

宽戗堤截流龙口水力特性研究

杨磊¹, 郑静¹, 方勇生², 詹青文³

(1. 武汉大学水资源与水电工程国家重点实验室 湖北 武汉 430072 ;

2. 湖北省咸宁市水利局 湖北 咸宁 437100 ; 3. 江西省水利规划设计院 江西 南昌 330029)

摘要 通过模型试验对宽戗堤截流龙口范围内的水流特性进行系统研究。试验结果表明 : 当宽戗堤宽度与总水头的比值 B/H_0 在 3.1 ~ 5.7 之间时 , 随着戗堤宽度的增加 , 戗堤表现出宽度效应 , 龙口内水面形态由单降型流态变为双降型流态 , 龙口中下部流速降低明显 , 龙口前壅水高度逐渐增大 ; 当 $B/H_0 > 5.7$ 时 , 戗堤的宽度效应减弱 ; 当 $B/H_0 < 3.1$ 时 , 龙口区域没有宽度效应。运用多元回归分析 , 初步研究了各因素对宽度效应的影响。

关键词 宽戗堤 ; 截流 ; 龙口 ; 水力特性 ; 模型试验

中图分类号 : TV551.2

文献标识码 : A

文章编号 : 1006-7647(2011)03-0061-04

Hydraulic characteristics of closure gap of wide dikes // YANG Lei¹, ZHENG Jing¹, FANG Yong-sheng², ZHAN Qing-wen³

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China ;

2. Water Resources Bureau of Xianning, Xianning 437100, China ; 3. Jiangxi Provincial Water Conservancy Planning and

Designing Institute, Nanchang 330029, China)

Abstract : The characteristics of water flows through the closure gap of wide dikes were studied based on model tests. The model tests show that when the ratio of the dike width to the total head is 3.1 ~ 5.7, with the increase of the closure width, the wide dike exhibits width effects, and the water surface shape in the closure gap has changed from single-drop flows to double-drop ones. The flow velocity in the middle and lower part of the closure gap obviously decreases, and the water level in front of the closure gap increases. When the ratio of the dike width to the total head is larger than 5.7, the width effects of the wide dike decreases, and when it is smaller than 3.1, there is no width effects in the closure gap. By means of the multiple regression analysis, the influences of various factors on the width effects were preliminarily studied.

Key words : wide dike ; closure ; closure gap ; hydraulic parameter ; model test

在水利水电工程建设中 , 河道截流占有十分重要的位置 , 截流的成败直接关系到工程建设的进度和造价 , 因此截流常被作为工程建设中的关键工序和里程碑。20 世纪 30 年代至 60 年代 , 前苏联学者 C. B. 伊兹巴斯和 K. L. 卢宾斯坦对大江大河平堵截流的理论和计算方法进行了充分的研究 , 打下了施工导流、截流、围堰工程理论研究的基础。20 世纪 60 年代以来 , 立堵截流逐步代替了平堵截流 , 并且由单戗堤立堵截流发展到双戗堤截流、多戗堤截流以及宽戗堤截流。1992 年 , 肖焕雄^[1]编著了《施工水力学》, 对水利水电工程施工中的主要水力学问题进行了全面系统的研究。在随后几年内 , 结合长江三峡工程 3 次截流的实施 , 郑守仁^[2]、王光谦等^[3]、周厚贵等^[4]、戴会超等^[5]、夏仲平^[6]、杨文俊等^[7]、金

忠青等^[8]、钟登华等^[9]、刘发全^[10]对截流过程中的关键技术、深水截流过程中的戗堤坍塌、施工过程的可视化仿真以及双戗堤截流等问题进行了深入的理论和试验研究。

