

半月形みぞを有する炭素鋼のねじり疲労試験 について

齋藤 葆・宮野 泰治・山崎 保輔

On the Torsional Fatigue Test of Carbon Steel Shafts with a Wood-Ruff
Key Way

Shigeru SAITO, Taiji MIYANO and Yasusuke YAMAZAKI

(昭和47年10月31日受理)

1. 緒 言

キーマズを有する軸のねじり疲労に関しては、普通の沈みキー型に対して大江、植田¹⁾や Gough²⁾らが実験を行っているが、半月キー型に関してはあまり見当らずわずかに回転曲げ疲労に関して森島ら³⁾の実験が見られる。またキーマズを有する丸軸のねじりにおける応力集中係数に関しては小数小範囲のもの^{4)~6)}しか得られていず、特に半月キーマズに関してはいまだ見当らないようである。

本報告では、炭素鋼試験片に幅および深さを異にする4種の半月形みぞを加工して繰返しねじり疲労試験を行い、みぞ寸法とねじり疲労強度との関係およびそれらの疲労破壊の様相を観察して応力集中の状態を検討した。以下にその結果を報告する。

2. 実験方法

実験に使用した材料は市販されている直径 25mm の S45C 炭素鋼で、これに 800°C 1時間の焼鈍を施し、図 1 に示すような試験片形状に機械加工をした。試験片材料の熱処理後の機械的性質は表 1 に示す通りである。なお試験片の平行部の直径は 12mm で、この中央に直径 16mm の半月キーマズフライスにより、幅 × 深さがそれぞれ 3mm × 2mm, 3mm × 4mm, 4mm × 2mm および 4mm × 4mm の 4種の半月形みぞを加工した。これらの試験片にて島津 10kg-m 曲げねじり疲労試験

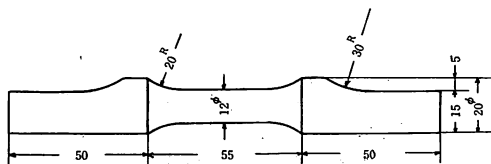


図 1 試験片形状

昭和48年2月

機 TB-10型によりねじり疲労試験を行った。なお繰返し数は毎分2,000回である。

表 1 機械的性質

材 料	降伏点 kg/mm ²	引張強さ kg/mm ²	伸び %	絞り %	かたさ HRB
S45C	35.0	58.0	25.9	53.1	81.9

3. 実験結果および考察

3.1 みぞの応力集中

一般にキーマズを持つ軸がねじりモーメントを受ける場合については、キーマズ端部の影響の及ばない中央部分すなわち真直棒のねじりとしての応力集中問題と、キーマズ端部の形状による応力集中についての2つの問題について考えねばならないと言われている⁶⁾。しかしこの前者の問題については Leven の数値計算⁴⁾や大久保の理論解⁵⁾等があるが、いずれも小数、小範囲の場合について応力集中率を求めているのみであり、また後者の問題については sled-runner 型のキーマズについてのみ西田ら⁶⁾が実験している程度で他には見当らないようである。

以上の応力集中の状態が半月形みぞの場合にも一部あてはまるものと仮定して、みぞ底と側面の交線付近に生ずる最大せん断応力 τ_{max} およびみぞ端部の隅に生ずる隅角の接線方向の垂直応力 σ_{max} のいずれかが疲労破壊の原点となるものとして以下の実験結果を考察した。そして τ_{max} はみぞの幅、みぞの深さ、みぞ底の丸み等の軸径に対する割合に支配されるが、 σ_{max} は図 2 に示す角度 ϕ と θ に支配されるものとした³⁾。 ϕ は円弧 AB の A における接線 AA' の傾き角、 θ は3次

