

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 2 期

(总第 344 期)

2022 年 2 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 陈淑珍

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2期

本期特稿

- 1 为黄河永远造福中华民族而不懈奋斗 中共水利部党组

特别策划

- 5 部长讲话中的“水利建设与管理”
——李国英在 2022 年全国水利工作会议上讲话节选

科研设计

- 8 引江济淮西淝河北站水泵装置模型试验研究 秦钟建
14 金沟河引水枢纽工程整体水工模型造床平衡试验研究
马 军 冉建西 范勇锋

工程施工

- 19 乌东德水电站右岸主厂房高边墙陡倾薄层小夹角部位岩体稳定性调控的工程措施研究 颜其林 蒋业龙
27 高海拔峡谷地区过高坝长鱼道快速施工技术研究
刘朝建 拓孝金 刘 惠
35 碾压式土石坝施工质量评定影响因素探究 张有文 陈金辉
42 城市地铁近距离下穿大型输水管道防护技术 闫梦华
48 涵洞钢内模移动台车的设计与应用效果 南晓飞 程士华
55 混凝土冷却水管布置形式优化分析 任喜平 李虎子 焦 雄

运行管理

- 60 王英水库大坝坝体渗流监测资料分析 张 峰 唐 威 姜丽萍
66 移动 APP 在灌区管理中的应用 张 波 罗朝林

水文泥沙

- 71 江苏省无资料山丘区产汇流计算方法与模型构建研究
华 晨 费国松 潘 茹
79 柳河上游水沙特性及河道断面变化特征分析 巩士群

行业动态

• 经国务院同意,国家发展改革委、水利部印发《“十四五”水安全保障规划》(以下简称《规划》)。《规划》是国家“十四五”规划体系的重要组成部分,是国家层面首次编制实施的水安全保障五年规划,是“十四五”时期水安全保障工作的重要依据。《规划》在深入调研、系统分析基础上,充分听取有关部门和地方意见,并组织专家论证后报请国务院审批。《规划》系统总结评估水利改革发展“十三五”规划实施情况,以全面提升国家水安全保障能力为主线,以全面推进国家水网工程建设为重点,研究提出了“十四五”水安全保障的总体思路、规划目标、规划任务和保障措施等。

(来源:水利部网站,网址:http://www.mwr.gov.cn/xw/slyw/202201/t20220111_1559209.html,日期:2022年1月11日)

• 2022年1月26日,水利部召开推动长江经济带发展水利工作会议,深入学习贯彻习近平总书记关于推动长江经济带发展重要讲话和指示批示精神,传达韩正副总理在推动长江经济带发展领导小组全体会议上的讲话精神,研究部署2022年推动长江经济带发展水利重点任务和生态环境突出问题整改工作。魏山忠副部长主持会议并讲话。

(来源:水利部网站,网址:http://www.mwr.gov.cn/xw/slyw/202201/t20220126_1560641.html,日期:2022年1月26日)

宣传与广告

封面 中国水利工程优质(大禹)奖获奖工程:广东省潮州供水枢纽工程之东溪拦河闸及发电厂房

封二 中国水利工程优质(大禹)奖获奖工程:广东省潮州供水枢纽工程

封三 中国水利工程优质(大禹)奖获奖工程:中心城区广开四马路等7片合流制地区市管排水设施雨污分流改造工程 新开河调蓄池工程

封底 公益宣传《绿毯》

《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. 本刊为公开发行刊物,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. 本刊已加入 OSID(Open Science Identity) 开放科学计划,欢迎作者使用。



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. 2 2022

CONTENTS

Special Report

- 1 Make unremitting efforts for the benefit of the Yellow River to the Chinese nation forever
Party Group of the Ministry of Water Resources of the Communist Party of China

Special Plan

- 5 Water conservancy construction and management in minister's speech
——Excerpts from Li Guoying's speech at National water Conservancy work conference in 2022

Scientific Design

- 8 Study on model test of water pump device in Xifeihebei Station of Yangtze-to-Huaihe Water Diversion
QIN Zhongjian
- 14 Study on bed building balance test of integral hydraulic model in Jingou River Diversion Project
MA Jun, RAN Jianxi, FAN Yongfeng

Project Construction

- 19 Study on engineering measures to regulate control rock mass stability in steep dip thin layer small included angle sites of the high side wall of the main powerhouse on the right bank of Wudongde Hydropower Station
YAN Qilin, JIANG Yelong
- 27 Study on fast construction technology of over-high dam long fishway in high altitude canyon area
LIU Chaojian, ZHE Xiaojin, LIU Hui
- 35 Study on factors influencing construction quality evaluation of roller compacted earth-rock dam
ZHANG Youwen, CHEN Jinhui
- 42 Protection technology for to penetrate large water pipeline in urban subway at short distance YAN Menghua
- 48 Design and Application Effect of Mobile Trolley for Culvert Steel Internal Form
NAN Xiaofei, CHENG Shihua
- 55 Optimization analysis of concrete cooling water pipe layout form REN Xiping, LI Huzi, JIAO Xiong

Operation Management

- 60 Analysis of seepage monitoring data of Wangying Reservoir Dam ZHANG Feng, TANG Wei, JIANG Liping
- 66 Application of mobile APP in irrigation district management ZHANG Bo, LUO Chaolin

Hydrology and Sediment

- 71 Study on calculation method and model construction of runoff yield and concentration in hilly regions without data in Jiangsu Province HUA Chen, FEI Guosong, PAN Ru
- 79 Analysis on the characteristics of water sediment characteristics in the upper reaches of Liuhe River and variation of river channel section GONG Shiqun

公民节约用水行为规范

第一条 了解水情状况，树立节水观念。懂得水是万物之母、生命之源，知道水是战略性经济资源、控制性生态要素，明白节水即开源增效、节水即减排降损；了解当地水情水价，关注家庭用水节水。提升节水文明素养，履行节水责任义务；强化节水观念意识，争当节水模范表率；以节约用水为荣，以浪费用水为耻。

第二条 掌握节水方法，养成节水习惯。按需取用饮用水，带走未尽瓶装水；洗漱间隙关闭水龙头，合理控制水量和时间；洗衣机清洗衣物宜集中，小件少量物品宜用手洗；清洗餐具前擦去油污，不用长流水解冻食材；正确使用大小水按钮，不把垃圾扔进坐便器；洗车宜用回收水，控制水量和频次；浇灌绿植要适量，多用喷灌和滴灌。适量使用洗涤用品，减少冲淋清洗水量；家中常备盛水桶，浴前冷水要收集；暖瓶剩水不放弃，其他剩水再利用；优先选用节水型产品，关注水效标识与等级；检查家庭供用水设施，更换已淘汰用水器具。

第三条 弘扬节水美德，参与节水实践。宣传节水洁水理念，传播节水经验知识；倡导节水惜水行为，营造节水护水风尚。志愿参与节水活动，制止用水不良现象；发现水管漏水，及时报修；发现水表损坏，及时报告；发现水龙头未关紧，及时关闭；发现浪费水行为，及时劝阻。

（来源：水利部网站，网址：http://www.mwr.gov.cn/zw/tzgg/tzgs/202112/t20211220_1556150.html，日期：2021年12月23日）

为黄河永远造福中华民族而不懈奋斗

中共水利部党组

黄河是中华民族的母亲河。习近平总书记一直十分关心黄河流域生态保护和高质量发展，亲自擘画、亲自部署、亲自推动黄河流域生态保护和高质量发展重大国家战略。2019年9月18日，总书记在河南郑州主持召开黄河流域生态保护和高质量发展座谈会并发表重要讲话。2021年10月22日，总书记在山东济南主持召开深入推动黄河流域生态保护和高质量发展座谈会并发表重要讲话。总书记的重要讲话，科学、系统、深刻阐述了黄河流域生态保护和高质量发展的战略方向、重大问题和关键任务，为深入推动黄河流域生态保护和高质量发展提供了根本遵循和科学指南。

一、牢记“国之大者”，切实增强担好黄河流域保护治理重任的政治责任感

黄河发源于青藏高原，流经9个省区，全长5464公里，是我国第二大河。千百年来，奔腾不息的黄河同长江一起，哺育着中华民族，孕育了中华文明。在我国5000多年文明史上，黄河流域有3000多年是全国政治、经济、文化中心，是中华民族坚定文化自信的重要根基。

党的十八大以来，习近平总书记多次实地考察黄河，足迹遍布上中下游九省区，多次就黄河保护治理工作作出重要指示批示。总书记强调，黄河流域在我国经济社会发展和生态安全方面具有十分重要的地位；保护黄河是事关中华民族伟大复兴的千秋大计；扎实推进黄河大保护，确保黄河安澜，是治国理政的大事。

从战略全局看，习近平总书记指出，黄河流域生

态保护和高质量发展，同京津冀协同发展、长江经济带发展、粤港澳大湾区建设、长三角一体化发展一样，是重大国家战略。黄河流域是我国生态安全的重要屏障、高质量发展的重要实验区、中华文化保护传承弘扬的重要承载区，在我国社会主义现代化建设全局中具有举足轻重的战略地位。黄河流域是连接青藏高原、黄土高原、华北平原的生态廊道，拥有三江源、祁连山等多个国家公园和国家重点生态功能区。黄淮海平原、汾渭平原、河套灌区是农产品主产区，粮食和肉类产量占全国三分之一左右，流域煤炭、石油、天然气和有色金属资源丰富，煤炭储量占全国一半以上，是我国重要的能源、化工、原材料和基础工业基地。黄河流域孕育了河湟文化、河洛文化、关东文化、齐鲁文化等，分布有郑州、西安、洛阳、开封等古都，文化底蕴丰厚。要立足中华民族伟大复兴战略全局、着眼中华民族永续发展，深刻认识黄河流域在我国经济社会发展和生态安全方面具有十分重要的地位，切实增强政治责任感和历史使命感，再接再厉，接续奋斗，为深入推动黄河流域生态保护和高质量发展贡献水利力量。

从根本宗旨看，习近平总书记指出，共产党是干什么的？是为人民服务的，为中华民族谋复兴的，所以我们要不断看有哪些事要办好、哪些事必须加快步伐办好，治理好黄河就是其中的一件大事；从某种意义上讲，中华民族治理黄河的历史也是一部治国史。“黄河宁，天下平”，这是千百年来沿岸人民对黄河安澜的长时期盼。黄河流域是多民族聚居地区，解决好流域人民群众关心的防洪安全、饮水安全、生态安全等问题，对维护社会稳定、促进民族团结具有重要



意义。从“让黄河成为造福人民的幸福河”到“为黄河永远造福中华民族而不懈奋斗”，总书记在两次座谈会上发出的伟大号召，出发点和落脚点都是为人民谋幸福，充分彰显了亲民、爱民、忧民、为民的领袖情怀。要坚持以人民为中心的发展思想，深刻认识推动黄河流域生态保护和高质量发展是满足流域人民对美好生活向往的必然要求，用心用情用力解决好流域人民急难愁盼的“水问题”，持续提升流域人民群众的幸福感、获得感、安全感。

从江河战略看，习近平总书记指出，继长江经济带发展战略之后，我们提出黄河流域生态保护和高质量发展战略，国家的“江河战略”就确立起来了。黄河、长江都是中华民族的母亲河，总书记一直很重视、一直在思考保护治理母亲河的重大问题。总书记站在战略和全局的高度，深刻洞察我国国情水情，深刻分析经济社会发展大势，确立国家江河战略，不仅对黄河、长江保护治理作出了全面系统部署，也明确了新时代江河保护治理的方针、原则、方法、路径，科学回答了如何处理好人口经济与资源环境的均衡关系、山水林田湖草沙生命共同体的耦合关系、流域与区域的统筹关系、水资源与生产力布局的适配关系等一系列重大理论与实践问题。黄河是一条举世闻名的复杂难治的河流。推动黄河流域生态保护和高质量发展对于大江大河治理具有重要标杆意义。要深刻领悟总书记念兹在兹、一以贯之的江河情怀，着力提升黄河流域水旱灾害防御能力、水资源集约节约利用能力、水资源优化配置能力、水生态保护治理能力，切实做好母亲河保护治理这篇大文章。

二、聚焦“洪水风险”这个最大威胁，加快构建抵御水旱灾害防线

习近平总书记强调，要统筹发展和安全两件大事，提高风险防范和应对能力。要高度重视全球气候变化的复杂深刻影响，从安全角度积极应对，全面提高灾害防控水平，守护人民生命安全。要加快构建抵御自然灾害防线。

