

圆柱绕流局部冲刷机制的实验研究

赵 威 呼和敖德¹⁾

(中国科学院力学研究所工程科学部, 北京 100080)

摘要 采用粒子图像测速技术和粒子图像识别技术研究了冲刷坑的演化过程及局部冲刷的流体动力机制. 首先研究了动床条件下圆柱周围的床面演化过程, 给出垂直对称面输沙率随时间变化以及圆柱下游垂直对称面的沙颗粒浓度和泥沙分布规律; 其次针对典型冲刷坑形状固定底床, 测量了圆柱下游的瞬时流场, 并给出平均流场. 结果表明尾流区平均剪应力较低, 但垂向涡量和湍流强度较高. 分析指出平均剪应力较低的尾流区域, 局部冲刷的主要动力机制是尾涡和湍流的综合作用.

关键词 局部冲刷机制, 沙颗粒运动, 粒子图像测速技术, 粒子图像识别技术

中图分类号: TV131.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0459-1879(2006)05-0577-09

引 言

局部冲刷是圆柱周围流动与床面泥沙耦合作用的结果. 该流动是复杂的非定常三维流动, 包含有圆柱上游的三维分离、马蹄涡系的运动和圆柱下游的尾涡运动及其与马蹄涡系的相互作用. 鉴于问题的复杂性, 长期以来局部冲刷的实验资料多数用于建立最大冲刷深度的经验公式^[1], 缺乏对局部冲刷机理的研究. 同时已有的经验公式结果分散, 甚至出现矛盾现象. 因此, 进一步研究局部冲刷机制十分重要.

近些年, 冲刷机理的实验研究除了采用流动显示技术研究流动分离现象和马蹄涡系运动外, 还结合单点测量技术(如热膜和声学多普勒测速技术)测量圆柱周围的流场速度. Melville 等^[2]采用热膜测速仪测量了固定底床条件下冲刷坑内距底 2 mm 处的平均流速, 计算给出床面平均剪应力. 实验结果显示平衡冲刷坑内平均剪应力低于冲刷开始和中间时刻冲刷坑内的平均剪应力. Dargahi^[3,4]采用氢气泡流动显示技术研究了平底圆柱绕流时圆柱上游的马蹄涡系以及圆柱周围的冲刷坑发展过程. 对冲刷坑发展过程分析认为马蹄涡系、侧面的加速流动和尾涡是圆柱周围局部冲刷的主要动力. Graf 等^[5,6]采用声学多普勒测速仪在雷诺数 $Re = 81000$ 下分别测量了固定底床条件下平底和平衡冲刷坑两种工况垂直对称面平均流速, 计算给出平均涡量和平均

湍流动能. 文章指出圆柱下游湍流扰动明显大于来流, 冲刷坑内剪应力低于来流剪应力.

综上所述, 目前关于局部冲刷机理的深入系统研究还很缺乏, 对尾流局部冲刷机制研究就更少. 尤其缺乏对动床局部冲刷与非定常流场特性相结合的实验研究, 因此本文力求通过流动显示、粒子图像测速(DPTV)和粒子图像识别技术研究圆柱下游冲刷坑内瞬时流场, 进而揭示非定常涡系运动与局部冲刷关系, 同时将动床实验的颗粒运动与定床实验的流体动力分析关联起来研究圆柱下游的局部冲刷机制. 本文主要内容有, 动床条件下通过流动显示研究床面形状随冲刷时间的演化过程, 同时记录圆柱下游对称面沙颗粒运动, 统计得到沙颗粒浓度分布及随时间的演化; 针对动床实验 3 个时刻的冲刷坑形状做成固定底床, 采用 DPTV 技术研究圆柱下游水平和垂直剖面瞬时流场和平均流场(包括平均速度、平均涡量、湍流强度及床面平均剪应力).

1 实验设备与实验方法

1.1 实验设备

实验在循环玻璃水槽中进行, 水槽实验段长 6 m, 宽 0.3 m, 深 0.2 m. 动床实验时在实验段中间布置长 0.6 m, 宽 0.3 m, 深 0.03 m 的沙槽, 圆柱模型固定于沙槽前 1/3 处. 实验沙为粒径 $d_{50} = 0.2$ mm, 比重 $\gamma = 2.65$ 的均匀石英沙. 定床实验研究了 3 种典型

2005-12-12 收到第 1 稿, 2006-04-17 收到修改稿.

1)E-mail: hhad@imech.ac.cn

形状冲刷坑流场, 其一, 未冲刷平底 $S/D = 0$ (S 为冲刷坑最大冲刷深度, D 为圆柱模型直径); 其二, $S/D = 0.375$ 冲刷坑, 该形状为圆柱下游对称面尚未冲通, 不是典型的倒锥形; 其三, $S/D = 0.85$ 的冲刷坑, 该形状为标准的倒锥形. 实验中采用的圆柱模型直径为 0.032 m .

1.2 实验方法

动床实验采用 MEMRECAMci 高速摄像机记录圆柱周围床面的演化过程, 并采用 5 W Millennia V 型激光器从顶部布置片光, 同时记录圆柱下游垂直对称面沙颗粒运动, 记录范围为圆柱后端水平长度 $3D$, 垂直高度 $2.5D$. 实验中为了迅速而准确地标定床面形状和冲刷深度, 在整个沙床 0.03 m 深度内交替铺设蓝色和红色沙, 共 10 层, 这样只需记录一幅图像就可以通过分层沙等高线确定该时刻冲刷坑形状.

