

DOI: 10.11779/CJGE202206018

基于透明土和粒子示踪技术的渗流侵蚀试验研究

梁 越^{1, 2}, 代 磊^{*1, 2}, 魏 琦³

(1. 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; 2. 重庆交通大学水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074;
3. 长江水利水电开发集团有限公司, 湖北 武汉 430000)

摘要: 渗流侵蚀是造成水利工程失稳破坏的主要原因之一。在渗流侵蚀过程中, 土体细颗粒逐渐流失, 土体渗透性增强, 从而进一步影响到颗粒的流失, 最终甚至导致失稳破坏。渗流侵蚀是典型的流固耦合问题, 为了从细观层面探究渗流侵蚀过程中流体运动与颗粒流失的相互作用, 结合透明土技术, 自行研制了一套基于双光源 PIV/PTV 的渗流侵蚀试验系统。试验采用熔融石英砂和溴化钙溶液作为透明土材料及孔隙溶液, 并对渗流侵蚀过程中孔隙溶液及土中细颗粒运动进行观测记录。对不同截面流速与试样宏观流速进行对比, 发现水力梯度较小时截面实测流速大于试样宏观流速, 随着水力梯度的增加试样宏观流速逐渐大于截面实测流速, 且越靠近试样中心, 试样宏观流速和截面流速差距越小; 同时试样中细颗粒逐渐由稳定状态过渡为垂直于进出水口所在平面方向运动, 并逐渐流失。与无黏性土临界水力梯度公式计算结果进行了对比, 发现通过试验获得的临界水力梯度略低于理论计算结果, 但其所反映的渗流侵蚀规律与传统试验结果基本相符, 表明了该试验系统在渗流侵蚀细观模拟中具有较高的可靠度, 对从细观层面研究渗流侵蚀具有重要的参考意义。

关键词: 渗流侵蚀; 透明土; 粒子图像测速; 粒子示踪测速

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2022)06-1133-08

作者简介: 梁 越(1985—), 男, 教授, 博士, 主要从事水利工程灾害形成机理及防治方向的研究。E-mail: liangyue2560@163.com。

Experimental study on seepage erosion based on transparent soil and particle tracing technology

LIANG Yue^{1, 2}, DAI Lei^{1, 2}, WEI Qi³

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

2. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 3. Changjiang Water Resources and Hydropower Development Group Co., Ltd., Wuhan 430000, China)

Abstract: Seepage erosion is one of the main reasons for the instability and failure of hydraulic engineering. In the process of seepage erosion, the fine particles of the soil are gradually lost, and the permeability of the soil is enhanced, which further affects the loss of particles, and eventually even leads to instability and destruction. The seepage erosion is a typical fluid-solid coupling problem. To explore the interaction between fluid movement and particle loss in the process of seepage erosion from the mesoscopic level, by use of the transparent soil technology, a set of seepage erosion test system based on the double light source PIV/PTV is developed. The fused quartz and solution of CaBr_2 are used as transparent soil and pore fluid. The movement of pore solution and fine particles in the soil during seepage erosion is observed and recorded. The flow velocity of different sections is compared with the macroscopic flow velocity of the sample, and it is found that when the hydraulic gradient is small, the measured flow velocity of the section is larger than the macroscopic flow velocity of the sample. With the increase of hydraulic gradient, the macroscopic velocity of the sample is gradually larger than the measured velocity of the cross-section, and the closer to the center of the sample, the smaller the difference between the macroscopic velocity and the cross-section velocity. At the same time, the fine particles in the sample gradually transitioned from a stable state to move perpendicular to the plane of the water inlet and outlet, and gradually lose. Compared with the calculated results of the critical hydraulic gradient formula for cohesive soil, it is found that the critical hydraulic gradient obtained through the experiment is slightly lower than the theoretical result. However, the

基金项目: 国家重点研发计划课题(2019YFC1510802); 广东省水利科技创新项目(2020-13); 重庆市研究生科研创新项目(CYB20179)

收稿日期: 2021-05-20

*通信作者(E-mail: lei_d0320@163.com)

regularity reflected by the experimental results is consistent with the traditional test results. It is shown that the test system has high reliability in the meso-simulation of seepage erosion, and has significance for the study of seepage erosion from the meso-level.

Key words: seepage erosion; transparent soil; particle image velocimetry; particle tracking velocimetry

0 引言

渗透破坏是一种常见的且极具危害性的水利工程破坏类型^[1]，其发生必须满足水力条件和几何条件，且两种条件相互作用并伴随其发展的全过程。渗透破坏主要表现为土体内部细颗粒发生了迁移，而驱动细颗粒运移的源动力主要是水流在渗流方向上对其产生的拖曳力和推动力^[2]，且其大小和方向都会影响到颗粒的起动和运移。Liang 等^[3-5]通过自行研制的管涌侵蚀试验系统，探究了管涌侵蚀速率与应力状态以及水力梯度之间的相互关系。刘杰等^[6]结合江河大堤中双层地基的渗透稳定问题，研究了不同细颗粒含量下，管涌土中的细颗粒带出后的土层结构及渗透系数变化规律。姚志雄等^[7]开展了垂直渗流下砂土管涌试验，并采用精细化量测设备，研究了颗粒级配对管涌发展的影响，揭示了其对颗粒运动特性、水力学特性等的影响规律，从细观尺度揭示渗漏通道的形成过程。

