

令和元年6月21日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K07970

研究課題名(和文) Bekker法の土壌力学パラメータによる3次元離散要素モデルパラメータ決定法

研究課題名(英文) Determination of model parameters for 3D DEM using soil values of Bekker's method

研究代表者

中嶋 洋(Nakashima, Hiroshi)

京都大学・農学研究科・准教授

研究者番号：80172302

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：土と機械の接触問題の解法である離散要素法(DEM)の計算モデルに用いられる接触モデルのパラメータを、圧力沈下ならびにせん断応力せん断変位試験から得られるBekkerパラメータを援用する校正法について検討した。乾燥砂条件では、球要素を3個組み合わせさせたMSM-L3モデルを作製し、実験的に求めたBekkerパラメータとYADEを用いた3次元DEM解析により求めたBekkerパラメータを比較した。粒子間摩擦係数に着目した校正を行い、概ね同様なBekkerパラメータが得られることを確認した。含水粘性土については、せん断試験結果に不合理な結果が得られたため、粘性力モデルの確認や校正が不可能であった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

農用タイヤや履帯と土との接触問題は、土の持つ粒としての性質を考慮した離散要素法が近年よく用いられる。この手法では、土のモデルとしては土粒子自体の大きさよりも大きい仮想粒子をモデルとして解析する。この際に、土粒子モデルの接触力を精度よく表現するため、モデルパラメータを何らかの手法で求める必要がある。本研究では、Bekker法で知られている半経験的手法で採用されているBekkerパラメータに着目し、実験と数値解析で同じ粒子モデルを用いてパラメータを決定する方法を試みた。乾燥砂については概ね妥当な結果が得られたことから、今後の接触問題の数値解析の高精度化に役立つ可能性が高い。

研究成果の概要(英文)：The discrete element method (DEM) is widely used in soil-machine contact problems. In this study, the parameter of contact model in DEM was calibrated by applying the soil values obtained from pressure-sinkage and shear stress-shear displacement relationships in Bekker's approach. For dry sand condition, particle model consisting of three spheres in series (MSM-L3 model) were manufactured and used in experiments. It could be confirmed that 3D DEM analysis by YADE using MSM-L3 model showed similar values of Bekker's parameters obtained from the experiments. In case of we cohesive soil, since the measurement of shear stress using annulus ring shear ring resulted in such irrational behavior of cohesion and internal friction angle against moisture content of soil which was, the detailed investigation such as construction of precise cohesive force model for DEM and parametric analysis of Bekker's parameters against moisture content could not be realized.

研究分野：農業機械学

キーワード：テラメカニクス 離散要素法 要素形状 圧力沈下関係 せん断応力せん断変位関係

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

水田ほ場土のような変形性の軟弱路面をトラクタやコンバインなどの農用車両が走行するとき、タイヤや履帯の接触部では、局所的に土の圧縮変形やせん断破壊が発生する。エネルギー消費の観点からは、滑りが少ない無駄のない作業走行を実現する走行装置の利用が望ましい。様々な設計要因の妥協的な最適組み合わせの中から走行装置の最大性能を引き出すには、対象ほ場の路面条件に対する車両の走行性能の予測が重要である。

車輪や履帯の走行性能予測は、M.G. Bekker の始めた Bekker 法が今日でも主流かつ多用されている。そこでは、圧力-沈下式(以下 PZ 式)ならびにせん断応力-せん断変位式(以下 SS 式)に用いられる土壌力学パラメータ(k_c , k_ϕ , n , c , ϕ , K)を実測し、得られた関係式をもとにタイヤや履帯のけん引力や走行抵抗が求められる。近年では月惑星ローバの車輪性能の予測などへも適用例が多く報告されているが、Bekker 法では走行性能の定性的予測に留まっているのが現状である。

一方、離散要素法(DEM)は、オフロード走行装置直下の土の圧縮、せん断亀裂、分離などの土の粒状体的な挙動を直接解析できる計算手法であり、対象とする土粒子と同じオーダの解析は不可能ではあるが、土と機械の接触問題を比較的高精度に近似解析する数値解析手法として、近年国内外で適用事例が報告されてきている。

