



# 船闸下引航道口门区回流特性及改善措施

李伟<sup>1</sup>, 张宝航<sup>2</sup>

(1. 贵州顺达水运规划勘察设计所, 贵州 贵阳 550004; 2. 长江航运规划设计院, 湖北 武汉 430030)

**摘要:** 根据船闸下引航道口门区水流特点, 应用水槽数学模型, 对不同引航道宽度、水流流速、水深等对下引航道口门区回流长度等特性的影响进行研究, 得出船闸下引航道口门区回流长度的计算公式, 并通过概化模型研究透空隔流堤对下引航道口门区水流条件的影响, 结论可供船闸工程设计参考。

**关键词:** 引航道; 口门区; 回流特性; 隔流堤

中图分类号: TV153.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)08-0160-05

## Characteristics of circumfluence and improvement measures for entrance of lower approach channel

LI Wei<sup>1</sup>, ZHANG Bao-hang<sup>2</sup>

(1. Guizhou Shunhua Planning Reconnaissance and Design Institute for Shipping, Guiyang 550004, China;

2. Changjiang Planning and Design Institute for Shipping, Wuhan 430030, China)

**Abstract:** This paper studies the impact of channel width, current velocity and water depth on the characteristics of the lower approach channel's entrance area by the mathematic model on the basis of the characteristics of current, obtains a theoretic formula pattern about the length of circumfluence of the approach channel's entrance and researches the influence of opening hole of partition dikes head by the generalized physical model, serving as reference for the lock design.

**Key words:** approach channel; entrance area; characteristics of circumfluence; partition dike

船闸的上下游引航道与河流相连接的口门区及连接段, 是过闸船舶(队)进出引航道的咽喉, 船闸引航道口门区水流条件是影响船舶航行安全和通航效率的重要因素, 因此, 研究改善船闸引航道口门区水流条件具有重要意义。

本文正是基于以上原因, 通过概化模型, 推导出船闸引航道口门区回流长度的计算模式, 并应用数学模型对理论公式的参数进行拟合, 确定船闸引航道口门区回流长度的计算公式。在实际工程中掌握口门区回流特性, 对船闸工程设计制定改善措施具有重要意义。

本文理论研究的出发点是将船闸引航道内的水体近似成静止不动的情况<sup>[1]</sup>, 并且引航道长度足

以使水流平顺过渡, 此时船闸引航道口门区水流可以近似看作单侧突扩水流, 其回流的形成也是由于水流的突然扩散。从能耗最小的原理出发, 假定对突然扩大的水流运动, 水流将以能量最小的方式扩散至下游两岸, 主回流交界线将以能耗最小的方式实现最优化, 其物理模式见图1。

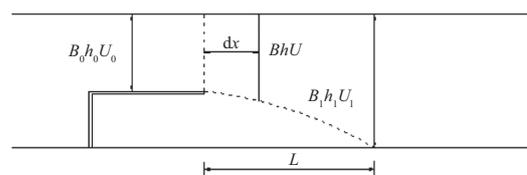


图1 船闸引航道口门区回流长度

在 $dx$ 范围内, 局部水头损失 $dh_f$ 由突然扩大的

收稿日期: 2012-12-20

作者简介: 李伟(1981—), 女, 硕士, 工程师, 从事港口航道工程设计、施工管理。

公式计算, 沿程水头损失  $dh_f$  由曼宁公式计算, 并假定局部水头损失不变, 则在回流长度范围内总能量损失为:

$$H_l = \int_0^L (dh_f + dh_j) = \int_0^L \left[ \frac{\zeta}{g} \frac{Q^2}{B_0 h_0} \left( \frac{1}{B h^2} \frac{dh}{dx} + \frac{1}{B^2 h} \frac{dB}{dx} \right) + \frac{Q^2}{g C_0^2 B^2 h^3} \right] dx \quad (1)$$

