



# 弯曲航道水流特性及岸坡稳定性研究\*

李景娟, 段祥宝, 谢罗峰

(南京水利科学研究院, 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,  
通航建筑物建设技术交通行业重点实验室, 江苏 南京 210029)

**摘要:** 对某段弯曲航道水流进行三维数值模拟, 简要分析了弯道水流特性, 并将弯曲航道水流淘刷作用耦合于岸坡稳定性二维数值模拟中, 量化水流淘刷对岸坡稳定性的影响, 在此基础上计算不同冲刷深度下的岸坡稳定性。结果表明: 高水位情况下岸坡受环流淘刷作用的影响更大; 冲刷深度越大, 岸坡稳定系数越小; 当冲刷达到一定程度, 岸坡局部发生崩塌从而降低整体稳定性。

**关键词:** 弯曲航道; 水流特性; 耦合; 岸坡稳定; 冲刷深度

中图分类号: U 611

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)12-0137-05

## Flow characteristics of bend channel and stability of bank slope

LI Jing-juan, DUAN Xiang-bao, XIE Luo-feng

(Nanjing Hydraulic Research Institute, State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering,  
Key Laboratory of Navigation Structure Construction Technology, Ministry of Transport, PRC, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** Three dimensional numerical simulation of water flow in a curved channel is carried out, and the flow characteristics flow in the bend channel are briefly analyzed. By coupling the water erosion with two-dimensional numerical simulation of slope stability, the effect of water erosion on the stability of bank slope was quantified, and the slope stabilities under different scour depths were calculated. The results show that the slope is affected by water erosion more with high water level; The greater the scour depth, the smaller the slope stability coefficient is. The local bank slope collapses to lead to lower stability when the erosion reaches a certain degree.

**Keywords:** curved channel; flow characteristics; coupling; slope stability; scour depth

近年来, 强降雨导致内河水位上涨, 堤防岸坡崩塌时有发生, 岸滩崩塌造成河道滩地流失, 严重威胁防洪堤安全, 破坏河道的稳定性, 影响航运、桥梁、供水等工程设施的安全<sup>[1]</sup>。崩岸影响因素包括内在因素与外在因素。内在因素包括土体结构本身、河势形态(如河道曲率、河床坡道比降)以及岸坡坡度等; 外在因素主要包括河

流冲刷、地下水渗流与降雨、河水位变化、人为活动(船舶航行、岸坡顶部超载、人工挖沙、植被破坏等)<sup>[2]</sup>。

对于弯曲航道而言, 水流冲刷是凹岸失稳的重要因素, 岸坡崩塌对下游防洪及航运有严重的不利影响<sup>[3-4]</sup>。因此, 弯曲航道水流对岸坡的淘刷作用不容忽视。本文在顺直河段堤岸受水流冲刷

收稿日期: 2016-09-16

\*基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0401901); 水利部堤防安全与病害防治工程技术研究中心开放基金(201506); 水利部公益性行业科研专项(201401083); 水利部“948”项目(201403)

作者简介: 李景娟(1989—), 女, 硕士, 助理工程师, 从事渗流控制研究。

作用力分布的基础上，建立了堤岸受弯道水流淘刷作用的整体稳定分析模型，分析河床岸坡受水流淘刷后的整体稳定性。

### 1 弯道水流数值模拟及分析

#### 1.1 计算模型

位于淮河的某段弯曲航道，航道横断面为复合梯形，断面尺寸沿程不变，侧壁与河床固定且糙率为0.0225，河底宽100m，岸坡坡度为1:3，弯道部分长约为100m，弯道入口上游直段稳定段长300m，下游出口直段长度为200m，弯道模型的圆心角 $\theta$ 为 $60^\circ$ ，对该弯曲航道段进行概化，建立三维数学模型。横断面及平面布置如图1、2所示，图2中断面0+339、0+491和0+644为实测断面。

