

文章编号:1673-9469(2021)01-0032-08

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2021.01.006

高分子聚合物-剑麻纤维复合加固砂土抗压特性试验研究

江灿琿¹,吴鸣飞²,刘瑾^{1*},祁长青¹,钱卫¹,李明阳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,杭州 浙江 311122)

摘要: 针对砂土容易引发工程地质灾害问题,选用聚氨酯高分子聚合物和剑麻纤维复合加固砂土,对不同固化剂含量和纤维含量复合加固砂土的无侧限单轴抗压特性进行了评价,并运用电子显微镜(SEM)分析了复合加固砂土的微观力学机理。随着固化剂含量和纤维含量的增加,砂土的弹性模量、抗压强度和韧性均显著提高,试样破坏形态随纤维含量的增加由“花瓣状”向缝合线状过渡。聚氨酯通过提高土-土/纤维互锁力、土-纤维黏结力和土-纤维摩擦力,增强了纤维的加筋效果。

关键词: 砂土;聚氨酯高分子聚合物;剑麻纤维;抗压强度;脆性

中图分类号: TU442

文献标识码: A

Experimental Study on Compressive Characteristics of Sand Reinforced by Polymer and Sisal Fiber

JIANG Canhui¹, WU Mingfei², LIU Jin^{1*}, QI Changqing¹, QIAN Wei¹, LI Mingyang¹

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

2. East China Survey and Design Research Institute Co., LTD., China Power Construction Group, Hangzhou, Zhejiang 311122, China)

Abstract: Sand widely distributed in engineering is easy to cause a series of engineering geological disasters due to its loose structure and poor engineering properties. In this paper, the unconfined uniaxial compressive characteristics of sand reinforced by polyurethane polymer and sisal fiber were evaluated, and the micromechanical mechanism of sand reinforced by different curing agent and fiber contents was analyzed by electron microscope (SEM). With the increase of curing agent content and fiber content, the elastic modulus, compressive strength and toughness of sand soil increases significantly, and the failure morphology of the sample changes from "petal-like" to suture line shape with the increase of fiber content. Polyurethane enhances the reinforcing effect of fiber by improving soil-soil/fiber interlock force, soil-fiber bonding force and soil-fiber friction force.

Key words: sand; polyurethane polymer; sisal fiber; compressive strength; brittleness

砂土常见于各种岩土工程施工场地,如道路工程、地基工程、边坡工程、城市地下工程等。由于其结构松散,孔隙较大,在饱水状态下受到振动易发生砂土液化,引起沙涌、地基不均匀沉降、地裂滑坡等一系列工程地质灾害。针对这一问题,改良砂土成为近年来学者研究的热点。水泥、石灰、粉煤灰等工业废渣被用于土体结构的改善,增

加了土体的强度和刚度^[1-3]。但是,这些传统添加剂改性土表现出较大的脆性,容易导致土体突然丧失强度。近年来,聚合物作为一种新型添加剂在土体中的加固效果得到了许多学者的验证^[4-7]。王龙威等人在极端温度条件下开展了聚氨酯型固化剂加固砂土的无侧限单轴抗压试验,研究表明在两种极端温度下($\geq 35\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $\leq -10\text{ }^\circ\text{C}$),聚氨酯的

收稿日期:2020-11-08

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YCF1508501);国家自然科学基金资助项目(41877212);中央高校基本科研业务费项目(B20020202013)

作者简介:江灿琿(1996-),男,福建三明人,硕士研究生,主要从事环境地质工程、地质灾害监测方面的工作。

* 通讯作者:刘瑾(1983-),女,福建漳州人,工学博士,教授,博士研究生导师,主要从事环境地质工程、地质灾害监测方面的工作。

掺入均提高了试样的抗压强度与韧性^[4]。岳跃展等人研究了乙烯醋酸乙烯酯对油井水泥力学特性的影响,聚合物的掺入能提高水泥石的抗折强度和韧性^[6]。这些研究成果表明,聚合物在土体加固中具有广阔的应用前景。相比于传统物理加固方法,如土工织物、土工膜等,天然短纤维的加固方式以其分散性强、各向同性好、易与土体混合、强度高、价格便宜、天然环保等优点得到了许多学者的广泛关注,并开展了大量研究,如竹纤维、椰壳纤维、棕麻纤维、剑麻纤维等^[8-12]。研究表明纤维的掺入能显著提高土体强度,限制破坏过程中裂隙的发育,提高土体塑性变形能力。李良勇等人通过直剪试验研究了椰壳纤维长度和含量对红黏土抗剪强度的影响,研究表明椰壳纤维在长度小于 5 cm 和掺量小于 0.5% 时,纤维的掺入均提高了试样的抗剪强度^[9]。吴燕开等人的研究发现随机分布剑麻纤维能有效提高粘性土的无侧限抗压强度和剪切强度^[12]。

