

文章编号: 1000-7598 (2009) 04-0965-06

土工格栅与土界面作用特性试验研究

刘文白¹, 周 健²

(1. 上海海事大学 海洋环境与工程学院, 上海 200135; 2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘 要: 土工格栅与土的界面摩擦特性指标是加筋土工程设计的关键。通过分析土工格栅与土的界面摩擦作用和进行了直剪摩擦试验和拉拔摩擦试验, 测试了两种试验条件的界面摩擦特性。在两种试验条件下, 土工格栅加筋土复合体的抗剪强度均有界面摩擦角 φ_{sq} 和界面凝聚力 c_{sq} , 且土工格栅与土相对位移量的不同, 其复合体的强度机理有区别。在拉拔摩擦试验中, 剪应力峰值强度对应的剪切变形值高于直剪摩擦试验中剪应力峰值强度的剪切变形值 5~10 倍以上。两种试验均有其适用性, 而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; 土与土工格栅相对位移较大时土与格栅双面均发生相对位移, 拉拔摩擦试验更为合适。随法向应力的增大, 直剪摩擦和拉拔摩擦试验的剪应力峰值以及剪应力峰值对应的位移均提高。直剪摩擦的剪切速度小, 剪应力峰值强度高, 且达到峰值强度的剪切位移大; 增加剪切速度, 剪应力峰值强度降低, 且对应的位移也减少, 其原因是界面上的孔隙水压力消散和筋材的应力松弛。应根据具体工程的需要选择直剪摩擦试验和拉拔摩擦试验确定设计参数。

关 键 词: 土工格栅; 土; 界面摩擦; 拉拔摩擦试验; 直剪摩擦试验

中图分类号: TU 411; TU 472

文献标识码: A

Experimental research on interface friction of geogrids and soil

LIU Wen-bai¹, ZHOU Jian²

(1. Department of Ocean Environment & Engoneering Traffic, Shanghai Maritime University, Shanghai 200135, China;

2. Department of Geotechnical Engineering of Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Indexes of interface friction between geogrids and soil are key of design of geosynthetic reinforced soil. The analysis of soil-geogrids interface friction and the direct shear friction tests and pullout friction tests have been carries out for interface friction characteristic of two tests. In the direct shear friction tests and pullout friction tests, shear strength tested interface angle of friction φ_{sq} and interface cohesion c_{sq} on composite soil of geogrids reinforced soil; the relative displacements of geogrids and soil are not same, their strength mechanism are distinguishable. Direct shear friction test and pullout friction test are to be each applications; shear displacements of shear stress peak value on pullout friction tests are about five to ten times greater than the shear displacements of shear stress peak value on direct friction tests. The relative displacements of geogrids and soil are little, direct shear friction test can be applied; and the relative displacements are large, pullout friction test can be applied. Normal stress is increase, shear stress pear strength and its shear displacements of direct shear friction tests and pullout friction tests are increase. Shear strain rate is little, shear stress peak value is large, and its shear displacement is large too; shear strain rate is increase, shear stress peak value and its shear displacement is lower, the reasons are dissipation of pore water pressure of soil-geogrids interface and stress relaxation of geogrids. To each projection, there are correct choose direct shear friction test and pullout friction test to determine design parameters.

Key words: geogrids; soil; interface friction; direct shear friction test; pullout friction test

1 引 言

在土工格栅加筋的堤坝、挡墙和护岸工程以及加筋垫层工程中, 土工格栅与土的界面摩擦特性指标是工程设计的关键, 其界面摩擦特性直接影响工

程的安全与稳定性, 可以通过直剪摩擦试验和拉拔摩擦试验研究土工格栅与土的界面摩擦特性。有研究提出, 土工格栅与膨胀土界面摩擦阻力系数的影响因素的影响程度, 从大到小次序为: 上覆压力、含水率、土工格栅尺寸和拉拔速度^[1]。砂砾料与土

