

土工格栅与土体界面摩擦特性试验研究

杨广庆^{1,2}, 隋传毅³

(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043; 2. 河北省交通安全与控制重点实验室, 河北 石家庄 050043; 3. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610032)

摘要:土工格栅与土体界面摩擦特性指标是加筋土结构设计的关键。基于分析土工格栅与土体的界面摩擦形式,进行了一系列室内筋土界面拉拔试验和直剪摩擦试验,测试了两种试验条件的界面摩擦特性。试验结果表明:土工格栅与砂砾料接触面抗剪强度较高,而与粘土接触面抗剪强度很低。剪切速率对两种试验方法测得的界面摩擦特性指标有不同的影响。随着法向应力的增加或剪切速率的降低,筋土界面剪应力峰值以及其对应的剪切位移增大。土工格栅的横肋对筋土界面特性具有重要贡献。随着填料压实度的提高,土工格栅加筋效果越明显。

关键词:土工格栅;界面特性;直剪试验;拉拔试验

中图分类号:TU 411; TU 472 **文献标识码:**A **文章编号:**2095-0373(2010)02-0046-07

0 引言

在我国大规模的经济建设中,铁路、公路、机场、水利、市政和建筑各行业都会涉及到加筋土挡墙、加筋土边坡和加筋垫层等加筋土结构。当土工格栅埋置于土中后,其与周围土体构成复合的结构体系,该体系在自重和外荷载作用下会产生变形,同时在筋土界面产生相互作用,如图1所示^[1-2]。由此可见,土工格栅的拉伸性能以及筋土界面作用特性对加筋土结构的稳定性具有重要贡献^[3]。土工格栅与土体相互作用所形成的摩擦力可分为三部分:一是土工格栅表面和土体之间的摩擦力,二是土颗粒与土工格栅横肋之间的端承力(被动阻力),三是土工格栅网孔内土体与网孔外土体之间的表面摩擦力,如图2所示。其中,第一部分摩擦力是与其它平面条带型拉筋相同的地方,而第二部分和第三部分摩擦力则是区别于其它条带式拉筋材料之处,也是土工格栅作为加筋材料优越性的体现。从筋土的相对位移方式可以看出,拉筋与土的相互作用型式主要表现为直接剪切摩擦与拉拔摩擦两种。土工格栅与土体的直剪摩擦特性主要用于研究筋土界面的相互作用机理、筋土界面的抗剪强度指标以及筋土界面上的局部剪应力和剪应变的关系。拉拔摩擦特性是以确定合理的锚固段长度及稳定性分析为目的,进行筋土界面相互作用机理、筋土界面的摩擦系数以及筋土界面剪应力和筋土相对位移的变化规律研究。

筋土界面摩擦特性除了与试验方法、加载方式、试验箱侧壁边界效应和尺寸效应、填料厚度、压实度以及筋材夹持状况等有关外^[4-7],还与填料类型、含水量等密切相关^[8-11]。以土工格栅加筋土结构工程实际为依托^[12-16],以结构采用的土工格栅和填料类型(砂砾料、细粒土)为试验材料,对不同强度的土工格栅,在不同的试验速率和不同的压实度填料中的界面摩擦特性进行了系统研究。

1 土工格栅与土体界面摩擦特性研究方法

1.1 试验装置

考虑到填料的尺寸效应,土工格栅与砂砾料的界面拉拔摩擦特性试验在清华大学岩土工程研究所研

收稿日期:2010-05-24

作者简介:杨广庆,男,1971年出生,博士,教授。从事岩土工程稳定性与变形控制以及土工合成材料应用等方面的研究工作,先后主持河北省自然科学基金等科研项目30多项,成果荣获省部级科技进步二等奖2项,三等奖8项。出版专著7部,发表学术论文100多篇,SCI、EI、ISTP收录30余篇。

