

剑麻纤维/砂土复合材料三轴剪切强度特性

武立林,钱卫*,刘瑾,张化鹏

(河海大学 地球科学与工程学院,江苏 南京 211100)

摘要: 为改善砂土的抗剪强度特性,针对剑麻纤维加筋砂土复合材料,通过一系列不固结不排水三轴试验,对不同纤维掺量、纤维长度和砂土干密度条件下剑麻纤维/砂土复合材料的剪切强度特性进行深入研究,并对剑麻纤维加筋机制进行分析。试验结果表明:复合材料中纤维相对含量改变时,初始刚度变化不大;适量的纤维掺量和纤维长度可以在砂体内形成三维网状结构,对比未加筋试样黏聚力显著提高,表明纤维加筋可有效提高砂土的抗剪强度;由于密度增加使得剪切过程中纤维与砂颗粒间的咬合和滑动摩擦力增加使复合材料抗剪强度显著提高;围压增加纤维与砂土界面有效接触面积导致砂土抗剪强度与峰值偏应力明显增强。采用剑麻纤维加筋砂土可增强砂土间界面作用力,明显改善砂土抗剪强度特性。

关键词: 剑麻纤维;复合砂土材料;三轴试验;剪切特性;破坏应力

中图分类号: TU441

文献标识码: A

Triaxial Shear Strength Characteristics of Sisal Fiber/Sand Composite Material

WU Lilin, QIAN Wei*, LIU Jin, ZHANG Huapeng

(School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210000, China)

Abstract: In order to improve the shear strength characteristics of sand, it is aimed at sisal fiber reinforced sand composite material in this paper. The effect of fiber content, fiber length and dry density on the shear characteristics of reinforced sand was thoroughly studied by unconsolidated-undrained triaxial shear test so as to investigate the reinforcement mechanism of fiber-reinforced sand. The test results show that fiber reinforcement has little effect on the initial stiffness of sand. Appropriate fiber content and fiber length can form a three-dimensional network structure in sandy soil, which higher than that of unreinforced samples. It shows that fiber reinforcement can effectively improve the shear strength of sand. The shear strength of the composite material increases significantly due to the increase in the bite and sliding friction between the fiber and sand particles in the shear process. The increase of confining pressure on the effective contact area between fiber and sand results in the increase of shear strength and peak deviatoric stress. Sisal fiber reinforced sand can enhance the interfacial force between sand and improve the shear strength of sand.

Key words: sisal fiber; composite sand material; triaxial test; shear characteristics; failure stress

砂土主要成分是疏松、未黏结的粒状物质,具有黏聚力低,抗剪强度差,易液化等特点,易引起许多工程地质问题。法国工程师 Henry 于 1963 年首次提出加筋土概念,随后加筋技术在世界各地蓬勃发展^[1]。而短纤维加筋技术在近年来成为研

究热点,其将纤维与砂按比例混合成一种复合材料,短纤维易于搅拌,韧性高强度大,Diambra 等^[2]认为随机分散的短纤维可有效改善各向异性。针对纤维加筋改善砂土复合材料的力学性质,国内外学者进行了大量研究,李广信等^[3]通过剪切和

收稿日期:2020-07-29

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC1508501);江苏省水利科技项目(2017010)

作者简介:武立林(1996-),男,安徽天长人,硕士生,主要从事工程地质研究。

* 通讯作者:钱卫(1963-),男,加拿大人,博士,教授,主要从事工程地质研究。

拉伸试验对纤维加筋粘性土的特征进行研究发
现,纤维加筋可以显著增加粘性土抗剪强度及在
拉力作用下的塑性与韧性;Michalowski 等^[4]通
过对聚丙烯和聚酰胺等合成纤维加筋砂土进行三轴
试验,试验表明加入少量合成纤维会增加复合材
料的破坏应力;Yetimoglu 等^[5]通过直剪试验研究
发现复合材料中纤维的随机分布可以有效减小峰
后强度损失并改善砂土的脆性性能;唐朝生等^[6-8]
通过单纤维拉拔等试验及从扫描电镜微观上分析
土壤颗粒与聚丙烯纤维接触面之间的相互力学作
用,发现纤维表面与土颗粒间的黏结和摩擦可以
增强土体强度;高磊等^[9-10]研究表明玄武岩纤维加
筋的黏土黏聚力与内摩擦角明显增大;钱叶琳
等^[11]使用黄麻纤维对土体进行改良,并研究其强
度特性和改良机理,改良效果良好。Sharma 等^[12]
试验发现纤维夹杂的复合材料抗剪强度和应力-
应变响应显著提高;冯巧等^[13-14]通过无侧限抗压
试验研究表明剑麻纤维和高分子固化剂复合加固
可明显提高砂土力学性质。

上述研究都表明纤维加筋作为一种物理加固
技术,可以有效增强土体强度,剑麻纤维与聚丙烯
等合成纤维相比,弹性模量大,为天然可再生资
源,与砂土混合形成的复合材料可广泛应用于加
固路基、边坡等工程领域。本文以剑麻纤维/砂土
复合材料为研究对象,通过一系列三轴剪切试验
研究了纤维掺量、纤维长度和干密度对非饱和砂
土复合材料抗剪强度和变形特性的影响。从砂-
筋界面作用的角度分析剑麻纤维加筋机制,本文
取得的成果可为剑麻纤维加筋砂土在实际工程
中的应用提供理论依据。