主流作为总体考虑, 水深的变化可由渐变流方程给出, 能量损失最小, 也即使泛函取得极值, 水深沿程变化很小, 近似取  $dh/dx=0$ ,  $h_0 \approx h \approx h_1$ , 代入边界条件, 上式变为:

$$L = \frac{C_0^2 \xi \sqrt{1 - \xi} Fr_0 h}{2} \left( \ln \frac{1 + \sqrt{1 - \xi} Fr_0}{1 - \sqrt{1 - \xi} Fr_0} - \ln \frac{1 + \sqrt{1 - \xi} Fr}{1 - \sqrt{1 - \xi} Fr} \right) = f(C_0, \xi, h, Fr_0, Fr) \quad (2)$$

式中:  $C_0$  为以断面平均水深计算的无量纲谢才系数:

$$C_0 = \frac{C}{\sqrt{g}} \quad (3)$$

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6} \quad (4)$$

式中:  $n$  为糙率;  $R$  为水力半径。

$$Fr_1 = \frac{Q}{B_1 h \sqrt{gh}} = \frac{Q}{K B_0 h \sqrt{gh}} = \frac{1}{K} Fr_0 \quad (5)$$

其中  $\frac{B_1}{B_0} = K \quad (6)$

根据 Skogerboe 的研究, 局部水头损失系数  $\zeta$  与展宽比  $B_1/B_0$  成正比, 所以影响回流长度的因素为: 回流长与  $n$  成反比, 与  $Fr$ ,  $B_1/B_0$ ,  $h$  成正比。下面将通过数学模型对影响回流长度的各个因素进行分析, 最终拟合出船闸引航道口门区回流长度的计算公式。

## 2 船闸下引航道口门区水槽数学模型计算分析

### 2.1 数学模型

对概化模型建立水流平面二维模型。根据 Bousinesq 假设忽略流体中的黏性耗散, 并设定压强服从静水分布、不计垂直方向的流动时间和空间的微分, 将 Navier-Stokes 方程沿水深积分, 这样可得河道水流运动的连续方程和运动方程, 令:  $q=hu$ ,  $p=hv$ , 用单宽流量形式进一步表示为:

水流连续方程

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad (7)$$

水流运动方程

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{qq}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{qp}{h} \right) = -gh \frac{\partial(h+z_b)}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (\varepsilon_t \frac{\partial q}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial x} (\varepsilon_t \frac{\partial q}{\partial y}) \right] - \tau_{xb} + fp \quad (9)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{qp}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{pp}{h} \right) = -gh \frac{\partial(h+z_b)}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (\varepsilon_t \frac{\partial p}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial x} (\varepsilon_t \frac{\partial p}{\partial y}) \right] - \tau_{yb} + fq \quad (10)$$

式中:  $u, v$  为流速;  $h$  为水深;  $g$  为重力加速度;  $Z_b$  为床面高程;  $\rho$  为水密度;  $\varepsilon_t$  为动黏滞系数;  $\tau_{xb}, \tau_{yb}$  为底部摩阻力。对紊动黏滞系数的确定采用 Smagorinsky 模型, 利用计算得到的流速梯度, 自动调整紊动黏滞系数的大小, 其计算公式如下:

$$\varepsilon_t = C_s A \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right] \quad (11)$$

式中:  $C_s$  是 Smagorinsky 系数, 通常取 0.094 ~ 0.2;  $A$  为计算单元格的面积。采用三角形有限单元自动加密剖分的网格生成技术, 步长为 10 ~ 50 个单位。

### 2.2 模型验证

数学模型中设计的水槽尺寸布置见图 2, 水槽宽  $B=1.5$  m, 长 40 m; 隔流堤长 8 m, 隔流堤厚 0.02 m; 口门宽  $b$  随不同模拟工况而改变。