收稿日期: 2007-04-24

基金项目: 上海市教育委员会科研项目资助 (No. 07ZZ99); 浙江省科技计划面上项目 (No. 2008C23023)。

第一作者简介: 刘文白, 男, 1955 年生, 博士, 教授, 主要从事地基基础和港口工程方面的研究。E-mail: liuw8848@163.com

工格栅接触面强度较高,黏土与土工格栅接触面强度很低,仅用直剪试验确定接触面的强度并不合理^[2]。土工格栅与填料界面的抗剪强度高,确定土工格栅界面摩擦特性参数要进行拉拔摩擦试验^[3]。基于极限平衡分析地基极限承载力,比较了两种土工格栅加固路基的设计方法^[4],通过原型试验,对土工合成材料加筋挡土墙进行研究^[5]。文献[6-9]对土工格栅的拉拔阻力及其影响的研究以及土工合成材料的相关特性研究。前述这些研究成果,对加筋土和加筋技术的研究起着很好的推动作用。

土工格栅的加筋作用是通过筋材与土的摩擦作用,限制土体的侧向变形,均化应力分布,减少不均匀沉降,增强土体的整体性和提高土体的抗剪强度。实际工程中,当土工格栅与填料的相对位移较小时,筋材约束增大了侧向压力,提高了土体的抗剪强度,土工格栅与填料的相互作用可以将视加筋土为复合材料,而筋材变形较大,加筋作用提高了土的抗压强度和抗剪强度^[10]。据此,筋土之间的相对位移会影响加筋土的力学特性。本文在分析土工格栅界面的受力和摩擦特性的基础上,通过直剪摩擦试验和拉拔摩擦试验研究了不同填料、不同剪切速率的土工格栅界面摩擦特性,分析了直剪摩擦试验和拉拔摩擦试验两种试验成果。

2 土工格栅筋材界面摩擦作用分析

土工格栅加筋土是一种复合材料,即在散粒状介质中加入若干层强度高、韧性大的连续网片状介质形成的筋土复合材料。土与土工格栅沿界面的相互摩擦、土工格栅材料从土中拔出引起筋土复合材料性能的增强。

土工格栅界面摩擦特性的影响因素有土工格栅的网格尺寸、格栅厚度、刚度、变形特性、单位面积质量、经向和纬向的抗拉强度与伸长率,有填料的级配、最大粒径、抗剪强度、密实度和上覆压力。在土工格栅与土的直剪摩擦试验和拉拔摩擦试验中,由于试验的方式不同以及上述的影响因素,筋材与土的摩擦和受力形式不同,所表现的筋土摩擦特性也不同。

图1和图2分别反映了在直剪摩擦试验和拉拔摩擦试验中土工格栅与土的相互作用。在土工格栅的筋材的不同侧表面分别和有法向应力 σ_x 、 σ_y 、 σ_z 剪应力 τ_{xy} 、 τ_{xz} 、 τ_{yx} 作用,二者区别在于,直剪摩擦试验中土工格栅处于相对静止状态,土体位移,格栅被动摩擦,土工格栅与土体是单面摩擦,剪应力 τ_{xy} 位于土体产生位移的作用面。在拉拔摩

擦试验中土工格栅受拉拔力作用主动拔出,土工格栅与土体是双面摩擦,剪应力 τ_{xy} 位于土工格栅的上、下表面,法向应力 σ_z 按试验中施加的垂直荷载计算。法向应力 σ_y 与 σ_z 相关,在实验条件下可以按侧限条件计算;法向应力 σ_x 方向同剪切位移方向,其值与土的初始状态和 σ_z 相关,土的初始密实度和应力 σ_z 越大,则 σ_x 越大。剪应力 τ_{xz} 与法向应力 σ_z 相关,剪应力 τ_{xy} 与法向应力 σ_y 相关,应力 σ_z 和 σ_y 越大,则 τ_{xz} 和 τ_{xy} 越大。

