

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.201911005

基于高分子复合材料改良砂土三轴剪切试验研究

王龙威¹, 刘 瑾², 奚灵智¹, 武立林², 郑 川¹, 祁长青²

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122;

2. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100)

摘要: 为研究剑麻纤维和高分子固化剂复合改良对砂土工程特性影响,通过一系列三轴剪切试验,对不同掺量和长度的剑麻纤维与高分子固化剂改良砂土的剪切强度特性进行了研究,从峰值偏应力、应力应变曲线特征和抗剪强度参数等方面分别对改良机理进行了研究。研究表明,纯高分子固化剂改良砂土的峰值偏应力和黏聚力明显提升,由于固化剂粘结砂土颗粒,限制了变形过程中颗粒的相对滑动,内摩擦角略微降低。随纤维掺量的增加,不同围压下固化剂改良土体的峰值偏应力明显增加,应力硬化特征愈加明显,土体的黏聚力和内摩擦角随纤维掺量的增加保持单调递增趋势。在单纯添加固化剂的情况下,土体强度与固化剂浓度呈正相关的关系;在给定0.4%的纤维含量下,随着纤维长度的加长,纤维和高分子固化剂复合改良砂土的剪切强度先增强后降低;在纤维长度为18 mm时,土体的剪切强度达到最大,黏聚力达到最大207.57 kPa;纤维长度的改变对试样破坏时的轴向应变和土体的内摩擦角基本没有影响。

关键词: 高分子固化剂;砂土;剑麻纤维;三轴剪切强度;应力-应变

中图分类号: TU411.7; TU442

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2020)04-0149-09

Triaxial shear test of sand improved by polymer composite

WANG Longwei¹, LIU Jin², XI Lingzhi¹, WU Lilin², ZHENG Chuan¹, QI Changqing²

(1. Powerchina Huadong Engineering Corporation, Hangzhou, Zhejiang 311122, China;

2. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 211100, China)

Abstract: The effect of sisal fiber and polymer curing agent on the engineering properties of sandy soil is examined in this paper. Through a series of triaxial shear tests, the shear strength characteristics of sand improved by sisal fiber and polymer curing agent with different content and lengths are studied. The improvement mechanism is studied in terms of peak deviation stress, stress-strain curve characteristics and shear strength parameters. The results show that the peak deviating stress and cohesion of pure polymer curing agent improved sandy soil are obviously increased. Because the curing agent binds sand particles, the relative sliding of particles during deformation is limited, and the internal friction angle is slightly reduced. With the increasing fiber content, the peak deviation stress and stress hardening characteristics of the soil improved by curing agent increase obviously under different confining pressures. The cohesion and internal friction angle of the soil keep a monotonous increasing trend with the increasing fiber content. Given the fiber content of 0.4%, with the increasing fiber length, the shear strength of composite sand improved by fiber and polymer curing agent increases first and then decreases. When the fiber length is 18 mm, the shear strength of soil reaches the maximum and cohesion reaches the maximum of 207.57 kPa. The change in fiber length has little

收稿日期: 2019-11-04; 修订日期: 2019-12-12

基金项目: 国家自然科学基金面上项目资助(41877212)

第一作者: 王龙威(1990-),男,工学硕士,工程师,主要从事公路工程项目管理。E-mail: 1115485714@qq.com

通讯作者: 刘瑾(1983-),女,教授,博士研究生导师,主要从事环境地质工程、地质灾害监测教学与科研。

E-mail: jinliu920@163.com

effect on the axial strain and the internal friction angle of soil when the sample is damaged.

Keywords: polymer curing agent; sand; sisal fiber; triaxial shear strength; stress-strain

在工程建设中,砂土作为一种典型的无黏性土,由于其结构松散、黏聚力小的性质,往往会造成边坡失稳、地基沉降以及水土流失等工程地质问题。与传统的化学加固方式相比,高分子固化剂作为一种新型的化学加固土体方法,具有经济、运输便捷、使用方便、对环境影响小等优点,成为了岩土工程领域的一个研究热点。因此,国内外许多学者都开始关注采用新型化学加固方法对土体进行改良^[1-5]。王银梅等^[6-8]针对黄土等易湿陷性土体的强度低、易湿陷等地质问题,自主研发了SH型固砂剂,并研究了改良黄土的抗冻性能以及抗老化性能,为黄土边坡治理与防治提供了新方法。刘瑾等^[9-10]研发了一种聚氨酯型高分子固化剂,并用于改良砂土,研究表明砂土改良后黏聚力明显增强,且保水性能得到一定程度的改善。汪勇等^[11]利用高分子固化剂对土质边坡进行加固,并研究了不同坡比工况边坡加固后的稳定性。Rezaeimalek等^[12]研究了养护方式和搅拌方法对MDI(Methylene Diphenyl Diisocyanate)加固砂土效果的影响。上述研究表明,通过新型高分子化学加固方法对土体进行改良,能够明显改善土体的不良工程性质。

而纤维加固作为一种传统的物理加固土体技术,已经日趋成熟。在工程中,一般将纤维与土体混合,使其随机分布在土体当中^[13-14]。研究表明在不同的土体中掺入一定量的纤维可以不同程度地改善土体的静力学强度特性^[15-17]。还有研究发现天然纤维加筋可以明显减小膨胀土的收缩性^[18-19]。这些都说明纤维加筋可以明显改善土体的工程性质。因此采用纤维和高分子固化剂复合改良土体的工程性质是值得研究的,本文采用不同浓度的高分子固化剂、不同掺量以及长度的纤维对砂土进行联合改良,定量分析了纤维和高分子固化剂对改良后的土体力学性质的影响,同时也为纤维-高分子复合加固砂土提供了具有参考性的理论基础。

