

河渠弯道缓流水面曲线计算探讨

刘曾美¹, 吴俊校², 黄国如¹

(1. 华南理工大学 建筑学院, 广东 广州 510640; 2. 广东省水利厅建管中心, 广东 广州 510600)

摘要: 明渠与河道中的弯道水流多为缓流, 生产实践部门或因技术欠缺, 或因嫌其复杂, 常常忽略或不考虑弯道的水流特点, 从而可能导致弯道水面线计算成果出现较大误差. 本文导出了弯道缓流的纵向和横向水面曲线计算式, 提出了纵向水面线的简易计算方法. 通过计算实例比较了有无考虑弯道水流特点所导致的结果差异, 分析了水流缓急程度、弯道弯曲程度等对纵向和横向水面曲线计算结果的影响. 结果表明, 相同弯道出口水位, 有无考虑局部水头损失所计算的弯道入口水位差异, 与水流缓急状况有显著的正相关关系, 而与曲率的正相关关系不显著; 弯道最大横向水面超高值与水流缓急状况和弯道弯曲程度均密切相关.

关 键 词: 弯道水流; 缓流; 纵向水面线; 最大横向水面超高

中图分类号: TV133.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-640X(2008)02-0054-06

Computation of water surface curve of slow flow in meandering river channel

LIU Zeng-mei¹, WU Jun-xiao², HUANG Guo-ru¹

(1. School of Architecture and Civil Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. Center for Supervision in Construction, Guangdong Province Water Conservancy Bureau, Guangzhou 510600, China)

Abstract: In the open canal and river, the most of water flow in the meandering channel is slow flow. Owing to lack of technology or computational complexity, it is very likely to cause a big error in the computing result of water surface line in curving watercourse because of neglecting or ignoring the characteristic of slow flow in the meandering channel. This thesis educes the computation formula for lengthways and transverse water surface lines of slow flow in the meandering channel, and introduces a simple computing method of lengthways water surface line. Moreover, by examples, the thesis compares the results of lengthways water surface line considering and neglecting the characteristic of slow flow in the meandering channel, and analyzes how the water flowing speed and the bend degree of the meandering channel influence the lengthways and transverse water surface line. It is concluded that for the same outlet water line of the meandering channel, the difference of inlet water line computed by considering or not considering the local loss of water energy has remarkable positive correlativity with water flowing

收稿日期: 2007-07-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10272062)

作者简介: 刘曾美(1970-), 女, 湖北石首人, 讲师, 主要从事水文水资源和水利计算的教学与科研工作.

E-mail: liuzm@scut.edu.cn

speed, but just a little with the bend degree of the meandering channel; and the maximum transverse water superelevation is highly interrelated with both water flowing speed and the bend degree of the meandering channel.

Key words: meandering channel flow; slow flow; lengthways water surface line; maximum of transverse water superelevation

水流流经弯道时,不仅受重力作用,还受离心惯性力的作用,使弯道水流产生凹岸高、凸岸低的横向自由水面(称为弯道平衡水面),形成横向水面超高;此外,水头损失比同等长度直线河渠也要大一些,主要原因是弯道水流产生了螺旋运动,水流紊动强度有所变化,在弯道顶点下游靠凸岸边,有时会发生水流分离现象,从而产生漩涡^[1,2].如果弯道水流属急流,河渠槽侧壁的偏转对水流有扰动作用,使下游自由表面形成一系列呈菱形交叉的扰动波,称为冲击波,冲击波的作用又会在弯道平衡水面基础上加大横向水面的超高^[2].不过,天然河道和人工河渠(不包括泄水建筑物)中多属缓流,本文只讨论河渠弯道缓流.弯道水流的水面变化非常复杂,关于河渠弯道水流的研究成果并不少见^[3-12].但在防洪减灾的河道堤防整治设计中,推求河道水位的沿程变化,以满足工程设计为目的,不可能也没有必要完全再现河道水位的微观变化.因此,需要寻找适于生产实践中实用的弯道缓流的水面线计算方法.目前,生产实践部门一方面由于技术水平的制约,另一方面由于防洪减灾任务时间比较紧迫,很少考虑弯道缓流的水流特点.在推求河渠弯道水面线时,往往由于没有现存的考虑弯道的水面线计算公式而直接应用河道水面线计算公式(令局部水头损失系数为零),或应用忽略局部水头损失的明渠恒定非均匀渐变流水面线计算公式,并且也很少注意弯道水流的横向水面超高问题.对平原地区而言,在河渠弯道弯曲不大的情况下,其纵向水面线计算结果的误差一般较小,且横向水面超高较小可以忽略;但对丘陵、山区河渠而言,弯道较大且河床坡度较陡,其纵向水面线计算结果的误差常较大,且横向水面超高也较大,因此,需考虑弯道的水力特性.本文将导出弯道缓流的纵向和横向水面曲线计算式,并提出纵向水面线的简易计算方法,并通过计算实例比较有无考虑弯道水流特点所导致的差异,分析水流缓急程度、弯道弯曲程度等对纵向和横向水面曲线结果的影响.