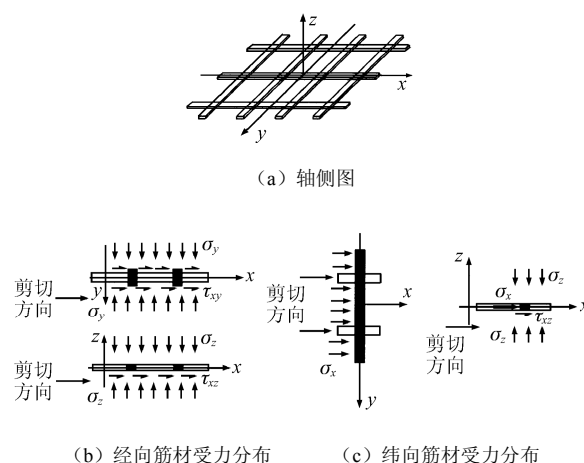


图1 直剪试验中土工格栅的经向与纬向筋材受力
Fig.1 Interaction between soil and warp and weft geogrids on direct shear friction tests

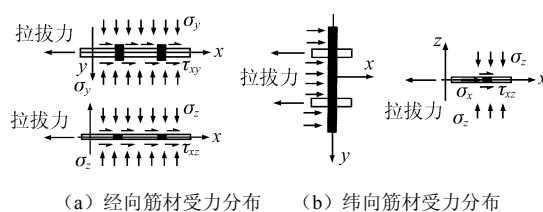


图2 拉拔试验中土工格栅的经向与纬向筋材受力
Fig.2 Interaction between soil and warp and weft geogrids on pullout friction tests

3 试验基础资料

试验用砂土和粉质黏土取自于上海青浦,含水率 $w=4.5\%$,孔隙比 $e=0.47$,中砂密度控制在 $\rho=1.84\text{ g/cm}^3$ 。用分土器分4层分别放置砂土于剪切盒并用相同的荷载振平以控制密度。粉质黏土含水率 $w=39\%$,密度 $\rho=1.83\text{ g/cm}^3$,液限为 $w_L=40\%$,塑限 $w_p=25\%$,塑性指数 $I_p=15$,塑性指数 $I_L=0.77$ 。细砂为库布齐沙地土样,重度为 14.8 kN/m^3 ,含水率 $w=4.15\%$,孔隙比 $e=0.89$,压缩系数 $a_{1-2}=1.06\text{ MPa}^{-1}$,黏聚力 $c_{cq}=0$,内摩擦角 $\varphi_{cq}=29.0^\circ$ 。试验用

土工格栅的主要性能指标见表 1。

土工格栅与土的摩擦试验主要有：不同垂直荷载下的土工格栅与中砂、粉质黏土、细砂的拉拔摩擦试验；不同垂直荷载下的土工格栅与中砂、粉质黏土、细砂的直剪摩擦试验；不同剪切速度下土工格栅与中砂的直剪摩擦试验，界面摩擦特性结果见表 2。

表 1 试验用土工格栅材料技术规格
Table 1 Main indexes of the geogrids in test

型号	抗拉强度/(kN/m)		伸长率/%		应变 15 % 时 抗拉强度/(kN/m)	
	经向	纬向	经向	纬向	经向	纬向
TGS303	60	57.6	16.5	16.6	52.4	50.4

型号	网格尺寸 (mm×mm)	材料	卷长 /m	幅宽 /m	单位面积质量 (g/m ²)
TGS303	25×25	高强涤纶丝	100	2.15	900

表 2 界面摩擦特性试验一览表
Table 2 Data on direct shear friction tests and pullout
friction tests

填料	直剪摩擦试验					拉拔摩擦试验				
	剪切速率 /(mm/min)	法向应力 /kPa				剪切速率 /(mm/min)	法向应力 /kPa			
粉质黏土	2.67	100	200	300	400	0.33	100	150	200	
中砂	0.33	100	200	300	400	0.33	100	200	300	400
中砂	1.33	200								
中砂	4.33	200								
中砂	8.33	200								
细砂	1.0	100	200	300	400		20	30	40	50

