機械構造用鋼の回転曲げ低サイクル疲労特性

浦島 親行^{*1} 西田 新一^{*1}
江原 隆一郎^{*2} 山田 義和^{*2}

Low Cycle Fatigue Properties Under Rotating Bending of
Machine Structural Steels

Chikayuki URASHIMA, Shin-ichi NISHIDA
Ryuichiro EBARA, Yoshikazu YAMADA

Rotating bending and push-pull fatigue tests in a low cycle region were carried out with plain and notched specimens of machine structural steels. Fatigue strength and cyclic strain amplitude at the surface of the specimen under the above applied stress were compared with each other. In addition, the notch effect on rotating bending fatigue properties under low cycle fatigue were investigated. The conclusions are summarized as follows; (1) In the case of expression by nominal stress, which is usually used, rotating bending fatigue strength is remarkably higher than push-pull. This is because the cyclic strain amplitude at the surface of the specimen under rotating bending is considerably smaller than the push-pull one. (2) It is found that the fatigue strength of both applied stress types shows good agreement by re-arranging the cyclic strain amplitude at the surface of the specimens. (3) Low cycle fatigue strength of notched specimens under rotating bending can be also arranged with plain specimens by re-arranging the cyclic strain amplitude at the notch bottom surface of notched specimens.

Key Words: Fatigue, Low Cycle Fatigue, Rotating Bending, Push-Pull, Noth Effect, Structural Steel

1. 緒 言

産業機械の回転曲げ軸の中には使用期間中に異常振動や非常時運転の時など、その材料の降伏点を越えるような過大応力が短期間ではあるが負荷する場合がある。このような変動応力を受ける軸の安全性を確保するためには低サイクル領域における回転曲げ疲労強度も十分に検討しておかなければならない。

ところが、山本⁽¹⁾らも指摘しているように、回転曲げ低サイクル疲労においては1回の負荷で変形し、その後円滑な回転が出来ないのではないかと、という素朴な疑問を持った。実験の結果、公称応力でその材料の引張強さを越える過大応力を負荷しても円滑に回転し、かなりの繰返し数に耐えることが分かった⁽²⁾。このような特異な挙動を有する回転曲げ低サイクル疲労に関

する研究は従来、西原⁽³⁾、河本⁽⁴⁾、Manson⁽⁵⁾、幡中⁽⁶⁾および山本⁽¹⁾らの研究例が見られるものの、残された課題が多いように思われる。例えば、低サイクル疲労強度の評価値として、弾性計算に基づく公称応力を用いているが、試験片表面が塑性域にある低サイクル疲労の本質から考えると、別の評価値による検討が必要である。また、従来の研究例は全て平滑試験片についてのものであり、実用上重要な切欠き材についての研究例は見当たらない。

軸力低サイクル疲労強度との統一的な評価法については幡中⁽⁷⁾らの真応力による検討が見られるものの、 10^5 回以上の高サイクル域での評価であり、低サイクル域での十分な検討例は見られない。

本研究ではこれら諸課題の中で、特に本質的な問題と考えられる(1)回転曲げと軸力低サイクル疲労強度の比較および(2)切欠き効果について検討を行った。(1)の課題については回転曲げ低サイクル疲労強度の評価値として、試験片表面に繰返されるひずみ振幅を用いて検討し軸力低サイクル疲労強度との統一的な評価を試みた。(2)の課題についても基本的には低サイクル疲労強度、寿命を支配するのは切欠き底の軸方向ひずみ振

* 昭和62年4月3日 第64期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和61年6月10日。

^{*1} 正員、新日本製鐵(株)八幡技術研究部 (〒805 北九州市八幡東区枝光町1-1-1)。

^{*2} 正員、三菱重工業(株)広島研究所 (〒733 広島市西区観音新町4-6-22)。

幅であろうと考えて、それによる評価を行った。

したがって、検討に当たっては平滑および切欠き試験片ともに回転曲げ試験中の試験片表面の軸方向繰返しひずみの測定を行った。特に切欠き底のひずみ測定については小形試験片での測定は困難なため、切欠き底直径が120 mmの大形相似試験片を準備した。これらの結果に基づいて、切欠きを有する回転曲げ軸の安全性の検討を行うことを究極の目的としている。

