



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2404432

引用格式:程鹏,谢玉江,张文生,等.根土复合体与岩体接触面剪切试验[J].科学技术与工程,2025,25(14):6009-6015.

Cheng Peng, Xie Yujiang, Zhang Wensheng, et al. The shear test of the contact surface between root soil composite and rock mass[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(14): 6009-6015.

根土复合体与岩体接触面剪切试验

程鹏¹, 谢玉江^{2,3}, 张文生², 李锦辉^{2,3*}, 林建武⁴

(1. 哈尔滨工业大学(深圳)实验与创新实践教育中心, 深圳 518055; 2. 哈尔滨工业大学(深圳)土木与环境工程学院, 深圳 518055; 3. 广东省土木工程智能韧性结构重点实验室, 深圳 518055; 4. 厦深铁路广东有限公司, 深圳 518000)

摘要 为了研究岩质边坡生态防护中根土复合体与岩石接触面的作用机理,通过构建不同植物种类、护坡土体类型与岩石风化程度的接触面物理模型,在天然应力条件下,开展了根土岩接触面的直接剪切试验,揭示了接触面抗剪强度和剪切位移的变化规律,并分析了植物根系形态、护坡土体类型、岩石风化程度对接触面抗剪强度的影响机理。结果表明,植物根系通过护坡土体并伸入基岩裂隙,显著提高了剪切带土体抗剪强度和土岩交界面抗滑移能力,从而增强了护坡土体与岩石的整体性;接触面抗剪强度与植物根系竖向延伸程度及岩石风化程度正相关,相较于无植物工况,当种植香根草时峰值抗剪强度提高了53.9%,强风化基岩条件下提高峰值强度达22.4%。相较于普通土,添加有黏合剂与团粒剂的基材土可显著提高土体抗剪性能,提升接触面峰值抗剪强度达20.1%。

关键词 生态护坡; 土-岩接触面; 剪切试验; 根系类型; 基材土; 风化程度

中图分类号 TU411.7; **文献标志码** A

The Shear Test of the Contact Surface between Root Soil Composite and Rock Mass

CHENG Peng¹, XIE Yu-jiang^{2,3}, ZHANG Wen-sheng², LI Jin-hui^{2,3*}, LIN Jian-wu⁴

(1. Education Center of Experiments and Innovations, Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen 518055, China;
2. School of Civil and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen 518055, China;
3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent and Resilient Structures for Civil Engineering, Shenzhen 518055, China;
4. Xiamen-Shenzhen Railway Guangdong Co., Ltd., Shenzhen 518000, China)

[Abstract] To investigate the mechanism of interaction between root-soil composites and rock interfaces in the ecological protection of rocky slopes, physical models of interfaces were established, considering different plant species, types of soil for slope protection, and degrees of rock weathering. Under natural stress conditions, direct shear tests on the root-soil-rock interfaces were conducted. The variation patterns of shear strength and shear displacement at the interfaces were revealed, and the influence mechanisms of plant root morphology, types of protective soil, and rock weathering degree on the shear strength of the interfaces were analyzed. The results indicate that plant roots, penetrating through the slope protection soil and into the bedrock fissures, significantly enhance the shear strength of the soil in the shear zone and the anti-slip capacity of the soil-rock interface, thereby improving the overall cohesion between the slope protection soil and the rock. The shear strength of the interface is positively correlated with the vertical extension of plant roots and the degree of rock weathering. Compared to scenarios without plants, the planting of vetiver grass increased the peak shear strength by 53.9%, and under highly weathered bedrock conditions, the peak strength increased by 22.4%. Compared to ordinary soil, substrate soil containing binders and aggregating agents significantly improved the shear performance of the soil, increasing the peak shear strength of the interface by 20.1%.

[Keywords] ecological slope protection; soil-rock interface; shearing test; root type; substrate soil; weathering degrees

道路与铁路工程的大规模建设形成了大量岩质边坡,为维护自然生态与线路景观,需对裸露边坡进行生态防护。护坡植物具有截雨和抗坡面冲

刷作用,减少了降雨入渗边坡内部的通道,同时能通过植物蒸腾作用吸收边坡内部水分,对于岩质边坡稳定性具有积极作用^[1]。因此,植物护坡成为裸

收稿日期:2024-06-13; 修订日期:2025-02-24

基金项目:国家重点研发计划(2021YFC3001002);中国铁路广州局集团有限公司科技研究开发计划(2022K057-Z)

