

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230621001

玄武岩纤维遏制作用下的砾类土管涌试验研究*

陈亮^{1,2,3}, 卢周洲^{1,2}, 滕耀宗⁴

(1. 河海大学土木与交通学院, 江苏南京 210098; 2. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏南京 210098; 3. 西藏农牧学院西藏土木水利电力工程技术研究中心重点实验室, 西藏林芝 860000; 4. 国网浙江省电力有限公司平湖供电公司, 浙江平湖 314200)

摘要: 管涌如果无法及时得到遏制, 会导致大量土体流失以致堤防溃决。为研究管涌发生环节时使用玄武岩纤维的遏制作用, 拟通过室内管涌试验, 从孔压、水力梯度、渗透系数、流速、颗粒流失等方面, 研究不同纤维含量和纤维长度的玄武岩纤维对管涌发生发展的遏制效应。结果表明, 玄武岩纤维的加入使得缺级配砾类土体的迁移通道变得更加曲折和狭窄, 从而遏制整个土体的管涌发展。同等玄武岩纤维含量下玄武岩纤维缺级配砾类土存在最佳的纤维长度遏制管涌发展。纤维长度过长, 增大了土体的迁移路径同时也使迁移通道相对变宽; 纤维长度越短使得细颗粒的迁移通道变得更加狭窄, 更加容易造成局部堵塞, 进一步使得管涌继续从其他方向发展, 造成颗粒的进一步流失。

关键词: 管涌; 土工合成材料; 玄武岩纤维; 砾类土

中图分类号: TU4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)03-0689-08

Experimental Study on Piping of Gravel Soil under the Inhibitory Effect of Basalt Fiber

CHEN Liang^{1,2,3}, LU Zhouzhou^{1,2}, TENG Yaorong⁴

(1. School of Civil Engineering and Transportation, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Key Laboratory of Tibet Civil Engineering, Water Conservancy and Electric Power Engineering Technology Research Center, Tibet Agriculture and Animal Husbandry University, Nyingchi 860000, China;
4. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd. Pinghu Power Supply Company, Pinghu 314200, China)

Abstract: If piping cannot be restrained in time, it can cause a large amount of soil erosion and lead to embankment collapse. To study the inhibitory effect of basalt fibers during the occurrence of piping, this article conducted indoor piping tests, focusing on aspects such as pore pressure, hydraulic gradient, permeability coefficient, flow velocity, and particle loss. The study examined the effects of different fiber contents and fiber lengths of basalt fibers on the suppression of piping development. The results indicated that the addition of basalt fibers made the migration path of poorly graded gravel soil more tortuous and narrow, thereby inhibiting the development of piping in the entire soil. For the same content of basalt fibers, there was an optimal fiber length to suppress piping development in

* 收稿日期: 2023-06-21; 修回日期: 2023-08-23

基金项目: 西藏自治区自然科学基金重点项目(XZ202301ZR0033G)、国家自然科学基金项目(U2243244)资助

作者简介: 陈亮(1976—), 男, 教授, 博士。主要从事渗流与环境岩土方向研究。E-mail: chenliang@hhu.edu.cn

poorly graded gravel soil with basalt fibers. If the fiber length was too long, it increased the migration path of the soil and also made the migration channel relatively wider. Conversely, shorter fiber length made the migration channel for fine particles narrower, which was more likely to cause local blockage and further led to piping to develop from other directions, resulting in further particle loss.

Keywords: piping; geosynthetics; basalt fiber; gravel soil

0 引言

鉴于气候条件的复杂与汛期的不可预测,堤坝的侵蚀现象愈发频繁,如果最终破坏将会严重威胁群众的生命财产安全^[1-3]。堤防最终事故发生的主要原因是渗透变形引起的破坏^[4],其又可分为流土和管涌两种基本形式。R. Awal等^[5]在研究中列举了发生破裂的各地溃决堰坝,河流的下游表面都出现了渗水现象与管道孔,因此管涌现象在坝体的频繁出现需要遏制。

近年来,越来越多的土工合成材料在地震和岩土工程中得到广泛应用。土工纤维是多种合成材料之一,通过提供额外应力阻力来提高土壤的工程性质^[6-8]。纤维加固土壤被定义为包含随机分布的纤维的土体。将具有较高抗拉强度的纤维嵌入土基体中,其力学性质^[9]表明了其在渗流防护的巨大潜力^[10]。A. Das等^[11-12]研究表明:聚酯纤维和聚丙烯纤维均有效提高砂土的临界水力梯度,且纤维含量、纤维类型和纤维长度是提高土工纤维加筋土管涌力学特性的关键参数。A.R. Estabragh等^[13]研究发现混有粘性土的砂土渗透性的降低取决于纤维含量和纤维长度。

