

•水利与土木工程•

DOI:10.15961/j.jsuese.201700963

顺直型展宽航槽沿程水沙运动规律试验研究

李福建, 黄 胜, 谢玉姝, 刘 超*, 刘兴年

(四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065)

摘 要:由于山区地势原因,山区卵石航槽几何形态时常由窄深突然转变为宽浅,引起水沙运动特性的改变。本文开展了概化模型试验,研究了单一航槽(窄深段)到复式展宽航槽(宽浅段)水沙运动沿程变化规律并开展了机理分析。在不同上游来流条件下,测量了主航槽中心线沿程水位以及滩槽流速,用于探究水流特性的沿程变化规律。同时,开展了床面切应力测量和推移质试验用于判断推移质在粗化层不发生破坏的山区河道中的运动状态。试验结果表明,航槽几何形态变化明显影响水沙运动,水深在窄深航槽段与宽浅航槽段交界处附近变化最为明显;上游窄深航槽段与下游宽浅航槽段稳定水深的差值随着来流量的增大而增大;主航槽断面平均流速从窄深段逐渐增加,在窄深和宽浅断面交界处附近达到最大值(约为上游窄深段断面平均流速的1.5倍),而后逐渐降低直至稳定(约为上游窄深段断面平均流速的0.8倍);推移质淤积试验结果表明,可通过比较床面摩阻流速与推移质临界起动摩阻流速来判断推移质的运动状态,当满足淤积条件时,绝大部分推移质会停止运动并淤积在下游宽浅航槽段。在山区卵石航槽中,当河床粗化层不发生破坏,可通过直接比较局部航槽段床面摩阻流速与推移质临界起动摩阻流速来预测推移质运动或淤积情况。

关键词:展宽航槽;水深;流速分布;摩阻流速;泥沙淤积;判别方法

中图分类号:TV133.2

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2018)04-0096-08

Study of Flow and Sediment Motions in a Straight Widening Navigation Channel

LI Fujian, HUANG Sheng, XIE Yushu, LIU Chao*, LIU Xingnian

(State Key Lab. of Hydraulics and Mountain River Eng., Sichuan Univ., Chengdu 610065, China)

Abstract: In the mountainous region, the geometrical shape of a navigation channel is often changed from narrow-deep to wide-shallow, yielding the longitudinal change of motions of flow and sediment. By performing model experiments, this study investigated the variation of flow and sediment motions in the longitudinal direction, and explained the mechanism. With different upstream flow conditions, the water depth and the velocity in the main channel and floodplains were measured to explore the pattern of their changes in the longitudinal direction. Based on the measurements of bed shear stresses and bedload experiments, the threshold for estimating the movement of bedload had been proposed. The experimental result indicated that the geometrical shape of navigation channel significantly affected flow and sediment motions; The largest change of flow depth was observed at the interface of the narrow-deep channel and the wide-shallow channel; The difference of flow depth in two channels increased as flow depth increased; The mean channel velocity increased from the end of narrow-deep channel, achieved the maximum (about 1.5 times greater than the mean channel velocity in the upstream channel) at the interface of two channels, and finally reached to a steady value (about 0.8 of the mean channel velocity in the upstream channel). The bedload experiment indicated that the motion of bedload could be evaluated from the comparison between the bed shear velocity and the critical shear velocity for the initiation of bedload. Most bedload stops moving and deposits when the condition for bedload deposition is satisfied. In the mountainous navigation channel with an intact bed armor layer that did not break, the proposed threshold can be employed directly to estimate whether the bedload from upstream will move to downstream or not.

收稿日期:2017-11-17

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFC0402101);国家自然科学基金资助项目(51609160; 51639007);中央高校基金科研业务费专项资金资助项目(YJ201633)

作者简介:李福建(1993—),男,硕士生.研究方向:港口、海岸及近海工程. E-mail: 1152725056@qq.com

*通信联系人 E-mail: liuchaosu@vip.qq.com

网络出版时间:2018-07-10 12:23:00

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20180710.1223.005.html>

<http://jsuese.ijournals.cn>

<http://jsuese.scu.edu.cn>

Key words: widening navigation channel; water depth; velocity distribution; friction shear velocity; sediment deposition; estimation criteria

在中国长江上游地区,受地势地貌,水沙条件等因素的影响,常常形成浅滩与深槽相间的宽窄航槽。由于宽窄航槽平面形态的特殊性,其水沙运动特性以及演变规律也与常见的弯曲河流和分叉河流有所不同^[1],特别是断面形态突然展宽的航槽,例如,窄深航槽后侧连接宽浅复式航槽(简称展宽航槽)。对于展宽航槽,非汛期时,水流在主航槽中运动;当汛期来临时,流量增大导致水深增大,水流漫过两侧浅滩,在宽浅段形成复式航槽^[2-3]。同时,窄深航槽段流速大,水流携带泥沙进入展宽航槽后输沙能力减小,引起泥沙淤积,降低主航槽有效运行水深,造成经济损失,例如,铜锣峡和锣锅滩余家湾,河道断面由狭窄突然展宽,水势放缓,致使推移质泥沙大量落淤。

