

文章编号:1673-9469(2024)06-0025-09

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2024.06.004

玄武岩纤维对无粘性间断级配土管涌遏制效果试验研究

高唱^{1,2}, 陈亮^{1,2,3*}

(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)

摘要: 为研究玄武岩对间断级配无粘性土管涌遏制的效果, 通过开展含玄武岩纤维间断级配土的管涌室内试验, 研究了纤维含量、纤维长度和土体防治位置对于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土体内部的迁移通道变得更加曲折和狭窄, 从而遏制土体的管涌发展; 当纤维含量较小时, 全部土体防治比上覆土体防治的遏制效果好, 随着纤维含量的增加, 上覆土体防治的遏制效果与全部土体防治的遏制效果相接近; 当纤维长度为 15 mm 时, 全部土体防治的遏制效果优于上覆土体防治的幅度最大, 当纤维长度为 10 mm 时, 二者相差不大。

关键词: 管涌; 玄武岩纤维; 纤维含量; 纤维长度; 上覆土体防治

中图分类号: TU411

文献标识码: A

Experimental Study on the Effect of Basalt Fiber on the Piping Restraint of Cohesionless Gap-graded Soils

GAO Chang^{1,2}, CHEN Liang^{1,2,3*}

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;
2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing,
Jiangsu 210098, China; 3. Key Laboratory of Xizang Civil Engineering, Water Conservancy and Electric Power Engineering
Technology Research Center, Xizang Agricultural and Animal Husbandry University, Linzhi, Xizang 860000, China)

Abstract: To study the effect of basalt fiber on the piping restraint of cohesionless gap-graded soils, indoor tests were conducted on discontinuous graded soil containing basalt fibers to investigate the inhibitory effects of fiber content, fiber length, and soil prevention location on the occurrence and development of subsurface erosion. The results indicate that the addition of basalt fibers makes the migration channels inside the soil more tortuous and narrower, thereby suppressing the growth of soil piping; When the fiber content is low, the control effect of the entire soil is better than that of only the overlying soil. As the fiber content increases, the control effect of the overlying soil is close to that of the entire soil control; When the fiber length is 15 mm, the containment effect of all soil prevention is better than that of overlying soil prevention by the greatest extent. When the fiber length is 10 mm, the difference between the two is not significant.

Key words: piping; basalt fiber; fiber content; fiber length; overlying soil reinforcement

渗透破坏是指土体的渗透性能发生了改变而导致的破坏, 会严重影响建筑物和基础的安全性^[1-4]。Barrs 等^[5]对世界各地的大坝灾害资料进行了归纳, 发现 60% 的大坝破坏是由坝体和坝基的渗流侵蚀造成。据 1998 年长江特大洪水的险情

资料^[6], 长江中下游地区的堤基管涌险情超过险情总数的一半, 长江中游的四起溃坝险情均由管涌引起^[7]。随着全球变暖加剧, 极端天气频发, 近年来管涌灾害亦层出不穷。

管涌作为渗流侵蚀的一种, 指细颗粒在粗颗

收稿日期: 2024-01-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (U2243244); 西藏自治区自然科学基金资助项目 (XZ202301ZR0033G)

作者简介: 高唱 (2000-), 男, 江苏徐州人, 硕士研究生, 从事岩土渗流方面的研究。

* 通信作者: 陈亮 (1976-), 男, 江苏沂沂人, 博士, 教授, 从事岩土渗流方面的研究。

粒骨架中间迁移并最终被渗流力带出颗粒骨架的过程^[8]。它是一个基于渗流条件、应力条件、几何条件三相耦合发生发展的复杂过程,对其的研究包括室内模型管涌试验研究、颗粒起动及管涌理论模型研究、数值模拟研究等方面。室内管涌试验是揭示管涌发生发展机理的重要手段, Kenney^[9]通过一维渗透试验,提出了经典渗透稳定性原则,根据土体级配的优劣判断其是否会发生管涌; Fleshman 等^[10]开发仪器开展管涌试验,将管涌划分为细颗粒跃迁、加速侵蚀、顶面砂沸和整体抬升四个阶段。吴良骥^[11]通过分析单一细颗粒的受力情况,总结出一般无粘性土的临界水力梯度计算公式;沙金焯^[12-13]分别提出了在层流和紊流下的临界水力梯度计算公式;刘昌军等^[14-15]发现数值模拟方法能较好地模拟单层和多层堤基试验堤基管涌的发生发展过程,其结果与室内试验相吻合;吴凤元等^[16]利用颗粒流程序 PFC 中渗流模型对无粘性土的临界水力梯度进行了分析,并通过室内试验加以佐证,验证了数值模拟结果的可靠性。但上述研究聚焦管涌的发生发展机理,在实际工况中,如何抑制管涌发展依然是一大难题。近年来,纤维开始被用作外加剂来抑制土体发生管涌。纤维加固具体是指通过将具有较高抗拉强度的纤维掺入土体中,提高土体在渗流冲击力作用下的稳定性,可以做到有效遏制管涌。Furumoto 等^[17]首先发现随机分布的离散纤维可以提高管涌发生的条件;Sivakumar 等^[18-19]将椰纤维与红土、砂土混合开展研究,发现纤维含量和纤维长度的增加增大了土体的临界水力梯度,降低了渗流速度;Das 等^[20-21]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,且聚丙烯纤维改善土体管涌发生发展特性的效果更好。考虑到实际工程的经济成本和环境污染等因素,如何挑选一个合适的纤维并且加固层厚度设定为多少可以有效遏制管涌的发展具有很好的研究价值。玄武岩纤维是一种经济环保的高性价比材料, Gao 等^[22]在最佳含水量和最大干密度条件下,对玄武岩纤维改良粘土进行了无侧限抗压强度试验,发现玄武岩纤维能有效提高粘土的抗压强度。

