

DOI: 10.11779/CJGE201907022

# 基于透明土技术的多孔介质孔隙流动特性研究

梁越<sup>1, 2</sup>, 陈鹏飞<sup>\*1, 2</sup>, 林加定<sup>1, 2</sup>, 孙志伟<sup>1, 2</sup>

(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)

**摘要:** 土体作为一种特殊多孔介质, 内部孔隙通道尺度与形态随机性强, 导致土体渗流场中孔隙流速分布不均, 即存在优势流现象。优势流是影响污染物运移、导致土体渗透变形的重要因素。基于透明土原理, 利用聚丙烯酸钠交联聚合物颗粒和蒸馏水, 配制成饱和透明多孔介质, 并利用一种新的研究透明多孔介质内部流场的装置及方法, 将绿色光源激光器、单反相机、十字滑台等组合成简易粒子图像测速(PIV)系统, 采集不同水力梯度下透明多孔介质内部流场图像, 结合粒子图像测速技术, 将得到的流速数据进行统计分析, 揭示孔隙液体的流动特性。研究表明, 利用自制简易 PIV 系统进行流场测量, 实测孔隙流动结果与宏观流速吻合程度高, 能够实现对流场的多点、无扰、高精度测量。研究发现多孔介质内部纵断面上的孔隙面积与纵断面所在位置有关, 而孔隙面积越大, 断面上的孔隙流速也越大。多孔介质内部孔隙流速分布规律大致相同, 优势流速随着断面流速的减小而减小, 优势流速越小, 其概率密度越高, 优势流动现象越显著。

**关键词:** 透明土; PIV; 多孔介质; 孔隙流速; 优势流; 宏观流速

**中图分类号:** TU411, P641.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4548(2019)07-1361-06

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

## Pore flow characteristics of porous media based on transparent soil technology

LIANG Yue<sup>1, 2</sup>, CHEN Peng-fei<sup>\*1, 2</sup>, LIN Jia-ding<sup>1, 2</sup>, SUN Zhi-wei<sup>1, 2</sup>

(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)

**Abstract:** The soil is a kind of special porous medium, whose internal pore channel is extremely random. As a result, the pore velocity distribution is not uniform in its seepage field, which is referred to the preference flow phenomenon. The preference flow is an important factor influencing the pollutant migration and infiltration deformation of the soil. Based on the principle of transparent soils, the saturated transparent porous medium is mixed with sodium polyacrylate cross-linked polymer particles and distilled water. A simple particle image velocimetry (PIV) system is combined with a green light laser, a SLR camera and a cross slide to study seepage in transparent medium. The flow field images of transparent porous medium under different hydraulic gradients are collected, and the velocity data obtained are statistically analyzed by combining with the particle image velocimetry technology to reveal the flow characteristics of pore fluid. The results show that the measured results are in good agreement with the macroscopic velocities. The simple PIV system can be used to measure the flow field with multi-point, non-interference and high precision. It is found that the pore area in the longitudinal section of porous medium is related to the location of the longitudinal section, and the larger the pore area, the larger the pore flow velocity on the section. The distribution of pore velocity in porous medium is approximately the same. With the decrease of longitudinal section velocity, the preference velocity decreases. The smaller the preference velocity is, the higher the probability density is, the more significant the preference flow phenomenon is.

