

山区河流沙卵石浅滩整治线宽度确定

何 熙, 张有林, 李顺超, 谢玉杰

(四川省交通勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610017)

摘要: 航道整治中整治线宽度的确定是整治成败的关键因素之一。在考虑山区河流挖槽稳定性以及船舶上滩能力基础上对整治线宽度计算公式进行改进, 提出适合山区河流沙卵石浅滩整治线宽度的计算公式。并通过工程实例借助数学模型对计算的整治线宽度进行验证并提出优化。整治线宽度的确定是一个系统性工作, 传统的整治线宽度计算公式与该公式的计算值仅可作为参考值。为达到良好的整治效果, 需要通过数学模型以及河工物理模型试验对整治线宽度进一步修正。

关键词: 航道整治; 沙卵石浅滩; 整治线宽度; 数学模型

中图分类号: TV 147; U 617

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)03-0107-05

Determination of regulation width of sand-pebble shoal of mountainous river

HE Xi, ZHANG You-lin, LI Shun-chao, XIE Yu-jie

(Sichuan Communication Surveying & Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610017, China)

Abstract: The determination of the width of the regulation line in the channel regulation is one of the key factors for the success or failure of regulation. In this paper, the calculation formula of the regulation width is improved on the basis of considering the stability of the navigation channel and the capacity of ships ascending rapids. Also, a formula for calculating the regulation width of the sand-pebble shoal in mountainous rivers is put forward. A mathematical model is established to verify and optimize the regulation width calculated by the formula in this paper through an engineering example. The calculation of regulation width is systematic work, the regulation widths calculated by the traditional formula, and the formula in this paper can only be used as reference values. To achieve a good regulation effect, the regulation width needs to be further modified by the mathematical model and physical model experiment.

Keywords: waterway regulation; sand-pebble shoal; regulation width; mathematical model

航道整治中整治线宽度的确定是整治成败的关键因素之一。整治线过宽, 水流无法集中冲刷航槽以至挖槽区难以维持稳定, 从而导致航道维护工作量加大; 整治线过窄, 一方面水流收缩厉害, 造成河床冲刷剧烈, 可能导致推移质输移至下游航槽而淤浅, 另一方面航槽内流速过大, 可能造成船舶上滩困难。整治线宽度的计算公式较多, 大体可分为: 基于优良河段河相关系的经验方法、基于联立水流连续方程和运动方程求解的水力学法、基于输沙平衡观点的河流动力学法等,

其中 JTS 181—2016《航道工程设计规范》推荐的一般河流整治线宽度计算公式基于水力学法。除此之外, 整治线宽度的确定并不是孤立的, 应配合整治高度综合考虑, 目前难以单纯从公式上直接找到整治线宽度和整治高度的最优组合。本文选取山区河流航道整治中第二造床流量对应的水位作为整治水位, 在此整治高度的基础上通过改进的整治线宽度计算公式推求其参考范围, 具体整治线宽度的确定往往需要借助数学模型或河工物理模型对该计算结果进行验证以及优化。

收稿日期: 2020-05-29

作者简介: 何熙(1989—), 男, 硕士, 工程师, 从事港口航道工程设计与研究工作。

1 整治线宽度公式推导

采用经验方法、水力学法以及河流动力学法计算整治线宽度时,均可由式(1)表达^[1]:

$$B_2 = AB_1 \left(\frac{H_1}{H_2} \right)^Y \quad (1)$$

$$\text{其中: } H_2 = H' + a \quad (2)$$

$$H' = \eta T \quad (3)$$

式中: B_1 、 B_2 分别为整治前后河宽; H_1 、 H_2 分别为整治前后断面平均水深; Y 为指数; H' 为设计水位下断面平均水深; a 为整治水位较设计水位的超高值; η 为水深修正系数,根据我国山区河流统计分析,一般相对航宽在 3~8 之间时, $\eta = 0.7 \sim 0.8$; T 为设计水位下航道边缘水深,对于研究河段有足够资料也可采用河相关系的方法进行求得。

