

DOI: 10.11779/CJGE201710019

生态边坡的水力和力学特性分析: 试验研究

程 鹏^{1,2}, 李锦辉^{*1}, 宋 磊¹

(1. 哈尔滨工业大学深圳研究生院, 广东 深圳 518055; 2. 深圳市建设综合勘察设计院有限公司, 广东 深圳 518055)

摘要: 植物护坡是一种新型的护坡方式, 是很多边坡防治灾害的首选方案。然而在降雨过程中植物的根系可能会诱发沿根系的优势流, 使得坡体内孔隙水压力升高, 从而降低土体的抗剪强度。另一方面, 植物的根系在土中相互缠绕, 可增强浅层土体的抗剪强度。在植物护坡过程中到底哪种效应占主导地位目前尚无定论。通过现场试验联合室内三轴试验综合评价植物土体的水力特性和力学特性。首先在室外建立香根草覆盖区、狗牙根草覆盖区和无植被裸土区, 在经历一年半自然状态下的干湿循环之后监测3种覆盖区的体积含水率和基质吸力, 并计算3个区域的非饱和渗透系数。其次研制取样器并对现场区域的3种土体进行取样, 利用现场土样进行三轴剪切试验, 研究室外裸土、含狗牙根草土体和含香根草土体的应力-应变关系和抗剪强度指标。同时为了与上述经历干湿循环的土体进行对比, 也测量了重塑土的渗透系数和抗剪强度。结果为生态边坡的稳定性研究提供了必要的数据和基础。

关键词: 植被; 现场监测; 渗透系数; 三轴试验; 加筋作用

中图分类号: TU41 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)10-1901-07

作者简介: 程 鹏(1994-), 男, 硕士, 主要从事生态边坡防治等方面的研究。E-mail: 767878194@qq.com。

Hydraulic and mechanical characteristics of ecological slopes: experimental study

CHENG Peng^{1,2}, LI Jin-hui¹, SONG Lei¹

(1. Shenzhen Graduate School, Harbin Institute of Technology, Shenzhen 518055, China; 2. Shenzhen City Construction Comprehensive Survey and Design Institute Co., Ltd., Shenzhen 518055, China)

Abstract: The biotechnical slope protection is a new method to protect slopes, which helps to prevent and control landslide. However, the vegetation roots can increase the permeability and pore water pressure of soils, which in turn decrease the shear strength of soils under rainfall conditions. On the other hand, the roots can be viewed as fibers in the soils and may increase the strength of soils. The controversial effect of roots on the soils remains unclear. The hydraulic and mechanical characteristics are analyzed through field monitoring combined with triaxial compression tests. Firstly, three soil regions (with Vetiver grass, with Bermuda grass and bare soil) are prepared in the field. The monitoring of volumetric water content and matric suction begins after these regions experience natural drying-wetting cycles for one year and a half. The unsaturated permeability functions for the three soils are calculated using the monitored data. Secondly, the soils are sampled from the field and used to conduct triaxial tests in lab. The stress-strain curves for the soils with Vetiver roots, the soils with Bermuda, the bare soils and the compacted soils are investigated. The cohesions and friction angles of soils are obtained. The results may provide necessary data in the stability analysis of ecological slopes.

Key words: vegetation; field monitoring; permeability function; triaxial compression test; reinforced effect

0 引言

中国是一个多山的国家, 在修建公路、铁路等基础设施时经常要深挖高填, 导致填方路堤和路堑边坡的数量急剧增多^[1]。传统的护坡方法一般采用水泥、混凝土、石材等硬性材料进行加固, 导致坡体原有植被无法恢复, 且随着岩石的风化和混凝土的老化, 防护效果逐渐削弱^[2]。为了减少水土流失和滑坡等自然灾害发生的可能性, 国内外学者提出了生态护坡的方

法^[3-5]。

一些学者认为根系在土中贯穿形成了大孔隙, 降雨时水分会优先沿着根系向下入渗, 使得土体渗透系数增大^[6-7]。李雄威等^[8]以广西膨胀土为研究对象, 表

基金项目: 国家自然科学基金项目(51379053); 深圳市科技计划项目(CXZZ20151117174345411)

收稿日期: 2016-06-30

*通讯作者 (E-mail: jinhui.li@hit.edu.cn)

层土种植了马尼拉草, 进行了现场渗透试验, 研究结果表明植被根系会增强土体的渗透性。Devitt 等^[9]研究了灌木植物的根系对土体渗透性的影响, 发现根系的优势流作用较明显, 且根系越粗优势流效应越明显。

