

DOI: 10.11779/CJGE2019S1047

# 土工格栅-土体界面特性大型直剪试验研究

刘开富<sup>1</sup>, 许家培<sup>1</sup>, 周青松<sup>1</sup>, 谢新宇<sup>2,3</sup>, 胡 意<sup>1</sup>

(1. 浙江理工大学建工学院, 浙江 杭州 310018; 2. 浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058;  
3. 浙江大学宁波理工学院, 浙江 宁波 315100)

**摘要:** 土工格栅与土体的界面特性直接影响了加筋土工程的安全和稳定性, 土工格栅两侧为不同材料的界面特性研究还较少。采用双向土工格栅为加筋材料, 对其两侧分别为不同含水率粉质黏土及不同粒径石英砂的界面特性开展一系列的大型室内直剪试验, 分析法向应力、粉质黏土含水率、剪切速率、石英砂粒径及粉质黏土压实系数等因素对土工格栅-土体界面抗剪强度的影响。结果表明: 土工格栅-土体界面抗剪强度与法向应力呈线性相关, 符合莫尔-库仑理论; 粉质黏土含水率的变化对土工格栅-土体界面抗剪强度有较大的影响, 在最优含水率时其界面抗剪强度指标最高; 剪切速率的大小和石英砂的粒径变化对土工格栅-土体界面的抗剪强度有一定的影响, 其影响范围分别在±10%和±7%内; 粉质黏土压实度的增加能有效增加界面抗剪强度, 压实系数越高, 其提高幅度越大。这些影响应在工程应用中适当考虑。

**关键词:** 土工格栅; 大型直剪试验; 界面特性; 影响因素

中图分类号: TU472.34 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)S1-0185-04

**作者简介:** 刘开富(1977—), 男, 山东临沂人, 博士, 副教授、硕士生导师, 主要从事软黏土力学及地基处理、土木工程材料性状等方面的研究。E-mail: liukaifu@zstu.edu.cn。

## Large-scale direct shear tests on properties of geogrid-soil interfaces

LIU Kai-fu<sup>1</sup>, XU Jia-pei<sup>1</sup>, ZHOU Qing-song<sup>1</sup>, XIE Xin-yu<sup>2,3</sup>, HU Yi<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 2. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 3. Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo 315100, China)

**Abstract:** The properties of geogrid-soil interface directly influences the safety and stability of reinforced earth projects. However, there are few researches on the interface properties of geogrid with different soil materials at the two sides of geogrid. A series of large-scale direct shear tests are conducted by using two-way geogrid as reinforced materials, silty clay with different water contents and quartz sand with different grain sizes. The effects on shear strength of geogrid-soil interface are analyzed under different influence factors, such as normal stress, water content of silty clay, shear velocity, grain size of quartz sand, and compaction degree of silty clay. The results show that the relationship between shear strength of geogrid-soil interface and normal stress is a linear correlation and in accordance with Mohr-Coloumb theory. The shear strength of geogrid-soil interface is influenced by the water content of silty clay. The shear strength index of interface is the highest at the optimum water content of silty clay. The shear strength of geogrid-soil interface is influenced little by the shear velocity and grain size, and their influence range is within ±10% and ±7%, respectively. The compaction degree of silty clay can improve the shear strength of geogrid-soil interface. The higher the degree of compaction is, the greater the shear strength-improving amplitude is. These factors must be considered properly in the engineering applications.

**Key words:** geogrid; large-scale direct shear test; interface characteristic; influence factor

## 0 引言

加筋土技术自法国工程师 Vidal<sup>[1]</sup>提出以来, 因其施工简单、造价低等优点广泛应用于堤坝、挡墙等工程。土工格栅加筋工程中, 土工格栅与土体的界面特性直接影响了加筋土工程的安全和稳定性。已有研究

表明, 土工格栅与土体界面特性可通过直剪试验、拉拔试验等分析得到<sup>[2-7]</sup>; 因仪器操作简单等优点, 直剪

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878619); 浙江省自然科学基金项目(LY13E090010)