山区河流沙卵石浅滩整治后不仅要考虑航道的回淤情况,也要考虑整治线是否太窄而导致整治后航槽内冲刷剧烈以及滩段内出现急流段。即整治后既要满足航槽内表面流速 U_s 小于等于成滩流速 U_t , 同时为使挖槽稳定,一般要求整治流量时挖槽内流速 U_h 为 $(1.1 \sim 1.3) U_c$, U_c 为推移质起动流速,结合长江上游沙卵石河床推移质起动流速的经验公式,本文选取沙莫夫公式计算推移质起动流速^[2],由于作用泥沙的近底流速在实际工作中不易确定,因此为方便使用,沙莫夫公式采用垂线平均流速来表达起动条件^[3]。

$$U_2 = \frac{Q}{B_2 H_2} \quad (4)$$

$$U_s = K_s U_2 < U_t \quad (5)$$

$$U_2 > K_a U_c \quad (6)$$

$$U_c = 1.14 \sqrt{\frac{\rho_s - \rho}{\rho}} g d \left(\frac{H_2}{d} \right)^{1/6} \quad (7)$$

$$U_t + \beta J = E \text{ 且 } E \leq E_c \quad (8)$$

式中: Q 为整治流量; B_2 、 U_2 、 H_2 分别为整治线宽度、整治后断面平均流速、整治后断面平均水深; E 为消滩判数; E_c 为临界消滩判数; ρ_s 、 ρ 分别为沙卵石和水的密度; d 为研究滩段沙卵石中值粒径; β 为消滩水力指标公式中的参数,对于不同航道拟定的消滩水力指标不同时,该数值可能不

相同; J 为水面比降。对于式(5),参数 K_s 的取值较为复杂, K_s 为表面流速与断面平均流速的关系,河道中的水流较为复杂,因此本文将简化为二元明渠均匀流,其垂向流速分布满足公式 $u = \frac{gJ}{\nu} \left(Hy - \frac{y^2}{2} \right)$, u 为流速, g 为重力加速度, H 为水深, y 为流速计算位置离河底的距离, ν 为运动黏度,沿垂向积分后可得断面平均流速 $\bar{U} = \frac{gJ}{3\nu} H^2$,

表面流速 $U_s = \frac{8J}{2\nu} H^2$, 即满足表面流速为断面流速

1.5 倍^[4],故取 $K_s = 1.5$ 。根据整治流量时航槽内流速为推移质起动流速的 1.1~1.3 倍关系,讨论整治线宽度最大值时,取 $K_a = 1.1$ 。

整理公式(4)~(8)可得: $\frac{K_s Q}{(E_c - \beta J)(\eta T + a)} <$

$$B_2 < \frac{Q}{1.14 K_a \sqrt{(\rho_s - \rho) g / \rho} (\eta T + a)^{7/6} d^{1/3}}.$$

2 实例分析

2.1 滩险概况

老君碛滩位于宜宾市叙州区境月波场下游 3 km,距拟建龙溪口枢纽坝址下游约 11 km。该滩位于岷江下游航道龙溪口和白甲滩两个弯道之间的顺直微弯河段,两岸滩地平均高出枯水位约 5 m。滩段上下深槽发育,尖潭深长。上、下深槽之间为碍航浅区,为改善航行条件,历史上曾进行过 4 次整治。另外该滩右岸历史上建有一座顺坝,目前该滩右岸顺坝存在一定水毁,左岸边滩因挖砂采石影响,破坏较为严重,形成深沟,最深处可达 7.5 m,河心处沙卵石石梗为残留的原边滩滩缘,其顶面高程高出设计水位约 1 m。现状条件下,枯水期形成左右两汊,滩段内水面展宽,水流挟沙能力减弱,航槽内因周期性落淤而出浅,最小水深仅 1.3 m。

