研 究

フレッティング摩耗に及ぼす相対すべり量の影響 (面接触の場合)*

——フレッティング摩耗に関する研究(第2報)——

大 前 伸 夫** 築 添 正***

The Influence of the Amplitude of Relative Slip on Fretting Wear with Area Contact

——Study on Fretting Wear (2nd Report)——

Nobuo OHMAE, Tadasu TSUKIZOE

The influence of slip amplitude on fretting wear was investigated. It seems that the amplitude of relative slip could be regarded as an essential factor which affects the fretting mechanism, not only because fretting is caused by the relative slip between surfaces of metal members, but also because considerable reduction in fretting damage can be made by minimizing the slip amplitude. When a series of wear experiments of mild steel is carried out with area contact, it becomes evident that the wear volume is dependent upon the slip amplitude. To clarify this phenomenon, measurements of frictional coefficient, electrical contact resistance and adhesive coefficient should be made. It was found that the so-called "fretting corrosion" is the phenomenon which takes place below the slip amplitude of about $70\text{ }\mu\text{m}$. In this region, the characteristic evidence of oxidative wear can be recognized; frictional coefficient is low about 0.6, electrical contact resistance is higher around $20\text{ }\Omega$ and adhesive coefficient is of lower value of about 1×10^{-3} . At larger slip amplitudes than about $70\text{ }\mu\text{m}$, it can commonly be observed that frictional coefficient becomes as high as 0.8, that electrical contact resistance is low about $1\text{ }\Omega$, and that adhesive coefficient is of high value of about 6×10^{-3} . At above the slip amplitude of about $70\text{ }\mu\text{m}$, mechanical types of wear (adhesive wear and abrasive wear) and the oxidative wear might be acting simultaneously, so that the wear process could tribologically be called as the "fretting wear."

1. 緒 言

フレッティング摩耗に影響を及ぼす因子としては種々のものが考えられるが、フレッティングのみに特有な因子である相対すべり量が本質的意義をもつと考えられる。このことは、フレッティングの発生自体が接触面間の相対すべり運動によること、さらには相対すべり量のできる限り小さくすることによってフレッティングの損傷をかなり軽減できること¹⁾から考えても明白である。

本報では面接触状態で摩耗試験を行い、摩耗量、摩擦係数、接触電気抵抗、凝着係数を測定して、フレッティングの相対すべり量依存性について実験的に明らかにしようとした。フレッティングなる語句は、表面の酸化が支配的で摩耗率が非常に小さい場合と、摩耗粉がアブレイプとなって摩耗を促進する場合があると定義されてい

る²⁾。特に、従来からフレッティングコロージョンと呼ばれてきた摩耗現象が、相対すべり量の小さい場合における酸化摩耗であり、酸化摩耗、凝着摩耗、引っかけ摩耗が混在する相対すべり量の大きい領域における摩耗形態はフレッティング摩耗と呼ぶべき性質のものであることを確かめた。

2. 実験装置および実験方法

摩耗試験装置は前報³⁾のものをを用いた。空気中における摩耗試験では、温度、湿度のふん囲気について考慮せねばならないので、本実験では試験機をプラスチック製カバーで囲い、Honeywell H 46 C 湿度調節器により除湿、加湿装置を制御して、相対湿度($60\pm 2\%$)、また実験温度は(20 ± 1) $^{\circ}\text{C}$ の空気調節を行った。なお、荷重(15 kg)、周波数(600 cpm)は一定とした。上下試験片ともに S 25 C 真空焼鈍材(900 $^{\circ}\text{C}$, 1時間; $H_V=115$)を用いた。図 1 に上部試験片の外観を示す。この作製方法は既報⁴⁾と同様であり、 $0.7\text{ }\mu\text{m } R_{\text{max}}$ の研削仕上を施した。下部試験片円板は砂吹き仕上により 1.0, 5.0, 20 $\mu\text{m } R_{\text{max}}$ の表面あら