第一作者:程鹏(1994—),男,汉族,辽宁铁岭人,硕士,实验师。研究方向:边坡稳定性。E-mail:chengpeng18@hit.edu.cn。

*通信作者:李锦辉(1978—),女,汉族,河北霸州人,博士,教授。研究方向:岩土工程风险分析与智能岩土工程。E-mail:jinhui.li@hit.edu.cn。

投稿网址:www.stae.com.cn

露岩质边坡治理工程中的重要组成部分,发展先进的植物护坡技术对岩质边坡工程治理具有重要意义^[2]。但由于根土复合体与岩石力学特性差异显著,以石灰岩边坡为例,不同风化程度下的石灰岩的弹性模量为 10 ~ 50 GPa,而根土复合体的弹性模量只有 3 ~ 10 MPa,这就导致了根土复合体与坡面之间的结合性弱,呈现典型的“两层皮”难题,在不利条件下易发生相对滑移而导致护坡土体脱落,严重威胁交通安全,尤其是当护坡土体滑塌后堆积于交通运行线路上,极易造成严重的生命财产损失。例如,2020年3月30日,T179次列车撞上滑塌后堆积在铁路上的土体后侧翻,导致1人死亡、120多人受伤^[3]。因此研究不同风化程度岩石面与含根土体之间抗剪强度形成机制与影响因素,对提高生态护坡效果、保障行车安全具有重要意义。

针对土-岩接触面剪切力学特性中外学者开展了丰富的研究。凌道盛等^[4]和 Neda 等^[5]研究表明岩土体-结构物接触面是具有一定厚度的薄层,称为剪切带,剪切带的厚度受接触面粗糙度、砂粒粒径和砂土密度的影响,且随着砂粒尺寸的增大和砂土密度的降低而减小。陈飞等^[6]认为根系固土与根系倾角、根长、根密度及根的分布情况有关。许飞等^[7]研究了干旱半干旱区岩质边坡的生态系统的生态护坡基材的优化配比,表明在土壤中添加黏结剂可以有效提升基材的强度,与适量水分作用可以发挥最优效能。成浩等^[8]研究表明,土-岩接触面的剪切曲线具有应变硬化和应变软化两种类型,曲线类型受法向应力^[9]、接触面粗糙度^[8]、碎石含量^[10]、剪切方式^[11]、土体类型^[12]等因素的影响。然而,对于土-岩接触面的剪切力学特性的研究匮乏,岩体风化程度对其力学特性的影响尚不清晰。

根据岩质边坡生态防护构成要素,现选取护坡植物种类、护坡土体类型、基岩风化程度3类因素和对应因素水平,建造不同参数组合工况下土岩接触面试样,开展大尺寸土岩接触面剪切试验,分析接触面破坏过程与抗剪强度形成机制,阐明接触面抗剪强度影响因素及影响规律。

1 试验方法

1.1 试验方案

根土复合体与风化岩石接触面抗剪强度由三部分组成,分别为土体与岩石接触面的胶结作用、土体与岩石接触面的摩擦作用和根系的加筋作用。基于此,选取植物类型、护坡土体类型和基岩风化程度作为根土复合体与风化基岩接触面剪切物理模型试验的研究因素。3种研究因素的水平设置如表1所示。

须根系植物和直根系植物分别选用植物护坡中常用的狗牙根草和香根草,典型的狗牙根草根系形态^[13]和香根草根系形态^[14]如图1所示。根据《铁路工程岩土分类标准》^[15],未风化基岩设置为无裂隙,弱风化基岩和强风化基岩的风化裂隙间距分别设置为20 cm和10 cm。生态基材土配比采用三浙高速公路工程中使用的高次团粒喷播技术基材土配比^[16],该基材土中含有黏结剂和团粒剂等添加物,可使土体形成良好的团粒结构,促进植物生长。针对不同试验因素和水平设计了18种试验工况,如表2所示。