1 材料与方案

1.1 试验仪器和材料

试验采用的仪器为 TSZ-1 全自动三轴仪,主
要由主机、压力控制器、压力传感器、孔压测量系
统、压力室及容器组成,可测试剪切过程中的应力
应变、孔压及变形特征。本次试验采用 UU 试验
研究砂土复合材料的剪切强度特性。试验所采用
的砂土取自于江苏省南京市江宁区,室内烘干并
过 2 mm 筛备用。砂土的颗粒粒径分布见图 1,其
物理性质见表 1,根据《土的工程分类标准》(GB/T
50145—2007)该砂土级配不良。

试验采用的剑麻纤维为天然麻类纤维(束纤

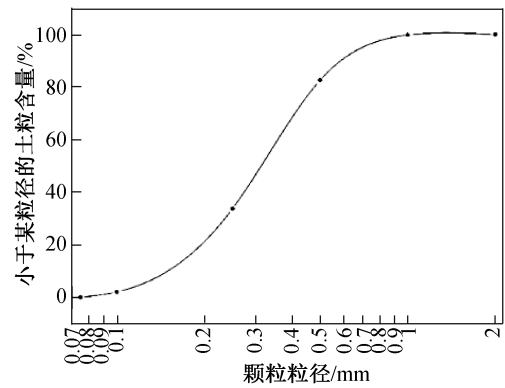


图 1 砂土的颗粒粒径分布曲线
Fig. 1 The particle size distribution curve of the sand

表 1 砂土的物理性质
Tab. 1 Physical properties of the sand

相对密度	天然含水率/%	干密度/(g·cm ⁻³)	孔隙率	均匀系数/C _u	曲率系数/C _c
2.65	2	1.34~1.66	0.59~0.97	2.43	1.11

维),可采用 NaOH 溶液处理纤维去除纤维间的胶
质使其分离为单纤维。与聚丙烯等化学合成纤维
相比,剑麻纤维属于可再生资源,具有可利用程度
高、成本低、弹性模量大、抗拉效果好等优点。本
试验采用的剑麻纤维长度分别为 6、12、18、24、
30 mm(图 2),其主要物理性质如表 2 所示。

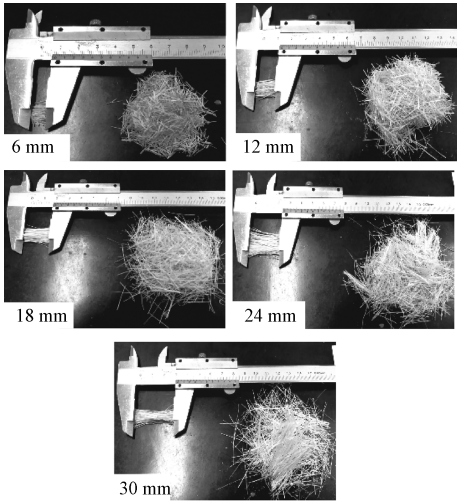


图 2 不同长度的剑麻纤维
Fig. 2 The sisal fiber of different lengths

表 2 剑麻纤维的物理性质
Tab. 2 Physical properties of the sisal fiber

密度/(g·cm ⁻³)	抗拉强度/MPa	平均直径/mm	弹性模量/MPa	分散性
1.2~1.45	450~700	0.25	45.64~55.98	好

1.2 试验方案

为研究纤维掺量(C_f)、纤维长度(L_f)以及砂的干密度(ρ)变化对复合材料强度特性的影响,在不同条件下进行 UU 试验。试验采用质量比制备试样,其中纤维掺量定义为纤维质量与干砂质量百分比:

$$C_f = \frac{M_f}{M_s} \times 100\%$$

其中 C_f (%) 为纤维掺量, M_f (g) 为纤维质量, M_s (g) 为干砂质量。根据 Diambra 等^[2]研究表明试样在采用分层夯实法制样时,会使纤维的水平方向分布占优势;并且当 $C_f \geq 1\%$ 时,纤维聚集成团不易与砂土很好地混合从而导致试样的局部不均匀性。因此,本次研究中选 $C_f = 0.0\%、0.2\%、0.4\%、0.6\%、0.8\%$ 。

本次研究用剑麻纤维/砂土复合材料的制备是依据《土工试验方案标准》(GB/T50123—2019)进行的。首先称取适量水(控制试样含水率为 10%)与适量砂土($\rho = 1.40、1.45、1.50、1.55 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)混合均匀;然后将准备好的纤维加入砂土中搅拌均匀;再将准备好的砂土/纤维混合物的质量分三等分,压力室底座依次将每份试样装入直径 39.1 mm,高 80.0 mm 的对开圆模,填至并分层击实达到指定高度完成制备(图 3)。选取的纤维长度为 $L_f = 6、12、18、24、30 \text{ mm}$ 。

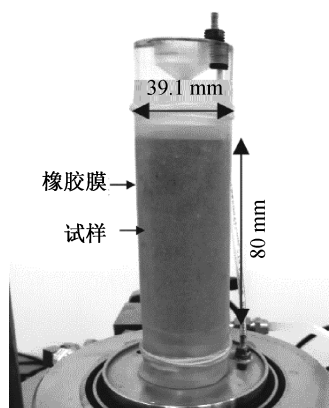


图 3 剑麻纤维/砂土复合材料试样

Fig. 3 The specimen of sisal fiber/sand composite material

本次研究中共制备如表 3 所示的 30 组砂样,每组试样在 100、200、300、400 kPa 4 个不同围压下进行剪切。研究在剪切速率为 0.8 mm/min,以最大应变 $\varepsilon = 20\%$ 的条件下对砂样的抗剪强度及变形特征进行测试。在本次研究中,取峰值强度或应变 15% 时的偏应力为破坏点,记录数据。