2. 実験方法

2.1 使用材料および試験片 使用材料は軸材などに多用されているS45Cで、その化学成分を表1に示す。実験には三種類の材料を用いたが、いずれもJIS規格値を満足するものである。表2は材料強度を変えるために行った熱処理条件と、各々の機械的性質を示す。引張強さは約613MPaから1346MPaの範囲に変えている。

回転曲げおよび軸力疲労試験片形状をそれぞれ図1および2に示す。回転曲げ疲労試験片は平行部直径10 mmの平滑試験片と、応力集中係数 K_t を1.4, 2.1および3.1の3種類に変えた切欠き試験片、および切欠き底のひずみ測定用に K_t を2.1と3.1の大形試験片の計6種類である。軸力疲労試験片は試験部直径6 mmの砂時計型平滑試験片と K_t が2.1と3.1の切欠き試験片の計3種類である。

2.2 疲労試験方法 回転曲げ疲労試験は容量98N・mの小野式回転曲げ疲労試験機を用いて繰返し速度0.07Hzで行った。平滑試験片の一部については疲労試験中の試験片表面の繰返しひずみを測定した。ひずみ測定は試験片平行部表面の相直交する4箇所に2 mmの塑性ひずみゲージを貼付し、自作のスリッピングを介して繰返しひずみをX-Yレコーダに記録する方

法で行った。また、試験片の一部はき裂発生寿命を求めるために任意の繰返し数毎に試験機を停止してカラーチェックを行った。き裂発生寿命と判定したときのき裂深さは約0.2 mmから0.8 mmの範囲であった。

応力集中係数 K_t 2.1および3.1の大形試験片の切欠き底の繰返しひずみ測定は147KN・mの大形回転曲げ疲労試験機を用い繰返し速度0.25Hzで行った。使用したひずみゲージは2軸2 mm塑性ひずみゲージで、180度相対する切欠き底の2箇所に試験片軸方向および周方向にひずみ軸を一致させて貼付した。繰返し応力-ひずみ曲線はマルチステップ法により求めたが、その際の各繰返し応力での繰返し数は20回とした。ひずみ測定はリード線を用いて動ひずみ計に接続し、ビシコダにて記録する通常の方法で行ったがその際、所定の繰返し応

図1. 回転曲げ低サイクル疲労試験片

図2. 軸力低サイクル疲労試験片

表1. 使用材料の化学成分

Materials	Chemical compositions %							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
S45C(1)	0.45	0.23	0.70	0.013	0.015	0.17	—	0.02
S45C(2)	0.49	0.31	0.67	0.024	0.024	0.02	0.01	—
S45C(3)	0.47	0.25	0.73	0.025	0.015	—	0.02	—

表2. 使用材料の熱処理条件および機械的性質

Materials	Heat treatment	Mechanical properties			
		$\sigma_{1.2}$ MPa	σ_B MPa	δ %	ϕ %
S45C(1)	As rolled	377.6	689.4	20.6	36.7
S45C(2)	As rolled	329.5	612.9	28.0	43.4
S45C(3)	As rolled	346.9	661.5	24.5	40.4
S45C(2-1)	1000°C×0.5Hr AC	333.4	670.8	23.0	43.2
S45C(2-2)	850°C×0.5Hr WQ, 450°C×0.5Hr WQ	886.5	1062.1	23.8	51.5
S45C(2-3)	850°C×0.5Hr WQ, 350°C×0.5Hr WQ	1161.1	1345.5	7.1	31.2

力-ひずみ曲線を得るために約 50 m のリード線を準備する必要があった。

軸力低サイクル疲労試験は ± 98 kN 油圧サーボ疲労試験機を使用し、平滑試験片では試験片直径方向変位制御、切欠き試験片の場合は荷重制御で各々両振りで行った。繰返し速度は 0.08 Hz で行ったが、一部 0.17 Hz でも実施した。なお平滑試験片については全て荷重と変位のヒステリシスループを記録し、これに基づいて繰返し応力-ひずみ曲線を得た。試験片の一部はき裂発生寿命を求めるために 100 倍の読取り顕微鏡を用いて断続観察を行った。き裂発生寿命と判定したときの試験片表面き裂長さは約 0.5 mm 以下である。