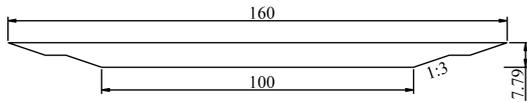


图1 弯道横断面 (单位: m)

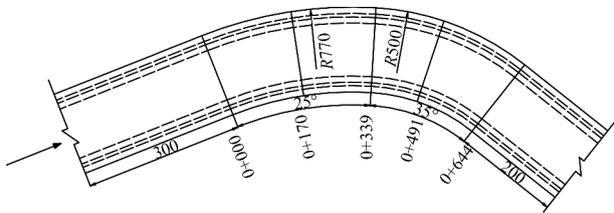


图2 弯道平面布置 (单位: m)

#### 1.2 初始条件及边界条件

弯道中的水流为紊流，取水流入方向与Y轴正向一致，进口边界设为速度进口，条件设定为： $U=u, V=0, W=0$ ， $u$ 为进口断面的平均流速，给出进口水深，根据进口流量及断面面积确定 $u$ 的大小，方向与Y轴正向一致。本文所取工况为设计流量 $Q=1\ 630\ m^3/s$ ；计算模型的出口并非全断面自由出流，因此对整个出口设为自由出流；计算域的自由表面定义为对称边界。对称边界定义是：它是不可穿透的，同一流动介质在对称面两侧是不连续的，由对称边界分隔开来，对称边

界条件按照完全滑移的固壁条件来给定。划分时兼顾了计算精度以及现有计算条件，使用疏密程度不同的网格。

#### 1.3 结果分析

图3为计算得到的水面速度场矢量，图4为水面压力分布，图5为表面和底部的流速分布。

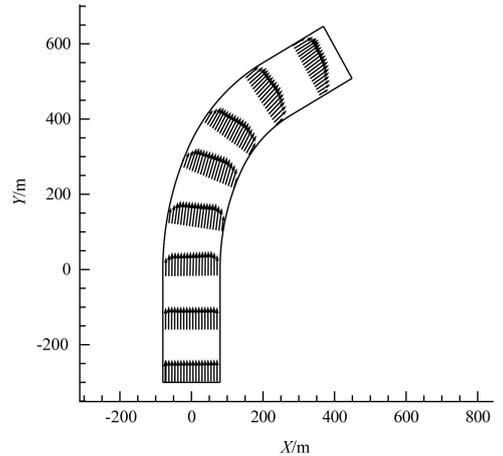


图3 水面速度场矢量

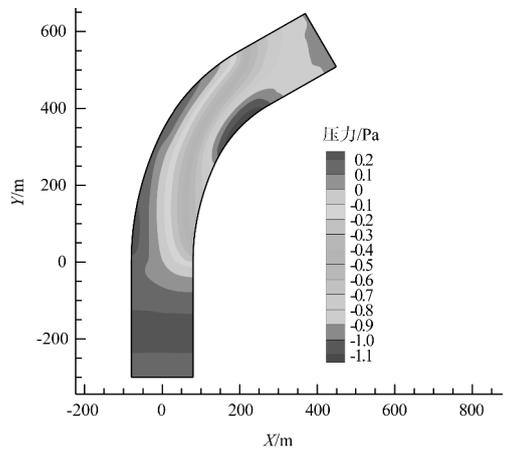
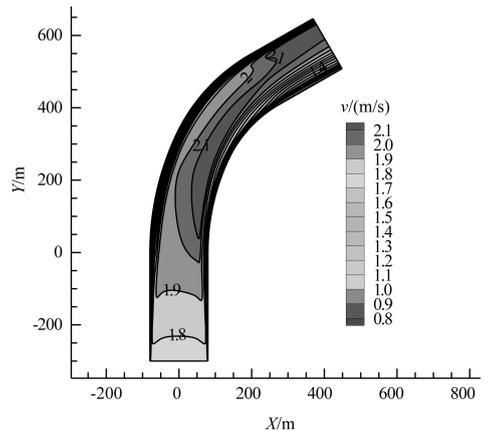


