回転曲げと引張圧縮下の疲労寿命差に関する一考察*

小川 壽^{*1}, 幡 中 憲 治^{*2}

A Consideration of the difference in Life between Rotary-Bending and Push-Pull Fatigues

Hisashi OGAWA and Kenji HATANAKA

Rotary-bending and push-pull fatigue tests were performed for JIS S15CK low-carbon and SNCM439 alloy steels. The fatigue lives for crack initiation and final failure plotted against stress amplitude were much shorter in push-pull loading than rotary-bending loading. This difference in fatigue lives almost disappeared however, in the life curves plotted against the cyclic strain amplitude, which was measured during fatigue tests. The surface crack growth rate, da/dN plotted against the strain intensity factor range, and $\Delta K\epsilon$ were expressed by a linear line on double logarithmic scales, independent of the test mode. The fatigue life for crack propagation was estimated by integrating the equation derived from this da/dN vs. $\Delta K\epsilon$ relation. The life estimated in this way produced only a small difference between the rotary-bending and the push-pull fatigues, compared with the scatter found in the pretest data. Thus, the strain-based fatigue life is hardly influenced by the test mode in the crack propagation and crack initiation processes.

Key Words: Metallic Materials, Rotary-Bending Fatigue, Push-Pull Fatigue, Cyclic Strain, Surface Crack Growth, Strain Intensity Factor.

1. 緒 言

一般に、いわゆる $S-N$ 曲線として疲労試験結果を整理した場合、回転曲げ下の疲労寿命のほうが引張圧縮疲労下のそれより長寿命となることはよく知られている⁽¹⁾⁽²⁾。平滑材の回転曲げと引張圧縮試験下における疲労寿命の時間強度の違いについて、公江らは公称応力と実応力の立場から検討を加えている⁽³⁾⁽⁴⁾。また、西谷ら⁽⁵⁾は回転曲げと引張圧縮疲労の寿命の差は微小き裂の伝ば速度の違いに起因するとしている。

このように、両試験条件下で生じる疲労強度差の原因を追求した二、三の研究がこれまでなされているが、この疲労強度差を説明する統一的な見解はいまだに存在しない。そこで著者らは、高強度・低延性鋼と低強度・高延性鋼を使用して両試験中、これらの材料に生じる繰返しひずみを正確に測定し、両試験条件下の疲労寿命をひずみ幅で整理することを試みると同時に、き裂発生およびき裂伝ばの二つの過程から上記寿命差の原因について検討を加えた。

2. 供試材料および試験方法

2・1 試験片 実験に使用した材料は強度レベルの異なる JIS S15CK と SNCM 439 鋼である。平行部を有する平滑試験片の場合、フィレット部(曲率半径 $\rho=40$ mm)に $\alpha=1.11$ の応力集中を生ずる。そのため、特に疲労限に近い(繰返し塑性ひずみが小さい)試験条件下ではフィレット部で破断が生じる。そこで本研究においては $\rho=100$ mm の砂時計形試験片($\alpha=1.03$)を使用した。き裂発生位置を限定するため $\rho=100$ mm の曲率を有する部分に $\rho=8$ mm、深さ 0.05 mm の浅いノッチを付した。試験片の形状および寸法を図 1 に、また供試材料の化学成分、熱処理条件および機械的性質を表 1～3 に示す。

2・2 試験方法 回転曲げ疲労試験には小野式回転曲げ疲労試験機(98 N・m)を使用した。試験時の繰返し回転速度は 3 550 rpm である。繰返し引張圧縮疲労試験は島津製サーボベット Lab 5(± 49 k)にて行った。このときの繰返し速度は 2～15 Hz である。繰返し応力-ひずみ曲線を決定するために振幅変動試験を行った。そのときのひずみの測定・制御にはひずみゲージ形伸び計(島津製・ダイナストレーン、標点間距離 12 mm)を用いた。また、引張圧縮疲労試験中、繰返し

* 平成元年 3 月 9 日 中国四国支部第 27 期総会講演会において講演、原稿受付 昭和 63 年 8 月 29 日。

*¹ 正員、宇部工業高等専門学校(〒755 宇部市常盤台)。

*² 正員、山口大学工学部(〒755 宇部市常盤台)。

ひずみの測定を行うために試験片の中央部(最小断面部)にひずみゲージ(グリッド長さ2mm)をはり付けた。さらに回転曲げ疲労試験中、試験片表面にはり付けたひずみゲージと自作のスリプリングを通じて繰返しひずみを測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 公称応力振幅-疲労寿命曲線 図2にS15CKとSNCM 439鋼のS-N曲線を示す。●印は

