

拱坝泄洪与 消能的 水力设计和 计算



艾克明



拱坝泄洪与消能的 水力设计和计算

艾 克 明

水利电力出版社

内 容 提 要

本书概要叙述了国内、外拱坝建设的历史和目前达到的水平,广泛收集、列举了拱坝枢纽,特别是拱坝泄洪与消能的几种典型布置形式和设计原则。对拱坝坝顶溢流、孔口泄流、挑流消能、空中冲击消能以及底流消能的水力设计和计算方法进行了介绍和探讨。综合、概括了国内、外拱坝泄洪与消能的最新试验研究成果和新型式以及一些工程的运用经验。

本书可供水利水电工程设计、科研和教学等方面的人员参考。

拱坝泄洪与消能的水力设计和计算

艾 克 明

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 6.25印张 137千字

1987年8月第一版 1987年8月北京第一次印刷

印数0001—3840册 定价1.50元

书号 15143·6425

前 言

拱坝是一种比较经济和整体安全度较高的坝型，混凝土方量较少，适宜在岩基条件良好的峡谷修建。但一般峡谷河流坡度较大，库容较小，坝身泄洪时常缺乏溢流面，不利于大流量的宣泄。当泄洪流量较大时，拱坝水流趋向集中及单宽流量较大的情况较突出。因而选择泄洪消能型式时，必须同时满足安全泄洪与下游消能防冲两方面的要求。拱坝泄洪存在径向集中问题，属三元水流，水力计算方法还很不成熟。但随着拱坝建设的迅速发展，国内外在工程实践中已出现不少好的布置型式，也积累了许多计算经验。为总结提高拱坝泄流与消能水力设计和计算的经验和经验，编写了此书。

第一章拱坝泄洪与消能的型式及布置：概述了国内、外拱坝建设的历史和目前已达到的水平，列举了拱坝坝身泄洪的六种典型布置型式和国内、外一些工程实例，讨论了选择泄洪消能型式和枢纽布置时应考虑的几个原则问题。

第二章坝顶溢流：分析比较了常用的堰面曲线，根据曲线形堰溢流水舌沿程相对加厚的特点，认为WES曲线优于其它曲线，似更符合于拱坝的溢流特性。本章还分析比较了一些计及拱坝曲率影响的流量系数估算公式；介绍了反弧半径、鼻坎挑射角的选择及坝顶溢流坝反弧段的设计特点。

第三章孔口泄流：概述了孔流界限和各类孔口的设计特点，收集了各类孔口的流量系数或压力计算方法，可供类似工程参考。

第四章挑流消能：介绍了挑流射距的计算方法、水垫消

力池的类型和计算方法、岩基冲刷深度的估算方法以及窄缝式挑坎的体型选择。还结合一些工程实例，对拱坝下游的防护措施进行了讨论。

第五章空中冲击消能：概述了空中冲击消能的发展，分析介绍了两侧挑流冲击消能和高低坎挑流冲击消能在水中的衔接计算方法，设计原则以及消能率等。

第六章水跃消力池：介绍了拱坝的水跃消力池的水力计算方法，并列举了国内外水跃消力池的六种型式和工程实例，可供类似工程参考。

本书编写时经湖南省水利水电勘测设计院上官能总工程师、王川龙主任工程师校阅，并经水利水电科学研究院李桂芬高级工程师以及西北水利科学研究所李崇智高级工程师审阅，最后由水利水电科学研究院陈椿庭高级工程师审定。在编写中，他们提出了许多宝贵的意见，笔者深表谢忱。

