

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2011.02.003

急流弯道水流露底现象研究

吴宇峰¹ 朱鉴远²

(1. 西华大学能源与环境工程学院, 四川 成都 610039; 2. 国家电力公司成都勘测设计研究院, 四川 成都 610072)

摘要: 为了解急流弯道水流聚集在凹岸的成因, 以便在弯道设计和管理中避免水流露底现象发生, 根据急流露底弯道水流速度比较快、在没遇到边壁之前沿直线运动的特点, 利用动量方程, 推导出急流弯道露底的界限。结果表明急流弯道露底与弯道半径、弯道宽度以及水流的 Fr 有十分密切的关系, 当弯道转弯半径与弯道宽度比小于 Fr 减去 0.5 时, 就会出现露底现象。结论与前人的试验研究结果大致吻合。

关键词: 急流弯道; 弯道露底; 弯道半径; 弯道宽度; Fr

中图分类号: TV8 文献标识码: A 文章编号: 1006-7647(2011)02-0009-02

Exposed bottom phenomenon of curved channels with rapid flows//WU Yu-feng¹, ZHU Jian-yuan² (1. School of Energy and Environment of Xihua University, Chengdu 610039, China; 2. HydroChina Chengdu Engineering Corporation, Chengdu 610072, China)

Abstract: The causes of rapid flows concentrating at the concave bank of curved channels were investigated so as to avoid the exposed bottom phenomenon during their design and management. Based on the characteristics of fast velocity and uniform motion of flows in a straight line before knocking against the wall, the limits that the bottom would be exposed were derived by use of the momentum equation. The results indicate that the exposed bottom of curved channels has close relationship with the radius and width of the bend as well as the Froude number. When the ratio of the radius to the width is less than the Froude number minus 0.5, the bottom will be exposed in the bend. They agree with other researchers' test results.

Key words: curved channel with rapid flow; exposed bottom; radius; width; Froude number

引水、泄洪渠道中, 急流弯道比较多^[1-3], 由于水流流态、弯道布置等关系, 有一部分急流弯道产生了露底现象, 造成渠道过水断面大量浪费, 水流积聚在弯道凹岸, 对凹岸水流造成冲刷, 有时水流冲出渠道, 其危害比较大, 在工程中一般都利用控制弯道半径和弯道宽度等措施防止出现露底和水流超高过大, 但是有时由于特殊地理原因, 这些参数不便改变, 因此造成了急流弯道露底, 需要治理。急流弯道露底在工程中并不常见, 因此研究不多, 以前对弯道研究主要涉及弯道水流超高^[4-6], 也有一部分规范对弯道水流出现过分超高作出相应的规定^[7], 而对弯道何时出现露底阐述较少。目前能够查到的关于急流弯道露底研究的文献是 19 世纪 30 年代哈特推导出的方程^[5], 后来水利部西北水利科学研究所对小半径弯道^[6]进行试验, 描述为水流已经不连续, 呈小扰动, 流经弯道的水流在凹岸因冲击而破裂, 已经脱离了边墙, 可能已经露底。田嘉宁^[8]在研究中等半

径大偏转角弯道的水流特性时, 对急流弯道露底也进行了阐述, 并提出了部分条件下的干底界限。总之, 急流弯道露底是一个很受关注的对象。周勤等^[9]在做重庆市黔江区小南海水库弯曲溢洪道水力学模型试验(以下简称小南海溢洪道模型试验)时也出现了弯道露底现象。但是目前就急流弯道露底问题还没完全透彻地研究, 需要进一步探讨。本文在试验的基础上对露底现象进行了进一步推导。

1 露底现象及其原因

图 1 反映了小南海溢洪道模型试验中的水流特性, 该弯道是溢洪道的第 2 个弯道, 其中线半径长 108.5 m, 弯道宽度为 18 m。从图 1 可以看出, B 点处的水流最大, 几乎积聚了全部流量, 弯道中 A 点没有水流, 也就是说水流在 A 点出现了露底。从图 1 还可以看出, 水流在受到边壁阻力之前沿直线运动, 当水流遇到边墙后几乎沿着边壁运动。图 2 为弯道

