

# 半円形環状ノッチ・円孔重複切欠き付き丸軸の 回転曲げ試験 (第2報)

望月 太喜雄\*・福田 睦好\*\*

On the Rotary Bending Test of a Semicircular Notched Shaft with a Diametrical Hole. (No. 2)

by

Takio Mochizuki and Mutuyoshi Fukuda

## Abstract

This report offers the summary of the study on the fatigue fractures of the specimens by the preceding experiment.

- 1) The phenomenon that the last part deviates from the center of the fracture also happens in the case of plain specimens as in sharply notched ones, although it is not obvious.
- 2) About 89% of fatigue cracks of a semi-circular notched specimens with a hole, approximately tends to travel in a slightly helical manner or so.

## 破断面 (Fracture) についての考察

### (i) 一般的考察

材料が静荷重を受けて破壊する場合には、大きい塑性変形を生じた後に破壊する場合(延性破壊)と、殆んど塑性変形を起さないで破壊する場合(脆性破壊)とがあるが、いずれの場合も荷重がある値に達した後に全断面が瞬間的に破断する。従って静荷重の破壊には全断面が影響する。これに反して疲れ破壊の場合には荷重がある回数繰返えされた後に材料の極めて小さい部分だけ微細な亀裂を生ずる。この亀裂の底部は応力集中のために応力が上昇するので、その後の荷重の繰返しによって亀裂は極めて徐々に進展し、残部の断面積は減っていくが、このようにして残りの部分の応力が静荷重破壊応力に等しくなると次の荷重で瞬間的に破壊する。この最後の瞬間的破壊は疲れ破壊ではなく、脆的または衝撃的な破壊である。

このように疲れ破壊は極めて小さい部分の応力によって決定されること。また疲れによる破壊部は巨視的な塑性変形を伴わない(例えば断面積の減少は殆んど生じない)脆性破壊で破面も滑らかであることが特長である。

一般に破断面は貝殻状の模様を呈する。しかし、荷重振巾と荷重繰返し速度が終始一定である場合は貝殻状の

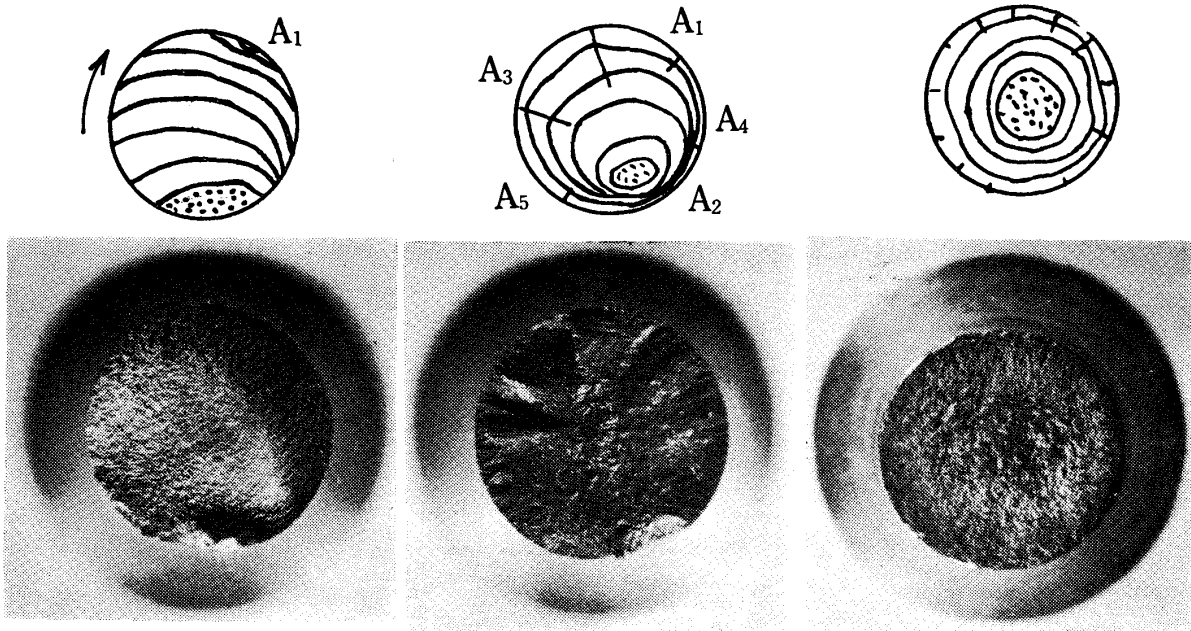
模様を生じない。疲労断面は一般に亀裂の進展によって生じた部分と静的に生じた部分との両者よりなっている。

