

DOI: 10.11779/CJGE202205016

根系形态和层次结构对根土复合体力学特性影响研究

徐 华¹, 袁海莉¹, 王歆宇², 王 栋², 陈建勋¹, 荣才权¹

(1. 西南交通大学土木学院, 四川 成都 610031; 2. 中铁二院工程集团有限公司, 四川 成都 610031)

摘 要: 植物根系的结构特征包括形态和层次结构, 对根土复合体力学特性影响显著。通过开展黑麦草生长参数测试及直剪试验, 获得了不同时期根土复合体的力学特征; 采用自主研发的 MechRoot 程序建立了符合黑麦草根系结构特征的根土复合体模型, 研究黑麦草不同形态和层次结构根系在直剪过程中的轴力水平以及占比情况, 阐明了根系形态与层次结构对根土复合体力学特性影响及固土作用机理。研究表明: 植物根系能明显提高土体的强度, 根土复合体的抗剪强度增加主要是由黏聚力增加引起, 增幅最大达 4.99 kPa; 随根系形态复杂程度增加, 剪切过程中根系能够调动更大范围土体抵抗剪切变形, 根系周围的剪切带和塑性区分布范围不断增加, 并向根系周围集中, 根土复合体的抗剪强度提高; 根土复合体剪切过程中, 各层次根系发挥作用逐渐变化, 一级根、二级根、三级根的轴力水平分别为 3.87, 1.50, 0.15 N, 随根系生长发展, 二级根、三级根参与到根系固土作用的比例不断增大, 最大贡献分别为 43.69%, 13.80%。

关键词: 根土复合体; 直剪试验; 根系形态分布; 根系轴力; 有限元模拟

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)05-0926-10

作者简介: 徐 华(1979—), 男, 四川乐山人, 副教授, 主要从事岩土与隧道工程方面研究。E-mail: xuhua@swjtu.edu.cn。

Influences of morphology and hierarchy of roots on mechanical characteristics of root-soil composites

XU Hua¹, YUAN Hai-li¹, WANG Xin-yu², WANG Dong², CHEN Jian-xun¹, RONG Cai-quan¹

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: The structural characteristics of plant roots, including morphology and topological structure, have significant effects on the mechanical characteristics of root-soil composites. The mechanical behaviors of the root-soil composites at different time are obtained by carrying out the Lolium perenne root system morphology parameter tests and direct shear tests. By using the self-developed MechRoot program, a numerical model for the root-soil composites with more realistic root structural characteristics of Lolium perenne is established, and the axial force levels and proportions of roots with different shapes and topological structures in the process of direct shear are studied, which illustrates the influences of morphology and topological structures of roots on the mechanical characteristics of root-soil composites and the mechanism of soil consolidation. The results show that the plant roots can strengthen soil significantly, and the increase of shear strength of root-soil composites is mainly caused by the increase of cohesion, with the maximum increase of 4.99 kPa. During the shearing process, with the increase of the morphological complexity of roots, the more range of soil can participate in the resistance of shear by the roots, the shear zone and plastic zone around the roots increase and are concentrated around the roots, and the shear strength of the root-soil composites increases. At the same time, the effects of the roots at several levels change gradually. The axial forces of the primary roots, secondary roots and fibrous roots are 3.87, 1.50 and 0.15 N. With the growth of the roots, the proportion of the secondary roots and fibrous roots participating in soil fixation of the roots increases continuously, with the maximum contributions being 43.69% and 13.80%, respectively.

Key words: root-soil composite; direct shear test; morphological distribution of root; root axial force; finite element simulation

0 引 言

近几十年来, 国家大力发展公路、铁路、水利水电及矿山开采等基础设施建设, 工程建设与生态保护的矛盾日益加剧。生态护坡作为一种对环境友好且能

有效增加边坡浅表层稳定性的护坡技术, 极大改善了工程护坡措施与环境不协调的局面, 在浅层边坡加固

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目(2016YFB1200401)

收稿日期: 2021-07-21

工程中得到广泛应用^[1-2]。研究表明,生态护坡的机理主要是利用植被茎叶的水文效应和根系的力学效应^[3]。因此,对根土之间的相互作用进行研究具有重要意义。

植物根系具有较高的抗拉强度,通过根土界面的摩擦和黏结作用,土体所受剪应力传递到根系产生轴力,限制土体位移变形,提高土体抗剪强度,提高边坡的浅表层稳定性^[4]。根土复合体中根系作用的发挥主要与根系的力学性质、复合体含根量、根土界面特性、根系分布形态等因素有关^[5-9]。王一冰等^[10]、曾红艳等^[11]通过开展不同根系倾角组合直剪试验及根系加固坡体的研究,量化了根系倾角对坡土的强度影响。孔纲强等^[12]制配透明黏土材料,开展了根系分布形态研究,对比了水平、竖直、倾斜、相交及混合等不同分布形态下的根系增强效应。Mickovski 等^[13]基于 Plaxis 和 Diana 模拟了根土复合体的直剪试验,与现场试验结果比较表明,相同工况下,不同数值模拟软件的结果存在一定差异,且比现场直剪试验的结果高 30% 左右。

目前对根系固土机理的研究已经取得了一定的成果,但在根系结构特征对根土复合体力学特性的影响方面还存在较大不足。由于植物根系埋藏于土中,形态分布非常复杂^[14],在直剪试验过程中难以直接观测分析根系受力情况,而已有的数值模拟研究往往将根系简化为杆件或简单杆件组合,忽略了各层次根系的联合作用机制,更未考虑植物根系的力学特性,如弹性模量、抗拉强度会随根径等因素变化,导致根系力学参数的赋值也不准确,研究结果不能反映真实的根土相互作用。因此,非常有必要对不同结构特征根系的根土复合体力学特性影响及固土机理进行深入研究。

通过选取典型的生态护坡植物黑麦草作为研究对象,开展种植试验和根土复合体的直剪试验获取不同生长时期黑麦草的形态参数和根土复合体的力学特征。采用自主研发的 MechRoot 程序^[15],建立形态分布、层次结构、力学性质等方面与真实黑麦草根系较为相似的三维模型,进行根土复合体直剪试验的数值模拟,分析不同形态和层次结构对根土复合体力学特性的影响,深入剖析根系的固土作用机理,量化根系对土体抗剪强度的影响,研究成果可为根土相互作用研究和边坡生态防护设计计算提供理论依据。

1 黑麦草根土复合体直剪试验

1.1 试验材料选取

试验种植基材选用四川地区常见的红层黏土及 PCF 生态基材^[3],基本物理特性指标见表 1。图 1 为试验土体颗粒粒径级配曲线,土体干密度为 1.32

g/cm³,为了保证种子的发芽和植物正常生长,每周测试 3 次含水率,及时浇水补充水分,控制土体含水率稳定在 15%~20%,避免因含水率变化而造成的抗剪强度变化。取常用的草坪和边坡生态护坡草种黑麦草进行种植试验。黑麦草具有根系发达、生长周期短等特点,根系横向生长半径为 5~8 cm,生长深度一般在 30 cm 以内,主要根系集中在 15 cm 内。