表1 试验因素与水平

Table 1 Section of experimental parameters

试验因素	试验水平
植物种类	须根系植物
	直根系植物
	无植物
护坡土体类型	壤土
	生态基材土
岩体风化程度	未风化基岩
	弱风化基岩
	强风化基岩



(a) 狗牙根草根系

(b) 香根草根系

图1 狗牙根草与香根草根系形态

Fig. 1 Root morphology of Bermuda grass and Vetiver grass

表2 试验工况

Table 2 Experimental series

工况	植物类型	土体类型	裂隙间距/cm	工况	植物类型	土体类型	裂隙间距/cm
1	狗牙根	壤土	—	10	香根草	基材土	—
2	狗牙根	壤土	20	11	香根草	基材土	20
3	狗牙根	壤土	10	12	香根草	基材土	10
4	狗牙根	基材土	—	13	无植物	壤土	—
5	狗牙根	基材土	20	14	无植物	壤土	20
6	狗牙根	基材土	10	15	无植物	壤土	10
7	香根草	壤土	—	16	无植物	基材土	—
8	香根草	壤土	20	17	无植物	基材土	20
9	香根草	壤土	10	18	无植物	基材土	10

1.2 试样制备与植物养护

采用普通硅酸盐水泥砂浆浇筑而成的圆柱型试件模拟风化基岩,根据试验所用剪切盒的尺寸,试件直径设置为29.80 cm,试件高度设置为14.40 cm。浇筑完成后,在恒温26℃条件下养护7 d,养护结束后的3种风化程度基岩试件如图2所示。

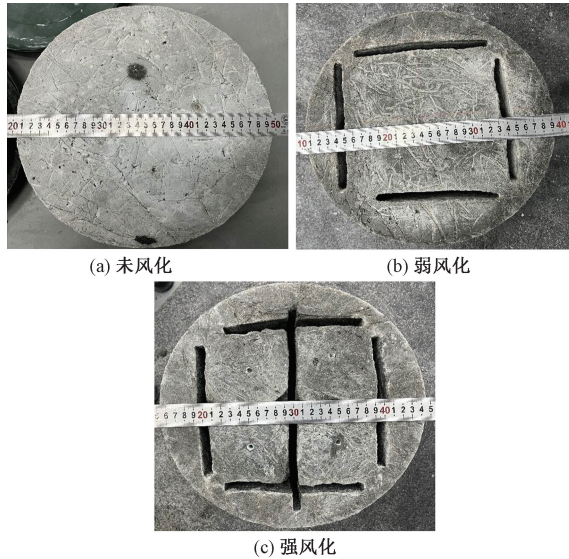


图2 风化基岩试件

Fig. 2 Weathered bedrock samples

植物生长所需土壤环境是岩质边坡生态防护效果的关键影响因素之一。护坡土体较薄时,植物缺乏根系生长所必须土壤空间,生长受限;护坡土体较厚时,土体在通常较陡的岩质边坡坡面上难以保持稳定。既有研究表明,岩质边坡护坡土体厚度的适宜区间为5~15 cm^[16]。根据基材土配比配置基材客土,土体厚度取为10 cm。

根据表2建造18种工况下试验单元,并种植相应植物。为避免植物生长状况不良,工况1~工况12均设置两个平行试样。植物养护周期为90 d,养护期间每天浇水一次,养护期末狗牙根草层高度达到8 cm、香根草新苗长度超1 m。

1.3 试验过程

采用全自动粗粒土固结剪切两用仪进行接触面剪切试验,试验设备如图3所示。该设备通过控制系统驱动伺服电机进行自动水平剪切,通过水平荷载传感器测量剪切力,并在电脑中自动记录和处理数据,可实现全自动的应变控制式直剪试验。设备的部分参数如下:水平应力测量精度 $\pm 0.1\%$ F.S.,量程:0~200 kN;水平剪切速度:0.001~5 mm/min;剪切盒直径为300 mm,深度为14.5 cm,可避免试样尺寸太小对试验结果的影响。

根据《土工试验方法标准》^[17]对土体天然密度与

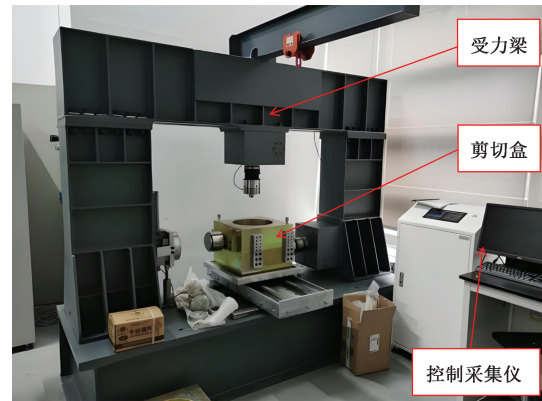


图3 试验设备

Fig. 3 Experimental equipment

含水率进行测量,结果为:壤土的密度为1.64 g/cm³,含水率为17.3%;基材土密度为1.78 g/cm³,含水率为16.9%。试验过程分为试样前处理、剪切、试样后处理三部分。在试样前处理阶段,去除植物过长的叶片,保证试样顺利放入剪切仪器中,放入后仪器的剪切面刚好为根土复合体与基岩试件的交界面。在剪切阶段,采用应变控制的加载方法,剪切速率为1 mm/min,为模拟实际工况,剪切过程中不对试样施加竖向荷载。在试样后处理阶段,拍照记录剪切后的试样形态,拍照记录完毕后去除上部土体,测量并记录伸入风化裂隙的香根草根数量与根系直径。

