

DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.05.011

何亮, 李国英. 钢筋在堆石料中的拉拔试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2017(5): 74-79. (HE Liang, LI Guoying. Pull-out test analysis of steel bar in rockfill materials[J]. Hydro-Science and Engineering, 2017(5): 74-79. (in Chinese))

钢筋在堆石料中的拉拔试验研究

何 亮^{1,2}, 李国英¹

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 常州工学院, 江苏 常州 213002)

摘要:作为一种有效的土石坝抗震加固措施,加筋在高土石坝建设中正被越来越广泛地运用。钢筋与堆石料接触特性及影响因素研究是合理进行加筋设计的前提。通过室内拉拔试验研究了钢筋与堆石料的界面摩擦特性,揭示了不同上覆压力、堆石料含水状态、堆石料级配及孔隙率等因素对试验结果的影响。结果表明,堆石料与钢筋接触面剪应力与拉拔位移曲线呈下端开口的抛物线形状,上升段陡于下降段,残余剪应力数值不稳定;4个影响因素中,上覆压力与峰值剪应力曲线近似于线性正比关系;孔隙率和峰值剪应力曲线类似于线性反比关系;级配平均线的峰值剪应力与拉拔位移曲线位于级配上包线的试验曲线之上;饱和含水状态下堆石料的峰值剪应力与拉拔位移曲线远低于风干状态。

关 键 词: 加筋; 堆石料; 拉拔试验; 剪应力

中图分类号: TV641.4

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2017)05-0074-06

高土石坝在受到地震荷载作用时,由于“鞭梢效应”,坝顶附近的地震加速度和永久变形明显大于大坝其他部位,从而可能会造成大坝失稳,影响大坝安全。加筋是坝顶抗震加固的有效措施之一,已成功用于坝高 21.2 m 的法国康柯耶拉克坝、坝高 125.5 m 的冶勒沥青混凝土心墙堆石坝、坝高 261.5 m 的糯扎渡心墙堆石坝和坝高 240 m 的长河坝心墙堆石坝等。目前常用的加筋材料有土工格栅和带肋钢筋两种。由于高强度的震动碾压对筋材的破坏性,所以带肋钢筋比土工格栅更适用于土石坝的加筋。

研究钢筋-堆石料界面摩擦特性对加筋土石坝的应用具有重要意义。国内外众多学者做了大量筋-土界面之间摩擦特性的研究工作,如徐超等^[1]利用自行研制的仪器研究了不同粗糙程度土工合成材料的界面摩擦特性,并进行了直剪和斜板试验对比。Lopes 等^[2]通过开展土工格栅和砂土界面特性试验,认为界面抗剪强度随着剪切速率的提高而增强。Bergado 等^[3]对钢制格栅在风化黏土中的抗拔性能进行了研究,认为试验结果主要受筋材的横肋影响。Collin^[4]的现场试验认为黏性土含水量对筋-土界面特性影响显著。Mohiuddin^[5]通过室内和现场拉拔试验研究了筋材在黏土中的抗拔机理,认为筋材长度和法向压力对试验结果影响显著。徐林荣等^[6]通过试验结果得出筋-土界面参数的测试方法要结合工程实践来选择的结论。杨广庆等^[7-9]通过室内拉拔试验研究了土工格栅界面摩擦特性,认为上覆荷载、压实度、拉拔速率等对试验结果有较大影响。张绪涛^[9]、吴海民^[10]等对土工合成材料与土相互作用的相关试验装置进行了改进研究。综上所述,虽然拉拔试验和接触面的研究成果较多,但对于钢筋与堆石料界面摩擦特性的相关研究极少,尤其缺少研究筋与料的接触面影响因素和剪应力大小的相关文献。

本文通过拉拔试验研究钢筋与堆石料的界面摩擦特性和影响因素,得出堆石料不同状态下的剪应力-拉拔位移关系曲线,拉拔试验的优点在于测试结果能自动反映堆石料的剪胀和剪切破坏状态,较直剪试验能

收稿日期: 2016-08-11

基金项目: 水利部公益性行业科研专项经费项目(201501035)

作者简介: 何 亮(1983—),男,江西九江人,工程师,博士研究生,主要从事土石坝工程抗震研究。

E-mail: springday_2007@163.com

更好地模拟钢筋在堆石料中的实际工作状态,拉拔试验测试结果可为加筋土石坝的极限稳定分析提供分析理论和破坏准则。

1 试验目的、方法和步骤

拉拔试验目的为在堆石料不同上覆压力、含水状态、孔隙率、级配等因素影响下,研究钢筋在堆石料中的摩擦特性。

目前由于拉拔试验的试验设备和方法尚未统一,因此必须自行研制拉拔试验装置(见图 1),其中试验筒体内直径 36.6 cm,内高度 61 cm,筒壁两侧对称有直径为 5 cm 的圆孔,中心点距离筒内底部 25 cm。

