

•水利与土木工程•

DOI:10.15961/j.jsuese.201700750

陡坡河段变动回水区推移质运动特性的试验研究

路信¹, 黄尔^{1*}, 王森², 赵新益³, 官夏菲¹

(1.四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 水利水电学院, 四川成都 610065;
2.长江重庆航运工程勘测设计院, 重庆 400012; 3.中国长江电力股份有限公司, 湖北宜昌 443002)

摘要:基于物理模型试验, 探讨典型河段变动回水区推移质的运动特性, 分析在库水位消落及来流增大过程中, 淤积体平面形态及淤积体推进轨迹变化等特性。试验结果表明, 由于河段比降较大, 水库回水尖灭点上下游呈现不同的流态, 从急流变为缓流的过程中, 输沙能力会陡然下降。在库水位消落过程中, 保持上游来流不变, 泥沙淤积体输移的距离大致与水库回水尖灭点前行的距离相当, 且下游水位降至875 m时, 淤积体在河道湾顶附近被水流切割分成上下两部分, 两级淤积体间泥沙颗粒级配差异较为明显, 反映出水流的分选作用。在来流增大过程中, 当推移质来沙量不变时, 保持下游库水位不变, 增大上游来流量, 推移质淤积体向下游推进的幅度相对较小, 表明研究河段变动回水区内的推移质运动受下游回水作用影响较大。对于陡坡性变动回水区, 在给定上游来沙总量的前提下, 泥沙淤积体前沿的推进幅度主要受到库水位降低的影响, 而受上游流量的影响相对较小。

关键词:变动回水区; 推移质; 概化模型

中图分类号:TV142

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2018)04-0089-07

Bed-load Sediment Transport in Fluctuating Backwater Area of a Steep Slope Reach

LU Xin¹, HUANG Er^{1*}, WANG Sen², ZHAO Xinyi³, GUAN Xiafei¹

(1.State Key Lab. of Hydraulics and Mountain River Eng., College of Water Resource & Hydropower, Sichuan Univ., Chengdu 610065, China;
2.Changjiang Chongqing Harbour and Waterway Eng. Investigation and Design Inst., Chongqing 400012, China;
3.China Yangtze Power Co., Ltd., Yichang 443002, China)

Abstract: The characteristic motion of the traction load in typical fluctuating backwater area, including the plane conformation, the promotion track of the sedimentation during the drawdown process of the reservoir, and the increasing process of the upstream flow, were studied based on the physical model tests. The results indicated that due to the large specific drop in the reach, the upstream and downstream flow patterns of the reservoir pinch-out point were different, and the sediment transport capacity would drop sharply in the course of the water flow changing from a jet to a slow flow. During the drawdown process of the reservoir, keeping the upstream water at a constant level until sediment transport distance was similar to the advancing distance of reservoir pinch-out point and the downstream level fell to 875 m, the siltation near the top of river bay would be cut into the upper and lower parts separately. The difference of sediment gradation between two grades of silt was more obvious, reflecting the separation effect of water flow. Comparatively, increasing the upstream flow while keeping sediment supply and the downstream level unchanged, the bed-load sediment of the downstream propulsion was relatively small, which showed that the bedload transport in the area of fluctuant backwater was greatly influenced by the backwater action in the lower reaches of the river. Under the premise that the total amount of the upstream sediment was given, the promoting of the frontier sedimentation was mainly affected by the decreasing water level of the reservoir, and the effect by the upstream flow was relatively small.

Key words: fluctuating backwater area; bed-load; generalized model

收稿日期:2017-09-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51539007)

作者简介:路信(1992—),男,硕士生.研究方向:水利工程. E-mail: 532930528@qq.com

*通信联系人 E-mail: huang_er@scu.edu.cn

网络出版时间:2018-07-10 12:19:00

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20180710.1219.004.html>

<http://jsuese.ijournals.cn>

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

水库变动回水区是指正常蓄水位末端与最低水位回水末端之间的河段,具有天然河道和水库的双重特性,汛期呈现天然河道的特性,枯期呈现水库特性。以三峡水库为例,蓄水后,水沙条件和边界条件的重大变化将使变动回水区的水流条件、冲淤特性及河床演变规律发生改变^[1-3]。三峡水库汛前以较高水位运行后,变动回水区受壅水作用影响导致泥沙淤积,汛末未能冲完的泥沙将会移至次年水库消落期冲刷,从而改变了天然情况下年内的冲淤平衡^[4-5]。舒安平^[6]、陈立^[7]等指出水库入库水沙条件的改变,甚至会引起河道河型转化及河道再造。

