

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：15301

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14610

研究課題名（和文）振動疲労き裂進展時の力学場の解明とピーニングによる振動疲労強度向上技術の構築

研究課題名（英文）Investigation of vibration fatigue crack growth behavior and vibration fatigue strength improvement by peening

研究代表者

坂本 惇司（Sakamoto, Junji）

岡山大学・自然科学学域・助教

研究者番号：50752052

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、共振点付近の加振振動数で試験片に曲げ振動を与えた場合の試験片の応力状態について、振動方程式から算出されるひずみの計算値およびひずみゲージを貼付した試験片から得られるひずみの実験値から検討した。その結果、未損傷試験片の一次共振点付近の曲げ振動時のひずみの分布を明らかにした。振動時の負荷の変化傾向は、加振振動数によって、徐々に負荷が増加する場合と徐々に負荷が低下する場合の2パターンに分けられる。そのため、負荷の大きさが徐々に増加する場合には、もう一方の場合と比べて、き裂進展とともに徐々にき裂進展に与えるピーニングの効果が小さくなることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

自動車や航空機に代表される輸送機械のように使用中に振動を受ける機械においては、その振動によって構成する材料や電子機器等に繰返し負荷がかかる。そのような振動によって生じる材料損傷は大事故を招く恐れがある。そのため、振動による材料損傷のメカニズムを明らかにすることが安全性を考慮する上で重要である。本研究では、振動試験システムを作製し、振動時の材料の力学的状態およびき裂進展に着目した実験を行った。その結果、重要な知見を得た。

研究成果の概要（英文）：In this study, the stress field of a specimen subjected to bending vibration at a vibration frequency near the resonance point was examined from calculated strain values derived from the vibration equation and experimental strain values obtained from the specimen with strain gauges. As a result, the strain distribution during bending vibration near the primary resonance point in the undamaged specimen was clarified. The tendency of the load change during vibration can be divided into two patterns depending on the vibration frequency, one in which the load increases gradually and the other in which the load decreases gradually. In the case in which the load increases gradually, the effect of peening on the crack propagation is gradually decreases with the crack growth compared to the other case.

研究分野：材料力学

キーワード：曲げ振動 共振 疲労 き裂進展 伸び 固有振動数 ピーニング せん断

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

自動車や航空機に代表される輸送機械のように使用中に振動を受ける機械においては、その振動によって構成する材料や電子機器等に繰返し負荷がかかる。そのような振動によって生じる材料損傷は、大事故を招く恐れがある。そのため、振動を受ける材料の信頼性の確保が重要な課題となる。

振動疲労についての先行研究の多くは、応力やひずみを用いた振動疲労強度の評価を対象としている。それらの研究は、振動疲労強度を評価する上では非常に有用である。しかし、振動疲労強度を合理的に向上させるためには、振動疲労におけるき裂の発生や進展のメカニズムを解明する必要があるが、それを対象とした研究は見当たらない。

2. 研究の目的

本研究では、振動疲労き裂進展時のき裂先端近傍の力学場の状態とそれがき裂進展とともにどう変化するかを明らかにすること、および、ピーニングによる振動時の疲労強度向上技術を構築することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 試験片

供試材として、市販の A7075 アルミニウム合金および Ti-6Al-4V チタン合金を用いた。試験片は、Fig.1 に示すように、切欠き平板試験片とし、振動台にボルトで固定するための貫通穴を設けた。き裂進展を観察するための試験はひずみゲージ No. 1 のみを貼付した試験片を用いて実施し、ひずみ分布を測定するための試験はひずみゲージ No. 1~5 を貼付した試験片を用いて実施した。

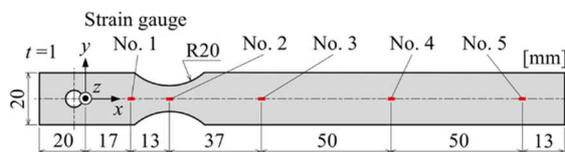


Fig.1 Shape and dimensions of specimen.