图4 水面压力



a) 表层流速

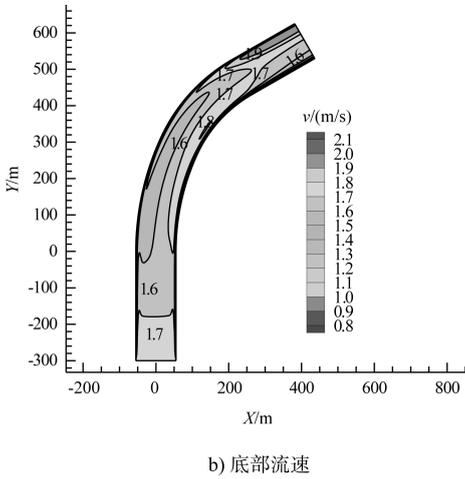


图 5 流速分布

由图 3 和图 5a) 可以看出, 水流进入弯曲航道后, 水面流速最大值从开始的靠近凸岸处逐渐向凹岸移动。结合图 5b) 可知, 水面和底部流速分布有显著差异, 水流刚进入弯道时, 表层与底层流速均在靠近凸岸侧较大, 凹岸侧流速相对减小; 经过弯道后凸岸流速减小, 凹岸流速明显增大, 且表层流速明显大于底层流速, 底部最大流速有向凸岸靠近的趋势, 表现了弯道水流底部流向和表层流向交错的重要特征, 这是二维模型所不能反

映的; 图 4 表明: 凹岸水面压力为正值, 而凸岸出现负压, 说明水流进入弯道后, 凹岸水面升高凸岸水面降低, 存在水面高差, 从而产生环流。

图 6 为不同断面的纵向流速分布等值线, 每个断面图的左侧为弯道的凹岸, 右侧为凸岸。由图 6 可以看出弯道中水流流速的最大值的位置沿程变化较明显, 最大值从进入弯道后就开始离开原来的位置逐渐向河湾的凸岸偏移, 越过弯顶断面后又逐渐向弯道中心线靠近, 后偏向凹岸。而且各断面的纵向流速最大值都出现在表面附近, 底部流速较小, 最小值出现在近壁区附近。

## 2 岸坡稳定性数值模拟

### 2.1 环流淘刷力的取值方法

根据水力学计算原理, 对于顺直河段, 其近岸水流冲刷力可采用近岸水流的切应力  $\tau_0$  来表示, 如下式:

$$\tau_0 = \rho_w ghJ \quad (1)$$

式中:  $\rho_w$  为水的密度 ( $t/m^3$ );  $g$  为重力加速度 ( $m/s^2$ );  $h$  为冲前水深 ( $m$ );  $J$  为水力坡度。

