

DOI: 10.11779/CJGE2017S1039

玄武岩纤维加筋黏土三轴试验研究

高 磊^{1, 2}, 胡国辉^{1, 2}, 陈永辉^{1, 2}, 胡艳杰^{1, 2}, 龚云皓^{1, 2}

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 江苏省岩土工程技术工程研究中心, 江苏 南京 210098)

摘要: 按纤维与干土质量的百分比 0.0%, 0.1%, 0.2%, 0.3% 和 0.4% 配制了玄武岩纤维加筋黏土试样, 在控制干密度的条件下, 对试样进行了一系列三轴固结不排水剪试验。试验结果表明: ①玄武岩纤维加筋黏土试样的破坏形态均呈鼓胀型, 为明显的塑性破坏; ②采用玄武岩纤维加筋, 能够显著增加黏土的有效黏聚力, 但对有效内摩擦角影响不大, 当纤维掺量为 0.3% 时, 土体的有效黏聚力最大; ③玄武岩纤维加筋黏土的应力 - 应变关系总体表现为弱硬化型, 可以用双曲线来拟合, 在纤维掺量相同时, 其拟合结果的参数 b 随围压的增大而减小, 在围压相同时, 参数 b 随掺量的变化规律与围压大小有关。

关键词: 玄武岩纤维; 纤维加筋土; 三轴试验; 应力 - 应变关系; 强度指标

中图分类号: TU472.34 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)S1-0198-06

作者简介: 高 磊(1984-), 男, 宁夏银川人, 副教授, 主要从事岩土和地质工程方面的研究。E-mail: taiyang360@gmail.com。

Triaxial tests clay reinforced by basalt fiber

GAO Lei^{1, 2}, HU Guo-hui^{1, 2}, CHEN Yong-hui^{1, 2}, HU Yan-jie^{1, 2}, GONG Yun-hao^{1, 2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Jiangsu Research Center for Geotechnical Engineering Technology, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: A series of CU triaxial tests on clay reinforced by basalt fiber are performed under controlled soil dry density conditions, and the ratio of basalt fiber content to dry soil by weight is 0.0%, 0.1%, 0.2%, 0.3% and 0.4%. The test results show that: (1) The failure of specimens are all tympanous and plastic obviously. (2) The effective cohesion of the reinforced clay soil increases obviously, but the effective internal friction angle only changes a little. The effective cohesion is the maximum under the fiber content of 0.3%. (3) The stress-strain relationships of the basalt fiber-reinforced clay soil possess weak hardening characteristics generally, and they can be fitted by hyperbolic curve. The parameter b of the fitting results decreases with the increase of confining pressure under the same fiber content, and the variation of b with the fiber content is related to the magnitude of confining pressure under the same confining pressure.

Key words: basalt fiber; fiber-reinforced soil; triaxial test; stress-strain relationship; strength index

0 引言

天然黏土材料的强度和变形特性难以满足一些土体工程需求, 因此研究和应用新的土体改良方法将在一定程度上弥补这种不足。在目前众多土体改良方法中, 加筋技术一直以来是工程实践当中最常用的方法之一^[1], 其中纤维加筋技术是近年来土体改良领域研究的热点^[2-5]。纤维加筋技术是指将分散的纤维丝均匀掺入土体当中, 使土体的工程力学性能得到改善和提高的一种土体改良技术^[6]。目前在工程中应用的纤维主要可以分为自然纤维和人工合成纤维两大类, 其中自然纤维的使用大多是根据工程当地的生态环境, 就地取材, 种类繁多^[7], 而人工合成纤维当中目前研究较多的有聚丙烯纤维、玻璃纤维和碳纤维。

玄武岩纤维(简称BF)是一种新型环保材料, 属于人工合成纤维的一种, 其价格仅为碳纤维的 1/10, 且抗拉强度和弹性模量等力学性能明显高于聚丙烯纤维, 被誉为 21 世纪纯天然的高性能纤维^[8]。目前在土木工程领域, 将玄武岩纤维掺入混凝土中进行改性的研究较多, 而将玄武岩纤维应用于黏土的成果相对较少, 尤其是在土体强度改善方面。近年来, 赵莹莹等^[9]开展了一系列不固结不排水剪试验来研究纤维土的强度特性和补强机理, 发现聚丙烯纤维的掺入能使土体

