

复掺纳米 SiO_2 对棕榈纤维加筋土抗剪强度的影响

璩继立, 赵超男, 胡晨凯

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

摘要: 通过直剪试验,探讨了在棕榈纤维加筋土中复掺纳米 SiO_2 对土体抗剪强度、黏聚力、内摩擦角的影响. 试验表明,棕榈纤维可以明显提高土体的抗剪强度和黏聚力,但对土体内摩擦角的影响不大,其最佳棕榈纤维质量加筋率为 1.0%~1.2%. 复掺纳米 SiO_2 后,土体的抗剪强度再次得到增强,且其黏聚力、内摩擦角也得到进一步提高. 对于相同质量加筋率的棕榈纤维土体,在复掺纳米 SiO_2 的质量百分比为 1.0%时,土体的抗剪强度最大;而不同质量加筋率下的棕榈纤维加筋土(质量加筋率为 1.0%~1.2%),其复掺纳米 SiO_2 质量百分比为 0.7%~1.0%时,土体的抗剪强度最大. 同时,分析了棕榈纤维和纳米 SiO_2 的作用机理,复掺纳米 SiO_2 后的棕榈纤维加筋土在微观结构上更加密实,土体更加稳定,抗剪强度更大. 因此,纳米 SiO_2 可以在路基土体加固中发挥作用.

关键词: 纳米 SiO_2 ; 棕榈纤维; 加筋土; 抗剪强度; 黏聚力; 内摩擦角

中图分类号: U 416

文献标志码: A

Impact of Nano- SiO_2 on the Shear Strength of Palm Fiber Reinforced Clay

QU Jili, ZHAO Chaonan, HU Chenkai

(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Direct shear tests were carried out and the shear strength, cohesion and internal friction angle of palm fiber reinforced clay mixed with nano- SiO_2 were investigated. The results show that the palm fiber can significantly improve the shear strength and cohesion of clay, but has little effect on the internal friction angle, and the optimal mass reinforcement percent of palm fiber is 1.0~1.2%. With the mix of nano- SiO_2 into palm fiber reinforced clay, the shear strength is further improved, and the cohesive force and the internal friction angle are also improved obviously. For the clay with the same mass reinforcement percent of palm fiber, the shear strength achieves the largest when the mass percent of nano- SiO_2 is 1.0%. For the reinforced clay with the mass reinforcement percent between 1.0%~1.2% of palm fiber, the shear strength is the largest when the mass percent of nano- SiO_2 is 0.7%~1.0%. Further, the action mechanisms of palm fiber and nano- SiO_2 were analysed. The micro structure of the palm fiber reinforcement clay with nano- SiO_2 is more compact, the clay becomes more stable and its shear strength is higher. So nano- SiO_2 can play a role in the reinforcement of subgrade soil.

收稿日期: 2017-01-10

第一作者: 璩继立(1964-),男,副教授.研究方向:岩土工程、水文地质. E-mail: qujili@sina.com

Keywords: nano-SiO₂; palm fiber; reinforced clay; shear strength; cohesion; internal friction angle

上海位于典型的软土地区,软黏土带来的地面沉降和地基变形等缓变形地质灾害在长时间作用下会给城市建设及经济发展带来巨大危害^[1]. 现代社会发展迅速,在道路工程中常需对路基进行进一步处理,以使土体的性能更加稳定. 近年来,纤维加筋土受到研究人员关注. 不同于传统的土工合成材料加筋土,纤维加筋土是按一定比例,将很细的纤维丝或纤维网与土料充分拌和,形成的一种土工复合材料. 由于纤维具有分散性好、易于拌和等优点,通常视纤维土为均质的各向同性材料^[2]. 并且自然纤维具有成本低、易降解、绿色环保等优点,吸引学者对此展开研究. 例如:Basha 等^[3]以稻壳作为土壤增强材料剂;赵宁雨等^[4]研究纤维加筋红黏土强度特性的影响因素,发现加筋红黏土的强度随加筋纤维配合比的提高而增强,红黏土中合理的加筋纤维长度为 10~13 mm.

纳米材料作为一种新型材料,吸引了各个领域的研究人员. 工程方面,在混凝土中掺入纳米材料可以提高混凝土强度^[5],增加抗渗透性^[6],控制混凝土中钙的溶出^[7],有效防止混凝土劣化. 混凝土中的纳米材料可作为水泥相的“核心”,不断促进水泥进行水化反应^[8-11]. 目前,国内研究主要集中在纳米对混凝土方面的影响,但随着社会生产力的提高,纳米材料更易获得,将会得到更加广泛的应用. 国外已经率先在土中加入纳米材料来研究对土体性能的改善情况,Khalid 等^[12]发现,通过对高岭土中掺加很少的纳米颗粒就会对高岭土的基本性质和工程特性有显著的影响. Taha 等^[13]发现将纳米氧化铝加到土壤中,可以减小膨胀量和收缩应变. Mohammadi 等^[14]利用扫描电镜(SEM)技术,分析

了拉什特土掺入纳米颗粒后其黏聚力增加的机理,发现土体孔隙被填充,进而导致其剪切强度提高.

