



武 涛, 黄伟凤, 陈学深, 等. 考虑颗粒间黏结力的黏性土壤离散元模型参数标定[J]. 华南农业大学学报, 2017, 38(3): 93-98.

考虑颗粒间黏结力的黏性土壤离散元模型参数标定

武 涛, 黄伟凤, 陈学深, 马 旭, 韩子奇, 潘 潼
(华南农业大学 工程学院, 广东 广州 510642)

摘要:【目的】实现黏性土壤离散元模型的接触参数与接触模型参数标定。【方法】基于土壤堆积角物理试验结果, 采用考虑颗粒间黏结力的“Hertz-Mindlin with JKR”接触模型进行土壤堆积角仿真试验, 借助 GEMM (Generic EDEM material model database) 数据库获得离散元模型关键参数 (包括 JKR 表面能、恢复系数、静摩擦系数与动摩擦系数), 进一步运用 Box-Behnken 试验方法进行堆积角仿真试验。【结果】通过对试验结果进行多元回归拟合分析获得了堆积角回归模型, 回归模型的方差分析表明该模型极显著, 试验因素对堆积角的影响为二次多项式, 且存在复杂的一次与二次交互作用。以堆积角 40.45° 为目标对回归模型进行寻优, 得到了优化解: JKR 表面能 7.91 J·m⁻²; 恢复系数 0.66; 静摩擦系数 0.83; 动摩擦系数 0.25。以此优化解进行仿真试验获得的堆积角为 39.73°。堆积角仿真试验与物理试验在堆积角度和形状上具有较高的相似性。【结论】可利用该优化参数对样品土壤进行进一步的黏性土壤与触土部件间的离散元仿真, 从而揭示黏性土壤在触土部件作用下的运动规律。

关键词:黏性土壤; 离散元模型; 接触参数; JKR 接触模型; 黏结力; 堆积角
中图分类号:S220.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-411X(2017)03-0093-06

Calibration of discrete element model parameters for cohesive soil considering the cohesion between particles

WU Tao, HUANG Weifeng, CHEN Xueshen, MA Xu, HAN Ziqi, PAN Tong
(College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract:【Objective】To calibrate contact parameters and contact model parameters for the cohesive soil discrete element model. 【Method】The Hertz-Mindlin with JKR contact model which consider the cohesion between particles was employed for the repose angle simulation test. The simulation test was based on the results of physical test for angle of repose. The key parameters including JKR surface energy, coefficient of restitution, coefficient of static friction and coefficient of rolling friction were obtained from the GEMM (Generic EDEM material model) database. A Box-Behnken design was then used to perform the simulation test for repose angle in above value ranges. 【Result】The regression model for repose angle was acquired from the test results by multiple regression analysis. Analysis of variance showed that the model was extremely significant, and the relationship between experimental factors and repose angle was fitted to a quadratic polynomial with complex liner and quadratic interactions. The optimized solution was acquired by using 40.45° as the target of repose angle. The optimized solution was as follow, JKR surface energy was 7.91 J·m⁻², coefficient of restitution was 0.66, coefficient of static friction was 0.83, and coefficient of rolling friction was 0.25. The optimized solution was then used for simulation test and the obtained repose angle was 39.73°. The simulation test was highly matched with physical test

收稿日期:2016-08-04 优先出版时间:2017-04-12
优先出版网址:<http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.s.20170412.1447.038.html>
作者简介:武 涛(1979—), 男, 副教授, 博士, E-mail:wt55pub@scau.edu.cn; 通信作者:陈学深(1977—), 男, 副教授, 博士, E-mail:chenxs@scau.edu.cn
基金项目:国家自然科学基金(51405164); 国家科技支撑计划(2014BAD06B03-01)

on both angle and shape of repose. 【Conclusion】 For the soil sample used in this research , the optimized parameters can be used for further simulation of kinematics and dynamics between cohesive soil and soil contact components , and for providing the motion characteristics of cohesive soil under the actions of soil contact components.