试验所用筋材为直径 2.2 cm 的带肋钢筋,试验时保证了钢筋上方堆石料厚度大于 25 cm。堆石料级配平均线和上包线的最大干密度为 2.174 g/cm^3 和 2.195 g/cm^3 ,最大干密度对应孔隙率分别为 19.8% 和 18.5%,级配组成见表 1。

由电机提供拉力,拉拔速率为 2 mm/min ,大型流变仪提供稳定的上覆压力,试验方案如表 2 所示。

表 1 平均线和上包线的级配组成

Tab. 1 Grade composition of average line and upper envelope curves						
级配范围/mm		60~40	40~20	20~10	10~5	<5
质量所占比例/%	平均线	17.8	26.4	20.4	16.1	19.3
	上包线	16.6	24.9	19.1	14.9	24.5

表 2 试验方案

Tab. 2 Test schemes				
参数	堆石料平均线	堆石料上包线	备注	
上覆压力/kPa	50,100,200,400,600,800	50,200,400,800	孔隙率均为 20%,风干状态	
孔隙率	20%,21%,23%,26%		上覆压力均为 50 kPa,风干状态	
含水状态		风干、饱和	上覆压力均为 200 kPa,孔隙率为 20%	

拉拔试验的步骤如下:

(1)按设计的级配组成配置堆石料,分 4 层震动碾压至设计的孔隙率,当第 2 层震动碾压完成后,将钢筋穿过筒壁两侧圆孔埋入堆石料,并保证第 4 层震动碾压完成后,每次试验中钢筋放置水平且外露筒壁的长度均为 35 cm。

(2)在堆石料上部施加设计所需的上覆压力,压力稳定后用套筒连接钢筋和拉杆,随后放置位移百分表并接上拉力数显器。

(3)启动电机对钢筋施加水平拉拔力,拍摄视频同步记录位移和拉拔力值。

(4)试验结束后将拉拔力卸载至零,松开钢筋连接套筒,卸载上覆压力。

2 试验结果分析

2.1 剪应力-位移曲线

钢筋与堆石料界面摩擦特性可通过剪应力-拉拔位移关系曲线来反映。对所拍摄的视频进行数据处理,将拉拔力除以钢筋长度和直径换算为剪应力,整理后发现所得剪应力-位移曲线规律均相似,以 400 kPa 上覆压力下的平均线堆石料拉拔试验为例(见图 2)。剪应力-位移曲线呈明显的非线性关系,形状类似于一

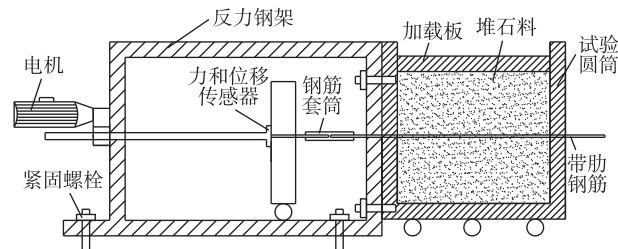


图 1 试验装置

Fig. 1 Schematic diagram of test equipment

个下端开口的抛物线,呈非线性软化特性。

(1)曲线上升阶段。随着拉拔位移的增大,剪应力也逐渐增大,这是由于钢筋抗拔能力的传递是从筋的施力端向埋入端逐渐传递发挥出来的。

(2)曲线下降阶段。其坡度缓于上升段,且随着拉拔位移的增大,下降段曲线逐渐变缓,进入了残余剪应力阶段,这是由于堆石料孔隙率为 20%,对钢筋包裹紧密,拉拔过程上升段实际也是堆石料的剪胀过程,超过峰值剪应力后即堆石料剪切破坏后,剪胀效应大幅降低。再观察残余剪应力曲线,发现虽然整体数值呈缓慢下降趋势,但局部偶尔上升,这是由于拉拔过程中堆石料颗粒的翻滚作用引起的。

2.2 剪应力-位移曲线影响因素

钢筋与堆石料的相互作用机理较为复杂,既与堆石料上覆压力、含水状态、孔隙率、级配有关,也与钢筋直径、弹性模量和拉拔速率等有关,现对上覆压力、含水状态、孔隙率、级配这 4 种因素进行分析。