定床流场实验采用 DPTV 技术测量了圆柱下游垂直对称面 $Y = 0$ 和水平剖面 $Z = 0.25D$, $Z = -0.3D$ (冲刷坑形状 $S/D = 0.85$ 时) 的瞬时速度场. 鉴于需要对各流体动力因素进行定量分析, 因此必须保证整个测速系统的测量精度. 本实验中示踪粒子在水中的上升速度约为 0.028 mm/s , 弛豫时间为 $8 \times 10^{-5}\text{ s}$, 跟随性很好. 因此示踪粒子速度测量的精度就取决于位移测量精度和时间间隔测量精度, 时间间隔测量精度远小于于位移测量精度. 为提高位移测量精度, 实验中将测量域分成多个子域, 在每个子域内通过光学放大进行粒子图像测速.

对垂直对称面 $Y = 0$ 进行流速测量时, 平底和冲刷深度 $S/D = 0.375$ 两种工况将整个下游测量域 (圆柱后端水平长度 $3D$, 垂直高度 $1.5D$) 分成 6 个子区; 冲刷深度 $S/D = 0.85$ 工况除上述 6 个子区外再增加一个冲刷坑内子区. 测量过程中从顶部用激光布置片光, 侧面放置高速摄像机, 逐个测量各个子区. 水平剖面 $Z = 0.25D$ 和 $Z = -0.3D$ 流速测量时, 测量区域为圆柱后端水平长度 $1.25D$, 垂直高度 $0.75D$.

本文研究清水冲刷, 实验中来流流速取为 0.22 m/s (实验沙的临界起动速度约为 0.24 m/s), 来流雷诺数 (以圆柱直径为特征长度) 为 $Re(D) = 7040$.

1.3 实验结果的统计方法

本文采用图像粒子识别方法来准确捕捉颗粒运动图像中的沙颗粒, 进一步统计得到颗粒浓度等值

线的空间分布规律以及平均颗粒浓度随时间的演化规律. 使用的图像粒子识别方法能够有效避免由于粒子重叠和亮度不均匀造成的粒子丢失. 颗粒浓度等值线空间分布的统计方法是: 在能够准确进行图像粒子识别的阈值范围内, 根据阈值变化在颗粒运动灰度图像中勾勒出灰度等值线轮廓, 并在此区域内统计出单位面积颗粒浓度, 由于在此阈值范围内阈值变化与单位面积颗粒浓度变化成线性关系, 因此由阈值变化等值线即可得到单位面积颗粒浓度变化等值线. 平均颗粒浓度随时间演化统计方法为: 在冲刷开始后的 300 s 内, 选取 20 个典型时刻进行颗粒浓度统计, 每个时刻涡脱落一个周期时间内统计的颗粒浓度的平均浓度作为该时刻的浓度, 统计区域为圆柱后端水平长度 $3D$ 、垂直高度 $2D$, 从而得到统计域内单位面积的颗粒浓度随时间的演化规律, 也就是随冲刷过程的演化规律.

定床实验流场测量得到的是圆柱下游瞬时速度场. 本文对 10 个周期内的瞬时速度场进行时间平均得到平均速度场. 根据平均速度场的数据通过计算可以得到床面平均剪应力和平均淌量. 平均剪应力计算时, 首先假设壁面附近平均速度满足对数率分布 $\bar{u}/u_* = (1/\kappa) \ln(u_* y/\nu) + 5.5$, 由平均速度场数据即可得到圆柱下游 $Y = 0$ 断面床面平均剪应力的二维分量. 平均淌量场定义为, $\omega_y = \partial \bar{u} / \partial z - \partial \bar{w} / \partial x$, $\omega_z = \partial \bar{v} / \partial x - \partial \bar{u} / \partial y$.

2 动床实验结果

动床实验展示, 水流绕圆柱的局部冲刷开始于圆柱两侧, 冲刷深度增加迅速, 冲刷范围不断向上下游扩展, 圆柱上游首先被冲通 (见图 1(a)); 冲刷约到 120 s 时来自圆柱两侧的冲刷坑在下游尚存一薄隔 (见图 1(b)), 冲刷时间超过 120 s , 冲刷坑在尾流中汇合, 并很快形成倒锥形冲刷坑 (见图 1(c)).

圆柱周围冲刷深度的变化可以通过彩色分层沙等高线统计得到, 图 2 给出上下游对称剖面床面冲刷率随时间的演化. 在上游对称面, 初始弱冲刷阶段, 冲刷率较低, 进入强冲刷阶段冲刷率线性增长, 约到 150 s 冲刷率达到最大值, 随后开始逐渐减弱. 而在圆柱下游, 当冲刷时间到约 120 s 后床面形状才开始明显变化, 约 130 s 变化率最大, 之后逐渐减小. 下游对称面冲通后, 整个冲刷坑形状类似于标准的倒锥形, 上下游冲刷坑床面冲刷率开始逐渐接近.