表1 供試材料の化学成分(wt.%)

	C	Si	Mn	Cu	Ni	Cr	Mo
A	0.38	0.29	0.77	0.13	1.68	0.79	0.16
B	0.40	0.27	0.75	0.10	1.63	0.65	0.16
C	0.14	0.24	0.43	0.13	0.50	0.14	-

A: SNCM439 引張圧縮試験片

B: SNCM439 回転曲げ試験片

C: S15CK

表2 供試材料に施した熱処理の条件

A and B	Heated at 855°C for 30 min and then air-cooled → Heated at 845°C for 30 min and then oil-quenched → Heated at 635°C for 1 hour and then water-quenched
C	Heated at 855°C for 30 min and then air-cooled

(a) S15CK 鋼

(b) 引張圧縮疲労試験片

図1 試験片の形状および寸法

浅いノッチを付した試験片を用い、レプリカ採取のために適宜、試験を中断して得た試験結果であり、○印はノッチを付さない試験片による連続運転試験結果を示している。これによると、●印は○印より低応力域において若干低寿命を呈する傾向にあるが、両者の差はデータのばらつきを考慮すると無視し得るほど小さい。S15CK 鋼では引張圧縮と回転曲げ下での寿命の間には、 $\Delta\sigma/2=220\sim270$ MPaの応力域において8~18倍程度の差異があり、SNCM 439 鋼では同様に両者間に、 $\Delta\sigma/2=460\sim600$ MPaの応力域で1.6~14倍程度の寿命差を生じている。初期き裂(長さ約20 μm)の発生に要する繰返し数の破断寿命に対する比、 N_i/N_f は、S15CK 鋼では $\Delta\sigma/2=230\sim270$ MPaの応力域で、回

表3 熱処理後の供試材料の機械的性質

	Yield stress MPa	Ultimate tensile strength MPa	Reduction of area %
A	820	930	66
B	836	955	68
C	305	437	69

(a) 回転曲げ疲労試験片

(b) SNCM 439 鋼

図2 応力振幅-き裂発生・破断寿命曲線

回転曲げ下で0.27~0.14, 引張圧縮下で0.27~0.21である。一方, SNCM 439 鋼ではこの比は, $\Delta\sigma/2=480\sim 600$ MPa の応力域で, 回転曲げ下で0.38~0.22, 引張圧縮下で0.5~0.35である。このように SNCM 439 鋼におけるほうが S 15 CK 鋼におけるより N_i/N_f の値が大きく, き裂発生寿命の全寿命に占める割合が大きくなっている。このことは, SNCM 439 鋼では S 15 CK 鋼におけるよりき裂伝ば寿命が短く, 微小欠陥など⁽⁶⁾⁽⁷⁾より発生した疲労き裂は急速に伝ばし, 破断に至ることを示している。

3・2 繰返し変形挙動と繰返し応力-ひずみ曲線
図3に回転曲げおよび引張圧縮疲労試験中, S 15 CK および SNCM 439 試験片に生じるひずみ振幅の変化を示す。S 15 CK 鋼は回転曲げ疲労試験中, 高応力振幅下で単調な繰返し軟化を示す。引張圧縮疲労下では応力振幅に依存するある繰返し数以降, 急速に軟化が進行し, 軟化終了後に高応力振幅下では繰返し硬化が生じる。一方, SNCM 439 鋼は回転曲げ疲労試験中, ほとんどひずみの変化を示さない。しかし, 引張圧縮疲労における高応力振幅下で単調な軟化を示している。図4にひずみ制御引張圧縮疲労試験下の振幅変動法($\Delta\epsilon_{tmax}=0.012$)より求めた繰返し応力-ひずみ関係

