

某拱坝坝顶纵向裂缝开度变化规律“异常”成因分析

杨程天¹,顾冲时¹,何 菁²

(1. 河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098; 2. 南京市水利建筑工程检测中心有限公司,江苏 南京 210036)

摘要:针对某重力拱坝坝顶沿拱向的贯穿性裂缝在河床坝段部分裂缝开度表现为温升时增大、温降时减小的“异常”现象,采用三维有限元方法,引入双节点单元来仿真分析坝顶纵向裂缝传力特性,在温升与温降两种工况下模拟坝顶纵向裂缝开度的变化情况,并结合裂缝实测资料分析了该裂缝出现“异常”变化规律的物理成因。分析结果表明:该重力拱坝坝顶纵向裂缝上游侧拱圈弧长大于下游侧拱圈弧长,温升时,上游侧拱圈膨胀向上游变形大于下游侧拱圈膨胀向上游变形,导致河床部位的坝顶纵向裂缝开度增大;而温降时,上游侧拱圈向下游变形大于下游侧拱圈向下游变形,从而出现河床部位坝顶纵向裂缝开度较小甚至处于闭合状态的现象。

关键词:重力拱坝;坝顶纵向裂缝;裂缝开度;双节点单元

中图分类号:TV642.4⁺4 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2022)02-0085-04

Cause analysis of “abnormal” variation law of longitudinal crack opening of a gravity arch dam crest//YANG Chengtian¹, GU Chongshi¹, HE Jing² (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Nanjing Water Conservancy and Construction Engineering Testing Center Co., Ltd., Nanjing 210036, China)

Abstract: Aiming at the “abnormal” phenomenon that the penetrating crack opening of a gravity arch dam crest along the arch direction increases when the temperature rises and decreases when the temperature falls, a three-dimensional finite element method was used to simulate the force transmission characteristics of longitudinal cracks on the dam crest. By introducing two-node element method, the opening degree variation of longitudinal cracks was simulated under two working conditions of temperature rise and temperature drop, and the physical causes of abnormal variation of cracks were analyzed based on the measured data of cracks. The analysis results show that the arc length of the upstream side arch ring is longer than that of the downstream side arch ring. When the temperature rises, the deformation of the upstream side arch is larger than that of the downstream side arch, which leads to the increase of the longitudinal crack opening at the riverbed. When the temperature drops, the deformation of the upstream side arch ring downstream is larger than that of the downstream side arch ring downstream, which leads to the phenomenon that the longitudinal crack opening of the dam crest at the riverbed is smaller or even in a closed state.

Key words: gravity arch dam; longitudinal cracks of dam crest; crack opening; two-node element

某混凝土重力拱坝位于我国中部地区,以发电为主,同时兼顾防洪、灌溉、养殖、航运等功能,最大坝高76.3 m,设计校核洪水位为124.6 m,汛后最高蓄水位为119.0 m,汛限制水位为117.0 m,装机15万kW,是一座综合性中型水利水电枢纽工程。在运行过程中,该坝坝顶上下游方向中间部位从左岸至右岸产生一条沿拱向的贯穿性裂缝,图1~3为河床14号、15号坝段和右岸坝坡30号坝段测缝计测值过程线。由图1和图2可知,河床坝段裂缝开

度温升时增大,温降时减小,不符合一般的裂缝开度变化规律;由右岸坝坡30号坝段测缝计测值过程线(图3)可看出,靠近坝坡坝段裂缝开度温升时减小,温降时增大,符合一般的裂缝开度变化规律。

混凝土坝产生裂缝是普遍现象,对裂缝产生的成因已有很深入的研究。张振洲等^[1-2]运用三维有限元方法,研究了拱坝在不同工况下的应力应变分布规律,由此解析了拱坝裂缝的成因;Lin等^[3]通过三维断裂力学数值模拟,提出了一种基于断裂韧性

基金项目:国家自然科学基金(51739003,51779086,52079046);中央高校基本科研业务费专项(B210202017);广东省水利科技创新项目(2020-04)

