

基于离散元的土壤模型参数标定方法

王宪良 胡红 王庆杰 李洪文 何进 陈婉芝

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 离散元法 (DEM) 建立土壤模型过程中部分土壤颗粒参数直接测量难度较大, 若基于间接测量的土壤参数值建立离散元土壤模型进行仿真, 导致仿真结果误差较大。本文结合代理模型基本理论, 提出一种离散元土壤模型的参数标定及优化方法, 步骤如下: 根据基本试验测定的参数建立离散元土壤模型; 结合堆积角及剪切试验, 利用模型仿真进行模型参数敏感性分析; 以敏感性参数为变量, 以真实试验测量值为目标值构造代理模型; 通过高斯-牛顿迭代法进行参数优化。由敏感性分析结果知, 代理模型自变量为土壤颗粒半径、颗粒间静摩擦因数及滚动摩擦因数, 目标量为土壤堆积角、黏聚力、内摩擦角。以涿州保护性耕作试验站土壤 (砂壤土) 为原型, 经优化建立的土壤模型变量参数值分别为: 颗粒半径 5.7 mm, 颗粒间静摩擦因数 0.45, 滚动摩擦因数 0.21。将建立的离散元土壤模型进行轮胎-土壤相互作用仿真模拟, 分析轮胎-土壤接触面最大应力、平均应力, 并通过田间试验进行验证, 将接触面最大应力值、平均应力的仿真值与实际测量值进行比较, 结果表明: 虚拟仿真与实测值之间数值差异在 5.1% 以内, 标定优化后的土壤模型能够近似代替真实土壤进行仿真。

关键词: 土壤模型; 离散元; 颗粒接触参数; 参数标定

中图分类号: O347.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)12-0078-08

Calibration Method of Soil Contact Characteristic Parameters Based on DEM Theory

WANG Xianliang HU Hong WANG Qingjie LI Hongwen HE Jin CHEN Wanzhi

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Discrete element modelling (DEM) is a numerical method for examining the dynamic behaviour of granular media. Soil is a nonuniform, discontinuity, elastic-plastic complicated medium. Although there are some advantages of using continuum numerical methods, the assumption of continuity is not always valid, as when there is a change in the soil structure and soil translocation. In order to overcome the shortcomings of the continuum numerical methods, discrete element modelling (DEM), which is a discontinuum numerical method for modelling the mechanical behaviour of granular materials, is a relevant approach for modelling soil as it can consider soil failure, deformation and translocation. In DEM simulation, soil is composed of individual particles which can be defined to be very small in size. And one of the key aspects for successful DEM simulation is to define and calibrate the model soil particles so that they reflect the behavior of real soil. This study presents a systematic method for calibrating a granular soil model, which is based on the surrogate model theory. This systematic method including four steps: (1) construct the soil contact model, the soil parameters were determined by two ways, measurement of three of the real-material properties through experiments and reference some soil parameters; (2) determination of the design variables defining the virtual soil, the design variables were selected by soil parameter sensitivity analysis; (3) construction of surrogate models for the virtual-material properties as a function of the design variables via simulated experiments; (4) optimization of the design-variable values to fit the virtual-soil properties to the real-soil values. The Edinburgh Elasto-Plastic Cohesion Model (ECM) was selected to fit the soil particle contact model, which was the elastic-plastic mechanics model. And the ECM contact parameters and its value were constant adhesive pull-off

收稿日期: 2017-04-17 修回日期: 2017-05-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0700301)

作者简介: 王宪良(1990—),男,博士生,主要从事土壤压实相关研究,E-mail: 13126728942@126.com

通信作者: 王庆杰(1979—),男,副教授,主要从事保护性耕作相关研究,E-mail: wangqingjie@cau.edu.cn

force f_0 : -0.001 N, adhesive parameter stiffness k_{adh} : 45 kN/m, tangential stiffness factor γ_t : 0.05 , loading spring stiffness k_1 : 100 kN/m, unloading/reloading spring stiffness k_2 : 613 kN/m. The virtual soil model sensitivity analysis results showed that the particle radius, particle contact static friction and rolling friction should be calibrated and optimized. Finally, this paper constructed a soil model, the real soil sample experiment tested were taken from Zhuozhou city Hebei province, the soil texture is sandy loam soil. By this way, the optimized soil model parameters were particle radius 5.7 mm, the static friction between two soil particles 0.45 , the rolling friction between two soil particles 0.21 , respectively. The soil penetration resistance tests simulation with optimized physical parameters were carried out. The real test about soil penetration resistance were carried out. Results showed that the difference values between virtual simulation and real test within 5.1% . And, it proved that the soil model after optimized could replace the real soil and take some simulation relate to soil-implementation. This study provide the theory for soil model parameter calibration and optimization based on DEM method.

