

高等院校教材

水力学

李家星

赵振兴 主编

下册



河海大学出版社

水力学

(下册)

主 编 李家星 赵振兴

编著者(以姓氏笔画为序)

王培莉	王新宏	戎红玉	李家星
陈水倮	陈立德	吴如漪	张良然
赵振兴	钱善琪	谢佩珍	薛朝阳

河海大学出版社

内容简介

本书按原国家教育委员会高等教育司制定的《水力学课程教学基本要求》编写,分为基础水力学(上册)和专门水力学(下册)两部分。

本书主要作为高等院校水利类、土建类各专业本科和专科教材,也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

水力学/李家星,赵振兴主编.—2版.—南京:河海大学出版社,2001.1

ISBN 7-5630-1558-2

I. 水… II. ①李…②赵… III. 水力学-高等学校-教材 IV. TV13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 78212 号

书 名 / 水力学(下册)

书 号 / ISBN 7-5630-1558-2/TV·193

责任编辑 / 吴毅文

责任校对 / 李 洁

封面设计 / 叶 兵

出 版 / 河海大学出版社

地 址 / 南京西康路 1 号(邮编:210098)

电 话 / (025)3737852(总编室) (025)3722833(发行部)

印 刷 / 南京京新印刷厂

开 本 / 850 毫米 × 1168 毫米 1/32 10.5 印张 插页 1 284 千字

版 次 / 2001 年 1 月第 2 版 2001 年 1 月第 2 次印刷

印 数 / 6001 ~ 12000 册

定 价 / 32.00 元(共二册)

目 录

第十章 堰流和闸孔出流	(1)
第一节 概述	(1)
第二节 堰的分类	(2)
第三节 堰流的基本公式	(4)
第四节 薄壁堰	(6)
第五节 实用堰	(11)
第六节 宽顶堰	(20)
第七节 闸孔出流	(28)
第八节 水工建筑物测流简介	(35)
第九节 测流堰槽简介	(37)
习 题	(44)
第十一章 泄水建筑物下游水流的衔接和消能	(47)
第一节 概述	(47)
第二节 底流消能	(49)
第三节 挑流消能	(66)
第四节 面流消能	(71)
习 题	(80)
第十二章 渗流	(81)
第一节 概述	(81)
第二节 土壤的分类,渗流模型	(81)
第三节 达西定律	(84)
第四节 恒定无压渗流	(88)
第五节 井的渗流	(98)
第六节 土坝渗流	(105)

第七节	渗流的基本微分方程, 渗流的流速势函数	… (112)
第八节	恒定平面渗流的流网解法	… (118)
习 题		(128)
第十三章	有压管道非恒定流	(132)
第一节	概述	(132)
第二节	水击现象及水击分类	(132)
第三节	直接水击压强和水击波速	(138)
第四节	一元非恒定流基本方程	(143)
第五节	水击基本方程	(147)
第六节	简单管道水击压强计算	(154)
第七节	调压系统非恒定流	(162)
习 题		(166)
第十四章	明渠非恒定流	(168)
第一节	概述	(168)
第二节	明渠非恒定渐变流的基本方程——圣维南方程组	(171)
第三节	特征线法	(179)
第四节	直接差分法	(188)
第五节	明渠非恒定急变流——断波	(200)
第十五章	水工建筑物的高速水流简介	(207)
第一节	概述	(207)
第二节	运动要素的数据处理	(208)
第三节	水工建筑物的空蚀	(212)
第四节	掺气水流简介	(216)
习 题		(219)
第十六章	挟沙水流基础	(220)
第一节	概述	(220)
第二节	浑水的特性	(220)
第三节	泥沙的沉速	(224)

第四节	推移质运动	(229)
第五节	悬移质运动	(239)
习 题		(247)
第十七章	波浪理论基础	(249)
第一节	概述	(249)
第二节	风成波的发生、发展和消失及其行近岸滩时的变化	(251)
第三节	拉格朗日连续方程和运动方程	(254)
第四节	有限振幅推进波	(260)
第五节	有限振幅立波	(285)
习 题		(302)
第十八章	水力模型试验基本原理	(304)
第一节	概述	(304)
第二节	量纲分析法	(304)
第三节	水力相似基本原理	(312)
第四节	相似原理的应用及水力模型设计	(320)
第五节	水力模型的分类	(325)
习 题		(327)
参考答案		(329)
附 录		