绘制 4 个围压(σ_3)下试样破坏时的应力莫尔圆及强度包线,计算得出砂样的黏聚力 c 和内摩擦角 φ 。

表 3 试样基本参数

Tab. 3 Parameters of samples

试验 编号	纤维掺 量/%	纤维长 度/mm	密度 /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
T1	0	0	1.45
T2	0.2	18	1.45
T3	0.4	18	1.45
T4	0.6	18	1.45
T5	0.8	18	1.45
T6	0	0	1.50
T7	0.2	18	1.50
T8	0.2	18	1.50
T9	0.6	18	1.50
T10	0.8	18	1.50
T11	0	0	1.55
T12	0.2	18	1.55
T13	0.4	18	1.55
T14	0.6	18	1.55
T15	0.8	18	1.55
T16	0.2	6	1.50
T17	0.2	12	1.50
T18	0.2	24	1.50
T19	0.2	30	1.50
T20	0.4	6	1.50
T21	0.4	12	1.50
T22	0.4	24	1.50
T23	0.4	30	1.50
T24	0.6	6	1.50
T25	0.6	12	1.50
T26	0.6	24	1.50
T27	0.6	30	1.50
T28	0	0	1.40
T29	0.2	18	1.40
T30	0.4	18	1.40

2 结果与分析

通过 UU 试验研究 C_f 、 L_f 及 ρ 对纤维/砂土复合材料强度特性的影响,记录偏应力与应变关系,绘制偏应力($\sigma_1 - \sigma_3$)与应变 ε 关系曲线。图 4 为 $\rho = 1.50 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、 $C_f = 0.4\%$ 试样在不同围压下($\sigma_1 - \sigma_3$)— ε 关系曲线。由图 4 应力应变曲线斜率分析得出,应变增大过程中,由应力应变曲线斜率分析得出 $\sigma_1 - \sigma_3$ 迅速增加,而后曲线斜率降低表明 $\sigma_1 - \sigma_3$ 增速速率降低至趋于平缓。 σ_3 由 100 kPa 增加至 400 kPa 时,初始应变时的 $\sigma_1 - \sigma_3$ 增加速率

变大,试样峰值偏应力不断增加,表明 σ_3 增加可提升砂样的初始刚度及抗剪强度。

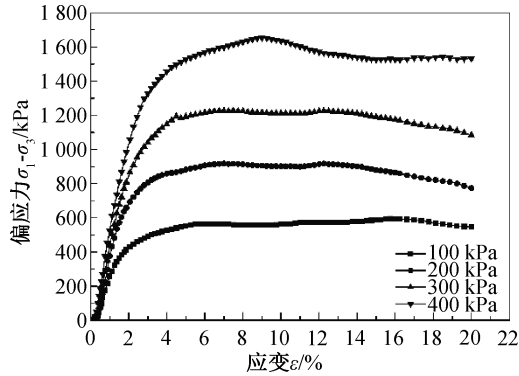


图4 加筋砂样在不同围压下 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon$ 曲线

Fig. 4 The $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon$ curves of reinforced specimens with different confining pressures

2.1 纤维掺量对试样强度特性的影响

L_f 和 σ_3 一定,试样的偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 随 C_f 提高不断增加。图5为 $L_f = 18$ mm 砂样在不同 C_f 下的 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon$ 曲线,由应力应变曲线斜率可看出,试样在 ε 为 0~2% 时, $\sigma_1 - \sigma_3$ 迅速增加,曲线的初始斜率基本不变,即纤维加筋对砂土的初始刚度基本没有影响。未加筋砂样在出现峰值后, $\sigma_1 - \sigma_3$ 有明显下降过程,试样屈服表现为应变软化,随后曲线趋于水平。较纯砂在 ε 约 3% 时试样达到峰值偏应力, $C_f = 0.8\%$ 的砂样在 ε 约为 3% 时发生屈服,而后偏应力仍然不断增加, ε 约为 17% 时达到其峰值偏应力,为典型的应变硬化型。随 C_f 增加,纤维/砂土复合材料的破坏应力明显增加且对应达到破坏应力的 ε 也增大,表明纤维掺量对复合材料的抗变形能力有重要影响。

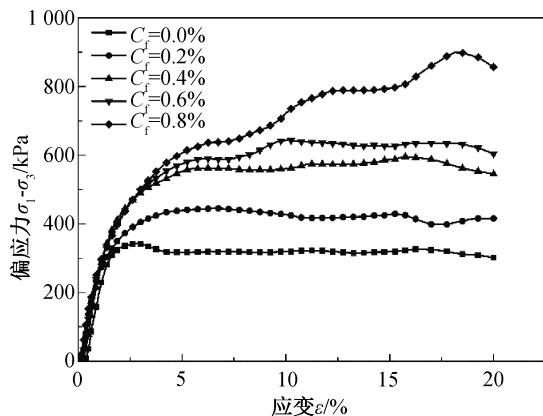
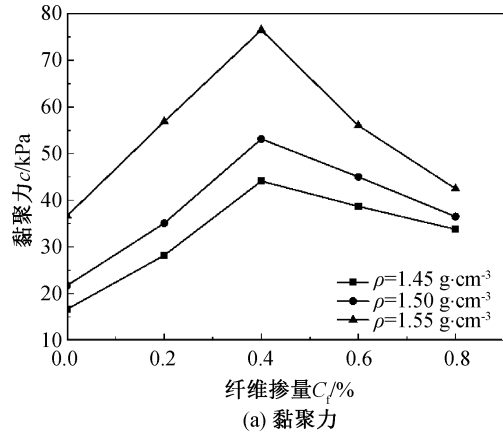


