

长江上游和尚岩滩群航道整治研究

曹民雄^{1,2}, 蔡国正^{1,2}, 王秀红^{1,2}

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 山区河流往往滩滩相连而成滩群,其航道整治须将滩群作为整体进行研究. 长江上游和尚岩滩群由马皮包滩、和尚岩滩、二郎滩与栈桥滩等4个滩组成,在滩性分析的基础上,采用1:140的正态模型研究了滩群的整体整治方案,并从滩头降水、航道尺度(航深、航宽、航道曲率半径等)、通航水流条件的改善程度、工程量与后期维护量的大小等方面对多组方案进行了比选,提出了本滩群的整治原则与措施,同时对推荐方案的挖槽稳定性进行了试验研究. 研究表明,推荐方案可以满足航道尺度与通航水流条件的要求.

关键词: 航道整治; 滩群; 和尚岩滩; 物理模型

中图分类号: U617.3

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2010)03-0001-09

山区河流因两岸组成的复杂与多样性,往往滩险相连成为滩群. 因各滩的滩性不同,航道整治必须将滩群作为整体进行研究,其物理模型试验仍然是主要的研究手段. 和尚岩滩群位于长江上游水富港以下3.5~11.5 km河段,即向家坝电站下游6.5~14.5 km,以下是该滩群的整体整治方案研究.

1 河段概况

和尚岩滩群由马皮包滩、和尚岩滩、二郎滩与栈桥滩组成(见图1).

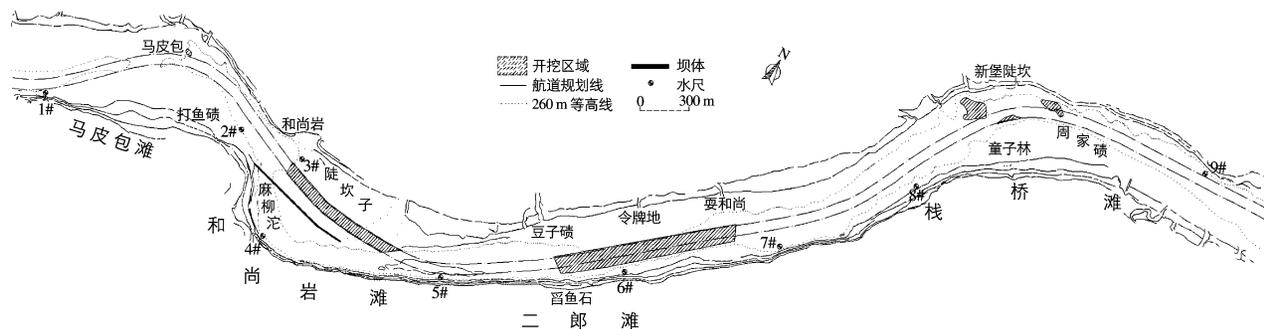


图1 和尚岩滩群及设计方案II

Fig. 1 Sketch map of Monk Rock serial rapids and design scheme II

马皮包滩因江中潜伏马皮包暗礁而得名,礁石阻流激起浪漩,流态紊乱、航深不足. 和尚岩滩进口为窄深的弯道过渡段,上与马皮包滩相连,向下进入和尚岩滩的河道放宽段,有宽大的边滩依附于左岸,边滩头部时有冲淤变化,出现沙弯沱,并受和尚岩的岩壁反射水流作用而出现水深流急的麻柳沱,流态恶劣,横流明显、航线曲折,下水船舶容易拐弯触礁. 二郎滩的河道顺直,但右岸晋鱼石石梁、卵石边滩与左岸的豆子碛、令牌

收稿日期: 2009-10-20

基金项目: 西部交通建设科技项目(200432874639)

作者简介: 曹民雄(1965-),男,江西永新人,教授级高级工程师,博士,主要从事港口航道与工程泥沙研究.

E-mail: mxcao@nhri.cn

地、要和和尚三边滩对峙,枯水期形成卡口而出现剪刀水,坡陡流急,船舶下水险、上水难;中水位时可贴左岸的缓流区航行,但孤石林立,流态恶劣,船舶上行非常危险. 栈桥滩段以浅、急为主,枯水期左岸新堡坎处的头盘、二盘、三盘共3处石盘(高程约261.6 m)伸入江中,如下挑的丁坝而出现滑梁水;对岸童子林、周家碛也凸向江中,使得江面狭窄,加之局部散乱着礁石,滩段局部大浪、流急坡陡、流态恶劣;行船避让石盘时,船舶有搁浅在周家碛边滩之虑.

本河段航道现为IV级航道,但目前维护尺度为V级:1.8 m×40 m×300 m(保证率98%),规划航道等级为III级,尺度为2.7 m×60 m×560 m^[1]. 航道整治的消滩指标在滩段比降为3‰,1.8‰和0.7‰时对应的水流速度分别为2.5,3.0和3.5 m/s.

2 滩性分析与整治原则

在滩险整治之前,首先需要滩性分析,了解何时成滩与消滩,以及成滩的主要原因和碍航状况,在此基础上才能提出合理的整治原则和有效的整治措施^[2].