2 试验结果分析

2.1 植物根系作用机理

无植物、狗牙根草、香根草条件下接触面剪应力-剪切位移曲线如图4所示。结果显示植物类型对根土复合体-风化基岩接触面剪切力学特性具有显著影响,具体表现在以下两个方面:①不同植物根系增大接触面峰值抗剪强度的程度存在显著差异,与无植物工况相比,种植狗牙根草平均提高接触面抗剪强度达20.0%,种植香根草平均提高接触面峰值抗剪强度达53.9%;②不同植物根系下接触面剪应力-剪切位移曲线特征存在差异。对无植物和狗牙根草工况,剪应力-剪切位移曲线呈现剪切硬化特征,对香根草工况,剪应力-剪切位移曲线呈现剪切软化特征。

根据接触面理论,两种材料接触面的剪切变形由接触面两侧一定厚度区域内材料变形和交界面滑动位移组成^[4]。对根土复合土体-风化基岩接触面剪切问题,由于岩体剪切刚度远大于土体剪切刚度,岩体剪切变形可以忽略。因此,接触面的剪切应变由交界面滑动位移(s_1)和交界面附近剪切带内土体的剪切变形(s_2)组成,如图5所示。

狗牙根草根属于以须根系为主的植物,试样

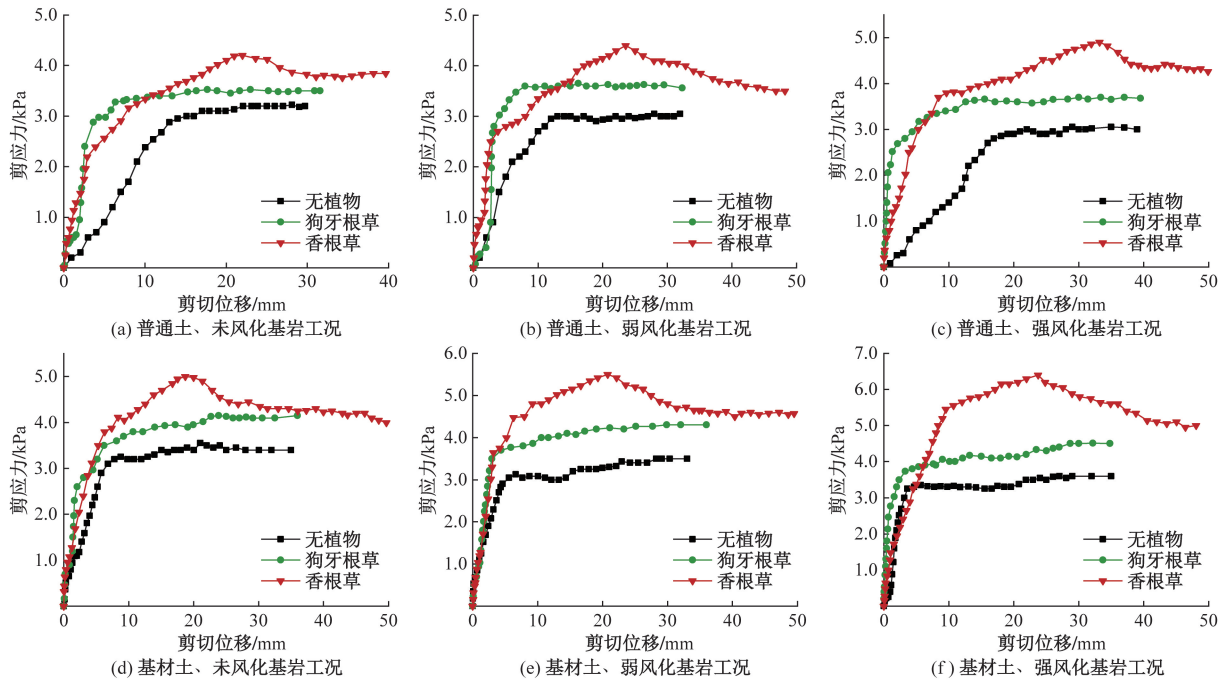


图4 接触面剪切试验结果

Fig. 4 Shear test results for the contact surface

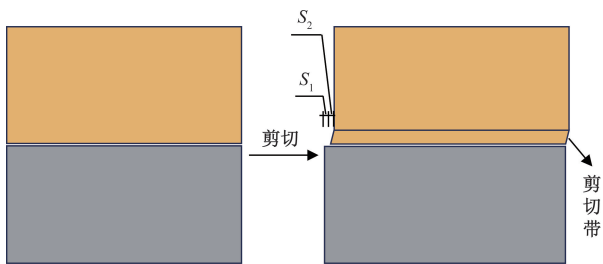


图5 交界面变形与剪切带土体变形

Fig. 5 Deformation of interface and shear zone soil

中的狗牙根草形态特征如图6所示。狗牙根草根系主要通过增大剪切带土体抗剪强度进而增大接触面抗剪强度。香根草根系以直根系为主,试样中的香根草根系形态特征如图7所示。香根草的根系能同时增大剪切带土体抗剪强度和交界面抗剪强度,因此,种植香根草后接触面抗剪强度得到大幅提高。

接触面破坏形式与剪应力-剪切位移曲线类型由剪切带土体抗剪强度与交界面抗剪强度之间的相对关系确定。为模拟护坡土体实际应力环境,试验中未对试样施加竖向荷载,未种植植物的土体抗剪强度较低。水泥砂浆试件表面具有大量的细小凹槽,土-岩接触面粗糙,土颗粒与试件表面摩擦阻力以及颗粒与凹槽的咬合力较大。因此,未种植植物时接触面抗剪强度大于土体抗剪强度,沿接触面进行剪切时以剪切带土体的内部剪切破坏为主,剪应力-剪切位移曲线呈现出剪切硬化特征。

