



湖北水总

广告



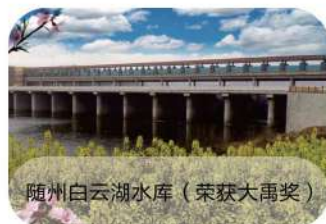
湖北水总水利水电建设股份有限公司

湖北水总水利水电建设股份有限公司是一家拥有雄厚技术实力、丰富施工经验和良好业内口碑的优质企业，其主要经营范围为：水利水电工程、环保工程、工业与民用建筑工程、市政工程、港口与航道工程、爆破工程、公路与桥梁施工等。近年来承建的工程有南水北调中线工程、荆江大堤综合整治工程、广州市西江引水工程、鄂北地区水资源配置工程、湖北省碾盘山水利水电枢纽工程等。所建工程多次荣获“中国建筑工程鲁班奖”“中国水利工程优质（大禹）奖”“湖北省水利工程优质奖（江汉杯）”等各类奖项。

公司始终秉承“团结、开拓、诚信、创新”的企业精神，赤心诚待各界友人，精诚合作，广泛建立共赢未来的战略伙伴关系。



广西瓦村水电站



随州白云湖水库（荣获大禹奖）



引江济汉西荆河枢纽工程



远安付家河水库工程
（荣获大禹奖）



宜昌东风渠灌区续建配套与
节水改造工程（荣获江汉杯）



远安付家河水库工程
（荣获大禹奖）



武汉龙王庙险段综合整治工程
（荣获鲁班奖）

电话：027-84217896

地址：湖北省武汉市汉阳区蔷薇路华中智谷B3栋

[期刊基本参数] CN 11-4446/TV*1980*m*A4*84*zh*P*¥20.00*17000*14*2022-8

Vol.42 No.8 2022

ISSN 2097-0528

CN 11-4446/TV

《中国核心期刊(遴选)数据库》收录期刊
《中文科技期刊数据库》收录期刊
《中国学术期刊综合评价数据库》来源期刊
《中国学术期刊网络出版总库》收录期刊
《中国知识资源总库》收录期刊

2022 8 第42卷

水利建设与管理

WATER CONSERVANCY CONSTRUCTION AND MANAGEMENT

水利建设与管理

二〇二二年 第四十二卷 第八期



三塔寺—肖家河水库全景

ISSN 2097-0528



国内邮发代号：2-781

定价：20.00 元

中国水利工程协会主管

Directed by China Water Engineering Association

中国水利工程协会主办

Sponsored by China Water Engineering Association

历城黄河防洪工程通过水利工程标准化管理 水利部评价

8月12日—13日，水利部专家组对历城河务局管理的历城黄河防洪工程进行了水利工程标准化管理评价。该工程为新标准实施以来全国首个通过水利部评价的工程。

专家组一行实地检查了12段(处)堤防、河道整治工程、档案室、防汛仓库、管理庭院和机关办公场所等，查阅内业资料，依据水利部《水利工程标准化管理评价办法》及评价标准，按照工程状况、安全管理、运行管护、管理保障、信息化建设5类34项内容进行逐项赋分。经过评议，专家组一致同意历城黄河防洪工程通过水利工程标准化管理评价。



(供稿单位：历城黄河河务局，执笔：王琳，审核：刘维花)

《中国水能及电气化》

水利水电工程建设的工法约稿（征稿）函

为更好地推广和宣传水利水电工程建设的工法，《中国水能及电气化》期刊开辟专栏，刊登优秀工法介绍。请有关单位严格按照稿件要求（见《中国水能及电气化》期刊官网投稿须知栏目）撰写工法内容，并将电子文稿发送至邮箱（wateree6346@163.com，请在邮件标题中注明“水利水电工法展示”字样）。本次宣传推广活动本着自愿参加的原则，不收取任何费用。

水利工程优秀质量管理小组成果约稿（征稿）函

为更好地推广和宣传水利工程优秀质量管理小组成果，《中国水能及电气化》期刊开辟专栏，刊登优秀质量管理小组成果介绍。请有关单位严格按照稿件要求（见《中国水能及电气化》期刊官网投稿须知栏目）撰写优秀质量管理小组成果内容，并将电子文稿发送至邮箱（wateree6346@163.com，请在邮件标题中注明“水利工程优秀质量管理小组成果展示”字样）。本次宣传推广活动本着自愿参加的原则，不收取任何费用。

单位：《中国水能及电气化》杂志社有限公司
联系地址：北京市西城区南滨河路27号 贵都国际中心B座1119室 邮政编码：100055
联系人：张洁 电话：010-63305281 投稿须知网址：<http://zgzn.cweun.org/tgxz.php>

水利建设与管理

SHUILI JIANSHE YU GUANLI

原刊名 水利管理技术 (1980 年创刊)

月 刊

2022 年 第 42 卷 第 8 期

(总第 350 期)

2022 年 8 月 23 日 出版

主管单位 中国水利工程协会
主办单位 中国水利工程协会
编辑出版 《水利建设与管理》杂志社有限公司

主 编 安中仁
副 主 编 任京梅 吴香菊
责任编辑 张雪虎

地 址 北京市西城区南滨河路 27 号小区
7 号楼 11 层 1116 号(贵都国际中
心 B 座 1116 室 编 1105)

邮 编 100055

网 址 www.sljsygl.com

在线投稿 www.sljsygl.com/home/login

邮 箱 water6346@163.com

联系电话 010-63305220 (发行)

010-63305239 (投稿)

010-63305258 (广告)

印刷单位 北京博海升彩色印刷有限公司

发行范围 公开发行

订 阅 全国各地邮局

国内发行 中国邮政集团公司北京市报刊发行局
本刊发行部

国内邮发代号 2-781

国外发行 中国国际图书贸易集团有限公司

国外发行代号 MO3713

广告发布登记 京西市监广登字 20170082 号

中国标准连续出版物号 ISSN 2097-0528
CN 11-4446/TV

定 价 20.00 元

目次

2022 年第 8 期

172 项节水供水重大水利工程专题

1 中部引黄工程大埋深超长引水隧洞 TBM 施工数值仿真分析

马 菲 张成军 王克忠

8 珠江三角洲水资源配置工程数字化安全管理

邹 哲 芦庆恭 曾 东

14 高温差地区混凝土面板施工期裂缝分布规律初探

罗 帅 王建帮 杨兵强

科研设计

21 基于数值模拟计算的大型泵站排涝效果分析

张玉伦 贾 能 陈盛达

27 感潮河道上过闸流量控制的自动化方法

刘 洪 马晓辉

32 长距离输水管道水力过渡过程计算

董航凯 田 睿 王启国

地质与勘测

39 安哥拉 KK 水电站高混凝土重力坝坝基综合勘察技术及建基岩体
选择

李辰舟 苏传洋 刘 凯

51 句容抽蓄地下厂房隐伏溶洞处理范围与措施研究

徐剑飞 梁睿斌 陈洪春

机电及金属结构

56 水利设备中二极管钳位型五电平逆变器优化均压算法研究

方 丽

62 基于分布式体系的门塔机群防碰撞系统设计与应用

李永山

工程施工

67 高压旋喷桩在流砂地层中的施工技术

刘少林 周书东 徐钦明

73 螺山泵站流道异型木模板支撑设计研究

黄 露 李建林 黄正东

81 水利工程装配式建筑的应用与展望

黄桂林 黄若坚

水利工程标准化管理经验交流

84 重庆市水利局四项措施高质量推进水利工程标准化管理工作

行业动态

• 2022年7月13日,水利部修订印发《水利标准化工作管理办法》,旨在深入贯彻落实中共中央、国务院印发的《国家标准化发展纲要》,进一步提升水利标准化工作管理水平,充分发挥水利标准化工作对推动新阶段水利高质量发展的支撑和引领作用。

(来源:水利部网站,网址:http://www.mwr.gov.cn/xw/slyw/202207/t20220718_1585959.html,日期:2022年7月18日)

• 2022年7月22日,重庆市观景口水利枢纽工程顺利通过竣工验收。该工程是国家172项节水供水重大水利工程之一,是一座以城市供水为主,兼顾输水干渠沿线城镇用水、农业灌溉及农村人畜饮水的大(2)型水利枢纽工程,总投资37.53亿元。建设内容主要包括水库枢纽工程和输水工程两部分,枢纽工程主坝坝型为混凝土面板堆石坝,水库总库容1.52亿 m^3 ,输水工程线路总长25.03km,水库多年平均供水量为1.04亿 m^3 ,设计灌溉面积为5.01万亩。

(来源:水利部网站,网址:http://www.mwr.gov.cn/xw/slyw/202207/t20220722_1586561.html,日期:2022年7月22日)

• 7月29日,河北省大陆泽、宁晋泊蓄滞洪区防洪工程与安全建设项目开工建设。该工程是国务院部署实施的150项重大水利工程之一,也是2022年重点推进的55项重大水利工程之一,总投资33.69亿元,总工期36个月。大陆泽、宁晋泊蓄滞洪区南北长69km,东西宽39km,总面积2143 km^2 ,是河北省第一大滞洪区,全国第三大滞洪区,为海河流域的关键防洪工程,对保护下游地区和华北油田、京沪铁路安全具有重要的作用。工程涉及邢台市的8个县区,建成后将保证蓄滞洪区的安全有效启用,进一步完善海河流域防洪工程体系,对保障流域防洪安全和蓄滞洪区内人民群众生命财产安全,促进地区高质量发展具有重要意义。

(来源:水利部网站,网址:http://www.mwr.gov.cn/xw/slyw/202207/t20220722_1586561.html,日期:2022年7月29日)

宣传与广告

封面 三塔寺—肖家河水库全景

封二 历城黄河防洪工程通过水利工程标准化管理水利部评价

封三 《中国水能及电气化》约稿(征稿)函

封底 湖北水总水利水电建设股份有限公司

《水利建设与管理》

编委会

主任:孙继昌

副主任:安中仁 任京梅

委员(按姓氏笔画排序)

王爱国 石小强 许文海 孙公新

李坤刚 张利新 陈明忠 宗敦峰

祖雷鸣 唐传利 董红元 蒲朝勇

本刊声明:

1. 本刊为公开发行人物,作者投稿须遵守国家有关保密的法律法规,并对此负完全责任。
2. 本刊刊发的文字、图片等所有内容,本刊拥有网络电子版版权,未经许可不得转载。作者若有异议,请在来稿时声明。
3. 本刊已许可中国知网、万方数据、维普资讯、超星域出版和中邮阅读网,以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。该著作权使用费及相关稿酬,本刊均用于作者文章发表、出版、推广交流(含信息网络)以及赠送样刊,即不再另行向作者支付。
4. 凡作者向本刊提交文章发表之行为即视为同意上述声明。



中国水利工程协会
公众号



《水利建设与管理》
杂志社公众号

WATER CONSERVANCY CONSTRUCTION AND MANAGEMENT

Vol. 42 No. 8 2022

CONTENTS

Special Topic on 172 Major Water Conservancy Projects for Water Saving and Water Supply

- 1 Numerical simulation analysis of TBM construction of super-long diversion tunnel with large buried depth in middle Yellow River Diversion Project MA Fei, ZHANG Chengjun, WANG Kezhong
- 8 Digital safety management of water resources allocation project in Pearl River Delta ZOU Zhe, LU Qinggong, ZENG Dong
- 14 Preliminary study on crack distribution law during concrete slab construction in areas with high temperature difference LUO Shuai, WANG Jianbang, YANG Bingqiang

Scientific Design

- 21 Analysis on drainage effect of large pumping station based on numerical simulation ZHANG Yulun, JIA Neng, CHEN Shengda
- 27 Automatic method for flow control of gate on tidal river LIU Hong, MA Xiaohui
- 32 Calculation of hydraulic transition process of long-distance water pipeline DONG Hangkai, TIAN Rui, WANG Qiguo

Geology and Survey

- 39 High concrete gravity dam of Angola KK Hydropower Station Dam foundation comprehensive investigation technology and construction foundation rock selection LI Chenzhou, SU Chuanyang, LIU Kai
- 51 Study on treatment range and measures of concealed karst cave in Jurong pumping and storage underground workshop XU Jianfei, LIANG Ruibin, CHEN Hongchun

Electromechanical and Metal Structure

- 56 Research on optimal voltage equalization algorithm of diode clamp five-level inverter in water conservancy equipments Fang LI
- 62 Design and application of cluster anti-collision system for gate tower crane based on distributed system LI Yongshan

Project Construction

- 67 Construction technology of high pressure rotary jet grouting pile in quicksand stratum LIU Shaolin, ZHOU Shudong, XU Qinming
- 73 Study on design of special-shaped wood formwork support for flow passage in Luoshan Pump Station HUANG Lu, LI Jianlin, HUANG Zhengdong
- 81 Application and prospect for fabricated structures of water conservancy projects HUANG Guilin, HUANG Ruojian

Exchange of Experience in Standardization Management of Water Conservancy Projects

84 Four measures was taken by Chongqing Water Conservancy Bureau to promote high – quality standardized management of water conservancy projects

行业动态

• 7月30日,淮河入海水道二期工程开工建设。水利部党组书记、部长李国英以视频形式出席开工动员会并讲话。水利部副部长刘伟平出席会议。李国英指出,以习近平同志为核心的党中央高度重视淮河治理。淮河入海水道二期工程建设是贯彻落实党中央、国务院关于全面加强水利基础设施建设决策部署的一项重大举措,是淮河流域防洪工程体系的标志性、战略性工程,是淮河流域亿万人民翘首以盼的民生工程、发展工程。实施这一工程,将扩大淮河下游洪水出路、打通淮河流域泄洪通道、减轻淮河干流防洪除涝压力,对保障淮河流域人民群众生命财产安全、支撑淮河流域经济社会高质量发展具有十分重要的意义。

(来源:水利部网站,网址:http://www.mwr.gov.cn/xw/slyw/202207/t20220730_1589250.html,日期:2022年7月30日)

• 近日,水利部印发《关于推动水利风景区高质量发展的指导意见》(以下简称《指导意见》),就充分发挥水利设施功能、维护河湖健康生命,推动新阶段水利风景区高质量发展作出部署。

《指导意见》要求,要以习近平新时代中国特色社会主义思想为指导,深入贯彻习近平生态文明思想和习近平总书记“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”治水思路及关于治水重要讲话指示批示精神,完整、准确、全面贯彻新发展理念,加快构建新发展格局,统筹发展和安全,加强水利设施和水域岸线保护,强化水文化建设,在确保水利工程安全平稳运行、功能全发挥的前提下推动水利风景区高质量发展,满足人民日益增长的美好生活需要。

《指导意见》提出两阶段发展目标,到2025年,水利风景区总体布局进一步完善,水利风景区管理制度体系建立健全,监管能力得到明显提升;推动水利风景区风光带和集群发展,新建100家以上国家水利风景区,推广50家高质量水利风景区典型案例,水利风景区发展质量整体提升,水利风景区成为幸福河湖、水美中国建设的突出亮点。到2035年,水利风景区总体布局进一步优化,发展体制机制进一步完善,综合效益显著增强,更好地满足人民日益增长的美好生活需要,水利风景区成为幸福河湖的重要标识、生态文明建设的水利名片。

《指导意见》明确了4个方面9项重点任务。在完善水利风景区总体布局方面,推动水利风景区风光带和集群发展,建设一批特色鲜明的国家水利风景区。在加强水利风景区保护与利用方面,提升文化内涵,完善水利风景区绿色安全服务设施,提升智慧服务水平。在强化水利风景区监督管理方面,落实景区管理责任,强化监督管理。在加强水利风景区品牌建设和价值实现方面,强化品牌建设,探索推动水利风景区水生态产品价值实现。

《指导意见》要求,流域管理机构 and 地方各级水行政主管部门要切实加强水利风景区的组织领导,建立工作机制,保障工作经费,充分利用河湖长制工作平台,建立多部门融合发展机制,加强人才队伍与专家队伍建设,深化与高等院校、科研机构等合作,建设高端智库,共同开展重大理论问题研究与技术应用推广。

(来源:水利部网站,网址:http://www.mwr.gov.cn/xw/slyw/202208/t20220803_1589738.html,日期:2022年8月3日)

中部引黄工程大埋深超长引水隧洞 TBM 施工数值仿真分析

马 菲¹ 张成军¹ 王克忠²

(1. 山西中部引黄工程建设管理有限公司, 山西 太原 030000;
2. 浙江工业大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310014)

【摘 要】 山西省中部引黄工程是山西省“十二五”规划大水网建设中的大型骨干引水工程,其水源工程是国家172项重大水利工程项目之一,输水线路总长达到384km。本文选取埋深600多m的吕梁山引水隧洞,对是否考虑开挖卸荷效应的两种不同工况施工进行了三维数值仿真分析,模拟计算隧洞围岩和衬砌管片的位移场、应力场以及围岩塑性区分布等,研究成果为隧洞支护设计和施工方案制定提供了支撑,对引水隧洞施工安全具有重要意义。

【关键词】 大埋深;超长;支护时机;数值仿真

中图分类号: TV311

文献标志码: B

文章编号: 2097-0528(2022)08-001-07

Numerical simulation analysis of TBM construction of super-long diversion tunnel with large buried depth in middle Yellow River Diversion Project

MA Fei¹, ZHANG Chengjun¹, WANG Kezhong²

(1. Shanxi Central Yellow River Diversion Project Construction Management Co., Ltd., Taiyuan 030000, China;
2. College of Civil Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Shanxi Central Yellow River Diversion Project belongs to a large-scale backbone water diversion project in the construction of large water network in the 12th Five-Year Plan of Shanxi Province. Its water source project is one of the 172 national major water conservancy projects. The total length of the water conveyance line is 384km. Lüliangshan water diversion tunnel with buried depth of more than 600m is selected in the paper. Construction under two different working conditions of whether considering excavation load effect or not undergoes three-dimensional numerical simulation analysis. The displacement field, stress field, surrounding rock plastic zone distribution and other aspects of tunnel surrounding rock and lining segment are simulated and calculated. The research achievement supports tunnel support design and construction scheme formulation. It is of great significance to the safety of diversion tunnel construction.

Keywords: large buried depth; super-long; supporting time; numerical simulation

解决水资源的不平衡问题,一个重要的办法就是调水。由于水源地、引水线路地形地貌的限制,深埋超

收稿日期: 2021-10-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(51679215);山西省水利厅科学技术项目

作者简介: 马菲(1983—),男,博士,正高级工程师,主要从事水利工程设计及模拟分析。



长引水隧洞的施工将会越来越多^[16]。

双护盾 TBM 硬岩掘进机又称伸缩护盾式 TBM,是一种集破岩、出渣、支护等作业于一体的成套施工设备,最适宜 30~120MPa 的硬质岩掘进,广泛用于水利水电等建设工程,因此深入研究双护盾 TBM 隧道施工具有很重要的工程意义^[7-11]。三维数值分析能够较好地模拟隧道开挖支护的过程^[12-15],而隧洞开挖卸荷效应^[16]、岩体开挖支护时机^[17-18]、围岩应力变化和围岩松动^[18-20]等因素,对于数值模拟分析引水隧洞的 TBM 施工影响很大,因此研究考虑开挖卸荷效应下的三维数值模拟分析,对于地下引水隧洞工程施工的安全性评价与设计优化具有重要意义^[21]。

1 工程概况

中部引黄工程是山西省大水网建设中输水线路最长、覆盖市县最广、投资规模最大、受益人口最多的大型骨干引水工程,规划每年供水 6.02 亿 m³。总干 3 号隧洞地处吕梁山脉,是中部引黄工程的控制性工程,具有线路长、埋深大、勘察研究范围广、地质构造背景与岩溶水文地质条件复杂、地下水环境影响敏感等工程特点。中部引黄总干 3 号隧洞桩号 K77+040.9~K118+395.8 为 TBM 施工段,全长 41.355km,为无压输水隧洞。穿过的地层为寒武、奥陶系灰岩、白云岩、太古界变质岩等,硬质岩占绝大多数,岩体较完整或较破碎,其饱和抗压强度多在 40~100MPa。隧洞沿线地面高程 1247~1605m,地表大部分被上第三系、第四系松散堆积物覆盖,洞底最大埋深 610m,隧洞埋深较大。

2 分析理论与方法

2.1 数值模型

采用 Unigraphics NX 软件建模,模型从原点(桩号 K97+476.87)出发,沿隧洞水流方向取 48m(40 环管片结构的长度),沿竖直方向向上、向下各取 20m,水平方向向上、向下各取 20m,使用 ANSYS 剖分网格(见图 1),共得到单元 31200 个,节点 32841 个,利用有限差分程序 FLAC3D 进行数值仿真计算。

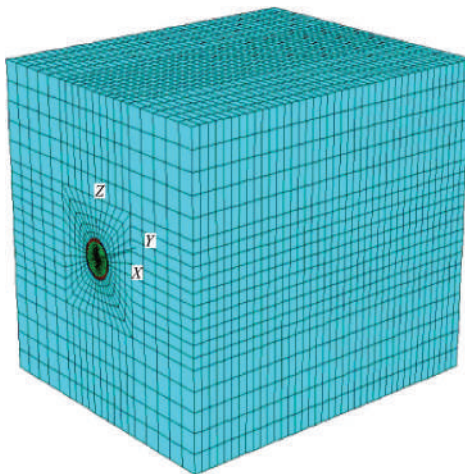


图 1 ANSYS 部分网格

2.2 计算基本假定

- 同层岩体按均质、各向同性理想弹塑性材料考虑;衬砌支护结构看作各向同性线弹性材料。
- 不考虑岩体变形的时间效应。

2.3 计算参数及本构模型

根据现场勘测资料,衬砌结构、岩体物理力学参数见表 1~表 2。

表 1 围岩物理力学参数

重度 $\gamma/(\text{kN/m}^3)$	弹性模量 E/GPa	黏聚力 C/MPa	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	泊松比 μ	侧压系数 k_x	侧压系数 k_y	饱和抗压强度/MPa
25.0	7.5	1.0	40	0.27	1.25	1.03	70

表 2 衬砌材料物理力学参数

衬砌材料	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	重度 $\gamma/(\text{kN/m}^3)$	衬砌厚度/cm
豆砾石灌浆层	25.5	0.171	22	9
C45 混凝土管片	33.5	0.2	25	25

2.4 初始应力场模拟

本文垂直应力场以自重应力场为主($\sigma_z = \gamma z$),构造应力场影响不大;水平应力场通过调整侧压力系数 k 值的大小来模拟($\sigma_x = k_x \sigma_z, \sigma_y = k_y \sigma_z$)。

3 计算分析

本工程隧道段施工断面为圆形,设计水深 3.43 ~ 3.32m,采用六边形蜂窝状结构预制混凝土管片衬砌,衬砌后直径 4.3m;管片宽 1.2m,厚 25cm,管片在洞内由四片组成一环;管片与围岩之间的间隙 90mm,用豆砾石充填并进行回填灌浆密实,以达到结构稳定和防渗止水效果。

隧洞开挖过程也是围岩应力释放并重新分布的过程,是否考虑开挖卸荷效应对于隧洞 TBM 施工三维弹塑性模拟分析影响很大。下面就是否考虑开挖卸荷效应的两种不同情况,模拟计算隧洞围岩和衬砌管片的位移场、应力场以及围岩塑性区分布等,分析隧洞围岩及衬砌结构的稳定性。取监测断面($y = 24\text{m}$)的特征点进行分析研究。

3.1 不考虑开挖卸荷效应下的结构稳定性分析

模拟过程说明:在不考虑开挖卸荷效应时,隧洞掘进后,在地应力还未开始释放时立即衬砌支护,衬砌管片产生支护反力,此时围岩中应力由衬砌与围岩共同承担。不考虑开挖面的推进过程,假定一次成型开挖成洞。

由图 2 ~ 图 3 可知,监测断面顶部下沉 3.80mm,底部上升 3.08mm,洞腰水平收敛 5.20mm。围岩各部位特征点的位移均较小,且没有出现围岩塑性区。

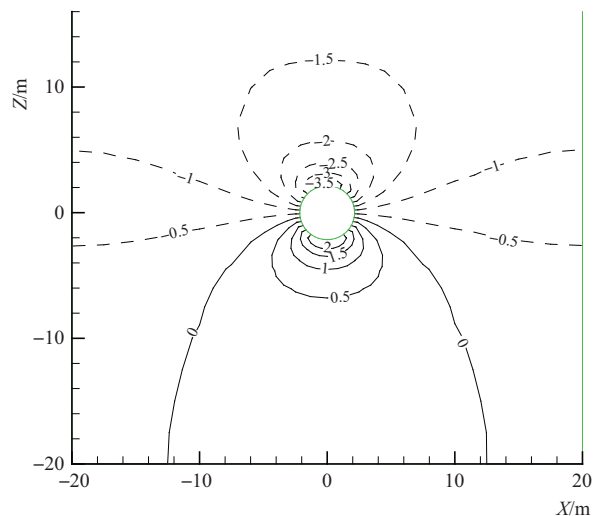


图 2 围岩竖向位移等值线

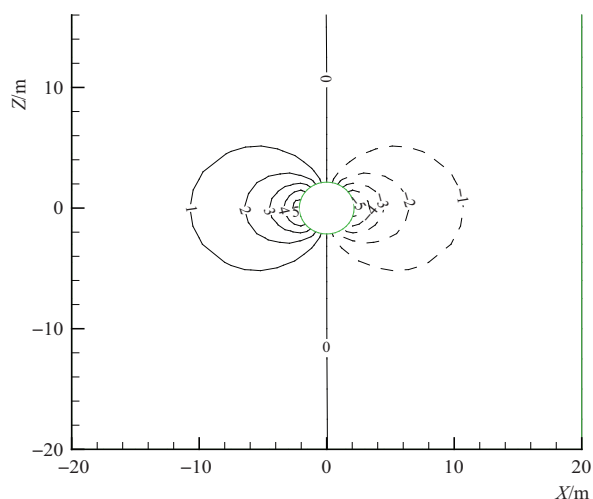


图 3 围岩水平位移等值线

由图 4 ~ 图 5 可知,监测断面洞顶和洞底处的水平应力为 30MPa,洞腰处的竖向应力为 28MPa。

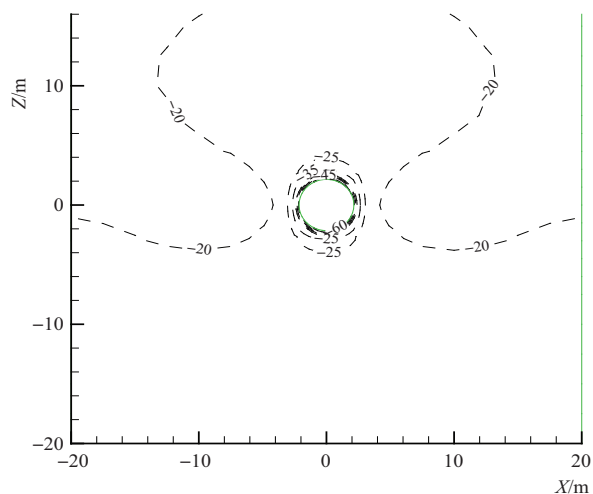


图 4 围岩第一主应力等值线(单位:MPa)

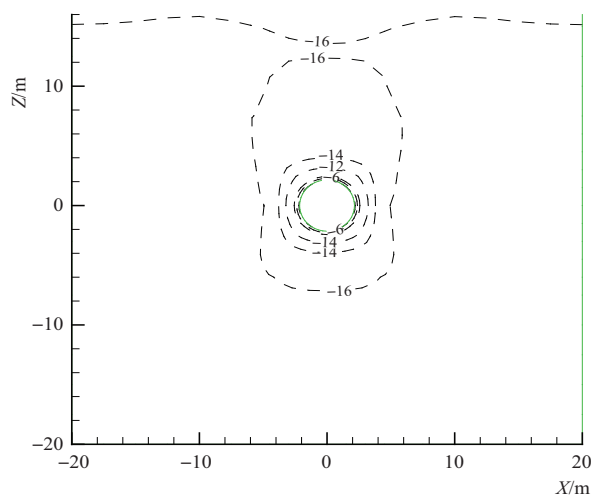


图 5 围岩第三主应力等值线(单位:MPa)

由图6~图7可知,监测断面管片顶部和底部的第一主应力最大值达到了76MPa,超出了衬砌管片的抗压强度设计值,管片衬砌混凝土主要表现为受压破坏。

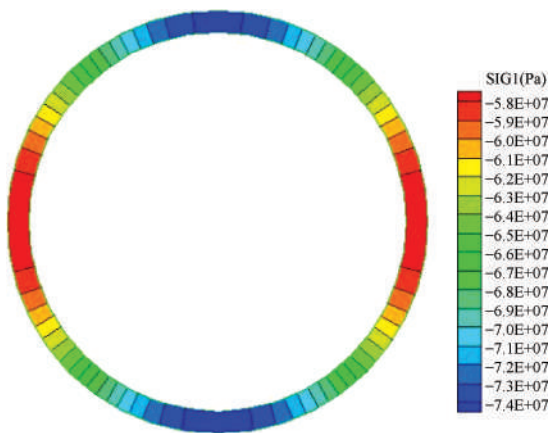


图6 管片第一主应力云图线

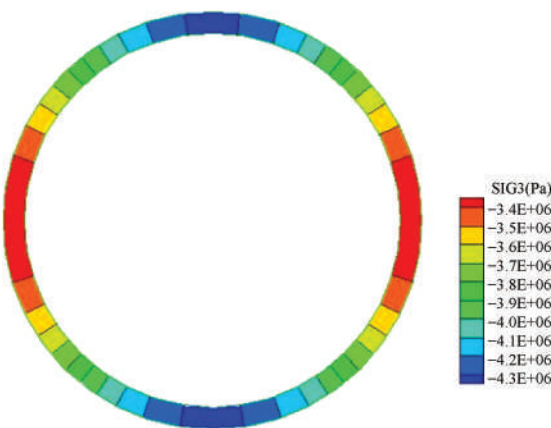


图7 管片第三主应力云图线

3.2 考虑开挖卸荷效应下的结构稳定性分析

考虑开挖卸荷效应,在围岩变形完成60%时进行管片结构支护,模拟计算该变形压力释放率下对围岩应力应变及管片结构应力应变的影响。假设盾构机是逐步向前推进的,每次向前推进的步距为一个衬砌管片单元的宽度(1.2m)。每个开挖步又分为两个时间步,第一个时间步模拟隧洞开挖,采用在隧洞周围施加虚拟支撑力模拟切削面围岩的变形;第二个时间步模拟管片结构的衬砌,采用替换注浆层和管片参数来模拟管片支护和盾尾孔隙注浆。通过重复循环上述过程,完成对隧道TBM施工的开挖卸荷、支护过程模拟。

3.2.1 围岩位移变化规律

a. 竖向位移变化规律。由图8可知,隧道开挖之初,监测断面洞顶下沉0.46mm,位移释放系数仅为5.1%,当超过监测断面1倍开挖洞径时,随着掌子面约束的解除,监测断面洞顶下沉量增加较快,监测断面洞顶位移释放系数达到81.6%,其后变形速率将有所减慢,逐渐趋于稳定。

b. 水平位移变化规律。由图9~图12可知,隧道开挖之初,监测断面围岩拱腰处最大水平位移值仅为2.6mm,当超过监测断面1倍开挖洞径(D)时,随着掌子面约束的解除,监测断面拱腰处最大水平位移值增加较快,位移释放系数达到85%。

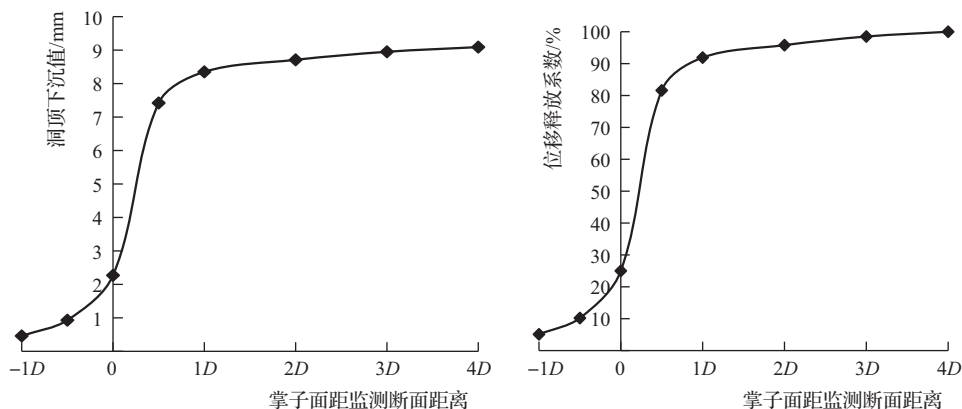
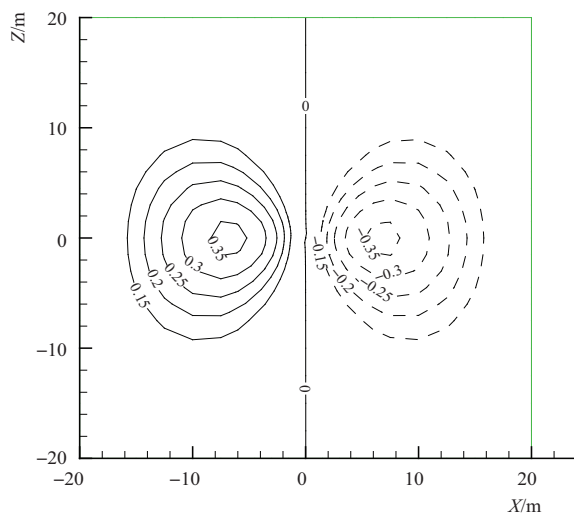


图8 洞顶竖向变形随掌子面推进的变化曲线



的适度发展。

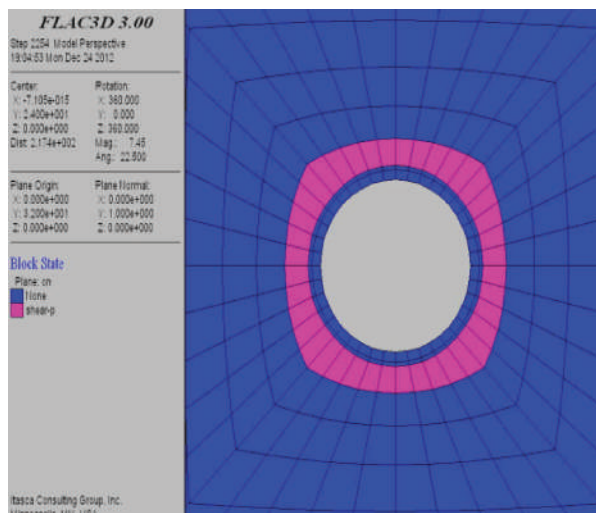


图 14 衬砌后围岩塑性区

3.2.3 管片净空收敛分析

隧洞 TBM 掘进贯通后,由图 15 可知,隧道管片结构竖向净空收敛为 2mm;由图 16 可知,隧道管片结构水平净空收敛为 3.6mm。水平净空收敛大于竖向净空收敛,这是由于工程区水平构造应力起主导作用。

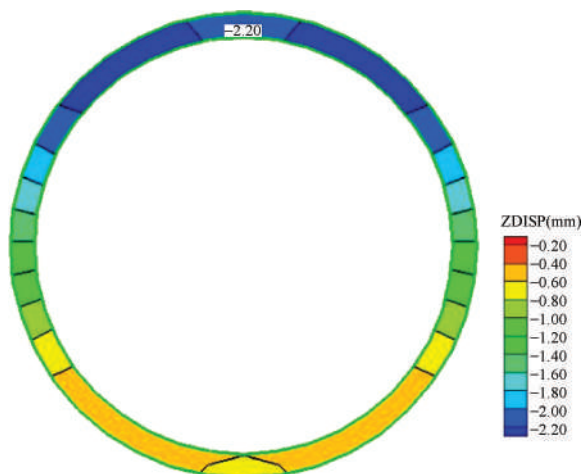


图 15 管片竖向位移云图

由图 17~图 20 可知,TBM 掘进过程中,隧道管片结构开始受压,管片应力值随掌子面推进而变化。在以水平构造应力为主的地应力作用下,隧道管片结构应力分布规律为:管片结构顶部和底部的应力大于侧腰;第一主应力的最大值出现在管片结构的顶部和底部的内侧;管片结构的内侧应力大于外侧应力,距离掌子面的远端应力大于近端应力。

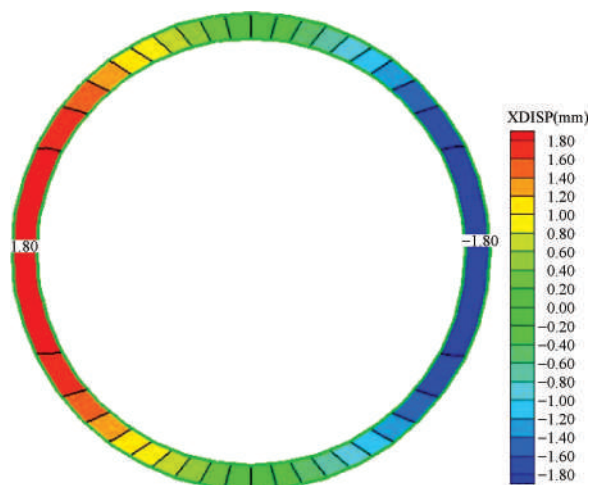


图 16 管片水平位移云图

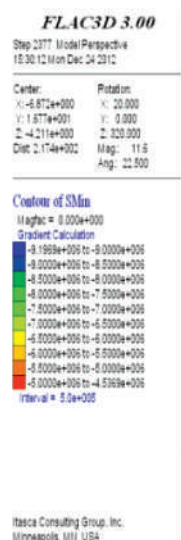


图 17 第 1 步掘进后管片第一主应力

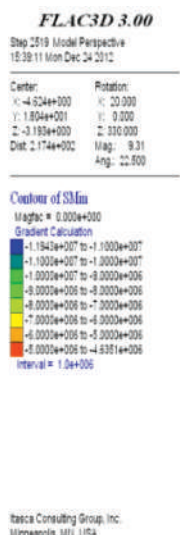


图 18 第 4 步掘进后管片第一主应力

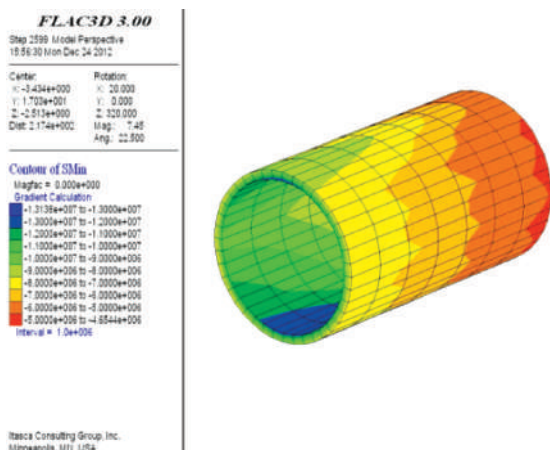


图 19 第 7 步掘进后管片第一主应力

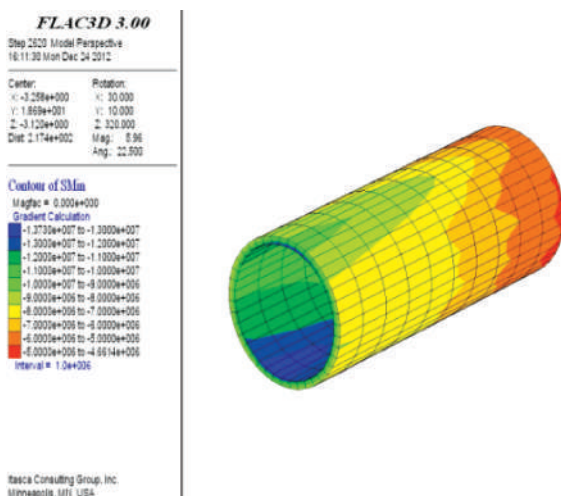


图 20 第 10 步掘进后管片第一主应力

随着 TBM 掘进衬砌,管片结构应力缓慢增加。当管片结构长度距离掌子面 7 环时,管片应力趋于稳定,管片第一主应力最大值最终稳定在 13.7MPa 左右,远小于衬砌管片(C45 预制混凝土)设计抗压强度,衬砌管片混凝土表现为稳定状态。

4 结论与建议

选取输水隧洞 600m 深处洞段,针对是否考虑开挖卸荷效应两种不同的工况进行了三维数值计算分析,研究得到以下结论和建议:

a. 通过数值模拟结果可知,在不考虑开挖卸荷效应下,TBM 掘进时,洞顶和洞底处应力集中现象明显,管片结构顶部和底部为脆弱部位,衬砌混凝土表现为

受压破坏。

b. 针对是否考虑开挖卸荷效应两种工况,采用不同的围岩应力释放率进行对比计算,分析得出应选择适当时机进行管片支护,在保证围岩稳定的基础上,达到减小衬砌成本的目的。

参考文献

- [1] 景茂贵,刘益勇,车公义,等. 向家坝灌区南北总干渠首部引水隧洞施工关键技术[J]. 水力发电,2019,45(3): 77-84.
- [2] 王克忠,李仲奎. 深埋长大引水隧洞三维物理模型渗透性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(4): 725-731.
- [3] 钮新强. 南水北调中线工程穿黄隧洞关键技术研究[J]. 南水北调与水利科技,2009,7(6): 42-46.
- [4] 卢文波,杨建华,陈明,等. 深埋隧洞岩体开挖瞬态卸荷机制及等效数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(6): 1089-1096.
- [5] 苏凯,常智慧,崔金鹏,等. 深埋隧洞开挖数值模拟分析的纵向模型范围研究[J]. 岩土力学,2016,37(S2): 706-714.
- [6] 王振,韩春,贾超,等. 深埋节理岩体隧洞开挖与支护的 3DEC 模拟[J]. 水电能源科学,2013,31(6): 150-152.
- [7] 闫军涛,胡潇,刘波. 上软下硬复合地层盾构隧洞开挖面稳定性研究[J]. 隧道建设(中英文),2020,40(2): 223-230.
- [8] 王小军. TBM 开挖隧洞管片衬砌结构三维有限元分析及配筋计算[J]. 南水北调与水利科技,2015,13(3): 606-608.
- [9] 陈曦川. 南水北调中线穿黄工程隧洞盾构施工规律的探讨[J]. 南水北调与水利科技,2010,8(4): 152-154.
- [10] 杨光华,李志云,徐传堡,等. 盾构隧洞复合衬砌的荷载结构共同作用模型[J]. 水力发电学报,2018,37(10): 20-30.
- [11] 孙金山,陈明,陈保国. TBM 滚刀破岩过程影响因素数值模拟研究[J]. 岩土力学,2011,32(6): 1891-1897.
- [12] 张宇娜. 某水电站引水隧洞开挖支护数值模拟研究[J]. 南水北调与水利科技,2011,9(2): 101-104,109.
- [13] 都辉,任旭华,张继勋,等. 基于 ABAQUS 的地下隧洞开挖及围岩稳定性分析[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2014,36(2): 28-32.
- [14] 肖明,叶超,傅志浩. 地下隧洞开挖和支护的三维数值分析计算[J]. 岩土力学,2007(12): 2501-2505.

