

外周切欠材の応力集中と回転曲げ疲労強度について (第6報)

孔付円筒 その3

大野元明**・望月太喜雄*

Stress Concentration and Fatigue Strength of Notched Specimens
Under Repeated Bending Moment (6th Report)

Circular shaft with a diametral hole No. 3

Motoaki ŌNO and Takio MOCHIZUKI

Abstract

Stress concentrations and notch factors are researched in hollow shafts with a diametral hole on one side and penetrated diametrically, and in solid shafts with a diametrically penetrated hole.

The material used are 3 kinds of S-20C steel whose tensile strength are 50 and 69 kg/mm² measured. The capacity of the testing machine is 1.5 kgm and the dia. of the specimen is 6 mm.

For the form factors of these notched specimens, the calculated results of Ishibashi is used and the equation relating between the form factor α and the notch factor β is

$$\beta = \alpha [1 - ke^{-N}] \quad N = n (1 + n d/D) d/D$$

where $n = \text{const}$, d , D inner dia. and outside dia.

which is discussed in the last paper (5th report).

Main results of these experiments are ; The fatigue limit of a hollow specimen is lower than that of a solid. The notch factor β of an hollow shaft with one side diametral hole is higher than that of penetrated diametral hole. The variation of β according to d/D agrees with the calculated β in the above formula.

1. 緒言

孔付円筒軸(または丸軸)と称される最も基本的なものは直径方向に円孔を貫通したものでこれについての疲労試験はかなり多く行われているが、孔が片側に1個ある円筒についての実験は少い、しかし実際にはこのような軸が機械部品に使用される例は多い。本報では第4報に続いて行つたこの種の実験結果の二、三を掲げ切欠係数 β について記述する。

β を論ずるに当つては貫通円孔の場合の曲げに対する形状係数 α はここでも石橋氏の解析値¹⁾をそのまま引用する。孔1個だけの場合は解析結果がないので第4報²⁾に述べた相等値平板を考へ片側に半円弧切欠をもつ帯板を面内に曲げる場合の形状係数 α をもつてその相当値として代用する。

切欠係数 β と形状係数 α との関係を表わす式は石橋氏の実験式もあるがここでは筆者立案の前報³⁾(5)式を用いる。Fig.1は円孔が1個の場合と貫通の場合の形状係数 α と後者に対する β の計算曲線を示す。前者に対する β は α を置換すれば容易に求められる。

実験は(1)中空軸に円孔1個(片側)、円孔2個(貫通)をもつたもの、(2)中実軸に円孔を貫通したものについて行いその切欠係数を比較することを主な目的とし、次いでFig.1の β 曲線と比較し実験式中の n の値をそれぞれについて定めることにした。

2. 試験片材料、寸法

供試片は市販のS-C鋼で顕微鏡写真をFig.2に示し、化学成分の分析値および引張試験を行つた結果をTable 1に掲げた。疲労試験片に加工したもの

** 機械工学教室

* 宇部工業高等専門学校

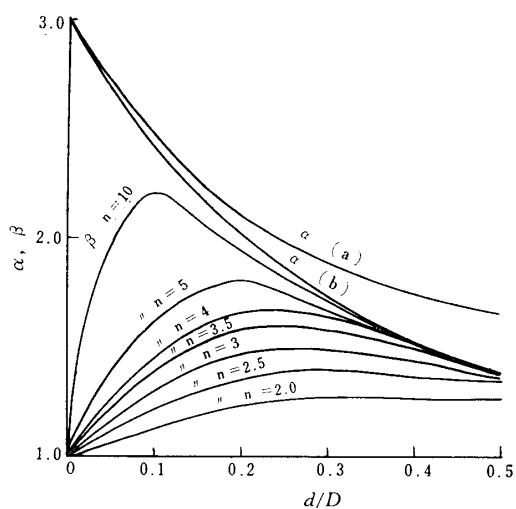
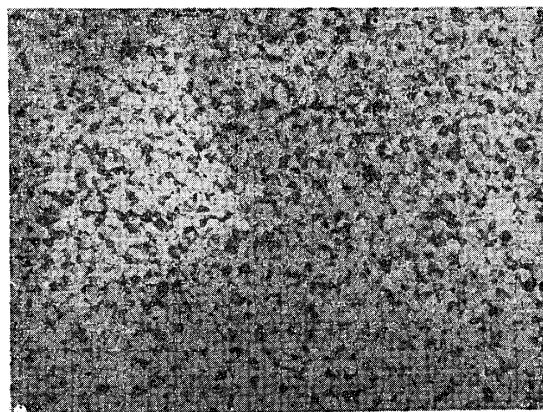
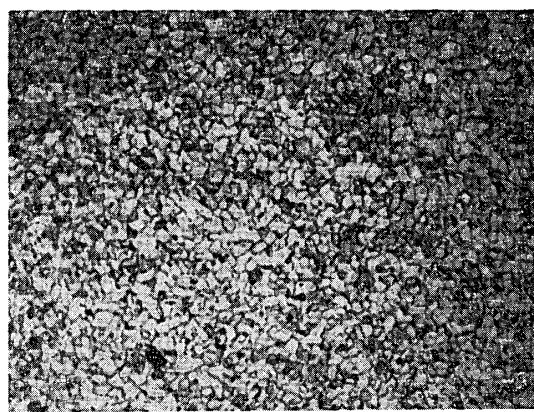