基金项目: 国家自然科学基金项目(51508159); 江苏省高校“青蓝工程”项目; 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2015B25914, 2016B20214, 2016B06114)

收稿日期: 2016-11-28

的强度和整体稳定性有明显提高, 而且纤维掺量和围压是影响纤维土性质的重要因素。Botero 等^[10]将再生的涤纶树脂(PET)纤维掺入到粉土中, 通过不固结不排水剪试验, 研究了纤维土的应力-应变特性, 发现 PET 纤维的掺入对土体抵抗变形的能力有很大提升。尤波等^[11]将不同掺量的玄武岩纤维分别掺入到膨胀土中, 进行固结不排水剪试验, 结果表明加筋对膨胀土内摩擦角的影响不大, 而黏聚力则有明显提高, 其中纤维掺量在 0.4% 左右时加筋效果最好。刘芳等^[12]利用不固结不排水剪试验对玻璃纤维土的应力与应变特性及加筋效果进行了研究, 得到了纤维长度、试样密实度、含水率和围压等对玻璃纤维加筋效果的影响。

本文以玄武岩纤维为加筋材料, 在控制干密度(1.72 g/cm³)的条件下, 对纤维加筋黏土样进行了一系列三轴固结不排水剪(CU)试验, 研究了玄武岩纤维加筋黏土的应力-应变特性, 考虑纤维掺量对土体变形模量和有效抗剪强度指标的影响, 并建立了玄武岩纤维加筋黏土应力-应变关系的数学模型。

1 试验材料

1.1 试验土样

试验采用的土样取自南京某工地(风干过 2 mm 筛), 小于 0.075 mm 粒径的土粒含量约占 57%, 其基本物理力学参数见表 1。

表 1 黏土的物理力学性质

Table 1 Physical indices of clay soil

风干含水率 w/%	土粒相对密度	液限 w _L /%	塑性指数 I _p	最优含水率 w _{op} /%	最大干密度 ρ _d /(g·cm ⁻³)
2.03	2.68	27.2	10	17.0	1.72

1.2 玄武岩纤维

试验所采用的玄武岩纤维为束状单丝压制而成的条状纤维, 试验前需将条状纤维分散后再均匀掺入到土体中, 分散后的纤维丝细而多(如图 1), 纤维丝的基本物理力学参数见表 2。

表 2 玄武岩纤维的物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical behaviors of basalt fiber

纤维类型	密度/(g·cm ⁻³)	长度/mm	单丝直径/μm	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	断裂伸长率/%	耐酸碱性
束状单丝	2.65	12	17	2611	85.9	3.12	极强

2 试验内容

2.1 试验方案

本文固结不排水剪试验是在应变控制式三轴仪上

进行, 并利用配套的数据采集系统进行数据收集。为了研究纤维掺量对玄武岩纤维土的影响, 在控制干密度(1.72 g/cm³)的条件下, 将分散后的玄武岩纤维丝按干土质量百分比分别为 0.1%, 0.2%, 0.3% 和 0.4% 的掺量掺入到素土中, 加上素土样共制备了 5 组试样进行 CU 试验, 每组试样制备 3 个平行试样。试验过程中, 分别施加 100, 200, 300 kPa 的围压, 剪切速率设置为 0.08 mm/min, 破坏标准根据峰值强度或 15% 轴向应变确定。