**Key words:** transparent soil; PIV; porous medium; pore flow velocity; preference flow; macroscopic velocity

## 0 引言

天然土体是由不同形状、尺寸的土体颗粒组成的多孔非均匀介质。土体内孔隙形状及尺寸复杂, 在土

**基金项目:** 国家重点研发计划课题(2018YFB1600403); 重庆市基础研究与前探索项目(cstc2018jcyjAX0559); 自然资源部中国地质调查局公益性项目(DD20160291)

**收稿日期:** 2018-06-07

**\*通讯作者** (E-mail: 1837655414@qq.com)

体渗流场中,呈现出显著的细观非均匀特性,即使在宏观均质土体中,孔隙中的流体运动特性也呈现出很强的差异性。当渗流在孔隙中流动时,会沿某些路径优先流动,形成“优势流”,造成渗流场流速分布不均。因此,多孔介质内孔隙流动特性的研究对于解决地下水污染物运移及土体渗透变形等问题具有重要意义。但由于土体孔隙形态的复杂性及分布的随机性,较难采用试验手段获取孔隙流动特性。数值模拟曾被用于孔隙流动特性研究,如梁越等<sup>[1]</sup>曾通过有限体积法对渗流场的流体进行了数学模拟分析与计算,发现多孔介质孔隙流速服从卡方分布。但复杂边界使得孔隙的三维建模面临较大困难,较大尺度的孔隙流动数值分析对计算资源的要求高,计算收敛与结果精度保障不高。

利用模型试验手段探索孔隙流动特性面临两个难题:一是天然土体不透明,难以在外部直接观测孔隙内部流体运动;二是当前缺乏适用于孔隙流动特性的直接测量工具,且介入式流速测量手段对孔隙流的扰动会对流动本身产生较大影响。基于此,本文将透明土技术引入土体孔隙流动特性研究中。透明土是一种基于折射率匹配原理的人造土体,由透明固体颗粒和透明液体分别模拟土颗粒和流体。在相同的试验环境下,要求两种材料折射率相同,光线穿过固-液界面时不会发生折射和散射,外观呈现透明效果。人造透明土主要分为两类,由无定型硅粉合成的透明土,具有与黏土相似的工程性质,而由石英砂、无定型硅胶等合成的透明土,工程性质类似于砂土<sup>[2]</sup>。目前国内对于透明土研究发展较快,高岳等<sup>[3]</sup>发现采用熔融石英砂与溴化钙溶液配制出的透明土在土体强度及变形方面具有表征天然砂土的能力。孔纲强等将由玻璃砂和混合油制成的透明土材料的三轴剪切特性,与福建标准砂试验结果进行了比较,研究其变形特性<sup>[4]</sup>,还针对不同种类液体研究了孔隙液体对玻璃砂透明土强度的影响<sup>[5]</sup>。齐昌广等<sup>[6]</sup>利用由熔融石英砂、Krystol40和 Puretol7 混合液制成的透明土进行了浅基础模型试验。曹兆虎等<sup>[7]</sup>开展了桩基贯入模型试验,用透明土模拟天然土体,研究了桩基贯入过程中“土体”变形测量。

目前国内对于透明土的研究大多局限在岩土体变形中,对多孔介质孔隙优势流动的研究较少。王凯剑<sup>[8]</sup>、贾宇鹏等<sup>[9]</sup>利用水晶玻璃球制成透明多孔填充床,并对内部单相流动进行了可视化研究,分析了流体流动机理的转变过程。在国外,Arthur 等<sup>[10]</sup>对流体在低雷诺数下流经具有不同边界条件的多孔介质时的流动规律开展了试验研究。Sen 等<sup>[11]</sup>进行了微观尺度下多孔介质内过渡流和湍流的研究,并统计了流速分

布规律。

本试验通过人工配制透明多孔介质来模拟饱和散粒土,利用一种测试多孔介质内孔隙液体流动特性的装置即简易粒子图像测速(PIV)系统,结合图像处理技术及 MATLAB 工具箱 PIVlab,获取试样内部孔隙液体流动二维图像并进行流场分析,得到孔隙流动空间分布规律和优势流动特性。

## 1 试验概况

### 1.1 透明土材料

透明多孔介质的模型研究所选用的固体材料还有 PMMA 颗粒、高硼硅玻璃、高吸水树脂等,孔隙液体的选择有硫氰酸钠溶液、烃类油、二甲基亚砷溶液等<sup>[12-16]</sup>。国内透明土模型所采用的熔融石英砂、玻璃砂等内部通常存在细微孔隙,杂质较多,会影响透明土整体透明效果。鉴于此,本文选用聚丙烯酸钠交联聚合物作为固体透明颗粒,其具有高透明度、低成本、易制备、安全无毒等特点,粒径范围为 9~11 mm,密度为 1.02 g/cm<sup>3</sup>,制成孔隙率  $n=0.40$  的“土体”。孔隙液体选用蒸馏水,将未吸水的固体颗粒放入到蒸馏水中,待颗粒在液体中充分泡发后,固-液两相折射率匹配度高,混合而成的介质透明度更好,如图 1。