研究代表者のグループにおいても、これまで DEM により車輪と路面の相互作用や工具による土中のせん断帯生成などの局所不連続現象を含む解析を行ってきた。最近では、2次元 DEM による月面小型探査車両の剛性車輪の走行性能における重力の影響の解明、また解析手法の高速化を目標として、剛性車輪の解析時間の短縮を試みた2次元並列 DEM 解析を行なった。履帯についても、モデル土とモデル履板グロースを用いた2次元室内実験と2次元 DEM 解析結果より、平均推進力は概ね一致すること、あるグロース条件では若干定量的に異なる結果も得ている。

DEM 解析においては、土要素として円モデル(2次元)あるいは球モデル(3次元)を適用すると、要素回転が過大に発生するため、実際の土の挙動を解析しえないことが知られている。一方、乾燥砂を対象とした3次元 DEM 切削解析において、転がり抵抗モーメント効果を要素形状により表現する複合球要素モデルに着目し、3次元土粒子モデル、中でも同じ半径を持つ球を3個、半径分を重ねて直線状につないだ L3 モデル(以下 MSM-L3 モデルと称する)が最適であることを確認した。これらのことから、DEM における接触モデルパラメータの意味や合理的決定方法について検討する必要性を痛感してきた。

対象とする土の挙動の違いは、DEM では主として土の接触モデルで用いられる DEM パラメータにより表現するため、このパラメータを正確に校正する必要がある。現状では、2次元では2軸圧縮試験、3次元では3軸圧縮試験を解析して、得られた DEM 解析結果と土を用いた試験結果と比較する方法がよく用いられる。しかしながら、これらの圧縮試験のように容器内に離散要素を配置し載荷境界辺を移動させることで得られる解析による校正は、いわば閉鎖容器内での土の過拘束条件下での準静的挙動を調べることであり、土と機械の接触時のように時々刻々と変化する接触領域ならびに接触部周辺の自由境界面を有するような低拘束条件下での土の動的な挙動とは異なる可能性が高く、DEM パラメータの校正方法としての有効性には疑問がある。

DEM 解析に用いる土粒子モデルと同じ形状の人工土粒子モデルを実験に用いることで、数値解析と実験解析における Bekker パラメータの相関を明らかにし、実際の土を用いた場合の Bekker パラメータとの関連性より、数値解析に用いられる土粒子モデルの接触パラメータ決定法に関する検討を行う。

2. 研究の目的

本研究では、新たな DEM パラメータ校正法として、Bekker 法における土壌力学パラメータに着目し、実際の走行装置の力学挙動を高精度に表現しうる DEM のモデルパラメータ決定法を試みる。すなわち、要素形状として MSM-L3 モデルを用いた土壌力学パラメータ測定実験を行なうとともに、実験と同じ条件で DEM 解析して得られた土壌力学パラメータと DEM 解析結果の比較により、DEM の接触モデルパラメータ校正の精度を詳細に検討する。

また、実際の土を用いて土壌力学パラメータを測定するとともに、MSM-L3 モデルによる3次元 DEM 解析を行ない、3次元 DEM による結果と実際の土の実験結果の比較から Bekker パラメータの観点から DEM における接触モデルパラメータの関連性を検討する。

3. 研究の方法

(1) 実験に用いる人工土粒子モデル(MSM-L3 モデル)を製作する。材料は、製作の簡易化のためポリプロピレン(PP)である。製作した MSM-L3 型土モデルならびに実際の乾燥豊浦砂を用いて、2種類の平板を用いた平板貫入実験を行い実験結果より PZ 式を求める。次に MSM-L3 モデルを対象として平板貫入実験の3次元 DEM 解析を実施した。この DEM 解析にはオープンソースソフトである YADE(Yet Another Dynamic Engine)を用いる。解析結果より、DEM パラメータと土壌力学パラメータの関係性を明らかにし、PZ 式における DEM パラメータ決定についての考察を行なう。

