

法向应力下土工织物过滤黏土淤堵试验研究

彭善涛, 徐超, 杜春雪, 张鹏程

An experimental study of clogging of the geotextile filter system under normal stress

PENG Shantao, XU Chao, DU Chunxue, and ZHANG Pengcheng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202106037>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于光纤传感技术的土工格栅变形及受力研究

A study of deformation and stress of geogrids based on optical fiber sensing technology

刘倩萁, 张孟喜, 洪成雨 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 119-125

高含水量冻粉黏土应力-应变曲线特性的试验研究

An experimental study of the stress-strain characteristics of frozen silty clay with high moisture content

张遂, 匡航, 靳占英, 徐国方 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 116-124

岩土体吸水膨胀应力系数的试验研究

Experimental research on water absorption expansion stress coefficient of rock and soil mass

郭永春, 许福周, 许嘉伦, 屈智辉 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 86-92

固化轻质土在干湿循环及大变形条件下力学特性研究

A study of the mechanical properties of curing light soil under the condition of drying-wetting circles and large deformation

杨爱武, 姜帅, 封安坤, 陈立杰, 赵梦生 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 93-100

初始固结应力对平面应变黄土剪切破坏特性影响

Effect of initial solidification stress on shear failure characteristics of loess under the plane strain condition

李宝平, 杨倩, 张玉, 平高权, 王智 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 92-99

玄武岩纤维加筋黄土承载比试验研究

An experimental study of the California bearing ratio of basalt fiber reinforced loess

李沛达, 骆亚生, 陈箐芮, 汪国刚 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 131-137



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202106037

彭善涛, 徐超, 杜春雪, 等. 法向应力下土工织物过滤黏土淤堵试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(2): 71-76.

PENG Shantao, XU Chao, DU Chunxue, *et al.* An experimental study of clogging of the geotextile filter system under normal stress[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(2): 71-76.

法向应力下土工织物过滤黏土淤堵试验研究

彭善涛¹, 徐超^{1,2}, 杜春雪¹, 张鹏程³

(1. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 3. 上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200434)

摘要: 模拟实际工况, 采用改进的可以施加竖向荷载的梯度比渗透仪完成了一系列土工织物过滤黏性土的梯度比试验。试验采用上海地区第④层黏性土和短纤针刺无纺土工织物, 分别在临界水力梯度(1.0)和水力梯度为2.0下进行, 并通过改变竖向荷载来研究土工织物反滤性能随水力梯度和法向应力的变化规律。研究表明: 水力梯度和法向应力是影响土工织物淤堵特性和滤层透水能力的重要因素。随着竖向荷载的增加, 土工织物过滤黏性土的梯度比有所增大, 但其稳定时并未发生不容许的淤堵; 在特定荷载下, 渗透系数随时间减小, 而后趋于稳定, 稳定后的渗透系数随竖向荷载的增大而减小; 水力梯度由1.0增大到2.0, 也引起了土工织物-黏性土体系的梯度比增大, 透水能力减弱。试验结果较好地反映了实际工况下土工织物滤层的反滤作用, 可为类似工程设计提供参考。

关键词: 土工合成材料; 无纺土工织物; 反滤; 法向应力; 梯度比试验

中图分类号: TU411.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)02-0071-06

An experimental study of clogging of the geotextile filter system under normal stress

PENG Shantao¹, XU Chao^{1,2}, DU Chunxue¹, ZHANG Pengcheng³

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Shanghai Investigation, Design & Research Institute Co. Ltd., Shanghai 200434, China)

Abstract: For simulating the actual working conditions, a series of gradient ratio tests of geotextile filtering clay are completed by using an improved gradient ratio permeameter that can apply vertical load. The tests are carried out under the condition of the critical hydraulic gradient (1.0) and hydraulic gradient equal to 2.0, respectively, with the 4th layer of clay soil in Shanghai and the short fiber needle punched non-woven geotextile. The variation of the filtration performance of geotextile with hydraulic gradient and normal stress is studied by changing the vertical load. The results show that the hydraulic gradient and normal stress are the important factors affecting the clogging characteristics and the permeability of geotextile filter. The gradient ratio of the geotextile filter clay increases with the increase of the vertical load, but there is no impermissible clogging when it is stable. Under a certain load, the coefficient of permeability decreases with time and then tend to stabilize. The stabilized coefficient of permeability decreases with the increase of the vertical load. The hydraulic gradient from 1.0 to 2.0

