

根-土接触計算コードの開発とベンチマーク計算による検証 Implementation and Validation of the Numerical Simulation on the Root-Soil Contact Interface

○友部 遼・藤澤和謙・村上 章

Haruka Tomobe, Kazunori Fujisawa, Akira Murakami

1. 緒言

根-土接触面の摩擦特性を明らかにすることは、倒伏のメカニズムや斜面に対する植生の保護効果を明らかにするために必要である。これまでに、根-土接触面の摩擦特性を計測する試験機が開発され、それを用いて根-土接触面の摩擦特性の計測と計算接触力学に基づく簡易なモデル化が達成された¹⁾。そこで、これまでに得られた根-土接触面の構成方程式を、倒伏や根混じり土のせん断試験といった実問題へ適用する準備として、計算接触力学に基づく接触計算コードを開発した。また、計算コードの検証を行うため、先行研究²⁾に示されるベンチマーク計算である Ironing problem を計算し、先行研究における結果との比較を行った。

2. 根-土接触計算コードの開発

多体の静的接触問題の支配方程式は、物体における力のつり合い式と構成式に加えて、接触面における制約条件式と構成式である。接触面構成式離散化および線形化のため、支配方程式を弱微分することで次式に示す弱形式を得る。

$$\int_{\Omega} \left(\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho b_i \right) \delta v_i d\Omega + \int_{\Gamma} (\sigma_{ij} n_j - t_i) \delta v_i d\Gamma + \int_{\Gamma_c} (p_N \delta u_N + t_{T\alpha} \delta u_{T\alpha}) d\Gamma = 0 \quad (1)$$

ここに、 Ω と Γ はそれぞれ現在配置における部分空間およびその境界、 σ_{ij} 、 x_i はそれぞれコーシー応力テンソルと位置ベクトル、 ρ は密度、 n_i はノイマン境界上の外向き法線ベクトル、 t_i は表面力ベクトルである。また、 δv_i は仮想速度であり、 δu_N および $\delta u_{T\alpha}$ は仮想変位のうちそれぞれ接触面に対して法線方向および接線方向の成分であり、 p_N 、 t_T はそれぞれ接触面における垂直応力とせん断応力である。領域を有限要素、接触面をNTS要素で離散化し、線形化することで図1に示す線形化方程式を得る。なお、接触面の塑性構成式¹⁾²⁾を満たす必要から、接触面のせん断応力更新法として Return-Mapping法を用いた。また、応力および変位の時間積分には前進オイラー法を用い、メッシュの更新は Updated Lagrangian法により行った。また、時間ステップごとに Newton法による反復計算を行った。以上により得た計算アルゴリズムを図1に示す。

```

LOOP over increments : n = 1, 2, ..., end of timesteps
  Add force/displacement increments on  $\Gamma_c$  /  $\Gamma_u$ 
  Generate contact elements on  $\Gamma_c$ 
  Check contact :  $g_N \leq 0$  on  $\Gamma_a$ 
  Calculate  $[K^{stick}(v_{n,0}^{tr})], [K(v_{n,0}^{tr})]$ 
  Solve :
     $v_{n,1}^{tr} = [K(v_{n,0}) + K^{stick}(v_{n,0})]^{-1} f_n$  (Globally updated, but elastic)
    under Dirichlet/Neumann condition on  $\Gamma_c$  /  $\Gamma_u$ 
  LOOP over iterations : j = 1, 2, ..., convergence
    IF j > 1 → Check contact :  $g_N \leq 0$  on  $\Gamma_a$ 
    IF j > 1 → Update frictional force
      with Return-Mapping algorithm
    LOOP over iterations : k = 1, 2, ..., convergence
      Calculate  $[K(v_{n,k})], f_{n,k+1}^{int}, f_{n,k+1}^{contact}$ 
       $r_{n,k+1} = f_n - f_{n,k+1}^{int} - f_{n,k+1}^{contact}$ 
      Check for convergence  $\|r_{n,k+1}\| < TOL \rightarrow EXIT$ 
      Solve :
         $\Delta v_{n,k+1} = [K^{stick/slip}(v_{n,j,k}^{tr}) + K(v_{n,j,k})]^{-1} r_{n,k+1}$ 
        with
           $\Delta v_{n,k+1} = 0$  on  $\Gamma_u$ 
         $v_{n,k+1}^{tr} = v_{n,k}^{tr} + \Delta v_{n,k+1}$ 
      END LOOP
    Check convergence → EXIT
  END LOOP
  Check convergence
  → Update mesh and EXIT
END LOOP

