

根直径及干湿循环对根土复合体抗剪强度影响的 试验研究

程平¹, 吴礼舟²

1. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 成都 610059;

2. 重庆交通大学 山区桥梁及隧道工程国家重点实验室, 重庆 400074

[摘要] 探究植被根系对土体的加固效应及干湿循环对根土复合体强度的劣化机制, 为边坡生态治理及灾害防治提供帮助。开展了不同根直径及干湿循环的根土复合体三轴试验, 利用电子显微镜对根土复合体的微观结构进行分析。研究表明: 新鲜根、饱和根和干燥根的抗拉强度随直径的增大呈幂律减小。干燥根的抗拉强度最大, 其次是新鲜根和饱和根。根土复合体的应力—应变曲线表现为持续硬化。随着应变的增大, 偏应力先迅速增大后缓慢增加, 最终保持稳定。随着根直径的增大, 根土复合体的抗剪强度先增大后减小。根直径过小或过大, 根对土壤的加固效果减弱。根系显著改变土壤黏聚力, 对内摩擦角影响较小。抗剪强度随围压的增加而增大, 随干湿循环的增加而减小。随着干湿循环次数的增加, 抗剪强度和黏聚力呈线性下降, 土颗粒团聚体分解, 土体裂缝和孔隙面积呈指数增长。根土复合体的破坏形式为剪胀破坏。考虑干湿循环, 修正的根土复合体强度预测模型是有效的, 预测结果与试验数据吻合较好。

[关键词] 根土复合体; 根直径; 干湿循环; 三轴试验; 抗剪强度

[分类号] TU41

[文献标志码] A

Experimental investigation into the influence of root diameter and dry-wet cycle on the shear strength of root-soil composite

CHENG Ping¹, WU Lizhou²

1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. State Key Laboratory of Mountain Bridge and Tunnel Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China

Abstract: This study investigates the reinforcing effect of the roots of vegetation on the soil, and the

[收稿日期] 2023-08-22。

[基金项目] 国家自然科学基金面上项目(42277183); 重庆市自然科学基金创新发展联合基金(CSTB2022NSCQ-LZX0044); 成都理工大学“研究生拔尖创新人才培养计划”项目(CDUT2023BJCX006)。

[第一作者] 程平(1994—), 男, 博士研究生, 研究方向: 岩土体稳定性及工程环境效应, E-mail: chengping0717@163.com。

[通信作者] 吴礼舟(1975—), 男, 教授, 研究方向: 岩土工程, E-mail: lzwu@cqjtu.edu.cn。

[引用格式] 程平, 吴礼舟, 2024. 根直径及干湿循环对根土复合体抗剪强度影响的试验研究[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 51(3): 465-476.

Cheng P, Wu L Z, 2024. Experimental investigation into the influence of root diameter and dry-wet cycle on the shear strength of root-soil composite[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 51(3): 465-476.

mechanism of weakening of the root-soil composite when subjected to wet-dry cycles, with the aim of providing suggestions for the ecological management of slopes for disaster prevention. We conducted triaxial tests on root-soil composite samples featuring roots with varying diameters that were subjected to wet-dry cycles. The microstructure of the composites was analyzed by using electron microscopy. The results showed that the tensile strength of fresh, saturated, and dry roots decreased according to the power law with increasing root diameter. Dry roots exhibited the highest tensile strength, followed by fresh and saturated roots. The stress-strain curve of the root-soil composite reflected continuous hardening behavior. As the strain increased, the deviatoric stress initially increased rapidly and then slowly, and eventually stabilized. The shear strength of the root-soil composite first increased and then decreased as the diameter of the roots increased. However, when the root diameter was too small or too large, the reinforcement effect of the roots on the soil weakened. The root system significantly altered the cohesion of the soil but had little impact on the internal angle of friction. Its shear strength increased with the confining pressure but decreased with an increase in the number of dry-wet cycles. As the latter increased, the shear strength and cohesion decreased linearly, the soil aggregates were decomposed, and the area occupied by cracks and pores increased exponentially. The root-soil composite exhibited a shear dilation-based pattern of failure. The results showed that considering the influence of dry-wet cycles can enhance the accuracy of the model for predicting the strength of the root-soil. The predictions of our model were in good agreement with experimental data.

Key words: root-soil composite; root content; dry-wet cycle; triaxial test; shear strength

降雨和蒸发是常见的自然现象,根系与土壤形成的根土复合体在经历反复降雨和蒸发后,其强度和内应力会发生改变(Guan et al., 2010)。干湿循环对土体的力学特性会产生不可逆转的影响,长期且复杂的干湿作用后岩土体损伤效应逐渐累积,容易诱发滑坡等地质灾害(曹玲等, 2016)。植被作为一种环境友好型材料,在边坡生态修复中得到了广泛的应用(Zhu and Zhang, 2019;徐华等, 2022)。根系可以通过水文和机械作用防止水土流失,保持边坡稳定(Kim et al., 2017;Lan et al., 2020)。因此,探究植被根系对土的加固效应及干湿循环作用下根土复合体强度劣化规律,对边坡的生态治理具有重要的工程价值和现实意义。

根系通过传递机械能来加固边坡。直剪和三轴试验是量化根系对土壤加固效果的 2 种常用方法(Mickovski et al., 2011;李为萍等, 2013)。直剪试验操作简单,但试样的破坏面是预先确定的。三轴试验将根土复合体视为弹塑性材料,破坏面不固定。围压可以模拟周围土体对根系的压缩,较好地评价了根系对土体抗剪强度的影响(Li et al., 2017)。目前,国内外学者针对根土复合体的抗剪强度进行了大量研究。例如,朱锦奇等

(2020)以北方常见灌木为例,通过试验研究了根土复合体和素土的抗剪强度随含水率的变化规律。陈昌富等(2007)采用室内三轴试验分析了根土复合体应力-应变特征,探讨了加筋层数、加筋量对根土复合体黏聚力和内摩擦角的影响。赵记领等(2017)基于大型直剪试验探讨了不同根系直径、根系数量、根系分布下根土复合体抗剪强度特征。Hu et al. (2013)分析了根系的抗拉、抗剪、形态特征,研究表明单根抗拉强度随根径变化呈幂次关系。Normaniza et al. (2006)和 Jiang et al. (2009)研究表明,干湿循环影响边坡含水率,从而影响边坡稳定性。夏季降雨丰沛,土壤含水率升高;冬季降雨减少,土壤含水量降低。不稳定的气候变化使得土壤含水量的改变,由此形成了复杂的干湿循环过程。降雨和蒸发引起的干湿循环导致土体裂隙收缩-扩展,土壤基质吸力和强度发生改变(Tang et al., 2020)。土壤裂隙随干湿循环次数的变化将经历 3 个阶段:迅速增长、缓慢增长、趋于平缓(Liu and Yin, 2010)。干燥和湿润路径下土的抗剪强度差异较大,干燥路径下的土体抗剪强度高,体积收缩;而湿润路径下的土体强度较低,体积膨胀(Guan et al., 2010)。赵思奕等(2021)研究了干湿循环对土体强度、裂隙扩展

