

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2022.04.031

砖渣土与土工格栅界面作用力学特性研究

袁喜魁¹, 杨皓天², 李雨润^{2*}

(1. 邢台路桥建设总公司, 河北 邢台 054001; 2. 河北工业大学 土木与交通学院, 天津市 300401)

摘要:该文通过直剪试验和拉拔试验方法,对天然状态及考虑雨水或地下水浸润作用下的砖渣土与土工格栅的界面作用力学特性进行分析,并与未加筋情况下砖渣土的力学特性进行对比研究。结果表明:在砖渣土中加入土工格栅后可以提高砖渣土的强度指标(内摩擦角和黏聚力),其内摩擦角增加 $2^{\circ}\sim 3^{\circ}$,加筋后对砖渣土的黏聚力影响要大于对内摩擦角的影响,天然砖渣土的黏聚力在直剪试验中比未加筋时增大1.35倍,在拉拔试验中比未加筋时增大1.32倍;在考虑浸润作用时,加筋砖渣土的黏聚力在直剪试验中比未加筋时增大1.65倍,在拉拔试验中比未加筋时增大1.54倍;对于相同条件下的砖渣土,其拉拔试验强度指标要大于直剪试验强度指标,浸润砖渣土的强度指标要低于天然砖渣土强度指标;通过剪应力和变形关系曲线对比分析可知:直剪试验适用于砖渣土与土工格栅相对位移较小的情况,而拉拔试验适用于砖渣土与土工格栅相对位移较大的情况。

关键词:界面摩擦; 建筑砖渣土; 直剪试验; 拉拔试验; 土工格栅; 浸润作用

中图分类号: U414 **文献标志码:** A

加筋土结构可以限制侧向变形、提高土体的强度,因此,在挡土墙、软土地基处理等工程领域应用广泛^[1-2],研究土工合成材料与土体的摩擦特性对于加筋土工程的设计具有非常重要的科学意义与工程应用价值。吴景海^[3]对砂和石灰粉煤灰在5种不同加筋材料中进行直剪试验和拉拔试验,但缺少直剪试验和拉拔试验的对比分析;马时冬^[4]采用土工格栅和土工布对残积土、砂砾、粗砾进行直剪试验和拉拔试验,并研究加筋材料对摩擦特性的影响;张波^[5]、杨广庆^[6]从直剪试验和拉拔试验出发,对界面摩擦特性影响因素进行探究,发现含水率以及颗粒的种类对摩擦特性影响很大;Teixeira^[7]专门采用拉拔试验研究土工格栅纵横肋之间的影响;张嘎^[8]采用土工布进行单调和往返剪

切试验以及拉拔试验发现,土与土工布之间的剪胀作用使得抗剪强度与法向应力不再是线性关系;赖闲根^[9]通过FLAC^{3D}模拟拉拔试验过程,并研究拉应力、位移等因素的变化特征;刘文白^[10]细致对比分析直剪试验和拉拔试验原理,并采用加筋材料为土工格栅的中砂、粉质黏土、细砂进行直剪试验和拉拔试验;刘飞禹^[11]通过直剪试验研究砂土颗粒级配对筋土界面抗剪特性的影响;Wang^[12]采用试验与有限元相结合,对土工格栅的位移应变分布进行探究;王家全^[13]通过研究纵横肋对筋土承载影响,发现横肋的端阻力占据了大部分的拉拔力;王志杰^[14]采用数值模拟对刚性与柔性顶部边界条件下土工格栅与土的力学响应进行研究,只有拉拔位移较大时顶部边界条件才会影响拉拔

- *****
- [6] 钱喜红. 存储温度和时间对SBS改性沥青高温性能的影响研究[J]. 路基工程, 2019(6):78-83.
- [7] 陈军,于新,孟令国. SBS改性沥青热存储性能衰减规律研究[J]. 中外公路, 2017,37(1):213-217.
- [8] 原健安,钟青华,纪东. SBS改性沥青热储存过程中软化点衰减机理分析[J]. 石油沥青, 2003,17(2):39-42.
- [9] 周昆,刘西胤,王鑫洋,等. SBS改性沥青存储稳定性试验

- 研究[J]. 山东建筑大学学报, 2018,33(4):39-44.
- [10] 梁星敏,黄康旭,朱林. TLA掺量对湖沥青改性沥青高、低温性能的影响[J]. 材料科学与工程学报, 2016,34(4):614-618.
- [11] 郭咏梅,倪富健. 几种改性沥青零剪切黏度的测试分析[J]. 交通运输工程与信息学报, 2013,11(2):42-46.