亀裂の進展によって生じた部分は比較的平滑な表面をもっており、いわゆる貝殻状を呈しているのに対し、静的に生じた部分は凹凸の多い粗い破面を呈している。例えば、Fig. 1 (d) にみられるごとく周辺は暗褐色の輝きをもち極めて滑らかで、最終破壊部は凹凸状を示し、中間部は鈍い暗色を呈し平らである<sup>2)</sup>。亀裂の進展によって生じた部分と静的に生じた部分の面積の大きさの割合は作用する繰返し応力の大きさによって異なる。すなわち、作用する繰返し応力が耐久限度に近く比較的小なるときは亀裂の進展によって生じた部分が大きくなり、逆に作用する繰返し応力が耐久限度よりはるかに大なるときは静的に生じた部分が大きくなる。Fig. 1の(a)(c)がこの関係を明瞭に示している。

本実験は殆んど切断するまで連続運転を行なったので貝殻状模様はできない筈であるが、Fig. 1 (a) など亀裂の進行方向に直角に多数の小さいしまが認められる。拡大写真にとればなお一層明瞭に分る。これはやはり亀裂の進行が小さいけれど段階的であったことを示す。鋳鉄の如き場合は亀裂の進展によって生じた破面がかなり凹凸の多い粗い面となるので静的に生じた破面の部分を明瞭に判別することは一般に困難であり、この点軟鋼の場合と異なる。

