

外周切欠材の応力集中と回転曲げ疲労強度について

(第 1 報)

大 野 元 明*

Stress Concentration and Fatigue Strength of Notched Specimens under Repeated Bending Moment

Motoaki ÔNO

Abstract

We find difficulties to determine the value of the notch factor in machine-design, in spite of many experimental results have been shown. In this report, I attempt to determine some proper value of these notch factors from my experimental results under rotating-bending stress, for U, V and rectangular notches — single, double, and tripple circumferential groove on the circular shaft. In the U, V notches, the experimental results shows that the notch factor is proportional to the degree of stress concentration, but in the case of rectangular notches, the value of the factor is lower than that estimated from the stress concentration in the groove corner, obtained from photo-elastic experiments.

1. 緒 言

U形, V形などの基本的形状の切欠をもつ板, 軸などについては古くから応力集中率あるいは形状係数, 切欠係数などに関して種々研究され実験結果も非常に多い。このうち切欠係数は機械設計上最も必要なものであるが, これは切欠の寸法的な要素に応力の種類, 材料の性質が関係して理論的扱いが難しく主として実験結果によらねばならない。筆者は 先に外周直径 12 mm, 谷底直径 8.6mm で切欠幅の略相等しい U, V, 矩形の環状切欠をもつ丸軸の回転曲げ実験を行ない切欠係数, 破断状況などについて記述した* が引続き同形の切欠の二列三列をもつものの実験を行ない全体的比較に基いて切欠係数の適正値を求めてみることにした。一般に切欠係数の測定値の中には材料の欠陥, 切欠の不等, 試験機の調整不良などの原因によって甚しく値が低く出ているものや不当に高くなっている場合も往々にあるのでこれらを除外または修正を施して標準とみられる値を求める必要がある。

多列切欠の軸方向間隔が小さい場合は当然切欠の相互干渉を生じる懸念があるから本研究ではそれを生じない場合を実験することにして溝間隔を大きくし直径の $\frac{5}{3}$ 倍にとった。したがってこれらの多列切欠試験片で

は単列切欠試験片と比較して疲労亀裂の発生しうる場所が増大されることにはなるが疲労限にはほとんど相異を生じないことが予想せられる。

切欠係数は切欠深さ, 谷底直径, 切欠底部の曲率半径などの関数であるから, 従来行なわれているようにノイバーの計算法によって形状係数を求めることにしたが矩形切欠には適用し難いので他に比較の基準をうるために三種の切欠形状について光弾性実験を行い応力集中率を求めてみた。

2. 供試材料及び切欠形状

回転曲げ試験片の材料は Table. 1 に示すごとき成分組成を有する低炭素鋼でいずれも素材のまま, 熱処理は行なわず外周を旋削研磨しその直径を 12mm とした, 谷底直径は 8.6mm (切欠深さ 1.7mm) を基準値として U, V, 矩形バイトによって Fig. 1 に示す寸法の環状溝を付けた。谷底直径の工作精度はやや悪く後の Table. 4 に記入したように各区別によって幾分の大小を生じている, また切欠底部の曲率半径も同表に記入してあるように僅少の不同があるがこれらは各試験片ごとに拡大投影して測定した。

二列, 三列切欠の溝間隔は 20mm とし切欠の相互干渉をさけるように計った。

* 機械工学教室

Table 1. Chemical Composition and Mechanical Properties of Test Pieces.

Division	Material	Chemical Composition %					Mechanical Properties					Remarks
		C	Si	Mn	P	S	σ_B	σ_s	$\epsilon\%$	σ_T	$H_{R\cdot B}$	
A	Steel	0.14	0.26	0.48	0.022	0.02	43.45	28.4	40	93.3	58	19 ^b Orig. Dia.
B	"	0.15	0.36	0.52	0.005	0.015	39.4	28.0	34.8	92.0	53	
C	"	0.14	0.25	0.51	0.003	0.018	44.9	29.2	40.5	94.5	56	"
D	"						40.2	26.1	35.3	96.6	17(H _s)	"
E	Brass						48.3		22.8	68.9		"
F	Steel						44.6	30.0	27	89.6	157(H _v)	"
G	"	0.14	0.26	0.48	0.022	0.02	44.9	29.2	41	95	56	"
H	Brass						48.3		22.8	68.9		"
I	"						48.3		22.8	68.9		"
J	Steel						53.4	35.4	30	94.5		"
K	"						46.6	31.7	28.9	132		"
L	"						44.1	29.6	30.3	130		"
M	"											"
N	"	0.16	0.29	0.47	0.033	0.032	52.2	34.5	28.5			"
O	"	0.19	0.26	0.69	0.008	0.036	45.5	32.5	34		60	12 ^b Orig. Dia.

σ_B = Tensile Strength. kg/mm²

σ_s = Yielding Point. kg/mm²

$H_{R\cdot B}$ = Hardness (Rockwell B Scale)

ϵ = Elongation %

σ_T = Actual Stress kg/mm²

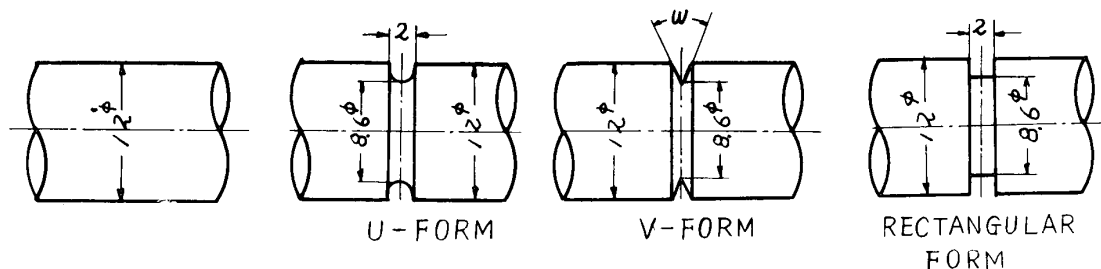


Fig. 1. Notch form (1). Center dist. of groove for double and triple row is 20 mm.

