

文章编号: 1001-4888(2024)02-0237-11

## 聚丙烯纤维对风积沙改性土 三轴压缩特性的影响研究\*

肖惠茹<sup>1</sup>, 苏占东<sup>1,2</sup>, 李驰<sup>3</sup>, 吴成龙<sup>4</sup>, 陶嘉伟<sup>1</sup>

(1. 防灾科技学院 地质工程学院, 河北三河 065201; 2. 河北省地震灾害防御与风险评价重点实验室, 河北三河 065201;

3. 内蒙古工业大学 土木工程学院, 内蒙古呼和浩特 010051; 4. 青海省交通规划设计研究院有限公司, 青海西宁 810000)

**摘要:** 为了研究聚丙烯纤维加固风积沙改性土(95%风积沙+5%水泥)的效果和机制,改善风积沙改性土的脆性破坏特性,将聚丙烯纤维以 0.1%、0.2% 和 0.4% 质量百分比掺入到风积沙改性土中,进行固结不排水三轴压缩试验。试验结果表明:风积沙改性土的应力-应变曲线具有弹性变形特征,应变初始阶段出现应力陡增的孔隙压密期后有完整的弹性阶段、塑性变形阶段和破坏阶段;聚丙烯纤维的掺入增加了土样的塑性变形能力,提高了残余强度,破裂面因纤维的拖拽牵引而呈现圆弧形,抑制了土样的脆性破坏,增加了其延展性;风积沙改性土的内聚力随着聚丙烯纤维含量的增大而增大,基本呈线性正相关关系,内摩擦角随着聚丙烯纤维含量的增大而减小,整体呈现负相关关系;风积沙改性土的峰值应变随着聚丙烯纤维含量的增大而增大,应力-应变曲线由应变软化转变为应变硬化型,可用双曲线进行有效拟合;同一围压下应力-应变双曲线拟合模型参数  $b$  随聚丙烯纤维的含量增大而减小,在同一聚丙烯纤维含量下,模型参数  $b$  均随围压的增大而减小。本文研究成果可为风积沙改性土的实际工程应用提供试验参考。

**关键词:** 聚丙烯纤维; 风积沙改性土; 三轴试验; 峰值应变; 抗剪强度

**中图分类号:** U213.1<sup>+</sup>5 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-23-021

### 0 引言

风积沙是沙被风沙流搬运到冲积平原地区形成沙丘而产生的风积物<sup>[1]</sup>。因其分布广泛,国内外对风积沙作为道路填筑材料的应用性能的研究起步较早。KHAN<sup>[2]</sup>对利比亚境内撒哈拉沙漠 4 个地区的风积沙取样,进行岩土工程测试和化学分析,结果表明在干旱地区的风积沙可以用来修筑道路工程。AIBAN<sup>[3]</sup>、WAHHAB 等<sup>[4]</sup>通过试验研究了风积沙的力学特性,试验结果为风积沙作为筑路材料提供了依据。YUAN 等<sup>[5]</sup>、ZHANG<sup>[6]</sup>通过对风积沙压实特性的研究,取得了振动压实、振动干压法以及湿压法等一系列压实工艺。针对沙漠地区风积沙路基发生盐渍化等病害的现象,张宏等<sup>[7]</sup>对风积沙土层水盐迁移规律进行了研究,结果表明,受外界环境荷载周而复始作用,压实风积沙土层浅部盐分渐渐积聚,由少到多,随着时间推移将形成盐渍化病害。随着经济建设的快速发展,越来越多的高等级线路工程不可避免地穿越风积沙分布区域,然而风积沙级配不良、松散、黏聚力低的特性导致其很难单独作为高等级线路工程路堤的填筑材料,亟需对其力学性质进行改良。有学者通过添加不同工程材料,例如黏性土、水泥、粉煤灰、石膏和木钙等改良风积沙的力学性能,增加风积沙的强度并为工程服务<sup>[8-10]</sup>。然

\* 收稿日期: 2023-02-01; 修回日期: 2023-05-26

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项项目(ZY20180106)

通信作者: 苏占东(1987-),男,博士,副教授。主要从事岩土工程和地质力学等方面的教科研工作。Email:szdchris@163.com

而单纯的水泥固化风积沙性质类似水泥土,有着抗裂性能不佳、收缩变形大、容易产生收缩裂缝的缺点,严重影响线路工程的安全<sup>[1]</sup>。为了弥补这种不足,有学者提出通过添加纤维材料来提高土体的延性,改善其工程性质<sup>[11]</sup>。目前,纤维材料作为一种良好的韧性材料,已被广泛应用于其他土体的改良研究中。SANTONI等<sup>[12]</sup>将纤维应用于路基填料中,对其工程性质进行分析,发现纤维能提高砂土的力学特性。PLAGUÉ等<sup>[13]</sup>通过测量纤维钢筋混凝土试样在施加拉伸荷载时裂缝开口的大小,发现聚丙烯合成纤维对高性能混凝土(HPFRC)试件单轴拉伸加载时产生的裂缝有一定的控制性。林桂武等<sup>[14]</sup>、LIBOS等<sup>[15]</sup>、YAO等<sup>[16]</sup>通过在水泥土中加入聚丙烯纤维,得出随纤维含量的增大,水泥土的力学强度有一定增强的结论。邓林飞等<sup>[17]</sup>在黏性土中加入聚丙烯纤维,建立邓肯-张模型,发现此种改性土随聚丙烯纤维含量的增加,黏聚力呈幂函数型增长。BELETE<sup>[18]</sup>通过直剪试验分析了聚丙烯纤维改性滨海软土的力学特性,发现纤维可以提高其抗剪强度。周林禄<sup>[19]</sup>探讨了天然纤维加筋砂土的抗液化性能,研究结果表明随着纤维含量的增加,加筋砂土的抗液化能力有一定的提高。ZHOU等<sup>[20]</sup>通过在砂土中添加聚丙烯纤维研究其固有强度的变化,提出2种土体抗剪强度参数预测模型。NARANI等<sup>[21]</sup>在砂质土中添加WTF纤维进行三轴试验,得出WTF纤维含量达到2%时,改性土的弹性模量增加774%的结果。然而,目前针对聚丙烯纤维风积沙改性土的研究还不够深入,苏占东等<sup>[22]</sup>、周富彪等<sup>[23]</sup>、阮波等<sup>[24]</sup>对聚丙烯纤维风积沙改性土的热物理特性、微观特性以及强度特性有一定程度的探索,但针对聚丙烯纤维风积沙改性土的三轴压缩特性还鲜有研究。

