

超音波疲労試験機を用いたステンレス鋼 SUS430 薄板の曲げ疲労試験に関する研究

生水 雅之¹・坪内 翼²

要旨：本研究では繰り返し周波数 20kHz の超音波疲労試験機を用いて、薄板ステンレス鋼に対して曲げ疲労試験を行い、他の研究者が行った小野式回転曲げ疲労試験結果との比較・検討を行った。また疲労き裂の発生形態について光学顕微鏡および走査電子顕微鏡を用いた観察を行った。得られた結果は以下のようにまとめられる。(1)超音波疲労試験機の最大変位振幅となる固定棒最下端部に片持ちはり状の薄板試験片を装着し、20kHz での曲げ疲労試験が可能な計測システムを確立した。(2)有限要素法による解析結果とレーザ変位計による梁の変位測定結果を比較することにより、最大応力点を決定した。(3)疲労き裂は固定端近傍の最大応力が作用する自由側の応力集中部から発生し、梁の板幅方向に進展していた。

キーワード：超音波，疲労試験，曲げ応力，両振応力，薄板，有限要素解析，疲労き裂

1. はじめに

近年の機械部品に対する使用環境の苛酷化、長寿命要求がより一層高まってきており、疲労設計においては 10^7 回以上の繰り返し負荷に耐えることのできる強度特性が要求されるようになってきている。疲労寿命が 10^8 回を超える疲労試験を行うには、従来の数十 Hz の周波数での試験では膨大な時間やコストがかかるため、効率の良い試験法が望まれている。これに対して約 20kHz の超音波を用いた疲労試験では、長寿命領域での加速試験が可能であり、 10^8 回の繰り返し負荷の実験は約 1.4hr で達成できる^{1)~5)}。一方ステンレス鋼は耐熱性、耐食性に優れているため高温下での構造部材に使われることが多い。しかし、近年では工作機械や産業ロボットの動力伝達用、搬送用のベルト材として厚さ 1mm 未満の薄板鋼板が多く使用されるようになってきている。それらの部材には、引張荷重だけでなく、曲げ荷重も同時に作用することが多い⁶⁾。薄板材の疲労試験の場合、引張平均応力下での軸疲労試験は比較的容易であるが、圧縮応力が存在する場合には、座屈を発生するため軸疲労試験は困難となる。Ishii^{7),8)}らは超音波疲労試験機を用い、1 次モード下での薄板材の曲げ疲労試験法を提案している。また秋庭ら⁶⁾は厚さ約 0.1mm のステンレス鋼を変位振幅が最大となる超音波疲労試験機の加振ホーンと固定棒の間に挟み込み、3 次モード下での曲げ疲労試験を行っている。

本研究では、SUS430 薄板ステンレス鋼に対して超音波疲労試験機を用いて疲労試験を行い、他の研究

者が同種鋼を用いて行った小野式回転曲げ疲労試験の結果と比較検討を行った。また走査電子顕微鏡によるき裂発生形態および破面の観察を行った。

2. 実験方法

2.1 供試材および試験片

供試材には市販の板厚 0.5mm のフェライト系ステンレス鋼 SUS430 薄板を使用した。その材料の JIS に基づく化学成分および引張試験による機械的性質を Table 1 および 2 に示す。試験片は Fig.1 に示す形状に直径 0.3mm のワイヤーを用いた放電加工を行った後、表面加工層除去のためエメリー研磨を #2000 まで施し実験に供した。なお試験片端面は研磨を行わず放電加工のみの状態で実験を行った。

Table 1 Chemical compositions based on JIS (wt.%).

C	Si	Mn	P	S	Cr
≤0.12	≤0.75	≤1.00	≤0.040	≤0.030	16.00~18.00

Table 2 Mechanical properties.

