

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.01.010

考虑围压影响的间断级配散粒土潜蚀规律试验研究

梁越^{1,2,3}, 李越¹, 许彬^{1,2,3}, 杨牛虎⁴, 张斌¹, 潘剑⁵, 尹朝恒¹

(1. 重庆交通大学河海学院, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074;
3. 重庆交通大学水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074;
4. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550081;
5. 广西平陆运河建设有限公司, 广西 南宁 530022)

摘要: 利用应力动态联动式渗透变形试验系统, 选用间断级配散粒土材料开展了潜蚀试验, 探索了 30、60、90 kPa 围压条件下土体潜蚀规律, 分析了不同围压下细颗粒流失、体积变化及临界水力梯度的变化特征。试验结果表明: 在较小围压下, 细颗粒易于流失, 导致土体孔隙连通性增强, 渗流流速显著提高; 而较大围压则压缩了土体孔隙, 降低了渗透路径通畅性, 使得渗透系数明显降低。在低水力梯度时渗流流速与水力梯度呈现非线性变化, 但随水力梯度增大逐渐趋向线性, 基本符合达西定律; 围压增大导致土体潜蚀启动的临界水力梯度提高, 二者呈正相关关系。围压对不同阶段细颗粒流失的影响存在差异, 但对细颗粒流失总量的影响不显著。较大围压下土体内部颗粒结合更紧密, 试样的变形程度更小, 而在 30 kPa 的低围压条件下, 试样体积变化曲线呈明显的阶梯式变化。

关键词: 间断级配散粒土; 围压; 潜蚀; 累计涌砂量; 体积变化量; 临界水力梯度

中图分类号: TU432 文献标志码: A 文章编号: 1000-1980(2025)01-0080-07

Experimental study on suffusion behavior of gap-graded cohesionless soil considering the effect of confining pressure

LIANG Yue^{1,2,3}, LI Yue¹, XU Bin^{1,2,3}, YANG Niuhu⁴, ZHANG Bin¹, PAN Jian⁵, YIN Chaoheng¹

(1. The College of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

3. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

4. POWERCHINA Guiyang Engineering Corporation Limited, Guiyang 550081, China;

5. Guangxi Pinglu Canal Construction Co., Ltd., Nanning 530022, China)

Abstract: Using a stress-controlled dynamic permeability deformation test system, experiments were conducted on gap-graded cohesionless soil to investigate the suffusion behavior under confining pressures of 30, 60, and 90 kPa. The study explored the suffusion behavior of the soil and analyzed the variation characteristics of fine particle loss, volume change, and critical hydraulic gradient under different confining pressures. The results show that, at lower confining pressures, fine particles are more prone to being lost, leading to increased pore connectivity and a significant rise in seepage velocity. In contrast, higher confining pressures compress soil pores, reducing the continuity of flow paths and causing a significant decrease in the permeability coefficient. At low hydraulic gradients, seepage velocity exhibits nonlinear variations; however, as the hydraulic gradient increases, it gradually becomes linear, generally conforming to Darcy's law. Increasing confining pressure raises the critical hydraulic gradient required to initiate suffusion, demonstrating a positive correlation between the confining pressure and critical hydraulic gradient. The effect of confining pressure on

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52379097); 重庆市技术创新与应用发展专项面上项目(CSTB2022TIAD-GPX0045); 重庆市博士后科学基金项目(CSTB2023NSCQ-BHX0223); 重庆交通大学博士后科学基金项目(22JDKJC-A008); 广西科技计划项目(桂科AA23062023)

作者简介: 梁越(1985—), 男, 教授, 博士, 主要从事水利工程灾变机理及防治技术研究。E-mail: liangyue2560@163.com

通信作者: 李越(1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事水利工程灾变机理及防治技术研究。E-mail: leeyuework@163.com

引用本文: 梁越, 李越, 许彬, 等. 考虑围压影响的间断级配散粒土潜蚀规律试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(1): 80-86.

LIANG Yue, LI Yue, XU Bin, et al. Experimental study on suffusion behavior of gap-graded cohesionless soil considering the effect of confining pressure[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025, 53(1): 80-86.

fine particle loss differs at various stages, but its overall impact on the total amount of fine particle loss is not significant. Under higher confining pressures, the soil particles bond more tightly, resulting in less deformation of the specimens. Under the confining pressure of 30 kPa, the volume change curve exhibits a distinct step-like pattern.

