

混凝土重力坝实测坝基渗流性态分析

许雷^{1,2}, 曾超², 刘慧²

(1. 国家能源局大坝安全监察中心, 浙江 杭州, 311122;

2. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州, 311122)

摘 要: 坝基扬压力和渗流量是混凝土重力坝坝基渗流性态最直观反映。为了总结运行期重力坝坝基扬压力和渗流量的一般性规律, 对我国电力行业主要混凝土重力坝实测资料进行分析研究。研究表明: 坝基局部承压系数超过设计值是比较常见的现象, 但经复核计算, 由于设计时安全裕度较大, 坝基抗滑稳定安全性仍能满足规范要求, 正常情况下坝基渗流量不大于 5.0 L/s, 不同工程坝基渗流量与地质条件、渗控效果、地震等因素密切相关, 但与坝高、坝顶长度之间的相关性不明显。研究成果可为混凝土重力坝监测资料分析及坝基渗流安全性评价提供一定参考。

关键词: 坝基扬压力; 混凝土重力坝; 渗流; 监测资料分析

Title: Analysis on foundation seepage behavior of concrete gravity dam// by XU Lei, ZENG Chao and LIU Hui// Large Dam Safety Supervision Center, National Energy Administration

Abstract: The uplift pressure and seepage volume are the most intuitive reflection of the foundation seepage behavior of concrete gravity dam. To get the general variation of the foundation uplift pressure and seepage volume of the gravity dam during operation period, the monitoring data of the main concrete gravity dams in domestic power industry are analyzed. The results show that it is a common phenomenon that the uplift pressure coefficient of partial foundation of the gravity dam exceeds the design value. However, due to the large safety margin in design, the anti-sliding stability of dam foundation could still meet the specification requirements in review and calculation. Under normal conditions, the foundation seepage volume of gravity dam is not greater than 5.0 L/s. The seepage flow of dam foundation of different projects is closely related to geological conditions, seepage control effect and earthquake, but has a weak correlation with dam height or dam crest length. The study results could provide some reference for monitoring data analysis and seepage safety evaluation of concrete gravity dams.

Key words: foundation uplift pressure; concrete gravity dam; seepage; monitoring data analysis

中图分类号: TV698.1

文献标志码: B

文章编号: 1671-1092(2025)01-0042-05

0 引言

截至 2024 年 12 月, 在国家能源局大坝安全监察中心(以下简称大坝中心)注册或备案的水电站大坝共有 693 座, 其中混凝土重力坝约占总数的 59%, 其安全运行性态是国家监管部门关注的重点。在混凝土重力坝运行过程中, 坝基、坝体、大坝接缝、裂隙及筑坝材料的微小变化都将直接影响坝基渗流性态, 因此坝基渗流监测结果是重力坝运行性态的综合反映, 也是进行大坝安全评价的重要依据。

混凝土重力坝坝基渗流性态主要通过坝基扬压力和渗流量等监测结果反映。针对运行期坝基扬压力和渗流量的变化规律, 国内外学者均进行过一定的研究, 如邢林生等^[1-3]根据多座混凝土重力坝的实测资料, 分析总结了坝基扬压力和渗流量的一般变化规律、分布规律及尾水对坝基扬压力大小的影响, 对重力坝的设计提出了建设性意见, 其余研究大多仅限于单座大坝坝基渗流性态的影响机理分析、异常成因分析及监控指标设定方法等方面^[4-6], 缺少对多座大坝坝基渗流性态的归纳总结和研究分析, 尤其是刚投入运行不久的高混凝土重力

坝,如光照、龙滩、官地等200 m级重力坝。因此,调研国内已投入运行的重力坝实测坝基扬压力和渗流量并进行归纳、分析和研究,能够更好地掌握混凝土重力坝的坝基渗流性态,且具有重要的安全监管价值和工程实践意义。