5. 矩形断面底流消能水力计算求解图

第十章 堰流和闸孔出流

第一节 概 述

在水利工程中,为了考虑防洪、灌溉、发电等综合要求,常兴建溢流坝和水闸以控制和调节流量。在水力学中,把顶部溢流的水工建筑物称为堰。因此,溢流坝和水闸坎顶就是堰。流经堰的水流,当没有受到闸门控制时就是堰流;当受到闸门控制时就是闸孔出流,简称孔流。

堰流和闸孔出流的水力计算在水利工程中应用十分广泛。在水工设计中,是根据堰闸的形式、上下游水位和堰闸过水能力之间的关系来设计堰闸;而在水文测验中,则是根据已建成的水工建筑物来施测流量,称为水工建筑物测流;此外,还有专门为了量水(测流)而建造的测流堰或测流槽,利用它们来测流时,称为量水建筑物测流或称为堰槽测流。

堰流和闸孔出流(简称堰、闸出流)都有自由出流和淹没出流(又称沉溺出流)之分。当下游水位不影响堰、闸的泄流量时为自由出流;反之,当下游水位影响堰、闸的泄流量时为淹没出流。这里,再从缓流到急流的过度来分析自由出流和淹没出流。一般来说,由于堰、闸的阻遏,其上游来流为缓流。通过堰、闸的水流,在自由出流状态下,能保持着从上游缓流到下游急流的过渡,由于急流的干扰不能向上游传播,堰、闸的泄流量就只与上游水位有关,下游(急流)水位的变化不会影响到堰、闸的泄流量。而淹没出流,是缓流(堰、闸上游的缓流)到缓流(堰、闸下游的缓流)的过渡,由于缓流的干扰可以向上游传播,所以下游水位的变化就会影响到堰、闸的泄流量;或者说,淹没出流的泄流量与上、下游水位均有

关。

堰、闸水力计算的共同特点是:由于流线在较短的范围内急剧变化,是急变流,所以能量损失以局部损失为主。

第二节 堰的分类

堰的形式和用途各异。然而,在水力计算中,并不是按堰的用途,而是按堰壁厚度与水头的相对大小,实质上是按堰的水力特性,将堰分为薄壁堰、实用堰和宽顶堰三类。图 10.1 是这三类堰的纵剖面图。图中上游渐变流断面处的水面到堰顶的高差称为堰上水头,以 H 表示。 H 一般在距堰上游面 $(3 \sim 4)H$ 处量测,该量测断面可视为渐变流断面。堰顶厚度以 δ 表示。

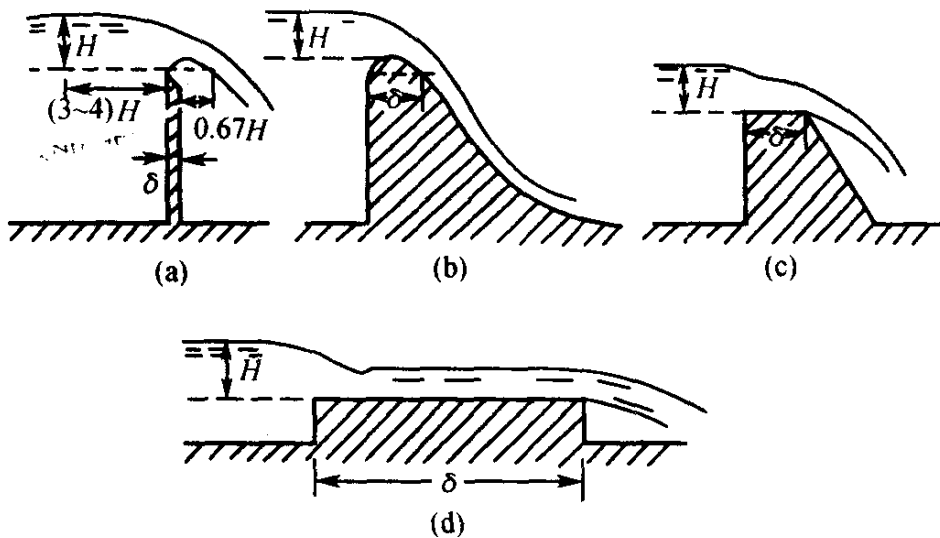


图 10.1

一、薄壁堰

当水流趋向薄壁堰壁时,堰顶下泄的水流形如舌状,如图 10.1(a)所示。当堰壁的厚度 δ 较小,堰壁没有触及到水舌的下缘,其厚度 δ 对水舌形状没有影响时,这种堰称为薄壁堰或称锐缘堰。根据实验,堰顶至水舌下缘之间的水平距离约为 $0.67H$,故在设计中,把 $\delta < 0.67H$ ($\delta/H < 0.67$) 的堰称为薄壁堰。