试验采用某土壤仪器厂生产的土工合成材料综合试验仪器，用于土工合成材料的力学特性试验和土与土工织物相互作用特性试验。试验装置包含了一系列组件，本文进行了中砂和粉质黏土直剪摩擦和拉拔摩擦试验。图 3 为中砂和粉质黏土的直剪摩擦和拉拔摩擦试验装置示意图。

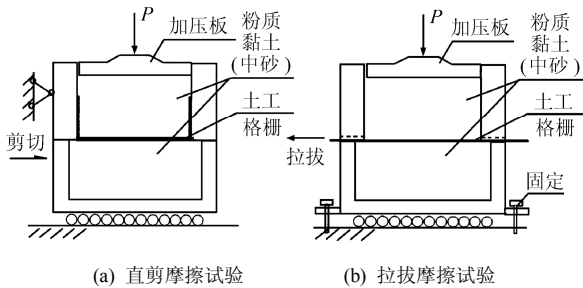


图 3 粉质黏土、中砂的直剪摩擦试验和拉拔摩擦试验
Fig.3 Silty clay and medium sand on direct shear friction
test and pullout friction test

中砂和粉质黏土的拉拔摩擦试验中土工格栅尺寸为 75 mm×200 mm，剪切盒中有效面积为 75 mm×100 mm。直剪摩擦实验中土工格栅在剪切盒中的有效面积为 100 mm×100 mm。

图 4 为细砂的直剪摩擦和拉拔摩擦试验示意图。直剪摩擦试验是在直剪仪的上、下剪切盒内填入细砂，剪切盒内土样的直径为 62 mm、高 20 mm，将土工格栅固定在上盒的底面进行直剪试验，根据各级法向应力作用下对应的抗剪强度值确定加筋土的界面摩擦角 φ_{sq} 和界面凝聚力 c_{sq} 。拉拔摩擦试验在拉拔试验箱内进行，试验箱尺寸为 500 mm×500 mm×600 mm，在模型箱侧板开洞口宽 100 mm，高 4.0 mm，洞口距箱底 200 mm，土工格栅平铺埋入试验箱内土中的面积为 100 mm×100 mm，土工格栅距土表面 100 mm。试验箱内，土工格栅的上、下填细砂，细砂表面加压垂直荷载，对土工格栅施加水平拉拔力，测试土工格栅在各级法向应力作用下拉拔力与拉拔位移的关系。 c_{cq} 和 φ_{cq} 值的确定方法同直剪摩擦试验。

实际工程中土工格栅埋于土中，无论土工格栅如何位移，土体在格栅的网孔处是相互连接的，所以直剪摩擦试验的上、下盒填筑土料是符合实际工况的。一些直剪摩擦试验成果，在下盒垫木块（或铁块）^[10]，使试验结果不符合实际工况。为防止土工格栅受法向应力后产生向下弯曲，影响土工格栅与土的摩擦效应，在下盒填料后施加垂直荷载进行预压，预压荷载值应与试验垂直荷载相同。

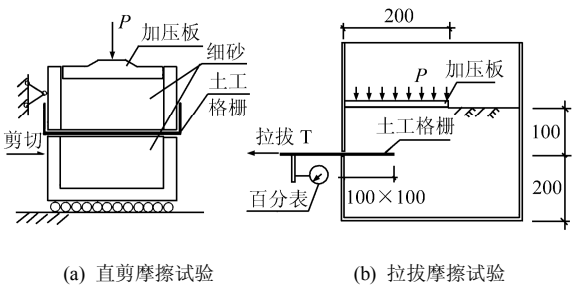


图 4 细砂的直剪摩擦试验和拉拔摩擦试验（单位：mm）
Fig.4 Fine sand on direct shear friction test and pullout
friction test (unit: mm)

4 土工格栅的直剪摩擦试验

试验中，通过控制作用于加筋土的垂直有效应力，测定剪切力随剪切位移的变化，反映土与土工

格栅在界面的相互作用, 剪切速度为 0.33 mm/min。中砂与土工格栅的直剪摩擦试验中, 进行了 3 种剪切速度的测试, 分析不同剪切速度对试验结果的影响。土工格栅与粉质黏土的直剪摩擦试验剪切速度为 2.67 mm/min。

