

# 某拱坝下游坝面渗漏成因及其处理方式研究

唐友山<sup>1</sup>, 杨杰<sup>1,2</sup>, 程琳<sup>1</sup>, 任杰<sup>1</sup>, 赵志明<sup>3</sup>, 张阳茁<sup>1</sup>

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2. 陕西省西北旱区生态水利工程重点实验室, 陕西 西安 710048; 3. 国电陕西水电开发有限公司, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 对某拱坝下游坝面出现渗漏的原因进行分析, 以期为大坝防渗处理提供依据。基于大坝安全监测系统的实测数据, 分别研究了大坝变形、工程质量缺陷以及低温高水位不利荷载对坝体渗漏的影响。结果表明: 低温高水位工况下, 坝体水平施工缝张开并贯穿上、下游可能是大坝渗漏的主要原因。建议在冬季低温时期将库水位放置于 1 688 m 高程以下, 并采用非水溶性聚氨酯(氰凝)化学灌浆法对贯穿性裂缝和渗水部位的水平施工缝进行处理。研究的成果可为类似工程问题提供一定的参考。

**关键词:** 坝面渗漏; 安全监测; 低温高水位; 裂缝; 化学灌浆

中图分类号: TV698.12 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2016)06-0202-05

## Research of leakage causes and its treatments at an arch dam downstream

TANG Youshan<sup>1</sup>, YANG Jie<sup>1,2</sup>, CHENG Lin<sup>1</sup>, REN Jie<sup>1</sup>, ZHAO Zhiming<sup>3</sup>, ZHANG Yangzhuo<sup>1</sup>

(1. Faculty of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;  
2. State Key Laboratory of Eco-Hydraulic Engineering in Shaanxi, Xi'an 710048, China;  
3. Guodian Shaanxi Hydropower Development co., LTD, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** In order to provide references for dam seepage treatment, this paper analyzes the leakage reasons of an arch dam downstream surface. Based on the measured data of dam safety monitoring system, the effects of dam deformation, quality defects and low temperature and high water level of unfavorable load on dam leakage were studied. The results showed that, the main cause of dam leakage in low temperature and high water level conditions was horizontal construction joint open and throughout the upstream and downstream. We suggested to put the reservoir level below 1688m in elevation during low temperature period of winter and use the hydrophobic polyurethane (Cyanogen Coagulation) chemical grouting method to process the horizontal construction joint which existed along the perfoliate crack and permeable part. The results of the study can provide a reference for similar project problems.

**Key words:** dam leakage; safety monitoring; low temperature and high water level; crack; chemical grouting

拱坝具有体形优美、结构合理、超载能力和自我调节性的特点,是所有挡水建筑物中最为安全的一种<sup>[1-3]</sup>。对于混凝土拱坝而言,由于施工质量差、温度应力影响、地基不均匀沉降等原因,随着大坝运行时间的增长,容易出现坝体裂缝、冲蚀和渗漏等问题,严重影响了坝体的结构安全和防渗安全,造成了极大的安全隐患<sup>[4-6]</sup>。国内针对大坝渗漏进行了很多的研究,荆凯等<sup>[7]</sup>对白山水电站重力拱坝进行了渗流分析,认为低温高水位不利荷载是坝体渗漏的

主要原因,叶源新等<sup>[8]</sup>对溪柄碾压混凝土薄拱坝渗漏进行了分析,认为施工质量差和大坝多年超校核洪水位蓄水是坝体渗漏的主要原因。刘其文<sup>[9]</sup>对沙老河拱坝裂缝成因进行了研究,认为大坝未设横缝是坝体产生裂缝的主要原因。于海龙<sup>[10]</sup>对彭水水电站渗漏进行了分析,认为大坝横缝止水局部失效和右岸山体存在渗漏通道是坝体渗漏的原因。上述研究基本上只是定性分析了拱坝渗漏的原因。本文基于大坝安全监测系统的实测数据,分别研究