综上所述,化学与物理加固均存在各自的优点,复合加固效果自然引起了广大学者的关注^[13-16]。粉煤灰和纤维加固的土壤表现出更好的强度与韧性^[13-14]。Antonio 等人研究发现在粘结剂的作用下,纤维的掺入显著提高了土体的韧性和抗拉强度^[15]。尽管复合加固处理土体的做法越来越受到工程实践的关注,但由于土体、加固材料、使用条件的多样性,复合加固土体的方式仍值得进一步研究。本文采用聚氨酯高分子聚合物和剑麻纤维复合加固砂土,通过无侧限单轴抗压强度试验研究固化剂含量、纤维含量对复合加固砂土抗压特性的影响,并基于 SEM 图像分析聚氨酯和纤维改变土体结构的微观力学机理。

1 试验方案

1.1 试验材料

1.1.1 砂土

本次试验的砂土选自南京市江宁地区,在试验室内烘干后冷却至室温,经过 2 mm 直径的筛子筛选后,进行其本身物理性质的测定。砂土的物理性质和粒径分布图分别见表 1 和图 1。砂土的最小干密度和最大干密度分别为 1.35、1.69 g/cm³,作为此次试验中砂土密度参量的参考范围。由于砂土的不均匀系数 $C_u = 2.4 < 5$,曲率系数 $C_c = 1.13 \in (1, 3)$,砂土为不良级配。

表 1 砂土基本物理性质

Tab. 1 Basic physical properties of sand

孔隙率	干密度 $\rho_d / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	比重 G_s	不均匀系 数 C_u	曲率系 数 C_c
$e_{\max} = 0.97$	$\rho_{\max} = 1.69$	2.65	2.4	1.13
$e_{\min} = 0.59$	$\rho_{\min} = 1.35$			

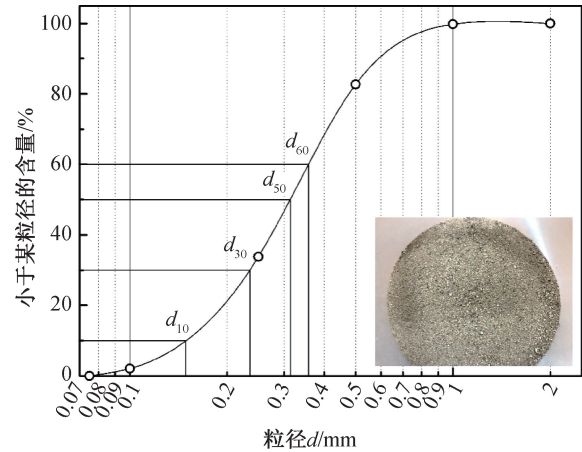


图 1 砂土颗粒累计级配曲线

Fig. 1 Cumulative grain gradation curve of sand

1.1.2 聚氨酯高分子聚合物

本次试验复合加固所用的固化剂为聚氨酯高分子聚合物(表 2),它是一种亮黄色透明稠状液体(图 2(b)),并对环境完全无害。它主要由聚氨基甲酸乙酯树脂组成,其中包含的大量官能团($-NCO$)能和水快速发生反应,形成乳白色的溶液(图 2(c)),产生 CO_2 ,并和氧气继续反应,逐渐凝固为乳白色的弹性薄膜。稳定剂的凝固时间为 30 s 到 1 800 s,随着固化剂浓度的增加,其凝固时间逐渐减小。固化剂与水反应后,其质量可增加超过 40 倍。

表 2 聚氨酯基本物理性质

Tab. 2 Basic physical properties of polyurethane

固含 量/%	密度 $/(g \cdot cm^{-3})$	pH	粘度 $/(MPa \cdot s)$	凝固时 间/s
85	1.18	6~7	650~700	30~1 800

1.1.3 剑麻纤维

本次试验复合加固所用的纤维为天然纤维——剑麻(图 2(d)),因其价格低廉,密度小但质地坚韧、耐磨、耐腐蚀,是当今世界上用量最大,范围最广的一种硬质纤维。剑麻纤维质地较硬,呈白色或淡黄色,表面粗糙,存在沿剑麻生长方向的纹路。其抗拉性质见表 3,纤维的抗拉强度和模量分别达到 220~1 000 MPa 和 10~27 GPa。

