

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.01.012

杨坡,魏炳乾,胡红胜,等. 复式河槽水位流量计算误差分析及方法对比[J]. 水利水运工程学报, 2019(1): 94-101. (YANG Po, WEI Bingqian, HU Hongsheng, et al. Error analysis and method comparison for calculating stage-discharge relation in compound channel[J]. Hydro-Science and Engineering, 2019(1): 94-101. (in Chinese))

复式河槽水位流量计算误差分析及方法对比

杨坡¹, 魏炳乾¹, 胡红胜², 杨明阳¹

(1. 西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048; 2. 淮安市水利勘测设计研究院有限公司, 江苏 淮安 223005)

摘要: 水位流量关系是推算水面线的重要依据。复式河槽的水流漫滩时,直接运用曼宁公式计算水位流量关系会产生很大的误差,并会出现流量随水深增加而减小的不合理现象,为此分析了复式河槽垂线平均流速的横向分布及曼宁公式中流量-水深函数的单调性,探讨了这种误差及现象出现的原因;然后以实测资料为依据,对比分析了以曼宁公式为基础的水平分割法、垂直分割法、对角线分割法、湿周修正法及权重分割法与传统理论方法(谢汉祥法、河槽协同度法)计算复式河槽水位流量关系的精度,进而讨论了改进后的曼宁公式在复式河槽中的适用性。结果表明,主槽与滩地的流速差使漫滩水流发生横向运动,并在滩槽交界处形成大量的动量交换,其作用机理完全不同于单一河槽,故曼宁公式不能直接应用于复式河槽;复式断面的水力半径增长率与湿周增长率满足一定的条件时,曼宁公式中流量-水深函数单调递减,漫滩初期流量随水深增加而减小;对比不同计算方法的结果发现,湿周修正法精度最低而不推荐使用;水平分割法、垂线分割法、对角线分割法及权重分割法的精度与传统理论方法接近甚至更高,因此这些改进后的曼宁公式能够较好地适用于复式河槽。由于对角线分割法在所有方法中精度最高且计算简便,故计算复式河槽水位流量关系时推荐采用对角线分割法。

关键词: 复式河槽; 曼宁公式; 水位流量关系; 对角线分割法

中图分类号: TV133.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2019)01-0094-08

水位流量关系不仅是堤防、桥涵、闸坝及防洪工程设计的重要依据,而且在水文资料的收集和整编中有着重要的作用^[1-2]。平原地区的天然河槽长期受到泥沙淤积和水流的冲刷,多形成具有主槽和滩地的复式河槽。在洪水漫滩后,复式河槽过水断面形态的变化致使水流结构发生突变,主槽和滩地水体相互作用,在滩槽交界处形成动量交换和能量交换,因此很难准确计算复式河槽的水位流量关系。对此许多研究者依据试验研究和数值模拟提出了以下3类计算方法:

第1类为理论方法。Shiono等^[3]以雷诺平均的N-S方程为基础,沿水深方向积分得出了复式河槽垂向平均流速分布的解析式。许唯临^[4]借鉴Knight等的SKM法,将二次流项归并入雷诺切应力项,并将主槽和滩地的流速分布曲线直接相接,推导出一套不需联立求解系数方程组的漫滩水流流速和床面切应力分布的计算式。杨华等^[5-7]采用有限体积法对SKM模型的控制方程进行离散,得出了计算漫滩水流的数值解。谢汉祥等^[8-9]考虑滩槽间的动量交换,依据动量传输理论分别提出了漫滩水流的简化计算方法。Ackers^[10]分析了复式断面的阻力和形态对过流能力的影响,提出了协同度法;Tang^[11]基于能量概念又提出了计算复式河槽过流能力的新方法。这些方法计算准确,但结构复杂且计算量大,参数取值主要依赖于试验,故难以应用于实际。

收稿日期: 2018-05-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51479163); 陕西水利科技计划资助项目(2014skj-14); 陕西省教育厅科学研究计划项目(2013-09)

作者简介: 杨坡(1994—),男,陕西西安人,硕士研究生,主要从事治河工程及山洪灾害分析评价等研究。

E-mail: 1921554231@qq.com 通信作者: 魏炳乾(E-mail: weibingqian@xaut.edu.cn)

