二つ以上の錐孔を有する鋼試験片の回転 曲げ疲労について*

森 島 鎮 雄** 田 中 勉**

On the Rotating Bending Fatigue of Steel Specimens with Two Holes and Over

by

Shizuo MORISHIMA and Tsutomu TANAKA
(University of Ōsaka Prefecture)

We carried on the rotating bending fatigue test of steel specimens with two holes and over. Specimens tested have radial holes drilled under the different conditions reciprocally, in parts of A and B types. Every specimen of A type has each hole axis on the same longitudinal section. Every specimen of B type has each hole axis on the same cross section. We investigated the effects that the conditions of drilled holes and the interference of mutual holes had on the fatigue strength. The results obtained are as follows;

(1) In A type, the fatigue limits are raised slowly with the increase of the number of holes up to six holes in each pitch of holes 2 mm, because of stress relaxation caused by the interference of mutual holes.

(2) In the hole pitches of 2 mm and of 6 mm, the fatigue limit for 2 mm is higher than that for a single hole, but the fatigue limit for 6 mm comes almost to the same value as that for a single hole. In the pitch of 6 mm, the stress relaxation is not caused by the mutual holes.

(3) In B type, the fatigue limits are reduced with the increase of maximum stress caused at holes under repeated load. In the same value of maximum stress, the time strengths by overstress are reduced with the increase of the number of holes.

(4) In comparison of the mechanical properties of various specimens subjected to repeated load and those of each virgin specimens, we obtained the effects of conditions of drilled holes upon the degree of fatigue progress.

(Received July 16, 1962)

1. 緒 言

一般に回転曲げ荷重など繰返荷重を受ける機械の主軸に、設計上の必要によりねじ孔、油みぞ孔などがあけられた場合、それらの切り欠きとみなされる孔部分から疲労が進展して、ついに破壊に至ることは、しばしば経験することである。筆者らはさきに種々寸法を異にせる各一つの錐孔を有する軟鋼試験片の回転曲げ疲労¹⁾についての実験結果を報告したが、今回は二つ以上の錐孔を有する鋼試験片の回転曲げ疲労について実験した結果を報告する。

本実験に用いた試験片は、標準試験片に二つ以上の錐孔を同一縦断面と同一横断面に種々条件を異にしてせん孔したものである。これら試験片のせん孔条件が、

疲労強度にどのような影響を及ぼすかについて、検討を加えたものである。

2. 供試材および実験方法

(I) 供試材

実験に使用した材料は、直径 19 mm の熱間圧延棒

Table 1 Chemical compositions of material (%)

C	Mn	Si	P	S
0.51	0.65	0.19	0.020	0.015

Table 2 Mechanical properties of material

Yield point (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Fatigue limit (kg/mm ²)	Elongation (%)	Reduction of area (%)	Vicker's hardness
46.1	75.9	29.8	15.4	47.2	224

* 原稿受付 昭和37年7月16日, 当協会第11期総会講演会にて講演(昭37.5)

** 正員 大阪府立大学

鋼で、その化学成分を Table 1 に、機械的性質を Table 2 に示す。

(II) 試験片

上記材料より平行部直径 12 mm, 平行部長さ 25 mm の標準試験片を作り、表面を研磨仕上し、せん孔後 800°C で真空焼なましを行なった。試験片は A (同一縦断面にせん孔した場合) と B (同一横断面にせん孔した場合) の二つの型に分けた。Fig. 1 と Table 3 および 4 は、実験に使用したすべての試験片のせん孔条件を示したものである。Table 3 において、A-1 は孔数を変えたもの、A-2 は孔ピッチを変えたもの、A-3 は追加孔寸法を変えたものである。

(III) 実験方法

上記の各種試験片を用いて、小野式回転曲げ疲労試験機によって疲労試験を行なった。おのおの S-N 曲線より求めた疲労限度と過大応力による時間強度および過大応力による疲労き裂の進展状況などに及ぼす各せん孔条件の影響について比較検討した。疲労き裂の進展状況を知る方法として、A 型については、疲労破断せる試験片の破断しなかった孔にどの程度のき裂が進展しているかを知るため、また B 型については、孔数および孔の相対位置によりき裂の進展状況にどの

Fig. 1 Illustration of specimens

ように影響するかを研究するため、A 型は疲労破断せる試験片を、B 型は疲労破断前の試験片を、いずれも電気炉で加熱(温度 300°~350°C, 約 1 時間保温)して疲労き裂面を酸化(熱着色)させた。それらについて、A 型は孔の反対側より手のこぎりで切り込みをつけ、手ハンマーでその部分を衝撃破断させた。B 型は炉より取り出したものをそのまま 30 t アムスラー材料試験機により静引張破断させた。

