

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2019.05.012

宽浅河段航道整治线宽度确定方法

刘新^{1,2},王纪锋³,马殿光²,乐培九²

- (1. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室,天津 300072;
2. 交通运输部天津水运工程科学研究所,天津 300456;
3. 河南省交通运输厅航务局,河南 郑州 450016)

摘要:为解决航道整治线宽度理论公式求解过程中假定工程前后参数不变产生的计算误差,提出一种确定整治线宽度的新方法。该方法从河流水流运动、泥沙运动以及河床形态机理出发,通过理论研究,推导了持续冲刷状态下和输沙平衡状态下航道整治线宽度的计算公式,并利用整治效果良好的实际工程进行验证。结果表明:新方法可以规避工程前后相关参数的取值问题;与已有大多数方法相比较,新方法确定的整治线宽度与实际工程应用值最为接近,验证了该方法的可行性。
关键词: 航道整治;浅滩;整治线宽度;计算公式;持续冲刷;输沙平衡
中图分类号: U617 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2019)05-0477-05

Study on determining method of the width of waterway regulation line for the broad-shallow river

LIU Xin^{1,2}, WANG Jifeng³, MA Dianguang², YUE Peijiu²

- (1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety,
Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, M. O. T., Tianjin 300456, China;
3. Maritime Administration of Henan Provincial Transportation Bureau, Zhengzhou 450016, China)

Abstract: At present, the theoretical formulas for determining the width of waterway regulation lines were mostly solved by establishing a certain relationship between the flow and sediment conditions before and after the project. Many parameters were involved in these formulas, and in the solving process, it was usually assumed that value of part parameters in the formula is the same before and after the project. However, some changes may occur before and after the project, affecting the accuracy of the width of regulation lines. In order to avoid errors caused by this assumption, a new method to determine the width of waterway regulation lines was proposed. Based on the mechanism of flow movement, sediment movement and river bed topography, two determining methods for the width of waterway regulation lines under continuous scouring condition and sediment transport equilibrium condition were put forward by theoretical study, and the proposed methods were verified by practical projects with good regulation effect. The results show that the proposed methods have good engineering results, and compared with most existing methods, the width of the regulation lines determined by the new method is the closest one to the actual value of engineering project, which can provide a good theoretical support for waterway regulation projects.

Key words: waterway regulation; shoals; regulation line width; calculation formula; continuous scour; equilibrium of sediment transport

作者简介: 刘新(1975—),女,博士,主要从事港口及航道工程研究。E-mail:825084669@qq.com

引用本文: 刘新,王纪锋,马殿光,等. 宽浅河段航道整治线宽度确定方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(5):477-481.
LIU Xin, WANG Jifeng, MA Dianguang, et al. Study on the method of determining the width of the waterway regulation line for the broad-shallow river[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2019, 47(5): 477-481.

天然河流航道浅滩“洪淤枯冲”,浅滩淤积的泥沙因落水期水流冲刷不力而水深不足形成碍航浅滩。在浅滩整治时,需用整治建筑物束窄中枯水河宽,增加主槽输沙能力,延长冲刷历时,满足航道尺度要求^[1-6]。整治线宽度的确定涉及影响因素较多,与水流、泥沙运动有关,也与河床形态密切相关,加之有的河流受枢纽调度影响,问题更加复杂。多年来,国内外学者对这一问题进行了大量研究,取得诸多成果,常用的理论有河相关系法、水力学法、河流动力学方法、输沙平衡法以及经验法等,航道整治线宽度公式均是通过工程前后的水沙条件建立一定的关系,求解工程后的整治线宽度^[7-14]。这些公式隐含假定工程前后这些参数不变,而实际上工程前后这些参数往往会发生一定变化,因而现有整治线宽度的确定方法有时存在计算误差。为此,本文提出一种确定整治线宽度的新方法,规避了工程前后相关参数的取值问题,从河道水流、泥沙运动以及河床形态机理出发,使之在考虑河流通航需求的基础上既满足河流输水要求,也满足输沙要求,更满足河床形态条件。

1 整治线宽度研究现状及存在问题

多年来,国内外的专家学者对整治线宽度进行了大量研究。从研究方法上讲,已有成果主要可以分为经验法和理论法两大类^[15-16],其公式的基本形式相同:

$$b = AB_1 \left(\frac{H_1}{H_2} \right)^y$$

(1)

式中: b ——整治线宽度; B_1 ——整治水位时,整治前河宽; H_1 、 H_2 ——整治水位时,整治前、后断面的平均水深; A 、 y ——与河流有关的系数,根据不同理论和假设会得出不同形式。

