曲げおよびねじり応力下の疲労き裂伝ば速度の比較*

原 田 昭 治** 大 路 清 嗣*** 小 倉 敬 二****

Comparison in Fatigue Crack Growth Rate between In-Plane Bending and Cyclic Torsion

by

Shoji HARADA

(Kyushu Institute of Technology, Kitakyushu)

Kiyotsugu OHJI

(Department of Mechanical Engineering, Osaka University, Suita)

and Keiji OGURA

(Faculty of Engineering Science, Osaka University, Toyonaka)

Fatigue crack growth under multiaxial loading is of importance in engineering practice. In order to examine the effect of stress biaxiality on the fatigue crack growth rate, torsional (biaxial) and uniaxial bending fatigue tests were carried out in this study by using a tough-pitch copper. The experimental results showed that in the case of torsional fatigue the compressive non-singular stress acting parallel to the direction of the initial cracked plane considerably accelerated the mode I crack growth rate in comparison with the result of the uniaxial bending fatigue test.

(Received Mar. 23, 1981)

キー・ワード：疲労き裂伝ば，1軸曲げ，繰返しねじり，き裂先端部塑性域，き裂の加速伝ば

1 緒 言

破壊力学の発達とともに疲労き裂伝ばに関する研究も目覚ましい進展を遂げた。特に基本的情報となる単軸応力下モードⅠのき裂伝ばについてはすでに膨大な資料が集積され、その取扱ひ手法も今日ではほぼ確立している。しかし種々の複雑な組合せ応力を受ける実用の構造部材を想定した場合、いわゆる多軸応力下での疲労き裂伝ばはこの分野で残された重要な研究課題の一つであり、事実この種の問題を取扱った研究報告が徐々にではあるが最近増えつつある。^{1)~13)}

2軸応力下の疲労き裂伝ばを扱ったこれまでの研究報告を概観すると、現在までのところ一般的な結論を得る段階にまで至っていない。例えばこの問題に関して最も重要と考えられるき裂面に平行に作用する静的または繰返しの引張、または圧縮応力がき裂伝ばに影響を及ぼすか否かについては、(1)加速または減速の効果あり、および(2)効果なし、など様々な結論の報告が

見られる。また横堀らはモードⅠ型引張りおよびねじり疲労試験を行い、き裂がみかけ上モードⅠで伝ばしても両応力条件下で伝ば速度曲線のこう配が異なり、き裂成長が必ずしも巨視的引張応力のみで律速されないことを指摘している。²²⁾

周知のように線形破壊力学の知見によれば、無限遠方で一様な2軸応力を受ける無限板中のき裂において、き裂面に平行に作用する一様応力はき裂先端のモードⅠ応力拡大係数 K_I に関与しない。しかしき裂先端部に形成される塑性域の形状寸法は応力の2軸性の影響を受けて変化することがすでに数多く報告されている。^{8)13)~16)} 小倉らはき裂開閉口挙動に及ぼす応力2軸性の影響を弾塑性FEM解析によって検討し、また最近北川らは¹³⁾ 1軸および2軸応力下のき裂先端部塑性域寸法を比較することによってき裂伝ば速度に及ぼす応力2軸性の影響を論じている。いずれにしても問題単純化のため、き裂伝ば速度はき裂先端部塑性域寸法に比例して変化し、応力多軸性の影響は塑性域寸法の変化を通じて現れると考えるのがこの種の問題を議論するうえで妥当な方法と思われる。

本研究では以上の背景に立って多軸応力下の疲労き

* 原稿受理 昭和56年3月23日

** 正 会 員 九州工業大学 北九州市戸畑区仙水町

*** 正 会 員 大阪大学工学部 吹田市山田丘

**** 正 会 員 大阪大学基礎工学部 豊中市待兼山町

裂伝ばを検討するための基礎的な実験を行った。まず 2 軸応力下試験として引張-圧縮の 2 軸応力状態と等価と考えられる主応力軸方向に初期スリットを有する薄肉円筒試験片を用いて繰返しねじり応力下疲労き裂伝ば試験を実施した。同時に比較試験として片側スリット付板試験片の 1 軸応力下面内曲げ疲労き裂伝ば試験を行い、両試験の結果を比較してき裂面に平行に作用する圧縮応力のき裂伝ば速度に及ぼす影響について検討した。