(a) 20 s, $S/D = 0.15$

(b) 120 s, $S/D = 0.375$

(c) 300 s, $S/D = 0.85$

图 1 3 个冲刷时刻冲刷坑形状

Fig.1 Bed forms at three scouring times

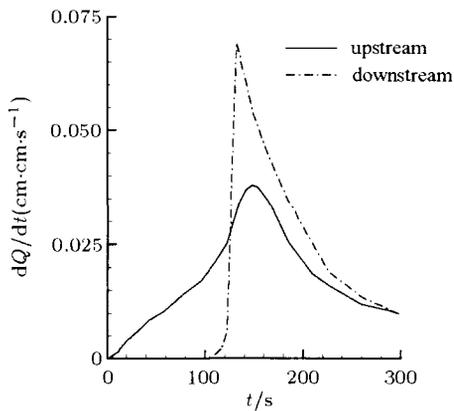


图 2 对称剖面床面冲刷率

Fig.2 Rate of change of the sediment transport in the symmetry plane

圆柱底床冲刷的沙颗粒在圆柱下游被尾涡高高

扬起, 悬浮于水体中. 由于尾涡的周期性运动, 局部冲刷也表现出周期性特征. 图 3 给出 3 个典型冲刷时刻圆柱下游对称面颗粒运动图谱, 每个时刻给出一个周期演化过程中的两个相位 (周期 T 定义为该时刻后涡脱落的一个周期). 在初始的弱冲刷阶段, 颗粒扬起范围主要限于圆柱下游 $1D \sim 2D$ 范围. 在约 120 s 时颗粒扬起浓度明显增强, 下游 $1D$ 范围内部分扬起沙颗粒在负向涡的作用下重新沉降坑中, 另一部分扬起沙和底沙一起被顺向高速流携带离开冲刷坑; 通过对冲刷坑内沙颗粒运动的观察发现此时圆柱两侧扬起的沙颗粒由于受尾涡的影响表现为螺旋式的向上运动, 同时床面形状又明显影响到尾涡, 使得对称面内颗粒扬起包含有回流运动和向下游运动. 约到 300 s 时, 由于冲刷坑的加深, 主尾涡

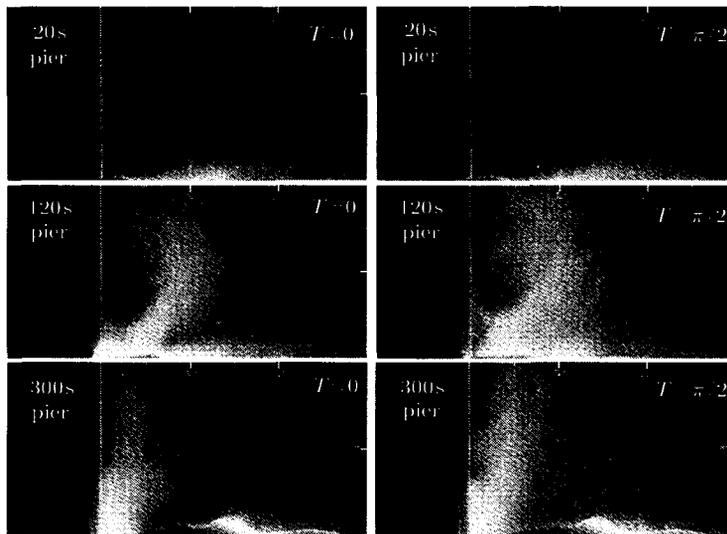


图 3 圆柱下游对称面悬浮颗粒周期运动图谱

Fig.3 Flow patterns of the suspended particles in the symmetry plane downstream of the pier

更加靠近圆柱, 沙颗粒扬起主要表现为贴近圆柱表面的向上运动, 同时能够明显看到颗粒的向下游运动, 两种运动间有明显的分界线, 分界线上的颗粒运动速度较大; 观察冲刷坑内沙颗粒运动可以看到沙颗粒在尾涡的作用下主要表现为向上的卷起, 同时脱落的尾涡又受到床面的束缚, 因此卷起的沙颗粒表现出较强的三维性。

圆柱下游对称面内颗粒浓度的周期变化见图 4. 冲刷约 20s 时, 高浓度区集中于床面附近的 $1D \sim 2D$ 范围并贴近底面, 表明颗粒冲刷动力较弱, 处于弱冲刷阶段. 冲刷时间约 120s 时, 颗粒浓度明显高于冲刷初始时刻, 相位间浓度范围变化较大, 说明颗粒扬起动力的周期变化明显. 冲刷时间约 300s 时, 高浓度区明显地靠近圆柱表面。

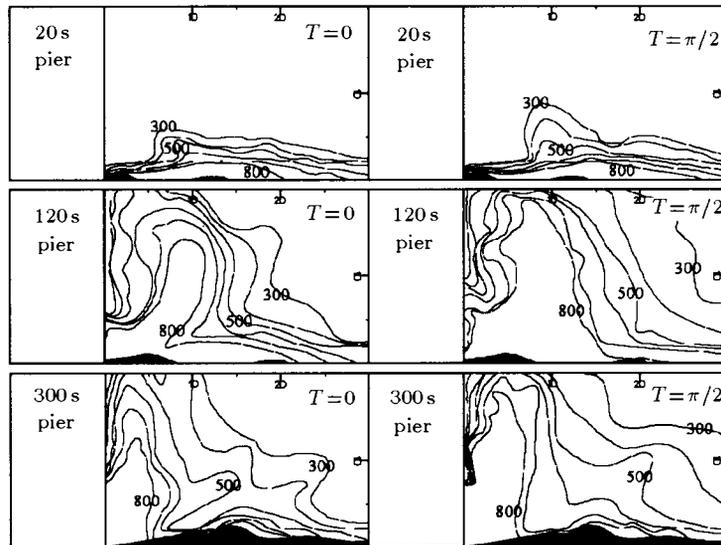


图 4 圆柱下游对称面颗粒浓度等值线

Fig.4 Particle concentration in the symmetry plane downstream of the pier

圆柱下游对称面单位面积平均颗粒浓度随时间变化规律见图 5. 结果表明, 初始的弱冲刷阶段颗粒扬起浓度较低, 强冲刷阶段颗粒扬起浓度线性增加, 到约 170s 左右时达到最大值, 之后逐渐缓慢降低. 由于实验条件限制, 本文冲刷并未做到平衡冲

