

三峡工程泄水建筑物水力优化设计

戴会超^{1 2}, 王玲玲², 唐洪武²

(1. 中国长江三峡工程开发总公司, 湖北 宜昌 443002; 2. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 三峡大坝在运行期和施工导流期要求的泄水能力分别达 10 万 m^3/s 和 7 万 m^3/s , 大坝设有永久泄水深孔 23 个、表孔 22 个、导流底孔 22 个。大坝采用深孔、表孔、导流底孔 3 层孔口相间布置方式, 缩短了溢流前缘长度, 解决了枢纽泄洪难题。深孔的主要作用是宣泄千年一遇以下洪水, 同时还担负着三期导流及围堰发电期间渡汛泄水任务。深孔具有数量多、尺寸大、水头高、水位变幅大、运用时间长和操作频繁等特点, 其进口堰顶上游坝面及侧面采用 1/4 椭圆曲线, 堰面下游接 1:0.7 的斜坡段后再接 $R = 30\text{ m}$ 的反弧段。通过布置方案的论证和试验研究, 深孔选用短有压管接明渠泄槽跌坎布置方案, 底孔选用长有压管布置方案。

关键词: 三峡工程; 泄水建筑物; 水力优化设计

中图分类号: TV652 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1980(2006)04-0409-05

20 世纪 80 年代以来, 我国兴建了一系列大型水利枢纽工程。大流量泄洪消能问题一直是工程设计中的难题之一^[1]。常见的问题有 2 类: 大流量、深尾水、低佛氏数和大流量、窄河谷、高落差工况。三峡工程泄水建筑物属于第 2 种情况。

经综合比较, 三峡工程采用两岸坝后式厂房方案。根据坝址的地形、地质条件及长江洪水峰高量大的特点, 河床中部布置 483 m 泄水坝段, 分为 23 个坝段, 每个坝段长 21 m, 布置 23 个深孔和 22 个表孔。深孔设在坝段中部, 孔口尺寸 7 m × 9 m, 进口底高程 90 m; 表孔在 2 个坝段之间跨缝布置, 净宽 8 m, 堰顶高程 158 m。为满足三期施工导流的要求, 在表孔正下方跨缝布置 22 个导流底孔, 孔口尺寸 6 m × 8.5 m, 两边侧各 3 个底孔进口底高程 57 m, 其余底孔进口底高程 56 m。导流底孔在工程运行后期回填混凝土封堵^[2]。

三峡大坝按千年一遇设计, 设计流量为 9.88 万 m^3/s , 相应挡水位 175 m; 万年一遇校核, 校核流量 12.43 万 m^3/s , 相应挡水位 180.4 m。在防洪限制水位 145 m, 要求深孔泄流量为 5.67 万 m^3/s 。在 135 m 水位时, 深孔与导流底孔联合泄水能力达 7 万 m^3/s 。枢纽正常运行后, 深孔与表孔联合运用并考虑排漂孔、排沙孔和厂房机组过流后具有 10 万 m^3/s 以上的泄水能力。针对大坝水头高、泄水量大、排沙量多、3 层泄水孔运行条件复杂等特点, 本文研究了 3 层泄水孔口不同运行条件下的体型选择和体型抗空化及防泥沙磨蚀问题, 以及深孔与表孔联合泄水和深孔与底孔联合泄水时, 下游水力衔接及消能防冲等问题。

1 枢纽深孔设计与运用研究

23 个深孔是主要泄水建筑物, 千年一遇以下洪水主要由深孔宣泄。其正常运用库水位为 145.0 ~ 180.4 m, 相应水头为 55.0 ~ 90.4 m, 泄流能力应达 3.788 万 ~ 5.039 万 m^3/s 。初步设计采用有压短管接明流泄槽鼻坎挑流形式, 进口底高程 90 m, 有压段出口孔口尺寸 7 m × 9 m, 出口最大流速为 34.8 m/s, 泄槽最大流速近 40 m/s。

根据溢洪道设计规范, 流速超过 35 m/s, 应采用掺气减蚀措施, 故存在是否需要设掺气减蚀设施问题。在闸门设计方面, 水头超过 80 m, 宜采用偏心铰变形止水或液压伸缩式止水, 这 2 种止水形式均要求门座两侧突扩, 底部突跌。三峡深孔闸门设计水头 85 m, 略大于 80 m 分界点, 需结合水工掺气设施模型试验, 进行突扩门槽体型的试验研究, 在突跌型掺气和突扩突跌型掺气 2 种方案之间进行选择^[3-4]。

方案明流段边墙厚度 4.25 m,突扩方案明流段边墙厚度 3.75 m.由于弧形工作门推力大,边墙厚度小,2 种方案的弧门支承均需采用预应力结构,即预应力大梁和预应力闸墩.