限于经验和水平，谬误之处在所难免，欢迎批评指正。

编 者

1986年

目 录

前言

第一章 拱坝泄洪与消能的型式及布置	1
第一节 拱坝建设的发展概况	1
第二节 拱坝泄洪与消能的型式	3
第三节 拱坝泄洪消能型式的选择与布置	28
第二章 坝顶溢流	32
第一节 堰面曲线的选择	32
第二节 定型水头的选定	38
第三节 流量系数的估算	39
第四节 反弧半径及鼻坎挑射角的选择	44
第五节 厂顶溢流坝反弧段的设计特点	49
第三章 孔口泄流	55
第一节 概述	55
第二节 表孔泄流	55
第三节 中孔和深孔泄流	59
第四章 挑流消能	76
第一节 挑流射距及入水断面水力参数的估算	76
第二节 水垫消力池	84
第三节 冲刷深度的估算	103
第四节 窄缝式挑坎的体型选择	111
第五节 坝下游的防护措施	114
第五章 空中冲击消能	119
第一节 冲击消能的发展概况	119
第二节 两侧挑流对冲消能	127
第三节 高低坎挑流冲击消能	132

第六章	水跃消力池	139
第一节	水跃消力池的水力计算方法	139
第二节	水跃消力池的实例	144
参考文献		153
附录		154
附表一	国内外部分拱坝坝顶溢流泄洪消能概况表	154
附表二	国内外部分拱坝坝面溢流泄洪消能概况表	164
附表三	国内外部分拱坝孔口泄洪消能概况表	166
附表四	国内外部分拱坝滑雪式及平面对冲泄洪消能概况表	174
附表五	国内外部分拱坝厂顶挑(溢)流概况表	180
附表六	国内外部分拱坝工程综合泄洪消能概况表	182
附表七	国内外部分拱坝岸边溢洪道及坝外泄洪工程概况表	184
附表八	国内外部分拱坝工程底流消能概况表	192

第一章 拱坝泄洪与消能的型式及布置

第一节 拱坝建设的发展概况

河流的中、上游，河谷地形狭窄，一般当谷宽与谷深之比小于 $4.5\sim 5$ ，且岩基地质条件良好时，宜于修建拱坝。这种坝型由于将大部分水压力传至两岸山体，坝体比较单薄，具有工程量小、整体安全度高、投资较省等优点，因此得到了较快的发展。据国外100m以上的403座大坝的统计，拱坝123座，占30.5%，仅次于土石坝^①。法国、意大利等国近年来修建的混凝土坝中70%为拱坝。我国已建和在建的7座120m以上的高坝当中，拱坝或拱型重力坝有5座，占71%。

关于拱坝建设的历史，尚无准确考证。据现有资料分析，第一座拱坝是意大利的潘塔利多（Понтальто）石坝。该坝高5m，半径15m，始建于1611年，后经逐步加高，至1887年达38m^[1]。另据27个国家的统计，至1910年为止，全世界修建拱坝37座，其中澳大利亚19座、意大利10座、美国7座、法国1座^②。如澳大利亚1902年修建的巴洛萨（Barossa）混凝土拱坝，高39m，至今运用良好^[2]。三十年代，美国修建的鲍尔德（Boulder）重力拱坝，坝高已达221m。目前世界上最高的拱坝是苏联的英古里（Ингури）混凝土双曲拱坝，坝高272m；其次是意大利的瓦依昂

① 国外电力统计手册，1978（第3册），电力部科技情报所，1981年9月。

② 各国拱坝资料分析，水利水电科学研究院编，1959年11月。

(Vajont) 双曲拱坝, 坝高262m。

我国五十年代开始大规模修建拱坝, 如安徽省的佛子岭连拱坝(坝高74.4m, 1954年)、梅山连拱坝(坝高88.24m, 1956年)、响洪甸重力拱坝(坝高87.5m, 1958年), 台湾省的库宽拱坝(坝高86m, 1956年), 广东省的流溪河拱坝(坝高78m, 1958年), 湖南省的三江寨砌石单曲拱坝(坝高48m, 1956年)、半江拱坝(坝高42m, 1958年)等等, 都是五十年代修建的。

截至1981年10月为止的统计, 我国坝高40m以上已建和在建的拱坝达182座: 其中混凝土拱坝46座; 砌石拱坝136座^①, 占74%。由此可见, 利用石料筑坝是我国拱坝建设的一个特点, 也是拱坝充分利用材料的抗压性能的一个独特之点。

