

天生桥一级水电站堆石坝面板破损分析

罗井伦

(天生桥一级水电开发有限责任公司水力发电厂,贵州 兴义 562400)

摘要:针对天生桥一级水电站混凝土面板在多次检查中发生局部破损的现象,分析面板裂缝发展情况和面板破损情况,认为天生桥一级水电站堆石坝面板发生的破损属局部问题,不影响大坝整体安全。分析面板破损的原因,指出坝体沉降变形及温度膨胀是导致面板多次发生破损的重要因素。提出以下针对面板破损的处理措施:优化面板设计算法,降低沉降形变影响,降低温度膨胀影响,以及合理安排施工进度。

关键词:混凝土面板堆石坝;面板破损;坝体变形;温度膨胀;天生桥一级水电站

中图分类号:TV641.4+3 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2013)06-0076-04

The breakage analysis of concrete panel in Tianshengqiao-1 Hydropower Station//LUO Jinglun(*Hydroelectric Power Plant, Tianshengqiao-1 Hydropower Development Company Limited, Xingyi 562400, China*)

Abstract: Based on the local damage phenomenon occurred in the concrete panel of the rockfill dam of Tianshengqiao-1 Hydropower Station during multiple checks, concrete panel crack propagation and breakage behaviors are analyzed. The results show that the local damage in the concrete panel will not affect the safety of the whole rockfill dam. The results also show that the settlement deformation and thermal expansion are important factors of the broken panel. Therefore, the following measures for improvement of panel breakage are put forward: improving the computational method for the panel design, reducing the effect of sedimentation, reducing the effect of thermal expansion, and reasonably arranging the construction schedule.

Key words: concrete panel rockfill dam; panel damage; dam deformation; thermal expansion; Tianshengqiao-1 Hydropower Station

1 工程概况

天生桥一级水电站是红水河梯级电站的第一级,位于南盘江干流上。水库总库容为102.57亿m³,调节库容为57.96亿m³,为不完全多年调节水库。电站装机容量为1200MW(4×300MW),年发电量为52.26亿kW·h,水库正常蓄水位为780m,最高库水位为789m。坝址以上流域面积达50139m²,大坝按千年一遇洪水设计,最大坝高为178m。坝体上游坝坡为1:1.4,下游坝坡平均为1:1.4。坝体为混凝土面板堆石坝,堆石坝体分为垫层区、过渡区、主堆石区和次堆石区(含软岩料区),坝体填筑总方量约为1800万m³。

天生桥一级水电站堆石坝面板宽度为16m,顶部高程为787.3m,顶部厚度为0.3m,底部厚度为0.9m,设置垂直缝,间距16m,共分69块。面板混

凝土标号为C25,抗渗标号为S12,一期、二期面板设单层双向配筋,三期面板设双层双向配筋,配筋率为0.3%~0.4%。面板总面积17.27万m²,方量共计8.87万m³。在高程680.0m和746.0m处分别设水平施工缝。

2 面板运行状况

2.1 裂缝发展情况

2002年4—8月昆明勘测设计研究院岩土公司对大坝面板裂缝进行检查,主要调查三期面板(编号R34~L35,桩号0+094~1+198,高程787.3~748.6m,共计69块)的裂缝发展情况。检查发现裂缝总计4357条,宽度大于0.3mm的裂缝有80条,长度大于5m的裂缝共有144条^[1]。为确保大坝安全运行,2003年3—5月对大坝面板裂缝进行无损修补。

