

DOI: 10.11779/CJGE201611022

根系作用下的基材土-岩接触面原位剪切试验研究

丁瑜^{1, 2, 3}, 夏振尧^{1, 2, 3}, 许文年^{1, 2, 3}, 杨奇⁴

(1. 三峡库区生态环境教育部工程研究中心, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡地区地质灾害与生态环境湖北省协同创新中心, 湖北 宜昌 443002; 3. 三峡大学三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002; 4. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550081)

摘要: 采用自制原位剪切仪, 对不同粗糙度、不同多花木蓝根系密度的基材土-岩接触面进行原位剪切试验, 研究了基材土-岩接触面的剪切变形特征。研究表明, 基材土-岩接触面剪切应力-位移具有典型的软化特性; 受根系加筋、锚固作用影响, 含根试样的剪切破坏面粗糙、破碎。根系作用对土-岩接触面峰值剪切强度、峰值剪切位移及残余剪切强度影响明显, 对比发现, 不同粗糙度下, 相同根系面积比对提高界面峰值剪切强度的贡献率差异较小; 根系面积比较小时, 增强界面峰值剪切强度的贡献率低于粗糙度, 随着根系面积比增大, 根系提高界面强度的作用更为明显, 其贡献率显著增加。

关键词: 生态护坡基材; 土-岩接触面; 原位剪切试验; 根系; 剪切软化

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2016)11-2107-07

作者简介: 丁瑜(1980-), 男, 副教授, 主要从事边坡防护加固、岩石风化等方面的教学和科研工作。E-mail: thirddding@163.com。

In-situ shear tests on base material soil-rock interface interacted by roots

DING Yu^{1, 2, 3}, XIA Zhen-yao^{1, 2, 3}, XU Wen-nian^{1, 2, 3}, YANG Qi⁴

(1. Engineering Research Center of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, CTGU, Yichang 443002, China; 2. Collaborative Innovation Center for Geo-hazards and Eco-Environment in Three Gorges Area, Hubei Province, Yichang 443002, China; 3. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education, Three Gorges University, Yichang 443002, China; 4. Guiyang Engineering Corporation Limited of Powerchina, Guiyang 550081, China)

Abstract: The shear characteristics of base material soil-rock interface are studied by means of in-situ shear tests by using the homemade shear apparatus under various interfacial roughnesses and root densities of Indigofera amblyantha. The test results reveal that the shear stress-displacement of the base material soil-rock interface is characterized by typical shear softening. Under the reinforced effect of roots on base material soil and its anchorage effect on soil-rock interface in the tests, the rooted samples exhibit rough fractured shear failure plane. The contribution of roots to improving the interfacial peak shear strength, peak shear displacement and residual shear strength is significant. According to the comparison, it is found that the contribution differences are small for the same root area ratio (RAR) to improving the intrfacial peak shear strength under different roughnesses. For a small RAR, the contribution ratio of roots is lower than that of interfacial roughness. As RAR increases, however, the effect of roots on improving the interfacial peak shear strength is more obvious, the contribution ratio of roots thus increases significantly.

Key words: base material for ecological slope protection; soil-rock interface; in-situ shear test; root; shear softening

0 引言

岩质边坡缺乏植物赖以生存的土壤条件, 故针对岩质边坡的生态防护技术大都是在坡面喷射一层适宜植物生长且具有一定强度的生态基材^[1-5]。边坡生态防护体系中, 基材是核心功能构件, 但整个体系的剪切性能、长期稳定主要取决于根系-基材-粗糙岩体的相互作用。综合考虑生态防护实施后基材与粗糙岩体、植被根系的相互作用, 特别是根系深入岩体裂隙后的

相互作用, 探索和明确基材剪切力学特性, 在此基础上, 改善生态防护构筑技术和草灌植物建植配置, 对于解决基材脱落难题、完善生态防护技术体系具有重要的理论和实际意义。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41202250, 51409150); 湖北省教育厅优秀青年科技创新团队计划项目(T201304); 三峡库区生态环境教育部工程研究中心开放基金项目(KF2013-04)

收稿日期: 2015-09-01

生态护坡实施后,尤其是草灌植物生长后,基材防护体系的剪切性能、长期稳定取决于根系、基材、坡面粗糙度相互作用。对于土与粗糙接触面的相互作用,试验研究发现^[6-7],粗糙度不仅直接影响界面的剪切强度,对剪切破坏过程、破坏特征也有直接影响。从力学效应而言,根系的固土护坡机制可归结为浅层加筋和深层锚固两个方面^[8]。国内外学者在根系或植株拉拔特性、根土复合体剪切特性等方面取得了大量有意义的认识^[9-13]。目前,在生态护坡体系中,当根系穿过接触面深入裂隙或孔洞时,对于基材、岩体、根系的相互作用以及根系对接触面剪切性能的影响等问题仍缺乏清晰认识。

