

文章编号:1001-4888(2018)01-0127-07

不同含水率下尾矿与土工格栅 界面特性的试验研究^{*}

谢宝璿^{1,2}, 张向东¹, 杜常博¹

(1. 辽宁工程技术大学土木与交通学院, 辽宁阜新 123000; 2. 中国中铁七局集团第三工程有限公司, 陕西西安 710032)

摘要: 含水率是影响尾矿加筋结构稳定性的重要因素。通过室内拉拔试验, 对不同含水率(1.5%、9.7%、19.3%)下尾矿与土工格栅的界面特性进行了研究。结果表明, 土工格栅的最大剪应力与法向应力呈线性相关, 能够反映筋-尾矿界面参数似粘聚力和似摩擦角; 似粘聚力随含水率增大先增大后减小, 似摩擦角随含水率增大先减小后增大; 在含水率增大过程中存在界限含水率, 大小约为10%; 在界限含水率下, 似粘聚力达到最大值, 似摩擦角达到最小值; 似摩擦系数随法向应力增大呈非线性递减, 可以二次抛物线拟合反映二者关系; 在不同含水率条件下, 似摩擦系数随含水率增大呈现先增大后减小规律, 与对应界面参数似粘聚力的变化一致。上述试验分析成果对应用土工格栅进行尾矿坝加筋设计有一定的指导价值。

关键词: 含水率; 似粘聚力; 似摩擦角; 似摩擦系数

中图分类号: TU411

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-16-230

0 引言

土工格栅与尾矿间界面特性的研究成果^[1,2]对实际工程应用有重要的指导作用, 应用土工格栅对尾矿堆积坝加固不仅可以实现坝体稳定性与安全性的提高^[3], 还可以提高尾矿堆积的高度和坡度, 增加尾矿坝的库容。而影响筋-尾矿界面特性的因素^[4]有很多, 其中填料含水率和上覆压力是比较重要的两个因素。

国内许多学者一般采用直剪试验和拉拔试验对影响筋土界面特性的这两个因素进行研究。关秀光等^[5]对不同上覆荷载下筋土界面特性进行了直剪试验, 认为剪力及对应位移随上覆荷载的增加而增加; 邹静蓉等^[6]和汪明元等^[7]通过拉拔试验对不同上覆压力影响下的筋土界面特性进行了分析, 表明拉拔力随上覆压力变化而变化。陈云勇^[8]和邹玉娜等^[9]对不同含水率填料进行了土工格栅直剪试验; 而凌天清等^[10]、张俊峰等^[11]及伍祥松等^[12]对不同含水率填料进行了拉拔试验研究, 结果表明含水率变化能比较明显地影响界面参数。杨广庆等^[13]认为由于格栅网孔较大导致直剪试验结果主要贡献土体之间的摩擦特性, 并非真正的筋土之间的直剪摩擦特性, 因此, 认为研究筋土界面特性选用拉拔试验更合理。本文在已有的研究基础上, 自制拉拔试验装置, 利用室内拉拔试验分析土工格栅与不同含水率条件下尾矿的界面特性, 为了解含水率对筋-尾矿界面特性的影响作一些有益的探索。

^{*} 收稿日期: 2016-11-01; 修回日期: 2016-12-05

基金项目: 国家自然科学基金委员会-神华集团有限公司煤炭联合基金资助(51174268)

通讯作者: 谢宝璿(1975—), 男, 博士研究生, 主要从事岩土工程方面的研究工作。Email: 2528420166@qq.com

1 土工格栅与尾矿拉拔试验

1.1 试验装置

试验装置如图 1 所示,该装置主要由三部分组成:

- (1) 试验槽主体设计:尺寸为 500mm×400mm×400mm(内径),采用 12mm 厚的有机玻璃砖黏贴而成,并在试验槽前方开有 210mm×5mm 的窄缝,供格栅引出;
- (2) 水平加载装置设计:采用辽宁工程技术大学土木与交通学院桥梁实验室的 WDW-300E 万能试验机施加拉拔力,整个试验可由计算机按设定的拉拔速率连续施加拉拔力,并进行记录;
- (3) 垂直加载装置设计:垂直加载采用大小相等的砝码(5.1kg)施加覆盖压力,并在试验槽填料顶部水平放置一块 495mm×395mm×5mm 的承压板,使加载在其上的砝码均匀施加法向应力。

1.2 试验材料

试验的填料尾矿砂来源于吉林老金厂金矿股份有限公司尾矿库(采用干堆,含水率在 8%~10%之间)。如图 2 所示为该尾矿的颗粒级配曲线,经计算,该尾矿的不均匀系数 $C_u=3<5$,曲率系数 $C_c=1.2$ 在 1~3 之间,说明该尾矿属于级配不良^[14]。



图 1 拉拔试验装置
Fig.1 Pull-out test device

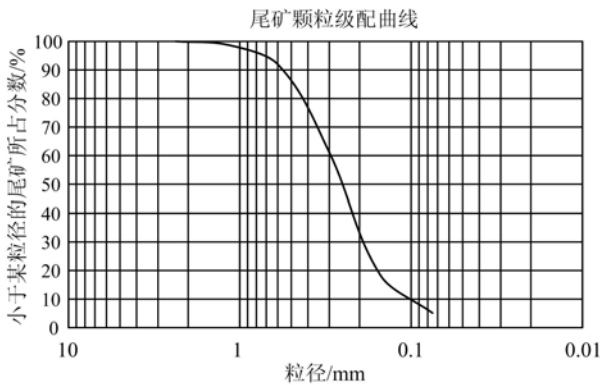


图 2 尾矿砂颗粒级配曲线
Fig.2 Gradation curve of taillights sand

试验采用聚丙烯双向拉伸塑料土工格栅(TGSG40-40),该类土工格栅在各种加筋工程中均有较好应用效果,其具体的技术指标见表 1。

表 1 土工格栅技术参数
Tab.1 The technology parameters of geogrid

型号	网格尺寸 /mm	网格厚度 /mm	纵横向拉伸 强度/(kN/m)	纵向标称 伸长率/%	横向标称 伸长率/%	纵横向 2%伸长率时 拉伸强度/(kN/m)	纵横向 5%伸长率时 拉伸强度/(kN/m)
TGSG40-40	30×30	3	40	16	13	14	28

1.3 试验步骤

- (1) 将导向滑轮安装在万能试验机下夹具夹紧,然后试验槽就位,并使试验槽开口与导向滑轮的下端在同一水平方向;
- (2) 将土工格栅按要求裁剪尺寸,然后用夹具固定好格栅并连接钢丝绳和导轮;
- (3) 向试验槽中添加尾矿,每添 50mm 高度压实一次,且保证每次压实度一定;
- (4) 尾矿添加并压实到高度 200mm 时,将安装好的土工格栅试件从开口处放入试验槽内,准确定位好位置,继续添加尾矿砂并分层压实;
- (5) 压实到稍高于试验槽高度时,结束添加,去掉多余尾矿砂,在顶部平整放置好承压板,并按控制要求加盖砝码,然后等待 30min,继续试验;
- (6) 将连接土工格栅的钢丝绳通过已安装好的定向滑轮连接到万能试验机上夹头并夹紧,启动软

件,调整好钢丝绳的距离,使格栅以 1mm/min 匀速开始拉拔,当位移达到设定值时,停止试验;

(7) 松开上夹头,卸去砝码和承压板,刨掉表面尾矿砂,用环刀取样,以便测定此次试验尾矿填料的相关参数;