1 坝基防渗工程设计

防渗帷幕和排水是在坝基渗流控制中经常采用的工程措施^[8-9],坝基帷幕灌浆可以延长渗径,减小渗透流量;坝基排水系统能及时排除坝基渗水,消减渗透压力,两者在渗流控制中发挥着不同的作用^[7]。统计国内21座坝高超过90 m的混凝土重力坝坝基主要渗流控制措施发现,除安砂混凝土空腹重力坝外,其余工程渗控措施设计均采取了堵(帷幕)、排(排水)相结合的原则,从目前运行性态来看,这些工程坝基渗流性态基本正常,表明防渗帷幕和排水幕对降低基础渗透压力和减小渗流量发挥了重要作用。安砂大坝的渗控措施主要为防渗墙下接帷幕灌浆,原因是坝基石英砂岩内有大量千枚岩和糜棱化千枚岩软弱夹层,本身渗透系数不大,但两侧有风化破碎的石英砂岩接触带,是良好的渗水通道,而软弱夹层层次多、埋藏深、分布广,不能逐层挖除,在高压渗水作用下性态容易恶化,故不设排水系统。多年运行表明,坝基防渗系统降压效果显著,未出现夹层恶化现象。渗控工程为地下隐蔽工程,施工过程中往往不能完全达到设计要求,同时坝基岩体裂隙渗流复杂,坝基渗控工程设计尚难以做到精确的计算,但从工程实践经验来说,采用规范推荐的“前堵后排”防渗原则可以保证坝基渗流安全。

2 坝基扬压力分析研究

2.1 坝基渗压系数

在工程设计阶段,采用假定坝基排水孔处渗压系数或者扬压力强度系数来表征渗控系统的防渗效果,运行期坝基扬压力绝对量值没有太大的工程意义,只有将坝基扬压力折算为渗压系数或者扬压力强度系数才能判断扬压力实测值是否超过设计标准。统计国内20座混凝土重力坝运行期坝基渗

压系数情况发现,仅有龙滩大坝的实测扬压力强度系数和残余扬压力强度系数均小于设计采用值,其余19座大坝均有部分测点渗压系数或者扬压力强度系数超过设计值。各工程渗压系数超限原因不尽相同,其中光照、棉花滩和古田溪一级大坝部分坝段渗压系数超限主要是因为防渗帷幕相对薄弱或者帷幕的防渗性能随着时间的推移逐渐减弱;大朝山、枫树坝、盐锅峡和富春江大坝渗压系数超限的主要原因是坝基存在断层或者构造裂隙、原生裂隙,从而导致基础存在渗漏通道;刘家峡大坝部分测孔距离帷幕太近,只有1 m,受排水孔降压的影响不明显,导致渗压系数偏高。一般情况,帷幕后测压管设在排水孔中心线上,距离灌浆帷幕2~3 m,能够反映排水孔降压后的坝基扬压力,也能与设计渗压系数假定位置保持一致。另外,最大闸高27.5 m的城东大坝12号坝段UP4-1测压管处渗压系数常年在0.9左右,超过设计采用值0.6,该测孔扬压水位与上游水位无明显相关性,且未发生淤堵,主要原因是石膏含量较高的泥质粉砂岩在水的腐蚀下产生融通的通道,测压管与地下承压水相连通。

对于运行期坝基渗压系数或扬压力强度系数超过设计值的坝段,一般需根据实测坝基扬压力进行抗滑稳定复核。统计6座大坝部分坝段抗滑稳定复核结果见表1。由表1可见,6座大坝渗压系数最大的坝段坝基渗压系数在0.33~0.65,由于设计阶段大坝坝基抗滑稳定安全系数一般均有较大的富裕度,复核计算结果表明各大坝坝基抗滑稳定安全性均能满足规范要求。坝基渗压系数超限会导致大坝抗滑稳定安全系数降低,表1所列6座大坝的坝基渗压系数超过设计值的65%~225%,坝基抗滑稳定系数会降低0.1%~29.1%,但渗压系数超限比例与安全系数降低比例并无明显的相关性。有些工程渗压系数超限较多,但尚不会引起大坝抗滑稳定安全系数的显著降低,因为坝基抗滑稳定安全性除了与坝基扬压力有关,还与坝体的体型、坝高、受力情况等众多因素有关,因此,当实测坝基渗压系数超过设计取值时,不能简单地利用线性关系判断运行期大坝坝基抗滑稳定安全性。