为了解天然基材土-岩接触面剪切变形特征,明确根系的影响,本文采用自制的原位剪切仪对不同粗糙度、不同根系密度的土-岩接触面开展原位剪切试验。为克服室内试验尺寸不足影响,确定试样尺寸 30 cm×30 cm;试样的灌木为现场种植,养护 1 a 后进行试验,可较好地模拟实际情况。通过试验,在分析粗糙度对土-岩接触面影响基础上,分析根系作用下的土-岩接触面剪切变形特性,探讨根系对界面剪切强度、变形的影响。

1 试验方案

试验中,岩质坡面粗糙起伏采用锯齿状混凝土试块模拟,设置 4 种不同粗糙度;生态防护基材土采用植被混凝土基材常用配比配置而成。通过在试块中均匀设置 3 排 3 列共 9 条贯通裂隙,将生态护坡灌木种子点播在试块裂隙中,模拟根系穿过基材、深入岩体裂隙的情况。多花木蓝(*indigofera amblyantha*)是生态防护中常用的灌木物种,为豆科木兰属直立灌木,生长速度较快,适应性强,其根系以单根为主,便于种植时控制植株在裂隙中生长,也便于试验后植株、根系统计。为此,选用多花木蓝为种植植物,按植株数量不同,设置 4 个植株梯度,以无植株试样为空白对照样。

1.1 试样制作及植物养护

试验选在三峡大学校园内的专用场地进行,样地平整处理后,进行放线、沟槽开挖,沟槽宽 34 cm,深 20 cm,相邻沟槽间隔 20 cm。随后,在槽内用木板立模,框格模长宽为 30 cm×30 cm,间隔 20 cm。然后,在模内浇筑砂浆,制作模拟岩体的混凝土试块,试块厚度 10 cm。试块表面粗糙起伏通过压入预作的不同锯齿形钢模获得,4 种不同的粗糙度详见文献[14]。试块粗糙度用轮廓算术平均偏差表示,经计算,4 种不同粗糙度试样的轮廓算术平均偏差分别为 3.85,

4.12, 4.84, 5.00 mm。为使灌木根系穿过试块,试块制作时均匀设置 3 排 3 列共 9 条贯通裂隙,如图 1(a)所示。

试验中基材土按场地土壤与水泥、有机质、植被添加剂按 100:8:5:3 的质量配比配制而成。试验前,测得其基本物理力学参数:密度为 1.82 g/cm³,孔隙率为 0.32,含水率为 18.3%,黏聚力为 24.1 kPa,摩擦角为 19.2°。

试块制作并经养护 7 d 后,拆除木模,进行铺土和灌木种植。种植植物时,先在试块裂隙中及试块表面铺撒少量基材土,将适量多花木蓝种子点播在预留裂隙后,再铺盖一层 1~2 cm 厚的基材土。待种子萌发后,在植株生长过程中逐渐增加试块上覆基材厚度至 20 cm。植株生长到 3 个月时,通过控制试样上多花木蓝的植株数量得到 4 个植株梯度,各梯度相应的植株数量分别为 9 株、18 株、27 株和 36 株。在样地后期管理中,及时进行浇水、除草、除虫以及遮阳等养护(图 1(b))。植株生长 1 a 后的样地如图 1(c)所示,试验前,植株根系均穿过试块裂隙(图 1(d))。