\* 宇部工業高等専門学校機械工学教室

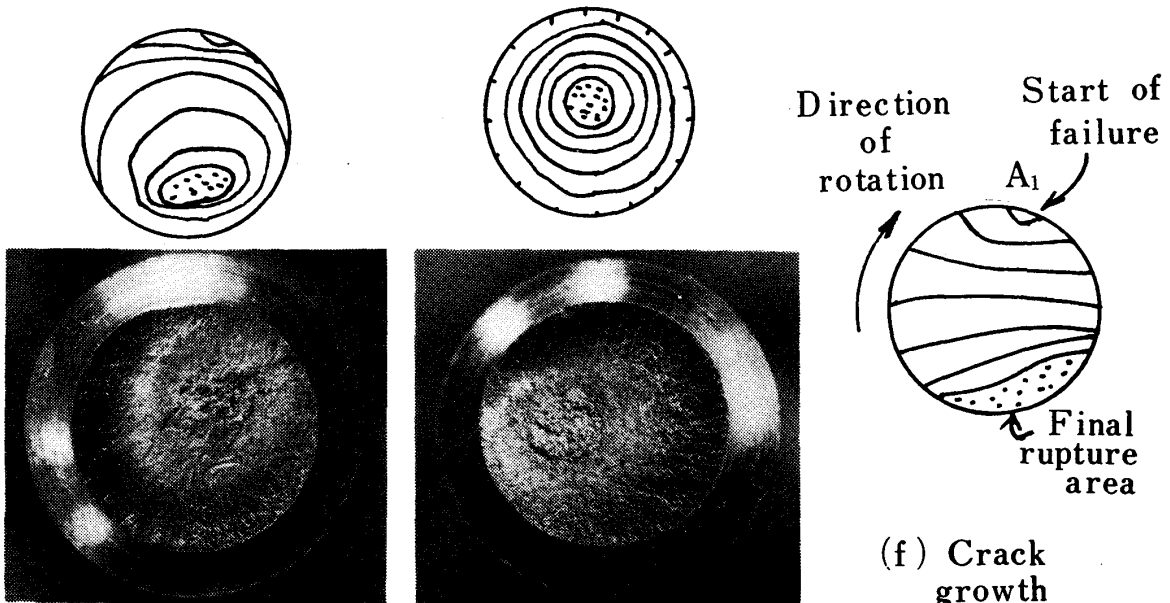
\*\* 前宇部工業高等専門学校機械工学教室



(a) Low nominal stress  $\sigma = 22.4 \text{ kg/mm}^2$   
 $N = 4.3774 \times 10^6$   
 No (or Low) Stress Concentration (plain Specimens)

(b) Intermediate " "  $\sigma = 24.03 \text{ kg/mm}^2$   
 $N = 0.6227 \times 10^6$

(c) High nominal stress  $\sigma = 32.2 \text{ kg/mm}^2$   
 $N = 0.0015 \times 10^6$



(d) Low nominal stress  $\sigma = 14.50 \text{ kg/mm}^2$   
 $N = 1.8075 \times 10^6$   
 High Stress Concentration (Sharply notched specimens)

(e) High nominal stress  $\sigma = 16.10 \text{ kg/mm}^2$   
 $N = 1.1075 \times 10^6$

(f) Crack growth pattern

Fig. 1 Fatigue Fractures

また，金属材料の疲れ現象<sup>2)3)</sup>は次のように説明されている。(i)わずかな加工硬化を伴って局部的に結晶にすべりが起る過程。(ii)超顕微鏡的な亀裂が発生する過程。(iii)超顕微鏡的な亀裂が可視的な亀裂に生長して破断する過程に分けられる。負荷応力の大きいときには(i)の過程は短時間で(ii)の過程に移り，負荷応力の小さいときには(i)の過程は比較的長時間で全寿命の20%程度を占めることもあるといわれる。破面の周辺部は上述の疲れ現象<sup>3)</sup>の結果，金属組織の変化の現われとして特殊な輝きを呈するのではなからうかと解釋される。

### (ii) 平滑材と切欠き材との比較

一般に疲労亀裂の進行は，材料の表面が平滑であり，なんらの応力集中部を有しない場合と，切欠きなどによる鋭い応力集中部を有する場合とは可成り趣が異ってくる。すなわち平滑材の場合は1箇所に亀裂が発生するとその先端に生ずる鋭い応力集中のため，その亀裂は極めて急激に成長進展し，直ちに破断することとなる。しかし，形状係数が分岐点より大きい切欠き材では切欠き底にいわゆる停留亀裂が生じ，その応力状態を保つ以上は回転数が増しても亀裂は進行せず，結局破壊しない。



No. 26

$$d_0 = 1.5\phi$$

$$\alpha = 3.16, \beta = 2.2$$

$$\sigma = 10.92 \text{ kg/mm}^2, N = 14 \times 10^6$$

Fig. 2

Fig. 2はNo.26に生じた亀裂のカット写真である。少し大きく亀裂が見えるようにしてある。No.26の場合 $10 \times 10^6$ の繰返し数における亀裂が $14 \times 10^6$ においても全然変化を示さなかったもので， $\alpha$ の値より推定して停留亀裂ではないかと考えられるがNo.27, 28が破断しているので，一方，供試試験片の等質等方性，製作の精度なども関係するわけであるが，停留亀裂であると断定するのはむづかしいようである。