2.2.1 上覆压力影响 上覆压力越大,对堆石料的剪胀抑制越明显,会显著影响剪应力-位移曲线。图 3 和 4 是不同压力下平均线和上包线的剪应力-位移曲线,堆石料为风干状态,孔隙率均为 20%。由图可知随着上覆压力的增加,峰值剪应力和残余剪应力也逐渐增加,但残余剪应力规律性不如峰值剪应力明显。

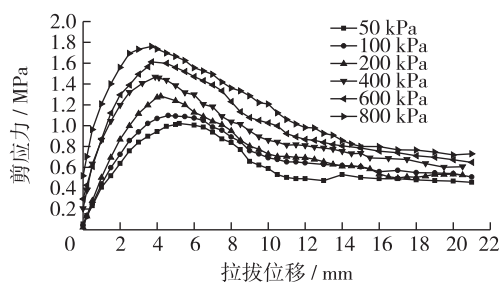


图 3 不同压力下平均线的剪应力-位移曲线

Fig. 3 Curves of shear stress and displacement of average envelope under different pressures

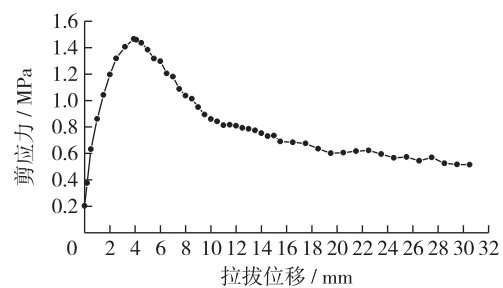


图 2 400 kPa 压力下平均线的剪应力-位移曲线

Fig. 2 Curves of shear stress and displacement of average line of 400 kPa

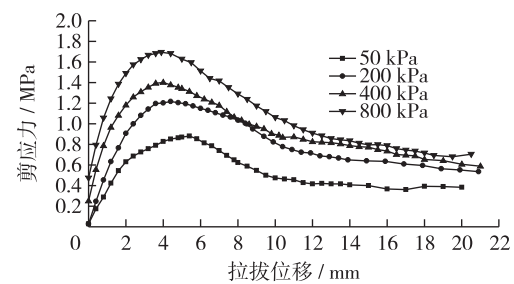


图 4 不同压力下上包线的剪应力-位移曲线

Fig. 4 Curves of shear stress and displacement of upper envelope under different pressures

图 5 为平均线和上包线的峰值剪应力-位移曲线,图 6 为平均线和上包线的峰值剪应力-上覆压力曲线。由图 5 可知平均线和上包线的峰值剪应力-上覆压力曲线近似呈正比线性关系,上覆压力对试验结果的影响较大;由图 6 可知峰值剪应力对应的位移呈非线性关系,且随上覆压力增大而逐渐减小,且低压力下减小的幅度大于高压力下,这是由于高上覆压力束缚下堆石料的剪胀变形小,较小的位移就能达到剪切破坏。

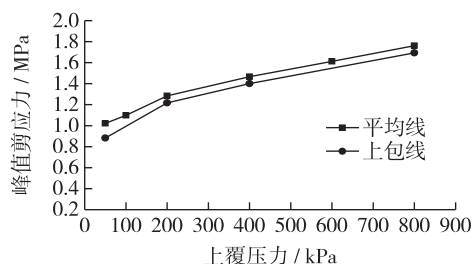


图 5 平均线和上包线的峰值剪应力-上覆压力曲线

Fig. 5 Curves of peak shear stress and overburden pressure under average line and upper envelope

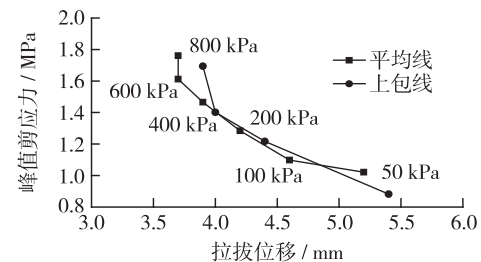


图 6 平均线和上包线的峰值剪应力-拉拔位移曲线

Fig. 6 Curves of peak shear stress and drawing displacement under average line and upper envelope

2.2.2 级配影响 本次试验还分别进行了堆石料上包线和平均线的拉拔试验,研究不同级配对试验结果的影响。上包线中粒径小于5 mm的细颗粒含量比平均线高5.2%,细颗粒含量越高,颗粒之间的咬合力和摩擦力越低,钢筋剪应力也应越低。图7为平均线和上包线剪应力-位移曲线,对比分析可知平均线的峰值剪应力要高于上包线,但两者的残余剪应力数值接近。再结合图5和6可知上覆压力大于200 kPa时,平均线的峰值剪应力数值均近似高于上包线的1.04倍,因此可认为级配对试验结果影响较小;在相同上覆压力作用下,平均线的峰值剪应力对应的拉拔位移大多小于上包线的,这表明细颗粒含量越高的级配组成,越晚达到峰值剪应力。

