

# 聚丙烯纤维红黏土力学特性试验研究

张金利<sup>1,2</sup>, 蒋正国<sup>1,2</sup>, 杨 钢<sup>1,2</sup>

(1. 大连理工大学建设工程学部土木工程学院岩土工程研究所, 辽宁 大连 116024; 2. 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

**摘 要:** 通过多种试验研究了聚丙烯纤维红黏土的力学特性。击实与渗透试验结果表明, 在一定纤维含量下, 纤维红黏土的最大干密度基本不变, 最优含水率变化范围较大, 与红黏土的渗透系数处于相同量级, 具有低渗透性。直剪试验、无侧限抗压强度试验、三轴试验结果表明, 纤维红黏土强度显著高于红黏土强度, 且随纤维含量与长度的增加而增加。红黏土加入纤维后, 黏聚力得到了显著提高, 而内摩擦角变化不大。纤维红黏土的应力—应变曲线具有典型的加工硬化特征, 且具有鼓胀性破坏特征。

**关键词:** 聚丙烯纤维; 红黏土; 抗剪强度; 纤维含量与长度; 加工硬化

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2011)S1-0420-06

**作者简介:** 张金利(1964-), 男, 博士, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事环境岩土工程方面的研究工作。E-mail: jlzhang@dlut.edu.cn。

## Experimental study on mechanical behaviors of polypropylene fiber reinforced clay

ZHANG Jin-li<sup>1,2</sup>, JIANG Zheng-guo<sup>1,2</sup>, YANG Gang<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Geotechnical Engineering, School of Civil Engineering, Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** The mechanical behaviors of polypropylene fiber reinforced red clay are studied by means of different test methods. The compaction test and the permeability test show that the maximum dry unit weight of the fiber reinforced red clay is basically a constant value and the variation range of the optimum moisture content is great with certain fiber content. It has the same magnitude of permeability coefficients as the fiber reinforced red clay and the permeability coefficient is small. The results of direct shear test, unconfined compressive test and triaxial consolidation undrained test show the strength of the fiber reinforced red clay is obvious higher than that of the red clay, which increases with the fiber content and length. After being mixed with fiber, the cohesion of red clay rises a lot and the change of friction angle is small. The stress-strain curve of the fiber reinforced red clay shows typical work hardening character. The sample has the character of bulging breakage.

**Key words:** polypropylene fiber; red clay; shear strength; fiber content and length; work hardening

## 0 引 言

工程上常采用碾压的黏土作为防渗材料进行工程防渗, 如黏土心墙坝、垃圾填埋场底部防渗层与最终封顶层。然而黏土的强度较低, 特别是发生不均匀沉降时, 易出现拉伸裂缝, 其渗透性显著提高。如采用压实黏土作为垃圾填埋场最终封顶层使用时, 由于不同填埋单元所填埋的垃圾降解特性不同, 极易出现差异沉降, 对最终封顶层的防渗性产生较大影响, 由此, 显著增加了垃圾填埋场后期运行成本。由于垃圾填埋场恶臭气味、苍蝇等对周围居民的影响, 新建垃圾填埋场选址异常困难, 多数城市采用改扩建垃圾填埋场处理生活垃圾。当进行改扩建垃圾填埋场时, 在原垃

圾堆体上需进行防渗处理, 同样会面临垃圾体不均匀沉降所引起的防渗层破坏问题。为解决这一问题, 可考虑对黏土进行加固改良的方法, 使其具有一定的抗拉强度。土工合成材料(土工格栅、土工布等)较早地应用于土体改良工程中, 通过筋土相互作用达到对工程土体的改良, 但这种加固方法并未从根本上改变土体的工程性质<sup>[1]</sup>。在土体中随机均匀加入纤维, 可使纤维与土颗粒有效接触, 在破裂面上, 纤维可发挥其抗拉能力, 阻止破裂面发展, 由此, 提高了土体的抗剪强度<sup>[2]</sup>。国内外已经较多地开展了纤维砂土的力学