狗牙根根系属须根系,没有明显的主根,而是



图6 狗牙根草根系

Fig. 6 The roots of Bermuda grass

由大量细小的根组成,生长深度较浅并沿四周发散,根系深度集中于5~9 cm,根系长度集中在5~15 cm,根系的加筋作用使得剪切带土体抗剪强度有所加强,但由于根系几乎很少深入到基岩裂隙中,所以剪切过程中仍以剪切带土体的内部破坏为主。

香根草根系属直根系,具有发达的主根,可以深入土壤深处,根系深度超过了土层厚度10 cm,根系长度基本分布在10~20 cm,这使得香根草在水土保持和防止土壤侵蚀方面非常有效。香根草纵向根系发达,根系伸入风化裂隙提升了交界面抗剪强度。然而,与根系总数量相比,伸入风化基岩的根系数量占比较小,多数根系沿接触面横向生长,如图7(b)所示,对剪切带土体起到了充分加筋作用。剪切过程中香根草的根系特征如图8所示。

①未剪切前香根草的根系特征如图8(a)所示,植物



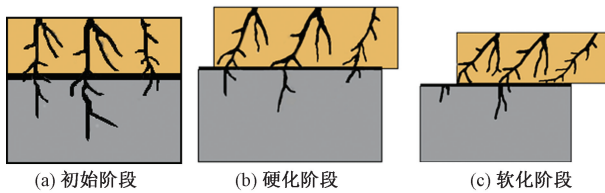
(a) 加固界面抗剪强度



(b) 加固剪切带土体

图7 香根草根系

Fig. 7 The roots of Vetiver grass



(a) 初始阶段 (b) 硬化阶段 (c) 软化阶段

图8 剪切过程中香根草根系变化

Fig. 8 Changes in the characteristics of vetiver root systems during the cutting process

根系穿过交界面伸入风化裂隙中;②硬化过程中香根草的根系特征如图8(b)所示,根土复合体沿交界面滑移过程中伸入风化裂隙中的香根草根系与风化裂隙中的土体产生相对位移,剪应力随着剪切位移增大而增大;③软化过程中香根草的根系特征图如图8(c)所示。根土复合体继续沿交界面滑移,部分细根系被拔断和短根系被拔出减弱了根系对交界面抗剪强度的加固作用,剪应力随着剪切位移的增大而减小,剪应力-剪切位移曲线出现剪切软化特性。

