

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

张凯, 杨松

(云南农业大学水利学院, 云南 昆明 650000)

摘要:为深入研究草本植物根系分布对土壤固土能力的影响。通过堆积试验对植物根系-土壤接触参数进行标定,利用 EDEM 离散元软件研究不同根系形状,根系长度,根系间距以及根系数量对土壤固土能力的影响。结果表明:根土复合体剪应力大于无根土体剪应力,植物根系对土壤有加固的作用,提高抗剪强度;均布形根系较于三角形根系,对根土复合体抗剪强度的提升更明显;根系长度越长,根土复合体剪应力越大,固土能力越强,200 mm 的根系阻力最大值比 150 mm 的根系阻力最大值增加 5.34%,150 mm 根系阻力最大值比 100 mm 根系阻力最大值增加 18.44%;当根系间距等于两根系最长根毛长度(两根系根毛不重叠)时,根系固土能力最强;一定数量范围内,植物根系数量越多,固土能力越好。

关键词:根土复合体;离散元模拟;草本植物根系;EDEM

中图分类号:S157 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2022)02-0059-08

DOI: 10.13817/j.cnki.cyycp.2022.02.008



近年来,我国基础建设不断发展,但严峻的生态环境问题也随之而来。为了防止对生态环境的破坏,将工程技术与生态技术相结合的方法受到越来越多的关注与重视,是生态文明建设有效的方法^[1]。植物根系能够作为加筋材料有效提高土壤的强度并且具有绿化环保等功能,对植物根系与土壤相互作用的研究尤为重要。

在含根土体根-土界面,垂直于剪切面的根系在发生剪切位移情况下,剪切面附近根系延伸发生变化,将部分土体受压的剪应力转化为植物根系的拉应力,拉应力转化为根-土界面间的静摩擦力与黏聚力,从而提高根土复合体的抗剪强度^[2]。之前的学者主要通过室内直剪试验、三轴试验等来研究根土复合体。潘天

辉等^[3]通过分析根土复合体抗剪强度得到植物根系对不同土层深度土壤加筋效果的影响;黄钢等^[4]通过直剪试验和轴平移技术对不同含水率的煤系土抗剪强度和基质吸力的影响进行了研究,得到草灌植物根系均能显著发挥固土作用;韩朝等^[5]通过根系拉拔试验对根-土界面摩擦性能进行研究,表明不同树种和不同直径对根系固土效果会产生较大的影响;奚灵智等^[6]利用直剪试验对培养的黑麦草加固黏土进行直剪试验,结果表明,抗剪强度与黏聚力随根系含量增加而增加,内摩擦角随根系含量增加而减小。陈辉等^[7]通过室内直剪试验与数值模拟研究了根系对黄土强度、边坡抗冲刷能力、边坡渗流场的影响,结果表明植物根系能明显提高黄土的抗剪强度,且随着根系数量增大,黄土的最大抗剪强度增大,残余抗剪强度增大;蔡宗根等^[8]对现场原状试样进行直剪试验,研究表明植物根系防止水土流失主要体现在减弱降水冲击力、提高堆积物抗冲刷能力与改善渗流条件;徐宗恒等^[9]对不同根系含量与含水量的根-土复合体进行抗剪强度试验,研究发现植物根系能为土壤提供额外的抗剪能力和抵抗土体变形的能力,但增强效应有限,在选用植物护坡时应确定土壤抗剪强度最高时的最佳含根量与含水量;林

收稿日期:2021-03-07; **修回日期:**2021-04-10

基金项目:国家自然科学基金(干湿循环条件下非饱和土的界面-吸力、界面-强度特性研究 41867038; 气-液界面张力作用下土颗粒移动的力学机理及其宏观反映 41662021)

作者简介:张凯(1996-),男,重庆奉节人,硕士研究生。

E-mail:714210312@qq.com

杨松为通信作者。E-mail:yscliff007@126.com

嘉辉等^[10]利用室内直剪试验,研究不同含水率条件下芒萁根系对红土层抗剪强度的影响,结果表明根系可增加崩壁红土层土壤的抗剪强度,不过含水率较高时,增强效应降低。

离散单元法近年来在国内快速发展,有着成本低、可重复性强、过程可控等优点^[2],是解决非连续性介质问题的富有特色的数值模拟方法。土壤由液体、气体、固体 3 相组成,具有典型的离散性,相对传统试验,通过离散元软件 EDEM 进行仿真模拟可从微观与宏观的视角对根土复合体进行分析,可单独分析不同颗粒的受力。因此通过堆积试验对根土界面参数进行标定,对不同长度,形状,根系间距的根土复合体,利用 EDEM 离散元软件进行根土复合体受压模拟,观察与分析根土复合体受压过程中,根系对土壤的影响范围。

