

DOI: 10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2016.01.009

土工布加筋土界面摩擦特性试验研究

杨敏¹, 李宁¹, 刘新星¹, 刘乃飞¹, 苏立海^{1,2}

(1. 西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048;

2. 空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

摘要: 以延安新机场黄土高填方为依托, 以工程实际使用的土工布作为筋材, 采用与西安亚星土工仪器有限公司共同研制的土工合成材料试验机, 进行了黄土加筋土的直剪试验和拉拔试验, 测试了不同压实度条件下筋土界面间的直剪和拉拔强度以及摩擦系数。试验结果表明: ①剪切位移与剪应力关系曲线为硬化型, 而拉拔位移与拉应力关系曲线为软化型; ②土工布与黄土的界面强度在直剪和拉拔条件下均符合莫尔库仑强度理论, 土工布与黄土间具有较好的摩擦特性, 但相同条件下直剪摩擦系数大于拉拔摩擦系数; ③剪切条件下筋土界面强度参数对压实度不敏感, 而拉拔条件下压实度对界面粘聚力影响显著。

关键词: 土工布加筋土; 黄土; 界面强度; 直剪试验; 拉拔试验

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2016)01-0046-06

Experimental research on interface frictional behaviors of the geotextile-reinforced soil

YANG Min¹, LI Ning¹, LIU Xinxing¹, LIU Naifei¹, SU Lihai^{1,2}

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: Based on the loess filled embankment in Yan'an new airport, and with the geotextile used in engineering practice as reinforcement material, the geotextile synthetic material testing machine jointly developed by Xi'an Yaxing Civil Engineering Instrument Co. Ltd. is adopted to carry out the direct shear tests and pull tests of geotextiles-loess interface so that the direct shear and pull strengths and friction coefficients between geotextile soil interfaces in the case of different compactness are tested. The test results indicate: ① The curves of shear displacement and shear stress is hardening type and the curves of drawing displacement and tensile stress is softening type; ② The interface strength of geotextiles-loess conforms with the Mohr-Coulomb strength theory. The friction behaviors of the geotextile-loess interface is very good. But the friction coefficient of direct shear is greater than that of pull test in the same condition; ③ In the shearing conditions, the interface strength of geotextiles-loess is not sensitive to the compaction degree, but in the drawing conditions, the compaction degree has a significant effect on interfacial cohesive force.

Key words: geotextile-reinforced soil; loess; interfacial strength; direct shear test; pull-out test

筋材和土是构成加筋土结构的两种主要材料, 由于它们之间的相互作用极其复杂, 填料、加筋材料及布筋方式、压实度和含水率等均会对加筋效果产生影响^[1], 所以两者间的界面摩擦特性是加筋土工程设计和研究的重要内容。赵川等^[2]、邹玉娜等^[3]

以土工格栅为筋材, 进行了摩擦特性试验。黄向京等^[4]、杜勇立等^[5]分别用土工布、镀锌覆塑格宾网为筋材, 进行了摩擦特性试验。王军等^[6]研究了格栅横肋与纵肋及格栅几何尺寸对筋土界面强度特性的影响。王协群等^[7]研究了格栅类型等五个因素对格

收稿日期: 2015-04-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51179153); 西安理工大学博士学位论文创新基金资助项目(310-11202J306)

作者简介: 杨敏, 女, 硕士生, 研究方向为黄土高填方及旋切触探。E-mail: yangmin0069@126.com

通讯作者: 李宁, 男, 教授, 博导, 博士, 研究方向为岩体静、动力学及岩土工程。E-mail: ningli@xaut.edu.cn

栅-土界面强度特性的影响规律。苗晨曦等^[8]建立三维离散元模型,模拟了三向格栅的增强型节点。谢婉丽等^[9]、雷胜友等^[10]通过三轴压缩试验方法探讨了加筋黄土的强化机理。刘湘元等^[11]以土工布为筋材,粘土为填料,进行了界面摩擦特性试验。综上所述,虽然目前关于筋-土界面摩擦特性的研究较多,但对其在直剪和拉拔两种试验条件下的对比研究却鲜见报道,致使在实际工程中,筋土的界面参数到底采用直剪试验结果还是拉拔试验结果,仍无定论,因此,开展加筋土的直剪和拉拔摩擦特性试验对于高速发展的工程实际至关重要。

