

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2009.02.012

枢纽下游航道整治线宽度的确定方法

应 强^{1,2},张幸农²

(1. 河海大学交通学院、海洋学院,江苏 南京 210098 ; 2. 南京水利科学研究院,江苏 南京 210029)

摘要 根据水利枢纽下游浅滩的碍航特性以及是否受到枢纽下泄水流的非均匀流影响,将碍航浅滩分为 4 种类型,分析了非恒定水流的输沙能力,讨论了碍航浅滩年内输沙不平衡的处理方法。在此基础上,提出了枢纽下游航道整治线宽度计算公式。该公式简化后与规范所推荐的公式一致,并采用汉江资料进行了计算。

关键词 水利枢纽下游航道 碍航浅滩分类 航道整治线宽度

中图分类号 :TV81 ;TV14 **文献标识码** :B **文章编号** :1006-7647(2009)02-0044-04

Method to determine the regulation width of waterways downstream of hydro-junctions//YING Qiang^{1,2}, ZHANG Xing-nong²(1. College of Traffic, College of Oceans, Hohai University, Nanjing 210098 ; China ; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract :Based on the navigation obstruction characteristics of the lower reach and whether the non-uniform flow from hydro-junctions affects the shallow areas, navigation obstructions of lower reaches are divided into four types. The sediment load capacity of non-uniform flow is analyzed. The method of un-equilibrium annual sediment transport on lower reaches is discussed. On this basis, the calculation formula of the regulation width of waterways downstream of hydro-junctions is put forward. After simplification, the formula is consistent with the one recommended by the standard. Data from the Hanjiang River is used with the formula to calculate the regulated width.

Key words :downstream of hydro-junction ;classification of navigation obstruction of lower reach ;regulated width of waterway

随着我国经济建设的发展,在河流上修建的水利枢纽越来越多,受水利枢纽调节作用的影响,出库水流流量和含沙量过程与未建枢纽时相比发生了较大的变化,可能会导致部分航段由于水深不足而出现碍航。为此,关于枢纽下游航道整治参数确定方法的研究正在进行,有的学者已获得了初步的研究成果^[1-3]。笔者根据碍航浅滩的成因及位置分 4 种情况进行讨论。

1 碍航浅滩的分类

根据水利枢纽下游浅滩段河床变化及碍航特征,可将碍航浅滩区分为 2 种情况 :①浅滩段河床出现同步变化,浅滩碍航特征与建坝前相一致。在枢纽下泄水沙条件的作用下,深槽与浅滩河床均出现冲刷或回淤的演变规律,相对河床地形没有发生变化,在最低设计通航水位时,浅滩上的水深不能满足最小通航水深的要求而碍航。②浅滩段河床出现不同步变化,浅滩碍航特征与建坝前有所差异。如枢纽运行初期,河床呈普遍下切的趋势,但因具体河段

地质条件的不同使得河床下切的程度有所差别,当出现深槽下切较多、浅滩下切较少时,会使浅滩段枯水位下降值大于河床下切值,浅滩段水深变浅而出现碍航。

枢纽下游河道可分为受日调节影响和不受日调节影响 2 种河段,结合上述 2 种浅滩碍航特征情况,枢纽下游浅滩段可分为 4 种类型 :①浅滩段受枢纽日调节的影响,年内输沙不平衡 ;②浅滩段受枢纽日调节的影响,年内输沙平衡 ;③浅滩段不受枢纽日调节的影响,年内输沙不平衡 ;④浅滩段不受枢纽日调节的影响,年内输沙平衡。以下分别讨论各类浅滩段整治参数的确定方法。

2 整治线宽度的确定

2.1 浅滩段受枢纽日调节作用和年内输沙不平衡的影响

2.1.1 受枢纽日调节作用的影响

由于坝下河段内流量和水位受到了枢纽日调节运行的影响,一天内会发生较大的变化。变化幅度

基金项目 西部交通建设科技项目(2005 328 746 26 ;2007 328 000 72)

作者简介 应强(1963—),男,浙江永康人,教授级高级工程师,从事河流动力学及泥沙工程研究。E-mail :qying@nhri.cn

• 44 • 水利水电科技进展,2009,29(2) Tel :025-83786335 E-mail :jz@hhu.edu.cn http ://hkb.hhu.edu.cn

与枢纽的运行方式和河段至枢纽的距离有关,即 $Q = Q(t, x)$ 。对于某一固定的坝下浅滩段,其流量过程与枢纽下泄流量有对应关系,但由于这一关系受河床地形、支流入汇等因素的影响,且这些因素较为复杂,笔者不对此进行研究,仅认为在研究河段内的流量过程为已知,即 $Q = Q(t, x_0)$ 。