Key words:cohesive soil; discrete element model; contact parameter; Johoson-Kendall-Roberts contact model; cohesion; repose angle

土壤介质的空间变异性及非线性特征,给土壤-机械相互作用模型的建立带来了很大的困难^[1]。研究者多采用基于连续介质的有限元方法研究耕作过程中的土壤动态行为,该方法将土壤视为整体,然而实际耕作中,土壤是以颗粒群的形式运动的,存在土层的分离和混合、裂缝的出现及土壤颗粒的流动,采用有限元法进行土壤运动模拟具有局限性^[2]。离散元法是由 Cundall 等^[3]提出的分析散体行为的数值方法,可用来模拟颗粒材料间的微观和宏观变形,也适合仿真土壤和刚性体间的相互作用。已有利用离散元法对土壤与耕作机具间的作用过程的研究^[4-6],证实了离散元仿真能够模拟耕作过程,可对土壤颗粒在耕作过程中的受力和运动情况进行分析。

土壤颗粒间受水分和化学物质的作用存在黏附现象,简化的接触模型难以准确模拟农业生产常见的黏性土壤的力学行为。张锐^[7]将土壤颗粒之间的液桥力和黏附力引入到模型中,修正了传统的离散元模型,使模拟结果与土壤特性更贴近。Kwork 等^[8]在数值分析中创新性地 将沙粒作为团聚体而不是单一的独立个体,为黏性土壤的离散元仿真提供了借鉴。采用三维球元的黏连颗粒模型和考虑土壤含水的湿颗粒模型进行土壤动力学的离散元模拟将推动土壤动力学的微观机理分析,有助于土壤耕作部件设计的创新^[9]。

进行离散元仿真需要选择适合的接触模型并确定相应的接触参数,但离散元仿真需要的参数很难直接获得,需要通过参数标定来确定。本研究针对样品土壤,采用考虑颗粒间黏结力的“Hertz-Mindlin with JKR”接触模型,进行土壤堆积角仿真试验,确定样品土壤的离散元接触参数与接触模型参数,为进一步研究黏性土壤与触土部件的关系提供基础。

1 材料与方法

1.1 接触模型的选取

接触模型的选取对模拟结果的准确性有很大影响
<http://xuebao.scau.edu.cn>

响。经典的 Hertz 接触模型的主要缺点是仅考虑弹性变形,不涉及由于范德华力作用导致的黏结力,因此不适合模拟黏性土壤。JKR (Johnson-Kendall-Roberts) 接触模型是一种黏结性颗粒接触模型,颗粒之间的相互吸引力用表面能代表^[10]。本文仿真环境为 EDEM 2.6,此版本软件中引入了“Hertz-Mindlin with JKR”接触模型,该接触模型基于 JKR 理论建立,在 Hertz 理论的基础上考虑了湿颗粒间黏结力对颗粒运动规律的影响,是 1 个凝聚力接触模型,适用于模拟颗粒间因静电、水分等原因发生明显黏结和团聚的物料,如农作物和泥土等^[11]。为表征颗粒间凝聚力,该模型采用了 JKR 法向弹性接触力 F_{JKR} 来计算:

$$F_{JKR} = \frac{4E^*}{3R^*} \alpha^3 - 4 \alpha^{\frac{3}{2}} \sqrt{\pi \gamma E^*},$$

式中, F_{JKR} 为 JKR 法向弹性接触力(N), γ 为表面张力($N \cdot m^{-1}$), E^* 为等效弹性模量(Pa), α 为切向重叠量(m), R^* 为等效接触半径(m)。等效弹性模量 E^* 与等效接触半径 R^* 定义为:

$$\frac{1}{E^*} = \frac{(1 - v_1^2)}{E_1} + \frac{(1 - v_2^2)}{E_2},$$
$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2},$$

式中, E_1 为接触颗粒 1 的弹性模量(Pa), v_1 为接触颗粒 1 的泊松比, R_1 为接触颗粒 1 的接触半径(m), E_2 为接触颗粒 2 的弹性模量(Pa), v_2 为接触颗粒 1 的泊松比, R_2 为接触颗粒 1 的接触半径(m)。

切向重叠量(α)与法向重叠量(δ)的关系如下:

$$\delta = \frac{\alpha^2}{R^*} - \sqrt{\frac{4\pi\gamma\alpha}{E^*}},$$

即使颗粒间没有直接接触,该模型也提供了颗粒间相互吸引的凝聚力计算方法。颗粒间具有非 0 凝聚力时的最大间隙通过下式计算:

$$\delta_c = \frac{\alpha_c^2}{R^*} - \sqrt{\frac{4\pi\gamma\alpha_c}{E^*}},$$
$$\alpha_c = \left[\frac{9\pi\gamma R^{*2}}{2E^*} \left(\frac{3}{4} - \frac{1}{\sqrt{2}} \right) \right],$$

