

せん断型疲労き裂進展試験法の改良

福岡大学[院] ○岡崎三郎 草場敦司 福岡大学 遠藤正浩

Improvement of Shear-Mode Fatigue Crack Growth Testing Method

Saburo OKAZAKI, Atsushi KUSABA and Masahiro ENDO

1 緒 言

近年、機械設備・機器の長寿命化の要請に伴い、軸受や鉄道レール、製鋼用圧延ロールなどの部材において、摩擦・接触面で生じるはく離損傷が問題になっている。はく離損傷には、モードIの開き裂だけでなく、モードII, IIIのせん断型疲労き裂が大きく関与して起こることが明らかになっている。特に微小な寸法のせん断型疲労き裂の挙動についてはまだ不明な点が多い。本研究では、1 mm未満の微小なせん断型疲労き裂の進展試験ができる廉価な試験機の開発を目的としている。

2 従来の疲労試験法の問題点

高硬度鋼中のせん断型疲労き裂については、これまでに数グループが独自に開発した試験機を用いて、き裂進展の再現と下限値の測定に取り組んできた^{2,4)}。しかしながら、いずれも対象としているき裂は、実際に転がり疲労で問題になる微小疲労き裂よりはるかに大きい。

著者らの研究グループでは、静的な圧縮荷重下で繰返しねじり疲労試験を行うことにより、軸受鋼の介在物または人工欠陥から数10 μm ~ 1 mm程度のせん断型疲労き裂の挙動を調査する方法を提案した¹⁾。これまで、この研究において油圧式の軸ねじり疲労試験機を用いてきたが、大容量の油圧装置のために多大な電力を必要とし、試験機自体も高価である。また、高圧縮荷重下で達成できる繰返しねじりの速度は10 Hz程度と低い難点があった。

3 開発した試験機

ベース試験機：本開発では、一般に普及している共振型ねじり疲労試験機(島津 曲げ・ねじり疲れ試験機 TB-10 B, 33 Hz)をもとに新しく設計を行った。Fig.1に開発機の駆動部の一部と試験部を示す。負荷容量は50 N・mのままにし、試験速度のみ50 Hzに上げた。開発機の駆動源は電気式のインバータモータで、従来の共振型疲労試験機の問題点であった起動時の過大荷重はモータの回転数制御により解決した。

荷重計：開発機には、試験片(S)に作用する圧縮力とねじりモーメントを測定できるロードセル(L)が装備され、試験中の荷重がモニターできる。

自動調心機構：オリジナルの試験機では、繰返しねじりモーメントが負荷される試験片の片方は固定されている。しかし、完全に固定すると、2つのつかみ部の軸心がずれている場合や試験片との軸が一致していない場合、試験片に曲げが生じる。静的圧縮下で繰返しねじり試験を行う場合、この曲げの影響は致命的である。そこで、Fig.2に示す試験片軸(z軸)まわりのねじりモーメ

ント以外の全ての曲げモーメントを最小にする自動調心機構(F)を開発した。この機構は、一組の平行な薄い板の構造を複数異なる方向で組み合わせたもので、試験片軸まわりの回転には剛体としてはたらし、その他に対して変形を許容して支えないようになっている。

圧縮機構：静的圧縮力は、鋼板(P)によって試験片と油圧シリンダ(H)をはさみ、油圧シリンダの反力によって試験片の軸方向に負荷される。大きな静的圧縮力の干渉を最小限にして試験片に繰返しねじりモーメントだけを伝達する特殊な機械要素を開発した。

その他：開発機の試験片チャックには、市販の摩擦式締結具(椿本チェーン パワーロック)を用いた。これにより、試験片を旋盤で加工することが可能となり、また油圧式軸ねじり疲労試験機に用いる試験片形状を同一にすることができた。

機能と経済性：開発機と油圧サーボ疲労試験機とを比較すると、試験速度は約5倍、試験装置本体価格は1/10以下、設置スペースは1/30以下、電気量は1/400以下で、ほとんどメンテナンスフリーである。

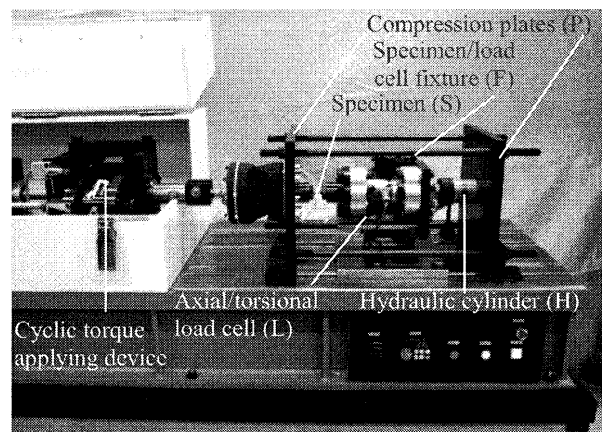


Fig.1 Resonance-type torsional fatigue testing machine modified for shear mode fatigue crack growth test.

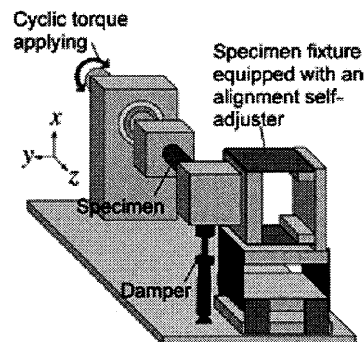


Fig.2 A schematic of specimen support mechanism.