2.2 基岩风化程度作用机理

基岩风化程度对接触面峰值抗剪强度的影响如表3所示。无植物根系时,接触面峰值剪应力主要受基岩表面粗糙度影响,与基岩风化程度无显著相关性。种植狗牙根草时,接触面抗剪强度随基岩风化程度增大而增大。强风化基岩下,对

于普通土和基材土,接触面抗剪强度较未风化基岩平均提高7.8%。种植有香根草时,基岩风化程度对接触面抗剪强度影响显著。与未风化基岩工况相比,弱风化基岩下接触面抗剪强度平均提高7.4%,强风化基岩下接触面抗剪强度平均提高22.4%。

为量化伸入基岩根系数量对接触面剪切特性的影响,以香根草工况为例,在剪切试验完成后清除根系周围土体,测量和统计伸入风化裂隙中根系横截面的面积,计算接触面根系面积比,接触面根系面积比为伸入裂隙的根系面积与接触面面积的比值。测量对象包括试验使用试样与平行试样,统计结果如表4所示。对于普通土和基材土两类工况,强风化基岩接触面根系面积比平均值大于弱风化基岩对应值,即风化程度越高,根系伸入基岩数量越多。基材土工况下接触面根系面积比普遍大于普通土,表面基材土更利于根土复合体与基岩面的整体性,有助于避免生态护坡体与岩体出现“两层皮”问题。由于混凝土试件预留了圆孔用于吊装试样,未风化基岩工况存在极少量根系沿圆孔伸入基岩的现象。

表3 基岩风化程度对接触面峰值剪切强度的影响

Table 3 The impact of bedrock's weathered degree on contact surface's peak shear strength

基岩风化程度	普通土		基材土	
	狗牙根草/%	香根草/%	狗牙根草/%	香根草/%
未风化基岩	0.0	0.0	0.0	0.0
弱风化基岩	2.9	4.8	4.9	10.0
强风化基岩	5.7	16.7	9.8	28.0

注:以不同植物类型中的未风化基岩工况作为参照。

表4 根系伸入风化基岩情况统计

Table 4 Statistics of root system penetration into weathered bedrock

试验工况	根系面积/mm ²	接触面根系面积比/‰
普通土、未风化基岩	1.227	0.018
	2.454	0.035
普通土、弱风化基岩	8.446	0.119
	9.228	0.131
普通土、强风化基岩	13.008	0.184
	14.677	0.208
基材土、未风化基岩	2.450	0.034
	2.896	0.041
基材土、弱风化基岩	11.781	0.167
	10.554	0.149
基材土、强风化基岩	8.439	0.119
	16.788	0.238

注:接触面根系面积比为伸入裂隙的根系面积与接触面面积的比值。

绘制接触面峰值剪应力及对应剪切位移随接触面根系面积比变化曲线,分别如图9和图10所示。含香根草试样的土-岩接触面剪切特性受伸入风化裂隙的根系的数量影响显著。对普通土和基材土两种工况,随着接触面根系面积比增加,香根草根对交界面的加固作用增强,接触面剪切峰值强度及对应的剪切位移值相应增大,且呈非线性增大趋势。

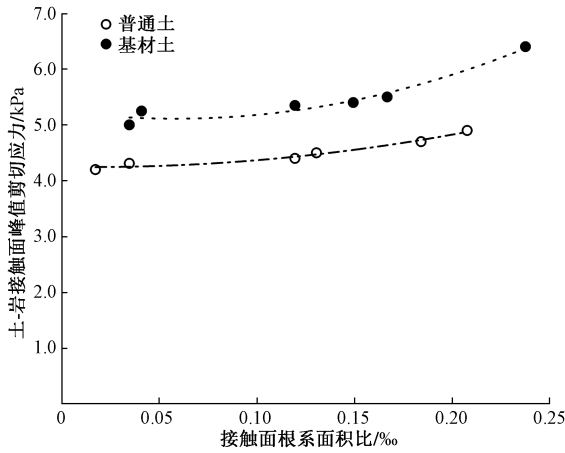


图9 峰值抗剪强度与接触面根系面积比的关系
Fig. 9 The relationship between peak shear strength and root area's ratio of contact surface