二、实用堰

当堰壁厚度影响到水舌的形状,水流即受到堰顶的阻力。把 $0.67H < \delta < 2.5H$ ($0.67 < \delta/H < 2.5$) 的堰称为实用堰。为了减少水流的阻力,某些大型的溢流坝,其剖面形状常做成曲线形,使堰面形状尽量与水舌相吻合,以减少阻力,称为曲线型实用堰,如图 10.1(b) 所示。某些小型的水利工程,为了施工方便,常采用折线型实用堰剖面,如图 10.1(c) 所示。

三、宽顶堰

根据实验,当 $\delta > 2.5H$ 以后,堰顶厚度对水流的影响使水流在堰进口附近的堰顶上有收缩现象。当 $\delta > 4H$ 以后,在收缩断面以后还可以在堰上出现近似水平的流段,如图 10.1(a) 所示。而当 $\delta > 10H$ 以后,堰顶的沿程水头损失已不能忽略不计,需按明渠理论计算。因此,把 $2.5H < \delta < 10H$ ($2.5 < \delta/H < 10$) 的堰称为宽顶堰。

以上分类是从水力学角度进行分类的。例如,对于一定的堰顶厚度 δ ,当水头 H 不同时,可以是实用堰,也可以是宽顶堰。

按堰壁厚度分类是古老而典型的分类,延用至今。随着生产的需要,新堰型不断涌现,如量水用的三角剖面堰、平坦 V 形堰等,它们并不明显地属于上述那一类,可不必追究它们的类别,以弄清它们的水流特点及计算公式为要求。

此外,对每一种堰,除了可以分为自由出流和淹没出流以外,又可以分为有侧收缩堰(溢流宽度小于上游渠道的宽度)和无侧收缩堰。并按堰顶轴线在平面上的位置分为正堰(堰顶轴线与水流方向垂直)、斜堰和侧堰(堰顶轴线与水流方向平行)等。以下阐述限于正堰。

第三节 堰流的基本公式

堰流的基本公式是指矩形薄壁堰、实用堰和宽顶堰均适用的普遍流量公式。

今以矩形薄壁堰自由出流为例推导如下。如图 10.2 所示,通

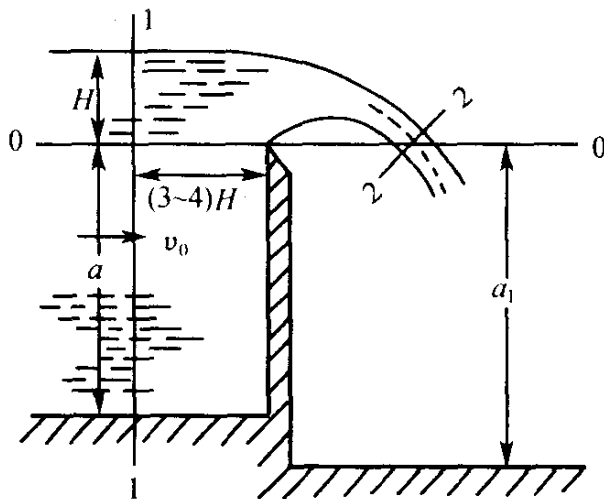


图 10.2

过堰顶取基准面 0-0。在堰上游(3~4) H 处取渐变流断面 1。过基准面与水舌中线的交点取过水断面 2。据试验,断面 2 为渐变流断面。对断面 1,2 列能量方程:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_w$$

式中 $z_1 + \frac{p_1}{\rho g} = H$; $\alpha_1 = \alpha_0$; $v_1 = v_0$, v_0 为行近流速;令 $H + \frac{\alpha_0 v_0^2}{2g} = H_0$ 为堰上总水头;断面 2 中点位于基准面上, $z_2 = 0$;水舌上、下表面与大气接触,可令 $p_2 = 0$; $\alpha_2 = \alpha$; $v_2 = v$;再取 $h_w = \zeta \frac{v^2}{2g}$, ζ 为堰的局部水头损失系数。将以上关系代入能量方程得

$$H_0 = \frac{\alpha v^2}{2g} + \zeta \frac{v^2}{2g}$$

整理得

$$v = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \zeta}} \sqrt{2gH_0} = \varphi \sqrt{2gH_0}$$