K. Furumoto等^[14]首先发现随机分布的离散纤维可以提高管涌发生的条件。S. Saghari等^[15]混合并加固了不同长度和重量百分比的聚合物纤维细颗粒土样品,通过标准落差法试验检查颗粒土的渗透性,对聚合物纤维增强土的渗透特性进行了评价。此外,还评估了不同条件下纤维对土壤渗透系数的影响。G.L. Sivakumar Babu等^[16]针对椰纤维与红土、砂土的混合开展了研究,发现纤维含量和纤维长度的增加提高了土体的临界水力梯度,同时降低了渗流速度。

应用土工合成材料方面,目前实践经验远大于理论。玄武岩纤维作为一种环保的高性价比材料,对于管涌灾害的预防、抢护和治理等方面具有重大意义。因此,本文将缺级配砾类土作为研究

对象,全掺玄武岩纤维,对不同试样开展室内管涌试验,研究管涌发展过程中各组试样的孔压、流量变化规律;利用不同土层的水力梯度变化寻找管涌发展的空间结构性特点;比较管涌过程中的累计细颗粒流失规律;最后分析玄武岩纤维对管涌发展产生的遏制效应,以及纤维含量和纤维长度的影响。

1 玄武岩纤维砾类土管涌试验

1.1 试验材料

根据 T.C. Kenney^[17]提出砂砾土发生管涌的临界条件:砂砾土内粗颗粒粒径最小值至少是细颗粒粒径最大值的4倍。本文选用的间断级配土参数为:粗颗粒粒径为2.0~8.0 mm,细颗粒粒径为0.075~0.25 mm。《土力学》^[18]指出管涌和流土的分界线受细颗粒含量的影响,细颗粒含量小于25%是缺级配土管涌发生的条件。从实验因素考虑,本文土样的细颗粒含量统一为20%,选用颗粒的孔隙比均为0.5。试样级配曲线及比重信息如图1所示。

玄武岩纤维是玄武岩石料在1450~1500℃熔融后拉制而成的连续纤维,颜色一般为褐色。是一种绿色环保绿色高性能纤维材料。本文采用宽度为1.8 mm的短切玄武岩纤维,直径为0.015 mm。

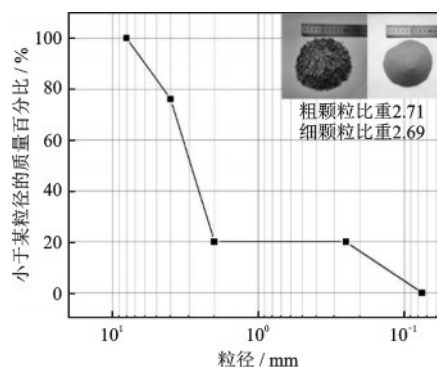


图1 试验用料级配曲线

Fig.1 Gradation curve of test materials

1.2 实验装置

本文采用了一套针对玄武岩纤维砾类土的一维室内管涌仪器。包含管涌发生、颗粒收集、数据处理三个部分,具体如图2所示。

管涌发生系统由电机牵引水箱,使得模型槽内的细颗粒在垂直向上水流下起动并被带出;颗粒收集系统利用电子天平实时测量重量变化;数据处理系统由水压力传感器、流量计及信号转换器、无纸记录仪组成。可以实时记录储存孔压、流量、细颗粒流失量等相关参数。其中水压力传感器测量范围为0~10 kPa,测量精度为±0.2%F.S.;流量计型号为FPR-301,精度1%;无纸记录仪的型号为SIN-R9600,其数据采集间隔为1 s,储存记录间隔范围可在1 s~60 min调整。

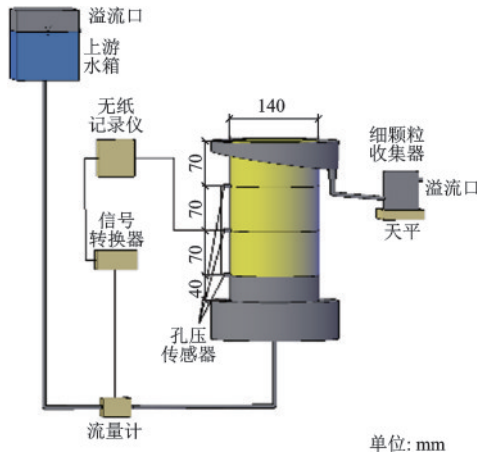


图2 实验装置结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of test device

1.3 试验方案

为研究玄武岩纤维对管涌发展的遏制效应,本文研究了玄武岩纤维土的管涌特性。在保证细颗粒含量、孔隙比及其他实验条件相同的情况下,开展不同纤维含量和长度条件下的室内管涌试验,具体方案见表1。