黄河的特点是水少沙多、水沙关系不协调，以善淤善决善徙而闻名。历史上黄河三年两决口、百年一改道，水旱灾害频发，给沿岸百姓带来深重灾难。据统计，从先秦到新中国成立前的2500多年间，黄河下游共决溢1500多次，改道26次，北达天津，南抵江淮。中华民族始终在同黄河水旱灾害作斗争，但是黄河屡治屡决的局面始终没有根本改观。新中国成立后，党和国家把治理开发黄河列入重要议事日程。在党中央坚强领导下，沿黄军民和黄河建设者开展了大规模的黄河治理保护工作，流域防洪减灾体系基本建成，龙羊峡、刘家峡、小浪底等大型水利工程、持续建设的堤防工程、河势控导工程等充分发挥作用，保障了伏秋大汛岁岁安澜。

党中央把黄河流域生态保护和高质量发展上升为重大国家战略以来，我们紧紧抓住水沙关系调节这个“牛鼻子”，完善水沙调控体系，优化实施调水调沙，黄河下游主河槽最小过流能力由4300立方米每秒提升到5000立方米每秒。黄河干流堤防全面达标，加快建设东庄等一批防洪水库。指导豫鲁两省有序实施滩区居民迁建规划，目前已基本解决近90万群众的防洪安全问题。特别是2021年，面对黄河历史罕见秋汛，科学精细调度水工程，强化预报预警预演预案措施，坚决实现了“不伤亡、不漫滩、不跑坝”的防御目标，有力保障了人民群众生命财产安全。

但也要看到，黄河水沙关系不协调的特性并未根本改变，流域防洪工程体系尚不健全，下游防洪短板突出，洪水预见期短、威胁大；游荡性河势和“地上悬河”形势严峻，洪水风险依然是黄河流域的最大威胁。必须立足防大汛、抗大灾的使命要求，迅速查漏补缺，构筑保障沿黄人民群众生命财产安全的稳固防线。

补好水旱灾害预警监测短板。强化对水文、气象等动态监测和科学分析，按照“需求牵引、应用至上、数字赋能、提升能力”要求，全面推进算据、算法、算力建设，加快构建具有预报、预警、预演、预案功能的数字孪生黄河，强化物理黄河与数字孪生黄

河之间的动态实时信息交互和深度融合，实现从被动应对向主动防控转变。

补好洪水灾害防御基础设施短板。健全“上拦下排、两岸分滞”防洪工程格局，加快完善流域防洪工程体系和水沙调控体系。抓好病险水库除险加固，增强径流调节和洪水泥沙控制能力。优化沿黄蓄滞洪区建设布局，规范蓄滞洪区各类开发建设活动，提升分滞能力。加强城市防洪排涝体系建设，严格保护城市生态空间、泄洪通道等“韧性”空间。加强山洪灾害防治和中小河流防洪体系建设，联防联控突发性暴雨洪水，保障人民群众生命财产安全。

三、针对“水资源短缺”这个最大矛盾，着力提升水资源集约节约利用水平

习近平总书记指出，要高度重视水安全风险，大力推动全社会节约用水。黄河水资源量就这么多，搞生态建设要用水，发展经济、吃饭过日子也离不开水，不能把水当作无限供给的资源。要坚决落实以水定城、以水定地、以水定人、以水定产，走好水安全有效保障、水资源高效利用、水生态明显改善的集约节约发展之路。

黄河水资源总量不到长江的7%，人均占有量仅为全国平均水平的27%，却承担了全国12%的人口、17%的耕地、50多个大中城市的供水任务。1972年至1999年，由于流域来水减少而用水增多，黄河有22年出现河干断流，给沿岸经济社会发展和生态系统带来严重影响。通过实施一系列治理措施，流域用水增长过快局面得到有效控制，入渤海水量年均增加约10%，特别是实施黄河水量统一调度后，黄河已实现连续22年不断流，为世界江河保护治理提供了“中国范例”。

党中央把黄河流域生态保护和高质量发展上升为重大国家战略以来，我们坚决落实把水资源作为最大的刚性约束要求，实施深度节水控水行动，对流域13个地表水超载地市、62个地下水超载县暂停新增取水许可。强化黄河水资源统一调度，加强取用水动

态监管，黄河流域取用水行为进一步规范。研究完善节水考核指标体系，沿黄已有7个省区将节水纳入地方政府绩效或经济社会发展综合考核评价体系，448个县级行政区达到节水型社会标准。据统计，2020年黄河流域万元GDP用水量、万元工业增加值用水量、亩均灌溉用水量分别较2019年下降3.4%、9.3%和8.8%。

但也要看到，黄河流域资源性缺水的特性并未根本改变，流域水资源开发利用率高达80%，远超一般流域40%的生态警戒线。近年来，天然径流量呈减少趋势，且水资源配置体系仍不完善，遇特枯年保障黄河不断流的压力巨大。必须立足水资源短缺这个流域最大矛盾，把“四水四定”原则贯穿到水资源管理全过程。

精打细算用好水资源。全面深入实施国家节水行动，打好深度节水控水攻坚战，以节约用水扩大发展空间。强化用水总量和强度双控，健全省、市、县三级行政区用水总量和强度管控指标体系，建立健全全过程用水监管体制机制。充分发挥用水定额的刚性约束和导向作用，大力推进农业节水增效、工业节水减排、城镇节水降损，挖掘水资源利用的全过程节水潜力。持续加强节水技术研究、转化、推广，强化节水宣传教育，推动全社会共同节水护水。

从严从细管好水资源。实施水资源刚性约束制度，严守水资源开发利用上限，强化规划和建设项目水资源论证，规范取水许可管理，坚决抑制不合理用水需求。健全水资源监测体系，实现干支流规模以上取水口动态监管。严格地下水保护，加快地下水超采治理。进一步推动将节水作为约束性指标纳入当地党政领导班子和领导干部政绩考核范围。科学推进工程规划建设，全面增强黄河流域水资源统筹调配能力和供水保障能力。

完善“两手发力”机制。创新用水权交易措施，推动建立完善用水权市场化交易平台和相关制度，引导推进区域用水权交易、取水权交易、灌溉用水户用水权交易。用好财税杠杆，落实水资源税（费）差



别化征收政策,促进水资源节约利用。发挥水价机制作用,深入推进农业水价综合改革,严格执行非居民用水超定额累进加价制度,适度提高引黄供水城市水价标准,倒逼提升节水效果。

四、把握“生态脆弱”这个最大问题,大力推动流域生态环境保护治理

习近平总书记强调,黄河是我们的母亲河,保护是前提,要有始有终、锲而不舍抓好黄河生态保护工作。要坚持正确政绩观,准确把握保护和发展关系。把大保护作为关键任务,通过打好环境问题整改、深度节水控水、生态保护修复攻坚战,明显改善流域生态面貌。

黄河一直“体弱多病”,生态本底差,资源环境承载能力弱。上游局部地区生态系统退化、水源涵养功能降低;中游水土流失严重,汾河等支流污染问题突出;下游生态流量偏低、一些地方河口湿地萎缩。

党中央把黄河流域生态保护和高质量发展上升为重大国家战略以来,我们严格全河水量统一管理和调度,黄河干流和6条重要跨省支流15个控制断面生态流量全部达标。推进水土流失综合治理,水土流失呈现面积强度“双下降”、水蚀风蚀“双减少”态势。持续做好乌梁素海等重点湖泊应急生态补水,累计向黄河三角洲补水4.58亿立方米,河口湿地面积增加1600多公顷,黄河三角洲生态系统稳定向好。充分发挥河湖长制作用,清理整治河湖乱占、乱采、乱堆、乱建“四乱”问题6.38万个,河湖面貌明显改善。

但也要看到,黄河流域生态保护的成果尚不巩固、任务仍十分艰巨,生态环境脆弱仍然是黄河流域最大问题。必须进一步增强贯彻生态优先、绿色发展理念的自觉性和坚定性,尊重规律,从维护天然生态系统完整性出发,分区分类推进水生态环境保护修复,坚决守住生态保护红线,维护黄河健康生命。

在上游,加强水源涵养。加大对扎陵湖、鄂陵湖、约古宗列曲、玛多河湖泊群等河湖保护力度,加

强黄河源区封育保护,提升水源涵养能力,筑牢“中华水塔”。加大水蚀风蚀交错、农牧交错地带生态修复力度,实施封禁治理,改善生态环境。

在中上游,加强水土保持。大力推进小流域综合治理和水土保持重点工程建设。以多沙粗沙区为重点,建设高标准淤地坝;以窟野河、无定河等粗泥沙集中来源区为重点,实施粗泥沙拦沙工程,有效减少黄河下游粗泥沙淤积;以陇东董志塬、晋西太德塬、陕北洛川塬、关中渭北台塬等塬区为重点,实施黄土高原固沟保塬项目;以黄土丘陵沟壑区、黄土高塬沟壑区为重点,建设高标准旱作梯田。打造一批生态清洁小流域。

在下游,加强生态治理。以稳定下游河势、规范黄河流路、保证滩区行洪能力为前提,建设黄河下游绿色生态走廊。加强黄河水量统一调度,保障河道基本生态流量和入海水量。推进滩区生态综合整治,因滩施策、综合治理下游滩区。加强滩区水生态空间管控,发挥滞洪沉沙功能,筑牢下游滩区生态屏障。加强河口三角洲生态保护,保障河口湿地生态流量,扩大自然湿地面积,改善入海口生态环境。

在全流域,提升生态廊道功能。依法划定河湖涉水空间范围,加强河湖水域岸线保护和管控。充分发挥河湖长制作用,深入推进清理整治河湖“四乱”问题常态化规范化。加强执法监督,加大对损害河湖健康躯体行为的处罚力度。强化全河生态调度和管理,通过实施“还水于河”等措施,全面提升干支流生态功能。保护河道自然岸线和湿地生态系统,打造沿黄生态廊道。

习近平总书记强调,“十四五”是推动黄河流域生态保护和高质量发展的关键时期,要抓好重大任务贯彻落实,力争尽快见到新气象。我们要牢固树立大局意识,坚定信心、主动作为,强化流域治理管理,强化法治效能,强化责任担当,坚定不移深入推动黄河流域生态保护和高质量发展。

(来源:《求是》杂志,2022年第4期)

编者按

2022年1月6日,水利部党组书记、部长李国英在2022年全国水利工作会议上发表重要讲话。讲话总结了2021年水利工作,分析了当前形势与任务,部署了2022年水利重点工作。本刊就讲话中有关水利建设与管理方面的相关内容作了摘编,供读者学习。

部长讲话中的“水利建设与管理”

——李国英在2022年全国水利工作会议上讲话节选

2021年工作回顾

◆扎实推进水利基础设施建设。全年完成水利建设投资7576亿元,为做好“六稳”“六保”工作、稳定宏观经济大盘作出了水利贡献。按照建设一批、开工一批、论证一批、储备一批的安排,加快水利基础设施建设,150项重大水利工程已批复67项,累计开工62项,水利基础设施投资惠民面大、带动力强的优势充分显现。深入开展南水北调后续工程高质量发展重大问题研究和重大专题论证,积极推进东线二期、中线引江补汉工程前期工作,南水北调东、中线一期工程累计完成设计单元完工验收146个,占全部155个设计单元的94.2%。玉龙喀什、引汉济渭二期等6项工程初步设计报告获批,一批重大工程实现重要节点目标,内蒙古东台子、陕西东庄实现截流,安徽江巷、四川红鱼洞、贵州黄家湾、广东高陂、新疆大石门等水库下闸蓄水,甘肃引洮供水二期、湖北鄂北水资源配置工程全线通水,荆江大堤综合整治工程、嫩江尼尔基水利枢纽、山东庄里水库、河南出山店水库等20项重大水利工程通过竣工验收。推进防汛抗旱水利提升工程建设,完成中小河流治理1.1万公里,实施重点山洪沟治理175条。巩固拓展水利扶贫成果同乡村振兴水利保障有效衔接,脱贫地区水利

