

外周切欠材の応力集中と回転曲げ疲労強度について

(第3報)

大野元明**・吉松靖雄*

Stress Concentration and Fatigue Strength of Notched Specimens Under Repeated Bending Moment (3rd Report)

Motoaki ŌNO and Yasuo YOSHIMATSU

Abstract

Continued from the 2nd report, we treat the identical problems of the stress concentration and fatigue limit under repeated rotating bending of the circular shaft with circumferential groove of a circular arc.

As to the stress concentration factor α_K of this type of notch, we can calculate approximately from author's formula, which regard this notch of circular arc as an equivalent elliptical form, and then these calculated values were compared with that of photoelastically measured.

We used 1.5kgm small type of endurance testing machine, whose test piece's dia. 6m/m, and repeating cycles per minute are 3,000. The obtained results of No. 1 and No. 2 low-carbon steel testpieces are that their notch factors 1.04~1.09, against to these stress concentration factors 1.37~1.45 calculated. From these results we see the characteristic curve of α_K to the a/H ratio (a : minimum breadth, H : maximum breadth) agrees with the β_K characteristic to the d_0/d ratio.

1. 緒言

第1, 2報¹⁾のU, V形状の切欠に次いで所謂円弧切欠の応力集中率およびその切欠係数について述べる。円弧環状切欠をもつ丸軸の回転曲げ疲労についてはH. F. Moorの実験²⁾その他があるが, 本報では前報と同様な方針によって形状係数の計算および実験を行ない, それと対照して2, 3の疲労実験による切欠係数を求めてみた。この場合の応力集中の大小を比較するための形状係数としては円弧形の対称切欠を有する帯板の板面内の均一曲げに対するものを用いる。ただし諸種の切欠形状についての形状係数の比較には別報の筆者提案の計算式³⁾を用い, これに光弾性実験を加えた。

円弧切欠の形状に関する要素は板幅(または直径), 切欠円弧半径, 切欠深さの3者であり実験に際してはこれらの中2つ, すなわち板幅, 切欠円半径を定めて円弧対称切欠の帯板について形状係数を求め,

それと対照して外径および切欠半径を一定とした円弧環状切欠をもつ丸軸の回転曲げ疲労実験を行なった。

元来円弧切欠の形状係数はU, V形などのように尖鋭切欠を生ずることがなくその値が低くしたがって切欠係数も小さい。

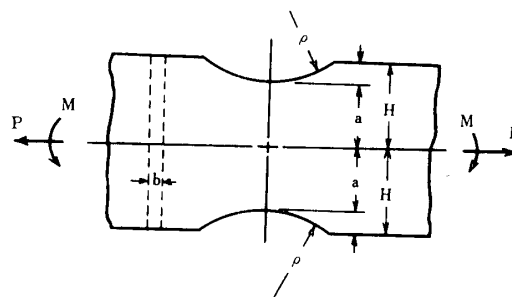


Fig. 1 Signs of the flat bar specimen with symmetrical circular arc notches.

2. 円弧切欠の応力集中率

Fig. 1のような円弧状の半面对称切欠を有する帯

** 機械工学科

* 宇部興産派遣学生

板の軸方向引張および平板面内の均一曲げに対して谷底A点に生ずる応力集中率は同一切欠半径を有する半楕円切欠に置換して近似的に次式によって計算する。

$$\text{引張 } \alpha_K = 1 + \frac{a}{H} \frac{t}{C} K_C \quad (1)$$

$$\text{曲げ } \alpha_K = 1 + \left(\frac{a}{H}\right)^2 \left(K_C - \frac{t}{H} \lambda_C\right) \quad (2)$$