Key words: soil models; DEM; contact characteristics parameters; parameter calibration

引言

离散元是一种将散粒群体简化成具有一定形状和质量颗粒的集合,解决散粒之间及散粒与边界间的接触作用和散粒体与边界的不同物理机械性质的方法^[1]。离散元方法在散落物料流动性、固体破碎及机器-土壤相互作用方面具有广泛应用^[2]。由于土壤特性较复杂力学特性没有明显的规律可循,普通的有限元土壤模型准确性不高,且只能模拟土壤破坏行为,无法模拟土壤运动过程^[3]。离散元能够结合土壤颗粒接触力学模型,利用粘连颗粒模拟生成土壤团聚体,极大提高了土壤模型准确性^[4],为农机具触土部件设计及优化提供了理论依据^[5-7]。

利用离散元土壤建模主要包括土壤颗粒本征参数(密度、泊松比、弹性模量等)、颗粒之间及颗粒与外界材料的接触参数(摩擦因数、恢复系数等)^[8-10]。在 EDEM 模型中,大多数土壤颗粒本征参数与真实土壤参数数值一致,但由于颗粒间接触特性复杂,所以部分参数需要进行重新标定及优化。

目前针对离散元土壤模型参数的标定主要集中在土壤颗粒大小(材料本征)、土壤颗粒间摩擦因数(颗粒接触参数)以及接触模型选择方面^[11]。在颗粒形状及大小标定方面,王燕^[12]结合自然界土壤颗粒形态分类,通过离散元球形颗粒组合不同形状的土壤颗粒进行模拟;黄玉祥等^[13]通过 Solidworks 创建不同形状土壤颗粒模型,利用 EDEM 软件内嵌不同大小颗粒进行填充,并设置颗粒参数;还有部分学

者^[8,14]直接设置内嵌球状颗粒大小进行建模,并进行模拟验证。在土壤摩擦因数标定方面,主要结合文献对土壤摩擦因数的规定,选择合适的模型参数,并通过休止角与土壤直剪试验进行模拟验证的方法进行标定^[7,15-16]。对于颗粒接触模型方面的研究主要围绕 EDEM 软件内嵌模型的优缺点进行研究,UCGUL 等^[3,14,17]通过对 Hertz - Mindlin 及 Hysteretic Spring 接触模型进行细致研究,解决了土壤粘结力及无粘结力土壤受力塑性形变等问题。

虽然国内外学者已经对离散元土壤模型部分参数标定方法进行了一些探索^[18],但并未针对离散元土壤模型系统提出土壤参数标定方法及符合土壤本构关系的接触模型。本文基于代理模型的方法,提出一种通用的模型参数标定及优化方法,并利用 The Edinburgh Elasto - Plastic Cohesion Model (ECM) 弹塑性接触模型表示土壤颗粒接触模型。以河北涿州保护性耕作试验区特定土壤为例,建立相应的离散元模型并进行优化,利用该模型进行轮胎-土壤压实模拟试验并进行相关验证,旨在为离散元土壤模型建立提供一种通用的参数标定方法,为建立土壤模型提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 土壤基本参数

2016 年 10 月在河北涿州保护性耕作试验地,取 $0 \sim 50$ cm 土壤原状土(土壤类型为砂壤土)。在实验室进行相关参数测量,为离散元模型建立提供支持。 $0 \sim 50$ cm 土壤的基本特性见表 1。

表 1 试验区土壤基本性质

Tab. 1 Basic soil properties in experiment field

| 土壤深度/ cm | 土壤团粒成分质量分数/% | | | | 土壤容重/ ($g \cdot m^{-3}$) | 土壤 孔隙度/% | 土壤有机质质量 比/($g \cdot kg^{-1}$) | 土壤含水率/ % |
|-------------|--------------|----------|-------------|-------------|-------------------------------|-------------|------------------------------------|-------------|
| | > 2 mm | 1 ~ 2 mm | 0.25 ~ 1 mm | 0 ~ 0.25 mm | | | | |
| 0 ~ 50 | 4.20 | 7.81 | 44.30 | 43.69 | 1.20 | 53.8 | 13.5 | 12.8 |

1.2 试验方法

本文主要以物料本征参数选择与标定及土壤颗粒间接触模型两方面进行离散元土壤建模。土壤颗粒自身参数依据代理模型方法进行标定与优化,主要包括以下步骤:基于基本试验测定的参数建立离散元土壤模型;利用模型结合堆积角及剪切试验,进行模型参数敏感性分析;以敏感性参数为变量,以真实试验测量值为目标值构造代理模型;通过高斯-牛顿迭代法进行参数优化。

在经典土力学理论中,土壤受力变形过程符合弹塑性本构模型^[19]。因此,离散元土壤颗粒接触模型选择外接 The Edinburgh Elasto - Plastic Cohesion Model (ECM) 模型。ECM 模型由爱丁堡大学发明,专门用于研究土壤、有机材料等的压缩问题,是一种将土壤应变滞后性、内聚力及范德华力等考虑在内的应用广泛的非线性模型^[20]。

1.2.1 土壤直剪试验

ZJ型应变控制式直剪仪(图1a)由土壤剪切盒、应力应变传感器、加载装置、电动机控制装置及数据储存装置等部分构成,测试时上部通过刚性加载装置施加4种不同垂直压力(100、200、300、400 kPa)进行剪切,应变速率为0.8 mm/min。土壤直剪试验的理论公式为库伦公式^[21]

$$\tau_{\max} = c + p \tan \varphi \quad (1)$$

式中 τ_{\max} ——剪切最大应力

c ——土壤黏聚力 p ——垂直压力

φ ——土壤内摩擦角

1.2.2 土壤堆积角

土壤作为一种弹塑性介质,农机具-土壤相互作用过程中,会发生土壤形变现象^[22-23]。土壤堆积角是农机具-土壤相互作用过程中影响土壤应变的重要参数^[21],因此将土壤堆积角作为一个重要参数进行测量。堆积角测量装置(图1b)由提升装置、抓取装置、自制铝桶构成,测试时将自制圆筒降到最底部与底面贴合,将一定量的土壤装入圆筒内,电动机为自制圆筒提供动力匀速上升,使土壤受重力自然降落并堆积,土壤堆积斜面与水平面的夹角即为土壤堆积角^[24]。

