

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2017.01.008

出渗对均匀大粒径泥沙附近水动力特性影响

蒋昌波^{1,2}, 刘 洋^{1,3}, 邓 斌^{1,2}, 刘易庄¹, 陈家源¹

(1. 长沙理工大学水利工程学院, 湖南 长沙 410004; 2. 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410004;
3. 中交天津港航勘察设计院有限公司, 天津 300461)

摘要: 为探讨出渗对均匀大粒径泥沙颗粒周围水流特性的影响, 基于粒子图像测速技术(PIV)对出渗影响下的均匀大粒径泥沙颗粒群周围水流结构进行测量, 并对不同出渗强度下颗粒群周围立面二维流场结构进行了分析。试验结果表明: 出渗能够减小颗粒群周围原水流运动方向的流速, 而增大垂直向上的流速, 且两者均随着出渗强度的增强而对流速的影响愈加明显; 根据实测数据, 拟合出考虑出渗影响下的均匀大粒径泥沙周围纵向流速分布公式, 相关性较好; 出渗能增强颗粒群附近的紊动强度, 加剧周围水体的能量耗散; 随着出渗强度的增强, 颗粒群周围的涡量值随之减小。

关键词: 水动力特性; 出渗; 颗粒群; 粒子图像测速技术

中图分类号: TV142 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2017)01-0067-09

大粒径泥沙颗粒附近的水流结构, 对泥沙的起动有着重要作用, 尤其是对于山区河流, 关系到航道整治等一系列工程实际问题。长期以来, 国内外学者在大粒径泥沙颗粒水动力特性方面开展了大量的研究, 揭示了一些大粒径单颗粒泥沙附近的水流规律, Jang 和 Lee^[1]分析了 $Re = 11\ 000$ 情况下单颗粒尾部的涡流结构, 发现单颗粒尾部瞬时流场不稳定, 且横断面涡量呈现波纹状分布。Tsutsui^[2]通过测量距离床面不同位置处的单颗粒表面压强和附近水流结构, 探讨了边界层与大粒径泥沙单颗粒之间的相互作用。Moradian 等^[3]研究了自由湍流度对单颗粒拖曳力的影响, 发现阻力系数随着紊动强度的增大而减小。此外, 国内学者孟震和杨文俊^[4-5]、白玉川等^[6]、吴岩等^[7]和曹永港^[8]均从泥沙颗粒相对暴露度的概念入手, 研究了相对暴露度对颗粒周围水动力特性的影响, 进而分析泥沙的起动规律。与此同时, 部分学者还开展了大粒径泥沙颗粒群的研究, Buffin-Bélanger 等^[9]通过对卵石石河流中卵石集群的试验研究, 揭示了卵石集群在深度受限的卵石石河流中对湍流结构的影响, 认为卵石集群相关区域存在一个紊流场, 并对其变化过程进行了描述, 分析了床面上涡流运动与大尺度流动结构之间的相互作用。Lamarre 和 Roy^[10]对不同卵石床面粗糙度下的紊流特性进行了试验研究, 认为无论床面情况如何, 流速仍呈现对数分布。Chan-Braun 等^[11]通过直接数值模拟的方法, 研究了定床条件下单层颗粒群所受到的脉动流体压力在颗粒表面的分布。然而, 前人这些针对大粒径泥沙颗粒的研究中均是基于床面为不可渗, 未考虑渗流的作用。

天然河流河床一般为砂质透水边界, 普遍存在渗流作用。已有部分学者对渗流出渗影响下的明渠水流运动特性及床面输沙开展研究。如 Cheng 和 Chiew^[12]认为出渗水流进入床面以上, 导致床面周围水流流速变小, 近水面流速增大, 底部边界层发生分离, 并根据紊动动能守恒原理, 给出了出渗条件下明渠水流垂线流速分布。在这基础上, Chen 和 Chiew^[13]通过水槽试验深入分析, 认为出渗能够增加明渠水流的紊动强度, 而入渗则会减小紊动强度。李寿千等^[14]通过试验并结合前人成果, 发现随着出渗强度的逐渐增加, 床面切

收稿日期: 2016-04-21; 网络出版时间: 2016-12-17

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20161217.1728.034.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51179015; 51239001)

作者简介: 蒋昌波(1970—), 男, 陕西石泉人, 教授, 博士, 主要从事河流、海岸动力过程及其数值模拟技术研究。

E-mail: jiangchb@csust.edu.cn

通信作者: 邓斌, E-mail: dengbin07@163.com

应力迅速增大至最大值(拐点),随后开始慢慢减小,最终切应力将小于无渗流时的情况。陆彦等^[15]采用中值粒径为 0.9 mm 的天然均匀沙为试验沙进行水槽输沙试验,发现出渗能够减小沙波高度和运动速度,并使得输沙减小。吴岩和白玉川^[16]通过滚动平衡方式推导了考虑渗流影响下的岸坡上泥沙起动流速公式。综上所述,这些研究工作虽然考虑了渗流的影响,但都是基于明渠水流或小粒径泥沙的,很少涉及到大颗粒泥沙或颗粒群。

