

聚丙烯纤维对加筋砂力学性能的影响

谢忠涛, 陆钰彬

(四川公路桥梁建设集团有限公司勘察设计分公司, 四川 成都 610000)

摘要: 以聚丙烯纤维为研究对象,通过一系列室内排水三轴压缩试验,研究了聚丙烯纤维对加筋砂的力学性能影响,重点研究了其应力应变特性、胀缩性和抗剪强度参数。试验结果表明:在有效围压50、100、150 kPa的条件下,与纯砂相比,聚丙烯纤维加筋砂的偏应力峰值和延性有显著提高,偏应力峰值较纯砂增长了30%、18%、10%,延性分别提升了61%、86%、83%;在胀缩性方面,纤维加筋材料对小应变下的收缩性几乎没有影响,而在较大应变下,纤维加筋材料显著抑制了土体的膨胀性。此外,聚丙烯纤维加筋砂的抗剪强度参数(内摩擦角和黏聚力)较纯砂均有所增加,黏聚力增加了128%,而内摩擦角仅增加了2%。

关键词: 三轴试验;聚丙烯纤维;加筋砂;应力应变特性;抗剪强度参数

中图分类号: U414

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)03-0257-04

Influence of Polypropylene Fibers on Mechanical Properties of Reinforced Sand

XIE Zhongtao, LU Yubin

(Survey and Design Branch of Sichuan Highway and Bridge Construction Group Co., Ltd., Chengdu 610000, China)

Abstract: Taking polypropylene fibers as the research object, through a series of indoor drained triaxial compression tests, the influence of polypropylene fibers on the mechanical properties of reinforced sand is studied, and the focus is on its stress-strain characteristics, expansion and contraction properties, and shear strength parameters. The test results show that under the conditions of effective confining pressures of 50, 100, and 150 kPa, compared with pure sand, the peak deviatoric stress and ductility of polypropylene fiber reinforced sand have significantly improved. The peak deviatoric stress has increased by 30%, 18%, and 10% compared to pure sand, and the ductility has increased by 61%, 86%, and 83% respectively. In terms of expansion and contraction properties, the fiber reinforced material has almost no effect on the contraction under small strains, while under larger strains, the fiber reinforced material significantly inhibits the expansion of the soil. In addition, the shear strength parameters (internal friction angle and cohesion) of polypropylene fiber reinforced sand have increased compared to pure sand. The cohesion has increased by 128%, while the internal friction angle has only increased by 2%.

Keywords: triaxial test; polypropylene fibre; reinforced sand; stress-strain characteristics; shear strength parameter

0 引言

在过去的三十年里,由于纤维带来的经济和环境效益,纤维加筋土这种能有效改善土的力学性能的加固技术引起了世界各国的广泛关注^[1]。纤维可以从木材、竹子、椰子壳、黄麻、玉米秸秆等天然材料中获得,这些天然纤维不仅价格低廉,而且其获得和使用均不会对环境造成破坏和污染,但天然纤维是可生物降解的(特别是在碱性环境下),这对土壤加

固是不利的。于是,聚乙烯纤维、聚丙烯纤维、聚酯纤维等人工合成纤维相继研究问世并得以采用。它们的主要优点是纤维的几何形状可以在生产时进行控制,并且不会在变化的环境中发生生物降解^[2-3]。

李金和等^[4]分析了近年来世界范围内纤维加筋土的研究成果,研究发现,在土中掺入纤维,可显著改善土的强度、刚度、压缩性等工程性质。马强^[5]等利用室内三轴试验,研究了棕麻纤维加筋土的力学性能,试验结果表明,棕麻纤维加筋土的抗剪强度明显高于纯砂。Ranjan等^[6]、Al-Refeai等^[7]通过一系列直剪和三轴试验观察到,纤维的加入增加了土体的抗剪强度。但是,Yetimoglu等^[8]研究发现,砂土的抗剪强度峰值几乎不受纤维加筋的影响,但砂土的残

收稿日期: 2024-04-12

作者简介: 谢忠涛(1994—),男,硕士,工程师,从事道路设计工作。

通信作者: 陆钰彬(1986—),男,硕士,高级工程师,从事道路桥梁设计咨询工作。电子邮箱: 515631944@qq.com

余剪切强度在加入纤维后有显著提高。Michalowski等^[9]利用三轴试验证明了纤维的加入抑制了砂土的膨胀。潘世起^[10]通过三轴固结不排水试验,研究了棕榈纤维对土体的加筋效果,结果证明,纤维的掺入会在一定程度上限制土体的侧向变形,且可以有效提高土体的力学性能。