1.4 试验步骤

(1) 装样阶段:划分土层为三层并均匀装填。采用湿拌法,加入土样4%左右的水以保证颗粒和纤维充分混合均匀。装样前在填土区侧壁均匀涂抹凡士林,减小边界效应。

(2) 饱和阶段:确保上游水箱的初始位置低于

表1 玄武岩纤维缺级配砾类土管涌试样配比方案

Table 1 Proportioning scheme for piping test specimens of poorly graded gravel soil with basalt fiber

组别	试样编号	纤维长度/mm	纤维含量/%
Cbf组	Cbf-0.4	15	0.4
	Cbf-0.8	15	0.8
	Cbf-1.2	15	1.2
Lbf组	Lbf-10	10	0.8
	Lbf-15	15	0.8
	Lbf-20	20	0.8
对照组	Cbf-0	0	0

试样底部,缓缓提升水箱液面,在水头高于试样底部2 cm时,固定水箱进行饱和,观察到水位平齐后,继续将水头向上提升,重复上述步骤,直至试样达到漫溢。此后固定上游水箱水头24 h后开始试验。

(3) 管涌发生阶段:将完全饱和时的水头高度设定为初始零点高度,开始管涌试验。此后试样于同一高度持续渗透10 min之后再将水头提升2 cm至下一级水头高度。试验方案各组提升水头级数应保持相同。提升水头过程中记录颗粒起动时间点、细颗粒开始流失时间点和细颗粒大量流失时间点。上游水头提至设定的水头高度后,保持水头不动,土样管涌发展3 h后停止试验。

(4) 统计各层颗粒流失:试验过程中可对填土层细颗粒流失量进行实时统计。经分层取样烘干后,与装样质量作差可求得分层的细颗粒流失量。

2 试验结果与分析

2.1 流速与水力梯度变化

经计算绘制出管涌过程中不同纤维含量下水力梯度与流速和渗透系数的变化图,如图3所示。由图可以看出,缺级配纤维土管涌过程的四个阶段分别为:①初始渗流阶段;②堵塞阶段;③加速破坏阶段;④完全破坏阶段。

图3(a)显示,在初始渗流阶段,相同的水力梯度下纤维含量越高,对应流速越小,说明纤维含量的增加使得缺级配土体的渗透系数显著降低,渗透系数随着水力梯度的增加呈现波动状态,这是由于土样中细颗粒受力开始出现漂浮、堵塞、回落的过程,但实际并没有造成堵塞;堵塞阶段随着水力梯度的快速增加流量缓慢上升,纤维含量越高,造成堵塞的水力梯度范围越大,堵塞阶段渗透系数随着

纤维含量的增加呈逐渐下降趋势,说明堵塞时随着水力梯度的增加,内部细颗粒也一直进行着迁移的状态,使得土样的渗透系数逐渐降低;加速破坏阶段,水力梯度基本不变,纤维含量越高,加速破坏阶段的水力梯度越大,流速变化越小,且加速破坏阶段持续时间越长,整个试样的渗透系数有所增加,纤维含量越小,增加越明显。在流速增加,水力梯度逐渐减小时,土体进入完全破坏阶段,完全破坏阶段的流速和渗透系数增速随纤维含量的增加而减小。

由图3(b)可看出,初始渗流阶段不同纤维长度土体的渗透系数差距不大,因此水力梯度流速变化曲线接近重合;纤维长度15 mm时,堵塞阶段的水力梯度范围最大,为0.44~1.38;纤维长度10 mm时,堵塞阶段水力梯度范围为0.40~1.22;纤维长度20 mm时,堵塞阶段水力梯度范围为0.45~1.3。且堵塞期间流量的上升幅度在纤维长度10 mm时最大,20 mm次之,15 mm最小;加速破坏阶段在纤维长度10 mm时流速突变最大,且突变之后的流速增

速快,渗透系数变化大。纤维长度20 mm流速突变最小;进入完全破坏阶段的水力梯度随纤维长度的增加分别为1.37、1.48、1.39。

通过前文分析可知,玄武岩纤维在缺级配砾类土中,宏观上能够降低缺级配砾类土体的渗透系数,然而各组试样的级配和孔隙实际上并没有发生变化,因此从微观层面考虑,可推断出一定掺量的玄武岩纤维缺级配砾类土能够显著增大土体的曲折系数,增大细颗粒在运移的过程中造成堵塞的路径,从而有效增大土体的渗径长度,使得水力梯度、流速等变量在管涌过程中的曲线有所区别。

