

石漫滩碾压混凝土重力坝温度效应分析

袁自立¹, 马福恒², 焦延涛³

(1. 河南省石漫滩水库管理局, 河南 舞钢 462500; 2. 南京水利科学研究院, 南京 210029;
3. 河海大学 水利水电学院, 南京 210098)

摘要: 温度是混凝土坝的主要荷载之一, 不利的温度荷载导致坝体产生裂缝, 特别在运行期, 不利水压荷载与温度荷载的组合使得裂缝进一步扩展, 严重危害大坝安全运行。石漫滩碾压混凝土重力坝裂缝严重, 尤其是部分坝段存在有规律的横向裂缝。现采用大型通用有限元软件 ANSYS, 依据石漫滩水库的水温和气温等监测资料, 分析了大坝运行期的温度场和温度应力场, 从温度效应角度揭示了该坝横向裂缝产生和发展的主要原因及其危害, 为大坝加固处理提供技术支撑。

关键词: 碾压混凝土重力坝; 裂缝成因; 温度场; 温度应力场

中图分类号: TV 642 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2013)05-0061-04

Analysis of Temperature Effects of Shimantan RCC Gravity Dam

YUAN Zi li¹, MA Fu heng², JIAO Yan tao³

(1. Management Bureau of Shimantan Reservoir, Henan Province, Wugang 462500, China;
2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;
3. College of Water Conservancy and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Temperature is one of the main loads of concrete dam, and the adverse temperature load can cause cracks in the dam, especially during the operation period, the combination of unfavorable hydraulic pressure load and temperature load can expand the cracks, resulting in the damage for the dam safety operation. The Shimantan RCC gravity dam has serious cracks, and regular transverse cracks occur in several sections of the dam. Based on the observed water temperature and air temperature data of the Shimantan reservoir, the large general finite element software ANSYS was used to analyze the temperature field and temperature stress field of the dam during the operation period, and to illustrate the main reasons of the occurrence and development of the transverse cracks in aspect of temperature effects, which can provide technical support for reinforcement of the dam.

Key words: RCC gravity dam; crack causes; temperature field; temperature stress field

温度是混凝土坝的主要荷载之一, 当库水位变化幅度很小时, 温差对混凝土坝应力影响较水压力的大。运行期间不利温度荷载不仅易导致坝体产生裂缝, 还可能促使施工期出现的裂缝进一步扩展, 比如低温会造成混凝土表面的冻融破坏和深层的冻胀破坏, 不仅影响大坝的使用寿命, 还严重威胁着大坝的安全^[1]。朱伯芳院士通过分析温度对坝体应力场的效应, 认为非线性温差和寒潮是引起运行期裂缝的主要原因, 表面永久保温是防止运行期出现裂缝的有效办法^[2-3]。本文以石漫滩碾压混凝土坝为研究对象, 采用有限元数值计算方法, 依据气温和水温等监测资料, 分析该坝在运行期的

温度场和温度效应, 从力学的角度分析和研究该坝裂缝产生的原因, 为大坝运行管理和除险加固处理提供技术支撑。

1 工程概况

石漫滩水库位于河南省舞钢市境内的淮河上游洪河支流滚河上, 原水库因遭遇“75·8”特大洪水漫坝溃决失事。水库复建于1993年9月, 1997年12月主体工程完工, 水库枢纽工程由拦河坝、溢洪道、取水底孔、发电站等建筑物组成, 水库总库容1.2亿m³, 是一座以工业供水、防洪为主, 结合灌溉、旅游、养殖等综合利用的大(2)型水利工程。拦河坝

收稿日期: 2013-01-05 修回日期: 2013-08-08 网络出版时间: 2013-08-23

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130823.1501.007.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51079086; 51139001; 51209144); 水文水资源国家重点实验室基本科研业务费专项(Y712005; Y713008)

作者简介: 袁自立(1965-), 男, 河南鲁山人, 高级工程师, 主要从事大型水库工程管理和防汛工作。E-mail: 857135915@qq.com

通讯作者: 马福恒(1969-), 男, 河南项城人, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事大坝安全评估与安全监控。E-mail: fhma@nhri.cn