Yield stress σ_Y , MPa	Tensile strength σ_B , MPa	Elongation ϵ_ℓ , %	Vickers hardness HV
249	420	29.6	173

2.2 有限要素法による応力・変位解析

解析には Solid Works(2010 SP3.1)を用い、解析条件は 2 次三角形シェル要素、総節点数および総要素数はそれぞれ 10270 点および 5009 個である。また Fig.1 に示す試験片の梁部の長さは、変位振幅を実測する

1 舞鶴工業高等専門学校 機械工学科 教授

2 舞鶴高専学生(現 国立電気通信大学 学生)

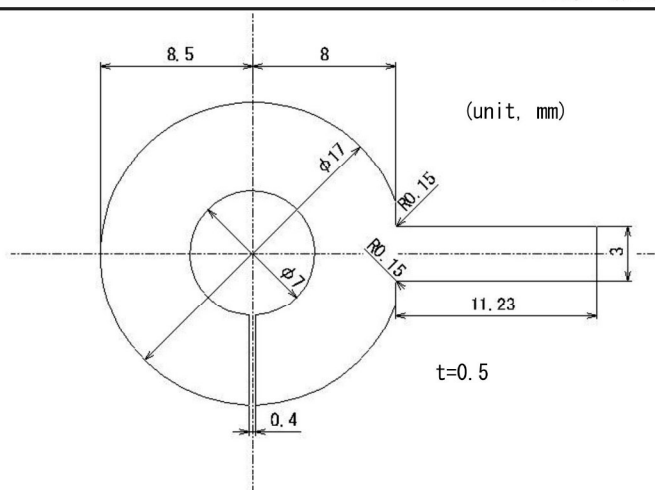


Fig.1 Shape and dimensions of specimen

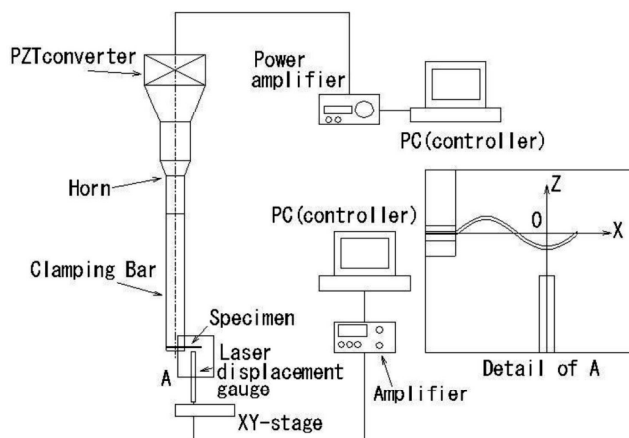


Fig.3 Schematic illustration of fatigue testing system.

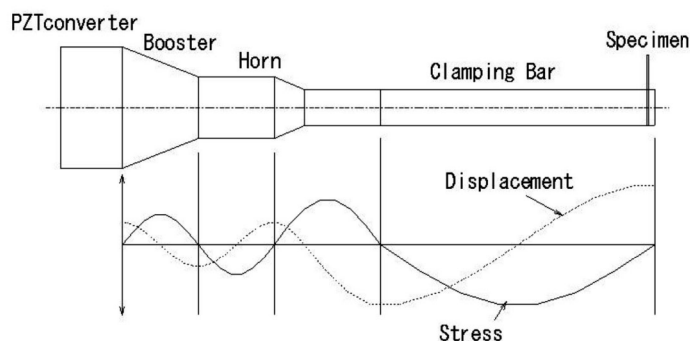


Fig.2 Schematic illustration of fatigue loading.