深孔长管不突扩方案采用长压力管接短明流泄槽形式,坝体内为有压段,长 75 m,后接 35 m 明流泄槽.水力学模型试验成果分析表明,与深孔有压短管不突扩方案相比没有质的差别.长管不突扩方案明流斜坡段也存在流速大于 35 m/s 和水流空化数较低的问题,但它的明流段较短,只要控制好施工质量,发生水流空化的可能性较小.

深孔长管突扩方案采用反弧及鼻坎均布置在有压段而无明流泄槽的形式.根据弧门门铰支承梁布置的需要,有压段长度为 93 m,挑流鼻坎位置比短管方案向上游移动了 17 m,鼻坎末端接 1:1 斜坡,以保证挑流水舌下部充分通气,出口下游两侧墙各突扩 0.5 m.

深孔长管方案在布置、结构、水力学和施工等方面,技术上是可行的,与短管方案相比有利有弊.在结构方面,长管方案将弧门移至坝面外,坝体结构简化,但弧门支承结构复杂,难度大,运行时存在振动、雾化等问题;在水力学方面,弧门采用突扩止水,长管方案有利,但下游冲刷情况稍有恶化;在施工进度方面,长管方案稍有利;在经济方面,长管方案钢衬和钢筋量增加较多,施工难度加大,造价增加较多.综合分析 2 种方案后采用了短管方案.

1.3 深孔采用方案——有压短管跌坎型掺气方案模型试验成果

短有压管和长有压管 2 种方案在技术上都是可行的,从设计、施工、水力学和运行条件诸多方面的综合比较来看,短有压管方案更为可靠,相对优于长有压管方案.因此,深孔采用了短有压管跌坎型掺气方案,体型如图 1 所示.对该体型进行的模型试验表明:(a)泄流能力满足设计要求,流量系数为 0.88~0.89.(b)在上游水位 135.0~180.4 m 之间运行时,能形成稳定的底空腔,相应的空腔长度为 17~56 m.(c)深孔泄水,上游水位为 135.0~180.4 m 时,通气孔时均风速在 15~67 m/s 之间变化,百年洪水位 166.9 m 时通气孔时均风速小于 56 m/s,基本满足原型时均风速一般不超过 60 m/s 的要求.闸室通风孔时均风速较小,在 7~16 m/s 之间变化.(d)在各种运行水位下,底空腔下游的泄槽段与反弧段上游底部,模型掺气浓度为 1%~5%,掺气设施可对底板提供有效保护.(e)时均压强分布,进口段顶板压强分布平顺,门井段压强梯度较大,施工时应对应门井下游侧进行圆化处理,有压段底板压强分布平顺,水舌冲击点位置与压强随着上游水位的变化而变化,在跌坎方案中,侧墙的时均压强分布与底板压强分布特征相似.(f)底板水舌冲击区的脉动压强,在上游水位 135.0~166.9 m 之间泄水时,其均方根值为 $(1.0\sim3.4)\times9.8\text{ kPa}$,优势频率主要集中在 6 Hz 以内的低频范围内.(g)明流段跌坎下游的底板,部分被空腔覆盖,其后水流空化数在 0.3 以上,满足最小水流空化数大于 0.2 的规范要求^[5],又有掺气保护,在保证混凝土施工质量和过流面平整度要求前提下,发生空化与空蚀破坏的可能性较小.

2 枢纽表孔及底孔设计与应用研究

2.1 表孔

表孔是主要泄水建筑物之一,但运用机遇较少,百年一遇以上洪水才参与泄水.可利用表孔排泄漂浮物,汛末蓄水至高水位时,也可利用部分表孔泄少量洪水.