而有学者认为根系在土中形成复杂的网络包裹住土颗粒, 从而减小土体的渗透系数^[10]。Albright 等^[11]对美国 11 个地区不同气候区的覆盖层进行了长期监测。结果表明传统覆盖层在湿润气候区渗漏量达 52~195 mm/年, 而在覆盖层顶部种植植物后在湿润气候区渗漏量小于 12 mm/年, 说明种植植物之后土体的渗透性会降低。随后 Bohnhoff 等^[12]、Fayer 等^[13]、Barnswell 等^[14]的一系列试验也说明根系可降低土体的渗透性。William 等^[15]对阿拉斯加中南部的腾发覆盖层和压实黏土覆盖层进行了 4 a 的监测。结果发现, 4 a 间腾发覆盖层的渗漏量为 201 mm, 低于压实黏土覆盖层的渗漏量 292 mm, 植物的存在会减少水分的渗漏。王康等^[16]对不同植被覆盖的覆盖层进行了现场监测, 结果表明表面无植被覆盖时, 渗漏量为 3.3 mm, 而表面移栽草本植物覆盖层的底部并未渗漏。综上所述目前关于植物根系对土体渗透性能的影响还存在较大争议。

目前研究含根系土体抗剪强度的试验大致可分为两种: 第一种是重塑加筋土试验, 指在重塑土中人为定量添加根系来模拟植物在土中的工况并进行试验^[17-19]。但人为添加根系的方法无法还原出实际根系分布及根系和周围土体的黏结作用。第二种是原状含根系土试验, 目前这种试验方法主要为直剪试验或小型的三轴剪切试验^[20], 多使用直径 39.1 mm 和高 80 mm 的小型试样, 当试样尺寸过小时, 其试验结果可能不具代表性。

综上所述, 生态边坡的试验研究仍存在以下两个方面的不足: ①根系一方面会在一定程度上限制土体的开裂, 减小土体的渗透系数, 另一方面会产生优势流, 增大土体的渗透系数。两者的综合作用对渗透系数的影响尚不清楚; ②目前研究含根系土体抗剪性能的方法多是人为在土中添加根系, 这样做不能模拟根系在自然情况下的生长形态和与土体的相互作用。取原状土进行室内剪切试验大多利用尺寸较小的环刀, 在小尺寸的土样中根系的生长分布并不均匀, 不具有代表性。所以本文利用自制的大尺寸取样器来获取现场具有代表性的含根系土样并进行室内三轴剪切试验。

本文首先在室外建立香根草覆盖区、狗牙根草覆盖区和无植被裸土区, 在经历一年自然状态下的干湿循环之后监测 3 种覆盖区的体积含水率和基质吸力变

化, 计算含根系土体的非饱和渗透系数。其次利用自制的取样器对现场的 3 种土体进行取样, 并利用现场土样进行三轴剪切试验, 研究室外裸土、含狗牙根草土体和含香根草土体的抗剪强度。同时为了与上述经历干湿循环的土体进行对比, 本文也研究了重塑土的渗透系数和抗剪强度。

1 含根系土体的水力特性

1.1 土体基本性质

本文试验用土的基本物理性质见表 1, 属低塑性黏土。图 1 为土颗粒级配曲线, 曲率系数为 2.6, 不均匀系数为 15, 级配良好。

表 1 试验用土基本参数

Table 1 Basic parameters of test soils

类别	最大干密度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	最优含水率 /%	液限 /%	塑限 /%
黏土	1.702	18.5	42.25	19.70

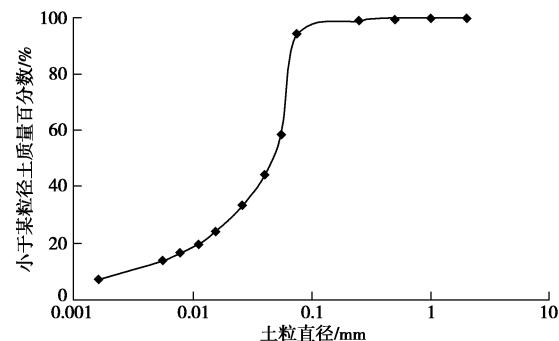


图 1 土颗粒级配曲线

Fig. 1 Distribution of grain sizes

1.2 现场监测

试验场地位于深圳市南山区西丽镇深圳大学城内, 室外场地于 2014 年 6 月 18 日建成, 香根草和狗牙根草在建成后立即播种。试验场地尺寸为 270 cm × 176 cm × 55 cm, 土体的压实度为 80%。压入时采用分层压实法, 共分 6 层, 前面 5 层每层 10 cm, 最后一层 5 cm。