研究表明,非恒定流的平均输沙率比相应平均流量下的恒定流输沙率大^[4],如流量过程符合正弦分布 $Q = Q_0 + \Delta Q \sin \theta t$,且输沙量满足 $Q_s = K(QJ)^m$ 时可表示为^[5]

$$Q_s = Q_{s0} \left[1 + \frac{3}{2} \left(\frac{\Delta Q}{Q_0} \right)^2 + \frac{3}{2} \left(\frac{k\theta \Delta Q}{J_0} \right)^2 + \frac{9}{8} \left(\frac{\Delta Q}{Q_0} \right)^2 \left(\frac{k\theta \Delta Q}{J_0} \right)^2 \right] = K' Q_{s0} \tag{1}$$

式中: Q_0 和 Q_{s0} 分别为恒定流时的流量及输沙量。 ΔQ 为最大流量与平均流量的差值; θ 为参数; t 为流量历时。

将式(1)应用于整治前后的情况,则有

$$Q_{s1} = K_1' Q_{s0} \tag{2}$$

$$Q_{s2} = K_2' Q_{s0} \tag{3}$$

一般来说,在枢纽建成前日平均流量变化不大,可以认为 $Q_{s1} = Q_{s0}$ 枢纽建成后,由于受枢纽日调节作用的影响,流量日内变化很大,亦即存在着较大的 ΔQ ,由式(1)可知 $K_2' \geq 1$,由式(3)可知 $Q_{s2} \geq Q_{s0}$

2.1.2 受年内输沙不平衡的影响

枢纽下泄流量的削峰填谷效应,使得枢纽下游河道洪峰消减,枯水水量增加,中水历时延长。枯水流量的增大以及流量过程受人为主的控制,使得某些浅滩段的冲刷时间不足、冲刷量不够而出现碍航浅情。河段年内往往出现河床平均下切(下切深度为 ΔZ_1),浅滩没有下切或下切较少(下切深度为 ΔZ_2),再假设水位随河床作同步调整,即相应于整个河段来说浅滩在一个水文年内淤积厚度 $H' = \Delta Z_1 - \Delta Z_2$,这一厚度下淤积量为 ΔG 。整治工程实施后,在水流从整治水位到设计水位的变化过程中不但要输送上游来沙,而且还应将 ΔG 这一淤积厚度冲走,整治前、后浅滩断面形态如图 1 所示。

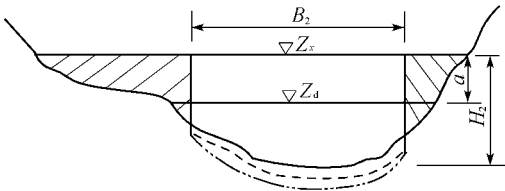


图 1 整治前、后浅滩断面形态

根据以上考虑,可得出如下方程^[6] :

$$G_{s2} - G_{s1} = \Delta G \tag{4}$$

式中 G_{s1} 和 G_{s2} 分别为整治工程前、后整治断面的输沙量。

整治前从整治水位至设计水位时浅滩段输沙量可表示为

$$G_{s1} = \sum g_{b1i} B_i \Delta t_i \tag{5}$$

式中 g_{b1i} , B_i , Δt_i 分别为由整治水位至设计水位过程中某一流量级下浅滩段的输沙率、水面宽度、历时。

为了方便说明,将 ΔG 用 G_{s1} 表示,引入因子系数 K ,有

$$G_{s1} + \Delta G = G_{s1} + (K - 1) G_{s1} = K G_{s1} \tag{6}$$

$$\text{则} \quad K = 1 + \frac{\Delta G}{G_{s1}} = 1 + \frac{\Delta G}{\sum g_{b1i} B_i \Delta t_i} \tag{7}$$