图 5 分别为中砂、粉质黏土和细砂的直剪摩擦试验结果。试验结果表明, ①直剪摩擦试验的剪应力与剪切位移曲线呈现非线性关系, 随着法向应力 σ 的增加, 剪应力峰值及对应的位移均随着增大。从土类上分析, 中砂在法向应力 $\sigma=400$ kPa 时的剪应力峰值 $\sigma=100$ kPa 的剪应力峰值的 3.75 倍, $\sigma=400$ kPa 时剪应力峰值的相应位移为 4.4 mm; 粉质黏土在 $\sigma=400$ kPa 时的剪应力峰值为 $\sigma=100$ kPa 时的剪应力峰值的 4.9 倍, $\sigma=400$ kPa 时剪应力峰值的相应位移为 9.0 mm; 细砂在法向应力 $\sigma=400$ kPa 时的剪应力峰值 $\sigma=100$ kPa 的剪应力峰值的 1.93 倍, $\sigma=400$ kPa 时剪应力峰值的相应位移为 1.5 mm。②中砂与土工格栅的界面摩擦发展较快, 达到峰值剪应力的相应位移较小, 而且出现峰值后曲线有下降段表现出应变软化特征; 粉质黏土与土工格栅的界面摩擦发展较慢, 达到峰值剪应力的相应位移较大, 而且出现峰值后曲线为平缓段表现出应变硬化特征; 中砂与粉质黏土在法向应力 $\sigma=400$ kPa 时剪应力峰值的比值(355/270)为 1.31, 相应剪应力峰值的位移比值为(4.4/9.0) 0.49; 中砂与粉质黏土在 $\sigma=100$ kPa 时的剪应力峰值的比值为(92/55) 1.67, 相应剪应力峰值的位移比值(3.0/8.0) 为 0.375; 相同法向应力下作用下中砂比粉质黏土和细砂表现出更大的抗剪能力。③直剪摩擦试验, 土工格栅与中砂的 f_{sq} 最大, 与粉质黏土的 f_{sq} 次之, 与细砂的 f_{sq} 最小。 f_{cq} 为土工格栅与填料的界面摩擦系数, $f_{sq} = \tan \varphi_{sq}$, 见表 3。

图 6 为直剪摩擦试验在法向应力 $\sigma=200$ kPa 时不同剪切速度下中砂与土工格栅的剪切特征。剪应力峰值随着剪切速度的增加而明显下降, 剪切速度等于 1.33 mm/min 时的剪切强度峰值为剪切速度等于 8.33 mm/min 时的剪切强度峰值(2.25/0.32)的 7.03 倍; 在较小剪切速度下达到峰值的剪切位移较大, 在剪切速度等于 1.33 mm/min 时的剪切强度峰值对应的位移为剪切速度等于 8.33 mm/min 时(3.1/1.5) 的 2.07 倍。由此分析剪切速度对界面摩擦的影响原因是由于不同的剪切速度致使筋土界面的孔隙水压力消散不同和筋材的应力松弛程度不同。