作者简介:杨程天(1997—),男,硕士研究生,主要从事大坝安全监控研究。E-mail:1275958743@qq.com

通信作者:顾冲时(1962—),男,教授,博士,主要从事大坝安全监控研究。E-mail:csgr@hhu.edu.cn

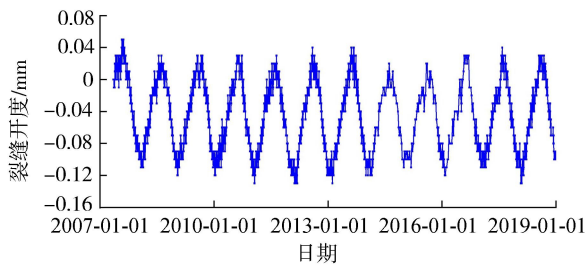


图1 河床14号坝段测缝计测值过程线

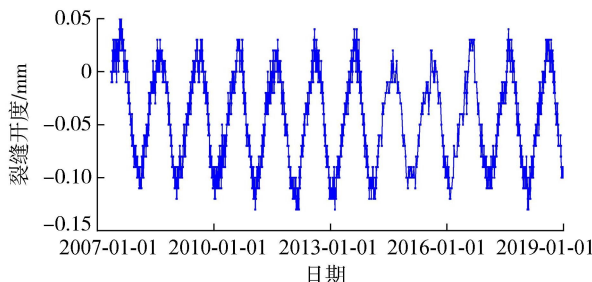


图2 河床15号坝段测缝计测值过程线

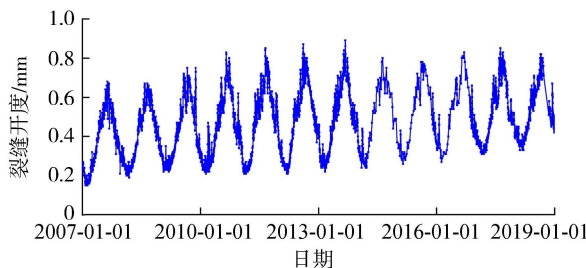


图3 右岸坝坡30号坝段测缝计测值过程线

的超高拱坝裂缝分析方法;Hu等^[4]利用特殊间隙单元,构建了包含预先存在裂缝的三维有限元模型,提出了考虑裂缝张开位移的静水热耦合时间模型;吴建营等^[5]提出了适用于混凝土等准脆性材料和结构破坏全过程分析的扩展内嵌裂缝模型,并给出了其有限元实现方法。在温度裂缝方面,张国新等^[6]详细介绍了高混凝土坝温控防裂的研究进展;程井等^[7]探讨了基于有限元法的温度场反馈分析模型,解释了高混凝土坝温度应力是导致裂缝产生的重要原因。本文结合有限元分析和裂缝监测成果,剖析该重力拱坝坝顶纵向裂缝开度变化规律。

1 分析方法

1.1 变温场的仿真分析原理

由图1~3可知,该重力拱坝坝顶纵向裂缝开度变化主要受温度变化的影响,呈年周期性变化。本文在坝体变温场仿真分析方法研究的基础上,进一步研究坝体变温对该裂缝变化的影响。

根据文献[8],长期运行的大坝温度场满足下列导热方程:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

式中: α 为热导率; T 为变温场函数, $T=T(x,y,z,\tau)$,其中 τ 为时间。

根据变分原理,若函数 $T(x,y,z)$ 在边界 C' 上满足 $T=T_b$,并使下式泛函实现极值,则上述变温场求解等价于求下式泛函的极值问题:

$$I(T) = \frac{1}{2} \iiint_R \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] dx dy dz \quad (2)$$

由欧拉方程可知, $T(x,y,z)$ 必然在区域 R 内满足 $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0$,故 $T(x,y,z)$ 为所求的解,在求解过程中在边界 C' 上令 $T=T_b$ 。

把求解域划分为有限个单元,设单元节点为1、2、 $\dots$ 、 i ,节点温度为 T_1 、 T_2 、 $\dots$ 、 T_i ,单元内任一点的温度 $T_e(x,y,z)$ 用节点温度表示如下:

$$T_e(x,y,z) = [N_1(x,y,z) T_1 + N_2(x,y,z) T_2 + \dots + N_i(x,y,z) T_i] = (N_1, N_2, \dots, N_i) (T_1, T_2, \dots, T_i)^T = \mathbf{N} \mathbf{T}_e \quad (3)$$