第2类为数值模拟。复式河槽的明渠水流具有三维流动的复杂性,数值模拟技术取得了重大进展。刘士和等^[12]采用 Thatchell 代数应力模型,对复式河槽粗糙度沿横向存在变化的流动进行了三维模拟;石荣荣等^[13]采用紊流模型中的雷诺应力模型(RSM)对非对称复式河槽水流的三维紊流进行了数值模拟,得出了滩槽交互区内的二次流、主流速分布和床面剪切力;林斌良等^[14]采用非线性 κ - ϵ 紊流模型和 Naot-Rodi 代数应力模型模拟了复式河槽的三维紊流。这些方法能够准确模拟某一水位或流量下的水流特性,但计算水位流量关系时的过程复杂。

第3类为经验公式。曼宁公式作为经典的水力学计算公式,因结构简单、计算准确而广泛应用于明渠水力计算,然而复式河槽和单一河槽的水流运动机理不同,因此适用于单一河槽的曼宁公式不能直接应用于复式河槽。Wormleation 等^[15-18]为提高曼宁公式在复式河槽中的适用性,提出了以曼宁公式为基础的断面分割法、权重分割法和湿周修正法,这些方法在复式河槽的水位流量关系计算中得到了广泛应用。

针对曼宁公式计算复式河槽水位流量关系时产生的误差及漫滩时出现流量随水深增加而减小的反常现象,本文通过分析复式河槽垂线平均流速的横向分布及曼宁公式中流量与水深的函数特性,对误差及反常现象出现的原因进行讨论;然后对比各种改进后的曼宁公式与传统理论方法的计算精度,进而论证改进后的曼宁公式在复式河槽水力计算中的适用性。

1 机理分析

1.1 问题引出

采用曼宁公式直接计算复式河槽的水位流量关系如图1所示。

由图1可见,水流漫滩前,曼宁公式计算的过流量与实测值相吻合;恰好漫滩时,计算值与实测值的偏差最大,且这种偏差随着水位的增加而不断减小;图中曲线的波浪段即为流量随水深增加而减小的不合理现象。分析该误差和现象产生的原因及如何解决便成为曼宁公式能否适用于复式河槽的重点。

1.2 复式河槽垂线平均流速的横向分布

根据英国科学与工程研究理事洪水水槽设备(SERC-FCF)的试验资料,对比分析单一河槽与复式河槽垂线平均流速的横向分布,通过分析复式河槽的水流结构来解释曼宁公式直接计算水位流量关系时产生较大误差的原因。试验水槽的断面形态如图2所示,图3为水流漫滩前(单一河槽)、漫滩后(复式河槽)垂线平均流速的横向分布。

由图3(a)可见,不同水位下,单一河槽垂线平均流速沿横断面分布较为稳定,除边壁附近外基本上没有横向的流速梯度,不存在动量交换,水流趋于均匀流,曼宁公式计算的过流量则与实测值相近,这与图1中水流漫滩前所得结果相符。

由图3(b)可见,复式河槽水流漫滩后,主槽流速大于滩地流速,滩槽间水体的流速差使滩槽交界面产生了垂向的漩涡,主槽和滩地间发生动量和能量交换,由于受到水流黏性和垂向漩涡的影响,滩槽交互区的水流将发生横向运动并形成二次流。曼宁公式由于没有考虑滩槽水体流速差对过流能力的影响,故计算值较实际偏小,这也解释了图1中水流刚漫滩时计算误差较大的原因。由图3(a)还可见,随着水深的增大,滩槽间的流速差逐渐减小,滩槽水体间的动量交换随着水深的增大而不断增强,水体间的相互混掺与碰撞增大了交界处的紊流强度,断面流速分布趋于均匀。因此图1中的计算结果与实测值的偏差随水深增加而减小。