我国最高的混凝土拱坝是台湾省的德基双曲拱坝, 坝高181m, 建于1974年; 其次是青海省的龙羊峡拱型重力坝(坝高178m, 在建)。砌石拱坝中, 最高的是河南省的群英重力拱坝(坝高100.5m, 建于1971年)。

随着拱坝建设的发展, 结构型式也日趋新颖, 重力拱坝的比例逐渐减少, 单曲、双曲薄拱坝愈来愈多。在平面布置上, 早期多为定圆心定半径的圆筒形拱坝, 现在多为变圆心变半径的双曲拱, 并且尚有三心双曲拱和多圆心变截面的抛物线拱、椭圆拱等。修建拱坝, 一般都希望有较好的地质、地形条件, 而随着拱坝建筑技术的发展, 目前在一些复杂地基上也可以修建拱坝。例如我国云南省1970年修建的窄巷口拱坝, 因河床地质条件较差, 于是先在基础上修建水平拱,

① 国内拱坝统计, 水利电力部东北勘测设计院编制, 1981年10月。

然后在水平拱上修建高54.8m的挡水拱坝。当地形地质条件比较优越时，坝体可以修建得比较薄，国内拱坝的厚高比最小达0.06~0.1，而高宽比却有逐渐加大的趋势。

第二节 拱坝泄洪与消能的型式

拱坝泄洪分坝外泄洪与坝体泄洪两种。但拱坝多修建在峡谷河段上，一般无合适的堰口可供利用，因此多数情况下采用坝体泄洪。鉴于坝外泄洪的水力计算与其它坝型无异，故本书不予讨论，拱坝坝身泄洪大体有以下六种布置型式：①坝顶溢流；②坝面溢流；③坝身开孔泄流；④滑雪式溢洪道；⑤厂房顶溢流；⑥综合方式泄洪。现分述如下（参见附录）。

一、坝顶溢流

坝顶溢流是指洪水经坝顶自由跌落或经短悬臂挑坎往下游挑射的过流型式。这种泄洪建筑物的优点是：①结构较简单，设计、施工较容易；②对坝体的应力影响较小；③一般水头不大（小于10m左右），启闭设备较轻且易于检修；④工程造价较低；⑤用表孔泄流时还可排漂；⑥对于调洪库容较小的水库，还可以通过超标准洪水，有利于工程安全。所以中、小型工程中多采用坝顶溢流。以贵州省1978年的统计资料[3]为例，已建或在建的151座拱坝中采用坝顶溢流的（包括部分坝面溢流，因二者无明显界限，难于确切统计）达127座，占84%。湖南省已建和在建的55座拱坝中，采用坝顶溢流的达82%。