式中 $\varphi = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \zeta}}$ 称为流速系数。由于动能校正系数 α 和局部水头损失系数 ζ 之和总是大于 1, 故 $\varphi < 1$ 。

设断面 2 的水舌厚度为 kH_0 , k 为与水舌垂向收缩情况有关的系数, 而溢流宽度为 B , 则过水断面 2 的面积 $A = kH_0B$ 。通过堰的流量为

$$Q = Av = kH_0Bv = \frac{k}{\sqrt{\alpha + \zeta}} B \sqrt{2gH_0^{\frac{3}{2}}}$$

令
$$m = \frac{k}{\sqrt{\alpha + \zeta}}$$

则

$$Q = mB \sqrt{2gH_0^{\frac{3}{2}}} \quad (10.1)$$

上式中 m 称为流量系数。

以上推导时没有考虑下游水位的淹没影响及侧收缩的影响。由于这两种影响均使过堰流量减少, 所以, 如若把这两种影响也反映到公式中来, 那就要再乘以淹没系数 σ 及侧收缩系数 ϵ 。淹没出流时 $\sigma < 1.0$, 有侧收缩时 $\epsilon < 1.0$; 当不淹没和无侧收缩时均等于 1。于是上式成为

$$Q = \sigma \epsilon mB \sqrt{2gH_0^{\frac{3}{2}}} \quad (10.2)$$

这就是堰流的普遍公式。虽然是就薄壁堰推导而得, 但仍不失其普遍性, 因为三种堰的物理本质并无差异, 其间的差别仅体现在流量系数 m 、淹没系数 σ 、侧收缩系数 ϵ 的确定方法及数值上。例如流量系数 m , 由推导过程可见, m 与堰的形式、水舌的收缩程度、断面 2 的流速分布以及堰的水头损失等因素有关, 但实用时并不是按 $m = k/\sqrt{\alpha + \zeta}$ 来计算流量系数 m , 因为其中 α, ζ, k 均是未知数, 与其分别测定 α, ζ, k , 不如根据式(10.1)实测 Q, H , 直接分析 m 的变化规律。根据实验, 人们已建立了许多流量系数的经验

公式。在经验公式中往往选用上游堰高 a 、水头 H (对于淹没情况还要考虑下游堰高 a_1 和水位差 z 等), 或它们的比值 $\frac{H}{a}$ 作为变量, 来反映流量系数 m 的变化规律。例如在相同的水头 H 下, 堰高 a 不同时, 堰前水流的收缩程度也不同, 所以比值 $\frac{H}{a}$ 可以反映水舌的收缩程度, 等。

由于建立各个经验公式的条件不同, 因此在初步计算中按不同的经验公式得到的流量系数值往往有出入, 仅可作为设计时的参考, 对于重要工程, 应进行模型试验。此外, 由于确定各种系数的经验公式及表格甚多, 不可能, 也无需一一罗列, 仅选择一、二, 用以阐明各种系数的影响因素。其他公式可查阅有关专著或手册。