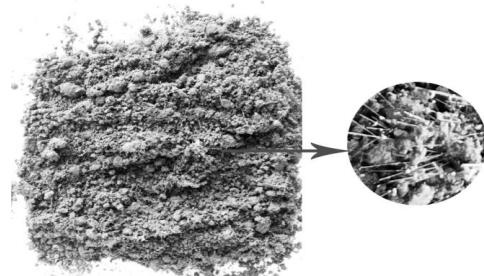


图 1 土体中分散的纤维丝

Fig. 1 Dispersed fibers in soil

2.2 试样制备

本次试验试样的制备根据掺量的不同共分了 5 个批次, 同条件拌合、养护及饱和。拌合过程中, 根据控制干密度(1.72 g/cm³)的计算结果, 将每个试样所需的纤维丝与风干土样分成 5 份, 逐份拌合后再将同批次的纤维土样集中拌合, 确保纤维丝在土样中均匀分散, 然后再掺入定量纯净水调至最优含水率(17.0%)。在土样拌合完成后, 将其装入塑料袋中, 密封养护 24 h, 以便水分均匀分布。养护结束后, 选用高 80 mm、直径为 39.1 mm 的模具, 将每个试样所需的纤维土样分 5 层击实。试样成型后采用真空饱和和抽气法使试样饱和。

3 试验结果与分析

3.1 应力与应变关系

各掺量试样在不同围压下的轴向应变与主应力差值关系的代表性曲线如图 2 所示。从图 2 可以看出, 同一掺量试样在不同围压作用下达到相同轴向应变时, 其围压越大, 则主应力差值越大。当轴向应变较小时, 不同围压下素土与纤维加筋试样的应力与应变曲线基本重合, 各试样初期抗压刚度近似相等, 纤维加筋效果不明显。随着轴向应变的增加, 各试样的主应力差值迅速增大, 达到一定应变(不超过 3%)之后, 其增幅逐渐减小, 最后基本趋于稳定。各试样的应力-应变曲线总体表现为弱硬化型, 土体强度随着轴向应变的增大而提高, 但也有部分试样(素土样和 0.1% 掺量试样)在高围压的作用下, 应力-应变曲线后期有弱软化的趋势。这种情况只出现在未掺入纤维

的素土样和纤维掺量较低的试样中，没有出现在纤维掺量较高的试样中。这是因为玄武岩纤维较细，在纤维掺量较低的情况下，纤维与土体颗粒之间的有效接触面积较小，其产生的界面作用力不足以抵抗高围压所产生的外力；而当纤维掺量较高时，纤维与土体颗粒之间的界面作用力较大，能将高围压产生的剪应力通过界面作用力分担给纤维，即使在高应变的情况下，土体也不至于发生脆性破坏^[13]。以上说明玄武岩纤维的掺入能改变土体在外荷作用下的受力形式，优化其受力结构。

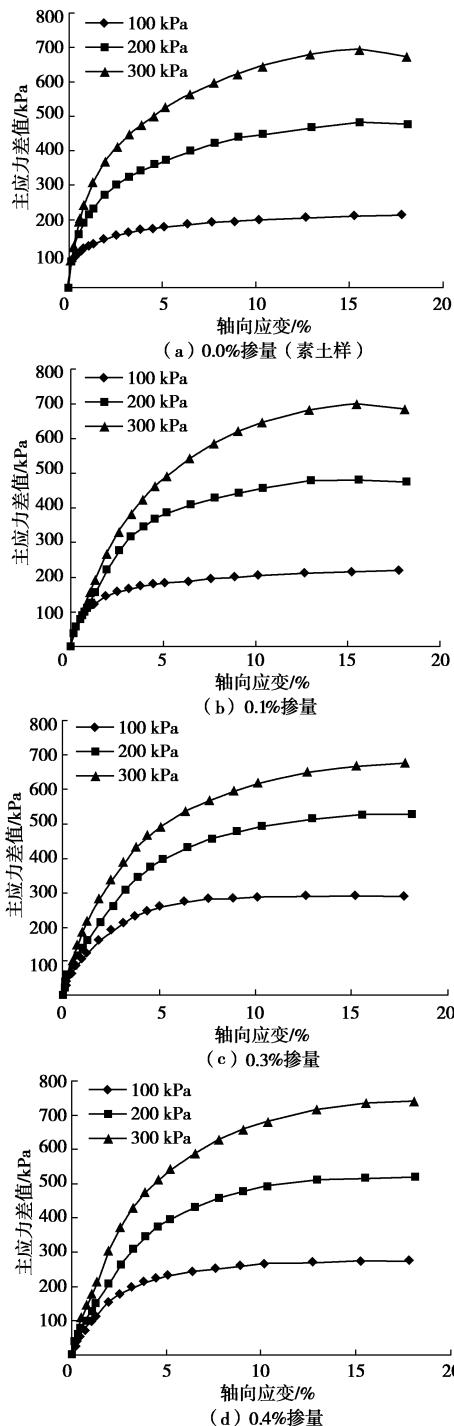


图 2 不同围压下应力 - 应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves under different confining pressures

