

椰丝纤维长度对土体抗剪强度和抗压强度的影响

吕津宜¹, 陈济丁², 孔亚平², 陶双成², 赵佳愉³, 李金波^{1,4}, 宋桂龙^{1,4*}

(1. 北京林业大学草业与草原学院, 北京 100083; 2. 交通运输部科学研究院, 北京 100029;

3. 中外园林建设有限公司, 北京 100040; 4. 国家林业草原运动场与护坡草坪工程

技术研究中心, 北京 100083)

摘要:【目的】探究在客土喷播基材中添加不同长度纤维材料对土体抗剪强度和抗压强度的影响。

【方法】采用控制变量的试验方法, 以不同长度(1、2、3、4、5 cm)的椰丝纤维和砂土为试验材料, 按0.4%(w/w)的质量比混合后进行了室内三轴试验和无侧限抗压试验。【结果】1)各长度纤维加筋土在各国压下的主应力差峰值强度和抗压强度峰值都大于无纤维加筋的素土; 2)随着纤维长度的增加, 主应力差峰值强度、内聚力、内摩擦角和加筋效果系数都呈现出先增加后减少的趋势, 且在长度为3~4 cm时, 强度达到峰值; 3)随着纤维长度的增加, 抗压强度峰值, 主应力差强度峰值及破坏后的残余强度都得到明显提升, 应力—应变曲线逐渐由应变软化型过渡为应变硬化型。【结论】掺量为0.4%、长度为3~4 cm的椰丝纤维可以有效提升土体的抗剪强度和抗压强度。

关键词:边坡修复; 椰丝纤维; 纤维长度; 抗剪强度; 抗压强度; 土体加固

中图分类号:S718.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2024)01-0158-10

DOI:10.13817/j.cnki.cyycp.2024.01.018



客土喷播是边坡植被恢复的一种常见的工程措施, 喷播基材中纤维材料的选择是纤维加筋技术在边坡植被恢复中的应用。喷播基材中加入的纤维材料主要通过材料自身表面凹凸不平的结构来增大表面摩擦力及与土壤颗粒的机械互锁, 从而提高土体稳定性。添加纤维后, 无论何种土壤的抗剪强度、抗压强度都有明显的提高, 特别是残余剪切强度, 植物纤维比人造纤维的效果更显著^[1]。国内外学者通过大量试验研究了不同因素对不同土壤类别纤维加筋效果的影响, 发现影响因素主要有3个: 1) 土体的组成与结构, 即土壤类型; 2) 纤维所处的环境条件, 包括纤维土的含水量和压实度等; 3) 纤维的种类、长度及掺量等参数^[2-3]。其中, 对纤维最优长度及掺量的研究逐渐成为研究热点。

国内外学者针对化学纤维和植物纤维进行大量的研究和应用, 多数研究表明不同土壤类型都存在着最优加筋长度和掺量^[4]。Prabakar和Sridhar^[5]通过在土中添加不同长度和掺量的剑麻纤维, 进行压实和三轴压缩试验, 结果表明土壤的破坏偏应力, 抗剪强度参数(C和 ϕ)均得到显著改善。Tang等^[6]研究了PP短纤维掺量对水泥土强度和力学作用, 结果表明纤维能有效提高抗剪、抗压强度, 且与掺量有很大关系。李丽华等^[7]用玻璃纤维加筋砂土, 结果表明纤维掺量和压实度对粘聚力的影响较大, 而对内摩擦角影响较小, 且最优的纤维掺量为0.4%。胡小庆等^[8]的研究表明, 当聚丙烯纤维含量为0.2%、纤维长度为2.5 cm时, 聚丙烯纤维加筋粉质黏土的效果得到最大程度的发挥。金曼等^[9]研究了玄武岩纤维和不同长径比的废弃PP纤维对砂浆力学性能的影响, 发现对砂浆的劈裂抗拉强度影响最为显著的是PP纤维的长径比, 且当长径比达到1 500时, 砂浆的抗拉性能最好。无论是PP粗纤维还是细纤维, 随所掺纤维长径比的增加, 混凝土拌合物的抗压、抗折、劈裂抗拉强度、坍落度等

收稿日期: 2023-02-11; 修回日期: 2023-03-19

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB2600100)

作者简介: 吕津宜(1998-), 女, 吉林延边人, 硕士研究生。

E-mail: 13161369977@163.com

*通信作者。E-mail: syihan@163.com

指标都呈现先增大后减小的趋势,而后趋于稳定^[10]。刘威等^[11]将玻璃纤维、聚丙烯纤维等合成纤维与椰丝、水稻秸秆等植物纤维加筋砂壤土进行对比研究,发现水稻秸秆、椰丝等纤维对土壤的粘附力和内摩擦角的贡献大于玻璃纤维、聚丙烯纤维;长度为0.01 m的玻璃纤维、聚丙烯纤维、水稻秸秆丝与椰丝均能有效提高薄层土壤的抗剪强度,且用量越大效果越明显。吴燕开等^[4]在土壤中加入0.4%的剑麻纤维,发现其内聚力可提高61%,并且随着纤维含量的增大,其内部摩擦角也随之增大。

在物理加固技术上,天然植物纤维作为物理加筋材料在改良土壤结构中的应用越来越广泛,深受人们关注。植物纤维具有耐久、质轻、无污染等特点,引入基材加固也可以提高抗压强度、抗剪强度^[12-13]和保水性^[14]。赵健等^[15]在棕榈/椰糠无土草坪生产的研究中发现,棕榈纤维制成的基质,土壤物理性能良好,营养元素含量丰富。龙荣^[16]对比了PET纤维、植物纤维(竹、麻、椰丝、棕榈)和矿物纤维(碳丝、玄武岩纤维)在土壤含量0.2%、0.4%、和0.6%时,对沙基根系层抗剪强度和草坪草生长的影响发现,纤维加入后对坪床的物理性能有改良作用,纤维比例在0.4%时效果最好;植物纤维对偏碱性的土壤pH有一定调节作用。在生长6个月时,碳丝、椰丝和麻纤维处理的草坪盖度较好,且草坪根直径显著增大。植物纤维能促进草坪草根系生长,且对土体的抗剪强度均有增大效果。