刷状态.

3 定床实验结果

3.1 瞬时速度场

图 6 给出 3 种地形条件下圆柱下游 $Y=0$ 剖面瞬时流速场. 未冲刷平底 $S/D=0$ 情况下, 圆柱下游近底部表现出涡的形成. 脱落及涡的相互作用形成的复杂旋涡流场. 在整个运动周期内都可以观察到圆柱下游 $X/D=1 \sim 1.5$ 范围内始终包含有较大的向上运动速度, 这位置对应于颗粒扬起的范围.

冲刷深度 $S/D=0.375$ 且圆柱下游区域尚未冲刷通时, 对称面流场中存在一个较大范围的回流和旋涡流场. 冲刷深度 $S/D=0.85$ 时, 流场主要表现为冲刷坑内的垂直向上运动、后角区的小尺寸顺时针涡、冲刷坑下游高速流动以及冲刷坑上面 $Z/D=0.5 \sim 1$ 范围内的大尺度顺时针涡. 在此冲刷坑地形条件下, 冲刷坑及其下游流场速度高于前两种地形情况.

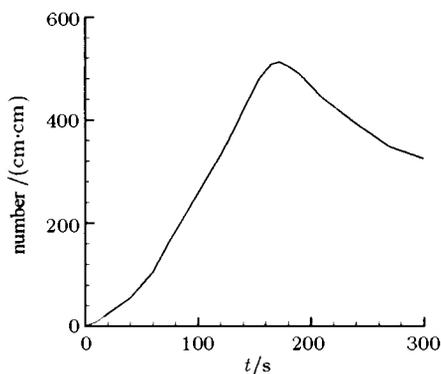


图 5 圆柱下游对称面颗粒浓度时间变化

Fig.5 Variation of the particle concentration with time in the symmetry plane downstream of the pier