2.1 滩性分析

2.1.1 马皮包滩 马皮包滩段右岸(1#~2#)的比降变化见图2. 可见枯水期受马皮包暗礁的阻水影响水面比降最大,设计流量($Q=1\ 250\ \text{m}^3/\text{s}$)时比降达0.88‰,水流表面流速达2.8 m/s左右,随着流量的增加,水面比降逐渐减缓;流量为10 000 m^3/s 时比降约为0.31‰,但流量进一步增加,比降有所增大,故本滩为枯水滩.

2.1.2 和尚岩滩 和尚岩滩段(2#~6#)比降变化见图3. 可见不同流量下滩段比降变化不大,洪水期比降稍大些. 其中和尚岩滩中段(3#~4#)横比降变化见图4,枯水期($Q=1\ 250\sim 4\ 590\ \text{m}^3/\text{s}$)水流沿深槽流动(见图5(a)),弯道特性明显、弯顶(4#)处水位较低,横比降达0.43‰,边滩头部沙湾沱处横流达0.65 m/s;但随着流量增加,水流上滩取直而下(见图5(b)),横比降减缓至0.1‰. 本滩的滩性主要表现在麻柳沱的流态恶劣、航线曲折且易出险.

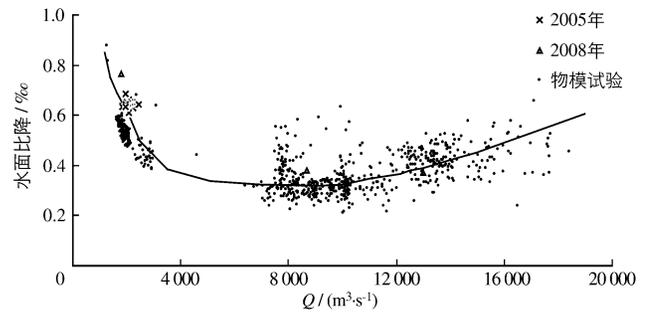


图2 马皮包滩(1#~2#)比降变化

Fig. 2 Slope changes of Mapibao rapids (1#~2#)

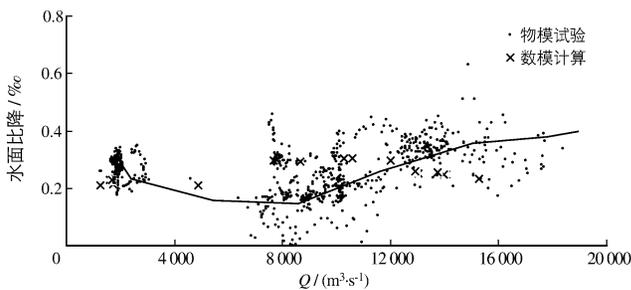


图3 和尚岩滩段(2#~6#)比降变化

Fig. 3 Slope changes of Monk Rock rapids (2#~6#)

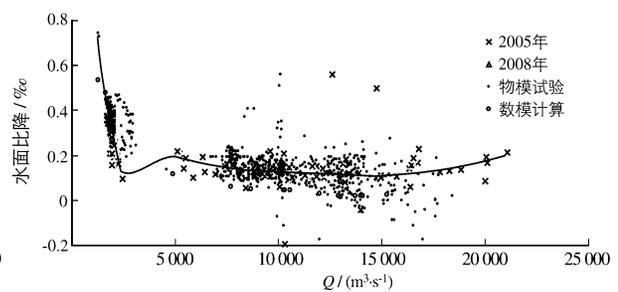


图4 和尚岩滩中段(3#~4#)横比降变化

Fig. 4 The transverse slope changes of middle Monk Rock rapids (3#~4#)

