

5. ワイヤロープ用鋼及び SNCM439 鋼のフレッティング疲労挙動

橋内良雄* S. Ganesh Sundara Raman** Muthuswamy Kamaraj**

5. Fretting Fatigue Behavior of Wire Rope Steel and SNCM439 Steel

by Yoshio KITSUNAI*, S. Ganesh Sundara RAMAN**, Muthuswamy KAMARAJ**

Abstract: It is known that one of the most important factors in failure cause of wire rope is fretting fatigue, which occurs as a result of relative cyclic slip at the interface between two surfaces in intimate contact. However, study of fretting fatigue in wire rope is limited because fretting phenomenon is very complex and reasonable fretting fatigue test is difficult. In this study, to assess the important variables that can affect fretting fatigue of wire rope, fretting fatigue behavior of a cold drawn eutectoid steel rod, which has been used to make wire rope, was examined by clamping the contact pads with the same material. Fretting fatigue strength is affected various factors. The effects of specimen configuration, fretting test apparatus, contact pressure and pad span on fretting fatigue strength were examined using two types of specimens and contact pads made of SNCM439 steel.

The fretting fatigue specimen for the wire rod is a total length of 280 mm with button head ends and a 90 mm long gage length with the cross sectional area of 33.24 mm². Two types of specimen geometry were machined from the rods of 16 mm and 25 mm dia. of SNCM439 steel. One is the same configuration as the wire rod specimen. Another is rectangular configuration with the cross section of 5 × 10 mm and gage length 70 mm. Bridge type contact pads having the span lengths of 20, 30 and 50 mm of the same material as the fatigue specimens were prepared. Two types of fretting fatigue test apparatus are used. One is a screw type apparatus of which contact pressure was applied by threaded screw attached to the proof ring. Another is an oil pressure type apparatus.

The plain and fretting fatigue tests were performed under a sinusoidal wave at frequency of 10 Hz using a 98 kN capacity closed loop servohydraulic fatigue testing machine. The fretting fatigue tests were carried out under contact pressure of 60, 96.5 and 100 MPa, and a stress ratio of 0.1. The slip amplitude between the specimen and the contact pad was determined using a contact type or lazier type displacement sensor. The frictional force between the specimen and the contact pad was measured using the strain gages bonded to the central part of the contact pad holder or the contact pad. The fractured and fretted damaged surfaces of the specimens were examined by an optical microscopy and a scanning electron microscopy to determine fracture morphologies, crack initiation and propagation modes of fretting cracks.

Based on the results of this experimental program, the following conclusions were drawn:

- (1) The fretting fatigue limit of wire rod and SNCM439 steel decreases about 55–70% and 34–57%, respectively, as compared with the plain fatigue limit.
- (2) The fretting fatigue life of both wire rod and SNCM439 steel specimens decreases with increasing contact pressure due to increasing frictional force.
- (3) The fretting fatigue strength of different types of specimens shows approximately same fatigue

* 日本クレーン協会 Japan Crane Association (前 産業安全研究所機械システム安全研究部)

** Mechanical System Safety Research Division, STA fellow

limit at a given contact pressure.

- (4) Under a given contact pressure, the fretting fatigue life tends to decrease with increasing pad span because of increasing relative slip amplitude, regardless of specimen configuration.
- (5) The fretting fatigue life or strength is controlled primarily by both relative slip amplitude and contact pressure.
- (6) The fretting fatigue life measured by the hydraulic type clamping apparatus tended to decrease, as compared to that obtained by the screw type apparatus.
- (7) Fractographic examination of the tested specimens revealed the fretting cracks were initiated at a shallow angle to the contact surface and the direction of crack growth changes to the loading axis. Fretting damage surface showed the wear tracks with heavy plastic deformation.

Keywords; Fretting, Fatigue, Fretting damage, Contact pressure, Frictional force, Pad span, Testing apparatus, Specimen configuration, Wire rod, SNCM439, Fractography

1. 緒 言

クレーン等の災害統計⁽¹⁾から最近の10年間におけるワイヤロープの損傷による死亡災害を見ると、毎年10～17件発生しており、この値はクレーン等による死亡者数が減少する中で殆ど変わっていない。また、幸い死傷に至らなかった場合も含めると、ワイヤロープの損傷に起因する災害はかなりの数に登ると推定される。

ワイヤロープは芯とそれを螺旋状にとり囲む素線とから構成されているが、負荷を受けた場合には芯と素線との間に強い押しつけ力が作用するほか、両線で伸びが異なるために、しばしば素線同士あるいは素線と芯線とが強く擦れ合いながら相対的にすべりを起こす現象、すなわちフレットングによる損傷が生じる。しかし、ワイヤロープのフレットング疲労に関する研

究^{(2),(3)}は、あまり行われていないようである。一方、フレットング疲労強度についてはこれまでにかなり多くの研究⁽⁴⁾⁽¹⁶⁾がなされているが、フレットング疲労試験結果に及ぼす影響因子が多岐に渡るためや、実機に対するフレットング損傷のモデリングが容易でないことから、標準的なフレットング疲労試験法自身が確立されているとは言い難い現状にある。そこで、フレットングによるワイヤロープの損傷に関する基礎的知見を得るため、並びにフレットング疲労強度に及ぼす試験方法、試験片形状、接触面圧、相対すべり量、パッド（摺動子）間隔等の影響について検討するため、ワイヤロープ用鋼およびSNCM439鋼から試験片とパッドを作製して、フレットング疲労試験を実施した。また、フレットング過程での試験片表面の損傷状況および試験後の破面の特徴について調べた。

Table 1 Mechanical properties of materials used.
供試材の機械的性質

Material	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)	Vickers hardness
Wire rod	—	1642	8.5	—	422
SNCM439	933	1044	32.2	58.4	350