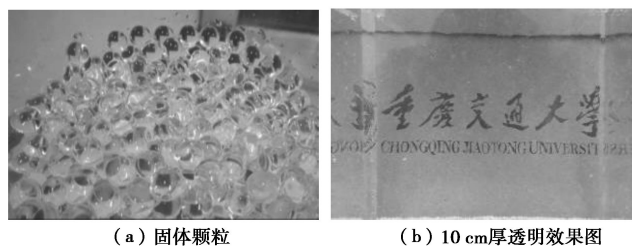


图 1 透明固体颗粒及 10 cm 厚透明试样效果图

Fig. 1 Transparent solid particles and transparent effect seen through 10 cm

### 1.2 粒子图像测速(PIV)系统

PIV 技术是目前一种较为成熟的二维流场测量手段,能够实现对流场多点、瞬态、无损的高精度测量,是激光技术、数字信号处理、图像处理、计算机技术等多种高新技术的融合。其基本原理在于:脉冲激光器片光光源入射到撒布示踪粒子的待测流场中,形成动态激光面,利用 CCD 相机,经过多次曝光,捕捉激光面上的粒子图像,然后利用自相关、互相关理论或杨氏条纹法对图像进行处理分析,得到流场信息图。其中,示踪粒子要求化学性质稳定,且具备良好的流动跟随性及散光性。

一套成熟的商业用 PIV 系统价格高昂,配件包括脉冲激光器,PIV 专用跨帧 CCD 相机,光源镜头组,导光臂,三维标定系统,示踪粒子,处理软件等设备。

而且设备尺寸较大,操作较为复杂。柯森繁等<sup>[17]</sup>利用简易 PIV 装置对示踪粒子的粒径及跟随性进行了优化,并出于对测量精度的考虑,根据水流速对摄像机应采用的帧率进行了研究。基于此,笔者根据 PIV 测速原理,在已有的研究基础上,自行研制了简易 PIV 系统,其中,成像系统包括:532 nm 绿色一字线激光器搭配十字滑台、PENTAX K-3 数码相机搭配 PENTAX-D FA 100 mm F2.8 微距镜头和定时快门线。图像处理软件采用 MATLAB 中的子程序 PIVlab。示踪粒子选用美国 TSI 公司生产的空心玻璃球,直径为 8~12  $\mu\text{m}$ ,密度为 1.03 g/cm<sup>3</sup>。

### 1.3 孔隙渗流控制装置

装置由模型盒及水流控制系统组成。为了方便研究孔隙流动,整个试验采用蒸馏水循环系统。循环动力由微型水泵提供,水泵置于一侧缓冲区,通过硅胶管连到另一侧缓冲区,宏观渗流方向为水平向。

模型盒由超白玻璃制成,高度为 100 mm,宽度为 310 mm,厚度为 100 mm;试样位于模型中间段,高 77 mm,宽 150 mm,厚 100 mm。渗透装置左右两端留有 80 mm 宽的缓冲区,使水流经缓冲区后能够均匀稳定流过整个试样,试样与缓冲区由透水隔板隔开,如图 2 所示。

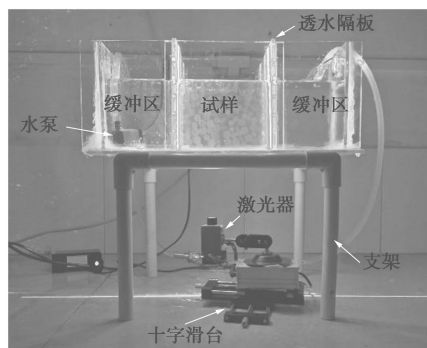


图2 试验装置图

Fig. 2 Experimental setup for model test using transparent soils

### 1.4 试验方法

本试验旨在利用简易 PIV 系统分析不同流量下透明多孔介质内孔隙液体的流动特性,并通过将测量结果与宏观实际流速做对比,验证简易 PIV 系统实用性及测量精度的同时,揭示土体孔隙流动规律。