3. 実験結果および考察

3.1 回転曲げと軸力低サイクル疲労強度の比較

両負荷型式の低サイクル疲労強度の比較をまず従来の整理法、公称応力で行い結果の一例を図 3 に示す。すでに Manson が指摘しているように、回転曲げ低サイクル疲労においては引張強さを超える過大応力を負荷しても直ちに破壊することなく、相当の繰返し数に耐えている。一方の軸力低サイクル疲労では引張強さ ($N_f = 1/4$ 回) を起点とするある勾配の S-N 曲線で示されることから、低繰返し数側ほど回転曲げの方が軸力より高い疲労強度を示している。この特異現象は

図 3. 平滑および切欠き ($K_t = 3.1$) 試験片の回転曲げと軸力低サイクル疲労強度の比較

図 4. 回転曲げおよび軸力低サイクル疲労強度に及ぼす切欠きの影響 (公称応力による整理)

図 4 および 5 に例示するように切欠き試験片でも材料強度が変わっても基本的には変わらない。この原因は軸力の場合試験片全断面が一様に降伏するのに対し、回転曲げにおいては応力勾配があるために試験片表面が塑性域にあっても内部は弾性域にあり試験片表面の変形が拘束されているためと言われている⁽⁵⁾。しかし、その試験片表面の繰返しひずみ挙動については明らかにされていない。

著者らは回転曲げ試験片の軸方向に貼付した 4 枚のひずみゲージにより疲労試験中の繰返しひずみを測定し、ひずみが安定した段階におけるそれらの平均値を用いて繰返し応力 (公称応力) との関係で整理し結果を図 6 に示す。同図には軸力低サイクル疲労の繰返し応力-ひずみ振幅曲線も比較して示す。なお、軸力の繰返し応力-ひずみ振幅曲線は振幅の異なる各試験片のヒステリシスループの圧縮側立上がり部分を一致させるように移動し、ひずみ振幅に直して得たものである。両負荷型式の繰返し応力-ひずみ振幅曲線を比較して

図 5. 回転曲げおよび軸力低サイクル疲労強度に及ぼす材料強度の影響 (公称応力による整理)

図 6. 回転曲げと軸力の繰返し応力-ひずみ曲線の比較 (平滑試験片)

明かなように、回転曲げ低サイクル疲労における試験片軸方向の表面に繰返されるひずみ振幅は軸力のそれに比べて非常に小さく、引張強さを越える公称応力の下でも応力とひずみ振幅の間に依然としてほぼ直線関係が成立している。すなわち、前項で述べた公称応力で整理した時の回転曲げと軸力の疲労強度の差は試験片表面に繰返されるひずみ振幅の違いに基づくものと考えられる。そこで低サイクル疲労強度は試験片表面に繰返される軸方向ひずみ振幅に一義的に支配されると仮定して、図6の繰返し応力-ひずみ振幅曲線と図3のS-N曲線とから各繰返し応力におけるひずみ振幅を求め、回転曲げと軸力低サイクル疲労強度を繰返しひずみ振幅で評価を行い結果を図7に示す。同図(a)は全ひずみ振幅と破断までの繰返し数 N_f の関係を示すが、回転曲げ、軸力ともに一本の直線でよく整理でき(1)式で表わせる。同図(b)は塑性ひずみ振幅と N_f の関係を示すが、回転曲げの結果は(2)式で表わせる軸力の結果より低目にずれている。なお、塑性ひずみ振幅は図6の繰返し応力-ひずみ曲線の立上り勾配を弾性ひずみ振幅として、全ひずみ振幅より差引いて求めた。

$$\epsilon_{ta} \cdot N_f^{0.45} = 0.240 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\epsilon_{pa} \cdot N_f^{0.49} = 0.233 \quad \dots\dots\dots (2)$$

(a) 全ひずみ振幅と破断までの繰返し数の関係

(b) 塑性ひずみ振幅と破断までの繰返し数の関係

図7. 回転曲げおよび軸力低サイクル疲労強度の比較(繰返しひずみ振幅による整理)