现有的相关试验研究中，往往采用天然土体作为试验材料，虽能较好的贴近工程实际，但由于其内部不可见，故无法对其内部的发展规律进行直接的观测，而往往其内部的规律是探究相关问题的关键所在^[8]。针对传统测量试验无法可视化土体内部的问题，不少学者开始尝试使用透明材料对其进行模拟。Chaney 等^[9]利用透明土试验技术有效模拟了地基处理时的渗流问题，并分析了该技术存在的不足和运用前景。伴随着数字图像处理技术的发展，粒子图像测速（particle image velocimetry, PIV）逐渐被运用于与透明土相关的试验中，并实现了隧道工程^[10-12]、基础工程^[13-15]、边坡工程^[16-18]以及其他方面^[19-20]的可视化模型试验。参考现有文献，透明土试验技术与 PIV 相结合的试验方法多用于土的力学性质方面的研究，在渗流侵蚀方面的应用仍相对较少，同时由于粒子图像测速（PIV）存在难以对单个颗粒进行识别追踪的局限性^[21]，故采取一种新的试验方法对渗流侵蚀规律及机理展开进一步研究显得很有必要。考虑 PIV 存在的不足，研究者对其进行了改进和完善，并提出了粒子示踪测速（particle tracking velocimetry, PTV）。该技术克服了 PIV 的局限性，可以实现以单个粒子为分析对象，通过识别粒子的形心运动轨迹来对其进行追踪和测速，常被用于流动测速^[22-23]、风沙运输^[24-25]、气泡流动^[26-27]等方面的研究。本文结合已有的透明土技术，将粒子

图像测速（PIV）与粒子示踪测速（PTV）相结合，自行研制了一套基于双光源 PIV/PTV 的渗流侵蚀试验系统，从细观角度出发，对渗流侵蚀的发展规律及特性进行了相关研究。

1 试验概况

1.1 透明土试样制备

在选择透明多孔介质时，为了保证“土体”的透明性，所选取的固体颗粒需具备光学性能良好、与天然土体相似、物理及化学性质稳定等特点。参考已有文献资料^[28-31]，本试验采用透明度高、性质稳定的熔融石英砂作为“土体”进行渗流侵蚀模拟，其平均相对质量密度约为 2.21，折射率 1.4584，其粒径范围在 0.5~20 mm。为了模拟土体渗流侵蚀过程，本试验选用缺级配熔融石英颗粒，其级配曲线如图 1 所示。采用南京水利科学研究院关于管涌和流土的判别方法^[32]：

$$P_z = \beta \frac{\sqrt{n}}{(1 + \sqrt{n})} \quad , \quad (1)$$

式中， P_z 为临界细颗粒含量， n 为土体孔隙率，本试样孔隙率为 0.42， β 为修正系数，一般取 0.95~1.0，本试验取 1.0。若细颗粒含量（2 mm） $P'_z \leq P_z$ 则为管涌破坏，反之则发生流土破坏。试样中细颗粒含量为 15%，小于临界细颗粒含量 39.39%，故所制“土样”满足管涌产生条件。

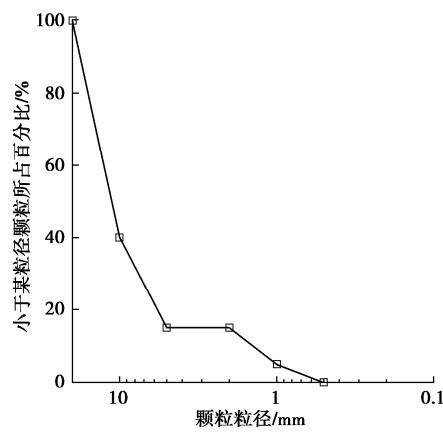


图 1 透明土颗粒级配曲线图

Fig. 1 Grain-size distribution curve of fused quartz

试验选用纯度为 98% 的溴化钙固体配置溴化钙溶液，为了获得与熔融石英砂折射率相匹配的溴化钙溶液，配置质量百分浓度分别为 40%，50%，55%，60%，70% 的溴化钙溶液，并量测所配置溶液的折射

率, 得到其与折射率关系曲线如图 2 所示。从图中可知溶液的最匹配浓度为 63.23%, 其相对密度为 1.38, 试样的透明效果见图 3。

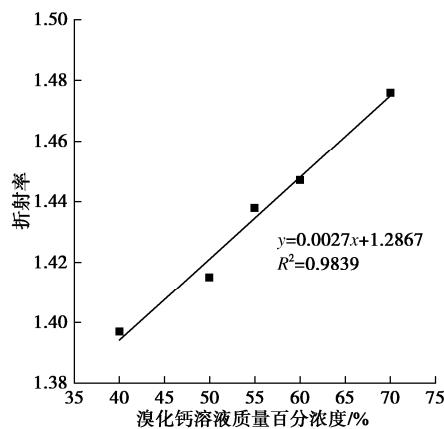


图 2 溴化钙溶液折射率随浓度变化曲线 (25°C)

Fig. 2 Variation of refractive index with mass fraction of CaBr_2 solution (25°C)

