

沿河公路弯道水流的数值模拟

龚波¹, 林小平², 甘明星³

(1. 浙江大学, 浙江 杭州 310000; 2 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 200092;

3 昆明理工大学 交通工程学院, 云南 昆明 650224)

摘要: 研究弯道水流的三维流场有助于认识沿河公路路基的冲刷机理并制定相应的防护措施, 从而提高路基抗水毁的能力. 采用标准 k ϵ 模型对圆心角为 120° 弯道的三维流场进行了合理模拟, 并得出了河床剪应力的分布特征, 为路基冲刷分析和合理防护措施的制定奠定了基础.

关键词: 弯道水流; 公路路基; 冲刷机理

中图分类号: U442.32 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-855X(2006)01-0098-05

Numerical Simulation of River Bends Flow along Highways

GONG Bo¹, LIN Xiaoping², GAN Mingxing³

(1 Zhejiang University Hangzhou 310000 China

2 Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Education Ministry, Tongji University, Shanghai 200092, China

3 School of Transportation Engineering, Kunming University of Technology, Kunming 650224, China)

Abstract Study on the three-dimensional flow field in the vicinity of river bends is helpful to understand the mechanism of subgrade scour along the bends. Therefore, reasonable precautionary measures are presented and the ability of prevention of subgrade scour is enhanced. Standard model is used in the present study to numerically simulate the flow field of river bends. The calculated results are in good agreement with experimental data. The distribution of shear stress is also obtained from the numerical simulation, which consequently lays a foundation for the analysis of subgrade scour and establishment of rational preventive measures.

Key words bend flow; highway subgrade; erosion mechanism

0 引言

近年来,我国公路建设事业高速发展,山区高等级公路也开始大规模地建设.山区公路由于地形限制,不少路段与河道并行,一面傍山,一面临河,顺河谷一侧修筑半填半挖的路基,或在山区河流的开阔河谷地段沿河堤修筑路基,使路基的一侧成为山区河流的河岸.由于天然河道一般都是弯曲的,在河流弯道中,因环流的存在导致凹岸冲刷、凸岸淤积,沿河湾凹岸的公路路基边坡和坡脚将受到水流的淘刷,有可能将沿河路基边坡的坡脚淘空造成路基坍塌,带来水毁损害,严重影响行车安全^[1].

为提高沿河路基的抗水毁能力,保障行车安全,研究弯道水流的三维绕流流场及路基的冲刷机理非常必要.对此,国内外学者^[2~11]有的采用解析法或模型实验进行分析,但实际上,解析法难度很大,模型试验费用高、周期长,全面采用并不可行,而现代数值模拟技术的迅速发展为本研究提供了一条更加可行的途径.本文针对典型中心角为 120° 的弯道,应用数值模拟手段,通过系统的计算机仿真模拟,分析在一定水深、流速、流向等条件下弯道附近流场的分布情况及河床的冲刷机理,为沿河公路路基水毁机理的认识和相关防护措施的制定奠定了基础.

收稿日期: 2005-03-28

第一作者简介: 龚波 (1967.5~), 男, 硕士, 经济师. 主要研究方向: 交通运输管理. E-mail: kmgongb@163.com

1 控制方程及边界条件

1.1 控制方程

1) 连续性方程

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

2) 动量方程

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{1}{Q} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{Q} \frac{\partial S_{ij}}{\partial x_j} + F_i$$

式中 u_i ($i = 1, 2, 3$) 为速度分量; Q 为流体密度; F_i 为单位体积的重力; Q = 流体密度; p = 压力. 湍应力 S_{ij} 通过 $k-\epsilon$ 湍流模型求得:

$$S_{ij} = Q \mu_t \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] - \frac{2}{3} T_i \delta_{ij}$$

$$T_i = C_L k^2 / E$$

湍动能 k 和耗散率 E 由以下方程确定:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial (u_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{T_i}{R_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G - E$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial (u_j E)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{T_i}{R_E} \frac{\partial E}{\partial x_j} \right) + (C_{1E} G - C_{2E} E) \frac{E}{k}$$