以上の結果、回転曲げ低サイクル疲労においてもその強度、寿命を支配するのは試験片表面に繰返される軸方向ひずみ振幅であると言える。したがって、これを評価値として回転曲げと軸力低サイクル疲労の統一的评价が可能である。なお図7は疲労寿命を破断までの繰返し数 N_f で整理したが、低サイクル疲労においては一般にき裂発生までの繰返し数が重要である。図8は各試験片について求めたき裂発生までの繰返し数 N_c と破断までの繰返し数 N_f の関係を示す。若干のバラツキはあるものの、工学上の可視き裂を問題にすればき裂発生までの繰返し数 N_c は(3)式で求められ、(1)および(2)式との関係から N_c とひずみ振幅の関係も得られる。

$$N_c = 0.62 \cdot N_f^{0.97} \quad \dots\dots\dots (3)$$

3.2 切欠き効果 低サイクル疲労における切欠き効果は軸力の場合には村上⁽⁸⁾や鶴戸口⁽⁹⁾らによって詳細に検討され、き裂発生までの繰返し数 N_c は切欠き底の軸方向塑性ひずみ振幅 $\Delta\epsilon_p$ に支配されていることが明らかにされている。しかしながら、回転曲げ低サイクル疲労に関する切欠き効果の研究は見当たらないようである。そこで著者らは回転曲げ低サイクル疲労における切欠き効果を検討するために、基本的には村上らの軸力における切欠き効果と同じ考えに立ち、低サイクル疲労強度を支配すると考えられる切欠き底の軸方向繰返しひずみ振幅の測定を切欠き底直径が120 mmの大形試験片を用いて行った。結果を図9に示す。同図の縦軸は公称応力振幅、横軸は180度相対する2箇所の切欠き底で測定した軸方向全ひずみ振幅の平均値を示す。同図には回転曲げおよび軸力平滑試験片の結果も併記している。同一公称応力での試験片表面の全ひずみ振幅は応力集中係数が高いほど大きい値を示す。しかし、実験の範囲内では軸力の平滑試験片のそれよりは依然として小さい。

図8. 各試験片のき裂発生までの繰返し数 N_c と破断までの繰返し数の関係

図9の繰返し応力-全ひずみ振幅曲線と図10のS-N曲線とから各繰返し応力におけるひずみ振幅を求め、各試験片について全ひずみ振幅と破断までの繰返し数の関係で整理し、結果を図11に示す。同図には平滑試験片の結果も併記している。

10^3 回以下の低繰返し数側で切欠き試験片の結果が短寿命側にずれ、ややバラツキが大きいが平滑および切欠き試験片、また両負荷型式ともにはば一本の直線で表示できる。バラツキの原因については切欠き試験片の結果が平滑試験片のそれより全般に短寿命側にずれているため、これについては以下のことが考えられる。すなわち、切欠き試験片のひずみ測定は試験装置の制約の関係から各公称応力での繰返し数を20回として、20回目の値を求めている。一方の平滑試験片については回転曲げおよび軸力ともに繰返しひずみの安定した段階（はば破断までの繰返し数の半分）での値を用いている。したがって、切欠き試験片の繰返しひずみ値はそれが安定した段階の値より幾分小さいものと考えられ、その結果平滑試験片と切欠き試験片の間にバラツキが生じたものと推察される。本質的には回

