

文章编号:1673-9469(2020)04-0034-06

DOI: 10.3969/j.issn.1673-9469.2020.04.006

棕榈纤维加固黏土无侧限抗压强度试验研究

胡恬静¹,赵宁宁²,刘瑾^{1*},王颖¹,卜凡¹,祁长青¹

(1. 河海大学地球科学与工程学院,江苏南京211100;2. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司,浙江杭州310000)

摘要: 采用天然棕榈纤维加固黏土,通过一系列无侧限抗压强度试验,对不同加筋率和土体密度条件下棕榈纤维加筋黏土的抗压强度特性进行试验研究,并对其加固机理进行较为深入的分析。试验结果表明:棕榈纤维可以在很大程度上提高黏土的抗压强度特性。当含水率和土体密度恒定时,加筋黏土的抗压强度随加筋率增加而不断增加;当含水率与加筋率恒定时,加筋黏土的抗压强度随土体密度增大而不断增大。这是由于棕榈纤维与土颗粒交织错列,形成空间网状结构,同时棕榈纤维与土体加筋过程中产生的弯曲变形,可以有效地促进土颗粒之间的紧密接触,从而阻挡土体位移,提高土体强度。

关键词: 棕榈纤维;黏土;加筋率;密度;抗压强度

中图分类号: TU422

文献标识码: A

Research on Unconfined Compressive Strength of the Clay Reinforced by Palm Fiber

HU Tianjing¹, ZHAO Ningning², LIU Jin^{1*}, WANG Ying¹, BU Fan¹, QI Changqing¹

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 211100, China;

2. China Electrical Construction Group East China Survey and Design Research

Institute Limited, Hangzhou, Zhejiang 310000, China)

Abstract: In this paper, natural palm fiber was used to reinforce clay. Through a series of unconfined compressive strength tests, the compressive strength characteristics of palm fiber reinforced clay at different rates of reinforcement and soil density were studied experimentally, and the reinforcement mechanism was analyzed profoundly. The results show that palm fiber can improve the compressive strength of clay to a large degree. When water content and soil density are constant, the compressive strength of reinforced clay increases with the increase of reinforcement ratio. When the moisture content and reinforcement ratio are constant, the compressive strength of reinforced clay increases with the increase of soil density. This can be attributed to that palm fiber and soil particles are interwoven and staggered to form a spatial network structure. At the same time, the bending deformation of palm fiber and soil in the process of the reinforcement can promote the close contact between the soil particles effectively, and consequently leading to the blocking of the soil displacement and improvement of the soil strength.

Key words: palm fiber; clay; rate of reinforcement; density; compressive strength

随着国民经济的发展与生态文明建设,对工程建设质量与环保的要求愈发严格。岩质边坡工程作为最常见的工程类型之一,广泛存在于路基两侧、矿山、基坑、水库库区等。未经治理的岩

质边坡表面往往难于提供植被生长的表层土体环境,破坏当地生态自然景观。因此,岩质边坡表层生态修复治理成为一项亟待解决的问题。客土喷播是目前常用的有效解决岩质边坡表层生态防护

收稿日期:2019-03-12

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41877212);中央高校基本科研业务费资助项目(B200202013)

作者简介:胡恬静(1990-),女,安徽六安人,硕士研究生,主要从事土体加固研究。

* 通讯作者:刘瑾(1983-),女,福建漳州人,工学博士,教授,主要从事工程地质与环境岩土工程方面的研究。

的方法。黏土作为岩质边坡表层客土材料,如何有效提高岩质边坡表层客土的强度特性是目前国内外学者关注的重点。作为当前两种常用的土体性质改良方法,对土体进行压实处理^[1-4]和添加纤维材料^[5-11]在工程界发挥了巨大作用。棕榈纤维作为一种天然的植物材料,因不易霉变、抗拉裂性能较好,具备多孔结构等特点^[12],保证了边坡加固工程的可靠性与耐久性,减少了施工后的维护成本,对促进边坡稳定和生态环境建设具有一定的意义。目前已有大量研究证实棕榈纤维改良土体性质的可行性^[13-15],但关于土体密度和加筋率对加筋土的破坏模式以及峰值应力强度与应变大小的影响研究较少。故本文在前人研究的基础上,基于无侧限抗压强度试验,考虑加筋率与土体密度 2 种变量,探究了土体密度与棕榈纤维加筋率对棕榈纤维抗压强度与破坏模式的影响,并分析了试样破坏时所需应变与应力强度峰值与加筋率及土体密度的关系,以期对棕榈纤维加固边坡土体提供借鉴。