收稿日期: 2021-06-16; 修订日期: 2021-08-09

投稿网址: www.swdkgcdz.com

第一作者: 彭善涛(1997-), 男, 硕士研究生, 研究方向为土工合成材料与地基加固技术。E-mail: tjupst@tongji.edu.cn

通讯作者: 杜春雪(1991-), 女, 博士研究生, 研究方向为土工合成材料与地基加固技术。E-mail: cx_d0114@tongji.edu.cn

also causes the increase of the gradient ratio and the decrease of the permeability. The test results better reflect the filtration effect of the geotextile filter under the actual working conditions, which can provide references for similar engineering design.

Keywords: geosynthetics; nonwoven geotextiles; filtration; normal stress; gradient ratio test

在目前的工程建设中,由于土地资源的紧张,人们开始对地下空间进行更多的开发与利用,在进行地下空间结构的建设中,土工织物作为性能优良的反滤材料已经广泛地运用到地下结构的排水主动抗浮、PVD排水固结等工程项目中^[1-3]。土工织物运用到工程中,最需要关注的是其反滤性能,反滤性能即要确保土工织物具有保土性、透水性以及防淤堵的特性,其中防淤堵性一直是工程建设中所关注的焦点问题^[4]。实际工程中因为土工织物的淤堵而出现安全隐患事故的现象并不少见^[5-6],因此,土工织物反滤特性的研究具有重要的实际意义。研究土工织物反滤特性的试验方法主要有长期渗透试验和梯度比试验,由于梯度比试验直观性较好,试验周期短,是目前研究土工织物滤层淤堵性能常采用的方法^[7]。

现有的梯度比试验研究中, 庞小朝等^[8]设置了3种水力梯度进行试验, 得出了细小颗粒移动及发生淤堵快慢与水力梯度之间的关系。Cazzuffi等^[9]研究了土工织物反滤黏性土在循环水力梯度下的反滤特性。翟超等^[10]采用了3种不同孔径的土工织物进行梯度比试验, 结果表明梯度比随着土工织物孔径的增加而减小。陈轮等^[11]采用4种不同孔径的钢丝编织网进行粉土反滤试验研究, 发现较大孔径的土工织物滤层可以减少淤堵, 这与李国栋等^[12]所进行的梯度比试验得到的结论相似。唐琳等^[13]研究发现, 随着拉应变的增加, 土工织物(有纺)的透水及淤堵性能增强、保土性能减弱。魏松等^[14]开展梯度比试验, 得出了黏粒含量越大、织物等效孔径越小, 土颗粒越容易造成织物的淤堵。徐超等^[15]利用无纺织物过滤黏土的梯度比试验揭示了土的性质对淤堵试验的影响。Palmeira等^[16]对砂土-土工织物系统在压力作用下的保土能力、渗透系数以及淤堵可能性等方面的反滤问题进行了探讨。

国内外学者对于影响土工织物反滤性能的影响因素做了较多的研究,但是对于在荷载状态下土工织物滤层的淤堵试验研究很少,而在实际工况中,土工织物长时间埋置在土体之中,承受着一定的上覆荷载,在法向应力和水流作用下,土工织物过滤黏性土时可能发生的淤堵情况值得进一步深入研究。

为了能够真实准确地反映实际工程,本次试验专门设计制作了具有加载装置的梯度比渗透仪,开展同一水力梯度、不同应力水平作用下土工织物过滤黏性土的淤堵试验,分析了不同应力水平下梯度比和渗透系数的变化规律,并结合稳定后梯度比与渗透系数的变化情况,指出法向应力的施加可能会加重土工织物滤层的淤堵情况。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验土样取自上海浦东张江镇第④层的淤泥质粉质黏土,采用单位质量为 125 g/m^2 的短纤针刺无纺土工织物,用自制的梯度比试验装置进行梯度比试验。试验用无纺土工织物由山东路德股份有限公司提供,厚度为 1.0 mm ,等效孔径 O_{95} 为 0.17 mm 。试验土样的颗粒分析曲线如图 1 所示,其特征粒径 $d_{85}=0.0181 \text{ mm}$, $<0.005 \text{ mm}$ 的颗粒质量分数为 43.1% 。

