

基于 L 系统的紫花苜蓿动态生长根系模型构建

杨贵侠^{1,2} 袁胜洋^{1,2} 杨小玲^{1,2} 李思环^{1,2} 刘先峰^{1,2} 杨烜宇³

(1. 西南交通大学土木工程学院, 成都 610031; 2. 西南交通大学高速铁路线路工程教育部重点实验室, 成都 610031;
3. 山西省智慧交通研究院有限公司遥感测绘研究院, 太原 030026)

摘要: 针对现有紫花苜蓿根系动态生长模型和岩土工程生态防护方面的护坡植物根系模型空缺, 将传统的 L 系统进行改进, 提出了一种基于 L 系统的可应用于岩土工程生态防护领域的动态生长根系建模方法。通过控制伊犁黄土干密度、初始含水率和种植环境的温湿度等, 开展了紫花苜蓿种植, 统计了不同生长时间下的紫花苜蓿的主根根长、主根直径、侧根数量、侧根直径、侧根长度和侧根分支点等。结合紫花苜蓿生长参数, 基于 L 系统和建模技术, 完成了紫花苜蓿动态生长根系模型的构建。结果表明: 紫花苜蓿根系生长满足 Logistic 方程, 侧根与主根夹角为 $15^{\circ} \sim 60^{\circ}$, 侧根数量、分支间距和开始分支的长度等随着生长时间增加而增加, 主根下段直径稳定在 $0.01 \sim 0.04 \text{ mm}$, 靠近土壤表面的主根直径随时间变化较大; 侧根直径小, 直径变化也小。使用 Logistic 方程为紫花苜蓿根系生长模型, 基于 L 系统结合建模技术构建了可用于数值仿真的紫花苜蓿动态生长根系模型, 对该模型进行了验证, 结果表明根系模型整体误差小。本文基于 L 系统的紫花苜蓿动态生长根系模型成功将紫花苜蓿根系的动态生长可视化, 可应用于农业生产、植物学和岩土工程的数值仿真领域, 为紫花苜蓿根系动态生长模型和岩土工程生态防护方面的植物动态生长根系模型建立提供参考。

关键词: 紫花苜蓿; 动态生长模型; 根系; L 系统; 岩土工程

中图分类号: S529; U416.1⁺4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)01-0319-10 OSID: 

Construction of Dynamic Growth Root System Model for Purple Alfalfa Based on L System Theory

YANG Guixia^{1,2} YUAN Shengyang^{1,2} YANG Xiaoling^{1,2} LI Sihuan^{1,2} LIU Xianfeng^{1,2} YANG Xuanyu³

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China

2. Key Laboratory of High Speed Railway Line Engineering, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China

3. Remote Sensing and Mapping Research Institute, Shanxi Intelligent Transportation Research Institute Co., Ltd., Taiyuan 030026, China)

Abstract: In response to the existing deficiencies in the dynamic growth model of alfalfa root system and the root system model of slope protection plants in geotechnical engineering ecological protection, the traditional L system was improved. A dynamic growth root system modeling method based on the L system applicable in the field of geotechnical engineering ecological protection was proposed. By controlling the dry density, initial moisture content, temperature, and humidity of Ili loess, alfalfa planting was carried out. The main root length, main root diameter, number of lateral roots, lateral root diameter, lateral root length, and lateral root branching points of alfalfa at different growth times were recorded. Based on the growth parameters of alfalfa and L system and modeling technology, a dynamic growth root system model of alfalfa was constructed. The results indicated that the root growth of alfalfa followed the Logistic equation. The angle between lateral roots and main roots ranged from 15° to 60° . The number of lateral roots, branch spacing, and length of starting branches was increased with growth time. The diameter of the lower segment of the main root remained stable between 0.01 mm and 0.04 mm , while the diameter of the main root near the soil surface varied significantly with time. The lateral root diameter was small, and

收稿日期: 2024-09-26 修回日期: 2024-11-11

基金项目: 山西交控科技研发项目(2022-JKKJ-7)和国家自然科学基金项目(52478472)

作者简介: 杨贵侠(1999—), 男, 博士生, 主要从事生态防护和路基处理研究, E-mail: 1452690070@qq.com

通信作者: 袁胜洋(1987—), 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事非饱和膨胀土研究, E-mail: shengyang.yuan@swjtu.edu.cn

the diameter variation was also minor. Using the Logistic equation as the root growth model for alfalfa, a dynamic root growth model for alfalfa suitable for numerical simulation was constructed based on the L system combined with modeling techniques. The model was validated, and the results showed that the overall error of the root model was small. This L system-based dynamic growth root model of alfalfa successfully visualized the dynamic growth of alfalfa roots and can be applied to numerical simulation fields in agricultural production, botany, and geotechnical engineering. It filled the gap in the dynamic growth model of alfalfa roots and provided a reference for the establishment of plant dynamic growth root models in geotechnical engineering ecological protection.

Key words: purple alfalfa; dynamic growth model; root; L system; geotechnical engineering

0 引言

新疆地区作为一带一路战略核心区域,近年来修建了大量的交通运输线路,其中伊犁地区的交通线路大多穿越了畜牧区域^[1],导致大量牧区边坡出现裸露的情况。紫花苜蓿作为伊犁河谷地区乡土牧草,是一种根系发达的豆科植物,在当前低碳发展的大背景下,由于具有优异的抗逆性、耐旱性和护坡能力等,还被广泛运用于交通线路边坡的防护中^[2-7]。在生态护坡中,主要是通过植物根系对土体起到加筋、锚固和支撑等作用,进行土体加固^[8],此外,根系作为植物的三大营养器官之一,在植物与外界的能量、物质交换和信息传递中都起到至关重要的作用,不同生长时间段的植物根系理论生长情况还能用于评判植物的生长状态^[9-10]。