U,V, 矩形切欠の他に Fig. 2(a) に示す谷底切欠 45°V の上半に半円弧形状をもつ二重切欠の実験を加えた。これは二重切欠における上半がどの程度切欠係数に影響するかを調べるためである。

同一切欠形状でも材料の延性、脆性が切欠係数に影響を及ぼすことは周知の事実で上記低炭素鋼の他に 4-6 黄銅材に同形の U, V, 矩形切欠を付けたものの実験を行なった。材料の機械的性質は Table 1. 中に記してある。

矩形切欠では隅角の曲率半径と溝幅との関係が切欠

影響を及ぼすことは周知の事実で上記低炭素鋼の他に 4-6 黄銅材に同形の U, V, 矩形切欠を付けたものの実験を行なった。材料の機械的性質は Table 1. 中に記してある。

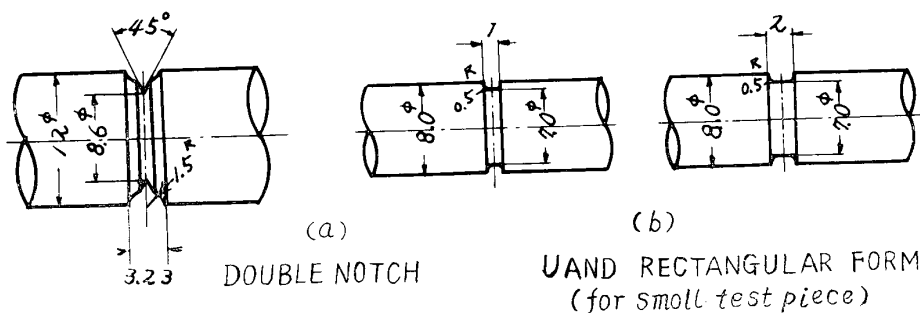


Fig. 2 Notch form (2)

係数に関するものでその一端を知るための実験として Fig. 2 (b) に示す外周直径 8mm の小試験片にて円弧切欠, U形切欠の試験片を使用した, これは矩形切欠の幅の影響を確かめるための補助的実験として行なったものである.

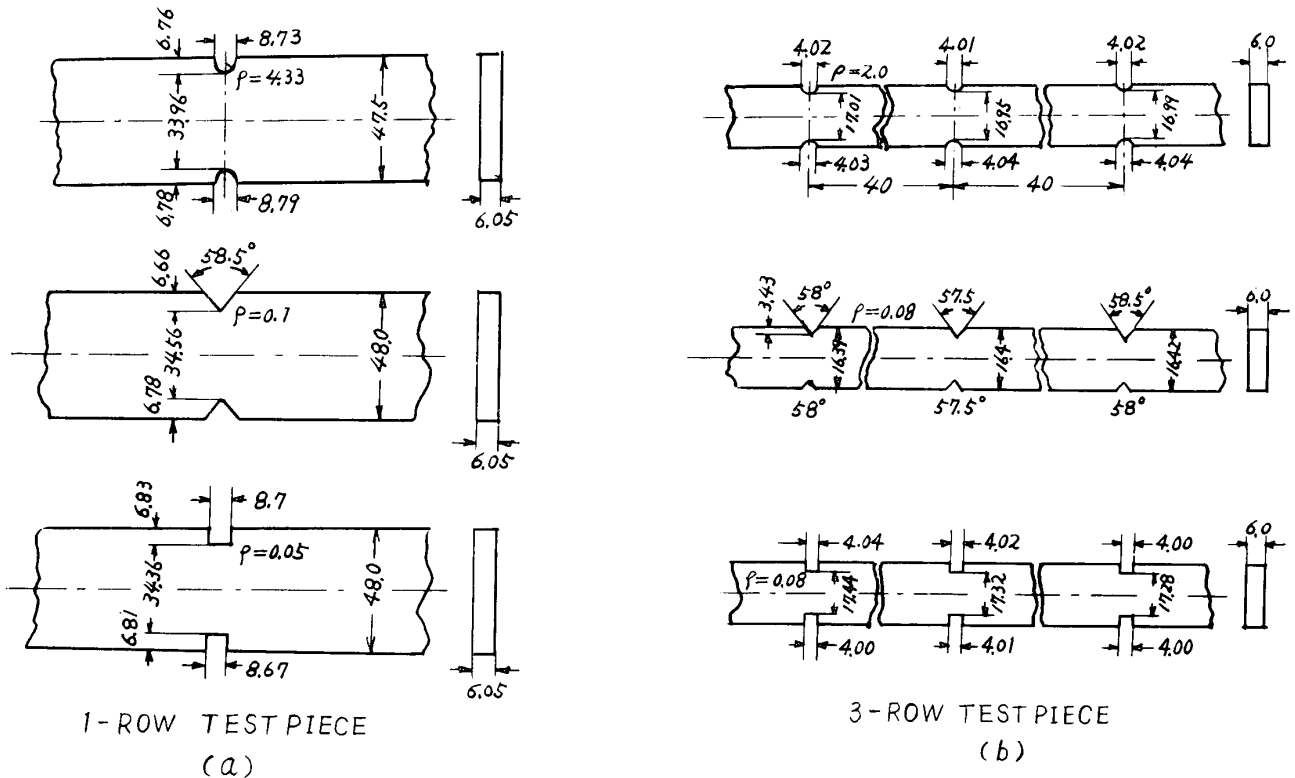


Fig. 3. Photo-elastic test piece.

3. 試験方法

疲労試験機は小野式回転曲げ疲労試験機を用い昼間のみの連続運転とした. 区別Oの実験に限り前記の小形試験片を使用し 1.5kg.m の小野式試験機によった, 前者が 1,762 r.p.m に対し後者は 3,000 r.p.m となっている.

疲労限の測定は低炭素鋼, 黄銅ともに 10^7 回の繰返数までについて測定した. したがって黄銅については耐久限度を測定した訳ではない.

光弾性実験は U, V, 矩形の単列切欠のエポキシ樹脂板試験片にて 1,137.5 kg.mm の均一曲げモーメントを加え縞次数を算定してフリンジオーダーの分布を求めて応力集中率を定めた. 三列切欠のフェノライト試験片では 218.8 kg.mm の均一曲げモーメントをかけ同様の測定を行った.

これらの材料のフリンジ応力および光弾性感度は切欠なき曲げ試験片にそれぞれ 500 kg.mm および 375

kg.mm を加えて検定して求めた.

光弾性試験片は単列切欠に対して Fig. 3 (a) の試験片 (エポキシ樹脂板), 三列切欠に対しては Fig. 3 (b) の試験片 (フェノライト板) を用い加工後 150°C 30 分間焼鈍し, 冷却速度 0.2~0.5°C/分にて除冷した.