收稿日期:2021-01-07

基金项目:河北省自然科学基金资助项目(编号:E2018202107);邢台市重点研发计划自筹项目(编号:2020ZC140)

作者简介:袁喜魁,男,高级工程师. E-mail:735018988@qq.com

* 通信作者:李雨润,男,教授,博士生导师. E-mail:iemlyr7888@hebut.edu.cn

试验结果;刘开富^[15]对土工格栅两侧为不同含水率粉质黏土采用大型直剪试验对界面特性进行研究。目前学者在该领域做了大量的研究工作,但研究的土体主要是砂土和黏性土,对加筋砖渣土的界面摩擦特性研究并不多见。

由于中国水文地质情况复杂,很多市政工程处于高水位软弱地基上,工程区域内有大量的水塘,道路工程通过水塘段要进行相应的地基处理或挤淤置换。为了经济、快速、环保地实施项目,在道路修建的过程中,往往采用建筑固体废弃砖渣与黏土混合作为换填材料。为了保证换填路基满足强度和变形要求,在换填土层厚度较大时通常会加入土工合成材料以防止路基发生破坏。该文以邢台市三里河东路市政工程软土地基处理为工程背景,采用双向土工格栅作为加筋材料,对路基回填砖渣土分别在天然和浸润条件下的界面作用力学特性开展相关试验研究,对实际道路工程设计和施工具有重要的指导意义。

1 砖渣土大型直剪试验研究

1.1 试验用土

试验所用砖渣土物理技术指标见表1。该砖渣土中粗骨料为粒径大于4.75 mm的砖渣,细骨料为粒径小于4.75 mm的砖渣以及黏土,采用粗细骨料配合比为1.0进行配比,最大粒径不超过40 mm,其级配曲线见图1。加筋材料为双向土工格栅^[16],尺寸为40 mm×40 mm(长×宽),具体参数见表2。将天然状态下的砖渣土在水中浸润12 h,模拟阴雨天气以及地下水作用下的砖渣土,即浸润条件下的砖渣土。

表1 砖渣土混合料的物理技术性能

不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c	含水率/%
28.57	1.27	7.4

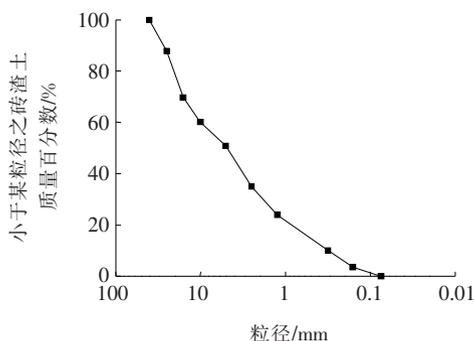


图1 砖渣土级配累积曲线

表2 土工格栅特性参数

密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	极限抗 拉强度/ ($kN \cdot m^{-1}$)	2%应变抗 拉强度/ ($kN \cdot m^{-1}$)	5%应变抗 拉强度/ ($kN \cdot m^{-1}$)	弹性 模量/ MPa
0.95	30	10.5	21	2 600

1.2 试验仪器及试验过程

该文采用大型直剪仪,型号ZJ-50-3,尺寸为400 mm×400 mm×400 mm(长×宽×高),直剪上盒300 mm,下盒100 mm,油缸行程120 mm,垂直荷载200 kN,水平荷载500 kN,设备总质量2 800 kg,包括计算机操作系统和数据采集系统、供油系统、直剪试验系统。在不影响试验结果的前提下,将直剪仪的上下盒两侧放置挡板减小砖渣土用量,挡板尺寸为400 mm×100 mm×100 mm(长×宽×高)。