目前,再加固纤维加筋土添加剂的研究主要集中在水泥、生石灰、粉煤灰等传统材料上,土壤中添加纳米材料的研究很少. 因此,本文将纳米 SiO₂ 复掺到棕榈纤维加筋土中,通过直剪试验和 Origin 软件对试验结果分析,探讨纳米 SiO₂ 对纤维加筋土的抗剪强度、黏聚力、内摩擦角的影响,分析纳米 SiO₂、棕榈纤维的作用机理,探索纳米材料在黏土加固、道路工程中的应用.

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验用土取自上海张江工业园区某大型项目施工现场. 试验时,首先将土放在自然条件下风干,再将土放在橡皮板上用橡胶锤碾碎,并过 2 mm 土工筛. 按《公路土工试验规程》JTGE40—2007^[15],通过击实试验测定其物性参数,见表 1. 试验用纳米 SiO₂ 购于成都麦卡希化工有限公司,实物拍照见图 1,其物性参数见表 2. 棕榈取自上海崇明,洗净自然条件下风干,以作备用,其物性参数见表 3.

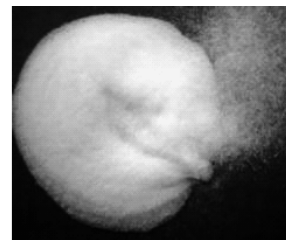


图 1 纳米 SiO₂
Fig.1 Nano-SiO₂

表 1 试验用土的物性参数

Tab.1 Physical properties parameters of the tested clay

最优含水率/%	液限含水率/%	塑限含水率/%	塑性指数	最大干密度/(g·cm ⁻³)	相对密度
20.72	42.34	20.56	21.78	1.62	2.73

表 2 纳米 SiO₂ 的物性参数

Tab.2 Physical properties parameters of Nano-SiO₂

含量/%	平均粒径/nm	比表面积/(m ² ·g ⁻¹)	PH 值
99.5	15±5	250±30	5~7

表 3 棕榈纤维的物性参数

Tab.3 Physical properties parameters of palm fiber

平均厚度/mm	拉伸强度/MPa	相对密度	弹性模量/MPa	自然伸长率/%
0.192~1.240	87~166	1.24	800~1 900	5~21

1.2 试验方法

试验前,先将棕榈纤维剪成 12 ± 2 mm 长度的纤维丝,见图 2. 棕榈纤维质量加筋率分别为 0.8%, 1.0%, 1.2%. 纳米 SiO₂ 按照质量百分比分别为 0, 0.5%, 0.7%, 1.0% 复掺到棕榈纤维加筋土中. 试验时,每种棕榈纤维质量加筋率对应 4 种纳米 SiO₂ 质量百分比(0%, 0.5%, 0.7%, 1.0%),各制备 3 个平行试样,如图 3 所示.



图 2 试验棕榈纤维

Fig.2 Palm fiber for tests



图 3 3 个平行试样

Fig.3 Three parallel samples

将称好的棕榈纤维及纳米 SiO₂ 平均分 5 次加入到相应质量的素土中,均匀混合,再倒入相应质量的水(最优含水率为 20%,占素土比重)进行充分搅拌.然后将混合均匀的土样用保鲜膜封闭起来,放入养护缸中养护 24 h,以确保土样的含水率稳定.最后制备试件.每个试件统一称取土样 120 g,采取统一的击实锤进行锤击,采用三层法进行击实(每次击实

20 次). 试样的含水率控制在 $20 \pm 2\%$, 干密度控制在 1.65 ± 2 g/cm³, 试样高 20 mm, 直径 61.8 mm.

试验仪器采用南京 DJY-4L 四联等应变直剪仪. 采取应变控制式直接剪切, 应变速率为 0.02 mm/min, 以使黏土试样能够充分排水. 当剪应变达到 10.001 mm 时, 停止剪切. 试样剪切过程中, 垂直荷载分别为 100 kPa, 200 kPa 和 400 kPa, 剪切速率为 0.8 mm/min, 每隔 15 s 记录一次钢环测力计读数. 土样剪切后如图 4 所示.



图 4 直剪仪剪切后试样

Fig.4 Sample after direct shear

2 试验结果与分析

2.1 棕榈纤维加筋土

2.1.1 对抗剪强度的影响

图 5 为棕榈纤维加筋土的应力-应变关系. 可以看出, 剪切位移较小时, 加入棕榈纤维后的应力-应变曲线已经发生分离, 并且在垂直压力 σ_n 为 200 kPa, 400 kPa 时, 应力-应变曲线分离更加明显; 随着剪切位移的增大, 应力-应变曲线继续分离. 分析可得, 棕榈纤维可以提高上海黏土的抗剪强度. 随着剪应变的增大, 剪应力逐渐增大, 且无明显的峰值强度, 其应力-应变曲线呈应变硬化型.

