

# ボルト締結部に発生・進展する不可視疲労き裂の超音波計測

プロジェクト代表者：加藤 寛（理工学研究科・教授）

## 1 はじめに

建設・建築物や大型機械類に用いられるボルト締結部やリベット締結部は応力集中部であり、繰り返し負荷による機械的疲労の他、接合部材間の摺動によりフレット疲労を生じるなど、き裂の発生源となる。このため多くの研究が行われているが、締結部ではボルトヘッドあるいはリベットにより穴の周囲が覆われており、疲労き裂の発生及び成長の初期過程を目視できない。本研究では、Al 合金平板のボルト締結部について、疲労き裂の発生状況に及ぼす応力振幅及びボルト締結力の影響を調べるとともに、表面弾性波を用いて疲労き裂を検出する方法の開発を行った。

## 2 実験方法

### 2.1 試験片の製作

Fig. 1 に示すように、ボルト穴（直径 6 mm）を有する厚さ 4 mm の Al 合金（A2024-T3）平板を高張力鋼製ボルトを用いて締結し、疲労試験片とした。

### 2.2 疲労試験

ボルト締結試験片に対して種々の応力振幅（応力比：0.1）で疲労試験を行い、SN 線図を求めた。次いで、締結力を変化させた場合の疲労破壊の状況を応力振幅 20 MPa、25 MPa、30 MPa で調べた。

### 2.3 超音波測定

締結トルク 5 mN の締結材を用い、応力振幅 25 MPa で疲労試験中、以下の超音波測定を実施した。

(1) オフライン測定：所定の疲労回数ごとに試験片を取り出し、水浸法超音波測定を行った。この際、発振周波数 20 MHz の探触子を用いて表面弾性波を試験片表面に発生・伝播させ、反射波を測定した。

(2) その場測定：所定の荷重繰り返し数ごとに試験機を停止させ、Fig. 2 に示すように、水袋を用いた局所水浸法で超音波測定を行った。

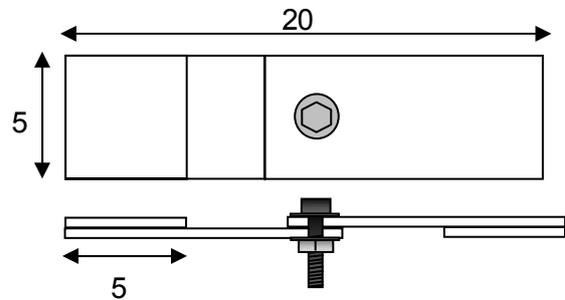


Fig. 1 疲労試験片

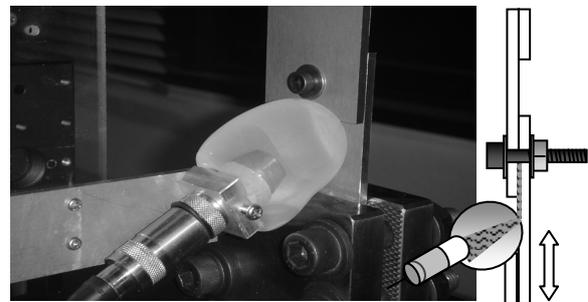


Fig. 2 その場測定の状態

(3) 実時間測定：疲労試験片の周期変動に同期させて超音波を観察・記録するため、実時間超音波測定システムを構築し、基礎的な実験を行った。

## 3 結果及び考察

### 3.1 ボルト締結部の破壊機構の解明

Al 合金平板ボルト締結部の疲労試験の結果を Fig. 3 に示す。図より、ボルト締結トルクが低い領域では、ボルト穴縁から疲労き裂（機械的疲労き裂）が発生・進展していき、締結力の増加に従って疲労寿命は増加していった。これに対し、ボルト締結トルクが 4 mN 以上の大きな領域では、ボルト穴近傍のフレット損傷領域の端部にき裂（フレット疲労き裂）が発生・進展していき、締結力の低下に従って疲労寿命は低下していった。