然而,随着颗粒尺度的增大,床面渗透作用变强,床面渗流与大粒径泥沙颗粒之间的相互作用必然会导致颗粒附近水流特性的变化,从而对泥沙运动规律产生重要影响。刘易庄^[17]通过 PIV 水槽试验,研究了出渗对大粒径泥沙单颗粒周围水流结构的影响,认为出渗能阻碍颗粒尾部回流区的形成,增加附近水流的紊动强度,减小周围涡量值。考虑到河流床底一般为颗粒群的情况,虽然单颗粒周围水流结构的研究在一定程度上反映了颗粒群附近水动力特性的某些规律,但颗粒群相对于单颗粒具有其独特的性质。Pokrajac 和 Manes^[18]通过在水槽底部分别铺设 1 层和 5 层均匀粒径($d=12\text{ mm}$)的小球,用以概化不可渗和可渗床面两种情况下的颗粒群,并利用粒子图像测速技术(PIV)较为完整地获得了两种情况下颗粒群周围的流场结构。但该研究仅比较了两种床面下颗粒水动力特性的不同,并没有针对渗流因素展开定量研究。

为更加清楚地认识渗流对大粒径泥沙颗粒群周围水动力特性的影响机理,有必要进行深入探讨。本文基于粒子图像测速技术,就床面出渗对均匀大粒径泥沙颗粒群周边水流结构的影响进行试验研究,为进一步认识渗流如何影响泥沙运动规律提供理论依据。

1 试验布置

1.1 试验条件和模型

试验在长沙理工大学水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室的 PIV 变坡水槽中进行,水槽尺寸为 $16\text{ m}\times 0.4\text{ m}\times 0.5\text{ m}$ 。试验布置如图 1 所示,定义纵向为 x 轴,垂向为 y 轴,横向为 z 轴。水槽底面及两侧均为透明的钢化玻璃,最大变坡范围为 1%,试验在平坡条件下进行。水槽通过水泵循环供水,流量由计算机操控并通过电磁流量计读数。试验中,将水槽垫高 0.16 m 的隔层以安放渗流装置,渗流装置距水槽入水口 12 m,尺寸为 $1\text{ m}\times 0.35\text{ m}\times 0.15\text{ m}$ 。渗流装置由水箱、进水管、出水管及打孔板构成,通过外界水箱提供恒定水头,并从水槽末端沿着水槽底部接入渗流箱,再通过纱布包裹的打孔板分散作用提供均匀渗流场。在渗

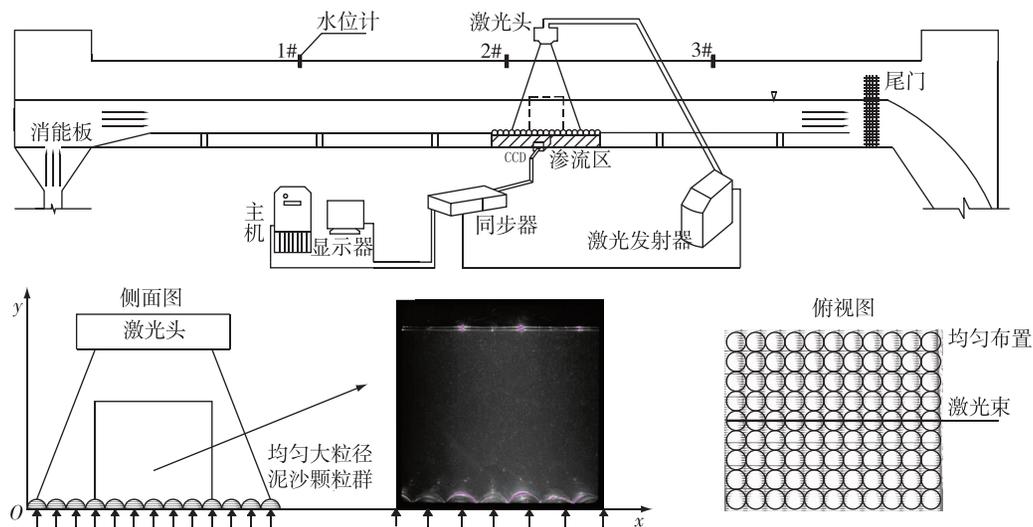


图 1 试验布置

Fig. 1 Setup of experiment

流装置隔板上铺设一层玻璃球以概化均匀大粒径泥沙颗粒群, 玻璃球直径 D 为 0.032 m。流场测试采用美国 TSI 公司的粒子图像测速仪(PIV), 该系统主要由激光发射器、CCD 相机、同步控制器、图像采集和分析系统 4 部分组成。其中光源为双脉冲激光器(YAG·15NW), 最高激光频率为 14.5 Hz, 为均匀照亮测试流场, 采用能量强度约为 120 mJ。粒子图像通过 CCD(2 048×2 048 像素)高速相机记录并传输到 Insight3G 软件进行分析, 图像采集间隔为 500 μ s, 采集频率约为 1.5 Hz, 采集图像样本容量为 500 对, 满足试验精度要求。

1.2 试验工况

试验水深 h 为 0.16 m, 试验流量为 40.0 m^3/h 。为获得出渗对均匀颗粒群周边水流特性影响的变化过程, 将出渗流量 Q_s 控制在 0~25.0 L/min, 出渗流速 v_s 与主流流速 U 的比值定义为出渗强度, 范围为 0~0.65%。具体水流条件如表 1 所示。试验过程中沿水槽布置 3 个超声波水位计以控制试验水深。