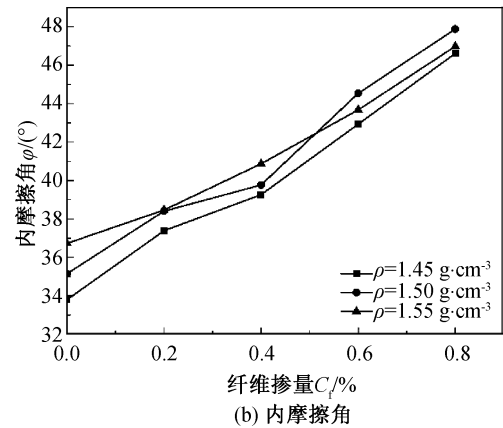
图5 不同纤维掺量试样在 $\sigma_3 = 100$ kPa 下 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon$ 曲线 ($L_f = 18$ mm, $\rho = 1.50$ g/cm³)

Fig. 5 The $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon$ curves of specimens for different fiber contents with $\sigma_3 = 100$ kPa ($L_f = 18$ mm, $\rho = 1.50$ g/cm³)

不同纤维掺量 ($C_f = 0, 0.2\%, 0.4\%, 0.6\%, 0.8\%$) 的砂样试验结果见图6,从图6(a)中看出, ρ 一定, c 随 C_f 增加逐渐增加,当 $C_f = 0.4\%$ 时, c 达到峰值,对应 $\rho = 1.45, 1.50$ 和 1.55 g·cm⁻³, 砂样 $c = 44.11, 53.14$ 和 76.47 kPa, 与未加筋砂样 $c = 16.67, 21.74$ 和 36.67 kPa 相比, c 值分别提升 264%、244% 和 208%。由 $C_f = 0.4\%$ 增至 $C_f = 0.8\%$, c 值开始下降至 33.77、36.49 和 42.47 kPa, 仍大于未加筋砂样的黏聚力。图6(b)表明同一 ρ 下,内摩擦角 φ 随 C_f 增加不断增加,当 C_f 增加至 0.8% 时, φ 相较于未加筋试样提升 10.25°~12.81°。



(a) 黏聚力



(b) 内摩擦角

图6 抗剪强度参数随纤维掺量变化曲线 ($L_f = 18$ mm)

Fig. 6 The variation of shear strength parameter with fiber contents ($L_f = 18$ mm)

2.2 纤维长度对试样强度特性的影响

图7为加筋砂样 $\rho = 1.50$ g·cm⁻³、 $C_f = 0.4\%$ 、 $L_f = 6, 12, 18, 24, 30$ mm 在 $\sigma_3 = 100$ kPa 下的 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon$ 曲线。根据应力应变曲线斜率分析得出,在 ε 为 0~2% 时, $\sigma_1 - \sigma_3$ 提升较快,不同 L_f 试样初始刚度基本相同。 $L_f = 6$ mm 纤维加筋砂样,在到达破坏应力后,偏应力明显下降而后趋于平稳,表现出明显的屈服阶段,与未加筋砂样 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon$ 曲线基本一致。 σ_3 不同时, L_f 增加峰值偏应力都具

有一个先增后减的趋势,在 18 mm 处偏应力增加达到峰值 595.25 kPa,对比未加筋砂样破坏应力 343.19 kPa 提升了 73%,对砂土力学性质具有明显改善效果。6 mm 加筋试样的破坏应力为 375.87 kPa 对比未加筋砂样仅提升 9%,对砂土性能没有明显改善效果。

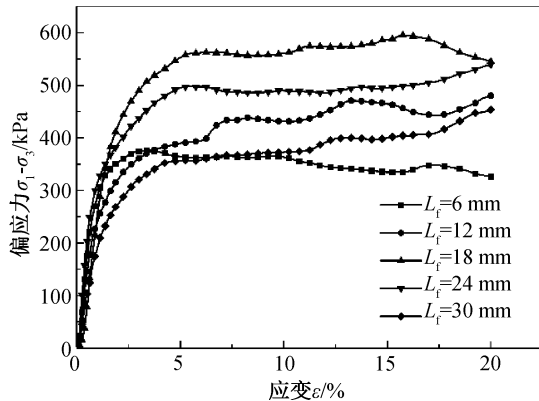


图 7 不同纤维长度试样在 $\sigma_3 = 100$ kPa 下 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon$ 曲线 ($C_f = 0.4\%$, $\rho = 1.50$ g/cm³)