及渗透性的影响,揭示了边坡稳定性对干湿循环的响应规律。

然而,自然界大量边坡被植被覆盖,茎叶可减小雨水的动能,降低雨水对坡面的冲刷。根系具有抗拉能力,它不仅限于限制土体裂隙的发展,还会影响土壤的水力特性。这是由于根系表面的根毛不仅能增大与土壤颗粒的摩擦,也具有吸水能力,而土壤的工程特性依赖含水量的变化(Harrison et al., 2012)。降雨和蒸发是诱发边坡水分和土体强度改变的重要条件,对边坡稳定性造成较大影响。当前许多研究探讨了根分布、不同根类型等(赵记领等, 2017; 祁兆鑫等, 2017; 王保辉和朱连奇, 2018; 徐华等, 2022)因素对土体强度的影响,但关于干湿循环作用下根土复合体强度变化的研究较少。因此,如何准确掌握降雨—蒸发循环作用下根土复合体的强度特性及破坏机制,是进行边坡生态防护的关键。

基于此,本文开展干湿循环作用下根土复合体的强度特性及破坏机制研究。首先,选取研究区典型护坡植物小叶女贞和黏土,制备根土复合体试样,定量分析根系直径对土的加固效果。其次,对试样进行不同次数的干湿循环,揭示干湿循环对根土复合体强度的劣化作用。然后,对试样进行电镜扫描,从微观角度分析根土复合体强度衰减机制。最后,修正根土复合体强度预测模型,并与实验结果相对比。研究成果可为揭示根土相互作用机制及覆被斜坡灾变机制提供重要理论依据。

1 研究内容与方法

1.1 区域概况

取样地位于四川省都江堰龙池镇(30°01'N, 103°35'E),属于龙门山断裂带,是青藏高原东缘的边界山脉(图1)。曾多次发生地震、泥石流和滑坡,原有的基础设施和生态环境被严重破坏。该区域属于亚热带季风气候,年平均气温和平均降雨分别为 10 °C, 1 179.4 mm,降雨集中在 5~9 月,占全年降雨的 80% 以上,这是地质灾害的高发期。降雨具有强度大和暴雨频率高的特点,是诱发滑坡等地质灾害的主要因素。该地区的主要植物为灌木,覆盖率达 60%~80%。

1.2 试验材料

研究区常见的土壤为粉质黏土。图2为试验土体颗粒粒径级配曲线。开展试验前,在取样地

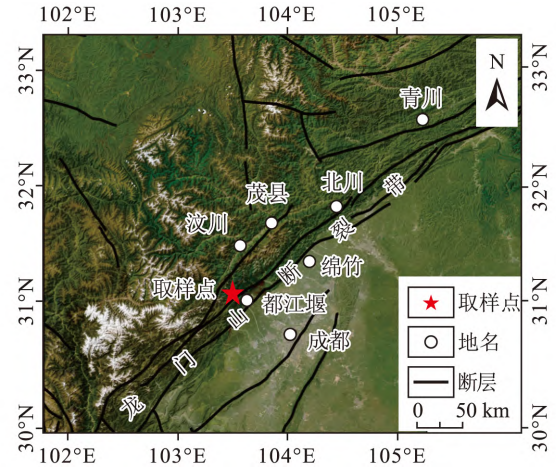


图1 研究区概况

Fig. 1 The study area

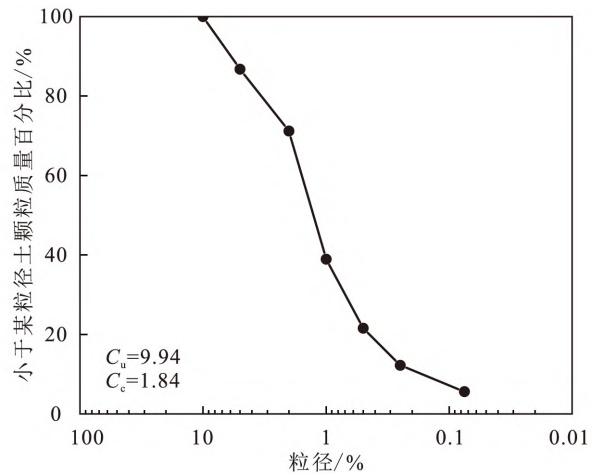


图2 试验土体颗粒粒径级配曲线

Fig. 2 Curve of the grain size distribution of the tested soil

选取灌木覆盖较少的区域(1 m×1 m),清除土壤表面的植被和杂质,挖取 10~50 cm 深的土壤。根据《公路土工试验规程》(交通部公路科学研究院, 2007)测定土壤参数(表1)。

表1 试验土体基本物理性质指标

Table 1 Basic physical properties of the tested soils

指标	干密度/(g·cm ⁻³)	含水率/%	液限/%	塑限/%
数值	1.63	21.40	33.50	17.40

试验采用西南地区常见的护坡植物小叶女贞的根系(图3)。其根系发达,生存能力强,对土坡有较好的加固作用。通过现场调查可知,侧根的长度范围为 5~25 cm,根的直径分布在 0.5~6 mm,且直径 1.5 mm 的根最多。

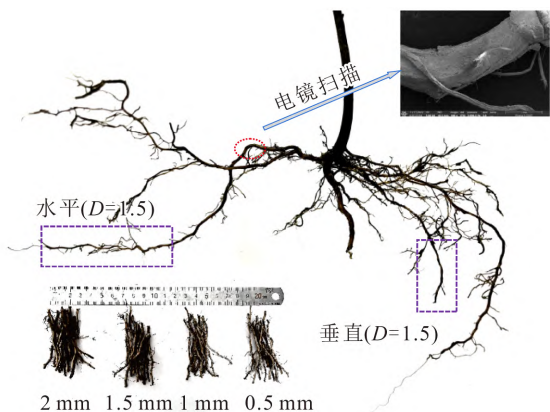


图 3 小叶女贞根系
Fig. 3 Roots of *Ligustrum quihoui* Carr

1.3 试验方案

为了探究根直径和干湿循环对根土复合体抗剪强度的影响,根系直径分别设为 0.5 mm, 1 mm, 1.5 mm, 2 mm, 根段长度为 60 mm。试样尺寸为 50 mm×100 mm, 每个试样中根的数目为 9 根。根在试样中的分布如图 4 所示。考虑滑坡发生时滑体推力作用于根系, 试验过程中的围压分别设置为 200 kPa, 600 kPa, 1 000 kPa。

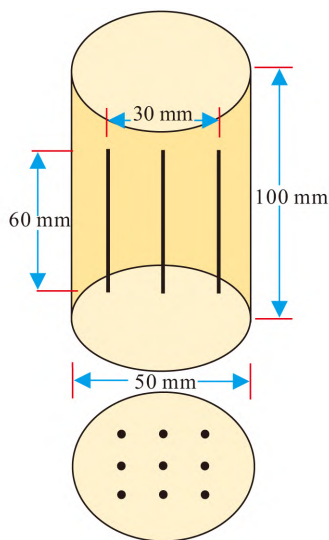


图 4 根系分布
Fig. 4 Distribution of the roots

调查结果表明, 研究区土壤最低含水率为 10%, 最高含水率为饱和含水率, 即 34.6%。试样的一个完整干湿循环包括失水和吸水, 干湿循环的处理过程参考王建华和高玉琴(2006)的研究。干燥阶段, 将试样置于恒温通风干燥箱内, 直到试样含水率达到 10%。湿润阶段, 将试样置于