项目稳步推进,提升了4263万农村人口供水保障水平,农村自来水普及率达到84%,创历史新高,完成9.9万处农村供水工程维修养护,开展512处大中型灌区续建配套与现代化改造。开展水利工程建设质量管理提升活动,强化质量终身责任,加大工程稽察核查力度,扎实开展水利行业安全生产专项整治三年行动集中攻坚。做好在建工程移民安置工作。

◆全面加强水利工程运行管护。持续抓好三峡后续工作规划实施,开展三峡水库运行安全监管行动,三峡水库连续12年实现175米满蓄目标,全年为下游补水138天、补水总量220.8亿立方米。南水北调东、中线一期工程年度调水97.28亿立方米,累计调水498.7亿立方米,东线各监测断面水质稳定在Ⅲ类及以上,中线水质稳定在Ⅱ类及以上。丹江口水库大坝加高后首次实现170米满蓄目标,小浪底、岳城水库拦蓄运用至建库以来最高水位。加快病险水库除险加固,实施大中型病险水库除险加固129座、小型病险水库除险加固4295座、病险淤地坝除险加固556座。推动水利工程运行管理标准化,加快国有水利工程管理与保护范围划定,健全工程信息档案,积极推广区域集中管护、政府购买服务、“以大带小”等专业化管护模式。

◆大力推动长江经济带发展、黄河流域生态保



护和高质量发展等国家重大战略水利重点工作。重大水利规划体系不断完善,国家水网建设规划纲要、黄河流域生态保护和高质量发展水安全保障规划、粤港澳大湾区水安全保障规划、重点流域综合规划编制取得重要进展。

◆启动数字孪生流域及数字孪生工程建设,推进北斗水利应用。

2022 年重点工作

◆强化水库安全管理。健全水库大坝安全责任制。建立覆盖所有水库的信息档案,全面、精准、动态掌握水库基本情况。严格水库运行监管,统筹病险水库除险加固与安全度汛,加快小型水库雨水情测报和大坝安全监测设施建设,逐库修订完善调度方案、应急预案。主汛期病险水库原则上一律空库运行。每一座水库都必须落实安全运行管理责任,都必须责任到机构、责任到岗、责任到人。

◆强化工程调度运用管理。精准掌握重要江河骨干河道行洪能力,精准掌握蓄滞洪区分洪运用风险隐患,精准掌握控制性水库影响区居民分布、重要基础设施、防洪高水位下居民及生产设施情况,研究完善超征地移民线防洪库容调度运用补偿机制和政策,分级负责强化工程日常管理和监督检查,及时完善水利工程调度方案,牢牢掌握汛期工程调度决策主动权。

◆实施国家水网重大工程,提升水资源优化配置能力。立足流域整体和水资源空间均衡配置,科学谋划“纲”“目”“结”工程布局,统筹存量和增量,加强互联互通,加快构建“系统完备、安全可靠,集约高效、绿色智能,循环通畅、调控有序”的国家水网,增强我国水资源统筹调配能力、供水保障能力、战略储备能力。

◆加快国家水网建设。编制完成《国家水网建设规划纲要》,加快构建国家水网主骨架和大动脉。科学有序推进南水北调东、中线后续工程高质量发展,深入开展西线工程前期论证。加快推进滇中引

水、引汉济渭、引江济淮、内蒙古引绰济辽、福建平潭及闽江口水资源配置、广东珠三角水资源配置等引调水工程,以及内蒙古东台子、福建白濂、海南天角潭、贵州凤山、西藏湘河、新疆库尔干等重点水源工程建设。加快环北部湾水资源配置、河北雄安干渠引水、澳门珠海水资源保障、湖北姚家平、河南张湾、重庆福寿岩、四川三坝等重大水利工程前期工作,完善国家骨干供水基础设施网络。

◆推进省级水网建设。各地要切实谋划和实施好本地区水网建设任务,做好与国家水网建设布局和重点任务的有效衔接,按照“确有需要、生态安全、可以持续”的原则,重点推进省内骨干水系通道和调配枢纽建设,加强国家重大水资源配置工程与区域重要水资源配置工程的互联互通。做好北京冬奥会、冬残奥会水安全保障工作。

◆打通国家水网“最后一公里”。依托国家骨干网及省级水网的调控作用,优化市县河湖水系布局。加强大中型灌区续建配套和现代化改造,完善灌溉水源工程、渠系工程和计量监测设施,推进标准化规范化管理,打造一批现代化数字灌区。推动在东北三江平原、黄淮海平原、长江中下游地区、西南地区等水土资源条件适宜地区,新建一批现代化灌区,夯实保障国家粮食安全水利基础。

◆加快建设数字孪生流域和数字孪生工程,强化预报预警预演预案功能。按照“需求牵引、应用至上、数字赋能、提升能力”要求,全面推进算据、算法、算力建设,对物理流域全要素和水利治理管理全过程进行数字化映射、智能化模拟。

◆做好顶层设计。出台《数字孪生流域建设技术大纲》《数字孪生水利工程建设技术导则》《水利业务“四预”功能基本技术要求》和成果共建共享制度办法,以流域为单元,编制七大江河数字孪生流域建设方案。三峡、南水北调、小浪底、丹江口、岳城、尼尔基、万家寨、大藤峡等工程管理机构要编制数字孪生工程建设方案。鼓励和支持有条件的流域管

理机构、工程管理部门、地方水利部门先行实施建设。

◆构建数字化场景。优化完善监测站网布局，建立与防汛调度和国家水网相匹配的水文站网，重点提高洪水来源区、水资源来源区、行政管理边界、重要防御对象、重要用水对象等重要节点覆盖率，加大天、空、地遥感技术应用力度，构建天、空、地一体化水利感知网。在完善全国水利一张图的基础上，抓紧细化流域水利专题图、定制水利工程实体场景，构建全国统一的数据底板。建立健全物理流域及水利工程等基础数据更新机制，实时更新重要站点监测信息、发生洪水的河道遥感信息、参与调度运用的工程安全监控信息，及时更新流域下垫面、重要水文站大断面、重点河段河道地形、模型参数等信息，及时定期更新影响区经济社会信息。

◆开展智慧化模拟。深入研究流域自然规律，融合流域多源信息，升级改造流域产汇流、土壤侵蚀、水沙输移、水资源调配、工程调度等水利专业模型，研发新一代具有自主知识产权的通用性水利专业模型，实现变化流场下数字孪生流域多维度、多时空尺度的高保真模拟。聚焦水利工程体系科学精细调度，推进预报调度一体化智能化、实体工程与数字孪生水利工程同步交互调度。构建水利业务遥感和视频人工智能识别模型，不断提高河湖“四乱”问题、水利工程运行和安全监测、应急突发水事件等自动识别准确率。

◆构建水利智能业务应用体系。坚持大系统设计、分系统建设、模块化链接，全面构建“2+N”应用体系。加快推进水工程防灾联合调度等流域防洪应用系统建设，以流域为单元，构建下垫面动态变化的数字流场，结合防洪工程数字孪生成果，升级流域防洪预报、预警功能，增强预演功能，支撑科学制定预案。建设水资源管理调配应用系统，整合水资源总量、水权分配、取用水量、省界断面监测以及经济社会等数据，完善数字孪生平台中红线预警等模型和功

能，支撑水资源监管、调配决策预演等业务。结合各级数字孪生平台建设，同步抓好其他各业务应用系统建设。

◆健全工程建设管理和运行管护机制。完善水利建设法规技术标准，开展水利工程建设质量提升行动，落实水利工程质量终身责任制，改进政府质量工作考核制度，深化水利建设市场信用体系建设，规范建设市场秩序，确保水利建设质量安全。严格落实水利工程注册登记和安全评价制度，强化工程检查监测和维修养护，突出病险工程安全管理，推进水利工程标准化管理和划界工作。完善水利工程安全保障制度，建立风险查找、研判、预警、防范、处置、责任等全链条管控机制。建立常态化水利设施运行管护机制，落实管护主体、经费、人员和措施，推广市场化、专业化管护模式。完善农村供水保障监管机制，探索建立小型水库“巡库员”机制。着眼“大时空、大系统、大担当、大安全”，强化三峡工程自身安全以及防洪、供水、生态等功能安全管理。强化南水北调工程沿线水资源保护，强化安全调度管理，加大东线一期北延应急供水工程调水力度，更好地满足华北部分地区生活、生产、生态用水需求。做好水库移民安置和后期扶持、对口支援工作。

◆深化水利重点领域改革。落实适度超前开展基础设施投资要求，健全多元化水利投融资机制，积极争取扩大中央水利投资规模，用好水利中长期贷款等金融信贷资金，推进水利领域不动产投资信托基金（REITs）试点，支持社会资本参与水利工程建设运营。深化农业水价综合改革。推动修订水利工程供水价格管理、定价成本监审办法，完善动态调整机制。研究建立水网区域综合定价机制。推动全面推开水资源税改革试点。研究推动建立水流生态保护补偿机制。

（来源：水利部网站，网址：http://www.mwr.gov.cn/xw/slyw/202201/t20220107_1558777.html，日期：2022年1月7日，节选）



引江济淮西淝河北站水泵装置模型 试验研究

秦钟建

(中水淮河规划设计研究有限公司,安徽 合肥 230601)

【摘要】 为提高引江济淮工程西淝河北站立式轴流泵装置的水动力特性,保证泵站安全、稳定和高效运行,在高精度水力机械试验台上对泵装置模型进行能量、空化、飞逸及压力脉动等特性试验,并获得综合性能,为泵站设计和运行提供可靠数据依据。研究结果对其他类似泵站也具有一定的参考价值。

【关键词】 引江济淮工程;立式轴流泵装置;模型试验;能量性能;空化性能;压力脉动

中图分类号: TV675

文献标志码: A

文章编号: 2097-0528(2022)02-008-06

Study on model test of water pump device in Xifeihebei Station of Yangtze-to-Huaihe Water Diversion

QIN Zhongjian

(Zhongshui Huaihe Planning and Design Research Co., Ltd., Hefei 230601, China)

Abstract: The pump device model undergoes characteristic test in the aspects of energy, cavitation, runaway, pressure pulse, etc. on the high precision hydraulic machinery test bench in order to improve the hydrodynamic characteristic of the vertical axial-flow pump device in Xifeihebei Station of Yangtze-to-Huaihe Water Diversion, and ensure the safe, stable and efficient operation of the pump station. Comprehensive performance is obtained. Reliable data basis is provided for pump station design and operation. The paper also has certain reference value for other similar pump stations.

Keywords: Yangtze River-Huai River Diversion Project; vertical axial flow pump device; model test; energy performance; cavitation performance; pressure pulse

引江济淮工程地跨皖豫两省,涉及江淮两大水系,是172项节水供水重大水利工程之一。引江济淮工程(安徽段)自南向北划分为引江济巢段、江淮沟通段及江水北送段^[1-2]。江水北送段中的安徽段起点为淮河北岸西淝河站,终点为豫皖交界的练沟河倒虹吸出口,线路总长223.8km。

江水北送(安徽)段多座泵站选用立式轴流泵装置,为了确保泵站建成后水泵高效、稳定和安全运行,采用水泵装置模型试验验证水泵选型与流道的优化设计是否满足工程建设要求是十分必要的^[3-6]。模型装置试验获得水泵装置不同叶片角度下的能量、空化、飞逸和压力脉动等水动力特性,为设计和运行提供可靠数据依

收稿日期: 2021-07-09

作者简介: 秦钟建(1979—),男,本科,高级工程师,从事水力机械设计与研究。

据,对其他类似泵站也具有一定的参考作用^[7-9]。

1 工程概况

西淝河北站为引江济淮工程淮河以北段的西淝河线第二级泵站,泵站设计流量 $80\text{m}^3/\text{s}$,设 4 台立式轴流泵(其中 1 台备用),水泵叶轮直径 2850mm ,转速 $136.4\text{r}/\text{min}$,单机配套功率为 2500kW 。泵站设计扬程 3.43m ,最高扬程 5.83m ,最小扬程 1.83m 。

