
水工水力学及 水文论文集

陈椿庭 著

水利电力出版社

水工水力学及水文论文集

陈椿庭 著

水利电力出版社

(京)新登字115号

内 容 提 要

本论文集共选论文32篇,系作者于1947~1992年间所写作,大部分论文曾在《水利学报》、《水力发电》、《水利水电技术》、《水利水电科技进展》等刊物及全国性和国际学术讨论会上发表,其中有的是获奖论文。主要内容包括:流线曲率影响,明渠水面线计算,早期真空箱实验,溢流坝空穴数和不平整度控制,挑流消能和局部冲刷估算,水跃消能计算,峡谷高坝、高土石坝、中低水头枢纽泄洪布置,高坝泄洪消能进展,新中国35年来水工试验研究回顾及水平的提高,高坝泄洪方式的选择,挑流、水跃、摩流消能的比较,挑流与水跃联合消能,大型水电站主要特征值的无尺度统计和施工导流,水文频率分析等。

论文紧密联系工程建设实际,可供广大水利水电科技人员及高等院校教学工作者参考。

水工水力学及水文论文集

陈椿庭 著

*

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号)

各地新华书店经售

朝阳区小红门印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 21印张 474千字

1993年10月第一版 1993年10月北京第一次印刷

印数 001—810 册

ISBN 7-120-01843-4/TV·669

定价20.80元

“今夫水，搏而跃之，可使过颡；激而行之，可使在山。”

——《孟子·告子上》

“云气西行，云云然，冬夏不辍；水泉东流，日夜不休。上不竭，下不满，小为大，重为轻，圜道也。”

——《吕氏春秋·圜道》

纪念亡妻任莲芳(1915.12.~1991.8.)

序

结合淮河、黄河、长江等大江大河及其它河流水利建设的需要，40多年来陈椿庭同志先后主持并参加了南京水利实验处（现改称南京水利科学研究院）水工所的扩建和北京的水利水电科学研究院水工所的创建工作；进行了大量的水工模型试验，为水工建筑物的设计提供了重要依据；另外也为全国许多设计院的水工试验室培养了大量技术干部。他对国民经济建设所作的贡献是值得称道的。

通过这些工程实践，在求实求真的思想指导下，他也撰写了许多有关水工水力学与水文学的学术论文。这对这两门学科的发展也起推进作用。本书包括他的代表性论文32篇。这些论文不仅记录了他学术上的成就，对后人也一定是有效益的。

黄文熙

1992.10.

前 言

新中国成立以来,在大规模水利水电建设事业的推动下,水利科学研究工作迅速发展。当前,水工试验研究机构已遍布全国,以高速水流课题为主要内容的基本研究和泄洪原型观测已取得了丰硕成果。水工水力学和水文资料频率分析是水利水电建设中的重要课题和基本依据。我长期从事水利的教育和科研工作,以心得体会撰写了不少有关水工水力学和水文学方面论文。本书汇集了1947~1992年32篇有代表性文章,多数文章已在学术刊物、全国和国际学术会议上发表,有的有同事参与编写,少数是未发表过的手稿。

本书主要包括:枢纽泄洪布置、溢流坝水力学、流线曲率影响、空化与空蚀、减压箱试验及掺气减蚀、挑流消能及岩石冲刷、水跃消能及明渠水面线无尺度计算、高坝及大型水电站主要特征值的无尺度统计分析、高坝大流量泄洪消能的实践经验、大江大河的洪水流量频率分析等;多数文章附有实际工程资料。水流运动和水文现象十分复杂,个人认识较肤浅,文中不当之处在所难免,欢迎读者批评指正。

水利水电科学研究院原院长黄文熙教授作序,陈炳新院长审阅文稿,靳国厚、刘永川、车跃光、崔延涛、刘清朝作跋,能源部科技司协助出版,谨一并致以深切谢意。

作 者

1992年11月于北京

Selected Works on Engineering Hydraulics and Hydrology

CONTENTS

Preface

Foreword

The curvature effect in the characteristics of free overflow of round crested spillway