根据JTG E50—2006《公路土工合成材料试验规程》^[17],在相同试验方法下对砖渣土在不同条件下界面作用力学特性进行对比分析;在相同条件下对砖渣土采用不同试验方法时界面作用力学特性进行对比研究。试验通过大型直剪仪来测试未加筋与加筋砖渣土的强度指标。将配制好的砖渣土搅拌均匀后分3次倒入剪切盒中,每层使用橡胶锤击实,重复该过程至最后一层,保持顶面平整。对于加筋砖渣土的直剪试验,为了防止施加压力后放置在上下盒中间的土工格栅发生沉降变形而导致试验出错,在下盒填满土样后施加与垂直荷载相同的预荷载。启动数据采集系统,首先竖向进行垂直预接触,手动旋拧传力柱抵住传力板,然后水平方向移动传力板与下剪切盒刚好接触。在施加垂直荷载稳定后,进行水平剪切,采用应变控制,剪切速率保持在0.5 mm/min,剪切位移30 mm,待剪切结束后卸除竖向荷载以及水平荷载,描绘剪切变形与剪应力的关系曲线,对不同正应力作用下的抗剪强度进行直线拟合,从而获得内摩擦角和黏聚力。

1.3 直剪试验结果分析

图2、3分别为未加筋砖渣土和土工格栅砖渣土在天然与浸润条件下剪应力和剪切变形关系曲线。对于天然条件下的未加筋砖渣土与土工格栅砖渣土,剪应力和剪切变形关系曲线存在峰值,而对于浸润条件下的未加筋砖渣土与土工格栅砖渣土,剪应力和剪切变形关系曲线仅存在稳定值,取剪切变形为25 mm处的剪应力为抗剪强度。比较相同正应力对应的抗剪强度可发现,未加筋砖渣土和土工格栅砖渣土均存在天然条件下抗剪强度要高于浸润抗剪强度的现象。随着含

水率增加,竖向应力使孔隙水压力增大,有效应力减小,导致抗剪强度降低。对比未加筋砖渣土和土工格栅渣土可以发现,由于加入土工格栅后上下盒之间的滑动摩擦变大,使得在相同含水率时未加筋砖渣土的抗剪强度要低于含土工格栅砖渣土。