(下转第 26 页)



珠江三角洲水资源配置工程数字化安全管理

邹 哲 芦庆恭 曾 东

(广东粤海珠三角有限公司,广东 广州 510000)

【摘 要】 跨流域引调水工程通常具有施工规模大、周期长、线路长、参建单位多、安全风险高等特点。本文以珠江三角洲水资源配置工程为例,建立以风险管控为核心,结合战略管理、体系管理、文化管理、绩效管理的数字化安全管理动态四维模型;利用安全信息化技术,构建数字化安全管理平台,加快模型动力推进,实现了安全管理标准化、流程化、信息化、数字化和智能化,显著提高了安全管理水平和监管效率。

【关键词】 风险;引调水工程;数字化;安全管理

中图分类号: C931.6

文献标志码: B

文章编号: 2097-0528(2022)08-008-06

Digital safety management of water resources allocation project in Pearl River Delta

ZOU Zhe, LU Qinggong, ZENG Dong

(Guangdong Yuehai Pearl River Delta Co., Ltd., Guangzhou 510000, China)

Abstract: Water diversion projects across basins are usually characterized by large construction scale, long cycle, long line, many participating units, high safety risks etc. Pearl River Delta water resources allocation project is adopted as an example. A digital safety management dynamic four-dimensional model with risk control as the core by combining strategic management, system management, cultural management and performance management is established. Security informatization technology is used for building a digital security management platform, accelerating the dynamic advancement of the model, realizing the standardization, process, informatization, digitalization and intelligence of safety management, and significantly improving the safety management level and supervision efficiency.

Keywords: risk; water diversion project; digital; safety management

近20年来,大型水利工程安全管理信息化建设广泛应用于各项工程^[1],如王刚等提出了盾构隧道全寿命周期数据模型及数字化搭建运用^[2]。在安全风险管控方面,龚远平等以白鹤滩水电站为例,在建设单位为主导,参建单位主动参与的管理模式下,使用反馈分析

并持续改进的方法,建立了运行高效的大型水电工程双重预防机制^[3]。江新等构建了工程项目群风险管理系统^[4],刘帅等基于模糊神经网络对水电施工安全隐患进行评估^[5]。刘皓对水电工程项目分包管理风险提出了强化总承包单位责任、督促分包单位自律、监理单

收稿日期: 2021-09-14

作者简介: 邹哲(1991—),男,硕士,主要从事水利水电工程施工管理工作。

位实施监督、业主单位落实协调、实施信息化管控等应对措施^[6]。2021年1月27日—2月25日安全生产修正案公开征求意见,2020年10月10日工业和信息化部 and 应急管理部印发《“工业互联网+安全生产”行动计划(2021—2023年)》,提出构建基于工业互联网的安全感知、监测、预警、处置及评估体系,标志着我国在逐渐完善安全管理体系的规范化、法制化、数字化。

本文结合珠江三角洲水资源配置工程的建设需求,通过分析水利工程施工安全标准化体系、相关事故案例等,构建以风险管控为核心的“战略、体系、文化、绩效”四维动力模型,结合地理信息技术与计算机技术,建立基于风险的数字化安全管理平台,实现实时监控、动态管理、隐患排查等功能,为大型引调水工程的安全建设提供一个合理的解决方案。

1 工程概况

珠江三角洲水资源配置工程是172项节水供水重大水利工程之一。工程总布置见图1。工程输水线路总长113.2km,主体由一条干线、两条分干线、三座泵站、四座调蓄水库组成,是世界上流量最大的长距离有压全封闭深埋地下输水工程。工程地处广东省,建设总工期60个月,现阶段涉及16个标段、7家监理单位、10家施工单位。工程以深基坑工作井为节点,以深埋隧道为节点间的连接通道,形成输水通道。隧道埋深为40~60m,全程共穿越高铁4处、地铁8处、公路12处、江海16处,工程设计、建设、运营面临诸多世界级难题。



图1 珠江三角洲水资源配置工程总布置示意图

珠江三角洲水资源配置工程建设过程中深井施工起重吊装工序多,部分交通洞、工作井开挖使用爆破工艺,长距离盾构、TBM、钻爆法施工,地质条件复杂,高水压衬砌结构施工难度较大,涉及坍塌、高处坠落、起重伤害、机械伤害、淹溺、爆炸、中毒、窒息、触电等事故风险。

2 数字化安全管理模型

本文在现有数字化安全管理研究的基础上,结合徐卫东的量化安全管理理论^[7],以风险管控为核心,从安全战略目标出发,以科学、系统、量化的手段对安全管理体系进行规划设计,建立系统的流程、标准,利用数字化的技术和手段,统计安全管理数据、分析安全管

理的现状,为安全管理决策提供依据。由此可以建立由战略管理(Value-based,基于价值)、体系管理(System-based,基于管理体系)、文化管理(People-based,以人为本)、绩效管理(Data-based,基于数据)构成的改进的四维动力模型,见图2,各部分详细内容见图3。开工前期根据历史数据及报告进行主要风险领域与重大风险因素的识别,通过明确的管理目标、权责清晰的组织、标准规范的体系建设、深入人心的安全文化管理、量化的绩效动态管理四者相互促进、相互影响,实现目标与指标的即时化、全员化、可视化、精益化。下面以珠江三角洲水资源配置工程为例详细介绍四大模块主要内容及其运行特征。

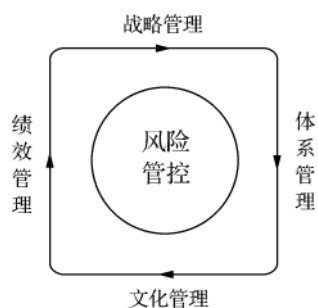


图2 以风险为核心的四维动力模型

2.1 战略管理

战略管理^[8]是项目法人通过分析制定安全战略目标、评价与选择管理工具、实施与控制管理成效,实现工程安全战略目标动态管理的过程。项目法人组织工程各参建单位技术人员、专家组及第三方安全技术服务机构分析工程建设全生命周期面临的主要风险,制定工程安全的战略目标,并结合SWOT分析结果,编制和实施工程的安全战略规划和行动计划,履行安全承诺并持续改进安全绩效,实现安全建设目标。战略管理的主要内容见表1,分为“动机与起因、战略分析、战略规划、战略管理”四大要素及对应的10个子要素。

表1 公司安全战略管理四大要素

四大要素	子要素
动机与起因	1. 安全理念
战略分析	2. 安全方针;3. 风险分析;4. 战略目标; 5. SWOT分析
战略规划	6. 战略规划;7. 行动计划;8. 安全领导力
战略管理	9. 批准、实施与监控;10. 审批与改进

珠江三角洲水资源配置工程项目参考2009—2017年147起事故,详细分析同类型建筑施工事故案例,结合ISO31001、ISO31000手册,水利工程建设安全生产管理规定等水利建筑施工相关标准规范,根据本工程各施工阶段的施工工艺类型,得到主要风险领域与重大风险因素(见图3),主要分为安全治理、人因因素、现场施工管理、环境与沿线建筑设施4个一级要素,21个二级要素。使用波士顿矩阵对各风险进行等级划分,得到危大工程、危险性作业、设备设施、水文与工程地质、恶劣天气、沿线建筑设施为高风险因素。基于风

险分析评估现状,编制了工程5年安全战略规划,并确定了年度阶段安全目标(2019安全治理年、2020安全达标年、2021—2023安全提升年),制定了4大安全提升战略措施,分别为:①完善安全治理框架;②规范人因因素管理;③加强现场施工安全管理;④控制环境与沿线建筑设施带来的风险。

2.2 体系管理

体系是水利工程建设安全管理的基础和依据。建立系统的安管理体系,确定安全管理的权责矩阵、流程,明确工作标准与方案等,实施清晰简明的管理流程,可以有效提高安全管理的效率。根据风险分析梳理的结果,结合全面质量管理理论4M1E^[9],将风险因素归为“人-机-法-料-环”五大类(见图3)。本工程结合《企业安全生产标准化基本规范》《水利安全生产标准化通用规则》等国家、行业标准规范及地方、项目法人管理要求,确定了工程安全管理体系,并将体系要求落实到34项相应制度、流程、标准、程序与操作指南中。2020年安全生产标准化管理体系全面实施,每年定期对体系落实情况进行回顾,持续完善。

为保障安全管理体系的有效实施及全生命周期安全风险管控,根据“管业务必须管安全”的要求,项目法人赋予各级管理人员清晰的安全责任与权限,规范全体人员的行为,形成系统的安管理机制。根据工程安全管理组织架构图(见图4),工程项目法人受水利部及相关政府机构和上级公司的监督,如《水利工程建设项目法人管理指导意见》中对法人职责权力的界定划分,同时对设计单位、监理单位、施工单位等参建单位开展安全监督管理,通过引入第三方安全技术服务、设计咨询、保险等多个中介服务机构,对工程实施了全生命周期风险管控。

2.3 文化管理

文化管理与体系管理相辅相成,形成安全管理战略机制,共同推动安全战略和政策落实,促进安全绩效的提升。文化管理是一个长期的过程,是一种重要有效的安全管理技术^[10],主要包括员工可接受且遵守的,具备工程特色的理念、作风、态度及行为规范。根据水

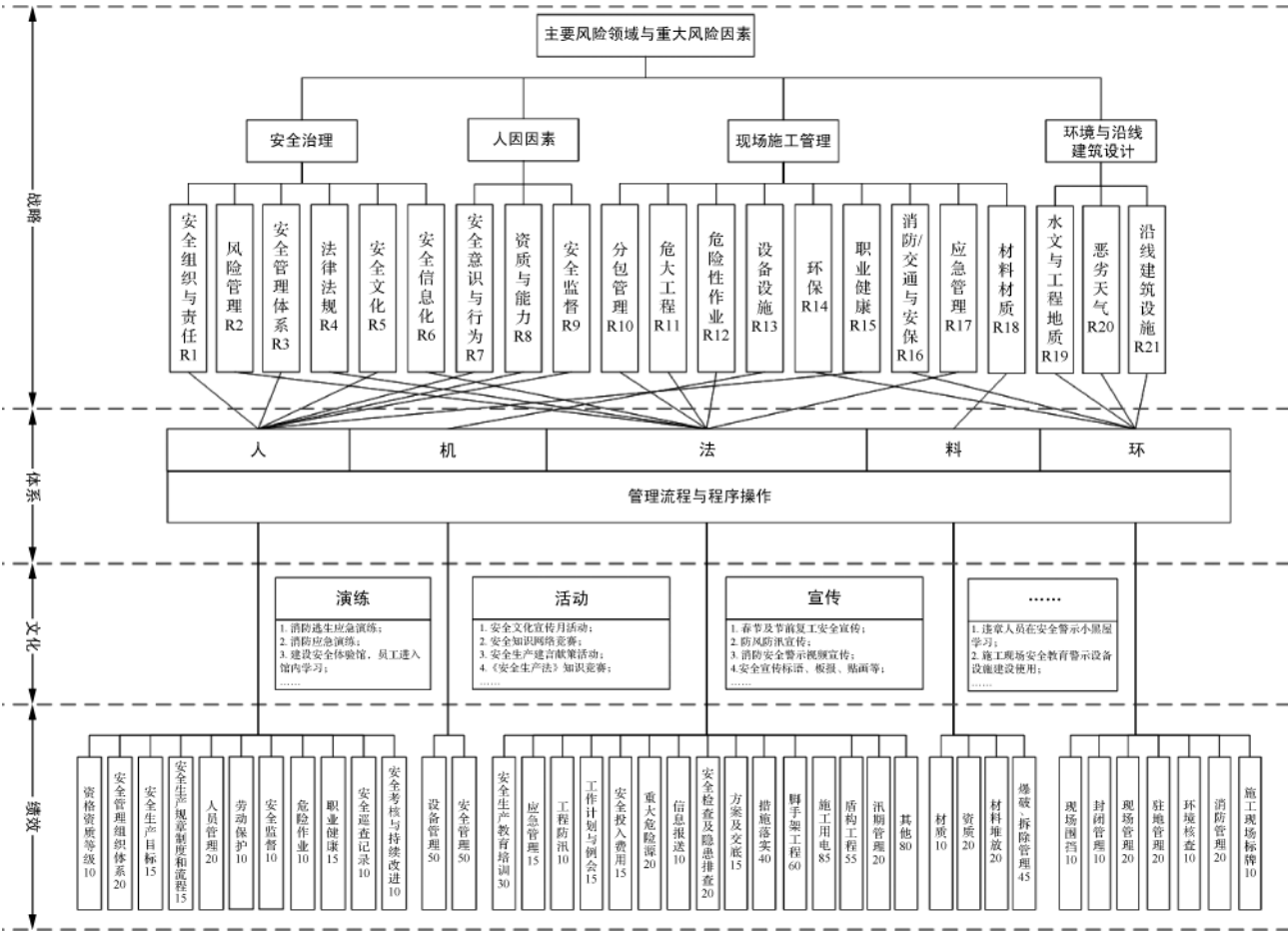


图3 工程安全管理模型

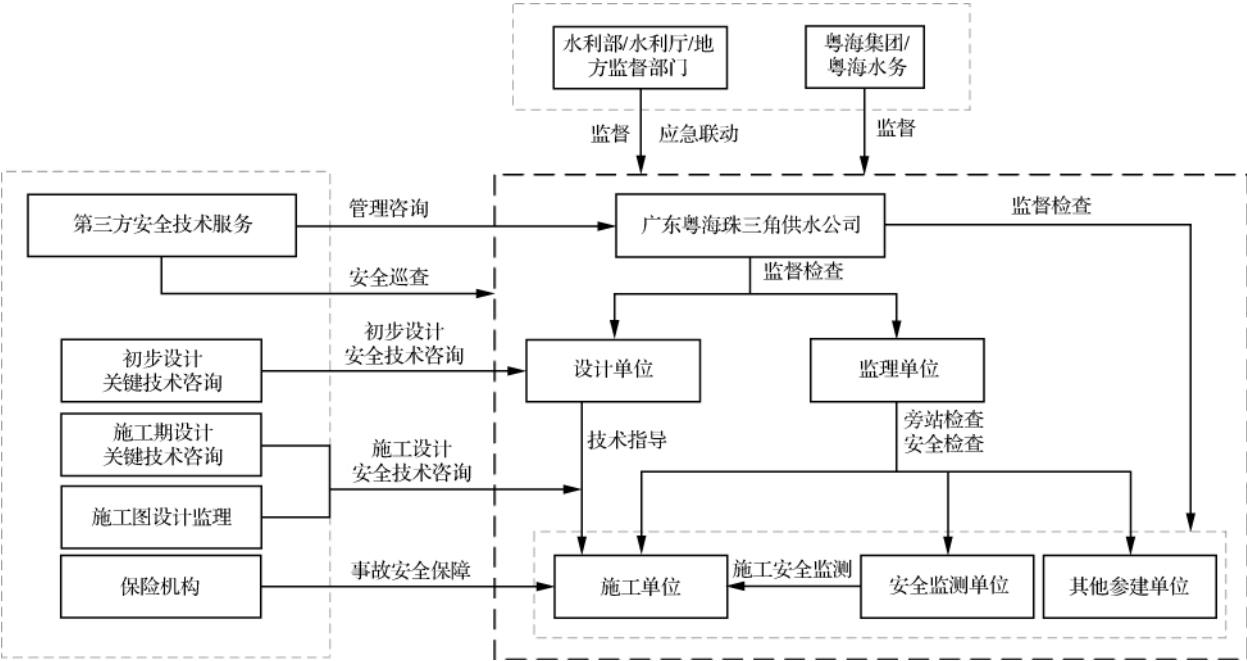


图4 安全管理组织架构及全生命周期安全风险管控

利施工阶段风险点、安全战略目标及体系管理情况,珠江三角洲水资源配置工程项目安全文化的核心理念是“安全第一,追求卓越”;工程秉承着“安全生产是坚守红线和严守法律法规的需要、是企业生存和可持续发展的需要、更是个人和其家庭美好生活的需要”的安全需要;以“所有的事故都是可以预防的、所有的伤害都是可以避免的、所有的违章都是可以杜绝的”为安全信念;以“全员参与、全程管控、全信息化”为安全原则;规定了“天天讲、日日查、月月检、季季比、年年评”的五个定期工作。这些安全理念精准概括了工程安全管理的基本要求,融汇在项目法人编制的各项制度中,打造自上而下的安全文化氛围(见图4)。通过安全生产月活动、安全知识竞赛、隐患排查、场景式应急演练、安全微视频大赛、安全小黑屋、安全体验等活动,在日常活动中对人员的思维模式和行为习惯产生潜移默化的影响,达到巩固人员安全风险意识,不断提高工程全体参建人员抵御安全风险的驱动力、安全技能等安全素质的作用。

2.4 绩效管理

安全绩效管理是整个模型的结果与动力源,根据风险管控情况的评估结果,对四维模型各部分内容进行合理有效改进。绩效管理内容包括安全目标的制定与管理计划、绩效辅导沟通、绩效考核评估、绩效结果应用、绩效目标提升等持续改进工作。具体的方法是针对各类考核内容与类别,设计数字模型,设定考核的数字化指标和工具。珠江三角洲水资源配置工程项目采用打分考核进行绩效管理,安全绩效作为单独考核系数参与总绩效计算[总绩效 = 安全得分(%) × 其他得分(%)],考核的核心是排名,因此安全具有一票否

决权。安全绩效考核主要应用在施工阶段,以施工阶段为例分为季度评分、月度评分、日评分等。季度评分于每年3月、6月、9月、12月开展,项目法人组织各中介咨询服务单位根据图4绩效指标进行打分。第二季度基础分数以第一季度得分为基准,在二季度期间,任何参建单位都有权对任何施工单位隐患进行扣分,并下发整改通知单;接收单位需及时整改,整改完成后通知参建单位审核闭合,审核通过后,将加上所扣得分,形成得分的动态变化,其余季度变化情况类似。评分后形成相应排名,排名末次位单位将被通报、扣除绩效、约谈集团公司相关领导,严重者不再具备相应施工资格,以此督促施工单位项目负责人重视安全管理、提高安全意识,促使其通过预先风险分类、管控、隐患整改等,最终促进整个复杂系统良性运转。

2.5 数字化安全管理平台

珠江三角洲水资源配置工程项目法人按照安全战略、安全管理体系要求,根据安全管理体系规定的业务模块及绩效管理检查的评定指标和动态管理方法,结合正在使用的工程数字门户、PMIS(项目管理信息系统, Project Management Information System)、BIM + GIS、质量检测、标段数字工地等,建立了物联网数字化安全管理平台(见图5)。定期定量对安全绩效各指标进行监测和衡量,结果及时公示在信息系统上。对于异常数据,及时组织相关专家进行分析,并鼓励员工积极参与安全管理持续改进。根据相关意见建议,从体系制度甚至战略上进行完善,通过各类安全活动、宣传将安全管理要求落地,营造和谐的安全文化氛围,为解决大型引调水工程现状安全管理强度大、施工准备不足、部门间协作性与联系性较弱、信息滞后、施工保障不足、



图5 珠江三角洲水资源配置工程数字大屏/安全监测系统/隐患统计与数据分析



图6 施工单位重大危险源、季度考核得分与实时安全指数及整改情况

安全监管效率低等问题提供有效解决方案。数字化安全管理平台的核心模块为安全目标、组织管理、风险管控、现场管理、安全教育、隐患排查、应急管理、安全考核模块。图6为重大危险源清单及相应管控措施、2020年4季度珠江三角洲水资源配置工程各施工单位的季度考核得分情况及2021年2月2日实时安全指数,80分为考核线,低于80分的A4、B2、D2标段系统将提出预警,并且对于逾期未整改隐患也将提出警示。

2.6 应用效果

珠江三角洲水资源配置工程在改进的四维动力模型推动及数字化安全管理平台工具运用下,在安全标准化建设方面,工程项目法人取得中国水利企业协会的安全生产标准化一级达标认证。法人单位也获得2020年广东省委省政府“文明单位”荣誉称号,其试验段项目获评省级文明工地称号。开工至2020年12月未发生较大及以上安全生产责任事故,实现安全生产570天。

3 结语

本文根据量化安全理论,构建了以风险为核心,融合战略管理、体系管理、文化管理、绩效管理四大模块的数字化安全管理四维动力模型,应用于珠江三角洲水资源配置工程项目。并结合现代信息技术与安全技术、珠江三角洲水资源配置工程搭建数字化安全管理平台。数字化安全管理平台实现了安全管理的可视

化、数据化、智慧化,使得安全管理更加科学、高效、直观,为安全决策提供科学依据,在监控、预测、预报、预防安全方面具有重要意义,为大型引调水工程数字化、智能化的风险管控提供一个科学的解决思路。◆

参考文献

- [1] 樊启祥,杨宗立,汪志林,等.大型水电工程建设全过程数字化动态管控[J].水力发电学报,2019,38(1):1-11.
- [2] 王刚,周质炎,白彦峰.盾构隧道全寿命周期信息的数字化及其应用研究[J].土木工程学报,2015,48(5):108-114.
- [3] 龚远平,阴彬,杨建业,等.大型水电工程构建双重预防机制的探索与实践——以白鹤滩水电站为例[J].中国安全生产科学技术,2020,16(2):155-160.
- [4] 江新,刘晓培,裴利民.工程项目群风险管理系统思维模式研究[J].人民长江,2013,44(5):103-106.
- [5] 刘帅,盛金保,王昭升,等.基于模糊神经网络的水电施工安全隐患评价[J].水利水电工程学报,2020(1):105-111.
- [6] 刘皓.水电工程项目分包管理风险及对策[J].水利水电技术,2017,48(S2):144-146.
- [7] 徐伟东.量化安全管理流程与指标设计[M].广州:广东经济出版社,2019.
- [8] 刘冀生.企业战略管理[M].北京:清华大学出版社,2003.
- [9] MORROW S L, KOVES G K, BARNES V E. Exploring the relationship between safety culture and safety performance in U. S. nuclear power operations[J]. Safety science, 2014, 69(1): 37-47.
- [10] 王秉,吴超.组织安全文化建设的基础性问题及方法论[J].企业经济,2017,36(10):66-73.



高温差地区混凝土面板施工期裂缝分布规律初探

罗 帅 王建帮 杨兵强

(中国水利水电第五工程局有限公司, 四川 成都 610066)

【摘 要】 阿尔塔什水利枢纽大坝为混凝土面板砂砾石堆石坝,面板裂缝一直是困扰面板堆石坝施工的一大难题,因初期混凝土受温度变化和自身体积变形引起收缩以及周边约束引起应力应变等,极易产生收缩性裂缝。本文结合有限元分析方法,对面板浇筑后温度、应力分布特征,结合面板厚度薄、暴露面积大等特点进行分析,研究温度变化对面板应力影响程度、早期温度裂缝产生机理、面板应力分布规律等情况,为后续面板裂缝防治措施的制定提供依据。

【关键词】 混凝土面板;有限元分析;应力分布;温度;裂缝

中图分类号: TV543+.6

文献标志码: B

文章编号: 2097-0528(2022)08-014-07

Preliminary study on crack distribution law during concrete slab construction in areas with high temperature difference

LUO Shuai, WANG Jianbang, YANG Bingqiang
(Sinohydro Bureau 5 Co., Ltd., Chengdu 610066, China)

Abstract: Altash Water Conservancy Project Dam belongs to a concrete slab gravel rockfill dam. The slab crack has always been a major problem during construction of slab rockfill dams. The shrinkage cracks are easily produced in concrete during early stage due to the temperature change, the shrinkage caused by its own volume deformation, the stress and strain caused by the surrounding constraints, etc. The finite element analysis method is combined in the paper for analyzing the temperature and stress distribution characteristics after slab pouring. The slab thickness, large exposure area and other characteristics are combined for analysis. The influence degree of temperature changes, the production mechanism of early temperature cracks, the slab stress distribution law, etc. are studied, thereby providing basis for formulating subsequent slab crack prevention measures.

Keywords: concrete slab; finite element analysis; stress distribution; temperature; crack

1 前 言

近些年来,一些高面板堆石坝工程相继出现了河

床段面板挤压破坏现象,面板挤压破坏按其表现形式可分为沿垂直缝的挤压破坏、横向水平挤压破坏和斜向挤压破坏。挤压破坏的主要原因是堆石体的变形,

收稿日期: 2021-07-19

作者简介: 罗帅(1988—),男,工程师,从事水电工程施工技术与管理工作。

除此之外还有河谷形状、坝高、面板厚度、面板纵缝设计、混凝土受力状态、面板钢筋布置、面板运行环境、地震等其他因素。面板垂直缝挤压破坏一般发生在河床中部坝顶,从面板的顶部一直向下延伸。面板水平挤压破坏常出现在中下部面板及面板分期分界线部位,一般不易被发现。斜向挤压破坏主要是由于堆石变形导致面板发生转动,因底部受到约束,面板应力发生改变所导致的。

2 混凝土面板早期温度应力分布特性

根据阿尔塔什坝体堆石、挤压边墙及混凝土面板相关材料参数,选择标准截面两侧各一半面板以及堆石体建立有限元计算模型。混凝土面板分三期进行浇筑:①第一期,2018年3月1日—5月31日浇筑1715m高程以下面板;②第二期,2019年3月1日—5月31日浇筑1776m高程以下面板;③第三期,2020年3月1日—5月31日浇筑1821.8m高程以下面板。混凝土抗裂安全度按下式计算:

$$k(t) = \frac{f_c(t)}{\sigma_1(t)} \quad (1)$$

式中: t 为混凝土龄期,d; $k(t)$ 为混凝土抗裂安全度; $f_c(t)$ 为龄期为 t 的混凝土抗拉强度,MPa; $\sigma_1(t)$ 龄期为 t 时的混凝土第一主应力,MPa。

根据面板堆石坝结构及施工特点,设置仿真计算工况如下:

假定Ⅰ序面板3月1日浇筑,Ⅱ序面板3月10日浇筑,考虑现场施工条件影响,结合以往工程案例,面板浇筑温度假定为浇筑日平均气温加3℃,考虑面板自重荷载,面板与挤压边墙间采用乳化沥青填料,面板与趾板、两序面板之间采用相同处理方式。考虑昼夜温差及日照辐射对面板温度场的影响,面板表面不采用任何温控防裂措施。

2.1 温度、应力分布特性

图1和图2为浇筑次日凌晨(0.5天)混凝土面板温度和第一主应力分布情况。由于散热均匀,顶面温度场分布均匀,第一主应力沿坡向分布基本均匀。

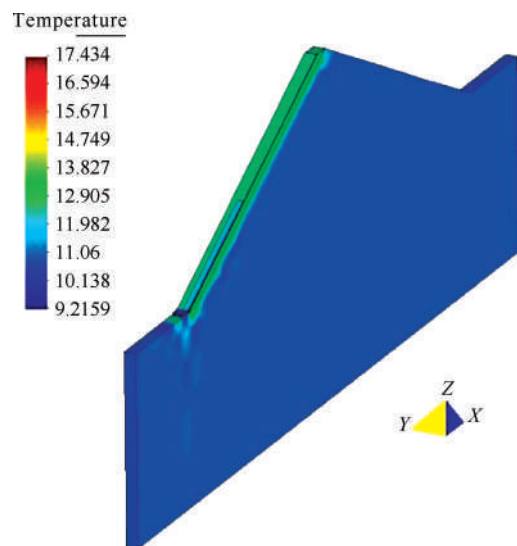


图1 0.5天温度场分布

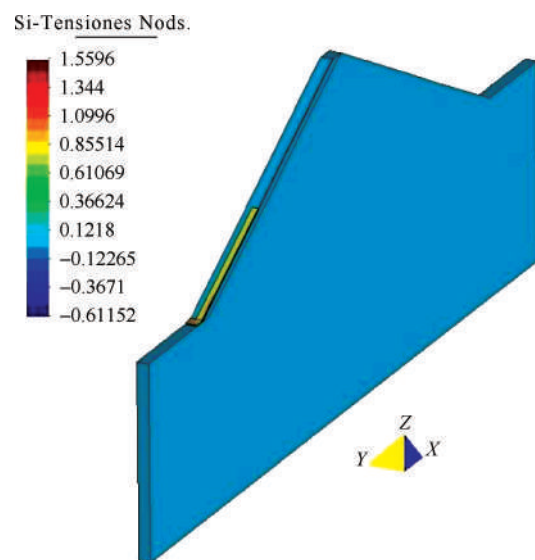


图2 0.5天第一主应力分布

图3和图4为浇筑次日凌晨(0.5天)A截面温度和第一主应力分布及面板变形情况,因顶面散热、底部接触传热同时存在,气温最低时,面板温度基本呈现出中部>底部>顶部现象。面板顶面降温收缩变形引起坝轴线方向的翘曲变形,面板顶面受拉内部受压,应力呈现出顶部>底部>中部现象。应力分布与温度分布相反,说明外部约束作用(底部挤压边墙约束)较小,应力主要为厚度方向非线性温度变形引起的翘曲应力。

图5和图6为浇筑3.5天后A截面温度和第一主应力分布及面板变形情况。3.5天面板轴向翘曲变形

增大,表面拉应力也有所增大,但温度场、应力分布规律与0.5天基本一致。

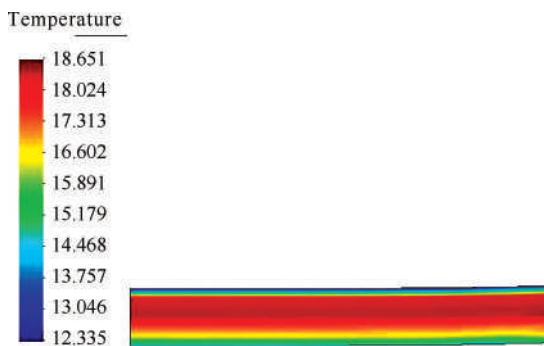


图3 0.5天A截面温度分布

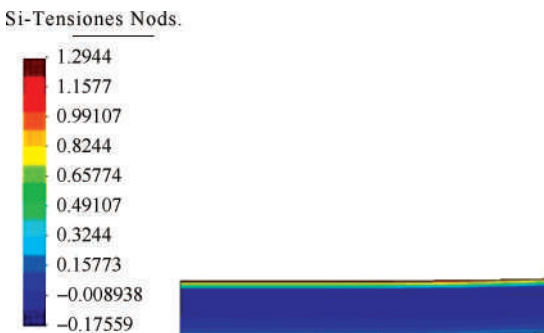


图4 0.5天A截面第一主应力分布

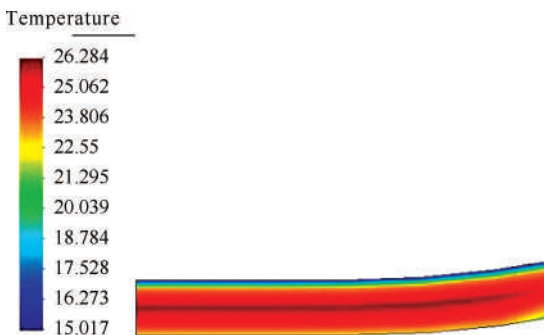


图5 3.5天A截面温度分布

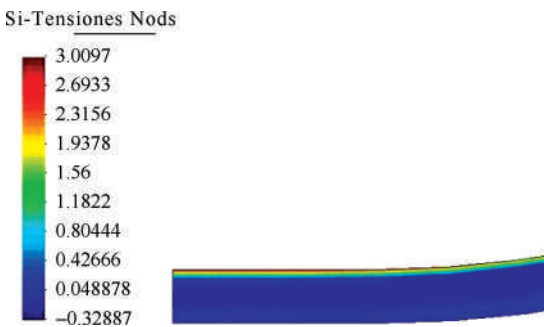


图6 3.5天A截面第一主应力分布

图7和图8为浇筑第5.5天后A截面温度和第一主应力及面板变形情况,面板内部温度有所降低,顶面应力与3.5天基本一致,但翘曲变形略有减小。

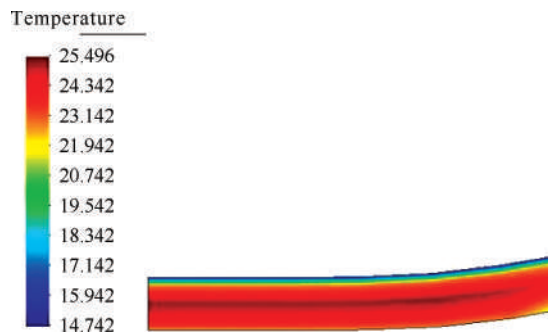


图7 5.5天A截面温度分布

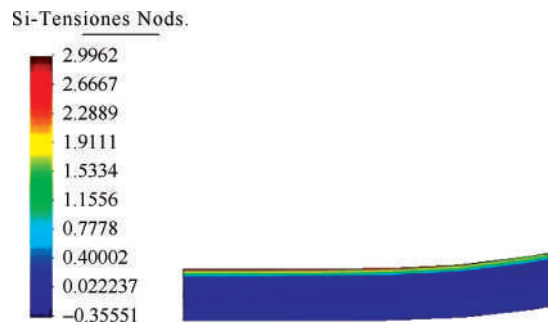


图8 5.5天A截面第一主应力分布

2.2 温度和应力沿厚度方向分布特性

图9和图10为距趾板48.0m截面A处温度和第一主应力历程。受日照辐射、昼夜温差影响,顶面点(T5)温度应力呈现周期性变化,在浇筑次日凌晨第一主应力达1.2MPa,抗裂安全度0.72,浇筑后10天内面板顶面峰值主应力均超过相应的轴拉强度;底部(T1)温度变化平缓,由于顶部散热及底部接触传热的影响,底部T1点峰值温度为21℃左右,但第一主应力较小,

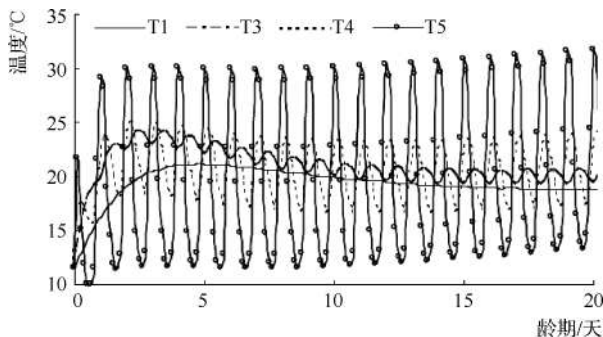


图9 截面A特征点温度历程

约为 0.5 MPa;内部点 T3、T4 受表面周期性变温的影响,温度有一定的波动,但最大第一主应力在 0.8 MPa 以内。

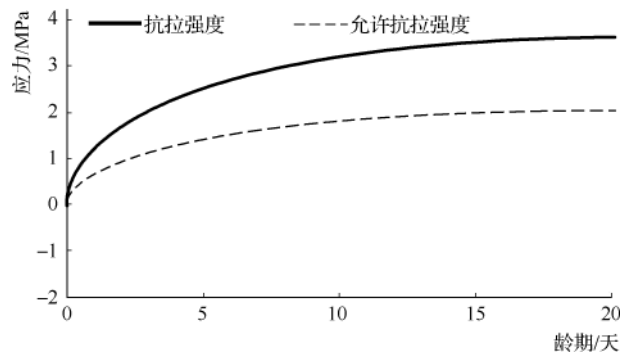


图 10 截面 A 特征点应力历程

面板底部峰值温度出现之前,典型时刻截面 A 处温度和第一主应力沿厚度方向分布见图 11。混凝土面板温度呈现中间高、两侧低,且顶面温度低于下底面温度。与之相应的应力分布见图 12。典型时刻温度和第一主应力沿厚度分布基本相反,说明外部约束较小。0.5~2.5 天,面板温度呈现整体上升趋势,但温度应力基本未发生较大变化,说明在底部约束较小情况下,面板整体变温对面板温度应力的影响较小,防裂关键是面板沿厚度方向的内外温差控制。

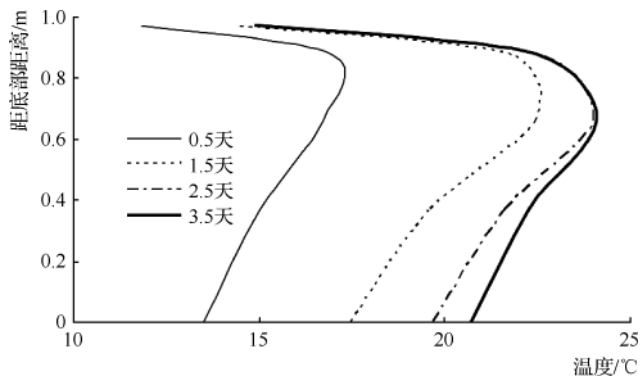


图 11 截面 A 处温度沿厚度分布

2.3 应力沿坡向分布特性

面板坡向各特征点的坡向应力见图 13。各点应力规律基本一致,由于面板自重及水化热升温膨胀,越靠近趾板,坡向压应力水平越高。龄期 10 天浇筑 II 序面板(A 型接缝),两序面板间为乳化沥青,顺坡向约束

小,因此 II 序面板对 I 序面板顺坡向峰值应力影响小。

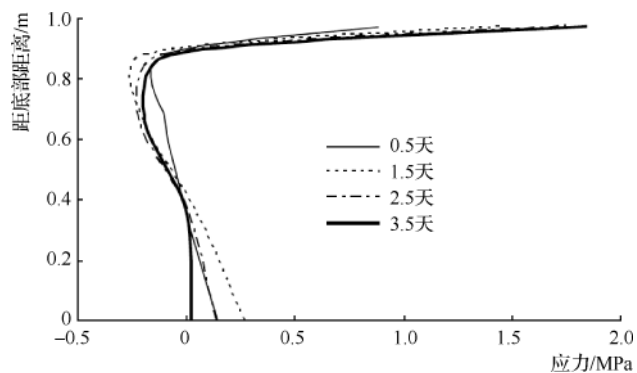


图 12 截面 A 处温度应力沿厚度分布

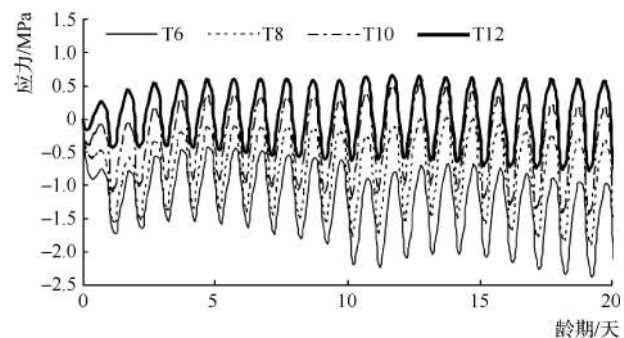


图 13 B 截面部分特征点坡向应力历程

2.4 坝轴向应力分布特性

面板沿坡向各特征点(T6~T12)轴向应力历程见图 14,由于计算考虑了面板与趾板之间的接触作用,趾板对面板的约束较小,沿坡向各特征点轴向应力的差异较小。龄期 10 天后 II 序面板浇筑后,各特征点轴向应力明显减小,说明相邻面板浇筑对面板轴向应力特性影响较大。典型时刻面板轴向应力分布见图 15,距离趾板较近部位受趾板影响明显,距离趾板较远位置,轴向应力分布基本一致。轴向应力随龄期的增长和弹性模量的增大逐渐增大。

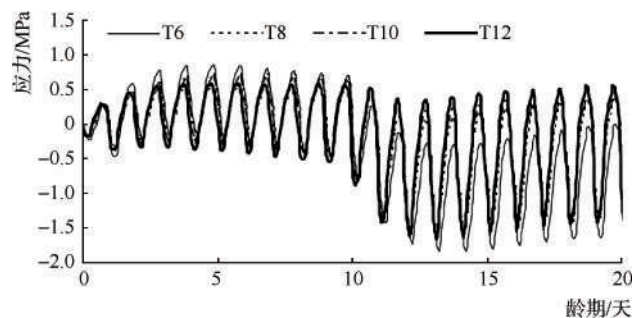


图 14 B 截面部分特征点轴向应力历程

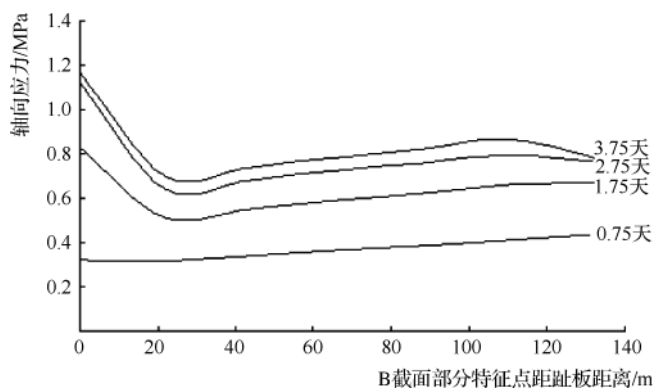


图 15 B 截面特征点轴向应力分布

3 裂缝分布规律分析

3.1 按面板浇筑时段温度分析

二期面板完成 5 ~ 63 号仓位混凝土浇筑,其中偶数单元为 I 序板,奇数单元为 II 序板,自 2019 年 3 月 1 日开始浇筑,5 月 25 日浇筑完成。二期混凝土面板分别在 4 月 30 日、5 月 10 日、5 月 22 日、5 月 31 日、6 月 22 日、7 月 2 日、7 月 12 日、7 月 22 日及 11 月 8 日,共计进行了 9 次裂缝普查,裂缝与温度关系见图 16。

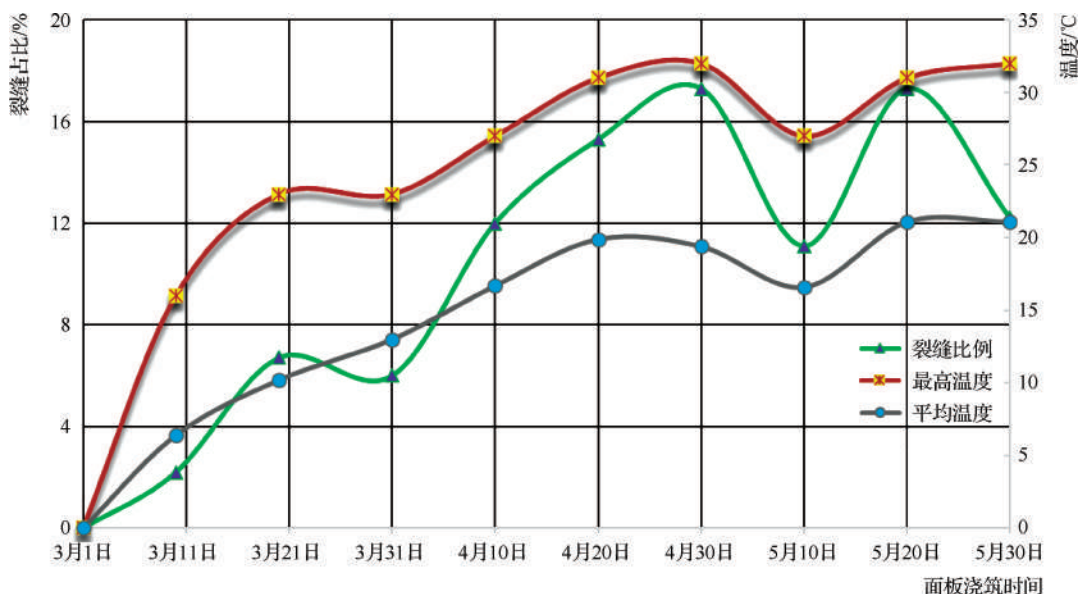


图 16 裂缝与温度统计曲线

从上述统计及图 16 中可以看出,面板裂缝发生与浇筑时段内的最高温度、平均温度存在正相关关系,3 月份最高气温、平均温度均较低,此时段内浇筑的面板混凝土裂缝数量占比最小;4 月份温度上升,当温度达到最高时,裂缝占比也达到峰值;而在 5 月 1—10 日期间平均气温、最高温度均出现下降,伴随温度下降裂缝占比明显下降,5 月 11—20 日期间伴随温度上升,裂缝占比也出现了明显的上升,5 月 25 日二期面板混凝土浇筑完成(5 月 21—25 日期间浇筑面板较少,因此统计的面板裂缝占比也较小)。因此,由上述面板裂缝占比与气温相关性规律可以看出,温度越高面板裂缝数量越多。