目前,纤维加筋砂在实际工程中尚未得到广泛应用,主要是因为学界对纤维加筋砂的力学性能研究尚不充分,其在实际工程中的稳定性和变形性难以把控。聚丙烯纤维是一种常见的纤维材料,广泛应用于建筑工程领域。它具有良好的耐久性和抗腐

蚀性能,以及适当的力学性能,并且在成本上相对较低。因此,开展聚丙烯纤维加筋砂的力学性能研究对于指导工程建设具有重要意义。通过在不同围压条件下进行固结排水三轴压缩试验,本文重点研究了聚丙烯纤维对砂的应力-应变特性、胀缩性和抗剪强度指标的影响,并分析了其工作机理。

1 试验过程

1.1 试验材料

表1给出了在本试验中所采用的砂的基本参数。加筋材料选用18 mm长的聚丙烯纤维,其基本参数见表2。

表1 砂土参数

有效粒径/mm	中值粒径/mm	最大干密度/(kN·m ⁻³)	不均匀系数	曲率系数	比重	最大孔隙比	最小孔隙比
0.50	0.78	17.5	1.72	1.06	2.65	0.71	0.47

表2 聚丙烯纤维参数

长度/mm	直径/mm	截面形状	比表面积/(m ² ·kg ⁻¹)	收缩率(130℃/5 min)	标称抗拉强度/MPa
18	0.088	圆形	134	0~5%	200

1.2 试验样本准备

在本试验中,统一取砂150 g,并控制纤维含量为0.25%。一般来说,纤维和干砂混合容易发生离析,不太可能使二者均匀混合。本研究使用的混合方法参考了Ibraim等^[11]提出的试样制备方法,该方法能够有效地防止纤维离析。试样的制作过程如下:先在砂中加入少量水,用小勺搅拌,使砂全部变湿;然后逐步添加少量纤维,每次添加纤维后手动进行搅拌,直到纤维均匀分布在砂中,可停止搅拌;接下来将砂和纤维的混合物小心转移到模具中,分次加水压实,直到可以看到水面,最终形成高度76 mm、直径38 mm的圆柱形试样。

1.3 试验过程

试验采用全自动三轴仪,在有效围压50、100、150 kPa的条件下,对每组纤维加筋砂和纯砂试样分别进行排水三轴压缩试验。为防止试验过程中超孔隙水压力的产生,选择了三轴仪能够提供的最小位移率0.05 mm/min,并对试样施加50 kPa的背压,使其趋向饱和。排水阀在整个试验过程中保持打开状态。试样的轴向变形量和体积变化分别用位移传感器和体积变化装置测量记录。

2 试验结果及讨论

2.1 应力-应变关系

图1展示了在不同围压下纯砂和聚丙烯纤维加

筋砂的应力-应变曲线。表3为纤维加筋对砂的抗剪强度和延性的影响,分别用偏应力改善系数^[3]和脆性指数^[12]来评估。从图1中可以看出:随着围压的增大,纯砂和纤维加筋砂的偏应力峰值均有所提升,而且纤维的掺入可以有效地提高试样的抗剪强度。表3中的数据显示,当有效围压为50 kPa时,砂土中掺入纤维会使偏应力增加30%,该系数随着围压的增加而减小,这意味着在较高的围压下,纤维引起的峰值强度的改善变得不那么显著。

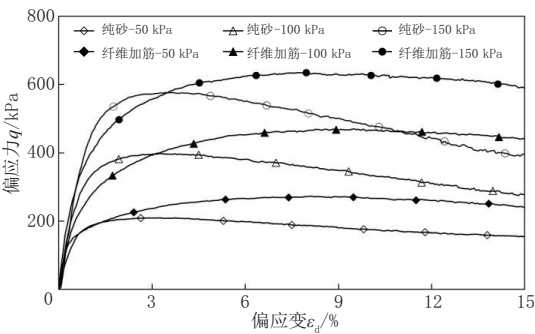


图1 纯砂及纤维加筋砂的应力应变曲线

表3 偏应力改善系数和脆性指数

有效围压/kPa	偏应力改善系数 <i>I_d</i> /%	脆性指数 <i>I_b</i>	
		纯砂	纤维加筋砂
50	30	0.36	0.14
100	18	0.43	0.06
150	10	0.47	0.08