式中, δ_c 为颗粒间具有非零凝聚力时的法向最大间隙(m), α_c 为颗粒间具有非零凝聚力时的切向最大间隙(m)。当 $\delta < \delta_c$, 模型返回 0。当颗粒并非实际接触并且间隙小于 δ_c 时, 凝聚力达到最大值, 颗粒非实际接触的最大凝聚力 $F_{pullout}$ 计算公式为:

$$F_{pullout} = -\frac{3}{2}\pi\gamma R^*$$

1.2 模型参数的类型及标定

离散元仿真中需要的模型参数大致分为 3 类: 材料本征参数, 包括泊松比、剪切模量和物料密度, 这是材料自身的特性参数, 通常较为固定, 可通过试验或者文献获得; 材料接触参数, 包括碰撞恢复系数、静摩擦系数和滚动摩擦系数, 材质、形状、湿度等对这类参数影响较大, 通常需要通过试验测定或虚拟试验进行标定; 接触模型参数。某些特殊的模型还需要额外的模型参数。这些参数由于是模型化的, 很难与物料特性直接换算, 通常采用虚拟试验进行标定。

利用仿真软件进行一些基本的物料参数的虚拟试验(如堆积角试验), 不断调整模型参数, 使模拟出来的物料性质与真实情况相一致, 则认为该离散元模型参数是符合实际情况的。

1.2.1 堆积角物理试验 堆积角也称为休止角, 是表征颗粒物料流动、摩擦等特性的宏观参数。颗粒状物质被倾倒在水平面上堆积为锥体, 堆积物的表面与水平面所成内角即为堆积角, 其与颗粒密度、颗粒的表面积、颗粒形状以及该颗粒物质的摩擦系数相关, 因此堆积角试验经常被用作颗粒物料的离散元参数标定^[12-14]。本文采用文献[15]的方法进行土壤堆积角试验, 试验装置如图 1 所示。



图 1 堆积角测试仪

Fig.1 Testing instrument of repose angle

土壤样品采自华南农业大学试验田, 土壤质地为砂壤土, 土壤堆积密度为 $913\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 土壤含水率(w)为 16.2%, 土壤粒径分布为 0.02~2.00 mm, 砂粒质量占比为 65%。试验测得土壤堆积角为 40.45° 。

1.2.2 堆积角虚拟试验几何模型建立及初始参数设定 根据土壤堆积角的测量方法, 在 EDEM 2.6 软件中建立堆积角虚拟试验几何模型。模型由漏斗、接料盘及土壤颗粒组成(图 2)。模型中的漏斗顶部直径为 250 mm, 底部直径为 60 mm, 高为 300 mm, 接料盘直径为 300 mm。漏斗底部距离接料盘 400 mm。土壤颗粒几何模型采用圆球模型。实际测试中, 土壤粒径与物料堆积角呈正相关关系, 在虚拟仿真试验中, 土壤粒径的设定也对仿真结果及仿真时间具有非常显著的影响。粒径设置过小, 会大量增加仿真计算时间, 粒径设置过大, 又会影响仿真的真实性, 为平衡计算时间与仿真结果真实性, 一般在粒径设置时对其进行比例放大, 使物料堆积形状在宏观上与实测试验相符。本研究对土壤粒径与堆积角测量装置的物理尺寸均进行了比例放大, 将土壤颗粒半径设置为 10 mm, 即满足了仿真计算的性

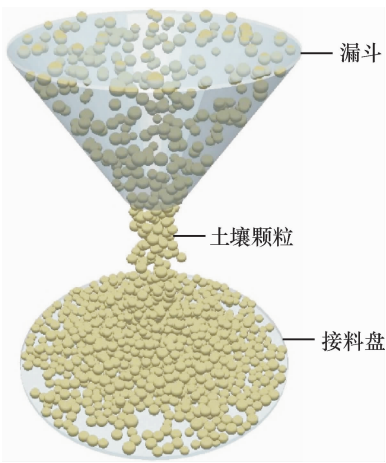


图 2 堆积角虚拟试验几何模型

Fig.2 A geometric model of virtual test of repose angle

1.2.3 材料本征参数的获得 材料本征参数通常较为固定, 可通过文献[6]获得, 将漏斗与底板的材质设置为玻璃, 土壤材料本征参数: 泊松比为 0.38; 剪切模量为 $1\times 10^6\text{ Pa}$; 密度为 $1\,850\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。玻璃材料本征参数: 泊松比为 0.25; 剪切模量为 $1\times 10^8\text{ Pa}$; 密度为 $2\,500\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

