

双江口进水塔塔背回填混凝土 稳定性数值仿真研究

唐青山¹, 钟 为², 李鹏鑫¹

(1.葛洲坝集团第一工程有限公司,湖北 武汉 430000;2.国家能源集团大渡河公司,四川 成都 610041)

摘 要:水电站进水塔塔背回填混凝土对整个塔体的受力至关重要,合理的回填高度要求在低成本、低投资的基础上能够实现塔体的安全运行,而塔背回填混凝土的合理设计、施工则是保证工程安全的前提,因此,对于双江口进水塔塔背回填混凝土稳定性研究具有重要工程意义。本文通过建立进水塔塔背岩质边坡的计算模型,采用有限差分法分析了回填过程混凝土和边坡的稳定性,考虑了回填混凝土与边坡接触面(岩—混凝土接触面)的相互作用。结果表明:塔背回填混凝土分层施工过程中混凝土以及岩质边坡整体稳定性较好;岩—混凝土接触面直接影响模型的应力、位移场分布特征,其力学参数的选取和设计对回填混凝土施工工艺优化具有重要参考价值。

关键词:进水塔;数值分析;特征对比;结果分析

中图分类号:TV732.1;TV642;TP202+.1 **文献标识码:** A **文章编号:**1001-2184(2019)增 2-0122-06

Numerical Simulation Study on the Stability of Backfill Concrete on the Back of Intake Tower at Shuangjiangkou

TANG Qingshan, ZHONG Wei, LI Pengxin

(1.China Gezhouba Group No.1 Engineering Co., LTD, Wuhan, Hubei, 430000;

2.Dadu River Co., LTD, CHN Energy, Chengdu, Sichuan, 610041)

Abstract: The backfill concrete on the back of intake tower of hydropower station is very important to the stresses of the whole tower body. Reasonable backfill height requires that the safe operation of the tower body can be realized on the basis of low cost and low investment, and reasonable design and construction of the backfill concrete on the back of the tower is the precondition to ensure the safety of the project. Therefore, it is of great engineering significance to the study on the stability of the backfill concrete on the back of intake tower at Shuangjiangkou. In this paper, the calculation model of rock slope on the back of intake tower is established, the stability of concrete and slope during backfilling is analyzed by the finite difference method, and the interaction between backfill concrete and slope contact surface (rock-concrete interface) is considered. The results show that the overall stability of the concrete and rock slope is good during the layered construction of the backfill concrete; the rock-concrete interface directly affects the distribution characteristics of the stress and displacement fields of the model, and the selection and design of its mechanical parameters have important reference value for the optimization of the backfill concrete construction technology.

Key words: intake tower; numerical analysis; characteristics comparison; results analysis

0 引 言

我国是世界上建设水库最多的国家之一,随着我国筑坝技术的不断提高,200 m 级以上的大坝工程相继建成,与此相对应的引水和泄水系统中的进水塔的高度也随之增高。进水塔^[1, 2]作为水库岸边的高耸塔式结构,底部位于山体边坡之上,下游通过人工回填与开挖岩体相连,大部分结

构常年处于水面以下,受力情况复杂。作为发电、灌溉、泄洪和放空等系统的首部建筑物,进水塔失事后不仅会导致整个水利枢纽不能正常运行,而且会严重危害大坝的安全,间接会对水库下游人民群众的生命财产安全造成威胁。

对于进水塔结构而言,其塔背回填土作为塔身在水平方向上的唯一约束,在维持进水塔稳定性和安全性上具有重要作用。徐东芝等人^[3]认为

收稿日期:2019-08-22

对进水塔进行回填有利于结构的抗震和稳定。陈震等人研究了进水塔在考虑黏弹性边界竖向地震作用下不同回填高度对塔背接触部位应力的影响,认为塔体抗震能力受回填高度影响很大,回填高度既不能太高也不能太低。

在诸多的混凝土工程中,通常会在岩—混凝土接触面上发生剪切破坏,从而导致重大事故的发生,因此,对于回填混凝土工程中存在的结构弱面性能的研究对其工程设计以及施工工艺优化具有重要的借鉴意义。曹伟等人^[4]将塔背回填材料由单纯的混凝土改为小部分石渣和混凝土的复合体,并证明了该种回填方式大幅降低了塔背与回填混凝土交界面的应力,对结构抗震有利。