收稿日期: 2019-04-30

试验常用于分析其格栅与土体的界面特性。

很多研究者采用直剪试验分析了同一类型土中的土工格栅-土体的界面特性,已有的研究表明其界面性状受到多种因素的影响<sup>[2-9]</sup>。Lee 等<sup>[2]</sup>的直剪试验发现边界条件和试验方法及设备对加筋土界面特性有很大影响。施有志等<sup>[3]</sup>的土工格栅界面性状室内直剪表明直剪盒的大小及压实度等对结果有影响。包承纲<sup>[4]</sup>分析了土工合成材料界面特性的机制并给出了典型的直剪试验结果。刘文白等<sup>[5]</sup>指出,土与土工格栅的相对位移较小时直剪摩擦试验较能反映实际;史旦达等<sup>[6]</sup>认为法向应力、土体压实度等对筋-土界面的性状都会产生影响;Liu 等<sup>[7]</sup>采用大型直剪试验定量分析了在砂土填料中单向格栅横肋对界面抗剪强度的额外贡献。徐超等<sup>[8]</sup>利用直剪试验研究了剪切速率和筋材性质对筋-土界面强度的影响。王协群等<sup>[9]</sup>通过大型直剪试验研究了格栅类型和填料类型、压实度、含水率及剪切速率五个因素对格栅-土界面强度特性的影响规律。

随着加筋土研究的深入,对土工格栅与黏土<sup>[10]</sup>、砂、粉煤灰、石灰等土体的界面研究越来越深入,而当前工程中由于施工控制等原因导致土工格栅位于不同土体中,当前这方面的研究还较少,仅有不同法向应力下煤矸石-土工格栅-砂层状体系的筋土界面特性研究<sup>[11]</sup>,因此本文采用大型直剪试验研究不同影响因素下粉质黏土及石英砂间的塑料土工格栅的界面性状。

## 1 试验方案及材料

### 1.1 试验设备

Lee<sup>[2]</sup>和施有志等<sup>[3]</sup>认为,筋-土界面特性的直剪试验中剪切盒的大小会影响试验结果,而且小的剪切盒影响尤其明显。因此,ASTM (2014)<sup>[12]</sup>建议剪切盒的平面的尺寸应和土工格栅尺寸、测试土体的粒径等相关,并且最小尺寸不得小于 300 mm×300 mm×50 mm。因此,本次直剪试验所采用的仪器为 STJY-5 型直剪仪,其上、下盒的内壁尺寸为 300 mm×300 mm×150 mm,剪切盒尺寸满足上述尺寸要求。

### 1.2 试验材料

试验中直剪仪下盒的填料采用粉质黏土,其物理性质指标见表 1。不同含水率的粉质黏土由天然状态下的粉质黏土烘干处理后加不同水量配制得到,即采用筛子筛取一定量的粉质黏土,用烘箱在 105℃的条件下烘 12 h,用电子秤准确称量一定量的干土和水,将其混合配制成一定含水率的粉质黏土。上盒填料采用 4~6 mm 粒径或 9~12 mm 粒径的石英砂,以分析

不同粒径的石英砂对界面特性的影响。

表 1 粉质黏土的基本物理性质指标

Table 1 Basic physical property index of silty clay

填料 种类	最优含 水率/%	最大干密 度/(g·cm <sup>-3</sup> )	液限 /%	塑限 /%	塑性 指数
粉质黏土	19.7	1.56	28.8	16.6	12.2

土工格栅采用双向拉伸塑料土工格栅 TGSG15—15。双向土工格栅的试样宽度和实际长度由剪切盒尺寸与固定方式确定,为保证有足够的长度保证试样的固定,裁剪的试样宽度大于要求尺寸 10 mm。

### 1.3 试验方案设计

为研究法向应力、粉质黏土含水率、剪切速率、上层填料粒径及压实度等因素对双向塑料土工格栅与粉质黏土及石英砂间的界面特性的影响,设计了多组试验,各组分别施加的法向应力分别为 25, 50, 75, 100, 200 kPa。