Experimental study on the effect of cavitation index in the characteristics of siphon spillway

On the cavitation index and control of surface irregularities of high overflow dam

On the energy dissipation of high overflow dam with flip bucket and estimation of downstream local erosion

On the large unit discharge of high spillways and its proper selection

An important dimensionless number in the 2—Doverflow of high dam

Some advances on the flood spilling and energy dissipation of high dams

Comparison of hydraulic jump length equations in horizontal flume

Unified nondimensional computation of 2—Dhydraulic jump in horizontal stilling basin

On the profiles and transitions in prismatic open channels

Unified nondimensional computation method for flow profiles in trapezoidal open channels

On the large discharge river diversion and spillway layout at high gorge dams

On the large discharge river diversion and spillway layout at high embankment dams

River diversion with large flood flow during construction of major hydropower projects

On the flood release layout of hydro-projects with low and medium head

Review of 35 years experimental hydraulics research in PRC

Promoting the experimental hydraulics research

Analysis of velocity observation data for three early chute spillways

Selecting large discharge flood release type for high dams

Nondimensional statistic analysis of main features in seven types of high dam

Nondimensional statistic analysis of main features of major hydropower plants

Some experiences on large discharge spillways and energy dissipation for high arch dams

On the River Diversion and Flood Releasing Layout for the Three Gorge Project

On the River Diversion Flood Release and silt sluicing for the Three Gorge Project

Study on the flood frequency curves for the Yangtze River, Yellow River, Yongding River, Jinghe River and Huaihe River

A simplification of plotting flood frequency curves

Comparison of plotting position for hydrological frequency curves

On the maximum precipitation records and unit runoff of 20 major rivers in the world

Discussion on "An engineering concept of flow in pipes"

On the joint energy dissipation of ski-jump and stilling basin for high dam

Unified nondimensional comparison of 2-D energy dissipation by hydraulic jump, ski-jump and bucket roller for overflow dams

Experimental studies on scale modelling in vacuum tank and mitigating cavitation damage by aeration

Remark

目 录

序

前言

圆顶坝自由溢流水力特性的曲率影响·····	1
空穴数对虹吸溢道水力特性影响的试验研究·····	15
关于高坝溢流的空穴数和坝面不平整度控制·····	29
关于高坝挑流消能和局部冲刷深度的一个估算方法·····	40
高水头泄洪建筑物的大单宽流量及其合理选用·····	52
高坝二元自由溢流的一个重要无尺度数·····	61
关于高坝泄洪消能的若干进展·····	68
平底水槽水跃长度公式的比较·····	86
平底塘二元水跃消能的无尺度运算·····	91
棱柱体渠道的水面线和转变线·····	98
梯形渠道水面线的通用无尺度计算方法·····	112
峡谷高坝大流量泄洪布置综述·····	121
高土石坝大流量导流、泄洪工程综述·····	140
大型水电站的大流量施工导流·····	157
中、低水头枢纽泄洪布置综述·····	166
新中国35年来水工试验研究工作回顾·····	182
进一步提高水工试验研究水平·····	188
三座早期陡槽的流速系数观测资料的分析·····	194
高坝大流量泄洪方式选择·····	198
七类高坝主要特征值的无尺度统计分析·····	210
大型水电站主要特征值的无尺度统计分析·····	223
高拱坝大流量泄洪消能的工程实践·····	230
对长江三峡枢纽施工导流和泄洪布置刍议·····	244
对长江三峡枢纽导流、泄洪、冲沙的框算·····	252
中国五大河洪水流量频率曲线之研究·····	260
绘制洪水流量频率曲线的简便新法·····	282
水文频率曲线点绘方法比较·····	288
关于世界最大暴雨记录及20条大河的径流模数·····	296
Discussion on “An Engineering Concept of Flow in Pipes”·····	303

On the Joint Energy Dissipation of Ski-jump and Stilling Basin for High Dam	306
Unified Nondimensional Comparison of 2-D Energy Dissipation by Hydraulic Jump,Ski-jump and Bucket Roller for Overflow Dams	311
Experimental Studies on Scale Modelling in Vacuum Tank and Mitigating Cavitation Damage by Aeration	319
后跋	326

