doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.07.011

基于水稻钵苗根系生长模拟的钵体根-土复合体离散元模型研究

辛　亮　李泽泽　庄智圆　王　航　朱轩卫
（东北农业大学工程学院，哈尔滨 150030）

摘要：针对目前缺乏水稻钵苗多株根系交织于基质形成独立钵体复合体基础模型研究的问题，同时为后续开展水稻钵苗移栽机构栽植过程探究机械-钵体互作规律提供理论基础，本文依据水稻钵苗根系物理机械特性与生长规律，提出了一种基于 Matlab 根系数值模拟生长的水稻钵苗钵体复合体离散元模型建立方法。通过破坏性检测对移栽期水稻钵苗根系的几何形态与根系拓扑关系及基质相关参数进行测量与分析，结合钵盘边界因素及根-根、根-钵盘间交互生长特性，建立水稻根系生长规律相关特性函数，并通过 Matlab 程序设计获取水稻钵苗根系生长拓扑轨迹。利用分割排序法求解完整粒子中心坐标，依托 EDEM 软件平台分别将所建立的水稻钵苗根-基质离散元几何模型与 EdinBurgh Elasto－Plastic Adhesion with Bonding 接触力学模型结合，实现水稻钵苗钵体复合体离散元模型的建立。开展水稻钵苗钵体压缩和剪切试验对比研究，结果表明，仿真结果与试验结果趋向保持一致，误差满足相关要求，验证了水稻钵苗钵体复合体离散元模型的可行性。

关键词：水稻钵苗；根系生长数值模拟；离散元；根-土复合体
中图分类号：S223.91　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2025)07-0128-11　　**OSID**：

Discrete Element Model for Pot-type Root－Soil Composite Based on Root Growth Simulation in Rice Pot Seedlings

XIN Liang　LI Zeze　ZHUANG Zhiyuan　WANG Hang　ZHU Xuanwei
(*College of Engineering*, *Northeast Agricultural University*, *Harbin* 150030, *China*)

Abstract: Aiming to address the current lack of fundamental models for studying the composite body system formed by intertwined multi-plant roots of rice pot seedlings within substrates, and establish a theoretical foundation for subsequent exploration of machine-pot body interactions during transplanting operations, a discrete element modeling method for rice pot seedling composite-body systems was proposed. The method integrated Matlab based root coefficient values to simulate growth patterns. Destructive testing was conducted to measure and analyze geometric morphologies, root topological relationships, and substrate-related parameters of rice seedling roots at the transplanting stage. By incorporating boundary constraints from seedling trays and root-root/root-tray interactive growth characteristics, characteristic functions describing root growth patterns were established. Matlab programming was employed to generate topological trajectories of root system growth. A segmentation sorting algorithm was developed to determine central coordinates of discrete particles. The EDEM software platform was utilized to integrate the established root-substrate discrete element geometric model with the EdinBurgh Elasto－Plastic Adhesion (EEPA) with Bonding contact mechanics model, thereby constructing the composite-body discrete element model. Validation through comparative compression and shear tests on rice pot seedling composite bodies demonstrated that simulation results exhibited consistent trends with experimental data, with errors meeting prescribed tolerances. This confirmed the feasibility of the proposed discrete element model for rice pot seedling composite-body systems.

Key words: rice pot seedlings; numerical growth simulation of root system; discrete element; root－soil composite

收稿日期：2025－05－09　修回日期：2025－05－20
基金项目：黑龙江省自然科学基金优秀青年项目(YQ2023E001)
作者简介：辛亮(1989—)，男，副教授，博士，主要从事水旱田移栽机械优化设计研究，E-mail：xinliang@neau.edu.cn

0　引言

机械化水稻钵苗有序移栽采用夹取茎叶方式完成独立秧钵的取秧、输送和栽植移栽工序，可大幅提高水稻生产品质与产量[1-2]。然而，钵苗栽植过程推秧爪与钵体作用速度快且不稳定，目前仍无法通过试验方法实时测量并分析水稻钵体相关状态，仍缺乏针对水稻钵苗根-基质钵体复合体基础模型的研究，因此也影响了对栽植过程机械-钵体互作的深入研究。

为了探究作物与农业机械部件间机械行为、运动状态及互作情况，目前国内外学者采用离散元法开展了系列作物建模研究。ZHAO 等[3]运用离散元法搭建了小麦根系离散元模型，通过土壤直剪试验和单根的拉拔试验模拟验证了其接触模型与参数的准确性。ZOU 等[4]采用三点弯曲试验与剪切试验相结合的方式对菠菜根粘结参数进行标定，建立了菠菜根-土复合离散元模型，开展了振动铲切割模拟试验，为后续菠菜收获机构优化提供了方法。LIU 等[5]基于粘接模型构建了山药根-土壤复合体模型，通过压缩试验校准了粘接参数，可为后续山药收获机的设计提供参考。上述研究通过离散元模型开展了单株作物根系及根土复合模型研究[6-7]，验证了该方法用于准确反映植物器官力学特性研究的可行性。

然而，多株水稻秧苗根系在独立钵盘穴孔有限三维空间内自主发育生长，其不同根系间、根系与水稻基质间的生物力学相互作用，形成了具有复杂空间结构的根系-基质交织形态，进而形成钵苗钵体。目前针对根-土复合的植物根系表达研究具有一定局限性，仍难以用现有方法建立能够准确表达钵苗钵体中根-基质空间相互交错盘结形态的水稻钵苗离散元模型。

针对植物根系生长模型的研究，国内外学者基于数值模拟方法开展了相关探索，一定程度上能够反映植物根系的空间分布。杨乐等[8-10]采用微分 L 系统方法，通过 Matlab 模拟了无约束根系生长的栽植后水稻根系生长过程，实现了水稻根系生长的可视化并构建了单株水稻根系三维形态模型；杨猛等[11]将植物根系生长机理与环境因素结合，构建了单株植物根系的三维模型，并针对不同环境开展了根系模拟试验，为探究植物根系与环境交互提供方法。然而上述研究仅局限于单株植物根系的生长建模。

因此，针对育秧期多株水稻秧苗根系交织成独立钵体特点，本文提出一种基于 Matlab 数值模拟生长的水稻钵苗钵体复合体离散元建模方法，借助破坏性检测、坡度试验、跌落试验以及对水稻根的拉伸和剪切试验等方法，开展针对该模型的根生长理论函数建立、根与根及根与钵盘间生长交互特性明晰、根系数值生长程序设计、离散元几何与键合模型参数确定及试验验证研究，最终建立并验证能准确反映水稻钵苗钵体复合体中根系分布及钵体力学特性的离散元模型。

1　材料与方法

1.1　试验材料

本研究选取“五优稻四号”典型水稻优质品种，在黑龙江省哈尔滨市东北农业大学智能阳光育秧室开展育秧。经泡种、催芽、覆土处理后，对水稻根系生长状况予以观测；育秧时段为 2024 年 9—10 月，本试验周期设定在 2024 年 10 月 15—17 日，此时水稻钵苗处于移栽期（三叶一心）阶段。

1.2　水稻钵苗根系的本征参数

在培育的水稻钵苗秧盘中，用随机数表法选取 10 株钵苗作为试验样品。考虑到实现“8”字形轨迹的夹取式水稻钵苗移栽机构，通常控制取秧夹以适当角度夹紧苗茎秆底部位置[12]（即取苗点位置，距水稻茎秆根部为 5 ~ 10 mm），为提高钵体根系模拟效率、降低模型复杂性，将样品苗茎秆保留 20 mm 开展研究，如图 1 所示。