* 原稿受付 昭和48年4月18日。昭和47年度精機学会春季大会学術講演会(昭和47年4月5日)にて発表。

** 学生会員 大阪大学工学部(吹田市字山田上)

*** 正 会 員 大阪大学工学部

さをつけたものと、研削仕上により $0.4\text{ }\mu\text{m } R_{\text{max}}$ にしたものをを用いた。摩耗量の測定は Talysurf 4 型表面あらさ検査機によって摩耗面の断面プロファイルを求め、処女面からの差を算出した。ただし、摩耗量がごく微小で上記の方法では測定誤差が大きくなると思われる場合には Abbott の負荷曲線の変化から算出した^{5)~7)}が、測定法の差異による誤差は約 5% 以内にとどまる。摩擦係数、接触電気抵抗、凝着係数の測定および相対すり量の検出方法は前報と同じである。ただし、接触電気抵抗はかなり大きくなるので、ブリッジ回路 1 辺の抵抗は $120\text{ }\Omega$, $510\text{ }\Omega$, $4700\text{ }\Omega$ の 3 種類を用いて測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 摩耗量

相対すり量 $a=220\text{ }\mu\text{m}$ における摩耗量 W と繰返し数 N の関係を図 2 に示す。摩耗のごく初期においては摩耗量の極端に小さい領域があるが、その後、繰返し数の増加とともに摩耗進行曲線は立上がり、 $N=50000$ 前後からはほぼ一定の傾きをもつ直線とみなすことができる。また、下部試験片の表面あらさの影響については、最初の表面あらさが大きいほど摩耗進行曲線の立上がる時期が遅くなるが、摩耗し始めると急激に摩耗量が増加する傾向にある。最初の表面あらさが大きいほど、表面突起が塑性変形して平滑化する時期が遅くなるが、主として凝着摩耗と考えられる摩耗の初期領域を過ぎて最初の表面あらさが消失する領域に入ると最初の表面あらさの影響は認められない。次に、図 3 には $a=130\text{ }\mu\text{m}$ の場合を示す。 $a=220\text{ }\mu\text{m}$ の場合と比較すると同一繰返し数における摩耗量は当然小さいが、摩耗進行曲線としてはほぼ同様の傾向を示すと考えられる。ここでも下部試験片の最初の表面あらさが小さいほど摩耗量は小さくなっている。図 2 および図 3 に示した結果では、相対すり量が大きい場合摩耗進行曲線の変化が顕著に現れるが、相対すり量が小さい場合は摩耗量も小さいために、 $N=0\sim 200000$ 程度で摩耗進行曲線の急激な変化は見られない。そこで、図 2、図 3 の結果をも含めて、横軸に

すり距離 $2aN$ 、縦軸に摩耗量 W をとって相対すり量の影響を示したのが図 4 である。同一すり距離において摩耗量を比較してみれば、個々の相対すり量によって影響されることがわかる。図 4 において摩耗量に及ぼす相対すり量の影響が顕著であったことから、フレッシングの摩耗機構については特に相対すり量の影響を考慮せざるをえなくなる。したがって、摩耗量が相対すり量によって異なることは、摩耗機構自体について詳細な検討を加える必要があると考えられるので、次に、摩擦係数、接触電気抵抗、凝着係数を測定して若干の考察を試みる。

図5 摩擦係数および接触電気抵抗と繰返し数の関係

図6 摩擦係数および接触電気抵抗と繰返し数の関係

3.2 摩擦係数および接触電気抵抗

図5および図6に摩擦係数 μ 、接触電気抵抗 R の測定結果の一例を示す。なお、砂吹き仕上面の場合 μ 、 R とも表面あらさによる差異があまり顕著ではなかった。ここで、接触電気抵抗については○あるいは◇で最頻値を、□は変動幅を表す。摩擦係数が大きく変動するのは $N \approx 10000$ 前後までであること、接触電気抵抗の変動が大き