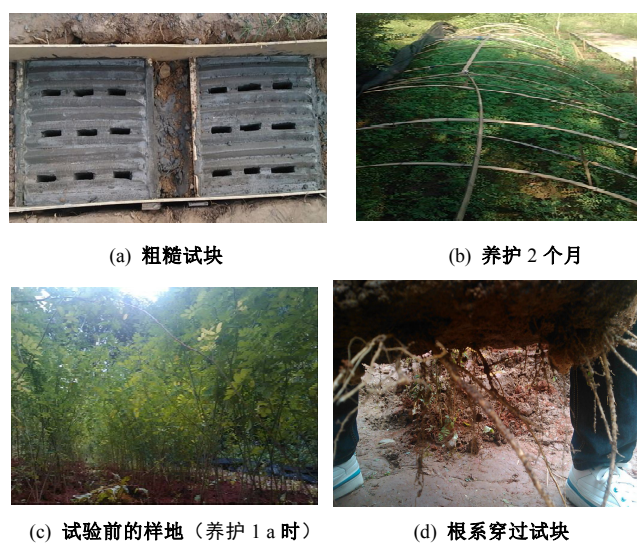


图 1 试验样地照片

Fig. 1 Photos of test area

1.2 原位剪切试验

试样养护 1 a 后,进行原位剪切试验。用于试验的自制原位直剪仪主要由框架、直剪盒、千斤顶、液压泵、位移传感器,压力传感器、显示器、电瓶、逆变器等部分组成。其中,剪切盒尺寸为 30 cm×30 cm,其最大剪切位移为 100 mm。

在试样自重作用下,原位剪切试验过程如下(图 2):仪器现场安装、检查,确保工作正常;将试样周围的土铲除,并将试样削切规整,使土体与试块尺寸大小一致;安放原位直剪仪支架,试样置放在直剪盒内后,将原位直剪仪固定,位移传感器、压力传感器

复位置零, 记录初始读数; 打开电源开关, 通过控制液压泵匀速对试样进行剪切, 当试样破坏或剪切位移达到最大量程时停止试验, 试验中, 采用摄像机记录试验过程; 记录、描述各试验破坏前后的特征, 随后, 对试验数据进行整理、分析。



图 2 原位剪切试验
Fig. 2 In-situ shear tests

2 试验结果

2.1 根系密度

受植株生长、现场养护等诸多因素影响, 原位剪切试验时, 部分试样的植株数与试验设计不完全一致, 各试样的植株高度、根径大小也略有差异 (图 3)。直接以植株数表示根系密度显然不尽合理, 为此, 采用根系面积比 RAR (即试样上穿过界面的根系面积与试样面积的比值) 表征根系密度。试验结束后, 用数显游标卡尺测量各试样界面的根系根径及数量, 然后计算得出各试样的根系面积比 RAR (%) 如表 1 所示。



图 3 试验后的试样植株

Fig. 3 Sample plant collected after in-situ shear tests

2.2 剪切应力 - 位移特征

4 种不同粗糙度条件下, 以空白样为参照, 得到含根试样的原位剪切应力 - 位移曲线如图 4 所示。由图 4 可知, 空白样、含根样的原位剪切应力 - 位移曲线均为明显的全应力 - 位移曲线, 各试样的剪切屈服、塑性变形的过程和特征明显。试样剪切变形破坏经历 4 个明显的变化阶段。

表 1 试样根系面积比 RAR				
Table 1 Root area ratios of test samples				
粗糙度 根系密度	RS1 (3.85 mm)	RS2 (4.12 mm)	RS3 (4.84 mm)	RS4 (5.00 mm)
空白样	0	0	0	0
梯度 1 (#1-#3)	0.75	0.57	0.52	0.42
	0.83	0.62	0.57	0.47
	0.88	0.67	0.62	0.51
梯度 2 (#4-#6)	1.21	1.15	0.84	0.76
	1.28	1.24	0.97	0.92
	1.30	1.31	1.06	0.96
梯度 3 (#7-#9)	1.33	1.50	1.11	1.05
	1.69	1.60	1.38	1.40
	1.73	1.65	1.40	1.48
梯度 4 (#10-#12)	1.79	1.88	1.48	1.51
	1.98	1.90	1.77	1.83
	1.99	1.98	1.88	1.90

(1) 初始弹性变形阶段: 界面剪切应力随位移呈线性增加, 达到比例极限, 试样在此阶段主要表现为挤密变形和弹性变形。试验结果显示, 各试样剪切位移达到 5 mm 左右时, 剪切应力达到比例极限; 该阶段剪切变形主要与基材土性质有关, 土-岩接触面粗糙度、根系密度影响较小。

(2) 弹塑性变形阶段: 剪切应力随剪切位移呈非线性增加, 速率随位移增大而减小, 剪切应力逐渐达到峰值; 在此阶段, 试样逐渐产生塑性屈服, 局部发生剪切破坏。

由于土体与接触面的黏结作用、界面附近土体颗粒之间的摩擦作用、土体与粗糙凸起体之间啮合作用, 粗糙度对界面剪切变形的影响明显。对比可知, 界面弹塑性剪切应力、变形随着粗糙度增加而增强。对比图 4 (a) ~4 (d), 各粗糙度下, 界面进入弹塑性剪切变形阶段后, 含根试样的剪切应力随位移的变化速率明显大于空白样; 而且, 根系密度越大, 剪切应力随位移增大而增加越明显。