$$\text{ただし } C = \sqrt{t\rho}$$

$$l_0 = [1.35 + 0.1\sqrt{t/H}]C \quad (3)$$

$K_C, \lambda_C =$ 第2図より求める。

計算は t/H によって l_0/C を(3)で計算し、これにより K_C または λ_C を求め(1)または(2)へ代入して α_K を算出する。

K_C, λ_C は l_0/C の関数で別報³⁾記載のように電子計算機により正確な図を作っておく、Fig. 2は概略図である。

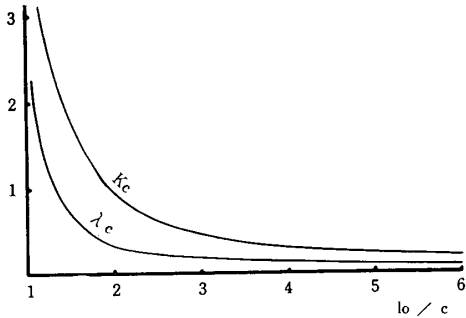


Fig. 2 Values of K_C and λ_C

ここで上式の計算例を一つ掲げておく。無限に広い平板に小円弧対称切欠がある場合の引張または曲げでは $t/H=0, a/H=1, l_0=1.35C, K_C=2, t/C=\sqrt{t/\rho}$

$$\alpha_K = 1 + 2\sqrt{t/\rho} \quad (4)$$

となる。 t/ρ を横軸にとって α_K を表わすとFig. 3となる。これは前記のように置換楕円の α_K である。この

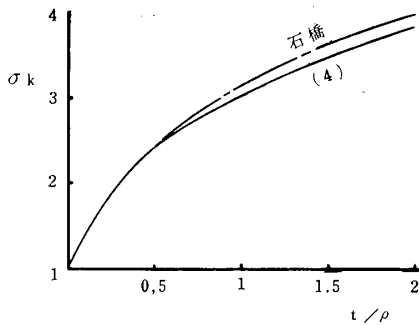


Fig. 3 $\alpha_K - t/\rho$ Diagram of infinite flat plate with symmetrical circular arc notches, subjected to pure tension.

場合の解析結果を石橋氏⁴⁾が与えているのでこれと比較すると図のように大差はない。 $t/\rho=2$ のときは円弧切欠は帯板の外縁に接する円孔となり、 t/ρ が2以上になることはないので(4)は近似的に円弧切欠に適用される。有限幅の円弧切欠帯板では幅に対して切欠円弧が無小から大きくなるにしたがって α_K はFig. 3のものより低下してゆく。この場合引張と曲げではその値は異り、曲げの方が α_K は小さくなる。

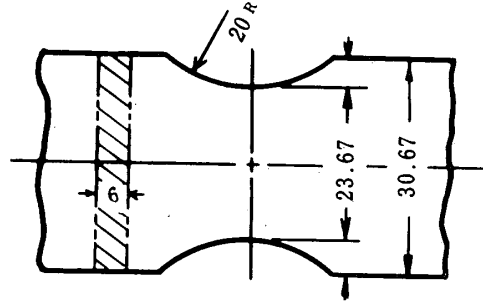


Fig. 4 Notch form of photoelastic test piece

Fig. 4は幅に対して切欠円弧が比較的大きいエポキシ樹脂板試験片で、この板面内の均一曲げに対して(3), (2)を計算すると $l_0/C=1.405, K_C=1.80, \lambda_C=0.74$ で $\alpha_K=1.37$ となる。これをノイバーのノモグラフで求めると $\alpha_K=1.25$ であるが前者の方が適切で

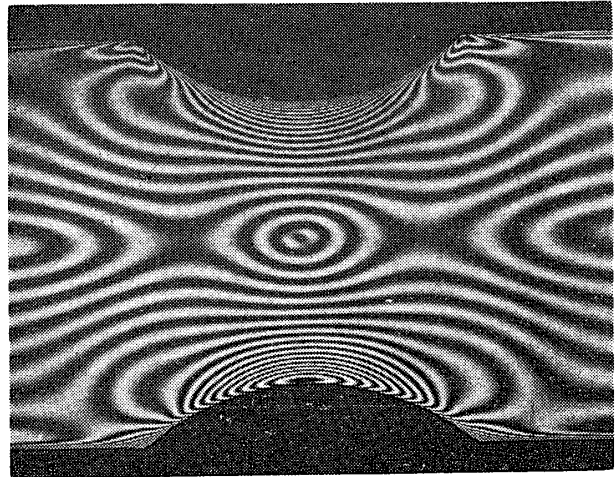


Fig. 5 Stress pattern subjected to pure bending

Table. 1 Results of Photo-elastic tests.