2.2 纤维长度与含量最优分析

Cbf组和Lbf组的临界堵塞水力梯度、临界破坏水力梯度、加速破坏水力梯度、完全破坏水力梯度见表2。由表2可知,Cbf组各阶段的临界水力梯度均随着纤维含量的增加而增大,说明纤维含量越高,缺级配砾类土的承压能力越强,细颗粒越不容易起动,造成堵塞的时间越久,土样越不容易发生管涌破坏;临界堵塞流速、临界破坏流速、加速破坏流速随纤维含量的增加而减小,说明纤维含量越高,土样的渗透系数越小,越能遏制管涌过程中的流量增加;完全破坏水力梯度与加速破坏水力梯度的差值与纤维含量正相关,纤维含量为0时,土样管涌过程跳过加速破坏阶段直接进入完全破坏阶段,纤维含量越大,加速破坏阶段的持续时间越长,说明纤维含量的增加可以遏制试样的加速破坏,在实际工况中更容易被及时发现并安排相关抢护工作。

Lbf组各阶段临界水力梯度在Lbf-15组最大,说明纤维长度并不是越大越好,而是存在某个最优长度使得土体的防渗透变形性能最好。

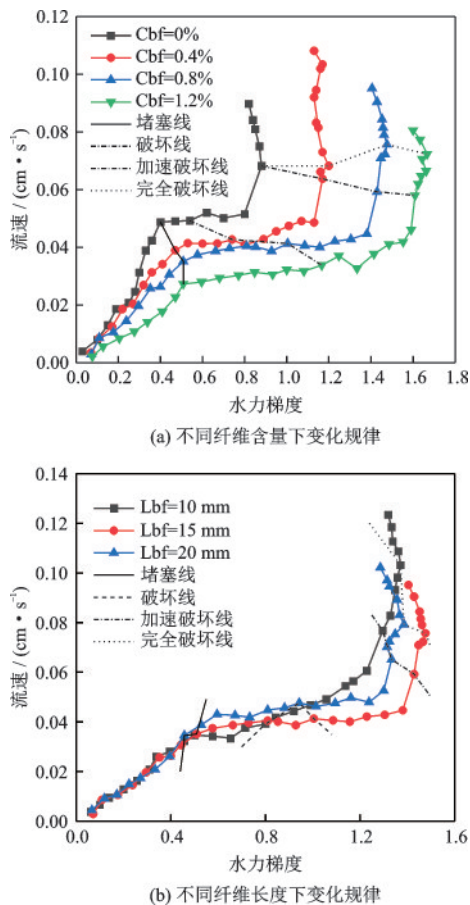


图3 水力梯度—流速变化规律

Fig.3 Variation of flow velocity with hydraulic gradient

表2 各土样临界水力梯度

Table 2 Critical hydraulic gradient of each soil sample

试样编号	临界堵塞水力梯度	加速破坏水力梯度	完全破坏水力梯度
Cbf-0	0.40	0.88	0.88
Cbf-0.4	0.47	1.17	1.20
Cbf-0.8	0.51	1.42	1.48
Cbf-1.2	0.51	1.61	1.67
Lbf-10	0.46	1.29	1.37
Lbf-15	0.51	1.42	1.48
Lbf-20	0.46	1.33	1.39

2.3 各层水力梯度变化

根据测得的孔压值在实验过程中的变化可计算出不同深度土层的水力梯度,对各层水力梯度进行分析研究可以进一步得到纤维土管涌的空间结构特性,从而进一步解释玄武岩纤维对管涌发展的遏制效应。

Cbf各组试样各土层水力梯度与水头高度的变化曲线如图4所示,变化规律大致如下:纤维含量越高,初始渗流阶段下层能够承受的水力梯度越大。在图4中,各层水力梯度可以看出明显差距,这意味着纤维含量越大,管涌越是由下层开始发展,承担更高的水力梯度,首先起动并造成堵塞;进入堵塞阶段后,纤维含量越高,各层水力梯度曲线越是体现出中层和下层的水力梯度增速加快,上层水力梯度增速不明显,上层承担的水力梯度越小,待细颗粒逐渐迁移发展至中上两层,中层的水力梯度逐渐增加,细颗粒开始迁移至顶面流出,造成试样的渗透破坏。破坏线之后试样仍旧处于堵塞阶段,中上层孔压迅速上升,证明细颗粒已开始逐渐迁移至中上两层,但并没有大量细颗粒涌出,因此下层土体

