フレットング疲労強度に及ぼす接触面圧の影響*

永田 晃 則**, 松 田 健***, 柏 谷 英 夫****

Effect of Contact Pressure on Fretting Fatigue Strength

Kohsoku NAGATA, Takeshi MATSUDA, and Hideo KASHIWAYA

The effects of contact pressure between the pad and specimen and the pad contact length on fretting fatigue strength were examined using NiCrMoV generator rotor steel and carbon steel pads. The fatigue limits at a low contact pressure decreased steeply with increasing contact pressure. At pressures higher than 100 MPa, the fatigue limits changed slightly with increasing pressure. The fretting fatigue strengths depended on the pad contact length. The effects described above were successfully explained by fictitious crack concepts and a stress intensity factor taking account of the applied stress, contact pressure and frictional force.

Key Words: Fatigue, Fretting Fatigue, Rotor Steel, Contact Pressure, Contact Length, Fracture Mechanics

1. 緒 言

微小な相対すべりを伴う接合部のフレットング疲労損傷を軽減することは構造設計上の難題のうちの一つでもある。その疲労強度に及ぼす相対すべり、接触面圧、平均応力、材質などを考慮し定量的に強度設計することは必ずしも容易ではなかった。しかしながらフレットング疲労における微小き裂⁽¹⁾、そのき裂の K 値解析⁽²⁾、疲労寿命解析⁽³⁾⁽⁴⁾、伝ば挙動の研究⁽⁵⁾などにより、フレットング疲労強度の定量的な評価が可能になりつつある。著者らもパッド端部間が接近することによりフレットング疲労強度は著しく減少し⁽⁶⁾、そのき裂の伝ばと停留挙動は K 値を用いて説明できることを報告している⁽⁷⁾。

さて、接触面圧の影響に関する研究は平川ら⁽⁸⁾のをはじめ、非常に数多く^{(3)(9)~(12)}行われている。それらによると疲労き裂の発生応力は面圧に反比例して直線的に低下するが、破断に関する疲労強度はある一定の面

圧以上では一定になるという傾向を示すことが明らかになっている。このことはある面圧以上ではき裂は停留することを意味するが、系統的な実験に基づいて、接触面圧の影響を破壊力学的手法によって検討した例は見当たらない。

そこで本研究では前報⁽⁶⁾⁽⁷⁾において考案したダブルパッド方式の試験装置を用い、パッド端部間が十分接近した場合と離れたシングルパッドの場合につき、疲労強度に及ぼす接触面圧とパッドの接触長さの影響を調べ、微小き裂に対する ΔK_{th} を用いて破壊力学的な考察を加えた。

2. 実 験 方 法

試験片の供試材は前報⁽⁷⁾に同じNi-Cr-Mo-V鋼で、パッド材は炭素鋼(S 55 C)の焼入れ焼戻し材で、それらの化学成分と機械的性質を表1、2に示す。

試験片とパッドの形状を図1、フレットング疲労試験装置を図2に示す。本試験装置は前報⁽⁶⁾⁽⁷⁾において、疲労強度に及ぼすパッド端部の接近効果を明らかにするために考案したダブルパッド方式のものである。

パッドの押付け荷重は図2に示す板状バネに貼付けたひずみゲージ出力により、また試験片とパッド間の摩擦力はパッド取付治具に貼付けたひずみゲージ出力

* 昭和61年7月1日 第23回シンポジウムにおいて講演、原稿受付 昭和61年8月20日。

** 正員、(株)東芝重電技術研究所 (〒230 横浜市鶴見区末広町2-4)。

*** 正員、(株)東芝京浜事業所。

**** (株)東芝重電技術研究所。

により計測した。試験片とパッド間の相対すべり量は負荷応力レベルに応じ、図2に示すクランプの位置を変えることによって調整した。図1に示す試験片とパッドの接触面は800番のエメリー紙で仕上げ、パッド端部には $\phi 0.05$ 程度の面取りを施した。

試験は、196 kNの電気油圧式疲労試験機を使用し、室温大気で行い、片振り引張り($R=0.05$)の荷重制御、繰返し速度10~15 Hzで行った。パッド端部の相対すべり量は $5\mu\text{m}$ 以上の一定振幅とし、接触面圧は50, 100, 200 MPaの三水準について試験した。またパッドの接触長さが疲労強度に及ぼす効果を調べるため、その接触長さが5, 10 mmのものについても試験した。接触面から試験片幅方向にき裂が $0.5\sim 1\text{mm}$ に達した時点で試験を中止し、疲労寿命とした。そのき裂長さは試験片側面に貼付けたクラックゲージの出力によって読取った。

表1 供試材の化学成分(%)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V
Specimen	0.24	0.10	0.32	0.007	0.005	3.71	1.60	0.27	0.12
Pad	0.56	0.21	0.75	0.01	0.01	—	—	—	—

表2 供試材の機械的性質

	0.2% proof stress MPa	Tensile stress MPa	Elongation %	Reduction of area %	Hardness Hv(10kg)
Specimen	790	895	25.3	71.3	269
Pad	634(*)	811	19.5	39.6	265