4 検証試験

開発機によるせん断型疲労き裂の再現性を検証するため、過去の研究に用いられてきた MTS 社製の油圧サーボ軸ねじり疲労試験機と開発機の2台を用いて試験を行い、結果を比較した。

4.1 使用材料および実験方法

供試材は軸受鋼 SUJ2 である。840 °C で 30 分保持→油焼入れ→170 °C で焼戻しの熱処理を施した。Table1 に化学成分を示す。Fig.3 に試験片形状を示す。試験部はエメリー研磨後、バフ研磨で仕上げた。試験部断面において荷重 9.8 N で 20 点測定したピッカース硬さの平均値は $HV = 753$ であった。

試験環境は室温大気中、繰返しねじりモーメントの波形は sin 波、応力比 $R = -1$ 、繰返し速度 f は開発機が 50 Hz、油圧サーボ軸ねじり疲労試験機が 8 Hz である。静的圧縮応力 $\sigma_s = -1200$ MPa、試験部表面におけるせん断応力振幅 $\tau_a = 420 \sim 600$ MPa で試験を行った。き裂の発生・進展に応じて τ_a を変化させ、最終的にき裂が停留する限界応力 $\tau_{a \text{ non-propagating}}$ まで低下させた。10⁷ 回の繰返しの間にき裂の表面長さが変化しない場合をき裂の停留と定義した。

4.2 実験結果および考察

Fig.4 および Table2 では、(a) が開発機によって得られた結果、(b) が油圧サーボ式軸ねじり疲労試験機によって得られた結果を示している。Fig.4 は各疲労試験機によって得られた停留き裂の顕微鏡写真である。いずれもき裂は表面付近の非金属介在物より発生し、モード I 分岐を起こすことなく試験片軸方向に進展後、停留に至った。試験終了後、停留き裂の深さ方向の形状を逐次研磨によって調べた。いずれのき裂も、内部に分岐き裂は観察されなかった。また、内部ではき裂に沿って一部組織変化が観察された。

き裂を半だ円き裂とみなし、き裂全体の表面長さを $2a$ 、き裂長さを b として求めた。Table2 に停留き裂の寸法と試験条件をまとめる。これらの結果から、Kassir と Sih のせん断応力を受ける無限体中のだ円き裂の応力拡大係数の解⁵⁾を用いて、表面付近の ΔK_{Ith} とき裂底の ΔK_{IIIth} を近似的に求めた。その際、ポアソン比は 0.3、試験片表面から内部方向のせん断応力分布は一樣と仮定した。

2 つの停留き裂のアスペクト比はほとんど同じであった。近似解によって得られた ΔK_{Ith} と ΔK_{IIIth} の値にも大きな差はなかった。したがって、開発機は、油圧式疲労試験機と同様のせん断型疲労き裂の挙動を再現可能であるといえる。

5 結言

せん断型疲労き裂進展試験を安価に高速で行うことができる専用試験装置を開発した。開発機と油圧サーボ軸ねじり疲労試験機の両機を用いてほぼ同条件で実験を行った結果、同様のせん断型疲労き裂が再現できることを確認した。

参考文献

- 1) H. Matsunaga, N. Shomura, S. Muramoto and M. Endo, *Fatigue Fract. Eng. Mat. Struct.*, **00**, 1-11 (2010).
- 2) Y. Fujii, K. Maeda and A. Otsuka, *J. Soc. Mat. Sci., Japan*, **50**, 1108-1113 (2001).
- 3) A. Otsuka, Y. Fujii and K. Maeda, *Fatigue Fract. Eng. Mat. Struct.*, **27**, 203-212 (2004).
- 4) Y. Murakami, T. Fukuhara and S. Hamada, *J. Soc. Mat. Sci., Japan*, **51**, 918-925 (2002).
- 5) Kassir, M. K. and Sih, G. C., *J. Appl. Mech.*, **33**, 601-611 (1966).

Table1 Chemical composition of SUJ2 in wt. %.

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	O (ppm)
1.01	0.26	0.37	0.011	0.006	0.06	0.06	1.45	0.03	2.9

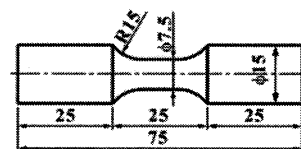
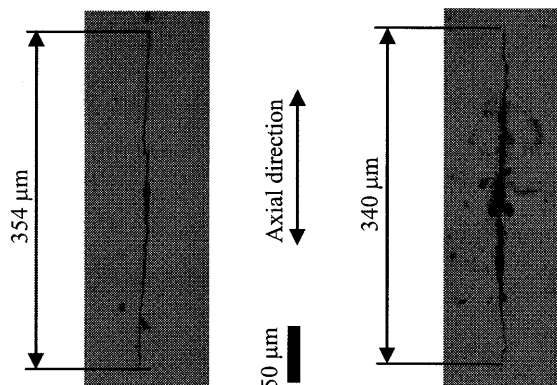


Fig.3 Shape and dimensions of specimen, in mm.



(a) Non-propagating crack obtained by developed testing machine. (b) Non-propagating crack obtained by servo-hydraulic testing machine.

Fig.4 Non-propagating cracks.

Table2 Test conditions, dimensions of non-propagating cracks and their thresholds.

	(a)	(b)
Testing machine	Developed testing machine	Servo-hydraulic fatigue testing machine
f (Hz)	50	8
$\tau_{a \text{ non-propagating}}$ (MPa)	480	420
N_{total} (cycles)	7.0×10^7	3.4×10^7
$2a$ (μm)	354	340
b (μm)	154	146
b/a	0.87	0.86
ΔK_{Ith} ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$)	16.1	13.7
ΔK_{IIIth} ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$)	12.1	10.3