许多学者对复式河槽水流特性及模拟计算方法开展了研究。Yang等^[4]探讨了不同滩地植被(树木、灌木和野草)对复式河槽水流各项特性的影响。Shiono等^[5]将Navier-Stokes方程沿水深积分,得到可以计算复式河槽水深平均流速横向分布的解析计算模型(简称SKM法)。Rameshwaran^[6]和Liu^[7]等通过改进SKM法,提出了能够预测滩地有非淹没或淹没植被的复式河槽水深平均流速及床面切应力解析计算方法。对于复杂的二维解析解形式,Liu等^[8]采用复化梯形公式得出了复式河槽局部区域过流量近似解。这些研究对于理解复式河槽水流特性及其模拟计算有很大帮助。

对于断面形态有变化的复式河槽(例如展宽航槽),Rezaei等^[9]从SKM法方程推导过程进行修正,提出了改正的SKM方法。高永胜等^[10]开展宽窄相间河道水沙运动过程的数值模拟研究,发现不对称的河道展宽与缩窄将改变断面流速峰值的分布,并将其与河床冲淤变化建立联系。吉祖稳等^[11]对宽窄复式河道的滩槽过流能力、断面平均流速、垂线流速及横向分布等水流运动特性进行了研究,并对比分析了顺直型与宽窄型复式河槽的水沙规律差异,得出了宽窄型复式河槽的滩槽动量交换较顺直型更为剧烈的结论^[12]。Singha等^[13]通过试验指出河道平面形态变化将会引起水流加速或减速运动,该变化会极大得影响推移质输移过程^[14]。曹叔尤等^[15]开展了上游泥沙补给变化下宽窄相间漫滩复式航槽河床调整与突变响应试验,提出了河床是否发生自我调整存在着一种临界水沙条件。Rezaei^[16]、Chlebek^[17]和王淑英^[18]等在不同形态的复式河槽中开展了水流试验,发现滩地形状及河槽形态的改变将导致滩槽动量交换强度的变化。

以上这些研究针对滩地形态有变化的复式河槽开展了水沙运动试验和模拟研究,但并未针对滩地形态变化带来的水流特性、床面切应力及推移质淤积作详细研究。作者通过开展概化模型试验,研究展宽航槽形态变化引起的水流运动各项特性变化,从机理上解释展宽航槽发生推移质淤积的原因,并提出一种判别推移质在展宽航槽段是否发生淤积的方式。

1 试验概况

试验在展宽航槽概化模型水槽中开展。该模型航槽由单一航槽(窄深段)与复式航槽(宽浅段)共同组成,其中:单一航槽段长12 m,宽1 m,深0.2 m;展宽航槽段主航槽长11 m,宽1 m,主航槽床面与滩地床面高差为4.5 cm,主航槽两侧对称布置了滩地,单边滩地宽度为2.1 m。单一航槽与展宽航槽主航槽直接相连,整个水槽底坡为0.003,床面铺设粒径1 cm的卵石颗粒并用水泥固化用以模拟山区砂卵石河床粗化层不发生破坏的情形。坐标原点设置在单一航槽与展宽航槽交界断面的主航槽中心处, $x>0$ 表示展宽航槽区域, $x<0$ 表示单一航槽区域。因为单一航槽段与展宽航槽段航槽几何形态有较大差别,水流特性和推移质泥沙运动在单一航槽与展宽航槽交界段($x=0$ m)附近会发生变化,为了详细说明水沙运动的沿程变化特性,作出了如下的断面布置:在 $x=0$ m处设置零断面(0[#]),往下每隔1 m($x=1$ m到7 m)设置一测量断面,分别为断面1[#]到7[#];往上在 $x=-1$ 、-2和-3.5 m分别设置断面-1[#]、-2[#]和-3.5[#],合计共布设11个测量断面(部分测量断面按实际测量需求添加)。所有工况的水流条件均为充分发展的湍流(雷诺数 $Re(QR/Av) \geq 5\ 625$,远大于明渠水流的下临界雷诺数500^[19],其中, Q 为流量, R 为断面水力半径, A 为断面面积, ν 为运动黏度,取常温 $T=20$ °C下的值 0.01 cm²/s)。模型试验水槽、坐标系统及断面布置见图1。

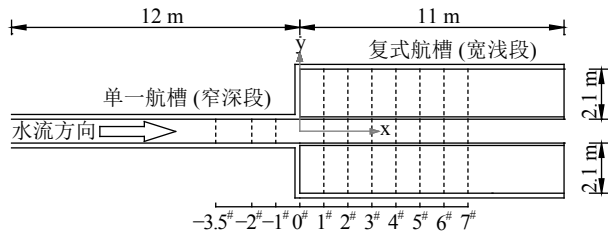


图1 概化展宽航槽平面图

Fig. 1 Plan view of experimental flume with arrangements of measurement transections and coordinate system

考虑了6种不同的上游来流量,具体参数如表1。

每组工况开展了详细的水深测量、流速测量、床面切应力测量、示踪试验和推移质淤积试验,各项测量试

验详情介绍如下。每组工况中的5种测量分开进行,避免相互干扰。

表 1 各试验工况参数表

Tab. 1 Summary of parameters in six cases

工况	流量/(L·s ⁻¹)	上游稳定水深/cm	下游稳定水深/cm	雷诺数 Re	
				单一航槽	复式航槽
1	29.8	5.89	4.85	26 659	5 625
2	39.9	6.85	5.62	35 092	7 510
3	50.9	7.98	6.06	43 894	9 565
4	62.7	9.2	6.63	52 956	11 758
5	75.4	10.22	6.81	62 603	14 129
6	88.8	11.55	7.83	72 136	16 577