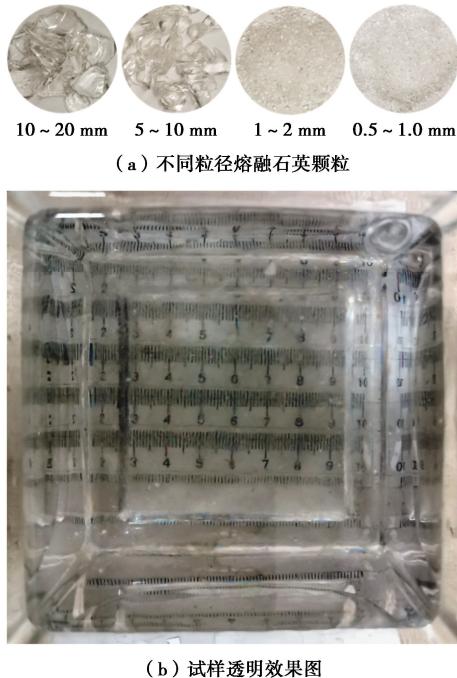


图 3 透明土颗粒及透明效果图

Fig. 3 Particles of transparent soil and picture of transparent effect
1.2 PIV/PTV 测速原理

本试验采用图像测速技术 (particle image velocimetry, PIV) 和粒子示踪测速技术 (particle tracking velocimetry, PTV) 相结合的方法, 分别对试样中流场分布及细颗粒运动情况进行观测记录。图像测速技术 (PIV) 是发展于 20 世纪 90 年代末的一种流体变形测量方法, 常应用于流场测试等相关领域的研究。其主要工作原理^[33-34]是通过在流体中散播一定密度的光学性能良好、易于识别捕捉的示踪粒子, 在

脉冲激光器作用下形成激光光片, 采用高速相机连续记录悬浮于流场中的示踪粒子运动过程, 经过多次曝光对激光面内粒子进行标定, 通过互相关理论对连续两幅图像中的粒子进行匹配分析, 进而获得流场的二维速度矢量分布信息。由于 PIV 技术对单个粒子匹配率低, 从而引进粒子示踪测速技术 (PTV), 该技术是通过追踪粒子形心运动轨迹, 进而计算粒子速度矢量^[22], 其跟随流体流动的情况类似于单个粒子^[35], 克服了 PIV 存在的不足。本文采用的则是匹配几率法, 该算法是以粒子群体运动为特征的 PTV 算法, 其示意图如图 4 所示。该方法的主要思想是首先在连续两帧的图像中, 其第一帧图像中的粒子 X_1 位移必须小于定值 R_m , 从而确定第二帧图像中可能与之相匹配粒子 (如图 4 所示设为 Y_1 , Y_2), 并设定 X_1 与 Y_1 , Y_2 相匹配的概率为 P_{11} , P_{12} , 与它们都不匹配的概率为 P_1^* , 假设初始概率为均匀分布, 则

$$P_{1\xi} = P_1^* = \frac{1}{2+1} \quad (\xi = 1, 2) \quad (2)$$

再通过第一帧图像的 X_1 粒子的邻域范围内 (半径为 R_n 的圆形区域) 示踪粒子 (图 4, 包括 X_2 , X_3 , X_4) 的速度矢量基本相同, 按前述步骤得到第二帧图像中的所有可能匹配粒子及其匹配概率; 同时第一帧图像中示踪粒子 X_i 的所有可能运动矢量 $\overrightarrow{XY_\xi}$, 其位移之差的模应小于误差 R_q , 并在邻域粒子的所有可能匹配粒子中寻找相似速度矢量, 并对所有相似速度矢量的匹配概率按下式求和:

$$\widetilde{P_{i\xi}^{(n)}} = A \cdot P_{i\xi}^{(n-1)} + B \cdot Q_{i\xi}^{(n-1)} \quad (3)$$

按下式进行归一化处理:

$$\widetilde{P_{i\xi}^{(n)}} = \frac{\widetilde{P_{i\xi}^{(n)}}}{\sum_{\xi} \widetilde{P_{i\xi}^{(n)}} + P_i^{*(n-1)}} \quad P_i^{*(n)} = \frac{P_i^{*(n-1)}}{\sum_{\xi} \widetilde{P_{i\xi}^{(n)}} + P_i^{*(n-1)}} \quad (4)$$

式中 $Q_{i\xi}^{(n-1)} = \sum_k \sum_l P_{kl}^{(n-1)}$; i 为第一帧图像上研究粒子的下标; ξ 为第 i 个研究粒子的可能匹配粒子的下标, $\xi=1, 2$; k 为第 i 个粒子的邻域粒子的下标, $k=2, 3, 4$; l 为邻域粒子的可能匹配粒子的下标; A, B 为松弛系数, 一般取 A 为 0.3, B 为 4; n 为迭代次数。最后按式 (3), (4) 构成迭代公式, 使得正确的匹配粒子的匹配概率迅速增加, 不正确的匹配粒子的概率则迅速减小, 从而获得匹配率最高的匹配粒子, 计算匹配完成的粒子的位移, 结合采样时间即可得到粒子的流速矢量^[35-37]。

1.3 基于双光源 PIV/PTV 的渗流侵蚀试验系统

试验采用自行研制的基于双光源 PIV/PTV 的渗流侵蚀试验系统对渗流侵蚀过程进行观测记录, 其示意图如图 5 所示。该装置主要包括渗流侵蚀系统、成

像系统、信息采集系统以及图像处理系统 4 个部分。其中渗流侵蚀系统主要由模型盒、透明土试样、水头控制部分、溴化钙溶液循环装置组成。模型盒 (长×宽×高为 100 mm×100 mm×200 mm) 采用超白玻璃制成, 试样 (长×宽×高为 90 mm×90 mm×100 mm) 位于模型盒中间段, 同时为了保证溴化钙溶液能够均匀稳定流过整个试样, 在试样的底部和顶部各设置高 50 mm 缓冲区。为便于研究溶液流动以及侵蚀的发展, 采用微型抽水泵进行溶液循环, 并通过调整水头箱向试样中注入溶液, 产生自下而上的渗流侵蚀作用。