从而式(4)可以写为

$$G_{s2} = K G_{s1} \tag{8}$$

假设整治后浅滩段的输沙仍可表示为式(5)的形式,将式(5) (整治前、后的形式)分别代入式(8)左、右侧,得 $\sum g_{b2j} B_{2j} \Delta t_j = K \sum g_{b1i} B_{1i} \Delta t_i$,将此式左右侧的累加部分用平均值代入,并约去时间项后,得

$$B_2 g_{b2} = K B_1 g_{b1} \tag{9}$$

2.1.3 整治线宽度

由浅滩断面整治前、后满足流量连续性方程,并假设河床以推移质造床为主,选用沙莫夫的推移质输沙率公式,并将其式中的 $\left(\frac{U}{kU_c} - 1 \right)$ 项采用 $k_1 \left(\frac{U}{kU_c} \right)^c$ 的分段函数表示后,可以得出 $Q_b = 0.065 k_1 B^{-2-c} d^{\frac{1-4c}{12}} H^{-\frac{43+14c}{12}} Q^{3+c}$,由整治前、后输沙率相等可得出

$$\frac{B_2}{B_1} = \left(\frac{1}{K} \right)^{\frac{1}{2+c}} \left(\frac{K'_2}{K'_1} \right)^{\frac{1}{2+c}} \left(\frac{k_{12}}{k_{11}} \right)^{\frac{1}{2+c}} \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^{\frac{4c-1}{12(2+c)}} \cdot \left(\frac{H_1}{H_2} \right)^{\frac{43+14c}{12(2+c)}} \left(\frac{Q_2}{Q_1} \right)^{\frac{3+c}{2+c}} \tag{10}$$

如果进一步考虑由于整治建筑物本身的渗水使得整治断面间的流量减少,设 $Q_2 = \eta Q_1$,即式(10)又可写为

$$\frac{B_2}{B_1} = \eta^{\frac{3+c}{2+c}} \left(\frac{1}{K} \right)^{\frac{1}{2+c}} \left(\frac{K'_2}{K'_1} \right)^{\frac{1}{2+c}} \left(\frac{k_{12}}{k_{11}} \right)^{\frac{1}{2+c}} \cdot \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^{\frac{4c-1}{12(2+c)}} \left(\frac{H_1}{H_2} \right)^{\frac{43+14c}{12(2+c)}} \tag{11}$$

2.2 浅滩段受枢纽日调节影响,年内输沙平衡

由于浅滩段年内输沙平衡,式(4)中的 $\Delta G = 0$,由式(7)可知 $K = 1$,因此整治线宽度可表示为

$$\frac{B_2}{B_1} = \eta^{\frac{3+c}{2+c}} \left(\frac{K'_2}{K'_1} \right)^{\frac{1}{2+c}} \left(\frac{k_{12}}{k_{11}} \right)^{\frac{1}{2+c}} .$$

$$\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{\frac{4c-1}{12(2+c)}}\left(\frac{H_1}{H_2}\right)^{\frac{43+14c}{12(2+c)}} \quad (12)$$

2.3 浅滩段不受枢纽日调节影响,年内输沙不平衡
由于没有日调节影响,故式(2)和式(3)中的系数 $K'_1 = 1, K'_2 = 1$,由式(11)可得

$$\frac{B_2}{B_1} = \eta^{\frac{3+c}{2+c}}\left(\frac{1}{K}\right)^{\frac{1}{2+c}}\left(\frac{k_{12}}{k_{11}}\right)^{\frac{1}{2+c}} \cdot \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{\frac{4c-1}{12(2+c)}}\left(\frac{H_1}{H_2}\right)^{\frac{43+14c}{12(2+c)}} \quad (13)$$

2.4 不受日调节影响,浅滩年内输沙平衡

这种类型既没有日调节产生水流非均匀流的影响,也没有由于输沙局部不平衡的影响,由式(7)、式(2)和式(3)可得 $K = 1, K'_1 = 1, K'_2 = 1$,故由式(11)可得

$$\frac{B_2}{B_1} = \eta^{\frac{3+c}{2+c}}\left(\frac{k_{12}}{k_{11}}\right)^{\frac{1}{2+c}}\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{\frac{4c-1}{12(2+c)}}\left(\frac{H_1}{H_2}\right)^{\frac{43+14c}{12(2+c)}} \quad (14)$$

式(14)即为张沛文^[7]、刘建民^[8]提出的整治线宽度的计算公式。在式(12)中,考虑了粒径、流量及水深变化对整治线宽度的影响。如果令整治前后流量相等(即 $Q_1 = Q_2$),再假设整治前后 $k_{12} = k_{11}$ 及 $d_1 = d_2$,即由式(14)可以得出

$$\frac{B_2}{B_1} = \left(\frac{k_{12}}{k_{11}}\right)^{\frac{1}{2+c}}\left(\frac{H_1}{H_2}\right)^{\frac{43+14c}{24+12c}} = k\left(\frac{H_1}{H_2}\right)^y \quad (15)$$