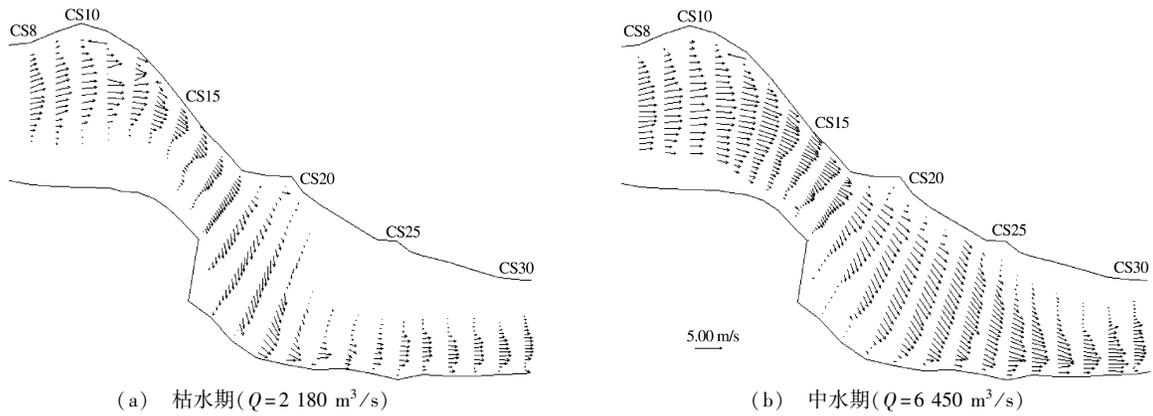


图5 和尚岩滩枯、中水期流场

Fig. 5 The low and median water period flow field of Monk Rock rapids

2.1.3 二郎滩 二郎滩段的比降变化见图6~7。可见,滩段枯水期水面比降随流量增加而降低,至流量约3300 m³/s时,比降达最小(0.23‰);随后随着流量增加,水面比降逐渐增大,至流量约10000 m³/s时(水位约271.0 m)比降达0.34‰,表面流速达3.82 m/s,高程为265~270 m的右岸乱石、礁石堆被淹没;流量继续增大后水面比降逐渐减缓。整个滩段表现出复杂的变化特性,其中上滩段(5#~7#)水面比降与流量成反比,为枯水滩;而下滩段(7#~8#)水面比降与流量成正比。主要表现为洪水滩。

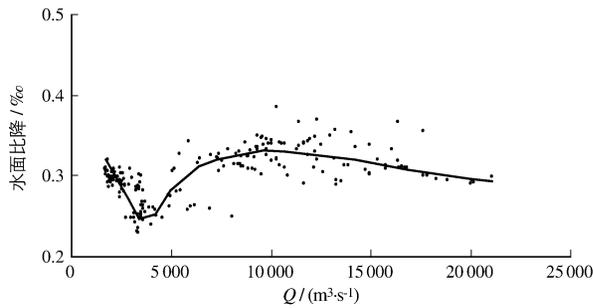


图6 二郎滩段(5#~8#)比降变化(2008年)

Fig. 6 Slope changes of Erlang rapids (5#~8#)

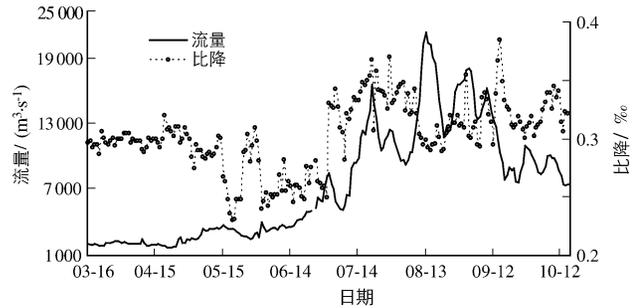


图7 二郎滩段(5#~8#)比降与流量变化过程(2008年)

Fig. 7 Slope and discharge changes of Erlang rapids (5#~8#)

2.1.4 栈桥滩 栈桥滩段的比降变化见图8~9。可见,滩段中枯水期随着流量的增加,水流逐渐漫过新堡坎处的3处石盘,水面比降随着流量的增加而减小,流量约9300 m³/s时比降达最小(0.27‰),其后比降略有增大;枯水期受两岸石盘和碛坝压缩河床的影响,水面比降达0.61‰。滩段落差主要集中在上滩段,枯水期上滩段水面比降达0.82‰,表面流速达2.87 m/s,流量约5000 m³/s时,上滩段水位约269 m,两岸石盘和碛坝早已过流,水面比降降至0.27‰左右。

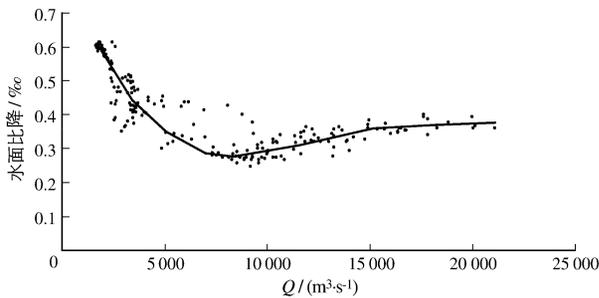


图8 栈桥滩滩段(8#~9#)比降变化(2008年)

Fig. 8 Slope changes of Zhanqiao rapids (8#~9#)

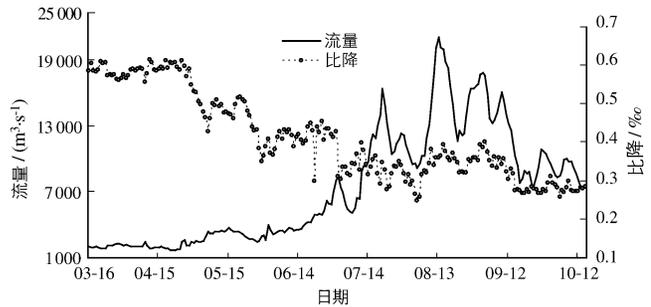


图9 栈桥滩滩段(8#~9#)比降与流量变化过程(2008年)

Fig. 9 Slope and discharge changes of Zhanqiao rapids

下滩段水面比降随着流量的增加而增大. 因河道呈“V”型的窄深形态, 流量增加到 $5\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 左右时比降急剧增加至 0.54% , 之后基本维持在 0.56% 左右. 本滩段受左岸新堡坎处的头盘、二盘、三盘伸入江中的影响, 主要表现为枯水急、浅滩.