试验过程在暗室环境中进行,当含有示踪粒子的流体在介质孔隙中流动时,在激光的照射下,纵断面方向会形成一动态激光面,数码相机镜头轴线垂直于激光面连续录制渗流场流动视频,然后将视频文件导出,按 50 ms 时间间隔连续截取图片,将连续的图片导入到 PIVlab 中,进行图像处理及流速数据分析。

考虑到不同截面流速有差异,为增大样本量提高

测量结果的准确性,便于与宏观流速做对比,同一流速条件下采集 A~F 6 个位置的纵断面图像并做分析,其中 A 断面紧贴玻璃壁、B~F 断面距玻璃前壁的距离分别为 0.5 倍、1 倍、1.5 倍、2 倍、2.5 倍颗粒直径,即 5, 10, 15, 20, 25 mm。每次改变流量之后、录制视频之前,应等待 30 s 以上,使得图像采集区域内渗流场的状态达到稳定,从而保证视频录制时流速的准确性,每次录制时间应保持在 15 s 以上。改变宏观流量重复试验,研究孔隙流动特性随宏观流量的变化规律。

值得注意的是,改变纵断面的位置后,会导致图像采集窗口的实际尺寸发生变化,因此每一个断面上视频录制完毕之后,应沿激光面树立刻度尺,要求尺面与激光面重合,记录采集窗口中刻度尺的刻度范围,便于之后像素坐标与实物坐标的准确转换。以图 3 为例,截取的图片像素尺寸为 1920×1080 像素,而采集窗口的实际高度为 25.7mm,则此组图片每毫米代表 42 个像素。

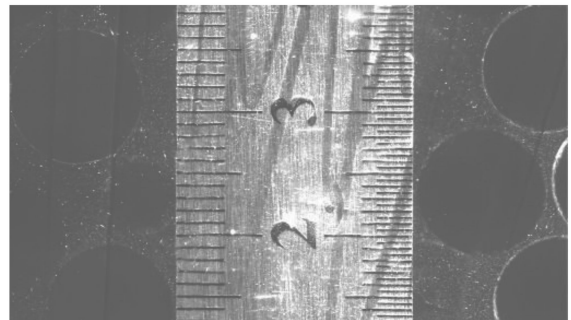


图3 激光面上的刻度尺图像

Fig. 3 Image of scale on laser surface

## 2 试验结果

### 2.1 不同位置纵断面实测流速分析

多孔介质内孔隙极其错杂,所测纵断面上的流速大小与其所在位置有关,图 4 给出了流量分别等于 2.7, 7.8 mL/s 时, A~F 纵断面上的孔隙流速变化曲线。从图 4 中可以看出,多孔介质内部由于空间位置的差异性,孔隙流速空间离散性较大,不同位置纵断面孔隙面积不同,纵断面上的孔隙流速呈“波浪式”变化,但波动幅度随着与玻璃前壁距离的增大逐渐变小。

图 5 显示为试验采集的去除原始背景图像的 C, D 纵断面图像。可以看出,图 5 (a) 显示的 C 断面,由于正位于颗粒与颗粒交界处,孔隙面积较大,连通性强,孔隙流体更易集中流动,因此此位置上的孔隙流速相对较大;而图 5 (b) 显示的 D 断面,激光光线基本恰好穿过颗粒中间,图像上颗粒截面面积更大,颗粒间接触紧密,孔隙几乎被封锁,里面的流体流动