表3 剑麻纤维基本物理力学性质

Tab.3 Basic physical and mechanical properties of sisal fiber

类型	长度/mm	直径/mm	弹性模量/GPa	抗拉强度/MPa
白色单根纤维	18	0.1~0.3	10.94~26.70	227.80~1 002.30

1.2 试验过程

1.2.1 试样制备

本次试验中制样的仪器(图2(f))为本课题组设计的专利,主要由模具、传压棒、底座、千斤顶四部分组成。称取适量砂土和对应量的纤维均匀混合,然后称取定量固化剂与适量的水反应后,迅速将两者搅拌均匀,倒入模具内,施加压力使试样高度达到80 mm要求,继续保持荷载2 min后,取出试样放入25℃恒温箱内养护48 h后,进行无侧限单轴抗压强度试验。本次试验主要通过无侧限单轴抗压强度试验评价高分子聚合物-剑麻纤维复合加固砂土的抗压特性,根据《土工试验标准》,确定本次试验试样(图2(g))的标准直径为39.1 mm,标准高度为80 mm。为了研究固化剂含量、剑麻纤维含量对复合加固砂土抗压特性的影响,试验一共包括20组试样,每组试样含有3个平行试样。试验参量的设定分别为固化剂含量(C_p):0%、1%、2%、3%、4%,纤维含量(C_f):0%、0.2%、0.4%、0.6%、0.8%,试样干密度均设为1.50 g/cm³,含水率均设定为10%。

1.2.2 无侧限单轴抗压强度试验

本次试验所使用的仪器为应变控制无侧限压力仪,装配YYW-2应变控制型无侧限压力表(南京砂仪厂有限公司制造),养护后的试样放置于升降台上,转动滚轮,在试样接触压力表指针移动时,停止转动并将压力表调零后,启动开关以

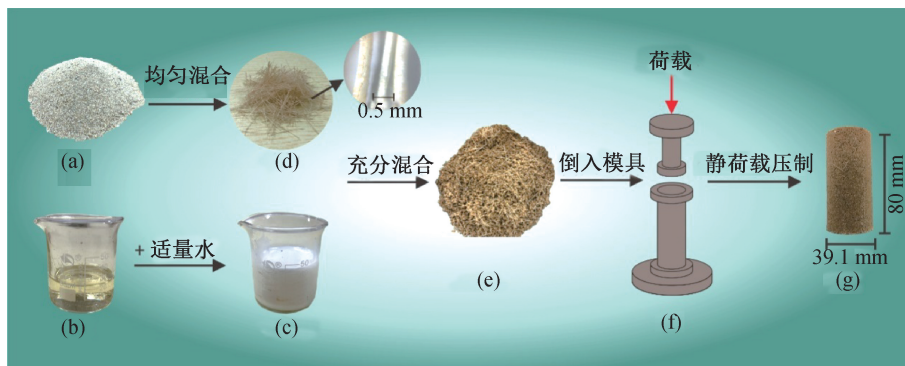
2.4 mm/min压缩速率开始试验。轴向位移表指针每移动0.4 mm,记录当前压力表示数,直到轴向应变达到20%时停止试验。为减少试验误差,每组试样设置3个平行试样进行试验,抗压强度取平均值并计算标准差,对标准误差大于10%的试样组重新制样试验。

2 试验结果及分析

基于研究固化剂含量、纤维含量对试样单轴无侧限抗压特性的影响,共计20组试样试验结果见表4。通过无侧限单轴抗压强度试验记录的某组试样数据以轴向应变(0~20%)为横轴,轴向应力(kPa)为纵轴绘制应力-应变曲线(图3),本研究中,若曲线出现峰值则取峰值应力为该试样的抗压强度(σ_{e1} 、 σ_{e2} 、 σ_{e3})参与该组试样抗压强度平均值(σ_c)和抗压强度标准差(σ)的计算;若曲线未出现峰值,则取20%轴向应变对应的峰值应力同上处理;并取中间峰值应力 σ_{e2} 对应的应变为峰值应变(ε_p)。

2.1 固化剂含量影响

本次试验固化剂变量设置为0%、1%、2%、3%、4%,由于所用试验砂土自身粘聚力不足,如不添加固化剂无法成样,因此未将0%试样试验结果列出,其余变量试样试验结果见表4。图4为不同固化剂含量试样应力-应变曲线,随 C_p 的增加,试



注:(a)试验所用的砂土;(b)聚氨酯高分子聚合物;(c)聚氨酯高分子聚合物水溶液;
(d)剑麻纤维;(e)试验材料混合物;(f)制样仪器;(g)试验试样。

图2 抗压试样制备过程

Fig.2 The preparation process of compressive specimens

表 4 不同 C_p 和 C_f 试样的试验结果
Tab. 4 Test results of samples with different C_p and C_f

$C_f/\%$	$C_p = 1\%$				$C_p = 2\%$			
	σ_c/kPa	$\varepsilon_p/\%$	σ/kPa	E/MPa	σ_c/kPa	$\varepsilon_p/\%$	σ/kPa	E/MPa
0	78.15	9.68	3.12	1.45	197.96	9.01	11.43	5.15
0.2	157.30	7.09	10.57	3.06	399.02	11.10	31.90	6.52
0.4	240.38	6.91	3.37	4.58	497.67	11.50	14.28	7.72
0.6	413.45	8.89	37.80	5.74	608.82	12.00	34.42	8.69
0.8	492.29	10.00	25.67	6.48	833.62	11.85	68.69	9.23
$C_f/\%$	$C_p = 3\%$				$C_p = 4\%$			
	σ_c/kPa	$\varepsilon_p/\%$	σ/kPa	E/MPa	σ_c/kPa	$\varepsilon_p/\%$	σ/kPa	E/MPa
0	238.65	8.65	12.58	6.62	257.92	7.72	15.97	8.84
0.2	438.25	13.67	4.72	6.99	529.21	20.00	24.19	8.31
0.4	666.90	13.50	13.85	7.49	754.82	20.00	3.85	10.35
0.6	861.89	18.27	44.39	8.65	1 040.76	20.00	86.71	12.64
0.8	1 250.53	20.00	14.52	11.86	1 476.10	20.00	100.88	14.84