现阶段对宽戗堤龙口水流特性以及截流机理的研究并不是特别充分 , 以往报道的国外研究主要有 1956 年美国 Dalles 工程 76 m 宽戗堤截流以及 1958 年 Oahe 工程 182 ~ 273 m 宽戗堤截流。根据截流试验研究成果 , 戗堤加宽后 , 龙口水流沿程损失增加 , 龙口前壅水高度和分流量增大 , 从而减小了龙口流量 , 降低了龙口流速。另外 , 戗堤加宽后 , 不仅从水力条件上改善了截流条件 , 而且从施工实施上提高了截流抛投强度 , 有利于控制和减少抛投截流材料的流失。肖焕雄等^[11]进行了多组宽戗堤截流模型

试验,提出宽戗堤截流中龙口水面线流态变化与戗堤宽度和总水头之比有关,给出了龙口上下游落差的推导方法,并认为宽戗堤龙口流量系数是河床束窄度和宽高比的函数。任春秀等^[12]针对不同地形、地质以及分流条件下的宽戗堤截流进行了模型试验研究,比较了宽戗堤截流与单戗堤和双戗堤截流的难易程度,初步研究了宽戗堤截流进占抛投方式以及降低截流难度的措施。王继保等^[13]采用平面二维浅水方程对宽浅河谷单戗立堵截流进行数学模型试验,通过对截流时的分流流量变化以及戗堤进占过程中戗堤中轴线流速和上下游水位落差变化,探讨了立堵截流中戗堤的宽度效应。

根据现阶段对宽戗堤截流的认识,以及对宽戗堤截流龙口的水力指标、水流形态等方面的初步研究和分析,得出宽戗堤能降低截流难度的结论。宽戗堤截流的适用条件、截流过程中水流运动的变化规律、戗堤顶宽的选择以及宽度效应分析等关系到截流工程能否顺利实施的科学问题都是值得研究的课题。为更加深入地探讨宽戗堤截流的机理,笔者拟通过模型试验,进一步研究宽戗堤截流过程中龙口水流运动的变化规律,为截流方案的设计和和实施提出新思路 and 理论依据。

1 模型设计

1.1 模型规划

由于工程水流边界条件复杂多变,水流三维特性强烈,结构复杂,给宽戗堤截流相似模拟增加了难度。根据科学研究的一般规律,先研究最基本的情况:一定的综合糙率、平底坡河床、矩形断面水槽,从不同宽戗堤宽度的定床试验成果中得出宽戗堤截流的一般规律。

1.2 模型尺寸

根据试验研究的目的、内容和要求,以及模型试验的相似理论,试验按重力相似准则设计成定床、整体、正态模型,即采用 Fr 相似条件。综合考虑场地的限制条件、模型制作的方便以及试验工作的便利等因素,经计算分析比较,模型选用的长度比尺为 1:80,由此得到模型流量比尺为 1:52 743.34,流速比尺为 1:8.94,糙率比尺为 1:2.07。最终试验场地为长 6.0 m、宽 1.0 m 的混凝土矩形水槽,水槽高 0.3 m,槽底坡度 $i = 0$,水槽综合糙率为 0.011 ~ 0.016。模型中拟定戗堤上游面坡度为 1:2.0,下游面坡度为 1:1.25,龙口进占前沿边坡坡度为 1:1.5,上、下游面和龙口进占前沿边坡之间以母线为 1/4 椭圆的扭面相连,左右岸戗堤对称布置。由于模型中槽底坡度为零,故河道下游水位未加控制。模型布置示意图

见图 1。

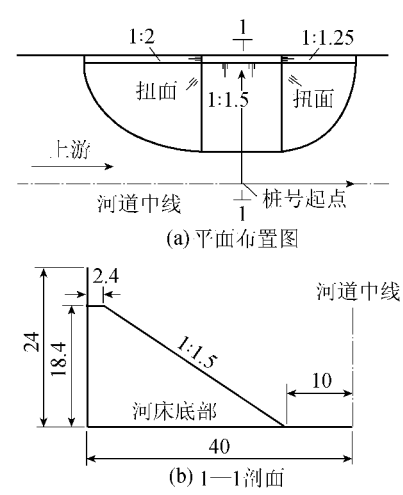


图 1 戗堤布置示意图(单位:m)