收稿日期:2016-06-14; 修回日期:2016-07-20

作者简介:唐友山(1992-),男,陕西安康人,硕士研究生,研究方向为水工结构数值仿真。

通讯作者:杨杰(1971-),男,四川大邑人,博士,教授,主要从事水工结构、水库大坝安全及除险加固理论方法研究。

了大坝沉陷、工程质量缺陷以及低温高水位不利荷载对坝体渗漏的影响,最后提出相应的处理措施。

## 1 工程概况及坝体渗漏情况

### 1.1 工程概况

某水电站位于甘肃省迭部县洛大乡上游 7 km, 腊子沟与白龙江交叉口下游约 100 m 处。坝址以上流域面积 7 953 km<sup>2</sup>, 坝址多年平均年径流量 23.17 × 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>。年平均气温 7.0℃, 极端最高气温 35.5℃, 极端最低气温 -19.9℃。多年平均降水量 595.9 mm, 多年平均蒸发量 1 461.7 mm。区域主要为东南风, 多年平均风速 1.8 m/s。坝址区河床狭窄, 基岩裸露, 主要岩层为花岗岩, 下游为由千枚岩、板岩组成的宽谷河段。

该水电站主要任务是发电, 为 III 等中型工程。枢纽由拦河坝、引水建筑物、电站厂房及 GIS 开关站组成。正常蓄水位 1 710.00 m, 死水位 1 706.00 m, 总库容 1 072 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>。拦河坝为混合线型混凝土双曲拱坝, 坝顶高程 1 712.00 m, 坝顶长度 102.6 m, 最大坝高 52 m。坝顶厚度 3.00 m, 坝底最大厚度 8.31 m, 顶层拱圈中心角 97.98°。大坝平面布置图如图 1 所示。

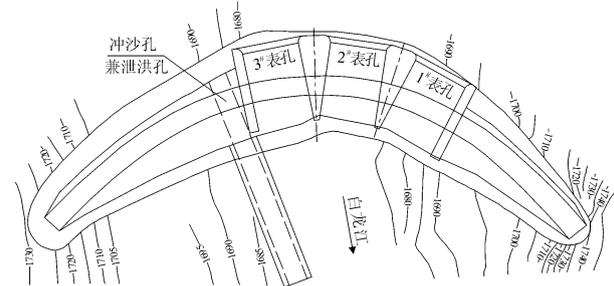


图 1 大坝枢纽平面布置图

### 1.2 坝体渗漏情况

该拱坝在冬季低温时期, 坝体下游面出现了多处沿水平施工缝的渗漏点, 并伴有泌钙现象。经现场观察, 拱坝下游表面共有 12 处渗漏点, 主要集中在大坝廊道 (1 688.0 m 高程) 以上的拱端附近, 渗水流速较小, 坝面湿润, 大坝渗漏现状如图 2 和图 3 所示。



图 2 大坝右岸下游面渗漏现状图



图 3 大坝左岸下游面渗漏现状图

## 2 大坝渗漏成因分析

针对大坝渗漏的现象, 分析其原因, 可能有以下几种: (1) 大坝不均匀沉陷; (2) 工程质量缺陷; (3) 低温高水位不利荷载作用。

### 2.1 大坝沉陷、坝肩、坝基稳定对裂缝的影响

为了监测和馈控大坝及其他水工建筑物的安全运行, 该水利枢纽工程布设了大坝垂直位移、水平位移、横缝开度和基岩变形等监测项目。

垂直位移监测起测日期为 2012 年 6 月 1 日, 水平位移监测起测日期为 2012 年 6 月 12 日。图 4 为 大坝垂直位移极大值分布图, 图 5 为 大坝水平位移 (上下游方向) 极大值分布图, 两图测点均沿坝轴线方向由右岸向左岸分布。

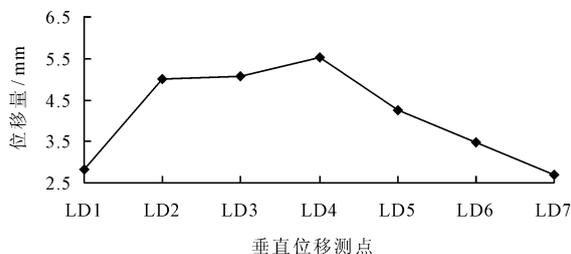


图 4 大坝垂直位移极大值分布图

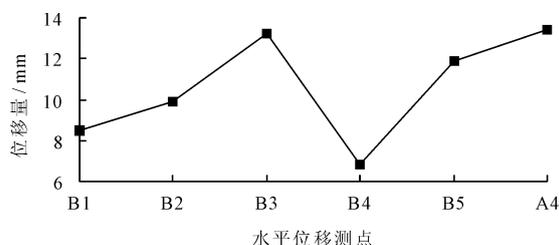


图 5 大坝水平位移极大值分布图

由图 4 可知, 大坝垂直位移最大下沉量为 5.52 mm, 发生在河床坝段的 LD4 测点, 大坝河床段垂直位移较两岸要大, 这也符合大坝沉降的一般规律, 相邻坝段测点垂直位移相差较小, 未发生突变, 表明大坝未发生不均匀沉降。由图 5 可知, 大坝上、下游方向水平位移最大为 13.42 mm, 其变形值在允许变形