22 个表孔每孔净宽 8 m,堰顶在坝轴线下游 3.6 m,堰顶高程 158 m.堰顶上游坝面采用 1/4 椭圆曲线,曲线方程为 $x^2/8.4^2+(4.8-y)^2/4.8^2=1$.表孔上游坝面在坝轴线上游 4.8 m,与底孔反钩叠梁检修门之间留有 0.2 m 的间隙,防止反钩门止水损坏.进口侧曲线受深孔反钩叠梁门制约,采用 $x^2/3.2^2+y^2/0.8^2=1$ 的 1/4 椭圆曲线.堰顶下游 WES 曲线的定型设计水头取 22 m,曲线方程为 $x^{1.85}=2\times22^{0.85}y$.堰面下游先接 1:0.7 的斜坡段,再接 $R=30\text{ m}$ 的反弧段.由于导流底孔长管方案工作门及启闭机室布置的需要,挑流鼻坎末端桩号上移至 20+75.7 m 处,鼻坎高程抬高至 110 m,挑角减小至 10°.

表孔最高工作水头达 25 m,因此门槽体型与布置是设计和模型试验研究的重点.模型试验研究表明,缩短两道门槽的布置间距,有利于消除和减弱门槽区的水流空化现象^[7].经分析取两道门槽间距为 5.8 m,其体型尺寸相同,门槽宽 1.4 m,深 0.85 m,下游侧错距 0.11 m,角隅圆弧半径 0.1 m,接 1:12 斜坡至原隔墩边墙.对表孔体型尺寸进行了减压模型试验.结果表明:下游门槽在设计水位和校核水位下运行时均发生水流空化,而上游门槽只在校核洪水位运行时发生水流空化.在下游门槽前设小折流器(坎高 9 cm,长 30 cm),可避免在

两门槽区发生空化水流。

2.2 底孔

导流底孔是明渠截流施工中唯一的分流泄洪通道,其泄洪能力的大小直接影响着截流落差,而导流底孔的布置是影响其泄洪能力的重要因素。导流底孔还承担了围堰挡水发电期泄水和调节库水位的特殊任务。因此,合理的底孔体型和良好的泄水能力对底孔显得极为重要。底孔的体型研究主要是比较弧门在坝内的短有压管方案和弧门在坝后的长有压管方案的可行性。经比较,采用长有压管方案。

底孔长有压管方案,从进口至桩号 $20+77\text{ m}$ 为有压段,出口设弧形工作门,其后至坝下游面 $20+105\text{ m}$ 为明流反弧段。通过物理模型试验对防止沙石磨损的体型进行了优化研究,并获得了优化体型沿程压力分布、水流空化特性和水力学试验结果。(a)压力分布与水流空化特性。常压断面模型试验结果表明:事故门槽前的水流空化数 $\sigma=1.77$,远大于该门槽体型的初生空化数;上游水位 135.0 m ,漩滚被推出鼻坎外,明流段最小水流空化数仍达 0.35 。这说明底孔长有压管体型抗空化特性较好,发生空化的可能性较小。(b)防止围堰残碴与泥沙磨损的研究。底孔运行时间仅 3 a ,上游的推移质还达不到坝址。粗颗粒磨损主要来源于围堰拆余部分。上游高水位时可能有 $5\sim 15\text{ cm}$ 的砾石进入导流底孔孔口并可能对溢流表面造成磨损。为确保底孔安全运行,在围堰顶及下游侧用块石保护堰面,保护层块石当量粒径大于 0.4 m ,厚度不小于 1 m ;在坝前预挖 40 m 宽的拦沙槽,底部与坝基同高程,总拦沙容积超过 60 万 m^3 ;严格控制底孔施工质量,限制放样误差和不平整度,以减少磨损破坏,过流面采用抗冲耐磨材料,进口处设置检修反钩闸门。

3 泄水建筑物调度研究

枢纽泄水调度包括调度运用方式和闸门开启次序。长江汛期洪水流量大、泄洪设施多、调度运行复杂,对于不同枢纽运行期(水库蓄水期、围堰挡水发电期、枢纽初期运行期、枢纽永久运行期),如何针对不同库水位和洪水流量对泄洪设施的调度运用方式和闸门开启次序进行合理优化运用,以保证枢纽建筑物及下游设施的安全和稳定,是三峡工程枢纽运行急需解决的问题。