Table 2 Chemical composition of materials used (wt.%).
供試材の化学成分

Material	C	Si	Mn	Cu	P	Ni	Cr	Mo
Wire rod	0.82	0.24	0.78	0.01	0.007	—	—	—
SNCM439	0.40	0.24	0.72	0.09	0.002	1.61	0.68	0.18

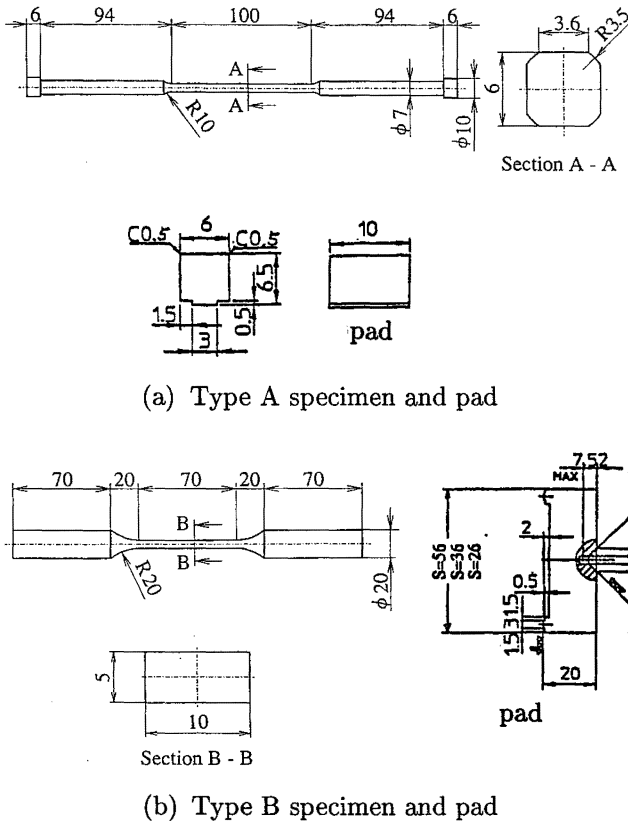


Fig. 1 Fretting fatigue specimens and pads
フレッティング疲労試験片およびパッド

2. 供試材および試験片

供試材は直径が 11 mm のワイヤロッドおよび、機械学会のフレッティング研究委員会で round robin 試験用として提供された直径 16 mm と 24 mm の SNCM439 鋼である。これら供試材の機械的性質と化学成分を、それぞれ Table 1 および Table 2 に示す。

供試材のワイヤロッドは、4 回の引き抜により直径 7 mm のロッドに加工後、約 280 mm の長さで切断して両端に直径が約 10 mm の球をプレス加工により付け、さらにパッドと試験片が面接触するように、試験片の中央部を長さ 90 mm に渡って研削加工を行った。ワイヤロッド試験片の形状は、Fig. 1(a) に示すとおりであって、最小断面積は 33.24 mm² である。

SNCM439 鋼の試験片は、直径 16 mm の丸棒からは、最小断面形状がワイヤロッドの場合と同様 Fig. 1(a) に示す試験片を、直径 24 mm の丸棒からは最小断面が 50 mm² の Fig. 1(b) に示す試験片を作製した。なお、これらの試験片の形状を区別するために、Fig. 1(a) の試験片をタイプ A、Fig. 1(b) のものをタイプ B として区別する。試験片に面圧を负荷するフレッティングパッドはいずれも試験片と同材であり、それらの形状を Fig. 1(a)、Fig. 1(b) に示す。パッド間隔は 20, 30,

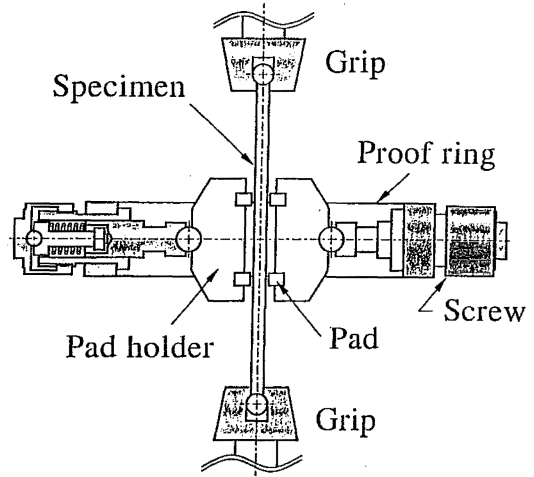


Fig. 2 Screw type fretting test apparatus
ネジ式フレッティング試験装置

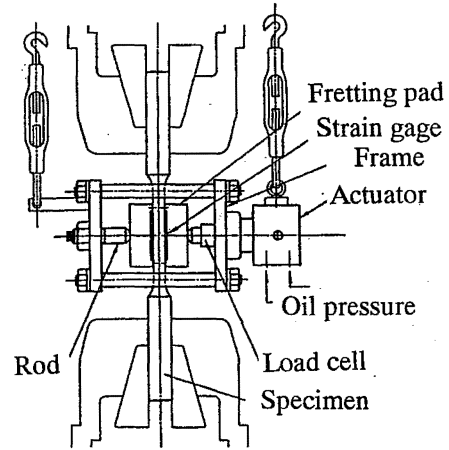


Fig. 3 Hydraulic type fretting test apparatus
油圧式フレッティング試験装置

50 mm の 3 種類のものを作製した。なお、パッドと試験片の面接触面積はタイプ A が 10.8 mm²、タイプ B が 15 mm² である。試験に先立ち、パッドと試験片の接触面はアセトンで脱脂した。

3. フレッティング試験装置および実験方法

フレッティング試験装置は、Fig. 2 に示すようにブルーリングの両側のネジを締め付けることにより、試験片に面圧を负荷するタイプ（ネジ式）と、Fig. 3 のように油圧により负荷するタイプ（油圧式）とを用いた。すなわち、ネジ式の場合はブルーリングの両側に取り付けたネジを締め付けることにより、ブリッジ式のパッドホルダーを介して 4 個のパッドで試験片に面圧を与える機構となっている。試験片の押し付け力（面圧）は、ネジ式ではブルーリングに張付けたひずみゲージにより、油圧式ではロードセルにより計測した。試験片とパッド端の間の相対すべり量は、接触式変位

