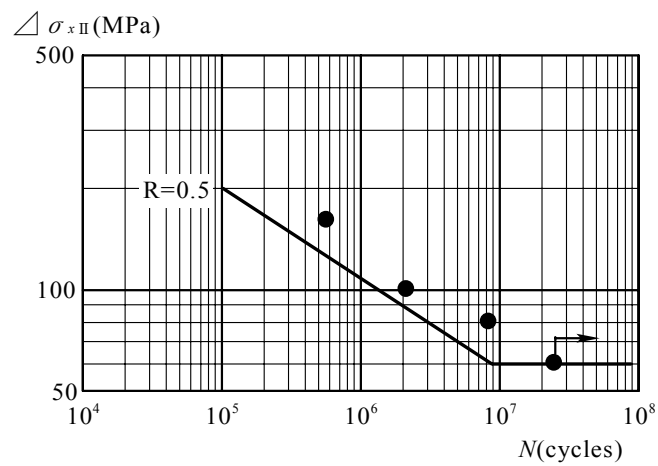
図 3.1 タイプ I の亀裂の S-N 関係



(c) $R=-1$



(a) $R=0.1$



(b) $R=0.5$

図 3.2 タイプ II の亀裂の S-N 関係

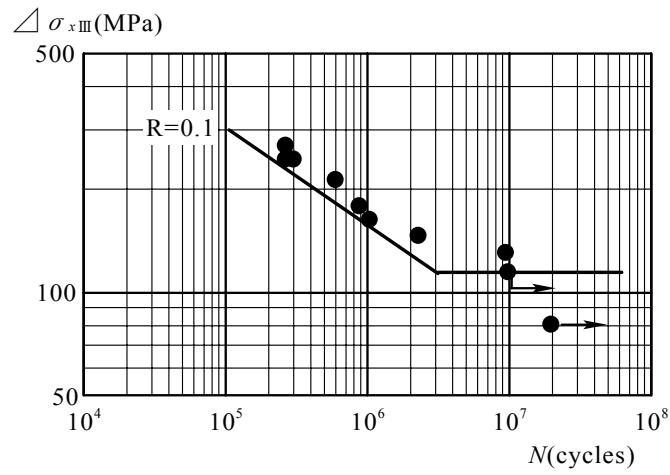


図 3.3 タイプⅢの亀裂の S-N 関係

表 3.4 m , $\log c$, ξ_N , $\Delta\sigma_{xcdf}$ の値

亀裂 タイプ	R	m	$\log c$	ξ_N	$\Delta\sigma_{xcdf}$ (MPa)
I	-1	3.52	14.777	0.120	138.0
	0.1	3.58	14.310	0.080	101.9
	0.5	3.70	14.247	0.177	75.3
II	-1	3.52	14.429	0.120	110.0
	0.1	3.56	13.903	0.087	80.0
	0.5	3.70	13.882	0.177	60.0
III	0.1	3.49	13.827	0.081	113.4

式(3.1)を式(3.2)に代入して次式を得る.

$$\log N = \log c_t - \xi_N - m \log(\Delta\sigma_1) \quad (3.4)$$

$$\text{ここに, } \log c_t = \log c - m \log k_x \quad (3.5)$$

さらに, $\Delta\sigma_1$ で表された疲労限度 $\Delta\sigma_{1caf}$ が次式で与えられる.

$$\Delta\sigma_{1caf} = \frac{\Delta\sigma_{xcaf}}{k_x} \quad (3.6)$$

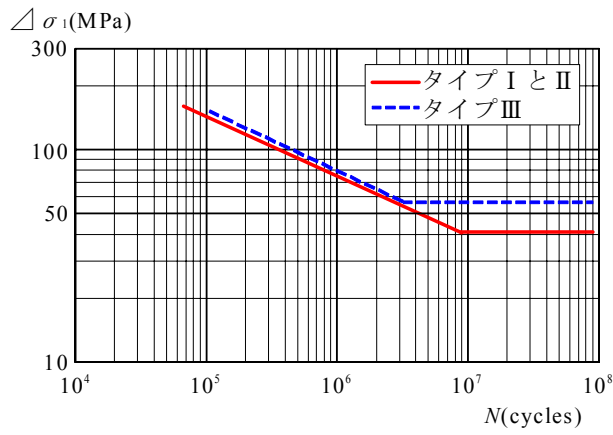
添接板の板厚ごとに各タイプの亀裂に対する m , $\log c_t$, ξ_N , $\Delta\sigma_{1caf}$ の値を表 3.5 に示す. これは, 応力比 $R=0.1$ に対するものである. 表 3.5 の値を用いて, 添接板の各板厚に対する S-N 曲線を図 3.4 に示す. タイプ I と II の亀裂に対する S-N 曲線はほぼ同一となるため, 各図面上で両者を区別していない.