3. 実験結果および考察

(I) A 型実験結果

(i) 孔数を変えたもの Fig. 2 は、A-1 試験片の疲労試験より求めた S-N 曲線である。図において縦軸に示す繰返曲げ応力は孔部を考えない公称応力で示した(以下同じ)。図によれば、1 孔の疲労限度 14・2

Table 4 B-type specimens

Type	Hole			
	Dimension		Number	Location θ degree
	Dia. d (mm)	Depth h (mm)		
B-1	1	3	1	—
B-2-30	"	"	2	30
B-2-45	"	"	"	45
B-2-90	"	"	"	90
B-2-180	"	"	"	180
B-3-45	"	"	3	45
B-3-90	"	"	"	90
B-4-90	"	"	4	90
B-8-45	"	"	8	45

Table 3 A-type specimens

Type		Hole								
		Dimension				Number		Pitch		
		Main		Additional		Main	Add.	P (mm)	P ₁ (mm)	P ₂ (mm)
		Dia. d (mm)	Depth h (mm)	Dia. d' (mm)	Depth h' (mm)					
A-1	A-1-1	1	3	—	—	1	0	—	—	—
	A-1-2	"	"	1	3	"	1	2	—	—
	A-1-3	"	"	"	"	"	2	"	—	—
	A-1-6	"	"	"	"	"	5	"	—	—
	A-1-10	"	"	"	"	"	9	"	—	—
A-2	A-2-2	The same as A-1-2								
	A-2-6	1	3	1	3	1	1	—	6	—
	A-2-2-6	"	"	"	"	"	2	—	2	6
A-3	A-3-1	The same as A-1-2								
	A-3-0.5	1	3	0.5	1	1	1	2	—	—

kg/mm² (平滑材の疲労限度 28.9 kg/mm² に対して切欠係数 ($\beta_K=2.04$) に対して, 2, 3, 10孔は 14.7 kg/mm² ($\beta_K=1.97$), 6孔は 15.3 kg/mm² ($\beta_K=1.89$) を示した. またこの $S-N$ 曲線の過大応力による破断部分を示す傾斜線は 1孔, 2孔, 3孔, 10孔, 6孔の順序にごくわずかつ右にずれておる. Fig. 3 は, これら孔数の増加に伴う過大応力による時間強度を明示するため, 横軸に孔数を縦軸に破断に至る応力繰返数をとり, その関係を線図に示したものである. 上記実験値にはある範囲において, ばらつきがあるが, 同条件で行なった 4 回の実験値の相加平均により示した. (以下の実験値も同じ). 実験結果では, 6孔までは孔数が増すに従いが, 破断回転数も増加の傾向を示しているが, 10孔になると 6孔よりわずかに低下する. 孔数

が増加するにしたがって, 疲労限度および時間強度が上昇する一般的傾向は, 当然孔相互干渉による応力集中緩和のためと考えられるが, また同一負荷に対して, 各孔における疲労き裂進展のエネルギーの総和を一定と考えると, 小数孔のほうが多数孔より進展が速いことは推察することができる.

(ii) 孔ピッチおよび追加孔寸法を変えたもの

Fig. 4 は A-2 および A-3 の各種試験片の疲労試験の結果を $S-N$ 曲線に示したものである. 疲労限度において, 孔ピッチ 2 mm の場合は, 14.7 kg/mm² で 1孔の場合の 14.2 kg/mm² に比べてわずかに高いが, 孔ピッチ 6 mm の場合および孔ピッチ 2 mm の場合でも直径 0.5 mm, 深さ 1 mm の追加孔の場合では, 1孔の場合と同値の 14.2 kg/mm² を示した. Fig. 5 は

Fig. 2 $S-N$ Curves of specimens (Type A-1)

Fig. 4 $S-N$ Curves of specimens (Type A-2, A-3)

Fig. 3 Effect of the number of holes upon the number of cycles to fracture under overstresses

Fig. 5 Effect of pitch of holes upon the number of cycles to fracture under overstresses

Fig. 3 と同様の方法で過大応力による時間強度の関係を図示したものである。孔ピッチ 6 mm の場合は、時間強度においても、1 孔の場合とほとんど変わらないことが示された。また、3 孔で孔ピッチが 2 mm と 6 mm の場合は疲労限度、時間強度はともに 1 孔の場合とほとんど変わらず、実験を行なった試験片はすべて 6 mm 隔たった一端の孔で破断した。