基金项目:河北省自然科学基金资助项目(E2006000393);河北省交通运输厅资助项目(Y-040217,T-070255)。

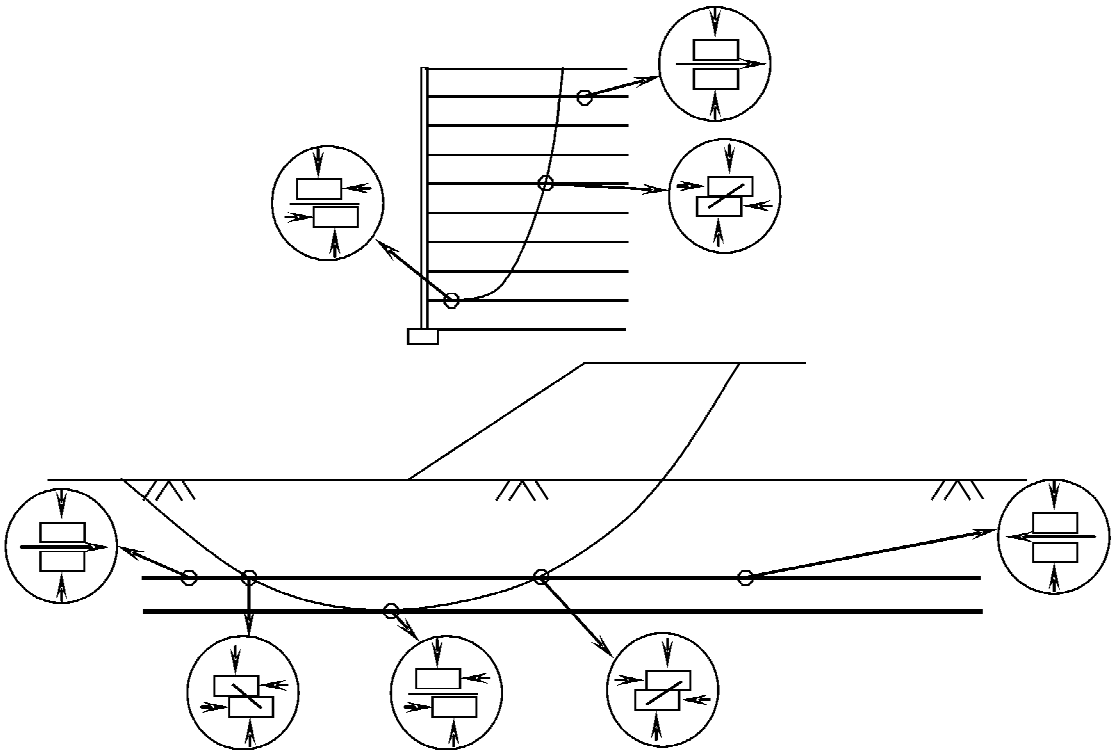


图 1 筋土界面作用形式

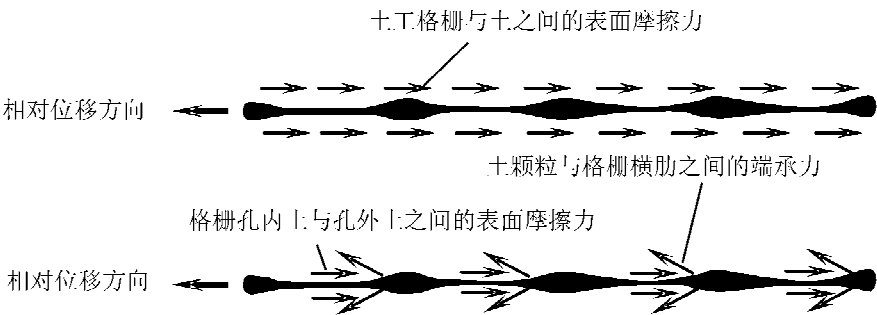


图 2 土工格栅与土之间的相互作用

制的 TH-20t CSASSI 大型土与结构接触面循环加载剪切仪上进行。拉拔试验装置内部尺寸为 45 cm×36 cm×25 cm(长×宽×高),设备实现了加载和测量的自动化,加载按应变控制。

土工格栅与细粒土的界面摩擦特性试验在数采式土工合成材料综合测定仪上进行,该仪器可以进行土工合成材料的力学特性试验和土与土工合成材料的相互作用特性试验。样本在剪切盒中的有效面积为 20 cm×20 cm。

1.2 试验材料

土工格栅与土体界面摩擦特性试验主要是依托赣(州)龙(岩)铁路土工格栅加筋土高挡墙、河北省邢(台)临(清)高速公路模块式土工格栅加筋土挡墙工程的现场试验进行的。试验所用高密度聚乙烯(HDPE)土工格栅指标如表 1 所示。土工格栅的具体形状、尺寸等物理特性如表 2 和图 3 所示。

