

· 水利与土木工程 ·

DOI:10.15961/j.jsuese.201600400

植物根系倾角对土体抗剪强度影响试验研究

王 涵^{1,2}, 周 成^{1,2*}, 刘 伟¹, 李红梅³

(1. 四川大学 水利水电学院 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065;

2. 南京水利科学研究院 水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室, 江苏 南京 210024;

3. 深圳市益田集团股份有限公司, 广东 深圳 518053)

摘 要:植物是天然的工程师,拥有防止浅层滑坡和地表侵蚀的潜能,并具备低投入、低养护、绿色环保和生态平衡等优点。植被护坡技术在西南地区浅层滑坡的预防及治理中有着广泛的应用前景,因此深入了解植被护坡机理具有重要的工程意义。影响植被护坡效应的因素有很多,根-土体系的协同作用机制是当前研究的重点。由于根系的分布模式及倾角不同,根-土体系的强度和变形会有较大差异,因此采用人工根系(草根和灌木根)制备试样并设定根系与剪切面的夹角 α 值为变量,对比不同试样的强度和变形差异。通过直剪试验研究草本根系倾角对土体抗剪强度的影响,通过三轴剪切试验研究灌木根系倾角对土体抗剪强度的影响。试验结果表明:含根系土样的峰值强度及残余强度均明显高于素土,具有 $\tau_{p\text{素土}} < \tau_{p90^\circ} < \tau_{p45^\circ} < \tau_{p135^\circ}$ 的规律;直剪试验中在 α 值等于 135° 时土样抗剪强度最高且表现出应变硬化,其余含根系试样应变软化特征均得到不同程度的抑制;三轴试验中当 α 值为 135° 时根系对土体抗剪强度的提高最为明显,其残余强度也最大,其余含根系试样抗剪强度也有不同程度提高。恰当的植物根系倾角能够加强根-土体系的协同作用,从而提高土体抗剪强度。同时由于根-土体系表现出延性破坏的特征,从而保证了土坡安全。研究结果可应用于生态护坡实践。

关键词:浅层滑坡;生态护坡;根系倾角;抗剪强度;草根;灌木根

中图分类号:TU411.7

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2017)增刊1-0081-08

Shear Test for Root Reinforced Soil Samples Considering the Inclination of Roots

WANG Han^{1,2}, ZHOU Cheng^{1,2}, LIU Wei¹, LI Hongmei³

(1. State Key Lab. of Hydraulics and Mountain River Eng., College of Water Resource & Hydropower, Sichuan Univ., Chengdu 610065, China;

2. Key Lab. of Failure Mechanism and Safety Control Techniques of Earth Rock Dam of the Ministry of Water Resources,

Nanjing Hydraulic Research Inst., Nanjing 210024, China; 3. Shenzhen Yitian Group Co. Ltd., Shenzhen 518053, China)

Abstract: Plants are sophisticated and intelligent natural construction materials, which can be used for enhancing the stability of shallow soil slopes and minimizing surface erosion. It is evident that the use of plants can be low-cost, sustainable (almost maintenance free) and environmentally friendly. Vegetation used in shallow slope protection has a wide application prospect in southwest China, so it is important to understand the mechanism of vegetation in slope engineering stabilization. The stabilized mechanism is influenced by a lots of factors, in which the synergistic effect of root-soil mass is the focus of current research. Due to the different inclination of roots, the shear strength of root-soil system becomes complicated. Direct and triaxial shear test were performed on soil sample with different inclinations of artificial roots to investigate the reinforcement effect. Test results indicated that the peak shear strength and the residual shear strength of roots reinforced soil were obviously larger than soil without roots, and followed the laws of $\tau_{p\text{ pure}} < \tau_{p90^\circ} < \tau_{p45^\circ} < \tau_{p135^\circ}$. In the direct shear test, the largest shear strength was detected and strain hardening was observed when the inclination of roots was 135° , and strain softening tendency of soil samples with roots was controlled at different levels. When the inclination of roots was 135° , the root reinforcement

收稿日期:2016-04-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51579167);水利部行业专项资助项目(201301022);水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室开放基金资助(YK915003)

作者简介:王 涵(1994—),男,硕士生.研究方向:生态护坡技术.

* 通信联系人 E-mail:czhou@scu.edu.cn

effect was the most obvious and the residual strength was also the largest. It was indicated that proper inclination of roots may enhance the synergistic effect between roots and soil, then the strength of root-soil mass could be improved. The ductile deformation characteristics of root-soil system could help improve the safety of the slope. This research results is valuable for vegetated slope engineering practice.