1 弯道缓流水面线计算式

弯道水流同时存在着纵向和横向流动,所以不仅要考虑局部水头损失的纵向水面变化规律,而且还要考虑横向水面超高.

1.1 弯道缓流纵向水面线计算式

某河流弯道如图1所示,设弯道上游入口断面1-1和下游出口断面2-2的水深分别为 h_1 和 h_2 ,断面平均流速分别为 v_1 和 v_2 ,河底高程分别为 z_{01} 和 z_{02} ,断面1-1和断面2-2的水流都符合渐变流条件.因此,可对河流弯道的上、下游断面建立如下能量方程:

$$z_{01} + h_1 \cos \theta + \frac{p_a}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_{02} + h_2 \cos \theta + \frac{p_a}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_f + h_j \quad (1)$$

式中: θ 为河渠底坡与水平轴的夹角,设 z_1 和 z_2 为弯道入口断面和出口断面的水位,则有 $z_1 = z_{01} + h_1 \cos \theta$, $z_2 = z_{02} + h_2 \cos \theta$; p_a 为水面大气压强; α_1, α_2 分别为断面1-1和2-2的动能修正系数; h_f 为弯道内(断面1-1和断面2-2之间)的沿程水头损失, $h_f = \frac{Q^2}{K^2} l$, l 为弯道的长度(断面1-1、2-2之间的距离), K 为流量模数,一般取上、下游断面平均值;

h_j 为弯道内的局部水头损失, $h_j = \zeta \frac{v^2}{2g}$, $\zeta = \frac{2gl}{C^2 R} \left(1 + \frac{3}{4} \sqrt{\frac{b}{r_0}} \right)$, R, C 分别为水力半径和谢才系数,

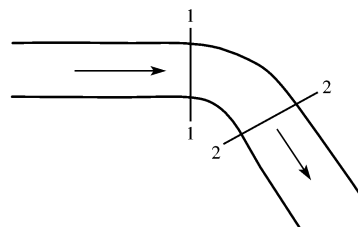


图1 河流弯道示意图

Fig. 1 Chart of meandering channel

取上、下游断面平均值, b 为河渠宽度, 对于梯形断面应为水面宽, r_0 为河渠弯轴线的弯曲半径. 只要河渠底坡 $i_0 < 0.1$, 可令 $\cos\theta \approx 1$, 常用铅垂水深代替垂直于槽底的水深. 令 $\alpha_1 \approx \alpha_2 = \alpha$, 则(1)式可化简为:

$$z_1 + \frac{\alpha v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{\alpha v_2^2}{2g} + \zeta \frac{\bar{v}^2}{2g} + \frac{Q^2}{K^2} l \quad (2)$$

式中: $v_1^2 = \frac{Q^2}{A_1^2}$, $v_2^2 = \frac{Q^2}{A_2^2}$; 采用 $\bar{v}^2 = \frac{1}{2}(v_1^2 + v_2^2)$; $\frac{1}{K^2} = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{K_1^2} + \frac{1}{K_2^2}\right)$. 化简可得:

$$z_u + \left(\alpha - \frac{\zeta}{2}\right) \frac{Q^2}{2gA_u^2} - \frac{l}{2} \frac{Q^2}{K_u^2} = z_d + \left(\alpha + \frac{\zeta}{2}\right) \frac{Q^2}{2gA_d^2} + \frac{l}{2} \frac{Q^2}{K_d^2} \quad (3)$$