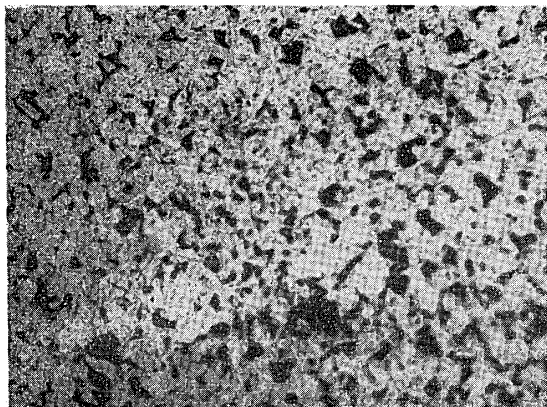
Fig. 1 α =form factors of the circular hollow shafts with a diametral circular hole ; (a) one hole, (b) two holes (penetrated), β =notch factors calculated from the formula (5) in the last report for above (b)



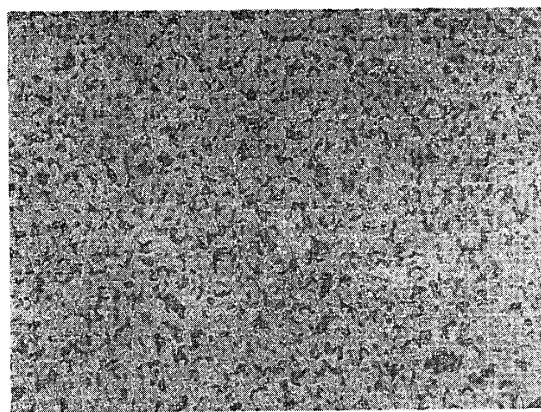
No. 3 steel $\times 100$



No. 4 steel $\times 100$

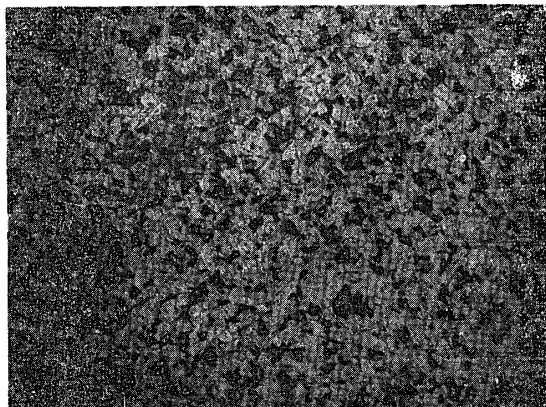


No. 1 steel $\times 100$



No. 5 steel $\times 100$

Fig. 2 Microstructure of the material



No. 2 steel $\times 100$

を引張つたため降伏点が明確に測定されなかつたが他の実験結果から推して No.4 では約35kg/mm²である。引張強さは No.3 と No.5 はほとんど同値で No.4 は第4報の No.2 とほぼ相等しくなっている。試験片の寸法は Fig.3 に示すように円筒試験片は軸中心線上に4mm直径の穿孔を行つて作った。これらの試験片の断面係数は直径方向の孔中心が最大曲げモーメントをうける位置にあるときの値を次式で計算し

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of the material used

NO	C	Si	Mn	P	S	Mechanical properties		
						σ_y Kg/mm ²	σ_B Kg/mm ²	σ_T Kg/mm ²
3	0.18	0.32	0.42	0.045	0.022	—	67.9	—
4	0.14	0.06	0.42	0.007	0.016	—	50.5	99.2
5	0.11	0.05	0.41	0.006	0.016	—	69.0	—

σ_y = Yielding pt.