2.2 整治线宽度计算

分别选用流量比降公式、水力学公式^[5]、JTS 181—2016《航道工程设计规范》规范中一般河流整治线宽度计算公式这 3 种目前常用的计算公

式, 以及结合本文推导的整治线宽度计算公式对研究滩段整治线宽度进行计算。对于本文公式中 η 的取值, 选取研究滩段上下游附近的优良河段, 采用河相关系求得 $\eta=0.76$, 见图 1。

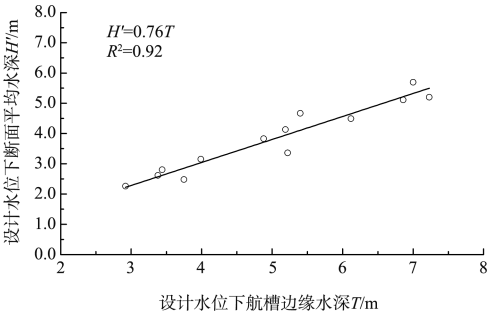


图1 研究滩段上下游优良河段河相关系

研究滩段实测枯水期水面比降为 0.89‰, 岷江下游为内河Ⅲ-(3)级航道, 设计最小航深 2.4 m, 临界消滩水力指标 $E_c=4.04$, 参数 $\beta=0.2671$ 。需要注意的是, 采用上述计算公式时, 一方面研究滩段断面选取极为重要, 沙脊断面为必选断面^[6]; 另一方面对于非正常过渡段浅滩, 应注意存在倒套和尖潭等情况^[7], 采用上述几种整治线

宽度计算公式的计算结果见表 1。

表 1 几种常见的整治线宽度计算公式以及本文公式的计算成果

计算公式	流量比降公式	水力学公式	规范公式	本文公式
计算值/m	$B_2=193$	$B_2=255$	$B_2=261$	$267<B_2<285$

2.3 方案概况

根据该滩碍航特性, 滩上段和滩中段沿左右两侧边滩外缘及右岸现有顺坝为节点规划整治线, 至滩下口以右岸基岩岸坡为节点规划整治线, 航槽自上而下顺接上下游深槽。考虑到左岸边滩受挖沙采石破坏, 布置 3 座护滩带, 起到促淤固滩加速原有边滩的修复, 同时束窄航道, 增强挖槽区稳定性。修复原右岸水毁顺坝, 护滩带及顺坝整治高度均为设计水位以上 1.5 m, 同时对规划航槽内浅区部分实施浚深, 其设计底高程为设计水位以下 2.4 m, 对河心沙卵石石梗实施部分清除, 清除底高程为设计水位下 0.5 m。对左岸深沟布置两处疏浚土处置区, 回填至不高于设计水位以下 2.0 m。老君碛滩方案布置见图 2。