直剪试验可得到不同法向应力下界面剪应力-剪切位移曲线,界面抗剪强度按《公路工程土工格栅土工合成材料试验规程》(JTGE50—2006)<sup>[13]</sup>中的规定确定,因本试验剪应力与位移关系曲线未出现峰值,取位移量为剪切面长度 10%时剪应力作为界面强度值。

## 2 试验成果与分析

### 2.1 法向应力的影响

图 1 为不同含水率的粉质黏土土工格栅-土体界面抗剪强度随法向应力变化的拟合图。由图 1 可见,相同含水率条件下,随着法向应力不断增大,土工格栅与土体间的界面抗剪强度不断增大;不同含水率条件下,其界面抗剪强度是不同的。图 1 中拟合曲线的决定系数都大于 0.95,拟合度较好。由图 1 的拟合曲线可见,抗剪强度与法向应力呈线性相关,符合莫尔-库仑模型。

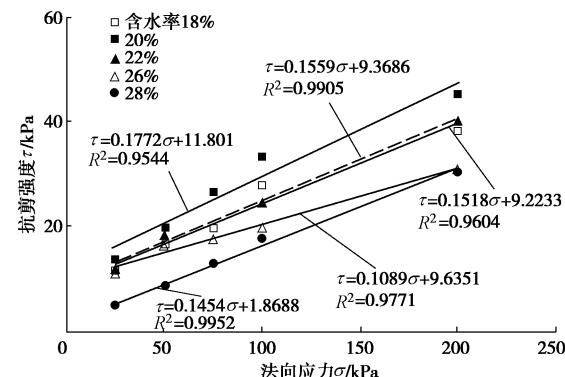


图 1 不同含水率时土工格栅-土体界面抗剪强度-法向应力变化拟合图

Fig. 1 Fitting of shear strength- normal stress of geogrid-soil interface under different water contents of silty clay

## 2.2 含水率的影响

图 2 为不同法向应力下土工格栅-土体界面抗剪强度-含水率变化曲线。由图 2 可见, 随着含水率的增大, 格栅与土体间的抗剪强度并不总是增大的。当粉质黏土的含水率小于 20% (接近最优含水率) 时, 随着含水率的增大, 其抗剪强度增大; 当粉质黏土的含水率大于 20% 时, 随着含水率增大其抗剪强度却逐渐减小。这与王协群等<sup>[9]</sup>的结论类似。

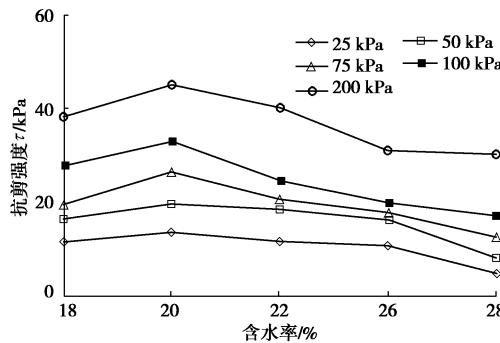


图 2 不同法向应力下土工格栅-土体界面抗剪强度-含水率曲线

Fig. 2 Curves of shear strength- water content of geogrid-soil interface under different normal stresses

## 2.3 剪切速率的影响

图 3 为不同含水率下土工格栅-土体界面抗剪强度-剪切速率变化曲线。由图 3 可见: 在剪切速率为 1 或 2 mm/min 时, 土工格栅-土体界面的抗剪强度较大, 当剪切速率为 0.5 或 3 mm/min 时, 土工格栅-土体界面的抗剪强度相对较小; 抗剪强度的变化范围相对较小 (剔除含水率 22% 及剪切速率 3 mm/min 的异常点), 剪切速率对土工格栅-土体界面抗剪强度的影响范围在土 10% 内。这与徐超等的当剪切速率不超过一定界限 (如 7.0 mm/min) 时其对直剪试验结果的影响可以忽略不计<sup>[8]</sup>、王协群等的随剪切速率的增大筋土界面的抗剪强度增大<sup>[9]</sup>的结论有所不同。