这种布置型式的缺点：①堰上水头低时泄流能力小，溢流前缘较长，而当全线溢流时，又容易冲刷岸坡；②坝顶下

泄水流的起挑流速小、挑距近，容易冲刷坝脚，需对岸坡与坝脚采取一定的保护措施；③不能适应低水位的泄洪要求。因而坝顶溢流孔口常与底孔或隧洞配合运用。

因坝顶溢流多布置在河床中央，故采用河床式电站的可能性很小，厂房多为地下式或引水式。如广东的流溪河拱坝即采用坝顶溢流结合隧洞泄洪和引水式地下厂房(图1-1)。

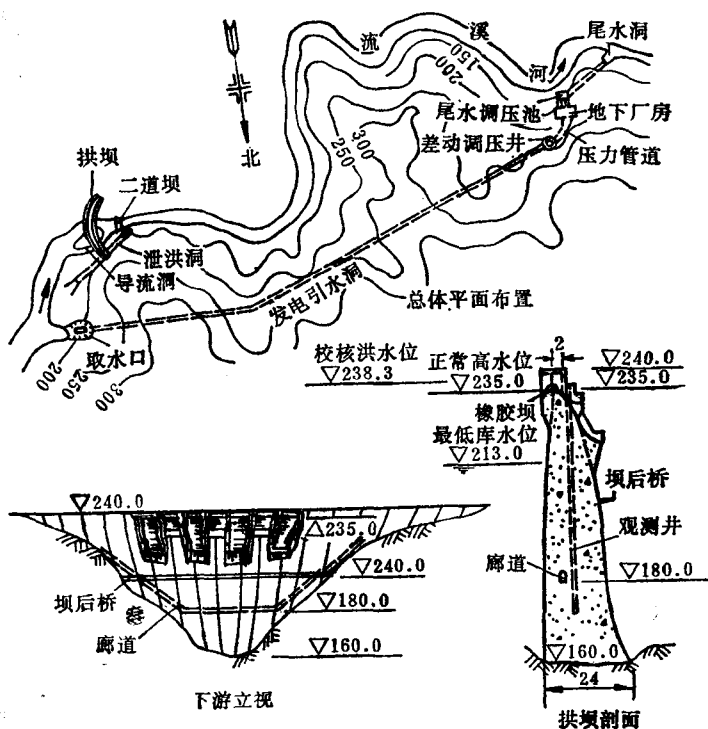


图 1-1 流溪河水电站工程示意图 (单位: m)

为了加大起挑流速和挑距,多将挑坎设计成短悬臂式,例如五十年代修建的流溪河拱坝、湖南的半江拱坝,七十年代修建的四川的长沙砌石拱坝、福建的闽东电站拱坝、浙江的里石门拱坝、雅溪拱坝等,都采用短悬臂挑坎。为分散水流并使它们在立面上相互冲击,流溪河拱坝采用了大差动挑坎(图1-1)。采用短悬臂挑坎的工程中以苏联的英古里拱坝最高,坝高272 m(图1-2)。

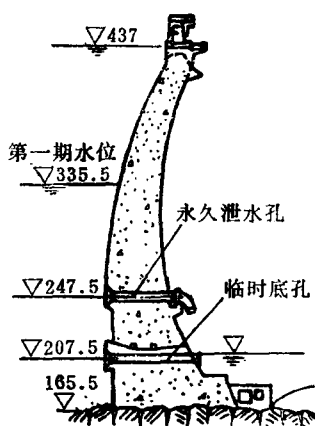


图 1-2 英古里拱坝断面
(单位: m)

当拱坝的倒悬度较大时,也有采用坝顶自由跌流的,如台湾省德基拱坝的5个表孔即采用跌流型式(图1-3)。法国的乌格朗(Vouglans)拱坝(图1-4)、美国的莫西罗克(Mossyrock)拱坝(图1-5)也都采用跌流型式。

坝顶溢流就前缘宽度而言,有部分溢流和全线溢流两种。在部分溢流布置中以拱坝中央部分溢流较常见,其优点是洪水易于归槽、流态好,同时可以避免下溢水舌直接冲刷岸坡,有利于坝肩的稳定。流溪河拱坝(图1-1)、里石门拱坝、半江拱坝等都是这种布置形式。

有的工程考虑到仅取中央部分溢流时缺口过深,单宽流量过于集中,也有采用全线溢流的,如法国五十年代修建的考斯克(Cousque)双曲拱坝(图1-6)。该坝高65.5m,坝顶溢流长度为175m,泄量为 $2700\text{m}^3/\text{s}$ 。为保护岸坡及坝

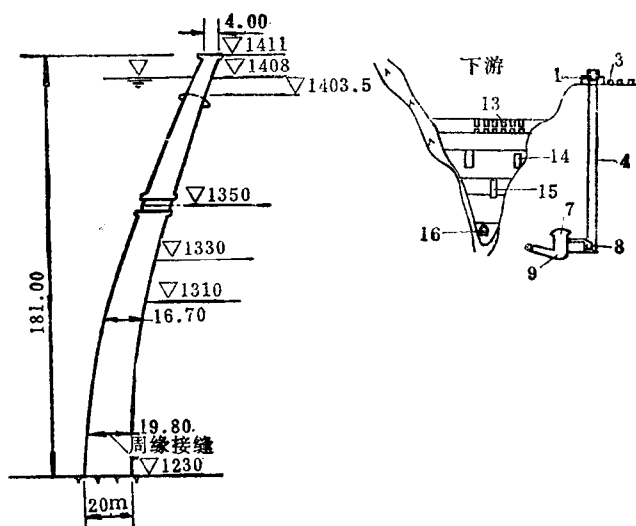


图 1-3 台湾省德基拱坝示意图 (单位: m)