表 1 试验工况
Table 1 Experimental parameters of each group

水深 h/m	断面平均流速 $U/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	颗粒粒径 D/m	渗流量 $Q_s/(\text{L}\cdot\text{min}^{-1})$	出渗流速 $v_s/(10^{-4}\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	出渗强度/%
0.16	0.174	0.032	0	0	0
			5.00	2.268	0.13
			15.0	6.803	0.39
			25.0	11.338	0.65

2 试验结果与分析

2.1 出渗对流速的影响

对试验中采集到的 500 对瞬态数据进行时均化处理, 得到均匀大粒径泥沙颗粒附近的时均流场图。图 2 给出了出渗强度 $v_s/U=0\%$ 的时均流场图。为进一步研究, 选取了两条特征垂线“Valley”和“Top”, 为方便起见, 简称为“V”线与“T”线。其中, “V”线为两颗粒间隙的低谷垂线, 而“T”线为大粒径泥沙颗粒中轴垂线。试验中受玻璃球反光的影响, 颗粒表面上层会出现微薄数据盲区(<3.2 mm), 因而颗粒本身区域用黑色表示, 上层盲区用白色表示。

图 3 给出了不同出渗强度下量纲一纵向时均流速 U^* ($U^* = u/U$) 的分布云图, 从图 3 可以看出, 4 种出渗强度下, 两颗粒间隙的低谷处纵向流速均接近于 0 或者小于 0, 并且纵向流速呈现分层分布, 越接近水面方向纵向流速越大, 与 Pokrajac 和 Manes^[18] 类似颗粒群的研究成果相一致。通过比较 4 种出渗强度下的纵向流速分布云图, 可以发现随着出渗强度的增大, 底部各层较小纵向流速量级的区域变大, 纵向流速受底部边界的影响范围变大。

图 4(a)、图 4(b) 给出了不同出渗强度下纵向时均流速分别沿两条特征垂线的分布, 纵坐标采用 y/h 量纲一相对水深。从图 4 可清楚看出, 随着出渗强度的增大, 相同位置处的纵向流速随之减小。这是由于出渗的作用对颗粒周围流场提供一个上升流, 随着出渗强度的增大($v_s/U=0\sim 0.65\%$), 更大流速的上升流经过颗粒后进入主流区域与纵向来流发生更为强烈的相互作用, 改变原有来流纵向流速方向, 使得颗粒周围的纵向流速减小。这也印证了随着出渗强度的增大, 底部各层较小纵向流速量级区域变大的结论。何建京和王惠民^[19] 提出了用 u/U 量纲一参数表达的适用于明渠流的统一纵向流速分布公式, 具体如下:

$$\frac{u}{U} = 0.273 \, 61g \frac{1 \, 000y}{h} + 0.31 \tag{1}$$

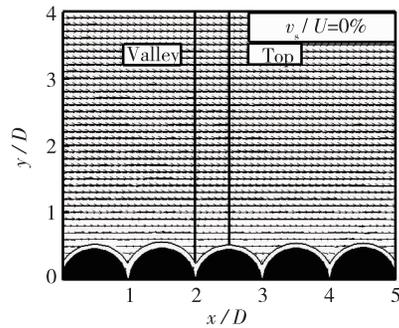


图 2 无渗时均流场

Fig. 2 Feature of time-average vector under stream flow with no seepage

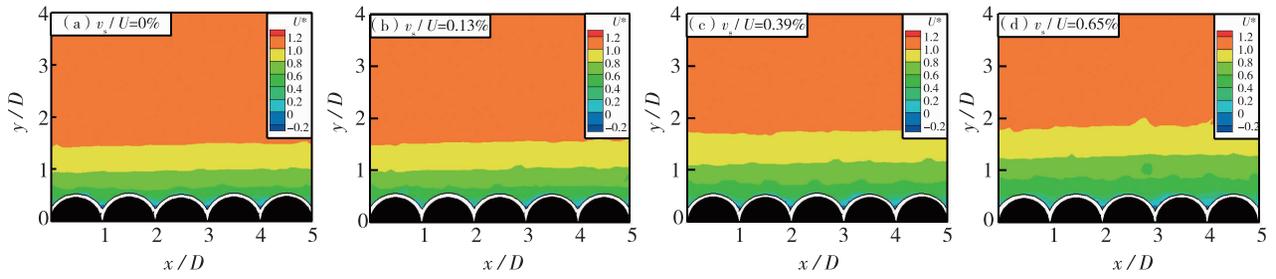


图3 不同出渗强度下量纲一纵向时均流速 U^* 分布云图

Fig. 3 Distribution of nondimensional longitudinal time-average velocity ($U^* = u/U$) under different upward seepage intensities