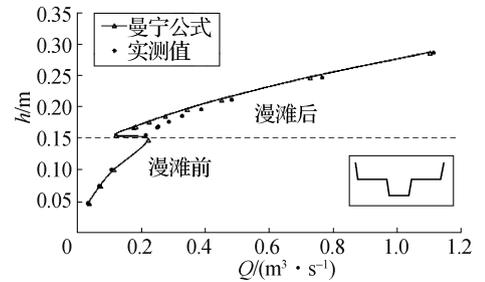


图1 曼宁公式计算的水位流量关系与实测值的对比

Fig. 1 Comparison between measured value and relationship of water level and flow calculated by Manning formula

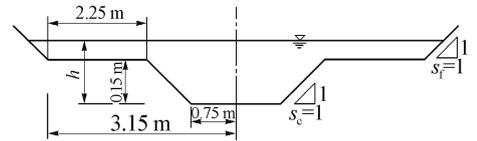


图2 FCF02 试验水槽断面形态

Fig. 2 Section shape of FCF02 compound channel

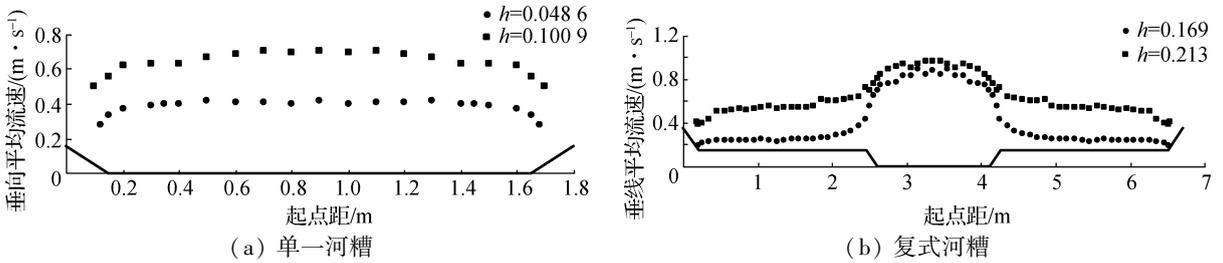


图3 不同水位的单一河槽和复式河槽垂线平均流速的横向分布

Fig. 3 Transverse distribution of average vertical velocity in single channel and compound channel under different water levels

1.3 曼宁公式中流量-水深的函数特性

以 χ 和 A 分别表示复式河槽中水深为 h 时的湿周和过水断面面积,曼宁公式^[19]为:

$$Q = AR^{\frac{2}{3}}n^{-1}J^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$R = A/\chi \quad (2)$$

式中: Q 为河槽流量; n 为复式河槽综合糙率; J 为水力坡降; R 为水深为 h 时的水力半径;其中 n, J 为试验水槽固定参数,不受水位影响。

合并式(1)和式(2)得:

$$Q = A^{\frac{5}{3}}\chi^{-\frac{2}{3}}n^{-1}J^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

将式(3)两边同时对水深 h 取微分得:

$$\frac{dQ}{dh} = \frac{2}{3}J^{\frac{1}{2}}n^{-1} \left(\frac{A}{\chi}\right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{5}{2} \frac{dA}{dh} - \frac{A}{\chi} \frac{d\chi}{dh}\right) \quad (4)$$

上式中,若 $dQ/dh > 0$,表明 Q 随 h 增加而增加,即函数 $Q = Q(h)$ 为单调递增函数;但由上式也可看出,当等式右边小于零,即有

$$\frac{5}{2} \frac{dA}{dh} - \frac{A}{\chi} \frac{d\chi}{dh} < 0 \quad (5)$$

则 $dQ/dh < 0$,表明函数 $Q = Q(h)$ 在自变量的定义域 $[h, h_{\max}]$ 中并不全是单调递增函数。

消去式(5)中的 dh ,得:

$$\frac{dA}{A} < 0.4 \frac{d\chi}{\chi} \quad (6)$$

将式(6)差分得:

$$\frac{\Delta A}{A} < 0.4 \frac{\Delta \chi}{\chi} \quad (7)$$

令水流恰好漫滩时的水力半径为 $R_0 = A/\chi$;水位升高 Δh 后 $R^* = (A + \Delta A)/(\chi + \Delta \chi)$;那么

$$\Delta R = R^* - R_0 = \frac{A + \Delta A}{\chi + \Delta \chi} - \frac{A}{\chi} = \left(\frac{\Delta A}{\Delta \chi} - \frac{A}{\chi}\right) / \left(1 + \frac{\chi}{\Delta \chi}\right) \quad (8)$$