为全断面碾压混凝土重力坝,最大坝高 40.5 m,坝顶高程 112.50 m,坝顶长 645 m,共分 22 个坝段,坝段长度 16.0~42.0 m 不等;1 号-9 号坝段为右岸非溢流坝段,长 320.0 m,10 号-16 号坝段为溢流坝段,长 132.0 m,17 号-22 号坝段为左岸非溢流坝段,长 193.0 m,其中 19 号坝段为底孔坝段,长 18.0 m。

石漫滩水库复建投入运行以来,大坝坝体出现较多裂缝,尤其是坝体上部可观察到多条垂直坝轴线分布的贯通裂缝,且具有较好的规律性:上游面(水位 108.20 m 以上)发现竖向裂缝 45 条,坝顶面顺水流向裂缝 39 条,坝下游面竖向裂缝 77 条,且坝顶裂缝大多与上、下游竖向裂缝位置对应。相关资料表明,这些坝体裂缝多产生于蓄水后的运行期^[4-5]。大坝的 9 号非溢流坝段在上游面、坝顶和下游面存在 2 条贯通性裂缝,本文选取该坝段为典型坝段,计算运行期温度场和温度应力场,分析坝体裂缝成因。

2 三维有限元模型

2.1 计算模型

本文采用 ANSYS 软件对 9 号非溢流坝段进行了热-结构耦合分析。对于三维有限元模型,规定计算坐标系为: X 轴为顺河流向(垂直坝轴线),指向下流为正; Y 轴为垂直向,指向上方为正; Z 轴为平行坝轴线,指向右岸为正。确定的计算模型范围为: X 方向,以坝轴线为零点,上下游各取约 1.5 倍坝高(坝高为 39.5 m)^[6]; Y 方向从坝基面(坝基高程为 73.00 m)向下取 1.5 倍坝高; Z 方向,取一个坝段长为 42 m。

进行热-结构耦合分析时,热单元类型选用 SOLID70,结构单元选用 SOLID45,两种类型单元联合使用。完成热分析后,将 SOLID70 单元转换为 SOLID45 单元,进行温度应力分析^[6]。9 号非溢流坝段三维有限元模型见图 1,模型总单元数为 58 520 个、总节点数为 674 302 个。

2.2 边界条件

石漫滩大坝已经运行 10 多年,从温度监测资料看,混凝土水化过程基本完成,坝体温度场已趋于稳定,主要受水温、气温、地温等边界温度条件影响,呈周期性波动变化^[5]。根据大坝、基岩和库水温度监测资料^[5],对温度场计算边界条件做以下假定:上游坝面温度取相应高程的库水温度;下游坝面的温度取气温加上太阳辐射升温;横缝内温度根据观测资料给定;建基面 15 m 以下基础温度不随水温、气温变化而变化,取恒定值(观测均值)。

进行温度应力场分析时,基岩上下游边界面上结点的 6 个位移分量中,只约束上下游方向(X 方向)位移分量,其余 5 个分量自由;基岩坝轴向边界面上结点的 6 个位移分量中,

只约束轴向(Z 方向)位移分量,其余 5 个分量自由;在模型底部边界面结点 6 个位移分量中,只约束 3 个线位移分量,其余分量为自由;由于横缝作用,坝体轴向边界面上的节点无约束^[7]。

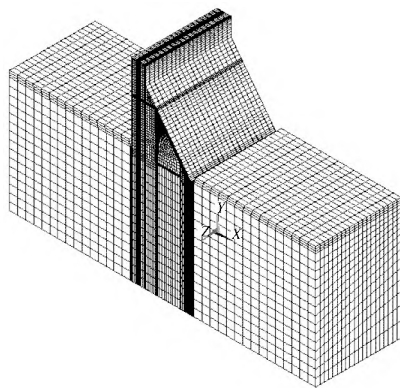


图 1 9 号非溢流坝段三维有限元模型
Fig. 1 Three dimensional finite element model for 9# non overflow section