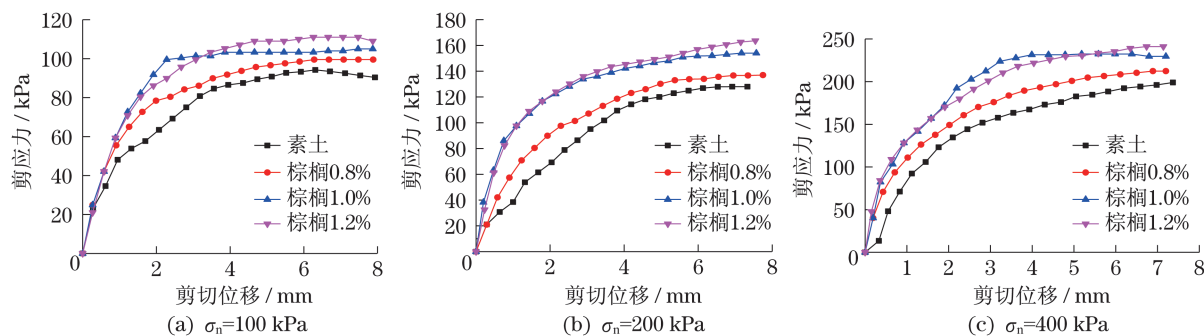


图 5 棕榈纤维加筋土的剪切位移-剪应力关系

Fig.5 Shear displacement-shear stress relationship of palm fiber reinforced clay

随着棕榈纤维质量加筋率的增加, 其抗剪强度呈现增大趋势. 质量加筋率为 0.8%, 1.0% 和 1.2% 时的棕榈纤维加筋土与素土相比: 在垂直压力为

100 kPa 时, 抗剪强度提高了 6%, 11%, 18%; 垂直压力为 200 kPa 时, 抗剪强度提高了 7%, 20%, 28%; 垂直压力为 400 kPa 时, 抗剪强度提高了 8%,

17%, 21%。通过以上比较,可以看出利用棕榈纤维能够提高黏土的抗剪强度,且棕榈纤维加筋率为1.0%和1.2%时的效果较为明显。

2.1.2 对黏聚力、内摩擦角的影响

图6为棕榈纤维加筋土垂直荷载与最大剪切强度的关系。可以看出,随着垂直压力的增大,土的抗剪强度逐渐提高。且棕榈纤维质量加筋率由0.8%增加到1.0%时,土体的抗剪强度有较明显提高;棕榈纤维质量加筋率由1.0%继续增加到1.2%时,土体的抗剪强度有较小提高。各直线的斜率变化不大,即棕榈纤维添加对土体的内摩擦角影响较小。表4为棕榈纤维加筋土的黏聚力 c 与内摩擦角 φ 的数值,与素土相比,棕榈纤维质量加筋率为1.2%, 1.0%, 0.8%时,其黏聚力分别提高41%, 37%, 16%, 内摩擦角分别提高15%, 11%, 3%。可见,棕榈纤维质量加筋率为1.2%时,土体的内摩擦角和黏聚力的增加幅度最大,且黏聚力的增加幅度大于内摩擦角的增加幅度,说明黏聚力对黏土抗剪强度的影响较大。

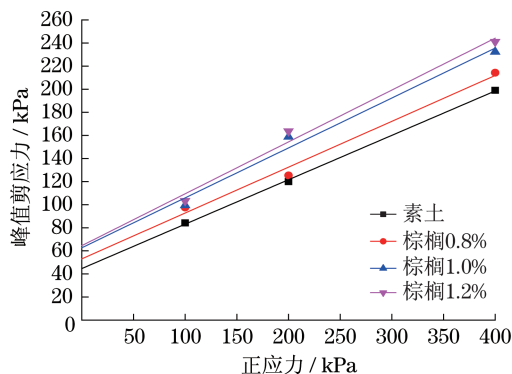


图6 棕榈纤维加筋土垂直荷载与最大剪切强度的关系

Fig.6 Relationship between vertical load and the maximum shear strength of palm fiber reinforced clay

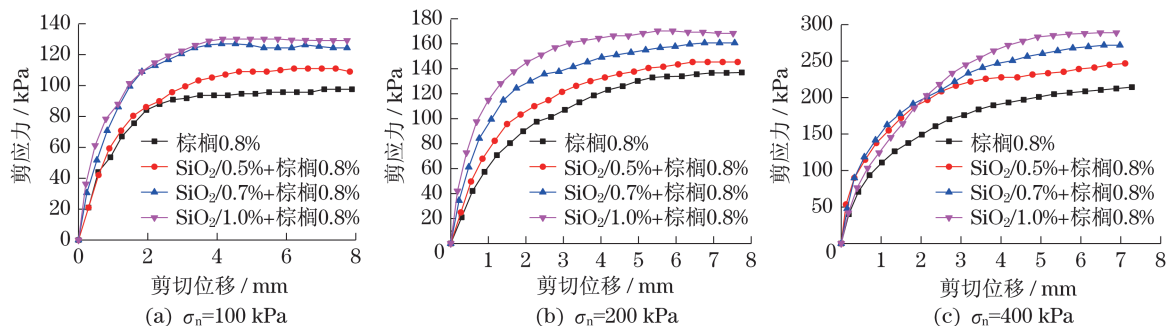


图7 纳米SiO₂对质量加筋率为0.8%的棕榈纤维加筋土的剪切位移-剪应力关系的影响

Fig.7 Effect of nano-SiO₂ on the shear displacement-shear stress relationship of the clay with 0.8% mass reinforcement percent of palm fiber