本文以延安新机场黄土高填方为背景,以现场黄土作为试验填料,以工程实际使用的土工布作为筋材,进行了黄土与土工布界面间的直剪和拉拔摩擦特性试验,并就两种试验结果进行了对比分析。研究成果可为实际工程应用中正确选择相应的界面参数提供依据。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

试验所用土料均取自延安机场扩建工程黄土高填方现场,如图 1 所示,基于界限含水率试验得到了圆锥下沉深度与含水率的关系,并将下沉深度 17 mm 时所对应的含水率作为液限,以下沉深度 2 mm 时所对应的含水率为塑限;用标准击实方法测定了黄土的密度与含水率的关系,从而确定出黄土的最大干密度及最优含水率。试验所有黄土的颗粒粒径均小于 5 mm。其主要物理参数见表 1。



(a) 现场取土样 (b) 黄土

图 1 试验所用土料

Fig. 1 Test materials of loess

表 1 试验黄土的主要物理参数

Tab. 1 Main physical parameters of loess

液限/%	塑限 /%	塑性 指数	最优 含水率/%	最大干密度 /(g/cm ³)
30.7	21.4	9.3	16	1.80

试验用的土工布型号为 PES100-50,是一种新型土工合成材料,具有强度高、延伸率低、蠕变性低

等优点。其力学性能及制造材料见表 2。

表 2 试验土工布的基本参数
Tab. 2 Basic parameters of geo-textiles

土工布 型号	横向短期 抗拉强度/ (kN/m)	纵向短期 抗拉强度/ (kN/m)	横向短期 延伸率/ %	原 材 料
PES100-50	50	100	10	聚酯

1.2 试验方法

试验采用与西安亚星土木仪器有限公司共同研制的土工合成材料直剪拉拔摩擦一体机,该仪器主要由轴向加压装置(气缸加压)、水平直剪拉拔装置及测控系统三部分构成,可进行土工合成材料的直剪及摩擦界面特性试验,如图 2 所示。



(a) 水平剪切、拉拔装置

(b) 数据采集系统

图 2 直剪拉拔摩擦特性试验仪器

Fig. 2 Experimental instrument of shear and pullout test

直剪和拉拔摩擦特性试验的试样制备是不同的。直剪摩擦特性试验采用接触面积递减型剪切盒,上下剪切盒的尺寸相等,内部尺寸均为 300 mm × 300 mm × 10 mm,试样基座采用土质基座。制样时先在基座填土、夯实并整平,然后在黄土基座上铺设并固定准备好的试验土工布,最后用液压式万能试验机将上盒的土样压实至预定的压实度。

拉拔摩擦特性试验的模具盒采用整体式,为一矩形箱体,箱体尺寸为 250 mm × 200 mm × 200 mm,在箱侧壁的半高处开一条贯穿全宽的窄缝,窄缝高度为 5 mm,供土工布引出箱体进行拉拔,制样时先按设计压实度用黄土填至拉拔面,再将土工布试样平放于土面上,并埋入土中 100 mm,然后继续往箱内填土,分层压实至设计的密度。试验按照 JTG E50-2006《公路工程土工合成材料试验规程》进行,剪切、拉拔速度均控制在 1 mm/min,直剪、拉拔摩擦特性试验选取黄土的最优含水率为 16%,设定土工布在不同竖向应力作用与不同压实度条件下进行直剪和拉拔试验。每种试验均制备了 16 个试样。详细试验方案见表 3。