3.2 按面板浇筑序列分析

二期总计浇筑 59 块面板,其中 54 块面板发现有裂缝,对 54 块面板按 I、II 序进行分类统计,绘制散点图及趋势线,见图 17。从图 17 中可以看出,二期面板中 II 序板裂缝数量明显高于 I 序板。分析其原因:一方面是由于 II 序板普遍在 4、5 月份进行浇筑,浇筑期间温度较高,根据按面板浇筑时间的统计分析结果,温度越高产生的裂缝数量越多;另一方面, I 序面板仅受挤压边墙约束, II 序面板受 I 序面板两侧约束,其所受温度应力无法有效释放也将导致裂缝的发生。

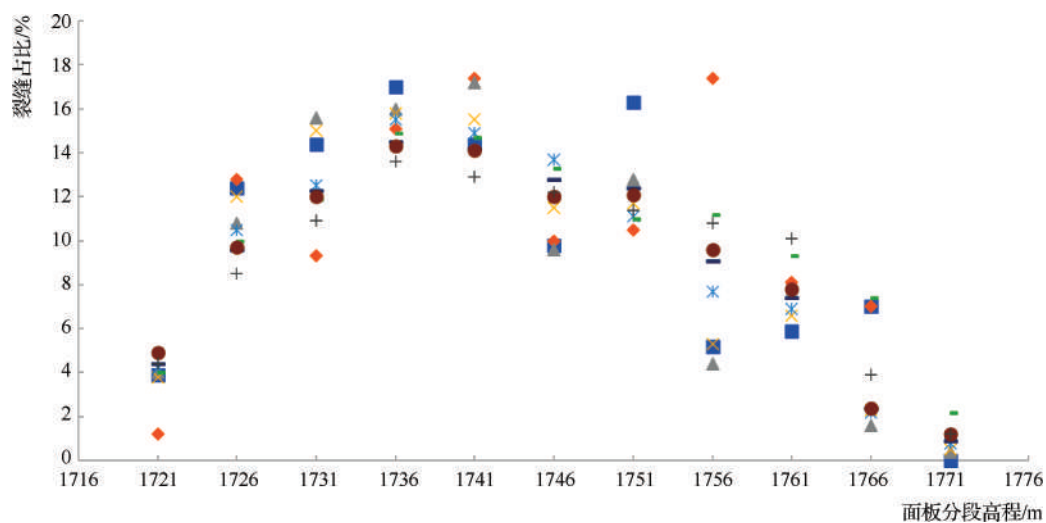


图 17 每仓面板裂缝占比散点图

3.3 按裂缝发生高程分析

按历次裂缝普查数据,按二期面板 1715 ~ 1776m 高程间隔 5m 进行分段裂缝统计,绘制散点图,见图 18。从图 18 中可以看出,面板裂缝主要集中在中下部

位置,这与约束条件下面板混凝土应力分析结果“裂缝将位于面板中下部,且为水平裂缝,面板底部越平整,裂缝位置越接近趾板”的结论一致。

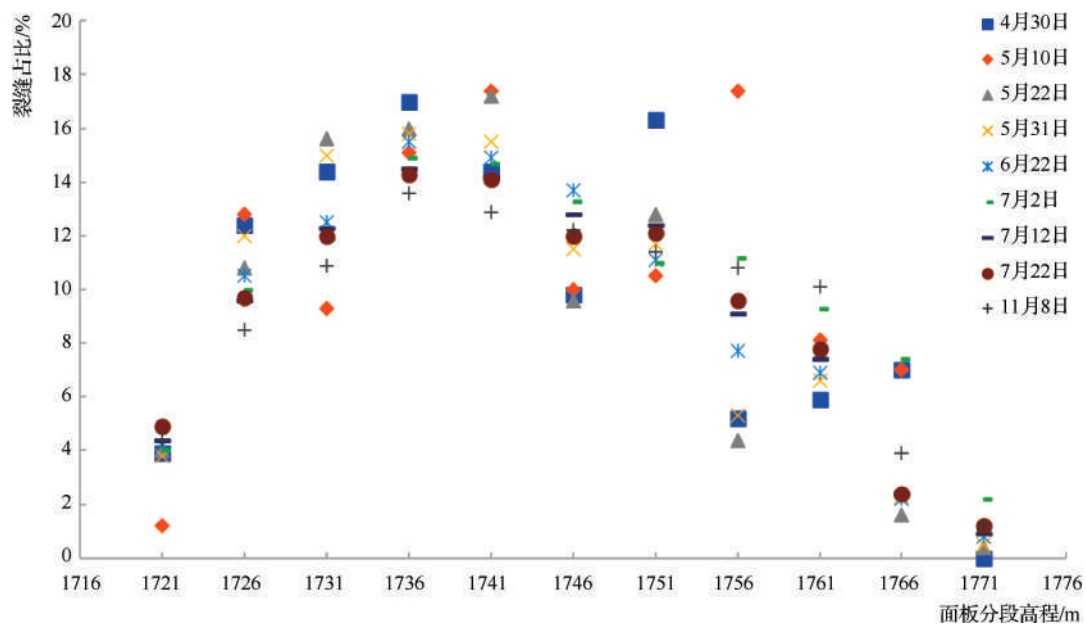


图 18 面板裂缝统计散点图

4 结 语

本文对阿尔塔什大坝工程面板混凝土早期温度应力以及不利条件对面板应力影响等方面进行初探,分析混凝土面板裂缝发生规律,找出影响面板混凝土施工的主要因素,为后续混凝土面板施工提供参考和借鉴。

a. 沿面板厚度方向,面板顶面散热作用及面板底部的接触传热作用,导致面板温度分布依次是中部 > 底部 > 顶部,对应第一主应力依次为顶部 > 中部 > 底部。采用乳化沥青填料情况下,挤压边墙对面板约束较小,整体变温对面板温度应力影响较小,温度应力主要由沿厚度方向的非线性温度分布引起。



b. 坡向应力分布规律基本一致,但由于自重作用,越靠近趾板,坡向压应力水平越高。浇筑早期,坡向受压范围较大,随龄期增长,坡向拉应力区范围逐渐增大;两序面板间采用乳化沥青填料情况下,面板顺坡向约束较小,Ⅱ序板对Ⅰ序板坡向应力影响较小。

c. 面板轴向应力在靠近趾板位置受趾板影响明显,在距离趾板较远处,轴向应力基本一致。随龄期增长,轴向应力逐渐增大。Ⅱ序面板浇筑对Ⅰ序面板轴向应力影响明显。

d. Ⅱ序面板裂缝数量与浇筑间隔时间未发现有明显的相关性规律,说明浇筑间隔时间不是影响面板裂缝的主要原因;根据现场数据统计,面板裂缝主要集中在5、6月份,该时段内气温较高、日照时间长、温差大,因此温差大、气温高是导致面板裂缝的主要原因。◆

参考文献

- [1] 李劲飞. 卡拉贝利水利枢纽工程坝体混凝土面板抗裂设计及面板受力分析[J]. 水利规划与设计, 2020(8): 99-102.
- [2] 田卫祖. 浅谈哈密景峡五A风电场工程基础大体积混凝土浇筑质量控制措施[J]. 水利建设与管理, 2018, 38(11): 30-33.
- [3] 赵志方, 钟阳峰, 李新宇, 等. 大坝混凝土早龄期变温条件下拉伸徐变研究[J]. 水力发电学报, 2020, 39(8): 46-54.
- [4] 刘涛, 王元鹏. 解析水电站大坝混凝土施工温控技术[J]. 建材与装饰, 2020(33): 295-296.
- [5] 王文峰. 水利工程中聚合物混凝土力学性能试验与实践分析[J]. 工程技术研究, 2020, 5(21): 131-132.
- [6] 刘明亮, 谷春涛, 陈贺义, 等. 浅谈水泥工业大体积混凝土裂缝控制[J]. 河南建材, 2020(6): 121-122.
- [7] 孔凡生. 龙潭水库除险加固工程交通桥混凝土拱圈施工工艺[J]. 水资源开发与管理, 2016(5): 63-66.
- [8] 朱红, 文湘禹. 提高预制梁混凝土外观质量验收合格率的方法[J]. 水资源开发与管理, 2019(2): 78-81.
- [9] 王建帮, 张芳军, 王真平. 150m以上高面板堆石坝挤压边墙混凝土配合比设计研究[J]. 水利建设与管理, 2019, 39(12): 12-16.
- [10] 胡应征. 挤压式边墙施工法在混凝土面板坝工程中的作用分析[J]. 建筑工程技术与设计, 2020(4): 3131.
- [11] 许绍银. 昭通市黑石罗水库混凝土面板堆石坝挤压边墙施工技术研究[J]. 建筑工程技术与设计, 2020(33): 3702.
- [12] 高亚威, 王帅. 云南省某水利工程挤压边墙混凝土配合比设计[J]. 黑龙江水利科技, 2020, 48(2): 63-67.

广西玉林市龙云灌区工程开工建设

8月16日,龙云灌区工程开工建设。该工程是国务院部署实施的150项重大水利工程之一,是国务院明确今年重点推进开工建设的6大灌区之一。工程总投资52.78亿元,总工期54个月,总设计灌溉面积54万亩。建设内容主要包括新建水源及连通工程、新建泵站,新建配套骨干灌溉渠(管)道等。

玉林市是海峡两岸农业合作试验区,正在大力发展特色农业,龙云灌区涉及的北流市列入国家粮食生产核心区,玉州区、福绵区、陆川县列入国家粮食增产后备区,建设龙云灌区对于保障国家粮食安全具有重要意义。工程建成后,可合理配置区域水资源,改善玉林市周边地区农业灌溉条件,预计可新增灌溉面积21.0万亩,恢复灌溉面积8.8万亩,改善灌溉面积24.2万亩;可向周边工业园区及铜石岭旅游度假区、高铁新城等区域供水,年均供水量3.61亿立方米,受益人口226万,为强化项目区粮食生产安全和城乡生活及工业用水保障、改善南流江水生态环境、发展热带特色农业和推动当地乡村振兴创造积极条件。

(来源:水利部网站,网址:http://www.mwr.gov.cn/xw/slyw/202208/t20220816_1591460.html,日期:2022年8月16日)

基于数值模拟计算的大型泵站排涝效果分析

张玉伦¹ 贾 能² 陈盛达²

(1. 杭州市南排工程建设管理服务中心, 浙江 杭州 310020;

2. 杭州市规划设计研究院, 浙江 杭州 310016)

【摘 要】 本文以应用河网非恒定流水动力模型计算得到的流量和实测水位为边界条件, 采用 InfoWorks ICM 软件构建雨水管网和河网耦合的城市排水模型, 模拟工程建成前后河道水位和积水情况, 评估内涝风险变化。结果表明, 遭遇 50 年一遇梅汛降雨, 本工程建成后河道水位平均降幅 0.4m, 积水深度超过 5cm 的积水面积、积水量分别减少 85%、89%, 排涝效果显著, 大幅降低了杭州城西区域内涝风险, 使其治涝标准达 50 年一遇。研究成果对其他大型泵站效益分析具有一定参考价值。

【关键词】 InfoWorks ICM; 城市排水模型; 积水面积; 积水量; 排涝效果

中图分类号: TV122

文献标志码: B

文章编号: 2097-0528(2022)08-021-06

Analysis on drainage effect of large pumping station based on numerical simulation

ZHANG Yulun¹, JIA Neng², CHEN Shengda²

(1. Hangzhou Nanpai Engineering Construction Management Service Center, Hangzhou 310020, China;

2. Hangzhou Urban Planning and Design Institute, Hangzhou 310016, China)

Abstract: The water flow calculated by the unsteady flow hydrodynamic model of application river network and the measured water levels are used as boundary conditions. The InfoWorks ICM software is used to construct the urban drainage model of rainwater pipe network and river network coupling. The change of river level and regional waterlogging before and after the completion of the project is simulated. The results show that in the case of 50-year rainstorm, the average decrease of river level is 0.4m, the area and amount of water accumulated in the region are reduced by 85% and 89% respectively after the completion of the project. The drainage effect of the project is significant, thereby greatly reducing the waterlogging risk in the western region of Hangzhou. Its waterlogging control standard reaches 50-year. The research results have certain reference value for benefit analysis of other large pumping stations.

Keywords: InfoWorks ICM; urban drainage model; waterlogged water acreage; water accumulating volume; drainage effect

收稿日期: 2021-07-19

作者简介: 张玉伦(1984—),男,硕士,主要从事水利工程建设与管理工作。

1 研究背景

杭州城西区域处于洪涝过渡地带,地势低洼,上承西部山洪,下受杭嘉湖平原河网高水位顶托,历来是杭州城市防洪排涝最薄弱环节。随着省市科创战略平台城西科创大走廊及云城布局城西后,区域面临的洪涝高风险与经济社会高质量发展的矛盾日益突出。为此,杭州提出建设城西南排通道工程破解洪涝难题,新建一条长约 13km、洞径约 11m、洞底高程 -50m 的深埋排水隧洞,隧洞进口设在五常港附近,在出口钱塘江九溪水域新建大(1)型强排泵站,设计排涝流量 $200\text{m}^3/\text{s}$ (远期 $300\text{m}^3/\text{s}$),利用闲林湿地、五常湿地和西溪湿地将城西洪涝水汇流后通过隧洞快速南排入钱塘江,见图 1。工程任务以防洪排涝为主,兼顾改善水环境。工程估算投资约 60 亿元。

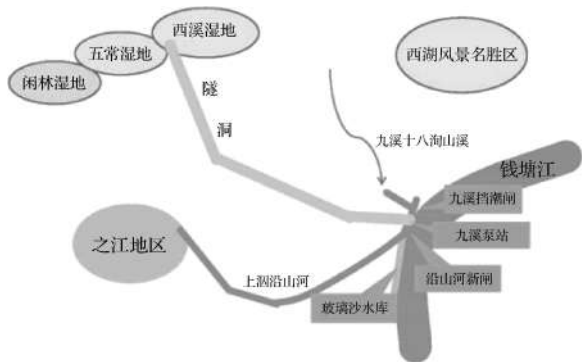


图1 城西南排通道工程示意图

由于工程牵扯面广、规模和投资大,各方对工程效益比较关注。水利行业一般应用河网非恒定流水动力模型进行数值计算,从河网高水位、高水位持续时间、排水量等角度开展效益分析,对非水利专业决策者而言数据相对抽象。基于此,本文以应用河网水动力模型计算得到的流量和实测水位作为边界条件,采用 InfoWorks ICM 软件构建雨水管网和河网耦合的城市排水模型,结合地面高程变化情况,模拟本工程建成前后河道水位和区域积水情况,评估区域内涝风险变化,从积水深度、积水面积、积水量角度定量分析排涝效果,展示更直观、具体。国内外学者利用 InfoWorks ICM 软件进行雨水管网数值计算取得了研究成果^[1-10],但构建雨水管网和河网耦合的城市排水模型开展大型

泵站排涝效果分析的并不多见。

2 研究区域概况

研究范围北至余杭塘河,东至西溪河,南至沿山河(含留下街道),西至何过港—林场港—梧桐港—闲林港,总面积约 69.7km^2 ,见图 2。在行政区划上分属于杭州市西湖区和余杭区,区位条件优越,区域内既有得天独厚的自然水域,又有数量众多的科技企业和创新平台,覆盖了城西科创大走廊核心区域,是杭州大城西地区东西向联结的重要节点。

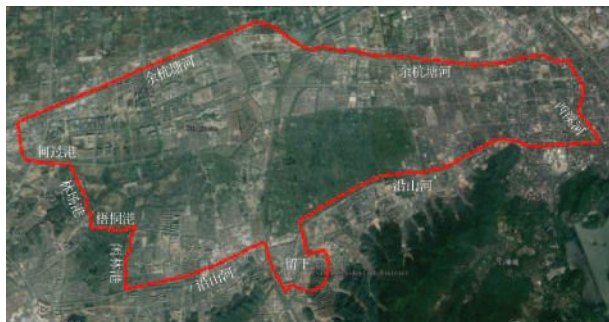


图2 研究区域示意图

区域内除留下街道东南部地势较高外,其余总体以平原地貌为主,中部及西部有面积宽广的天然湿地。研究范围内 95% 的地坪高程在 2~6m 之间。从水系上划分,该区域属杭州市区运河水系上游,西南为山区,有上埠河等山区性河道,往东北进入下游平原,主要行洪通道包括闲林港、五常港、余杭塘河、沿山河等。

3 模型构建

本次数模分析采用 Wallingford 软件 (InfoWorks ICM), InfoWorks ICM 模型系统能够精确模拟雨污水收集系统,预测雨污水管道和河道系统的工作状态,或降雨后对环境的影响。

3.1 模型概化

本次模型分析对区域主要河道及雨水管网进行概化。共划分 4607 个子汇水区。现状雨水管覆盖区域单个子汇水区域的面积大部分在 $0.5 \sim 2\text{hm}^2$ 之间,就近汇入附近的雨水管网中,雨水管网未覆盖的区域子汇水区相对概化,就近汇入附近的河道中。经概化后的模型共计有检查井节点 4547 处,雨水管段 4547 段,

雨水管径在 500 ~ 2000mm 之间。圩区排涝泵站 12 个,河段 358 段。二维网格的最大网格为 100m^2 ,最小网格面积为 25m^2 ,见图 3。



图3 模型概化示意图

3.2 边界条件

共设 5 个水位边界,其中 1 个为运河水位边界,其余 4 个为余杭塘河北面的通义港、九曲洋港、蓬驾桥港、西行河水位边界,水位边界的时间间隔为 1h。共设 5 处流量边界,分别为梧桐港、沿山河、上埠河、留下河和老和山山水,其中沿山河流量和老和山山水根据沿线汇流面积分配至沿线的河道中。流量边界的时间间隔为 1h。水位边界采用水位站实测值,流量边界采用城西南排通道工程河网水动力模型计算结果,见图 4。

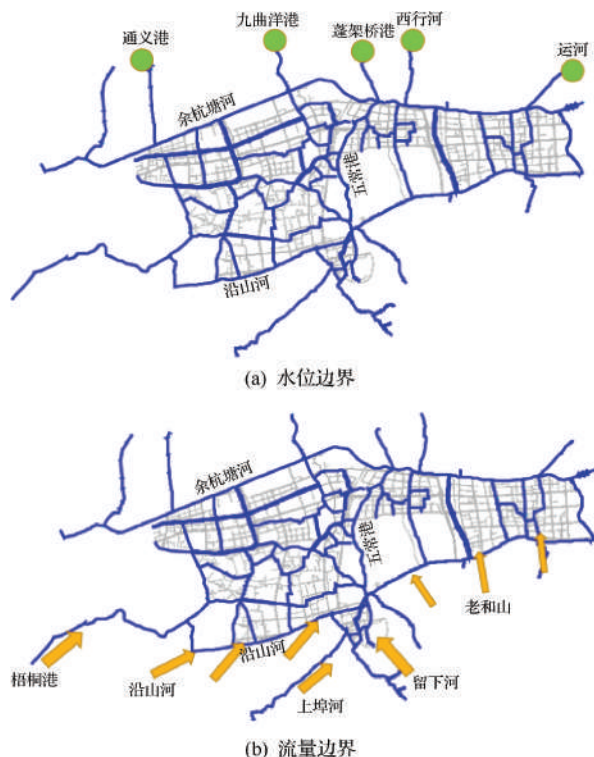


图4 计算边界条件

3.3 模型验证

模型验证采用 2013 年“菲特”台风期间的水位和积水点进行。计算成果表明,模拟和实测的水位过程线变化基本一致,其中洪水位实测值与计算值吻合较好,最大变幅误差在 5% 以内。除个别积水点外,“菲特”台风期间模拟计算得到的积水点与实际报道的积水点吻合较好。经过验证,本数学模型可以满足数值计算需求,见表 1。

表1 “菲特”台风最高洪水位验证 单位:m

监测点	实测值	模拟值	相差
运河拱宸桥	3.64	3.64	0
闲林水位台	4.25	4.26	1%
西溪湿地外	3.96	3.95	-1%

4 计算成果分析

本次开展了 4 个典型工况研究,分别是“罗莎”台风雨、“菲特”台风雨、50 年一遇梅汛降雨、50 年一遇台风汛降雨,限于篇幅,本文就“菲特”台风雨、50 年一遇梅汛降雨进行详细分析。

4.1 “菲特”台风雨工况

遭遇“菲特”台风雨,现状条件下,区域河道水位呈现西高东低趋势,西南部河道水位均超过 4m,大部分河道处于高水位运行状态;城西南排通道工程建成后,区域河道水流均向方家桥港和五常港汇集,紫金港河以东、方家桥港以西的河道水位在 3.5 ~ 4.0m 之间,隧洞进水口附近河道水位相对较低,如蒋村港、五常港、永胜港水位在 3.3 ~ 3.5m 之间,而圩区内河道普遍处于 2.5 ~ 3.3m 之间。五常港和方家桥港附近的水位大幅下降,水位最高降幅达到 0.85 ~ 1.0m,区域内大部分河道水位降幅超过 0.5m,靠近运河水位降幅最小,但也达 0.3 ~ 0.5m。河道高水位变化情况见图 5。

遭遇“菲特”台风雨,现状条件下,区域内出现了较大范围的积水,积水量为 $65.8 \text{ 万 m}^3/\text{d}$,积水面积 2.06km^2 ,积水区域主要集中在留下街道、学院路、益乐新村、天目山路等。最深积水处位于留下街道,深度超过 1.5m。城西南排通道工程建成后,研究区域积水面积进一步下降,留下街道范围内的积水基本消失,区域



(a) 现状条件下河道高水位分布



(b) 工程建成后河道高水位分布

图5 “菲特”台风雨工况工程建成前后河道高水位分布
内基本消除超过15cm的积水。积水区域变化情况见图6。



(a) 现状条件下积水点分布



(b) 工程建成后积水点分布

图6 “菲特”台风雨工况工程建成前后积水点分布

4.2 50年一遇梅汛降雨工况

遭遇50年一遇梅汛降雨,现状条件下,区域内的大部分区域河道水位超过4m,仅有东片少量河道水位在4m以下,城西南排通道工程建成后,区域内的河流流向发生较大的变化,均向方家桥港和五常港汇集,研究范围内河道水位也下降至3.5~4m,平均降幅达到0.4m以上,进水口附近的河道水位在3.3~3.5m。河道高水位变化情况见图7。



(a) 现状条件下河道高水位分布



(b) 工程建成后河道高水位分布

图7 50年一遇梅汛降雨工况工程建成前后河道高水位分布

遭遇50年一遇梅汛降雨,现状条件下,积水量为87.1万 m^3/d ,积水面积3.445 km^2 ,积水区域主要集中在文一路、留下街道、全丰苑北侧、景兴路等,最深积水处位于留下街道,最大积水深度可达1m以上。城西南排通道工程建成后,积水总量下降至9.7万 m^3/d ,积水面积大幅度减少至0.529 km^2 ,除局部地势低洼处,大部分区域的积水点消除。积水区域变化情况见图8。

统计各工况下积水情况,工程建成前,50年一遇台汛降雨积水面积最大,积水深度超过5cm的面积达4.994 km^2 ,占研究区域面积近7%;50年一遇梅汛降雨积水面积超过3.445 km^2 。工程建成后,各工况积水下

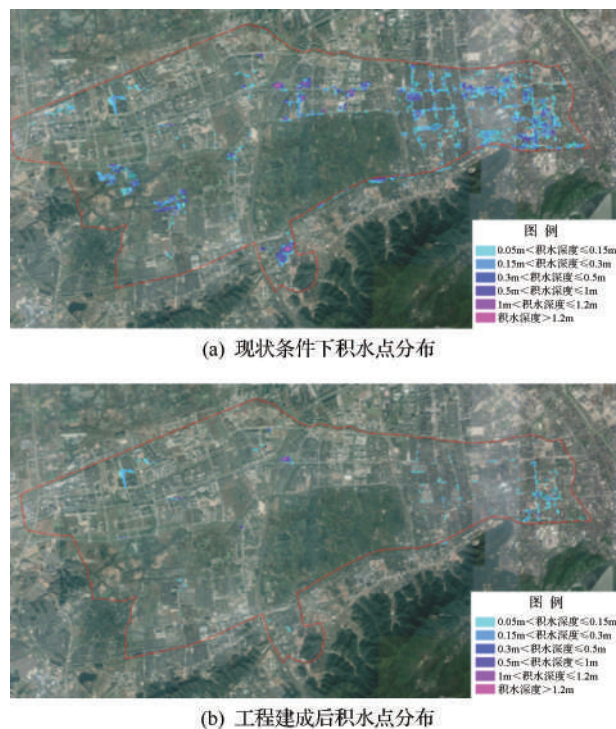


图8 50年一遇梅汛降雨工况
工程建成前后积水点分布

降明显,其中50年一遇台汛降雨工况下,积水面积由 4.994km^2 降至 1.332km^2 ,减少73%,50年一遇梅汛降雨工况下,积水面积由 3.445km^2 降至 0.529km^2 ,减少85%,见表2。

表2 不同工况下工程建成前后积水数据对比

工 况	建成前 积水量/ 万 m^3	建成后 积水量/ 万 m^3	建成前 积水面积/ km^2	建成后 积水面积/ km^2
“菲特”台风雨	43.3	15.9	2.060	0.850
“罗莎”台风雨	9.1	4.4	0.414	0.165
50年一遇台汛降雨	123.4	22.3	4.994	1.332
50年一遇梅汛降雨	87.1	9.7	3.445	0.529

4.3 内涝风险评估

一般认为,当积水深度小于 0.15m 时,积水不会淹没道路侧石,不影响行人和机动车的通行,当积水深度超过 0.15m 时,会造成一定程度的灾害损失,本次拟订内涝风险分级的最低界线为积水深度 $h > 0.15\text{m}$,积水时间 $t > 1\text{h}$,见表3。

表3 内涝风险等级划分标准

内涝风险等级	积水深度/ m	积水时间/ h
高风险区	$h > 0.5$	—
中风险区	$0.3 < h \leq 0.5$	> 1
低风险区	$0.15 < h \leq 0.3$	> 1

通过数值模拟计算,在50年一遇台汛降雨工况下,工程建成后,内涝高风险区域面积从 0.46km^2 减少到 0.04km^2 ,减少91.3%,中风险区域从 0.88km^2 减少到 0.077km^2 ,减少91.25%,低风险区域从 1.73km^2 减少到 0.41km^2 ,减少约76.3%。在50年一遇梅汛降雨工况下,工程建成后,内涝高风险区域面积从 0.35km^2 减少到 0.035km^2 ,减少90%,中风险区域从 0.53km^2 减少到 0.02km^2 ,减少96.23%,低风险区域从 1.16km^2 减少到 0.14km^2 ,减少87.93%。

4.4 积水原因分析

城西南排通道工程建成后,研究区域内在台汛或梅汛期遭遇强降雨时,局部区域仍面临积水风险,主要原因如下:①局部管道的排水路径较长,且在外河水位较高时,由于承压出流导致管道的排水能力降低,雨水排出不及时,从而产生路面积水;②该风险区自身的地势要明显低于周边道路和地块,由于地势低洼导致极易产生积水;③由于道路建设时序原因导致局部管道排水无出路,直接汇流到道路或者附近小区的地势低洼处,产生积水。

对于上述原因产生的积水,可考虑采取以下措施予以消减:对于受纳水体顶托严重或者排水不畅的雨水管道,应当结合道路整治对雨水管网不合理处进行重新设计,提高管道的排水能力,同时定期疏通管道,减轻管道淤积程度。对于已有规划但现状尚未建成的区域,应优先考虑通过调整用地布局和场地、道路竖向标高,降低区块内涝风险,同时结合地形地貌,规划地表雨水的行泄通道。对于现状已经建成的地势低洼区域,通过保留现状圩区,同时结合旧城改造工作,对原有低于标准的管网进行改造,并通过适当的雨水调蓄措施,提高应对内涝风险的能力。



5 结 论

本文以城西南排通道工程为例,基于雨水管网和河网耦合城市排水模型数值计算结果,从河道水位、积水量、积水面积变化方面,定量分析了工程排涝效果,得到以下结论:

a. 目前研究范围部分区域排涝能力明显不足,主要集中在何过港以南片区,在发生高重现期的降雨时,河道水位过高,造成较大范围的积水和内涝。从积水的范围来看,西湖区范围内受灾相对更严重,积水点主要集中在学院路、教工路、天目山路、文一路以及留下区块范围内。

b. 城西南排通道工程建成后,不同工况下河道水位平均降幅超过 0.4m,最高降幅超过 1m;积水量、积水面积减少超过 50%,最多减少 84%,工程排涝效果非常显著,大幅降低了杭州城西区域内涝风险,可使杭州城西区域治涝标准达 50 年一遇。

c. 内涝防治是一项系统工程,本工程建成后,河道水位已降至较低水平,但仍有区域反复出现积水,应同时加强区域内的低洼点改造,雨水管网、雨水口等建设工程,增加区域内水面率,降低区域内涝风险。

本文所涉工程案例较为典型,构建雨水管网和河网耦合的城市排水模型开展数值模拟,可有效克服水利行业常用计算软件的局限,直观展示内涝变化情况,定量分析大型泵站排涝效益,并进一步论证工程方案的科学性、合理性。水利、城市规划行业可就河网非恒

定流水动力模型和城市排水耦合模型的联合应用开展深入研究,使得数值计算更可靠、更准确、更直观。◆

参考文献

- [1] 张建云,王银堂,贺瑞敏,等. 中国城市洪涝问题及成因分析[J]. 水科学进展,2016,27(4):485-491.
- [2] 李虎成,王天宇,王灵华,等. 基于 MIKE FLOOD 的典型滨湖城市排水防涝系统规划[J]. 中国农村水利水电,2017(4):77-85.
- [3] 杨小明,张瑞金.《曲靖市中心城市海绵城市专项规划》编制中模型软件的应用[J]. 中国市政工程,2017,193(4):50-53.
- [4] 张立洪. 基于潮、雨遭遇情景的城市防潮排涝数值模拟及风险评估研究[D]. 天津:天津大学,2016.
- [5] 彭建,魏海,武文欢,等. 基于土地利用变化情景的城市暴雨洪涝灾害风险评估:以深圳市茅洲河流域为例[J]. 生态学报,2018,38(11):3741-3755.
- [6] 赵威. 沿淮洼地泥黑河地区大型泵站排涝效果分析[J]. 江淮水利科技,2015(6):24-25.
- [7] 董磊. 南方某特大城市主城区排水防涝能力评估研究[J]. 城市道桥与防洪,2016(3):79-81.
- [8] 钱立鹏,李田. 基于 1D/2D 耦合模型的排水系统内涝重现期校核[J]. 中国给水排水,2014,30(15):155-158.
- [9] 王磊. 基于模型的城市排水管网积水灾害评价与防治研究[D]. 北京:北京工业大学,2010.
- [10] 李尤,邸苏闯,朱永华,等. 基于多模型耦合的城市内涝多视角分析[J]. 中国农村水利水电,2019(5):82-90.
- [11] 苏凯,张妍珺,伍鹤皋,等. 隧洞开挖过程中围岩安全系数演化特征与支护时机选择方法研究[J]. 岩石力学与工程学报,2019,38(S1):2964-2975.
- [12] 张传庆,冯夏庭,周辉,等. 应力释放法在隧洞开挖模拟中若干问题的研究[J]. 岩土力学,2008(5):1174-1180.
- [13] 熊良宵,杨林德. 深埋隧洞开挖造成的应力变化过程[J]. 中南大学学报(自然科学版),2009,40(1):236-242.
- [14] 王克忠,刘耀儒,王玉培,等. 引水隧洞复合支护钢拱架变形特性及围岩稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(2):217-224.
- [15] 王小军,周慧,蒋兵. 引水隧洞开挖支护方案围岩稳定的非线性有限元模拟[J]. 南水北调与水利科技,2010,8(5):153-156.
- [16] 侯公羽,刘宏伟,李晶晶,等. 基于开挖卸荷效应的地铁隧道施工过程数值分析[J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(S1):2915-2924.
- [17] 胡天明,张继勋,任旭华. 引水隧洞初期支护及其施加时机对围岩稳定性的影响[J]. 水电能源科学,2020,38(10):95-98.

(上接第7页)

感潮河道上过闸流量控制的自动化方法

刘洪¹ 马晓辉²

(1. 丹阳市水利局, 江苏 丹阳 212300;
2. 丹阳市九曲河枢纽管理处, 江苏 丹阳 212300)

【摘要】 为保证水闸安全, 解决感潮河道上水闸因内外水位差不断变化而无法准确控制过闸流量的问题, 本文通过对感潮河道上大量首次启门时过闸水流的流态统计分析, 归纳出两种不同的闸下出流流态, 并建立对应的水力学模型和流量-开度-水位差关系, 绘制出相应的曲线, 建立数据库。同时, 通过现场设备把采集的闸内外水位、要求控制的流量记录在数据库中, 以备查询, 确定闸门的开度值, 最后通过系统软硬件对过闸流量实现自动化控制。这种方法控制流量准确、自动化程度高, 实现了水闸的安全运行, 具有一定的实用价值。

【关键词】 潮汐; 流量; 控制; 自动化

中图分类号: TV66

文献标志码: A

文章编号: 2097-0528(2022)08-027-05

Automatic method for flow control of gate on tidal river

LIU Hong¹, MA Xiaohui²

(1. Danyang Water Conservancy Bureau, Danyang 212300, China;
2. Danyang Jiuquhe Hub Management Office, Danyang 212300, China)

Abstract: The water level difference inside and outside the sluice is constantly changed on the tidal river channel, so it is unable to accurately control the lock traffic problems. Two different outflowing states under the gate are concluded in the paper through flow state statistic analysis of gate flow during massive first-time gate opening on tidal river in order to ensure the safety of sluice. Corresponding hydraulic model and flow-opening-water level difference relationship are established. A corresponding curve is drawn and a database is established. Meanwhile, the collected gate inside and outlet water level and required flow are recorded in the database through the equipment in the site for inquiry. The gate opening value is determined, and the automatic control of the gate flow is realized through system software and hardware. The method is characterized by accurate flow control and high automatic level. Safe operation of the gate is realized. It has certain practical value.

Keywords: tide; flow; control; automation

九曲河位于长江下游镇江段。九曲河节制闸是九曲河入江的控制口门, 具有引潮、排涝功能。闸外侧为长江, 受海洋潮汐影响, 其潮汐规律呈现“两高两低、一

强一弱”的日周期变化特性^[1], 内河侧水位相对固定, 开闸情况下水位亦随闸门启闭呈周期性变化。该闸在工程运用上可分为两类, 一类是在闸内外有一定水位

收稿日期: 2021-11-04

作者简介: 刘洪(1974—), 男, 高级工程师, 主要从事水利工程建设与管理的方法与技术研究。

差的情况下开启闸门,过闸流量随着内外水位差变小而逐渐变小;另一类是在闸内外无水位差或水位差很小的情况下开闸,随着涨潮,过闸流量由小变大,再随着落潮,流量又变小。

本文以水文统计为基础,重点研究对过闸流量进行控制的理论及方法,以使过闸的流量不超过设计标准或满足调度的要求,达到保证工程运行安全的目的。

1 建立过闸流量控制模型

按《水工建筑物与堰槽测流规范》(SL 537—2011)对九曲河节制闸投入运行后的最初三年中首次启门时过闸水流的流态情况进行了统计^[2],统计结果见表1。

表1 始流时流态统计

年 份	当年总开闸次数	淹没式闸孔出流次数	淹没式堰流次数
2006	567	282	285
2007	522	239	283
2008	541	254	287

根据表1中的统计结果,运用水位差关系法,以闸门流量与开度的水力学关系为基础建立如下的过闸流量控制水力学模型^[3-5]。

1.1 始流模型

该模型与实际运行时的淹没式闸孔出流相对应,定义为开闸前内外侧有水位差,开闸后水位差开始变小、短时间内流量由大逐渐变小。

淹没式闸孔出流的水力学公式^[5-6]为:

$$Q = \mu_1 n b e \sqrt{2g\Delta Z} \quad (1)$$

式中: μ_1 为淹没孔流量系数; n 、 b 、 e 、 ΔZ 、 g 分别为孔数、单孔净宽、闸门开度、上下游水位差和重力加速度。

对于平底平板门闸,本文采用经验系数法计算流量系数:

$$0.76(e/H)e^{0.038} \quad (2)$$

式中: H 为上游水位^[7-8]。

由此,编制始流流量查算表,并绘制“流量-开度-水位差”三者的关系曲线(见图1)。

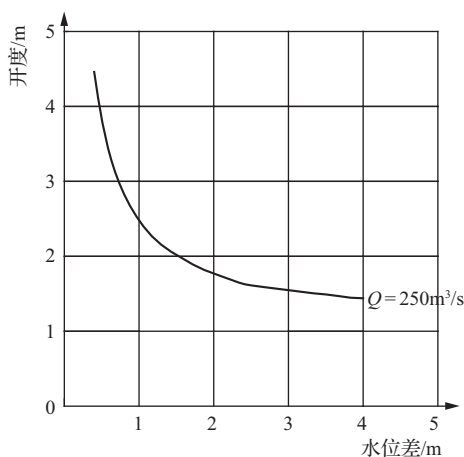


图1 始流时流量-开度-水位差曲线

上述曲线由不同的上下游水位及不同的开度绘制而成,并可以将多个流量叠加在一张图中。实际运用时,可根据不同流量下的开度-水位差关系,通过查表来确定对应流量的开度。

1.2 平潮引排水模型(以引水为例)

该模型与实际运行时的淹没式堰流相对应,定义为开闸前内外无水位差或水位差很小,开闸后内外水位同步上升或下降、短时间内流量由小变大。

《水工建筑物与堰槽测流规范》规定的感潮堰流最大流量公式为

$$Q_{\max} = C_k h b^\alpha \Delta Z^\beta \quad (3)$$

式中: C_k 、 α 、 β 均为经验参数,需由实测资料分析确定; h 为开闸前开水位; b 为单孔净宽; ΔZ 为有效水位差。

九曲河水文站近几年来对上述公式中的经验参数进行了率定^[9],引潮时过闸的最大流量为

$$Q_{\max} = 18.4 \Delta Z_L^{0.559} Z_{L\max}^{1.59} \quad (4)$$

式中: ΔZ_L 为一潮引水的闸内高潮与低潮的差; $Z_{L\max}$ 为一潮引水的闸内的最高水位。

由此,编制平潮引水流量查算表,并绘制“流量-开度-水位差”三者的关系曲线(见图2)。

先按开闸前内河水位及前一潮的最高潮位估算本次引水的闸内潮位差,闸内最高水位和潮位差的交点位于要求流量曲线的下方时,最大引水流量才不超过要求的流量;换言之,调整闸门开度,控制闸内的最高

水位,即可达到控制流量的要求。

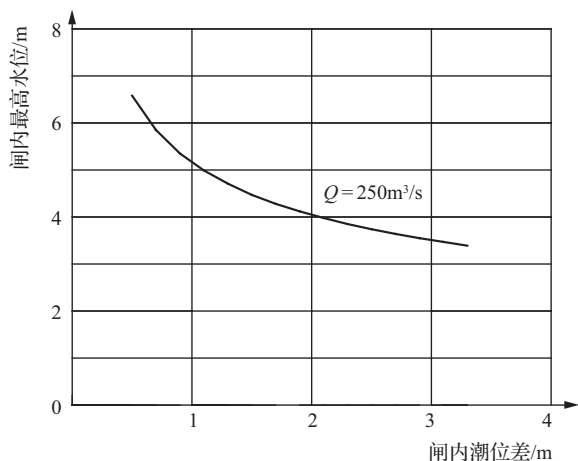


图2 平潮时流量-开度-水位差曲线

1.3 模型的转换

上述这两种过闸流量控制的水力学模型在实际运用中有可能发生转换,特别是在长时间引排水时,并且这种转换是动态双向的。

2 自动化控制的实现

2.1 系统需求分析

按图1和图2及相应的流量查算表,即可对过闸流量进行控制。但由于其潮汐规律呈现“两高两低,一强一弱”的日周期变化特性,经常会出现有一个潮次是在深夜才符合引排水条件的情况,这就加大了值班人员的劳动强度;并且,因为潮水的涨落是动态的,这也要求必须动态地调整闸门的开度才能达到控制过闸流量的目的^[10-12]。

2.2 系统软硬件组成

在硬件上,设置内外水位仪、闸门开度仪、行程开关(测水流方向)等几类现场信号(数据)采集装置,这些数据由可编程逻辑控制器 PLC 进行预处理后,再送到上位机进行自动化控制^[13],硬件拓扑结构见图3。本系统控制软件,采用组态软件(INTOUCH)+数据库(SQL SERVER)的形式,实现对数据的采集、分析及对设备的控制、调整 and 实现交互性较强的人机界面^[14]。

2.3 控制流程图

结合系统需求及软硬件功能设计,自动化控制^[15-16]的流程见图4。



图3 硬件拓扑结构

2.4 系统设置及说明

a. 水位数据库是本系统的核心之一,控制流程中有很多判断都用到内或外侧的水位,以实际运行时经验,一般以2min左右记录一次内外水位为宜,时间间隔如短,则数据量太多,间隔长了则不够精确。同时,数据库中的水位数据保留最近一个月即可。

b. 始流状态判断,以开闸前10min内内外水位差不超过10cm来确定,这是为了消除波浪的影响;控制流程中比较水位的时间、调整闸门开度的水位差等,在系统中都是可以设定的,可在调试过程中择优确定。

c. 上面是按设计流量进行控制的过程,同理,还可以用调度流量值输入“流量设定值”对话框,以实现控制其他不同的流量过闸。

3 系统使用情况及改进措施

本系统自2013年完成开发投入使用以来,每年由自动化系统控制过闸流量的次数达260余次,系统运行可靠,操作方便,各类报表齐全,控制流量达到了预期的目的,减轻了值班人员的劳动强度,保证了工程的运行安全。但同时也存在一些问题,如:平潮引排水模

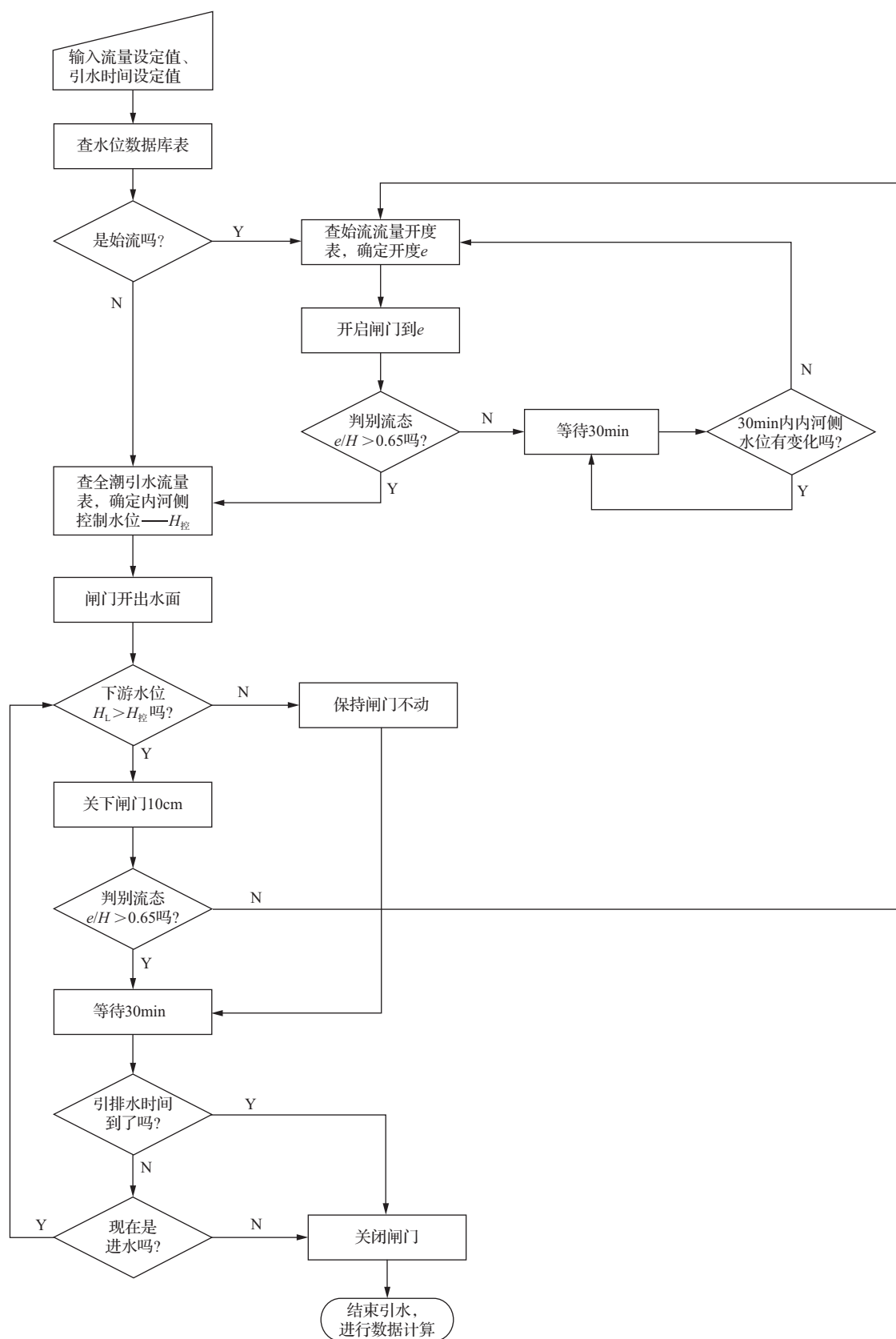


图4 闸门控制流程

型中,对过闸流量的控制仅指不超过某一个流量值,并不能测出实时的流量是多少,这主要是因为模型采用的是最大流量公式,而相关的规范并没有推荐瞬时流量公式,分析其原因主要还是与感潮河段水文变化的复杂性有关。

为了解决上述存在的问题,实现流量的实时监测与控制,统一两个模型,简化程序控制步骤,可以在河道岸边安装声学多普勒流速剖面仪(ADCP)^[17],流速传感器安装采用侧视水平方式(即H-ADCP)^[18],根据测得的一个水层的流速分布数据,采用“回归法”实时测量并计算、记录河流的断面流量,再采用通信手段,将测得的流量数据发至上位机,系统由此控制闸门升降,以达到实时流量监控的目的。

4 结 论

我国众多的沿海、沿江感潮河道上的水闸,对其过闸流量进行控制的常规方法是查始流曲线(表)或一潮引排水曲线(表)来确定闸门的开度,用人工方式来不断调整闸门开度。本文所述的方法是在对流态进行分析的基础上,确定适用的水力学控制模型,绘制“流量-开度-水位差”三者关系曲线、制定“流量查算表”,形成相应的数据库,通过一定的硬件和软件予以支持,自动对过闸流量进行控制,这种方法简便可靠,安全性高,投资较省,具有一定的实用价值。◆

参考文献

- [1] 包为民,卞毓明.感潮河段水位演算模型研究[J].水利学报,1997(11):34-38.
- [2] 水工建筑物与堰槽测流规范:SL 537—2011[S].北京:中国水利水电出版社,2011.
- [3] 万晓凌,陆小明,周毅,等.感潮水闸引水量计算方法研究[J].长江科学院院报,2013,30(4):17-20.
- [4] 周婷,宁芊.都江堰灌区柏条河三孔平板闸门流量-开度模型研究[J].水电能源科学,2012,30(5):90-93.
- [5] 水闸设计规范:SL 265—2001[S].北京:中国水利水电出版社,2004.
- [6] 李家星,赵振兴.水力学[M].南京:河海大学出版社,2001.
- [7] 孟健.平原区中小型水闸过闸流量推求方案与实例[J].黑龙江水利科技,2012(1):104-106.
- [8] 吴门伍,陈立,周家俞.大和水闸过闸流量分析[J].武汉大学学报(工业版),2003(10):51-54.
- [9] 周全,吴伟华,杨晓斌,等.上海浦东水闸过闸流量和水量率定方法研究[J].水利水文自动化,2010(1):65-68.
- [10] 钱福军,钱江.长江感潮段沿江引水闸过闸流量的自动控制[J].中国水利,2014(10):36-38.
- [11] 常成.基于PLC的闸门自控系统研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2015,36(1):76-80.
- [12] 杨朋林,赵成萍,施一潭.基于PLC的闸门自动控制系统的设计与实现[J].中国测试技术,2006(5):107-109.
- [13] 赵子涛,魏皓,王小霞,等.小浪底水电站闸门监控系统中PLC与上位机通信的实现[J].水力发电,2006,32(2):83-84.
- [14] 牛广文,边玉国.基于PLC与组态软件的闸门监控系统的实现[J].工业控制计算机,2007,30(9):84-85.
- [15] 王平,刘复玉.PLC自动控制系统可靠性研究[J].电气传动,2001(1):36-38.
- [16] 吴爱萍.PLC控制的设计技巧[J].机床电器,2003(2):34-36.
- [17] 陈代志.ADCP在感潮河段流量测验中的应用[J].江西建材,2014(5):222-223.
- [18] 李德标,刘永亮.H-ADCP在平原水网区河道站流量测验中的应用试验[J].江苏水利,2015(4):38-41,44.