国内外学者对水库泥沙和推移质运动分别作了许多研究。丹江口水库修建后,改变了原有天然河道的水沙输移条件^[8-9],徐程等^[10]以丹江口水库大孤山分汊河段为例,对比分析了上游建库前后不同时段变动回水分汊河段的冲淤调整及其内在机理,结果表明该河段的冲淤变化趋势是由水位、挟沙能力、不饱和输沙共同作用的结果。冲淤变化、水流结构、泥沙输移复杂的分汊型河道向单一河槽转化是水库变动回水区中一种较为普遍的淤积再造床过程^[11-13],赵瑾琼^[14]以三峡水库变动回水区青岩子河段为研究对象,运用平面2维水沙数学模型,分析来沙量、壅水高度等因素对主支汊易位、河型转化的影响,结果表明来沙量减少并未改变泥沙落淤部位和河床演变趋势。Li等^[15]通过原型观测,分析了水库泥沙絮凝特性及异重流对水库泥沙淤积的影响。Beylich等^[16]分析了天然河流推移质输沙率的时空变化。金中武等^[17]探讨了壅水条件下推移质泥沙输沙率的具体变化特性。Ziegler等^[18]以泰国一条山区河流为例,分析了推移质运动占整个泥沙输移的比例,及影响推移质输沙量变化的因素。

从上述研究现状可知,国内外学者对水库变动回水区泥沙淤积和推移质运动分别作了许多研究,但涉及水库变动回水区推移质运动特性的研究较少,特别是山区陡坡河道变动回水区的相关研究更为稀少。鉴于此,作者结合国家自然科学基金重点项目《水库变动回水区推移质运动机理及卵石滩群再造过程研究》,选取四川省都江堰市龙溪河(紫坪铺库尾)段为研究对象,采用概化物理模型对典型河段的推移质运动特性进行初步试验研究,为解决山区河流的航道整治、河流修复、防洪、灾害防治等问题提供参考。

1 试验概况

试验模型位于四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室,模型依据2016年龙溪河紫坪铺库尾段实际地形修建,原型卫星示意图如图1所

示。根据研究河段实际河床特性,同时考虑到场地与模型用水量等因素的制约,采用定床正态河工模型,并选定模型长度比尺为1:50。基于野外调查选取天然细沙作为模型用沙。自上游向下游共设置44个断面,断面之间的间隔为50 m,其中研究河段位于31#断面到4#断面之间,其中将39#断面定为基准断面,向上游为负方向、向下游为正方向,断面布置图如图2所示。

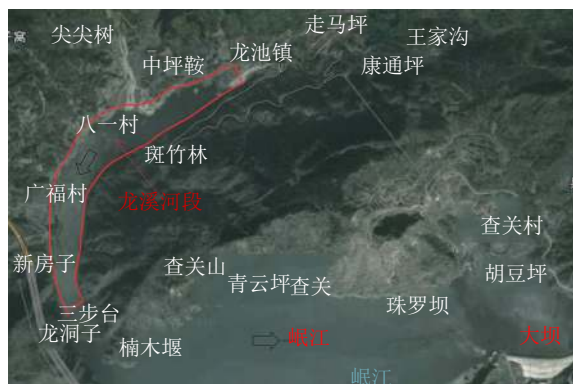


图1 龙溪河(紫坪铺库尾)段卫星地图

Fig. 1 Satellite map of Longxi river (Zipingpu reservoir tail)

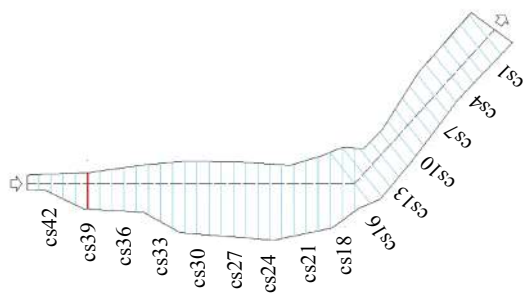


图2 测量断面布置图

Fig. 2 Layout of measuring sections

1.1 试验方案布置

研究河段缺乏准确的实测水文资料,据相关流量估算,龙溪河汇入紫坪铺水库10年一遇洪水流量约386 m³/s,50年一遇洪水流量约669 m³/s,100年一遇洪水流量约795 m³/s,结合试验模型供水条件,在频率洪水估算值范围内设定流量梯度,分别为354、530、707、972 m³/s。试验方案设计如表1所示,试验方案1主要研究库水位消落过程中的推移质运动情况;试验方案2主要研究相同库水位下、来流增加过程中的推移质运动情况。

1.2 试验步骤及测量说明

试验测量内容包括每个工况各断面水位及典型横断面流速。以工况1~5为例,在模型流量40 L/s、初始下游水位890 m塑造的初始推移质淤积体基础上,将水位降低至885 m,每隔两个小时测量各断面的水位,放水冲刷6~8 h后,观察各次测得的水位,当水位