1 试验方案

1.1 试验材料与仪器

本试验材料为黏土与棕榈纤维。黏土均取自于浙江省丽水市缙云县某边坡,将黏土烘干碾碎过 2 mm 筛备用,过筛后的土见图 1(a),其物理性质见表 1。将当地市场购买的原始棕榈纤维剔除杂质,捋顺后剪为长度为 20 mm 的细丝备用,棕榈纤维见图 1(b),棕榈丝物理力学参数见表 2。

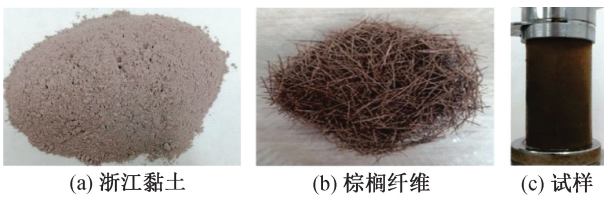


图 1 试验材料与试样

Fig. 1 Material in the experience and the specimen

表 1 试验用黏土的物理参数

Tab. 1 Physical parameters of clay for test

比重	天然含水率 $\omega/\%$	液限 $\omega_l/\%$	塑限 $\omega_p/\%$	塑性指数 I_p
2.71	33	50.4	28.2	2.60

表 2 试验用棕榈纤维的物理参数

Tab. 2 Physical properties of palm fiber for test

密度 $/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	平均直径/mm	断裂强度/MPa	杨氏模量/GPa	断裂伸长率/%
1.32	0.3	155.5	0.77	19.07

1.2 试验方案

本文通过测量含水率一定时,不同土体密度与不同加筋率下黏土的无侧限抗压强度,以探究土体密度与加筋率对棕榈纤维改良黏土强度的影响。本次试验设置的变量为黏土密度与加筋率。其中,土体含水率取 20%;黏土的干密度分别取 1.55、1.60、1.65 g/cm^3 ;加筋率(纤维与干黏土质量的百分比)分别设置为 0%、0.2%、0.4%。

取适量烘干过筛后的黏土均匀掺入蒸馏水,再装入塑料袋,密封静置 24 h 后,依照试验方案加入不同含量的棕榈纤维,混合均匀后分三层倒入模具,倒入下一层土前分别以重锤击实 9 次,再刨毛击实面,避免所制试样出现明显的分层性。随后用千斤顶施加静态压力将混合物压实至指定高度,静置 3 ~ 5 min 后脱除模具,制得直径为 3.91 cm,高为 8 cm 的圆柱形标准抗压试样,试样见图 1(c)。试样制备完毕后以保鲜膜包裹,在恒定温度与湿度下养护 24 h 后进行无侧限单轴抗压强度试验。本次试验采用的仪器为南京土壤仪器厂生产的 YYW-2 型应变式无侧限压力仪验测量控制仪,试验过程中应变速率控制为 2.4 mm/min。每个配比的试样制作三个平行样,取其平均值进行分析。

2 试验结果与分析

本文通过对不同加筋率与土体密度的试样进行无侧限抗压强度试验,研究了加筋率与土体密度对土体加固的影响,试验结果见表 3。从表中可看出,土体的抗压强度随加筋率以及黏土密度的增加而增加。

表 3 不同密度和加筋率下试样的单轴抗压强度

Tab. 3 Uniaxial compressive strength of specimens with different density and rates of reinforcement

编号	平均密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	加筋率 $W_{PF}/\%$	峰值强度 σ/kPa	峰值应变 $\varepsilon/\%$
1	1.55	0	158.65	2
2	1.55	0.2	182.69	2.5
3	1.55	0.4	196.34	3
4	1.60	0	206.15	2.5
5	1.60	0.2	215.38	3
6	1.60	0.4	301.91	4.5
7	1.65	0	234.61	3.5
8	1.65	0.2	301.91	4
9	1.65	0.4	394.22	5

