

機械構造用炭素鋼(S45C)による片持ち回転曲げおよび均一回転曲げ疲労特性の同等性に関する実験的検証

株式会社 山本金属製作所 ○國分昭雄 山本泰三 河合真二
立命館大学 菊池将一 上野明 酒井達雄

Experimental verification on the equality of fatigue properties of the carbon steel for mechanical use(S45C) between cantilever and uniform rotating bendings

Akio kokubu and Taizou Yamamoto and Shinji Kawai
Shoiti Kikuike and Akira Ueno and Tatuo Sakai

In order to investigate the fatigue characteristics of metallic materials experimentally, a long period of time is required to get sufficient number of $S-N$ data. In recent years, in order to overcome this difficulty, multi-type fatigue testing machines have been developed in the cantilever rotating bending by Yamamoto Metal Technos Co. Ltd., in which four specimens can be tested simultaneously.

On the other hand, another type of uniform rotating bending fatigue testing machine so-called "Ono type" has been widely used from both academic and industrial viewpoints. Can we obtain the same fatigue property for the given steel by using these different types of fatigue testing machines? This is the fundamental question for each user of the respective fatigue testing machines. Thus, the equality of the fatigue properties between both types of the rotating bending was experimentally reconfirmed by performing fatigue tests for the carbon steel of S45C in this study.

1 緒 言

金属材料の疲労特性を実験的に調べるためには長期間を要する。近年ではこの課題を克服するため同時に多数の試験片に対する疲労試験が可能な多連式片持ち回転曲げ疲労試験機が開発され、すでに大学機関などで使用されている。この片持ち式の回転曲げ疲労試験機はその荷重方式により、荷重点からの距離に比例して応力が增大される特徴がある。それゆえ、負荷する応力と破断点を特定するため、片持ち式の疲労試験機を使用する際は、切欠き底を持った砂時計型試験片が一般的に用いられてきた¹⁾⁷⁾。一方、多くの研究機関では従来から両持ち式回転曲げ疲労試験機が使い続けられ、多数の疲労特性データを蓄積している。この試験機は試験片全体に均一曲げ応力を負荷するものである。それゆえ、材料欠陥の影響を考慮した $S-N$ 線図を作成するときは、平滑形状を有した試験片(平滑試験片)が頻繁に使用されてきた。本研究は、片持ち式で均一な曲げ応力が得られるように試験片にテーパを設けた試験片(テーパ型試験片)を準備し、このような試験片にて得られる片持ち回転曲げ疲労特性と、平滑試験片を用いて行なう均一回転曲げ疲労特性との同等性に関して実験的検証をおこない、考察を加えた。

2 実験方法

2.1 試験片の形状 従来通り片持ち回転曲げ方式で切欠き底のついた試験片を使用しては、平滑試験片で行な

う均一回転曲げ疲労試験と比較して、危険体積の評価範囲が大きく異なる。このことより、片持ち回転曲げ疲労特性が均一回転曲げ疲労特性に対して、 $S-N$ 線図がやや上方に現れることが予想される。

そこで本研究では、以下に示すように片持ち式にて曲げ応力が均一となるようなテーパ型試験片を準備し疲労試験を行なった。

まず、Fig.2 に示すような片持ち式にて断面一樣な丸棒試験片に負荷される曲げ応力は、基礎式 (1)、断面係数：式 (2)、モーメント：式 (3) より、式 (4) のように求められる。

$$M = \sigma Z \quad (1)$$

$$Z = \frac{\pi d^3}{32} \quad (2)$$

$$M = Wl \quad (3)$$

$$\sigma = \frac{M}{Z} = \frac{32Wl}{\pi d^3} \quad (4)$$

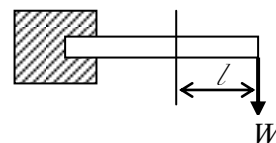


Fig.1 Uniform section round bar specimen.

次に、曲げ応力一様なテーパ型試験片の場合も、任意位置での直径を d とすれば、上記と同様に式(4)で表わされる。ここで曲げ応力一定の形状寸法を求めると、式(4)より以下のようになる。

$$d^3 = \frac{32Wl}{\pi\sigma} \quad (5)$$

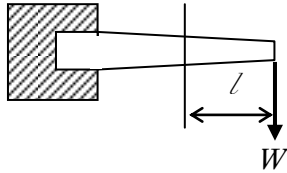


Fig.2 Uniform bending stress round bar specimen.