许多工程通过观测数据计算得出的坝基渗压系数均有大致相同的变化规律,即较高库水位时的扬压力系数往往小于较低库水位时的渗压系数,这与坝基扬压水位变化滞后于库水位变化有关。这

表1 国内6座混凝土重力坝坝基渗压系数与抗滑稳定安全系数关系

Table 1 Relationship between foundation seepage coefficient and anti-sliding stability safety factor of the six concrete gravity dams in China

坝名	复核坝段	设计 渗压系数	实测 渗压系数	渗压系数 升高比例	最不利工况	设计 安全系数	复核 安全系数	安全系数 降低比例
光照	7号坝段	0.2	0.48	140%	正常蓄水位	1.36	1.01	25.7%
索风营	右岸溢流坝段	0.2	0.33	65%	正常蓄水位	1.04	1.03	0.1%
棉花滩	3号坝段	0.3	0.58	93%	正常蓄水位	1.41	1.28	9.2%
黄龙滩	14号坝段	0.25	0.60	140%	设计洪水	1.19	1.06	10.9%
龚嘴	14号坝段	0.2	0.65	225%	正常蓄水位	4.95	4.71	4.8%
古田溪一级	4号坝段	0.25	0.42	68%	校核洪水位	7.21	5.11	29.1%

注:光照、索风营和棉花滩大坝按照NB/T 35026—2014《混凝土重力坝设计规范》进行抗滑稳定计算,安全系数取为结构抗力/作用效应;黄龙滩大坝按照SL 319—2018《混凝土重力坝设计规范》中的抗剪强度公式进行抗滑稳定计算;龚嘴和古田溪一级大坝按照SL 319—2018《混凝土重力坝设计规范》中的抗剪断强度公式进行抗滑稳定计算。

一现象说明,大坝个别部位在某些时段虽然实测渗压系数超限,但对应库水位较低,此时不属于影响坝基抗滑稳定安全的控制工况,因而坝基渗压系数短时超限一般不会对大坝的安全运行产生实质性的不利影响。

2.2 坝基扬压力变化和分布规律

运行期坝基扬压力与上游水位变化呈正相关关系,库水温度对坝基扬压力也有一定影响,尤其是上游水位较为恒定的低坝。

部分大坝坝基扬压力存在时效变化,有的是因为坝前泥沙淤积或渗流通道被慢慢堵塞引起测点扬压力呈趋势性缓慢下降,但也不时有渗流通道被打开又被堵塞的情况,导致扬压力出现时效变化。

地震工况下,坝基扬压水位可能出现显著的上升或下降,随着时间的推移,坝基扬压水位逐渐恢复至震前水平,表明地震对坝基扬压力的影响在较大程度上具有可恢复性,见图1。

沿上下游方向,帷幕前坝基扬压水位接近上游水位;帷幕后扬压力小,且离帷幕越远,坝基扬压力越小。帷幕后沿坝轴线方向,扬压水头通常是中央河床坝段较高,两岸较低;扬压水位一般是两岸高,中央河床较低。但坝基帷幕灌浆、排水幕施工质量、坝基构造裂隙分布、坝基排水畅通情况及两岸地下水分布均对坝基扬压力存在影响,因此坝基扬压水头并不一定严格按照“两岸小,河床大”的分布方式。