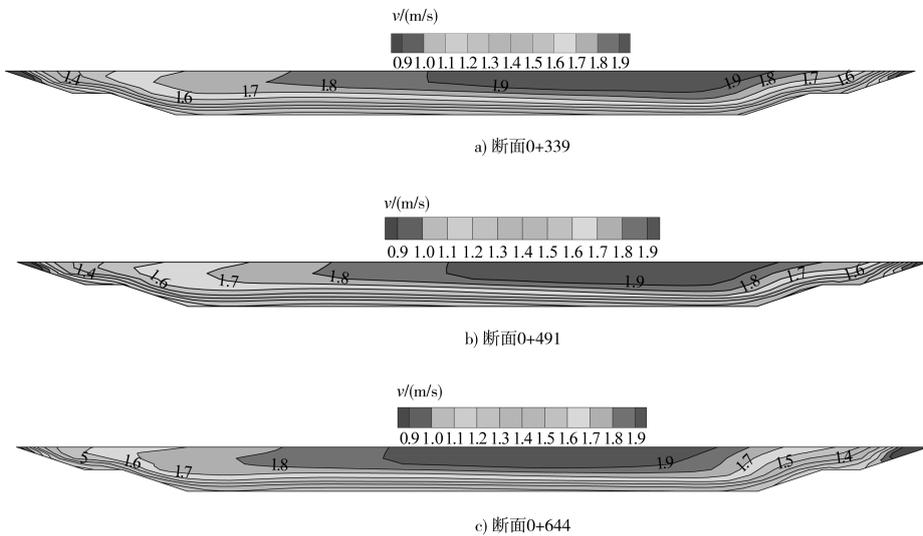


图 6 断面流速分布 (单位: m/s)

弯曲航道两侧岸坡由于受到水位变化、船舶波浪以及风浪作用等因素的影响, 最大冲刷力  $\tau$  是河床的 1.29 倍, 如下式:

$$\tau = 1.29\rho_w ghJ \quad (2)$$

对于弯曲航道水流, 其特有的环流作用对岸坡坡脚的淘刷是导致岸坡稳定性改变的重要因素<sup>[5]</sup>。顺直河段中岸坡所受水流剪应力方向为流速的切线方向, 由此可认为环流对岸坡的淘刷力

也可类似冲刷力分布来考虑。

根据毛佩郁<sup>[6]</sup>提出的环流强度表达式可以得到河湾水流的横向环流速度  $v_r$  的表达式为:

$$v_r = \frac{0.9B}{B+r_2} v_\theta \quad (3)$$

式中:  $r_2$  为凹岸的弯曲半径(m);  $B$  为河水面宽度(m);  $v_\theta$  为纵向流速(m/s)。

结合曼宁公式, 由此推导出岸坡断面所受的环流淘刷作用力大小为:

$$\tau_1 = 1.29\rho_w g \frac{n^2}{R^{1/3}} \left(\frac{0.9B}{B+r_2}\right)^2 v_\theta^2 \quad (4)$$

式中:  $n$  为岸坡糙率;  $v$  为断面平均流速(m/s);  $R$  为断面的水力半径(m), 对于宽浅河道而言, 等于水深  $h$ 。

简化环流淘刷力, 对岸坡水下部分施加垂直岸坡指向内河的线作用力, 使其在水平与竖直方向的分量与环流产生的淘刷作用力相等, 由此可实现现在二维数值计算中模拟环流淘刷力的作用。

### 2.2 岸坡稳定数学模型选取

对弯曲航道凹岸来说, 近岸处纵向流速越大, 冲刷也就越严重, 因此要选择凹岸水流顶冲点位置处岸坡作为二维稳定模型。针对该工程选取断

面 0+644 为最危险断面。如图 7 所示, 堤岸结构为二元结构, 上覆黏土下卧砂。根据堤岸的运行情况及上述河流淘刷力的取值方法(式(4)), 令岸坡受冲刷力  $F_1 = \tau_1$ , 增大流量后环流淘刷作用力增大至  $\tau_2$ , 令  $F_2 = \tau_2$ , 对以下 5 种工况进行整体稳定分析: 1) 高水位稳定渗流+河流冲刷力  $F_1$ ; 2) 高水位稳定渗流+河流冲刷力  $F_2$ ; 3) 枯水位稳定渗流; 4) 枯水位稳定渗流+河流冲刷  $F_1$ ; 5) 枯水位稳定渗流+河流冲刷  $F_2$ 。