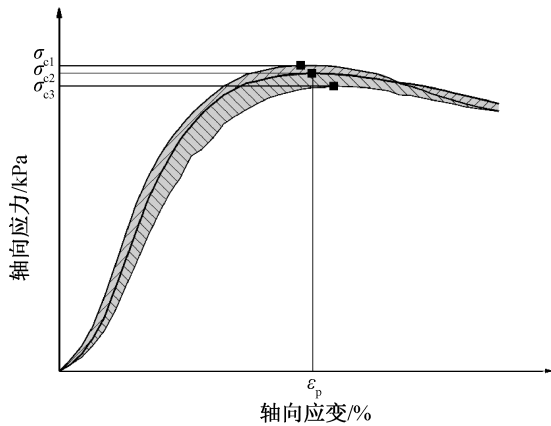


图 3 某组试样的轴向应力-应变曲线

Fig. 3 Axial stress-strain curves of a group of samples

样在峰前弹性阶段抵抗变形的能力逐渐上升,并且当 $C_p \leq 2\%$ 时,抵抗弹性变形的能力受 C_p 影响更加显著。例如:1%~4% C_p 试样的弹性模量 E 分别为 1.45、5.15、6.62、8.84 MPa,增长率分别为 256%、29%、34%。同时,随着 C_p 的增加,试样的抗压强度呈现出与弹性模量相似的规律。例如:1%~4% C_p 试样的抗压强度 σ_c 分别为 78.15、197.96、238.65、257.92 kPa,增长率分别为 153%、21%、8%。不难看出, C_p 的增加提高了峰前弹性阶段抵抗变形的能力,即试样的刚度,进而提高了试样的强度。但实际工程在考虑地质体强度基础上,仍需要对其塑性变形能力有所要求。因此前人针对应力-应变曲线峰后特性提出了关于脆性指数的概念,用于评价工程材料的塑性变形能力。周辉等人在总结分析前人提出的脆性指标后,基于应力-应变曲线峰后特性提出了评价脆性的新指标 B_d ,并已通过大量室内试验验证了其可靠

性^[17]。

$$B_1 = \frac{\tau_p - \tau_r}{\tau_p} \quad (1)$$

式中: B_1 表示峰后应力降的相对大小,取值范围 0~1; τ_p 表示峰值强度,即 A 点坐标对应的应力值; τ_r 表示残余强度,本次试验中用数据点拟合的平滑曲线峰后第一个拐点 C 点坐标对应的应力值代替残余强度参与计算。

$$B_2 = \frac{\lg |k_{AC}|}{10} \quad (2)$$

式中: B_2 表示峰后应力降的绝对速率,取值范围 0~1; k_{AC} 表示峰值起始点(A)到残余起始点(C)的斜率(图 4)。

$$B_d = B_1 B_2 \quad (3)$$

式中, B_d 取值范围 0~1,值越大表示脆性越强。计算结果见表 5。

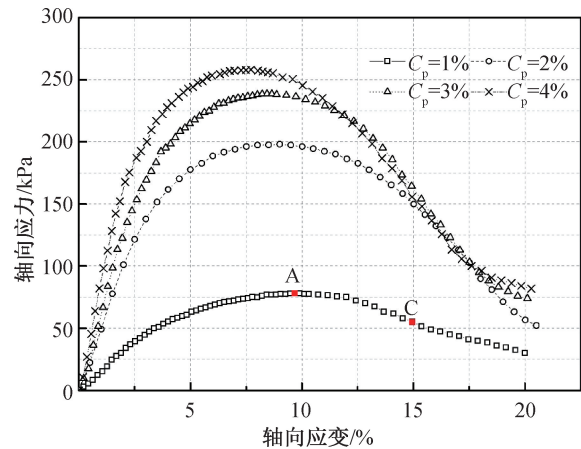


图 4 不同 C_p 试样的应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of samples with different C_p

表 5 不同 C_p 试样的脆性指标

Tab. 5 Brittleness index of samples with different C_p

参数	B_1	B_2	B_d
$C_p = 1\%$	0.30	0.26	0.08
$C_p = 2\%$	0.49	0.31	0.15
$C_p = 3\%$	0.36	0.31	0.11
$C_p = 4\%$	0.35	0.31	0.11