式中的 G 为湍动能产生项, 表达式为: $G = \nu_t [(\partial u_i / \partial x_j) + (\partial u_j / \partial x_i)] (\partial u_i / \partial x_j)$

上述方程中, $C_L, C_{1E}, C_{2E}, R_k, R_E$ 均为经验常数, 取值见表 1

1.2 模型方程的离散格式

为了方便方程离散, 将模型控制微分方程写成通用形式:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho U) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} (\Gamma \frac{\partial U}{\partial x_j}) + S$$

式中, Γ 是扩散系数, S 为源项, 对应于特定的 U (如 U 分别取体积分数、速度、紊动能及其耗散率), Γ 和 S 分别有其对应的形式.

本文采用的数值离散方法为有限体积法 (FVM), 网格划分使用交错网格, 时间差分采用全隐式格式, 非计算网格点处变量 U 值, 用幂函数插值格式.

离散方程的求解采用 ADI 算法, 数学模型的求解采用 PISO 算法.

1.3 模型近壁条件

固壁边界采用的函数处理方法, 具体为:

$$\frac{U_p}{U^*} = \frac{1}{J} \ln \left(\frac{E Q_p U^*}{L} \right) - S_B$$

式中, U_p 是近壁面网格点的速度; U^* 为摩阻速度; y_p 为网格点 P 到壁面的距离; k 为卡门常数 (0.42); E 表征粗糙率的参数, 对光滑壁面, $E = 9.8$; S_B 为粗糙修正函数, 表达式为 $S_B = \frac{1}{J} \ln(1 + C_{ks} k_s^+)$, 其中 C_{ks} 为粗糙常数, 在 0 和 1 之间取值, k_s^+ 为边壁平均粗糙高度. 计算中边壁平均粗糙高度取为 0.003.

2 弯道附近三维流场及路基冲刷分析

2.1 计算模型

由于河流形态不同, 河湾特征各异, 因而计算模型不应只针对某一个具体的河湾建立, 而应当考虑弯曲河流

表 1 经验常数取值表

Tab 1 Experimental constants

C_L	C_{1E}	C_{2E}	R_k	R_E
0.09	1.44	1.92	1.0	1.3

的共性,即采用概化模型. 本文计算时采用的概化模型具有的特征为: ¹ 流速恒定; ^o 弯道为圆形曲线,其中心线半径 R 一定; [»] 横断面为矩形断面(即岸壁边坡系数为 0),断面尺寸沿程不变,侧壁与河床固定光滑.

为便于与试验结果对比,弯道模型的选取(如图 1)与试验模型严格对应,弯道宽度为 $B = 80\text{ cm}$,弯道进口上游和出口下游直段稳定段的长度为 650 cm ,可认为弯道进口来流为均匀流,弯道模型的圆心角 H 为 120°

2 2 初始条件及边界条件

计算的初始流速为 0.135 m/s 边界条件为: 速度入口、OUTFLOW 出口、壁面取固壁条件.

2 3 计算结果及分析

运用标准 $k-\epsilon$ 模型对弯道附近三维湍流流场进行模拟, 所得结果如图 2~ 7 所示. 其中图 2 为计算网格; 图 3~ 6 所示为流场的一些基本特征量.

从流速分布来看, 我们得出如下结论:

- 1) 弯道上游断面处的流速分布较为均匀;
- 2) 从弯道进口处的流速分布看, 主流偏向河槽凸岸;
- 3) 进入弯道后, 主流偏向河槽凸岸, 大约在弯顶 ($H = 60^\circ$) 附近, 内外侧流速相差差不多了, 从此主流已开始偏离凸岸;
- 4) 从弯顶到弯道下游, 主流偏离凸岸越来越明显, 在弯道出口段最明显;
- 5) 在弯道出口流速分布不均匀, 凹岸侧的流速大, 凸岸侧流速偏小, 可以推知, 弯道凸岸侧存在回流区.