(iii) 非破断孔のき裂の進展状況 疲労破断せる試験片について、破断しなかった孔に、どの程度のき裂が進展したか、また多数孔の場合、中央部の孔と端部の孔とでは、疲労き裂の進展に相違がみられるかどうかを知るため、破断せる 10 孔試験片の中から、2 の (Ⅲ) に述べた方法によって、非破断孔のき裂の進展状況を観察した。Photo. 1 は破断せる端孔と、その孔から 5 番目および 10 番目の破断しなかった孔におけるき裂の進展状況を示したものである。写真により 5 番目の孔のき裂は 10 番目の孔のそれよりも少ないことがみられた。本実験で行なった試験片のうち、ほとんどのものが端孔で破断したことは、Photo. 1 に示したき裂の進展状況を裏づけるものである。Photo. 2 は、2 孔および 3 孔において二つの孔で同時に破断したもので少数のものにみられた。以上の実験結果を従来理論的にまた実験的に数多く行なわれている 1 円孔および多円孔の形状係数の面から検討する。まず、無限板に無限個の円孔が引張荷重方向に 1 列に並んでいる場合、孔径と孔ピッチの関数として理論計算より求めた形状係数 α_K を、Howland の計算図表より求めれば、本実験の孔径 1 mm、孔ピッチ 2 mm の場合は 2.4、また孔径 1 mm、孔ピッチ 6 mm の場合は、

1 孔の場合とほとんど変わらず 3 となる。すなわち、孔ピッチ 6 mm の場合は、相互孔の干渉による応力緩和の影響はほとんどみられないことになる。また、村上、川辺両氏の引張荷重方向に 1 列に 2 円孔、3 円孔、4 円孔および 5 円孔を有する各帯板の光弾性実験の結果によれば、1 円孔の形状係数 $\alpha_K=2.0$ に対して、2 円孔の場合は、孔ピッチと孔直径との比が 3.4 になると、応力集中度は 1 円孔の場合とほとんど同じになる。また、3 円孔の場合は、同じ比に対して両端孔は $\alpha_K=1.9$ 、中央の孔は 1.8 となり、いずれも相互孔の干渉による応力緩和の影響はきわめてわずかになる。本実験条件は Howland の理論計算や引例せる実験の条件とは同じではないが、実験結果は上記の理論計算値や実験による応力集中度の傾向に大体従っていることが認められた。

Photo. 2 Unusual fractures of specimens with 2 holes and with 3 holes caused by repeated loading

Photo. 1 Growth of cracks around each hole of specimen with 10 holes ruptured at $N=723\,800$ under repeated stress 20.0 kg/mm^2

(II) B型実験結果

(i) 疲労限度 Fig. 6 はB型の各種試験片の疲労試験の結果を $S-N$ 曲線に示したものである。また、Table 5 には次の数値を示した。断面係数は孔部を最上に置いた場合の値である。 σ/σ_0 は各種試験片に回転曲げ荷重を加えた場合、1回転中に孔部に生起する最大応力を、同荷重下の平滑材に生ずる最大応力の倍数で示したものである。最大応力を生ずる場合の孔の位置は、最上または最下にきたときであるが、B-3-45 では中の孔に対して、B-3-90 では両端の孔に対してこのことが適用される。 $\alpha_K \cdot \sigma/\sigma_0$ は各種試験片の孔部に生ずる応力集中の影響を考えた場合の最大応力を同一荷重における平滑材の最大応力の倍数で示したものである。この場合の形状係数 α_K は Frocht 氏の実験結果を適用した。同氏の行なった貫通横孔を有する丸軸の曲げにおける光弾性実験の結果によれば、本実験の場合の形状係数 α_K は 2.48 となる。表に示す順位は、これら最大応力の小なるものからの順位である。実験結果により本表に示した疲労限度は、大体この順位に従っていることがわかる。

Fig. 6 S-N curves of B-type specimens

Table 5 Maximum stresses calculated and fatigue limits of B-type specimens

Type of specimens	Modulus of section (mm²)	σ/σ_0	$\alpha \cdot \sigma/\sigma_0$	Order	Fatigue limit (kg/mm²)	Notch factor β_K
Smooth	170	1	1		28.9	1
B-1	156	1.09	2.69	1	14.2	2.04
B-2-30	145.5	1.17	2.89	4	13.0	2.22
B-2-45	148.5	1.14	2.84	3	13.6	2.13
B-2-90	156	1.09	2.70	1	14.2	2.04
B-2-180	149	1.14	2.82	2	13.6	2.13
B-3-45	141	1.21	2.99	5	13.0	2.22
B-3-90	149	1.14	2.82	2	13.6	2.13
B-4-90	149	1.14	2.82	2	13.0	2.22
B-8-45	129	1.32	3.27	6	12.4	2.33