值  $\pm 30$  mm 以内。上述结果表明,拱坝的水平位移和垂直位移都变化不大,拱坝稳定,坝体沉降较均匀,从而说明,坝体沉降和水平位移不大可能是结构出现贯穿性裂缝的原因。

## 2.2 工程质量缺陷的影响

根据现场检查记录,大坝浇筑完成之后,在 1<sup>#</sup>坝块距离左拱端约 5.00 m 的坝体上下游面,出现一条宽 2~4 mm 裂缝,长约 7.20 m,裂缝宽度沿坝顶向下逐渐变小。在右岸的 6<sup>#</sup>坝段顶端也出现一条顶宽约 4 mm 的裂缝,长度较短。两条裂缝在形成后并未继续发展。上述两条裂缝与大坝横缝有一定距离,裂缝呈铅直方向。裂缝形成主要原因是:混凝土浇筑过程中水灰比偏大,该部位混凝土在夏季高温时段施工,未采取温控措施及养护欠佳。2011 年,该电站邀请了甘肃省水利水电勘测设计研究院进行了大坝混凝土质量检测,通过超声波检测发现孔内混凝土波速较低,可能存在混凝土浇筑密实度不够的问题。由于混凝土浇筑密实度不够,浇筑完成后混凝土疏松多孔,形成微小的渗漏通道,在渗流作用下混凝土中的钙质便会被带出,从而发生泌钙现象,进而影响混凝土的强度和防渗性能。

该水电站为中型工程,坝体混凝土在浇筑过程中,可能会出现下层混凝土未凿毛的情况,从而导致相邻两仓混凝土之间产生冷缝而形成层间薄弱面。在冬季低温时期,由于混凝土冷缩,层间薄弱面可能开裂形成渗漏通道。此时,有必要对裂缝进行灌浆,针对本工程而言,建议在冬季低温时期对大坝水平施工缝进行化学灌浆处理,此时,缝的开合度较大,有利于灌浆的进行,渗水部位大部分处于 1688 高程以上,因此,只需将水位降至此高程以下便可进行灌浆。

## 2.3 低温高水位不利工况对裂缝的影响

大坝在各横缝的上下游侧布设有测缝计,以监测横缝开度,图 6 为大坝测缝计布置下游立视图。对测缝计各测点建立统计模型进行回归分析。

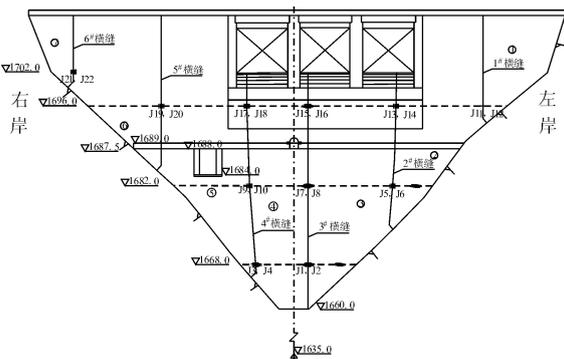


图 6 大坝测缝计布置下游立视图

根据统计模型分离得到的 2014 年各分量结果见表 1。从年变幅分离结果看,温度对横缝开度的影响比较显著,温度分量占横缝年变幅的 70%~90%;水压对横缝开度有一定的影响,横缝开度年变幅中水压分量均在 30% 以下。

表 1 横缝开度 2014 年实测值年变幅模型

测点	拟合及分离结果统计				
	实测值 年变幅	拟合值 年变幅	水压分量 变幅	温度分量 变幅	时效分量 变幅
J3	0.03	0.03	-0.02	0.05	0.00
J4	0.04	0.04	0.00	0.04	0.00
J14	0.12	0.23	0.07	0.10	0.06
J16	0.34	0.35	0.00	0.35	0.00
J17	0.29	0.37	0.00	0.37	0.00
J18	0.12	0.10	0.00	0.11	-0.01