整个场地划分为 4 部分, 无植被裸土区、狗牙根草覆盖区、香根草覆盖区及仪器预留区(见图 2)。前 3 个部分又平均分为 A, B 两个区域, A 区为监测区, 在 A 区的土体内埋设多个张力计、温度和含水率传感器, 分别测量土体不同深度的基质吸力、温度和含水率。B 区为取样区, 为室内三轴剪切试验提供土样。仪器预留区的作用是为了便于从侧向安装仪器。为避免预留区在降雨后产生积水或水分从侧面蒸发对监测造成的影响, 在仪器安装完成之后用相同的黏土填满预留区并用防水油布覆盖在上面。

考虑到根系深度情况, 每个区域分别在距地表 5, 30, 50 cm 深度处安装传感器 (见图 3), 监测各个深度的体积含水率和基质吸力。体积含水率的测量选用 EC-5 传感器, 量程为 0~100% 体积含水率, 精度在土 1%~2% 之间。基质吸力的测量需考虑张力计的量程, 5 cm 深度处基质吸力较高, 变化范围较大, 因此选用量程较大的高量程张力计^[21], 量程为 0~500 kPa, 精度为 ± 2.5 kPa。

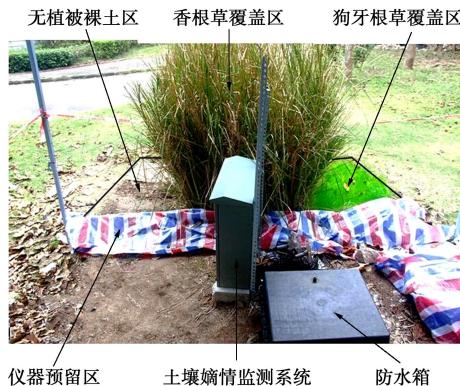


图 2 监测现场

Fig. 2 In-situ monitoring field

30, 50 cm 深度处基质吸力较低, 变化范围也较小, 故选用精度更高的普通量程张力计, 该张力计由 2100F 型张力计改装而成, 其量程为 0~100 kPa, 精度为 ± 0.5 kPa。同时考虑到监测周期较长, 为避免个别仪器出现故障, 在 30 cm 和 50 cm 深度处也安装高量程张力计。高量程张力计的输出信号和温度有关, 因此在距离每个高量程张力计 10 cm 的位置安装温度传感器。图 3 为传感器布置图。

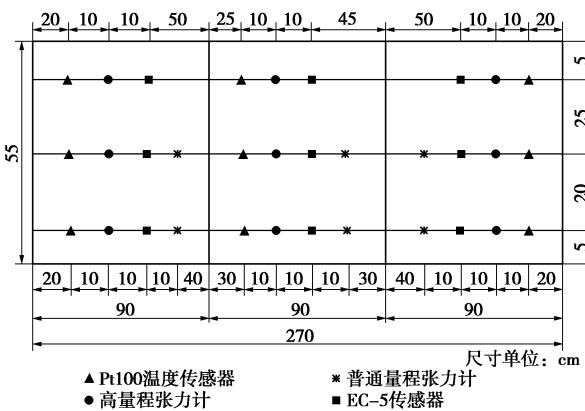


图 3 传感器布置图

Fig. 3 Deployment of sensors

利用现场监测的土体体积含水率和基质吸力, 得到了室外裸土、含狗牙根草土体和含香根草土体的土水特征曲线 (SWCC), 如图 4 所示。由于现场试验中土体未达到饱和状态, 所以从现场得到的 SWCC 曲线

