

EPSD2 転がり抵抗モデルの数式解説 (rolling_model_epsd2.h)

Open DEM Japan

2025年6月29日

接触点を結ぶ単位法線を e_n , 粒子半径を R_i, R_j とする。壁相手では $R_j \rightarrow \infty$ を取る。正規ばね力 F_n とせん断ばね定数 k_t は対応する正・接線モデルがすでに与えるものとする。

■ 有効半径

$$R^* = \begin{cases} \frac{R_i R_j}{R_i + R_j} & \text{粒子対} \\ R_i & \text{粒子-壁} \end{cases}, \quad (\text{壁は粒子 } j \text{ を固定体とみなす}). \quad (1)$$

■ 相対角速度 (壁なら $\omega_j = 0$)

$$\omega_{ij} = \omega_i - \omega_j. \quad (2)$$

■ 転がり変位速度 (ねじり成分を除外: オプション `torsionTorque=false` が既定)

$$\dot{\xi}_r = R^* (\omega_{ij} - (\omega_{ij} \cdot e_n) e_n), \quad \omega_r = \|\dot{\xi}_r\|. \quad (3)$$

`torsionTorque=true` の場合は括弧内の射影を行わず $\dot{\xi}_r = R^* \omega_{ij}$ 。

■ 弾性ばねトルクの更新

$$k_r = k_t R^{*2}, \quad (4)$$

$$M_r^{\text{spring}}(t + \Delta t) = M_r^{\text{spring}}(t) + k_r \dot{\xi}_r \Delta t. \quad (5)$$

履歴 M_r^{spring} はファイル中 `r_torque_old` として保存される。

■ クーロン限界 (塑性クリップ)

$$M_{\max} = \mu_r F_n R^*, \quad \mu_r = \text{coeffRollFrict}_{ij}, \quad (6)$$

$$\|M_r^{\text{spring}}\| > M_{\max} \implies M_r^{\text{spring}} \leftarrow \frac{M_{\max}}{\|M_r^{\text{spring}}\|} M_r^{\text{spring}}.$$

EPSD2 では粘性ダッシュポット項を用いないため,

$$M_r = M_r^{\text{spring}}. \quad (7)$$

■ 運動方程式への反映

$$I_i \dot{\omega}_i = -M_r + (r_{ci} \times F_t), \quad (1)$$

$$I_j \dot{\omega}_j = +M_r - (r_{cj} \times F_t), \quad (8)$$

ここで $r_{ck} = -R_k e_n$ は接触点から粒子 k の重心へのベクトル, F_t は接線力である。壁相手では第 2 式は作用しない。

■ 履歴リセット接触が解消すると M_r^{spring} を 0 として (式 (5) の記憶を) 初期化し, 次回接触の転がりばね変位をゼロスタートとする。

■ まとめ式 (1) – (8) により EPSD2 は

- ばね定数を $k_t R^{*2}$ とする純弾性転がりばね,
- $\mu_r F_n R^*$ によるクーロン塑性クリップ,
- 粘性成分の省略 (EPSD の “D” を除いた簡易版),

を特徴としており, せん断モデルが返す k_t をそのまま転用することで正規モデルに依存しない実装を実現している。