1.2.3 试验结果

土壤直剪试验中,测量不同垂直压力条件下土壤剪切力,根据库伦公式计算土壤黏聚力及内摩擦角。土壤堆积角测量过程中为了减少人为视觉误差,利用 Matlab 读取土壤堆单侧图像,依次对图像进行去噪、灰度、二值化处理最终提取图像边界点,并对边界点进行线性拟合,得拟合直线斜率即为土壤堆积角正切值。每组试验重复3次,结果见表2。

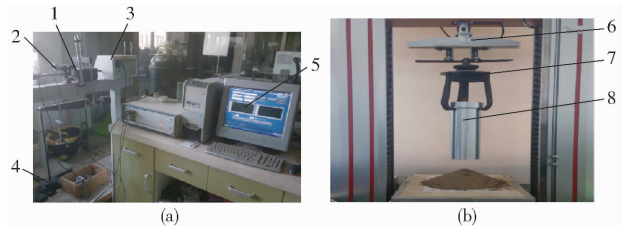


图1 试验装置

Fig.1 Experiment devices

1. 剪切盒 2. 应力应变传感器 3. 电动机控制装置 4. 加载装置
5. 数据储存装置 6. 提升装置 7. 抓取装置 8. 自制铝桶

表2 试验指标测量结果

Tab.2 Measurement results of soil angle of repose, cohesion and internal angle of friction

| 试验序号 | 土壤堆积角/(°) | 土壤黏聚力/kPa | 内摩擦角/(°) |
|------|-----------|-----------|----------|
| 1 | 27.8 | 23.8 | 21.3 |
| 2 | 25.9 | 20.4 | 17.5 |
| 3 | 32.1 | 19.7 | 18.8 |
| 平均值 | 28.6 | 21.3 | 19.2 |

1.3 建立土壤模型

1.3.1 颗粒参数

土壤模型参数的准确性是离散元(EDEM)模拟的基础。土壤结构复杂且不均匀,研究表明,土壤颗粒结构主要包括:块状土壤颗粒、核状土壤颗粒和柱状土壤颗粒。为提高土壤模型准确性,根据 EDEM 软件自带的球形颗粒组合替代不同类型的土壤颗粒形状,模拟土壤团聚体,如图2所示,设置球形颗粒填充单元半径为5 mm。土壤颗粒密度、土壤泊松比、土壤屈服强度、摩擦因数通过室内实验测得,而土壤刚度、土壤剪切模量、临界应力、恢复系数通过参考相关文献取得^[25-27]。

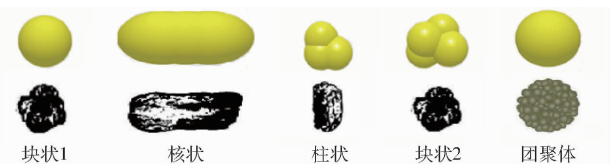


图2 土壤颗粒模型

Fig.2 Soil particle models

1.3.2 土壤接触模型

Hysteretic Spring Model 及 Hysteretic Spring Model 结合 Linear Cohesion 模型常常被用作土壤颗粒接触模型,因为该模型不仅能符合土壤弹性模型特征,而且能体现土壤的粘结力特性^[3,17]。但研究发现材料弹塑性模型更适合土壤受力条件下土壤应力-应变特征,所以选择既能体现土壤弹塑性又能体现土壤粘结性的 The Edinburgh Elasto - Plastic Cohesion Model (ECM) 模型^[28]。不同接触模型颗粒法向力-法向重叠量关系如图3所示,2个土壤颗

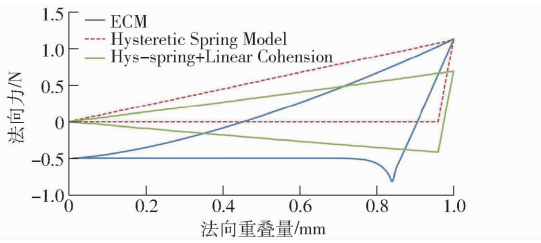


图 3 不同接触模型颗粒法向力-法向重叠量关系曲线

Fig. 3 Relationships between normal force and normal overlap under different contact models

粒受力接触时, 颗粒受合法向力 f_n 主要包括滞回弹力 f_{hyst} 和法向粘性阻尼 f_{nd} 。

$$f_n = f_{hyst} + f_{nd} \quad (2)$$

其中

$$f_{hyst} = \begin{cases} f_0 + k_1 \delta & (k_2(\delta - \delta_p) \geq k_1 \delta) \\ f_0 + k_2(\delta - \delta_p) & (k_1 \delta > k_2(\delta - \delta_p) > -k_{adh} \delta) \\ f_0 - k_{adh} \delta & (-k_{adh} \delta \geq k_2(\delta - \delta_p)) \end{cases} \quad (3)$$