本文以内蒙古科尔沁沙地风积沙为研究对象,针对通辽—新民高客专铁路工程采用的风积沙改性土(95%风积沙+5%水泥)强度高而脆性强的现象,设计添加不同含量的聚丙烯纤维,开展固结不排水三轴压缩试验,研究了聚丙烯纤维改善风积沙改性土三轴压缩特性的效果和机制,以为风积沙改性土的实际工程应用提供试验参考。

## 1 试验概况

### 1.1 试验方案

试验以聚丙烯纤维的掺入量为变量因素,将聚丙烯纤维以质量比为0.1%、0.2%和0.4%的3种不同掺量加入到风积沙中;按线性分布设计得到4种配比的風积沙改性土试验方案见表1,通过击实试验得出最大干密度、最优含水率;按照在最优含水率及相对密实度90%的情况下,制备不同含量纤维的风积沙改性土试样进行三轴压缩试验,依据工程区实际路堤工程的填筑高度,分别设置三轴试验围压为100kPa、300kPa和400kPa。为了保证结果的可靠性,每组制备3个试样进行平行试验,以研究聚丙烯纤维对风积沙改性土的力学特性影响。

表1 试验材料配比

Tab.1 Test material ratio

编号	风积沙/%	水泥/%	聚丙烯纤维/%	最优含水率/%	最大干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )
C5P0	95.0	5	0.0	10.0	1.90
C5P1	94.9	5	0.1	11.5	1.84
C5P2	94.8	5	0.2	12.2	1.85
C5P4	94.6	5	0.4	11.9	1.86

注:编号中C5表示水泥掺量为5%;P代表纤维,其后数字表示纤维的千分含量。

### 1.2 试验材料

试验所用的风积沙取自内蒙古科尔沁沙地通辽—新民北高铁附近(图1),该区域以风积平原为主,地势较平坦,局部有起伏,标段工程地处寒冷地区,在地面表层有季节性冻土层,厚度约1.4m。科尔沁沙地风积沙(图2(a))主要由岩屑、长石和石英3种颗粒组成,该风积沙中黏粒和粉粒含量极少,颗粒表面的活性低,松散无黏性。天然平均含水率为0.3%,由颗粒级配曲线(图2(b))计算可得:风积沙的不均匀系数 $C_u=2.1$ ,曲率系数 $C_c=0.92$ ,该参数不符合级配良好范围,即不均匀系数 $C_u>5$ 、曲率系数 $C_c$

为 1~3,表明风积沙的级配不良。试验采用水泥(图 2(c))和聚丙烯纤维(图 2(d)) 2 种材料对风积沙进行改性处理,其中水泥为旋窑熟料 P·O42.5 普通硅酸盐水泥,其具体性质指标见表 2,聚丙烯纤维的主要力学指标见表 3。

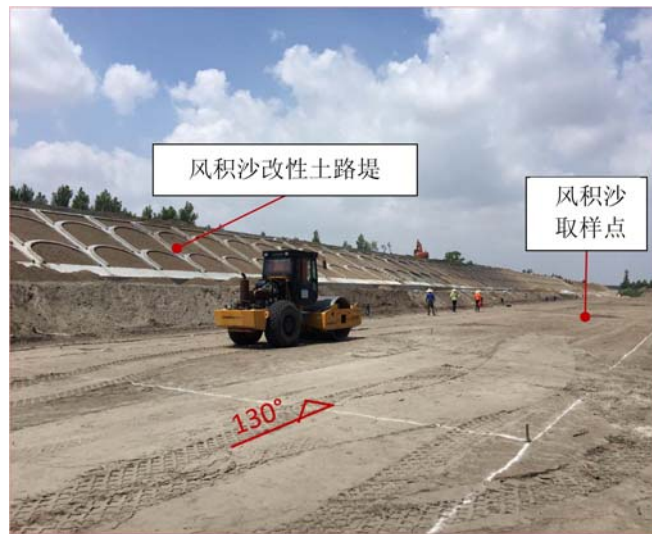
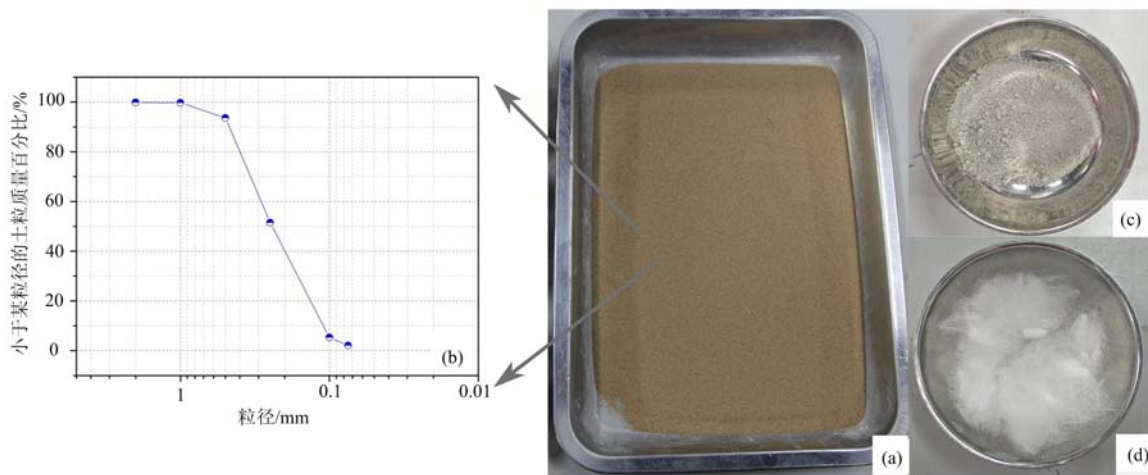


图 1 现场照片

Fig. 1 Photograph of criminal scene



(a) 风积沙; (b) 风积沙颗粒级配曲线; (c) 硅酸盐水泥; (d) 聚丙烯纤维

图 2 试验材料

Fig. 2 Experiment materials

表 2 水泥指标

Tab. 2 Cement index

强度等级	比表面积/( $\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ )	标准稠度/%	初凝时间/min	终凝时间/min
42.5	348	25.4	177	209