図9. 回転曲げ切欠き試験片の繰返し応力-ひずみ振幅曲線

図10. 回転曲げ低サイクル疲労強度に及ぼす切欠きの影響（公称応力による整理）

転曲げ切欠き試験片においてもその強度、寿命を支配するものは切欠き底の軸方向繰返しひずみ振幅であろうと考えられる。

4. 回転曲げ低サイクル疲労寿命の推定

以上の結果から、回転曲げおよび軸力低サイクル疲労とともにその強度、寿命を本質的に支配しているのは試験片表面の軸方向繰返しひずみ振幅であると言える。したがって、目的とする回転曲げ試験片の各公称応力で発生する軸方向繰返しひずみ振幅が求められれば平滑試験片の軸力低サイクル疲労試験結果から、回転曲げ低サイクル疲労寿命が容易に求めることができる。そこで有限要素法を利用して、切欠き試験片の低サイクル疲労における切欠き底のひずみ算出を試みた。算出にはMARCの汎用プログラムを使用し、弾塑性計算の基礎となる応力-ひずみ曲線は図6に示す軸力の曲線を用いた。解析は丸棒切欠き試験片を図12のように8節点平面ひずみ要素にモデル化して、試験片端部にFを負荷して曲げモーメントを与え、最大荷重点での切欠き底の要素1に発生するひずみを求めた。なお、切欠き底の要素1は図13に示すように9点の積分点を設け、切欠き底直下の1, 4, 7のひずみ値から切欠き底表面のひずみを外挿により求めた。図13は応力集中係数 $K_t = 2.1$ 試験片の切欠き底軸方向全ひずみ振幅の算出結果を示す。繰返し応力200MPaのとき ϵ_{ta} は0.16%, 400MPaで0.35%, 600MPaで0.57%および800MPaで0.88%が得られ、これを実測ひずみ値と比較して図14に示す。有限要素法による算出結果は実測値の破線上によくプロットされている。応力集中係数 $K_t = 3.1$ についても同様の算出を行い、図14に実測値と比較して示す。いずれの切欠き試験片も計算値と実測値はよく一致している。

したがって、回転曲げ切欠き試験片の低サイクル疲

図11. 回転曲げ低サイクル疲労強度に及ぼす切欠きの影響（全ひずみ振幅による整理）

図 12. 有限要素法による回転曲げ切欠き試験片の弾塑性解析方法

図 13. 有限要素法による回転曲げ切欠き試験片 ($K_t = 2.1$) の弾塑性解析結果の一例

図 14. 回転曲げ切欠き試験片の計算により求めた繰返し応力-ひずみ振幅と実測曲線の比較

疲労寿命は平滑試験片の軸力低サイクル疲労試験結果と、回転曲げ切欠き底に発生するひずみの弾塑性解析結果から容易に推定することができる。

5. 結 論

本研究では回転曲げと軸力低サイクル疲労強度の比較および回転曲げ低サイクル疲労における切欠き効果を検討した。得られた結論をまとめると以下の通りである。

(1) 回転曲げ低サイクル疲労強度を従来の一般的評価値である公称応力で整理し、軸力のそれと比較すると、軸力の場合引張強さ ($N_f = 1/4$ 回) を起点とするある勾配の $S-N$ 曲線で示されるのに対し、回転曲げの場合は引張強さを超える過大応力を負荷しても直ちに破壊することなく相当の繰返し数に耐え、低繰返し数側ほど軸力との差が大きくなる。この特異現象は切欠き材でもまた材料強度を変えても基本的には変わらない。この原因は試験片表面の軸方向ひずみ振幅の違いによるものである。

(2) 試験片表面の軸方向ひずみ振幅の実測値に基づき、それを評価値として回転曲げおよび軸力低サイクル疲労強度を整理すると両者は一本の直線で表され、低サイクル疲労強度、寿命は負荷型式によらず試験片表面の軸方向ひずみ振幅に支配されている。

(3) 切欠き試験片についても、本質的には切欠き底の軸方向繰返しひずみ振幅で整理することにより平滑試験片と同一直線で表わせる。

(4) 有限要素法を用いて回転曲げ切欠き試験片の低サイクル疲労における切欠き底のひずみ算出を試みた結果、実測値とよく一致した。したがって、回転曲げ切欠き試験片の疲労寿命は軸力平滑試験片の低サイクル疲労試験結果と、回転曲げ切欠き底に発生するひずみの弾塑性解析結果から容易に推定できる。

最後に、本研究を行うに当たり有益なご助言をいただいた九州大学工学部西谷弘信教授ならびに山口大学工学部幡中憲治教授に感謝申し上げます。また、切欠き試験片の有限要素法による弾塑性解析は当社機械技術部山村和人氏の御協力による。ここに重ねて感謝申し上げます。