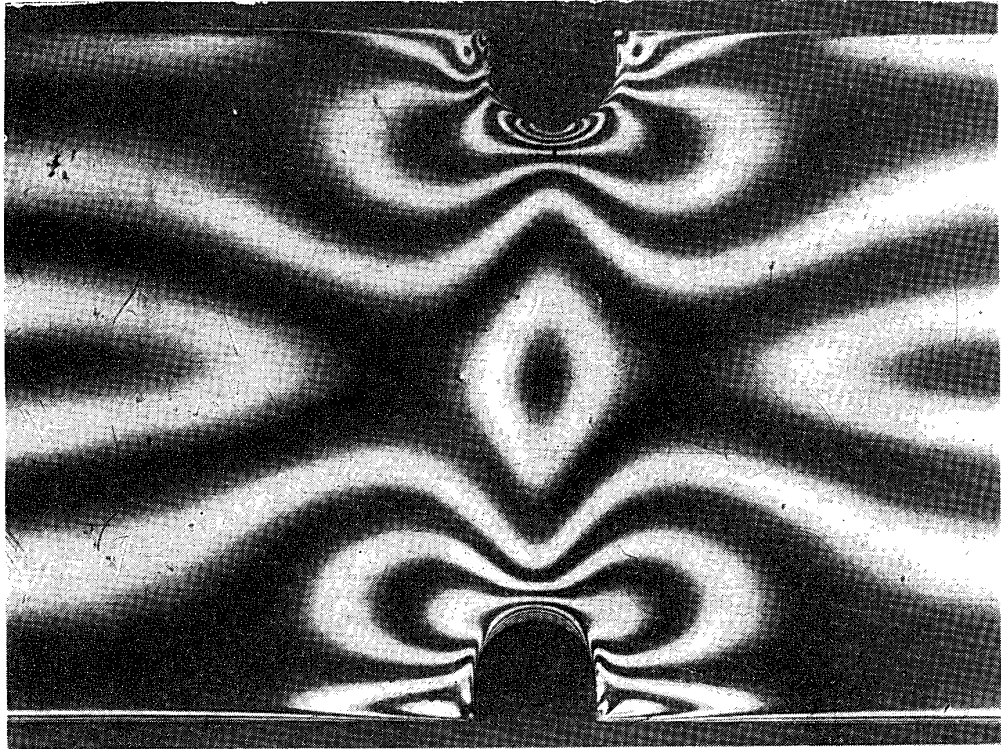
kg.mm を加えて検定して求めた.

4. 実験結果

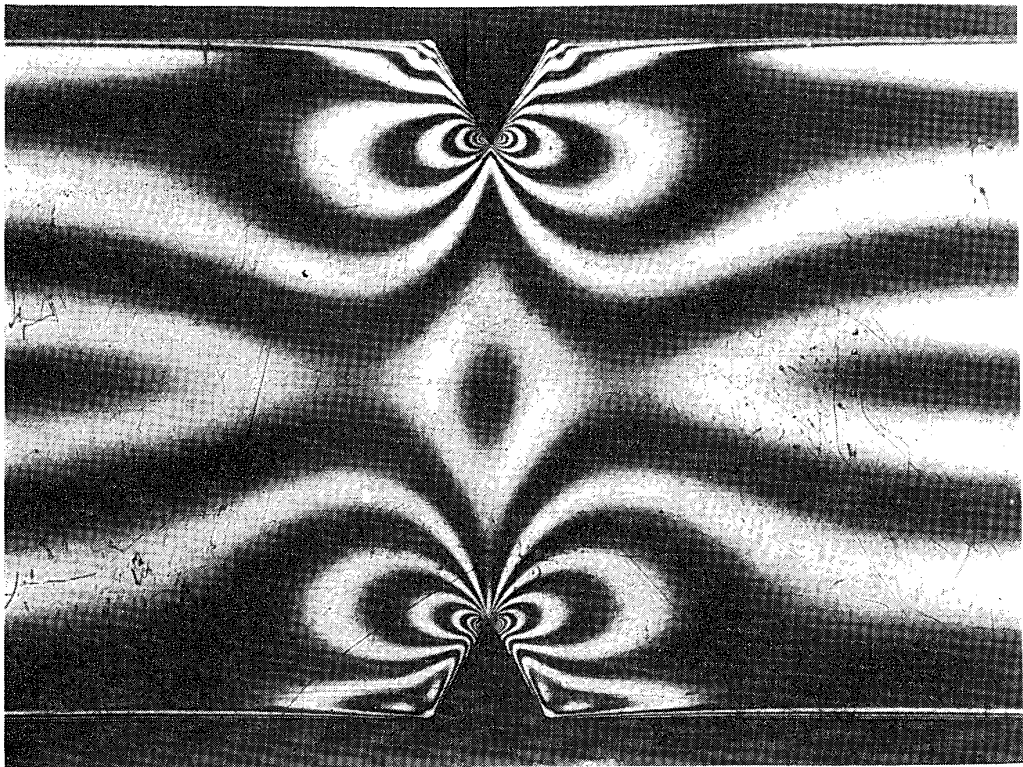
4.1 応力集中率 (光弾性実験)

Fig. 4 は単列切欠試験片の曲げ応力縞写真である, フリンジ数の分布は Fig. 5 となる. V形切欠ではV斜面の底部に最高次数が現われるからその点にて斜面に垂直方向にフリンジ次数分布を示した. これらより応力集中率を算出すると Table.2 のごとくなる. 三列切欠の縞写真は前者ほど明瞭に現われていないが Fig. 6 のごとくであり, これより Table 3 の実験結果がえられる. 引張側と圧縮側では次数が幾分異なっているがこの実験としては圧縮側の次数を採用することにした. 応力集中率の値は単列の実験値の方が約 10% 高く, 両者ともに V形が最大で矩形, U形の順である.