本文针对双江口水电站进水塔塔背混凝土回填过程中岩质边坡以及所填筑混凝土的变形和受力特征,在考虑岩—混凝土接触面的条件下,采用FLAC^{3D}软件对施工过程中回填混凝土的稳定性进行了一定的探究,相信本文的研究成果能够对业界相关研究起到一定的启发作用。

1 工程概况

双江口水电站^[5]位于四川省阿坝州境内,是大渡河干流上游控制性水库。双江口水电站进水

口布置在左岸岸边,通过人工开挖后布置 4 台机组所需的进水口,进水口为塔式结构。进水塔呈“一”字型直线并排布置,前缘总宽度 112.6 m,塔基开挖高程 2 395 m,进水塔底板高程 2 400 m,塔顶高程 2 508 m,塔总高 113.00 m;塔身后背回填混凝土,回填高程 2 420~2 455 m。

2 数值分析方案的确定

2.1 计算模型的简化

模型边坡为三阶台阶式放坡,由下往上前两阶设计坡度为 1:0.5,第 3 阶坡度为 1:0.75。混凝土回填高程共 35 m,拟设计为 12 层分层填筑,填筑混凝土纵向延伸距离约 130 m,为了简化模型和减轻计算量,利用 FLAC^{3D} 软件建立了基于实际尺寸的二维有限差分计算模型(见图 1),模型总计节点数 43 050,单元数 21 024 个。混凝土单元左侧设置一排支撑钢板,固定其三个方向速度以模拟真实施工过程。在相应位置布置三个位移监测点(S₁、S₂和 S₃)。为实现二维平面应力分析,固定模型所有节点 Y 向速度;模型底边界固定模型底边 X、Y、Z 三个方向速度,模型左、右边界固定 x 向速度。

2.2 本构模型和力学参数选取

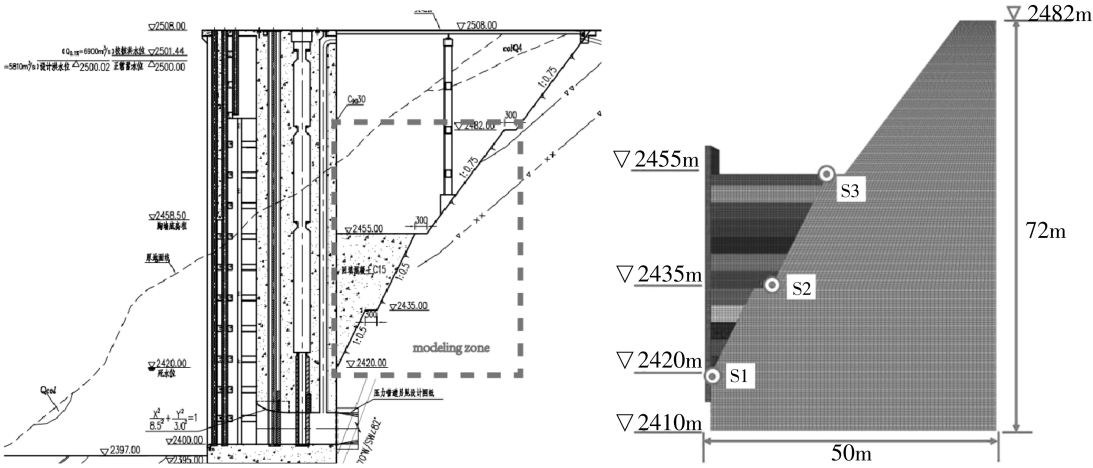


图 1 计算模型及网格划分

在前人的研究^[6,7]中,鲜有学者针对回填混凝土工程中接触面问题进行系统的研究,但岩—混凝土接触面的存在与天然地层中岩层面等弱面性质类似,均属于潜在破坏发生的优势面,其力学参数直接影响了回填后混凝土与边坡基岩整体的稳定性。针对该问题,本文对所模拟混凝土回填工程中设置有无接触面两组工况展开对比分析。