进口、1/4 弯道处、2/4 弯道处和 3/4 弯道处横断面的水深。因为弯道末端接消力池,两岸水深受消力池影响,故在图 2 中没标出。从图 2 可以看出,在弯道进口两岸水深近似相等,甚至凹岸水面比凸岸水面低,在 1/4 弯道断面处,凹岸水深逐步升高,凸岸水深逐步降低,到 3/4 断面处凹岸水深达到最大,而凸岸水深很小,此时只有很薄的一层水流,也就是一层附着水,弯道已经露底。2/4 断面和 3/4 断面凸岸水深差别很小,因为在 2/4 断面处凸岸的水流很小,几乎露底了。笔者认为,之所以出现露底现象是由于弯道凸岸的水流冲向凹岸,使水流在凹岸壅高,凹岸水深变深,凸岸水深变浅。而凸岸水流向凹岸水流冲击力比较大,水流不能回到凸岸,当凸岸水流全部流向凹岸时,凸岸就没有水流,形成了露底。



图 1 急流弯道水流特性

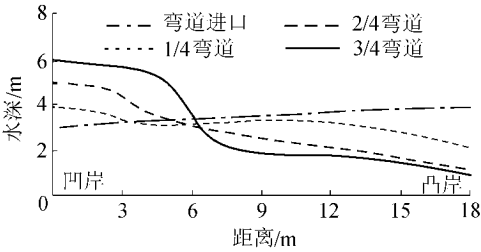


图 2 弯道部分横断面水深

2 急流弯道露底公式的推导

从图 1 可以看出,对于露底弯道水流,水流质点几乎沿直线运动,由于弯道壁面的弯曲,绝大部分水流都向凹岸挤压,使边墙水流壅高,导致凸岸露底。

任取一急流弯道(图 3),设弯道转角为 β ,中线半径为 r_0 ,凸岸半径为 r_1 ,凹岸半径为 r_2 ,直道段水流为急流,进口前直道段水深为 h_1 ,流速为 u_1 ,其方向与弯道进口垂直,设该水流在弯道引起的超高为 Δh 。取弯道凹岸壁面的一微元 C 进行受力分析。为了建立水流的基本方程,假定水流在直道段是均匀急流,并且水流方向垂直于弯道入口。

设质量为 dm_1 、流速为 u_1 的水流质点与边墙切线成一定夹角进入微元 C,该质点从 C 流出的速度为 u_2 ,在壁面引起的受力为 dF_1 ,其引起的超高为 $d\Delta h$ 。根据图 1 的水流特性可知 u_2 与壁面相切,所

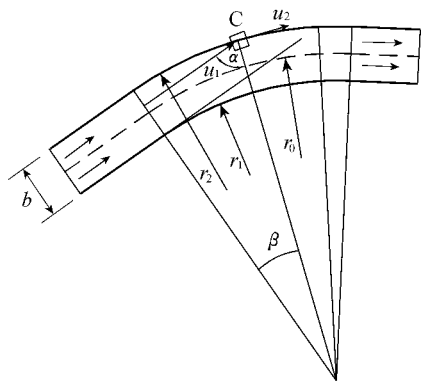


图 3 弯道壁面水流超高分析示意图

$$dF_1 \Delta t = -dm_1 u_1 \quad (1)$$

以 u_2 在垂直于壁面的方向分速为零,由动量方程得而 $dm_1 = \rho u_1 \cos \alpha \Delta t d\alpha dA$,其中 dA 为 C 的面积。将其代入式(1)可得

$$dF_1 = -\rho u_1 \cos \alpha d\alpha dA u_1 \quad (2)$$

式中 α 为水流流速方向与该点半径方向的夹角。

$$\text{同时} \quad dF_1 = \rho g d\Delta h dA \quad (3)$$

将式(3)代入式(2)可得

$$d\Delta h = -\frac{u_1^2}{g} \cos \alpha d\alpha \quad (4)$$

根据图 3 可得 $\alpha = 90^\circ - \beta$,代入式(4)并积分得

$$\Delta h = \frac{u_1^2}{g} - \frac{u_1^2}{g} \cos \beta \quad (5)$$

如果弯道凹岸不在直道段水流直接冲击的范围内,那么由于水流冲击引起的超高将失去动力,也就是说式(5)将失去意义。如果水流流速垂直于弯道入口进入弯道,那么 β 的最大值为