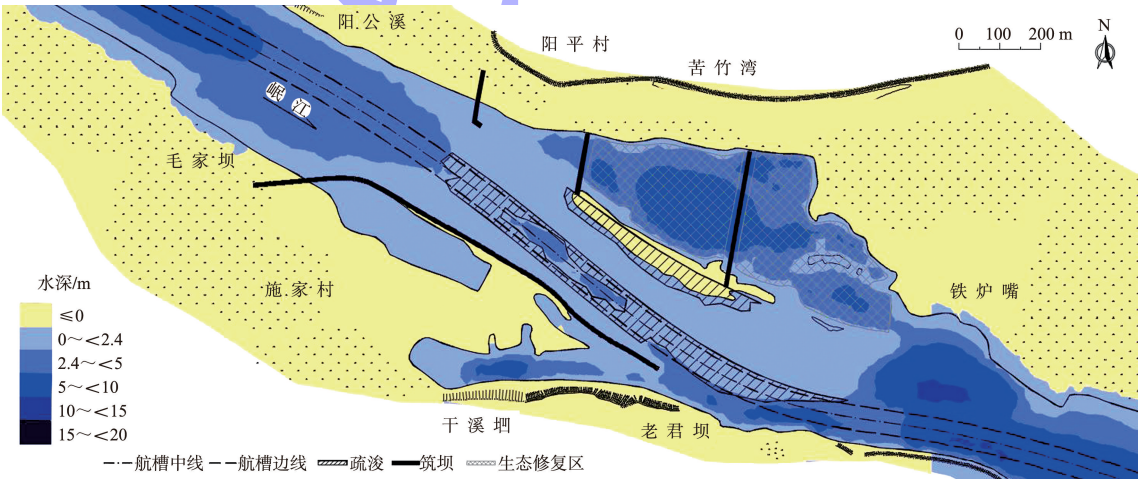


图2 老君碛滩方案布置

结合整治线宽度计算结果, 研究滩段分别选取整治线宽度 250、275、300 m 共 3 种方案加以研究, 其中老君碛滩原左岸边滩至右岸顺坝间宽度距离约 250 m, 故选取整治线宽度 250 m

为方案Ⅰ, 选择接近规范计算的整治线宽度以及本文公式计算的整治线宽度范围的中间值 275 m 为方案Ⅱ, 选取大于本文公式计算的整治线宽度 300 m 为方案Ⅲ。

2.4 模型建立

本文采用平面二维水流数学模型对研究滩段不同整治线宽度的合理性加以研究，由于老君碛滩上游龙溪口滩以及下游白甲滩实施后会对上游滩险造成一定影响，因此将龙溪口滩以及白甲滩方案纳入本次研究对象，本文建立拟建龙溪口枢纽至泥溪基本水尺 16 km 河段平面二维水流数学模型，采用实测枯水流量 $Q=1\,020\text{ m}^3/\text{s}$ 、中水流量 $Q=3\,764\text{ m}^3/\text{s}$ 与洪水流量 $Q=10\,800\text{ m}^3/\text{s}$ 时的沿程 9 个水位测点开展水位验证。采用实测枯水流量下 4 个测流断面、中水流量下 4 个测流断面以及洪水流量下 2 个测流断面开展断面流速分布验证。验证结果表明：水位、断面流速分布以及分流比精度均符合 JTJ/T 231-4—2018《内河航道与港口水流泥沙模拟规程》的要求。

2.5 方案比选

3 种方案实施后，研究滩段水流条件均改善明显，左岸 3 座护滩带实施后，来流小于整治流量时，水流全部进入规划通航汉道。设计流量 $Q=900\text{ m}^3/\text{s}$ 时，3 种方案下规划航槽内均满足设计最小航深 2.4 m 的要求，且各方案实施后航槽内流速均有所增加。方案 I 航槽内流速在 $0.82\sim2.53\text{ m/s}$ ，单倍代表船型船长范围内比降在 $0.13\text{‰}\sim3.51\text{‰}$ ；方案 II 航槽内流速在 $0.85\sim2.41\text{ m/s}$ ，单倍代表船型船长范围内比降在 $0.15\text{‰}\sim3.46\text{‰}$ ；方案 II 航槽内流速在 $0.89\sim2.19\text{ m/s}$ ，单倍代表船型船长范围内比降在 $0.16\text{‰}\sim3.25\text{‰}$ 。整治流量 $Q=2\,250\text{ m}^3/\text{s}$ 时，方案 I 航槽内流速在 $2.62\sim3.67\text{ m/s}$ ，单倍代表船型船长范围内比降在 $0.22\text{‰}\sim4.01\text{‰}$ ，最大流速发生在右岸顺坝坝头位置，该方案航槽内可能出现过度冲刷，同时第 2 座护滩带至第 3 座护滩带之间 5 倍代表船型船长范围内最大流速比降