基金项目: 国家自然科学基金项目(50979013)

收稿日期: 2011-04-26

特性研究, 主要考虑纤维的含量、长径比、模量、纤维与剪切面的方向、砂土颗粒级配、试验条件(围压、排水条件)等因素对强度的影响, 研究表明, 纤维砂土峰值强度增加较大, 峰后强度降低有限<sup>[3-9]</sup>。

关于细粒土加纤维的力学特性研究相对较少。Prabakar 和 Sridhar<sup>[10]</sup>研究了剑麻纤维不同长度和掺量对黏土强度的影响; Khosrow 等<sup>[11]</sup>对椰壳纤维的物理性质和加筋效果开展了试验研究。研究表明, 黏土加入天然纤维(剑麻、椰子壳)可显著提高破坏时的偏差应力与刚度。李广信与介玉新等<sup>[12-13]</sup>研究表明, 聚丙烯纤维不仅能提高土体的抗拉强度, 而且还增强了土体临界断裂韧度。Miller 等<sup>[14]</sup>在黏土中加入纤维, 在渗透系数满足要求下进行收缩试验, 结果表明, 当控制纤维含量在 0.4%~0.5%时, 可大幅度降低干裂缝。Viswanadham 等<sup>[15]</sup>通过离心模型试验模拟纤维黏土在较大不均匀沉降下的开裂特征, 试验结果表明纤维长径比与含量可有效控制裂缝形成。

压实黏土衬里的抗剪强度指标是确定垃圾填埋场高度的重要参数, 关系到填埋场的容量。因此, 本文主要通过室内试验, 探讨在一定纤维添加量与纤维长度的条件下, 试验研究纤维红黏土的渗透性与强度特性, 在确保纤维红黏土具有较低渗透性的条件下, 重点研究纤维黏土的强度特性。如果纤维红黏土的强度参数得到显著提高, 纤维黏土应用于垃圾填埋场防渗工程时, 可显著提高垃圾的填埋高度, 因此, 具有较高的理论与经济价值。

## 1 试验材料及方法

### 1.1 材料选取

试验用土样为大连地区红黏土, 经风干碾压过 0.5 mm 筛备用。红黏土的主要物理力学性质指标如表 1 所示。

试验采用聚丙烯纤维(盐城市恒固纤维有限公司, HG-0X2 砂浆纤维), 纤维类型为束状单丝, 圆形截面, 分散性良好, 其物理力学性质指标见表 2。试验所使用的纤维长度分别为 7, 13 和 19 mm。

### 1.2 试样制备

在试样制备过程中, 使纤维与红黏土均匀随机混合, 确保所制备试样具有良好的 consistency 是有效进行相应试验的关键。经大量试验, 反复摸索, 发现黏土在高含水率(接近液限)时, 边加纤维边长时间搅拌, 纤维可在黏土中基本均匀分布, 但含水率很难满足试样制备要求。为解决降低含水率较高这一问题, 采用如图 1 所示的制样设备进行排水。试验时, 将加入适量水的红黏土装入搅拌机, 使其处于流塑状态, 然后

开动搅拌机, 边搅拌边加入纤维, 直至达到设计添加量, 在搅拌过程中, 反复检查土样中纤维混合情况, 待纤维均匀混合后, 将土样装入制样箱, 表层用塑料布密封, 开启真空泵排水, 直到满足制样要求为止。

纤维含量按下式定义:

$$r_f = \frac{m_f}{m_s} \quad (1)$$

式中,  $r_f$  为纤维含量(%);  $m_f$  为纤维质量(kg);  $m_s$  为干土质量(kg)。在制备试样时, 依据文献资料以及可能的工程应用, 选择以下 5 种纤维含量, 分别为 0.15%, 0.25%, 0.35%, 0.5%, 0.8%。

直剪试验土样采用压样法, 高 20 mm, 直径 61.8 mm。无侧限抗压试验和三轴试验的土样采用分层锤击方法, 在击样器内分 5 层击实制样, 土样均为高 80 mm, 直径 39.1 mm 的圆柱体, 采用抽气法饱和试样。