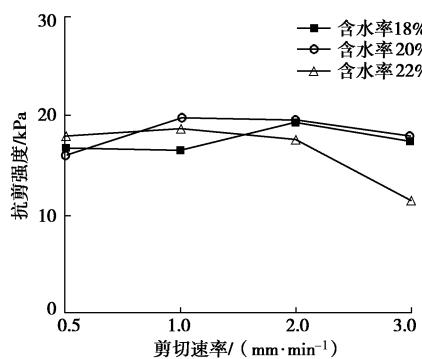


图 3 不同含水率下土工格栅-土体界面抗剪强度-剪切速率曲线

Fig. 3 Curves of shear strength-shear velocity of geogrid-soil interface under different water contents

## 2.4 石英砂粒径的影响

图 4 为石英砂不同粒径时的土工格栅-土体界面抗剪强度-法向应力拟合图。由图 9 可见: 石英砂的粒径为 4~6 mm 时, 格栅-土界面的黏聚力和摩擦系数分别为 9.38 kPa 和 0.202, 相应的内摩擦角为 11.42°; 当填料为 9~12 mm 粒径的石英砂时, 格栅土界面的黏聚力和摩擦系数分别为 11.80 kPa 和 0.177, 相应的内摩擦角为 10.05°; 石英砂的粒径对土工格栅-土体界面抗剪强度的影响范围在土 7% 内。

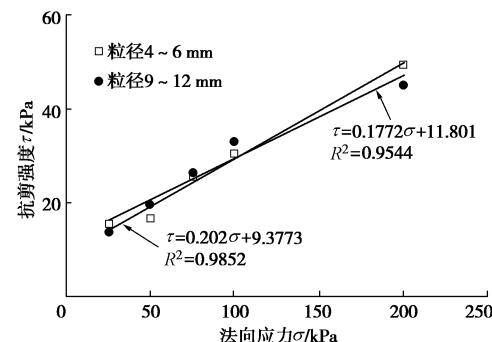


图 4 不同石英砂粒径时土工格栅-土体界面抗剪强度-法向应力拟合图

Fig. 4 Fitting of shear strength- normal stress of geogrid-soil interface under different grain sizes of quartz sand

## 2.5 填土压实系数的影响

图 5 为不同压实系数条件下土工格栅-土体界面抗剪强度随法向应力变化的拟合图。由图 5 可见, 随着压实系数的增加, 界面抗剪强度也随之增加; 格栅-土体界面抗剪强度指标中, 黏聚力和内摩擦角都有一定程度增加, 其中压实系数由 0.90 增大到 0.94 时, 黏聚力增加较大, 而压实系数由 0.94 增加到 0.98 时, 内摩擦角提高幅度相对较大; 土体的压实系数越高, 其提升幅度越大, 这与王协群等<sup>[9]</sup>的结论有所不同。

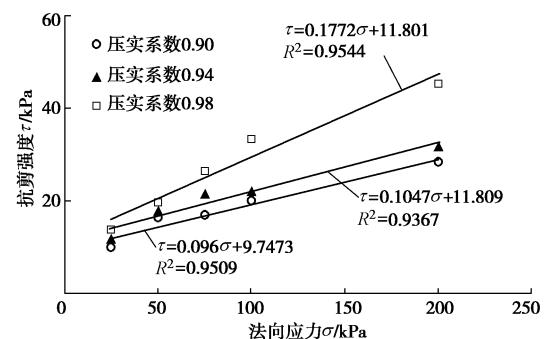


图 5 不同压实系数时界面抗剪强度-法向应力拟合图

Fig. 5 Fitting of shear strength- normal stress of geogrid-soil interface under different compaction degrees of silty clay

## 3 结 论

通过大型直剪试验分析了土工格栅-土体的界面

抗剪强度在不同影响因素下的变化,可得到以下结论:

(1) 土工格栅-土体界面抗剪强度随着法向应力增大而增大,且抗剪强度与法向应力符合莫尔-库仑理论。

(2) 土体含水率对土工格栅-土体界面抗剪强度有较大的影响,含水率接近最佳含水率时土工格栅-土体界面的内摩擦角和黏聚力最大,含水率远离最佳含水率时其黏聚力和内摩擦角都会有不同程度的降低。