1.3 模型试验方案

制定模型试验方案时主要考虑以下机理指标:宽戗堤的宽度、河道来流量、龙口底宽等要素。根据试验任务的要求,设计了 4 种工况。各工况对应戗堤宽度分别为 25 m、50 m、65 m、80 m;龙口底宽均为 20 m;河道来流量分别为 1 500 m³/s、2 500 m³/s、3 500 m³/s、4 236 m³/s(当戗堤宽度为 25 m 时,增加 1 个河道来流量数据 1 000 m³/s)。

1.4 模型控制与测量方法

拟定流速测点布置方案时,考虑到水槽中有两种断面,一种为非龙口断面,这种断面形状规则,每隔 0.5 m 进行测量(将桩号起点位置设在戗堤宽度中心距离水槽进口 3 m 处,试验过程中修改戗堤宽度时均为向上下游加长,如图 1 所示);另一种为龙口断面,需要施测的点较多,在戗堤坡脚断面、挑角断面、龙口轴线断面等进行布点测量。水面线测点分布同流速测点分布,并在龙口区域加密。

模型试验采用恒定流试验方法,用电磁流量计控制模型流量,堰上水头用精度为 0.1 mm 的测针量测。采用长江科学院研制的 CF9901 型微电脑流速仪测量各测点的流速及流向,沿程水位采用固定测针测量。

2 模型试验成果

2.1 水面线特性

模型试验水面线如图 2 所示,横坐标为水流方向的桩号,纵坐标为河道水位。图中龙口范围为围堰上下游坡脚线之间的距离。

定义宽高比(B/H_0)为戗堤宽度和龙口前总水头的比值。由图 2 可知,龙口范围内水面线形态随 B/H_0 的变化规律如下:①当 $B/H_0 < 3.1$ 时,龙口类似于无底坎宽顶堰,水流流态与宽顶堰流态相似,过

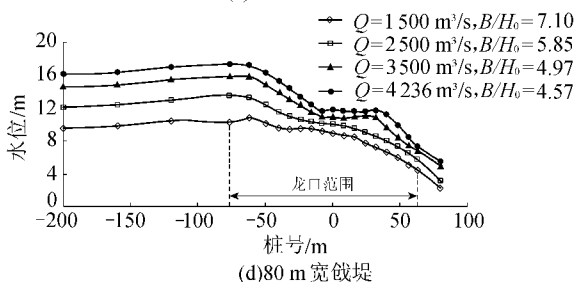
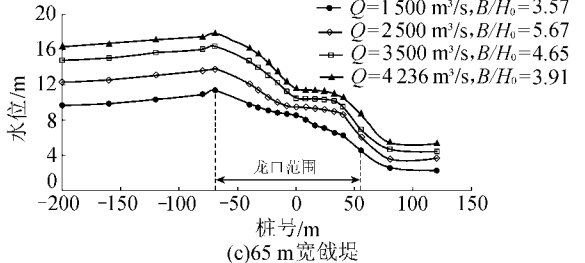
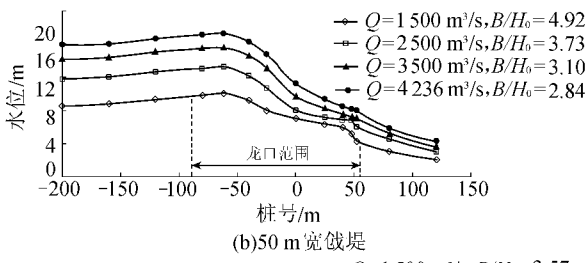
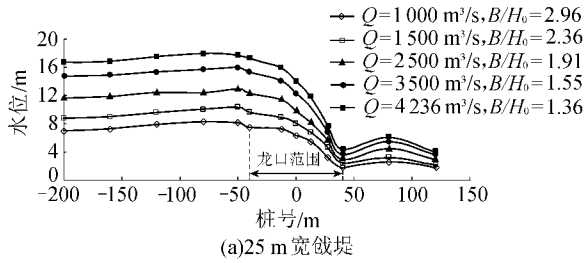