工程实施阶段,为了确保西淝河北站安全高效运行,采用计算流体力学进行泵装置进出水流道优化研究工作^[10-11],确定进出水流道形线见图 1。

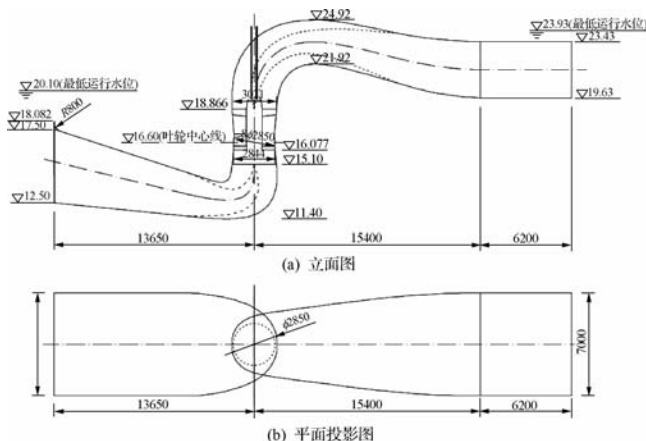


图 1 西淝河北站泵装置流道单线图(单位:mm)

2 装置模型试验

2.1 试验概况

装置模型试验在江苏大学水力模型高精度试验台上进行,该试验台效率综合允许不确定度优于 $\pm 0.32\%$ 。水泵装置模型试验转速按原型与模型的 nD 值相等确定,模型泵采用 ZM55 轴流泵水力模型,叶轮直径 300mm ,根据原型泵参数计算确定模型泵装置试验转速 $1295.8\text{r}/\text{min}$,模型比 9.5。

模型泵装置由进水流道、水泵叶轮、导叶和出水流道等装配而成,全部过流部件几何相似^[12]。为便于观察试验时模型装置内部水流和空蚀现象,叶轮室、进出水流道均设有透明观察窗,现场试验见图 2。



图 2 西淝河北站模型装置试验现场

2.2 测量方法及精度

2.2.1 流量测量

流量采用电磁流量计测量。流量计水平布置,其前后直管段长度满足安装大于 5 倍管路直径要求,测量不确定度优于 $\pm 0.2\%$ 。

2.2.2 扬程测量

采用智能差压变送器测量,测量范围为 $0 \sim 25\text{m}$ 水柱。装置模型试验扬程测点位于进出口水箱上,测量不确定度优于 $\pm 0.1\%$ 。

2.2.3 进水箱真空度测量

以模型泵转轮中心线为基准,测点位于进口水箱上,采用智能绝对压力变送器测量,测量不确定度优于 $\pm 0.1\%$ 。

2.2.4 轴功率计算

转矩和转速采用智能型转矩、转速传感器测量,传感器在使用时只承受扭矩,不承受其他外力作用,测量不确定度优于 $\pm 0.1\%$ 。轴功率按式(1)计算。

$$P = \frac{2\pi nM}{60} \times \frac{1}{1000} \quad (1)$$

式中: P 为轴功率, kW ; n 为模型泵试验转速, r/min ; M 为模型泵轴传递的去除机械损失的净转矩, $\text{N} \cdot \text{m}$ 。

2.3 试验内容及方法

2.3.1 能量试验

在能量试验采集数据前,模型泵在额定工况点运转 30min 以上排除循环系统中游离气体,并检查水泵轴承、密封、噪声和振动状况。能量性能试验从大流量点开始并在无空化条件下进行,试验点数不少于 15 个。

水泵装置模型水力效率按式(2)计算。

$$\eta = \frac{30\rho gQH}{\pi nM} \quad (2)$$

式中: η 为水泵装置效率,%; ρ 为试验时水体密度, kg/m^3 ; g 为试验室当地重力加速度, m/s^2 ; Q 为模型泵装置流量, m^3/s ; H 为模型泵装置扬程, m 。

2.3.2 空化试验

空化试验的第一个试验点在无空化情况下进行,完成第一个点测试后抽真空逐渐加大真空度,试验过程中保持试验转速恒定,辅助泵转速或截止阀开度恒定,逐渐降低试验系统的空化余量,取水泵效率下降1%时的空化余量作为临界空化余量。空化试验以模型泵转轮中心线高程为基准,按式(3)计算水泵装置空化余量值。

$$\text{NPSH} = \frac{P_s}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} - \frac{P_v}{\rho g} \quad (3)$$

式中: $\frac{P_s}{\rho g}$ 为进水测压断面相对于叶轮中心线压力水头, m ; $\frac{v^2}{2g}$ 为进水测压断面的液体平均速度头, m ; $\frac{P_v}{\rho g}$ 为抽送液体汽化压力水头, m 。

2.3.3 飞逸试验

飞逸特性试验是测定模型泵在反转(水轮机旋转方向)且轴扭矩为零时的转速。试验时采取辅助泵反向供水使电动机反转,测量在轴扭矩为0时飞逸转速值,并根据式(4)计算出单位飞逸转速。

$$N'_{1,R} = \frac{n_R D}{\sqrt{H}} \quad (4)$$

式中: $N'_{1,R}$ 为单位飞逸转速, r/min ; n_R 为试验的飞逸转速, r/min ; D 为模型泵叶轮名义直径, m ; H 为模型试验水头, m 。

原型泵飞逸转速由式(5)计算。

$$N_{R,P} = N'_{1,R} \frac{\sqrt{H_P}}{D_P} \quad (5)$$

式中: $N_{R,P}$ 为原型泵飞逸转速, r/min ; H_P 为原型泵工作点扬程, m ; D_P 为原型泵的叶轮名义直径, m 。

2.3.4 压力脉动特性试验

压力脉动特性试验采用高频压力传感器对叶轮进

口、叶轮出口和导叶出口部位的压力脉动情况进行测量。测量采样频率1000Hz,记录时间15s,对每个叶片安放角测定5个不同工况点。

3 试验结果

3.1 能量性能

模型试验进行了水泵叶片7个不同角度(+6°、+4°、+2°、0°、-2°、-4°、-6°)下的水泵装置能量特性试验。试验中通过观察窗观察,进出水流道及叶片处流态良好,未发生旋涡与涡带等有害现象。模型泵装置的流量-扬程、流量-效率和流量-轴功率等综合曲线见图3,各叶片角度下最优效率工况点参数见表1,原型泵综合特性曲线见图4。

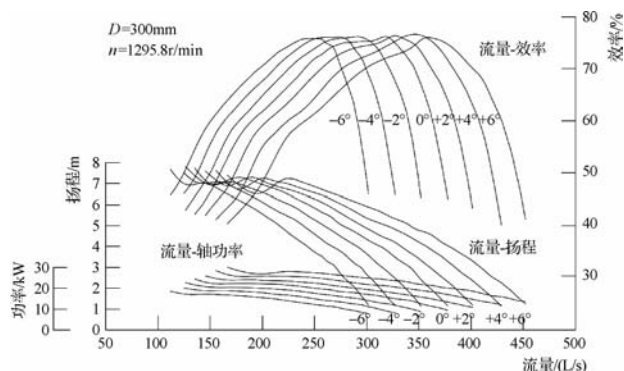


图3 泵装置模型能量试验综合特性曲线

表1 泵装置模型的最优工况点性能参数数据

叶片安放角/ (°)	最优工况点参数			
	流量/(L/s)	扬程/m	轴功率/kW	效率/%
-6	243.83	3.979	12.56	75.80
-4	270.38	3.907	13.63	76.05
-2	293.60	3.908	14.78	76.14
0	319.15	3.816	15.69	76.16
+2	327.16	4.203	17.67	76.33
+4	349.11	4.236	18.95	76.56
+6	357.05	4.668	21.51	76.01

试验结果表明:水泵装置模型最高效率76.56%,此时叶片角度为+4°、扬程4.236m、流量349.11L/s、轴功率18.95kW;当叶片角度-2°时,扬程3.43m、流量305.14L/s,效率75.0%,该参数满足水泵设计流量

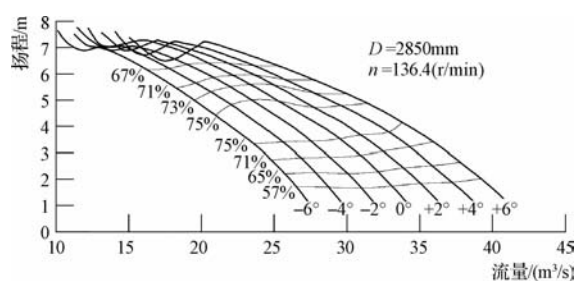


图4 原型泵装置综合特性曲线

26.7m³/s的要求,选-2°为水泵设计工况运行角度是合适的。

3.2 空化性能

模型试验进行了水泵叶片7个不同角度(+6°、+4°、+2°、0°、-2°、-4°、-6°)下的水泵装置空化性能试验。试验时每个叶片角度测试了5个工况点,限于篇幅,只列出叶片角+6°时的空化试验数据,见表2。分别以流量和扬程为横坐标轴表示了不同叶片角度模型泵装置的临界空化余量变化曲线,见图5和图6。

表2 水泵模型装置空化特性试验数据(+6°)

序 号	1	2	3	4	5
流量/(L/s)	289.71	346.53	391.59	415.76	441.18
扬程/m	6.12	4.87	3.62	2.74	1.72
临界空化余量值/m	8.85	7.55	7.41	7.83	8.63

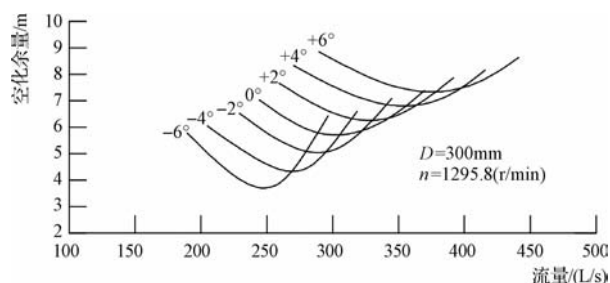


图5 模型泵装置临界空化余量变化曲线(一)

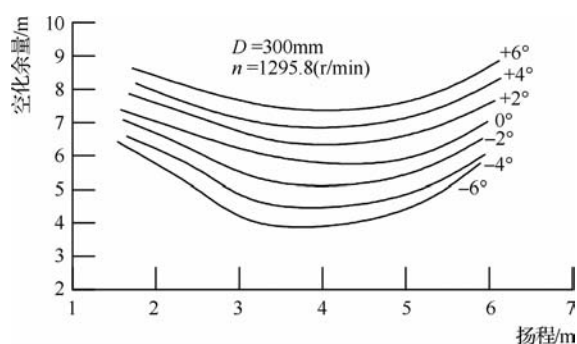


图6 模型泵装置临界空化余量变化曲线(二)

试验结果表明:同一叶片角度下,临界空化余量值呈随流量或扬程的增加先减小再增大的趋势;在相同扬程工况下,临界空化值随着叶片角度的增大而增大。装置模型的临界空化余量均小于8.85m;在水泵叶片安放角为-2°时,扬程为1.83~5.83m,水泵装置的最大空化余量值小于7.0m,表明水泵装置空化性能良好,满足设计要求。

3.3 飞逸性能

模型试验进行了水泵叶片7个不同角度(+6°、+4°、+2°、0°、-2°、-4°、-6°)下的水泵装置飞逸转速试验,限于篇幅,只列出叶片角度-6°飞逸转速试验数据,见表3,其余各叶片角度单位飞逸转速见表4。

表3 飞逸转速试验数据(-6°)

序 号	试验水头/m	飞逸转速/(r/min)	单位飞逸转速/(r/min)
1	0.807	855	285.53
2	0.918	911	285.25
3	1.082	989	285.24
4	1.179	1034	285.68
5	1.284	1081	286.20
6	1.443	1148	286.70
平 均 值			285.77

表4 各叶片安放角度下单位飞逸转速值

叶片角度/(°)	-6	-4	-2	0	2	4	6
单位飞逸转速/(r/min)	285.77	284.1	279.92	277.07	274.62	271.55	265.29