1.2.4 材料接触参数与接触模型参数的获得 EDEM 通用颗粒材料数据库(Generic EDEM material

model database,GEMM)由英国 DEM Solution 公司于 2015 年推出,是世界上首个离散元颗粒模型数据库,包含了数千种具有代表性的颗粒物料,如岩石、土壤、矿石等。将仿真规模、材料堆积密度和堆积角输入 GEMM 数据库,便可得到恢复系数、静摩擦系数、滚动摩擦系数与 JKR 表面能的参考值范围;将土壤堆积角试验中测得的土壤堆积密度与土壤堆积角输入 GEMM 数据库中,便可获得材料接触参数与接触模型参数的参考值范围。土壤-土壤接触参数与接触模型参数参考值范围如下:恢复系数为 0.15 ~ 0.75;静摩擦系数为 0.44 ~ 1.16;滚动摩擦系数为 0.05 ~0.25;JKR 表面能为 3.5 ~10.5 J · m⁻²。

1.3 参数标定试验设计

得到离散元接触参数与接触模型参数参考值范围后,采用 Box-Behnken 方法进行参数标定试验设计。试验因素为 JKR 表面能、恢复系数、静摩擦系数和滚动摩擦系数。试验指标为堆积角,利用软件的量角器工具,分别从锥面的 *x* 方向和 *y* 方向测量堆积角,取平均值。利用 design-expert 软件设计了 4 因素 3 水平共 29 个试验点进行响应面分析,29 个试验点分为 2 类:一类是析因点,共 24 个;一类是零点为区域的中心点,零点重复 5 次,用于估计试验的误差。因素及水平设置如表 1 所示。

表 1 堆积角仿真试验因素及水平

Tab. 1 Factors and levels of simulation test for repose angle				
变量	试验因素	低水平	中心水平	高水平
<i>x</i> ₁	JKR 表面能	3.50	7.00	10.50
<i>x</i> ₂	恢复系数	0.15	0.45	0.75
<i>x</i> ₃	静摩擦系数	0.44	0.80	1.16
<i>x</i> ₄	滚动摩擦系数	0.05	0.15	0.25

2 结果与分析

试验因素组合及仿真试验结果见表 2。

2.1 堆积角回归模型

对表 2 中的试验数据进行多元回归拟合分析,得到堆积角的回归模型:

$$y=37.6+2.53x_1-1.81x_2+0.47x_3+0.20x_4+1.31x_1x_2-0.46x_1x_3-3.22x_1x_4+1.88x_2x_3+3.80x_2x_4-0.16x_3x_4-0.34x_1^2-2.13x_2^2-0.90x_3^2+0.57x_4^2+3.26x_1^2x_2-1.10x_1^2x_3+1.19x_1^2x_4-1.08x_1x_2^2-2.14x_1x_3^2-1.30x_2^2x_3+1.38x_2^2x_4+2.58x_2x_3^2-0.79x_1^2x_2^2+1.19x_1^2x_3^2,$$