表 1 试验土体基本物理性质指标
Table 1 Basic physical properties of test soils

土粒相对质 量密度 G_s	ρ_{dmax} /(g·cm ⁻³)	孔隙比	液限 w_L /%	塑限 w_p /%	渗透系数 k /(cm·s ⁻¹)
2.58	1.63	0.82	48	23	2.5×10^{-6}

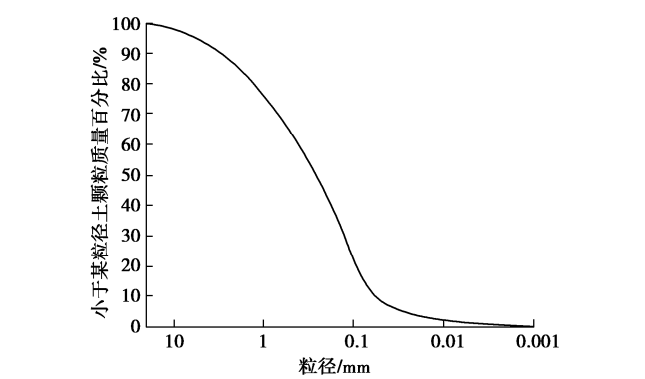


图 1 试验土体颗粒粒径级配曲线

Fig. 1 Grain-size distribution curve of test soil

1.2 试验仪器及试样制备

采用中型直剪仪进行试验,剪切盒直径为 10 cm,高度为 5 cm,如图 2 所示,黑麦草根径为 0.1~1 mm,与剪切盒厚度之比小于 1:50,满足土体对根的锚固长度要求^[16]。

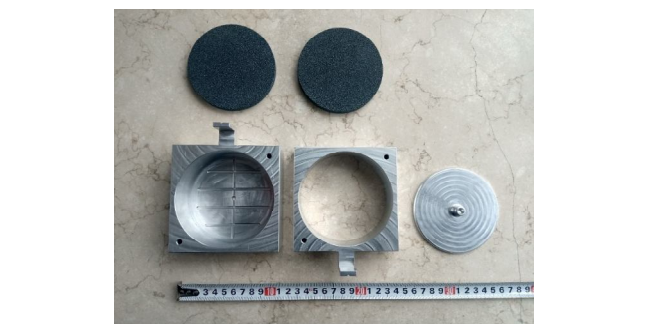


图 2 中型剪切盒

Fig. 2 Medium shear box

图 3 为试样制备过程,将黑麦草种植在直径 10 cm,高 30 cm 的 PVC 管内,以避免后期取样对根土接触关系的破坏。制取试样时,先切除裸露在土体外部的黑麦草茎叶,从 PVC 管根顶一端向另一端管口均匀推出 17.5 cm 根土复合体切除,然后将 PVC 管根土复合体竖直对准剪切盒均匀推入 5 cm,用抹刀切除剪切盒上部多余的根土复合体,得到剪切面距根顶 10

cm 处 $\phi 10\text{ cm}\times 5\text{ cm}$ 的根土复合体试样。



图 3 试样制备

Fig. 3 Sample preparation

1.3 试验方案

为了研究不同形态及层次结构的根系，选取 7，10，14，21，28 d 为时间点，每个时间点至少 3 个试验样本，测量黑麦草根系生长参数。同时进行素土试样（0 d）以及不同生长时间根土复合体试样的直剪试验，每组施加法向压力分别为 0.15，50，100，200 kPa，按照固定速率 1.0 mm/min 推动上部剪切盒，记录横向推力随剪切位移的变化。对黑麦草根系进行剥土，对不同直径根系的抗拉力进行了测量。

1.4 试验结果及分析

（1）根系生长参数测量结果

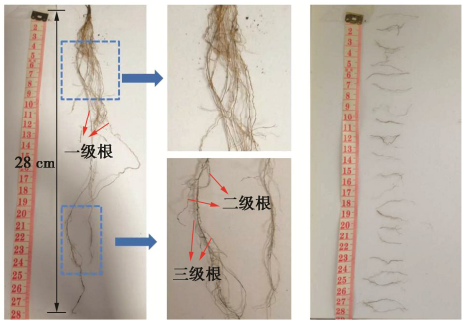
取根系数量、长度、直径为生长指标，试验采用剥离法以及漂洗法获取根系。制取试样时，简单刨除根系周围土体后，将取出的根土复合体浸泡在水中直至土壤松软，反复清洗后，用镊子收集部分残留在土体中拉断的根系，利用游标卡尺和钢尺测量各参数，具体结果见表 2。图 4 为剥离土体得到的 28 d 黑麦草根系。黑麦草在第 5 天开始发芽，第 7 天将长势不好的黑麦草和没有发芽的种子刨除，每个 PVC 管内仅保留一株黑麦草。不同层次根系直径均由根端向根尖逐渐减小，这与文献[17，18]所得结论一致。

表 2 不同层次根系的生长数量指标

Table 2 Growth indices of root system

根系 指标	时间/d	数量/条	长度/mm	直径/mm
一级根	7	3	98.160	—
	10	3	175.320	0.28
	14	3	244.060	0.52
	21	3	278.100	0.65
	28	3	285.980	0.68
二级根	7	11	7.640	—
	10	21	15.260	0.16
	14	33	17.520	0.36
	21	36	17.600	0.47
	28	42	17.700	0.50
三级根	7	0	—	—
	10	45	1.660	0.08
	14	91	4.700	0.14
	21	134	5.350	0.16
	28	168	5.400	0.16

注：表中根系直径为距离根顶 100 mm 处根系的平均值；二级根和三级根的长度为距离根顶 80~120 mm 范围内的平均值。



(a) 完整根系 (b) 局部放大 (c) 清洗后根系

图 4 28 d 黑麦草根系

Fig. 4 Root system of 28 days

不同生长时间的黑麦草根系形态分布具有明显的差异，黑麦草萌芽以后，各层次根系的生长指标均表现为随生长时间先快速增加，后增速减缓，21 d 和 28 d 的黑麦草根系各项指标极为接近，说明 21 d 以后黑麦草生长逐渐减缓。一级根、二级根、三级根的各项生长指标差异很大，当黑麦草根系生长 28 d 时，一级根、二级根、三级根的数量分别为 3，42，168 条，直径分别为 0.68，0.50，0.16 mm，长度分别为 285.98，17.70，5.40 mm。