Key words: shallow landslide; vegetated slope; root angle; shear strength; grass root; shrub root

西南地区多为丘陵及山地地貌,下层多为岩层或硬土层,上覆松散土层主要是粉质黏土、砂土及碎石土,容易形成浅层滑坡^[1]。鉴于砌石挡墙、混凝土格构梁等传统护坡方法用于浅层滑坡的预防及治理时存在成本高、耐久性差、不美观等缺点,植被护坡在浅层滑坡治理中被越来越广泛地使用^[2]。

关于植被与土体的协同作用,特别是根系对土体强度的影响,国内外学者做了一些探索研究工作,建立了根系与土体协同作用的力学模型。Wu 等^[3]提出 W-W 模型,认为根系对土体强度的提高与根系的平均抗拉强度及其截面积有关,但此模型假定所有根系同时发生断裂,这与实际不符,导致计算结果偏大。Fan 等^[4]考虑根系的拉伸、滑动及断裂等力学响应,建立位移模型,考虑不同响应下根系对土体强度的贡献,比 Wu 模型更加合理。另外,还有 Pollen 的纤维束模型及 Schwarz 的根束增强模型^[5-7],虽然计算更加精确,但是过于复杂导致应用并不广泛。因此学术界目前仍多采用修正的 Wu 模型进行计算^[8]。

此外,关于根系固土作用的现场试验及室内试验研究,胡其志等^[9]利用狗牙根进行不同含根量的根系混合土试样的直剪试验,得出相应组合的最优含根率;刘治兴等^[10]通过试验发现,不同生长期植物根系对土体强度的贡献不同,且随着生长日期的增长植物根系对土体强度的贡献增加;刘德涛等^[11]研究了根系对可液化砂土的加固作用,证实一定密度的植被对液化有明显的抑制作用,且根系越长抑制作用越明显。关于植物根系在土体内部不同分布方式对土体抗剪强度影响研究方面,相关学者等也做了大量工作^[12-17]。

分析国内外文献,发现目前有关根系在剪切面上的相对倾角对土体抗剪强度影响的研究还很少。为此,开展考虑植物根系倾角对土体抗剪强度影响的剪切试验研究,分析根系在剪切面上的不同倾角对土体强度的影响十分必要。

1 试验准备

1.1 试验设计

定义植物根系与剪切面夹角 α 值表示根系的倾

角,如图 1 所示。注意 α 值并非根系与水平面的夹角。

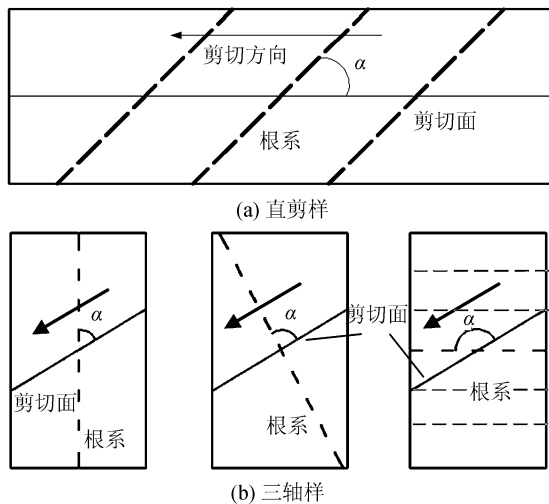


图 1 α 值及埋根方式

Fig. 1 Diagram of inclination of the roots with respect to the failure surface

直剪和三轴试验设备分别采用 ZJ 型应变控制式直剪仪及 TSZ30-2 型三轴试验仪。直剪试验采用如图 1(a) 所示的根-土混合体进行饱和固结快剪,根系与剪切面的夹角 α 取 45° 、 90° 及 135° 。为与直剪试验对比,三轴试样进行固结不排水剪切试验(CU 剪),分别采用竖直、倾斜及水平的埋根方式,分别对应直剪试验中 α 取 45° 、 90° 及 135° 的情况,如图 1(b) 所示。

保持每个试样含根率大致相同的前提下,在直剪试样与剪切方向一致的中轴线上安置 3 根根系;三轴试验中根系均都在同一平面平行放置。不仅增加了试验的可操作性,而且一定程度上也方便突出根系与剪切面夹角 α 值变化对土体抗剪强度的影响。

1.2 土料制备

采用人工制备土料,将自然风干砂土过 2 mm 筛,再向其中掺入 10% 的黏土。将所得混合土料放入烤箱中,在 108°C 温度下烘干。取出烘干土料,利用比重瓶试验测量土粒比重。在不同含水率情况下进行轻型击实试验,得到土料的最优含水率及最大干密度及相应的孔隙比,结果见表 1,土料级配曲线见图 2。

表 1 土料物理参数
Tab.1 Physical parameters of soil sample

指标	$\gamma/$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	G_s	e	$w_{op}/$ %	$\rho_{d \max}/$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
数值	22.05	2.76	0.40	11.93	1.97

