

闽江北港束流工程方案研究^{*}

戴文鸿 金忠青 陆定维

(河海大学水利水电工程学院 南京 210098)

摘 要 针对河道整治模型试验所提出的在北港文山里河段设置束流工程这一预案,用数学模型对此束流工程进行专项的方案研究和分析,提出一种能改善北港河道水流条件、保证行洪安全和航道稳定的束流工程方案。

关键词 束流工程方案;分流比;防洪

中图号 TV85;TV872

1 闽江北港河道近年来的变化

闽江经过福州市分为南北两汉,分别称为南港、北港。福州河段下游白岩潭受潮汐作用,近几年北港下切,潮流向上延伸,最远已达侯官附近。当径流为 $2\,500 \sim 13\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时,南、北港受径流及潮流共同作用,上、中段成为潮区界,只起壅水作用,下段壁头、螺州以下属潮流界,有往复流,当竹歧流量大于 $13\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时,白岩潭潮汐现象不明显,此时福州河段为径流河段。

自 1993 年以来,北港有较大变化,逐年有冲刷下切的现象,由 1996 年 12 月与 1993 年测图比较可知:北港进口至洪山桥 4.7 km,平均冲深 3 m,洪山桥至解放大桥河段 6.6 km,为开阔段,平均冲深 1.5 ~ 2.5 m,解放大桥以下至魁歧 7.5 km,普遍冲深 3 ~ 5 m,使台江作业区成为险工岸段,魁歧以下经快安至顺坝尾 8.2 km,由于吹填快安围垦区,最大挖深达 8 m 左右。因北港两岸基本上已有原防洪堤控制,无法展宽,近几年水流动能增加主要反映在河床下切,致使北港近 4 年来平均冲深 2.0 m 左右,实测文山里、解放大桥上、下的水位-流量关系曲线,1996 年比 1990 年同流量下文山里断面水位下降 0.7 ~ 0.9 m,解放大桥上游水位下降 1.0 m,下游水位下降 0.6 m,因此水面比降加大,流速加剧,从而加速了河床冲刷。

水口大坝拦蓄后,输入北港的底沙每年 30 多万吨,而通过沿江各采沙船队连续两年的调查得知,自 1993 年以来北港年平均采沙约 243 万 t,其中 1993 年采沙 423.5 t,来沙少,采挖多,失去平衡,连冲带挖,致使北港河床降低,这样加速了南港的淤塞,使之更加宽浅,其河床的平均高程约 +4 m(罗零高程),而北港河床平均高程为 -1 m,两汉高差 5 m,因此,当竹歧径流 $1\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 以下时,南港分流为零。

南北港分流比的变化趋势是北港逐年增加,南港逐年减少。南港到 90 年代初期,干流流量在 $600\text{ m}^3/\text{s}$ 左右时,便开始断流,到 1996 年,干流流量到 $1\,200\text{ m}^3/\text{s}$ 时就断流,断流时间长达 5 个月。尤其近年来,洪水期北港分流比有逐年增大的趋势,从而加重了其下游福州等城市的防洪负担。因此,控制洪水期北港分流比成为整治闽江福州河段的首要任务。