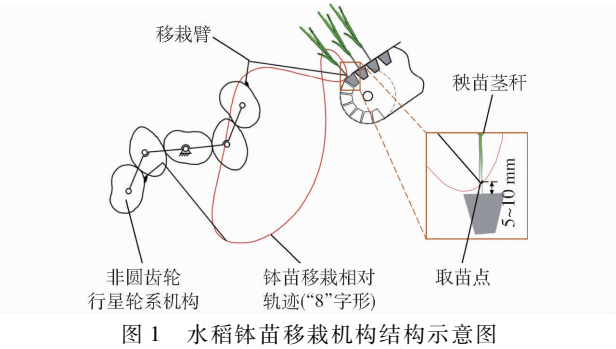


图 1　水稻钵苗移栽机构结构示意图

Fig. 1　Schematic of rice bowl seedling transplanting mechanism structure

采用破坏性检测法获取样本根系各项测量值并统计，如表 1 所示。水稻钵苗每钵包含 3 株秧苗，单株秧苗茎秆窄径为 1.1 mm，宽径为 2.7 mm。根据水稻根系生理生长规律与相关数据可知，水稻根属于纤维根，由 1 个种子根和许多不定根（也称为冠根或节根）组成[13]，种子根与不定根可以分支，从而形成一种分支根；种子根通常有 1 根，不定根为 7 ~ 10 根，分支根为 2 ~ 4 根，毛细根忽略不计。

1.3　水稻钵苗根系的基本接触参数测定

水稻钵体内不同物质间的接触参数对水稻钵苗

表 1 水稻根系参数测量值

Tab. 1 Measurement values of root system parameters of rice pot seedlings

根系种类	根数量/(根·株$^{-1}$)	直径/mm	平均长度/mm	长度范围/mm
种子根	1	0.49	85.36	81.2~92.5
不定根	7~10	0.47	64.71	52.8~88.3
分支根	2~4	0.39	26.40	14.3~35.7

植株群体间的力学行为有显著影响。包括基质-基质、根-根、根-基质、根-钢板以及基质-钢板之间的摩擦因数(静摩擦因数与滚动摩擦因数)和碰撞恢复系数。

首先,采用坡度试验测定不同对象间的摩擦因数,如图 2 所示。试验时通过制备根板、基质板以及钢板粘于试验装置上,同时制备基质方形块、基质球形块以及根块等作为滑块。考虑到水稻钵苗根是非球型颗粒,且单根水稻钵苗根轻,在斜坡上滑动时易受到静电作用影响,同时跌落时受空气阻力作用导致其跌落轨迹偏移,且到达碰撞点速度较低,会极大影响测量结果。为解决这一问题,将水稻根系(包含上述所提及的 3 种根系)揉扎塑形,得到直径 19.18 mm、高 3 mm、质量 0.6 g 的圆柱体水稻根块,并将其作为整体进行研究。

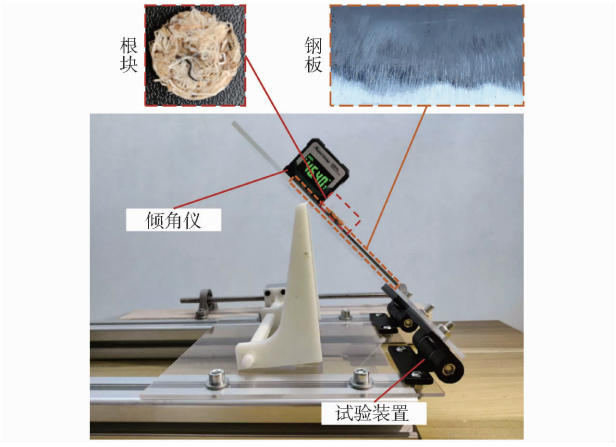


图 2 坡度试验

Fig. 2 Slope test

试验时,匀速转动丝杠,带动与滑块所固接的倾角支架匀速运动。采用拍摄频率为 4 000 f/s 的摄像机记录基质块与根块的滑动过程,记录其开始滑动(滚动)时的倾角。

恢复系数表示材料在碰撞后的恢复能力,为两物体碰撞后的速度差与碰撞前的速度差比值[14]。采用跌落试验测定不同物质间的碰撞恢复系数,如图 3 所示。

试验时,将根板、基质板以及钢板作为碰撞板,将制备的基质球形块以及根块从距离碰撞板竖直高度 200 mm 的位置自由落下。采用拍摄频率为 4 000 f/s 的摄像机记录基质块与根块的完整碰撞过程,并计算碰撞前后的速度。

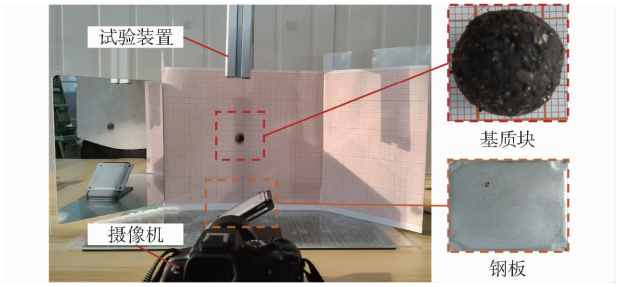


图 3 跌落试验

Fig. 3 Drop test

1.4 水稻钵苗根拉伸与剪切力学特性测定

通过表 1 可知,不定根不仅在根系组成中占比最高,其根直径与种子根相比无显著差异,从而构成了根系力学性能的主要承载结构。分支根呈现直径细、长度短的特征,对整体力学性能影响较小。因此,本研究使用 TA. XT Plus C 质构仪针对水稻钵苗不定根做拉伸与剪切试验,分支根的力学参数被设置为不定根的 60%。

试验使用裁剪长度为 60 mm 的水稻钵苗不定根样品。拉伸试验时,将水稻根系样品两段用塑料薄膜保护并夹紧在质构仪拉伸夹具两端,以 0.2 mm/s 的速度对其施加载荷进行拉伸,同时以质构仪所受最大载荷作为指标,如图 4 所示,试验重复 5 次。得到其最大平均拉伸力为 0.748 67 N。

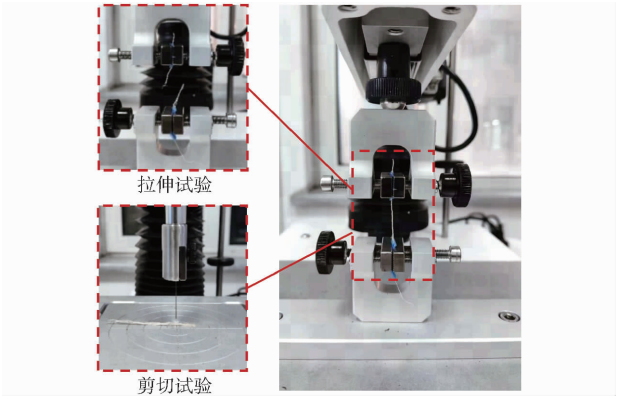


图 4 水稻根拉伸与剪切试验

Fig. 4 Rice root tensile and shear tests

水稻幼苗根系属于柔性体且单根直径较小,剪切测量误差较大,因此采用累积法开展试验,将 5 组不定根样品紧铺于质构仪的剪切置物平台上,质构仪剪切刀以 0.2 mm/s 的速度对样品施加载荷完成剪切过程,如图 4 所示,试验重复 5 次,获得质构仪所受的最大平均载荷为 3.498 6 N,因此,单根样品所受最大剪切力为 0.699 72 N,并将其作为剪切试验的指标。

水稻钵苗根系的强度参数包括临界法向应力 σ_l 和临界切向应力 τ_l，二者共同决定了水稻钵苗根系所能承受的最大应力极限。当作用于根系的外部作用力突破这一临界应力阈值时，根系便会断裂。因此，通过上述试验可获得根系的强度参数，计算式为

$$\begin{cases}\sigma_l = \dfrac{4F_n}{\pi D^2} \\ \tau_l = \dfrac{4F_\tau}{\pi D^2}\end{cases} \tag{1}$$

