

· 升船机 ·

中间渠道交汇区尺度及船舶航行方式研究*



李中华, 胡亚安, 陈莹颖

(南京水利科学研究院, 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,
通航建筑物建设技术交通行业重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 利用自航船模试验, 研究两级单线航道中间渠道供船舶交汇错船的交汇区尺度及船舶航行方式。试验表明, 中间渠道交汇区通过斜导墙缩窄分别与上、下游通航建筑物连接, 过渡段长度大于2倍船长是合理的。参考相关标准和设计规范确定交汇区宽度和船舶航行方式, 确保一线船舶停泊另一线船舶以正常航速航行能在交汇区顺利进行交汇, 以提高通航建筑物通过能力和船舶航行安全性。

关键词: 中间渠道; 交汇区; 尺度; 航迹带宽度; 船舶航行方式

中图分类号: U 642.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)12-0142-06

Scale and navigation mode at confluence area of intermediate channel

LI Zhong-hua, HU Ya-an, CHEN Ying-ying

(Nanjing Hydraulic Research Institute, State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering,
Key Laboratory of Navigation Structure Construction Technology, Ministry of Transport, PRC, Nanjing 210029, China)

Abstract: Based on self-propelled ship model test, the paper studies the scale and ship navigation mode of interference area for ships to meet in the intermediate channel between two single channels. The result shows it is reasonable that the intermediate channel interference area connects with the navigation structures through oblique guide wall, and the transition is more than 2 times length of the captain. The intersection area width and ship navigation mode is determined by referring to the relevant standards and design specifications in order that one line ship berthed can smoothly meet another line ship sailing at a normal speed in the interference area, and the ability and security to navigation is improved.

Keywords: intermediate channel; confluence area; scale; course width; navigation mode

中间渠道是一种两端封闭的通航渠道^[1]。渠道流速几乎为零, 断面尺度受工程条件限制通常较小, 是一种较特殊的限制性航道, 其尺度设计尚无规范或标准可循^[2]。为提高通航建筑物通过能力, 中间渠道一般可供双向过坝船舶交错航行。双向通航的中间渠道尺度和通航条件, 有多名学者曾进行过大量研究^[3-5]。单向通航的中间渠道供船舶交汇错船的交汇区尺度和通航条件方面目前研究还不是很多, 本文结合乌江构皮滩第一级中间渠道布置^[6], 采用自航船模试验方法, 对单向

通航中间渠道交汇区的尺度及船舶航行方式进行了试验研究。

1 中间渠道交汇区布置

中间渠道交汇区布置见图1。交汇区平面采用近似反对称布置, 通过斜导墙缩窄分别与上、下游通航建筑物连接。上游通航渠道宽度16 m, 下游通航渠道宽度15 m, 两者中心线间距22 m。交汇区长约340 m、宽37 m, 扣除两侧斜导墙过渡段长度, 交汇区平直段长约136 m。

收稿日期: 2016-09-16

*基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0402003, 2016YFC0402004)

作者简介: 李中华(1974—), 男, 教授级高级工程师, 从事通航建筑物模型试验及数值模拟方面的研究。

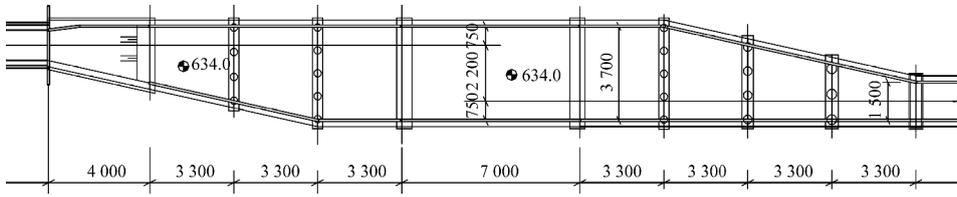


图 1 中间渠道交汇区布置 (高程: m; 尺寸: cm)

