

不同分汊比下分汊河道水流规律试验研究*



赵聪聪¹, 王平义¹, 王梅力², 陈雅飞¹

(1. 重庆交通大学, 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074;

2. 重庆交通大学 建筑与城市规划学院, 重庆 400074)

摘要: 分汊河道作为一种常见的河型, 其水流特性在河床演变和航道维护中具有重大意义。以分汊河道为研究对象, 通过对天然滩体概化进行物理模型试验, 得到分汊河道的水流规律。结果表明, 滩体前后各出现低流速区, 两汊流速分布具有不对称性, 两汊断面最大流速交替出现, 沿程流速变化与滩体高程走势一致, 滩体最高处出现流速最大值(在完全淹没条件下); 分流比随汊道宽度的减小而减小, 滩体靠近河道中央时, 两汊分流比相当, 当滩体靠近岸边时, 较窄一侧汊道分流比变小, 但流速变化大, 水流更不稳定。

关键词: 分汊比; 分流比; 分汊河道; 水流规律

中图分类号: TV 143; U 612.23

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)05-0084-07

Experimental study on flow law of branching channel under different branching ratios

ZHAO Cong-cong¹, WANG Ping-yi¹, WANG Mei-li², CHEN Ya-fei¹

(1. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. College of Architecture and Urban Planning, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: As a common type of river, the flow characteristics of branching channel are of great significance in river bed evolution and channel maintenance. We take the branching channel as the research object, apply the physical model test of natural beach generalization, obtain the flow law of branching channel. The results show that there are low velocity zones in front and back of the beach, and the velocity distributions of the two branches are asymmetrical. The maximum velocities of two branches appear alternately. The variation of velocity along the river is consistent with the trend of beach elevation, and the maximum velocity appears at the highest point of the beach (under the condition of total flooding). The diversion ratio decreases with the decrease of the branch width. When the beach is near the center of the channel, the diversion ratios of the two branches are equivalent. When the beach is near the shore, the diversion ratio of the narrower branch becomes smaller, but the velocity changes greatly, and the flow is more unstable.

Keywords: branching ratio; diversion ratio; branching channel; flow law

在天然河道里, 滩体的位置并不是固定的, 即使同一个滩体也会随着时间的推移或往岸边或下游移动。滩体的移动和变化主要是水流的作用, 流速的大小和分布是影响滩体变化的重要因素。分汊河道的水流运动最突出的特点就是分汇流,

而河道的演变又与分流比、分沙比密切相关, 因此水流规律是反映河道稳定性的重要参数, 直接影响河道主支汊的演变过程。分汊河道的水力要素与河道演变之间是一种动态关系, 河道演变依赖于水流提供的动力和泥沙补给, 河道变形对水

收稿日期: 2021-08-25

*基金项目: 重庆市教育委员会青年项目(KJQN-201900745)

作者简介: 赵聪聪(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为航道整治。

通讯作者: 王平义(1964—), 男, 博士, 教授, 研究方向为水力学及河流动力学。E-mail: py-wang@163.com

流运动又有一定的影响, 两者相互适应、相互调整, 是流域自然条件下长期适应的结果。随着长江上游梯级水库的修建落成, 打破了原有的水沙平衡, 开展新水沙条件下的河道水流规律研究具有重要现实意义, 通过掌握分汊河道的水流特性, 因势利导对其进行整治规划, 对航运、灌溉、防洪等工程具有指导意义。

国内外众多学者对分汊河道的水流运动进行了深入研究。Bramely 等^[1]采用涡量-流函数模型, 对分汊口的二维层流进行模拟, 讨论不同雷诺数和不同分汊宽度对汊道水流的影响; Ramamurthy 等^[2]建立直角双汊明渠的三维紊流模型, 利用试验数据验证三维模型, 并得到三维流速分布图, 对分汊口水流进行研究; Shettar 等^[3]采用沿水深平均的 $k-\varepsilon$ (湍能-湍能耗散率) 紊流模型, 研究了明渠分汊水流的运动特性; Neary 等^[4]通过建立三维紊流模型来研究底床糙率变化对分汊水流结构的影响, 并模拟直角分汊口区域的三维水流结构; 余新明等^[5]通过水槽试验对分汊河道水流平面结构进行分析, 并对底沙输移演化特征进行探讨; 常宏兴等^[6]应用重整化群 (renormalization group, RNG) 紊流模型, 采用两种自由表面处理方法即刚盖假定和流体体积函数 (volume of fluid, VOF) 法进行三维数值模拟, 研究分汊河道不同分流比工况下的水流运动规律; 童朝锋等^[7]推导出两种汊道分流比的简便计算方法, 即等含沙量法和动量平衡法, 并利用实测资料进行验证; 张红等^[8]以长江下游东流水道为研究对象, 剖析近 10 年来汊道