圆顶坝自由溢流水力特性的曲率影响*

【提要】 本文根据H. Lauffer所作的两项假定^[1, 2]: ①垂直测线上各点所含能量为常数; ②流线呈同心圆弧, 对圆顶坝自由溢流的各项水力特性中的曲率影响作了推导。作者将所进行的大、中、小三个圆顶坝试验的118组试验资料^[3], 与推算的算式相比较, 合致性较好。根据试验资料制定了一些经验算式, 应用简便。此外, 收集了16个实用溢流坝27种剖面曲线的流量系数模型试验资料, 验证溢流曲率对流量系数的影响, 基本上也相符合。

一、引言

通过泄水建筑物的流线带有显著曲率时, 水力计算中必须考虑由流线曲率引起的影响^[4]。例如, 溢流坝自由溢流的流线有凸曲率, 坝顶水深即不同于按平行流动所算得的临界水深, Bundschu流量系数可大于1, 且流量系数常随上游水深而增大; 宽顶堰的末端水深, 因凸曲率影响而较平行流的临界水深为小。流线曲率所引起的影响, 可认为首先反映在: 使水深方向的压力分布不变遵守静水压力分布规律, 因而在流速分布、泄流能力、临界水深、边壁压力分布等方面, 都引起一系列的影响。流线的曲率影响问题广泛存在, 有时很严重, 例如局部流线的曲率过甚时, 可产生严重的负压, 甚至产生空化现象和空蚀作用。流线曲率影响问题的研究, 具有重要意义。

Harald Lauffer和Paul Böss为二元明渠水流的竖曲率研究奠定了基础^[1, 2]。作者根据Lauffer所作的两项假定: ①垂直测线上各点所含能量为常数, ②流线呈同心圆弧, 对流线曲率影响的算式作了推导; 并在玻璃水槽内进行了圆顶坝模型系列试验^[3], 又收集了16个实用溢流坝的流量系数模型试验资料, 基本上验证了所推算的算式。根据试验成果得出的一些经验公式, 也可供参考应用。

圆顶坝试验在美国St. Anthony Falls 水工试验所内进行^[3], 用的是英制单位; 实用溢流坝的流量系数模型试验资料, 2个来自南京水利实验处, 其余来自美国垦务局, 后者也是英制单位。本文的成果分析, 全都是无尺度曲线和算式, 应用时不必换算单位。

二、测线上能量的分布

根据位流理论, 二元恒定明渠流垂直竖测线上的各点, 都含有相等的能量。当单位重水体所含的能量用水柱高表示时, 总能 H 、静能 H_s 、流速水头 h 、位置高 Z 、压力水头 p/γ (γ 是水的容重), 都以长度为单位, 这几项的相互关系见图1。对于无曲率的平行水流,

* 原载水利学报, 1957年第三期, 此次作了删节。

如图1(a)所示。它们的关系式为:

$$\left. \begin{aligned} Z_y &= y \cos \varphi \\ (p/\gamma)_y &= (d-y) \cos \varphi \\ H_{S_y} &= (Z + p/\gamma)_y = d \cos \varphi = H_S = \text{常数} \\ h_y &= \frac{v_y^2}{2g} = H - H_S = \frac{q^2}{2gd^2} = \text{常数} \\ H_y &= H = H_S + h = \text{常数} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 q 为已知的单宽流量,其余符号示于图1(a)。当水流的流线有凸曲率时,沿竖测线的能量分布如图1(b)所示,压力水头 $(p/\gamma)_y < (d-y) \cos \varphi$, H_{S_y} 和 h_y 也不等于常数,但 Z 线和 H 线仍未改变。