中无法得到土体的进气值。

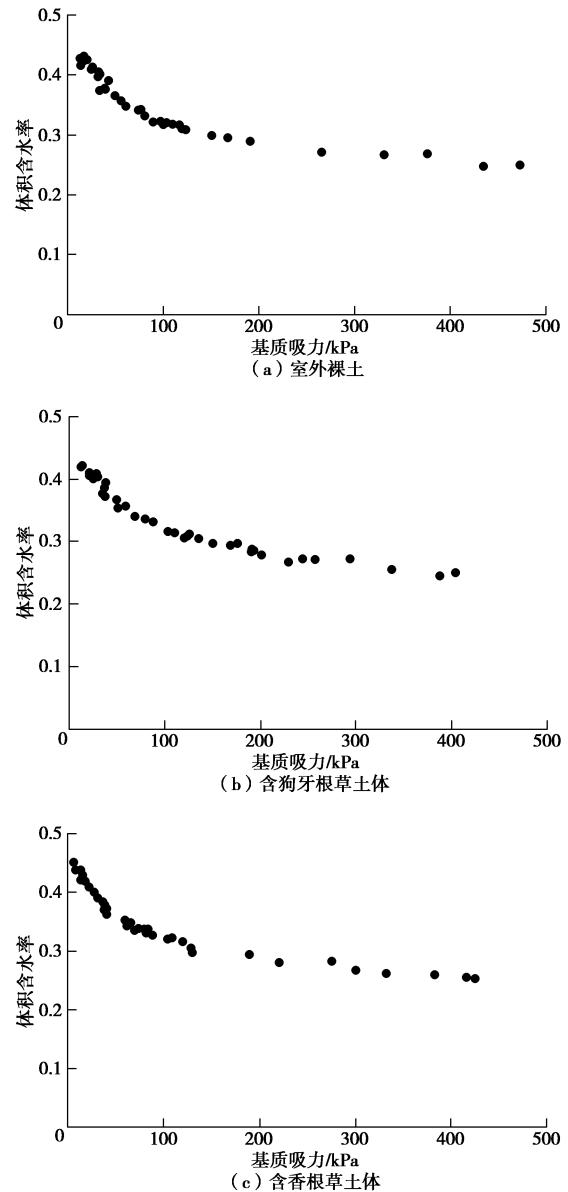


图 4 不同土体的 SWCC 曲线

Fig. 4 SWCCs for different soil samples

1.3 非饱和渗透系数

由于基质吸力的存在, 非饱和土的渗透系数和饱和土明显不同。实际情况中边坡土往往是非饱和的, 所以分析含根系土体的非饱和渗透系数是很有必要的。本文采用瞬态剖面法来计算非饱和渗透系数^[22]。瞬态剖面法通过测量土样在渗流状态下沿水流方向分布点的体积含水率和基质吸力, 求得平均流速和平均水力梯度, 进而可得到非饱和渗透系数。同时为了与室外经过干湿循环的土体进行对比, 本文进行了室内重塑土渗透系数的测量, 采用 Schindler 等^[23]提出的简易蒸发测量方法。计算得到的 4 种土体的非饱和渗透系数见图 5。含香根草土体的基质吸力在 32.9~296 kPa 变化时, 其渗透系数在 8.35×10^{-6} ~ 5.23×10^{-7}

cm/s 变化, 室外裸土的基质吸力在 43.3~492 kPa 变化时, 其渗透系数在 $3.44 \times 10^{-7} \sim 1.31 \times 10^{-8}$ cm/s 变化, 含狗牙根草土体的基质吸力在 38.8~404 kPa 变化时, 其渗透系数在 $1.60 \times 10^{-7} \sim 3.00 \times 10^{-8}$ cm/s 变化, 重塑土的基质吸力在 0.120~315 kPa 变化时, 其渗透系数在 $8.56 \times 10^{-6} \sim 1.33 \times 10^{-8}$ cm/s 变化。可以看出当基质吸力相同时, 重塑土的渗透系数最小, 含狗牙根草土体的渗透系数小于室外裸土的渗透系数, 含香根草土体的渗透系数最大。而随着基质吸力的降低, 4 种土体的渗透系数都有所增大。种草之后渗透系数改变的原因可能是香根草根系垂直向下生长, 优势流效果较明显, 使得渗透系数变大。而狗牙根草根系水平生长, 在一定程度上可以阻碍裂隙发展, 使得渗透系数变小。根系的分布及直径等参数与其非饱和渗透系数的变化关系紧密, 更加详细的研究内容及结果可参见文献[24]。

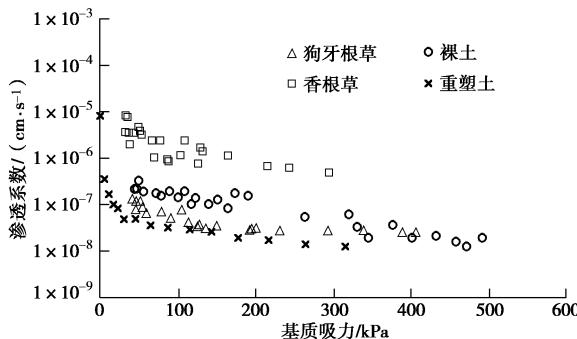


图 5 4 种土体的非饱和渗透系数

Fig. 5 Permeability function of four unsaturated soil samples

2 含根系土体的力学性能

2.1 试验设计

室内三轴剪切试验的土样取室外原状土进行。原状土取样时间为 2016 年 1 月 27 日—2016 年 3 月 8 日, 经过了 20 个月左右的干湿循环。取得原状土样后进行室内三轴剪切试验, 测量含根系土体的力学性能。三轴剪切试验有 4 种工况, 如表 2 所示。试验工况 1 所代表的工况为室外裸土, 不种植植被且经历了多个干湿循环; 试验工况 2 代表了种植香根草并经历干湿循环后的土体; 试验工况 3 研究的是种植狗牙根草并经历干湿循环后的土体; 试验工况 4 的土体为室内重塑土, 既没有根系也没经历干湿循环, 代表了刚刚形成边坡的状况。采用固结不排水剪切的方法进行试验, 试样尺寸为直径 101 mm, 高 200 mm, 剪切速度为每分钟轴向应变 0.1%。试验施加的围压值分别为 50, 100, 150 kPa。

