

花岗岩残积土边坡草本植物根固效应试验

陈洁^{1,2}, 雷学文¹, 黄俊达³, 李勇⁴, 吕建根², 邱剑辉²

(1. 武汉科技大学城市建设学院, 武汉 430065; 2. 仲恺农业工程学院城乡建设学院, 广州 510225;
3. 佛冈县龙山镇人民政府, 广东 清远 511685; 4. 襄阳汽车职业技术学院, 湖北 襄阳 441021)

摘要: 为了推进根系固土机制的定量研究, 在前期边坡调查和植物筛选的基础上, 人工种植了百喜草、假俭草、狗牙根 3 种常见的护坡植物, 根据各深度下原状根—土复合体干密度、含水率和质量含根量等物理性质指标, 设计了重塑根—土复合体直剪试验方案, 实施了 3 种植物原状和重塑根—土复合体的直剪试验。结果表明: 3 种原状根—土复合体的抗剪强度在各级法向压力作用下均随含根量的增加而逐渐增大; 3 种原状根—土复合体的黏聚力和内摩擦角均随深度的增加而减小; 3 种植物根系在相同的土体状态下对黏聚力的影响排序为狗牙根>百喜草>假俭草; 对土体内摩擦角的影响排序为假俭草>百喜草>狗牙根。植物根系增强土体抗剪强度的作用不仅受植物种类的影响, 还与土体的干密度和含水率密切相关, 干密度的增加对黏聚力的提升有显著影响, 对内摩擦角的影响却并不大; 3 种植物重塑根—土复合体的最优含水率均为 25% 左右。在重塑根—土复合体的直剪试验中, 很难探求含根量对抗剪强度指标的影响。

关键词: 根—土复合体直剪试验; 花岗岩残积土; 根系质量分数

中图分类号: TU411.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2018)01-0104-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.01.017

Experimental Research on Reinforcement Mechanism of Herbs Root System on Granite Residual Soil Slope

CHEN Jie^{1,2}, LEI Xuewen¹, HUANG Junda³, LI Yong⁴, LÜ Jiagen², QIU Jianhui²

(1. School of Urban Construction, Wuhan University of Science and Technology,
Wuhan 430065; 2. College of Urban and Rural Construction, Zhongkai University of Agriculture
and Engineering, Guangzhou 510225; 3. People's Government of Longshan Town, Fogang County,
Qingyuan, Guangdong 511685; 4. Xiangyang Auto Vocational Technical College, Xiangyang, Hubei 441021)

Abstract: In order to promote the quantitative study on mechanism of root-soil reinforcement, three kinds of common herbs including *Paspalum notatum*, *Eremochloa ophiuroides* and Bermudagrass were selected and artificially planted based on slope investigation and plants selection, and the direct shear test for remolded root-soil composite of these three herbs were designed and implemented on the basis of physical properties of undisturbed root-soil composite, such as dry density, moisture content and root content of quality in different depths. The results showed that: the shear strengths of three undisturbed root-soil composites rose gradually with the increasing of the root content under different vertical pressure; the cohesions and internal friction angles of three undisturbed root-soil composites decreased with the increasing of depth. Under the same condition, the effects of three plant roots on the cohesion were sorted as follows: Bermudagrass> *P. notatum*> *E. ophiuroides*, while the effects on the internal friction angle were sorted as follows: *E. ophiuroides*> *P. notatum*> Bermudagrass. The effects of plant roots on shear strength were not only affected by plant species, but also related to the dry density and water content of soil, and the increases of dry density had a significant influences on the cohesion, but had few effects on the internal friction angle. The most suitable moisture content for the three kinds of disturbed root-soil composite was about 25%. It was difficult to explore the influences of the root content on the shear strength index in the direct shear test of remolded root-soil composite.