椰丝纤维作为一种可再生的环保材料,低密度、高强度和来源广泛的特性使其具有广阔的应用前景^[17-18]。同时椰丝纤维绿色环保的特性使得它在植

被护坡方面的应用更是具有得天独厚的优势。因此,本研究通过室内三轴试验和无侧限抗压强度试验,测定了不同长度椰丝纤维加筋土的抗剪强度及抗压强度,量化纤维长度对土体强度和应力—应变响应规律,为边坡客土喷播基材中纤维长度的选择提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

试验用砂土取自张家口市赤城县龙关镇三岔口村,风干后进行粒径分析,分析结果见图1。

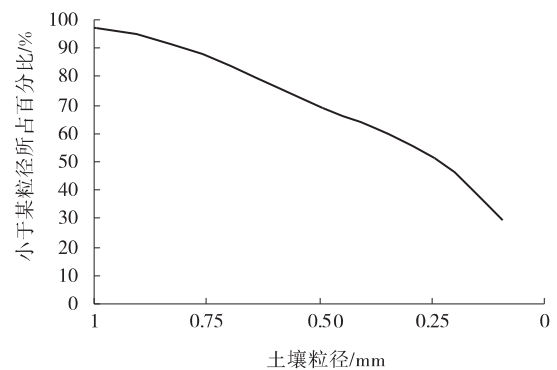


图1 试验用土壤粒径级配曲线

Fig. 1 Soil particle size grading curve for testing

加筋材料为椰丝纤维,通过万能试验机拉伸试验得到轴向应力—应变曲线,并对其进行均值化处理,得到椰丝的基本性能参数(表1)。椰丝纤维进行晾干处理后,用剪刀剪成5种不同长度,分别为1、2、3、4和5 cm,以不添加纤维的素土为对照(CK),每种处理在三轴试验和无侧限抗压试验中均设置5个重复。剪为不同长度的椰丝纤维,见图2。

表1 试验用纤维材料的基本性能

Table 1 Basic properties of experimental fiber material

纤维种类	直径/mm	密度/(g·cm ⁻³)	弹性模量/GPa	极限抗拉强度/MPa
椰丝	0.1~0.2	1.15~1.33	4~5	250

1.2 试验方法

1.2.1 三轴试验 1)试样的制备 试样的制备过程和仪器设备的操作参考土工试验方法标准^[19],称取试验所需土样,将风干土碾散过2 mm筛,按照质量比0.4%(w/w)称取相应的晾干的椰丝纤维(0、1、2、3、4、5 cm),在容器中搅拌均匀,使纤维与土体充分混合

平铺于不吸水的盘内;按照试验计划的含水量量取相应的水量(该试验所加水量为11%),用喷壶喷施,并用保鲜膜密封土盘,浸润一昼夜备用。测量浸润土样不同位置的含水量(至少两个以上),要求差值满足含水率测定的允许平行差值。

本试验的试样采用击实法制备,按照试件要求的

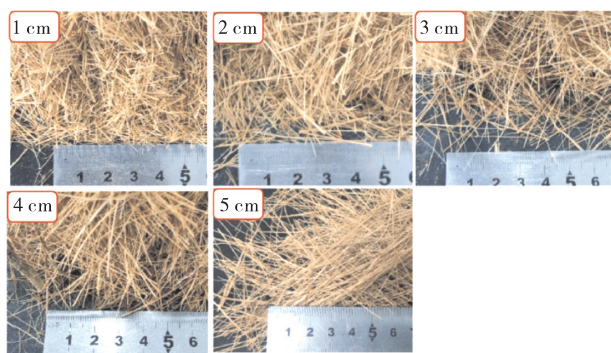


图2 剪到不同长度的椰丝纤维

Fig. 2 Coir fiber trimmed to different lengths

干密度和含水率称取制备好的纤维土,准确至0.1 g,将土样均分为3次加入到三瓣膜中,用击实锤击实,每层击实25次,共击实75次,完成1次试样制备过程。同时注意层与层之间要刮毛,目的是增大层与层之间的摩擦和咬合^[20]。将制备好的土样脱模,称重并记录,准确至0.1 g。

2) 试验设备与方法 为了研究不同长度纤维对土体的加筋作用,采用三轴压缩试验对根系层土体的抗剪强度参数进行测试。试验所用仪器为TSZ-6A型应变控制式三轴试验仪(南京土壤仪器厂有限公司,中国)。该试验仪器是通过向试样施加3个方向的应力,根据Mohr-Coulomb定律确定试样的粘聚力及内摩擦角。该型三轴仪由试验机部分与数据控制柜部分组成,试验机的 x 轴与 y 轴法向应力相等(即围压),通过液压实现,通过 z 轴的轴向压力使土体剪断。

按照SL237-1999土工试验规程进行试验,试验采用不固结不排水(UU)剪切。试验使用四级剪,每级应变增加5%,围压设置为50、100、150及200 kPa;试验中加载速率设置为0.8 mm/min,试样的破坏判断标准为:应力—应变关系曲线达到峰值点或达到20%轴向应变。