(3) 峰后软化阶段: 达到峰值应力后, 剪切应力随位移增加而降低, 土-岩界面的塑性屈服从局部扩展, 剪切位移迅速发展, 界面剪切破坏不断扩展。

由图 4 (a) ~4 (d), 与空白样相比, 含根试样界面峰值剪切应力前后变化较小, 剪切位移变化范围较大, 曲线出现近平直段。说明峰值应力阶段, 根系对界面剪切变形存在持续作用。而且, 由于根系作用, 含根系试样的界面峰值剪切应力随根系密度增大而增大。

剪切软化阶段伴随界面的渐进破坏, 空白样、含根样的剪切软化规律基本一致。由于根系作用影响, 试样根系密度越大, 剪切软化时的应力水平越高; 而且, 含根样在剪切软化末段的位移量亦有所增大。

(4) 残余变形阶段: 界面剪切应力下降, 逐渐达到残余剪切应力, 剪切位移持续增加, 剪切应力变化

极小。

除受粗糙度影响外,根系作用对土-岩接触面的残余变形的影响也十分明显。各粗糙度下,对比空白样与含根样发现,进入残余剪切变形后,试样残余剪切应力随根系密度增加而有所增大;粗糙度、根系密度均较大时,界面残余剪切应力差异逐渐减小。

2.3 剪切破坏特征

典型试样剪切破坏如图 5 所示,其中图 5 (a) 为空白试样照片,图 5 (b) 为含根试样照片。

对于空白样而言,界面剪切破坏主要依赖于基材土、基材土与粗糙结构面的相互作用。界面产生局部塑性破坏时,主要表现为局部土-岩界面的拉裂、滑移破坏,土-岩界面及其附近土体局部剪切破坏。持续剪切作用下,拉裂、滑脱以及局部剪切不断扩展,界面

发生剪切破坏,破坏面相对比较规整、光滑。

与空白样相比,含根试样的破坏具有明显差异(图 5)。穿过界面、深入孔隙的根系对表层基材土体、土-岩界面具有加固作用。根系通过连接周围土体、强化界面共同抵抗剪切荷载作用。界面局部塑性剪切破坏时,根系影响范围内土-岩界面的局部拉裂、滑移破坏受到抑制,因此,含根试样的界面剪切应力得以提高。含根试样界面破坏时,根系周围伴有大量破碎、起伏的土体,形成具有一定厚度的剪切带。

根系在剪切过程中主要有拉断和拉脱两种破坏形式(图 5 (b))。发生拉断的根系主要集中在靠近原位剪切仪的千斤顶一侧,其数量占整个试样根系数量的 20%~30%左右。除前侧的少量根系拉脱外,远离千斤顶的后侧根系大多以拉脱为主。