（2）根系的抗拉力测量结果

将取出观察的根系剪为 50 mm 长的根段，挑选出弯曲程度较低的根段，测得直径、抗拉力，测试结果见表 3。采用艾德堡拉力试验台测量根的抗拉力和弹性模量，拉伸速率 10 mm/min^[19]。黑麦草根弹性模量与根径存在明显的负相关关系。用 origin 2017 拟合得到根的抗拉力（N）随根直径（mm）的拟合函数为

$$T = 14.187D^{2.171} \quad (1)$$

拟合得到根的弹性模量（MPa）随根直径（mm）的拟合函数为

$$E = 25.595D^{-0.713} \quad (2)$$

表 3 根系的力学参数指标

Table 3 Mechanical parameters of roots

根径/mm	抗拉力/N	弹性模量/MPa
0.21	0.50	73.88
0.32	1.43	55.72
0.46	2.74	52.82
0.56	3.52	40.21
0.67	5.88	28.79
0.79	7.56	31.11
0.84	9.12	25.41
0.91	11.87	23.98
1.02	15.64	20.59

（3）根土复合体抗剪强度指标变化

图 5 为根土复合体的剪切试样。不同生长天数的根土复合体抗剪强度指标结果，如表 4 所示。素土的黏聚力最小，为 13.6 kPa。根土复合体的黏聚力均大于素土的黏聚力，且随根系的发展不断增大，最大增幅 4.99 kPa，与郝郑芳^[20]采用黑麦草根系，以及沈庆

双^[2]采用含根量为 10 的高羊茅根系得到的根土复合体的黏聚力的增幅分别为 4.72, 7.5 kPa 相比, 黑麦草根系较小, 且根土复合体试样中只含有一株黑麦草根系, 故增幅稍小; 黏聚力前期缓慢增长, 中期快速增长, 后期逐渐减缓, 在 14 d 时平均增长速率达到最大值 0.40 kPa/d。而内摩擦角随生长变化不大, 根土复合体的抗剪强度增加主要由黏聚力增加引起。

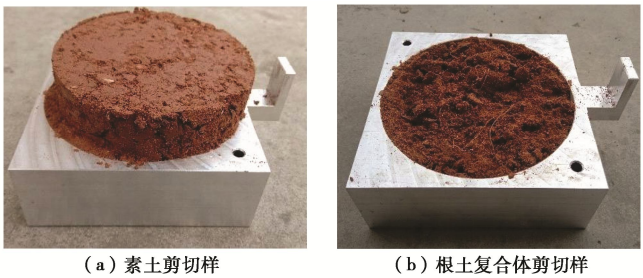


图 5 根土复合体的剪切样

Fig. 5 Shear samples of root-soil composites

表 4 室内直剪试验结果

Table 4 Results of direct shear test

生长时间/d	c/kPa	$\varphi/(\text{^\circ})$
0	13.60	25.5
7	13.82	25.3
10	15.32	25.0
14	17.26	24.2
21	18.21	24.8
28	18.59	24.5

(4) 剪应力 - 剪切位移关系

不同生长时间根土复合体剪应力 - 位移曲线, 如图 6。根土复合体达到最大剪应力时的位移均明显大于素土, 说明黑麦草根系明显提高了土体的延性。

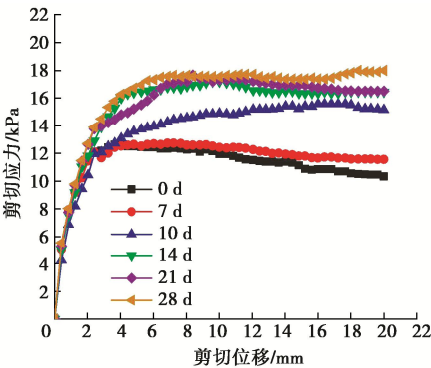


图 6 剪应力 - 位移曲线

Fig. 6 Curves of shear stress

生长时间 0~7 d, 一级根长度还未达到 100 mm, 根径很小, 二级根、三级根基本还未发育, 对土体的加固效果有限, 剪应力 - 位移曲线与素土几乎相同。根系生长时间 7~14 d, 根系各项生物量指标增长速率较大, 根系与土体间接触面积增大, 根土相互作用增强, 剪应力峰值显著提高。在生长时间 14~28 d, 增长速率减缓, 虽然三级根仍大量发展, 但土体和根系的有效接触面积提高不大, 三级根自身的强度远小于

一级根和二级根。整体根系的直径、根长发展速度减缓, 根土复合体的力学特性发展随之稳定。

2 不同结构特征的根土复合体模型

直剪试验结果仅能获得宏观的力学规律, 难以定量表征根系结构对根土复合体力学特性的影响。为解决这一问题, 根据种植试验和直剪试验获得的不同生长时期黑麦草的形态参数和根土复合体的力学特征, 采用自主研发的 MechRoot 程序, 建立形态分布、层次结构、力学性质等方面与真实黑麦草根系较为相似的根系三维模型导入 Plaxis 3D, 进行直剪试验的数值模拟分析, 研究不同形态和层次结构根系对根土复合体力学特性的影响, 深入剖析根系的固土机理, 量化根系对土体抗剪强度的影响。

2.1 根系几何模型

为了更好地研究根系结构特征对根土复合体力学特性的影响, 构建经典锚杆根系模型和复杂根系模型对比分析。复杂根系结构模型根据表 2, 表 5 黑麦草不同时期的根系结构特征、生长数量指标以及关键生长参数, 由 MechRoot 程序多次试算生成, 再导入 Plaxis 3D 生成具有复杂结构特征的根土复合体三维模型; Mickovski 等^[13]的经典锚杆根系模型直接在 Plaxis 3D 中生成, 直径取一级根的平均值, 力学参数取与一级根和二级根直径对应根系单元力学参数的累加值。

MechRoot 程序是在 MATLAB 平台开发的基于参数 L-系统的根系三维力学模型构建程序, 该程序将根系划分为有限个自定义长度的小单元, 基于一系列算法实现了根系直径和长度随时间动态变化、根的分叉、根的重力倾向性生长、根系随机弯曲等功能, 通过整合根的力学参数与根直径的函数关系为不同的根系单元赋予力学参数, 实现根系力学特性的精确赋值。

黑麦草的关键生长参数通过生长观测得到, 见表 5, i 为根系的等级, s 为根长度的初始生长速度, c 为根直径的初始生长速度, n 为分叉个数, l_b 为根基部长度, l_n 为分叉间距, l_a 为尖端长度, θ 为分叉角度; 根系直径 r_i 生长函数为^[17-18]

$$r_i = R_i \left(1 - \exp \left(- \frac{c_i}{R_i} t \right) \right)^{\frac{\lambda_i - L}{\lambda_i}} \quad (3)$$

