

Mohr-Coulomb-Vilar モデルによる不飽和抜根試験の二次元再現計算 2-D Numerical Simulation of Unsaturated Pull-out Tests Based on Mohr-Coulomb-Vilar Model

○友部 遼・藤澤和謙・村上 章

Haruka Tomobe, Kazunori Fujisawa, Akira Murakami

1. 緒言

植物根と土の混合物（根混じり土）は自然斜面や人工斜面を浸食から保護することで国土保全や地下水涵養に重要な役割を果たし、また植物体を支持するため倒伏や倒木を防ぐことで農林業の生産性の維持に貢献する。一方で、根混じり土は土壌水分の増加に伴ってしばしば脆弱化することで、国土保全や農林業に打撃を与えるため、その力学特性を理解し予測することが重要である。本研究では、不飽和条件下における根一土接触面のせん断強度特性に着目し、不飽和土の力学特性をモデル化の際に用いられてきた Mohr-Coulomb-Vilar モデルによる数理モデル化を行い、Node-To-Segment(NTS)法と FEM に基づき再現計算を行った。

2. 不飽和抜根試験結果の Mohr-Coulomb-Vilar モデルによる数理モデル化

不飽和条件下で抜根試験を行うことで得られたサクションーせん断強度関係と、Vilar モデルによるフィッティング結果を図 1 に示す。試験は水田圃場土とオオムギ根を用いて 6 回行われ、それぞれ 0.5, 4.4, 5.8, 8.8, 22.0, 28.0 kPa のマトリックサクションを載荷した。結果として、マトリックサクションの増加に伴ってせん断強度が増加し、またその増加率はサクションが 10 kPa を上回ると鈍化した。本結果は、これまで不飽和土において確認されてきたサクションによるせん断強度の上昇と類似することから、不飽和土において用いられる代表的なモデルの一つである Vilar モデルを適用した。フィッティング結果は図 1 の実線に示され、実験結果によく適合した。

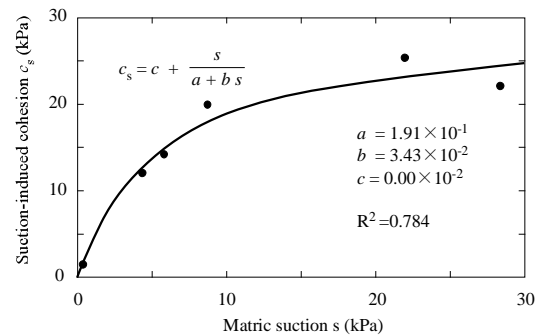


図 1 Vilar モデルによるフィッティング結果

また、同じ材料を用いた根一土接触面の摩擦試験結果（友部ら，2016）より、この材料の摩擦係数は 0.60 であることから、Mohr-Coulomb モデルと Vilar モデルを組み合わせた Mohr-Coulomb-Vilar(MCV)モデル（Vilar, 2006）によって、不飽和条件下における根一土接触面のせん断強度を図 2 のようにモデル化した。なお、不飽和抜根試験結果より、サクションが 0 kPa の際の見かけの粘着力は十分に小さいと考えられたため、0 kPa としてモデル化を行った。結果として、土壌水分条件の変化に応じて根一土接触面のせん断強度特性が変化する様子がモデル化された。

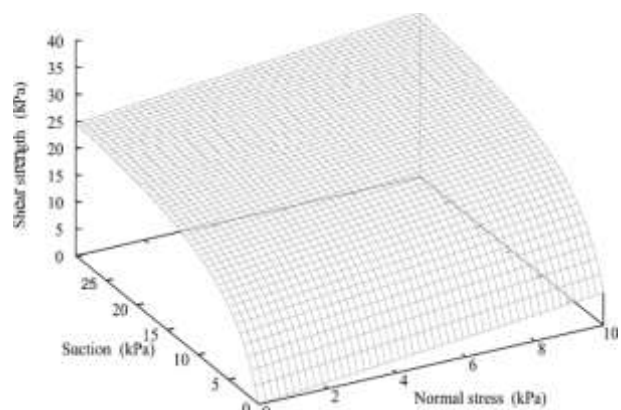


図 2 Mohr-Coulomb-Vilar モデルによる根一土接触面のせん断強度のモデル化

3. NTS法とFEMによる有限要素定式化と解析コードの実装

有限要素法において摩擦接触問題を解くための代表的な離散化手法である NTS 法を用いて、接触面のせん断強度を定式化した。まず、接触面におけるせん断変位は、弾性成分と塑性成分に可算分解され、接触面のせん断応力 t_T は、Penalty 法を用いて定式化される。塑性成分の時間発展 g_T^{slip} は塑性流れ則に類似した塑性すべり則により次式となる。

$$t_T = g_T^{stick} = \varepsilon(g_T - g_T^{slip}), \quad \dot{g}_T^{slip} = \dot{\lambda} \frac{\partial f}{\partial t_T} \quad (1)$$