計およびレーザー変位計を用いて測定した。パッドと試験片との間の摩擦力は、ワイヤロッドの場合は、パッドホルダーのパッド間（ブリッジ間）の中央に貼り付けた半導体ひずみゲージにより計測した。また、SNCM439鋼では、パッドの下面に張付けたひずみゲージにより計測した。

フレットング疲労試験は、ネジ式または油圧式の試験装置により、あらかじめ 60 MPa あるいは 100 MPa（一部 96.5 MPa）の面圧を負荷後、容量 98 kN の電気油圧式サーボ疲労試験機を用いて繰返し速度 10 Hz、荷重波形正弦波、応力比 $R = 0.1$ で試験を実施した。幾つかについては途中で試験を止め、試験片を外してフレットング試験部分を、光学顕微鏡やレーザー顕微鏡を用いてフレットングによる損傷状態を調べた。また、試験後、試験片の表面や破面について走査電子顕微鏡による観察を行った。試験片とパッドの接触面の凹凸は、レーザー顕微鏡を用いて調べた。

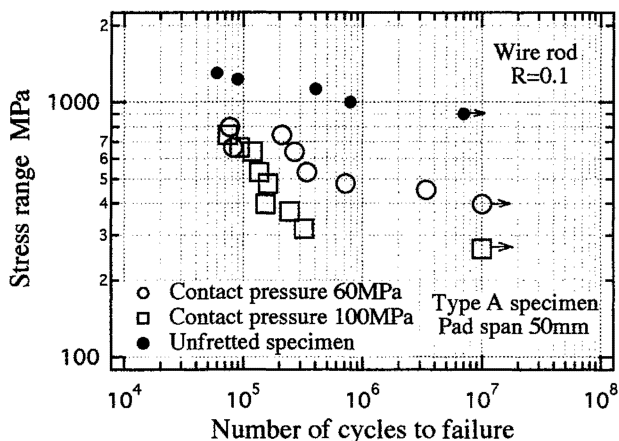


Fig. 4 Plain and fretting fatigue tests results of wire rod
ワイヤロッドの非フレットングおよびフレットング疲労試験結果

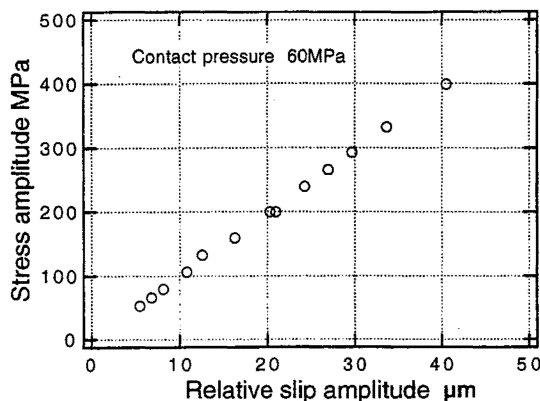


Fig. 5 Relationship between stress amplitude and relative slip amplitude of wire rod
ワイヤロッドの応力振幅と相対すべり振幅の関係

4. 実験結果および考察

4.1 ワイヤロッドのフレットング疲労強度

フレットング疲労試験に先立ち、直径 7 mm のワイヤロッドの長さの中央に 20R の切欠きを付けて、最小直径を 4 mm に加工した丸棒試験片を用いて、疲労試験を行った。その結果、応力比 $R = 0.1$ での非フレットング疲労限度は、450 MPa（全振幅 900 MPa）であった。

ワイヤロープでは、素線同士が強く接触しながら擦れあうためフレットングが生じるが、素線同士の面圧がどの程度になるのかは、ワイヤロープの直径 d やシーブの直径 D 等に影響されるため、素線間の面圧を求めることは必ずしも容易ではない。そこで、本実験では、これまで合金鋼等のフレットング疲労試験に採用されている面圧^{(4)~(9)}を、便宜的に採用した。Fig. 4 は、面圧を 60 MPa および 96.5 MPa としてフレットング疲労試験を行った際の S-N 線図を示したもので、低寿命側でばらつきが認められるが、傾向として面圧の低い場合の方が時間強度および疲労限度が増加している。この場合の疲労限度は、面圧が 60 MPa では約 199 MPa（全振幅 398 MPa）、面圧が 96.5 MPa では 132.8 MPa（全振幅 265.6 MPa）程度となっている。Fig. 4 には非フレットング疲労試験データも一緒に示したが、フレットング材では非フレットングに比較して、疲労限度が面圧が 60 MPa では 55%、面圧が 96.5 MPa の場合では 70%それぞれ低下している。

フレットング疲労試験において、面圧により疲労強度に差異が見られたが、この差異を後述の摩擦係数の測定結果から推測すると、応力振幅が 200 MPa（全振幅 400 MPa）以上の場合では摩擦係数はほぼ一定となっており、したがって、面圧の増加はパッドと試験片の間の摩擦力を増大させることから、相対すべり振幅が増加し、疲労強度が異なると推察される。

4.2 ワイヤロッドの相対すべり振幅

Fig. 5 は応力振幅と相対すべり振幅の関係を面圧が 60 MPa の場合について示したもので、応力振幅の増加に連れて相対すべり振幅も増加している。このような傾向は、面圧が 96.5 MPa の場合においても同様である。Fig. 6 は摩擦係数と相対すべり振幅との関係を示したもので、摩擦係数はパッドと試験片間の摩擦力振幅 F_a と押し付け荷重 P との比、 F_a/P として定義した。図に見られるように、相対すべり振幅が小さい領域では摩擦係数は相対すべり振幅と共に増加しているが、相対すべり振幅が約 15 μm 程度からはほぼ一定