本文针对多次提出的在北港上口文山里河段修建束流工程,用数学模型进行专项的方案研究,并主要分析北港束流对河道分流比及局部河床的冲淤影响。

2 数学模型研究

2.1 水流运动控制方程

本文研究的计算域为侯官—白岩潭之间的南北港段,如图 1 所示。在该区域的地形和来流条件下,水流运动的控制方程为著名的浅水方程,在图 2 所示的直角坐标系下表达为

收稿日期:1998-08-28

第一作者简介:戴文鸿,男,讲师,博士研究生,主要从事水工水力学及计算流体力学研究。

^{*} 本文研究得到高等学校博士学科点专项科研基金(9529406)及河海大学青年科学基金“取水河段水流运动特性及底沙输移规律研究”的资助。

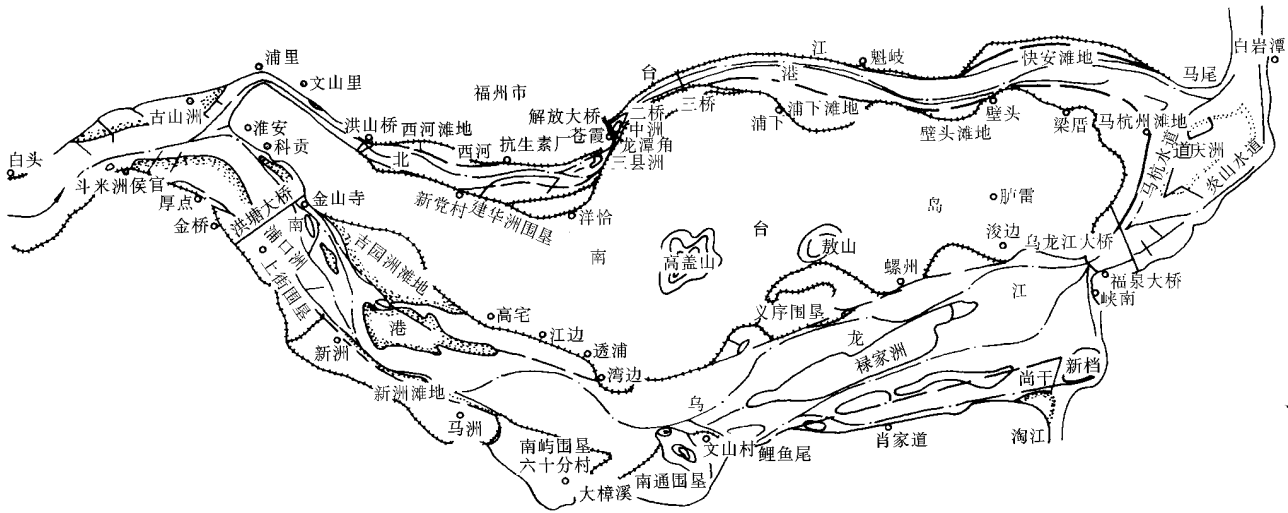


图1 南北港水流分流比计算域

Fig.1 An area for computation of flood ratio for south and north branches of Minjiang River

连续方程：
$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial (Hu)}{\partial x} + \frac{\partial (Hv)}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

运动方程：
$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \xi}{\partial x} + gu \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{Hc^2} = 0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \xi}{\partial y} + gv \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{Hc^2} = 0 \tag{3}$$

式中： u, v —— x, y 方向的垂线平均流速； ξ ——水位（参考水平面以上为正）； h ——床底高程（参考水平面以下为正）； H ——水深， $H = h + \xi$ ； t ——时间； g ——重力加速度； c ——谢才系数， $c = 1/n(\xi + h)^{1/6}$ （对宽浅河道，水力半径 $R \approx \xi + h$ ）， n 为河床糙率。

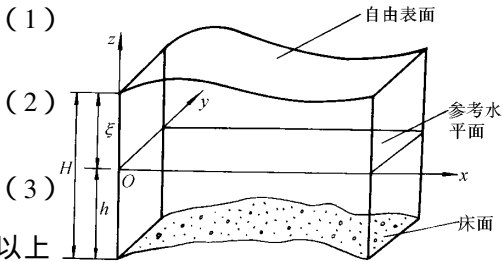


图2 浅水方程的坐标系

Fig.2 The coordinates of shallow water equations

2.2 推移质输沙控制方程

据质量守恒原理易知：泥沙推移质输沙率的通量总和等于床底高程随时间的变化率。

计算域内任一点(x, y)以密实体积计的输沙率设为 q_s ，则输沙控制方程为

$$M \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial q_{sx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{sy}}{\partial y} \tag{4}$$

式中： q_{sx}, q_{sy} —— q_s 在 x, y 方向的分量； M ——河床淤沙密实率， $M = 1 - \epsilon$ ， ϵ 为淤沙孔隙率。

显然，若已有 q_s ，则据式(4)即可求得床面高程 h 随时间的变化，再结合水流运动控制方程，即可描述推移质输沙过程，预测床底冲淤前景。问题是至今还缺乏既有严谨理论基础又便于实用的推移质输沙率公式。好在仍有一些经过实用考验的经验或半经验公式，如梅耶-彼德公式^[1]、恩格隆-翰生公式^[1]、成都勘察设计院公式^[2]以及下式^[3]可供选用于计算 q_s 。

$$q_s = \frac{1}{200} d(V - V_c) \left[\left(\frac{V}{V_c} \right)^3 - 1 \right] \tag{5}$$

式中： d ——泥沙计算粒径； V ——垂线平均流速， $V = \sqrt{u^2 + v^2}$ ； V_c ——以垂线平均流速计的沙粒临界起动流速。 V_c 值可在沙漠夫公式^[4]、成都勘察设计院公式^[2]以及下式^[3]中选用计算。

$$V_c = \sqrt{\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} g d \left(\frac{H}{d} \right)^{1/5}} \tag{6}$$

式中： γ_s ——泥沙密实重度； γ ——水的重度； g ——重力加速度； H ——水深。

在笔者的研究中，上述 q_s 和 V_c 的计算式都曾试用比较，结果发现，以式(5)和式(6)最便于配套协调计算，且得到最符合模型验证的结果，其适用范围为 $d \geq 0.00024 \text{ m}$ 的推移质输沙。