1 试验材料及方案

本次研究共进行13组不固结不排水剪切试验(12个加固试样和1个对照试样)。试验方案分别将固化剂浓度、纤维含量、纤维长度以及围压作为试验变量。

1.1 试验材料

试验所用砂土取自南京市江宁区某工地,砂土的

干密度为 $1.39 \sim 1.66 \text{ g/cm}^3$,比重为2.65。从图1的粒径分布曲线中可以看出,有效粒径(d_{10})约为0.14 mm,限制粒径(d_{60})约为0.36 mm,计算得出土的不均匀系数(C_u)为2.57,曲率系数(C_c)为1.05。根据土的粒径分布及级配系数判断, $C_u < 5$, $C_c = 1 \sim 3$,颗粒粒径主要分布在0.075 ~ 1 mm,且粒径 $d > 0.25 \text{ mm}$ 的颗粒含量超过全重的50%,根据《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)分类方法可知试验采用的砂土为级配不良的中砂。

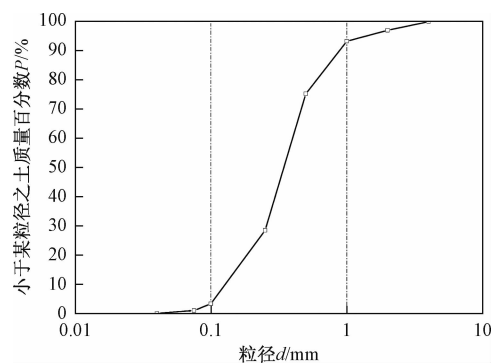


图1 砂土的粒径分布曲线

Fig.1 Grain distribution of the sand used in the experiment

本次试验采用一种透明的浅黄色水溶性聚氨酯型固砂剂,是一种易使用、成本低廉、无毒的土体加固材料。在制备该固化剂的过程中,采用不同分子量、不同配比的二元醇混合物(PEG 聚乙二醇/PPG 聚丙二醇)和过量的甲苯二异氰酸酯(TDI)进行反应。本次研究定义固化剂的含量(P_c)为固化剂质量与试样中干砂质量之比。之后与干砂质量10%的水互溶形成一种黏稠的乳白色溶液。在试样的养护过程中,水分逐渐挥发,形成了一种弹性好、强度高且不溶于水的胶状物质,不会污染周围地区的环境。该型号固砂剂的主要物理化学参数如表1所示。

表1 聚氨酯型固化剂参数

Table 1 Parameters of polyurethane curing agent

状态	密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	黏度/($\text{MPa} \cdot \text{s}$)	固态含量/%	pH值
液态	1.18	650 ~ 700	75 ± 1	7

采用广西某一产地同一批次生产的剑麻纤维作为与固化剂复合加固砂土的材料。剑麻纤维表面粗糙,硬度大,断裂时拉伸的长度约为初始长度的3%,弹性模量高达45 ~ 55 MPa,纤维横截面的直径约为

0.25 mm。试验通过改变所添加剑麻纤维的含量(F_c)与长度(F_l),来研究纤维对加固砂土的力学性质的影响。其中,纤维含量被定义为纤维质量(m_x)与试样干砂质量(m_s)的比值,计算公式如下:

$$F_c = \frac{m_x}{m_s} \tag{1}$$

1.2 试验方案

为研究纤维对聚氨酯型固化剂加固砂土力学特性的影响,对添加不同纤维含量以及长度并且混合了 2% 固化剂含量的改良砂土试样进行三轴不固结不排水剪切试验,同时增加了未改良砂土的剪切试验作为对照。传统的三轴剪切试验采用南京土壤仪器厂生产的 TSZ-1 型全自动三轴剪切仪,通过传感器自动采集数据。试验分为 100, 200, 300, 400 kPa 共 4 个围压下进行不固结不排水剪,根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999)中试验要求,控制剪切仪的应变速率为 0.8 mm/min,当试样剪切至应变 $\varepsilon = 15\%$ 时,停止剪切。

研究不同固化剂浓度、剑麻纤维含量及长度影响固化剂改良砂土的强度变化。试验中控制纤维含量为 0%,调节固化剂浓度为 1%,2%,3%,4%;控制高分子固化剂的含量(P_c)为 2% 不变,改变剑麻短切纤维的含量和长度,其中剑麻纤维含量分别为 0%,2%,0.4%,0.6%,0.8%,纤维长度分别为 6,12,18,24,30 mm。同时控制试样的初始含水率 $w = 10\%$,干密度 $\rho = 1.50 \text{ g/cm}^3$ 。并取相同含水率和干密度的未处理砂($P_c = 0\%$)作为试验参照。

试验开始前,先将工地取回的砂土在烘箱中烘干,之后用碎土机将其研磨,最后用 2 mm 的筛进行筛分。在试样制备过程中,为了使纤维能够均匀地分布,先将干砂与纤维进行充分的搅拌,然后再将充分混合搅拌后得到的高分子固化剂溶液均匀地倒入砂-纤维混合物中,再次进行搅拌使纤维和溶液都均匀地分散在砂土中。搅拌过后得到的砂土分成三等分,依次倒入三瓣模试样制作模具中,采用分层夯实,将每一层击实至所需高度即可。最终形成的试样直径为 39.1 mm、高度为 80.00 mm。制备好的试样放入 $20 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ 恒温养护箱中养护 48 h。