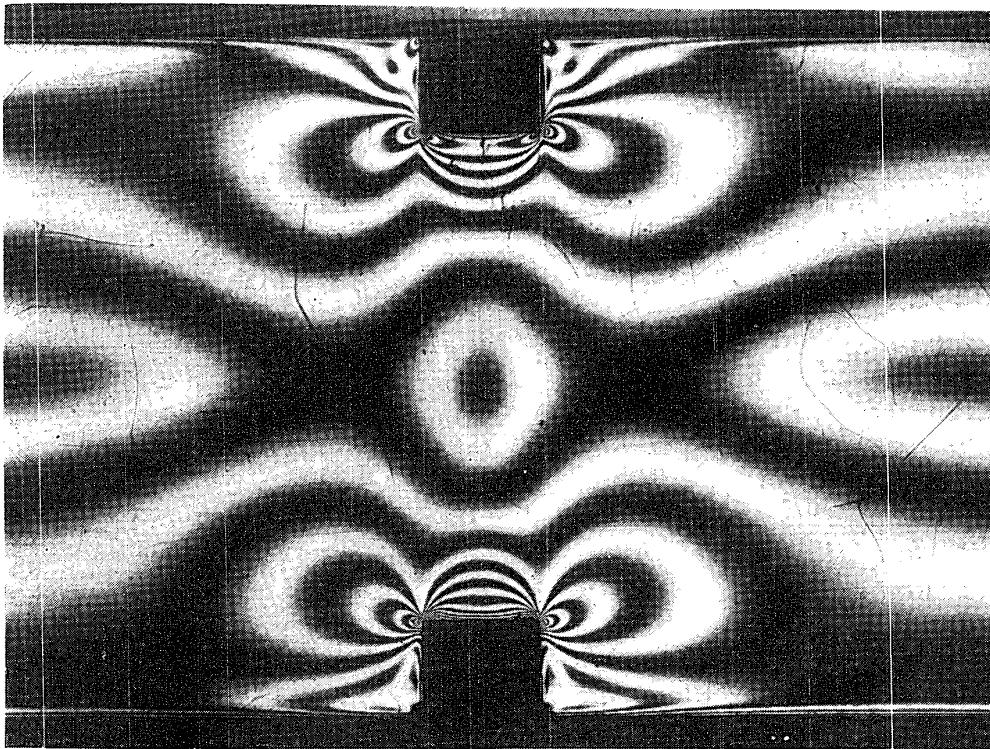
エポキシ樹脂板については曲げ試験による検定によってフリンジ応力は 1.21 kg/mm², 光弾性感度 0.83 m•m/kg であり, フェノライト板では 1.36 kg/mm²



(a) U-1 Groove



(b) V-1 Groove



(c) Rec-1 Groove

Fig. 4. Photo elastic pattern of a beam with 1-row groove subjected to pure bending.

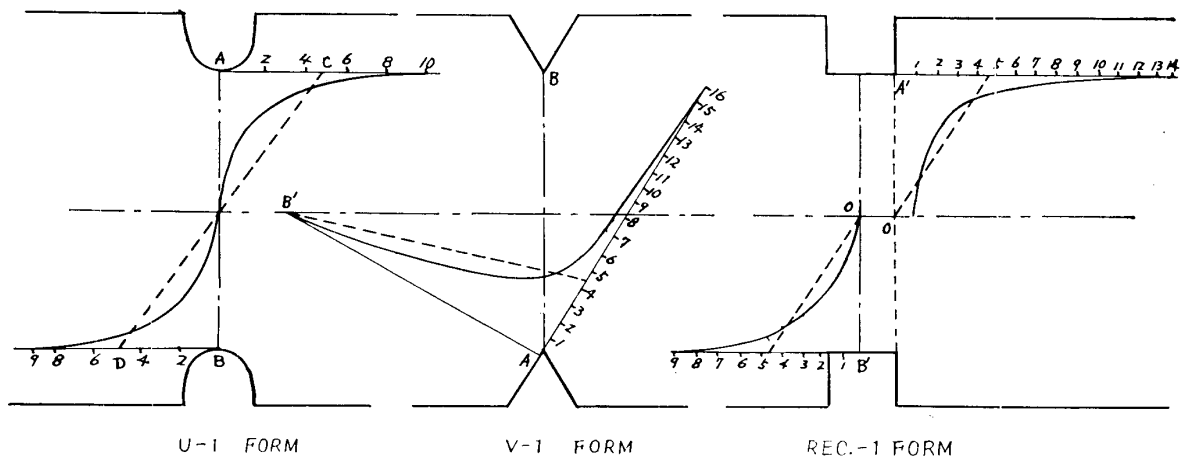


Fig. 5. Distribution of fringe order.