较差, 因此流速较小。

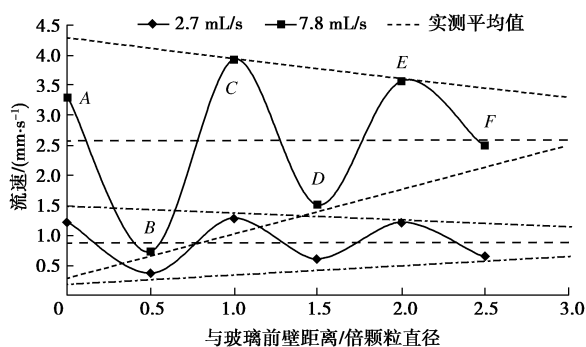
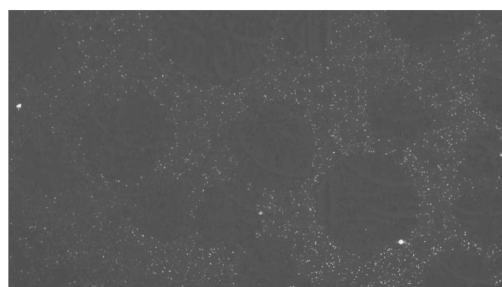
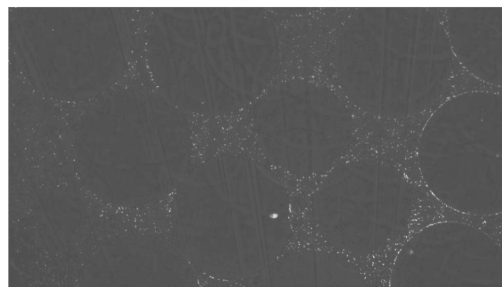


图4 不同断面上的流速实测值

Fig. 4 Measured values of velocity on different sections



(a) C断面 (距离玻璃前壁1倍粒子直径)



(b) D断面 (距离玻璃前壁1.5倍粒子直径)

图5 C, D纵断面粒子图像

Fig. 5 Particle images of C and D longitudinal planes

图6给出了在A~E5个位置的纵断面上, 孔隙流速随宏观流量的变化趋势, 以及多个断面的平均流速与宏观流速的对比。其中, 宏观流速  $v=Q/(An)$ , 其中,  $Q$  为流量,  $A$  为试样横截面积,  $n$  为孔隙率。

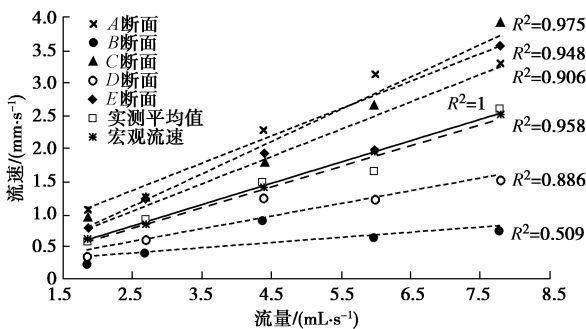


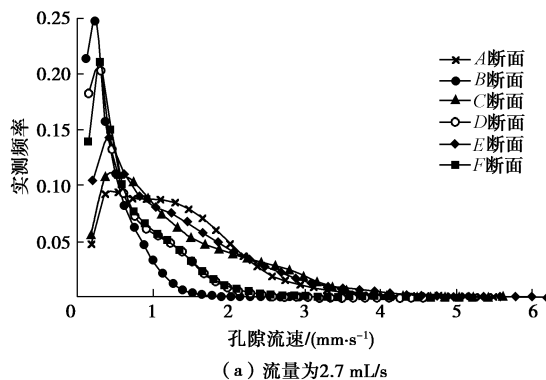
图6 不同流量下各个纵断面实测流速值变化

Fig. 6 Variation of measured velocities of longitudinal section with different flow rates