(3)式即为河渠弯道水面线的计算式, $\zeta = \frac{2gl}{C^2 R} \left(1 + \frac{3}{4} \sqrt{\frac{b}{r_0}}\right)$, 其中, R, C 取上下游断面平均值.

1.2 最大横向水面超高

在工程实际应用中, 主要关心水力要素的最大值, 常不考虑其变化过程, 本文主要研究其最大值的计算方法. 试验证明弯道横向水面最大超高出现在弯顶断面附近, 过了弯顶断面以后, 凹岸相对凸岸的超高逐渐减小, 直至弯道出口断面^[12].

当水流由直段进入弯段后, 由于惯性离心力的存在而使弯道水流产生从凸岸向凹岸逐渐升高的横向自由水面超高 Δh_1 . 计算公式为^[2, 11, 12]:

$$\Delta h_1 = \frac{v^2}{g} \ln \frac{r_2}{r_1} = \frac{v^2}{g} \ln \frac{r_0 + b/2}{r_0 - b/2} \quad (4)$$

式中: v 为断面平均流速; r_1, r_2 和 r_0 分别为凸、凹岸和河渠中心线的转弯半径; b 为河渠宽度.

此外, 还因弯段前直段水流的惯性作用顶冲凹岸时, 顶冲水流的横向分速 $v \cos \beta_1$ 的部分动能转变为势能, 能使凹岸水位升高值 Δh_2 为^[12]:

$$\Delta h_2 = \lambda \frac{(v \cos \beta_1)^2}{2g} \quad (5)$$

式中: β_1 为进口直段轴线与弯段凹岸交点之法线的交角; λ 为与 r_0/β_1 及边坡系数有关的系数, 可近似地取值为 1.

$$\text{所以弯道最大水面超高 } \Delta h \text{ 为: } \Delta h = \Delta h_1 + \Delta h_2 = \frac{v^2}{g} \ln \frac{r_0 + b/2}{r_0 - b/2} + \frac{(v \cos \beta_1)^2}{2g} \quad (6)$$

经物理模型试验, $\Delta h_1, \Delta h_2$ 计算值与试验值基本一致^[12].

2 弯道水面线计算的探讨

2.1 弯道缓流纵向水面线简易计算方法

由于考虑弯道局部水头损失后的水面线计算式(3)形式比较复杂, 无法直接应用原天然河道水面线计算公式及程序, 故生产实践部门常常忽略或不考虑弯道的水流特点, 从而导致计算结果有较大误差. 因此, 有必要寻求简化的计算方法来满足生产实践部门的需要.

上述纵向水面线计算式中, $h_f = \frac{Q^2}{K^2} l = \frac{\bar{v}^2}{C^2 R} l$, $h_j = \zeta \frac{v^2}{2g} = \frac{2gl}{C^2 R} \left(1 + \frac{3}{4} \sqrt{\frac{b}{r_0}}\right) \frac{\bar{v}^2}{2g} = \frac{\bar{v}^2}{C^2 R} l \left(1 + \frac{3}{4} \sqrt{\frac{b}{r_0}}\right)$, 代入(2)式, 则有:

$$z_1 + \frac{\alpha v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{\alpha v_2^2}{2g} + \frac{\bar{v}^2}{C^2 R} l \left(2 + \frac{3}{4} \sqrt{\frac{b}{r_0}}\right) \quad (7)$$

若令 $n_e^2 = n^2 \left(2 + \frac{3}{4} \sqrt{\frac{b}{r_0}}\right)$, 即: $n_e = n \sqrt{\left(2 + \frac{3}{4} \sqrt{\frac{b}{r_0}}\right)}$, 则 $C_e = \frac{1}{n_e} R^{1/6}$, $\frac{1}{C_e^2} = \frac{1}{C^2} \left(2 + \frac{3}{4} \sqrt{\frac{b}{r_0}}\right)$, 进而推出