また、応力振幅の増加に従って、疲労寿命はそれぞれ増加していったが、機械的疲労き裂からフレット

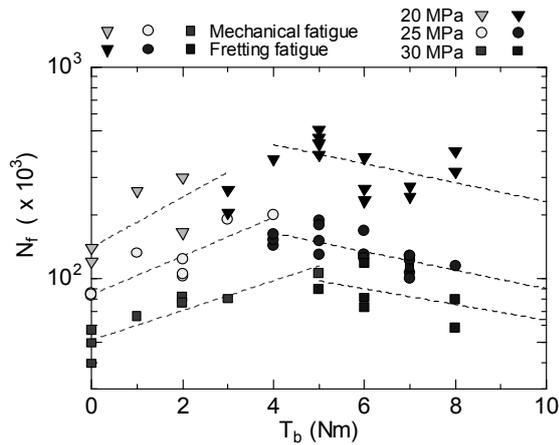


Fig. 3 疲労寿命に及ぼす締結トルク及び応力振幅の影響

ティング疲労き裂に遷移する臨界のボルト締結トルクはほぼ一定であった。

### 3.2 疲労試験中の表面弾性波の変化

疲労試験中にその場測定を行った結果を Fig. 4 に示す。図より、試験片端部、摺動領域端部、ボルト穴縁、などからの反射波が測定された。また、フレットィング疲労き裂の発生に伴って、ボルト穴の前方に新たな反射波が出現するのが観察された。そこで、表面観察の結果と比較した結果、この反射波は新たに発生したき裂からの反射波であることが分かった。このことから、表面弾性波測定により、疲労き裂の発生が検出可能であることが明らかとなった。

また、疲労繰返し数の増加に従って、ボルト穴前方の摺動領域における超音波散乱波が増大していった。そこで、この領域における超音波散乱波の局所最大値(PI)及び二乗平均値(RMS)を求め、疲労繰返し数との関係を調べた。その結果、Fig. 5 に示すように、微小き裂が観察される少し前の段階で PI 及び RMS が増加し始めることが分かった。

## 4 まとめ

Al 合金平板のボルト締結体の疲労寿命に及ぼす応力振幅及び締結トルクの影響を調べた結果、ボルト締結トルクが 4 mN 以下では、ボルト穴縁から機械的疲労き裂が発生・進展していき、締結力の増加に従って疲労寿命は増加していった。これに対し、4 mN 以上では、ボルト穴近傍にフレットィング疲労

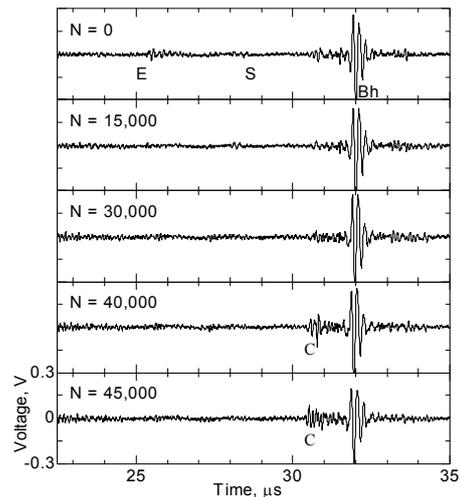
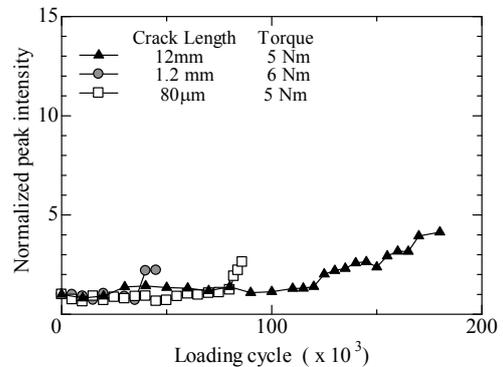
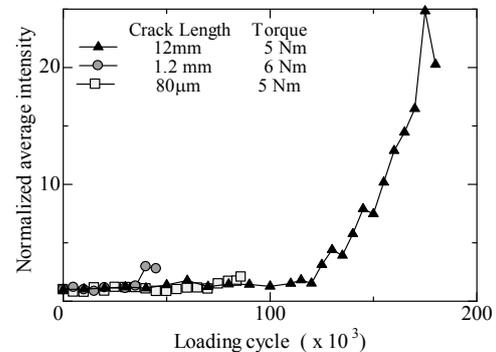


Fig. 4 疲労繰返し数(N)の増加に伴う表面弾性波の波形分布の変化



(a) 散乱波の局所最大値(PI)



(b) 二乗平均値(RMS)

Fig. 5 疲労繰返し数(N)の増加に伴う PI 及び RMS の変化

き裂が発生・進展していき、締結力の低下に従って疲労寿命は低下していった。次いで、疲労試験中に表面弾性波を用いた超音波測定を行った結果、疲労き裂からの反射波が測定されるとともに、超音波散乱波の変化から疲労き裂が検出可能であることが分かった。