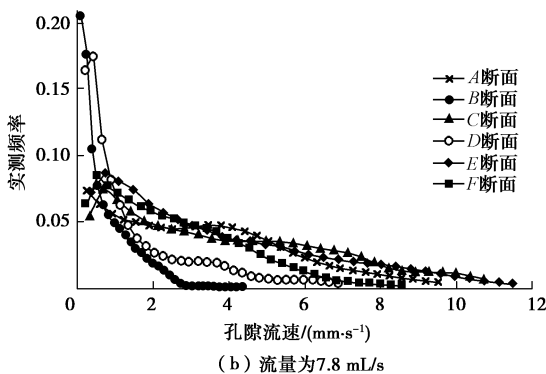
从图6中可以看出, 随着渗流流量的增大, 每个位置的孔隙流速亦随之增大, 但增大速率不尽相同, B, D纵断面上由于孔隙连通性差, 宏观流量增大时, 其孔隙流速增速较缓, 且线性拟合较差; 而对于A, C, E纵断面, 孔隙连通性较强, 渗流流动对于流量增大的响应更加及时。另外, 由图6可知, 简易PIV设备的测量结果与实际宏观流速吻合程度较高。说明试验所采用的简易PIV系统测量结果可近似替代专业PIV设备, 进行流场的测定。

## 2.2 优势流速分析

每个位置的图像经PIVlab分析后得到一系列流速值, 将流速值由小到大等距分为50组, 并计算得到每一组的频率, 图7表示流量为2.7, 7.8 mL/s时, 试样内不同位置纵断面上的流速值频率分布图。



(a) 流量为2.7 mL/s



(b) 流量为7.8 mL/s

图7 不同纵断面的流速分布曲线图

Fig. 7 Distribution curves of flow velocity of different longitudinal sections

可观察到, 同一断面位置流速的频率分布悬殊, 频率最高的流速区间, 即优势流速, 通常为第二组, 少数为第一组, 大于优势流速的流速值频率分布呈骤降趋势并最后趋近于0; 而不同位置上的孔隙流速的“优势性”也不尽相同, B, D, F三组纵断面上的孔隙流速相对较小, 但其优势流速的频率更高, 说明在此类纵断面上优势流动更加明显; 而A, C, E组纵断面上孔隙流速相对较大, 但流速频率分布曲线相对平缓, 优势流动相对较弱。

优势流速的优势程度随纵断面位置的变化曲线如

图 8, 随着与玻璃前壁的距离越来越远, 曲线波动幅度逐渐变小, 由于试样中心部分颗粒分布更加杂乱, 不同位置纵断面上的流速差异性逐渐变小, 说明试验过程中玻璃壁造成的边界效应不容忽视。

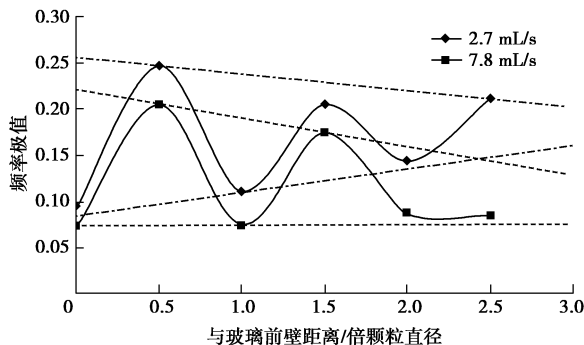


图 8 不同纵断面优势流速频率值变化曲线图

Fig. 8 Variation curves of preference velocity frequency values on different longitudinal sections

为弱化边界效应, 取试样的  $E$  组断面进行不同流量条件下孔隙流动纵向比较, 如图 9。与图 7 类似, 第二组流速区间频率最高, 优势流动现象突出, 由于流量的变化, 导致试样内宏观孔隙流速也发生变化, 而宏观流速越小, 频数分布曲线越陡峭, 说明优势流现象越显著。

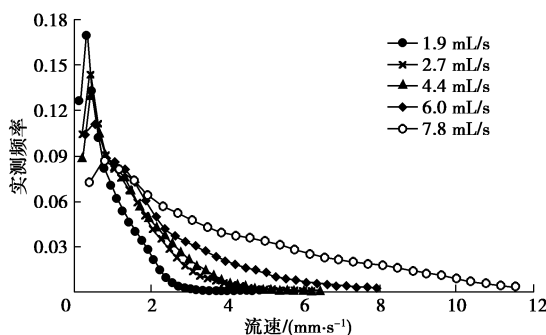


图 9 不同流量下  $E$  断面流速分布曲线图

Fig. 9 Distribution curves of velocity of section  $E$  under different flow rates