表 1 试验用土工格栅的主要技术规格

规格	纵向抗拉强度/ (kN·m ⁻¹)	纵向 2% 伸长率时的拉伸力/ (kN·m ⁻¹)	纵向 5% 伸长率时的拉伸力/ (kN·m ⁻¹)	峰值应变/%
EG70R	≥74.6	≥24.8	≥47.2	≤11.5
EG130R	≥136.0	≥38.0	≥75.5	≤11.5

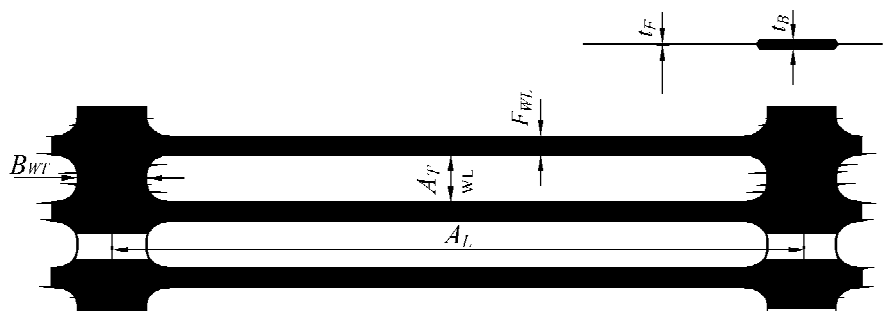


图 3 土工格栅形状、尺寸图示

表 2 单向格栅的典型结构尺寸

规格	A_L	A_T	B_{WT}	F_{WL}	t_R	t_F
EG70R	240 ~ 250	16	17	6.2	2.3 ~ 2.6	1.0
EG130R	245 ~ 265	16	17	6.2	5.4 ~ 5.9	2.1

砂砾料的技术指标:不均匀系数为 17.1,不均匀系数 14.9,最大干密度为 2.107 g/cm^3 ,最小干密度为 1.654 g/cm^3 ,内摩擦角为 35.0° 。粘性土的技术指标:密度为 2.68 g/cm^3 ,最优含水量为 20.3%,最大干密度为 1.651 g/cm^3 ,塑性指数为 13.0,压缩系数为 0.14 MPa^{-1} ,渗透系数为 $1.27 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$,内摩擦角为 31.2° ,黏聚力为 23.7 kPa。

1.3 试验方法

EG130R 土工格栅与砂砾料的界面摩擦特性拉拔试验采用应变控制式,拉拔速率取为 0.5 mm/min 。试样相对密度按 $D_r = 0.7$ 控制。

EG70R 土工格栅与细粒土的界面摩擦特性试验也采用应变控制式,分别进行了剪切速率为 0.17 mm/min 、 1.33 mm/min 、 4.33 mm/min ,压实度为 90%,剪切面上有、无横肋条件下的拉拔和直剪摩擦试验以及压实度为 90% 和 96% 时剪切面上有横肋条件下的筋土界面摩擦试验。

2 土工格栅在砂砾料中的拉拔摩擦试验

图 4 为在不同的法向应力作用下,EG130R 型土工格栅在砂砾料中进行拉拔试验过程中的剪切位移与剪应力之间的变化曲线。从图中看出曲线接近于双曲线。由于该砂砾料级配不均匀,个别大粒径颗粒分布对拉拔强度曲线影响很大。随着土工格栅被拉拔,其结点及横肋处的砂砾料被推动,大颗粒被堆积产生更大的抗力,所以拉拔曲线呈台阶状。基于筋土之间存在较大的摩擦力,拉拔试验过程中,在 150 kPa 和 200 kPa 较高的法向压力作用下土工格栅最后被拉断。根据试验曲线确定其抗剪强度 τ_p ,即 $\tau_p = T_d/2LB$ 。根据求出的抗剪强度绘制 τ_p 与各级法向应力 p 之间的曲线(图 5),求出土工格栅与砂砾料之间的强度指标:似黏聚力 $c = 0$,界面摩擦角 $\varphi_{sg} = 29.4^\circ$ 。