式中 f_0 ——粘性分离力常数

k_1 ——加载弹性刚度

k_2 ——卸载弹性刚度

δ_p ——塑性颗粒重叠量

k_{adh} ——粘性刚度系数

δ ——受正应力颗粒重叠量

法向粘性阻尼 f_{nd} 计算公式为

$$f_{nd} = \beta_n v_n \quad (4)$$

其中

$$\beta_n = \sqrt{\frac{4m^* k_1}{1 + \left(\frac{\pi}{\ln e}\right)^2}} \quad (5)$$

$$m^* = m_i m_j / (m_i + m_j) \quad (6)$$

式中 v_n ——法向速度 β_n ——阻尼系数

m^* ——接触颗粒 m_{ij} 的等效质量

e ——土壤颗粒恢复系数

同理, 颗粒接触切向力 f_t 由切向刚度 f_{ts} 及切向阻尼 f_{td} 组成 ($f_t = f_{ts} + f_{td}$), 根据离散元素法的迭代理论知, $f_{ts} = f_{ts(n-1)} + \Delta f_{ts}$, $f_{ts(n-1)}$ 为在某一时间切向力, 时间步长为 Δt , Δf_{ts} 为切向力的步长增量, Δf_{ts} 计算方法为 $\Delta f_{ts} = -\gamma_t k_t \delta_t$, γ_t 为切向刚度系数, δ_t 为颗粒切向重叠量。切向阻尼是由切向阻尼系数 β_t 、颗粒切向速度 v_t 决定的, 计算公式为: $f_{td} = -\beta_t v_t$ 。切向阻尼系数计算公式为

$$\beta_t = \sqrt{\frac{4m^* \gamma_t k_t}{1 + \left(\frac{\pi}{\ln e}\right)^2}} \quad (7)$$

土壤颗粒相互滑动时, 颗粒间切向摩擦符合库伦摩擦准则, 所以在正应力作用下, 颗粒剪切强度符合

$$f_{ct} \leq \mu (|f_{hyst} + k_{adh} \delta - f_0|) \quad (8)$$

式中 f_{ct} ——切向极限摩擦力

μ ——颗粒静摩擦因数

ECM 接触模型在 EDEM 软件应用过程中主要参数包括粘性分离力常数 f_0 、粘性刚度系数 k_{adh} 、切向刚度系数 γ_t 、加载/卸载弹性刚度 k_1/k_2 , 参考文献[20,28], 各参数为: $f_0 = -0.001 \text{ N}$, $k_{adh} = 45 \text{ kN/m}$, $\gamma_t = 0.05$, $k_1 = 100 \text{ kN/m}$, $k_2 = 613 \text{ kN/m}$ 。

1.4 构建代理模型

1.4.1 参数敏感性分析

离散元土壤模型主要通过表 3 所示的参数构造, 本文通过一系列筛选试验, 选择对土壤模型影响较大的参数代表实际土壤, 并进行优化, 确保土壤模型的精确性。参数筛选试验借助于土壤堆积角及土壤直剪试验 (图 4)。

表 3 土壤模型及筛选试验参数

Tab. 3 Soil properties used in simulations and selected test parameters

| 参数 | 土壤颗粒 密度 ρ / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | 颗粒半径 r/mm | 土壤 泊松比 ν | 土壤表面能 Φ / ($\text{J} \cdot \text{mm}^{-2}$) | 单位面积 法向刚度 N / ($\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$) | 单位面积 切向刚度 S / ($\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$) | 土壤剪切 模量 G / MPa | 土壤-土壤 静摩擦 因数 μ_s | 土壤-土壤 动摩擦 因数 μ_r | 恢复 系数 e |
|----|--|-----------------------|--------------------|--|--|--|-------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------|
| 数值 | 2550 | 5 | 0.35 | 40 | 1×10^9 | 5×10^8 | 1 | 0.541 | 0.31 | 0.6 |

堆积角试验模拟所用钢管直径为 20 mm, 内含 5 000 个土壤颗粒, 钢管以 5 mm/s 的速度竖直向上匀速运动, 直至所有颗粒停止运动则模拟结束, 利用 EDEM 软件自带量角器功能对土壤堆积角进行测量。土壤直剪试验上下直剪盒尺寸 (长 \times 宽 \times 高) 分别为: 80 mm \times 40 mm \times 40 mm 和 80 mm \times 40 mm \times 20 mm。上剪切盒以 0.8 mm/min 的速度进行土壤剪切, 通过软件后处理导出剪切过程中横向力 F_x 变化过程, 则土壤破坏时最大剪切应力 $\tau_{\max} = F_{x\max}/S$,

结合库伦公式求解土壤粘聚力及内摩擦角。为向直剪过程中添加恒定竖向载荷, 在 EDEM 中利用新建几何体垂直向下运动的方式向上剪切盒内土壤施加压力, 压动土壤颗粒, 通过数据分析运动几何体与颗粒接触力即为直剪试验施加载荷。

结合表 3 土壤颗粒参数建立的土壤模型, 对土壤堆积角及土壤直剪试验进行模拟试验, 经 3 次重复模拟取平均值得在该参数设置条件下土壤堆积角为 28.6°、内摩擦角为 22.8°、黏聚力为 25.1 kPa。