ために十分な長さを確保することが必要である。本研究では3次モードを用い、有限要素解析に基づき20kHzで共振を発生する梁部の長さを11.23mmと決定した。

2.2 超音波疲労試験

実験には島津製作所(株)製の超音波疲労試験機USF-2000を用いた。応力比 $R=-1$ 、周波数20kHzである。Fig.2にピエゾ素子で発生させた縦波振動がブースタおよびホーンで増幅され固定棒へ伝播していく様子を示す。変位振幅が最大となる固定棒最下端部にFig.1に示す薄板試験片を2枚のスペーサを介して挟み込み、試験片固定部の直線部と押さえ板の直線部分が平行かつ同一面になるように接着剤で予め固定した⁶⁾。これらを自作ねじで固定棒最下端部に取付け直線状に完全固定し一端が完全固定、他の一端を自由端とした片持ち梁の状態とした。試験装置の構成をFig.3に示す。固定端を20kHzで加振させることで曲げモードの共振状態を発生させた疲労試験を行った。なお、秋庭ら⁹⁾の試験片取付け位置がホーンと固定棒の間であるのに対して、本研究では固定棒最下端部となっている。これはFig.3に示すX-Yステージを移動させる際、レーザ変位計のセンサヘッド部が固定棒に接触し測定不能となるため

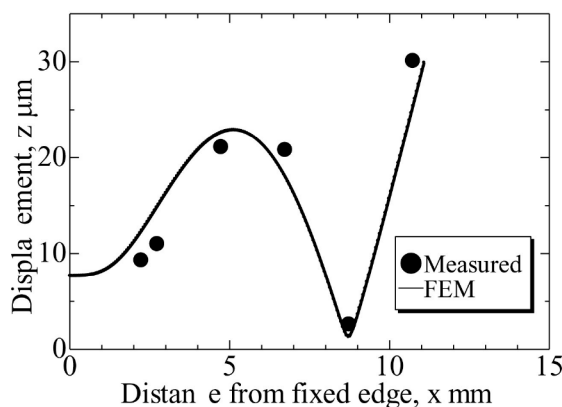


Fig.4 Change in displacement range with distance from fixed edge.

最下部に移動させている。実験はまず超音波疲労試験機のンプ出力10%で予備的に加振し、その際に生じる試験片梁部の自由端の変位をレーザ変位計により測定する。その変位と有限要素解析による変位を比較して、両者の差異を $\pm 0.5\mu\text{m}$ 以内に制御した後、試験応力に相当するンプ出力を疲労試験機に入力し加振した。次に実験中は、梁の自由端における変位振幅をパソコンに取り込み監視を行った。疲労き裂が発生・成長する際には、変位振幅が大きく変化する。この変位が初期変位値に対して約 $\pm 100\mu\text{m}$ 以上変化した時刻をき裂発生時刻とし、試験経過時間より破損に至るまでの負荷繰返し数 N_f を算出した。

3. 実験結果および考察

3.1 変位分布の測定

試験片R部に作用する応力を決定するためには梁部の変位分布を実測する必要がある。まず有限要素解析によって得られた梁の固定端からの距離と変位振幅の関係をFig.4の実線を示す。またレーザ変位計により計測した変位振幅の測定結果を黒丸で示す。両者はほぼ一致していることがわかる。このよ

うに測定される最大振幅をもとに有限要素解析による変位と応力についての解析結果を比較することから、試験片R部に生じる最大応力を決定した。

3. 2 S-N 線図

Fig.5 に S-N 曲線を示す。図中の白丸は同種鋼バルク材に対して森本が小野式回転曲げ疲労試験を行った結果⁹⁾を、黒丸は本研究結果を示している。また右矢印(→)の付されたプロットは、破損までの負荷繰返し数がそれぞれ $N_f=2.0 \times 10^6$ または 1.0×10^7 を越えても破断しなかった試験片であり、疲労限度 σ_w を示している。本研究の疲労限度は 261MPa となった。両者の時間強度および疲労限度はやや異なる。これは SUS430 鋼の化学組成の差やワイヤー放電加工により切出した本試験片端面の表面粗さは Fig.7 に見られるように比較的大きく、得られた疲労強度はこのような粗さによる応力集中や残留応力が影響をおよぼしているものと考えられる⁶⁾。