1.1 沿程水深测量设备及方法

水深测量采用武汉大学制造的LH-1全自动水位仪,数据采样频率为0.5 Hz,采样时间为25 min。在拟定的测量断面基础上,考虑到断面0[#]附近水深会有较大变化,此处加设测量断面。小流量下(工况1、工况2),水深调整范围较短,从断面-1[#]到1[#]之间每隔0.5 m加设一个测量断面;大流量下(工况3、工况4、工况5、工况6),水深调整范围较长,从断面-2[#]到2[#]之间每隔0.5 m加设一个测量断面,测点布置在单一航槽与展宽航槽主航槽中心处。另外,上游稳定水深为断面-3[#]和-3.5[#]处的水深平均值,下游稳定水深为水流稳定断面6[#]和7[#]处的水深平均值。

1.2 流速测量设备及过程

在本文的6组试验工况中,展宽航槽的水深有限(4~12 cm)且声学多普勒流速仪器(ADV)有5 cm的盲区无法测量数据,因此,不能用ADV测量沿程各

断面的流速垂向分布。所以这里选择南京水利科学研究院研发的LGY—Ⅲ型多功能智能流速仪测量各断面的流速垂向分布,流速仪同时配备8只直径15 mm的新型流速旋浆传感器,每次采样时间为10 s,流速仪自动连续测量3次,并逐次显示、计算和存储测量平均流速。测量断面为断面-3.5[#]到7[#],每个断面横断面的流速测线布置如下:在主航槽中,以主航槽中心为基准左右对称布置3根测量垂线,测线间距为15 cm(合计布置7根测线),最靠近床面的测点距离床面1.5 cm,垂向测点间距为0.5 cm直至水面;滩地上,因为复式航槽左右滩地对称布置,这里仅考虑在右侧滩地进行测量工作,以滩槽交界面为起点,往外每隔30 cm布设一侧线,共布设7条测线,最靠近床面的测点距离床面1.5 cm,垂向测点间距为0.5 cm,直至水面,具体断面测点布置见图2。

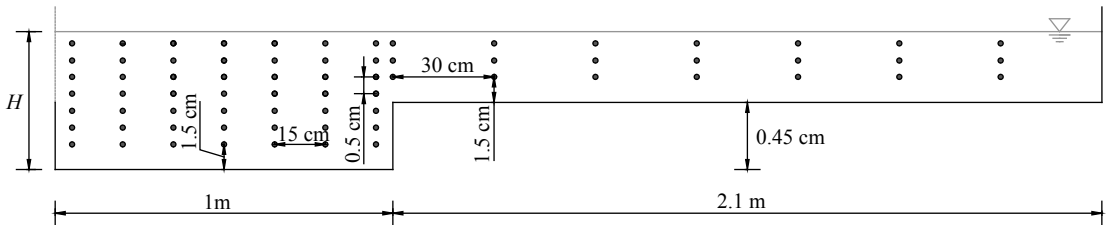


图 2 断面测点图(以工况4为例)

Fig. 2 Arrangement of measurement points at a cross section of the shallow-wide navigation channel(Taking Case 4 as an example)

1.3 床面剪切应力测量设备及计算方法

床面剪切应力无法通过测量直接获得。ADV无法测量流速的垂线分布,但在水深大于5 cm的工况中,可以测量近底雷诺剪切应力,再通过计算获得床面剪切应力。ADV采样频率和时间分别为50 Hz和30 s。由于水流在下游断面5[#]、6[#]、7[#],上游断面-2.5[#]、-3[#]、-3.5[#]较为稳定,故在这些测量断面开展测量。在每个测量断面上设计3个测量点,分别为主航槽中心点

($y=0$ m)和主航槽中心左右0.25 m处($y=\pm 0.25$ m),测点距离床面0.5 cm($z=0.5$ cm)。由表1中的雷诺数可知:在不同工况下,单一航槽段与复式航槽段水流均充分发展。水流 z 处的水流总应力 τ 可以表示为:

$$\tau = \tau_V + \tau_R \quad (1)$$

式中,第一项 τ_V 为层流切应力,第二项 τ_R 为湍动切应力。对于湍流来说,在近底区存在黏性底层,水流在该区域内近似为层流,位于黏性底层以外的水流为

湍流。水流黏性底层厚度的计算式为: $\delta_0 = 11.6\nu/u_*$ 。用实测的 u_* 值 ($=\sqrt{\tau_z/\rho}$) 计算, 得到黏性底层厚度约在 0.4~0.9 mm, 因此试验时测量的数据点都在湍动区。所以, 式(1)中的第一项可以忽略, 并简化为:

$$\tau \approx \tau_R \quad (2)$$

对于湍流区的切应力, 它与床面切应力(即摩阻流速 u_*) 之间有如下换算关系^[20]:

$$\tau_z = \left(1 - \frac{z}{H}\right) \tau_b = \left(1 - \frac{z}{H}\right) \rho u_*^2 \quad (3)$$

其中, H 为水深, τ_b 为床面切应力。用 ADV 测量各断面上 $z=0.5$ cm 处的 3 个点(主航槽中心点 ($y=0$ m) 以及中心左右 0.25 m 处 ($y=\pm 0.25$ m)) 的切应力并计算平均值, 再通过式(3)估算床面切应力和摩阻流速。考虑到工作量, 这里仅测量了工况 3 和工况 5 下的单一和展宽航槽段的 u_* 。两组工况中, 单一和展宽航槽段的水深均大于 5 cm。