Key words: gap-graded cohesionless soil; confining pressure; suffusion; cumulative sand production; volume change; critical hydraulic gradient

潜蚀可能导致工程结构失稳甚至坍塌,给工程建设带来巨大的经济损失和安全隐患。散粒土通常由颗粒较大、间隙较大的颗粒堆积而成,颗粒之间存在较大的空隙和不稳定的结构,当水流通过这些颗粒之间的空隙时,会发生流体动力效应,造成颗粒的移动和重排;而在局部特殊的条件下,例如水流速度较高、土壤颗粒分布不均等,水流会集中冲刷某些颗粒形成潜蚀。随着潜蚀的发展,这些管道可能会不断加深和扩大,最终形成明显的溶洞或沟槽,对土体结构和稳定性可能造成不利影响。

潜蚀是内部侵蚀的一种,而内部侵蚀一直是国内外学者研究的重点。2013 年,国际大坝委员会将大坝及基础内发生的颗粒运移现象统称为内部侵蚀,并根据其发生机制不同,细分为逆向侵蚀型管涌、潜蚀、集中渗漏侵蚀和接触侵蚀 4 种。许多学者针对不同类型内部侵蚀的影响因素开展了大量研究。例如:Robbins 等^[1-2]通过室内试验研究了逆向侵蚀型管涌的水平临界水力梯度等水力条件,发现管涌发展速度与渗流流速成正比;梁越等^[3-7]研究了不同渗流方向、粒径分布和干密度的土壤内部侵蚀,定义了与细颗粒局部移动和整体损失相对应的低、高临界水力梯度,并进一步分析了不同粒径分布以及干密度对临界水力梯度的影响;陈亮等^[8]通过室内管涌试验发现变水头条件下无黏性土中细颗粒的逆流运动和流失情况比常水头条件更为显著。随着研究的深入,应力状态对土体侵蚀的影响逐渐受到学者们的关注,如 Moffat 等^[9-14]开展了竖向应力大小对不同土体抗侵蚀能力的研究,建立了临界水力梯度与应力状态的联系,利用孔隙水压力探头获取了土体内部渗流场的变化规律。此外,有学者通过研制三轴侵蚀设备开展试验,分析了土体在各向同性和各向异性条件下的渗透侵蚀过程。例如:Bendahmane 等^[15]分析了 3 个关键参数对黏土和砂土侵蚀机制的影响,提出土体围压对潜蚀的影响显著,过程复杂;Chang 等^[16-17]在 3 种应力路径下进行了室内内部侵蚀试验,得到了潜蚀发生、土体变形以及土体破坏的临界水力梯度;Richards 等^[18]研制了试样形状为立方体的真三轴渗透仪,认为利用临界渗流速度描述侵蚀过程能够更好地建立土体潜蚀与应力状态的联系;凌华等^[19]通过三轴渗透试验发现,土料的级配、围压和应力水平显著影响其渗透系数,并给出了描述复杂应力状态下土体渗透系数的经验公式。此外,罗玉龙等^[20]开展了不同应力状态下渗流-应力耦合潜蚀试验研究,发现围压越大,潜蚀临界渗透坡降越大,并进一步提出了由围压表示的潜蚀临界渗透坡降线性经验公式;Ke 等^[21]利用改装的三轴仪器针对间断级配的无黏性土进行了渗流试验,通过在各向同性应力状态下对试样设置不同的围压(50、100、200 kPa),发现在较大围压下试样的体积变形和孔隙率变化都较小,应力水平的提高会导致土体抵抗渗流侵蚀的能力增大。Tomlinson 等^[22]指出受到较大的围压时颗粒材料可能会在一个较小的水力梯度下发生侵蚀,因为试样中的土拱效应受到了扰动。

可见,考虑应力状态的内部侵蚀问题研究成果已有不少,但大部分研究考虑的是向下渗流,而在自然环境中,向上渗流的侵蚀往往比向下渗流的侵蚀更为常见。此外,同时采用渗流流速、体积变化量、细颗粒流失量及水力梯度等多参数研究间断级配散粒土潜蚀特性的成果较少。鉴于此,本文在已有研究基础上,采用自主研发的应力动态联动式渗透变形试验系统,通过室内潜蚀试验,结合精细化量测方法,对相同颗粒级配下不同围压状态的间断级配散粒土试样潜蚀过程中水力特性、细颗粒流失规律以及潜蚀后砂样体积变化等进行研究,以为堤防等散粒土潜蚀危险评价提供参考。