式中： u 为纵向流速； U 为断面平均流速； y 为距床面高度； h 为水深。

基于本文的实验数据，与式(1)进行对比，如图4所示。可以发现，本文数据与式(1)相比具有明显差异，流速大小总体呈现下减上增的趋势，这与文献[12]出渗影响下的明渠水流流速分布的研究结果一致。对比图4(a)与图4(b)可见，本文试验数据与式(1)相比，“V”线较“T”线中的试验数据近底流速出现更大程度的减小，这是由于大粒径泥沙颗粒对水流的阻挡作用以及相对于“T”线位置“V”线处出渗情况更为剧烈所造成。针对“V”线，纵向流速在接近两颗粒间隙的底部时为负值，随后快速增大，流速梯度达到最大，并在 $y/h=0.4$ 附近脱离边界层影响，流速梯度减小，流速缓慢增大并稳定。可见，虽然相对于单颗粒而言，成排出现的颗粒下游相对静水区被相邻颗粒所填充，使得水流在绕流过程中更加接近于流线型绕流，但在颗粒间隙间小范围的回流仍然存在。而“T”线沿水深的纵向流速其值均为正数，这说明小范围的回流起点位于颗粒中轴垂线的上游，与 Chan-Braun 等^[11]、Pokrajac 和 Manes^[18] 研究结果相似。

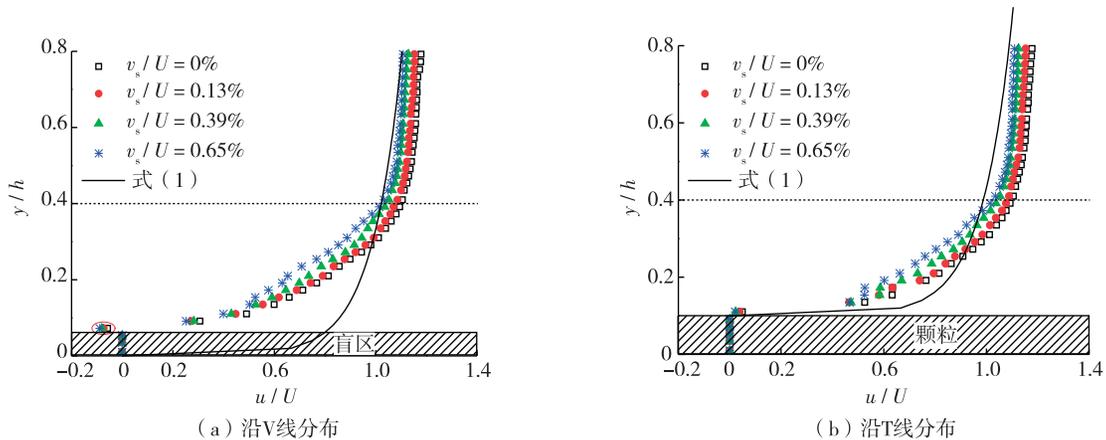


图4 不同出渗强度下纵向时均流速沿特征垂线分布

Fig. 4 Distribution of longitudinal time-average velocity along characteristic verticals under different upward seepage intensities

图5(a)将两条特征垂线上的纵向时均流速分布进行对比。从图5可以发现，当水深 $y/D < 1$ 时，相同出渗强度下“V”线纵向流速较“T”线较小，这是由于大粒径泥沙颗粒对水流的阻挡作用造成的。当水深 $y/D > 1$ 时，纵向流速分布基本一致。受到出渗水流及大粒径泥沙颗粒的影响，出渗影响下的大粒径泥沙颗粒周围的流速分布较明渠水流流速分布更为复杂，通过引入出渗流速和泥沙粒径因素，拟合得到当水深 $y/D > 1$ 时，受出渗影响的均匀大粒径泥沙周围纵向流速分布公式，相关系数达到 0.9003，如图5(b)所示。

$$\frac{u}{U} = \frac{\kappa}{2} \ln \frac{y}{D} - \frac{v_s}{0.331U} \left(\frac{\kappa}{2} \ln \frac{y}{D} - 0.331 \right)^2 + 0.9173 \quad (2)$$

式中： v_s 为出渗流速； D 为大粒径泥沙颗粒直径； κ 为卡门常数。

试验在来流水深(1#水位计控制)0.16 m 条件下进行，经 PIV 图像识别技术发现，随着出渗强度加强，

渗流区附近水位随之增大, 水面受出渗水流影响较大。但随着试验水深增大, 水面受出渗水流影响的幅度必然减小, 说明拟合公式针对单一水深条件的局限性, 同时指出改变试验水深、颗粒粒径也将是今后进一步认识出渗对颗粒群附近水动力特性影响的研究方向。

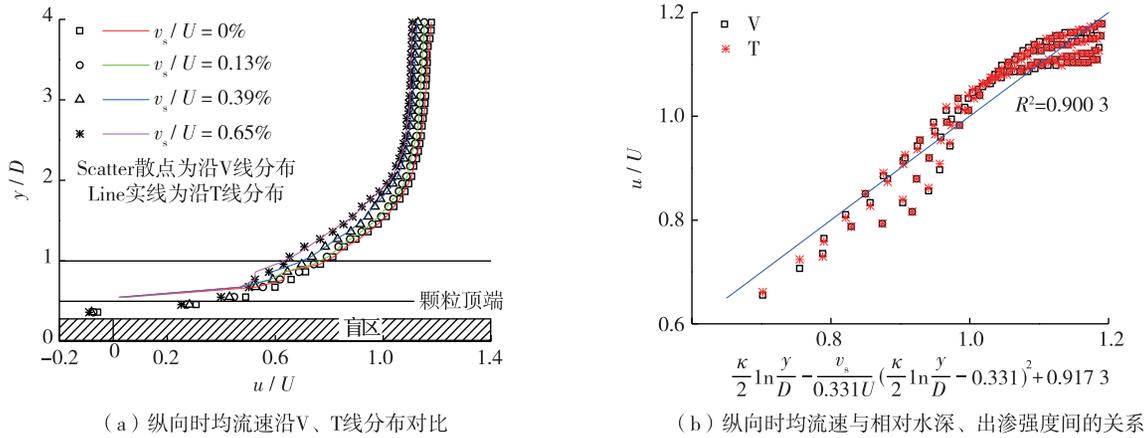


图 5 不同出渗强度下纵向时均流速沿两条特征垂线分布对比及其与相对水深、出渗强度间的关系

Fig. 5 Distribution of longitudinal time-average velocity along the two characteristic verticals, and the relationship between longitudinal time-average velocity and relative depth, upward seepage intensity