2 実験材料および方法

供試材は素材径 19 mm のタフピッチ銅である。供試材の化学成分および機械的性質をそれぞれ Table I, II に示す。Fig. 1 (a), (b) に繰返しねじりおよび 1 軸応力下面内曲げ疲労き裂伝ば試験に用いた試験片の形状を示す。ねじり疲労試験には同図(a)に示すように外径 12 mm, 内径 9 mm の薄肉円筒試験片を用い、試験片中央の平行部に主応力軸方向に放電加工により初期スリット (長さ 3 mm, 幅約 0.2 mm, 先端半径約 0.1 mm) を導入した。曲げ疲労試験には同図(b)に示す片側スリット (長さ 1 mm, 幅約 0.2 mm, 先端半径約 0.1 mm) 付平板試験片を用いた。すべての試験片は機械加工後 600℃, 1 時間の内部応力除去用焼なましを施した後実験に供した。ねじりおよび曲げ両疲労試験ともにシェンク式疲労試験機 (最大容量 2.5 kg・m) を用いて完全両振り荷重条件下, 繰返し速度 1700

Table I. Chemical composition of the material tested (ppm).

Fe	Pb	Sn	Bi	Ni	Co	Ag	As	Sb	O ₂	S
11	11	2	1	3	0	1	1	0	277	6

Table II. Mechanical properties of the material tested which was annealed at 600°C for an hour after machining.

Yield stress* (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	Reduction in area (%)
—	20.7	58.2	77.2

Fig. 1. Geometry of the specimen tested.

- (a) Cyclic torsion.
- (b) Uniaxial in-plane reversed bending.

r. p. m. (定格) で行い、曲げ疲労試験は面内曲げ負荷方式で実施した。また一定の繰返し数毎にトルクを修正して公称の繰返しねじりおよび曲げ応力を一定に保った。き裂長さはねじり試験の場合一定の繰返し数毎に試験片を取りはずして万能投影機を用いてき裂の軸方向および円周方向長さ成分を測定し、曲げ試験の場合には試験機に取付けた移動式顕微鏡を用いて試験片を取りはずすことなく測定した。

3 実験結果

Fig. 2 に繰返しねじりおよび 1 軸曲げ疲労のき裂伝ば曲線を示す。ねじり疲労の場合き裂は初期スリットと同軸のほぼ主応力軸方向に伝ばし、図に示すき裂長さは実測したき裂の軸方向および円周方向長さ成分より計算して求めたものである。完全両振りの繰返し応力振幅 σ_n をねじりの場合 ± 2.3 , ± 3.0 および ± 4.1 kg/mm² の 3 レベルに、1 軸曲げの場合 ± 4.1 kg/mm² のレベルにそれぞれ選んだ。また図中に示すき裂長さはき裂伝ば初期の段階における初期スリットの影響を除くため、き裂がある程度成長した段階 (ねじりの場合初期スリット (3 mm) の両端からき裂がそれぞれ約 1 mm 成長, 曲げの場合には初期スリット (1 mm) の一端からき裂が約 1 mm 成長) より測定したものである。Fig. 3 にき裂伝ば速度 dl/dN と繰返し応力拡大係数幅 $4K$ の関係を実験点と実線で示す。ねじりの場合本研究で用いた試験片形状のき裂部材がねじり負荷を受けた場合の K 値はこれまでのところまだ求められていないようであるので、Pook と Denton¹⁷⁾ に従い第一近似として $4K = 4\sigma_n/\sqrt{\pi l}$ の式を用いて $4K$ 値を算出した。また曲げの場合 $4K$ 値は Brown の式⁴⁾を用いて求めた。図中の破線は後述のように、薄肉中空試験片の曲率の影響を考慮して求めた既存の K 値の 3 次元解析の結果を利用して算出した $4K$ の修正値を用いて実験結果を整理し直したもので、もとの実験値との関連については次節で詳論する。

Fig. 3 に見られるごとく、ねじり疲労き裂伝ばの場

Fig. 2. Crack growth curves in cyclic torsion and uniaxial bending fatigue tests.