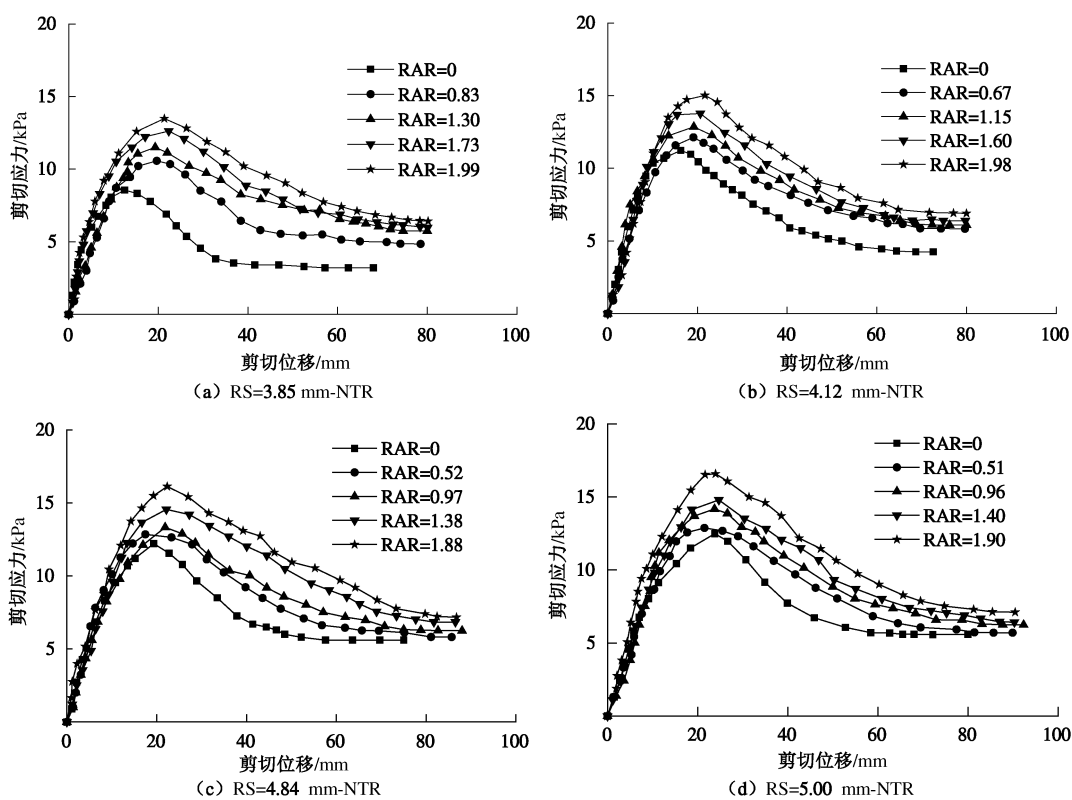


图 4 试样剪切应力 - 位移试验结果

Fig. 4 Test shear stress-displacement curves of samples



图 5 试样剪切破坏情况

Fig. 5 Shear failure of samples in tests

3 根系-土-岩接触面相互作用机制

无根系作用时, 基材土与粗糙岩接触面的相互作用主要依赖于土体与接触面的黏结作用、接触面附近土体颗粒之间的摩擦作用、土体与粗糙凸起体之间啮合作用^[14]。界面初始弹性剪切变形主要以基材土在剪切荷载作用下产生挤密变形为主外; 后续的局部塑性变形、剪切破坏以及残余摩擦阶段, 变形主要取决于基材土与粗糙岩面的相互作用。

有根系作用时, 对比含根试样与空白样试验结果, 整理得到根系剪切应力随位移的变化速率 (图 6 (a)) 和根系剪切应力 - 位移曲线 (图 6 (b))。分析试样的变形过程、试验结果可知, 多花木蓝根系的力学效应主要表现为: ①根系对于基材土体的加筋作用, 根土复合体的力学性能因而得以提高; ②根系穿过土-岩界面深入岩体裂隙中, 对界面起到锚固作用, 提高了界面的剪切性能。由此, 可将根系-土-岩接触面作用机制及剪切变形破坏过程归结为图 7 所示。

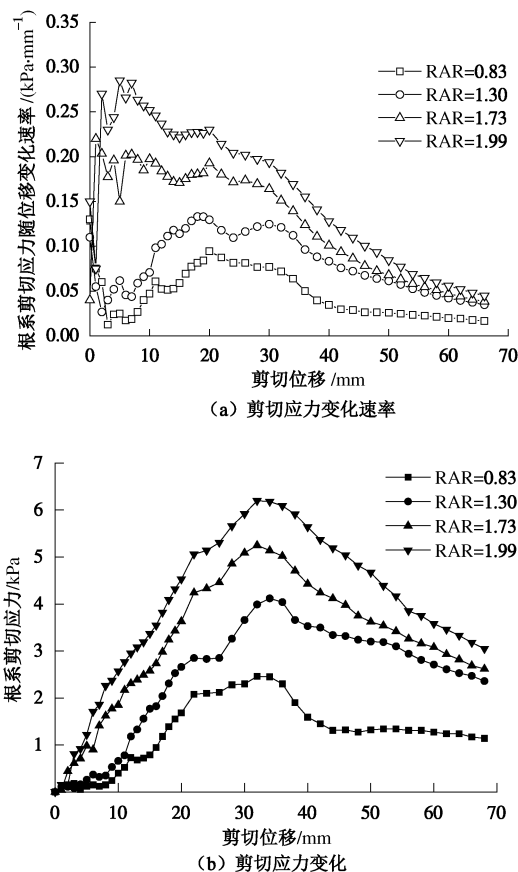


图 6 剪切过程中的根系力学特性(RS=3.85 mm)

Fig. 6 Mechanical properties of roots during shearing

在剪切变形初始阶段, 主要以基材土与粗糙接触面相互作用为主, 界面产生挤压变形。土体经挤密后, 根系与临近土体形成的根土复合体均匀分布于整个界面。在此阶段后期, 根系对界面剪切性能的贡献随根