くなるのが $N \approx 20000$ 前後であることから考えて、約 $N \approx 20000$ 近傍から定常な摩耗領域に入ると思われる。 $a = 33 \mu\text{m}$ の場合には摩擦係数は約0.6と低い、 $a = 220 \mu\text{m}$ の場合には $\mu \approx 0.85$ 程度にまで増大している。一方、接触電気抵抗の最頻値に着目すれば、 $a = 33 \mu\text{m}$ では変動幅のほぼ中央値であるのに対し、 $a = 220 \mu\text{m}$ の場合では変動幅は大きい最頻値が非常に低い値をとる。以上のことから、 $a = 33 \mu\text{m}$ の場合のように相対すべり量が小さいとき、接触面間に酸化物が介在する領域が多く、金属母材どうしの接触が少ないために R の最頻値が高くなると考えられる。このことは、比較的安定した酸化膜摩耗が主となっているものとみなされる。また、摩耗面の観察、あるいは既報⁸⁾においてフレッティング摩耗過程を直接観察した結果からも、相対すべり量約 $70 \mu\text{m}$ 以下における摩耗形態は摩耗率のごく小さい酸化摩耗が主となっていると考えてよい。一方、相対すべり量が大きくなるにつれて、接触電気抵抗は大きく変動するようになるが最頻値が低くなる。この原因は生成した酸化物層が破断あるいは剝離することによって金属母材間の接触が生じるためと考えられる。相対すべり量が大きい領域では酸化物層の遊離が生じやすく、おもにすべり方向に排出して接触面外に堆積する。

3.3 凝着係数

凝着係数 λ の測定結果を図7および図8に示す。図7では $a = 220 \mu\text{m}$ の場合について表面あらさの影響を調べた。最初の表面あらさが $1.0 \mu\text{m} R_{\text{max}}$ のように小さいときには凝着係数曲線の立上がり急で、また最大値も大きい。凝着係数が実験を開始して $N \approx 10000$ 程度の潜伏期間の後に急増することは、表面突起の変形がかなり大きくなってから凝着力が発生することに対応すると考えられる。よって、接触面間に巨視的な凝着が発生するには個々の表面突起が変形し、また突起どうしの合流なども原因して、真実接触面積がある程度大きくなる必要があるということが出来る。また、表面突起の塑性変形が主である摩耗量の小さい領域は図2の結果と一致している。図8には最初の表面あらさが一定の場合について相対すべり量の影響を調べた結果を示す。 $a = 220 \mu\text{m}$ 、 $a = 130 \mu\text{m}$ の場合には繰返し数の増加とともに凝着係数は最大値をとって、しかる後に減少する。しかしながら、 $a = 75 \mu\text{m}$ の場合には $a = 220 \mu\text{m}$ の場合のような凝着係数の急激な変動はなく、また $a = 33 \mu\text{m}$ の場合には λ はきわめて低い。したがって、 $a = 33 \mu\text{m}$ 、 $a = 75 \mu\text{m}$ の場合には酸化物が接触面間に介在し、金属どうしの接触を妨げるために凝着係数は低い、一方、 $a = 130 \mu\text{m}$ 、 $a = 220 \mu\text{m}$ の場合には初期において金属どうしの凝着が

図7 凝着係数と繰返し数の関係

5.0 μm R_max 砂吹き仕上面
図8 凝着係数と繰返し数の関係

起こり、その後ルースな酸化摩耗粉が生成して接触面間に介在するようになると凝着係数が減少すると考えられる。次に、図8の結果と比較するために、図9には摩耗率 $dW/d(2aN)$ の進行曲線を示す。図8において凝着力が増大した領域は図9における摩耗率の大きい領域に対応する。また、相対すべり量が小さい場合 ($a = 33 \mu\text{m}$, $a = 75 \mu\text{m}$) には摩耗率、凝着係数ともに小さい。以上の結果から、相対すべり量の大小によって摩耗量が異なる原因の一つとして、摩耗の初期における凝着発生の有無が考えられる。

3.4 摩耗面ならびに摩耗粉の観察

3.1~3.3項において、摩耗機構について摩耗量 W 、摩擦係数 μ 、接触電気抵抗 R 、凝着係数 λ の測定から実験的考察を加えた。ここでは摩耗面ならびに摩耗粉を観察した数例について述べる。図10

(a)は試験片中央部の走査電子顕微鏡写真で、白く観察される部分は酸化物であると思われるが、すべり方向に細かい引っかき傷がついている領域も観察される。また、図10(b)は試験片のすべり方向端部で、さらに激しい引っかき傷が観察される。空气中におけるフレッチングの場合には特に酸化摩耗粉の引っかき作用が顕著であると考えられる⁹⁾が、本実験においても引っかき傷を高倍率で観察すると、引っかきみぞの幅が摩耗粉の平均粒径(約 $5 \mu\text{m}$)とよく一致