$\frac{\bar{v}^2}{C^2 R} l \left(2 + \frac{3}{4} \sqrt{\frac{b}{r_0}} \right) = \frac{\bar{v}^2}{C_e^2 R} l = \frac{Q^2}{K_e^2} l$, 这里, n_e 可看作是弯道局部水头损失相等的直道的糙率系数, 故称为等价糙率系数, 相应地, C_e 称为等价谢才系数, K_e 称为等价流量模数, 于是(7)式可整理为:

$$z_1 + \frac{\alpha v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{\alpha v_2^2}{2g} + \frac{Q^2}{K_e^2} l \quad (8)$$

(8)式即为不计局部水头损失的天然水面线方程形式, 河段长度和河道断面尺寸均不变, 只是河道的糙率系数采用等价糙率系数, 河道的谢才系数采用等价谢才系数, 流量模数采用等价流量模数而已. 因此, 可以直接应用生产实践部门常用的不计局部水头损失(即令 $\zeta=0$)的天然河道水面线的计算公式和程序, 或应用忽略局部水头损失的明渠恒定非均匀渐变流水面线计算公式和程序来计算弯道的纵向水面线, 只不过河道的糙率系数应采用等价糙率系数 n_e . 亦即需要考虑弯道局部水头损失时, 弯道的糙率系数采用等价糙率系数 n_e ; 忽略弯道局部水头损失时, 弯道的糙率系数直接取河道的实际糙率系数 n .

2.2 最大横向水面超高的影响要素分析

经计算, $\sin\beta_1 = \frac{r_0}{b + \frac{r_0}{2}}$, 则弯道最大横向水面超高计算式(6)可以整理为如下形式:

$$\Delta h = \frac{v^2}{g} \left[\ln \left(1 + \frac{1}{\frac{r_0}{b} - \frac{1}{2}} \right) - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{2 \left(\frac{r_0}{b} + \frac{1}{2} \right)} \right)^2 + \frac{1}{2} \right] \quad (9)$$

由(9)式可知, 影响最大横向水面超高 Δh 的因子有表征水流缓急的平均流速 v 和表征弯曲程度的相对曲率半径 $\frac{r_0}{b}$. Δh 与 v^2 成正相关, 影响平均流速 v 的因素(如水深、水位和糙率等)都会影响 Δh 值; Δh 与 $\frac{r_0}{b}$ 成反相关, 而且在同一曲率半径下, b 愈小, Δh 值愈小; 同一河宽, 曲率半径 r_0 愈大, Δh 值愈小.

3 计算实例及分析

3.1 水流缓急对水面线的影响

某矩形断面小河道, 底宽 20 m, 存在着长度为 110 m 的弯道, 河道中心线曲率半径为 85 m, 弯道入口和出口断面的河底高程分别为 $\nabla 42.80$ m 和 $\nabla 42.25$ m, 弯道上下游底坡均为 5.0‰, 糙率为 0.025, 设计洪峰流量为 216 m³/s. 同一流量下水流相对缓急状态可用断面水位高低来反映, 现用简要计算方法分析弯道出口水位变化时弯道入口水位和横向水面超高的变化规律.

经计算, 上游临界底坡 $i_k = 6.1‰$, 大于实际底坡 5.0‰, 故弯道中水流为缓流. 分析弯道出口水位变化时的水面线还必须考虑与弯道下游水流的衔接. 当弯道下游水流为缓流或临界流时, 水流衔接平顺, 可直接由弯道出口水位推求弯道入口水位; 当弯道下游水流为急流时, 弯道缓流出弯道后将产生水跌, 水流自大于临界水深变为小于临界水深, 其间必经过临界水深 h_k , 在实际应用时可认为出弯道处水深为临界水深, 则由临界水深推求弯道入口水位. 因此, 讨论弯道出口水位大于等于临界水深时的水面线变化规律. 计算得弯道下游临界水深 $h_k = 2.28$ m, 则弯道下游临界水位 $z_{1k} = 44.53$ m, 如果下游水位小于临界水位时, 出弯道断面水位取为临界水位 44.53 m.