表 3 聚丙烯纤维性能指标

Tab. 3 Polypropylene fiber performance index

密度/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	长度/mm	抗拉强度/MPa	弹性模量/MPa	熔点/ $^{\circ}\text{C}$	极限拉伸率/%
$0.91 \pm 0.01$	10	$\geq 300$	3.792	160~170	30~50

### 1.3 试验设备

风积沙改性土试样采用标准砂浆养护箱进行养护,该养护箱控制温度为( $20.0 \pm 2.0$ ) $^{\circ}\text{C}$ ,控制湿度

为(40%~80%)±5%,测温精度 $\leq 0.2^{\circ}\text{C}$ ,测湿精度为 $\pm 3.0\%$ 。试验所用仪器为北京华堪全自动三轴仪,可提供不固结不排水(UU)、固结不排水(CU)、固结排水(CD)条件(应变控制),提供的围压  $P$  为 200kPa~800kPa,控制试样应变速率为每分钟 0.003%~1.0%。

#### 1.4 试验过程

通过击实试验得到不同配比风积沙改性土的最优含水率和最大干密度,制备的试样为直径39.1 mm、高80mm的圆柱体,相对密实度控制在90%。首先,按照设定配比称取风干后的风积沙与水泥拌和均匀,由于干燥状态下的聚丙烯纤维易分散,故分批加入聚丙烯纤维进行干拌;其次,按照最优含水率计算出所需水的质量,将水加入拌合均匀;最后,将混合料分4层击实,每层按照预定的干密度击实到指定高度后将表面刨毛,再加下一层土料,如此击实完成。试样在室温条件下静置24h后脱模,脱模后的试样(图3(a))均用塑料薄膜密封装好置于标准箱养护箱内养护6d。

养护完成后,先对试样进行1h的抽真空饱和,饱和中的试样如图3(b)所示,待试样饱和后开始室内三轴试验(图3(c))。采用北京华堪全自动三轴仪进行固结不排水试验,应变控制速率为每分钟0.08%。

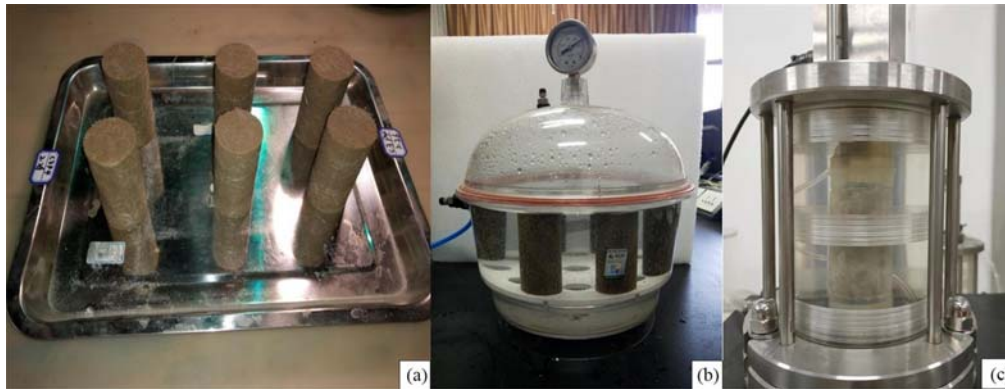


图3 试验过程

Fig. 3 Test process

## 2 试验结果与分析

### 2.1 应力-应变关系曲线

不同围压下试样的应力-应变曲线如图4所示。由图可知,随着围压的增加,风积沙改性土的峰值应力增加明显,经计算,围压300kPa和400kPa试样的峰值应力相对于围压100kPa试样的峰值应力平均增长了94%和210%,可见围压大小对试样的固结不排水强度的影响显著。在不含聚丙烯纤维和聚丙烯纤维含量较少( $\leq 0.1\%$ )的情况下,试样的应力-应变曲线表现为应变软化特征,应力随着应变的增大呈现先增大后减小,最后趋于稳定的趋势。而纤维含量为0.4%试样的应力-应变曲线呈现应变硬化型,应力随应变增大而逐渐增大,但是增长速率不断减小。这一点与邓林飞等<sup>[17]</sup>研究聚丙烯纤维改良水泥黏土得出的结论一致。剪切开始后,应力-应变曲线呈线性增加,主应力差与轴向应变关系曲线具有典型的弹塑性变形特性。在高围压情况下,聚丙烯纤维的加入可以提高试样的峰值强度和残余强度,这主要是由于将聚丙烯纤维加入风积沙改性土中,水泥水化后风积沙和纤维胶结形成聚合体,受到剪切作用时,土体承担主要荷载,纤维起骨架连接作用,约束土体的变形和沙粒的移动,从而限制了裂缝的产生与发展<sup>[25]</sup>。纤维含量增多则意味着风积沙改性土试样产生变形甚至破坏时所需的应力也要增加,因而聚合体材料的断裂峰值强度得以显著提高。要使聚合体破坏,则必须将纤维从基体中拔出,需要克服基体对纤维的黏结力<sup>[26]</sup>。在纤维的拖引下削弱了脆性,未被拔出的纤维提供约束力,从而提高了试样的残余强度。