根据现场已有的地质勘查资料以及室内试验得到的模型计算参数见表 1,由于没有实测现场岩—混凝土接触面的物理力学参数,这里笔者模型参数主要依据为文^[8]中的材料参数。接触面采用库伦剪切本构,FLAC^{3D} 软件中接触面表现为一系列无厚度的面单元。

3 模型特征对比

表 1 模型各材料及分界面的物理力学参数

类型	本构模型	弹模 /GPa	泊松比	密度	拉伸强度 /MPa	内摩擦角	内聚力 /MPa
花岗岩岩基	莫尔库伦	69	0.26	3 000	10	35	4
钢板支撑	弹性	195	0.247	7 900	—	—	—
混凝土	莫尔库伦	30	0.167	2 500	3	54.9	3.18
类型	本构模型	摩擦角		黏聚力	法向刚度	切向刚度	拉伸强度
岩—混凝土接触面	库伦剪切	42.8		1.5 MPa	4.7e9	4.7e9	1.6

3.1 模型应力场分布特征对比

基于更改强度参数的弹塑性求解法得到模型初始应力场(见图 2(a)和图 3(a))。分析图像发现模型左下边界处的重力值略有异常,这与设置的边界条件有关,可忽略其影响。模型水平应力场分布显示自然条件下计算模型边坡坡脚以及台阶处存在不同程度的应力集中现象。

逐层激活预设的混凝土单元,以模拟混凝土回填施工,手动归一化 ColorBar 后得到考虑有无接触面的工况下模型的重力场(图 2)以及水平应力场(图 3)。从图 2 中可以看出两种工况下模型右侧岩质边坡的重力分布特征基本相同,说明混凝土回填施工对于边坡重力分布基本无影响。在边坡第一阶台阶上会出现应力集中现象(仅考虑所回填混凝土单元分布区域),其主要区别在于:无接触面工况计算得到的重力分布云图在混凝土一边坡交界面呈现出锯齿状的“波动”,第一级台阶处存在一个椭圆形的应力集中区,该椭圆区域

内最大重力值为 2.99 MPa;在考虑混凝土一边坡接触面的工况下,混凝土与边坡单元交界面上的重力云图具有较好的连续性,第一节台阶处重力场较为复杂,台阶面附近存在一个半椭圆形的重力低值区,其重力值与模型表层单元近似(重力值范围-0.03~0 MPa,考虑到模型计算精度,这里近似看成 0 MPa),其外侧区域是一个长轴与岩—混凝土接触面近似重合的半椭圆应力集中区,区内最大重力为 7.42 MPa。两种工况下模型右侧岩质边坡的水平应力分布(图 3)大致相同,其主要差异在于:无接触面工况计算结果显示,水平应力集中在混凝土一边坡交界面处呈现“台阶”状分布;在考虑混凝土一边坡接触面的工况下,模型水平应力在接触面附近分布较均匀,但在边坡第一节台阶处水平错动现象更加明显(接触面两侧水平错动应力:上部 2.64 MPa 向右;下部-4.95 MPa 向左)。