(8) 改变尾矿含水率的大小,按上述步骤重复进行,以测出不同含水率下土工格栅与尾矿的界面作用特性及相关参数。

1.4 试验方案设计

拉拔试验过程中,结合土工格栅本身的极限抗拉强度和尾矿砂实际情况,依据实验室所容许的试验条件,对各影响因素下的拉拔试验进行了合理的安排设计,具体的试验方案见表 2。

表 2 试验方案

Tab.2 Test plan

拉拔速率/(mm/min)	尾矿含水率/%	上覆压力/kPa
1	1.5、9.7、19.3	0
		1.02
		2.04
		5.10
		10.20

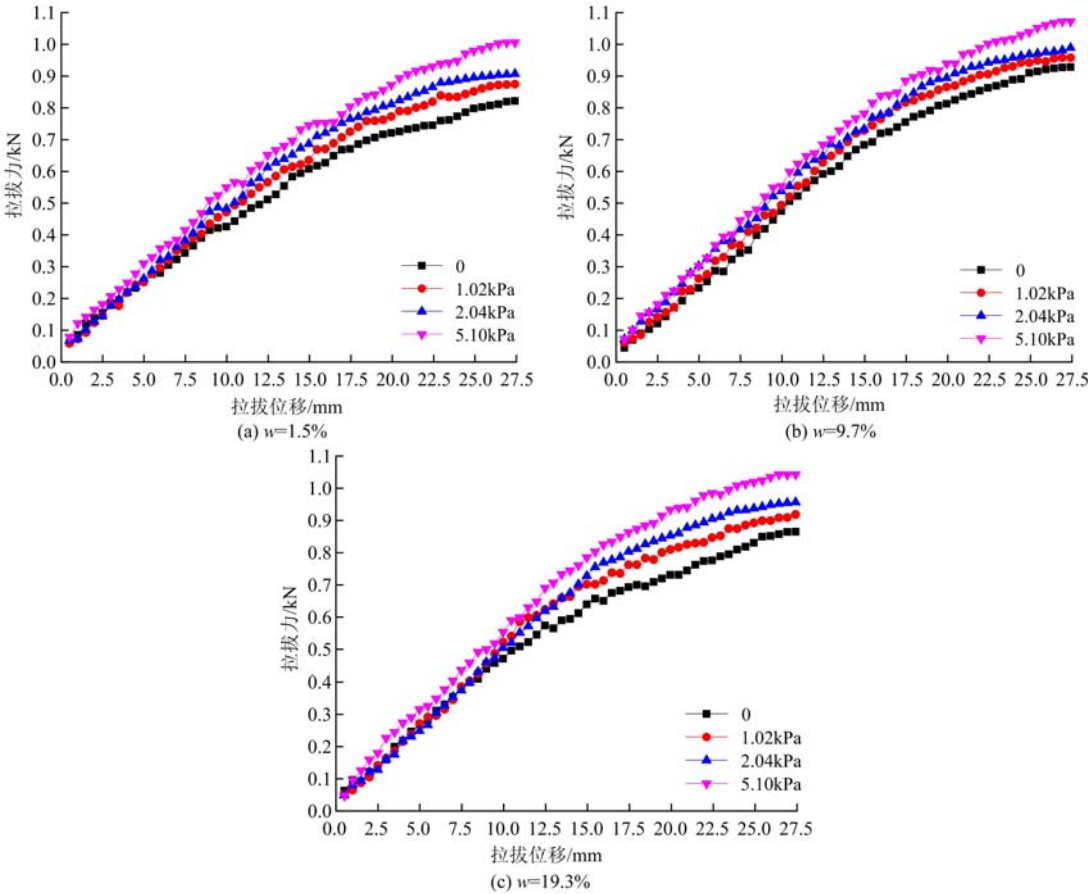


图 3 不同上覆压力下拉拔位移与拉拔力关系

Fig. 3 The relationship between drawing displacement and drawing force under different overburden pressure

