

# 安定化 NTS 法による抜根試験の再現シミュレーション A Numerical Simulation of the Pull-out Tests Based on A Modified Node-To-Segment Method

○友部 遼・藤澤和謙・村上 章

Haruka Tomobe, Kazunori Fujisawa, Akira Murakami

## 1. 緒言

根混じり土は、植物根と土からなる材料であり、自然斜面や人工斜面上に広く分布する。根混じり土は、山林や農地、農業水利施設の減災に貢献しているため、そのメカニズムを理解することは、根による補強効果を最大限に活用した、より効率的な管理手法を模索できる可能性がある。加えて、根混じり土の農地における力学特性を理解することは、倒伏の予測や防止に不可欠であることから、農業生産性の向上に寄与する。根混じり土の力学特性を予測するため、根—土接触面の摩擦接触特性を予測するシミュレータを開発した。この際、接触面は、一般的な方法である NTS 法 (Wriggers, 2006) に概ね基づき離散化を行ったが、NTS 法に特有な不安定性を軽減するために改良を行った。以下に、解析コードの実装および根—土接触面の材料試験である抜根試験 (友部ら, 2016) の再現シミュレーション結果を示す。

## 2. 解析コードの開発

根混じり土の変形問題は根と土の摩擦接触問題とみなせる。摩擦接触現象を一貫して記述するために、仮想仕事式を拡張した支配方程式が用いられてきた。

$$\sum_{\alpha=1}^{nd} \left( \int_{\bar{\Omega}_{\alpha}} \boldsymbol{\tau} \cdot \nabla \delta \mathbf{u} d\bar{\Omega} + \int_{\bar{\Omega}_{\alpha}} \mathbf{f} \cdot \delta \mathbf{u} d\bar{\Omega} + \int_{\bar{\Gamma}_{\alpha}} \mathbf{t} \cdot \delta \mathbf{u} d\bar{\Gamma} \right) + \int_{\Gamma_c} \mathbf{t}_N \cdot \delta \mathbf{g}_N d\Gamma + \int_{\Gamma_c} \mathbf{t}_T \cdot \delta \mathbf{g}_T d\Gamma = 0$$

ここに、 $nd$  は連続体の数、 $\boldsymbol{\tau}$  はキルヒホッフ応力テンソル、 $\mathbf{u}$  は変位ベクトル、 $\delta$  は変分作用素を示す。また、 $\mathbf{f}$  は物体力、 $\mathbf{t}$  は表面力、 $\bar{\Omega}$  は基準配置における領域、 $\bar{\Gamma}$  はその境界面、 $\mathbf{t}_N$  と  $\mathbf{t}_T$  は垂直および摩擦応力  $\mathbf{g}_N$  は境界面間の距離、 $\mathbf{g}_T$  は接触面の接線方向に対する移動距離である。

解析コードを実装するため一般的な方法である NTS 法を用いた。この NTS 法は最もシンプルな方法である一方で、節点において微分不可能であることに起因する不安定性を引き起こすことがある。この不安定性の原因の一つは、図 1 に示すように、特殊な場合において NTS 要素が唯一に決まらないことに起因する。そこで、周辺接点を用いて境界線を設け、その左右のどちらに Slave 節点が存在するかを判定することで、NTS 要素を唯一に決定するアルゴリズムを導入した。

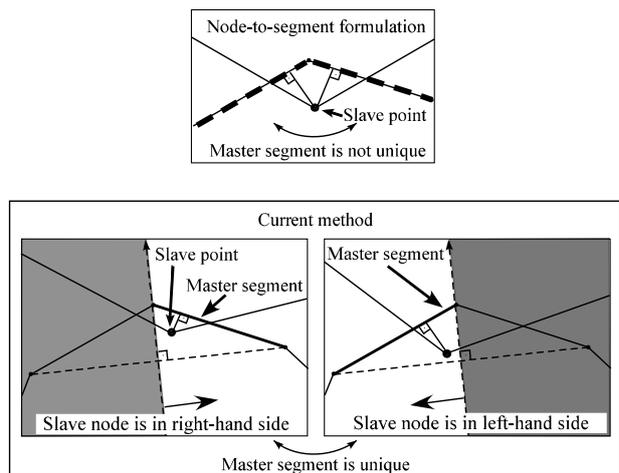


図 1 導入した安定化 NTS 法の概要  
Fig.1 Description of a stabilized NTS element

### 3. 抜根試験の再現シミュレーション

局所スケールにおける根—土接触面の材料特性を再現するため、抜根試験のシミュレーションを行った。抜根試験は、友部ら(2016)によって提案された根—土接触面の摩擦試験である(図2)。シミュレーションにおいては、土上面と根左端の反力を、それぞれの面積で除すことで、根—土接触面における平均的な垂直応力および摩擦応力を求めた。なお、根および土は簡単のためともに Neo-Hookean 型の超弾性構成則に従うものとした。根—土接触面の材料パラメータは友部ら(2016)と同様とし、土の材料構成則は抜根試験を通じて計測し、根の材料定数は簡単な曲げ試験により取得した。

