

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2024.05.008

基于透明土的水力梯度对渗流侵蚀影响试验研究

梁越^{1,2,3}, 何慧汝¹, 许彬^{1,2,3}, 张鑫强⁴, 冉裕星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. 江西省港口集团有限公司江西省水运咨询有限公司, 江西 南昌 330008)

摘要: 为探究水力梯度对土体内部渗流侵蚀的影响规律, 利用熔融石英砂作为透明土材料, 以十五号白油与正十二烷按一定比例配置孔隙溶液, 采用自研的 PIV-PLIF(粒子图像测速-平面激光诱导荧光)渗流侵蚀试验系统研究了水力梯度对渗流侵蚀过程中孔隙溶液流速分布以及细颗粒运动的影响。结果表明: 随着水力梯度的增大, 示踪粒子流速也随之增大且不规则运动现象加剧, 直到试样发生破坏流速才趋于稳定; 同一水力梯度下, 宏观流速略大于微观流速, 两者之间的差距也随水力梯度的增大而不断缩小; 当水力梯度达到临界水力梯度时, 骨架颗粒中的细颗粒开始流失, 渗透系数也开始发生变化, 继续提升水头会使细颗粒大量流失而导致渗流通道不断发展扩大, 最终达到破坏临界水力梯度, 试样发生渗透破坏。

关键词: 渗流侵蚀; 水力梯度; 透明土; 平面激光诱导荧光(PLIF); 粒子图像测速(PIV)

中图分类号: TU44 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2024)05-0060-07

Experimental study on the influence of hydraulic gradient on seepage erosion based on transparent soil

LIANG Yue^{1,2,3}, HE Huiru¹, XU Bin^{1,2,3}, ZHANG Xinqiang⁴, RAN Yuxing¹

(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. Jiangxi Water Transport Consulting Co., Ltd., Jiangxi Port Group Co., Ltd., Nanchang 330008, China)

Abstract: In order to explore the influence of hydraulic gradient on the seepage erosion in soil, fused silica sand was used as the transparent soil material, and the pore solution was configured with No. 15 white oil and n-dodecane in a certain proportion. Based on the seepage erosion system developed by PIV-PLIF (particle image velocimetry and planar laser induced fluorescence), the influence of hydraulic gradient on the flow velocity distribution of pore solutions and the movement of fine particles in seepage erosion damage was explored. The results show that with the increase of the hydraulic gradient, the flow velocity of tracer particles also increases and the irregular motion phenomenon intensifies, and the flow velocity tends to be stable until the sample fails. Under the same hydraulic gradient, the macroscopic flow velocity is slightly larger than the microscopic flow velocity, and the gap between the two is also narrowing with the increase of the hydraulic gradient. When the hydraulic gradient reaches the critical hydraulic gradient, the fine particles in the particle skeleton begin to lose, and the permeability coefficient also begins to change. If the water head continues to increase, a large number of fine particles will be lost, resulting in the continuous development and expansion of the seepage channel, and finally the critical hydraulic gradient of failure will be reached.

Key words: seepage erosion; hydraulic gradient; transparent soil; planar laser induced fluorescence (PLIF); particle image velocimetry (PIV)

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); 重庆市博士后特别资助项目(2022CQBSHTB1010); 重庆交通大学博士后科学基金项目(22JDKJC-A008); 重庆市研究生联合培养基地项目(JDLHPYJD2021004)

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: 何慧汝(1998—), 男, 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: cqjtuhehuiru@163.com

引用本文: 梁越, 何慧汝, 许彬, 等. 基于透明土的水力梯度对渗流侵蚀影响试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(5): 60-66.

LIANG Yue, HE Huiru, XU Bin, et al. Experimental study on the influence of hydraulic gradient on seepage erosion based on transparent soil[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2024, 52(5): 60-66.

土体渗流侵蚀是松散细颗粒在渗流作用下通过骨架颗粒间孔隙发生运移的过程,它是造成土壤粗化、渗透性增大、土体沉降甚至土工结构破坏的重要因素^[1-2]。在渗流-侵蚀的发展过程中,细颗粒的损失将导致土壤的稳定性和渗透性等物理性质发生变化,而且细颗粒的损失及发展的过程也将对土壤渗流-侵蚀机制产生一定的影响。由渗透破坏引起的事故不但威胁人民群众的生命安全而且还会造成严重的经济损失,因此开展渗流侵蚀研究并分析其破坏机理有着极为重要的现实意义。