と多数試験片法より求めた繰返し応力-ひずみ関係(一定応力振幅引張圧縮疲労試験中, $1/2N_f$ の時点での応力振幅とひずみ振幅との関係)を示してある。S 15 CK 鋼の多数試験片法による繰返し応力-ひずみ関係は振幅変動法によるその低応力側に位置する。一方, SNCM 439 鋼のそれは, 低ひずみ域では振幅変動法による応力-ひずみ関係より高応力側に, また, 高ひずみ域ではこれより低応力側に位置する傾向にある。回転曲げ下の応力-ひずみ関係は, 引張圧縮下のそれより一様に高応力側に位置する。また, SNCM 439 鋼の回転曲げ下の繰返し応力-ひずみ関係はほぼ弾性線の延長線上に位置している。それぞれの材料および試験法に対して得られた繰返し応力-ひずみ関係に最小二乗法を適用し, これより決定された繰返し応力-ひずみ曲線を Ramberg-Osgood 形構成式⁽⁸⁾で表すと

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{C} \right)^{1/n} \quad \dots\dots\dots (1)$$

となる。以下に2種類の試験方法により決定された2種類の材料の繰返し応力-ひずみ曲線を表現する式(1)の定数を取りまてて示す。

振幅変動法(引張圧縮)

(a) S 15 CK 鋼の回転曲げ疲労試験

(b) S 15 CK 鋼の引張圧縮疲労試験

(c) SNCM 439 鋼の回転曲げ疲労試験

(d) SNCM 439 鋼の引張圧縮疲労試験

図3 疲労過程中的繰返しひずみ振幅の変化

S 15 CK : $C=436, n=0.08$

SNCM 439 : $C=2\,204, n=0.2$

多数試験法

S 15 CK : 回転曲げの場合 $C=530, n=0.09$

引張圧縮の場合 $C=557, n=0.12$

SNCM439 : 回転曲げの場合 $C=2\,118, n=0.15$

引張圧縮の場合 $C=976, n=0.09$

なお、後述するひずみ拡大係数幅、 $\Delta K\varepsilon$ の算出および、ひずみ振幅と疲労寿命の関係の算出に際しては多数試験片法により決定された繰返し応力-ひずみ曲線を使用した。

3・3 き裂伝ば過程の解析 図5にき裂伝ば速度

図4 繰返し応力-ひずみ曲線

da/dN と応力拡大係数幅 $\Delta K\sigma$ の関係を示す。き裂伝ば速度 da/dN は半円形状き裂の深さ方向についてのものであり、き裂長さ l に対するき裂深さ a の比、アスペクト比は回転曲げおよび引張圧縮疲労の両方に対し $a/l=0.45$ とした。実線および破線は、それぞれ回転曲げおよび引張圧縮疲労下の、長さ $50 \sim 1\,000\,\mu\text{m}$ のき裂の伝ば速度と $\Delta K\sigma$ との関係に最小二乗法を適用し、これを両対数グラフ上で直線近似した結果である。なお、き裂同志の合体によるき裂の急速な成長は、単一き裂の定常的な成長とは異なっているためこれに関するデータは最小二乗法による直線近似のための対象から除外してある。また、疲労過程中表面き裂は閉口しないと仮定した。なお、応力拡大係数幅、およびひずみ拡大係数幅の算出に際しては Raju-Newman の解析式⁽⁹⁾を用いた。それらを以下に示す。

$$\Delta K\sigma = \Delta\sigma \sqrt{\pi a} (M_k/\Phi) \dots\dots\dots (2)$$

$$\Delta K\varepsilon = \Delta\varepsilon_t \sqrt{\pi a} (M_k/\Phi) \dots\dots\dots (3)$$

ここで形状補正係数、 M_k は引張圧縮試験片に対しては、 $9 \times 9\,\text{mm}$ の正方形の横断面を有する角棒に軸方向の負荷が作用した場合の、また、回転曲げ試験片に対しては $7.5 \times 7.5\,\text{mm}$ の正方形横断面を有する角棒に曲げ負荷が作用した場合を採用した。なお、丸棒試験片を角棒試験片とみなして M_k を計算することによ

(a) S 15 CK 鋼

(b) SNCM 439 鋼

図5 表面き裂進展速度 da/dN と応力拡大係数幅 $\Delta K\sigma$ の関係

り生じる誤差は、例えば、直径 10 mm および、10 mm $\times$ 10 mm の丸棒および角棒試験片に生じた深さ 2 mm 以内の表面き裂に対し 6% 以下であることをすで