図 3.4(a)から分るように, 添接板の板厚が 4mm の場合, タイプ I と II の亀裂の S-N 曲線がタイプ III の亀裂の S-N 曲線より常に下にあるため, タイプ I または II の亀裂が発生する. 図 3.4(b)から分るように, 添接板の板厚が 6mm の場合, $\Delta\sigma_1$ が大きいとき, タイプ III の亀裂の S-N 曲線がタイプ I と II の亀裂の S-N 曲線より低いので, タイプ III の亀裂が発生する. しかし, タイプ III の亀裂の疲労限度 $\Delta\sigma_1=64.1\text{MPa}$ 未満ではタイプ I または II の亀裂が発生する. 図 3.4(c)から分るように, 添接板の板厚が 8mm の場合, タイプ III の亀裂の S-N 曲線がタイプ I と II の亀裂の S-N 曲線より常に下にあるので, タイプ III の亀裂が発生する.

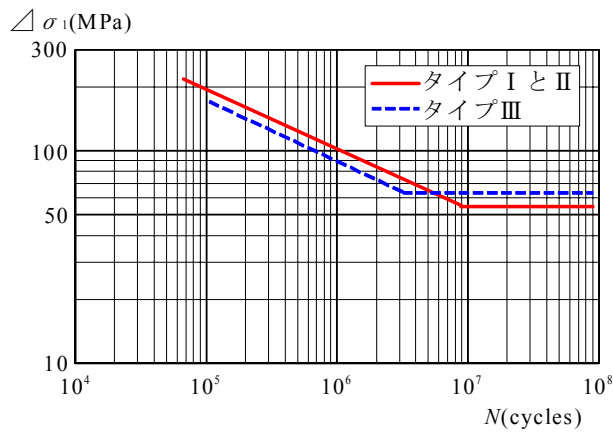
図 3.4 の各図において最も低い S-N 曲線を図 3.5 に集める. これは継手全体としての疲労強度を表している. 添接板の板厚が厚くなると疲労強度は高くなるが, 添接板の厚さが 6mm から 8mm の間では疲労強度の上昇は小さいことが分かる.

表 3.5 m , $\log c_t$, ξ_N , $\Delta\sigma_{1caf}$ の値

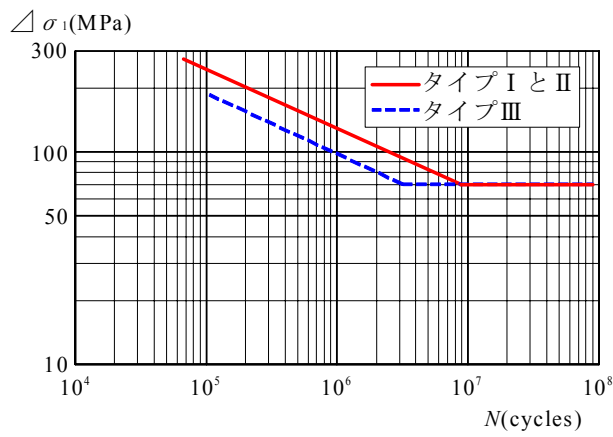
t_2 (mm)	亀裂 タイプ	m	$\log c_t$	ξ_N	$\Delta\sigma_{1caf}$ (MPa)
4	I	3.58	12.881	0.080	40.7
	II	3.56	12.831	0.087	40.0
	III	3.49	12.784	0.081	57.0
6	I	3.58	13.361	0.080	55.4
	II	3.56	13.339	0.087	55.6
	III	3.49	12.962	0.081	64.1
8	I	3.58	13.726	0.080	70.0
	II	3.56	13.725	0.087	71.3
	III	3.49	13.096	0.081	70.0