据不完全统计,目前这类计算公式多达数十个,而且计算的结果相差较大。冲积河流过水断面形态时空差异显著,经验法主要基于当挟沙水流与河床边界的长期相互作用使河道达到输水输沙平衡时,河床几何形态与流域水沙条件和河床边界组成之间存在着一种特定关系^[17]。因此,根据整治河段及其上、下游来水来沙条件,确定整治线宽度。将河相关系应用于航道整治已有近百年历史,早在1924年苏联人格鲁什可夫就利用河相系数即宽深比来论证航道整治方案。近年来唐存本等^[18]又提出“河床断面法”及其改进方法,易静^[19]考虑来水来沙条件中泥沙粒径的影响提出了基于河相关系的整治线宽度计算改进方法。由于各工程资料代表性不统一,其结果往往规律性不强,研究还有待加强。

理论法主要根据整治前后的河道水流或泥沙关系构建公式,常用的水力学法和河流动力学法基本上分别属于这两类。水力学法根据水流连续方程和运动方程联解,一般假定整治前后的流量、比降和糙率系数相同,只满足输水要求,与输沙无关,不适用于冲积性河流。河流动力学方法无疑是理论上最为完整的,其原理是从河道水沙运动特征出发,浅滩整治前后“输沙平衡”。由于输沙公式本身的经验性和多样性,造成式(1)的形式多种多样。基于该原理,刘建民^[20]根据不同输沙能力公式,得到诸多成果。整治线宽度的理论推导基本基于联解整治前后的水流连续方程、运动方程和输沙平衡方程,由于求解的方程数比方程中未知数少,方程组无定解,因此,需进行一些假定来求解。基本分为三类:引入河相关系式;利用假定增加辅助方程;直接联解三大方程,建立河相要素间的相关关系(减少一个未知数),目前常见的公式大多属这一类。加之现有研究成果均存在工程前后多个参数不变的假设,如整治前后的流量、比降和糙率系数,而工程前后有些参数会发生一定变化,从而带来误差。为此,本文提出一种新的方法,提高整治线宽度计算的精度。

2 航道整治线宽度确定方法

图1为内河航道典型断面示意图,主槽位于河道中心,两侧为边滩。图1中, B 为流量 Q_1 时河面宽度, h_n 为整治水位以上水深, T 为整治水位以下水深, $h_p = h_n + T$, b 为整治线宽度。

设 Q_n 为滩地过流流量, Q_p 为主槽通过流量,则通过河道整个断面的总流量为

$$Q_1 = Q_n + Q_p$$

(2)

由于洪峰对冲刷起主导作用, Q_1 宜取年最大日

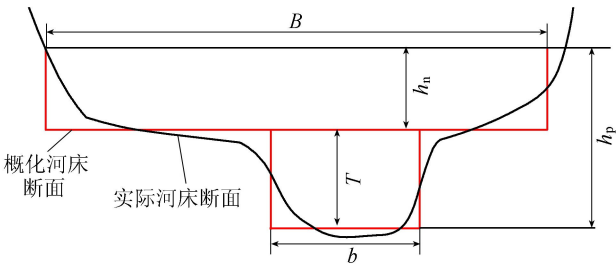


图1 河流浅滩断面示意图

Fig.1 Schematic plot of shoal section

洪峰流量的多年平均值。对于宽浅河段,水力半径可以用平均水深来代替,将水流运动方程 $Q = Av = bhn^{-1}h^{\frac{2}{3}}J^{\frac{1}{2}}$ 代入式(2)并根据图 1 各参数相关关系,可得

$$Q_t = (B - b)h_n n_n^{-1} h_n^{\frac{2}{3}} J_n^{\frac{1}{2}} + bh_p n_p^{-1} h_p^{\frac{2}{3}} J_p^{\frac{1}{2}}$$

(3)

式中: J_p 、 n_p ——主槽比降及主槽糙率; J_n 、 n_n ——滩地比降及滩地糙率。

假定 $n_n = n_p = n$, 可得

$$nQ_t = (B - b)h_n h_n^{\frac{2}{3}} J_n^{\frac{1}{2}} + bh_p h_p^{\frac{2}{3}} J_p^{\frac{1}{2}}$$

(4)

因此整治线宽度的基本公式为

$$b = \frac{nQ_t - Bh_n^{\frac{5}{3}} J_n^{\frac{1}{2}}}{h_p^{\frac{5}{3}} J_p^{\frac{1}{2}} - h_n^{\frac{5}{3}} J_n^{\frac{1}{2}}}$$