通过分析不同流量下拟合得到的曲线的极值点坐标, 分别得到优势流速及其所对应的频率与流量之间的关系如图 10, 11。

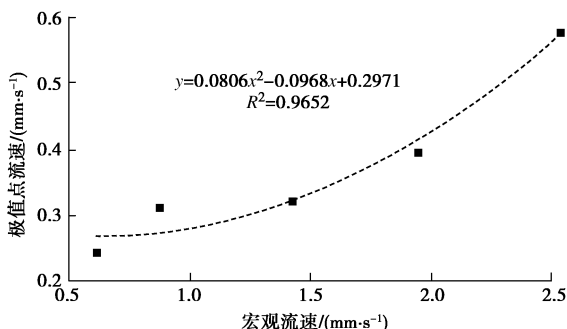


图 10 优势流速与宏观流速的关系曲线图

Fig. 10 Relation between preference velocity and macroscopic velocity

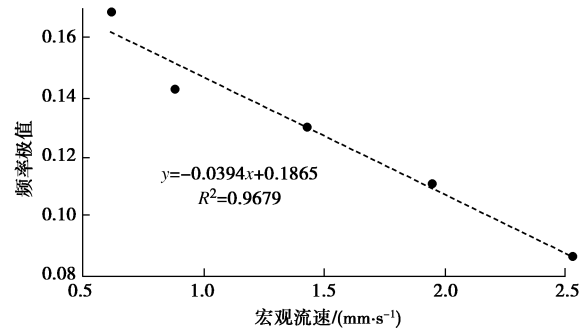


图 11 优势流速频率值与宏观流速的关系曲线图

Fig. 11 Relation between frequency value of preference velocity and macroscopic velocity

从图 10, 11 中可以看出, 多孔介质孔隙率一定时, 孔隙流动中具有最高频率的流速, 即优势流速随着流量的增大而增大, 其两者之间的关系可以利用二次函数较好地拟合; 而孔隙流速频率极值随流量的增大而减小, 说明当试样内渗流的宏观流速变大时, 其优势流速“优势性”逐渐减弱, 可以推测, 当流量增大到一定程度时, 优势流现象将不再存在。

### 3 结 语

本文基于透明土技术原理, 利用成本较低, 操作性更强的简易 PIV 系统采集透明多孔介质内部流场图像, 并进行图像处理, 将得到的流速数据进行统计, 并与实际宏观流速做对比。无论是截面位置不同还是流量不同, 孔隙流速值分布规律基本一致, 流速值的频率先陡增后急剧减小, 最终趋于 0。流速越小的截面优势流速值越小但优势现象越显著。

本文仅仅针对不同流量对孔隙液体流动特性做了研究, 而颗粒形状、颗粒组成、流体特性及试样密度等因素都会对孔隙流动造成影响, 因此, 影响孔隙液体流动特性的因素待进一步研究。此外, 误差方面, 试验时应当注意避免边界效应, 简易 PIV 系统的测量精度亦有待提高。

### 参考文献:

- [1] 梁 越, 陈建生, 陈 亮. 孔隙流动数值模拟建模方法及孔隙流速分布规律[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(7): 1104 - 1109. (LIANG Yue, CHEN Jian-sheng, CHEN Liang. Numerical simulation model for pore flows and distribution of their velocity[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(7): 1104 - 1109. (in Chinese))
- [2] 隋旺华, 高 岳, LIU Jin-yuan. 透明土实验技术现状与展望[J]. 煤炭学报, 2011, 36(4): 577 - 582. (SUI Wang-hua, GAO Yue, LIU Jin-yuan. Status and prospect of transparent soil experimental technique[J]. Journal of China Coal Society,