图2 模型试验水面线

堰水流由于受到侧向束缩,过水断面减小,局部阻力增大,上游水位壅高,进入龙口区域后,水面下降,一直到出龙口区域呈现出明显的一次性跌落,称为单降。②当 $3.1 \leq B/H_0 \leq 5.7$ 时,当戽堤宽度增大之后,束窄部分沿河道很长,龙口内水流流态类似于明渠非均匀渐变流^[14],进龙口区域处有一次水面跌落,进入龙口区域后,水流犹如在明槽中渐变流动,水面线下降缓慢,趋于水平,在即将出龙口区域处由于扩散作用,水面再次下降,呈现出2次水面跌落,称为双降。③当 $B/H_0 > 5.7$ 时,整个龙口区域内的水流仍然是双降的水面流态,但其中部区域水面线斜率开始逐渐变大,水面线有了变陡的趋势,即龙口水面线由双降逐渐变为斜率较小的单降。

2.2 龙口区域流速

由于篇幅有限,仅对模型试验各工况从上游坡脚线至下挑角 45° 断面之间的区域中轴线上的垂线平均流速(表1)进行分析。

对表1进行分析,得出龙口区域流速变化规律如下:①龙口流量相同时,随着戽堤宽度的增大,流

表1 模型试验龙口区域中轴线垂线平均流速

断面 桩号/m	戽堤 宽度 B/m	$v/(m \cdot s^{-1})$			
		$Q = 1500$ m^3/s	$Q = 2500$ m^3/s	$Q = 3500$ m^3/s	$Q = 4236$ m^3/s
0-49.30	25	2.33	2.59	2.83	2.95
0-39.13	25	2.36	2.27	2.71	3.28
0-25.81	25	4.44	4.50	4.56	4.59
0-12.50	25	5.22	5.90	6.32	5.87
0+00.00	25	6.26	7.45	8.05	8.35
0+12.50	25	7.22	8.65	9.60	10.46
0+20.99	25	8.77	8.90	11.24	12.30
0-61.60	50	2.24	2.44	3.16	2.89
0-51.43	50	3.16	3.19	3.82	4.08
0-38.11	50	4.59	4.29	5.16	5.28
0-25.00	50	4.38	6.20	6.89	6.83
0+00.00	50	4.79	8.80	9.39	9.63
0+25.00	50	5.32	7.90	9.75	10.79
0+33.49	50	5.55	9.09	10.17	10.82
0-69.30	65	2.06	2.44	2.64	2.89
0-59.13	65	2.86	3.25	3.19	3.31
0-45.81	65	4.14	4.26	4.56	4.35
0-32.48	65	4.98	6.08	6.86	6.65
0+00.00	65	5.34	6.32	9.87	10.20
0+32.48	65	7.39	8.53	9.33	10.52
0+40.97	65	7.96	9.18	10.08	10.73
0-76.80	80	2.09	2.41	2.95	2.21
0-66.63	80	2.44	2.89	3.31	2.89
0-53.31	80	3.73	4.08	3.94	3.49
0-40.00	80	4.62	5.34	5.96	5.75
0+00.00	80	4.77	6.53	9.48	9.81
0+40.00	80	7.51	8.62	10.02	9.78
0+48.49	80	8.41	9.48	10.61	10.03