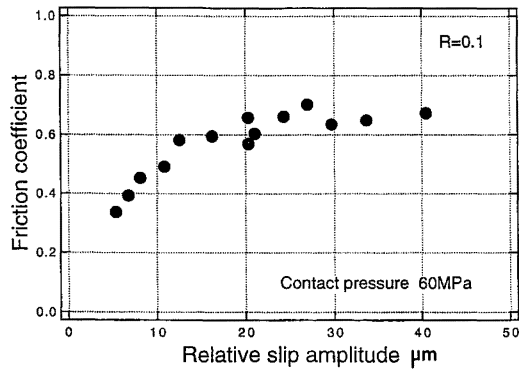


Fig. 6 Relationship between friction coefficient and relative slip amplitude of wire rod
ワイヤロッドの摩擦係数と相対すべり振幅の関係

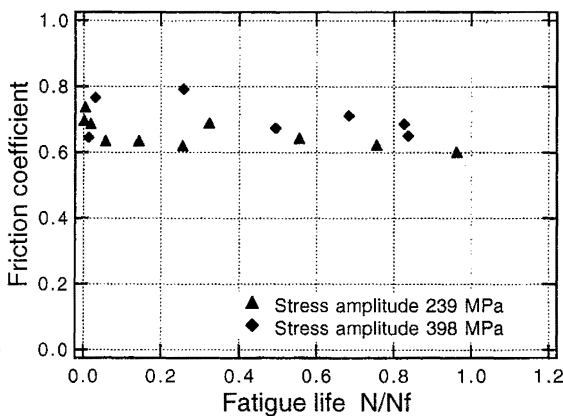


Fig. 7 Relationship between friction coefficient and fatigue life
摩擦係数と疲労寿命の関係

(0.6~0.7) となる傾向が認められる。このような傾向は、これまでに行われている多くのフレットング試験結果と定性的に一致している。Fig. 7 は、摩擦係数と疲労寿命の関係を示したもので、摩擦係数は寿命の初期に若干ばらつきが見られるけれども、その後は大きな変化は見られず、おおよそ 0.6~0.8 の範囲にあることから、繰り返し寿命の影響をあまり受けないと考えられる。なお、応力振幅の高い場合の方が摩擦係数が増加する傾向が認められる。

4.3 SNCM439 鋼のフレットング疲労強度に及ぼす試験片形状の影響

Fig. 8 はパッド間隔が 50 mm の場合について、Type A と B 試験片のフレットング疲労試験結果を面圧が 100 および 60 MPa の場合について示したもので、寿命が 10^5 回程度以下では試験片の形状の影響は見られないが、 10^5 回程度以上ではパッドと試験片の接触面積の小さい Type A 試験片の寿命がかなり増加する傾向が認められる。同様な傾向は、パッド間隔が 20 mm

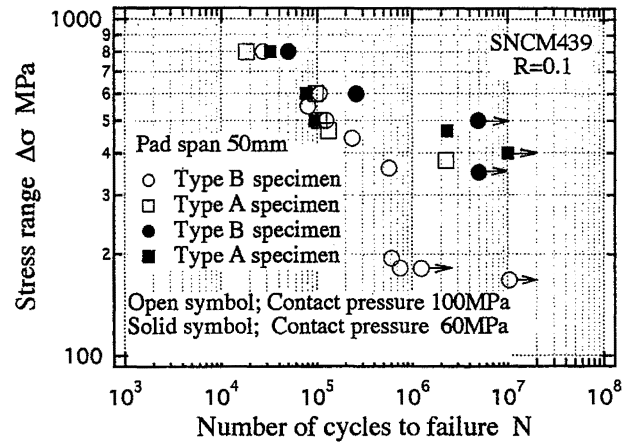


Fig. 8 Fretting fatigue tests results of SNCM439 steel
SNCM439 鋼のフレットング疲労試験結果

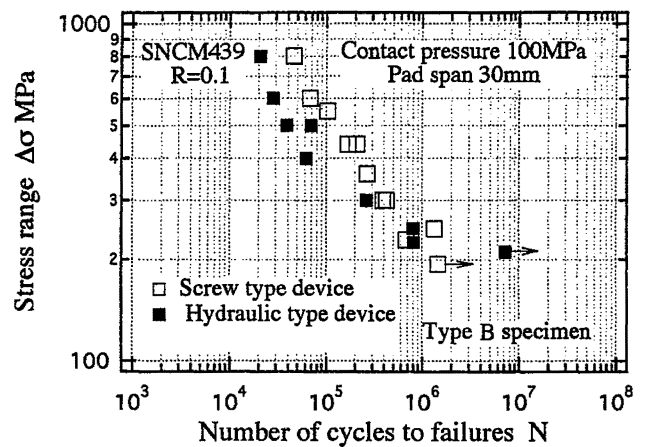


Fig. 9 Effect of fretting test apparatus on fretting fatigue strength of SNCM439 steel
SNCM439 鋼のフレットング疲労試験結果に及ぼす試験装置の影響

や 30 mm の場合においても見られた。なお、接触面積は Type A が 10.8 mm^2 、Type B が 15 mm^2 である。面圧の影響を見ると、ソリッドシンボルで示す 60 MPa のデータの方が長寿命側にプロットされる傾向にあり、他の報告と同様、60~100 MPa の範囲では面圧が低下すると寿命が増加することを示している。これは、後述するように、面圧が低下すると摩擦力も低下し、接触面でのフレットング摩耗が少なくなり、き裂の発生までに長時間を要するためと推察される。Nakazawa ら^{(11),(16)} は面圧を大幅に変えてフレットング疲労試験を行っており、面圧があまり大きくない場合は面圧の増加と共に疲労寿命が低下するが、面圧がある値以上になると疲労寿命の低下が顕著でなくなり、さらに面圧を増加させると寿命が若干増加することを示している。これは面圧が増加すると摩擦力も増加するが、同時にフレットング面に対しても強い圧縮応力が作用し、摩擦力と圧縮平均応力とが相殺しあうために面圧と疲労寿命の関係が複雑な挙動を示すものと考えられる。