试验结果表明:水泵单位飞逸转速随着叶片角度的增加而减小;同一叶片的飞逸转速随着装置净扬程

增大而增大。各叶片安放角的最大单位飞逸转速为叶片角度为-6°时的285.77r/min,根据式(5)计算最大



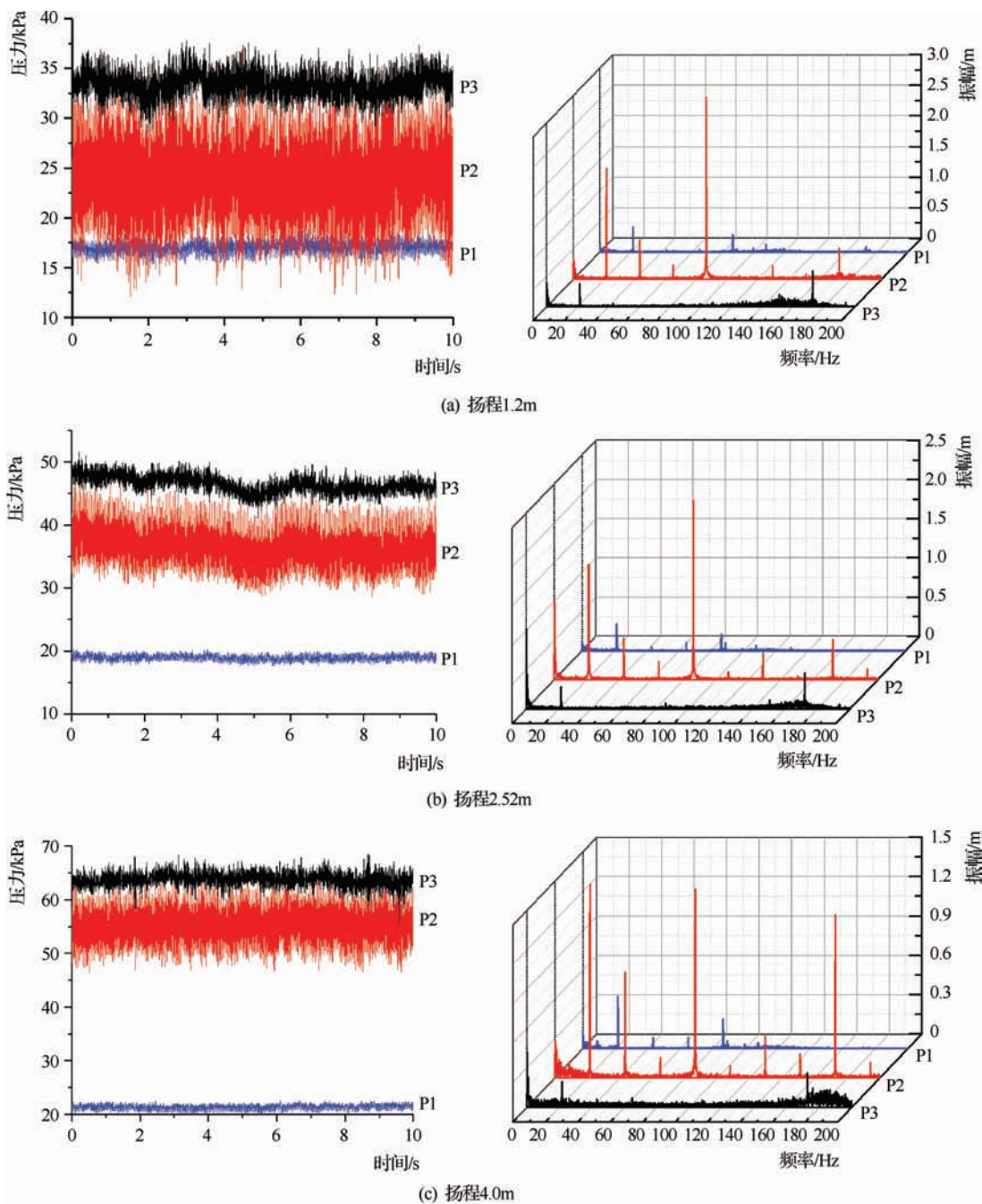
扬程 5.83m 时原型水泵的最大飞逸转速为 242.11 r/min,是水泵额定转速的 1.77 倍,可作为水泵、电动机转动部分超速安全运行的设计依据^[13]。

3.4 压力脉动

模型试验进行了水泵叶片 7 个不同角度 (+6°、+4°、+2°、0°、-2°、-4°、-6°) 下的水泵装置压力脉动试验测试,限于篇幅,只给出 -2° 叶片安放角在各特

征净扬程工况下的时域和频域压力脉动曲线,见图 7。

根据试验结果,采用 97% 置信度双幅值进行统计^[14],在叶片角 0° 以下的运行范围内:在叶轮进口的最大脉动幅值小于 0.26m;在叶轮出口导叶进口最大脉动幅值小于 1.25m,主要是由于旋转叶轮与固定导叶的动静干涉所致;在导叶出口的最大脉动幅值也小于 0.85m。



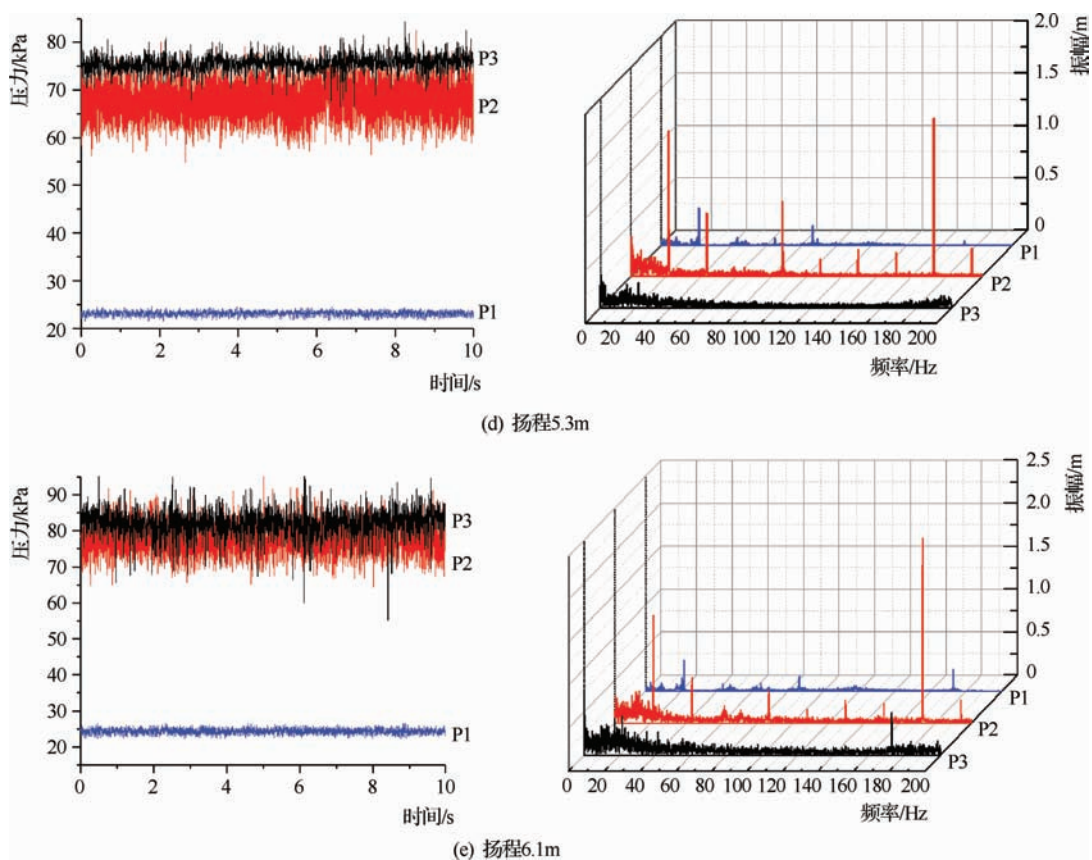


图7 -2° 叶片安放角不同净扬程压力脉动时域和频域图

在最优工况点的压力脉动幅值相对较小,在低扬程和高扬程工况压力脉动幅值相对较大,在大角度工况下总体压力脉动幅值较小角度工况要大,振动的主频主要为水泵的叶频及其倍频,在试验过程中该泵的内部流动引起的压力脉动对泵性能的影响较小,未引起明显的振动和噪声。

4 结 语

a. 泵装置 75% 的高效率范围区间较宽,可降低运行能耗并有利于发挥泵站的经济效益;泵装置空化特性良好,水泵安装高程 16.60m 具有足够的安全裕量,可保证机组在无空化条件下稳定运行;水泵运行时内部流动引起的压力脉动对泵性能的影响较小,不影响机组的安全稳定运行。

b. 原型泵装置最大飞逸转速为 242.11r/min,是水泵额定转速的 1.77 倍,水泵和电动机转动部分按该超速要求设计,可保证机组安全运行。

c. 西淝河北站选用 ZM55 水力模型,并据此确定原型水泵叶轮直径 2.85m 和额定转速 136.4r/min 等机组参数,满足西淝河北站泵站的设计要求,试验成果可为选用 ZM55 水力模型的泵站提供借鉴和参考。◆

参考文献

- [1] 雷晓辉,张利娜,纪毅,等. 引江济淮工程年水量调度模型研究[J]. 人民长江,2021,52(5):1-7.
- [2] 黄广灵,胡培,刘树锋,等. 供水水库水量水质优化调度模式研究[J]. 广东水利水电,2019(12):34-39.
- [3] 杨林,许哲,郑源. 大型低扬程泵站的停机过渡过程研究[J]. 水利建设与管理,2020,40(2):73-79.
- [4] 刘超,张松,谢传流,等. 高效平面 S 形抽排泵装置优化设计与模型试验[J]. 农业机械学报,2017,48(12):132-140.
- [5] 宋伟新,徐国荣,赵凯. 机动式混流泵成套设备的优化改造[J]. 水利建设与管理,2019,39(4):75-79.
- [6] 杨帆,刘超,汤方平,等. 斜轴抽排泵装置水动力数值计算与模型试验[J]. 机械工程学报,2012,48(18):152-159.

(下转第 41 页)



金沟河引水枢纽工程整体水工模型造床平衡试验研究

马 军¹ 冉建西² 范勇锋²

(1. 新疆水利水电规划设计管理局, 新疆 乌鲁木齐 830000;

2. 新疆水利水电勘测设计研究院, 新疆 乌鲁木齐 830000)

【摘 要】 对新建金沟河引水枢纽工程进行水工模型造床平衡试验,通过对工程过流能力、闸前泥沙淤积平衡状态和运动规律进行模拟,优化了工程冲沙布置。试验研究证明工程总体布置基本合理,达到了引水闸进口的“门前清”,可避免河道大量粗颗粒泥沙进入引水系统带来的磨蚀和淤积问题,保持引水枢纽长期有效。根据试验结果提出了合理的枢纽调度方案。

【关键词】 水工模型试验;淤积;冲沙;加沙试验

中图分类号: TV149

文献标志码: A

文章编号: 2097-0528(2022)02-014-05

Study on bed building balance test of integral hydraulic model in Jingou River Diversion Project

MA Jun¹, RAN Jianxi², FAN Yongfeng²

(1. Xinjiang Water Resources and Hydropower Planning and Design Administration, Urumqi 830000, China;

2. Xinjiang Water Resources and Hydropower Survey, Design and Research Institute, Urumqi 830000, China)

Abstract: The hydraulic model bed building balance test is carried out for the newly-built Jingou River Diversion Project. The project flow capacity, sediment deposition balance state in front of the gate and movement law are simulated. The sand flushing layout of the project is optimized. The test results show that the overall layout of the project is basically reasonable, thereby achieving the “gate clearance” at the entrance of the diversion gate, avoiding the abrasion and siltation problems caused by a large amount of coarse silt entering the diversion system, and keeping the diversion hub effective for a long time. A reasonable hub scheduling scheme is proposed according to experimental results.