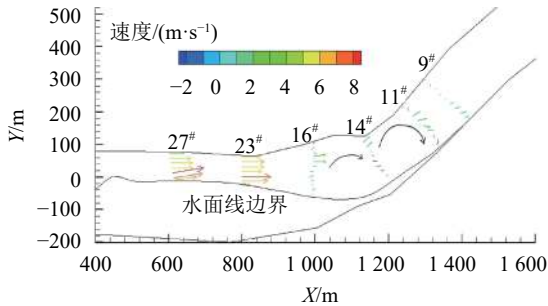
变化较小,同时淤积体已不再向前推进时,则说明该水位下河道已达到平衡状态。

表1 试验方案布置

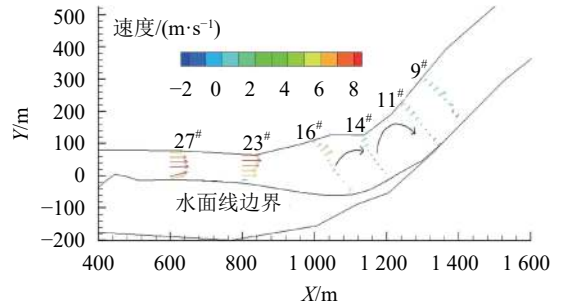
Tab. 1 Layout of the test program

| 试验方案 | 工况 | 模型流量 $q/(L \cdot s^{-1})$ | 原型流量 $Q/(m^3 \cdot s^{-1})$ | 原型下游水位 H/m | 备注 |
|------|----|---------------------------|-----------------------------|--------------|--------------|
| 方案1 | 1 | | | 890 | 铺沙 $1.2 m^3$ |
| | 2 | | | 885 | 清水 |
| | 3 | 40 | 707 | 880 | 清水 |
| | 4 | | | 875 | 清水 |
| | 5 | | | 870 | 清水 |
| 方案2 | 6 | 20 | 354 | | 铺沙 $1.2 m^3$ |
| | 7 | 30 | 530 | 880 | 清水 |
| | 8 | 40 | 707 | | 清水 |
| | 9 | 55 | 972 | | 清水 |

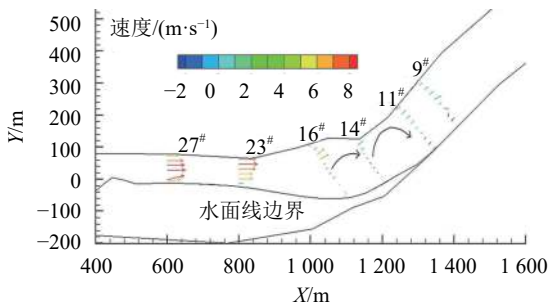
试验过程中,下游水位通过事先校核过的尾门开度进行控制,误差控制在 $\pm 1 mm$ 内;当完成某一水位下的推移质淤积体冲刷后,为了保证试验过程的连续性,进行倒灌水至上一水位,基本稳定后缓慢下调水位进行后续工况。



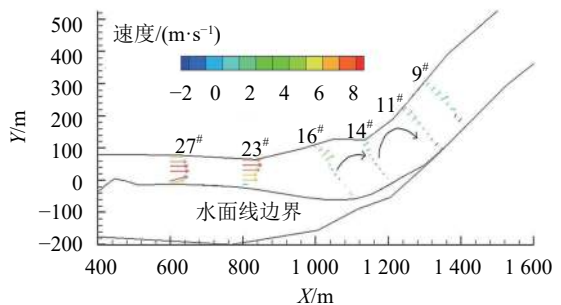
(a) 表面流速分布 $q = 40 L/s$



(b) 底部流速分布 $q = 40 L/s$



(c) 表面流速分布 $q = 55 L/s$



(d) 底部流速分布 $q = 55 L/s$

图3 相同水位下,不同流量的流速分布图

Fig. 3 Velocity distribution under the same downstream water level and different discharge

根据横断面平均最大流速值,对各断面处弗劳德数进行求解,结果如表3所示。

由上述结果可知,研究河段比降较大,库水位回水尖灭点上下游呈现不同的流态,从急流变为缓流的过程中,输沙能力会相应陡然下降。受

2 水库变动回水区推移质运动特性分析

2.1 河段流速分布

试验时选取流速大、输沙强的工况进行断面流速测量,分别为:1)上游模型来流 $40 L/s$ (原型 $707 m^3/s$)、下游水位 $880 m$;2)上游模型来流 $55 L/s$ (原型 $972 m^3/s$)、下游水位 $880 m$ 。