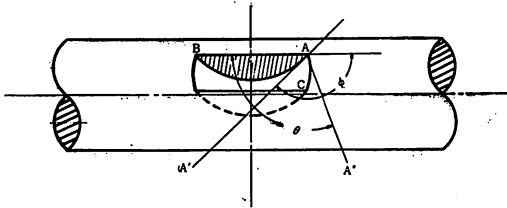


図2 みぞ端部の隅角

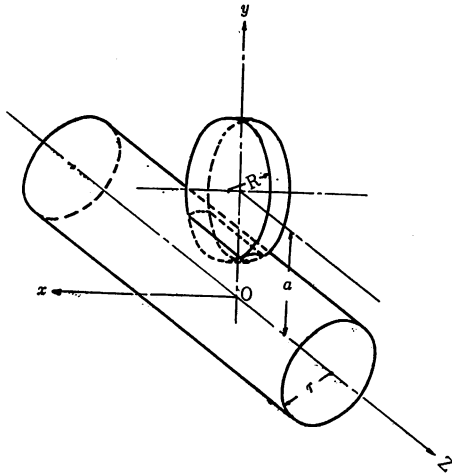


図3 半月みぞ加工の状態および座標系

曲線 AC の A における接線 AA'' と直線 AB とのなす角度である。φ と θ は次のようにして求められる。いま半径 r の試験片と半径 R のキーみぞフライスが相貫している状態を、図3のように座標軸を定めて示せば、3次曲線 AC の方程式は

$$y = \sqrt{r^2 - x^2}, \quad z = \sqrt{R^2 - (y-a)^2}$$

で、円弧 AB の方程式は

$$z = \sqrt{R^2 - (y-a)^2}$$

で示される。これから

$$\frac{dy}{dx} = \frac{-x}{\sqrt{r^2 - x^2}} = -\frac{x}{y}$$

$$\frac{dz}{dy} = \frac{-(y-a)}{\sqrt{R^2 - (y-a)^2}} = -\frac{y-a}{z}$$

$$\frac{dz}{dx} = \frac{-(y-a)}{\sqrt{R^2 - (y-a)^2}} \times \frac{-x}{\sqrt{r^2 - x^2}}$$

を得る。ここに a はキーみぞフライスと試験片の中心距離である。R = 8, r = 6, x = -1.5 および -2 とするとき θ および φ は次式によって計算される。すなわち

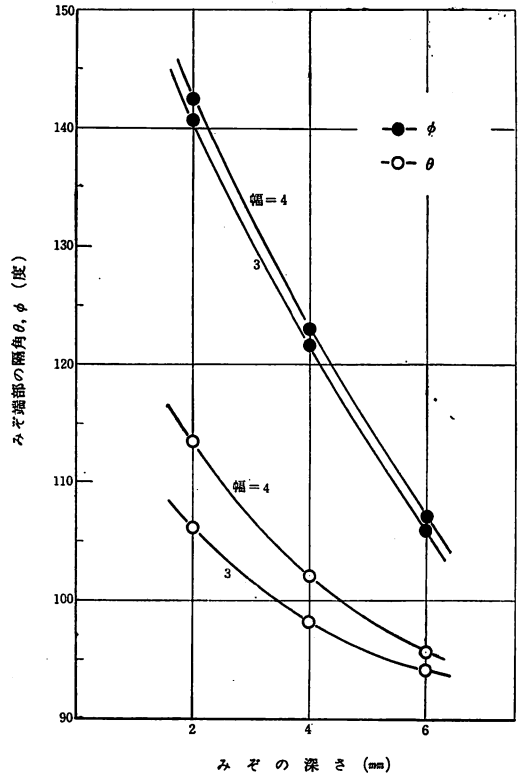


図4 半月みぞ端部の隅角 θ と φ

$$\cos(180^\circ - \theta) = \frac{\frac{dz}{dx}}{\sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dx}\right)^2}}$$

$$\tan(180^\circ - \phi) = \frac{dy}{dz}$$

みぞ深さ 2, 4 および 6 mm の場合について計算した結果を図4に示す。θ も φ もみぞ深さに対する変化の傾向は同じで、みぞ深さが増すと θ も φ も減少するが、同一みぞ深さに対してはみぞ幅の大きいものが角度が大きくなる。

3.2 疲労強度

各寸法の半月みぞに対する疲労曲線を図5と図6に示した。図5はみぞの幅 3 mm に対し深さが 2 mm, 4 mm のもの、図6はみぞの幅 4 mm に対し深さが 2 mm, 4 mm のものである。またこの図6には図5の疲労曲線も破線で合せ示してある。これら各図の縦軸にとったせん断応力はすべて試験片平滑部のねじり応力である。各みぞ寸法に対する疲労限度を表2および図7に示した。以上の実験結果より、疲労限度はみぞ幅が同じであれば、みぞ深さの大きいものが小さく、また同じみ