文 献

- (1) 山本, 河本, 日本材料強度学会誌, 19-2 (昭59), 27
- (2) Nishida, Urashima, Ebara and Yamada, Proc., Int., Conf., on Fatigue, Corrosion Cracking, Fracture Mechanics and Failure Analysis, (昭61)
- (3) 西原, 榎木, 田賀, 機論, 5-20 (昭14) 1-34
- (4) 河本, 中川, 機論, 31-226 (昭41), 898
- (5) Manson S. S., Exp. Mech., 5 (昭40), 193
- (6) 幡中, 藤満, 機論, 810-11 (昭56), 223
- (7) 幡中, 藤満, 機論, 50-459 (昭59), 1795
- (8) 村上, 楠本, 機論, 39-319 (昭52), 780
- (9) 鶴戸口, 野末, 機論, 41-344 (昭50), 1052

討 論

〔質問〕 二 瓶 正 俊

〔科学技術庁金属材料技術研究所〕

(1) 異なった負荷形式の低サイクル疲労強度の比較は、平面曲げについては比較的容易に行うことができるが(付1)、回転曲げの場合、荷重とひずみの最大値の間に塑性変形による位相差が生じ、それが解析を難しくしている(付2)。回転曲げ荷重下の繰返し応力-ひずみ曲線を用いるにあたってその補正はなされているか。

(2) 図10のS-N曲線で、高サイクル(10^4 程度)でほとんど K_t の影響がなくなっているが、通常言われていることと傾向が逆のように思われる。理由をお聞かせ願いたい。

(3) 図11において、低サイクル側のばらつきを振幅変動法とコンパニオン法との差異によるとしているが、切欠試験片だけみても同様な傾向が見られる。ほかに原因は考えられない。

〔回答〕 (1) 補正はしていない。理由は低サイクル疲労寿命は位相差に関係なく試験片表面に繰返されるひずみ振幅に影響されると考えられ、軸力との比較のために公称応力との関係で整理した。

(2) ご指摘のとおり軸力疲労の場合には図3に見られるように、短寿命側で平滑材と切欠材の N_f の差が小さくなる傾向にある。これは疲労寿命に短寿命側ほど静的強度特性の影響が強く現れるためと考えられる。ところが回転曲げの場合、引張強さを超える繰返し応力(公称応力)下でも試験片は全断面が降伏することなく、短寿命側でも疲労の影響が強いと考えられる。その結果、平滑材と切欠材の疲労き裂発生寿命の差が短寿命側でより顕著に現れ図8のようになったものと思われる。なお高サイクル領域の結果も合わせてS-N曲線を整理すると、図8の線図の傾向はいくぶん変わる可能性はある。

(3) ご指摘のことについては、現段階では推測の域を出ませんので今後さらに検討させていただきたい。

〔質問〕 幡 中 憲 治〔山口大学工学部〕

次に示す3点につきご教示いただきたく存じる。

(1) 図6において、圧縮側立上り部を一致させたヒステリシス・ループから軸力繰返し応力-ひずみ曲線

を得たと記述されているが、これはどのような物理的意味をもつのか。なぜ、通常の方法(応力-ひずみ座標の原点に関して整理したループ群の先端を連ねる)で繰返し応力-ひずみ曲線を求めなかったのか。

(2) 図8は切欠材に関するものである。これに平滑材の N_c - N_f 関係をプロットするとどのようなになるか。データがあればお示し願いたい。

(3) 切欠底における $\log \epsilon_{pa}$ と $\log N_c$ の関係は平滑材のそれと同じ直線で近似できることが指摘されている⁽⁸⁾⁽⁹⁾。質問(2)とも関連するが、図11で $\log \epsilon_{pa}$ - $\log N_f$ 関係についても $\log \epsilon_{pa}$ - $\log N_c$ 関係と同様なことが成立するとお考えか。

〔回答〕 (1) ご指摘のとおり、通常は繰返し応力-ひずみ座標の原点に関して整理したループ群の先端を連ねる方法で、繰返し応力-ひずみ曲線を求めているが、本実験では引張側と圧縮側応力振幅の絶対値がほぼ等しいため、整理のしやすさからこのような方法を用いた。結果的には通常の方法で求めた繰返し応力-ひずみ曲線と、本法で求めたものとは変わらないことを確認しているが、必ずしも正当な整理方法ではないので、今後注意が必要と考えている。