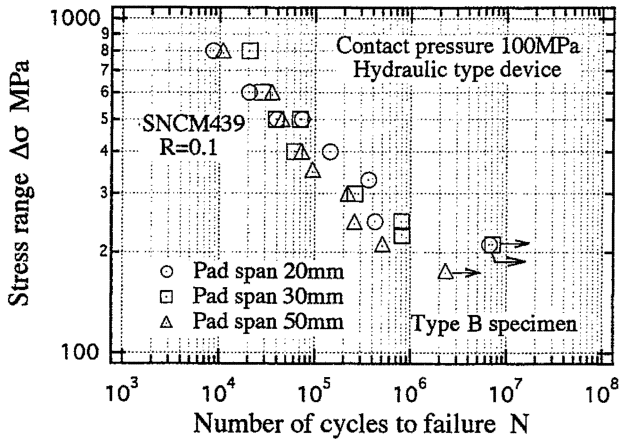


Fig. 10 Effect of pad span on fretting fatigue strength of SNCM439 steel
SNCM439 鋼のフレット疲労強度に及ぼすパッド間隔の影響

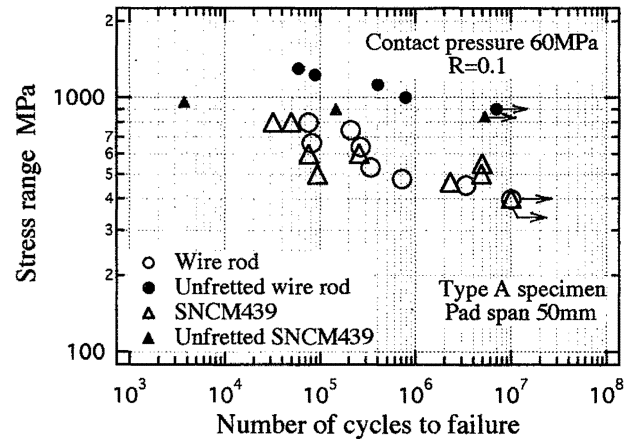


Fig. 12 Comparison of plain and fretting fatigue strength between wire rod and SNCM439 steel
SNCM439 鋼の非フレットとフレット疲労強度の比較

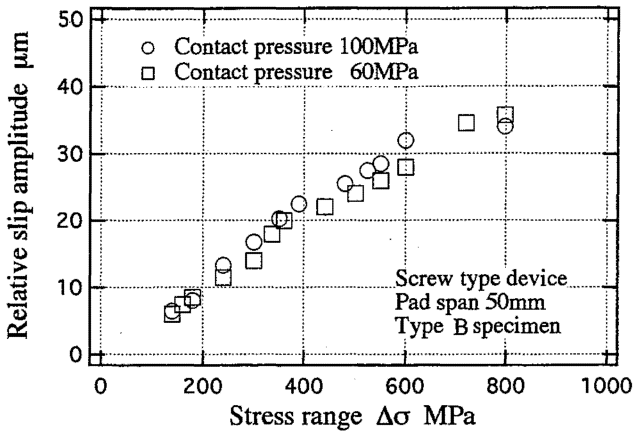


Fig. 11 Relationship between relative stress amplitude and stress range of SNCM439 steel
SNCM439 鋼の相対すべり振幅と応力範囲の関係

SNCM439 鋼の場合、試験片の本数の関係で十分な非フレット試験結果を得ることが出来なかったが、データを外挿してフレット疲労限度と比較した結果、フレット疲労限度は非フレットのそれよりも 34~57%減少していた。

4.4 SNCM439 鋼のフレット疲労強度に及ぼす試験装置、面圧等の影響

Fig. 9 は Type B の試験片を用いて、パッド間隔 30 mm、面圧 100 MPa の条件の下で、ネジ式と油圧式のフレット試験装置を用いて疲労試験を行った際のデータを比較したもので、一部を除き油圧式で試験した場合の方が、ネジ式のデータよりも短寿命側にプロットされている。また、両試験装置のデータの差異は負荷応力範囲 $\Delta\sigma$ の大きい低寿命側で顕著であり、長寿命側になるに連れて両者の差異は減少している。同様の傾向はパッド間隔や試験片のタイプが異なる場

合においても認められる。ただし、パッド間隔が小さい方がネジ式と油圧式のデータの差異が小さい。ネジ式の方が寿命が増加する原因として、装置のフレームの剛性や押し付け保持力の相違が考えられる。すなわち、油圧式では繰返し数の増加に連れて試験片やパッドが摩耗しても常に一定の締め付け力が保持されるのに対して、ネジ式の場合には摩耗するに連れて締め付け力が低下して面圧が下がるためと思われる。実際、ネジ方式では試験中に締め付け力の低下が見られ、この傾向は負荷応力範囲が大きい程顕著であった。以上のほか、パッドの剛性も関係している。すなわち、ネジ式ではパッド部分をパッドホルダーにネジで止める構造 (Fig. 2 参照) であるのに対し、油圧式ではパッドホルダーを用いず、直接パッドを油圧で押す構造 (Fig. 3 参照) となっており、両装置の剛性の差異が影響しているものと推察される。