孔压也继续上升。此外,在图4(b)和(c)中堵塞阶段中出现了中层孔压先于下层孔压降低的现象,这可能是由于纤维含量的升高使得细颗粒的迁移通道变得蜿蜒和狭窄,使得下层细颗粒还未完全迁移至中上层时,中层水力梯度的提高使得细颗粒首先迁移至了上层,造成中层渗透系数的增大和水力梯度的减小,较为明显地体现了玄武岩纤维对管涌发展的遏制效应;进入加速破坏阶段后,中层和下层的水力梯度已经开始下降,这是由于细颗粒从中下层大规模迁移至上层,所以上层水力梯度表现为在继续上升几级水头高度后下降,体现了玄武岩纤维土作为下游土体抗渗透变形的能力,纤维含量越高,规律越明显,土体防止渗透破坏的能力越强。

如图5所示,对不同纤维长度各组试样分层水力梯度随水头高度的变化规律分析如下:在初始渗流阶段,各组不同土层的水力梯度没有拉开很大差距;进入堵塞阶段后,各组中层和下层的水力梯度差距渐渐拉开,各组的下层孔压迅速增长,说明此时下层细颗粒首先迁移造成堵塞,试样开始破坏后,上层水力梯度增速逐渐加快。不同纤维长度达到临界破坏点、加速破坏点的水力梯度不同,其中

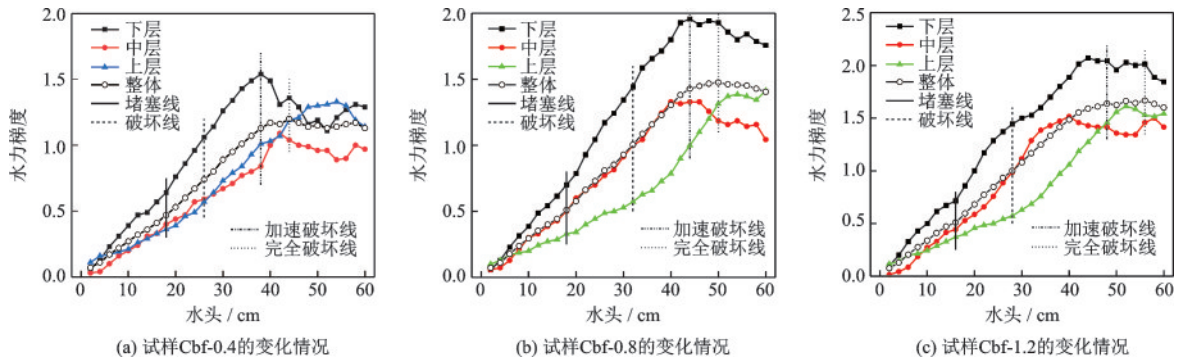


图4 不同土层深度水力梯度变化(Cbf组)

Fig.4 Variation of hydraulic gradient at different soil depths (Cbf group)

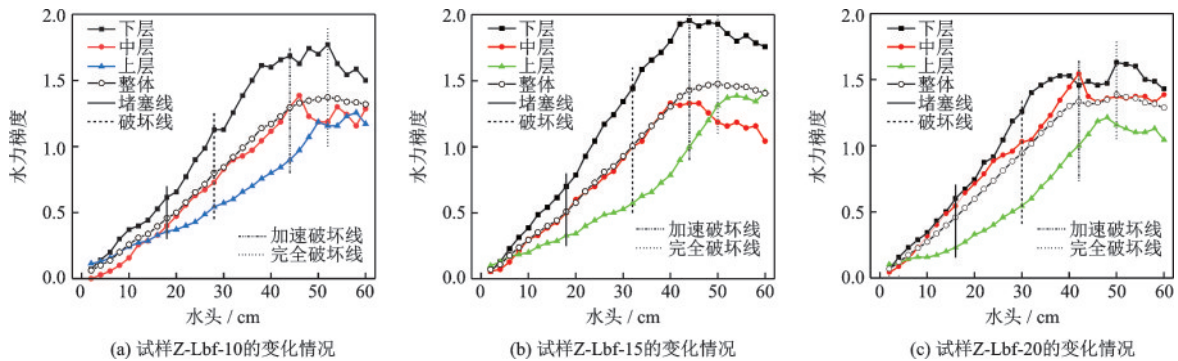


图5 不同土层深度水力梯度变化(Lbf组)

Fig.5 Variation of hydraulic gradient at different soil depths (Lbf group)