植物根系模拟涉及建模技术、计算机、植物科学与农林业等诸多领域,通常应用于计算机动画、教学、宣传等方面^[11],目前还鲜有将其与生态岩土领域相结合的例子。在植物科学和农林业方面,植物根系可视化建模多采用扫描或微根管法^[12],获取植物的真实构型,再依靠软件获取根系形态和拓扑结构,从而进行植物三维建模。该方法虽然能获取真实的植物根系数据,但在构建动态生长的植物根系模型方面,却较为复杂繁琐。其次是使用 L 系统进行植物根系的可视化^[13],这种方法通过总结植物根系生长规律,使用计算机较好的模拟出植物根系。虽然已有学者^[14]使用该方法建立植物根系模型,但却鲜有针对紫花苜蓿根系动态生长模拟的研究报道。在生态岩土护坡方面,植物根系模型常应用于数值仿真领域,考虑的因素较为单一,通常将根系简化为等长的直线或是三叉形锚杆进行数值仿真^[15-16],缺少了对植物根系长度、粗细等要素的考虑,而实际生态防护边坡中,伴随着植物生长时间的变化,根系长度和直径等都会产生变化,这使得在植物根系不同的生长时间下加固边坡土壤的性能不同^[17],增大了数值仿真还原真实生态边坡的难度,导致传统植物根系模型与现实生态防护边坡的差距

较大。针对能适用于生态岩土护坡的动态植物根系生长模型需进一步开展研究。

鉴于此,本文拟采用新疆伊犁黄土为种植土壤,搭建植物温室,提取恒定温度、湿度等情况下不同生长周期的紫花苜蓿生长数据,通过 L 系统建立植物根系动态生长模型,以建模软件对 L 系统的动态生长模型进行数值仿真建模,从而获得可用于生态岩土护坡数值仿真的紫花苜蓿动态根系生长模型,以期为紫花苜蓿动态生长模型构建和生态护坡数值仿真提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料与方案

以紫花苜蓿为研究对象,开展根系动态生长模型构建。以伊犁黄土为种植土壤,根据相关学者研究^[18]及现场试验研究可知,原状伊犁黄土土粒相对密度 G_s 为 2.72,天然含水率为 6.18% ~ 6.73%,现场土体少量浇水后含水率能达到 10% 左右,液限 ω_L 为 29.2%,塑限 ω_p 为 19%。

基于已有不同伊犁黄土干密度对紫花苜蓿生长发芽影响的研究成果,本试验将伊犁黄土干密度控制为 1.3 g/cm³ 开展紫花苜蓿种植,土壤初始含水率为 10%,李宏钧等^[19]提到伊犁地区某一典型公路的生态防护区域,边坡覆土厚度在 20 cm 时,护坡质量最好,拟设计种植土壤深度为 20 cm。为便于根-土混合物的完整取出,将 PVC 管(直径 10.5 cm)均匀分割为 5 cm 厚度,使用透明胶带将 4 个分割短管缠绕制作作为高 20 cm 的种植桶。

种植土壤填筑前,对伊犁黄土进行干燥过筛处理,筛子孔径为 2 mm^[20],处理后的伊犁黄土分层填筑到种植桶中,干密度控制为 1.3 g/cm³,每层土壤高度为 5 cm,每层填筑完成后浇水至土壤含水率为 10%,最后 5 cm 填筑时,将紫花苜蓿种子与种植土壤混合均匀再进行填筑,试样制作完成后置于种植温室中。本试验制作多个试样,控制所有试样每日浇水量相同,以 7 d 为一个周期,连续 3 d 进行植物根系数据统计,直到根系长度达到 20 cm,根系数据

记录时,将种植桶上的透明胶带揭下后,分层将 PVC 管从根-混合体上推出,获取到完整的根-土复合体试样,再用水洗的方法获取完整的紫花苜蓿根系,使用游标卡尺统计主根和侧根的长度、直径以及侧根间距等,使用量角器统计侧根与主根的夹角,具体试验方案如表 1 所示,表中试样名称的 1、2、3 对应种植时间为 6、7、8 d 的试样,以此类推。为保证模型的可靠性与普适性,基于种植温室,开展两批次重复种植与数据统计,每个数据统计时间节点采集不多于 40 个样本,共计 687 个样本。

表 1 种植试验方案
Tab.1 Planting experiment plan

试样名称	种植土壤初始	种植土壤初始干	统计
	含水率/%	密度/(g·cm ⁻³)	
1、2、3	10	1.3	6、7、8
4、5、6	10	1.3	13、14、15
7、8、9	10	1.3	20、21、22
10、11、12	10	1.3	27、28、29

1.2 种植温室搭建

紫花苜蓿种植时间跨度长,生长受温湿度影响较大^[21],所以采用植物温室控制温湿度开展紫花苜蓿的种植试验,获取根系生长数据。种植温室通过温湿度传感器记录温室的温湿度,并据此调整加热器、降温空调和加湿器。由于室内种植,缺少光照,因此加入全光谱植物补光灯为紫花苜蓿进行补光;为增加温室的透气性并使室内种植更贴近自然状态,增加带有排气扇的通风口模拟空气流动。种植温室结构简图如图 1 所示,温度控制为 18 ~ 25℃,相对湿度控制在 55% ~ 75%。

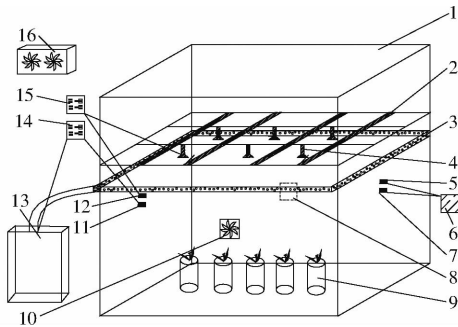


图 1 植物种植温室结构简图

Fig.1 Structural diagram of plant planting greenhouse

- 1. 薄膜温室架 2. 全光谱植物补光灯 3. 水雾导管 4. 加热器
- 5. 温度传感器 6. 温湿度采集仪 7. 湿度传感器 8. 排风口
- 9. 试样 10. 通风口(装有排气扇) 11. 湿度控制器探头 12. 温度控制器探头 13. 加湿器 14. 湿度控制器 15. 温度控制器
- 16. 降温空调

1.3 基于 L 系统的根系动态生长模型构建方法

L 系统的本质是字符串的重写,依靠初始公理

的定义和迭代置换规则形成不同的分形图形^[22],根据定义的初始公理可以定义模拟植物初始状态,迭代置换规则表示在每个演化周期系统状态的变化规则,通过控制迭代置换规则可以获取不同形态的图形,通过迭代次数的增加,所得到的图形会更加复杂^[23]。通过对某一特定字符定义划线或者方向转变等,可以将 L 系统图形进行可视化。如定义公理为 X ,把 X 中的字符作为第 0 次迭代的结果字符;调用 Y 中相应规则改写为第 i 次迭代完成后的字符,得到第 $i+1$ 次迭代的结果字符,根据 L 系统的定义则能写出上述字符串的生成过程,公理 $X = B$,产生规则为 $P_1: B \rightarrow A, P_2: A \rightarrow AB$,据此第一次迭代 B 被 A 换掉。第 2 次迭代的第 1 次迭代结果中的 A 被 AB 替换,在下次迭代中 AB 两个字母将同时被替换,得到新的字母组合 ABA ,这个过程可以一直进行下去,最后得到一个由 A 和 B 2 个字母组成的复杂字符串序列,如图 2 所示。