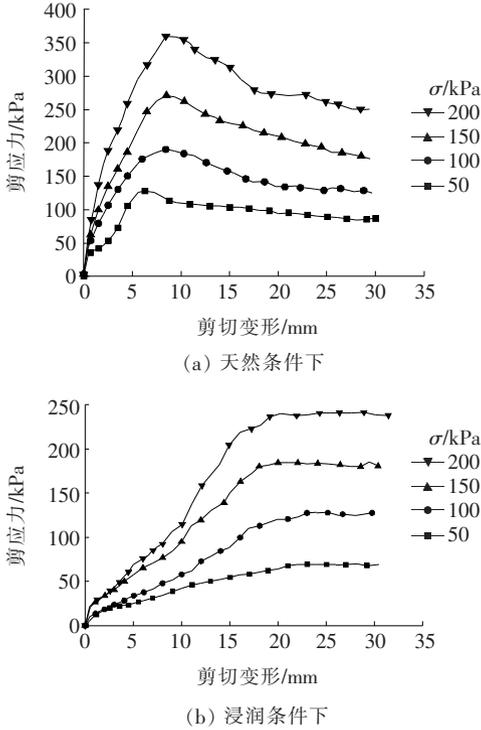


图 2 未加筋砖渣土剪应力和剪切变形关系曲线

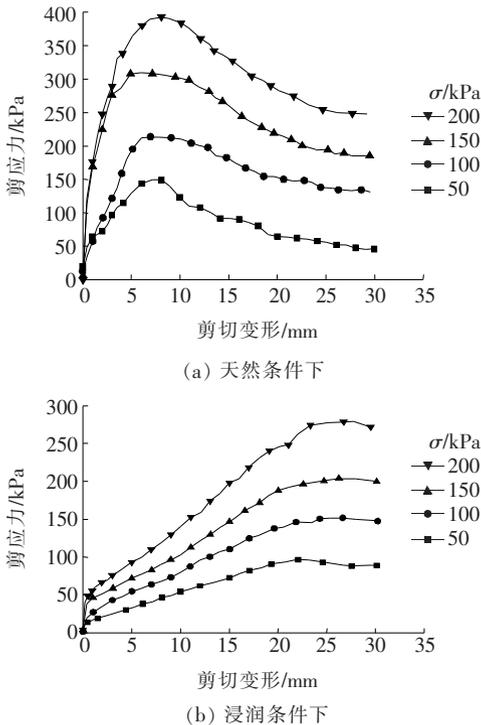


图 3 加筋砖渣土剪应力和剪切变形关系曲线

2 砖渣土拉拔试验研究

2.1 试验仪器及试验过程

试验所用砖渣土混合料颗粒级配及物理技术指标与大型直剪试验相同。拉拔试验由拉拔箱、动力系统以及数据采集系统等相互协作组成。拉拔箱 $650\text{ mm} \times 400\text{ mm} \times 550\text{ mm}$ (长 \times 宽 \times 高),距底部 200 mm 处存在一个 10 mm 的开口缝。力传感器用于采集竖向荷载以及水平力,位移计用于采集水平拉拔位移。

试验采用拉拔仪测试加筋砖渣土的强度指标。将砖渣土试样分 3 次放入拉拔试验箱中并夯实,在开口缝处加入尺寸为 $650\text{ mm} \times 400\text{ mm} \times 550\text{ mm}$ (长 \times 宽 \times 高)的土工格栅,施加竖向压力,水平方向保持 1 mm/min 匀速拉拔。记录拉拔位移与剪应力的关系曲线,并对不同正应力时的抗剪强度拟合直线方程,获得内摩擦角和黏聚力。

2.2 拉拔试验结果分析

砖渣土剪应力和拉拔变形关系曲线如图 4 所示。天然砖渣土正应力为 $\sigma = 10\text{ kPa}$ 时以及浸润条件下砖渣土正应力为 $\sigma = 35\text{ kPa}$ 时均存在土工格栅被拉断的现象,这是由于土工格栅埋入砖渣土中后受到的摩擦力较大,使土工格栅发生较大的伸长变形直至破坏。

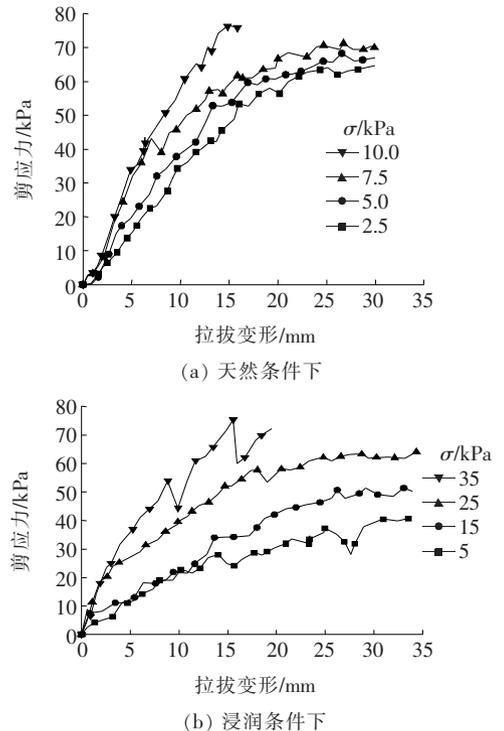


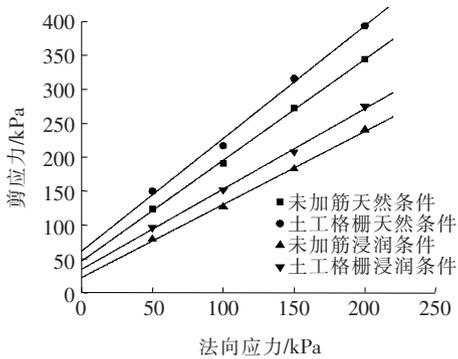
图 4 加筋砖渣土剪应力和拉拔变形关系曲线

在砖渣土的其他正应力作用下土工格栅都被匀速拉动,在拉拔变形和抗剪强度曲线中出现稳定值,取拉拔变形为 30 mm 时剪应力为抗剪强度。由图 4 可以发现:剪应力与拉拔变形关系曲线均为波浪状,甚至有的曲线出现台阶状,这是因为土工格栅被拉出时所受到的摩擦力较大,甚至存在被砖渣土中的粗骨料嵌固等现象。对比在相同竖向压力作用下拉拔试验砖渣土抗剪强度,可以发现浸润后砖渣土的抗剪强度较天然条件下低,这是因为砖渣土被浸润后,水分在砖渣土与土工格栅之间起到润滑的作用,使两者之间的摩擦变小,进而导致抗剪强度变低。