目前,已有大量学者开展了渗流侵蚀相关的试验研究^[3-5]。陈亮等^[6-10]对渗流引起的管涌进行了研究;Liang 等^[11]利用室内试验法探讨了不同颗粒度和干密度下土体向上渗透的粒子冲刷规律并揭示了微粒的局部移动和总体流失与高、低临界水力梯度的关系;陈建生等^[12]利用室内试验模拟了刚性盖板下双层堤基渗透破坏的过程,研究了堤基发生管涌破坏后对上覆黏土层的影响;Wang 等^[13]通过一系列离散单元法模拟研究了不同孔隙比和细颗粒含量下的双峰土发生渗流引起的侵蚀并提出了一个基于量纲分析的模型来预测最终侵蚀率。随着粒子图像测速 (particle image velocimetry, PIV) 和平面激光诱导荧光 (planar laser induced fluorescence, PLIF) 等先进技术的引入^[14-15],透明土体的渗流侵蚀研究不再局限于肉眼观测以及传统的力学性能研究,且能在不产生破坏的情况下对土体内部的发展规律进行直观的监测,还能降低试验成本。例如:梁越等^[16]采用由凝胶微粒与纯水混合而成的透明土壤样品结合示踪颗粒探究了多孔介质中的孔隙流特征;曹兆虎等^[17]基于透明土和 PIV 技术开发了桩基贯入模型试验系统,对开口管桩和闭口管桩贯入过程中桩周土体的位移场进行了研究;谷敬云等^[18]基于 PLIF 技术研制了潜蚀可视化试验装置并进一步证明了该试验装置可以对透明土体中不同部位的粒子运动进行实时观察;梁越等^[19]采用透明土技术,基于自制的 PIV/PTV (particle tracking velocimetry, 粒子追踪测速) 简易渗流侵蚀试验系统对水力侵蚀的细观机理进行了研究;刘汉龙等^[20]考虑到含石量、块石尺寸、固结压力 3 个内在因素及流量外在因素,开展了透明土石混合体水力侵蚀模型试验并对试验结果进行了二维断面分析以及三维重构;张建伟等^[21]利用透明土研究了斜坡条件下坡顶加载造成的土体破坏特征,并借助 PIVview2C 软件和 Surfer 软件对采集的图像进行了处理和数据分析。纵观国内外研究现状,尽管有不少学者基于透明土开展了相关研究,但基于透明土的渗流侵蚀内部演化特征研究仍有必要开展。

为揭示渗流侵蚀过程中流体与细颗粒的运动规律及相关关系,本文在已有研究^[11,16,19]的基础上,采用透明土基于自研的 PIV-PLIF 渗流侵蚀试验系统进行了渗流侵蚀过程的内部可视化试验,以期为渗流侵蚀可视化研究提供参考。

1 试验方案

1.1 透明土制备

透明土试样通常由透明的固体颗粒与折射率相近的孔隙溶液混合而成。为保证试样有足够的透明度、耐高压能力且与天然土体有相似且稳定的物理化学性质等特征,试验采用平均相对质量密度为 2.20、粒径范围为 0.5 ~ 20 mm 且细颗粒质量分数为 20% 的熔融石英砂作为透明土,并用十五号白油 (折射率 1.4630) 与正十二烷 (折射率 1.4220) 在室温 25℃ 条件下以 4.2 : 1 的比例配置孔隙溶液结合熔融石英砂进行渗流试验,固体颗粒与孔隙溶液的折射率均为 1.4585。试样颗粒级配曲线见图 1,经测定试样的孔隙率为 0.32,根据颗分曲线可判断该级配试样能发生渗透破坏;根据土体内部稳定性判别方法,此初始细颗粒级配的透明土试样为内部不稳定土体,满足管涌产生的条件。试样透明效果如图 2 所示。

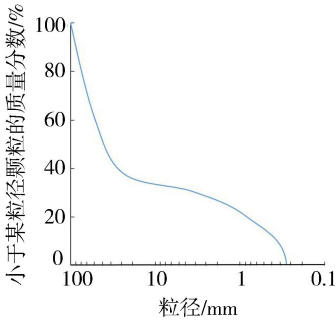


图 1 试样颗粒级配曲线

1.2 PIV-PLIF 渗流侵蚀试验系统

Fig. 1 Specimen particle gradation curve

PIV-PLIF 渗流侵蚀试验系统装置如图 3 所示,主要由模型盒、成像系统及图像信息采集、处理系统等组成。该系统综合运用 PIV 和 PLIF 两项技术,不但能实现数据采集时空上的同频进行,还能减小系统误差,且能完整观测到一次渗流侵蚀发生时的固体颗粒与流场的变化情况。为便于探究内部溶液流动及更好地模拟侵蚀过程,试验加入了溶液循环装置,循环动力由水头控制装置和可调节功率抽水泵提供,抽水泵置于孔隙溶液装置中,将孔隙溶液抽到水头控制装置中,再利用水头控制装置向试样中注入溶液,产生向上的渗流侵蚀作用。测压管一段连在模型盒一侧的 4 个小孔上,另一端与 DH3821 数据采集系统相连,再通过水晶电缆将压力传感器