真空饱和缸内使试样饱和, 通过称取试样质量来控制含水率。试验过程中分别进行 0, 1, 3, 6, 10, 15 次干湿循环, 试样达到干湿循环次数后, 取饱和和试样进行试验。干湿循环方案如图 5 所示。

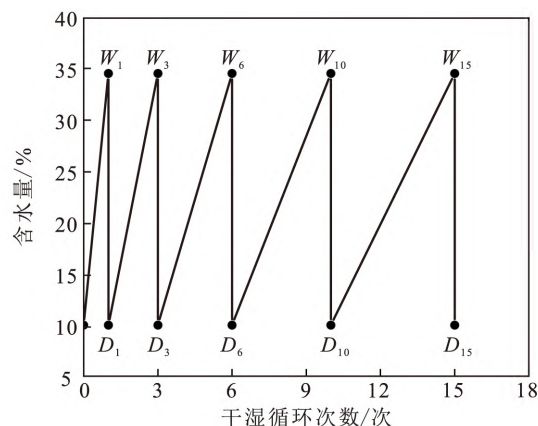


图 5 干湿循环过程
Fig. 5 The process of dry-wet cycles

大量研究表明, 滑坡主要发生在降雨期间。土壤在长期复杂环境作用下已完成固结, 雨水入渗后难以排出, 导致土体抗剪强度降低, 根系对土壤的加固效果也减弱。因此, 本试验采用固结不排水, 图 6 给出了本次试验的全过程示意图: ①将新鲜的根均匀分布在土壤中, 制成标准试样。②按照图 4 方案开展干湿循环。③取饱和的根土复合体试样, 用橡胶膜包裹试样, 将透水石放在试样的顶部和底部。向压力腔内注水来控制围压, 调整轴向测力计。设置实验的剪切速率为 0.1 mm/min, 试样轴向应变达到 20% 时停止试验, 取应变为 15% 时对应的偏应力作为破坏偏应力。④将试验后的土样和根系进行电镜扫描, 分析干湿循环对根土复合体结构的改变, 从微观角度揭示根土复合体强度劣化机制。

2 结果与分析

2.1 含水率对根抗拉强度的影响

干湿循环导致土壤含水量发生周期性变化, 从而影响根的水分含量变化, 也会导致根的抗拉强度改变。在试验开始前, 测定不同含水量下的根系抗拉强度。将根的长度裁剪为 60 mm, 直径范围为 0.5~3.5 mm。把根均匀地分为 3 组, 每组 30 根。第一组为新鲜根, 用保鲜膜包裹, 防止水分蒸发; 第二组根放入水中浸泡至质量不发生改变; 第三组根在室温下风干 12 h。试验前需测

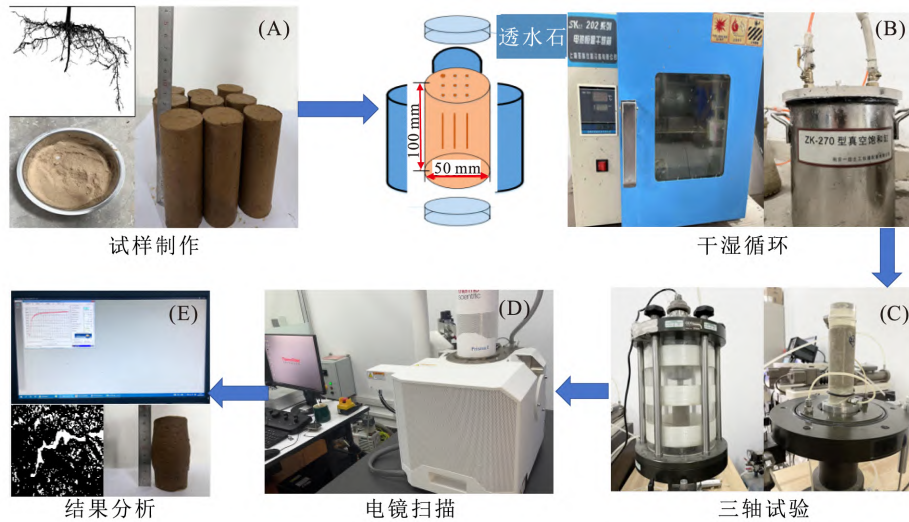


图 6 试验流程
Fig. 6 Test process

定根的两端和中间部位的直径,取平均值为根的最终直径。根的抗拉强度计算公式为:

$$P = \frac{4F}{\pi D^2} \quad (1)$$

式中: P 为抗拉强度 (MPa); F 为拉力 (N); D 为根的直径 (mm)。

图 7 给出了根的抗拉强度随直径的变化规律。新鲜根、饱和根、干燥根的抗拉强度随直径呈幂律减小。对图 7 进行拟合,公式(2)~(4)给出了根的抗拉强度随直径的变化关系式。干燥根的抗拉强度最大,其次是新鲜根,饱和根最小。干燥根的最大抗拉强度是饱和根的 1.7 倍,是新鲜根的 1.5 倍。这是因为根系吸水增加了根的直径,根的张力减小(Zhang et al., 2019),细胞壁有机

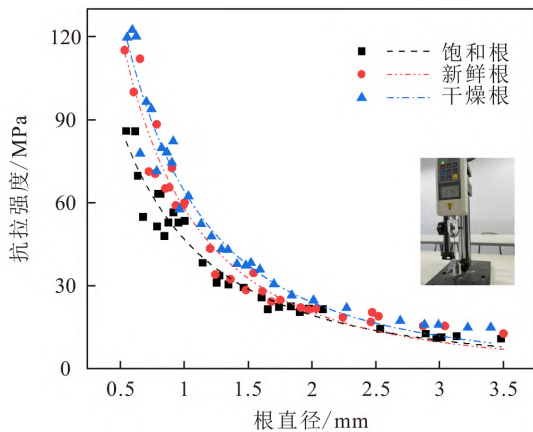


图 7 抗拉强度与根直径的关系
Fig. 7 Relationships between root diameter and tensile strength

聚合物的结合强度减弱(Hales et al., 2013)。滑坡通常发生在土壤含水量高的区域,根和土壤的含水率达到饱和,根的加固效果会极大地减弱。采用干燥根和新鲜根的抗拉强度分析边坡稳定性会高估根的贡献,而采用饱和根是合理的(Zhang et al., 2019)。

$$\text{饱和根: } y = 200.40(1+x)^{-2.12} \quad R^2 = 0.9565 \quad (2)$$

$$\text{新鲜根: } y = 322.24(1+x)^{-2.51} \quad R^2 = 0.9565 \quad (3)$$

$$\text{干燥根: } y = 325.94(1+x)^{-2.37} \quad R^2 = 0.9536 \quad (4)$$

式中: y 为抗拉强度; x 为根直径; R^2 为决定系数。

2.2 根直径对根土复合体强度的影响

图 8 给出了根土复合体试样在不同直径下的偏应力-轴向应变曲线。由图 8 可知,应力-应变曲线呈非线性,表现为持续硬化,没有明显的峰值,取轴向应变为 15% 时的偏应力为破坏应力。偏应力随围压的增大而增大。当轴向应变小于 2% 时,不同围压下根土复合体的应力-应变曲线非常接近。当轴向应变达到 15% 时,偏应力基本保持不变。当轴向应变确定时,随着围压的增大,根土复合体的偏应力越大。在相同偏应力下,根土复合土的轴向应变小于素土。当应变较大时,根系被完全拉伸,其抗拉能力也达到峰值。这些结果表明,根的掺入提高了土体的强度,并能更好地抑制土体变形。