2 试验结果及分析

对养护后的试样进行三轴剪切试验,根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999)规范要求,试样剪切过程中出现峰值的,取峰值强度;无峰值强度的试

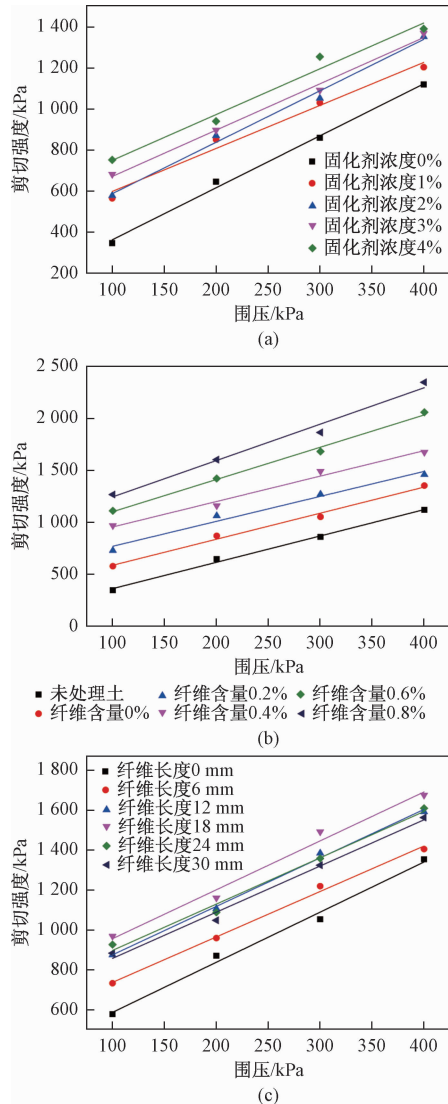
样取 $\varepsilon = 15\%$ 对应的强度为峰值强度。

2.1 峰值剪切强度

表 2 列出了所有试样的峰值偏应力,可以看出,固化剂纤维复合改良砂土的峰值偏应力随着固化剂浓度以及纤维含量单调增强。当固化剂浓度与纤维含量分别增加到 4% 与 0.8% 时,对应不同围压下的峰值偏应力达到最大,分别为 749.79, 938.97, 1 253.67, 1 390.22 kPa 和 1 266.30, 1 603.09, 1 865.03, 2 348.27 kPa。相较于未加筋砂土的峰值偏应力(343.19, 642.95, 857.74, 1 118.14 kPa)分别提升了 118.48%、46.04%、46.16%、24.33% 和 268.89%、149.33%、117.43%、110.01%。此外,将固化剂纤维混合加固砂与纯固化剂加固砂(575.35, 868.25, 1 050.96, 1 352.10 kPa)相比较,峰值的增量分别为 120.09%、84.63%、77.46%、73.69%。这表明随着围压的增加,试样峰值偏应力增加,同时围压的增加使得掺入纤维后峰值提升的效率降低。图 2 分别为未处理土与高分子固化剂($P_c = 2\%$)改良砂土的 $\tau - \sigma$ 关系(图 2a)、未处理土与高分子固化剂($P_c = 2\%$)改良砂土中不同纤维含量的 $\tau - \sigma$ 关系(图 2b)以及高分子固化剂($P_c = 2\%$)改良砂土中不同纤维长度的 $\tau - \sigma$ 关系(图 2c)。从图 2(a)、图 2(b)可知,固化剂含量、纤维含量以及围压的增加,均对改良后砂土的强度特性有着显著的影响。此外,图 2(c)表明,在给定的固化剂含量和纤维含量下,试样的强度随长度变化逐渐增加。在 $F_l = 18 \text{ mm}$ 时,试样强度达到最大,随后纤维长度的继续增加将导致试样强度略微的下降。这说

表 2 未加固砂及纤维与固化剂改良砂土的峰值偏应力
Table 2 Summary of deviatoric stress of the unreinforced sand and the fiber and polymer stabilization sand

样品 编号	固化剂 含量 $P_c/\%$	纤维 掺量 $F_c/\%$	纤维 长度 F_l/mm	围压/kPa			
				100	200	300	400
1	0	0	0	343.19	642.95	857.74	1 118.14
2	1	0	0	562.31	849.35	1 028.95	1 202.81
3	2	0	0	575.35	868.25	1 050.96	1 352.10
4	3	0	0	679.58	895.03	1 089.95	1 368.69
5	4	0	0	749.79	938.97	1 253.67	1 390.22
6	2	0.2	18	726.04	1 061.15	1 269.12	1 459.17
7	2	0.4	18	966.64	1 158.19	1 489.72	1 673.67
8	2	0.6	18	1 109.67	1 420.40	1 681.59	2 059.17
9	2	0.8	18	1 266.30	1 603.09	1 865.03	2 348.27
10	2	0.4	6	730.43	956.92	1 217.23	1 403.37
11	2	0.4	12	873.05	1 104.55	1 383.06	1 590.41
12	2	0.4	24	924.46	1 085.97	1 356.13	1 608.36
13	2	0.4	30	881.38	1 046.26	1 322.26	1 561.57

图2 未加固砂及纤维与固化剂改良砂土的 $\tau-\sigma$ 关系曲线Fig.2 $\tau-\sigma$ curves of the unreinforced sand and the fiber and polymer stabilization sand