第四节 薄壁堰

薄壁堰相对于实用堰和宽顶堰而言, 具有测流精度较高的优点, 但由于堰壁较薄, 难以承受过大的水压力, 上游水头不宜过大, 故常作为实验室和小型渠道量测流量之用。

薄壁堰的堰口形状有矩形、三角形、梯形等, 如图 10.3 所示, 分别称为矩形薄壁堰、三角形薄壁堰和梯形薄壁堰。

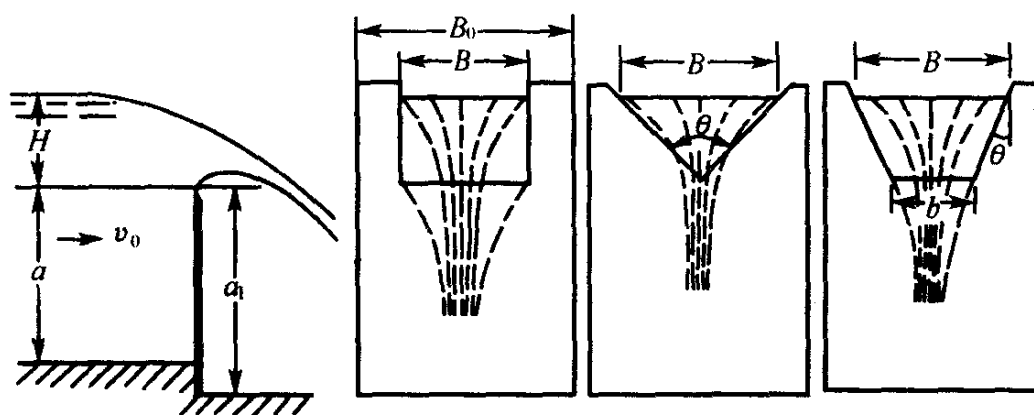


图 10.3

一、矩形薄壁堰

(一)流量系数

薄壁堰堰壁厚度不影响水舌形状,水头相对不大,且上游渠道一般建造的比较规则,为简便计,在公式(10.1)中,用水头 H 代替 H_0 ,而把 $\frac{\alpha_0 v_0^2}{2g}$ 的影响并入流量系数中考虑。于是式(10.1)改写为

$$Q = m_0 B \sqrt{2g} H^{3/2} \quad (10.3)$$

式中 m_0 是包括行近流速影响在内的流量系数,也称为流量系数。

矩形薄壁堰的流量系数 m_0 在自由流和无侧收缩的情况下可按以下经验公式计算。

巴辛(Bazin)公式

$$m_0 = (0.405 + \frac{0.0027}{H}) \left[1 + 0.55(\frac{H}{H+a})^2 \right] \quad (10.4)$$

此式适用条件为 $0.2\text{m} < a < 1.13\text{m}$, $B < 2\text{m}$, $0.1\text{m} < H < 1.24\text{m}$ 。

雷保克(T·Rehbock)公式

$$m_0 = 0.4034 + 0.0534 \frac{H}{a} + \frac{1}{1610H - 4.5} \quad (10.5)$$

此式适用条件为 $0.15\text{m} < a < 1.22\text{m}$, $H < 4a$ 。

在应用以上各式时,水舌下面为大气压强(即 $p_2 = 0$)。一般可设通气管与大气相通,否则,会因为水舌下部的部分空气被带走而出现负压。负压虽然可以增加有效水头,从而加大流量,但负压值不稳定,并使水舌上下摆动,因而影响测流精度。

薄壁堰有侧收缩时通常不单独计算侧收缩系数,而是将其影响并入到流量系数 m_0 中去考虑,例如巴辛公式:

$$m_0 = \left[0.405 + \frac{0.0027}{H} - 0.03 \frac{B_0 - B}{B_0} \right] \cdot \left[1 + 0.55(\frac{H}{H+a})^2 (\frac{B}{B_0})^2 \right] \quad (10.6)$$

式中 B_0 为渠宽, B 为堰顶宽(垂直于流向), B_0 及 B 均以 m 计。

(二)淹没系数

当下游水位影响堰的泄流量时为淹没出流。薄壁堰发生淹没出流的条件是:①下游水位高于堰顶;②堰下游发生淹没水跃。如图 10.4 所示。因为只满足其中任一个条件,都有可能在堰的下游发生临界水跃或远离水跃,以致使下游收缩断面处于急流状态,并使泄流时的流态仍然为自由出流。

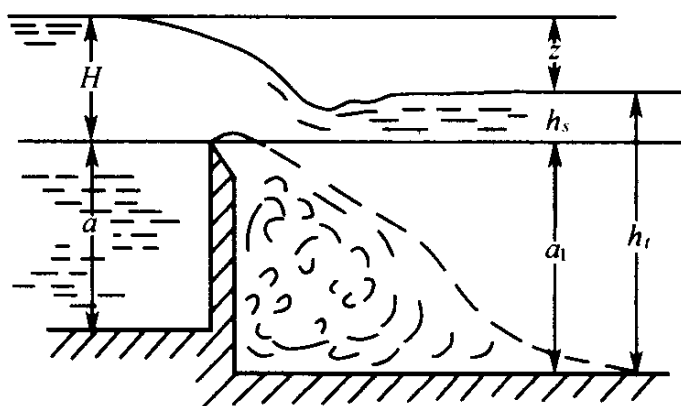


图 10.4

根据实验发生淹没水跃的经验关系是

$$\frac{z}{a_1} < \left(\frac{z}{a_1}\right)_c \quad (10.7)$$

上式中临界值 $\left(\frac{z}{a_1}\right)_c$ 与 $\frac{H}{a_1}$ 的经验关系如图 10.5 所示。由图可见, $\left(z/a_1\right)_c$ 在 0.7 上下变化。