σ_B = Tensile strength

σ_T = True rupture stress

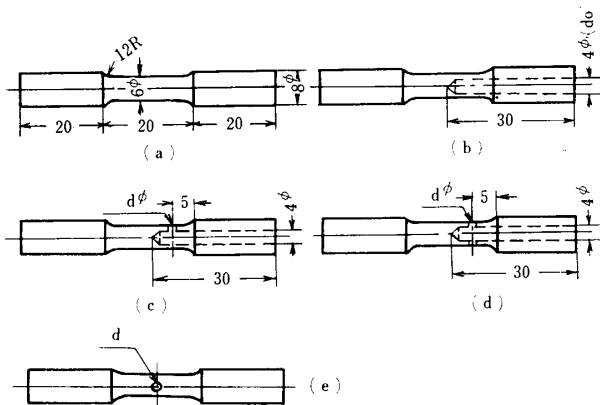


Fig. 3 Dimensions of the specimens used

た、Table 2 にその値を掲げた。

(1) 円筒に1個の円孔 Fig.4(a)

$$X_G = \frac{\frac{1}{2}(r_1+r_2)\pi(r_1^2-r_2^2) - (r_1+r_2)2\rho(r_1-r_2)}{\pi(r_1^2-r_2^2) - 2\rho(r_1-r_2)}$$

$$e = \frac{r_1+r_2}{2} - X_G$$

$$I_G = \frac{\pi}{4}(r_1^4-r_2^4) - \frac{2\rho}{3}(r_1^3-r_2^3) - e^2$$

$$\times \left[\pi(r_1^2-r_2^2) - 2\rho(r_1-r_2) \right]$$

$$Z = \frac{I_G}{r_1+e}$$

(2) 円筒に貫通孔

$$I_G = \frac{\pi}{4}(r_1^4-r_2^4) - \frac{4}{3}\rho(r_1^3-r_2^3), Z = \frac{I_G}{r_1}$$

(3) 中実軸に貫通円孔 Fig.4(b)

$$I = r^4 \left[\frac{1}{3} \cos^3\beta \sin\beta + \frac{1}{2}\beta - \frac{5}{12}\sin 2\beta \right]$$

$$Z = \frac{1}{r \sin\beta} = \frac{D^3}{32 \sin\beta} \left(2\beta - \frac{4}{3}\sin 2\beta + \frac{1}{6}\sin 4\beta \right)$$

試験機は1,5kgm, 3000r.p.m の小型回転曲げ試験機を用いた、これは試験片は小さいけれども回転が円滑で振動も少く比較的精密に測定ができる点が長所である。

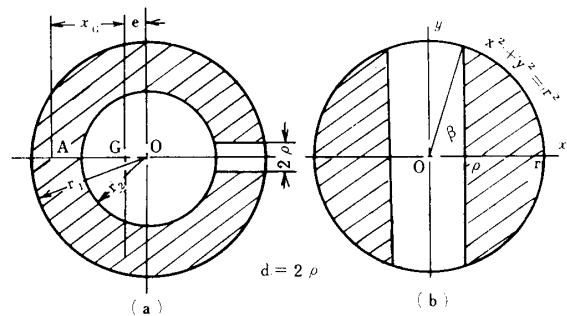


Fig. 4 Section of specimens

3. 試験結果

Table 2 および Table 3,4 が実験結果である。これらの値から耐久線を描くと Fig.5~Fig.7 となる。

Table 2 Section modulus

Material series	Plain specimen		Notched (Hollow)						Notched(Solid)	
	Solid shaft	Hollow shaft	1.0mm		1.5mm		2.0mm		2.5mm	3,0mm
			Single	Penetrated	Single	Penetrated	Single	Penetrated	Penetrated	Penetrated
No.1	17.65	16.30	—	—	11.62	9.50	—	—	—	—
″ 2	21.20	19.87	16.11	14.62	—	—	—	—	—	—
″ 3	21.20	17.00	13.97	12.79	—	—	—	—	—	—
″ 4	21.20	—	—	—	—	12.93	—	10.44	—	—
″ 5	21.20	—	—	15.52	—	—	—	—	8.16	6.21