Lbf-15组的水力梯度最大,说明在一定的纤维含量下,纤维长度过大和过小均会对土体管涌发展的遏制性能变差,存在一个最优的纤维长度使得其对土体管涌的遏制效果最好。在纤维长度偏小时,随着水头提升,上中下层的水力梯度差距不大,且从堵塞到临界破坏的水头差越小,从临界破坏到加速破坏的水头差越大。在纤维长度偏大时,中层从临界破坏到加速破坏的水力梯度增速越快,一度超过了下层水力梯度,这是大量细颗粒从试样下层涌入中层的结果,因此管涌的内部发展越快,随后造成中层和上层的堵塞,上层水力梯度急速升高至加速破坏阶段。可认为纤维长度偏小时,使得细颗粒的迁移路径更加狭窄,但是曲折性较差,即渗透路径变短;纤维长度偏大时,土体迁移通道更加蜿蜒曲折,但是其迁移路径相对宽阔,此结论可根据后文的细颗粒流失规律分析得到进一步证实。

2.4 纤维遏制下的细颗粒流失规律

本节从两个方面对不同纤维含量和纤维长度下的细颗粒流失进行分析,一是利用位于装置末端的细颗粒收集器中记录的细颗粒流失随时间的变化,累计细颗粒流失规律。二是通过分析管涌结束后各层细颗粒最终的流失情况,验证玄武岩纤维土管涌发展的空间结构规律。

在观察到细砂涌出后,通过颗粒收集装置收集不断涌出的细颗粒,得到各组累计细颗粒流失量随时间变化(图6),以开始管涌试验的时间为坐标原点,每隔10 min记录一次试样流失的细颗粒质量。Cbf组在初始渗流阶段,各试样均无细颗粒从顶部迁出,随着时间推移,外部水头提升,细颗粒开始从顶部迁出,此时颗粒收集装置开始记录数据。从图中可直观地看出,纤维含量Cbf越高,颗粒开始大量涌出的时间更晚,在细颗粒大量涌出,进入加速破坏阶段后,纤维含量越高的组别细颗粒流失增速就越低,验证了纤维含量的升高使得细颗粒的迁移通道变得蜿蜒和狭窄的结论。含纤维土的细颗粒流失增速在300 min附近有一个较明显的拐点,这是由于此时各试样已经提高到最大水头高度,之后在水头稳定的状态下自由发展180 min。由图可知,纤维含量越高,土体渗透变形的发展越缓慢。Lbf-10组试样较晚进入加速破坏阶段,但在此后的细颗粒累计流失量却超过了Lbf-20组,这印证了Lbf-10的迁移通道相对更加狭窄,容易造成局部堵塞,进而

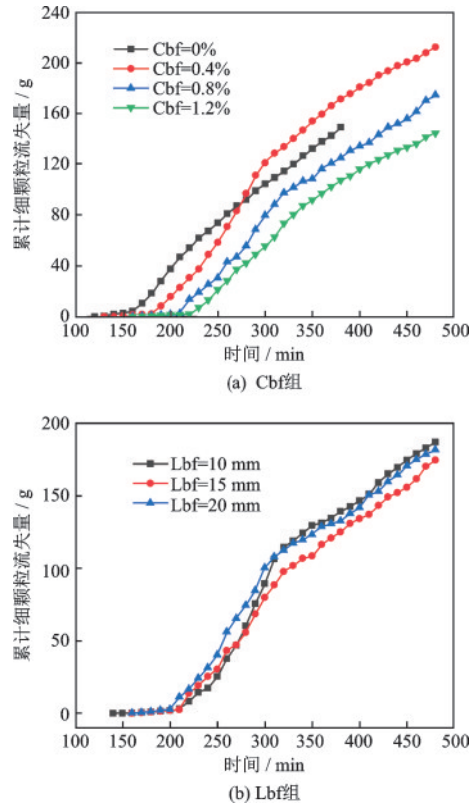


图6 累计细颗粒流失量随时间变化规律

Fig.6 Time-dependent variation of cumulative fine particle loss

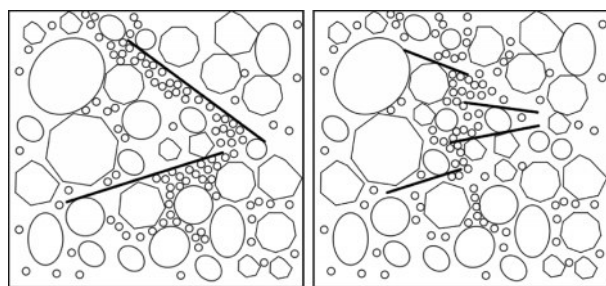
发展出更多的细颗粒迁移路径。Lbf-20组试样细颗粒在210 min时大量涌出,使试样较早进入加速破坏阶段,此后细颗粒保持较高速率流出。300 min以后,水头不再上升的拐点最明显。说明Lbf-20的迁移通道相对更加曲折且较为宽阔。在其管涌破坏发生后,周边的细颗粒更加不容易被带出,因此在水头稳定后的细颗粒流失速度最慢;对比试验印证了本实验中Lbf组的最佳纤维长度为15 mm。