2 中间渠道交汇区船模试验

2.1 试验内容

针对 500 t 设计船舶, 分别以 1.0、1.2、1.4 和 1.6 m/s 等 4 种航速在中间渠道内航行, 观测船舶航行特征值变化, 分析航迹带宽度的主要影响因素, 确定中间交汇区的尺度和船舶航行方式。

2.2 试验方法

在研究中间渠道交汇区通航条件和尺度时采用自航船模试验研究方法。水工模型按重力相似准则设计, 模型比尺为 1:16。船模主要按重力相似准则设计, 几何比尺与水工物理模型一致。船模除满足与实船的尺度、线型几何相似外, 船模运动时与实船的航速也应满足相似, 还应使船模与实船的排水量相似。

船舶在交汇区采用直进曲出方式在交汇区进行交汇, 即船舶以曲线方式出单向航道进入交汇区停泊交汇, 以直线航行方式在从交汇区停泊段进入船厢。船舶以 4 种速度分别按 1 倍、1.5 倍、2 倍、2.5 倍和 3 倍船长的过渡段长度曲线进入中间渠道, 见图 2。

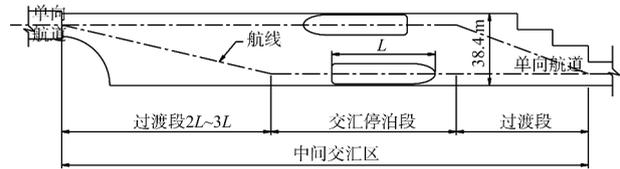


图 2 船舶航行示意图

自航船模航态测量采用无线测量方式进行船舶航速、航行轨迹、舵角、漂角等的测量, 测试系统包括舵角遥测接收机、PIV 摄像测量系统、计算机采集处理系统等, 该系统对船模进出中间渠道交汇区时的航行轨迹、舵角、漂角等航行参数进行同步采集和快速计算处理、船模测量及操控。

2.3 试验成果分析

船舶以 4 种速度分别按 2 倍、2.5 倍和 3 倍船长的过渡段长度曲线进入中间渠道, 见图 2。各种试验研究工况下船舶航行特征值见表 1, 船舶航迹带宽度、航线偏移量、交汇安全距离等与过渡段、船舶航速关系见图 3~6, 典型工况船舶航行特征值变化过程线见图 7。

表 1 中间交汇区船舶航行特征值

过渡段长	速度/ (m/s)	过渡段							平直段							航线 漂移/m	安全 距离/m
		最大舵角/(°)		漂角/(°)		航向/ (°)	航迹带宽/m	最大舵角/(°)		漂角/(°)		航向/ (°)	航迹带宽/m				
		-	+	-	+			-	+	-	+		1	2			
2.0L	1.0	-15.3	14.9	-7.4	2.8	-11.9	17.8	13.5	-12.0	5.0	-2.3	6.2	1.2	16.7	13.0	1.0	8.5
2.0L	1.2	-10.9	10.1	-5.8	1.7	-11.7	16.4	12.5	-9.7	3.0	-1.7	5.4	1.2	16.1	12.4	0.9	9.3
2.0L	1.4	-7.4	7.5	-5.0	1.2	-11.6	15.6	12.0	-8.2	2.3	-1.3	5.2	1.3	15.8	12.1	1.0	9.4
2.0L	1.6	-5.9	5.9	-4.4	1.0	-11.7	15.0	11.7	-6.9	1.7	-1.2	5.0	1.7	15.6	12.0	1.3	9.3
2.5L	1.0	-12.3	11.5	-5.7	2.2	-9.4	16.3	12.9	-12.0	4.7	-2.3	6.0	1.2	16.5	13.0	1.0	8.7
2.5L	1.2	-8.8	8.0	-6.6	1.4	-9.3	15.3	12.1	-7.5	2.3	-1.3	4.3	0.8	14.9	12.0	0.7	10.6
2.5L	1.4	-6.4	6.0	-3.9	0.9	-9.2	14.6	11.7	-5.6	1.4	-0.9	3.6	0.8	14.3	11.6	0.6	11.4
2.5L	1.6	-5.0	4.6	-3.4	0.8	-9.3	14.1	11.5	-4.7	1.1	-0.8	3.4	1.0	14.0	11.5	0.7	11.4
3.0L	1.0	-11.3	9.7	-4.8	1.8	-7.9	15.4	12.5	-10.4	4.0	-1.9	5.0	0.9	15.6	12.6	0.8	9.8
3.0L	1.2	-7.0	6.7	-3.8	1.1	-7.7	14.5	11.9	-6.7	2.1	-1.2	3.9	0.8	14.6	11.9	0.6	11.0
3.0L	1.4	-5.5	5.0	-3.2	0.8	-7.7	13.9	11.5	-4.7	1.2	-0.8	3.1	0.7	13.8	11.5	0.5	11.9
3.0L	1.6	-4.1	3.8	-2.9	0.6	-7.8	13.5	11.4	-3.7	0.8	-0.6	2.7	0.7	13.4	11.4	0.6	12.3