Table 3 Results of fatigue tests

Material	Form of notched specimen	Test piece No.	D mm	d ₀ mm	d mm	σ Kg/mm ²	σ' Kg/mm ²	Repeated number N×10 ⁶	Broken × Unbroken ○	Remarks	
No. 3	(a)	2	6.03			30.4		3.8378	×		
		3	″			28.0		10.6619	○		
		4	″			29.2		10.7381	○		
		5	″			31.6		4.4270	×		
		7	″			36.2		0.4690	×		
		8	″			33.9		0.8574	×		
	(b)	26	6.03	4.0			31.8		1.1782	×	
		27	″	″			26.0		10.0268	○	
		28	″	″			28.9		12.1000	○	
		29	″	″			30.4		3.9814	×	
		30	″	″			33.2		0.3250	×	
		31	″	″			29.6		2.9335	×	
	(c)	32	6.03	4.0	1.0	24.92	20.2		0.9597	×	
		33	″	″	″	21.40	17.35		1.5655	×	
		34	″	″	″	19.65	15.90		7.1478	×	
		35	″	″	″	17.85	14.45		2.2186	×	
		36	″	″	″	16.42	13.30		12.9432	○	
		37	″	″	″	17.83	14.45		6.3558	×	
		38	″	″	″	18.60	15.05		4.4578	×	
		39	″	″	″	17.15	13.90		11.1121	○	
	(d)	40	6.03	4.0	1.0	19.30	14.50		1.5289	×	
		41	″	″	″	17.30	13.00		10.0790	○	
		42	″	″	″	18.50	13.90		3.6873	×	
		43	″	″	″	20.00	15.03		2.3548	×	
		44	″	″	″	23.30	17.35		0.9169	×	
		45	″	″	″	17.70	13.30		3.7817	×	
		46	″	″	″	16.16	12.15		2.9333	×	
		47	″	″	″	15.37	11.55		10.0500	○	
No. 4	(e)	1	6.01		1.5	27.00		1.9317	×		
		2	″		″	19.30		0.0450	×		
		3	″		″	19.30		5.5885	×		
		4	″		″	11.60		10.8067	○		
		5	″		″	15.45		10.6457	○		
		6	″		″	17.35		6.7767	—		
		7	″		″	18.15		6.9136	×		
		8	″		″	17.75		8.3889	×		
		9	″		″	—		—	—		
		10	″		″	17.35		5.5415	×		
		11	″		″	17.00		14.5040	○		
		12	″		″	17.16		12.1011	○		

σ : nominal stress for the shaft with a hole

σ' : nominal stress for the hollow shaft neglecting the hole in the section modulus

Table 4 Results of fatigue tests

Material	Form of notched specimen	Test-piece No.	D mm	d ₀ mm	d mm	σ Kg/mm ²	σ' kg/mm ²	Repeated number N×10 ⁶	Broken × Unbroken ○	Remarks		
No. 4	(e)	13	6.01		2.0	19.16		2.1441	—			
		14	〃		〃	18.20		1.6648	—			
		15	〃		〃	18.20		8.8621	×			
		16	〃		〃	19.16		8.6045	×			
		17	〃		〃	16.77		0.0999	—			
		18	〃		〃	15.82		11.3245	○			
		19	〃		〃	14.38		10.7385	○			
		20	〃		〃	16.77		10.9551	○			
		21	〃		〃	17.73		10.8641	○			
	(a)	22	6.01			28.20		1.9892	×			
		23	〃			30.50		1.0329	×			
		24	〃			29.40		0.7996	×			
		25	〃			25.80		10.2829	○			
		26	〃			24.60		10.1534	○			
		27	〃			27.00		8.6356	×			
		28	〃			32.80		0.2701	×			
		29	〃			26.50		10.1018	○			
	No. 5	(e)	30	6.01		2.5	19.00		10.0981		○	Crack
			31	〃		〃	17.15		11.1121		○	
			32	〃		〃	22.05		4.8457		×	
			33	〃		〃	20.81		7.2184		×	
			34	〃		〃	21.44		4.9669		×	
			35	〃		〃	20.21		11.0172		○	
			36	〃		〃	19.60		10.0546		○	
			37	〃		〃	18.98		9.8701		○	
			38	〃		〃	20.82		14.0870		○	
		(e)	39	6.01		3.0	24.17		2.4620		×	
			40	〃		〃	21.72		4.1391		×	
			41	〃		〃	18.12		3.6076		—	
42			〃		〃	16.10		10.6455	○			
43			〃		〃	14.50		10.4518	○			
52			〃		〃	22.55		4.5586	×			
53			〃		〃	20.94		—	—			
54			〃		〃	19.32		11.6439	○			
(e)			44	6.01		1.0	16.13		11.1320	○		
			45	〃		〃	17.70		10.1131	○		
			46	〃		〃	19.31		5.6379	×		
			47	〃		〃	20.94		1.7620	×		
			48	〃		〃	19.97		1.9153	×		
			49	〃		〃	18.35		—	—		
		50	〃		〃	18.55		15.2154	○			
51		〃		〃	18.80		2.6354	×				
(a)		55	6.01			41.25		0.1135	×			
		56	〃			38.95		0.1687	×			
		57	〃			37.75		0.1770	×			
		58	〃			36.65		0.3395	×			
		59	〃			33.05		1.7175	×			
		60	〃			29.50		9.3201	○			