1.4 荧光剂试验方法及过程

在航槽内开展荧光示踪剂试验以证明主航槽两侧滩地水流的对称性及水流扩散现象。试验前, 取 10 g 荧光剂干粉溶于 10 L 水中搅拌均匀。随后, 将荧光剂水溶液均匀加入上游航槽 $x=-3.5$ m 处, 尽量靠近水面缓慢加入以避免产生额外的水流紊动, 将大疆无人机(Phantom 3 standard 型号)稳定在下游展宽航槽 3[#]断面上空 4.5 m 高处以捕捉荧光剂水溶液从上游单一航槽向下游展宽航槽运动的全过程, 无人机上配备分辨率 1 200 万的摄像头拍摄高清视频。

1.5 加沙试验及淤积判别方法

推移质淤积试验考虑了长时段内上游有均匀泥沙补给的条件, 加沙位置在单一航槽段入口处。本研究考虑了 2 种泥沙粒径(1~2 mm 和 3~4 mm), 分别由天然级配沙筛分获得, 完全晒干后各称取 250 kg。推移质淤积试验考虑了 2 组工况: 1) 50.9 L/s 流量下采用 1~2 mm 泥沙颗粒(工况 S1); 2) 75.4 L/s 流量下采用 3~4 mm 的泥沙颗粒(工况 S2)。上游泥沙补给采用自主研发的自动加沙机可以实现在固定时间内均匀加入推移质泥沙, 每组试验工况中, 250 kg 泥沙颗粒

在 10 h 内均匀加入, 由于加沙机体积有限, 每次添加 50 kg, 加沙强度为 50 kg/2 h, 每组共计添加 5 次。这里充分考虑推移质运动的时间比尺问题, 因此, 10 h 加沙结束之后, 水槽继续运行至少 14 h, 合计运行至少 24 h, 确保推移质能够向下游充分运动。在推移质试验完成后, 待水槽及淤积推移质泥沙颗粒完全晾干后用全站仪采集下游展宽航槽段推移质泥沙淤积形态。在展宽航槽中, 我们使用全站仪在主航槽 x 和 y 方向上每隔 10 cm 测量一个高程点, 该间距为主航槽宽度的 10%, 由于大部分区域不发生推移质淤积, 因此, 点与点之间的高程差可以忽略不计。在推移质淤积区域加密测点以更准确的采集淤积高程的变化。用 tecplot 将采集的地形数据处理为地形图, 其中, 选用 tecplot 的线性插值模式填充实测点之间的空隙。地形数据采集后将下游航槽段淤积推移质和水槽尾端沉砂池中的泥沙收集起来, 分别晾干后称取重量。

采用推移质泥沙的临界起动条件作为判断推移质颗粒是否在展宽航槽中淤积。在计算沙粒临界条件时, 采用 Julien^[21] 的方法, 引入临界希尔兹参数 τ_{*c} 。当 $d_* < 0.3$ 时: $\tau_{*c} = 0.5 \tan \phi$; 当 $0.3 < d_* < 19$ 时: $\tau_{*c} = 0.25 d_*^{0.6} \tan \phi$; 当 $19 < d_* < 50$ 时: $\tau_{*c} = 0.013 d_*^{0.4} \tan \phi$; 当 $d_* > 50$ 时: $\tau_{*c} = 0.06 \tan \phi$ 。其中: ϕ 为泥沙休止角, 小粒径下取 30°; d_* 为无量纲颗粒粒径, 表达式如下:

$$d_* = d_s \left[\frac{(\rho_p - \rho)g}{\rho \nu^2} \right]^{1/3} \quad (4)$$

式中: d_s 为颗粒粒径, 一般取中值粒径 (d_{50}); ρ_p 为沙的干密度 (2.65 g/cm³); g 为重力加速度, 取 9.8 m/s²。用临界希尔兹数来表征沙粒的临界起动剪切应力时, 可采用如下关系^[20]:

$$\tau_c = \rho u_{*c}^2 = \tau_{*c} (\rho_p - \rho) g d_s \quad (5)$$

当推移质泥沙颗粒已知时, 通过式(4)、(5)可计算出所选粒径泥沙颗粒的临界起动摩阻流速, 通过比较床面摩阻流速与推移质临界起动摩阻流速来判别泥沙淤积情况。不同中值粒径的推移质临界起动摩阻流速和床面摩阻流速见表 2。

表 2 各工况下推移质临界起动摩阻流速和床面摩阻流速计算结果表

Tab. 2 Summary of critical initiation shear velocity and bed shear velocity

工况	流量 $Q/(L \cdot s^{-1})$	颗粒粒径 d_s/mm	无量纲颗粒 粒径 d_*	临界摩阻流速 $u_{*c}/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	单一航槽 $u_{*c\text{单一}}/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$u_{*c\text{单一}} \cdot u_{*c}^{-1}$	展宽航槽 $u_{*c\text{展宽}}/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$u_{*c\text{展宽}} \cdot u_{*c}^{-1}$
S1	50.9	1	25.29	2.10	3.57	1.70	3.00	1.43
		2	50.57	3.41	3.57	1.05	3.00	0.88
S2	75.4	3	75.86	4.10	4.17	1.02	3.71	0.90
		4	101.15	4.73	4.17	0.88	3.71	0.78