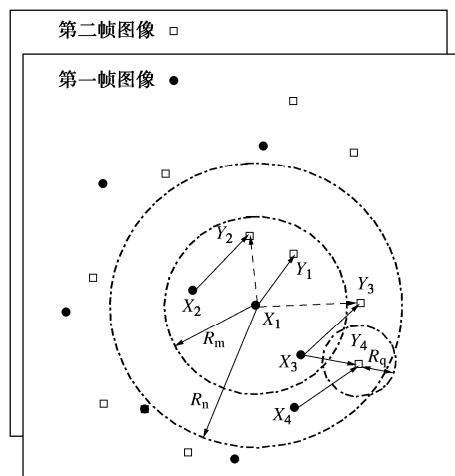


图 4 匹配几率法原理图^[35-37]

Fig. 4 Matching probability algorithm

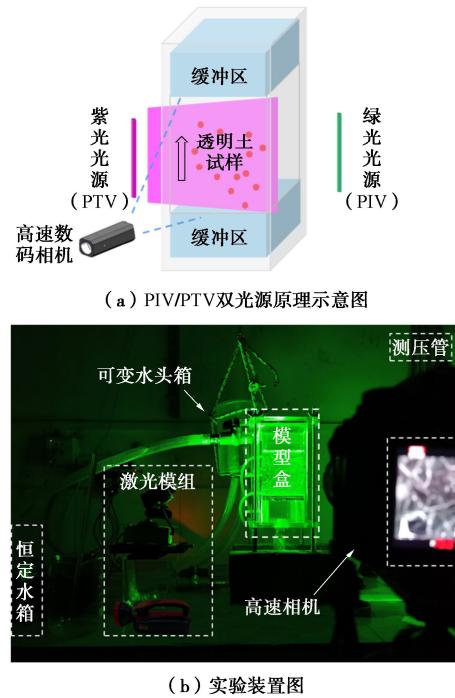


图 5 渗流侵蚀装置示意图

Fig. 5 Experimental setup for model tests

成像系统主要由高稳定带温控激光模组组成, 即绿色激光用于流场测量, 紫外光则是用于试样细颗粒

运动的观测。本试验示踪粒子分别选用由美国 TSI 公司生产的空心玻璃球 (以下简称粒子) 和荧光着色的熔融石英颗粒。空心玻璃球干燥条件下呈白色粉末状, 直径范围 8~12 μm , 密度为 1.03 g/cm^3 , 用以分析流场分布情况。同时对粒径小于 2 mm 熔融颗粒进行着色, 荧光染剂采用紫光显形颜料, 以此对试验过程中细颗粒的运动情况进行示踪。图像信息采集系统主要通过高速数码相机 (PENTAX K-3) 搭配微距镜头 (PENTAX-D FA 100mm F2.8) 实现。利用 MATLAB 程序对采集的图像进行信息处理, 进而研究分析渗流侵蚀过程流体及颗粒的运动特点。

1.4 试验方法

激光穿过透明介质时, 激光面上的示踪粒子发生散射, 使得在不同光源作用下, 试样中不同的示踪粒子会显现不同颜色。如当采用紫外光时, 试样中的荧光颗粒吸收紫光而显现红色; 使用绿色激光时则荧光染色颗粒不显色, 而空心玻璃球则显现绿色。同时由于激光光源强度高, 在使用不同光源时为避免发生干扰, 故需交替打开不同光源。

整个试验过程需在暗室环境中进行, 观察和记录距边壁不同位置处粒子的运动规律, 将试样分为 6 个区域, 即 A—C 断面为正视方向距前壁 1, 2, 3 cm, D—F 为距后壁 1, 2, 3 cm。将染色后的熔融石英颗粒分层加入试样中, 再注入溴化钙溶液, 将制试样进行真空饱和; 将已制好的试样放入模型盒中, 不同光源分别置于左右两侧, 使其在试样中形成明显激光面, 并将激光面调节到待测位置; 使高速数码相机镜头对准试样中间, 并使镜头轴线垂直于激光面, 本试验以 60 帧/s 的速率对激光面上示踪粒子运动进行录制, 不同光源下的录制时间为 30 s; 通过调节水头箱位置, 控制水力梯度的变化, 每次记录均在试样稳定后进行。试验初始阶段以 3 cm/次向上提升水头箱, 当试样细颗粒发生较大规模运动后, 以 5 cm/次继续向上提升, 直至试样发生破坏, 试验停止。对采集的视频以 80 ms 为间隔进行截取, 并将其导入到由 Matlab 编写的程序中进行图像处理, 获得粒子的运动情况。

2 试验结果

2.1 渗流通道的发展及流速分布

试验初期, 即上游水头高度为 3~9 cm 的过程中, 试样整体保持稳定, 水流状态较为稳定, 基本呈层流状态且流速较小, 此阶段的粒子主要运动于试样模型的孔隙之中, 且分布较为均匀。上游水头差升至 12 cm 后, 随着流速增大, 试样中的粒子开始显现出一定的运动规律, 即沿着大颗粒表面运动和集中向内部运动,