图3为相同下游水位 $880 m$,不同流量时的表面流速及底面流速分布图,表2为两组工况下横断面最大流速测量值(流速以顺水流方向为正,逆水流方向为负)。由测量结果知,当上游模型来流 $40 L/s$ 、下游水位 $880 m$ 时,27#断面处流速最大值达 $8.50 m/s$,至下游处表层流速逐渐减小,9#断面处表层流速最大值为 $1.61 m/s$ 。由于受到弯道环流及下游回水作用影响,自16#断面至下游河道右侧形成一顺时针旋转的回流区,14#断面处回流流速较大,表层最大回流流速为 $-1.24 m/s$,底层最大回流流速达至 $-1.51 m/s$ 。当下游水位保持不变,上游来流增至 $55 L/s$ 时,流速分布与上一工况基本类似。上游来流增大,表层最大流速值相应有所增大,整体而言,此两组工况主流自16#断面起偏向河道左岸,水流底、表层流速差别较小。

河道微地貌影响,在不同边界条件下,水流在水库回水末端附近存在主流的左右摆动,形成了不同旋转方向的回流区,使得回水末端的河势稳定性较差,存在滩槽异位的风险,给河道防洪安全造成了隐患。

表 2 部分横断面最大流速值测量结果

Tab. 2 Maximum flow rate measurement results of partial cross section

| 断面号 | $q=40$ L/s | | $q=55$ L/s | |
|-----------------|---|---|---|---|
| | 表层流速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) | 底层流速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) | 表层流速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) | 底层流速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) |
| 27 [#] | 8.50 | 8.50 | 8.56 | 8.56 |
| 23 [#] | 7.80 | 7.80 | 8.43 | 8.43 |
| 16 [#] | 3.55 | 2.87 | 4.21 | 4.65 |
| 14 [#] | 3.46 | 2.36 | 3.91 | 3.59 |
| 11 [#] | 2.35 | 1.07 | 2.87 | 2.12 |
| 9 [#] | 1.61 | 0.69 | 2.06 | 2.05 |
| | -0.41 | -0.31 | -1.15 | -1.44 |

注: 27[#]、23[#]水深较浅, 表面流速值与底层流速值相同; 16[#]、14[#]、11[#]、9[#]中负值表示该断面处最大回流流速值。

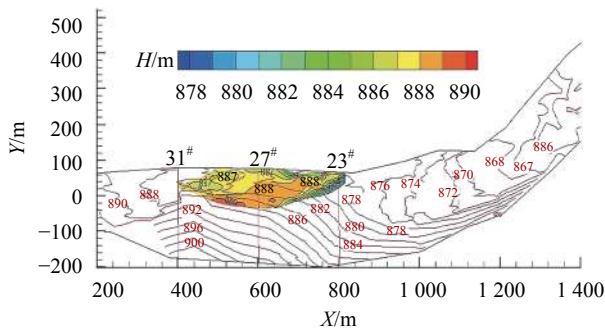
表 3 部分横断面 Fr_{\max} 计算结果Tab. 3 Calculation results of Fr_{\max} of partial cross section

| 断面号 | $q=40$ L/s | $q=55$ L/s | 水流流态 |
|-----------------|------------|------------|------|
| 27 [#] | 1.81 | 1.66 | 急流 |
| 23 [#] | 1.86 | 2.23 | 急流 |
| 16 [#] | 0.35 | 0.48 | 缓流 |
| 14 [#] | 0.30 | 0.36 | 缓流 |
| 11 [#] | 0.23 | 0.26 | 缓流 |
| 9 [#] | 0.10 | 0.21 | 缓流 |
| 6 [#] | — | — | 缓流 |

2.2 河道推移质淤积体平面形态变化

2.2.1 库水位消落过程中的泥沙淤积体平面形态

在初始铺沙条件下, 当上游模型来流 40 L/s (原型流量 707 m^3/s)、下游水位 890 m 时, 淤积体稳定后的平面形态如图 4 所示。

图 4 $q=40$ L/s, $H=890$ m, 初始淤积体形态Fig. 4 Initial silt morphology when $q=40$ L/s and $H=890$ m

由图 4 可知初始淤积体形成于河道凸岸(左岸); 在水流作用下, 同时受到下游壅水高水位影响, 淤积

体前端推进至模型 23[#]断面。本文试验模型相对库容较大, 库区地形较为开阔, 初始下游水位处于壅水高水位, 推移质淤积体整体上呈现出三角洲淤积形态。

在初始淤积体基础上, 实施倒灌后依次降低下游水位, 如此反复多次, 并分别用全站仪施测各工况下淤积体地形, 以确定整组工况下推移质淤积体的变化过程, 其平面形态如图 5 所示。