2 试验结果及分析

2.1 拉拔力与拉拔位移关系

图 3 为三种尾矿含水率情况下,格栅的拉出位移与其对应拉拔力的曲线关系。由图可以看出:尾矿含水率的变化不影响拉拔曲线的整体趋势,其大致趋势都是拉拔力随格栅拉出的位移先线性增加,再逐

渐减缓,最后趋于稳定,且在刚开始拉拔时,都需要一定的拉拔力。

2.2 最大拉拔力变化分析

根据图 3 可得到在不同尾矿含水率下上覆压力与最大拉拔力的曲线关系,如图 4 所示。由图可知:在含水率一定时,土工格栅所受的最大拉拔力随着上覆压力的增大基本呈线性增长;在上覆压力一定时,土工格栅所受的最大拉拔力会随着尾矿含水率的增加而先增大后减小,这是由于随着尾矿含水率的增加,尾矿颗粒间及其与格栅间的相互作用会由胶凝作用逐渐向润滑作用过渡,说明含水率增大过程中存在一个“界限含水率”,当含水率小于界限含水率时,尾矿颗粒间的相互作用主要为胶凝作用,而当含水率大于界限含水率时,润滑作用在尾矿颗粒间起主要作用。所以在实际加筋工程中要注意控制各层厚度及观察不同尾矿堆积层间含水率的变化。

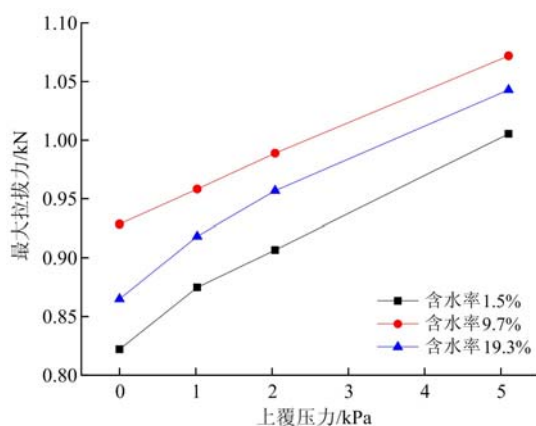


图 4 上覆压力与最大拉拔力的关系

Fig. 4 The relationship between overburden pressure and maximum drawing force

性拟合。该拟合直线符合库伦定律:

$$\tau_d = C + \sigma_v \tan \varphi \quad (2)$$

通过本次拉拔试验结果可获得该种拟合直线,确定出界面参数似粘聚力 C 和似摩擦角 φ 。法向应力 σ_v 可按下式计算:

$$\sigma_v = P + P_0 + \gamma h \quad (3)$$

式中, P 为承压板上砝码施加的上覆压力, kPa; P_0 是由承压板自重施加的压力, 为 0.38 kPa; γ 为填料尾矿的容重, kN/m^3 ; h 为土工格栅上尾矿的铺筑高度(试验过程中, h 变化不大, 为 0.2 m)。

试验过程中,不同含水率下的尾矿容重有所变化,导致土工格栅上加载的法向应力也发生了改变,具体变化结果见表 3。

表 3 不同含水率下格栅上的法向应力

Tab. 3 Normal stress on the geogrid under different water content

含水率 参数	容重 (kN/m^3)	上覆压力/kPa			
		0	1.02	2.04	5.10
1.5%	16.0	3.58	4.60	5.62	6.68
9.7%	17.4	3.86	4.88	5.9	8.96
19.3%	18.7	4.12	5.14	6.16	9.22

由以上分析可以得到在三种尾矿含水率条件下的法向应力与对应最大剪应力的关系,再进行数据拟合得出两者的公式关系,具体情况见图 5 所示。

由图 5 可知,该试验施加的法向应力与土工格栅所受的最大剪应力呈线性增加关系。当尾矿含水率为 1.5% 时, $\tau_d = 0.1955\sigma_v + 3.9642$; 尾矿含水率为 9.7% 时, $\tau_d = 0.1588\sigma_v + 4.6014$; 尾矿含水率为

