

圆柱绕流无沙区试验研究^{*}

刘焕芳 文 辉 李 强

(石河子大学工学院土木建筑工程系 石河子 832003)

摘 要 试验发现推移质泥沙随水流绕过圆柱体时,将在圆柱周围的床面上形成一个无沙区。根据动能定律建立了圆柱绕流无沙区的定量关系式。分析该定量关系式可知,无沙区的范围随圆柱直径的增大而增大;当泥沙粒径减小时,无沙区的范围将增大;水流条件的变化直接影响泥沙颗粒的运动情况,同无沙区的形成、消失及范围大小有密切的关系。理论分析结果同试验现象是一致的。

关键词 圆柱绕流 无沙区 试验研究 推移质泥沙 定床

分类号 TV143.1; TV149.1

在工程实践中经常可以遇到流体绕过各种柱体的流动,如水流绕过底栏栅式渠首的闸墩和风沙绕过各种凸起的建筑物等。显然,在绕流过程中,柱体会影响流体的流动,引起流体流动速度的变化及流场中压力分布的变化。柱体绕流中,最简单的是圆柱绕流^[1]。在分析圆柱绕流时,均把流动看作是理想流体的平面流动,使问题得以简化,然后再考虑实际流体粘性的影响。但在工程实际中还常遇到挟带固体颗粒的实际流体的柱体绕流,如挟带泥沙颗粒的水流绕过桥墩和闸墩等。因此分析和了解推移质泥沙的圆柱绕流是有实际意义的。这种有自由表面且挟带泥沙颗粒的圆柱绕流是一个复杂的空间问题,为此,笔者在定床条件下对推移质泥沙的圆柱绕流进行了试验研究。

1 试验概况

定床条件下推移质泥沙的圆绕流试验是在宽0.5m,深0.6m,长25m的活动玻璃水槽中进行的,水槽的底坡在 $\pm 1/66$ 的范围内变化,试验中用圆形钢管作为圆柱安置在水槽的中央,用天然泥沙颗粒模拟推移质泥沙。从水槽上游加入不同粒径组的沙粒,观察泥沙颗粒随水流推移运动及其绕过圆柱体时的流动现象并量测有关数据,水槽末端设有量水接沙设备。

试验中主要变化参数为圆柱直径 D 、流量 Q 、水槽比降 i 和泥沙颗粒的粒径 d ,按以下组合安排试验组次:

圆柱直径: $D = 8.93\text{cm}, 6.06\text{cm}, 4.85\text{cm}, 3.42\text{cm};$

流量: $Q = 20\text{L/s}, 40\text{L/s}, 60\text{L/s}, 80\text{L/s};$

比降: $i = 1/1000, 1/408, 1/245, 1/117, 1/81;$

^{*} 收稿日期: 1996-10-3; 修改稿日期: 1997-3-31。

泥沙粒径: $d = 1 \sim 3\text{mm}$, $3 \sim 5\text{mm}$, $5 \sim 10\text{mm}$, $10 \sim 20\text{mm}$ 。

试验中调整流量和水槽比降的目的是为了形成不同的水深、流速和佛汝德数 Fr ，以观察水流条件对推移质泥沙颗粒圆柱绕流的影响。

2 试验现象

2.1 流体绕圆柱时的反向底流

当流体绕过突立于床面边界上的圆柱体时，其流态是很复杂的。圆柱体周围的水流结构主要包括柱前的下冲水流、柱前的水面涌波和尺度很大的旋涡体系^[2,3]。在圆柱迎流面的竖直

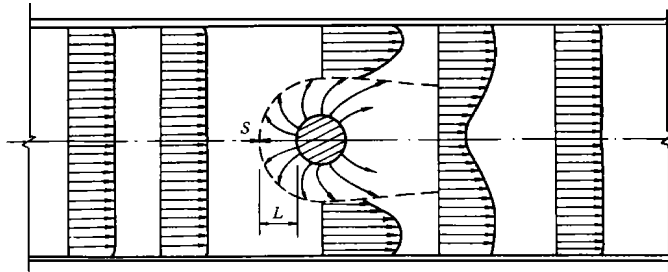


图1 反向底流区示意图

Fig. 1. Sketch of the reverse bottom current

对称轴上，水流受到圆柱壁面的阻滞，行近流速变为零，转化为滞点压力。由于流速 u 沿垂线自水面向床面递减，其滞点压力（等于 $\rho u^2/2$ ）同样自水面向床面递减，即存在一个向下的压力梯度。该压力梯度引起向下流动，导致床面附近形成反向底流。来自圆柱底部的反向底流在离圆柱面一定距离处遇到上游来的主流，形成驻点 S 。反向底流和