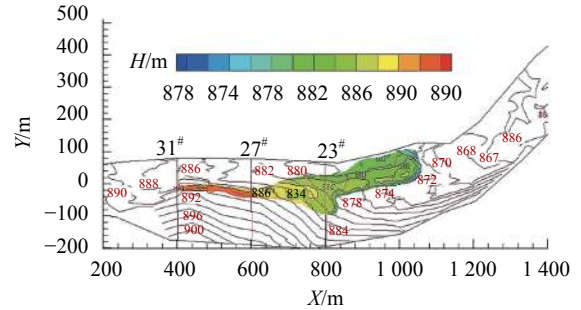
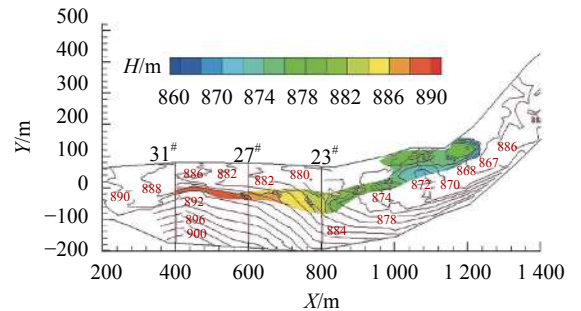
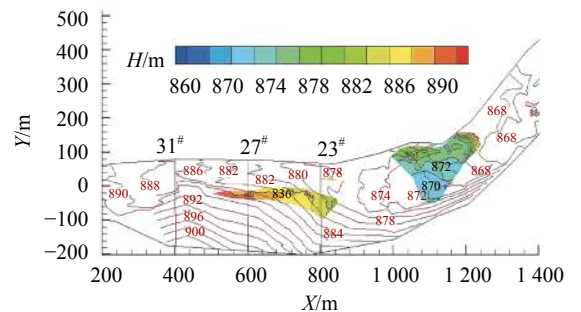
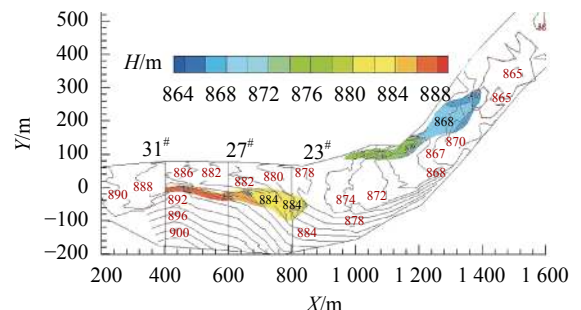
(a) $H=885$ m(b) $H=880$ m(c) $H=875$ m(d) $H=870$ m

图 5 同一流量、不同下游水位下淤积体变化过程

Fig. 5 Sedimentation process under the same discharge and different downstream water level

由图5可知在上游来沙的条件下,当上游来流保持不变,随着下游水位降低,淤积体逐步向前推进,且推进幅度不尽相同;受弯道作用及研究河段地形影响,推移质主要淤积在河道转弯处凸岸侧。下游水位降至885、880 m时,与初始壅水高水位相比,由于回水影响改变了河道推移质横向淤积规律,淤积体靠主流侧呈现冲刷。下游水位降至875 m时,从图中看出该弯曲河道中、下部共有两级淤积体;试验结果发现两级淤积体间泥沙颗粒级配差异较为明显,反映出水流的分选作用;其形成原因为下游水位降低后,回水对上游段影响减弱,主流相应收缩,主流横向水流切割淤积体时紧接着在其下游形成次淤积体。下游水位降至870 m时(全试验段不受回水影响),上游淤积体由于已达到输沙平衡状态,未发生显著变化;下游次淤积体在水流作用下继续向前推进。

2.2.2 来流增加过程中的淤积体平面形态

在初始铺沙条件下,当上游模型来流20 L/s(原型流量354 m³/s)、下游水位880 m时,淤积体稳定后其平面形态如图6所示。由图6可知初始淤积体形成于河道凸岸(左岸),淤积体前端推进至模型13#断面;淤积体整体上呈现出三角洲淤积形态。在初始淤积体基础上,实施倒灌后依次增加上游流量,如此反复多次,并分别用全站仪施测各工况下淤积体地形,以确定整组工况下推移质淤积体的变化过程,其平面形态如图7所示。