3 计算参数和计算工况

3.1 计算参数

根据设计和施工资料选取混凝土及基岩的计算参数,见表 1。

3.2 计算工况

石漫滩大坝坝块间设横缝。一般地,运行期产生的坝体裂缝与不利气温和荷载变化相关。从现场安全检查成果和监测资料分析来看,库水位年变幅一般在 2.0 m 范围内^[5],由此初步推测坝体顺水流向的裂缝应主要由温度应力引起。考虑到裂缝大多在大坝蓄水后运行期而非施工期中出现^[5],本文以多年平均气温边界条件下的坝体稳定温度场为基准温度场,以运行期月平均变化温度场的温度变化增量为大坝运行期的温度荷载,以此探讨运行期大坝裂缝的成因。

根据工程区气象条件,1 月-2 月气温最低,7 月-8 月气温最高。为此,选择“正常蓄水位+1 月温降”和“正常蓄水位+7 月温升”2 种工况进行计算(简称为“1 月温降”和“7 月温升”)。“1 月温降”荷载指一年中温度最低的 1 月-2 月坝体准稳定温度场与年平均气温边界条件下坝体稳定温度场(基准温度场)之差产生的温度荷载;“7 月温升”荷载指一年中温度最高的 7 月-8 月坝体准稳定温度场与年平均气温边界条件下的坝体稳定温度场(基准温度场)之差产生的温度荷载。通过这两种温度荷载工况,可分析坝体在冬季温降和夏季温升作用下可能产生的温度应力,判断坝体混凝土是否会产生开裂。

表 1 坝体及坝基材料参数

Table 1 Material parameters of dam body and dam foundation

材料	容重 γ /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 E /GPa	泊松比 ν	导热系数 λ /($\text{kJ} \cdot (\text{m} \cdot \text{day} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$)	比热 c /($\text{kJ} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$)	线膨胀系数 α /($10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)
常规混凝土(C ₂₅)	24.00	28.00	0.167	181.00	0.940	5.8
二级配混凝土(C ₂₀)	23.51	25.50	0.167	184.00	0.940	5.8
三级配混凝土(C ₁₅)	23.60	22.00	0.167	184.00	0.940	6.7
石英砂岩(Z ₃ S)	25.40	12.90	0.230	164.88	0.770	7.0

4 坝体温度场及温度应力成果分析

4.1 坝体温度场分析

将多年平均气温和水温对应的准稳定温度场作为计算坝体温度应力的基准温度场。根据文献^[9]的监测资料,坝址区多年平均气温为 15.5 ℃,上下游水温按不同深度取相应的多年平均水温。考虑日照辐射影响,坝体表面暴露在空气中的部分,温度取为 18 ℃。经计算,9号非溢流坝段基准温度场等值线见图 2。

将最低月平均气温对应的准稳定温度场作为计算坝体温度应力的“1月温降”工况温度场。根据气温监测资料和相关气象资料,坝址区1月平均气温为 1.6 ℃,水温按不同深度取相应的1月平均水温。经计算,9号非溢流坝段“1月温降”温度场等值线见图 3。

将最高月平均气温对应的准稳定温度场作为计算坝体温度应力的“7月温升”工况温度场。根据气温监测资料和相关气象资料,坝址区7月平均气温为 27.5 ℃,水温按不同深度取相应的7月平均水温。经计算,9号非溢流坝段“7月温升”温度场等值线见图 4。

