

局所結合接触モデルの数式解説 (compute_pair_gran_local_bond.cpp)

Open DEM Japan

2025年6月30日

離散要素法において粒子間の結合（コヒージョン）を表現する際、接触履歴には結合の有無を示すフラグとともに結合接触位置が保存される。本実装は履歴配列を走査し、結合が**存在する**接触のみを抽出して解析用の局所リストに登録する機構を提供する。以下では、この機能を数式的にまとめる。

まず、総接触数を N_c とし、 k 番目の接触履歴配列を

$$\mathbf{h}^{(k)} = (h_0^{(k)}, h_1^{(k)}, h_2^{(k)}, h_3^{(k)}, \dots)^T \quad (k = 1, \dots, N_c) \quad (1)$$

と定義する。ここで

- $h_0^{(k)} \in [0, 1]$ は結合接触フラグ（1 なら結合あり、0 なら結合なし）、
- $(h_1^{(k)}, h_2^{(k)}, h_3^{(k)})$ は結合接触点座標を表す。

結合接触を判定する指示関数 $\chi^{(k)}$ を

$$\chi^{(k)} = \Theta(h_0^{(k)} - \frac{1}{2}) \quad (2)$$

と定める。ここで $\Theta(x)$ は Heaviside の階段関数であり、

$$\Theta(x) = \begin{cases} 1, & x > 0, \\ 0, & x \leq 0. \end{cases}$$

式 (??) により

$$\chi^{(k)} = \begin{cases} 1, & h_0^{(k)} > \frac{1}{2}, \\ 0, & h_0^{(k)} \leq \frac{1}{2}, \end{cases} \quad (3)$$

となる。すなわち $h_0^{(k)} > 0.5$ が結合の有無判定条件である。

結合が存在する場合 ($\chi^{(k)} = 1$) には当該接触の局所情報

$$\mathcal{S}^{(k)} = (\mathbf{r}^{(k)}, \mathbf{F}_n^{(k)}, \mathbf{F}_t^{(k)}, \boldsymbol{\tau}_n^{(k)}, \boldsymbol{\tau}_t^{(k)}, \dots) \quad (4)$$

を解析用バッファへ格納する。ここで

$$\mathbf{r}^{(k)} = \begin{pmatrix} h_1^{(k)} \\ h_2^{(k)} \\ h_3^{(k)} \end{pmatrix} \quad (5)$$

は結合接触点の空間座標である。ベクトル $\mathbf{F}_n^{(k)}$, $\mathbf{F}_t^{(k)}$ はそれぞれ法線・接線方向の接触力、 $\boldsymbol{\tau}_n^{(k)}$, $\boldsymbol{\tau}_t^{(k)}$ はそのモーメントを示す。

全抽出操作を総括すると、局所リスト \mathcal{L} は

$$\mathcal{L} = \{ \mathcal{S}^{(k)} \mid 1 \leq k \leq N_c, \chi^{(k)} = 1 \}, \quad (6)$$

すなわち式 (??) を満たす接触に対応する状態ベクトルの集合で与えられる。

以上により、本ファイルは接触履歴中の結合フラグを判定基準 ((??)) とし、結合接触位置 (??) を含む状態ベクトル (??) を局所リスト (??) に登録する数式的アルゴリズムを実装していることが確認できる。