

粘弾性由来の固体摩擦におよぼす周期的表面粗さの影響

Effect of periodic 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, Toshiaki Watanabe¹, Ken Nakano¹¹Yokohama National University

1. 緒言

ゴムをはじめとする粘弾性体は、摩擦部の材料として、様々な用途で使用されている。例えば、タイヤでは、制駆動力の獲得に向けて高摩擦性能が求められ、オイルシールでは、エネルギーロスの削減に向けて低摩擦性能が求められる。用途によって求められる特性が異なるので、製品の高品質化には、粘弾性体の摩擦現象の理解が必要である。先行研究[1]では、明示的な摩擦則を仮定することなく、固体の粘弾性体由来する摩擦を表現する「粘弾性ファンデーションモデル」が提案されている。粗さのない単一のプローブと粘弾性ファンデーションとのすべり摩擦では、プローブの浮上により粘弾性体に特有な釣鐘型の摩擦係数の速度依存性が現れることが示されている[1]。しかし、実際の固体には非零の表面粗さが存在し、粘弾性由来の固体摩擦に影響を及ぼすことが予想される。そこで、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剛平板と粘弾性体と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周期的表面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。二次関数形状の周期的な表面粗さを有する剛平板(突起曲率半径: R , 単位長さあたりの突起個数: n)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。粘弾性ファンデーションは、水平方向は周期境界条件とし、一定速度(駆動速度: V)で駆動する。剛平板は、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「位置制御モデル」と、鉛直方向の荷重(単位面積当たりの接触荷重: W)を一定とする「荷重制御モデル」を採用した。定常状態について、粘弾性要素が剛平板に伝える力の総和を求め、プローブの貫入量 δ , 単位面積当たりの接触荷重 W , 単位面積当たりの摩擦力 F , 摩擦係数 $\mu (= F/W)$ を数値計算した。

3. 結果および考察

貫入量を5条件($\delta = 10^{-6} \sim 10^{-2}$ m)設定した位置制御モデルの計算結果と、接触荷重を5条件($W = 10^4 \sim 10^8$ N/m²)設定した荷重制御モデルの計算結果を図2に示す。同図は、定常すべりの剛平板の貫入量 δ , 接触荷重 W , 摩擦力 F の速度依存性であり、左が位置制御モデル、右が荷重制御モデルの結果である。本モデルでは、表面粗さにより摩擦力が発生し、速度の増加に伴い、位置制御モデルでは接触荷重 W が増加し、荷重制御モデルでは貫入量 δ が減少する(剛平板が浮上する)。しかし、先行研究[1]とは異なり、高速域における接触荷重の増加量と剛平板の浮上量には限界があり、一定値に収束することがわかった。

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。低速域の漸近線は静止時において突起がファンデーションに完全に埋まるか否かで異なる式で表されるが、高速域の漸近線は単一の式で表される。突起が完全に埋まらない場合の漸近線の交点の値から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。縦軸に正規化摩擦係数、横軸に無次元速度を取り、マスターカーブを描画した。摩擦係数の速度依存性は、低速域では $\mu \propto V^1$, 高速域では $\mu \propto V^{-1/2}$ であり、無次元粗さ(位置制御モデル: $\delta/h_c = 8n^2R\delta$, 荷重制御モデル: $3W/2Kh_c = 12n^2RW/K$)によってマスターカーブが分岐することがわかった。なお、 h_c は突起高さ($h_c = (8n^2R)^{-1}$)であり、無次元粗さが1より小さいときは静止時において突起が埋まらない状態、1より大きいときは静止時において突起が埋まる状態を意味する。図3から、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。

以上の結果を踏まえ、摩擦係数の速度依存性を考察する。先行研究[1]では、荷重制御モデルにおいて、プローブの浮上により摩擦係数が速度弱化特性を示すことが報告されている。これは、浮上によりプローブの接触勾配($\gamma = \delta/a$)が減少することに起因する。本モデルでは、剛平板の浮上は高速域で収束するが、摩擦係数は変わらず速度弱化特性を示している。また、剛平板の浮上が起こらない位置制御モデルでも、摩擦係数は速度弱化特性を示している。これは、高速域では、上流に位置する突起で剥離したファンデーションが自然長に戻る前に次の突起と接触し、突起一つの実効的な貫入量(δ_{eff})と接触勾配($\gamma_{eff} = \delta_{eff}/a$)が減少することに起因する。つまり、剛平板の浮上が起こらずとも、周期的な表面粗さがあれば、摩擦係数は釣鐘型の速度特性を示す。

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剛平板と一様な粘弾性体とのすべり摩擦を解析した。摩擦係数の速度依存性は、三つの無次元数（無次元速度、正規化摩擦係数、無次元粗さ）により整理されることを明らかにした。また、周期的な表面粗さの影響により、実効的な貫入量と接触勾配が減少し、摩擦係数は粘弾性体に特有な釣鐘型の速度依存性を示すことがわかった。

本研究はCREST(JPMJCR2193)の助成を受けて実施した。

[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).