从河床剪应力分布(图 6)来看:

弯道存在两个高切应力区: 一个高切应力区在凸岸, 从进口断面 ($H= 0^\circ$) 到弯顶断面 ($H= 60^\circ$) 之间. 可以预测, 这个区域的泥沙颗粒将从进口断面向弯顶断面的凸岸快速移动(滚动、滑动), 逐渐形成凸岸一侧舌状的堆积体. 舌状堆积体不断向下游延伸, 在下游形成深潭死水区. 另一个高切应力区出现在凹岸, 大约从弯顶 ($H= 60^\circ$) 到出口断面及其下游. 这里的泥沙颗粒将从弯顶起, 开始沿凹岸向下游移动, 到出口断面附近, 移动速度和参加移动的泥沙数量逐渐增大, 形成一条沿着凹岸大约从弯顶开始, 逐渐加深加宽的冲沟, 在出口断面附近形成最大深度和最大宽度, 在弯道出口断面下游冲沟才逐渐变浅, 直到出口下游一定距离处, 冲沟才消失. 这两个高切应力区将直接影响沿河公路路基的稳定性, 致使其坡脚被冲刷淘空, 是沿河路基最易发生水毁的区域, 需采取有效措施(如挡墙、丁坝)加以防护.

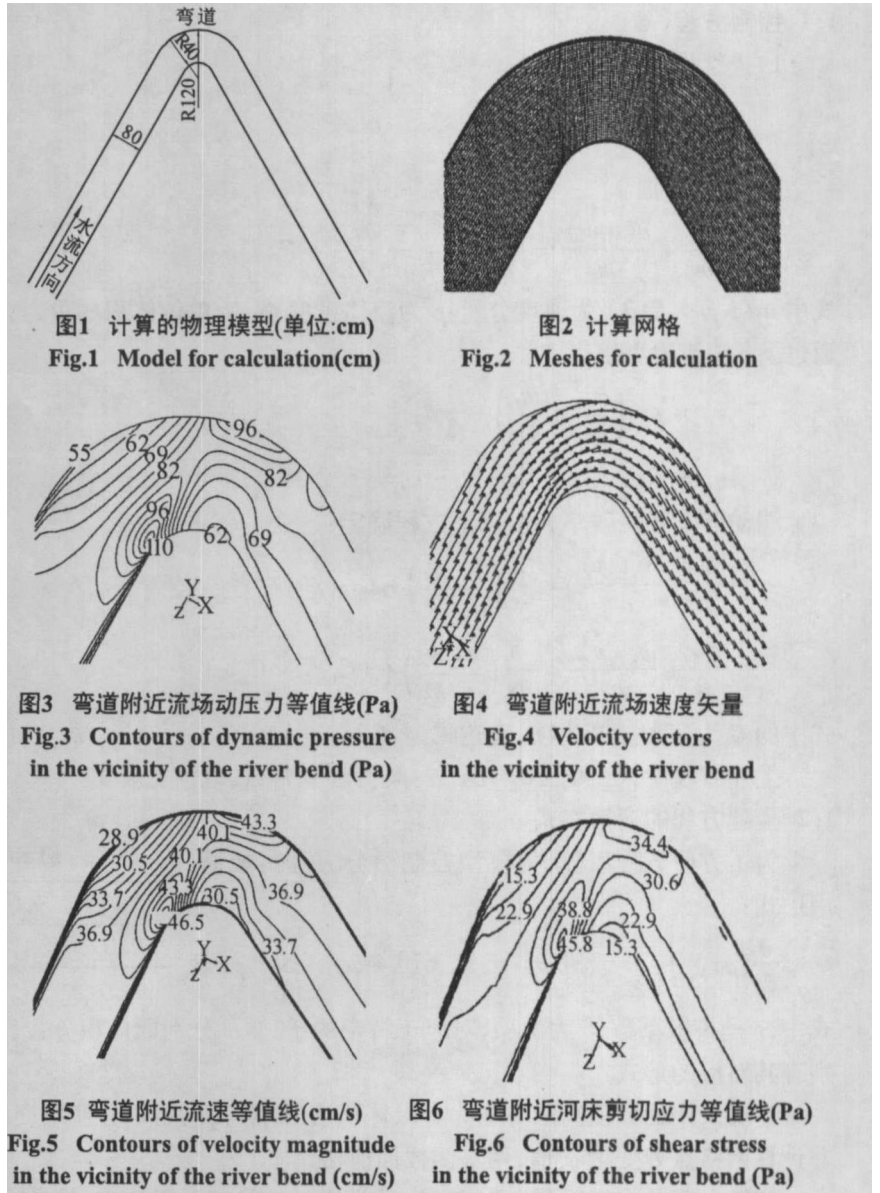


图1 计算的物理模型(单位:cm)
Fig.1 Model for calculation(cm)

图2 计算网格
Fig.2 Meshes for calculation

图3 弯道附近流场动压力等值线(Pa)
Fig.3 Contours of dynamic pressure in the vicinity of the river bend (Pa)

图4 弯道附近流场速度矢量
Fig.4 Velocity vectors in the vicinity of the river bend

图5 弯道附近流速等值线(cm/s)
Fig.5 Contours of velocity magnitude in the vicinity of the river bend (cm/s)

图6 弯道附近河床剪切应力等值线(Pa)
Fig.6 Contours of shear stress in the vicinity of the river bend (Pa)