为评价纤维土体强度的影响,引入含根(加筋)效果系数的概念^[21],公式为:

$$R_e = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_s}$$

式中: R_e 含根(加筋)效果系数; $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 含纤维或根土破坏时的主应力差; $(\sigma_1 - \sigma_3)_s$ 素土时的主应力差。

1.2.2 无侧限抗压强度试验 1) 试样制备 试样的制备过程和仪器设备的操作参考土工试验方法标

准^[19],试样制备过程与三轴试验一致,试样尺寸也为 $H=12.5$ cm, $D=6.18$ cm。

2) 试验设备与方法 采用WED型电子万能试验机(无锡建仪仪器机械有限公司生产)。应变压缩速率设置为0.8 mm/min,不对试样施加任何周围压力,在竖向压力下使试样逐渐被压缩直至被破坏,停止试验,当应变达到10 mm时,若试样无明显破坏或应力衰减也停止试验。数据通过压力传感器和位移传感器传输到储存设备中,等试验结束后,再将试验数据导出到Excel,进行数据的统计和分析。

1.2.3 试验变量控制 影响土体抗剪强度的因素非常多,如土壤类型、容重、土壤含水量、加强材料含量、加强材料长度等。研究中如不根据研究目的对其他变量进行控制,将对试验造成较大误差。因此,根据本研究的研究目的,对纤维土体的含水量(w/w)、容重、加强纤维的平均长度和掺量(w/w)进行控制。

1) 含水量控制 土体含水量是影响土体抗剪强度的重要因素之一,在土力学和根土力学的研究中,都需要根据实际土体的含水量设计不同的含水量梯度进行试验研究。在预试验阶段设置多个含水量梯度(图3),从图中可以看出当含水量在11.0%左右时,土体的干密度达到最大,此时对应最高的土体强度,即最优含水量应控制在11.0%左右。

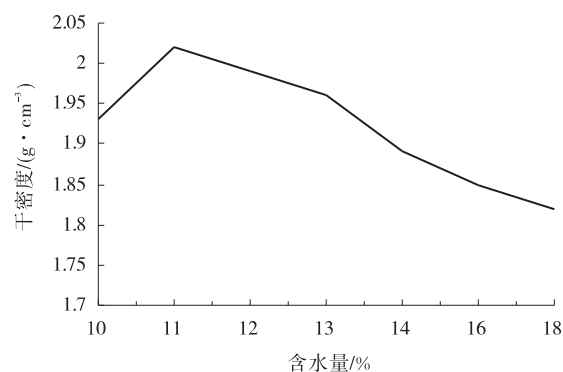


图3 不同含水量下的土体干密度

Fig. 3 Dry density of soil under different water content

2) 容重控制 为了保证试验样品最大干密度的一致,制备每个试样所使用的纤维土都要进行称重以保证质量一致,含水量控制一致,并对每个样品进行相同次数的压实。

3) 纤维长度及掺量的选择 本试验主要研究纤维的长度和掺量对土体稳定性能的影响,特在材料准备阶段,用剪刀将纤维材料剪切成均匀一致的长度,

分别为1、2、3、4和5 cm。掺量的控制主要在每次制备土样前都称取一定质量的风干土和椰丝,按照0.4% (w/w)的质量比进行均匀混合。

1.3 数据统计和分析

原始数据采用 Excel 2019 整理,运用 IBM SPSS26.0 软件对所测数据进行统计分析,用平均值和标准误差表示测定结果,Oringin 2021 软件作图。显著性水平设定为 $\alpha = 0.05$,对数据进行单因素方差分析 (one-way ANOVA),并利用最小显著差异法 (LSD) 检验不同数据组间的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 椰丝纤维长度对土体抗剪特性的影响

2.1.1 应力—应变曲线 不同长度椰丝纤维加筋土的三轴压缩试验的应力—应变曲线见图4。结果表明,各处理的峰值主应力差($\sigma_1 - \sigma_3$)随围压和应变的增加而增加,二者呈现双曲线关系。当主应力差值达到峰值强度时的应变 ϵ_1 也达到最大,在发生剪切断裂后,主应力差不随应变的增加而增加。主应力差峰值点处的轴向应变也随着纤维长度的增加而明显增加。