进而有:

$$\frac{\Delta A}{\Delta \chi} = \frac{A}{\chi} + \Delta R \left(\frac{\chi + \Delta \chi}{\Delta \chi}\right) \quad (9)$$

将式(2)、式(9)代入式(7)得:

$$\frac{\Delta R}{R_0} + 0.6 \left(\frac{\Delta \chi/\chi}{1 + \Delta \chi/\chi}\right) < 0 \quad (10)$$

式中: $\Delta R/R_0, \Delta \chi/\chi$ 分别为漫滩水流升高 Δh 时水力半径和湿周的增长率。

由上可知,当式(10)成立时,则式(4)中 $dQ/dh < 0$,即流量随水深增加而减小。水流刚漫滩时,过水面积虽有所增加,但湿周突然增大,水力半径骤然减小^[19],其湿周与水力半径的变化率满足式(10),因此图1中的水位流量关系曲线在刚漫滩时出现流量随水深增加而减小的现象。

2 不同方法的对比与分析

由上文分析可得,结构简单且计算简便的曼宁公式已不能准确计算复式河槽的水位流量关系。传统理论方法如谢汉祥法、协同度法等,其计算结果精度较高^[20],但由于结构复杂,计算繁琐而未能广泛应用于实际。为实现高效地计算复式河槽水位流量关系,多种以曼宁公式为基础的经验公式法相继提出,本文通过对比这些改进后的曼宁公式与传统理论方法的计算精度,进而探讨改进后的曼宁公式在复式河槽水力计算中的适用性。

2.1 计算方法

2.1.1 经验公式法

(1) 断面分割法 Wormleation 考虑到滩槽流速差对过流能力的影响,故将滩槽分割为若干个单式断面,针对每一单式断面采用曼宁公式进行计算。根据不同的分割形式断面分割法主要有垂直分割法、水平分割法和对角线分割法,图4中虚线1-1,1-2和1-3分别表示这3种分割线。

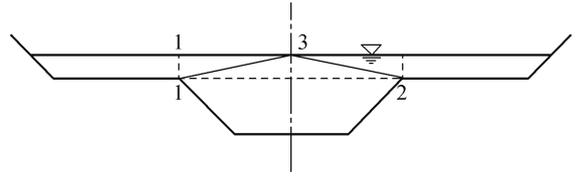


图4 复式河槽断面分割线示意

Fig. 4 Different segmenting lines of compound section

3种不同分割法的计算式如下:

$$\text{垂直分割法: } Q = V_{\text{垂f}}A_{\text{垂f}} + V_{\text{垂m}}A_{\text{垂m}} \quad (11)$$

$$\text{水平分割法: } Q = V_{\text{水f}}A_{\text{水f}} + V_{\text{水m}}A_{\text{水m}} \quad (12)$$

$$\text{对角线分割法: } Q = V_{\text{对f}}A_{\text{对f}} + V_{\text{对m}}A_{\text{对m}} \quad (13)$$

式中: $V_{\text{垂f}}, V_{\text{水f}}, V_{\text{对f}}$ 与 $V_{\text{垂m}}, V_{\text{水m}}, V_{\text{对m}}$ 分别为不同分割法的滩地和主槽的流速; $A_{\text{垂f}}, A_{\text{水f}}, A_{\text{对f}}$ 与 $A_{\text{垂m}}, A_{\text{水m}}, A_{\text{对m}}$ 分别为不同分割法的滩地和主槽的面积。