式中: $N_1(x,y,z)$ 、 $N_2(x,y,z)$ 、 $\dots$ 、 $N_i(x,y,z)$ 为形函数; $\mathbf{N}$ 为形函数矩阵; $\mathbf{T}_e$ 为节点温度列阵。

本文利用Abaqus软件对该重力拱坝变温场进行计算,计算步骤如下:①在Hypermesh中划分好网格后导入Abaqus中;②定义坝体材料特性,在Edit Material窗口中录入材料参数并定义传热系数和线膨胀系数,然后根据热传导分析的类型进一步定义比热容,将定义好的参数赋予坝体中相应的单元;③在Edit Step窗口选择Heat Transfer分析步;④定义初始变温场,初始变温边界条件施加在各单元节点上;⑤在Create Boundary Condition窗口中添加边界条件;⑥定义几何特性;⑦在Job Manager中选择定义好的温升与温降分析工况,点击Submit进行计算;⑧计算结束后进入Visualization模块查看结果,得到各节点的变温值。

1.2 变温作用下混凝土坝裂缝开度变化有限元分析实现技术

采用接触模型来模拟该重力拱坝坝顶纵向裂缝开度变化规律,由于普通节点单元接触模型模拟裂缝的几何性质较困难,故引入双节点单元的接触模型进行分析。

1.2.1 双节点单元的构建

双节点单元是沿着裂缝开展的深度及走向,将普通有限单元的节点拆分成两个节点,从而使相邻单元在共同节点处断开,其有限元网格单元见图4。对于未产生裂缝部分的单元,其有限元网格见图5。图4中ENKH和ENYX为裂缝面,在ENMDGJKH和ENOFILYX两个单元之间模拟了一条长HK(或

XY)、宽HX(或KY)、深EX(或EH)的裂缝。在模拟整条裂缝时,根据裂缝的走向、宽度及深度,类似于上述方法组合若干个双节点单元即可。

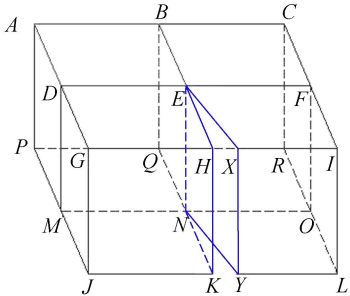


图4 双节点单元网格

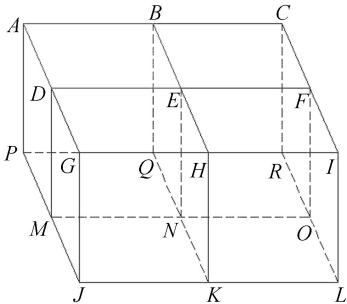


图5 普通单元网格

大坝在变温荷载作用下,裂缝会呈现张开或闭合状态,若相邻两个裂缝单元受到向两侧的拉应力,则裂缝开度增加,双节点单元在模拟受拉应力时裂缝开度的变化规律较为准确;但相邻两个裂缝单元受到向内侧的压应力时,若不考虑接触限制,则会出现两个单元互相嵌入的情况,因此采用双节点单元模拟裂缝变化时,增加裂缝开度不小于0的约束条件。

1.2.2 基于接触模型的混凝土坝裂缝开度变化有限元分析

接触问题有限元分析的基本方法一般有数学规划法、接触约束法和直接迭代法,其中直接迭代法尤其适用于接触面积较大或难以预知接触发生区域的非线性接触问题。直接迭代法又分为柔度法、位移法与混合法,本文采用直接迭代的位移法进行裂缝开度变化有限元分析,求解两个接触体的方程^[9-12]为

$$\mathbf{K}''\mathbf{U} = \mathbf{F} - \mathbf{K}_\delta (0, \delta, 0)^T \tag{4}$$

式中： $\mathbf{K}''$ 、 $\mathbf{K}_\delta$ 为刚度矩阵； $\mathbf{U}$ 为位移场； $\mathbf{F}$ 为响应的荷载向量； δ 为接触面初始间距。