B
A
AB
ABA
ABAAB
ABAABABA
ABAABABAABA
ABAABABAABAABA

图 2 L 系统例子

Fig.2 Example of L system

植物根系在生长中具有自相似性的分形规则,并且植物根系的生长可以看作是一个连续和重复的过程^[24],根据确定的某一植物根系的生长规律,可以较好地模拟植物根系的动态生长过程。近年来 Python 因其应用面广、库多、语法优雅等优点成为编程首选,而植物模拟大多使用 C++、Java 和 Matlab 等平台^[11,14,23],暂时还缺少 Python 进行植物模拟的实例,本次紫花苜蓿根系动态生长模型程序在 Python 中完成编译,所有程序编写均自主完成。

L 系统的动态生长根系模型主要包括根系身长规则和根系分支规则 2 个方面,由于植物根系的粗细变化会对数值仿真结果造成影响,并且岩土边坡数值仿真软件模型多需划分网格,才能进行应力和位移的计算,据此紫花苜蓿动态生长模型将通过 Python 建立忽略根系粗细的线模型,通过导入建模软件(Rhino)进行根系粗细的建模并划分网格,使得紫花苜蓿根系的动态生长模型能应用于 Flac3D、Abaqus 等典型数值仿真软件中,本文以 Flac3D 为例。植物根系并不是无限伸长的,杨乐等^[25]将水稻根系分为 2 个生长速率阶段,建立出生长速率分阶段的动态生长模型,但该模型对未知生长速度的植

物根系并不适用,并且 2 个生长速率交界处的根系生长难以精准控制;由于 Logistic 方程满足植物动态生长情况、参数确定方便和参数较少等优点现被常用于植物的动态生长模型^[26],如张慧春等^[27]使用 Logistic 方程对南芥的叶片面积和主茎长度进行动态模型构建,王全九等^[28]也基于 Logistic 方程对叶片面积生长进行了研究,但目前大多研究集中于将 Logistic 方程应用于地表以上的植物部分模拟,还鲜有运用于根系动态生长的例子,本文拟采用 Logistic 方程对已有根系生长数据进行拟合确定相关参数,开展根系动态生长模型的构建,方程为

$$L(t)=\frac{a}{1+be^{-ct}}$$

(1)

式中 $L(t)$ ——某一生长时刻根系长度,cm
 a ——模型尺寸上限,cm
 b ——常数
 c ——生长速度参数
 t ——生长时间,d

当胚根朝一定方向生长到一定程度,将会在胚根上长出侧根,侧根依靠与主根的夹角 θ 和径向角 λ 确定生长方向,其中 θ 为一个范围值,需根据实际情况测出, λ 为 $0\sim2\pi$ 的均匀随机取值,如图 3 所示。根系的生长过程中,为使根系生长的随机性更强,对紫花苜蓿的初始根系生长方向增加随机的角度变化,即当植物根系生长长度为 L 时,下一段根系生长将在上一个生长段的终点增加随机角度进行增长,增长长度为 d_L ,当 d_L 增长到生长函数控制的长度时停止生长,以此循环迭代进行根系增长。

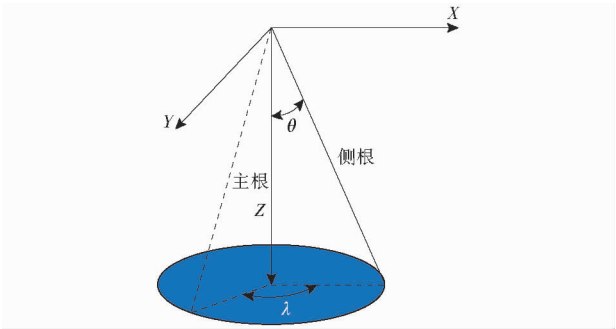


图 3 根系生长方向
Fig.3 Root growth direction

紫花苜蓿为直根系的植物,即根系由一条主根和多个侧根构成^[29],侧根均从主根上长出,侧根的生长具有自相似的特性。根系一般分为顶端不分支区域 G 和分支区域 H, $L_{\max}$ 为分支间的最大间距(侧根生长间距), $L_{\min}$ 为分支间的最小间距,当 L 系统迭代 i 次时最大的分支数为 n ,如图 4 所示。即在紫花苜蓿根系生长初期侧根并不会长出,这就需要通过根系监测,确定侧根的长出时间和某一生长时期

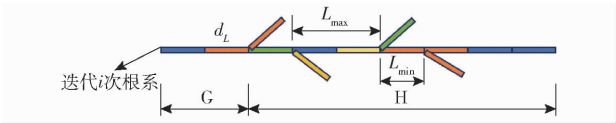


图 4 紫花苜蓿根系自相似结构图

Fig.4 Self similarity structure diagram of alfalfa root system

侧根的数量,依据根系之间的间距,控制侧根在这个间距中随机长出,由此固定侧根开始生根时间、每次迭代后新生长侧根的数量和距离。

由此在产生第 n 个侧根分支时的胚根根长计算式为

$$L=M+(n-1)H_m$$

(2)

式中 L ——产生第 n 个侧根分支时主根根长,cm
 M ——顶端不分枝区域的长度,cm
 H_m —— $L_{\min}$ 和 $L_{\max}$ 之间的任意值,cm

2 结果

2.1 紫花苜蓿根系生长随时间变化规律

紫花苜蓿在种植后第 4 天开始萌芽,为便于观测根系生长情况,于第 6 天开始对根系数据进行收集,连续收集 3 d,并以 7 d 为一个周期。在种植 28 d 左右时,由于根系长到 20 cm 左右,为探究根系长期生长的情况,采集了种植后 59、60、61、62 d 的根系生长数据,主根长度如图 5 所示,由图 5 可知,紫花苜蓿主根的生长大体呈现 S 形,对数据进行拟合后 R^2 为 0.98,式(1)能很好地拟合紫花苜蓿主根的生长,如图 5 所示。