式中　F_n——根样品最大拉伸力，N

F_τ——根样品最大剪切力，N

D——根样品直径，mm

2　水稻钵苗根系生长模拟

水稻钵苗由人工培育，营养、水分和阳光充足，满足水稻生长的必要条件。通过对水稻钵苗根系的生长机理分析，在基于 L 系统的建模方法上，建立水稻钵苗根系生长函数，构建根-根生长函数模型，建立水稻根系与钵盘环境交互生长函数模型，最后得到水稻钵苗根系生长拓扑轨迹，并通过水稻根系生长拓扑轨迹建立三维水稻钵苗根系模型。

2.1　水稻根系生长模型建立

鉴于植物根系生长过程中，仅根尖部分具备生长能力这一特性，在研究中预设水稻根系以分段形式生长[15]，将各生长段依次连接，即可描绘出水稻根的生长轨迹，如图 5 所示。

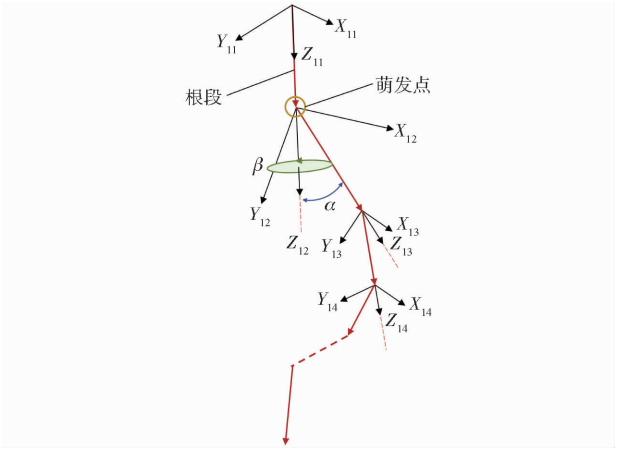


图 5　水稻根生长示意图

Fig. 5　Schematic of rice root growth

水稻根系在土壤环境中的生长轨迹并非直线，其生长方向除主要表现为向重力性外，还受光、水、养分等因素影响[10]。如图 5 所示，将这些对水稻根系生长所产生影响的因素，转换为水稻根系在三维空间内生长方向的轴向旋转角 α 与径向旋转角 β，建立水稻根系生长方向函数 $\boldsymbol{L}$，计算式为

$$\boldsymbol{L} = \boldsymbol{UV} \tag{2}$$

其中
$$\begin{cases}\boldsymbol{U} = \begin{bmatrix}\cos\beta & \sin\beta\cos\alpha & -\sin\beta\sin\alpha \\ \sin\beta & -\cos\beta\cos\alpha & \sin\alpha\cos\beta \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha\end{bmatrix} \\ \boldsymbol{V} = \begin{bmatrix}x_1 - x_0 \\ y_1 - y_0 \\ z_1 - z_0\end{bmatrix}\end{cases} \tag{3}$$

式中　α——轴向旋转角，取 0°～15°

β——径向旋转角，取 0°～360°[10]

(x_0, y_0, z_0)——原有节点坐标

(x_1, y_1, z_1)——新节点坐标

在钵盘栽培中，水稻根系生长受钵穴空间限制，随着根系的增多，根生长有效空间减小，使根系生长阻力增大。以根系生长速率变化描述根生长阻力的变化，发现生长速率前期高、随后速降。同时，为维持所测量根系的总长不变，采用指数衰减函数表征不同时间的根系生长速率，计算式为

$$V = \frac{\mu L_{\max}}{\left(1 - \dfrac{1}{e^{\mu t}}\right)(T_2 - T_1)\, e^{\mu(t - T_1)}} \quad (T_1 < t < T_2) \tag{4}$$

式中　V——时刻 t 的生长速率，mm/d

$L_{\max}$——根生长的最大长度，mm

μ——衰减系数

t——根系生长时间，d

T_1——根系生长开始时间，d

T_2——根系生长结束时间，d

将根段与根段连接处设为萌发节点，如图 5 所示，分支根则由萌发节点处发出。因此对所获得分支根发根节点进行测量统计，通过分析该发根节点位置并基于正态分布模型建立水稻钵苗分支根发根节点概率密度函数，计算式为

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi q L}\, e^{\frac{(N_i - pL)^2}{2qL}}} \tag{5}$$

式中　p——比例系数，为 0.32～0.45

q——发散系数，取 0.1

L——不定根总长，mm

N_i——同一根的不同根节点

2.2　水稻根-根生长特性判定

水稻根系在钵盘内生长，根系的增多以及有效空间的减小，导致根系间不断争抢生长空间。通过增加如下判别来避免根系间的干涉与重叠，如图 6 所示。具有生长能力的根尖以段的形式向前生长，设定根尖可提前一步到达原有生长轨迹的下一新节点 P_{n+1}^i 处，将下一新节点 P_{n+1}^i 和原有节点 P_n^i 作为空间直线函数端点，绘制空间直线函数，并标记为

“新生根”。再通过添加不同种类根系的根径 D_n，得到新生根段直线函数 $f_m^i(P_n^i, P_{n+1}^i, D_n)$。

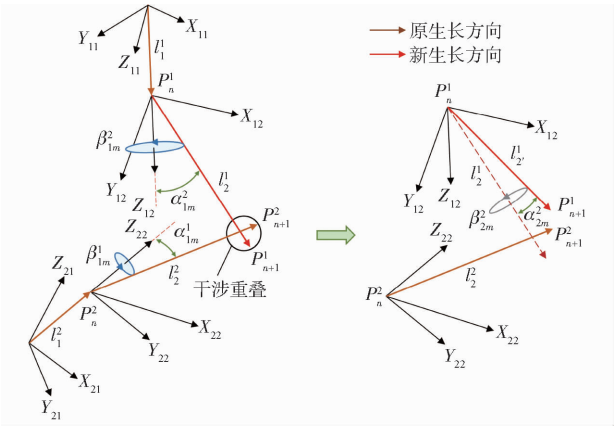


图 6 水稻根-根生长过程

Fig. 6 Root - root growth process of rice

如图 6 所示，将新生根段 l_2^1 与已有根段 l_2^2 作函数计算求其两根段间的最小距离 $x_{\min}$，计算式为

$$x_{\min} = \frac{|(PQ \cdot \boldsymbol{s}_1) \times \boldsymbol{s}_2|}{|\boldsymbol{s}_1 \times \boldsymbol{s}_2|} \tag{6}$$

式中 P——新生根段 l_2^1 上的一点

Q——已有根段 l_2^2 上的一点

PQ——连接所取两点构成的向量

$\boldsymbol{s}_1$——l_2^1 的方向向量

$\boldsymbol{s}_2$——l_2^2 的方向向量

最小距离 $x_{\min} \geqslant D_n$ 时，即可正常生长。当最小距离 $x_{\min} < D_n$ 时，则标记该根段为“新生根接触”，通过不断改变水稻根段 l_2^1 在三维空间内生长方向的轴向旋转角 α_{2m}^2 与径向旋转角 β_{2m}^2，来调整水稻新生根段的生长方向，并得到新水稻根段 $l_{2'}^1$ 的生长方向。返回至原有节点替代初始根段 l_2^1，而后在每个时间步长中动态调整根尖的方向。

2.3 水稻根-钵盘交互生长特性

在水稻钵苗根系的生长过程中，钵盘壁对水稻根系生长产生了显著的空间约束效应，如图 7a。通过创建对应的钵盘边界函数，来模拟边界墙。并将钵盘外部空间划分为如图 7b 所示的 17 个空间区域。在根系根尖生长开始时，根尖以原有的生长方向与生长速率生成根尖轨迹。设定根尖可提前一步到达原有生长轨迹的下一节点处。