表4 棕榈纤维加筋土的黏聚力与内摩擦角

Tab.4 Cohesion and internal friction angle of palm fiber reinforced clay

棕榈质量加筋率/%	c /kPa	φ /($^{\circ}$)
0	45.7	21.0
0.8	53.1	21.7
1.0	62.7	23.4
1.2	64.6	24.2

2.2 纳米SiO₂对质量加筋率为0.8%的棕榈纤维加筋土的影响

2.2.1 对抗剪强度的影响

图7为不同质量百分比的纳米SiO₂复掺到棕榈纤维质量加筋率为0.8%的加筋土的应力-应变关系。可以看出,与图5(a)相同,当剪切位移较小时,加入纳米SiO₂前后的应力-应变曲线很接近,随着剪切位移的增大,应力-应变关系曲线逐渐分离,并且复掺纳米SiO₂后的加筋土抗剪强度均大于棕榈纤维加筋土的抗剪强度。分析可得,纳米SiO₂可以提高棕榈纤维加筋土的抗剪强度。由图7可以看出,随着剪应变的增大,剪应力逐渐增大,且无明显的峰值强度,其应力-应变曲线呈应变硬化型。

随着纳米SiO₂质量百分比的增加,土体的抗剪强度变化与棕榈纤维加筋土的趋势一致,纳米SiO₂质量百分比为1.0%时,抗剪强度达到最大值。质量百分比为0.5%, 0.7%和1.0%时的纳米SiO₂棕榈纤维加筋土与质量加筋率为0.8%的棕榈纤维加筋土相比:在垂直压力为100 kPa时,抗剪强度提高了14%, 29%, 33%;在垂直压力为200 kPa时,抗剪强度提高了16%, 28%, 36%;在垂直压力为400 kPa时,抗剪强度提高了15%, 27%, 35%。通过以上比较,复掺纳米SiO₂后,纳米SiO₂加筋率在0.7%与1.0%时,对棕榈纤维加筋土的抗剪强度的提高比较明显。

2.2.2 对黏聚力和内摩擦角的影响

图8为纳米 SiO₂ 对质量加筋率为 0.8% 的棕榈纤维加筋土垂直荷载与最大剪切强度关系的影响.可以看出,在土体中添加纳米 SiO₂ 后,纳米 SiO₂ 对土体抗剪强度的提高与在土体中只添加棕榈纤维的趋势基本相同;从各条直线间距来看,纳米 SiO₂ 土体抗剪强度的提高比只添加棕榈纤维提高的幅度要大,且各直线斜率发生较明显变化,即纳米 SiO₂ 对土体的内摩擦角的影响比较大.表5为纳米 SiO₂ 对质量加筋率为 0.8% 的棕榈纤维加筋土的黏聚力与内摩擦角的影响.与棕榈纤维加筋土相比,纳米 SiO₂ 质量百分比为 1.0%,0.7%,0.5% 时,黏聚力分别提高 34%,33%,14%,内摩擦角分别提高 30%,21%,14%;纳米 SiO₂ 质量百分比为 1.0% 时,两者增加幅度都较大,此时黏聚力和内摩擦角对黏土抗剪强度的影响都较大.

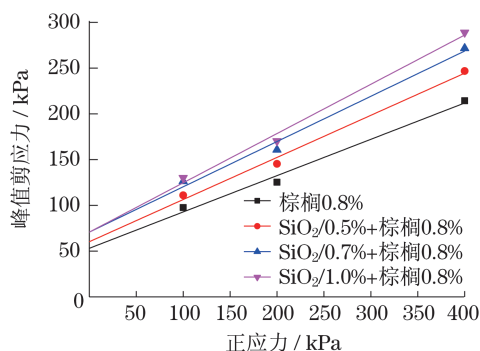


图8 纳米 SiO₂ 对质量加筋率为 0.8% 的棕榈纤维加筋土垂直荷载与最大剪切强度关系的影响

Fig.8 Effect of nano-SiO₂ on the relationship between vertical load and the maximum shear strength of the clay with 0.8% mass reinforcement percent of palm fiber

表5 复掺纳米 SiO₂ 棕榈纤维加筋土(质量加筋率为 0.8%)的黏聚力与内摩擦角

Tab.5 Cohesion and internal friction angle of the palm fiber reinforced clay (mass reinforcement percent 0.8%) with nano-SiO₂

棕榈质量 加筋率/%	纳米 SiO ₂ 质 量百分比/%	c /kPa	φ/(°)
0.8	0	53.1	21.7
	0.5	60.3	24.7
	0.7	70.8	26.3
	1.0	70.9	28.3