1—管理建筑物; 3—变压器; 4—垂直竖井; 7—地下厂房; 8—电缆廊道; 9—导流和尾水洞; 13—坝顶溢洪道; 14—泄水孔; 15—放水孔; 16—临时孔口

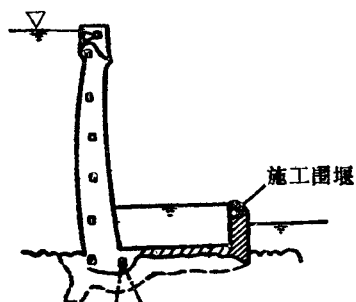


图 1-4 乌格朗拱坝消力池

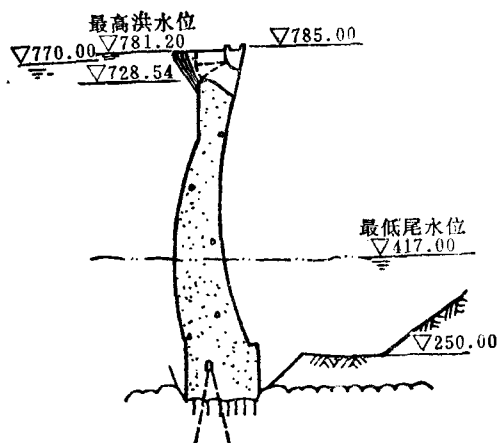


图 1-5 莫西罗克拱坝 (单位: m)

脚不受冲刷, 均做了护固, 岸坡上还设有导水墙^①。

坝顶溢流的拱坝一般将溢流堰布置在一个高程上, 也有将堰顶布置成台阶形的。如澳大利亚的戴维斯峡 (Devils Gats) 拱坝, 坝高 83.8m, 河床中央的堰顶高程比两侧高 1.5m。溢流堰下游两岸进行了护固, 做了导水墙 (图 1-7)^[2]。贵州省的大飞水砌石拱坝的溢流堰 (坝高 38.5m, 1971 年建成), 也采用了这种布置形式。其优点是小流量时可以减小起挑流量、避免贴流掏刷; 大流量时可以全线溢流, 同时使主流居中^[3]。

① 刘元岐, 高拱坝泄洪消能设计中的几个问题, 云南电力技术参考资料, 1978 年 8 月。

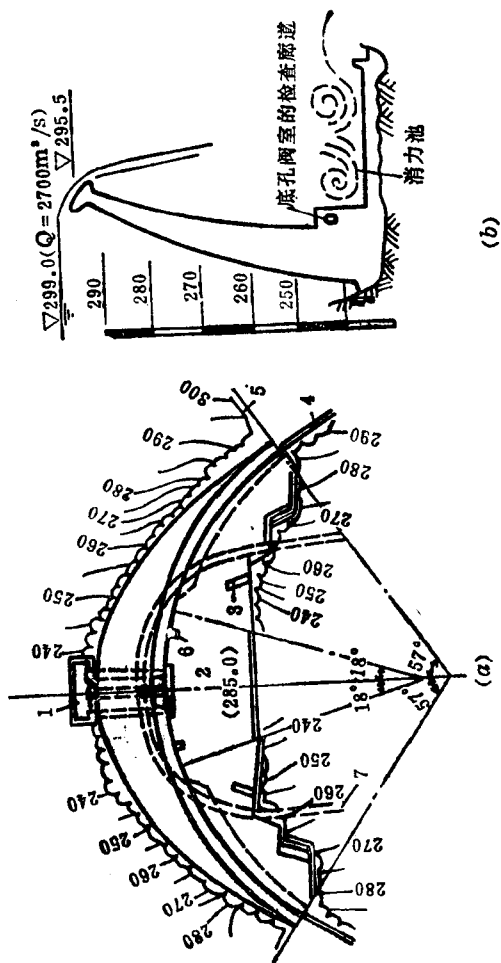


图 1-6 考斯克拱坝全线溢流布置图 (单位: m)