Fig. 5 においては中実軸と円筒軸疲労限に僅少の差が現れている、これに関しては別報⁴⁾に關係式を掲げたように円筒軸の方が弱くなる理由によつていと思う。

孔1個の場合と孔2個(貫通)の場合の疲労限の差も余り著しくはないが前者の方が少し低い。

Fig. 6 のNo. 4 材の平滑材の疲労限度は No. 3 のものよりも低いのは引張強さ σ_B の相異からも首肯される訳であつて、孔径 1.5mm と 2mm のものの相異も現われている。

Fig. 7 の No. 5 材は No. 3 とほとんど同材であつて σ_B も Table 1 のように一致して平滑材の疲労限度も No. 3 のものと同値である。3mm 孔と 2.5mm 孔のものはほとんど区別し難い程度であるが 3mm 孔の方が僅かに高いと見ることが出来る。

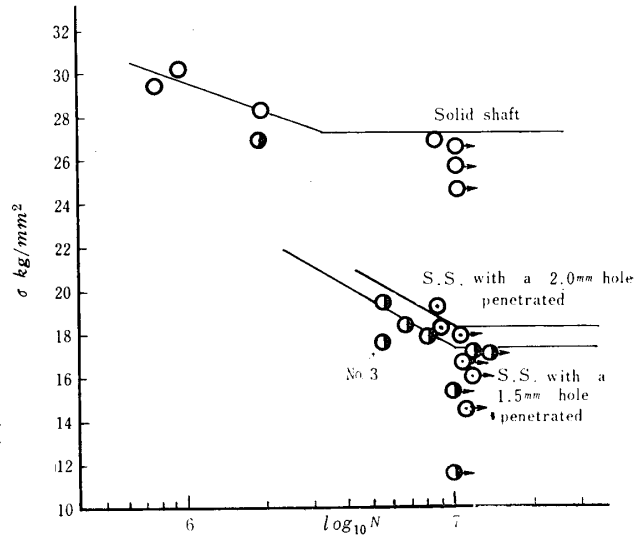


Fig. 6 Fatigue limit of No. 4 series

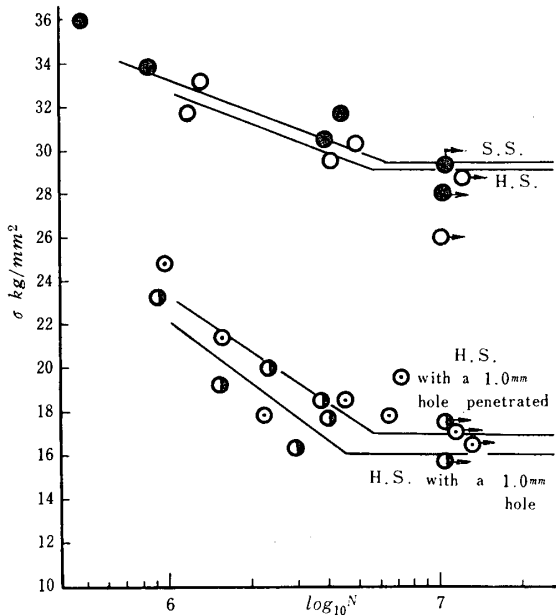


Fig. 5 Fatigue limit of No. 3 series

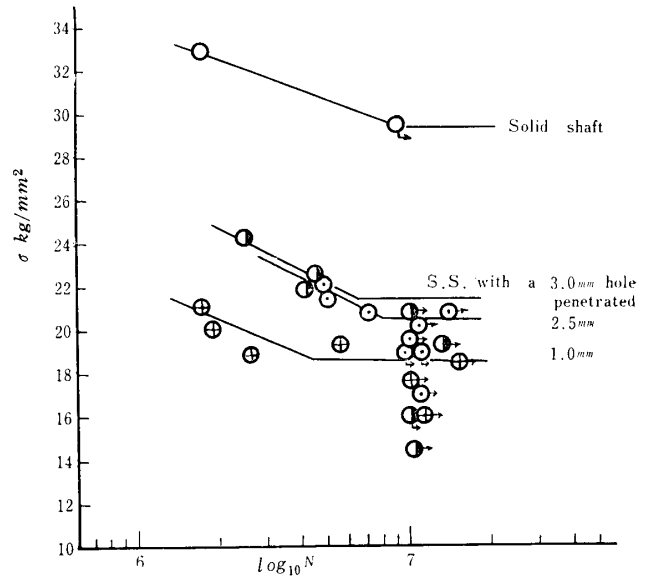


Fig. 7 Fatigue limit of No. 5 series

Table 5 Fatigue limit $\hat{\sigma}_{wk}$ and β

Material series	Plain specimen		Notched (Hollow)						Notched (Solid)	
	Solid shaft	Hollow shaft	1.0 mm		1.5 mm		2.0 mm		2.5mm	3.0mm
			Single	Penetrated $\alpha=2.11$	Single	Penetrated $\alpha=1.86$	Single	Penetrated $\alpha=1.66$	Penetrated $\alpha=1.52$	Penetrated $\alpha=1.38$
No. 1	21.9	19.8	—	—	11.5 (1.72)	(1.6)	—	—	—	—
No. 2	30.5	29.6	15.5 (1.90)	18.0 (1.64)	—	—	—	—	—	—
No. 3	29.5	29.0	16.0 (1.81)	17.0 (1.70)	—	—	—	—	—	—
No. 4	27.0	—	—	—	—	17.2 (1.57)	—	18.0 (1.50)	—	—
No. 5	29.5	—	—	18.6 (1.58)	—	—	—	—	20.5 (1.44)	21.5 (1.37)

The numerical values in the parenthesis are the values of β measured.

これらの測定値を Table 5 にまとめた。この場合第4報に実験データをのせてある No.1, No.2 材の測定値も引用して同表に記入した。表中の()中の値は切欠係数 β である。