4.5 SNCM439 鋼のフレット疲労強度に及ぼすパッド間隔、相対すべり振幅等の影響

Fig. 10 は Type B 試験片についてフレット疲労強度とパッド間隔の関係を示したもので、パッド間隔が減少すると疲労寿命が増加する傾向が認められる。この結果は油圧式の試験装置で得た結果であるが、ネジ式においても同様であった。パッド間隔の減少による疲労寿命の増加は、他の材料や試験方法が異なる場合においても報告⁽¹²⁾されており、フレット疲労強度の支配因子の一つと考えられる。Fig. 11 は相対すべり振幅と応力範囲の関係を示したもので、面圧が 100 MPa の場合の方が僅かにすべり振幅が大きい傾向を示している。この結果と Fig. 8 の結果を対比すると、面圧が増加すると相対すべり振幅が増加し、そ

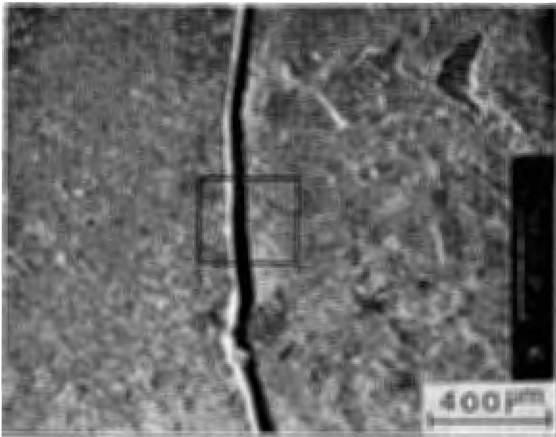


Fig. 13 Fretting fatigue crack and surface damage formed on SNCM439 steel
SNCM439 鋼のフレット疲労き裂と表面の損傷

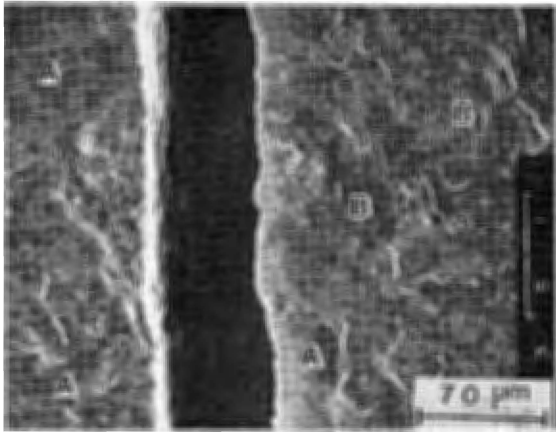


Fig. 14 Enlarged view of the square in Fig. 13
図 13 の拡大

の結果摩擦力が増加するので疲労強度が低下すると推察される。面圧を一定として相対すべり振幅とパッド間隔の関係を調べた結果、パッド間隔が増加すると相対すべり振幅が増大し、その結果摩擦力も増加するので疲労強度が低下すると考えられる。

4.6 ワイヤロッドと SNCM439 鋼のフレット疲労強度の比較

Fig. 12 は Type A 試験片を用いてワイヤロッドと SNCM439 鋼のフレット疲労強度の比較した結果であって、面圧はネジ式のフレット試験装置で負荷した。図に見られるように、かなりのバラツキが見られるが、フレット疲労強度は材質や硬さ（ワイヤロッドは 411~432 Hv, SNCM439 鋼は 350 Hv）にあまり影響しない。一方、非フレット疲労強度は引っ張り強さが高く、また高度の高いワイヤロッドの方が増加している。フレット疲労では材質に比較的不敏感となっているが、この原因としてフ

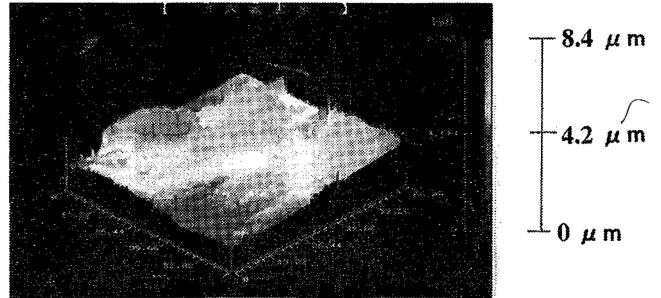


Fig. 15 Roughness of fretted wear on specimen surface
試験片の表面のあらさ

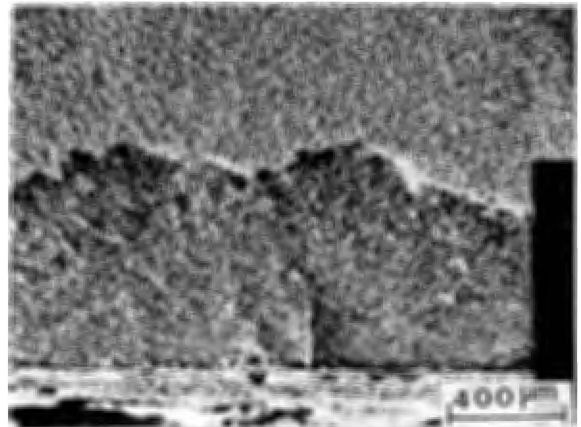


Fig. 16 Fractograph showing fretting oxide film formed on the fracture surface near origin of SNCM439 steel. Fracture surface was obtained by open the crack shown in Fig. 13
SNCM439 鋼の起点付近の破面上に形成されたフレット酸化被膜。破面は図 13 に示すき裂を開いて得た

レットでは擦れによって主にき裂が発生するのに対し、非フレット疲労ではすべりによってき裂が発生するので、き裂生成の機構の差が寿命に反映していると思われる。

4.7 フレット面の特徴

Fig. 13 は面圧が 95.6 MPa, 応力振幅が 239 MPa, 破断寿命が 1.604×10^5 の試験片について、破断後の試験片を突き合わせて表面の損傷状態を観察した結果であって、き裂はフレットによる摩耗痕の発生端から僅かに内部に入った箇所が発生している。Fig. 14 はき裂近傍の拡大写真を示したもので、接触面にはき裂の近傍にパッドのすべり方向に多数の線 (A) が作られているが、そこから少し離れた箇所の接触面上にはき裂長さと同方向（負荷方向と垂直）にさざなみ状の微細な線 (B) が残されていて、この模様が接触面の大部分を占めている。このような接触面の形態は面圧や応力振幅によらず認められる。ただし、き裂発

