

大阪大学工学部 学生員 ○吉野 浩祐  
 大阪大学大学院工学研究科 正会員 大倉 一郎

1. はじめに

近年、軽量で耐食性に優れるアルミニウム合金が歩道橋、拡幅歩道用床版、道路橋用床版などに用いられるようになってきた<sup>1)</sup>。これらの構造物の建設には、工場では MIG 溶接や摩擦攪拌接合が使用されるが、現場では鋼製高力ボルトによる摩擦接合継手が必要となる。

図-1 に示すような試験片の疲労試験が過去実施され、図-2 に示すような疲労亀裂が、添接板表面(座金側)、添接板裏面(母材側)および母材の 3 箇所で開催した<sup>2)</sup>。これらの疲労亀裂はボルト孔の縁ではなく、円形の接触跡の縁に付着していた摩耗粉の帯上に発生し、フレット疲労によるものであることが明らかにされた。既往の研究<sup>3)</sup>においては、摩耗粉の帯の外に生じる応力と変形が FEM 解析によって調べられたが、疲労亀裂発生の解明には至らなかった。

本研究では、亀裂発生点である、摩耗粉の帯上に生じる応力と変形を FEM 解析によって調べ、フレット疲労亀裂の発生に影響する因子を明らかにする。

2. 固着部とこすれ部

図-3 に示すように、接触跡は、傷がなく光沢のある固着部と摩耗粉が付着しているこすれ部に分けられる。固着部では板の界面が連続し、こすれ部では界面で板が水平ずれを起こすと仮定する。図-2 に示すように、こすれ部の内径は明瞭に確認できるが、外径は自然消滅しているため、接触する板が離間し始める位置をこすれ部の外径と定義し、これを解析によって求める。

3. FEM 解析

汎用解析プログラム Diana を用いて、図-1 の試験片の片側の締結部を解析対象とする。ボルト軸力による応力と変形を、図-4 に示す軸対称 FEM 解析によって調べる。使用した有限要素は 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であり、ボルト孔の中心に軸対称の回転軸を置く。添接板に対して 4, 6, 8mm の板厚を考慮し、ボルト軸力として F10T の設計ボルト

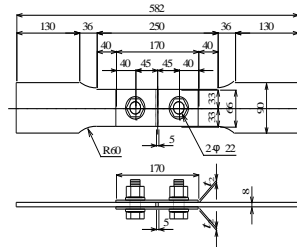


図-1 疲労試験片

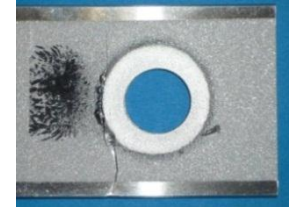


図-2 添接板裏面の亀裂

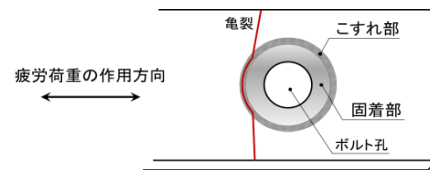


図-3 ボルト孔周辺の接触

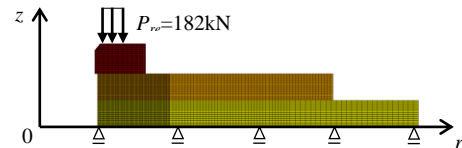


図-4 軸対称 FEM 解析

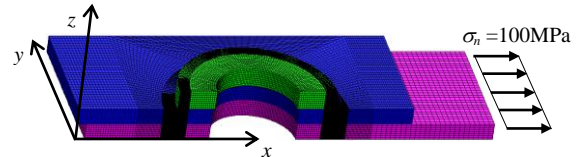


図-5 3次元 FEM 解析

軸力の 1 割増し  $P_{re}=182\text{kN}$  に相当する面圧力を座金の上面に作用させる。

疲労荷重による応力と変形を、図-5 に示す立体要素を用いた 3 次元 FEM 解析によって調べる。使用した有限要素は 8 節点立体要素である。  $x=0, y=0, z=0$  の各面に対称性の境界条件を与える。添接板は 4mm の板厚を考慮し、外力として、母材の材端に引張応力  $\sigma_n=100\text{MPa}$  を作用させる。

4. こすれ部の範囲

こすれ部の内径と外径を図-6 に示す。座金と添接板のこすれ部の内径と外径は、添接板の板厚が増加してもほとんど変化しないが、添接板と母材のこすれ部の内径と外径は、添接板の板厚が厚くなるに従って増加する。