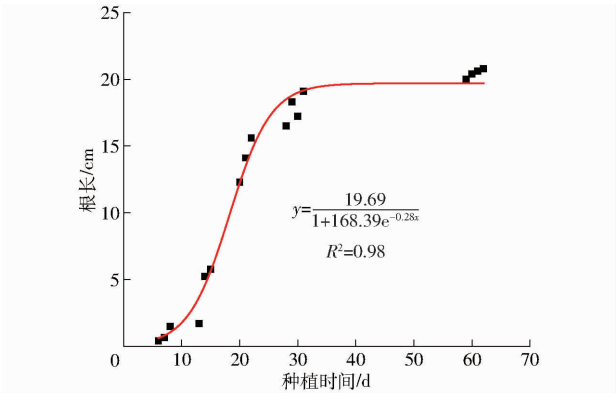


图 5 根长随时间变化拟合图

Fig.5 Fitting graph of root length over time

种植温室中的紫花苜蓿根系如图 6 所示,由于根系直径是单独考虑并进行实体建模,后续将主根和侧根的直径参数单独给出,紫花苜蓿侧根周期性生长规律如表 2 所示,由于根系分支情况如图 3 中的 λ 为 $0\sim2\pi$ 随机值,据此仅需通过量角器对根系的 θ 进行测量统计即可,侧根与主根的夹角为 $15^\circ\sim60^\circ$;侧根生长长度随时间变化的关系曲线较难获取,但基于数据统计获取了不同生长时间侧根的长



图 6 种植温室紫花苜蓿根系图

Fig. 6 Root system diagram of purple alfalfa in greenhouse

表 2 紫花苜蓿侧根生长指标

Tab. 2 Lateral root growth indicators of purple alfalfa

记录 时间	侧根与主 根夹角/ (°)	侧根 长度/ cm	侧根 条数	侧根分支 间距/mm	侧根开始 分支长度/ cm
第 7 天	0	0	0	0	0
第 14 天	15 ~ 42	1 ~ 3.3	0 ~ 3	0 ~ 0.3	1.2 ~ 3.01
第 21 天	15 ~ 60	2.1 ~ 5.4	3 ~ 7	0 ~ 2.02	2.3 ~ 5.04
第 28 天	18 ~ 48	2.4 ~ 7.2	7 ~ 16	0 ~ 3.32	3.1 ~ 5.5

度范围,对侧根进行计数,随着种植时间的增加侧根长度呈现增加的趋势;侧根在第 14 天左右数量较少,随着种植时间的增加侧根数量也呈现增加的趋势,并且通过游标卡尺统计侧根间距,随着时间增加侧根间的分支间距会增加,侧根开始分支的长度也呈现增加的趋势,这可能是根系的细胞生长造成的。

根系实体建立需考虑主根的直径变化和侧根的直径变化,使用游标卡尺对不同生长时间根系直径测量,统计出主根和侧根不同生长周期下的直径变化范围如表 3 和表 4 所示。在进行实体建模过程中,由于主根较长,仅通过根系变化范围不能很好地对根系进行建模,在统计主根根系直径时,将主根分为了上段、中段和下段,如表 4 所示。由于种植第 7 天时,根系较短,共同测量记为上段直径。随着生长时间的增加主根直径和侧根直径均会增加,其中主根最小直径基本不变,均位于根尖的下段直径中,根尖处直径稳定在 0.01 ~ 0.04 mm,变化最为明显的

表 3 根系直径变化

Tab. 3 Root diameter variation

记录时间	主根直径	侧根直径
第 7 天	0.02 ~ 0.03	0
第 14 天	0.02 ~ 0.28	0 ~ 0.02
第 21 天	0.01 ~ 0.33	0 ~ 0.04
第 28 天	0.01 ~ 0.41	0 ~ 0.05

表 4 主根不同位置的根系直径

Tab. 4 Root diameter at different positions of main root

记录时间	上段直径	中段直径	下段直径
第 7 天	0.02 ~ 0.03		
第 14 天	0.16 ~ 0.28	0.06 ~ 0.13	0.02 ~ 0.03
第 21 天	0.16 ~ 0.33	0.06 ~ 0.17	0.01 ~ 0.04
第 28 天	0.23 ~ 0.41	0.05 ~ 0.27	0.01 ~ 0.03

是上段直径;相较主根,侧根直径显得较小,但在种植 21 d 之后,直径也能达到 7 ~ 14 d 的主根直径范围,结合图 5 和表 2 主根和侧根的长度来看,当侧根生长到一定时间会形成相当于早期的主根,这对土壤强度也会有相应的影响。

2.2 紫花苜蓿根系骨架建立

紫花苜蓿周期性生长参数如表 2 所示,侧根与主根的夹角定为 15° ~ 60°;通过表 2 中的侧根长度、数量、分支间距和分支长度等范围与生长时间绑定进行侧根的控制;主根的生长长度由图 5 的生长函数进行控制。使用 Python 平台,基于 L 系统的紫花苜蓿根系生长骨架和非同一株不同生长时间下紫花苜蓿根系对比如图 7 所示,由图 7 可知,由于紫花苜蓿根系的自相似性,通过控制根长生长、侧根夹角和侧根长度等参数,使用 L 系统能较好地紫花苜蓿根系进行模拟。

2.3 紫花苜蓿根系实体建立

Rhino 是一款 3D 建模软件,能够导出高精度的模型供其它的三维软件使用,其中包括岩土工程中常用的数值仿真软件 Flac3D,据此采用 Rhino 作为本次紫花苜蓿的根系实体建模软件。由于实体单元的建立通常需要进行网格划分,但针对较为精细或者较小的物体会造成物体导出不全等问题,据此使用 Griddle 犀牛网格划分插件对 Rhino 中建立的根系模型进行网格划分。

在 Python 中导入 ezdxf 库,将模拟的紫花苜蓿根系导出 AutoCAD 和 Rhino 等软件能打开的 dxf 文件,在 Rhino 中打开根系模拟文件,进行建模。根据表 3 和表 4 的紫花苜蓿主根和侧根直径情况,使用多段圆台对植物根系直径进行建模,以根系骨架为圆台中心线分段建立根系实体模型,对圆台截面直