回归方程的决定系数 *R*²=0.998 4,校正决定系

<http://xuebao.scau.edu.cn>

表 2 堆积角仿真试验设计及结果

Tab. 2 Results and arrangement of simulation test for repose angle

试验 序号	JKR 表面能/ (J · m ⁻²)	碰撞恢 复系数	静摩擦 系数	动摩擦 系数	堆积角/ (°)
1	10.5	0.45	0.80	0.05	42.19
2	7.0	0.45	0.44	0.05	36.44
3	3.5	0.45	1.16	0.15	37.00
4	10.5	0.45	0.44	0.15	39.03
5	7.0	0.45	0.44	0.25	37.16
6	7.0	0.15	0.44	0.15	36.50
7	7.0	0.75	1.16	0.15	36.40
8	7.0	0.45	0.80	0.15	37.90
9	10.5	0.45	1.16	0.15	36.86
10	7.0	0.75	0.80	0.05	28.85
11	3.5	0.45	0.44	0.15	37.33
12	10.5	0.15	0.80	0.15	33.02
13	3.5	0.15	0.80	0.15	32.76
14	10.5	0.75	0.80	0.15	38.54
15	3.5	0.45	0.80	0.25	39.92
16	10.5	0.45	0.80	0.25	38.52
17	7.0	0.45	0.80	0.15	37.98
18	7.0	0.15	0.80	0.05	40.07
19	7.0	0.15	0.80	0.25	35.62
20	7.0	0.45	1.16	0.05	37.71
21	3.5	0.45	0.80	0.05	30.69
22	3.5	0.75	0.80	0.15	33.03
23	7.0	0.45	0.80	0.15	37.28
24	7.0	0.75	0.80	0.25	39.60
25	7.0	0.75	0.44	0.15	34.29
26	7.0	0.45	1.16	0.25	37.78
27	7.0	0.15	1.16	0.15	31.09
28	7.0	0.45	0.80	0.15	37.39
29	7.0	0.45	0.80	0.15	37.46

数 adj-*R*²=0.989 1,说明回归方程的拟合度很好,可以用该回归方程代替真实试验点结果进行分析。模型的方差分析结果见表 3,*P* <0.05 表示该因素对试验指标具有显著影响。由表 3 可知,在给定的试验因素参考值范围内,*x*₁、*x*₂、*x*₃ 对堆积角的影响极显著,影响顺序依次为 *x*₁、*x*₂、*x*₃; *x*₄ 对堆积角的影响不显著。试验因素的一次交互作用项中,*x*₃*x*₄ 对堆积角的影响不显著,其余均显著。试验因素的二次方项中,*x*₁² 对堆积角的影响不显著,其余均显著。试验因素的二次方与一次方项的交互作用均极显著。试验因素的二次方项交互作用中,*x*₁²*x*₂² 的影响不显著,*x*₁²*x*₃² 的影响显著。模型的 *P* =0.000 2 <0.05,说明该模型极显著,可以根据模型对堆积角进行预测。

表3 堆积角回归模型的方差分析

Tab.3 ANOVA of regression model of repose angle					
方差源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	257.11	24	10.71	107.00	0.000 2
x_1	25.50	1	25.50	254.72	<0.000 1
x_2	13.10	1	13.10	130.89	0.000 3
x_3	0.89	1	0.89	8.92	0.040 5
x_4	0.16	1	0.16	1.56	0.280 0
x_1x_2	6.89	1	6.89	68.82	0.001 2
x_1x_3	0.85	1	0.85	8.45	0.043 8
x_1x_4	41.60	1	41.60	415.53	<0.000 1
x_2x_3	14.14	1	14.14	141.21	0.000 3
x_2x_4	57.76	1	57.76	576.91	<0.000 1
x_3x_4	0.11	1	0.11	1.05	0.362 4
x_1^2	0.24	1	0.24	2.36	0.198 9
x_2^2	19.19	1	19.19	191.65	0.000 2
x_3^2	3.39	1	3.39	33.86	0.004 3
x_4^2	1.36	1	1.36	13.56	0.021 2
$x_1^2x_2$	21.22	1	21.22	211.97	0.000 1
$x_1^2x_3$	2.41	1	2.41	24.06	0.008 0
$x_1^2x_4$	2.84	1	2.84	28.41	0.006 0
$x_1x_2^2$	2.34	1	2.34	23.41	0.008 4
$x_1x_3^2$	9.12	1	9.12	91.06	0.000 7
$x_2^2x_3$	3.37	1	3.37	33.63	0.004 4
$x_2^2x_4$	3.80	1	3.80	37.90	0.003 5
$x_2x_3^2$	13.36	1	13.36	133.48	0.000 3
$x_1^2x_2^2$	0.62	1	0.62	6.23	0.067 0
$x_1^2x_3^2$	1.42	1	1.42	14.14	0.019 8
纯误差	0.40	4	0.10		
总和	257.51	28			