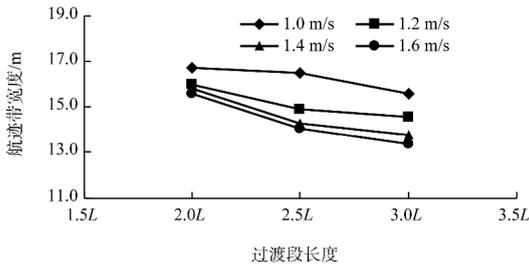


图3 航迹带宽度与过渡段长度关系

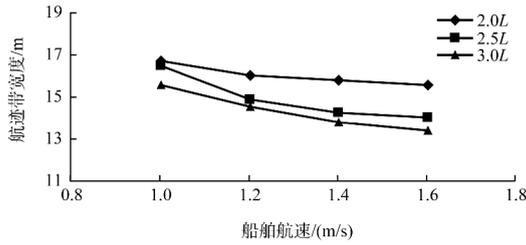


图4 航迹带宽度与航速关系

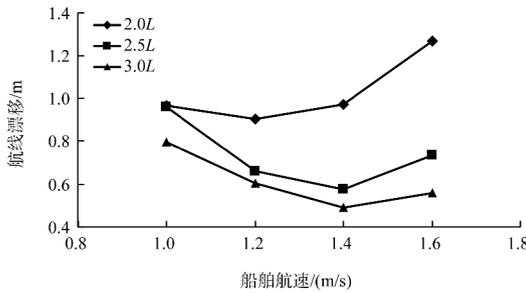


图5 不同航速与过渡段长度下船舶航行漂移量

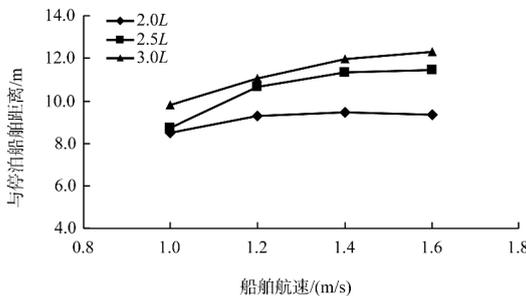
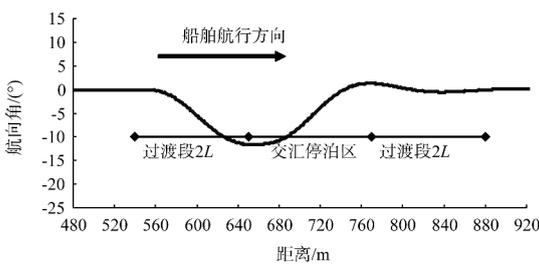
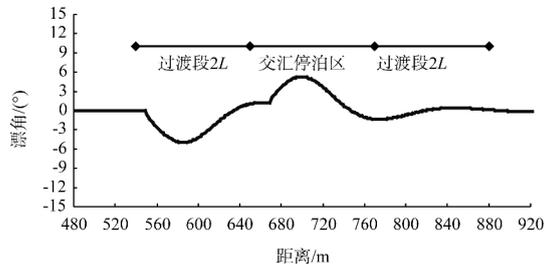