1 材料和方法

南方的黏性土壤泊松比(ν)为 0.25~0.45,根据选取的样品特性及相关文献,本试验土壤泊松比选用 0.38^[11]。通过直剪试验测得弹性模量 3.39MPa,利用剪切模量 G 计算公式:

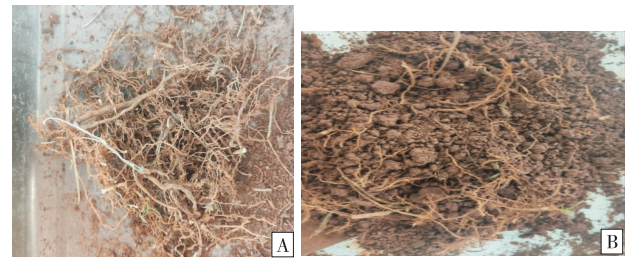
$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

得出剪切模量为 1.23 MPa。并通过环刀法测得试验土壤样品的密度为 2 600 kg/m³。

采用漏斗法测量根系土壤堆积角,将植物根系与土壤均匀搅拌,植物根系选用生长良好的狗牙根根系(图 1-A),根系与土壤拌合(图 1-B),其试验装置(图 2-A)主要由圆底支架,漏斗,接土盘组成(图 2-A)。试验后,采用 Matlab 读取土壤堆单侧图像,对图像分别进行去噪、灰度、二值化处理,最终提取图像边界点,对边界点进行线性拟合,得出拟合直线的斜率即为土壤休止角的正切值^[12]。

堆积试验离散元仿真模拟过程中,漏斗口保持开启状态,漏斗中不断有土壤颗粒以及颗粒组成根系模型生成,至所有颗粒停止运动则模拟结束,利用 EDEM 离散元软件自带量角器功能测定堆积角(图 2-B)。

土壤堆积实验重复 3 次,取 3 次平均值为土壤实测堆积角,其结果为 47.3°,标准偏差 0.42°。

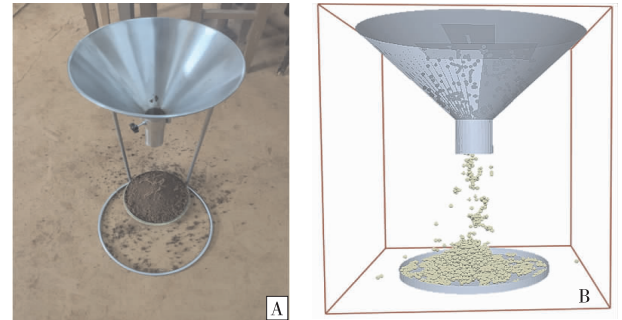


狗牙根根系

土壤与根系搅拌

图 1 狗牙根根系

Fig. 1 Bermudagrass root system



实际实验装置

仿真实验装置

图 2 试验装置

Fig. 2 Experimental device

1.1 参数标定

通过大量预实验确定仿真试验系数水平(表 1),然后利用 EDEM 进行仿真试验,并利用 EDEM 自带量角器功能测量堆积角。

表 1 实验系数水平

Table 1 Test coefficient level table

水平	土壤-植物根系			
	恢复系数	静摩擦系数	滚动摩擦系数	JKR 表面能/(J·m ⁻²)
1	0.52	0.59	0.12	10.2
2	0.68	0.68	0.16	11.5
3	0.76	0.77	0.20	13.4

参数标定采用正交实验法,有 3 个水平,4 个因素,选择 L₉(3⁴)正交表,堆积角偏差为正交分析指标^[13]。正交实验因素组合仿真结果如表 2 所示,然后根据堆积角偏差进行极差分析,如表 3 所示。

由极差分析得到,参数的影响从大到小依次为:JKR 表面能、恢复系数、静摩擦系数、动摩擦系数(图 3)。滚动摩擦因素越大,堆积角偏差越大;静摩擦因素越大,则堆积角的偏差越小。所以最优的正交组合为:土壤-植物根系恢复系数 0.52;静摩擦系数 0.77;动摩擦系数 0.12;JKR 表面能 11.5 J/m²。采用上述组合,

代入 EDEM 软件进行仿真模拟,得出堆积角为 47.30,表明上述参数合理。

表 2 正交试验结果

Table 2 Results of orthogonal experiment

试验序号	堆积角/°	试验序号	堆积角/°	试验序号	堆积角/°
1	38.2	4	40.1	7	31.4
2	41.5	5	45.8	8	50.6
3	43.5	6	49.6	9	41.8

表 3 堆积角偏差分析

Table 3 Analysis of accumulation angle deviation

参数	恢复系数	静摩擦系数	滚动摩擦系数	JKR 表面能/($J \cdot m^{-2}$)
K1	3.986	12.158	5.489	8.561
K2	11.615	6.286	7.235	3.186
K3	6.152	5.687	8.156	13.086
R	7.629	6.471	2.667	9.9