3.2 变形模量的变化规律

CU 试验的变形模量通常可取破坏点的主应力差值的一半与其所对应的轴向应变的比值。不同掺量时试样的变形模量与围压的关系如图 3 所示。由图 3 可知，对于同一掺量的试样，其变形模量随着围压的增大而增大，这主要是因为试样在剪切之前，围压越大，固结过程中的压缩量越大，试样的相对密实度越大，土颗粒之间的摩擦咬合作用及抗剪切变形能力越强，其在达到相同主应力差时所需应变就越小，变形模量则越大^[14]。而且在同一围压条件下，纤维加筋试样的变形模量普遍低于素土样的变形模量，这说明玄武岩纤维的掺入能够提高土体的塑性。但是对于同一围压作用下的试样，其变形模量随纤维掺量的总体变化规律不是很明显，低围压作用下试样的变形模量随纤维掺量的增加而减小，高围压作用下试样的变形模量随纤维掺量的变化关系不大。

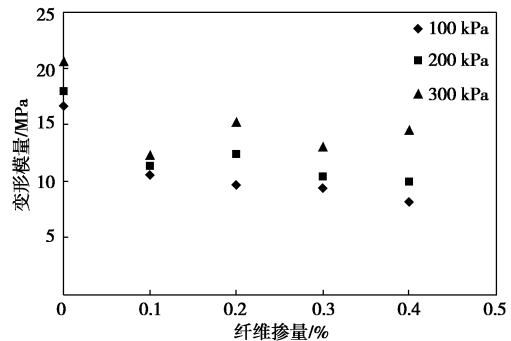


图 3 各试样的变形模量

Fig. 3 Deformation moduli of samples

3.3 有效强度指标

根据试验结果，绘制试样破坏时在有效应力状态下的莫尔圆，并对同一掺量不同围压下的莫尔圆作出公切线，此公切线即为该掺量试样的有效应力强度包络线，将拟合的公切线用 $\tau = \sigma \tan \varphi' + c'$ 表示，可以计算得到各掺量下试样的有效应力强度指标（有效黏聚力 c' 和有效内摩擦角 φ' ），具体结果如表 3 所示。

表 3 试样的有效应力强度指标

Table 3 Effective strength indices of samples

纤维掺量/%	有效应力强度指标	
	c'/kPa	$\varphi'/(^{\circ})$
0.0	15.0	35.3
0.1	15.8	34.0
0.2	21.9	34.2
0.3	26.9	34.5
0.4	19.6	35.4

由表 3 可得玄武岩纤维加筋黏土的有效黏聚力 c' 值和有效内摩擦角 φ' 值随纤维掺量的变化关系，如图 4 所示。对于正常固结饱和土的 CU 试验而言，其黏

聚力理论上为 0。本文试验过程中由于采用最大干密度制样, 并且剪切之前固结应力的设定一步到位, 试样处于超固结状态, 故试验结果中素土样也存在较为明显的黏聚力。由图 4 (a) 可知, 玄武岩纤维加筋黏土的有效黏聚力随纤维掺量的增加先增大后减小, 当纤维掺量为 0.3% 时, 土样的有效黏聚力最大; 由图 4 (b) 可知, 与有效黏聚力值与纤维掺量的关系相比, 玄武岩纤维加筋黏土的有效内摩擦角相对纤维掺量的变化不太敏感, 纤维加筋后土体的有效内摩擦角值相对素土样变化幅度较小。