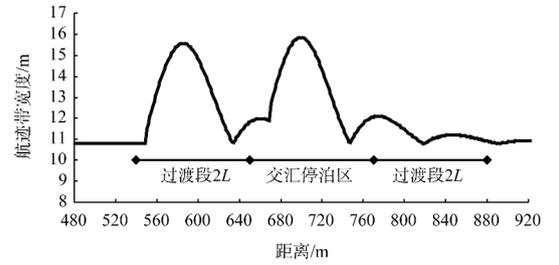
图6 航行船舶与停泊船舶最小安全距离



a) 航向角



b) 漂角



c) 航迹带宽度

注：过渡段长度 2L，船舶航速 1.4 m/s。

图7 典型船舶航行参数变化曲线

由典型船舶航行特征值变化过程线图 7 可见，船舶曲线出单向航道进入中间交汇区时，船舶需要通过两次转向来调整航线，每次调整航向船舶的漂角明显增大，船舶的航迹带也随之增加。船舶第 1 次转向时船舶在过渡段内，没有其他船舶，航迹带增大将增加船舶碰擦渠道边壁的概率；第 2 次转向时，船舶开始进入交汇停泊段，对岸停泊有等待交汇的船舶，航迹带宽度增加将增加航行船舶与停泊船舶碰撞的概率，为保障船舶交汇安全，需要增加渠道宽度，因此，船舶曲线出单向航道进入中间交汇区时，第 2 次转向引起的船舶漂角及航迹带宽度是确定中间交汇区最小宽度的主要控制因素。

中间交汇区采用了斜导墙来连接中间渠道和上下游通航建筑物，斜导墙长度约为 2 倍船长 L ，因此试验中仅比较了过渡段为 2.0~3.0 倍船长的 3 种航行方案。由表 1 和图 3~5 可见，船舶曲线出单向航道进入中间交汇区时，船舶航迹带宽度也随过渡段长度增大而略有减小，过渡段长度由 $2L$ 增加到 $3L$ 时，相同航速下船舶的最大航迹带宽度最大仅减小 2.2 m，航线偏移量基本在 0.5~1.3 m

范围内, 因此过渡段长度在 $2L \sim 3L$ 范围内, 对船舶航态影响不十分显著, 斜导墙段的长度选择是合理的。

自航船模试验表明: 过渡段长度为 $2L$ 时, 在交汇停泊区第 2 次转向引起的船舶航迹带最大宽度为 $15.6 \sim 16.7$ m, 船舶航向调整结束后, 船舶漂角最大仅 2.3° , 航迹带宽度也减小到 13.0 m 左右, 综合船舶航线偏移及船舶航迹带宽度影响, 此时实测航行船舶与停泊船舶的最小安全距离为 $8.5 \sim 9.3$ m; 过渡段长度为 $2.5L$ 时, 船舶第 2 次转向及航向调整结束后的船舶航迹带宽度均有所减小, 实测航行船舶与停泊船舶的最小安全距离为 $8.7 \sim 11.4$ m; 过渡段增加到 $3L$, 实测航行船舶与停泊船舶的最小安全距离为 $9.8 \sim 12.3$ m。多次自航船舶模型表明, 过渡段长度大于 2 倍船长, 中间交汇区宽 37.0 m, 两线通航建筑物中心线距离 22 m, 一线船舶停泊, 另一线船舶以 $1.0 \sim 1.6$ m/s 航速航行能在交汇停泊区顺利进行交汇。