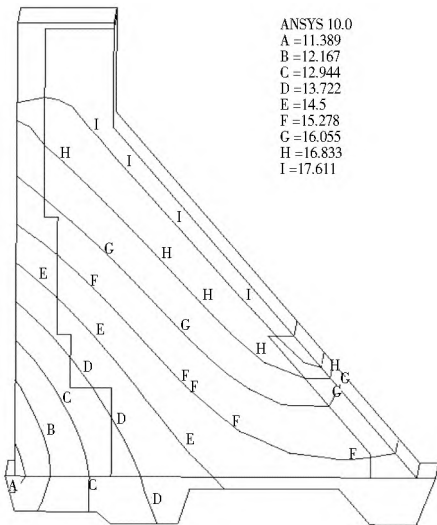


图 2 基准温度场等值线

Fig. 2 Contour map of datum mark temperature field

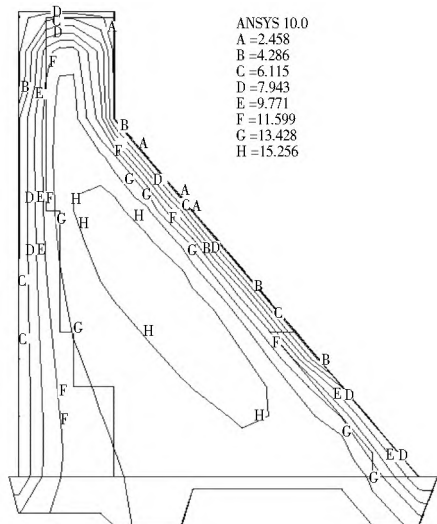


图 3 1月温降温度场等值线

Fig. 3 Contour map of temperature drop field in January

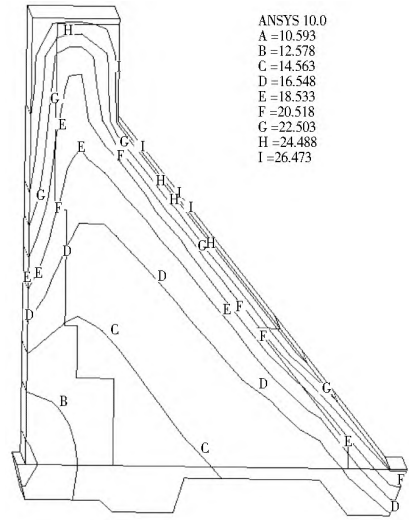


图 4 7月温升温度场等值线

Fig. 4 Contour map of temperature rise field in July

基准温度场以及1月温降、7月温升准稳定温度场的计算结果表明:气温和库水温度对运行期间混凝土坝的影响仅限于坝体表层,即影响深度较浅。坝体上游面因为库水的存在,混凝土温度随水温变化而变化,其他坝体上部及下游离表面较近的混凝土受外界气温的影响,温度变化较为剧烈,混凝土温度梯度较大,变幅也较内部更大,坝体内部温度较稳定,变幅不大。比如,在灌浆廊道内常年稳定在 11.6 ℃~12.6 ℃,与监测资料吻合^[5]。

4.2 坝体温度应力成果分析

4.2.1 温降温度应力分析

计算得出的温降时温度应力等值线见图 5-图 8。

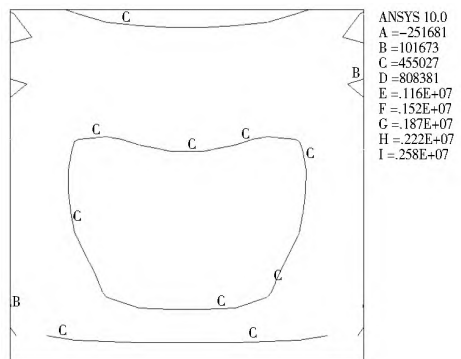


图 5 剖面 X = 1 m Z 向温度应力等值线

Fig. 5 Contour map of temperature stress in the Z direction (X = 1 m)

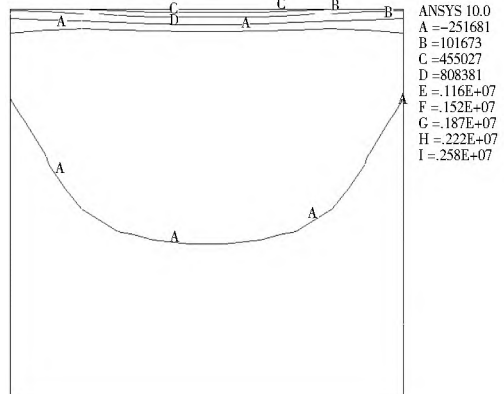


图 6 剖面 X = 4 m Z 向温度应力等值线

Fig. 6 Contour map of temperature stress in the Z direction (X = 4 m)

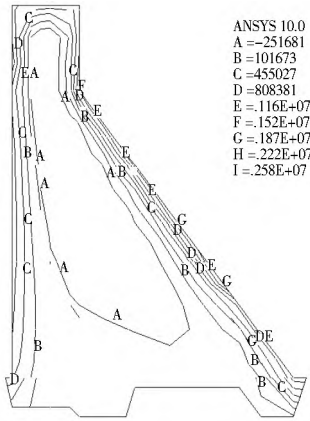


图 7 剖面 Z=21 m Z 向温度应力等值线

Fig. 7 Contour map of temperature stress in the Z direction(Z= 21 m)