(2) 平滑材については残念ながら N_c は求めている。図8の結果から推察すると、 K_t が小さいほど同一 N_f に対して N_c は若干大きくなる傾向にあり、平滑材は切欠材よりやや左上側にずれるものと思われるが、 N_c は可視き裂発生までの繰返し数と定義しているのでバラツキの範囲内に納まるものと考えられる。

(3) 図8に示すように N_c と N_f の間にはよい相関があり、平滑材もほぼ図中の式で近似される直線上にプロットされると考えられるので、 $\log \epsilon_{pa}$ - $\log N_c$ 間にもバラツキはあるものの直線で近似できるものと予想される。

〔質問〕 原 田 昭 治〔九州工業大学工学部〕

実用上重要な回転曲げと軸力低サイクル疲労寿命の相互関係について、平滑材および大小の切欠試験片を用いて系統的な実験を実施され、有用な知見を呈示されたことに敬意を表す。以下の点についてご教示いただきたい。

(1) 貴論文の大きな結論として、試験片表面に繰返される軸方向のひずみ振幅に注目すれば、負荷形式、試験片形状によらず、疲労寿命を統一的に解釈することが可能と述べておられる。その際、図10、図11および1496ページ左欄13行~21行めの記述とも関連し

(付1) 二瓶・今野・飯田、日造論、156(昭59)、458。

(付2) 西島・石井、機講論、No.790-13(昭54-4)、161。

付図 1 SM 50 平滑試験片の回転曲げ疲労における試験片表面ひずみ ε およびたわみ δ の繰返しに伴う変化

て、繰返し応力-ひずみ関係の的確な評価が問題になるものと思われる。平滑材(通常 $N_f/2$ での値を代表値とみなして評価)の場合にはともかく、切欠材の場合について、その評価法についてご教示いただきたい。

(2) 最近低サイクル疲労寿命を表面での微小き裂の発生、伝ばに注目して評価しようとする研究が盛んに行われている。大部分は平滑材に関するものであるが、貴論の切欠材の結果とそれらの研究結果との関連の見通しについて、ご見解があればご教示いただきたい。

(3) 図 4 において、回転曲げおよび軸力の結果ともに、 $N=10^3$ での疲労強度が K_t の増加とともに漸減して飽和する傾向を示している。このような傾向は単純にはどのように解釈すればよいか。

(4) 平滑材の低サイクル疲労では、一般に全荷重

行程中き裂は開口しており、き裂開口の影響は小さいといわれている。貴論ではき裂開閉口についての検討はされていないが、切欠材と平滑材の寿命を比較する際には留意すべき問題かと思われる。貴結論(3)と関連してき裂開閉口の観点からご見解があればご教示いただきたい。

〔回答〕 (1) 大変重要な質問と考える。実験装置の関係で繰返しに伴う切欠底ひずみの変化を疲労寿命の大部分の繰返し数まで、連続的に求めることができなかったが、別の平滑試験片の回転曲げ疲労試験結果(鋼種 SM 50, $\sigma_B 49.6 \text{ kgf/mm}^2$, 付図 1 参照)によると、繰返しに伴う試験片表面のひずみ変化とたわみ変化は負荷応力によって若干異なるが、10~20 回以下の繰返し数では大きなひずみおよびたわみ変化が見られ、繰返し数とともに安定した値を示している。切欠試験片の場合も本質的には同様な変化を示すと考えられるので、たわみの安定した時期(ひずみも安定していると考えられる)、例えば $N_f/2$ でのひずみ値を代表値に採用したほうがよいと考えている。

(2) 本研究ではご指摘の件については検討していないが、興味あるところなので今後検討したいと考えている。

(3) K_t の増加に伴って、時間疲労強度が漸減して飽和する傾向を示すということは、試験片の切欠底の繰返しひずみ振幅が K_t の増加に伴って漸増しほぼ一定値に近づくことを意味していると考ええる。

(4) き裂開閉口挙動については調査していない。