(ii) 過大応力による時間強度 Fig. 6 の $S-N$ 曲線において、過大応力により疲労破断した傾斜部を検討する。B-2-90 の疲労限度は、1孔の場合と同値で 14.2 kg/mm^2 であるが、B-2-90 の傾斜部は、明らかに1孔の場合より左にずれている。すなわち、時間強度は1孔より小なることを示している。また、B-2-30, B-3-45, B-4-90 は疲労限度はいずれも 13.0 kg/mm^2 であるが、これらの傾斜部は、B-4-90 は B-2-30, B-3-45 より左にずれており、時間強度はこの3者の中では一番小なることを示している。Fig. 7 は Fig. 3, 5 と同様の方法で、せん孔条件の時間強度に及ぼす影響を図示したものである。Fig. 8 は、B-4-90 の1サイクルにおける各孔の応力の変動を示したものである。四つの孔の各応力波形はそれぞれ 90° の位相のずれをもつ同じ波形で示される。二つ以上の同一波形を有する場合、最大応力が疲労限度以内であれば、その中のいずれか1本の波形について考えればよいが、過大応

Fig. 7 Effect of the number and locations of holes upon the number of cycles to fracture under over stresses

Fig. 8 Stress produced in one cycle of B-4-90

力における時間強度では、各孔に対するすべての応力波形について、すなわちその数と位相のずれについて考えねばならない。その理由は、疲労限度以内では一つの孔がその繰返応力で破壊しないものなれば、同条件の他の孔についても当然同じことがいえるわけであるが、過大応力では各孔において疲労き裂が発生し、進展してついに破壊に至るものであるから、孔数の多いほど時間強度は低下するわけである。B-2-180, B-3-90, B-4-90はいずれも最大応力は同値である(Table 5 による)が、B-4-90は他の二つよりも時間強度の低下がみられる。また、Fig. 6によれば、B-8-45は

過大応力の増大に伴い時間強度は加速度的に低下する。次に位相のずれについては、B-2-30のように二つの波形の項点が接近せる場合は、相互孔の疲労き裂の進展が加速度的に作用しあうため、位相が 90° 以上の場合に比べて時間強度の低下が考えられる(き裂発生前においては相互孔の応力緩和により反対の影響が考えられる)。本実験結果において、B-2-30がB-2-90, B-2-180に比べて時間強度の低下せるゆえんは、最大応力の差によるとともに、位相のずれの影響も無視できないものと考えられる。

(iii) 過大応力による疲労の進展 B型の各種試験片について、過大繰返荷重による疲労の進展度を知るため、まず疲労前の試験片を静引張荷重で破断し、引張強度、絞り、破断に要した仕事量を求めた。この結果、孔数が増加するに従い、引張強度は上昇し、絞りは減少する傾向がみられた。これは切り欠きによる脆性化のためである。さて、本実験において繰返応力 17.6 kg/mm^2 、繰返数190 000前後と繰返応力 22.4 kg/mm^2 、繰返数190 000前後の2通りの荷重を受けた各種試験片を静引張荷重で破断して、引張強度、絞り、仕事量を求めて疲労前におけるそれらの値と比較した。Fig. 9はこれらの実験結果を図示したものである。実験の結果、繰返応力 17.6 kg/mm^2 の場合は、各種試験片の引張強度は疲労前よりわずかに高い傾向を示したが、絞りと仕事量とはかなり低下した。これはき裂発生前の結晶面のすべりによる硬化の状態によるものと思われる。繰返応力 22.4 kg/mm^2 の場合は、き裂が発生し、しかも相当進展せる状態にあるので、引張強度、絞り、仕事量ともかなりの低下を示した。

Fig. 9 Effect of the number and location of holes upon the degree of fatigue progress under over stresses

Photo. 3 Fractures of B-type specimens ruptured by static tensile load after run of about 190 000 cycles (Except. B-4-90-N=142 200, B-8-45-N=56 400) of repeated stress 22.4 kg/mm^2 (Fractures are colored by heating)