位移法能根据大坝的变形约束和相互作用自动探测接触区域,施加接触约束,不会增加模型的自由度,不需要增加特殊的接触面单元。在有限元分析过程中,由于施加变温荷载后变形的接触状态无法预知,故先假定接触状态,由计算结果进行接触状态检查,若与假定状态不同,则更新接触状态进行迭代,直至结果收敛。本文利用位移法计算得到某一

变温工况下的坝体各节点的位移值,在此基础上,求解裂缝处的双节点位移差值,据此研究裂缝开度的变化规律。

1.3 拱坝三维有限元模型的构建

为深入分析该重力拱坝坝顶纵向裂缝开度的变化性态,结合该坝的特点,充分考虑坝址区地形地质条件的影响,建立了该坝三维有限元模型,其坝体与基岩三维有限元网格见图6。在三维有限元计算模型中,坝基基岩厚度约1.5倍坝高,两岸基岩厚度约2倍坝高;坝体与基岩采用空间8节点等参实体单元,整个计算区域共88947个节点,46618个单元。

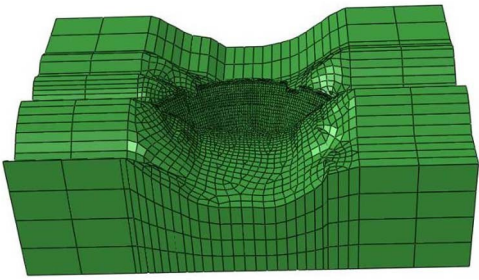


图6 坝体及基岩三维有限元模型

2 模拟结果与分析

根据实测温度资料确定初始温度场,将2005—2010年坝址气温实测值(图7)导入Abaqus中进行Heat Transfer传热分析,求得坝体在气温变化下的初始温度场如图8所示。

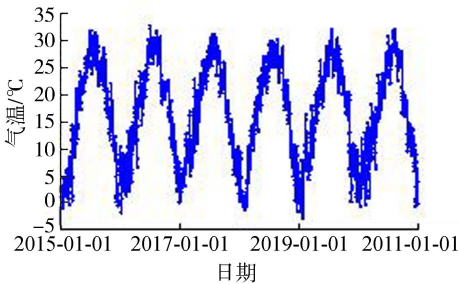


图7 坝址实测气温

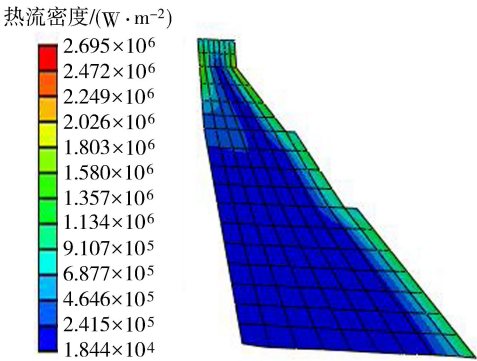


图8 坝体初始温度场

由该重力拱坝温度计监测资料可知,1—3月坝体温度较低,7—9月较高。因此,分别选择2008年

1月31日、2008年7月5日的实测温度与上述初始温度场的差值作为典型温降和温升工况。因坝顶纵向裂缝高程位于正常蓄水位以上,水压对坝顶纵向裂缝影响不显著,故重点分析变温对该纵向裂缝开度变化的影响。表1为2008年1月31日与7月5日坝顶纵向裂缝从左岸至右岸在3号、8号、14号、15号、30号坝段的裂缝开度有限元计算结果。由表1可以看出,低温工况河床坝段坝顶纵向裂缝处于受压状态,开度为0,岸坡坝段坝顶纵向裂缝开度较大,30号坝段裂缝开度为0.66 mm。在高温工况下,河床坝段坝顶纵向裂缝开度较大,最大开度发生在14号坝段,为0.74 mm,与实测值相近,而岸坡坝段坝顶裂缝处于闭合状态,开度为0。

表1 两种工况下坝顶纵向裂缝开度有限元计算结果

单位:mm

坝段编号	温降工况裂缝开度 (2008年1月31日)	温升工况裂缝开度 (2008年7月5日)
3	0.61	0
8	0.55	0
14	0	0.74
15	0	0.69
23	0	0.68
30	0.66	0