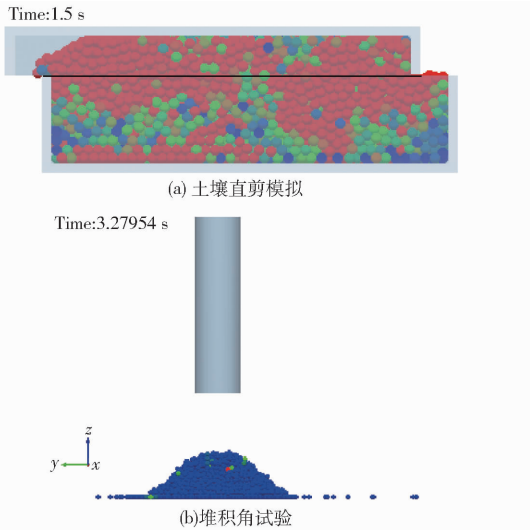


图4 试验设置方法

Fig. 4 Experiment arrangement method

表4 土壤模型基本参数敏感性分析结果

Tab. 4 Sensitivity analysis results of parameters of discrete element model used in simulations

| 筛选试验参数值 | 土壤堆积角 | | 黏聚力 | | 内摩擦角 | | 结果分析 |
|--------------------------------------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|------|
| | 计算值/(°) | 敏感系数/% | 计算值/kPa | 敏感系数/% | 计算值/(°) | 敏感系数/% | |
| $\rho = 3\ 000\ \text{kg/m}^3$ | 28.79 | 3.7 | 24.6 | 1.15 | 21.7 | 0.58 | |
| $r = 10\ \text{mm}$ | 25.12 | 13.8 | 19.3 | 30.5 | 19.8 | 15.2 | * |
| $\nu = 0.15$ | 28.56 | 0.11 | 25.4 | 0.009 | 23.1 | 0.99 | |
| $\Phi = 30\ \text{J/mm}^2$ | 28.50 | 1.06 | 25.2 | 1.21 | 22.7 | 1.45 | |
| $N = 2 \times 10^{10}\ \text{N/m}^3$ | 28.57 | 0.11 | 25.6 | 1.99 | 22.3 | 2.24 | |
| $S = 1 \times 10^9\ \text{N/m}^3$ | 28.58 | 0.09 | 23.6 | 3.4 | 22.6 | 1.77 | |
| $G = 7\ \text{MPa}$ | 28.55 | 0.20 | 24.2 | 4.3 | 23.4 | 3.1 | |
| $\mu_s = 0.3$ | 32.13 | 15.4 | 20.0 | 31.7 | 28.7 | 32.2 | * |
| $\mu_r = 0.1$ | 35.70 | 13.5 | 23.9 | 22.1 | 32.2 | 41.2 | * |
| $e = 0.3$ | 28.52 | 0.28 | 24.5 | 2.44 | 23.3 | 2.2 | |

注：* 表示敏感系数超标参数。

运用数理统计及线性代数等数学理论来优化参数模型,是一种很好的数据分析方法。响应面法主要在试验结果测量、数值分析及经验公式的基础上,对试验设计空间内的设计点进行试验求值,构造测定量的全局近似。响应面法能够提高优化算法收敛速度,在对接触-碰撞这样复杂的动力学问题进行参数优化设计时,响应面法是一种快速、高效的方法^[29]。根据大量文献^[7,30-32]可知,土壤颗粒间静摩擦因数小于(等于)0.7,动摩擦因数小于(等于)0.5,为确保仿真运行速度及准确性,土壤颗粒半径范围取2~50 mm,结合各参数的取值范围制定仿真试验因素水平表(表5),试验为全因素设置,响应面表示方法为

$$c(r, \mu_s, \mu_r) = f_c(\mu_s, \mu_r) g_c(r) \quad (9)$$

$$f_c = \sum_{i+j \leq 2} c_{ij} \mu_{si} \mu_{rj} \quad (10)$$

式中 $f_c(\mu_s, \mu_r)$ ——包含 μ_s, μ_r 的二元二次方程

$g_c(r)$ ——以颗粒半径 r 为变量的无量纲函数

设置筛选试验参数值时,分别改变表3中某个相应土壤参数,保持其余参数值不变(表3),根据变化的土壤参数模拟土壤堆积角及直剪试验,每次参数变化重复3次模拟,计算平均土壤堆积角、黏聚力及内摩擦角,并分析不同土壤模型参数对土壤堆积角、黏聚力及内摩擦角的敏感系数(表4)。敏感系数表示土壤参数变化情况 $\Delta A/A$ 与参数变量变化情况 $\Delta P/P$ 比值, $A, \Delta A$ (堆积角、黏聚力及内摩擦角)为筛选试验模拟结果指标及指标变化, $P, \Delta P$ (表4)为筛选试验模拟结果指标及指标变化。

1.4.2 建立响应面关系

由表4敏感性分析结果可知,土壤颗粒半径、静摩擦因数及滚动摩擦因数对土壤模型特性具有显著影响,所以确定此3个参数作为代理模型的自变量,堆积角、黏聚力及内摩擦角为目标因素。

c_{ij} ——待定系数,通过最小二乘法计算得到

μ_{si} ——颗粒静摩擦因数

μ_{rj} ——颗粒动摩擦因数

表5 仿真试验因素水平

Tab. 5 Factors and levels for simulation test

| 水平 | 颗粒半径 | 颗粒静摩擦因数 | 颗粒动摩擦因数 |
|----|---------------|---------|---------|
| | r/mm | μ_s | μ_r |
| 1 | 2 | 0 | 0 |
| 2 | 5 | 0.1 | 0.05 |
| 3 | 10 | 0.3 | 0.1 |
| 4 | 20 | 0.5 | 0.3 |
| 5 | 50 | 0.7 | 0.5 |