円孔直径 d を横軸にとつて図示すると Fig. 8 となる。No.3 は円筒材であるから孔を穿つたものの疲労

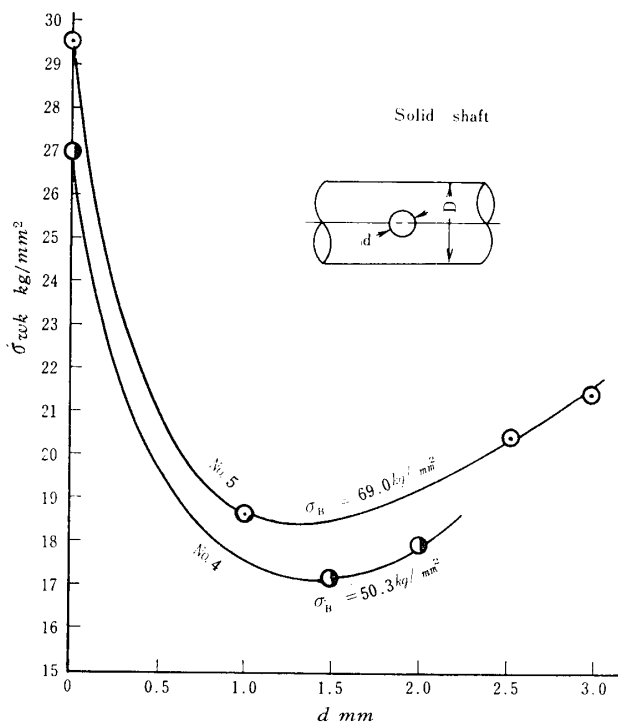


Fig. 8 Variation of σ_{wk} with d

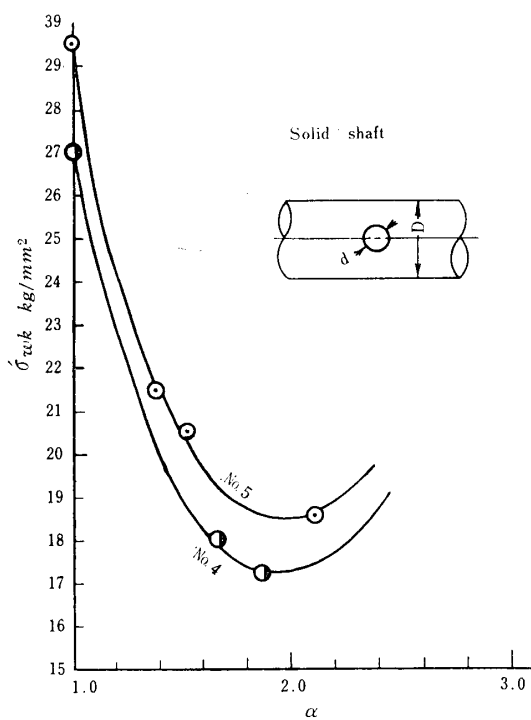


Fig. 9 Relation between α and σ_{wk}

限度は No. 5 のものより相当低くなつてゐる、ただしこれでは孔径 1 mm 以外は実験を行つていないために曲線を引くことができないが No.4 のものよりも下位に存在すると推定できる。

この図を α に対して書き直すと Fig.9 となる。No. 4 の疲労限度の最小値は約 17Kg/mm² で降伏点を 35 kg/mm² としてこの点の α の値を 2.0 とすると $\sigma_{wk} = \sigma_s/\alpha$ の関係に近い、すなわちこの点が所謂切欠係数の分岐点に相当していることがわかる。

Fig.10 は d/D を横軸にとつて切欠係数 β を表わしたものである。孔が1個の場合の β は孔2個(貫通)の場合よりも高くなるのは Fig. 1 に掲げたように前者の α の方が後者のものよりも大きいので当然の結果と考えられる。

なお、これを Fig.11 の計算曲線上にて比較すると図のごとく No.3, No.5 材に対しては $n=3.7$ 位となり No.4 材では $n=3.2$ 位である。

上記の実験に附随して破断を生じた試験片について急進破面の偏心量をその試験片に作用させた見掛けの応力についてプロットしてみると Fig.12 となつた。これは作用させた応力が大きいほど繰返数は少くまた急進破面は大きいという当然の結果であるが図から偏心量は見掛け応力に大体直線的に比例して減少していることがわかる。Fig.13に中実材の破断面写真を示す。