(2) 权重分割法 上节述及的垂线分割法与水平分割法考虑的因素不同,得出的平均流速也不同,Lambert 为平衡这两种方法的差异,在其基础上提出了加权平均法。令垂线分割法的加权系数为 ζ ,则水平分割法为 $1 - \zeta$ 。计算式如下:

$$V_{\text{权m}} = \zeta V_{\text{垂m}} + (1 - \zeta) V_{\text{水m}} \quad (14)$$

$$V_{\text{权f}} = \zeta V_{\text{垂f}} + (1 - \zeta) V_{\text{水f}} \quad (15)$$

$$Q = V_{\text{权f}}A_f + V_{\text{权m}}A_m \quad (16)$$

式中: A_m, A_f 分别为主槽、滩地的总面积。

(3) 湿周修正法 Khatua 考虑水流漫滩后湿周突变引起了滩槽水体的相互作用,故采用曼宁公式计算时将主槽湿周适当增加,滩地湿周适当减小。具体计算式为:

$$Q = \frac{\sqrt{J}}{n_m} A_m^{\frac{5}{3}} (P_{mc} + \chi_{mc})^{-\frac{2}{3}} + \frac{\sqrt{J}}{n_f} A_f^{\frac{5}{3}} (P_f + \chi_f)^{-\frac{2}{3}} \quad (17)$$

$$P_m = \chi_m \left[\frac{100}{(100 - S_f)} \frac{A_m}{A_0} \right] - 1 \quad (18)$$

$$P_f = \chi_f \left[\frac{100}{S_f} \left(\frac{A_m}{A_0} - 1 \right) - 1 \right] \quad (19)$$

$$S_f = 48 \left(\frac{B}{b} - 0.8 \right)^{0.289} \left(2 \frac{H-h}{H} \right)^{\frac{1}{0.75 \exp(0.38B/b)}} \quad (20)$$

式中: χ_m, χ_f 分别为主槽和滩地的湿周; P_m, P_f 分别代表主槽和滩地对应的交界面长度; n_m, n_f 分别为主槽和滩地的糙率; S_f 为滩地部分床面剪切应力在断面全部床面剪切应力中的占比; A_0 为断面总面积; B 为复式河槽总宽; b 为主槽底宽。

2.1.2 理论分析法

(1) 谢汉祥法 谢汉祥法的计算公式:

$$V_f = \frac{V_{of}}{B_f} \left[B_f - N(\exp(-\alpha\beta_f) - 1) + \frac{\alpha}{4} N^2(\exp(-2\beta_f) - 1) - \frac{\alpha^2}{6} N^3(\exp(-3\alpha\beta_f) - 1) \right] \quad (21)$$

$$V_m = \frac{V_{0m}}{B_m} \left[B_m - G(-\exp(-\beta B_m) + 1) - \frac{\beta}{4} G^2(-\exp(-2\beta B_m) + 1) - \frac{\beta^2}{6} G^3(-\exp(-3\beta B_m) + 1) \right] \quad (22)$$

$$N = \frac{\beta D_m (V_{0m}^2 - V_{of}^2)}{2V_{of}^2 \alpha (\alpha D_f + \beta D_m)}; \quad G = \frac{\alpha D_f (V_{0m}^2 - V_{of}^2)}{2V_{0m}^2 \beta (\alpha D_f + \beta D_m)} \quad (23)$$

$$Q = V_m A_m + V_f A_f \quad (24)$$

式中: V_f , V_m 分别为滩地和主槽的平均流速; V_{of} , V_{0m} 分别为利用曼宁公式计算滩地和主槽的平均流速; B_f , B_m 分别为滩地和主槽的宽度; D_f , D_m 为与水深和糙率有关的参数。

(2) 河槽协同度法 协同度是指全断面过流量与垂直分割法的过流量之比,那么复式河槽过流能力的表达式为:

$$Q = Q_b - I_{DISDEF} \quad \text{或} \quad Q = Q_b I_{DISADF} \quad (25)$$

式中: Q_b 为断面分割法计算的流量; I_{DISDEF} , I_{DISADF} 分别为计算过流能力时引入的流量误差和流量校正因子。

2.1.3 统计参数 本文引入相对误差(relative error, 简称 e_R) 与归一化均方根误差(normalized root mean square error, 简称 e_{NR}) 来直观比较这些方法在计算过流量时的精度,其中 e_{NR} 值越接近0,说明计算精度越高;若接近1,则精度越低。计算式如下所示:

$$e_R = \frac{Q_c - Q_m}{Q_m} \times 100\% \quad (26)$$

$$e_{NR} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_m - Q_c)^2}}{Q_m - Q_c} \quad (27)$$