(2) MSM-L3 モデルと豊浦砂を対象に、YADE を用いて SS 式における土壌力学パラメータを解析する3次元 DEM 解析プログラムの開発を行う。また、外径 100 mm、内径 60 mm、せん断グロース高さ 10 mm の SR-2 型円環リングを用いたせん断実験を MSM-L3 モデルを対象に実施し、得られた実験結果より SS 式を表す土壌力学パラメータを求め、3次元 DEM 解析で得られた土

壤力学パラメータとの関係を比較検討する。また、DEM における接触モデルパラメータが土壌力学パラメータへ与える影響を確認する。

(3) ほ場土を想定して、粘性土を対象に SR-2 型円環リングを用いたせん断実験を行い、SS 式を求めるとともに土壌力学パラメータを求める。粘性土は、藤森粘土、殖土 A、殖土 B の三種類を供試した。土の含水比は、最大で各供試土の液性限界までとした。含水比を変化させた際に測定された土壌力学パラメータについて、粘性力を取り入れた L3 モデルによる YADE による DEM 結果と比較する。最後に、実際の土を対象とした際の DEM の接触モデルパラメータの再設定あるいは修正方法を検討する。



図 1 MSM-L3 モデルによる実験

4. 研究成果

(1) 図 1 のような MSM-L3 モデルを用いた平板貫入実験の結果、 k_c , k_ϕ , n はそれぞれ 4.22, 195.0, 0.943, 間隙率は 0.32 であった。YADE による予備解析において、PP 材料間の摩擦係数をいくつか設定して Bekker パラメータを求めたところ、実測値より若干異なる結果が得られた。これより、摩擦係数値は 0.76 の場合が実験結果に最も近くなった。このとき、DEM 解析より得られた k_c , k_ϕ , n はそれぞれ -0.933, 192.0, 0.863 であった。また、初期充填間隙率は 0.32 であった。したがって、MSM-L3 モデルにおいて適切な DEM パラメータを用いることで、YADE による 3 次元 DEM 解析の結果 PZ 関係が高精度に解析可能なことが確認できた。

次に、乾燥豊浦砂を用いて充填間隙率を変化させた実験より PZ 式を求め、間隙率の違いによる Bekker パラメータの変化を調べた。同様に PP 材料密度ならびに豊浦砂の土粒子密度を用いた MSM-L3 モデルの YADE による DEM 解析より Bekker パラメータの関係を求めた。その結果、図 2 のように豊浦砂の Bekker パラメータの変化の挙動と MSM-L3 モデルの変化の挙動は明らかに異なることが判明した。なお、図中の L3,PP と L3,Sand は MSM-L3 モデルにおいて、それぞれ粒子密度を PP の値、砂粒子の値とした結果である。また、DEM 解析における MSM-L3 土粒子モデルでは、実際の土粒子の間隙率を表現できないことも確認された。豊浦砂の間隙率と Bekker パラメータについては、間隙率が小さくなると k_ϕ が増加することが図 2 から明らかである。一方で、過去の数値解析例では、MSM-L3 モデルを用いた 3 次元 DEM 解析が砂の挙動をよく再現し、DEM による土の切削反力は実験値とほぼ一致したとの報告もある。DEM においては、土粒子よりも大きな MSM-L3 モデルのような土要素が用いられる。過去の解析例では実験結果と遜色のない結果が得られるが、Bekker パラメータにおいては図 2 のような相違が発生することは、MSM-L3 モデルの場合の間隙率の計算方法も含めて再度検討する必要がある。