主流汇合后流线向对称面外弯曲^[4]，在圆柱周围的床面上形成一如图1所示的反向底流区。该反向底流区的大小同圆直径 D 成正比，可表示为

$$L = kD \quad (1)$$

式中 L 为驻点 S 到圆柱迎流面的距离， k 为系数。

2.2 圆柱绕流中的无沙区

当推移质泥沙颗粒随水流沿床面推移运动到圆柱附近时，由于圆柱前反向底流的作用，泥沙颗粒在 M 点停止前进，形成泥沙颗粒运动的驻点，然后被推向两侧，在圆柱周围的床面上形成一个无泥沙颗粒运动的区域，如图2所示，这个区域称为泥沙颗粒圆柱绕流的无沙区。无沙区的范围大小用 M 点到圆柱迎流面的距离 R 表示。

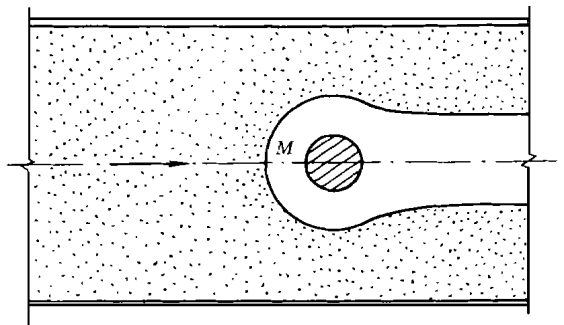


图2 无沙区示意图

Fig. 2. Region of non-sediment movement

3 试验结果及分析

推移质泥沙颗粒圆柱绕流无沙区的形成、消失及范围大小同泥沙粒径 d 、圆柱直径 D 和水流的佛汝德数 Fr 等因素有关。

3.1 泥沙粒径对无沙区的影响

本次试验共采用了四个粒径组, 其中最小粒径组 1~3 mm, 最大粒径组 10~20mm。试验表明, 在相同的水流条件下, 泥沙粒径越大, 则无沙区的范围越小。因为泥沙粒径越大, 泥沙颗粒的惯性越大, 因此在相同的反向底流作用下, 大粒径泥沙颗粒的无沙区范围较小。

对于粒径小于 1mm 的泥沙颗粒没有进行试验, 但可以设想, 当泥沙粒径小到某一数值时, 水流速度趋近于该粒径泥沙颗粒的扬动流速, 即该粒径组泥沙有转化为悬移质的趋势, 其无沙区的大小将与反向底流区的大小基本相同, 即无沙区范围的极限就是反向底流区, 当推移质转化为悬移质后, 就不再是推移质泥沙的圆柱绕流了, 床面上也就不存在无沙区了。

3.2 圆柱直径对无沙区的影响

本试验中采用了四种圆柱直径。试验表明, 在同样的水流和泥沙粒径条件下, 无沙区的范围随圆柱直径的增大而增大。这是因为反向底流区的大小同圆柱直径成正比, 当圆柱直径增大时, 反向底流区的范围扩大, 反向底流的作用增强, 因此导致无沙区的范围增大。

3.3 佛汝德数 Fr 对无沙区的影响

佛汝德数 Fr 综合反映了水槽中流速和水深的关系。当水槽坡度较缓时, 水流强度较弱, Fr 较小, 断面平均流速小于泥沙颗粒的起动流速, 此时泥沙颗粒在床面上静止不动, 不存在推移质泥沙颗粒的运动, 也就无所谓无沙区了。如当 $Fr < 0.48$ 时, $d > 3\text{mm}$ 的泥沙颗粒均在床面上静止不动, 不存在无沙区。