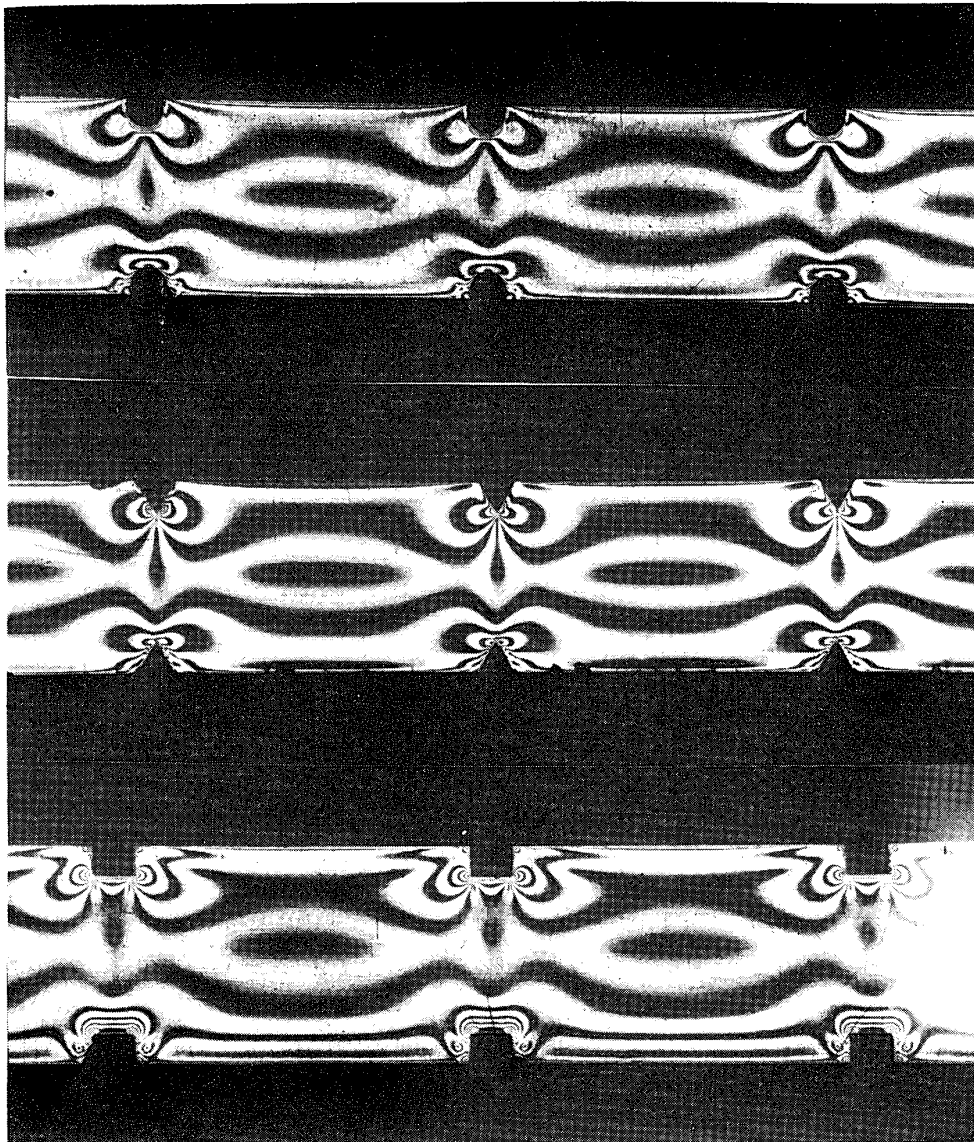


Fig. 6. Photo-elastic pattern of beams with triple-row notch subjected to pure bending.

および $0.735m \cdot m/kg$ である。

U,V切欠に対してはノイバーの計算式によって形状係数 α_k, A_k を算出して Table 4. 中に記してある。

4.2 回転曲げ試験結果

Fig. 7 は区別 A, B, C, の耐久線図でこれより各切欠係数を求めると Table 4. 記載のごとくなり応力集中率と対比せられる。U形の $\beta = 1.54$ およびV形の 1.64 はほぼ適当な値と見られ、 $90^\circ V$ が 1.67 で $60^\circ V$

Table 2. Results of Photo-Elastic Tests. (Single Row)

Notch Form	M kg·mm	Z mm ³	$\sigma_{b,2}$ kg/cm ²	$\sigma_{max A}$ kg/cm ²	$\sigma_{max B}$ kg/cm ²	Stress Concent.	
						α_A	α_B
U	1135.7	1166	97.6	202	181.8	2.07	1.86
V	//	1206	94.4	323	222	2.43	2.36
U	//	1686	96	283	183	2.95	1.89

M: Bending Moment

Z: Section Modulus.

Table 3. Results of Photo-elastic Tests (Triple Row)

Notch Form	Position		Fringe. n	σ_{bn} kg/cm ²	σ_{max} kg/cm ²	Stress Concent	
						α	α_{mean}
U	Ten	1	9	75.5	204	2.70	2.69
		2	9	76.2	204	2.68	
		3	9	76.0	204	2.69	
	Comp	4	6	75.5	136	1.80	1.78
		5	6	76.2	136	1.77	
		6	6	76.0	136	1.78	
V	Ten	1	10	81.5	227	2.79	2.61
		2	9	81.3	204	2.51	
		3	9	81.0	204	2.52	
	Comp	4	8	81.5	183	2.23	2.24
		5	8	81.3	183	2.25	
		6	—	81.0	—	—	
U'	Ten	1	7	71.5	158.9	2.22	2.19
		2	7	72.8	158.9	2.18	
		3	7	73.3	158.9	2.17	
	Comp	4	7	71.5	158.9	2.22	2.19
		5	7	72.8	158.9	2.18	
		6	7	73.3	158.9	2.17	

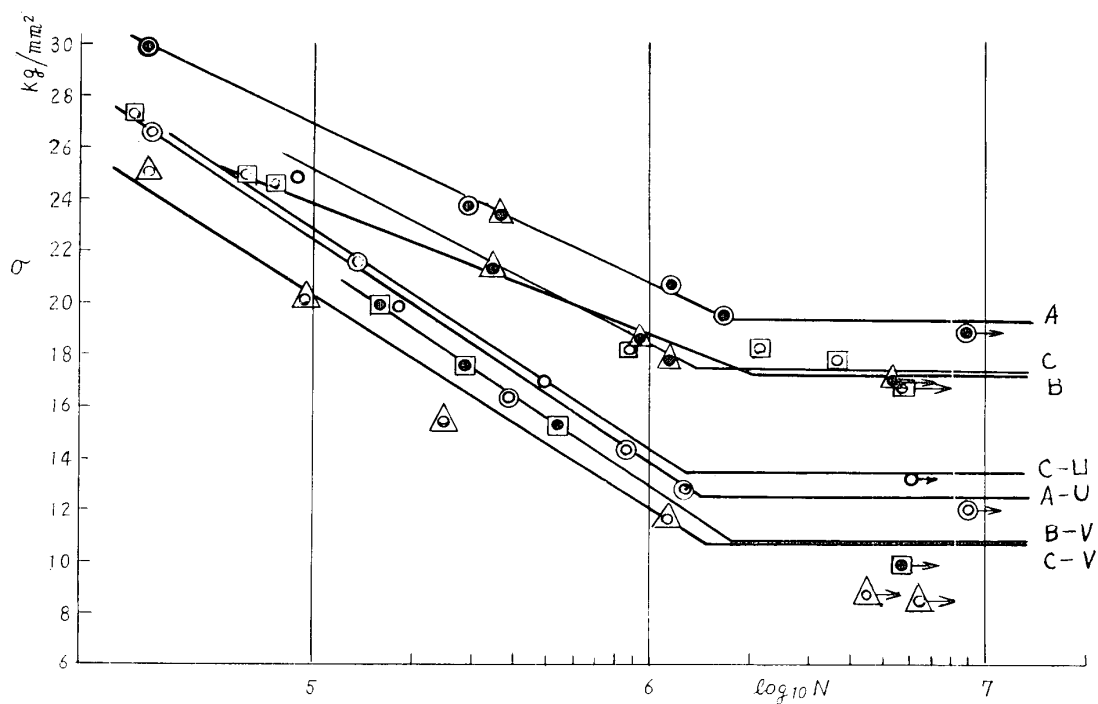


Fig. 7. Fatigue tests of A, B, C groups.

Table 4. Results of Repeating Bending Tests.