本文将玄武岩纤维掺入易发生管涌的间断级配砾类土,通过改变纤维含量、纤维长度以及土体加固层厚度等条件,进行室内管涌试验。重点监测管涌发生发展过程中的孔压、流量、渗透系数等

宏观渗流参数,结合纤维条件进行对比分析,分析纤维条件的改变对于管涌遏制的具体影响效果。

1 玄武岩纤维间断级配土管涌试验

1.1 试验装置

本研究采用自制的室内管涌仪器,见图 1,该仪器由管涌发生装置、颗粒收集装置、数据采集与传输系统组成。管涌发生装置主要采用径向的有机玻璃圆筒,可使细颗粒在垂直向上水流作用下起动并被带出。颗粒收集装置用来收集经过溢流槽出水口通过水管进入到装置中的水和颗粒,采用底部的电子收集秤实时测量装置重量变化。数据采集系统由上中下 3 个孔压传感器、流量计及信号转换器、无纸记录仪组成。试验过程中,水压力传感器实时读取不同土层深度下水压力变化,并连接无纸记录仪进行数据的存储,流量计实时监测流量变化。无纸记录仪实时测量并按照设定采样间隔保存所测数据。

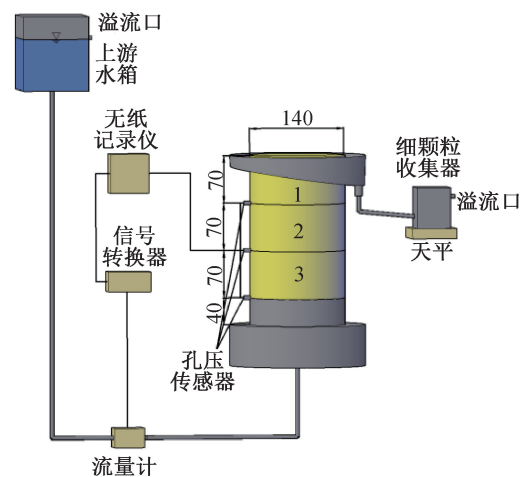


图 1 试验装置结构示意图(单位:mm)

Fig. 1 Schematic diagram of the test setup (unit:mm)

1.2 试验材料

本试验采用间断级配砾类土与玄武岩纤维混合,间断级配砾类土中,粗颗粒最小粒径和细颗粒最大粒径之比为 4 是管涌发生的临界条件,故本试验采用粒径为 2~8 mm 的细砾作为粗颗粒,采用粒径为 0.075~0.25 mm 的细砂作为细颗粒,粗颗粒和细颗粒的比重分别为 2.71 和 2.69。试样的级配曲线及比重信息如图 2 所示,试验用玄武岩纤维如图 3 所示。

1.3 试验方案

为研究含玄武岩纤维间断级配土对管涌发展

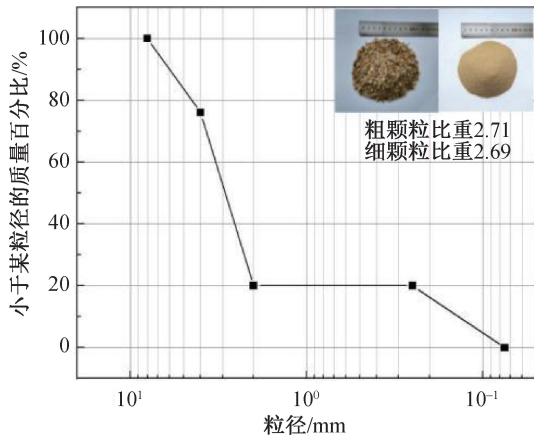


图 2 试验用料级配曲线

Fig. 2 Gradation curve of test materials

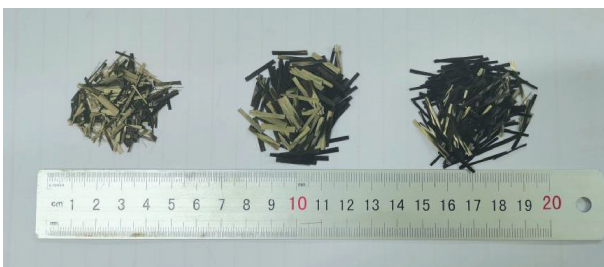


图 3 试验用玄武岩纤维

Fig. 3 Basalt fiber used for experiment

的遏制效应,本文将室内管涌试验分为两部分,即 Z 组和 S 组。Z 组填土层中全部混入玄武岩纤维, S 组于填土层上层掺入玄武岩纤维,其他试验步骤保持一致。在保证细颗粒含量、孔隙比及其他试验条件相同的情况下,开展不同纤维含量(Cbf)和不同纤维长度(Lbf)条件下的室内管涌试验。试验方案如表 1 所示。