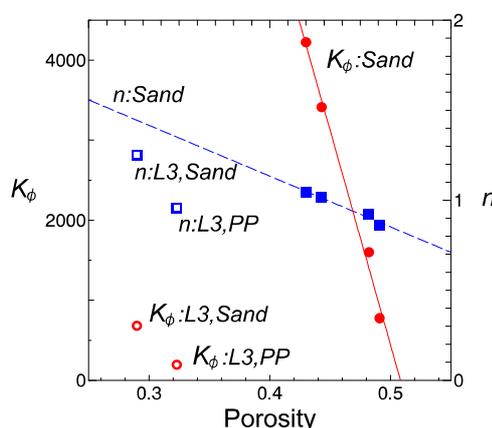


図 2 間隙率と Bekker パラメータ

(2) 乾燥豊浦砂ならびに MSM-L3 モデルを用いた SS 式を求める円環リングせん断実験を行うとともに、YADE による円環リングせん断の DEM 解析を実施した(図 3)。実験結果より、初期充填調製なしの場合、豊浦砂では c , ϕ , K はそれぞれ 0.084 kPa, 32.6 deg, 14.3 mm, また MSM-L3 モデルでは同様に 1.41 kPa, 35.3 deg, 15.5 mm とほぼ同等の Bekker パラメータを有することが分かった。また、豊浦砂と MSM-L3 モデルの充填間隙率の違いは c , ϕ にはほとんど影響しないことも確認できた。なお、MSM-L3 モデルを用いたせん断実験では、円環リングが砂の場合よりも沈下しやすいことが判明した。

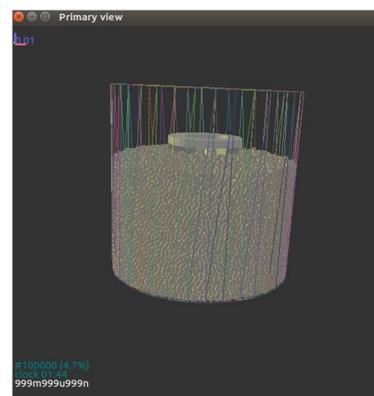


図 3 YADE による MSM-L3 モデルのリングせん断解析

YADE による MSM-L3 モデルで要素密度を変化させた数値解析では、PP 密度の場合 c , ϕ , K はそれぞれ 0.512 kPa, 28.5 deg, 6.22 mm, また砂粒子密度に設定した場合 0.958 kPa, 30.7 deg, 3.96 mm であった。このように、PP 材料密度を土粒子密度に変更することで、MSM-L3 モデルは豊浦砂の K 以外の Bekker パラメータを良好に再現可能なことが確認できた。なお、YADE による土粒子密度時の解析結果は内部摩擦角 ϕ の結果に若干のばらつきが見られたことから、今後解析結果の増加によりさらに正確な値を求める必要がある。

参考までに、Wong(2008)によれば、乾燥砂の Bekker パラメータ k_c , k_ϕ , n , c , ϕ はそれぞれ 0.99, 1528.43, 1.1, 1.04, 28 である。乾燥豊浦砂の結果と比較すると k_ϕ は異なるものの他の数値はよく似た値となっている。YADE に用いた DEM パラメータが実際の砂の Bekker パラメータを表現可能であることが確認される。

(3) 粘性土を対象としたせん断実験を円環リング回転軸のねじりトルクとして検出するせん断装置にて実施した。なお、予備実験においてねじりトルクの検出感度が低いことが判明し、リング回転軸直径を小さくするとともにせん断面への垂直応力の載荷方法において装置内部摩擦の影響を可能な限り排除する改造を行った。改造したせん断装置により、三種類の供試粘性土について含水比を変化させてせん断実験を実施した。実験結果より、三種類の供試粘性土の全てについて、含水比を増加させたところ、過去の文献例とは異なり、いずれの粘性土についても内部摩擦角は増加し、逆に粘着力はゼロ付近で減少する傾向となった。この原因は、装置側の問題としては、せん断リングが回転とともに土中に容易に沈下することから、載荷垂直応力の設定範囲が限定的で、より小さな垂直応力での載荷が困難であったこと、また粘性土の調製方法の問題として、含水比が増加するにつれて土塊が形成されやすくなり、事前に十分に土塊を細かく均一な条件で準備することが困難であったことなどが考えられる。実験時の観察では、リング回転角度を 180 度とすることで、リングはある程度は沈下するものの乾燥 MSM-L3 モデルほど過大とはならず、含水状態では土塊の生成とも相まって粘性土がある程度のリング支持強度を発揮していたことが確認された。Bekker の教科書(Bekker, 1969)によれば、円環せん断リングによる計測ではリングが過大沈下を起こさないことが前提となっており、沈下が大きくなるとリングのせん断グロース側面によるトルクへの影響を補正するリースの補正方法が提案されている。この方法により側面の影響を補正した粘着力ならびに内部摩擦角を得たが、含水比に対する上述のような特異な傾向は解消しなかった。したがって、粘性土について、PZ 関係と SS 関係を同時に考慮した Bekker パラメータの十分な検討は行えなかった。YADE に導入する含水条件を考慮した粘着力モデルの校正ならびに粘性土についての Bekker パラメータ変動の検討、他の粘性土との Bekker パラメータの比較考察は今後の課題である。