疲労進展度は対称にあげられた B-2-180 の場合は比較的小さく、B-2-30, B-3-45 のように非対称でかたよってあげられた場合が著しいが、前述の時間強度の結果からみて当然である。Photo. 3 は、繰返応力 22.4 kg/mm^2 の場合の熱着色による各種試験片の破断面を示したものである。き裂は孔の両側の口から発生して、円周に沿いつつ扇形のふちから内部に進展していくことがみられた。B-2-30 では2孔にはさまれた部分は完全にき裂がはいっていた。また、B-3-45 では、中の孔が両端の孔よりき裂の進展が大であり、また B-3-90 では、両端の孔が中の孔よりき裂の進展が大であるが、これは (II) (i) で述べたことを裏づけるものである。

4. 総 括

試験片の同一縦断面と同一横断面とに、それぞれ孔数および孔の相対位置を変えて、錐孔をあけた各種試験片について、回転曲げ疲労試験を行なった。各種試験片の疲労強度に及ぼすせん孔条件および相互孔の干渉による影響について検討した。実験結果を要約すれば次のようである。

(1) 同一縦断面に孔ピッチはいずれも 2 mm で、孔数を 1, 2, 3, 6, 10 と変えた場合、疲労限度は相互孔の干渉による応力緩和により、6孔までは孔数の増加に伴い上昇するが、10孔になると多数孔による弱化的ため2孔、3孔の列まで低下した。

(2) 同一縦断面に孔ピッチ 2 mm 、 6 mm のそれ

ぞれ2孔をあけた試験片の疲労限度は 2 mm の場合は1孔より高いが、 6 mm になると1孔とほとんど変わらない。また、孔ピッチ 2 mm と 6 mm の3孔においては、いずれも 6 mm 側の端孔で破断した。これは相互孔による応力集中の緩和とその影響の消滅によるものである。

(3) 同一横断面における孔数および孔軸角度を変えた試験片について疲労試験を行なった。疲労限度は1サイクルにおいて、孔部に生ずる最大応力の順序に従っているが、過大応力による時間強度は、疲労限度は同じ程度でも、孔数の増加に従い低下の傾向を示した。

(4) 過大応力の繰返しを受けた前項の各種試験片を静引張荷重によって破断した。その試験結果を疲労前の引張試験結果と比べその疲労進展度を調べた。孔が非対称でかたよってあげられた場合の疲労進展度が著しいことがみられた。

(5) 前項の過大応力の繰返しを受けた各種試験片のき裂の進展状況を熱着色により写真に示した。き裂は孔の両側の口から発生して円周に沿いつつ扇状のふちから内部に進展していくことがみられた。

参 考 文 献

- 1) 森島, 内藤, 材料試験, **10**, 89, 111 (1961)
- 2) R.C.J. Howland, Proc. Roy. Soc., **148**, 417 (1935)
- 3) 村上, 川辺, 材料試験, **11**, 100, 13 (1962)
- 4) M.M. Frocht, Appl. Phys., **15**, 1, 22 (1944)

(216 頁より)

電解研削した鋼の表面の性質と残留応力 (Surface Effects and Residual Stresses in Electrolytically Ground Steel) J. Frisch, R.R. Cole Trans. ASME, J. Engineering for Industry Vol. **84**, Series B, No. 4, p. 483/490 (1962)

電解研削をした鋼の表面の性質と残留応力について実験を行なったものである。電解研削法は、研削車を陰極として回転させて機械的切削を行なうかわり、試料を陽極として直流を通電して、その中間に電解液として硝酸カリウム液を送り、電解研削を行なう切削法である。実験材料は研削したのち焼なましした AISI-1020 鋼を使用している。残留応力は、板の片面から表層を除去してゆき、他の面の曲率の変化を測定して、これより計算している。また、表面あらさを、Applied Research Profilemeter で測定している。実験は研削車の送り深さを種々変化させ、また電流密度も変化させて測定を行なった結果、次のような結論を得ている。

1. 研削車の送り深さ、 0.002 in 以下の電解研削では、測定可能な残留応力は発生しない。
2. 送り深さ、 0.003 in から 0.0045 in の間では、電解研削によっても、 $22,000 \text{ psi}$ 以下の残留応力が発生する。
3. 小さい送り深さでの電解研削法は、研削操作によって生ずる残留応力がきわめて小さいので、残留応力分布を求めるための表層除去に適した研削法である。
4. 表面あらさは、送り深さが増加するにしたがつて換言すれば機械的な除去が多くなるほど、仕上面がきれいになる。
5. 電流は、ある限界値以上で一定の値でないと、一定の研削ができない。
6. 電気火花が生じるような大きな送り込み深さでの電解研削では、表面は光沢面でしかも滑面となる。
7. 機械的研削を行なったものより、電解研削をしたもののほうが腐食に対する抵抗性が大きい。

(吉岡靖夫)

(234 頁へ)