### 2.2 纤维含量对风积沙改性土脆延性特征的影响

风积沙改性土的轴向应力达到峰值时所对应的应变即为峰值应变,该数值的大小可以反映材料的



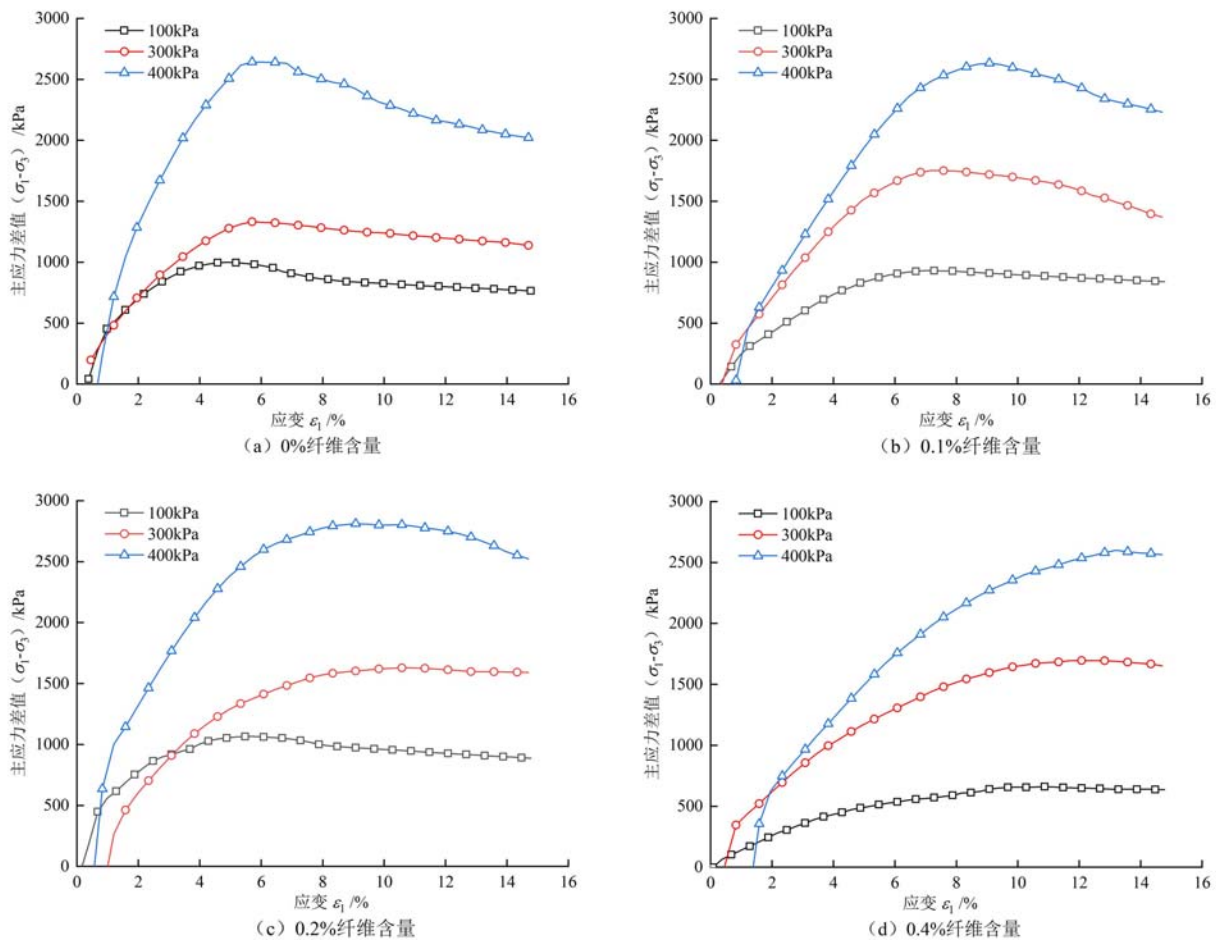


图 4 不同围压下试样的应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of samples under different confining pressures

脆延性特征,峰值应变越大,材料的延性越好。不同围压下风积沙改性土纤维含量与峰值应变的关系如图 5 所示,经计算,当围压分别为 100kPa、300kPa 和 400kPa 时,纤维含量为 0.4% 的风积沙改性土相较于纤维含量为 0% 的风积沙改性土峰值应变分别提高约 123%、99%、132%,说明在不同围压下纤维含量的增加,会使得峰值应变总体呈增加趋势,这主要是因为纤维在土的内聚力以及土颗粒的内摩擦力作用下,承担了土样在荷载作用下发生变形的一部分拉应力,有效地阻碍了裂缝的进一步发展,增强了试样的临界断裂韧度,从而增加了峰值应变<sup>[27]</sup>。由此可得,聚丙烯纤维可以有效改善水泥固化风积沙改性土的脆性,增加其延展性。

### 2.3 纤维含量对风积沙改性土抗剪强度指标的影响

聚丙烯纤维含量对内聚力的影响如图 6 所示,由图可见风积沙改性土的内聚力随纤维含量的增加而增大,基本呈线性正相关关系,但内聚力随纤维含量的增加幅度远大于内摩擦角的减小幅度。聚丙烯纤维将水泥与土体颗粒之间形成的黏胶体连接<sup>[28]</sup>,并使基体致密,从而有效地阻止了沙粒间的变形与位移。随着纤维含量的增加,纤维与土体颗粒间的接触面积增大,与土颗粒相互作用力增强,使土体的整体性更加严密。在荷载的作用下,土样受力变形,土颗粒相互摩擦咬合,纤维承担了变形时的部分拉应力,起到“锚固”作用,因此内聚力不断增大。此外,纤维在土体中随机分布,弯曲的纤维形成彼此交错空间的网状结构,起到近似“围压”的作用<sup>[29]</sup>,约束土样的变形和土体颗粒的滑动。然而,当纤维含量过高时,纤维在土体中聚集成团,影响了纤维与土体之间的摩擦作用和纤维受力网的形成,从而会降低土体的强度<sup>[30]</sup>。图 7(a)、(b)、(c)、(d)、(e)分别为纤维含量 0.1%、0.2%、0.3%、0.4% 和 0.5% 的改性土试样剖面图,由图 7(e)可以发现,当纤维含量达到 0.5% 时,试样剖面已经可以明显观察到成团的聚丙烯纤维,由此可以得出,0.5% 的纤维含量会影响试样的整体性和均匀性,因此,对于当前配比的风积

沙改性土(95%风积沙+5%水泥),0.4%的纤维含量可以作为较优掺量。

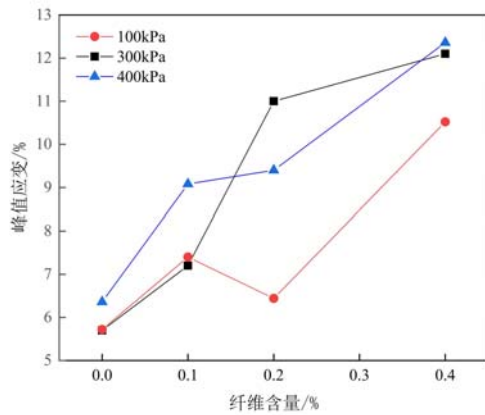


图5 不同围压下聚丙烯纤维含量与峰值应变的关系  
Fig. 5 Relationship between polypropylene fiber content and peak strain under different confining pressures