3.2 模型位移场分布特征对比

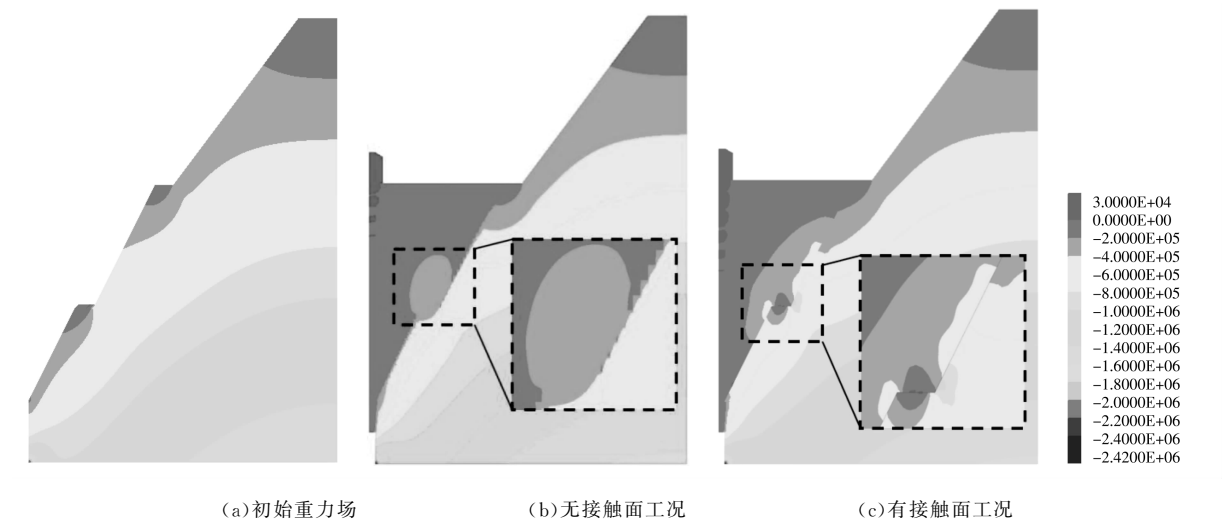


图 2 浇筑完成后模型重力分布云图

两种工况下模型的垂直位移和水平位移分布见图 4 和图 5,分析图像可以看出模型整体的稳

定较好。图 4 显示两种工况下模型的垂直位移均存在“阶梯型”的分布规律,同时边坡表面还出现

了一个潜在圆弧状“滑动面”(从其沉降值判断不会发生滑动)。其区别在于考虑接触面后模型最大垂向位移分布区更加靠近接触面位置,边坡潜在滑动面范围较之于无接触面工况也更小。两种工况下模型水平位移分布(图 5)的规律性更为明

显;与垂直位移类似,水平位移同样存在“阶梯型”的分布特征;两种工况对应的模型第二级台阶附近均存在一个水平张拉区,但考虑接触面工况下,模型第一级边坡坡面以及台阶附近的混凝土单元在受力上表现为水平张拉。