変位と摩擦応力との関係を図3に示す。各々の応力条件の下で、シミュレーション結果は実験結果とよく一致した。しかしながら、シミュレーションと実験の間には2点の小さな差異を認めた。まず、初期の傾きに関して、予測値は実験値よりも大きな値となった。これは、根または土の弾性係数の精度が十分でなかったことに起因すると考えた。次に、実験で観察された摩擦応力の緩和がシミュレーションにおいては観察されなかった。これは、すべり基準が緩和を表現しないことに起因する。この基準は、緩和を表現するように更新することが可能である。加えて、図4に示されるようにすべり基準が正確に満たされた。また、最大摩擦応力は実験値とよく一致した。これは、摩擦構成式が正確に実装されたことを意味する。

これらの結果から、この解析コードが根—土接触面の摩擦特性を正確に予測できることが示された。著者らの知る限り、ここで提案された根—土接触面における摩擦特性の計画な予測は、初めてのものである。今後は、より精度の高い結果を得るために、より先進的な材料構成則を導入する予定で会ある。謝辞 本研究は日本学術振興会特別研究員研究奨励費(課題番号:17J02383)の助成を受けた。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, 2006.

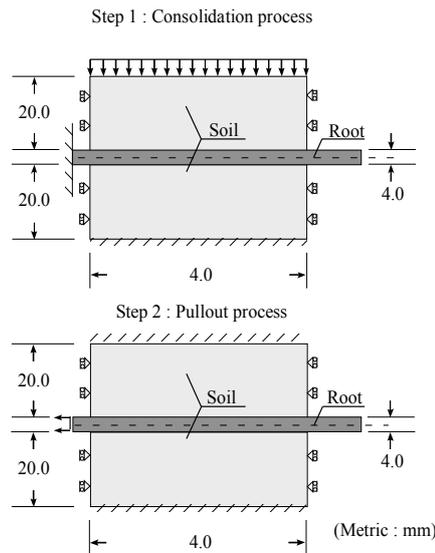


図2 抜根試験の概要  
Fig. 2 Outline of the pull-out test

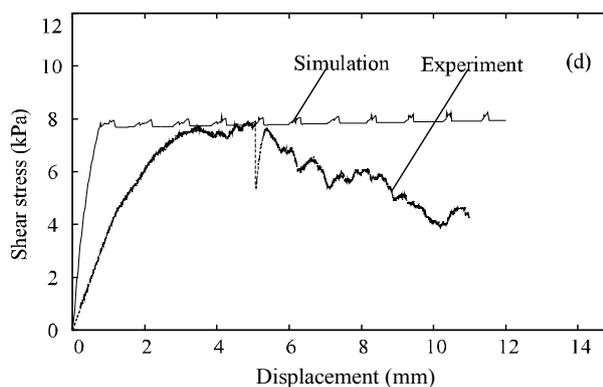


図3 変位—摩擦応力関係  
Fig. 3 Relationship between displacement and frictional stress

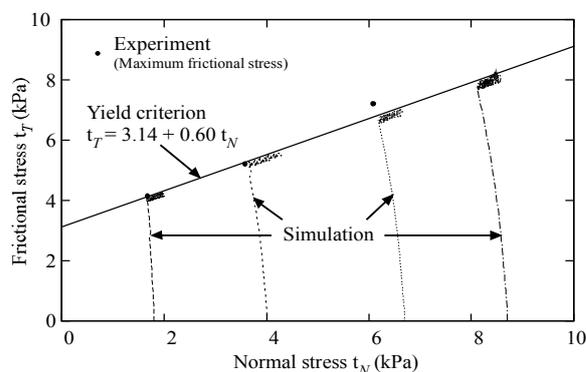


図4 垂直応力—摩擦応力関係  
Fig. 4 Relationship between normal and frictional stress