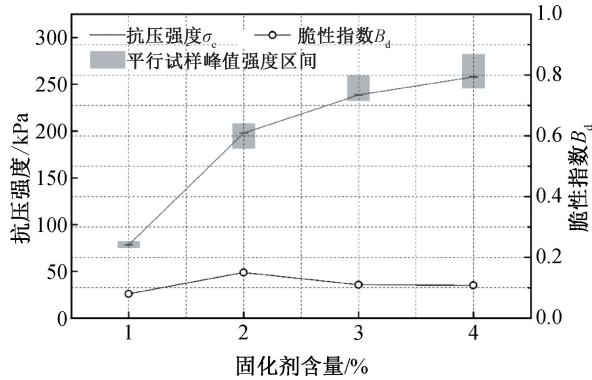


图 5 不同 C_p 试样的抗压强度与脆性指标

Fig. 5 The compressive strength and brittleness index of samples with different C_p

如图 5,假设将未添加固化剂而无法成样的试样脆性指数定义为 1,则被加固试样脆性指数 B_d 主要介于 0.07~0.15 之间,受固化剂的影响,试样所表现的脆性均较弱。随 C_p 的增加,当 $C_p \leq 2\%$ 时, B_d 相对大幅度增加,当 $C_p > 2\%$ 时, B_d 出现相对下降的趋势,并且随 C_p 的增加,相对下降趋势逐渐减小。 $C_p = 2\%$ 作为峰后脆性指数规律异常变化

的临界点,主要是由 $C_p = 2\%$ 对应的 B_1 大幅度增加引起的,即 $C_p = 2\%$ 试样对应的峰后应力降的相对大小异常变化引起的。这可能与峰前弹性模量和峰值抗压强度变化规律存在着直接关系,当 $C_p \leq 2\%$ 时,固化剂对试样弹性阶段变形抵抗能力的影响大幅度增加,对塑性变形抵抗能力的影响相对较小,导致 B_1 出现异常。当 $C_p > 2\%$ 时,随着 C_p 含量的增加,尽管固化剂对抗压强度的影响相对减小,却相对更大地提高了试样的塑性变形抵抗力,因此 B_d 呈现出下降的趋势。

2.2 纤维含量影响

为了探究剑麻纤维含量对复合加固砂土抗压特性的影响,本次试验设置了 C_p (0%、1%、2%、3%、4%) 和 C_f (0%、0.2%、0.4%、0.6%、0.8%) 单一变量的正交试验,试样试验结果见表 4。图 6 为不同固化剂含量和纤维含量试样的应力-应变曲线,在 C_p 变化范围内,随着 C_f 的增加,试样弹性模量均呈现上升趋势,当 $C_p = 1\%$ 时,弹性模量从 1.45 MPa 增长到 6.48 MPa,增长率超过 300%,随着 C_p 的增加,增长趋势相对有所减小。如图 7 所示,试样抗压强度随 C_f 的增加而增加,并且当 C_p 逐渐增加时, C_f 对试样抗压强度影响更加明显。图中,试样抗压强度相对增量随 C_p 的增加总体上升,当 $C_p > 2\%$ 时,试样抗压强度相对增量随 C_f 增大而增大。例如:当 $C_p = 3\%$ 时,试样抗压强度相对增量分别为 199.6、228.65、194.99、388.64 kPa,相

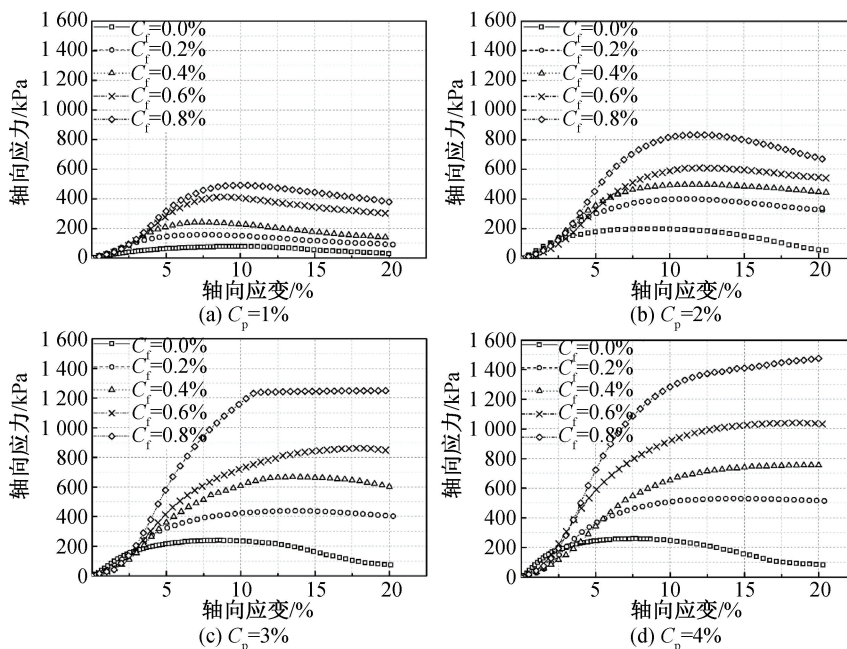


图 6 不同 C_p 和 C_f 试样的应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves of samples with different C_p and C_f