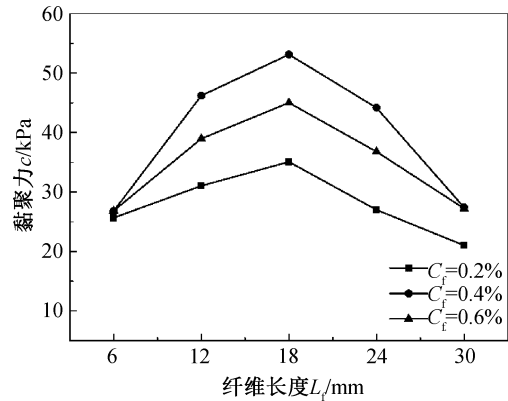
Fig. 7 The $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon$ curves of specimens for different fiber lengths with $\sigma_3 = 100$ kPa ($C_f = 0.4\%$, $\rho = 1.50$ g/cm³)

图 8 给出了不同纤维长度 L_f 砂样试验结果,图 8(a)表明 C_f 相同,黏聚力 c 随 L_f 增加具有先增后减的趋势, c 值在 $L_f = 18$ mm 达到峰值,随后 c 开始降低。 $L_f = 18$ mm、 $C_f = 0.2\%$ 、 0.4% 和 0.6% 时, c_{max} 分别为 35.07、53.14 和 45.01 kPa,较未加筋试样 c 值分别提升了 61%、144% 和 107%,其中 $C_f = 0.4\%$ 时, c 值要普遍高于 $C_f = 0.2\%$ 与 0.6% 的试样的黏聚力。从图 8(b)看出加筋砂样内摩擦角 φ 随 L_f 增加同样为先增后减的趋势,当 $C_f = 0.6\%$ 、 $L_f = 18$ mm 时, φ 最大为 44.54° , φ 在 L_f 大于 18 mm 后开始下降。 L_f 从 12 mm 增加到 18 mm 时,内摩擦角提升的效果最为明显。 $L_f = 6$ mm 时, c 、 φ 随纤维掺量的改变没有明显变化,说明 6 mm 纤维对于砂土抗剪强度的提升没有影响。

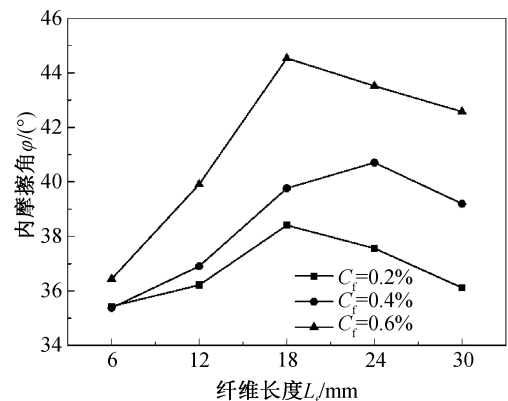
2.3 干密度对试样强度特性的影响

图 9 为加筋试样 $L_f = 18$ mm、 $C_f = 0.4\%$ 、 $\rho = 1.40$ 、 1.45 、 1.50 和 1.55 g/cm³ 在 $\sigma_3 = 400$ kPa 下的 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon$ 曲线。由应力应变曲线斜率可看出, $\sigma_1 - \sigma_3$ 随 ε 先迅速增加至一定值后继续缓慢增加后趋于平缓,符合一般规律。而 $\sigma_1 - \sigma_3$ 及破坏应力随 ρ 增加而缓慢增加,增幅较小,当 ρ 由 1.50 g/cm³ 增至 1.55 g/cm³ 时, $\sigma_1 - \sigma_3$ 明显增大。

图 10 给出了 18 mm 各纤维掺量 C_f 砂样在不同干密度 ρ 的剪切试验结果, C_f 和 L_f 一定时, ρ 提



(a) 黏聚力



(b) 内摩擦角

图 8 抗剪强度参数随纤维长度变化曲线 ($\rho = 1.50$ g/cm³)

Fig. 8 The variation of shear strength parameter with fiber lengths ($\rho = 1.50$ g/cm³)

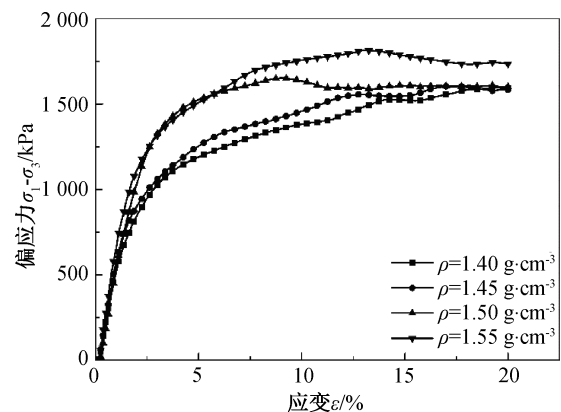
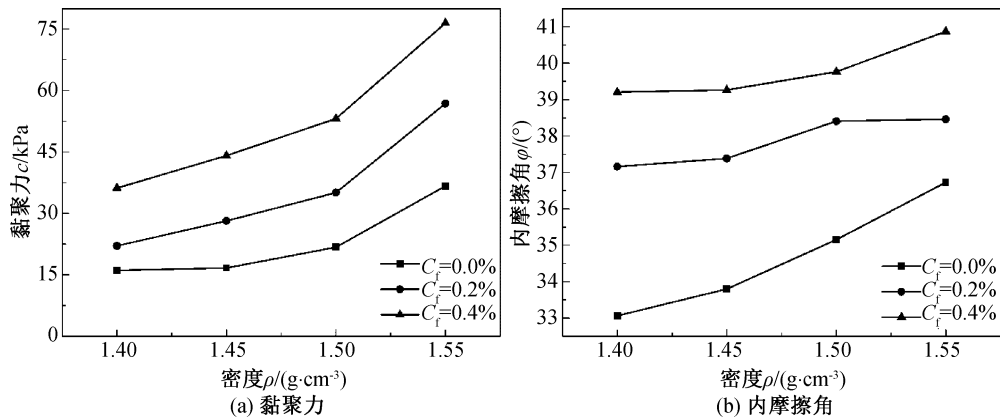