(a) S15CK 鋼

(b) SNCM 439 鋼

図 6 表面き裂進展速度 da/dN とひずみ拡大係数幅 $\Delta K\varepsilon$ の関係

に確かめている⁽¹⁰⁾。また、 ϕ は第 2 種完全だ円積分である。図 5 (a) によると、引張圧縮下の $da/dN-\Delta K\sigma$ 関係は回転曲げ下のそれより高い裂進展速度側に位置する。ある与えられた応力拡大係数幅に対するき裂進展速度間の比較によると、その差は 5 倍程度である。また、引張圧縮疲労下の $da/dN-\Delta K\sigma$ 関係には若干、応力振幅依存性が認められる。一方、図 5 (b) によると、SNCM 439 鋼の $da/dN-\Delta K\sigma$ 関係には試験方法 (回転曲げと引張圧縮疲労試験) 依存性がほとんど認められない。図 6 は図 5 の $da/dN-\Delta K\sigma$ 関係を da/dN とひずみ拡大係数幅 $\Delta K\varepsilon$ の関係として整理し直したものである。ここで、 $\Delta\varepsilon_i$ は図 4 に示した $\sigma-\varepsilon$ 曲線 (引張圧縮疲労試験においては多数試験片法より決定された $\sigma-\varepsilon$ 曲線、また、回転曲げ疲労試験においてはその過程に実測された応力-ひずみ関係から決定された $\sigma-\varepsilon$ 曲線) から求められた。図 5 (a) と図 6 (a) との比較によると与えられた $\Delta K\sigma$ に対する da/dN の二つの試験方法間の差は約 5 倍であるのに対し、与えられた $\Delta K\varepsilon$ に対するその差は約 1.5 倍である。このように図 6 (a) では図 5 (a) に比べてき裂進展速度の整理結果における試験方法依存性が顕著に減少している。

(a) S15CK 鋼

(b) SNCM 439 鋼

図 7 ひずみ振幅-き裂発生・破断寿命曲線

また、図 6 (a) の $da/dN-\Delta K\epsilon$ 関係においては引張圧縮疲労下で $da/dN-\Delta K\sigma$ 関係に認められた応力振幅依存性 [図 5 (a)] も消失している。一方、図 6 (b) より、二つの試験条件下で得られた SNCM 439 鋼の $da/dN-\Delta K\epsilon$ 関係は、ほぼ一致することがわかる。このように、図 6 (a) および図 6 (b) は、 $\Delta K\epsilon$ に対して整理された両試験条件下の表面き裂進展速度には両対数グラフ上で直線則が成立し、しかもそれらはほぼ一致することを示している。そこで二つの試験条件下で得られた $da/dN-\Delta K\epsilon$ 関係を次式で表現した。

$$da/dN = C(\Delta K\epsilon)^m \quad \dots\dots\dots (4)$$

ただし、S 15 CK 鋼に対し $C=190$, $m=2.38$, SNCM 439 鋼に対し $C=112$, $m=2.42$ である。なお、図 6 より明らかなように $da/dN-\Delta K\epsilon$ 関係には試験方法依存性がほとんど生じないのでこの場合、両方の材料に対し引張圧縮下で得られた $da/dN-\Delta K\epsilon$ 関係を採用した。これを積分することにより得られる次の式

$$N_f = N_i + \int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{C(\Delta K\epsilon)^m} \quad \dots\dots\dots (5)$$

を用いて疲労寿命を計算した。その結果を図 7 に示した。ここで、 a_i は初期き裂深さで、 $a_i = a/l \cdot l_i = 0.45 \times 0.02 \text{ mm} = 9 \mu\text{m}$, また、 $a_f = a/l \cdot l_f = 0.45 \times 5 \text{ mm} = 2.25 \text{ mm}$, N_i は $l_i = 0.02 \text{ mm}$ の初期き裂発生寿命とした。なお、最終破断はいずれの試験条件においても、き裂長さが $l_f > 5.0 \text{ mm}$ に達した時点で生じる。また、 l_f の大小が N_f の算出値に与える影響は小さい。そこで、本研究においては $l_f = 5.0 \text{ mm}$ とした。