2.3 纳米 SiO₂ 对质量加筋率为 1.0% 的棕榈纤维加筋土的影响

2.3.1 对抗剪强度的影响

图9为不同质量百分比的纳米 SiO₂ 作用于质量加筋率为 1.0% 的棕榈加筋土的应力-应变关系.由图9可知,复掺纳米 SiO₂ 后,棕榈纤维加筋土的抗剪强度均提高,分析可得纳米 SiO₂ 可以提高棕榈纤维加筋土的剪切强度.其应力-应变曲线趋势与图7一样,由图9可以看出,纳米 SiO₂ 增加到 0.7% 时,土体的抗剪强度相比没添加纳米 SiO₂ 时有较大提高,并且增加纳米 SiO₂ 到 1.0% 时,土体的抗剪强度增加幅度较小.同图7,随着剪应变的增大,剪应力逐渐增大,且没有明显的峰值强度,其应力-应变曲线呈应变硬化型.

随着纳米 SiO₂ 含量的增加,土体抗剪强度呈现增大趋势,当纳米 SiO₂ 质量百分比为 1.0% 时,剪切强度达到最大值.质量百分比为 0.5%,0.7%,1.0% 的纳米 SiO₂ 棕榈纤维加筋土与不添加纳米 SiO₂ 的棕榈纤维加筋土(质量加筋率 1.0%)相比:垂直压力为 100 kPa 时,抗剪强度分别提高 25%,36%,38%;垂直压力为 200 kPa 时,抗剪强度提高 10%,28%,32%;垂直压力为 400 kPa 时,抗剪强度提高 11%,20%,26%.通过以上比较,可以得出与图7相同的结论:复掺纳米 SiO₂ 在 0.7% 与 1.0% 时,对棕榈纤维加筋土的抗剪强度的提高比较明显.因此纳米 SiO₂ 作为一种新型的加固材料,能够有效加强加筋黏土的抗剪强度.

2.3.2 对黏聚力和内摩擦角的影响

图10为纳米 SiO₂ 对质量加筋率为 1.0% 的棕榈纤维加筋土垂直荷载与最大剪切强度关系的影响.随着纳米 SiO₂ 的增加,土体抗剪强度的提高较为明显,且纳米 SiO₂ 为 0%,0.5%,0.7% 时的 3 条直线接近平行,此时纳米 SiO₂ 对土体的内摩擦角影响较小;纳米 SiO₂ 为 1.0% 时的斜率发生明显变化,说明此时纳米 SiO₂ 对土体的内摩擦角影响较大.表6为纳米 SiO₂ 对黏聚力和内摩擦角的影响,与棕榈纤维加筋土相比:纳米 SiO₂ 为 1.0%,0.7%,0.5% 时,黏聚力分别提高 53%、56%、34%,内摩擦角分别提高 15%、7%、0.4%.可见,纳米 SiO₂ 为 0.7% 时,黏聚力的提高最显著,而纳米 SiO₂ 为 1.0% 时,内摩擦角的提高最显著,但黏聚力的提高幅度较大,这表明黏聚力对黏土抗剪强度的影响更大.

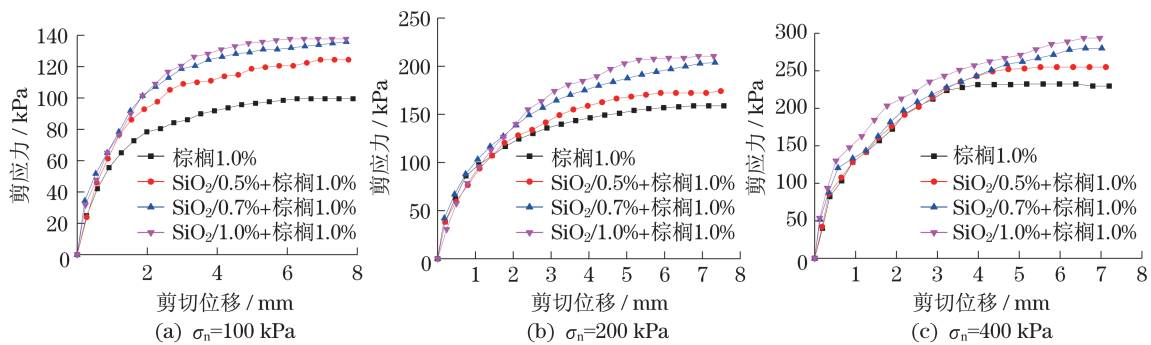


图 9 纳米 SiO_2 对质量加筋率为 1.0% 的棕榈纤维加筋土的剪切位移-剪应力关系的影响

Fig.9 Effect of nano- SiO_2 on shear displacement-shear stress relationship of the clay with 1.0% mass reinforcement percent of palm fiber

