

桑园土壤非等径颗粒离散元仿真模型参数标定与试验

宋占华^{1,2} 李浩¹ 闫银发^{1,2} 田富洋^{1,3} 李玉道^{1,4} 李法德^{1,2}

(1. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018; 2. 山东省园艺机械与装备重点实验室, 泰安 271018;
3. 山东省农业装备智能化工程实验室, 泰安 271018; 4. 农业生产机械装备国家工程研究中心, 泰安 271018)

摘要: 为获取土壤离散元仿真模型的土壤颗粒物理参数和接触参数, 本文采用试验与仿真相结合的方法, 以桑园土壤为例, 对土壤颗粒的接触参数进行了仿真标定。首先利用粉体仪、斜面仪、等应变直剪仪等, 分析了试验地不同深度土壤的粒径分布, 测量了试验地不同深度土壤休止角、滑动摩擦角、剪应力、内聚力、内摩擦角; 然后, 根据实测土壤粒径分布, 利用 EDEM 软件建立了非等直径土壤球形颗粒模型。在此基础上, 以土壤颗粒间及土壤与 65Mn 钢间的静摩擦因数、滚动摩擦因数、恢复系数为试验因素, 土壤休止角、土壤-65Mn 钢滑动摩擦角为目标值, 建立了基于中心组合试验设计 (CCD) 方案, 并利用 Design-Expert 软件对仿真试验结果进行了分析, 得到了仿真标定的土壤-土壤间静摩擦因数、滚动摩擦因数和恢复系数的最优值分别为 0.89、0.45 和 0.43; 标定的土壤-65Mn 钢间静摩擦因数、滚动摩擦因数和恢复系数的最优值分别为 1.15、0.05 和 0.4。利用以上标定的最优参数对桑园土壤进行了休止角与滑动摩擦角仿真试验, 试验结果表明, 休止角仿真值与试验值相对误差为 1.69%, 土壤-65Mn 钢的滑动摩擦角仿真值与试验值相对误差为 2.88%。在此基础上, 依据实测的土壤剪应力, 采用试错法, 以实测土壤内摩擦角为目标值, 优化标定了土壤-土壤颗粒 Hertz-Mindlin with Bonding 接触模型中的粘结参数, 标定法向粘结刚度、切向粘结刚度分别为 1×10^8 、 5×10^7 N/m³, 临界法向应力和临界切向应力均为 10 kPa, 接触半径为 1.1 倍颗粒半径, 直剪仿真得到内摩擦角为 30.24°, 仿真值与直剪试验内摩擦角平均值相对误差为 5.53%。本文提出的土壤颗粒建模方法、标定方法及其所标定的参数值, 可用于砂质壤土桑园耕作机械触土部件与土壤相互作用的离散元仿真分析及其结构优化。

关键词: 桑园土壤; 仿真模型; 离散元法; 参数标定; 非等直径球形颗粒

中图分类号: S223.92 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)06-0021-13 OSID: 

Calibration Method of Contact Characteristic Parameters of Soil in Mulberry Field Based on Unequal-diameter Particles DEM Theory

SONG Zhanhua^{1,2} LI Hao¹ YAN Yinfa^{1,2} TIAN Fuyang^{1,3} LI Yudao^{1,4} LI Fade^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China
2. Shandong Province Key Laboratory of Horticultural Machineries and Equipments, Taian 271018, China
3. Shandong Engineering Laboratory of Agricultural Equipment Intelligence, Taian 271018, China
4. National Engineering Research Center for Agricultural Production Machinery and Equipment, Taian 271018, China)

Abstract: To obtain the physical parameters and contact parameters of discrete element modelling (DEM) for simulating soil and interaction between soil and soil-engaging components in mulberry field, a method combining the experiments and the DEM simulations for calibrating the contact parameters of soil particles in mulberry field was proposed. Firstly, the particle size distribution and physical parameters of soil, such as the angle of repose of soil, sliding friction angle of soil and 65Mn steel, shear stress of soil, cohesion and angle of internal friction of the soils sampled at different depths in the mulberry field, were measured respectively with the powder instrument, inclinometer and equal strain direct shear apparatus. Then an unequal-diameter sphere particles model was built according to the measured particle size

收稿日期: 2022-03-18 修回日期: 2022-05-16

基金项目: 财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系项目 (CARS-18-ZJ0402) 和山东省现代农业产业技术体系建设项目 (SDAIT-18-06)

作者简介: 宋占华 (1984—), 男, 副教授, 博士, 主要从事现代农业机械设计 & 理论研究, E-mail: songzh6688@163.com

通信作者: 李法德 (1962—), 男, 教授, 博士, 主要从事智能农业装备研究, E-mail: lifade@sdau.edu.cn

distribution by using the EDEM. On this basis, the coefficient of the static friction, coefficient of rolling friction and coefficient of restitution between soil particles and between soil and 65Mn steel were used as test factors, and the angle of repose of soil and the sliding friction angle between the soil and 65Mn steel were used as target values to construct a central combined experimental design (CCD) scheme (three factors and five levels). Subsequently, by analyzing with the Design-Expert software, the simulated optimum values of the coefficient of static friction, coefficient of rolling friction and coefficient of restitution between soils were calibrated to be 0.89, 0.45 and 0.43, respectively; the simulated optimum values of coefficient of static friction, coefficient of rolling friction and coefficient of restitution between soil and 65Mn steel were calibrated to be 1.15, 0.05 and 0.4, respectively. The simulation experiments for verifying the values of the angle of repose of mulberry field soil and the sliding friction angle between the mulberry field soil and 65Mn steel were performed with the simulated parameters such as the coefficient of static friction, coefficient of rolling friction as well as coefficient of restitution. The simulating results showed that the relative errors between the simulating values and the experimental values for the angle of repose and for the sliding friction angle between the mulberry field soil and 65Mn steel were 1.69% and 2.88%, respectively. On the basis of these simulating results, using the soil shear stress gained from the experiments as the judgment standard, the bond parameters of the Hertz-Mindlin with the Bonding contact model for describing the particles of soils were calibrated with the trial-and-error method with measured soil internal friction angle as the target value. The normal bond stiffness and the tangential bond stiffness were calibrated to be $1 \times 10^8 \text{ N/m}^3$ and $5 \times 10^7 \text{ N/m}^3$, both of the critical normal stress and the critical tangential stress was calibrated to be 10 kPa, and the contact radius was 1.1 time of radius of the particles, the simulating angle of the internal friction was 30.24° , the relative error between the simulation value and the experimental value of the angle of internal friction was 5.53%.

Key words: soil in mulberry field; simulation model; discrete element method; parameter calibration; unequal-diameter sphere particles

0 引言

在蚕桑高效生产中,桑园管理占有重要地位。桑园管理中的松土、施肥等作业,由于没有适合的作业机具,目前主要靠人工或微耕机进行作业,劳动强度大,作业效率低,因此,目前急需适合桑树栽植模式的桑园松土施肥机械。在土壤耕作机械研发中,利用离散元仿真软件研究土壤在切割、翻垡、开沟等过程中的颗粒群离散及动态破裂、破碎和流动,有助于了解土壤与作业部件的相互作用过程,为作业部件的优化设计提供依据^[1-2]。

在农业土肥秸秆特性研究方面,目前已有研究者对颗粒肥料^[3]、散体厩肥^[4]、作物残茬等^[5-9]进行了离散元参数标定研究。运用离散元法进行机械触土部件作业仿真时,桑园土壤的本征参数包括密度、泊松比和弹性模量等,可通过查阅文献或试验测得;而土壤颗粒间及土壤和触土部件间的接触参数包括静摩擦因数、滚动摩擦因数和碰撞恢复系数,较难直接测得^[10]。目前,有研究学者应用试验与离散元仿真相结合的方法完成了沙土、砂壤土、黏壤土、黑土区玉米秸秆-土壤混料等的接触参数标定^[10-14]。