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



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



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

図 3.4 母材の公称応力範囲に基づいた S-N 曲線

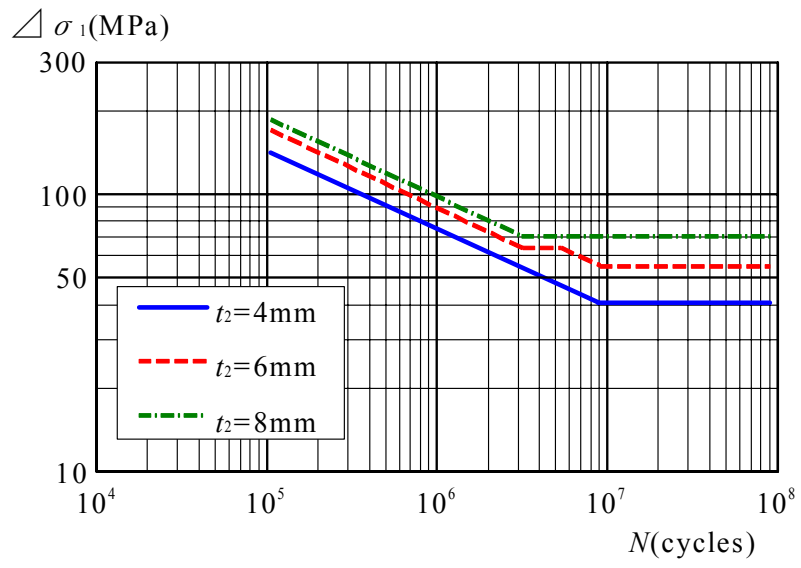


図 3.5 継手全体としての疲労強度

第 4 章 結論

本研究では、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フレットング疲労亀裂の発生を支配する応力を FEM 解析によって明らかにした。さらにこの応力に基づいた S-N 曲線を与えた。本研究で得られた主な結論を以下に示す。

- (1) 座金と添接板の接触部および添接板と母材の接触部近傍に生じる面と面の水平方向の変位差 Δu および面と面の隙間 Δw を考慮することによって、亀裂発生位置の荷重方向の応力 σ_x が疲労亀裂発生を支配する応力であることを明らかにした。
- (2) タイプ I, II, III の各疲労亀裂に対して、亀裂発生位置の応力 σ_x に基づいた S-N 曲線を与えた。
- (3) 継手全体としての S-N 曲線を与えた。添接板の板厚が厚くなると疲労強度は高くなるが、その増加率は添接板の板厚が大きくなるに従って小さくなる。

参考文献

- 1) アルミニウム橋研究会：アルミニウム構造物，<http://alst.jp/str.htm>
- 2) 大倉一郎，岡田理，萩澤亘保，大澤章吾：開閉断面のアルミニウム床版の開発，構造工学論文集，Vol.51A，pp.1219-1227，2005.
- 3) 大倉一郎，石川敏之，筒井将仁，大澤章吾：トラックタイヤの接地形状がアルミニウム床版の板曲げ応力に与える影響，土木学会論文集 A，Vol.63，No.4，pp.655-666，2007.
- 4) 大倉一郎，長尾隆史，萩澤亘保：アルミニウム床版の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，2010.（印刷中）
- 5) 萩澤亘保，大倉一郎：アルミニウム合金 A6005C-T5 の母材と摩擦攪拌接合部の疲労強度に応力比が与える影響，土木学会論文集 A，Vol.65，No.1，pp.117-122，2009.
- 6) 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.
- 7) 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，2010.（印刷中）
- 8) 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.
- 9) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，I 共通編 II 鋼橋編，2002.
- 10) アルミニウム建築構造協議会：アルミニウム建築構造製作要領，アルミニウム建築構造物製作工場認定規程および基準・同解説，pp.39-50，2003.
- 11) TNO DIANA：Diana User's Manual -- Release 9.3，TNO DIANA，2008.

付録 A 疲労試験結果

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	添接板		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	—	—

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	添接板		母 材	r_{c1} (mm)	θ_{c1} (°)	r_{c2} (mm)	θ_{c2} (°)		
								ナット 側	ボルト 頭側							
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	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	—	—	○	—	—	—	—	—	—	
FE-1	6	182	0.1	150	268339	1	III	—	—	●	18.6	111.1	18.8	123.4		
FE-2				100	893511	2	III	—	—	●	17.2	119.2	—	—		
						2	IV*3	—	◎	—	—	—	—	—		
FE-3				70	4034636	2	I	●	—	—	—	17.4	29.3	18.0	23.7	
						2	I	—	◎	—	17.1	13.6	17.6	32.1		
FE-4	120	602623	2	III	—	—	●	19.3	116.0	—	—					
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				70	10000000*1	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
FF-5	90	2333636	1	III	—	—	●	21.3	128.5	19.6	129.9					
			1	IV*3	◎	—	—	—	—	—	—					
			1	IV*3	—	◎	—	—	—	—	—					
FF-6	80	9678502	2	III	—	—	●	22.4	120.9	—	—					