组合为 $3.67\text{ m/s}\times4.01\text{‰}$ ，因此无法满足自航上滩的要求；方案 II 航槽内流速在 $2.53\sim3.28\text{ m/s}$ ，单倍代表船型船长范围内比降在 $0.26\text{‰}\sim2.57\text{‰}$ ，最大流速发生的位置和方案 I 基本一致，航槽内流速基本在推移质临界起动流速的 $1.1\sim1.3$ 倍，同时最大流速比降组合为 $3.28\text{ m/s}\times2.57\text{‰}$ ，满足船舶自航上滩的要求；方案 III 实施后能满足船舶自航上滩的要求，航槽内流速在 $2.18\sim2.80\text{ m/s}$ ，单倍代表船型船长范围内比降在 $0.31\text{‰}\sim2.29\text{‰}$ ，最大流速发生位置和方案 I 基本一致，但挖槽区下半部分流速在 $2.18\sim2.40\text{ m/s}$ ，不满足推移质起动的条件，极可能挖槽区上段的推移质被冲刷后挟带至下游航槽内而淤浅。综合上述，方案 II 所选取的整治线宽度较为合理。各方案实施后航槽内流速及消滩水力指标见图 3，方案 II 实施前后老君碛滩流场对比见图 4。

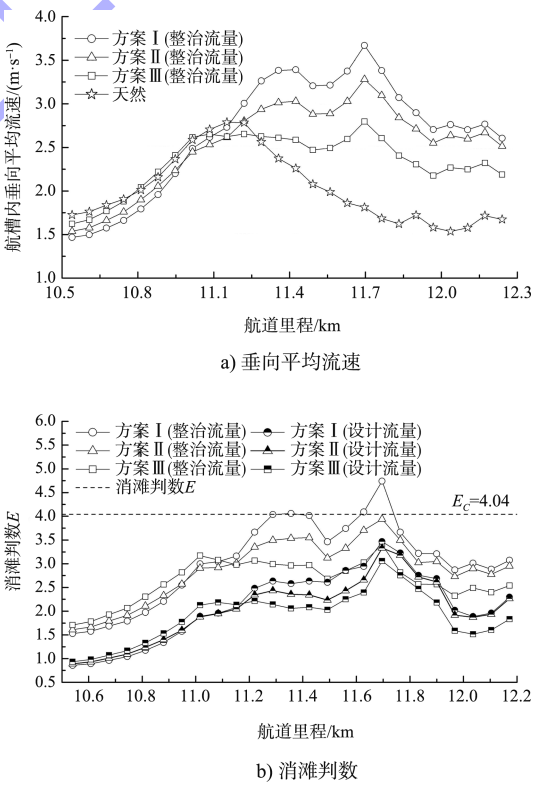


图 3 老君碛滩各方案航槽内平均流速及上滩水力指标对比

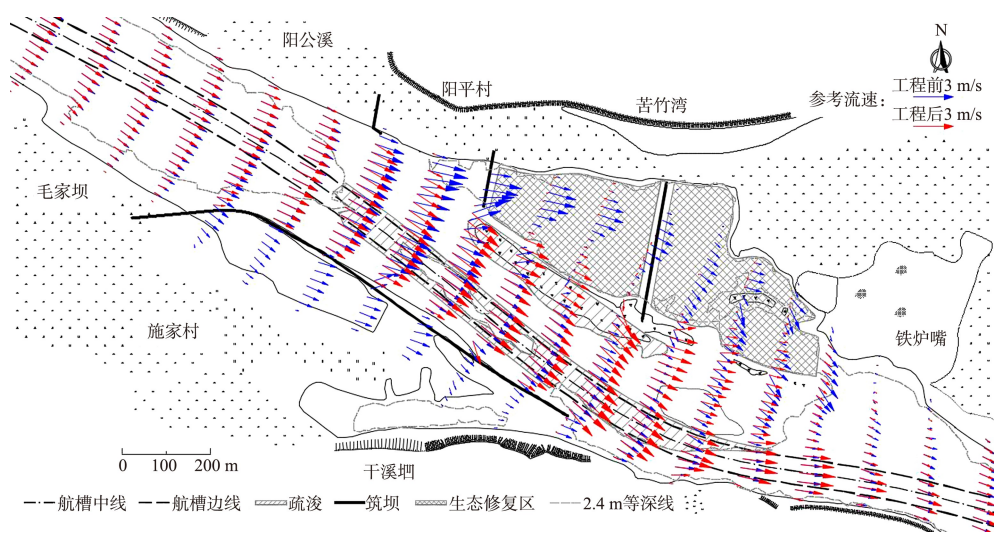


图 4 老君碛滩方案 II 实施前后流场对比

对于山区河流不仅要关注中枯水期的通航问题,对于中洪水条件下,航道选线以及整治方案是否对水流条件造成恶化也要一并考虑。一般来说,山区河流顺直微弯航道一般利用河心处的自然水深布置枯水航线,但对于中洪水以上流量,河心处往往流速过大,上行船舶避开主流选择航深满足要求且宽度适宜的缓流区上行,通过对常年航行于该段航道上 有经验的船长以及当地航道部门调查,中洪水期上行船舶的习惯航路为循左岸缓流区上行,一般流量越大,傍左岸越紧。