

(続紙 1)

京都大学	博士 (農 学)	氏名	友部 遼
論文題目	Constitutive Models for Root-Soil Contact Interface Considering Hydro-Mechanical Effects (水理学的-力学的効果を考慮した根-土接触面の構成モデル)		
(論文内容の要旨)			
<p>根-土接触面の接触，剥離，摩擦を高精度にモデル化することは，植生による斜面の補強効果を予測可能なものとし，農業基盤を支える土構造物の減災に貢献する．また，根-土混合物の力学挙動の高精度予測は，当該分野のみならず，作物学分野，土壌物理学分野などの関連分野において求められる技術である．</p> <p>本論文では，根-土接触面の構成モデルを提案するとともに，通常は人工材料や金属の接触問題に用いられるNode-To-Segment法（NTS法）を植物根と土の接触問題に適用することで，根-土接触問題を高精度に解くことのできる数値計算法を提案する．根-土接触問題に NTS法を適用する際の主な問題は，根の形状非線形性と，根-土接触面のせん断挙動特性の把握の困難さにある．人工材料や金属の接触問題と比較して，植物根と土の接触問題は形状非線形性が著しいことで，解の安定性が低下する．また，根-土接触面において特異的な，根-土間の粘着力とその土壌水分による変化を計測することは困難である．このためNTS法と併用可能で，水理学的-力学的効果を考慮した接触面の構成モデルは提案されていない．以上の点が障壁となり，高精度な手法にもかかわらず，根-土接触解析においてNTS法や他の計算接触力学的手法は普及していなかった．</p> <p>本論文は，サクシオンと土圧の影響を考慮した根-土接触面の構成モデルとしてMohr-Coulomb-Vilarモデル（以下，MCVモデル）を提案する．併せて，従来のNTS法と比較して非線形形状に対する安定性を向上させた接触解析手法（論文中では，Mohr-Coulomb-Vilar NTS法と定義し，MCV-NTS法と呼ぶ）を提案する．</p> <p>本論文は全7章で構成され，MCV-NTS法の手法自体の特徴とその応用性が調べられる．第1章では，研究背景と目的とともに，既往研究についてのレビューを記述する．第2章では，本論文が根-土接触面の構成モデルとして新規に提案するMCVモデルと，その実装手法であるMCV-NTS法の詳細を示す．第3，5章では，根-土接触面のせん断強度を計測するための新たな試験法を提案し，第4，6章にて基本的な数値計算例を通じて，同手法がもたらす計算結果の特徴を整理する．具体的には，要素試験である抜根問題と植物個体スケールの根-土接触問題である倒伏問題を解析する．第7章では，研究全体の結論と展望を述べる．本論文に記される研究結果を要約すると，以下のようである．</p> <p>■ 提案手法の特徴（第2，3，5章）</p> <ol style="list-style-type: none">1. MCVモデルは，根-土接触面のせん断強度に対する土圧とサクシオンの効果を高精度に表現できる．2. MCV-NTS法は，提案した安定化法と組み合わせることで，複雑な界面形状が現れる根-土接触面において，従来のNTS法と比較して高い安定性を有する．3. MCV-NTS法の材料パラメータは，提案した抜根試験により計測可能である．			

以上のように本論文で提案したMCV-NTS法は、幅広い土圧とサクシジョンのもとで根-土接触問題に適用可能な高精度かつ安定な手法である。同手法の欠点は、根-土接触面のサクシジョンを根および土のサクシジョンの平均などにより与える必要がある点にある。

■ 提案手法の応用性（第4，6章）

1. 実際問題への適用性を調べるため、抜根試験の再現計算と試験結果とを比較した（第4章）。この問題は、サクシジョン一定条件を仮定した摩擦接触問題であり、土圧の増減に伴う根-土接触面の摩擦の増減を高精度に表現可能であることが示された。
2. 抜根試験の再現計算に加えて、根系への水平載荷問題である倒伏問題の再現計算と試験結果とを比較した（第4章）。この問題は、植物個体スケールを対象としており、根-土接触面には極めて複雑な形状が現れるが、解析結果は安定しており、また載荷点の変位-荷重関係は実験結果と極めてよく一致した。
3. 根-土接触面の摩擦構成則にサクシジョンによる効果が組み込まれたMCV-NTS法によりサクシジョン制御抜根試験とdry-to-wet条件下抜根問題の解析を行った（第6章）。この解析の特徴は、上述の二つの応用例とは異なり、根-土接触面のサクシジョンが動的に変化する点にある。具体的には、初期において乾燥状態で根の引き抜きを開始し、すべりが生じた後に、サクシジョンを低下させ湿潤状態に移行することで根-土接触面のサクシジョンに起因する粘着力が失われている過程を安定的に予測するに至った。