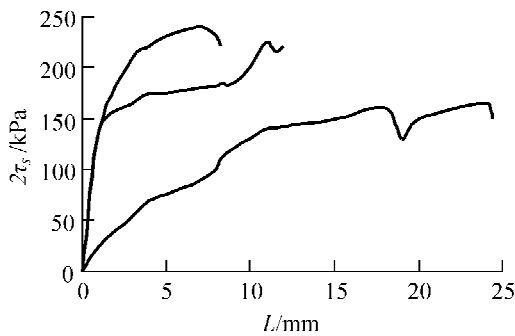


图 4 EG130R 在砂砾料中 τ_p - L 曲线

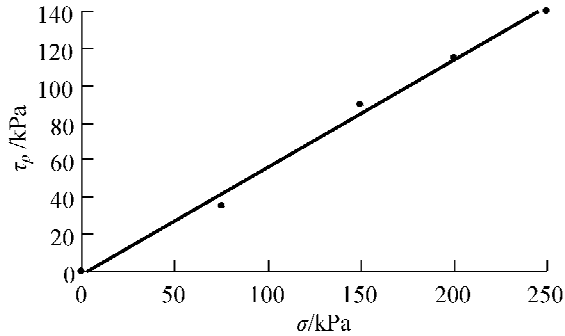


图 5 EG130R 在砂砾料中的摩擦试验结果

3 土工格栅在细粒土中的摩擦试验

3.1 压实度 $K=90\%$,不同速率条件下 EG70R 在粘性土中的摩擦特性

3.1.1 剪切面上有横肋时

当粘性土压实度 $K=90\%$ 时,分别在 0.17 mm/min 、 1.33 mm/min 、 4.33 mm/min 三种剪切速率条件下进行了 EG70R 单向土工格栅(剪切面上含有一个横肋)在粘性土中的直剪和拉拔试验。根据每级法向荷载下的剪切力峰值 F 和拉拔力峰值 T_d ,确定直剪试验时的剪应力 $\tau_s = F/A$ 以及拉拔试验时的剪应力 $\tau_p = T_d/2LB$ 。分别绘制剪应力与各级法向应力 p 之间的曲线,试验曲线如图 6 所示。

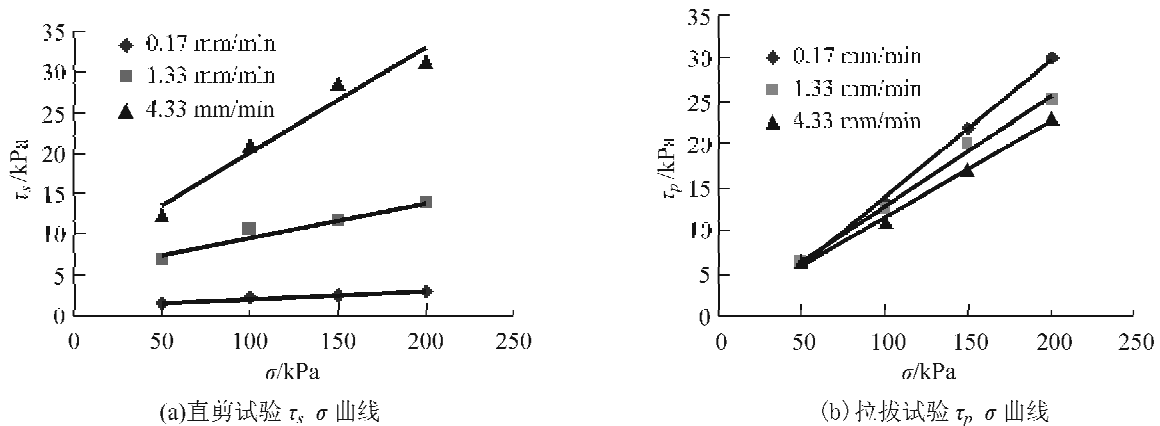


图 6 剪切面上有横肋时,土工格栅与粘性土的摩擦试验结果

根据不同剪切速率条件下直剪摩擦试验结果可以看出:随着剪切速率的变化,筋土界面的直剪摩擦特性也有所变化,筋土界面摩擦角和似黏聚力随着剪切速率的增加而增大。剪切速率由 1.33 mm/min 增加到 4.33 mm/min 时,筋土界面似黏聚力增加了 31.5% 。由拉拔试验的 τ_p - P 曲线可以看出:筋土界面的似黏聚力随拉拔速率的增加而增大,而界面摩擦角随拉拔速率的增加而减小,并且直剪摩擦试验中界面强度指标的变化速率较拉拔试验中的要大。