3 中间渠道交汇区尺度确定

我国 GB 50139—2014《内河通航标准》将内河航道分成了两大类: 一类是天然和渠化河流航道(包括湖泊和水库航道); 一类是限制性航道, 其定义为因水面狭窄、断面系数小而对船舶航行有明显限制作用的航道, 主要是指运河、渠道和河网地区的部分航道, 并规定限制性航道的断面系数不应小于 6, 流速较大的航道不应小于 7。本文中连接上下游通航建筑物的中间渠道则属于一种特殊限制性航道, 不能归于以上两类航道, 所以其交汇区宽度的确定并没有明确计算公式。

1) 交汇区宽度确定方法 1。

对于中间渠道交汇区, 船舶交汇时一侧船舶处于停泊等待状态, 而另一侧船舶进行航行交汇, 若参照 GB 50139—2014《内河通航标准》附录 A “天然和渠化河流航道宽度的计算方法” 中航道尺寸的确定公式, 中间交汇区的渠道宽度则可按下式进行计算:

$$B_1 = B_F + d + C + B_S \quad (1)$$

式中: B_1 为航道宽度(m); B_F 为船舶航迹带宽(m); B_S 为设计船舶(队)宽度(m); d 为船舶至航道边缘的安全距离; C 为船舶会船安全距离。

《内河通航标准》中给出了天然和渠化河流航道 d 、 C 值的取值范围, 中间渠道安全距离 $d+C$ 可取 $0.44B_F \sim 0.54B_F$ 。

2) 交汇区确定方法 2。

对限制性航道 d 、 C 值的取值范围, 《内河通航标准》没有说明, 但比较标准中“表 3.0.2-1 天然和渠化河流航道尺度”和“表 3.0.3 限制性航道尺度”中相同等级航道类似船舶对航道宽度尺度的规定可见: II 级航道中双线天然航道与限制性航道宽度分别为 75 m 和 60 m, III 级航道分别为 60 m 和 45 m, IV 级航道分别为 50 m 和 40 m, 限制性航道宽度比天然和渠化河流航道小了 20% 以上。因此该中间渠道宽度也可先按天然双线航道标准, 在此基础上减小 20%, 作为中间渠道的合理宽度。

3) 交汇区确定方法 3。

在国内相关文献中, 建议对中间渠道这类特殊航道, 单线航道安全距离 $2d$ 可取 $0.34B_F$, 对双线航道安全距离 $2d+C$ 可取 $0.68B_F$ 。中间交汇区是介于单线航道与双线航道间的一种航道类型, 因此 $d+C$ 可取单线与双线航道安全距离的平均值, 即 $d+C = (0.34B_F + 0.68B_F) / 2 = 0.51B_F$ 。

根据中间交汇区自航船舶试验实测的漂角和航迹带宽度数据, 按不同安全距离取值标准确定的中间交汇区最小宽度见表 2。由表 2 可见, 方法 1 和方法 3 确定的中间交汇区宽度值基本接近, 方法 2 确定的交汇区渠道宽度明显偏小, 考虑到标准中公式确定的航道宽度为直线航道宽度, 中间渠道交汇区船舶实际是由曲线进入交汇区, 船舶转向时间控制不好会出现航线偏移, 此外中间渠道这类特殊的限制性航道的取值国内外还没有明确的规范可寻, 国内也没有成熟的工程经验, 因此确定中间渠道交汇区时从安全考虑, 取上述计