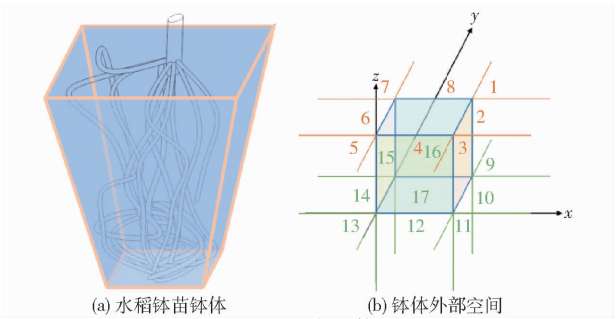


图 7 水稻钵苗钵体空间图

Fig. 7 Space diagrams of rice bowl seedling bowl body

首先，判断根系的下一节点是否进入约束空间外部，若根系进入，则标记该根段为“触碰”。同时，判断该节点位于约束空间外部的空间区域，将该节点投影到该空间区域相邻的钵盘壁上，并获得新节点 P_{n+1}，计算式为

$$P_{n+1} = \left(x_1 - \frac{A(Ax_1 + By_1 + Cz_1 + D)}{A^2 + B^2 + C^2}, \right.$$
$$y_1 - \frac{B(Ax_1 + By_1 + Cz_1 + D)}{A^2 + B^2 + C^2},$$
$$\left. z_1 - \frac{C(Ax_1 + By_1 + Cz_1 + D)}{A^2 + B^2 + C^2} \right) \tag{7}$$

式中 A、B、C、D——钵盘壁面空间参数

并将新生根段采用根-根生长特性判定。

由于根系的向重力性，根系在秧盘底部不断聚集，可生长空间不断减少；同时水稻钵苗在根生长的不同时间段内，钵体不同深度的根系体积占比不同，根系所受向上的吸引力也不同；因此，为了更好的模拟根系在钵体底部的生长状态，通过增加上引力参数 w 来控制根系向上的吸引力，计算式为

$$w = \frac{1}{e^{0.117\,815t + 0.025\,713H}} - 1 \tag{8}$$

式中 H——根系生长深度，mm

根系生长方向与生长速率开始发生适应性调整，部分根系受重力影响向下蜿蜒，部分则随着上引力的增大，与重力相抵消，开始沿着钵盘壁横向迂回。

2.4 根系停止生长

根系生长的随机性、不确定性以及生长空间的不断减小，导致一些根常常会被周围的根系所包围缠绕，进而缺乏生长的空间。因此，对根系进行生长设定，某一段根系在向外寻找生长空间时，动态调整根尖的生长方向与速率 50 次，仍未突破屏障，则该根段停止生长，并对该根标记为“停止”。

基于 Matlab 平台通过数值模拟方法生成钵苗根系不同时期生长过程（如图 8 所示），最终获得移栽期（生长期约 30 d）水稻钵苗根系生长拓扑轨迹，如图 9 所示。并对该拓扑轨迹不同根系赋予其特定的根径与茎叶特征，完成水稻钵苗三维模型的建立，如图 10 所示。

2.5 水稻钵苗根系数值生长轨迹模型验证

为探究水稻钵苗根系数值生长方法的可行性，采用模拟与试验验证相结合的方式，对水稻钵苗根系开展表征现象解析以及钵体根体积占比、钵体根系纵向分布体积占比（上层、中层和下层）等数据测

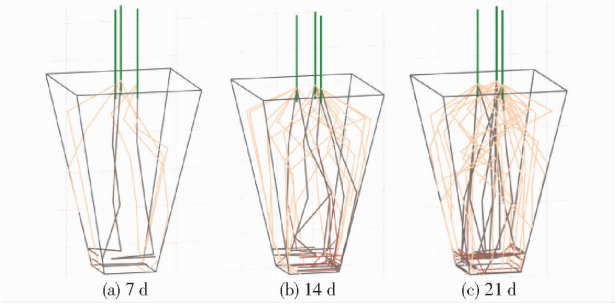


图 8　水稻钵苗根系生长

Fig. 8　Root growth of rice pot seedlings

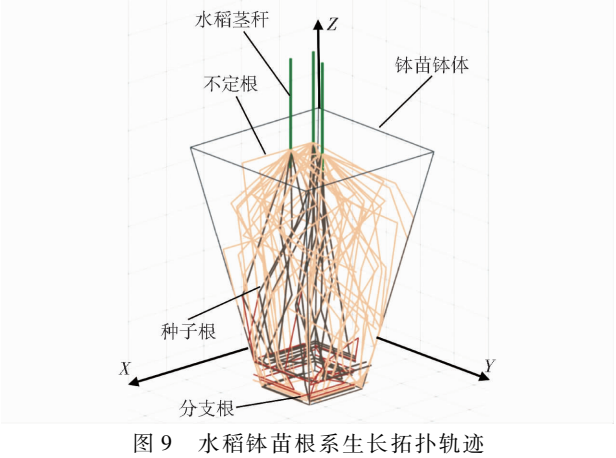


图 9　水稻钵苗根系生长拓扑轨迹

Fig. 9　Topological trajectory of root system growth of rice pot seedlings

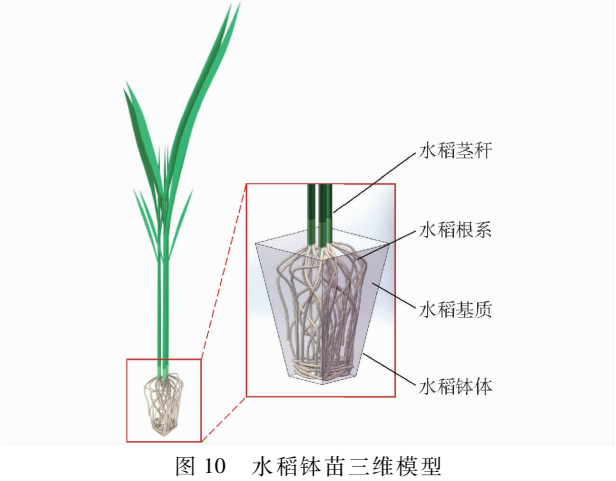


图 10　水稻钵苗三维模型

Fig. 10　Three-dimensional model of rice pot seedlings

量分析。本次试验，随机选取 5 株钵苗样本，剪去茎叶，并将其以 7 mm 的厚度切割成 3 部分样本，并对其标注上层、中层与下层，如图 11 所示。

对切割下的根系样本进行水洗操作，用量程为 5 mL、分度值为 0.1 mL 的玻璃量筒对上述样本体积进行测量，如图 12 所示。对其测量值做均值化处理，并计算其根体积占比 o_1，计算式为

$$o_1 = \frac{V_{Root}}{V_{Total}} \tag{9}$$

式中　V_{Root}——样本中根系体积，mm^3

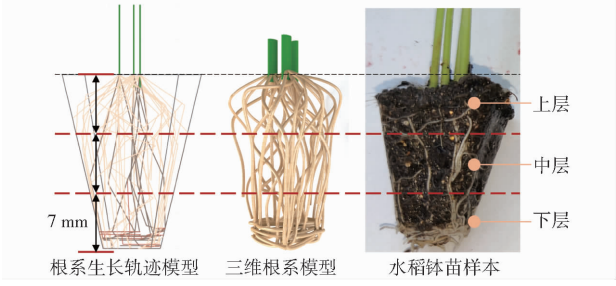


图 11　水稻钵苗根系数值生长模型验证

Fig. 11　Validation of numerical growth model for rice pot seedling root systems

V_{Total}——样本总体积，mm^3

对水稻钵苗根系数值生长拓扑轨迹模型及钵苗三维根系模型进行分割（如图 11 所示），并计算其根体积占比 o_2，计算式为

$$o_2 = \frac{\pi\left[D_1\sum_{i=1}^{n}(L_{r1}^i + L_{r2}^i) + D_2\sum_{i=1}^{n}L_{r3}^i\right]}{4V} \tag{10}$$