1—拦污栅; 2—消力池; 3—外导水墙; 4—岸墩; 5—平衡支墩; 6—分水隔墙; 7—底孔检查廊道

坝顶自由溢流的拱坝中，全线溢流的多不设控制闸门；中央部分溢流的工程中，有设控制闸门的，也有不设的。这主要取决于水库的调节性能、泄量大小、运用频繁的程度等。

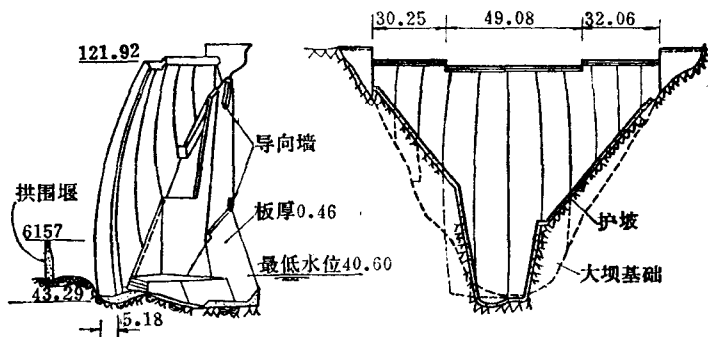


图 1-7 戴维斯峡拱坝 (单位: m)



图 1-8 考尔达乌德拱坝消力池

坝顶溢流的拱坝，由于水舌跌落较近、入射角大，对坝基的冲刷力大，所以一般采用跌流消力池，或在下游设二道坝抬高水位形成水垫消能。例如美国的莫西罗克拱坝（图 1-5）用下挖消力池的方法消能；美国的考尔达乌德（Colder Wood）拱坝在坝下设戽斗，并在下游修建二道坝形成水垫消能（图 1-8）；台湾省的德基拱坝（图 1-3）和法国的乌格朗拱坝（图 1-4）利用下游围堰与坝体形成跌流消力池消

能；日本的天濑（Amagase）拱坝（图1-9）在坝下做混凝土护坦，同时还设二道坝抬高水位，构成跌流消力池消能；流溪河拱坝、半江拱坝虽坝下未做护坦，但在下游一定距离内设二道坝抬高水位，形成水垫消能。

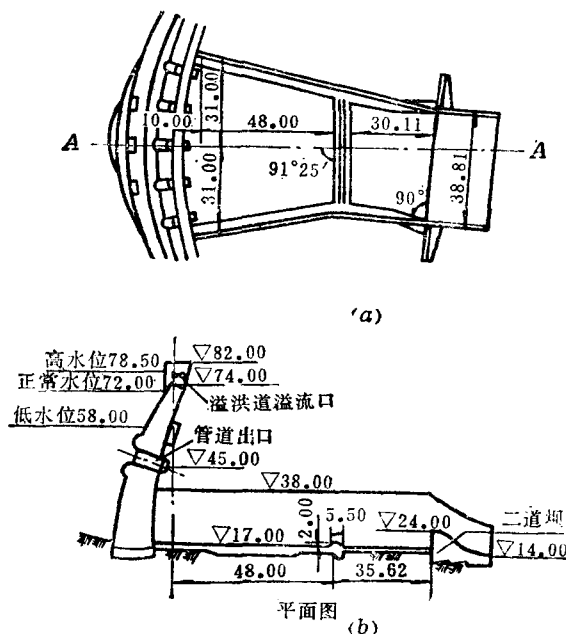


图 1-9 天濑坝泄洪工程和消力池（单位：m）
(a)平面图；(b)侧视图剖面A-A

当过堰单宽流量较小（一般不大于 $10\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ ），基岩较好或下游水垫较深时，也有不设消力池或不予护固的。但为保护坝脚不受掏刷，坝下以做适当护固为宜。例如湖南小龙潭拱坝，坝高36.2m，采用坝顶溢流，最大单宽流量 $15.5\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ ，基岩为碳质页岩，岩石抗压强度较高但较破