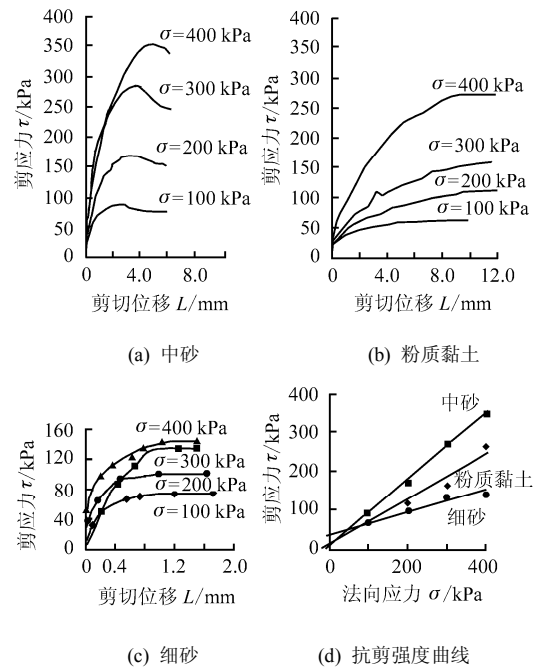


图 5 直剪摩擦试验剪应力与剪切位移关系和抗剪强度曲线
Fig.5 Shear stress-shear displacement and shear strength curves on direct shear friction tests

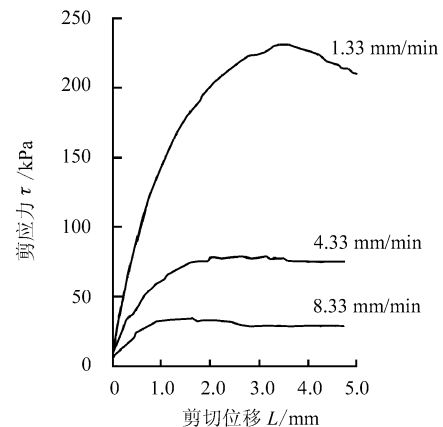


图 6 不同剪切速率的中砂和土工格栅直剪摩擦试验结果
Fig.6 Direct shear friction tests of medium sand and geogrids on different shear rate

5 土工格栅的拉拔摩擦试验

中砂、粉质黏土和细砂的拉拔摩擦试验结果见图 7。由图可见, ①拉拔试验的拉拔应力与拉拔位移曲线表现出明显的非线性关系, 随着法向应力的增大, 拉拔应力的峰值及其峰值应力对应的位移均随着增大, 这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, 垂直荷载越大, 拉拔力达到峰值时的过程越长, 需要发生的位移量也越大。②在相同法向应力下中砂的峰值拉拔应力比粉质黏土的峰值应力大, 对应的各剪切变形

值都在 10 mm 数量级。③拉拔摩擦试验中, 土工格栅与粉质黏土、中砂的界面摩擦系数 f_{sq} 较大, 与细砂的 f_{sq} 次之。见表 3。粉质黏土和中砂的拉拔试验中, 土工格栅与土的接触面积在拉拔过程中是等面积的; 在细砂的拉拔试验中, 土工格栅与土的接触面积在拉拔过程中是有所减少。为此, 将细砂拉拔试验中土工格栅的试样面积适当加大(100 mm×100 mm), 以消弱边界条件不同对试验成果对比的影响。

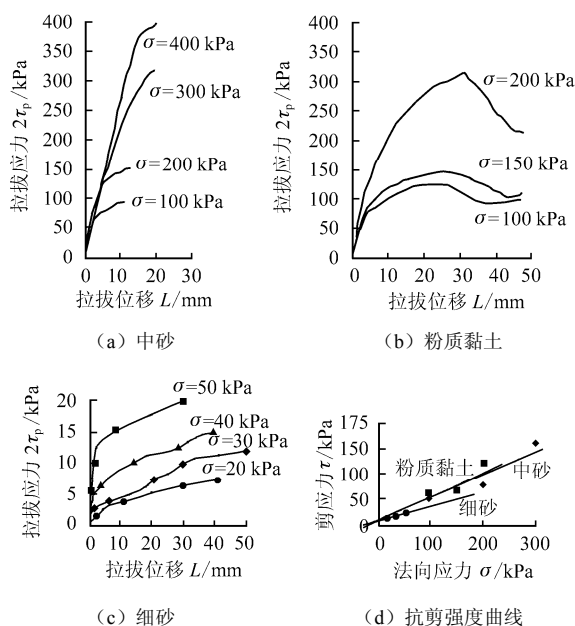


图7 拉拔摩擦试验的剪应力与剪切位移关系和抗剪强度曲线

Fig. 7 Shear stress-shear displacement and shear strength curves on pullout friction tests