明试样的纤维加筋存在最优长度,且纤维长度对改良砂土强度的影响要小于纤维含量的影响。而试样峰值偏应力与围压之间几乎保持线性增强趋势,其中拟合方程公式如下:

$$\begin{aligned}\tau_1 &= 105.5950 + 2.5396\sigma, R^2 = 0.9942 \\ \tau_2 &= 385.5800 + 2.1011\sigma, R^2 = 0.9751 \\ \tau_3 &= 333.4250 + 2.5129\sigma, R^2 = 0.9876 \\ \tau_4 &= 442.7500 + 2.2622\sigma, R^2 = 0.9909 \\ \tau_5 &= 524.0400 + 2.2362\sigma, R^2 = 0.9787 \\ \tau_6 &= 105.5942 + 2.5396\sigma, R^2 = 0.9943 \\ \tau_7 &= 333.4298 + 2.5129\sigma, R^2 = 0.9876 \\ \tau_8 &= 527.0283 + 2.4074\sigma, R^2 = 0.9703\end{aligned}$$

$$\tau_9 = 708.8968 + 2.4526\sigma, R^2 = 0.9796$$

$$\tau_{10} = 790.2810 + 3.1097\sigma, R^2 = 0.9923$$

$$\tau_{11} = 893.7138 + 3.5078\sigma, R^2 = 0.9766$$

$$\tau_{12} = 507.2085 + 2.2791\sigma, R^2 = 0.9943$$

$$\tau_{13} = 630.1201 + 2.4306\sigma, R^2 = 0.9957$$

$$\tau_{14} = 663.2685 + 2.3219\sigma, R^2 = 0.9843$$

$$\tau_{15} = 623.7270 + 2.3166\sigma, R^2 = 0.9863 \quad (2)$$

各拟合直线的判定系数 R^2 均大于 0.97, 表明直线拟合程度较高, 可以用来预测试样在其他围压下试样的峰值偏应力。

2.2 应力应变曲线

图3为未处理土与剑麻纤维与高分子固化剂复合改良砂土在不同围压下的应力应变曲线。从图3(f)中可以看出, 未处理砂的应力应变存在明显的峰值后软化现象, 且试样剪切应力较低。通过观察图3(a)~(e)可知, 随着固化剂浓度的增加, 各围压下试样的剪切应力随之提高。且改良后砂的峰值后软化现象得到改善, 但程度相对较小。在2%固化剂改良的砂土中, 随着纤维掺量的增加, 应力应变曲线逐渐由应变软化型向应变硬化型过渡。当纤维掺量 $F_c > 0.6\%$ 时, 应变硬化趋势更加明显, 表明纤维的加入使试样的韧性明显增加。加入纤维的改良砂土剪切应力明显增大, 且试样破坏点对应的轴向应变逐渐增大。随着围压增加, 所有试样的应力应变曲线均呈现明显的增强趋势。对于给定的固化剂含量 $P_c = 2\%$ 和纤维掺量 $F_c = 0.4\%$, 试样的应力应变总体随着纤维长度增加而增加, 在纤维长度达到18 mm时, 试样的剪切应力达到最大值。随后, 纤维长度超过18 mm继续增加将导致试样剪切应力降低, 但其剪切应力仍大于纯固化剂处理砂土的剪切应力。由此可知, 纤维长度对试样破坏对应的轴向应变无明显影响, 其作用与纤维掺量的影响相比较轻微。

2.3 抗剪强度参数

由于是根据试验结果绘制不同围压下试样的破坏莫尔圆, 绘制强度包线不可避免地带有有人为因素。现采用最小二乘法中对破坏应力点进行拟合的 $p-q$ 法, 计算结果如图4所示, 公式如下:

$$\begin{aligned}q &= a + p \tan \alpha \\ \varphi &= \arcsin(\tan \alpha)\end{aligned} \quad (3)$$