式中, t 为生长时间, R_i 为第 i 级根的最大根直径, L 为该根上一点到根顶部的距离, λ_i 为该根长度。

对根系各项生物量进行统计, 结果如表 6 所示。根系的总长和体积增长速度是呈先增大后减小的趋势, 与生长试验一致, 符合自然规律。黑麦草根系模型如图 7, 生成根系形态与实测根系形态较为相似。受篇幅限制, 后面仅分析素土、经典锚杆杆件根系及

3 种典型结构特征根系模型的根土复合体力学特性。

表 5 黑麦草的关键生长参数

Table 5 Key growth parameters of Ryegrass							
生长参数	s /(mm·d ⁻¹)	l_b /mm	l_a /mm	l_n /mm	n	θ /(rad)	c /(mm·d ⁻¹)
0 th (种子)	30	0	0	0	3	$\pi/3$	1
1 st (一级根)	60	32.2	42	15.3	15	$\pi/6$	0.218
2 nd (二级根)	10	3.2	3.3	2.8	10	$\pi/3$	0.146
3 rd (三级根)	2.0	3.3	2.1	—	—	—	0.0925

表 6 不同生长时间的根系模型生物量

Table 6 Growth parameters of root model				
不同生长时间/d	单元数	根系总长 /mm	根系总面 积/mm ²	根系总体积 /mm ³
10	589	1445.236	1089.63	116.59
14	1143	2441.007	2090.78	252.34
28	2172	4456.762	3777.45	452.01

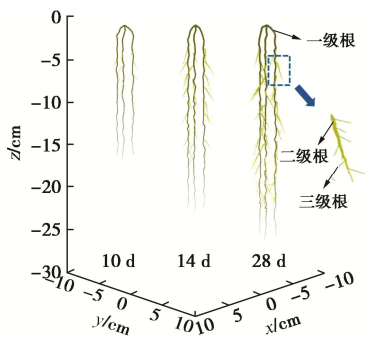


图 7 不同形态根系模型

Fig. 7 Models for different root forms

2.2 有限元模型的建立

(1) 模型尺寸及边界条件

为了消除上下盒错开引起剪切面积减小所带来的误差，根土复合体直剪模拟计算模型采用地基-剪切体模型^[13]，如图 8 所示。

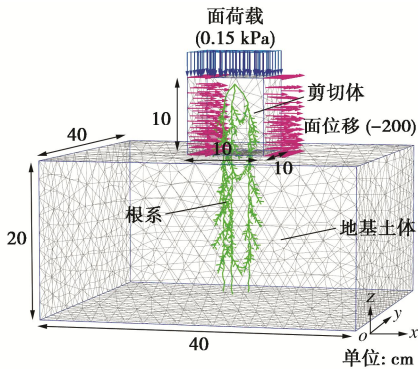


图 8 有限元直剪试验模型示意图

Fig. 8 Diagram of finite element direct shear test model
地基土尺寸为 40 cm×40 cm×20 cm，剪切体尺

寸为 10 cm×10 cm×10 cm。地基土边界条件：底部固定约束，四周法向约束，顶部自由约束，模型中剪切体边界条件为：顶部自由约束，y 方向竖直面法向约束，对 x 方向两个竖直面施加大小为 20 mm 的指定面位移，模拟剪切作用。

(2) 计算参数

模型中土体采用莫尔-库仑本构模型^[10, 13, 15, 22]，试验土体参数如表 7 所示。Plaxis 3D 中的锚杆单元可以同时承受拉伸和剪切的双向作用，比较符合根系实际受力情况，因此采用锚杆单元模拟根系单元，设置根系为弹性本构模型，一个根系单元对应一个锚杆单元，锚杆单元之间设为固定约束。在剪切体与地基土交界处设置界面单元模拟剪切面，参考 Mickovski 等^[13]的经典锚杆杆件根系研究，根土界面黏聚力和内摩擦角取根周围土的黏聚力和内摩擦角。为合理判断剪切面土体破坏类型，允许剪切面土体发生拉伸破坏，并设置抗拉强度为 1.0 kPa。考虑试样在竖向压力 0.15 kPa 作用下的剪切，模拟自然界中可能出现的少量上部荷载情况。

表 7 土体参数

Table 7 Soil parameters				
天然重度 /(kN·m ⁻³)	内摩擦角 /(°)	黏聚力 /kPa	杨氏模量 /Pa	泊松比
14.9	25.5	13.6	2.72×10 ⁶	0.22

3 数值模拟结果分析

3.1 根土复合体应力分析

(1) 剪应力分析

为分析根系对土体剪应力以及塑性点分布的影响，取不同生长时期穿过两根一级根的剖面作为剪应力的监测剖面，图 9 为 28 d 监测位置示意图。

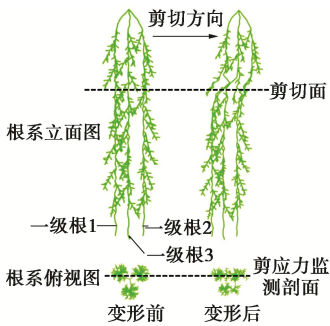


图 9 监测剖面

Fig. 9 Monitoring profile

图 10 为不同生长天数根土复合体的剪应力云图。剪切面附近出现明显剪切带，根系生长时间从 0 d 增长到 28 d，剪切带有扩大趋势。随根系长度、分支数量等发展，形态和层次结构逐渐复杂，根系承担的剪

应力范围越来越大, 同时根系竖向周边土体受根土作用影响也发挥了积极作用, 说明根系能够调动更大范围的土体抵抗剪切变形, 提高根土复合体的剪切强度, 根系形态对根土复合体抗剪增强起到显著作用。