表 1 试验方案

Tab. 1 Experimental plan

试样组	试样编号	纤维长度/mm	纤维含量/%	细颗粒含量/%	孔隙比	
Z 组	Cbf 组	Z-Cbf-0.4	15	0.4	20	0.5
		Z-Cbf-0.8	15	0.8	20	0.5
		Z-Cbf-1.2	15	1.2	20	0.5
	Lbf 组	Z-Lbf-10	10	0.8	20	0.5
		Z-Lbf-15	15	0.8	20	0.5
		Z-Lbf-20	20	0.8	20	0.5
S 组	对照组	Cbf-0	0	0	20	0.5
	Cbf 组	S-Cbf-0.4	15	0.4	20	0.5
		S-Cbf-0.8	15	0.8	20	0.5
		S-Cbf-1.2	15	1.2	20	0.5
	Lbf 组	S-Lbf-10	10	0.8	20	0.5
		S-Lbf-15	15	0.8	20	0.5
	S-Lbf-20	20	0.8	20	0.5	

1.4 试验步骤

1.4.1 试样配制

在确定试样孔隙比的情况下,将试样均匀分成 3 份装填,根据粗颗粒、细颗粒、纤维的比重和质量百分比,分层计算出各层所需相应物料的质量进行装填。采用湿拌法以保证细颗粒、粗颗粒和纤维充分混合均匀。

1.4.2 试样饱和

饱和开始时,上游水箱的初始位置应低于试样底部。之后缓缓提升水箱液面,在水头高于试样底部 2 cm 时,固定水箱高度进行饱和,在观察到试样水位与水箱水位平齐后,继续将水头向上提升 2 cm,重复上述步骤,直至上游水箱水位与试样顶部高度平齐,试样顶部水达到刚好漫溢的状态时,固定上游水箱水头,试样饱和 24 h 后即可开始试验。

1.4.3 管涌试验

设定土样完全饱和时的上游水头高度为初始高度,开始管涌试验,此后试样于该高度持续渗透 10 min 之后再水头提升至下一级水头高度。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。

2 上覆玄武岩纤维砾类土管涌发展规律

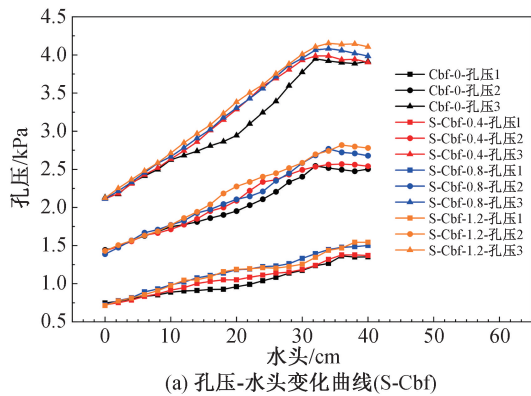
2.1 S-Cbf 组管涌发展规律

本文中孔压 1、孔压 2、孔压 3 分别代表试样上层测压管、中层测压管、下层测压管的测量孔压。

图4为管涌试验过程中试样 Cbf-0、S-Cbf-0.4、S-Cbf-0.8以及S-Cbf-1.2组的孔压与流量变化曲线。初始阶段,4组试样的各测量数值随着水头提升均匀升高,且孔压3升高较快,孔压1升高较慢。提升水头至14、20、18、16 cm时,4组试样的孔压2和孔压3迅速上升,流量增速放缓,此时土体内部已经发生堵塞。提升水头至22 cm时,除Cbf-0之外的3组试验顶部表面细颗粒开始跳动并涌出,此时试样发生临界破坏,而Cbf-0组在提升水头至18 cm时就出现此现象。提升水头至24、32、32、34 cm时,4组试样的流量急剧增大,细颗粒大量涌出,试样进入加速破坏阶段。提升水头至32、36、34、38 cm时,各层孔压开始缓慢降低,流量继续增大,试样完全破坏。

从图4来看,上覆纤维土层能够在土体管涌时起到一定的遏制作用,各层孔压变化表现出了一定的迟滞性,且在加速破坏点时流量突然减小,此时涌出的细颗粒质量也减小,即上覆玄武岩纤维土层承担了更大的水力梯度,减少了细颗粒的流失,从而减慢了土体破坏的过程。

为了进一步研究含纤维土体的管涌遏制机



理,对试验过程直接测得的孔压、流量进行进一步处理,得到管涌试验过程中水力梯度-流速-渗透系数的相关关系,见式(1)一式(4):

$$\Delta h = \frac{P_3 - P_0}{\gamma_w} \times 10^5 - L \quad (1)$$

$$i = \frac{\Delta h}{L} \quad (2)$$

$$v = \frac{Q}{\pi r^2} \quad (3)$$

$$k = \frac{v}{i} \quad (4)$$

式中: Δh 为水头损失,cm; P_3 为下层传感器的孔隙水压力,kPa; P_0 为大气压强,kPa; L 为渗径长度,cm; γ_w 为水的重度, N/m^3 ; Q 为试样流量,mL/s; r 为试验模型内径,cm; i 为水力梯度; v 为水流速度,cm/s; k 为渗透系数,cm/s。

经计算,绘制出管涌过程中不同纤维含量下水力梯度-流速-渗透系数变化曲线见图5。上覆纤维土层的间断级配砾类土试样管涌过程存在4个阶段,即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。