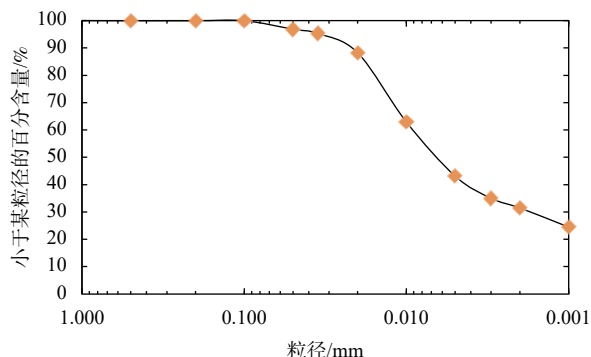


图 1 土样的颗粒分析曲线

Fig. 1 Particle analysis curve of the soil sample

1.2 试验装置与试验方法

本试验根据《土工合成材料测试规程》^[17]进行,试验装置示意图如图2所示,该装置主要由调节常水头的供水筒和具有加压装置的梯度比试验仪器组成。试验过程中将土工织物和被保护土依次放入渗透室中,先由排水管进水,使水缓缓从底部流入至土样一定高度的时候,改用进水管进水直至水充满整个渗透室,待土样饱和之后,调节试验所需的水力梯度和测压管示数进行试验,其中1号和7号测压管分别代表

最低水位和最高水位。渗流稳定之后, 每隔 1 h 测读各个测压管的示数以及渗流量, 同时计算不同土样位置处的水力梯度值并计算梯度比。

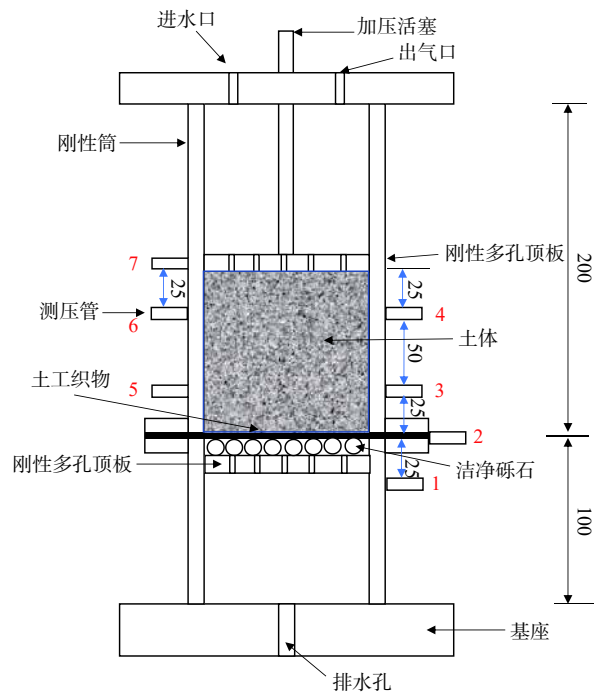


图 2 梯度比装置示意图 (单位: mm)
Fig. 2 Schematic diagram of the gradient ratio device (unit: mm)

根据梯度比的定义^[18], 梯度比按公式(1)计算:

$$G_R = \frac{i_1}{i_2} = \frac{\left(\frac{H_3 + H_5}{2} - H_1\right) / (l_1 + \delta)}{\left(\frac{H_4 + H_6}{2} - \frac{H_3 + H_5}{2}\right) / l_2}$$
 (1)

式中: G_R ——梯度比;
 i_1 ——土-土工织物体系的水力梯度;
 i_2 ——土体的水力梯度;
 $H_1 \sim H_6$ ——1 号至 6 号测压管的水头高度值;
 δ ——土工织物的厚度/mm;
 l_1 ——1 号测压管到 3 号测压管位置的渗流路径距离, 其值为 25 mm;
 l_2 ——3 号测压管到 4 号测压管位置的渗流路径距离, 其值为 50 mm。

根据测得的渗流量和渗透系数的计算公式^[19], 反滤体系的渗透系数按公式(2)计算:

$$K = \frac{q \cdot L}{A \cdot \Delta h} = \frac{q \cdot L}{A \cdot (H_7 - H_1)}$$
 (2)

式中: K ——渗透系数/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$);
 q ——反滤体系的渗流量/mL;
 L ——渗流路径/cm;