由有限元计算结果可知,该重力拱坝河床坝段坝顶纵向裂缝在温度较低时,裂缝开度较小,裂缝处于闭合状态;而温度较高时,裂缝开度较大,裂缝处于张开状态;而靠近岸坡坝段,坝顶裂缝温度较低时开度较大,而温度较高时开度较小,且处于闭合状态。坝顶纵向裂缝开度变化有限元分析结果与实测相符,其原因是坝顶纵向裂缝上游侧拱圈弧长大于下游侧拱圈弧长,温升时,上游侧拱圈膨胀向上游变形大于下游侧拱圈膨胀向上游变形,导致河床部位的坝顶纵向裂缝开度增大;而温降时,上游侧拱圈向下游变形大于下游侧拱圈向下游变形,从而出现河床部位坝顶纵向裂缝开度较小甚至处于闭合状态的现象。上述原因导致坝顶河床坝段纵向裂缝开度变化与一般裂缝开度变化规律不一致,产生温度较低时裂缝开度较小,而温度较高时裂缝开度较大的“异常”变化规律;而岸坡坝段坝顶纵向裂缝在变温荷载作用下,裂缝变化受上、下游侧拱圈弧长变化影响较小,主要受混凝土材料热胀冷缩的影响,即温度较低时,裂缝开度较大,在温度较高时,裂缝开度较小(甚至处于闭合状态),符合一般裂缝在变温作用下的开度变化规律。

3 结 语

为分析某重力拱坝坝顶纵向裂缝开度变化规律

“异常”成因,采用混凝土坝温度场仿真分析方法,导出了求解坝体混凝土准稳定温度场的有限元支配方程,构建了三维有限元模型,在此基础上引入双节点单元模拟裂缝开度变化,同时引入接触模型位移法来求解变温工况下的坝顶纵向裂缝各节点的位移值。结合裂缝监测成果,剖析了该重力拱坝坝顶不同部位纵向裂缝开度变化规律,河床坝段坝顶纵向裂缝温度升高时开度增大,而温度较低时开度较小(甚至处于闭合状态)是因为坝顶纵向裂缝上游侧拱圈弧长大于下游侧拱圈弧长,温升时,上游侧拱圈膨胀向上游变形大于下游侧拱圈膨胀向上游变形,导致河床部位的坝顶纵向裂缝开度增大;而温降时,上游侧拱圈向下游变形大于下游侧拱圈向下游变形,导致河床部位的坝顶纵向裂缝开度减小。

参考文献:

[1] 张振洲,吴瑞婷,段炼,等.基于有限元法的西南某碾压混凝土拱坝裂缝成因研究[J]. 人民珠江,2016,37(3):57-64. (ZHANG Zhenzhou, WU Ruiting, DUAN Lian,et al. Research on causes of crack in a RCC arch dam in Southwest China with FEM[J]. Pearl River, 2016,37(3):57-64. (in Chinese))

[2] 曹国东,陈胜超,袁俊平,等.拱坝裂缝成因三维有限元分析[J]. 人民黄河,2013,35(7):110-113. (CAO Guodong, CHEN Shengchao, YUAN Junping, et al. Study on crack causes of arch dam by using 3D finite element analysis[J]. Yellow River, 2013,35(7):110-113. (in Chinese))

[3] LIN P, GUAN J, PENG H. et al. Horizontal cracking and crack repair analysis of a super high arch dam based on fracture toughness[J]. Engineering Failure Analysis, 2019,97:72-90.

[4] HU J, WU S H Statistical modeling for deformation analysis of concrete arch dams with influential horizontal cracks[J]. Structural Health Monitoring, 2019,18(2):546-562.

[5] 吴建营,李锋波,徐世烺.混凝土破坏全过程分析的扩展内嵌裂缝模型[J]. 水利水电科技进展,2016,36(1):53-59. (WU Jianying, LI Fengbo, XU Shilang. Extended embedded crack finite element method for modeling localized failures in concrete structures[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016,36(1):53-59. (in Chinese))

[6] 张国新,刘毅,刘有志,等.高混凝土坝温控防裂研究进展[J]. 水利学报,2018,49(9):1068-1078. (ZHANG Guoxin, LIU Yi, LIU Youzhi, et al. Reviews on temperature control and crack prevention of high concrete dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018,49(9):1068-1078. (in Chinese))

(下转第94页)