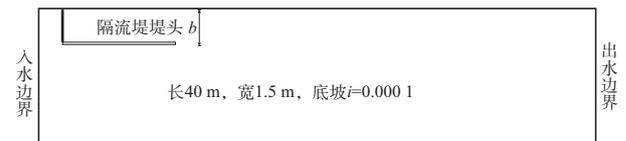


图2 数学模型

计算中入水边界通过均布分散源项给出流量, 相当于均匀入流边界, 为不透流边界; 平水通过恒定水位调节, 为透流边界。

分别用单边突扩水流和丁坝回流来对建立的数学模型进行验证。图 3 为单边突扩水流验证模型的流场, 入水边界宽为 1.1 m, 长 8 m, 流量为 42 L/s, 水深 0.15 m。

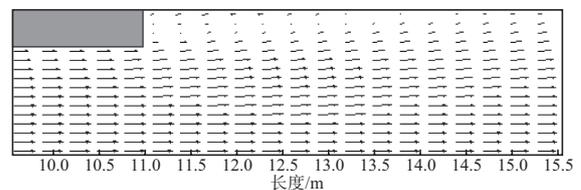


图3 单边突扩流场

数模计算结果中, 单边突扩回流长度为2.5 m, 与程天金等<sup>[2]</sup>计算的回流长度3 m比较接近。

图4为丁坝回流验证模型的流场, 丁坝长0.4 m, 厚0.05 cm, 流量为42 L/s, 水深0.15 m。丁坝后回

流长度为8.1 m, 与李国斌等<sup>[3]</sup>计算的回流长度7.7 m接近。由数模验证结果和各家经验公式所计算的回流长度相比可知, 所建数学模型基本反映了实际情况, 可以用来计算船闸引航道口门区的水流情况。

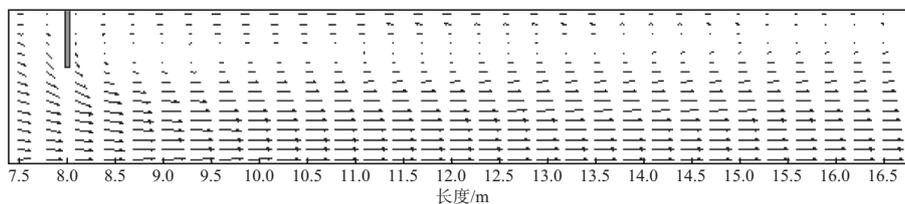


图4 丁坝流场

### 2.3 计算结果及分析

#### 2.3.1 不同展宽比对回流长度的影响

为分析展宽比 $B/(B-b)$ 对回流区长度的影响, 给定固定的水深和流速, 进行不同展宽比的数值模拟, 统计分析回流区长度。数值模拟的计算组次与参数见表1。

表1 不同展宽比情况下的回流长度

模拟条件					回流长度/cm
B/m	b/m	B/(B-b)	流速/(m·s <sup>-1</sup> )	水深/m	
1.5	0.25	1.20	0.2	0.2	97.2
1.5	0.30	1.25	0.2	0.2	142.1
1.5	0.35	1.30	0.2	0.2	231.9
1.5	0.38	1.34	0.2	0.2	254.0
1.5	0.40	1.36	0.2	0.2	291.7

由数模的计算结果可以看出, 随着展宽比的增加, 回流长度随之增大, 这与程天金等<sup>[2]</sup>对单侧突扩水流回流长度的研究结论一致。由于展宽比的增大, 隔流堤所占河道的宽度增大, 河道的束水能力增强, 从而使主流的流速增加, 水流恢复到平稳状态时的恢复距离也将增大, 回流长度也会随之增大。

#### 2.3.2 不同水深对回流长度的影响

在分析水深对回流区长度的影响时, 选择展宽比为1.3, 即口门宽为35 cm时进行计算, 流速控制为0.2 m/s, 改变不同水深进行数值模拟, 统计分析回流区长度。数值模拟的计算组次与参数见表2。

表2 不同水深情况下的回流长度

模拟条件					回流长度/cm
B/m	b/m	B/(B-b)	流速/(m·s <sup>-1</sup> )	水深/m	
1.5	0.35	1.3	0.20	0.15	180
1.5	0.35	1.3	0.20	0.17	209
1.5	0.35	1.3	0.20	0.20	235
1.5	0.35	1.3	0.20	0.23	265
1.5	0.35	1.3	0.20	0.25	286