これより、任意の位置で σ 一定となる直径 d を求めると、以下の式を得る。

$$d = \sqrt[3]{\frac{32Wl}{\pi\sigma}} \quad (6)$$

すなわち、Fig.2 に示すように試験片直径は荷重点から離れるほど、大きくなるような形状となる。これらのことより、直径は $\sqrt[3]{l}$ に比例するように変化させれば均一な曲げ応力を発生させることできる。

このことを踏まえ、回転曲げ疲労に限らず通常の寿命域におけるほとんどの疲労破壊が、試験片表層部における結晶粒のすべり帯から発生する⁸⁾と想定し、以下の通り試験片の形状・寸法を設計した。すなわち、片持ち方式で使用するテーパ型試験片と、均一回転曲げ方式で使用する平滑試験片に関して、供試材の結晶粒の大きさとして $30\mu\text{m}$ 程度を想定し、深さ $30\mu\text{m}$ の表面層の体積が両試験片で同等 (5.8mm^3) となるように試験片形状を設計した。このように設計された両試験片の形状・寸法を、それぞれ Fig.3, Fig.4 に示す。

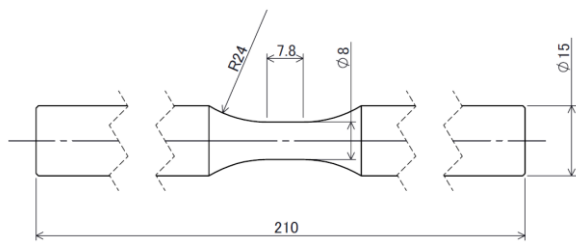


Fig.3 Specimen configuration for uniform rotating bending test.

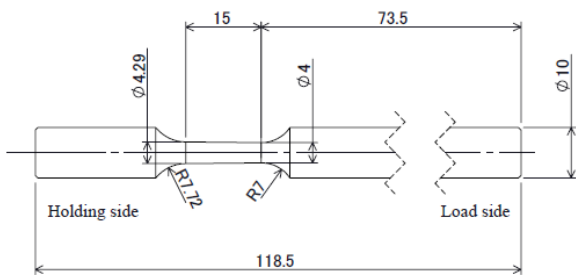


Fig.4 Specimen configuration for cantilever rotating bending test.

Fig.4 に示す試験片については、一見すると Fig.3 の試験片と同様の平行部付き試験片のように見えるが、平行部の右端部の直径が 4mm であるのに対し、平行部左端部の直径が 4.29mm になっている点に注意されたい。

今回の実験では、一般機械装置に頻繁に使用されている汎用鋼材の一例として、機械構造用炭素鋼 S45C を供試材に選定した。本研究で用いた供試材の化学成分を Table 1 に示す。

Table 1 Chemical compositions (mass %)

Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Co
S45C	0.42	0.15	0.60	0.30	0.35	0.20	0.20

試験片作製手順としては、外径 $\phi 16$ の丸棒形状で納入後、焼入れ 880°C で 45 分の油冷を施し、焼戻し 420°C で 50 分の空冷を行なった。その後、それぞれ Fig.3, 4 に示す試験片形状に切削加工後、平行部およびテーパ部を #180~#3000 までのエメリー紙を用いて研磨し鏡面に仕上げた。

2.2 残留応力の測定 両試験片に使用した材料ロットは同じであるが、全長や外径が異なる。試験片の芯振れ精度や、切欠き部の表面粗さを揃えるためには、必然的に加工条件を変えなければならない。このことより、加工時に切欠き部表面に異なる残留応力が発生することが予想されたため⁹⁾、予め疲労試験前に両試験片の残留応力を測定した。測定に使用した装置は 2 次元検出器搭載 X 線解析装置 D8 Discover With Gadds (Bruker 製) である。試験片長手方向の残留応力を Cr-K α 回折線を用いて測定した。また、測定箇所は切欠き部円周方向に 4 箇所等間隔に設定した。