(3) 在剪切速率在 0.5~3 mm/min 范围时,剪切速率的大小对土工格栅-土体界面的抗剪强度的影响范围在土 10%内;石英砂粒径对土工格栅-土体界面抗剪强度的影响在土 7%内。

(4) 填土压实系数的增加能有效增加界面抗剪强度,黏聚力和内摩擦角的提高幅度在不同压实系数条件下是不同的,压实系数越高,其提升幅度越大。

(5) 工程应用时应同时考虑法向应力、填土含水率、剪切速率、石英砂粒径、填土压实系数等因素的影响,合理选择格栅-土体的界面强度指标。

## 参考文献:

- [1] VIDAL H. The principal of reinforced earth (Highway Research Record 282)[R]. Washington D C: Highway Research Board, National Research Council, 1969: 1~24.
- [2] LEE K M, MANJUNATH V R. Soil-geotextile interface friction by direct shear test[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, **37**(1): 238~252.
- [3] 施有志, 马时冬. 土工格栅的界面特性试验[J]. 岩土力学, 2003, **24**(2): 296~300. (SHI You-zhi, MA Shi-dong. Test for interface characteristics of geogrid[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, **24**(2): 296~300. (in Chinese))
- [4] 包承纲. 土工合成材料界面特性的研究和试验验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(9): 1735~1744. (BAO Cheng-gang. Study on interface behavior of geosynthetics and soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(9): 1735~1744. (in Chinese))
- [5] 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. (LIU Wen-bai, ZHOU Jian. Experimental research on interface friction of geogrids and soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(4): 965~970. (in Chinese))
- [6] 史旦达, 刘文白, 水伟厚, 等. 单、双向塑料土工格栅与不同填料界面作用特性与对比试验研究[J]. 岩土力学, 2009, **30**(8): 2237~2244. (SHI Dan-da, LIU Wen-bai, SUI Wei-hou, et al. Comparative experimental studies of interface characteristics between uniaxial/biaxial plastic geogrids and different soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(8): 2237~2244. (in Chinese))
- [7] LIU C N, HO Y H, HUANG J W. Large scale direct shear tests of soil/PET-yarn geogrid interfaces[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2009, **27**(1): 19~30.
- [8] 徐超, 孟凡祥. 剪切速率和材料特性对筋-土界面抗剪强度的影响[J]. 岩土力学, 2010, **31**(10): 3101~3106. (XU Chao, MENG Fan-xiang. Effects of shear rate and material properties on shear strength of geosynthetic-soil interface [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(10): 3101~3106. (in Chinese))
- [9] 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 Xie-qun, ZHANG Jun-feng, ZOU Wei-le, et al. A shear strength model of geogrid-soil interface and its influence factors[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, **46**(4): 133~141. (in Chinese))
- [10] 张建伟, 余杭, 王仕卿, 等. 黄泛区粉土-GFRP 布界面摩擦特性试验[J/OL]. 复合材料学报, <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20181129.001>. (ZHANG Jian-wei, YU Hang, WANG Shi-qing, et al. Experimental study on interface friction characteristics of silty soil in the Yellow River flooding area with GFRP cloth[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20181129.001>. (in Chinese))
- [11] 刘泽, 雷勇. 煤矸石-土工格栅-砂层状体系的界面摩擦特性试验研究[J]. 工业建筑, 2014, **44**(4): 90~93, 134. (LIU Ze, LEI Yong. Test study on the interface friction characteristics of coal gangue-geogrid-sand layered system[J]. Industrial Construction, 2014, **44**(4): 90~93, 134. (in Chinese))
- [12] ASTM D5321/D5321M—14 Standard test method for determining the shear strength of soil-geosynthetic and geosynthetic-geosynthetic interfaces by direct shear[S]. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
- [13] 中华人民共和国交通部. JTGE50—2006 公路工程土工合成材料试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2006. (Ministry of Communications of the People's Republic of China. JTGE50—2006 Test methods of geosynthetics for highway engineering[S]. Beijing: China Communications Press, 2006. (in Chinese))

(责编: 明经平)