A ——试样的横截面积/ cm^2 ;
 Δh ——水头差/cm;
 H_1 、 H_7 ——1 号、7 号测压管的水头高度。

2 试验结果及分析

经计算得出试验土的临界水力梯度为 1.0, 试验分别在水力梯度 $i=1.0$ (临界水力梯度)、 $i=2.0$ 条件下通过调节水头差确定水力梯度。在每一水力梯度下, 对试样施加 0, 5, 15, 25 kPa 的荷载进行梯度比试验。

2.1 梯度比 G_R 变化规律

待渗流稳定后连续测读 48 h, 试验结果见图 3。从图 3 中可知: 施加不同荷载的各组梯度比试验具有相同的变化趋势, 梯度比随时间缓慢减小, 之后趋于稳定, 最终稳定的梯度比值列于表 1。

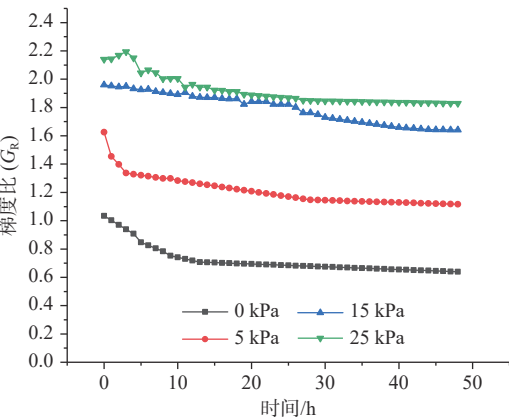


图 3 临界水力梯度下梯度比的变化规律
Fig. 3 Gradient ratios under the critical hydraulic gradient

表 1 临界水力梯度下各级荷载稳定后的 G_R 值
Table 1 Gradient ratio of stable loads under the critical hydraulic gradient

荷载/kPa	0	5	15	25
G_R	0.63	1.18	1.64	1.83

从表 1 可以看出, 最终稳定的 G_R 值会随着荷载的增大而增大; 相邻应力水平下梯度比 G_R 值增大的趋势在减小, 如 0~5 kPa 应力水平下 G_R 值增大了 87%, 15~25 kPa 应力水平下 G_R 值增大了 11.6%。

水力梯度为 2.0 时, 在不同法向应力下渗流稳定后梯度比的变化规律如图 4 所示, 梯度比的稳定值列于表 2。

从图 4 和表 2 可以看出, $i=2.0$ 下梯度比的变化趋势与 $i=1.0$ 下的相同, 即 G_R 值会随荷载的增加而增大。

2 种水力梯度下梯度比的总体趋势都是先下降,

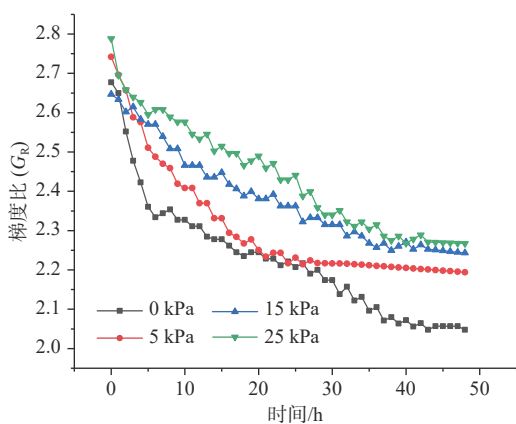


图 4 水力梯度为 2.0 的梯度比变化规律

Fig. 4 Variation of the gradient ratios with hydraulic gradient of 2.0

表 2 各级荷载稳定后的 G_R 值 ($i=2.0$)Table 2 Gradient ratio of stable loads at all levels ($i=2.0$)

荷载/kPa	0	5	15	25
G_R	2.06	2.20	2.25	2.27

且下降的速率逐渐减缓,并最终趋于一个稳定的值。开始时梯度比下降得快,从渗出的液体里发现了土颗粒,分析原因认为在渗流作用下,细颗粒会逐渐被带走,随着时间的增加,土体内部逐渐形成了比较稳定的反滤层,渗流也处于稳定的状态。

2.2 渗透系数 K 变化规律

在水力梯度为 1.0 时,施加不同荷载水平,在渗流稳定后记录每小时的渗流量,为了避免人工读数的误差,渗流量的记录采用电子天平称量,连续读取 48 h,根据上述体系渗透系数的计算公式进行计算,计算结果见图 5 以及表 3。