(上接第50页)

- [10] Geotechnical investigation and testing-Geohydraulic testing Part 3:Water pressure tests in rock:ISO 22282-3:2012[S].Spain:AENOR,2012.
- [11] YOW J L. Suggested method for deformability determination using a stiff dilatometer[J]. International journal of rock mechanics and mining science & geomechanics abstracts,1996(33):735-741.
- [12] 水力发电工程地质勘察规范:GB 50287—2016[S].北京:中国计划出版社,2016.
- [13] BIENIAWSKI Z T. Engineering rock mass classifications[M]. New York:The wiley-interscience publication,1989.



长距离输水管道水力过渡过程计算

董航凯¹ 田睿² 王启国¹

1. 陕西省引汉济渭工程建设有限公司, 陕西 西安 710024;
2. 陕西省水利电力勘测设计研究院, 陕西 西安 710048)

【摘要】 由于管线较长、沿线地形地势复杂,长距离输水管道工程的管道水力和水锤计算是工程研究的重点与难点。本文以引汉济渭二期工程北干线黄池沟至板桥出水池段为例,对系统起运过程、停运过程、由设计流量运行过渡到最小流量运行、由最小流量运行过渡到设计流量运行,以及一根管按设计流量运行而另一根管零流量的并管运行等不同工况进行了计算。计算结果表明压力管道内正负压力都在允许范围内。

【关键词】 引汉济渭;水锤;水力过渡过程

中图分类号: TV131.4

文献标志码: A

文章编号: 2097-0528(2022)08-032-07

Calculation of hydraulic transition process of long-distance water pipeline

DONG Hangkai¹, TIAN Rui², WANG Qiguo¹

- (1. Shaanxi Hanjiang-to-Weihe Diversion Project Construction Co., Ltd., Xi'an 710024, China;
2. Shaanxi Water Conservancy and Electric Power Survey and Design Institute, Xi'an 710048, China)

Abstract: The calculation of pipeline hydraulic power and water hammer in long-distance water pipeline project is the key and difficulty of project research because the pipeline is long and the terrain along the line is complex. Hanjiang-to-Weihe Diversion Project Phase II Project north trunk Huangchigou-to-Banqiao outgoing pool section is adopted as an example. The system shipment process, the service process, designed flow operation transition to the minimum flow operation, minimum flow operation transition to the designed flow operation, combined pipe operation of one pipe operation according to designed flow and one pipe operation according to zero flow as well as other working conditions are calculated. The calculation results show that the positive and negative pressures in the pressure pipeline are within the allowable range.

Keywords: Hanjiang-to-Weihe Diversion Project; water hammer; hydraulic transition process

1 引言

调水比较常见的方法是有压管道输水。输水管道具有输水线路长、流量大等特点,但是复杂的水流情况和长距离的输水,会产生各自原因的水力过渡过程,引

起有压管道内流速急剧变化,发生水锤现象,导致管道爆管等事故^[1-8],造成生产设备的破坏、居民财产的损失和水资源浪费等。因此,对输水管道水力过渡过程进行分析是十分必要,可以为调水工程的设备研发和施工方法提供强有力的技术支撑,保障工程的安全运

收稿日期: 2021-11-16

基金项目: 2017年陕西省水利科技项目;陕西省引汉济渭工程初期运行(三河口-黄池沟段)调度模型研究(2017slkj-27)

作者简介: 董航凯(1986—),男,硕士,主要从事引汉济渭工程建设管理。

行,减少经济损失。

国内外许多研究人员对压力输水管道水力过渡过程进行了研究,儒科夫斯基^[9]提出了不同管道长度的波速公式。乔杜里^[10]研究了水力过渡过程的原理、模型、实际应用案例。我国于1960年开始进行水力过渡过程的研究。王树人编写的《水击理论和水击计算》,介绍了水击计算的详细公式。李进平等^[11]研究了输水管道过渡过程的摩擦阻力,在模拟非恒定流摩阻上取得一定的成果。但是在长距离输水管道水力过渡计算研究方面,仍然较为缺乏。

本文以引汉济渭二期工程北干线黄池沟至板桥出水池段为例,采用特征线法,研究长距离输水管道水力过渡过程^[12],通过提出各连通阀、检修阀及调流调压阀等不同操作工况下管道工作压力、设计压力变化规律,优化最佳阀门开关时间过程^[13],为引汉济渭工程长距离输水管道确定合理的管理运行方式提供技术参考。

2 特征线法

本文应用特征线法^[14],通过建立管内非恒定流动的微分方程及各类复杂的边界条件方程并求解,以获得事故停泵过程中水力过渡过程的数值解^[15-18]。水锤基本方程^[19]是由运动方程和连续性方程组成的双曲型偏微分方程组,可在特征线方向将它转换为水锤全微分方程:

$$\frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} + \frac{fv|v|}{2D} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{dx}{dt} = +a \quad (2)$$

$$-\frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} + \frac{fv|v|}{2D} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{dx}{dt} = -a \quad (4)$$

由上式进行有限差分近似,可以得到如下水锤离散特征线方程:

$$H_P - H_A + \frac{a}{gA}(Q_P - Q_A) + \frac{f\Delta x}{2gDA^2}Q_A|Q_A| = 0 \quad (5)$$

$$H_P - H_B - \frac{a}{gA}(Q_P - Q_B) - \frac{f\Delta x}{2gDA^2}Q_B|Q_B| = 0 \quad (6)$$

解上述方程可得

$$C^+: H_P = H_A - B(Q_P - Q_A) - RQ_A|Q_A| \quad (7)$$

$$C^+: H_P = H_B + B(Q_P - Q_B) - RQ_B|Q_B| \quad (8)$$

或

$$C^+: H_P = C_P - BQ_P \quad (9)$$

$$C^-: H_P = C_M + BQ_P \quad (10)$$

其中

$$B = \frac{a}{gA} \quad (11)$$

$$R = \frac{f\Delta x}{2gDA^2} \quad (12)$$

$$C_P = H_A + BQ_A - RQ_A|Q_A| \quad (13)$$

$$C_M = H_B - BQ_B + RQ_B|Q_B| \quad (14)$$

式中: H_P 、 H_A 、 H_B 、 Q_P 、 Q_A 、 Q_B 分别为 t 时刻 P 、 A 、 B 三个断面的瞬态压力水头和流量, A 为管道断面面积, D 为管道直径, Δx 为 P 点到 A 点和 B 点的水平距离微分段, a 、 g 、 f 分别为系数。

3 上黄池至板桥段水力过渡计算

3.1 工程概况

引汉济渭二期工程由黄池沟配水枢纽、南干线及北干线组成^[20]。北干线长度89.49km,始端设计流量30m³/s。北干线黄池沟至板桥出水池段以压力管道为主,有压隧洞为辅,采用有压输水方式,穿越黄池沟黑河采用倒虹吸、跨渭河采用管桥方式;沿程每700~800m设置一组进排气阀,每5~10km设置一组连通阀井或检修阀井,并结合线路上地形特点分别设有黑河倒虹进口退水设施、蔡家庄退水设施及渭河管桥进、出口处退水设施。

本文的资料主要来源于工程中的实测数据,主要有北干线黄池沟至板桥出水池段主要控制点水位(见表1)、引汉济渭二期工程输水干线分段流量(见表2)、北干线黄池沟至板桥出水池段管道分段(见表3)。

表1 北干线黄池沟至板桥出水池段主要控制点水位

控制点名称	黄池沟配水枢纽	上黄池进水池	周至及咸阳分水口1	杨凌、武功分水口	板桥出水池
要求水位/m	514.88	514.13	475	505	498



表2 引汉济渭二期工程输水干线分段流量

干线名称	分段桩号		分段位置		设计流量/ (m^3/s)
	起	至	起	至	
北干线	0+000	6+301.22	黄池沟配水枢纽	周至、咸阳分水口1	30.0
	6+301.22	19+563.30	周至、咸阳分水口1	杨凌、武功分水口	27.0
	19+563.30	39+409.55	杨凌、武功分水口	板桥出水池	23.0

黄池进水池至板桥出水池段有压力流,在倒虹进出口、管桥段和管道沿线每5~10km设连通、检修阀;在管道的隆起点或直线段长度大于0.7~0.8km处设置排气阀、空气阀、微量排气阀。根据设计资料,输水管选用预应力钢筒混凝土管(PCCP)——在带有钢筒的高强混凝土管芯上缠绕环向预应力钢筋,再在其上喷致密的水泥砂浆保护层而制成的输水管,管糙率取0.012;钢管糙率取0.0115。分段及参数见表3。

表3 北干线黄池沟至板桥出水池段管道分段

编号	起点桩号	终点桩号	水平长度/m	总长度/m	主管	管 材	壁厚/mm	设计压力/MPa
1	0+862.12	1+052.27	190.15	193.07	2×DN3400	钢管	12	0.8
2	1+052.27	1+866.13	813.86	833.88	2×DN3400	预应力钢筒混凝土管(PCCP)	360	0.8
3	1+866.13	3+850.27	1984.14	1964.2	2×DN3400	预应力钢筒混凝土管(PCCP)	360	1.0
4	3+850.27	4+211.91	361.64	361.67	2×DN3400	预应力钢筒混凝土管(PCCP)	360	1.2
5	4+211.91	5+146.73	934.82	935.23	2×DN3400	钢管	20	1.4
6	5+146.73	7+328.49	2181.76	2181.9	2×DN3400	预应力钢筒混凝土管(PCCP)	360	1.2
7	7+328.49	10+695.01	3366.52	3366.56	2×DN3400	钢管	20	1.4
8	10+695.01	17+006.83	6311.82	6312.34	2×DN3400	钢管	22	1.6
9	17+006.83	18+249.63	1242.8	1243.27	2×DN3400	钢管	20	1.4
10	18+249.63	19+601.15	1571.15	1352.01	2×DN3400	钢管	22	1.6
11	19+601.15	38+551.15	18950	18952.4	2×DN3400	钢管	24	1.6
12	38+551.15	39+101.15	550	557.48	2×DN3400	钢管	22	1.4
13	39+101.15	39+402.15	301	304.69	2×DN3400	钢管	16	1.0

3.2 系统稳定状态分析

3.2.1 设计流量运行

进水池设计水位514.13m,出水池设计水位498.0m,两根供水管线单独运行。分水口设计流量运行的分流流量见表4。预应力钢筒混凝土管(PCCP)管糙率取0.012,钢管和球墨铸铁管糙率取0.0115(另加10%的局部损失)。计算考虑最大流量放水,以及

表4 分水口设计流量运行的分流流量

分 水 口	设计流量运行/ (m^3/s)	最小流量运行/ (m^3/s)
来流流量	30.0	5.0
周至分水口、咸阳分水口1	1.5+1.5	0.5+0
杨凌、武功分水口	2.0+2.0	0.67+0
入板桥出水池	23.0	3.83

末端调流调压阀部分开启以设计流量放水两种工况。

a. 在分水口按设计流量分水的基础上,假定板桥出水池处管段末端调流调压阀全开,以求得末端可能的最大流量。沿程流量分布计算结果如图1所示。计算得到两根管道首端流量 $31.78\text{m}^3/\text{s}$,末端流量 $24.78\text{m}^3/\text{s}$,大于设计流量 $23\text{m}^3/\text{s}$,表明系统有大于设计流量的过流能力。

b. 考虑到压力流管道系统运行时,全线分水流量及入板桥水池流量应按设计流量控制。调小末端调流调压阀开度,使得进入板桥出水池的总流量为 $23\text{m}^3/\text{s}$ 。沿程流量分布计算结果如图2所示。

通过调算得到末端调流调压阀的面积开度为8.94%。单管道首端流量 $15.0\text{m}^3/\text{s}$,末端流量 $11.5\text{m}^3/\text{s}$,前压力水头500.038m,过阀损失2.038m。按阀

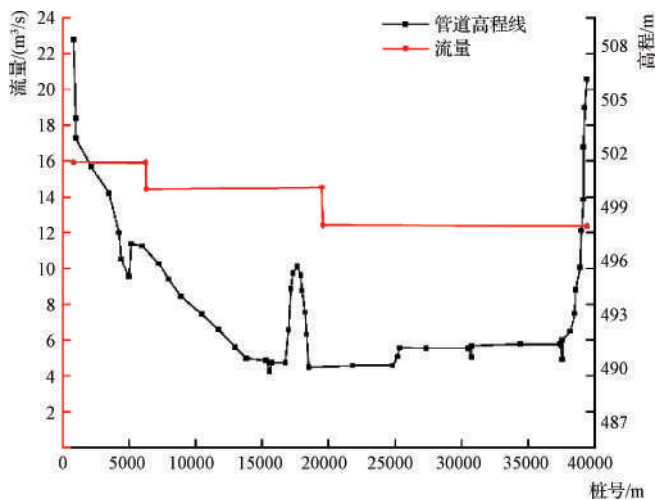


图1 流量沿程分布线(设计分水流量、末端阀全开)

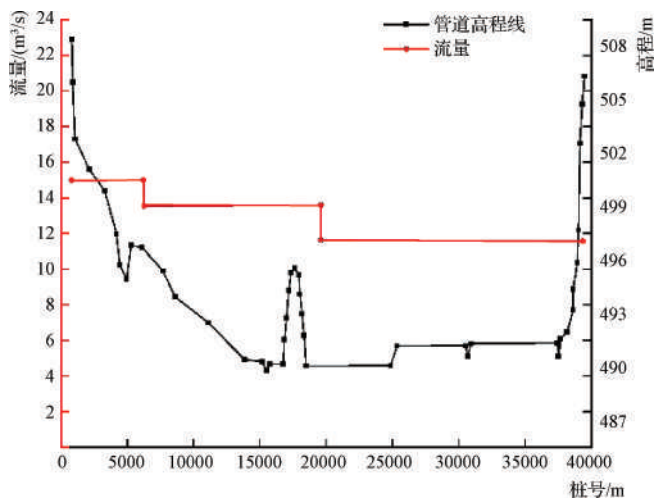


图2 流量沿程分布线(设计流量运行)

全开局部阻力系数 $\zeta = 0.25$ 计算,过单个末端调流调压阀流量 $Q_a = 11.5/4 = 2.875 \text{ m}^3/\text{s}$, 闸门直径 $D = 1.8 \text{ m}$, 开度 $\tau = 0.0894$, 过阀损失 $h_f = 2.037 \text{ m}$ 。理论公式推算出的水力损失与数模计算值一致。

3.2.2 最小流量运行

上游取为上黄池进水池,为设计水位 514.37 m , 下游取为板桥出水池,为设计水位 495.02 m 。单根供水管线运行,沿程检修阀全开,连通阀关闭,末端调流调压阀部分开启。沿程流量分布如图3所示。通过调算得到末端调流调压阀的面积开度为 1.02% ,单管道首端流量 $5.0 \text{ m}^3/\text{s}$,末端流量 $3.83 \text{ m}^3/\text{s}$ 。计算得到末端调流调压阀前压力水头 512.566 m ,过阀损失 17.546 m 。

按阀全开局部阻力系数 $\zeta = 0.25$ 计算,过单个末端调流调压阀流量 $Q_a = 3.83/4 = 0.9575 \text{ m}^3/\text{s}$, 闸门直径 $D = 1.8 \text{ m}$, 开度 $\tau = 0.0102$, 过阀损失 $h_f = 17.354 \text{ m}$ 。

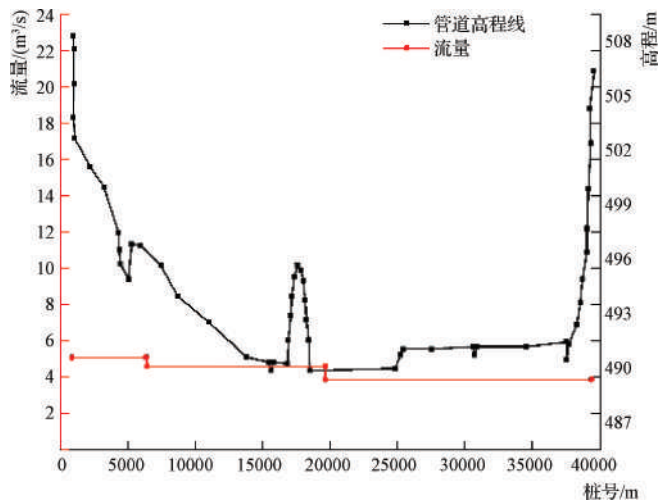


图3 流量沿程分布线

3.3 系统调整运行状态分析

3.3.1 系统起运

初始条件为:进水池为设计水位 514.13 m ,出水池为设计水位 498.0 m ,管道内充满水。各分水口依次开启,开阀时间见表5。考虑1、2 管线之间连接阀已关闭,两条管线可独立运行,故只计算1号管线。

表5 分水口及闸阀开阀时间

分水口	始流量 (单管)/ (m^3/s)	开始时间/s	开阀用时/s	终流量(单管)/ (m^3/s)
来流流量	0			15.0(1800s 计算值)
周至分水口、咸阳 分水口1	0	0	180	3.0
杨凌、武功分水口	0	180	180	4.0
入板桥出水池	0			11.5(1800s 计算值)
调流调压阀1		0	180	
调流调压阀2		180	180	
调流调压阀3		360	180	
调流调压阀4		540	180	

管道压力沿程分布如图4所示,最大压力 102.937 m ,为渭河管桥进口前;最低压力 5.244 m ,出现在板桥出水池处的管道末端。按拟定的开关阀程序,



正负压力均在允许范围内。

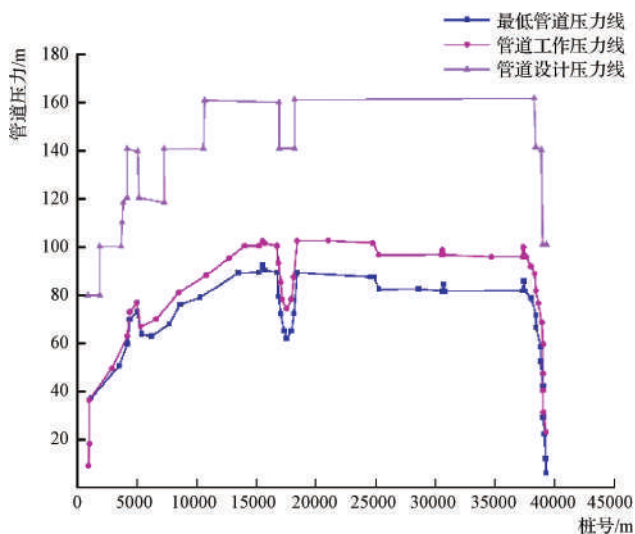


图4 管道压力沿程分布线

3.3.2 系统停运

初始条件为系统设计流量运行工况,如图2所示,设定末端的4个调流调压阀,前3个阀关闭时间180s关闭,后1个阀关闭时间480s关闭。分水流量、关阀时间见表6。

表6 分水口及闸阀关阀时间

分水口	始流量 (单管)/ (m ³ /s)	开始时间/s	开阀用时/s	终流量 (单管)/ (m ³ /s)
来流流量	15.0			0
周至分水口、咸阳 分水口1	1.5	0	180	0
杨凌、武功分水口	2.0	180	180	0
入板桥出水池	11.5			0
调流调压阀1		0	180	
调流调压阀2		0	180	
调流调压阀3		0	180	
调流调压阀4		360	180	

管道压力沿程分布线如图5所示。最大压力123.761m,位于渭河管桥进口前;最低压力4.547m,出现在出水池处管道末端。按拟定的开关阀程序,正负压力均在允许范围内。相对而言,系统停运时的关阀水锤产生的压力波动更大。

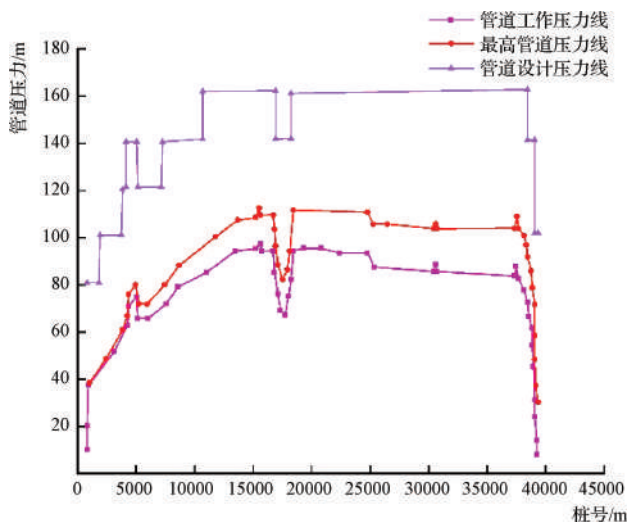


图5 管道压力沿程分布线

3.3.3 设计流量运行切换到最小流量运行

初始条件为系统设计流量运行工况,设定各分水口切换到最小流量运行。分水流量、需要的调节闸阀的关阀时间见表7。参照3.3.1只计算1号管线。

表7 分水口及闸阀开阀时间

分水口	始流量 (单管)/ (m ³ /s)	开始时间/s	开阀用时/s	终流量(单管)/ (m ³ /s)
来流流量	15.0			5.0(1800s 计算值)
周至分水口、咸阳 分水口1	1.5	0	180	0.5
杨凌、武功分水口	2.0	180	180	0.67
入板桥出水池	11.5			3.83(1800s 计算值)
调流调压阀1(关小开度)		0	180	
调流调压阀2(关小开度)		180	180	
调流调压阀3(关小开度)		360	180	
调流调压阀4(关小开度)		540	300	

管道压力沿程分布如图6所示。1号管线最大压力110.165m,位于IIIA-VA26检修进气阀前;最低压力5.638m,出现在板桥出水池处的管道末端。按拟定的关阀程序,正负压力都在允许范围内。

3.3.4 最小流量运行切换到设计流量运行

计算初始条件为系统最小流量运行工况。各分水口逐渐增加到设计流量。分水流量、需要的调节闸阀的开阀时间见表8。参照3.3.1只计算1号管线。

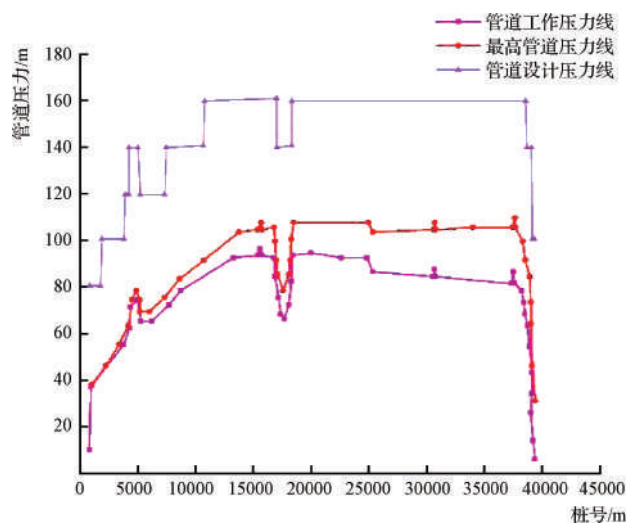


图6 管道压力沿程分布线

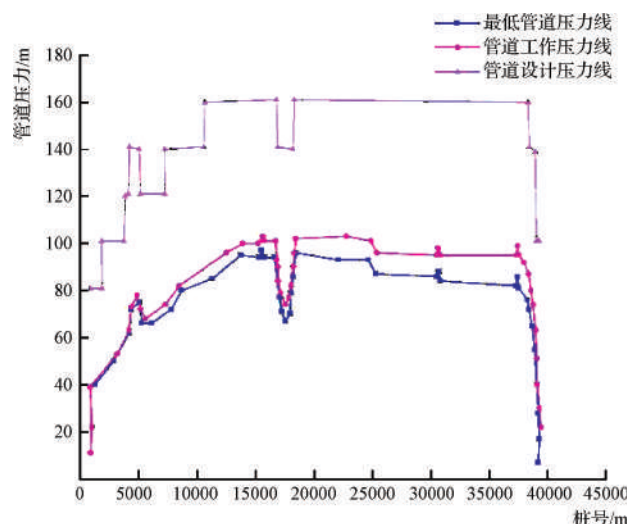


图7 管道压力沿程分布线

表8 分水口及闸阀开阀时间

分水口	始流量 (单管)/ (m ³ /s)	开始时间/s	开阀用时/s	终流量(单管)/ (m ³ /s)
来流流量	5.0			15.0(1800s 计算值)
周至分水口、咸阳 分水口1	0.5	0	180	1.5
杨凌、武功分水口	0.67	180	180	2.0
入板桥出水池	3.83			11.5(1800s 计算值)
调流调压阀1(增加开度)		0	180	
调流调压阀2(增加开度)		180	180	
调流调压阀3(增加开度)		360	180	
调流调压阀4(增加开度)		540	300	

管道压力沿程分布线如图7所示。1号管线最大压力102.2m,最低压力5.363m。虽然切换引起了水力波动,但正负压力都在允许范围内。按拟定的开关阀程序,正负压力均在允许范围内。

3.3.5 系统并管计算

初始条件为1号管线按单管的设计流量运行,2号管线没有运行,分水阀、末端阀全关。从上游到下游依次打开1号、2号管线之间连接阀。分水流量、调节闸阀开阀时间见表9。

管道压力沿程分布线如图8~图9所示。1号管线最大压力101.206m,出现在渭河管桥进口前;最低压力5.637m,出现在板桥出水池处的管道末端。2号

表9 分水口及闸阀开阀时间

分水口	始流量 (单管)/ (m ³ /s)	开始时间/s	开阀用时/s	终流量(单管)/ (m ³ /s)
来流流量	15+0			10.897+10.887 (1800s 计算值)
周至分水口、咸阳 分水口1	1.5+0			1.5+0
杨凌、武功分水口	2+0			2+0
入板桥出水池	11.5			18.287+0 (1800s 计算值)
1号连接阀井1号阀(开)		0	180	
2号连接阀井1号阀(开)		180	180	
3号连接阀井1号阀(开)		360	180	
4号连接阀井1号阀(开)		540	180	
5号连接阀井1号阀(开)		720	180	
6号连接阀井1号阀(开)		900	180	

管线最大压力103.214m,出现在桩号15+578m附近;最低压力9.67m,出现在板桥出水池处的管道末端。虽然切换引起了水力波动,但正负压力都在允许范围内。

4 结 论

a. 设计流量运行时,在不调小尾端调流调压阀开度的情况下,两根管道首端总流量31.78m³/s,大于设计流量30.0m³/s;末端流量24.78m³/s,大于设计流量23.0m³/s。因此,系统有能满足设计要求的供水能力。

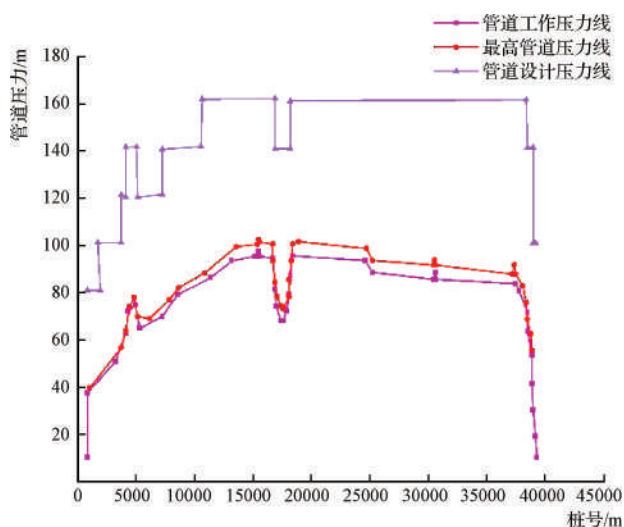


图8 1号管线管道压力沿程分布线

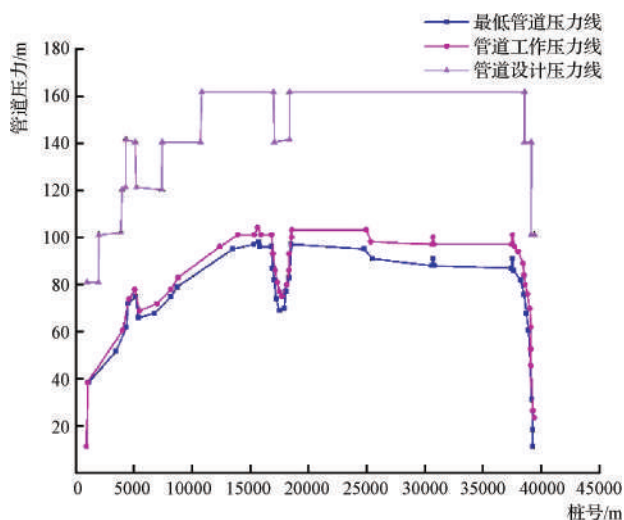


图9 2号管线管道压力沿程分布线

b. 对系统起运、停运过程,由设计流量运行过渡到最小流量运行,由最小流量运行过渡到设计流量运行,以及一根管按设计流量运行而另一根管零流量的并管运行等不同工况进行了计算,发现无论何种运行方式,压力管道内正负压力都在允许范围内,引汉济渭工程北干线黄池沟至板桥出水池段输水管道运行良好。

本文运用特征线法,对引汉济渭有压长距离输水管道水力过渡过程进行了研究,对比分析输水管道的阀门开关和闭合,优化出最佳阀门开关时间过程,确保了输水管道的稳定性,为引汉济渭工程的设计和运行提供了依据和建议。但阀门开关方式和水锤防护措施有效结合问题,仍需要进一步研究。◆

参考文献

- [1] 乔恩春. 支管对长距离输水系统水锤防护的影响[J]. 水利建设与管理,2016,36(4):32-35.
- [2] 杨宇. 长距离有压输水系统防水锤设计探析[J]. 水利建设与管理,2015,35(9):35-37.
- [3] 张涛,李瀚,刘长林. 长距离多起伏输水管道爆管分析与防护探讨[J]. 水利建设与管理,2015,35(10):54-57.
- [4] 郎颖. 高扬程多起伏长距离供水工程水锤计算分析[J]. 水利建设与管理,2016,36(9):36-41.
- [5] 梁其东,时伟,刘青. 管道中水锤产生原因及防控措施[J]. 水利建设与管理,2007,27(11):51-52.
- [6] 朱烨华. 吐木秀克水电站机组调节保证分析研究[J]. 水利规划与设计,2011(6):66-68.
- [7] 徐燕,李江. 长距离有压流输水管道水锤计算及防护设备研究进展[J]. 水利规划与设计,2020(9):117-123.
- [8] 葛曦,黄正财,杨超,等. 沅各水电站水力过渡过程研究[J]. 水利规划与设计,2018(5):97-100.
- [9] JOUKOWSKI N E. Memoirs of the imperial academy society of St. Petersburg[J]. Proceedings of the American Water Works Association,1898(24):341-424.
- [10] CHAUDHRY M H. Applied hydraulic transients[M]. New York:Van Nostrand Reinhold Company,1979.
- [11] 李进平,李修树. 有压管道瞬变流摩阻的数值模拟[J]. 人民长江,2000(6):34-36.
- [12] 鲍慧琼. 新疆某电站引水系统压力水道优化计算[J]. 水利建设与管理,2011,31(3):20-24.
- [13] 李强,彭鹏,付冰冰. 浅析长距离输水管道技术在引白水源工程中的应用[J]. 水利建设与管理,2016,36(12):50-52.
- [14] 韩建军,张旭峰,陈红刚. 大型泵站叠压输水水锤防护研究[J]. 水利建设与管理,2012,32(S1):25-28.
- [15] 夏明月. 水电站引水隧洞水力过渡过程分析[J]. 水利规划与设计,2019(10):101-104.
- [16] 胡清顺,王和芬,王飞. 庙山水电站阻抗式调压室水力过渡数值与水力模型试验成果分析[J]. 水利建设与管理,2018,38(3):33-36.
- [17] 张旭峰,陈立志,刘先念. 真空吸气管与单向调压塔在长距离多起伏管线中的水锤防护研究[J]. 水利建设与管理,2012,32(S1):36-39.
- [18] 朱烨华. 吉林台二级水电站过渡过程分析研究[J]. 水利规划与设计,2012(1):25-29.
- [19] 张薇,程虹. 红寺堡灌区泵站水锤分析与计算[J]. 水利规划与设计,2004(S2):64-68.
- [20] 肖瑜,罗军刚,燕军乐. 引汉济渭工程黄金峡水库多目标调度模拟研究[J]. 人民黄河,2021,43(7):141-144.

安哥拉 KK 水电站高混凝土重力坝 坝基综合勘察技术及建基岩体选择

李辰舟 苏传洋 刘 凯

(长江岩土工程有限公司, 湖北 武汉 430010)

【摘 要】 本文以安哥拉 KK 水电站为例,通过在坝址区开展工程地质测绘、物探、勘探、试验测试等综合勘察,对坝基地质条件进行复核评价,新发现主坝区顺河流右岸及河床发育的碎裂岩带,并查明碎裂岩带及带内 fb1、fb2 断层的产状、规模及性状;同时结合综合勘察技术成果,分析碎裂岩及片麻岩各风化带岩体性质,根据岩体性质将坝基岩体共分为六个带,对每个带(亚带)进行 RMR 评分,提出各带力学性质参数;根据带内岩体性状及力学性质的不同,对不同坝高对应的建基岩体进行选择,减少坝基开挖,提供安全经济的工程设计。此研究成果可供类似工程参考。

【关键词】 高混凝土重力坝;综合勘察技术;工程地质分带;建基岩体

中图分类号: TV221.2

文献标志码: B

文章编号: 2097-0528(2022)08-039-12

High concrete gravity dam of Angola KK Hydropower Station Dam foundation comprehensive investigation technology and construction foundation rock selection

LI Chenzhou, SU Chuanyang, LIU Kai

(Changjiang Geotechnical Engineering Co., Ltd., Wuhan 430010, China)

Abstract: Angola KK Hydropower Station is adopted as an example in the paper. The geological conditions of dam foundation is reviewed and evaluated through engineering geological mapping, geophysical prospecting, exploration, test and other comprehensive exploration in the dam site area. The calving, scale and character of cataclasite belt as well as fb1 and fb2 faults in the belt are investigated. Meanwhile, the comprehensive investigation results are combined, the rock mass properties of cataclastic and gneiss weathering zones are analyzed, and the dam foundation rock mass is divided into six zones based on rock mass properties. Each zone (sub-zone) undergoes RMR scoring. The mechanical property parameters of each zone are proposed. The foundation rock mass corresponding to different dam heights is selected to reduce the excavation of dam foundation and provide safe and economic engineering design according to the characteristics and mechanical properties of rock mass in the belt. The research results can be used as reference for similar projects.