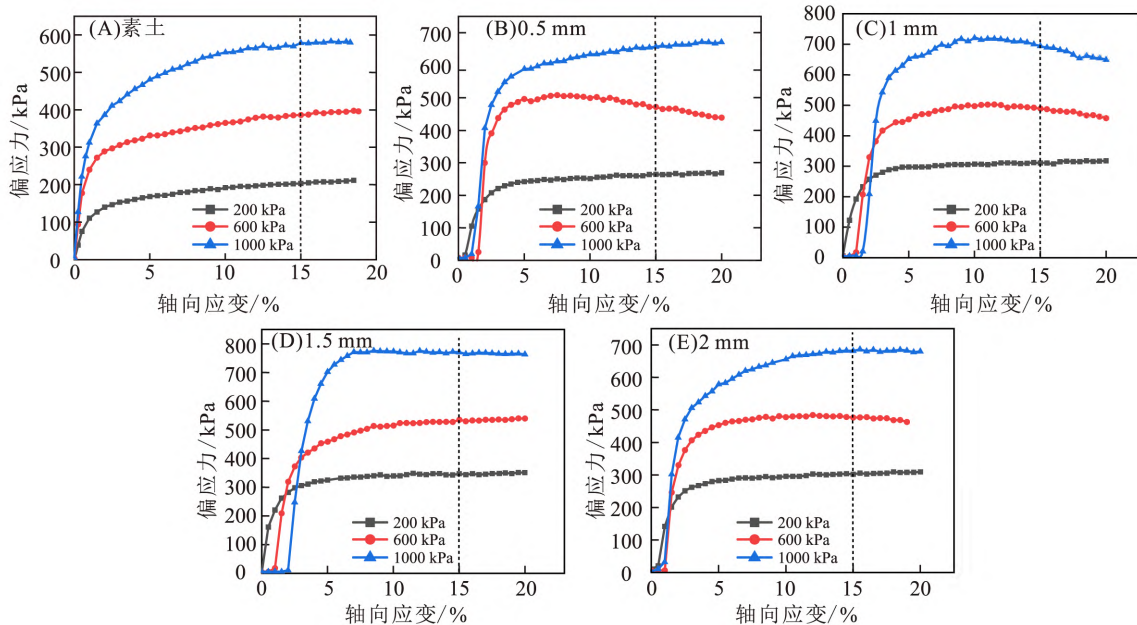


图 8 不同根直径的根土复合体与素土的应力应变曲线
 Fig. 8 Stress-strain curves of root-soil composite and plain soil with roots of different diameters

抗剪强度是评价土体强度特性的重要指标, 图 9~10 给出了根土复合体抗剪强度随根直径的变化规律。随着根径的增大, 根土复合黏聚力先增大后减小。李为萍等(2013)通过三轴试验得出了同样的结论, 陈终达等(2016)通过直剪试验也认为根土复合体抗剪强度随直径的增大表现为先增大后减小, 这与本文的结论一致。根径为 1.5 mm 时, 根土复合材料的黏聚力比平原土高 49.82 kPa。当根径大于 1.5 mm 时, 根土复合体的黏聚力随根径的增大而降低, 抗剪强度随之降低。根径为 0.5 mm 时, 根土复合体黏聚力 (24.95 kPa) 高于素土; 根径过小, 其抗剪切变形

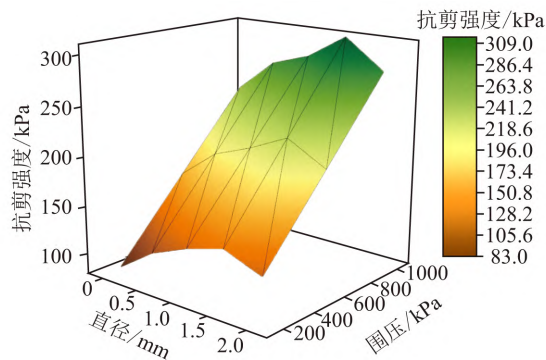


图 10 抗剪强度随根直径的变化
 Fig. 10 Variation in the shear strength with the root diameter

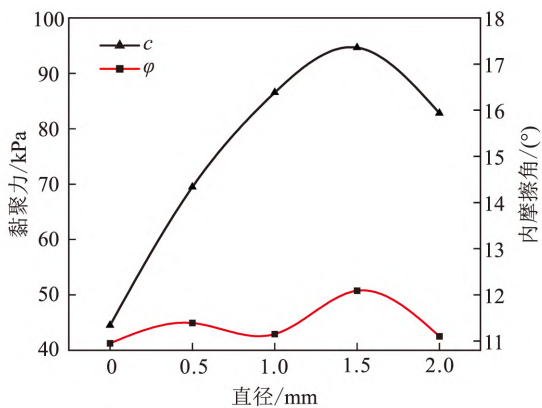


图 9 黏聚力和内摩擦角随根直径的变化
 Fig. 9 Variation in the cohesion and internal angle of friction with the root diameter

的能力有限, 根土复合体抗剪强度不能明显提高。根径对根土复合体的内摩擦角影响不大, 这与土颗粒的结构有关。与土壤体积相比, 根土复合体中根系体积较小, 土壤结构变化不大。试验结果表明, 最优根径可以使根土复合体的抗剪强度达到最大。

2.3 干湿循环对根土复合体强度的影响

图 11 给出了相同围压和不同干湿循环次数下偏应力随轴向应变的变化规律。对比分析图 11-A~C 可得: ①干湿循环对根土复合体试样的偏应力有显著影响。相同围压下, 随着干湿循环次数的增加, 根土复合体的破坏偏应力降低。②当

轴向应变较小时(低于 3%),偏应力随应变的增加而迅速增加。干湿循环次数越小,偏应力增加速度越快。当轴向应变大于 3%后,偏应力增加速度减小。当轴向应变达到 15%时,偏应力保持恒

定。③初始模量随围压的增大而增大。这是因为围压越大,土体之间压缩量越大,相对密实度越大,根与土、土颗粒之间接触更加紧密,根土复合体抵抗剪切变形的能力越强,所以变形模量越大。