5.0 μm R_max 砂吹き仕上面
図9 摩耗率と繰返し数の関係

することから、このような引っかき傷は生成した酸化摩耗粉によるものと考えの方が妥当であると思われる。

$a = 220 \mu\text{m}$, $N = 100\,000$

図10 摩耗面の走査電子顕微鏡写真

(a) 摩 耗 粉

(b) 摩 耗 面

 $\alpha = 130 \mu\text{m}$, $N = 100\,000$

図 11 電子線回折写真

 λ は $N = 0 \sim 100\,000$ における最大値をとった

図 12 摩耗量、摩擦係数、接触電気抵抗、凝着係数と相対すべり量の関係

摩耗による生成物について電子線回折法を用いて調べた結果を図 11 に示す。摩耗粉は Si 単結晶板上に厚く塗布して電子線回折用試料とした。ASTM カードと照合した結果、摩耗粉ならびに摩耗面の回折リングは $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ と同定された。また、摩耗粉については他の回折リングが観察されなかったことから、フレッシングによって生成する摩耗粉は鉄酸化物 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ であるといえることができる。なお、X 線粉末法による摩耗粉の解析からも、同様に $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ を検出している。摩耗面については図 11 (b) に示したような $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ のパターンがほとんどであったが、相対すべり量が多い場合、酸化物が剝離した部分があるため母材 $\alpha\text{-Fe}$ の回折リングが観察されることもあった。以上の結果から、本実験における摩耗生成物は $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ であると考えてよい。

3.5 摩耗機構の相対すべり量依存性

3.1～3.4 項における結果を総括すれば、フレッシング

グ摩耗が相対すべり量の影響を大きく受けることが明らかとなったが、ここではさらに若干の考察を加えたい。すなわち、図 12 に摩耗量 W 、摩擦係数 μ 、接触電気抵抗 R 、凝着係数 λ と相対すべり量 a の関係をまとめてみれば、 W は $a \approx 70 \mu\text{m}$ 近傍から増加し始める。対応してこの領域で μ は $0.6 \rightarrow 0.8$ と増加し、 R は $20 \Omega \rightarrow 1 \Omega$ と減少する、また、 λ について $N = 0 \sim 100\,000$ における最大値をとって比較すれば、 $1 \times 10^{-8} \rightarrow 6 \times 10^{-8}$ と増加する：以上から、 $a =$

$70 \mu\text{m}$ 近傍を境界として摩耗の機構が異なることが明白であり、 μ, λ が低く、 R が大きい $a \leq 70 \mu\text{m}$ の領域での摩耗形態は主として酸化摩耗であると考えられる。一方、 $a \geq 70 \mu\text{m}$ の領域では、酸化摩耗と機械的な摩耗が混在すると考えられる。機械的な摩耗については摩耗の初期における凝着摩耗と、比較的定常な摩耗領域における酸化摩耗粉の引っかかり摩耗をあげることができる。

4. 結 言

フレッシング摩耗に影響を及ぼす本質的な因子として相対すべり量を取上げ、摩耗量、摩擦係数、接触電気抵抗、凝着係数を測定して、相対すべり量に依存した摩耗形態の存在について実験的に明らかにした。結論として次の諸点をあげることができる。

- (1) フレッシングの摩耗機構は相対すべり量約 $70 \mu\text{m}$ 前後を境として変化し、相対すべり量約 $70 \mu\text{m}$ 以下では酸化摩耗、相対すべり量約 $70 \mu\text{m}$ 以上では凝着摩耗、酸化摩耗、引っかかり摩耗が混在する。
- (2) フレッシングにより生成する酸化物は $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ であり、酸化物が母材から脱落しないときは摩耗率のごく小さい酸化摩耗といえるが、遊離して接触面外に排出される過程ではアブレシブの役割をする。
- (3) 相対すべり量が多い場合のフレッシング過程は次の 3 段階に大別できる。
 - i) 表面突起の塑性変形による摩耗率のきわめて小さい領域。
 - ii) 凝着による摩耗率の大きい領域。
 - iii) 酸化摩耗と生成した遊離酸化摩耗粉による引っかかり作用がおもな定常摩耗領域。