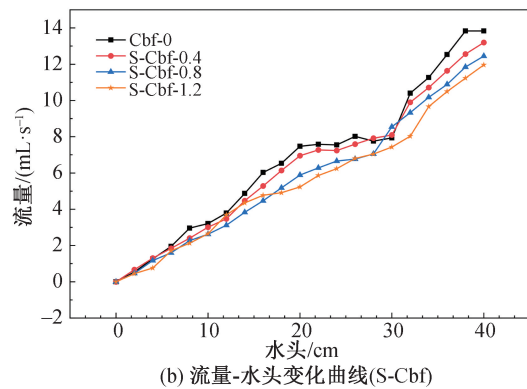


图4 孔压与流量变化曲线图(S-Cbf)

Fig. 4 Variation curve of pore pressure with flow rate (S-Cbf)

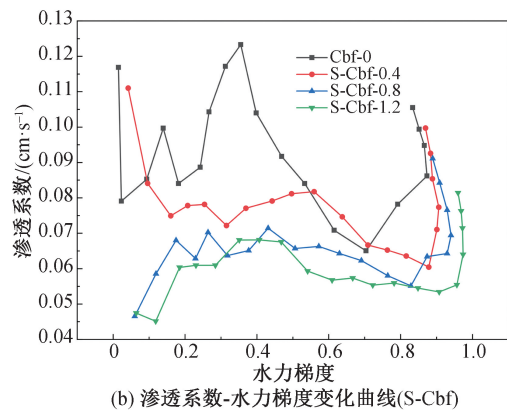
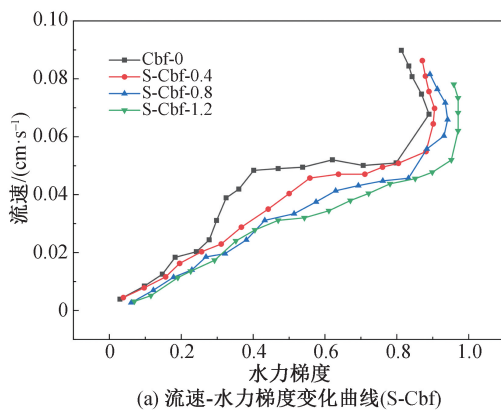


图5 不同纤维含量下水力梯度-流速-渗透系数变化曲线图

Fig. 5 Variation of hydraulic gradient-flow rate-permeability coefficient under different fiber contents

初始渗流阶段,流量随着水力梯度的提高表现出线性上升。堵塞阶段随着水力梯度的快速增加流量缓慢上升,渗透系数随着水力梯度的增加呈逐渐下降趋势,内部细颗粒也一直进行着迁移,使得土样的渗透系数逐渐降低,对比 Cbf-0 组,含纤维试样的渗透系数降幅减小,流速增长较快,这表明上覆纤维层试样在堵塞阶段的堵塞程度较轻,结合图 4(a) 孔压曲线,在堵塞阶段,孔压 1 和孔压 2 增速较快,意味着上覆纤维层改变了不同深度处孔压的分布,从而遏制堵塞阶段细颗粒从底部逐渐向上的迁移过程。加速破坏阶段,各试样的加速破坏水力梯度分别为 0.88、0.90、0.88、0.97,可见加速破坏水力梯度与纤维含量之间的关系不明显,这是由于上覆土层纤维含量的增加影响了不同深度的孔压改变情况,即上覆纤维土层使得整个试样的孔压进行重分布。完全破坏阶段,水力梯度开始下降,渗透系数随着细颗粒大量流失不断增加。纤维含量越高,完全破坏点处的水力梯度越大。

2.2 S-Lbf 组管涌发展规律

不同纤维长度试样的孔压与流量随水头高度的变化曲线如图 6 所示。根据图 6(a),试样在水头提升过程中,各层孔压呈非线性增长,深层的孔压 3 升高最快,孔压 1 升高最慢。当上游水头高度达到堵塞的临界点时,下层土体由于承压最大首先发生堵塞,继续提升水头,孔压 3 迅速升高,孔压 1 和孔压 2 升高存在一定的滞后现象,一段时间后才明显提升。这种变化反映了细颗粒从下游逐渐

迁移至上游造成的土体结构改变,水头提升时颗粒堵塞也从下游逐渐发展至上游。当纤维长度 $Lbf=15\text{ mm}$ 时,滞后现象最明显, $Lbf=10\text{ mm}$ 次之, $Lbf=20\text{ mm}$ 时滞后现象最弱。

根据图 6(b),各组流量变化呈现出稳定增长、缓慢增长、快速增长 3 个时期。从图 6 中可以看出,纤维长度对试样流量的变化存在一定影响。

图 7 为不同纤维长度下试样的水力梯度-流速-渗透系数变化曲线。初始渗流阶段,相同水力梯度下, $Lbf=20\text{ mm}$ 的流量最大,渗透系数最大; $Lbf=15\text{ mm}$ 的流量最小,渗透系数最小。堵塞阶段,不同纤维长度的各试样的变化趋势大致相同,流速随着水力梯度的增加缓慢增加,渗透系数随之逐渐减小。堵塞阶段 $Lbf=15\text{ mm}$ 的渗透系数依然保持最小,从堵塞到发生加速破坏的水力梯度变化范围最大,说明当 $Lbf=15\text{ mm}$ 时,上覆玄武岩纤维土层遏制管涌发展的效果最好。