横缝开度主要受温度变化的影响,低温季节坝体混凝土收缩,横缝受拉,测值较大,而高温季节坝体混凝土膨胀,横缝受压,测值较小。横缝开度最大值一般出现在每年的 12 月至次年 1 月份,最小值一般出现在每年的 6~8 月份。表 2 是各横缝测缝计测点分别在典型高温日(1704.80 m,2014-07-21)与典型低温日(1708.05 m,2015-01-30)的大坝横缝开度测值的对比。由表 2 可知:在水位相近情况下,低温时期横缝开度测值明显大于高温时期的测值。

表 2 相近水位不同气温横缝测缝计测值比较表

测点	典型低温日 (2015-01-30)	典型高温日 (2014-07-21)
J2	0.69	0.32
J6	1.17	0.94
J8	12.70	9.42
J10	1.62	1.37
J16	2.67	2.36
J17	1.13	0.85
J18	1.63	1.53
J21	5.52	5.30

注:横缝开度拉伸为正;压缩为负。

大坝蓄水运行后,高水位使坝顶向下游变形,在冬季低温时期,因库水温度变化滞后于气温,坝体下游侧温降超过上游侧,坝顶也向下游方向变形,两者都使坝体梁向上游一侧呈受拉状态<sup>[11]</sup>。上游库水升高时坝体上抬,大坝垂直位移减小,导致因低温状态下混凝土收缩变形而产生的缝隙不能有效闭合,该组合工况为大

坝漏水量增加创造了有利条件。大坝上游面有水平施工缝存在,其可能因低温状态下缝的开度变大,水位在这些缺陷之上导致上下游面贯通而形成渗漏,图7为冬季低温时期混凝土开裂示意图。

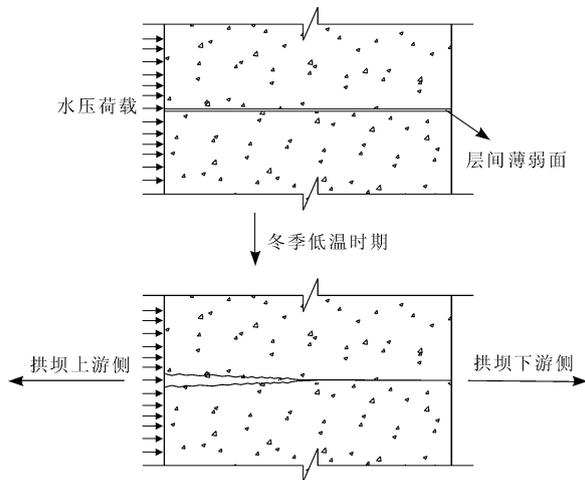


图7 混凝土冬季低温时期开裂示意图

## 2.4 综合分析

综上所述,结合拱坝位移成果分析和典型裂缝分析可以初步推断,拱坝下游坝面出现的渗水、泌钙现象的主要原因有两点:

- (1)混凝土质量较差,坝体水平施工缝处理不当,导致出现层间薄弱面。
- (2)低温高水位工况使上述薄弱面开裂,形成以纵贯上下游的渗漏通道。

## 3 检测渗漏通道和处理的相关建议

监测中若发现坝体渗漏有连续发展趋势,则应及时采取相应的工程措施来检测坝体是否有裂缝产生,若发现坝体有较大的贯穿性裂缝,应采取相应的工程措施进行处理。

### 3.1 采用无损检测对渗漏通道进行检查

混凝土裂缝的检测一般分为常规检查和无损检测。常规检查是对混凝土表面裂缝的检查,一般应检查裂缝发生的位置、形态、发展长度、宽度及裂缝数量,并观测裂缝的发展情况。混凝土裂缝的无损检测方法较多,目前主要包括超声波检测、冲击弹性波法、声发射检测法、探地雷达检测法和摄影检测法等。

针对本工程出现的坝体裂缝问题,参考类似工程的经验,建议采用超声波检测法对坝体混凝土进行质量检测。超声波检测是利用超声波在混凝土中传播的时间(声时)和波幅值、频率值的变化来计算裂缝深度、确定内部裂缝的位置。该方法具有操作简单、快捷准确、费用低廉等优点,在混凝土工程中得到广泛的应用<sup>[12]</sup>。