ぞ深さに対してはみぞ幅が大きいものが小さい。しかし同一みぞ深さに対するみぞ幅の違いが疲労限度の大小に及ぼす影響は、同一みぞ幅に対するみぞ深さの違いによるそれに比べればはるかに小さく、みぞ深さが同じであれば疲労限度に対してはみぞ幅の大小はあまり問題とならないようである。なお疲労限度付近の疲労破壊はその

破断の状態より、すべてみぞ端部の隅から軸線と45°方向に疲労き裂が入って破断しているの、みぞ端部の応力集中 σ_{max} で破壊したと考えられる。これを図4の θ と ϕ でみれば、みぞの深さが同じ場合の幅による θ, ϕ の変化よりも、みぞの幅が同じ場合の深さに対する θ, ϕ の変化が大きいことと関連している。すなわちみぞ幅よりもみぞ深さによって θ, ϕ は大きく変化する。言い換えればみぞ端部の応力集中の度合はみぞ幅よりもみぞ深さによって大きく影響され、それが疲労限度の違いにあらわれたとみなしてよいようである。しかし、いまこの半月みぞにおいて θ と ϕ だけがみぞ端部の応力集中を支配するものであり、 θ と ϕ が小さい場合に切欠きによる応力集中が大きいとすれば、同じみぞ深さに対してはみぞ幅の小さい方が、またみぞ幅が小さくてみぞ深さの大きいものが応力集中が大きいと言える筈である