2.3 纤维最优含量与长度分析

将进入堵塞阶段时对应的水力梯度和流速称为临界堵塞水力梯度和临界堵塞流速,将观察细颗粒涌出土样顶部时对应的水力梯度和流速称为临界破坏水力梯度和临界破坏流速,将进入加速破坏阶段时的水力梯度和流速分别称为加速破坏水力梯度和加速破坏流速,将进入完全破坏阶段时的水力梯度和流速分别称为完全破坏水力梯度和完全破坏流速。各组的临界水力梯度和临界流速如表 2 所示。

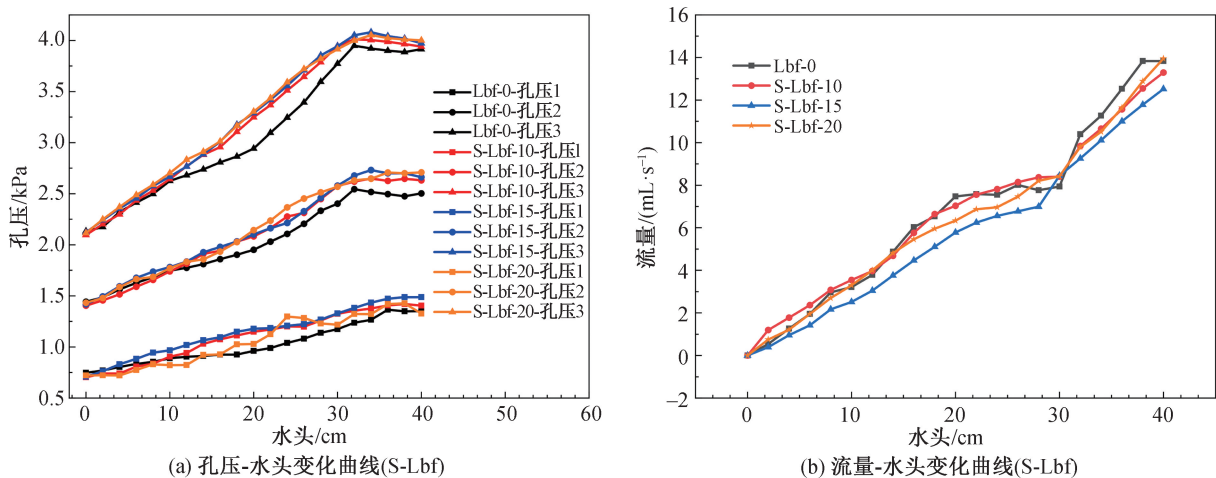


图 6 孔压与流量变化曲线图(S-Lbf)

Fig. 6 Variation curve of pore pressure with flow rate(S-Lbf)

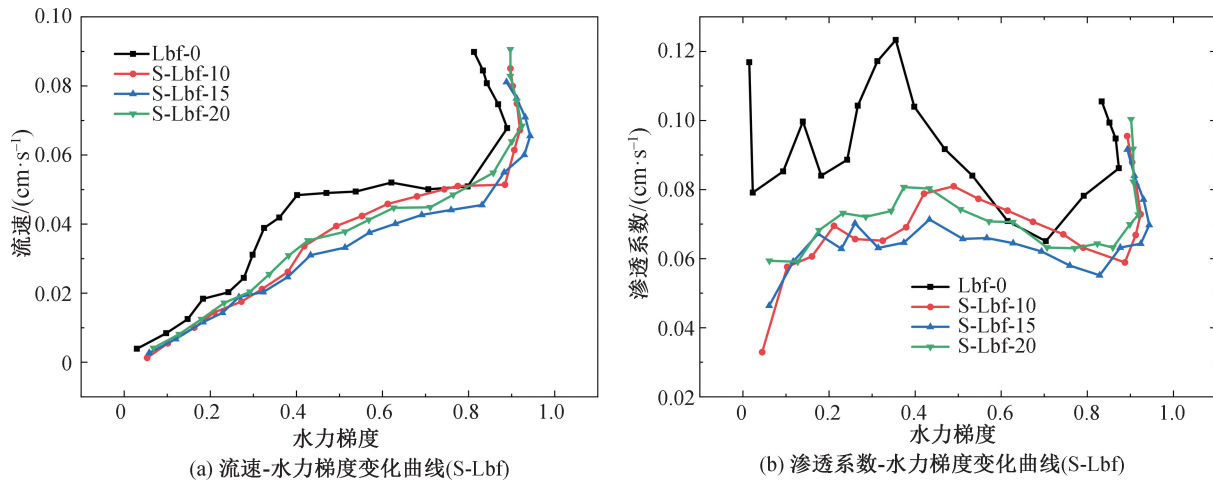


图7 不同纤维长度下水力梯度-流速-渗透系数变化曲线图

Fig.7 Variation curve of hydraulic gradient-flow rate-permeability coefficient under different fiber lengths

表2 各土样临界水力梯度和临界流速

Tab.2 Critical hydraulic gradient and critical flow velocity for each soil sample