3 坝基渗流量分析研究

大坝在上下游水位差(水头)的作用下,坝基会出现渗流现象,渗流现象对大坝造成的危害主要有两个方面:一方面会使一部分水量从坝基渗向下游,造成一定的水量损失,这在缺水地区和喀斯特地貌地区尤为重要;另一方面渗流会给坝基结构稳定和渗透稳定造成不利影响,甚至有可能引起大坝的失事和损坏。在渗流处于稳定状态时,渗流量一般与水头保持稳定的正相关关系,在同样水头情况下,渗流量的显著增加和减少都意味着渗流稳定的破坏。渗流量显著增加有可能发生管涌或集中渗流通道,渗流量显著减小则可能是排水通道堵塞的反映。因此,混凝土重力坝坝基渗流量的变化情况是评判大坝渗流性态的重要依据。

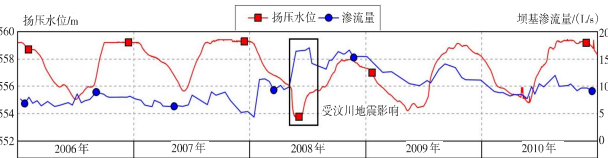


图1 宝珠寺大坝坝基扬压力和渗流量典型测点测值过程线
Fig. 1 Measured foundation uplift pressure and seepage volume of Baozhushi dam at a typical measuring point

3.1 渗流量量值分析

统计国内52座混凝土重力坝坝基渗流量特征值发现,各混凝土重力坝运行期坝基渗流量最大值在0.04~21.5 L/s,多年平均值在0.02~6.53 L/s。除宝珠寺大坝(21.5 L/s)、戈兰滩大坝(16.42 L/s)、五强溪大坝(14.36 L/s)外,其余大坝坝基渗流量最大值均小于5.0 L/s。宝珠寺大坝坝基渗流量偏大主要是由“5·12”地震引起的,同时其坝基渗流量也包含了右岸岸坡排水系统渗流量;戈兰滩大坝坝基渗流量偏大主要因为6号坝段坝基存在明显地质缺陷,经补强灌浆后渗流量明显降低,维持在9 L/s左右,仍大于同类工程,这与其防渗标准(3 Lu)偏低也存在一定相关性;五强溪大坝坝基渗流量偏大主要是由下游水渗漏进坝趾排水和副排水廊道引起,趾排和副排廊道渗流量占坝基总渗流量的60%以上,主排水廊道渗流量基本不超过5 L/s。

不少水工人员会利用坝高和坝顶长度等特征参数进行工程类比得到重力坝坝基渗流量的大小。为了探明坝基渗流量与坝高、坝顶长度之间的相关性,根据实测数据绘制坝基渗流量与坝高、坝顶长度相关图,见图2和图3。由图可见,各混凝土重力坝坝基渗流量大小不一,以坝高、坝顶长度为自变量,采用多元回归拟合坝基渗流量数据,复相关系数仅为0.2左右,由此说明不同工程之间坝基

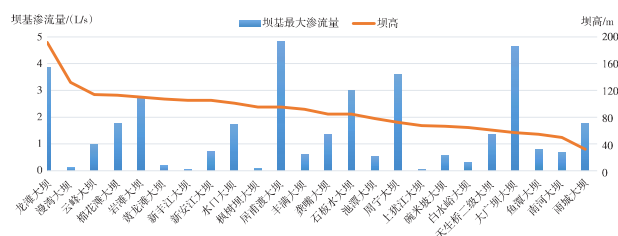


图2 国内部分混凝土重力坝坝基渗流量与坝高相关图

Fig. 2 Correlation between foundation seepage volume and dam height of some concrete gravity dams in China

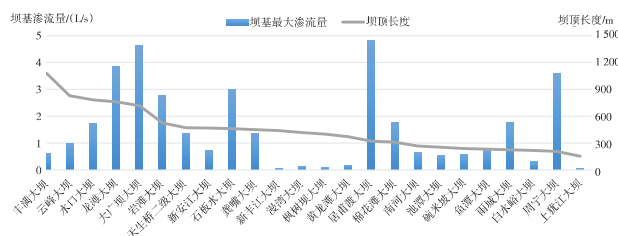


图3 国内部分混凝土重力坝坝基渗流量与坝顶长度相关图

Fig. 3 Correlation between foundation seepage volume and dam crest length of some concrete gravity dams in China