与电脑相连,使用 DHDAS 动态信号采集分析系统对模型盒每一个小孔上的压强变化情况进行实时监测。整个操作可保证渗流侵蚀试验过程能不间断收集水头信息,为后续水力梯度等参数的计算提供试验依据。

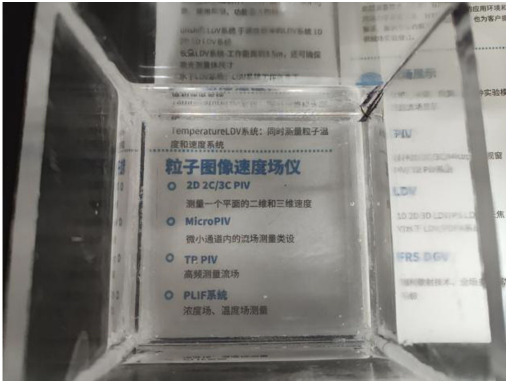


图 2 试样透明效果

Fig. 2 Transparent effect of specimens

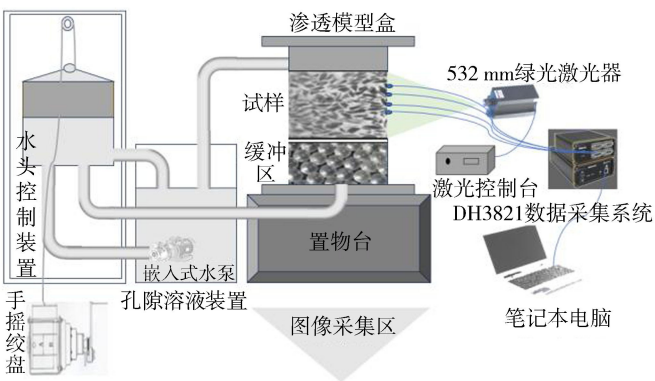


图 3 PIV-PLIF 渗流侵蚀试验系统装置示意图

Fig. 3 Device diagram of seepage-erosion system with PIV-PLIF

1.3 试验过程

将制备好并加入适当浓度示踪剂以及荧光染料的透明土试样置入模型盒,并用水管、阀门、压力传感器等将模型盒与水头控制装置、孔隙溶液装置、DH3821 数据采集系统连接起来,做好试验前的准备,具体试验步骤如下:①将荧光染料注入透明土中,注入孔隙溶液使试样完全浸透,并不断搅拌保持试样中无气泡且粗细颗粒分布均匀;②充分饱和试样并置于渗透模型盒内;③调节水头控制装置,使装置内液面与模型盒中孔隙溶液水面保持水平;④将绿光激光器打开,调节激光输出功率至产生明亮而又不刺眼的竖向激光平面;⑤分别安装一台微距相机(拍摄水头提升后试样流场流速变化视频)和一台加装长通滤波器的全画幅相机(用于拍摄水头变化前后的荧光图片),并确保相机能拍摄到整个透明土试样;⑥试验过程中,以先快后慢变化水力梯度控制试验进程;⑦待到试样以及流场流速分布图像未见明显差异后,关闭试样模型盒下方阀门和潜入式水泵,继续观察试样情况;⑧整理分析并处理试验所得的图像和视频信息以及所采集的试验数据。