以上各符号的意义可参见图 10.4,其中 z 为上、下游水位差, a_1 为下游堰高, H 为上游水头。

矩形薄壁堰淹没出流的流量公式为

$$Q = \sigma m_0 B \sqrt{2g} H^{3/2} \quad (10.8)$$

式中 σ 为淹没系数,可用以下经验公式计算:

$$\sigma = 1.05 \left(1 + 0.2 \frac{h_s}{a_1}\right) \sqrt[3]{\frac{z}{H}} \quad (10.9)$$

式中 h_s 为下游水位高于堰顶的数值。淹没出流时 $h_s > 0$, 如图

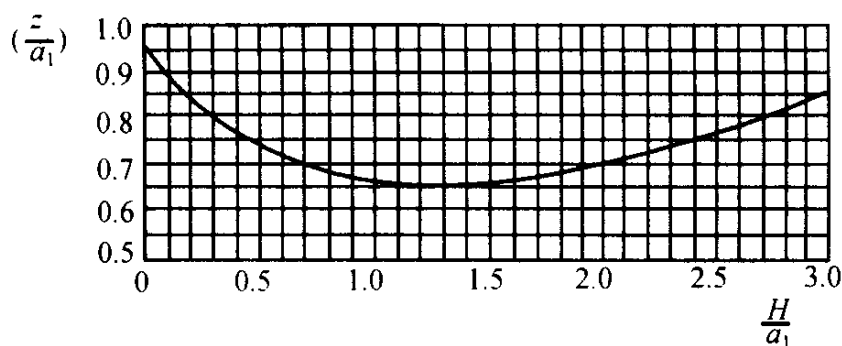


图 10.5

10.4 所示。

需要说明的是,淹没出流的测流精度较自由出流为低。作为测流设备,在设计时,应尽量避免在淹没条件下工作。

例 10.1 有一矩形无侧收缩薄壁堰,已知堰宽 $B = 0.5 \text{ m}$,上、下游堰高 $a = a_1 = 0.5 \text{ m}$,堰上水头 $H = 0.2 \text{ m}$,求下游水深分别为 $h_t = 0.4 \text{ m}$ 及 $h_t = 0.6 \text{ m}$ 时通过薄壁堰的流量。

解: (1)求 $h_t = 0.4 \text{ m}$ 时的流量。 $h_t (= 0.4 \text{ m}) < a_1 (= 0.5 \text{ m})$,下游水位低于堰顶,为自由出流。按式(10.5)和式(10.3)分别计算 m_0 及 Q :

$$\begin{aligned} m_0 &= 0.4034 + 0.0534 \frac{H}{a} + \frac{1}{1610H - 4.5} \\ &= 0.4034 + 0.0534 \frac{0.2 \text{ m}}{0.5 \text{ m}} + \frac{1}{1610 \times 0.2 - 4.5} = 0.428 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q &= m_0 B \sqrt{2g} H^{3/2} = 0.428 \times 0.5 \text{ m} \times \sqrt{2 \times 9.81 \text{ m/s}^2} \times (0.2 \text{ m})^{3/2} \\ &= 0.0848 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

(2)求 $h_t = 0.6 \text{ m}$ 时的流量。判别出流是否淹没: $h_t (= 0.6 \text{ m}) > a_1 (= 0.5 \text{ m})$,下游水位高于堰顶。又, $\frac{z}{a_1} = \frac{a_1 + H - h_t}{a_1} = \frac{0.5 \text{ m} + 0.2 \text{ m} - 0.6 \text{ m}}{0.5 \text{ m}} = 0.2$ 。由 $\frac{H}{a_1} = \frac{0.2 \text{ m}}{0.5 \text{ m}} = 0.4$,查图 10.5 得 $(\frac{z}{a_1})_c (= 0.76) > \frac{z}{a_1} (= 0.2)$,为淹没出流。