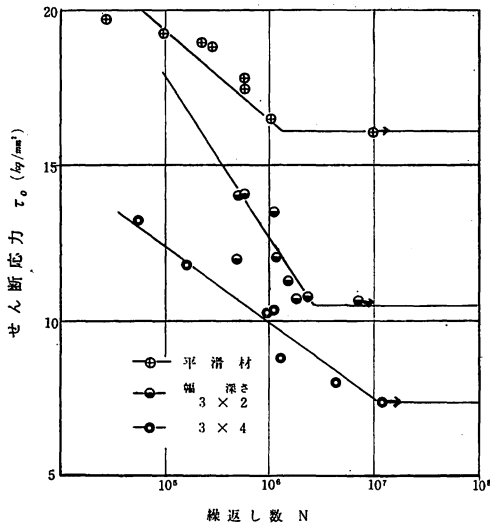


図5 半月みぞ(幅3 mm, 深さ2 mm, 4 mm)の疲労曲線

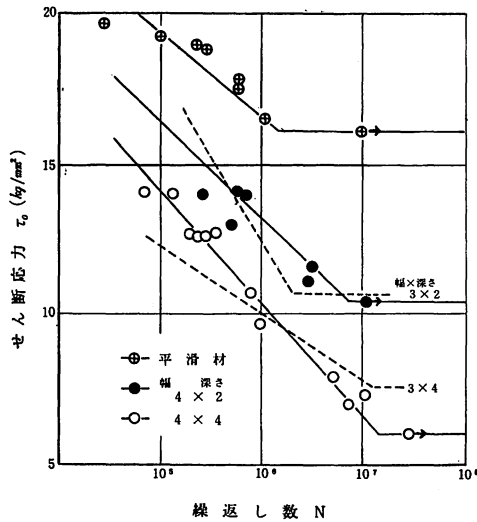


図6 半月みぞ(幅4 mm, 深さ2 mm, 4 mm)の疲労曲線

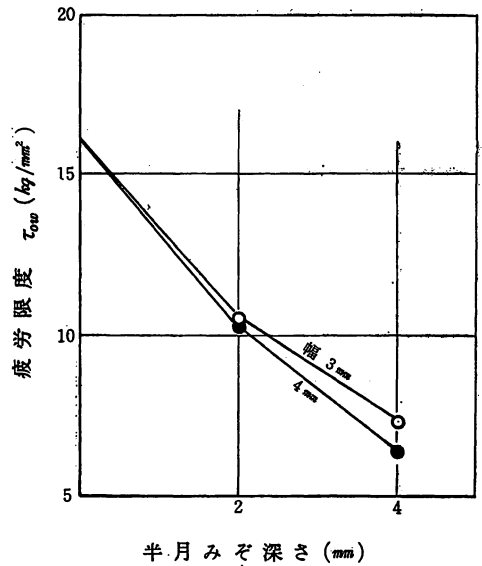


図7 半月みぞ寸法と疲労限度の関係

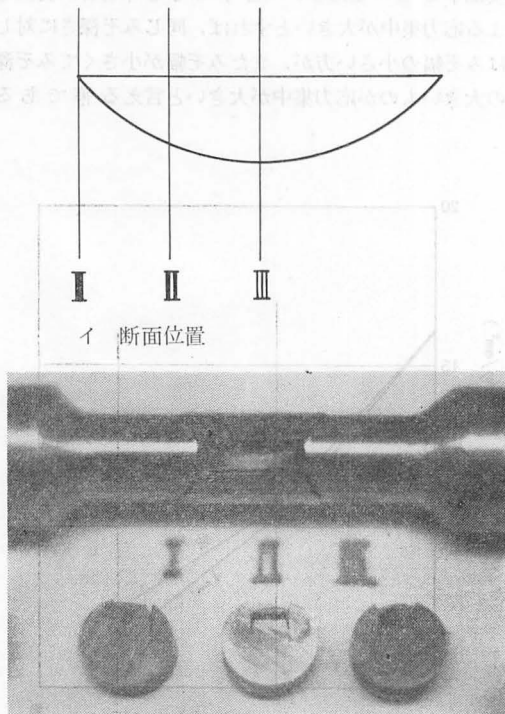
表2 疲労限度と切欠係数

	疲労限度	切欠係数
平滑材	16.1 kg/mm ²	1
幅 深さ		
3 × 2	10.6	1.52
3 × 4	7.3	2.21
4 × 2	10.4	1.56
4 × 4	6.4	2.52

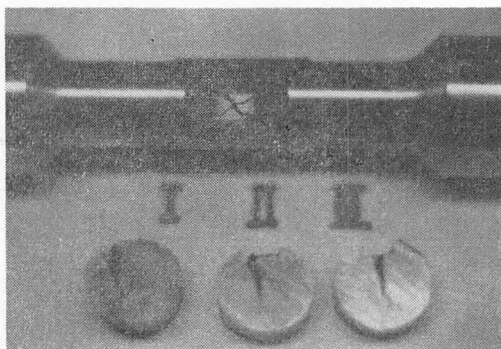
が、この実験結果からは、むしろ同じみぞ深さに対してはみぞ幅の大きいものが少し疲労強度が大きくなる傾向がみられた。これはみぞ端部の応力集中を支配するのは主として θ と ϕ であっても、みぞ底の応力集中がまったく影響しないのではなく、2つの部分の応力集中が互に関連しているためであろうと考えることが出来る。さらに θ と ϕ の理論値と実際の工作上的の値との誤差および隅角の丸み等についても今後の検討課題である。

3.3 破断状態

試験片の破断の様相を観察すると2つの形態に分類出



ロ みぞ底と側面の交線上の割れ



ハ みぞ端部の隅からの割れ

図8 疲労破断の様相

来た。すなわち、みぞ端部の隅から軸線と 45° 方向に疲労き裂が進行し、みぞ底を斜に走って破断したものと、みぞ底と側面との交線上から疲労き裂が進行し、みぞ端部の隅まで進み前者の 45° 方向のき裂と交わり破断するものである。これらのことは3・1で仮定した応力集中の状態にあてはまるもので2つの応力集中部のいずれかが破壊の原点となったと考えられる。図8に2つの破断状態の例を示した。なおこの図には図中の I, II, III の各断面の疲労き裂の状態も示してある。

みぞ深さが 4 mm のものに対してはねじりモーメントの比較的小さい、すなわち疲労限度に近いほうの応力では前者の破断形態であり、ねじりモーメントの大きい方は後者の破断形態であった。またみぞ深さが 2 mm の場合はすべて前者の破断形態であった。しかし前者の形態で破断したものでも、そのみぞ底を顕微鏡でみると 0.1~0.2mm くらいの微視的クラックが観察された。