表 1 红黏土的物理性质指标

物理参数	值
天然含水率 $w$ /%	8.5
天然密度 $\rho$ /( $\text{g cm}^{-3}$ )	1.65
塑限 $w_p$ /%	17.1
液限 $w_L$ /%	33.4
塑性指数 $I_p$	16.3
最优含水率 $w_{op}$ /%	16.8
最大干密度 $\rho_{dmax}$ /( $\text{g cm}^{-3}$ )	1.83

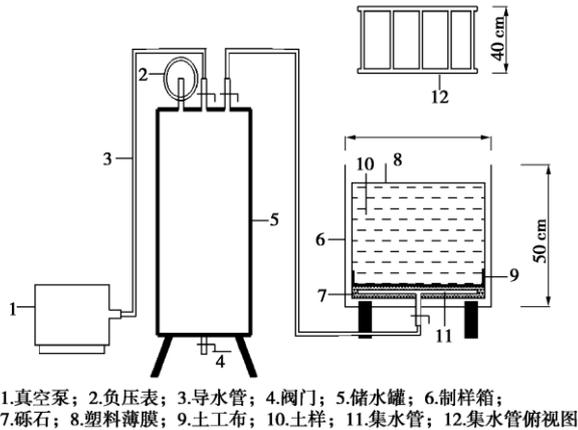
表 2 聚丙烯纤维的物理性质参数

纤维参数	值
线密度/dtex	7.33
直径 $d$ /mm	0.025
重度 $\gamma$ /( $\text{g cm}^{-3}$ )	0.91
抗拉强度/MPa	592
断裂伸长率/%	26.4
初始弹性模量/MPa	4479
熔点/ $^{\circ}\text{C}$	163
燃点/ $^{\circ}\text{C}$	590
抗酸碱性	极高

### 1.3 试验仪器及方法

本次试验中所采用的仪器有: TDJ—2 多功能电动土工击实仪; 南 55 型渗透仪; ZJ 型应变控制式直剪仪; 应变控制式无侧限压缩仪; 应变控制式三轴仪等。击实试验采用轻型击实, 分 3 层, 每层 25 击; 通过变水头渗透试验来测定渗透系数; 直剪试验为固结快剪, 施加的垂直压力分别为 100, 200, 300, 400 和 600 kPa, 并保持 0.8 mm/min 的匀速剪切速率, 直至剪坏。无侧限抗压试验时, 控制加载速率为 1.2 mm/min, 试验中

取最大轴向应力作为无侧限抗压强度  $q_u$ , 当无峰值时, 以轴向应变 15% 时的轴向应力作为破坏点。采用固结不排水三轴试验, 剪切速率为 0.08 mm/min, 取主应力差出现峰值的点作为破坏标准, 当无峰值时, 以轴向应变 15% 时的主应力差值作为破坏点。



1.真空泵; 2.负压表; 3.导水管; 4.阀门; 5.储水罐; 6.制样箱; 7.砾石; 8.塑料薄膜; 9.土工布; 10.土样; 11.集水管; 12.集水管俯视图

图 1 制样设备示意图

Fig. 1 Equipment for preparing clay samples

## 2 结果与分析

### 2.1 击实试验结果分析

为分析红黏土添加纤维后的压实特性, 对 3 种纤维长度与 5 种含量, 进行了 16 组试验, 以确定纤维黏土的最优含水率与最大干密度, 试验结果如表 3 所示。

表 3 击实试验结果

Table 3 Results of compaction tests

长度/mm	含量/%	$\rho_{dmax}/(g\ cm^{-3})$	$w_{op}/\%$	
0	0	1.83	16.8	
	7	0.15	1.84	16.7
		0.25	1.85	15.7
		0.35	1.83	16.1
		0.5	1.82	15.6
13	0.8	1.81	16	
	0.15	1.84	16.1	
	0.25	1.83	15.9	
	0.35	1.82	16.4	
19	0.5	1.8	17.2	
	0.8	1.81	15.8	
	0.15	1.83	15.8	
	0.25	1.84	16	
19	0.35	1.81	17.7	
	0.5	1.83	17.1	
	0.8	1.83	16.7	

