

氏 名	SANAT WAGLE
博士の専攻分野の名称	博士（学術）
学位記番号	博理工甲第 786 号
学位授与年月日	平成 22 年 3 月 24 日
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	Non Destructive Evaluation of Fatigue crack initiation and propagation in Al Alloy Plate with Bolt Fastened Hole (Al 合金平板におけるボルト締結部からの疲労き裂の発生・進展過程の超音波評価)
論文審査委員	委員長 教授 加藤 寛 委 員 教授 荒居 善雄 委 員 教授 堀尾健一郎 委 員 准教授 蔭山 健介

論文の内容の要旨

The riveted and the bolted joints are primary sources of fatigue cracks in service life of machinery such as aircrafts and vehicles and so on. The fatigue cracks often initiate at these joints mainly due to the high stress concentration at a hole edge, and the fretting also occurs at mating interfaces of the joint part due to repeated relative movement. Fretted regions are highly sensitive to repeated loadings and lead to nucleation of cracks even at lower stresses. If such cracks are not detected during inspection, progressive structural degradation takes place, which can finally lead to complete failure of the structures. From these situations, many studies have been carried out on the fretting damages of different materials but the quantitative evaluation and analysis on the effect of tightening conditions on the life cycle in consideration of the failure mode: the mechanical fatigue failure and the fretting fatigue failure were rare. To avoid unexpected failure, it is vital to detect these cracks nondestructively. In the bolted joint, however, crack initiation sites are on the contact surfaces and it is difficult to observe the fatigue crack in an early stage of the fatigue process. Among the non-destructive techniques, the ultrasonic measurement with Surface Acoustic Waves (SAW) method has been used for detection and evaluation of surface cracks initiation and propagation because of a simple path, independence of the plate thickness, and hence easy identification of the crack at the mating surface of bolted joints under fastened conditions.

This dissertation presents the research work on the evaluation of the influence of the tightening torque on the fatigue behavior of the bolted specimens fabricated from the Al alloy plate: the fatigue life and the failure mode at different stress amplitudes. In this research, we propose a non-destructive detection method of the fatigue crack initiated in bolted specimen under fastened conditions by using the SAW, and a relationship between the SAW intensities and the crack length. Then, the synchronized SAW measurement by synchronizing ultrasonic pulsation with the fatigue load during the fatigue testing of the bolted specimen was carried out to examine changes in the intensity of the SAW

reflected from the fretting fatigue crack in the fatigue cycle. Finally, the size of the fatigue crack was estimated from the change of the SAW intensity in the fatigue cycle following the Elber' model on the crack opening and closure following the stress intensity factor.

To achieve these objectives, the bolted specimens were fabricated from the aluminum alloy A2024-T3 plate and fastened with a different tightening torque by high strength steel bolt, a nut and washers. The specimens were subjected to fatigue testing at different loading conditions to understand the fatigue behavior. Then, the in-process and synchronized ultrasonic measurements in the fatigue testing were also carried out by the local immersion method with a water bag to detect the fretting fatigue cracks of the bolted specimen under the fastened condition.

The results of the experiments revealed that the fatigue life of the bolted specimen increased with increasing tightening torque in the lower range of tightening torque, and the mechanical failure occurred at the bolt hole edge. At the higher range of torque, the fretting wear and the fretting fatigue was observed and the fractured occurred near the bolt hole. In the fretting wear region, the fatigue life increased with increasing torque, whereas in the fretting fatigue region, the fatigue life decreased with increasing torque. These trends were also compared with the analytical life modeling in mechanical fatigue and fretting wear regions whereas fretting failure life modeling was discussed with Smith-Matson-Topper (SWT) equation. By the in-process SAW measurement, fretting fatigue cracks of different lengths were detected in the fatigue process of bolted specimen. During the fatigue process, the average and peak intensities of the scattered wave ahead of the bolt hole edge reflection gradually increased in the early stage of the fatigue life and then steeply increased. The steep increase in the average and peak intensities was thought to be caused by a combination of surface roughness, crack initiation and propagation. The average and peak scattered intensities from the fatigue crack were seen to increase with increasing crack length.