以上分析表明,JKR 表面能、恢复系数、静摩擦系数和动摩擦系数对堆积角的影响为二次多项式,且存在复杂的一次与二次交互作用,这也解释了黏性土壤离散元参数标定试验的复杂性,对于农业耕作中常见的黏性土壤来讲,在进行离散元仿真时,很难通过少量的虚拟试验来获得理想的标定结果。借助 GEMM 这样的数据库工具可缩小参数的标定范围,并结合适合的试验设计方法可以减少参数标定工作量,避免标定过程中参数调整的盲目性。

2.2 JKR 表面能对土壤颗粒堆积形状的影响

Hertz – Mindlin with JKR 模型中用 JKR 表面能表征颗粒接触的黏性,因此该参数对于黏性土壤的离散元仿真具有重要作用。当恢复系数、静摩擦系数与滚动摩擦系数都为中心水平时,不同 JKR 表面能形成的土壤颗粒堆积状态如图 3 所示。由图 3a 可见,当 JKR 表面能为 $3.5\text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$ 时,土壤颗粒间无显著的黏结现象,土壤颗粒的流动性较好,因此形成

的土壤颗粒堆积锥面较为平滑。由图 3b 可见,当 JKR 表面能为 $7.0\text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$ 时,部分土壤颗粒间出现黏结现象,若干颗粒黏结在一起,形成小块的颗粒聚集体,影响了土壤颗粒的流动性,因此土壤颗粒堆积锥面出现凸起与凹陷现象。由图 3c 可见,当 JKR 表面能为 $10.5\text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$ 时,土壤颗粒间的黏结现象更加明显,小块的颗粒聚集体黏附在一起形成了大块的颗粒聚集体,土壤颗粒的流动性很差,因此土壤颗粒堆积锥面产生更大的凹陷。

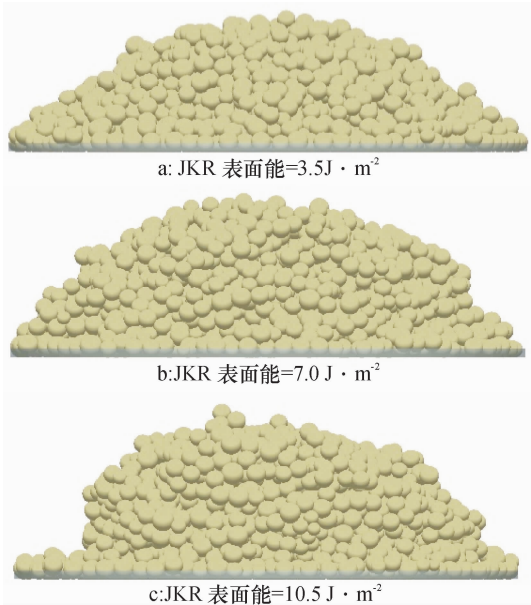


图3 土壤颗粒的堆积形态

Fig.3 Stack shape of soil particles

由以上分析可知,JKR 表面能反映了颗粒间黏结力的大小,对颗粒的流动性具有显著影响,从而决定了土壤颗粒的堆积形态。随着 JKR 表面能的增加,颗粒间黏结力增大,颗粒流动性下降,土壤颗粒的堆积高度和堆积角均升高。

2.3 参数优化与验证

利用 design-expert 的优化功能,在试验因素取值范围内以堆积角 40.45° 为目标对回归模型进行寻优,所得到优化解并非唯一解,而是若干组解。对这些优化解进行堆积角仿真试验验证,选取与土壤堆积角试验堆积形状近似的一组优化解,其中 JKR 表面能为 $7.91\text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$,恢复系数为 0.66,静摩擦系数为 0.83,动摩擦系数为 0.25。此优化解下的堆积角仿真结果为 39.73° 。优化解下的堆积角仿真试验结果与物理试验结果对比如图 4 所示。图 4 表明,通过对堆积角仿真试验获得的堆积角回归模型进行寻优,可得到一组优化参数,利用该优化参数获得的堆积角仿真试验结果与堆积角物理试验结果在堆积角度和堆积形状上都具有较高的相似性。这表明,对

于本试验中所使用的样品土壤,利用此优化参数进行堆积角仿真试验所模拟出来的物料性质与真实情况相一致,该参数可为样品土壤与触土部件间相互作用的进一步的离散元仿真提供依据。