由上表可见, 红黏土添加不同长度与含量的纤维后, 最大干密度略有变化, 变化幅度较小, 主要原因为纤维占总质量较小所致。而红黏土添加纤维后, 最

优含水率变化幅度较大。

### 2.2 渗透试验结果分析

采用变水头渗透试验确定纤维黏土的渗透系数。分别对红黏土、不同长度纤维与含量的纤维黏土进行了 56 组试验, 对于同一种试验, 渗透系数取均值, 实测结果如图 2 所示。由图可见, 添加聚丙烯纤维后, 试样的渗透系数表现出一定程度增加, 但与红黏土相比, 渗透系数仍处于同一数量级, 表明红黏土添加聚丙烯纤维对渗透系数可产生一定影响, 但影响不大。由图可见, 随纤维含量增加, 渗透系数略有增大, 即使纤维含量达到 0.8% 时, 渗透系数尚小于  $10^{-8}$  cm/s。纤维长度对渗透系数影响相对较小。

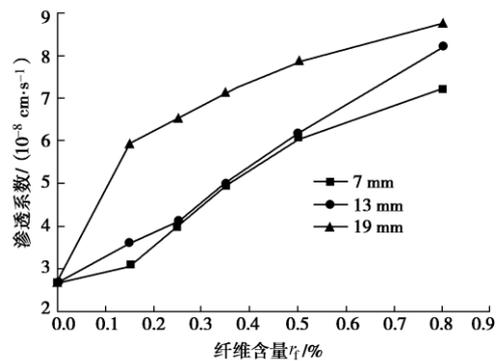


图 2 纤维长度与含量对渗透系数的影响

Fig. 2 Effects of fiber length and content on infiltration coefficients

### 2.3 直剪试验结果分析

为研究红黏土加纤维后的抗剪强度特性, 分别对素土及不同纤维含量与长度的纤维黏土进行了固结快剪试验, 试验结果如图 3~6 所示。由于纤维黏土在剪切过程中剪应力无峰值, 因此, 取剪切位移 4 mm 所对应的剪应力为抗剪强度。

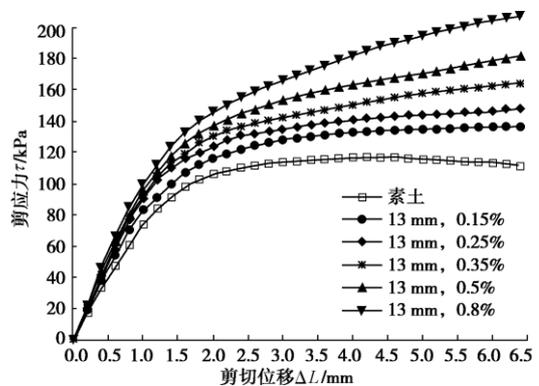


图 3 纤维含量对抗剪强度的影响 (垂直压力 200 kPa)

Fig. 3 Effects of fiber content on shear strength (vertical pressure 200 kPa)

由图 3 可见, 红黏土添加纤维后随着剪切位移的

增加, 剪应力也在相应增大, 并无降低趋势, 表明添加纤维对抗剪强度影响较大, 且纤维含量越高, 其影响越大。相对于红黏土, 纤维黏土在剪切过程中表现出明显的加工硬化现象, 当取剪切位移 4 mm 时的剪应力为抗剪强度, 对于 5 种含量的纤维黏土, 其抗剪强度分别为 133.01, 140.98, 150.67, 163.65 和 181.93 kPa, 为红黏土抗剪强度的 1.14~1.56 倍, 抗剪切能力得到显著提高。