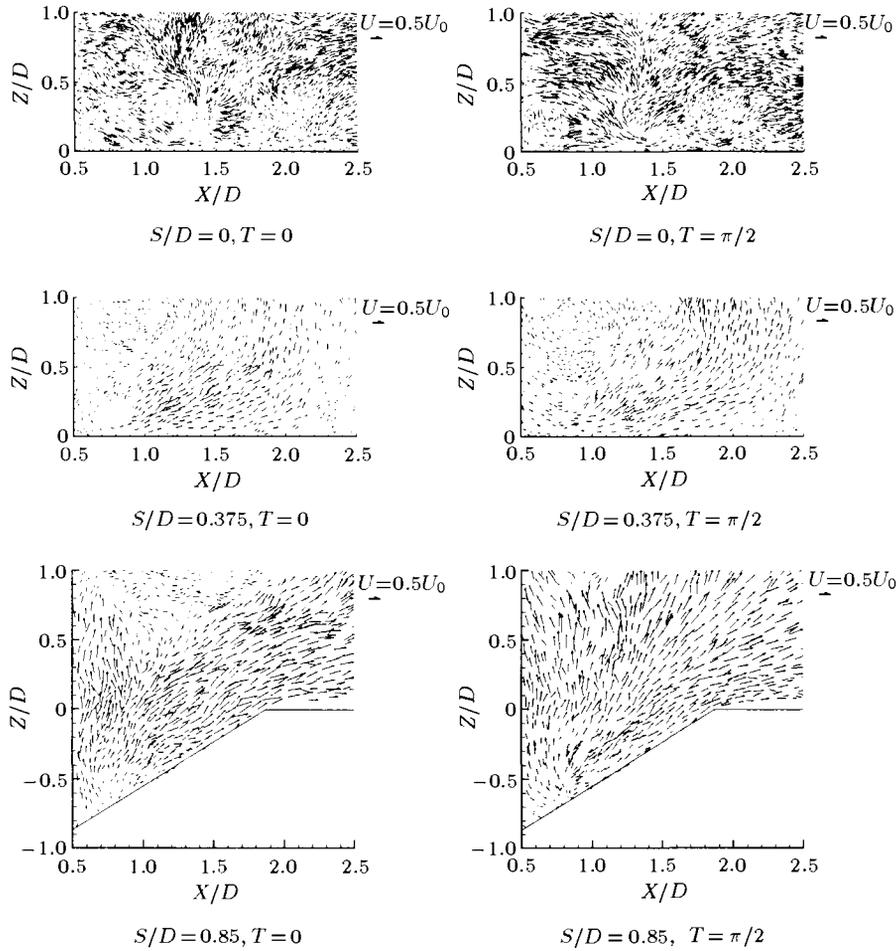


图 6 圆柱下游对称面瞬时速度场

Fig.6 Instantaneous velocities in the symmetry plane downstream of the pier

3.2 平均流场特性

下面给出伴随床面演化圆柱下游湍流场的平均速度、剪应力、涡量及湍流强度等平均量。

3.2.1 平均流速场

图 7 给出 3 种地形条件下圆柱下游 $Y = 0$ 对称面平均速度向量 (\bar{u}, \bar{w}) 场。平底 $S/D = 0$ 情况下，圆柱下游对称面流场，如图 7(a) 所示，存在着负向流动、正向流动和两者之间的过渡区域，并且从负向流动向正向流动过渡的位置随着远离床面发生变化。当冲刷深度达到 $S/D = 0.375$ 时，由于冲刷坑浅而小而且下游对称面尚未冲通，靠近圆柱后角区冲刷坑内的尾涡靠近圆柱但离开对称面，导致圆柱后角区流速降低，而在高于冲刷坑的上部流场存在着逆时针的低速回流和较高速的下游流动，如图 7(b)。

随着冲刷深度增加，冲刷坑变为倒锥形，如

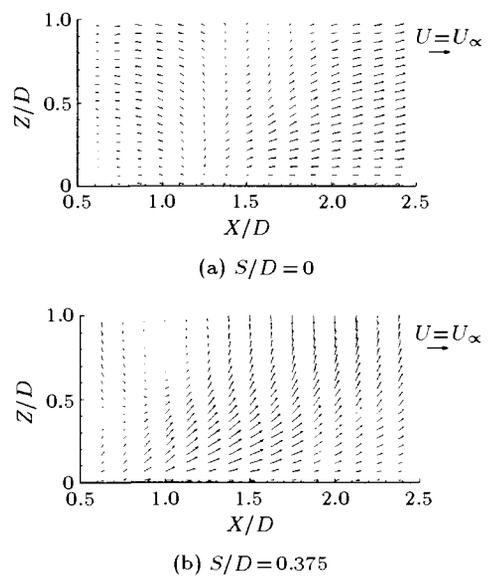


图 7 圆柱下游对称面平均速度向量场

Fig.7 Mean velocity field in the symmetry plane downstream of the pier

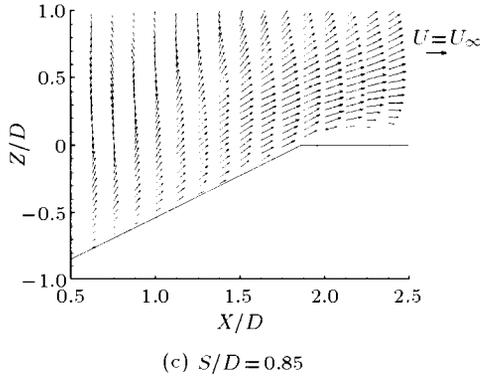


图 7 圆柱下游对称面平均速度向量场 (续)

Fig.7 Mean velocity field in the symmetry plane downstream of the pier (continued)

$S/D = 0.85$ 时的流动. 圆柱下游冲刷坑内马蹄涡与尾涡相互作用导致靠近圆柱附近出现较强的垂直向上流及沿冲刷坑向下游的强顺向流, 在冲刷坑内和冲刷坑上分别存在顺时针小涡和逆时针的大涡. Graf^[6] 平衡冲刷坑内平均速度测量结果也表明始终有向上的流速, 同时圆柱表面附近水平速度较低, 有指向水面的回流.

3.2.2 床面平均剪应力

图 8 给出 3 种地形条件下圆柱下游平均剪应力沿圆柱下游对称轴分布. 在冲刷前和下游尚未冲通的 $S/D = 0.375$ 冲刷坑工况下, 圆柱下游对称轴的剪应力分布规律基本相似, 两种情况下圆柱后区剪应力为负, 绝对值接近于来流值, 过渡区剪应力随 X/D 增大而逐渐减小, 并在约 $X/D \approx 1.4$ 附近趋于零. 当冲刷深度约 $S/D = 0.85$ 时冲刷坑内床面剪应力明显低于来流床面剪应力. Melville^[2] 和 Graf^[6] 的研究结果同样表明, 随冲刷坑发展尾流内床面剪应力逐渐降低, 到达某一深度后平均剪应力低于来流剪应力.

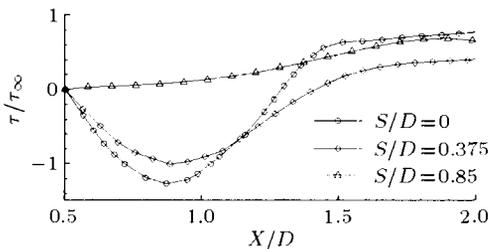
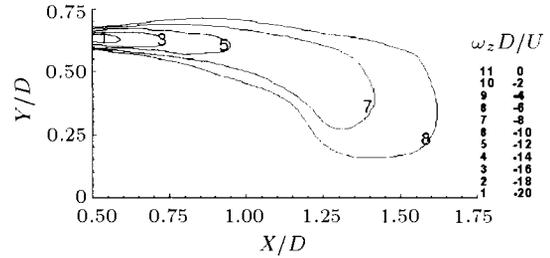