图 9 不同密度试样在 $\sigma_3 = 400$ kPa 下

$(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon$ 曲线 ($L_f = 18$ mm, $C_f = 0.4\%$)

Fig. 9 The $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon$ curves of specimens for different densities with $\sigma_3 = 400$ kPa ($L_f = 18$ mm, $C_f = 0.4\%$)

高可以有效改善砂样的抗剪强度。从图 10(a)中可看出, $\rho = 1.40 \sim 1.55$ g/cm³, c 随 ρ 增大而增大,且在 $1.50 \sim 1.55$ g/cm³ 区间内增加最快。 $C_f = 0$ 、 0.2% 和 0.4% , c 在 $\rho = 1.55$ g/cm³ 处最大分别为 36.67、56.84 和 76.47 kPa,较 $\rho = 1.40$ g/cm³ 处 $c = 16.07$ 、 22.0 和 36.20 kPa 提升了 128%、157% 和

图10 抗剪强度参数随干密度变化曲线 ($L_f = 18 \text{ mm}$)Fig. 10 The variation of shear strength parameter with dry densities ($L_f = 18 \text{ mm}$)

111%。 C_f 不同的砂样,砂样越密实 c 越高。图 10 (b) 表明未加筋与加筋砂样的 φ 在 $1.40 \sim 1.55 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 区间内均随 ρ 增大而增大,但增幅有所区别,未加筋砂样 φ 从 33.06° 增长至 36.73° ,增幅约 4° , $C_f = 0.2\%$ 试样 φ 从 37.16° 增至 38.46° , $C_f = 0.4\%$ 试样 φ 从 39.20° 增至 40.87° ,增幅较小,但加筋砂样 φ 仍远大于同等条件下未加筋砂样 φ 。

3 机制分析

3.1 纤维掺量对试样强度特性影响的机制分析

在试样含水率为 10% 的情况下, C_f 为 $0 \sim 0.4\%$ 时,由于纤维加筋占据砂土颗粒之间的孔隙,使其孔隙率减小,土/土与土/筋之间毛细水作用增强,使其黏聚力增加。 C_f 超过 0.4% 时,颗粒间的孔隙过低,且纤维本身吸收水分,反而使得毛细水作用力减小, c 降低,但仍大于未加筋砂样。 C_f 较低时,较少纤维散布在砂土颗粒间,受力变形时,砂土颗粒与纤维之间的咬合摩擦力和滑动摩擦力起主要作用, φ 增加。 C_f 增加,纤维不仅提供单根拉筋作用,较多的纤维组成三维结构,土-筋间咬合摩擦力和滑动摩擦力显著提高,使 φ 随 C_f 增加不断增加。

在试样压缩变形过程中,试样内砂粒重新排布,纤维重新定向,对于围压和纤维含量较高的纤维,峰后偏应力没有明显下降。试验结果表明,纤维加筋能使砂土的脆性行为发生改变,使其具有一定的延展性,即增加了纤维加筋砂样的韧性,加入纤维后,砂土的抗剪强度增强。说明纤维加筋对较小轴向应变作用不大,随着轴向应变的增大,颗粒间相互错动,土-筋间咬合摩擦力和滑动摩擦力限制纤维相对于颗粒的滑动,分布在孔隙间纤

维被逐渐拉伸至绷直状态,由于其弹性模量高达 $450 \sim 700 \text{ MPa}$,承受了较大拉力,颗粒重新排布的阻力变大,限制了砂体的径向形变,说明纤维加筋有效地改善了砂土的力学性质。图 11 展示了未加筋砂样与 $C_f = 0.8\%$ 加筋砂样达到破坏应力时的对比,根据 Hatibu 等^[15] 的破坏模式判定,未加筋试样具有明显剪切面,而纤维加筋具有明显的韧性破坏模式,说明纤维加筋可以有效地增强砂样的韧性和抗变形的能力。

(a) 未加筋砂样 (b) $C_f = 0.8\%$ 加筋砂样

图 11 试样破坏对比图

Fig. 11 The contrast image of sample failure

3.2 纤维长度对试样强度特性影响的机制分析

当砂的颗粒粒径与纤维长度接近时,对砂土强度特性不会起强化效果。纤维加筋的长度至少要比晶粒的尺寸大一个数量级,否则复合材料中没有有效的砂-纤维相互作用,与 Radoslaw 等^[16] 提出的观点一致。 L_f 增加,即使纤维数量减少,但较长纤维仍比短纤维对复合强度的贡献更大,砂样受力剪切过程中,纤维的轴向拉力与纤维与砂体间界面摩擦力相等(图 12),更长的纤维可以提供更大应力,对复合材料的强度贡献更大,试样的 c 、 φ 均有明显提升,但在 $L_f = 18 \text{ mm}$ 时达到临界