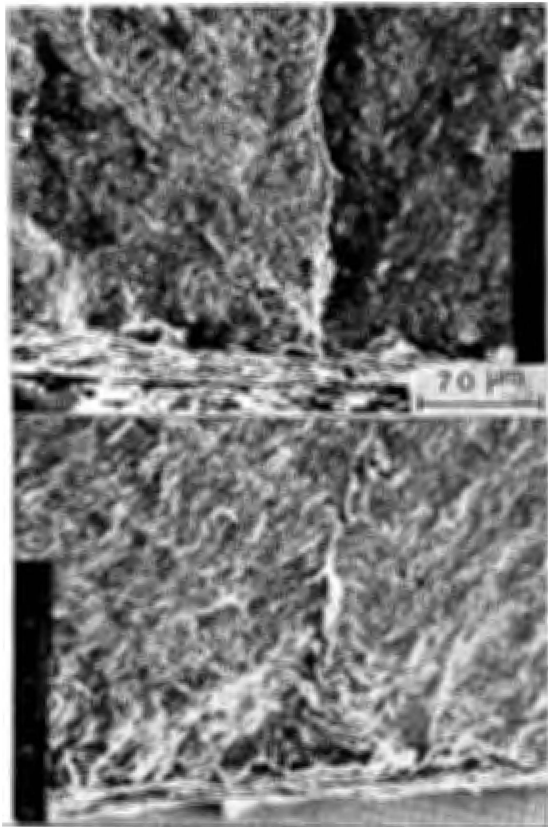


Fig. 17 Enlarged view and matching fractograph of Fig. 16
 図 16 の破面の拡大とマッチング

生箇所はフレットによる接触痕の端から 0.5~1 mm 程度内部に入った箇所を起点としてき裂が発生している場合が多かった。パッドと試験片の接触による摩擦力は接触部分で一様ではなく、パッド端部では摩擦力の集中が起こることが知られている⁽⁷⁾。このためパッド間隔によらず起点はパッド摺動端付近の試験片表面に集中していたものと思われる。パッドの接触面についても SEM 観察を行った結果、すべり方向と同方向にパッドの研磨痕がつぶされたと思われる平行な浅い線が残されている場合が多く、さらにフレットによって生じた凹凸や磨耗粉が付着している箇所が存在していた。

Fig. 15 は面圧が 60 MPa、応力振幅が 199.2 MPa で試験を行い、 10^7 回まで破断しなかった試験片の接触面のあらさをレーザー顕微鏡を用いて測定した結果の一部を示したもので、試験片では $7.99 \mu\text{m}$ 、パッドでは $6.48 \mu\text{m}$ の高低差が生じていた。接触面全体に渡ってあらさ測定を行ってはいないため今後の検討が必要であるが、あらさは試験片もパッドもほぼ同程度のものである。武藤ら⁽⁵⁾はバネ鋼の接触面あらさと相対すべり量の関係を調べているが、最大あらさは $10 \mu\text{m}$ 程度となっており、本実験結果とあらさは概略一致して

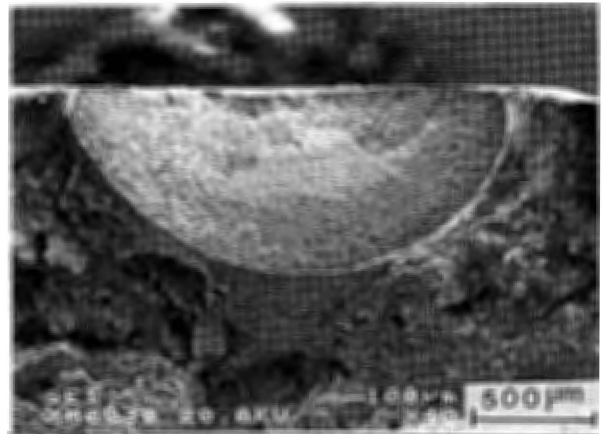


Fig. 18 Fractograph showing crack profile of wire rod
 ワイヤロッドのき裂の形状を示すフラクトグラフ

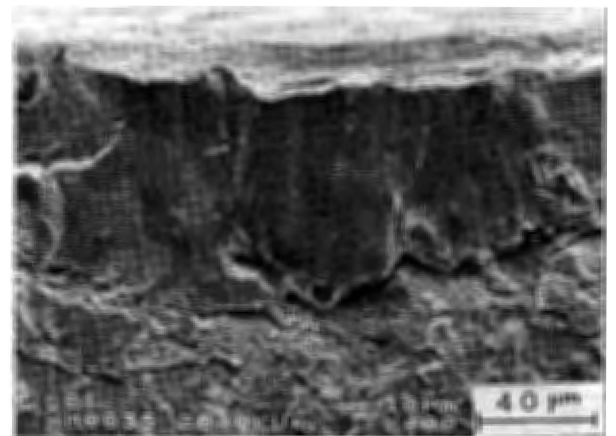


Fig. 19 Fractograph showing enlarged view of crack initiation shown in Fig. 18
 図 18 に示したき裂発生部の拡大

いた。

4.8 フレット疲労破面のフラクトグラフィ

試験後の破面観察を行ったところ、き裂はパッドが試験片に当たる箇所の両側から内部に向かって対称に入っている場合は約 1/3 であって、他は一方の表面からのき裂長さが長く、破断後の試験片には非対称なフレット破面が形成されている場合が多かった。この場合、起点と思われる箇所にはフレットによって生じた茶褐色の酸化磨耗粉が半楕円状に付着していた。Fig. 16 は、Fig. 13 に示した試験片を割って長いき裂側の起点近傍の様相を低倍率で示したもので、ブランクレプリカを施したにもかかわらず酸化磨耗粉の付着の跡が黒く残されている。