表3 试验方案

Tab. 3 The experimentation schemes

影响因素	试验条件
竖向应力/kPa	50,100,150,200
压实度/%	0.80,0.85,0.90,0.95

2 筋土界面摩擦特性

2.1 试验结果分析

试验后按照 JTGE50-2006《公路工程土工合成材料试验规程》的要求进行了数据整理。图3和图4分别为不同压实度条件下黄土与土工布之间的直剪和拉拔试验结果。

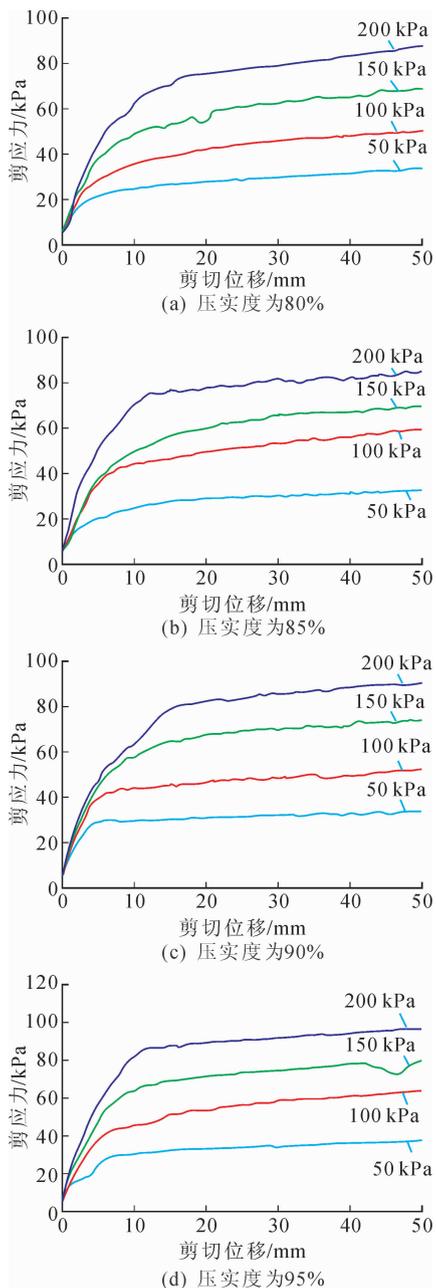


图3 直剪试验曲线

Fig. 3 Direct shear test curves

由图3可以看出,各方案下直剪摩擦特性试验曲线基本一致,均呈现硬化特性,即剪应力随着剪切位移的增大而增大。这是由于随着直剪试验的进行,下盒在水平力推动下与上盒的接触面积逐渐减小,而竖向应力保持不变所致。各试验曲线呈现的总体规律为:在剪切位移小于10 mm前,剪应力增长较快,之后剪应力缓慢增长。同时可以看出,在不同竖向应力作用下,黄土与土工布之间的直剪剪应力-位移曲线变化趋势大致相同。同一压实度下,剪应力随着竖向应力的增大而增大。