式中: Q_m 为实测值; Q_c 为计算值; n 为数据组数。

2.2 对比与分析

按照2.1节述及的方法分别计算图4中复式河槽的水位流量关系,并结合实测值按式(26)和(27)计算对应的 e_R , e_{NR} 值,以评价各方法的计算精度,其结果如下所示:

表1 不同水位不同方法的 e_R , e_{NR} 值

Tab. 1 Relative error and normalized root mean square error values of different methods under water levels

水位	经验公式法					理论分析法		
	单一河槽法	湿周修正法	垂直分割法	水平分割法	权重分割法	对角线分割法	谢汉祥法	协同度法
0.156	-45.106	-19.610	4.335	-2.121	10.462	1.047	-4.805	8.815
0.170	-28.409	-12.163	10.040	-4.129	10.968	2.550	1.502	9.698
0.169	-30.489	-13.852	8.365	-5.204	9.613	1.217	-0.226	7.957
0.178	-22.074	-9.433	10.471	-5.551	9.609	1.795	2.970	10.438
0.187	-16.470	-6.818	10.700	-6.019	8.683	1.394	4.166	10.838
0.198	-11.368	-4.447	10.615	-5.815	7.852	1.067	4.991	10.734
0.213	-7.037	-2.705	9.632	-5.122	6.740	0.471	5.068	9.691
0.248	-4.873	-3.600	4.778	-4.867	2.945	-2.549	1.869	4.670
0.288	-1.087	-1.204	5.170	0.058	4.741	-0.546	3.255	4.944
e_{NR}	0.060	0.029	0.038	0.021	0.033	0.009	0.019	0.038

由表1可见,单一河槽法(将复式河槽作为整体,直接运用曼宁公式计算)较其他经验公式法精度低,由此说明改进后的曼宁公式不同程度上提高了在复式河槽中的适用性。对比改进后曼宁公式的计算结果发现,水流刚漫滩时,湿周修正法的精度最低,其原因在于研究者将滩槽水体相互作用时的能耗损失简单转化为湿周长度的变化,而忽略滩槽间动量交换对过流能力的影响,故该方法的计算结果小于实测值;垂直分割法和水平分割法的精度相对较高,这是因为主槽中心区和远离滩槽交界处的滩地区,其流速分布较为均匀(如图3),因此将滩槽分割后分别采用曼宁公式计算其过流能力,其结果精度较高,但由于垂直分割法在分割时没有考虑滩槽交界处流速梯度对过流能力的影响,故所得结果较实测值偏大,水平分割法由于忽略了滩槽间的表观切应力,其结果较实测值偏小;权重分割法是对水平分割法和垂直分割法结果的加权平均,故精度在两种方法之间;对角线分割法与垂直分割法均考虑了滩槽间的表观切应力,而垂直分割法的精度远小于对角线分割法,这说明复式断面上存在一条零切应力线,且这条线大致沿对角线方向,这也与图3中滩槽交界处的流速分布形态相近,因此该方法的精度最高。另外,对比各方法的 e_{NR} 值发现,对角线分割法最小,说明该方法总体上精度最高且精度受水深变化的影响最小。综合分析,本文建议在计算复式河槽水位流量关系时采用对角线分割法。

对比经验公式法和理论分析法的计算结果发现,对角线分割法的精度在所有方法中最高,垂直分割法与协同意度法相近,水平分割法与谢汉祥法相近,由此说明个别经验公式法与常用理论方法的计算精度相接近甚至更高,而且经验公式较理论方法结构简单,计算简便,因此这些改进后的曼宁公式能够较好地适用于复式河槽的水力计算。

3 结 语

本文利用试验资料并通过数学推导分别分析了复式河槽垂线平均流速的横向分布及曼宁公式中流量-水深函数的单调性,以及曼宁公式直接计算复式河槽水位流量关系时产生较大误差的原因。在对比分析了断面分割法、湿周修正法、权重分割法、谢汉祥法及河槽协同意度法等不同方法的计算精度的基础上,得出了以下主要结论:

(1) 水流刚漫滩时,滩槽水体的流速差使水流发生横向运动,致使滩槽交界处形成动量交换和能量交换。曼宁公式是基于均匀流条件的经验公式,故水流刚漫滩时的计算结果较实际偏小且误差最大;随着水深的逐渐增大,滩槽间的动量交换强度也随之增强,滩槽水体的流速差逐渐减小,水体趋于均匀流,其计算误差逐渐减小。

(2) 河槽断面的湿周与水力半径满足不等式 $\Delta R/R + 0.6(\Delta\chi/\chi)/(1 + \Delta\chi/\chi) < 0$ 时,曼宁公式中的流量-水深函数单调递减,该式可作为判定曼宁公式适用性的定性条件。

(3) 对角线分割法的精度最高且精度受水深变化的影响最小,故本文推荐计算复式河槽水位流量关系时采用对角线分割法。

(4) 对角线分割法、水平分割法及垂线分割法与常用的理论方法(谢汉祥法、河槽协同意度法)的计算精度接近,且计算更为简便,因此这些改进后的曼宁公式能够较好地适用于复式河槽的流量计算。

参 考 文 献:

- [1] MONTANARI A, GIOVANNA G. Estimating the uncertainty of hydrological forecasts: A statistical approach [J]. *Water Resources Research*, 2008, 44(12): 1-9.
- [2] SHAO Quanxi, DUTTA D, KARIM F, et al. A method for extending stage-discharge relationships using a hydrodynamic model and quantifying the associated uncertainty [J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 556: 154-172.
- [3] SHIONO K, KNIGHT D W. Turbulent open-channel flows with variable depth across the channel [J]. *Journal of Fluid*

Mechanics, 1991, 222: 617-646.

- [4] 许唯临. 复式河道漫滩水流计算方法研究[J]. 水利学报, 2002(6): 21-26, 31. (XU Weilin. Study on computational method of overbank flow in channels with compound cross section[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002(6): 21-26, 31. (in Chinese))
- [5] 杨华, 廖华胜, 李连侠, 等. SKM模型在天然河道的适用性研究[J]. 水利水电科技展, 2011, 31(3): 53-56. (YANG Hua, LIAO Huasheng, LI Lianxia, et al. Applicability of SKM model in natural channels[J]. Advances in Science and Technology of Water Resource, 2011, 31(3): 53-56. (in Chinese))
- [6] 芦妍婷, 刘达, 李连侠, 等. 不同形状断面河槽下SKM模型解析解与数值解的比较分析[J]. 广东水利水电, 2012(7): 3-6. (LU Yanting, LIU Da, LI Lianxia, et al. Comparison and analysis of analytic solution of SKM model and numerical solution in different compound channels[J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2012(7): 3-6. (in Chinese))
- [7] 刘达, 芦妍婷, 李连侠, 等. 明渠流动S-K模型在具有垂直壁面的复式断面下的数值模拟[J]. 武汉大学学报(工学版), 2012, 45(2): 148-151, 156. (LIU Da, LU Yanting, LI Lianxia, et al. Numerical simulation of SKM in open-channel with vertical wall[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2012, 45(2): 148-151, 156. (in Chinese))
- [8] 谢汉祥. 漫滩水流的简化算法[J]. 水利水运科学研究, 1982(2): 84-92. (XIE Hanxiang. Simplified calculation of water flow in floodplain[J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 1982(2): 84-92. (in Chinese))
- [9] 刘沛清, 冬俊瑞. 复式断面渠道中均匀流的水力计算[J]. 长江科学院院报, 1995, 12(3): 61-66. (LIU Peiqing, DONG Junrui. Hydraulic calculation of uniform flow in compound channel[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1995, 12(3): 61-66. (in Chinese))
- [10] ACKERS P. Flow formulate for straight two-stage channel[J]. Journal of Hydraulic Research, 1993, 31(4): 509-531.
- [11] TANG Xiaonan. An improved method for predicting discharge of homogeneous compound channels based on energy concept[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2017, 57: 57-63.
- [12] 刘士和, 黄伟, 罗秋实. 复式明渠水流运动的数值模拟[J]. 武汉大学学报(工学版), 2006, 39(6): 1-5. (LIU Shihe, HUANG Wei, LUO Qiushi. Numerical simulation of compound open channel flow[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2006, 39(6): 1-5. (in Chinese))
- [13] 石荣荣, 刘兴年, 杨克君. 复式河槽漫滩水流的三维数值计算[J]. 水利水电科技进展, 2006(2): 13-16, 25. (SHI Rongrong, LIU Xingnian, YANG Kejun. Three-dimensional numerical calculation of overbank flow in compound channel[J]. Advances in Science and Technology of Water Resource, 2006(2): 13-16, 25. (in Chinese))
- [14] 林斌良, SHIONO K. 复式断面明渠三维紊流的数值模拟[J]. 水利学报, 1995(3): 52-61. (LIN Binliang, SHIONO K. Three dimensional numerical modelling of compound open channel flows[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1995(3): 52-61. (in Chinese))
- [15] WORMLEATON P R, ALLEN J, HADJIPANOS P. Discharge assessment in compound channel flow[J]. Journal of Hydraulic Division, ASCE, 1982, 108(9): 975-994.
- [16] ZENG Y H, GUYMER I, SPENCE K J, et al. Application of analytical solutions in trapezoidal compound channel flow[J]. River Research and Applications, 2012, 28(1): 53-61.
- [17] LAMBERT M F, MYERS W R C. Estimating the discharge capacity in straight compound channels[J]. Civil Engineers Water Maritime Energy, 1998, 130: 84-94.
- [18] KHATUA K K, PATRA K C, MOHANTY P K. Stage-discharge prediction for straight and smooth compound channels with wide flood plains[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 138(1): 93-99.
- [19] 吴持恭. 水力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2016. (WU Chigong. Hydraulics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2016. (in Chinese))
- [20] 杨克君, 曹叔尤, 刘兴年, 等. 复式河槽流量计算方法比较与分析[J]. 水利学报, 2005, 36(5): 563-568. (YANG Kejun, CAO Shuyou, LIU Xingnian, et al. Comparison of methods for calculating flow capacity of channels with compound cross section[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(5): 563-568. (in Chinese))