この破面をステレオ・マッチング観察を行って起点付近の様相を調べた結果、低倍率では一對の形態の輪郭が一致していたが、高倍率では Fig. 17 に見られるように一對の対応は良好ではなかった。この原因として、

起点付近はき裂の発生・進展後も強い面圧をパッドから受け続けるので、破面が変形するためと考えられる。ステレオ観察の結果、長いき裂の起点付近の破面は負荷方向に対して $10\sim 20^\circ$ 程度傾斜している場合が多く、傾斜範囲は面圧が高くかつ応力振幅が高い場合に増加する傾向が認められた。Fig. 18 は短いき裂の起点近傍の破面を示したもので、き裂は試験片の幅のほぼ中央から半楕円状に進入している。この種のき裂に対して表面き裂長さ $2C$ とき裂深さ a を測定し $a/2C$ の値を求めたところ、 $0.4\sim 0.45$ の範囲となっていた。Fig. 18 の結果から推察すると、面接触でのワイヤロープ用鋼のフレッティングき裂は最初ほぼ半円状の表面き裂となって進展し、その後貫通き裂に遷移して最終破壊に至ると考えられる。

なお、起点近傍では表面から $60\sim 80\ \mu\text{m}$ の深さまでき裂進展方向と同方向に幾つかの線を有する平坦な領域が形成されており、この領域は主き裂進展面と $15\sim 20^\circ$ 程度傾斜していた (Fig. 19)。試験に用いたワイヤロッドは、引っ張り強度が $1642\ \text{MPa}$ と非常に高いにもかかわらず、起点から離れた箇所ではストライエーションが形成されていた。

5. 結 論

- (1) ワイヤロープ鋼のフレッティング疲労強度は面圧が増加すると低下傾向を示し、パッド間隔が $50\ \text{mm}$ における疲労限度は面圧が $60\ \text{MPa}$ では $199\ \text{MPa}$ 、 $95.6\ \text{MPa}$ では $133\ \text{MPa}$ 程度である。これらの値をフレッティングを受けないワイヤロッドの疲労限度と比較すると、面圧が $60\ \text{MPa}$ では約 55% 、 $95.6\ \text{MPa}$ では約 70% 低下する。
- (2) ワイヤロッドと同様な条件で比較した SNCM439 鋼のフレッティング疲労限度は、フレッティングを受けない場合の疲労限度に比べて $34\sim 57\%$ 低下する。
- (3) 材質によらずパッド間隔が増加すると疲労寿命が減少する。また、面圧が増加すると相対すべり振幅が若干増加し、疲労寿命が低下する。
- (4) 摩擦係数は相対すべり振幅とともに増加し、相対すべり振幅が約 $15\ \mu\text{m}$ 以上になるとほぼ一定 (約 0.6) になる。
- (5) ネジ式と油圧式のフレッティング試験装置による試験データを比較した結果、油圧式の方がフレッティング疲労寿命が減少する傾向が見られる。
- (6) 試験片の形状およびパッド形状によって、疲労寿命が異なる。
- (7) フレッティング疲労き裂は最初はアスペクト比が 0.45 程度の半楕円表面き裂として発生・進展し、貫通き裂に遷移後最終破壊に至ると推察される。
- (8) 起点付近には酸化磨耗粉が付着しており、起点近傍の破面は負荷方向に対して $10\sim 20^\circ$ 程度傾斜している場合が多い。
- (9) フレッティングによって生じる表面あらさは、試験片とパッドでオーダー的にほぼ等しいようである。

参 考 文 献

- (1) 労働省安全衛生部安全課, クレーン, Vol. 37, No. 9, (1999), pp. 27-33.
- (2) W.L. Starkey, and H.A. Trans. of the ASME, Journal of Engineering for Industry, Nov. (1959), pp. 307-316.
- (3) M. Takeuchi, R. B. Waterhouse, Y. Mutoh and Satoh, Fatigue Fract. Engng Mater. Struct., Vol. 14, No. 1, (1991), pp. 69-77.
- (4) 服部, 河合, 岡本, 園部, 機械学会論文集, Vol. 47, No. 415, (1981), pp. 264-273.
- (5) 武藤, 田中, 迫田, 中村, 甘粕, ばね論文集, No. 29, (1984), pp. 38-47.
- (6) 永田, 柏谷, 松田, 太田, 機械学会論文集, A 編, Vol. 53, No. 484, (1985), pp. 2590-2596.
- (7) 武藤, 田中, 近藤, 機械学会論文集, A 編, Vol. 56, No. 496, (1987), pp. 2280-2286.
- (8) 永田, 松田, 柏谷, 機械学会論文集, A 編, Vol. 53, No. 486, (1987), pp. 196-203.
- (9) 武藤, 西田, 坂本, 材料, Vol. 37, No. 417, (1988), pp. 649-655.
- (10) G.M. Spink, Wear, Vol. 136, (1990), pp. 281-297.
- (11) K. Nakazawa, M. Sumita, and N. Murayama, ASTM STP 1159, (1992), pp. 115-125.
- (12) D.B. Rayaprolu and R. Cook, ASTM STP 1159, (1992), pp. 129-152.
- (13) T.C. Lindley and K.J. Nix, ASTM STP 1159, (1992), pp. 153-169.
- (14) G. Fischer, V. Grubisic, and O. Buxbaum, ASTM STP 1159, (1992), pp. 179-189.
- (15) M. Raoof, Fretting fatigue, ESIS 18, (edited by R.B. Waterhouse and T.C. Lindley), (1994), 267.
- (16) K. Nakazawa, M. Sumita, N. Maruyama, Fatigue Fract. Mater. Struct. Vol. 17, No. 7, (1994), pp. 751-759.

(平成 10 年 11 月 25 日受理)