2 试验结果与分析

2.1 流速分布演化特征

基于 PIVlab 软件对试验拍摄的透明土试样流速分布图进行处理(图 4),之后将试样同一截面在不同水

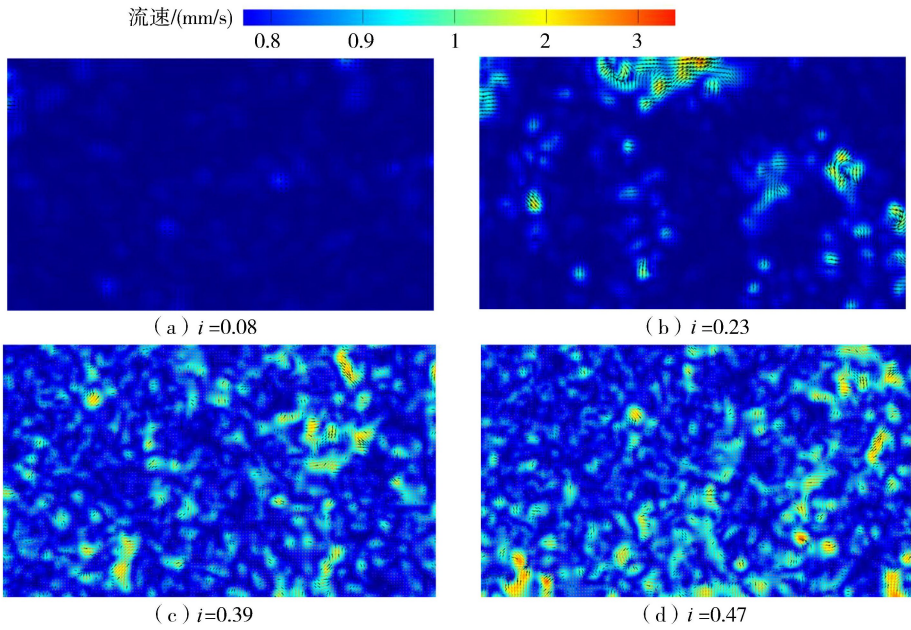


图 4 不同水力梯度下试样流速分布情况

Fig. 4 Flow velocity distribution diagram of specimens under different hydraulic gradients

力梯度(i)下的处理结果进行对比分析,其中水力梯度以每次 0.01 均匀提升直至流速无明显变化。

a. 当水力梯度从 0 增大到 0.08 时(图 4(a)),整个试样流场大都处于静止或相对稳定且低速(约为 0.1 mm/s)运动的状态,绝大多数示踪粒子无明显的运动轨迹(在流速分布图中呈现深蓝色);只有小部分区域流速约为 0.2 mm/s(在图中呈现浅蓝色)。

b. 继续增大水力梯度,当水力梯度增大到 0.23 时(图 4(b)),流场内绝大多数低速区域相比之前流速都有了提升,约为 0.7 mm/s;而孔隙中的示踪粒子最大速度约为 2.5 mm/s,可以看到流场中深蓝色的低速区域被勾勒得越发明显。试样顶部部分示踪粒子呈现出高速的流线型运动状态且速度在整个试样范围内都较高;靠近右边界出现了旋涡。此时流体示踪粒子绝大多数都沿着熔融石英砂骨架颗粒之间的间隙流动,并且随着水头的升高,不光骨架颗粒之间孔隙中的流体流速增大,熔融石英砂骨架表面的流体流速也有相应的增大。此时,试样熔融石英砂骨架颗粒之间的细颗粒也开始不规则运动,在水流的冲刷下与颗粒骨架发生碰撞,有小部分细颗粒被水流带走,在骨架颗粒之间形成空洞。

c. 随着水力梯度增大到 0.39(图 4(c)),此时在水流的作用下,示踪粒子基本呈现加速运动状态且速度相比之前越来越大,此时流场中最低流速为 0.8 mm/s 左右,而最大流速约为 4 mm/s,整个流场的平均流度也在进一步提升。从图 4(c)中可以明显看到浅蓝色包裹着绿色区域围绕试样骨架颗粒区域形成了数条尚未连通的流线,此时熔融石英砂骨架颗粒缝隙中的细颗粒不断被孔隙溶液带走,随着细颗粒的大量流失,熔融石英砂骨架孔隙中的细颗粒填充率显著降低,初步形成了肉眼可观测到的、明显的优势渗流路径(即渗流通道),并从试样下部开始不断向上部发展。

d. 持续增大水力梯度,当水力梯度达到 0.47 时(图 4(d)),示踪粒子持续加速(流场区域最大流速可达 5 mm/s)促使整个流场区域的流速分布更加清晰可见,细颗粒在高速水流作用下被加大力度向上游冲刷进而导致此前形成的渗流通道进一步扩大,但并未看到有从底部贯穿到顶部的通道出现。