作者简介:罗井伦(1983—),男(布依),贵州兴义人,助理工程师,主要从事水工观测维护工作。E-mail:luojinglun256@163.com

2.2 面板破损情况

天生桥一级水电站大坝面板自 2003 年 7 月发现破损以来,由于大坝变形量过大,加之温度的影响,导致面板破损现象反复发生。

2003—2012 年共进行了 7 次面板破损情况检查,发现破损部位主要在 L3、L4 面板和 L8、L9 面板接缝处。历次面板破损情况如下^[1-2]:①2003 年 7 月 18 日发现大坝 L3、L4 面板垂直分缝高程 746.0 ~ 787.3 m 处混凝土有挤压破损现象,破损部位平均宽度 1 m,最大宽度 1.58 m,局部面板水平向钢筋顶弯、外露。对破损较严重的部位凿坑检查,发现止水铜片局部破损,局部止水片与混凝土分离^[2]。②2004 年 5 月 29 日发现大坝 L3、L4 面板分缝高程 710.0 ~ 787.3 m 处发生挤压破损,破损部位平均宽度 3.1 m,最大宽度 6 m,2003 年修补的混凝土部分破损,底层钢筋变形,破裂面光滑。③2005 年 7 月 8 日发现 L8 面板施工缝右边高程 741.5 ~ 746.1 m 处面板破损,破损部位平均宽度 0.7 m,最大宽度 1.43 m。④2008 年 6 月 3 日发现大坝 L8、L9 面板分缝高程 745.2 ~ 736.1 m 处破损,有钢筋出露,但无弯曲情况,最大破损宽度为 2.42 m,最大破损深度为 30 cm; L3、L4 面板分缝高程 745.3 ~ 731.9 m 处破损,最大破损宽度为 1.5 m,最大破损深度为 29 cm,大部分钢筋出露、弯曲,破裂面不新鲜。⑤2009 年 5 月 29 日发现 L3 面板侧分缝高程 726.3 ~ 725.8 m 处破损,最大破损宽度为 0.4 m; L4 面板侧分缝高程 722.9 ~ 720.8 m 处破损,最大破损宽度为 1.57 m。⑥2011 年 6 月 21 日发现 L8、L9 面板接缝高程 735.5 ~ 736.3 m 处发生破损,平均宽度为 1.1 m; L3、L4 面板分缝高程 753.3 ~ 735.3 m 处破损,平均破损宽度为 2.3 m。⑦2012 年 6 月 2 日水下检查发现 L3、L4 面板接缝处 L3 面板侧高程 706.7 ~ 716.1 m 部位发生破损,平均破损宽度为 1.7 m,经喷墨检查发现面板裂缝有吸墨现象。L8、L9 接缝处 L8 面板侧高程 731.2 ~ 726.2 m 部位发生破损,平均破损宽度为 1.5 m,经喷墨检查发现面板裂缝也有吸墨现象。

综上所述,面板虽然在 2003—2012 年发生过局部破损现象,最大破损深度达 30 cm,但裂缝没有贯穿面板,大坝集水井、量水堰、水位孔等测值均正常。2008 年大坝安全特种检查专家组几次会议研究认为,除破损相关区域的面板应变得得到一定释放外,大坝整体的变形、渗流规律没有变化,坝体填筑料分区和级配可以满足渗流稳定要求,面板周边缝未见异常变形。因此专家组得出如下结论:天生桥一级水电站堆石坝面板发生的破损属局部问题,不影响大坝整体安全。

3 面板破损原因分析

3.1 温度因素

面板在汛前高温季节处于低水位运行状态,洪水到来前,三期面板基本处于夏季阳光暴晒中,面板实测温度最高达 50℃,高温使得面板产生温度膨胀挤压^[3],根据观测数据,在挤压过程中两岸未发生位移,膨胀压力导致面板中部应力集中。面板的温度膨胀量为

$$\Delta L = L(C_1 - C_2)A \quad (1)$$

式中: L 为面板长度; C_1 为面板实测最高温度; C_2 为大坝面板浇筑基础温度; A 为混凝土膨胀系数。

根据文献[4],由大坝面板混凝土配合比查表可得膨胀系数为 9.32。面板长度为 1 104 m,大坝面板浇筑基础温度为 20℃,面板实测最高温度为 50℃。由式(1)计算得到面板的膨胀量为 308.68 mm。