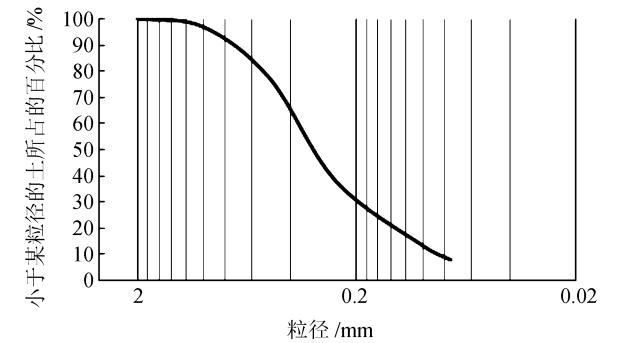


图 2 土料级配曲线

Fig.2 Gradation curve of soil sample

为保证试验质量,加大根系与土体的协同作用,采用最大干密度进行制样。向烘干的土料中按照最优含水率掺入 11.93% 的水,分级逐次加土和水以保证水和土混合均匀,充分搅拌后,将土料转入密封的保鲜袋中静置一夜。

1.3 根系制备

试验采用人造根系,通过初期试验对比细竹签、牛皮纸绳及爬山虎茎,直剪试验最终采用爬山虎茎制备人工根系。人工根系制备时,采集新鲜的成年爬山虎茎,去掉枝叶,选取顺直部分剪成 60 mm 左右的小段,然后利用美工刀将其两端分成 4~6 瓣,中间留 20 mm 的完整部分,主茎直径约为 1.5 mm,如图 3 所示。人造根系的两端可以模拟植物细根在土体内部的锚固作用,中间部分对应模拟穿过剪切面的主根,从而模拟草根加固土体。



图 3 直剪试验人造根系

Fig.3 Artificial root in DST

三轴试验采用细竹签制备人工根系,可反映灌木根系加固土体的情况。人工根系制备时,将竹箴削成直径 1 mm、长 12 cm 的细竹签,表面稍刮毛,然

后放入水中浸泡软化。处理之后的细竹签性质与灌木根系十分相似。

2 不同根系倾角的剪切试验

2.1 直剪试验

2.1.1 直剪试样制备

根据土体密度,再结合环刀体积,称取相应重量的人工土样。利用推土器将土完全压入环刀当中,并保持压力 3 min;取出已经初步制好的土样,用细铁丝在土样中轴线上按照预先选定的角度钻孔,孔径较人造根系的直径稍小;将人造根系缓缓插入孔中并注意不要带出土粒。在人造根系中间部分完全嵌入土样后,将其两头露出的分叉部分尽量分开,如图 4 所示。将环刀放入推土器中压实,并保持压力 5 min,使试样内部应力重新分配并消散。按照以上方式制作 45°、90°、135°夹角的试样各 3 个,并制作 3 个素土试样,共计 12 个试样;利用饱和器及真空缸对试样进行饱和。3 个试样为一组,在试样上下两面各放置一片湿滤纸;试样之间需放置透水石,用饱和器夹紧。将所有试样的饱和器放入干净的真空缸内,抽真空 4 h。抽真空后打开真空缸阀门,向缸内吸水,直到预计所有饱和器都被淹没为止。关闭阀门及真空泵,静置饱和一夜。

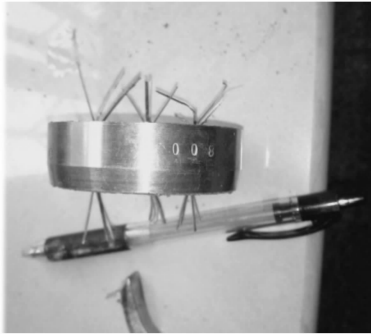


图 4 直剪试样

Fig.4 Root-soil sample

2.1.2 直剪试样安装及剪切

取 3 个根系与剪切面夹角 α 值一样的试样为一组,共 4 组试样(素土、 $\alpha = 45^\circ$ 、 $\alpha = 90^\circ$ 、 $\alpha = 135^\circ$)。试样安装时环刀刀口向上,轻轻旋转试样至根系中点连线与剪切方向平行为止,将试样缓缓推入剪切盒中,装好后加压。需注意的是,试验研究对应的是浅层滑坡情况,试验的正应力不应过大,而直剪试样的尺寸较小,应力梯度不能太小,选取 50、100 和 150 kPa 的正应力。加压 5 min 之后,用洗耳球向下剪切盒内注水至液面淹没剪切面。因为试验土料的主要成分为砂土,次固结效应较小,故不测量其压缩