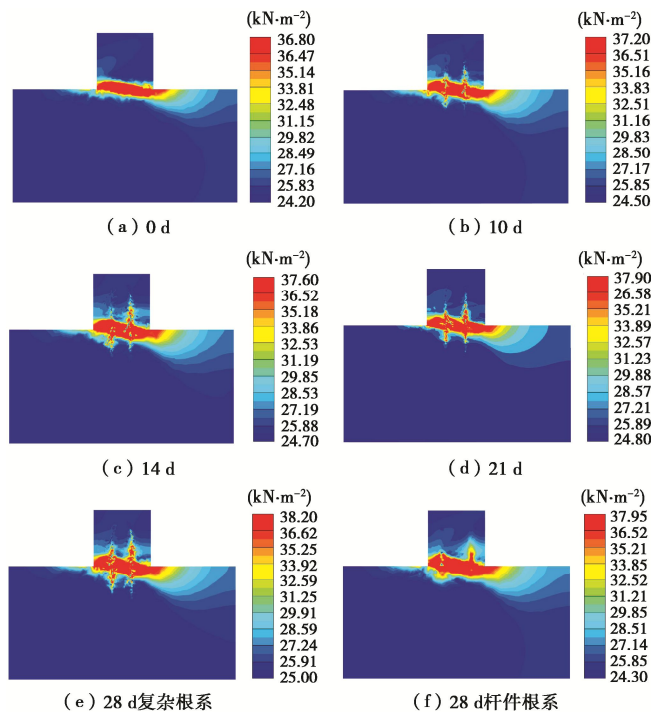


图 10 监测剖面剪应力云图

Fig. 10 Shear stress nephogram of monitoring profile

图 11 为 28 d 经典锚杆杆件根系模型与复杂根系模型的剪切带对比图。虽然两种根系模型剪切带在一级根位置处均有较大的剪应力集中, 但由于锚杆根系模型没有考虑二级根和三级根结构特征, 剪应力外边缘分布较为平滑。在抵抗土体剪切过程中, 复杂根系模型中一级根长度最大, 穿过剪切面深入土体, 起锚固作用; 二级根和三级根长度较短, 数量较多, 围绕一级根向四周和纵横生长, 相互穿插, 呈网状结构分布, 类似于许多细小的纤维, 对土体起加筋作用。由于二级根、三级根的存在, 一级根周围剪切带分布纵横交错, 外边缘凹凸不平, 而经典锚杆根系由于过度简化, 形态较为单一, 只能模拟根系对土体的锚固作用, 不能模拟加筋作用, 因此剪切带外边缘较为平滑。

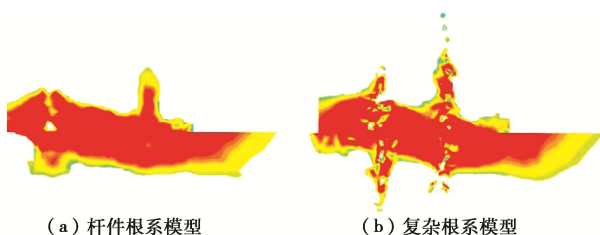


图 11 28 d 剪切带对比

Fig. 11 Comparison of 28 d shear bands

(2) 塑性区分析

图 12 为根系变形后的塑性点分布图, 红色点代表土体发生塑性屈服。随根系形态和层次结构发展, 塑性屈服点不断增加, 根系位置处的塑性点逐渐增多, 说明根系的存在使得剪切面附近土体的塑性区逐渐从剪切体边缘部分向根系周围集中, 在根土复合体破坏前, 根系为土体承受部分剪切力, 延缓了土体塑性区的发展, 提高根土复合体的延性^[23]。而 28 d 杆件根系周围塑性点无明显集中现象, 抗剪强度较低, 与复杂根系相差 1.83 kPa, 说明用传统锚杆模拟根系无法体现真实复杂根系的固土作用机理。

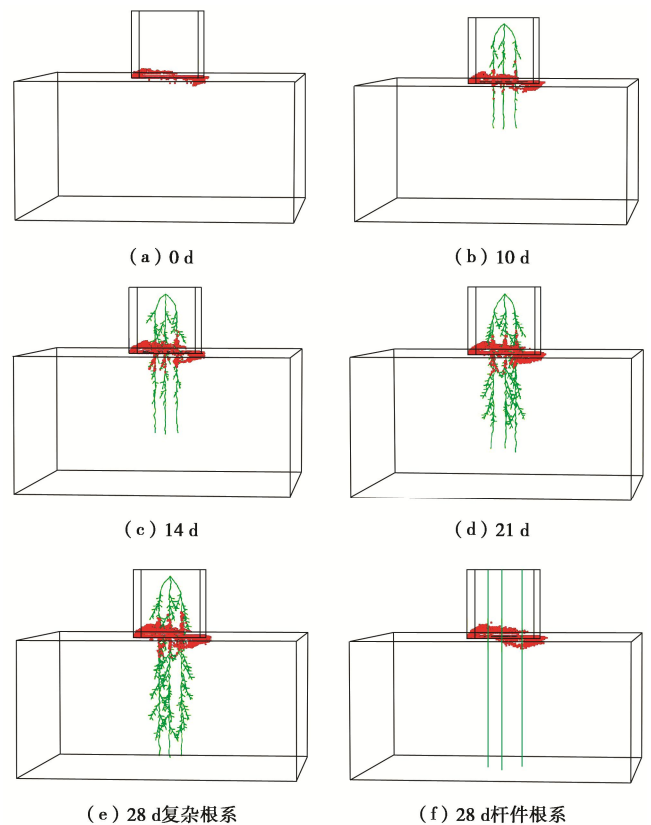


图 12 塑性点分布图

Fig. 12 Distribution of plastic points

(3) 根系轴力分析

图 13 为不同形态与层次结构根系剪切完成后根系轴力云图。随根系生长天数的增加, 根系逐渐增多, 根系轴力分布也越来越密集, 分布区间主要为距根顶 4~13 cm, 最大轴力发生在剪切面, 在剪切面以外逐渐减小。复杂结构根系是由各级根系联合产生内部轴力发挥作用, 杆件根系模型忽略了根系结构特征的影响, 对二级根、三级根的处理仅通过简单的折算力学参数, 无法得出真实的根系固土机理。因此, 需进一步量化根系形态及层次结构对根土复合体力学特性影响。

3.2 根系轴力变化规律分析

根系在土体剪切过程中通过将内部产生的轴力转化为根土界面的摩擦力来阻止土体发生变形^[24]。因

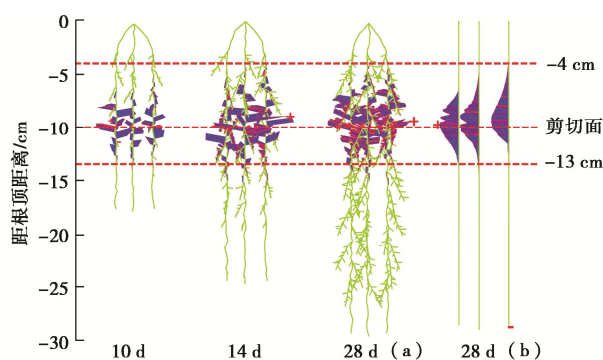


图 13 根系轴力图

Fig. 13 Diagram of axial forces of roots

此, 可以用根系轴力的大小表征根系的固土能力。由 3.1 节可知, 在根土复合体的剪切过程中, 剪切面的根系轴力最大, 为了进一步研究黑麦草根系的固土作用机理, 对生长时间为 10, 14, 28 d 所有与剪切面相交位置处根系的轴力进行统计分析, 其中, 相交位置处一级根数量均为 3 条, 二级根分别为 3, 6, 6 条, 三级根分别为 6, 17, 18 条。