1 试验方案

1.1 试验材料

试验所用的土料均取自三峡库区重庆段,为避免土料中掺杂的黏粒对试验效果造成影响,先对土料进行清洗,在去除树根、草根、螺蛳壳等杂质和粉粒、黏粒之后,将土料烘干,再进行筛分。采用 GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》推荐的机械筛分方法进行筛分,筛分后的粒径组为 0.075~0.25、0.25~0.5、0.5~1、2~5、5~8 mm(边界值归入后一组),如图 1 所示。土体颗粒级配如图 2 所示,该间断级配条件下散粒土不均匀系数为 20,曲率系数为 53.79,特征粒径(D_{15}/D_{85})为 4.23,属于级配不良且抗渗稳定性较差的土体^[23],符合土体发生潜蚀的条件。

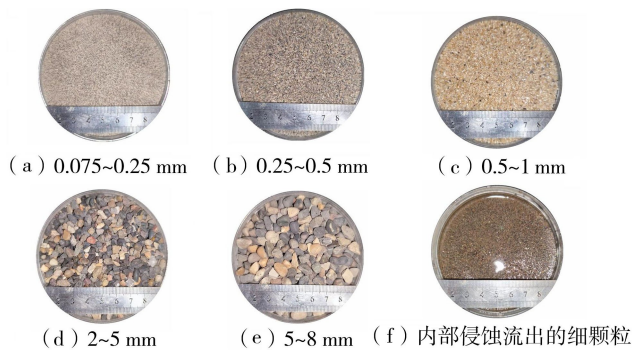


图 1 土样照片

Fig. 1 Photographs of soil samples

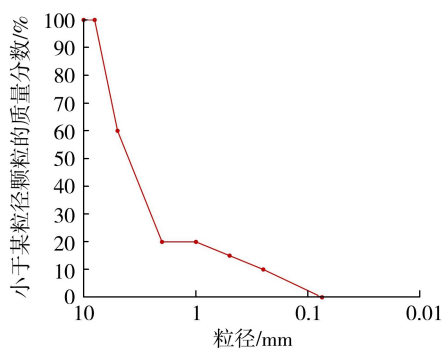


图 2 颗粒级配曲线

Fig. 2 Particle gradation curves

1.2 试验装置

本文试验采用自主研发的应力动态联动式渗透变形试验系统开展间断级配散粒土潜蚀破坏试验^[4]。该系统主要由上游侵蚀供水系统、压力室、压力加载系统、砂水分离装置和数据采集系统组成,如图 3 所示。

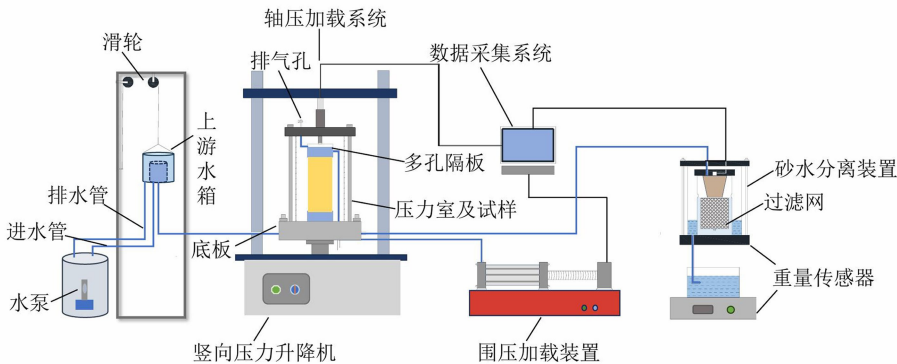


图 3 试验装置示意图

Fig. 3 Experimental setup diagram

上游侵蚀供水系统上部是一个提供稳定水头的小水箱,包括内外两个有机玻璃桶。下部是一个储水大水箱,里面放置水泵可以使水进入小水箱的内桶。

压力加载系统由围压加载系统、竖向压力加载系统和渗透压加载系统三部分组成。压力加载系统是内部侵蚀试验的核心部分,其作用是为试样提供稳定的围压和轴向压力。本文试验采用柔性壁压力室,即用橡胶膜包裹试样,与刚性壁的压力室相比可避免试样与内壁之间产生优先流现象^[16]。压力室包含内部试样装填室和外部密封部件,内部试样装填室高为 200 mm,直径为 100 mm;外部密封部件由下部钢制底座和上部压力室外罩构成。底座由 30 mm 厚的钢板制成。外罩采用透明有机玻璃制作,在侵蚀试验过程中能够直观地观测试样在侵蚀试验过程中的变化情况。侵蚀试验仅使用围压加载系统。