2.3 疲労試験 均一疲労回転曲げ疲労特性を調査するため、小野式回転曲げ疲労試験機 (株東京衝機製造所製) を用いた。また、片持ち回転曲げ疲労特性を調査するためには 4 連式回転曲げ疲労試験機 (株山本金属製作所製) を用いた。実験環境は室温、大気中で行なった。繰り返し速度は、いずれも 52.5Hz に設定し実験を行なった。

3 実験結果

3.1 残留応力測定結果 両試験片において測定サンプル数 3 本、円周方向に 90° 間隔で 4 ヶ所、表層から照射

Table 2 Experimental results of residual stress

(A) Rotating bending cantilever

Measurement location	Residual stress (MPa)				
	Area1	Area2	Area3	Area4	Average
1	-364	-422	-376	-373	-384
2	-397	-471	-373	-396	-409
3	-426	-439	-391	-454	-427

(B) Rotating uniform bending

Measurement location	Residual stress (MPa)				
	Area1	Area2	Area3	Area4	Average
1	-322	-185	-217	-305	-257
2	-216	-311	-328	-297	-288
3	-213	-221	-221	-194	-212

深さ $13\mu\text{m}$ として測定した結果を Table 2 に示す。

また, Fig.5 は各試験片での残留応力の分布を表したものである。両試験片にはともに圧縮の残留応力が発生していた。また, テーパー型試験片の 3 本, 12 ヶ所の平均残留応力 -407MPa であり, 平滑試験片は -252MPa であった。この差については, 前述のとおり両試験片で加工条件が異なることによるものと思われる。

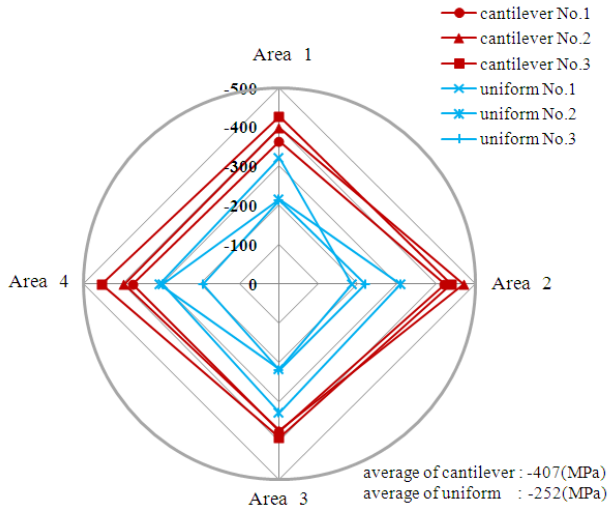


Fig.5 Residual stress distributions measured on both types of fatigue specimens.

3.2 疲労試験結果 Fig.6 に疲労試験結果の S-N 線図を示す。図中の実験結果において両試験片ともに明瞭な疲労限度を呈し, 片持ち回転曲げの場合の疲労限度は $\sigma_w = 673\text{MPa}$ なる値を示しており, 一方, 均一回転曲げの場合の疲労限度は $\sigma_w = 532\text{MPa}$ なる値を示すことがわかる。なお, S-N 曲線の回帰法については日本材料学会標準「S-N 曲線回帰法」¹⁰⁾ を用い, 一般に鉄鋼材料について幅広く採用されている「折れ線モデル」を採用して S-N

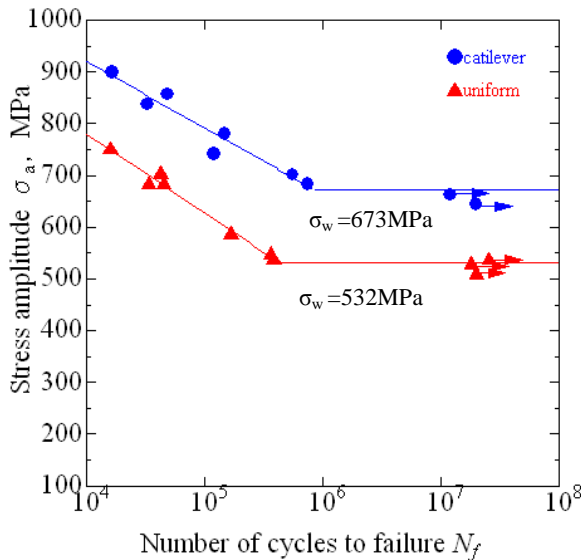


Fig.6 S-N diagram for both types of fatigue specimens (S45C).