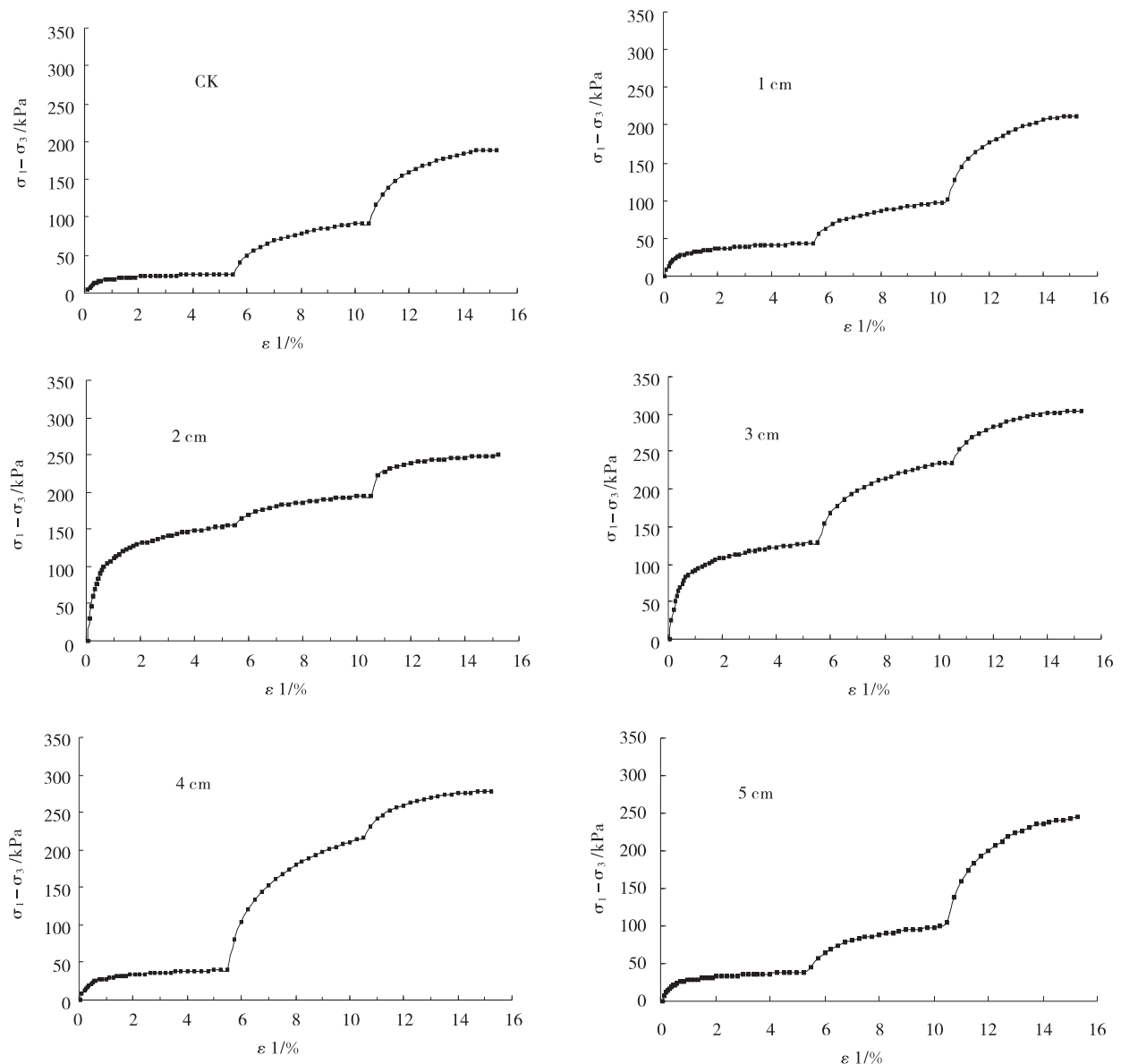


图4 不同长度椰丝纤维加筋土体的应力—应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of reinforced soil with different lengths of coir fibers

注:多次重复测试中的应力—应变曲线的趋势基本一致,因此仅以其中一次的测试结果进行展示。

各长度椰丝加筋土进行不固结不排水三轴剪切试验(UU),剪切完成后试样形态特征主要呈现出两头小,中间大的鼓状膨胀破坏,且随着纤维长度的增加,横向鼓起的幅度越小(图5),土样形态破坏越小。这从宏观的角度充分说明添加适宜长度的纤维,可以有限延缓土体形变。

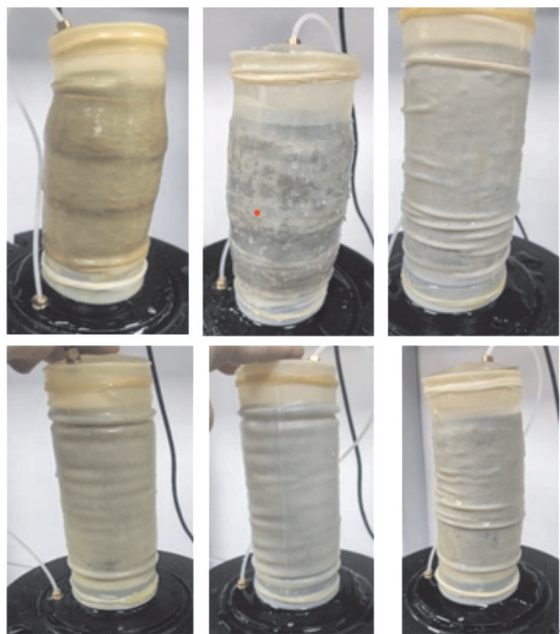


图5 不同长度椰丝纤维加筋土在三轴压缩试中的形态特性
Figure 5 Morphological properties of coir fiber reinforced soil of different lengths in triaxial compression test

2.1.2 峰值强度 不同长度椰丝纤维加筋土的主应力差随着围压的增加而增大。在50 kPa围压时,2 cm和3 cm纤维长度下的主应力差峰值强度显著高于其他各长度($P<0.05$),且2 cm显著高于3 cm;在100 kPa围压时,3 cm和4 cm纤维长度下的主应力差峰值强度显著高于其他各长度($P<0.05$),且3 cm大于4 cm,但3 cm和4 cm之间差异不显著;在150 kPa围压时,0 cm和1 cm纤维长度下的主应力差峰值强度显著低于其他各长度($P<0.05$),长度为4 cm时强度达到最大,且显著高于其他各处理长度;在200 kPa围压时,0 cm和1 cm纤维长度下的主应力差峰值强度显著低于其他各长度($P<0.05$),且0 cm又显著低于1 cm下的强度峰值,同时长度在4 cm时峰值强度达到最大并显著高于其他各处理长度。

