

摺動による接線方向変形を考慮したゴム材料のヒステリシス摩擦モデルの検討

Hysteresis friction model for rubber materials considering tangential deformation during sliding

名工大（学）*伊藤 一志 名工大（正）劉 曉旭 名工大（正）前川 寛 名工大（正）糸魚川 文広

Kazushi Ito*, Satoru Maegawa*, Xiaoxu Liu*, Fumihiro Itoigawa*

*Nagoya Institute of Technology

1. 緒言

ゴム材料のヒステリシス摩擦とは、摩擦により入力されたエネルギーが、バルク変形にともなう粘性散逸により熱エネルギーへと変換されことに起因する摩擦である。このゴム特有のヒステリシス摩擦は粗面とゴムの摩擦において支配的である。例としてタイヤ用ゴムは粘弾性特性を調整することで摩擦力が設計されている。そこで本研究ではヒステリシス摩擦発生メカニズムを明確にして、より高精度にヒステリシス摩擦を予測できる摩擦モデルの構築を目指した。

ヒステリシス摩擦の正確な予測のためには、真実接触点におけるゴムの変形挙動を正確にモデリングすることが重要である。Fig.1に単突起と摩擦するゴムの変形状態の模式図を示す。水色で示す法線方向変位はゴム表面と突起先端の距離である。また、赤色矢印は摺動による接線方向変位を示す。粗さ突起の傾斜が小さい場合や凝着力が小さい場合などでは、法線方向変位に対して接線方向変位が無視できるほど小さく、ヒステリシス摩擦モデルとして例えば粘弾性ファンデーションモデル¹⁾が有効である。一方で、接触面の平均的な傾斜が大きい場合や凝着力が大きい場合、接線方向変位の影響を無視することができない。その場合、従来モデルで見積もったエネルギー散逸量よりも実際のエネルギー散逸量が大きくなる可能性があり、接線方向変位の正確な見積もりが重要である。

本報では、接線方向変位を考慮した摩擦モデルを検討するため、接線方向変位及び摩擦係数と法線方向変位の関係を調査した。単突起と平滑なゴムの摩擦係数、接線方向変位、法線方向変位を実験により計測した結果と、有限要素解析（FEA, Finite Element Analysis）により計測した結果を以下に報告する。

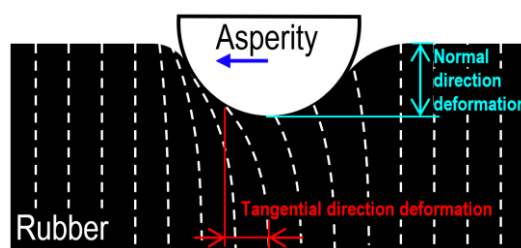


Fig. 1 Schematic diagram of rubber friction with asperity

2. 実験概要

2.1 単突起との摩擦実験

実験装置の概略図をFig.2に示す。装置は2軸自動ステージ（Fig.2下部）と力センサ（Fig.2上部）からなる。2軸移動ステージの上面には、厚み2mmのシート状ゴム試験片が取り付けられている。ゴム表面にはシリコンオイル（動粘度10mm²/s）を塗布した。力センサの先端には単一突起を模擬したダイヤモンド触針（形状はFig.2の挿図参照）を取り付けた。触針に加わる鉛直力および水平力は板ばねに取り付けられたひずみゲージにより計測される。なお、板ばねの剛性は鉛直方向5.86×10⁻³N/μm、水平方向5.63×10⁻³N/μmである。

実験は次の手順で実施した。まず、ステージを鉛直方向に移動させゴム試験片を触針に押し当てた。なお、力センサが力を検知した位置を原点として押し込み量を設定した。次にゴム試験片を速度100 μm/sで距離1000 μmを往復させ、触針に作用する水平力（摩擦力）と鉛直力（垂直荷重）を計測した。同様の手順で、異なる押し込み量での摩擦係数を計測した。