为节约建模和仿真运算时间,现有针对土壤颗粒离散元模型参数标定的研究,多采用放大尺寸的

等直径球形颗粒替代真实土壤,仿真所用颗粒直径为真实土壤颗粒直径的10~50倍,张锐等^[11]选用土壤颗粒半径为1 mm,方会敏^[15]选用土壤颗粒半径为5 mm,丁启朔等^[16]选用土壤颗粒半径为8 mm。然而,仿真所用土壤粒径对建模精度和建模效率有重要影响,采用过大的土壤颗粒易导致仿真结果的误差增加,反之,计算机的运算时间急剧增加^[14]。另外,采用等直径的球形土壤颗粒无法充分体现实际土壤的粒径分布对土壤-土壤颗粒和土壤-触土部件间相互作用的影响^[14,17]。因此,有研究学者采用非等直径颗粒对土壤模型和土壤-触土部件接触模型参数进行了标定,UCGUL等^[18]选定土壤颗粒直径范围为7.5~118 mm;SUN等^[19]选用的土壤颗粒半径范围为4~6 mm;BARR等^[20]选用土壤颗粒半径为2~3 mm。

综合考虑仿真准确性及计算机计算能力,本文拟在对真实土壤粒径及其分布分析的基础上,以非等直径球形颗粒作为土壤颗粒模型,基于试验与离散元仿真模拟相结合的方法,以国家和山东省蚕桑产业技术体系试验示范基地的桑园土壤为研究对象,触土部件为65Mn钢材料,提出一种通过试验与仿真模拟相结合标定桑园土壤颗粒接触参数的方法,以期桑园土壤与触土部件的离散元仿真参数设置提供参考。

1 土壤特性参数测量

1.1 试验材料

桑园土壤于 2019 年 3 月取自山东省泰安市岱岳区马庄镇朱家寨村国家和山东省蚕桑产业技术体系蚕试验示范基地 (35.96°N, 117.01°E)。桑园桑树品种为育 71-1, 树龄 6 年, 土壤类型为砂壤土, pH 值为 7.7, 年均降雨量 720 mm。

1.2 试验方法

土壤特性参数试验参照国标 GB/T 50123—1999《土工试验方法标准》进行。

1.2.1 基本物理参数测量方法

(1) 土壤粒径分布试验

在面积为 1.3 hm² 的桑园内, 采用五点法取桑园土层 0~400 mm 的土壤样本, 每个样点取样质量大于 2 kg, 取样后待土壤自然风干后, 用电子天平 (精度 0.001 g, JA5003A 型, 上海精天电子仪器有限公司) 分别称量各样点土壤样本 500 g, 准确至 0.1 g, 利用电动振筛机 (8411 型, 绍兴市上虞区道墟越州土工仪器厂) 和试验标准筛 (孔径分别为 2、1、0.5、0.1、0.05 mm) 进行筛分, 振筛时间为 10 min。振筛结束后, 称量各级土壤筛及底盘内的土壤质量, 准确至 0.1 g^[21]。

(2) 土壤密度及含水率试验方法

采用五点法确定取样位置, 每个取样点分 4 层取样, 每层深度为 100 mm。采用环刀法测定土壤密度。取样时将样点周围清理干净, 在取土环刀 (内径 50.46 mm, 高度 50 mm) 内壁均匀涂抹凡士林, 环刀刀口垂直于土壤平面放置, 将手柄置于环刀上方, 用锤子敲击手柄使环刀切入土壤。待环刀没于土壤平面, 清除环刀周围土壤, 将环刀轻轻取出, 用刮土刀刮掉多余土壤, 使环刀两端土壤平整。为防止土壤水分蒸发, 立即将清理好的土样放置在电子天平上称量, 称量后将土样放置在铝盒内, 采用干燥法测量土壤含水率。

1.2.2 土壤休止角测量

试验土样取自 3 个长×宽为 200 mm×200 mm 的随机样点, 自取样点土壤表面开始, 每向下 100 mm 作为 1 个取样层, 每个样点平均分为 4 层分别取样, 取土深度累计为 400 mm。每层试样取完后用密封袋分别密封并标号, 在实验室进行试验。通过漏斗法测量土壤从漏斗中漏出后所形成的锥体母线与水平面的夹角, 测量原理如图 1 所示, 图中 θ 即为休止角。

采用智能粉体特性测试仪 (BT-1001 型, 丹东百特仪器有限公司) 测定土壤休止角, 漏斗锥角为

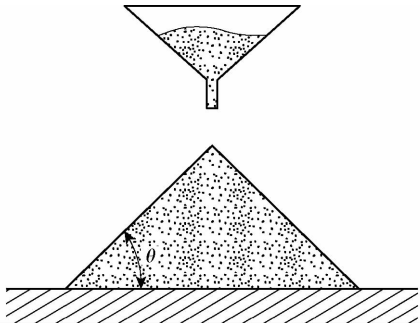


图 1 休止角测量原理

Fig. 1 Measuring principle of repose angle

120°, 流出孔内径为 13 mm, 流出口底沿与接料盘盘面距离为 80 mm, 料盘直径为 80 mm。如图 2 所示, 试验时, 启动智能粉体特性测试仪, 将土壤试样从仪器顶部通过筛网缓慢倒入漏斗中, 土壤逐渐从漏斗出料口流出, 在圆盘上堆积, 当接料盘下方托盘出现少量土壤时即停止向漏斗内添加土壤试样, 待漏斗内的土壤完全落下后, 按下智能粉体特性测试仪的完成按键, 智能粉体特性测试仪通过成像系统自动计算并输出土壤休止角。



图 2 土壤休止角测定

Fig. 2 Repose angle of soil measurement

1. 摄像头 2. 漏斗 3. 接料盘

1.2.3 土壤-65Mn 钢滑动摩擦角测量

土壤滑动摩擦角测量试验所用仪器为斜面仪 (自制), 摩擦面材料为农机具触土部件常用的 65Mn 钢。将所取土样在电子天平上称量 200 g, 准确至 0.1 g, 称量完毕的土样加入放置在水平摩擦面上的试样盒 (内部长×宽×高为 100 mm×100 mm×100 mm) 内, 将试样盒稍微抬离摩擦面, 确保试样盒壁面不接触摩擦面; 缓慢匀速转动手柄, 使摩擦面一端缓慢上升, 避免振动。如图 3 所示, 当土壤试样开始向下滑动时, 记录此时的摩擦面倾角, 即为土壤滑动摩擦角。

1.2.4 直剪试验及内摩擦角测量

采用五点法取土壤直剪试验试样, 利用取土环刀 (内径 61.8 mm, 高度 20 mm) 在每个样点深度 100、200 mm 分别取样一次, 将试样与环刀共同放入环刀盒并密封保存。利用等应变直剪仪 (ZJ-1 型, 南京土壤仪器厂) 进行直剪试验测定土壤的抗剪强



图3 土壤滑动摩擦角测定

Fig.3 Sliding friction angle of soil measurement

度 τ_s 、内摩擦角 φ 及内聚力 c 。土壤抗剪强度是指在外力作用下,土壤抵抗破坏的极限剪应力,通常可用库伦公式^[22]表示为

$$\tau_s = c + \sigma \tan \varphi$$

(1)

式中 σ ——法向压应力

利用等应变直剪仪分别在 σ 为100、200、300、400 kPa作用下,测出土壤剪切破坏时所需的剪应力 τ 。利用相应的 τ 与 σ 绘制 $\tau-\sigma$ 抗剪强度线。内摩擦角 φ 通过强度线的斜率 k 计算,即 $\varphi = \arctan k$ 。

图4为试样被剪切破坏后的形状。



图4 剪切破坏后的土壤样本

Fig.4 Soil sample after shear failure

1.3 试验结果

1.3.1 基本物理参数

经统计计算后,土壤粒径分布如表1所示。经测定,试验地土壤平均干密度为 $1.6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,平均湿基含水率为12.56%,平均湿密度为 $1.79 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,表2为土层0~400 mm的土壤密度及含水率。

表1 试验地土壤粒径分级及对应的质量分数

Tab.1 Size classification and mass fraction of soil

粒径/ mm	0 ~ 0.05	0.05 ~ 0.1	0.1 ~ 0.5	0.5 ~1	1 ~2	≥2
质量分 数/%	9.14 ± 3.55	4.67 ± 0.88	28.89 ± 2.11	26.57 ± 1.75	14.04 ± 1.57	16.70 ± 5.43