总体来看,当水力梯度很小时流场中示踪粒子无明显运动轨迹,由于水头较低整个流场处于低流速状态,部分孔隙溶液沿着熔融石英砂大颗粒表面运动;随着水力梯度的增大,整体流速不断增大,直至冲开细颗粒的阻碍,形成优势渗流路径后流速大幅度提升并且不断扩宽优势通道,最终贯通试样。随着渗流通道的不断扩张发展,细颗粒大量流失,在试样中形成贯通的通道,此时达到破坏临界水力梯度,试样被渗透破坏,如渗透破坏严重甚至会发生骨架颗粒的垮塌。

2.2 不同截面孔隙流速变化规律

为了探究试样内部的流场流速与细颗粒运移情况,试验中用激光器依次照射试样的 5 个截面并逐渐增大水头,这 5 个截面分别距模型盒(10 cm 宽)前壁 1、2、3、4、5 cm,依次命名为 D1、D2、D3、D4、D5。利用加权平均公式(式(1))定义平均细观流速,并将流场示踪粒子中实测速度最大值定义为细观流速,试验中不断变化截面与模型盒前壁的距离,并通过水头控制装置不断变化水头差,探究宏观流速、细观流速和平均细观流速之间的关系,各个截面的流速频数分布如图 5 所示。

$$\bar{v} = \frac{v_1 f_1 + v_2 f_2 + \cdots + v_k f_k}{\sum_{i=1}^k f_i}$$

(1)

式中: $\bar{v}$ 为平均细观流速; v 为实测流速; f 为实测流速频数; k 为实测流速的总数。

从图 6 可以看出,随着水力梯度的不断增大,宏观流速、细观流速和平均细观流速都呈不断增大的趋势,但整体增幅都相对较小。同一水力梯度下,越靠近模型盒前壁的截面流速越小,D1、D2、D3 截面流速相对较小,D4、D5 截面的流速相对较大;D1 截面的宏观流速从 0.512 mm/s 增大到了 4.71 mm/s,细观流速从 0.501 mm/s 增大到了 4.609 mm/s,平均细观流速从 0.265 mm/s 增大到了 2.412 mm/s;相比之下 D5 截面的宏观流速、细观流速和平均细观流速最大值分别达到了 5.010、4.874、2.528 mm/s,由此可见在同一截面处,3 种流速都有较大的增长。从整体看,随着水力梯度的增大,3 种流速也不断增大,并都呈现出先加速增大再平缓增大,之后又加速增大的规律,在水力梯度达到 0.63 后,流速基本不再变化,其主要原因是在此阶段渗

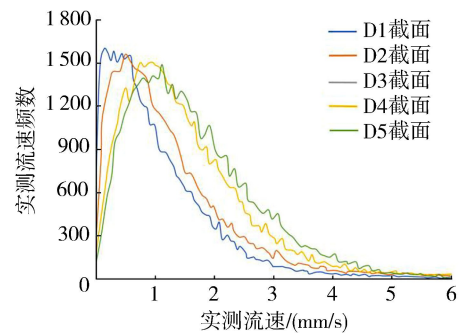


图 5 各截面的流速频数分布

Fig. 5 Flow velocity frequency distribution plots for each section

流通道已完全形成,流速趋于稳定。3种流速对水力梯度变化响应的一致性可以说明水力梯度能在一定程度上影响渗流侵蚀的发生、发展,能够作为判断试样是否发生渗流侵蚀的依据。而随着流速的不断增大促使试样细颗粒不断流失后会形成渗流通道,通道内流体不再受到骨架颗粒结构的束缚,这会加速细观流速的增大从而带动平均细观流速的增大,同样宏观流速也随着细颗粒流失后试样整体渗透性增大而增大。