2.1 应力应变曲线分析

在土体含水率和土体密度相同的情况下,加筋率对土体无侧限抗压强度有着明显的影响。应力-应变曲线见图2与图3。在达到峰值强度之前,相同含水率与土体密度下,随着加筋率增高,土体峰值强度随之增高,峰值强度出现时所需应变逐渐增大,素土在达到峰值强度之后,抗压强度急剧减缓,需在4%~8.5%的应变范围下才趋于平缓,残余强度较低。而加筋率为0.2%与0.4%的加筋土达到峰值强度后,随着形变的增加,土体强度降低相对较缓,而加筋率越大,达到峰值强度的曲线越平缓光滑,表面试样逐步由脆性破坏过渡为韧性破坏。说明棕榈纤维对提高土体强度与稳定性效果显著。因为素土在外荷载作用下多表现为脆性破坏,而加筋土因掺入延性较高的棕榈纤维,在外荷载作用下,由于棕榈纤维仅发生弯曲变形而不被破坏,故棕榈纤维加筋土整体上主要表现为韧性破坏。随着加筋率的增大,试样逐步由脆性破坏向韧性破坏转化,因而在轴向应力达到峰值强度后,棕榈纤维加筋土的应力-应变降落曲线较为平缓。

在含水率及加筋率保持不变的情况下,土体

无侧限抗压强度轴向应力-应变曲线如图3所示。随着密度增大,应力应变曲线峰值强度也随之增大,峰值强度逐渐增高,达到峰值强度时所产生的应变逐渐增大。从图中可明显发现,在达到峰值强度之前,各种密度与各种加筋率的土体峰值强度增加幅度均较大,曲线较陡,在达到峰值强度之后,素土峰值曲线在2.5%~3%的应变范围内,轴向应力曲线下降坡度均较陡,在此之后曲线才逐渐趋于平缓,同时,土体密度越大者,曲线越平缓,趋于平稳所需应变范围越小。加筋土应力-应变曲线相对较光滑,下降曲线相对较平缓,可见加筋率与土体密度的增大均有利于土体抗压强度的提高,并减少土体抵抗压力时产生的破坏。

当试样变形较小时,加筋黏土在不同加筋率下的应力-应变曲线的变化趋势线整体上较相似,但在达到峰值后,各曲线的变化趋势却出现了较大的差异。这表明,试样变形较小时,加筋率对其应力-应变曲线影响偏小;试样变形较大时,加筋率对其的应力-应变影响较大,即纤维对土体的加固作用主要在试件变形较大的时候发挥作用,此时纤维受到拉力,约束土体的变形滑移^[16]。

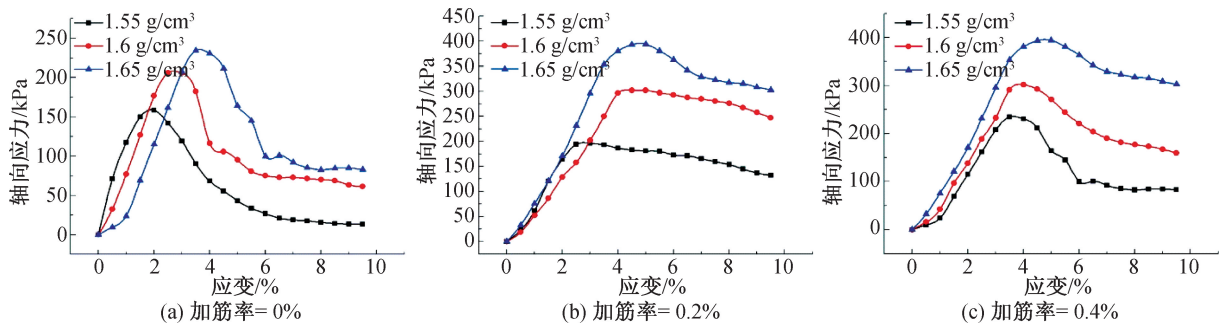


图2 变加筋率条件下试样应力应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curve of specimen at variable rates of reinforcement