由表2可知,土壤含水率随着取土深度的增加

表2 土壤密度及含水率

Tab.2 Density and moisture of soil

土层深度/mm	湿密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	含水率/%	干密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
0 ~ 100	(1.74 ± 0.04) × 10 ^{3a}	(14.76 ± 2.24) ^a	(1.52 ± 0.03) × 10 ^{3a}
	(1.82 ± 0.09) × 10 ^{3a}	(12.64 ± 1.63) ^a	(1.62 ± 0.06) × 10 ^{3b}
100 ~ 200	(1.81 ± 0.11) × 10 ^{3a}	(11.62 ± 2.80) ^a	(1.62 ± 0.08) × 10 ^{3b}
	(1.80 ± 0.12) × 10 ^{3a}	(11.21 ± 4.75) ^a	(1.62 ± 0.05) × 10 ^{3b}
200 ~ 300			
300 ~ 400			

注:表中数据为算术平均值±标准差,同一列不同数据后的相同字母表示没有显著差异($P > 0.05$),不同字母表示具有显著差异($P < 0.05$)。

而减小,这可能是因为试验地进行喷灌作业,导致土壤表层含水率增加,而水分未渗透到深层土壤造成的。土壤干密度随深度变化不明显,除土层0~100 mm内土壤干密度较小,土层100~400 mm内土壤干密度基本相同,这可能是因为桑园耕整作业导致表层土壤干密度减小。

1.3.2 休止角和滑动摩擦角

土壤休止角和滑动摩擦角测定结果如图5所示,在土层0~400 mm中,土壤休止角和土壤与65Mn钢之间的滑动摩擦角随取土深度的增加而增大,且在土层300~400 mm内较土层0~300 mm内增加明显,原因是土层300~400 mm包括犁底层中下部和心土层的土壤,土壤粘性更大,颗粒细而密实,颗粒间更易产生粘结作用而不易碾散,导致土壤休止角和土壤与65Mn钢之间的滑动摩擦角较大。

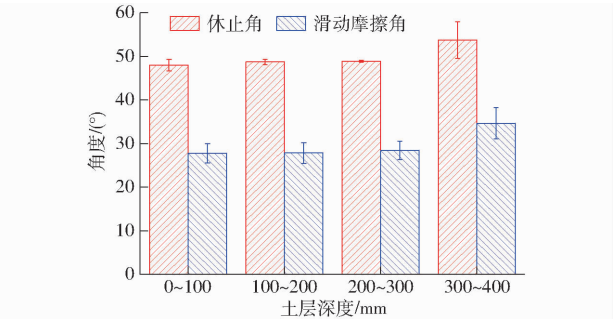


图5 土壤休止角和滑动摩擦角

Fig.5 Repose angle and sliding friction angle of soil

1.3.3 直剪试验及内摩擦角

土壤直剪试验中,直剪仪所测试样的剪应力 τ 为

$$\tau = C_0 R$$

(2)

式中 C_0 ——量力环标定系数,取154.362 kPa/mm
 R ——量力环测微表最大读数,mm

根据对应的剪应力 τ 和法向压应力 σ 绘制抗剪强度曲线,并求出内聚力 c 和内摩擦角 φ 。因试验地耕整深度普遍在土层0~200 mm内,因此只对

土层 0 ~ 200 mm 进行了直剪试验。计算得到土壤的剪应力如表 3 所示。

表 3 剪应力测试结果

Tab. 3 Testing result of shearing stress

法向压应力 σ/kPa	土层深度/ mm	量力环测微表 最大读数/mm	剪应力 τ/kPa
100	100	0.43	66.376
	200	0.45	69.463
200	100	0.80	123.490
	200	0.87	134.295
300	100	1.17	180.604
	200	1.22	188.322
400	100	1.64	253.154
	200	1.70	262.415

依据表 3 数据,绘制土壤抗剪强度曲线如图 6 所示,土层 100 mm 的内聚力和内摩擦角分别为 1.544 kPa 和 31.69°,土层 200 mm 的内聚力和内摩擦角分别为 5.403 kPa 和 32.33°。造成差异的原因是试验地桑园长时间浅耕,导致土层 200 mm 的土壤因未得到充分耕作更加坚实,土壤密度大于土层 100 mm,其内聚力和内摩擦角更大。

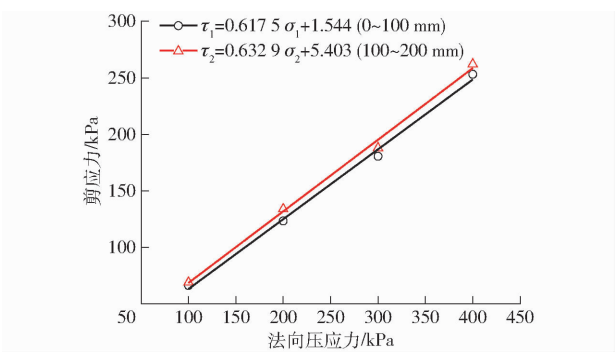


图 6 土壤剪应力与法向压应力关系

Fig. 6 Relationship between shear stress and normal stress

2 土壤接触参数仿真标定

采用试验测试与离散元仿真相结合的方法对桑园土壤进行仿真参数标定及优化,以实测的休止角、滑动摩擦角和抗剪强度为响应值,基于中心组合试验设计(Central composite design, CCD)方案,利用 Design-Expert 软件分析各因素的编码值和试验数据,利用响应面法建立土壤休止角与试验因素编码值之间的关系;对各项进行方差分析和回归系数显著性检验,分析仿真参数对仿真结果的影响,确定桑园土壤离散元仿真的最优参数。

2.1 土壤仿真离散元模型建立

2.1.1 土壤颗粒模型

目前,用于耕作方面的离散元仿真研究,其土壤颗粒尺寸普遍大于土壤真实尺寸^[18-20]。综合考虑

仿真准确性及计算机计算能力,本文选用非等直径球形颗粒作为土壤颗粒模型,各粒径范围的土壤颗粒质量分数按照实际土壤颗粒质量分数的平均值,根据土壤粒径分级及质量分数,选定仿真所用土壤颗粒直径(取仿真粒径为实际土壤颗粒算术平均粒径的 10 倍^[18])及对应的质量分数如表 4 所示。

表 4 EDEM 土壤颗粒直径分布

Tab. 4 Distribution of soil particle diameter in EDEM

实际粒径/mm	仿真颗粒直径/mm	质量分数/%
0 ~ 0.1	1	13.81
0.1 ~ 0.5	3	28.89
0.5 ~ 1.0	7.5	26.57
1.0 ~ 2.0	15	14.04
≥ 2.0	20	16.72

2.1.2 接触模型

利用 EDEM 软件模拟触土部件作业的仿真研究,主要包括土壤颗粒间及土壤颗粒与触土部件间的接触与碰撞,其中,颗粒间的接触模型是仿真分析的基础。EDEM 软件内置接触模型主要有:Hertz - Mindlin(no slip)模型、Hertz - Mindlin with Bonding 模型、JKR 模型、Linear Cohesion 模型、Linear Spring 模型、Moving Plane 模型等。

因不考虑传热及磨损问题,选用 Hertz - Mindlin(no slip)模型作为离散元仿真中土壤颗粒与 65Mn 钢的接触模型^[23-24]。此模型由颗粒间的法向力模型及切向力模型共同组成,其中,法向力分量基于 Hertzian 接触理论,切向力模型基于 Mindlin 的研究工作,切向摩擦力遵守库仑摩擦定律,滚动摩擦力由接触独立定向恒转矩模型实现^[25-28]。

设两个接触球体颗粒的颗粒半径为 R_i 、 R_j ,法向重叠量为 δ_n ,则颗粒间接触法向力 F_n 为

$$F_n = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^*} \delta_n^{\frac{3}{2}} \tag{3}$$

其中
$$E^* = \frac{E_i E_j}{E_j (1 - \mu_i^2) + E_i (1 - \mu_j^2)} \tag{4}$$

$$R^* = \frac{R_i R_j}{R_i + R_j} \tag{5}$$

式中 E^* ——土壤颗粒的当量杨氏模量,Pa
 R^* ——土壤颗粒的当量半径,m
 E_i 、 E_j ——第 i 、 j 颗粒的弹性模量,Pa
 μ_i 、 μ_j ——第 i 、 j 颗粒的泊松比