系密度增大而逐渐显现。

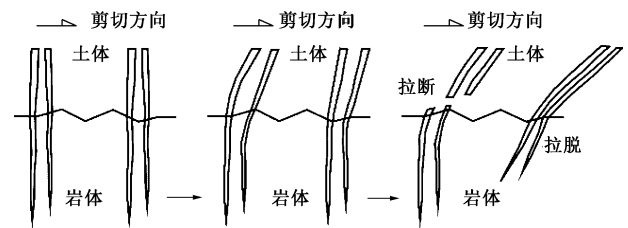


图 7 根系-土-岩接触面作用机制及渐进破坏

Fig. 7 Mechanism and progressive failure of root-soil-rock interface system

进入弹塑性变形阶段后, 根系、土体、粗糙岩体共同作用抵抗剪切荷载。在土体与粗糙岩体逐步发挥抗剪能力基础上, 根系对土体的加筋作用、对界面的锚固作用也随之逐步发挥。根系的锚固作用主要取决于根系自身的极限抗拉力以及界面以下根系的摩阻力。在剪切作用下, 在界面位置附近, 当根系上的拉拔力超其抗拉强度时, 根系在界面处被拉断; 当根系抗拉强度足够, 根系在界面处受到拉拔力超过界面以下根系受到的极限摩阻力时, 根系产生摩擦滑移、拉脱。试样剪切过程中, 根系的拉脱、拉断呈现渐进破坏特征。剪切位移达到 35 mm 左右时, 根系极限拉拔力、摩擦阻力共同发挥达到极限, 根系承担的剪切应力达到峰值; 根系密度越大, 对界面剪切应力的贡献越明显 (图 6 (b))。

进一步的剪切作用下, 越来越多的根系相继发生拉脱或拉断, 界面剪切应力逐渐降低, 发生剪切软化。剪切软化过程中, 根系-土-岩接触面的相互作用主要包括被拉断的根系对破坏面的摩擦作用、尚未完全拔出根系的延滞作用、剪切破坏带上粗糙起伏根土复合体的摩擦作用。当破坏在土-岩接触面完全贯通时, 进入残余剪切变形阶段。

4 根系对粗糙土-岩接触面剪切特性的影响

试验结果表明, 当根系深入岩体裂隙时, 根系的加筋、锚固作用对粗糙基材土-岩接触面的剪切强度、剪切变形的影响显著 (图 8)。

粗糙度对峰值剪切强度的增强作用会随着粗糙度不断增大而逐渐趋于稳定, 即粗糙度达到一定值后, 继续增加粗糙度将不能明显提高剪切强度。在某一粗糙度下, 随着含根量增加, 界面峰值剪切强度增大。试验条件下, 界面峰值剪切强度与根系面积比呈非线性正相关。粗糙度 RS 为 3.85, 4.12, 4.84, 5.00 mm 时, 与相应空白样相比, 含根试样最大根系面积比对应的峰值剪切强度分别增加了 46.7%, 33.6%, 32.7%,

32.1%。

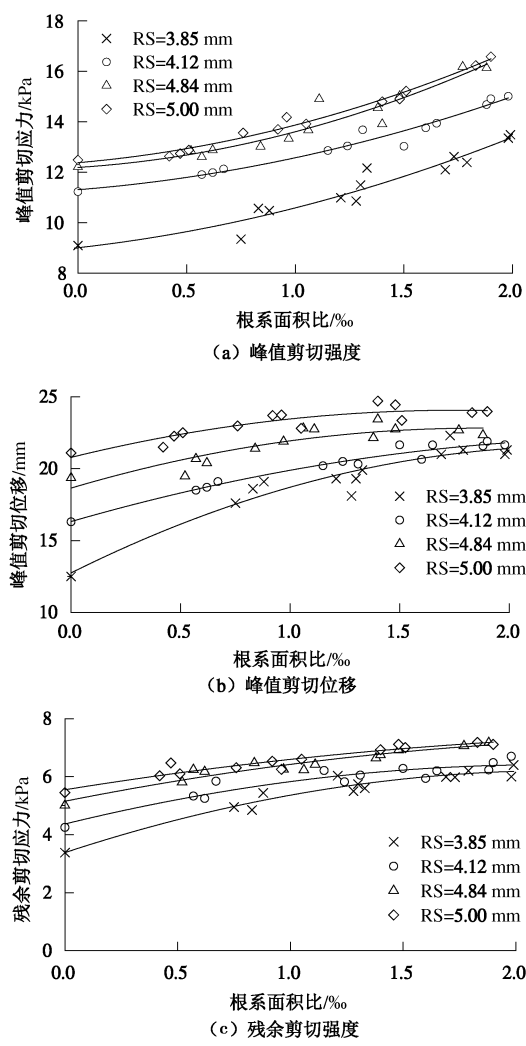


图8 粗糙度、根系密度对界面剪切特性的影响

Fig. 8 Effects of roughness and root on shear features of interface

受根系与土体、土-岩接触面相互作用影响,含根试样界面峰值应力前后的剪切变形范围较空白样有所增大。同一粗糙度下,随着根系面积比增加,峰值剪切位移增大,增长趋势随根系面积比增大逐渐减弱。4种粗糙度条件下,与空白样相比,含根试样最大根系面积比时的峰值剪切位移分别增加了70.4%,32.9%,15.4%,13.6%。根系面积比在2.0%左右时,4种粗糙度的界面峰值剪切位移在21.30~23.90 mm之间。