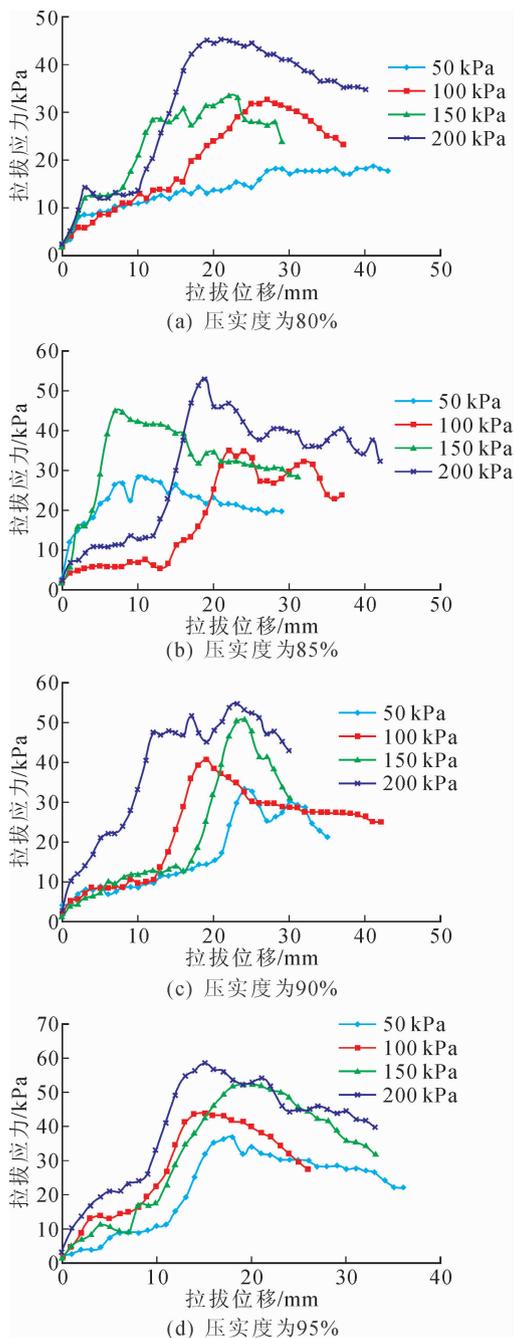


图4 拉拔试验曲线

Fig. 4 Pull-out test curves

对比图 3 和图 4 可以看出,无论是直剪试验曲线还是拉拔试验曲线,在同一压实度下,最大应力值都随着竖向应力的增大而增大。在图 4 中,不同竖向应力作用下,黄土与土工布之间的拉拔应力-位移曲线呈现软化特性,即拉应力随着拉拔位移的增大先增大后减小,这与杜勇立等^[12]的拉拔试验结果比较吻合,规律一致。

2.2 界面强度特性分析

由前述分析及图 3 可知,直剪试验所得关系曲线为硬化型曲线(未出现峰值),因此根据 JTG E50-2006《公路工程土工合成材料试验规程》,取位移量为剪切面积长度 10%(30 mm)时对应的剪应力作为最大直剪剪应力。而对于拉拔试验(见图 4),其所得关系曲线为软化型曲线,可取其峰值为最大拉拔拉应力。

各试验方案所得最大直剪剪应力和最大拉拔拉应力与法向应力的关系如图 5 和图 6 所示。从图中可以看出,两种试验条件下,最大剪(拉)应力与法向应力间有很好的线性关系,且均符合莫尔库仑强度准则。其关系可用下列式子表示:

$$\tau = c_{sg} + \sigma_n \tan \varphi_{sg} \quad (1)$$

式中, τ 为最大剪(拉)应力; σ_n 为法向应力; c_{sg} 为界面粘聚力; φ_{sg} 为界面摩擦角。

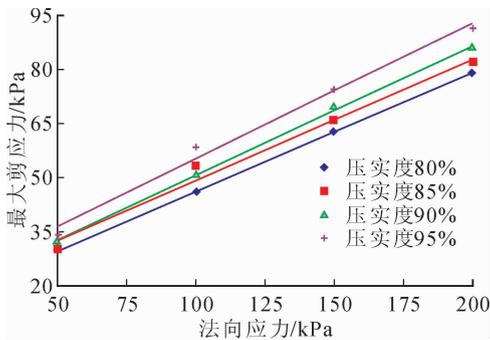


图 5 最大剪应力与法向应力曲线

Fig. 5 Maximum shear stress and normal stress curves

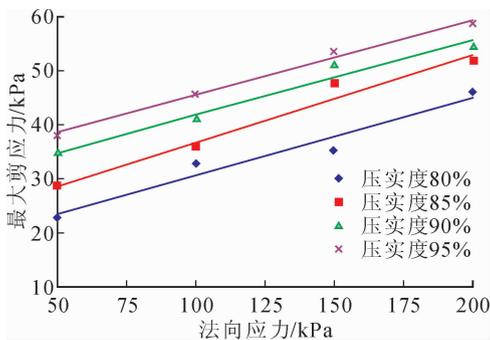


图 6 最大拉应力与法向应力曲线

Fig. 6 Maximum tensile stress and normal stress curves

由图 5 可以看出,随着压实度的增加,土工布与黄土之间的界面粘聚力(拟合曲线的截距)及界面摩擦角(拟合曲线与 x 轴的夹角)均稍有增大,说明在直剪试验中,压实度对界面参数的影响较小。

由图 6 可以看出,随着压实度的增大,界面粘聚力明显增大,而摩擦角变化较小,说明在拉拔试验中,压实度对粘聚力的影响显著而对摩擦角影响较小。

根据图 5 和图 6 可以得到不同试验方案条件下筋-土界面间的粘聚力和摩擦角,详见表 4。

表 4 土工布与黄土间的界面强度
Tab. 4 The interface parameters between geotextile and loess

压实度/%	直剪试验		拉拔试验	
	粘聚力/kPa	摩擦角/°	粘聚力/kPa	摩擦角/°
80	13.27	18.18	16.54	8.13
85	15.72	18.54	20.55	9.25
90	14.73	19.03	28.00	7.93
95	17.63	19.72	31.65	7.90