切欠きなどの鋭い応力集中部を有する場合は1箇所に亀裂が発生してもその先端に生ずる応力集中による効果は最初より存在していた切欠き底における応力集中による効果と大差なく，亀裂の成長はきわめて緩慢であり，もちろん最初より存在していた切欠きが鋭い場合ほど亀裂の成長も一層緩慢である。平滑材の場合は一般に，亀裂発生箇所はFig. 1(a)のA<sub>1</sub>点の如く1点であり，その点よりほぼレンズ形をなして亀裂が成長する<sup>4)</sup>といわれる。確かにその傾向は極めて強いが，(b)の如き中間応力値をとり始めると色々な方向より中心部へ向って割れ目が入ってくる場合も生じ，疲労限より極めて大きい応力が加わり始めると上記の傾向を有しながら，切欠き材にもみられるように，(c)図の如く静的破断部（最終破壊部）は中心に生じていることがはっきり認められるが，平滑材の場合は(c)図の如く幾分判然としない所が切欠き材と区別される。切欠き材の場合は静的破断部は作用する応力の減少につれて，比較的規則正しく中心より偏心してくることが分っている。静的破断部の形状は中心できれいな円形を保ち低応力につれて偏心すると共に楕円形に近づく<sup>5)</sup>。この様子はFig. 1(d), (e)にも望見できる。(d), (e)においては全円周上，ほぼ一様に亀裂が成長しているものと認められる。この理由は平滑なる表面を有する場合は前述の如く円周上の1点にて亀裂が発生すると急激に成長するため，円周上のほかの点より亀裂の発生する余裕がないためと考えられ，また切欠きを有する場合は円周上の一点に亀裂が発生してもそれが容易に成長せず，したがって円周上の他の多くの点よりも亀裂の発生が起り，結局全円周ほぼ一様に亀裂が進展した様相を呈する。また高応力の場合，静的破断部が中心部附近に残る理由は，繰返し応力の大きい場合は周縁部に存在する多くの欠陥より亀裂が一様に成長するのに対し，応力の小さい場合は周縁部の一部に存在する特に大きな欠陥のみが亀裂を発生せしめ，比較的小さい欠陥は亀裂を発生せしめるに至らないためと解せられる。切欠き材，平滑材をとわず，低繰返し応力の場合は輝きをもった周縁部，凹凸状の静的破断部，中間部の暗色部の3つの地帯より構成されているように見えるが，応力が大きくなるにつれ後者2つに近づくようにも解せられる。Fig. 1の(b), (c)にその状態がうかがわれる。

### (iii) 重複切欠き材についての考察

つぎに半円形環状ノッチ，円孔付き重複材(Fig. 3, 4)について考察しよう。前述の平滑材，単なる半円形

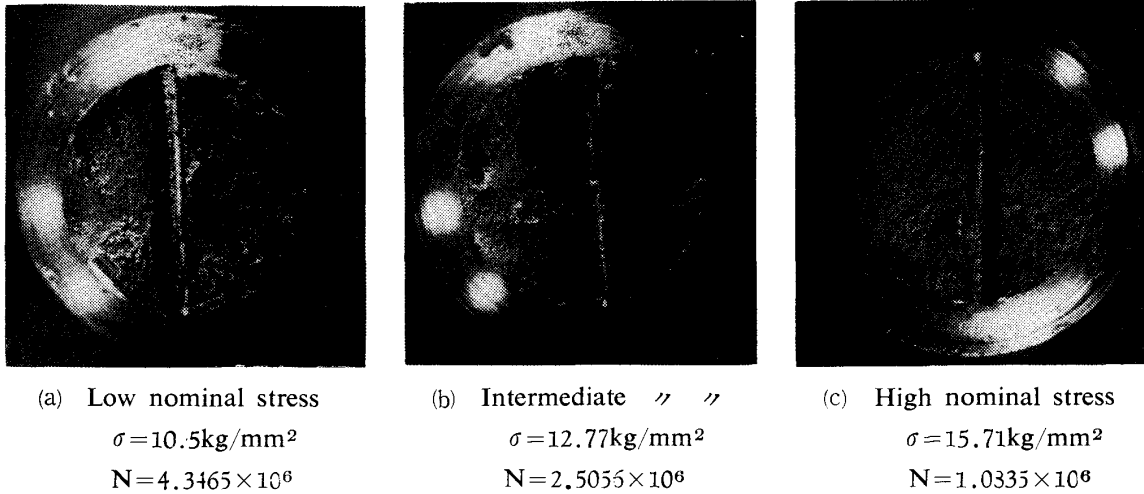


Fig. 3 Fatigue fractures of semi-circular notched specimens with a 1.0mm hole.