Material	Div.	Notch Form	d_0 mm	ρ mm	σ_w' kg/mm ²	$\sigma_w'k$ kg/mm ²	Notch-Factor β	Stress-Concent. α	Form-Factor α_k, A_k
Carbon Steel	A	U-1	8.79~9.1	1.0	19.2	12.4	1.54	1.86	1.59
	B	60V-1	8.45~8.58	0.10	17.3	10.6	1.64	2.36	1.82
	C	90V-1	8.40~8.50	0.05	17.5	10.2	1.67		1.76
	//	U-1	8.45~8.56	0.05	//	13.2	1.33	1.89	
	D	U-2	8.52~8.55	1.0	18.2	13.0	1.43		
	//	U-2	8.55~8.58	0.05	//	13.9	1.33		
	F	65V-1	8.50~8.70	0.05~0.1	15.0	8.5	1.76		
	//	U-1	8.60~8.70	0.04~0.07	//	11.0	1.36	1.89	
	G	60V-2	8.79~8.80	0.05	20.25	12.04	1.68		
	//	90V-2	//	//	//	9.5	2.13		
	J	U-3	8.55~8.63	1.0	22.2	14.6	1.52	1.78	1.64
	//	U-3	8.60~8.70	0.02~0.03	//	13.8	1.61	2.19	
	//	60V-3	8.60~8.70	0.03~0.08	//	13.6	1.63	2.24	
	M	U-3	8.50~8.70	1.0	//	14.8	1.5		1.45
	N	45V-1	8.60~8.70	0.05	20.2	15.8	1.3		
	//	Doble	//	//	//	12.0	1.68		
O	U-1	6.98~7.00	0.5	19.0	17.0	1.17			
//	U-1	6.85~7.00	//	//	13.0	1.46			
Brass.	E	60V-1	8.60~8.70	0.05	11.2	6.12	1.83	2.36	1.85
	H	U-1	8.60~8.66	1.0	14.5	9.5	1.53	1.86	1.84
	//	U-1	8.63~8.85	0.07	//	9.0	1.61	1.89	
	//	45V-1	8.58~8.66	0.08	//	4.5	3.22		1.95
	I	60V-2	8.50~8.70	0.03~0.07	12.0	7.0	1.71		2.30
	//	U-2	//	0.01	//	7.0	1.71		

より少し高くなっているのは逆順であるが60°Vも大差ない切欠係数を与えることを示している。矩形切欠では応力集中率はU形のものより高いにかかわらず切欠係数が三者の中で最も低く出ているけれどもこれは他の区別のものにも見られる通りこの $\beta=1.33$ の値はこれら矩形切欠の切欠係数としては適当な値になっていると判断される。矩形切欠では疲労破壊は隅角部から発生しその方向は横断面方向と傾斜しており逐次これが横断面方向に向って破断面は皿形を呈する、その深さは0.15~0.2m・m程度である。

Fig. 8は区別DのU2列、矩形2列の耐久線でこれよりTable. 4中の切欠係数がえられる、U形1.43の値は区別Aの1.54に比して少し小さく、矩形1.33はCの値と一致しており適当値と判断される。

区別F, Gの耐久線は省略したが65°V-1の1.76はAの60°V-1の1.64と略々同等で矩形-1で1.36は前記の値と同等である。60°V-2の1.68は適当値であるが90°V-2の2.13は少し高すぎる感がある。

Fig. 9は区別Jの耐久線でこれよりTable 4.の切欠係数をうる。光弾性実験結果の三列試験片の応力集中率の値に大体比例しているが区別C, D, Fなどの値と比較すれば矩形-3の値1.61は少し高すぎる感があるがこれは隅角の曲率半径が0.02~0.03m・mで最も小さいからであろう。

U-3, 60°V-3の値は単列の場合とほぼ同等で適当値と認められる。

Fig. 10は区別Mの耐久線図で表4のU-3の $\beta=1.5$ は適当である。ノイバーの計算式による形状係数の値1.45は小さ過ぎる。

Fig. 11は区別Nの耐久線図で45°V-1の $\beta=1.3$ は他のV形の値と比較して小さ過ぎる感があるがこれは試験機の調整不良が原因ではないかと思う。これに対して45°Vを下半とする二重切欠では $\beta=1.68$ で適当な値を示している。

Fig. 12は区別Oの耐久線図で外周径8mm、谷底直径7mmで同一切欠底半径を有するU形と矩形切欠の耐

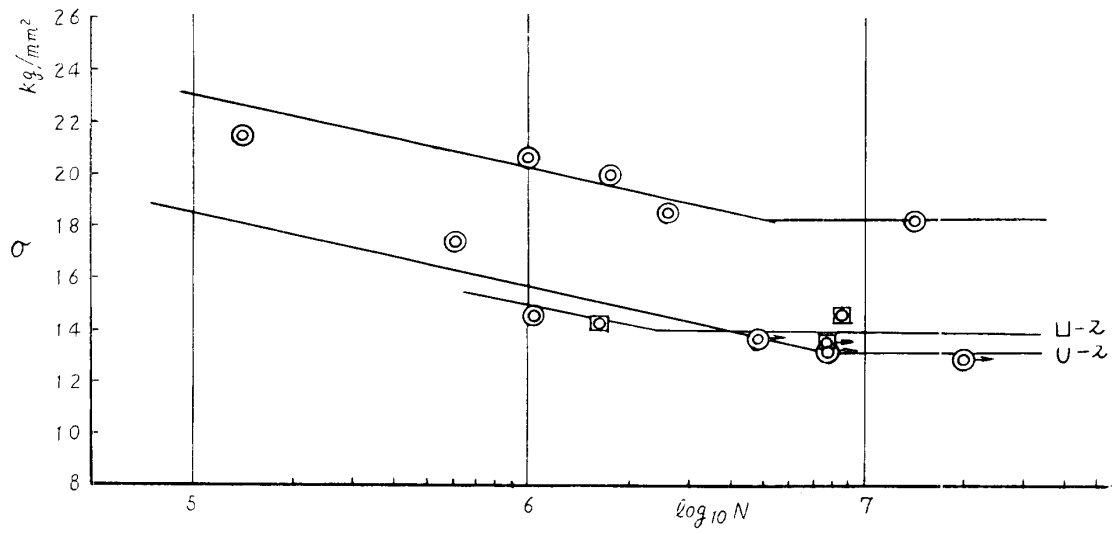


Fig. 8. Fatigue tests of D group.