Keywords: high concrete gravity dam; comprehensive investigation technology; engineering geology zoning; construction foundation rock

收稿日期: 2021-12-04

作者简介: 李辰舟(1988—),男,硕士,主要从事水利水电勘察工作。



现阶段在国内外工程地质勘察工作中接触到的勘察方法种类较多^[1],主要包括地质测绘、物探、勘探、岩体测试等,在水利水电工程建设过程中,工程地质勘察工作需要面临更为复杂的地质环境,为了确保勘察工作的可靠性,需要运用多种勘察技术对同一区域的地质情况进行数据获取,通过对勘察数据信息的整合,可以有效提高工程地质勘察成果的真实性与可靠性^[2],如此才能提高地质勘察质量,从而为建基岩体的选择提供依据,进一步为水利水电工程建设提供有效的技术保证^[3]。

目前国内外水利水电工程主要根据综合勘察技术成果,以岩体质量分级(带)为综合评价指标,根据岩体质量级别来选择合适的建基岩体。坝基岩体和开挖深度对大坝的安全和造价关系甚大,是坝工设计和施工中十分重要的问题^[4],对高混凝土重力坝而言,理想的建基岩体为Ⅰ类或Ⅱ类岩体^[5],想选择既技术可行又经济合理的理想建基岩体,就需要充分分析综合勘察成果^[6],细化岩体质量分级,根据不同坝高选择不同质量级别的岩体作为建基岩体。

本文以安哥拉 KK 水电站为例,对该电站坝基所采用的综合勘察技术进行论述,整理分析了综合勘察技术成果,根据岩性和岩体性状的差异,将坝基岩体细分为六个带,并叙述每个带的主要力学性质,根据带内岩体性状及力学性质的不同,对不同坝高对应的建基岩体进行选择,研究成果可供类似工程参考。

1 工程概述

该水电站位于非洲西南部,是某主干河流中段规划的第3级,枢纽布置中挡水建筑物采用一座主坝和两座副坝,均为碾压混凝土重力坝,在距主坝约1.8km上游左岸山体中,布置发电地下厂房。

其中主坝布置在主河床,设计坝顶高程633.0m,轴线坝顶长度553.0m,坝顶宽度9.0m,最大坝高约108.0m;按设计方案共分33个坝段,主坝轴线方向NE26°,与河流流向近于正交。主坝区河流总体自SE流向NW,河谷开阔,两岸沟谷较发育,河床分布多处

激流险滩,两岸地形呈不对称的“V”形,坝址区基岩地层岩性主要为下太古界下段(Ar_1^I)片麻岩间夹透镜状斜长角闪岩。

为查明坝址区工程地质条件,对坝址各建筑物尤其是主坝的工程地质条件、主要工程地质问题进行论证和评价,在原有少量勘察资料的基础上,采用综合勘察技术方法和手段,在坝址区开展了工程地质测绘、物探、勘探、试验测试等工作,对其坝基地质条件进行研究及评价。

2 坝基综合勘察技术

2.1 地质测绘及调查

2.1.1 地质测绘

勘察期间对坝址区进行了1:2000比例的工程地质测绘^[7],成果表明:覆盖层主要为第四系残坡积层(Q^{el+dl})和崩坡积层(Q^{col+dl}),其中残坡积层零星分布于两岸山坡,物质组成主要为砾质土,崩坡积层分布于河流右岸坡麓一带,物质组成主要为碎块石土;基岩地层岩性主要为下太古界下段(Ar_1^I)片麻岩夹透镜状斜长角闪岩。除此之外,测绘新发现在主坝区顺河流右岸及河床发育一碎裂岩带,宽度150~190m,主要由碎裂岩组成。

2.1.2 裂隙调查

勘察期间对工程区裸露基岩实施了大量裂隙调查,共统计裂隙735条,优势方向主要为NE、NW向,见图1。裂隙迹长一般小于8m,且以2~6m居多,大部分部位发育密度较稀,多充填钙质岩屑,裂面以稍起伏稍粗糙为主,部分平直稍粗糙。

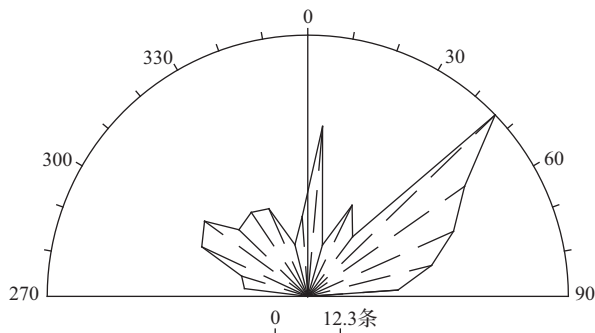


图1 节理裂隙走向玫瑰花图

2.2 物探

2.2.1 剖面物探

根据任务要求和本区地震地质条件,本次物探剖面采用地震折射层析成像法^[8],每个排列采用 24 个检波器,道间距为 5m,采样间隔 0.125ms,记录长度为 128ms。

根据物探剖面成果,岩体全强风化带地震波纵波速值 800 ~ 2000m/s;弱风化带地震波纵波速值 2000 ~ 3600m/s;微新状岩体地震波纵波速值 3600 ~ 5400m/s,其中微新状碎裂岩地震波纵波速值 3600 ~ 4600m/s,微新状片麻岩地震波纵波速值 4200 ~ 5400m/s。

主坝左岸 11 条浅层地震物探剖面揭示,第四系覆盖层厚度一般 0.5 ~ 2m,局部厚度达 3.5m,全强风化层厚度一般 1 ~ 3m,局部稍厚,可达 5 ~ 6m;横河向 5 条浅层地震物探剖面揭示,河床部位覆盖层厚度一般 2m 左右,局部稍厚,约 5m 左右,部分区域弱风化基岩直接裸露;主坝右岸 2 条浅层地震物探剖面揭示,主坝右岸中低海拔地形较缓处及右岸河床附近,第四系覆盖层和全强风化层均较发育。

2.2.2 钻孔声波

钻孔声波测试是基于固体介质中弹性波传播理

论,向介质发射声波,在一定的空间距离上接收被测介质的传播速度、振幅、频率等声波参数。勘察期间,选取部分钻孔开展了钻孔声波纵波速测试,受钻孔地下水位影响,声波测试均在微新状岩体中进行。

对声波测试结果进行统计分析显示:微新状岩体声波纵波速值 4000 ~ 5900m/s,其中微新状片麻岩声波纵波速值一般 5200 ~ 5900m/s,微新状碎裂岩声波纵波速值一般 4000 ~ 5200m/s。

2.2.3 钻孔电视录像

钻孔电视录像是观测钻孔壁岩性及构造发育特征的一种测试方法,其原理是将摄像头和带有自动调节光圈的广角镜头装进防水承压舱里,拍摄孔壁四周及下部的全景图像,并通过电缆传送到地面监视器显示,同时记录整个检测过程的图像。通过观察钻孔全孔壁数字图像可划定岩性界线,确定软弱泥化夹层、断层、裂隙、破碎带等地质信息。

本次对坝址区 26 个钻孔中的 10 个钻孔进行了钻孔彩色电视录像,录像清晰记录了片麻岩及碎裂岩的情况,见图 2。



(a) 碎裂岩

(b) 片麻岩

图 2 钻孔电视录像不同岩性代表性图像

2.3 勘探

2.3.1 钻孔

勘察期间主坝区共实施 26 个钻孔,其中斜钻孔 16 个,铅直钻孔 10 个。浅表第四系覆盖层及上部全强风化基岩采用单管合金钻具,当钻进至弱风化或微风化

顶面以下一定深度后,使用配套绳索钻具取芯工艺,采用双管金刚石钻头钻具。按照钻探进度,现场地质专业技术人员对钻取岩芯进行描述,并统计第四系覆盖层岩芯每回次采取率,统计基岩岩芯每回次采取率,获得率和岩石质量指标(RQD)。



钻孔揭示岩体风化厚度见表1。

表1 钻孔揭示岩体风化厚度

单位:m

部 位	基岩岩性	覆盖层铅直厚度	全强风化铅直厚度	弱风化铅直厚度	备 注
左岸	片麻岩	0~3.5	0~6	0~3	局部微新状片麻岩直接裸露
河床左侧	片麻岩	0	<2	1~3	
河床中部及右岸高程580m以下	碎裂岩	0~10.6	2~5	0~5	
右岸高程580m以上	片麻岩	0~2.4	0~5	<2.5	局部微新状片麻岩直接裸露

钻孔揭示各部位岩体风化带岩芯 RQD 结果统计见表2。

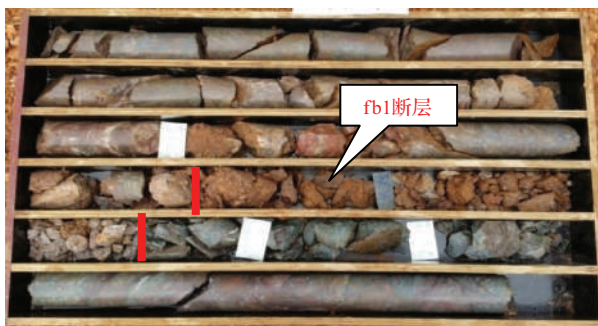
表2 钻孔不同岩体各风化带 RQD 结果统计

岩 性	片 麻 岩			碎 裂 岩		
风化程度	W5~W4	W3	W2~W1	W5~W4	W3	W2~W1
RQD/%	<5	25~40	75~95	<5	<20	≥30
破碎程度	F5	F3~F4	F1~F3	F5	F4~F5	F2~F4

注 岩体破碎程度按照国际岩石力学学会(ISRM)推荐的划分标准^[7],F1:裂隙间距>200cm;F2:裂隙间距60~200cm;F3:裂隙间距20~60cm;F4:裂隙间距6~20cm;F5:裂隙间距<5cm。

另外,右岸共12个钻孔揭露到地质测绘新发现的碎裂岩带,其中斜钻孔S507、S536揭穿碎裂岩带左侧边界,左侧边界沿河床左侧主河槽部位高程523~535m一线分布;钻孔S537揭穿碎裂岩带右侧边界,右侧边界大体上沿高程580~575m一线顺岸坡分布。碎裂岩带顺河流右岸及河床延伸,走向NW,总体倾向NE,倾角70°~80°,宽度150~190m。带内发育fb1、

fb2断层,其中fb1分布在右岸低高程一带;fb2沿主河床分布,fb1、fb2断层物质组成为碎屑状碎裂岩及泥化物,称其为“泥化碎屑带”,宽度一般0.1~0.6m,局部以断面形式存在。泥化碎屑带两侧局部一定范围岩体破碎明显,形成影响带,其中fb1上盘影响带宽0.3~0.6m,下盘影响带宽0.3~0.4m;fb2仅见上盘影响带,最宽约2.6m,见图3。



(a) 钻孔揭露断层fb1泥化碎屑带



(b) 钻孔揭露断层fb2泥化碎屑带

图3 代表性岩芯照片

2.3.2 平洞

为进一步查明该碎裂岩带发育特征、边界条件及工程性状,在主坝右岸沿轴线高程538.1m位置实施一勘探平洞,平洞宽2.8m,高2.8m,洞身长70.76m。平洞内清楚揭示了碎裂岩的情况:洞身0~8m为全强风

化碎裂岩;洞身8~28m为弱风化碎裂岩;洞身28~59.5m为微新状碎裂岩;59.5~70.76m为微新状片麻岩。洞身19.20~19.35m段发育泥化碎屑带(fb1),宽度0.1~0.6m。平洞揭示的碎裂岩发育情况与钻孔揭示一致。

2.3.3 坑槽探

为查明工程区左、右岸覆盖层深度及碎裂岩带发

育特征及边界位置,在主坝共实施 5 个坑槽探,坑槽探结果见表 3。

表 3 坑槽探结果统计

编 号	位 置	覆 盖 层		基岩岩性	备 注
		铅直厚度/m	物质组成		
TK01	主坝右岸轴线	1.7	残坡积砾质土	片麻岩/碎裂岩	片麻岩与碎裂岩右侧界线位置
TK02	主坝右岸下游	0		片麻岩/碎裂岩	片麻岩与碎裂岩右侧界线位置
TK03	主坝右岸轴线	6.3	崩坡积碎块石土	片麻岩	
TK04	主坝右岸轴线	0.3	残坡积砾质土	片麻岩	
TK05	主坝右岸轴线	1.0	残坡积砾质土	片麻岩	

坑槽探揭示残坡积层零星分布于两岸山坡,厚度一般小于 2.0m,物质组成主要为砾质土,崩坡积层分布于河流右岸坡麓一带,厚度一般 2~7m,物质组成主要为碎块石土;坑槽探揭示碎裂岩顺河向发育,走向 NW,总体倾向 NE,倾角 70°~80°,坝轴线位置右侧边界在高程 580~575m 一线顺岸坡分布。

2.4 测试

2.4.1 孔内压水试验

根据欧洲标准,压水试验以 5.0m 为一个试段,压水试验压力采用 3 个级别 5 个阶段顺次进行,各试验

段最大试验压力随试段埋深的不同而不同^[9]。

本次补充勘察阶段共进行钻孔压水试验 267 段,其中左岸 97 段、河床及右岸高程 580m 以下部位 137 段、右岸高程 580m 以上部位 33 段,均分布于微新状岩体内,钻孔压水试验结果见表 4。

主坝区岩体透水性 $q < 5\text{Lu}$ 占总数的 92% 以上,绝大多数渗透性等级属弱—极微透水;局部受断层构造影响发育的破碎岩体部位,渗透性等级属中等—强透水,大多出现在碎裂岩带及 fb1、fb2 中。

表 4 钻孔压水试验结果统计

部 位	统计项	透水性 $q(\text{Lu})$ 及渗透性等级					
		$q < 0.1$	$0.1 \leq q < 1$	$1 \leq q < 3$	$3 \leq q < 5$	$5 \leq q < 10$	不起压
		极微透水	微透水	弱透水	弱透水	弱透水	中等、强透水
左 岸	段数	14	44	30	3	2	4
	比例/%	14.4	45.4	30.9	3.1	2.1	4.1
右岸高程 580m 以下及河床	段数	49	49	21	4	3	11
	比例/%	32.9	32.9	14.1	2.7	2.0	7.4
右岸高程 580m 以上	段数	13	17	2	0	0	1
	比例/%	39.4	51.5	6.1	0	0	3.0
合 计	段数	76	110	53	7	5	16
	比例/%	28.5	41.2	19.8	2.6	1.9	6.0

2.4.2 孔内膨胀仪试验

膨胀仪测试按照国际岩石力学学会^[10]和美国材料协会规程的建议方法^[11]进行,在坝址区 8 个钻孔中

测试了 33 个测点,其中 24 个片麻岩测点,9 个碎裂岩测点,测试结果见表 5。



表5 孔内微新状岩体变形试验结果统计

岩体类别	统计项	微新状片麻岩		微新状碎裂岩	
		变形模量 E_0 /GPa	弹性模量 E_e /GPa	变形模量 E_0 /GPa	弹性模量 E_e /GPa
测点全部岩体	样本数	24	24	9	9
	最小值	8.5	13.7	5.0	8.3
	最大值	37.3	50.4	26.8	34.4
	平均值	21.0	30.6	12.1	17.8
不含显著裂隙岩体	样本数	14	14	3	3
	最小值	16.0	30.5	17.2	26.8
	最大值	37.3	50.4	26.8	34.4
	平均值	25.7	38.3	21.4	30.4
含显著裂隙岩体	样本数	10	10	6	6
	最小值	8.5	13.7	5.0	8.3
	最大值	21.0	28.0	9.6	15.4
	平均值	14.5	19.8	7.5	11.5

2.4.3 室内岩石物理力学性质及裂隙直剪强度试验

在该区钻孔中采取微新状岩石及岩体裂隙面芯样,进行了室内岩石物理力学性质试验,试验项目包括

物理性质、单轴抗压强度、变形模量及弹性模量、声波波速、裂隙面直剪强度等,综合分析剔除异常值后,岩石物理力学性质结果统计见表6、表7。

表6 室内微新状岩石物理性质试验结果统计

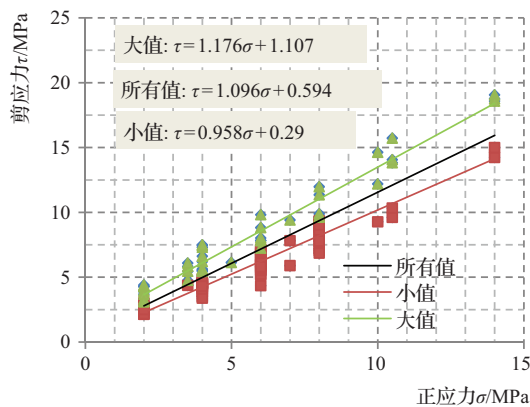
岩性	统计项	块体密度/(g/cm ³)			含水率/%	吸水率/%	饱水率/%	孔隙率/%
		烘干	天然	饱和				
片麻岩	样本数	6	6	6	6	6	6	6
	最小值	2.71	2.71	2.72	0.02	0.05	0.10	0.28
	最大值	2.90	2.90	2.90	0.03	0.11	0.15	0.42
	平均值	2.76	2.76	2.77	0.02	0.08	0.13	0.35
	90%置信度	2.64	2.64	2.65	0.01	0.04	0.08	0.21
斜长角闪岩	样本数	7	7	7	7	7	7	7
	最小值	2.90	2.90	2.91	0.02	0.04	0.08	0.25
	最大值	3.11	3.11	3.11	0.03	0.09	0.13	0.38
	平均值	3.01	3.01	3.01	0.02	0.07	0.10	0.31
	90%置信度	2.68	2.68	2.68	0.02	0.06	0.10	0.28
碎裂岩	样本数	9	9	9	9	9	9	9
	最小值	2.63	2.63	2.63	0.03	0.06	0.10	0.26
	最大值	2.74	2.75	2.75	0.26	0.34	0.38	1.01
	平均值	2.68	2.68	2.69	0.10	0.16	0.19	0.52
	90%置信度	2.90	2.90	2.90	0.01	0.04	0.08	0.26

表 7 室内微新状岩石主要力学性质及声波波速试验结果统计

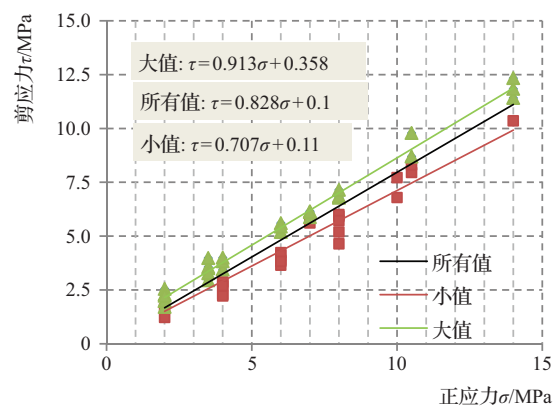
岩 性	统计项	单轴抗压强度 $\sigma_{cs}/$ MPa		变形模量 E_0/GPa		弹性模量 E_e/GPa		泊松比 ν		天然状态声波 速度值/(m/s)	
		干燥	饱和	干燥	饱和	干燥	饱和	干燥	饱和	纵波	横波
片麻岩	样本数	6	6	6	6	6	6	6	6	12	12
	最小值	210	150	58	49	69	61	0.19	0.20	5611	3223
	最大值	266	252	83	71	95	90	0.21	0.22	6858	3651
	平均值	242	176	66	57	80	70	0.20	0.21	6160	3374
	90% 置信度	219	130	55	49	69	57	—	—	5675	3208
斜长角 闪岩	样本数	7	7	7	7	7	7	7	7	14	14
	最小值	206	94	57	40	76	55	0.18	0.19	5890	3279
	最大值	308	272	83	80	105	94	0.21	0.23	6858	3686
	平均值	255	218	70	61	91	76	0.19	0.20	6503	3498
	90% 置信度	216	145	59	55	77	60	—	—	6110	3353
碎裂岩	样本数	9	7	9	9	9	9	9	9	18	18
	最小值	104	75	37	16	48	18	0.20	0.21	5378	3116
	最大值	221	172	56	49	75	64	0.24	0.28	6538	3669
	平均值	138	115	47	34	60	46	0.23	0.24	6137	3332
	90% 置信度	88	70	39	23	49	30	—	—	5800	3180

本工程岩体裂隙室内直剪试验方法采用单点平推法,试验时对每一个微新状岩体裂隙面芯样施加 5 级法向应力,得到不同法向应力下剪应力值。根据试验

结果,对各试验结果按裂隙面类型(稍起伏稍粗糙和平直稍粗糙)进行分类统计,分别采用最小二乘法拟合^[12],试验各试样正应力与剪应力拟合曲线见图 4。



(a) 稍起伏稍粗糙型



(b) 平直稍粗糙型

图 4 正应力与剪应力拟合曲线

根据最小二乘法拟合所得结果,低限值时:稍起伏稍粗糙型裂隙面抗剪强度参数黏聚力 $C = 0.30\text{MPa}$,摩擦系数 $f = 1.02$;平直稍粗糙型裂隙面抗剪强度参数黏聚力 $C = 0.11\text{MP}$,摩擦系数 $f = 0.70$ 。

2.4.4 平洞内原位试验

平洞内分别选取弱风化碎裂岩、微新状碎裂岩、微新状片麻岩各一段,采用刚性承压板法测试原位岩体铅直向变形模量,试验结果见表 8。



表 8 岩体变形模量与弹性模量测试结果

岩 性	点 号	试验段洞身 位置/m	变形模量 E_0 /GPa		弹性模量 E_e /GPa	
			单值	平均值	单值	平均值
微新状片麻岩	DT11	56 ~ 68	24.41	20.69	69.03	43.78
	DT12		11.42		24.93	
	DT13		26.25		37.39	
微新状碎裂岩	DT21	30 ~ 39	19.69	18.93	41.74	35.35
	DT23		18.17		28.95	
弱风化碎裂岩	DT31	18 ~ 27	1.44	2.60	2.97	5.60
	DT32		4.64		9.56	
	DT33		1.72		4.27	

平洞内分别选取弱风化碎裂岩、微新状碎裂岩、微新状片麻岩各一段,开展原位岩体以及混凝土与岩体接触面直剪强度试验,试验结果见表 9、表 10。

表 9 岩体直剪试验结果

岩 性	洞深/m	抗 剪 断 强 度			抗 剪 强 度		
		摩擦系数 f'	内摩擦角 $\varphi'/(^\circ)$	黏聚力 C'/MPa	摩擦系数 f	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	黏聚力 C/MPa
微新状片麻岩	56 ~ 68	2.34	66.86	3.35	1.21	50.43	2.34
微新状碎裂岩	30 ~ 39	1.94	62.73	2.59	0.95	43.53	1.21
弱风化碎裂岩	18 ~ 27	1.13	48.49	1.02	0.60	30.96	0.58

表 10 混凝土与岩体接触面直剪试验结果

岩 性	洞深/m	抗 剪 断 强 度			抗 剪 强 度		
		摩擦系数 f'	内摩擦角 $\varphi'/(^\circ)$	黏聚力 C'/MPa	摩擦系数 f	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	黏聚力 C/MPa
微新状片麻岩	56 ~ 68	1.20	50.19	1.31	0.90	41.99	0.60
微新状碎裂岩	30 ~ 39	1.13	48.49	1.16	0.86	40.70	0.50
弱风化碎裂岩	18 ~ 27	0.98	44.42	0.85	0.50	26.57	0.35

2.5 地质分析

根据地质测绘及勘探成果并结合物探数据,分析认为第四系残坡积层零星分布,厚度较薄,一般小于 2m,崩坡积层厚度较厚,厚度 2 ~ 16m,主要分布于河流右岸坡麓一带;坝址区基岩岩性主要为下太古界下段 (Ar_1^1) 片麻岩夹透镜状斜长角闪岩,岩体全强风化层厚度合计 1 ~ 3m,弱风化岩体一般小于 3m;在主坝区顺河流右岸及河床发育一碎裂岩带,走向 NW,总体倾向 NE,倾角 $70^\circ \sim 80^\circ$,宽度 150 ~ 190m,碎裂岩岩体全强风化层厚度 2 ~ 13m,弱风化岩体一般厚 0.8 ~ 5.0m。碎裂岩带内发育 fb1、fb2 断层,其物质组成为碎屑状碎

裂岩及泥化物,宽度一般 0.1 ~ 0.6m,主坝工程地质平面图见图 5。

根据室内及原位试验成果,微新状片麻岩夹透镜状斜长角闪岩,岩质坚硬,单轴饱和抗压强度 130MPa,重度 27.6kN/m^3 ,微新状岩体钻孔取芯 RQD 平均值一般大于 75%,钻孔声波纵波波速 V_p 一般 5200 ~ 5900m/s,岩体渗透性以微透水为主。微新状碎裂岩单轴饱和抗压强度 70MPa,重度 26.3kN/m^3 ,微新状岩体钻孔取芯 RQD 平均值一般 30% ~ 55%,钻孔声波纵波波速 V_p 一般 4000 ~ 5200m/s,岩体渗透性以弱透水—微透水为主。

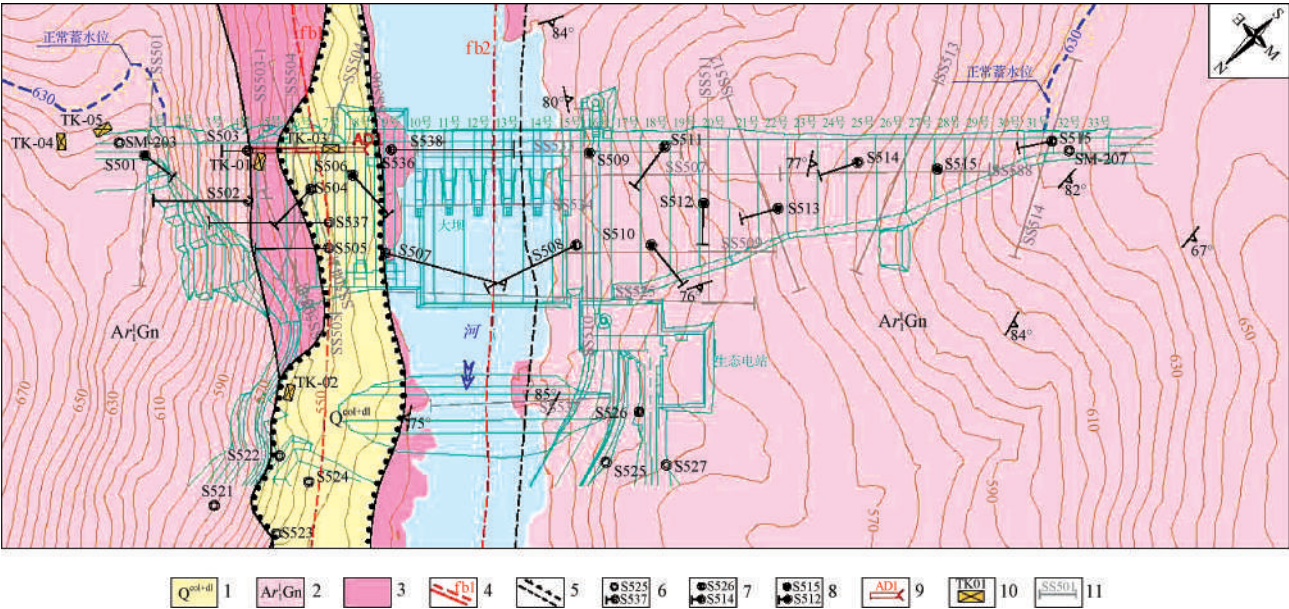


图5 主坝工程地质平面图

1-第四系崩积碎块石土;2-下太古界下段片麻岩;3-碎裂岩;4-断层及编号(虚线为推测);5-岩性边界(虚线为推测);6-铅直(斜)钻孔及编号(未进行孔内测试);7-铅直(斜)钻孔及编号(孔内物探测试);8-铅直(斜)钻孔及编号(孔内物探测试及膨胀仪试验);9-平洞及编号;10-坑槽探及编号;11-物探剖面及编号

3 坝基工程地质分带及地质力学性质

3.1 工程地质分带

根据区内已完成的勘探地质资料及试验成果,经工程地质分析研究,按照岩体风化程度(W)、岩石饱和单轴抗压强度(σ_{cs})、岩体破碎程度(F)、透水率(q)、

岩芯采取率(CMR)、岩石质量指标(RQD)、岩体声波纵波波速(V_p)七个指标的不同,将主坝区坝基岩体分为ZG1、ZG2、ZG3共三个带,其中ZG1、ZG2、ZG3根据岩性和岩体性状差异再分为两个亚带,岩体工程地质分带特征指标见表11。

表11 岩体工程地质分带特征指标

岩体分带		岩 性	风化程度	饱和单轴抗压强度 σ_{cs} /MPa	破碎程度	透水率 q /Lu	岩芯采取率/%	RQD/%	声波纵波波速 V_p /(m/s)
带	亚带								
ZG1	ZG1-1	片麻岩	W2 ~ W1	130	F1 ~ F3	<5	≥95	≥75	5200 ~ 5900
	ZG1-2	碎裂岩	W2 ~ W1	70	F2 ~ F4	<10	≥75	≥30	4000 ~ 5200
ZG2	ZG2-1	片麻岩	W3	40	F3 ~ F4	<20	≥75	≥25	3500 ~ 4800
	ZG2-2	碎裂岩	W3	30	F4 ~ F5	>10	≥50	<20	3000 ~ 4500
ZG3	ZG3-1	片麻岩 碎裂岩	W5 ~ W4	—	F5	>10	≥20	<5	2000 ~ 3000
	ZG3-2	断层	W5 ~ W4	—	F5	>10	≥20	0	1500 ~ 2800

3.2 RMR 分类

RMR 分类系统由 Bieniawski^[13]于1973年提出并经多次修订,该分类系统由6个指标构成,包括岩块强度(点荷载强度或单轴抗压强度) R_1 、岩石质量指标

(RQD) R_2 、结构面间距 R_3 、结构面状况 R_4 、地下水条件 R_5 、结构面方向 R_6 。根据野外实测资料,按照标准对各指标参数评分进行RMR值计算,并划分岩体类别。RMR值计算式如下:



$$RMR = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 \quad (1) \quad \text{带)进行 RMR 值评分,结果见表 12。}$$

根据本次勘察地质资料,对主坝区岩体各带(亚

表 12 各带(亚带)RMR 评分值

分带		参 数 指 标 及 评 分												RMR 值	岩体类别	
		R_1		R_2		R_3		R_4		R_5		R_6				
		指标/ MPa	评分	指标/ %	评分	指标	评分	指 标		评分	指标	评分	指标			评分
ZG1	ZG1-1	130	12	≥ 75	17	F1 ~ F3	10-15	粗糙—较粗糙;延伸长度小于 10m;张开度小于 1mm;硬质充填物;微风化		20 ~ 23	潮	10	—	—	69 ~ 77	II
	ZG1-2	70	7	≥ 30	8	F2 ~ F4	8-10	粗糙—较粗糙;延伸长度小于 20m;张开度小于 5mm;硬质充填物;微风化		14 ~ 21	湿	7	—	—	44 ~ 58	III
ZG2	ZG2-1	40	4	≥ 25	8	F3 ~ F4	8-10	粗糙—较粗糙;延伸长度3 ~ 10m;张开宽度 1 ~ 10mm;硬质或软质充填;强风化		10 ~ 17	潮	10	—	—	40 ~ 49	III
	ZG2-2	30	4	≥ 15	3	F4 ~ F5	5-8	粗糙—较粗糙;延伸长度小于 20m;张开宽度1 ~ 10mm;硬质或软质充填;强风化		5 ~ 11	湿	7	—	—	24 ~ 33	IV
ZG3	ZG3-1	—	0	0-5	1	F5	5	张开 > 5mm;连续		0	湿	7	—	—	13	V
	ZG3-2	—	0	0-5	1	F5	5	张开 > 5mm 的软弱夹层;连续		0	淋水	4	—	—	10	V

3.3 地质力学参数

据区内完成的孔内岩体测试成果、室内岩石物理力学性质、岩体裂隙面室内直剪强度试验成果,结合类

似工程岩性一致同类岩体物理力学性质参数成果经验,提出其主要物理力学性质参数地质建议值,见表 13。

表 13 岩体主要物理力学性质参数地质建议值

岩体分带		重度 γ / (kN/m ³)	σ_{cs} /MPa	泊松比 ν	强度准则(Mohr-Coulomb)				变形模量 E_0 /GPa	RMR 值	岩体 类别
带	亚带				岩 体		岩体与混凝土				
					黏聚力 C' /MPa	摩擦系数 f'	黏聚力 C' /MPa	摩擦系数 f'			
ZG1	ZG1-1	27.6	130	0.22	1.80 ~ 2.00	1.20 ~ 1.40	1.10 ~ 1.30	1.10 ~ 1.20	20 ~ 25	69 ~ 77	Ⅱ
	ZG1-2	26.3	70	0.24	1.20 ~ 1.40	0.90 ~ 1.10	0.90 ~ 1.10	1.00 ~ 1.10	10 ~ 18	44 ~ 58	Ⅲ
ZG2	ZG2-1	27.0	40	0.25	0.90 ~ 1.10	0.80 ~ 1.00	0.70 ~ 0.90	0.90 ~ 1.00	5 ~ 8	40 ~ 49	Ⅲ
	ZG2-2	25.8	30	0.26	0.50 ~ 0.70	0.65 ~ 0.80	0.40 ~ 0.60	0.55 ~ 0.75	2 ~ 4	24 ~ 33	Ⅳ
ZG3	ZG3-1	21.0	—	0.31	0 ~ 0.15	0.45 ~ 0.55	—	—	0.03 ~ 0.04	13	Ⅴ
	ZG3-2	—	—	0.31	0 ~ 0.10	0.40 ~ 0.50	—	—	0.25 ~ 0.35	10	Ⅴ

4 建基岩体选择

大坝设计坝顶高程 633m,最大坝高 108m。根据对综合勘察成果的分析研究,结合大坝工程要求和各类岩体对不同坝高的适宜性,对大坝建基岩体选择认识如下:ZG3-1 带全强风化层岩体不能用作高混凝土重力坝建基岩体,须予以挖除。ZG1-1 带微新状片麻岩岩体,是混凝土重力坝良好的建基岩体。主坝坝基 580m 高程以下(4~24 坝段)对应坝高 60~108m,

ZG1-2 带微新状碎裂岩,岩体性状虽然不如 ZG1-1 带微新状片麻岩,但其岩体性状及力学性质满足建坝要求,因此可选择 ZG1-1 带和 ZG1-2 带岩体作为建基岩体;580m 高程以上(1~3、25~33 坝段),对应坝高 6~60m,可根据 ZG3-1 带全强风化层岩体厚度视情况选择 ZG1-1 带微新状岩体或 ZG2-1 带弱风化岩体作为建基岩体。坝基 fb1、fb2 断层泥化碎屑带性状极差,不能直接用作主坝建基岩体。坝基岩体工程地质分带平面图见图 6,主坝工程地质剖面示意图见图 7。

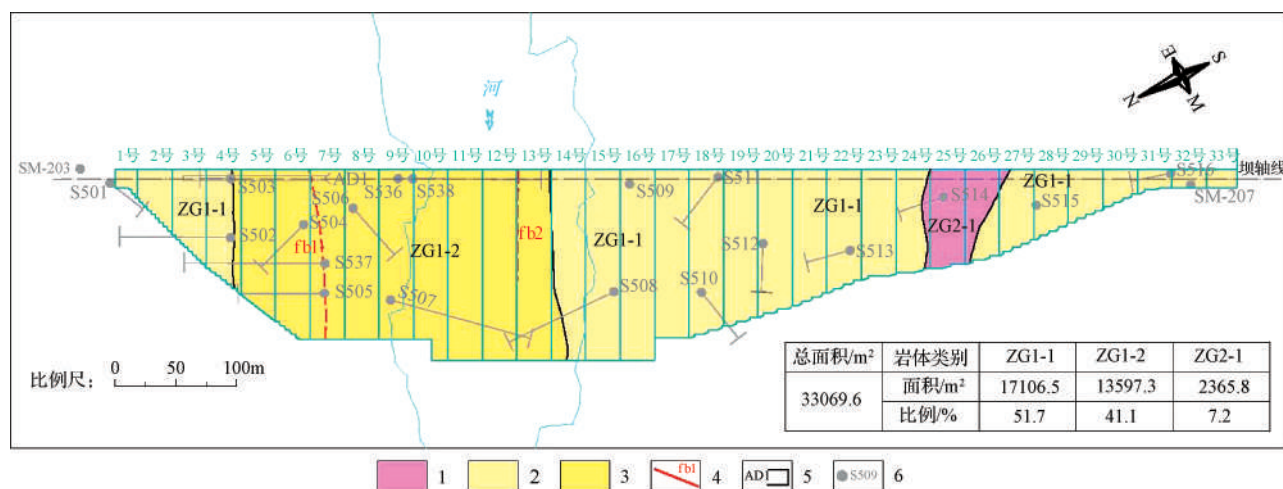


图 6 坝基岩体工程地质分带平面图

1-ZG2-1 带;2-ZG1-1 带;3-ZG1-2 带;4-断层及编号(虚线为推测);5-平洞及编号;6-钻孔及编号

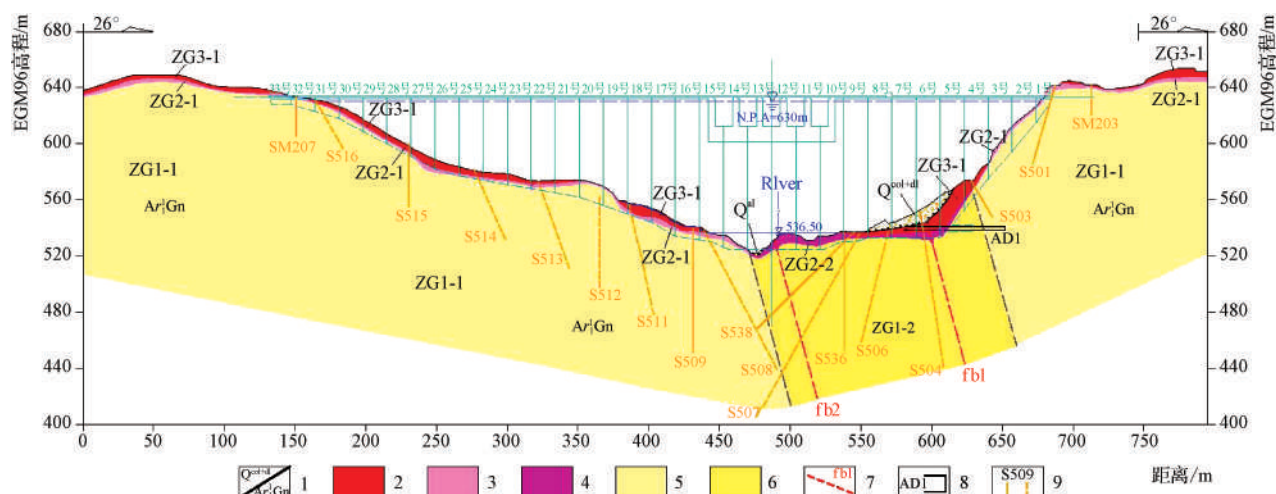


图 7 主坝工程地质剖面示意图

1-地层代号;2-ZG3-1 带;3-ZG2-1 带;4-ZG2-2 带;5-ZG1-1 带;6-ZG1-2 带;7-断层及编号(虚线为推测);8-平洞及编号;
9-钻孔(虚线为投影钻孔)



本水电站大坝建基岩体主要为 ZG1-1 和 ZG1-2 带岩体,少量为 ZG2-1 带岩体。大坝建基岩体中 ZG1-1、ZG1-2 和 ZG2-1 带岩体分别占坝基总面积的 51.7%、41.1%、7.2%;在大坝轴线上,ZG1-1、ZG1-2 和 ZG2-1 带岩体分布长度分别占坝轴线总长的 61.6%、28.2%、10.2%。

主坝坝基碎裂岩带分布于右岸高程 580m 以下至河床中部,以次块状及镶嵌状结构为主,裂隙为较发育;碎裂岩带内发育有 fb1、fb2 断层泥化碎屑带及其影响带;碎裂岩带两侧其余部位均为片麻岩,间夹透镜状斜长角闪岩,呈块状结构,裂隙发育程度为轻微发育—中等发育。碎裂岩与两侧片麻岩微新状岩体变形模量差异明显;fb1、fb2 断层泥化碎屑带变形模量极低,并与两侧碎裂岩岩体变形模量差异显著,坝基存在不均匀变形问题,尤其是 fb1、fb2 断层泥化碎屑带及其影响带,可能会产生有害变形,应进行相应处理。此外,坝基碎裂岩带中发育有 fb1、fb2 断层泥化碎屑带,渗透性等级属中等透水—弱透水。fb1、fb2 断层泥化碎屑带性状软弱,在长期渗流作用下,可能会产生渗透变形。

5 结 论

通过整理分析综合勘察技术成果,对坝基地质条件进行复核评价,得到以下结论:

a. 通过综合勘察,新发现在主坝区顺河流右岸及河床发育碎裂岩带,碎裂岩带走向 NW,总体倾向 NE,倾角 $70^{\circ} \sim 80^{\circ}$,宽度 150 ~ 190m。同时查明碎裂岩带内发育 fb1、fb2 断层泥化碎屑带,宽度一般 0.1 ~ 0.6m,局部以断面形式存在。泥化碎屑带两侧发育影响带,fb1 上盘影响带宽 0.3 ~ 0.6m,下盘影响带宽 0.3 ~ 0.4m;fb2 仅见上盘影响带,最宽约 2.6m。

b. 根据综合勘察技术成果,根据岩体性质的不同,将坝基岩体分为 ZG1、ZG2、ZG3 共三个带,其中 ZG1、ZG2、ZG3 根据岩性和岩体性状差异再分为两个亚带,并对每个带(亚带)进行 RMR 评分,根据区内完成的试验成果,结合类似工程岩性一致同类岩体物理力学性质参数成果经验,提出其主要物理力学性质参数地质建议值,供设计参考采用。

c. 根据带内岩体性状及力学性质的不同,对不同坝高对应的建基岩体进行选择,主坝坝基 580m 高程以下(4 ~ 26 坝段)对应坝高 60 ~ 108m,可选择 ZG1-1 带和 ZG1-2 带微新状岩体作为建基岩体;580m 高程以上(1 ~ 3、26 ~ 33 坝段)可视情况选择 ZG1-1 带微新状岩体或 ZG2-1 带弱风化岩体作为建基岩体。另外,碎裂岩与两侧片麻岩交界位置及断层泥化碎屑带位置,坝基存在不均匀变形的可能,应进行相应处理;坝基碎裂岩带中 fb1、fb2 断层泥化碎屑带,可能会产生渗透变形,应予以处理。

坝基岩体分类及坝建基岩体的选择对大坝安全和造价至关重要,运用地质测绘及调查、物探、勘探、原位测试、室内试验等综合勘察技术手段,通过整理分析综合勘察技术成果,对坝基岩体进行分带,根据带内岩体性状及力学性质的不同,对不同坝高对应的建基岩体进行选择,其研究方法及其成果可供类似工程参考。◆

参考文献

- [1] 杨巍青. 岩土工程勘察中综合勘察技术的应用[J]. 工程技术与应用, 2019(11): 43-45.
- [2] 陶佳伟. 水利工程中的岩土地质勘察探索[J]. 科学技术创新, 2019(16): 33-35.
- [3] 王奕刚. 浅谈勘察技术在岩土工程施工中的应用[J]. 施工技术, 2018(6): 100-102.
- [4] 曹明华. 基于坝基岩体结构的重力坝建基面选择[D]. 南京: 河海大学, 2017: 1-2.
- [5] 杨友刚, 邓争荣, 吴树良, 等. 某水电站特高混凝土重力坝建基面选择[J]. 资源环境与工程, 2014, 4(28): 551-557.
- [6] 晁燕安, 蒋龙, 李玉峰. 乌东德水电站大坝边坡及建基面精细开挖技术[J]. 水利建设与管理, 2020, 40(8): 25-30.
- [7] 水电水利工程地质测绘规程: DL 5185—2004[S]. 北京: 中国水利水电出版社出版, 2004: 8-26.
- [8] 王宪志. 声波检测试验在马鹿塘水库坝体填筑质量控制中的应用[J]. 水利建设与管理, 2014, 34(3): 59-61.
- [9] BIENIAWSKI ZT, HAWKES I. International society for rock mechanics commission on standardization of laboratory and field tests-suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts, 15(6): 319-368.

(下转第 31 页)

句容抽蓄地下厂房隐伏溶洞处理范围与措施研究

徐剑飞 梁睿斌 陈洪春

(江苏句容抽水蓄能有限公司, 江苏 镇江 212400)

【摘要】 句容地下厂房工程区域岩溶地质现象较发育, 为了研究隐伏溶洞的处理范围及处理措施, 根据厂房第一层开挖完成时揭露的溶洞情况, 推测出可能存在隐伏溶洞的区域, 并通过二维概化模型的分析计算, 根据塑性区贯通情况判断隐伏溶洞对厂房围岩的影响, 并针对不同的溶洞洞径分顶拱、拱肩、边墙三个部位提出了厂房开挖过程中的隐伏溶洞处理范围, 并提出了具体可行的工程处理措施, 可供类似工程参考。

【关键词】 隐伏溶洞; 处理范围; 处理措施

中图分类号: TU311

文献标志码: B

文章编号: 2097-0528(2022)08-051-05

Study on treatment range and measures of concealed karst cave in Jurong pumping and storage underground workshop

XU Jianfei, LIANG Ruibin, CHEN Hongchun

(Jiangsu Jurong Pumped Storage Co., Ltd., Zhenjiang 212400, China)

Abstract: The regional karst geological phenomenon is more developed in Jurong underground workshop project. The areas with possible concealed karst cave are speculated according to karst cave condition disclosed during the completion of workshop first-layer excavation to study the treatment range and measures of concealed karst cave. The influence of the concealed karst cave on the workshop surrounding rock is judged according to plastic area penetration condition through analysis calculation of two-dimensional calculation mode. The concealed karst cave treatment range during workshop excavation is proposed according to top arch, arch shoulder and side wall aiming at different karst tunnel diameters. Concrete and feasible engineering treatment measures are put forward, which can be used as reference for similar projects.