2.3 剪应力与法向应力分析

当土工格栅被拉出时,上下界面的摩阻力即为最大剪应力^[15],又称为界面摩擦强度,在试验中可取均值,具体计算公式为:

$$\tau_d = \frac{T_d}{2A} \quad (1)$$

式中, τ_d 为最大剪应力, kPa; T_d 为土工格栅受到的最大拉拔力, kN; $A = BL$ 为土工格栅埋入尾矿中的宽度 B 与长度 L 的乘积。试验过程中, A 基本保持不变,经计算 $A = BL = 0.495\text{m} \times 0.18\text{m} = 0.0891\text{m}^2$ 。

本试验在四种不同上覆压力 P (0、1.02 kPa、2.04 kPa 和 5.10 kPa) 作用下进行,可绘制出 $\tau_d - \sigma_v$ 曲线(近似直线)(σ_v 为法向应力),然后进行线

19.3%时, $\tau_d = 0.1887\sigma_v + 4.1448$ 。再根据式(2)库伦定律可以得到土工格栅与尾矿的界面参数,具体数值见表 4。

表 4 土工格栅与尾矿的界面参数

Tab. 4 Interface parameters between geogrid and tailings

界面参数含水率	1.5%	9.7%	19.3%
似粘聚力 C/kPa	3.9642	4.6014	4.1448
似摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	11.0618	9.0232	10.6861

由表 4 可知,界面参数似粘聚力 C 随含水率的变化规律与界面摩阻力即最大剪应力随含水率的变化一致,都是随着含水率的增加而先增大后减小,而似摩擦角的变化正相反,随含水率的增大呈现先减小后增大的规律,结合在含水率增大过程中尾矿颗粒间及其与格栅间的相互作用会由胶凝作用逐渐转变为润滑作用,在此过程中存在界限含水率,大小约为 10%,在界限含水率下,似粘聚力达最大,似摩擦角最小。

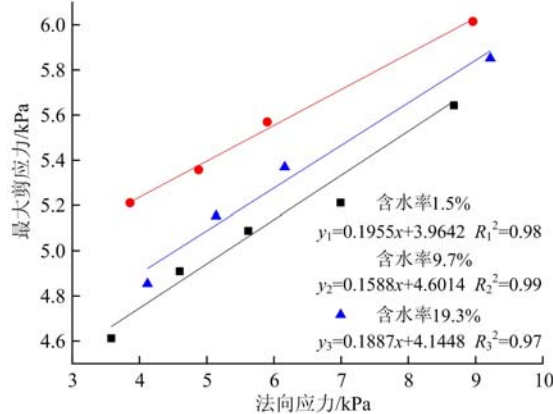


图 5 法向应力与最大剪应力的关系

Fig. 5 The relationship between normal stress and maximum shear stress

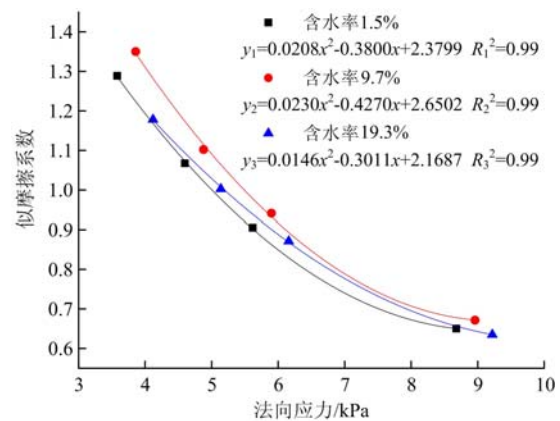


图 6 法向应力下与似摩擦系数的关系

Fig. 6 The relationship between normal stress and similar coefficient of friction