式(15)的形式与航道整治工程技术规范^[9]所推荐的公式一致,由式(15)可见,整治前后浅滩段在流量、河床粒径不变的情况下,河宽比为水深比的函数,其系数为 $\left(\frac{k_{12}}{k_{11}}\right)^{\frac{1}{2+c}}$ 或 $\eta^{\frac{3+c}{2+c}}\left(\frac{k_{12}}{k_{11}}\right)^{\frac{1}{2+c}}$,指数为

$\frac{43+14c}{24+12c}$,二者均与将 $\left(\frac{U}{kU_c} - 1\right)$ 项转化为 $k_1\left(\frac{U}{kU_c}\right)^c$ 时的分段函数有关,若整治前后处于同一分段内,则系数项为 1,指数项与 c 的取值有关。当 $c = 1.75$ 时,指数 $y = 1.5$;当 $c = 5.5$ 时,指数 $y = 4/3$;随着 c 值的增大指数 y 值减少, y 极限最小值为 $7/6$ 。必须说明的是,以上指数是在以推移质输沙为主的公式中导得的,根据黄才安^[10]的研究,认为推移质和悬移质运动规律无本质上的不同。

K 由式(11)确定,可以认为它是由于年内输沙不平衡对整治线宽度的修正,由式(11)可知 K 值总是大于 1,因此修正后的整治线宽度较原先有所缩小。 K' 是由于日调节作用对整治线宽度的修正。式中 K' 是在流量为正弦变化和比降为流量变化率函数的假定下得出的,与实际流量过程有所差别,应根据实际流量过程具体确定。

3 应用

汉江确家套(距丹江口水利枢纽 166 km)浅滩段群中的官庄附近河段,随着丹江口水利枢纽的运行,初期(1968 ~ 1978 年)河底平均高程变化不大,但在 1978 年以后河底高程与长河段(红山头 ~ 雅口)平均纵剖面线相比较呈逐年增高的趋势^[11],1984 年为 0.7 m,1986 年为 0.8 m,1987 年为 1.4 m,1988 年为 1.4 m,1989 年为 1.7 m,说明此滩段年内输沙不平衡。同时,此河段还受丹江口水利枢纽日调节作用的影响,根据宜城站(位于确家套浅滩段的进口)1983 年水位资料统计(表 1),宜城站日水位最大变幅为 2.78 m,最小变幅为 0 m,平均变幅为 0.21 m。

表 1 宜城站受丹江口水利枢纽日调节作用影响的水位变幅统计^[12]

月份	最大变幅	最小变幅	平均变幅	月份	最大变幅	最小变幅	平均变幅
1	0	0.05		7	2.54	0.02	0.32
2	0.24	0.01	0.08	8	0.99	0.04	0.30
3	0.22	0	0.12	9	1.56	0.02	0.47
4	0.32	0.02	0.15	10	2.78	0.03	0.58
5	0.35	0	0.09	11	0.53	0.04	0.19
6	0.49	0	0.08	12	0.17	0.01	0.08

如果以 1978 ~ 1989 年作为统计时间,此河段累计淤积厚度达 1.7 m,平均每年淤积厚度为 0.155 m。根据内差求得河段蓄水期的年输沙总量为 1771×10^4 t,并取 2 个月作为枯水冲刷期,由式(7)可得 $K = 1.165$ 。

对牛路口等浅滩计算表明,整治线宽度的表达式中指数为 1.5 较为合适^[5,13]。该浅滩位于牛路口浅滩下游约 7 km 处,认为此指数值同样也符合该滩段,由式(13)可以得出整治前后的整治线宽度公式为

$$\frac{B_2}{B_1} = \left(\frac{\sum g_{b1i}B_i\Delta t_i}{\Delta G + \sum g_{b1i}B_i\Delta t_i}\right)^{\frac{1}{3.75}}\left(\frac{H_1}{H_2}\right)^{\frac{3}{2}} = 0.960\left(\frac{H_1}{H_2}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (16)$$

式(16)说明对于年内输沙不平衡的浅滩段,整治线宽度较输沙平衡的浅段有所缩窄,但缩窄程度较小。

4 结论

水利枢纽下游航道根据有无受枢纽日调节和浅滩输沙能力是否达到年内平衡可分为 4 种类型。

笔者根据 4 种碍航浅滩所具有的水沙特性,考虑了枢纽日调节所产生的非恒定流对输沙能力的影响和浅滩年内输沙不平衡影响等因子,导出了枢纽

下游的整治线宽度计算公式(式(11)),该式概括了4种碍航浅滩的情况,对于天然河流,简化后的式(11)与规范所推荐的公式一致。

采用汉江资料对式(11)进行了初步验证,由于实测资料取得比较困难,且影响整治线宽度的因素较为复杂,故公式的正确性还有待进一步验证。

参考文献：

[1] 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):13-20.
[2] 程武.汉江航道整治技术分析研究[D].武汉:华中科技大学,2004.
[3] 雷燕,唐洪武,周宜林,等.韩江三角洲河网航道整治水动力数学模型[J].水利水电科技进展,2007,27(6):53-56.
[4] 刘春晶,曲兆松,李丹勋,等.明渠非恒定流推移质输沙试验研究[J].水力发电学报,2006,25(2):31-37.
[5] 应强.枢纽下游河段航道设计水位、整治水位和整治线