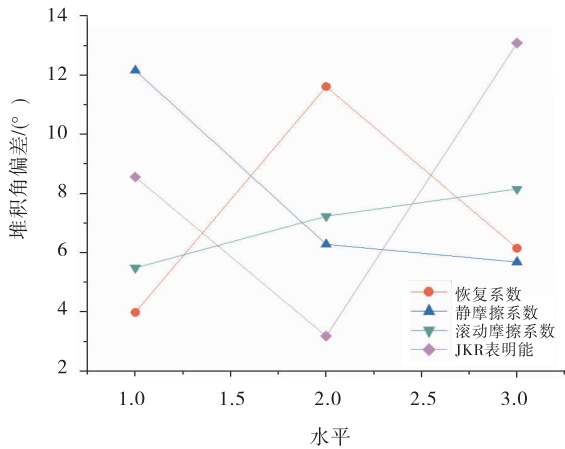


图 3 堆积角正交试验影响因素

Fig. 3 Influencing factors of stacking angle orthogonal test

1.2 离散元模型建立

1.2.1 土壤颗粒模型建立 中国南方地区的红黏土具有较强的弹塑性和较强的粘结性。细小、潮湿颗粒间黏聚作用的模拟适合用 JKR 颗粒粘结模型,该模型引入了颗粒间表面能, EDEM 软件中内置 Hertz-Mindlin with JKR 模型既能体现颗粒间的粘结性,又能体现颗粒的弹塑性^[12]。

受压仿真模拟中,模拟装置材料为钢材,是底面积为 500 mm×500 mm 的正方形,侧面是倾角为 30°的梯形的盒子,其本征参数与土壤仿真参数参照文献^[12](表 4),土壤颗粒间接触参数见表 5。为了模拟方便和减小计算量,红黏土颗粒模型为球形,直径为 10 mm,颗粒数为 100 000 个。利用颗粒工厂(Factory)在钢槽中生成土壤颗粒,得到土体模型(图 4)。

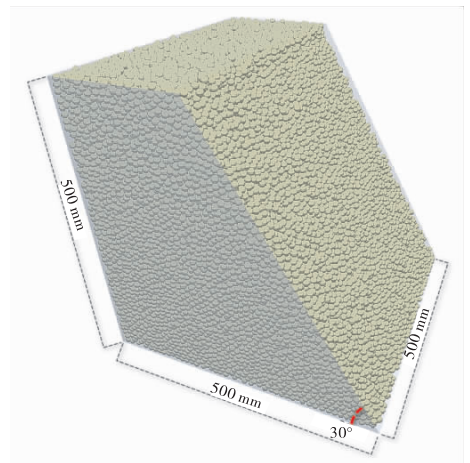


图 4 土体模型

Fig. 4 Soil model

表 4 仿真参数^[12]

Table 4 Simulation parameter

仿真参数	材料		
	土壤颗粒	钢	植物根系
泊松比	0.38	0.30	0.30
密度/($kg \cdot m^{-3}$)	2 550	7 850	900
剪切模量/MPa	1.23	7.00	1.76

表 5 接触参数^[12]

Table 5 Contact parameter

接触参数	土壤-土壤 土壤-钢材 土壤-植物根系		
	土壤-土壤	土壤-钢材	土壤-植物根系
恢复系数	0.56	0.30	0.52
静摩擦系数	0.85	0.60	0.77
滚动摩擦系数	0.10	0.10	0.12
JKR 表面能/($J \cdot m^{-2}$)	12.5		11.5

1.2.2 CAD 根系模型建立 将植物根系理想化可分为 4 种不同的根系形状,分别为:均布形、三角形、指数形、椭圆形,均布形根系的面积随着深度均匀地分布,三角形根系的面积随着深度线性减少,指数形根系的面积随着深度呈现指数变化,椭圆形根系的面积随着深度椭圆变化^[14]。本研究选用均布形和三角形根系进行模拟(图 5)。由于根系比较复杂密集,但其外围轮廓可理想化为上述 4 种形状,所以采用简易模型代替复杂密集根系模型,从而提高计算时间,减小计算量^[15]。根系模型选用 CAD 软件建立模型,最长根毛长度分别为 100、150、200 mm;根系间间距分别为 100、150、200 mm。