颗粒间的切向力 F_τ 由切向重叠量 δ_τ 和切向刚度 S_τ 确定,其表达式为

$$F_\tau = -\delta_\tau S_\tau \tag{6}$$

其中
$$S_\tau = 8 G^* \sqrt{R^* \delta_n} \tag{7}$$

式中 G^* ——当量剪切模量,Pa

在离散元仿真中,颗粒间的滚动摩擦一般通过在接触表面施加一个力矩来表示,其表达式为

$$T = -\mu_r F_n R_i \omega_i \tag{8}$$

式中 μ_r ——土壤颗粒间的滚动摩擦因数

ω_i ——颗粒 i 在接触点处的单位角速度,rad/s

由于土壤颗粒间存在一定的粘聚力,故在仿真时选用 Hertz - Mindlin with Bonding 模型作为土壤颗粒间的接触模型,该模型通过“粘结键”将两个颗粒粘结在一起,这种粘结作用可以承受一定的法向力和切向力,传递作用力和力矩。两颗粒在设定的粘结时刻之前,其接触模型仍为标准的 Hertz - Mindlin (no slip) 模型。粘结作用产生后,土壤颗粒的粘结力 F_n 、 F_τ 和力矩 M_n 、 M_τ 随着时间步从零开始增加。即

$$\begin{cases} \Delta F_n = -v_n S_n A \Delta t \\ \Delta F_\tau = -v_\tau S_\tau A \Delta t \\ \Delta M_n = -\omega_n S_n J \Delta t \\ \Delta M_\tau = -\omega_\tau S_\tau \frac{J}{2} \Delta t \\ A = \pi R_b^2 \\ J = \frac{1}{2} \pi R_b^4 \end{cases} \tag{9}$$

式中 A ——土壤颗粒间的接触区域面积,m²

R_b ——土壤颗粒间的粘结半径,m

J ——土壤颗粒的截面极惯性矩,m⁴

S_n ——粘结颗粒法向刚度,N/m

v_n 、 v_τ ——颗粒运动速度法向、切向分量,m/s

ω_n 、 ω_τ ——颗粒角速度法向、切向分量,rad/s

Δt ——时间步长,s

当外界作用力超过某个预设值时,粘结被破坏。定义法向临界应力 $\sigma_{\max}$ 和切向临界应力 $\tau_{\max}$ 为

$$\sigma_{\max} = \frac{-F_n}{A} + \frac{2M_\tau}{J} R_b \tag{10}$$

$$\tau_{\max} = \frac{-F_\tau}{A} + \frac{M_n}{J} R_b \tag{11}$$

2.1.3 仿真参数

土壤模型参数对仿真结果有重要影响,因此,准确设置土壤模型相关参数尤为重要。所需参数包括材料参数和接触参数。

材料参数主要包括土壤、65Mn 钢的密度、泊松比、剪切模量等,此类参数主要通过试验测定及参考相关文献中的参数获得。据相关研究,规则球体的随机填充率为 0.56 ~ 0.64^[29]。桑园土壤颗粒密度采用实测湿密度平均值,仿真中颗粒采用随机生成方式,仿真中土壤颗粒密度为 1.79×10^3 kg/m³,土壤和 65Mn 钢的本征参数如表 5 所示。土壤颗粒接

触半径为 1.1 倍颗粒半径^[30]。

表 5 土壤与 65Mn 钢的本征参数

Tab.5 Intrinsic parameters of soil and 65Mn steel			
材料	密度/(kg·m ⁻³)	泊松比	剪切模量/Pa
土壤	1.790×10^3	0.3 ^[31]	1.15×10^{11}
65Mn 钢	7.865×10^3	0.3 ^[32]	7.90×10^{10} ^[33]

接触参数包括土壤-土壤、土壤-65Mn 钢间的静摩擦因数、滚动摩擦因数及恢复系数等。本文利用试验测量与仿真标定相结合的方法获得。根据相关研究^[12,23,33-35],结合仿真预试验,确定土壤-土壤、土壤-65Mn 钢间的静摩擦因数、滚动摩擦因数及恢复系数,如表 6 所示。

表 6 离散元模拟接触参数范围

Tab.6 DEM simulation contact parameters range			
材料	恢复系数	静摩擦因数	滚动摩擦因数
土壤-土壤	0.35 ~ 0.80 ^[34]	0.36 ~ 1.16 ^[12,33]	0.20 ~ 0.70 ^[34]
土壤-65Mn 钢	0.20 ~ 0.50 ^[12]	0.50 ~ 1.20 ^[12]	0.05 ~ 0.40 ^[12]

采用 EDEM 软件进行仿真(计算机 CPU 为 Intel (R) Core(TM) i9 - 9900KF CPU@3.60 GHz,机带 RAM 为 64 GB,显卡为 GeForce RTX 2080Ti,显存 11 GB),通过仿真测定土壤颗粒休止角来确定土壤-土壤间的静摩擦因数、滚动摩擦因数及恢复系数;通过仿真测定土壤与 65Mn 钢滑动摩擦角来确定土壤-65Mn 钢间的静摩擦因数、滚动摩擦因数及恢复系数。设置固定时间步长为 Rayleigh 时间步长的 30%,计算时间步长为 0.05 s。

2.2 仿真标定试验

2.2.1 土壤颗粒休止角仿真试验

因仿真所用土壤颗粒尺寸大于实际土壤尺寸,结合预仿真试验,确定仿真试验中所使用的漏斗与接料盘的尺寸和相对位置如图 7 所示。

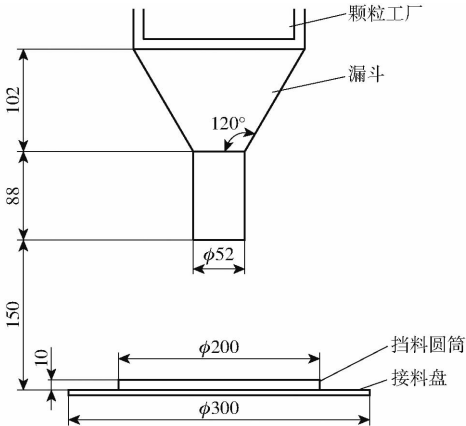


图 7 休止角仿真试验仪器尺寸

Fig.7 Dimensions of instrument used for simulation test of repose angle

在进行休止角仿真试验前,还无法确定土壤与 65Mn 钢之间(土壤-65Mn)的接触参数,故在接料盘上添加 $\phi 200\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 的挡料圆筒限制底层土壤的水平移动,消除土壤与 65Mn 间接触参数的影响^[18]。仿真时,在漏斗上方设置一 $\phi 150\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ 的圆柱形颗粒工厂,所生成的仿真颗粒直径及其质量分数如表 4 所示。每组试验以速率 1 kg/s 生成 2 kg 仿真颗粒。仿真颗粒经漏斗流出口落向接料盘,待全部颗粒落完并形成稳定的物料堆后结束仿真。并在 EDEM 中保存其在 X 轴方向和 Z 轴方向的正视图,将保存后的正视图导入到 Auto CAD 中,如图 8 所示,在水平方向和锥体母线方向分别画一条直线,分别量取角 Y_{1i} 、 Y_{2i} 、 Y_{3i} 、 Y_{4i} ,计算取其平均值作为休止角 Y_{ai} ,计算式为

$$Y_{ai} = \frac{Y_{1i} + Y_{2i} + Y_{3i} + Y_{4i}}{4}$$

(12)

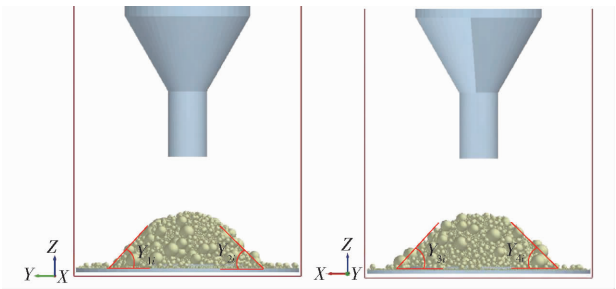


图 8 仿真试验土壤休止角测量

Fig. 8 Repose angle of soil measured in simulation experiment

为探究土壤-土壤间接触参数与土壤休止角的关系,以土壤-土壤间静摩擦因数 x_1 、滚动摩擦因数 x_2 及恢复系数 x_3 为因素,采用中心组合试验设计方法,进行三因素五水平仿真模拟试验,根据表 6 的参数范围,得到基于中心组合试验因素编码如表 7 所示。

表 7 休止角仿真试验因素编码

Tab. 7 Factors and codes of repose angle simulation

编码	因素		
	土壤颗粒间静摩擦因数 x_1	土壤颗粒间滚动摩擦因数 x_2	土壤颗粒间恢复系数 x_3
-1.682	0.36	0.20	0.35
-1	0.52	0.30	0.44
0	0.76	0.45	0.57
1	1.00	0.60	0.71
1.682	1.16	0.70	0.80