其中　$$L_{rk} = \sqrt{(x_1^n - x_0^n)^2 + (y_1^n - y_0^n)^2 + (z_1^n - z_0^n)^2} \quad (k = 1,2,3) \tag{11}$$

$$V = \frac{h_1(S_1 + S_2 + \sqrt{S_1 S_2})}{3} \tag{12}$$

式中　o_2——某一空间内的根体积占比

V——钵体样本体积，mm^3

h_1——钵体样本高，mm

S_1——钵体样本下底面积，mm^2

S_2——钵体样本上顶面积，mm^2

L_{r1}、L_{r2}、L_{r3}——不同类型根段长，mm

(x_0^n, y_0^n, z_0^n)——该区域内某一类型根的某一根段节点坐标

(x_1^n, y_1^n, z_1^n)——该区域内某一类型根的某一根段下一节点坐标

D_1、D_2——不同类型根系直径，mm

针对已构建完成的水稻钵苗根系生长轨迹模型和实测样本，从根系分布状态分析，在水稻根系生长纵深方向可观察到根系生长结构大致可分为 3 层，即由未代谢完成的水稻种子、茎秆根部、新发根系及水稻基质所组成的上层，由基质、种子根和不定根交织而成的中层，由多种类型根系与水稻基质盘结、交错生长的下层，表现出不同层次各具特点生长状态。对比分析，水稻钵苗根系生长趋势模型与实际现象趋于一致。

由表 2 可得，钵苗样本根体积占比实测值与仿真值的相对误差为 3.82%。进一步探究，钵苗样本根系纵向分布上层、中层和下层的根体积占比实测值与仿真值的相对误差分别为 4.82%、5.11% 和 2.67%。结果表明，水稻钵苗样本根体积占比数值

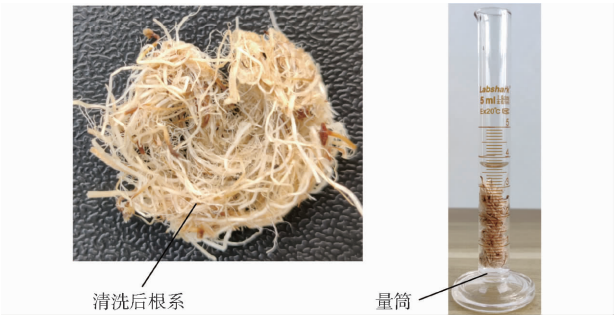


图 12 水稻根体积占比测量

Fig. 12 Measurement of root volume proportion in rice

模拟结果与试验结果相差较小,仿真模型结果在试验结果的标准误差范围内。可以推断所建立的水稻钵苗根系生长拓扑轨迹基本符合建模要求。

表 2 水稻钵苗根体积占比试验实测与仿真结果

Tab. 2 Experimental measurement and simulation results of root volume proportion in rice pot seedlings

类别	纵向分布根体积占比			根系体积占比
	上层	中层	下层	
实测均值	0.083 0	0.124 5	0.207 5	0.138 4
仿真均值	0.087 2	0.131 2	0.213 2	0.143 9
相对误差/%	4.82	5.11	2.67	3.82

3 水稻钵苗钵体离散元模型构建

3.1 水稻钵苗根-基质离散元几何模型建立

水稻钵苗钵体主要由根系和基质组成,其中不同种类根的直径以及根系在钵盘内的生长轨迹等已通过破坏性检测和根系生长模拟的方法得到。水稻钵苗根系的真实直径如表 1 所示。由于水稻幼苗根径较小,因此水稻根系采用单个球型颗粒排列,由于不定根直径与种子根相比无显著差异,取种子根与不定根的离散元球型颗粒直径为 0.5 mm,水稻分支根的颗粒直径为 0.4 mm。将不同种类根系的生长轨迹用其相对应的颗粒直径均匀划分,使得根系离散球型颗粒紧密排列,并求解得到完整钵苗根系颗粒及粒子的中心点坐标,进而获得水稻钵苗根系离散元几何模型如图 13a 所示。

取水稻钵苗基质的离散元球型颗粒直径为 0.5 mm[16],将水稻钵体内部空间均匀划分为边长 0.5 mm 的正方体空间(基质颗粒直径),求解得到全部基质颗粒及其中心点的空间坐标。最后将水稻基质颗粒与水稻钵苗根系颗粒进行重叠计算,与根系颗粒重叠及干涉的基质颗粒进行删除,最终得到带有根系生长空间的全部基质颗粒及其离散元几何模型如图 13b 所示。

3.2 水稻钵苗根-基质离散元接触模型建立

构建水稻钵苗离散元模型时选择 Edinburgh

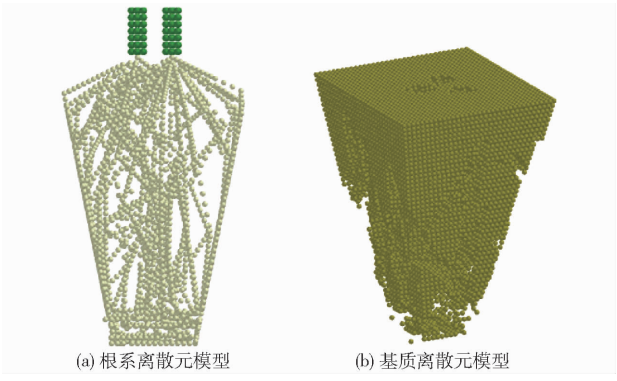


图 13 水稻钵苗土钵离散元几何模型

Fig. 13 Discrete element geometric model of rice pot seedlings and soil

Elasto-Plastic Adhesion with Bonding 作为接触力学模型,并用于模拟水稻基质颗粒之间的粘接、水稻基质与水稻根之间的粘接以及水稻单根内部的形变与断裂,其中 Bonding 键作为颗粒粘接的载体,如图 14 所示。

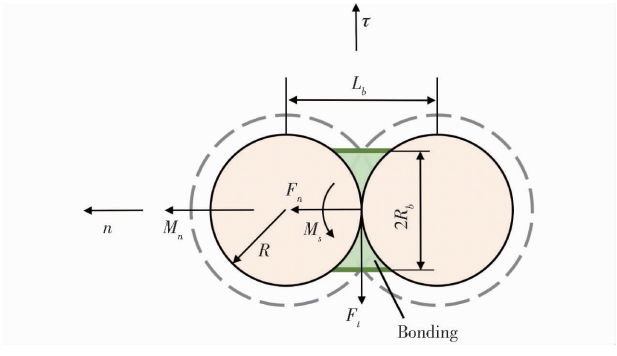


图 14 Bonding 粘结模型

Fig. 14 Bonding contact model

同时 Bonding 键呈现出特定的力学特性,在外力(拉伸、剪切与弯曲等)施加于相应模型时,该模型相应地发生形变,与此同时产生应力,相邻粒子间的力与扭矩发生改变[17]。当粒子之间的法向和切向应力超过临界应力时,Bonding 键就会断裂,模型内粘接力失效,表现出根系断裂、基质破碎以及根与基质分离等现象。

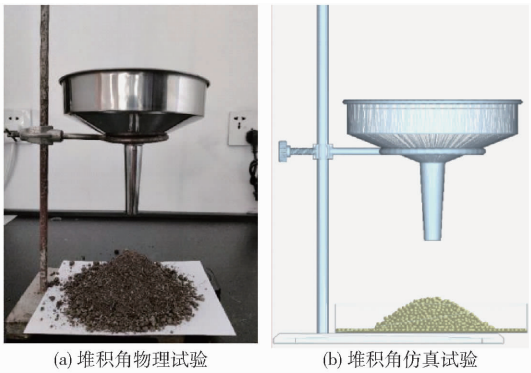
3.3 水稻钵苗根-基质离散元接触参数标定方法

在离散元建模过程中,由于模型参数与实测参数间存在较大差异,且受材料本征特性因素影响,直接将实测参数作为模型参数使用会导致仿真结果偏离实际物理行为。因此,需采用参数标定方法对模型参数进行校正,以确保仿真模型的可靠性。

