

高拱坝泄洪方式的分类及坝身泄水建筑物的设计水平

陈青生¹, 汪星良²

(1. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 西藏农牧学院水利电力工程系, 西藏 林芝 860000)

摘要:从建立高拱坝坝身泄洪建筑物优化数学模型的目的出发, 提出了高拱坝坝身泄洪方式的分类方法, 即以泄洪流量与水头的关系来划分表、中孔, 以孔口所处位置及其功能来划分中孔、深孔和底孔。通过对已有工程的资料分析, 指出了当前高拱坝坝身泄洪建筑物的设计水平, 如孔口的泄流量、水头、高度、宽度以及闸门的承载力等, 并提出了高拱坝泄洪表孔和中、深孔弧形闸门的合理宽高比的范围。

关键词:拱坝; 泄洪; 泄水建筑物; 泄水孔

中图分类号: TV642.4

文献标识码: A

文章编号: 1006-7647(2001)05-0017-03

20世纪50年代以来, 我国的坝工建设在防洪、灌溉、水电、航运以及供水事业的推动下, 取得了迅速的发展。在高坝中, 最具竞争力的坝型是拱坝和土石坝。根据世界上已建200m以上高坝的资料统计, 拱坝坝型占的比例为57%、土石坝为23%、重力坝为11%、土坝为6%、连拱坝为3%。我国近年来兴建和设计中的高于200m的高坝, 在经过多种坝型比较后, 大多数都选择了拱坝坝型, 如二滩、构皮滩、拉西瓦、小湾、溪洛渡等工程。

建设高拱坝所需的坝工技术涉及面广, 非常复杂, 大体上可将其分为坝体结构设计、坝肩岩体稳定分析和泄洪消能建筑物布置等三大方面, 其中泄洪消能建筑物是高拱坝枢纽中的重要组成部分。由于高拱坝在泄洪消能方面具有大流量、大泄洪总功率、大泄洪单宽功率和狭窄河谷的“三大一窄”以及其投资约占大坝土建工程总投资三分之一等特点, 因此高拱坝的泄洪消能问题可以说是高拱坝设计中的关键技术问题之一。如何对高拱坝进行泄洪和消能建筑物的布置, 如何解决泄洪建筑物的安全泄洪、进行下泄水流的充分消能以及减轻水流对下游河道的冲刷等, 都是水力设计中的重大科研课题。由于上述问题的重要性, 国家在“八五”、“九五”期间都将其列为科技攻关课题, 其中包括建立高拱坝泄洪消能建筑物布置的优化数学模型。

在建立高拱坝大流量泄洪建筑物布置的数学优化模型中要涉及拱坝坝身表、中、深孔泄洪方式的定义, 各类闸门宽高比以及当前闸门承受水压力的设计水平等。作为优化数学模型中的约束, 上述这些参数

必须要有明确的取值范围。本文即是以此为目的对拱坝坝身泄洪方式提出了定义; 并通过对已有工程资料分析, 提出了露顶式弧形闸门(表孔闸门)、淹没式弧形闸门(中、深孔闸门)的宽高比取值范围和承受水压力的设计水平, 以及当前各类孔口的泄洪水平。

1 高拱坝泄洪方式的分类

目前对混凝土拱坝的泄洪方式的分类方式较多, 其主要表现是在对中孔和深孔的定义以及滑雪道式溢洪道的归属等问题有不同的认识。许多设计研究者作了大量的分析研究工作, 提出了各种分类方法。文献[1]认为表孔是指开敞式坝顶溢流孔或带胸墙的浅孔以及滑雪道式溢洪道在坝顶上设置的泄水孔; 中孔是指位于坝高上半部分的泄水孔; 深孔是指位于坝高的下半部分的泄水孔; 底孔是指不参与高水位时的泄洪任务, 而承担排沙以及必要时的速降库水位等任务的泄水孔。文献[2]对各类泄洪建筑物的定义及适用条件描述为: 坝顶自由跌流的含义是布置在河床中间, 泄流量较小, 不论是否有闸门控制; 坝面溢流是指坝下游面是泄流面的一部分并下接挑流消能; 坝身孔口包含表孔、中孔和深孔, 表孔是指无或有胸墙的泄水孔, 中孔是指位于中部或中部偏上的泄水孔, 深孔是指位于死水位以上的坝体底部的泄水孔; 滑雪道式溢洪道是指溢洪道在拱坝下游面有用支墩支撑起来的“滑雪道”, 或在坝的侧面根据山体布置成滑雪道, 且下游出口水流采用挑流消能的泄洪建筑物; 岸边溢洪道是指溢洪道的开口不影响拱坝的整体性的泄洪建筑物。文献[3]也对溢洪道和孔口建筑物给出了定