2 结果分析与讨论

2.1 水深沿程分布

在本文设计的试验水槽中,航槽过流断面突然展宽导致水深发生改变。水深变化主要发生在单一段和展宽段交界处($x=0\text{ m}$)附近,在单一航槽段靠近上游的部分(断面 $3^{\#}$ 和 $3.5^{\#}$)和复式航槽段靠近下游的部分(断面 $6^{\#}$ 和 $7^{\#}$)都有一段较为稳定的水流区域,以该区域测量水深平均值作为上下游航槽稳定水流水深。图3为工况3(50.9 L/s)和工况5(75.4 L/s)下的水深变化沿程分布。可以看出:水深的变化趋势为自单一航槽段逐渐减小直至在展宽航槽段达到稳定。过流断面形态变化明显影响了水深的纵向发展,在单一和展宽航槽交界断面上游附近($x=-1\sim 0\text{ m}$),水深持续降低,主要是因为来流量不变的情况下,展宽航槽滩地会分担一部分流量导致主航槽过流量降低,而复式航槽段的主航槽宽度同单一航槽段相同,因此水深会比单一航槽段小。另外,单一航槽与复式航槽稳定水深的差值随着流量的增大而增大。

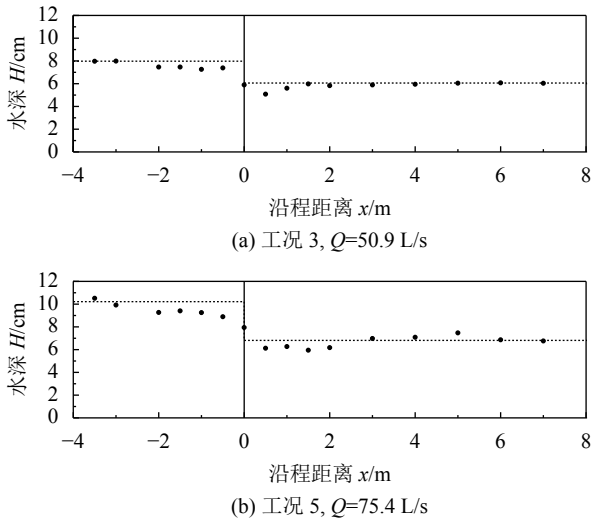


图3 工况3和工况5下水深沿程分布

Fig. 3 Longitudinal evolution of flow depth in cases 3 and 5

王淑英等^[18]在宽窄交替相间河道中发现,在河宽最窄处水深降至最低,而在河宽最宽处水深升至最大。其测量结果与本文结果有较大差异,主要由于她们的试验是在宽窄交替相间河道中开展的,河道变宽后的再次变窄会对水流的纵向发展产生影响。而本文的试验航槽展宽后在纵向上不再发生航槽形态变化,所以得到与前人研究不同的测量结果。

2.2 流速分布

2.2.1 水深平均流速沿横向分布

类似的,单一和展宽航槽交界处横断面形态的改变引起了滩槽流速分布的变化,进而影响了航槽的过流能力及推移质输沙能力。

图4给出了工况6($Q=88.8\text{ L/s}$)下断面 $1^{\#}$ 、 $3^{\#}$ 和 $6^{\#}$ 处的垂线平均流速沿横向分布,从图4中可以看出,即使是同一流量下,滩槽流速分布在不同的断面呈现出了不同的分布。当流量漫过主航槽进入滩地时(断面 $1^{\#}$),由于主航槽水深相对较深,而两侧滩地较宽且水深较浅,因此,水流主要在主航槽中运动,主航槽流速较大,滩地流速较小。随着沿程距离的增加,滩槽动量充分交换,例如,在断面 $3^{\#}$,相比断面 $1^{\#}$ 主航槽流速变小,滩地流速变大。越靠近下游,其滩槽流速的分布越均匀,说明滩槽动量交换的剧烈程度从展宽处开始到下游一定距离以内是逐渐减弱的,一定距离以后,例如,在断面 $6^{\#}$ 处,滩槽动量交换强度变得比较稳定,流速特性与稳定复式航槽横向流速分布相似^[7]。另外,图4中靠近单一与展宽航槽交界断面(断面 $1^{\#}$ 处)的部分滩地流速约等于零,说明滩地存在部分死水区域。由于单一航槽水流与下游稳定复式航槽水流之间有一个过渡区,荧光示踪剂用来指示该区域的水流运动情况(图5)。在过渡区内很明显能观察到水流由主航槽向滩地扩散,滩地边缘两侧存在静水区域(见图5三角区域),与流速测量结果吻合。另外,两侧滩地示踪剂分布平均且对称,说明两侧滩地水流呈镜面对称,所以本文仅在单边滩地开展测量是合理的。