以上の考察結果から、“フレッシングコロージョン”と呼ばれてきた摩耗現象は酸化膜摩耗が主体である相対すべり量約 $70 \mu\text{m}$ 以下の場合であって、相対すべり量

が約 $70\ \mu\text{m}$ 以上では, 酸化摩耗, 凝着摩耗, 引っかき摩耗が混在する“フレッティング摩耗”と呼ぶべき領域に入ることができる。

終わりに臨み, 本研究を行うにあたり種々ご援助をいただいた大阪大学・久門輝正助教授に厚く感謝するとともに, 実験にご協力いただいた当時の本学大学院学生・中川久敏, 苗村康次の両氏に深謝します。

参 考 文 献

- 1) H. H. Uhlig: Corrosion and Corrosion Control, J. Wiley, N. Y. (1963) 131.
- 2) A. W. J. deGee & G. W. Rowe: Friction, Wear and Lubrication-Tribology-(Glossary), OECD, Paris (1969) 35.

- 3) 築添 正, 大前伸夫: フレッティング摩耗に及ぼす相対すべり量の影響(線接触の場合)——フレッティング摩耗に関する研究(第1報), 精密機械, **38**, 12 (1972) 1024.
- 4) 大前伸夫, 築添 正: フレッティング摩耗過程の観察, 精密機械, **39**, 2 (1973) 219.
- 5) I. V. Kraghelsky: Calculation of Wear Rate, Trans. ASME, Ser. D, **87**, 3 (1965) 785
- 6) 遠藤吉郎ほか: 加工方法の初期摩耗に及ぼす影響, 日本機械学会講演論文集(関西支部第224回), No. 704-8 (1970) 42.
- 7) 築添 正, 久門輝正ほか: 初期摩耗に及ぼす表面あらさの影響について, 日本機械学会講演論文集(関西支部第45期定時総会), No. 704-6 (1970) 52.
- 8) 前出4)の223ページ.
- 9) I-Ming Feng & B. G. Rightmire: An Experimental Study of Fretting, Proc. Inst. Mech. Engr. (Lond.), **170** (1956) 1055.

—表紙写真説明—

産業用ロボット“トランサー”

ロボットは, 第一に機械的, 電気的な信頼性がすぐれていること, 第二に人間に代わって仕事をするのですから, 極端に作業スピードが下がらないこと, 第三に経済面のメリットが考えられる価格であることが条件です。

カムからダイレクトに動作をとれる当社のトランサーは, 上記の条件を十分に満足させるものです。

機種は搬送物重量によって選ぶことができます。

用途としては自動組立機等のトランスファーやプレス作業が最適です。

仕 様

	RBM-5 ZH	RBM-15 ZH RBM-15 ZV	RBM-30 ZH
搬送荷重	0.5 kg	1.5 kg	3 kg
標準アーム	300 mm	400 mm	400 mm
上下動	60 mm 40 mm 20 mm (選択の上 御指定下さい)	45 mm 20 mm (選択の上 御指定下さい)	60 mm 40 mm 20 mm (選択の上 御指定下さい)
上下位置 停止精度	$\pm 0.1\ \text{mm}$	$\pm 0.1\ \text{mm}$	$\pm 0.1\ \text{mm}$
旋 回 角	$100^\circ (120^\circ \sim 85^\circ)$ $80^\circ (85^\circ \sim 60^\circ)$ (選択の上 御指定下さい)	$90^\circ (100^\circ \sim 80^\circ)$	$90^\circ (100^\circ \sim 80^\circ)$
旋回位置 停止精度	$\pm 0.1\ \text{mm}$	$\pm 0.1\ \text{mm}$	$\pm 0.1\ \text{mm}$
アーム前 後進	オプション	オプション	オプション
アーム回 転	オプション	オプション	オプション
サイクル タイム	3 秒	3 秒	3 秒
動 力 源	AC 200 V 3 ϕ 200 W	AC 200 V 3 ϕ 0.4 kW	AC 200 V 3 ϕ 0.75 kW

TSK 東芝精機株式会社

システム部

〒243 神奈川県海老名市柏ヶ谷1410 電話 厚木(0462)31-8111(代)