Bending Moment.	$M=1600\text{kg} \cdot \text{mm}$
Fringe Order.	$n=18.5$
Section Modulus	$Z=550\text{mm}^3$
Fringe Stress.	$s=0.202\text{kg/mm}$
Normal Stress.	$\sigma = M/Z = 2.86\text{kg/mm}^2$
Maximum Stress.	$\sigma_{\text{max}} = s \cdot n = 3.74\text{kg/mm}^2$
Stress Concentration Factor.	$\alpha_K = 1.31$

と思う。Fig. 5は上記試験片の光弾性縞写真で測定値はTable. 1の通りであり $\alpha_K=1.31$ であるが、これらの実験では支点幅の影響などのために測定値が幾分低くなるようであるから計算値1.37が適当な値と判断される。

これらの平面切欠の形状係数を環状切欠をもつ立体

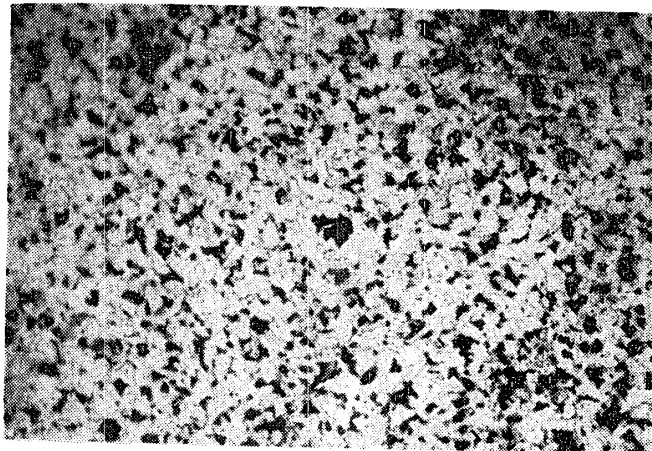
の丸軸の曲げに直接適用して比較する理由は幅の狭い縦断面層についての応力集中を考えるため、これは軟鋼丸軸の曲げ降伏において降伏開始応力が同じく幅の狭い縦断面層（短形）の安定降伏に当る $1.5\sigma_0$ （但し σ_0 は引張降伏点）で生ずることを併せ考えればよい。

Table. 2 Chemical composition and mechanical properties of test pieces.

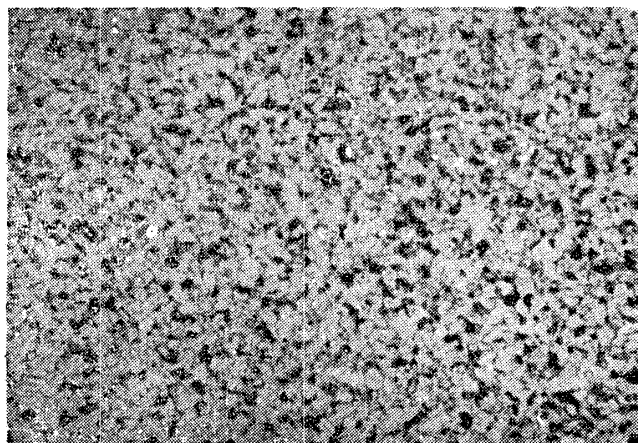
NO	C	Si	Mn	P	S	Mechanical properties			
						σ_e	σ_B	σ_T	H _V
1	0.22	0.24	0.50	0.021	0.023	—	—	—	175
2	0.18	0.23	0.42	0.045	0.022	—	67.9	105	156

3. 疲労実験

供試材料はTable. 2に掲げた化学的成分、機械的性質を有する低炭素鋼である。No. 1の機械的性質は都合により測定していないが、No. 2より降伏点、引張強さなどが幾分高い程度で顕微鏡組織もFig. 6に見るようにNo. 2の方が幾分細かい。



No. 1 steel



No. 2 steel

Fig. 6 Microstructure of No. 1 steel and No. 2 steel, $\times 300$

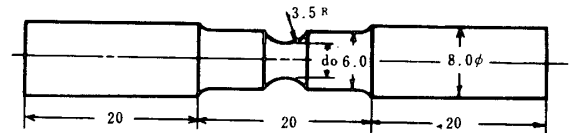


Fig. 7 Dimension of the test piece for the endurance test.