等价糙率系数 $n_e = n \sqrt{\left(2 + \frac{3}{4} \sqrt{\frac{b}{r_0}} \right)} = 0.025 \sqrt{\left(2 + \frac{3}{4} \sqrt{\frac{20}{85}} \right)} = 0.0384$. 为了便于比较是否考虑弯道局部水头损失带来的纵向水面线结果差异, 忽略弯道局部水头损失($n=0.025$)和考虑弯道局部水头损失($n_e=0.0384$)两种情况下, 不同弯道出口水位的弯道入口水位和横向水面超高见图 2 和图 3.

由图 2 可见, 是否考虑局部水头损失所计算的入口水位与水流缓急状况有关, 水流愈缓(即弯道出口水

位愈高),两种情况下的弯道入口水位差愈小;水流愈急(即弯道出口水位愈低),两种情况下的弯道入口水位差愈大.因此,只有水流很缓的时候才能忽略局部水头损失.由图3可见,最大横向水面超高也与水流缓急状况有关,水流愈缓,离心作用横向水面超高和惯性顶冲凹岸水面升高均愈小,则最大横向水面超高愈小;水流愈急,离心作用横向水面超高和惯性顶冲凹岸水面升高均愈大,则最大横向水面超高愈大.对大型河渠而言,最大横向水面超高一般很小,对水面线的计算影响不大,工程上常可忽略不计,但对山丘地区小型河渠而言,最大横向水面超高对水面线的计算影响较大,一般不能忽略不计,只有在水流很缓的状态下才可忽略不计.

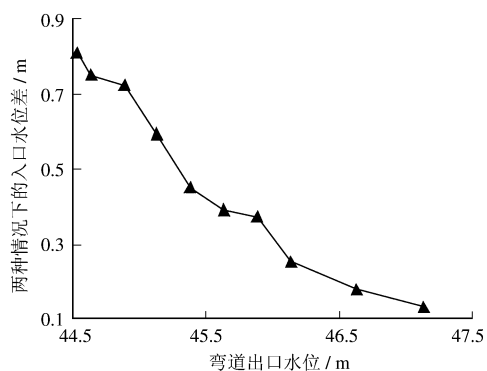


图2 两种情况下弯道入口水位差随弯道出口水位的变化

Fig. 2 Inlet water line changes with outlet water line under two flow regimes in meandering channel

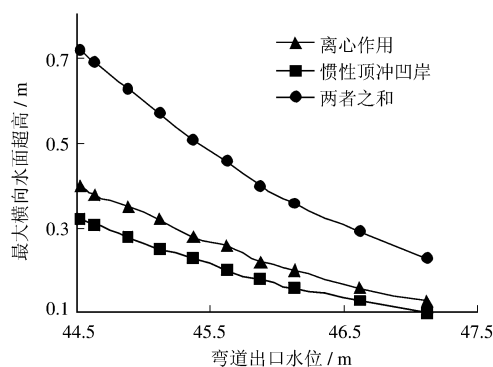


图3 最大横向水面超高随弯道出口水位的变化

Fig. 3 Maximum of transverse water superlevation changes with outlet water line in meandering channel

3.2 弯道弯曲程度对水面线的影响

在上例中,如果其它条件不变,只是把弯道中心线的曲率半径增大2倍, $r_0 = 170$ m,即减小弯道曲率,计算分析弯道曲率对水面线的影响,计算结果见图4和图5.