Keywords: direct shear test of root-soil composite; granite residual soil; root mass fraction

广州北部地区广泛分布着花岗岩,其中华南快速、大广高速段沿线以燕山期为主,形成了较为复杂的多期次花岗岩体^[1]。由于地处亚热带与温带交界处,降雨量大,暴雨多,表层岩体风化程度极重,基本失去原岩性质,形成了厚达十几米的花岗岩残积土层,其在物理力学性质、结构性、扰动性、软化性等方面存在着较大的差异性^[2]。该区域的土体多为砂质黏性土,粗颗粒含量高,黏聚力低,虽然干燥状态下强度高,但水稳性极差,遇水极易崩解,在雨水冲刷和水力冲蚀下,花岗岩残积土坡面的崩岗和水土流失现象严重。植物作为“天然的工程师”,根系对浅层土体有力学加筋作用,茎叶能有效截留雨水,缓解雨水对地表的冲刷和侵蚀。该区域植物生长迅速,四季常青,虽然初期固坡作用较小,但是随着植物的生长,日渐繁盛的植物在边坡浅层加固和防止表层侵蚀方面的作用会越来越大。因此,植物固坡不仅具备低投入、易养护、绿色环保和美化生态环境的优点,还能有效改善当地的生态环境。

根—土复合体的抗剪特性在一定程度上可以体现植物根系的固坡效果,藤本、草本植物的根系通常呈水平生长,根系对边坡土层的加固作用与其在土壤中的分布形态、含量及其自身强度等因素有关。刘益良等^[3]对 2 种植植在低液限粉质黏土边坡上的抗旱耐瘠植物的根—土复合土体及素土进行了室内剪切试验,探讨了不同根系密度和含水量对抗剪强度的影响。郑启萍等^[4]测出了含有不同量狗牙根和麦冬草根系的根—土复合体的抗剪强度,并分析了根系质量分数对土体抗剪强度的影响。Abernethy 等^[5]通过含根重塑土的直剪试验,认为土中存在的植物根系有助于约束土体,土体强度的增加来源于根系表面的黏聚力。Bengough 等^[6]、郭维俊等^[7]从理论上探讨了根—土复合体的本构关系,认为根—土复合体的本构关系一般呈非线性,且抗剪强度不仅与根系材料特性、组织结构有关,还与复合体的根系含量、含水率等因素有关。鉴于重塑根—土复合体直剪试验的诸多局限,原状根—土复合体直剪试验逐渐开展,栗岳洲等^[8]采用尽量接近原状土的布根方式,在不同含根量梯度下对 4 种盐生植物的重塑含根土进行了直剪试验,探讨了根系对土体抗剪强度的增强作用以及根—土复合体的最优含根量。蒋必凤^[9]选取了 5 种常见的草本植物进行种植,在尽量不破坏原状土的情况下,用环刀现场取样并实施了原状含根土的直剪试验,将得到的抗剪强度指标作为评判这几种草本植物固土能力的依据。

本研究在选择及试种护坡植物的基础上,对华南地区 3 种常见护坡植物的原状和重塑根—土复合体实施了直接剪切试验,以期对定量研究相似区域花岗岩残积土边坡的根系固土机制提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

2015 年 9 月,课题组选取了仲恺农业工程学院白云校区的部分区域进行边坡调研和护坡植物的试种。该校区位于广州市白云区钟落潭镇以东的广州第二大学城,总体地貌形态属丘陵与平原之间的过渡类型,西侧多为坡地,东部较平坦;边坡多为花岗岩残积土质边坡,土体多呈褐黄色,部分区域呈褐红色,原岩结构尚可辨认,质软,手捏即碎,遇水易崩解,土的基本物理力学性质见表 1。

表 1 原状土基本物理力学性质

土体 类别	土层 深度/cm	含水率/ %	干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	黏聚力/ kPa	内摩 擦角/($^{\circ}$)
原状素土	30	21.7	1.18	3.8	15.6

1.2 供试样品和试验方法

2016 年 11 月,课题组用定制的不锈钢取土器,在 1 m 深度范围对百喜草、假俭草、狗牙根 3 种植物取直径略大于环刀直径的带根原状土样。为使直剪试样尽量接近实际情况,分别在取土器的 20,40,60,80 cm 深度处用环刀取 4 个原状含根土试样,每个深度为 1 组,共 48 个试样。采用四联直剪仪,每组试样分别在 50,100,200,400 kPa 的法向压力作用下,以 0.8 mm/min 的速率快剪,绘制出 $\tau-\sigma$ 曲线,拟合得出不同深度下各组原状根—土复合体的黏聚力和内摩擦角,用余土测定各试样的干密度、含水率并统计根系分布情况。由于 3 种草本植物的根系都比较纤细,且呈须根型分布,故用根系质量分数(根质量与总土质量之比(%)),即根土质量比来定义含根量。