值得注意的是,纯砂试样的偏应力达到峰值后,便下降到较低的强度,而纤维加筋砂试样的偏应力

在达到强度峰值后并没有出现明显的偏应力下降,说明聚丙烯纤维的加入使试样的残余剪切强度提高。表3的结果表明,纤维加筋砂的脆性指数因纤维的加入而显著降低,在有效围压50、100、150 kPa的条件下,脆性指数分别降低了61%、86%和83%,表明纤维可提高土体的延性增加。

2.2 纤维加筋砂的胀缩性

图2揭示了在不同围压下纯砂和聚丙烯纤维加筋砂的体应变与偏应变的关系。

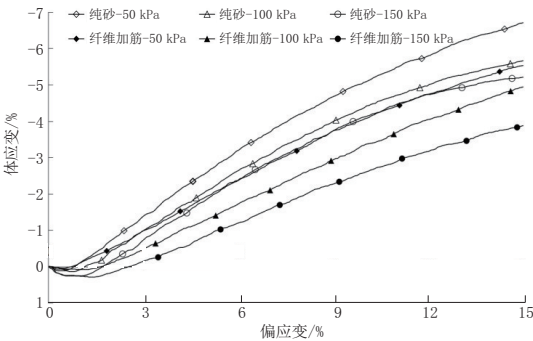


图2 体应变与偏应变关系曲线

由图2可以看出:

(1)纯砂和纤维加筋砂试样在应变较小时都表现出收缩性,而在较大应变下则表现为膨胀性,且膨胀性明显占主导地位。

(2)聚丙烯纤维对试样的收缩性影响较小,而对试样的膨胀性有显著的抑制作用。

2.3 纤维加筋砂的抗剪强度

图3为聚丙烯纤维加筋砂及纯砂的摩尔应力圆和强度包线,根据图3可得出纯砂和纤维加筋砂的抗剪强度参数,结果见表4。

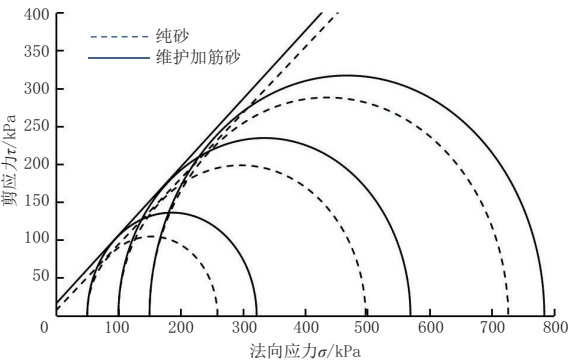


图3 纯砂及纤维加筋砂的摩尔应力圆及强度包线

表4 抗剪强度参数

试样	抗剪强度参数	
	黏聚力 c' /kPa	内摩擦角 φ' /(°)
纯砂	7	41
纤维加筋砂	16	42

从图3中可以看出,纤维的加入使强度包线向上移动,即在相同的法向应力下,纤维加筋砂的抗剪强

度较纯砂有所提高。表4的结果表明,纤维加筋砂的黏聚力较纯砂增加了128%,而内摩擦角仅增加了2%。

2.4 纤维加筋砂的增强机制分析

纤维加筋砂的强度特性与纤维在砂中的分布方式、纤维和砂的相互作用密切相关,笔者主要从纤维与土颗粒之间的作用方式对其增强机制进行分析。图4显示了土颗粒在微观水平上与纤维的相互作用^[13]。

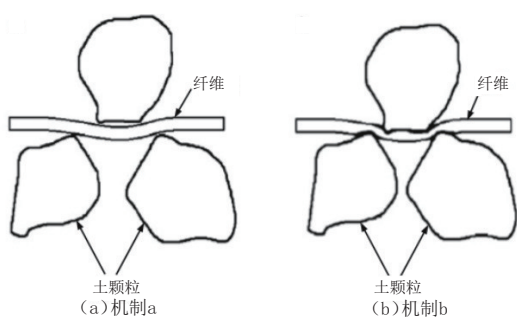


图4 纤维与土颗粒的相互作用机制

在外部荷载作用下,纤维与土颗粒的接触面会形成摩擦力,摩擦力可以防止纤维随土壤滑动,使土体能够承受一定的拉应力;当荷载持续增加时,纤维进一步变形并产生一些印记(机制b),使纤维和土颗粒之间形成卯榫结构,有效限制了土颗粒在各个方向上的扭动和滑移,使得土体的黏聚力和抗剪强度有所提高。