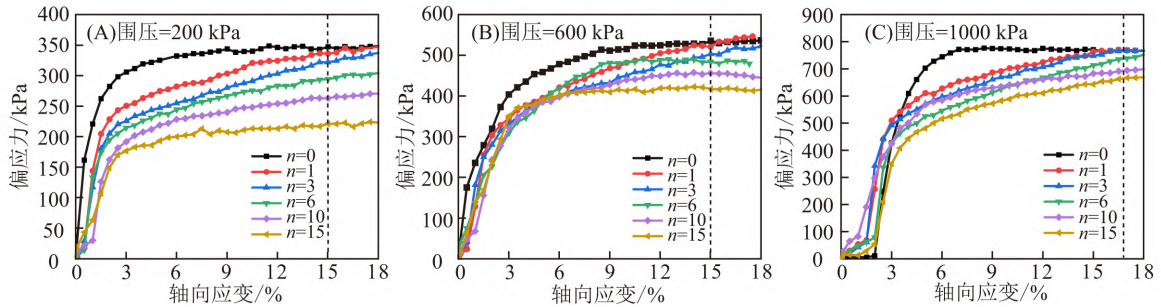


图 11 干湿循环数下偏应力与轴向应变的关系

Fig. 11 Relationship between the deviatoric stress and axial strain under different numbers of dry-wet cycles

当应变相同时,偏应力随着围压的增大而增大。当 $n=1$ 时,1 000 kPa 围压对应的偏应力是 200 kPa 对应偏应力的 2.78 倍,是 600 kPa 对应偏应力的 1.46 倍。当 $n=15$ 时,1 000 kPa 围压对应的偏应力是 200 kPa 对应偏应力的 2.90 倍,是 600 kPa 对应偏应力的 1.54 倍。图 12 拟合了相同围压下最大偏应力随干湿循环次数的变化规律。围压相同时,随着干湿循环次数的增加,破坏偏应力呈线性减小。

循环主要影响根土复合体的黏聚力。与初始状态相比,1 次、3 次、6 次、10 次、15 次干湿循环后,根土复合体的黏聚力分别减小了 6.1 kPa,11.48 kPa,20.8 kPa,32.98 kPa,49.56 kPa。

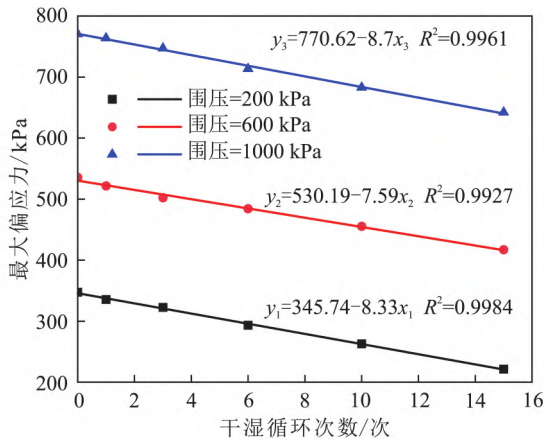


图 12 干湿循环数下根土复合体最大偏应力变化规律

Fig. 12 Variation in the maximum deviatoric stress of the root-soil composite under different numbers of dry-wet cycles

为了更好地反映干湿循环对根土复合体抗剪强度的劣化,图 13 给出了抗剪强度参数随干湿循环次数变化的规律。由图 13 可知,黏聚力随干湿循环次数线性降低,内摩擦角降低较小,表明干湿

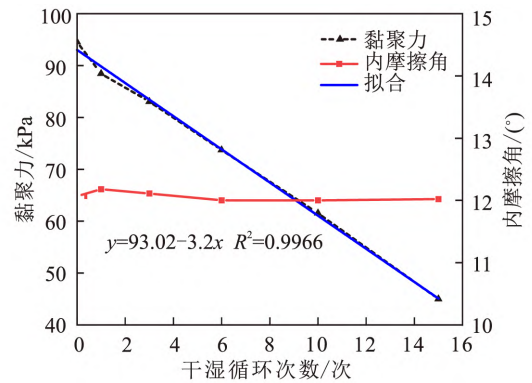


图 13 黏聚力和内摩擦角随干湿循环次数的变化

Fig. 13 Variation in the cohesion and internal angle of friction with under different numbers of dry-wet cycles

抗剪强度随干湿循环次数的增加呈线性降低。采用弱化率描述抗剪强度的衰减程度。图 14 描述根土复合抗剪强度及弱化率与干湿循环次数的关系,弱化率计算公式如下:

$$\omega_i = \frac{\tau_n - \tau_0}{\tau_0} \times 100\% \quad (5)$$

式中: ω_i 表示弱化率; τ_n 表示 n 次干湿循环后根土复合体的抗剪强度; τ_0 表示未进行干湿循环根土复合体的抗剪强度。

由图 14 可得到以下结论:①当围压相同时,干湿循环次数越多,根土复合体抗剪强度衰减越

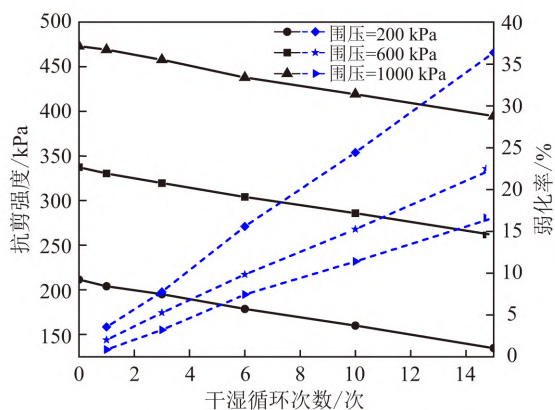


图 14 抗剪强度随干湿循环次数的变化

Fig. 14 Variation in the shear strength with under different numbers of dry-wet cycles

多, 弱化率越大。当围压为 200 kPa 时, 1 次和 15 次干湿循环后, 抗剪强度分别降低了 7.56 kPa, 76.91 kPa, 弱化率分别为 3.57%, 36.35%。②当干湿循环次数相同时, 围压越大, 根土复合体抗剪强度弱化率越小, 表明高围压可限制土体变形。当干湿循环次数为 15 次时, 围压为 200 kPa,

600 kPa, 1 000 kPa 时, 根土复合体抗剪强度弱化率分别为 36.35%, 22.48%, 16.59%。③围压越大, 根土复合体抗剪强度越大。

2.4 强度劣化机制分析

由 2.3 节可知, 根土复合体黏聚力和抗剪强度随干湿循环次数的增加而降低。这是由于土壤裂缝和孔隙数量增多, 裂缝宽度和孔隙直径增大, 颗粒之间吸附强度降低 (Lu et al., 2002; Hu et al., 2019)。图 15 给出了电镜扫描下根土复合体的微观结构变化图。结果表明, 随着干湿循环次数的增加, 土壤开裂程度显著增加, 但根系可以抑制土开裂。Tang et al. (2011) 研究表明, 干湿循环导致土壤中均匀浆体结构改变为聚集体结构, 增强了土壤的非均质性。随着干湿循环次数的增加, 土壤的总密度减小, 颗粒之间的吸附力减弱。较大的土粒团聚体在不断干湿循环后分离, 形成新的孔隙。根系通过抗拉能力为土壤提供附加黏聚力, 干湿循环后根的抗拉能力降低, 根土复合体黏聚力降低, 抗剪强度降低。