图 4 描绘了相同纤维含量下, 纤维长度对抗剪强度影响。由图可见, 当纤维含量相同时, 随纤维长度增加, 其抗剪强度相应增加。表明纤维长度对强度影响较大。主要原因可归结为: 由于纤维与土颗粒在竖向与侧限压力共同作用下, 使得纤维与土颗粒间产生咬合力, 特别是处于剪切破裂面两侧的纤维, 在剪应力作用下, 处于受拉状态, 较长纤维所受到的咬合力相对较大, 相应地锚固力越大, 因此, 聚丙烯纤维可充分发挥其较高的抗拉强度特性, 进而提高了纤维黏土的抗剪强度。

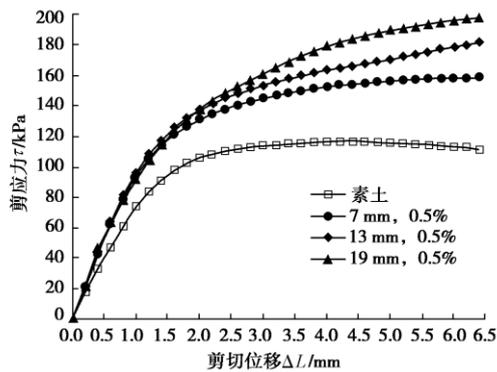


图 4 纤维长度对抗剪强度的影响(垂直压力 200 kPa)

Fig. 4 Effects of fiber length on shear strength (vertical pressure 200 kPa)

图 5, 6 分别给出了不同纤维长度与含量对纤维黏土  $c$  和  $\phi$  的影响。由图可见,  $c$  值随纤维含量与长度增加而显著增加, 且  $c$  值与纤维含量呈较好的线性关系。由图 6 可见, 纤维长度为 19 mm 时, 内摩擦角  $\phi$  有一定提高, 其它两种情况变化不大。表明红黏土加少量量纤维后, 破裂面上的摩擦特性基本不变。