Fig.3にステージが往復する際の、動き出すときの測定した力の時間変化を示す。摩擦中のゴム表面の接線方向変位は、滑り出す直前のゴム表面の変位量と考え、摩擦力が0（板ばねが平衡位置にあるときの摩擦力）から定常値まで増加する間の時間にステージの滑り速度を掛けた値を接線方向変位とした。

2.2 有限要素解析

本研究では、COMSOL Multiphysics®を用いてシミュレーションを行った。Fig.4に単突起とゴムの摩擦の2次元FEMモデルを示す。圧子は計測で用いたものと同じ形状の剛体とした。ゴムの材料

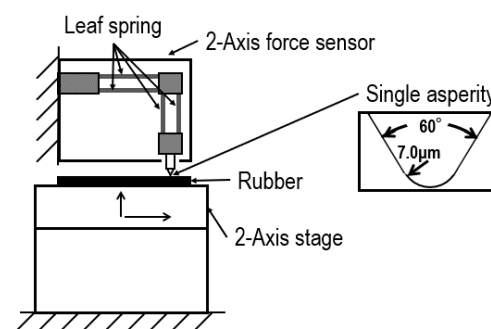


Fig. 2 Schematic of experimental apparatus

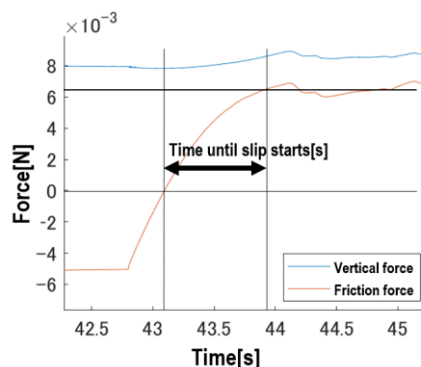


Fig. 3 Time variation of measured force

モデルには Neo-Hookean を用い、物性値には実験に用いたゴムのヤング率である 0.63MPa, ポアソン比 0.48 を用いた。ゴムの左右と下側界面は固定拘束とした。接触・摩擦問題の取り扱いにはペナルティ法を用い、界面の摩擦係数を定義するクーロン摩擦モデルを用いた。ゴムに対して突起を指定した法線方向変位となるようにゴムに近づけたのち、摩擦力が一定の値を示すまで水平方向に移動させた。シミュレーションにより得られたゴムの変形場の時間変化から、突起が乗り越えた位置のゴム表面変位の時間変化における、水平方向変位の最大値を撓動による接線方向変位として計測した。

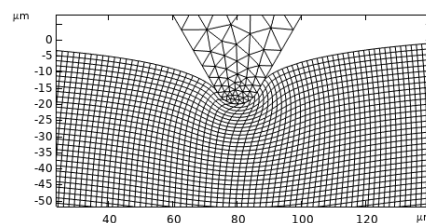


Fig. 4 Deformation of rubber by FEA ($\mu=0.2$)
Normal direction deformation: 20 μm

3. 実験結果

Fig.4 に FEA による界面の摩擦係数は 0.2, 法線方向変位が 20 μm の場合での摩擦中のゴムの変形状態を示す。Fig.5 に、摩擦係数と法線方向変位の関係について、実験で計測した結果と FEA で異なる界面の摩擦係数を設定した場合の結果を示す。いずれも界面で設定した摩擦係数より高い摩擦係数が計測された。このことから接触面の摩擦により、突起との接触面積の前後非対称性が拡大され、設定した摩擦係数より突起の受ける力と垂直荷重から計算される摩擦係数が増大したと考えられる。Fig.4 に示す圧子は左から右に移動しており、界面の摩擦により変形し、突起前後で接触面積が非対称となっている。このゴムの形状変化による摩擦は Gabriel らも指摘しており²⁾、凝着により接触面積の非対称性が拡大されている状態である。この非対称性により、粘性を持たない弾性体においても、ヒステリシス摩擦が生じているように見える。

