

半球ゴムの摩擦摩耗に及ぼす往復滑りの影響

Friction and wear of hemispherical rubber with reciprocating sliding

九大・工（正）*田中 宏昌 九大・院（学）劉 鵬宇 九大・工（正）杉村 丈一

Hiroyoshi Tanaka*, Pengyu Liu*, Joichi Sugimura*

*Kyushu University

1. はじめに

ゴム製 O リングは、簡便な静的密封装置として、多くの機器に利用されている。O リングは、O リング溝に設置され、溝面に対して垂直に一定のつぶし率を付与される。つぶしによる溝内での変形により、シール面を形成し、流体を封止するが、封止流体の昇圧・脱圧によって、リングの圧縮方向に対して直交方向に力を繰り返し受けることになる。この力により O リングが溝内で変形や相対変位を受けると O リング表面に摩耗や損傷を生じることがある。ゴムの摩擦摩耗についてはこれまでに多くの研究がなされており、アブレーションパターンを持つ摩耗の発生機構等が解明されてきた。しかしその多くが一方方向滑りによる考察であり、往復動、特に高サイクルにおけるゴム表面の摩耗についての知見は十分ではない。

本研究では、往復滑り接触下におけるゴムの摩擦摩耗を取り上げる。O リング表面の損傷を想定し、ゴム表面にかかる力とゴム表面の変形、および損傷発生条件をモデル配合ゴム試験片を用いて評価した。

2. 実験方法

O リングの接触状態を模擬し、単純化するため、半径 2.5mm の半球形状を持つゴム試験片を作製した(Fig. 1)。ベースゴムは EPDM ゴムとフッ素系ゴムで、それぞれ“EPDM”、“FKM”と表記する。それぞれのゴム試験片には、無充填のものと、カーボンブラック(CB)を配合したものを準備した。ゴム試験片の硬さを Table 1 に示す。ゴム試験片を BK7 ガラスディスクに押し当て、ガラスディスクに連結されたモータを回転することで、接触面に一方方向滑り、往復滑りを与えた。ガラスディスク越しに接触面の動画観察を行い、ゴムの変形や相対滑りがゴム表面の摩擦、摩耗、損傷にどのような影響を及ぼすかを観察した。摩擦試験は、ゴムの変形特性を把握するための一方方向滑り試験と、繰り返し負荷による摩耗を観察するための最大 1 万サイクルの繰り返し往復滑り試験を実施した。実験はすべて大気中室温で行った。試験条件を Table 2, 3 に示す。

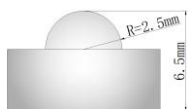


Fig. 1 Hemispherical rubber sample

Table 2 Conditions of uni-directional sliding test

Sliding speed, mm/min	1, 2, 4, 10, 20, 40, 60, 120, 240, 600, 1200
Load, N	0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9

Table 1 Hardness of rubber samples

	EPDM	FKM	EPDM-CB	FKM-CB
Hardness, Duro-A	35	42	80	73

Table 3 Conditions of reciprocating sliding test

Sliding speed, mm/min	600
Load, N	0.5
Amplitude, mm	±1, ±1.5, ±2

3. 実験結果

3.1 一方方向滑り試験

ゴムの変形における速度、荷重、滑り距離依存性を把握するために、広範な作動条件におけるゴム試験片の一方方向滑り試験を行った。摩擦係数は滑り距離増加とともにほぼ直線的に増加し、滑り距離 1.0mm 程度で変曲点を迎え、それ以上の滑り距離では、ほぼ一定値を取る。Figure 2 に変曲点通過後の摩擦係数の滑り速度依存性を示す。Table 2 に示す広範な速度条件に対して、各ゴムの摩擦特性の差異は小さかった。しかし、接触表面の観察によると、ゴム種や、特に充填剤の配合の有無による巨視的、微視的変形の状態に違いを生じた。無充填ゴムの表面は滑り方向前縁より強い引張応力を受けて、平坦な接触面を形成した。また、EPDM 試験片のごく低速の試験をのぞき、滑り方向後縁よりシャラマッハ波が発生することが観察された。一方、充填剤を配合したゴムにおいてはほとんどシャラマッハ波が観察されることはなかった。引張応力による表面の変形は小さく、滑り距離の小さい間は接触域の中心部に円形の固着域を生じた。滑り距離が増加するに従いこの固着域は縮小し消滅した。また、多くの試験において Stick-slip を生じた。以上の知見を基に、往復滑り試験の荷重を 0.5N、滑り速度を 600mm/min、振幅を ±1, ±1.5, ±2mm とした。

3.2 繰返し往復滑り試験

ゴム表面は大きな引張力により微視的、巨視的破断が生じ、摩耗の発生につながると考えられる。本節においては、摩耗の発生、発展に繰返し応力負荷がどのような影響を及ぼすのかを調査するため最大 1 万サイクルの繰返し往復滑り試験を実施した。

Figure 3 に無充填 EPDM 試験片を用いた場合の、繰返し往復滑りによる最大摩擦係数の推移を示す。振幅が 1mm であれば摩擦係数は 1 万サイクルの試験において変化は見られず、ゴム表面にも損傷は現れない。しかし 1.5mm では摩擦係数は顕著に増大する。表面観察によると 1000 サイクル以降顕著に摩耗が生じ、その後サイクル数の増加に伴い全面に摩耗が広がっていく様子が確認された。100 サイクル未満においてはシャラマッハ波や平坦な引張領域が明瞭に観察されるが、1000 サイクルを超えると微小な摩耗粉の排出とともにシャラマッハ波は消滅し、摩耗領域が拡大していく様子が観察された。振幅 2mm の場合は、摩耗がさらに顕著であり、数十サイクル後にはすでに摩耗粉の接触面への介在が顕著で、摩擦係数はむしろ大きく低下した。充填剤を配合した EPDM-CB 試験片の場合は、振幅を 2mm まで増大しても、摩耗が顕著に増加することはなかった。また、摩擦係数も一方滑り試験と同等の高い値を維持した(Fig. 4)。