(1) 不同形态根系整体轴力分析

图 14 为剪切面上不同形态根系总轴力随剪切位移变化曲线。由图可知, 不同形态的根系轴力随剪切位移的变化趋势基本一致, 前期呈线性增长, 后期增长速率逐渐减缓。随根系形态的发展, 根系内部产生的轴力越来越大, 相同剪切位移下, 14 d 根系较 10 d 根系有较大提升, 但 28 d 根系较 14 d 根系增长减缓, 该规律与室内试验中抗剪强度指标变化规律吻合。剪切位移为 20 mm 时, 10, 14, 28 d 根系总轴力分别为 9.22, 18.09, 22.31 N。

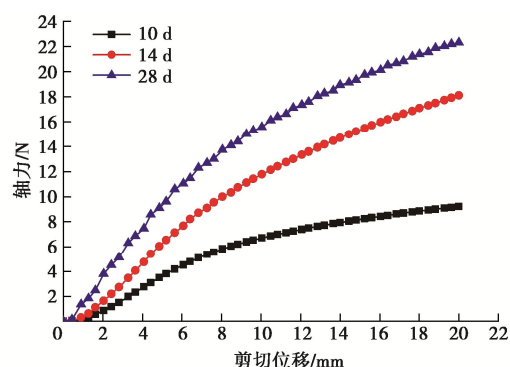


图 14 剪切面总轴力变化曲线

Fig. 14 Variation curves of total axial force of roots on shear plane

随着根系形态, 例如长度、直径、数量的发展引起根系自身抗拉强度以及与土体的接触面积增大, 根土相互作用逐渐增强, 导致复合体抗剪强度增大。同时, 从根系受力方面, 剪切过程中, 由于土体的韧性、延性明显低于根系, 根土之间的错动关系发生变化。在面位移施加初期, 根系和土体均表现为弹性状态,

二者之间存在相互错动的趋势或发生微小错动^[25], 根土之间的摩擦力为静摩擦, 根系轴力接近线性增长。随剪切位移增大, 土体逐渐进入塑性阶段, 部分根系与土体之间静摩擦转变为动摩擦, 根系和土体之间错动增大, 轴力增长减缓。

(2) 不同层次结构根系轴力分析

为进一步研究各层次根系在剪切过程中发挥的作用, 分别对不同生长天数下各层次根系总轴力进行分析, 如图 15 所示。随剪切位移增大, 一级根的轴力增长明显大于二级根、三级根; 14 d 时, 一级根最大轴力为 11.62 N, 二级根为 4.73 N, 三级根仅为 1.74 N; 28 d 时, 二级根、三级根大量发展, 分担了土体中一部分荷载, 一级根轴力降低为 10.42 N, 而二级根、三级根分别增加为 10.28, 2.86 N。说明在根土复合体中, 不同层次根系协同发挥作用, 共同抵抗土体变形; 其中, 一级根起主导作用, 二级根、三级根进行分担, 且随根系发展, 分担作用越明显, 三级根数量很多, 但长度仅在 1~5 mm, 分担的作用远小于二级根。

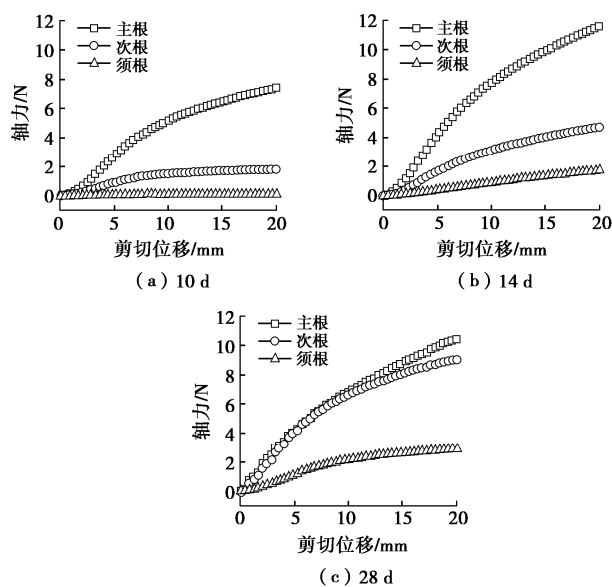


图 15 各层次根系轴力变化曲线

Fig. 15 Variation curves of axial forces of roots

(3) 不同层次根系轴力水平及占比分析

为量化不同层次根系的固土作用, 提出用不同生长形态下各层次根系平均轴力达到的最大值作为单根根系的轴力水平来评价不同层次根系的固土能力, 用各层次根系总轴力占剪切面整体轴力的比例大小来衡量不同层次根系对土体抗剪强度的贡献, 各层次根系轴力水平见表 8。一级根、二级根、三级根轴力水平分别为 3.87, 1.50, 0.15 N。随生长天数增加, 二级根和三级根的平均轴力提高很大, 28 d 时, 二级根、三级根的平均轴力分别为 10 d 时的 2.5 倍和 75 倍, 但与一级根仍有较大差距。

表 8 剪切面上各层次根系轴力水平统计表
Table 8 Statistics of axial force of roots at different levels on shear plane

不同生长 时间 /d	一级根 数量 /条	一级根 平均 轴力/N	二级根 数量 /条	二级根 平均 轴力/N	三级根 数量 /条	三级根 平均 轴力/N
10	3	2.46	3	0.60	6	0.002
14	3	3.87	6	0.78	17	0.100
28	3	3.47	6	1.50	18	0.150

不同形态下各层次根系轴力占比随剪切位移变化曲线,如图 16 所示。生长时间为 10 d 时,主要由一级根产生应力集中承担大部分荷载,通过根土相互作用与周边土体共同作用,一级根轴力占比维持在 75%~80%,而其他根系还未大量发展,发挥作用不大;生长时间为 14 d 时,二级根轴力占比先快速上升,一级根轴力占比有所下降,在剪切位移达到 2.46 mm 时出现明显拐点,之后轴力占比趋于平稳。剪位移施加初期,土体中应力重新分布,生长在一级根周围的二级根遇到土体传递的荷载作用,迅速调动自身轴力分担,然后一级根产生应力集中与周边土体承担主要荷载。因此,二级根轴力占比快速上升,但受根土接触面积限制,二级根轴力占比提升有限,最高占比 26.95%,此时,一级根、三级根轴力占比分别为 67.21%, 5.84%, 仍然是一级根轴力占比最大。生长时间为 28 d 时,二级根、三级根数量、力学性质不断发展,二级根轴力占比快速上升阶段增加,拐点位置后移至 5.26 mm 处,当二级根轴力占比最大达 43.69% 时,一级根轴力占比下降为 44.18%, 仅差 0.49%, 同时三级根轴力占比也有较大幅度增加,达到 12.13%, 随剪切位移增加最高达 13.80%。