编号	临界堵塞水力梯度	临界堵塞流速 $/(cm \cdot s^{-1})$	临界破坏水力梯度	临界破坏流速 $/(cm \cdot s^{-1})$	加速破坏水力梯度	加速破坏流速 $/(cm \cdot s^{-1})$	完全破坏水力梯度	完全破坏流速 $/(cm \cdot s^{-1})$
Cbf-0	0.40	0.048 7	0.54	0.049 2	0.88	0.077 8	0.88	0.077 8
S-Cbf-0.4	0.56	0.045 6	0.64	0.047 3	0.90	0.064 4	0.90	0.069 9
S-Cbf-0.8	0.51	0.037 7	0.63	0.040 5	0.88	0.055 0	0.94	0.065 6
S-Cbf-1.2	0.47	0.031 3	0.67	0.038 2	0.97	0.062 6	0.97	0.073 3
S-Lbf-10	0.49	0.039 2	0.61	0.045 4	0.91	0.061 5	0.92	0.067 0
S-Lbf-15	0.51	0.037 7	0.63	0.040 5	0.88	0.055 0	0.94	0.065 6
S-Lbf-20	0.51	0.037 9	0.63	0.044 2	0.90	0.063 4	0.92	0.068 3

据表2可得结论: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,间断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、加速破坏流速均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=15mm时最大,说明纤维长度存在某个最优长度使得土样的防渗透性能最好。

3 全部土体防治和上覆土体防治管涌对比分析

3.1 孔压与流量变化

同一纤维含量和同一纤维长度的全部土体防治(即Z组)与上覆土体防治(即S组)的孔压与流量变化如图8所示。相同纤维含量和相同纤维长度下,在水头提升初期,S组的孔压1相比Z组明显较大,而两组的孔压3则较为接近。在水头提升后期,S组呈现出与未覆盖纤维砾类土相近的趋势,而Z组则能够承受更大的水头,在水头到达50cm左右时各层孔压才开始下降。

比较相同纤维含量及相同纤维长度下的两组试验,各临界水头数据如表3所示,随着纤维含量的增加,两组试验的最终破坏水头的差距逐渐减小。因此,纤维含量越高,S组的遏制效果越接近Z组。随着纤维长度的增加,两组试验破坏水头的差距并未减小。当纤维长度Lbf=15mm时,Z组

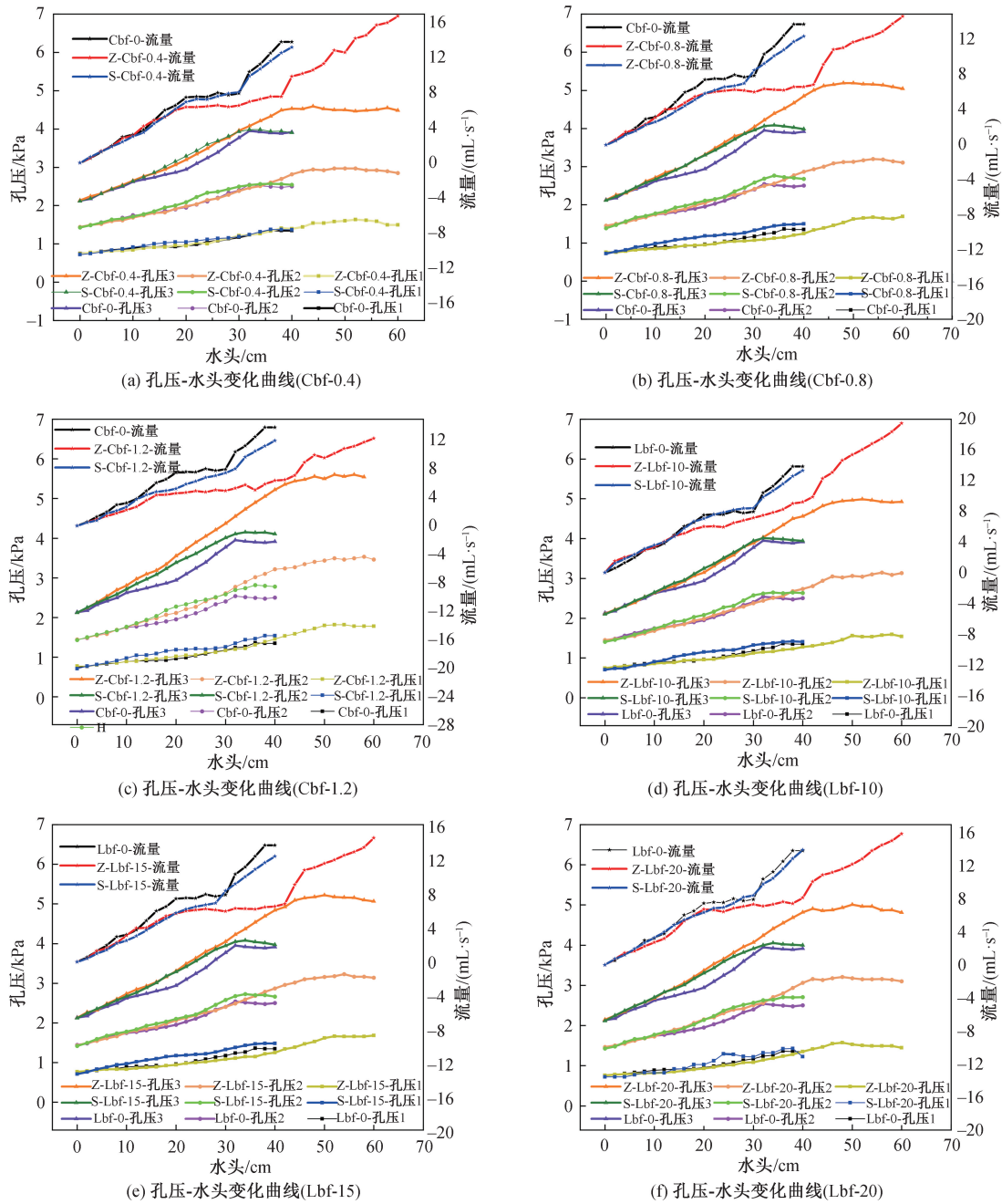


图 8 相同纤维含量(长度)下试样的孔压与流量变化曲线图

Fig. 8 Variation curve of pore pressure and flow rate of specimens under the same fiber content to length