$$c = \frac{a}{\cos \varphi} = \frac{a}{\cos(\arcsin(\tan \alpha))}$$

图5为抗剪强度参数随纤维掺量变化的关系曲线, 其中均加入了未处理砂的抗剪强度参数作为对照。

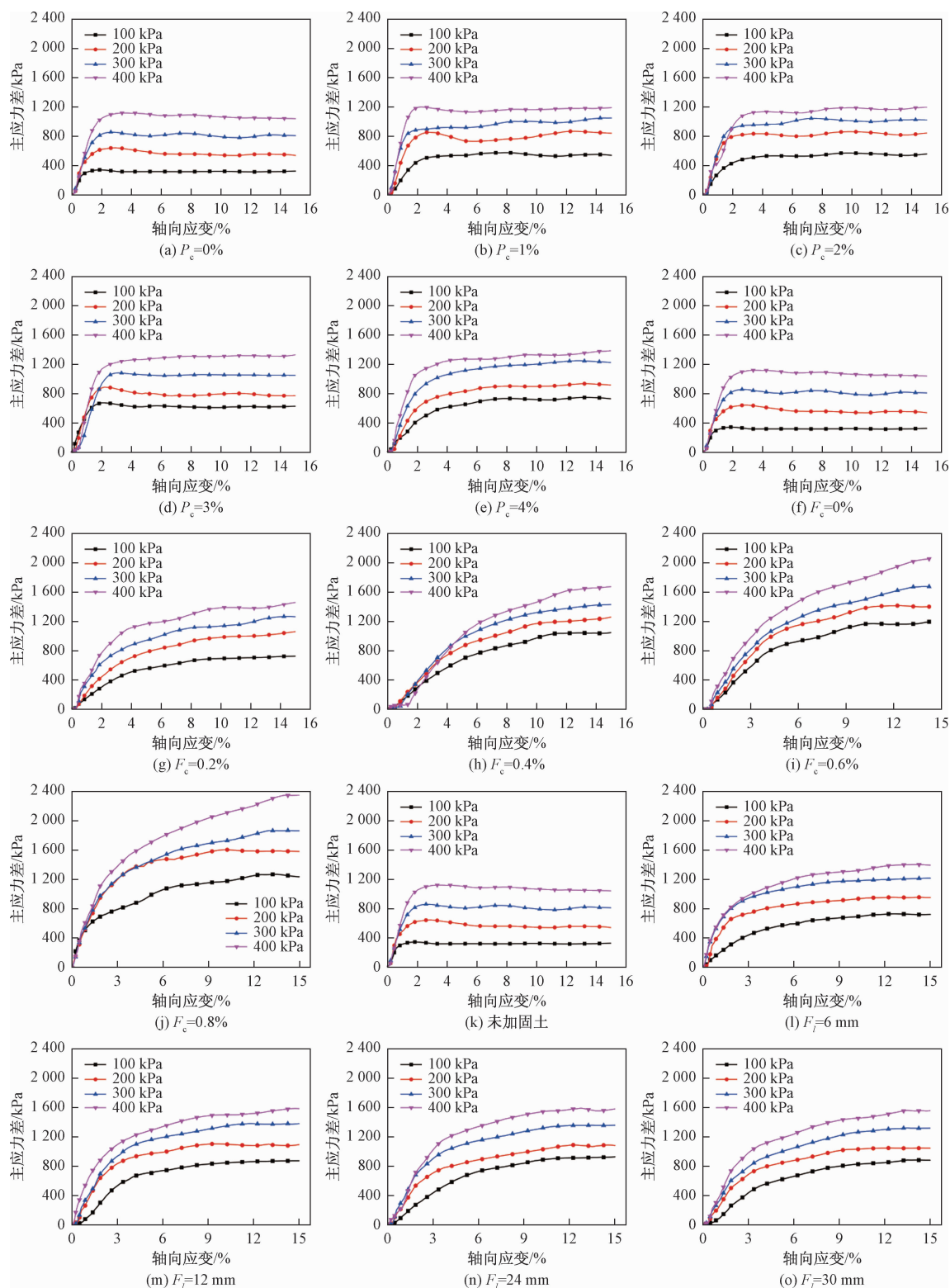


图3 未加固砂及纤维与固化剂改良砂土的应力应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of the unreinforced sand and the fiber and polymer stabilization sand

从图 5(a) 可以看出, 固化剂的掺入使试样的黏聚力大幅提高, 数值为未处理土的黏聚力 (21.67 kPa) 的 5 ~ 6 倍。这是由于高分子固化剂与水等比例混合形成的

流体渗入到砂土颗粒之间的孔隙当中, 在试样养护过程中, 溶液中的水分逐渐蒸发并在砂颗粒之间形成了具有弹性好、强度大的网状粘膜, 充分地砂土颗粒进

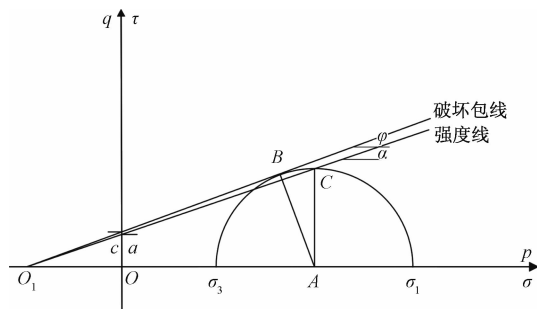


图4 土体抗剪强度计算示意图

Fig. 4 Graphics for calculating the shear strength parameters of sand

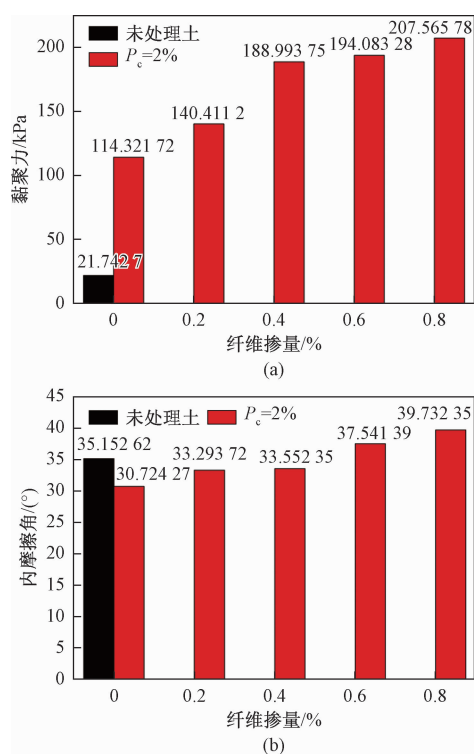


图5 抗剪强度参数与纤维掺量的关系

Fig. 5 Relationship between the shear strength parameters and the fiber contents

行包裹与缠绕,增强了相互之间的连结力。故固化剂的加入可以提高改良后砂土的整体性与稳定性,使其黏聚力大幅增强。而在高分子固化剂处理的试样中,随着纤维的掺入,试样的黏聚力也不断增加,在纤维掺量达到 0.4% 时,黏聚力增加的幅度变缓。这表明纤维的掺入能有效提高固化剂改善砂土的黏聚力。在掺入纤维的基础上,一定长度的纤维在砂土颗粒间的固化剂中锚固,通过桥接作用有效地填充孔隙并胶结颗粒,增强了土体结构性,当试样被剪切时,颗粒间的固化剂与纤维产生了较大的拉应力,提高了颗粒间的连