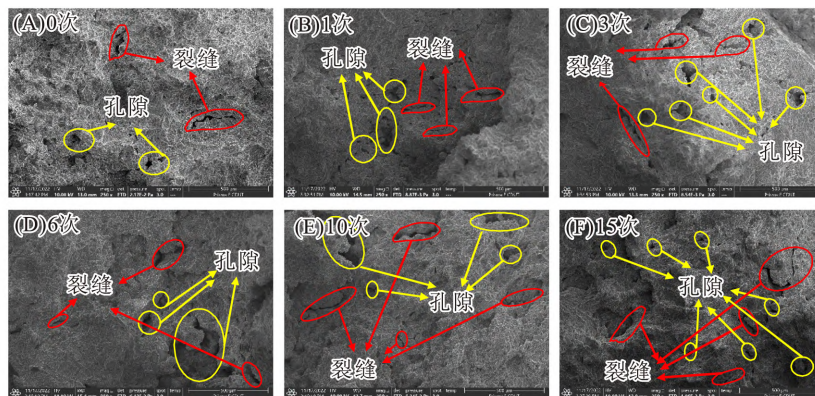


图 15 干湿循环后黏土微观结构

Fig. 15 Microstructure of clay after being subjected to dry-wet cycles

采用 MATLAB 软件的图像处理功能对根土复合体的 SEM 图像中典型区域进行微观处理。定量描述不同循环次数下土体裂缝、孔隙特征变化规律。图 15 给出了裂缝和孔隙面积随干湿循环次数的变化规律, 拟合曲线后得到的方程如下:

$$S = 1.27 \times 10^4 \times e^{(n/7.42)} - 2.19 \times 10^3 \quad (6)$$

由公式(6)和图 15 可知, 随着干湿循环次数的增加, 裂缝和孔隙面积呈指数函数形式增加。干湿循环次数越多, 曲线斜率越大, 面积增加速率越快。图 17 给出了裂缝长度和最大裂缝宽度随干湿循环次数的变化规律。裂缝长度和最大裂缝

宽度随干湿循环次数的增加而显著增加。在干湿循环初期, 裂缝和孔隙迅速增加。由于干湿循环的作用, 根土复合体的含水率反复变化, 水分迁移导致土体内部孔隙结构改变。在自然界, 降雨和蒸发反复作用于含植被斜坡, 土壤结构改变, 外部出现张拉裂缝, 从而发生边坡失稳。

图 18 给出了干湿循环后根土复合体破坏机制示意图。由图可知, 随着干湿循环次数的增加, 复合体结构发生较大的变化。干燥过程中, 土体非饱和区增加, 饱和区减小。土颗粒的数量增多但面积减少, 这会在土体内部形成新的渗流通道

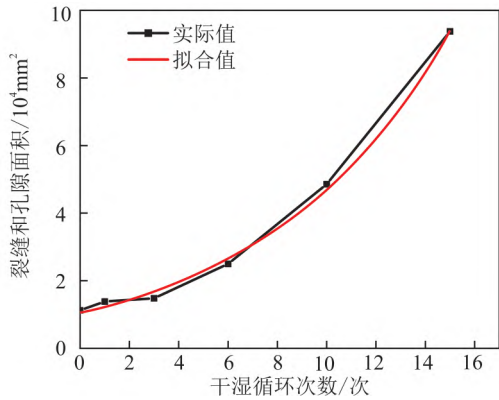


图 16 裂纹和孔隙面积随干湿循环的变化

Fig. 16 Variations in the number of cracks and the area of the pores with increasing number of dry-wet cycles

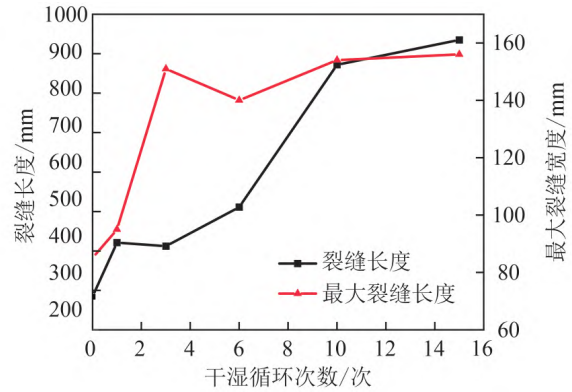


图 17 裂缝长度和最大裂缝宽度随干湿循环次数的变化

Fig. 17 Variations in the crack length and maximum crack width with increasing number of dry-wet cycles

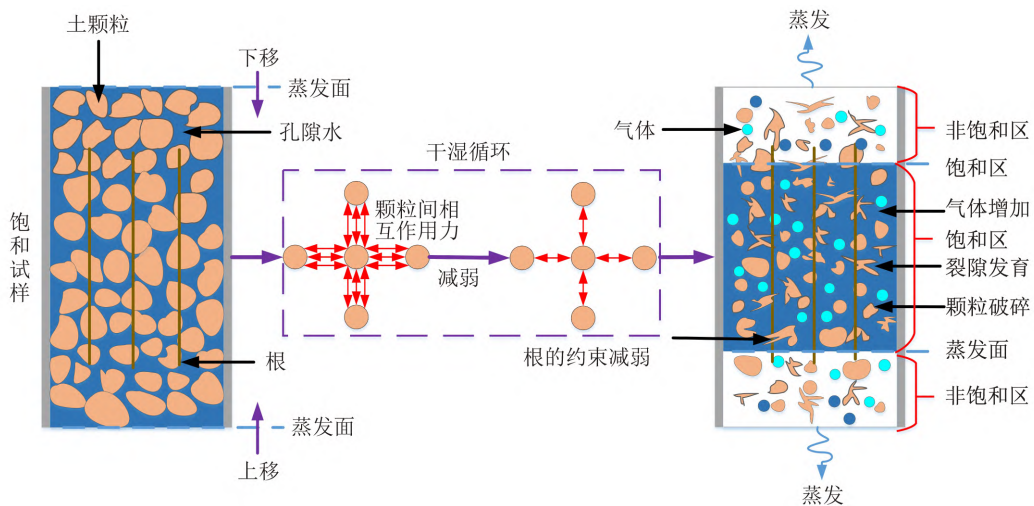


图 18 干湿循环下根土复合体破坏机理示意图

Fig. 18 Schematic diagram of the mechanism of failure of the root-soil composite under dry-wet cycles

(张浩和张凌凯, 2024)。土体中的微小裂隙在不断干湿循环后逐渐发育成较大的孔隙。土颗粒被反复地膨胀收缩, 颗粒结构发生损伤破坏, 颗粒之间的相互作用力减弱, 黏聚力逐渐减小。干湿循环对内摩擦角影响不大, 这与试验结果是一致的。

3 破坏模式和强度准则

试验结果表明, 根土复合体在三轴压缩下为剪胀破坏(图 19)。随着干湿循环次数的增加, 试样的剪胀效应更加明显。与未破坏的试样相比, 干湿循环 3 次和 15 次后, 试样膨胀分别增加了 4% 和 8%, 高度分别减少了 5% 和 12%。干湿循环软化了土壤颗粒, 减弱了根系对土壤的约束。当根土复合体受到破坏时, 根系不会断裂, 但会产生相对