Fig. 3. Comparison in crack growth rates between cyclic torsion and uniaxial bending fatigue tests.

合異なる3種類の応力レベル下の結果がほぼ1本の直線上にある。また注目すべき点としてねじり応力下のき裂伝ば速度が1軸曲げの場合に較べ明らかに大きな値を示している。みかけ上、1軸応力下(曲げ)に較べて2軸応力下(ねじり)のき裂伝ばが加速されるこのような傾向は、大形のねじり試験片を用いてこの種の問題を検討した Pook と Denton の結果と同傾向である。ねじりの場合のき裂伝ば加速の理由として彼等はき裂の成長とともにその影響の度合が大きくなる試験片座屈の影響を指摘している。本研究のねじり試験の場合、き裂長さ測定のため一定の繰返し数毎に試験機から試験片を取りはずし再び取付けるという操作を繰返しているため、試験片座屈の影響はほとんどなかったものと考えられる。

4 考 察

Fig. 3 に示したように繰返しねじり応力下の疲労き裂伝ば速度は1軸曲げの場合に較べ同一の ΔK 値に対してほぼ1桁大きい。き裂を有するシェル構造物の3次元解析をした Folias の結果¹⁸⁾によると、 K 値は曲率半径の影響を受けて大きく変化する。本研究のねじりの場合、大ざっぱな ΔK の評価として $\Delta K = \Delta \sigma_n / \sqrt{l}$ の式を用いて ΔK 値を算出したため、 ΔK 値に試験片形状の効果(補正係数)が含まれておらず、 K 値をかなり過小評価していることが考えられる。Lakshminarayana と Murthy は任意な方向にき裂を有する中空円筒が引張、曲げおよびねじりを受けた場合の K 値を解析した。彼等の計算結果の表示方法は本研究の場合に直接利用できるような形になっていないが、全き裂長さ $2l$ が5~12 mm の範囲で K 値を彼等の計算結果から内挿して求め、き裂伝ば速度曲線を再整理したものを Fig. 3 の図中に破線で示す。無次元応力拡大係数 $K^*/\sigma_n/\sqrt{l}$ (K^* : 肉厚および曲率の影響を考慮して求めた真の応力拡大係数)、すなわち補正係数はき裂長さの増加とともに大きくなり、 $l=5$ mm で約1.02 程度であるが、 $l=12$ mm で約1.14 となる。主要な実

験結果の範囲($l=5\sim 10$ mm)では補正係数は最大1.10、すなわち簡便式を使って K 値を求めても最大10%過小評価しているにすぎず、繰返しねじり応力下のき裂伝ば速度は1軸曲げに較べてはるかに大きい (Fig. 3 に示す破線と1軸曲げの結果を比較)。

多軸応力下の疲労き裂伝ば問題に関するこれまでの研究ではき裂伝ば速度に及ぼす応力多軸性の影響がき裂先端部に形成される塑性域の大きさの変化を通じて現れるといった観点からの取扱いが比較的多く、特に北川らは最近この点について詳論している。き裂面に平行に作用する応力は K 値には影響を及ぼさないが、ミーゼス型の降伏条件を想定すると、相当降伏応力を変化させることが容易に理解される。また線形破壊力学の知見によると、き裂先端部に形成される塑性域の大きさ ω は降伏応力 σ_y に反比例して変化する。今、 ω_1 , ω_2 を1軸および2軸応力下の場合にき裂先端部に形成される塑性域の大きさとしてき裂面に平行に作用する応力が(i)引張りの場合 $\omega_2/\omega_1 < 1$ および(ii)圧縮の場合 $\omega_2/\omega_1 > 1$ となる。^{13), 14)}したがって1軸の場合に比較して(i)の場合き裂伝ばの遅延が、(ii)の場合き裂伝ばの加速がそれぞれ予想されることになり、本研究の結果は(ii)の場合の予想傾向と符合する。実際のき裂伝ば速度はこの塑性域とともにき裂開口挙動に強く支配される。この点をも考慮して応力2軸性の影響を検討した小倉らのFEMによるシミュレーション解析の結果によると、き裂面に平行に使用する圧縮応力はき裂開口レベルを下げ、き裂伝ばを加速することを明らかにした。