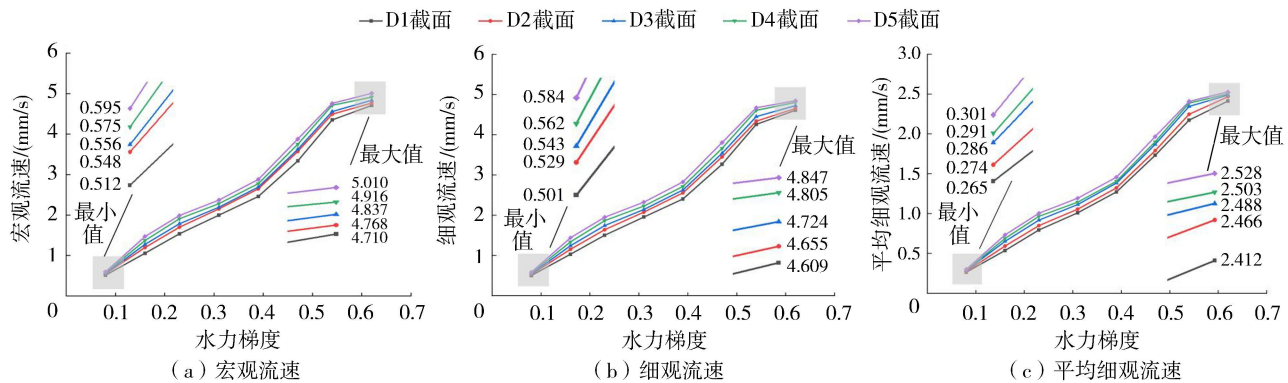


图6 水力梯度与截面流速的关系

Fig. 6 Relationship between hydraulic gradient and section flow velocity

2.3 不同水力梯度下细颗粒迁移特征

对试验过程中拍摄的图像进行滤波、降噪处理,结果如图7所示,图中黑色代表骨架颗粒,白色代表细颗粒流动迁移通道。

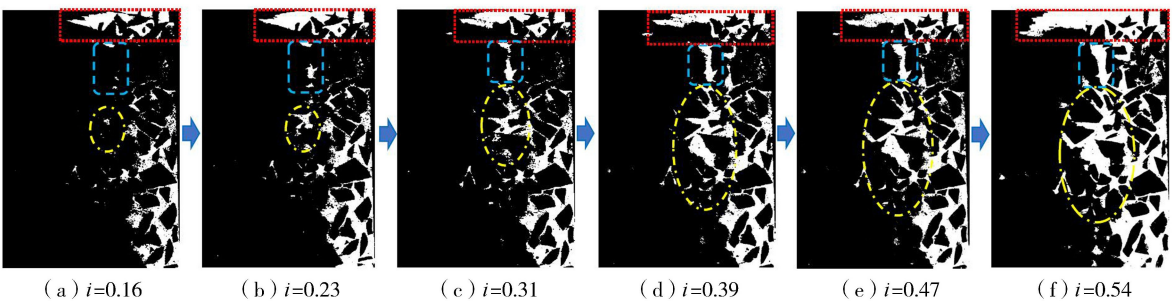


图7 细颗粒迁移与水力梯度的关系

Fig. 7 Relationship between fine particle migration and hydraulic gradient

从图7可见,当水力梯度从0.16增大到0.23时(图7(a)(b)),透明土试样下部及试样中部开始出现零星孔隙内小范围的细颗粒流失现象。细颗粒起动意味着透明土试样中开始发生渗流侵蚀,此时可以看到原本被细颗粒填满的骨架孔隙开始出现空洞并在不断扩张,而骨架孔隙中仍有细颗粒淤积。持续增大水头,骨架颗粒之间的孔隙逐渐被掏空(图7(c)),渗流侵蚀发生的范围随之变大,透明土试样内逐步开始形成了优势渗流路径。但在水力梯度达到0.39时(图7(d)),试样上部积压的细颗粒仍在阻碍流体的流动,并未形成上下贯通的完整渗流通道。继续增大水力梯度,优势路径进一步向试样上部发展(图7(e)),更多的细颗粒在渗透作用下失去平衡而起动,不断拓宽渗流路径。由于试样并非理想中的绝对均匀,因此在渗流侵蚀不断发展的过程中,孔隙溶液不断寻找最薄弱点并逐渐往上部发展,最终形成贯穿上下的渗流通道。从图7(f)可以发现在试样右侧形成了由下至上贯通的渗流通道,但其他地方并没有发现贯通的渗流通道,只是出现了一定程度的细颗粒流失,这说明渗流侵蚀的发生过程并不是均匀的,渗流力会从试样结构不稳定的区域不断向上发展,最终形成贯穿试样的渗流通道,该现象在文献[6,12]中都有所体现。