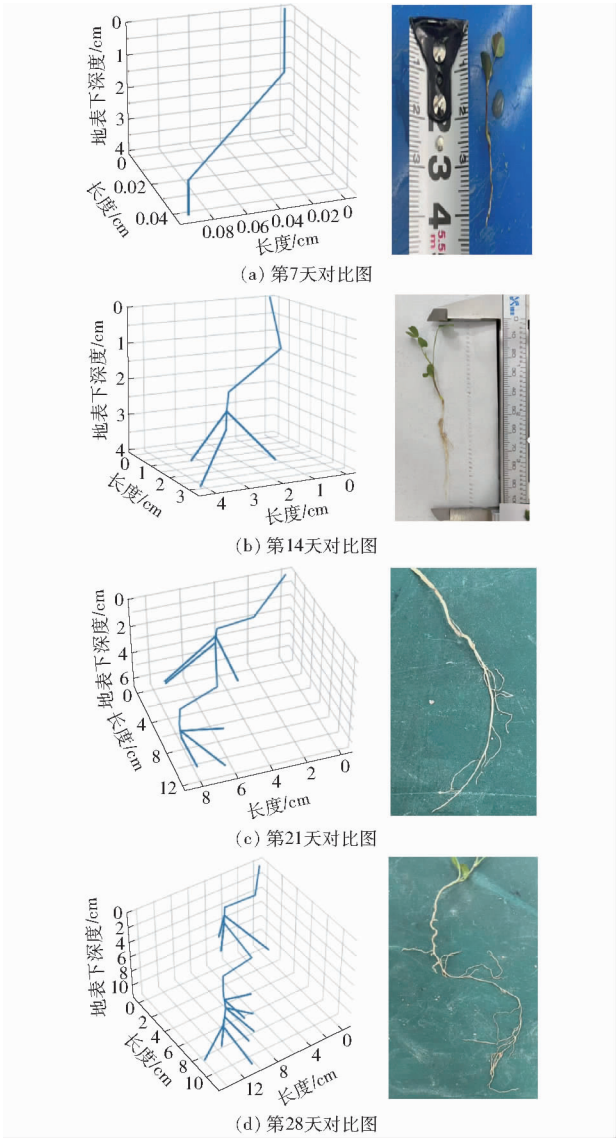


图7 紫花苜蓿根系骨架和真实根系对比图

Fig.7 Comparison between root skeleton and real root system of purple alfalfa

径进行控制即可实现根系直径的控制,由于骨架模型的存在,根系长度、角度等实体建模均不再考虑,建模和网格划分后的紫花苜蓿根系如图8所示,通过对紫花苜蓿根系进行实体建模,使得动态生长根系模型更加接近真实状态下的紫花苜蓿根系,高度还原了不同生长时间下的紫花苜蓿根系的根长、直径变化和侧根数量等,此外在Rhino软件的渲染模式下,对根系进行渲染,能够更加逼真地实现根系的可视化。

在岩土工程领域,数值仿真被用于探究土壤或岩石在受力状态下的位移、应力和应变等分布情况。通过在Rhino中建立种植过程中的PVC管土柱,以此还原试验中不同生长时期下的土壤-紫花苜蓿根系混合体。使用Griddle犀牛网格划分插件将紫花苜蓿根系动态生长模型和土柱导出为grid网格文件,在Flac3D中打开,如图9所示,高度还原了种植

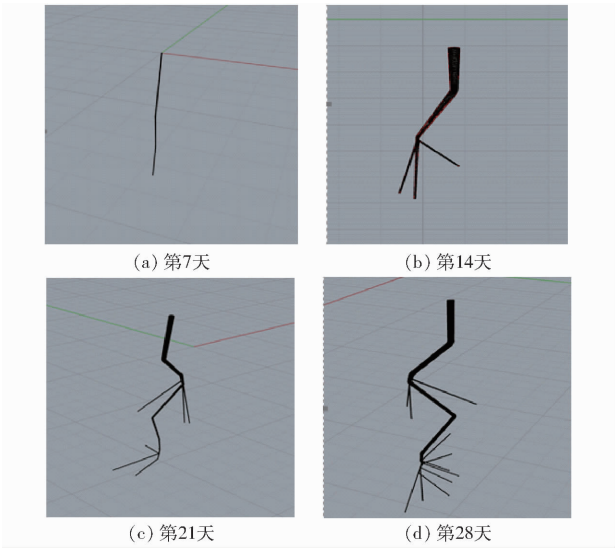


图8 紫花苜蓿根系实体图

Fig.8 Solid diagrams of purple alfalfa root system

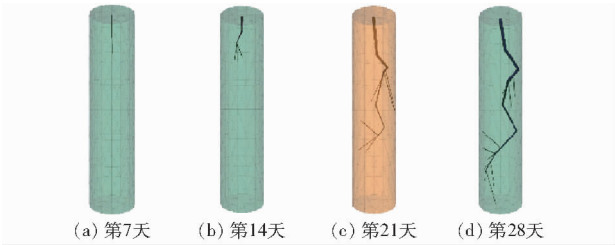


图9 数值仿真土壤-紫花苜蓿根系图

Fig.9 Numerical simulation of soil - alfalfa root system diagrams

温室中生长过程中的紫花苜蓿根系情况,可以据此开展直剪、三轴等根-土混合体的强度数值仿真。

在Flac3D中,通过坐标信息统计紫花苜蓿根系各生长时间段的主根和侧根相关参数,如表5~7所示,表5为主根的相应参数,根系模型的主根直径与实际根系直径平均误差为0.03mm,平均长度误差为0.23cm;模型的侧根与主根夹角平均误差为4.75°,侧根数量范围内没有误差,侧根长度误差为0.37cm,侧根分支间距误差为0.13mm,侧根开始分支长度均符合实际根系情况。模型中的主根与侧根参数虽然与实际参数具有一定误差,但误差相对

表5 主根实际参数与模型参数

Tab.5 Actual and model parameters of main root

时间	主根直径/mm			主根长度/cm		
	试验记录	模型	误差	试验记录	模型	误差
第7天	0.02 ~ 0.03	0.02 ~ 0.03	0	0.61 ~ 1.65	2.6	0.95
	0.02 ~ 0.28	0.02 ~ 0.22	0.06	3.5 ~ 5.24	4.35	0
第14天	0.01 ~ 0.33	0.02 ~ 0.32	0.02	11.34 ~ 16.54	14.96	0
	0.01 ~ 0.41	0.02 ~ 0.38	0.04	16.5 ~ 20.4	18.79	0