图 8 平均剪应力沿圆柱下游对称轴分布

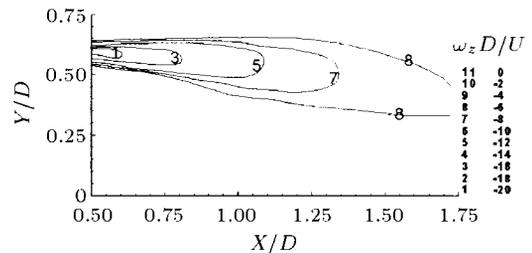
Fig.8 Mean bed shear stress along centerline downstream of the pier

3.2.3 平均涡量场

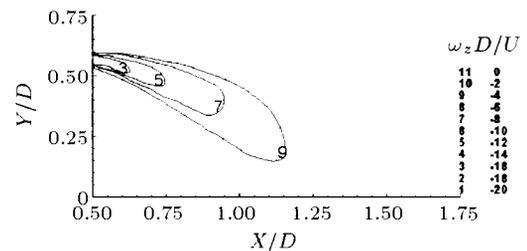
图 9 给出 3 种地形条件下圆柱下游 $Z = 0.25D$ 平面垂向涡量 ω_z 场. 在平底情况下, 圆柱两侧涡脱落长度较长, 因此高涡量区范围较大; 随冲刷深度的增加, 圆柱周围涡系、尾涡的脱落受到地形的影响使得高涡区更靠近圆柱 (见图 9(c)); $S/D = 0.375$ 时因圆柱后端冲刷坑尚未冲通, 未冲通部分的类似隔板作用导致涡脱落向下游延伸 (见图 9(b)).



(a) $S/D = 0$



(b) $S/D = 0.375$



(c) $S/D = 0.85$

图 9 圆柱下游 $Z = 0.25D$ 剖面垂向涡量 ω_z 场

Fig.9 Contour of mean vorticity ω_z in the plane of $Z = 0.25D$ downstream of the pier

图 10 给出冲刷深度 $S/D = 0.85$ 水平剖面 $Z = -0.3D$ 垂向涡量 ω_z 分布. 结果清晰地展示出马蹄涡和紧靠圆柱的尾涡, 表明脱落涡被约束在冲刷坑内. 并沿冲刷坑深度向下尾涡涡心更加靠近圆柱. 因此冲刷深度 $S/D = 0.85$ 时, 尾涡和马蹄涡的高涡强区更靠近圆柱, 从而导致圆柱后的高负压区, 这是圆柱下游局部冲刷的重要因素之一, 并且

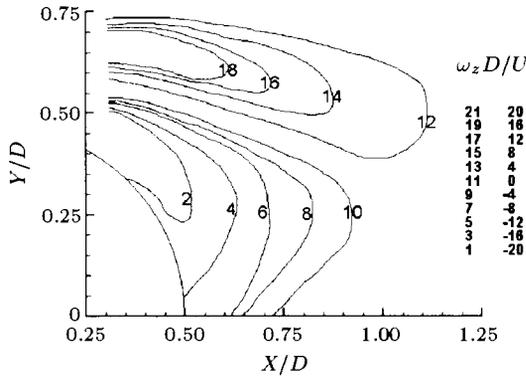


图 10 圆柱下游 $Z = -0.3D$ 剖面垂向涡量 ω_z 场

Fig.10 Contour of mean vorticity ω_z in the plane of $Z = -0.3D$ downstream of the pier

更强.

3.2.4 湍流强度

圆柱下游 $Y = 0$ 对称面流向和垂向湍流强度随着冲刷坑的发展有明显的强弱变化 (见图 11). 冲刷前 $S/D = 0$ 时流向湍流强度随着远离圆柱逐渐增大, 在过渡区达到最大值, 约为来流速度 0.3 倍, 之后又逐渐减小, 垂向湍流强度的强度及其变化规律与流向类似. 随着冲刷坑的逐渐发展, 两侧的冲刷坑在圆柱后端汇合后, 冲刷坑内流向湍流强度垂向变化不大, 而垂向湍流强度增强, 其值高于水平分量. 两者都在冲刷坑边缘附近达到最大值, 在冲刷坑下游湍流强度逐渐减弱, 并随着远离冲刷坑湍流强度沿垂向的变化逐渐减小 (见图 11(b)).