```

図1 計算アルゴリズムの概要
Frictional contact algorithm using the penalty method

3. 計算条件

計算コードの検証を目的に、摩擦のある接触問題のベンチマークである Ironing problem²⁾を計算する。Ironing problemとは、厚板とブロックの接触問題であり、ステップ1とステップ2の2つの過程により構成される。ステップ1においては、図2の左上に存在するブロックを準静的に下降させ、厚板に押し付ける過程である。また、ステップ2は、ステップ1を完了した状態から開始し、ブロック上端を右方向に、厚板右端まで滑らせる準静的過程である。以上の過程を、摩擦あり接触を仮定して計算する。なお、先行研究²⁾においては厚板およびブロックの構成方程式として超弾性構成式を用いているが、ここでは線形垂弾性構成方程式を用いる。なお、用いた材料パラメータは先行研究と同様である。結果の検証のため、変位図、主応力線図および垂直反力の時間変化を出力し、先行研究との比較を行う。変位図および垂直反力の時間変化は先行研究と比較を行い、計算の妥当性を検証する。

4. 結果と考察

計算結果は、変位図、垂直反力の時間変化とともに先行研究²⁾とよく一致したことにより、計算結果の妥当性を確認した。変位図を図3に、垂直反力の時間変化を図4に示す。変位図および垂直反力の時間変化は先行研究とよく一致した。一方で、接触開始位置が先行研究²⁾より遅い点、およびステップ2の開始時点では反力増加が先行研究より緩慢な点が差異として認められた。前者は、本計算アルゴリズムにおいて、各時間ステップで反復計算の初回に接触が判定されなかった要素については反復計算の次回以降でも接触なしであると仮定していたために生じた差異であり、時間ステップ間隔をより細かくすることで解消され则认为した。また、後者に関しては、構成方程式の差異に起因するものであると考えた。以上により、新たに接触計算コードを開発し、ベンチマーク計算に適用することで従来の接触計算コードと同様の結果およびロバスト性を得た。特に、従来NTS要素による離散化では計算が不可能だった領域でも安定した計算を行った。

参考文献

- 1) 友部ら：抜根試験機による根-土接触面のせん断試験およびモデル化，農業農村工学会論文集，Vol. 84(3)，pp.223-232，2016.
- 2) Wriggers P.: *Computational contact mechanics*, Springer, pp.69-93, 2002.

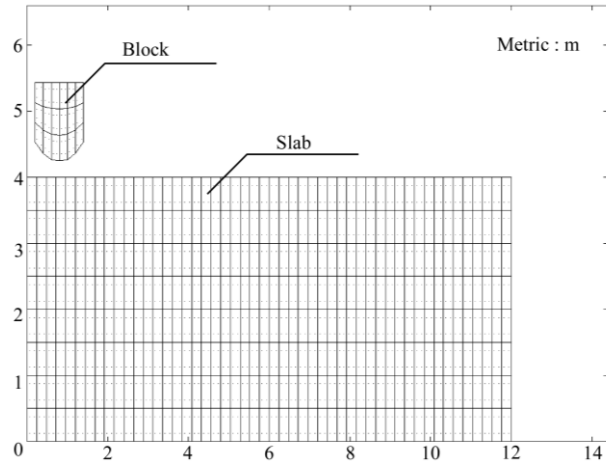


図2 Ironing problem の初期メッシュ
Initial mesh of the ironing problem

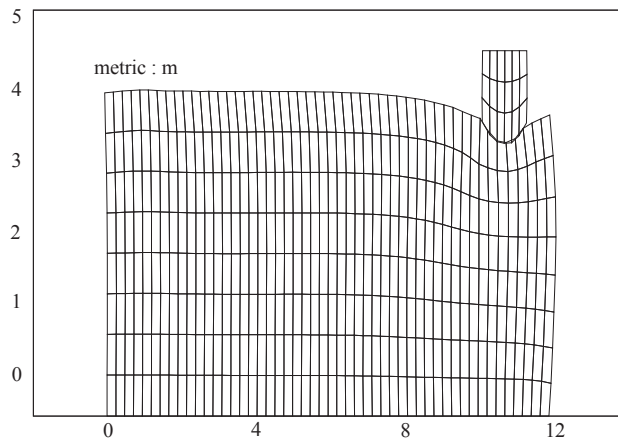


図3 最終時間ステップの変形図
Deformed mesh at the end of time steps

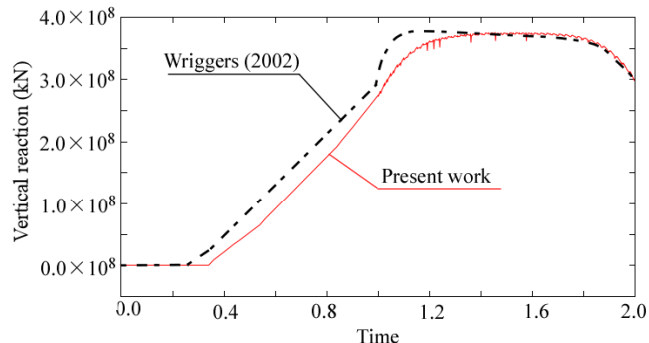


図4 鉛直反力の時間変化
The relationship between time and vertical reaction