按式(10.9)和式(10.8)计算 σ 及 Q

$$\begin{aligned} \sigma &= 1.05(1 + 0.2 \frac{h_t}{a_1}) \sqrt[3]{\frac{z}{H}} \\ &= 1.05(1 + 0.2 \frac{0.6 \text{ m} - 0.5 \text{ m}}{0.5 \text{ m}}) \sqrt[3]{\frac{0.1 \text{ m}}{0.2 \text{ m}}} = 0.867 \end{aligned}$$

$$Q = \sigma m_0 B \sqrt{2gH^{3/2}} = 0.867 \times 0.0848 = 0.0735 \text{ m}^3/\text{s}$$

二、三角形薄壁堰

三角形薄壁堰简称三角堰,如图 10.3(c)所示。其最大优点是,小水头时水面宽度小,流量的微小变化将引起较大的水头变化,当 $Q < 0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,可得到较高的精度,是理想的量水建筑物之一。其堰口夹角可取不同值,但常做成 90° 。

不妨估计一下三角堰流量公式的形式:矩形堰公式(10.3)表明 $Q \propto BH^{3/2}$,当堰口夹角 θ 一定时,三角堰的溢流水舌宽度 B 与水头 H 成比例[参见图 10.3(c)]。故三角堰流量 $Q \propto H \cdot H^{3/2} \propto H^{5/2}$,引入比例系数 C ,可写成

$$Q = CH^{5/2} \quad (10.10)$$

国际标准手册* 给出了 θ 在 $20^\circ \sim 120^\circ$ 范围内流量系数 C 相应的图、表和经验公式。

汤普森(Thompson)试验得 $\theta = 90^\circ$ 时, C 的近似值为 1.4,即

$$Q = 1.4H^{5/2} \quad (10.11)$$

式中单位以 m, s 计,应用条件为: $0.05 \text{ m} < H < 0.25 \text{ m}$; $a \geq 2H$; $B_0 \geq (3 \sim 4)H$ 。

三角堰也有淹没出流情况,但应避免之。

三、梯形薄壁堰

梯形薄壁堰的水头 H 越大,水面 B 越宽,适用量测稍大的流量,例如量测 $Q > 0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ 时的流量。

梯形堰口侧边与铅垂线的夹角用 θ 表示,见图 10.3(d)。当 $\text{tg}\theta = 1/4$,在自由出流情况下,西坡列梯(Cippoletti)的经验公式为

$$Q = 1.856 bH^{3/2} \quad (10.12)$$

式中 H 为堰上水头, b 为梯形堰口的底宽,均以 m 计,上式的适用

* ISO 国际标准手册 16 《明渠水流测量》,中国标准出版社,1985 年。

条件为 $b \geq 3H$ 。

第五节 实用堰

实用堰是溢流坝中常见的堰型,其剖面形式较多,可大体分为曲线型和折线型两大类。无论是曲线型实用堰还是折线型实用堰,其流量公式均为堰流的普遍公式(10.2),即

$$Q = \sigma \epsilon m B \sqrt{2g} H_0^{3/2}$$

一、曲线型剖面实用堰

(一)剖面形状

曲线型剖面有各种定型设计,例如克里格尔(Creager) - 奥菲采洛夫(Офицеров)剖面、WES* 剖面、长研 I 型剖面等。其设计原则是使堰面轮廓与薄壁堰水舌下缘基本吻合,以减少水流阻力。然而水舌的形状、尺寸随水头 H 而变,设计堰面时所采用的水头称为设计水头,以 H_d 表示。在设计水头下,堰顶附近的动水压强接近于零。我国一些高坝在 20 世纪五六十年代常采用克 - 奥剖面。近几十年来多采用 WES 剖面。这里仅对 WES 剖面作简要介绍。

WES 剖面堰顶由圆弧段构成,有两圆弧段和三圆弧段两大类,每一类又有几种型号。现以图 10.6 所示的三圆弧段 WES 剖面为例说明其设计思想。图 10.6 所示的 WES 剖面,其上游堰面铅直,其堰顶上游部分由三段圆弧连接,比两圆弧段可以更为平顺地与上游面连接,从而改善了堰面压力条件。堰顶下游亦用曲线方程表示,详见图 10.6。

曲线型实用堰剖面的下部可与一倾斜直线相连接,再用圆弧与下游河床相连接,以便水流平顺地进入河床,参见图 10.7。斜

* WES 是 Waterways Experiment Station(水道实验站)的缩写,该站属美国陆军工程兵团。