同时部分粒子呈漩涡状流动, 如图 6(a) 所示(图中蓝色箭头表示水流的运动方向和大小), 此阶段属于从层流到紊流的过渡阶段。当调整水头高度至 24 cm, 由于流速过大, 此时流场中的粒子不再沿大颗粒表面运动, 而是直接垂向运动, 同时试样中细颗粒发生大规模运动。此后以 5 cm 为间隔继续提升上游水头, 发现细颗粒由斜向流失逐渐过渡为竖向流失, 且运动速度逐渐加快, 最终形成渗流通道, 上游水头提升至 60 cm 时试样完整性和稳定性遭到破坏, 试验结束。

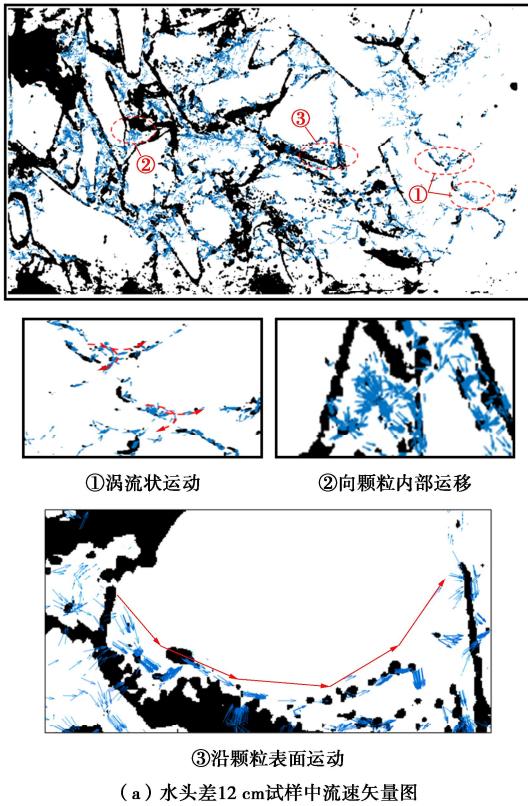


图 6 孔隙液体及细颗粒运动状态

Fig. 6 Motion states of pore liquid and fine particles

将识别出的粒子流速通过加权平均求得粒子流速分布累计频率, 图 7 为不同水头条件下流速累计频率分布情况。可以发现, 在上游水头较低时粒子流速累计频率曲线斜率变化较大, 处于低流速的粒子占主导优势, 即约 60% 的粒子其流速主要集中在 0~1.74 mm/s。当上游水头提升至 12 cm 时, 处于低流速区域的粒子数目仍然较多, 但其优势性明显降低, 可见随着水头的提高, 粒子流速也得到了一定程度的提升, 流速分布逐渐趋于均匀分布, 同时运动状态逐渐由层流过渡为紊流, 粒子运动的无序性逐渐显现。继续提

高上游水头, 处于低流速状态的粒子不再占主导优势, 同时粒子运动的无序性减弱, 此阶段流速分布逐渐趋于稳定。

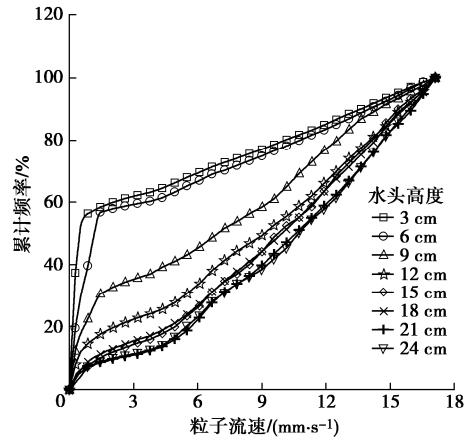


图 7 不同水头条件粒子流速分布频率图

Fig. 7 Frequencies of particle velocity distribution under different water head conditions

2.2 渗流过程各截面宏微观流速对比

对不同水头条件下试样各截面流速情况进行统计分析, 通过加权平均获得各截面流速, 其结果如图 8 所示。当上游水头较低时各截面流速基本相同, 随着水头差的增加, 试样中粒子流速逐渐增加, 当上游水头达到 20 cm 左右时出现拐点, 此时试样中颗粒开始发生较大规模运移, 靠近试样中心的粒子流速变化较大, 而靠近边壁的粒子流速虽继续增大, 但趋势逐渐减缓, 同时试样中各截面流速分布具有对称性。最后由于渗流通道的形成试样中各截面流速逐渐趋于稳定, 同时越靠近试样中心, 粒子流速越大, 即渗流通道发育较完整。

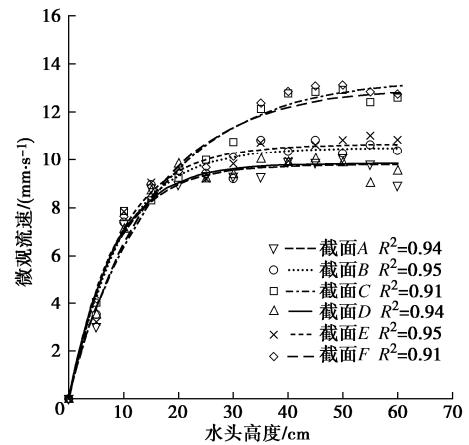


图 8 不同水头条件下各截面流速分布

Fig. 8 Velocity distribution of each section under different water head conditions