当围压强度分别为50、100、150和200 kPa时,最大强度峰值对应的椰丝纤维长度分别为2、3、3和4 cm。整体上呈现出随着法向应力的增加,同一纤维

长度下的峰值强度也增加;随着纤维长度的增加,同一法向应力下的峰值强度呈现先增大后减小的趋势(图6)。

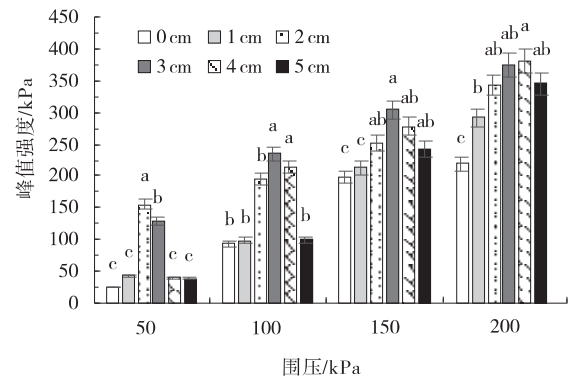


图6 不同长度椰丝纤维加筋土在不同围压下主应力差峰值强度对比
Fig. 6 Comparison of peak strengths of differential principal stresses in reinforced soil with different lengths of coir fibers at different envelope pressures

注:0 cm为不加纤维的素土,为本试验的对照CK;图中的主应力差峰值强度为多次试验的平均值。

2.1.3 加筋效果系数 所有围压下不同长度椰丝纤维的加筋效果系数都大于1,且随着纤维长度的增加呈现先上升后下降的变化趋势。其中,当围压为50 kPa时,效果系数变化幅度最大,在1.54(长度为5 cm)到6.20(长度为2 cm)之间;其次,当围压为100 kPa时,效果系数在1.05(1 cm)到2.52(3 cm)之间变化;当围压为150 kPa时,效果系数在1.07(1 cm)到1.53(3 cm)之间变化;当围压为200 kPa时,效果系数在1.33(1 cm)到1.73(4 cm)之间变化(图7)。

总体来看,各长度纤维效果系数大于1,说明土体中加入纤维能够有限提升主应力差峰值强度,其在

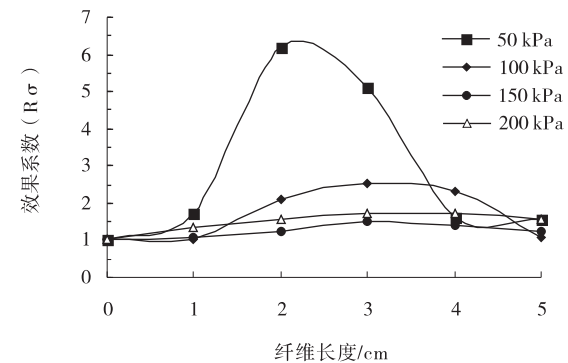


图7 不同围压下的加筋效果系数随长度变化曲线图
Fig. 7 Coefficient of reinforcement effect with length for different enclosure pressures

注:图中的加筋效果系数为多次试验数据的平均值,效果系数越大说明较素土提升作用越明显。

2~3 cm 之间时,土体提升效果最好。

2.1.4 土体抗剪强度参数 内聚力 C 随着纤维长度的增加呈现出先增大后减小的趋势,在纤维长度为 3 cm 时达到峰值 33.54 kPa;1 cm 到 5 cm 各处理内聚力较 CK 分别提升 5.57%、11.18%、16.69%、13.95 和 8.38 kPa,即提升百分比分别为 33.03%、66.33%、99.05%、82.76% 和 49.76%,且各处理之间均差异显著($P<0.05$)(表 2)。

内摩擦角 φ 随着纤维长度的增加呈现出先增大后减小的趋势,1 cm 到 5 cm 各处理内摩擦角较 CK 分别提升 0.53°、0.94°、1.35°、1.14° 和 0.73°,即分别提升为

表 2 不同长度椰丝加筋土体抗剪强度参数

Table 3 Shear strength parameters for coir reinforced soil of different lengths

处理	内聚力/kPa	内摩擦角/°
0 cm	16.85±0.41 ^f	25.16±0.12 ^d
1 cm	22.42±1.37 ^e	25.69±0.13 ^e
2 cm	28.03±0.86 ^e	26.10±0.15 ^b
3 cm	33.54±0.88 ^a	26.51±0.16 ^a
4 cm	30.80±0.91 ^b	26.31±0.10 ^{ab}
5 cm	25.23±0.76 ^d	25.90±0.17 ^{bc}

注:表中的内聚力和内摩擦角为多次试验的平均值, $P<0.05$ 。

2.09%、3.73%、5.36%、4.55% 和 2.91%。

2.2 椰丝纤维长度对土体抗压特性的影响

2.2.1 应力—应变曲线 随着纤维长度的增加,加筋土体的应力衰减越慢,即随着轴向应变的增加其应力出现明显下降的时间延迟,出现时间由快到慢的顺序为 0、1、2、3、4 和 5 cm。当纤维长度到达 4 cm 和 5 cm 的时候,应变到达 10 mm 时仍然没有出现明显的应力衰减(图 8)。

不同长度椰丝加筋土进行无侧限抗压试验结束后。土样整体呈现竖向劈裂破坏,形成纵而深的裂隙,随着纤维长度的增加,裂隙逐渐变宽,最后导致局部片块状脱落(图 9)。

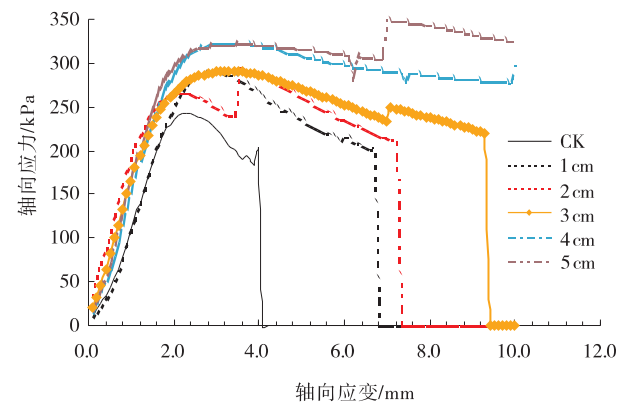


图 8 不同长度椰丝纤维加筋土体的应力—应变曲线

Fig. 8 Stress-strain curves of reinforced soil with different lengths of coir fibers