Keywords: concealed karst cave; treatment range; treatment measure

岩溶隧道不仅有一般隧道存在的风险, 而且还有特殊的地质灾害风险^[1-3]。从两个方面来分析: 第一, 裂隙水的存在大大降低了隧道围岩的物理强度, 使其在相同压力强度下更容易破坏; 第二, 隧道受周边溶洞

的影响, 各个部位的受力发生了极大变化, 致使隧道在某些部位极易发生破坏。当隧道存在溶洞时, 隧道受力不再对称, 支护结构也不再均匀受压, 局部存在高压状态, 所以在这种情况下, 隧道围岩稳定性难以保证,

收稿日期: 2021-11-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1765206)

作者简介: 徐剑飞(1993—), 男, 工程师, 主要从事工程建设管理工作, 研究方向为岩土工程。

建成的隧道寿命也将减小。隧道在开挖爆破震动、机械影响下将产生变形。如果这种影响未及时处理,隧道稳定性将降低,当位移超过极限位移时,这种变化将随时带来灾害,如隧道塌方、突水突泥等,从而威胁施工人员的生命安全,影响施工进度^[4]。目前,国内外许多学者大都结合工程实际,采用数值计算手段对岩溶隧道稳定性进行专门研究^[5-15],但对中小隐伏溶洞的处理范围与处理原则,尚未有较明确的技术方案和结论。

本文采用 Flac3D 软件,从数值模拟的角度出发,研究了不同大小和距离的溶洞对句容地下厂房围岩稳定性的影响,并研究已揭露溶洞的回填处理时机,预测了后续开挖过程中溶洞重点探查范围,提出了切实可行的工程建议,为地质条件类似地下洞室工程提供参考。

1 已探明溶洞概况

句容地下厂房工程区域岩溶、溶蚀裂隙等岩溶现

象较发育,岩溶腔(溶洞)往往沿着长大断层或者长大裂隙分布,图1为地下厂房在厂右0+94.5断面开挖揭露的溶洞,溶洞内充填红色黏土或棕黄色泥质物,溶蚀泥化物存留在岩容腔内,附近岩体往往伴生不同尺度的断层及节理裂隙,使得隐伏溶洞及溶蚀裂隙带四周岩体的强度总体较低,当发育距离地下厂房结构距离较近时,影响洞室围岩的稳定。由于工程现场岩脉及节理裂隙等结构面交错复杂,部分结构面存在走向不同于洞段的变化特征,因此在开展溶洞影响分析时,可以结合具体问题分析需要,综合考虑岩溶腔及伴生的岩脉及节理裂隙这些特性。图2为地下厂房区溶洞及部分结构面三维空间示意图,根据超声物探结果以及现场锚杆钻孔结果,在厂右0+94.5断面和厂右0+120断面厂房上游侧第一层开挖底板高程附近发现了两个直径在3~5m之间的中小型溶洞,形状为长椭圆形,长轴方向均与厂房轴线方向近似平行,距离厂房拱肩2~4m,溶洞底部高程尚未探明。



图1 地下厂房开挖揭露的溶洞照片



另外根据现场地质素描资料,整理了溶洞揭露的厂房洞段范围内的小型节理裂隙,根据溶蚀岩脉 f_{x4} 以及结构面 f_{37} 走向,推测了厂房上游侧边墙的半确定性块体以及可能存在隐伏溶洞的范围,见图3。在厂房后续层的开挖过程中,通过锚杆钻孔可以探测是否存在溶洞以及溶洞范围,及时制定处理方案,避免对厂房围岩稳定性产生较大影响。

2 溶洞处理范围研究

针对潜在溶洞对地下洞室围岩稳定的影响进行初步分析,建立二维数值计算概化模型,按Ⅲ类围岩低值计算($f=0.9$, $C=0.8\text{MPa}$),并且不考虑系统支护加固效果和潜在溶洞与结构的空间关系。主要考虑了三种溶洞尺寸:1.5m、3m以及5m,分析溶洞尺寸与溶洞距厂房的距离对厂房围岩的影响。

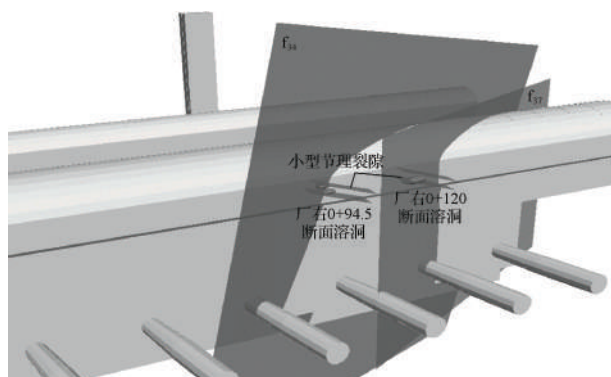


图2 地下厂房区溶洞及部分结构面三维空间示意图

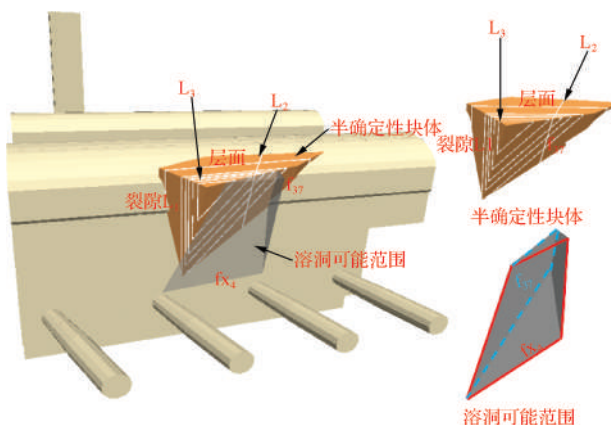


图3 地下厂房区溶洞洞段半确定性块体以及溶洞可能存在范围

厂房围岩完整,不存在潜伏溶洞影响时的塑性区分布见图4。顶拱塑性区深度约4m,边墙塑性区深度约11m,拱肩塑性区深度约3.5m。

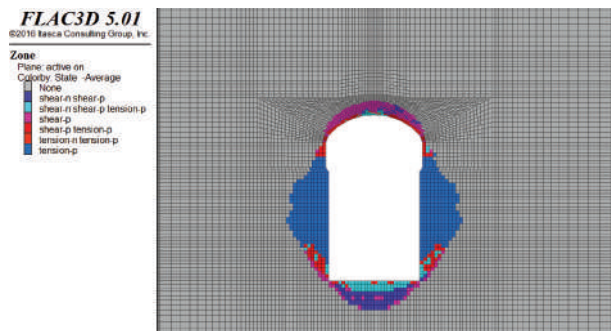


图4 完整厂房洞室开挖塑性区分布

不同位置3m洞径的厂房开挖塑性区分布见图5。顶拱3m处存在1.5m洞径的隐伏溶洞时,塑性区深度由4m增加到5.3m,溶洞周围岩体塑性程度加深,塑性区集中分布在溶洞周围岩体,对厂房围岩稳定性有不

利影响;拱肩6m处存在1.5m洞径的隐伏溶洞时,溶洞周围岩体的塑性区与厂方围岩的塑性区连通;边墙腰部9m处存在1.5m洞径的隐伏溶洞时,溶洞尚在厂房围岩塑性区内,溶洞周围岩体塑性程度加深,可能影响厂房边墙腰部的围岩强度。

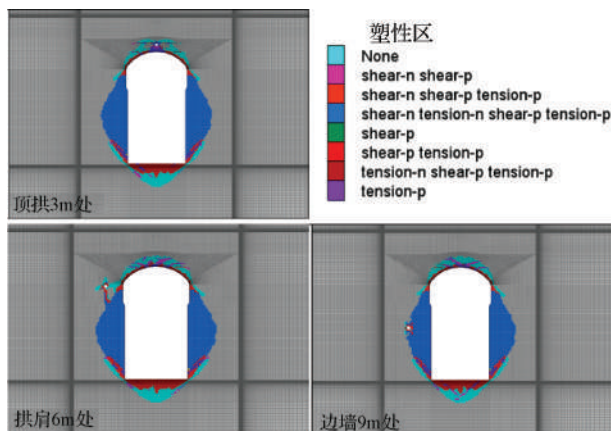


图5 不同位置1.5m洞径溶洞的厂房开挖塑性区分布

不同位置3m洞径的厂房开挖塑性区分布见图6。顶拱6m处隐伏溶洞周围岩体的塑性区连通了厂房顶拱围岩塑性区,而9m处溶洞对厂房围岩的塑性区无影响;拱肩9m处溶洞周围岩体的塑性区以两条贯通路径的模式与厂方围岩的塑性区连通,而12m处溶洞左侧与下侧的贯通路径不再连通;边墙腰部15m处溶洞周围岩体的塑性区与厂方围岩的塑性区以一条贯通路径的模式连通,20m处溶洞右侧塑性区贯通路径消失。

不同位置5m洞径的厂房开挖塑性区分布见图7。相较于图6,顶拱12m处的塑性区虽尚未连通但有一定的连通趋势;拱肩处9m处塑性区的贯通路径更宽,12m处溶洞右侧和下侧均出现了贯通路径的趋势;边墙腰部20m处溶洞的塑性区也出现了贯通路径。

根据上述分析,提出溶洞建议处理原则,见图8。顶拱和拱肩的排查范围锚杆钻孔可覆盖,边墙的排查范围可结合锚索钻孔和探地雷达成果推测。确定溶洞位置后,结合断层、岩脉及裂隙产状等,分析溶洞成因,制定针对性的处理方案。对于小于1.5m洞径的溶洞,除开挖揭露外建议不处理;对于 $1.5\text{m} \leq D \leq 3\text{m}$ 的溶洞,分别在顶拱、拱肩、边墙距离3m、6m、9m范围内进行处

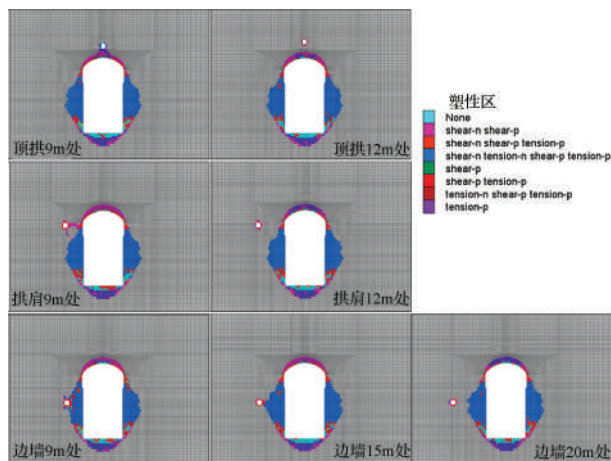


图6 不同位置3m洞径溶洞的厂房开挖塑性区分布

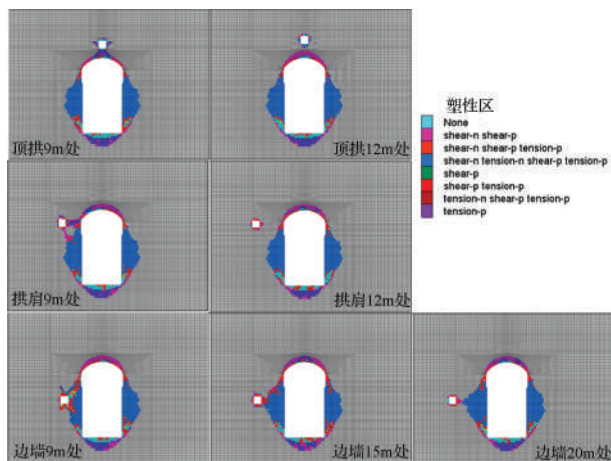


图7 不同位置5m洞径溶洞的厂房开挖塑性区分布

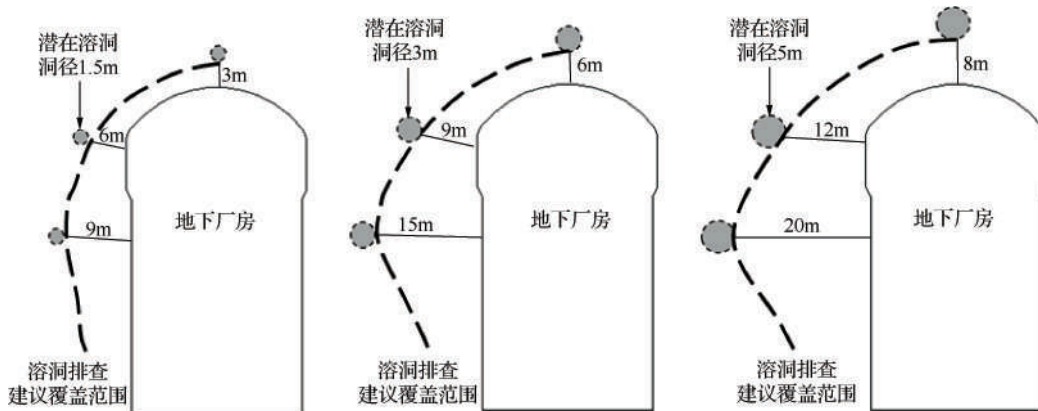


图8 地下厂房溶洞处理建议覆盖范围概化图

理;对于 $3\text{m} \leq D \leq 5\text{m}$ 的溶洞,分别在顶拱、拱肩、边墙距离6m、9m、15m范围内进行处理;对于 $5\text{m} \leq D$ 的溶洞,分别在顶拱、拱肩、边墙距离8m、12m、20m范围内进行处理。

3 处理措施

句容厂房已探明隐伏溶洞均充填密实黏土,仅依靠钻孔水枪无法冲洗,须人工进行开挖后冲洗,因此,建议采取以下处理方案(见图9):

- 以最大可能减少对厂房施工影响为原则,从排水廊道或者厂房向隐伏溶洞开挖导洞。
- 挖机或人工清理完溶洞内充实黏土,用水枪将岩面清洗干净。
- C25 混凝土回填,顶部回填灌浆。

d. 在溶洞范围内按3~5m间距增加无黏结锚索支护。

e. 结合溶洞附近地质特征,采取数值计算等手段复核厂房围岩稳定性。

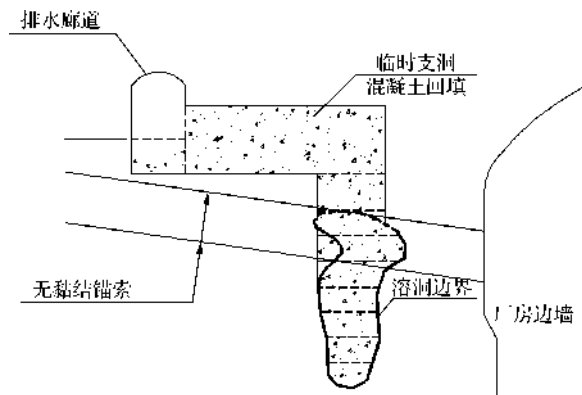


图9 地下厂房溶洞处理措施方案示意图

4 结 论

句容地下厂房围岩以Ⅲ、Ⅳ类为主,地质条件复杂,为了保证围岩稳定性,应对隐伏溶洞进行合理的探查并针对性地制定处理方案。本文根据已发现隐伏溶洞及溶洞附近岩脉及断层产状,推测厂房上游侧边墙第一层地板高程以下溶洞可能存在范围,另外通过二维概化数值模型计算,给出了厂房整体溶洞处理的建议范围,顶拱和拱肩溶洞的处理范围锚杆钻孔可覆盖,边墙处理范围内的溶洞可结合锚索钻孔和探地雷达成果推测确定,提出隐伏溶洞处理措施,供类似工程参考。◆

参考文献

- [1] 邹成杰. 水利水电岩溶工程地质[M]. 北京:水利电力出版社,1994.
- [2] 汪从锦. 鲁布革电站引水隧洞的岩溶发育特征及其工程意义[J]. 中国岩溶,1991(4):46-56.
- [3] 史世雍,梅世龙,杨志刚. 隧道顶部溶洞对围岩稳定性的影响分析[J]. 地下空间与工程学报,2005(5):698-702,716.
- [4] 李宁,SWOBODA G. 当前岩石力学数值方法的几点思考[J]. 岩石力学与工程学报,1997(5):104-107.
- [5] 李小会,邢健,张志强. 糯租水电站地下厂房溶洞处理施工技术[J]. 黑龙江水利科技,2009,37(6):35-36.
- [6] 陈玉辉,赵玉杰,李毅. 锦屏二级水电站3号引水隧洞溶洞探洞地下水处理[J]. 水利水电技术,2012,43(5):78-79.
- [7] 付敬,丁秀丽,张练. 岩溶回填改善地下洞室群围岩稳定性的数值分析[J]. 长江科学院院报,2006(4):47-50.
- [8] 邵兵,方丹,万祥兵,等. 缓倾层间错动带对大跨度地下洞室顶拱围岩稳定的影响及支护对策[J]. 水电能源科学,2019,37(12):53-57.
- [9] 史箫笛,黄勋,康小兵,等. 高密度电法在覆盖型岩溶地区探测中的应用[J]. 人民长江,2018,49(S2):117-120,127.
- [10] 白伟,宛良朋,王团乐,等. 乌东德水电站左岸进水口边坡岩溶问题分析[J]. 人民长江,2018,49(23):74-78.
- [11] 马文波,宋威. 锦屏二级水电站引水隧洞岩溶段处理措施及施工[J]. 人民长江,2015,46(20):63-66.
- [12] 邓争荣,向能武,尹春明,等. 构皮滩水电站坝址地下岩溶施工期预测预报探测技术[J]. 资源环境与工程,2015,29(S1):47-52.
- [13] 范开平. 彭水水电站地下厂房大型复杂岩溶处理技术[J]. 人民长江,2011,42(23):58-61.
- [14] 孟桂萍. 岩溶发育地区的地下厂房及岩壁吊车梁设计[J]. 云南水力发电,2009,25(3):51-53.
- [15] 余波,封云亚. 强岩溶地区抽水蓄能电站库址选择主要工程地质问题[C]//贵州省岩石力学与工程学会2008年学术年会论文集. 贵阳:贵州省科学技术协会,2008:16-21.

黄河下游"十四五"防洪工程开工建设

7月9日,黄河下游“十四五”防洪工程开工建设。该工程是国务院部署实施的150项重大水利工程之一,也是2022年重点推进的55项重大水利工程之一。工程建设任务涉及山东、河南两省14个市42个县(区)的河道整治工程和堤防工程,主要包括控导工程续建改建、险工改建加固、堤防扩建和加高帮宽、堤顶硬化以及防汛路等,工程总投资31.85亿元,总工期36个月。

实施黄河下游“十四五”防洪工程是落实黄河流域生态保护和高质量发展的重要举措,是加快构建抵御自然灾害防线、补好防灾基础设施短板的重要内容。工程建成后将进一步完善黄河下游防洪体系,有效改善游荡性河段河势,提高河道排洪输沙能力,对确保堤防不决口,保障黄河长治久安,促进地区高质量发展具有重要意义。

(来源:水利部网站,网址:http://www.mwr.gov.cn/xw/slyw/202207/t20220709_1584715.html,日期:2022年7月9日)



水利设备中二极管钳位型五电平逆变器 优化均压算法研究

方 丽

(莒南县岭泉水利服务中心, 山东 莒南 276621)

【摘 要】 如何利用高压大功率变换装置降低水利设备单位产值能耗已成为当前亟待解决的重要问题。在新型高压大功率变换装置中,多电平变换器凭借其突出的性能而被广泛研究。二极管钳位型五电平相对三电平具有诸多优势,但其存在直流侧电容电压均压困难的问题。本文在现有的研究成果基础上,针对不同七段式矢量序列对于直流侧电容电压的调节作用,采用了一种高低调制比不相同的新型均压控制策略,解决了二极管钳位型五电平逆变器均压困难的问题。通过仿真与实验表明,新型 SVPWM 均压算法具有良好的均压能力,性能优异,值得推广应用。

【关键词】 二极管钳位型五电平;电容均压;SVPWM 调制;矢量序列

中图分类号: TV733

文献标志码: B

文章编号: 2097-0528(2022)08-056-06

Research on optimal voltage equalization algorithm of diode clamp five-level inverter in water conservancy equipments

Fang LI

(Ju'nan Lingquan Water Conservancy Service Center, Ju'nan 276621, China)

Abstract: How to reduce energy consumption per unit output value of hydraulic equipment with high-voltage and high-power converter has become a to-be-solved important problem. The multilevel converter has been widely studied because of its outstanding performance in the novel high voltage and high power converter. The diode clamp type five-level has many advantages compared with three-level, but it has the problem of difficult voltage equalization of DC capacitor. A novel voltage equalization control strategy with different high and low modulation ratio is adopted to solve the difficult voltage equalization problem of diode clamp five-level inverter aiming at the regulation effect of different seven-section vector sequences on DC capacitor voltage on the basis of the existing research results. Simulation and experiment show that the novel SVPWM algorithm has excellent pressure equalization ability and excellent performance, which is worthy of popularization and application.

Keywords: diode clamp type five level; capacitance voltage equalization; SVPWM modulation; vector sequence

当今世界的能源缺乏与环境污染日益成为人类面临的共同难题。在全球呼吁节能减排的形势下,多电

平变换技术已成为高压大功率电力电子技术领域的研究热点^[1-2]。多电平逆变器能够以耐压较低的功率器

收稿日期: 2021-09-27

作者简介: 方丽(1984—),女,工程师,主要从事水利电气设备优化设计研究。

件实现较高电压输出,相对于两电平逆变器具有输出电压等级高、谐波特性好、开关损耗小等优点,因而在高压交流电机调速、分布式发电、静止无功补偿、新型直流输电等领域有良好的应用前景^[3]。目前研究得出的多电平逆变器拓扑结构主要有三种:H桥级联型、飞跨电容型和二极管钳位型。其中二极管钳位型多电平逆变器由于无须多个独立直流电源和辅助电路,可靠性较高,相比于其他拓扑结构在应用领域具有更好的发展前景^[4]。

由于二极管钳位型的主电路结构和调制算法复杂度随着电平数的增加而急剧上升,目前只对五电平及以下二极管钳位型多电平进行研究^[5]。在目前的研究中,二极管钳位型三电平已广泛应用于 HVDC、STATCOM、有源滤波等领域。尽管五电平相对于三电平能够输出更高的电压等级以及具备更好的谐波特性,但却存在以下问题:直流侧电容电压不均衡,一个奇数次多电平会逐渐退变为三电平,而偶数次多电平会退变为两电平。目前实现二极管钳位型五电平逆变器均压的主要方法有:为电容分别独立供电;通过外接电路辅助均压;优化 SVPWM 算法选择合适的冗余矢量均压。相比于前两种方法需要外接设备辅助完成均压,优化算法选择合适的冗余矢量均压的方法更具备经济性,是当前研究的热点。张兴等^[6]、赵志宏等^[7]分别研究了二极管钳位型五电平逆变器在 HVDC 和 STATCOM 中的应用,得出 SVPWM 算法的均压效果受到逆变器调制比和功率因数的影响,当调制比小于 0.5 时,可以利用内层较多的冗余矢量实现全功率因数均压,当调制比大于 0.5 时调制比升高会导致功率因数降低,而当调制比继续升高至 1 附近时,二极管钳位型五电平逆变器几乎不能输出有功功率。本文将高调制比算法类比于低调制比,完成算法编写,通过仿真验证得出该算法能够实现二极管钳位型五电平逆变器的均压,且具有较好的动态性能。

1 二极管钳位型五电平逆变器拓扑结构

由于传统二极管钳位型五电平逆变器钳位二极管受压不均存在反向击穿的潜在危险,需要采用无极性

缓冲电路,这大大增加了制造难度与成本。为了避免这种潜在安全隐患,本文采用如图 1 所示的改进型二极管钳位型五电平逆变器,避免了钳位二极管的直接串联,消除了反向击穿的隐患。 R_p 为辅助均压电阻, R_s 、 D_s 和 C_s 构成每个功率开关器件的 RCD 吸收电路, C_1 、 C_2 、 C_3 和 C_4 为直流侧电容。4 个电容器件将直流侧电压 V_{dc} 分为了 5 个电平($V_{dc}/2$ 、 $V_{dc}/4$ 、0、 $-V_{dc}/4$ 、 $-V_{dc}/2$),所以每相桥臂能输出 5 个电平状态^[7]。具体的开关状态与输出电平对应关系如表 1 所列,表中“1”表示该开关器件开通,“0”表示该开关器件关断, S_{xi} 与 $\overline{S_{xi}}$ 的驱动信号互补($i=1,2,3,4$)。

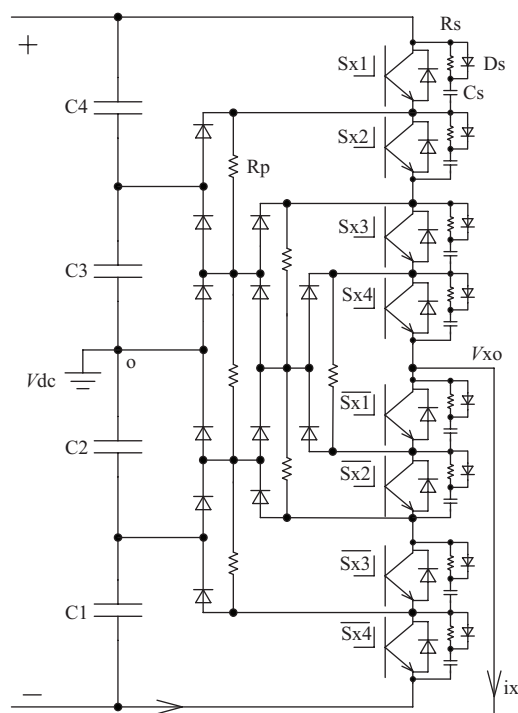


图 1 改进二极管钳位型五电平逆变器主电路

表 1 改进二极管钳位型五电平逆变器工作状态

输出电平	S_{x1}	S_{x2}	S_{x3}	S_{x4}
$V_{dc}/2$	1	1	1	1
$V_{dc}/4$	0	1	1	1
0	0	0	1	1
$-V_{dc}/4$	0	0	0	1
$-V_{dc}/2$	0	0	0	0

如表 1 所列,逆变器每相可以输出五种电平($V_{dc}/2$ 、 $V_{dc}/4$ 、0、 $-V_{dc}/4$ 、 $-V_{dc}/2$),将其定义为编号为 0,

1,2,3,4 五种工作状态,因此三相共有 125 种工作状态组合,其空间矢量图如图 2 所示。由图可知,125 个开关矢量中 61 个为有效矢量,剩余的为冗余矢量。

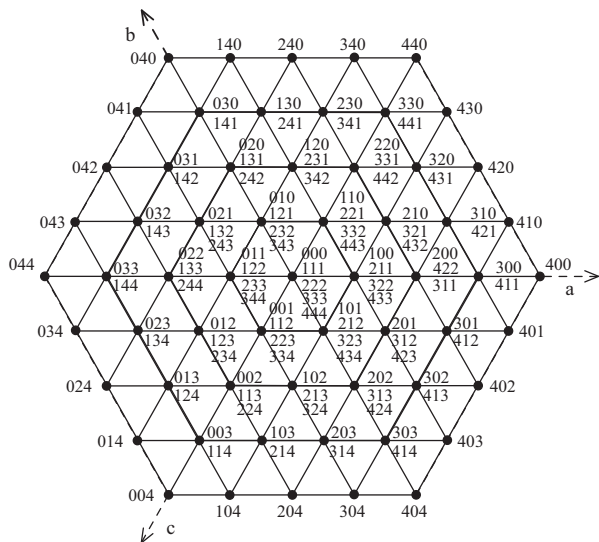


图 2 二极管钳位型五电平逆变器空间矢量图

二极管钳位型五电平逆变器空间矢量图由四个正六边形中心嵌套而成,其中绝大部分冗余矢量位于内两层六边形区域内,因此当逆变器调制比较低时,目前大多 SVPWM 算法均是利用内两层六边形数量众多的冗余矢量进行均压,而随着调制比的增大,冗余矢量个数逐渐减少,其中最外层六边形只有一种状态,冗余矢量个数为零,较少的冗余矢量选择导致直流侧电容均压变得十分困难。

2 二极管钳位型五电平逆变器控制策略

通过观察图 2 可知,当逆变器的开关序列矢量位于矢量图最内层六边形上时,逆变器仅对一个直流侧电容电压有影响。例如,假设逆变器此时开关矢量为 (100),如图 3 所示,此时逆变器仅对电容 C1 进行充放电,控制电流为 I_a 。当开关矢量位于第二、三、四层六边形上时,逆变器对相邻的 2,3,4 个直流侧电容电压起调节作用。

基于上述原则,本文所采用的 SVPWM 算法控制将矢量图分为如图 4 所示两个区域。内两层六边形即图 4 深色部分为区域 1,本文第三节将介绍区域 1 部分的相关五电平控制均压算法;外两层六边形为区域 2,

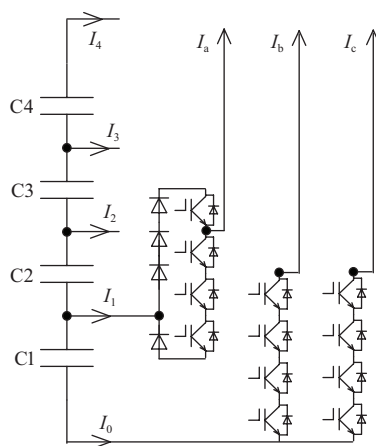


图 3 开关矢量(100)主电路工作状态

当参考矢量位于区域 2 时,此时忽略一些节点将空间矢量图转化成三电平矢量图,即将四个直流侧电容进行成对控制。这样高调制比下的控制关键环节(矢量序列选择,确定最近三矢量)即可采用类比于区域 1 的三电平 SVPWM 算法。

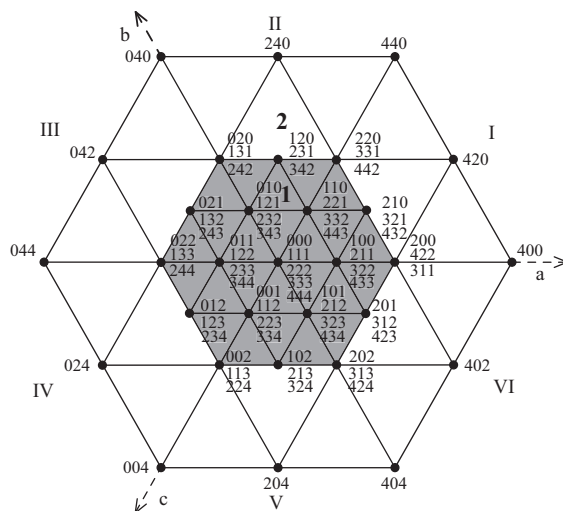


图 4 空间矢量图区域划分

3 二极管钳位型五电平 SVPWM 算法

由于空间矢量图的旋转对称性,我们可以将其分成如图 4 所示 I ~ VI 六个完全相同的扇区。以下有关算法的讨论均以扇区 I 为例,其余扇区的控制均可在算法中通过坐标转换转化为扇区 I 进行处理。

3.1 区域 1 部分

扇区 I 区域 1 部分由四个三角形组成,将其按如

图5所示进行编号。当确定参考矢量 V_{ref} 所在三角形区域时,该三角形所在的三个顶点即为当前最近三矢量 V_1 、 V_2 、 V_3 。由于三角形在矢量图中的方向不完全相同,当参考矢量位于三角形 1,2,4 中时,最近三矢量 V_1 、 V_2 、 V_3 如图 5(a)所示;当参考矢量位于三角形 3 中时,最近三矢量 V_1 、 V_2 、 V_3 如图 5(b)所示。

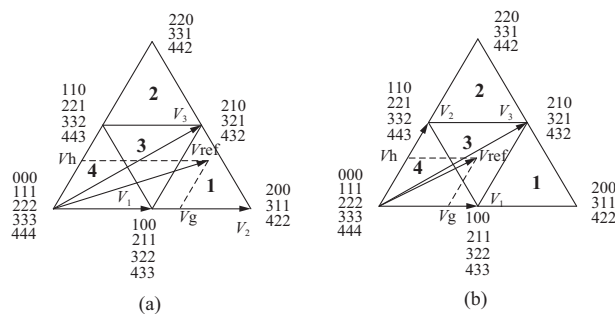


图5 扇区I区域1空间矢量图

由七段式矢量序列规则可知,当参考矢量位于三角形 1 或 2 时,矢量序列起始点唯一(100/211/322/433 为三角形 1 起始点,110/221/332/443 为三角形 2 起始点);当参考矢量位于三角形 3 或 4 时,矢量序列起始点有 2 种选择(100/211/322/433 和 110/221/332/443 均可作为三角形 3 或 4 的起始点)。因此按此分类后,我们仅需对三角形 1 和 3 进行分析。

3.1.1 三角形 1 区域

在三角形 1 中, 矢量序列起始点共有 100、211、322 和 433 四个开关序列, 由图 3 类比可知这四个序列分别对电容 C1、C2、C3 和 C4 电压起调节作用。该三角形区域内存在的七段式序列及其控制的电容如表 2 所列。

表 2 三角形 1 矢量序列

编号	七段式矢量序列	控制电容
1	100-200-210-211-210-200-100	C1、C2
2	211-311-321-322-321-311-211	C2、C3
3	322-422-432-433-432-422-322	C3、C4

由图3可知,三角形1中的均压控制电流为 I_a ;当 I_a 大于0时,此时逆变器对所控制的电容放电;当 I_a 小于0时,此时逆变器对所控制的电容充电。为了达到电容电压均压的效果,应该利用控制电流的调节作用,对当前电压较低的电容充电或对电压较高的电容放电。另外,表2所列出的七段式矢量序列均同时控制相邻的2个电容。因此,控制算法核心思路总结如下:

a. 判断当前控制电流方向,确定此时对电容的调节方式为充电还是放电。

b. 确定当前的调节方式为充(放)电后,选择当前电压最低(高)的电容为目标控制电容。

c. 判断目标控制电容相邻电容的电压,选择其为第二个控制电容,根据选择的 2 个控制电容查表 2 确定矢量序列。

举例分析,假设当前控制电流 I_a 大于 0,电容电压状态为 $V_{c2} > V_{c3} > V_{c4} > V_{c1}$,由于此时控制电流对电容电压放电,因此应该选择电压最大的电容 C2。此外,C2 相邻电容的电压状态为 $V_{c3} > V_{c1}$,因此应该选择 C2 和 C3 为控制电容,选择矢量序列为 211-311-321-322-321-311-211。

依据以上原则,表3 按各电容分类列出了三角形1 内所有情况下的矢量序列选择,其中 V_{c1} 至 V_{c4} 分别代表四个直流侧电容的电压, V_{\max} 为四个直流侧电压的最大值, V_{\min} 为四个直流侧电压的最小值。

表3 三角形1 矢量序列选择

电 容	条 件		选 择 序 列
C1	$(I_a > 0, V_{\max} = Vc1)$ 或 $(I_a < 0, V_{\min} = Vc1)$		100-200-210-211-210-200-100
C2	$I_a > 0, V_{\max} = Vc2$	$Vc1 > Vc3$	100-200-210-211-210-200-100
		$Vc1 < Vc3$	211-311-321-322-321-311-211
	$I_a > 0, V_{\min} = Vc2$	$Vc1 > Vc3$	211-311-321-322-321-311-211
		$Vc1 < Vc3$	100-200-210-211-210-200-100



续表

电容	条 件		选 择 序 列
C1	$(I_a > 0, V_{\max} = V_{c1})$ 或 $(I_a < 0, V_{\min} = V_{c1})$		100-200-210-211-210-200-100
C3	$I_a > 0, V_{\max} = V_{c3}$	$V_{c2} > V_{c4}$	211-311-321-322-321-311-211
		$V_{c2} < V_{c4}$	322-422-432-433-432-422-322
	$I_a > 0, V_{\min} = V_{c3}$	$V_{c2} > V_{c4}$	322-422-432-433-432-422-322
		$V_{c2} < V_{c4}$	211-311-321-322-321-311-211
C4	$(I_a > 0, V_{\max} = V_{c4})$ 或 $(I_a < 0, V_{\min} = V_{c4})$		322-422-432-433-432-422-322

3.1.2 三角形3区域

在三角形3中,存在2个矢量序列起始点,其控制电流分别为 I_a 和 $-I_c$,我们分别定义其为起始点1和起始点2,首先应确定1和2哪个为矢量序列起始点。文献[7]提供了一种判断矢量序列起始点对于电容电压调节作用强弱的方法,具体如下:

设起始点1一个周期内作用时间为 $t1$,起始点2作用时间为 $t2$ 。如果 $|I_a \times t1| > |I_c \times t2|$,则起始点1具有更好的电压平衡能力,应选择其为矢量序列起始点,否则应选择起始点2为矢量序列起始点。

起始点确定后,其余步骤与3.1.1中三角形1区域内相同。

3.2 区域2部分

在区域2中,我们将直流侧电容C1和C2,C3和C4进行联合控制,这样区域2中的均压控制就转换为三电平SVPWM控制。此时区域2的空间矢量图如图6所示,共分为三角形1,2,3三个区域,其中三角形1和2中仅有1组矢量序列,三角形3中有2组可选择的矢量序列。

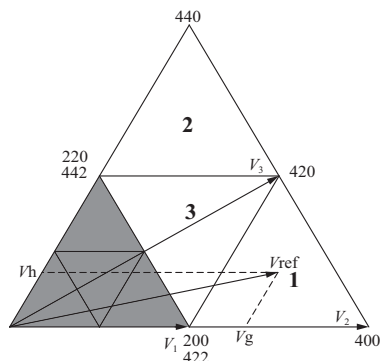


图6 扇区1区域2空间矢量图

在三角形3中,由于存在2组七段式矢量序列:

200-220-420-422-420-220-200 和 220-420-422-442-422-420-220 需要进行选择。这里采用与3.1.2中相同的方法:如果 $|I_a \times t1| > |I_c \times t2|$,则选择 200-220-420-422-420-220-200 矢量序列,否则应选择 220-420-422-442-422-420-220 矢量序列。

4 仿真验证

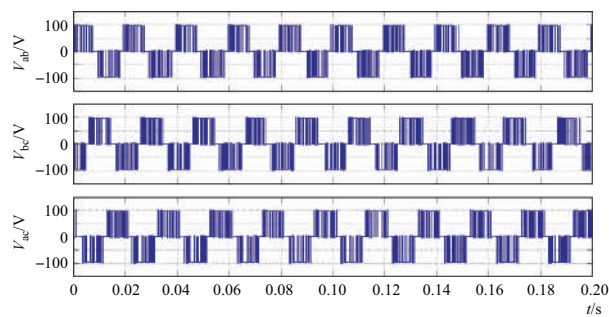
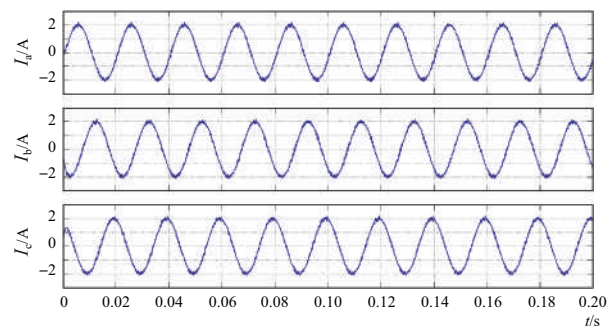
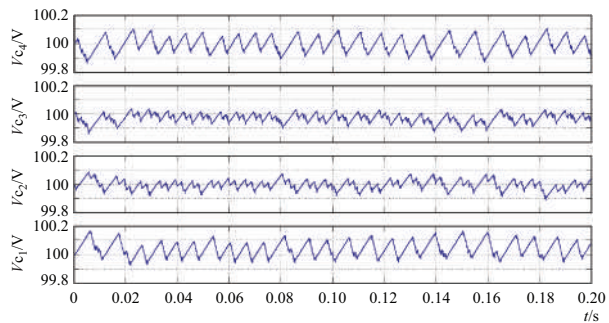
为验证本文所提出的二极管钳位型五电平逆变器改进SVPWM算法的有效性,在Simulink仿真平台下以图1所示电路拓扑为基础进行仿真验证。仿真参数设置如下:直流侧电压400V,开关频率2kHz,电容器C1、C2、C3、C4的电容值均为6800μF,负载电阻10Ω,负载电感20mH。

设置调制比为0.2,此时参考电压位于区域1内,图7为调制比为0.2时的各项仿真参数波形图。可以从图上看,直流侧电容电压的波动均在99.8~100.2V之内,达到了理想的均压效果。

设置调制比为0.53,此时参考电压位于区域2内,图8为调制比为0.53时的各项仿真参数波形图。由图可知,直流侧电容电压纹波在1.2V以内,均压效果较为理想。

5 结 论

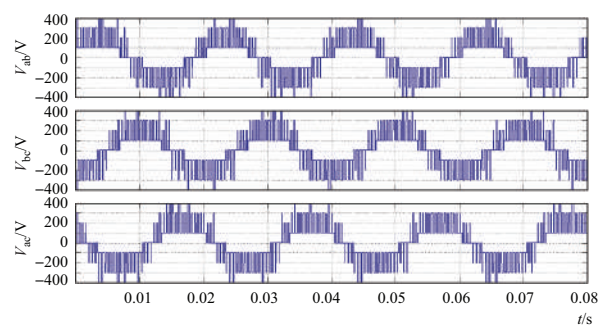
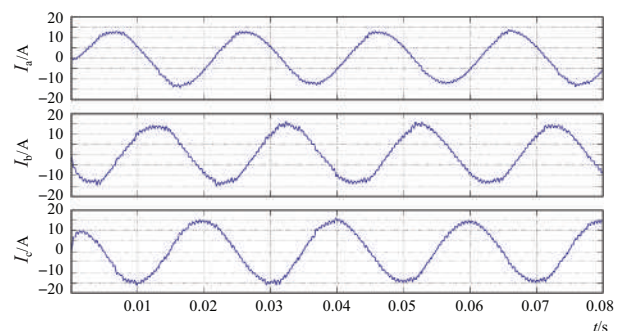
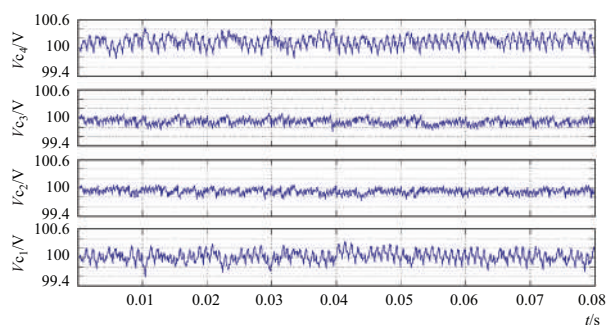
随着近年来高压大功率电力电子技术的不断发展与应用,五电平的相关研究已成为电力电子领域的研究重点之一。本文在总结与归纳现有研究成果的基础上,采用一种改进型的SVPWM算法,通过利用七段式矢量序列对于电容电压的调节作用,实现了二极管钳

(a) 三相线电压 V_{ab} 、 V_{bc} 、 V_{ac} (b) 三相电流 I_a 、 I_b 、 I_c (c) 直流侧电容电压 V_{c4} 、 V_{c3} 、 V_{c2} 、 V_{c1} 图7 调制比 $m=0.2$ 仿真波形

位型五电平逆变器的直流侧均压,最后通过仿真验证了该算法的正确性及有效性。◆

参考文献

- [1] 辛想. 多电平变换器 PWM 控制技术的研究[D]. 济南: 山东大学, 2007.
- [2] 张志, 谢运祥, 乐江源, 等. 二极管钳位型单相三电平逆变器空间矢量脉宽调制方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(27): 62-68.
- [3] 沈凯安. 二极管钳位型五电平逆变器优化调制及平衡技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.