砂水分离装置分为 3 层,最内层为细颗粒过滤器,第二层筒体由有机玻璃制作,最外层有机玻璃筒体起密封作用,利用螺杆将最外两层筒体与上下钢板固定并密封。底部装有质量传感器便于采集数据。数据采集系统即电脑终端的程序控制软件,其作用可分为监测和控制两个部分。监测信息包括竖向压力、围压、渗透水压力、渗透进水量、细颗粒流失质量、试样竖向变形量、试样体积变化量和渗透涌水质量,其中出砂称重的精度为 1 g,出水称重精度为 0.1 g,竖向变形精度为 0.01 mm,竖向应变精确到 0.01%,试样体积收缩精确至 0.01 cm³。控制系统可控制试样所受围压、轴压和渗透压。

1.3 试验工况

本文主要研究围压对间断级配散粒土内部侵蚀的影响,分析围压大小对散粒土侵蚀过程中涌水特征、细颗粒流失特征和结构变化特征的影响。设置 3 种工况进行试验,控制试样所受围压分别为 30、60、90 kPa,对应编号分别为 A-30、B-60、C-90。各工况试件的主要参数如下:相对密度为 0.55,孔隙比为 0.51,最大孔隙比为 0.75,最小孔隙比为 0.32,孔隙率为 33.8%,试样总质量为 3 102 g。

1.4 试验流程

a. 试样制备及密封性检查。将筛分后的土料搅拌均匀,将拌和砂土料分成五等份,采用击实器分层击实,分层击实高度为每层 40 mm。试样制备完成后,将压力室上盖盖紧并使用六角螺丝拧紧。然后使用水泵将水灌入压力室中并排出所有空气,最后密封压力室。使用围压作动器从 20 kPa 开始,每隔 1 min 增加 20 kPa,直到达到 100 kPa。在增压过程中,需要观察围压值是否可以保持稳定,确保装置气密性良好。

b. 试样饱和与固结。先检查试样密封性并调整试验围压到符合要求。通过水泵向水箱供水,然后向试样输送渗透水流。为避免饱和水对试样内部造成扰动,上游水箱间隔 4 min 提升 1 cm,直至上游测压管水位与压力室内的试样顶部齐平后停止提升。保持该状态 120 min,使试样充分饱和,并在预设围压状态下继续固结 2 h。

c. 潜蚀试验。为模拟土体侵蚀过程并得到潜蚀启动的临界水力梯度,通过提升上游水头高度的方式进行多级渗流侵蚀试验。每级渗流时间为 2 min,试验水头提升方式如表 1 所示。当试样出砂称重数值保持 10 min 稳定或上游水头抬升达到极限后结束侵蚀试验。

表 1 渗流水头提升方式

Table 1 Lifting method of seepage water head				
试验阶段	水力梯度	单次提升水头/cm	单次提升水力梯度	各级渗流时间/min
初期	<1	1	0.05	2
中期	1~2	2	0.10	2
后期	>2	1	0.05	2

2 试验结果与分析

2.1 渗流流速和水力梯度情况

3 种不同围压条件下渗流流速随时间变化曲线如图 4 所示,随着水力梯度的提升及渗流时间的增加,各组试样的渗流流速整体上均呈上升趋势,直至试验中后期渗流流速达到峰值并趋于稳定,试验结束时,A-30、B-60、C-90 试验组渗流流速分别为 0.466 cm/s(5 475 s)、0.114 cm/s(5 475 s)、0.093 cm/s(4 970 s)。虽各试验组围压差值相同,但 B-60、C-90 试验组试验的渗流流速增速均较为稳定,流速曲线没有明显拐点,二者在中后期明显更为接近,而 A-30 试验组渗流流速明显大于 B-60 和 C-90 试验组,且中后期渗流流速随时间增幅较大。这是由于 A-30 试验组围压较小,潜蚀过程中土颗粒之间的接触力更低,减弱了颗粒之间的滤阻作用,使得细颗粒更容易流失,从而可能导致孔隙间的连接通道扩大,增大了渗流流速。试验中后期渗流路径基本形成,各试验组的渗流流速基本稳定。