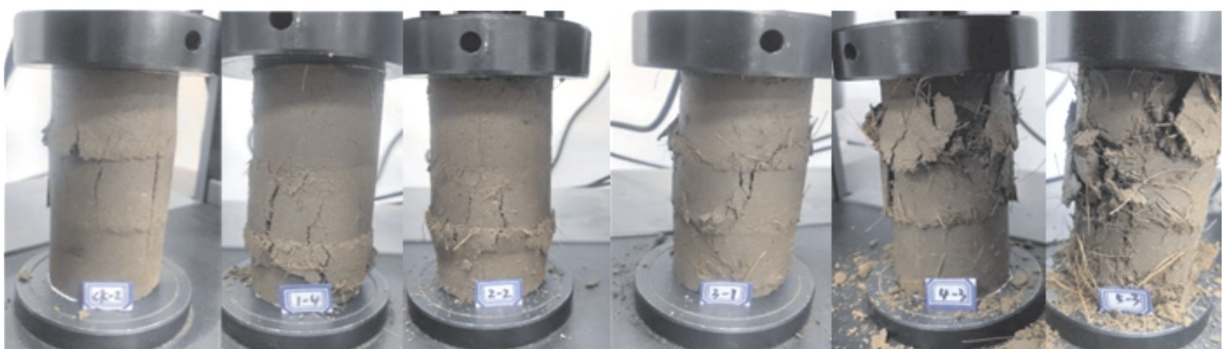


图 9 不同长度椰丝加筋土在进行无侧限抗压试验的形态特征

Fig. 9 Morphological characteristics of coir-reinforced soil of different lengths in performing unconfined compressive tests

2.2.2 抗压强度峰值 各纤维长度处理下抗压强度较 CK 都有提升,1、2、3、4 和 5 cm 椰丝纤维加筋土较 CK 分别提高了 11.57%、18.73%、22.56%、35.57% 和 37.38%,且 4 cm 和 5 cm 显著高于 1 cm 和 2 cm 长度($P<0.05$)(图 10)。

3 讨论

3.1 椰丝纤维长度对土体抗剪强度的影响

本研究表明,加入椰丝纤维的土体各处理的主应力差峰值强度在各个围压下都大于无纤维加筋的素

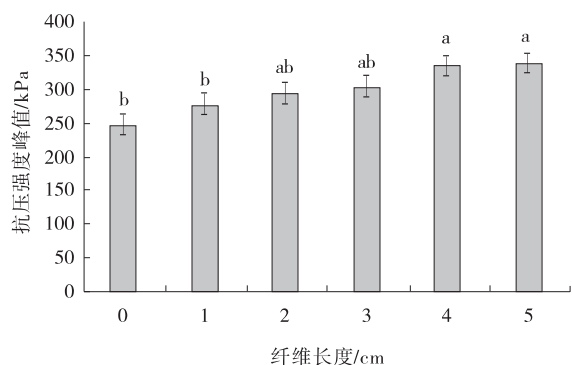


图 10 不同长度椰丝纤维加筋土体抗压强度峰值

Fig. 10 Peak compressive strength of reinforced soil with different lengths of coir fibers

土,不同长度椰丝纤维加筋土体的应力—应变曲线在不同围压下都呈现出双曲线形状。说明土体在受到外力干扰的初期,应力上升速度越来越快,以抵抗土体的鼓状膨胀破坏^[22],当到达峰值强度以后,土体发生形变,土壤颗粒和纤维材料发生新的重组,以抵消残余剪切强度的降低。在各围压下主应力差强度($\sigma_1 - \sigma_3$)随纤维长度的增加,呈先增大后减小趋势;随着围压的增加,主应力差峰值强度对应的纤维长度也由 2 cm 逐渐增加至 4 cm。说明椰丝具有明显的加筋作用,存在最优长度但效果的发挥与围压有关^[22]。加筋效果系数反映了不同长度纤维加筋土体在不同围压下峰值强度较素土提升的倍数,可以看出所有围压下不同长度椰丝纤维的加筋效果系数都大于 1,进一步说明对素土的提升作用,且随着纤维长度的增加呈现先上升后下降的变化趋势。

随着纤维长度的增加,加筋土逐渐由应变软化性过渡为应变硬化型,破坏韧性提高。主要原因是,短纤维(1~2 cm)难以在土体中相互搭接形成类似鸟巢的三维网状结构,或者说形成的三维网状结构体积较小且不稳定,很难起到一级纤维与二级纤维之间的力学传递作用,主要为单一纤维的拉筋作用^[23]。此时,纤维的束缚作用主要由纤维表面粗糙的结构与土颗粒之间摩擦力来承受,其破坏机理类似于素土,与长纤维相比,短纤维所能提供的拉伸应力比土内粘结力和摩擦力的损失要小得多^[24]。而 3~4 cm 的长椰丝纤维更容易与土体形成类似鸟巢的三维立体网状结构,加筋作用和交织作用可以得到充分的发挥,只有克服了空间网状结构的约束,土颗粒间及土颗粒与纤维间

才会发生较大错动。而发生错动后,土壤中的空隙会被新的土壤颗粒所填满,从而更容易形成新的三维网状结构,而筋土之间的空间限制效应依然存在,并且随着应力的增大而保持一定的强度,从而使其呈现出应变硬化的倾向^[24]。

