

標準線形固体モデルを用いたヒステリシス摩擦の表現法

Description of hysteresis friction by the standard linear solid model

横国大(学)※渡辺 稔紀, (正) 畠中 慎太郎, (正) 中野 健

Toshiki Watanabe¹, Shintaro Hatanaka¹, Ken Nakano¹

¹Yokohama National University

1. 緒言

粘弾性に起因するエラストマーの性質として、クリープと応力緩和が知られている。また、エラストマーに特有なヒステリシス摩擦も粘弾性に起因している。本研究では、クリープと応力緩和の両性質を表現する最も簡単なレオロジー要素、すなわち「標準線形固体モデル(standard linear solid model: SLS モデル)」を用いて、剛体圧子と半無限粘弾性体の間に生じるヒステリシス摩擦の表現法を考察した。

2. 方法

半無限粘弾性体のモデルとして、等間隔に並んだレオロジー要素で構成される「粘弾性ファンデーション」を用いた(図 1)。円柱状の剛体圧子(半径: R)が粘弾性ファンデーションに接触し(貫入量: δ)、粘弾性ファンデーションが水平方向に駆動速度 V で並進運動する状況を表している。剛体圧子の拘束条件として、全方向に拘束のある「固定圧子」と鉛直方向のみに自由度のある「可動圧子」の二条件を考えた。固定圧子は位置制御、可動圧子は荷重制御と解釈することもできる。

粘弾性ファンデーションを構成するレオロジー要素として、三要素で構成される SLS モデルを用いた(図 2)。二要素のレオロジーモデルでは、Voigt モデル(ばねとダンパを並列に配置したモデル)はクリープのみ、Maxwell モデル(ばねとダンパを直列に配置したモデル)は応力緩和のみを表現する。一方、SLS モデルは、Voigt モデルと Maxwell モデルの要素を併せ持ち、クリープと応力緩和の両方を表現するミニマルモデルである。SLS モデルには Voigt 型と Maxwell 型の二通りの表現法があるが、次式に示すように、どちらも同形式の構成方程式に従い、物理的には等価である。

$$F + t_M \dot{F} = kx + c\dot{x} \quad \text{where} \quad t_M = \frac{c_{V2}}{k_{V1} + k_{V2}} = \frac{c_{M2}}{k_{M2}}, \quad k = \frac{k_{V1}k_{V2}}{k_{V1} + k_{V2}} = k_{M1}, \quad c = \frac{k_{V1}c_{V2}}{k_{V1} + k_{V2}} = \frac{k_{M1} + k_{M2}}{k_{M2}} c_{M2} \quad (1)$$

構成方程式を解くと、クリープの解 $x = x_0 \exp(-t/t_V)$ 、応力緩和の解 $F = (F_0 - F_{eq}) \exp(-t/t_M) + F_{eq}$ を得る。ただし、 $t_V = c/k$ とした。つまり、SLS モデルには、二個の時定数(t_V と t_M)が存在する。

3. 結果および考察

数値シミュレーションにより得た摩擦係数 μ の結果を図 3 に示す。理論的に求めた漸近線に基づき、各軸に適切な無次元量を選択して、結果をまとめた。二本の漸近線(L_1 と L_3)の交点に当たる臨界速度 V^* を基準とすると、低速域($V \ll V^*$)では、圧子の拘束条件によらず μ は V に比例する。一方、高速域($V \gg V^*$)では、圧子の拘束条件によらず μ は V^{-1} に比例する。また、中速域($V \sim V^*$)では、二個の時定数の比 t_V/t_M に応じて分岐し、固定圧子と可動圧子で異なる速度依存性を示している。

粘弾性ファンデーションのレオロジー要素として Voigt モデルを用いた先行研究[1]の結果を図 4 に示す。低速域と中速域では同じ速度依存性を示す一方で、高速域では異なる性質が表れている。高速域での違いはレオロジーモデルの特性に由来すると考えられる。つまり、Voigt モデルでは、低速域では弾性、高速域では粘性が支配的になり、SLS モデルでは、低速域と高速域では弾性、中速域では粘性が支配的になる。SLS モデルの支配因子の遷移は、エラストマーの性質をよく表現している。よって、高速域でのモデリングには SLS モデルが適しているが、低速域と中速域では、両モデルに著しい違いはないと考えて良い。

4. 結言

本研究では、SLS モデルで構成される粘弾性ファンデーションを用いて、剛体圧子との間に現れるヒステリシス摩擦を数値的に求めた。二種類の拘束条件(固定圧子と可動圧子)に対して、理論的な漸近線より適切な無次元パラメータを見出し、摩擦係数の結果を整理した。Voigt モデルで構成される粘弾性ファンデーションを用いた先行研究[1]との比較により、SLS モデルの強みは高速域にあることが明らかになった。

謝辞

本研究は CREST(JPMJCR2193)と科研費(21H01236)の助成を受けて実施した。

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).