2.3 实现水沙运动解耦的准恒定模式

值得注意的是,推移质泥沙的输运过程使河床高程 h 发生变化,从而又引起水流流场的变化,严格地说,求解水流流场和求解推移质的输运是互相耦合的问题,必须以适当的方式实现解耦方可求解,即严格来讲方程(1)~(6)应联立起来,在每一时间步长 Δt 内联立求解,或引入某种迭代过程,使得出的迭代解逐步地同时满足水流运动方程和推移质输运方程。显然,这两种解耦方法均较繁杂。

考虑到推移质泥沙输运及河床床面冲淤变化的速率相对于水流运动要慢得多,在一个很短的时间(如水流计算时间步长,常为 $0.5 \sim 1.0\text{ s}$)内,由推移质输运所致床面高程的改变不足以引起流场的明显变化,所以在每个水流计算时间步长 Δt_w 内,河床可近似作为不变;非但如此,推移质运动计算的时间步长也可较 Δt_w 大。因此,本文研究可用下述简化的准恒定模式实现解耦且不失足够的精度:先算一步定床流场,再以算得的流场为依据计算一步泥沙输运,据河段输沙率的高低算得河床床面冲淤变化,进而再切换去算床面变化了的下一步流场。如此循环,直至输沙总时段末。

3 闽江北港束流对河道分流比的影响计算

3.1 模型研究验证计算

在数学模型研究过程中,为了检验其精确程度,对相同水文、地质、地形等条件下的数学模型计算结果与实测洪水及物理模型试验结果^[5]进行比较。验证计算所选取的洪水为闽江 1992 年 7 月 7 日洪水,干流流量为 $30\,300\text{ m}^3/\text{s}$,该洪水条件下原型和物理模型均有结果,便于进行相互比较。

经计算,闽江北港在 1992 年 7 月 7 日洪水下分流比为 26.93%,而对应的实测洪水分流比为 26.50%,物理模型试验结果为 27.28%。计算结果相对地比模型试验值略偏小,又比实测洪水分流比值略偏大,可见计算结果较为合理,表明用该数学模型作为本文的研究分析是正确适宜的。

3.2 北港束流方案的分流比计算

针对北港在洪水期分流比近来有逐年加大的趋势,拟在文山里水文站以下 330 m 处设置束流工程来控制北港的分流比。此处为北港河道最窄处,洪水自然宽仅 170 m 左右,在此处再束窄河道,将进一步束窄过水面积。

为了验证束流对北港分流比影响的效果,现通过数值计算对不同的束流程度在定床条件下的 24 年、50 年、100 年、200 年一遇洪水北港的分流比加以计算分析,它们对应的干流洪水流量分别为 $29\,400\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $32\,800\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $35\,600\text{ m}^3/\text{s}$ 和 $38\,300\text{ m}^3/\text{s}$ 。

本文中研究中,利用数值计算较为快捷方便的优势,设计了多种束流方案,束流口门宽度分别为 80 m、90 m、95 m、100 m、105 m、110 m、115 m、120 m、125 m、130 m。北港分流比计算结果列于表 1。

表 1 各种束流方案对应的北港分流比计算结果

Table 1 Computational results of flood ratio for north branch for various flood-narrowing projects												%
洪水标准	束流前	束流后口门宽度/m										
		80	90	95	100	105	110	115	120	125	130	
200 年一遇	24.97	22.36	22.57	22.81	23.04	23.33	23.68	23.74	23.89	24.26	24.57	
100 年一遇	25.38	22.67	22.96	23.29	23.45	23.71	24.05	24.19	24.35	24.68	24.93	
50 年一遇	26.19	23.78	24.04	24.36	24.69	24.83	24.97	25.01	25.09	25.25	25.46	
24 年一遇	27.32	25.81	25.92	26.08	26.21	26.39	26.46	26.55	26.69	26.72	26.81	

计算结果表明,由于束流工程在束流口缩小了过水宽度和过水面积,使得北港文山里及其以上断面水位抬高,将水流强行逼向南港,以致南港的进口水位也相应抬高。这样就使得水流多分向南港,从而减小了北港的分流比,而且这种减小的程度随着束流口门宽度的变小而加大。

计算结果也表明*,束流后在抬高口门上游水位的同时,下游(洪山桥以下)水位也降低了,在口门处形成了一定的水位壅高,而且此时束流口门及其下游约 1 km 的河道局部区域流速增大。除此之外,南北港河道的流态基本保持不变。