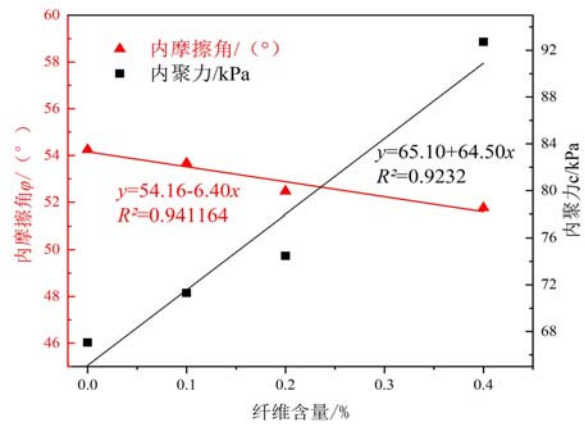
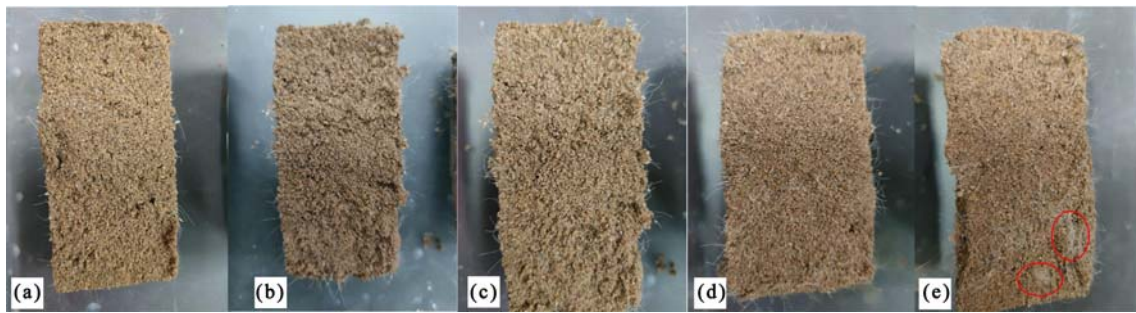


图6 内聚力和内摩擦角与纤维含量的线性拟合关系  
Fig. 6 Linear fitting relationship between cohesion and internal friction angle and fiber content



(a)0.1%纤维含量;(b)0.2%纤维含量;(c)0.3%纤维含量;(d)0.4%纤维含量;(e)0.5%纤维含量

图7 不同纤维含量改性土试样剖面图

Fig. 7 Profile of modified soil samples with different fiber content

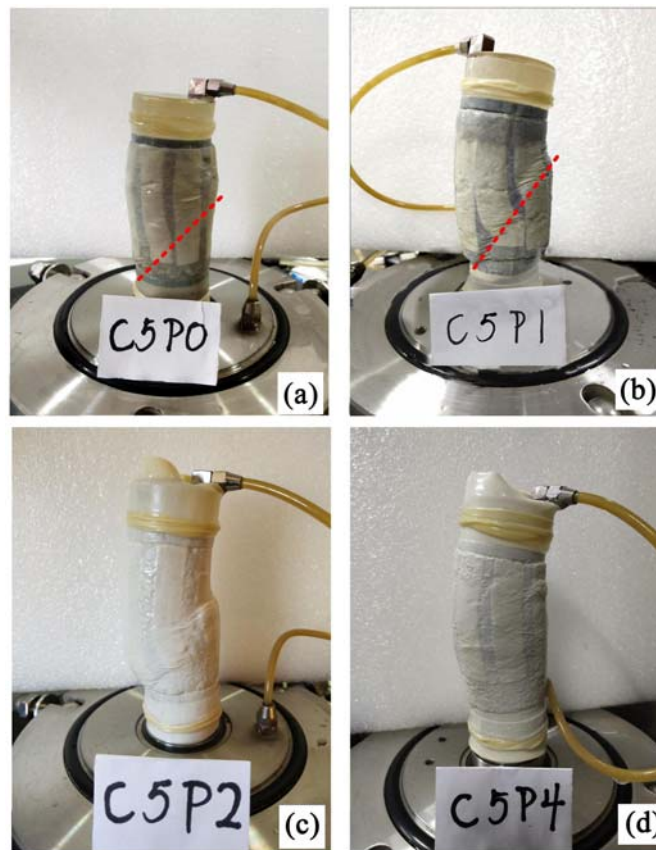
由图6还可以看出,风积沙改性土的内摩擦角整体较一般土体的内摩擦角大,然而内摩擦角随着聚丙烯纤维的增加而减小,内摩擦角与纤维的含量整体呈现线性负相关关系。内摩擦角反映的是土的摩擦特性,主要包括2部分:滑动摩擦和咬合摩擦。砂土颗粒表面凹凸不平,有着较大的摩擦因数,能够相互咬合,而聚丙烯纤维表面光滑与土颗粒间的摩擦力小,随着聚丙烯纤维含量的增加,土样内摩擦角有减小的趋势。整体而言,聚丙烯纤维掺量为0.4%时,内聚力增加约24kPa,内摩擦角降低约 $3^\circ$ ,内聚力的增长幅度看似比内摩擦角的减小幅度大,但是由土体抗剪强度 $\tau = \sigma \tan \varphi + c$ ( $c$ 为内聚力, $\sigma$ 为正应力, $\varphi$ 为内摩擦角)的组成而言,聚丙烯纤维对风积沙改性土抗剪强度的影响主要取决于土体中的正应力 $\sigma$ 大小。

## 2.4 土样破坏特征

由图8可知,试样破坏后存在明显破裂面,同时部分试样中间段鼓胀明显,呈腰鼓状,说明同时出现了鼓胀破坏和剪切破坏,这也是掺入聚丙烯纤维土的2种主要破坏情况<sup>[31]</sup>。随着纤维含量的增加,剪切破坏面出现了弯曲现象(纤维含量为0.2%和纤维含量为0.4%),这主要是由于剪切作用时纤维的拖拽牵引作用而形成的,当试样受到剪切作用时,纤维发挥了其抗拉性能,说明纤维的连接使得试样发生破坏时有牵引力,使破裂面不呈直线发展,抑制了试样的剪切破坏,降低了试样的脆性。