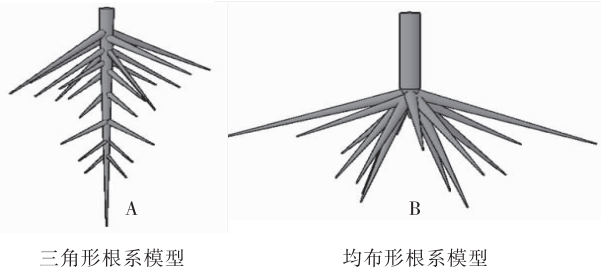


图5 三角形、均布形根系模型

Fig. 5 Triangular, uniformly distributed root system model

在模拟的过程中,实际上是土体受压,土颗粒发生位移,并挤压根系的过程。植物根系的存在能够提高土壤的内摩擦角,从而达到根系固土的效果^[16]。且植物根系根毛与土壤颗粒直剪存在液桥作用,相互之间存在凝聚力作用^[17-18],所以根系与土壤颗粒之间的接触模型也选择 Hertz-Mindlin with JKR 模型。

2 试验结果

2.1 有无植物根系模拟

分别对无植物根系土体与有植物根系土体施加荷载进行模拟,模拟时间为 6.5~8.0 s,共 1.5 s,每次模拟时间相同(图 6)。

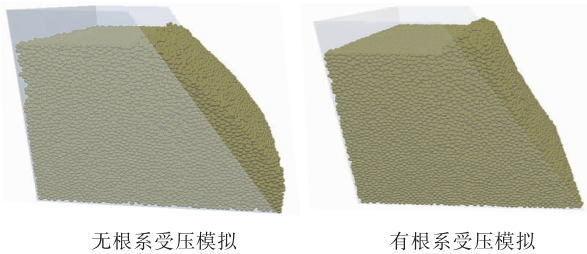


图6 有无根系土体受压模拟

Fig. 6 Simulation of soil compression with or without roots

通过模拟,可以直观的看到,在荷载作用下,土体上部受压,产生相同的位移变化(50 mm),对于没有植物根系的土体,除了土壤颗粒间相互作用的黏聚力,没有其他约束,土体整体呈现下滑的形态,上部移动较为显著,土壤颗粒被挤压出装置外,且出现滑动层(图 7)。剪应力呈先升高后降低的趋势,并在 7.35 s 出现滑动层时开始降低。而对于有植物根系的根土复合体,根系的存在能够显著的提高土体的抗剪强度,从而提高了根土复合体的剪应力。根土复合体并没有出现滑动层,且由于根系的固定,根土复合体剪应力大于无根系土体(图 8)。

取接触根系土壤颗粒与未接触根系土壤颗粒(图 9)。植物根系与土壤接触,由于根系与土壤颗粒之间

的摩擦力,将土壤的剪应力转化为根系的拉应力,使得根土复合体剪应力增大(图 10)。根系附近的土壤剪应力随时间延长总体呈增长趋势,未与根系接触的土壤则先增大后减小。

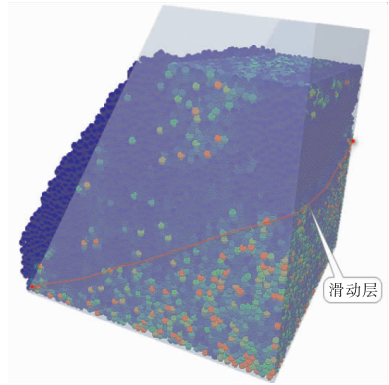


图7 滑动层

Fig. 7 Sliding layer

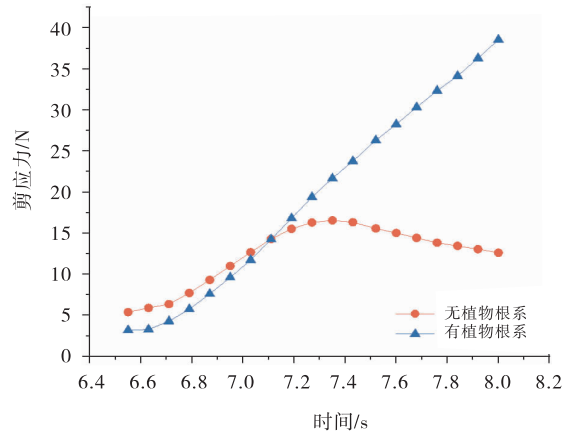


图8 剪应力

Fig. 8 Shear stress



图9 有无接触根系土壤颗粒

Fig. 9 Whether contact with root soil particles

2.2 不同形状根系根土复合体模拟

分别采用根量相同,总根长为 1 000 mm,直径为 2 mm 的以须根为主的均布形根系和以主根为主的三角形根系进行模拟。模拟过程中,均布形根系与三角形根系均提高了土壤的抗剪强度,并都未出现滑动层。从植物根系受力分析,均布形根系与三角形根系阻力