分流属性及分流比调整的驱动机制; 刘海强等^[9]通过对矩形渠道直口渠分水口进行分流规律试验, 得到不同分流比下水面变化和分流比与相对堰上水头、主渠上下游弗劳德数的关系及流向角与分流比的关系; 陈立等^[10]通过分析比较现有分流比计算公式对三峡水库蓄水后的实测资料的适用性, 引入综合反映两汊糙率、比降差异的因子, 建立较高精度的分流比计算式, 分析分流比的变化特点。在众多学者研究基础上发现, 分汊河道的水流规律是研究其河道演变的重点内容, 因此本文以常见的分汊河道为研究对象, 着重分析其水流规律, 为今后研究分汊河道泥沙运动、河道演变等提供理论依据。

1 试验设计

试验在重庆交通大学国家内河航道整治工程技术研究中心进行。矩形水槽长 30 m、宽 3 m, 分为进水段、试验段和出水段共 3 部分, 试验模型及测点布置见图 1。在试验段布置 17 个横断面, 每个断面布置 11 个测点用来测量流速和水位等数据, 横断面以 1#~17# 表示, 纵断面以 Z1~Z11 表示, 试验水槽进口流量由电磁流量计控制, 水位由尾门控制。流速采用挪威 Nortek 科学仪器公司研制的高精度声学多普勒测速仪测量。水位测量采用同步自动测量系统, 采样频率为 1 次/s, 每次采集 60 s, 系统利用超声测距原理, 结合先进的传感技术和电子技术, 同步采集、记录不同测点的水位数据。

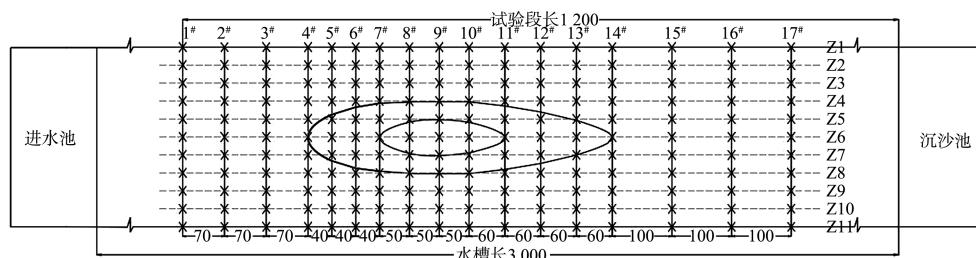


图 1 试验模型及测点布置 (单位: cm)

为了研究不同位置滩体的水流规律, 采用不同分汊比来实现。根据李志威等^[11]定义分汊比 λ 为滩体所在河道的支汊水面宽度 B_1 与主汊水面宽

B_2 之比, 则采用 3 种分汊比分别为 0.90、0.67、0.43 进行试验。试验以长江上游河段为研究区域, 根据长江上游航行参考图^[12], 统计出典型滩体的

形态尺寸，结合试验水槽条件，设计滩体长度为 510 cm，依次为滩头段、顺直段、滩尾段，长度分别为 120、150、240 cm，高度为 12 cm。本次试验为恒定流概化模型试验，采用 3 个流量、水深进行研究，分为未淹没、恰淹没以及完全淹没 3 个状态，具体工况见表 1，每个分汊比均按这 5 个工况进行试验。