为便于对比分析,以原状含根土的基本物理状态为基础设计重塑根—土复合体的直剪试验方案^[10]。3 种草本固坡植物以干密度 1.1,2.1 g/cm^3 ,含水率 15%,25%,35%,根系质量分数 1%,3%为控制量,组合成 12 组土样。制样时,先将去除根系的土烘干粉碎后过 2 mm 筛备用;选择 0.6~1.2 mm 的根洗净并晾干表面水分,剪成 2 cm 长的小段。然后,分别计算出每个试样所需的土、水和根的质量,用天平称取并拌匀后放入密封袋中浸润 24 h,使其充分混合均匀后放入环刀中分层压实,植物根系在试样中主要呈水平或倾斜分布状态。制样完成后,将每组试样分别在 50,100,200,400 kPa 法向压力作用下逐级固结并以 0.8 mm/min 速率快剪,绘制出 $\tau-\sigma$ 曲线,拟合

得出每种土样的黏聚力(c)、内摩擦角(φ)值。

2 结果与分析

2.1 原状根—土复合体的抗剪特性

取同一深度处各组试样干密度、含水率和含根量的平均值,得到 3 种植物在不同土层深度处根—土复合体的基本物理性质指标(表 2)。由表 2 可知,百喜草和狗牙根两种带根原状土的干密度为 1.1 g/cm^3 ,假俭草带根原状土的干密度为 2.1 g/cm^3 。3 种植物根系质量的 90% 都分布在地表以下 0—40 cm 的土层内,百喜草根系在土中的质量分数约为 1%~3%,狗牙根根系在土中的质量分数约为 3%~4%,而假俭草的根系较为发达,其质量分数约为 7%~10%。由图 1 可知,3 种植物的根系含量随土层深度的变化范围及情况。

表 2 各组根—土复合体的基本物理性质指标

植物种类	土层深度/cm	干密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	含水率/ %	根系质量 分数/%
百喜草	20	1.03	17.3	3.50
	40	1.11	17.1	1.00
	60	1.15	16.5	0.30
	80	1.21	16.2	0.10
假俭草	20	2.21	25.1	10.58
	40	2.19	23.9	7.14
	60	2.12	20.7	0.39
	80	2.08	21.2	0.15
狗牙根	20	1.37	37.2	4.62
	40	1.46	28.9	3.67
	60	1.55	25.5	0.13
	80	1.50	20.1	0.00

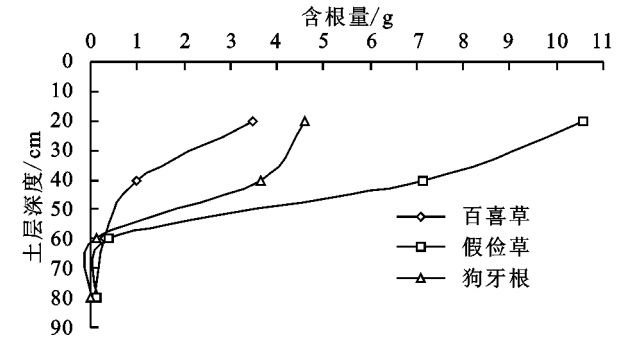


图 1 原状土含根量与土层深度的关系

由图 2、图 3 可知,3 种原状根—土复合体的黏聚力和内摩擦角基本随土层深度的增加而减小;狗牙根根—土复合体的黏聚力在各土层深度处均最大,且其随土层深度的下降趋势也最为显著;而假俭草根—土复合体的内摩擦角在各土层深度处最大,3 种根—土复合体的内摩擦角随土层深度的下降趋势比较一致。

由图 4 可知,在各级法向压力的作用下,3 种植物根—土复合体的抗剪强度随含根量的增加逐渐增大。由图 5、图 6 可知,3 种原状根—土复合体的黏聚力和内摩擦角基本也随含根量的增加而增大;相同土体状态下,3 种植物根系对黏聚力的影响为狗牙根>