FKM 試験片の場合は、無充填においては、EPDM 試験片と似た挙動を見せた。無充填 FKM 試験片は振幅 1.5mm までは EPDM 試験片より安定して、摩耗も少ない。しかし、充填剤を配合すると EPDM 試験片とは異なる挙動を示した(Fig. 5)。振幅 1mm の場合は EPDM-CB と同様摩耗が見られなかったが、FKM-CB では振幅 1.5mm において数十サイクルの時点ですでに表面が大きく荒れていることが観察された。摩耗粉は摩擦面外へは排出されにくい、非常に細かい粒の凝集体となって摩擦面内で堆積していくことが観察された。振幅が 2mm の場合はさらに顕著に摩耗粉の堆積が生じ、ゴム接触面に帯状に盛り上がり形成した。この堆積部を拡大観察すると、非常に細かい摩耗粉の集積物であることが示唆された。

3.3 摩耗の評価と考察

上述のように無充填ゴム試験片では EPDM に比べ耐摩耗性に優れる FKM が、充填剤を配合すると EPDM より摩耗を増大させてしまうケースがあることが分かった。これは、ベースゴムの種類と充填剤のカーボンブラックとの親和性や、排出される摩耗粉の特性により、充填剤配合のゴムであっても繰返し応力負荷によって摩耗が増大する可能性を示唆するものである。

4. おわりに

○ リングを想定した半球ゴム試験片を用いて往復滑り試験を行った。振幅 1mm の往復滑りにおいてはすべての試験片において 1 万サイクル応力負荷で変化は見出されなかったが、1.5mm 以上の振幅を与えるとゴム組成に依存した摩耗を生じた。振幅 2mm においては、カーボンブラック充填 EPDM のみ低摩耗を維持した。

謝辞

本研究で用いたゴム試験片は NOK(株)から提供を受けたものであり、ここに謝意を表する。

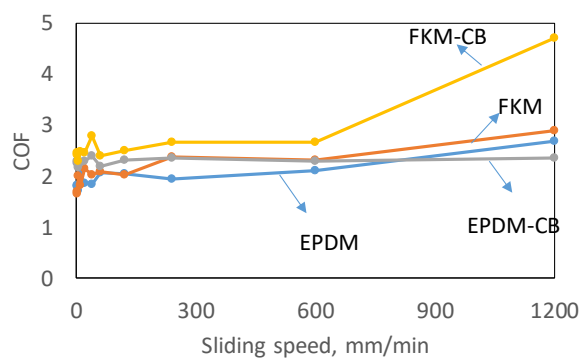


Fig. 2 Coefficient of friction under different sliding speeds, Normal load at 0.5N

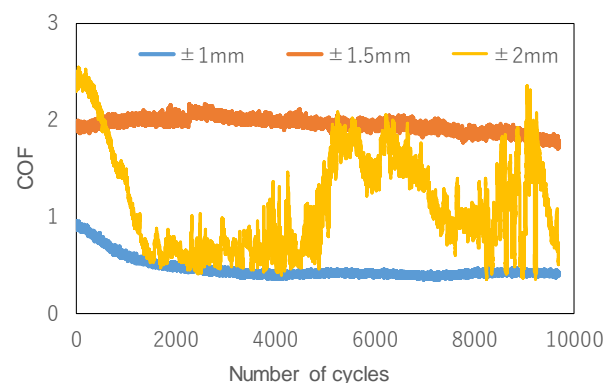


Fig. 3 Changes in coefficient of friction at different amplitudes with EPDM

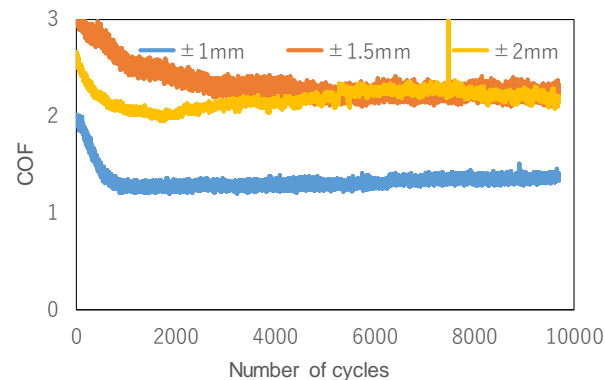


Fig. 4 Changes in coefficient of friction at different amplitudes with EPDM-CB

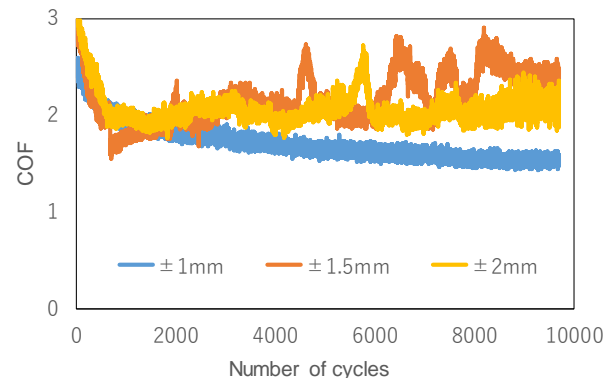


Fig. 5 Changes in coefficient of friction at different amplitudes with FKM-CB