The synchronized SAW measurement was developed and carried out during fatigue testing of the bolted specimen of aluminum alloy A2024-T3 plates, in which the ultrasonic wave was generated in synchronization with the fatigue cycle to obtain ultrasonic wave signals at different stress levels in the fatigue cycle. In the synchronized SAW measurement, the peak and average intensities increased in the loading stage, reached the maximum, and then decreased in the unloading stage of the fatigue cycle. At larger number of fatigue cycles, the intensities formed a terrace around the maximum stress level, and a relation between the peak and average intensities and the stress level showed a sigmoid curve. The crack length was estimated at different numbers of fatigue cycles from the change of the peak intensity in the fatigue cycle following the model given by Elber, and showed a good agreement with the measured ones.

The SAW intensity distribution between the crack and the bolt hole edge was also analyzed to evaluate the depth of the crack: the SAW intensity distribution after the crack root was subjected to the band-pass filtering to recognize the creeping wave (the longitudinal wave) reflected from the crack tip, and then the crack depth was estimated from the propagation time of the creeping wave from the crack root to the crack tip, which was in good agreement with the value measured on the cross section of the specimen and evaluated through the scanning acoustic analysis.

論文の審査結果の要旨

学位論文審査委員会は、平成 22 年 2 月 8 日に論文発表会を開催し、論文内容の発表及びそれに引き続いた質疑応答、論文内容の審査を行なった。以下に審査結果を要約する。

本学位論文はボルト締結した Al 合金平板が繰り返し荷重を受ける場合の、フレット疲労き裂の発生条件を明らかにするとともに、超音波測定により疲労き裂の発生・進展過程を非破壊的に検出しようとするを目的として実施された研究成果をまとめている。以下に各章の内容について概要を述べる。

第 1 章は緒言であり、研究の背景及び研究の目的を述べている。すなわち、航空機や自動車などにおいてリベット締結やボルト締結が多く用いられているが、それらを起点として疲労き裂が発生し成長していくことを述べている。特に、これらの締結部においては締結面における部材の摺動によりフレット損傷を生じ、これを起点として疲労き裂が発生する。このため多くの研究が行われてきているが、締結条件や荷重条件を考慮した定量的な検討はあまりなされてきていない。特に、条件によって疲労き裂の発生状況が異なることについての考察が行われてきていない。

また、締結部の安全性確保の立場から、疲労き裂の検出は不可欠であり、多くの研究が行われてきているが、疲労き裂は締結面を起点としており、外から目視することはできないために、間接的な測定によらざるを得ない。従来より、超音波測定によるき裂検出が試みられてきているが、機器の稼働中に疲労き裂を検出しようとする試みはなされていない。

そこで本研究では、ボルト締結したアルミニウム合金平板の疲労試験を、締結トルク及び応力振幅を変えて実施し、ボルト穴近傍における疲労き裂の発生状況に及ぼすこれらの影響を定量的に明らかにするとともに、表面弾性波 (Surface Acoustic Wave, SAW) を用いて高精度に疲労き裂の発生を検出し、さらに疲労き裂の進展状況をモニタリングする技術の開発を目的とした。

第 2 章では、ボルト締結した試験片の疲労試験の結果について述べている。すなわち、ボルト締結トルク (締結力) 及び応力振幅を種々に変えて疲労試験を行い、疲労寿命に及ぼすこれらの因子の影響を調査した。その結果、一定の応力振幅で疲労試験を行った場合であってもボルト締結力によって疲労寿命が複雑に変化するとともに、疲労き裂の発生状況が異なることが分かった。すなわち、締結力が小さい場合は締結力の増加に従って疲労寿命は増加していき、また疲労き裂はボルト穴縁から生じ、負荷方向に対して直角方向に成長していった。しかし、臨界の締結力を過ぎると逆に疲労寿命は低下していき、疲労き裂はボルト穴から少し離れた位置に生じ、成長していった。このような複雑な変化について、従来知られているフレット損傷モデル及び新たに構築した疲労破壊モデルを元に議論を行い、定量的な説明に成功している。