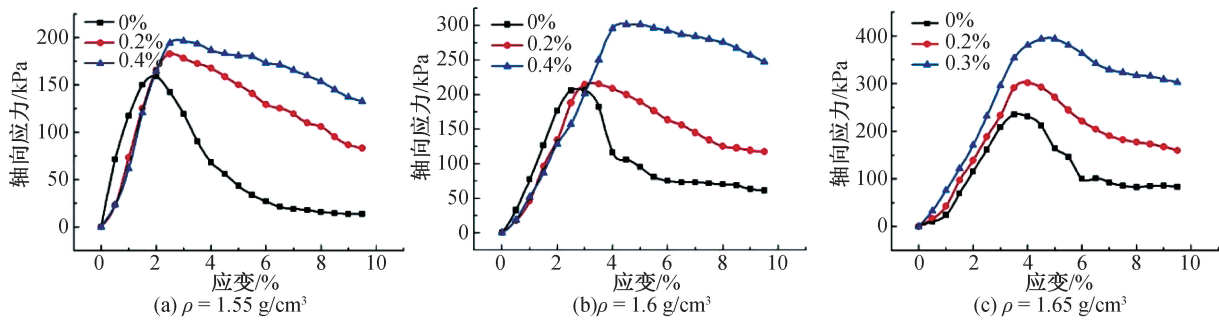


图3 变密度条件下试样应力应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curve of specimen at variable density

2.2 抗压强度分析

图4反应了变加筋率试样的峰值强度,可见土体含水率与土体密度一致时,土体轴向应力达到峰值强度所需形变随加筋率增大而增大,且均大于素土;当土体含水率与土体加筋率一定时,土体峰值强度随土体密度增加而增加,且加筋率为0.4%的土体随密度增加上升幅度最大。图5反映了不同加筋率与不同密度下试样达到峰值时所需形变。由图可知,土体在相同含水率与相同加筋率下,土体轴向应力达到峰值所需形变随土体密度增加而增加,增幅可达50%以上;而在试样土体含水率与土体密度均相等的情况下,试样开始破坏时对应的土体应变随加筋率的增加而急遽增大,其增幅最高可达82%。说明加筋率与土体密度的提高会延缓土体的破坏过程。

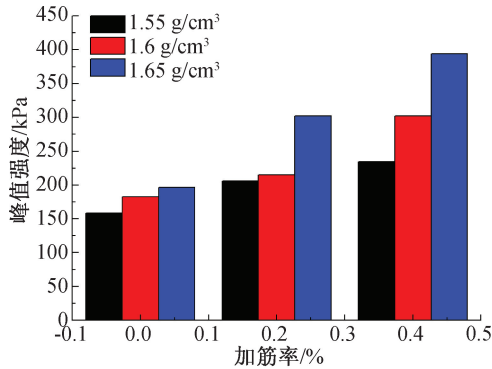


图4 变加筋率与密度条件下各密度试样单轴抗压强度
Fig. 4 Uniaxial compressive strength of each density sample at variable density and rates of reinforcement

2.3 破坏模式分析

不同密度及不同加筋率下的加筋土的破坏状态如图6—图8所示。图6—图8可反映出土体密度与棕榈纤维加筋率对土体破坏程度的影响。由图可知,含水率为20%时,密度为1.55 g/cm³的素土试样破坏最为严重。试样具有明显的破坏面,整体呈

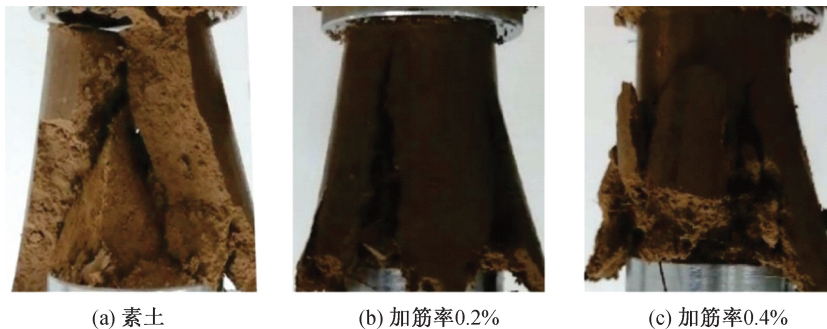


图6 干土密度为1.55 g/cm³时不同加筋率条件下试样破坏模式

Fig. 6 Failure mode of specimen with density of 1.55 g/cm³ under variable rates of reinforcement

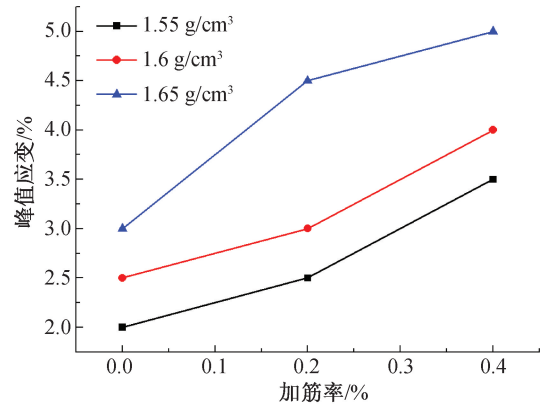


图5 不同加筋率与不同密度下试样达到峰值时所需应变
Fig. 5 The deformation of peak value of specimen at variable rates of reinforcement and density