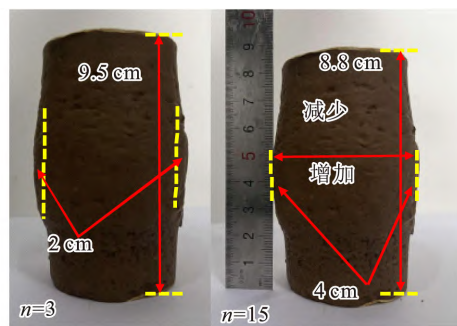


图 19 根土复合体的破坏模式

Fig. 19 Failure mode of the root-soil composites

滑动。Machado et al. (2002) 利用公式(7)的纤维滑移函数 f_m 来描述纤维在土壤中的相对滑移, 该方程也可以解释根系在土壤中的滑动破坏。当 $f_m = 0$ 时, 根系与土壤完全滑移, 无黏结作用; 当 $f_m =$

1 时,根与土不滑移,完全黏结。由公式(7)可知,根在土壤中的作用与平均法向应力 p 和广义剪应力 q 有关。由公式(8)和图 20 可知根系的应变与根土复合体应变的关系(王磊等,2014)。

$$f_m = \frac{2}{\pi} \arctan \left[\left(\frac{q}{p} \right)^2 \right] \quad (7)$$

$$d\varepsilon_f = f_m d\varepsilon \quad (8)$$

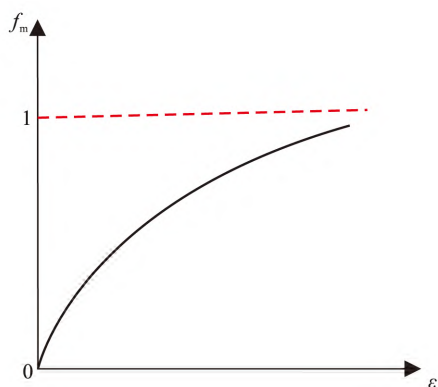


图 20 f_m 和 ε 的变化关系(王磊等,2014)

Fig. 20 Variation in f_m with ε

莫尔-库仑强度理论在土体强度预测中得到了广泛的应用,并具有良好的预测效果。但莫尔-库仑强度模型会高估根土复合材料的抗剪强度,不利于评价边坡的稳定性。为了更好地描述根土复合材料的破坏特征,需要建立更准确的强度预测模型。基于修正的加筋砂强度准则(王磊等,2014),建立干湿循环下根土复合体强度预测模型,即:

$$\tau = M_c f(\theta) [(\sigma + \sigma_0^u) + T_c] \quad (9)$$

$$T_c = c p_r \left[1 - \exp \left(-k \frac{\sigma + \sigma_0^u}{p_r} \right) \right] \quad (10)$$

式中: τ 是偏应力; σ 是平均应力; M_c 是三轴压缩破坏时的应力比; σ_0^u 是素土的抗拉强度;三轴压缩时, $f(\theta)=1$; c 和 k 为常数,表示根系对土体强度的影响程度; p_r 为参考压力, $p_r=101$ kPa; T_c 是描述根土复合体强度的函数。根据试验数据, $M_c=0.193$, $\sigma_0^u=229.43$ kPa。以干湿循环 3 次、6 次、10 次、15 次为例,对比试验结果和模型预测得到的强度包络线。从图 21 可以看出,试验结果与预测结果是一致的。在考虑干湿循环的情况下,本文修正的根土复合体强度预测模型是有效的。

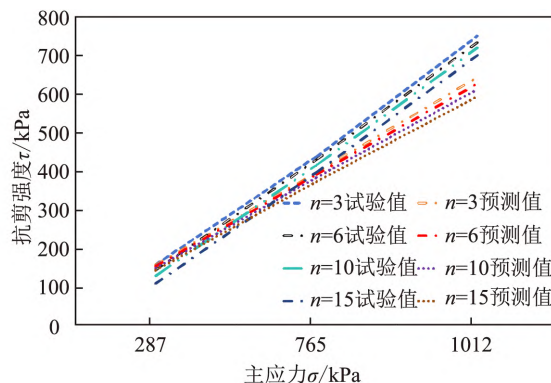


图 21 试验与预测的根土复合体抗剪强度

Fig. 21 Experimentally obtained and predicted shear strengths of the root-soil composite

4 结论

本文开展了不同根直径及干湿循环作用下根土复合体的固结不排水三轴试验及电镜扫描测试,分析了不同含水率下根系的抗拉强度,揭示了根直径及干湿循环对根土复合体抗剪强度的影响,修正了根土复合体强度预测模型,主要结论如下:

a. 根系可显著提高土体的抗剪强度,根主要提高土壤黏聚力,对内摩擦角影响较小。根土复合体的抗剪强度随根直径的增加呈先增加后减小的趋势,随干湿循环次数的增加而减小。根径过小或过大,根对土壤的加固效果减弱。

b. 根的抗拉强度随直径的增大呈幂律递减,干燥根的抗拉强度最大,其次是新鲜根,饱和根最小。三轴试验结果表明,随着应变的增大,偏应力先快速增大后缓慢增加,最后趋于稳定。抗剪强度和黏聚力随干湿循环次数的增加而线性降低,土体裂缝和孔隙面积呈指数增长。应力应变曲线都经历 2 个阶段:弹性阶段和持续硬化阶段。弹性阶段的偏应力急剧增加,曲线接近为直线。持续硬化阶段的偏应力增加缓慢,曲线斜率减小并逐渐趋于 0。

c. 根土复合体的破坏形式为剪胀破坏。当围压增大时,剪胀效应减弱。干湿循环后,土壤孔隙和结构发生明显改变,土壤颗粒增加,裂隙增多。干湿循环改变土壤颗粒之间的吸引力,黏聚力降低,内摩擦角变化较小。修正的根土复合体强度模型的预测结果与试验结果一致,表明该模型具有较好的适用性。

[参 考 文 献]