*1 : 表記の载荷回数において試験体が未破断

*2 : 図 A.1 に示すように、1 は上のボルト、2 は下のボルト

*3 : 図 A.2 に示す、タイプ III の亀裂が添接板とこすれることによって添接板に発生した亀裂

● : 試験体を破断させた疲労亀裂

◎ : 試験体を破断させていないが、板厚方向に貫通した疲労亀裂

○ : 板厚方向に未貫通の表面亀裂

r_{c1} , θ_{c1} , r_{c2} , θ_{c2} : 図 A.3 に示す, ボルト孔を中心とした極座標で表した疲労亀裂の発生位置

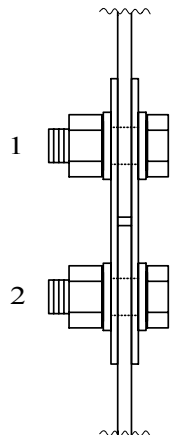


図 A.1 ボルトの番号

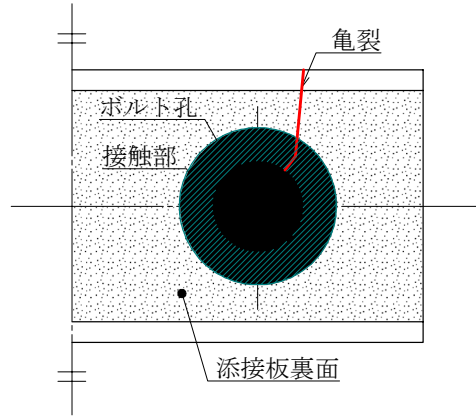
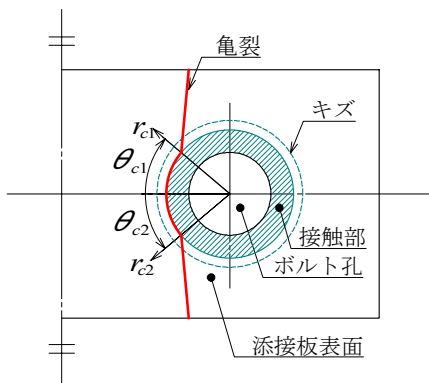
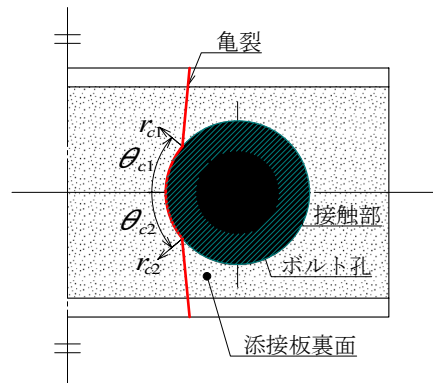


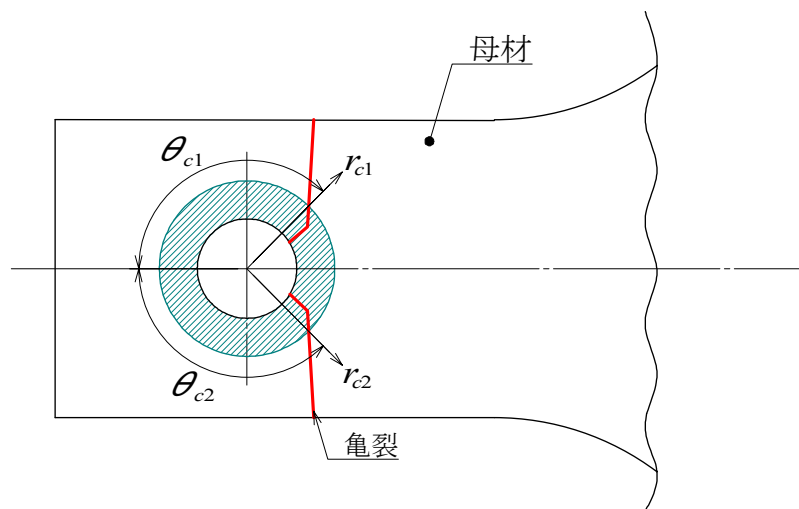
図 A.2 タイプIVの亀裂



(a) 添接板表面



(b) 添接板裏面



(c) 母材

図 A.3 r_{c1} , θ_{c1} , r_{c2} , θ_{c2}