- 2011, **36**(4): 577 – 582. (in Chinese))
- [3] 高岳, 隋旺华. 熔融石英型透明砂土及其岩土工程性质[J]. 徐州工程学院学报, 2016, **31**(2): 60 – 66. (GAO Yue, SUI Wang-hua. Geotechnical properties of transparent sand made of fused silicap[J]. Journal of Xuzhou Institute of Technology(Natural Sciences Edition, 2016, **31**(2): 60 – 66. (in Chinese))
- [4] 孔纲强, 刘璐, 刘汉龙, 等. 玻璃砂透明土变形特性三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(6): 1140 – 1146. (KONG Gang-qiang, LIU Lu, LIU Han-long, et al. Triaxial tests on deformation characteristics of transparent glass sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(6): 1140 – 1146. (in Chinese))
- [5] 孔纲强, 孙学谨, 李辉, 等. 孔隙液体对玻璃砂透明土强度特性影响研究[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(2): 377 – 384. (KONG Gang-qiang, SUN Xue-jin, LI Hui, et al. Effect of pore fluid on strength properties of transparent soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(2): 377 – 384. (in Chinese))
- [6] 齐昌广, 范高飞, 崔允亮, 等. 利用人工合成透明土的岩土物理模拟试验[J]. 岩土力学, 2015, **36**(11): 3157 – 3163. (QI Chang-Guang, FAN Gao-fei, CUI Yun-liang, et al. Geotechnical physical model test using artificial synthetic transparent soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(11): 3157 – 3163. (in Chinese))
- [7] 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 Zhao-hu, KONG Gang-qiang, LIU Han-long, 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))
- [8] 王凯剑. 多孔介质流动特征实验研究——水晶玻璃球填充床[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2014. (WANG Kai-Jian. Experiment research of flow characteristic in porous media: crystal glass ball packed bed[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2014. (in Chinese))
- [9] 贾宇鹏, 王景甫, 郑坤灿, 等. 应用粒子图像测试技术测量球床多孔介质单相流动的流场[J]. 物理学报, 2016, **65**(10): 263 – 269. (JIA Yu-peng, WANG Jing-fu, ZHENG Kun-can, et al. Measurement of single phase flow in porous media using PIV technique[J]. Acta Physica Sinica, 2016, **65**(10): 263 – 269. (in Chinese))
- [10] ARTHUR J K, RUTH D W, TACHIE M F. PIV measurements of flow through a model porous medium with varying boundary conditions[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2009, **629**: 343.
- [11] SEN D, NOBES D S, MITRA S K. Optical measurement of pore scale velocity field inside microporous media[J]. Microfluidics & Nanofluidics, 2012, **12**(1/2/3/4): 189 – 200.
- [12] PATIL V A, LIBURDY J A. Turbulent flow characteristics in a randomly packed porous bed based on particle image velocimetry measurements[J]. Physics of Fluids, 2013, **25**(4): 201.
- [13] PATIL V A, LIBURDY J A. Flow characterization using PIV measurements in a low aspect ratio randomly packed porous bed[J]. Experiments in Fluids, 2013, **54**(4): 1497.
- [14] HARSHANI H M D, GALINDO-TORRES S A, SCHEUERMANN A, et al. Experimental study of porous media flow using hydro-gel beads and LED based PIV[J]. Measurement Science & Technology, 2017, **28**(1): 015902.
- [15] OVER B, RATHKE B, WILL S. Investigations on particle diffusion in porous glass by angle-dependent dynamic light scattering[J]. Journal of Molecular Liquids, 2016, **222**: 972 – 980.
- [16] NI W J, CAPART H. Cross-sectional imaging of refractive-index-matched liquid-granular flows[J]. Experiments in Fluids, 2015, **56**(8): 163.
- [17] 柯森繁, 石小涛, 王恩慧, 等. 简易粒子图像测速(PIV)技术开发与优化技巧[J]. 长江科学院院报, 2016, **33**(8): 144 – 150. (KE Sen-fan, SHI Xiao-tao, WANG En-hui, et al. Development and optimization skill of simple particle image velocimetry technology[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2016, **33**(8): 144 – 150. (in Chinese))