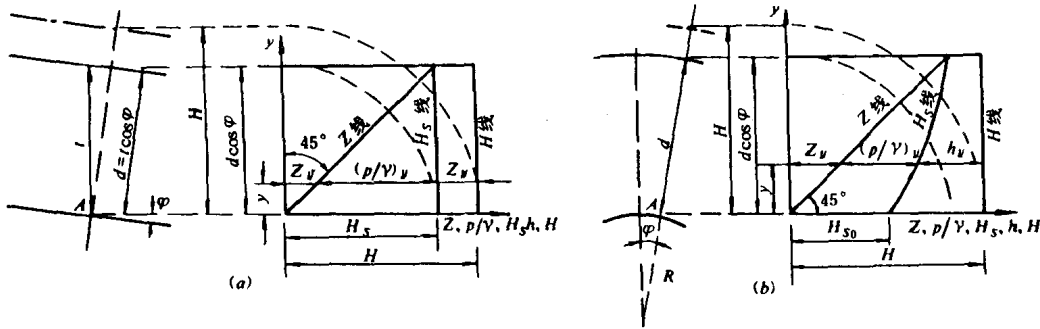


图 1 二元平行水流和凸曲水流的断面水力要素的比较示意图

图1(b)中 $(p/\gamma)_y \neq (d-y) \cos \varphi$ 可作流线竖曲率的基本影响,其余如流速、流量等也都和平行水流发生相应的差异。以上式(1)和图1都可改成无尺度比值的形式。

三、二元水流凸曲率影响的基本算式

流线有竖曲率的二元水流,如图2所示,在渠底以上 y 处 A 点单元立方体 $dx \cdot dy \cdot 1$ 上的4项作用力为:重力 $\gamma dx dy$,离心力 $\frac{\gamma v_y^2}{gr} dx dy$,下方的压力 $p_y dx$,上方的压力 $(p_y + \frac{\partial p_y}{\partial y} dy) dx$ 。沿测线方向写出力的平衡方程式如下:

$$\gamma dx dy \cos \varphi - p_y dx + \left(p_y + \frac{\partial p_y}{\partial y} dy \right) dx - \frac{\gamma v_y^2}{gr} dx dy = 0 \quad (2)$$

式中 r (或 r_y) ——该点的流线曲率半径;

φ ——该测线与铅垂线的夹角^[6]。

式(2)可简化为:

$$\frac{\partial (p_y/\gamma)}{\partial y} = \frac{v_y^2}{gr} - \cos \varphi \quad (3)$$

式 (3) 是曲线水流垂直测线上压力分布的一般通式。

根据 Lauffer 所作的两项假设, 式 (3) 右边第 1 项可代以:

$$\frac{v_y^2}{g} = 2hy = 2 \left(H - y \cos \varphi - \frac{p_y}{\gamma} \right) \quad (4)$$

$$r = R + y \quad (5)$$

式中 R 为渠底的曲率半径 [2, 5]。

式 (4)、式 (5) 代入式 (3), 积分可得测线上的压力分布算式:

$$\frac{p_y}{\gamma} = (d - y) \cos \varphi + (H - d \cos \varphi) \left[1 - \left(\frac{d + R}{y + R} \right)^2 \right] \quad (6)$$

上式方括号内的无尺度校正项, 以 K_p 示之, 称为压力校正系数:

$$K_p = 1 - \left(\frac{d + R}{y + R} \right)^2 = 1 - \left(\frac{1 + \frac{d}{R}}{1 + \frac{d}{R} \frac{y}{d}} \right)^2 \quad (7)$$

流线有凸曲率时, 式 (7) 内 $y < d$ 时 K_p 恒为负值, 即水压力较相应的平行水流为小。式 (7) 内的 d/R 称为曲率指数 i :

$$i = d/R \quad (8)$$

或式 (7) 可写作:

$$K_p = 1 - \left(\frac{1 + i}{1 + i \frac{y}{d}} \right)^2 \quad (7a)$$

对于相同的 y/d 比值, 曲率指数 i 愈大, K_p 的绝对值或曲率的影响为愈大; 当 i 为常数时, 曲率影响随 y/d 值的减小而加大。因之, 式 (1) 中的第 2 行须为式 (6) 所代换外, 第 3、4 两行须相应改为下列两式:

$$H_{S_y} = (Z + p/\gamma)_y = H - (H - d \cos \varphi) \left(\frac{1 + i}{1 + i \frac{y}{d}} \right)^2 \quad (9)$$

$$h_y = H - H_{S_y} = (H - d \cos \varphi) \left(\frac{1 + i}{1 + i \frac{y}{d}} \right)^2 \quad (10)$$