在土壤休止角仿真试验中,因添加了挡料圆筒,土壤-65Mn 钢的接触参数不影响休止角。取表 6 中各参数范围的中位数,即土壤-65Mn 钢间的恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数分别为 0.35、

0.85、0.23 进行休止角仿真中心组合试验。所需的土壤-65Mn 钢准确参数通过后续的滑动摩擦角仿真试验进行标定。

2.2.2 土壤-65Mn 钢间滑动摩擦角仿真试验

如图 9 所示,在土壤-65Mn 钢间滑动摩擦角仿真试验中,设置长为 500 mm ,宽为 $1\,000\text{ mm}$ 的矩形倾斜面,在距离倾斜面正上方 100 mm 处设置长为 100 mm ,宽为 100 mm 的长方形颗粒工厂,颗粒工厂下设置 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 的无盖无底方盒作为试样盒,每组试验生成 0.8 kg 颗粒。待颗粒生成完毕,通过给试样盒添加力控制器赋予试样盒一个极小的质量($1 \times 10^{-5}\text{ kg}$,其重力和惯性力可忽略不计)。因 EDEM 中各部件间无相互作用,方盒可在颗粒的力的作用下随颗粒沿摩擦面移动,即方盒只起到包围颗粒的作用,而不会影响颗粒沿摩擦面滑动。倾斜面以转动速度 $2(^{\circ})/\text{s}$ 围绕斜面的定轴转动,直至生成的土壤颗粒在倾斜面上开始滑动,仿真结束^[23-24]。在 EDEM 软件 Analyst 模块下的 Data Browser 中读取摩擦面的倾角如图 10 所示。

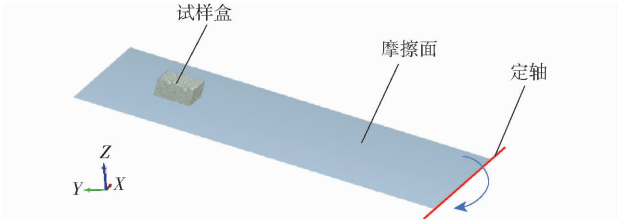


图 9 土壤-65Mn 钢间滑动摩擦角仿真试验

Fig. 9 Simulation test of sliding friction angle between soil and 65Mn

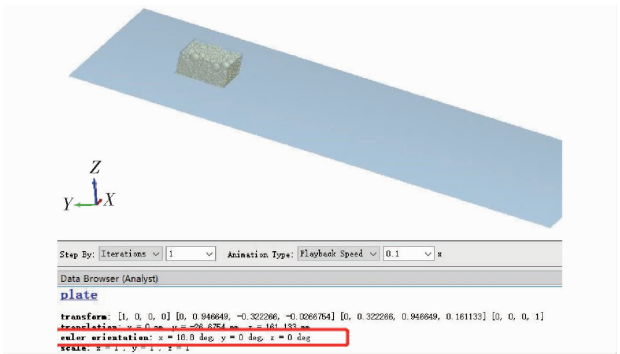


图 10 滑动摩擦角的读取

Fig. 10 Sliding friction angle measurement

为探究土壤-65Mn 钢间接触参数与土壤-65Mn 钢间滑动摩擦角的关系,以土壤-65Mn 钢间静摩擦因数 x_4 、滚动摩擦因数 x_5 及恢复系数 x_6 为因素,采用中心组合试验设计方法,进行三因素五水平仿真模拟试验,基于中心组合试验设计(CCD)编码如表 8 所示。

2.2.3 土壤直剪仿真试验

Hertz-Mindlin with Bonding 接触模型中的粘结

表 8 滑动摩擦角仿真试验因素编码
Tab.8 Factors and codes of sliding friction

编码	angle simulation		
	因素		
	土壤-65Mn 钢 静摩擦因数 x_4	土壤-65Mn 钢 滚动摩擦因数 x_5	土壤-65Mn 钢 恢复系数 x_6
-1.682	0.50	0.05	0.20
-1	0.64	0.12	0.26
0	0.85	0.23	0.35
1	1.06	0.33	0.44
1.682	1.20	0.40	0.50

参数主要包括法向刚度 S_n 、切向刚度 S_τ 、临界法向应力 $\sigma_{\max}$ 、临界切向应力 $\tau_{\max}$ 及粘结半径 R_b 等。此类粘结参数主要通过直剪仿真试验获得。根据已有研究,颗粒行为在此模型下对粘结刚度参数的变化不敏感^[10],取法向粘结刚度为 $1 \times 10^8 \text{ N/m}^3$,取切向粘结刚度为 $5 \times 10^7 \text{ N/m}^{3[36-37]}$ 。取 $\sigma_{\max} = \tau_{\max}$ 以减少标定参数^[31-32],颗粒接触半径取 1.1 倍颗粒半径。临界应力是判断粘结键是否断裂的重要指标,其取值与粘结强度密切相关,将直接影响仿真中土壤的破碎程度及作业阻力。以土壤直剪试验土层 0 ~ 200 mm 的内摩擦角结果为标准,校核模型中临界应力的取值。在其他粘结参数确定的情况下,调整临界应力进行土壤直剪仿真模拟试验,得到不同临界应力下的土壤抗剪强度。参照土壤直剪试验的结果进行误差分析,选定合适的临界应力。

根据直剪试验原理,建立仿真模型如图 11 所示,上、下剪切盒尺寸为 $\phi 100 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 。下剪切盒上部开口,下部封闭,上剪切盒上下均开口。土壤模型的垂直载荷通过对上剪切盒中的压力板施加垂直向下的移动速度来添加,分析得到土壤颗粒与压力板在垂直方向的接触力即为直剪仿真试验的垂直载荷^[10,38-39]。

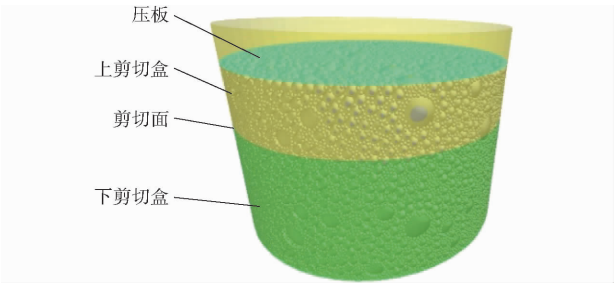


图 11 土壤直剪仿真试验
Fig.11 Soil direct shear simulation test

仿真中,下剪切盒以水平速度 2 mm/s 剪切土壤,当下剪切盒水平位移达到 10 mm 时,即停止仿真^[10,14,38-40]。利用 EDEM 软件后处理功能,导出仿真过程中下剪切盒所受水平力 F_x ,根据公式

$$\tau = \frac{F_x}{S}$$

(13)

计算得到剪应力-位移曲线如图 12 所示。取其峰值作为土壤剪损时的应力 $\tau_{\max}$ 。

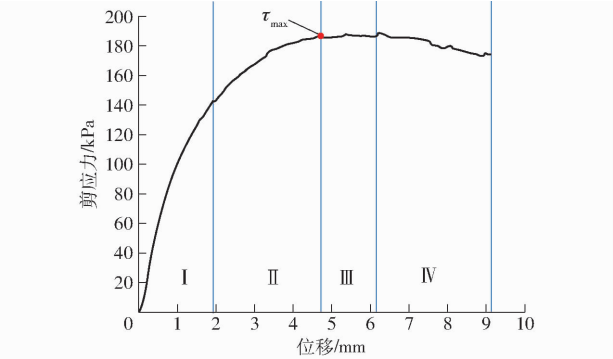


图 12 土壤剪应力-位移曲线
Fig.12 Shear stress - displacement curve of soil

2.3 仿真试验

2.3.1 土壤休止角仿真试验

以各因素编码值 X_1 、 X_2 、 X_3 为自变量,模拟仿真所测得的土壤休止角 Y_α 为目标值,试验设计与结果如表 9 所示。

表 9 土壤休止角仿真试验设计与结果
Tab.9 Simulation test design and result of angle of repose of soil-soil