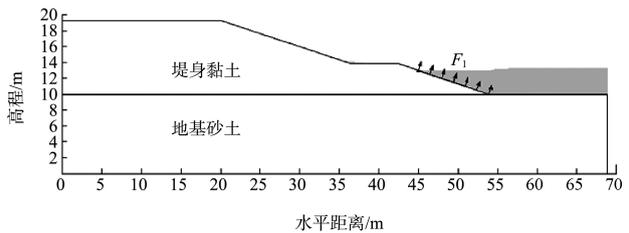


图 7 岸坡受冲刷时的计算断面

### 2.3 计算参数与边界条件

根据堤岸的土体特征, 采用摩尔-库伦本构模型, 由现场取样及室内试验确定堤身及地基的物理力学参数见表 1。本文所用到的稳定分析方法为简化毕肖普法。

表 1 各土层物理力学性质指标

岩土名称	湿密度/ (g/cm <sup>3</sup> )	干密度/ (g/cm <sup>3</sup> )	孔隙比 <i>e</i>	土粒 比重	含水率 <i>W</i> %	凝聚力 <i>C</i> /kPa	内摩擦角 $\varphi$ /(°)	渗透系数 <i>K</i> /(cm/s)
堤身粉质黏土	1.646	1.450	0.775	2.680	13.9	12	21.7	$5.59 \times 10^{-5}$
地基细砂	1.999	1.617	0.818	2.670	23.6	9	23.4	$6.01 \times 10^{-4}$

边界条件: 河内高水位  $h = 17.79$  m, 正常水位  $h = 15.99$  m, 低水位  $h = 13.00$  m, 堤内地下水位  $h = 16.29$  m。

### 2.4 结果分析

采用上述稳定分析方法对断面 0+644 进行不同工况下的整体稳定计算, 计算结果见表 2。

上述计算结果表明, 弯曲航道内河高水位时岸坡受水流淘刷作用的稳定系数明显降低许多, 而低水位受淘刷时其稳定系数下降幅度相对较小, 说明高水位时流量大环流作用强, 对岸坡的淘刷作用对整体稳定性影响较大, 当淘刷作用增大到

一定范围, 岸坡稳定性下降直至崩塌; 枯水位时流量小环流作用较弱, 对坡脚的淘刷作用敏感度较低, 稳定系数随水流淘刷作用的增强而降低, 但变化幅度不大。

表 2 岸坡整体稳定安全系数计算结果

渗流	计算工况	最小安全系数
高水位稳定渗流	无淘刷	2.426
	淘刷力 $F_1$	1.651
	淘刷力 $F_2$	1.162
低水位稳定渗流	无淘刷	2.013
	淘刷力 $F_1$	1.796
	淘刷力 $F_2$	1.777

### 3 冲刷后岸坡稳定性数值模拟

#### 3.1 冲刷深度计算

弯曲航道的侧岸冲刷不同于顺直河道, 必须考虑到其环流强度, 环流不仅淘刷岸坡使凹岸变陡, 加强沿边界上的水流剪切应力, 更重要的是螺旋水流伴随着涡街或漩涡群摇滚前进使紊动强度大为增加, 助长更大的局部冲深, 大约为正常水流冲深的 1.5~2.0 倍。毛昶熙<sup>[7]</sup>提出环流流速相对比值可作为河道主流速或  $q$  冲深河床的附加值, 即用顺直河道冲刷公式计算值再加上环流速比数作为弯曲航道冲深的公式, 即:

$$T_b = \frac{0.1q}{\sqrt{d}(h/d)^{\frac{1}{6}}} \left( 1 + \frac{0.9B}{B+r_2} \right) \quad (5)$$

式中:  $T_b$  为冲刷深度(m);  $q$  为单宽流量( $m^2/s$ );  $d$  为泥沙粒径(m);  $h$  为冲前水深(m);  $B$  为河水

面宽度(m);  $r_2$  为凹岸的弯曲半径(m)。

根据式(5)计算出沿河宽各点的冲刷深度, 表 3 为最危险断面 0+644 对应的岸坡河床沿河宽方向的实际冲刷深度, 由此绘出冲刷后岸坡计算模型。B3 代表河床距离岸坡坡脚水平距离为 3 m。