(a) 三相线电压 V_{ab} 、 V_{bc} 、 V_{ac} (b) 三相电流 I_a 、 I_b 、 I_c (c) 直流侧电容电压 V_{c4} 、 V_{c3} 、 V_{c2} 、 V_{c1} 图8 调制比 $m=0.53$ 仿真波形

- [4] 伊凯, 马铭遥, 何原明, 等. 三相混合钳位五电平 PWM 整流器的研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(12): 59-66.
- [5] 何英杰, 刘进军, 唐健, 等. 适用于二极管钳位型三电平有源滤波器的母线电压数字控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(36): 55-61.
- [6] 张兴, 邵章平, 王付胜, 等. 三相三电平模块化光伏并网系统的零序环流抑制[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(9): 17-24.
- [7] 赵志宏, 赵剑锋, 沈凯安, 等. 二极管钳位型五电平逆变器高调制比高功率因数改进的均压方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 29(6): 153-161.



基于分布式体系的门塔机群防碰撞 系统设计与应用

李永山

(中国水利水电第五工程局有限公司,四川 成都 610066)

【摘要】 针对特定空间内门塔机之间交叉作业时存在较大碰撞风险的问题,本文结合航电枢纽项目施工的需要,阐述了基于分布式体系的门塔机群防碰撞系统的构建和安装工艺,给出了该系统在岷江犍为航电枢纽项目的应用情况。该系统对提升施工机械智能化、减少安全隐患、提升工作效率、降低开发成本具有现实意义。

【关键词】 分布式;门塔机群;防碰撞;系统

中图分类号: TV53+2

文献标志码: B

文章编号: 2097-0528(2022)08-062-05

Design and application of cluster anti-collision system for gate tower crane based on distributed system

LI Yongshan

(Sinohydro Fifth Engineering Bureau Co., Ltd., Chengdu 610066, China)

Abstract: There is a great risk of collision in view of the cross operation between specific space interior door tower cranes. The navigation-power junction project construction needs are combined in the paper. The construction and installation process of the gate tower crane cluster anti-collision system based on the distributed system is discussed. The application of the system in Minjiang Jianwei Navigation Junction Project is given. The system has realistic significance for improving the construction machinery intelligence, reducing safety risks, improving work efficiency, and reducing development costs.

Keywords: distributed; gate tower crane cluster; anti-collision; system

机群是由多台垂直运输设备组成,一个大型的水电项目针对不同的施工环境与工作量要求,需要配备不同数量以及不同种类的垂直运输设备布置在同一施工现场,进行近距离交叉作业,实现空间上的复用,以提高工作效率和工程进度。门塔机具有臂架覆盖范围广、起重量大、整机装拆运输方便、吊具下放深度大、能较好地适应临时性工作等优点,应用较多。但受环境

的限制,水电工程常将多台不同种类的垂直运输设备交叉布置,作业时存在着相互碰撞的风险,而且水电工程坝(厂)及枢纽施工中随着构筑物逐渐增高,垂直运输设备机群的大臂以及吊钩与构筑物发生碰撞的概率增大,这不仅降低了垂直运输设备的运行效率,而且存在碰撞的安全隐患。

本文以犍为航电枢纽项目中的垂直运输设备安全

收稿日期: 2021-10-15

作者简介: 李永山(1986—),男,高级工程师,主要从事水利水电工程施工管理工作。

运行为实例,开展门塔机群防碰撞系统的设计和应用工作。

1 系统设计

1.1 整体框架构建

航电枢纽工程项目中,不同地点的施工项目对主要垂直运输设备的要求不完全一致,主要垂直运输设备为门塔机。为了避免机群之间相互碰撞,提升工作效率,同时规范化吊运施工管理,安全化施工进度,从以下几个方面进行了分析:①可扩展性,系统可以随时增加或者减少垂直运输设备的数目,以满足项目对进度的要求;②通用性,能够解决不同种类垂直运输设备间的防碰撞问题,满足不同应用场景的需求;③易操作性,整个集群参数设置和系统监控操作方便;④实时性,系统能够实时对信息进行传输、运算和处理,及时作出判断和反馈;⑤可靠性,即使在出现误操作的情况下,系统依然能够保持安全稳健运行,具有较高的容错性;⑥经济性,整套系统经济实用,成本低廉。

通过比选,选择基于分布式网络控制体系,如图1所示,主要体现在每台门塔机都搭载了相应处理器,能够独立感知外部信息,作出决策,并控制自身机构执行相应的操作。即使有部分门塔机控制器出现故障,其他设备依然能够正常运行,弥补了集中控制的不足,在门塔机为主、其他设备为辅布置方式中具有很大的优势。

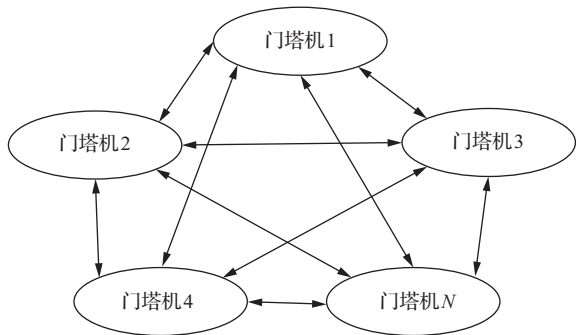


图1 控制体系结构

注:每台门塔机搭载防碰撞决策控制系统

1.2 单台门塔机防碰撞系统设计

基于分布式网络控制体系,每一台门塔机都集成了感知系统、工况监视系统、算法模块、决策系统、执行

系统和知识库,只是在不同的应用场合决策系统活跃的层级不同,如图2所示。

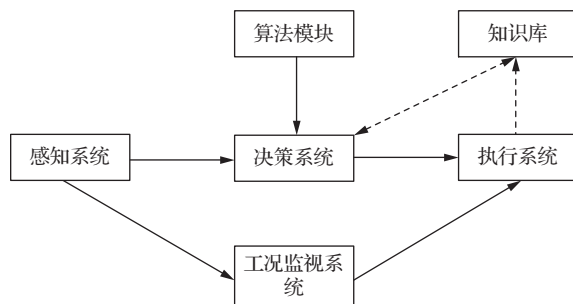


图2 单台垂直运输设备控制系统的组成

a. 门塔机防碰撞系统的感知系统搭载了回转信号采集传感器、幅角信号采集传感器、大车行走距离及相对位置信号采集传感器、风速信号采集传感器、起重量信号采集传感器、吊钩高度信号采集传感器、高清红外夜视球机摄像头和高清红外夜视墙机摄像头。这些传感器用于获得垂直运输设备自身的位置、状态和施工现场状况等动态信息。此外,感知系统也接收来自施工现场地图等静态信息以及其他垂直运输设备的实时动态信息,如图3所示。

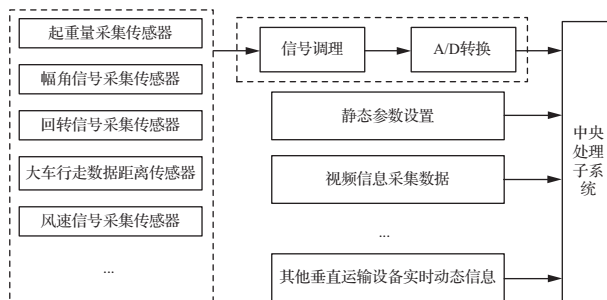


图3 门塔机防碰撞感知系统结构

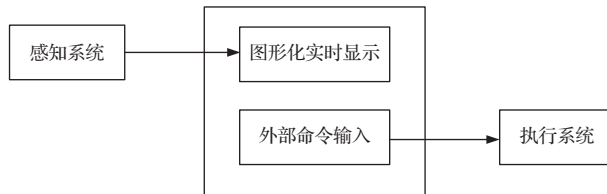


图4 垂直运输设备工况监视系统

b. 工况监视系统通过感知系统获得整个系统的运行参数、状态以及施工现场状况等信息,以图形化的方式实时呈现,此外,可以通过工况监视系统人工输入

控制命令驱动执行机构执行相关的操作,如启动、停止或者报警等,如图4所示。

c. 算法模块主要根据空间参数建立碰撞的物理模型,整合数据定位垂直运输设备的空间相对位置,分

析与计算垂直运输设备的危险区域、报警区域和制动区域,为决策模块提供决策的依据。避碰流程如图5所示。

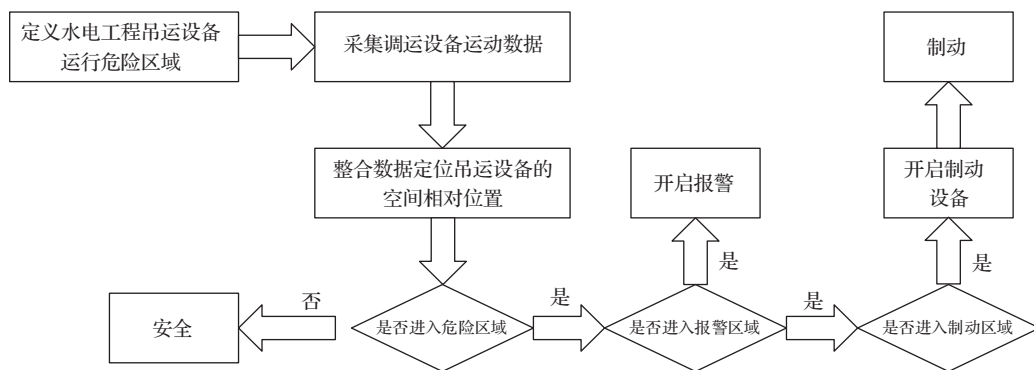


图5 垂直运输设备避碰算法流程

d. 决策系统收集感知系统、算法模块和规则库中的信息,作出有利于当前设备运行的控制决策,并将决策结果的控制量输出到执行机构,驱动设备做出相应的行为。该模块赋予垂直运输设备以较高的智能,它是进行复杂决策和知识处理的关键所在,不同的垂直运输设备的运动轨迹预测模型不同,但都是基于设备间的最小距离来判别设备的状态。根据设备的特点,不同的主要垂直运输设备和其他辅助设备之间采用了不同的防碰撞决策方法。

e. 执行系统接收决策信号驱动执行机构产生实际的行为,包括直接产生声光的预警和报警以及作为PLC输出的控制电气信号,如图6所示。

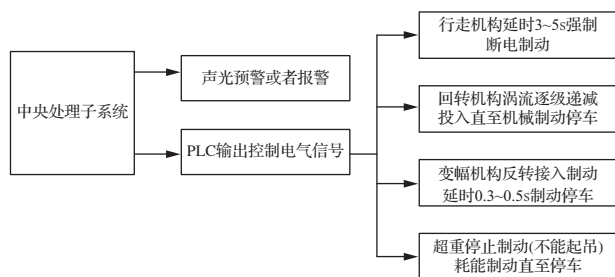


图6 垂直运输设备执行系统

f. 知识库中存储着施工过程中的数学模型,并且通过执行系统的结果反馈,不断校正和学习垂直运输设备在不同应用场景下的防碰撞知识信息,该模块使

得系统具有一定的学习能力,是本系统在未来的研究方向。

1.3 多元状态信息感知技术应用

为了保证防碰撞系统的性能,要求对每一台垂直运输设备(包括门机、塔机等)的状态进行监控,其中包括对运输设备的位置、幅角、回转角等信息进行实时感知,保证其处于安全的工作状态。同时为了各个设备能够实时共享信息,采用无线数传电台作为媒介,从而保证各个设备之间达到快速的信息通信。

1.4 视频数据稳定采集

由于仅仅确定各个门塔机的相对位置还不能达到安全的要求,因此还需要对施工现场障碍物和工作人员的位置是否处于危险区进行鉴别,通过视频监控移动的障碍物或者工作人员,实时地将数据传递给操作人员,从而减少操作人员的盲区。

视频采集的要求是提供精准的图像,通过显示器显示采集的图像,代替驾驶员目测临时障碍物的位置,为垂直运输设备驾驶员提供准确的视野范围。为保证垂直运输设备在运行过程中可以采集准确的视频信息,采用一种电站门座式起重机视频监控设备连接装置,其通过可摆动的连杆保证视频采集的视角始终与地面垂直,通过电磁阻尼原理设计安装减震器,保证视频信息采集的稳定性。

2 安装工艺

2.1 工艺流程

整个系统采用了分布式的控制体系结构,通过获取自身状态信息、周围设备的状态信息和环境信息,每台垂直运输设备间能够互相通信,实现数据共享。通过自动实时信息感知、分析与计算,预测设备间存在碰撞时采用灯光闪烁、语音报警、强行停机等方式及时提醒操作人员进行避让,辅助门塔机等设备安全运行。施工工艺流程为:电站门座式起重机群安装→安装分布式门塔机群防碰撞系统→安装视频监控系统→日常维护,如图7所示。

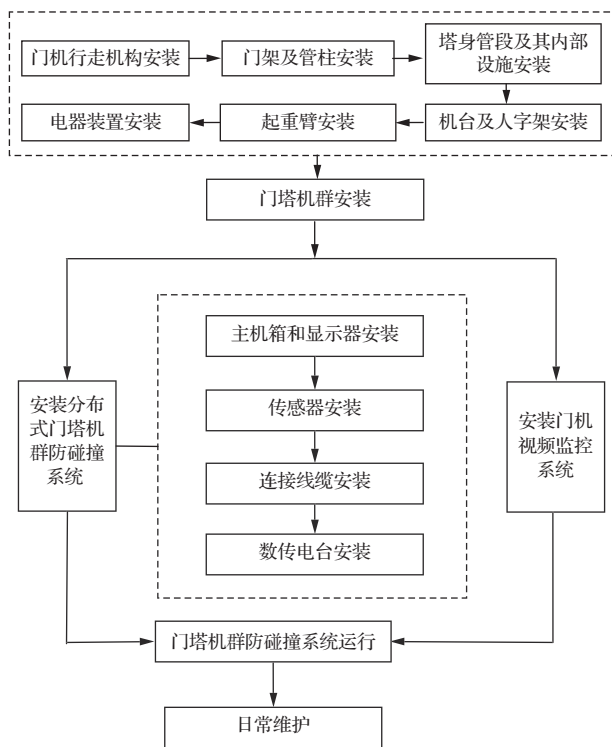


图7 安装工艺流程

2.2 操作要点

2.2.1 门塔机群安装

根据航电枢纽工程构筑物结构特点及施工进度计划要求,为保证施工区域能够被门塔机全部覆盖并满足施工强度的要求,在构筑物周边合适位置布置门塔机群。

2.2.2 门塔机群防碰撞系统安装

分布式门塔机群防碰撞系统包含控制主机箱及显示器、行走距离及相对位置信号采集传感器、旋转角度及方向信号采集传感器、幅角度信号采集传感器、风速信号采集传感器、起重量信号采集传感器、吊钩高度信号采集传感器、控制信号输出连接电缆等。

a. 主机控制箱使用自攻螺丝安装固定在驾驶室墙壁上,显示器使用定制的加重底座安装固定后置于驾驶室承物桌上。

b. 行走传感器安装。行走信号采集传感器安装在门机外加设的从动轮上,在从动轮上设置安装支架,将传感器安装在支架上,让传感器齿轮与门机从动轮的管柱齿圈很好地咬合在一起。将传感器安装在从动轮上避免了门机滑动造成的采集数据不准确的问题。

回转传感器安装。设计制作了安装支架,先将传感器安装在支架上,后将支架焊接于门机驾驶室下方,让传感器齿轮与门机管柱齿圈很好地咬合在一起,须保证齿轮与齿圈是水平不错位的,以保障在运行过程中不产生纵向力矩,而造成卡齿、跳齿或联轴器发生滑动,造成信号采集误差。

幅角传感器安装。幅角度信号采集传感器安装于门机大臂下方。

起重量信号采集传感器、吊钩高度传感器、风速信号采集传感器安装在门机动作运行的相应位置。

c. 连接线缆安装。通过连接线缆将各传感器与主机控制箱连接在一起。

d. 数传电台使用自攻螺丝安装固定在驾驶室墙壁上,天线底部含有强力磁铁,可有效吸附在钢铁表面,信号穿透性强,所以天线可置于驾驶室顶部或驾驶室内部墙壁上。

2.2.3 视频监控系统安装

门机视频监控系统采用单摆连接杆保证摄像头视角固定,通过电磁阻尼原理削减摄像头的反复摆动。高清红外夜视球机摄像头安装于大臂臂尖用于监控吊钩工作状态,高清红外夜视墙机摄像头安装于机构机房用于监控起升机构与变幅机构的工作状态。液晶显

示屏安装于门机操作室,通过门机大臂上始终垂直地面的视频监控系统采集门机大臂下部视野的精准图像,通过显示器显示采集的图像,代替驾驶员目测临时障碍物的位置,为门机驾驶员提供了准确的视野范围。

2.2.4 防碰撞系统运行

防碰撞系统通过门机行走机构、门机大臂回等各个传感器安装于门座式起重机不同机构,当门座式起重机运动时传感器也随着运动,输出信号不断变化,门座式起重机防碰撞系统采集传感器数据不断计算,实时将数据显示到显示器供操作人员查看门座式起重机当前工作数据及状态,并且通过无线传输电台使数据相

互通信。

门机防碰撞智能控制系统工作时,各项数据都会随着不同的操作指令动作在显示界面得到直观的体现,本系统中包含幅角度、吊钩高度、大车行走、旋转角度及方向。并且防撞系统建立了门机坐标系定位门机空间位置,定义门机运行的危险区域,通过无线局域网络传输数据,将门机群的位置信息收入处理装置;通过处理装置判断门机的相对位置,门机进入危险预警区后开启报警装置,并启动门机行走限位器和回转行程限位器,使门机运行减速制动,防止门机相互碰撞,如图8所示。

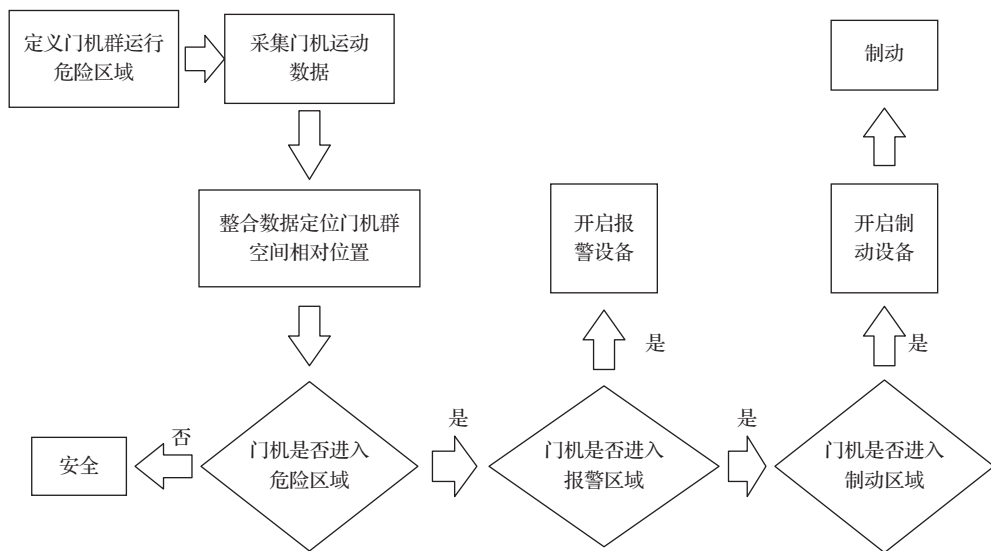


图8 控制流程

2.2.5 运行维护

随着使用时间的增加,各种因素的影响,系统不可避免地会出现一些数据误差问题,此时需要对系统设备进行维护更正,纠偏相应数据,确保采集数据准确无误。

3 应用实例

岷江犍为航电枢纽工程正常蓄水位 335.00m,相应库容为 2.27 亿 m^3 ,总装机容量为 500MW,校核洪水位为 339.21m。结合施工布置及施工进度计划,基于混凝土施工分布情况和混凝土施工机械性能等综合因素,布置 2 台 MQ900B 高架门座式起重机、5 台

MQ600B 中架门座式起重机,7 台塔机用于浇筑混凝土,门塔机交叉作业频繁施工强度高。

基于分布式体系的门塔机群防碰撞系统通过自动实时信息感知、分析与计算,预测设备间存在碰撞时采用灯光闪烁、语音报警、强行停机等方式及时提醒操作人员进行避让,辅助门塔机等设备安全运行。自运行以来成功发出上百次确实存在运行安全的报警信号,提醒操作人员尽早进行了避让,碰撞危险基本在声光预警阶段得到有效解决,实现了施工现场没有任何设备碰撞事件发生,保证了垂直运输设备运行的安全性,并提高了设备的运行效率和吊装生产能力。同时有效减少了不必要的电能等资源消耗,(下转第 72 页)

高压旋喷桩在流砂地层中的施工技术

刘少林¹ 周书东² 徐钦明¹

- (1. 中铁建工集团有限公司, 北京 100160;
2. 东莞市建筑科学研究院有限公司, 广东 东莞 523000)

【摘要】 传统高压旋喷桩在流砂地层中成桩质量差,旋喷桩强度低,严重影响地基处理效果,为解决上述问题,在充分研究当前高压旋喷桩机械设备特点,并借鉴当前可提高流砂地层高压旋喷桩成桩质量和强度的较有效方法的基础上,改进和创新现有技术,设计了先利用膨润土泥浆旋喷定型成桩,保障成桩质量,然后再利用水泥浆复旋喷,保障旋喷桩强度的技术思路,并通过试验确定施工参数和具体施工步骤,形成相应的施工技术,并应用于具体工程,提高了施工效率,节省了资源,取得了较好的经济社会效益。

【关键词】 高压旋喷桩;膨润土;水泥浆;成桩质量

中图分类号: TV553

文献标志码: B

文章编号: 2097-0528(2022)08-067-06

Construction technology of high pressure rotary jet grouting pile in quicksand stratum

LIU Shaolin¹, ZHOU Shudong², XU Qinming¹

- (1. China Railway Construction Engineering Group Co., Ltd., Beijing 100160, China;
2. Dongguan Building Research Institute Co., Ltd., Dongguan 523000, China)

Abstract: Traditional high pressure jet grouting pile has disadvantages of poor pile formation quality, and low jet grouting pile strength in quicksand stratum, thereby seriously affecting the foundation treatment effect. The mechanical equipment characteristics of the current high pressure rotary jet grouting piles are fully studied in order to solve the above problems. The current efficient method of improving the high-pressure jet grouting pile formation quality and strength in the quicksand stratum are applied. Existing technology can be improved and innovated on the basis. The following thought is designed: the bentonite slurry jet grouting pile formation is utilized firstly to guarantee the quality of the pile formation, and the slurry re-jet grouting is utilized to guarantee the jet grouting pile strength. The construction parameters and specific construction procedures are determined through the test. Corresponding construction technique is formed, which is applied to the specific project, thereby improving the construction efficiency, saving resources, and achieving excellent economic and social benefits.

Keywords: high pressure rotary jet grouting pile; bentonite; slurry; pile formation quality



1 引言

当前地基处理应用最普遍和最成熟的主要有深层搅拌桩和高压旋喷桩^[1-5],但在狭小作业空间环境下,由于深层搅拌桩的机器设备较大,适用性不强,而高压旋喷桩施工设备较小,可在较狭小空间实施,适用性较强。但高压旋喷桩在含砂层的地基处理施工中往往成桩质量差,桩径大小和强度无法保障,严重影响地基处理效果。当前高压旋喷桩在含砂层的地基处理中主要是在水泥浆中加入一定的膨润土^[6-7],在含水量较小的砂层中,成桩效果较好,但在含水量较大的流砂层中,旋喷桩的成桩质量依然较差,为保障旋喷桩的最终成桩质量,需要多次的复喷,桩径也往往大于设计桩径,造成大量的水泥浆浪费,增加了施工成本。此种情况下,缺少一种可在流砂层进行高压旋喷桩高质量施工的施工技术。

为解决上述问题,开发出一种高压旋喷桩在流砂地层中的施工技术就显得十分必要。在充分利用现有高压旋喷桩机械设备的基础上,借鉴行业内流砂地层中常规提高高压旋喷桩成桩质量的施工方法及原理^[8-9],并加以改进开发出一种适用于流砂地层可有效保障高压旋喷桩施工质量的施工方法,先确定技术的实施思路,再通过具体工程试验确定技术的相关参数、操作流程,并通过试验不断改进并最终形成相关技术,申报专利,并经省级行业协会科技成果鉴定达到国内领先水平。本技术依托“番禺区取水口优化整合工程-东部输配水管道工程(标段二)”进行开发,并将此技术应用此项目,取得了较好的应用效果。本文以此项目为例,阐述该施工技术的主要内容。

2 工程概况

“番禺区取水口优化整合工程-东部输配水管道工程(标段二)”项目,为广州市番禺区重点建设工程项目,建设 DN2200 管道总长约 9.38km,其中,管道明挖施工共计 5166m,泥水平衡 D2200 钢管顶管施工共计 3836m,混凝土套直缝钢管 DN2600(D2000)顶管施工共计 182m,阀门井共计 34 座,顶管井共计 29 座。对

于地质条件较差,周边环境复杂,施工作业面小的区域,采用高压旋喷桩进行地基处理。

项目区上部第四系覆盖土层主要有人工堆积成因的素填土、杂填土;冲-洪积成因的淤泥、淤泥质砂、粉质黏土、粉细砂、中粗砂及残积成因的粉质黏土等;下伏基岩为白垩系泥质粉砂岩(K),局部揭露震旦系混合岩(Z)。根据高压旋喷桩施工现场的验证情况,结合地勘报告,其上部 2.3~11.2m 全部为细砂层。地下水的稳定水位埋深介于 0.7~2.2m 之间(标高介于 4.1~8.8m 之间),初见水位埋深介于 0.5~2.3m 之间(标高介于 4.01~8.17m 之间),地下水位变化幅度一般为 1~3m。项目区为珠江三角洲冲洪积平原地带,场地地下水主要赋存和运移于冲洪积成因的淤泥质粉细砂、粉细砂、中粗砂中,透水性较好;此外人工填土层含有一定的上层滞水;由于场地风化岩裂隙很发育,估计基岩也含一定的裂隙水。地下水主要来源为河涌水和大气降水,项目区地下水较丰富。

高压旋喷桩在流砂地层中的成桩质量和强度,直接影响地基处理效果的好坏,地基处理效果好将会有效保障工程质量和施工工期。

3 关键技术

3.1 工艺原理

先利用膨润土泥浆旋喷定型成桩,再利用水泥浆复旋喷,既减少水泥浆多次复喷的浪费,也保证了成桩效果和强度要求,可有效改进和创新传统流砂地层高压旋喷桩的施工方法。原理为:首先根据设计提供的高压旋喷桩平面布置图,放线定位,钻机就位后钻孔;然后根据设计文件,钻孔至设计深度,其中钻孔和插管两道工序合而为一;开始旋喷膨润土泥浆,膨润土泥浆为胶体状泥浆,在流砂层中成桩质量较好;边旋喷膨润土泥浆边提升旋喷管,旋喷压力和提升速度均保持一致;旋喷管被提到设计标高顶部,旋喷膨润土结束成桩;换用水泥浆,重新插入旋喷管至设计深度,开始水泥浆复喷;边旋喷水泥浆边提升旋喷管,旋喷压力和提升速度均保持一致;旋喷管被提到设计标高顶部一定

高度,结束成桩,该孔的喷射即告完成,冲洗旋喷管,钻机移至下一孔位,具体各步骤见图 1。

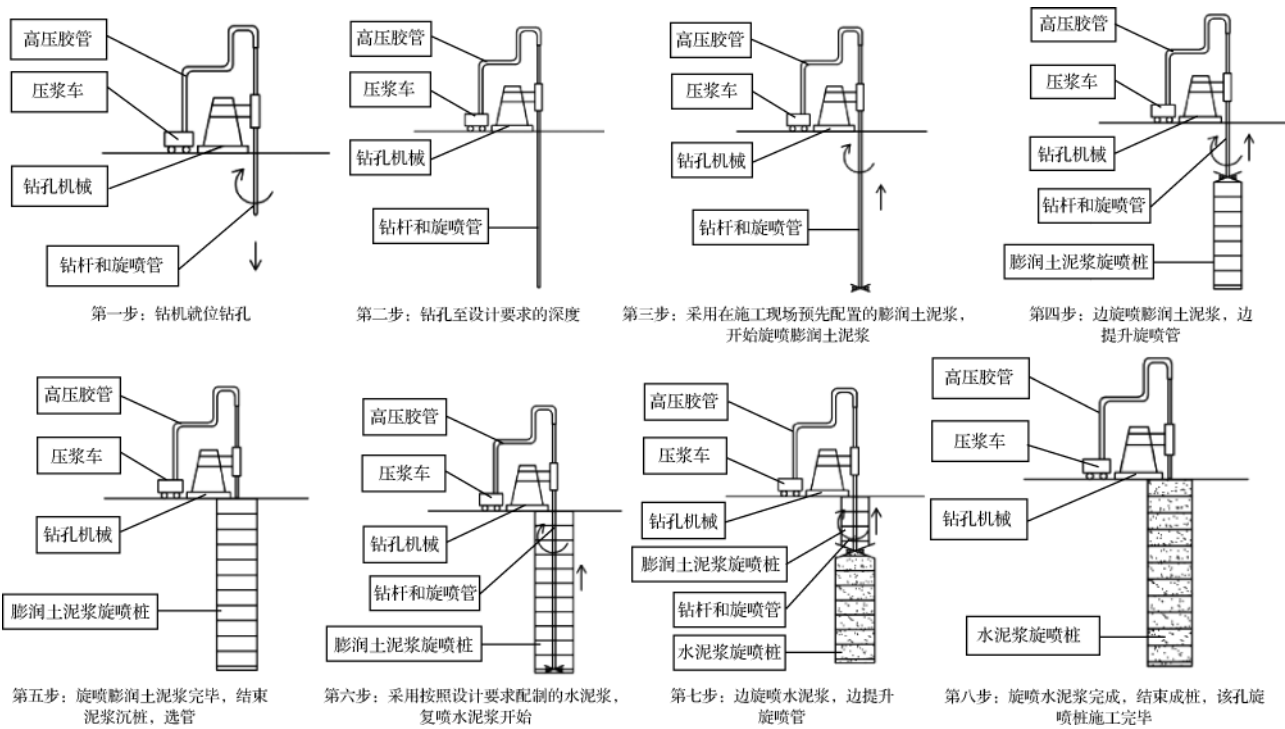


图 1 工艺原理

3.2 高压旋喷桩施工参数确定

3.2.1 膨润土泥浆配合比

膨润土泥浆主要用于控制流砂地层的土压力、维持孔壁稳定及起到隔水效果。针对施工现场流砂地层的地质情况,需要严格控制膨润土泥浆的各项指标,科学管理膨润土泥浆性能的各项指标,保证优质膨润土泥浆的施工效果,所选膨润土见图 2。



图 2 泥浆膨润土(高黏型)

在选定所用造浆材料后,进行了泥浆配比试验(见图 3),以寻求兼顾施工质量和效益要求的泥浆配合比(见表 1)。

表 1 泥浆配比试验

编号 分组	膨润土/ kg	水/L	黏度/s	密度/ (g/cm ³)	含砂量/ %	pH 值
A	25	1000	17.7	1.011	—	9.5
B	37	1000	21.8	1.018	—	9.5
C	50	1000	27.6	1.060	—	10
测试工具			泥浆 黏度计	泥浆 比重计	泥浆含 砂量计	pH 广泛 试纸

根据配比结果进行现场测试,结果表明:A 组配比的膨润土泥浆黏度和比重太小,对旋喷桩成桩效果不理想;C 组配比的膨润土泥浆黏度和比重太大,易造成机械设备堵管、堵泵,不利于旋喷施工作业;B 组配比的膨润土泥浆符合现场施工要求,可以有效地提高旋喷桩的质量和成桩效果,相应地降低工程的经济成本。水泥比重测试见图 4。

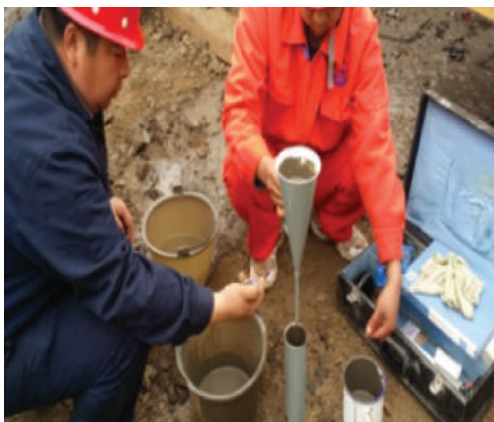


图3 膨润土泥浆施工现场配比测试

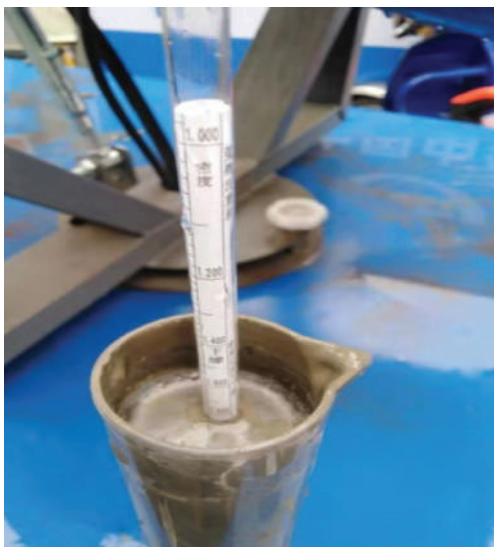


图4 水泥比重测试

3.2.2 旋喷桩施工参数

- a. 高压旋喷桩成桩桩径为 500mm, 桩端进入基础以下密实土层 1m, 若遇夹层, 桩端必须穿过夹层。
- b. 旋喷桩采用单管法进行施工, 水泥强度等级为 42.5, 水泥浆液的水灰比为 1.0 (每延米的水泥用量约 250kg)。
- c. 喷射管分段提升的搭接长度不得小于 100mm, 桩位偏差不大于 50mm, 成孔直径和桩长不得小于设计值。
- d. 高压旋喷喷浆压力要求达到 20MPa, 提升速度为 20cm/min (见图 5)。
- e. 在旋喷桩加固的地基上开挖基坑时, 桩顶以上 300mm 内的土采用人工开挖。



图5 高压旋喷喷浆压力表

3.3 施工步骤

根据高压旋喷桩在流砂地层中易出现成桩难的技术特点确定施工步骤如下:

- a. 根据设计提供的高压旋喷桩平面布置图, 放线定位, 钻机就位后钻孔。
- b. 根据设计文件, 钻孔至设计深度, 其中钻孔和插管两道工序合二为一。
- c. 开始旋喷膨润土泥浆, 膨润土泥浆为胶体状泥浆, 在流砂层中成桩质量较好 (见图 6)。



图6 按试验配合比配置膨润土泥浆用于初喷

- d. 边旋喷膨润土泥浆边提升旋喷管, 旋喷压力和提升速度均保持一致 (见图 7)。



图7 旋喷膨润土泥浆

e. 旋喷管被提到设计标高顶部,旋喷膨润土结束成桩(见图8)。



图8 旋喷膨润土泥浆成桩结束

f. 换用水泥浆,重新插入旋喷管至设计深度,开始水泥浆复喷(见图9)。

g. 边旋喷水泥浆边提升旋喷管,旋喷压力和提升速度均保持一致。

h. 旋喷管被提到设计标高顶部一定高度,结束成桩,该孔的喷射即告完成,冲洗旋喷管,钻机移至下一孔位(见图10)。



图9 按设计要求制备水泥浆用于复喷



图10 旋喷成桩结束后移至下一孔位

如上所述施工步骤,操作较简单,可有效提高高压旋喷桩成桩质量和强度,减少传统高压旋喷桩在流砂地层的复喷次数,大大提高施工效果和效率,且节省大量的水资源和人力物力(见图11)。

4 适用范围

本技术适用于高压旋喷桩在狭窄空间流砂地层中的地基处理项目,以及类似可采用高压旋喷技术加固



图 11 施工完成达到龄期后钻芯取样

地基的项目,该技术可有效提高高压旋喷桩的成桩质量,减少常规方法中水泥浆复喷次数,实现高压旋喷桩在流砂地层中的高质量施工,采用本施工技术所产生的社会效益和经济效益是显著的。

5 经济及社会效益

与传统的高压旋喷桩在流砂层的施工技术相比,本施工技术可有效地保障桩径大小和旋喷桩强度,减少常规高压旋喷桩在流砂层复喷次数和水泥浆用量,提高高压旋喷桩在流砂地层中的成桩质量,且方法操作简单,大大提高了高压旋喷桩在流砂地层中的成桩质量和施工效率,在“番禺区取水口优化整合工程-东

部输配水管道工程(标段二)”项目流砂地层中施工 $\phi 500$ 高压旋喷桩共 5846m,共节约工期 3 天,节约项目成本 20.723 万元,具有较好的经济效益。

使用本施工技术,有效保障了施工质量和效率,极大地降低了施工强度,减少了噪声和建筑垃圾,提升了现场文明施工形象。◆

参考文献

- [1] 王敏. 高压旋喷桩施工技术在软路基处理中的运用分析[J]. 四川水泥, 2021(7): 218-219.
- [2] 段荣丰. 单排高压旋喷桩止水帷幕在流砂层地质中的应用[J]. 四川建筑, 2019, 39(5): 98-99.
- [3] 田攀. 高压旋喷桩技术处治现役高速公路沉降分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- [4] 余东辉. 旋喷桩地基加固方案及效果研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2016.
- [5] 张健, 李仁刚, 李翔. 浅析高压旋喷桩在软基渠道扶壁的应用[J]. 水利建设与管理, 2014, 34(4): 17-19.
- [6] 王泽东. 深基坑围护结构接缝处理施工技术研究[J]. 施工技术, 2018, 47(1): 41-44.
- [7] 高常宝, 高涵. 竖井施工通过流砂层高压旋喷桩止水帷幕技术[J]. 建井技术, 2018, 39(6): 1-4.
- [8] 崔维本, 沈振忠, 康义红. 浅谈高压旋喷桩在响泉和龙洞泉取水工程中的应用[J]. 水利建设与管理, 2010, 30(8): 4-5.
- [9] 王泽东. 深基坑围护结构接缝处理施工技术研究[J]. 施工技术, 2018, 47(1): 41-44.

(上接第 66 页) 节能减排环保效益显著。

4 结 语

本文针对门塔机机群防碰撞控制系统采用了分布式控制体系结构, 每台垂直运输设备间能够互相通信, 通过获取自身状态信息、周围设备的状态信息和环境信息, 解决了门机与其他辅助设备交叉作业时的避碰问题, 提升了水电工程机群空间作业智能防撞安全控制技术。在实际施工运行过程中, 取得了良好的效果。◆

参考文献

- [1] 起重机械 安全监控系统: GB/T 28264—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [2] 水电工程施工组织设计规范: DL/T 5397—2007[S]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [3] 陈猛, 李永山, 梁勇, 等. 一种电站门座式起重机视频监控设备连接装置: CN208454311U[P]. 2019-02-01.
- [4] 李永山, 刘发永, 周新志. 门塔机碰撞预警方法研究[J]. 水利建设与管理, 2021, 41(8): 31-35.
- [5] 陈猛, 李永山, 梁勇, 等. 一种电站门座式起重机行走数据采集装置: CN208829134U[P]. 2019-05-07.

螺山泵站流道异型木模板支撑设计研究

黄 露 李建林 黄正东

(湖北水总水利水电建设股份有限公司,湖北 武汉 430056)

【摘 要】 螺山泵站进出水流道异型木模板体积大、自重大,形状及内部支撑构造复杂,普通的材料力学和结构力学分析手段难以清晰分析其复杂的应力、应变状态。本文利用有限元分析方法,准确分析了模板外壳以及支撑结构的应力、应变情况,并对模板支撑结构进行了优化设计。优化后整体应力情况变化不大,局部应力也未出现激增的情况,结构改良较为合理。本文研究可为类似工程设计与施工参考借鉴。

【关键词】 泵站;异型木模板;支撑;有限元分析方法

中图分类号:TV52

文献标志码:B

文章编号:2097-0528(2022)08-073-08

Study on design of special-shaped wood formwork support for flow passage in Luoshan Pump Station

HUANG Lu, LI Jianlin, HUANG Zhengdong

(Hubei Shuizong Hydraulic and Hydropower Construction Co., Ltd., Wuhan 430056, China)

Abstract: The special-shaped wood formwork in the inlet and outlet channel of Luoshan Pump station is large in volume with high self-weight. Its shape and internal support structure are complex. It is difficult to analyze its complex stress and strain state clearly by ordinary means of material mechanics and structural mechanics analysis. The stress and strain of formwork shell and supporting structure are analyzed accurately by means of finite element analysis. The supporting structure of the formwork is optimized. The overall stress is not changed greatly after optimization, and the local stress does not surge, and the structural improvement is reasonable. It provides important guidance for similar engineering design and construction.