根据仿真试验结果,利用 Matlab 进行二元回归分析,分别对黏聚力、内摩擦角及堆积角求解回归方程。通过对3种回归模型分别进行求解,并对回归模型进行标准差比较,选择标准差最小的模型。通过比较确定3个参数的最优回归方程为

$$\begin{aligned}
c(r, \mu_s, \mu_r) &= (6.77 + 18.9\mu_r - 22.4\mu_s + 21.84\mu_r^2 + \\
&9.72\mu_s^2 + 62.43\mu_r\mu_s) \left(0.43 + \frac{r}{r_0} - 0.21 \frac{r^2}{r_0^2} \right) \\
\varphi(r, \mu_s, \mu_r) &= (17.13 - 63.18\mu_r + 25.61\mu_s - 20.14\mu_r^2 - \\
&26.34\mu_s^2 + 10.33\mu_r\mu_s) \left(0.88 + 0.51 \frac{r}{r_0} - 0.27 \frac{r^2}{r_0^2} \right) \\
A(r, \mu_s, \mu_r) &= (12.11 + 82.15\mu_r + 27.64\mu_s - 161.95\mu_r^2 - \\
&15.87\mu_s^2 + 75.67\mu_r\mu_s) \left(1 - 0.18n \frac{r}{r_0} \right) \quad (11)
\end{aligned}$$

式中 n ——拟合系数,由最小二乘法求解

1.4.3 模型参数优化

为了优化土壤模型参数 (c, φ, A) 使其更接近于土壤参数的实测值 (c_0, φ_0, A_0), 围绕参数建立 3 个目标方程

$$\begin{cases} \phi_1(x) = \left| \frac{A(x) - A_0}{A_0} \right| \\ \phi_2(x) = \left| \frac{c(x) - c_0}{c_0} \right| \\ \phi_3(x) = \left| \frac{\varphi(x) - \varphi_0}{\varphi_0} \right| \end{cases} \quad (12)$$

土壤颗粒大小对仿真时间、精确度等均有重要影响, 所以为了优化土壤颗粒半径, 目标方程为

$$\phi_4(x) = 10 \left(\frac{\pi}{2} - \arctan(r - 5) \right) \quad (13)$$

为了求解各参数误差的最小值, 令

$$\phi(x) = \begin{bmatrix} \phi_1(x) \\ \phi_2(x) \\ \phi_3(x) \\ \phi_4(x) \end{bmatrix} = 0 \quad (14)$$

根据牛顿-高斯优化算法最佳优化向量 $x = (r, \mu_s, \mu_r)$, 有

$$f(x) = \frac{1}{2} \phi^T W \phi \quad (15)$$

其中 $W = 0.25I_4$

式中 W ——正定加权矩阵 I_4 ——单位矩阵

给定初始值 $X_0 = (r_0, \mu_{s0}, \mu_{r0})$, 根据牛顿高斯迭代法, $x^{k+1} = x^k + \Delta x^k$, 迭代收敛条件 $\|\Delta x^k\| \leq \varepsilon$ ($\varepsilon = 0.001$)。其中

$$\Delta x^k = -(\Phi^T W \Phi)^{-1} \Phi^T W \phi \quad (16)$$

式中 Φ —— ϕ 的 4×3 阶雅可比矩阵

$$\Phi(x) = \frac{\partial \phi(x)}{\partial x} \quad (17)$$

经过计算迭代得 $x = (5.7, 0.45, 0.21)$, 则模型的堆积角为 28.7° 、内摩擦角为 19.0° 、黏聚力为 21.5 kPa 。

2 试验验证

2.1 试验地概况

在河北省涿州市东城坊镇 ($115^\circ 56' E, 39^\circ 28' N$) 中国农业大学河北北部耕地保育科学观测试验站进行试验, 土壤质地为砂壤土, 地势平坦, 平均气温为 $11.6^\circ C$, 平均降雨量约 450 mm , 主要种植方式为冬小麦-夏玉米一年两熟制。

2.2 试验目的及方法

为验证通过代理模型进行土壤参数标定建立的离散元土壤模型是否能够准确反映土壤力学特征, 本试验结合真实试验与离散元试验进行土壤压实试验, 分析轮胎行走过程中轮胎-土壤接触面最大应力、平均应力, 将仿真值与实测值进行对比, 利用误差值指标判断离散元土壤模型准确性。

2.2.1 轮胎-土壤接触面应力测量^[33]

对于轮胎-土壤接触面应力分布, 在选定试验地点, 将宽度为 50 cm 、长度为 100 cm 区域, 表层 10 cm 土壤清除, 制作 $100 \text{ cm} \times 50 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ 土槽 (图 5)。测量沿着轮胎行走方向垂直方向应力分布情况时, 将 8 个传感器平铺安装在土槽中轴线上。