3.2 变形影响

a. 沉降。2007 年 12 月 25 日达到坝内沉降历史最大值,为 3 551.7 mm^[5]。

b. 水平位移。2007 年 10 月 5 日达到坝内水平位移最大值,为 1 143.28 mm^[5]。

c. 脱空。2002 年 4 月对 0+446 ~ 1+038、高程 760.0 ~ 787.3 m 面板的脱空情况进行无损探测,总探测面积为 27 805 m²,检查结果发现 R12 ~ L25 面板在高程 760.0 ~ 775.0 m 范围内存在较大面积的脱空,但脱空高度较小。2011 年 7 月对大坝 0+638 ~ 0+782、高程 740.0 ~ 787.3 m、面积为 11 520 m² 的面板进行无损探测,检测共发现 5 处脱空区,脱空平均高度 1 ~ 5 cm,面积 4.5 ~ 41 m²,脱空区分布于 L3、L4、L6 和 L9 面板内,总脱空面积为 60 m²。

天生桥一级水电站大坝面板垂直缝为硬性接缝,发生挤压变形时没有位移空间释放应力,而两岸基岩十分坚固,当发生膨胀变形时应力只能向面板释放,巨大的膨胀变形量、大坝沉降变形、水压力和面板自重等因素导致面板发生脱空现象。因此温度膨胀和坝体变形是导致面板发生破损的重要因素。

4 面板破损处理措施

4.1 优化面板设计算法

天生桥一级水电站堆石坝面板有限元分析采用的计算程序是在一般土石坝商业计算程序的基础上适当修改而来,以适应面板堆石坝的工作特性,其中,二维计算采用修改后的美国 FEADAM 程序,程序中应用不协调四边形等参单元;三维计算采用修改后的加拿大 FENA3D 程序,在程序中增加了双曲线的应力-应变模型,有限元网格采用用六面体八

节点单元^[2]。

在本次面板堆石坝的破损分析中,坝体材料采用邓肯-张非线性弹性双曲线模型,其相应计算公式为^[6-8]

$$E = KP_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \left[1 - \frac{R_f(1 - \sin\varphi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cos\varphi + 2\sigma_3 \sin\varphi} \right]^2 \quad (2)$$

$$B = K_b P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^m \quad (3)$$

$$E_{ur} = K_{ur} P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^{n_{ur}} \quad (4)$$

式中: E 为弹性模量; K 为弹性模量数; σ_1 和 σ_3 分别为最大主应力和最小主应力; P_a 为大气压力; n 为弹性模量指数; R_f 为破坏比; c 和 φ 为强度指标; B 为体积模量; K_b 为体积模量数; m 为体积模量指数; E_{ur} 为卸荷弹性模量; K_{ur} 为卸荷弹性模量数; n_{ur} 为卸荷弹性模量指数。

建议设计单位根据面板后期的运行情况,验证有限元分析所采用计算程序的合理性,进一步优化设计算法。

4.2 降低沉降变形影响

在面板堆石坝计算中常把面板接缝看成是能转动的铰接,但为了施工方便和节约工程造价,施工中面板的接缝通常是垂直对接的。当面板产生沉降、温度膨胀和脱空时,面板接缝就会产生相对移动,此时面板将产生应力集中,导致面板破损释放应力,面板破损如图1所示。所以在施工中要采用一定的措施降低坝体沉降量,以避免面板因受力产生破损。

4.3 降低温度膨胀影响

a. 增大伸缩缝间隙。在进行弧形接缝时,如施工有难度或受经济的制约,可以采取常用的接缝施工方法,适当增加伸缩缝的间隙,此方法同样有避免裂缝产生的作用。

b. 增加伸缩缝数量。为避免或减小变形挤压,增加伸缩缝的数量,将面板的分块数量适当增加,同样可以缓解变形时面板产生的应力,从而避免面板

发生破坏。天生桥一级水电开发有限责任公司水力发电厂曾在2011年尝试采用面板切割增设胶条的方法增加伸缩缝数量和间隙,以避免面板再次发生破损。

c. 采用热能吸收小的涂料。天生桥一级水电站混凝土面板总面积为17.27万 m^2 ,方量共计8.87万 m^3 ,在当时填筑方量和面板挡水面积2项指标均居世界之首。大面积的面板在受到温度影响时,其膨胀量是不容忽视的,可采用热能吸收小的涂料涂刷大坝面板或采用面板喷淋系统减小面板温度膨胀量,从而降低由温度产生的热胀冷缩变形对大坝面板带来的危害^[9-10]。