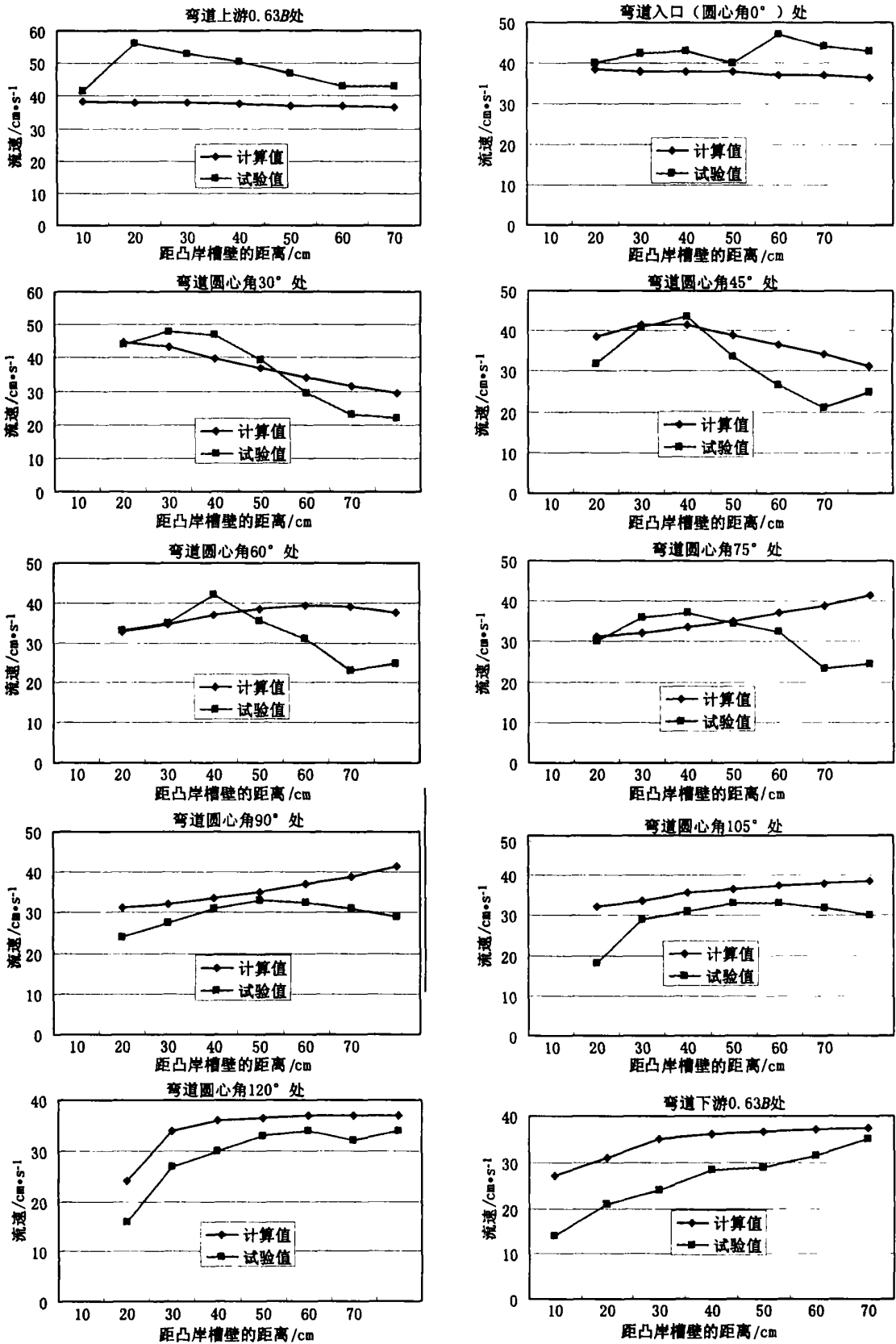


图7 弯道各断面流速计算值与试验值对比

Fig.7 Comparison of velocity magnitude between calculation and experiment in different transects of river bends

3 结语

弯道附近的流场结构非常复杂. 研究弯道附近的流场分布, 有助于进一步了解沿河路基的冲刷机理, 进而采取有效的防护措施. 为此, 本文采用标准 $k-\epsilon$ 模型对沿河公路弯道水流的湍流流场进行模拟, 取得了较为合理的结果, 并针对水流对河床的冲刷给出了弯道附近床面的剪切应力分布, 为沿河公路路基水毁机理的认识和相关防护措施的制定奠定了基础.

参考文献:

- [1] 高东光. 公路与桥梁水毁防治技术 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2002 108~ 125.
- [2] 董耀华. 弯道水流的基本特征及数值模拟 [J]. 长江科学院院报, 1996 (3): 25~ 29.
- [3] CHN L Y, KWAN T L. Bed Topography and Sediment Sorting in Channel Bend with Unsteady Flow [J]. Journal of Hydraulic Engineering 1995, 121(8): 591~ 599.
- [4] JIAN Y, MCCORQUODALE J A. Simulation of Curved Open Channel Flows by 3D Hydrodynamic Model [J]. Journal of Hydraulic Engineering 1998, 124(7): 687~ 698.
- [5] WEIM W, WOLFGANG R, WOLFGANG M. Thomas Wenka. 3D Numerical Modeling of Flow and Sediment Transport in Open Channel [J]. Journal of Hydraulic Engineering 2000, 126(1): 4~ 16.