Error analysis and method comparison for calculating stage-discharge relation in compound channel

YANG Po¹, WEI Bingqian¹, HU Hongsheng², YANG Mingyang¹

(1. *State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China*;
2. *Designing and Research Institute of Water Conservancy Investigation in Huai'an, Huai'an 223005, China*)

Abstract: The stage-discharge relationship is an important basis for estimating water surface line. Using the Manning formula directly to calculate the relationship of water level and flow will produce great errors, and the unreasonable phenomenon is that the decrease of flow with the increase of water depth will occur when flood is out of bank. In this paper, the transverse distribution of the average vertical velocity and the monotonicity of the flow-depth function of the Manning formula are first analyzed, and then the reasons for such errors and unreasonable phenomena are discussed. In addition, the calculation accuracy of different methods such as horizontal segmentation, vertical segmentation, diagonal segmentation, wetted perimeter correction, weight segmentation, Xie Hanxiang method and synergism method is compared to demonstrate the applicability of the improved Manning formula in the compound channel. The results show that the velocity difference between the main channel and the floodplain makes the flow move laterally, which will lead to produce a large amount of momentum exchange at the junction, and its mechanism of action is completely different from the single channel, so the Manning formula cannot be applied directly to the compound channel. When the growth rate of hydraulic radius and the wetted perimeter satisfy a certain condition, the flow-depth function is monotonically decreasing, and the flow decreases with the increase of water depth. Compared with the results of different calculation methods, it is found that the precision of wetted perimeter correction is the lowest and not recommended. The precision of horizontal segmentation, vertical segmentation, diagonal segmentation and weight segmentation is close to the traditional theoretical method, so the improved Manning formula can be better applied to the compound channel. Diagonal segmentation is recommended in this paper because the diagonal segmentation method has the highest accuracy and the most simple calculation in all the methods.

Key words: compound channel; Manning formula; stage-discharge relation; diagonal segmentation