表 1 试验工况

工况	流量 $Q/(L \cdot s^{-1})$	水深 H/cm
1	60	12
2	90	16
3	90	12
4	90	9
5	120	12

2 试验分析

2.1 不同分汊比下的横向流速分布规律

为了能较为全面地研究水流规律，本文从横向流速、纵向流速以及分流比 3 个方面进行分析。

分析横向流速时选取滩头(4#断面)、滩体顺直段(9#断面)、滩尾(14#断面)3 个特征断面对不同工况、不同分汊比下的横向流速进行对比分析。滩头横向流速分布见图 2。可以看出，流速从左岸至右岸有先减小后增加的趋势，最小流速出现在滩体中轴线附近。在同一分汊比下，当流速较小时，断面流速较平稳，沿河宽方向变化不大，随着流速的增加，中轴线流速开始减小，各工况下减小的幅度略有不同，可以看到流量越大，水深越小，流速减小幅度越大。这是因为水流至分流点后，向左右两个汊道分流，水流分散，加之滩体的阻碍作用，中间的流速变小，在滩体中轴线区域形成一个低流速区。在不同分汊比下，流速变化的现象又有不同，在分汊比 0.90 时，由于滩体大致处于河道中心，两边分得的流量大致相当，因此两汊的流速基本相差不大。在分汊比 0.67 时，心滩的位置往左岸偏移，左汊变窄，左汊分得的流量比右汊少，因此左汊流速略微小于右汊流速，左右两汊流速不对称的现象在分汊比 0.43 时更明显，并且由于该位置比较靠近边壁，在边壁效应和滩体阻碍的双重影响下，左汊流速相比其他两

个分汊会稍小一些，与右汊流速相比则小得多，在图上反映为从左岸至右岸连续增加。该断面流速的变化分流比起主要作用，随着左汊逐渐变窄，分得的流量减少，流速有变小的趋势，而右汊流速有增加的趋势。

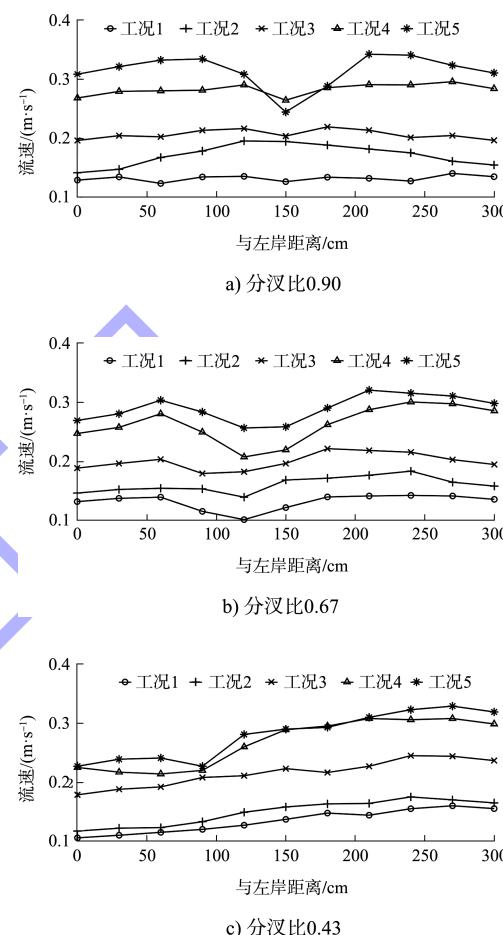


图 2 不同分汊比时 4#断面的横向流速分布

9#断面为滩体顺直段，滩体最宽处即河道最窄处，断面平均流速最大，横向流速分布见图 3。由于设计 3 种水深，在未淹没条件下滩面上的测点未能测到流速，因此图像上存在断点。最大流速一般出现在滩槽交界区，反映汊道主流线出现在滩体边界深槽处，进入滩面略微减小，这是因为滩体有一定的坡度，上滩后水深变浅，坡降变大，流速下降且不稳定，这里流态最为复杂，水流上下波动极为紊乱。在滩体全淹没状态下，最大流速出现在滩体中轴线处，此时整个河道被水流贯通，滩体的分流作用减弱，心滩成为河底暗滩，流速分布比较符合“中间大两边小”的规律。