引張または圧縮の静的荷重または動的繰返し荷重をき裂面に平行に加えてき裂伝ば速度に及ぼすき裂面平行応力の影響を検討したこれまでの研究結果の大部分は、たとえき裂伝ばが1軸応力下の場合に較べて加速または減速されるとしてもその程度はわずかである傾向を示しており、本研究のようにき裂面に平行な圧縮応力の負荷によってき裂伝ばが著しく加速されることを確認した報告例は横堀らの結果を除き見当たらないようである。横堀らは本研究と同様薄肉中空ねじり試験片(初期スリットは本研究の場合と異なり円周方向に導入されている)および中央スリット付板試験片を用いてねじりおよび引張応力下き裂伝ば試験を行い、(i)べき乗型き裂伝ば則: $dl/dN = C(\Delta K)^\delta$ における δ の値が両応力条件で異なり、ねじりの方が引張りより δ の値が大きくなる、(ii)き裂伝ば形態が引張り型およびせん断型の場合でき裂開口比は異なるが、き裂伝ば速度はほぼ等しい、および曲き裂がみかけ上モードIで伝ばしてもき裂成長機構はねじりと引張りの場合で異なるなどの諸点を明らかにした。ねじりおよび引張負荷におけるき裂伝ば速度の差についての詳細な議論はなされて

いないが、実験結果を見ると本研究結果と同様、応力状態が引張-圧縮の2軸応力と等価となるねじり負荷の方がモードⅠ型引張負荷に較べてはるかに大きな伝ば速度を示している。横堀らおよび本研究の結果と他の研究者らの結果との間に認められる、応力多軸性の影響によるき裂伝ば速度傾向の相違の理由は必ずしも明らかではないが、試験片形状、負荷形式および材料によって傾向が変化するのもかも知れない。すなわち従来の研究ではおもに十字形試験片が用いられ、荷重条件も片振りの引張-引張（双方とも繰返し荷重）または静的引張または圧縮（き裂面に平行）-繰返し引張の荷重組合せのものが大部分で、本研究の結果と直接比較できるような荷重条件下での資料はほとんど見あたらないようである。

上記以外の影響因子として、材料のもつ異方性の影響が考えられる。菊川らによると²⁰⁾ 圧延丸棒材の長手（圧延）方向に存在する繊維状組織は平滑材の引張圧縮および繰返しねじり低繰返し数疲労におけるき裂伝ばおよび破断様式の相違を誘起し、引張圧縮およびねじりの場合き裂はそれぞれ最強面（半径方向）および最弱面（長手方向）を伝ばする。その結果き裂面上での応力条件が異り、き裂伝ば寿命に差異が生じる可能性があることを指摘した。本研究の場合、き裂はねじりでは最弱または最強面と45°をなすらせんの円筒面上を、1軸曲げでは最強面（半径方向）をそれぞれ伝ばした。き裂面上に作用する引張の垂直応力成分は繰返し応力振幅を同一とした場合、両試験でみかけ上同じであるが、上述の菊川らの結果および大路らの²¹⁾ 圧延鋼板の疲労き裂伝ば試験の結果を参照して、き裂伝ば方向と繊維状組織のなす角の相違によりねじりの方が1軸曲げの場合よりき裂伝ばが²¹⁾ 加速されたことが考えられる。ただし、圧延鋼板の結果から類推して、材料異方性の⁹⁾ 実験結果に対する寄与は比較的小さいものと思われる。

平らはこの種の問題を微視フラクトグラフィの立場からも検討した。その結果によると、1軸引張およびき裂面平行応力が圧縮の2軸引張-圧縮組合せ負荷条件の場合、破面はかなり平坦で通常のストライエーション状の模様で覆われているのに対し、2軸引張-引張組合せ応力条件の場合には、破面は比較的平坦ではあるが、二次割れやぜい性ファセットが高頻度で観察されることを明らかにした。このような破面形態の相違の理由として2軸組合せ応力条件が引張-引張の場合には引張-圧縮の場合に較べき裂先端での静水応力が大きくなることを指摘している。この結果をもとに本研究でも破面観察を行ったが、1軸曲げの場合破面上の広い領域で明りょうなストライエーション状の模様が観察されたのに対し、応力状態が引張-圧縮組合せのねじりの場合には破面は平坦、無特徴でストライ