3・4 ひずみ振幅-疲労寿命曲線 図 7 は図 2 に示した $\Delta\sigma/2-N_f$ 関係を、多数試験法に基づき決定された式 (1) を介して $\Delta\epsilon_i/2-N_i$ および $\Delta\epsilon_f/2-N_f$ 関係として描き直したものである。これによると、両材において、回転曲げ下と引張圧縮疲労下の $\Delta\epsilon_i/2-N_f$ 曲線はよく一致している。さらに、き裂発生寿命に関する $\Delta\epsilon_i/2-N_i$ 曲線も二つの試験条件下においてほぼ一致している。なお、このようなひずみ疲労寿命曲線においてはいわゆる寸法効果もほとんど消失することが鋼の回転曲げ疲労試験において確かめられている⁽¹⁾。

式 (5) より算出された回転曲げと引張圧縮下の $\Delta\epsilon_i/2-N_f$ 関係を図 7 (a) および図 7 (b) に細い実線と破線で示した。これと先述した、実験結果に基づいて決定された $\Delta\epsilon_i/2-N_f$ 関係との比較より次のことがわかる。S 15 CK 鋼ではき裂伝ばに基づいて算出された $\Delta\epsilon_i/2-N_f$ 曲線は、実験結果の傾向をかなりよく表現するが、実験結果より負のこう配が大きいため低ひずみ域で実験結果より短寿命側に位置する。同様なこ

とが、SNCM 439 鋼に関する計算結果についても成立する。これは、 $da/dN-\Delta K\epsilon$ 関係の最小二乗法による直線近似が特に低き裂進展速度域のデータの傾向を十分に表現していないことに起因すると考えられる。すなわち、 $\log da/dN-\log \Delta K\epsilon$ 関係は全き裂進展速度域にわたって 1 本の直線で表現できず、これが上に述べた解析結果と実験結果との間の差異を生じる原因と思われる。これについては次報において詳細に検討を加える予定である。

ところで、図 7 (a) および図 7 (b) においてき裂伝ば過程に基づいて計算された疲労寿命を与える破線と実線の差はデータのばらつきの大きさに比べて極めて小さい。このことはき裂伝ば寿命は試験片横断面内の比較的小さい、ある限られた層内を進展するき裂に支配され、このような領域内のき裂進展速度は応力あるいはひずみこう配の影響をほとんど受けないことを示唆しているものと思われる。このように、き裂発生寿命はもちろんのこと、き裂伝ば寿命についてもひずみ基準で整理された回転曲げと引張圧縮下の疲労寿命にはほとんど差が生じないと考えられる。

4. 結 論

JIS S 15 CK 鋼焼ならし材および、SNCM 439 鋼調質材につき回転曲げおよび引張圧縮疲労試験を実施し、試験方法に起因する疲労寿命の相違について検討を加えた。得られた結果は次のように取りまとめられる。

- (1) 回転曲げ疲労と引張圧縮疲労下においては繰返しひずみ特性に顕著な差が生じる。この差は負荷応力が大きくなるほど拡大する。
- (2) ひずみ振幅に基づいて整理された回転曲げおよび引張圧縮疲労寿命曲線はき裂発生寿命および破断寿命の両方についてほぼ一致する。
- (3) き裂伝ば速度、 da/dN とひずみ拡大係数 $\Delta K\epsilon$ の間には両対数グラフ上で直線関係が成立し、これは試験方法の影響を受けない。
- (4) (3) の結果を用いて回転曲げと引張圧縮疲労下のき裂伝ば寿命を算出した結果によると、き裂伝ば寿命は試験方法の影響をほとんど受けない。

文 献

- (1) 大内田, 機誌, 62-484 (1959), 772.
- (2) 星野・新井, 機論, 25-155 (1959), 528.
- (3) 公江・中村・恒成・岡田, 材料, 32-356 (1983), 522.
- (4) 中村・恒成・岡崎・岡田, 材料, 27-299 (1978), 721.
- (5) 西谷・皮籠石・若原, 材料, 33-366 (1984), 311.
- (6) 酒井・上野・藤谷・田中, 材料, 33-373 (1983), 1278.

- (7) 幡中・藤満・渡辺, 機論, 51-463, A (1985), 790. (1979), 817.
(8) Ramberg, W. and Osgood, W. R., *NACA Tech. Note*, 902 (1943). (10) 小川・幡中・山本, 機論, 54-503, A (1988), 1322.
(9) Raju, I. S. and Newman, J. C., Jr., *Eng. Fract. Mech.*, 11 (11) 幡中・清水・永江, 機論, 48-436, (1982), 1514.
-