渗流量与坝高、坝顶长度之间的关系无明显可比性。从水工结构专业角度来看,坝地质构造、帷幕灌浆质量、上游水位等因素对坝基渗流量的影响更为明显。

3.2 渗流量变化和分布规律

坝基渗流现象是在上下游水头差的影响下产生的,因此坝基渗流量受库水位变化的影响较大,两者呈正相关,如图4所示。降雨对岸坡坝段的坝基渗流量有一定影响,对河床坝段坝基渗流量的影响不明显。外界气温主要通过水温对坝基渗流量起作用,随着水温上升,渗流通道因热胀导致渗流量减小;随着水温下降,渗流量增大。由于水温变化滞后于气温变化,因此渗流量变化也滞后于气温变化,对于高坝,滞后可达4~6个月。

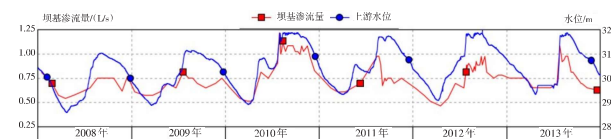


图4 云峰大坝坝基渗流量与上游水位相关图

Fig. 4 Correlation between foundation seepage volume and upstream water level of Yunfeng dam

坝基渗流量通常存在时效变化^[10]。当上游泥沙逐渐淤积或裂隙被慢慢堵塞促使帷幕防渗能力增强,坝基的渗流量将逐渐下降;当坝体或坝基的渗流通道有所扩展时,渗流量将趋向增大;当渗流通道发生时通时堵的情况,相应部位的渗流量将时大时小。这些时效变化都与渗流通道畅通与否有关。图5为某重力坝坝基渗流量测值过程线,左岸和右岸坝基渗流量在运行初期达到20 L/s和8 L/s,蓄水运行十多年以来,坝基渗流量逐年减小,至2020年底,左岸和右岸坝基渗流量已降至2.1 L/s和1.3 L/s,这主要与多年运行以来坝前淤积形成天然“防渗铺盖”有关。

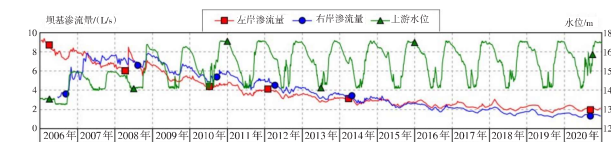


图5 某重力坝坝基渗流量测值过程线

Fig. 5 Measured foundation seepage volume of a gravity dam

地震工况下,由于坝基岩体和帷幕微细裂隙张开或闭合,渗透性发生改变,坝基渗流量可能出现变化,之后随着时间的推移,坝基渗流量逐渐恢复

正常,表明地震促使坝基岩体和帷幕微细裂隙发生改变的效应较大程度上是可恢复的,如图1所示的宝珠寺大坝坝基渗流量测值过程线。

坝基渗流量沿坝轴线方向一般呈不均匀分布,分布情况与帷幕灌浆质量、坝基地质构造分布、坝基排水孔畅通情况等有关,通常在帷幕灌浆质量较差、坝基断层裂隙发育、坝基排水孔通畅的坝段,坝基渗流量会偏大。图6为云峰大坝各坝段坝基渗流量分布图,一般每坝段布置4个排水孔。由图可见,46号坝段渗流量最大,最大值在11~12 L/min,其次为9号坝段,最大值在3~4 L/min,主要原因是46号坝段位于 F_{12} 顺河大断层及其影响带,9号坝段施工时基础处理得不彻底,2/3分块 F_{47} 断层右侧半风化的岩石没有挖出。由此可见,地质缺陷对坝基渗流量的影响十分明显,导致坝基渗流量沿坝轴线方向分布不均匀。