図 4 含水粘性土のリングせん断実験

〔参考文献〕

- J. Y. Wong: Theory of ground vehicle, Fourth Edition, John Wiley & Sons, Hoboken, 2008.
M. G. Bekker: Introduction of terrain-vehicle systems, The University of Michigan Press, Ann Arbor, 1969.

5 . 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 10 件)

- 土井原美桜, 中嶋 洋, 清水 浩, 宮坂寿郎, 大土井克明: 粘着力成分を考慮した DEM 解析のための粘性土のせん断力計測, 農業食料工学会関西支部第 141 回例会, 2019 年 3 月 4 日, 兵庫県神戸市.
- 中西亮太, 中嶋 洋, 清水 浩, 宮坂寿郎, 大土井克明: OSS を用いた空気入りタイヤの 3 次元 FE-DEM 解析の試み, 第 5 回オーガナイズド・テラメカニクス・ワークショップ, 2018 年 11 月 8 日, 神奈川県横浜市.
- 中嶋 洋, 清水 浩, 宮坂寿郎, 大土井克明: 乾燥豊浦砂と人工土モデルにおける Bekker 定数の比較, 農業環境工学関連 5 学会合同大会, 2018 年 9 月 12 日, 愛媛県松山市.
- R. Nakanishi, H. Nakashima, H. Shimizu, J. Miyasaka, K. Ohdoi: 3D DEM analysis of lugged wheel performance using open source software, 10th Asia-Pacific Conference of the ISTVS & 39th Annual Meeting of Japanese Society for Terramechanics, July 13, 2018, Kyoto, Japan.
- 大住理紗, 中嶋 洋, 清水 浩, 宮坂寿郎, 大土井克明: 土を対象とした DEM 解析のパラメータ校正に関する基礎実験, 農業食料工学会関西支部第 139 回例会, 2018 年 3 月 5 日, 京都市左京区.
- H. Nakashima, R. Nakanishi, H. Shimizu, J. Miyasaka, K. Ohdoi: Pressure-sinkage relationship of an artificial soil model, 19th International & 14th European-African Regional Conference of the ISTVS, September 27, 2017, Budapest, Hungary.
- 中嶋 洋, 中西亮太, 清水 浩, 宮坂寿郎, 大土井克明: 人工土による圧力沈下式の土壌パラメータについて, テラメカニクス第 38 回研究会, 2017 年 11 月 18 日, 高知県高知市.
- 中西亮太, 中嶋 洋, 清水 浩, 宮坂寿郎, 大土井克明: OSS を用いた空気入りタイヤの 3 次元 FE-DEM 解析の試み, 第 38 回テラメカニクス研究会, 2017 年 11 月 18 日, 高知県高知市.
- 中嶋 洋, 中西亮太, 清水 浩, 宮坂寿郎, 大土井克明: 人工土モデルの圧力沈下特性, 農業食料工学会 第 76 回年次大会, 2017 年 9 月 8 日, 東京都世田谷区.
- 中西亮太, 中嶋 洋, 清水 浩, 宮坂寿郎, 大土井克明: OSS を用いた切削問題の 3 次元 DEM 解析, 農業食料工学会関西支部第 137 回例会, 2017 年 3 月 15 日, 大阪府堺市.

6 . 研究組織

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。