2.2 航道整治原则与措施

天然来流情况下, 本河段的成滩期比降较大, 各滩的成滩期(水位)略有不同. 马皮包滩为枯水滩, 枯水期水流流速较大, 随着流量的增加逐渐消滩; 和尚岩滩段虽也为枯水滩, 但主要是枯水期横向比降较大、枯水航槽弯曲、流态恶劣, 滩段以险、急为主; 二郎滩的上滩段为枯水滩、下滩段为洪水滩, 滩段洪水期比降较大, 航槽两侧有暗礁乱石堆; 栈桥滩为枯水滩, 枯水期江中石盘碍航, 滩段以浅、急为主.

依据石质急流滩航道整治的一般原则^[3-4], 结合本滩群的滩性特点, 本滩整治拟采取以下整治原则与措施: (1) 合理调配各滩的水面比降、控制滩头水位. 山区河流因河床地形特殊, 水面比降往往集中在滩险处, 下游滩险整治引起的水位降落可能恶化上游滩险, 上游滩险整治将改变下游滩险的进流条件, 因而滩群须作为总体进行研究, 目标是合理调配各滩的水面比降, 同时控制滩头水位降落值, 以免本滩群整治引起的水位降落恶化上游滩险. (2) 平顺航槽、改善流态. 航槽边或有乱石危害船舶航行安全, 或有暗礁、石盘突入江中碍航, 拟采取炸礁措施, 将产生陡比降、恶劣流态、大流速的碍航石梁、石盘、石嘴、孤石等进行清炸, 使航槽平整, 流态改善. 如二郎滩段水流急、流速大, 主要考虑开挖断面降低流速. 栈桥滩石梁突出, 槽窄、流急、流态紊乱, 应采取疏浚进行整治, 以满足航深与改善流态. (3) 疏浚筑坝维持航槽尺度. 有些地方水浅流急, 航道等级提高后水深不够, 需要开挖; 河道放宽的淤沙处, 需要疏浚与整治相结合. (4) 结合枢纽泄流特点进行整治. 马皮包滩与和尚岩滩两滩间深槽成 S 形(近 90° 的转弯), 造成水流流向与航道中心线夹角较大、流态恶劣, 上游向家坝电站泄流后瞬间比降加大、流态将更恶劣, 拟开挖新的航槽避开原航槽的弯道与恶劣流态, 减轻电站泄流的影响. 原深槽采取潜坝封堵.

本河段的设计流量为 $1\ 250\ \text{m}^3/\text{s}$, 整治流量为 $2\ 180\ \text{m}^3/\text{s}$, 向家坝电站日调节峰值流量 $6\ 450\ \text{m}^3/\text{s}$ (含横江入流) 介于多年平均流量 $4\ 875\ \text{m}^3/\text{s}$ 与汛期平均流量 $8\ 646\ \text{m}^3/\text{s}$ 间, 试验中主要研究这 3 级流量的航道条件, 同时兼顾多年平均流量 $4\ 875\ \text{m}^3/\text{s}$ 与封航流量 $17\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 的情况.

3 模型设计与验证

3.1 模型设计

为研究航道的水流条件, 模型在满足几何相似的基础上, 还应满足水流运动状态相似^[5-6]:

$$\text{重力相似} \quad \alpha_v = \alpha_H^{1/2} \quad (1)$$

$$\text{阻力相似} \quad \alpha_v = \frac{1}{\alpha_n} \frac{\alpha_H^{7/6}}{\alpha_L^{1/2}} \quad (2)$$

根据试验场地条件, 确定模型平面比尺为 $\alpha_L = 140$. 因为研究河段为山区河流, 航道整治要研究航道尺度与通航水流条件, 需要保证流态的相似, 要求模型为正态. 根据相似条件有 $\alpha_n = \alpha_L^{1/6} = 2.279$, 实测资料计算原体糙率 $n_p = 0.037$, 则模型糙率 $n_m = 0.016$, 可见模型表面糙率高于水泥抹面糙率, 平面比尺 $\alpha_L = 140$ 的正态模型糙率可以达到.

本河段 20 个计算断面的流速 $V = 1.0 \sim 2.6\ \text{m/s}$, 水力半径 $R = 3.2 \sim 11.3\ \text{m}$, 计算得原体雷诺数 $Re_p = 3\ 200\ 000 \sim 298\ 380\ 000$, 将临界雷诺数 $Re_k = 1\ 000$ 同时代入 $\alpha_H \leq \left(\frac{Re_p}{Re_k}\right)^{2/3}$ 计算得 $\alpha_H \leq 217$, 取模型垂直比尺为 140 可保证模型水流处于紊流区. 将 $n_p = 0.037$, $R = 3.2 \sim 11.3\ \text{m}$ 代入 $\lambda = \frac{8gn^2}{R^{1/3}}$ 得原体阻力系数 $\lambda = 0.048 \sim 0.073$; 为保证模型水流位于阻力平方区, 要求 $\alpha_H < 4.22 \left(\frac{V_p H_p}{v_m}\right)^{2/11} \lambda_p^{8/11} \alpha_L^{8/11} = 366 \sim 435$ (其中 $V = 1.0 \sim 2.6\ \text{m/s}$), 取模型垂直比尺为 140 可保证模型水流处于阻力平方区. 综上所述, 采用正态模型可以达

到糙率要求,同时满足阻力平方区、最小水深及紊流的要求.故选择几何比尺 $\alpha_L = 140$,流速比尺 $\alpha_V = 11.83$,糙率比尺 $\alpha_n = 2.279$,流量比尺 $\alpha_Q = 231\ 910$.