表 3 各土样堵塞水头及破坏水头

(单位:cm)

Tab. 3 Plugging head and destructive head of each soil sample

(unit:cm)

	堵塞水头	开始破坏水头	加速破坏水头	最终破坏水头
Z-Cbf-0.4	18	26	38	48
S-Cbf-0.4	20	22	32	36
Z-Cbf-0.4	16	32	44	52
S-Cbf-0.4	18	22	32	34
Z-Cbf-0.4	16	32	46	52
S-Cbf-0.4	16	22	34	38
Z-Lbf-10	16	28	44	50
S-Lbf-10	18	22	32	38
Z-Lbf-15	16	32	44	52
S-Lbf-15	18	22	32	38
Z-Lbf-20	16	30	42	48
S-Lbf-20	16	22	32	36

对管涌的遏制效果显著强于S组。当纤维长度增大时,Z组对管涌的遏制效果与S组之间的差距在缩小。

3.2 水力梯度-流速-渗透系数变化

同一纤维含量下的Z组和S组的流速-水力梯度以及渗透系数-水力梯度变化如图9所示。初始渗流阶段,相同纤维含量相同水力梯度下,Z组与

S组的流速差距很小,均比纤维含量为0的试样流速低,二者的渗透系数较为接近,均随着水力梯度的增加呈波动状态。随着水力梯度上升,流速差距逐渐拉大,纤维含量越高,流速差距越大。与S组相比,Z组的堵塞阶段及临界破坏阶段更加明显且持续时间更长,因此在相同长度下,当Lbf=15 mm时,与S组相比,Z组临界破坏阶段维持时间和渗透系数下降幅度最大,