Keywords: pump station; special-shaped wood formwork; support; finite element analysis method

在大型泵站施工中,流道为大体积、变截面的异型混凝土复杂结构。由于模板材质、模板工艺和立模技术等原因,施工中易出现混凝土断面尺寸偏差大、错台、平整度差等质量问题,将对水泵安装和运行产生显著影响。

泵站进水流道模板数量大,若采用传统厂家订制钢模板,一次性成本大,且不可重复利用,制作周期长。

因此,泵站工程进水流道可以采用木模现场拼接组装,然后利用起重设备配合人工进行吊装施工^[1]。

木模板布置方案中对其模板压力的计算是关键步骤。大型泵站进出水流道异型木模板体积大,自重大,形状复杂,内部支撑构造复杂,普通的材料力学和结构力学分析手段非常难以将该模板结构的应力、应变、变形情况分析清楚,因此需要对其进行有限元分析,从而

收稿日期:2021-11-26

作者简介:黄露(1984—),女,高级工程师,主要从事水利水电工程施工组织管理研究。



对该模板结构中的模板外壳以及支撑的应力、应变情况有更准确的了解,也对今后类似模板及其内部支撑设计提供一些有效的参考。

1 工程概况

螺山泵站增容工程建设内容为:拆除老泵站,新建进水前池、主泵房、安装间、副厂房、两岸连接建筑物、进出口翼墙、出水池、出水渠、工程管理设施等,重建螺山交通桥。新建泵站规模:6台 \times 7.4m(每孔净宽) \times 5m(孔高),总设计流量 $198\text{m}^3/\text{s}$ 。螺山泵站进水流道结构型式为肘形,三联六孔,每孔中间采用中隔墩分流。进口底板高程为13.2m,顶板高程为20.3m,尾部高程为16.725m。10-10~16-16断面为直线段,0-0~

10-10断面为肘形段,方变圆临界断面为13-13。螺山泵站流道侧视图如图1所示。

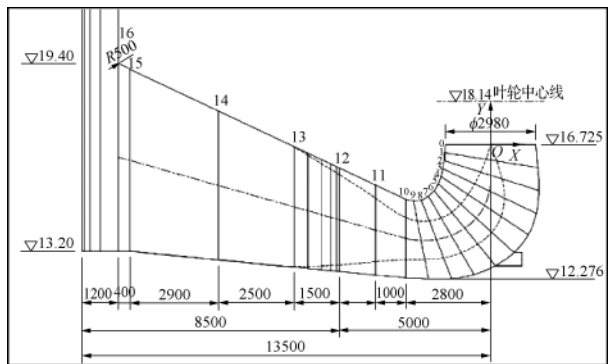


图1 螺山泵站流道侧视

各断面流道设计参数见表1。

表1 肘形进水流道设计参数

断面编号	0-0	1-1	2-2	3-3	4-4	5-5	6-6	7-7	8-8	9-9	10-10
上边 x/mm	-1490.0	-1514.0	-1541.2	-1579.3	-1640.3	-1729.6	-1866.9	-2057.3	-2285.2	-2544.5	-2800.0
下边 y/mm	0	-262.7	-525.1	-786.1	-1042.6	-1290.6	-1515.0	-1696.6	-1827.7	-1862.4	-1800.0
下边 x/mm	1490.0	1558.6	1589.4	1508.3	1244.5	772.8	156.9	-542.4	-1286.0	-2043.2	-2800.0
下边 y/mm	0	-754.9	-1512.1	-2264.5	-2972.4	-3561.6	-4000.5	-4289.2	-4430.8	-4444.1	-4400.0
断面高度 H/mm	2980.0	3111.8	3282.5	3423.2	3470.7	3379.2	3205.2	3002.8	2788.2	2629.9	2600.0
断面宽度 B/mm	2980.0	3169.8	3529.7	4050.4	4646.6	5294.4	5958.6	6585.4	7122.2	7556.2	7890.8
倒角半径 r/mm	1490.0	1375.6	1264.8	1168.5	1079.0	992.3	923.8	836.7	743.6	672.7	604.2
中心距 s/mm	0	509.3	1019.1	1529.3	2038.1	2542.0	3043.8	3546.9	4051.5	4560.4	5069.3
断面面积 A/m^2	6.97	8.24	10.21	12.69	15.13	17.05	18.37	19.17	19.38	19.48	20.20

模板制作过程如下:根据流道断面图,绘制各个断面构件图,按构件图下料。构件材料如下:内支撑(图2中构件2、4、6)采用 $4\text{cm}\times 8\text{cm}$ 矩形截面松木;直线段排架、圆弧段排架(图2中构件1、3、5)采用 4cm 厚松木板;面板采用 2.5cm 厚松木板。

根据流道中心截面单线图,在水平地面上按1:1比例加密放样流道曲线。根据流道放样曲线,将 $\phi 18$ 圆钢按流道曲线弯制成型,利用钢筋按流道模板样架示意图焊接加固,形成稳定的流道上弯段和下弯段样架。采用 $\phi 50$ 钢管搭设脚手架,作为样架固定及流道整体平整的结构支撑架。样架安装采用经纬仪测量校核,保证流道排架安装的精度。

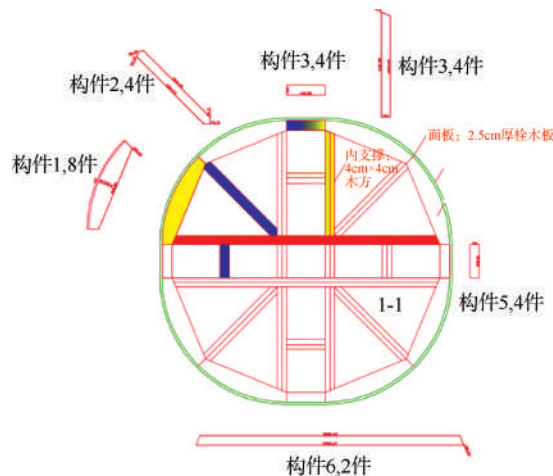


图2 流道断面构件(第1断面)

整体拼装从进水侧开始,根据样架和排架上的定

位点,逐榫拼接排架,连系件采用 $4\text{cm} \times 8\text{cm}$ 松木,拼接节点采用节点板连接。排架拼装完成后,拼装松木面板,面板与排架采用圆钉连接。

用刮刀将调配均匀的原子灰涂刮在流道木模面板间隙和明显凹陷部位表面。刮灰后 $2 \sim 3\text{h}$ 干磨,打磨好后除掉表面灰尘。最后采用塔吊将流道木模整体安装就位(见图3)。



图3 异型流道木模塔吊整体安装

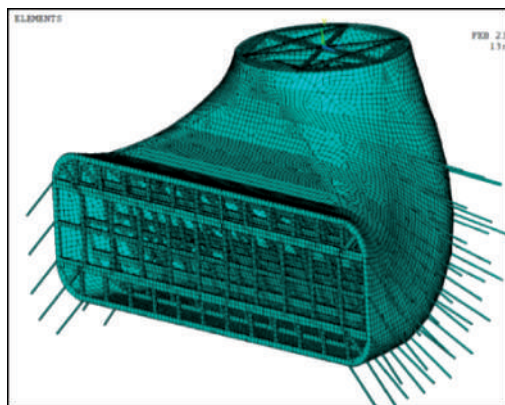
2 模板结构有限元分析

2.1 有限元建模

有限元建模时,对模板主体部分均采用三维壳体单元 shell181。内部支撑结构中,每个截面沿模板壳体一周的弧形支撑由于其高度是个变化值,采用梁单元时梁的高度不好准确地模拟,所以也采用三维壳体单元 shell181,其他撑杆均采用 beam188,支撑钢筋均采用三维杆单元 link8。

本次有限元模型的建立充分利用了 ANSYS 软件自带的 APDL 语言,可实现完全参数化三维有限元建模,使得模型可适用于某一种支承结构全部可能的尺寸形式,做到了在更改方案时无须重新建模,大大提高了有限元模型的效率。

异型模板的整体及内部支撑结构有限元模型如图4所示。典型断面内部支撑结构及有限元网格如图5所示。

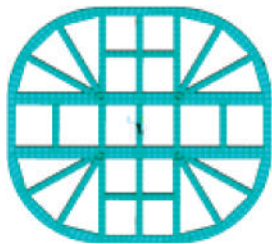


(a) 模板整体有限元网格

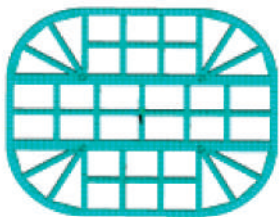


(b) 全部内部支撑有限元网格

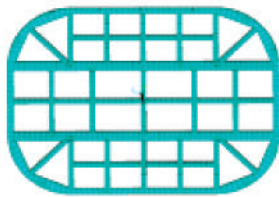
图4 模板有限元网格



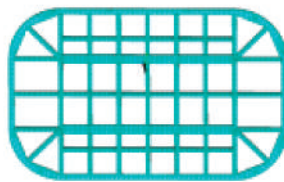
(a) 断面2-2



(b) 断面3-3



(c) 断面4-4



(d) 断面5-5

图5 典型断面内部支撑结构及有限元网格

2.2 计算工况及材料参数

根据该泵站施工过程,进水流道的混凝土浇筑模

板需要在工地现场制作,然后由吊车采用吊带捆扎后安放到指定位置(见图3)。为了保证吊装过程中的结



构安全,需要计算吊装过程中结构中的应力情况;考虑到混凝土的浇筑速度和初凝时间,按照模板受侧压力及竖向压力的较不利情况,对混凝土浇筑到三个不同高程时的模板支撑应力进行了分析:④混凝土浇筑到高程 14.276m 处;⑤混凝土浇筑到高程 16.000m 处;⑥混凝土浇筑到高程 16.725m 处。

综上所述,本次三维有限元分析的计算工况与荷载组合见表 2。

表 2 计算工况与荷载组合

编号	计算工况	荷载组合
一	吊装工况	结构自重
二	混凝土浇筑到高程 14.276m	结构自重 + 混凝土竖向压力 + 混凝土侧压力 + 施工人员及设备荷载 + 振捣混凝土产生的荷载(作用在新浇混凝土侧压力的有效压头高度之内) + 倾倒混凝土时产生的水平荷载(作用在新浇混凝土侧压力的有效压头高度之内)
三	混凝土浇筑到高程 16.000m	
四	混凝土浇筑到高程 16.725m	

模板体系的自重,由有限元软件根据材料密度自行计算而得。

工况二至工况四均为浇筑混凝土工况,整个模板结构位于高程 12.276 ~ 16.725m 之间。在各自浇筑高程下部从压力荷载梯度值 12.03 kN/m² 递减至 0,在此高程上部,从压力荷载梯度值 23.88 kN/m² 递减至 0。

本次计算中,共涉及 3 种材料,即制作模板和撑杆采用的松木木材、钢筋和合成纤维吊绳。模板采用 2.5cm 厚松木,由三维壳体单元 shell181 模拟;沿内部周边的弧形支撑采用 3cm 厚松木,也用三维壳体单元 shell181 来模拟;三维壳体单元 shell181 均用实常数模

拟板厚;内部撑杆采用 4cm × 8cm 木方,采用 beam188 模拟。各材料力学参数见表 3。

表 3 材料力学参数

材料类别	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(kg/m ³)
松 木	10000	0.4	600
钢 筋	210000	0.3	7850
合成纤维拉绳	30000	0.3	1150

2.3 计算结果分析

由于外部模板为三维壳体单元 shell181,可通过模板的各工况的第一主应力和第三主应力云图,考察其最大和最小主应力的大小和方位,判断模板结构的强度是否满足要求;通过各工况下模板的合位移云图,考察其最大变形的位臵和大小,从而判断模板结构的刚度是否满足要求。

对于内部支撑杆,由于采用三维梁单元 beam188 来模拟,因此在有限元后处理中,考察各梁单元的轴向应力和弯曲应力,以及由轴向应力与弯曲应力组合而得到的梁截面沿轴向的最大应力和最小应力。在此需要说明的是,最大应力 = 轴向应力 + 弯曲应力,最小应力 = 轴向应力 - 弯曲应力,此应力组合可以表示出沿撑杆轴向的极值应力,最大应力和最小应力中有一个是极大值,另一个则是极小值,但最大应力未必一定大于最小应力。在下面分析中,只采用两个极值中的大值。

各工况模板应力、位移见表 4。各工况模板的内部支撑杆件极值应力见表 5。工况一与工况四计算结果云图如图 6、图 7 所示。

表 4 各工况模板应力、位移

项 目		工 况 一	工 况 二	工 况 三	工 况 四
第一主应力	大小/MPa	3. 83	3. 47	14. 1	13. 9
	位置	0-0 断面的起吊点附近	10-10 断面的最下部沿纵向支撑附近位置	10-10 断面的最下部沿纵向支撑附近位置	10-10 断面的最下部沿纵向支撑附近位置
第三主应力	大小/MPa	2. 07	4. 32	17. 8	17. 6
	位置	0-0 断面的起吊点附近	10-10 断面的最下部沿纵向支撑附近位置	10-10 断面的最下部沿纵向支撑附近位置	10-10 断面的最下部沿纵向支撑附近位置

续表

项 目		工 况 一	工 况 二	工 况 三	工 况 四
Mises 应力	大小/MPa	3.32	4.23	17.3	17.0
	位置	0-0 断面的起吊点附近	10-10 断面的最下部沿纵向支撑附近位置	10-10 断面的最下部沿纵向支撑附近位置	10-10 断面的最下部沿纵向支撑附近位置
最大合位移	大小/mm	0.582	1.07	4.45	4.37
	位置	10-10 断面的最下部中间位置	10-10 断面的最下部中间位置	10-10 断面的最下部中间位置	10-10 断面的最下部中间位置

表 5 各工况模板的内部支撑杆件极值应力

单位:MPa

断面	极值应力	工况一	工况二	工况三	工况四
0-0	最大轴拉应力	0.26	0.01	0.04	0.14
	最大轴压应力	0.10	0.03	0.04	0.12
	最大弯曲应力	0.20	0.01	0.10	0.11
	组合最大应力	0.32	0.03	0.14	0.23
1-1	最大轴拉应力	0.05	0.03	0.19	0.10
	最大轴压应力	0.12	0.03	0.28	0.27
	最大弯曲应力	0.06	0.02	0.21	0.25
	组合最大应力	0.17	0.03	0.32	0.32
2-2	最大轴拉应力	0.02	0.06	0.30	0.08
	最大轴压应力	0.06	0.04	1.25	1.07
	最大弯曲应力	0.06	0.05	1.12	0.38
	组合最大应力	0.09	0.10	1.66	1.24
3-3	最大轴拉应力	0.03	0.39	0.41	0.35
	最大轴压应力	0.07	0.23	0.63	0.69
	最大弯曲应力	0.12	0.42	0.56	0.69
	组合最大应力	0.19	0.74	0.77	0.84
4-4	最大轴拉应力	0.02	0.41	0.20	0.14
	最大轴压应力	0.07	0.39	0.33	0.76
	最大弯曲应力	0.16	0.75	0.40	0.64
	组合最大应力	0.17	0.77	0.56	0.92
5-5	最大轴拉应力	0.02	0.46	0.01	0.02
	最大轴压应力	0.08	0.32	0.75	0.68
	最大弯曲应力	0.10	0.65	0.46	0.41
	组合最大应力	0.15	0.79	0.83	0.73
6-6	最大轴拉应力	0.001	0.28	0.03	0.10
	最大轴压应力	0.04	0.49	1.49	1.58
	最大弯曲应力	0.09	0.65	0.96	1.14
	组合最大应力	0.08	0.91	1.49	1.58

续表

断面	极值应力	工况一	工况二	工况三	工况四
7-7	最大轴拉应力	0.03	0.31	0.33	0.50
	最大轴压应力	0.03	0.50	1.65	1.83
	最大弯曲应力	0.07	0.52	1.65	1.86
	组合最大应力	0.09	0.67	2.25	2.56
8-8	最大轴拉应力	0.15	0.27	0.86	0.97
	最大轴压应力	0.15	1.00	4.30	4.42
	最大弯曲应力	0.15	1.00	3.48	3.52
	组合最大应力	0.16	1.03	4.31	4.43
9-9	最大轴拉应力	0.06	0.31	1.04	1.11
	最大轴压应力	0.02	1.58	6.38	6.29
	最大弯曲应力	0.29	1.91	7.79	7.68
	组合最大应力	0.33	2.07	8.08	7.94
10-10	最大轴拉应力	0.07	0.25	0.68	0.73
	最大轴压应力	0.04	0.61	1.93	1.90
	最大弯曲应力	1.00	1.51	6.66	6.65
	组合最大应力	1.03	1.77	6.87	6.86

a. 吊装工况中,无论是模板还是内部支撑,其应力值均不大,模板的变形也很小,完全满足强度和刚度要求。

b. 在混凝土浇筑到三个不同高程的工况中,模板中出现的最大主拉应力值为 14.1MPa,最大主压应力值为 17.8MPa,最大 Mises 应力值为 17.3MPa。内部支撑杆的最大极值应力为 8.08MPa(压应力)。三个工况中的最大合位移仅为 4.45mm。模板中的极值应力部位有很明显的应力集中现象,其他部位的应力值相对要小得多,因此显然是满足材料的强度和刚度要求的。

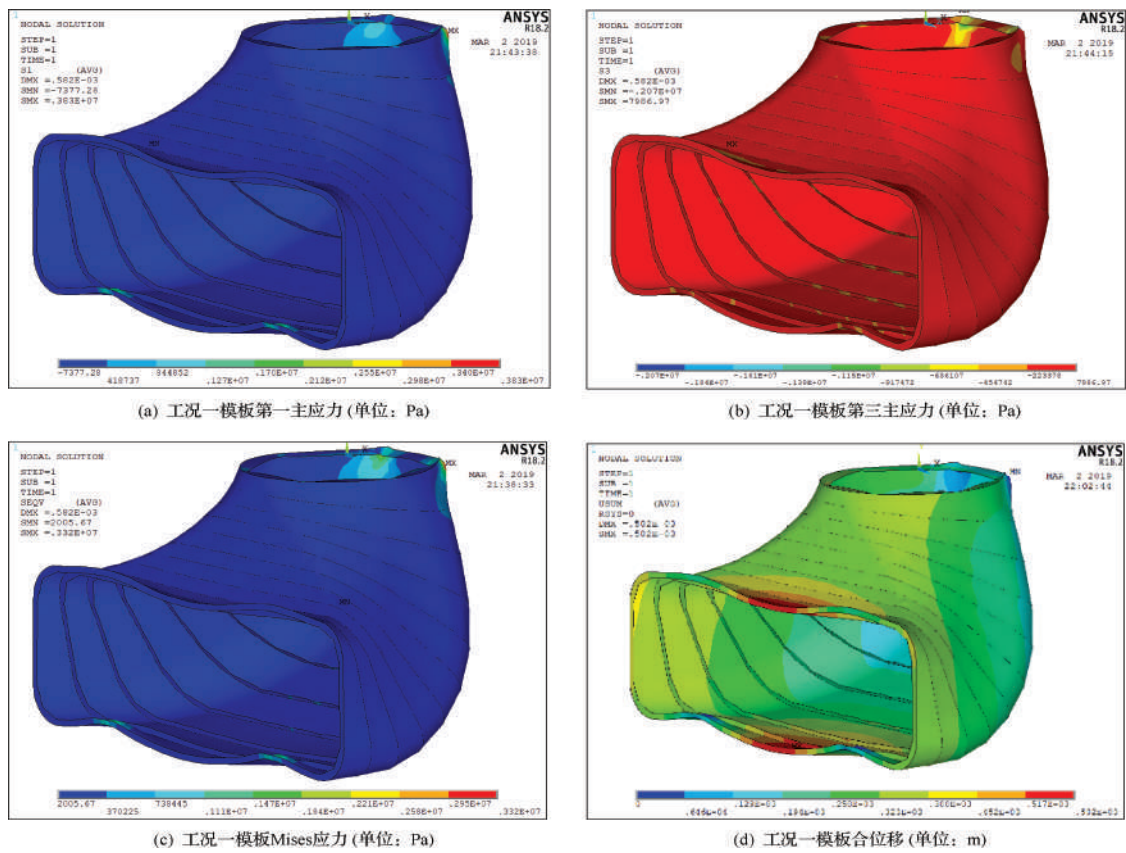


图6 工况一计算结果云图

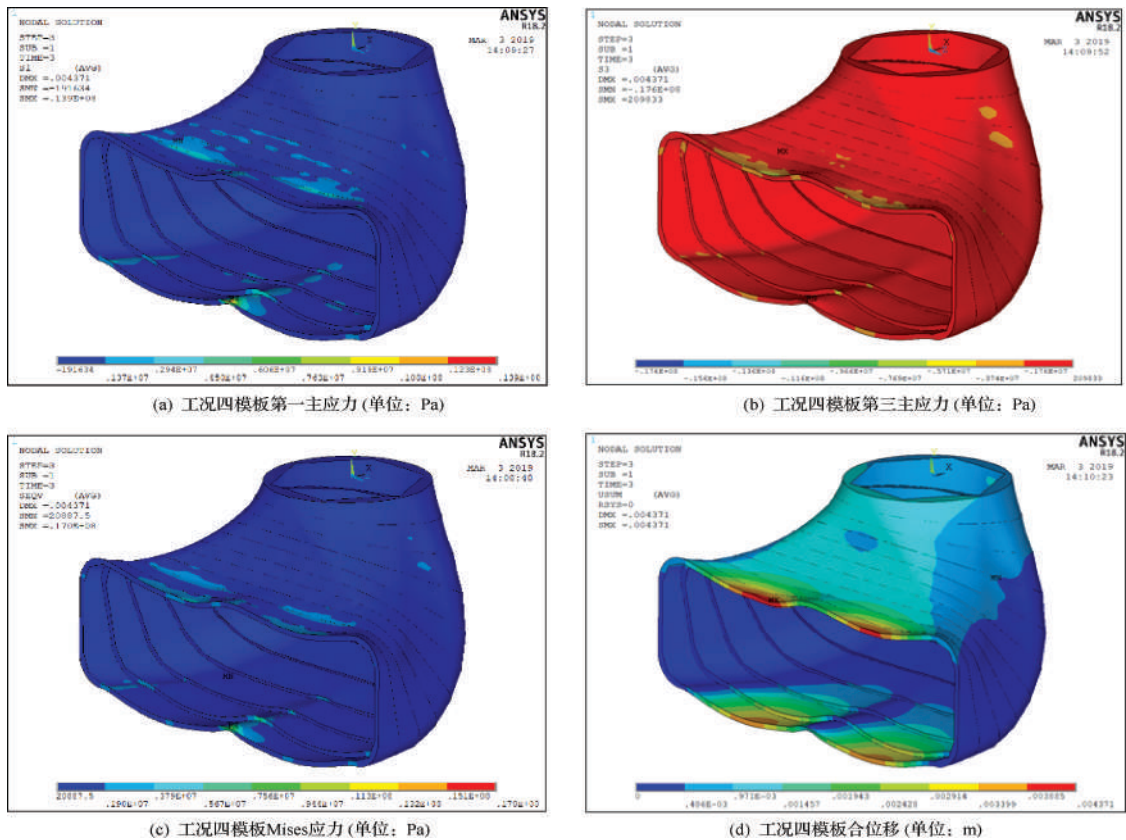


图7 工况四计算结果云图

3 模板支撑结构优化有限元分析

3.1 支撑结构优化及建模

由上节可知,0-0断面至5-5断面的各种应力极值均较小,留有很大的裕度,故对断面2-2、3-3、4-4、5-5进

行结构改进,减少其内部支撑(2-2和3-3断面减少四角斜支撑1个、4-4断面减少上下部竖支撑1个、5-5断面减少竖支撑1个)。优化后各断面内部支撑结构及有限元网格如图8所示。

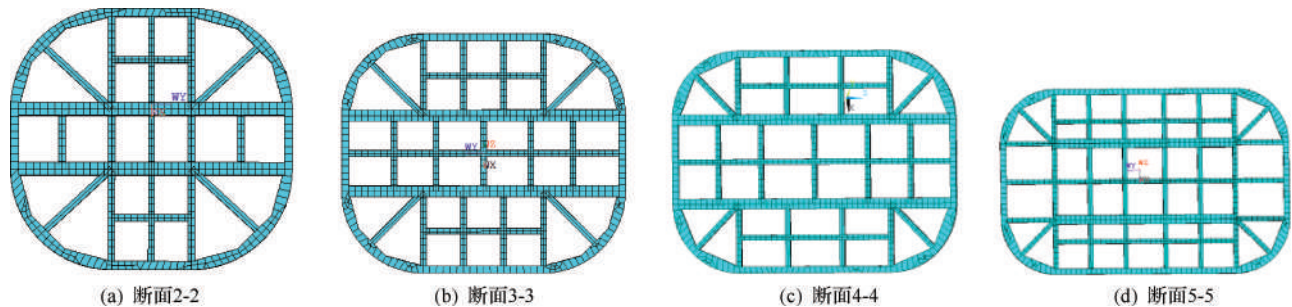


图8 优化后各断面内部支撑结构及有限元网格

计算工况与荷载组合及材料力学参数与前述方案相同。

3.2 计算结果分析

支撑结构优化后各工况模板应力、位移见表6。各工况模板的内部支撑杆件极值应力见表7。工况四计算结果云图如图9所示。

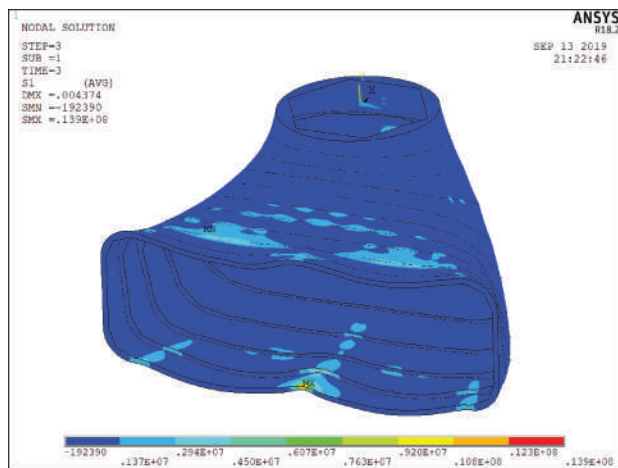
a. 吊装工况中,无论是模板还是内部支撑,其应力值均不大,模板的变形也很小,完全满足强度和刚度要求。

b. 在混凝土浇筑到三个不同高程的工况中,模板中出现的最大主拉应力值为14.1MPa,最大主压应力值为17.9MPa,最大Mises应力值为17.3MPa。内部支撑杆的最大极值应力为8.08MPa(压应力)。三个工况中的最大合位移仅为4.45mm。模板中的极值应力部位有很明显的应力集中现象,其他部位的应力值相对要小得多,因此显然是满足材料的强度和刚度要求的。

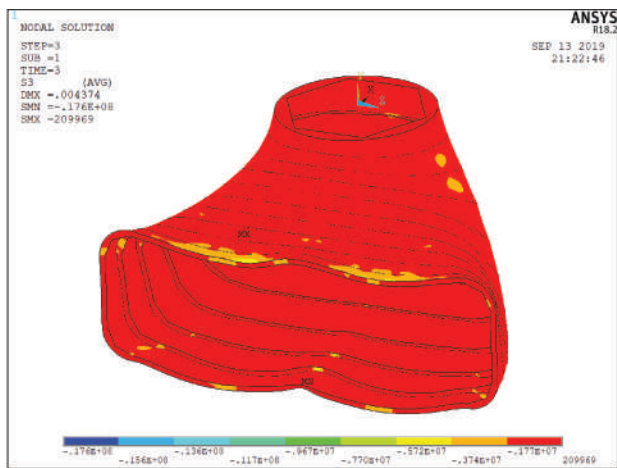
c. 与结构改良前相比,整体应力情况变化不大,局部应力也未出现激增的情况,故结构改良较为合理。

表6 支撑结构优化后各工况模板应力、位移

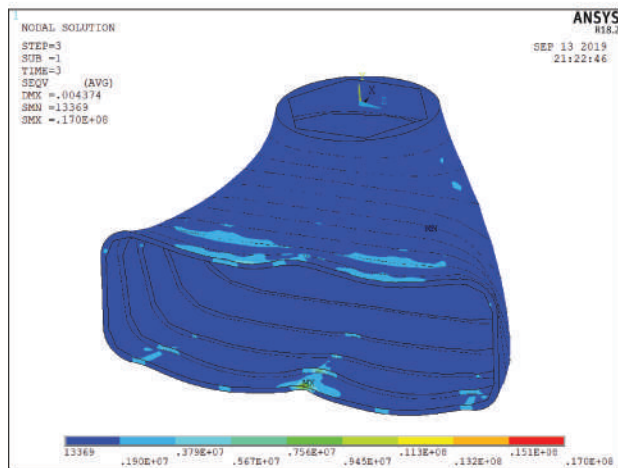
项 目		工 况 一	工 况 二	工 况 三	工 况 四
第一主应力	大小/MPa	3.79	3.47	14.1	13.9
	位置	0-0断面的起吊点附近	10-10断面的最下部沿纵向支撑附近位置	10-10断面的最下部沿纵向支撑附近位置	10-10断面的最下部沿纵向支撑附近位置
第三主应力	大小/MPa	2.06	4.32	17.9	17.6
	位置	0-0断面的起吊点附近	10-10断面的最下部沿纵向支撑附近位置	10-10断面的最下部沿纵向支撑附近位置	10-10断面的最下部沿纵向支撑附近位置
Mises 应力	大小/MPa	3.32	4.23	17.3	17.0
	位置	0-0断面的起吊点附近	10-10断面的最下部沿纵向支撑附近位置	10-10断面的最下部沿纵向支撑附近位置	10-10断面的最下部沿纵向支撑附近位置
最大合位移	大小/mm	0.580	1.07	4.45	4.37
	位置	10-10断面的最下部中间位置	10-10断面的最下部中间位置	10-10断面的最下部中间位置	10-10断面的最下部中间位置



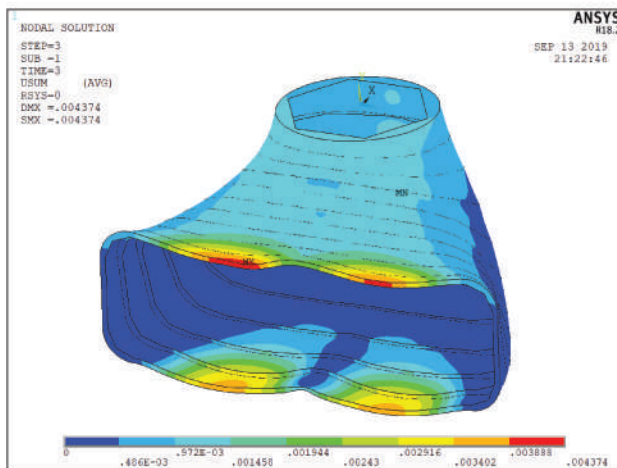
(a) 工况四模板第一主应力(单位: Pa)



(b) 工况四模板第三主应力(单位: Pa)



(c) 工况四模板Mises应力(单位: Pa)



(d) 工况四模板合位移(单位: m)

图9 支撑结构优化后工况四计算结果云图

表7 支撑结构优化后典型断面板的内部支撑杆件

极值应力 单位: MPa

断面	极值应力	工况一	工况二	工况三	工况四
2-2	最大轴拉应力	0.03	0.05	1.25	0.03
	最大轴压应力	0.05	0.05	1.25	1.07
	最大弯曲应力	0.05	0.06	1.13	0.38
	组合最大应力	0.07	0.09	1.65	1.24
3-3	最大轴拉应力	0.03	0.39	0.32	0.27
	最大轴压应力	0.06	0.20	0.35	0.47
	最大弯曲应力	0.11	0.38	0.47	0.77
	组合最大应力	0.17	0.65	0.71	0.87
4-4	最大轴拉应力	0.02	0.20	0.21	0.14
	最大轴压应力	0.07	0.18	0.32	0.54
	最大弯曲应力	0.17	0.53	0.58	1.23
	组合最大应力	0.18	0.56	0.88	1.43

续表

断面	极值应力	工况一	工况二	工况三	工况四
5-5	最大轴拉应力	0.02	0.12	0.03	0.02
	最大轴压应力	0.08	0.35	0.61	0.63
	最大弯曲应力	0.11	0.75	0.64	0.66
	组合最大应力	0.15	0.84	0.91	0.79

4 结 论

a. 利用有限元分析方法,可以准确了解泵站进出水流道异型木模板结构中的模板外壳以及支撑结构的应力、应变情况。

b. 木模板原设计支撑结构下,无论是模板还是内部支撑,其应力值均不大,模板的变形也很小,模板中的极值应力部位有很明显的应力集中(下转第84页)

水利工程装配式建筑的应用与展望

黄桂林 黄若坚

(湖北省水利水电规划勘测设计院,湖北 武汉 430070)

【摘 要】 装配式建筑将构件预制与施工装配分离,其优势在于缩短工程建设周期,减少物料堆放占地和实现智慧化管理等。本文在简要论述装配式建筑在水利工程中应用的基础上,探讨推广应用对策,提出未来展望。

【关键词】 水利工程;装配式建筑;应用展望

中图分类号: TV5

文献标志码: B

文章编号: 2097-0528(2022)08-081-03

Application and prospect for fabricated structures of water conservancy projects

HUANG Guilin, HUANG Ruojian

(Hubei Institute of Water Resources Survey and Design, Wuhan 430070, China)

Abstract: Component prefabrication and construction assembly are separated in prefabricated building. It has advantages of shortening the construction period, reducing the space occupied by material stacking, realizing intelligent management, etc. The popularization and application countermeasures are discussed, and future prospect are proposed in the paper on the basis of briefly discussing the application of prefabricated building in water conservancy project.

Keywords: water conservancy project; fabricated structure; application and prospect

1 装配式建筑应用背景

装配式建造就是采用工业化生产方法将建筑整体拆分,建筑物的部分或全部构件以工厂预制代替现场浇筑,在施工现场通过机械化、信息化的工程技术手段,按不同要求进行组合和安装,建成特定建筑部品的建造方式。

2016年,国务院办公厅《关于大力发展装配式建筑的指导意见》(国办发〔2016〕71号)指出发展装配式建筑是建造方式的重大变革,是推进供给侧结构性改革

和新型城镇化发展的重要举措;并从总体要求、重点任务和保障措施三个方面给予指导。工程建设行业掀起了装配式建筑的热潮。

2017年,河北省、山西省、广东省、湖北省、辽宁省人民政府等均发布了关于大力发展装配式建筑的实施意见。

2020年2月,人力资源和社会保障部等部门发布通知,将装配式建筑施工员纳入智能制造工程技术人员新职业,定义为在装配式建筑施工过程中从事构件安装、进度控制和项目现场协调的人员。

收稿日期: 2022-03-25

作者简介: 黄桂林(1963—),男,教授级高级工程师,主要从事水工结构设计与研究工作。



2021年4月,国家“十四五”规划纲要在推进新型城市建设中提出推广绿色建材、装配式建筑和钢结构住宅,建设低碳城市。2022年1月,住房和城乡建设部在“十四五”建筑业发展规划的通知中提出,开展绿色建造示范工程创建行动,提升工程建设精细化设计和施工水平。通过创新中心,开展关键核心技术攻关,研究制定标准体系与计价依据。

2 水利工程装配式建筑应用状况

张力鹏对水利工程装配式结构从1955年到2011年的应用研究历程进行了回顾。高国明从材料和结构型式方面对寒冷地区装配式渠道进行了总结阐述,认为聚丙烯纤维混凝土具有更大的抗压、抗折强度,竹塑渠道比混凝土渠道能更好地适应季节性冻土地区渠道冻胀过程。

2016年以来,BIM技术得到快速发展,工程全生命周期正在逐步实现数字化,依托数字化和信息技术,加之先进的施工建造技术,水利装配式建筑建设水平上了一个新台阶。湖北省鄂北水资源配置工程为其中的典型案例。

该工程全长约270km,2021年1月全线通水,其中孟楼渡槽全长4.99km,由于防渗抗裂要求严格,槽身采用三向预应力结构。为了加快施工进度、确保质量安全,经多方比较采用预制场制作、运槽车+架槽机运输吊装方式施工。施工现场见图1。



图1 孟楼渡槽施工现场

设计阶段对渡槽在不同荷载组合下的受力进行三维有限元分析,保证各项指标满足规范要求,并对在预制控制台上实施分级张拉,进行施工过程仿真分析,对

张拉顺序进行了优化,在此基础上提出了施工技术要求。预制场设浇筑台,将预应力锚索(锚筋)、钢筋绑扎就位,待混凝土达到需要的龄期后分级张拉锚索(锚筋)最后锁定。张拉好的槽身运至蒸养室,控制好温度和湿度,养护好的槽身送至堆放场储存,施工用槽时从堆放场提取,构成了顺畅的作业流程。张拉模拟应力见图2。

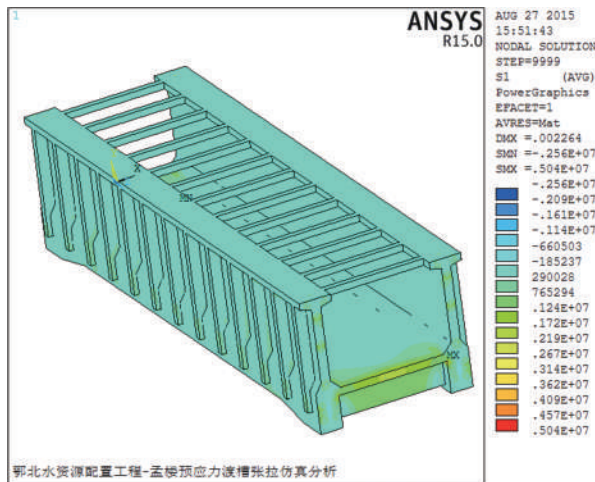


图2 张拉模拟应力(单位:Pa)

由于采用了装配式施工,工期提前,槽身光面整洁,没有发生任何裂缝。现在渡槽已通水运行,各项指标良好。孟楼渡槽的建设,一方面也得益于采用了三维设计、仿真模拟等BIM新手段,对结构受力、施工过程事先做到精准模拟和优化;另一方面由于施工方法、施工机械和施工工艺进步使得大型装配件加工、运输、吊装和组易于操控。

总体来看,水利工程装配式建筑多用在农田水利和少数中小型工程,以线状建筑居多,交通桥、重力坝、拱坝也有部分采用条石或混凝土预制块砌筑;近年来受BIM技术应用、大型施工机械出现和施工工艺水平提升的推动,出现了类似装配式预应力渡槽的水工建筑物,随着水利装配式建筑应用研究的深入,结合智能化管理要求还将有更多形式的水利装配式建筑呈现。

3 应用推广对策

与其他行业尤其是工业与民用建筑行业相比,水利工程装配式建筑在规模、材料工艺、数字化、信息化

等方面还存在一定差距。20世纪90年代后,水利工程装配式建筑应用研究主要集中在渠道衬砌、小型涵管等渠系建筑物,在大坝、水闸等关键挡水建筑物方面研究相对较少。在总结前人经验结合工作体验基础上,对水利工程装配式建筑的推广提出以下对策建议。

a. 大型水利工程需慎重采用装配式。水工建筑物种类多、结构异形,且体积大,承受的荷载大,对整体性要求高,无论是设计还是施工,采用装配式建筑都是一种新的挑战。大江大河水工建筑物地理位置重要,防渗、稳定和应力等安全性要求高,加上体积大,无论拆分还是运输都十分困难,过多灌浆缝会导致安全隐患,施工工艺也难以跟上,不适合装配式,可以考虑在交通洞、板、梁、柱等支撑结构局部采用预制装配。

b. 对适合做装配式的水利建筑合理分类。中小型工程装配式要形成规模化和集约化生产,建筑物要易于拆分为各类构件,构件的形状、尺寸和其他信息尽量标准化,同时安全可靠、易于施工。目前来看适用范围首先是渠道衬砌、生态护坡、河道景观蓄水(如翻板闸门、小型堰闸、橡胶坝支撑结构等)或受施工条件限制的桩、墩台;其次是地质条件相似,适宜定型设计的隧洞二衬、小型农桥、渡槽、水闸、箱涵、中小型泵站等。规模或体量较大的泵站、水闸、重力坝,可以借鉴建筑业做法,考虑装配式与现浇相结合的方式满足各项要求。

c. BIM + 水利装配式是创新设计的最佳融合。对结构的理解认识需要从空间入手,结合各种可能出现的工况,才能构思出不同的拆分方法。需要从稳定性、安全性、施工工艺等方面模拟,必要时结合物模试验加以验证。模型拆分还要结合信息化管理要求,在施工阶段配合做好构件编码并实现关键信息联动、可视化查询和质量追溯等。

d. 进一步加强施工企业人才培养和关键技术研究。装配式建筑施工工艺要求较高,对位要精准,连

接、灌浆要细致,需要专业熟练工来操作,要加强培训,落实装配式建筑施工作业员职业资格制度,做到持证上岗。要以企业自主或校企联合的方式进一步开展连接键方式、止水型式和材料性能,灌浆材料、锚固件和钢筋连接强度、耐久性等关键技术的研究。

e. 尽早出台水利工程装配式建筑的规程规范,确保建筑质量有据可依。从政策、资金等方面鼓励地方在研究应用的基础上,参考其他行业标准、体现时代要求,出台适合水利工程装配式建筑特点的设计、施工和验收标准及技术要求,加强专利、新型实用性技术的转化力度。

4 展 望

随着“十四五”期间国家水网重大工程实施,各地将有序开展水网建设,会有大批补短板工程落地实施,水利工程装配式建筑在加快工程建设进度、促进低碳环保及精细化、智能化建设方面发挥着独特作用,也必将促进该技术的创新进步和推广。◆

参考文献

- [1] 刘爽,李秋燕. 装配式建筑的应用与发展[C]//北京力学学会第26届学术年会论文集. 北京:北京力学学会,2020:351-353.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部标准定额研究所. 建筑信息模型施工应用标准:GB/T 51235—2017[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2017.
- [3] 张胜龙. 铁路隧道预制装配式衬砌接头力学性能及选型研究[D]. 北京:中国铁道科学研究院,2020.
- [4] 张力鹏. 装配式结构水利工程中的应用回顾与建议[J]. 黑龙江水利科技,2014,42(9):67-68.
- [5] 高国明,李明. 农业水利装配式渠道发展综述[J]. 东北水利水电,2020(11):60-62.
- [6] 黄桂林,张兵. 鄂北地区水资源配置工程大跨度预应力渡槽三维有限元分析[J]. 水利水电技术,2016,47(7):27-31.



重庆市水利局四项措施高质量推进 水利工程标准化管理工作

为加快推行水库标准化管理,充分发挥水库效益,努力提升水库管理水平,重庆市水利局按照水利部相关部署,早谋快动、多措并举,打好水利工程标准化管理“组合拳”。

一是强化组织领导。成立水利工程标准化管理工作领导小组,局主要领导亲自挂帅,下设分管领导为负责人的工作专班,为全面推进水利工程标准化工作护航。

二是健全工作机制。提出严格考评与长效激励相结合的工作思路,印发实施方案、分解目标任务、明确工作责任。建立定期调度、定时报告、年度通报等工作推进机制,确保按期完成目标任务。

三是完善评价体系。组建标准化管理专家团队,

结合重庆实际,针对工程特点,出台了全市水利工程标准化管理评价办法、评价标准及工作手册示范文本,厘清管理事项,规范管理程序。

四是强化激励监督。健全市、县两级标准化管理长效激励机制,在水利发展资金分配过程中,对通过标准化管理评价的达标区县、达标工程予以倾斜奖励;将标准化建设成果作为单位及个人的业绩考核、职称评定等重要依据。同时,将此项工作纳入市河长制考核范围,借助纪检监察、审计、稽察等力量,对工作推进缓慢、问题整改不力,成果弄虚作假的依法依规严肃追究问责。

(供稿单位:重庆市水利局,执笔:薛崧秀,审核:舒富林)

(上接第80页)现象,其他部位的应力值相对要小得多,完全满足强度和刚度要求。

c. 与结构改良前相比,整体应力情况变化不大,局部应力也未出现激增的情况,故结构改良较为合理。◆

参考文献

- [1] 水电水利工程模板施工规范:DL/T 5100—2013[S]. 北京:中国电力出版社,2013.
- [2] 兰振辉. 泵站异型进水流道施工重点难点控制[J]. 水利建设与管理,2014,34(5):14-17.
- [3] 王英伟. 水电站尾水流道钢木模板施工技术[J]. 四川建材,2015,41(2):183-185.
- [4] 韩宝祥,吉文佳. 浅述泗洪泵站流道层大体积混凝土施工技术及其质量控制[J]. 江苏水利,2016(1):23-26.

- [5] 刘利. 大岸泵站流道施工质量重难点控制[J]. 科学技术创新,2017(19):130-132.
- [6] 吴钢,李皓,刘磊. 异型钢模板在密云水库调蓄工程泵站群施工的应用[J]. 水利建设与管理,2017,37(10):23-27.
- [7] 杜谢贵,肖灿辉. 基于有限元分析方法的定型木模板应用研究[J]. 中国水运,2018,18(5):253-254.
- [8] 朱同然,姬永胜,全廷发. 异形双曲面清水混凝土拱形通道样板施工技术[J]. 施工技术,2019,48(21):32-34.
- [9] 孙建星. 木模板在主泵房簸箕型进水流道中的应用[J]. 黑龙江水利科技,2019,47(3):194-196.
- [10] 余结良,项海玲,张四明. 玻璃钢-木复合模板施工技术在童家湖泵站工程中的应用[J]. 水利建设与管理,2019,39(8):39-43.