图 9 反映了各截面在不同水头条件下宏、微观流速差异情况, 由于流速分布存在对称性, 故将相对称的截面作均值处理。可以发现在水头较低时, 实测微

观流速大于宏观流速, 随着水头差的增大, 宏观流速逐渐大于微观流速, 且差距逐渐增大, 同时越靠近试样中心, 其宏观流速与微观流速差值越小。这是由于在边壁对颗粒存在挤压作用, 使得靠近边界的颗粒相对紧密, 其孔隙连通性相对较弱, 进而无法对水头的变化做出及时的响应。同时靠近试样中心, 由于其颗粒受水流作用较强, 颗粒流失相对严重, 故流速变化相对显著, 其最大流速相对较高, 与宏观流速也更匹配。

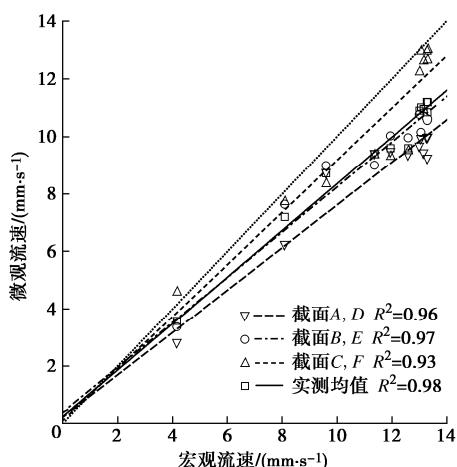


图 9 不同水头条件下宏微观流速对比图

Fig. 9 Comparison of macro- and micro-flow velocities under different water head conditions

3 结果分析

达西试验表明, 对于饱和土壤中的层流, 单位时间内流量与水力梯度成正比。达西定律中考虑的是水为孔隙液体, 本次试验溴化钙溶液的运动黏度为 $1.886 \text{ cm}^2/\text{s}$, 其符合达西定律的理论最大流速为 12.57 mm/s 。在符合达西定律条件下, 土体内部颗粒排列基本不变, 有效孔隙率保持不变。图 10 为试样流速与水力梯度变化曲线, 发现流速小于 10.21 mm/s 时, 流速与水力梯度成线性相关, 即在此区间内符合达西定律。

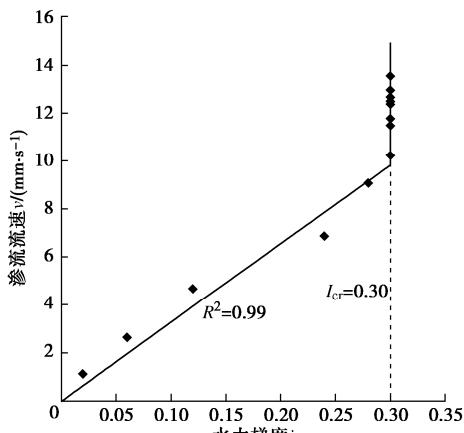


图 10 试样渗透流速与水力梯度关系图

Fig. 10 Relationship between seepage velocity and hydraulic gradient

在渗流侵蚀的研究中, 临界水力梯度是判断发生渗流侵蚀的重要依据, 是颗粒发生大规模运动的启动条件。试验发现当流速介于 $0 \sim 10.21 \text{ mm/s}$ 时, 渗流流速与水力梯度线性相关, 超过该范围后, 流速和水力梯度不再成线性变化, 此时水力梯度为 0.3, 即发生渗流破坏的临界水力梯度。根据太沙基无黏性土临界水力梯度计算公式:

$$I_{\text{cr}} = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{\gamma_w} (1 - n) \quad (5)$$

式中 I_{cr} 为临界水力梯度; γ_s 为颗粒相对质量密度, 即熔融石英砂相对质量密度, 为 2.21; γ_w 为溶液的相对质量密度, 即溴化钙溶液相对密度, 为 1.38; n 为孔隙率, 即 0.42。代入公式得到临界水力梯度为 0.35, 略大于本试验所得临界水力梯度。太沙基临界水力梯度计算公式中, 考虑的是垂直向上渗流作用下, 根据单位土体的浮重度与水压力的平衡得出。但随着渗流的发展, 土体中颗粒组成也在发生变化, 仍按试样初始孔隙率计算临界水力梯度会使计算结果偏大。加之透明土与透明溶液其固有的理化性质, 使得试验结果与理论计算存在一定的偏差, 但其所反映的试验规律仍与天然土体试验结果基本相符。

4 结 论

本文采用透明土技术, 结合 PIV 和 PTV 的相关原理, 研制了基于双光源 PIV/PTV 的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。通过分析不同截面、不同水力梯度条件下, 试样中粒子的运动情况, 可以发现: ①当水力梯度较低时, 颗粒处于相对稳定状态, 随着水力梯度的提高, 颗粒逐渐随水流运动, 且运动路径由最初沿颗粒表面运动逐渐转变为孔隙运动, 并最终沿出水口方向流动, 形成渗流通道。②对比分析不同截面实测流速和试样宏观流速, 水力梯度较低时截面实测流速大于宏观流速, 随着水力梯度的增加, 宏观流速增加迅速, 并大于截面实测流速, 同时越靠近试样中心即垂直于进、出水口平面, 两者的差距越小。③此外由于透明土材料及溶液其固有的理化性质使得试验结果与传统侵蚀试验结果略有差异, 但其所反映的渗流侵蚀规律基本相符, 对后续渗流侵蚀细观机理的深入研究及防渗治理具有重要的参考意义。