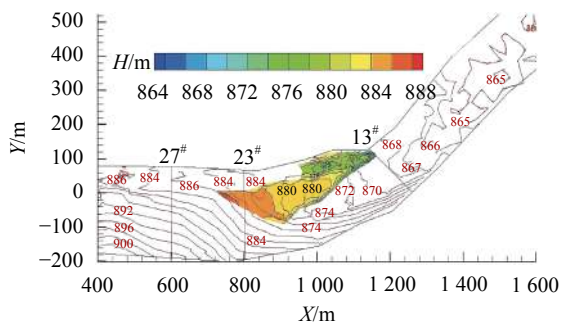
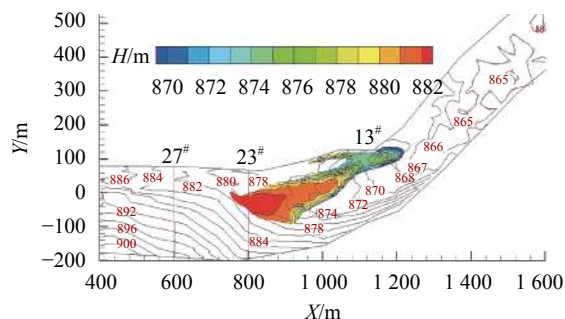


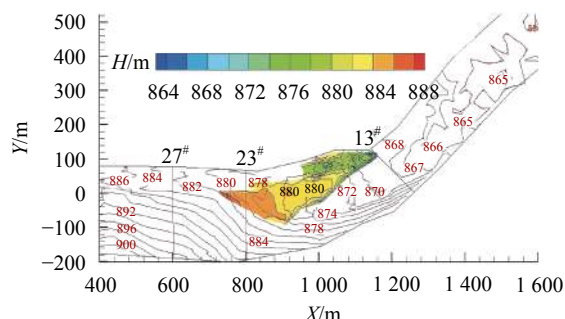
图6 $H=880\text{ m}$ 、 $q=20\text{ L/s}$,初始淤积体形态

Fig. 6 Initial silt morphology when $H=890\text{ m}$ and $q=40\text{ L/s}$

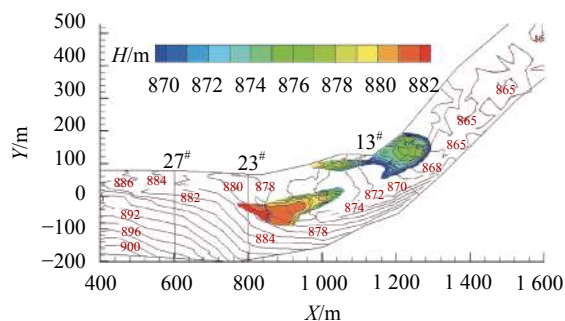
由图7可知在上游来沙的条件下,当下游水位保持不变,随着上游来流量增大,淤积体以较小幅度向前推进。上游模型来流增至30 L/s(原型530 m³/s)、40 L/s(原型707 m³/s)后,河道进入强烈冲刷阶段(大流量要求扩大过水面积),河道左岸主流冲刷强烈,横向上靠主流侧淤积体呈现冲刷,远离主流侧呈现淤积,横向变形较为显著。上游来流增至55 L/s(原型972 m³/s)时,横向水流切割淤积体形成次淤积体,并在水流冲刷作用下向前推进。



(a) $q=30\text{ L/s}$, $Q=530\text{ m}^3/\text{s}$



(b) $q=40\text{ L/s}$, $Q=707\text{ m}^3/\text{s}$



(c) $q=55\text{ L/s}$, $Q=972\text{ m}^3/\text{s}$

图7 同一下游水位、不同流量下淤积体变化过程

Fig. 7 Sedimentation process under the same downstream water level and different discharge

2.3 推移质淤积体前坡推进轨迹变化

在初始铺沙条件下,保持上游来流不变、降低水位或保持水位不变、增大上游来流,无论何种方案,淤积体稳定后整体上均呈现出三角洲淤积形态;淤积体前坡推进轨迹即为三角洲前坡推进轨迹变化。三角洲前坡段的特点是水深迅速增加,流速急剧降低,泥沙在此再一次发生淤积和分选,使三角洲前沿不断向前推进。其中,三角洲的推进包括三个方面:前坡向坝前的推移,洲面的抬高和淤积末端(起淤点)的后退;这三方面均与三角洲洲面的推进成正相关关系。本文主要研究三角洲前坡向前推进过程,两组试验方案下其推进轨迹分别如图8、9所示。

由图8、9可知在未持续来沙的条件下,上游来流不变、水位逐渐降低时,淤积体前坡向前推进幅度呈先大后小之势($a \rightarrow b \rightarrow c$ 幅度较大, $c \rightarrow d$ 幅度较小),

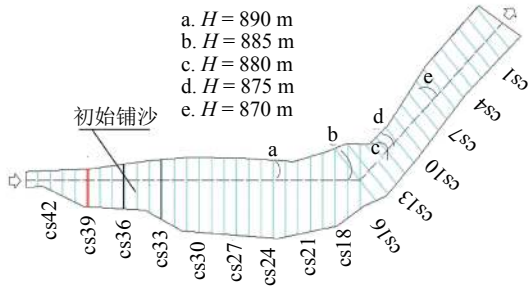


图 8 库水位消落过程中淤积体前坡推进轨迹变化

Fig. 8 Changes of precipitation trajectory in the process of the drop of water level