劈裂破坏,底部散开呈花瓣状,破裂面呈倾斜状,裂隙自下而上贯穿整个试样,掉落的土块将近占总体积的1/3。破坏程度最小的试样密度为1.65 g/cm³,加筋率为0.4%,主要破坏面不甚明显,形成的多个小型破坏面主要集中在试样底部。裂隙仅在底部贯穿,裂隙部分高度约占总高度1/2,剥落土块的量较少。总体而言,随着土体密度与加筋率增大,试样内部的裂隙长度与宽度逐渐变小,从试样表面至深部剥落的土块越少,破坏程度越轻。

3 加固机理分析

土体颗粒摩擦较大程度上决定了素土试样的抗变形破坏能力。当素土在外荷载作用下产生变形时,土颗粒与土颗粒之间的摩擦力起到了阻止土体变形的作用。随着素土试样土体密度的增大,土颗粒之间的间距缩短,孔隙体积减少,土颗粒之间接触点增多,排列更为紧密,在外荷载作用下,土颗粒移动减弱,破裂变形逐渐被削弱,抵抗变形破坏的能力逐渐增强,故应力峰值强度加大。

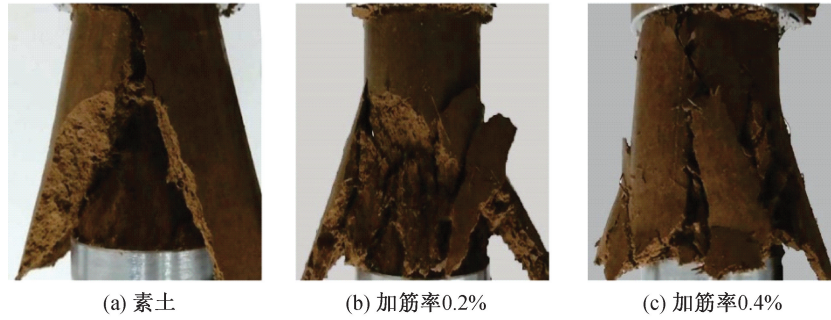


图7 干土密度为 1.6 g/cm^3 时不同加筋率条件下试样破坏模式

Fig. 7 Failure mode of specimen with density of 1.6 g/cm^3 under variable rates of reinforcement

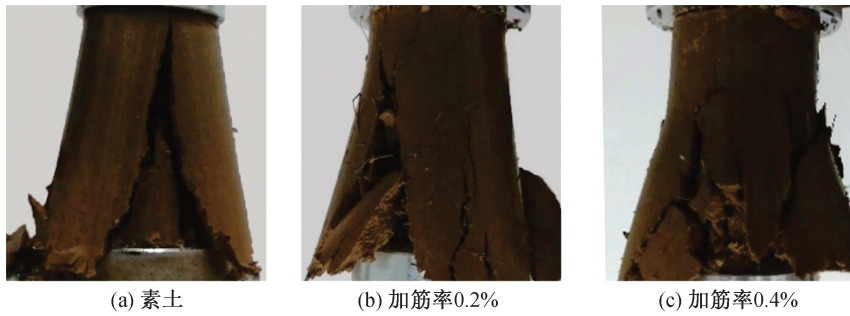


图8 干土密度为 1.65 g/cm^3 时不同加筋率条件下试样破坏模式

Fig. 8 Failure mode of specimen with density of 1.65 g/cm^3 under variable rates of reinforcement

纤维的掺入,使加筋土体内部形成三维结构,整体性增强,抗压强度增大;抗拉强度和延伸率也均较大,因此纤维土具备一定的韧性^[17]。在加筋土内部,大量黏土颗粒黏附于棕榈纤维表面,因此纤维加筋土与素土相比,存在筋土界面的作用,包括土颗粒与纤维之间摩擦力与黏聚力。同时,棕榈纤维在试样中呈不规则交错排布。因此,土颗粒与土颗粒之间、土颗粒与棕榈纤维之间、棕榈纤维与棕榈纤维之间的摩擦力以及黏土颗粒与棕榈纤维表面的黏结力,四者共同决定了棕榈纤维加筋土的抗压强度与抵抗变形破坏能力。微观作用机理见图9。当棕榈丝加筋土在外荷载作用下产生变形时,土和土、土和棕榈纤维、棕榈纤维和棕榈纤维间的摩擦力均为阻止这种变形而发生相应