随时间总体呈升高趋势(图 11)。均布形根系的根毛更加扩散,对土壤颗粒的影响更大,使得根系阻力整体大于三角形根系。

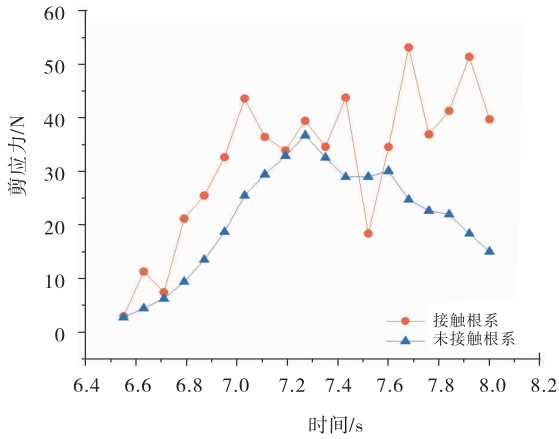


图 10 有无接触根系土壤颗粒的剪应力

Fig. 10 Shear stress of soil particles in contact with roots

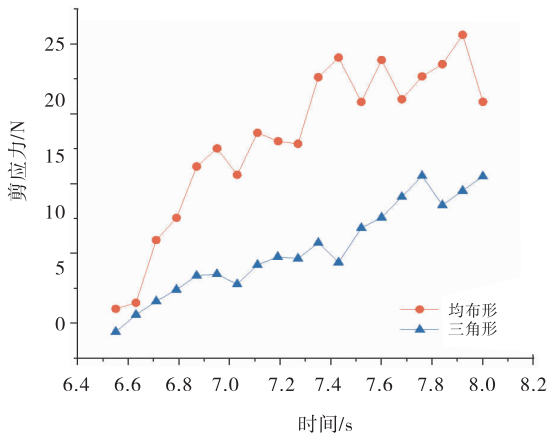


图 11 根系根土阻力

Fig. 11 Simulation of root-soil complex

2.3 不同长度根系根土复合体模拟

以须根为主的均布形根系为研究对象,建立根系总量相同,最长根毛为 100、150、200 mm 的根系。受压过程中,植物根系均起到对土壤颗粒的约束作用,取根系周围土壤剪应力,由于根系与土壤颗粒之间的液桥作用,产生相互间的凝聚力,根系的根毛越长,约束范围越广泛,根系阻力越大,土壤剪应力越大(图 12, 13)。植物根系阻力随根土复合体受压位移的增大呈现总体增涨的趋势。

2.4 不同根系间距根土复合体模拟

以须根为主的最长根毛 100 mm 的均布形根系为研究对象,分别建立以间距为 100、150、200 mm 的根系模型(图 14)。从模拟结果看,根系影响土壤范围主