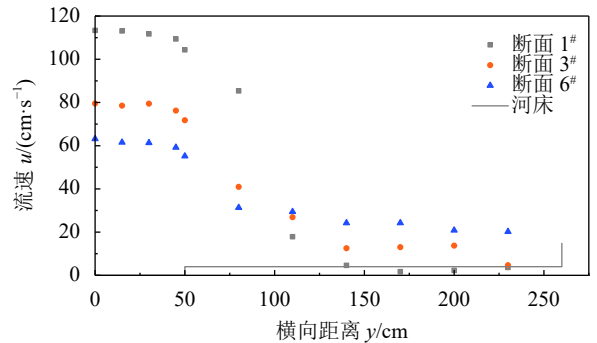


图4 工况6下展宽复式航槽垂线平均流速沿横向分布
Fig. 4 Lateral distributions of depth-averaged velocity in the compound navigation channel in case 6

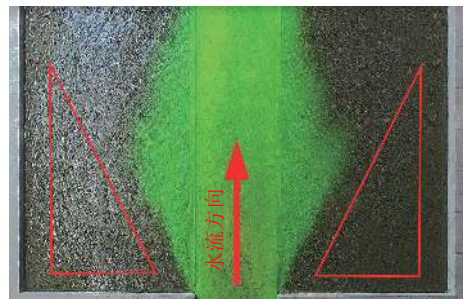


图5 工况5($Q=75.4\text{ L/s}$)的荧光示踪剂试验
Fig. 5 Tracer experiments with fluorescein in case 5 (75.4 L/s)

2.2.2 水深平均流速纵向分布

图6给出了6组工况下主航槽内平均流速的沿程分布,各断面流速均用 u_A ($-3.5^\#$ 断面)进行无量纲处理。从结果来看,流速总体上呈现先增后减小的变化趋势,最大流速(约为 $1.5u_A$)出现在断面 $0^\#$ 和 $1^\#$ 处,这是因为该区域非常靠近单一与展宽航槽的交界处。然后,流速开始逐渐减小,这是由于展宽航槽滩地的分流作用,导致主航槽的过流量逐渐减小,从而造成了主航槽断面流速逐渐减小。随着水流继续向下游运动至展宽段中部($x=6\text{ m}$)处,滩槽水流间的调整和交换已基本完成,主航槽的平均流速也趋近于稳定,约为上游流速的80%。需要注意,这里出现的最大流速和稳定流速都与展宽航槽段的滩槽宽度比(B/b)有关,本文航槽的 $B/b=5.2$ 。因此,在与此滩槽宽度比相似的航槽中,能够观察到与本文结果相似的最大和稳定流速,但在滩槽宽度比差别较大的航槽中(例如,滩地非常宽的航槽 $B/b=30$),本文给出的最大和稳定流速就不再具有参考价值。但是,不论滩槽宽度

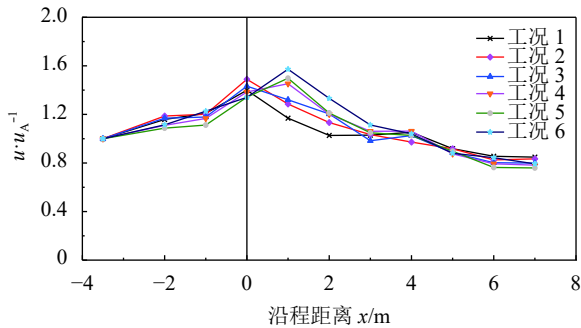


图6 各试验工况下主航槽流速沿程分布

Fig. 6 Longitudinal distribution of mean velocity in the main navigation channel in six cases

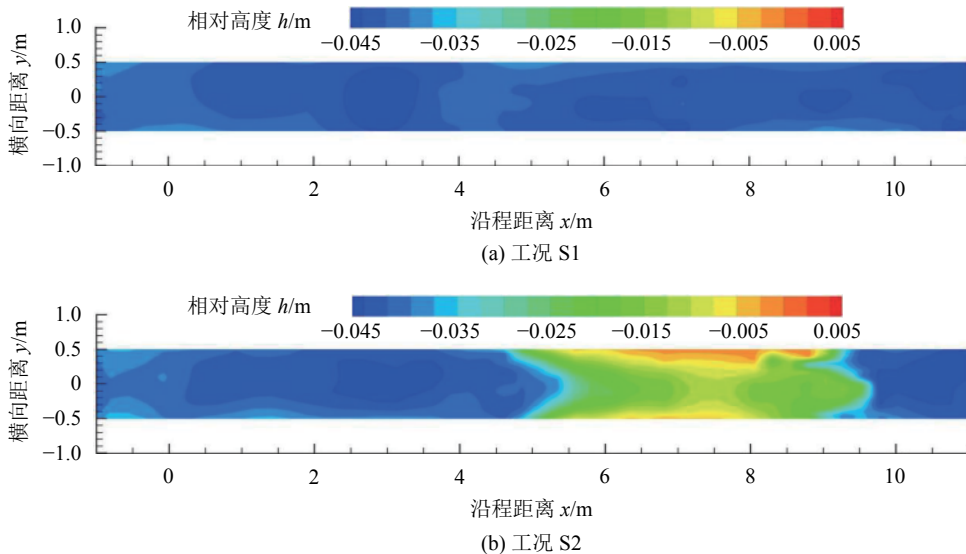


图7 不同条件下主航槽推移质淤积形态

Fig. 7 Bedload deposition in the main navigation channel under different conditions