試験片の寸法はFig. 7の通りで、何れも外径6mm、切欠円弧半径3.5mmで $\rho/d=0.58$ である。谷底直径（最小軸直径） d_0 はTable. 3に記入してある3種類で、 d_0/d の値がNo. 1材で0.7 No. 2材で0.8および0.9になっている。No. 1材の寸法は先に測定した光弾性試験片と相似になっている。

Fig. 8は種々の ρ/d に対して(2)、(3)で計算した α_K を d_0/d を横軸にとりて図示したもので、 d_0/d が約0.85において α_K が最大になっている。この実験の $\rho/d=0.58$ に対しては図示となる。なおこのような曲線的な α_K の変化は河本氏⁵⁾の計算式によるものとほとんど一致する。（注 a/Hは d_0/d に対応する。）

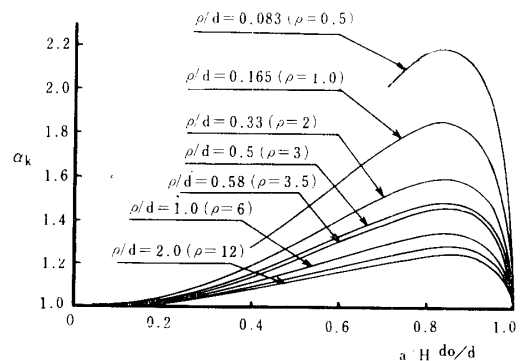
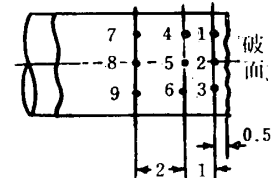


Fig. 8 α_K -characteristic to the a/H ratio for bending.

Table. 3 Results of fatigue tests.

Material	Test-piece No.	d mm	d ₀ mm	σ kg/mm ²	Repeated number × 10 ⁶	Broken × Un-broken ○	Eccentricity mm	Tensile* strength kg/mm ²	Vicker's Hardness near the broken section												
									1	2	3	4	5	6	7	8	9				
No. 1	1	6.00		25.9	10.0081	○		70.4													
	2	6.00		22.4	10.3190	○		71.5													
	3	5.99		30.6	4.0118	×			154	172	161	186	166	160	171	187	161				
	4	6.00		33.0	0.5948	×			195	187	178	147	178	188	146	201	183				
	5	5.99		30.0	10.0133	○		73.3													
	6	6.00		29.5	1.8294	×			195	183	203	188	191	190	188	179	191				
	7	6.00		29.0	14.3617	○		72.2													
	8	6.00		31.4	2.6652	×			163	182	164	182	182	168	178	170	177				
	37	5.98	4.26	26.6	10.4984	○		92.0													
	38	5.98	4.18	29.9	3.9272	×		1.0	165	187	174	177	175	161	169	176	175				
	39	6.05	4.22	28.5	6.9030	×		1.8	188	163	199	186	193	192	191	176	185				
	40	5.98	4.25	29.2	12.8352	○		90.8													
	41	5.99	4.27	27.5	12.3514	○		90.7													
	42	5.99	4.23	30.9	0.9432	×		1.5	146	165	173	153	166	149	152	157	151				
	43	5.99	4.23	32.9	0.8065	×		1.1	197	169	162	192	178	179	164	180	166				
44	5.99	4.23	28.9	10.3332	○		91.2														
45	5.99	4.23	32.2	1.0567	×		0.5	181	176	199	177	175	181	175	175	171					
No. 2	9	6.03	4.79	27.6	0.3452	×	1.5		154	182	152	152	177	153	152	156	170				
	10	″	4.76	33.2	0.2007	×	0.5		176	169	172	177	167	175	159	161	193				
	11	″	4.81	29.8	0.2603	×	1.5		172	173	172	164	180	170	174	163	158				
	12	″	4.84	26.1	10.2529	○		85.92													
	13	″	4.83	24.9	4.9063	×	1.5		152	145	179	171	137	176	168	167	178				
	14	″	4.84	24.8	1.1209	×	1.5		164	189	176	170	172	152	179	178	179				
	15	″	4.76	21.2	13.5552	○		85.44													
	16	″	4.76	23.6	12.5687	○		85.10													
	17	″	4.75	27.1	10.0858	○		86.39													
	18	″	4.71	29.4	0.7266	×	1.0		174	171	154	142	165	168	178	168	166				
	19	″	5.43	32.0	1.8037	×	1.0		158	160	177	177	185	170	151	136	175				
	20	″	5.43	30.2	10.7020	○		78.21													
	21	″	5.44	28.8	10.6392	○		78.35													
	22	″	5.38	30.0	4.5014	×	1.0		152	178	160	173	181	155	187	167	165				
	23	″	5.40	34.3	0.3209	×	1.0		182	176	207	182	179	180	178	170	175				
	24	″	5.40	27.2	10.0530	○		78.35													
25	″	5.43	35.2	0.3160	×	1.0		190	169	177	172	190	183	152	171	175					
46	″		30.4	3.8378	×			153	175	181	157	154	157	168	171	163					
47	″		28.0	10.6619	○		67.65														
48	″		29.2	10.7381	○		67.97														
49	″		31.6	4.4270	×			179	167	177	153	164	176	167	162	182					
50	″		36.2	0.4690	×			152	165	186	148	158	181	152	164	178					
51	″		33.9	0.8574	×			167	161	164	158	177	165	167	146	163					