4 北港束流段局部河床冲淤变化计算

根据要求,须对北港束流段河床束流前后的冲淤变化作出预估。在北港文山里河段设置束流工程后,据前

* 戴文鸿等. 闽江北港束流工程方案研究报告. 河海大学,福州闽江整治工作组,1998. 3

述分流比及南北港整体水流计算的结果*分析可知(a)束流口门以上段,由于束流壅水的影响,水位较束流前稍高,但来流量及流速减小,根据输沙平衡原理易知,河床的冲刷较束流前要减缓;(b)束流口门及其以下1 km范围内的局部河段,来流量及水位降低,但流速在此局部河段增大,此段为河床冲淤变化分析的重点区域;(c)距束流口门1 km以外的下游段,由于束流的影响在此后只是相应地减小过流量(分流比减小),而对流态的影响甚微,同样,依据输沙平衡原理知,束流前后河床的冲淤变化不大,更不会加深对下游河床的冲刷作用。

因此,选定北港束流口(文山里水文站后330 m处)以下,并包括洪山大桥和洪山旧桥在内的下游局部河段作为研究对象,进行局部河床冲淤变化计算,其局部域进口即为束流口处。

这样,对束流前及束流口宽为100 m和90 m两种方案分别在进口(束流口处)进行输沙,输沙条件为:分别在进口以 1.6 kg/s 的输沙率输入推移质泥沙,其中值粒径为 0.00065 m ,输沙时间均为3 d。经计算得到对应的河床高程变化值及河床冲淤分布图*。

由计算结果分析知(a)束流前后在束流口及其以下200 m范围的河段内,河床均为基岩,河段没有发生淤积,故为不冲不淤区段。(b)束流口以下200~1 000 m范围内,三种进口情况下,河床均发生了不同程度的冲刷,束流前此段最大刷深(输沙前后河床高程下切数值)为 0.32 m ,而束流口宽分别为100 m和90 m时,此段最大刷深分别为 0.38 m 和 0.41 m 。由此可知,尽管束流使该段流速增大,并带来河床的进一步下切,但影响的程度并不大,如果在此段再加以一定的河床保护措施,便可消除束流带来的负面影响。(c)束流口以下1 000 m之后范围,三种进口情况下,无论是河床冲、淤分布还是冲、淤值大小都没有什么变化,说明在此后范围的北港河床受束流的影响甚微,显然,束流工程不会引起北港下游河床的进一步下切。

5 北港束流工程方案布置研究

在文山里水文站下游约330 m处修建束流工程有三种不同的布置型式(a)北港全断面拦截,修建拦河控制闸和通航船闸组成一个闸坝水利枢纽,利用闸门的不同启闭方式来调节流量,可有效地控制南北港水流的分流比,但需要修建围堰,解决施工导流问题,从工程实施的可行性和经济性等方面考虑,目前不太可能采用北港全断面拦截的闸坝枢纽布置方案。(b)沿河床修筑潜坝,可减小过水面积,抬高上游水位,从而改变南北港分流比,即增加南港分流比,减小北港分流比,但潜坝方案不仅受通航要求的限制,而且沿河床在水下修筑潜坝施工难度较大,也不宜采用。(c)在两侧河岸修建伸向河中的丁坝,以缩窄河道过水宽度,在保证束流口段河床(此段河床为裸露的岩石)不被冲刷的条件下,经以上分析计算和河工模型试验研究^[5],束流口门宽度取为100 m左右,该束流方案对减少洪水期北港分流比是有效的(见表1),平均可减少分流比2%左右,达到了预期的目标,是一种合理、可行的方案。

参 考 文 献

- 1 钱宁,万兆惠.泥沙运动力学.北京:科学出版社,1983.262~295
- 2 华东水利学院.水工设计手册.第2卷.北京:水利电力出版社,1984.116~125
- 3 王世夏.论底沙的起动流速和输沙率.华东水利学院学报,1979,(1):86~103
- 4 武汉水利电力学院.河流泥沙工程学.上册.北京:水利电力出版社,1983.41~109
- 5 李安中,常福田,蔡辉等.闽江福州河段防洪整治研究.河海大学学报,1998,26(2):45~49

Study on Flood-Narrowing Project on North Branch of Minjiang River

Dai Wenhong Jin Zhongqing Lu Dingwei

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098)

Abstract Because of the increase of flood and new scour, embankment collapse of the north branch of the Minjiang river has arisen, and it has threatened the safety of Fuzhou city. To ensure safety and control flood, a flood-narrowing project on the north branch of the Wenshanli reach of the Minjiang river is suggested, and on the basis of numerical computation the proposed project is studied.

Key words flood-narrowing project; ratio of flood discharge; flood control

* 戴文鸿等.闽江北港束流工程方案研究报告.河海大学,福州闽江整治工作组,1998.3