速有变小的趋势,尤其是龙口中下部断面表现得十分明显。例如, $B = 65 m$, $Q = 4236 m^3/s$ 时,桩号 $0 + 00.00 m$ 断面的流速为 $10.20 m/s$,龙口出口断面的流速为 $10.73 m/s$;相同流量下 $B = 80 m$ 时,桩号 $0 + 00.00 m$ 断面的流速为 $9.81 m/s$,龙口出口断面的流速为 $10.03 m/s$ 。其原因在于戽堤宽度加长,龙口中下部断面与龙口入口断面的距离也随之加长,从而导致沿程损失增加,流速变小。②各种工况下龙口区域第二、第三流速测试断面分别代表上挑角 45° 和上挑角 60° 断面。虽然这2个断面相隔很近,但是流速梯度比其他各相邻断面都大。由图2可以看出,上游壅水最高点在龙口进口断面处,该断面之后水面急剧下降,故第二、第三流速测试断面之间的水头差很大,使得二者之间的速度差很大。同时表明龙口区域上挑角附近为截流难度最大的部位。③当 $B/H_0 < 5.7$ 时,龙口内流速随着戽堤的加长而变小,此为戽堤宽度效应的表现,例如 $B = 65 m$, $B/H_0 = 3.57$, $Q = 4236 m^3/s$ 时,上挑角 45° 断面的平均流速为 $3.31 m/s$,龙口轴线断面的平均流速为 $10.20 m/s$; $B = 80 m$, $B/H_0 = 4.57$, $Q = 4236 m^3/s$ 时,上挑角 45° 断面的平均流速为 $2.89 m/s$,龙口轴线断

面的平均流速为 9.81 m/s ,而当 $B/H_0 > 5.7$ 时 ,流速变小的趋势开始减弱甚至出现流速不减小反而增大的现象。这说明当 B/H_0 大于一定值之后 ,戗堤的宽度效应对流速的影响减弱直至没有影响。

3 宽度效应初步分析

戗堤宽度效应 ,一般是指戗堤宽度增加导致龙口前壅水增高、龙口内水流流速降低、截流难度降低的现象。截流中人们很关心上挑角处的流速变化规律 ,为了研究宽戗堤截流的宽度效应 ,以上挑角 45° 断面平均流速和龙口轴线断面平均流速的比值 v_a/v_z 作为因变量 ,来分析其他因素对宽度效应的影响。由试验数据可以得出各实测参数如表 2 所示。

表 2 模型试验实测 v_a/v_z

B/m	$Q = 1\,500\text{ m}^3/\text{s}$		$Q = 2\,500\text{ m}^3/\text{s}$	
	B/H_0	v_a/v_z	B/H_0	v_a/v_z
25	2.36	0.401 7	1.91	0.404 7
50	4.92	0.329 5	3.73	0.322 5
65	3.57	0.315 6	5.67	0.314 2
80	7.10	0.390 0	5.85	0.362 6

B/m	$Q = 3\,500\text{ m}^3/\text{s}$		$Q = 4\,236\text{ m}^3/\text{s}$	
	B/H_0	v_a/v_z	B/H_0	v_a/v_z
25	1.55	0.406 6	1.36	0.412 8
50	3.10	0.386 8	2.84	0.393 7
65	4.65	0.323 2	3.91	0.324 5
80	4.97	0.339 2	4.57	0.325 6

由表 2 可以看出 ,在同一龙口流量下 ,随着戗堤宽度的增加 , v_a/v_z 均先降低后升高 ,表明在该流量下 ,应有一个最适宜的戗堤宽度使上挑角的流速最小、截流难度最低 ;在同一戗堤宽度下 ,随着流量的增加 , v_a/v_z 变化受水深影响变化较大 ,呈现不规则变化 ,因此 ,引入无量纲参数 B/H_0 来分析其影响程度。 v_a/v_z 随 B/H_0 的变化曲线如图 3 所示。由图 3 可以看出 :当 $B/H_0 < 3.1$ 时 ,戗堤宽度增加不足以引起宽度效应的产生 ,龙口流态类似无底坎宽顶堰流 ,宽度增加对流速影响不明显 , v_a/v_z 变化不大 ;当 $3.1 \leq B/H_0 \leq 5.7$ 时 ,随着戗堤宽度的增加 ,龙口内的沿程损失增加 ,导致龙口前壅水增高 ,龙口内水流类似明渠非均匀流 ,流速降低 , v_a/v_z 降低较明显 ,宽度效应较显著 ;当 $B/H_0 > 5.7$ 后 ,龙口内沿程损失的增加对流速变化的影响变得不明显 , v_a/v_z 有上升趋势 ,宽度效应不太明显。