由式 (10), 可得测线上的流速分布算式为:

$$v_y = \sqrt{2gh_y} = \sqrt{2g(H - d \cos \varphi)} \left(\frac{1 + i}{1 + i \frac{y}{d}} \right) \quad (11)$$

对式 (11) 进行积分, 得凸曲线水流的单宽流量算式为:

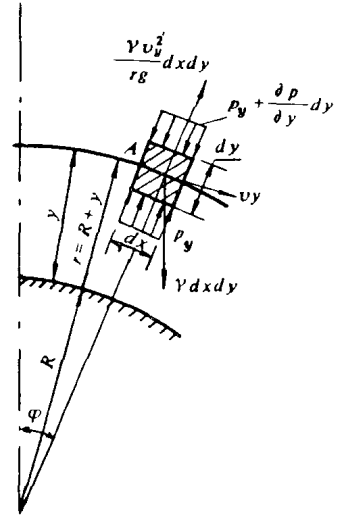


图 2 凸曲水流单位方体上的作用力

$$q = \int_0^d v_y dy = d \sqrt{2g(H - d \cos \varphi)} \left(1 + \frac{1}{i} \right) \ln(1+i) \quad (12)$$

令流量校正系数为 K_q ，由式 (13) 表达，则式 (12) 可改写为：

$$q = K_q d \sqrt{2g(H - d \cos \varphi)} \quad (12a)$$

$$K_q = \left(1 + \frac{1}{i} \right) \ln(1+i) \quad (13)$$

由于凸曲线水流的曲率指数 i 为正值，所以 K_q 恒大于 1。

四、圆顶坝自由溢流的水力特性

作者曾选择了坝顶为半圆、上下游为直立面的圆顶坝，作为研究二元明流竖曲率影响的简单模型，如图 3 示意，即认为圆顶坝自由溢流的水力特性所受的曲率影响，近似地符合于 Lauffer 所作的两项假定。从而就大、中、小三个模型进行 118 组系列试验，得以进行互相比较 [3]。

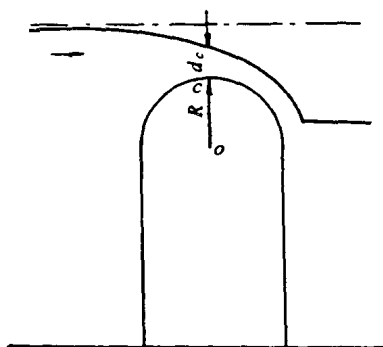


图 3 圆顶溢流坝模型示意图

略去短距离内的能量损失，水流的比能以坝顶测线为最小，取作临界断面，相应的临界水深 d_c 可对式 (12) 微分并令为零以求得（此处 $\varphi = 0, \cos \varphi = 1$ ）：

$$d_c = \frac{1 + \ln(1+i_c)}{1 + \ln(1+i_c) + 0.5 K_q} H \quad (14)$$

式中 i_c 为相应于临界水深 d_c 的曲率指数， $i_c = d_c/R$ 。

令临界水深系数 $K_{d_c} = d_c/H$ ，即由式 (14) 可得：

$$K_{d_c} = \frac{d_c}{H} = \frac{1 + \ln(1+i_c)}{1 + \ln(1+i_c) + 0.5 K_q} \quad (14a)$$

当流线有凸曲率， i_c 为正值，式 (14a) 给出的 K_{d_c} 恒较 $2/3$ 为大，即坝顶的临界水深 $d_c > \frac{2}{3} H$ 。

对于流线无曲率的平行水流， $R = \infty$ ， $i_c = 0$ ， $K_q = 0$ ， $K_{d_c} = 2/3$ 。

式 (14a) 代入式 (12a)，可得总能头 H 为常数时的最大溢流量 $q_{\max}$ 为：

$$q_{\max} = \frac{K_q^{1.5}}{\sqrt{1 + \ln(1+i_c)}} \sqrt{g} d_c^{1.5} = K'_q \sqrt{g} d_c^{1.5} \quad (15)$$