表 6 侧根与主根夹角、数量及长度参数

时间	侧根与主根夹角/(°)			侧根数量			侧根长度/cm		
	试验记录	模型	误差	试验记录	模型	误差	试验记录	模型	误差
第 7 天	0	0	0	0	0	0	0	0	0
第 14 天	15 ~ 42	20 ~ 47	5	0 ~ 3	2	0	1.0 ~ 3.3	1.4 ~ 2.5	0.8
第 21 天	15 ~ 60	19 ~ 52	8	3 ~ 7	6	0	2.1 ~ 5.4	2.4 ~ 5.2	0.3
第 28 天	18 ~ 48	16 ~ 54	6	7 ~ 16	10	0	2.4 ~ 7.2	2.5 ~ 6.8	0.4

表 7 侧根分支间距及开始分支长度参数
Tab.7 Parameters of lateral root branch spacing and starting branch length

时间	分支间距/mm			开始分支长度/cm		
	试验记录	模型	误差	试验记录	模型	误差
第 7 天	0	0	0	0	0	0
第 14 天	0 ~ 0.3	0.2	0.1	1.2 ~ 3.01	2.7	0
第 21 天	0 ~ 2.02	0 ~ 1.76	0.26	2.3 ~ 5.04	3.2	0
第 28 天	0 ~ 3.32	0 ~ 3.15	0.17	3.1 ~ 5.5	4.6	0

较小,并且根系模型相关参数基本满足实际根系参数范围,可见本紫花苜蓿的动态生长模型与实际根系情况基本符合,模型还原效果良好。

3 讨论

3.1 紫花苜蓿根系动态生长模型与现有根系模型比较

传统的 L 系统植物根系模拟为固定性模拟,即根据根系经验模型进行根系模拟^[30],生成的植物根系单一,不能很好地将生长时间与生长模型连接起来,在定量描述上存在较大局限性,并且不能反映环境变化下的根系生长情况。曹红飞等^[31]定义了一种水生植物的生成方法,但不涉及植物的动态生长过程。LEITNER 等^[32]依靠 Matlab 平台开发的 RootBox 系统虽然实现了根系的动态生长过程,但却忽略了根系由粗变细的过程。也有学者开发出微分 L 系统用于模拟根系生长,如杨乐等^[25]通过微分方程控制生长时间的粒度控制水稻根系的生长,但真实中的根系需不断地调整生长时间,较为繁杂。近年来还发展出一种基于机理描述的根系模型,能较好地反映出土壤条件、温湿度条件等情况对根系分布的影响,但此类模型研究成本较大,侧重于根系数量分布上,在形态方面欠缺较大,如 CLAUSNITZER 等^[33]模拟的根系生长与水土状态间的动态交互,倾向于根系数量分布。

本文以种植温室获取了紫花苜蓿生长过程中的重要参数,开展了根系动态生长的模拟,用紫花苜蓿根系生长长度模型控制了根系随时间的变化情况,再以直径随时间变化模型和骨架建模相结合的方法进一步完成了根系的三维模拟,从而精确控制了植

物根系随时间的变化。其次,本文的 L 系统通过调整主根生长模型、侧根分支点、长度和数量等情况,就能实现各种种类植物根系的生长模型构建,这极大地增大了本根系系统的推广性。植物根系生长受环境影响较大^[21],本文所述实现根系动态生长模型的方法也适用于不同环境下根系模型实现,如改变种植温室中的温湿度、土壤类型、土壤干密度和土壤深度等,即可获取不同环境条件下的根系生长数据,从而模拟某地固定植物种类的根系随时间生长情况,获得生长模型,从而完成特定植物根系的模拟。

本文所述的紫花苜蓿动态生长模型,在根系的弯曲上模拟得较为生硬,根系骨架直接使用了直线替代,这使得根系模型的可视化上尚有欠缺,这也是本文 L 系统值得改进的地方。

3.2 根系生长模型在岩土工程中的可能应用探讨

边坡治理是岩土工程领域的一大重点^[34],目前边坡治理多使用生态防护,不仅能解决绿化和生态等问题,还能起到加固边坡的作用^[35-36],国内外许多学者开展了植物根系加固边坡土体的研究,大体分为基础试验和数值仿真 2 种^[8, 37],其中基础试验是探究根-土混合体的力学效益和植被产生的水文作用,如通过直剪试验探究根-土复合体强度、抗冲刷试验探究水土保持性能和长期监测探究土壤体积含水率和基质吸力的变化情况^[16, 38-40];数值仿真方面除了可以模拟基础试验,还能模拟大型的生态边坡在降雨和地震等情况下的应力和变形等^[41-42],目前的数值仿真在生态模拟方面通常将根简化为直线或叉形的锚杆^[15-16],但真实的植物根系的长度、表面积、直径和生长周期均会对土体产生影响^[17],并且植物根系与锚杆的材料性能也不相同,在大型的生态边坡模拟中,这会导致实际情况与模拟差距较大。

本文的动态根系生长模型,可以很大程度上还原不同时期植物根系的长度、直径和表面积等,可以填补紫花苜蓿根系在岩土工程方面的空缺,应用于上述基础试验的数值模拟和生态边坡的稳定性模拟中。

4 结 论

(1)以紫花苜蓿为研究对象,通过控制种植土壤(伊犁黄土)的干密度和初始含水率等,在种植温室中开展了紫花苜蓿种植,统计了紫花苜蓿不同生长时间下的主根和侧根的长度、直径以及侧根间距等,基于L系统结合建模技术实现了可用于岩土工程领域数值仿真软件的紫花苜蓿根系动态生长模型。

(2)紫花苜蓿主根生长满足 Logistic 方程,即随着种植时间延长,主根生长速度呈现先增大后减小,最后根系长度趋于平稳的规律;侧根与主根夹角为 $15^{\circ}\sim 60^{\circ}$,侧根数量、分支间距和开始分支的长度等随着生长时间增加而增加;主根下段直径基本不随时间变化而变化,稳定在 $0.01\sim 0.04\text{ mm}$,靠近土壤表面的主根直径随时间变化最大;侧根直径小,直径变化也小。

(3)基于L系统和确定的紫花苜蓿根系生长模型,控制根系生长过程中的主根长度、直径以及侧根与主根的夹角、长度、条数、分支间距、开始分支长度等,完成了紫花苜蓿动态生长根系骨架;基于根系骨架,通过建模技术还原根系直径,建立出可用于数值仿真的紫花苜蓿根系动态生长模型。

(4)对建立的紫花苜蓿动态生长根系模型进行了验证,主根方面,直径平均误差为 0.03 mm ,平均长度误差为 0.23 cm ;侧根方面,夹角平均误差为 4.75° ,数量范围没有误差,长度误差为 0.37 cm ,分支间距误差为 0.13 mm ,开始分支长度符合实际根系情况,整体误差小。

(5)本文所述的基于L系统的紫花苜蓿根系模型可以模拟不同生长时间下的紫花苜蓿根系的生长情况,将紫花苜蓿根系的动态生长可视化,可用于精细化的农业生产、植物学和岩土工程数值仿真领域。

参 考 文 献

[1] 冯定原,吕新,罗先平. 新疆伊犁地区畜牧气象灾害主成份线性加权评估模型[J]. 南京气象学院学报,1995(3):439-443.