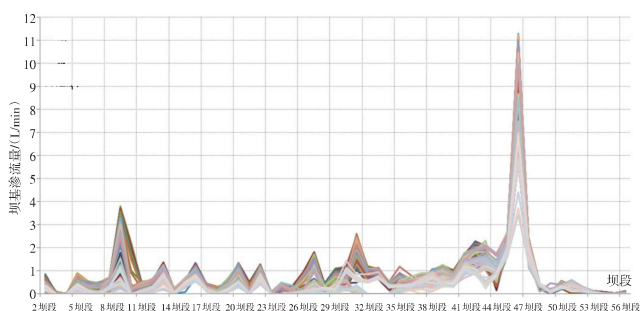


图6 云峰大坝各坝段坝基渗流量

Fig. 6 Foundation seepage volume of each section of Yunfeng dam

4 结语

通过对在大坝中心注册或备案的典型混凝土重力坝工程的实测坝基扬压力和坝基渗流量进行研究分析,得到以下几点结论:

(1)混凝土重力坝部分坝段坝基渗压系数超过设计值是很常见的,主要原因有:防渗帷幕局部相对薄弱;坝基存在断层或者构造裂隙、原生裂隙,从而导致基础存在渗漏通道;扬压力测孔距离帷幕太近,扬压水位仅反映灌浆帷幕的折减效果;帷幕后排水孔与测孔之间联系偏弱,未能达到降压的效果;个别测压管内水位受地下承压水影响等。

(2)坝基渗压系数超限对大坝抗滑稳定安全性

的影响需要通过复核计算得出,渗压系数超限比例与安全系数降低比例并无明显的相关性,还与坝体的体型、坝高、计算参数及工况等因素有关,因此不能简单地利用线性关系判断运行期坝基抗滑稳定安全性。

(3)正常情况下,混凝土重力坝坝基渗流量不大于5.0 L/s,除非遇到特殊工况、防渗系统存在缺陷或其他部位渗水汇入等情况。坝基渗流量主要受坝基地质构造差异、帷幕灌浆质量标准、坝前淤积层厚度等因素的影响,不同工程之间坝基渗流量与坝高、坝顶长度之间的关系无明显可比性。

(4)坝基扬压力和渗流量均是坝基渗流性态的直观反映,这两个监测项目通常会存在时效变化,主要与坝前泥沙淤积及渗流通道堵塞、张开等因素有关。

参考文献:

- [1] 邢林生. 混凝土坝坝基扬压力若干问题的探讨[J]. 华东电力, 1990(1): 20-24.
- [2] 邢林生. 混凝土坝坝基渗漏量异常变化规律分析[J]. 红水河, 1997(3): 41-46.
- [3] 邢林生, 李涛, 徐建清, 等. 混凝土坝基渗流控制效果及耐久性分析研究[J]. 大坝与安全, 2010(6): 9-16, 26.
- [4] 黄耿. 大化电站左岸重力坝基础扬压力偏大原因再分析[J]. 大坝与安全, 2017(3): 40-46.
- [5] 李黎. 大朝山水电站大坝渗流量分析[J]. 大坝与安全, 2018(4): 25-29.
- [6] 杨金辉. 基于在线监测数据的重力坝安全监控与健康诊断研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018.
- [7] 程正飞. 碾压混凝土坝渗流性态分析与渗控结构优化研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
- [8] 齐智勇, 陈舰, 李秋炎, 等. 复杂地质条件下高重力坝坝基运行性态分析[J]. 大坝与安全, 2023(4): 33-38.
- [9] 张萍, 朱安龙. 洪屏抽蓄电站重力坝坝基扬压力超标分析及处理[J]. 人民长江, 2023, 54(S1): 113-117.
- [10] 张雪超. 某水库混凝土重力坝渗流性态分析与评价[J]. 红水河, 2024, 43(3): 20-24.

收稿日期: 2024-12-23

基金项目: 国家重点研发计划项目课题(2021YFC3090102)

作者简介: 许雷(1991—), 男, 江苏盐城人, 工程师, 主要从事大坝安全管理工作。

作者邮箱: xu_l8@hdec.com