由图 5 和图 6 及表 4 可知,土工布的直剪界面摩擦角一般要比拉拔界面摩擦角大,约为 2.2 倍。这是由于直剪试验和拉拔试验的机理不同所致。

2.3 界面摩擦特性分析

筋-土界面摩擦系数 f 是加筋土工程设计的重要参数,其值一般是不同方向应力下的最大剪应力 τ_{max} 与对应的法向应力 σ_n 的比值,即:

$$f = \frac{\tau_{max}}{\sigma_n} \quad (2)$$

根据式(2)可计算得到不同方案下的筋-土界面摩擦系数。各方案下直剪摩擦系数介于 0.40~0.68 之间,而拉拔摩擦系数介于 0.23~0.76 之间。不同压实度下黄土与土工布之间的直剪摩擦系数、拉拔摩擦系数与相应法向应力的关系曲线如图 7 和图 8 所示。

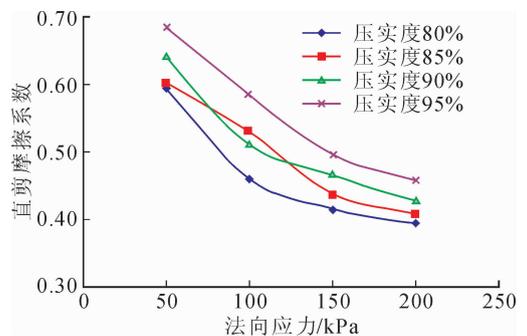


图 7 直剪摩擦系数与法向应力的关系

Fig. 7 Direct shear friction coefficient and normal stress

由图7可以看出,同一压实度下,直剪摩擦系数随着法向应力的增大呈逐渐减小趋势,即法向应力较低时的直剪摩擦系数大于法向应力较高时的直剪摩擦系数,且随着法向应力的增大,直剪摩擦系数减小速度逐渐变慢。相同法向应力条件下,随着压实度的增加,直剪摩擦系数逐渐增大。

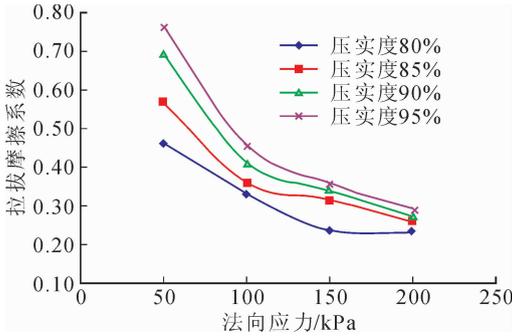


图8 拉拔摩擦系数与法向应力的关系

Fig.8 Drawing friction coefficient and normal stress

由图8可以看出,拉拔摩擦系数的分布规律与直剪摩擦系数分布规律基本相同。拉拔摩擦系数随着法向应力的增大而减小,但量值较直剪界面摩擦系数小。

从理论上讲,直剪试验土工布与黄土之间的摩擦为单面摩擦,而拉拔试验为双面摩擦,如果计算时考虑面积的变化,那么由拉拔试验获得的摩擦系数应为直剪试验的2倍。但从试验结果可以看到,拉拔摩擦系数介于0.23~0.76之间,相同条件下拉拔摩擦系数仅为直剪摩擦系数的0.58~1.12倍。

JTG D30-2004《公路路基设计规范》对筋材与粘性填料间摩擦系数的取值建议:0.25~0.40。可见,本试验土工布用于实际加筋土工程(延安新机场)时,其筋-土界面摩擦系数满足路基规范建议值,满足工程要求。

3 摩擦特性机理

3.1 直剪特性机理

假定直剪摩擦特性试验的轴向压力为 P ,推动下盒移动的水平力为 F ,土工布与土之间的摩擦系数为 μ ,下盒长、宽分别为 a 、 b ,下盒的移动距离为 x 。直剪试验初始及试验结束示意图如图9所示。