3.2 模型制作与验证

制模地形采用2005年6月实测的1:2 000的河道地形图,模型范围上起马皮包滩、下至栈桥滩,全长8 km.本河段的枯水糙率 $n_p = 0.037$,相应的模型糙率为 $n_m = 0.016$.根据以往的研究和经验,采用梅花形(5 mm的石子、间距为11 cm)加糙^[7],并在恒定流验证时作了调整.进行了流量分别为16 953, 8 378, 2 191 m³/s的洪、中、枯3级流量的水位、流速平面分布与流向等验证,结果表明,精度符合《内河航道与港口水流、泥沙模拟规程》(JTJ/T 232-98)^[6]的要求.

4 航道整治方案

4.1 方案比选

在滩性分析的基础上,针对存在的航道问题,按本滩群的整治原则,提出了2个航道整治方案:设计方案I以原深槽作为航槽,采取疏浚与整治相结合(图10(a));设计方案II和尚岩滩的边滩上新挖航槽(图1与图10(b)),其余滩段整治措施一致:马皮包滩开挖底高程为259.4 m;二郎滩开挖底高程为258.0~257.1 m;栈桥滩的上滩段开挖底高程为258.6 m、下滩段开挖底高程为258.2 m.各开挖区域的范围见图1.

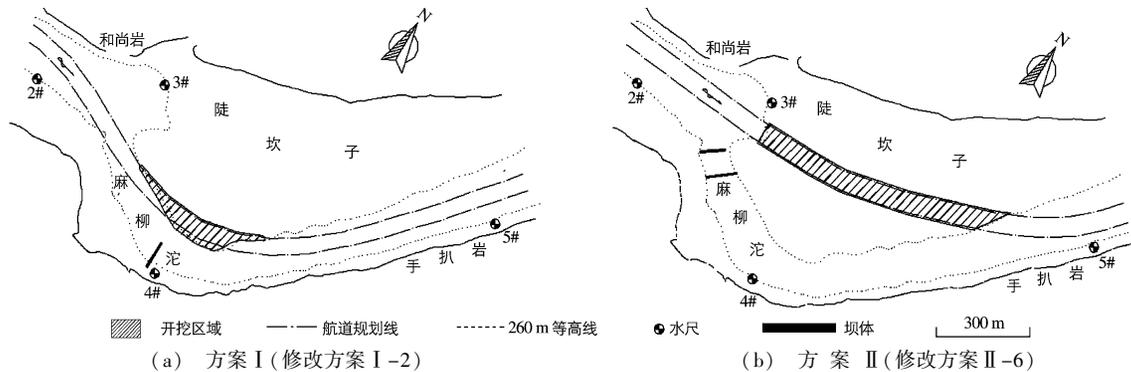


图10 和尚岩滩比选方案布置示意图

Fig.10 Layout of Monk Rock rapids comparison schemes

针对2种设计思路的方案进行了试验,其中修改方案I-1、I-2以设计方案I为基础,修改方案II-1~II-6以设计方案II为基础.各滩整治的主要措施为马皮包滩清除碍航礁石;和尚岩滩采取整治与疏浚相结合以调整航线,增大航道曲率半径,或者在边滩上新挖航槽,以改善航行条件;二郎滩采取拓宽过水断面以解决水浅流急;栈桥滩清炸礁石与石梁,以拓宽航槽并调整比降,各方案主要工程措施及工程效果见表1.

表1 各方案主要工程措施与效果比较

Tab.1 Comparison between engineering measures and effects of schemes

方案	和尚岩滩的主要工程措施	工程主要效果	滩头水位变化/m
修改I-1	1条86 m丁坝,坝顶高程264.9 m;磺沿开挖至260.3 m	工程区流速过大	-0.11
修改I-2	1条86 m丁坝,坝顶高程264.9 m;磺沿开挖至259.74 m(图10(a))	航道条件基本满足要求	-0.12
修改II-1	挖槽及其右侧1条顺坝,坝长570 m,顶高程265.4 m;挖槽底高程260.4~260.0 m(图1)	顺坝封堵了原深槽,使得挖槽内流速过大、航深不足	0.19
修改II-2	挖槽及其右侧的顺坝缩短为封堵原深槽的锁坝,坝长165 m,顶高程263.4 m;挖槽底高程260.4~260.0 m	挖槽内流速仍过大、航深不足	0.10
修改II-3	原麻柳潭深槽进口筑一潜坝,坝长123 m,顶高程261.9 m;边滩挖槽,挖槽底高程260.4~260.0 m	航深不足	-0.14

(续表)