随着水槽坡度变陡, 水流强度增加, 当 $Fr > 0.75$ 时, 各粒径组泥沙颗粒均沿床面推移前进并在运动到圆柱附近时形成无沙区。

在试验中发现, 当水流强度进一步增强时, 泥沙颗粒沿床面的运动速度加快, 此时大粒径泥沙颗粒具有较大的动量(惯性), 反向底流的作用不足以阻止固体颗粒的运动趋势, 结果泥沙颗粒一直向前运动直至碰撞圆柱壁面, 这时可听到泥沙颗粒撞击圆柱壁面的响声, 并且观察不到明显的无沙区。如当 $Fr > 1.8$ 时, $d = 10 \sim 20\text{mm}$ 的泥沙颗粒其无沙区 $R = 0$ 。但在同样的来流条件下, 小粒径泥沙颗粒在反向底流的作用下, 则强烈地在圆柱前翻腾, 但靠近不了圆柱面, 可观察到明显的无沙区。

试验表明, 水流条件可以改变泥沙颗粒在床面上的运动情况, 将对无沙区的形成、范围和消失产生影响。

4 无沙区与影响因素的定量关系

在床面上泥沙颗粒的运动速度 u_s 与水流平均流速 v 之间存在以下关系⁶⁾

$$u_s = a_1(v - v_c) \quad (2)$$

式中 v_c 为泥沙颗粒的起动流速; a_1 为比例系数。

当推移质泥沙运动到圆柱附近时, 由于柱前反向底流的作用, 泥沙颗粒受到了一个与运动方向相反的阻力 F

$$F = C_d a_2 d^2 \frac{\rho u_0^2}{2} \quad (3)$$

式中 C_d 为阻力系数; a_2 为面积系数; ρ 为水的密度; u_0 为作用在床面泥沙颗粒的反向底流

速度, 可表示为⁶⁾

$$u_0 = a_3 v \quad (4)$$

式中 a_3 为比例系数。

在该阻力 F 的作用下, 泥沙颗粒作减速运动, 在 M 点停止前进, 形成床面泥沙颗粒运动的驻点。设床面泥沙颗粒从进入反向底流区 (S 点) 到驻点 (M 点) 所运动的距离为 x , 则根据动能定律有

$$Fx = \frac{1}{2} m u_s^2 = \frac{1}{2} \rho_s a_1^2 a_4 d^3 (v - v_c)^2 \quad (5)$$

式中 m 为泥沙颗粒的质量; ρ_s 为泥沙颗粒的密度; a_4 为体积系数。由式 (5) 可得

$$x = \Phi \frac{\rho_s}{\rho} d \left(\frac{v - v_c}{v} \right)^2 \quad (6)$$

式中 Φ 为综合系数, $\Phi = a_1^2 a_4 / C_d a_2 a_3^2$ 。由此可得圆柱绕流无沙区的定量关系式为

$$R = L - x = kD - \Phi \frac{\rho_s}{\rho} d \left(\frac{v - v_c}{v} \right)^2 \quad (7)$$

或

$$R = kD - \beta d \left(1 - \frac{Fr_c}{Fr} \right)^2 \quad (8)$$

式中 Fr_c 为泥沙起动流速 v_c 所对应的佛汝德数, $Fr_c = v_c / \sqrt{gh}$; $\beta = \Phi \rho_s / \rho$ 。

泥沙的起动流速可用沙莫夫公式计算⁶⁾

$$v_c = 1.14 \sqrt{\frac{\rho_s - \rho}{\rho} g d} \left(\frac{h}{d} \right)^{1/6} \quad (9)$$