比于 $C_p = 1\%$ 时, 抗压强度相对增量大幅度增加。这一规律表明固化剂对纤维加固砂土的效果存在促进作用, 并且随 C_p 的增加, 纤维加固砂土的效果更加显著。

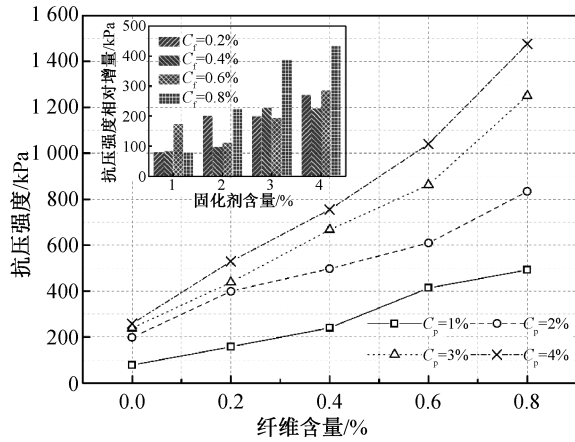


图 7 不同 C_p 和 C_f 试样的抗压强度

Fig. 7 Compressive strength of samples with different C_p and C_f

随着 C_f 的增加, 试样应力-应变曲线表现出应变硬化, 曲线峰值对应的应变 ε_p 逐渐增加。例如: 当 $C_p = 3\%$ 时, 曲线峰值应变 ε_p 分别为: 8.65%、13.67%、13.5%、18.27%、20%。在高 C_p 时, 由于纤维的影响, 使得部分峰后曲线超出了无侧限单轴抗压强度试验的有效应变范围, 因此本文选择 $C_p = 1\%$ 对应试样曲线计算所得的脆性指数(表 6)分析纤维对试样抵抗塑性变形能力的影响。试样脆性随 C_f 的增加呈现出下降的趋势, 相比于 $C_f = 0\%$ 的试样, 当 $C_f = 0.8\%$ 时, 试样的脆性指数下降了超过 80%。图 8 给出了 $C_p = 1\%$ 时在不同 C_f 条件下试样的 20% 应变对应的破坏形态, 受到固化剂的影响, 试样破坏形态均表现为塑性侧胀破坏, 即由于固化剂提高了试样的塑性变形能力, 在无侧限单轴抗压强度试验轴向荷载作用过程中, 与脆性破裂中因剪切带扩张使得试样整体破坏的方式相反, 被加固试样首先局部发生侧向鼓胀现象, 随着试验的进行, 试样局部持续鼓胀, 最终试样沿局部剪切带发生破坏(图 8)。随 C_f 的增加, 试样破坏时局部剪切带发育程度明显变小, 从“花瓣形”破坏状态逐渐过渡到缝合线状破坏状态。这表明纤维的掺入能大幅度提高试样的侧向塑性变形抵抗能力。

3 机理分析

土体宏观试验结果是土体微观结构的外在表

表 6 $C_p = 1\%$ 时不同 C_f 试样的脆性指数

Tab. 6 Brittleness index of samples with different C_f when C_p equals to 1%

参数	B_1	B_2	B_d
$C_f = 0.0\%$	0.29	0.26	0.08
$C_f = 0.2\%$	0.16	0.26	0.04
$C_f = 0.4\%$	0.13	0.28	0.04
$C_f = 0.6\%$	0.07	0.30	0.02
$C_f = 0.8\%$	0.05	0.29	0.01

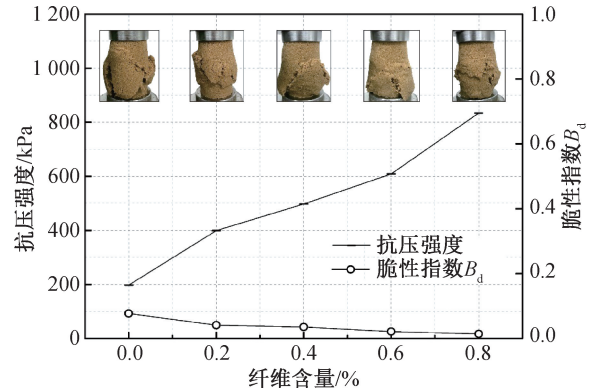


图 8 $C_p = 1\%$ 时不同 C_f 试样的抗压强度、脆性指数及破坏形态

Fig. 8 The compressive strength, brittleness index and failure morphology of samples with different C_f when C_p equals to 1%