方 案	和尚岩滩的主要工程措施	工程主要效果	滩头水位变化/ m
修改 II-4	原麻柳潭深槽进口潜坝长 123 m, 顶高程 261.9 m; 边滩挖槽, 挖槽底高程降为 260.4 ~ 259.8 m	挖槽内流速较大	-0.15
修改 II-5	潜坝长 123 m, 坝顶高程降为 261.6 m, 边滩挖槽, 挖槽底高程降为 260.4 ~ 259.8 m	航道条件满足要求	-0.16
修改 II-6	为增加潜坝稳定性, 将 1 条潜坝改为 2 条, 坝长各为 83 和 96 m, 坝顶高程 261.0 m, 边滩挖槽, 挖槽底高程降为 260.4 ~ 259.8 m (图 10(b))	航道条件满足要求	-0.15

通过洪、中、枯多级流量的试验与分析, 2 个方案中修改方案 I-2 与修改方案 II-6 基本满足航道水流与航行尺度的要求(见表 2), 可以作为优化方案进一步比选。

表 2 各滩段大流速区长度及比降统计

Tab. 2 The length and slope statistics of each rapids with large velocity

流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	滩 段	修改方案 I-2			修改方案 II-6		
		流速区长度/ m		比降 /‰	流速区长度/ m		比降 /‰
		3.0 m/s	3.5 m/s		3.0 m/s	3.5 m/s	
1 250	马皮包滩	98.82		0.64	186.24		0.64
	和尚岩滩	232.84		0.53			0.53
	二郎滩	186.23		0.28			0.28
	栈桥滩	294.12	77.2	0.67	249.52	38.71	0.67
	总 计	812.01	77.2		435.76	38.71	
1 330	马皮包滩			0.57	43.57		0.75
	和尚岩滩	208.42		0.49			0.42
	二郎滩	224.38		0.27			0.28
	栈桥滩	304.01	74.26	0.64	110.88		0.64
	总 计	736.81	74.26		154.45		
2 180	马皮包滩	76.41		0.44			0.59
	和尚岩滩	193.34		0.42			0.28
	二郎滩			0.26	265.21		0.27
	栈桥滩	113.5	50.55	0.54	187.52		0.55
	总 计	383.25	50.55		452.73		
6 450	马皮包滩	232.09		0.35	293.89		0.38
	和尚岩滩			0.32			0.19
	二郎滩	315.83	47.35	0.25	311.74	44.03	0.28
	栈桥滩	488.06		0.32	353.06		0.29
	总 计	1 035.98	47.35		958.69	44.03	

整治工程方案的优劣主要从航道尺度(航深、航宽、航道曲率半径等)、通航水流条件的改善程度、工程量与后期维护量的大小等方面进行比选。

(1) 滩头水位降落. 修改 I-2 的滩头水位降落 0.12 m, 修改 II-6 为 0.15 m, 2 个方案的上游水位降落不明显。

(2) 航道尺度的改善. 2 个方案的航宽(≥ 60 m)、航深(≥ 3.0 m)和航道曲率半径(≥ 560 m), 都满足航道要求。

(3) 通航水流条件的改善. 从沿程比降看, 枯水局部比降较大的栈桥滩等都得到明显改善, 相对而言修改方案 II-6 的枯水沿程水面比降相对均匀. 中、洪水期 2 个方案沿程比降的改善情况基本一致。

从航道流速条件看, 流量在 6 450 m^3/s 以下时, 超过 3.5 m/s 的流速区范围很小, 相应比降小于 0.7‰。

相对而言修改方案 II-6 的高流速区范围更小(见表 2)。当流量增大到 17 000 m³/s 时,规划航线内沿程表面流速大于 3.5 m/s 的流速区连成一片,船舶航行困难,2 个方案都需调整航线避开高流速区。

从航道流态来看,修改方案 I-2 在和尚岩滩段的航线仍从麻柳沱航行,虽航线作了微调,但航道流态仍紊乱,修改方案 II-6 的航行流态相对较好。

(4) 工程量与后期维护量的比较。2 个方案整治工程都包括开挖、炸礁与筑坝,修改方案 I-2 工程量相对较少。从后文“挖槽稳定性研究”中可知,修改方案 II-6 的和尚岩滩段挖槽有一定的回淤量,后期维护量相对大些。

(5) 对向家坝电站泄流的适应性。2 个方案的航道曲率半径都满足要求,但修改方案 II-6 的航道曲率半径远大于修改方案 I-2。向家坝电站运行后,每天水流一涨一落,滩段水位与流速的日内变幅较大。和尚岩滩段修改方案 I-2 仍从原深槽航行,航道通视条件差,下行船舶船位调整的时间短,易发生海损事故;修改方案 II-6 能更好地适应向家坝电站的泄流,《电站日调节非恒定流对航道整治效果的影响试验研究》^[8] 论证了整治方案对电站泄流的适应性。

综合以上 5 个方面的分析,选择修改方案 II-6 为推荐方案。

4.2 挖槽稳定性研究

为了研究修改方案 II-6 中和尚岩滩的挖槽稳定性,拟进行定床输沙试验,模型在满足式(1)、(2)的基础上,还必须满足泥沙起动相似 $\alpha_v = \alpha_{v0}$ 。