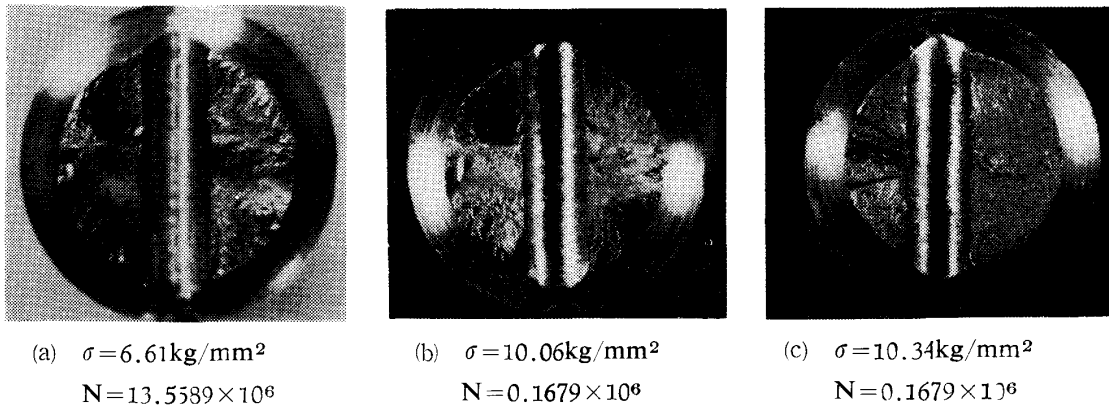


Fig. 4 Fatigue fractures of semi-circular notched specimens with a 2.5mm hole.

環状ノッチ材の場合にみられた性状，すなわち周辺部が高繰返し応力の場合，破断面が緻密化する傾向があったが，Fig. 3, 4 の場合はこれが極めて明瞭に認められる。亀裂は殆んどの場合，円孔縁の両端より大体同時に発生して成長している様子が見える。しかし，亀裂進行速度は内部の組織状態の影響を受けて必ずしも同一速度ではなく，静的破断部が中央より外れている場合も多い。それは静的破断部附近の円孔溝が大きくふくれていることから容易に認められる。しかし中には左，右両面の亀裂進行状態が全然異っているものも見受けられた。また最大応力集中部が円孔縁より少し下った所に生じることが Frocht<sup>6)</sup> により認められているが，確認することができなかった。ただ考えられることは外径  $D$  に対する円孔径  $d$  の寸法が極めて小さくなれば，他の影響を打ち消して純粋に最大応力集中部が現われ易くなるのではないかと推察される。

ノッチ底の円孔縁に生ずる亀裂は必ずしも最小断面谷底径の位置に生じていないのが極めて多い。すなわち，

約90%のものは軽い螺旋形の破面<sup>7)</sup>をしているようにみえる。その1つの例を Fig. 5 に示す。またフィレット付き丸棒が直径方向にいくつかの貫通孔をもつ場合，疲



No. 24  
 Fig. 5

労亀裂の破面はやや螺旋形をなし，かつ ratchet mark を形作ることが報告されている<sup>5)</sup>。これは内部摩擦またはトルクのためと解されている。フィレットが鋭くなれば余り現われないようであるが，本実験の重複切欠き材の場合も No.21, 24, 30 (共に  $d_0 = 2.0$ ) に ratchet mark らしきものが現われており， $d_0 = 1.0$  の部材には現われていない。