4.4 合理安排施工进度

在天生桥一级水电站建设过程中,由于受到各种因素的干扰,施工进度比原计划慢。为了在汛期前赶上工程原定施工进度,加快了建设步伐,当时的日填筑量曾经创下世界第一的记录。但是,在加快施工进度、实现高填筑量的同时也存在压实和沉降时间不足的缺陷,从而使后期的沉降量影响面板的安全,这也是面板产生脱空的原因之一。所以,在施工时应合理安排施工进度,使堆石体达到充分密实,以减小后期沉降变形对坝体造成的危害。

5 结 语

天生桥一级水电站面板堆石坝的最大沉降量为3551.7 mm,最大水平位移量为1143.28 mm。面板温度膨胀变形量估算为308.68 mm。在沉降和变形影响下面板脱空,面板破损集中在坝体变形较大的L3、L4接缝断面和L8、L9接缝断面上。天生桥一级水电站堆石坝面板的接缝均是硬性接缝,沉降导致的面板脱空和温度膨胀产生的面板挤压,加之面板自重和水压力的作用,是导致面板破损反复发生的主要原因。在运行管理中,尝试启用面板喷淋系统以及面板切割增设胶条的方法来缓解面板的破损情况。

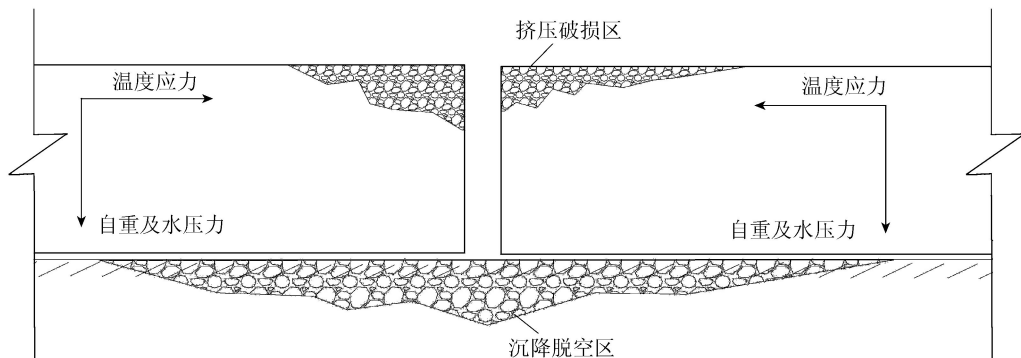


图1 面板破损示意图

参考文献:

[1] 戴杨春. 天生桥一级水电站大坝面板 L3、L4 坝块混凝土破损修复处理报告[R]. 兴义: 杭州国电大坝安全工程有限公司, 2003.

[2] 冯业林. 天生桥一级水电站面板局部破损原因分析及处理措施[R]. 兴义: 国家电力公司昆明勘测设计研究院, 2003.

[3] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.

[4] 姚武, 郑欣. 配合比参数对混凝土热膨胀系数的影响[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2007, 35(1): 11-17. (YAO Wu, ZHENG Xin. Effect of mix proportion on coefficient of thermal expansion of concrete[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2007, 35(1): 11-17. (in Chinese))

[5] 包亚军, 周庆东, 刘春. 天生桥一级水电站大坝体检大坝安全监测分析报告[R]. 兴义: 天生桥一级水电开发有限责任公司水力发电厂, 2008.

[6] 张文正, 帅方生, 苏立峰. 天生桥混凝土面板堆石坝二维及三维的应力变形分析[C]//岩土力学数值方法的工程应用: 第二届全国岩石力学数值计算与模型实验学术

研讨会论文集. 上海: 同济大学出版社, 1990: 470-475.