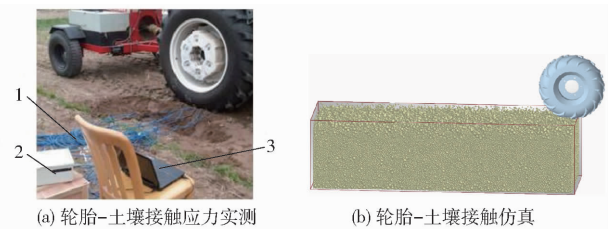


图 5 轮胎-土壤接触面应力测试

Fig. 5 Experiment test on stress of tyre-soil contact

1. 数据传输线 2. 数据接收站 3. 数据显示装置

2.2.2 建立土壤及轮胎模型

设置土槽模型尺寸 (长 \times 宽 \times 高) 为 $3000 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$, 共分为 4 层, $0 \sim 200 \text{ mm}$ 颗粒孔隙度为 55.92% , 颗粒 1~5 的数量比为 $2:1:1:2:4$; $200 \sim 400 \text{ mm}$ 颗粒孔隙度为 47.44% , 颗粒 1~5 数量比为 $3:1:1:2:3$; $400 \sim 600 \text{ mm}$ 颗粒孔隙度为 45.34% , 颗粒 1~5 数量比为 $6:1:1:1:1$; $600 \sim 1000 \text{ mm}$ 颗粒孔隙度为 41.21% , 颗粒 1~5 数量比为 $12:2:2:3:1$ 。通过三维软件建立不同颗粒形状, 通过软件球形颗粒进行填充, EDEM 土槽模型中颗粒 1~5 的数量分别为 196806 、 61391 、 45139 、 34488 、 18913 个。

利用 Solidworks 建立轮胎三维结构模型, 型号为 $16.9-34$, 保存格式为 $*.igs$ 。轮胎具体参数如下: 花纹类型为 R1; 标准轮辋 W15L; 钢圈直径 864 mm ; 充气外直径 1585 mm ; 断面宽 430 mm ; 标准

充气压力 200 kPa;最大负荷 2 065 kg。

模拟仿真过程中轮胎与土壤模型接触参数分别为:轮胎-土壤静摩擦因数为 0.57,滚动摩擦因数为 0.31。

2.3 试验结果及分析

离散元仿真轮胎-土壤接触面最大应力、平均应力与实际测量的应力值对比如表 6 所示。结果表明,利用代理模型进行离散元土壤模型参数标定并优化后,土壤模型力学特性与实际测量值差别较小,数值差异在 5.10% 以内,经过模型参数标定,使离散元土壤模型更精确,提高了仿真模拟准确性。

表 6 仿真与真实土壤应力值对比

Tab. 6 Comparison of soil stress for simulation and actual result

| 参数 | 应力模拟值/kPa | 应力实测值/kPa | 误差/% |
|-----|---------------|---------------|------|
| 最大值 | 118.70 ± 5.61 | 113.60 ± 8.31 | 4.24 |
| 平均值 | 84.61 ± 5.22 | 80.51 ± 3.62 | 5.10 |

3 结论

(1) 基于代理模型相关理论,结合离散元虚拟仿真,明确离散元土壤模型优化参数,通过对土壤堆积角、直剪试验数据进行回归分析,建立响应面数学模型,经过高斯-牛顿迭代法优化,最终得涿州地区砂壤质地土壤半径颗粒大小为 5.7 mm,颗粒间静摩擦因数为 0.45,滚动摩擦因数为 0.21。通过该方法能够快速准确找到目标参数,为 EDEM 仿真建立土壤模型提供一种途径。

(2) 通过验证试验表明,经过标定优化后的离散元土壤模型有效改善了土壤力学特征,使其综合特征更符合真实土壤特征。通过对比仿真及实测轮胎-土壤接触面应力值,虚拟仿真与实测值之间数值差异在 5.1% 以内。证明 ECM 颗粒接触模型符合土壤本构关系,且标定后的离散元土壤模型能够近似代替真实土壤进行试验模拟。

参 考 文 献

- 1 JAEGER H M, NAGEL S R, BEHRINGER R P. The physics of granular materials[J]. *Physics Today*, 1996,49(4):32-38.
- 2 于建群,付宏,李红,等. 离散元法及其在农业机械工作部件研究与设计中的应用[J]. *农业工程学报*, 2005,21(5):1-6.
YU Jianqun, FU Hong, LI Hong, et al. Application of discrete element method to research and design of working parts of agricultural machines[J]. *Transactions of the CSAE*, 2005,21(5):1-6. (in Chinese)
- 3 UCCUL M, FIELKE J M, SAUNDERS C. Three-dimensional discrete element modelling of tillage: determination of a suitable contact model and parameters for a cohesionless soil[J]. *Biosystems Engineering*, 2014,121(3):105-117.
- 4 张锐. 基于离散元细观分析的土壤动态行为研究[D]. 长春:吉林大学, 2005.
ZHANG Rui. Research on the dynamic behavior of soil based on mesoscopic simulation by DEM[D]. Changchun: Jilin University, 2005. (in Chinese)
- 5 李博. 基于离散元法的深松铲减阻及耕作效果研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2016.
LI Bo. Reducing force and tillage performance of a subsoiler based on the discrete element method (DEM) [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016. (in Chinese)
- 6 方会敏, 姬长英, FARMAN Ali Chandio, 等. 基于离散元法的旋耕过程土壤运动行为分析[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(3):22-28. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160304&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.004.
FANG Huimin, JI Changying, FARMAN Ali Chandio, et al. Analysis of soil dynamic behavior during rotary tillage based on distinct element method [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(3):22-28. (in Chinese)
- 7 郑侃, 何进, 李洪文, 等. 基于离散元深松土壤模型的折线破土刃深松铲研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(9):62-72. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160910&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.010.
ZHENG Kan, HE Jin, LI Hongwen, et al. Poly-line soil-breaking blade subsoiler research based on subsoiling soil model using discrete element method (DEM) [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(9):62-72. (in Chinese)
- 8 SMITH W, PENG H. Modeling of wheel-soil interaction over rough terrain using the discrete element method[J]. *Journal of Terramechanics*, 2013,50(5):277-287.
- 9 BRIEND R. Modelling wheel-soil interactions using the discrete element method for tread shape optimization[D]. Montreal: McGill University, 2010.
- 10 龚明. 材料物料特性参数标定[R]. 北京: EDEM 用户大会报告, 2013.
- 11 COETZEE C J, ELS D N J, DYMOND G F. Discrete element parameter calibration and the modelling of dragline bucket filling [J]. *Journal of Terramechanics*, 2010,47(1):33-44.
- 12 王燕. 基于离散元法的深松铲结构与松土效果研究[D]. 长春:吉林农业大学, 2014.
WANG Yan. Simulation analysis of structure and effect of the subsoiler based on DEM [D]. Changchun: Jilin Agricultural