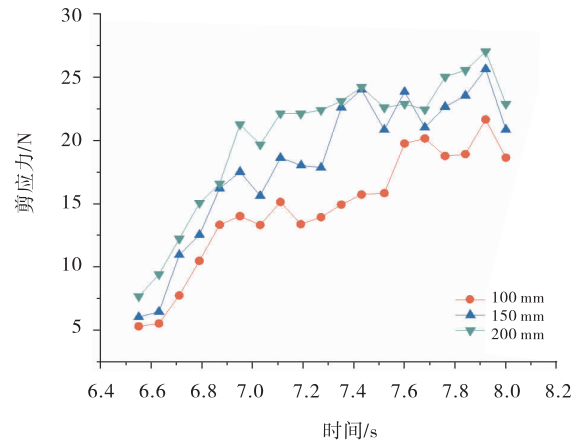


图 12 均布形根系阻力

Fig. 12 Uniform shape root resistance

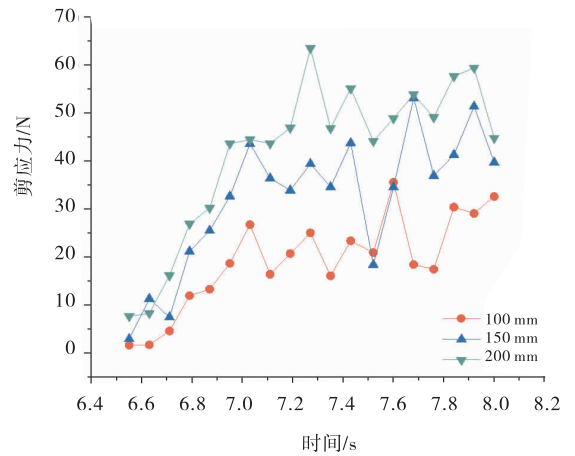


图 13 土壤剪应力

Fig. 13 Soil particle shear stress around the root system

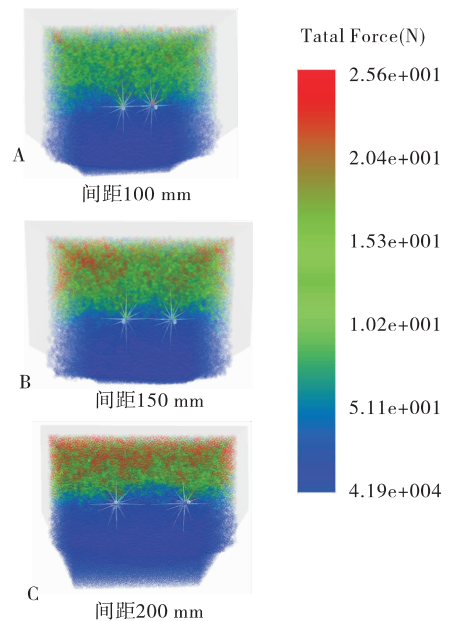


图 14 均布形根系间距根土复合体模拟

Fig. 14 Simulation of root-soil complex with uniform root spacing

要以根系根毛附近的土壤为主。两个根系的根系阻力均大于一个根系的根系阻力,随着根系距离的增大,根系阻力呈现增大的趋势,当根系距离为 200 mm 时(根毛间无重叠),根系阻力最大(图 15)。当间距越大,重叠越小,根系影响范围越大。

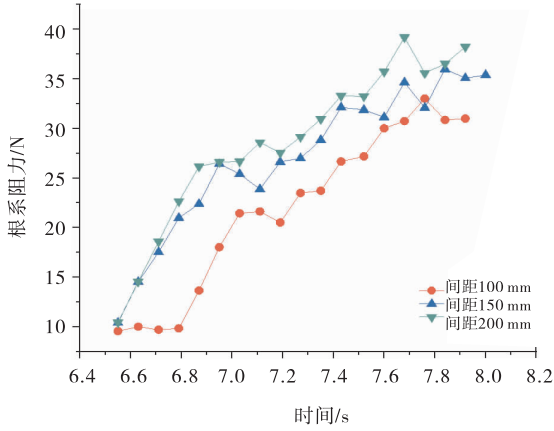


图 15 不同间距根系的根系阻力

Fig. 15 Root resistance of different roots

2.4 不同数量根系根土复合体模拟

以须根为主的均布形根系为研究对象,对比 1、2、4 颗植物根系根土复合体(图 16),模拟研究发现,土壤剪应力随时间呈上升的趋势,植物根系的颗数越多,土壤剪应力越大(图 17)。

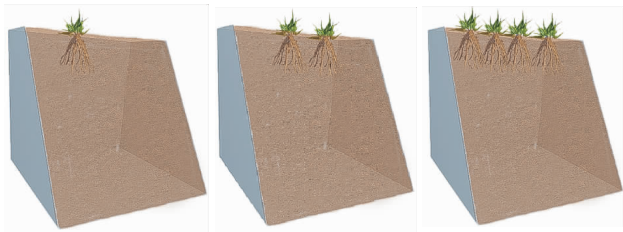


图 16 不同根系数量的根土复合体

Fig. 16 Root-soil complex with different root coefficients

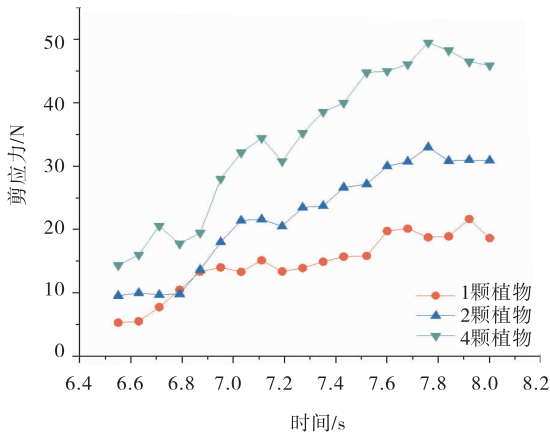


图 17 不同根系颗数的土壤剪应力

Fig. 17 Soil shear stress with different number of roots

3 讨论

现有研究表明^[19-20],植物根系对土壤的力学性能产生一定的影响。段青松等^[21]采用无侧限抗压强度试验,对素土与 3 种草根土复合体的黏聚力进行了测定,得到自然生长状态下,非洲狗尾草对土体抗剪强度提高最多,鸭茅次之,紫花苜蓿最差。不同的草本植物对土壤无侧限抗压强度提高不同,这表明植物根系的类型对根土复合体强度同样有着直接的影响。根土复合体土壤抗滑力随时间呈上升趋势,且均布形根系大于三角形根系(图 18)。薛杨等^[22]对均布形根系的灯心草、皱叶狗尾草以及三角形根系的栽秧泡、星毛金锦香研究发现 4 种植物根系吸收能力以及固土影响范围表现为灯心草>皱叶狗尾草>栽秧泡>星毛金锦香。相同根系长度下均布形根系>三角形根系,与本研究结果相似。