由摩擦系数的定义可知轴向力与水平力的关系:

$$F = P \cdot \mu \quad (3)$$

对式(3)进行转化,有:

$$\tau = \frac{P \cdot \mu}{a \cdot (b-x)} \quad (4)$$

式中, P 、 μ 、 a 、 b 均为定值,因此随着 x 的减小,剪应力不断增大,理想曲线呈现硬化特征,这与试验结果相一致。

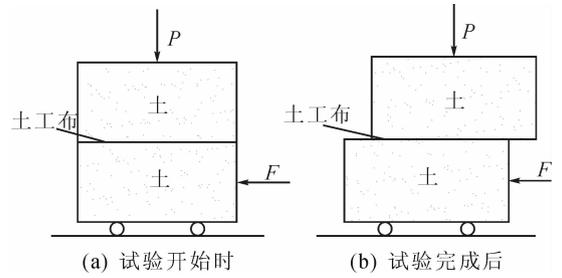


图9 直剪试验示意图

Fig.9 Schematic diagram of direct shear test

3.2 拉拔特性机理

假定拉拔摩擦特性试验的轴向压力为 P' ,夹具拉拔土工布的拉拔力为 F' ,土工布与土之间的摩擦系数为 μ' ,盒宽为 a' ,土工布的埋置深度为 b' ,土工布拉出距离为 x' , k 为盒长, σ 为轴向压力作用下土工布的正应力, τ' 为水平拉拔力作用在土工布上的拉拔应力。拉拔试验初始及试验结束示意图如图10所示。

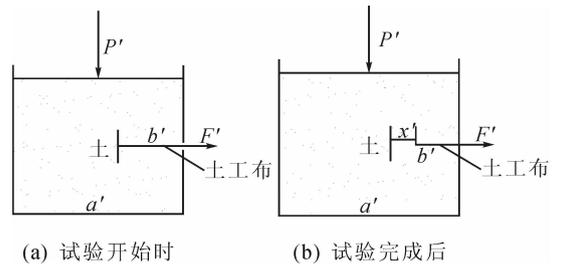


图10 拉拔试验示意图

Fig.10 Schematic diagram of pullout test

由摩擦系数的定义可知轴向力与水平拉拔力的关系,有:

$$F' = 2P' \cdot \frac{b'-x'}{a'} \cdot \mu' \quad (5)$$

对式(5)进行转化,有:

$$\tau' = \frac{F'}{2k \cdot (b'-x')} = \frac{2P'(b'-x')\mu'}{2k(b'-x')a'} = \frac{P'\mu'}{ka'} \quad (6)$$

式中,由于 P' 、 μ' 、 k 、 a' 均为常数,故拉拔应力应该为常数。但考虑到土工布为柔性物体,拉拔试验过程中,首先是土工布的拉伸过程,随着土工布自身的变形,拉拔力值不断增大,拉拔应力也逐渐增大;当自身变形达到最大值时,土工布开始从土中被拉出直至试验结束。理想情况下,此过程中拉拔应力应该保持不变,但试验中受多种因素影响,例如窄缝处漏土等导致曲线呈现明显的软化特性。

4 结 论

1) 直剪条件下剪切位移与剪应力关系曲线为硬化型,而拉拔条件下拉拔位移与拉应力关系曲线为软化型。

2) 直剪条件下压实度对直剪界面参数的影响不敏感,而在拉拔条件下压实度对粘聚力的影响较大,对摩擦角影响较小。

3) 土工布与黄土的直剪界面强度和拉拔界面强度均满足莫尔库仑强度理论。

4) 直剪条件下的界面摩擦角大于拉拔试验的,而拉拔条件下界面的粘聚力大于直剪试验的。

5) 在相同条件下,直剪界面摩擦角约为拉拔界面摩擦角的 2.2 倍,而直剪摩擦系数约为拉拔摩擦系数的 1.2 倍。

综上可知,由于直剪试验和拉拔试验的机理不同,实际工程中筋-土界面参数的选择,应充分考虑加筋织物所处的位置,判断是属于直剪摩擦还是拉拔摩擦,从而正确选择相应的界面参数。