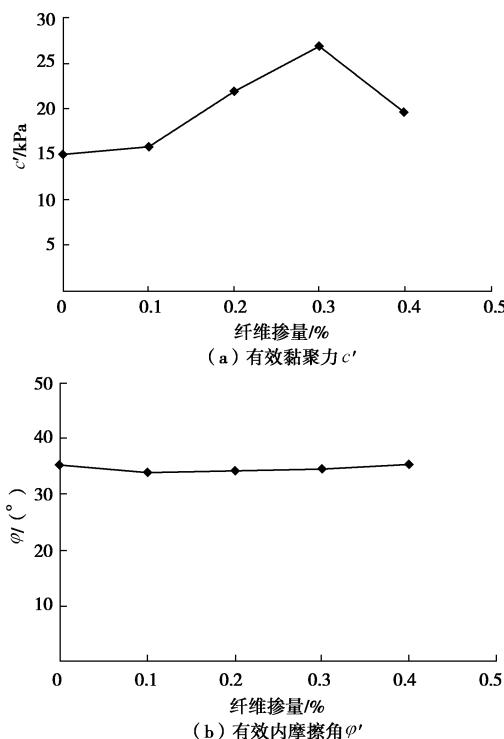


图 4 有效强度指标随纤维掺量的变化

Fig. 4 Variation of effective strength indices with BF content

3.4 试样的破坏特征

玄武岩纤维土样的破坏形态主要如图 5 (a) 所示, 由于是饱和黏土样, 所有试样均为鼓胀型破坏, 试样在破坏过程中没有形成明显的裂缝和破坏面, 而是发生侧向鼓胀, 中间变形大, 两端变形小, 外形匀

称, 为明显的塑性破坏, 这与文献[11]的试验结果基本相符。并且从土样的扫描电镜图(图 5 (b))来看, 土颗粒之间离散分布的纤维丝有助于抑制试样的变形。

4 应力 - 应变关系的数学模型

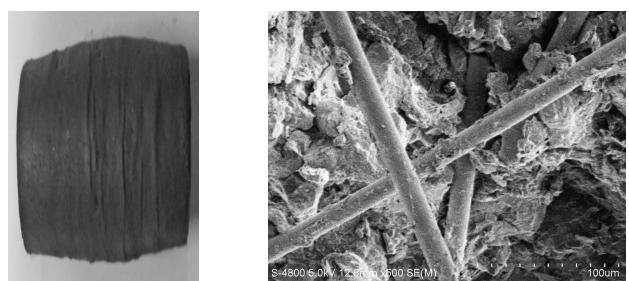
本文试验中各试样的应力 - 应变曲线总体表现为弱硬化型, 可以用双曲线来拟合^[15], 如式 (1) 所示, 以 ε_1 为横坐标, $\frac{\varepsilon_1}{\sigma_1 - \sigma_3}$ 为纵坐标, 可以将式 (1) 中

双曲线方程转换为直线方程, 如式 (2) 所示, 其截距为 a , 在应力 - 应变曲线中实际对应为初始切线模量的倒数, 其斜率为 b , 在应力 - 应变曲线中实际对应为极限偏差应力的倒数。

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon_1}{a + b\varepsilon_1} , \quad (1)$$

$$\frac{\varepsilon_1}{\sigma_1 - \sigma_3} = a + b\varepsilon_1 . \quad (2)$$

选取各试样中代表性拟合结果整理如图 6 所示, 由图 6 可知, 各试样的 $\frac{\varepsilon_1}{\sigma_1 - \sigma_3}$ 与 ε_1 均能较好的用直线方程来拟合, 两者线性相关程度较高。这说明玄武岩纤维加筋黏土的应力 - 应变关系与双曲线的吻合程度较高, 符合弱硬化型关系, 可以用双曲线来拟合。