表 2 三轴剪切试验工况

Table 2 Test conditions of triaxial shear tests

试验工况	植物种类	根系情况	开裂情况	土样类型
1	无	无	有	现场原状土
2	香根草	直根系	有	现场原状土
3	狗牙根草	须根系	有	现场原状土
4	无	无	无	室内重塑土

2.2 取样过程

由于需要将现场原状土取回室内做三轴剪切试验, 所以如何取现场带根系土样是本研究面临的一个难题。为此, 本文特别研制了取样器。取样器为一个内径为 101 mm, 外径为 160 mm, 高为 200 mm 的圆柱金属筒, 底部锋利, 再将圆筒切割成相等的两部分, 一侧安装两个铰链, 一侧安装两个开关, 使得取样器具有开合的功能。

现场取样的原则就是尽可能减小对土体的扰动, 本试验取样的过程是依照规范^[25]中提到的方法进行的。包括以下 4 个步骤: 首先确定取样区域。由于现场土体压实度较高, 取样器很难压入土体中, 所以需要先将周边土清除。为了保证可以取到 20 cm 深处的土样, 将取样器向外扩展 10 cm 后的扩大区域定为取样区域, 清除周边土, 见图 6 (a)。由于取样区域尺寸较小, 应使用较小的工具如美工刀、水果刀等进行清土, 见图 6 (b)。接下来是取样器下压。虽然取样器下压是第 3 个步骤, 但在实际取样过程中是和第二步交替进行的。在下压前需要将取样器内壁涂抹一层凡士林, 目的是减小下压过程中取样器和周围土体之间的摩擦力, 方便下压并减小对土体的扰动, 见图 6 (c)。最后取出土体。下压完成后将取样器下方连接的土体铲断。用美工刀将土柱切削至与取样器底部平齐后运回实验室进行剪切试验, 见图 6 (d)。

2.3 试验结果

为了研究土体中的根系状况, 在室外试验场地, 靠近剪切土样取土区域, 利用自制取土器, 取得尺寸为 24 cm×24 cm×20 cm 的原状土样。对原状土样进行小心冲洗并进行测量, 得到了土样中根系的长度、直径、根系分布形式、抗拉强度和根系体积含量等参数, 如表 3 所示。表 3 中狗牙根草根系抗拉强度采用魏华伟等^[26]的经验计算模型, 香根草根系的抗拉强度采用刘川顺等^[27]的经验计算模型。

表 3 含根系土样中根系特征的描述

Table 3 Description of properties of roots in vegetated soils

根系参数	根系种类	
	狗牙根草	香根草
长度/mm	1~18	10~42
直径/mm	0.12~0.92	0.12~2.41
根系分布形式	须根系	直根系
抗拉强度/MPa	20.0~90.0	5.2~89.5
根系体积含量/%	0.22	0.76



图 6 现场土样的获取过程

Fig. 6 Process of in-situ soil sampling

图 7 (a) 为室内重塑土剪切过程中主应力差与轴向应变的关系曲线。可以看出在剪切的初期, 不同围压下的主应力差与轴向应变关系曲线相差不大。随着剪切过程的不断进行, 曲线之间的差距不断加大。主应力差在轴向应变较小时上升较快, 在轴向应变约 2% 左右时趋于稳定, 呈现应变硬化现象。