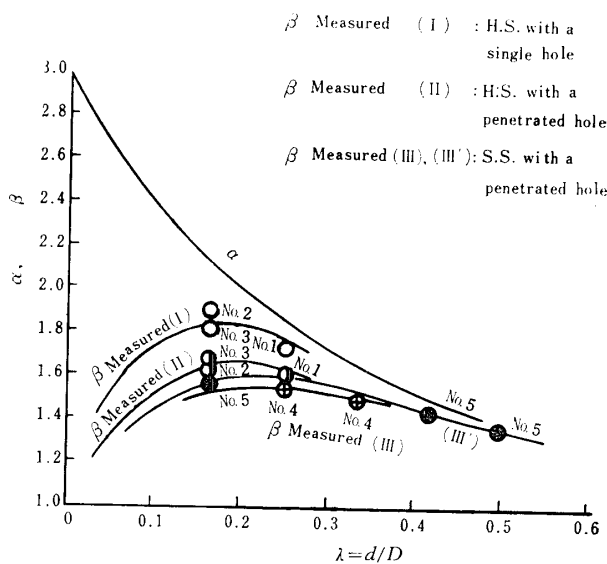


Fig. 10 Experimental results

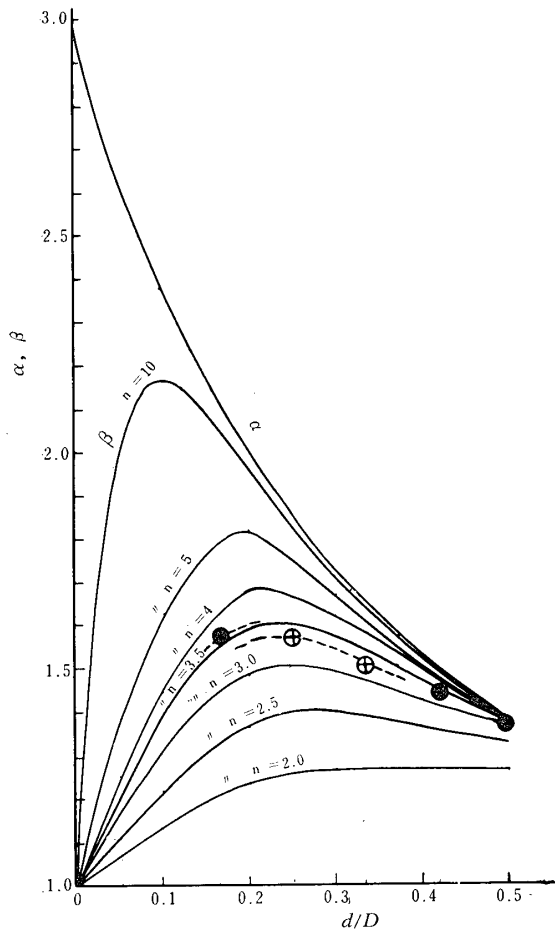


Fig. 11 α and β against d/D

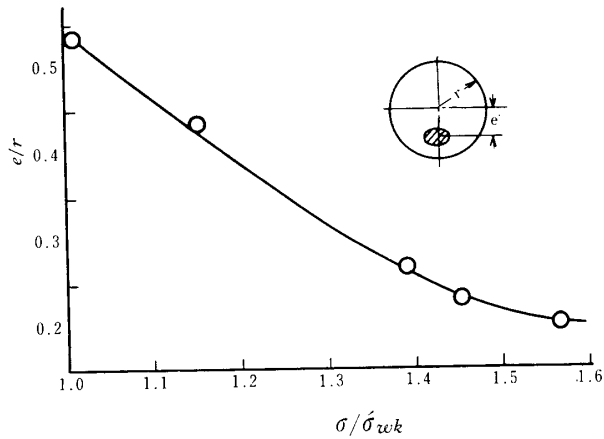


Fig. 12 Eccentricities of ruptured specimens against applied stresses ratios
 σ : Applied nominal stress
 σ'_{wk} : Fatigue limit
 r : Radius of the minimum cross section
 e : Eccentric distance

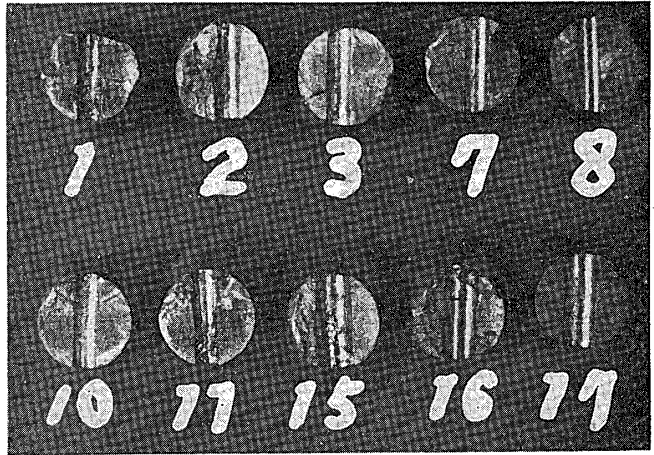


Fig. 13 Notched fractured surface of No. 4 series

4. 結 論

本報に掲げた No.3~No.5 材の円孔付試験片についての実験結果ならびに第4報の No.1, No.2 材の実験結果を比較検討してつぎの結論を得た。

- (1) 円筒軸の疲れ限度は中実軸の疲れ限度より低いこと
- (2) No.3~No.5 は化学成分はほとんど同様であるが、No.4 の引張強さが低く疲労限度も異つている。
- (3) 円筒に孔1個を穿つたものは孔2個（貫通）のものよりも形状係数も大きくしたがって β も大きい。
- (4) 切欠係数の分岐点では $\sigma'_{wk} = \sigma_s/\alpha$ の関係が現れている。
- (5) d/D を横軸にとつて表わした β 曲線は前報(5)式の曲線上に載り実験式中の n の値を定め得た。これは β の計算や比較の上に非常に役立つものと思う。

参 考 文 献

- 1) 石橋：九大工学部紀要 10, 165 (1947)。
- 2) 大野, 吉松：山口大学工学部研究報告 18, No. 3 (昭和42年12月)
- 3) 大野：山口大学工学部研究報告, 第5報
- 4) 大野：山口大学工学部学報, 12, No. 1 (昭和36年10月)

(昭和43年7月2日受理)