Note. *: Tesile strength of unruptured testpieces.



疲労実験に用いた試験機は1.5kg・mの小型回転曲げ疲労試験機で繰返数は毎分3000である。実験方法は前報のものと同様に屈間のみの連続運転とし、107回の繰返数を非破断繰返数とした。

実験結果はTable. 3の通りで、これよりFig. 9, Fig. 10の耐久線図がえられる。耐久線図は若干精度が不足であるが、No. 1, No. 2ともに平滑材の耐久限度は30kg/mm²とせられ、切欠係数はTable. 4のようになる。これは第8図に示した α_K の大小と大体同様に現われている。

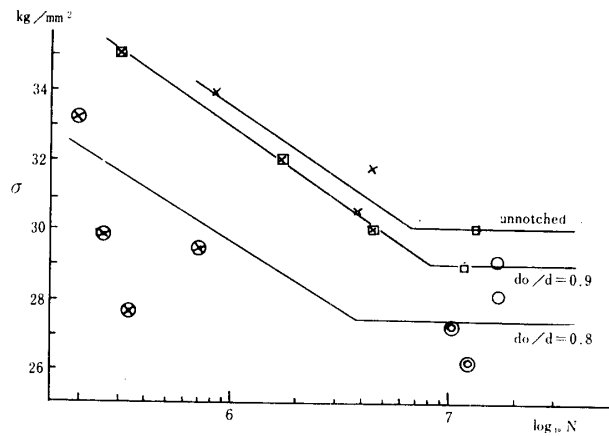


Fig. 10 Fatigue limits of No. 2 material.

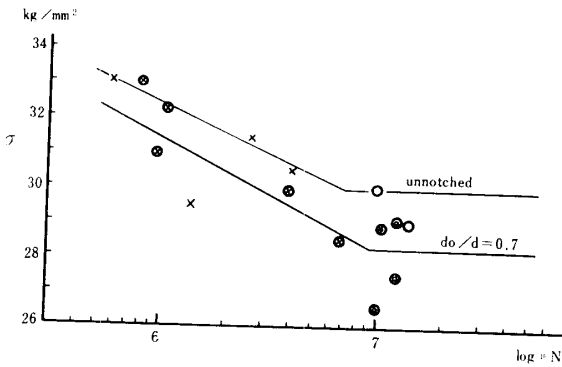


Fig. 9 Fatigue limits of No. 1 material.