曲線を回帰したことを付記する。

4 考察

回転曲げ疲労試験においては表面起点型破壊が一般的であるので, 表面の圧縮残留応力の影響を大きく反映する^{11), 12), 13)}。片持ち回転曲げで使用したテーパー型試験片には残留応力が平均で -407MPa , また, 均一回転曲げで使用した平滑試験片については平均で -252MPa の圧縮残留応力が発生していることを前述の実験で明らかにしている。そこで, このような残留応力は当該材料の S-N 特性に関して平均応力を負荷したのと同様の効果があると考えられているので¹⁴⁾, Fig.6 における負荷応力から圧縮残留応力を差し引いた値を真の負荷応力 (残留応力のない場合の応力) として負荷応力を補正した S-N 線図を Fig.7 に示した。比較のために, 図中には Fig.6 と同じ補正前の生データもプロットしてある。

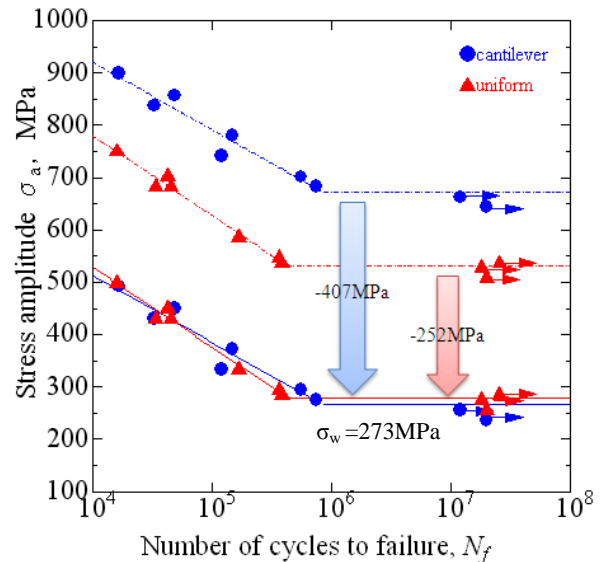


Fig.7 S-N diagram modified by compressive residual stress (S45C).

上記の補正を行ったデータに対する回帰 S-N 曲線から求められる疲労限度として, 片持ち回転曲げ (●印) では $\sigma_w = 266\text{MPa}$ なる値を示し, 均一回転曲げ (▲印) では $\sigma_w = 280\text{MPa}$ を示し, 両者は極めて近い数値を与えており, 両者の平均値を図中に示した。また, Fig.6 の生データにおける疲労限度から残留応力値を差し引いた補正後の疲労限度は以下のとおりである。

片持ち回転曲げ: $\sigma_w = 673\text{MPa} - 407\text{MPa} = 266\text{MPa}$

均一回転曲げ: $\sigma_w = 532\text{MPa} - 252\text{MPa} = 280\text{MPa}$

これらの値は, Fig.7 の補正データに対して回帰された S-N 曲線の疲労限度と両者とも完全に一致している。完全な一致は偶然とは云え, 残留応力の効果が平均応力と同様の効果を与えていることを意味している。

ここで, S-N 曲線の水平部だけでなく S-N 曲線の傾斜部に着目すると, この領域における S-N データの勾配についてもほぼ一致していることがわかる。これらの結果は, 本研究の主題である片持ち回転曲げと均一回転曲げ

の2種類の疲労試験法で得られた疲労試験結果に対する同等性を示している。すなわち、本報で紹介した4連式回転曲げ疲労試験機を用いることにより、従来から広く使用されている小野式回転曲げ疲労試験機（均一回転曲げ）で得られる実験結果と同等の疲労試験結果が得られることが確認できたことになる。

なお、4連式回転曲げ疲労試験機で広く使用されている砂時計型切欠き試験片に対するS-N特性と、均一回転曲げ荷重下でのS-N特性との同等性については、今後、引き続き検証を行う予定である。