试验 序号	因素			休止角 $Y_\alpha / (^\circ)$
	静摩擦 因数 X_1	滚动摩擦 因数 X_2	恢复系数 X_3	
1	-1	-1	-1	44.37
2	-1	-1	1	43.10
3	1	-1	-1	41.29
4	1	-1	1	44.11
5	-1	1	-1	44.83
6	-1	1	1	44.97
7	1	1	-1	50.91
8	1	1	1	50.94
9	0	0	-1.682	47.73
10	0	0	-1.682	47.59
11	-1.682	0	0	38.88
12	1.682	0	0	50.63
13	0	-1.682	0	38.90
14	0	1.682	0	52.17
15	0	0	0	47.37
16	0	0	0	47.95
17	0	0	0	50.49
18	0	0	0	48.02
19	0	0	0	48.82
20	0	0	0	48.06

利用 Design-Expert 软件分析试验结果,依据表 7、9,利用响应面法建立土壤休止角与试验因素编码值之间的关系模型为

$$Y_{\alpha}=48.46+2.18X_1+3.01X_2+0.11X_3+1.76X_1X_2+0.50X_1X_3-0.17X_2X_3-1.36X_1^2-1.09X_2^2-0.34X_3^2$$

(14)

对各项进行方差分析和回归系数显著性检验,结果如表 10 所示。由表 10 可知,建立的土壤休止角与试验因素编码值之间的关系模型是极显著的 ($P<0.01$),失拟项不显著 ($P>0.05$),表明模型合理,信噪比为 9.76,表明模型是较优的,可以用来进行预测。 X_1 、 X_2 对土壤休止角的影响极显著, X_1X_2 、 X_1^2 、 X_2^2 具有显著影响,其余各项均不显著。从单因素分析来看,各因素对土壤休止角的影响由大到小为: X_2 、 X_1 、 X_3 。交互作用下,交互作用项对土壤休止角的影响由大到小为 X_1X_2 、 X_1X_3 、 X_2X_3 。

表 10 土壤休止角仿真试验响应面方差分析结果

Tab.10 Variance analysis of response surface of simulation test of angle of repose of soil

来源	平方和	自由度	均方	<i>F</i>	<i>P</i>
模型	255.89	9	28.43	8.35	0.0013**
X_1	64.68	1	64.68	19.00	0.0014**
X_2	123.76	1	123.76	36.36	0.0001**
X_3	0.15	1	0.15	0.04	0.8365
X_1X_2	24.78	1	24.78	7.28	0.0224*
X_1X_3	1.96	1	1.96	0.58	0.4655
X_2X_3	0.24	1	0.24	0.07	0.7939
X_1^2	26.81	1	26.81	7.88	0.0186*
X_2^2	17.18	1	17.18	5.05	0.0485*
X_3^2	1.64	1	1.64	0.48	0.5040
残差	34.04	10	3.40		
失拟项	27.99	5	5.60	4.62	0.0591
纯误差	6.05	5	1.21		
总和	289.93	19			

注：**表示极显著($P<0.01$),*表示显著($P<0.05$)。下同。

由于本仿真主要研究土层深度 0~200 mm 内触土部件与土壤的相互作用情况,因此,对土层 0~200 mm 内土壤休止角进行优化求解。以实际测量的土壤休止角为优化目标,土壤休止角在土层 0~100 mm 相对于土层 100~200 mm 仅相差 1.52%,因此取两者平均值 48.35°作为优化目标,代入式(14),并进行优化求解,得到若干组优化解,经验证,选取一组最优解为:土壤颗粒间静摩擦因数 0.89,土壤颗粒间滚动摩擦因数 0.45,土壤颗粒间恢复系数 0.43。将得到的最优解作为参数条件进行 3 次重复仿真试验,得到土壤休止角分别为 48.21°、46.83°、47.56°,均值为 47.53°,标准偏差为 0.69°,与实测休止角 48.35°相对误差为 1.69%,仿真值与试验值一致。

2.3.2 土壤-65Mn 钢间滑动摩擦角仿真试验

以各因素编码值 X_4 、 X_5 、 X_6 为自变量,模拟仿真

所测得的土壤-65Mn 钢间滑动摩擦角 Y_{β} 为目标值,试验设计与结果如表 11 所示。

表 11 土壤-65Mn 钢间滑动摩擦角仿真试验设计与结果

Tab.11 Simulation test design and result of sliding friction angle of soil - 65Mn

试验 序号	因素			滑动摩擦角 $Y_{\beta}/$ (°)
	静摩擦 因数 X_4	滚动摩擦 因数 X_5	恢复系数 X_6	
1	-1	-1	-1	20.1
2	-1	-1	1	22.4
3	1	-1	-1	25.3
4	1	-1	1	26.3
5	-1	1	-1	18.8
6	-1	1	1	21.0
7	1	1	-1	24.1
8	1	1	1	24.9
9	0	0	-1.682	23.2
10	0	0	1.682	24.7
11	-1.682	0	0	15.5
12	1.682	0	0	26.9
13	0	-1.682	0	24.7
14	0	1.682	0	24.0
15	0	0	0	24.3
16	0	0	0	23.9
17	0	0	0	23.3
18	0	0	0	23.8
19	0	0	0	24.1
20	0	0	0	23.4

利用 Design-Expert 软件分析试验结果,依据表 8 和表 11,利用响应面法建立土壤-65Mn 钢间滑动摩擦角与试验因素编码值之间的关系模型为

$$Y_{\beta}=24.53+2.69X_4-0.51X_5+0.67X_6+0.025X_4X_5-0.35X_4X_6-0.05X_5X_6-0.86X_4^2-0.085X_5^2-0.24X_6^2$$

(15)

对各项进行方差分析和回归系数显著性检验,结果如表 12 所示。由表 12 可知,建立的土壤-65Mn 钢间滑动摩擦角与试验因素编码值之间的关系模型极显著 ($P<0.01$),失拟项不显著 ($P>0.05$),表明模型合理,信噪比为 16.299,表明模型是较优的可以用来进行预测。模型中, X_4 、 X_4^2 对土壤-65Mn 钢间滑动摩擦角的影响极显著, X_6 具有显著影响,其余各项影响均不显著。从单因素分析来看,各因素对土壤-65Mn 钢间滑动摩擦角的影响由大到小为: X_4 、 X_6 、 X_5 。交互作用下,交互作用项对土壤-65Mn 钢间滑动摩擦角的影响由大到小为: X_4X_6 、 X_5X_6 、 X_4X_5 。

对土层 0~200 mm 内土壤-65Mn 钢间滑动摩擦角进行优化求解。以实际测量的土壤-65Mn 钢

表 12 土壤-65Mn 钢间滑动摩擦角仿真试验响应面方差分析

Tab.12 Variance analysis of response surface of simulation test of sliding friction angle of soil - 65Mn					
来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	120.40	9	13.38	12.90	0.000 2 **
X_4	98.67	1	98.67	95.17	<0.000 1 **
X_5	3.53	1	3.53	3.41	0.094 7
X_6	6.09	1	6.09	5.88	0.035 8 *
X_4X_5	0.005	1	0.005	0.004 822	0.946 0
X_4X_6	0.98	1	0.98	0.95	0.353 9
X_5X_6	0.02	1	0.02	0.019	0.892 3
X_4^2	10.73	1	10.73	10.35	0.009 2 **
X_5^2	0.10	1	0.10	0.10	0.757 4
X_6^2	0.86	1	0.86	0.83	0.383 9
残差	10.37	10	1.04		
失拟项	7.76	5	1.55	2.98	0.128 3
纯误差	2.61	5	0.52		
总和	130.77	19			