改变。其改变量主要取决于加筋纤维的含量与土体密度^[18]。

当加筋率与土体密度较小时,土颗粒与纤维、土颗粒与土颗粒,纤维与纤维间的接触面积较小,相互间摩擦力也相应较小;当外荷载作用较小,试样变形较小时,棕榈纤维虽然随土体变形而产生了同步变形,但是因形变量不足,较小的相对位移难以使棕榈纤维与土体间的摩擦阻力充分发挥作用。这也解释了在试样变形初始阶段,即抗压强度达到峰值前,相同土体密度、不同加筋率的试样应力-应变曲线形状差别较小的现象^[19-20]。

随着加筋率与土体密度的增大,土颗粒与纤维、土颗粒与土颗粒,纤维与纤维间的接触面积加大,相互交织缠绕的纤维包裹着排列更为紧密的

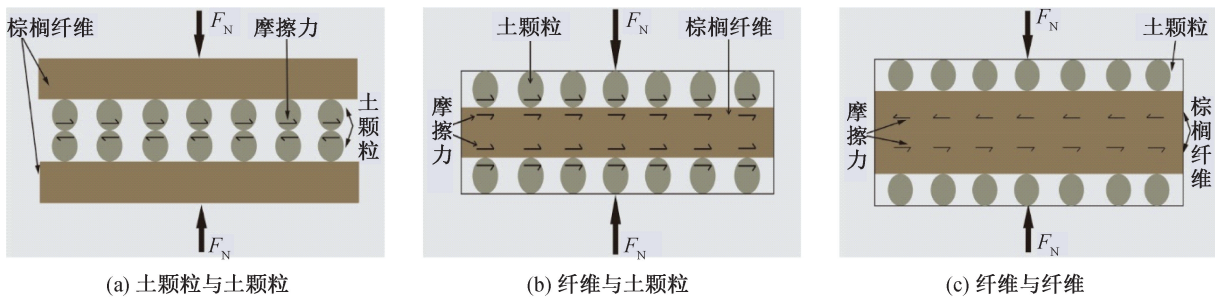


图9 微观作用机理

Fig. 9 Micro-schematic diagram

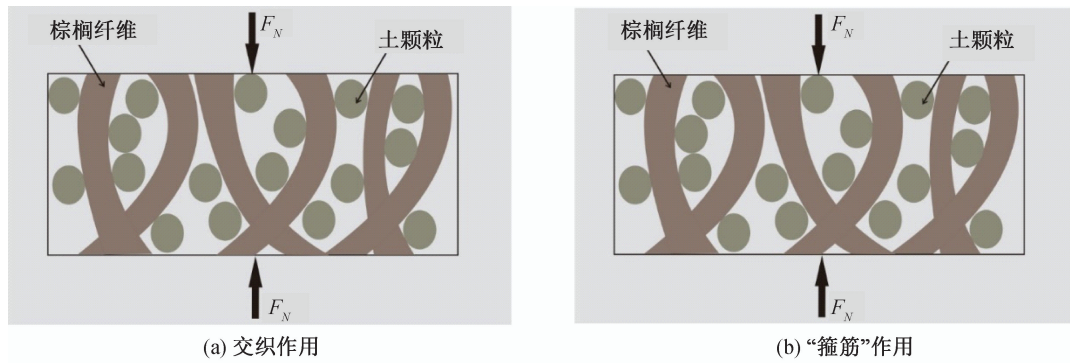


图10 棕榈纤维作用机理

Fig. 10 Mechanism of palm fiber

土颗粒,使上述三种摩擦作用也相应增大。加筋率较高时,纤维与土颗粒的交织作用(图10(a))使土颗粒和纤维间的接触面相应增加,黏结程度提高,导致加筋土黏聚力增大。纤维与土颗粒的交织作用可解释为:若单根纤维受到力的作用产生位移趋势,则周围与其交织的纤维会阻止这种位移,即任何一段纤维的受力变形都会牵动与之交织的各个方向的纤维,导致该位移趋势减弱,即形成空间网状的受力区域,建立立体的支撑体系,从而提高土体的承载力^[21]。当纤维与土交织错列而形成的空间网状结构受到荷载作用时,交错的纤维相互制约,若有部分纤维发生位移,则会受到其他纤维的限制作用,同时,形成的空间网状结构会使得土颗粒互锁,从而约束了土颗粒的位移和变形,在空间层面上大大增加了土样的强度和稳定性^[22]。