现, 因此本文运用电子显微镜 (SEM) 技术分析砂土介质中土-土/土-纤维微观力学作用。前人的研究表明土体强度主要取决于土的孔隙结构、颗粒形状和矿物成分。砂土由于其颗粒粗大、质地较硬, 形成的土体结构松散, 粘聚力较小, 工程性质差。而固化剂的掺入大大改善了砂土的这一特性, 如图 9(a) SEM 照片所示, 聚氨酯高分子聚合物与水反应形成的凝胶通过覆盖、粘结、填充的作用方式改变了砂土的微观结构: 聚氨酯凝胶覆盖在砂土颗粒表面, 包裹着松散砂土颗粒, 形成的塑性团聚体增加了试样结构完整性; 同时凝胶的粘结性增加土颗粒间的作用力; 并且在一定程度上填充了砂土孔隙, 增加了砂土颗粒间的有效接触面积。本次研究中随 C_p 增加, 无侧限单轴抗压强度的上升和塑性变形特性正是聚氨酯凝胶改变砂土结构, 提升试样强度的宏观力学表现(图 5)。

土-纤维微观界面力学作用是影响纤维加筋效果的关键因素^[18]。在无侧限单轴抗压强度试验中, 轴向荷载作用下试样产生变形时, 纤维发生拉应变, 这时纤维受到的拉应力主要由土-纤维互锁力、土-纤维粘结力和土-纤维摩擦力组成。尽管砂土颗粒质地坚硬, 不规则度高, 土颗粒-纤维粗糙度

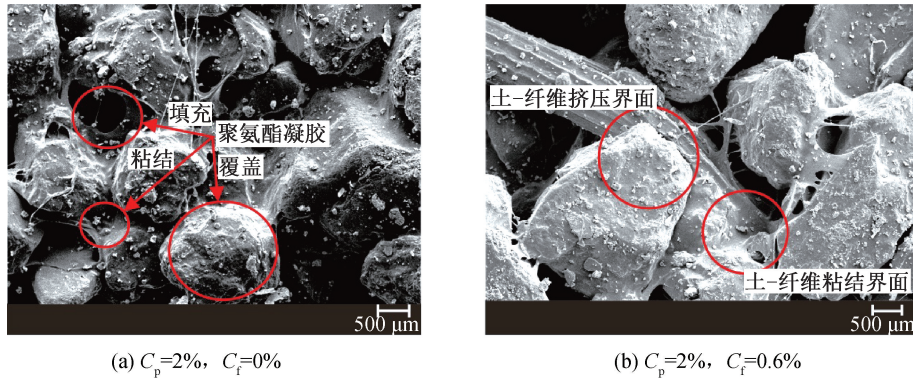
(a) $C_p=2\%$, $C_f=0\%$ (b) $C_p=2\%$, $C_f=0.6\%$

图9 试验试样电镜扫描图像

Fig. 9 SEM image of the test samples

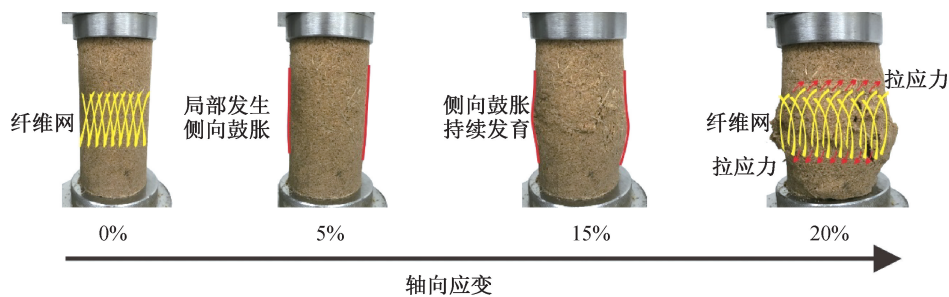


图10 无侧限单轴抗压强度试验中试样破坏过程

Fig. 10 Failure process of samples in unconfined uniaxial compression test

相对较高,但由于纯砂土结构松散,孔隙大,使得土-纤维有效界面接触面积减小。此外,因为砂土粘聚力较小,在外部荷载作用下颗粒容易发生错位和重排。以上这些因素影响了纤维加筋纯砂土界面力的作用效果。如图9(b)所示,聚氨酯凝胶填充了土-土和土-纤维间的孔隙,增大了土-纤维界面的有效接触面积,同时聚氨酯凝胶的粘性改善了土-土/土-纤维界面粘结作用,增加了土颗粒间的重排阻力、土-纤维的粘结力和摩擦系数,此外,更紧密的土-受挤压的纤维结构增大了土-纤维间的互锁力,使得纤维的拉应力能够充分发挥作用。在轴向荷载作用下,试样发生局部塑性侧向鼓胀,裂隙开始出现,纤维的抗拉特性使其起到了桥梁作用,而交错纤维在土体内组成了网状结构,限制土体继续破坏,从而提高了土体的韧性和强度(图10)。聚氨酯-纤维复合加固砂土微观力学如图11所示,土颗粒受荷载作用逐渐压密,土颗粒的旋转趋势与直接作用力挤压纤维发生形变产生互锁力,与粘结力、摩擦力共同调动纤维的拉应力。综上所述,聚氨酯的掺入,能显著提升纤维的加筋效果,本文的无侧限单轴抗压强度试验结果也验证了这一观点(图7)。