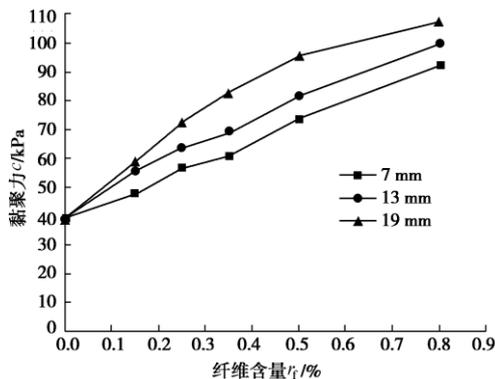


图 5 纤维长度与含量对黏聚力的影响

Fig. 5 Effects of fiber length and content on cohesion

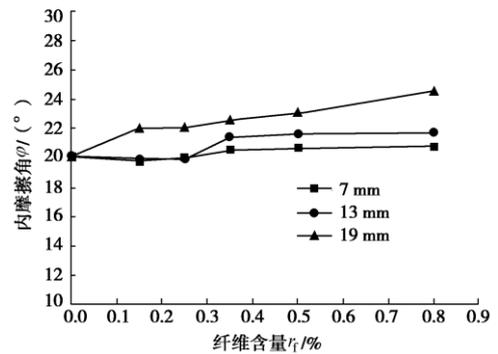


图 6 纤维长度与含量对内摩擦角的影响

Fig. 6 Effects of fiber length and content on friction angle

## 2.4 无侧限抗压强度试验结果分析

为探讨添加纤维对红黏土抗压强度的影响, 对不同纤维长度与不同含量情况, 进行了对比试验, 这里仅给出纤维长度为 13 mm 的试验结果, 如图 7 所示。

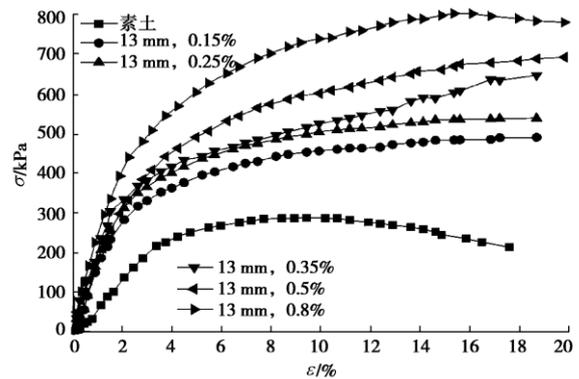


图 7 轴向应力 - 应变关系曲线

Fig. 7 Effects of fiber content on stress-strain curves

由图 7 可见, 与素土的应力 - 应变关系曲线相比, 纤维红黏土的应力 - 应变关系曲线不存在峰值点, 随轴向应变增加, 强度逐渐增加。具有典型的加工硬化特征。

依据试验结果, 当极限应变为 9.41% 时, 红黏土的峰值强度为 288.1 kPa, 而纤维含量为 0.15% 与 0.8% 的纤维黏土在此时的强度分别为 454.6, 737.5 kPa, 强度分别提高了 58% 与 156%, 表明纤维红黏土的无侧限抗压强度提高幅度较大。若采用纤维黏土作为填埋场防渗衬里, 可提高垃圾填埋高度 58% 与 156%, 由此新增库容非常可观, 同时可节约大量建设经费。

## 2.5 三轴试验结果分析

为进一步探讨纤维黏土的抗剪强度特性, 在固结不排水与不同围压条件下, 对纤维黏土进行了大量的三轴试验, 所得到的应力 - 应变关系曲线如图 8, 9 所示。

图 8,9 中分别给出了不同纤维含量与长度对强度的影响,由图可见,随轴向应变的增加,偏应力均出现较大幅度增长,应力-应变关系曲线表现出典型的加工硬化特征。与素土相比,即使添加少量纤维(如 0.15%),也可较好地改善红黏土的强度特性,且随含量的增加,强度明显提高。当取轴向应变 15%作为极限应变时,5 种纤维含量所对应的极限强度分别为 615.9, 678.3, 741.6, 834.9 和 1018.8 kPa,为素土极限强度的 1.53~2.53 倍,由此可见,纤维红黏土的抗剪切能力得到了显著提高。

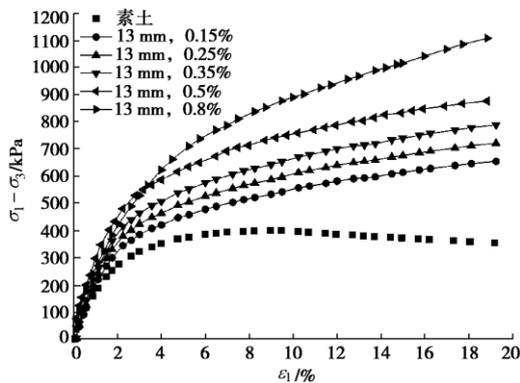


图 8 纤维含量对应力-应变关系影响 ( $\sigma_3=200$  kPa)

Fig. 8 Effects of fiber content on stress-strain curves ( $\sigma_3=200$  kPa)

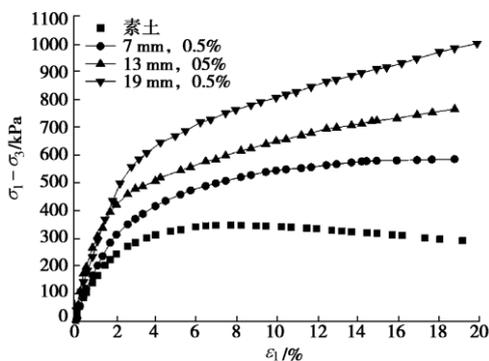


图 9 纤维长度对应力-应变关系影响 ( $\sigma_3=100$  kPa)

Fig. 9 Effects of fiber length on stress-strain curves ( $\sigma_3=100$  kPa)