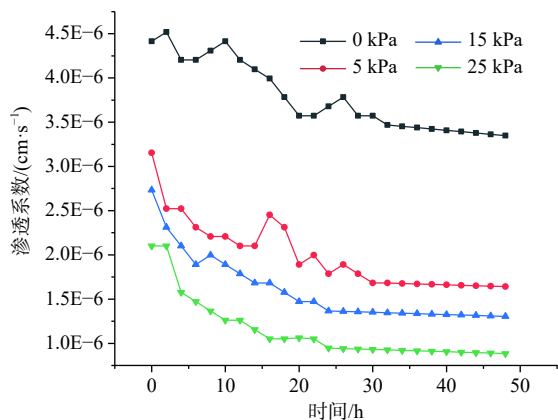


图 5 临界水力梯度下渗透系数的变化规律

Fig. 5 Variation of coefficient of permeability under the critical hydraulic gradient

从图 5 可以得出,在临界水力梯度的条件下,不

表 3 临界水力梯度下各级荷载稳定后的渗透系数

Table 3 Coefficient of permeability of stable loads under the critical hydraulic gradient

荷载/kPa	0	5	15	25
$K/(10^{-6} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1})$	3.40	1.70	1.30	0.89

同荷载条件下水力梯度的变化趋势都是随时间的增加而逐渐降低,最终达到一个稳定的值;从表 3 最终稳定的渗透系数值可以得到:随着荷载增加,渗透系数的稳定值逐渐减小;0~5 kPa 应力水平下渗透系数减小了 50%,5~15 kPa 应力水平下渗透系数减小了 23.5%,15~25 kPa 应力水平下渗透系数减小了 31.5%。

调节水力梯度为 2.0,其他条件保持不变,渗流稳定后渗透系数随时间变化的曲线如图 6 和表 4 所示。由图 6 可知,各级法向应力下渗透系数的总体变化趋势是随时间不断减小并趋于稳定值。从表 4 可知, $i=2.0$ 下渗透系数在不同法向应力下的变化趋势与临界水力梯度下的变化趋势一致。

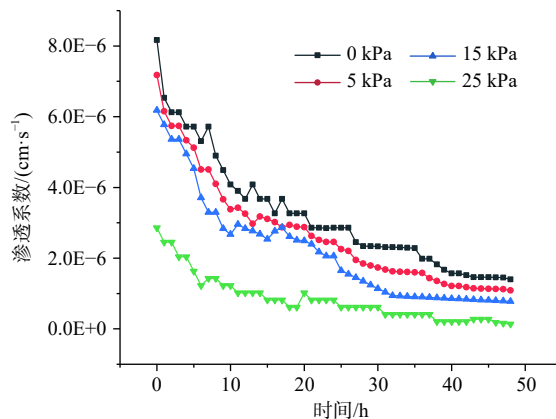


图 6 水力梯度为 2.0 渗透系数的变化规律

Fig. 6 Variation of coefficient of permeability with hydraulic gradient of 2.0

表 4 各级荷载稳定后的渗透系数 ($i=2.0$)Table 4 Coefficient of permeability after all levels of load stabilization ($i=2.0$)

荷载/kPa	0	5	15	25
$K/(10^{-6} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1})$	1.50	1.10	0.78	0.18

在临界水力梯度和水力梯度为 2.0 的情况下,施加不同荷载时的渗透系数变化趋势均为先下降后趋于稳定,分析认为:在水流和法向应力作用下细颗粒被逐渐带走,并与相邻级配土颗粒重新排列,使局部土层颗粒形成挤密效应,导致土-土工织物系统的渗透系数随时间逐渐减小,之后随着时间的推移,织物上