图 6 给出了不同出渗强度下量纲一垂向时均流速 V^* ($V^* = v/U$) 的分布云图, 从图 6 可以看出 4 种出渗强度下, 底部垂向流速分布基本一致, 而随着出渗强度的增大, 上部较大正向垂向流速范围变大。图 7 给出了不同出渗强度下垂向时均流速沿特征垂线的分布, 纵坐标采用 y/h 量纲一相对水深。从颗粒特征垂线“V”的垂向流速分布可以看出(图 7(a)), 在接近床底时类似于纵向流速分布, 其垂向流速出现负值, 随后快速增大, 在相对水深 $y/h=0.4$ 左右时垂向流速达到最大, 然后垂向流速减小, 在接近水面处减小至 0 附近, 整个流速分布呈现反“C”型分布。两颗颗粒间隙低谷处(即“V”线)纵向流速与垂向流速负值的存在, 同时印证了大粒径泥沙颗粒间隙间回流区域的存在。特征垂线“T”的垂向流速也有类似的反“C”型分布, 如图 7(b)所示。可见, 出渗对最大垂向流速以下范围的垂向流速加强作用较弱, 而对于最大垂向流速点以上范围的垂向流速有明显作用, “T”线处较“V”线处更明显。这是由于在出渗的作用下, 经过颗粒群后的流场存在一个上升流, 为颗粒群周围提供向上的流速, 在近底区域由于床底边界层的影响, 紊动较为强烈, 出渗对垂向流速的增强作用并不明显, 而当上升流穿越影响区域, 进入相对接近水面区域后, 将会明显增大垂直向上的流速。这也印证了前面提到的随着出渗强度的增大, 上部较大正向垂向流速范围变大的发现。

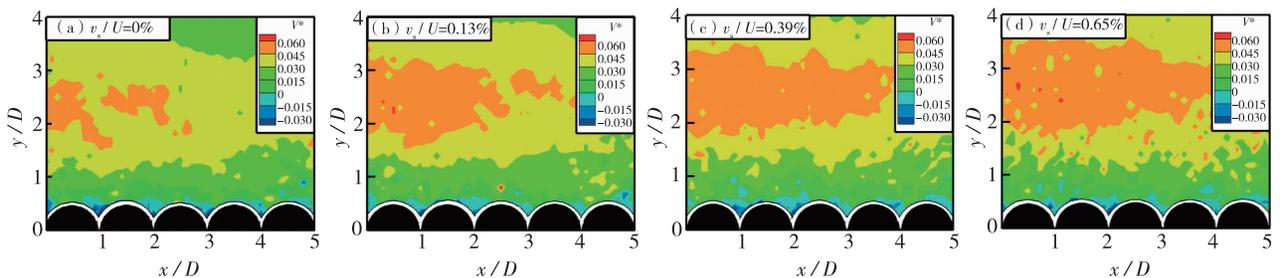


图 6 不同出渗强度下量纲一垂向时均流速 V^* 分布云图

Fig. 6 Distribution of nondimensional vertical time-average velocity ($V^* = v/U$) under different upward seepage intensities

2.2 出渗对紊动特性的影响

图 8(a)、图 8(b) 分别给出了不同出渗强度下颗粒群周围的纵向紊动强度 (T_u) 及垂向紊动强度 (T_v) 云

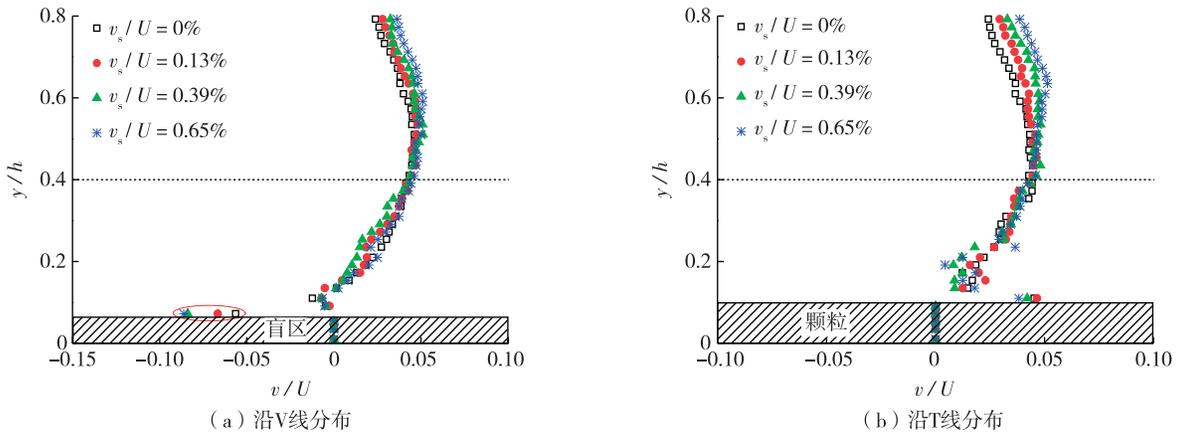


图7 不同出渗强度下垂向时均流速沿特征垂线分布

Fig. 7 Distribution of vertical time-average velocity along characteristic verticals under different upward seepage intensities