当试样受到较大的轴向压力而产生破裂时,由纤维形成的空间网状结构具备与土颗粒一同承担外荷载的作用。鉴于棕榈纤维自身的弹性,在受压时不会立即破裂,而是在一定范围内发生弯曲变形,进而发挥了箍筋作用(图10(b))。即纤维弯曲的凹侧面会使土体受到一定的压力与摩擦力,阻碍其位移。同时,随着加筋率的增大,单位体积内环绕、包裹土颗粒的纤维数目也随之增多,分布于纤维间的土颗粒距离更近,土颗粒间摩擦力更大,试样受力状态从单轴应力状态逐渐转化为三轴应力状态,导致应力相对分散于试样的每个部分,避免由土体快速开裂引发的应力集中,从而进一步增强了土体抗变形能力。

此外,在土体开裂破坏时,棕榈纤维在宏观上起到了“桥接”作用(图11),即纤维连接裂隙两侧的土体以阻碍土体裂隙进一步向深部拓展。随着加筋率的增大,纤维层层堆叠,形成大量“桥梁”,

裂隙因此不能自由延伸。桥接作用解释了加筋率增大土体达到峰值所需应变增大,达到峰值后加筋率高的土体峰值回落较慢的现象。

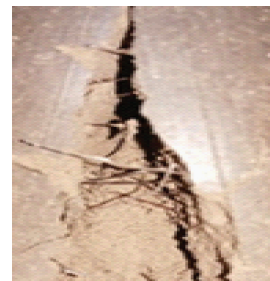


图11 纤维的“桥接作用”

Fig. 11 The “bridge” effect of fiber

4 结论

1) 在土体密度与含水率相同的条件下,黏土试样的屈服强度和极限强度随棕榈纤维加筋率的增大而增大,且逐渐由脆性破坏过渡至韧性破坏。说明较高的加筋率对提高土体强度与稳定性产生了较大的作用。因此,棕榈纤维加筋率越高,土体加固效果越显著。

2) 在加筋率与含水率相同的条件下,黏土试样无侧限抗压强度随土体密度增大而增大。原因在于土体密度增大时,单位体积内土颗粒排列更紧密,减小了土颗粒位移,增大了土颗粒之间摩擦力,使得土体抗压能力得到提升,变形破坏作用也相对减弱。且加筋土相对于素土,随密度增大土体抗压强度增幅更为明显,破坏过程更为缓慢。

3) 棕榈纤维强度较高,具备承担部分外荷载的能力。同时,棕榈纤维因延性较高,随着其含量的增加,棕榈纤维与黏土颗粒之间接触面增多,相互之间摩擦力与黏聚力增大,棕榈纤维之间接触摩擦也增大,从而提高了土体抗压强度与抗变形

(下转第46页)

- and Geotechnical Engineering (Proceedings) The Netherlands Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering; Ministry of Transport, Public Works and Water Management; AP van den Berg Machinefabriek; Fugro NV; GeoDelft; Holland Railconsult. 1999 (Volume 3).
- [15] 徐前卫. 盾构施工参数的地层适应性模型试验及其理论研究[D]. 上海:同济大学, 2006.
- [16] QUEBAUD S, SIBAI M, HENRY J P. Use of Chemical Foam for Improvements in Drilling by Earth-pressure Balanced Shields in Granular Soils[J]. Tunnelling & Underground Space Technology, 1998, 13(2):173-180.
- [17] 曹利强, 张顶立, 孙振宇, 等. 盾构隧道穿越富水砂层开挖面稳定性分析[J]. 铁道建筑, 2019, 059(003): 35-38.
- [18] 刘海宁, 张亚峰, 刘汉东, 等. 砂土地层中泥水盾构掌子面主动破坏模式试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 038(003):572-581.
- [19] 宋克志, 王本福. 常见盾构刀盘型式及选用[J]. 筑路机械与施工机械化, 2007(06):44-46.
- [20] 王俊, 何川, 王闯, 等. 砂土地层土压盾构隧道施工掌子面稳定性研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(01):177-185.
- [21] 邓亨义, 徐雪莹, 陈明娟. 富水砂卵石地层盾构隧道施工泥浆的研究与应用[J]. 中国工程科学, 2010, 12(12):79-82.