(*) Yield stress

図1 試験片とパッドの形状

図2 試験装置

3. 実験結果

3.1 接触面圧とS-N曲線 試験片とパッド間の公称面圧 P_n が50, 100, 200 MPaのときのS-N曲線を図3(a), (b)に示す。同図の $P_n=200\text{ MPa}$ のS-Nデータは前報⁽⁷⁾と同じであり、き裂長さ a が1 mmに達したときの寿命とした。同図(a)は二つのパッド端部間 C を0.25 mmまで接近したダブルパッド試験、同図(b)は $C=\infty$ とした通常のフレット試験(シングルパッド)の結果である。負荷応力 σ_a が20 MPa以下の場合、パッド端部に発生したき裂は1.5~2.3 mm成長して停留した⁽⁷⁾。

ダブルパッド試験の場合、片方のパッドの摩擦力によって発生する試験片表面の軸方向応力の影響範囲内に他方のパッド端が位置するため、負荷応力が実質上高くなる。このためダブルパッド試験による疲労強度はシングルパッド試験よりも著しく低下するものと考え⁽⁷⁾。

図3の疲労限度 σ_w と接触面圧の関係を示したのが図4である。 $C=0.25$ と ∞ の試験では疲労限度に及ぼす面圧の効果はほとんど同じ傾向にある。すなわち、 $P_n=100\text{ MPa}$ 以下では疲労限度は P_n の増加に伴って急激に減少するが、それ以上の面圧では応力の低下

(a) $C=0.25\text{ mm}$

(b) $C=\infty$

図3 接触面圧—S-N曲線

は極めて小さい⁽⁹⁾。

3.2 パッドの接触長さとS-N曲線 パッドの軸方向接触長さとフレッティング疲労強度の関係を調べるため、その接触長さ $l_0=5, 10 \text{ mm}$ について $P_n=100 \text{ MPa}$, $C=\infty$ の条件下で試験した結果が図5である。 l_0 が長くなると疲労寿命は全体に短くなり、それらの疲労限度は70から50 MPaに低下した。これは接触長さが長くなった分だけ接触面の摩擦力が増加し、フレッティング部の局所的な接触応力が高くなったことによるためと思われる。

3.3 摩擦力と相対すべり 試験片とパッド端部の相対すべり振幅 S_a と摩擦力の関係を $P_n=50, 100, 200 \text{ MPa}$ について図6に示す。同図の白抜き印は前報⁽⁷⁾の結果であり、黒印は図3に示した寿命の約1/2時点における測定結果である。 $P_n=200 \text{ MPa}$ のときの S_a は $5\sim 6 \mu\text{m}$ になるよう極力調整した。一方、 $P_n=50, 100 \text{ MPa}$ の場合には図6に示すように $S_a=5\sim 10 \mu\text{m}$ とばらついていたが、本研究結果は前報⁽⁷⁾とほぼ同じであった。

4. 考 察

4.1 接触面圧の影響 平川ら⁽⁸⁾と遠藤ら⁽¹³⁾のフレッティング疲労理論によれば、そのき裂発生応力は接触面圧と摩擦係数の積に反比例して低下するとい

う。しかしながらこの摩擦力は試験片表面に作用するため負荷応力が小さいときはフレッティング部に発生したき裂は約 $100 \mu\text{m}$ 以下で停留する⁽¹¹⁾⁽⁸⁾⁽¹¹⁾。面圧が高いほど静的圧縮応力が大きくなるため、このようなき裂の停留現象が生じやすくなる。このため破断寿命に対する面圧の効果は面圧が大きくなると消失すると考えられている⁽³⁾。そこで、図7は図4の疲労限度に対する ΔK_I と微小き裂長さとの関係を示したものである。 ΔK_I の算出は前報⁽⁷⁾に同じである。すなわち、パッド端部の試験片き裂を半無限板の端部き裂と仮定し、

$$K_I = 1.12(\sigma_m + \sigma_a)\sqrt{\pi a} + K_f + K_p \dots\dots\dots (1)$$

の最大値を ΔK_I とした。ここで σ_a, σ_m は負荷応力振幅、平均応力、 K_f は摩擦力、 K_p は接触面圧による K_I 成分である。 K_f と K_p はRookeら⁽²⁾が示した基本解を用いた。 K_f の算出に際し、 $P_n=200 \text{ MPa}$ のときは図6より $S_a=5\sim 6 \mu\text{m}$ に対する摩擦係数0.45を用い、一方 $P_n=50, 100 \text{ MPa}$ のときは同図より0.75を用いた。また K_p を求めるための面圧分布は、 $C=\infty$ のと