(1)水稻基质堆积角仿真试验

通过水稻基质堆积角物理试验,获得其堆积角度,将其作为试验指标,如图 15a 所示。

依托 EDEM 软件进行仿真试验,仿真装置与物理试验装置保持一致,如图 15b 所示。对影响水稻



(a) 堆积角物理试验　(b) 堆积角仿真试验

图 15　水稻基质堆积角试验

Fig. 15　Rice substrate stacking angle test

基质的主要接触参数：碰撞恢复系数、静摩擦因数以及滚动摩擦因数等围绕 1.3 节中坡度试验以及跌落试验获得的数据做多因素试验分析，再与实测值进行比较，获取一组最优的数据。以此确定基质与基质间，以及基质与钢板间的接触力学参数。

(2)水稻钵苗根-基质混合物堆积角仿真试验

对水稻根段-基质混合物做堆积角物理试验。根段样品(包含种子根、不定根与分支根)长度为 9 ~ 10 mm，根段与基质的体积混合比为 1∶2。试验时，待根段-基质混合物填满环刀内部，将环刀抽离，使得根段-基质混合物自主滑落，如图 16 所示。获得其堆积角度，并将其作为试验指标。

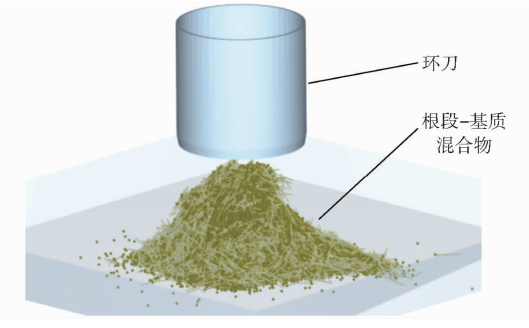


图 16　水稻根段-基质混合物堆积角仿真试验

Fig. 16　Simulation experiment on angle of repose of rice root segment - substrate mixture

仿真试验时，采用与物理试验装置尺寸相同的装置。同理，对影响水稻根段的主要接触参数做多因素试验。获取一组最优的数据以确定根与基质间、根与钢板间以及根与根之间的接触力学参数。所得最终数据见表 3。

基质和钢的密度、泊松比等本征参数以及基质的接触参数选取参考文献[18 - 22]。

3.4　水稻钵苗根-基质复合体离散元模型建立

将在 3.1 节中得到的水稻钵苗根系与基质离散元几何模型的粒子坐标设置成文件 Block_Factory_Data，在 EDEM 软件目录 Geometries 下的 Plugin Factories 中导入 Block_Factory_x64.dll 文件。调用

表 3　水稻钵苗离散元模型主要仿真参数

Tab. 3　Main simulation parameters of rice pot seedling discrete element model

参数	数值
水稻根-水稻根碰撞恢复系数	0.5
水稻根-基质碰撞恢复系数	0.235
水稻根-钢板碰撞恢复系数	0.445
基质-基质碰撞恢复系数	0.12
基质-钢板碰撞恢复系数	0.23
水稻根-水稻根静摩擦因数	0.42
水稻根-基质静摩擦因数	0.542
水稻根-钢板静摩擦因数	0.3
基质-基质静摩擦因数	0.65
基质-钢板静摩擦因数	0.58
水稻根-水稻根滚动摩擦因数	0.2
水稻根-基质滚动摩擦因数	0.132
水稻根-钢板滚动摩擦因数	0.12
基质-基质滚动摩擦因数	0.345
基质-钢板滚动摩擦因数	0.16
水稻钵苗根密度 ρ/(kg·m^{-3})	1 220
水稻钵苗根泊松比 μ	0.241
水稻钵苗根剪切模量 K/Pa	5.5×10^{6}
水稻根单位面积法向刚度 l_n/(N·m^{-3})	1.145×10^{9}
水稻根单位面积切向刚度 l_t/(N·m^{-3})	7.24×10^{8}
水稻钵苗根-根法向临界应力 σ_{max}/Pa	4.315×10^{6}
水稻钵苗根-根切向临界应力 τ_{max}/Pa	1.008×10^{6}

颗粒体力 API 接触模型[23]，改写颗粒自定义插件设置颗粒生成方式。基于 3.2 节构建的离散元接触模型开展后续步骤。最终得到具有特定力学特性的水稻钵苗钵体离散元模型，如图 17 所示。

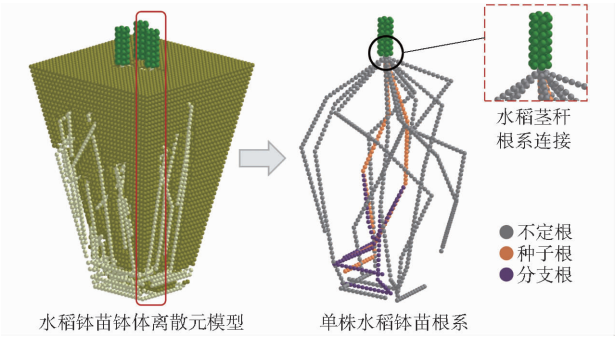


图 17　水稻钵苗钵体离散元模型

Fig. 17　Discrete meta-model of rice pot seedlings

4　水稻钵苗根-基质钵体复合体离散元模型仿真与试验

为进一步验证水稻钵苗模型的准确性和建模方法的可靠性，针对已构建完成的水稻钵苗钵体离散元模型，开展剪切试验与压缩(正压与侧压)试验。通过模拟剪切试验与压缩试验，探究在 TA.XT Plus C 质构仪加载条件下水稻钵苗模型标定数据结果的准确性。

4.1 水稻钵苗钵体剪切与压缩试验

在培育的水稻钵苗秧盘中,用随机数表法选取15 株钵苗,剪去水稻茎叶,作为试验样品。试验时,将样品放在质构仪的置物台上方(正放与侧放),如图 18b、18c 所示。

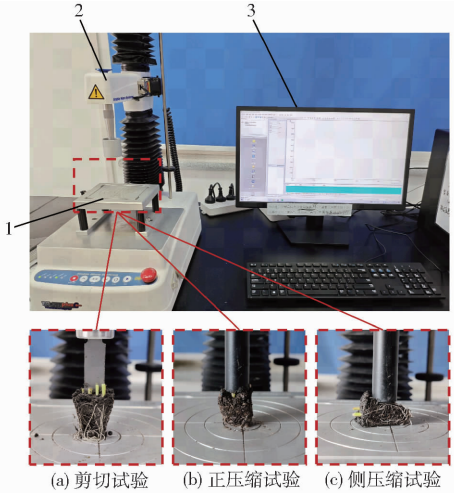


图 18 水稻钵苗剪切与压缩试验

Fig. 18 Shear and compression test of rice pot seedlings

1. 置物台 2. 质构仪 3. 计算机

压缩台(质构仪自带)以 0.5 mm/s 的速度对水稻钵苗施加载荷[24-25]。质构仪的压力传感器最大值为 5 kg,待压缩力达到 5 kg 时,自动停止压缩。试验重复 5 次。记录水稻钵苗加载条件下质构仪所受载荷(抗压力)与位移数据。