在3种位置下, 随着左汊变窄, 流速不断增加, 在分汊比0.43时, 左汊流速最大, 并且左汊的流速大于右汊的流速, 左汊流速变化范围大, 最大涨幅超过15%, 右汊流速相对平稳, 说明较窄一侧汊道流态更加紊乱。在该断面引起流速变化起主要作用的是过水面积, 在滩体顺直段, 支汊道越窄, 过水面积越小, 流速越大。

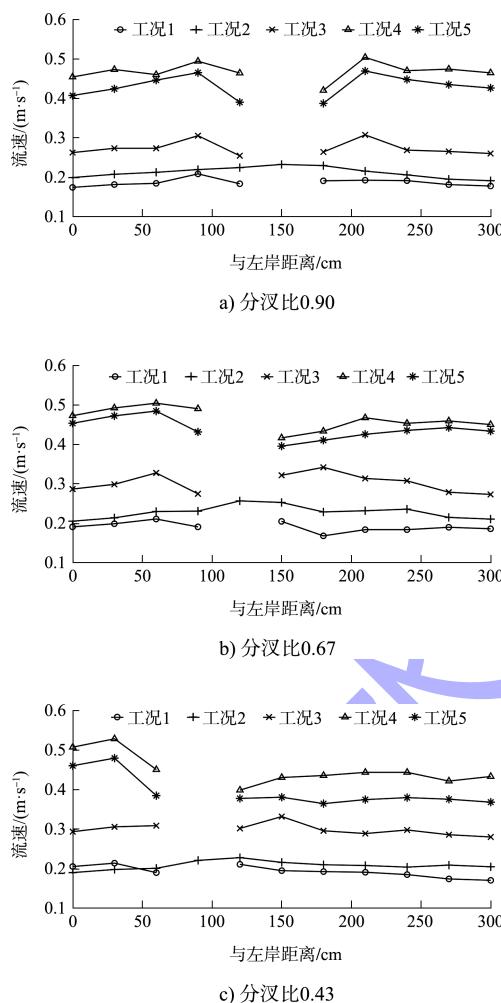


图3 不同分汊比时9#断面的横向流速分布

14#断面在滩尾处, 滩体逐渐变矮, 所占河道宽度变小; 河道变宽, 两流逐渐交汇, 横向流速分布规律见图4。可以看出, 不同工况不同位置下的横向流速分布规律是相似的, 滩槽流速较为平稳, 滩体中轴线流速最小, 在滩尾也会形成一个低流速区。这是因为水流通过滩体达到汇流区时, 两汊水流经交汇碰撞相互融合后以相同的速度运动, 可以认为是非弹性碰撞, 动量守恒而动能损

失, 水流碰撞造成强烈紊动导致能量耗散, 具体表现则是流速减小。最大流速一般出现在滩槽交界处, 然后向两岸逐渐稳定, 说明主流线仍在滩体附近。流速沿横向分布在大小上具有不对称性, 流速的不对称性受分汊比的影响, 分汊比越小即滩体越靠近岸边, 流速的不对称性越明显。究其原因是两汊的水流运动状态不同, 可以追溯至分流点位置, 自分流点至汇流区两汊流量、汊道宽度不同, 受滩体和边壁的影响不同, 导致左右两汊流速不对称。