参考文献:

- [1] 刘杰. 土的渗透破坏及控制研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014. (LIU Jie. Piping and Seepage Control of Soil[M]. Beijing: China Water Power Press, 2014. (in

- Chinese))
- [2] 李广信. 论土骨架与渗透力[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(8): 1522 – 1528. (LI Guang-xin. On soil skeleton and seepage force[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(8): 1522 – 1528. (in Chinese))
- [3] LIANG Y, ZENG C, WANG J J, et al. Constant gradient erosion apparatus for appraisal of piping behavior in upward seepage flow[J]. Geotechnical Testing Journal, 2017, **40**(4): 630 – 642.
- [4] LIANG Y, YEH T C J, MA C, et al. Experimental investigation of internal erosion behaviours in inclined seepage flow[J]. Hydrological Processes, 2020, **34**(26): 5315 – 5326.
- [5] LIANG Y, YEH T C J, WANG J J, 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] 刘杰, 谢定松, 崔亦昊. 江河大堤堤基砂砾石层管涌破坏危害性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(8): 1188 – 1191. (LIU Jie, XIE Ding-song, CUI Yi-hao. Destructive tests on piping failure of sandy gravel layer of river dikes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(8): 1188 – 1191. (in Chinese))
- [7] 姚志雄, 周健, 张刚, 等. 颗粒级配对管涌发展的影响试验研究[J]. 水利学报, 2016, **47**(2): 200 – 208. (YAO Zhi-xiong, ZHOU Jian, ZHANG Gang, et al. Experimental study of particle grading impact on piping mechanism[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, **47**(2): 200 – 208. (in Chinese))
- [8] 杜建明, 房倩, 刘翔, 等. 透明土物理模拟试验技术现状与趋势[J]. 科学技术与工程, 2021, **21**(3): 852 – 861. (DU Jian-ming, FANG Qian, LIU Xiang, et al. The present and development trend of physical simulation experiment technology for transparent soils[J]. Science Technology and Engineering, 2021, **21**(3): 852 – 861. (in Chinese))
- [9] CHANEY R C, DEMARS K R, WELKER A L, et al. Applied research using a transparent material with hydraulic properties similar to soil[J]. Geotechnical Testing Journal, 1999, **22**(3): 266.
- [10] LIU H L, ZHONG H Y, GU X, et al. Transparent soil model testing on ground settlement induced by parallel tunnels excavation[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, **43**(1): 1 – 10.
- [11] XIANG Y Z, LIU H L, ZHANG W G, et al. Application of transparent soil model test and DEM simulation in study of tunnel failure mechanism[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, **74**: 178 – 184.
- [12] ZHANG W G, ZHONG H Y, XIANG Y Z, et al. Visualization and digitization of model tunnel deformation via transparent soil testing technique[J]. Underground Space, 2020.
- [13] QI C G, ZHENG J H, ZUO D J, et al. Experimental investigation on soil deformation caused by pile buckling in transparent media[J]. Geotechnical Testing Journal, 2018, **41**(6): 1050 – 1062.
- [14] ZHENG J H, QI C G, ZHAO X, et al. Experimental simulation on open-ended pipe pile penetration using transparent granule[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2020, **24**(8): 2281 – 2292.
- [15] 周东, 刘汉龙, 仉文岗, 等. 被动桩侧土体位移场的透明土模型试验[J]. 岩土力学, 2019, **40**(7): 2686 – 2694. (ZHOU Dong, LIU Han-long, ZHANG Wen-gang, et al. Transparent soil model test on the displacement field of soil around single passive pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(7): 2686 – 2694. (in Chinese))
- [16] SUI W H, ZHENG G S. An experimental investigation on slope stability under drawdown conditions using transparent soils[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2018, **77**(3): 977 – 985.
- [17] 王壮, 李驰, 丁选明. 基于透明土技术土岩边坡滑移机理的模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(增刊2): 185 – 188. (WANG Zhuang, LI Chi, DING Xuan-ming. Model tests on sliding mechanism of soil-rock slopes based on transparent soil technology[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(S2): 185 – 188. (in Chinese))
- [18] 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 Jian-wei, LI Bei-bei, FAN Ya-long, 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))
- [19] 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 Peng-fei, LIN Jia-ding, et al. Study on pore flow characteristics of porous media based on transparent soil technology[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(7): 1361 – 1366. (in Chinese))
- [20] 武亚军, 李俊鹏, 姜海波, 等. 不同颗粒级配透明黏土的固结与渗透特性[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2020, **41**(6): 875 – 880. (WU Ya-jun, LI Jun-peng, QIANG Hai-bo, et al. Consolidation and permeability characteristics of