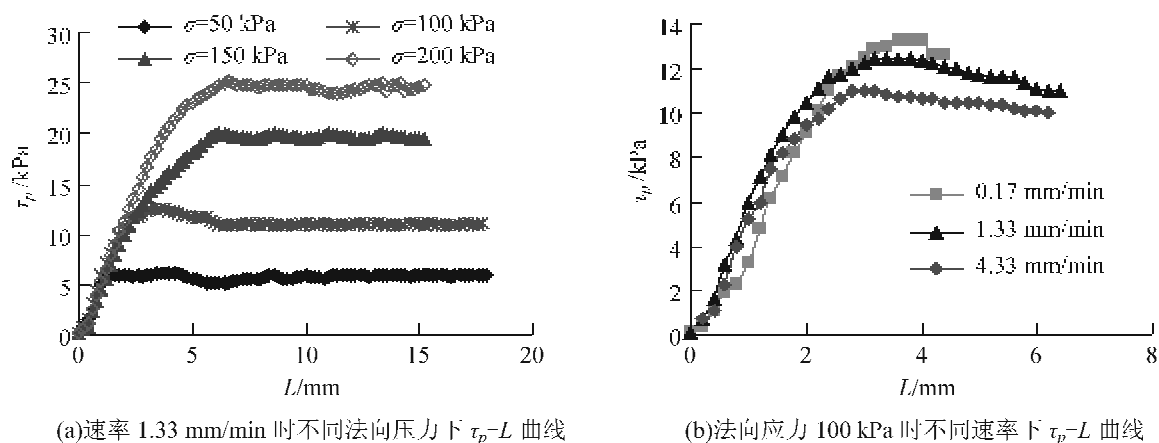
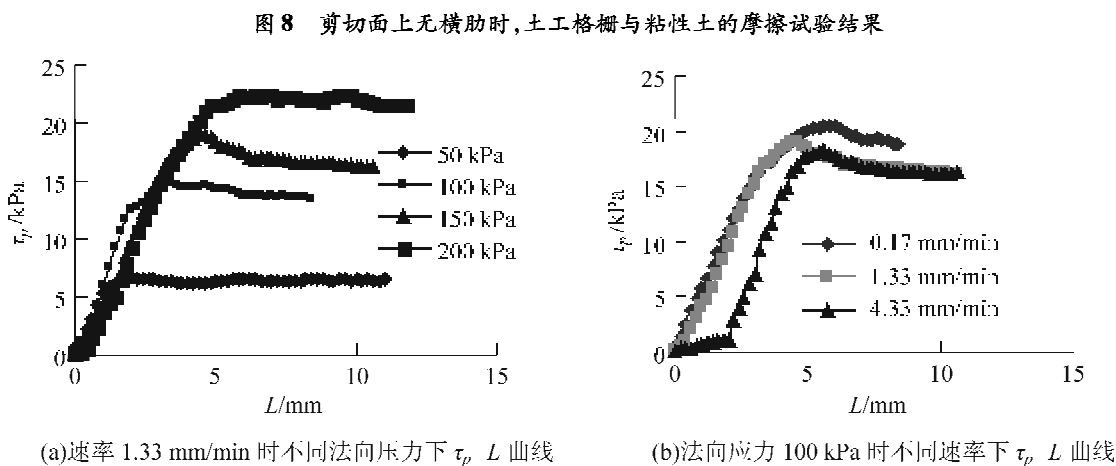
图 7 为拉拔试验过程中,拉拔速率为 1.33 mm/min 时的 L - τ_p 关系曲线以及法向应力为 100 kPa 时,不同拉拔速率条件下的 L - τ_p 关系曲线。分析图 8 可知:拉拔摩擦试验的剪应力与剪切位移曲线表现出明显的非线性特征。随着法向应力的增大,剪应力峰值及其对应的位移均增大。这主要是由于土工格栅抗拔能力是从筋材的施力端向埋入端逐渐传递发挥出来的,法向应力越大,剪应力达到峰值时的过程越长,需要发生的位移量也越大。拉拔速率影响着界面剪应力峰值的大小,拉拔速率越大,剪应力峰值越小,对应的剪切位移也越小。拉拔速率从 0.17 mm/min 增加到 4.33 mm/min ,界面剪应力峰值降低了 17.0% ,由此可见,对于土工格栅加筋粘性土工程应控制填筑速率施工速率。同时,在低拉拔速率条件下应变软化现象较高速率条件下更为明显,且达到峰值时的拉拔位移要大的多。