百喜草>假俭草;对内摩擦角的影响为假俭草>百喜草>狗牙根。

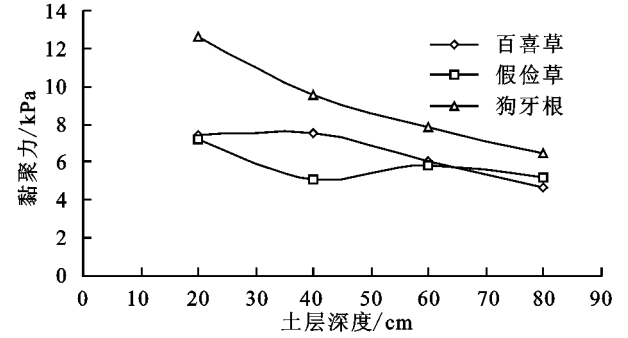


图 2 原状土黏聚力与土层深度的关系

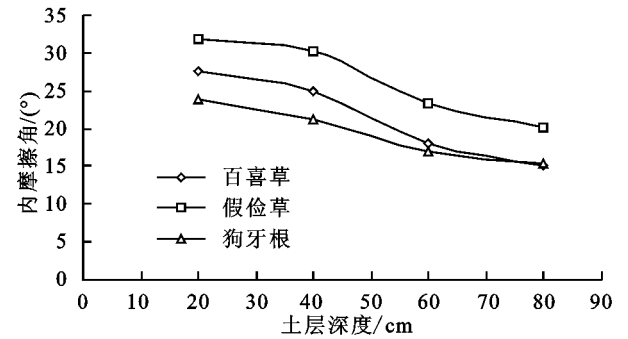


图 3 原状土内摩擦角与土层深度的关系

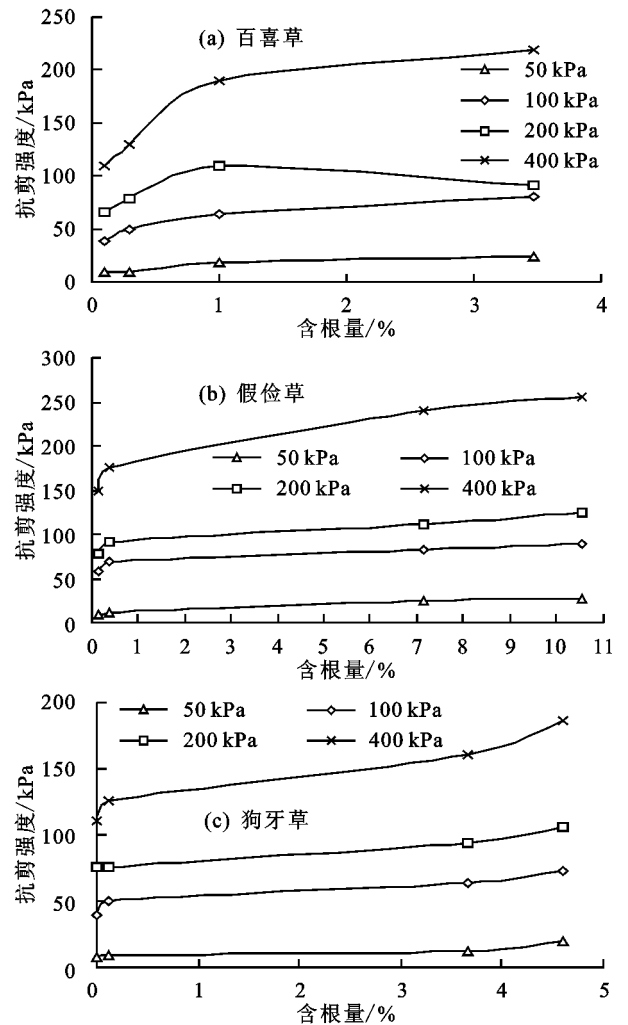


图 4 3 种植物在不同法向压力下抗剪强度与含根量的关系