2.5 纤维加筋砂的胀缩性分析

纤维加筋砂吸水膨胀时,纤维和土体的界面产生的摩擦力限制了土体的膨胀,图2的结果表明,围压越大,产生的摩擦力也就越大,抑制土体膨胀的效果就越好。从图4中纤维与土颗粒的相互作用机制来看,纤维表面和土颗粒的接触面积也能影响摩擦力的大小,从而影响土体的胀缩性。因此,理论上通过增加外界压力、纤维表面的粗糙程度,增大纤维与土体的摩擦力,可以有效抑制土体膨胀变形。

3 结 论

本文通过一系列三轴压缩试验,研究了聚丙烯纤维加筋砂的力学性能。研究得出的主要结论如下:

(1)聚丙烯纤维的加入可显著提高砂土的偏应力峰值,在有效围压50、100、150 kPa的条件下,聚丙烯纤维加筋砂的偏应力峰值较纯砂增长了30%、18%、10%,说明围压越大,偏应力峰值增幅越小;纤维的加入还导致了土体脆性指数的降低,分别降低

了61%、86%、83%,表明纤维可提高土体的延性增加。

(2)聚丙烯纤维的加入可有效地抑制土体的膨胀性,该抑制程度由外界压力以及纤维与土颗粒表面的接触面积决定。

(3)聚丙烯纤维加筋砂的抗剪强度参数,即黏聚力和内摩擦角,相较于纯砂均有所提高,其中黏聚力增幅较大,较纯砂增加了128%,但内摩擦角增幅较小,仅增加了2%。

参考文献:

- [1] 徐光黎,刘丰收,唐辉明.现代加筋土技术理论与工程应用[M].武汉:中国地质大学出版社,2004.
- [2] MILLER C J, RIFAI S. Fiber reinforcement for waste containment soil liners[J]. Environ Eng ASCE, 2004, 130(8): 891-895.
- [3] Sanjay Kumar Shukla. Fundamentals of Fibre-Reinforced Soil Engineering[M]. Springer Singapore: Singapore, 2017: 167-169.
- [4] 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.
- [5] 马强,邢文文,李丽华,等.棕麻纤维加筋砂的三轴试验研究[J].郑州大学学报(工学版),2018,39(2): 56-60.
- [6] RANJAN G, VASAN R, CHARAN H. Probabilistic analysis of randomly distributed fiber-reinforced soil[J]. J Geotech Eng ASCE, 1996, 122(6): 419-426.
- [7] AI-REFEAI T, AI-SUHAIBANI A. Dynamic and static characterization of polypropylene fiber-reinforced dune sand[J]. Geosynth Int, 1998, 5(5): 443-458.
- [8] YETIMOGLU T, SALBAS O. A study on shear strength of sands reinforced with randomly distributed discrete fibers[J]. Geotext Geomember, 2003, 21(3): 103-110.
- [9] MICHALOWSKI R L, ZHAO A. Failure of fiber-reinforced granular soils[J]. Geotech Eng ASCE, 1996, 122(3): 226-234.
- [10] 潘世起.基于GDS及DEM的棕榈纤维加筋黏土力学性能研究[D].郑州:郑州大学,2022.
- [11] IBRAIMI E, FOURMONT S. Behaviour of sand reinforced with fibers [C]//soil stress-strain behavior: measurement, modeling and analysis. Rome: Springer, 2006.
- [12] MAHER MH, HO YC. Behaviour of fiber-reinforced cemented sand under static and cyclic loads. Geotech Test[J]. 1993, 16(3): 330-338.
- [13] FALORCA I M C F G, PINTO M I M. Effect of short, randomly distributed polypropylene fibers on shear strength behaviour of soils[J]. Geosynth Int, 2011, 18(1): 2-11.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: roadfloodbridge@163.com