2.4 实测流速与水力梯度的关系

如图8所示,水力梯度随着试验中水头不断增大而增大,当水力梯度为0.16时达到发展临界水力梯度,此时试样由层流逐渐向紊流

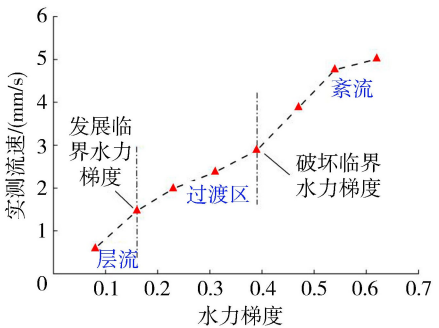


图8 实测流速与水力梯度的关系

Fig. 8 Relationship between measured flow velocity and hydraulic gradient

过渡,骨架颗粒中的细颗粒也开始流失,导致渗透系数开始发生变化;随着水力梯度进一步增大到 0.39 时达到破坏临界水力梯度,此时细颗粒开始大量流失,渗流路径在水头作用下逐渐发展形成了优势渗流路径,致使试样发生渗透破坏。随着水力梯度的进一步提升,细颗粒运移情况更加明显,优势渗流通道在水流的作用下加速发展并逐渐形成通路,情况严重时甚至会发生骨架颗粒的垮塌。在试验中发现,在远离边界截面试样发生细颗粒运移起动所需的水力梯度更小,且对应的破坏水力梯度也较小;细颗粒流失后形成优势渗流路径导致通道内流体不受骨架颗粒结构的控制,优势渗流路径内的流速也就是细观流速将会突增,进而平均细观流速也会相应增大,但受细颗粒流失后试样整体渗透性发生改变的影响,宏观流速也会提升。

2.5 侵蚀机理分析

根据试验现象以及对示踪粒子流速的图像分析可以发现试样破坏过程可分为 4 个阶段:①孔隙流体运动阶段,该阶段细颗粒不受水流运动的影响;②示踪粒子起动阶段,此时试样整体稳定,但存在少量示踪粒子沿骨架颗粒表面运动;③示踪粒子规模运动阶段,此阶段示踪粒子加速运动且运动方向即为渗流方向;④试样破坏阶段,即侵蚀通道形成,示踪粒子运动不受阻碍,试样遭到破坏。在整个过程中,越靠近试样中心即越靠近进水口与出水口的连线位置,试样破坏后的流速与流量越大,也就是说形成的渗流通道越大。在水力侵蚀发生前即细颗粒未流失的时候,试样的运动符合达西定律,随着水力梯度的增大,试样开始发生水力侵蚀,试样的运动不再遵从达西定律。

3 结 论

a. 水力梯度随着水头的提升而不断增大,试样流场流速也在随之变化,各区域的示踪粒子也表现出流线型或涡流型等不规则运动状态,且随着流速的不断增大而更加紊乱,这也表明试样随着水力梯度的变化逐渐从层流转化成了紊流,且逐渐发展为不再遵从达西定律。

b. 3 种流速对水头变化的响应高度一致,说明定义的这 3 种流速尺度都能在一定程度上影响渗流侵蚀的发生、发展,随着水头的不断增大,3 种流速也随之增大。当水力梯度逐渐增大到甚至超过破坏临界水力梯度时,试样也从开始渗流逐渐发展到破坏阶段;试样发生侵蚀破坏大致可分为孔隙流体运动、示踪粒子起动、示踪粒子规模运动、试样破坏等 4 个阶段。

c. 随着水力梯度的增大,试样下游孔隙处骨架颗粒首先会被渗流力突破,进而不断寻找最薄弱点并逐渐往上游发展,导致大量细颗粒流失,骨架颗粒之间的孔隙逐渐被掏空,渗流侵蚀发生的范围随之变大,透明土试样内逐步开始形成了优势渗流路径,最终演变成从下而上贯通的渗流通道并促使试样发生破坏。

参考文献:

[1] YANG Bin,SHI Wenhao,YANG Xin. Nonlinear seepage erosion model of water inrush considering particle size distribution of karst collapse column and its engineering applications[J]. Scientific Reports,2022,12(1):17078.

[2] LI Yan,LUO Yashen,HU Songta,et al. Effect of alkali seepage erosion on physical and mechanical properties of laterite[J]. Advances in Materials Science and Engineering,2021,2021:8002984.

[3] 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))

[4] 梁越,马士谦,魏琦,等. 希德拉顿颗粒铺盖防渗性能试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(2):31-36. (LIANG Yue,MA Shiqian,WEI Qi,et al. Experimental study of the anti-seepage characteristics of the Sidraton particles blanket[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2022,50(2):31-36. (in Chinese))

[5] ZENG Bin,ZHU Yucong,YE Siqiao,et al. Double-O-tube shield tunneling-induced soil displacement considering burial depth and convergence mode:transparent soil experiment and DEM simulation[J]. Frontiers in Earth Science,2022,10:925356.