方的土体形成稳定的结构而阻止细颗粒被带走,渗流处于稳定的状态,渗透系数也将趋于稳定。

2.3 试验结果的分析与讨论

根据前文的试验结果,水力梯度分别为 1.0 和 2.0、各级荷载下土工织物过滤黏性土,体系达到渗流稳定时的 G_R 值和渗透系数的变化规律如图 7 所示。

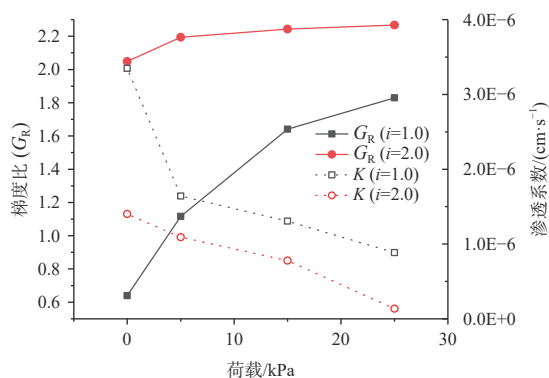


图 7 梯度比、渗透系数与法向应力的关系

Fig. 7 Relationship among gradient ratio, coefficient of permeability and normal stress

从图 7 中可以看出,在相同的应力水平下,当水力梯度从 1.0 增大到 2.0 时,反滤体系的梯度比增大,渗透系数减小。可见,水力梯度是影响土工织物淤堵特性和滤层透水能力的重要因素。根据达西定律,渗透流速与水力梯度成正比。在渗透系数变化不大的情况下,增大水力梯度必然会使渗透流速增大,则渗流携带土粒的能力增强,使得相邻土体中更多的土颗粒在较大的渗透力作用下淤堵在织物表面或滞留在土工织物中,导致土工织物的淤堵程度更严重。因此,土工织物滤层的透水性降低,对应的 G_R 增大,渗透系数减小。

同时,如前所述,在相同的水力梯度下, G_R 值会随荷载增大而逐渐升高,体系的渗透系数随荷载增大而逐渐减小,这都表明增大荷载使土-土工物体系的透水性减弱。根据相关学者的试验研究^[19-20],在显微镜下可以观测到,施加在织物上的法向应力改变了土工织物的细观结构特征,土工织物的孔隙随着法向应力增大而减小,同时孔隙的形状也会由圆形变得扁平。因此,竖向荷载的增加使细颗粒更不容易穿过土工织物进而加重了淤堵程度,使滤层的渗透系数随着压力的增大而减小。

3 结论

(1)对土-土工织物反滤体系施加荷载,改变了织

物的孔隙大小和形状,使土颗粒更不容易透过织物,梯度比明显增大,相应的渗透系数也会随之降低,说明增加荷载会影响系统的渗流,使渗流更加困难,加重系统的淤堵情况。

(2)增大水力梯度,增强了渗流携带土颗粒的能力,更多的土颗粒淤堵在织物表面或者滞留在织物内部使得淤堵情况更加严重,透水性减弱,因此梯度比值增大,同时渗透系数减小。

实际工程中,土工织物发挥反滤作用时,受到渗流力和外荷载的影响,通过开展法向应力下土工织物反滤体系的梯度比试验,证明了施加竖向荷载对土工织物反滤系统的淤堵情况具有显著的影响,但应进一步深入研究渗流与应力场耦合作用下土工织物的反滤特性。

参考文献 (References) :

- [1] 徐文炜,黄文靖.地下车库无桩稳压抗浮技术研究[J].城市住宅,2020,27(1):153-157. [XU Wenwei, HUANG Wenjing. Research on stabilizing pressure and anti floating technology of underground garage without piles[J]. City & House, 2020, 27(1): 153 - 157. (in Chinese)]
- [2] 王力健.降水抗浮技术在地下工程中的应用[J].建筑技术,2014,45(3):243-246. [WANG Lijian. Application of draw-water anti-floating technology in underground engineering[J]. Architecture Technology, 2014, 45(3): 243 - 246. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 张占荣.PFF复合反滤层及其在支挡工程中的应用研究[J].水文地质工程地质,2017,44(3):100-104. [ZHANG Zhanrong. Study on PFF composite filter layer and its application in retaining engineering[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(3): 100 - 104. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 杨春和,李泽华,冒海军,等.尾矿坝排渗系统淤堵机理试验研究[J].广西大学学报(自然科学版),2019,44(3):845-854. [YANG Chunhe, LI Zehua, MAO Haijun, et al. Experimental study on the clogging mechanism of drainage system in tailings dam[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2019, 44(3): 845 - 854. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 唐正涛,孙爱国,熊荣军,等.模拟现场工况条件下的无纺布淤堵试验研究[J].水运工程,2017(5):87-91. [TANG Zhengtao, SUN Aiguo, XIONG Rongjun, et al. Clogging tests study on non-woven fabrics under simulated on-site operating conditions[J]. Port &