量,加压半天即可认为试样变形稳定。待试样固结稳定之后,打开电机,以 0.8 mm/min 的速度对试样进行剪切,直到读数达到稳定或者位移达到 6 mm 为止。

2.2 三轴试验

2.2.1 三轴试样制备

试样直径 6.18 cm,高 12.4 cm,分 6 层击实。竖直及倾斜试样中放置 3 根长 12 cm 的人造根系,保证同一类型试样中根系均在同一平面上且倾角相同。水平试样击实时在两层之间放置长 6 cm 的人造根系,共 5 根,并保证在同一纵剖面上。制取每种类型的试样各 4 个,共 12 个试样。三轴试验不设置素土对照样。随后进行真空饱和,抽气 4 h 后浸水,并静置一夜。

2.2.2 三轴试样安装及剪切

由于没有前述直剪试验的安装角度要求,三轴试样饱和后正常安装即可。安装完成后注水加压,对同一组试样围压分别取 25、50、100 和 200 kPa。静置直至固结完成。固结完成之后,启动电机开始施加轴向荷载,待量力环读数出现峰值之后继续施加 3%~5% 的轴向应变。试样的破坏型态见图 5。

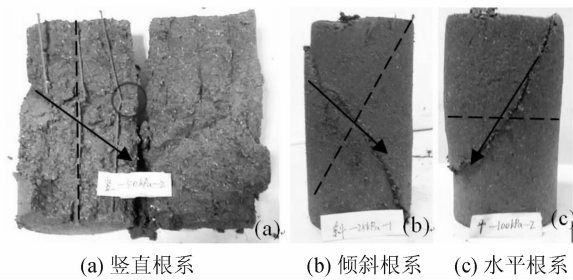


图 5 根系复合土三轴试样破坏型态

Fig. 5 Rooted samples after triaxial shear tests

3 不同根系倾角的剪切试验结果与分析

3.1 直剪试验

整理试验数据,得到不同的 α 值对应的剪应力-剪切位移曲线如图 6 所示。分析图 6 可以得出以下规律:

1) 含有根系的土体较不含根系的土体,峰值强度有明显提高,残余强度也均有一定的提高。其中,峰值强度大体上表现出 $\tau_{p素土} < \tau_{p90^\circ} < \tau_{p45^\circ} < \tau_{p135^\circ}$ 的规律。

2) 根系、土体混合试样的剪应力-剪切位移关系呈现出应变软化的特征,以 $\alpha = 45^\circ$ 软化最为明显。随着 α 值增加,应变软化趋势逐渐减弱,且当根系与剪切面夹角 α 达到 135° 时其软化趋势几乎不

明显。整体而言,残余强度表现出 $\tau_{r素土} < \tau_{r90^\circ} \approx \tau_{r45^\circ} < \tau_{r135^\circ}$ 的规律。

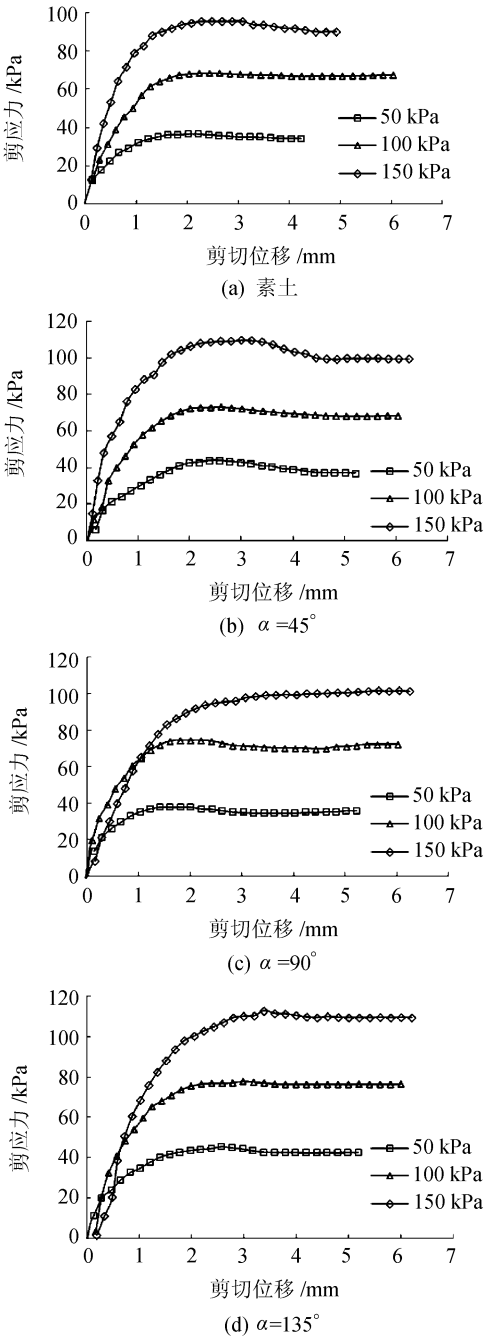


图 6 根系与剪切面不同夹角 α 试样的剪应力-剪切位移曲线

Fig. 6 Shear stress-shear displacement curves of samples with different α

图 7 给出了试验获得的抗剪强度包线,据此得到不同的根系倾角 α 对应的抗剪强度参数 c 、 φ 值见表 2。可以发现含根系土体较素土的 c 、 φ 都有一定的提高;其中 $\alpha = 90^\circ$ 时效果最弱, $\alpha = 135^\circ$ 时效果最好。含根系的不同试样组较素土的强度提高百分比如表 3 所示。