3.1.2 剪切面上无横肋时

图 8 和图 9 为粘性土压实度 $K=90\%$ 时,分别在 0.17 mm/min 、 1.33 mm/min 、 4.33 mm/min 三种剪切速率条件下进行的 EG70R 单向土工格栅(剪切面上无横肋)在粘性土中的直剪和拉拔试验结果。从图中可以看出:在相同的剪切速率条件下,剪切面内有横肋时的单向土工格栅与粘性土之间的界面摩擦角大于剪切面上无横肋时的情况,并且直剪摩擦试验结果较拉拔试验更加明显。该现象也说明土工格栅横肋与土颗粒之间的端承力对筋土界面的摩擦特性具有重要贡献。同时,在相同的拉拔速率条件下,剪切面上有横肋时,剪应力达到峰值时的剪切位移要大于无横肋时的情况。

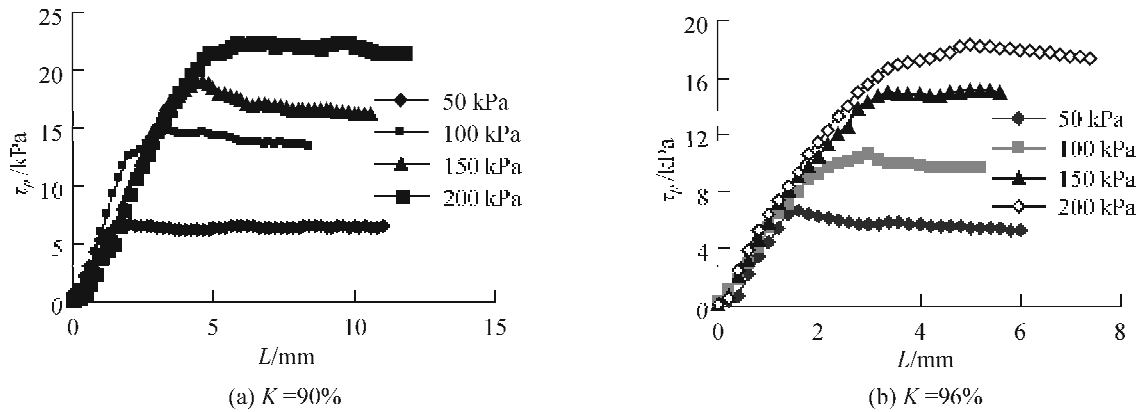
3.2 剪切速率为 1.33 mm/min 时,不同压实度条件下 EG70R 在粘性土中的摩擦特性

图 10 和图 11 表示拉拔速率为 1.33 mm/min 时,当压实度分别为 90% 和 96% 条件下 EG70R 土工格栅在粘性土中的摩擦实验结果。由图可见,填料压实度对筋土界面强度有一定影响。筋土界面摩擦角随

图 7 剪切面上有横肋时,土工格栅与粘性土拉拔摩擦试验 L - τ_p 结果图 9 剪切面上无横肋时,土工格栅与粘性土拉拔摩擦试验 τ_p - L 结果

填料压实度的增加而增大,而界面似黏聚力随填料压实度的增加而减小,且直剪试验结果的变化趋势比拉拔试验结果要明显一些。在摩擦试验过程中,土体在较为疏松的情况下,由于土工格栅表面比较光滑,土工格栅与填土之间的摩擦角较小,欠密实的土体对土工格栅的嵌固作用比较弱。随着填土压实度的提高,界面摩擦角逐渐增加。同时,当填料压实度较大时,界面剪应力达到峰值时的剪切位移要大于压实度小的的情况。

图10 不同压实度时筋土界面摩擦试验结果

图11 不同压实度条件下拉拔试验的 τ_p - L 曲线

4 结语

土工格栅与填土的界面摩擦强度指标是加筋土结构设计中的重要参数。基于室内筋土摩擦特性试验研究,得出如下结论:

(1) 土工格栅与砂砾料接触面抗剪强度较高,在砂砾料级配不均匀的情况下,拉拔强度曲线会出现台阶现象。当施加的法向压力较大时,土工格栅会被拉断。因此,对于加筋土结构中拉拔力较大的土工格栅,应选择砂砾料为填料。