同理,如图 18a 剪切试验所示,将压缩台更换为剪切刀,重复上述过程。试验重复 5 次。记录水稻钵苗样品的剪切力与位移数据。

4.2 水稻钵苗钵体剪切与压缩仿真试验

在 EDEM 软件中对水稻钵苗剪切与压缩试验过程进行仿真模拟,将所建立的水稻钵苗钵体离散元模型通过 Analyst 模块的 Simulation Deck 导出,起始时间设置为 1 s。为保证仿真的准确性,采用与物理试验尺寸相同的装置,并用 Solidworks 三维建模软件对试验装置进行建模。之后,将试验装置模型通过 EDEM 软件目录 Geometries 下的 Import Geometry 导入到软件中,从而构建水稻钵苗钵体剪切与压缩模拟试验仿真模型。

设置剪切刀移动速度为 0.5 mm/s,仿真时间步长设置为 5×10^{-7} s[6],数据存储时间间隔为 0.05 s,网格尺寸为最小颗粒直径的 5 倍。在模拟中,1 ~ 1.5 s 时间段内,在质构仪的置物台上方 3 mm 处释放水稻钵苗离散元模型,使其在重力的作用下掉落至置物台上,以模拟人工放置模型。在 1.5 s 后切刀开始以设定速度运动,直至剪切试验仿真完成。通过 Analyst 模块得到仿真试验的剪切力和位移数据,仿真模拟重复 3 次,剪切试验仿真如图 19 所示。

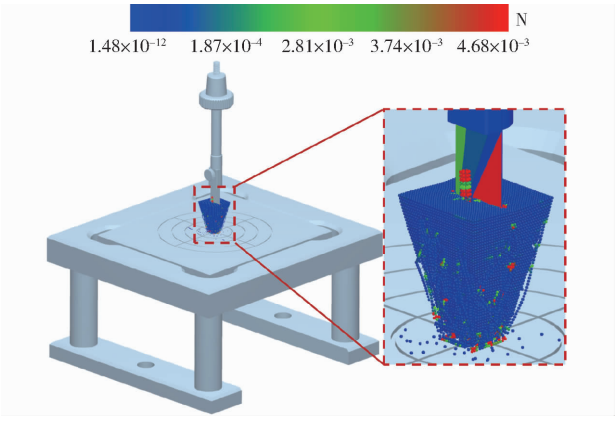


图 19 水稻钵苗离散元模型剪切试验仿真图

Fig. 19 Simulation diagram of discrete element model shear test for rice pot seedlings

更换剪切刀为压缩台,并设置以 0.5 mm/s 速度对水稻钵体施加载荷,重复上述试验模拟过程。通过 Analyst 模块得到仿真试验的压缩力和位移数据,仿真模拟重复 3 次,压缩试验仿真如图 20 所示。

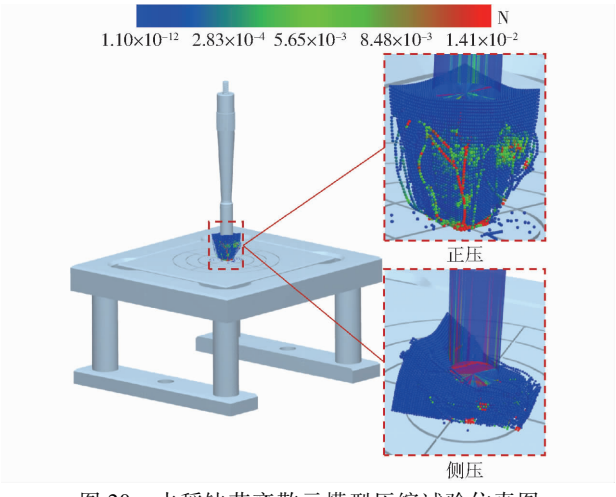


图 20 水稻钵苗离散元模型压缩试验仿真图

Fig. 20 Simulation diagram of discrete element model compression test for rice pot seedlings

4.3 结果分析

图 19、20 表明,水稻钵苗被剪切(压缩)过程的仿真结果与试验结果趋向一致,且与现象相吻合。选取水稻钵苗钵体的压缩与剪切试验,将通过试验得到的试验数据与仿真数据做均值化处理,并绘制压缩力(剪切力)与位移曲线,如图 21、22 所示。在压缩力与位移的关系曲线中,在正压阶段和侧压阶段,均是以仿真载荷所达到的最大值作为基准参照,进而确定并获取压缩台的行进位移。在剪切力与位移的关系曲线中,确定并获取最大剪切载荷数据作为参考,见表 4。分析得到,在侧压载荷为 37 N 以及正压载荷为 48 N 时,仿真获取的压缩台行进位移与实测值的误差为 5.01% 和 2.167%;水稻钵体剪切

最大载荷与实测值的误差为 3.71%，所得误差在试验结果的标准范围内。表明模型参数的结果可靠，能较好地反映水稻钵苗钵体在压缩与剪切作用下的物理过程。

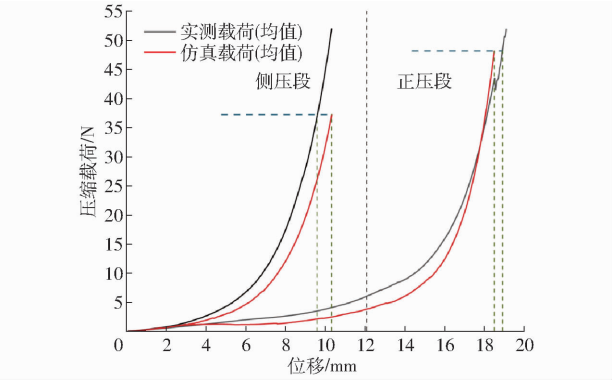


图 21　压缩载荷与位移曲线

Fig. 21　Compression load and displacement curves

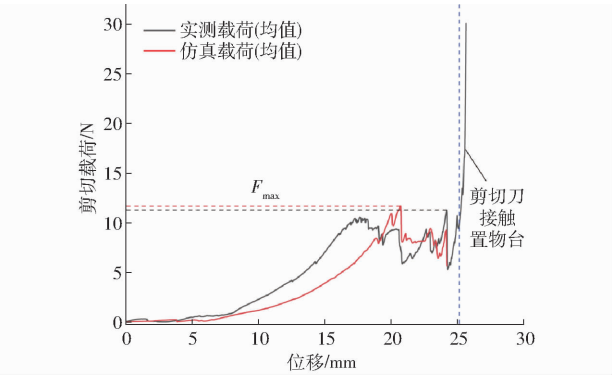


图 22　剪切载荷与位移曲线

Fig. 22　Shear force and displacement curves

表 4　水稻钵苗试验实测与仿真结果

Tab. 4　Measured and simulated results of rice pot seedling experiment

类别	压缩台行进位移/mm		剪切最大载荷 F/N
	侧压载荷 37 N	正压载荷 48 N	
实测均值	9.650	18.878	11.263
仿真均值	10.159	18.469	11.697
相对误差/%	5.01	2.167	3.71

在水稻钵苗剪切过程中，随着时间的推移，剪切力的变化呈现出阶段性特征，如图 22 所示：初期，剪切载荷平稳过渡；随后，呈现出逐步爬升的态势；最后出现不规则的大幅波动。进一步分析试验结果：①初期载荷趋近于 0 N，其原因是剪切刀在该阶段处于茎秆间空隙处，处于空载。②出现大幅波动的原因极可能是水稻钵苗钵体底部根系盘结关系不同，所表现出根系在其生长纵深方向根系体积占比存在较大差异，以及在根系生长切面上根系分布存在较大差别。

5　结论

（1）通过破坏性试验明确水稻钵苗根系构成：即单株水稻秧苗包含 1 株茎秆、1 根种子根、7 ~ 10 根不定根以及 2 ~ 4 根分支根，各类型根平均直径为 0.39 ~ 0.49 mm，平均长度为 26.4 ~ 85.36 mm。通过水稻根段的拉伸与剪切试验，测得平均最大载荷分别为 0.748 67 N 和 0.699 72 N。同时，明确了仿真模型所需的静摩擦因数、滚动摩擦因数等主要仿真参数。