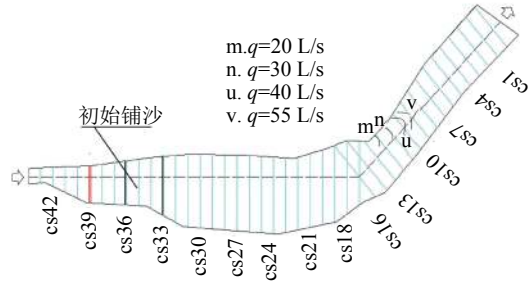


图 9 来流增大过程中淤积体前坡推进轨迹变化

Fig. 9 Changes of precipitation trajectory in the process of the increasing upstream flow

其原因是淤积体推进至弯曲段后,环流作用削弱水流向前推力,弯曲段淤积体向前推进幅度有所减小;下游水位降至870 m后,研究河段已不受回水影响,淤积体以较大幅度推进至图示e位置(d→e)。下游水位不变、来流逐渐增大时,受弯道环流作用影响,在上游来水冲刷下,淤积体前坡以较小幅度由图示m位置依次推进至图示v位置(m→n→u→v)。

对比以上两种情况可以发现,在陡坡性变动回水区,在给定上游来沙总量的前提下,泥沙淤积体前沿的推进幅度主要受到库水位降低的影响,而受上游流量的影响相对较小。

3 结论

1) 试验表明,由于河段比降较大,库水位回水尖灭点上下游呈现不同的流态,水流从急流变为缓流的过程中,输沙能力会相应陡然下降。另一方面,受河道微地貌的影响,在不同边界条件下,水流在水库回水末端附近存在主流的左右摆动,形成了不同旋转方向的回流区,使得回水末端的河势稳定性较差,存在滩槽异位的风险,给河道防洪及涉河工程建设造成了安全隐患。

2) 当上游来流保持不变,随着下游水位降低,初始泥沙淤积体逐步向前推进。下游水位降至875 m时,淤积体在河道湾顶附近被水流分成上下两部分,两级淤积体间泥沙颗粒级配差异较为明显,反映出

水流的分选作用。

3) 在推移质沙源定量的前提下,保持下游库水位不变,上游来流量增大时,推移质以较小幅度向下游运动(相对前一种情况),反映出研究河段变动回水区淤积运动受下游回水作用影响较大。

4) 对于陡坡性变动回水区,在给定上游来沙总量的前提下,泥沙淤积体前沿的推进幅度主要受到库水位降低的影响,而受上游流量的影响相对较小。

参考文献:

- [1] He Yanjun, Zhang Pan. Characteristics of scouring and deposition in fluctuating backwater region of the Three Gorges reservoir[J]. *Journal of Waterway and Harbo*, 2010, 31(5): 473-477. [何艳军, 张璠. 三峡水库变动回水区泥沙冲淤特性分析[J]. *水道港口*, 2010, 31(5): 473-477.]
- [2] Geng Xu, Mao Jixin, Chen Xujian. Study on scour and armor in the downstream of Three Gorges reservoir[J]. *Journal of Sediment Research*, 2017, 42(5): 19-24. [耿旭, 毛继新, 陈绪坚. 三峡水库下游河道冲刷粗化研究[J]. *泥沙研究*, 2017, 42(5): 19-24.]
- [3] Fan Shugang, Zhu Daichen, He Yanjun, et al. Stepped navigation regulation structures design of Hujiatan beach in fluctuating backwater area of the Three Gorges reservoir[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2016(1): 134-138. [樊书刚, 朱代臣, 何艳军, 等. 三峡水库变动回水区胡家滩阶段阶梯状整治建筑物设计方案[J]. *水运工程*, 2016(1): 134-138.]
- [4] Liu Qingquan, Li Jiachun. Sedimentation and optimal operation of Three Gorges reservoir in Yangtze River[J]. *Mechanics in Engineering*, 2000, 22(6): 1-10. [刘青泉, 李家春. 三峡水库的工程泥沙与优化运行[J]. *力学与实践*, 2000, 22(6): 1-10.]
- [5] Yin Weiqing, Dai Changjun, Qian Jun. Strategy study on waterway and port regulation in fluctuation backwater area of Three Gorges reservoir[J]. *Yangtze River*, 2011, 42(23): 10-13. [尹维清, 戴昌军, 钱俊. 三峡水库变动回水区航道与港口治理对策研究[J]. *人民长江*, 2011, 42(23): 10-13.]
- [6] Shu Anping, Huang Jintang, Ding Junsong. Experimental study on the transformation to the braided channel pattern in the fluctuating backwater zone of the reservoir[J]. *Journal of Sediment Research*, 1992(4): 54-62. [舒安平, 黄金堂, 丁君松. 水库变动回水分汉河型转化问题的试验研究[J]. *泥沙研究*, 1992(4): 54-62.]
- [7] Chen Li, Wang Xin, Zhang Jiong, et al. Evolution process of Tunaozi shoal at the fluctuating backwater area of the Three Gorges project[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2007(1): 70-74. [陈立, 王鑫, 张炯, 等. 三峡变动回水区典型淤沙浅滩土脑子河段河型变化特点分析[J]. *水运工程*, 2007(1): 70-74.]
- [8] Lin Yunfa, Luo Yuan, Ye Zhixiong, et al. Regularity of re-