算值中的最大值作为设计标准。因此, 交汇区的计算最小宽度为 36.22 m, 设计选择 37.0 m 也较为合理。

表2 中间渠道交汇区最小宽度

过渡段长	速度/ (m/s)	漂角/ (°)	航迹 带宽/m	中间渠道最小宽度/m		
				方法1	方法2	方法3
2L	1.0	7.3	17.80	34.55~36.22	32.45	35.39
	1.2	6.6	17.15	33.55~35.15	31.45	34.35
	1.4	6.4	16.94	33.23~34.81	31.13	34.02
	1.6	6.0	16.59	32.94~34.50	30.84	33.72
2.5L	1.0	7.0	17.46	34.26~35.91	32.16	35.09
	1.2	5.1	15.64	31.95~33.44	29.85	32.69
	1.4	4.3	14.93	31.04~32.47	28.94	31.75
	1.6	4.1	14.73	30.72~32.13	28.62	31.42
3L	1.0	6.0	16.58	32.95~34.51	30.85	33.73
	1.2	4.6	15.25	31.45~32.91	29.35	32.18
	1.4	3.7	14.33	30.34~31.71	28.24	31.02
	1.6	3.2	13.84	29.76~31.09	27.66	30.42

4 中间渠道交汇区船舶航行方式

由前面试验成果可知, 当船舶采用直进曲出的航行方式进出交汇区的方式下, 船舶曲线进入中间交汇区时, 其航迹带宽度、航行偏移量等参数均随过渡段减小而迅速增大, 过渡段大于 2L 时, 航线偏移量明显减小, 且分布较为均匀, 航线偏移量基本在 0.6~1.7 m 范围内, 因此船舶曲线进入中间交汇区时, 过渡段长度应至少大于 2 倍船长。而前述中间渠道交汇区长均约 340 m, 扣除两端进入交汇区各 2 倍船长的过渡段及船舶停泊段长度 60 m, 船舶交汇段的长度仅剩余 60 m 左右, 船舶在 60 m 范围内要实现第 2 次转向后的航向调整并进行船舶的减速停靠, 操作难度较大。

在 JTJ 305—2001《船闸总体设计规范》中, 对于引航道的平面布置有两种规定, 一种是上述试验中所采用的直进曲出方式, 这也是国内外最常采用的布置形式; 而另一种则是曲进直出方式, 即船舶直线进入交汇区, 曲线方式离开交汇区。

针对本文中间渠道交汇区, 船舶航行更适宜采用曲进直出方式, 其主要优点有:

1) 缩短交汇区长度。对于原先采用的曲线进入交汇区的方式, 由于船舶进入交汇区时需要频繁调整航向, 因此其漂角相对较大, 航迹带宽度较大, 因此为避免与交汇区停泊船舶发生碰擦, 停泊船舶的位置需适当远离曲线段。而对于直线进入交汇区的方式, 由于船舶不需要转向改变航向, 因此船舶漂角和船舶航迹带均较小, 相同渠道宽度下交汇船舶间有更大的安全距离, 因此可将交汇区等待船舶的位置向上游或下游方向移动, 以尽量靠近曲线段末端, 从而可缩短交汇区长度。

2) 提高船舶安全性。采用直线进入交汇区的方式, 船舶操纵难度将大大降低, 从而可降低船舶在中间交汇区的航行难度, 更能保障船舶在中间交汇区内的交汇安全。而离开交汇区时由于船舶本身航速较低, 因而其操纵难度与采用原方式相当。

因此, 鉴于以上原因, 中间渠道交汇区船舶航行更宜采用曲进直出方式。

5 结论

1) 船舶曲线出单向航道进入中间交汇区时, 第 2 次转向引起的船舶漂角及航迹带宽度是确定中间交汇区最小宽度的主要控制因素。船舶曲线进入中间交汇区时, 过渡段大于 2L 时, 航线偏移量明显减小, 且分布较为均匀, 航线偏移量基本在 0.6~1.7 m 范围内, 因此中间渠道中间交汇区过渡段长度应至少大于 2 倍船长。

2) 船舶采用曲进直出方式通过中间渠道, 不仅能提高船舶在中间渠道交汇区内的航行和交汇安全, 而且船舶的停泊位置更靠近上游或下游曲线段末端, 不仅可缩短交汇区长度, 而且可提高通航能力。

参考文献:

[1] 孟祥玮, 高学平, 周华兴, 等. 船闸中间渠道尺度对通航水流条件影响的研究[J]. 水利水电技术, 2010, 41(10): 31-36.