次に、Fig.6 に法線方向変位と接線方向変位の関係を示す。FEA で界面に設定した摩擦係数が高いほど、摩擦係数及び接線方向変位が大きくなることが分かる。界面の摩擦係数が 0.3 の時、FEA の結果と実験値は Fig.5 と Fig.6 のいずれにおいてもよく一致する。実験での滑り速度は非常に小さいため、エネルギー散逸量は小さくヒステリシス摩擦は非常に小さいと考えられる。よって、実験では接触面の凝着と、凝着により作られた突起前後での面積非対称性による摩擦の和が摩擦力となっていると考えられる。このようなヒステリシス摩擦の影響が小さく凝着によるヒステリシス摩擦が生じるように見える状態において、突起形状や凝着力の大小が異なる場合の接線方向変位は FEA を用いて予測できると考えられる。

一方、FEA ではゴムを弾性体と仮定したが、実験に用いたゴムは粘性を有する。油を塗布することによって凝着力が低下した、本実験の状態ではヒステリシス摩擦が無視できないほど大きくなっている可能性もある。ヒステリシス摩擦によってもゴムは力を受けて接線方向に変形し、凝着に起因する接線方向変位と、ゴムの粘性に起因する接線方向変位の発現メカニズムは異なると考えられる。この検討で得られた結果は、ゴムの粘性に起因するヒステリシス摩擦の影響が無視できない状況においても、法線方向変位と接線方向変位の関係を界面にクーロン摩擦を設定し凝着摩擦を与えた FEA で予測することができる可能性を示唆している。

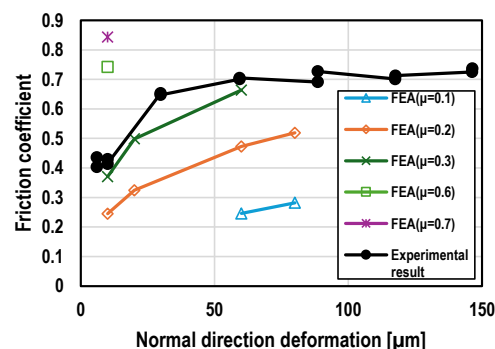


Fig. 5 Normal direction deformation of rubber vs friction coefficient

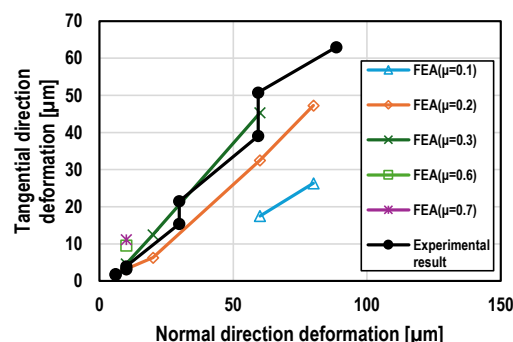


Fig. 6 Normal direction deformation vs Tangential direction deformation

4. 結 言

本報で得られた結果から、凝着力により接触面積非対称性が拡大されて、摩擦が増大し得ると考えられる。ゴムの粘性によっても接触面の非対称性は増大するため、凝着摩擦とヒステリシス摩擦の相互作用が存在すると考えられる。このような状態では凝着力とヒステリシス摩擦どちらかのみを制御する方法では相互作用が不明であるため、摩擦の大小を設計することは難しい。実験と FEA の比較から、凝着摩擦とヒステリシス摩擦が相互に作用しあう場合において摩擦係数が同じであれば接線方向変位も同じとなることが示唆された。これは、単突起とゴムの力のつり合いを考えると、ゴムの摩擦係数が接触面の形状の傾きによって決まることでも説明できる。今後、接線方向変位の影響を組み込んだモデルを構築するためには、界面の油の有無やゴムの粘弾性、突起形状や速度の異なる条件で接線方向変位と摩擦係数を計測しデータを蓄積することが必要である。

文 献

- 1) K. Nakano, &M. Kono, Transient and steady sliding friction of elastomers: Impact of vertical lift, *Frontiers in Mechanical Engineering*, 6, 38 (2020).
- 2) P. Gabriel, A.G. Thomas, &J.J.C. Busfield, Influence of interface geometry on rubber friction, *Wear*, 268(2010), 747-750.