义.1985 年我国制定的拱坝设计规范^[4]认为,表孔是指在设计或校核洪水下,不论是否设置闸门和胸墙,闸门全开时泄水流量与水头呈堰流出流规律的泄水孔;中孔是指孔口水流符合孔流出流规律且其位置位于坝身中部偏上的泄水孔。

总之,对拱坝泄洪方式的分类较多,其共同点可概述为:①考虑到泄水建筑物与坝体的相对位置关系,将泄洪方式划分为“坝体泄洪”和“岸边泄洪”两大基本类型;②根据进口水流的特点,将泄洪方式分为堰流和孔流两种形式。对“坝体泄洪”的泄水建筑物划分为“表孔”和“中孔”(或“深/底孔”);对“岸边泄洪”的泄洪洞则分为“浅式进水口”和“深式进水口”。一般认为中孔作为一种主要泄洪设施参与大坝泄洪;深孔则多在施工期参与导流或承担部分泄洪任务,在水库蓄水初期参与大坝泄洪,但在大坝正常运行期如工作水头很高的情况下则很少在设计水位下运行;底孔除在施工期和水库蓄水初期参与部分导流或泄洪任务外,主要目的是为大坝检修、紧急降低水库水位、冲沙等运行要求进行泄水。文献[1]明确规定,中孔位置位于坝高 1/2 以上,反之则为深孔或底孔。一般情况下底孔位于深孔之下。不同点主要反映在对中孔的定义及滑雪道式溢洪道的归属问题上。对于“中孔”,由于大多数文献没有给出明确的位置上的定义,因而易造成中孔与深孔在划分上的混淆。对于“滑雪道式溢洪道”,将其按进口是否位于坝身而划归了“坝体泄洪”或“岸边泄洪”方式。由此可见,对高拱坝泄洪方式的划分很难有一个明确的标准。为了便于对拱坝坝身泄洪建筑物的布置建立数学优化模型,本文综合上述分类方法,将坝身式泄洪建筑物划分为表孔、中孔、深孔和底孔。划分表孔的原则是,在闸门全开时其泄水流量满足 $q \propto H^{3/2}$ 的关系式,且其水舌落水点位于坝下消力塘内,而不具体细分为坝顶式、坝面式或滑雪道式。划分中孔与深孔的原则为,中孔和深孔都担负正常运行期的泄洪任务,位于坝高上半部分的为中孔,位于坝高下半部分且在死水位以上的为深孔。底孔只参与施工期导流及放空水库、排沙等任务,且位于水库死水位以下。无论是表孔、中孔、深孔和底孔,其出口水流的消能场所必须在坝后的消力塘内。本文对高拱坝泄洪方式的分类见图 1。