(5)

下文将对不同状态下整治线宽度的确定进一步进行研究。

2.1 持续冲刷状态下航道整治线宽度确定方法及验证

2.1.1 确定方法

河道上修建水利枢纽后,泥沙淤积在库区,使下泄水流含沙量大幅度减少,尤其大型水库下泄水流含沙量极小。此时,河床往往会发生单向冲刷变形,因此导致河床变形停止的控制因素不再是水流输沙能力,而是床沙的起动流速,即持续冲刷状态的限制条件为

$$v_p = \frac{1}{n} h_p^{\frac{2}{3}} J_p \leq v_c$$

(6)

其中

$$v_c = K \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} g d \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{h_p}{d} \right)^{\frac{1}{6}}$$

式中: v_p ——主槽流速; v_c ——止冲流速; ρ_s 、 ρ ——泥沙和水的密度; g ——重力加速度; d ——泥沙粒径,因冲刷粗化, d 增大,暂取 d_{90} ; K ——系数,沙莫夫公式取 1.14。

由 $h_p = h_n + T$ 和式(6)得

$$h_n \leq \left(\frac{n_p v_c}{J_p^{\frac{1}{2}}} \right)^{\frac{3}{2}} - T$$

(7)

由于 $J_p = \Delta Z / L_p$ (ΔZ 为水位差, L_p 为主槽长度), $J_n = \Delta Z / L_n$ (L_n 为研究河段长度), 因此

$$J_p = \frac{J_n L_n}{L_p}$$

(8)

式(7)(8)代入式(5)可求得整治线宽度 b , 整治水位即滩面高程。

2.1.2 验证

贵州省境内北盘江董箐枢纽坝下近坝段的坝草滩,在董箐枢纽调度影响下,为处于持续冲刷河段。以该持续冲刷河段浅滩整治工程进行理论应用,验证研究结果的应用效果。

贵州北盘江上游分别建有 3 个电站,光照水电站为不完全调节水库,其下为日调节的马马崖一级水电站和董箐水电站。坝草滩上距董箐水电站 5 km,长约 1.30 km,建设航道尺度为 1.6 m×30 m×300 m(水深×航宽×弯曲半径)。由于航道尺度不能满足标准要求,且考虑到该河段存在沙卵石浅滩碍航,航道整治方案为:“浅区疏浚,边筑坝滩整治,增加主槽冲刷”^[21]。

整治工程于 2009 年 7 月竣工,航道最小水深达到 1.60 m,竣工后,航槽稳定无回淤现象,整治效果良好。以此滩的相关资料,计算情况如下:此滩为持续冲刷浅滩,由于洪峰对冲刷起主导作用, Q_t 宜取年最大日洪峰流量的多年平均值,该滩段 $Q_t = 3\,010\text{ m}^3/\text{s}$, $n_p = 0.028$, $J_p = 0.086\%$, $J_n = 0.079\%$, $d_{90} = 56\text{ mm}$,求得 $h_n = 4.80\text{ m}$,其整治线宽度可用式(5)进行计算,选取滩脊处的断面为计算断面,代入式(5),即得到整治线宽度 $b = 50.36\text{ m}$ 。工程建设实际采用的整治线宽度为 50 m(该工程采用的整治线宽度为物理模型与数学模型试验确定的数值)。本文计算值与工程实际采用的数值基本一致。

表 1 为不同方法计算得到的整治线宽度值,由表 1 可见,持续冲刷状态下整治线宽度确定方法计算得到的整治线宽度值与实际取值最为接近。

2.2 输沙平衡条件下航道整治线宽度确定方法及验证

2.2.1 确定方法

当河流来水来沙条件发生变化时,河床也会发生冲刷变化,而后会使本河段及其上下游的水、沙和河床边界条件发生变化和调整,最终使来水来沙条件与本河段河床形态基本适应,达到新的平衡。如河床变形主要由推移质运动造成,应引入推移质输沙率公式;如河床变形主要由悬移质运动造成,应引入水流挟沙力公式。对于平原河流和部分山区河流,悬移质落淤常在淤积过程中起主要作用,因此一般可选用张瑞瑾提出的水流挟沙力公式。当输沙平衡时,水流含沙量等于水流挟沙力,该时段内河段上的冲淤量为零:

$$S = S_* = K \left(\frac{v_p^3}{gh_p \omega} \right)^m \tag{9}$$

式中: S ——含沙量; ω ——泥沙沉速; m ——系数。

由式(9)及 $h_p = h_n + T$,可得

$$h_n = h_p - T = \frac{gn_p^3 \omega}{J_p^{\frac{3}{2}}} \left(\frac{S}{K} \right)^{\frac{1}{m}} - T \tag{10}$$