结力,使砂土颗粒之间的黏聚力变大,可有效抑制砂土剪切破坏。当纤维掺量较少时,纤维可充分地在砂土颗粒孔隙中与固化剂胶结;当纤维掺量过大 ($F_c \geq 0.6\%$),过多的纤维互相重叠,反而对砂土颗粒之间产生了一定的隔离作用,拉应力提升的幅度降低,因此黏聚力提升幅度变缓。

然而,从图 5(b)中可以看出未处理砂土的内摩擦角为 35.15° ,掺入固化剂后内摩擦角为 30.72° ,下降了约 4° 。这是由于固化剂的掺入使得砂土颗粒得到了有效的胶结,限制了砂土颗粒的相对位置,使土体在剪切过程中不能发生有效的滑动摩擦,从而使土体的内摩擦角降低。随着纤维掺量的增加,砂土的内摩擦角保持单调增加的趋势,在纤维含量为 0.8% 时,内摩擦角达到最大值 39.73° 。砂土颗粒交错排列,纤维的掺入使试样在剪切过程中颗粒重新定向排列和转动的阻力增大,使土体的咬合摩擦力增强,从而使土体的内摩擦角增加。因此,随着纤维掺量的增加可以使固化剂改良砂土的抗剪强度参数得到明显改善。

图 6 为固化剂与不同长度纤维复合改良砂土的抗剪强度参数变化。从图 6(a)中看出,固化剂的掺入使砂土的黏聚力提升了 92.58 kPa。纤维与固化剂复合改良砂土的黏聚力在固化剂浓度不变的情况下,随纤维长度增加而增加,且在纤维长度为 18 mm 时,黏聚力达到最大值 207.57 kPa。随后,随着纤维长度的进一步增加将导致土体黏聚力降低,纤维长度达到 30 mm 后,黏聚力为 170.16 kPa,与纯固化剂处理砂土的黏聚力相比,增加了 55.84 kPa。由此说明纤维长度对于加筋砂土而言,存在最优加筋长度。当长度继续增加,黏聚力反而略微下降,但仍远远高于纯固化剂处理砂土的黏聚力。图 6(b)表明,纯固化剂处理砂土时,使砂土颗粒得到胶结,增强了土体的结构性与整体性,但同时也限制了砂土颗粒的相对位置,降低了砂土颗粒之间的滑动摩擦,从而降低了土体的内摩擦角。与纤维掺量对砂土内摩擦角影响不同的是,对于给定的纤维含量 ($F_c = 0.4\%$),不同长度纤维的掺入略微提高纯固化剂处理砂土的内摩擦角。随着长度的改变,土体的内摩擦角变化不大,变化幅度在 1° 左右。这是由于不同长度的纤维均可以有效地在胶结砂土颗粒的高分子固化剂中锚固,并通过桥接效应充分地连接相邻的砂土颗粒。对于不同长度的纤维加固砂土,都可以有效地增强砂土颗粒之间的咬合摩擦作用,故对于一定含量纤维加筋时,纤维长度的改变对土体内摩擦角的变化影响不大。

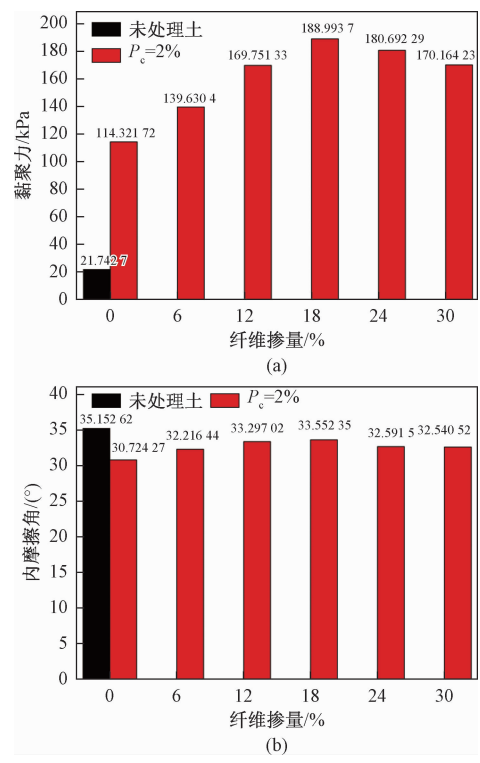


图 6 抗剪强度参数与纤维长度的关系

Fig. 6 Relationship between the shear strength parameters and the fiber lengths

3 加固机理分析

众所周知,砂土不存在内聚力而是靠着颗粒之间的相互咬合与摩擦进行连结。如图 7(a)可知,未经改良的原砂颗粒之间存在许多孔隙,因此是不稳定结构。而即便往原砂中添加剑麻纤维(图 7b)也只是轻微地填补了一些孔隙,砂土整体上的稳定性仍然未得到改善。聚氨酯型固化剂作为一种新型的高分子土壤加固材料,当与水混合后会形成乳白色的弹性粘膜。如图 7c 所示,当聚氨酯溶液还是液体状态时,与砂-纤维混合物均匀搅拌,砂颗粒与纤维之间的孔隙被充分地填充。静置一段时间后,聚氨酯水溶液固化为稳定的弹性膜结构,将砂颗粒与纤维胶结在一起。结合扫描电子显微镜进行更进一步的分析。