（2）基于 L 系统建模方法，构建了根-根及根-钵盘边界生长判定函数，依托 Matlab 软件获得了根系在钵体空间内的生长拓扑轨迹曲线，并建立了水稻钵苗三维模型；通过开展水稻钵苗根系表征现象、完整根体积占比及纵向分布根体积占比试验分析，测得其实测与仿真值的误差分别为 3.82%、4.82%（上）、5.11%（中）和 2.67%（下），验证了该模型的准确可行。

（3）设定各类型根系及基质离散元球型颗粒直径，求解出完整钵苗根系及基质颗粒的中心点坐标。依托 EDEM 软件结合 Edin Burgh Elasto-Plastic Adhesion with Bonding 接触模型构建水稻钵苗钵体离散元模型；通过水稻钵苗剪切与压缩试验验证表明，仿真位移及剪切载荷与实测值误差分别为 5.01%、2.167%、3.71%，均在标准误差范围内。表明水稻钵苗根-基质钵体复合体离散元模型参数准确有效，可为后续栽植过程中推秧爪与钵体互作研究提供技术基础。

参　考　文　献

[1]　李泽华，马旭，李秀昊，等. 水稻栽植机械化技术研究进展[J]. 农业机械学报，2018，49(5)：1 - 20.
LI Zehua, MA Xu, LI Xiuhao, et al. Research progress of rice transplanting mechanization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 1 - 20. (in Chinese)

[2]　XIN L, LV Z, WANG W, et al. Optimal design and development of a doublecrank potted rice seedling transplanting mechanism [J]. Transactions of the ASABE, 2017, 60(1): 31 - 40.

[3]　ZHAO J, YU J, SUN K, et al. A discrete element method model and experimental verification for wheat root systems[J]. Biosystems Engineering, 2024, 244: 146 - 165.

[4]　ZOU L, YAN D, NIU Z, et al. Parametric analysis and numerical optimisation of spinach root vibration shovel cutting using discrete element method[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 212: 108138.

[5]　LIU Y, ZHAO J, YIN B, et al. Discrete element modelling of the yam root-soil complex and its verification[J]. Biosystems Engineering, 2022, 220: 55 - 72.

[6] HORABIK J, MOLENDA M. Parameters and contact models for DEM simulations of agricultural granular materials: a review [J]. Biosystems Engineering, 2016, 147: 206 – 225.
[7] ZHONG W, YU A, LIU X, et al. DEM/CFD – DEM modelling of non-spherical particulate systems: theoretical developments and applications[J]. Powder Technology, 2016, 302: 108 – 152.
[8] YANG L, WU P, LIAO M, et al. Three-dimensional modeling and visualization of rice root system based on the improved dual-scale automaton and L-system[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 195:106823.
[9] YANG L, WU P, ZUO Z, et al. ERoots: a three-dimensional dynamic growth model of rice roots coupled with soil[J]. Biosystems Engineering, 2024, 244: 122 – 133.
[10] 杨乐,彭军,龙兰,等. 基于三维动态生长模型的水稻根系模拟[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版),2022,48(5):613 – 618.
YANG Le, PENG Jun, LONG Lan, et al. Rice root system simulation research based on three dimensional dynamic growth model[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences),2022,48(5):613 – 618. (in Chinese)
[11] 杨猛,肖成. 与环境交互的根系动态生长可视化算法[J]. 农业机械学报,2022,53(7):275 – 281,300.
YANG Meng, XIAO Cheng. Visualization of growing dynamically of root system interacting with environment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(7):275 – 281,300. (in Chinese)
[12] 辛亮,王明成,张浩,等. 非圆齿轮-连杆组合式水稻钵苗膜上移栽机构优化设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(8):63 – 70.
XIN Liang, WANG Mingcheng, ZHANG Hao, et al. Optimization design and experiment of non-circulargear – linkage combination type transplanting mechanism of rice pot seedling on film[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(8):63 – 70. (in Chinese)
[13] 丁仕林,刘朝雷,钱前. 水稻根系遗传研究进展[J]. 中国稻米,2019,25(5):24 – 29.
DING Shilin, LIU Chaolei, QIAN Qian. Research progress on genetic of rice root[J]. China Rice,2019,25(5):24 – 29. (in Chinese)
[14] 陈远玲,王梦乔,金亚光,等. 基于离散元法的潮湿甘蔗复合肥参数标定[J]. 中国农机化学报,2024,45(1):229 – 236.
CHEN Yuanling, WANG Mengqiao, JIN Yaguang, et al. Parameter calibration of moist sugarcane compound fertilizer based on discrete element method[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2024,45(1):229 – 236. (in Chinese)
[15] 熊海桥,蒋立华,罗轶先,等. 基于粒子系统的物理约束植物根生长建模[J]. 计算机应用, 2002,22(7): 39 – 41.
XIONG Haiqiao, JIANG Lihua, LUO Yixian, et al. A physically restrained plant root growing model based on particle system [J]. Journal of Computer Applications, 2002,22(7): 39 – 41. (in Chinese)
[16] 王东伟,路通,赵壮,等. 滨海盐碱地耕作层土壤离散元仿真参数标定方法[J]. 农业机械学报,2024,55(11):240 – 249.
WANG Dongwei, LU Tong, ZHAO Zhuang, et al. Calibration of discrete element simulation parameters for cultivated soil layer in coastal saline alkali soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(11):240 – 249. (in Chinese)
[17] 夏俊芳,张朋,苑宏文,等. 水稻秸秆离散元柔性模型参数标定与试验验证[J]. 农业机械学报,2024,55(9):174 – 184.
XIA Junfang, ZHANG Peng, YUAN Hongwen, et al. Calibration and verification of flexible rice straw model by discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(9):174 – 184. (in Chinese)
[18] 马国鑫. 生物炭苗钵低损取苗增强机理与气顶-包裹夹取式取苗机构研究[D]. 镇江:江苏大学,2021.
MA Guoxin. Study on enhancement mechanism of low loss seedling picking in biochar and air ejection-package clamping pick-up device[D]. Zhenjiang: Jiangsu University,2021. (in Chinese)
[19] 王小琴,俞高红,刘霓红,等. 温室劣苗基质离散元仿真参数标定[J]. 农业机械学报,2023,54(12):359 – 366.
WANG Xiaoqin, YU Gaohong, LIU Nihong, et al. Calibration of discrete element simulation parameters for greenhouse inferior seedling substrate[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(12):359 – 366. (in Chinese)
[20] ZHANG J, WANG J, DU D, et al. Optimization and validation of root-cutting device for Chinese cabbage harvester based on discrete element method[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 214:108314.
[21] SHI Y, JIANG Y, WANG X, et al. A mechanical model of single wheat straw with failure characteristics based on discrete element method[J]. Biosystems Engineering, 2023, 230: 1 – 15.
[22] 张凯,杨松. 基于离散元模拟的草本植物根系分布对黏土抗剪强度的影响研究[J]. 草原与草坪,2022,42(2):59 – 66.
ZHANG Kai, YANG Song. Influence of herbal plant root distribution on soil consolidation capacity based on discrete element simulation[J]. Grassland and Turf,2022,42(2):59 – 66. (in Chinese)
[23] SUN K, YU J, ZHAO J, et al. A DEM-based general modeling method and experimental verification for wheat plants in the mature period[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 214:108283.
[24] LEBLICQ T, SMEETS B, RAMON H, et al. A discrete element approach for modelling the compression of crop stems[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 123: 80 – 88.
[25] LEBLICQ T, VANMAERCKE S, RAMON H, et al. Mechanical analysis of the bending behaviour of plant stems[J]. Biosystems Engineering, 2015, 129: 87 – 99.