

粘弾性由来の固体摩擦におよぼす圧子のマクロ形状とマイクロ粗さの影響

Effects of macroscopic probe shape and microscopic surface roughness on viscoelastic solid friction

横国大(学)※千葉 大誠, (学)渡辺 稔紀, (正)中野 健

Taisei Chiba¹, Toshiki Watanabe¹, Ken Nakano¹

¹Yokohama National University

1. 緒言

ゴムをはじめとする粘弾性体は、タイヤやワイパーなどの摩擦材料として広く利用されており、各用途に合った摩擦特性が求められている。一般に粘弾性体の摩擦挙動は、対向面の表面粗さによって決まるひずみ量やひずみ周波数に影響される。よって、製品の高機能化のためには、粘弾性体の摩擦におよぼす表面粗さの影響を理解する必要がある。先行研究では、粘弾性に由来する摩擦現象の理解のために「粘弾性ファンデーションモデル」が提案されている[1]。同モデルは、必要最低限のパラメータで摩擦現象を記述してその全体像を把握する思考ツールである。本研究では同モデルを拡張して、周期的な表面粗さを有する円柱状の剛体圧子と粘弾性体のすべり摩擦を解析し、粘弾性由来の固体摩擦におよぼす圧子のマクロ形状とマイクロ粗さの影響を考察した。

2. 方法

本研究で用いた摩擦モデル(粘弾性ファンデーションモデル)を図 1 に示す。粘弾性ファンデーションモデルとは、固体を独立な粘弾性要素の配列で表現する摩擦モデルである[1]。本研究では、粘弾性要素として、ばねとダンパを並列につないだ Kelvin-Voigt モデルを採用した。周期的な表面粗さを有する円柱状の剛体圧子(粗さ曲率半径: r , 突起密度: n , 圧子曲率半径: R)が粘弾性ファンデーション(弾性係数: K , 減衰係数: C)と接触する。この圧子では突起高さ $h_c (= (8n^2r)^{-1})$ を表面粗さの指標と考えることができ、突起高さ h_c が大きいほど圧子は粗くなる。粘弾性ファンデーションは、水平方向に一定速度(駆動速度: V)で駆動する。圧子は、水平方向には固定され、鉛直方向の位置(貫入量: δ)を一定とする「固定圧子モデル」と、鉛直方向の力(接触荷重: W)を一定とする「可動圧子モデル」を採用した。粗さ曲率半径を 3 条件($r = 10^{-6}, 10^{-5.5}, 10^{-5}$ m)設定し、定常状態について粘弾性要素が圧子に伝える力の総和を求め、圧子の貫入量 δ , 接触荷重 W , 摩擦力 F , 摩擦係数 $\mu (= F/W)$ を数値計算した。

3. 結果および考察

計算結果を図 2 に示す。同図は、定常すべりの圧子の貫入量 δ , 接触荷重 W , 摩擦力 F , 摩擦係数 μ の速度依存性であり、左が固定圧子モデル、右が可動圧子モデルの結果である。粗さ曲率半径が小さくなるほど突起高さが大きくなり、圧子が粗い状況を表している。まず貫入量と接触荷重に着目すると、3 条件のグラフがすべて重なっているため、貫入量と接触荷重は表面粗さに依存しないことがわかる。次に摩擦力と摩擦係数に着目すると、粗い条件ほど絶対値が大きくなっていることがわかる。つまり、摩擦力と摩擦係数の絶対値は表面粗さに依存している。

次に、摩擦係数 μ の低速域と高速域における漸近線を解析的に求めた。求めた漸近線の交点が定点となるように速度と摩擦係数を正規化し、得られたマスターカーブを図 3 に示す。縦軸が正規化摩擦係数、横軸が無次元速度である。摩擦係数の速度依存性は、低速域のときは圧子の拘束条件によらず $\mu \propto V^1$, 高速域のときは固定圧子では $\mu \propto \text{const}$, 可動圧子では $\mu \propto V^{-1/4}$ であり、中速域で無次元粗さ(固定圧子モデル: $\rho\delta = Rh_c/r\delta$, 可動圧子モデル: $\rho W = (R/r)^{4/3}(2Kh_c/3nW)^{2/3}$)によってマスターカーブが分岐することがわかった。無次元粗さの値が大きい条件ほど、表面粗さの影響を大きく受けることを意味している。以上より、本モデルの摩擦特性は、無次元速度、正規化摩擦係数、無次元粗さの三つの無次元数で整理できることがわかった。

最後に、可動圧子モデルにおける摩擦係数の速度依存性を考察する。先行研究[1]では、圧子の浮上に伴う接触勾配の減少が、摩擦係数の速度弱化特性を生む要因であることが示されている。しかし、本研究では、図 2 に示すように、表面粗さが粗い条件(赤線)では、圧子の浮上が始まる速度($V \sim 10^{-2}$ m/s)と、摩擦係数の速度弱化が始まる速度($V \sim 10^{-3}$ m/s)が異なっている。これらの条件について、圧子と粘弾性要素の接触状態を解析すると、圧子の浮上現象が起こる速度よりも低い速度において、表面粗さ突起におけるファンデーションの剥離が起こることがわかった。つまり、剥離によりマイクロな接触勾配が減少した後に、浮上によりマクロな接触勾配が減少する。どちらの接触勾配も摩擦係数に影響しており、摩擦係数は中速域から高速域にかけて 2 段階の速度弱化プロセスを経る。