2.4 似摩擦系数与法向应力分析

筋-土之间的作用力主要是通过两者表面摩擦体现出加筋材料的作用。通常是引入似摩擦系数^[16]定量描述筋-土摩擦特性,其值按下式计算:

$$f = \frac{T_d}{2A\sigma_v} = \frac{\tau_d}{\sigma_v} \quad (4)$$

由以上分析可以拟合得到土工格栅在不同法向应力下与似摩擦系数变化的关系,如图 6 所示。由图可知,三条曲线总体趋势基本一致,随着法向应力的增大,似摩擦系数呈非线性减小,满足 $f = A\sigma_v^2 - B\sigma_v + C$ (A、B、C 均大于 0) 的曲线形式;而在相同法向应力下,似摩擦系数随着含水率的增大先增加后减小,这与对应界面参数似粘聚力随含水率变化的结论一致,存在界限含水率,在界限含水率下,似摩擦系数达到最大。

3 结论

根据室内拉拔试验分析不同尾矿含水率条件下筋-尾矿的界面特性,得出如下结论:

(1) 相同含水率条件下,最大剪应力与法向应力呈线性相关,符合库伦定律,能够反映尾矿与土工格栅界面参数似粘聚力和似摩擦角。

(2) 不同含水率条件下,似粘聚力随含水率的增加先增大后减小,似摩擦角随含水率的增加先减小后增大,在含水率增大过程中存在界限含水率,大小约为 10%,在界限含水率下,似粘聚力最大,似摩擦

角最小,这是由于含水量的增加使尾矿颗粒间及其与格栅间的相互作用由胶凝逐渐向润滑过渡。

(3) 相同含水率条件下,似摩擦系数随法向应力呈非线性递减,可用二次抛物线进行拟合表征两者关系;而在不同含水率条件下,似摩擦系数随含水率的增大也呈现先增大后减小的规律,存在界限含水率,在界限含水率下,似摩擦系数达到最大。

参考文献:

- [1] 王子鹏,贾梓. 土工格栅横肋在加筋作用中贡献的试验研究[J]. 长江科学院院报, 2014(3):84—86 (WANG Zipeng, JIA Zi. Pull-out test on the contribution of geogrid ribs to reinforcement effect[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2014(3):84—86 (in Chinese))
- [2] Gurung N. A theoretical model for anchored geosynthetics in pull-out tests[J]. Geosynthetics International, 2000, 7(3):269—284.
- [3] 梁冰,董擎,姜利国,等. 不同含水率和压实度铅锌尾砂抗剪强度试验研究[J]. 实验力学, 2016, 31(3):417—424 (LIANG Bing, DONG Qing, JIANG Liguang, et al. Experimental investigation on shear strength of lead-zinc tailings with different compaction degrees and moisture contents[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2016, 31(3):417—424 (in Chinese))
- [4] Sugimoto M, Alagiyawanna A M N, Kadoguchi K. Influence of rigid and flexible face on geogrid pullout tests[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2001,19:257—277.
- [5] 关秀光,刘文白. 土工格栅与土的摩擦特性试验[J]. 上海地质, 2004(2):13—17 (GUAN Xiuguang, LIU Wenbai. Experimental of interface frictional characteristics on geogrid and soil[J]. Shanghai Geology, 2004(2):13—17 (in Chinese))
- [6] 邹静蓉,刘拓瑜,冷伍明. 土与土工格栅相互作用的模型试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2005, 2(3):51—55 (ZOU Jingrong, LIU Tuoyu, LENG Wuming. The model test research on interaction of soil and geogrid[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2005, 2(3):51—55 (in Chinese))
- [7] 汪明元,包承纲,丁金华,等. 试验条件对土工格栅与膨胀土界面拉拔性状的影响[J]. 岩土力学, 2008, 29(11):442—448 (WANG Mingyuan, BAO Chenggang, DING Jinhua, et al. Effect of some test conditions on pull-out behaviors of interface between geogrids and compacted expansive soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(11):442—448 (in Chinese))
- [8] 陈云勇. 加筋土筋土界面特性试验研究[J]. 公路交通技术, 2010(1):8—11 (CHEN Yunyong. Test and research on characteristics of reinforcement-soil interface in reinforced soil[J]. Technology of Highway and Transport, 2010(1):8—11 (in Chinese))
- [9] 邹玉娜,时伟. 土工格栅加筋土直剪摩擦试验研究[J]. 青岛理工大学学报, 2013, 34(3):11—16 (ZOU Yuna, SHI Wei. Study on direct shear friction test of geogrid reinforced soil[J]. Journal of Qingdao Technological University, 2013, 34(3):11—16 (in Chinese))
- [10] 凌天清,周滨,吴春波,等. 筋土界面摩擦特性影响因素分析[J]. 交通运输工程学报, 2009, 9(5):7—12 (LING Tianqing, ZHOU Bin, WU Chunbo, et al. Study of influence factors on tendons-soil interface characteristic[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2009, 9(5):7—12(in Chinese))
- [11] 张俊峰,王协群,邹维列,等. 土—格栅界面强度参数和剪切刚度试验研究[J]. 长江科学院院报, 2014(3):77—83 (ZHANG Junfeng, WANG Xiequn, ZOU Weilie, et al. Experimental study on shear strength parameters and shear stiffness behavior of soil-geogrid interface[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2014(3):77—83 (in Chinese))
- [12] 伍祥松,蒋科,贾圣东. 加筋土筋土界面特性研究[J]. 公路交通术, 2009(1):9—13 (WU Xiangsong, JIANG Ke, JIA Shengdong. Study on characteristics of reinforced earth surface[J]. Technology of Highway and Transport, 2009(1):9—13 (in Chinese))
- [13] 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))
- [14] 臧贺. 煤矸石与土工格栅界面特性研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2014 (ZANG He. Research on interfacion behavior between coal gangue and geosynthetics[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014