图。从图 8(a)可以看出, 由于受床底颗粒群的边界影响, 近床底纵向紊动相对强烈, 随着相对水深的增加, 脱离边界影响的水流平稳。由于“V”线附近的出渗上升流较其他区域大以及颗粒凸起部分对水流的强烈扰动, 使得“V”线附近的纵向紊动较其他区域强烈。随着出渗强度的增大, 颗粒群周围的纵向紊动逐渐增加, 这是由于伴随着出渗强度的增加($v_s/U=0\sim 0.65\%$), 流速逐渐增大的出渗水流进入地表之后, 改变原有来流情况, 使床底边界层分离, 床底附近紊动强度随之逐渐增加。垂向紊动强度(T_v)也有类似的规律, 虽然在近床底部分从区域整体数值上看其紊动强度较纵向紊动较小, 但基本规律一致, 如图 8(b)所示。分析可知, 出渗能加强颗粒群附近的紊动强度, 并且紊动极大值往往出现在近床底处两大粒径颗粒间隙之间的垂线上, 即特征垂线“V”上。

随着出渗强度的增强, 大粒径颗粒群附近的水流流动紊乱加剧, 直接影响水流的运动特性及泥沙的起动机理。紊动动能的扩散对分析水流特性及泥沙起动过程具有重要意义。紊动动能计算公式为

$$K = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (3)$$

式中: $\overline{u'^2}$ 、 $\overline{v'^2}$ 、 $\overline{w'^2}$ 分别为 3 个坐标方向上的脉动均方。

图 8(c)给出了不同出渗强度下量纲一紊动动能 K^* ($K^* = K/U^2$) 的云图。对比图 8(c)与图 8(a)、图 8(b)可以看出, 紊动动能的分布规律与紊动强度的分布一致。由于出渗的作用, 上升水流与大粒径颗粒群周围水体相互作用, 增加周围水流的紊动强度, 并随着出渗强度的增强, 颗粒群周围水体的能量耗散加剧, 这与出渗对明渠水流紊动特性的影响总体趋势上一致^[13]。

2.3 出渗对涡量的影响

漩涡是紊流中的一种基本形态, 而涡量是描写漩涡运动最重要的物理量之一, 反映水体的旋转流速, 其对颗粒的起动过程有着至关重要的作用。采用量纲一处理, 横向涡量计算公式为

$$Z^* = \frac{\partial V^*}{\partial(x/D)} - \frac{\partial U^*}{\partial(y/D)} \quad (4)$$

式中: Z^* 为横向量纲一涡量; U^* 、 V^* 分别为纵向 x 、垂向 y 的量纲一流速。

图 9 显示了不同出渗强度下颗粒群周围横向量纲一涡量分布云图。由图 9 可见, 水流绕过大粒径颗粒迎流面后发生分离, 部分水流向下偏转呈现顺时针运动趋势, 从而使得迎流面及剪切层区域形成负向涡流, 且呈现出包裹颗粒形状。当出渗透过大粒径颗粒群床面向上不断提供上升流时, 随着出渗强度的增强, 发现近颗粒处的涡量数值随之减小, 说明出渗有减缓颗粒间隙之间尾涡形成的趋势。