以上のように、本論文では根-土接触問題を解くために新たな接触面構成モデルであるMCVモデルと、その実装手法であるMCV-NTS法を提案し、手法自体の特徴を精査するとともに、その応用性を抜根試験の再現計算と倒伏試験の再現計算を通じて実証した。提案法は、根-土接触面に現れる形状非線形性によく対応して安定性を維持することに成功し、また、根-土接触面の構成モデルとして提案されたMCVモデルとも理論的に一貫性を有する。また、提案法は新たに開発した抜根試験を用いることで、幅広い土圧とサクシジョンに対して適用できるため、今後、さらに幅広い根-土接触問題に適用されるものと期待される。

一例として、農業水利施設にみられる人工斜面や、農村の自然斜面を対象として、植生による斜面補強効果を高精度予測することで、植生を利活用した斜面減災手法の提案に活用できると期待される。植生を利活用する斜面防災は、雨滴侵食を軽減する観点から既に実用されているが、植物根による補強効果を評価できる手法は未だ実現されていない。植物根と土の混合物の力学挙動特性を予測することが困難であったことがその原因であるが、MCV-NTS法により根-土混合物の挙動が予測可能となれば、植生の斜面補強効果などを正確に評価できることから、植生の高度利用に繋がると期待される。

注) 論文内容の要旨と論文審査の結果の要旨は1頁を38字×36行で作成し、合わせて、3,000字を標準とすること。

論文内容の要旨を英語で記入する場合は、400～1,100 wordsで作成し
審査結果の要旨は日本語500～2,000字程度で作成すること。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、根-土混合物の力学的挙動を精度よく予測することを目的として、根-土接触面の構成モデルとなるMohr-Coulomb-Vilarモデル(MCVモデル)、接触解析法の一つであるNode-To-Segment法(NTS法)に改良を加えた計算手法を提案した。これにより、上記の構成モデルと計算手法を組み合わせたMCV-NTS法による有限要素解析を実践し、抜根問題及び倒伏問題への適用性を実証した。農業農村における減災に対する関心が高まる中、植生のある斜面のような、根が混在する土質材料の安定性を精度良く評価できる手法を提案しており、提案法は穀実作物の倒伏を高精度に予測する手法としても有用と言える。本論文において評価できる研究成果は以下のようである。

1. 根-土接触面にNTS法を適用するとともに、NTS法と理論的に一貫性のある根-土接触面の構成モデルを併せて提案した。同手法は根-土接触面の接触、剥離およびせん断を安定的に解析可能であることを示した。
2. 新規に根-土接触面の構成モデルとして提案されたMCVモデルは、幅広い土壌水分と土圧のもとで、根-土接触面のせん断強度を高い精度で予測できることを、一連の室内試験を通じて実証した。
3. 抜根問題と倒伏問題について、室内実験と再現解析を行い、MCV-NTS法の高い計算精度と実際現象への適用可能性を実証した。

以上のように、本論文では根-土接触問題に有利であるMCVモデルと、それを組み込んだ接触計算方法としてMCV-NTS法を提案し、手法の特徴を精査した上で、抜根問題と倒伏問題を通じて実問題への適用性を実証した。MCV-NTS法を搭載した有限要素解析は、根-土接触問題に対する有用性を示し、数値的に安定した高精度な根-土接触解析を実現することから、施設機能工学並びに水利施設の設計、管理・保全の発展に寄与するところが大きい。

よって、本論文は博士(農学)の学位論文として価値あるものと認める。

なお、令和2年2月13日、論文並びにそれに関連した分野にわたり試問した結果、博士(農学)の学位を授与される学力が十分あるものと認めた。

また、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

注) 論文内容の要旨、審査の結果の要旨及び学位論文は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。

ただし、特許申請、雑誌掲載等の関係により、要旨を学位授与後即日公表することに支障がある場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日： 年 月 日以降 (学位授与日から3ヶ月以内)