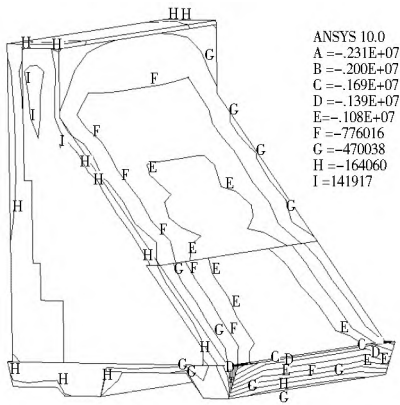


图 8 坝体 Z 向温降应力等值线

Fig. 8 Contour map of temperature drop stress of dam body in the Z direction

从图 5- 图 8 可以看出,在“正常蓄水+ 1 月温降”工况下,该坝段坝体沿坝轴向的拉应力 σ_z 呈现出如下分布规律:坝体表面沿坝轴向的拉应力 σ_z 随高程的增加逐渐减小,并且拉应力 σ_z 在坝段的中间部位最大,向坝段两端逐渐减小,深度范围为 1~ 2 m;坝体内部很大区域内承受压应力作用,大小为 0.25 MPa。坝体表面拉应力 σ_z 的详细分布情况如下所述。

(1) 坝体下游面 σ_z 的分布。

a. 沿高程的分布情况:在接近最低尾水位 84. 80 m 高程处出现一个最大拉应力区,最大拉应力 σ_z 达到 2. 22 MPa。随着高程的增加拉应力 σ_z 逐渐减小,在高程 110. 65 m 左右,拉应力 σ_z 减小到 1. 16 MPa,在坝顶处为 0. 81 MPa。

b. 沿坝轴向的分布情况:在坝体下游面中央高程 84. 80~ 96. 00 m 的区域内,拉应力 σ_z 为 1. 87 MPa,向坝段两端逐渐减小,在坝段两端横缝处 σ_z 为 0. 81 MPa。

(2) 坝体上游面 σ_z 的分布情况。

a. 沿高程的分布情况:在接近正常蓄水位 107. 00 m 高程处出现一个拉应力区,拉应力 σ_z 达到 1. 16 MPa,随着高程的增加拉应力 σ_z 逐渐减小,直到坝顶。

b. 沿坝轴向的分布情况:在坝体上游面正中,高程 107. 00~ 110. 65 m 这块区域,拉应力 σ_z 为 1. 16 MPa,随着向坝段两端的扩展,拉应力 σ_z 逐渐减小,在坝段两端横缝处 σ_z 为 0. 46 MPa。

4. 2. 2 温升温度应力分析

计算得出的温升时坝体温度应力等值线见图 9。

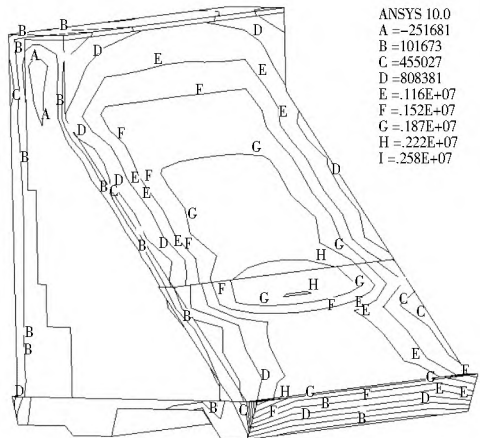


图 9 坝体 Z 向升力应力等值线

Fig. 9 Contour map of temperature rise stress of dam body in the Z direction

可以看出,在“正常蓄水+ 7 月温升”工况下,坝体下游面出现的沿坝轴向的最大压应力 σ_z 为 1. 08 MPa,分布在坝体下游面中间高程 74. 00~ 96. 00 m 的区域。向坝段两端方向,压应力逐渐减小,两端横缝处压应力为- 0. 47 MPa。坝体上游面沿坝轴向的压应力分布规律与下游相同,最大压应力 σ_z 为- 0. 78 MPa,发生在坝体上游面中间高程 95. 00~ 107. 00 m 的区域,坝段两端横缝处压应力也为- 0. 47 MPa。