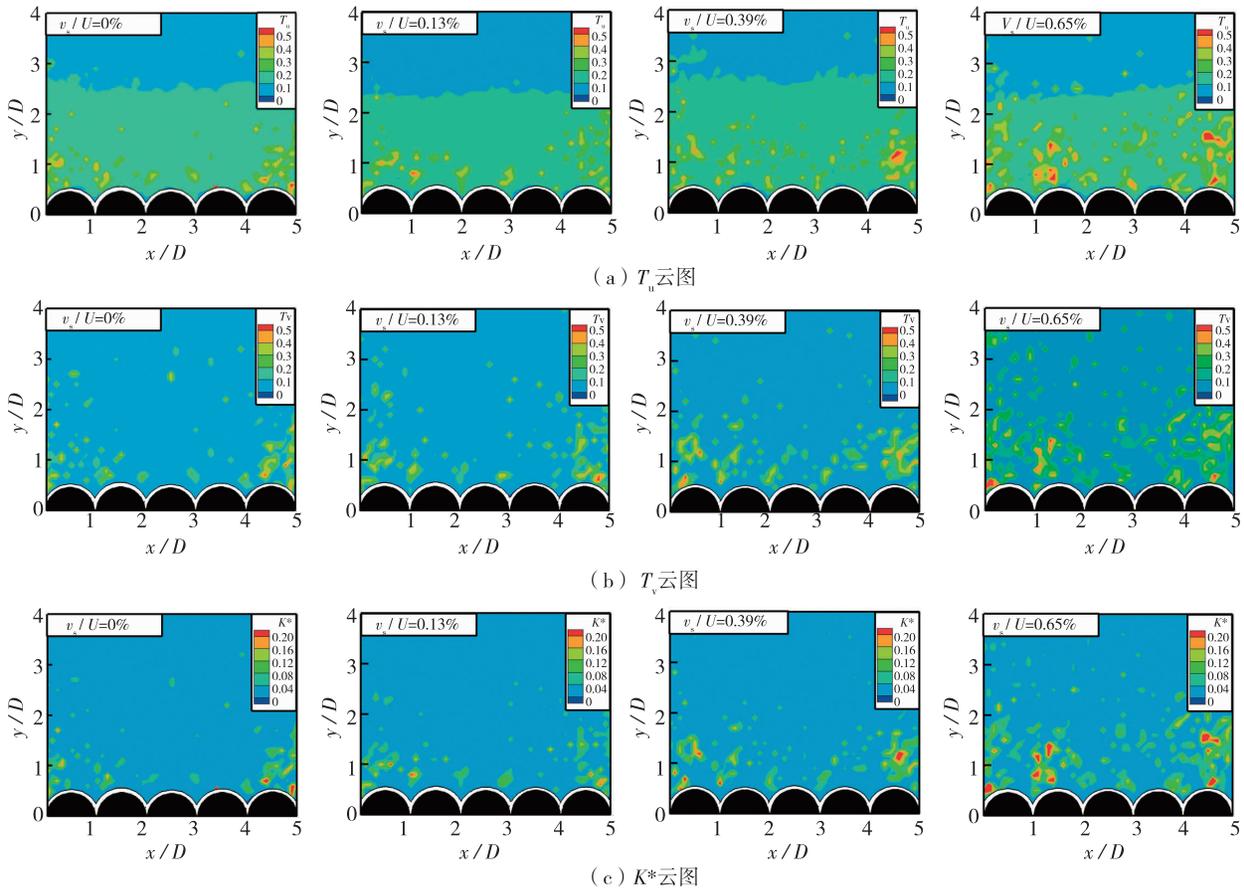


图 8 不同出渗强度下紊动特性分布云图

Fig. 8 Distribution of turbulence characteristic under different upward seepage intensities

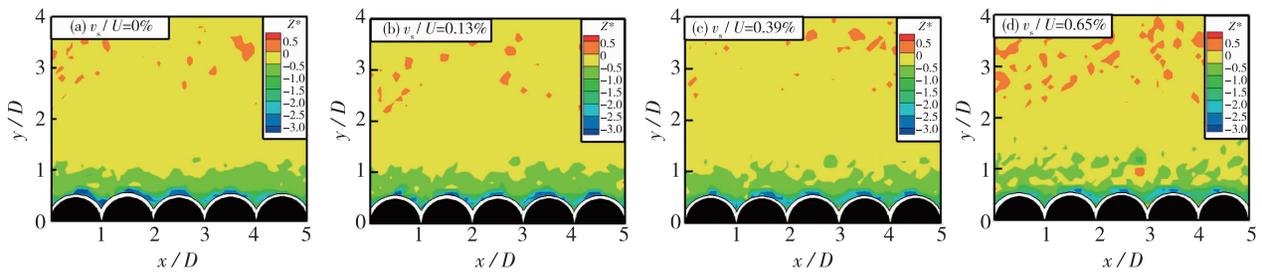


图 9 不同出渗强度下量纲一横向涡量分布云图

Fig. 9 Distribution of nondimensional transversal vorticity under different upward seepage intensities

3 结 论

(1) 出渗对颗粒群周围原水流方向上的流速有明显的减小作用, 而对近水面区域的垂直向上流速有明显的增大作用, 且两者均随着出渗强度的增加而对流速的影响愈加明显。特征垂线“V”在接近床面处的纵、垂向流速均为负值, 在大粒径颗粒群中两颗粒间隙之间存在较小范围的回流区。

(2) 根据实测数据拟合出以均匀大粒径颗粒为床底, 考虑出渗影响下的颗粒群周围纵向流速分布公式, 相关性系数达到 0.900 3, 相关性良好。

(3) 出渗能增强颗粒群附近的紊动强度, 加剧周围水体的能量耗散, 且紊动极大值往往出现在近床底处两大粒径颗粒间隙之间的垂线上, 即特征垂线“V”上。

(4) 随着出渗强度的增强, 大粒径颗粒群周围的涡量值随之减小。

参考文献:

- [1] JANG Y I, LEE S J. PIV analysis of near-wake behind a sphere at a subcritical Reynolds number [J]. *Experiments in Fluids*, 2008, 44(6): 905-914.
- [2] TSUTSUI T. Flow around a sphere in a plane turbulent boundary layer [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2008, 96(6): 779-792.
- [3] MORADIAN N, TING D S K, CHENG S H. The effects of freestream turbulence on the drag coefficient of a sphere [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2009, 33(3): 460-471.
- [4] 孟震, 杨文俊. 基于三维泥沙颗粒的相对隐蔽度初步分析[J]. *泥沙研究*, 2011(3): 17-22. (MENG Z, YANG W J. Preliminary analysis of 3-D hidden degree of sediment particles [J]. *Journal of Sediment Research*, 2011(3): 17-22. (in Chinese))
- [5] 孟震, 杨文俊. 泥沙颗粒相对隐蔽度在散体沙起动研究中的应用[J]. *长江科学院院报*, 2011(7): 1-6. (MENG Z, YANG W J. Hidden degree applied in the research on incipient motion of cohesionless sediment particles [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2011(7): 1-6. (in Chinese))
- [6] 白玉川, 王鑫, 曹永港. 双向暴露度影响下的非均匀大粒径泥沙起动[J]. *中国科学: 技术科学*, 2013(9): 1010-1019. (BAI Y C, WANG X, CAO Y G. Incipient motion of non-uniform coarse grain of bedload considering the impact of two-way exposure [J]. *Science China: Technological Sciences*, 2013(9): 1010-1019. (in Chinese))
- [7] 吴岩, 韩其为, 白玉川. 斜坡上非均匀沙分组起动流速[J]. *天津大学学报*, 2012, 45(3): 209-214. (WU Y, HAN Q W, BAI Y C. Incipient velocity of non-uniform sediment on sloping fluvial beds [J]. *Journal of Tianjin University*, 2012, 45(3): 209-214. (in Chinese))
- [8] 曹永港. 考虑尺度效应的泥沙颗粒周围水动力特性研究[D]. 天津: 天津大学, 2012. (CAO Y G. Flow dynamics characteristics around sediment particles with consideration of scale effect [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012. (in Chinese))
- [9] BUFFIN-BÉLANGER T, ROY A G, KIRKBRIDE A D. On large-scale flow structures in a gravel-bed river [J]. *Geomorphology*, 2000, 32(3): 417-435.
- [10] LAMARRE H, ROY A G. Reach scale variability of turbulent flow characteristics in a gravel-bed river [J]. *Geomorphology*, 2005, 68(1/2): 95-113.
- [11] CHAN-BRAUN C, GARCÍA-VILLALBA M, UHLMANN M. Force and torque acting on particles in a transitionally rough open-channel flow [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2011, 684: 441-474.
- [12] CHENG N S, CHIEW Y M. Modified logarithmic law for velocity distribution subjected to upward seepage [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1998, 124(12): 1235-1241.
- [13] CHEN X, CHIEW Y M. Turbulence characteristics of open-channel flow with bed suction [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2007, 133(12): 1388-1393.
- [14] 李寿千, 陆彦, 陆永军. 渗流作用下床面切应力响应机理[J]. *水科学进展*, 2011, 22(4): 509-515. (LI S Q, LU Y, LU Y J. On the response of bed shear stress to seepage [J]. *Advances in Water Science*, 2011, 22(4): 509-515. (in Chinese))
- [15] 陆彦, 陆永军, 李寿千. 渗流边界上推移质输沙率[J]. *水科学进展*, 2011, 22(2): 215-221. (LU Y, LU Y J, LI S Q. Bedload transport on bed with seepage [J]. *Advances in Water Science*, 2011, 22(2): 215-221. (in Chinese))
- [16] 吴岩, 白玉川. 渗流作用下的岸坡非均匀沙起动[J]. *水利水电技术*, 2014(1): 136-138, 142. (WU Y, BAI Y C. Incipient motion of non-uniform sediment on bank slope under effect of seepage [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2014(1): 136-138, 142. (in Chinese))
- [17] 刘易庄. 出渗影响下明渠流及单颗粒局部水流运动特性试验研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2015. (LIU Y Z. Experimental study on flow structure of open-channel flow and around particle under the influence of injection [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2015. (in Chinese))
- [18] POKRAJAC D, MANES C. Velocity measurements of a free-surface turbulent flow penetrating a porous medium composed of uniform-size spheres [J]. *Transport in Porous Media*, 2009, 78(3): 367-383.

- [19] 何建京, 王惠民. 光滑壁面明渠非均匀流水力特性[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2003(5): 513-517. (HE J J, W H M. Turbulence characteristics of non-uniform flow in a smooth open channel [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2003(5): 513-517. (in Chinese))

Effect of upward seepage on hydrodynamic characteristics around uniform coarse grains*

JIANG Changbo^{1,2}, LIU Yang^{1,3}, DENG Bin^{1,2}, LIU Yizhuang¹, CHEN Jiayuan¹

- (1. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410004, China;
2. Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha 410004, China;
3. CCCC Tianjin Port & Water Way Prospection & Design Research Institute Co, Ltd, Tianjin 300461, China)

Abstract: In order to study the influence of upward seepage on the flow characteristics around uniform coarse grains, we experimentally measured the flow structures around uniform coarse grains under the impact of upward seepage by the technique of Particle Image Velocimetry (PIV), we subsequently analyzed the two-dimensional vertical flow structure around the particle group with different relative upward seepage intensities. The results show that upward seepage decreases the velocity along the mainstream direction and increases the vertical upward velocity around the particle group. With the relative upward seepage intensity increases, both of them become more affected. We also proposed an empirical formula for the longitudinal current velocity distribution under the impact of upward seepage based on the measurements. We finally found that the upward seepage could enhance the turbulence intensity and energy dissipation around the particle group, and the value of vorticity around uniform coarse grains decreases with the increase of relative upward seepage intensity.

Key words: hydrodynamic characteristics; coarse grains; flow structure; particle image velocimetry

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51179015; No. 51239001).