Keywords: hydraulic model test; siltation; sand flushing; sand addition test

新疆流域内大部分河流具有洪水过程集中、泥沙含量大等突出特点,1949—2000年,新疆大量引进苏联工程建设经验,“费尔干”式引水枢纽在全疆广泛应用,无论推移质为主的北疆河道,还是悬移质多见的南

疆,都建设了大量“费尔干”式引水枢纽,如乌鲁木齐市三屯河西干渠渠首、呼图壁河呼图壁渠首、叶尔羌河喀群枢纽、巴音河渠首等。原金沟河引水枢纽也采用了此种模式。“费尔干”式引水枢纽的引进对处理新

收稿日期: 2021-04-07

作者简介: 马军(1977—),男,本科,高级工程师,主要从事水工设计及审查工作。

疆多泥沙河流的引水具有积极意义,但一种引水形式不可能解决所有河道的全部问题,每种引水枢纽要取得好的效果,都有其特定的前置条件。“费尔干”枢纽首先应有天然或人工修建的有一定曲率的河流弯道,以便形成横向环流,且河道主要为下切河道,坡陡流急,有排沙条件处,长期有一定冲沙流量。

金沟河主要以冰川积雪的消融补给为主,历年最大洪峰流量多发生在7—8月,其余时段河道流量较小,原金沟河引水枢纽受到两岸山体影响,上游弯道半径较大,河道较宽,且在极高引水比情况下,原渠首泥沙淤积非常严重,本次新建引水枢纽根据洪水、引水比特性以及现场地形条件,最终选择直线型引水渠首,抬高进水闸底板高程,进水闸前设置冲沙廊道,小流量引水和中流量冲沙,保证进水闸的门前清,大流量将上游淤积泥沙全部冲至下游的设计方案,围绕新布置方案进行本次水工模型试验,验证工程实际效果,并提出优化思路。

1 工程概况

金沟河引水枢纽工程位于沙湾县城西南方向金沟河中游河段出山口处,属Ⅲ等中型工程。设计洪水标准 $P = 5\%$ ($Q = 363.4 \text{ m}^3/\text{s}$),校核洪水标准 $P = 2\%$ ($Q = 559.0 \text{ m}^3/\text{s}$)。

工程在原址新建,新建方案采用正面泄洪冲沙、侧面引水的布置形式,工程由进水闸、冲沙闸、泄洪闸、沉沙冲沙槽、自溃坝及上下游导流堤等建筑物组成。

进水闸布置在左岸台地,设三孔,单孔净宽 3.5m,闸底板高程 812.75m,与冲沙闸轴线夹角为 30° ,右侧与冲沙闸相接。冲沙闸布置在河床的左侧,冲沙闸设两孔,单孔 3.5m,闸底板高程为 810.05m,冲沙闸前设有长 70m、宽 8.6m 的冲沙沉沙槽,沉沙槽上游始端右侧布置有三孔泄洪闸,单孔净宽 6.5m,闸底板高程为 810.55m,泄洪闸右侧与上游导流堤相连,泄洪闸右侧导洪堤上游 60m 处设置自溃坝,坝长 60m。工程具体平面布置见图 1,对此布置进行造床平衡试验,以此进一步验证设计的合理性。

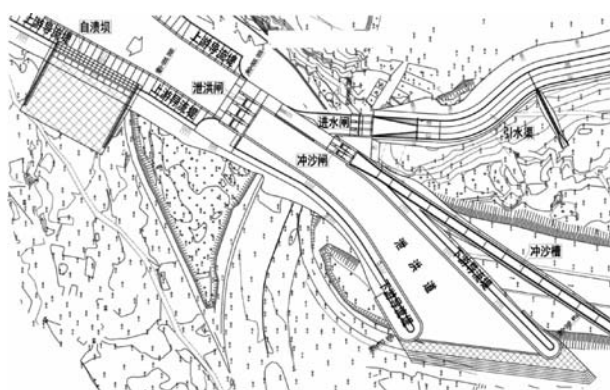


图 1 工程平面布置图

2 模型方案

2.1 模型比尺

根据模型试验的前提条件和设计目标,本试验使用正态模型,按弗劳德相似准则设计,模型比尺 1:40,模型全貌见图 2,水闸编号从左至右依次进行。



图 2 模型全貌

2.2 造床流量、含沙量、推悬比的选取

经对工程水文、洪水以及泥沙资料的分析研究,本水工模型试验所需要的造床流量选用 90% 频率的洪水流量,即 $Q_{造床} = 66.4 \text{ m}^3/\text{s}$;多年平均悬移质含沙量为 $6.31 \text{ kg}/\text{m}^3$;推悬比采用设计值 15%。

3 水工模型试验成果分析

3.1 造床平衡试验研究成果

新建的引水枢纽将泄洪闸闸底板高程相对原河床加高 1.0m,改变了河道的天然纵坡和水流挟沙能力,



新的输沙不平衡将引起河床的变形。为分析工程运行若干年后新的造床平衡形态,以及河床达到平衡后枢纽的运行情况,进行造床平衡试验。

模型沙模拟原始地形,施放 $66.4\text{m}^3/\text{s}$ 造床流量的同时按 $62.85\text{kg}/\text{s}$ 的推移质输沙率加模型沙,并根据清水试验得出的闸门运行方式控制冲沙闸闸门,保持进水闸引 $45\text{m}^3/\text{s}$ 的流量,若上游冲沙槽内的泥沙淤积到与进水闸前挡沙坎同高时,打开冲沙闸间歇冲沙,当泥沙低于坎高一半时调节冲沙闸开启高度,保持进水闸引 $45\text{m}^3/\text{s}$ 的流量,如此重复试验,直至达到造床平衡。经过近4个月的造床试验,枢纽基本达到了造床平衡。

3.2 造床平衡后常遇洪水过程线试验研究成果

为了解新建枢纽造床平衡后河道遇常遇洪水时渠首的运行情况,根据2013年7月19—26日的常遇洪

水资料,进行了常遇洪水过程的模拟试验。常遇洪水过程线见图3。

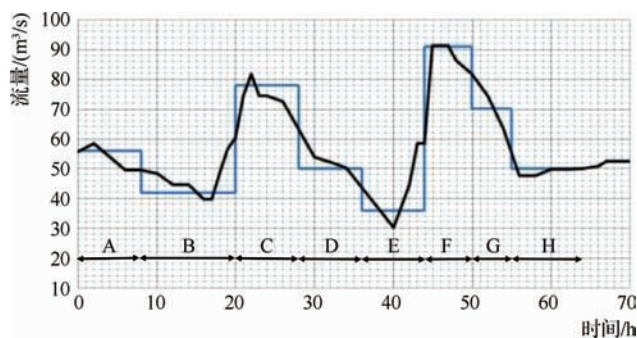


图3 常遇洪水过程线

常遇洪水过程试验中考虑模型对洪水完全拟合的难度,以及试验目的是为工程设计和运营中闸门启闭的可操作性提供服务,将相关流量数据进行整合,将其分为8个典型段,如A段典型流量为 $56\text{m}^3/\text{s}$,时长8h,各段流量及时长对应关系见表1。

表1 常遇洪水典型流量与时间对应关系

编 号	A 段	B 段	C 段	D 段	E 段	F 段	G 段	H 段
典型流量/(m^3/s)	56	42	78	50	36	91	70	50
时长/h	8	12	8	8	8	6	5	9
时段/h	0~8	8~20	20~28	28~36	36~44	44~50	50~55	55~64

常遇洪水过程试验情况如下:

a. A段($Q=56\text{m}^3/\text{s}$,8h)试验条件下的模拟数据。泄洪及冲沙闸除1号冲沙闸门打开0.4m外,其余闸门全部关闭,泄流 $11\text{m}^3/\text{s}$,进水闸门完全打开,确保进水的闸门引水流量为 $45\text{m}^3/\text{s}$ 。进水闸门的前水位815.19m。模型上游的河道主流向方位偏向于左侧岸,泄洪闸门的前69m范围里少许壅水,故闸门前泥沙处于几乎没有移动的状态,泄洪闸前水位为815.27m,闸前泥沙基本不动,模型上游段的冲沙槽范围内的水流较为平缓,携带泥沙较少,试验中进水闸无泥沙进入。

b. B段($Q=42\text{m}^3/\text{s}$,12h)试验条件下的模拟数据。进水闸全开,其余闸门全关,全部用以引水。模型的上游河道主流方向依然是偏向左侧岸,泥沙的流动较为缓慢,闸口前的水流较平缓稳定,试验的进水闸口没有泥沙进入。

c. C段($Q=78\text{m}^3/\text{s}$,8h)试验条件下的模拟数据。

进水闸全开引进 $45\text{m}^3/\text{s}$,1号泄洪闸和1号冲沙闸分别开启0.16m、0.96m,其余全关,泄流 $25\text{m}^3/\text{s}$ 。上游主流河道偏左侧岸,冲沙槽中进入部分泥沙,经过76min泥沙已冲运到进水闸挡沙坎前,淤积高度与进水闸底板高度一致,部分泥沙跃至挡沙坎之上,为阻止泥沙进一步被冲运到进水闸,打开冲沙闸,进行间歇性冲沙,大量泥沙被携带至闸后,经过48min便将1号冲沙闸门前约1/3区域内的泥沙冲带走,因间歇性冲沙时上游水位很低,故冲沙槽内泥沙持续带人,经60min后,冲沙槽中泥沙已不超过进水闸前挡沙坎的高度,再调整冲沙闸门开度,确保进水闸引水 $45\text{m}^3/\text{s}$,上游水流平稳,进水闸无泥沙进入。

d. D段($Q=50\text{m}^3/\text{s}$,8h)试验条件下的模拟数据。泄洪闸全关、冲沙闸1号开启0.2m、2号完全关闭,泄流 $5\text{m}^3/\text{s}$,进水闸全开,确保进水闸引水流量为 $45\text{m}^3/\text{s}$ 。泄洪闸前100m范围内略有壅水,闸前泥沙不动,进水

闸无泥沙进入。

e. E段($Q=36\text{m}^3/\text{s}$, 8h)试验条件下的模拟数据。泄洪以及冲沙闸门全部完全关闭, 进水闸门完全打开, 引水 $36\text{m}^3/\text{s}$ 。河道上下游同 A 段试验情况。

f. F段($Q=91\text{m}^3/\text{s}$, 6h)试验条件下的模拟数据。大量泥沙进入冲沙槽, 很快到达进水闸挡沙坎前, 打开冲沙闸间歇冲沙, 经 60min 后, 挡沙坎前泥沙低于挡沙坎的高度。2 号、3 号完全关闭, 1 号泄洪闸开启 0.28m, 泄洪 $21\text{m}^3/\text{s}$; 1 号冲沙闸开启 0.96m, 2 号全关, 泄流 $25\text{m}^3/\text{s}$, 进水闸全开, 引水 $45\text{m}^3/\text{s}$ 。试验发现依然有泥沙冲运到了冲沙槽, 进水闸不进沙, 泄洪闸前水位 815.47m。

g. G段($Q=70\text{m}^3/\text{s}$, 5h)试验条件下的模拟数据。

由于之前的洪水已把泥沙带入进水闸挡沙坎前, 因此打开冲沙闸间歇冲沙, 经 60min 后, 挡沙坎前泥沙低于挡沙坎的高度。泄洪及冲沙闸仅 1 号冲沙闸开启 0.96m, 泄流 $25\text{m}^3/\text{s}$, 进水闸引水 $45\text{m}^3/\text{s}$ 。部分泥沙冲运到了冲沙槽, 历时 144min, 泥沙又再度被冲运到进水闸挡沙坎前, 打开冲沙闸间歇性冲沙, 进水闸不进沙, 历时 60min, 泥沙低于挡沙坎高度。调节闸门进水闸引水 $45\text{m}^3/\text{s}$ 。泄洪闸前水位 815.35m。

h. H段($Q=50\text{m}^3/\text{s}$, 9h)试验条件下的模拟数据。进水闸引水 $45\text{m}^3/\text{s}$ 。1 号冲沙闸开启 0.2m, 其余泄洪冲沙闸全关, 泄流 $5\text{m}^3/\text{s}$ 。上游河道由原左岸摆向中间, 闸前又偏向左岸。上游水流平稳, 进水闸不进沙。

常遇洪水过程中各控制点水位见表 2。

表 2 常遇洪水各控制点水位

单位:m

位 置	B 段水位 ($42\text{m}^3/\text{s}$)	C 段水位 ($78\text{m}^3/\text{s}$)	D 段水位 ($50\text{m}^3/\text{s}$)	E 段水位 ($36\text{m}^3/\text{s}$)	F 段水位 ($91\text{m}^3/\text{s}$)	G 段水位 ($70\text{m}^3/\text{s}$)	H 段水位 ($50\text{m}^3/\text{s}$)	备 注
上游点 1	816.38	816.90	816.65	816.46	817.02	816.74	816.58	上游 432.8m 处
上游点 2	815.06	815.18	815.21	814.98	815.34	815.38	815.26	上游 20m 处
泄 1 号前	814.95	815.15	815.15	814.87	815.43	815.35	815.15	1 号泄洪闸前
泄 2 号前	814.99	815.19	815.19	814.87	815.47	815.35	815.19	2 号泄洪闸前
泄 3 号前	914.99	815.23	815.23	814.87	815.43	815.35	815.19	3 号泄洪闸前
冲槽口	814.99	815.15	815.19	814.75	815.31	815.27	815.19	