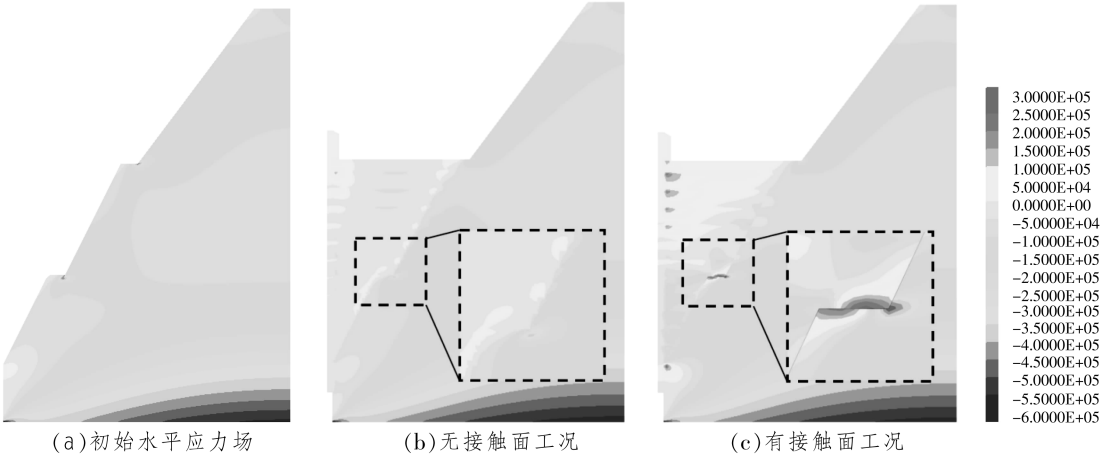


图 3 浇筑完成后模型水平应力分布云图

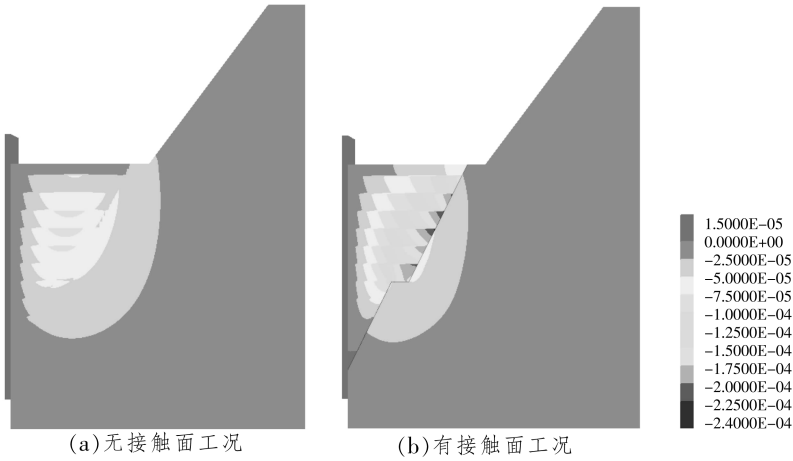


图 4 浇筑完成后模型垂直位移分布云图

图 6 为两种设计工况下预置监测点的垂直和水平位移变化曲线。对比垂向位移(图 6(a))发现两种工况下监测点沉降值相差不大,考虑接触面工况下 S_2 、 S_3 监测点垂直位移均小于无接触面工况(以 S_3 监测点为例,其在无接触面工况下最终垂直沉降为 0.04 mm,有接触面工况下最终垂直沉降仅为 0.024),说明接触面摩擦对回填混凝土的沉降具有一定的抑制作用。接触面对回填混凝土的作用显然不仅仅是抑制垂向沉降的作用,

图 6(b)中各个监测点水平位移监测值的区别更能够说明问题; S_3 监测点由于处于岩质边坡的最顶端,其受拉发生向左的水平位移,且有接触面工况下的位移值;0.013 mm 小于无接触面工况的 0.02 mm; S_2 监测点在无接触面工况下,第七层回填完成后测点水平位移由负变为正,说明随着回填的进行 S_2 监测点所在的第一级台阶处由受压逐渐转化为受拉,而在考虑接触面工况下, S_2 监测点的水平位移始终为正,说明第一级台阶