4. 3 坝体裂缝成因分析

综合温度场与温度应力研究结果可知,在“正常蓄水+ 1 月温降”工况下,坝体下游面最大 Z 向拉应力为 2. 22 MPa,坝体上游面最大 Z 向拉应力为 1. 16 MPa。相关规范规定 C20 混凝土的设计轴心抗拉强度 1. 10 MPa^[8],因此,温降荷载引起的沿坝轴向的拉应力 σ_z 超过规范要求,可能会导致坝体混凝土的开裂。在“正常蓄水+ 7 月温升”工况下,温升荷载引起的沿坝轴向的应力 σ_z 主要为压应力,其满足规范要求。根据文献[4],9 号非溢流坝坝段存在的 2 条贯通性裂缝开裂时间分别为 2002 年 12 月 26 日和 2008 年 02 月 05 日。文献[5]的气温监测资料表明,在这两个时间段内,坝址区正经历寒潮期,降温幅度分别达到- 6℃和- 8℃。这也进一步验证了本文的推断,温降荷载引起的温度应力是导致石漫滩大坝产生裂缝的主要原因。

5 结论

基于运行期的气温和坝体温度监测资料,选取“正常蓄水+ 1 月温降”和“正常蓄水+ 7 月温升”两种典型工况,以 9 号非溢流坝段为研究对象,借助 ANSYS 软件对石漫滩碾压混凝土重力坝进行了热- 结构耦合分析,综合工程运行管理档案和分析结果,分析了该坝运行期裂缝的成因,得到如下结论。

(1)“正常蓄水+ 1 月温降”是该坝的不利工况,大幅温降在坝体表面产生的拉应力超出了混凝土的抗拉强度,导致了大坝坝体上部出现多处有规律横向裂缝的现状。

(下转第 69 页)

- Civil and Environmental Engineering, University of Michigan: Michigan, 2005.
- [6] AWWA. Concrete Pressure Pipe[M]. USA: AWWA, 1995.
- [7] Henry T F. Air water Flow in Hydraulic Structures[M]. Denver Colorado: United States Department of the Interior.
- [8] 杨开林, 时启燧, 董兴林. 引黄入晋输水工程充水过程的数值模拟及泵站充水泵的选择[J]. 水利学报, 2000, (5): 76-80 (YANG Kai lin, SHI Qi sui, DONG Xing lin. Numerical simulation of the filling process for Wanjiashai Diversion Project [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, (5): 76-80 (in Chinese))
- [9] 杨敏, 李强, 李琳, 等. 有压管道充水过程数值模拟[J]. 水利学报, 2007, 38(2): 171-175. (YANG Min, LI Qiang, LI Lin, et al. Numerical Simulation of Water filling Process in Pressure Conduit [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(2): 171-175. (in Chinese))
- [10] 曹命凯, 郑源, 严继松, 等. 长距离有压输水管道充水过程的研究[J]. 长江科学院院报, 2009, 26(12): 54-57. (CAO Ming kai, ZHENG Yuan, YAN Ji song, et al. Research on Pressure Pipeline Water Filling Process in Long Distance [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2009, 26(12): 54-57 (in Chinese))
- [11] SL 155-2012, 水工常规模型试验规程[S]. (SL 155-2011, Test Regulation for Normal Hydraulic Model [S]. (in Chinese))
- [12] SL 162-95, 水电站有压引水系统模型试验规程[S]. (SL 162-95 Test Regulation for Special Hydraulic Model Hydropower Pressurized Water Diversion System [S]. (in Chinese))
- [13] 夏毓常. 水力计算论文集[M]. 中国水利水电出版社, 1997. (XIA Yu chang, Proceedings of Hydraulic calculation [M]. China Waterpower Press. 1997. (in Chinese))
- [14] 夏毓常, 张黎明. 水工水力学原型观测与模型试验[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999. (XIA Yu chang, ZHANF Li ming. Prototype Observation and Model Test of the Hydraulics [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999. (in Chinese))
- [15] 南京水利科学研究所, 水利水电科学研究院. 水工模型试验[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985. (Nanjing Hydraulic Research Institute, China Institute of Water Resources and Hydropower Research. Hydraulic Physical Modelling [M]. Beijing: China WaterPower Press. 1985. (in Chinese))
- [16] SL 74-95, 水利水电工程钢闸门设计规范[S]. (SL 74-95, Specification for design of steel gate in hydraulic and hydroelectric engineering [S]. (in Chinese))
- [17] 吴望一. 流体力学[M]. 北京: 北京大学出版社, 1982. (WU Wang yi. Hydromechanics [M]. Beijing: Beijing University Press, 1982. (in Chinese))
- [18] Wylie E B, Streeter V L. Fluid Transients [M]. New York: McGraw-Hill Book Co., 1978.
- [19] 杨开林. 电站与泵站中的水力瞬变及调节[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000. (YANG Kai lin. Hydraulic Transients and Regulation in Power Plants and Pumping Stations [M]. Beijing: China WaterPower Press, 2000. (in Chinese))
- [20] Vasconcelos J G, Wright S J, Guizani M. Experimental Investigations on Rapid Filling of Empty Pipelines [R]. Report UM-CEE-05-01, University of Michigan, 2005.
- [21] Lauchlan C S, Escarameia M. et al. Air in Pipelines [R]. HR Wallingford, Report SR 649. 2005.