宽度的确定方法[R].南京:南京水利科学研究院,2008.
[6] 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.
[7] 张沛文.论冲积性浅滩航道整治线宽度的确定[J].水运工程,1979(2):24-35.
[8] 刘建民.冲积性河流浅滩整治水位与整治线宽度确定[J].水道港口,2005,26(2):83-86.
[9] JTJ 312—2003,航道整治工程技术规范[S].
[10] 黄才安.水流泥沙运动基本规律[M].北京:海洋出版社,2004.
[11] 李昌华,孔祥柏,方佳岱,等.汉江典型河段航道整治模型试验研究[R].南京:南京水利科学研究院;天津:交通部天津水运工程科学研究所;南京:河海大学,1990.
[12] 董松年.汉江丹江口水库坝下河床演变及其对航道的影 响[C]//交通部水运司.内河航道整治工程技术交流大会文集.北京:人民交通出版社,1998:259-275.
[13] 童奇峰,张雨耕,陈岚.汉江丹江口至襄樊段整治线宽度计算公式率定[J].交通科技,2007(5):110-112.

(收稿日期 2008-08-05 编辑 高建群)

(上接第 43 页)

高性能混凝土泵送设备选型时应注意以下 3 个方面 ①常 C 60 以上,坍落度在 16~20 cm 的高性能混凝土,其泵送距离或高度只有普通混凝土的 1/3~1/2,如泵送距离较长,应选择泵送压力较大的混凝土泵。②应注意所选设备混凝土泵的吸料能力,吸入混凝土能力差时易吸入空气,造成泵送效率低,甚至堵管。③如果混凝土坍落度小,流动性就差,还 必须注意搅拌能力,一旦搅不动则泵送能力也会下降,必要时可向制造商提出要求。

东泵站 2004 年 6 月进水流道混凝土泵送时堵管频繁,后来施工单位重新选泵,操作手规范操作后就很少再出现堵泵现象。因此,泵送设备的合理选型和规范操作也是成功泵送的关键。

6 结 语

东泵站工程应用高性能混凝土泵送技术,充分利用高性能混凝土的泵送特性,解决了施工场地狭窄、混凝土浇筑困难等问题,取得了成功的经验。

高性能混凝土的水灰比很低,自由水分少,矿物细掺料对水有更高的敏感性,在工程中容易发生塑性收缩而引起表面开裂^[1]。东泵站工程初期由于对高性能混凝土特性认识不足,混凝土养护没有得到重视,造成了局部混凝土温度裂缝的质量缺陷。在

后来的施工过程中不断摸索,并从设计角度提出保温保湿措施。施工单位在高性能混凝土终凝(开始常规养护)前保持混凝土表面的湿润,覆盖塑料薄膜和保温被,使东泵站的混凝土质量有了很大的提高。建议以后类似工程要严格进行温控设计,采取正确的保温保湿措施,从而有效控制裂缝产生,增强建筑物的耐久性。

参考文献：

[1] 吴中伟,廉慧珍.高性能混凝土[M].北京:中国铁道出版社,1999.
[2] GB 50287—99,水利水电工程地质勘察规范[S].
[3] GB/T 50080—2002,普通混凝土拌和物性能试验方法[S].
[4] 林军,李克亮,黄国泓,等.曹娥江大闸高性能混凝土抗氯离子渗透性能[J].水利水电科技进展,2007,27(4):71-73.
[5] 梅明荣,任青文.混凝土结构的干缩应力研究综述[J].水利水电科技进展,2002,22(3):59-62.
[6] 曹恒祥,殷保合.超细水泥修补与加固混凝土裂缝技术的应用与开发[J].水利水电科技进展,2000,20(6):45-49.
[7] 林琳.大掺量矿渣粉煤灰混凝土试验研究——一种低热、高强、大流动性混凝土[J].水利水电科技进展,1997,17(4):28-32.

(收稿日期 2008-06-12 编辑 高建群)