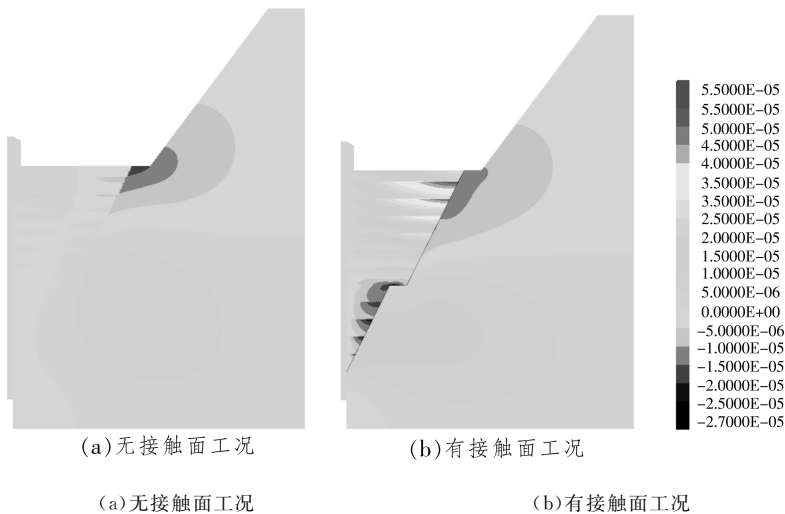


图 5 浇筑完成后模型水平位移分布云图

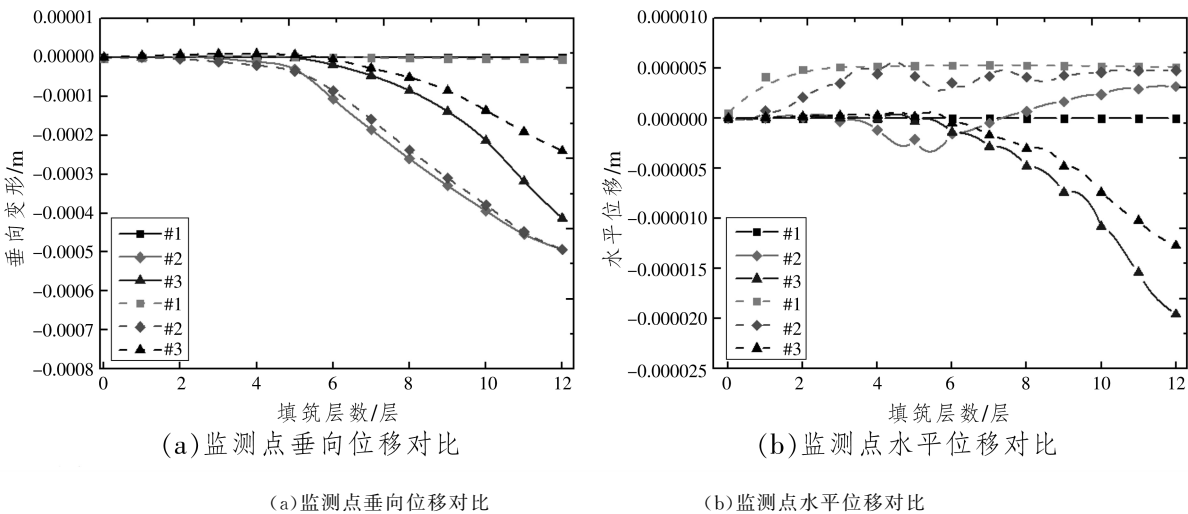


图 6 两种计算工况下监测点的位移分布特征(虚线为有接触面工况,实线为无接触面工况)

始终处于受拉的状态。

4 计算结果分析

从 3.1 节以及 3.2 节的分析结果可以看出:分层填筑导致模型应力场不同方向上存在不同程度的应力集中现象,并导致位移场出现较为明显的“阶梯化”分布的现象;岩—混凝土接触面的存在一定程度上提高了回填混凝土与岩质边坡的胶结程度,其作用机理主要在于接触面的摩擦效应,这从两种工况下位移云图以及监测点位移变化曲线中看出。

而分析本文两种工况下模型计算结果不难发现,混凝土回填工程中岩—混凝土接触面对模型应力场、位移场结果具有较大影响,如:模型第一级台阶小范围内重力值偏低,但存在水平应力集

中的现象,说明这个部位可能需要加强抗滑动设计;模型第一级边坡坡面和台阶附近的混凝土也会处于水平拉伸的状态,因此这个部位属于潜在拉伸破坏发生部位,在组织设计时需要注意采取适当的锚固措施。

对于不同性质、具有显著接触关系的实际工程而言,考虑接触面能够在一定程度上得到更加贴合实际和有别于常规数值仿真的计算结果。在本文的研究中,有无涉及岩—混凝土接触面的两种计算工况的结果具有较明显的区别,实际上接触面的力学参数在很大程度上决定了其能否计算收敛以及后续模型计算结果的准确度。笔者建议,通过实验室岩—混凝土接触面的直接剪切试

验来获得最真实、可靠地接触面参数,使数值模拟结果更具有说服力。

5 结 语

本文利用 FLAC3D 软件模拟了塔背回填混凝土分层施工过程中混凝土以及岩质边坡整体稳定性,针对混凝土材料与边坡之间接触面的有无两种工况开展研究。得到如下结论:

双江口进水塔塔背回填混凝土具有较高稳定性;FLAC3D 软件可以很好的模拟混凝土工程的应力和变形,岩一混凝土接触面的存在在一定程度上能够提高混凝土与岩质边坡之间的胶结程度;较之于未设置接触面的计算工况,考虑接触面后计算模型的重力场和水平应力场具有更加典型和独特的分布特征,如模型第一级台阶的应力集中、位移错动等,这对工程设计和现场施工具有重要的参考价值和指导意义。

参考文献:

[1] 吕念东,贾爱军,贾仕开,余迎宾.巴基斯坦塔贝拉水电站四期扩建工程金属结构布置与设计[J].四川水利,2019,40(02):8—10.