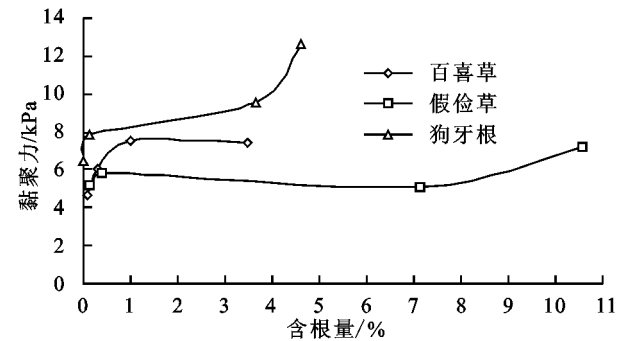


图 5 原状土含根量与黏聚力关系

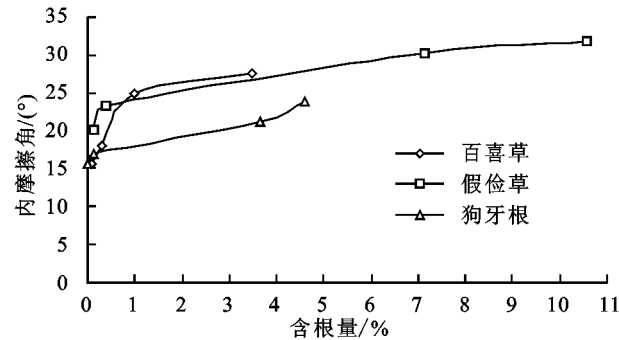


图 6 原状土含根量与内摩擦角关系

2.2 重塑根-土复合体的抗剪特性

由重塑根-土复合体直剪试验可知,重塑根-土复合体的抗剪强度与法向压力的关系符合库仑定律,

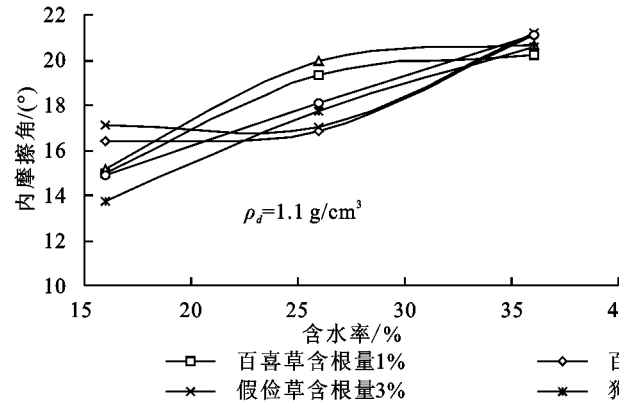
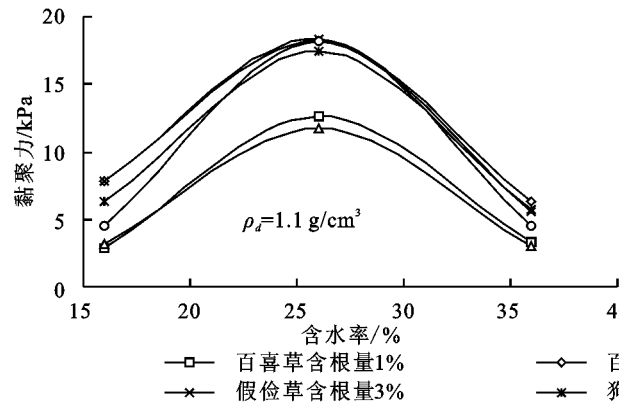