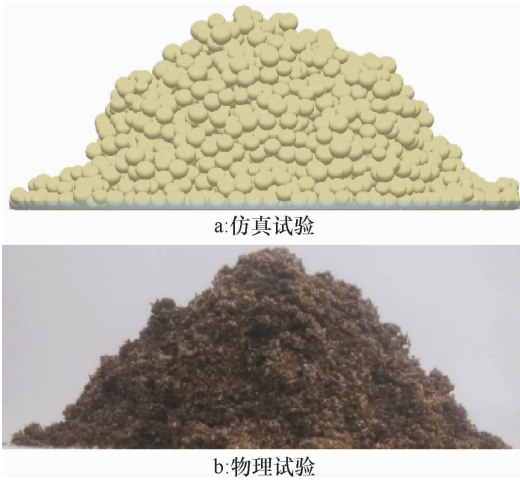


图4 优化解下的堆积角仿真试验与物理试验结果
Fig.4 Results of the physical test and simulation test under the optimal solution

3 结论

Hertz-Mindlin with JKR 模型在 Hertz 理论的基础上考虑了湿颗粒间黏结对颗粒运动规律的影响,以该模型为接触模型对黏性土壤进行堆积角仿真试验,实现了黏性土壤的离散元参数标定。JKR 表面能参数反映了颗粒间黏结力的大小,对颗粒的流动性具有显著影响,从而决定了土壤颗粒的堆积形态。随着 JKR 表面能的增加,颗粒间黏结力增大,颗粒流动性下降,土壤颗粒的堆积高度和堆积角均升高。

堆积角回归模型的方差分析表明:该模型极显著,可以根据模型对堆积角进行预测,试验因素对堆积角的影响为二次多项式,且存在复杂的一次与二次交互作用,因此很难通过少量虚拟试验获得理想的标定结果。借助 GEMM 数据库并结合 Box-Behnken 试验设计方法能够缩小参数标定范围,避免了标定试验的盲目性,提高了标定效率。堆积角仿真试验与物理试验在堆积角度和堆积形状上都具有较高的相似性,本研究参数可为样品土壤与触土部件间相互作用的进一步离散元仿真提供依据。

参考文献:

[1] 李博,陈军,黄玉祥. 机械与土壤相互作用的离散元

仿真研究进展[J]. 农机化研究, 2015, 37(1): 217-222.
[2] 徐中华, 王建华. 有限元法分析土壤切削问题的研究进展[J]. 农业机械学报, 2005, 36(1): 134-137.
[3] CUNDALL P A, STRACK O D. A discrete numerical model for granular assemblies [J]. Geotechnique, 1979, 29(1): 47-65.
[4] 方会敏, 姬长英, AHMED Ali Tagar, 等. 秸秆-土壤-旋耕刀系统中秸秆位移仿真分析[J]. 农业机械学报, 2016(1): 60-67.
[5] MAK J, CHEN Y, SADEK M A. Determining parameters of a discrete element model for soil-tool interaction [J]. Soil Tillage Res, 2012, 118: 117-122.
[6] CHEN Y, MUNKHOLM L J, NYORD T. A discrete element model for soil-sweep interaction in three different soils[J]. Soil Tillage Res, 2013, 126: 34-41.
[7] 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.
[8] KWORK C Y, BOLTON M D. Dem simulations of soil creep due to particle crushing [J]. Geotechnique, 2013, 63(16): 1365.
[9] 徐泳, 孙其诚, 张凌, 等. 颗粒离散元法研究进展[J]. 力学进展, 2003, 33(2): 251-260.
[10] JOHNSON K L, KENDALL K, ROBERTS A D. Surface energy and the contact of elastic solids [J]. Proc R Soc London: A, 1971, 324(1558): 301-313.
[11] DEM Solutions. EDEM 2. 6 theory reference guide [M]. Edinburgh: DEM Solutions, 2014.
[12] COETZEE C J, ELS D N J. Calibration of discrete element parameters and the modelling of silo discharge and bucket filling [J]. Comput Electron Agric, 2009, 65(2): 198-212.
[13] UCGUL 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]. Biosyst Eng, 2014, 121: 105-117.
[14] 冯俊小, 林佳, 李十中, 等. 秸秆固态发酵回转筒内颗粒混合状态离散元参数标定[J]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 208-213.
[15] 日用化学工业科学研究所. 表面活性剂、粉体和颗粒休止角的测量 GB11986—1989[S]. 北京: 国家技术监督局, 1989.

【责任编辑 霍欢】