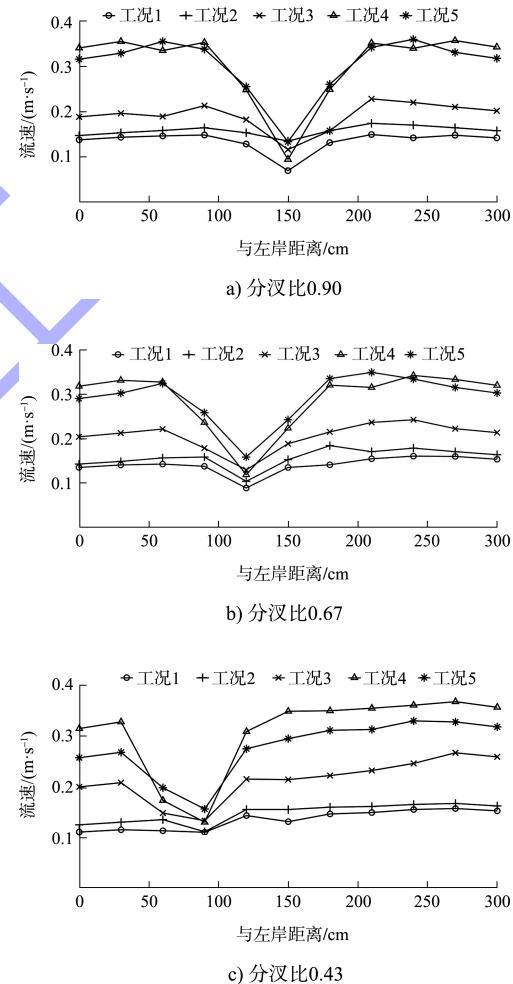


图4 不同分汊比时14#断面的横向流速分布

总体来看, 各断面的流速分布均受滩体的影响, 靠近边壁的滩体受自身和边壁的双重影响, 滩体的位置对流速分布规律影响较小, 对流速的量值变化影响较大。在分汊河段, 分流区和汇流区都会形成一个低流速区, 但形成的原因不同, 前者为滩体的阻碍作用, 后者为过流断面变宽加

之两流汇合的能量耗散，使后者流速减小的程度大于前者。

2.2 不同分汊比时纵向流速分布规律

为研究滩体所在河段区域的纵向流速分布规律，采用固定流量改变水深的方法，即选取 3 个工况(工况 2~4)对 3 个分汊比的纵向流速进行对比分析。以 1#断面为原点，左右汊都取滩槽交界区的断面，即分汊比 0.90 时选择 Z4、Z8 断面，分汊比 0.67 时选择 Z3、Z7 断面，分汊比 0.43 时选择 Z2、Z6 断面进行对比分析，左、右两汊纵向流速分布见图 5、6。