Fig. 6 は疲労破断面と引張破断面との比較を示す。引

張り破断面が大きく塑性変形を生じ断面積も大きく減少しているのに対し，疲労破断面には断面積の減少は殆んど認められない。破断面も疲労破断面は滑らかであるのに対し引張り破断面は全然異った様相を示す。Fig. 7 は疲労および引張破断面を横方向より比較したものである。(a) (b) は半円環状ノッチ材で (a) は疲労，(b) は引張による破断面を示す。(a) は全然伸びは認められず殆んど直線的に破断しているのに対し (b) には著し

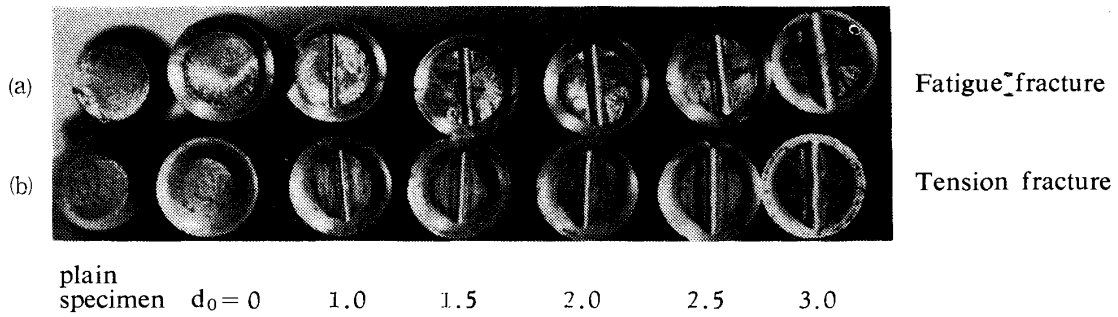


Fig. 6 Fatigue fracture compared with tension fracture.