表3 直剪摩擦试验和拉拔摩擦试验成果汇总表
Table 3 Summary on results of direct shear friction tests and pullout friction tests

序号	填料	直剪摩擦试验		
		界面凝聚力 c_{sq}/kPa	界面摩擦角 $\varphi_{sq}/(^{\circ})$	界面摩擦系数 f_{sq}
1	粉质黏土	14.9	31.0	0.60
2	中砂	11.7	41.0	0.87
6	细砂	38.3	17.0	0.31
7	粉质黏土	8.9	26.0	0.49
8	中砂	12.0	24.0	0.45
9	细砂	8.3	16.0	0.29

在直剪摩擦试验和拉拔摩擦试验条件下的界面摩擦响应是不同的。从各级法向应力作用下剪应力与剪切位移的关系曲线分析, 直剪摩擦试验中对应于各剪切峰值强度的剪切位移为 1~10 mm 量级, 而拉拔摩擦试验中对应于各剪切峰值强度的剪切位移值为 10~50 mm 量级以上, 直剪摩擦试验与拉拔

摩擦试验中各剪切峰值强度对应的剪切位移值相差 10 倍以上。这反映了直剪摩擦试验与拉拔摩擦试验两种试验的试验方法不同, 使得强度发挥和影响因素不同, 主要原因是填料与土工格栅之间的相对位移情况。一种是筋材与土的界面摩擦, 剪切位移较小, 比较接近于直剪摩擦。另一种是筋材从土中被拔出, 筋材与土产生较大的相对位移, 类似于拉拔摩擦试验的结果。直剪摩擦试验和拉拔摩擦试验均有其适用性。土与土工格栅的相对位移较小, 直剪试验较能反映实际; 格栅的双面均发生相对位移且位移较大, 则拉拔试验更为合适。

从拉拔和直剪两种摩擦试验结果可以分析得出, 土工格栅加筋材料与砂土和粉质黏土的界面抗剪强度都反映出筋土复合材料具有类似黏性土凝聚力的 c_{sq} 值和反映摩擦性状的 φ_{sq} 值。在土中加筋后, 改善了土的物理力学性能。由于在散粒状土中加入连续的网格状介质, 两种介质的界面产生摩擦, 使土中应力通过土工格栅的界面摩擦而产生扩散; 土工格栅与土的界面摩擦力限制了土体的侧向位移, 增加了复合土体的变形模量; 土工格栅所受拉应力通过界面摩擦力传递到土中, 使应力扩散。当地基中基础受到下压、水平和上拔荷载作用时, 地基土中埋设的土工格栅可以将荷载产生的土中应力传递并扩散, 提高了承载能力和抗变形能力; 土工格栅的存在, 使筋土复合体的宏观剪切机理不再是土体沿某一滑动面剪切破坏, 而是土中剪应力作用下土工格栅与土界面的摩擦拉拔作用与土体的抗剪能力之和; 土工格栅的网眼, 可使土工格栅上下部位的土直接接触, 在土工格栅的经纬编织纤维处, 土被格栅的纤维隔离, 纤维起到加筋增强作用, 而土工格栅的网孔处, 格栅上下部的土颗粒相互接触, 起到咬合作用, 使加筋土复合材料的材料性能在筋土界面有一逐渐的变化; 而不是像土工布将土隔离使复合材料的材料性能在此处是一突变, 土工格栅可以使复合材料的均匀性增强。

6 结 语

通过土工格栅与土的直剪摩擦试验和拉拔摩擦试验, 测试了两种试验条件下界面摩擦特性。两种试验条件下, 筋土复合材料的抗剪强度均有界面摩擦角 φ_{sq} 和界面凝聚力 c_{sq} 。

筋土复合体中土工格栅的经向和纬向筋材的各侧表面分别作用有法向应力 (σ_x , σ_y , σ_z) 和剪应力 (τ_{xy} , τ_{xz} , τ_{yx}), 格栅与土的相对位移不同, 其复合体的强度机制有区别。