## 3 应力-应变关系的数学模型

将聚丙烯纤维风积沙改性土的应力-应变曲线用双曲线进行拟合,得出



(a)纤维含量 0%；(b)纤维含量 0.1%；(c)纤维含量 0.2%；(d)纤维含量 0.4%

图 8 不同纤维含量的风积沙改性土三轴压缩试样破坏照片

Fig. 8 Failure photos of aeolian sand modified soil with different fiber contents under triaxial compression conditions

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\epsilon_1}{a + b\epsilon_1} \tag{1}$$

式中： $\sigma_1$  为最大主应力； $\sigma_3$  为最小主应力； $\epsilon_1$  为最大主应力方向上的应变； $a$  和  $b$  为拟合参数。

将式(1)转化为  $y = bx + a$  形式，令  $x = \epsilon_1$ ， $y = \frac{\epsilon_1}{\sigma_1 - \sigma_3}$ ，常数  $a$  表示截距， $b$  为斜率，可得

$$\frac{\epsilon_1}{\sigma_1 - \sigma_3} = b\epsilon_1 + a \tag{2}$$

当  $\epsilon_1 \rightarrow \infty$  时，

$$b = \frac{1}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} \tag{3}$$

在式(3)中， $b$  作为土体本构模型的重要参数，表示双曲线渐近线所对应的极限偏差(ult)应力的倒数，故分析纤维含量对于  $b$  值的影响，可为风积沙改性土本构模型的应用提供试验数据参考。

对各个试样进行拟合，整理得拟合结果如图 9 所示。

将双曲线拟合参数  $b$  和相关系数  $R^2$  进行整理(见表 4)，可以看出试样的拟合相关系数整体大于 0.9，拟合效果较好。对于添加了聚丙烯纤维的风积沙改性土试样，在纤维含量为 0.4% 的情况下，拟合程度最高，这也与 ALONSO 等<sup>[32]</sup>的观点——呈现弱硬化型的应力-应变曲线采用双曲线来拟合相符。对于同一聚丙烯纤维含量的风积沙改性土试样，参数  $b$  均随围压的增大而减小。对于同一围压下的风积沙改性土试样，参数  $b$  随聚丙烯纤维含量的增大而减小，当围压较低(等于 100kPa)时，参数  $b$  的范围整体大于围压较高时的  $b$  值。



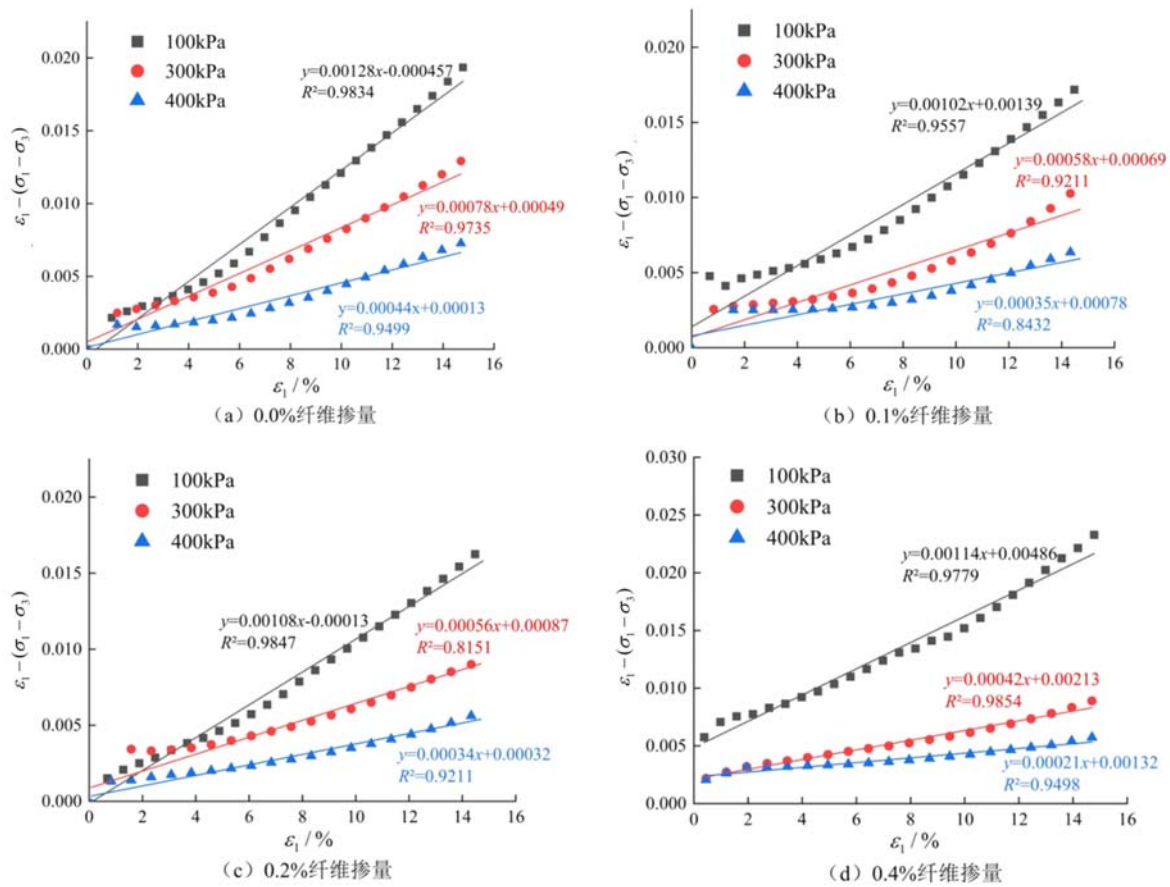


图9 应力-应变关系的双曲线拟合

Fig.9 Hyperbolic fitting of stress-strain relationship

表4 各试样的参数  $b$  和相关系数  $R^2$  的值

Tab. 4 Value of parameter  $b$  and correlation coefficient  $R^2$  of each sample