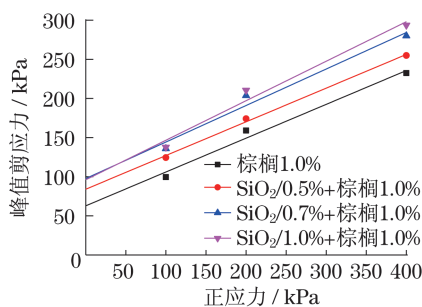


图 10 纳米 SiO_2 对质量加筋率为 1.0% 的棕榈纤维加筋土垂直荷载与最大剪切强度关系的影响

Fig.10 Effect of nano- SiO_2 on relationship between vertical load and the maximum shear strength of the clay with 1.0% mass reinforcement percent of palm fiber

表 6 复掺纳米 SiO_2 棕榈纤维加筋土(质量加筋率为 1.0%)的黏聚力与内摩擦角

Tab.6 Cohesion and internal friction angle of palm fiber reinforced clay (mass reinforcement percent 1.0%) with nano- SiO_2

棕榈质量加筋率/%	纳米 SiO_2 质量百分比/%	c /kPa	φ / $^\circ$
1.0	0	62.7	23.4
	0.5	84.0	23.5
	0.7	97.7	25.0
	1.0	96.1	26.8

2.4 纳米 SiO_2 对质量加筋率为 1.2% 的棕榈纤维加筋土的影响

2.4.1 对抗剪强度的影响

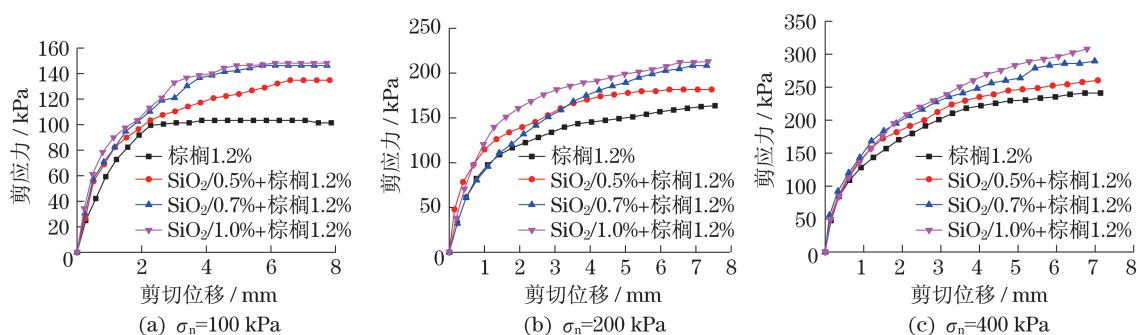
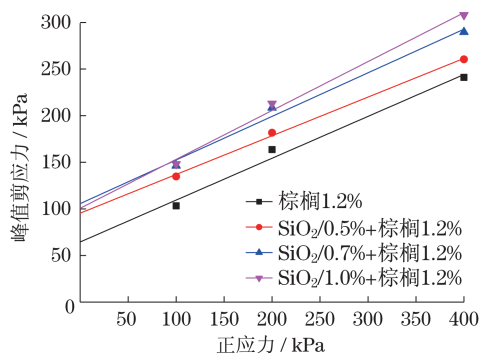
图 11 为不同质量百分比的纳米 SiO_2 作用于质量加筋率为 1.2% 的棕榈纤维加筋土的应力-应变关系. 由图 11 可以看出, 同图 7 和图 9 一样, 复掺纳米 SiO_2 后的加筋土抗剪强度明显提高, 且随着纳米

SiO_2 的增加, 土体的抗剪强度逐渐增强, 在纳米 SiO_2 为 1.0% 时, 土体的抗剪强度最大. 即复掺纳米 SiO_2 可以提高加筋土的抗剪强度. 由图 11 中可以看出, 随着剪应变的增大, 剪应力逐渐增大, 且没有明显的峰值强度, 其应力-应变曲线呈应变硬化型.

随着纳米 SiO_2 的增加, 棕榈纤维加筋土的抗剪强度呈增大趋势, 纳米 SiO_2 质量百分比为 1.0% 时, 剪切强度达到最大值. 质量百分比为 0.5%, 0.7%, 1.0% 的纳米 SiO_2 棕榈纤维加筋土与不添加纳米 SiO_2 的棕榈纤维加筋土(质量加筋率 1.2%)相比: 垂直压力为 100 kPa 时, 抗剪强度提高 30%, 42%, 43%; 垂直压力为 200 kPa 时, 抗剪强度提高 11%, 27%, 30%; 垂直压力为 400 kPa 时, 抗剪强度提高 8%, 20%, 28%. 与添加纳米 SiO_2 到棕榈纤维质量加筋率为 0.8% 和 1.0% 时土体的抗剪强度的增加趋势相同, 在图 11 中纳米 SiO_2 为 1.0% 时, 土体的抗剪强度最大.