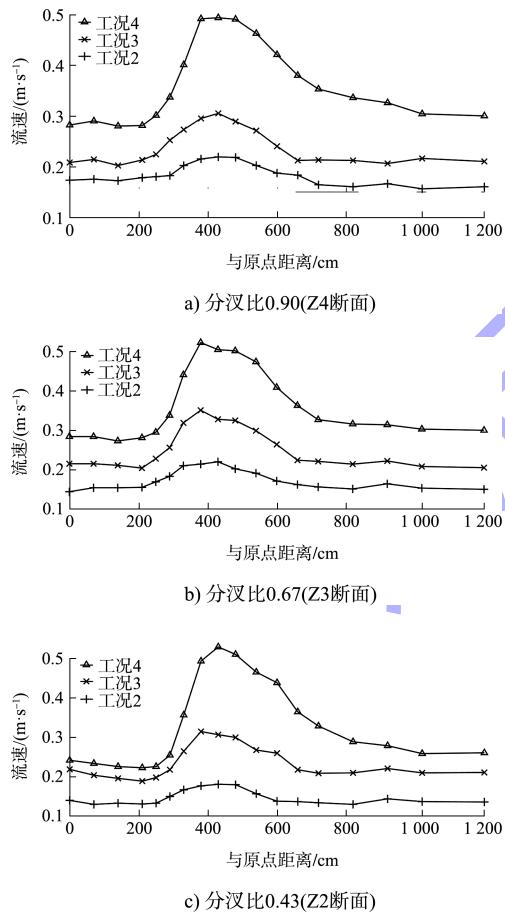


图 5 不同分汊比时左汊纵向流速分布

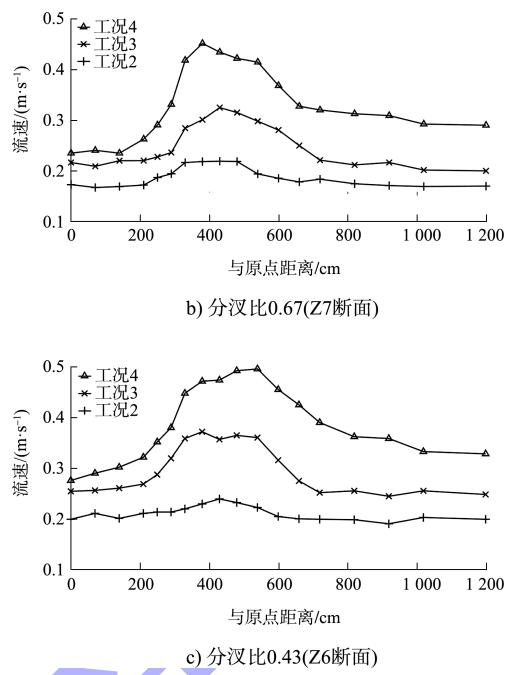
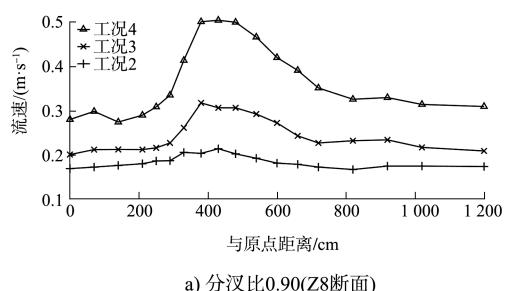


图 6 不同分汊比时右汊纵向流速分布

对于纵向流速，不同工况下水深的改变对流速的大小有影响，对流速的分布规律没有显著变化，各工况下的分布规律是相似的。由图 5、6 可以看出，在滩体上游，水流未受到滩体的影响，流速比较稳定，至滩头处，由于过水断面开始变窄，流速开始增加，并且增长速率较快，到滩体顺直段河宽达到最窄，流速升至最大，在顺直段流速并不稳定，并且测点在滩槽交界处，之后河道慢慢放宽，水流流速也开始下降，下降速率较为缓慢，最后趋于稳定。在流速变化方面，大水深下流速小、变化幅度小，水深越小流速越大，变化幅度也越大，在 3 种工况下，小水深时最大流速差能达到 0.3 m/s，而大水深下的最大流速差仅有 0.07 m/s，说明浅水下流速沿程变化剧烈，流速的增加幅度受平均流速的限制。滩体位置的变化对顺直段的流速变化有影响，体现在变幅上，对其他区域影响较小，右汊流速变化相对于左汊平稳一些。总体上，流速沿程变化规律和滩体的形态有关，滩头相较于滩尾陡短，反映在流速上则是变化率大，流速对滩体坡降的变化十分敏感。

2.3 不同分汊比下的分流比规律

天然分汊河道计算分流比的方法有多种，何书会^[13]曾用推求水面线的方法进行分流比计算，

虽然得到的解比较精确, 但是推算过程十分繁琐。目前多是利用数学计算公式进行求解, 很多学者都建立了比较适用的公式, 但基本是在丁君松等^[14]、韩其为等^[15]、秦文凯等^[16]建立的公式上改进的。结合本试验测得的数据, 进行分流比计算。根据分流比定义, 得出左汊分流比 η_L 为:

$$\eta_L = \frac{Q_L}{Q_L + Q_R} \quad (1)$$

式中: Q_L 、 Q_R 为进入左、右汊的流量。在试验过程中, 测得各断面测点的流速和水位, 根据式(1)可以计算得到各汊流量。以测点为标准沿河宽分为若干个流带, 计算每个流带的面积, 在两边深槽处, 将断面概化为矩形断面, 在滩面处, 将断面概化为梯形断面进行计算。通过计算, 各工况下计算流量与设计流量误差在 5% 以内, 说明数据具备可靠性。

本试验是概化模型试验, 没有天然河道复杂, 故不考虑一些复杂的因子, 采用基于曼宁公式得到的分流比计算公式:

$$\eta_L = \frac{1}{1 + \frac{A_R}{A_L} \left(\frac{H_R}{H_L} \right)^{\frac{2}{3}} n_R \left(\frac{J_R}{J_L} \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (2)$$

式中: A_L 、 A_R 分别为左、右汊道断面过水面积; H_L 、 H_R 分别为左、右汊道平均水深; n_L 、 n_R 分别为左、右汊道糙率系数; J_L 、 J_R 分别为左、右汊道比降。将计算值与实测值进行对比, 见图 7。