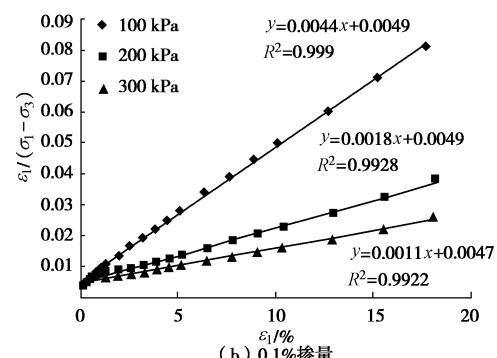
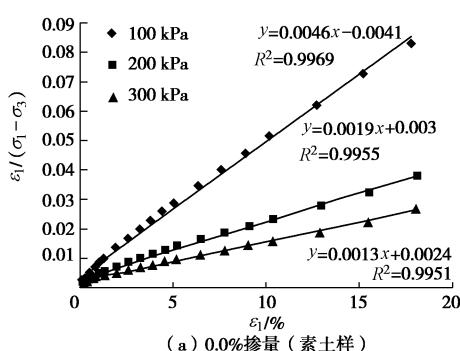


(a) 破坏形态

(b) 扫描电镜图

图 5 纤维土样的破坏及扫描电镜图

Fig. 5 Failure mode and SEM image of fiber-reinforced soil



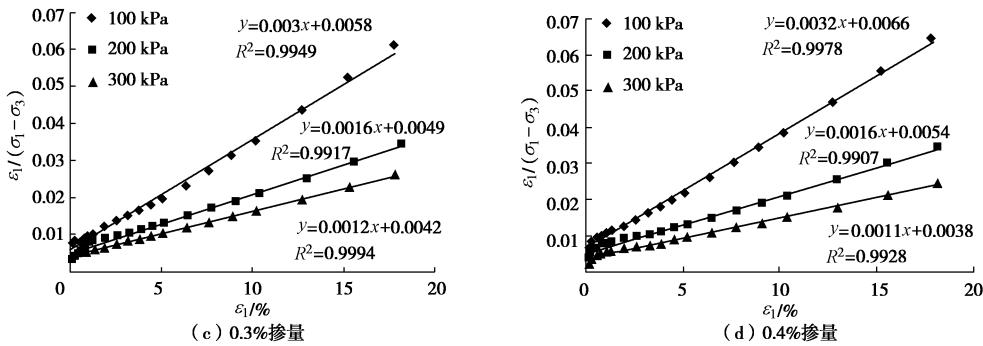


图 6 应力 - 应变关系的双曲线拟合

Fig. 6 Hyperbolic fitting of stress-strain relationship

将各试样拟合结果中参数 b 的大小整理如表 4 所示, 可以明显发现, 对于同一掺量的纤维加筋土试样, 其拟合结果的参数 b 均随围压的增大而减小。对于同一围压下的纤维加筋土试样, 当围压较高时其参数 b 随掺量的变化不大; 当围压较低 (100 kPa) 时, 纤维的掺量存在一个临界区间 ($0.1\% \sim 0.2\%$), 其中 0.1% 纤维掺量拟合所得参数 b 的大小相对于素土样变化不大, 而当纤维掺量较大且在该区间之外时, 参数 b 的大小随掺量的变化不大。

表 4 各试样参数 b 值Table 4 Values of parameter b of samples

围压/kPa	0.0%	0.1%	0.2%	0.3%	0.4%
100	0.0046	0.0044	0.0031	0.0030	0.0032
200	0.0019	0.0018	0.0019	0.0016	0.0016
300	0.0013	0.0011	0.0012	0.0012	0.0011

5 结 论

(1) 玄武岩纤维加筋黏土试样在三轴试验 (CU) 中的破坏形态均呈鼓胀型, 为明显的塑性破坏。

(2) 采用玄武岩纤维加筋, 能够显著增加黏土的有效黏聚力, 但对有效内摩擦角影响不大。在控制干密度 (1.72 g/cm^3) 的条件下, 当纤维掺量为 0.3% 时, 土体的有效黏聚力最大。

(3) 玄武岩纤维加筋黏土的应力 - 应变关系总体表现为弱硬化型, 可以用双曲线来拟合。在同一纤维掺量的情况下, 其拟合结果的参数 b 随围压增大而减小。在同一围压的情况下, 当围压较高时, 参数 b 随掺量的变化不大; 当围压较低 (100 kPa) 时, 纤维的掺量存在一个临界区间, 参数 b 随纤维掺量的变化规律与该临界区间有关。

参 考 文 献:

[1] 王协群, 郭 敏, 胡 波. 土工格栅加筋膨胀土的三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(6): 1649 - 1653. (WANG

Xie-qun, GUO Min, HU Bo. Triaxial testing study of expansive soil reinforced with geogrid[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(6): 1649 - 1653. (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 geotextile textile soil reinforcement mechanism and engineering application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(8): 1323 - 1326. (in Chinese))
- [3] TANG Chao-sheng, SHI Bin, ZHAO Li-zheng. Interfacial shear strength of fiber reinforced soil[J]. Geotextiles & Geomembranes, 2010, 28(1): 54 - 62.
- [4] TANG Chao-sheng, SHI Bin, CUI Yu-jun, et al. Desiccation cracking behavior of polypropylene fiber-reinforced clayey soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2012, 49(9): 1088 - 1101.
- [5] CHEN M, SHEN S L, ARULRAJAH A, et al. Laboratory evaluation on the effectiveness of polypropylene fibers on the strength of fiber-reinforced and cement-stabilized Shanghai soft clay[J]. Geotextiles & Geomembranes, 2015, 43(6): 515 - 523.
- [6] 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 Bao-sheng, TANG Chao-sheng, LI Jian, et al. Advances in engineering properties of fiber reinforced soil[J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21(4): 540 - 547. (in Chinese))
- [7] SHARMA V, VINAYAK H K, MARWAHA B M. Enhancing compressive strength of soil using natural fibers[J]. Construction & Building Materials, 2015, 93: 943 - 949.
- [8] 高 磊, 胡国辉, 徐 楠, 等. 玄武岩纤维工程性质研究进展[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(增刊 2): 1749 - 1754. (GAO Lei, HU Guo-hui, XU Nan, et al. Advances in research on engineering properties of basalt fiber[J]. Chinese Journal

- of Underground Space and Engineering, 2014, **10**(S2):1749 - 1754. (in Chinese))
- [9] 赵莹莹, 赵燕茹, 李 驰, 等. 纤维土的三轴试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2009, **7**(1): 127 - 128. (ZHAO Ying-ying, ZHAO Yan-ru, LI Chi, et al. Study on triaxial experiment of fibrous soil[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2009, **7**(1): 127 - 128. (in Chinese))
- [10] BOTERO E, OSSA A, SHERWELL G, et al. Stress-strain behavior of a silty soil reinforced with polyethylene terephthalate (PET)[J]. Geotextiles & Geomembranes, 2015, **43**(4): 363 - 369.
- [11] 尤 波, 徐洪钟, 董金梅. 玄武岩纤维加筋膨胀土三轴试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2015, **35**(4): 503 - 507. (YOU Bo, XU Hong-zhong, DONG Jin-mei. Triaxial test of expansive soil reinforced with basalt fiber[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2015, **35**(4): 503 - 507. (in Chinese))
- [12] 刘 芳, 孙 红, 葛修润. 玻璃纤维土的三轴试验研究[J]. 上海交通大学学报, 2011, **45**(5): 762 - 766. (LIU Fang, SUN Hong, GE Xiu-run. Glass fiber-reinforced sand studied by triaxial experiments[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2011, **45**(5):762 - 766. (in Chinese))
- [13] GAO L, HU G H, XU N, et al. Experimental study on unconfined compressive strength of basalt fiber reinforced clay soil[J]. Advances in Materials Science & Engineering, 2015, 2015: 1 - 8.
- [14] 孔纲强, 刘璐, 刘汉龙, 等. 玻璃砂透明土变形特性三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(6): 1140 - 1146. (KONG Gang-qiang, LIU Lu, LIU Han-long, et al. Triaxial tests on deformation characteristics of transparent glass sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(6): 1140 - 1146. (in Chinese))
- [15] 龙万学, 陈开圣, 肖涛, 等. 非饱和红黏土三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2009, **30**(增刊 2): 28 - 33. (LONG Wan-xue, CHEN Kai-sheng, XIAO Tao, et al. Research of general triaxial test for unsaturated red clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(S2): 28 - 33. (in Chinese))

(本文责编 黄贤沙)