丁伟等^[23]通过建立根系固坡模型并进行数值模拟分析,得到边坡的安全系数随植物根系长度的增加而增大,但在一定根系密度下,随根系长度的增加对固土能力的提高逐渐减弱。随植物根系长度的增加,根系对土壤的影响范围随着增加,所以其固土能力随之增加。通过研究发现,200 mm 的根系阻力最大值比 150 mm 的根系阻力最大值增加 5.34%,150 mm 根系阻力最大值比 100 mm 根系阻力最大值增加 18.44%。不同长度根系土壤抗滑力表现为根系越长抗滑力越大(图 19)。

根系能够提升土体强度,主要是因为根系与土壤接触面的摩擦力把土壤的剪应力转换成了根的拉应力^[24],当根系间距等于主根系长度之和时,根系间没

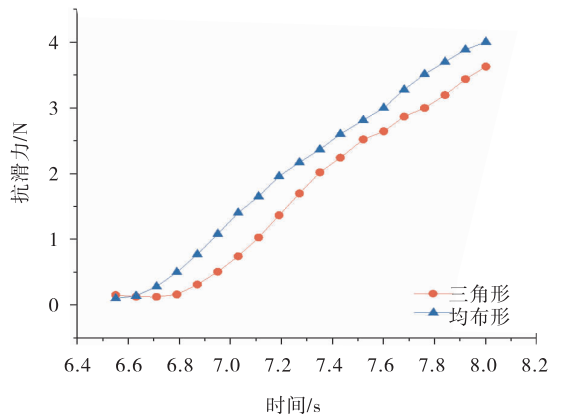


图 18 不同形状根系的土壤抗滑力

Fig. 18 Soil anti-sliding capacity of different root systems

有重叠,根系与土壤的接触面积最大,抗滑力越大,因此固土能力最强(图 20)。

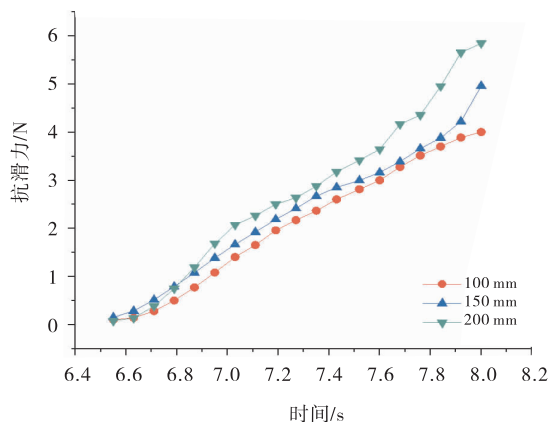


图 19 不同长度根系的土壤抗滑力

Fig. 19 Soil anti-sliding force of roots of different lengths

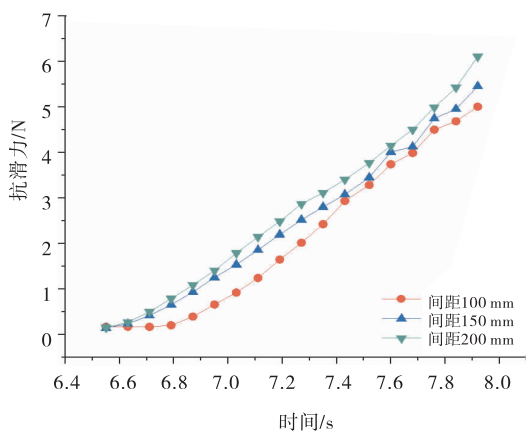


图 20 不同根系间距的土壤抗滑力

Fig. 20 Soil anti-sliding force with different root spacing

5 结论

(1)通过正交实验法,提出 JKR 表面能对土壤-植物根系接触参数标定影响最大。

(2)通过土壤-植物根系堆积角实验与土壤-植物根系离散元模拟试验对比,采用正交试验法得到土壤-植物根系:恢复系数 0.52;静摩擦系数 0.77;动摩擦系数 0.12;JKR 表面能 11.5 J/m^2 。进一步对根土复合体离散元模拟研究奠定了基础。

(3)利用 CAD 对植物根系建模并导入 EDEM 离散元软件中进行模拟,从模拟结果得到:根系对土体起到加筋作用,提高斜坡体的抗剪强度;根系长度越长,根系的固土能力越强;相同最长根毛长度情况下均布根系比三角形根系更能起到对土体的加固作用;当根系间距等于两根系最长根毛长度(两根系根毛不重叠)时,根系对土壤的加固能力最高;一定数量范围内,

植物根系数量越多,根系的固土能力越强。

参考文献:

- [1] 万娟,夏军,肖衡林,等.护坡植物的生态性能及根系力学性能[J].湖北工业大学学报,2019,34(4):77-80.
- [2] 蒋明镜,朱云刚.重塑黄土与植物根系界面摩擦离散元分析[J].水资源与水工程学报,2017,28(2):210-215+221.
- [3] 潘天辉,杜峰,王月.陕北黄土区护坡植物根系分布和抗剪增强分析[J].水土保持研究,2020,27(3):357-363+371.
- [4] 黄钢,郑明新,董旭,等.草灌植物根系对煤系土加固效果研究[J].北京交通大学学报,2020,44(4):49-56.
- [5] 韩朝,冀晓东,刘小光,等.北方5种常见乔木根-土摩擦锚固性能研究[J].北京林业大学学报,2020,42(9):80-91.
- [6] 奚灵智,王龙威,王颖,等.植被根系固土抗剪强度试验研究[J].河北工程大学学报(自然科学版),2019,36(4):84-89.
- [7] 陈辉.植被根系对黄土边坡稳定性及固土效果的影响[J].水电能源科学,2019,37(10):97-100.
- [8] 蔡宗根.植被固土防治水土流失作用机制研究[J].黑龙江水利科技,2019,47(9):143-145.
- [9] 徐宗恒,黄丽苹,杨正辉,等.不同根系含量对山原红壤抗剪强度的影响[J].水土保持通报,2019,39(5):54-59+66.
- [10] 林嘉辉,黄梦元,张莉婷,等.芒萁根系对崩岗红土层土壤抗剪强度的影响[J].水土保持学报,2020,34(6):159-165.
- [11] 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.
- [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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 高国华,谢海峰,王天宝.设施蔬菜收获机拉拔力学性能 EDEM 仿真与试验[J].农业工程学报,2017,33(23):24-31.
- [16] 乔娜,余芹芹,胡夏嵩,等.植物对土壤加强作用及其生态护坡研究综述[J].人民黄河,2011,33(7):106-109+143.

- [17] 赵梓彤,赵川,付成华. 基于 JKR-Cohesion 模型的湿颗粒松散堆积体滑坡模拟分析[J]. 人民珠江,2016,37(5): 26—29.
- [18] Li J, Webb C, Pandiella S S, *et al.* Discrete particle motion on sieves—a numerical study using the DEM simulation[J]. Powder technology, 2003, 133(1): 190—202.
- [19] 曹婷婷,师晨迪. 不同植物根系对土质边坡土壤理化性质影响研究[J]. 农业与技术, 2020, 40(21): 9—11.
- [20] 王元战,刘旭菲,张智凯,等. 含根量对原状与重塑草根加筋土强度影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(8): 1405—1410.
- [21] 段青松,赵焱柯,杨松,等. 不同草本植物根系提高无侧限受压土体的抗剪强度[J]. 土壤学报, 2019, 56(3): 650—660.
- [22] 薛杨,赵洋毅,段旭,等. 磨盘山 4 种典型护坡植物根系特征及其对土壤含水率的影响[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2019, 48(4): 501—509.
- [23] 丁伟,孙树林,陈怿旻,等. 木本植物根系对边坡稳定性影响分析[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2017, 34(3): 27—31.
- [24] WU T H, WATSON A J, ELKHOULY M A, *et al.* Soil-root Interaction and Slope Stability[C]//First Asia-Pacific Conference on Ground and Water Bioengineering for Erosion Control and Slope Stabilization. Manila, Philippines; Science Publishers, 2004: 183—192.

Influence of herbal plant root distribution on soil consolidation capacity based on discrete element simulation

ZHANG Kai¹, YANG Song²

(College of Water Resources, Yunnan Agricultural University)

Abstract: In order to fully understand the influence of herb root distribution on soil consolidation ability, the plant root-soil contact parameters were calibrated through accumulation tests. The EDEM discrete element software was used to study the effects of different root shapes, root lengths, root distances, and root coefficients on the soil-solidification capacity. The results showed that shear stress from root-soil composite was greater than that of unrooted soil. Plant roots could reinforce the soil and increase the shear strength. Compared to the triangular root system, the evenly distributed root system improved the shear strength of the root-soil complex more significantly. The longer the root system, the greater the shear stress of the root-soil complex, the stronger the soil-fixing ability. The maximum root resistance of 200mm was 5.34% higher than that of 150mm, and the maximum root resistance of 150mm was 18.44% higher than that of 100mm. When the root space equaled to to the longest root hair length of the two root systems (the root hairs of the two root systems did not overlap), the root system had the strongest soil-fixing ability; within a certain range, the more the plant root, the better the soil-fixing ability.

Key words: root-soil complex; discrete element simulation; herb root system; EDEM