值。纤维长度过长时,纤维数量减少,且在装样过程中纤维易贴于内壁,使在试样中竖直分布的纤维数量增多。在砂样中在三轴剪切过程中,纤维水平分布与砂体延伸方向一致对于砂体应力提升贡献最大,砂体中竖直分布的纤维剪切过程中受到压缩,对于应力的提升没有作用。导致纤维长度从 18 mm 继续增加使其抗剪强度反而降低。

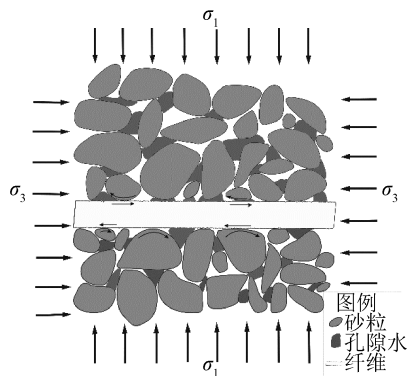


图 12 纤维与砂粒局部作用力示意图

Fig. 12 The schematic of local force between fibers and sand particles

3.3 干密度对试样强度特性影响的机制分析

砂样由松散到密实,其孔隙率降低,显著提高砂-砂及砂-筋间有效接触面积,且由于砂颗粒硬度远远大于纤维硬度,纤维未发生明显形变,而随着复合材料试样密度增加,纤维被砂颗粒挤压发生塑性形变(图 13)。说明在击实制备干密度较大的砂样过程中,砂颗粒挤压纤维使其发生塑性形变,表面变得更加粗糙,砂颗粒对纤维体渗透深度变大,砂颗粒与纤维间更加契合。由于有效接触面积的改变直接影响摩擦力与黏结力大小,两种因素使得砂样在受力变形过程中剪切阻力显著提高。

4 结论

1)在砂性土中掺入纤维可以有效改善砂体的抗剪强度参数以及抗变形能力,100 kPa 的围压条件下,随着纤维掺量的增加,相较于纯砂在 ε 约为 3% 时试样达到峰值偏应力 343.18 kPa,0.8% 掺量的砂样在 ε 约为 3% 时发生屈服后,偏应力仍然不断增加,至 ε 约为 17% 时才达到峰值偏应力 899.17 kPa,为典型的应变硬化型。有效提高了土体韧性,密度一定,黏聚力随纤维掺量增加逐渐增加,当 $C_f = 0.4\%$ 时,黏聚力达到峰值 53.14 kPa,而内摩擦角 φ 随纤维掺量增加不断增加,当 C_f 增加至 0.8% 时, φ 相较于未加筋试样提升 10.25°~12.81°。提

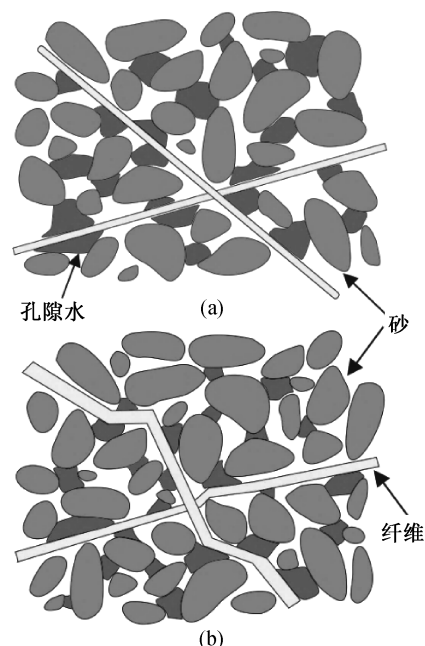


图 13 不同密度试样接触关系微观示意图

Fig. 13 Microcosmic diagram of contact relationship of samples with different densities

升复合材料抗变形能力,纤维加筋对材料的初始刚度没有影响。

2)随着纤维长度增加,纤维/砂土复合材料的抗剪强度参数及峰值偏应力呈现一个先增后减的趋势,纤维长度 18 mm,纤维掺量 0.4% 时,黏聚力为 53.14 kPa 较未加筋试样提升了 144%,内摩擦角最大为 44.54°,当 L_f 大于 18 mm 后开始下降。100 kPa 围压下,偏应力增加达到峰值 595.25 kPa,对比未加筋砂样破坏应力 343.19 kPa 提升了 73%,此时纤维长度 18 mm 为最优纤维加筋长度。同等纤维掺量的纤维数量与长度更适合形成有效的三维网状结构,提升纤维在拉伸受力过程中的咬合摩擦力。

3)复合材料随干密度增加变得密实,孔隙减小,纤维发生塑性形变,砂-筋间有效接触面积增加,界面作用力提高,纤维长度 18 mm、纤维掺量 0.4%,当试样密度由 $1.40 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 增加到 $1.55 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 时,100 kPa 围压下偏应力由 565.60 kPa 增加至 685.44 kPa,剪切变形过程中阻力增大,可以更加充分发挥纤维加筋作用,同时密度的增加对抗剪强度参数的提升较小。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] DIAMBRA A, IBRAIM E, WOOD D M, et al. Fibre Re-