由数学模型的计算结果可以看出, 在相同流速下, 随着水深的增大回流长度在不断增大。

#### 2.3.3 不同流速对回流长度的影响

在分析流速对回流区长度的影响时, 仍然选择展宽比为1.3即口门宽为35 cm进行计算, 水深控制为17 cm, 改变不同流速进行数值模拟, 统计分析回流区长度。数值模拟的计算组次与参数见表3。

表3 不同流速情况下的回流长度

模拟条件					回流长度/cm
B/m	b/m	B/(B-b)	流速/(m·s <sup>-1</sup> )	水深/m	
1.5	0.35	1.3	0.16	0.17	179.5
1.5	0.35	1.3	0.17	0.17	187.0
1.5	0.35	1.3	0.20	0.17	209.0
1.5	0.35	1.3	0.22	0.17	224.4
1.5	0.35	1.3	0.23	0.17	231.9

由数学模型的计算结果可以看出, 当水深不变, 随着流速的增加回流长度在不断增加, 其原因也是由于主流流速增加后使回流强度增强, 回流长度增大。

### 2.4 船闸下引航道口门区回流长度经验公式

根据数学模型计算结果, 依据前面分析的影响回流长度的因素进行曲线拟合, 得出回流长度 $L$ 的计算公式:

$$L = 84.96 \frac{B}{B_0} \left( B - \frac{B_0}{2} \right) Fr_0^{0.848} \left( \frac{h}{B_0} \right)^{1.316} \quad (12)$$

式中:  $B_0=B-b$ ,  $B$ 为水槽宽度,  $b$ 为口门宽;  $Fr_0$ 为进口断面的弗汝德数。

根据此式计算出的回流长度与数学模型计算的回流长度的比较见图5, 由图5可以看出, 计算值和模拟值结果很相近, 说明以理论推导为依据、用数学模型结果回归出参数得出的回流长度

计算公式是可信的。

### 3 船闸下引航道口门区水流条件改善措施研究

有多种措施可以改善船闸下引航道口门区水流条件, 如调整导流堤头形式、导流墩<sup>[4]</sup>、浮式导流堤<sup>[5]</sup>, 吸、喷水<sup>[6]</sup>以及透空隔流堤等方法。但以上措施在实际应用中, 往往仅针对某一具体工程, 存在一定的局限性。本文采用概化的水槽模型, 从引航道口门区斜流和回流机理出发, 分析不同的隔流堤堤头透空形式对船闸引航道口门区水流条件改善效果, 得出隔流堤的最佳透空范围和透空方式, 为具体工程措施提供理论依据。