式中相应于最大溢流量 $q_{\max}$ 的流量系数 K'_q 即为临界 Froude 数 Fr_c ：

$$K'_q = \frac{K_q^{1.5}}{\sqrt{1 + \ln(1+i_c)}} = Fr_c \quad (15a)$$

用 d'_c 代表由过坝单宽流量 q 按平行水流算出的临界水深：

$$d'_c = (q^2/g)^{1/3} \quad (16)$$

相应的另一个临界水深系数 K'_{d_c} 为：

$$K'_{d_c} = \frac{d_c}{d'_c} = \left(\frac{1}{K'_q} \right)^{2/3} = \frac{1}{K_q} [1 + \ln(1+i_c)]^{1/3} \quad (17)$$

对于流线有凸曲率时, $i_c > 0$, K'_q 或 Fr_c 的数值大于 1; 而 K'_{d_c} 值则小于 1。也就是说, 圆顶坝的坝顶临界水深 $d_c > \frac{2}{3}H$, 但比同一流速假设为平行流动时的临界水深 d'_c 为小, 这可说明宽顶堰末端水深小于平行流临界水深的根由。

如果从总能头 H 来计算过坝单宽流量 q , 令另一个流量系数为 K''_q :

$$q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} K''_q H^{1.5} \quad (18)$$

根据上述演化, 可得 K''_q 的算式为:

$$K''_q = \frac{3}{2\sqrt{2}} K'_q K_{d_c}^{1.5} \quad (19)$$

K''_q 即为 Kramer 氏堰流流量系数。Bundschu 氏流量系数 μ 与 K''_q 的关系为 [7]:

$$\mu = \sqrt{3} K''_q \quad (20)$$

当流线有凸曲率时, $K''_q > 0.576$, $\mu > 1$; 而平行流动时, 则为 $K''_q = 0.576$, $\mu = 1$ 。式 (19)、式 (20) 说明了溢流坝的 Bundschu 流量系数 μ 可大于 1 的问题。

坝顶最高点测线上的压力分布, 可将 $d = d_c$ 、 $H = d_c/K_{d_c}$ 、 $\cos \varphi = 1$ 代入式 (6) 求得:

$$\left(\frac{p}{\gamma d} \right)_c = \frac{1}{K_{d_c}} - \frac{y}{d_c} - \left(\frac{1}{K_{d_c}} - 1 \right) \left[\frac{1+i_c}{1+i_c \frac{y}{d_c}} \right]^2 \quad (21)$$

以 $y = 0$ 代入上式, 得坝顶最高点的无尺度压力比值 K_{p_c} 如下:

$$K_{p_c} = \left(\frac{p_0}{\gamma d} \right)_c = 1 - i_c (2 + i_c) \left(\frac{1}{K_{d_c}} - 1 \right) \quad (22)$$

式 (21) 绘成一组曲线, 相应于参数 $i_c = 0 \sim 1.5$, 示于图 4。图中当 $i_c \approx 0.85$, 坝顶最高点的压力为 0; 当 $i_c \approx 1.45$, 该点的压力比值 $(p_0/\gamma d)_c = -1$ 。

同样, 将 $d = d_c$ 、 $H = d_c/K_{d_c}$ 、 $\cos \varphi = 1$ 代入式 (11), 可得坝顶最高点测线的流速分析算式为:

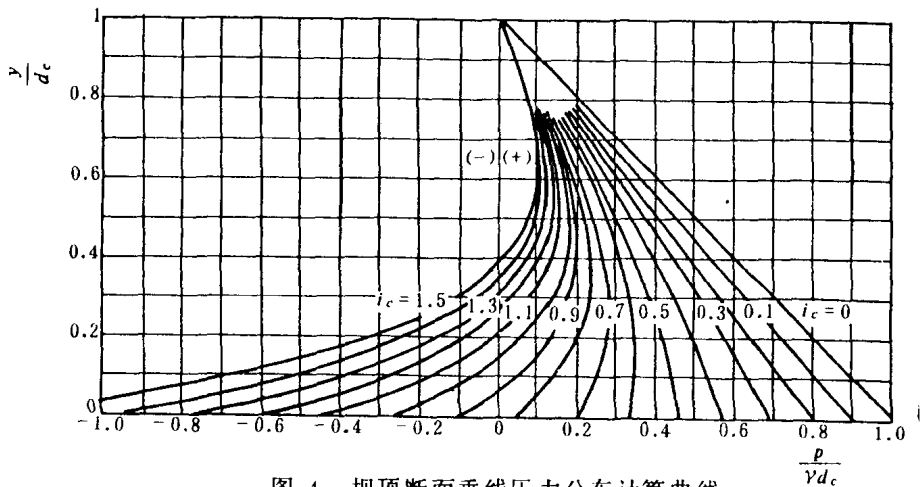


图 4 坝顶断面垂线压力分布计算曲线

$$v_{yc} = \sqrt{2gd_c} \sqrt{\frac{1}{K_{dc}} - 1} \frac{1+i_c}{1+i_c \frac{y}{d}} \quad (23)$$

当 $y=0$, C 点的临底流速为 v_b ; 当 $y=d_c$, C 点的面流速为 v_s :

$$v_b = \sqrt{2gd_c} \sqrt{\frac{1}{K_{dc}} - 1}; v_s = v_b(1+i_c) \quad (24)$$

对式(23)沿水深进行积分, 可得过 C 点测线的平均流速 v_m 为:

$$v_m = K_q v_b \quad (25)$$

相应的能头校正系数 α 和动量校正系数 β , 都可根据式(23)进行积分求得。

五、圆顶坝模型试验成果

为了探索二元明流的竖曲率影响, 作者曾在50cm宽玻璃水槽内进行了三个不同尺寸的圆顶坝模型试验, 研究竖曲率对溢流水力特性的影响, 所得成果与根据Lauffer所作两项假定导得的算式进行核验比较。模型的形状见图3, 118组系列试验的参数范围见表1。表1

表 1 三个圆顶坝模型的尺寸及试验组次

项 目	大 模 型 I	中 模 型 II	小 模 型 III
圆顶半径 R (cm)	10.98	8.32	5.72
流量 Q (L/s)	2.1~39	3.9~59	3.9~62
临界水深 d_c (cm)	1.2~7.6	1.7~9.7	1.7~9.2
曲率指数 $i_c = d_c/R$	0.11~0.69	0.20~1.16	0.30~1.60
试验组次编号	I.1~I.27	II.1~II.61	III.1~III.30
相对坝高 p/R	2.45	2.31	2.04

中 p 为模型坝高, 以 R 乘 p/R 比值即得模型坝高, 以cm计。

模型用金属管及薄钢板加工精制, 坝顶布设测压孔5个, 上游直立面设测压孔2个; 坝顶最高点测线的流速分布用Prandtl型毕托管施测, 压力沿测线的分布用停滞点不开孔的毕托管施测; 自由溢流水面线借助滑动测针架上的测针测得; 流量由锐缘平口堰板测定, 经过量水箱的精密衡重率定。表1中试验组次的安排, 三个模型的曲率指数 i_c 值有较多的搭接, 起互相核验的系列模型作用。

通过坝顶最高点的测线上沿水深的能量分布, 以6次试验的成果为例, 即I.12、I.22、II.14、II.19、III.15、III.11为例, 比较如图5; 同样6次试验的测线上沿水深的压力分布示于图6, 两图可对照比较。

图5、图6中曲率指数 i_c 值分别相应为0.361、0.648、0.817、1.055、0.936、1.154, i_c 值愈大, 压力分布偏离于静水压力愈甚, 而且有两组出现了显著的负压。图6中总能头 H 线上未将实验成果点上, 这些实验成果是符合第①项假定的。

坝顶最高点 c 的压力校正系数 K_{pc} 的实验成果点绘于图7, 大、中、小三个模型的成