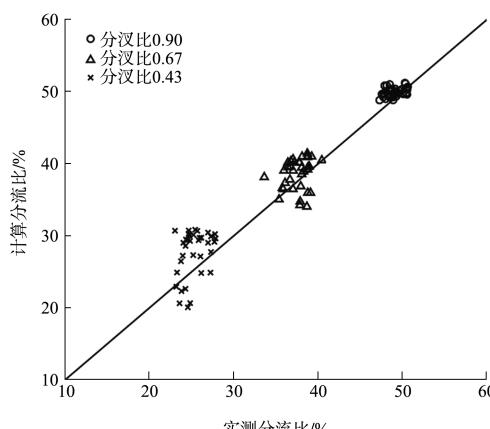


图 7 实测分流比与计算分流比对比

本试验中, 引起分流比变化的主要因素是分汊比, 为了得到分流比明显的变化, 滩体在河道

中的相对位置每次间隔 30 cm 获取 3 个分汊比, 对应的分流比相差较大, 数据反映在图上则呈现出分段现象。由图 7 可以看出, 不同分汊比时的分流比不同, 从点的分布来看, 计算值略大于实测值。其中分汊比 0.90 的分流比分布比较集中, 大多数点都在线上; 分汊比 0.67 的分流比分布比较发散, 但多数点分布在在线上或线的周围, 偏离程度不是很大, 说明计算公式在这两种情况下适用性较好, 滩体越靠近河道中央两汊流量越稳定; 分汊比 0.43 的分流比分布也比较分散, 比分汊比 0.67 时稍好, 但与计算分流比的吻合度不佳, 偏离程度很大, 最大误差超过 10%, 说明计算公式在分汊比较小, 即两汊宽度相差较大时适用性欠佳。文献[16]指出, 若支汊和干流间存在一定的夹角, 水流至分流点时会发生弯曲形成环流, 进而影响分流比。在本试验中, 虽然干流与支汊同在一矩形河槽, 不存在夹角, 但由于滩体的存在, 水流在分流点处仍会产生夹角, 发生偏转, 而在式(2)中没有考虑这一变量, 导致公式在小分汊比下不再适用。

3 结语

1) 河道中由于滩体的存在, 对水流的影响特别大, 主要是水流变得紊乱, 流态变得复杂, 对地形的演变和航道的维护带来重大影响。通过试验发现滩体前后都会存在一个低流速区, 两汊流速具有不对称性, 大部分断面是宽侧流速大于窄侧, 但在滩体最宽段, 窄侧流速会大于宽侧, 主要是受分流比和过水面积的影响; 沿程流速受滩体形态影响, 与滩体的地形走势一致, 不同分汊比下的流速变化不一致, 窄侧流速变幅大, 宽侧流速相比较平缓。

2) 不同分汊比下的分流比明显不同, 大分汊比下流速较为稳定, 则分流比分布较为集中, 小分汊比下流速比较紊乱, 则分流比分布较为发散。通过与计算分流比相比, 大分汊比下的分流比吻合度较好, 小分汊比下有偏离, 说明滩体往边壁靠近, 影响分流比的因素越多, 需要考虑更多的因素才能得到更加真实的分流比。

参考文献:

- [1] BRAMLEY J S, DENNIS S C R. The numerical solution of two-dimensional flow in a branching channel[J]. Computers & fluids, 1984, 12(4): 339-355.
- [2] RAMAMURTHY A S, QU J, VO D. Numerical and experimental study of dividing open-channel flows[J]. Journal of hydraulic engineering, 2007, 133(10): 1135-1144.
- [3] SHETTAR A S, MURTHY K K. A numerical study of division of flow in open channels[J]. Journal of hydraulic research, 1996, 34(5): 651-675.
- [4] NEARY V S, SOTIROPOULOS F, ODGAARD A J. Three-dimensional numerical model of lateral-intake inflows[J]. Journal of hydraulic engineering, 1999, 125(2): 126-140.
- [5] 余新明, 谈广鸣, 张悦, 等. 分汊河道水沙输移特征试验[J]. 武汉大学学报(工学版), 2007, 40(4): 9-12, 17.
- [6] 常宏兴, 芦松, 武亚辉. 分汊河道分流比对河道水流流态影响分析[J]. 水科学与工程技术, 2013(6): 43-45.
- [7] 童朝峰, 严以新, 孟艳秋, 等. 分汊河道分流比估算方法[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(6): 7-9, 90.
- [8] 张红, 张明. 长江下游东流水道汊道分流属性及分流比调整机制研究[J]. 水利水电快报, 2021, 42(4): 29-34, 41.
- [9] 刘海强, 王文娥, 胡笑涛, 等. 矩形渠道分水口分流规律及影响因素[J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(9): 117-122.
- [10] 陈立, 陈帆, 张为, 等. 荆江沙市段分流比计算公式的改进及应用[J]. 湖泊科学, 2020, 32(3): 840-849.
- [11] 李志威, 王兆印, 张康. 冲积河流中沙洲形态统计分析[J]. 水电能源科学, 2011, 29(11): 142-144, 214.
- [12] 长江航道局. 长江上游航行参考图[M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.
- [13] 何书会. 汊道型河道水面线及两汊分流量计算[J]. 水文, 2000, 20(1): 51-52.
- [14] 丁君松, 丘凤莲. 汊道分流分沙计算[J]. 泥沙研究, 1981(1): 58-64, 57.
- [15] 韩其为, 何明民, 陈显维. 汊道悬移质分沙的模型[J]. 泥沙研究, 1992(1): 44-54.
- [16] 秦文凯, 府仁寿, 韩其为. 汊道悬移质分沙模型[J]. 泥沙研究, 1996(3): 21-29.

(本文编辑 王璁)

(上接第 83 页)

5 结语

1) 综合考虑工程特性和过鱼对象的生态习性, 蚌埠闸鱼道采用垂直竖缝式鱼道结构形式, 并根据以往工程经验提出了一种无翼板式隔板布置形式。

2) 通过建立三维紊流数学模型, 计算分析了鱼道池室和休息池水力特性。池室和休息池内水流流态均较佳, 主流基本呈 S 形弯曲、明确且平顺, 鱼类上溯过程中无需急速转弯, 有利于节省体力; 主流最大流速基本出现在竖缝附近, 且水层越偏下主流流速相对越高; 主流在池室左右两侧均存在较大范围流速低于 0.2 m/s 的低流速区、在休息池内存在大范围的流速在 0.1~0.2 m/s 的弱回流区, 适合鱼类休息; 隔板布置形式可满足鱼类在鱼道内轻松上溯和充分休息的要求。

3) 池室坡度不同时, 鱼道整体水流流态差别不大, 鱼道内水流流速整体随坡度变缓而减小。池室坡度为 1:100 和 1:120 时, 鱼道竖缝平均最大流速分别为 0.71 m/s 和 0.65 m/s, 满足鱼道设计流速要求, 为营造良好的上溯水力条件, 建议条

件许可情况下取相对较缓的 1:120 坡度。

参考文献:

- [1] 边永欢, 孙双科. 垂直竖缝式鱼道的水力特性研究[J]. 水力学报, 2013, 44(12): 1462-1467.
- [2] 南京水利科学研究院. 引江济淮工程鱼道工程技术研究: 过鱼设施总体布置及水力学研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2020.
- [3] FUJIHARA M, AKIMOTO M, IZUMI M. 3-D numerical simulations of pool-and-weir fishways using VOF[J]. Journal of rainwater catchment systems, 2008, 14(1): 69-76.
- [4] BARTON A, KELLER R. 3D free surface model for a vertical slot fishway [C] //Proceedings of the 30th IAHR Congress. Thessaloniki: AUTH, 2003: 409416.
- [5] 王晓刚, 李云, 何飞飞, 等. 垂直竖缝式鱼道休息池水动力特性研究[J]. 水利水运工程学报, 2020(1): 40-50.
- [6] 水利部水利水电规划设计总院, 南京水利科学研究院. 水利水电工程鱼道设计导则: SL 609—2013[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2017.
- [7] 杨秀荣, 朱成冬, 范穗兴. 鱼道设计关键技术问题探讨[J]. 水利规划与设计, 2020(12): 114-120.

(本文编辑 武亚庆)