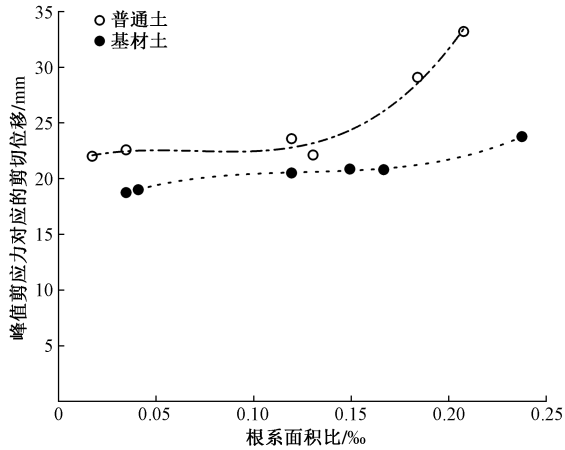


图10 峰值剪应力对应的剪切位移与根系面积比的关系
Fig. 10 The relationship between shear displacement corresponding to peak shear stress and root area's ratio of contact surface

2.3 护坡土体的作用

对于普通土和基材土工况,不同植物类型和基岩风化程度条件下接触面峰值抗剪强度如图11所示。同等条件下,使用基材土作为护坡土体可得到更高的峰值剪应力。其中,香根草条件下峰值剪应力提升效果优于狗牙根草,强风化基岩条件下提升效果优于弱风化基岩,在香根草和强风化基岩组合下峰值剪应力提升可达20.1%。基材土中黏合剂、

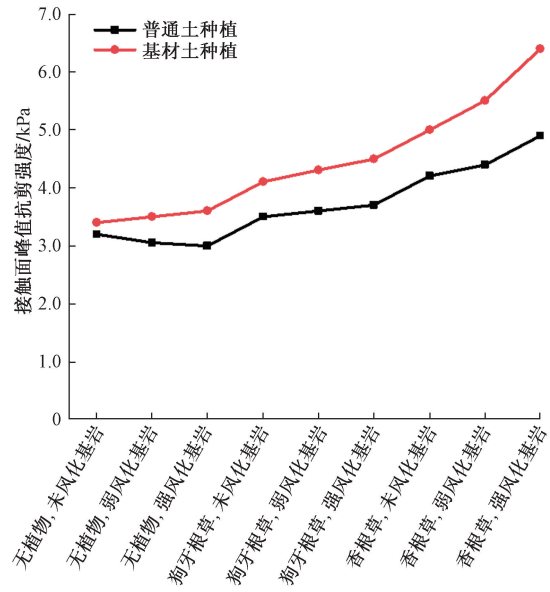


图11 土体类型与峰值剪应力的关系
Fig. 11 The relationship between soil type and peak shear stress

团粒剂等添加物增大了剪切带土体抗剪强度,提高了土颗粒与基岩之间摩擦阻力,使得接触面抗剪强度明显提升。

3 结论

采用接触面剪切试验方法,研究了植物护坡中根土复合体与岩石接触面抗剪强度形成机制与影响,得出如下结论。

(1) 土岩接触面抗剪强度由剪切带土体抗剪强度和交界面抗剪强度两部分组成。当交界面抗剪强度大于剪切带土体抗剪强度,剪切过程以剪切带土体破坏为主,剪应力-剪切位移曲线呈现硬化特征;反之,以根土复合体沿交界面滑移为主,剪应力-剪切位移曲线呈现软化特征。

(2) 植物根系可提高剪切带土体抗剪强度和土岩交界面抗剪强度。与无植物相比,种植水平根系狗牙根草条件下接触面峰值抗剪强度提高可达20.0%,种植垂直根系香根草条件下峰值抗剪强度提高可达53.9%。

(3) 基岩风化程度对接触面抗剪强度具有明显影响。基岩风化程度越高,伸入风化裂隙的根系数量越多,接触面抗剪强度提升越显著,相较于未风化基岩工况,强风化基岩工况的香根草试样峰值抗剪强度提高了22.4%。

(4) 基材土中添加剂可提高土体抗剪强度、促进植物根系成长,对土岩接触面抗剪能力具有积极效应。其他条件相同时,基材土试样的土岩接触面峰值抗剪强度较普通土提高20.1%。

