

堆石料与土工格栅间拉拔特性试验研究

董博文¹, 邹德高^{1,2}, 周晨光^{1,2}, 刘京茂^{1,2}, 周 扬^{1,2}

(1. 大连理工大学 建设工程学部, 辽宁 大连 116024;

2. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘 要: 针对目前土石坝工程中最常采用的双向塑料焊接土工格栅和双向涤纶经编土工格栅, 采用大型拉拔试验设备完成了两种格栅在堆石料中的拉拔试验, 以研究其与堆石料的相互作用机制及加筋效果。试验结果表明: 拉拔位移较大时, 塑料焊接格栅的格栅节点达到极限强度而发生剥离破坏, 造成拉拔力的阶梯式衰减, 节点强度是控制界面强度的重要因素且法向作用的荷载大小对节点强度的影响不大; 而涤纶经编格栅拉拔力“硬化”现象明显, 试验初段, 由于格栅材质柔度较大, 横肋阻力作用不明显, 抗拉拔力由纵肋摩擦力和节点端承阻力提供, 经过较大的拉拔位移后, 格栅节点并未发生剥离破坏。

关键词: 堆石料; 土工格栅; 拉拔试验; 节点强度; 节点端承阻力

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2016)04-0050-05

Experiments on Pullout Behavior of Geogrid Under Rockfill Materials

DONG Bowen¹, ZOU Degao^{1,2}, ZHOU Chenguang^{1,2}, LIU Jingmao^{1,2}, ZHOU Yang^{1,2}

(1. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China;

2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract: Geogrids are increasingly applied in seismic strengthening of earth-rockfill dam slopes, which mainly include biaxial plastics welded geogrids and biaxial polyester warp-knitted geogrids. To better understand the mechanism and effect of these two types of geogrids, the pullout tests were conducted using these two types of geogrid specimens and large-scale pullout devices. By analyzing experimental data, some conclusions were drawn that the debonding between longitudinal and transversal ribs in plastics-welded geogrid nodes cause the stepped decay of pullout force at large pullout displacement, so the junction strength of welded geogrid is the controlling index to the effect of welded geogrids reinforcement. Based on the pullout test data of polyester warp-knitted geogrids, the ‘hardening’ of pullout force is obvious, the pullout force is composed of friction resistance of longitudinal geogrid ribs and transverse geogrid ribs, resistance of transverse geogrid ribs and the junctions. The resistance of transverse geogrid ribs doesn’t work at the beginning of test due to its great flexibility.

Keywords: rockfill materials; geogrid; pullout test; junction strength of geogrids; resistance of junction

土工格栅作为一种强度较高、柔性较好的加筋材料, 起初主要用于挡土墙、地基以及路基^[1-2]的加固。近些年, 土工格栅越来越多地被应用于土石坝坝坡的加固。但已有的试验研究大多集中于土工格栅与砂土和黏土的相互作用机理方面。如 Moracia 等^[3]提出了土工格栅在砂土中拉拔阻力的传递模型, 杨广庆等^[4]通过对比土工格栅在砂土和黏土中的拉拔试验结果, 得出针对加筋挡土墙有益的设计

建议。与砂土和黏土相比, 筑坝堆石料的颗粒尺寸较大, 颗粒棱角较多, 力学特性有明显的差异, 所以进一步研究土工格栅在堆石料中的加筋机理, 开展相应的拉拔试验很有必要。张嘎等^[5]进行了粗粒土与土工布的直剪试验以及拉拔试验, 王家全等^[6]进行了粗粒料与土工格栅间的直剪试验。但关于堆石料与土工格栅的拉拔试验研究资料还较少。

国内青峰岭、冶勒、狮子坪、两河口等已建和在

建大坝^[7-10]均采用了土工格栅对坝顶区进行加固,所用格栅主要为双向塑料焊接和双向涤纶经编两类。本文采用大型拉拔试验设备对这两类格栅进行了拉拔试验,并分析了两种格栅分别在堆石料中的加固效果以及抗拉拔力的传递机理。

1 试验设备

土工格栅拉拔试验使用的仪器是大连理工大学工程抗震研究所联合长春市朝阳试验仪器有限公司研制的大型静、动两用直剪仪,该设备主要由加载单元、计算机测控单元、液压伺服单元和拖动单元等组成。其主要的性能指标见表 1。

表 1 仪器主要性能指标						
最大静、动荷载 /kN		最大位移 /cm		测量精度 /%		最大加载频率 /Hz
切向	法向	切向	法向	荷载	位移	
500	500	10	15	0.5	0.1	2