通过扫描电子显微镜(SEM)观察传统三轴试验后样品的微观结构,研究纤维、聚合物和砂粒之间的相互作用。纯聚合物处理砂和复合纤维聚合物处理砂的显微图像如图 8 所示。图 8(a)清楚地显示了 2% 聚合物处理砂的微观图像,砂颗粒被大量的聚氨酯固化薄膜覆盖,这些薄膜填补了砂颗粒之间的空隙,并提供了它们之间的键合。一系列交错和相互连接的固化膜进

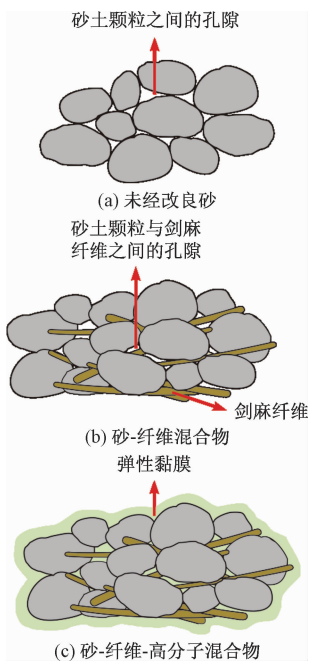


图 7 改良砂土加固机理示意图

Fig. 7 Schematic diagram showing the reinforcement mechanism of the improved sand

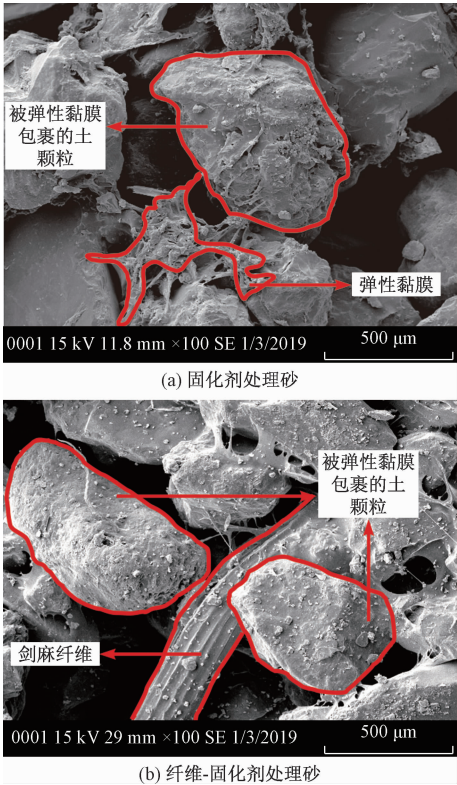


图 8 不同试样 SEM 图

Fig. 8 SEM photos of the polymer stabilization sand sample (a) and the fiber-polymer stabilization sand (b)

一步增强了砂粒之间的胶结。纤维含量为 0.4%、聚

合物含量为 2% 的复合处理样品的 SEM 图像如图 8 (b) 所示。砂颗粒间的孔隙中充满了纤维和聚合物,纤维很好地固定在聚氨酯形成的粘结剂中。这些纤维起桥接作用,与聚合物共同作用将间隔的沙粒连接在一起,形成稳定的结构。有效的三维交联网络结构在很大程度上归功于固相桥接效应,它增强了砂粒间的胶结。纤维和聚合物形成的网状结构通过桥接有效地传递应力,为试样提供了机械支撑,提高了试样的力学性能。

4 结论

(1) 一定量的高分子固化剂处理的砂土与未处理砂土相比,在不同围压下的土体峰值偏应力均有明显提高,且随着围压增加,峰值偏应力明显增加。应力应变曲线中峰后软化行为减弱,试样破坏时对应的轴向应变变化不大。由于高分子固化剂的掺入使砂土颗粒相互连结,土体结构性增强,黏聚力增加。由于固化剂连结松散砂土颗粒的同时限制了其相对位置,使其滑动摩擦力下降,导致了土体内摩擦角略微下降。

(2) 随着在固化剂改良砂土中纤维掺量的增加,土体的峰值剪切强度逐渐增加。且随纤维掺量的逐渐增加,试样应力应变曲线的应变硬化愈加明显,试样破坏时对应的轴向应变增大。由于纤维的掺入有效地填充了砂土颗粒之间的孔隙,并通过桥接效应将砂颗粒进行了充分地连结,增强了土体的结构性、整体性以及黏聚力,增强了砂土颗粒之间的咬合摩擦作用。

(3) 纤维-高分子固化剂改良土体存在最优的加筋长度。随着纤维长度的增加,土体的剪切强度也逐渐增加,并且在纤维长度为 18 mm 时达到最大。随后纤维长度继续增加将导致改良砂土的剪切强度的下降。纤维长度改变时,试样变形过程中的弹性变形阶段对应的轴向应变并未发生明显改变。试样在添加的纤维长度为 18 mm 时,其黏聚力达到最大值,而试样的内摩擦角无明显地变化。

参考文献 (References):

- [1] NAEINI S A, NADERINIA B, IZADI E. Unconfined compressive strength of clayey soils stabilized with waterborne polymer [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2012, 16(6): 943 - 949.
- [2] SANTONI R L, TINGLE J S, NIEVES M. Accelerated strength improvement of silty sand with nontraditional additives [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research