(2) 曲げ振動試験方法

曲げ振動試験は、低騒音小型振動試験装置 (株式会社 IMV, m-030) を用いて、Fig.2 に示すように、試験片の端部を振動台にボルトで固定し、振動台を z 方向に正弦波形で振動させることによって実施した。本研究で用いた試験片の一次共振点は、アルミニウム合金試験片およびチタン合金試験片ともにおよそ 22 Hz であり、試験条件としては、一次共振点前後の加振振動数を用いた。き裂の発生および進展を観察するために、60 秒もしくは 180 秒を 1 step として step 毎に試験を中断し、試験片切欠き部の表面のレプリカを取得した。各 step のレプリカの光学顕微鏡画像を基に、き裂長さを測定した。また、試験中の試験片の振動の様子を確認するため、各 step の初期段階において、高速度ビデオカメラ (株式会社島津製作所, HPV-1) を用いて y 方向から撮影速度 2 ms で撮影した。その中の最も曲げ変位が大きくなった撮影画像を基に、Fig.3 に示す曲げ変位振幅 (δ_a) を測定した。

Fig.1 に示す 5 箇所ひずみゲージを貼付した試験片を用いて、各加振振動数で振動試験を行い、ひずみを測定した。今回は、曲げ振動試験を実施した一次共振点付近である 25 Hz を含めた 4 条件 ($f_v = 10, 25, 30, 40$ Hz) を対象とした。また、実験で得られたひずみ分布と比較するために、計算が可能である切欠きが無い一様断面を有する片持ちはりについて一次共振点の振動モード形状を計算し、ひずみ分布を算出した。

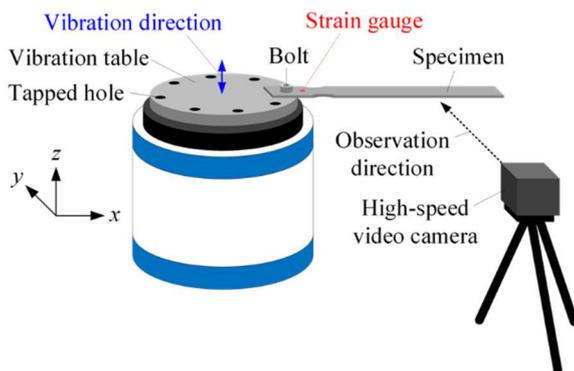


Fig.2 Experimental setup of bending vibration test.

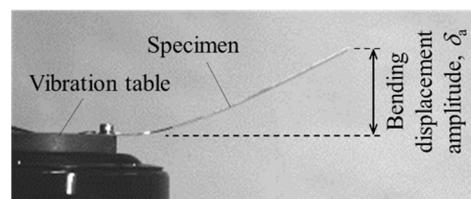


Fig.3 Bending displacement amplitude.

4. 研究成果

(1) アルミニウム合金試験片における曲げ振動時のひずみ分布

共振点付近の加振振動数で試験片に曲げ振動を与えた場合のアルミニウム合金試験片の力学状態について、振動方程式から算出される計算値およびひずみゲージを貼付した試験片から算出される実験値の両面から検討した。Fig.4 に、その結果を示す。プロットが各加振振動数で実験した時のひずみの実験値であり、実線が計算値である。未損傷試験片の一次共振点付近の曲げ振動時の曲げモーメントおよびせん断力の状態を明らかにした。x が 90 mm 以下ではほぼ直線であり、90 mm 以上になると緩やかな曲線になることが分かる。このようなひずみ分布になる静的な負荷状態を考えると、x が 90~180 mm の領域に分布荷重が作用している状態に近いと考えられる。本研究の対象である一次共振点付近 ($f_v = 25$ Hz) の実験値に関して、切欠き部 ($x = 30$ mm) 以外のひずみが計算で求めたひずみとほぼ一致した。また、切欠き部のひずみは、切欠きが無い場合の計算値のおよそ 2 倍であった。これは、切欠き部では断面幅が小さくなるため、その断面での断面係数が、切欠きが無い場合の断面係数の 1/2 倍であることに起因するためであると考えられる。また、一次共振点のひずみ分布に比べて、一次共振点よりも低い加振振動数の場合 ($f_v = 10$ Hz) は試験片中心部のひずみが相対的に小さくなり、一次共振点よりも高い加振振動数の場合 ($f_v = 30, 40$ Hz) は試験片中心部のひずみが相対的に大きくなる事が分かる。これらのことから、実験および計算により、曲げ振動時のひずみの分布を明らかにした。