(上接第64页)

(2) 裂缝产生后, 将进一步改变坝体的温度场, 在今后运行过程中, 若再次遭遇大幅温降的不利工况, 裂缝可能向坝体内部继续发展, 导致坝体承载能力下降, 危害大坝的运行安全。

(3) 目前该水库已评定为“三类坝”, 建议加固处理时, 应针对性地采取保温措施, 以避免裂缝进一步发展。

参考文献(References):

- [1] 宋恩来. 温度作用对运行期混凝土坝的影响[J]. 大坝与安全, 2003, (2): 16-18. (SONG En lai. Temperature Effect on Concrete Dam during Operation [J]. Dam & Safety, 2003, (2): 16-18. (in Chinese))
- [2] 朱伯芳. 建设高质量永不裂缝拱坝的可行性及实现策略[J]. 水利学报, 2006, 37(10): 1155-1162. (ZHU Bo fang. On the Feasibility of Building High Quality Arch Dams without Cracking and the Relevant Techniques [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(10): 1155-1162. (in Chinese))
- [3] 朱伯芳. 混凝土拱坝运行期裂缝与永久保温[J]. 水利发电, 2006, 32(8): 21-24. (ZHU Bo fang. On Permanent Superficial Thermal Insulation of Concrete Arch Dams [J]. Water Power, 2006, 32(8): 21-24. (in Chinese))
- [4] 马福恒, 李子阳, 戴群. 河南省石漫滩水库大坝安全综合评价报告[R]. 南京: 南京水利科学研究所, 2012. (MA Fu heng, LI Zi yang, DAI Qun. Comprehensive Safety Assessment Report of Shimantan Reservoir Dam in Henan Province [R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2012. (in Chinese))
- [5] 马福恒, 沈振中, 袁自立. 河南省石漫滩水库大坝原型观测资料分析报告[R]. 南京: 南京水利科学研究所, 2012. (MA Fu heng, SHEN Zhen zhong, YUAN Zi li. Analysis Report of in situ Monitoring Data of Shimantan Reservoir Dam in Henan Province [R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2012. (in Chinese))
- [6] 李子阳, 马福恒, 沈振中. 河南省石漫滩水库大坝结构性能安全评价报告[R]. 南京: 南京水利科学研究所, 2012. (LI Zi yang, MA Fu heng, SHEN Zhen zhong. Safety Assessment Report of Structural Performance of Shimantan Reservoir Dam in Henan Province [R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2012. (in Chinese))
- [7] 邓仕涛. 基于ANSYS的丹江口大坝加高结构性能及温度应力研究[D]. 南京: 河海大学, 2008. (DENG Shi tao. Study on Structural Behavior and Thermal Stress of Heightening of Danjiangkou Dam on ANSYS [D]. Nanjing: Hohai University, 2008. (in Chinese))
- [8] SLT 191-96, 水工混凝土结构设计规范[S]. (SLT 191-96, Design Code for Hydraulic Concrete Structures [S]. (in Chinese))