围压/kPa	参数 $b$				$R^2$			
	0.0%	0.1%	0.2%	0.4%	0.0%	0.1%	0.2%	0.4%
100	0.00128	0.00102	0.00108	0.00114	0.9834	0.9557	0.9847	0.9779
200	0.00078	0.00058	0.00056	0.00042	0.9735	0.9211	0.8151	0.9854
300	0.00044	0.00035	0.00034	0.00021	0.9499	0.8432	0.9211	0.9498

## 4 结论

(1) 风积沙改性土固结不排水试验的应力-应变曲线呈现弹塑性变形特性,随着纤维含量的增大,应力-应变曲线由应变软化型转变为应变硬化型;同时高围压状态时纤维的加入可以提高试样的残余强度。

(2) 从不同含量聚丙烯纤维风积沙改性土的应力-应变曲线、峰值应变和破坏形态上可知:聚丙烯纤维可以改善风积沙改性土的脆性,提高残余强度,峰值应变随着聚丙烯纤维含量的增大而增大。

(3) 风积沙改性土的内聚力与纤维含量呈正相关关系,内摩擦角与纤维含量呈负相关关系,纤维的含量对风积沙改性土内聚力的影响幅度较大。

(4) 含聚丙烯纤维的试样破坏形式主要为鼓胀破坏和剪切破坏,随纤维含量的增加,剪切破坏面出现了类似断层拖拽作用而产生的圆弧,说明纤维可以抑制试样的脆性破坏。

(5) 聚丙烯纤维风积沙改性土的应力-应变曲线采用双曲线拟合的程度较高,从拟合方程中可以发



现在同一围压下拟合的参数  $b$  随聚丙烯纤维含量的增大而减小,在同一聚丙烯纤维含量下,参数  $b$  均随围压的增大而减小。

#### 参考文献:

- [1] 牟献友,谷攀. 国内风积沙工程特性研究综述[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2010, 31(1):307-310 (MOU Xianyou, GU Pan. Review on engineering characteristics of wind-blown sand[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University(Natural Science Edition), 2010, 31(1):307-310 (in Chinese))
- [2] KHAN I H. Soil studies for highway construction in arid zones[J]. Engineering Geology, 1982, 19(1):47-62.
- [3] AIBAN S A. A study of sand stabilization in Eastern Saudi Arabia[J]. Engineering Geology, 1994, 38:65-79.
- [4] WAHHAB H A A, ASI I M. Improvement of marl and dune sand for highway construction in arid areas[J]. Building and Environment, 1997, 32(3):271-279.
- [5] YUAN Y Q, WANG X C. Experimental research on compaction characteristics of aeolian sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007(3):360-365.
- [6] ZHANG J T. Study on compaction characteristics of aeolian sand [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2014, 12(1):77-82.
- [7] 张宏,闫晓辉,王中翰,等. 压实风积沙土层盐分迁移规律研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(4):741-747 (ZHANG Hong, YAN Xiaohui, WANG Zhonghan, et al. Migration law of salt in compacted aeolian sandy soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(4):741-747 (in Chinese))
- [8] 吴景芳. 红黏土改良风积沙基础物理力学性能试验研究[J]. 广西水利水电, 2021(1):1-4 (WU Jingfang. Physical mechanical property test and study of improving aeolian sand foundation with red clay[J]. Guangxi Water Resources & Hydropower Engineering, 2021(1):1-4 (in Chinese))
- [9] 盛明强,邹淳,乾增珍,等. 水泥固化剂提高风积沙承载性能试验[J]. 地质科技通报, 2022, 41(2):147-153 (SHENG Mingqiang, ZOU Chun, QIAN Zengzhen, et al. Experiments on the bearing capacity of aeolian sand stabilized by cement stabilizers[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(2):147-153 (in Chinese))
- [10] 董伟,吕帅,薛刚. 风积沙与粉煤灰掺量对混凝土力学性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(7):2320-2325 (DONG Wei, LÜ Shuai, XUE Gang. Effect of aeolian sand and fly ash content on mechanical properties of concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(7):2320-2325 (in Chinese))
- [11] 周琳,姜屏,张伟清,等. 聚丙烯纤维改性石灰土的力学特性及微观机理[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2021, 43(4):50-55 (ZHOU Lin, JIANG Ping, ZHANG Weiqing, et al. Mechanical properties and micro mechanism of polypropylene fiber modified lime soil [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2021, 43(4):50-55 (in Chinese))
- [12] SANTONI R L, TINGLE J S, WEBSTER S L. Engineering properties of sand-fiber mixtures for road construction[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(3):258-268.
- [13] PLAGUÉ T, DESMETTRE C, CHARRON J-P. Influence of fiber type and fiber orientation on cracking and permeability of reinforced concrete under tensile loading[J]. Cement and Concrete Research, 2017, 94:59-70.
- [14] 林桂武,刘凯格,陈宇良,等. 纤维再生混凝土劈裂抗拉力学性能试验研究[J]. 实验力学, 2022, 37(5):711-721 (LIN Guiwu, LIU Kaige, CHEN Yuliang, et al. Study on splitting tensile mechanical properties of different fiber recycled concrete[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2022, 37(5):711-721 (in Chinese))
- [15] LIBOS I, CUI L, LIU X. Effect of curing temperature on time-dependent shear behavior and properties of polypropylene fiber-reinforced cemented paste backfill[J]. Construction and Building Materials, 2021, 311: 125302.
- [16] YAO X, HUANG G, WANG M, et al. Mechanical properties and microstructure of PVA fiber reinforced cemented soil[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2021, 25:482-491.
- [17] 邓林飞,阮波. 聚丙烯纤维水泥粉质黏土三轴压缩试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(5):1201-1206 (DENG Linfei, RUAN Bo. Experimental study on triaxial compression test of polypropylene fiber reinforced cement silty clay[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(5):1201-1206 (in Chinese))
- [18] BELETE A M. Direct shear mechanical behavior of fiber/nano material improved coastal cement clay [D].