参 考 文 献

- [1] 蒋希雁, 杨尚青, 谢聪. 降雨条件下不同类型植被边坡稳定性的研究[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(26): 11550-11558.
Jiang Xiyan, Yang Shangqing, Xie Cong. Stability of slope with different vegetation types under rainfall conditions[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(26): 11550-11558.
- [2] 王昊宇, 薛雷, 丁昊, 等. 热水河小流域香薷根系力学性能分析[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(17): 6894-6903.
Wang Haoyu, Xue Lei, Ding Hao, et al. Analysis of mechanical properties of elsholtzia root in the small watershed of Reshui River [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(17): 6894-6903.
- [3] 谭志文. 突发事件报道考验媒体融合发展实效-郴州日报全媒体关于京广线 T179 次列车侧翻事故报道的思考[J]. 中国地市报人, 2020(5): 10-13.
Tan Zhiwen. Reporting on breaking news tests the effectiveness of media integration development-reflections of Chenzhou Daily All-Media on the derailment of train T179 on the Beijing-Guangzhou line[J]. Chinese City and Regional Newspaper Journalists, 2020(5): 10-13.
- [4] 凌道盛, 韩超, 陈云敏, 等. 土结接触面黏聚区域模型及渐进累积破坏分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(9): 1405-1411.
Ling Daosheng, Han Chao, Chen Yunmin, et al. Interfacial cohesive zone model and progressive failure of soil-structure interface [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(9): 1405-1411.
- [5] Yavari N, Tang A M, Pereira J M, et al. Effect of temperature on the shear strength of soils and the soil-structure interface[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, 53(7): 1186-1194.
- [6] 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 of root slope protection based on numerical simulation method[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(16): 6728-6738.
- [7] 许飞, 尹晓晴, 包含, 等. 干旱半干旱区岩质边坡生态基材防护特性与优化配比[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(5): 2158-2167.
Xu Fei, Yin Xiaqing, Bao Han, et al. Protection characteristics and optimal proportion of ecological base material for rock slope in arid and semi-arid region[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(5): 2158-2167.
- [8] 成浩, 曾国东, 周敏, 等. 考虑粗糙度影响的黏土-混凝土接触面峰值剪切强度模型研究[J]. 工程科学与技术, 2021, 53(4): 168-177.
Cheng Hao, Zeng Guodong, Zhou Min, et al. Peak shear strength model for clay-concrete interface considering roughness [J]. Advanced Engineering Sciences, 2021, 53(4): 168-177.
- [9] 杨忠平, 刘浩宇, 李进, 等. 土石混合料-基岩接触面剪切力学特性及剪切带变形特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(2): 292-306.
Yang Zhongping, Liu Haoyu, Li Jin, et al. Study on shear mechanical properties and deformation characteristics of shear zone of soil-rock mixture-bedrock interface [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(2): 292-306.
- [10] 安琪, 滕伟福, 李伟忠. 三峡库区巴东组岩-土接触面抗剪强度特性研究[J]. 安全与环境工程, 2016, 23(2): 110-116.
An Qi, Teng Weifu, Li Weizhong. Shear strength characteristics of rock-soil interface in Badong formation in the three gorges reservoir of China [J]. Safety and Environmental Engineering, 2016, 23(2): 110-116.
- [11] Du P, Zhou D Q, Liu X L, et al. Mechanical test and action mechanism of interface between gravel soil and concrete [J]. Frontiers in Earth Science, 2023. DOI: 10.3389/FEART.2023.1112568.
- [12] Li D J, Shi C, Ruan H N, et al. Shear characteristics of soil-concrete structure interaction interfaces [J]. Applied Sciences, 2022, 12(18). DOI:10.3390/app12189145.
- [13] 周腾. 含根系土体水力特性的试验与理论研究[D]. 深圳: 哈尔滨工业大学, 2016.
Zhou Teng. Experimental and theoretical research of hydraulic properties of root-containing soil [D]. Shenzhen: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [14] 吉乔伟, 邹世俊, 丁哲, 等. 香根草在边坡支护中的应用[J]. 环境工程, 2023, 41(S1): 532-534.
Ji Qiaowei, Zou Shijun, Ding Zhe, et al. Application of Vetiver grass in slope protection [J]. Environmental Engineering, 2023, 41(S1): 532-534.
- [15] 中华人民共和国国家铁路局. 铁路工程岩土分类标准: TB 10077—2019[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2019.
National Railway Administration of People's Republic of China. Rock and soil classification of railway engineering code: TB10077—2019 [S]. Beijing: China Railway Publishing House Co., Ltd., 2019.
- [16] 王娜, 付进. 团粒喷播技术在矿山地质环境恢复治理工程实施中的应用[J]. 吉林地质, 2016, 35(4): 143-145.
Wang Na, Fu Jin. Application of aggregate spraying technology to mine geological environment restoration project [J]. Jilin Geology, 2016, 35(4): 143-145.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准: GB/T50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for geotechnical testing method: GB/T50123—2019 [S]. Beijing: Beijing China Planning Publishing House, 2019.