间滑动摩擦角为优化目标,土壤-65Mn 钢间滑动摩擦角在土层 0 ~ 100 mm 相对于土层 100 ~ 200 mm

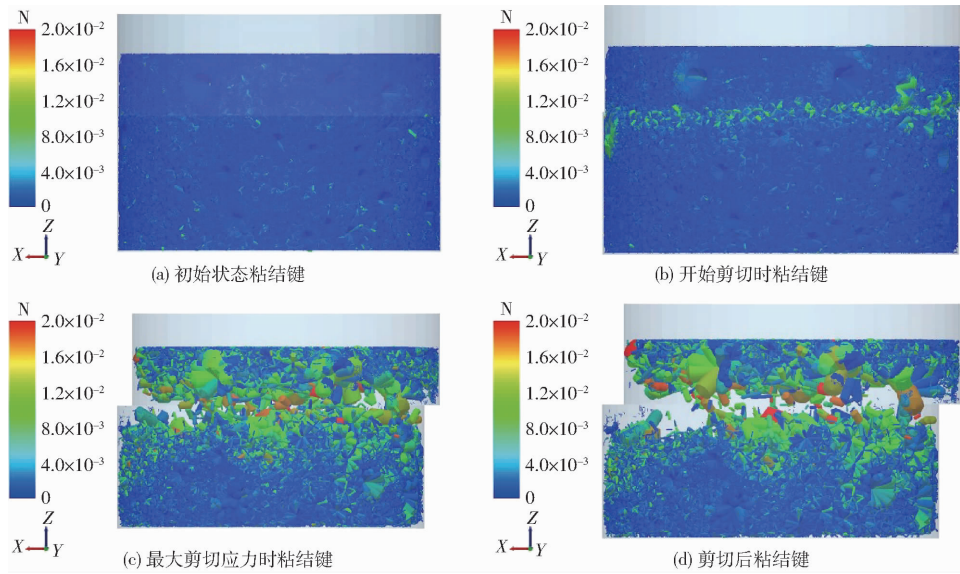


图 13 剪切仿真过程中粘结键及其受力云图

Fig.13 Bond and its force nephograms in shear simulation

图 13a 为初始状态的粘结键,此时由于压板垂直向下的压力,颗粒间的粘结键受到较小的力,各处受力均匀。图 13b 为下剪切盒开始移动,但土壤样本未发生剪切破坏时粘结键的受力情况,由图可知,剪切面处的粘结键受力较大,由于剪切力未超过粘结键的断裂强度,粘结键未发生断裂,试样整体呈现弹性体特征,对应图 12 中的 I 段,此时剪切应力与剪切盒位移成线性关系;图 13c 为剪切应力达到最大时的粘结键受力和断裂情况,此时剪切面附近的粘结键几乎全部断裂,对应图 12 的 $\tau_{\max}$ 点,即剪切应力达到最大值。在达到最大剪切应力前,因部分颗粒间的挤压、摩擦力增大,部分粘结键超过断裂强

仅相差 0.22%,因此取两者平均值 27.8°作为优化目标,代入式(15),并进行优化求解,得到若干组优化解,选取一组最优解为:土壤-65Mn 钢间静摩擦因数 1.15,土壤-65Mn 钢间滚动摩擦因数 0.05,土壤-65Mn 钢间恢复系数 0.4。将得到的最优解作为参数条件进行 3 次重复仿真试验,得到土壤-65Mn 钢间滑动摩擦角分别为 28.1°、27.5°、29.3°,均值为 28.6°,标准偏差为 0.61°,与实测滑动摩擦角 27.8°相对误差为 2.88%。

2.3.3 土壤直剪仿真试验

选择土壤直剪试验土层 100、200 mm 的内摩擦角试验结果的平均值 32.01°为标准,经反复试验,当临界正应力和临界切应力均为 10 kPa 时,得到内摩擦角仿真值为 30.24°,仿真值与试验值相对误差为 5.53%,故最终确定接触模型中的临界应力为 10 kPa。剪切试验中,从剪切盒外部沿着垂直于正压力方向和剪切位移的方向观察,粘结键分布及其受力云图如图 13 所示。

度而发生断裂,颗粒间产生相对运动,导致土壤样本局部发生剪切破坏,因此图 12 中达到最大剪切应力前(Ⅱ段),位移-剪应力曲线出现明显的非线性段。达到最大剪切应力后,剪切面处土壤颗粒间的粘结键已断裂殆尽,颗粒间的粘结力急剧减小,土壤试样整体所受到的剪切应力主要受颗粒间的摩擦和挤压力影响,因此剪切应力趋于平稳,对应图 12 中的Ⅲ段。在下剪切盒不断移动的同时,剪切面随剪切盒不断移动而缩小,导致相互接触的颗粒数量减少,颗粒间的摩擦和挤压也随之减少,剪应力在达到最大后有所下降,对应图 12 中的Ⅳ段。在到达最大剪切应力后,仍有部分粘结键因颗粒间的挤压或摩擦而

断裂,如图 13d 所示。

综上可知,剪切仿真试验所标定的参数及仿真过程能反映真实的剪切试验过程,模型和接触参数标定合理。标定的桑园土壤离散元仿真参数如表 13 所示。

表 13 桑园土壤离散元仿真参数

Tab. 13 Discrete element simulation parameters of soil in mulberry field

材料	参数	数值	来源
土壤-土壤	静摩擦因数	0.89	标定
	滚动摩擦因数	0.45	标定
	恢复系数	0.43	标定
	接触半径	1.1R	文献[29]
	法向粘结刚度/(N·m ⁻³)	1×10 ⁸	文献[36]
	切向粘结刚度/(N·m ⁻³)	5×10 ⁷	文献[37]
	临界法向应力/kPa	10	标定
	临界切向应力/kPa	10	标定
土壤-65Mn 钢	静摩擦因数	1.15	标定
	滚动摩擦因数	0.05	标定
	恢复系数	0.40	标定

注:R 为土壤颗粒半径。

3 结论

(1)通过对土壤休止角仿真试验,标定土壤-土

壤间静摩擦因数、滚动摩擦因数、恢复系数分别为 0.89、0.45、0.43,仿真验证试验得到休止角为 47.53°±0.69°,仿真值与试验值相对误差为 1.69%。

(2)通过土壤-65Mn 钢滑动摩擦角仿真试验,标定土壤-65Mn 钢间的静摩擦因数、滚动摩擦因数和恢复系数分别为 1.15、0.05、0.4,仿真验证试验得到滑动摩擦角为 28.6°±0.61°,仿真值与试验值相对误差为 2.88%。

(3)通过土壤直剪试验仿真,标定 Hertz-Mindlin with Bonding 接触模型中土壤-土壤颗粒的法向粘结刚度和切向粘结刚度分别为 1×10⁸ N/m³和 5×10⁷ N/m³,接触半径为 1.1 倍颗粒半径,临界法向应力为 10 kPa、临界切向应力为 10 kPa 时,仿真得到内摩擦角为 30.24°,仿真值与试验值相对误差为 5.53%。

(4)提出了桑园土壤离散元仿真物理参数系统标定的方法,建立了桑园土壤的非等直径土壤颗粒离散元仿真模型,通过对试验测得和仿真所得的休止角、滑动摩擦角及土壤内摩擦角分析与比较可知,试验值与仿真预测值一致。可以用本文提出的标定方法及其参数值,进行桑园耕作机械触土部件与土壤相互作用的离散元仿真分析及其结构优化。

参 考 文 献

[1] 张晴. 中国桑蚕空间格局演变及其优化研究[D]. 北京:中国农业科学院,2018.
ZHANG Qing. Research on the spatial distribution evolution and optimization of silkworm in China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2018. (in Chinese)

[2] 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)

[3] 温翔宇,袁洪方,王刚,等. 颗粒肥料离散元仿真摩擦因数标定方法研究[J]. 农业机械学报,2020,51(2):115-122,142.
WEN Xiangyu, YUAN Hongfang, WANG Gang, et al. Calibration method of friction coefficient of granular fertilizer by discrete element simulation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 115-122, 142. (in Chinese)

[4] 韩树杰,戚江涛,坎杂,等. 新疆果园深施散体厩肥离散元参数标定研究[J]. 农业机械学报,2021,52(4):101-108.
HAN Shujie, QI Jiangtao, KAN Za, et al. Parameters calibration of discrete element of deep application of bulk manure in Xinjiang orchard[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 101-108. (in Chinese)

[5] ADAJAR J B, ALFARO M, CHEN Y, et al. Calibration of discrete element parameters of crop residues and their interfaces with soil[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2021,188: 106349.