2 拱坝坝身泄水孔工程资料分析

2.1 坝身表孔资料及分析

2.1.1 当前拱坝坝身表孔的泄洪规模

高拱坝坝顶设置表孔,当泄洪量较大且坝型为

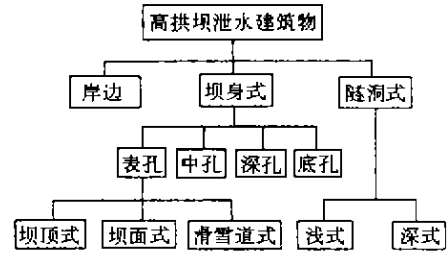


图 1 高拱坝泄洪方式分类

重力拱坝时,通常采用坝顶溢流、坝面泄流的布置;当泄洪流量较小且坝型为薄拱坝时,多采用坝顶跌流形式。坝顶跌流的落水点距坝址很近,入水角度大,冲刷力量较强,主要靠加设二道坝壅高坝下水位,形成水垫塘供跌流水舌进行水下淹没扩散消能。形成水垫塘的工程措施有多种,如美国摩西罗克拱坝在坝脚处开挖深池;美国卡尔德伍德坝设置二道坝,并在落水点处设戽斗;法国乌格朗拱坝利用施工围堰形成水垫塘等。重力拱坝中单孔泄量较大的有葡萄牙的皮科特和中国的构皮滩,分别为 $2600 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $2408 \text{ m}^3/\text{s}$ 。薄拱坝中,美国 1968 年建成的摩西罗克坝(高 185 m),坝顶中部设置了 4 孔 $13 \text{ m} \times 15.2 \text{ m}$ 的跌流表孔,泄洪流量 $7800 \text{ m}^3/\text{s}$,单孔泄流量为 $1950 \text{ m}^3/\text{s}$,单宽流量为 $150 \text{ m}^2/\text{s}$,是当前表孔泄洪单宽流量最大的薄拱坝工程^[5]。闸门的规模同科学技术的发展水平密切相关,闸门的面积愈大,作用其上的总水压力愈大,要求的启闭机容量亦愈大,由此带来的金属结构的力学问题、加工工艺问题也愈复杂。根据文献[6],目前世界已建最高水平的表孔闸门为前苏联的布列亚闸门,其闸门尺寸为 $63 \text{ m} \times 17.5 \text{ m}$,总水压力为 79 MN。当前高拱坝采用弧形闸门控制的表孔规模见表 1。

表 1 采用弧形门的拱坝坝身孔口规模

类 型	下泄总流量 $/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	下游单宽流量 $/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	闸门承载力 $/\text{MN}$	最大 宽度/m	最大 高度/m
表 孔	2600	150	79	63	23
中、深孔	2030	302	93	13	12.8

2.1.2 表孔闸门合理宽高比的统计

根据有关资料^①,本文统计了 175 例表孔弧形闸门的水头与宽高比的关系,得出拟合曲线方程(1)和上、下包络线方程(2)、(3),如图 2 所示。符合目前设计水平和技术工艺水平的表孔闸门的合理宽高比范围应在上下包络线之间。