把式(10)(8)代入式(5),即得到整治线宽度 b 。上述输沙平衡状态整治线宽度的计算中,流量宜取造床流量,按照第二造床流量法进行确定。

2.2.2 验证

选取处于输沙平衡状态下的长江中游戴家洲航道整治二期工程进行应用效果验证。戴家洲上距武汉市约99 km,属于微弯分汊河型,左汊为圆水道,右汊为直水道。建设航道尺度:4.5 m×200 m×1 050 m(水深×航宽×弯曲半径)。航道整治方案:(a)在直水道凸岸中上段布置3条潜丁坝,保持滩槽格局。(b)洲右缘中上段实施护岸,以维持洲体稳定。

根据戴家洲河段的实测资料,计算成果如下:此滩为多年输沙平衡河段,当整治水位确定后,其整治线宽度可用式(5)进行计算,选取滩脊处的断面为计算断面。输沙平衡时,流量宜取造床流量为11 900 m³/s,对应的 $S=0.462 \text{ kg/m}^3$, $n_p=0.02$, $J_p=0.0021\%$, $T=6.7 \text{ m}$,根据式(9)求得 $h_p=9.86 \text{ m}$,根据式(10)得 $h_n=3.16 \text{ m}$ 。数据代入式(5),即得到整治线宽度 $b=903.6 \text{ m}$,与实际取用900 m整治线宽度比较接近(采用的整治线宽度为物理模型试验确定的数值)。由表2可见,本文方法计算值与实际取值最为接近。

3 结 语

针对已有整治线宽度确定公式存在的不足,从河流水流运动、泥沙运动以及河床形态机理出发,进行了航道整治线宽度确定理论和方法研究,提出了枢纽下游持续冲刷条件下和输沙平衡条件下整治线宽度的确定方法,并选取贵州省北盘江董箐枢纽坝下近坝段坝草滩与长江戴家洲为代表河段对该方法进行了应用研究。结果表明:本文方法计算的整治线宽度与工程建设实际采用的数值基本一致,本理论方法具有良好的应用效果。

整治线宽度和整治水位是航道整治的重要参数,建议将来开展更加深入的研究;同时,河流生态治理是发展的方向和趋势,建议今后结合生态工程结构,开展生态整治工程参数确定方法的研究。

参考文献:

[1] 王世昭,唐洪武,俞扬,等. 外秦淮河武定门闸上游偏流淤积成因及流态改善措施[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018,46(3):219-226. (WANG Shizhao,TANG Hongwu,YU Yang,et al. Study on the causes of sediment deposition and the

表1 坝草滩整治线宽度不同方法计算值对比
Table 1 Calculated values of regulation width for the Bacaotan m

计算方法	计算值	与实际取值差值
河相关系法	45.68	-4.32
水力学法	58.53	8.53
河流动力学方法	59.92	9.92
经验法	60.00	10.00
本文方法	50.36	0.36

表2 戴家洲整治线宽度不同方法计算值对比
Table 2 Calculated values of regulation width for the Daijiazhou m

计算方法	计算值	与实际取值差值
河相关系法	875.0	-25.0
水力学法	911.0	11.0
河流动力学方法	920.0	20.0
经验法	882.0	-18.0
本文方法	902.8	2.8

improvement of flow pattern in the upper part of Wudingmen Sluice in the outer Qinhuai River[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46(3): 219-226. (in Chinese))

[2] 王昌杰. 河流动力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.

[3] 张子龙, 臧英平. 南京八卦洲汉道河道整治工程措施分析[J]. 人民长江, 2003, 34(7): 30-32. (ZHANG Zilong, ZANG Yingping. Analysis and study on regulation measures of Baguazhou bifurcated river channel[J]. Yangtze River, 2003, 34(7): 30-32. (in Chinese))

[4] 燕京. 长江南京河段八卦洲汉道特性及整治技术研究[D]. 南京: 河海大学, 2008.

[5] 潘庆繁, 胡向阳. 长江中下游分汊河段的整治[J]. 长江科学院院报, 2005, 22(3): 13-16. (PAN Qingshen, HU Xiangyang. Bifurcated channel stretches regulation in middle and lower Yangtze River[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2005, 22(3): 13-16. (in Chinese))

[6] SEIM H E, BIAN TON J O, GROSS T. Direct stress measurements in a shallow sinuous estuary[J]. Continental Shelf Research, 2002, 22(11/12/13): 1565-1578.