参考文献:

- [1] 桂晓刚,邵生俊,刘奉银. 加筋土钢塑筋带拉拔特性的室内模型试验研究[J]. 西安理工大学学报, 2007, 23(4): 422-426.
GUI Xiaogang, SHAO Shengjun, LIU Fengyin. The in-lab model test of the retaining wall of expansive reinforcement soil[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2007, 23(4): 422-426.
- [2] 赵川,窦远明,耿敏. 土工格栅界面摩擦特性试验研究[J]. 河北工业大学学报, 2014, 43(1): 88-91.
ZHAO Chuan, DOU Yuanming, GENG Min. Interface friction characteristics of geogrids [J]. Journal of Hebei University of Technology, 2014, 43(1): 88-91.
- [3] 邹玉娜,时伟. 工格栅加筋土直剪摩擦试验研究[J]. 青岛理工大学学报, 2013, 34(3): 11-16.
ZOU Yuna, SHI Wei. Study on direct shear friction test of geogrid reinforced soil [J]. Journal of Qingdao Technological University, 2013, 34(3): 11-16.
- [4] 黄向京,刘泽. 煤矸石与土工布的界面摩擦特性试验研究[J]. 公路工程, 2012, 37(4): 50-55.
HUANG Xiangjing, LIU Ze. Test study on the interface friction characteristics between coal gangue and geotextile [J]. Highway Engineering, 2012, 37(4): 50-55.
- [5] 杜勇立,高礼,杨果林. 不同掺土量加筋煤矸石的界面摩擦试验研究[J]. 湖南大学学报, 2014, 41(4): 54-60.
DU Yongli, GAO Li, YANG Guolin. Experimental study of the interface friction characteristics between

coal gangue and reinforcement with different qualities of soil [J]. Journal of Hunan University, 2014, 41(4): 54-60.

- [6] 王军,林旭,刘飞禹,等. 砂土与格栅界面相互作用的直剪试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(1): 113-120.
WANG Jun, LIN Xu, LIU Feiyu, et al. Research on interaction of geogrid and sand interface by direct shear tests [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(1): 113-120.
- [7] 王协群,张俊峰,邹维列,等. 格栅-土界面抗剪强度模型及其影响因素[J]. 土木工程学报, 2013, 46(4): 133-141.
WANG Xiequn, ZHANG Junfeng, ZOU Weilie, et al. A shear strength model of geogrid-soil interface and its influence factors [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(4): 133-141.
- [8] 苗晨曦,郑俊杰,崔明娟,等. 三向土工格栅筋土界面及摩擦特性的离散元模拟[J]. 岩土力学, 2014, 35(1): 423-430.
MIAO Chenxi, ZHENG Junjie, CUI Mingjuan, et al. Discrete element simulation of interface characteristic and frictional properties of triaxial geogrid[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(1): 423-430.
- [9] 谢婉丽,王家鼎,王亚玲. 加筋黄土变形和强度特性的三轴试验研究[J]. 地球科学进展, 2004, 19(7): 333-339.
XIE Wanli, WANG Jiading, WANG Yaling. Triaxial tests study on deformation and strength characteristics of reinforced loess[J]. Advance Earth Sciences, 2004, 19(7): 333-339.
- [10] 雷胜友. 加筋黄土的三轴试验研究[J]. 西安公路交通大学学报, 2000, 20(2): 1-5.
LEI Shengyou. Study on reinforced loess by triaxial tests [J]. Journal of Xi'an Highway University, 2000, 20(2): 1-5.
- [11] 刘湘元,彭立,杜勇立,等. 有纺土工布与粘土的界面摩擦特性试验研究[J]. 中外公路, 2014, 34(2): 229-232.
LIU Xiangyuan, PENG Li, DU Yongli, et al. Test study on the interface friction characteristics between clay and geotextile [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2014, 34(2): 229-232.
- [12] 杜勇立,黄向京. 黄土与土工布的界面摩擦特性试验研究[J]. 中外公路, 2013, 33(4): 227-280.
DU Yongli, HUANG Xiangjing. Test study on the interface friction characteristics between loess and geotextile [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2013, 33(4): 227-280.