[2] 张岳,李守义,夏可,郭金君,何冠洁,李萌.高耸进水塔结构塔背回填高度抗震研究[J].水利水电技术,2018,49

(11):62—67.

[3] 徐东芝,骆勇军,祁潇,魏珍中.塔背回填对混凝土进水塔结构静动力响应影响分析[J].水电能源科学,2014,32(04):81—83+95.

[4] 曹伟,刘云贺,党康宁,郑晓东,陶磊.进水塔塔背回填抗震设计优化研究与动态响应[J].南水北调与水利科技,2017,15(03):151—157.

[5] 李永利,唐茂颖,段斌,吴先俊.双江口水电站智能大坝系统建设探索[J].人民长江,2018,49(S2):124—127.

[6] 郭宇,吴俊杰.联合进水塔塔背回填混凝土最优高度三维有限元计算分析[J].吉林水利,2019,(01):5—10.

[7] 吴俊杰,潘旭东,郭宇,陈刚.阿尔塔什水电站联合进水口塔群三维有限元静动力分析及配筋设计[J].水利水电技术,2018,49(S1):64—72.

[8] 王明年,胡云鹏,童建军,王奇灵,王翊丞,董从宇.高温变温环境下喷射混凝土-岩石界面剪切特性及温度损伤模型研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(01):63—75.

作者简介:

唐青山(1997-),男,重庆市人,助理工程师,学士,现于中国葛洲坝集团第一工程有限公司从事水利水电工程施工工作

钟 为(1992-),男,四川金川人,研究生,助理工程师,从事水电工程建设管理;

李鹏鑫(1993-),男,甘肃陇南人,助理工程师,本科,现于中国葛洲坝集团第一工程有限公司从事水利水电工程施工工作.

(责任编辑:卓政昌)

(上接第 105 页)

附近沿进尺方向拱肩拱顶区域,微震事件震级中等,但微震事件聚集不明显,围岩存在轻微岩爆或局部掉块可能。

5 结 语

通过双江口水电站洞式溢洪道微震监测及成果分析,及时反馈隧洞周边区域围岩发生岩爆的部位与频次、强度,指导开挖支护施工组织,检查并核对主要关注地质构造是否存在岩爆风险及对隧洞围岩稳定性的影响,找出对岩体不稳定性起支配作用的软弱结构面,根据微震监测成果研究隧洞是否存在对稳定性不利的未知地质结构或未加以注意的地质结构,根据隧洞不同区域岩体内的岩爆微震活动性数据,对观测范围内的岩体按岩爆风险等级进行安全评价,为隧洞开挖、加固治理提供了技术性建议,成功避免了岩爆发生可能造成的安全事故,保证了隧洞开挖的正常进行,可为同类大型水工隧洞开挖岩爆预测预警提供借鉴。

参考文献:

[1] 赵兴东.红透山矿深部开采岩爆潜在区微震活动性研究

[J].东北大学学报,2009,30,(9):1331—1333.

[2] 徐奴文,唐春安.基于三维数值模拟和微震监测的水工岩质边坡稳定性分析[J].岩土力学与工程学报,2013,(7):1373—1381.

[3] 于群,李连崇,马天辉.深埋硬岩隧洞微震监测及微震活动特征分析[J].哈尔滨工程大学学报,2015,36(11):1465—1470.

[4] 张文东,马天辉,唐烈先.锦屏二级水电站引水隧洞岩爆特征及微震监测规律研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(1):339—347.

[5] 张伯虎,邓建辉,高明忠.基于微震监测的水电站地下厂房安全性评价研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(5):937—944.

作者简介:

雷厚斌(1983-),男,重庆渝北人,工程硕士,高级工程师,主要从事水电工程建设技术和管理工作;

严沁之(1992-),男,四川汉源人,工学硕士,助理工程师,主要从事水电工程建设技术和管理工作;

邹 婷(1992-),女,湖北天门人,工学硕士,助理工程师,主要从事水电工程建设技术和管理工作;

杨 波(1995-),男,四川小金人,工学学士,业务专责,主要从事水电工程建设技术和管理工作.

(责任编辑:卓政昌)