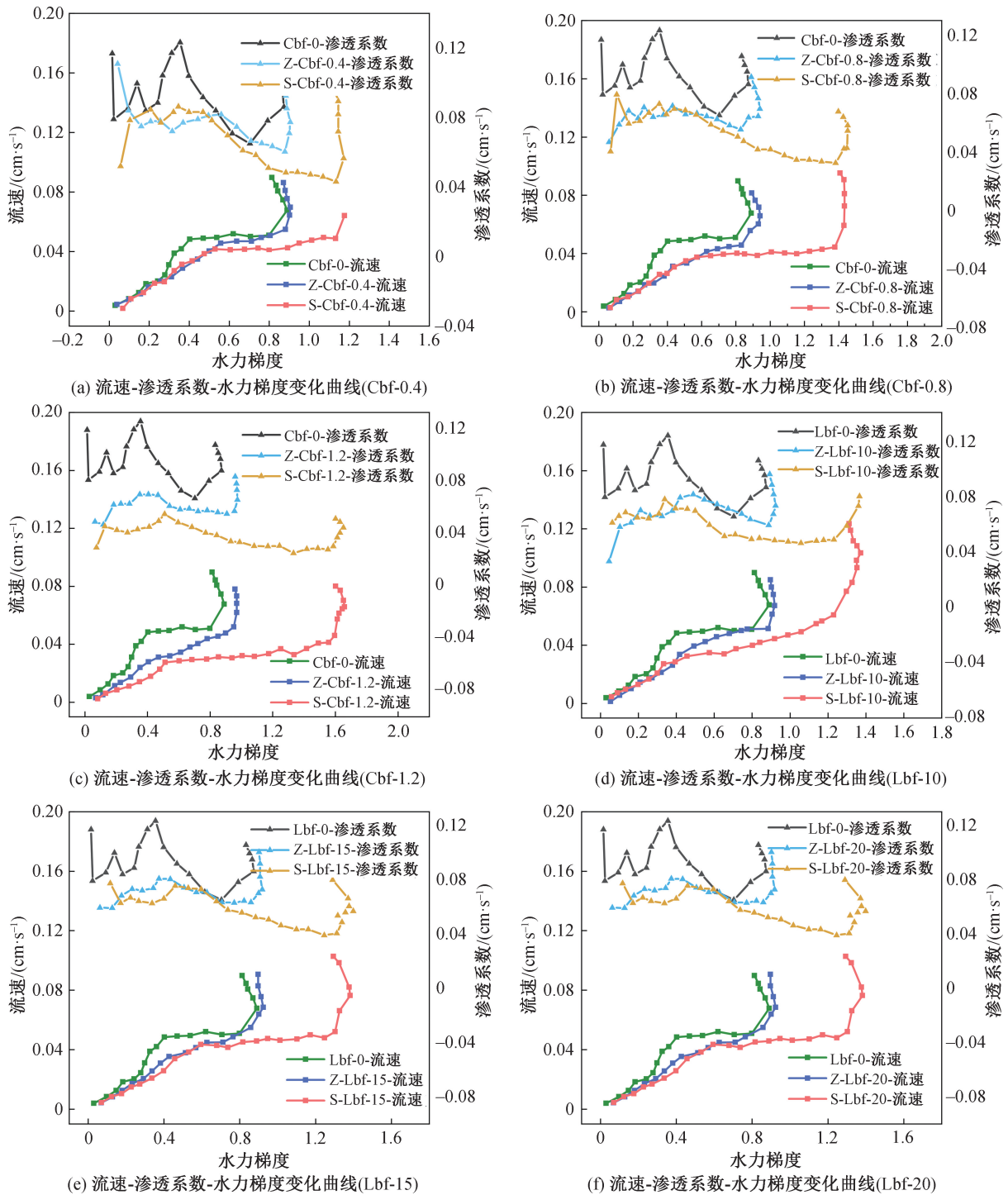


图9 相同纤维含量(长度)下水力梯度-流速-渗透系数变化曲线图

Fig. 9 Variation curve of hydraulic gradient-flow rate-permeability coefficient under the same fiber content to length

遏制效果提升幅度最大。当 $L_{bf} = 10 \text{ mm}$ 时,两组相差不大。

4 结论

1) 上覆加固纤维间断级配土的管涌过程可分为4个阶段:初始渗流阶段、堵塞阶段、加速破坏阶段、完全破坏阶段,加速破坏阶段持续时间较短。上覆加固纤维土使得整个土体的管涌的空间结构发生变化,遏制了渗透变形的进一步破坏。

2) 上覆加固纤维土的纤维含量越高,对管涌发展的遏制效应越强。上覆玄武岩纤维层存在最佳的纤维长度遏制管涌发展,本试验的最佳纤维长度为 15 mm ,其在上覆纤维层能够达到的水力梯度最高。

3) 与上覆土体加固纤维相比,全部土体加固纤维的堵塞阶段及临界破坏阶段更加明显且持续时间更长。纤维含量越高,上覆土体加固纤维对管涌的遏制效果越接近全部土体防治。当纤维长度为 15 mm 时,全部土体加固纤维的遏制效果较上覆土体加固纤维提升幅度最大。

参考文献:

- [1] FELL R F, WAN C F, CYGANIEWICZ J, et al. Time for development of internal erosion and piping in embankment dams[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2003, 129, 307-314.
- [2] DANKA J, ZHANG L M. Dike failure mechanisms and breaching parameters[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2015, 141, 04015039.
- [3] 刘杰. 土的稳定性与渗流控制[M]. 北京:水力电力出版社,1992.
- [4] RICE J D, DUNCAN J M. Findings of case histories on the long-term performance of seepage barriers in dams[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2010, 136(1): 2-15.
- [5] BAARS S V, KEMPEN V. The causes and mechanisms of historical dike failures in the Netherlands[J]. *E-Water*, 2009: 1-14.
- [6] 牛运光. 病险水库加固实例[M]. 北京:中国水利水电出版社,2002.
- [7] ICOLD C. Internal erosion of existing dams, levees and dikes, and their foundations[J]. *Bulletin 164, Volume 1: Internal Erosion Processes and Engineering Assessment*, 2013.
- [8] BLIGH W G. Weirs on porous foundations and with pervious floors[J]. *Eng News*, 1911, 65(15):444-445.
- [9] KENNEY, T C. Internal stability of granular filters[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1985, 22(2): 215-225.
- [10] FLESHMAN M, RICE J. Constant gradient piping test apparatus for evaluation of critical hydraulic conditions for the initiation of piping[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2013, 36(6): 1-14.
- [11] 吴良骥. 无粘性土管涌临界坡降的计算[J]. *水力水运科学研究*,1980,4: 90-95.
- [12] 沙金焯. 多孔介质中的管涌研究[J]. *水力水运科学研究*,1981,3: 89-93.
- [13] 沙金焯. 预测堤防背侧管涌的一种方法[J]. *水力水运科学研究*,2003(4): 57-59.
- [14] 刘昌军,丁留谦,孙东亚,等. 单层堤基管涌侵蚀过程的模型试验及数值分析[J]. *土木工程学报*,2012,45(8):140-147.
- [15] 刘昌军,丁留谦,孙东亚,等. 双层堤基管涌模型试验尺寸效应的数值模拟[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012,31(增1): 3110-3116.
- [16] 吴凤元,梁力,樊赟赟,等. 基于 PFC3D 的无粘性土渗流临界水力梯度模拟分析[J]. *东北大学学报(自然科学版)*,2015,36(3): 428-433.
- [17] 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 [C]//Proc. , 7th Int. Conf. on Geosynthetics. Swets & Zeitlinger, Lisse, 2002: 1241-1244.
- [18] SIVAKUMAR BABU G L, VASUDEVAN A K. Seepage velocity and piping resistance of coir fiber mixed soils [J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2008, 134(4): 485-492.
- [19] SIVAKUMAR BABU G L, VASUDEVAN A K. Strength and stiffness response of coir fiber-reinforced tropical soil [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2008, 20(9): 571-577.
- [20] 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 and Geomembranes*, 2009, 27(5): 341-349.
- [21] DAS A, VISWANADHAM B V S. Experiments on the piping behavior of geofiber-reinforced soil[J]. *Geosynthetics International*, 2010, 17(4): 171-182.
- [22] GAO L, HU G, XU N, et al. Experimental study on unconfined compressive strength of basalt fiber reinforced clay soil[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015, 2015(1): 561293.

(责任编辑 张爱丽)