通过对该滩段的水流条件分析,流量小于 $4\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时,船舶均可通过规划航槽上行;流量在 $4\,000\sim 17\,400\text{ m}^3/\text{s}$ 时,可借助现规划航槽和左岸护滩带之间的缓流区上行;流量在 $17\,400\text{ m}^3/\text{s}$ 至最大通航流量 $30\,600\text{ m}^3/\text{s}$ 时,船舶可循铁炉嘴边滩至阳公溪位置处的缓流区上行。方案 II 中洪水期流量下船舶上滩水力指标见图 5。

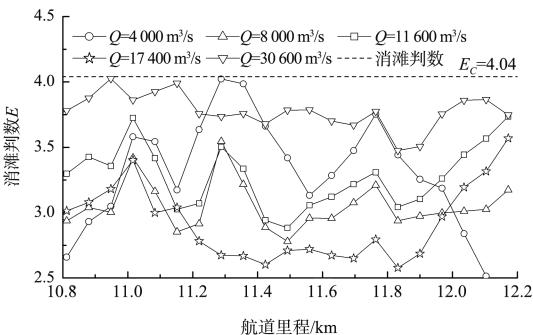


图 5 老君碛滩中洪水期上滩水力指标

3 结论

- 1) 在考虑推移质临界起动条件及船舶自航上滩基础上提出适合山区河流沙卵石浅滩整治线宽度的计算公式,但本文公式须首先明确研究滩段的推移质临界启动条件以及消滩水力指标。
- 2) 常见的整治线宽度计算公式以及本文公式的计算值可作为山区河流沙卵石浅滩整治线宽度选取的参考值,但须借助数学模型以及河工物理模型试验对整治线宽度进行进一步验证及优化。
- 3) 老君碛滩方案 I 整治线宽度采用 250 m ,即该宽度为成滩前左岸边滩滩缘位置。但需要注意的是:岷江上游近年来兴建紫坪铺以及瀑布沟等大型水利枢纽。其高坝大库兴建运行后,枯水期调节能力增强,例如原岷江下游航道保证率 95% 的流量为 $662\text{ m}^3/\text{s}$,近年来通过水文统计该数据增至 $1\,020\text{ m}^3/\text{s}$,即类比可得该段航道整治流量也有所增加。老君碛滩原良好的滩槽格局的整治线宽度对应较小整治流量,目前整治流量有所增大,若采用增大后的整治流量所对应的的整治高度,则整治线宽度应适当加宽。

参考文献:

[1] 贡炳生.卵石浅滩整治线宽度及整治水位的确定[J].水运工程,1978(2): 15-18.