图 7 重塑土黏聚力与含水率关系

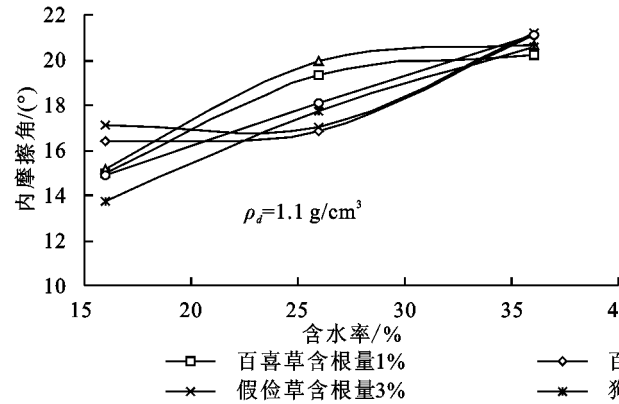


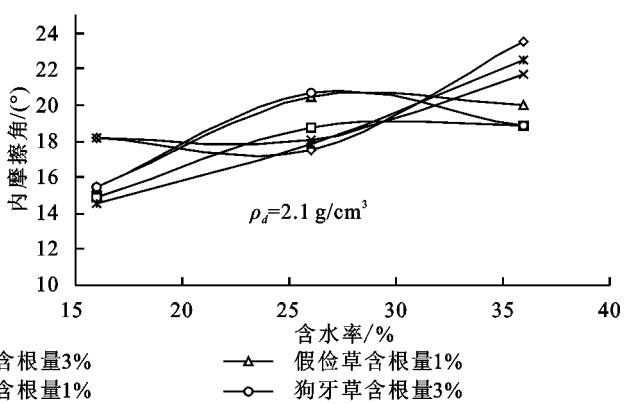
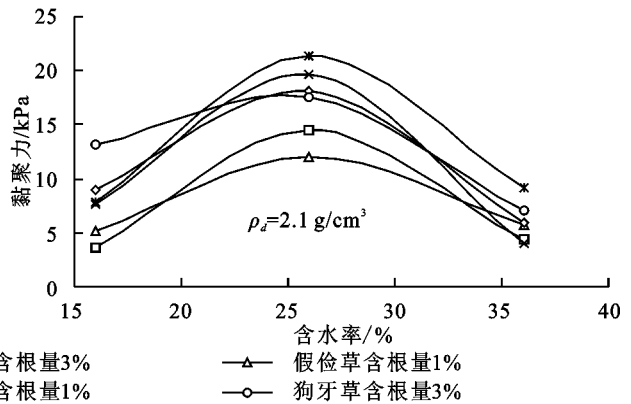
图 8 重塑土内摩擦角与含水率关系

3 讨论

对比原状及重塑根-土复合体的直剪试验结果可知,植物根系对土体黏聚力的影响比较一致,但对

根系增强土体抗剪强度的作用不仅受植物种类的影响,还与土体干密度和含水率密切相关。由图 7、图 8 可知,土样干密度的增加对黏聚力的提升有显著影响,对内摩擦角的影响却并不大。在两种不同干密度状态下,各试样的黏聚力均随含水率的增加呈现先增大后减小的变化趋势,而内摩擦角随含水率的增加总体呈增大趋势,这与格日乐等^[11]的研究结果是一致的,且 3 种植物重塑根-土复合体的最优含水率均在 25% 左右。重塑根-土复合体的含根量与黏聚力、内摩擦角之间并没有明显的规律,主要表现在相同含根量的土体在不同状态下,其黏聚力和内摩擦角的大小顺序各不相同。

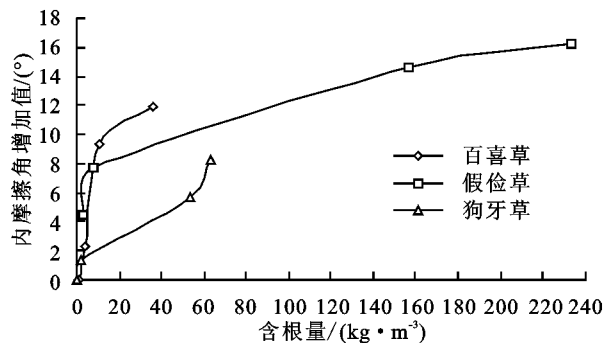
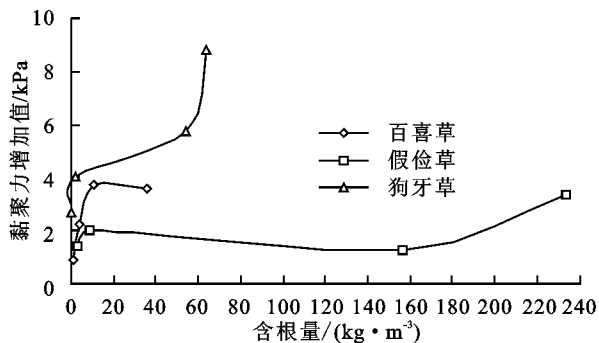
本试验把含根土视为均质化的复合体,采取了人为添加的方法定量地控制根系含量,忽略了根系原有的生长形态,这会使试验结果产生一定误差。另一方面,重塑土的含根量是基于原状土中根系质量分数确定的,而 3 种草本植物原状根-土复合体的根系质量分数都较低,加之草本植物根系纤细,故试验中每个试样的总质量差别很小,基本可忽略不计。因此,在草本植物重塑土的直剪试验中,很难探求含根量对抗剪强度指标的影响。



内摩擦角的影响差别较大。前人通过大量的重塑根-土复合体直剪试验,对单位体积土含根量(V_r)与附加黏聚力(Δc)的关系曲线进行拟合,再由此为

依据推导出植物根系锚固效应强度公式^[12-13]。这种根系锚固效应强度公式是基于重塑土试验基础之上的,试验一般采用失去生命力的干根代替有生命力的活根,且改变了根的走向和角度,所以最终只考虑了根系对土体黏聚力的影响,而忽略了对内摩擦角的影响,局限性较大。从原状根—土复合体直剪试验的