图 7 (b) 为室外裸土剪切过程中主应力差与轴向应变的关系曲线。当土体产生相同轴向应变时, 裸土的主应力差最小。

图 7 (c) 为含狗牙根草土体剪切过程中主应力差与轴向应变的关系曲线。与前面两种土体变化趋势相近, 当轴向应变相同时, 含狗牙根草土体主应力差大于重塑土。

图 7 (d) 为含香根草土体剪切过程中主应力差与轴向应变的关系曲线。和狗牙根草土体变化情况基本

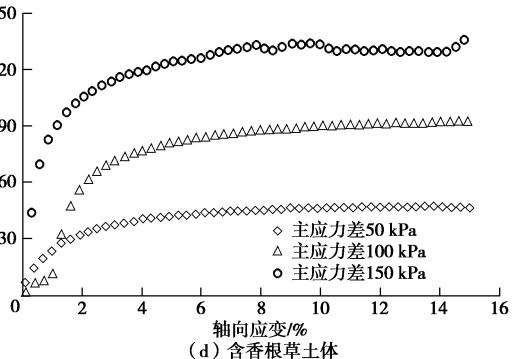
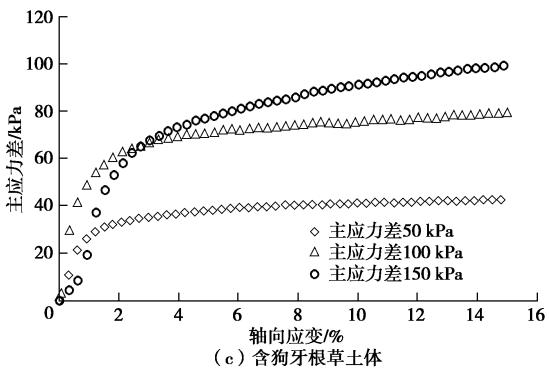
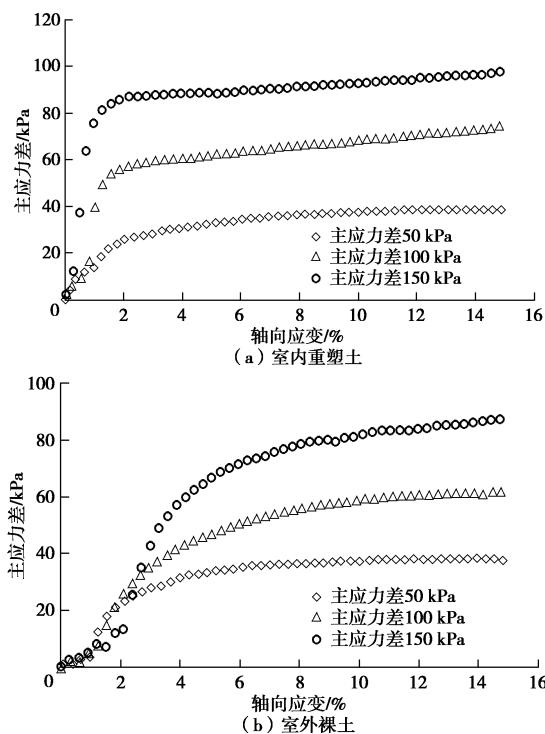


图 7 不同土样主应力差与轴向应变关系曲线

Fig. 7 Relationship between principal stress difference and axial strain of different soil samples

类似, 但当轴向应变相同时主应力差明显高于狗牙根草土体。

表 4 为 4 种土体的有效内摩擦角和有效黏聚力, 可以看出根系的存在明显地增强了土体的有效黏聚力, 增长率达 24.36%~118.49%, 且香根草对土体的加筋效果优于狗牙根草, 这可能是由于香根草的根系较粗, 且从顶部贯穿到底部, 而狗牙根草的根较细, 且土样底部根系含量较少导致的。由于裂隙的存在, 裸土有效黏聚力降低了 17.83%。从有效内摩擦角的对比情况看出, 含香根草土体的有效内摩擦角明显高于另外 3 种土。

香根草根系对土体黏聚力的贡献明显, 同时对内摩擦角也有一定的提高作用。刘川顺等^[27]和黄金^[28]研究了香根草对砂土土性的影响, 其结果表明香根草根系对砂土的内摩擦角影响不大, 分别为 5% 和 3%。而赵亮^[29]采用直剪试验研究了香根草根系对黏土内摩擦角的影响。当土体含水率为 21.15% 时, 含香根草土体的内摩擦角提高了 32%。由此可见, 香根草根系对黏土内摩擦角的作用更加明显。文献[29]采用的直剪试验中剪切面被限定在上下盒之间的平面, 只有经过此面的根系才对试样抵抗剪切作用有贡献。此时土样中的大部分根系垂直于剪切面, 破坏形式多为根系被剪断, 而根系与土体之间的相对位移较小, 从而其摩檫作用未被完全发挥。而三轴剪切试验中, 根系与土体之间发生了较大的相对位移, 根土间的摩擦力得到充分发挥。这导致本文三轴试验中含香根草黏土的

内摩擦角有较明显的提高。本文研究的香根草和狗牙根草都属于草本植物, 灌木及林木根系的研究可参见文献[30~32]。

表 4 抗剪强度参数的对比

Table 4 Comparison of shear strength parameters

土体类型	有效内摩擦角 / (°)	有效内摩擦角增长率 / %	有效黏聚力/kPa	有效黏聚力增长率 / %
室内重塑土	18.17	—	9.03	—
室外裸土	18.75	3.19	7.42	-17.83
含狗牙根草土体	19.25	5.94	11.23	24.36
含香根草土体	26.65	46.67	19.73	118.49

3 结论与建议

本文通过现场监测试验和原状土三轴剪切试验研究了根系对土体渗透性能和力学性能的影响, 得到了以下结论:

(1) 含香根草土体的非饱和渗透系数在 $8.35 \times 10^{-6} \sim 5.23 \times 10^{-7}$ cm/s 变化, 室外裸土的渗透系数变化范围为 $3.44 \times 10^{-7} \sim 1.31 \times 10^{-8}$ cm/s, 含狗牙根草土体的渗透系数分布于 $1.60 \times 10^{-7} \sim 3.00 \times 10^{-8}$ cm/s, 重塑土的渗透系数最大为 8.56×10^{-6} cm/s, 最小为 1.33×10^{-8} cm/s。