$$\beta = \arccos \frac{r_1}{r_2} \quad (6)$$

将式(6)代入式(5)可得由水流冲击引起的最大超高为

$$\Delta h = \frac{u_1^2}{g} \frac{1}{\frac{r_0}{b} + \frac{1}{2}} \quad (7)$$

式中 r_0 为弯道半径, b 为弯道宽度。

如果水流的超高大于或等于弯道进口的水流水深,也就是 $h_1 = \Delta h$ 时,那么必定会出现露底。其露底的公式推导为

$$h_1 = \Delta h = \frac{u_1^2}{g} \frac{1}{\frac{r_0}{b} + \frac{1}{2}} \quad (8)$$

那么其半径与弯道宽度之比为

$$\frac{r_0}{b} = \frac{u_1^2}{gh_1} - \frac{1}{2} = Fr^2 - \frac{1}{2} \quad (9)$$

式(9)就是弯道发生露底的公式。从式(9)可以看出,发生弯道露底主要与弯道半径、(下转第33页)

und Glaziologie , Eidgenoessischen Tech ,1983(66) :71.

[3] KELLS J A ,SMITH C D. Reduction of cavitation on spillways by induced air entrainment[J]. Canadian Journal of Civil Engineering ,1991 ,18(3) :358-377.

[4] 杨永森 ,陈长植 ,于琪洋. 掺气槽上射流挟气量的数学模型[J]. 水利学报 ,1996 ,27(3) :13-21.

[5] 杨永森 ,杨永全. 掺气减蚀设施体型优化研究[J]. 水科学进展 ,2000 ,11(2) :144-147.

[6] RUTSCHMANN P ,VOLKART P. Spillway chute aeration[J]. International Water Power and Dam Construction ,1988 ,40(1) :10-15.

[7] RUTSCHMANN P ,HAGER W H. Design and performance of spillway chute aerators[J]. International Water Power and Dam Construction ,1990 ,42(1) :36-42.

[8] 时启燧 ,潘水波 ,邵英英. 等. 通气减蚀挑坎水力学问题的试验研究[J]. 水利学报 ,1983 ,14(3) :1-13.

[9] 许唯临 ,廖华胜 ,杨永全 ,等. 水垫塘三维紊流数值模拟及消能分析[J]. 水动力学研究与进展 ,1996 ,11(5) :561-569.

[10] 戴光清 ,杨永全 ,吴持恭. 水垫塘多层淹没射流数值模拟及消能研究[J]. 水利学报 ,1996 ,27(1) :13-19.

[11] 陈永灿 ,许协庆. 挑流冲坑内水流特性的数值模拟[J]. 水利学报 ,1993 ,24(4) :48-54.

[12] 杨忠超 ,邓军 ,杨永全 ,等. 多层水平淹没射流数值模拟研究[J]. 水利学报 ,2004 ,35(5) :31-37.

[13] 董延超 ,郭维东 ,魏长勇 ,等. 陡槽式溢洪道三维流场数值计算分析[J]. 人民长江 ,2006 ,37(4) :69-71.

[14] 刘士和 ,段红东. 挑流水舌运动数值模拟[J]. 武汉大学学报 :工学版 ,2004 ,37(6) :1-4.

[15] LIU Shi-he ,YE Qing. Numerical simulation of 3-D aerated jet behind flip bucket of overflow dam [J]. Journal of Hydrodynamics ,2000 ,12(1) :49-56.

[16] 余挺 ,邓军 ,夏勇 ,等. 翻卷水舌鼻坎挑流的紊流数值模拟[J]. 水利水电技术 ,2005 ,36(5) :37-39.

[17] 沙海飞 ,周辉 ,陈惠玲. 坝身泄水孔窄缝消能工三维水动力特性数值模拟[J]. 水利学报 ,2006 ,37(5) :625-629.

[18] CHARLES S G ,THOMAS G B ,NEASSAN F. An analysis of RNG base turbulent models for homogeneous shear flow[J]. Phys Fluids ,1991 ,3(9) :2278-2281.

[19] 钱忠东 ,黄社华. 四种湍流模型对空化流动模拟的比较[J]. 水科学进展 ,2006 ,17(2) :43-47.