越靠近圆柱基础, 脱落涡越靠近圆柱, 垂向作用力

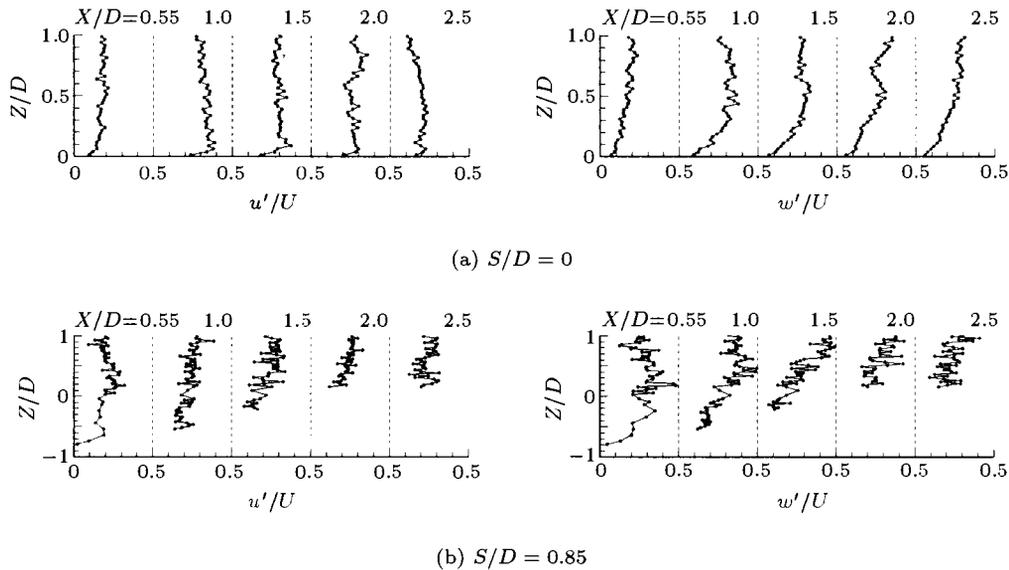


图 11 圆柱下游对称面流向和垂向湍流强度

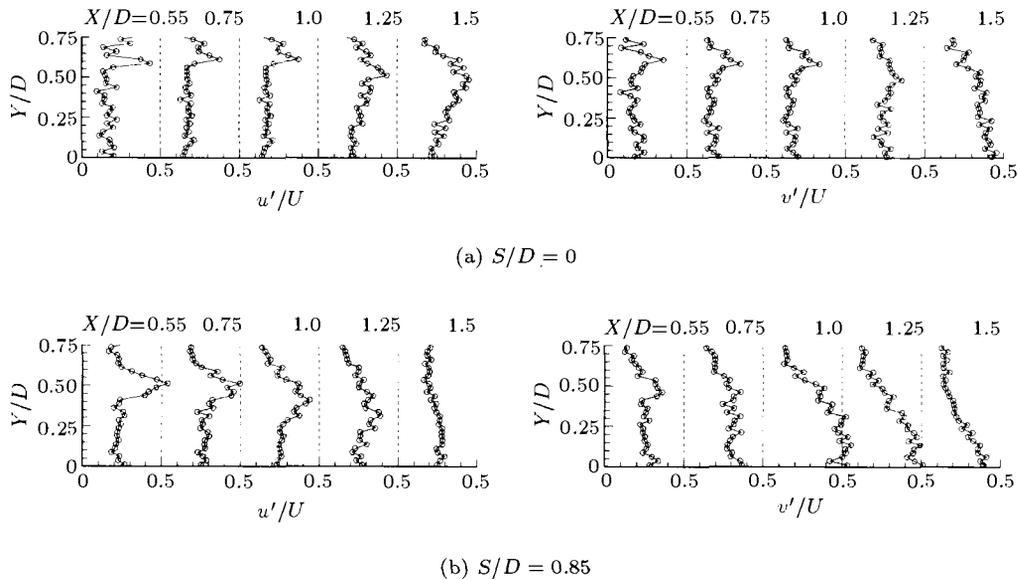
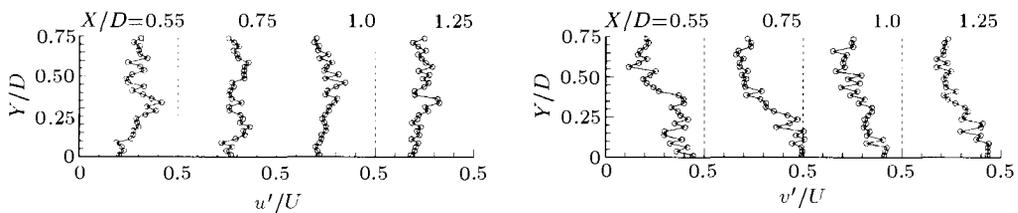
Fig.11 Turbulence intensities $\sqrt{u'u'}/U$ and $\sqrt{w'w'}/U$ in the symmetry plane downstream of the pier

本文还给出冲刷坑上和坑内两个水平面的湍流强度. 冲刷坑上 $Z = 0.25D$ 平面圆柱下游湍流强度分布示于图 12. 平底条件下, 由于尾涡的作用圆柱侧面下游的湍流强度较高, 靠近圆柱附近展向湍流强度和分布规律与流向相似, 而在过渡区展向湍流强度明显增高. 随着冲刷坑的发展, 尤其是在冲刷坑冲通后, 水平方向湍流强度明显高于平底, 如图 12(b), 其中展向湍流强度最高, 已经达到来流速度的 1.5 倍. 对深度 $S/D = 0.85$ 的冲刷坑, 坑内 $Z/D = -0.3$ 平面的湍流强度如图 13 所示. 由于马蹄涡和尾涡的相互

作用, 坑内湍流强度较高, 其展向湍流强度大约高于流向一倍. 在垂直对称面附近展向湍流强度最高.