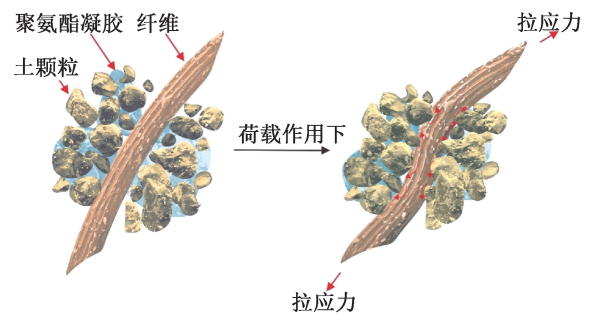


图11 聚氨酯-纤维复合加固砂土微观力学示意图

Fig. 11 Microcosmic schematic diagram of sand reinforced by polyurethane - fiber composite reinforcement

4 结论

1) 无侧限抗压强度和弹性模量均随聚氨酯含量的增加而增加,当聚氨酯含量从1%增加到4%时,强度从78.15 kPa增加到257.92 kPa。随聚氨酯含量的增加,强度上升的幅度逐渐减小。

2) 无侧限抗压强度和弹性模量均随着纤维含量的增加而增加,最大强度达到了1476.1 kPa。随着聚氨酯含量的增加,纤维加筋效果逐渐增强。

3) 在聚氨酯和纤维的作用下,试样脆性呈现下降的趋势,在无侧限单轴抗压强度试验中试样

破坏形态均表现出局部塑性侧向膨胀现象,并随纤维含量的增加,试样破坏形态从“花瓣状”向缝合线状过渡。

4) 聚氨酯的掺入通过覆盖、粘结和填充改善了砂土结构,提高了土-土/纤维互锁力、土-纤维粘结力和土-纤维摩擦力,增强了纤维加固砂土的效果。

参考文献:

- [1] 蒋晓庆,李永彪,林雁. 不同水泥掺灰率下膨胀土抗剪强度参数的试验分析[J]. 安徽广播电视大学学报, 2020(03):93-96.
- [2] 王春阳. 石灰改良软土填料路用性能试件研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2020, 34(04):118-123.
- [3] 解邦龙,张吾渝,张丙印,等. 不同龄期下粉煤灰水泥土的UU抗剪强度试验研究[J/OL]. 工程地质学报, 2020: 1-8 [2020-11-08]. <https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2019-541>.
- [4] 王龙威,石霄,江灿琿,等. 温度对水溶性有机材料改良砂土的力学特性试验研究[J]. 河北工程大学学报:自然科学版, 2019, 36(04):72-77.
- [5] 孔繁轩,羊东,刘瑾,等. 聚氨酯型固化剂改良砂土的固结特性试验研究[J]. 勘察科学技术, 2019(04):1-6.
- [6] 岳跃展,杨远光,杨生荣,等. 改性乙烯醋酸乙烯酯共聚物对水泥浆性能的影响[J]. 油田化学, 2017, 34(01):16-20.
- [7] 刘凌,黄天勇,王肇嘉,等. 聚丙烯酰胺对砂浆微观结构与性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(09):2777-2781+2788.
- [8] 王毅红,丁思远,杨世豪,等. 掺入玻璃和竹纤维的生土基材料性能试验研究[J]. 西安科技大学学报, 2016, 36(05):640-646.
- [9] 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(03):304-308.
- [10] 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(02):56-60.
- [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(02):19-24.
- [12] 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(06):77-81.
- [13] 李文龙. 掺玻璃纤维粉煤灰煤矸石骨料混凝土强度与抗裂性能试验研究[J]. 建筑结构, 2020, 50(13):49-53.
- [14] 陈登,宋旭艳,姜正平,等. 秸秆与粉煤灰复掺对混凝土性能的影响[J]. 混凝土与水泥制品, 2020(04):100-103.
- [15] ANTONIO A S C, PAULO J V O, DIONE G C. Effect of Polypropylene Fibres on the Compressive and Tensile Strength of a Soft Soil, Artificially Stabilised with Binders [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2015, 43(2):97-106.
- [16] 戴文亭,司泽华,王振,等. 剑麻纤维水泥加固土的路用性能试验[J]. 吉林大学学报:工学版, 2020, 50(02):589-593.
- [17] 周辉,孟凡震,张传庆,等. 基于应力-应变曲线的岩石脆性特征定量评价方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(06):1114-1122.
- [18] TANG C S, SHI B, ZHAO L. Interfacial Shear Strength of Fiber Reinforced Soil [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2009, 28(1):54-62.

(责任编辑 王利君)