注 试验中根据 A 段反馈情况, 对控制点水位进行了适当调整, 本表中选取 B~H 段完整数据进行统计分析。

从试验情况看, 当上游来水小于造床流量 $66.4\text{m}^3/\text{s}$ 时, 上游河道流速小, 泄洪闸前水位略有壅高, 带入上游冲沙槽的泥沙少, 当上游来水大于造床流量时, 河道挟沙能力逐渐增大, 特别是当流量大于 $70\text{m}^3/\text{s}$ 时, 泄洪闸局开, 闸前流速增大, 泄洪闸由于局开, 排沙很少, 大量泥沙带入冲沙槽, 当泥沙到达进水闸挡沙坎前, 且淤积高度与挡沙坎同高时需打开冲沙闸, 间歇冲沙。整个洪水过程模拟 64h, 上游共加沙 1945t, 排沙量 820.67t, 排沙率 42%, 大部分泥沙淤积在上游河道, 进水闸不进沙。

3.3 造床平衡后典型流量试验研究成果

通过对常遇洪水过程线选取典型段, 对各控制点水位及泥沙淤积情况进行了完整研究, 获得了所需研究成果数据, 对工程布置及闸门启闭提供了具体数据

支撑。试验后续继续分析造床平衡后, 对设计洪水标准 $P=5\%$ 和校核洪水标准 $P=2\%$ 对应 $Q=363.4\text{m}^3/\text{s}$ 、 $Q=559.0\text{m}^3/\text{s}$, 以及校核洪水标准下冲沙槽有无侧堰情况分别进行试验研究, 获取控制点水位及泄洪槽下游冲刷形态数据结果。

a. $Q=363.5\text{m}^3/\text{s}$ (设计洪水洪峰流量) 典型研究。施放 $Q=363.5\text{m}^3/\text{s}$ 设计流量, 分两种工况: 工况 1 为自然分水, 工况 2 为冲沙闸控制运行。

工况 1: 泄洪闸、冲沙闸及进水闸全开, 自然分水, $Q_{\text{进}}=13.92\text{m}^3/\text{s}$, $Q_{\text{冲}}=115.53\text{m}^3/\text{s}$, $Q_{\text{泄}}=234.05\text{m}^3/\text{s}$ 。上游河道水流平顺, 主流偏左, 流速较快, 泄洪闸前明显产生横向比降, 冲沙槽中不进沙, 但冲沙槽内水面波动较大, 大量泥沙从泄洪闸排往下游, 排沙顺畅。进水闸关闭, 泄洪闸和冲沙闸全开, $Q_{\text{冲}}=117.83\text{m}^3/\text{s}$, $Q_{\text{泄}}=$



245.67m³/s。上游冲沙槽内水深明显高于自然分水时水深,水面波动较大,水位 814.67~815.73m。

工况 2:进水闸全关,调节冲沙闸开度,1 号开启 1.84m,2 号开启 1.68m,保证冲沙槽过流 70m³/s,泄洪闸全开,泄流 293.5m³/s。由于冲沙闸限制运行,所以上游冲沙槽内水位明显壅高,最高水位位于冲沙闸前,泄洪闸前水位也相应壅高,冲沙槽入口水位 815.63m,原因主要是平衡后的上游地形比原始地形坡降大,流速快。上游水流偏向左岸,冲沙槽和 1 号泄洪闸不进沙,大量泥沙从 2 号、3 号泄洪闸排往下游,排沙顺畅。下游河床主流偏左,右岸齿墙后有回流,齿墙后最大冲深高程 802.342m,冲刷地形见图 4。

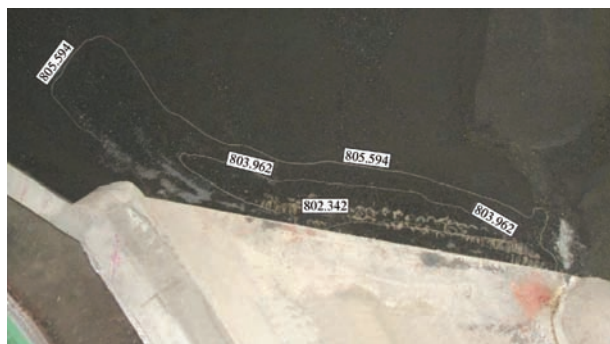


图 4 $Q = 363.5\text{m}^3/\text{s}$ 典型流量历时 3h10min 后泄洪槽下游冲刷形态

整个典型洪水流量模拟 3h10min,加沙量 619.3t,排沙量 486.74t,排沙率 78.6%,泄洪闸排沙效果非常好,冲沙槽不进沙。

b. $Q = 559\text{m}^3/\text{s}$ (校核洪水洪峰流量) + 冲沙槽无侧堰的典型研究。施放 $Q = 559\text{m}^3/\text{s}$ 校核流量,分两种工况:工况 1 为自然分水,工况 2 为冲沙闸控制运行。

工况 1:泄洪闸、冲沙闸及进水闸全开,自然分水, $Q_{\text{进}} = 26.98\text{m}^3/\text{s}$, $Q_{\text{冲}} = 131.15\text{m}^3/\text{s}$, $Q_{\text{泄}} = 400.87\text{m}^3/\text{s}$ 。水流流态及排沙效果与 363.5m³/s 时基本一致。

工况 2:进水闸全关,调节冲沙闸开度,1 号开启 2.24m,2 号开启 2.08m,限制冲沙槽过流 90m³/s,泄洪闸全开,泄流 469m³/s。水流流态及排沙效果与 363.5m³/s 时基本一致,齿墙后最大冲深高程 798.462m,冲刷地形见图 5。



图 5 $Q = 559\text{m}^3/\text{s}$ 典型流量历时 3h10min 后泄洪槽下游冲刷形态

整个典型洪水流量模拟 3h10min,加沙量 952.4t,排沙量 1113.12t,排沙率 116.9%,泄洪闸排沙效果非常好,冲沙槽、进水闸不进沙。

c. $Q = 559\text{m}^3/\text{s}$ (校核洪水洪峰流量) + 冲沙槽设侧堰的典型研究。鉴于造床平衡后试验实测校核洪水水位较高,因此,将冲沙闸前 10~41.5m 范围左侧冲沙槽边墙改为侧堰,侧堰底高程与设计洪水水位同为 815.224m,以增大下泄流量,降低上游水位,并且方便管理。

重复工况 2 试验:进水闸全关,调节冲沙闸开度,1 号开启 2.24m,2 号开启 2.08m,保证冲沙槽过流 90m³/s,泄洪闸全开,侧堰和泄洪闸共同泄流 469m³/s。由于侧堰增加了冲沙槽的泄流量,减少了泄洪闸的泄洪压力,因此泄洪闸前及上游冲沙槽内水位明显降低,水位差 0.48m。由于侧堰加大了上游冲沙槽的行近流速,因此冲沙闸 2 号闸前水位最高。上游水流偏向左岸,冲沙槽和泄洪闸 1 号闸不进沙,大量泥沙从 2 号、3 号泄洪闸排往下游,排沙顺畅。泄洪闸后泄水槽上游直线段水流均匀,弯道以下水流稍偏左岸,左右岸水面差 0.12~1.80m。

4 结论和建议

新建金沟河引水枢纽采用直线式沉沙槽布置方案,通过水工模型造床平衡试验研究证明工程总体布置基本合理,达到了小流量减少泥沙进入引水渠,提高引水比;中流量束水冲沙,保证引水闸门前清;大流量宣泄上游淤积泥沙,保持引水枢纽长 (下转第 26 页)

乌东德水电站右岸主厂房高边墙陡倾薄层小夹角部位岩体稳定性调控的工程措施研究

颜其林^{1,2} 蒋业龙²

(1. 中国长江三峡集团有限公司, 北京 100038;
2. 安徽省引江济淮集团有限公司, 安徽 合肥 230000)

【摘要】 乌东德水电站右岸主厂房具有高边墙大跨度特点, 其中部分洞段高边墙稳定性受陡倾薄层小夹角层状岩体开挖卸荷作用影响显著。通过对陡倾小夹角层状岩体开挖后的变形破坏机制进行观察分析, 揭示了控制高边墙稳定性的主要因素。进而从施工组织管理、开挖方案、爆破控制、支护优化设计、动态反馈分析等方面采取一系列措施以确保施工期小夹角洞段高边墙的稳定。主厂房开挖期间的监测结果表明, 针对小夹角洞段采取的工程措施可以有效限制围岩过量变形及开裂破坏, 印证了这些措施的合理性及可靠性, 同时也为类似高边墙地下洞室工程的开挖支护提供参考依据。

【关键词】 层状岩体; 陡倾薄层小夹角; 地下洞室; 高边墙; 工程对策; 乌东德水电站

中图分类号: O319.56

文献标志码: A

文章编号: 2097-0528(2022)02-019-08

Study on engineering measures to regulate control rock mass stability in steep dip thin layer small included angle sites of the high side wall of the main powerhouse on the right bank of Wudongde Hydropower Station

YAN Qilin^{1,2}, JIANG Yelong²

(1. China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, China;
2. Anhui Yangtze River-Huaihe River Diversion Group Co., Ltd., Hefei 230000, China)

Abstract: The main powerhouse on the right bank of Wudongde Hydropower Station has the characteristics of high side wall and large span, wherein the stability of high side wall in some tunnel sections is significantly affected by the excavation and unloading of steep dip small inclined angle stratified rock mass. The main factors controlling the stability of the high side wall are revealed by observing and analyzing the deformation and failure mechanism after steep dip small inclined angle stratified rock mass excavation. In addition, a series of measures are adopted from the aspects of construction organization management, excavation scheme, blasting control, support optimization design, dynamic feedback analysis, etc., thereby ensuring the stability of small included angle tunnel section high side wall during the construction period. The monitoring result during excavation of the main powerhouse shows that the engineering measures adopted in the small included angle tunnel section can effectively limit the excessive deformation and crack damage of the surrounding rock, thereby

收稿日期: 2021-03-29

作者简介: 颜其林(1983—), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事水利水电工程结构安全分析与工程管理方面研究。



demonstrating the reasonability and reliability of the measures, and providing reference for excavation support of similar high side wall underground cavern projects.

Keywords: stratified rock mass; steep dip thin layer small included angle; underground cavern; high side wall; engineering countermeasures; Wudongde hydropower station

1 引言

乌东德水电站位于金沙江下游,总装机容量10200MW,多年平均发电量389.3亿kW·h。电站采用地下厂房布置型式,各安装6台单机容量850MW的水轮发电机组。电站枢纽布置见图1。

乌东德右岸主厂房长333m,为圆拱直墙型,顶拱中心高程855.0m,机窝底板高程765.2m,高89.8m。

岩锚梁台面高程839.7m,岩锚梁以上跨度32.5m,以下跨度30.5m。由于主厂房围岩为典型的由碳酸盐岩构成的层状岩体,加之厂房大跨度高边墙特点,局部洞段受小夹角陡倾岩层影响,高边墙稳定性问题较为突出,受小夹角岩层法向卸荷松弛作用影响,高边墙围岩易产生明显变形及沿层面张开破坏,因此控制小夹角洞段岩体变形破坏是乌东德地下厂房建设的关键之处。