根系对残余剪切强度影响规律与峰值剪切位移相似。试验结果表明,根系对界面残余剪切强度的影响随接触面粗糙增大而减弱;根系面积比在2.0%左右时,4种粗糙度的界面残余剪切强度在6.0~7.15 kPa左右。

根据含根试样与空白样试验结果,可进一步明确粗糙度、植物根系对界面剪切性能的影响大小。不同粗糙的空白样,由于无根系作用,界面峰值剪切强度的提高为粗糙度增加所致。以粗糙度最小(RS=3.85

mm)的试样为参考,可得到粗糙度对增强界面抗剪强度的作用大小。由表2可知,相对于参考试样,粗糙度RS为4.12,4.84,5.00 mm时,对提高界面峰值剪切强度的贡献率分别为23.6%,34.6%,36.8%。

根据上述思路,将相同粗糙度的含根试样与空白样对比,扣除粗糙度影响,可以得到不同根系密度对提高界面峰值剪切强度的贡献大小(表3)。结果显示,根系对提高界面峰值剪切强度的贡献率随着根系面积比增大而增大;不同粗糙度下,相同根系面积比的贡献率差异较小。对比粗糙度、根系贡献率可知,试验条件下,根系面积比RAR小于1.0%,其贡献率低于RS=4.12 mm的粗糙度;当根系面积比RAR达到2.0%,其贡献率明显大于RS=5.00 mm的粗糙度。

表2 粗糙度对增强峰值抗剪强度的贡献率

Table 2 Contribution rates of roughness to peak shear strength				
粗糙度 RS/mm	3.85	4.12	4.84	5.00
贡献率/%	0.0	24.5	34.7	36.8

表3 根系对增强峰值抗剪强度的贡献率

Table 3 Contribution rates of roots to peak shear strength (%)				
根系面积比 RAR/%	粗糙度 RS			
	3.85 mm	4.12 mm	4.84 mm	5.00 mm
0	0.0	0	0	0
0.5	6.3%	5.3	5.1	4.9
1.0	16.9%	15.0	15.1	14.9
1.5	30.8%	27.0	30.2	29.8
2.0	47.2%	44.0	45.4	44.6

注:表2,3均以粗糙度RS=3.85mm的空白样为参照

分析表明,当根系穿过基材土-岩接触面深入岩体时,根系的加筋、锚固作用有助于进一步提高和改善界面的剪切变形性能。因此,在边坡生态防护中,基于岩质坡面的粗糙起伏条件,通过合理的构筑技术使灌木根系穿过岩体表面,可显著提高界面的剪切变形性能,从而确保防护体系的长期稳定。

5 结 论

(1) 植被混凝土基材土-岩接触面剪切应力-位移表现出典型的软化特征,其初始线弹性变形主要取决于基材土性质,但其弹塑性变形、峰后软化以及残余剪切变形与接触面粗糙度、根系密度等密切相关。

(2) 根系对基材土的加筋作用、对土-岩接触面的锚固作用,加之基材土粗糙接触面的黏结、摩擦、咬合作用,是影响根系-土-岩接触面剪切变形特性发展、演化的主要机制;由于根系作用,含根试样界面剪切变形过程、剪切强度、破坏特征较空白样均有明显差异。

(3) 研究结果表明,不同粗糙度下,相同根系面

积比对提高界面峰值剪切强度的贡献率差异较小; 根系面积比较小时, 其贡献率低于粗糙度, 随着根系面积比增大, 其增强界面峰值剪切强度的作用更为明显, 其贡献率显著增加。

参考文献:

- [1] 张俊云, 周德培, 李绍才. 岩石边坡生态护坡研究简介[J]. 水土保持通报, 2000, **20**(4): 36~38. (ZHANG Jun-yun, ZHOU De-pei, LI Shao-cai. Brief introduction of study on slope eco-engineering for rock slope protection[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2000, **20**(4): 36 - 38. (in Chinese))
- [2] 许文年, 叶建军, 周明涛, 等. 植被混凝土护坡绿化技术若干问题探讨[J]. 水利水电技术, 2004, **35**(10): 50 - 51. (XU Wen-nian, YE Jian-jun, ZHOU Ming-tao, et al. Several problems of vegetation for protecting slope using vegetation-growing concrete[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2004, **35**(10): 50 - 51. (in Chinese))
- [3] 刘黎明, 邱卫民, 许文年, 等. 传统护坡与生态护坡比较与分析[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2007, **29**(6): 528 - 532. (LIU Li-ming, QIU Wei-min, XU Wen-nian, et al. Discussion on traditional slope protection and ecological slope protection technology[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2007, **29**(6): 528 - 532. (in Chinese))
- [4] 王晓梅, 陈建平, 董道军. 喷射厚层基材植被护坡效果分析[J]. 湖北农业科学, 2009, **48**(4): 891 - 893. (WANG Xiao-mei, CHEN Jian-ping, DONG Dao-jun. Analysis of effects on vegetation slope protection technology of thick layer backing[J]. Hubei Agricultural Science, 2009, **48**(4): 891 - 893. (in Chinese))
- [5] 夏振尧, 许文年, 王乐华. 植被混凝土生态护坡基材初期强度特性研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(6): 1719 - 1724. (XIA Zhen-yao, XU Wen-nian, WANG Le-hua. Research on characteristics of early strength of ecological slope-protected base material of vegetation-growing concrete[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(6): 1719 - 1724. (in Chinese))
- [6] 蔡显杨. 植被混凝土基材与岩体接触面力学特性试验研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2012. (CAI Xian-yang. Experimental study on Mechanical characteristics of interface of vegetation-growing concrete base material & rock mass[D]. Yichang: China Three Gorges University, 2012. (in Chinese))
- [7] 胡黎明, 濮家骝. 土与结构物接触面物理力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2001, **23**(4): 431 - 435. (HU Li-ming, PU Jia-liu. Experimental study on mechanical characteristics of soil-structure interface[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, **23**(4): 431 - 435. (in Chinese))
- [8] 陆桂红, 杨 顺, 王 钧, 等. 植物根系固土力学机理非的研究进展[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2014, **38**(2): 156 - 161. (LU Gui-hong, YANG Shun, WANG Jun, et al. The mechanism of plant roots reinforcement on soil[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2014, **38**(2): 156 - 161. (in Chinese))
- [9] SCHMIDT K M, ROERING J J, STOCK J D, et al. Root cohesion variability and shallow landslide susceptibility in the Oregon Coast Range[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2001, **38**: 995 - 1024.
- [10] SCIPPA G S, DI MICHELE M, DI IORIO A, et al. The response of spartium juuceum roots to slope: anchorage and gene factors[J]. Annals of Botany, 2006, **97**: 857 - 866.
- [11] 李绍才, 孙海龙, 杨志荣, 等. 坡面岩体-基质-根系互作的力学特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(12): 2074 - 2081. (LI Shao-cai, SUN Hai-long, YANG Zhi-rong, et al. Interactional mechanical characteristics of rock-substrate-root system[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(12): 2074 - 2081. (in Chinese))
- [12] 赵丽兵, 张宝贵, 苏志珠. 草本植物根系增强土壤抗剪切强度的量化研究[J]. 中国生态农业学报, 2008, **16**(3): 718 - 722. (ZHAO Li-bing, ZHANG Bao-gui, SU Zhi-zhu. Quantitative analysis of soil anti-shearing strength enhancement by the root systems of herb plants[J]. Chinese Journal of Eco-agriculture, 2008, **16**(3): 718 - 722. (in Chinese))
- [13] 胡夏嵩, 李国荣, 朱海丽, 等. 寒旱环境灌木植物根-土相互作用及其护坡力学效应[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(3): 614 - 620. (HU Xia-song, LI Guo-rong, ZHU Hai-li, et al. Research on interaction between vegetation root and soil for slope protection and its mechanical effect in cold and arid environments[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(3): 614 - 620. (in Chinese))
- [14] 丁 瑜, 杨 奇, 夏振尧, 等. 生态护坡基材土-岩接触面原位剪切试验研究[J]. 岩土力学, 2015, **36**(增刊 2): 383 - 388. (DING Yu, YANG Qi, XIA Zhen-yao, et al. Experimental study of base material soil-rock interface in ecological slope protection by in-situ shear test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(S2): 383 - 388. (in Chinese))