根据试验得到的数据及本文水头提升方法,绘制渗流流速随水力梯度变化曲线如图 5 所示。由图 5 可知,在试验前期水力梯度小于 1 时,渗流流速与水力梯度呈非线性关系,曲线斜率即渗透系数不稳定。至试验中期水力梯度在 1~2 时,渗流流速与水力梯度明显呈线性变化,基本符合达西定律($v=ki$,其中 v 为渗流流速, k 为渗透系数, i 为水力梯度)。观察该范围内曲线走势,能比较明显看到 B-60 和 C-90 试验组的渗流流速接近,而 A-30 试验组流速最大,其渗透系数也最大,为 0.188,B-60 和 C-90 试验组的渗流流速和渗透系数依次减小,这与张改玲等^[24]的研究结论一致。试验后期随着水力梯度的上升,每组试样渗流流速的变化各有不同,渗流流速与水力梯度曲线再次呈现非线性变化。潜蚀过程中土体内部发生细颗粒移动和堵塞,导致土体孔隙体积和连通性等特性的改变,因而各试验组渗透系数均有不同程度的变化。在围压作用下,土体首先经历初始压密过程,其间土体内部的孔隙水压力迅速增大,导致孔隙水从土体中排出。这一过程中较大的围压会使得土体内部的颗粒更紧密地重新排列,孔隙被压缩,土体的密实度增大。随着时间的推移,土体

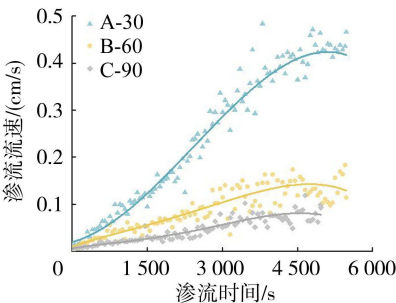


图 4 渗流流速变化曲线

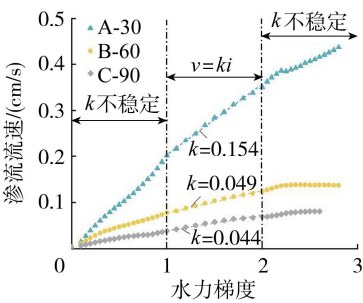


图 5 渗流流速随水力梯度变化曲线

Fig. 4 Variation curve of seepage flow velocity Fig. 5 Variation curve of seepage flow velocity with hydraulic gradient

进入主固结阶段。在这一阶段,围压增大导致有效应力增大,进而导致土颗粒之间的接触力增大,颗粒间的孔隙被进一步压缩,孔隙率显著降低。由于孔隙空间变小,水流通过土体的路径变得更加狭窄和复杂,增加了水流的阻力。这表明围压增大会显著降低土体的渗透性能,因此 C-90 试验组渗流流速和渗透系数最小,这也是应力水平的提高会导致土体抵抗渗流侵蚀能力提高的原因。在主固结阶段之后,饱和土体可能继续经历再压密和二次固结阶段,土体在围压作用下继续压实和孔隙结构进一步调整,以适应增大的有效应力水平和改变的应力状态。

将首次检测到涌砂量时的水力梯度视为潜蚀启动的临界水力梯度^[20],30、60、90 kPa 围压下临界水力梯度分别为 0.05、0.15 和 0.20,临界水力梯度与围压呈正相关关系。围压越大的试验组,其潜蚀启动所需的渗透力越大,这也和 Moffat 等^[25]的试验数据比较吻合。Moffat 等^[25]探讨了无黏性土在不同围压条件下的内部侵蚀过程,发现高围压条件下,土体可能需要更高的水力梯度才能发生足够的渗流从而引发内部侵蚀。这是由于围压的增大会导致土体颗粒受到的有效应力较大,使稳定的颗粒更加紧密排列,孔隙结构更加密集,从而增加对细颗粒移动的约束作用,因此土体需要更大的水力梯度才能克服阻力引起涌动。