- 曹玲,王志俭,张振华,2016. 降雨—蒸发条件下膨胀土裂隙演化特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 35(2):413—421.
- Cao L, Wang Z J, Zhang Z H, 2016. Experimental research of cracking process of expansive soil under rainfall infiltration and evaporation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 35(2): 413—421. (in Chinese)
- 陈昌富,刘怀星,李亚平,2007. 草根加筋土的室内三轴试验研究[J]. 岩土力学, 28(10):2041—2045.
- Chen C F, Liu H X, Li Y P, 2007. Study on grassroots-reinforced soil by laboratory triaxial test[J]. Rock and Soil Mechanics, 28(10): 2041—2045. (in Chinese)
- 陈终达,肖宏彬,张春晓,等,2016. 根系分布方式对根—土复合体抗剪强度的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 36(8):130—135.
- Chen Z D, Xiao H B, Zhang C X, *et al.*, 2016. The impact of root distribution methods on the shear strength of root-soil composite[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 36(8): 130—135. (in Chinese)
- 交通部公路科学研究院, 2007. 公路土工试验规程: JTG E40—2007[S]. 北京:人民交通出版社.
- Research Institute of Highway Ministry of Transport, 2007. Test Methods of Soils for Highway Engineering: JTG E40—2007[S]. Beijing: China Communications Press. (in Chinese)
- 李为萍,史海滨,梁建财,等,2013. 基于三轴试验的根土复合体抗剪性能试验研究[J]. 灌溉排水学报, 32(2): 128—130.
- Li W P, Shi H B, Liang J C, *et al.*, 2013. The shear performance of the soil-root composites based on triaxial test[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 32(2): 128—130. (in Chinese)
- 王保辉,朱连奇,2018. 不同布根形式对草本植物根土复合体抗剪强度试验[J]. 水土保持学报, 32(6):118—122.
- Wang B H, Zhu L Q, 2018. Experimental study on shear strength of herbal root-soil composites under different arrangement modes[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 32(6): 118—122. (in Chinese)
- 王建华,高玉琴,2006. 干湿循环过程导致水泥改良土强度衰减机理的研究[J]. 中国铁道科学, 27(5): 23—25.
- Wang J H, Gao Y Q, 2006. Study on the strength degradation mechanism of cement-soils resulting from dry-wet cycles[J]. China Railway Science, 27(5): 23—25. (in Chinese)
- 王磊,朱斌,李俊超,等,2014. 一种纤维加筋土的两相本构模型[J]. 岩土工程学报, 36(7):1326—1333.
- Wang L, Zhu B, Li J C, *et al.*, 2014. Two-phase constitutive model for fiber-reinforced soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 36(7): 1326—1333. (in Chinese)
- 祁兆鑫,余冬梅,刘亚斌,等,2017. 寒旱环境盐生植物根—土复合体抗剪强度影响因素试验研究[J]. 工程地质学报, 25(6):1438—1448.
- Qi Z X, Yu D M, Liu Y B, *et al.*, 2017. Experimental research on factors affecting shear strength of halophyte root-soil composites systems in cold and arid environments[J]. Journal of Engineering Geology, 25(6): 1438—1448. (in Chinese)
- 徐华,袁海莉,王歆宇,等,2022. 根系形态和层次结构对根土复合体力学特性影响研究[J]. 岩土工程学报, 44(5):926—935.
- Xu H, Yuan H L, Wang Q Y, *et al.*, 2022. Influences of morphology and hierarchy of roots on mechanical characteristics of root-soil composites [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 44(5): 926—935. (in Chinese)
- 赵记领,李光范,胡伟,等,2017. 雨林乔木直根根土复合体的抗剪强度试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 36(增刊1):3663—3669.
- Zhao J L, Li G F, Hu W, *et al.*, 2017. Experiment research on rainforest trees tap root resistance slide effect in the shallow landslide[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 36(S1): 3663—3669. (in Chinese)
- 赵思奕,石振明,鲍燕妮,等,2021. 考虑吸湿膨胀及软化的膨胀土边坡稳定性分析[J]. 工程地质学报, 29(3): 777—785.
- Zhao S Y, Shi Z M, Bao Y N, *et al.*, 2021. Stability analysis of expansive soil slope considering seepage softening and moistening swelling deformation[J]. Journal of Engineering Geology, 29(3): 777—785. (in Chinese)
- 张浩,张凌凯,2024. 干湿—冻融循环条件下膨胀土剪切特性的劣化机制研究[J]. 工程力学, 41(4):94—105.
- Zhang H, Zhang L K, 2024. Study on degradation mechanism of shear properties of expansive soil under drying-wetting freezing-thawing cycles[J]. Engineering Mechanics, 41(4): 94—105. (in Chinese)

- 朱锦奇, 苏伯儒, 王云琦, 等, 2020. 荆条根系的固土功能随土壤含水率的变化[J]. 林业科学, 56(6): 202—208.
- Zhu J Q, Su B R, Wang Y Q, *et al.*, 2020. Variation of soil reinforcement of vitex negundo root with soil moisture[J]. Scientia Silvae Sinicae, 56(6): 202—208. (in Chinese)
- Guan G S, Rahardjo H, Choon L E, 2010. Shear strength equations for unsaturated soil under drying and wetting[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 136(4): 594—606.
- Harrison A M, Plim J F M, Harrison M, *et al.*, 2012. The relationship between shrink-swell occurrence and climate in south-east England[J]. Proceedings of the Geologists Association, 123: 556—575.
- Hales T C, Cole-Hawthorne C, Lovell L, *et al.*, 2013. Assessing the accuracy of simple field based root strength measurements[J]. Plant Soil, 372(1—2): 553—565.
- Hu C, Yuan Y, Mei Y, *et al.*, 2019. Comprehensive strength deterioration model of compacted loess exposed to drying-wetting cycles[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 79(1): 383—398.
- Hu X S, Brierley G, Zhu H L, *et al.*, 2013. An exploratory analysis of vegetation strategies to reduce shallow landslide activity on loess hillslopes, northeast Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. Journal of Mountain Science, 10(4): 668—686.
- Jiang H H, Dong X B, Wang H B, 2009. Effects of slope soil water content on soil shear strength of different vegetation[J]. Forest Engineering, 25(3): 77—80.
- Kim J H, Fourcaud T, Jourdan C, *et al.*, 2017. Vegetation as a driver of temporal variations in slope stability: The impact of hydrological processes[J]. Geophysical Research Letters, 44(10): 4897—4907.
- Lan H, Wang D, He S, *et al.*, 2020. Experimental study on the effects of tree planting on slope stability[J]. Landslides, 17(4): 1021—1035.
- Li Y P, Wang Y Q, Wang Y J, *et al.*, 2017. Effects of root spatial distribution on the elastic-plastic properties of soil-root blocks[J]. Scientific Reports, 7(1): 800.
- Liu H Q, Yin Z Z, 2010. Experimental study on the effect of cracks on shear strength of expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 31(3): 727—734.
- Lu Z H, Chen Z H, Pu Y B, 2002. A CT study on the crack evolution of expansive soil during drying and wetting cycles[J]. Rock Soil Mechanics, 23(4): 417—422.
- Machado S L, Carvalho F M, Vilar O M, 2002. Constitutive model for municipal solid waste[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 128(11): 940—951.
- Mickovski S B, Stokes A, Beek R V, *et al.*, 2011. Simulation of direct shear tests on rooted and non-rooted soil using finite element analysis[J]. Ecological Engineering, 37(10): 1523—1532.
- Normaniza O, Barakbah S S, 2006. Parameters to predict slope stability-soil water and root profiles[J]. Ecological Engineering, 28(1): 90—95.
- Tang C S, Cui, Y J, Shi B, *et al.*, 2011. Desiccation and cracking behaviour of clay layer from slurry state under wetting-drying cycles[J]. Geoderma, 166: 111—118.
- Tang C S, Cheng Q, Leng T, *et al.*, 2020. Effects of wetting-drying cycles and desiccation cracks on mechanical behavior of an unsaturated soil[J]. Catena, 194: 104721.
- Zhang C B, Zhou X, Jiang J, *et al.*, 2019. Root moisture content influence on root tensile tests of herbaceous plants[J]. Catena, 172: 140—147.
- Zhu H, Zhang L M, 2019. Root-soil-water hydrological interaction and its impact on slope stability[J]. Georisk Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards, 13(4): 349—359.

(责任编辑: 黄维婷)