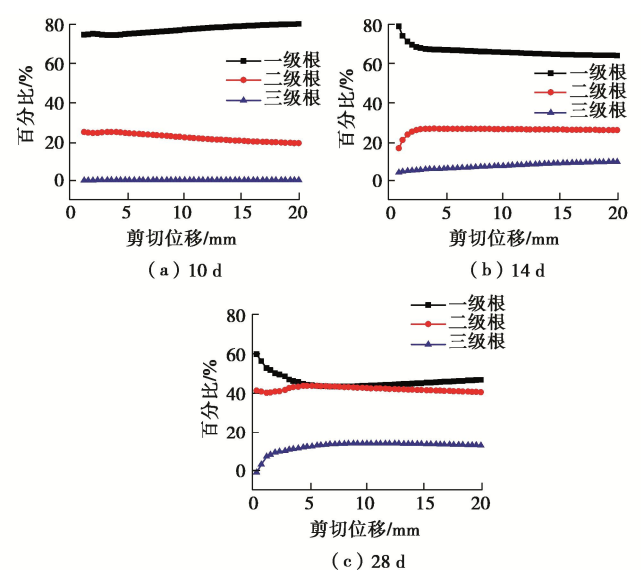


图 16 不同形态下各层次根系轴力占比变化曲线
Fig. 16 Variation curves of axial force ratio of roots at different levels under different morphologies

综上,虽然一级根的固土能力远大于二级根和三级根,但随着根系形态逐渐复杂,二级根、三级根数量不断发展,参与到根系固土作用的比例也不断增大,说明二级根、三级根对土体抗剪强度也有很大的贡献,在研究根土相互作用及固土机理时不应只强调主根的加固作用。

(4) 剪应力 - 位移曲线分析

室内试验与数值模拟 3 种根土复合体剪应力-位移曲线结果见图 17。10 d 剪切曲线吻合较好,14, 28 d 剪切曲线随剪切位移增加明显高于试验结果。室内直剪试验只截取高度为 5 cm 的部分根土复合体,未考虑其余根系在剪切时发挥的作用,而数值模拟不受试验仪器约束,建模时考虑整体根系,采用了更符合实际的地基剪切体模型,结果更能反映实际情况。

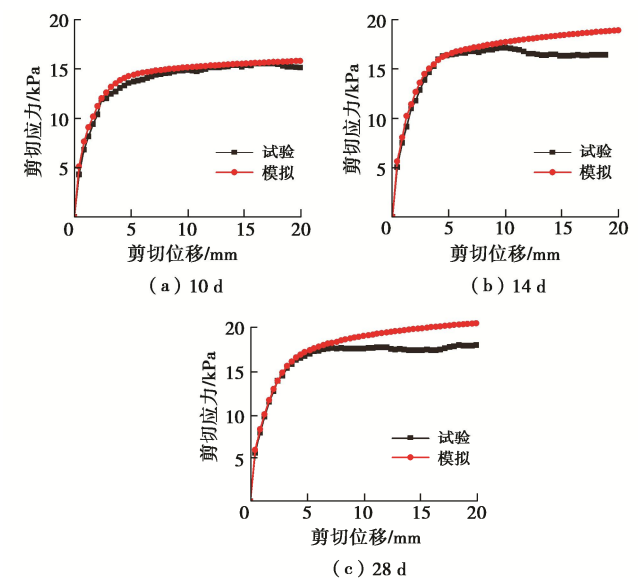


图 17 数值模拟与试验剪应力 - 位移曲线对比
Fig. 17 Shear stress-displacement curves under numerical simulation and experimental conditions

不同形态和层次根系的根土复合体直剪试验与数值模拟的抗剪强度,如表 9 所示。试验结果与数值模拟结果较为吻合,误差仅为 1.60%~13.93%,而 Mickovski 等^[13]将根系简化为杆件的计算结果与试验结果比较,误差为 30%左右,说明考虑不同形态和层次结构的复杂根系更能反映根土复合体的实际抗剪强度。而 14, 28 d 根系模型误差大于 10 d 根系模型,主要是由于 Plaxis 3D 无法模拟根系的突然断裂,在模拟剪切过程中,即使根系断裂,根系与土体间的摩擦力也一直存在,剪切曲线无法模拟达到破坏后的下降阶段,导致抗剪强度有一定的误差,而 14, 28 d 根土复合体模型中根系数量明显增多,误差大于 10 d 根系模型。

表 9 不同形态根系的根土复合体抗剪强度统计表

Table 9 Statistics of shear strength of root-soil composites with different root forms

生长时间 /d	根土复合体抗剪强度		
	试验结果/kPa	模拟结果/kPa	误差/%
10	15.58	15.84	1.60
14	17.19	18.94	10.18
28	17.98	20.46	13.93

4 结 论

采用直剪试验和数值模拟相结合的方法，建立了较为符合实际根系结构特征和力学性质的根土复合体三维模型，进行直剪试验数值模拟，解释了根系不同形态和层次结构对根土复合体力学特性影响以及固土作用机理，得到以下 4 点结论。

(1) 试验表明：黑麦草根系可以明显提高根土复合体的抗剪强度，抗剪强度增长主要由黏聚力增加引起，增幅最大达 4.99 kPa；根土复合体的黏聚力随生长时间的变化规律与根系各项生长指标变化规律一致：前期快速增加，后期增速逐渐减缓趋于平稳。

(2) 通过对复杂结构特征根土复合体的剪应力和塑性区分析，探明了复杂根系对土体的加固机理。根系形态越复杂，根系能够调动更大范围的土体抵抗剪切变形，根土相互作用越明显。在根系的层次结构中，各级根系联合发挥作用，一级根起锚固作用，二级根和三级根起加筋作用。根系使得剪切面附近土体的塑性区逐渐从剪切体边缘部分向根系周围集中，在根系及周边土体产生应力集中共同承担主要荷载，从而提高了根土复合体的抗剪强度。

(3) 采用各层次根系剪切面上总轴力占整体轴力的比例大小衡量不同层次根系对土体抗剪强度的贡献，量化了不同层次根系对土体强度的影响。一级根轴力水平为 3.87 N，远大于二级根和三级根，但随生长时间增大，二级根、三级根数量不断发展，参与到根系固土作用的比例不断增大，二级根对固土的最大贡献由 24.78% (10 d) 增长至 43.69% (28 d)，三级根对固土的贡献由 0.1% (10 d) 增长至 13.80% (28 d)。这一结论弥补了目前只强调一级根加固作用的不足。

(4) 对比室内试验与数值模拟的三种根土复合体的剪应力 - 位移曲线结果，考虑根系不同形态和层次结构的复杂结构特征根土模型计算结果误差仅 1.60%~13.93%，远小于杆件根系模型的 30%，更符合实际情况，为研究根系固土作用及边坡生态防护设计计算提供了理论依据和计算模型。