- [6] AHAMED A, KASSEM M. Hanif Chaudhry. Numerical Modeling of Bed Evolution in Channel Bends [J]. Journal of Hydraulic Engineering 2002, 128(5): 507~ 514.
- [7] WILSON C A M E, BOXALL J B, GUYMER I et al. Validation of a Three-Dimensional Numerical Code in the Simulation of Pseudo-Natural Meandering Flows [J]. Journal of Hydraulic Engineering 2003, 129(10): 758~ 768.
- [8] BUIM D, THOMAS W N, WOLFGANG R. Numerical Modeling of Bed Deformation in Laboratory Channels [J]. Journal of Hydraulic Engineering 2004, 130(9): 894~ 904.
- [9] WENNIFER G D. Simulation of Flow and Mass Dispersion in Meandering Channels [J]. Journal of Hydraulic Engineering 2004, 130(10): 964~ 976.
- [10] WORMLEATON P R, HEY R D, SELLIN R H J et al. Behavior of Meandering Overbank Channels with Graded Sand Beds [J]. Journal of Hydraulic Engineering 2004, 130(10): 964~ 976.
- [11] ZARRATI A R, TAMAIN, JIN Y C. Mathematical Modeling of Meandering Channels with a Generalized Depth Averaged Model [J]. Journal of Hydraulic Engineering 2005, 131(6): 467~ 475.