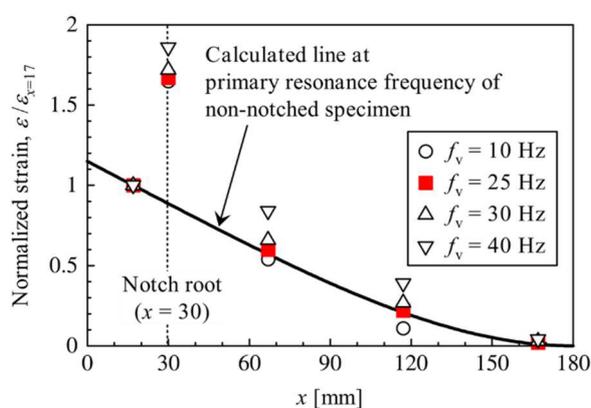


Fig.4 Distributions of normalized strains.

(2) アルミニウム合金試験片における曲げ変位振幅とき裂長さの関係

Fig.5 に、各加振振動数で曲げ振動試験を実施した際のアルミニウム合金試験片におけるき裂長さとき裂変位振幅の変化を示す。き裂が短い時は材料の曲げ変位振幅にあまり変化はなかったが、き裂が 1 mm 程度の長さまで成長すると、 $f_v = 20, 21$ Hz の条件では曲げ変位振幅が増加し、 $f_v = 24, 25$ Hz の条件では曲げ変位振幅が減少した。これは、材料の損傷によって試験片の固有振動数が低下することが原因であると考えられる。それによって、加振振動数が初期の固有振動数よりも低い条件においては負荷が大きくなり、加振振動数が初期の固有振動数よりも高い条件においては負荷が小さくなると思われる。そのため、曲げ振動時のき裂進展を正確に評価するためには、疲労損傷によって試験片の固有振動数が低下することから、それによる力学状態の変化を考慮する必要があることが分かった。

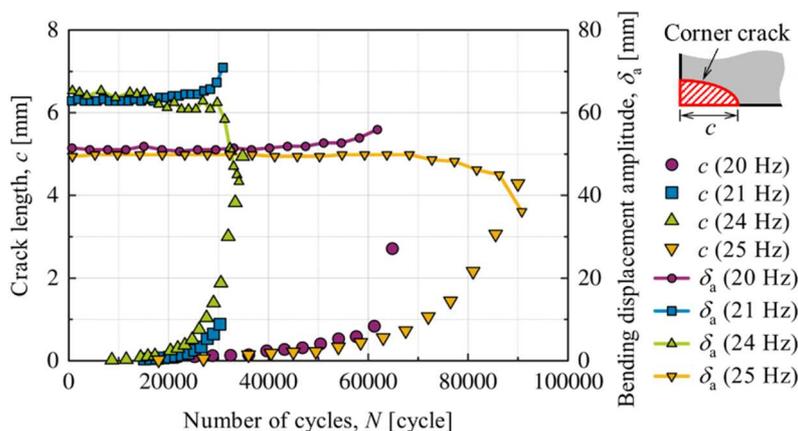


Fig.5 Changes of crack length and bending displacement amplitude during vibration test.

(3) チタン合金試験片における曲げ振動寿命に及ぼすピーニングの影響

振動疲労強度を向上させるピーニング手法として、2020~2021年度はニードルピーニングを検討したが表面粗さの増加等の影響が大きいと考えられたため、2022年度は表面粗さの増加が少ない微粒子ピーニングを検討した。

Table 1 にチタン合金試験片において、ピーニング処理材 (Specimen LP) とピーニング未処理材 (Specimen L) の初期のひずみ範囲と破断までの繰返し数を示す。通常の疲労寿命に及ぼす微粒子ピーニングの影響と同様に、曲げ振動時の疲労寿命も向上させた。ただし、通常の疲労寿命に及ぼすピーニングの影響と異なる点がある。振動時の負荷の大きさは、加振振動数によって、徐々に増加して破断に至る場合と徐々に低下して破断に至る場合の2パターンに分かれる。そのため、負荷の大きさが徐々に増加する場合には、もう一方の場合と比べて、き裂進展とともに徐々にピーニングの影響が小さくなることが分かった。