参考文献：

[1] 徐 华, 李天斌, 周雄华, 等. 高寒地区 JYC 生态基材护

坡现场试验及测试研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(5): 799 - 804. (XU Hua, LI Tian-bin, ZHOU Xiong-hua, et al. Field tests on JYC ecological base material for slope protection in high-cold areas[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(5): 799 - 804. (in Chinese))

[2] 李天斌, 徐 华, 周雄华, 等. 高寒高海拔地区岩质陡边坡 JYC 生态基材护坡技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(11): 2332 - 2339. (LI Tian-bin, XU Hua, ZHOU Xiong-hua, et al. Protection techniques of steep rock slope with jyc ecological base materials in high-cold and high-altitude area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(11): 2332 - 2339. (in Chinese))

[3] XU H, LI T B, CHEN J N, et al. Characteristics and applications of ecological soil substrate for rocky slope vegetation in cold and high-altitude areas[J]. Science of the Total Environment, 2017, 609: 446 - 455.

[4] 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 Yun-yan, CHEN Jian-ping, WANG Xiao-mei. Progress of study on soil reinforcement mechanisms by root and its expectation[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(6): 1171 - 1177. (in Chinese))

[5] GONZALEZ-OLLAURI A, MICKOVSKI S B. Plant-soil reinforcement response under different soil hydrological regimes[J]. Geoderma, 2017, 285: 141 - 150.

[6] KIM J H, FOURCAUD T, JOURDAN C, et al. Vegetation as a driver of temporal variations in slope stability: the impact of hydrological processes[J]. Geophysical Research Letters, 2017, 44(10): 4897 - 4907.

[7] NG C W W, WOON K X, LEUNG A K, et al. Experimental investigation of induced suction distribution in a grass-covered soil[J]. Ecological Engineering, 2013, 52(2): 219 - 223.

[8] 周 成, 路永珍, 黄月华. 香根草加固不同含水率膨胀土的侧限膨胀和直剪试验[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(增刊 2): 30 - 35. (ZHOU Cheng, LU Yong-zhen, HUANG Yue-hua. Oedometer expansion and direct shear tests on vetiver root-reinforced expansive soil with different water contents[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(S2): 30 - 35. (in Chinese))

[9] 刘亚斌, 胡夏嵩, 余冬梅, 等. 西宁盆地黄土区 2 种灌木植物根 - 土界面微观结构特征及摩擦特性试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(5): 1270 - 1280. (LIU Ya-bin, HU Xia-song, YU Dong-mei, et al. Microstructural features and friction characteristics of the interface of shrub roots and soil

- in loess area of Xining Basin[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, **37**(5): 1270 – 1280. (in Chinese))
- [10] 王一冰, 吴美苏, 周 成, 等. 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 Yi-bing, WU Mei-su, ZHOU Cheng, et al. Direct shear tests and numerical simulation on slope soils reinforced by composite roots[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(S1): 177 – 182. (in Chinese))
- [11] 曾红艳, 吴美苏, 周 成, 等. 根系与植筋带固土护坡的力学机理试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(增刊 2): 151 – 156. (ZENG Hong-yan, WU Mei-su, ZHOU Cheng, et al. Experimental study on reinforcement mechanism of vegetated slopes with root system and vertical geotextile belts[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(S2): 151 – 156. (in Chinese))
- [12] 孔纲强, 文 磊, 刘汉龙, 等. 植物根系分布形态及含根复合土强度特性试验[J]. 岩土力学, 2019, **40**(10): 3717 – 3723. (KONG Gang-qiang, WEN Lei, LIU Han-long, et al. Strength properties of root compound soil and morphological observation of plant root[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(10): 3717 – 3723. (in Chinese))
- [13] MICKOVSKI S B, STOKES A, VAN BEEK R, et al. Simulation of direct shear tests on rooted and non-rooted soil using finite element analysis[J]. Ecological Engineering, 2011, **37**(10): 1523 – 1532.
- [14] BERNTSON G M. Modelling root architecture: are there tradeoffs between efficiency and potential of resource acquisition? [J]. New Phytologist, 1994, **127**(3): 483 – 493.
- [15] XU H, WANG X Y, LIU C N, et al. A 3D root system morphological and mechanical model based on L-Systems and its application to estimate the shear strength of root-soil composites[J]. Soil and Tillage Research, 2021, **212**: 105074.
- [16] JEWELL R A, WROTH C P. Direct shear tests on reinforced sand[J]. Géotechnique, 1987, **37**(1): 53 – 68.
- [17] LEITNER D, KLEPSCH S, KNIEß A, et al. The algorithmic beauty of plant roots-an L-System model for dynamic root growth simulation[J]. Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems, 2010, **16**(6): 575 – 587.
- [18] PAGÈS L, VERCAMBRE G, DROUET J L, et al. Root Typ: a generic model to depict and analyse the root system architecture[J]. Plant and Soil, 2004, **258**(1): 103 – 119.
- [19] MATTIA C, BISCHETTI G B, GENTILE F. Biotechnical characteristics of root systems of typical mediterranean species[J]. Plant and Soil, 2005, **278**(1/2): 23 – 32.
- [20] 郝郑芳. 高速公路切方边坡防护草本植物根系固土能力研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2014. (HAO Zheng-fang. Research of Capability of Soil Conservation of Herb Plant root Used in Cutted Slope of Highway[D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2014. (in Chinese))
- [21] 沈庆双. 草本植物加固边坡的试验探究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018. (SHEN Qing-shuang. Experimental Investigation of Slope Reinforcement by Herbaceous Plants[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2018. (in Chinese))
- [22] 田 佳, 曹 兵, 金 楠, 等. 花棒根-土复合体直剪试验的有限元数值模拟与验证[J]. 农业工程学报, 2015, **31**(16): 152 – 158. (TIAN Jia, CAO Bing, JI Jin-nan, et al. Numerical simulation and validation test of direct shear test for root-soil composite of Hedysarum scoparium using finite element method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, **31**(16): 152 – 158. (in Chinese))
- [23] 闫海燕. 香根草根土复合体力学性能研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2013. (YAN Hai-yan. Research on Mechanical Properties of Vetiver Root-Soil Composite[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2013. (in Chinese))
- [24] 卜宗举. 植被根系浅层加筋作用对边坡稳定性的影响[J]. 北京交通大学学报, 2016, **40**(3): 55 – 60. (BU Zong-ju. Effect of shallow layer of vegetation root on slope stability[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2016, **40**(3): 55 – 60. (in Chinese))
- [25] WU T H. Investigation of landslides on Prince of Wales Island, Alaska, Geotechnical Engr. Report No 5, dept. of Civil Engr[M]. Columbus: Ohio State University, 1976: 94.