4.2.1 模型沙的选择 水富至宜宾的河床主要由基岩(包括礁石)与卵石夹砂组成,卵石边滩主要为漂卵石、卵石、砾石、中细砂等,沿程卵石边滩的级配较宽(图 11),2#(和尚岩滩头)的级配有一定的代表性,并位于新开挖航槽的进口,因而选择 2#沙样代表原体沙。2#沙样级配组成的特征值为: $d_{25} = 0.013$ m, $d_{50} = 0.053$ m, $d_{75} = 0.140$ m, $d_{84} = 0.180$ m, $d_{90} = 0.220$ m, 平均粒径 $d_m = 0.103$ m, 不均匀系数 $\eta = 3.28$ 。

原体沙为卵石夹沙,起动流速可用以下 4 个公式进行计算,结果见表 3。可见,原体沙的起动流速约为 2.0 ~ 3.0 m/s。

沙莫夫公式^[9]:
$$V_c = 4.6d^{1/3}h^{1/6} \tag{3}$$

岗恰洛夫公式^[9]:
$$V_c = 1.06lg \frac{8.8h}{d_{90}} \sqrt{\frac{r_s - r}{r}gd} \tag{4}$$

唐存本公式^[10]:
$$V_c = \frac{6}{7} \left(\frac{h}{d}\right)^{1/6} \left[3.2 \left(\frac{r_s - r}{r}\right)gd\right]^{1/2} \tag{5}$$

曹民雄公式^[11]:
$$V_c = 1.3 \sqrt{\frac{r_s - r}{r}g \frac{d_i^2}{d_m} \frac{lg \frac{11.11h}{d_{84}}}{lg \frac{15.1d_i}{d_{84}}}}, \quad \eta = \sqrt{\frac{d_{75}}{d_{25}}} \tag{6}$$

表 3 原型及模型沙的起动流速

Tab. 3 The threshold velocity computation of prototype and model sediment

原体沙起动流速($d_{50}=0.053$ m)/(m·s ⁻¹)		模型沙起动流速($d_{50}=0.007$ m)/(m·s ⁻¹)				α_{v0}/α_v					
原体水深/m	式(3)	式(4)	式(5)	式(6)	模型水深/m	式(4)	式(5)	式(6)	式(4)	式(5)	式(6)
2	1.939	1.867	2.600	1.998	0.014	0.108	0.275	0.132	1.47	0.80	1.28
3	2.075	2.040	2.781	2.166	0.021	0.137	0.294	0.168	1.26	0.80	1.09
4	2.177	2.163	2.918	2.286	0.029	0.158	0.309	0.193	1.15	0.80	1.00
5	2.259	2.258	3.029	2.378	0.036	0.175	0.315	0.204	1.09	0.81	0.99

利用式(3)~(6)进行试算,采用 $\gamma_s = 1.37$ t/m³, $d_{50} = 0.007$ m 的 BZC 模型沙基本能满足起动相似条件, $\alpha_{v0}/\alpha_v = 0.8 \sim 1.5$ (见表 3)。因而,采用 $\alpha_d = 7.57$ 配制(见图 12)的模型沙可满足起动相似。

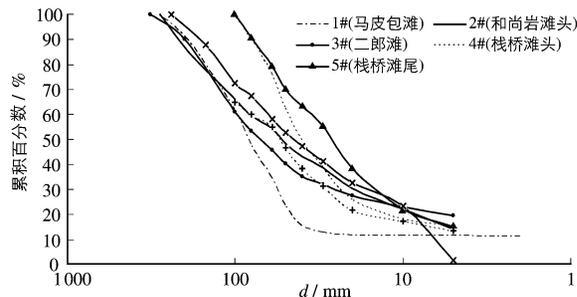


图 11 沿程各边滩河床组成

Fig. 11 The composition of the riverbed along the rapids

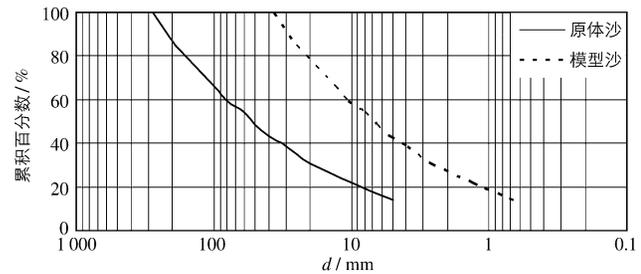


图 12 模型沙级配曲线

Fig. 12 The gradation curve of model sediment

4.2.2 航槽稳定性试验 在和尚岩滩边滩新开挖航槽内均匀铺设一定量的模型沙,研究水流作用下的沿程冲淤变化.试验流量为 $4\ 875 \sim 17\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$,水流冲刷时间为原体 $24\ \text{h}$,结果见表4.可见:流量为 $4\ 875\ \text{m}^3/\text{s}$ 时模型沙不起动,流量为 $6\ 450\ \text{m}^3/\text{s}$ 时仅表面细小颗粒起动,流量为 $17\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 时航槽内输移出泥沙 44.8% .结合泥沙输移路线分析,当洪水期将泥沙($d_{50}=0.053\ \text{m}$)带入航槽后,泥沙能否被输送出新挖航槽,取决于汛后消落期的时间长短,流量小于 $4\ 875\ \text{m}^3/\text{s}$ 后新带入的泥沙无法起动.可见,挖槽在洪水后需要加强观测,如有卵石淤积需及时清淤.