(2) 当基质吸力相同时, 重塑土的渗透系数最小, 含狗牙根草土体的渗透系数小于室外裸土的渗透系数, 含香根草土体的渗透系数最大。而随着基质吸力的降低, 4 种土体的渗透系数都有所增大。

(3) 根系的存在可以增强黏土的强度, 其中有效黏聚力增长率达 24.36%~118.49%, 有效内摩擦角的增长率达 5.94%~46.67%, 且香根草对土体的加筋效果优于狗牙根草。

(4) 裂隙的存在显著降低了黏土的黏聚力, 从而降低了其抗剪强度。

参考文献:

- [1] 饶运章. 岩土边坡稳定性分析[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2012. (YAO Yun-zhang. Stability analysis of geotechnical slope[M]. Changsha: Central South University Press, 2012. (in Chinese))
- [2] 周德培, 张俊云. 植被护坡工程技术[M]. 北京: 北京人民交通出版社, 2003: 30~36. (ZHOU De-pei, ZHANG Jun-yun. Vegetation slope protection engineering technology [M]. Beijing: Beijing People's Communications Press, 2003: 30~36. (in Chinese))
- [3] 杨俊杰, 王亮, 郑建国, 等. 生态边坡客土稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(2): 414~422. (YANG Jun-jie, WANG Liang, ZHENG Jian-guo, et al. Study on stability of replace with out-soil in ecological slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(2): 414~422. (in Chinese))
- [4] 戚国庆, 胡利文. 植被护坡机制及应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(11): 2220~2225. (QI Guo-qing, HU Li-wen. Study on mechanism and application of slope protection with vegetation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(11): 2220~2225. (in Chinese))
- [5] 周跃, WATTS D. 欧美坡面生态工程原理及应用的发展现状[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(1): 80~86. (ZHOU Yue, WATTS D. Current development of slope eco-engineering principle and application in Europe and America[J]. Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1999, 5(1): 80~86. (in Chinese))
- [6] ANGERS D A, CARON J. Plant-induced changes in soil structure: processes and feedbacks[J]. Biogeochemistry, 1998, 42(4): 55~72.
- [7] MEEK B D, DETAR W R, RECHEL E R, et al. Infiltration rate as affected by an alfalfa and no-tile cotton dropping system[J]. Soil Science American Journal, 1990, 54(2): 505~508.
- [8] 李雄威, 孔令伟, 郭爱国. 植被作用下膨胀土渗透和力学特性及堑坡防护机制[J]. 岩土力学, 2013, 34(1): 85~91. (LI Xiong-wei, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo. Permeability and mechanical characteristics of expansive soil and cut slope protection mechanism under vegetation action[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(1): 85~91. (in Chinese))
- [9] DEVITT D A, SMITH S D. Root channel macropores enhance downward movement of water in a mojave desert ecosystem[J]. Journal of Arid Environments, 2002, 50(1): 99~108.
- [10] 周云艳, 陈建平, 王晓梅. 植被护坡中植物根系的阻裂增強机理研究[J]. 武汉大学学报(理学版), 2009, 55(3): 613~618. (ZHOU Yun-yan, CHEN Jian-ping, WANG Xiao-mei. Research on resistance cracking and enhancement mechanism of plant root in slope protection by vegetation[J]. Journal of Wuhan University: Natural Science Edition, 2009, 55(3): 613~618. (in Chinese))
- [11] ALBRIGHT W H, BENSON C H, GEE G W, et al. Field water balance of landfill final covers[J]. Journal of Environmental Quality, 2004, 33: 2317~2332.
- [12] BOHNHOFF G L, OGORZALEK A S, BENSON C H. Field data and water-balance predictions for a monolithic cover in a semiarid climate[J]. Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, 2009, 135(3): 333~348.
- [13] FAYER M J, GEE G W. Multiple-year water balance of soil covers in a semiarid setting[J]. Journal of Environmental