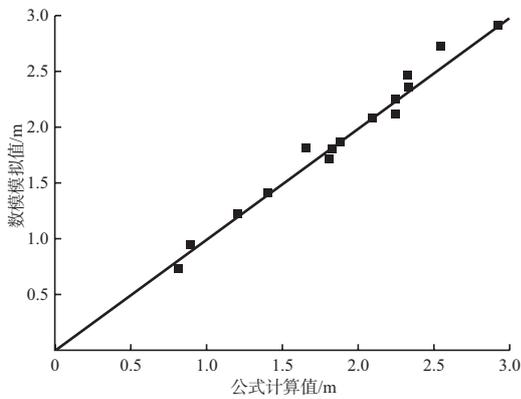


图5 回流长度计算值与数模模拟值的比较

#### 3.1 试验方法

试验的模型布置见图6, 图7为隔流堤堤头的纵断面。

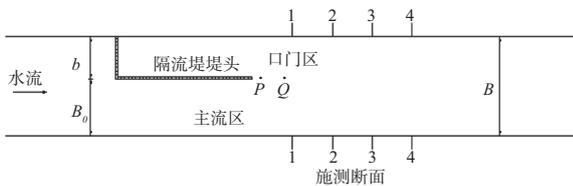


图6 试验模型布置

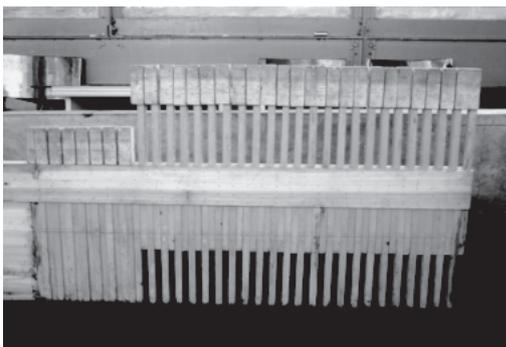


图7 隔流堤堤头纵断面

隔流堤的堤头80 cm为透空形式, 具体试验中根据每一种工况要求来改变透空的孔数和高度。测量不同工况(用水槽内水流的深度 $H$ , 流量 $Q$ , 口门宽 $b$ 确定)以及堤头透空范围和不同的开孔率下的水力要素。其中把开孔率定义为隔流堤开孔面积与开孔范围内隔流堤水下面积之比, 用 $\omega$ 表示。对每一种工况, 分别测出引航道口门区附近自由水面流场、回流长度, 以及4个断面(1-1, 2-2, 3-3, 4-4)的垂线流速分布, 以分析水流流经隔流堤后流态变化和回流情况。

#### 3.2 不同透空长度试验研究

在 $H$ 和 $Q$ 不变的情况下通过改变 $b$ 和 $\omega$ 以及堤头透空范围 $l$ , 测量15组工况下的回流长度。绘出回流长度 $L$ 与隔流堤堤头透空长度 $l$ 之间的关系曲线, 见图8。

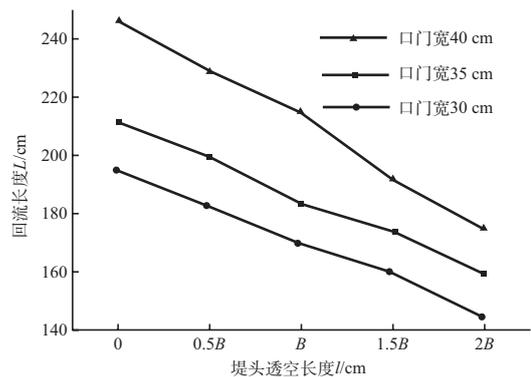


图8  $L$ 与 $l$ 的关系曲线

在上述关系曲线中可以得出, 在任意一种口门宽度下, 随着隔流堤堤头开孔范围的增加, 回流区流速和回流长度都存在减小的趋势; 随着开孔范围的扩大, 引航道内的动水范围也增大, 将影响船舶的航行和停泊; 在实际工程中, 如果隔流堤堤头开孔范围越大, 隔流堤的长度将越长, 使工程量增加。

#### 3.3 不同开孔率试验研究

在开孔率对回流长度的影响试验中, 口门宽度为35 cm, 固定水深、流量( $H=18$  cm,  $Q=50$  L/s)以及隔流堤的堤头透空范围( $l=2b$ ), 改变不同的开孔率, 测得回流长度随开孔率变化(图9)。

从开孔率与回流长度的关系曲线可以看出, 当开孔率小于0.3时, 回流长度随着开孔率的增大迅速减小; 但当开孔率大于0.4后, 随着开孔率的

继续增大, 回流长度减小幅度较小。

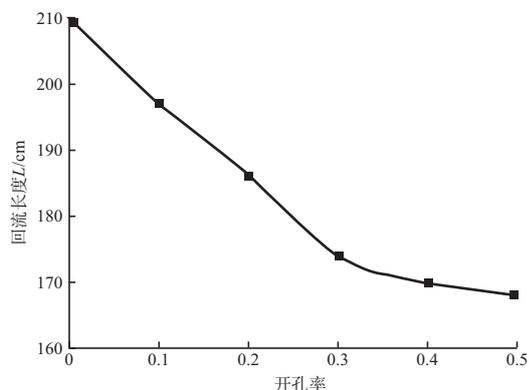


图9 不同开孔率与回流长度关系

### 3.4 不同透空方式试验研究

隔流堤的堤头开孔率一定时, 选择两种不同的开孔方式进行试验, 一种是隔流堤堤头均匀开孔, 另一种是隔流堤堤头至闸首开孔高度逐渐减小, 即孔高顺水流方向逐渐增大, 即隔流堤堤头透空是不等高的。摘录几组不同工况下试验数据, 回流长度见表4, 断面纵向流速分布见图10。