ここで、 g_T は接触面における全体せん断変位、 g_T^{stick} は弾性成分、 g_T^{slip} は塑性成分（すべり）である。ここに、 $\dot{\lambda}$ は塑性乗数である。また、 f は降伏関数であり、MCV モデルにおいては次式を用いる。

$$f = \|t_T\| - \left(\mu \cdot \varepsilon \|g_N\| + \frac{s}{a \cdot s + b} \right) + c \quad (2)$$

ここに、 s はマトリックスサクション、 g_N は垂直応力、 c はマトリックスサクションに起因しない粘着力、 a と b はモデルパラメータである。

4. 不飽和抜根試験の再現計算結果と考察

図3に、計算条件を示す。上部に位置する土領域と下部に位置する根領域が接触した状態で解析を行い、鉛直方向は変位を固定することで試験を再現した。

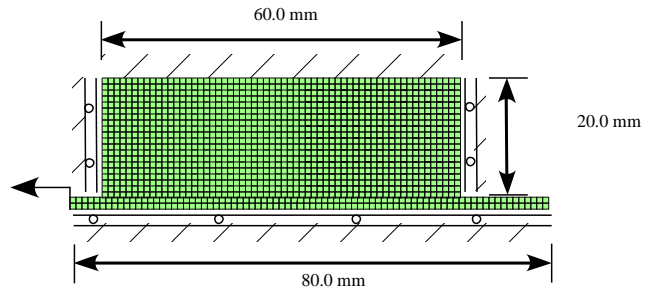


図3 再現計算の解析メッシュと境界条件

図4に、不飽和抜根試験により得られた変位—せん断応力関係と再現計算結果を示す。すべてのケースにおいて、シミュレーション結果は実験結果をよく再現し、特にせん断応力が一定となるすべり状態において高精度にその挙動を再現するに至った。より詳細には、変位が小さい領域においては、ペナルティパラメータの特性に起因して、やや過大なせん断応力を与える傾向があるものの、すべりが生じるとほぼ一定のせん断応力のまま変位が増大することで、不飽和条件下における根—土接触面のすべりを精度よく再現した。

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) Vilar O.M.: A simplified procedure to estimate the shear strength envelope of unsaturated soils, Can. Geotech. J., 43:1088-1095, 2006

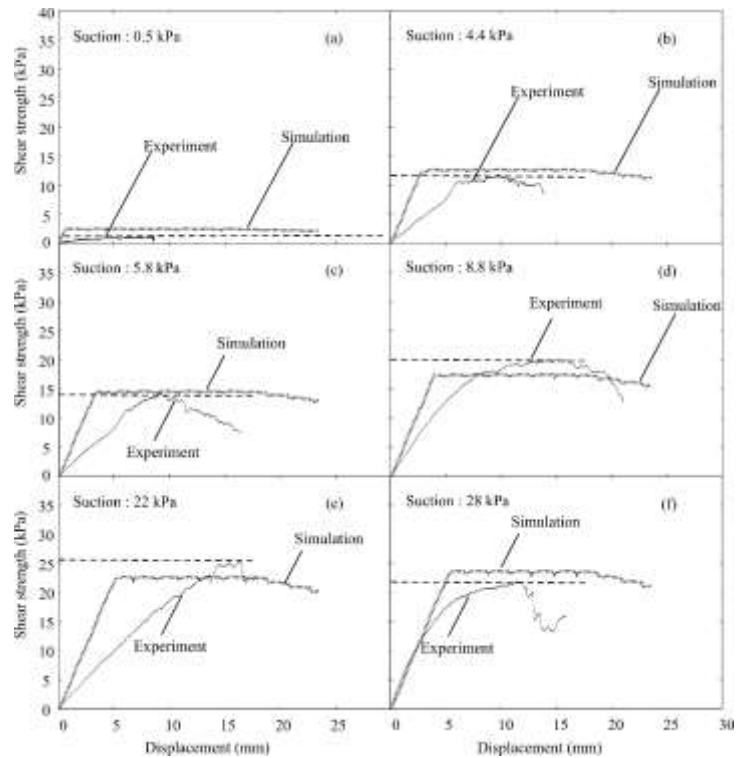


図4 不飽和抜根試験およびその再現計算により得られた変位—せん断応力関係