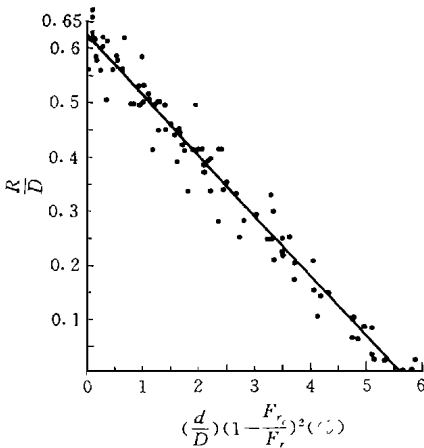


图3 无沙区的关系

Fig. 3. Relation of region non-sediment movement

由式 (7) 或式 (8) 可知, 在同样的水流条件和推移质泥沙条件下, 无沙区的范围将随圆柱直径的增大而增大; 在同样的水流条件和边界条件下, 无沙区的范围将随泥沙粒径的增大而变小; 当水流速度 v 小于泥沙起动流速 v_c (或 $Fr < Fr_c$) 时, 泥沙颗粒在床面上静止不动, 不存在无沙区; 当 $v > v_c$ (或 $Fr > Fr_c$) 时, 在柱前将形成无沙区, $R > 0$; 但当 v 远大于 v_c (或 Fr 远大于 Fr_c) 且泥沙粒径较大时, 结果 x 大于 L , 即 $R < 0$, 此时泥沙颗粒将直接碰撞圆柱壁面; 同样在 v 远大于 v_c 条件下, 如泥沙粒径较小, 结果 $R = L - x > 0$, 此时在圆柱附近的床面上将仍存在无沙区。上述分析结果从定性上是同试验所观察到的现象完全一致的。

将式 (8) 转化为无量纲表达式, 在图 3 中根据试验资料点绘出 R/D 和 $(d/D) \left(1 - \frac{Fr_c}{Fr} \right)^2$ 的关系, 由回归分

析和相关分析得出 $k = 0.627 \sim 0.63$, $\beta = 11.21$, 其相关系数 $r = -0.98$, 剩余标准差 $\sigma = 0.033$ 。因此式 (8) 可以较好地模拟床面推移质泥沙圆柱绕流无沙区的变化情况。

5 结 论

(1) 当泥沙颗粒随水流推移运动绕过圆柱体时, 将在圆柱周围的床面上形成一个无泥沙颗粒运动的区域, 即无沙区。

(2) 在同样的水流条件和泥沙颗粒条件下, 无沙区的范围随圆柱直径的增大而增大。

(3) 在同样的水流条件和边界条件下, 推移质泥沙圆柱绕流中无沙区的范围随泥沙粒径的增大而变小。

(4) 水流条件的变化将直接影响床面泥沙颗粒的运动状况, 同无沙区的形成、消失及范围大小有密切的关系。

(5) 根据动能定律, 建立了无沙区的定量关系式 ((8) 式), 所得结论与试验现象一致。

以上所述只是定床条件下推移质泥沙圆柱绕流的试验现象和无沙区同圆柱直径、泥沙粒径及佛汝德数的定量关系。事实上不但这些因素对无沙区有影响, 而且来流的宽度、柱体的形状、泥沙的级配等因素均可能对推移质泥沙的圆柱绕流无沙区有影响, 因此有必要进一步探讨这些因素对无沙区的影响。这对桥墩局部冲刷和降低底栏栅渠首引水中的水沙比等的研究是有参考价值的。

参 考 文 献

- 1 郑洽馥, 鲁钟琪主编. 流体力学. 北京: 机械工业出版社, 1980. 236 ~ 249
- 2 陆浩, 高冬光编著. 桥梁水力学. 北京: 人民交通出版社, 1991. 167 ~ 184
- 3 A J Raudkivi. Functional Trends of Scour at Bridge Piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE. 1986, 112 (1): 1 ~ 13
- 4 H 史里希廷. 边界层理论, 上册. 北京: 科学出版社, 1988. 281 ~ 287
- 5 张瑞瑾等编著. 河流泥沙动力学. 北京: 水利电力出版社, 1989. 147 ~ 149, 83 ~ 89

Experiment Study of the Region Non-Sediment Movement in Cylinder Circulation Flow

Liu Huanfang, Wen Hui, and Li Qiang

(*Shihezi University, Shihezi 832003*)

Abstract: This paper presents the experiment phenomena of particle at bottom in cylinder circulation flow. When the bed load round the cylinder with water flow, a region of non-sediment s moving will be formed in the bed layer near the cylinder. Based on the law of kinetic energy, the formula in the region of non-sediment movement is set up. The influence of the particle size, the diameter of cylinder and the Froude coefficient to the region there are no particle's movement are analysed. The analysis result from the formula agrees with the experiment phenomena.

Key words: cylinder circulation flow; region of non-sediment movement; experiment study; bed load; fixed bed.