3. 3 疲労き裂の観察

負荷応力 $\sigma_a=352\text{MPa}$ 、繰返し数 $N_f=8.0 \times 10^4$ におけるき裂発生点近傍の実体顕微鏡および走査電子顕微鏡による観察結果を Fig.6 および Fig.7 にそれぞれ示す。き裂は試験片梁部と固定端の境界の R 部から板幅方向に成長していることが認められた。他の疲労試験条件においても、き裂は R 部から梁の直線部に移行する位置からすべて発生していた。また Fig.8 に疲労試験後に試験片に静的引張荷荷を与え、強制的に破壊させた破面の SEM 写真を示す。き裂は試験片 R 部から梁の直線部に移行する自由側面の位置から発生し矢印の方向に進展している。また疲労試験中に破面同士が擦れた痕跡が見られる。これはき裂の発生・成長に伴い、梁の振動が複雑に変化するため損傷が発生したと考えられる。

4. 結言

本研究では、繰返し周波数 20kHz の超音波疲労試験機を用いて厚さ 0.5mm の市販の薄板ステンレス鋼に対して曲げ疲労試験を行い、他の研究者が行った小野式回転曲げ疲労試験結果との比較を行い、本試験の妥当性および疲労き裂の発生形態について検討を行った。得られた結果は、以下のようにまとめられる。

- (1) 片持ち梁状の薄板試験片を超音波疲労試験機の最大変位振幅となる固定棒最下端に取付け、20kHz の超音波帯域での曲げ疲労試験が可能な計測システムを確立した。
- (2) 有限要素解析の結果とレーザ変位計を用いた変位測定の結果を比較することで、試験片 R 部にかかる最大応力を決定した。
- (3) 疲労き裂は試験片 R 部から梁の直線部に移行する自由側面の位置から発生し、梁の板幅方向に進展していた。

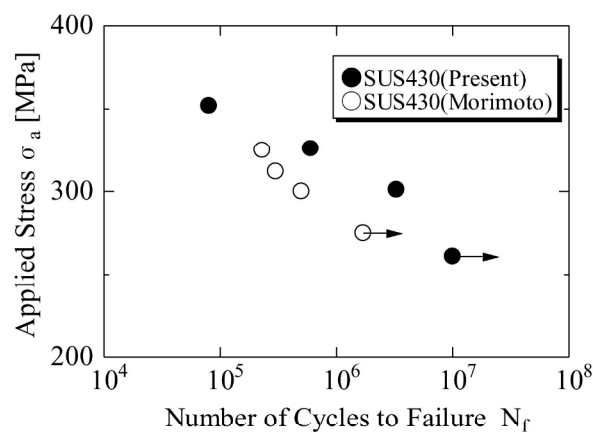


Fig.5 S-N curves.

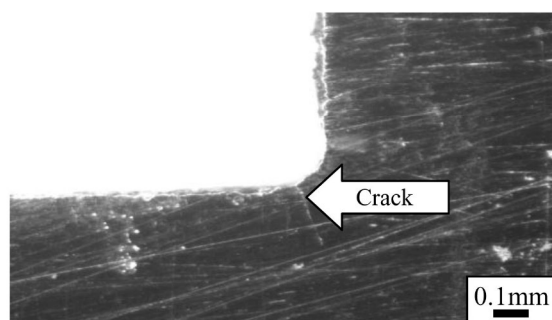


Fig.6 Optical microscope image of fatigue crack.