比如何,断面平均流速在纵向的分布一定与本文提出的规律相似,可能的差异仅在于流速调整区域的长度和流速峰值大小。

2.3 推移质淤积

图7给出了不同条件下(表2)的推移质泥沙在展宽主航槽中的淤积形态,主航槽的相对高程(即,测量高程减去滩地高程)用不同颜色表示。例如,深蓝色(-0.045 m)表示主航槽没有推移质淤积,而橙色(0 m)表示推移质淤积高程等于滩地高程。在工况S1中,考虑了较小的推移质粒径($1\sim 2\text{ mm}$),不论是单一航槽段还是展宽航槽段,都满足 $u_{*单}/u_{*c}$ 平均值(1.37)和 $u_{*展宽}/u_{*c}$ 平均值(1.15)大于1,说明整个航槽推移质都会向下游运动,试验结果也证明这一点。绝大多数推移质泥沙($\approx 90\%$)运动至下游沉砂池中,仅有少量颗粒($\approx 5\%$)残留于主槽和滩地边缘,展宽主航槽没有发生推移质淤积(图7(a))。在工况S2中,考虑了较大的泥沙粒径($3\sim 4\text{ mm}$),单一航槽中 $u_{*单}/u_{*c}$ 平均值(0.95)约等于1,满足推移质起动的条件,说明推移质都会向下游运动。但是,展宽航槽中 $u_{*展宽}/u_{*c}$ 平均值只有0.84(<1),说明局部区域不满足推移质的起动条件,会出现推移质淤积。试验结果与所预测的结果一致,单一航槽段并未发生推移质淤积,而绝大多数推移质($\approx 95\%$)淤积在展宽主航槽(图7(b)),淤积高度达到了主航槽的74%。这对于航槽通航是极为不利的,减小有效通航水深,甚至可能直接降低航槽通航等级,造成航深不够无法通航。

天然河道一般修建丁坝实现束水攻沙清淤。董年虎等^[22]在试验中发现,在丁坝束窄作用下,越小的河道断面宽度形成越大的断面冲刷下切深度。这是

因为较小的河道宽度形成较大的断面平均流速和较强的推移质输沙能力。这与本文研究的观测结果类似,上游单一航槽段宽度小于下游展宽航槽段,因此,上游航槽段流速大、输沙能力强。但是,本文采用固定河床开展试验,无法观测到河床冲刷深度的变化。然而,根据本文试验结果,在董年虎等^[22]的丁坝束窄河道试验中,随着水流远离丁坝,断面宽度变大,主河道流速减小,水流挟沙能力下降,推移质可能会在主河道中淤积。

3 讨论

本文中考虑到的泥沙试验是在滩槽宽度比 (B/b) 为 5.2 的展宽航槽中进行的。主航槽床面固化不可动以模拟粗化层不发生破坏的情况。单一和展宽段的主航槽坡降相同,均为 0.003。上游来沙为粒径相同的均匀沙。为了进一步研究主航槽推移质发生淤积的条件,作者对比了表 2 的床面摩阻流速 (u_*) 与推移质临界起动摩阻流速 (u_{*c}), 并将 u_*/u_{*c} 与推移质运动或淤积构建关系, 当床面摩阻流速与推移质临界起动摩阻流速满足 $u_*/u_{*c} > 0.9$ 时, 单一或展宽航槽的推移质泥沙颗粒将会起动并向下游运动; 当两者满足 $u_*/u_{*c} \leq 0.8 \pm 0.1$ 时, 推移质将停止运动并淤积在床面。需要注意, 当满足 $u_*/u_{*c} \leq 0.8 \pm 0.1$ 条件时, 仅能说明绝大部分推移质会停止运动并淤积, 并不代表所有的推移质颗粒都会淤积在河床并保持静止, 这是因为泥沙的起动满足一定的随机性^[23]。即便上述条件满足, 仍有极少量泥沙颗粒停止运动后会再起运动并向下游运动。最后, 本文结论可应用于与本文试验条件类似的航道或河道中, 如各项条件相差很大, 需要进一步验证结果判定关系的准确性。

4 结论

1) 从单一航槽段开始, 水深逐渐减小直至展宽航槽段达到稳定, 水深变幅最大的区域靠近单一和展宽航槽交界断面, 单一航槽与展宽航槽的水深差随上游来流量的增大而增大。

2) 主航槽断面平均流速自单一航槽段逐渐增大, 在单一和展宽航槽交界断面附近达到最大(约等于 1.5 倍稳定段单一航槽断面平均流速), 随后逐渐减小直至达到稳定。相反, 展宽航槽段滩地流速沿水流方向逐渐增大, 直至稳定。主槽和滩地水流的稳定区域基本一致, 因为滩槽动量交换在该区域达到稳定。

3) 在床面粗化层不破坏的前提下, 通过比较床面摩阻流速 (u_*) 与推移质临界起动摩阻流速 (u_{*c}) 之间的关系, 可判别推移质是否停止运动并淤积。

参考文献:

- [1] Wang Qi, Dong Yaohua, Qu Geng. Review on researches of flow and sediment transport in compound channels[J]. *Yangtze River*, 2015, 46(22): 30–34. [王齐, 董耀华, 渠庚. 复式渠槽水沙输移特性研究综述[J]. *人民长江*, 2015, 46(22): 30–34.]
- [2] Liu C, Shan Y, Liu X, et al. Method for assessing discharge in meandering compound channels[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management*, 2016, 169(1): 17–29.
- [3] Shan Y, Liu X, Yang K, et al. Analytical model for stage-discharge estimation in meandering compound channels with submerged flexible vegetation[J]. *Advances in Water Resources*, 2017, 108: 170–183.
- [4] Yang K, Cao S, Knight D W. Flow patterns in Compound Channels with Vegetated Flood-plains[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 133(2): 148–159.
- [5] Shiono K, Knight D W. Turbulent open-channel flows with variable depth across the channel[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1991, 222(1): 617–646.
- [6] Rameshwaran P, Naden P S. Three-dimensional numerical simulation of compound channel flows[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003, 129(8): 645–652.
- [7] Liu C, Luo X, Liu X, et al. Modeling depth-averaged velocity and bed shear stress in compound channels with emergent and submerged vegetation[J]. *Advances in Water Resources*, 2013, 60(8): 148–159.
- [8] Liu C, Liu X, Yang K. Predictive model for stage-discharge curve in compound channels with vegetated floodplains[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2014, 35(6): 1495–1508.
- [9] Rezaei B, Knight D W. Application of the Shiono and Knight Method in compound channels with non-prismatic floodplains[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2009, 47(6): 716–726.
- [10] Gao Yongsheng, Wang Shuying, Zhou Sufen, et al. Numerical study on the effects of flow motion on channel evolution in gradual width river[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2014, 46(2): 14–19. [高永胜, 王淑英, 周苏芬, 等. 河宽渐变水流运动对河床冲淤特性影响的数值分析[J]. *工程科学与技术*, 2014, 46(2): 14–19.]
- [11] Ji Zuwen, Pan Dong. Experiment study on characteristics of water movement in compound channels with variable boundary[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 1997, 28(11): 24–28. [吉祖稳, 潘东. 宽窄复式河道水流运动特性的试验研究[J]. *水利水电技术*, 1997, 28(11): 24–28.]
- [12] Ji Zuwen, Hu Chunhong. Comparisons of flow movement and sediment transport in straight and lotus root-shape compound channels[J]. *Journal of Sediment Research*, 1998(2):

- 10-16.[吉祖稳,胡春宏.顺直型与宽窄型复式河道水沙分布规律的比较[J].*泥沙研究*,1998(2):10-16.]
- [13] Singha A,Balachandar R.Structure of wake of a sharp-edged bluff body in a shallow channel flow[J].*Journal of Fluids and Structures*,2011,27(2):233-249.
- [14] Paiement-Paradis G,Marquis G,Roy A.Effects of turbulence on the transport of individual particles as bedload in a gravel-bed river[J].*Earth Surface Processes and Landforms*, 2011,36(1):107-116.
- [15] Cao Shuyou,Liu Xingnian.Adaptive adjustment and mutation response of river bed within changing sediment supply in mountain river[J].*Advanced Engineering Sciences*,2016, 48(1):1-7.[曹叔尤,刘兴年.泥沙补给变化下山区河流河床适应性调整与突变响应[J].*工程科学与技术*,2016, 48(1):1-7.]
- [16] Rezaei B,Knight D W.Overbank flow in compound channels with non-prismatic floodplains[J].*Journal of Hydraulic Engineering*,2011,137(8):815-824.
- [17] Proust S,Rivière N,Bousmar D,et al.Flow in compound channel with abrupt floodplain contraction[J].*Journal of Hydraulic Engineering*,2006,132(9):958-970.
- [18] Wang Shuying,Zhou Sufen,Zhao Xiaoe,et al.Experimental study on the flow characteristics at local diverging-converging sections in mountain lotus root shape channel[J].*Advanced Engineering Sciences*,2013,45(Supp2):51-54.[王淑英,周苏芬,赵小娥,等.山区宽窄相间河道渐扩渐缩局部区域水流运动特性试验研究[J].*工程科学与技术*,2013, 45(增刊2):51-54.]
- [19] Wu Chigong.*Hydraulics*[M].Beijing:Higher Education Press,2008.[吴持恭.水力学[M].北京:高等教育出版社,2008.]
- [20] Liu C,Nepf H.Sediment deposition within and around a finite patch of model vegetation over a range of channel velocity[J].*Water Resources Research*,2016,52(1):600-612.
- [21] Julien P Y.Erosion and sedimentation[M].Cambridge: Cambridge University Press,2010.
- [22] Dong Nianhu,Zhao Xinjian,Liu Yan,et al.Experimental study on characteristics of sediment scouring and deposition in dike-narrowed river channel of Lower Yellow River[J].*Journal of Hydraulic Engineering*,2009,40(6): 688-695.[董年虎,赵新建,刘燕,等.黄河下游丁坝缩窄河道泥沙冲淤特性试验研究[J].*水利学报*,2009,40(6): 688-695.]
- [23] Li Junhua,Jiang Enhui,Zheng Bang min,et al.Stochastic analysis of threshold velocity of sediment particles[J].*Journal of Sediment Research*,2012(3):15-20.[李军华,江恩惠,郑邦民,等.泥沙起动流速的随机分析[J].*泥沙研究*,2012(3): 15-20.]

(编辑 张琼)

引用格式: Li Fujian,Huang Sheng,Xie Yushu,et al.Study of flow and sediment motions in a straight widening navigation channel[J].*Advanced Engineering Sciences*,2018,50(4):96-103.[李福建,黄胜,谢玉姝,等.顺直型展宽航槽沿程水沙运动规律试验研究[J].*工程科学与技术*,2018,50(4):96-103.]