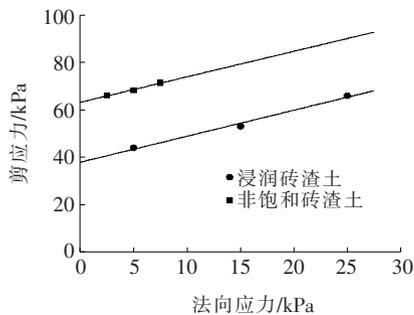
3 直剪试验与拉拔试验对比分析

3.1 砖渣土强度指标对比分析

图 5 为直剪试验和拉拔试验分别在不同条件下的法向应力—剪应力拟合曲线,其具体强度指标见表 3。综合图 5、表 3 可以发现:未加筋砖渣土的黏聚力和内摩擦角均低于加筋砖渣土在直剪试验和拉拔试验中的参数值,因此加筋起到了提高砖渣土强度的作用,抗剪强度更大。加筋可以增大强度指标,对黏聚力的影响更大。直剪试验中:天然状态下,加筋砖渣土黏聚力是未加筋砖渣土的 1.32 倍;浸润状态下,加筋砖渣土黏



(a) 直剪试验



(b) 拉拔试验

图 5 拟合曲线对比

表 3 砖渣土强度指标对比

项目		内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa
未加筋直剪试验	浸润	47.10	22.56
	天然	56.07	46.79
土工格栅直剪试验	浸润	49.79	34.71
	天然	58.93	61.54
土工格栅拉拔试验	浸润	50.17	37.30
	天然	58.60	63.29

聚力是未加筋砖渣土的 1.54 倍;拉拔试验中,加筋砖渣土天然状态下黏聚力是浸润状态下的 1.70 倍。因此,土工格栅加筋砖渣土不再是一种单一材料,将离散状土样通过高强度的连续网片包裹连接起来形成一种复合材料,限制土样的侧向变形,增加土样的抗剪强度,提高路基的整体性和稳定性。

对比加筋后直剪试验和拉拔试验强度指标可以发现,在相同条件下加筋直剪试验强度指标较拉拔试验结果小。直剪试验是下盒在移动过程中土体发生剪切破坏,并且土工格栅的上表面主要受到摩擦力作用;而拉拔试验是将埋入砖渣土中的土工格栅拉出,在土工格栅两侧受到摩擦力作用以及砖渣土中粗骨料对其的嵌固作用,导致土工格栅受拉变形甚至破坏。因此拉拔试验土工格栅受到的阻力要比直剪试验的大,导致在相同工况下直剪试验强度指标要低于拉拔试验强度指标。

在直剪试验和拉拔试验中,浸润条件下的强度指标要比天然条件下的小,说明含水率对强度指标有较大的影响。未加筋砖渣土中内摩擦角降低 16%,黏聚力降低 51.8%;土工格栅砖渣土直剪试验中内摩擦角降低 15.5%,黏聚力降低 43.6%;土工格栅砖渣土拉拔试验中内摩擦角降低 14.4%,黏聚力降低 41.1%。进一步地,随着含水率的升高,内摩擦角和黏聚力虽均有所下降,但黏聚力下降幅度要远大于内摩擦角的下降幅度,因此含水率对黏聚力的影响更大。因此在下雨以及地下水作用的土层中,路基应考虑到黏聚力减小所造成的影响。

3.2 摩擦响应对比分析

摩擦响应分析是指对直剪试验和拉拔试验过程中存在的表观现象进行探究。对于直剪试验,天然砖渣土剪切变形与剪应力曲线中在 5~10 mm 处出现峰值,浸润砖渣土在 20~25 mm 处达到稳定;对于拉拔试验,天然砖渣土和浸润砖渣土拉拔变形与剪应力曲