[7] 刘建民. 山区性河流航道治理研究与实践文集[M]. 天津: 科学出版社, 2007.

[8] 张幸农, 孙波. 冲积河流航道整治线宽度的研究[J]. 泥沙研究, 2002(5): 48-53. (ZHANG Xingnong, SUN Bo. Research on the regulation width of waterway in alluvial rivers[J]. Journal of Sediment Research, 2002(5): 48-53. (in Chinese))

[9] 王秀英, 李义天, 孙昭华. 长江中下游整治线宽度确定方法研究[J]. 泥沙研究, 2005(6): 13-19. (WANG Xiuying, LI Yitian, SUN Zhaohua. Study on the regulation width of the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. Journal of Sediment Research, 2005(6): 13-19. (in Chinese))

[10] 乐培九, 李旺生. 冲积河流航道整治线宽度问题的研究[J]. 泥沙研究, 1991(2): 46-51. (YUE Peijiu, LI Wangsheng. Investigation on the determination of regulation width for an alluvial river[J]. Journal of Sediment Research, 1991(2): 46-51. (in Chinese))

[11] 李旺生, 贾锐敏, 王永成. 航道整治水位及整治线宽度确定方法综述[J]. 水道港口, 1990, 12(2): 39-46. (LI Wangsheng, JIA Ruimin, WANG Yongcheng. Research overview of the method of calculating the regulation stage and width[J]. Journal of Waterway and Harbour, 1990, 12(2): 39-46. (in Chinese))

[12] 肖立敏. 顺直微弯河段整治水位与整治线宽度对航道整治效果影响研究[D]. 南京: 南京水利科学研究院, 2007.

[13] 应强, 臧英平, 张幸农, 等. 长江中游航道整治线宽度确定方法[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(3): 51-52. (YING Qiang, ZANG Yingping, ZHANG Xinnong, et al. Determination of width of waterway regulation lines in middle reaches of Yangtze River[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(3): 51-52. (in Chinese))

[14] 陈茜, 逢勇, 王一秋. 长江航道整治工程生态保护的重点研究课题[J]. 水资源保护, 2016, 32(1): 67-71. (CHEN Qian, PANG Yong, WANG Yiqiu. Key research topic of ecological protection of Yangtze River waterway regulation project[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(1): 67-71. (in Chinese))

[15] 乐培九, 杨燕华, 刘鹏飞. 内河航道整治线宽度研究现状与进展[J]. 水道港口, 2014, 35(4): 347-352. (YUE Peijiu, YANG Yanhua, LIU Pengfei. Reach of middle changjiang river research review on inland waterway regulation width: status and process[J]. Journal of Waterway and Harbour, 2014, 35(4): 347-352. (in Chinese))

[16] 乐培九, 张华庆, 李一兵. 坝下冲刷[M]. 北京: 人民交通出版社, 2013.

[17] 刘晓芳, 黄河清, 邓彩云. 冲积河流稳定平衡条件与断面几何形态的数理分析[J]. 泥沙研究, 2012(1): 14-22. (LIU Xiaofang, HUANG Heqing, DENG Caiyun. Mathematical-physical analysis of stable equilibrium condition and channel form in alluvial rivers[J]. Journal of Sediment Research, 2012(1): 14-22. (in Chinese))

[18] 唐存本, 贡炳生, 左利钦. 再论航道整治线宽度与整治水位的确定[J]. 水运工程, 2010(3): 85-90. (TANG Cunben, GONG Bingsheng, ZUO Liqin. Further study on regulated width and regulated water stage[J]. Port & Waterway Engineering, 2010(3): 85-90. (in Chinese))

[19] 易静. 山区河流航道整治线宽度的确定及稳定性分析[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2014.

[20] 刘建民. 整治水位与整治线宽度及其走向的研究[J]. 水道港口, 1998, 20(4): 1-13. (LIU Jianmin. Study on elevation, width and course of regulation line[J]. Journal of Waterway and Harbour, 1998, 20(4): 1-13. (in Chinese))

[21] 程从虎. 浅析北盘江坝草滩整治与模型试验研究[J]. 珠江水运, 2015(18): 90-92. (CHENG Conghu. Analysis on regulation and model test of Bacao beach of Beipanjiang River[J]. Pearl River Water Transport, 2015(18): 90-92. (in Chinese))