(in Chinese))

- [15] 刘昌禄, 邓荣贵, 顾垒, 等. 加筋土界面作用参数的拉拔试验研究[J]. 路基工程, 2014(6):77—81(LIU Changlu, DENG Ronggui, GU Lei, et al. Study on interface parameters of reinforced soil by pull-out test[J]. Subgrade Engineering, 2014(6):77—81(in Chinese))

Experimental study of interface characteristics between geogrid and tailings with different water contents

XIE Bao-jin^{1,2}, ZHANG Xiang-dong¹, DU Chang-bo¹

(1. Institute of Civil Engineering and Transportation Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China;

2. The Third Engineering Co., LTD of China Railway Seventh Group, Xi'an 710032, China)

Abstract: Water content is an important factor to influence the stability of tailings reinforced structure. Through indoor drawing experiment, the interface characteristics between tailings and geogrid were studied under the condition of different water contents of tailings (1.5%, 9.7%, 19.3%). Results show that the maximum shear stress and normal stress of geogrid are linearly related, which can reflect that geogrid-tailings interface parameter is similar to pseudo-cohesion and pseudo-friction angle. With the increase of water content, pseudo-cohesion increases first and then decreases; and with the increase of water content, pseudo-friction angle also decreases first and then increases. During the process of water content increase, there is a water ratio limit of about 10%. Under the water ratio limit condition, pseudo-cohesion reaches the maximal value, pseudo-friction angle reaches the minimum value. Pseudo-friction coefficient decreases nonlinearly with the increase of normal stress, which shows that the relationship between them can be fitted by second-degree parabola. Under the condition of different water content, with the increase of water content, pseudo-friction coefficient increases first and then decreases, which is consistent with pseudo-cohesion variation of corresponding interface parameters. Above results have certain guiding value for tailings dam reinforcement design using geogrid.

Keywords: water content; pseudo-cohesion; pseudo friction angle; pseudo-friction coefficient