[2] 李焱, 刘俊涛. 百色升船机中间渠道内船舶航速与渠道尺度分析及航行条件试验[J]. 水道港口, 2014, 35(4): 393-398.

[3] 杨宜章, 钟放平. 多级带中间渠道的船闸中间渠道设计有关问题的探讨[J]. 湖南交通科技, 1999(1): 69-70.

[4] 戈龙仔, 曹玉芬, 孟祥玮, 等. 船闸中间渠道非恒定流特性与调节池改善措施探讨[J]. 水道港口, 2006, 27(6):

378-383.

[5] 李广一, 范宝山, 金贤, 等. 大藤峡水利枢纽船闸中间渠道非恒定流三维数值模拟研究[J]. 水利科技与经济, 2012, 18(10): 58-65.

[6] 李中华, 胡亚安. 构皮滩升船机第一级中间渠道水流及船舶航行条件研究[R]. 南京: 南京水利科学研究所, 2011.

[7] GB 50139—2014 内河通航标准[S].

[8] JTJ 305—2001 船闸总体设计规范[S].

(本文编辑 武亚庆)

(上接第 141 页)

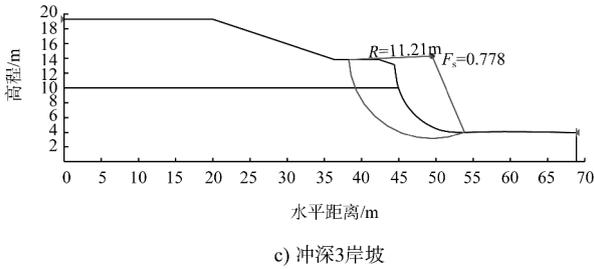


图 9 冲刷后岸坡稳定性

从图 9 可以看出, 冲刷深度越大, 岸坡越陡, 对应的最危险滑弧半径越小。弯曲航道水流冲刷河床淘刷岸坡, 水流带走坡脚处砂性土体, 不断将凹岸底部淘空, 上层土体失去支撑容易产生局部失稳破坏, 形成新的岸坡边界, 坡度变陡, 边界水流形态发生改变, 重新淘刷底部砂土, 最终导致岸坡整体失稳。

4 结论

- 1) 水流进入弯曲航道后, 水面流速最大值从开始的靠近凸岸处逐渐向凹岸移动, 凹岸侧流速最大处为迎流顶冲点, 受水流冲刷最为严重。
- 2) 在环流淘刷力的作用下岸坡稳定性降低, 水位越高, 环流作用力越大, 岸坡稳定系数明显

降低; 当淘刷作用增大到一定范围, 岸坡稳定性下降直至崩塌。

3) 岸坡被淘刷后底部坡度变陡, 上部土体局部失稳, 从而降低整体稳定性。随岸坡底部不断被淘刷, 最终整体崩塌。

参考文献:

[1] 吴昌洪, 林木松, 柳小珊, 等. 河型分类研究现状与展望[J]. 人民长江, 2014, 45(1): 6-10.

[2] 张幸农, 蒋传丰, 应强, 等. 江河崩岸问题研究综述[J]. 水利水电科学进展, 2008, 28(3): 80-83.

[3] 毛昶熙, 段祥宝, 李思慎, 等. 堤防工程手册[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.

[4] 张幸农, 蒋传丰, 陈长英, 等. 江河崩岸的影响因素分析[J]. 河海大学学报, 2009, 37(1): 36-40.

[5] 张芳枝, 陈晓平. 河流冲刷作用下堤岸稳定性研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2009, 29(4): 84-88.

[6] 毛佩郁, 毛昶熙. 河湾水流冲刷与防护综合研究[R]. 南京: 南京水利科学研究所, 1996.

[7] 毛昶熙, 周名德, 柴恭纯. 闸坝工程水力学与设计管理[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.

(本文编辑 王聰)