FENG Dingyuan, LÜ Xin, LUO Xianping. Principal component linear weighted evaluation model for meteorological disasters in animal husbandry in Ili, Xinjiang[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 1995(3): 439-443. (in Chinese)

[2] 王长燕,郁耀闯. 黄土丘陵区不同草被类型土壤细沟侵蚀性季节变化研究[J]. 农业机械学报,2016,47(8):101-108.

WANG Changyan, YU Yaochuang. Seasonal variations of soil rill erodibility under different types of grass in loess hilly region [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(8):101-108. (in Chinese)

[3] 栗涛,王全九,张振华,等. 矿化度对紫花苜蓿发芽率和株高的影响[J]. 农业机械学报,2013,44(10):159-163,111.

LI Tao, WANG Quanjiu, ZHANG Zhenhua, et al. Effects of mineralization degree on germination percentage and plant height of alfalfa[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10): 159-163,111. (in Chinese)

[4] LV Y, WANG J, YIN M, et al. Effects of planting and nitrogen application patterns on alfalfa yield, quality, water-nitrogen use efficiency, and economic benefits in the Yellow River Irrigation Region of Gansu Province, China[J]. Water, 2023, 15(2): 251.

[5] HAN B, MING T, LAN H X, et al. Soil erosion and its causes in high-filling body: a case study of a valley area on the Loess Plateau, China[J]. Journal of Mountain Science, 2023, 20(1): 182-196.

[6] 毛正君,耿咪咪. 紫花苜蓿根系抗拉力学特性及其影响因素研究[J]. 干旱区研究,2023,40(2):235-246.

MAO Zhengjun, GENG Mimi. Study on the tensile mechanical properties of alfalfa roots and the influencing factors[J]. Arid Zone Research, 2023,40(2): 235-246. (in Chinese)

[7] MAO Z, BI Y, GENG M, et al. Pull-out characteristics of herbaceous roots of alfalfa on the loess in different growth stages and their impacts on slope stability[J]. Soil and Tillage Research, 2023, 225: 105542.

[8] 陈飞,谢蕴忠,王俊峰,等. 基于数值模拟方法的根系护坡研究进展[J]. 科学技术与工程,2023,23(16):6728-6738.

CHEN Fei, XIE Yunzhong, WANG Junfeng, et al. Research progress on root slope protection based on numerical simulation methods[J]. Science and Technology and Engineering, 2023,23(16): 6728-6738. (in Chinese)

[9] 王政权,郭大立. 根系生态学[J]. 植物生态学报,2008(6):1213-1216.

WANG Zhengquan, GUO Dali. Root ecology[J]. Journal of Plant Ecology, 2008(6): 1213-1216. (in Chinese)

[10] MOLLES M C, TIBBETS T. Ecology: concepts and applications[M]. New York: McGraw-Hill, 2002.

[11] 淮永建,杨丹琦,蔡东娜. 基于三维点云数据的花瓣形态及生长过程模拟[J]. 农业工程学报,2019,35(15):155-164.

HUAI Yongjian, YANG Danqi, CAI Dongna. Simulation of plant petal shape change and growth based on 3D point cloud data [J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(15): 155-164. (in Chinese)

[12] HONG L, YAN X L. Genotypic variation in root morphological characteristics of common bean in relation to phosphorus efficiency[J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2001, 43(11): 1161.

[13] YANG L, PENG J, SHAO P. Modeling and visualization of rice roots based on morphological parameters[J]. IEEE Access, 2020, 8: 23407 – 23416.

[14] 彭军,杨乐. 基于参数 L 系统的水稻根系生长可视化研究[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版),2020,46(1):119 – 124.
PENG Jun, YANG Le. Visualization of rice root growth based on parameter L system[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Science Edition), 2020,46(1): 119 – 124. (in Chinese)

[15] 郑明新,黄钢,彭晶. 不同生长期多花木兰根系抗拉拔特性及其根系边坡的稳定性[J]. 农业工程学报,2018,34(20): 175 – 182.
ZHENG Mingxin, HUANG Gang, PENG Jing. Tensile-pullout properties of roots of Magnolia multiflora in different growth stages and stability of slope with its root[J]. Transactions of the CSAE, 2018,34(20): 175 – 182. (in Chinese)

[16] 王一冰,吴美苏,周成. 组合根系加固坡土的直剪试验及数值模拟[J]. 岩土工程学报,2020,42(增刊1):177 – 182.
WANG Yibing, WU Meisu, ZHOU Cheng. Direct shear tests and numerical simulation on slope soil reinforced by composite roots[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020,42(Supp.1): 177 – 182. (in Chinese)

[17] 吴宏伟. 大气-植被-土体相互作用:理论与机理[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(1): 1 – 47.
WU Hongwei. Atmospheric plant soil interactions: theories and mechanisms[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(1): 1 – 47. (in Chinese)

[18] 牛丽思,张爱军,赵佳敏,等. 易溶盐含量对伊犁原状黄土力学特性的影响规律[J]. 岩土工程学报,2020,42(9):1705 – 1714.
NIU Lishi, ZHANG Aijun, ZHAO Jiamin, et al. Influence of soluble salt content on mechanical properties of Ili undisturbed loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020,42(9): 1705 – 1714. (in Chinese)

[19] 李宏钧,张晓峰,刘涛. 不同覆土厚度对伊犁地区公路护坡植被质量的影响[J]. 草地学报, 2018, 26(4): 893 – 897.
LI Hongjun, ZHANG Xiaofeng, LIU Tao. The effect of different soil thicknesses on slope protection vegetation quality in the Ili highway[J]. Journal of Grassland, 2018, 26(4): 893 – 897. (in Chinese)

[20] 杨璞,向志海,胡夏嵩,等. 根对土壤加强作用的研究[J]. 清华大学学报(自然科学版),2009,49(2):305 – 308.
YANG Pu, XIANG Zhihai, HU Xiasong, et al. Soil reinforcement by vegetation roots[J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition), 2009,49(2): 305 – 308. (in Chinese)

[21] CHANDA R, SINGH S S, SINGH N S, et al. Two-decadal climate impacts on growth of major forest types of Eastern Himalaya [J]. Trees, Forests and People, 2024, 15: 100491.