2.2 体积变化及细颗粒流失量变化特征分析

应力大小影响体积变化曲线如图 6 所示,3 组试验试样没有发生明显的轴向位移,虽然均表现为体缩,但仍存在一定的差异。其中 A-30 试验组试样整体呈阶梯式体积收缩现象,在试验进行到 5480 s 时体积变化量大约为 0.65 cm³;B-60 试验组试样在渗流全过程均持续发生体积收缩,不存在较长时间的体积稳定现象,在试验进行至 5580 s 时体积变化量大约为 0.65 cm³;C-90 试验组试样在试验前中期发生持续的体积收缩,但在试验进行至 4000 s 后体积变化速率增大,至 4975 s 时体积变化量大约为 0.58 cm³。这种现象与 Moffat 等^[9]得到的结果类似,Moffat 等^[9]在潜蚀试验中发现,在渗流作用下,有部分承受力的细颗粒被冲出了试样,颗粒之间的力链将重新构造,这个过程会导致试样的总体积减小。这说明外部应力状态对试样的变形有影响,在围压越大的情况下,土体有效应力越大,试样内部结合越紧密,土体颗粒受到的约束作用越大,细颗粒迁移越困难,所以在相同的水压作用下产生的变形越小。

为了更好地分析土体应力状态对散粒土潜蚀过程的影响,绘制如图 7 所示的累计细颗粒流失量变化曲线。由图 7 可知,3 个试验组的细颗粒流失速度均呈现快慢交替的趋势。这是由于在潜蚀过程中,细颗粒在水力作用下运移,较大孔隙通道中的细颗粒能以较快速度通过,而在较小孔隙通道中,细颗粒受到阻碍或堵塞导致流速减慢,进而影响后续细颗粒的运动。当水力梯度再次增大时,堵塞的细颗粒重新启动,细颗粒流失速率将再次增大。

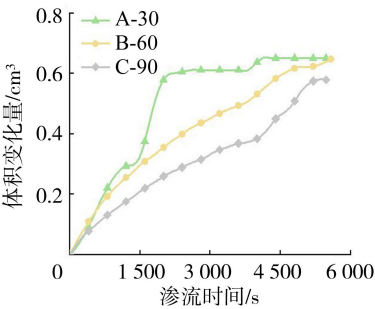


图 6 体积变化曲线
Fig. 6 Volume change curve

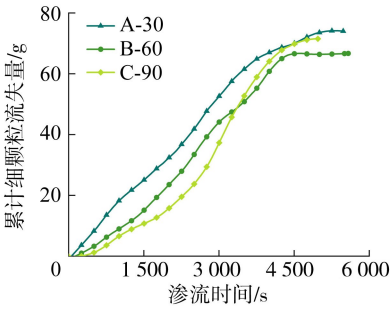


图 7 累计细颗粒流失量变化曲线
Fig. 7 Change curve of cumulative loss of fine particles

试验初期,A-30 试验组细颗粒流失速度较快,约 20 s 后观察到出水口的浑浊现象,同时出砂质量开始增大,表明细颗粒已经开始流失。约在 1500 s 时,A-30 试验组试样的体积变化量曲线出现明显拐点,体积突然减小,这是由于试样内部细颗粒流失导致试样体积减小,内部颗粒重新排列,内部孔隙被细颗粒填充,故此时细颗粒流失速率减小。随着时间的推移和水力梯度的增大,细颗粒进一步流失,至 2000~3500 s 时,A-30 试验组的细颗粒流失速率加快但其体积变化速率却接近零。这是由于随着潜蚀的发展,细颗粒逐渐流失,在试样内部可能由粗颗粒形成类似的土拱效应,细颗粒从拱圈粗颗粒中间缝隙流失,这部分体积可能不会有明显变化,因此 A-30 试验组体积变化曲线会出现“平台期”。然而,随着时间的推移和水力梯度的增大,细颗粒进一步流失,这种土拱效应可能会被破坏,导致体积再次发生突变。因此,A-30 试验组体积变化曲线整体呈

阶梯式变化。

相比之下,B-60 和 C-90 试验组的细颗粒流失速率较为接近,但二者体积变化速率却表现出不同的趋势,这在一定程度上说明了散粒土潜蚀过程的复杂性。试验结束时,A-30、B-60、C-90 试验组累计细颗粒流失量约分别为 73、66、70 g,3 组试验的累计细颗粒流失量接近。由此可见,围压对试样细颗粒流失速率在不同阶段有一定影响,但总体上对细颗粒流失总量的影响不显著。其中,A-30 试验组累计细颗粒流失量和体积变化量均为最大。通过对各特征参数的分析能看出围压对试样的潜蚀程度有显著影响,围压较小的试验组其潜蚀程度更为严重,这也与 Liu 等^[26]的研究结论一致。