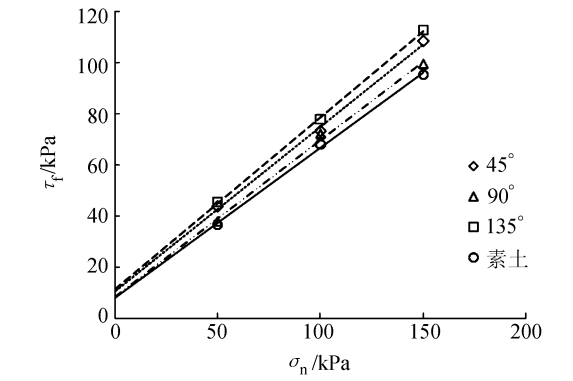


图 7 直剪试验不同 α 值根 - 土混合体抗剪强度

Fig.7 Shear strength of root-soil samples with different α in direct shear test

表 2 直剪试验各组试样 c 和 φ 值

Tab.2 Values of c and φ of different samples in direct shear tests

α	c/kPa	$\varphi/(\text{^\circ})$
素土	7.87	30.46
45°	10.34	32.96
90°	8.20	31.67
135°	11.55	33.94

表 3 直剪样含根系土较素土 c 和 φ 值增量百分比 (Δc 、 $\Delta \varphi$)

Tab.3 Values of Δc and $\Delta \varphi$ of the root reinforced soil in comparison with that of the soil

α	$\Delta c/\%$	$\Delta \varphi/\%$
45°	31.38	8.21
90°	4.19	3.97
135°	46.76	11.42

根据表 3 可以看出,对比素土, 含根系土的 c 值提高较大,而 φ 值提高的百分比比较小;对于根系与剪切面夹角 $\alpha = 90^\circ$ 和 $\alpha = 45^\circ$ 的试样而言, φ 值的提高几乎可以忽略。 c 值受根系作用影响较大,其中 $\alpha = 90^\circ$ 时 c 值提高了 4.19%, $\alpha = 45^\circ$ 和 $\alpha = 135^\circ$ 时, c 值分别提高了 31.38% 和 46.76%。

为进一步论证不同 α 值对土体强度的影响,将不同正应力下各种根系倾角试样的剪应力 - 剪切位移曲线绘于图 8。

由图 8 可知:

- 1) 剪切初期,即当位移小于 1.5 mm 左右时,含根系土与素土的曲线变化趋势基本相同,数值也大致相近。但是当位移达到 1.5 mm 后,根系的作用开始凸显,含根系土样内部剪力持续上升,素土样则很快达到峰值并出现应变软化。
- 2) 变形初期, $\alpha = 90^\circ$ 和 $\alpha = 45^\circ$ 的试样承受的剪应力要大于 $\alpha = 135^\circ$ 试样承受的剪应力。随着变形的增加, $\alpha = 135^\circ$ 试样承受的剪应力逐渐超越前述两种情况所承受的剪应力,最终表现出 $\alpha = 135^\circ$ 对应试