土工格栅与土的直剪摩擦试验和拉拔摩擦试验结果受土质条件、拉拔和直剪的界面摩擦条件、剪切速率等因素的影响大。一种是筋材与土的界面摩擦, 剪切位移较小, 比较接近于直剪摩擦。另一种是筋材从土中被拔出, 筋材与土产生较大的相对位移, 类似于拉拔摩擦试验的结果。

在直剪摩擦试验和拉拔摩擦试验条件下的摩擦反响是不同的, 直剪试验中对应于各剪应力峰值强度的剪切变形值为 1~10 mm 量级, 而拉拔试验中对应于各剪应力峰值强度的剪切变形值为 10~50 mm 量级以上, 直剪试验与拉拔试验中各剪应力峰值强度对应的剪切变形值相差 10 倍以上。

直剪摩擦试验和拉拔摩擦试验均有其适用性。土与土工格栅的相对位移较小, 直剪摩擦试验较能反映实际。当土与土工格栅相对位移较大且格栅双面均发生相对位移, 拉拔摩擦试验更为合适。

随法向应力的增大, 直剪摩擦试验和拉拔摩擦试验的剪应力峰值以及剪应力峰值对应的位移均提高。在工程实践中, 在土工格栅上部保持一定的填土厚度, 对提高土工格栅加筋土的承载能力和抗变形能力是有效的。

剪切速度对土工格栅直剪摩擦特性的影响, 剪切速度小, 剪应力峰值强度高, 且达到峰值强度的剪切位移大; 增加剪切速度, 使剪应力峰值强度减小, 达到峰值强度对应的位移也减少。分析剪切速度对测试成果影响的主要原因, 是界面上的孔隙水压力消散和筋材的应力松弛。

对不同的工程和工程的不同部位, 要根据土工格栅的位移条件, 确定采用直剪摩擦试验或拉拔摩擦试验测定设计参数, 这关系到筋土复合体的承载力、抗变形能力和整体稳定性, 以及工程造价。

参考文献

- [1] 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.
- XU Lin-rong, LING Jian-ming, LIU Bao-chen. Experiment on interface friction coefficient parameters between geogrids and expansive soil[J]. *Journal of Tongji University*, 2004, 32(2): 172—176.
- [2] 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.
- YANG Guang-qing, LI Guang-xin, ZHANG Bao-jian. Experimental studies on interface characteristics of geogrids[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(8): 948—952.
- [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—299.
- SHI You-zhi, MA Shi-dong. Test for interface characteristics of geogrid[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, 24(2): 296—299.
- [4] KEVIN Lyons C, JONATHAN Fannin. A comparison of two design methods for unpaved roads reinforced with geogrids[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2006, 43(12): 1389—1394.
- [5] RICHARD J bathurst, NICHOLAS Vlachopoulos, DAVE L, WALTERS, PETER G Burgess, TONY M Allen. The influence of facing stiffness on the performance of two geosynthetic reinforced soil retaining walls[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2006, 43(12): 1225—1237.
- [6] FANNIN R J, RAJU D M. On the resistance of geosynthetics[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1993, 30: 409—417.
- [7] 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.
- YANG Guang-qing, YANG Chun-ling. Analysis of factors influencing the pull-out test of geo-grid[J]. *Underground Space*, 2004, 24(1): 31—32.
- [8] JAE-Myung Lee, CHARLES D Shackelford, CRAIG H Benson, HO-Young Jo, TUNCER B Edil. Correlating index properties and hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners[J]. *Journal Geotechnical and Geoenvironment Engineering*, 2005, 131(11): 1319—1329.
- [9] SIDNEI H C Teixeira, BENEDITO S Bueno, JORGE G Zornberg. Pullout resistance of individual longitudinal and transverse geogrid ribs[J]. *Journal Geotechnical and Geoenvironment Engineering*, 2007, 133(1): 37—50.
- [10] 《土工合成材料工程应用手册》编写委员会. 土工合成材料工程应用手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994: 48—50, 88—92.