除主要泄水建筑物外,泄洪坝段左右侧排漂孔亦具有泄水作用。同时,随着左、右电厂机组及船闸^[8]的投入使用,也能分泄部分洪水。按设计进度安排,2002年11月~2003年5月导截流期间,由导流底孔泄洪;2003年6月~2006年9月为围堰挡水发电期,由深孔单独运用和深孔与底孔联合运用泄洪;2006年10月~2007年9月三峡坝体临时挡水,由深孔泄洪;2007年10月~2010年9月三峡枢纽进入初期运行期,主要由深孔和表孔承担泄洪任务;2010年10月起,三峡工程进入永久运行期,左、右电厂共26台机组全部投入运用。

4 结 语

三峡水利枢纽泄洪建筑物泄水流量大、孔口多、水头高、水位变幅大、运用条件复杂,需考虑排沙、排漂要求。采用以深孔泄水为主、表孔与深孔平面上相间布置、跨缝设置导流底孔的方案,总体布置极为紧凑且可节省工程量。

深孔是三峡枢纽的主要泄水排沙建筑物,运行频繁且明槽流速达 35 m/s ,运行水头为 $55\sim 70\text{ m}$,考虑过流流态和闸门止水2种因素,采取了突跌掺气设施和常规止水方案。为了减少泥沙冲磨并保证通气,选择了高度较小(1.5 m)的跌坎和直径较大(1.4 m)的通气孔,短有压管接明渠泄槽跌坎掺气形式。

三峡工程三期导流流量大,导流底孔任务艰巨。采用长有压管方案,调整孔口高度,使有压段长度增加,明流泄槽相应缩短,从而提高了底孔抗磨、抗空化空蚀性能,为安全运行提供了可靠保证。

参考文献:

- [1] 张超然,戴会超.三峡工程重大技术问题的研究[J].水利水电技术,1998(1):6-11.
- [2] 戴会超.三峡工程大江截流三维施工仿真研究[J].科技导报,1998(8):45-47.
- [3] 张超然,戴会超.三峡水利枢纽工程建设概况和若干关键技术问题[J].水力发电,1998(1):16-19.
- [4] 倪汉根,陈霞.凹槽中的漩滚及初生空化数的估算[J].水利学报,2000(2):16-21.
- [5] 杨志明,丁宇健.关于初生空化试验技术的规范[J].科学技术与工程,2003(3):222-223.

[6] DAI Hui-chao. The applications and study of numerical simulation of turbulence flow with free surface in hydraulic spillway structure[J].
Journal of Hydrodynamics Ser B ,1997(4) :54-59.
[7] 郭炎 ,倪汉根. 旋流竖井溢洪道的水流特性研究[J]. 水动力学研究与进展 ,1995(4) :146-154.
[8] 邓浩 ,刘继广. 三峡永久船闸抽水调试期水力学原型观测[J]. 长江科学院院报 ,2004(4) :7-10.

Hydraulic optimal design for flood discharge structures
in Three-Gorges Project

DAI Hui-chao^{1, 2} , WANG Ling-ling² , TANG Hong-wu²

(1 China Yangtze River Three Gorges Project Development Corporation , Yichang , 443002 , China ;

2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract :It is required that the flood discharge capacity of the Three-Gorges Dam should reach 100 000 m³/s and 70 000 m³/s in the operation period and construction period , respectively. The pattern of interlaced arrangement of 23 permanent deep flood discharge holes , 22 surface holes and 22 temporary base diversion holes shortens the length of overflowing , and overcomes the difficulties in flood discharge of the project. With the characteristics of large number , large dimension , high water head , large variation range of water level , and long period and high frequency of operation , deep holes are the main flood discharge structure , especially for floods with intervals less than 1 000 years. Meanwhile , they undertake the third stage water diversion and flood control to ensure the safety of cofferdam during power generation in flood seasons. By experimental study of 4 different schemes for deep hole arrangement , the layout scheme of short pressurized conduit connected with open discharge channel was selected in the Three-Gorges Project(TGP) , with the quarter ellipse curves adopted at upstream dam surface of weir crest and intake side of surface holes , and downstream weir surface connected with a slope of 1:0.7 and further an ogee spillway for $R = 30\text{m}$. By experimental study and analysis of the short pressurized conduit and long pressurized conduit layout schemes for base diversion holes , the scheme of long pressurized conduits is finally adopted.

Key words :Three-Gorges Project(TGP) ; flood discharge structure ; hydraulic optimization design