- cent sedimentation in Danjiangkou reservoir area of main-stream Hanjiang river[J].*Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*,2014,31(7):7-12.[林云发,罗媛,叶志雄,等.丹江口水库汉江干流库区近期淤积规律分析[J].*长江科学院院报*,2014,31(7):7-12.]
- [9] Zhang Houyu,Lin Yunfa,Yang Dean,et al.Deposition analysis on Danjiangkou reservoir area in Han river[J].*Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*,2010,27(9):1-5.[章厚玉,林云发,杨德安,等.丹江口水库汉江干流库区淤积分析[J].*长江科学院院报*,2010,27(9):1-5.]
- [10] Xu Cheng,Chen Li,Tang Rongjie,et al.Fluvial processes of Dagushan braid reach in the Danjiangkou reservoir after construction of reservoirs in the upstream[J].*Journal of Sediment Research*,2016(1):19-23.[徐程,陈立,唐荣婕,等.丹江口库区大孤山分汉段冲淤变化及趋势分析[J].*泥沙研究*,2016(1):19-23.]
- [11] Jiang Ling,Li Yitian,Zhang Wei.Research on trend of the Shashi channel evolution in the middle reach of Yangtze River[J].*Journal of Sediment Research*,2006(3):76-80.[江凌,李义天,张为.长江中游沙市河段演变趋势探析[J].*泥沙研究*,2006(3):76-80.]
- [12] Zhang Wei,Li Yitian,Jiang Ling.Fluvial process change of the typical multi-branched meandering reach in the mid-down Yangtze River after Three Gorges dam impoundment[J].*Journal of Sichuan University:Engineering Science Edition*,2008,40(4):20-27.[张为,李义天,江凌.三峡水库蓄水后长江中下游典型分汉浅滩河段演变趋势预测[J].*四川大学学报:工程科学版*,2008,40(4):20-27.]
- [13] Yao Shiming,Zhang Chao,Wang Long,et al.Study on the characteristics of flow movement in branching river[J].*Journal of Hydroelectric Engineering*,2006,25(3):49-52.[姚仕明,张超,王龙,等.分汉河道水流运动特性研究[J].*水力发电学报*,2006,25(3):49-52.]
- [14] Zhao Jinqiong.Analysis of influences on river pattern change of braided channel in reservoir fluctuated backwater area[J].*Yangtze River*,2013,44(17):52-55.[赵瑾琼.水库变动回水分汉河道河型转化影响因素分析[J].*人民长江*,2013,44(17):52-55.]
- [15] Li W,Wang J,Yang S,et al.Determining the existence of the fine sediment flocculation in the Three Gorges Reservoir[J].*Journal of Hydraulic Engineering*,2015,141(2):05014008.
- [16] Beylich A A,Laute K.Sediment sources,spatiotemporal variability and rates of fluvial bedload transport in glacier-connected steep mountain valleys in western Norway(Erdalen and Bødalen drainage basins)[J].*Geomorphology*,2015,228:552-567.
- [17] Jin Zhongwu,Zhang Xiaofeng.Preliminary study on bedload sediment transport rate in the presence of backwater flow[J].*Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*,2014,31(2):1-7.[金中武,张小峰.壅水条件下推移质泥沙输沙率变化规律初步研究[J].*长江科学院院报*,2014,31(2):1-7.]
- [18] Ziegler A D,Sidle R C,Phang V X H,et al.Bedload transport in SE Asian streams—Uncertainties and implications for reservoir management[J].*Geomorphology*,2014,227:31-48.

(编辑 张 琼)

引用格式: Lu Xin,Huang Er,Wang Sen,et al.Bed-load sediment transport in fluctuating backwater area of a steep slope reach[J].*Advanced Engineering Sciences*,2018,50(4):89-95.[路信,黄尔,王森,等.陡坡河段变动回水区推移质运动特性的试验研究[J].*工程科学与技术*,2018,50(4):89-95.]