Table. 4 Calculated α_K and Measured β_K .

	d_0/d	α_K	β_K
No. 1	0.7	1.37	1.05
No. 2	0.8	1.45	1.09
	0.9	1.44	1.04

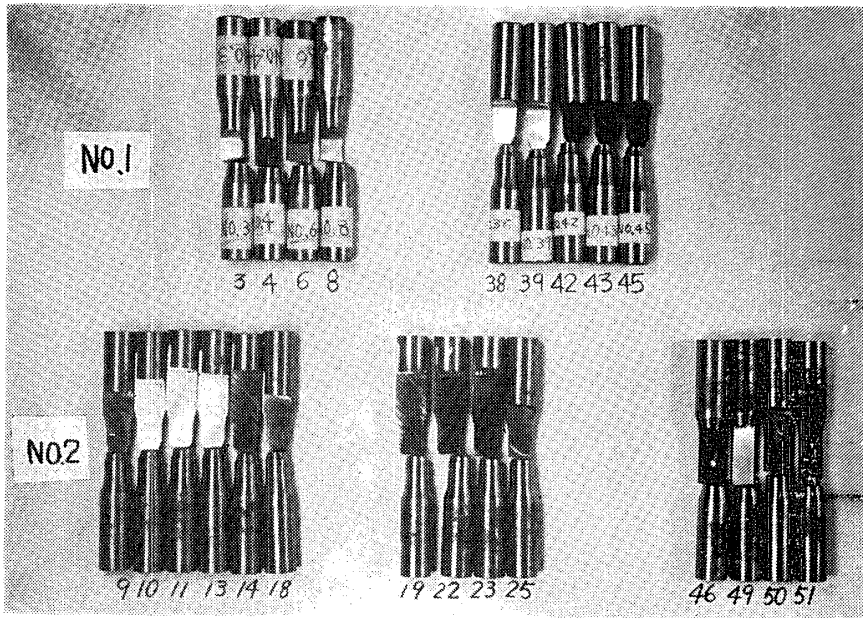


Fig. 11 Tested pieces.

これらの切欠係数の実験値を検討するために H. F. Moor が0.49% C 鋼で実験した結果と比較してみると、彼の実験では $d=10.16\text{mm}$, $d_0=7.24\text{mm}$, $\rho=6.35\text{mm}$ で $\rho/d=0.62$, $d_0/d=0.72$ であって切欠係数は1.09である。 ρ/d , d_0/d は No. 1 のものと著しく異っていないのでその値1.05と対照できるが、材料

の炭素量も異なるので当然一致すべきものではない。

先の Table. 3 中の偏心量は急進破面の中心の試験片中心よりの偏心量、未破断強さは破断しなかった試験片を引張って測った引張強さ（未破断の断面積で荷重を除いた値）を表わし、ビッカース硬度は破断面附近の硬化程度を知るために表下図の位置で測定した値

を示す。これらは何れも統計的な資料の一部を構成するもので本報では参考に止めておく。Fig.11は供試々験片を示す。

4. 結 言

前報U, Vの場合と同様に、円弧形対称切欠を有する帯板の板面内の均一曲げに対する形状係数を(1)~(3)式にて計算し、これを切欠係数との比較の基準にとることとした。この計算式による値は石橋氏の解析による結果や河本氏の計算式による結果ともほぼ合致することが知られ、筆者の光弾性実験結果によっても適正な値を与えることを示した。

この円弧切欠では板幅または切欠円弧半径が一定の場合、板幅と切欠円弧半径の比が小さくなるほど α_K は小さくなる。換言すると第3図に示したように切欠半径に対して幅が非常に大きくなったとき α_K が最大($t/\rho = 2$ のとき α_K は約4)であり、したがって有限

幅(または直径)の円弧切欠はU形やV形のように尖鋭な形をとることがなくそれらの α_K よりも一般に小さく切欠係数もこれに応じて小さい。

(2), (3)式で計算すれば、幅と切欠半径の2つを一定にして切欠深さを変えた場合に谷底幅(最小断面部の幅)と板幅の比が0.85附近で α_K が最大になるが、円弧環状切欠の丸軸の回転曲げ実験による切欠係数 β_K もこれに応じて同様な傾向を示すことが知られる。

参 考 文 献

- 1) 大野：山口大学工学部学報，15巻1号，(昭.40.4)，16巻1号，(昭.40.11)
- 2) H. F. Moor.：日本學術振興会，金属材料。
- 3) 大野，吉松：日本機械学会北陸信越地方講演会，前刷，(昭.41.9)
- 4) 石橋正：日本機械学会誌，(昭.15.4)
- 5) 河本実：日本機械学会論文集，17巻61号，(昭.26)

(昭和41年10月15日受理)