- transparent clay with different grain composition[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2020, **41**(6): 875 – 880. (in Chinese))
- [21] 由长福, 邱海鹰, 徐旭常, 等. 采用 PTV 技术研究循环流化床内气固两相流动[J]. *应用力学学报*, 2004, **21**(4): 1 – 5, 165. (YOU Chang-fu, QI Hai-ying, XU Xu-chang, et al. Investigation to gas-particle two-phase flow in CFB using PTV technology[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2004, **21**(4): 1 – 5, 165. (in Chinese))
- [22] 杨福胜, 张早校, 王斯民, 等. 粒子追踪测速(PTV)技术及其在多相流测试中的应用[J]. *流体机械*, 2014, **42**(2): 37 – 42. (YANG Fu-sheng, ZHANG Zao-xiao, WANG Si-min, et al. Particle tracking velocimetry and its application to the measurement of multiphase flow-A review[J]. *Fluid Machinery*, 2014, **42**(2): 37 – 42. (in Chinese))
- [23] 郑金海, 丁星宇, 管大为, 等. 循环荷载作用下海上风机单桩基础周围砂土沉降与对流特性[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2020, **48**(6): 552 – 561. (ZHENG Jin-hai, DING Xing-yu, GUAN Da-wei, et al. Characteristics of soil subsidence and convective motion around offshore windfarm monopile foundations subjected to long-term cyclic loading [J]. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)*, 2020, **48**(6): 552 – 561. (in Chinese))
- [24] ZHANG W, KANG J H, LEE S J. Visualization of saltating sand particle movement near a flat ground surface[J]. *Journal of Visualization*, 2007, **10**(1): 39 – 46.
- [25] WANG Y, WANG D W, WANG L, et al. Measurement of sand creep on a flat sand bed using a high-speed digital camera[J]. *Sedimentology*, 2009, **56**(6): 1705 – 1712.
- [26] LELOUVELT J, NAKAGAWA M, SATO Y, et al. Effect of bubbles on turbulent kinetic energy transport in downward flow measured by time-resolved PTV[J]. *Experiments in Fluids*, 2011, **50**(4): 813 – 823.
- [27] 周云龙, 李洪伟, 范振儒. 基于 PTV 法对油气水三相流流场的测定[J]. *化工学报*, 2008, **59**(10): 2505 – 2510. (ZHOU Yun-long, LI Hong-wei, FAN Zhen-ru. Measurement of flow field of oil-air-water three-phase based on PTV [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2008, **59**(10): 2505 – 2510. (in Chinese))
- [28] 孔纲强, 孙学谨, 刘汉龙, 等. 孔隙液体对透明土渗透特性影响对比试验[J]. *水利学报*, 2017, **48**(11): 1303 – 1310. (KONG Gang-qiang, SUN Xue-jin, LIU Han-long, et al. Contrast experiments on permeability of transparent soil influenced by pore fluids[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, **48**(11): 1303 – 1310. (in Chinese))
- [29] 张仪萍, 李亮, 王思照. 透明土中孔隙流体的实验研究[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2014, **48**(10): 1828 – 1834. (ZHANG Yi-ping, LI Liang, WANG Si-zhao. Experimental study on pore fluid for forming transparent soil[J]. *Journal of Zhejiang University(Engineering Science)*, 2014, **48**(10): 1828 – 1834. (in Chinese))
- [30] 孔钢强, 张鑫蕊, 许文宾, 等. 透明土中孔隙液体折射率、黏度系数与稳定性[J]. *水利水电科技进展*, 2017, **37**(4): 25 – 29. (KONG Gang-qiang, ZHANG Xin-rui, XU Wen-bin, et al. Refractive index, viscosity coefficient and stability of pore fluids in transparent soil[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2017, **37**(4): 25 – 29. (in Chinese))
- [31] 齐昌广, 左殿军, 王新泉. 基于透明土和图像测量的试验模拟技术及应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017. (QI Chang-guang, ZUO Dian-jun, WANG Xin-quan. Experimental Simulation Technology Based on Transparent Soil and Image Measurement and Its Application[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2017. (in Chinese))
- [32] 沙金煊. 多孔介质中的管涌研究[J]. *水利水运科学研究*, 1981(3): 89 – 93. (SHE Jin-xuan. Research on piping in porous media[J]. *Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute*, 1981(3): 89 – 93. (in Chinese))
- [33] 许联锋, 陈刚, 李建中, 等. 粒子图像测速技术研究进展[J]. *力学进展*, 2003, **33**(4): 533 – 540. (XU Lian-feng, CHEN Gang, LI Jian-zhong, et al. Research progress of particle image velocimetry[J]. *Advances in Mechanics*, 2003, **33**(004): 533 – 540. (in Chinese))
- [34] 王灿星, 林建忠, 山本富士夫. 二维 PIV 图像处理算法[J]. *水动力学研究与进展(A辑)*, 2001, **16**(4): 399 – 404. (WANG Can-xing, LIN Jian-zhong, Yamamoto Fujio. An algorithm for two-dimensional PIV images[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2001, **16**(4): 399 – 404. (in Chinese))
- [35] 胡涛. PTV 匹配算法的对比分析[D]. 北京: 清华大学, 2010. (HU Tao. Comparison of Particle Matching Algorithms for PTV[D]. Beijing: Tsinghua University, 2010. (in Chinese))
- [36] BAEK S J, LEE S J. A new two-frame particle tracking algorithm using match probability[J]. *Experiments in Fluids*, 1996, **22**(1): 23 – 32.
- [37] 靳斌, 杨冠玲, 何振江, 等. 一种利用示踪粒子群体运动特征的 PTV 方法[J]. *光学技术*, 2000, **26**(1): 16 – 18. (JIN Bin, YANG Guan-ling, HE Zhen-jiang, et al. A fluid field velocimetry method basing on tracers' group property[J]. *Optical Technology*, 2000, **26**(1): 16 – 18. (in Chinese))