本研究还发现,内聚力 C 随着纤维长度的增加呈现出先增大后减小的趋势,各长度处理较 CK 提升 33.03%~99.05%,且达到显著差异水平;内摩擦角 φ 随着纤维长度的增加虽然也呈现出先增大后减小的趋势,但较 CK 差异不显著^[22]。该结果与前人提出的根系—纤维对土体的加固作用主要体现在增加土体粘聚力的结果相一致^[22,25-26]。

同时,随纤维长度的增加,土壤与单根纤维间的摩擦面也会随之增大,因此,试样的强度也随之提高^[27]。同时笔者也认识到,在纤维掺量(w/w)一定的情况下,随着纤维长度的增加,单位体积中的纤维数量(根数)就会减少。短纤维主要是在数量上取胜,能够形成密集的网状效应但垂直加固效果较差;而长纤维拥有更高趋向于竖向加固的纤维数量,垂直加固效果好,但由于纤维总数少,在掺量不足时只能形成松散的网状效应。还有研究表明,对于任何特定百分比的纤维含量,干密度随着纤维长度的增加而降低;对于任何特定长度的纤维,干密度随着纤维含量的增加也会降低^[5]。这就要求我们在面对不同的土壤类型,不同的压实条件及不同含水量等不确定因素时,需要在纤维长度与掺量的选择上做到权衡。

在护坡草坪的实践应用中,椰丝纤维作为客土喷播基材的一种材料添加进土壤后,随着草本植物的生长,椰丝纤维对土壤的加筋作用会与根系生长形成复合效应,进而影响土体强度。纤维与沙缠绕为沙根基层提供基本的附加粘聚力,而随着根系的生长与缠绕,附加粘聚力会快速增加^[28]。椰丝纤维为土体提供的附加粘聚力显著高于碳丝,这不仅与草坪草根系的缠绕与串联密不可分,更与纤维力学、粗糙度、土体和纤维的摩擦力有关。椰丝纤维表面粗糙,与沙的摩擦力大,同时附加根系的盘结作用,因此对土体的稳固更加有利^[28]。

3.2 椰丝纤维长度对土体抗压强度的影响

无侧限抗压试验是在周围压力为 0($\sigma_3=0$)的情况下,施加轴向压力直至被压缩破坏的过程,主要反应

了土体的竖向加固能力。本研究表明,随着纤维长度的增加,纤维加筋土破坏强度和破坏后残余强度均增加且高于素土,且在长度为5 cm时达到最大。同时,抗压强度峰值对应的应变也随着纤维长度的增加而明显提高,说明土体的韧性明显得到提升,由应变软化型过度为应变硬化型^[24,29]。这与前边的三轴试验应力—应变曲线变化趋势一致。

从破坏形态来看,虽然长纤维能够提升土体的峰值前度和破坏后残余强度,但出现了越来越宽的裂隙和明显的片块状脱落现象,这是由于长纤维达到峰值强度时的应变程度远大于短纤维处理,所以表现出了如此特征。除此之外,还可能是由于随着纤维长度的增加,在土体中的分散性能变差,加筋不均匀,破坏了土样的完整性,容易形成局部软弱面^[29-30]。但这与长纤维有利于垂直加固效果并不冲突。

4 结论

1) 各长度纤维加筋土在各围压下的主应力差峰值强度和抗压强度峰值都大于无纤维加筋的素土,且都能有效提升土体在剪切及压缩破坏后的残余强度,说明加入椰丝纤维能够有效提升土体强度和韧性。

2) 随着纤维长度的增加,主应力差峰值强度、内聚力、内摩擦角和加筋效果系数都呈现出先增后减的趋势,且在长度为3~4 cm时强度达到峰值,说明纤维长度对土体稳定性的影响存在最优长度;且在最优长度时,主应力差峰值强度较CK分别提升6.2倍(50 kPa)、2.5倍(100 kPa)、1.5倍(150 kPa)和1.7倍(200 kPa)。

3) 随着纤维长度的增加,抗压强度峰值和主应力差强度峰值及破坏后的残余强度都得到明显提升。在椰丝长度为5 cm时,抗压强度较CK提升了37.35%,此时应力—应变曲线逐渐由应变软化型过渡为应变硬化型。

参考文献:

- [1] 李金和,郝建斌,陈文玲.纤维加筋土技术国内外研究进展[J].世界科技研究与发展,2015,37(3):319—325.
- [2] 唐朝生,施斌,高玮,等.含砂量对聚丙烯纤维加筋黏性土强度影响的研究[J].岩石力学与工程学报,2007(S1):2968—2973.
- [3] Tang C S, Shi B, Zhao L Z. Interfacial shear strength of fi-

ber reinforced soil[J]. Geotextiles&Geomembranes, 2010, 28(1):54—62.