$$b/h = 3.38896H^{-0.472491} \quad (1)$$

$$b/h = 5.36491H^{-0.479139} \quad (2)$$

$$b/h = 1.26963H^{-0.350128} \quad (3)$$

①水利电力部水利水电规划设计院,水利水电工程闸门技术特性手册,1985。

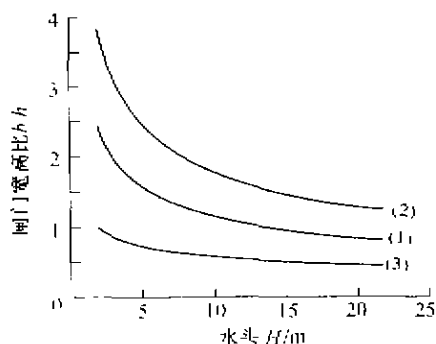


图2 坝顶表孔弧形闸门宽高比与水头关系

2.2 坝身中、深孔资料及分析

2.2.1 当前拱坝坝身中、深孔的泄洪规模

国外从 20 世纪 50 年代以来,修建了 90 多座 120 m 以上的高拱坝,其中双曲拱坝约占 79%。坝高最高的是前苏联的英古里双曲拱坝,高 272 m,但其泄洪流量却仅有 $2500 \text{ m}^3/\text{s}$;泄洪流量超过 $10000 \text{ m}^3/\text{s}$ 的有伊朗 1975 年建成的卡比尔双曲拱坝,莫桑比克 1974 年建成的卡·巴萨双曲拱坝及墨西哥 1964 年建成的埃诺维洛双曲拱坝等。其中卡·巴萨双曲拱坝高 163 m,在坝身上开设 8 孔 $6 \text{ m} \times 7.8 \text{ m}$ 的中孔,孔底以上水头为 96 m,上、下游最大水位差 101 m,单孔流量为 $1630 \text{ m}^3/\text{s}$,河面宽 80~120 m,这是当前坝身中孔泄洪的较高水平。中国的乌江东风双曲拱坝高 166 m,坝身设 3 孔 $6 \text{ m} \times 6.5 \text{ m}$ 的中孔,孔底以上水头 77.7 m,上、下游最大落差 112 m,单孔流量为 $1256 \text{ m}^3/\text{s}$,枯水期河面宽约 50 m^[7]。这代表了国内已建薄拱坝坝身泄水孔泄洪的较高水平。正在规划设计中的溪洛渡拱坝,坝高 283 m,单孔泄量 $1510 \text{ m}^3/\text{s}$,单宽流量达 $302 \text{ m}^3/\text{s}$,是世界最高水平。对于中、深孔闸门,闸门的工作水头和闸门的孔口面积是决定闸门规模及水平的两个主要因素。闸门的工作水头愈高,由高速水流引起的闸门问题(如空蚀、振动、启闭力的变化)或由闸门引起的高速水流问题(如空化、水翅等)也愈突出。同时,单位面积上的水压力同工作水头呈正比关系。根据文献[6],目前中深孔闸门的国际先进水平为工作水头 120~140 m,闸门面积 80~90 m²,总水压力 94~123 MN。最高规模的闸门为巴西依泰普导流洞平面闸门,其闸门尺寸为 $6.7 \text{ m} \times 22 \text{ m}$,工作水头为 140 m,总水压力为 202 MN。当前高拱坝采用弧形闸门的坝身中、深孔的较高规模可见表 1。

2.2.2 拱坝中、深孔闸门宽高比的统计

根据有关资料^[1],统计了 215 例中、深孔闸门的水头与闸门宽高比之间的关系,得出拟合曲线方程

(4)和上、下包络线方程(5)、(6),如图 3 所示。中、深、底孔闸门的合理宽高比应位于上下包络线之间。

$$b/h = 2.30803H^{-0.228832} \quad (4)$$

$$b/h = 4.18351H^{-0.257986} \quad (5)$$

$$b/h = 1.05649H^{-0.233665} \quad (6)$$

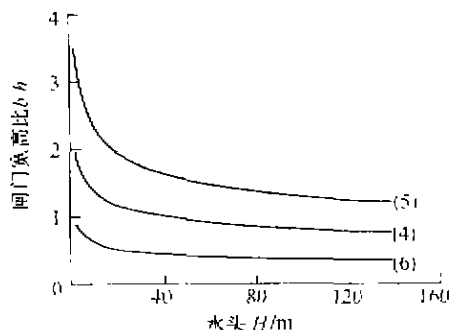


图3 中、深孔闸门宽高比与水头关系

3 结 语

本文总结了目前对拱坝泄洪方式的划分方法,鉴于目前对拱坝泄洪方式划分的主要争议在于滑雪道式溢洪道的归属问题及坝身中孔的高度定义问题上,本文提出了将落水点位于下游消力塘的滑雪道划归为表孔类泄洪方式;将中孔定义为 0.5 倍坝高以上且符合 $Q \sim H^{1/2}$ 关系的泄洪方式。分析了国内外拱坝坝身泄水孔的工程资料,阐述了各类孔口及其闸门的技术水平,根据 175 例表孔弧形闸门和 215 例中、深孔闸门的资料,统计了其水头与闸门宽高比的关系,得出了表孔和中、深孔闸门合理宽高比的取值范围。

参考文献:

- [1] 陈椿庭.高拱坝大流量泄洪工程实践[A].陈椿庭.小水力水力学及水文论文集[C].北京:水利电力出版社,1993. 230~243.
- [2] 艾克明.拱坝泄洪消能的水力设计和计算[M].北京:水利电力出版社,1987.3~28.
- [3] United States Department of the Interior Design of small dams [M].2nd Edition. Washington:United States Government Printing Office,1977.345~497.
- [4] SD145-85,混凝土拱坝设计规范[S].
- [5] 陈椿庭.峡谷高坝大流量泄洪布置综述[J].水利水电技术,1984,15(4):6~15.
- [6] 金泰荣.高坝闸门总体布置[M].北京:科学出版社,1994.2~4.
- [7] 章福仪,梁烈清,铁灵芝.峡谷河段高拱坝泄洪消能的研究[A].水利水电科学研究院.水利水电科学研究院科学研究论文集[C].北京:水利电力出版社,1987.1~13.

(收稿日期:2001-05-17 编辑:熊永斌)