(责任编辑 周雪梅)

(上接第 39 页)

能力;此外,棕榈纤维可在土体中形成空间网状结构,限制土体颗粒位移以及土体破坏时的裂隙深部扩展。

参考文献:

- [1] 石磊. 击实黄土强度特性研究[D]. 西安:长安大学, 2019.
- [2] ZOU W L, HAN Z, YE J B. Influence of External Stress and Initial Density on the Volumetric Behavior of an Expansive Clay During Wetting[J]. Environmental Earth Sciences, 2020, 79(10): 1-12.
- [3] 靳松洋, 王俊杰, 黄诗渊, 等. 压实黏土抗拉强度测试新方法研究[J]. 人民长江, 2020, 51(7):212-217.
- [4] 胡艳欣. 红黏土含水量和干密度与抗剪强度的相关性分析[J]. 人民长江, 2017(S1):249-252.
- [5] 刘宝生, 唐朝生, 李建, 等. 纤维加筋土工程性质研究进展[J]. 工程地质学报, 2013, 21(4):540-547.
- [6] 王德银, 唐朝生, 李建, 等. 纤维加筋非饱和粘性土的剪切强度特性[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(10):1933-1940.
- [7] 王进. 加筋土边坡回填土改良试验及稳定性分析[J]. 资源环境与工程, 2016, 30(04):618-621.
- [8] MOHAMED A E M K. Improvement of Swelling Clay Properties Using Hay Fibers[J]. Construction & Building Materials, 2013, 38(JAN.): 242-247.
- [9] KHIEM Q T, TOMOAKI S, HIROSHI T. Improvement of Mechanical Behavior of Cemented Soil Reinforced with Waste Cornsilk Fibers[J]. Construction & Building Materials, 2018, 178: 204-210.
- [10] 卫杰, 张晓明, 丁树文, 等. 黄麻纤维加筋条件对崩岗岩土无侧限抗压强度的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(06):59-63.
- [11] YIXIAN W, PANPAN G, SHENGBIAO S, et al. Study on Strength Influence Mechanism of Fiber-Reinforced Expansive Soil Using Jute[J]. Geotechnical & Geological Engineering, 2016, 34(4): 1079-1088.
- [12] 李晓龙. 棕榈纤维的基本性能研究[D]. 重庆:西南大学, 2012.
- [13] 璩继立, 俞汉宁, 江海洋, 等. 棕榈丝与麦秸秆丝加筋土无侧限抗压强度比较[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(05):1216-1220.
- [14] 唐皓, 李华华, 刘驰洋, 等. 棕榈加筋黄土剪切强度特性及细观结构[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(19): 7832-7837.
- [15] 孙中明, 璩继立. 棕榈加筋土抗剪强度的影响因素分析[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(005):203-207.
- [16] 马福全, 常源朝, 高建新, 等. 不同纤维掺量加筋土无侧限抗压强度分析[J]. 山西建筑, 2016, 42(13):64-66.
- [17] 包承纲, 丁金华. 纤维加筋土的研究和工程应用[J]. 土工基础, 2012, 26(1):80-83.
- [18] 璩继立, 赵冬雪, 李贝贝. 加筋条件对棕榈加筋土强度的影响[J]. 工业建筑, 2015, 45(3):115-119.
- [19] 王剑焯. 玄武岩与玉米秸秆纤维加筋土力学性能及其在边坡中的应用研究[D]. 北京:北京建筑大学, 2016.
- [20] LIU J L, HOU T S, LUO Y S, et al. Experimental Study on Unconsolidated Undrained Shear Strength Characteristics of Synthetic Cotton Fiber Reinforced Soil[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2019, 38(2): 1-11.
- [21] 奚灵智, 王龙威, 王颖, 等. 植被根系固土抗剪强度试验研究[J]. 河北工程大学学报:自然科学版, 2019, 36(04):84-89.
- [22] 冯幻. 基于复合式加筋改良方法的软塑性黏土性能研究[D]. 重庆:重庆大学, 2014.

(责任编辑 王利君)