5 結 言

一般機械装置に幅広く使用されている機械構造用炭素鋼 S45C を用いて、テーパ型試験片および断面一様の平滑試験片を準備し、片持ち式回転曲げ疲労試験および均一回転曲げ疲労試験の同等性に関して実験的検証をおこなった。その結果、以下の結論を得た。

1) 危険体積として試験片表層部の結晶粒寸法程度の厚さを想定した表層部体積を同じにすれば、両方式の試験法による疲労試験結果はほぼ同等と考えることができる。

2) 試験片加工時に導入される圧縮残留応力を測定して、これを平均応力として補正することで当該材料のS-N特性を正確に評価することができる。

3) 上記2点により、片持ち回転曲げ疲労試験と均一回転曲げ疲労試験は、荷重様式が異なっても同等の疲労特性を得ることができることがわかった。すなわち、4連式回転曲げ疲労試験機により小野式回転曲げ疲労試験機と同等の疲労試験結果が得られることが検証できた。

本研究を行なうにあたり、残留応力測定にご協力いただいた岡山工業技術センター研究開発部の村上浩二様に心から感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 酒井達雄, 武田光弘, 塩澤和章, 越智保雄, 中島正貴, 中村孝, 小熊規泰, 「高炭素クロム軸受鋼の広寿命域における特徴的回転曲げ疲労特性に関する実験的検証」, 材料, Vol.49, No.7, (2000), pp.779-785.

回転曲げ疲労における内部起点型疲労破壊メカニズム」, 材料, Vol.52, No.11, (2003), pp.1292-1297.

- 3) 小熊規泰, 原田久, 酒井達雄, 「軸受鋼の長寿命回転曲げ疲労における内部起点型疲労破壊挙動の強度レベル依存性」, 日本機械学会論文集, A編, Vol.70, No.690, (2004), pp.221-228.
- 4) 武田光弘, 酒井達雄, 小熊規泰, 「高強度鋼と機械構造用炭素鋼の超広寿命域における回転曲げ疲労特性と破面形態の特徴」, 日本機械学会論文集, A編, Vol.68, No.670, (2002), pp.977-984.
- 5) Tatsuo SAKAI, Benning LIAN, Mitsuhiro TAKEDA, Kazuaki SHIOZAWA, Noriyasu OGUMA, Yasuo OCHI, Masaki NAKAJIMA, Takashi NAKAMURA, "Statistical Duplex S-N Characteristics of High Carbon Chromium Bearing Steel in Rotating Bending in Very High Cycle Regime", International Journal of Fatigue, Vol.32, (2010), pp.497-504.
- 6) 中村裕紀, 酒井達雄, 平野秀夫, 望田修也, 「アルミニウム合金の長寿命疲労挙動に対するアルマイト処理および微細組織の影響」, 日本機械学会論文集, A編, Vol.76, No.764, (2010), pp.386-388.
- 7) Y. Zhang, T. Sakai, H. Osuki, T. Yamamoto, A. Kokubu, "Very high cycle fatigue characteristics of Zr-base bulk amorphous alloy in rotating bending", Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, Vol.5, No.10, (2011), pp.519-533.
- 8) T.Sakai and T. Kikuchi, Journal of Eng. M. T., Vol.107, pp.338-342(1985).
- 9) 小川俊文, 福岡県工業技術センター研究報告, Vol.15, pp.86-88(2005).
- 10) 酒井達雄, ほか21名, 金属材料疲労信頼性評価標準-S-N曲線回帰法-, JSMS-SD-6-08, (2008), 日本材料学会
- 11) 殿塚易行, 佐野明彦, 神奈川県産業技術センター研究報告書, No.13, pp44-45(2007).
- 12) 越智達郎, 久保田学, 吉田卓, 小山達也, 熱処理, 52巻1号, pp11-17(2012).
- 13) 小川一義, 浅野高司, 豊田中央研究所 R&D レビュー, Vol.30, No.1, pp37-44(1995).
- 14) 中井善一, ほか11名編集, 材料強度学, (2005), pp.99-102, 日本材料学会

- 2) 小熊規泰, 原田久, 酒井達雄, 「軸受鋼の長寿命