[6] 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.
FENG Junxiao, LIN Jia, LI Shizhong, et al. Calibration of discrete element parameters of particle in rotary solid state fermenters [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(3):208-213. (in Chinese)

[7] 彭飞,王红英,方芳,等. 基于注入截面法的颗粒饲料离散元模型参数标定[J]. 农业机械学报,2018,49(4):140-147.
PENG Fei, WANG Hongying, FANG Fang, et al. Calibration of discrete element model parameters for pellet feed based on injected section method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 140-147. (in Chinese)

[8] 廖彦涛,廖庆喜,周宇,等. 饲料油菜薹期收获茎秆破碎离散元仿真参数标定[J]. 农业机械学报,2020,51(6):73-82.
LIAO Yitao, LIAO Qingxi, ZHOU Yu, et al. Parameters calibration of discrete element model of fodder rape crop harvest in

- bolting stage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 73–82. (in Chinese)
- [9] 廖宜涛, 王在腾, 廖庆喜, 等. 果菜初期饲料油菜茎秆离散元接触模型参数标定[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊1): 236–243.
- LIAO Yitao, WANG Zaiteng, LIAO Qingxi, et al. Calibration of discrete element model parameters of forage rape stalk at early pod stage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 1): 236–243. (in Chinese)
- [10] 王宪良, 胡红, 王庆杰, 等. 基于离散元的土壤模型参数标定方法[J]. 农业机械学报, 2017, 48(12): 78–85.
- WANG Xianliang, HU Hong, WANG Qingjie, et al. Calibration method of soil contact characteristic parameters based on DEM theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12): 78–85. (in Chinese)
- [11] 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]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 49–56.
- ZHANG Rui, HAN Dianlei, JI Qiaoli, et al. Calibration methods of sandy soil parameters in simulation of discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 49–56. (in Chinese)
- [12] 向伟, 吴明亮, 吕江南, 等. 基于堆积试验的黏壤土仿真物理参数标定[J]. 农业工程学报, 2019, 35(12): 116–123.
- XIANG Wei, WU Mingliang, LÜ Jiangnan, et al. Calibration of simulation physical parameters of clay loam based on soil accumulation test[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(12): 116–123. (in Chinese)
- [13] 田辛亮, 丛旭, 齐江涛, 等. 黑土区玉米秸秆-土壤混料离散元模型参数标定[J]. 农业机械学报, 2021, 52(10): 100–108, 242.
- TIAN Xinliang, CONG Xu, QI Jiangtao, et al. Parameter calibration of discrete element model for corn straw–soil mixture in black soil areas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 100–108, 242. (in Chinese)
- [14] FRANCO Y, RUBINSTEIN D, SHMULEVICH I. Prediction of soil-bulldozer blade interaction using discrete element method [J]. Transactions of the ASABE, 2007, 50(2): 345–353.
- [15] 方会敏. 基于离散元法的秸秆-土壤-旋耕刀相互作用机理研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2016.
- FANG Huimin. Research on the straw–soil–rotary blade interaction using discrete element method[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [16] 丁启朔, 任骏, BELAL E A, 等. 湿粘水稻土深松过程离散元分析[J]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 38–48.
- DING Qishuo, REN Jun, BELAL E A, et al. DEM analysis of subsoiling process in wet clayey paddy soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 38–48. (in Chinese)
- [17] WANG X, ZHANG S, PAN H, et al. Effect of soil particle size on soil-subsoiler interactions using the discrete element method simulations[J]. Biosystems Engineering, 2019, 182(5): 138–150.
- [18] UCGUL M, SAUNDERS C, LI P, et al. Analyzing the mixing performance of a rotary spader using digital image processing and discrete element modelling (DEM)[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2018, 151(8): 1–10.
- [19] SUN J, WANG Y, MA Y, et al. DEM simulation of bionic subsoilers (tillage depth > 40 cm) with drag reduction and lower soil disturbance characteristics[J]. Advances in Engineering Software, 2018, 119(5): 30–37.
- [20] BARR J B, UCGUL M, DESBIOLLES J M A, et al. Simulating the effect of rake angle on narrow opener performance with the discrete element method[J]. Biosystems Engineering, 2018, 171(1): 1–15.
- [21] 南京水利科学研究所土工研究所. 土工试验技术手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- [22] ROWE P W. The stress-dilatancy relation for static equilibrium of an assembly of particles in contact[J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 1962, 269(1339): 500–527.
- [23] 戴飞, 宋学锋, 赵武云, 等. 全膜双垄沟覆膜土壤离散元接触参数仿真标定[J]. 农业机械学报, 2019, 50(2): 49–56, 77.
- DAI Fei, SONG Xuefeng, ZHAO Wuyun, et al. Simulative calibration on contact parameters of discrete elements for covering soil on whole plastic film mulching on double ridges[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 49–56, 77. (in Chinese)
- [24] 孙景彬, 刘琪, 杨福增, 等. 黄土高原坡地土壤与旋耕部件互作离散元仿真参数标定[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 63–73.
- SUN Jinbin, LIU Qi, YANG Fuzeng, et al. Calibration of discrete element simulation parameters of sloping soil on Loess Plateau and its interaction with rotary tillage components[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 63–73. (in Chinese)
- [25] HERTZ H R. On the contact of elastic solids[J]. Journal for Pure and Applied Mathematics, 1882, 92: 156–171.
- [26] MINDLIN R D, DERESIEWICZ H. Elastic spheres in contact under varying oblique forces[J]. Journal of Applied Mechanics, 1953, 20(3): 327–344.
- [27] CUNDALL P A, STRACK O D L. Discussion: a discrete numerical model for granular assemblies[J]. Géotechnique, 1980, 30(3): 331–336.
- [28] SAKAGUCHI H, OZAKI E, IGARASHI T. Plugging of the flow of granular materials during the discharge from a silo[J]. International Journal of Modern Physics B, 1993(7): 1949–1963.
- [29] 李水乡, 赵健, 陆鹏, 等. 基本三维几何体的最高填充率[J]. 科学通报, 2009, 54(6): 729–733.

- LI Shuixiang, ZHAO Jian, LU Peng, et al. Maximum packing densities of basic 3D objects[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(6): 729–733. (in Chinese)
- [30] 朱惠斌, 钱诚, 白丽珍, 等. 基于 Plackett–Burman 试验设计与响应面法优化玉米秸秆离散元模型[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(12): 221–231.
- ZHU Huibin, QIAN Cheng, BAI Lizhen, et al. Optimization of discrete element model of corn stalk based on Plackett–Burman design and response surface methodology[J]. Journal of China Agricultural University, 2021, 26(12): 221–231. (in Chinese)
- [31] ASAF Z, RUBINSTEIN D, SHMULEVICH I. Determination of discrete element model parameters required for soil tillage[J]. Soil & Tillage Research, 2007, 92(1–2): 227–242.
- [32] LINDE J V D. Discrete element modeling of a vibratory subsoiler[D]. Stellenbosch: Stellenbosch University, 2007.
- [33] 贺一鸣, 向伟, 吴明亮, 等. 基于堆积试验的壤土离散元参数的标定[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2018, 44(2): 216–220.
- HE Yiming, XIANG Wei, WU Mingliang, et al. Parameters calibration of loam soil for discrete element simulation based on the repose angle of particle heap[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2018, 44(2): 216–220. (in Chinese)
- [34] 李俊伟, 佟金, 胡斌, 等. 不同含水率黏重黑土与触土部件互作的离散元仿真参数标定[J]. 农业工程学报, 2019, 35(6): 130–140.
- LI Junwei, TONG Jin, HU Bin, et al. Calibration of parameters of interaction between clayey black soil with different moisture content and soil-engaging component in northeast China[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(6): 130–140. (in Chinese)
- [35] UCGUL M, SAUNDERS C, FIELKE J M. Discrete element modelling of top soil burial using a full scale mouldboard plough under field conditions[J]. Biosystems Engineering, 2017, 160: 140–153.
- [36] MAK J, CHEN Y, SADEK M A. Determining parameters of a discrete element model for soil-tool interaction[J]. Soil & Tillage Research, 2012, 118(1): 117–122.
- [37] 张永良. 基于离散元的逆转旋耕施肥播种机抛土性能仿真及试验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2012.
- ZHANG Yongliang. Simulation and experimental study throwing soil performance of reversal cultivated land and fertilization seeder based on DEM[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2012. (in Chinese)
- [38] UCGUL M, FIELKE J M, SAUNDERS C. Three-dimensional discrete element modelling (DEM) of tillage: accounting for soil cohesion and adhesion[J]. Biosystems Engineering, 2015, 129: 298–306.
- [39] 曹秀振. 基于离散元法的免耕播种开沟器的设计与试验[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016.
- CAO Xiuzhen. Design and test of no-till seeding opener on discrete element method[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [40] HE Hantao, ZHENG Junxing, LI Zhaochao. Accelerated simulations of direct shear tests by physics engine[J]. Computational Particle Mechanics, 2021, 8(3): 471–492.