[22] LINDENMAYER A. Mathematical models for cellular interactions in development I. Filaments with one-sided inputs [J]. Journal of Theoretical Biology, 1968, 18(3): 280 – 299.

[23] 黄晓龙,李松阳,李宽意. 基于 L 系统的水生植物根系动态生长模型构建[J]. 湖泊科学,2022,34(6):2083 – 2094.
HUANG Xiaolong, LI Songyang, LI Kuanyi. L-system based dynamic root growth model formulation of aquatic plants[J]. Lake Science, 2022, 34(6): 2083 – 2094. (in Chinese)

[24] GAO J, NEWBERRY M. Fractal scaling and the aesthetics of trees[J]. arxiv Preprint arxiv:2402.13520, 2024.

[25] 杨乐,彭军,杨红云,等. 基于微分 L-系统的水稻根系三维生长模型研究[J]. 农业机械学报,2019,50(10):208 – 214.
YANG Le, PENG Jun, YANG Hongyun, et al. Three-dimensional growth modeling of rice root based on differential L-system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(10): 208 – 214. (in Chinese)

[26] 杨朋. 基于分形特征的虚拟植物形态建模方法研究[D]. 济南:山东师范大学,2015.
YANG Peng. Research on the virtual plant modeling method based on fractal characteristic [D]. Ji'nan: Shandong Normal University, 2015. (in Chinese)

[27] 张慧春,王国苏,边黎明,等. 基于光学相机的植物表型测量系统与时序生长模型研究[J]. 农业机械学报,2019, 50(10):197 – 207.
ZHANG Huichun, WANG Guosu, BIAN Liming, et al. Visible camera-based 3D phenotype measurement system and time-series visual growth model of plant[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 197 – 207. (in Chinese)

[28] 王全九,刘云鹤,苏李君. 基于单参数 Logistic 的典型作物相对叶面积指数模型研究[J]. 农业机械学报,2020,51(7): 210 – 219.
WANG Quanju, LIU Yunhe, SU Lijun. Relative leaf area index of typical crop based on single parameter Logistic model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(7): 210 – 219. (in Chinese)

[29] 田榆琴,王兵,汪建芳,等. 黄土丘陵区典型草本根系特征对土壤抗剪特性的影响[J]. 水土保持研究,2024,31(3): 153 – 159.
TIAN Yuqin, WANG Bing, WANG Jianfang, et al. Influence of typical herbaceous root characteristics on soil shear properties

in loess hilly regions[J]. Soil and Water Conservation Research, 2024,31(3): 153 – 159. (in Chinese)

[30] SCHNEPF A, LEITNER D, LANDL M, et al. CRootBox: a structural-functional modelling framework for root systems[J]. Annals of Botany, 2018, 121(5): 1033 – 1053.

[31] 曹红飞,李云飞. 一种太湖流域水生植物的生成[J]. 苏州大学学报(工科版),2011,31(1): 68 – 72.
CAO Hongfei, LI Yunfei. The modeling of one sort of aquatic plant in Taihu lake[J]. Journal of Soochow University (Engineering Science Edition), 2011, 31(1): 68 – 72. (in Chinese)

[32] LEITNER D, KLEPSCH S, BODNER G, et al. A dynamic root system growth model based on L-Systems: tropisms and coupling to nutrient uptake from soil[J]. Plant and Soil, 2010, 332: 177 – 192.

[33] CLAUSNITZER V, HOPMANS J W. Simultaneous modeling of transient three-dimensional root growth and soil water flow[J]. Plant and Soil, 1994, 164: 299 – 314.

[34] 张家明. 含软弱夹层岩质边坡稳定性研究现状及发展趋势[J]. 工程地质学报, 2020, 28(3): 626 – 638.
ZHANG Jiaming. State of art and trends of rock slopes stability with soft interlayer[J] Journal of Engineering Geology, 2020, 28(3): 626 – 638. (in Chinese)

[35] YAZDANI F, ALIPANAHI P, SADEGHI H. A comparative study of environmental and economic assessment of vegetation-based slope stabilization with conventional methods[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 359: 121002.

[36] ABRAMSON L W, LEE T S, SHARMA S, et al. Slope stability and stabilization methods[M]. John Wiley & Sons, 2001.

[37] 周云艳,陈建平,王晓梅. 植物根系固土护坡机理的研究进展及展望[J]. 生态环境学报,2012,21(6):1171 – 1177.
ZHOU Yunyan, CHEN Jianping, WANG Xiaomei. Progress of study on soil reinforcement mechanisms by root and its expectation[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012,21(6): 1171 – 1177. (in Chinese)

[38] ZUAZO V H D, PLEGUEZUELO C R R. Soil-erosion and runoff prevention by plant covers: a review[J]. Sustainable Agriculture, 2009: 785 – 811.

[39] LEUNG A K, GARG A, NG C W W. Effects of plant roots on soil-water retention and induced suction in vegetated soil[J]. Engineering Geology, 2015, 193: 183 – 197.

[40] HE W, ISHIKAWA T, NGUYEN B T. Effect evaluation of grass roots on mechanical properties of unsaturated coarse-grained soil[J]. Transportation Geotechnics, 2023, 38: 100912.

[41] 刘积魁,方云,刘智,等. 钓鱼城遗址始关门破坏机制研究与 FLAC ~ (3D)地震动力响应模拟[J]. 岩土力学,2011, 32(4):1249 – 1254.
LIU Jikui, FANG Yun, LIU Zhi, et al. Study of damage mechanism and FLAC3D simulation of the seismic dynamic response of Shiguan gate in Diaoyu cheng, ruins[J]. Geotechnical Mechanics, 2011, 32(4): 1249 – 1254. (in Chinese)

[42] 蒋中明,熊小虎,曾铃. 基于 FLAC(3D)平台的边坡非饱和降雨入渗分析[J]. 岩土力学,2014,35(3):855 – 861.
JIANG Zhongming, XIONG Xiaohu, ZENG Ling. Unsaturated seepage analysis of slopes under rainfall condition based on FLAC(3D)[J]. Geotechnical Mechanics, 2014,35(3): 855 – 861. (in Chinese)