线中均在 25~30 mm 之间达到稳定。拉拔试验达到稳定所需位移要大于直剪试验达到稳定所需位移。这种现象是由于两种试验摩擦机制不同造成的,直剪试验是上下盒的单面摩擦错动,而拉拔试验是土工格栅从试样中被拔出,双面摩擦受力,在拉拔试验中土工格栅受到的摩擦力更大,因此达到稳定需要的变形就更大。进一步地,当土工格栅和土之间的位移较小时直剪试验更能反映现场实际情况;当土工格栅和土之间的位移较大时拉拔试验更能反映实际。

4 结 论

通过直剪试验和拉拔试验对砖渣土的强度指标进行了对比研究,得出以下结论:

(1) 加筋可以提高砖渣土的强度指标,其内摩擦角仅增加 $2^{\circ}\sim 3^{\circ}$,加筋后对砖渣土的黏聚力影响要大于内摩擦角的影响。

(2) 与天然条件下的砖渣土相比,被浸润后的砖渣土与土工格栅界面作用力学特性变差,主要表现在浸润砖渣土的内摩擦角比天然状态下要降低 14%~16%,而黏聚力则会降低 40%~50%,因此,浸润作用对砖渣土的黏聚力影响更为显著。

(3) 在直剪试验中,砖渣土剪切变形与剪应力关系曲线达到峰值(5~10 mm)或稳定值(20~25 mm)时的位移比拉拔试验到达稳定值(25~30 mm)时的位移要小,因此,对于加筋砖渣土而言,当土与土工格栅位移相对较小时,加筋土界面作用力学特性宜采用直剪试验结果;而当土与土工格栅位移相对较大时,加筋土界面作用力学特性宜采用拉拔试验结果。

参 考 文 献:

- [1] 邱艺文. 西南莫机场高填方加筋边坡稳定性分析[J]. 中外公路, 2018, 38(3): 19-23.
- [2] 王成皿, 王中文. 基于规范法的加筋土挡土墙边坡加固稳定性计算研究[J]. 中外公路, 2017, 37(2): 24-26.
- [3] 吴景海, 陈环, 王玲娟, 等. 土工合成材料与土界面作用特性的研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(1): 89-93.
- [4] 马时冬. 土工格栅与土的界面摩擦特性试验研究[J]. 长江科学院院报, 2004, 21(1): 11-14.
- [5] 张波, 石名磊. 粘土与筋带直剪试验与拉拔试验对比分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(增刊): 61-64.
- [6] 杨广庆, 李广信, 张保俭. 土工格栅界面摩擦特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(8): 948-952.
- [7] TEIXEIRA S H C, BUENO B S, ZORNBERG J G. Pull-out Resistance of Individual Longitudinal and Transverse Geogrid Ribs[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(1): 37-50.
- [8] 张嘎, 张建民. 土与土工织物接触面力学特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(1): 51-55.
- [9] 赖咸根, 杜勇立, 鲁重, 等. 加筋土拉拔试验的拉拔过程数值模拟[J]. 中外公路, 2014, 34(4): 35-40.
- [10] 刘文白, 周健. 土工格栅与土界面作用特性试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(4): 965-970.
- [11] 刘飞禹, 林旭, 王军. 砂土颗粒级配与筋土界面抗剪特性的影响[J]. 岩土力学与工程学报, 2013, 32(12): 2 575-2 582.
- [12] WANG Z J, JACOBS F, ZIEGLER M. Experimental and DEM Investigation of Geogrids-Soil Interaction under Pullout Loads [J]. Geotextiles and Geomembrances, 2016, 44(3): 230-246.
- [13] 王家全, 陆梁梁, 周岳富, 等. 土工格栅纵横肋的筋土承载特性分析[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(1): 186-193.
- [14] 王志杰, 杨广庆, 王贺, 等. 刚性与柔性顶部边界下筋土界面特性的细观数值研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(12): 1-7.
- [15] 刘开富, 许家培, 周青松, 等. 土工格栅-土体界面特性大型直剪试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(增刊 1): 185-188.
- [16] 肖成志, 罗亚楠, 王子寒, 等. 土工格栅-砂土界面特性的拉拔试验研究[J]. 深圳大学学报(理工版), 2019, 36(3): 252-259.
- [17] 交通部公路科学研究院. 公路土工合成材料试验规程: JTG E50-2006[S]. 北京: 人民交通出版社, 2006.