4 局部冲刷动力机制分析

基于 3 种典型冲刷地形条件下圆柱下游流动特性的研究结果, 结合动床的局部冲刷实验, 进一步分析圆柱周围局部冲刷的动力机制. 局部冲刷开始于圆柱两侧, 两侧冲刷是由于马蹄涡绕柱侧面拉伸导致局部剪应力和涡强的增高, 而在近尾流区平均剪应力较低不足以引起冲刷, 但是此处尾涡的作用

图 12 圆柱下游 $Z = 0.25D$ 剖面湍流强度Fig.12 Turbulence intensities $\sqrt{u'u'}/U$ and $\sqrt{v'v'}/U$ in the plane of $Z = 0.25D$ downstream of the pier图 13 圆柱下游 $Z/D = -0.3$ 剖面湍流强度Fig.13 Turbulence intensities $\sqrt{u'u'}/U$ and $\sqrt{v'v'}/U$ in the plane of $Z = -0.3D$ downstream of the pier

导致较高的湍流强度 (见图 11(a)) 和垂直向上流 (见图 6(a)) 从而引起该区域的沙颗粒扬起 (见图 3 中 20 s), Dargahi^[4] 实验冲刷坑开始于尾流, 该实验 $Re = 39000$, 尾涡强和湍流强度高, 冲刷开始于圆柱下游; 随着冲刷发展, 两侧冲刷坑逐渐向上下游延伸, 在圆柱下游由于冲刷坑的逐渐加深马蹄涡和尾涡逐渐贴近柱体, 马蹄涡对尾涡的影响逐渐增强, 涡强和湍流强度增高 (见图 10, 图 13), 较大涡强引起较高的负压梯度, 因此在尾涡和高强湍流作用下泥沙被抽吸扬起甚至达到水面 (见图 3 中 300s); 在下游对称面没有冲通前, 对称面位置的类似隔板作用减弱了两侧流动在下游床面附近的相互作用, 下游区域内运动的沙颗粒主要来源于圆柱上游和两侧 (见图 3 中 120s).

综上所述, 在平底和冲刷坑条件下圆柱下游床面平均剪应力虽然很低, 但在尾涡和湍流作用下仍会引起局部冲刷. 因此在建立局部冲刷模型时不能单

纯考虑平均剪应力的作用, 还必须综合考虑涡强, 湍流动能等动力因素.

5 结 论

本文采用 DPTV 粒子图像测速技术和粒子图像识别方法实验研究了动床和定床两种条件下圆柱周围的局部冲刷和流场特性, 并进一步探索圆柱下游局部冲刷的动力机制. 研究得到以下结果.

(1) 动床实验给出冲刷坑随时间的演化过程及上下游对称面的输沙规律. 发现局部冲刷首先出现在圆柱侧面, 冲刷迅速扩大, 在上游对称面强冲刷阶段输沙率随时间线性增长达到最高, 随后冲刷开始逐渐减弱. 下游对称面直到冲刷时间约 120s 才出现冲刷, 并迅速冲通形成倒锥形冲刷坑.

(2) 动床实验研究给出圆柱下游对称面沙颗粒平均浓度随冲刷时间的变化规律. 研究指出, 强冲刷阶段颗粒浓度随冲刷时间线性增长, 冲刷约 170s

时沙颗粒浓度达到最大值, 然后逐渐减缓降低。

(3) 本文给出圆柱周围流体动力的统计平均结果包括平均速度、平均剪应力、涡量和湍流强度。发现在冲刷发展过程中尾流区平均剪应力始终较低, 平底圆柱绕流下游过渡区湍流强度较高并有较强的垂向流, 倒锥形冲刷坑形成后冲刷坑内垂向涡量和湍流强度显著增强。

(4) 综合分析动床局部冲刷和定床水动力特性研究, 揭示了圆柱下游区域局部冲刷的主要动力是尾涡和湍流的作用, 在圆柱两侧脱落涡的作用明显, 而在对称剖面的过渡区和冲刷坑内湍流强度较高, 在建立颗粒运动模型时必须考虑尾涡和湍流的影响。

参 考 文 献

- 1 Dey S. Local scour at piers, Part I: A review of developments of research. *Int J Sediment Res*, 1997, 12 (2): 23~46
- 2 Melville BW, Raudkivi AJ. Flow characteristics in local scour at bridge piers. *J Hydr Res*, 1977, 15(4): 373~380
- 3 Dargahi B. The turbulent flow field around a circular cylinder. *Exp Fluids*, 1989, 8: 1~12
- 4 Dargahi B. Controlling mechanism of local scouring. *ASCE J Hydr Engrg*, 1990, 116(10): 1197~1214
- 5 Graf WH, Yulistiyanto B. Experiment on flow around a cylinder; the velocity and vorticity fields. *J Hydr Res*, 1998, 36(4): 637~653
- 6 Graf WH, Istiarto I. Flow pattern in the scour hole around a cylinder. *J Hydr Res*, 2002, 40(1): 13~20

EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON THE LOCAL SCOURING MECHANISM AROUND A CIRCULAR PIER

Zhao Wei Huhe Aode¹⁾

(Division of Engineering Sciences Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract In this paper, the development of the scour hole and the mechanism of the local scouring around a vertical circular pier are investigated experimentally with DPTV and the Particle Mask Correlation Method. First, the bed evolution is studied using the mobile bed, and the rate of the sediment transport along the centerline, the law of the particle concentration and the sand distribution in the symmetry plane downstream of the pier are obtained. Second, the instantaneous velocities are measured under the condition of fixed beds corresponding to the mobile beds of scour, and also the mean flow fields are obtained. The experimental results show that in spite of the fact that the bed shear stress is low during erosion in the wake, the vertical vorticity and the turbulence intensities are high. So besides the bed shear stress, the wake vortices, the negative pressure and the turbulent intensities also contribute to the mechanism of the local scouring.

Key words scouring mechanism, sediment transport, DPTV, particle mask correlation method