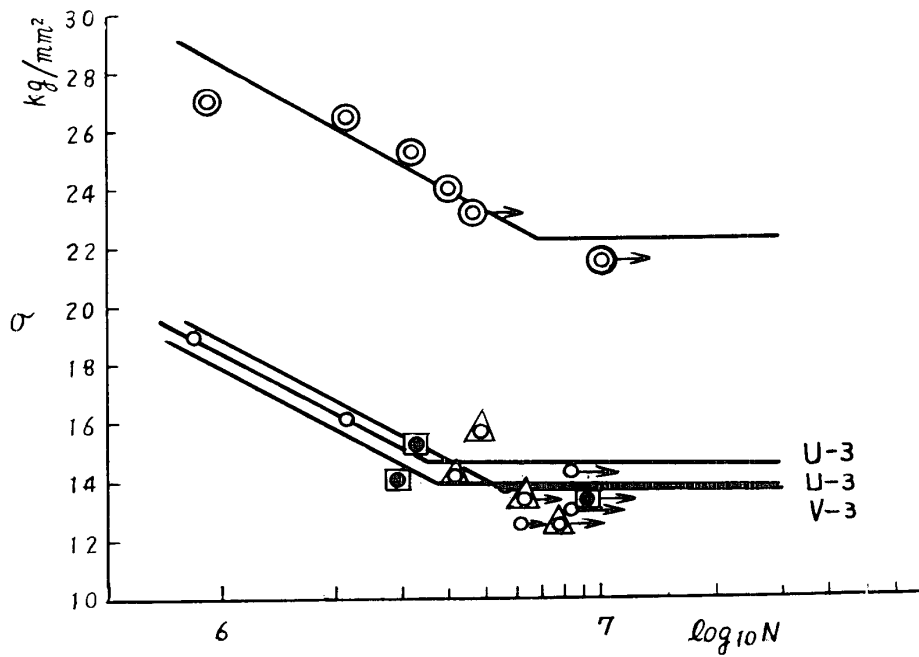


Fig. 9. Fatigue tests of I group.

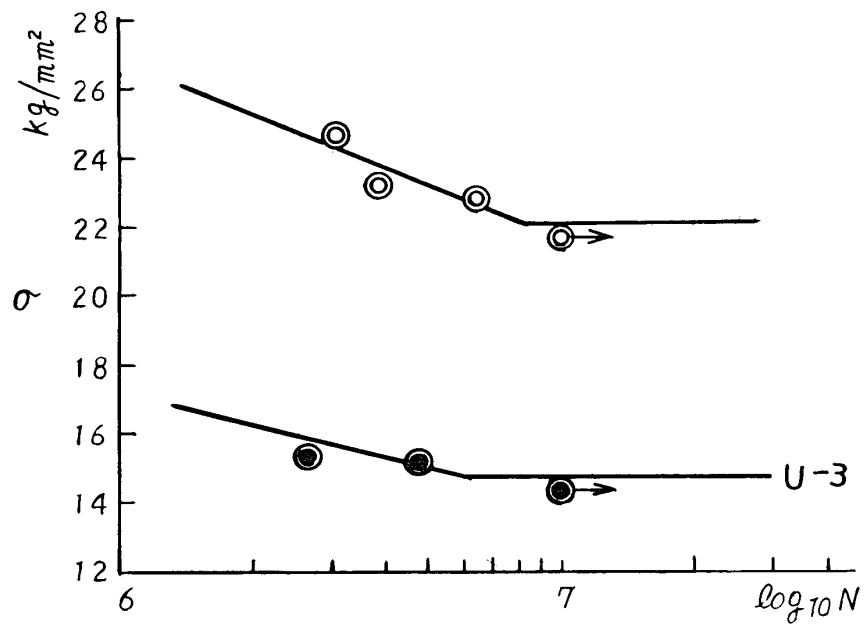


Fig. 10. Fatigue tests of M group.

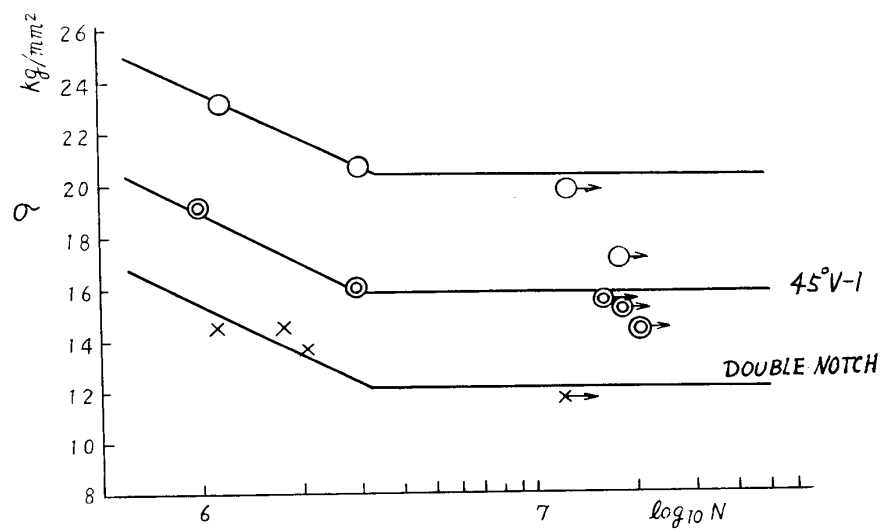


Fig. 11. Fatigue tests of N group.

