

履歴無しタンジェンシャルモデルの数式解説 (tangential_model_no_history.h)

Open DEM Japan

2025年6月29日

粒子 i と粒子 j (または壁) 間の接触において、法線単位ベクトルを \hat{n} , 相対接線速度を $\mathbf{v}_{\text{tr}} = (v_{\text{tr},1}, v_{\text{tr},2}, v_{\text{tr},3})$ とする。本モデルは剪断変位の履歴を保持せず、接線減衰力のみでクーロン摩擦を満足させる最も簡潔な接線相互作用である。

$$v_{\text{rel}} = \|\mathbf{v}_{\text{tr}}\| = \sqrt{v_{\text{tr},1}^2 + v_{\text{tr},2}^2 + v_{\text{tr},3}^2} \quad (1)$$

材料静摩擦係数 μ と法線弾性力 (粘性項を含めた実効法線力) F_n によりクーロン限界

$$F_t^{\text{max}} = \mu |F_n| \quad (2)$$

を定義する。接線粘性係数の基準値を γ_t^0 とすれば、許容減衰力 $\gamma_t^0 v_{\text{rel}}$ が式 (2) を超えぬよう

$$\gamma = \min(\gamma_t^0, F_t^{\text{max}}/v_{\text{rel}}) \quad (3)$$

と動的に制限係数を導入する。よって接線力は

$$\mathbf{F}_t = -\gamma \mathbf{v}_{\text{tr}} = -(\gamma v_{\text{tr},1}, \gamma v_{\text{tr},2}, \gamma v_{\text{tr},3}) \quad (4)$$

となり、その大きさは常に $0 \leq \|\mathbf{F}_t\| \leq F_t^{\text{max}}$ を満足する。

球形粒子半径 R_i, R_j の場合のトルクは

$$\boldsymbol{\tau}_i = -R_i \hat{n} \times \mathbf{F}_t, \quad \boldsymbol{\tau}_j = -R_j \hat{n} \times (-\mathbf{F}_t) \quad (5)$$

であり、非球形粒子では接触点 \mathbf{x}_c と重心 $\mathbf{x}_{i,j}$ の差 $\mathbf{r}_{i,j} = \mathbf{x}_c - \mathbf{x}_{i,j}$ を用いて

$$\boldsymbol{\tau}_{i,j} = \mathbf{r}_{i,j} \times (\pm \mathbf{F}_t) \quad (6)$$

を適用する。せん断履歴を持たないため静止摩擦はモデル化されず、粒子は常に速度比例のダッシュポット抵抗 (ただし式 (3) が許す範囲) で減衰される。したがって本モデルは高剪断レートや流動状態の系で数値安定かつ計算量を最小化したい場面に向く。