- inforced Sands: Experiments and modelling[J]. *Geotextiles & Geomembranes*, 2010, 28(3): 238-250.
- [3] 李广信, 陈 轮. 纤维加筋粘性土的试验研究[J]. *水利学报*, 1995 (6): 31-36.
- [4] MICHALOWSKI R L, ČERMÁK J. Triaxial Compression of Sand Reinforced with Fibers[J]. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 2003 (129): 125-136.
- [5] YETIMOGLU T, SALBAS O. A Study on Shear Strength of Sands Reinforced with Randomly Distributed Discrete Fibers[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2003, 21 (2): 103-110.
- [6] 唐朝生, 施 斌, 顾 凯. 纤维加筋土中筋/土界面相互作用的微观研究[J]. *工程地质学报*, 2011, 19(4): 610-614.
- [7] 唐朝生, 顾 凯. 聚丙烯纤维和水泥加固软土的强度特性[J]. *土木工程学报*, 2011 (Z2): 5-8.
- [8] 唐朝生, 施 斌, 高 玮. 聚丙烯纤维和水泥对粘性土强度的影响及机理研究[J]. *工程地质学报*, 2007, 15 (1): 108-113.
- [9] 高 磊, 胡国辉, 陈永辉, 等. 玄武岩纤维加筋黏土三轴试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(S1): 198-203.
- [10] 高 磊, 胡国辉, 杨 晨, 等. 玄武岩纤维加筋黏土的剪切强度特性[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(S1): 231-237.
- [11] 钱叶琳, 王 洁, 吕卫柯, 等. 黄麻纤维加筋土的强度特性及增强机理研究[J]. *河北工程大学学报: 自然科学版*, 2016, 33(3): 19-24.
- [12] SHARMA V, KUMAR A. Strength and Bearing Capacity of Ring Footings Resting on Fibre-Reinforced Sand[J]. *International Journal of Geosynthetics & Ground Engineering*, 2017, 3(1): 9.
- [13] 冯 巧, 刘 瑾, 卢 毅, 等. 一种复合加固剂改良砂土的强度试验研究[J]. *工程地质学报*, 2017, 25(4): 903-911.
- [14] WEI J H, KONG F X, LIU J, et al. Effect of Sisal Fiber and Polyurethane Admixture on the Strength and Mechanical Behavior of Sand[J]. *Polymers*, 2018, 10, 1121-1135.
- [15] HATIBU N, HETTIARATCHI D R P. The Transition From Ductile Flow to Brittle Failure in Unsaturated Soils [J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1993, 54(4): 319-328.
- [16] MICHALOWSKI R L, ČERMÁK J. Strength Anisotropy of Fiber-reinforced Sand [J]. *Computers and Geotechnics*, 2002, 29(4): 279-299.

(责任编辑 王利君)

(上接第25页)

3) 现场采用阴离子型聚丙烯酰胺进行泥浆絮凝处理效果良好, 与室内试验结果基本吻合, 可快速达到理想的絮凝、沉降、上浮、泥浆脱水处理效果。既降低了施工生产成本, 又可大幅提高泥浆处理效率。

4) 絮凝剂的最佳添加量并非一成不变, 对于不同密度、粘度的泥浆则需根据实际情况不断调整以达到最佳效果。

参考文献:

- [1] 曾垂刚. 泥水盾构泥浆循环技术的探讨[J]. *隧道建设*, 2009, 29(02): 162-165.
- [2] 何 川, 曾东洋. 盾构隧道结构及施工对环境的影响[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2007.
- [3] LI Y, EMERIAULT F, KASTNER R. Stability Analysis of Large Slurry Shield-driven Tunnel in Soft Clay[J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2009, 24(4): 472-481.
- [4] SHEN J Q, JIN X L, LI Y, et al. Numerical Simulation of Cutterhead and Soil Interaction in Slurry Shield Tunneling[J]. *Engineering Computations*, 2009, 26(7/8): 985-1005.
- [5] PALLA B J, SHAH D O. Stabilization of High Ionic Strength Slurries Using the Synergistic Effects of a Mixed Surfactant System [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2000, 233(1): 102-111.
- [6] 房 凯, 张忠苗, 刘兴旺, 等. 工程废弃泥浆污染及其防治措施研究[J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(Z2): 238-241.
- [7] 张亚洲, 夏鹏举, 魏代伟, 等. 南京纬三路过江通道泥水处理及全线路废弃土再利用技术[J]. *隧道建设*, 201, 35(11): 1229-1233.
- [8] 姜 腾, 姚占虎, 闵凡路. 废弃黏土在泥水盾构泥浆配制中的再利用研究[J]. *隧道建设*, 2014(12): 1148-1152.
- [9] 梁止水, 杨才千, 高海鹰, 等. 建筑工程废弃泥浆快速泥水分离试验研究[J]. *东南大学学报: 自然科学版*, 2016, 46(2): 427-433.
- [10] 杨春英, 白晨光, 马庆松. 絮凝固液分离技术处理废弃泥浆实验研究[J]. *实验室科学*, 2013, 16(01): 50-53.
- [11] 杨春英, 徐 薇, 白晨光. 施工废弃泥浆絮凝脱水试验及机理分析[J]. *环境科技*, 2013, 26(5): 15-17.
- [12] 李 旭. 泥水盾构废弃泥浆絮凝脱水试验研究[J]. *铁道建筑*, 2018, 58(5): 144-147.
- [13] 高 宇, 周普玉, 杨 霞. 絮凝剂对工程废弃泥浆脱水性能的影响[J]. *环境工程学报*, 2017, 11(10): 5597-5602.
- [14] 张 涛, 艾英铎, 范志浩, 等. 吹填泥浆絮凝沉降规律研究[J]. *河北工程大学学报: 自然科学版*, 2017, 34(3): 50-55.

(责任编辑 王利君)