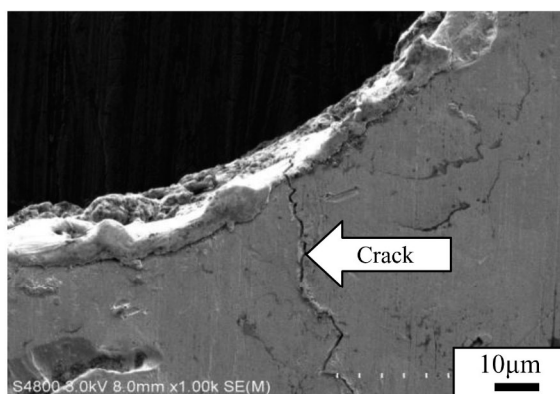


Fig.7 SEM image of fatigue crack

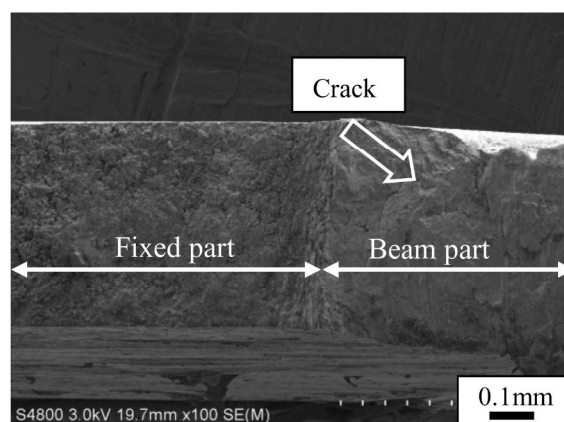


Fig.8 Fracture surface by SEM.

謝辞：本研究の一部は、平成 23 年度舞鶴工業高等専門学校機械工学科研究経費の配分を受けて行われたことを記し、関係各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) 古谷佳之, 日本機械学会論文集, A, 73-732, (2007)957-964.
- 2) 石田渉, 山本徹, 金田忍, 小川武史, 日本機械学会論文集, A, 78-785, (2012)23-33.
- 3) 皮籠石紀雄, 福留拓朗, 仮屋孝二, CHEN Qiang, 後藤真宏, 日本機械学会論文集, A, 76-772, (2010)1651-1658.
- 4) 志波光晴, 古谷佳之, 山脇寿, 伊藤海太, 榎学, 日本金属学会誌, 73-3, (2009)205-210.
- 5) 皮籠石紀雄, 前村英史, CHEN Qiang, 後藤真宏, 森野数博, 日本機械学会論文集, A, 74-743, (2008)1000-1005.
- 6) 秋庭義明, 木村英彦, 鶴尋貴, 中村亜有子, 日本機械学会論文集, A, 74-742, (2008)879-884.
- 7) Ishii, H., Taguchi, Y., Ishii, K., and Akagi, H., *Proc. Int. Conf. Adv. Tech. Exp. Mech. ATEM(2003)* CD-ROM OS11W0239.
- 8) Ishii, H., Yamada, T., and Okada, Y., *Proc. Int. Conf. Very High Cycle Fatigue VHCF-3(2004)*420-426.
- 9) 森本精洋, 日本機械学会論文集, A, 72-713, (2006) 114-119.

(2013. 1. 7 受付)

STUDY ON FATIGUE TEST OF THIN STAINLESS STEEL SHEET UNDER BENDING USING ULTRASONIC FATIGUE TESTING MACHINE

Masayuki SHOZU and Tsubasa TSUBOUCHI

ABSTRACT: In this study, fatigue test system for thin stainless steel sheet, SUS 430, was conducted using an ultrasonic fatigue testing machine. The thickness of the specimen was approximately 0.5mm. The ultrasonic fatigue testing results were compared with conventional rotating bending fatigue testing. Specimen was fixed at the location where the displacement amplitude became the maximum. The specimen was fatigued under purely alternating bending stress. Displacement at a fixed edge of the specimen and the beam-deflection of the specimen were measured with a laser displacement equipment during fatigue tests. Stress-displacement analysis based on finite element analysis was carried out to determine the dimensions of the specimen and to calculate the applied stress on the basis of the flexural displacement amplitude. The maximum stress was observed on the free side edge near the fixed edge. The 3rd vibration mode was selected for this fatigue test. The fatigue cracks initiated from the free side edge of the specimen, and progressed to the width direction of the beam. The fatigue strength at finite life of the specimen was higher than that of Morimoto.

Key Words : *Ultrasonic, Fatigue test, Bending stress, Purely alternating stress, Thin sheet, Fatigue crack, Finite element analysis*