2.4.2 对黏聚力和内摩擦角的影响

图 12 为纳米 SiO_2 对质量加筋率为 1.2% 的棕榈纤维加筋土垂直荷载与最大剪切强度关系的影响. 可以看出, 纳米 SiO_2 对质量加筋率为 1.2%, 1.0% 的棕榈纤维加筋土的影响趋势基本相同. 从各条直线间距来看, 强度依次增加, 但增大的幅度各不相同; 各直线的斜率也发生变化, 直线斜率变化最明显的是纳米 SiO_2 为 1.0% 时, 且此时对土体内摩擦角的影响也较大. 表 7 为纳米 SiO_2 对土体黏聚力和内摩擦角的影响, 与棕榈纤维加筋土相比, 纳米 SiO_2 为 1.0%, 0.7%, 0.5% 时的黏聚力分别提高 56%, 63%, 48%, 内摩擦角分别提高 14%, 4%, 1%. 可见, 复掺纳米 SiO_2 为 0.7% 时, 黏聚力的提高最显著, 而复掺纳米 SiO_2 为 1.0% 时, 内摩擦角提高最明显, 但黏聚力的增加幅度较大, 因此黏聚力对黏土抗剪强度的影响更大.

图 11 纳米 SiO₂ 对质量加筋率为 1.2% 的棕榈纤维加筋土的剪切位移-剪应力关系的影响Fig. 11 Effect of nano-SiO₂ on shear displacement-shear stress relationship of the clay with 1.2% mass reinforcement percent of palm fiber图 12 纳米 SiO₂ 对质量加筋率为 1.2% 的棕榈纤维加筋土垂直荷载与最大剪切强度关系的影响Fig. 12 Effect of nano-SiO₂ on relationship between vertical load and the maximum shear strength of the clay with 1.2% mass reinforcement percent of palm fiber表 7 复掺纳米 SiO₂ 棕榈纤维加筋土(质量加筋率为 1.2%) 的黏聚力与内摩擦角Tab. 7 Cohesion and internal friction angle of palm fiber reinforced clay (mass reinforcement rate 1.2%) with nano-SiO₂

棕榈质量 加筋率/%	纳米 SiO ₂ 质 量百分比/%	c /kPa	φ/(°)
1.2	0	64.6	24.2
	0.5	95.5	24.5
	0.7	105.7	25.1
	1.0	100.7	27.7

3 纳米 SiO₂ 和棕榈纤维加固黏土的作用机制

由以上试验分析可以知道,单掺棕榈纤维时,土体的抗剪强度和黏聚力均提高,但内摩擦角的变化

较小. 棕榈纤维质量加筋率为 1.2% 时,土体的抗剪强度最大,相比棕榈纤维质量加筋率为 1.0% 时,抗剪强度的提高幅度较小. 本试验采用的棕榈纤维长度为 12 ± 2 mm,与土混合之后,均匀分散在土壤之中,压实之后,土颗粒与棕榈纤维紧密结合,而棕榈纤维表面有着凹凸明显、粗糙、有短绒、具有一定的“沟槽”等特点,这样的表面能够显著提高纤维与土之间的机械咬合力^[16]. 棕榈纤维在土中交织贯穿,相当于对土体产生围压,当剪切力作用时,棕榈纤维会对土产生压力和摩擦力,约束土体变形,因而增强土体的抗剪强度,黏聚力和内摩擦角都得到提高. 而当加筋纤维过多时,容易在土中形成薄弱层,造成土与纤维之间的黏结作用减弱,反而不会使土体的抗剪强度得到更大增强. 因此,棕榈纤维质量加筋率 1.0% 比 0.8% 时有较大提升,而质量加筋率增加到 1.2% 时,土体抗剪强度只有较小的提高. 因此,棕榈纤维的最佳质量加筋率为 1.0%~1.2%. 此外,棕榈纤维^[17]具有牢固、耐磨、耐盐、透气、质轻、富有弹性、耐腐蚀等特性,单根棕榈纤维呈“圆柱形”. 并且在直剪试验时,发现纤维可增加土体在拉应力作用下的塑性和韧性,防止土工建筑物由于开裂而造成的整体破坏,增强土体的自愈能力^[18].

纳米材料是一种粒径为 1~100 nm 的超细材料,由于纳米材料的小尺寸,与传统土质加固材料相比,具有其独特的结构特性,会产生 4 种效果:尺寸效应、量子效应、表面效应和界面效应^[19]. 在土中添加纳米 SiO₂ 后,由于纳米 SiO₂ 比表面积大,因此均匀混在土壤中时,可以增加与土颗粒之间的密实程度,此时土颗粒之间的部分孔隙被纳米 SiO₂ 填充,土体整体表现为抗剪强度、黏聚力和内摩擦角均得到提高. 并且纳米 SiO₂ 具有吸水特性,因而在土体中吸水后形成凝胶,增强土体的整体性,同时降低黏土的流动性. 概括起来纳米 SiO₂ 作用机理有三层原

因:一是纳米 SiO_2 填充土颗粒之间的孔隙,使土颗粒之间的接触面积增大,增强土体的整体性;二是纳米 SiO_2 对水分子的吸附作用,产生凝胶,因而与周围土颗粒之间黏结更加紧密;三是未吸水的纳米 SiO_2 与周围土颗粒之间形成团聚体.也就是说,黏土颗粒之间有效接触面积随着纳米 SiO_2 的加入而增加,使得土体的密实度和整体性更强,因此可以使土体的抗剪强度、黏聚力与内摩擦角增加.而在棕榈纤维加筋土中复掺纳米 SiO_2 后,棕榈纤维的纤维抗拉作用以及空间交织和土体的摩擦作用,再加上纳米 SiO_2 填充孔隙和形成团聚体以及吸水凝胶作用,使复掺纳米 SiO_2 后的棕榈纤维加筋土的抗剪强度、黏聚力和内摩擦角均得到提高.