- [4] 吴燕开,牛斌,桑贤松.随机分布剑麻纤维加筋土力学性能试验研究[J].水文地质工程地质,2012,39(6):77—81.
- [5] Prabakar J, Sridhar R S. Effect of random inclusion of sisal fibre on strength behaviour of soil[J]. Construction and Building Materials, 2002, 16(2):123—131.
- [6] Chaosheng Tang, Bin Shi, Wei Gao, *et al.* Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2007, 25(3):184—202.
- [7] 李丽华,万畅,刘永莉,等.玻璃纤维加筋砂土剪切强度特性研究[J].武汉大学学报(工学版),2017,50(1):102—106.
- [8] 胡小庆,洪柳,徐光黎,等.纤维含量及长度对纤维加筋土强度的影响研究[J].安全与环境工程,2015,22(2):139—143.
- [9] 金曼,金松浩.纤维长径比对混杂废弃纤维高强再生砂浆力学性能的影响[J].江西建材,2021(6):5—6.
- [10] 罗洪林,杨鼎宜,周兴宇,等.不同长径比聚丙烯纤维增强混凝土的力学特性[J].复合材料学报,2019,36(8):1935—1948.
- [11] 刘威,孙海龙,李绍才,等.加筋纤维类型及用量对薄层土壤抗剪强度的影响[J].中国水土保持,2011(10):58—60.
- [12] 张建华,张保全,王润喜,等.天水市4种典型树种根系的力学特性[J].甘肃农业大学学报,2012,57(4):129—136.
- [13] 姚婕.麦秸秆加筋土强度特性试验研究[D].西安:长安大学,2017.
- [14] 杨继位,柴寿喜,王晓燕,等.以抗压强度确定麦秸秆加筋盐渍土的加筋条件[J].岩土力学,2010,31(10):3260—3264.
- [15] 赵健,罗学刚,汪飞.棕榈/椰糠无土栽培基质理化性质比较及调节[J].中国农学通报,2016,32(12):71—76.
- [16] 龙荣,陈雨峰,宋桂龙.不同类型纤维材料对草坪根系的加强效果研究[C]//中国草学会.2018中国草学会年会论文集.中国草学会:中国草学会,2018:10.
- [17] Lee H V, Hamid S B A, Zain S K. Conversion of Lignocellulosic Biomass to Nanocellulose: Structure and Chemical Process [J]. The Scientific World Journal, 2014, 24:1—20.

- [18] Bordoloi S, Yamsani S K, Garg A, *et al.* Study on the efficacy of harmful weed species *Eichhornia crassipes* for soil reinforcement [J]. *Ecological Engineering*, 2015, 85: 212—222.
- [19] 中华人民共和国水利部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2019.
- [20] 蒋志琳, 王崇淦, 肖伟, 等. 纤维加筋土无侧限抗压强度试验及数值分析[J]. *铁道科学与工程学报*, 2020, 17(6): 1404—1410.
- [21] 陈丽华, 余新晓, 宋维峰. 林木根系固土力学机制[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 145.
- [22] 秦文帅, 李光范, 胡伟, 等. 椰壳纤维土的三轴试验研究[J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(10): 272—276.
- [23] 张金利, 蒋正国, 杨钢. 聚丙烯纤维红黏土力学特性试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(S1): 427—432.
- [24] 赵莹莹, 凌贤长, 张锋, 等. 纤维参数和围压对纤维加筋风沙土力学特性的影响[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(S2): 4426—4432.
- [25] 程洪, 张新全. 草本植物根系网固土原理的力学试验探究[J]. *水土保持通报*, 2002(5): 20—23.
- [26] 李良勇, 马炜迪, 曹宝珠. 以天然椰壳纤维加固的红黏土的力学性质研究[J]. *海南大学学报(自然科学版)*, 2020, 38(3): 304—308.
- [27] 钟汉林, 刘春辉, 张俊, 等. 随机分布剑麻纤维对砂土力学特性的影响[J]. *烟台大学学报(自然科学与工程版)*, 2019, 32(4): 391—396.
- [28] 陈雨峰. 纤维对足球场草坪根系层力学作用机制及草坪质量的影响研究[J]. 北京: 北京林业大学, 2021: 88.
- [29] 王生新, 柴寿喜, 王晓燕. 加筋条件和含水率对加筋土抗压强度和应力应变的影响[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2011, 41(3): 784—790.
- [30] 姜宇波, 柴寿喜, 魏丽, 等. 四种因素对纤维加筋盐渍土抗压性能的影响[J]. *岩土力学*, 2016, 37(S1): 233—239.

Effect of coir fiber length on shear strength and compressive strength of soil

LV Jin-yi¹, CHEN Ji-ding², KONG Ya-ping², TAO Shuang-cheng², ZHAO Jia-yu³,
LI Jin-bo^{1,4}, SONG Gui-long^{1,4*}

(1. School of Grassland Science, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. China Academy of Transportation Science, Beijing 100029, China; 3. Landscape Architecture Corporation of China, Beijing 100040, China; 4. Engineering and Technology Research Center for Sports field and Slope Protection Turf, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100083, China)

Abstract: 【Objective】Fiber material is one of the main materials for soil spraying in slope vegetation restoration. The aim of the study is to investigate the influence of the length of fiber material added to the soil spray-sown substrate on the shear strength and compressive strength of soil. 【Method】This paper adopted the test method of control variables. The indoor triaxial test and unconfined compression test were carried out by mixing coconut fiber and sand soil of different lengths (1, 2, 3, 4, 5 cm) at the mass ratio of 0.4% (w/w). 【Result】The results of the study showed that: (1) The peak strength of the principal stress difference and the peak compressive strength of each length treatment at each circumferential pressure were greater than those of the plain soil without fiber reinforcement, and both could effectively improve the residual strength of the soil body after shear and compression damage, indicating that the addition of coir fibers could effectively improve the strength and toughness of the soil body. (2) With the increase of fiber length, the principal stress difference peak strength, cohesion, internal friction angle and reinforcement effect coefficient all showed a trend of increasing and then decreasing, and the strength reached the peak at the

length of 3~4 cm. This fully indicated that there was an optimal length for the effect of fiber length on soil stability. (3) At the same time, the peak compressive strength, the peak principal stress difference strength and the residual strength after damage all increased significantly with increasing fiber length, and the stress—strain curve gradually changed from a strain—softening type to a strain—hardening type. 【Conclusion】 When the content of coir fiber is 0.4% and the length of coir fiber is 3~4 cm, the shear strength and compressive strength of soil can be effectively improved.

Key words: slope rehabilitation; coir fiber; fiber length; shear strength; compressive strength; soil reinforcement

(责任编辑 靳奇峰)