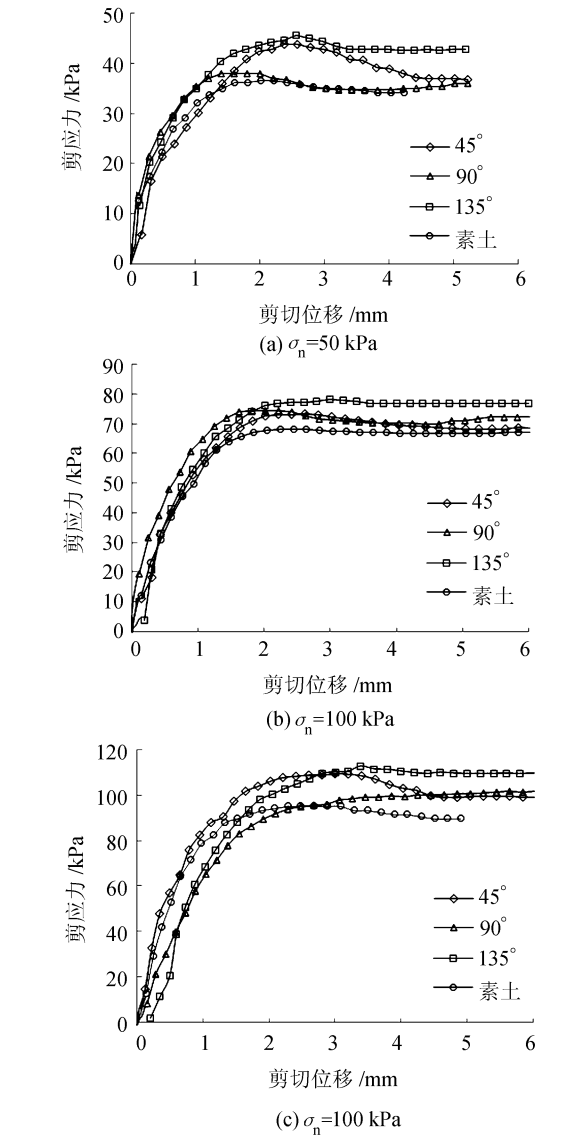


图 8 不同正应力下各种试样剪力 - 剪切位移曲线

Fig.8 Shear stress-shear displacement curves of samples under different normal stress

样的峰值强度大于另外两种试样。对 $\alpha = 90^\circ$ 的试样而言,前期变形中土体先被剪坏,此时根系的锚固作用并未得到充分发挥,故其峰值强度较低。值得注意的是,随着变形增加,特别是当变形达到 5 mm 后,土样的残余强度出现上升趋势,说明此时根系处于拉剪状态,其锚固作用得到了充分发挥。当 $\alpha = 45^\circ$ 时,根系一直处于压剪状态,虽然根系对土体也有一定的加筋作用,但是当剪切位移达到 2.5 mm 后,根系与土体的协同作用遭到破坏,试样强度迅速降低。当 $\alpha = 135^\circ$ 时,根系一直处于拉剪状态,根系对土体的锚固作用得到充分发挥;与其他试样相对比可以发现,此时变形越大根系对土体的加强越明显。

3) 变形后期, $\alpha = 135^\circ$ 时试样的残余强度较其他情况要高得多, $\alpha = 90^\circ$ 和 $\alpha = 45^\circ$ 的残余强度趋