第 3 章では、疲労試験中のボルト締結試験片における疲労き裂を、表面弾性波を用いて検出する方法について報告している。すなわち、疲労き裂は締結面に生じ、成長していくことから、従来の接触型探触子を用いた超音波測定法では疲労き裂の検出はできない。そこで、先に開発した水袋法を拡張し、SAW 測定が可能な方法を開発した。この水袋法により、SAW を試験片表面上に発生・伝播させ、締結面を通過させることにより、締結面上に発生した疲労き裂を検出しようとするものである。そこで、所定の疲労繰り返し数ごとに試験機を停止させ、SAW 測定 (その場 SAW 測定) を行った結果、広範囲な締結力において SAW は締結面上を伝播していき、ボルト締結穴縁から反射してくることが確認され、この方法の有効性が確認され

た。また、ボルト穴前方に、疲労繰返し数が増加すると、摺動によって締結面の凹凸が増大し、散乱波として検出されるようになり、さらに繰返し数が増加すると、この摺動領域縁に疲労き裂からの反射波と思われる明瞭な波形が観察された。そこで、この反射波強さ（ピーク強さ）、及び摺動部における散乱波の平均強さ（平均強さ）を測定した結果、ピーク強さ及び平均強さは疲労繰返し数の増加に従って徐々に増加していき、ある繰返し数に達すると急速に増大していくことを明らかにした。この急速な増加が見られた段階で疲労き裂が出現し、その後、疲労き裂の成長に伴って強さが増大していったと推定している。

第4章では、疲労サイクルに同期させた測定法の開発に関する内容について述べている。すなわち、第3章で水袋を用いた SAW 測定法を開発し、その場測定法に適用したが、疲労試験中は荷重が周期的に変動しており、その変動中にどのような超音波の伝播状況の変化があるのかを知ることは、疲労き裂の早期検出にとって、非常に重要である。そこで、本章では、疲労サイクルに同期して SAW を発生・伝播させる方法を開発し、疲労サイクル中の超音波伝播挙動を調べた。その結果、疲労サイクル中の応力変化に伴って、疲労き裂からの反射波強さは増加していき、き裂寸法が大きい場合は、最大応力近傍で一定値を取り、その後、低下していくことが分かった。Elber による、疲労き裂が応力拡大係数の増加に従って閉口状態から開口状態に移移するモデルに従って、き裂からの反射波強さの変化を推定した応力拡大係数で整理し、一定の変化曲線を得た。同時に、推定したき裂長さを実測のき裂長さとピーク強さとの関係曲線とを比較し、良好な一致を得ている。

第5章では、疲労き裂からの反射波からき裂深さを測定する方法に関する内容について述べている。すなわち、最大応力状態で得られた SAW 反射波形中に存在するクリーピング波を特定し、き裂底からの反射波とクリーピング波との時間差より、き裂深さを推定した。その結果、超音波顕微鏡測定及び切断面観察により測定されたき裂深さと良好な一致を得ている。

第6章は研究で得られた知見を結論としてまとめるとともに、今後の研究の課題についても述べている。

これらの研究成果については、すでに、2編の原著論文として国際的な学術雑誌（International Journal of Fatigue, NDT&E International）に発表されるとともに、2編が国際会議論文集に発表されている。更に、現在、2編が査読中（Experimental Mechanics, Materials Transactions）となっている。

学位論文審査委員会としては、本論文が博士（学術）の学位を授与するに十分値するものと判断し、合格と判定した。