- Waterway Engineering, 2017(5): 87 – 91. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 程醒, 吴海民, 易有元, 等. 土工织物/铝尾矿赤泥系统淤堵特性试验[J]. 金属矿山, 2020(12): 196 – 202. [CHENG Xing, WU Haimin, YI Youyuan, et al. Laboratory tests on clogging property of geotextile/aluminum tailings red mud system[J]. Metal Mine, 2020 (12): 196 – 202. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 龚明. 无纺土工织物淤堵试验及评价指标研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019. [GONG Ming. Study on clogging test and evaluation index of nonwoven geotextiles[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 庞小朝, 朱江颖, 周小文. 土工织物淤堵试验装置及方法改进研究[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(3): 68 – 73. [PANG Xiaochao, ZHU Jiangying, ZHOU Xiaowen. Improvement of test device and test method for geotextile clogging[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(3): 68 – 73. (in Chinese with English abstract)]
- [9] CAZZUFFI D A, MAZZUCATO A, MORACI N, et al. A new test apparatus for the study of geotextiles behaviour as filters in unsteady flow conditions: relevance and use[J]. Geotextiles and Geomembranes, 1999, 17(5/6): 313 – 329.
- [10] 翟超, 郭伟锋, 严驰. 黏性土渗透淤堵室内模拟试验及分析[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(增刊 1): 147 – 151. [ZHAI Chao, GUO Weifeng, YAN Chi. Laboratory model tests and mechanism of infiltration clogging effect of clayey soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(Sup 1): 147 – 151. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 陈轮, 庄艳峰, 许齐, 等. 极限保土状态下的反滤机制试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(6): 1455 – 1460. [CHEN Lun, ZHUANG Yanfeng, XU Qi, et al. Test study on filtration mechanism of silt-net system under limit soil-retained state[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(6): 1455 – 1460. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 李国栋, 王媛, 刘胜, 等. 尾矿坝中土工织物滤层反滤试验研究[J]. 水电能源科学, 2021, 39(3): 45 – 49. [LI Guodong, WANG Yuan, LIU Sheng, et al. Experimental study on filtration properties of geotextile filter in tailings dams[J]. Water Resources and Power, 2021, 39(3): 45 – 49. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 唐琳, 唐晓武, 余巍, 等. 单向拉伸对土工织物反滤性能影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(4): 785 – 788. [TANG Lin, TANG Xiaowu, SHE Wei, et al. Influence of uniaxial tensile strain on filtration characteristics of geotextiles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(4): 785 – 788. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 魏松, 龚明. 无纺土工织物渗透淤堵试验研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2021, 44(3): 383 – 388. [WEI Song, GONG Ming. Experimental study on infiltration and clogging of non-woven geotextiles[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2021, 44(3): 383 – 388. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 徐超, 柴菲, 刘若彤, 等. 无纺织物过滤黏土的梯度比试验及机理研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018, 46(3): 227 – 233. [XU Chao, CHAI Fei, LIU Ruotong, et al. Gradient ratio tests and filtration mechanism of cohesive soil-geotextile system[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46(3): 227 – 233. (in Chinese with English abstract)]
- [16] PALMEIRA E M, FANNIN R J, VAID Y P. A study on the behaviour of soil-geotextile systems in filtration tests[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996, 33(6): 899 – 912.
- [17] 中华人民共和国水利部. 土工合成材料测试规程: SL 235—2012[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012. [Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Specification for test and measurement of geosynthetics: SL 235—2012[S]. Beijing: China Water Power Press, 2012. (in Chinese)]
- [18] CALHOUN C C. Development of design criteria and acceptance specification for plastic filter cloths[R]. Vicksburg, Mississippi, USA: Waterways Experiment Station of U. S. Army Corps of Engineers, 1972.
- [19] SHAN H Y, WANG W L, CHOU T C. Effect of boundary conditions on the hydraulic behavior of geotextile filtration system[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2001, 19(8): 509 – 527.
- [20] 滕晓敏. 上覆荷载作用下无纺织物和窗纱反滤性能的试验研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2006. [TENG Xiaomin. The research of filtration properties of the geotextile and window screening under normal stress[D]. Wuhan: Wuhan University, 2006. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 张明霞