在大型直剪仪的基础上,依据 ASTM(D6706 - 01)^[11]的设计要求,制作了试验所需的拉拔试验盒及夹具。其中试验盒的内部长×宽×高为:500 mm×400 mm×500 mm;在试验盒前壁距盒底高 13.5 cm 处预留一个与盒子同宽的开口,高度为 10 mm;夹具由上、下两块内表面轧有纹理的钢片和固定螺栓组成,试验时将格栅的端部放入两钢片之间,拧紧螺栓即可。其结构示意图见图 1。

2 试验材料及方案

2.1 堆石料

现场施工过程中为避免土工格栅遭到碾压破

坏,一般在铺设土工格栅之前均匀铺设一层厚为 20 mm~50 mm 的堆石保护垫层。本试验用料为两河口筑坝主堆石料,采用相似级配法对原型主堆石料缩尺至最大粒径为 40 mm,用于模拟格栅上下堆石垫层,试验的颗粒组成见表 2。试验控制干密度 $\rho_d=2.03\text{ g/cm}^3$,试验用堆石料为干样。

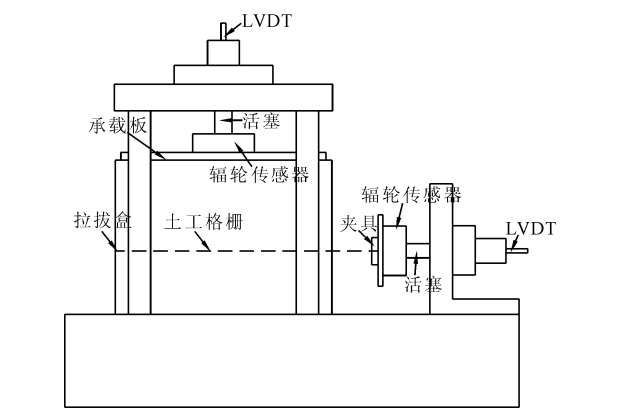


图 1 设备结构示意图

表 2 堆石料试验级配					
颗粒组成 /mm	20~40	10~20	5~10	2~5	<2
含量/%	17.5	26.5	15	15	26

2.2 土工格栅

本次试验采用的两种土工格栅,分别为重庆永固公司生产的型号为 CATTSG100-100 的聚丙烯塑料焊接双向土工格栅和山东浩珂公司生产的型号为 GSJ300X300/C 的丙烯酸涂层涤纶经编双向土工格栅。格栅具体参数见表 3。

表 3 两种双向土工格栅主要技术指标							
格栅类型	标称抗拉 /(≥kN·m ⁻¹)		2%伸长率时拉伸力 /(≥kN·m ⁻¹)		5%伸长率时拉伸力 /(≥kN·m ⁻¹)		网孔尺寸 /mm
	纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向	
塑料焊接格栅	100	100	55.0	55.0	65	65	80×80
涤纶经编格栅	321	316	23.3	23.3	82	82	35×35

2.3 拉拔试验方案及方法

装样时采用分层击实方法来达到试验所需的干密度,格栅上下的堆石回填高度为 13.5 cm。为使法向压力施加均匀,法向加载时,承载板通过作用一个橡胶垫袋将法向荷载施加于试样上。试验中对筋-土界面所施加的法向应力分别采用 100 kPa、300 kPa 和 500 kPa 三种。采用位移控制的方法^[11],拉拔试验速率均采用 ASTM(D6706 - 01)^[11]建议速率 1

mm/min,设定最大水平拉拔位移为 50 mm。试验用格栅尺寸及法向应力详见表 4。

表 4 拉拔试验方案			
格栅类型	埋置格栅尺寸 /cm	法向应力 /kPa	试验组数
双向塑料焊接格栅	37×38	100、300、500	4
双向涤纶经编格栅	21×21	100、300、500	5

3 试验结果与分析

3.1 双向塑料焊接土工格栅拉拔试验

塑料焊接格栅是采用预拉伸的聚丙烯塑料土工条带,通过超声波粘接而成,具有网格尺寸多样,格栅肋条强度大的优点。考虑到拉拔试验盒至夹具这段格栅的变形不可忽略,为消除这一影响,基于对格栅的无侧限拉伸曲线,对试验结果的拉拔位移进行修正,图 2 给出了双向塑料焊接土工格栅在不同法向荷载作用下拉拔力与拉拔位移的关系曲线。