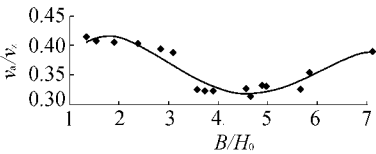


图 3 模型试验实测 v_a/v_z 随 B/H_0 的变化曲线

4 结 论

宽戗堤截流当宽高比 B/H_0 小于 3.1 时 ,龙口区域没有宽度效应 ,水面线呈现单降 ;当 $3.1 \leq B/H_0 \leq 5.7$ 时 ,龙口沿程损失增加 ,宽度效应明显 ,龙口水流从宽度不足的宽顶堰流态转变为明渠渐变非均匀流流态 ,水面线由一次降落的形态变为进入龙口时水面线降落一次、在龙口中部水面线较平缓、出龙口时水面线再次下降的形态 ,水面流态呈双降 ,且龙口内流速降低 ;当 $B/H_0 > 5.7$ 时 ,戗堤的宽度效应减弱 ,龙口内沿程损失的增加部分对总的能量损失影响不大 ,水面形态变化由双降逐渐变为单降 ,宽戗堤的宽度效应减弱并变得不明显 ,流速也由变小的趋势变为变大 ,龙口中部水面线由平缓变为有一定的坡度。因此可以得出在一定的条件下 ($3.1 \leq B/H_0 \leq 5.7$) 宽戗堤的确能够降低截流难度的结论。

参考文献 :

[1] 肖焕雄.施工水力学[M].北京 :水利电力出版社 ,1992.
[2] 郑守仁.三峡工程大江截流及二期围堰设计主要技术问题论述[J].人民长江 ,1997 ,28(4):1-4.
[3] 王光谦 ,杨文俊 ,夏华强 ,等.三峡工程明渠截流水流数学模型研究及其应用[J].长江科学院院报 ,2005 ,22(2):1-4.
[4] 周厚贵 ,刘光廷 ,王光谦.三峡深水截流堤头坍塌计算及预报[J].清华大学学报 :自然科学版 ,2002 ,42(4):535-538.
[5] 戴会超 ,胡昌顺 ,朱红兵.施工导截流理论与科技进展[J].水力发电学报 ,2005 ,24(4):78-83.
[6] 夏仲平.水利工程截流技术进展[J].人民长江 ,2005 ,36(12):11-13.
[7] 杨文俊 ,饶冠生 ,黄伯明.三峡工程大江截流水力学试验研究与工程实践[J].人民长江 ,1998 ,29(1):5-7.
[8] 金忠青 ,王玲玲 ,魏文礼.三峡工程大江截流流场的数值模拟[J].河海大学学报 :自然科学版 ,1998 ,26(1):83-87.
[9] 钟登华 ,刘东海.工程可视化辅助设计理论与应用[M].北京 :中国水利水电出版社 ,2004.
[10] 刘发全.双戗堤立堵进占截流龙口水力参数变化规律的研究[J].陕西水力发电 ,1996 ,1(1):21-27.
[11] 肖焕雄 ,夏明耀 ,王年云.立堵截流龙口戗堤宽度效应的研究[J].水利学报 ,1983 ,4(4):60-65.
[12] 任春秀 ,杨磊 ,肖焕雄 ,等.金安桥水电站截流方案及宽戗堤截流宽度效应模型试验[J].武汉大学学报 :工学版 ,2007 ,40(2):42-45.
[13] 王继保 ,刘伟 ,陈和春.宽戗堤截流二维数值模拟计算研究[J].三峡大学学报 :自然科学版 ,2009 ,31(4):18-22.
[14] 李炜 ,徐孝平.水力学[M].武汉 :武汉大学出版社 ,2000.

(收稿日期 :2010-10-11 编辑 :骆超)