(2) 随着剪切速率的增加,土工格栅与土体直剪摩擦试验确定的界面摩擦角和似黏聚力都增大,而拉拔摩擦试验测得的界面似黏聚力增大、摩擦角却减小。随着剪切速率的变化,直剪摩擦试验界面强度指标变化趋势比拉拔试验的变化趋势更明显,亦即剪切速率变化对直剪摩擦试验的影响比拉拔试验要大。

(3) 随着法向应力的增加,剪应力峰值及其对应的位移均增大,且拉拔速率越大,界面剪应力峰值及其对应的剪切位移越小。

(4) 在相同的剪切速率条件下,剪切面内有横肋时土工格栅与粘性土之间的界面摩擦角大于剪切面上无横肋时的情况,并且直剪摩擦试验结果较拉拔试验更加明显。在相同的拉拔速率条件下,剪切面上有横肋时,界面剪应力达到峰值时的位移要大于无横肋时的情况。

(5) 土工格栅与土体界面强度摩擦角随填料压实度的增加而增大,而界面似黏聚力随填料压实度的增加而减小。直剪试验结果的变化趋势比拉拔试验结果要明显一些,而且填料压实度越大,界面剪应力达到峰值时的位移越大。

参 考 文 献

- [1] 杨广庆. 土工格栅加筋土挡墙水平变形研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2005.
- [2] 杨广庆. 土工格栅加筋土结构理论及工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [3] 杨广庆. 塑料土工格栅拉伸特性试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(8): 2387-2391.
- [4] 杨广庆, 杨春玲. 土工格栅拉拔试验影响因素分析[J]. 地下空间, 2004, 24(1): 31-32.
- [5] 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, 27(8): 948-952.
- [6] 汤飞, 杨广庆, 李广信. 土工格栅拉拔与直剪试验研究[C]//全国第六届土工合成材料学术会议. 香港: 现代知识出版社, 2004: 227-232.
- [7] 汤飞, 李广信, 金炎, 等. 单向塑料土工格栅与土界面作用特性的试验研究[J]. 水力发电学报, 2006, 25(6): 89-93.
- [8] 徐林荣, 凌建明, 刘宝琛. 土工格栅与膨胀土界面摩擦阻力系数试验研究[J]. 同济大学学报, 2004, 32(2): 172-176.
- [9] 尹光志, 张东明, 魏作安, 等. 土工合成材料与细粒尾矿界面作用特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(3): 426-429.
- [10] 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): 67-72.
- [11] 魏红卫, 喻则红, 邹银生. 土工合成材料加筋土抗剪作用的试验研究[J]. 水利学报, 2005, 36(5): 555-562.
- [12] Yang Guangqing. Behaviour of geogrid reinforced soil retaining wall with concrete-rigid facing[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2009, 27(5): 350-356.
- [13] Yang Guangqing. Field Behavior of a Geogrid Reinforced Soil Retaining Wall with a Wrap-Around Facing[J]. Geotechnical Testing Journal, 2010, 33(1): 96-101.
- [14] 杨广庆. 土工格栅加筋土挡墙试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(1): 206-210.
- [15] 杨广庆. 返包式土工格栅加筋土高挡墙现场试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(3): 517-522.
- [16] 杨广庆. 整体面板式土工格栅加筋土挡墙现场试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(10): 2077-2083.

Experimental Research on Interface Friction Characteristics of Geogrids and Soil

Yang Guangqing^{1,2}, Sui Chuanyi³

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. Key Laboratory of Traffic Safety and Control of Hebei, Shijiazhuang 050043, China;

3. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610032, China;)

Abstract: Indexes of interface friction between geogrids and soil are key in design of geosynthetic reinforced soil structure. The analysis of geogrids-soil interface friction in the direct shear friction tests and pullout friction tests have been carried out. The direct shear and pullout friction tests are done of geogrids in clay and coarse gravel in laboratory. The results show that the shear strength of the interface between geogrids and the coarse gravel is high, but the shear strength of the interface between geogrids and the clay is low. The shear strain rate has different effects on the interface friction characteristics of geogrids and soil in the two friction tests. As normal stress is increased, shear stress peak strength and its shear displacements are increased. The horizontal ribs contribute greatly to the interface characteristic of reinforcement soil is important. With the increased degree of compaction of fill, the interface strength increases and the reinforcement effect is more distinct.

Key words: geogrids; interface characteristics; pullout test; direct shear test