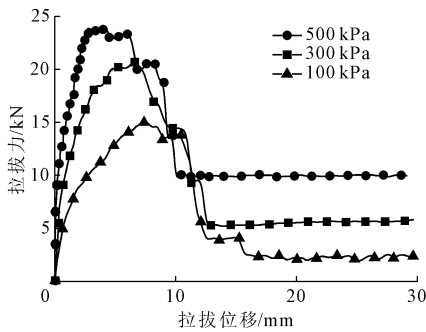


图 2 双向塑料焊接拉拔位移与拉拔力关系

由图 2 可以看出:

- (1) 试验曲线的初始切线模量最大,随着拉拔位移的增大,切线模量逐渐减小。
- (2) 拉拔力达到峰值后呈阶梯式衰减,表现出明显的“软化”特性。试验过程中拉拔力每次阶梯式衰减时,均可听到拉拔盒内格栅节点断裂声。试验后拆样发现格栅中横、纵肋的节点均已破坏,横肋脱落,试验前后的格栅见图 3。

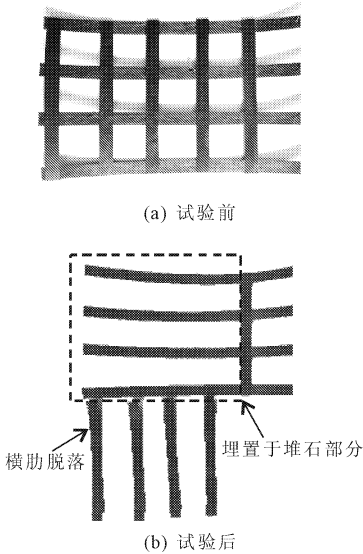


图 3 试验前后焊接格栅的对比

- (3) 试验最终的残余拉拔力趋于稳定,此时的

拉拔阻力仅由格栅纵肋的摩阻力提供。

(4) 随着法向荷载增大,峰值拉拔力及残余拉拔力均增大,拉拔力初次衰减时对应的拉拔位移越小。

对试验结果分析如下:

徐超^[12]通过焊接格栅节点的剥离强度来表征拉拔试验过程中节点强度对抗拉拔力的影响。本文通过 Wilson – Fahmy^[13]提出的拉拔阻力 F 计算公式(1)可求出格栅节点的平均强度。

$$F = F_1 + F_2 + F_3 \tag{1}$$

式中: F_1 、 F_2 分别为纵肋、横肋所提供的摩阻力, F_3 为横肋提供的端承阻力。

拉拔过程中焊接格栅横肋所受的摩阻力及端承阻力通过节点传递到纵肋,因此,当与节点相连的格栅横肋所受的摩阻力及端承阻力之和达到该节点的强度时,节点破坏。故试验格栅总的节点极限强度之和 F_4 的大小可表示为:

$$F_4 = F_2 + F_3 = F - F_1 \tag{2}$$

其中 F_1 的大小为试验曲线最终的残余拉拔力, F 为峰值拉拔力,通过式(2)可得到三种法向荷载作用下 F_4 的大小,由于埋置格栅共 16 个节点,所以平均节点强度为 $F_4/16$,结果见表 5。

表 5 格栅节点强度

法向荷载/kPa	100	300	500
节点强度/kN	0.81	0.92	0.87

由表 5 可知不同法向荷载下节点强度差别不大,依据本试验数据,法向荷载的大小对焊接格栅的节点强度影响较小。

本文依据《土工合成材料测试规程》^[14](SL235 – 2012)通过式(3)、式(4)求得筋 – 土界面拉拔摩擦系数 f (见表 6)表征不同法向荷载下的界面强度。

$$\tau_{sg} = \frac{F}{2 \times b \times l} \tag{3}$$

$$f = \frac{\tau_{sg}}{\sigma_n} \tag{4}$$

式中: τ_{sg} 为筋 – 土接触面的剪应力; b 为试验用格栅的宽度; l 为格栅在堆石料中的埋置长度; F 为试验拉拔力; σ_n 为法向应力。

依据 Jewell^[15]提出的格栅加筋机理,相同条件下横肋的极限摩阻力与极限端承阻力随着法向应力增大而增大,但是由于焊接格栅节点强度的限制,当与节点相连的格栅横肋所受的摩阻力及端承阻力之和达到该节点的强度时,节点破坏,拉拔力衰减。因

此法向荷载增大时,横肋摩阻力及端承阻力并未充分发挥作用,造成表 6 中拉拔摩擦系数(界面强度)随法向荷载增大而剧烈衰减。故焊接格栅的节点强度是影响筋-土界面强度的重要因素。