### 3.2 工程处理措施

针对拱坝坝体渗漏的问题,已经形成了一套比较完备的工程处理措施体系。表3中搜集了国内一些对于拱坝渗漏问题的解决措施。

表3 拱坝渗漏处理措施工程实例

工程	坝型	渗漏部位	处理方式
天福庙水	浆砌石拱坝	坝体、坝基及坝肩	坝体增加混凝土防渗面板并对原防渗帷幕进行补强灌浆
黄羊河水	混凝土拱坝	右坝段	选用非水溶性聚氨酯(氰凝)化学灌浆法进行坝体裂缝灌浆
四五水库	浆砌条石单曲拱坝	坝基和坝体	在拱坝原坝体上游面加设钢筋混凝土面板防渗。面板完成后进行接触灌浆,以增加混凝土与原坝面的结合,增加砌体间的黏合力。
沙老河水	混凝土双曲拱坝	右坝肩	接缝灌浆
石城子水	浆砌石拱坝	坝体渗漏、坝体坝肩接触部位渗漏	多层挂网喷混凝土抹浆防渗、坝顶帷幕灌浆
里石门水	混凝土双曲拱坝	大坝横缝	更换止水结构
天堂山水	混凝土双曲拱坝	坝体	经过近2年的细致观测,发现坝体裂缝随着低温高水位荷载组合的消除逐渐闭合。
溪柄坝	碾压混凝土薄拱坝	坝体层间水平缝	交缝灌浆

根据本工程情况,做如下建议:

- (1)利用超声波法检测大坝裂缝,对于浅层裂

缝可采用环氧砂浆进行嵌缝修补,对贯穿性裂缝和渗水部位的水平施工缝进行化学灌浆处理,灌浆宜

选用氰凝材料。

(2)更换失效的坝体横缝测缝计,必要时增加横缝测缝计的数量,并在水平施工缝等易开裂部位布设测缝计。

(3)加强大坝渗流监测,及时掌握大坝渗漏动态。

## 4 结 论

拱坝在冬季低温时期下游坝面部分水平施工缝附近出现渗漏现象的原因可以归结为:

(1)混凝土质量较差和大坝施工阶段水平施工缝处理不当,使坝体存在层间薄弱面;

(2)在冬季高水位工况下,由于混凝土收缩和水压力作用下,上述层间薄弱面张开,形成渗漏通道。针对该拱坝冬季渗漏较为严重的问题,建议管理单位对大坝进行混凝土裂缝检测,在冬季低温时期采用非水溶性聚氨酯(氰凝)化学灌浆法对贯穿性裂缝和渗水部位的水平施工缝进行处理。同时须加强大坝监测力度,若发生异常情况,应及时采取工程技术措施,以确保大坝安全运行。在进一步的研究工作中可考虑将监测数据分析与数值模拟方法相结合,以提高分析精度。

### 参考文献:

[1] Gaziev E G. Safety provision and an expert system for diag-

nosing and predicting dam behavior[J]. Power Technology and Engineering, 2000, 34(6): 285-289.

- [2] Linsley R K, Franzini J B. Water resources engineering [M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 2000.
- [3] 纪林强. 高拱坝承载能力与安全评价研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- [4] 陈兴海, 张平松, 江晓益, 等. 水库大坝渗漏地球物理检测技术方法及进展[J]. 工程地球物理学报, 2014, 11(2): 160-165.
- [5] 邢林生. 混凝土坝坝体渗漏危害性分析及其处理[J]. 水力发电学报, 2001, 20(3): 108-116.
- [6] 杨启贵, 高大水. 我国病险水库加固技术现状及展望[J]. 人民长江, 2011, 42(12): 6-11.
- [7] 荆凯, 王千, 戴江鸿, 等. 低温高水位工况下白山水电站混凝土重力拱坝变形及渗流分析[J]. 水电能源科学, 2012, 30(8): 59-62.
- [8] 叶源新, 刘光廷, 李鹏辉, 等. 溪柄碾压混凝土薄拱坝坝体渗漏处理[J]. 水利水电科技进步, 2005, 25(3): 27-31.
- [9] 刘其文, 代富红. 沙老河拱坝裂缝成因探讨及其处理措施[J]. 人民长江, 2011, 42(5): 59-61.
- [10] 于海龙. 彭水水电站 14 号坝段渗漏处理及分析[J]. 大坝与安全, 2015, 27(6): 31-33+41.
- [11] 陈献. 对东风大坝低温高水位运行工况的探讨[J]. 大坝与安全, 2007, 19(6): 13-15.
- [12] 彭运朝. 超声波检测混凝土裂缝的研究[J]. 农业科技与装备, 2012(6): 57-58.