于一致,但其数值仍然高于素土的残余强度。显然,实际工程中植物根系提高滑坡体的残余强度,对避免二次滑坡发生有重要贡献。

3.2 三轴试验

绘制不同围压下三轴试验应力-应变曲线,见图 9。

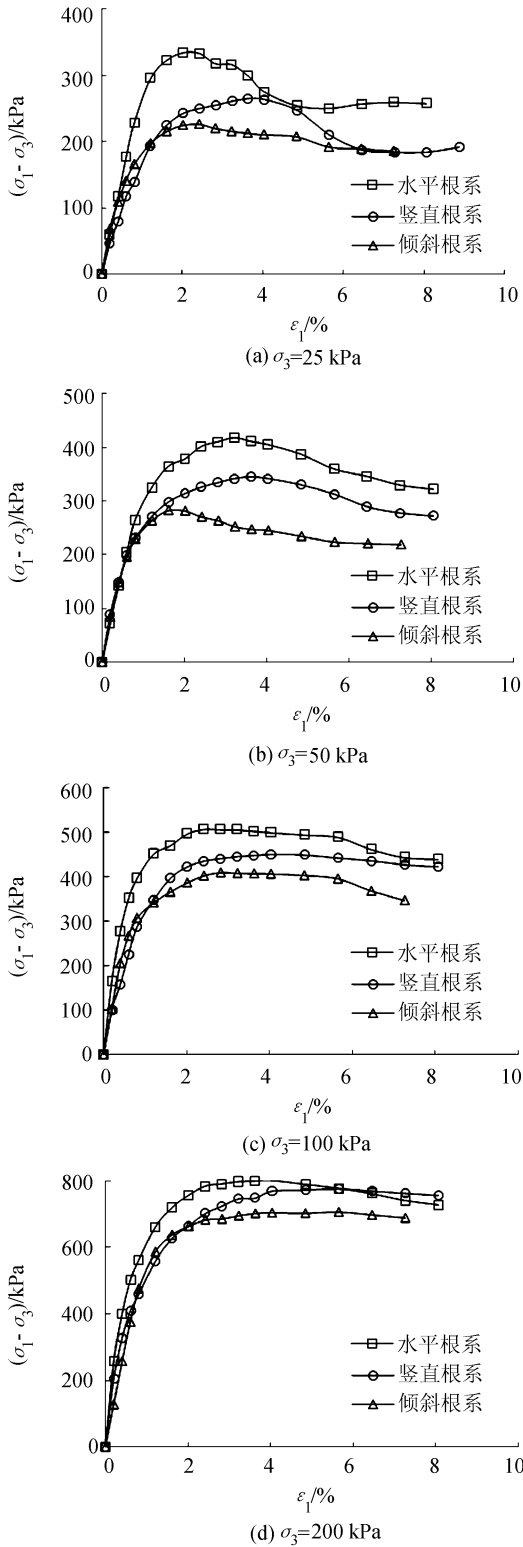


图 9 三轴试验应力应变曲线
Fig. 9 Stress-strain curves of triaxial shear tests

由图 9 可以看出,3 种不同的根系倾角情况下三轴试验获得峰值强度的变化趋势与直剪试验大体相同,峰值强度倾斜试样($\alpha \approx 90^\circ$) < 竖直试样($\alpha \approx 45^\circ$) < 水平试样($\alpha \approx 135^\circ$)。但是残余强度表现出的趋势与直剪试验略有区别,三轴试验中倾斜根系($\alpha = 90^\circ$) 并没有表现出较高的残余强度,也没有表现出回升趋势,且 3 种类型试样破坏后强度下降均比较明显,这可能是由于人造根系在土样内部发生错动造成的。此外,三轴试验再次验证了当根系与剪切面夹角 $\alpha = 135^\circ$ 时根系对土体的加固作用最为明显, $\alpha = 45^\circ$ 次之, $\alpha = 90^\circ$ 最弱。

利用 Mohr 圆作图法得到的三轴试样强度参数见表 4。

表 4 三轴试样强度参数

Tab. 4 Values of c and φ of different samples in triaxial shear tests		
试样	c/kPa	$\varphi/(^\circ)$
素土(直剪)	7.87	30.46
竖直	38.90	36.16
倾斜	37.80	35.48
水平	66.40	35.72

分析表 4 可知:

- 1) 相较于素土,三轴试验中含根系土体的 c 、 φ 值均有一定程度的提高,而且提高的程度远大于直剪试样(虽然三轴试验抗剪强度指标不宜与直剪试验直接比较)。这是因为竹签抵抗变形的能力强于爬山虎茎;加上试样的尺寸效应,三轴试样中土体与根系的接触强度大于直剪试样,现实情况下灌木根系对土体的加固能力的确大于草本根系^[18]。
- 2) 含根系试样 c 值远大于素土,且水平试样($\alpha \approx 135^\circ$) 尤为明显,提升了约 8 倍。较竖直和倾斜试样而言,水平试样 c 值也提升近 1 倍。三轴试验也证实植被根系与剪切面夹角对根系的固土作用有直接的影响。
- 另外,试验过程中没有出现根系被拉断的情况,但是图 5(a) 中标记出来的位置显示了三轴样中根系的变形情况。在通过剪切面的部位出现了扭曲,说明根系的确承担了相当大的剪切力,意味着在有限元计算的时候,当根系刚度比较大的时候就可能不宜再把根系通过杆单元模拟了。

4 结 语

- 通过试验及数据分析,可以得到以下结论:
- 1) 根系与剪切面的夹角 α 值对土体抗剪强度

有明显的影响。对于土体强度的提高宏观上表现出 $\Delta\tau_{p90^\circ} < \Delta\tau_{p45^\circ} < \Delta\tau_{p135^\circ}$ 。当 α 值达到 135° 的时候,土体的 c 值较素土可以提高近 50%,采用灌木根系加固时甚至可以达到 800%。如果在潜在的浅层滑坡区域构建植被护坡,可以通过特定的种植方式和水肥供给影响根系的生长形态,使其与滑坡剪切面的夹角尽量呈钝角,从而增加土体强度,预防浅层滑坡的发生。

2) 根系的作用需要一定的位移才能得到充分体现。因此宜采用柔性护坡与植被护坡相结合的工程措施,在释放坡体变形的同时发挥根系的锚固作用,从而保持浅层滑坡体的稳定。例如在石笼挡墙护脚的坡面上种植植被,由于乔木锚拉石笼挡墙^[19]允许边坡一定的变形,这就给根系发挥锚固作用提供了变形空间,同时减小了滑坡推力或者石笼挡墙上的土压力。

3) 含根系土体的残余强度普遍高于素土。直剪试验中 $\alpha = 135^\circ$ 的试样几乎没有应变软化趋势,也即这种情况下由于根系和土体的协同作用,土体经过较大的变形依然能够保持较高的强度和延性破坏的特征,在实际工程中有重要应用价值。

参考文献:

- [1] Yang Yonghong, Wang Chenghua, Liu Shuzhen, et al. Experimental research on improving shear strength of soil in surface landslide by root system of different vegetation types [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007, 14 (2): 233 - 235. [杨永红, 王成华, 刘淑珍, 等. 不同植被类型根系提高浅层滑坡土体抗剪强度的试验研究[J]. 水土保持研究, 2007, 14 (2): 233 - 235.]
- [2] 周德培, 张俊云. 植被护坡工程技术 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- [3] Wu T H, Mcomber R M, Erb R T, et al. Study of soil-root interaction [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1988, 114 (12): 1351 - 1375.
- [4] Fan C C. A displacement-based model for estimating the shear resistance of root-permeated soils [J]. Plant Soil, 2012, 355 (1/2): 103 - 119.
- [5] Pollen B N. Temporal and spatial variability in root reinforcement of stream banks: Accounting for soil shear strength and moisture [J]. Catena, 2007, 69 (3): 197 - 205.
- [6] Pollen B N, Simon A, Thomas R E. The reinforcement of soil by roots: Recent advances and directions for future research [J]. Treatise on Geomorphology, 2013, 12 (3): 103 - 127.
- [7] Schwarz M, Cohen D, Or D, et al. Spatial characterization of root reinforcement at stand scale: Theory and case study [J]. Geomorphology, 2012, 171/172 (10): 190 - 200.
- [8] Tian Jia, Cao Bing, Ji Jinnan. Research progress of root reinforcement models [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31 (21): 209 - 219. [田佳, 曹兵, 及金楠. 植物根系固土作用模型研究进展 [J]. 中国农学通报, 2015, 31 (21): 209 - 219.]
- [9] Hu Qizhi, Zhou Zheng, Xiao Benlin, et al. Experimental research on relationship between root weight and shear strength in soil [J]. Soil Engineering and Foundation, 2010, 24 (5): 85 - 87. [胡其志, 周政, 肖本林, 等. 生态护坡中土壤含根量与抗剪强度关系试验研究 [J]. 土工基础, 2010, 24 (5): 85 - 87.]
- [10] Liu Zhixing, Yang Jianying, Yang Yang, et al. Research on the root-soil composite anti-shearing strength on expressway slope in different plant protection measures [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24 (4): 631 - 637. [刘治兴, 杨建英, 杨阳, 等. 高速公路不同植物防护边坡根土复合体抗剪能力研究 [J]. 生态环境学报, 2015, 24 (4): 631 - 637.]
- [11] Liu Taode. Reinforcement effect of root for liquefiable sandy soil and research on influence factors [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. [刘涛德. 根系对可液化砂土的加固效果及影响因素的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.]
- [12] Gai Xiaogang, Chen Lihua, Jiang Kunyun, et al. Shear characteristic research on root-soil composite in four kinds of roots of trees and different root buried ways [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2014, 50 (9): 105 - 111. [盖小刚, 陈丽华, 蒋坤云, 等. 4 种乔木根系不同埋根方式根 - 土复合体的抗剪特性 [J]. 林业科学, 2014, 50 (9): 105 - 111.]
- [13] Xiao Hongbin, Zhao Liang, Li Zhenyu, et al. Experimental

study on vetiveria zizanioides root system distribution and tensile strength[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2014,34(3):6-10. [肖宏彬,赵亮,李珍玉,等. 香根草根系的分布形态及抗拉强度试验研究[J]. 中南林业科技大学学报,2014,34(3):6-10.]

[14] Gray D H, Al-Refeai T. Behavior of fiber-versus fiber-reinforced sand[J]. Journal of Geotechnical Engineering,1986,112(8):804-820.

[15] Comino E, Druetta A. The effect of poaceae roots on the shear strength of soil in the Italian alpine environment [J]. Soil and Tillage Research,2010,106(2):194-201.

[16] Song Hhengchuan. Study on the distribution and mechanical properties of four tree species in beichuan county[D]. Beijing:Beijing Frosty University,2013. [宋恒川. 北川县四个树种根系的分布及力学性能研究[D]. 北京:北京林业大学,2013.]

[17] Wang Fang. Root spatial distribution characteristics of six kinds of shrub and application in the soil bioengineering [D]. Beijing:Beijing Frosty University,2006. [王芳. 六种灌木根系空间分布特征及其在土壤生物工程中的应用[D]. 北京:北京林业大学,2006.]

[18] Jiang Kunyun. Mechanism of the microstructure of a single root of the tensile properties of plant root system[D]. Beijing:Beijing Frosty University,2013. [蒋坤云. 植物根系抗拉特性的单根微观结构作用机制[D]. 北京:北京林业大学,2013.]

[19] Zeng Zi, Zhou Cheng, Wang Leiguang, et al. Bioengineering stabilization of slope via rock-cable-gabion net flexible system[J]. Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition),2013,45(Supp 1):63-66. [曾子,周成,王雷光,等. 基于乔灌木根系加固及柔性石笼网挡墙变形自适应生态护坡[J]. 四川大学学报(工程科学版),2013,45(增刊1):63-66.]

(编辑 李轶楠)

引用格式:Wang Han,Zhou Cheng,Liu Wei,et al. Shear test for root reinforced soil samples considering the inclination of roots [J]. Advanced Engineering Sciences,2017,49(Supp 1):81-88. [王涵,周成,刘伟,等. 植物根系倾角对土体抗剪强度影响试验研究[J]. 工程科学与技术,2017,49(增刊1):81-88.]