结果来看,植物根系锚固效应强度公式应同时考虑附加黏聚力(Δc)和附加内摩擦角($\Delta \varphi$)的影响。基于原状根—土复合体直剪试验的结果,图 9 是以单位体积土含根量为衡量指标,单位体积土含根量与附加黏聚力、附加内摩擦角的关系曲线,可为后续建立原状根—土复合体锚固效应强度公式提供依据。



注:含根量用单位体积土壤中根质量表示。

图 9 单位体积土含根量与 Δc 、 $\Delta \varphi$ 的关系

4 结论

(1) 百喜草、狗牙草根原状土的干密度为 1.1 g/cm^3 , 假俭草根原状土的干密度为 2.1 g/cm^3 左右; 3 种植物根系质量的 90% 都分布在 0—40 cm 的土层内。在各级法向压力作用下, 3 种植物原状根—土复合体的抗剪强度均随着含根量的增加而逐渐增大, 其黏聚力和内摩擦角均随土层深度的增加而减小。在相同的土体状态下, 3 种植物根系对黏聚力的影响为狗牙根 > 百喜草 > 假俭草; 对内摩擦角的影响为假俭草 > 百喜草 > 狗牙根。

(2) 土样干密度的增加对重塑含根土黏聚力的提升有显著影响, 但对其内摩擦角的影响却并不大; 在 2 种不同干密度状态下, 各重塑含根土样的黏聚力均随含水率的增加呈现先增大后减小的变化趋势, 而内摩擦角随含水率的增加总体呈增大趋势。3 种植物重塑根—土复合体的最优含水率均为 25%。与原状根—土复合体直剪试验的结果差异较大的是, 重塑根—土复合体的含根量与土样黏聚力、内摩擦角之间并没有明显的规律。

(3) 上述结论说明, 忽略了根系原有生长形态的重塑根—土复合体直剪试验很难探求含根量对抗剪强度指标的影响。因此, 在建立植物根系锚固效应强度公式时, 应尽量采用原状根—土复合体直剪试验的结果作为依据, 并同时考虑附加黏聚力和附加内摩擦角的影响。

参考文献:

- [1] 熊灵阳. 大广高速公路粤境新丰至从化段花岗岩残积土工程特性分析[J]. 西南公路, 2015, 23(4): 3-6.
- [2] 马吉倩. 高速公路花岗岩残积土边坡生态防护技术研究

[J]. 公路工程, 2016, 41(4): 222-227.

- [3] 刘益良, 刘晓立, 付旭, 等. 植物根系对低液限粉质黏土边坡浅层土体抗剪强度影响的试验研究[J]. 工程地质学报, 2016, 24(3): 384-390.
- [4] 郑启萍, 徐得潜. 草本植物护坡机理及其固土效应试验研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2014, 37(2): 225-228.
- [5] Abernethy B, Rutherford I D. The distribution and strength of riparian tree roots in relation to riverbank reinforcement [J]. Hydrol Process, 2001, 15(1): 63-79.
- [6] Bengough A G, Croser C, Pritchard J. A biophysical analysis of root growth under mechanical stress [J]. Plant and Soil, 1997, 189: 155-164.
- [7] 郭维俊, 黄高宝, 王芬娥, 等. 土壤-植物根系复合体本构关系的理论研究[J]. 中国农业大学学报, 2006, 11(2): 35-38.
- [8] 栗岳洲, 付江涛, 余冬梅, 等. 寒旱环境盐生植物根系固土护坡力学效应及其最优含根量探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(7): 1370-1383.
- [9] 蒋必凤. 几种草本护坡效果评价[D]. 长春: 东北林业大学, 2008.
- [10] 陈洁, 黄俊达, 陈镇武, 等. 广州北部地区花岗岩残积土边坡植物固坡初探[J]. 仲恺农业工程学院学报, 2016, 29(4): 18-22.
- [11] 格日乐, 张成福, 蒙仲举, 等. 3 种植物根—土复合体抗剪特性对比分析[J]. 水土保持学报, 2014, 28(2): 85-90.
- [12] 扈萍, 宋修广, 吴登高. 高速公路边坡植草护坡的根固效应试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(2): 442-444.
- [13] 张谢东, 石明强, 沈雪香, 等. 高速公路生态防护根系固坡的力学试验研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2008, 32(1): 59-61.