表 6 双向塑料焊接格栅拉拔试验拉拔摩擦系数

法向荷载/kPa	100	300	500
f	0.534	0.245	0.171

用图钉对焊接格栅的所有节点进行加固处理,在 100 kPa 的法向荷载下做拉拔试验,试验曲线见图 4,由图 4 可看出,节点加固后格栅的拉拔力峰值提高了约 26%,同时由于图钉的作用,节点破坏时拉拔力衰减的趋势更为缓和。

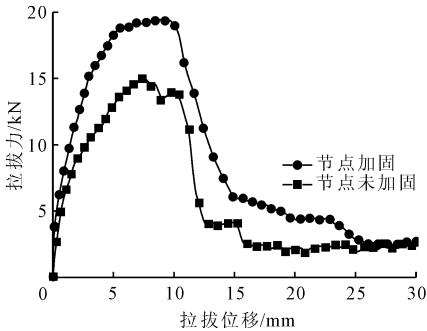


图 4 100 kPa 下格栅节点加固后试验曲线

3.2 双向涤纶经编土工格栅拉拔试验

涤纶经编格栅是复合长丝编织后涂覆涂层而成,材质柔度较大,具有抗拉强度大,节点强度高的特点,图 5 为双向涤纶经编格栅在不同法向荷载作用下滤去筋-土界面外格栅伸长量后的拉拔试验曲线。由图 5 可以看出:

(1) 随着法向荷载增大,峰值拉拔力增大;切线模量随着拉拔位移增大而逐渐减小;拉拔力出现较明显的“硬化”现象。

(2) 对比图 6 所示试验前后的格栅试样,堆石在格栅网孔所形成的嵌固作用十分明显,且经过较大拉拔位移后,格栅节点未发生剥离破坏。

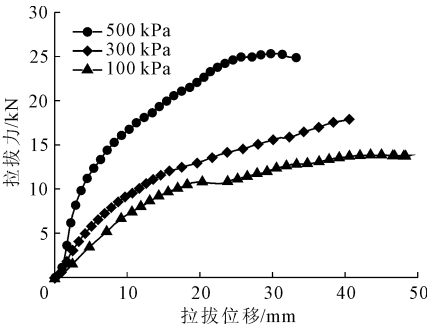


图 5 双向涤纶拉拔位移与拉拔力曲线

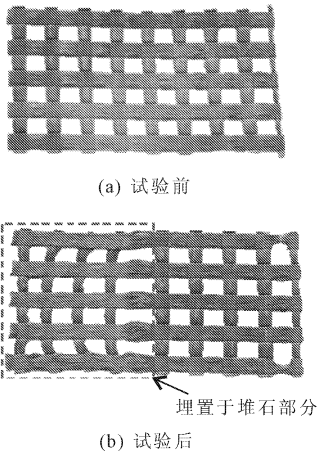


图 6 试验前后经编格栅的对比

为进一步了解涤纶经编格栅的加筋机理,剪裁格栅去除横肋得到图 7 所示保留格栅节点的 A 型格栅,以及去除格栅节点的 B 型格栅。在法向荷载 100 kPa 作用下,得到两种格栅的拉拔试验曲线,见图 8。

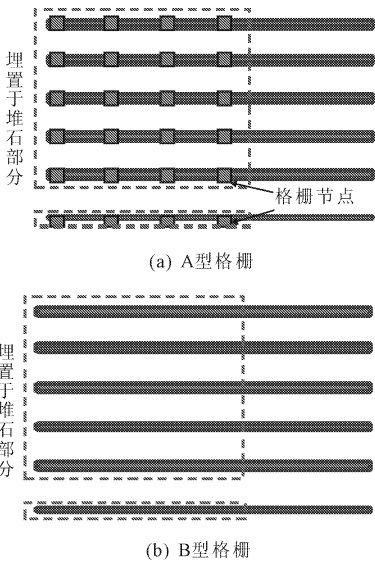


图 7 A、B 型格栅俯视图及纵面图

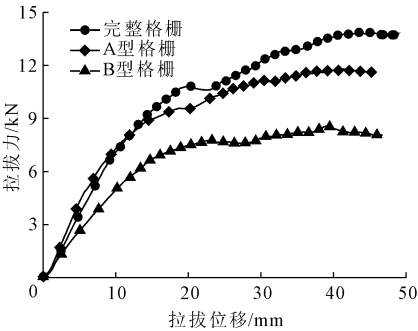


图 8 100 kPa 下 A、B 型格栅拉拔位移与拉拔力曲线

由图 8 可以看出:

(1) 拉拔初始阶段, A 型格栅与完整格栅的试验曲线几乎重合, 说明在试验初段, 抗拉阻力主要由纵肋摩阻力和格栅节点端承阻力提供。由 B 型格栅的试验曲线可知纵肋摩阻力的占比较大。

(2) 拉拔位移越大, A 型格栅与完整格栅的试验曲线差异越大, 格栅横肋的阻力作用越明显。

(3) 以完整格栅的拉拔力峰值大小为极限抗拉拔力。A 型格栅与完整格栅的峰值拉拔力之差为格栅横肋极限端承阻力, 占极限抗拉拔力的 15.4%; A 型格栅与 B 型格栅的峰值拉拔力之差为节点极限端承阻力的大小, 占极限抗拉拔力的 26.04%; 纵肋极限摩阻力(即 B 型格栅的峰值拉拔力)占极限抗拉拔力的 58.56%。由此可得, 经编格栅在试验过程中, 纵肋摩阻力和节点端承阻力起主要作用, 约占拉拔阻力的 84%。

(4) 经编格栅的横肋端承阻力主要在试验中后段发挥作用, 主要原因是经编格栅由长丝编制而成, 刚度小, 试验初段拉拔力沿纵肋传递时, 横肋由于产生变形而不能有效地发挥阻力作用, 试验中后段横肋的端承阻力作用明显。

4 结 论

本文对国内大坝加固常用的两种土工格栅进行了拉拔试验, 并对试验结果进行了分析, 得出以下结论:

(1) 在塑料焊接格栅的拉拔试验中, 拉拔位移较大时, 格栅节点由于达到极限强度而发生剥离破坏, 拉拔力发生阶梯式衰减, 最终的残余抗拉拔力由纵肋摩阻力提供。

(2) 塑料焊接土工格栅的节点强度是控制其加筋效果的重要因素, 且试验中法向荷载的大小对节点强度影响不大。因此, 在采用此类格栅进行大坝坝坡加固时, 为提高加筋效果, 建议对格栅的节点进行加固处理。

(3) 在涤纶经编格栅的拉拔试验中, 拉拔力“硬化”现象明显, 经过较大的拉拔位移后, 格栅节点仍未发生剥离破坏。

(4) 涤纶经编格栅材质柔度较大, 试验初段横肋由于变形未发挥阻力作用, 试验过程中, 抗拉拔力

主要由纵肋摩阻力和节点端承阻力提供。

参考文献:

- [1] 陈毅, 郑乾, 王军军, 等. 土工合成材料在桩承式加筋路堤中的应用现状[J]. 水利与建筑工程学报, 2011, 9(6): 29-32.
- [2] 陈兴专, 洪宝宁, 刘鑫. 土工格栅加筋高液限土路堤的稳定性研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2013, 11(2): 37-41.
- [3] Nicola Moracia, Recalcati Piergiorgio. Factors affecting the pullout behaviour of extruded geogrids embedded in a compacted granular soil[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2006, 24(4): 220-242.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 王家全, 武标, 邹红, 等. 土工格栅与粗粒土界面特性的大型直剪试验研究[J]. 广西科技大学学报, 2015, 26(3): 78-83.
- [7] 曹学兴. 深厚覆盖层地基高土质心墙堆石坝抗震安全性研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2013.
- [8] 邢新元, 刘汉祥. 土工格栅在砾石土心墙坝中的应用[J]. 东北水利水电, 2012, 30(1): 25-26.
- [9] 刘长珍. 土工格栅加筋技术在青峰岭水库主坝加固工程中的应用[J]. 大坝与安全, 2008(5): 61-64.
- [10] 马家燕. 土工格栅应用于水工大坝初探[J]. 四川水力发电, 2007, 26(6): 84-85.
- [11] ASTM D6706-01 (Reapproved 2013), Standard Test Method for Measuring Geosynthetic Pullout Resistance in Soil[S]. [s.l]: [s.n], 2013.
- [12] 徐超, 陈洪帅, 朱洪, 等. 焊接土工格栅土中锚固强度的影响因素[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(4): 61-65.
- [13] Wilson - Fahmy R F, Koerner R M, Sansone L J. Experimental behavior of polymeric geogrids in pullout[J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1994, 12(4): 661-677.
- [14] 中华人民共和国水利部. 土工合成材料测试规程: SL235 - 2012[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.
- [15] Jewell R A, Milligan G W E, Sarsby R W, et al. Interactions between soil and geogrids[C]//Proceedings from the Symposium on Polymer Grid Reinforcement in Civil Engineering. Thomas Telford. London, UK, 1985: 18-29.