図4 接触面圧——疲労限度

図5 パッドの接触長さ——S-N曲線

図6 摩擦力と相対すべり

図7 $a-\Delta K_I$ の関係

図 8 パッドの接触長さ l_0 と ΔK_I

図 9 パッドの接触長さ l_0 と疲労限度

きは弾性接触論⁽⁷⁾による分布を、 $C=0.25$ mm のときは一様面圧分布を仮定した。

一方微小き裂に対する ΔK_{Ih} の修正⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁹⁾はHaddadら⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾によって提案された仮想き裂の考え方をを用いた。材料の固有き裂長さ a_0 (Intrinsic crack length) は供試材の $\Delta K_{Ih}=8$ MPa $\sqrt{m}$ 、 $\Delta\sigma_w=700$ MPa⁽⁷⁾より求めた。

図 7 において停留き裂の最大長さ 0.1 mm 以下で 2, 3 の実験データは微小き裂の ΔK_{Ih} よりも上側にあるが大半のデータは ΔK_{Ih} の 1 MPa $\sqrt{m}$ 以内に入っている。これより接触面圧がフレットング疲労限度に及ぼす効果は試験片の負荷応力、接触面圧と摩擦力を考慮した ΔK_I と微小き裂に対する ΔK_{Ih} を用いることによって説明できるといえる。

4.2 パッドの接触長さの影響 パッドの接触面形状として一般に円形⁽⁸⁾⁽¹¹⁾あるいは接触長さ l_0 の短い平面形が多用されている。 l_0 が大きくなると摩擦力の和が増加するばかりでなく、その摩擦力と接触面圧が長いき裂にまで影響するであろうことが予想される。このため、フレットング疲労試験による強度の絶対値は前述した諸因子はもちろんのことパッドの形状によっても左右される。

ΔK_I とき裂長さの関係に及ぼす l_0 の影響を示したのが図 8 である。ただし、 $C=\infty$ 、 $P_n=100$ MPa、摩擦係数 0.75、 $\sigma_m=\sigma_a=0$ の条件で算出した。同図より l_0 が長くなるにつれ摩擦力と接触面圧による ΔK_I とその立上りこう配が大きくなるとともに、最大値を示すき裂長さも長くなる。このため l_0 がフレットング疲労寿命や停留き裂の限界長さにも著しく影響するであろうことがわかる。

一方、図 9 は図 5 に示した疲労限度と l_0 の関係を示す。限界停留き裂長さが材料の固有き裂長さ a_0 に等しいと仮定して、 $a=a_0$ における ΔK_I 値が $\Delta K_{Ih}=5.7$ MPa $\sqrt{m}$ に等しくなる負荷応力を求めた結果が同図に示す曲線である。 ΔK_I の算出方法は 4.1 節と同じで

ある。 $l_0=5, 10$ mm の実験値と疲労限度の推定曲線はよく一致している。

5. 結 論

Ni-Cr-Mo-V 鋼の試験片と炭素鋼のパッドを用い、接触面圧 (50, 100, 200 MPa) とパッドの接触長さ (5, 10 mm) がフレットング疲労強度に及ぼす影響を調べ、破壊力学的手法によって検討した結果以下の結論が得られた。

- (1) 疲労限度は接触面圧の増加に伴って急激に減少するがある面圧以上ではその減少率は小さくなった。
- (2) パッドの接触長さが短くなると疲労寿命は長く、疲労限度は高くなった。
- (3) 接触面圧とパッドの接触長さが疲労限度に及ぼす効果は、負荷応力、接触面圧と摩擦力を考慮した ΔK_I と微小き裂に対する ΔK_{Ih} によって説明できることを示した。

文 献

- (1) Endo, K. and Goto, H., *Wear*, **38** (1976), 311.
- (2) Rooke, D. P. and Jones, D. A., *J. of Strain Analysis*, **14**-1 (1979), 1.
- (3) Edwards, P. R., (Waterhouse, R. B. 編), *Fretting Fatigue*, (1981), 67, Applied Science Publ.
- (4) 田中・ほか 2 名, 機論, **51**-464, A (昭 60), 1200.
- (5) 佐藤・ほか 2 名, 機論, **52**-474, A (昭 61), 417.
- (6) 永田・ほか 4 名, 第 929 回講演会講演前刷集, (昭 59-11), 455.
- (7) 永田・ほか 3 名, 機論 **52**-484, A (昭 61), 2590.
- (8) 西岡・平川, 機論, **37**-298 (昭 46), 1051.
- (9) King, R. N. and Lindly, T. C., *Proc. ICF* **5**, (1975), 631.
- (10) Gauland, D. J. and Duguet, D. J., *Metal. Trans.*, **A**, **11** (1980), 1555.
- (11) 大藪・ほか 3 名, 機論, No. 810-13 (昭 56-10), 237.
- (12) 佐藤・藤井, 日本材料強度学会誌, **18**-4 (昭 58), 98.
- (13) 遠藤・ほか 2 名, 機論, **38**-310 (昭 47), 1125.
- (14) El Haddad, M. H., ほか 2 名, *Eng. Fract. Mech.*, **11** (1979), 573.
- (15) Tanaka, K., ほか 2 名, *Int. J. Fract.*, **17**-5 (1981), 519.