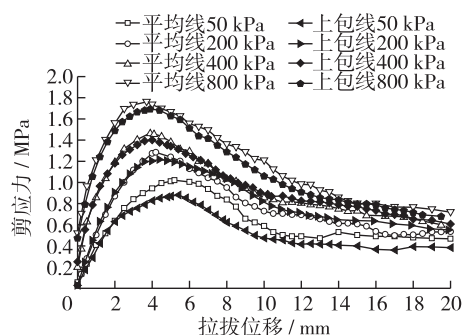


图7 平均线和上包线的剪应力-拉拔位移曲线

Fig. 7 Curves of shear stress and drawing displacement of average line and upper envelope

2.2.3 孔隙率影响 孔隙率越小,堆石料剪胀效应越明显,对钢筋的包裹性越好,钢筋与堆石料之间的摩擦力越大。图8为不同孔隙率下的剪应力-位移曲线,堆石料均为风干状态,上覆压力均为50 kPa。由图可知堆石料孔隙率越小,峰值剪应力和残余剪应力越大。分析峰值剪应力、峰值位移和孔隙率三者之间的关系(见图9和10),可知孔隙率越小,峰值剪应力对应的位移越小,峰值剪应力-位移曲线和峰值剪应力-孔隙率均近似反比线性分布,孔隙率对试验结果的影响较大。

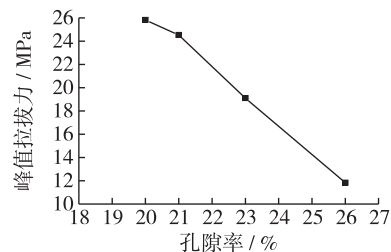
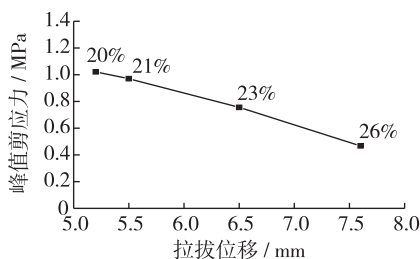
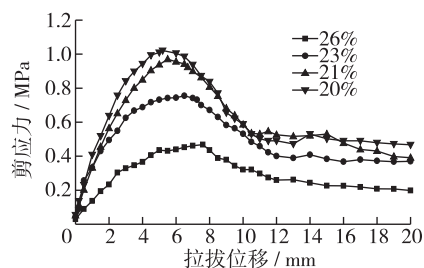


图8 不同孔隙率的剪应力-位移曲线

图9 不同孔隙率的峰值剪应力-拉拔位移曲线

图10 峰值剪应力-孔隙率曲线

Fig. 8 Curves of shear stress and displacement under different porosities

Fig. 9 Curves of peak shear stress and drawing displacement under different porosities

Fig. 10 Curves of peak shear stress and porosity

2.2.4 含水状态的影响 堆石料在非饱和状态时,由于受到震动碾压作用,含水量不易控制,所以本试验仅对风干和饱和状态进行研究。根据土力学原理,堆石料在饱和状态时,孔隙里充满了水,相比风干状态,水的存在必然减小筋-料之间的摩擦系数。图11为200 kPa压力下风干和饱和状态的剪应力-位移曲线,孔隙率均为20%,分析可知饱和状态的峰值剪应力和残余剪应力均明显小于风干状态下的,前者的峰值剪应力值仅为后者的53%,含水状态对试验结果影响较大;拉拔位移在15 mm时,前者的残余剪应力值仅为后者的45%。

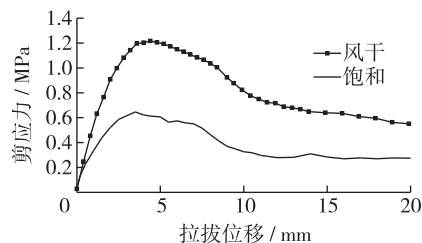


图11 风干和饱和状态下的剪应力-位移曲线

Fig. 11 Curves of shear stress and displacement under air dry and saturated conditions

3 结 语

通过开展拉拔试验研究分析了钢筋与堆石料的摩擦特性。初步结论与建议如下:

(1)拉拔试验过程中剪应力的增长阶段为堆石料的剪胀过程,超过峰值剪应力后,剪应力逐渐衰减进入

残余剪应力阶段。剪应力-拉拔位移曲线呈下端开口的抛物线形状,上升段陡于下降段,由于堆石料颗粒的滚动,残余剪应力数值不稳定。

(2)堆石料的上覆压力、孔隙率、级配和含水状态均对拉拔试验的剪应力-拉拔位移有影响,其中上覆压力、孔隙率和含水状态对试验结果的影响较大,级配对试验结果的影响较小。上覆压力与拉拔位移曲线类似于线性正比关系;孔隙率和拉拔位移类似于线性反比关系;级配平均线的峰值剪应力-拉拔位移均高于级配上包线的;饱和含水状态的剪应力-拉拔位移曲线远低于风干状态的。

(3)后续可补充堆石料级配下包线、不同饱和度、50 kPa 以下低上覆压力等条件下的拉拔试验,充实堆石料的上覆压力、级配和含水状态等因素对筋土界面摩擦特性的影响研究。

参 考 文 献:

- [1] 徐超,廖星樾,叶观宝,等. 土工合成材料界面摩擦特性的室内剪切试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 1285-1289. (XU Chao, LIAO Xingyue, YE Guanbao, et al. Research on interface fractional characteristics of geosynthetics by laboratory shear test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(5): 1285-1289. (in Chinese))
- [2] LOPES M L, LADRIRA M. Influence of the confinement, soil density and displacement rate on soil-geogrid interaction[J]. Geotextiles and Geomembranes, 1996, 14(10): 543-554.
- [3] BERGADO D T, HARDIYATIMO H C, CISNEROS C B, et al. Pullout resistance of steel geogrids with weathered clay as back fill material[J]. Geotechnical Testing Journal, 1992, 15(1): 33-46.
- [4] COLLIN J G. Earth wall design[D]. Berkeley: University of California, 1986.
- [5] MOHIUDDIN A. An analysis of laboratory and field pull-out test of geosynthetics in clayed soils[D]. Baton: Louisiana State University, 2003.
- [6] 徐林荣. 筋-土界面参数测试方法合理选择研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(3): 458-462. (XU Linrong. Research on selection of measuring method of interface parameters between reinforcements and soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(3): 458-462. (in Chinese))
- [7] 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 Guangqing, LI Guangxin, ZHANG Baojian. Experimental studies on interface friction characteristics of geogrids[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(8): 948-952. (in Chinese))
- [8] 陈榕,栾茂田,赵维,等. 土工格栅拉拔试验及筋材摩擦受力特性研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(4): 960-964. (CHEN Rong, LUAN Maotian, ZHAO Wei, et al. Research on pull-out test and frictional resistance characteristic of geogrids[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(4): 960-964. (in Chinese))
- [9] 张绪涛,张强勇. 土工直接拉伸试验装置的研制及应用[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(7): 1309-1315. (ZHANG Xutao, ZHANG Qiangyong. Development and application of geotechnical direct tensile test device[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(7): 1309-1315. (in Chinese))
- [10] 吴海民,束一鸣. 土工合成材料双向拉伸多功能试验机的研制与初步应用[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(1): 170-175. (WU Haimin, SHU Yiming. Geosynthetic materials development and preliminary application of two-way stretch multi-function testing machine[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(1): 170-175. (in Chinese))

Pull-out test analysis of steel bar in rockfill materials

HE Liang^{1, 2}, LI Guoying¹

(1. *Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 2. *Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213002, China*)

Abstract: As an effective seismic strengthening measure for the earth rock dam, the reinforcement is used more and more widely in the construction of high earth rockfill dams. A premise of the reinforcement design is the research on the contact characteristics and influence factors of the steel bar and rockfill materials. The authors of this paper, through laboratory pull-out tests, made studies of rebars and interface friction characteristic of the rockfill materials, and revealed the impacts of different overburden pressures, water content of rockfill, aggregate gradation and porosity factors on the test results. The experimental results show that the rockfill materials and steel contact shearing force and pull-out displacement curves show a parabolic shape with an opening at the lower end, which is steeper than that in the descending section, and the values of the residual shear stress are unstable. For the four influence factors, the overburden pressure and peak shear curves have approximately linear relationships; the porosity and the peak values of the shear curve are similar to a linear inverse relationship; the peak shear stress and the pull-out displacement curves of the trim level average are over the test curves of the grading of the upper envelope line. The peak shear stress and the pull-out displacement curves of the rockfill materials under the conditions of saturated water content are much lower than those under the dry conditions.

Key words: reinforcement; rockfill materials; pull-out test; shear stress