- Quality, 2006, **35**(1): 366 - 377.
- [14] BARNSWELL K D, DWYER D F. Assessing the performance of evapotranspiration covers for municipal solid waste landfills in northwestern Ohio[J]. Journal of Environmental Engineering, 2011, **137**: 301 - 305.
- [15] WILLIAM E S, MUNK J, WILLIAM J L. Four-year performance evaluation of a pilot-scale evapotranspiration landfill cover in southcentral Alaska[J]. Cold Regions Science and Technology, 2012(82): 1 - 7.
- [16] 王 康, 刘川顺, 王富庆, 等. 腾发覆盖垃圾填埋场覆盖层机理试验研究及结构分析[J]. 环境科学, 2007, **28**(10): 2307 - 2314. (WANG Kang, LIU Chuan-shun, WANG Fu-qing, et al. Field test and evaluation of landfill performance and structure with evapotranspiration cover[J]. Environmental Science, 2007, **28**(10): 2307 - 2314. (in Chinese))
- [17] 栗岳洲, 付江涛, 胡夏嵩, 等. 土体粒径对盐生植物根-土复合体抗剪强度影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, **35**(2): 403 - 412. (LI Yue-zhou, FU Jiang-tao, HU Xia-song, et al. Experimental study of the influence of grain size on the shear strength of rooted soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, **35**(2): 403 - 412. (in Chinese))
- [18] 陈昌富, 刘怀星, 李亚平. 草根加筋土的室内三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2007, **28**(10): 2041 - 2045. (CHEN Chang-fu, LIU Huai-xing, LI Ya-ping. Study on grassroots-reinforced soil by laboratory triaxial test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(10): 2041 - 2045. (in Chinese))
- [19] 刘秀萍, 陈丽华, 宋维峰. 林木根系与黄土复合体的抗剪强度试验研究[J]. 北京林业大学学报, 2006, **28**(5): 67 - 72. (LIU Xiu-ping, CHEN Li-hua, SONG Wei-feng. Study on the shear strength of forest root-loess composite[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2006, **28**(5): 67 - 72. (in Chinese))
- [20] 王元战, 张智凯, 马殿光, 等. 植物根系加筋土剪切试验研究综述[J]. 水道港口, 2012, **33**(4): 330 - 336. (WANG Yuan-zhan, ZHANG Zhi-kai, MA Dian-guang, et al. Review of shear test investigation on plant roots-reinforced soil[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2012, **33**(4): 330 - 336. (in Chinese))
- [21] 陈 锐, 陈中奎, 张 敏, 等. 新型高量程张力计在吸力量测中的应用[J]. 水利学报, 2013, **44**(6): 743 - 747. (CHEN Rui, CHEN Zhong-kui, ZHANG Min, et al. Applications of a high-capacity tensiometer for direct measurement of suction [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, **44**(6): 743 - 747. (in Chinese))
- [22] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. New York: John Wiley & Sons, 1993: 151 - 152.
- [23] SCHINDLER U, MULLER L. Simplifying the evaporation method for quantifying soil hydraulic properties[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2006, **169**(5): 623 - 629.
- [24] 周 腾. 含根系土体水力特性的试验与理论研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015: 53 - 57. (ZHOU Teng. Experimental and theoretical research of hydraulic properties of root-containing soil[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015: 53 - 57. (in Chinese))
- [25] ASTM (2003c) D 7015-03 Standard practices for obtaining undisturbed block (cubical and cylindrical) samples of soils[S]. Annual Book of Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003.
- [26] 魏华伟, 罗海波, 张玉环. 狗牙根根系分布特征及其抗拉强度试验研究[J]. 水土保持通报, 2011, **31**(4): 185 - 189. (WEI Hua-wei, LUO Hai-bo, ZHANG Yu-huan. Root distribution characteristics and tensile strength of Cynodon Dactylon L[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2011, **31**(4): 185 - 189. (in Chinese))
- [27] 刘川顺, 吴洪亮, 张 路. 香根草根土复合体抗剪强度试验研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2012, **45**(5): 580 - 583. (LIU Chuan-shun, WU Hong-liang, ZHANG Lu. Experimental study of shear strength of soil rooted with vetiver roots[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2012, **45**(5): 580 - 583. (in Chinese))
- [28] 黄 金. 香根草生物工程技术在浅层滑坡治理中的应用研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2010: 49 - 59. (HUANG Jin. The research on applying Vetiver zizanioides bio-engineering technique to curb slope surface[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2010: 49 - 59. (in Chinese))
- [29] 赵 亮. 根土复合体抗剪强度试验研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2014: 37 - 42. (ZHAO Liang. Experimental study on shear strength of root-soil composite[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2014: 37 - 42. (in Chinese))
- [30] DOCKER B B. Biotechnical engineering on alluvial riverbanks of southeastern Australia: a quantified model of the earth-reinforcing properties of some native riparian trees[D]. Sydney: The University of Sydney, 2003.
- [31] LEUNG T Y F. Native shrubs and trees as an integrated element in local slope upgrading[D]. Hong Kong, The University of Hong Kong, 2014.
- [32] HU X S, BRIERLEY G, ZHU H L, et al. An exploratory analysis of vegetation strategies to reduce shallow landslide activity on loess hillslopes, Northeast Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. Journal of Mountain Science, 2013, **10**(4): 668 - 686.