- Board, 2005, 1936(1): 34 - 42.
- [3] LEVY G, MILLER W. Polyacrylamide adsorption and aggregate stability [J]. Soil and Tillage Research, 1999, 51(1/2): 121 - 128.
- [4] 黄英, 符必昌. 土壤强固剂加固红土的力学特性 [J]. 水文地质工程地质, 2002, 29(5): 4 - 6. [HUANG Y, FU B C. Mechanical Properties of the soil-solidified additive on the strengthening of laterite [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2002, 29(5): 4 - 6. (in Chinese)]
- [5] 徐岗, 裴向军, 等. 改性纳米硅材料加固松散砂土的工程特性研究 [J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(4): 143 - 149. [XU G, PEI X J, et al. A study of the engineering characteristics of reinforced loose sand by modified nano-Si materials [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(4): 143 - 149. (in Chinese)]
- [6] 王银梅, 韩文峰, 谌文武, 等. 新型高分子固化材料耐老化性能的试验研究 [J]. 工程地质学报, 2004, 12(3): 318 - 322. [WANG Y M, HAN W F, CHEN W W, et al. Experimental study on resistances to aging of a new polymer solidified material [J]. Journal of Engineering Geology, 2004, 12(3): 318 - 322. (in Chinese)]
- [7] 王银梅, 孙冠平, 谌文武. SH 固砂剂固化砂体的强度特征 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增刊 2): 2883 - 2883. [WANG Y M, SUN G P, CHEN W W. Strength characteristics of sand fixated by SH [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(Sup 2): 2883 - 2883. (in Chinese)]
- [8] 王银梅, 杨重存, 谌文武等. 新型高分子材料 SH 加固黄土强度及机理探讨 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(14): 2554 - 2559. [Y M, YANG Z C, CHEN W W, et al. Strength characteristics and mechanism of loess solidified with new polymer material SH [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(14): 2554 - 2559. (in Chinese)]
- [9] 刘瑾, 施斌, 顾凯, 等. 聚氨酯型固沙剂改性土室内试验研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 2013, 33(1): 29 - 34. [LIU J, SHI B, GU K, et al. Laboratory study on soil modified by polyurethane sand-fixing agents [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2013, 33(1): 29 - 34. (in Chinese)]
- [10] 刘瑾, 亓孝辉, 张达, 等. 聚氨酯型固化剂改良表层砂土抗渗透特性试验 [J]. 地球科学与环境学

- 报, 2017, 39(1): 126 - 134. [LIU J, QI X H, ZHANG D, et al. Experiment on penetration resistance of surface sandy soil stabilized by polyurethane soil stabilizers [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2017, 39(1): 126 - 134. (in Chinese)]
- [11] 汪勇, 刘瑾, 张达, 等. 高分子固化剂加固土质边坡的稳定性分析[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2016(4): 14 - 16. [WANG Y, LIU J, ZHANG D, et al. Stability analysis of soil slope reinforced by polymer curing agent[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2016(4): 14 - 16. (in Chinese)]
- [12] REZAEIMALEK S, HUANG J, BIN-SHAFIQUE S. Evaluation of curing method and mix design of a moisture activated polymer for sand stabilization[J]. Construction and Building Materials, 2017, 146: 210 - 220.
- [13] 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. [LIU B S, TANG C S, LI J, et al. Progress in research on engineering properties of fiber reinforced soil[J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21(4): 540 - 547. (in Chinese)]
- [14] 王桂尧, 胡圣辉, 张永杰, 等. 小乔木根系根土间作用力的室外拉拔试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(6): 64 - 69. [WANG G Y, HU S H, ZHANG Y J, et al. An outdoor drawing test study of the root soil interaction force for a small tree root system[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(6): 64 - 69. (in Chinese)]
- [15] 施利国, 张孟喜, 曹鹏. 聚丙烯纤维加筋灰土的三轴强度特性[J]. 岩土力学, 2011, 32(9): 2721 - 2728. [SHI L G, ZHANG M X, Cao P. Triaxial shear strength characteristics of lime-soil reinforced with polypropylene fiber inclusions [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(9): 2721 - 2728. (in Chinese)]
- [16] 李丽华, 万畅, 刘永莉, 等. 玻璃纤维加筋砂土剪切强度特性研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2017, 50(1): 102 - 106. [LI L H, WAN C, LIU Y L, et al. Shear strength characteristics of glass fiber reinforced sandy soil [J]. Journal of Wuhan University, 2017, 50(1): 102 - 106. (in Chinese)]
- [17] 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. [TANG C S, SHI B, GU K. Microscopic study on interfacial interactions between fiber reinforcement and soil [J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(4): 610 - 614. (in Chinese)]
- [18] 张丹, 许强, 郭莹. 玄武岩纤维加筋膨胀土的强度与干缩变形特性试验[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2012, 42(5): 975 - 980. [ZHANG D, XU Q, GUO Y. Experiments on strength and shrinkage of expansive soil with basalt fiber reinforcement [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2012, 42(5): 975 - 980. (in Chinese)]
- [19] 吴继玲, 张小平. 聚丙烯纤维加筋膨胀土强度试验研究[J]. 土工基础, 2010, 24(6): 71 - 73. [WU J L, ZHANG X P. Study on strength of polypropylene fiber reinforced expansive soil [J]. Soil Engineering and Foundation, 2010, 24(6): 71 - 73. (in Chinese)]

编辑: 张明霞