在相同纤维含量下,图 9 对比分析了纤维长度对应力-应变关系曲线的影响。由图可见,随纤维长度的增加,偏应力也相应增加,由此可见,纤维长度对强度同样具有显著影响。

### 3 结 论

本文针对纤维红黏土的力学特性进行了大量试验研究,经对试验结果分析,可得到以下结论:

(1) 纤维红黏土的最大干密度变化不大,最优含水率有一定变化。

(2) 尽管纤维红黏土的渗透系数略有增加,但仍与红黏土渗透系数处于同一量级,可作为防渗材料。

(3) 纤维含量与长度对纤维红黏土的力学特性影

响显著,能明显提高红黏土的无侧限抗压强度和抗剪强度,且随着纤维含量与长度的增加而增加。黏聚力可得到显著提高。

(4) 纤维红黏土应力-应变关系曲线具有典型的加工硬化特征。

### 参考文献:

- [1] 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**: 2968 - 2973. (TANG Chao-sheng, SHI Bing, CAO 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**: 2968 - 2973. (in Chinese))
- [2] 张艳美,张旭东,张鸿儒. 土工合成纤维土补强机理试验研究及工程应用[J]. 岩土力学, 2005, **26**(8): 1323 - 1326. (ZHANG Yan-mei, ZHANG Xu-dong, ZHANG Hong-ru. Test research of geotechnique textile soil reinforcement mechanics, 2005, **26**(8): 1323 - 1326. (in Chinese))
- [3] MAHER M H, GRAY D H. Static response of sands reinforced with randomly distributed fibers[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1990, **116**(11): 1661 - 1677.
- [4] AL-REFEAI T O. Behavior of granular soils reinforced with discrete randomly oriented inclusions[J]. Geotextiles and Geomembrane, 1991, **10**(4): 319 - 333.
- [5] MICHALOWSKI R L, ZHAO A. Failure of fiber-reinforced granular soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, **122**(3): 226 - 234.
- [6] KUMAR R, KANAUIA V K, CHANDRA D. Engineering behavior of fiber-reinforced pond ash and silty sand[J]. Geosynthetics International, 1996, **6**: 509 - 518.
- [7] SANTONI R L, TINGLE J S, WEBSTER S L. Engineering properties of sand-fiber mixtures for road construction[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, **127**(3): 258 - 268.
- [8] MICHALOWSKI R L, CERMAK J. Triaxial compression of sand reinforced with fibers[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, **129**(2): 125 - 136.
- [9] 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.
- [10] PRABAKAR J, SRIDHAR R S. Effect of random inclusion of sisal fibre on strength behaviour of soil[J]. Construction and Building Materials, 2002, **16**(2): 123 - 131.
- [11] KHOSROW G, ROMILDO D, TOLEDO F, et al. Behaviour

- of composite soil reinforced with natural fibres[J]. Cement and Concrete Composites, 1999, **21**(1): 39 - 48.
- [12] 李广信, 陈 轮, 郑继勤, 等. 纤维加筋黏性土的试验研究[J]. 水利学报, 1995(6): 31 - 36. (LI Guang-xin, CHEN Lun, ZHENG Ji-qin, et al. Experimental study on fiber-reinforced cohesive soil[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1995(6): 31 - 36. (in Chinese))
- [13] 介玉新, 李广信. 纤维加筋土计算方法的研究[J]. 土木工程学报, 1999, **32**(5): 51 - 55. (JIE Yue-xin, LI Guang-xin. A study on calculation method of textsol[J]. China Civil Engineering Journal, 1999, **32**(5): 51 - 55. (in Chinese))
- [14] MILLER C J, RIFAI S. Fiber reinforcement for waste containment soil liners [J]. Journal of Environmental Engineering, 2004, **130**(8): 891 - 895.
- [15] VISWANADHAM B V S, JHA B K, SENGUPTA S S. Centrifuge testing of fiber-reinforced soil liners for waste containment systems[J]. Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management, 2009, **13**(1): 45 - 58.

(本文责编 李运辉)