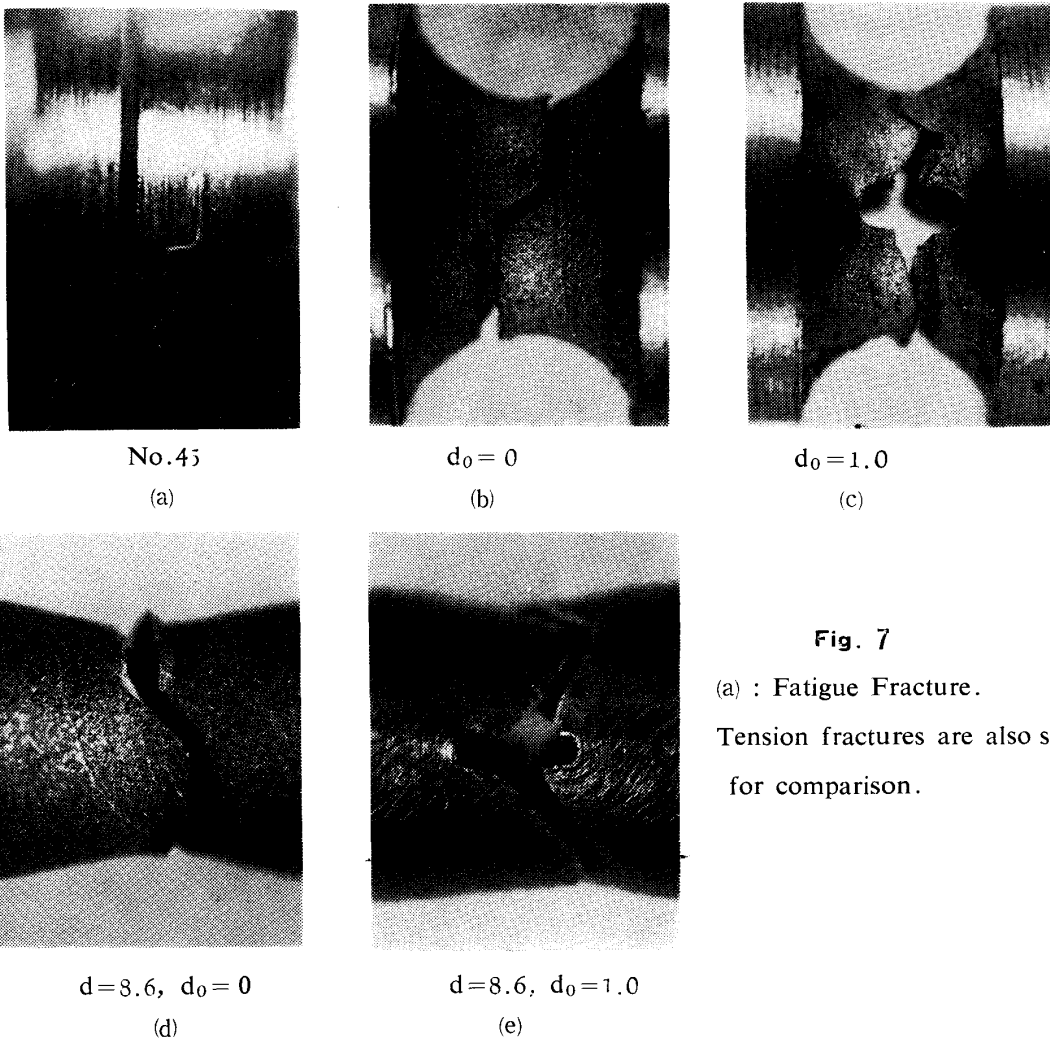


Fig. 7

(a) : Fatigue Fracture.  
Tension fractures are also shown for comparison.

い塑性変形が見られる。(c)はさらに  $d_0 = 1.0\phi$  の孔をもつ重複切欠材の引張破断写真で (b) に比較して伸びが少い。これは切欠きのため剪断すべりが丸軸の如く生ずることができぬため剪断抵抗を生じ従って抗張力も大きい値となる。降伏点も現われず鑄鉄の引張破壊の如き  $\epsilon-\sigma$  線図を画く。Table 1 に  $d_0$  に対する  $\sigma_B$  の変化を示す。  $d_0 = 1.0$  のとき最大値を示した。(d) は平滑材、(e) は平滑材に 1.0 の円孔をあけたもので共に引張破断を示す。(e) はすべり線が軸と  $45^\circ$  の方向に沢山生じ (c) と同様伸びは極めて小さい。

Table 1 Tension test of specimens.

	A ( $d=12.08\phi$ )	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>
$d_0$ (mm)	0	0	1.0	1.5	2.0	3.0
$\sigma_B$ (kg/mm <sup>2</sup> )	45.41	61.67	64.70	63.15	61.17	56.78

破断面の硬度を調べる目的でフェライトを検出し、ピッカーズ硬度計を用いて押込み荷重50gで前後0.5mm間隔で測定してみたが、はっきりした結果を得ることはできなかった。

### ま と め

1) 平滑材においても円周切欠き材と同様、高繰返し応

力になると最終破断部が中心に生じる傾向が認められた。しかし、円周切欠き材の場合ほど明瞭ではない。

2) 重複切欠材の場合低繰返し応力ほど破断が荒れ模様となり、高繰返し応力ほど緻密化する傾向をもつ。

3) 重複切欠材の破面は必ずしも最小断面谷底径の位置に生じないで、軽い螺旋線を画くようにも推定される。

終りに、種々有益なる助言を賜りました山口大学工学部助教授大野元明先生、および本実験に終始熱心に協力をいただいた卒論研究生内田篤男・鳥井晴介・縄田治・長野良基の諸君に深甚なる謝意を表します。

### 参 考 文 献

- 1) 川田雄一：金属の疲労と設計，オーム社。
- 2) 日高・福田：宇部工業短大・高専研究報告，1巻1号。
- 3) 田中：機械学会論文集，26，164（昭35—4）489。
- 4) 日本材料学会：金属と疲労，丸善。
- 5) M. Hetenyi Handbook of Experimental Stress Analysis John Wiley & Sons.
- 6) M. M. Frocht Studies in Three Dimensional Photoelasticity, Trans ASME, V.66, 1944, p.A-10.

(昭和43年3月26日受理)