2.5 管涌发生的空间结构规律

各试样的各层细颗粒流失量采用管涌后分层取土烘干再称量作差的方式进行,最终绘制出不同纤维含量和纤维长度下的分层细颗粒流失规律,因此本实验所得分层细颗粒流失量并不是严格意义上各层的细颗粒流失量,而是用试验前填样时各层的细颗粒与试验结束后滞留于各层的细颗粒质量的差值,即其他层补给量与此层流失量的差值。

结论发现不同纤维含量下土层的细颗粒流失量均随着土层深度的增加而增加,表现为下层细颗粒流失量高于中层,中层细颗粒流失量高于上层。

这是由于管涌从下层逐渐发展,中下层细颗粒不断的迁移至上层堵塞或流出,因此管涌结束时,滞留于中上层的细颗粒较多。纤维含量越高,各层的细颗粒流失均减小。这说明了一定范围内纤维含量的增加使得整个土体的抗渗透变形能力更强。对于不同纤维长度下各土层细颗粒流失量,Lbf组各土层的细颗粒流失虽然差距不大,但仍有规律可循:上层细颗粒流失Lbf-10组最少,Lbf-20组最大,说明纤维长度越短,最终土样上部残留的细颗粒越少。结合前文分析可知,纤维长度越短使得细颗粒的迁移通道变得更加狭窄,更加容易造成局部堵塞进一步使得管涌继续从其他方向发展,因此导致了最终上层形成的管涌通道更多,最终滞留于上层的细颗粒越多,迁移出顶面的细颗粒更多,根据前述细颗粒流失曲线,结合不同纤维含量和纤维长度的孔压—流量曲线、水力梯度—流速曲线、分层水力梯度曲线进行进一步分析,可总结出玄武岩纤维对管涌发展的两种遏制效应,即玄武岩纤维在缺级配土中可使细颗粒的迁移路径更加曲折,且迁移通道更加狭窄。纤维长度一定时,纤维含量的增加使得其对砾类土管涌发展的两种遏制效应均增强。相同纤维含量下,纤维长度增加,使得细颗粒迁移通道更加曲折,如图7(a)所示;纤维长度减小,使得细颗粒迁移通道更加狭窄,如图7(b)所示。



(a) 使迁移路径更加曲折 (b) 阻塞迁移通道横截面
图7 遏制效应示意

Fig.7 Schematic diagram of containment effect

3 结 论

对不同纤维含量和纤维长度的玄武岩纤维缺级配砾类土开展室内管涌试验,研究了玄武岩纤维土在管涌过程中的变化规律,分析了玄武岩纤维对管涌发展的影响,探讨了不同纤维含量长度组别的遏制效应的区别,具体结论如下:

(1)纤维缺级配砾类土的管涌过程分为四个阶段:①初始渗流阶段,该阶段表现为流量随着水力梯度表现出线性上升的状态;②堵塞阶段,表现为流速随着水力梯度的增加缓慢上升,渗透系数持续降低,期间可观察到顶部细颗粒涌出,但是涌出量不大,且涌砂点暂停涌砂的现象;③加速破坏阶段,表现为流量大幅上升,水力梯度不下降或稍有上升,试样表面持续大量涌砂;④完全破坏阶段,表现为流量增加,水力梯度减小,试样表面持续涌砂的现象。

(2)玄武岩纤维的掺入增大了土体的峰值强度和内摩擦角。纤维含量和纤维长度的增加,可以使整个试样形成更大的受力面积和更广的传力体系。本试验中,峰值强度在围压较高时,峰值强度与纤维含量正相关,在围压较低时,峰值强度与纤维含量负相关。实际工程深度较浅时纤维含量不宜过高。

(3)玄武岩纤维的加入使得缺级配砾类土体的迁移通道变得更加曲折和狭窄,从而遏制整个土体的管涌发展。在相同条件下,纤维含量越大,土样的承压能力越高,相应流速和渗透系数越小,细颗粒流失量越小。玄武岩纤维的掺入可以增大各阶段临界水力梯度,遏制加速破坏点处的流速突变、遏制细颗粒流失,其效应与纤维含量正相关。

参考文献:

- [1] 刘嘉欣,钟启明,陈亮,等.堰塞坝溃决机理与溃决过程模拟技术研究综述[J].防灾减灾工程学报,2022,42(3):638-652.
Liu J X, Zhong Q M, Chen L, et al. Review on the simulation technologies of breach mechanism and breaching process of landslide dam [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(3): 638-652. (in Chinese)
- [2] 孙东亚,姚秋玲,赵雪莹.堤坝涵管接触冲刷破坏模式分析[J].中国水利水电科学研究院学报,2021,19(2):276-280.
Sun D Y, Yao Q L, Zhao X Y. Analysis on failure mode of contact erosion of embankment culvert pipe [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2021, 19(2): 276-280 (in Chinese)
- [3] 姚秋玲,孙东亚,张顺福,等.堤防渗透侵蚀破坏有关概念辨析[J].中国防汛抗旱,2021,31(8):7-10,45.