エーション状模様も1軸曲げの場合ほど高頻度には観察されなかった。破面形態の相違からき裂伝ばの加速または減速現象を説明するには現状ではまだ資料が乏しく、今後検討を積重ねる必要がある。

最後に本研究では比較的大きい繰返し硬化特性を示すタフピッチ銅を用いて疲労き裂伝ば試験を行い、従来の結果で確認されていないような、2軸応力による顕著なき裂伝ば加速現象が見られた。この種のき裂伝ば加速についてさらに詳細に検討するため、繰返し荷重に対して比較的安定な炭素鋼を用い、応力条件も種々変化させて調べる予定である。

5 結 言

疲労き裂伝ば速度に及ぼす応力多軸性の影響を検討するため、タフピッチ銅を用いて繰返しねじり応力下および1軸曲げ応力下疲労き裂伝ば試験を行った。得られた実験結果を要約すると以下のようである。

繰返しねじり応力下の疲労き裂伝ば速度は1軸曲げの場合に較べてかなり大きく、き裂面に平行に作用する圧縮応力の存在はき裂伝ばを加速することが明らかとなった。

参 考 文 献

- Christensen, R. H., and M. B. Harman., ASTM STP 415, 5 (1967).
- Joshi, S. R., and J. Shewchuk., *Exper. Mech.*, **10**, 529 (1970).
- Kibler, J. J., and R. Roberts., *J. Engng for Industry, Trans. ASME, Ser. B.*, **92**, 727 (1970).
- Pook, L. P., and K. Denton., *Int. J. Frac.*, **8**, 118 (1972).
- Ogura, K., K. Ohji, and Y. Ohkubo., *Int. J. Frac.*, **10**, 609 (1974).
- Zamrik, S. Y., and M. A. Shabara., *J. Pressure Vessel Technology, Trans. ASME, Ser. J*, **99**, 137 (1977).
- Hopper, C. D., and K. J. Miller., *J. Strain Analysis*, **12**, 137 (1977).
- Taira, S., K. Tanaka, S. Ogawa, and M. Kan., *Proc. 21st Japan Congress on Material Research*, 50 (1978).
- Taira, S., K. Tanaka, M. Kan., and A. Yamada., *Proc. 22nd Japan Congress on Material Research*, 130 (1979).
- Leevers, P. S., J. C. Radon, and L. E. Culver., *Int. J. Frac.*, **13**, 874 (1977).
- Leevers, P. S., L. E. Culver, and J. C. Radon., *Engng. Frac. Mech.*, **11**, 487 (1979).
- 北川英夫, 結城良治, 東郷敬一郎, 角田義秋, *日本機械学会論文集*, **45**, 707 (1979).
- 北川英夫, 結城良治, 東郷敬一郎, *日本機械学会論文集*, **47**, 981 (1981).
- Adams, N. J. I., *Engng. Frac. Mech.*, **5**, 983 (1973).
- Kfour, A. P., and K. J. Miller., *Proc. 4th Int. Conf on Frac. Waterloo*, **1**, 43 (1977).
- Ogura, K., K. Ohji, and K. Honda., *Proc. 4th Int. Conf. Frac., Waterloo*, **2**, 1035 (1977).
- Brown, W. F., and J. E. Strawley, Jr., *ASTM Standard-410*, 1 (1967).
- Folias, E. S., *Int. J. Frac.*, **5**, 327 (1969).
- Lakshminarayana, H. V., and M. V. V. Murthy., *Int. J. Frac.*, **12**, 547 (1976).
- 菊川 真, 大路清嗣, 小谷純久, 横井玉雄, *日本機械学会論文集*, **37**, 2237 (1971).
- 大路清嗣, 小倉敬二, 原田昭治, 田路 勉, *日本機械学会論文集*, **43**, 3594 (1977).
- 横堀武夫, 高木清寿, 横堀寿光, 阿部 明, *日本機械学会講演論文集*, No. 780-13, 163 (1978).