これらのことから、試験片は応力集中の発生しているすべての点に疲労き裂が発生するが、みぞの寸法状態とねじりモーメントの大小によって各部分の応力集中の度合が異なり、各疲労き裂の成長速度もそれに対応し、みぞ底から破断したりあるいはみぞ端部の隅から破断するものと考えられる。本実験の場合は、みぞ深さ 4 mm のものは繰返しねじりモーメントの大きいときは主としてみぞ底の応力集中で、繰返しねじりモーメントの小さいほうでは隅の角度 θ と ϕ による応力集中で、またみぞ深さ 2 mm のものはすべて隅の角度 θ と ϕ による応力集中が主になって疲労破壊に至ったものと考えられる。以上から疲労限度付近の応力では主としてみぞ端部の隅の応力集中が問題になるであろう。

しかしそれらの2つの応力集中はそれぞれ独立して影響するものでなく複雑に関連しあっているものであらうと思われる。これらのことについては多くの種類の半月みぞに対する応力集中係数およびその疲労き裂の成長過程について検討する必要がある。

4. 結 言

本実験の結果を要約すれば次の通りである。

- (1) 半月形みぞを有する丸軸のねじり疲労はみぞの中央部分の応力集中と、みぞ端部の隅の形状による応力集中との2つに分けて考えねばならない。
- (2) みぞ深さ 4 mm のものは過大荷重ではみぞの中央部で、疲労限度近くの低荷重ではみぞ端部の隅から、またみぞ深さ 2 mm のものはすべてみぞ端部の隅から破断する傾向がみられた。

したがって疲労限度近くの応力状態の繰返しねじりで

はみぞ端部の応力集中が問題になると考えられる。

(3) みぞ端部の破断状態は、みぞ端の隅に疲労破断の原点を持ち、これより軸方向に対し45°方向に割れて行き、みぞの底と側面との交線上には巨視的な割れは生じない。しかし顕微鏡で見るとこの部分にも微小なクラックが確認出来た。このことから疲労き裂は応力集中の起る何れの点にも生ずるが、そのうちの1つが成長して破断に至るものと思われる。

(4) 実験の範囲内では疲労強度に対して、みぞの幅の影響は深さのそれよりも少なく、深さが同じであれば幅の大小はあまり問題とならない。これはみぞ端部の隅の角度が幅よりも深さによって大きく変ることと関連している。しかし必ずしも隅の角度が小さいものは疲労強度が小さいというものではなかった。このことからみぞ底の応力集中とみぞ端部の応力集中はそれぞれ独立しているのではなくて相互に影響しあっていると考えられる。

本論文では、みぞの形状が4種のもののみであるが、

さらに多くのみぞの種類について、また応力集中係数や、疲労き裂の進展、成長の様子など多くの実験をまとめて検討しなければならない問題である。

最後に、以上の実験を行うにあたって協力戴いた当時学生、根本裕三、米沢谷栄一君らに感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 大江, 植田, 機械学会講演前刷集, No.50 (61-10, 東京秋期大会)
- 2) H・F・Gough, British Aero. Res. Com. Rep II, p. 488 (1924/25)
- 3) 森島, 田中, 材料試験, 9, 85, 625 (1960)
- 4) M・M・Leven, SESA, 7, 2, 141~154 (1950)
- 5) H・Okubo, Quart. Journ. Mech. and Applied Math. III-2, 162~172 (1950)
- 6) 西田, 応力集中, 659~665, 森北

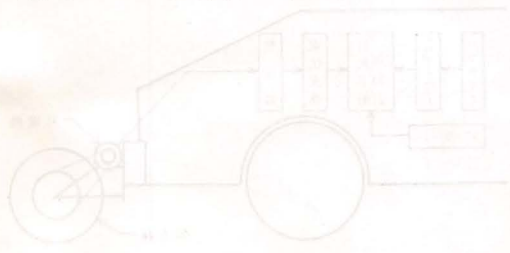


図1 ねじり試験装置の概略図

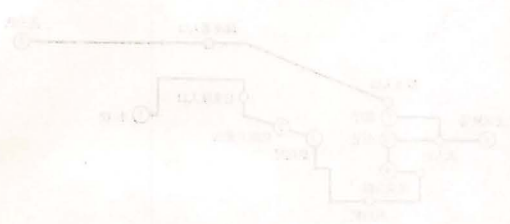


図2 試験片の形状寸法