[7] 朱伯芳. 论微膨胀混凝土筑坝技术[J]. 水力发电学报, 2000, 19(3): 1-12. (ZHU Bofang. On construction of dams by concrete with gentle volume expansion [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2000, 19(3): 1-12. (in Chinese))

[8] 阿拉亚. 2000 年混凝土面板堆石坝、导流洞和溢洪道监测及运行年报[R]. 兴义: 南方水电工程联合有限公司, 2000.

[9] 李承木. 不同试验温度条件下 MgO 混凝土的自生体积变形研究[J]. 水电工程研究, 1998(3): 1-9. (LI Chengmu. Study on autogenous volume deformation of MgO concrete under different test temperature conditions [J]. Hydropower Engineering Research, 1998(3): 1-9. (in Chinese))

[10] 李承木. 掺 MgO 混凝土自生体积变形的温度效应[J]. 水电站设计, 1999, 15(2): 96-100. (LI Chengmu. Temperature effect for autogenous deformation of concrete mixed with MgO [J]. Design of Hydroelectric Power Station, 1999, 15(2): 96-100. (in Chinese))

(收稿日期: 2012 - 12 - 13 编辑: 骆 超)

(上接第 70 页)

[15] 吉小盼, 刘德富, 黄钰铃, 等. 三峡水库泄水期香溪河库湾营养盐动态及干流逆向影响[J]. 环境工程学报, 2010, 4(12): 2687-2693. (JI Xiaopan, LIU Defu, HUANG Yuling, et al. Dynamic characteristics of nutrients in Xiangxi Bay and converse impact from mainstream in drainage period of the Three Gorges Reservoir [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2010, 4(12): 2687-2693. (in Chinese))

[16] KELLY V J. Influence of reservoirs on solute transport: a regional-scale approach [J]. Hydrobiological Processes, 2001, 15: 1227-1249.

[17] 郭胜, 李崇明, 郭劲松, 等. 三峡水库蓄水后不同水位期干流氮、磷时空分异特征[J]. 环境科学, 2011, 32(5): 1266-1272. (GUO Sheng, LI Chongming, GUO Jingsong, et al. Spatio-temporal variation of nitrogen, phosphorus in different period in Three Gorges Reservoir after its impoundment [J]. Environmental Science, 2011, 32(5): 1266-1272. (in Chinese))

[18] 黄程, 钟成华, 邓春光, 等. 三峡水库蓄水初期大宁河回水区流速与藻类生长关系的初步研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(2): 453-457. (HUANG Cheng, ZHONG Chenghua, DENG Chunguang, et al. Preliminary study on correlation between flow velocity and algae along Daning River's backwater region at sluice initial stages in the

Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 25(2): 453-457. (in Chinese))

[19] 龙天渝, 蒙国湖, 吴磊, 等. 水动力条件对嘉陵江重庆主城段藻类生长影响的数值模拟[J]. 环境科学, 2010, 31(7): 1498-1503. (LONG Tianyu, MENG Guohu, WU Lei, et al. Numerical simulation for effects of hydrodynamic condition on algae growth in Chongqing reaches of Jialing River [J]. Environmental Science, 2010, 31(7): 1498-1503. (in Chinese))

[20] REYNOLDS C S, BELLINGER E G. Patterns of abundance and dominance of the phytoplankton of Roster Mere, England: evidence from an 18-year data set [J]. Aquatic Sci-Res Across Boundaries, 1992, 54(1): 10-36.

[21] REYNOLDS C. The ecology of freshwater ecology [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1984.

[22] 秦伯强, 胡维平, 高光, 等. 太湖沉积物悬浮的动力机制及内源释放的概念性模式[J]. 科学通报, 2003, 48(17): 1822-1831. (QIN Boqiang, HU Weiping, GAO Guang, et al. Lake sediments suspended in the dynamic system and a conceptual model of endogenous release [J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(17): 1822-1831. (in Chinese))

[23] 张佳磊. 三峡库区大宁河富营养化和水华研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2012.

(收稿日期: 2013 - 05 - 14 编辑: 骆 超)