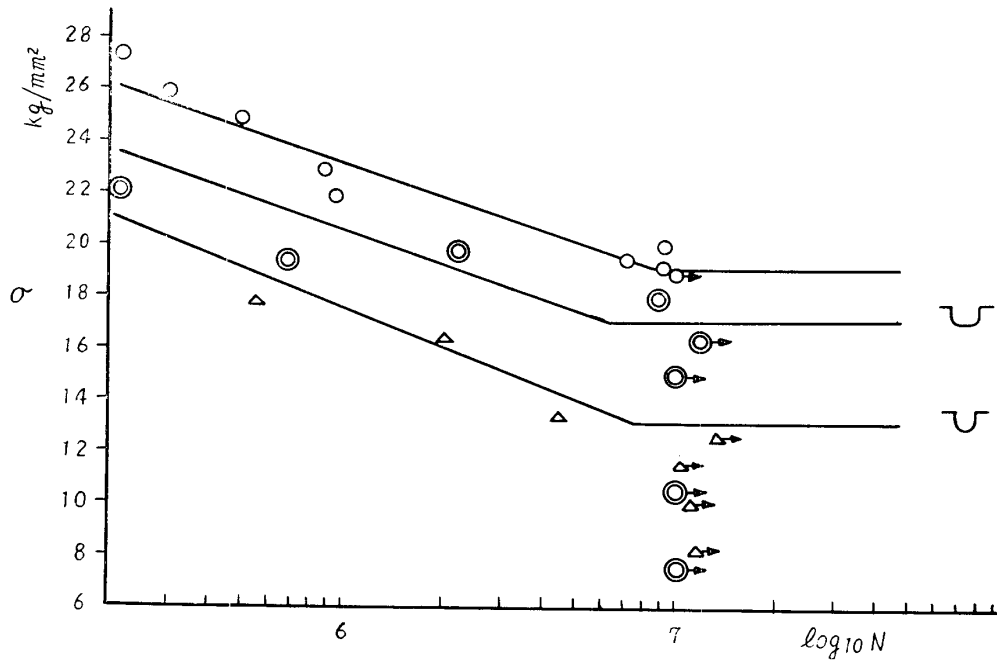


Fig. 12. Fatigue tests of O group.

久線の比較を示し Table 4. に見るようにU形 1.46 に対し矩形が1.17に低下している, すなわち前記の矩形切欠の切欠係数の低下を立証している.

Fig. 13 は区別 H の黄銅材の実験結果でこれより Table 4. の切欠係数がえられる. U形では鋼の場合と同等に現われているが矩形では鋼における値に比して

高くなっている. これは黄銅材では矩形溝の隅角部に加工硬化を生じる程度が小さいためであろう. $45^\circ V-1$ の3.2の値は少し大きすぎるようにも感じるが全体的に見てこの材料は尖鋭切欠に対して耐久性が低くなっている. なお区別 E, I の耐久線図は省いた.

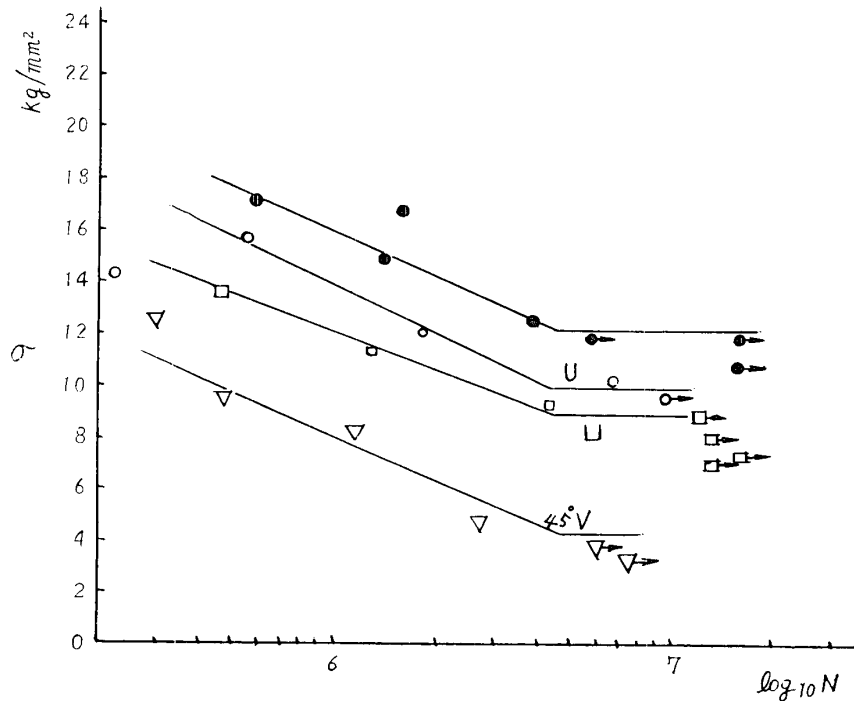


Fig. 13. Fatigue tests of H group.

5. 結 論

光弾性実験による応力集中率は単列のものと三列のものでは幾分相異しているが両者の値の平均をとって U ($\rho = 1.0$) ... 1.82 60°V ($\rho \doteq 0.05$) ... 2.30 矩 ($\rho \doteq 0.05$) ... 2.05 を採用することにする。

ノイバーの形状係数は Table 4. より選出して

U ($\rho = 1.0$) ... 1.60 45°V ($\rho \doteq 0.05$) ... 1.95 60°V ($\rho = 0.05$) ... 1.82 90°V ($\rho \doteq 0.05$) ... 1.76

とする。これに対して低炭素鋼についての切欠係数はこの実験結果より

U ($\rho = 1.0$) ... 1.45 ~ 1.55 60°, 90°V ($\rho \doteq 0.05$) ... 1.6 ~ 1.7 矩 ($\rho \doteq 0.05$) ... 1.3 ~ 1.4 を適正值と認めることにする。

矩形の切欠係数が最小になる原因は隅角部に先ず加工硬化を生じてこれが溝底平坦部に拡がり疲労層が厚くなって疲労強度は増大するためと推定する。したがって矩形切欠では隅角の曲率半径 ρ 、切欠深さ t とともに溝幅の影響が大きくなる、このことは区別 O の実験結果からも立証され丸軸に矩形切欠を付けるような場

合に参考となる。

4-6 黄銅材は引張強さは比較的大きいが低炭素鋼に比して延性が小で平滑材の耐久限度も低い。切欠係数は U 形では大体低炭素鋼と同程度であるが V 形、矩形では高くなっている。

U ($\rho = 1.0$) ... 1.53 60°V ($\rho \doteq 0.05$) ... 1.7 ~ 1.8 矩 ($\rho \doteq 0.05$) ... 1.6 ~ 1.7 である。矩形の切欠係数が U 形よりも高くなっており、低炭素鋼の場合と順序が相異しているのは前記の加工硬化が生じ難く疲労層も比較的薄くなる結果と推定する。この場合の皿形破面は鋼のそれと比較して粗面を呈している (写真省略)。

以上本報においては基本形状の切欠をもつ丸軸の回転曲げ疲労に対する切欠係数について検討したがこれらはいわゆる任意の深さの切欠の一つの場合であって切欠深さを変えた場合にいかになるか、また多列溝間隔を小にしたときの切欠干渉、二重切欠における形状係数、切欠係数などについては次報に譲る。

* 昭和33年11月日本機械学会宇部臨時大会、講演前刷