4. 結言

本研究では、粘弾性ファンデーションモデルを拡張して、周期的な表面粗さを有する円柱状の剛体圧子と粘弾性体のすべり摩擦を解析した。その結果、マイクロ粗さによって摩擦力と摩擦係数の絶対値が定まり、マクロ形状によって摩擦力と摩擦係数の速度特

性、貫入量、接触荷重が定まることを明らかにした。また、マイクロ粗さにおける剥離が発生した後にマクロな圧子の浮上が発生し、摩擦係数は中速域から高速域にかけて2段階の速度弱化プロセスを経ることがわかった。

謝辞

本研究はCREST(JPMJCR2193)とERATO(JPMJER2401)の助成を受けて実施した。

文献

- [1] T. Watanabe, S. Hatanaka, K. Nakano, Dimensionless numbers and master curves for sliding friction from the Kelvin-Voigt viscoelasticity of solids, *Tribology Online*, 18, 406-416 (2023).

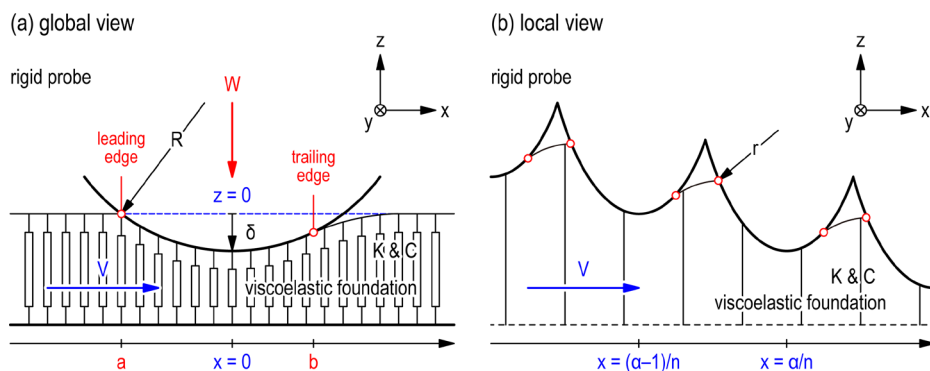


図1 周期的表面粗さを有する円柱圧子を用いた粘弾性ファンデーションモデル((a):全体図,(b):詳細図)

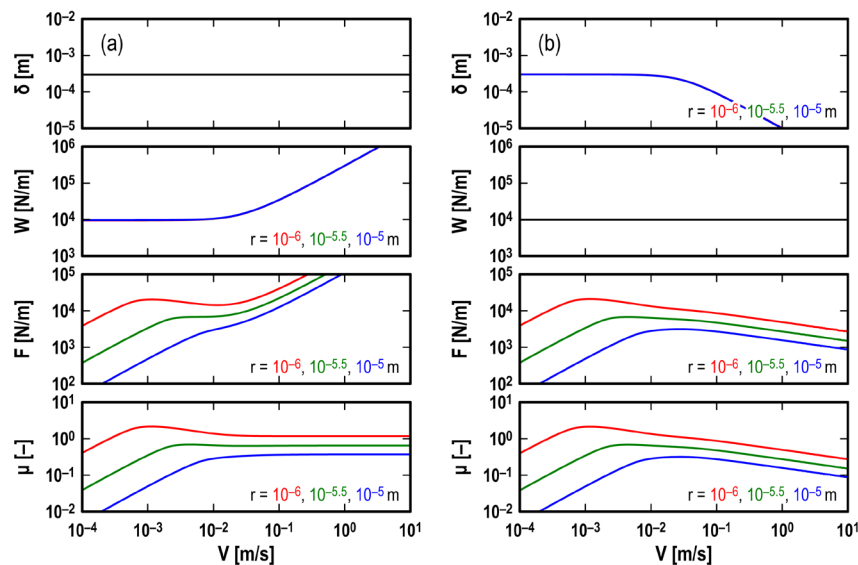


図2 貫入量 δ , 接触荷重 W , 摩擦力 F , 摩擦係数 μ の計算結果((a):固定圧子モデル,(b):可動圧子モデル)

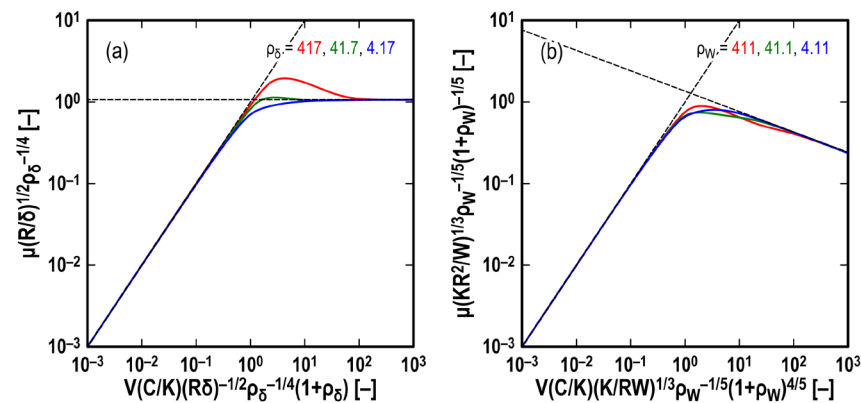


図3 摩擦係数のマスターカーブ((a):固定圧子モデル,(b):可動圧子モデル)