Table 1 Number of cycles to failure.

| Specimen (f_v) | Strain range at step 1, | Number of cycles to failure, |
|-----------------------|--------------------------------------|------------------------------|
| | $\Delta\epsilon_x$ [$\mu\epsilon$] | N_f [cycle] |
| Specimen LP (24.2 Hz) | 7964 | 39542 |
| Specimen L (24.8 Hz) | 7976 | 15921 |
| Specimen LP (22.0 Hz) | 7935 | 20482 |
| Specimen L (22.2 Hz) | 7731 | 12787 |

(4) アルミニウム合金試験片における曲げ振動時のき裂進展特性の検討

Fig.6 に、き裂進展速度と応力拡大係数範囲の関係を示す。応力拡大係数範囲の算出には、Raju and Newman が提案した曲げを受ける板材の角部だ円き裂の K の算出式を用いた。本研究では、曲げ応力のみを考慮し、だ円き裂の形状のアスペクト比 (a/c) は、試験後の破面観察結果から 0.2 とした。ここで、 a および c は、それぞれ板厚方向および板幅方向のき裂長さである。また、切欠き部の応力範囲は、ひずみゲージ No. 1 の測定値から推定した切欠き部のひずみ範囲にヤング率を掛けた値を用いた。Fig.6 より、 ΔK が小さい領域において、ばらつきが大きい。この一因として、微小なき裂の進展がき裂先端近傍の微視組織に強く依存することが考えられる。全体的な傾向としては、多少ばらつきがあるものの、一つのバンド内に収まっていることが分かる。 ΔK の算出方法については議論する余地があるが、一次共振点付近の曲げ振動時のき裂進展速度は、振動中のひずみを測定することで予測できる可能性があると考えられる。

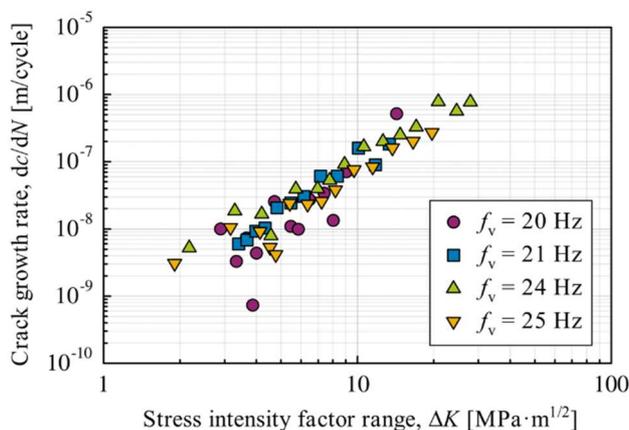


Fig.6 Relationship between crack growth rate and stress intensity factor range.

(5) まとめ

曲げ振動に関する実験および計算により、曲げ振動を受ける材料の安全性を考慮する上で重要な知見が得られた。振動時のき裂進展特性に関しては、材料の内部方向にどのように進展するのかや応力拡大係数の算出方法等、不明な点が残されているため、今後の検討が必要である。

<引用文献>

1) I.S. Raju and J.C. Newman, in: T. Cruse (Ed.), Fracture Mechanics: Nineteenth Symposium, ASTM International, West Conshohocken, (1988), pp.43-55.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 小林大悟, 坂本惇司, 多田直哉, 上森武 |
| 2. 発表標題 アルミニウム合金の曲げ振動におけるき裂進展に伴う曲げ振幅の変化とそのき裂進展寿命への影響 |
| 3. 学会等名 日本材料学会第71期学術講演会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 畑昂輝, 坂本惇司, 多田直哉, 上森武, 杉澤拓海 |
| 2. 発表標題 チタン合金の曲げ振動寿命に及ぼす微粒子ピーニングの影響 |
| 3. 学会等名 日本機械学会中国四国支部第61期講演会 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 坂本惇司, 多田直哉, 上森武 |
| 2. 発表標題 アルミニウム合金における曲げ振動時の疲労損傷に関する検討 |
| 3. 学会等名 日本材料学会第72期学術講演会 |
| 4. 発表年 2023年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|---------------------------|-----------------------|----|
|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|