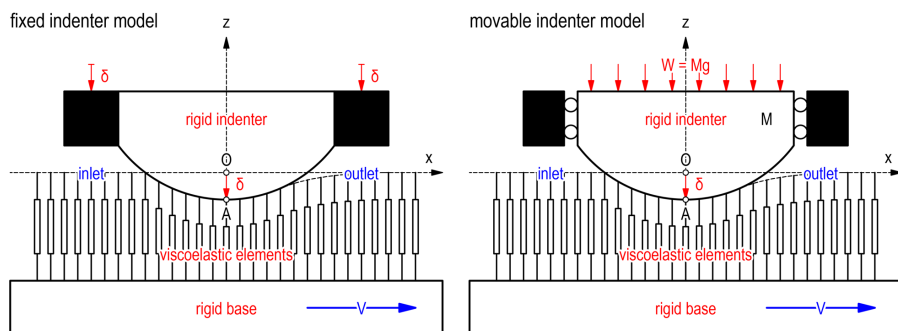


図1 粘弾性ファンデーションモデル(左: 固定圧子モデル, 右: 可動圧子モデル)[1]

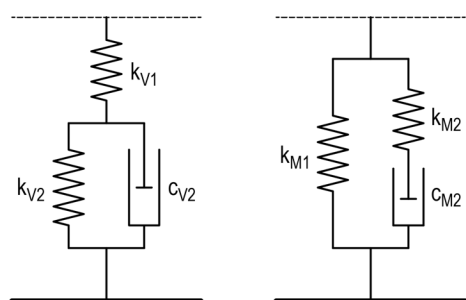


図2 標準線形固体モデル(SLS モデル) (左: Voigt 型, 右: Maxwell 型)

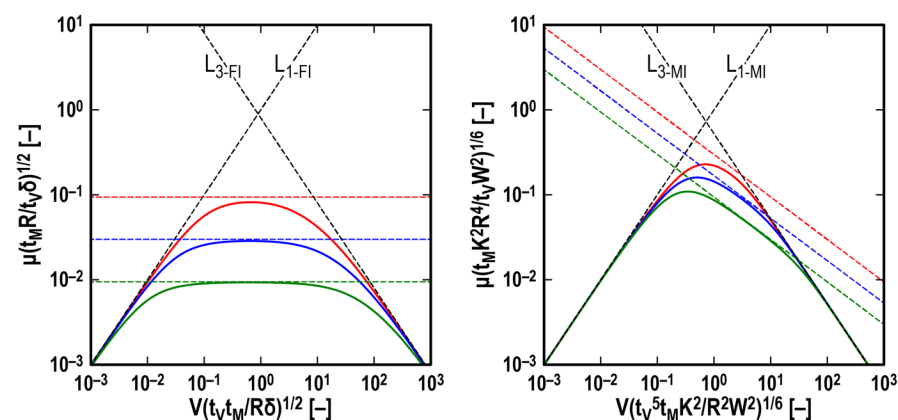


図3 SLS ファンデーションの摩擦係数(左: 固定圧子, 右: 可動圧子) (赤: $t_v/t_M = 10^2$, 青: $t_v/t_M = 10^3$, 緑: $t_v/t_M = 10^4$)

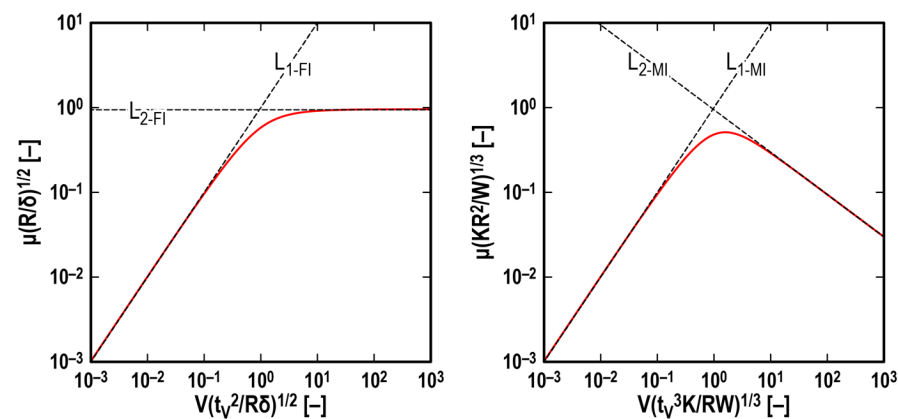


図4 Voigt ファンデーションの摩擦係数(左: 固定圧子, 右: 可動圧子)[1]