- Shaoxing: Shaoxing University, 2020.
- [19] 周林禄. 纤维和土工布加固砂土抗液化试验及数值模拟[D]. 青岛:青岛理工大学, 2022 (ZHOU Linlu. Experimental and numerical investigation of liquefaction resistance of sand soil reinforced by fiber and geotextile [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2022 (in Chinese))
- [20] ZHOU F, SUN W, SHAO J, et al. Experimental study on nano silica modified cement base grouting reinforcement materials[J]. *Geomechanics and Engineering*, 2020, 20(1):67–73.
- [21] NARANI S S, ABBASPOUR M, HOSSEINI S, et al. Long-term dynamic behavior of a sandy subgrade reinforced by waste tire textile fibers (WTTFs)[J]. *Transportation Geotechnics*, 2020, 24(9):375–386.
- [22] 苏占东, 孙进忠, 周富彪, 等. 风积沙改性土热物理性质的测试与分析[J]. *水利水电技术*, 2019, 50(7):153–159 (SU Zhandong, SUN Jinzhong, ZHOU Fubiao, et al. Test and analysis of thermophysical properties of aeolian sand modified soil [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2019, 50(7):153–159 (in Chinese))
- [23] 周富彪, 苏占东, 田梦楠, 等. 黏性土和纤维对风积沙改性土热膨胀特性的影响[J]. *硅酸盐通报*, 2020, 39(1):199–205 (ZHOU Fubiao, SU Zhandong, TIAN Mengnan, et al. Effect of clayey soil and fiber on thermal expansion of aeolian sand modified soil [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2020, 39(1):199–205 (in Chinese))
- [24] 阮波, 袁忠正, 张佳森, 等. 养护条件对纤维水泥改良风积沙强度及微观结构影响[J]. *铁道科学与工程学报*, 2022, 19(6):1594–1604 (RUAN Bo, YUAN Zhongzheng, ZHANG Jiasen, et al. Effect of curing conditions on the unconfined compressive strength and microstructure of cemented aeolian sand reinforced with polypropylene fiber [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2022, 19(6):1594–1604 (in Chinese))
- [25] 张鹏远, 白冰, 蒋思晨. 聚丙烯酰胺改性掺砂混杂纤维水泥土的无侧限抗压强度[J]. *中国铁道科学*, 2014, 35(6):7–14 (ZHANG Pengyuan, BAI Bing, JIANG Sichen. Unconfined compressive strength of hybrid fiber cement soil mixed with sand and modified by polyacrylamide [J]. *China Railway Science*, 2014, 35(6):7–14 (in Chinese))
- [26] 朱志铎, 刘松玉, 邵光辉, 等. 粉土及其稳定土的三轴试验研究[J]. *岩土力学*, 2005, 26(12):1967–1971 (ZHU Zhiduo, LIU Songyu, SHAO Guanghui, et al. Research on silts and silts treated with stabilizers by triaxial shear tests [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(12):1967–1971 (in Chinese))
- [27] 唐朝生, 施斌, 高玮, 等. 含砂量对聚丙烯纤维加筋黏性土强度影响的研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(增 1):2968–2973 (TANG Chaosheng, SHI Bin, GAO Wei, et al. Study on effects of sand content on strength of polypropylene fiber reinforced clay soil [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(Supp. 1):2968–2973 (in Chinese))
- [28] TANG C, SHI B, GAO W, et al. Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil [J]. *Geotextiles & Geomembranes*, 2007, 25(3):194–202.
- [29] LI L, SHAO W, LI Y, et al. Effects of climatic factors on mechanical properties of cement and fiber reinforced clays [J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2015, 33(3):537–548.
- [30] 钱健, 周琳, 杨建冬, 等. 不同纤维改性石灰土的力学特性研究[J]. *中外公路*, 2022, 42(5):203–208 (QIAN Jian, ZHOU Lin, YANG Jiandong, et al. Study on mechanical properties of lime soil modified with different fibers [J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2022, 42(5):203–208 (in Chinese))
- [31] 阮波, 彭学先, 米娟娟, 等. 聚丙烯纤维加筋红黏土抗剪强度特性试验研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2017, 14(4):705–710 (RUAN Bo, PENG Xuexian, MI Juanjuan, et al. Experimental study on shear strength of polypropylene fiber reinforced red clay [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2017, 14(4):705–710 (in Chinese))
- [32] ALONSO E E, GENS A, JOSA A. A constitutive model for partially saturated soils [J]. *Géotechnique*, 1990, 40(3):405–430.

## Study on the influence of polypropylene fibers on triaxial compression properties of aeolian sand modified soil

XIAO Huiru<sup>1</sup>, SU Zhandong<sup>1,2</sup>, LI Chi<sup>3</sup>, WU Chenglong<sup>4</sup>, TAO Jiawei<sup>1</sup>

(1. School of Geological Engineering, Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, Hebei, China; 2. Hebei Key Laboratory of Earthquake Disaster Prevention and Risk Assessment, Sanhe 065201, Hebei, China; 3. School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, Inner Mongolia, China; 4. Qinghai Transportation Planning and Design Institute Co., Ltd., Xining 541004, Qinghai, China)

**Abstract:** To study the effect and mechanism of polypropylene fibers in reinforcing aeolian sand modified soil (95% aeolian sand +5% cement) and to improve the brittle failure properties of aeolian sand modified soil, polypropylene fibers were divided into 0.1%, 0.2% and 0.4% by mass percentage and respectively incorporated into the aeolian sand modified soil. A consolidated undrained (CU) triaxial compression test was conducted. The test results show that the stress-strain curve of the aeolian sand modified soil has the characteristics of elastic-plastic deformation. The initial phase is pore compression with a sudden stress increase followed by a complete elastic phase, a phase of plastic deformation, and a phase of failure after the contact phase. The incorporation of propylene fibers increases the plastic deformation of the soil sample and improves the residual strength. The fracture surface becomes arc-shaped due to the pulling and tugging of the fibers, which prevents the brittle failure of the soil sample and increases its ductility. The cohesion of aeolian sand modified soil increases with the increase of fiber content, which basically shows a linear positive correlation, and the internal friction angle decreases with the increase of polypropylene fiber content and shows an overall linear negative correlation. The peak strain increases with the increase of polypropylene fiber content, and the stress-strain curve changes from strain softening type to strain hardening type, which can be effectively fitted by a hyperbola. The parameter  $b$  of stress-strain hyperbolic fitting model under the same confining pressure decreases with the increase of polypropylene fiber content. The research results can provide an experimental reference for the practical engineering application of aeolian sand modified soil.

**Keywords:** polypropylene fiber; aeolian sand modified soil; triaxial test; peak strain; shear strength