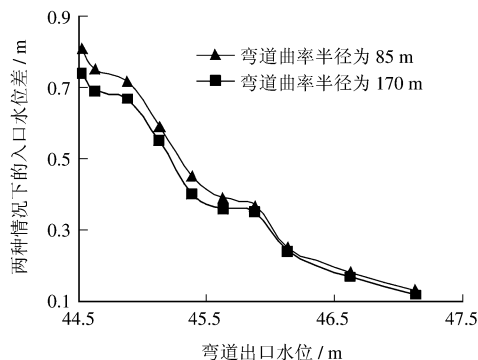


图4 不同曲率半径下弯道入口水位差随弯道出口水位的变化

Fig. 4 Inlet water line changes with outlet water line under two conditions of curvature radius in meandering channel

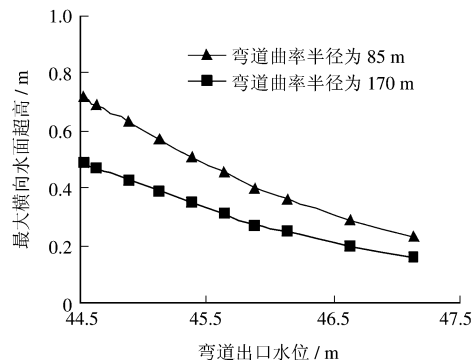


图5 不同曲率半径下最大横向水面超高随弯道出口水位的变化

Fig. 5 Maximum of transverse water superlevation changes with outlet water line under two conditions of curvature radius in meandering channel

由于曲率只与局部水头损失和超高计算有关,所以忽略局部水头损失情况下的入口水位不变;考虑弯道局部水头损失时,曲率半径增大,弯道入口水位只是略有减小,而最大横向水面超高则明显变小,尤其是离心作用产生的横向水面超高减小明显,而且是水流愈急,横向水面超高减小程度愈大.

4 结 语

本文导出了弯道缓流的水面线计算式,提出了弯道缓流纵向水面线的简易求解方法.并通过实例计算比较是否考虑弯道的水力特性导致的结果差异,可得出如下结论:

(1)相同弯道出口水位,在忽略局部水头损失与考虑局部水头损失情况下,计算的弯道入口水位差与水流缓急有显著的正相关关系,水流愈急,两者的弯道入口水位差愈大;而与弯道曲率的关系尽管是正相关但不显著.因此,只有在水流较缓的情况下才能忽略局部水头损失.

(2)弯道最大横向水面超高值与水流缓急和弯道弯曲程度均密切相关.水流愈缓,最大横向水面超高愈小;反之则横向水面超高愈大.弯道弯曲程度对最大横向水面超高影响显著,曲率愈大,最大横向水面超高愈大.对大型河渠而言,最大横向水面超高一般很小,对水面线的计算影响不大,在工程上常可忽略不计,但对山丘地区小型河渠而言,最大横向水面超高对水面线的计算影响较大,一般不能忽略不计,只有在水流较缓且弯曲不大的状态下才可忽略不计.

参 考 文 献:

- [1] 黄继忠,霍耀东,冯彩凤,等.南水北调中线工程弯道附加阻力损失规律的试验研究[J].武汉水利电力大学学报,1997,30(增刊):10-13.
- [2] 吴持恭.水力学[M].北京:高等教育出版社,2003.
- [3] 杨永全,汝树勋,张道成,等.工程水力学[M].北京:中国环境科学出版社,2005.
- [4] Anwar H O. Turbulent structure in a river bend[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 1986, 112(8): 657-669.
- [5] 刘月琴,万艳春.弯道水流紊动强度[J].华南理工大学学报(自然科学版),2003,31(12):89-93.
- [6] 董耀华.弯道水流的基本特性及数值模拟[J].长江科学院院报,1996,13(1):25-29.
- [7] 王平义.弯曲河道纵向垂线平均流速平面分布的研究[J].水动力学研究与进展,1994,9(3):267-275.
- [8] 刘月琴.弯曲型河流基本特性研究进展[J].人民珠江,2003,2:1-4.
- [9] 许建林,曹叔尤,方 铎.河流弯道蠕动的动量模式[J].成都科技大学学报,1992,(6):1-6.
- [10] 王平义.弯曲河道动力学[M].成都:成都科技大学出版社,1995.
- [11] 张红武,吕 昕.弯道水力学[M].北京:水利电力出版社,1993.
- [12] 张玉萍.弯道水力学研究现状分析[J].武汉水利电力大学学报,2000,33(5):35-39,80.