3 结 论

a. 在较小围压条件下,土颗粒间接触力和滤阻作用减弱,促使细颗粒易流失,孔隙连接通道扩大,渗流流速增大。相比之下,较大围压则显著压缩土体孔隙,降低了渗透路径通畅性,导致渗透系数显著减小。水力梯度较小时,渗流流速与水力梯度呈非线性变化;随水力梯度增大逐渐趋向线性,基本符合达西定律;但随着水力梯度进一步增大,各组试样的渗流流速变化存在差异。围压增大使得土体潜蚀启动所需的临界水力梯度提高,因而临界水力梯度与围压呈正相关关系。

b. 围压对散粒土细颗粒流失的影响在不同阶段表现不同,总体而言,其对试样细颗粒流失总量的影响不显著。较大围压条件下,试样内部颗粒结合更紧密,受到的约束作用更大,在其作用下所产生的变形更小;在 30 kPa 的低围压条件下,试样体积变化曲线呈明显的阶梯式变化。

参考文献:

[1] ROBBINS B A, STEPHENS I J, LEAVELL D A, et al. Laboratory piping tests on fine gravel[J]. Canadian Geotechnical Journal,2018,55(11):1552-1563.

[2] ROBBINS B A, VAN BEEK V M, LÓPEZ-SOTO J F, et al. A novel laboratory test for backward erosion piping[J]. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics,2018,18(5):266-279.

[3] 梁越,张强,曾超,等. 变向渗流下的无黏性土颗粒起动机理研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2016, 35(2):89-92. (LIANG Yue, ZHANG Qiang, ZENG Chao, et al. Non-cohesive particles starting mechanism under the changing seepage direction [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science),2016, 35(2):89-92. (in Chinese))

[4] LIANG Yue, YEH T C J, ZHA Yuanyuan, et al. Onset of suffusion in gap-graded soils under upward seepage[J]. Soils and Foundations,2017,57(5):849-860.

[5] LIANG Yue, YEH T C J, WANG Junjie, et al. Onset of suffusion in upward seepage under isotropic and anisotropic stress conditions[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering,2019,23(12):1520-1534.

[6] 梁越,喻金桃,张强,等. 骨架颗粒组成对散粒土管涌规律影响的试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(1):63-69. (LIANG Yue, YU Jintao, ZHANG Qiang, et al. Experimental study on the effect of skeleton particle composition on piping law of cohesionless soil[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2024,52(1):63-69. (in Chinese))

[7] 梁越,龚胜勇,杨咏梅,等. 间断级配散粒土侵蚀过程及强度演变机理研究[J]. 岩土工程学报:2024,46(3):632-639. (LIANG Yue, GONG Shengyong, YANG Yongmei, et al. Erosion process and strength evolution mechanism of gap-graded cohesionless soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2024,46(3):632-639. (in Chinese))

[8] 陈亮,滕耀宗,蔡国栋,等. 变水头下管涌细颗粒迁移试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(5):82-88. (CHEN Liang, TENG Yaozong, CAI Guodong, et al. Experimental study on the migration of fine particles in piping under variable water head[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2022,50(5):82-88. (in Chinese))

[9] MOFFAT R, FANNIN R J. A hydromechanical relation governing internal stability of cohesionless soil[J]. Canadian Geotechnical Journal,2011,48(3):413-424.

[10] 蒋中明,王为,冯树荣,等. 砂砾石土渗透变形特性的应力状态相关性试验研究[J]. 水利学报,2013,44(12):1498-1505. (JIANG Zhongming, WANG Wei, FENG Shurong, et al. Experimental of study on the relevance between stress state and seepage failure of sandy-gravel soil[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2013,44(12):1498-1505. (in Chinese))

[11] MOFFAT R, HERRERA P. Hydromechanical model for internal erosion and its relationship with the stress transmitted by the finer soil fraction[J]. Acta Geotechnica,2015,10(5):643-650.

[12] LUO Yulong, NIE Min, XIAO Ming. Flume-scale experiments on suffusion at bottom of cutoff wall in sandy gravel alluvium[J]. Canadian Geotechnical Journal,2017,54(12):1716-1727.

[13] LUO Yulong, HUANG Yi. Effect of open-framework gravel on suffusion in sandy gravel alluvium[J]. Acta Geotechnica,2020,

15(9):2649-2664.

[14] LUO Yulong, ZHANG Xingjie, XIAO Ming. Influence of constriction-based retention ratio on suffusion in double-layered alluvial foundation with a cutoff wall[J]. Soils and Foundations,2020,60(6):1489-1506.