- University, 2014. (in Chinese)
- 13 黄玉祥, 杭程光, 苑梦婵, 等. 深松土壤扰动行为的离散元仿真与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 80-88. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160712&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.012.
HUANG Yuxiang, HANG Chengguang, YUAN Mengchan, et al. Discrete element simulation and experiment on disturbance behavior of subsoiling [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 80-88. (in Chinese)
- 14 UCGUL M, FIELKE J M, SAUNDERS C. 3D DEM tillage simulation; validation of a hysteretic spring (plastic) contact model for a sweep tool operating in a cohesionless soil[J]. Soil and Tillage Research, 2014, 144: 220-227.
- 15 BROVE E L, TIJSKENS E, MIGUEL H S, et al. Prediction model for non-inversion soil tillage implemented on discrete[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014, 106(5): 120-127.
- 16 SHMULEVICH I. State of the art modeling of soil-tillage interaction using discrete element method[J]. Soil & Tillage Research, 2010, 111: 41-53.
- 17 UCGUL M, JOHN M, FIELKE C. Three-dimensional discrete element modelling (DEM) of tillage; accounting for soil cohesion and adhesion[J]. Biosystems Engineering, 2015, 129: 298-306.
- 18 张锐, 韩佃雷, 吉巧丽, 等. 离散元模拟中沙土参数 标定方法研究[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 49-56. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170306&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.006.
ZHANG Rui, HAN Dianlei, JI Qiaoli, et al. Calibration methods of sandy soil parameters in simulation of discrete element method [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 49-56. (in Chinese)
- 19 李广信. 高等土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- 20 Edinburgh. EDEM Tutorial; tablet press model[EB/OL]. www.dem-solutions.com.
- 21 BRIEND R, RADZISZEWSKI P, PASINI D. Virtual soil calibration for wheel-soil interaction simulations using the discrete-element method[J]. Canadian Aeronautics & Amp Space Journal, 2011, 57(1): 59-64.
- 22 ZIYAAE A, ROSHANI M R. A survey study on soil compaction problems for new methods in agriculture[J]. International Research Journal of Applied and Basic Sciences, 2012, 3(9): 1787-1801.
- 23 姚艳. 软粘土条件下的车辆驱动力学研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2009.
YAO Yan. Study on the mechanical driving performance of vehicle in soft soil[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2009. (in Chinese)
- 24 王云霞, 梁志杰, 张东兴, 等. 基于离散元的玉米种子颗粒模型种间接触参数标定[J]. 农业工程学报, 2016, 32(22): 36-42.
WANG Yunxia, LIANG Zhijie, ZHANG Dongxing, et al. Calibration method of contact characteristic parameters for corn seeds based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(22): 36-42. (in Chinese)
- 25 MAK J, CHEN Y, SADEK M A. Determining parameters of a discrete element model for soil-tool interaction[J]. Soil & Tillage Research, 2012, 118: 117-122.
- 26 LI Bo, CHEN Ying, CHEN Jun. Modeling of soil-claw interaction using the discrete element method (DEM)[J]. Soil & Tillage Research, 2016, 158: 177-185.
- 27 张锐, 李建桥, 周长海, 等. 推土板表面形态对土壤动态行为影响的离散元模拟[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9): 13-19.
ZHANG Rui, LI Jianqiao, ZHOU Changhai, et al. Simulation of dynamic behavior of soil ahead of the bulldozer plates with different surface configurations by discrete element method[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(9): 13-19. (in Chinese)
- 28 JANDA A, OOI J Y. DEM modeling of cone penetration and unconfined compression in cohesive solids[J]. Powder Technology, 2016, 293: 60-68.
- 29 陈潇凯, 李邦国, 林逸. 改进响应面法在汽车正面抗撞性优化中的应用[J]. 北京理工大学学报, 2009, 29(12): 1076-1079.
CHEN Xiaokai, LI Bangguo, LIN Yi. Application of improved RSM in the optimization design of automotive frontal crashworthiness[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2009, 29(12): 1076-1079. (in Chinese)
- 30 曾德超. 机械土壤动力学[M]. 北京: 北京科学技术出版社, 1990.
- 31 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.
- 32 任露泉. 土壤粘附力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- 33 王宪良, 王庆杰, 李洪文, 等. 基于 FRIDA 模型的轮胎-土壤接触特性研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(9): 121-127. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160918&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.018.
WANG Xianliang, WANG Qingjie, LI Hongwen, et al. Research on contact properties of soil-tyre based on FRIDA model[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 121-127. (in Chinese)