4 结 论

a. 相比素土,棕榈纤维加筋土的抗剪强度和黏聚力明显提高,而内摩擦角变化较小.棕榈纤维最佳质量加筋率为 1.0%~1.2%.与素土相比,垂直压力为 200 kPa 时,抗剪强度提高最大,提高了 28%.

b. 相比棕榈纤维加筋土,复掺纳米 SiO_2 后的棕榈纤维加筋土抗剪强度增大.当复掺的纳米 SiO_2 加筋率为 1.0%时,土体的抗剪强度最大.

c. 复掺纳米 SiO_2 后,土体黏聚力与内摩擦角均提高,黏聚力增加幅度更加明显.

在加筋土中复掺颗粒更细、比表面积更大、活性更高的纳米 SiO_2 可以成为一种加强加固方法,纳米 SiO_2 和棕榈纤维的共同作用能更好改善道路黏土状况,在一些重要道路工程建设中可以发挥必要的作用.由于试验是在一定的室内条件下得到的,并未进行工程中的现场实践,所以只是提供了一种研究加筋条件对提高上海黏土强度的方法,对提高上海黏土强度具有一定的参考价值.

参考文献:

- [1] 施亚霖,高世轩.上海某道路工程地质灾害调查与危险性评估[J].西部探矿工程,2008,20(10):227-229.
- [2] 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.
- [3] BASHA E A, HASHIM R, MAHMUD H B, et al. Stabilization of residual soil with rice husk ash and cement[J]. Construction and Building Materials, 2005, 19(6):448-453.
- [4] 赵宁雨,荆林立.纤维加筋红黏土强度特性影响因素的试验[J].重庆理工大学学报(自然科学),2010,24(9):47-51,68.
- [5] JO B W, KIM C H, TAE G T, et al. Characteristics of cement mortar with nano- SiO_2 particles [J]. Construction and Building Materials, 2007, 21(6):1351-1355.
- [6] CHONG K P, GARBOCZI E J. Smart and designer structural material systems[J]. Progress in Structural Engineering and Materials, 2002, 4(4):417-430.
- [7] GAITERO J J, CAMPILLO I, GUERRERO A. Reduction of the calcium leaching rate of cement paste by addition of silica nanoparticles [J]. Cement and Concrete Research, 2008, 38(8/9):1112-1118.
- [8] SOBOLEV K, GUTIÉRREZ M F. How nanotechnology can change the concrete world[J]. American Ceramic Society Bulletin, 2005, 84(10):14-17.
- [9] JENNINGS H M, BULLARD J W, THOMAS J J, et al. Characterization and modeling of pores and surfaces in cement paste; correlations to processing and properties [J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2008, 6(1):5-29.
- [10] YE Q, ZHANG Z, SHENG L, et al. A comparative study on the pozzolanic activity between nano- SiO_2 and silica fume[J]. Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition, 2006, 21(3):153-157.
- [11] 李晗,高丹盈,赵军.纤维纳米混凝土力学性能和抗氯离子渗透性能的研究[J].华北水利水电学院学报,2012,33(6):39-45.
- [12] KHALID N, ARSHAD M F, MUKRI M, et al. The properties of Nano-kaolin mixed with kaolin [J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 19:4247-4255.
- [13] TAHA M R, TAHA O M E. Influence of Nano-material on the expansive and shrinkage soil behavior [J]. Journal of Nanoparticle Research, 2012, 14(10):1190.
- [14] MOHAMMADI M, NIAZIAN M. Investigation of Nano-clay effect on geotechnical properties of Rasht clay [J]. International Journal of Advanced Scientific and Technical Research, 2013, 3(3):37-46.
- [15] JTG E40—2007 公路土工试验规程[S].北京:人民交通出版社,2007.
- [16] 刘晓霞,茅琛.棕叶纤维性能研究[J].上海纺织科技,2006,34(9):20-21.
- [17] 李晓龙.棕榈纤维的基本性能研究[D].重庆:西南大学,2012:27-40.
- [18] 李广信,陈轮,郑继勤,等.纤维加筋粘性土的试验研究[J].水利学报,1995(6):31-36.
- [19] GAO L, REN Z, YU X J. Experimental study of nanometer magnesium oxide-modified clay [J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2015, 52(4):218-224.

(编辑:董伟)