[15] BENDAHMANE F, MAROT D, ALEXIS A. Experimental parametric study of suffusion and backward erosion[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2008,134(1):57-67.

[16] CHANG D S, ZHANG L M. A stress-controlled erosion apparatus for studying internal erosion in soils[J]. Geotechnical Testing Journal,2011,34(6):579-589.

[17] CHANG D S, ZHANG Liming. Critical hydraulic gradients of internal erosion under complex stress states[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2013,139(9):1454-1467.

[18] RICHARDS K S, REDDY K P. Experimental investigation of initiation of backward erosion piping in soils[J]. Géotechnique, 2012,62(10):933-942.

[19] 凌华,张胜,敖大华,等.复杂应力状态下土料三轴渗透试验[J].河海大学学报(自然科学版),2017,45(5):451-456. (LING Hua, ZHANG Sheng, AO Dahua, et al. Triaxial test study on the permeability of soil under complex stress state[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2017,45(5):451-456. (in Chinese))

[20] 罗玉龙,吴强,詹美礼,等.考虑应力状态的悬挂式防渗墙-砂砾石地基管涌临界坡降试验研究[J].岩土力学,2012,33(增刊1):73-78. (LUO Yulong, WU Qiang, ZHAN Meili, et al. Study of critical piping hydraulic gradient of suspended cut-off wall and sand gravel foundation under different stress states[J]. Rock and Soil Mechanics,2012,33(Sup1):73-78. (in Chinese))

[21] KE L, TAKAHASHI A. Experimental investigations on suffusion characteristics and its mechanical consequences on saturated cohesionless soil[J]. Soils and Foundations,2014,54(4):713-730.

[22] TOMLINSON S S, VAID Y P. Seepage forces and confining pressure effects on piping erosion[J]. Canadian Geotechnical Journal,2000,37(1):1-13.

[23] SHERARD J L, DUNNIGAN L P. Internal stability of granular filters: discussion[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1986,23(3):418-420.

[24] 张改玲,王雅敬.高围压下砂土的渗透特性试验研究[J].岩土力学,2014,35(10):2748-2754. (ZHANG Gailing, WANG Yajing. Experimental investigation of hydraulic conductivity of sand under high confining pressure[J]. Rock and Soil Mechanics,2014,35(10):2748-2754. (in Chinese))

[25] MOFFAT R, FANNIN R J, GARNER S J. Spatial and temporal progression of internal erosion in cohesionless soil[J]. Canadian Geotechnical Journal,2011,48(3):399-412.

[26] LIU Yajing, WANG Lizhong, HONG Yi, et al. A coupled CFD-DEM investigation of suffusion of gap graded soil: coupling effect of confining pressure and fines content[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2020,44(18):2473-2500.

(收稿日期:2024-04-01 编辑:熊水斌)

(上接第79页)

[26] 张红武,吕昕.弯道水力学[M].北京:水利电力出版社,1993.

[27] 廖绍凯,张研,陈达.基于S-A模型的覆冰输电线绕流数值分析[J].河海大学学报(自然科学版),2023,51(1):110-117. (LIAO Shaokai,ZHANG Yan,CHEN Da. Numerical analysis of flow past iced conductor based on S-A model[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(1):110-117. (in Chinese))

[28] TAVAKOLI S,KHOJASTEH D,HAGHANI M,et al. A review on the progress and research directions of ocean engineering[J]. Ocean Engineering,2023,272:113617.

[29] LEE J,AHN J. Analysis of bed sorting methods for one dimensional sediment transport model[J]. Sustainability,2023,15(3):2269.

[30] 汪晨辉,张汇明.含滩地交汇河道水动力特性与掺混特征数值模拟[J].河海大学学报(自然科学版),2023,51(2):89-98. (WANG Chenhui,ZHANG Huiming. Hydrodynamic and mixing characteristics of river confluence with floodplain[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(2):89-98. (in Chinese))

[31] 刘洋,徐毅,王茂枚,等.方形桥墩紊动特性及尾涡区尺寸PIV试验[J].水利水电科技进展,2022,42(4):55-60. (LIU Yang, XU Yi, WANG Maomei, et al. PIV experiments on turbulence characteristics and tail vortex zone scale of a square pier [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(4):55-60. (in Chinese))

[32] 杨熠琳.桥梁群桩基础局部冲刷机理研究[D].北京:北京交通大学,2020.

(收稿日期:2024-02-27 编辑:刘晓艳)