[6] 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))

[7] 陈亮,雷文,张红宇,等. 非稳定流作用下管涌发生发展的室内试验及理论分析[J]. 岩土工程学报,2013,35(4):655-662. (CHEN Liang,LEI wen,ZHANG Hongyu,et al. Laboratory simulation and theoretical analysis of piping mechanism under

unsteady flows[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2013,35(4):655-662. (in Chinese))

[8] 罗玉龙,速宝玉,盛金昌,等. 对管涌机理的新认识[J]. 岩土工程学报,2011,33(12):1895-1902. (LUO Yulong, SU Baoyu, SHENG Jinchang, et al. New understanding on piping mechanism[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2011,33(12):1895-1902. (in Chinese))

[9] 罗玉龙,张兴杰,张海彬,等. 深厚覆盖层地基潜蚀研究综述[J]. 岩土力学,2022,43(11):3094-3106. (LUO Yulong, ZHANG Xingjie, ZHANG Haibin, et al. Review of suffusion in deep alluvium foundation[J]. Rock and Soil Mechanics,2022,43(11):3094-3106. (in Chinese))

[10] 隋海宾,安超,张鹏. 基于离心模型试验的砂土管涌特性研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2010,38(5):545-549. (SUI Haibin, AN Chao, ZHANG Peng. Piping characteristics of sand based on centrifugal model tests[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2010,38(5):545-549. (in Chinese))

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

[12] 陈建生,何文政,王霜,等. 双层堤基管涌破坏过程中上覆层渗透破坏发生发展的试验与分析[J]. 岩土工程学报,2013,35(10):1777-1783. (CHEN Jiansheng, HE Wenzheng, WANG Shuang, et al. Laboratory tests on development of seepage failure of overlying layer during piping of two-stratum dike foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2013,35(10):1777-1783. (in Chinese))

[13] WANG Xiukai, HUANG Bo, TANG Yao, et al. Microscopic mechanism and analytical modeling of seepage-induced erosion in bimodal soils[J]. Computers and Geotechnics,2022,141:104527.

[14] HUANG Shuo, HUANG Wenrui, ZHONG Guihui. PIV-based experiments on density-induced flow in an estuarine navigation channel constricted by a groin[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2022, 275: 107994.

[15] MITROTTA F M A, SODJA J, SCIACCHITANO A. On the combined flow and structural measurements via robotic volumetric PTV[J]. Measurement Science and Technology,2022,33(4):045201.

[16] 梁越,陈鹏飞,林加定,等. 基于透明土技术的多孔介质孔隙流动特性研究[J]. 岩土工程学报,2019,41(7):1361-1366. (LIANG Yue, CHEN Pengfei, LIN Jiading, et al. Pore flow characteristics of porous media based on transparent soil technology [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2019,41(7):1361-1366. (in Chinese))

[17] 曹兆虎,孔纲强,刘汉龙,等. 基于透明土的管桩贯入特性模型试验研究[J]. 岩土工程学报,2014,36(8):1564-1568. (CAO Zhaohu, KONG Gangqiang, LIU Hanlong, et al. Model tests on pipe pile penetration by using transparent soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2014,36(8):1564-1568. (in Chinese))

[18] 谷敬云,罗玉龙,张兴杰,等. 基于平面激光诱导荧光的潜蚀可视化试验装置及其初步应用[J]. 岩石力学与工程学报,2021,40(6):1287-1296. (GU Jingyun, LUO Yulong, ZHANG Xingjie, et al. A suffusion visualization apparatus based on planar laser induced fluorescence and the preliminary application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2021,40(6):1287-1296. (in Chinese))

[19] 梁越,代磊,魏琦. 基于透明土和粒子示踪技术的渗流侵蚀试验研究[J]. 岩土工程学报,2022,44(6):1133-1140. (LIANG Yue, DAI Lei, WEI Qi. Experimental study on seepage erosion based on transparent soil and particle tracing technology[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2022,44(6):1133-1140. (in Chinese))

[20] 刘汉龙,钟文涵,仇文岗,等. 基于透明土石混合体的水力侵蚀特性研究[J]. 岩土工程学报,2023,45(9):1868-1877. (LIU Hanlong, ZHONG Wenhan, ZHANG Wengang, et al. Hydraulic erosion characteristics based on transparent soil-rock mixture[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2023,45(9):1868-1877. (in Chinese))

[21] 张建伟,李贝贝,樊亚龙,等. 基于透明土模型试验的斜坡加载土体破坏特征研究[J]. 河南大学学报(自然科学版),2020,50(6):717-723. (ZHANG Jianwei, LI Beibei, FAN Yalong, et al. Study on loading failure characteristics of slope based on transparent soil model test[J]. Journal of Henan University (Natural Science),2020,50(6):717-723. (in Chinese))