(收稿日期 2010-08-02 编辑 高建群)

(上接第 10 页)

弯道宽度以及弯道水流 Fr 有关。在图 1 的弯道水流 , 大约 $Fr = 3.8$, 根据式 (9) 可以算出当 $Fr = 3.8$ 时 , 其不出现露底的最小半径与弯道宽度之比为 $r_0/b = 13.94$, 而该试验中 $r_0/b = 6.02$, 因此推断会产生露底现象。

3 露底公式的检验与讨论

笔者查阅了多种关于弯道露底的试验和研究 , 其中比较有代表的是田嘉宁^[8]在研究急流弯道露底时得出的结论 : 当 $Fr > 3$, $r_0/b < 10$ 时和当 $Fr > 4$, $r_0/b < 15$ 时以及当 $Fr > 5$, $r_0/b < 20$ 时会出现露底现象 , 设计时应该注意。笔者根据式 (9) 算出露底的界线为当 $Fr = 3$, $r_0/b = 8.5$ 时和当 $Fr = 4$, $r_0/b = 15.5$ 时以及当 $Fr = 5$, $r_0/b = 24.5$ 时会出现露底现象 , 与田嘉宁试验结果相比基本吻合。

当然 , 从式 (9) 可以看出水流的露底现象主要与流速、水深以及弯道的相对半径有关 , 但是并不是达到上面条件就会产生露底现象 , 笔者认为除了上面的关系外 , 还与弯道的水流位置有关系 , 也就是与弯道转角有关。根据笔者理论 , 当转弯角度小于 β ($\beta = \arccos \frac{r_1}{r_2}$) 时 , 弯道水流还没达到最大超高 , 如果在临界条件下 , 也不会产生露底。另外 , 如果弯道边墙比较低 (低于 $2h_1$) 时 , 就会产生水流溢出现象 , 在小南海溢洪道模型试验中也出现了这种情况。

4 结 论

急流弯道露底现象比较复杂 , 本文在前人的基

础上得出了急流弯道 Fr 与弯道半径和弯道宽度的关系。与其他人的试验结果大致吻合。急流弯道露底与多种因素有关 , 运用时一定要考虑实际情况。一般说来 , 由于急流弯道露底时水流运动比较剧烈 , 因此在工程中必须加以治理。根据水流特性 , 笔者建议采用斜槛法进行控制^[10-11]。

参考文献 :

[1] 赵小娥 , 钟杰 , 刘兴年 , 等. U 形弯道建闸对水流运动特性的影响试验[J]. 水利水电科技进展 , 2010 , 30(3) :47-49.

[2] ELLIS J. Numerical analysis of Kielder dam spillway[J]. Journal of the Institution of Water Engineers and Scientists , 1985 , 39(3) :254-270.

[3] WILLI H. Infinitesimal cross-wave analysis[J]. Journal of Hydraulic Engineering , 1984 , 110(8) :1145-1150.

[4] IPPEN A T. 高速水流论文译丛 : 急流力学[M]. 萧世泽 , 译. 北京 : 科学出版社 , 1958 :667-701.

[5] 李建中 , 宁利中. 高速水力学[M]. 西安 : 西北工业大学出版社 , 1994 :182.

[6] ROGER H , WILLI H. Supercritical bend flow[J]. Journal of Hydraulic Engineering , 1997 , 123(3) :208-218.

[7] SL253-2000 溢洪道设计规范[S].

[8] 田嘉宁. 中等半径大偏转角弯道的水流特性[J]. 西安理工大学学报 , 2002 , 16(1) :28-32.

[9] 周勤 , 伍超 , 赵元弘 , 等. “ S ” 型溢洪道水流特性试验与数值模拟研究[J]. 水力发电学报 , 2005 , 24(6) :78-82.

[10] 吴宇峰 , 伍超 , 李静. 斜槛在急流弯道控制超高的设计研究[J]. 水力发电学报 , 2007 , 26(3) :77-81.

[11] 陈鑫荪. 消除泄水建筑物弯道急流冲击波的措施[J]. 水利水电技术 , 1984 (6) :32-36.

(收稿日期 2010-04-15 编辑 方宇彤)