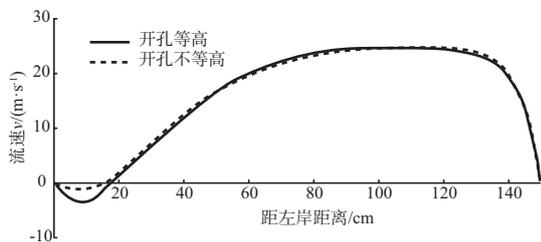


图10 距堤头100 cm断面纵向流速分布  
( $H=17\text{ cm}, Q=50\text{ L/s}$ )

表4 不同透空方式的回流长度

口门宽度 $b/m$	流量 $Q/(L \cdot s^{-1})$	水深 $H/cm$	透空方式	回流长度 $L/cm$
35	42	17	等高	182
			不等高	175
35	50	17	等高	210
			不等高	203
35	55	20	等高	278
			不等高	265

由试验结果可以看出, 当开孔率相同时隔流堤堤头透空不等高时的回流长度比堤头透空等高时要小。开孔率不等高时回流区的流速相对较小, 由此进一步说明当墙头开孔不等高时对船

闸口门区水流条件的改善更为明显。其主要原因是, 隔流堤堤头开孔高度在顺水流方向逐渐增高, 流量从底部孔口出流, 引入船闸引航道的水流流量将逐渐增大, 减小了水流偏角, 进一步降低横向流速, 在这一过程中, 从孔口出流到最终引航道水体与开敞河段水体融合为主流, 对水流流态改变均是渐变的, 更好地平顺水流调整口门区流速分布, 减小了回流长度。

### 4 结语

本文利用数学模型, 推导出船闸引航道口门区的回流长度的计算模式, 并通过概化水槽模型将实测回流长度与经验公式进行对比, 误差均在5%以内, 认为所得经验公式具有一定适用性。通过水槽试验, 研究了透空隔流堤对船闸下引航道口门区水流条件影响, 得出最佳的隔流堤透空范围和开孔形式, 隔流堤堤头较好的透空范围是  $l=2b$  时; 当开孔率在0.4~0.5时透空隔流堤改善船闸口门区水流条件的效果最佳, 回流区流速较小且回流长度最短; 在相同开孔率情况下, 隔流堤堤头透空不等高时要比透空等高时改善水流条件的效果更为明显。本文结论可为船闸设计提供理论依据, 达到改善口门区水流条件和节约工程投资效果。

### 参考文献:

- [1] 李伟. 透空隔流堤对船闸引航道口门区水流条件影响研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2007:13-21
- [2] 程天金, 谢葆玲. 单边突扩浅水回流水流结构研究[J]. 水动力学研究与进展: A辑, 1992(4): 24-30.
- [3] 李国斌, 韩信, 傅津先, 等. 非淹没丁坝下游回流长度及最大回流宽度研究[J]. 泥沙研究, 2001(3): 68-73.
- [4] 朱红, 郝品正. 导流墩改善船闸引航道口门区水流条件试验研究[J]. 水道港口, 2005(2): 109-112
- [5] 韩昌海, 王傅文. 飞来峡水利枢纽下游引航道口门区通航条件改善途径探讨[J]. 水运工程, 1996(12): 26-29.
- [6] 马永军. 丁坝回流尺度控制方法和减少回流淤积的实验研究[D]. 北京: 清华大学, 2003.

( 本文编辑 武亚庆 )