- Yao Q L, Sun D Y, Zhang S F, et al Analysis of concepts related to infiltration and erosion damage of embankments [J]. Flood Control and Drought Relief in China, 2021, 31 (8): 7-10, 45. (in Chinese)
- [4] 田大浪,谢强,宁越,等.间断级配砂砾石土的渗透变形试验研究[J].岩土力学, 2020, 41(11): 3663-3670.
Tian D L, Xie Q, Ning Y, et al. Experimental study on permeability deformation of intermittent graded sand gravel soil [J]. Geotechnical Mechanics, 2020, 41 (11): 3663-3670. (in Chinese)
- [5] Awal R, Nakagawa H, Kawaike K, et al. Experimental study on piping failure of natural dam[J]. 京都大学防災研究所年報, 2011, 67(4):I_157-I_162.
- [6] 吴燕开,牛斌,桑贤松.随机分布剑麻纤维加筋土力学性能试验研究[J].水文地质工程地质, 2012, 39(6): 77-81.
Wu Y K, Niu B, Sang X S. Experimental study on mechanical properties of randomly distributed sisal fiber reinforced soil [J]. Hydrological & Geological Engineering Geology, 2012, 39 (6): 77-81. (in Chinese)
- [7] 李良勇,马炜迪,曹宝珠.以天然椰壳纤维加固的红黏土的力学性质研究[J].海南大学学报(自然科学版), 2020, 38(3):304-308.
Li L Y, Ma W D, Cao B Z. Study on the mechanical properties of red clay reinforced with natural coconut shell fibers [J]. Journal of Hainan University (Natural Science Edition), 2020, 38 (3): 304-308. (in Chinese)
- [8] 陈佳雨,刘之葵,陈永国,等.纤维红黏土强度的正交试验及多元非线性回归分析[J].水文地质工程地质, 2020, 47(1):117-124.
Chen J Y, Liu Z K, Chen Y G, et al. Orthogonal test and multiple nonlinear regression analysis of fiber red clay strength [J]. Hydrology & Geological Engineering Geology, 2020, 47 (1): 117-124. (in Chinese)
- [9] Li J, Ding D W. Nonlinear elastic behavior of fiber-reinforced soil under cyclic loading[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2002, 22(9-12): 977-983.
- [10] Bao X, Li L, Liao Z, et al. Study of silty sand slope protection from seepage flows using short fiber-sand mixtures [J]. Geosynthetics International, 2021, 28 (5): 491-507.
- [11] Das A, Jayashree C, Viswanadham B. Effect of randomly distributed geofibers on the piping behaviour of embankments constructed with fly ash as a fill material [J]. Geotextiles & Geomembranes, 2009, 27 (5): 341-349.
- [12] Viswanadham A D V S. Experiments on the piping behavior of geofiber-reinforced soil[J]. Geosynthetics International, 2010, 17(4):171-182.
- [13] Estabragh A R, Soltannajad K, Javadi A A. Improving piping resistance using randomly distributed fibers [J]. Geotextiles & Geomembranes, 2014, 42 (1): 15-24.
- [14] Furumoto K, Miki H, Tsuneoka N, et al. Model test on the piping resistance of short fiber reinforced soil and its application to river levee [J]. Geosynthetics, 2002, 1:1241-1244.
- [15] Saghari S, Bagheri G, Shabanzadeh H. Evaluation of permeability characteristics of a polymer fibers-reinforced soil through laboratory tests [J]. Journal of the Geological Society of India, 2015, 85(2):243-246.
- [16] Sivakumar Babu G L, Vasudevan A K. Seepage velocity and piping resistance of coir fiber mixed soils [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 2008, 134(4): 485-492.
- [17] Kenney T C. Internal stability of granular filters [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1985, 22(3):420-423
- [18] 卢廷浩.土力学[M].2版.南京:河海大学出版社, 2002: 89-100.
Lu T H. Soil mechanics [M]. 2nd ed. Nanjing: Hohai University Press, 2002: 89-100. (in Chinese)

(本文编辑:池营营)