表 4 和尚岩滩新开挖航槽内定床输沙结果

Tab.4 The fixed-bed sediment transport results of Monk Rock rapids' new dredged channel

流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	新挖航槽流速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	铺沙湿质量/kg	冲移沙质量/kg	铺沙冲失率/%
4 875	1.76 ~ 2.68	40	0	
6 450	2.20 ~ 2.90	40	1.2	3.0
17 000	3.30 ~ 3.50	40	17.9	44.8

5 结 语

针对和尚岩滩群特性,采取的整治原则与措施为:合理调配各滩的水面比降,控制滩头降水,平顺航槽、改善流态,疏浚筑坝,维持航槽尺度,结合枢纽泄流特点、新挖航槽.经近10组方案试验,从滩头降水、航道尺度、通航水流条件的改善程度、工程量与后期维护量的大小等方面对多组方案进行了比选,滩群采取修改方案II-6进行整治,可以满足航道尺度与通航水流条件的要求.

参 考 文 献:

- [1] 长江航运管理局,长江航道局.长江干线航道发展规划[R].武汉:长江航运管理局,长江航道局.2002.(Bureau of Changjiang Shipping, Changjiang Waterway Bureau. The Changjiang River Waterway Development Plan[R]. Wuhan: Bureau of Changjiang Shipping, Changjiang Waterway Bureau, 2002. (in Chinese))
- [2] 曹民雄,蔡国正,龙杰.石质滩险的滩性分析方法与实例[J].水运工程,2008(12):110-113.(CAO Min-xiong, CAI Guo-zheng, LONG jie. Analyzing method and example of shoal characteristics in rapids[J]. Port & Waterway Engineering, 2008(12):110-113. (in Chinese))
- [3] 邓桂香,邓传伟.乌江羊角碛急流滩群航道整治研究[J].重庆交通学院学报,1995(2):77-88.(DENG Gui-xiang, DENG Chuan-wei. A study on regulation channel located at Yangjiaoqi of Wujiang[J]. Journal of Chongqing Jiaotong Institute, 1995(2):77-88. (in Chinese))
- [4] 赵志舟,周华君.长江神背嘴滩险成因分析与整治技术[J].水利水运工程学报,2008(3):58-63.(ZHAO Zhi-zhou, ZHOU Hua-jun. Regulation measures and effect analysis for the Shenbeizui shoal in the Yangtze River[J]. Hydro-Science and Engineering, 2008(3):58-63. (in Chinese))

- [5] 李昌华,金德春. 河工模型试验[M]. 北京:人民交通出版社,1981. (LI Chang-hua, JIN De-chun. River model test[M]. Beijing: China Communications Press, 1981. (in Chinese))
- [6] JTJ/T 232-98, 内河航道与港口水流泥沙模拟技术规程[S]. (JTJ/T 232-98, Technical regulation of modelling for flow and sediment in inland waterway and harbor[S]. (in Chinese))
- [7] 唐存本. 梅花型糙率的研究[R]. 天津:天津水运工程科学研究所,1977. (TANG Cun-ben. Study on quincuncial roughness[R]. Tianjin: Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, 1977. (in Chinese))
- [8] 曹民雄,马爱兴,胡金义. 电站日调节非恒定流对航道整治效果的影响试验研究[R]. 南京:南京水利科学研究院,2007. (CAO Min-xiong, MA Ai-xing, HU Jin-yi. Study on power station's daily regulating unsteady flow influence on channel regulation effect[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2007. (in Chinese))
- [9] 中国水利学会泥沙专业委员会. 泥沙手册[M]. 北京:中国环境科学出版社,1989. (Sediment Professional Committee of Chinese Hydraulic Engineering Society. Sediment manual[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1989. (in Chinese))
- [10] 唐存本. 泥沙起动的规律[J]. 水利学报,1963(2): 1-12. (TANG Cun-ben. Laws of threshold motion[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1963(2): 1-12. (in Chinese))

Waterway regulation of Monk Rock rapids group in the upper reaches of the Yangtze River

CAO Min-xiong^{1,2}, CAI Guo-zheng^{1,2}, WANG Xiu-hong^{1,2}

(1. *Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 2. *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210029, China*)

Abstract: As the mountain river rapids are often linked up, the channel regulation should be studied as a whole. The Monk Rock serial rapids in the upper reaches of the Yangtze River are composed of Mapibao rapids, Monk Rock rapids, Erlang rapids and Zhanqiao rapids. Based on analysis of the rapids characteristics, the regulation scheme was studied with the model scale of 1 : 140, the schemes were compared and selected considering water level change of rapids-head, channel dimensions (channel depth, channel width, curvature radius of channel, etc.), the improvement degree of navigation flow conditions, quantity of works and maintenance engineering. The regulation principle and measurement were advanced. The dredge-cut stability of the recommended project was studied. Research results show that the recommended scheme can meet the requirements of channel dimensions and navigation conditions.

Key words: channel regulation; serial rapids; Monk Rock rapids; physical model