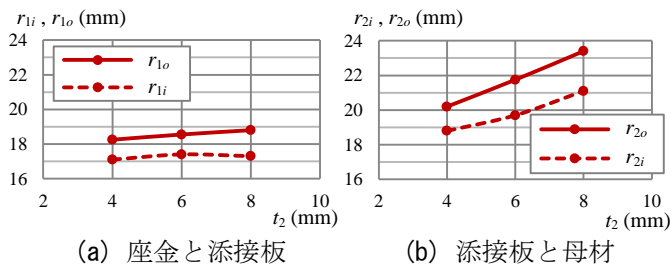


図-6 こすれ部の内径  $r_i$  と外径  $r_o$

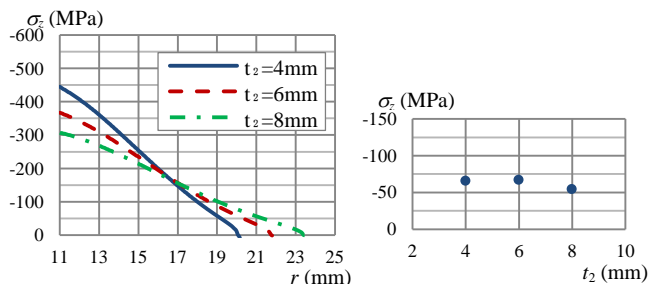


図-7 添接板と母材の界面に生じる接触面圧力  $\sigma_z$

### 5. 接触面圧力

ボルト軸力によって、添接板と母材の界面に生じる接触面圧力  $\sigma_z$  の半径方向の分布を図-7(a)に示し、こすれ部の内径の位置の  $\sigma_z$  の値を図-7(b)に示す。こすれ部の内径の位置の  $\sigma_z$  の値は、添接板の板厚によらず、約 63MPa(三つの値の平均値)である。座金と添接板のこすれ部でも同様の傾向が見られ、内径の位置の  $\sigma_z$  の値は約 96MPa である。

### 6. フレッシング疲労亀裂発生に影響する因子

図-3 に示すように、疲労亀裂はこすれ部で発生し、疲労荷重の作用方向に対して、直角方向に伝播する。したがって、こすれ部に生じる疲労荷重方向の応力が疲労亀裂発生に影響する。さらに、疲労荷重を受けると、板はこすれ部で水平方向に変位差を生じる。

疲労荷重による母材の引張応力  $\sigma_n = 100\text{MPa}$  によって、こすれ部に生じる荷重方向の応力を  $\sigma_x$ 、座金と添接板のこすれ部の水平変位差および添接板と母材のこすれ部の水平変位差をそれぞれ  $\Delta u_1$ 、 $\Delta u_2$  で表す。疲労荷重による引張応力  $\sigma_n$  の下限応力が 0MPa の場合、こすれ部の荷重方向の応力の平均応力  $\sigma_{xm}$  は次式で与えられる。

$$\sigma_{xm} = \frac{\sigma_x}{2} + \sigma_{Bx} \quad (1)$$

ここで、 $\sigma_{Bx}$  はボルト軸力によって生じる、疲労荷重方向の応力であり、次式で与えられる。

$$\sigma_{Bx} = \sigma_r \cos^2 \theta + \sigma_\theta \sin^2 \theta \quad (2)$$

ここに、 $\sigma_r$  と  $\sigma_\theta$ ：それぞれ、軸対称 FEM 解析で得られる、半径方向の応力と円周方向の応力。

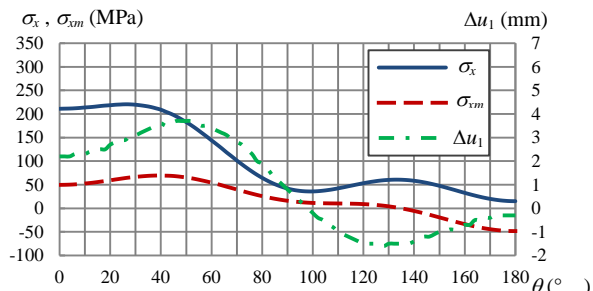


図-8 添接板表面における  $\sigma_x$ 、 $\sigma_{xm}$ 、 $\Delta u_1$  の円周方向分布

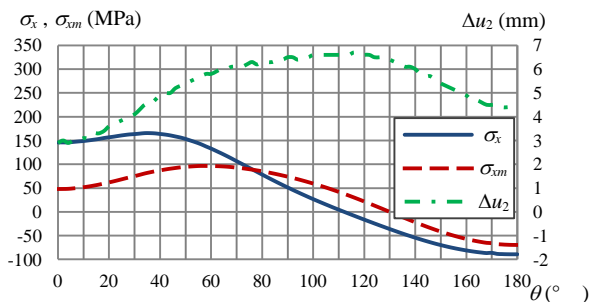


図-9 添接板裏面における  $\sigma_x$ 、 $\sigma_{xm}$ 、 $\Delta u_2$  の円周方向分布

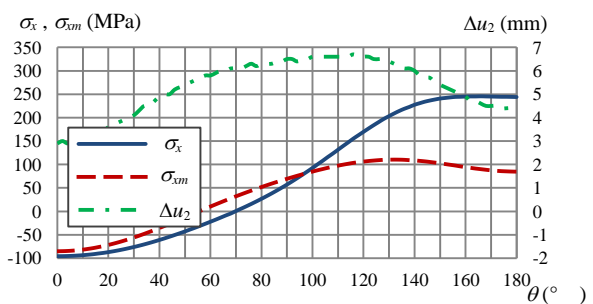


図-10 母材における  $\sigma_x$ 、 $\sigma_{xm}$ 、 $\Delta u_2$  の円周方向分布

こすれ部の幅中央  $[r=(r_i+r_o)/2]$  における、 $\sigma_x$ 、 $\sigma_{xm}$ 、 $\Delta u_1$ 、 $\Delta u_2$  の円周方向の分布を図-8~10に示す。図-8と9から分かるように、添接板表面および添接板裏面においては、それぞれの亀裂の発生位置  $30^\circ$  と  $40^\circ$  の周辺で  $\sigma_x$  が最大値をとる。他方、図-10に示すように、母材においては、 $\sigma_x$  は  $160^\circ$  付近で最大値をとり、亀裂の発生位置  $120^\circ$  と異なる。しかし、 $\Delta u_2$  が  $120^\circ$  付近で最大値をとる。したがって、母材においては、水平変位差  $\Delta u_2$ 、すなわち板と板のこすれ作用が影響したことにより、応力  $\sigma_x$  が最大値をとる位置とは異なった位置に亀裂が発生したと考えられる。

### 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，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，No8，2009。
- 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，No14，2010。