表 3 计算断面 0+644 河床冲刷深度

位置	$v_{max}/(m/s)$	$\bar{v}/(m/s)$	$\Delta h/m$	$h/m$	$q/(m^2/s)$	$T_b/m$
B0	1.693	1.451	0.027	7.817	11.342	9.679
B3	1.724	1.478	0.026	7.816	11.552	9.858
B6	1.725	1.479	0.024	7.814	11.557	9.863
B9	1.743	1.494	0.023	7.813	11.673	9.962
B12	1.762	1.510	0.022	7.812	11.796	10.067
B15	1.785	1.530	0.021	7.811	11.951	10.200

冲刷深度随流量增大而加大, 图 8 为不同流量对应的冲深后岸坡位置。

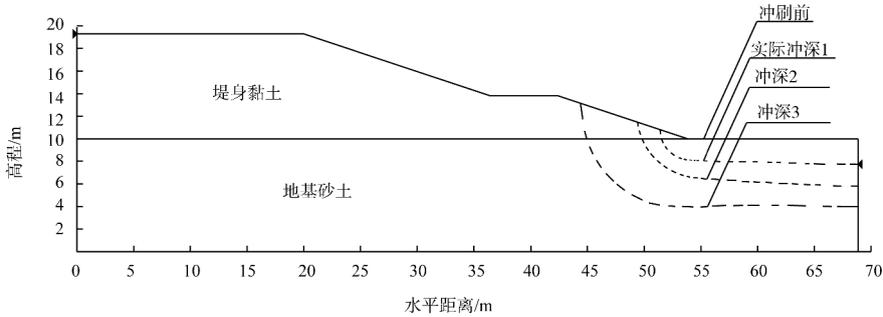


图 8 不同冲深岸坡位置

#### 3.2 冲刷后岸坡稳定计算分析

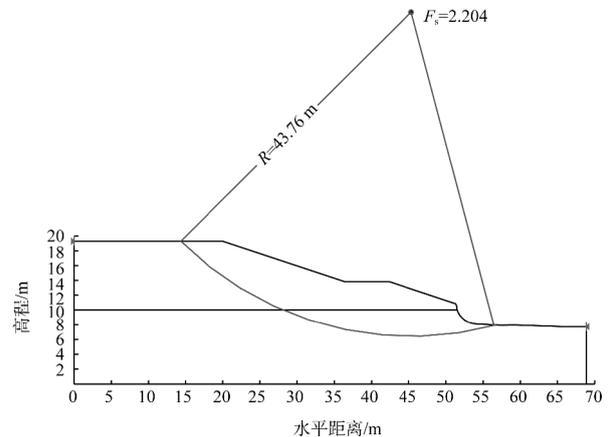
计算该弯曲河段岸坡在不同冲深时的岸坡稳定岸坡稳定系数, 结果见表 4。

表 4 不同冲深时岸坡稳定安全系数

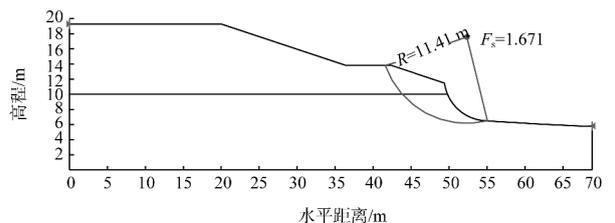
工况	最小安全系数 $F_s$
冲刷前	2.426
实际冲深 1	2.204
冲深 2	1.671
冲深 3	0.778

从表 4 可以看出, 河床岸坡受水流冲蚀淘刷, 冲刷后岸坡稳定系数明显降低; 冲深越大, 岸坡整体稳定系数越小, 当冲深达到一定程度时, 岸坡最小稳定安全系数小于 1, 整体失稳坍塌, 对航运带来不利的影响。

图 9 为不同冲深情况下岸坡最危险滑弧位置, 图中  $F_s$  为最小安全系数。



a) 冲深1岸坡



b) 冲深2岸坡

(下转第 147 页)