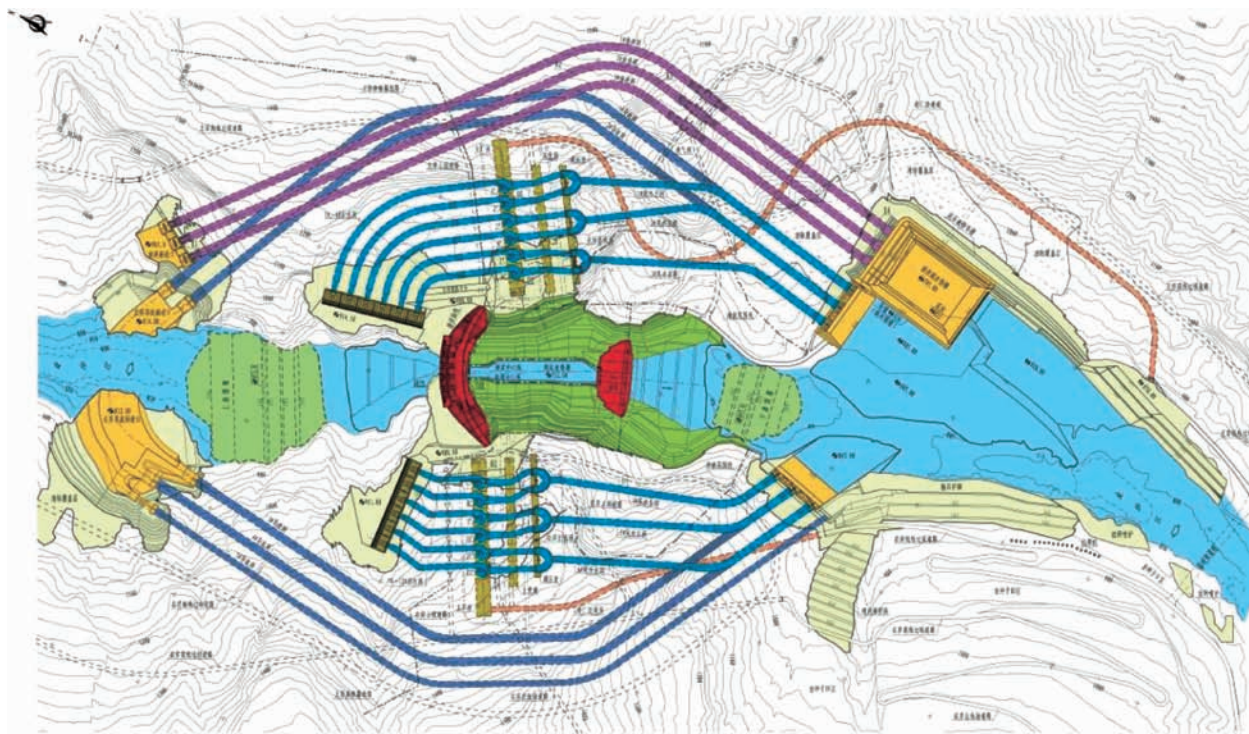


图1 乌东德水电站枢纽平面布置图

2 小夹角洞段主要工程地质问题

2.1 工程地质条件

乌东德右岸主厂房位于峡谷岸坡内,其外侧端墙距岸边120m,埋深220~380m,围岩主要为落雪组第三段厚层、中厚层夹互层及薄层灰岩、白云岩、石英岩及大理岩,局部A类角砾岩及少量B类角砾岩。乌东德工程地质平切图见图2。

右岸主厂房岩层走向与厂房轴线夹角从靠江侧往山内侧逐渐变大。本文定义小夹角指岩层走向与洞室轴线夹角不大于 20° ,开挖揭露的小夹角洞段占30%,岩性为薄层夹互层灰岩及白云岩,围岩类别为IV类。小夹角洞段分布范围统计见表1,小夹角洞段的剖面及现场情况见图3、图4。

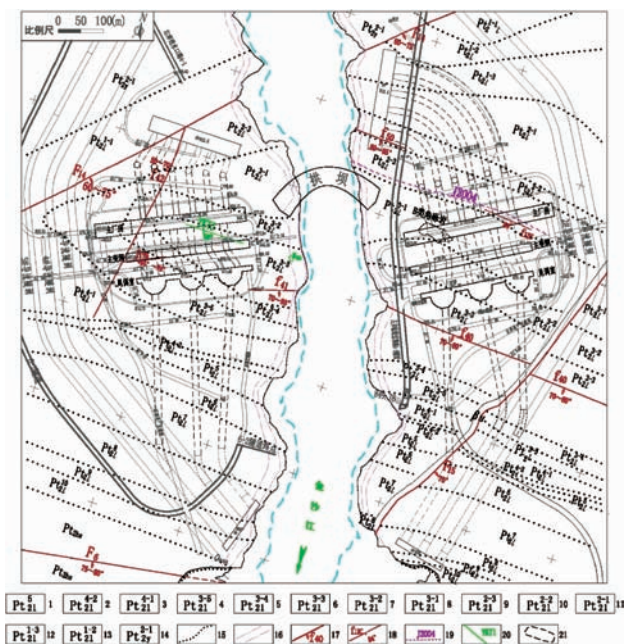


图2 乌东德水电站引水发电系统850m高程工程地质平切图

表1 右岸主厂房小夹角洞段位置及特征

部位	机 组	桩 号	边墙结构
上游边墙	7号、8号机组及副安装场	1+230~1+325	近直立倾
	9~10号机组间	1+160~1+207	下游(顺向)
下游边墙	7号、8号机组及副安装场	1+240~1+317.55	近直立倾
	9~10号机组间	1+177~1+205	下游(反向)
内端墙		1+079.8	陡倾江边(顺向)
中隔墩	11~12号机组间	1+106.05~1+124.75	陡倾江边(一侧反向, 一侧顺向)

2.2 小夹角洞段围岩变形及破坏机制

层状岩体中的原生层面是中低地应力环境下控制层状岩体稳定性的最关键因素,其空间延伸范围大,表面通常较为平整光滑,无充填物或发育钙膜、碳膜直至泥钙质、泥质充填等,强度变化很大,常与其他结构面共同构成块体。层状岩体开挖后通常沿层面张开或滑移,破坏范围逐步扩大,同时随着侧向约束力解除逐步向深层发展。此外,爆破产生的应力波也会引起层面的拉张破坏。

根据现场观察及数值计算分析,乌东德右岸主厂

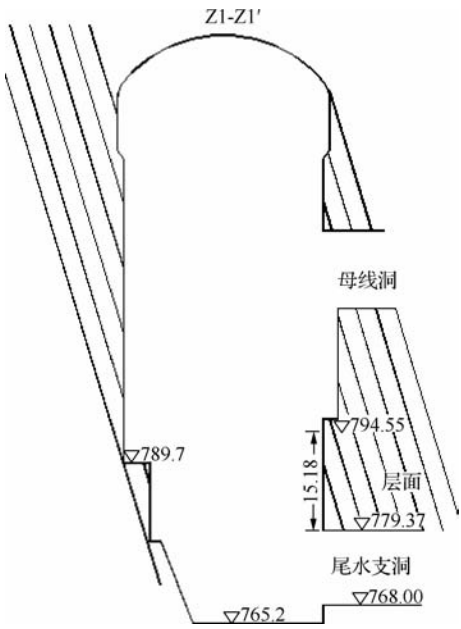


图3 右岸主厂房机组段小夹角层面剖面示意图(单位:m)



图4 小夹角洞段情况

房小夹角洞段围岩的主要破坏机制见图5。受岩体产状与开挖临空面不利组合影响,上游边墙顺倾岩体易发生顺层滑移,而下游边墙岩锚梁顶面至起拱线边墙部位的反倾岩体易在应力集中情况下产生岩层弯折内鼓,并伴随有表层混凝土开裂。地应力较高时顺倾岩层也可能产生弯折破坏。层面在法向应力解除后张开,导致薄层岩体变成两端固定的薄板结构,在端部应力挤压下产生弯曲,一旦弯曲应力超过其容许值,便发生折断并向开挖临空面内鼓。此外,薄层岩体的层间岩石也包含大量裂隙,一旦裂隙贯通,层间岩石易在重力作用下顺层面滑移并坠落。

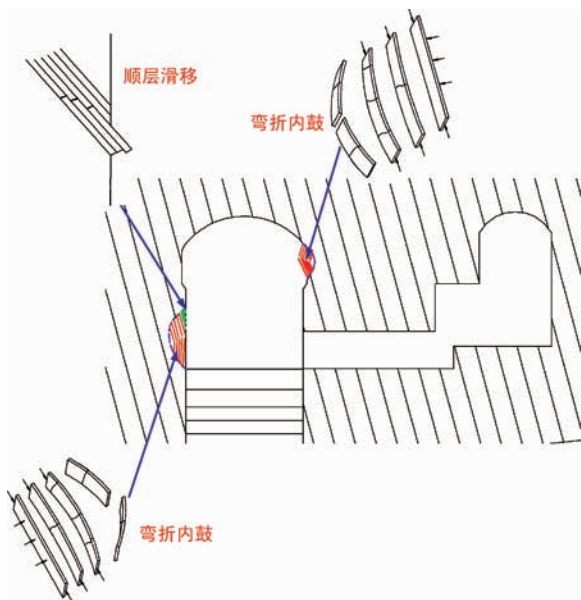


图5 层状围岩破坏机制示意图

3 小夹角洞段围岩稳定的管控措施

3.1 管理方面

a. 成立参建各方共同参与的地质工作小组,建立快速反应机制,加强现场重大地质问题处理的速度和效率。

b. 根据开挖揭露的实际地质情况及时调整支护,备用一定数量带垫板长锚杆,同时将随机支护的增设权下放至监理以满足现场快速支护需要。

c. 汇集各方力量,邀请相关专家专项研究小夹角层面面的处理方案。

3.2 开挖方面

a. 严格按照“薄层开挖,随层支护”的原则组织开挖,层高控制在3~5.9m,见图6,避免岩层因一次性暴露过多造成侧向变形过大。

b. 采用“中部小梯段抽槽爆破、两侧预留保护层光面爆破”的方法开挖,中槽开挖设置施工预裂。

c. 爆破网络采用单孔单响,最大单响药量控制在20 kg以内。爆破参数见表2,中部抽槽爆破孔间排距为3.0m×2.5m,见图7,边墙预留保护层4.0m,见图8,通过控制爆破以控制岩层损伤开裂、保持岩体完整性。

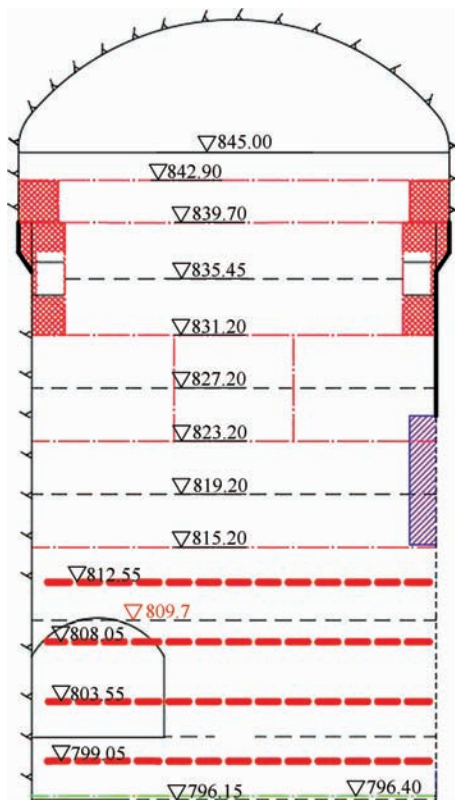


图6 主厂房开挖分层示意图



图7 小夹角部位中槽开挖装药联网图(单位:cm)

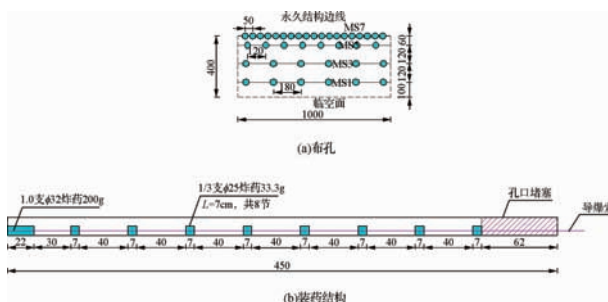


图8 小夹角部位保护层开挖装药联网图(单位:cm)

表 2 小 夹 角 部 位 爆 破 参 数

部 位	炮 孔	钻 孔 参 数				装 药 参 数				
		孔径/mm	孔深/cm	孔距/cm	孔数	药径/mm	单孔药量/kg	堵塞长度/m	总药量/kg	装药形式
中部抽槽	爆破孔	90	450	300	24	70	12	1.5	288	连续装药
	缓冲孔	90	450	300	8	70	8	2.5	64	连续装药
	小 计				32				352	
保护层	爆破孔	42	450	180	12	32	3.2		38.4	连续装药
	缓冲孔	42	450	120	8	32	2.5		20	连续装药
	周边孔	42	450	50	19	25	0.467		12.73	间隔装药
	小 计				39				71.13	

3.3 支护方面

- a. 尽快实施随机锚杆进行快速支护,控制围岩松弛变形,然后再施工系统支护。及时支护有利于抑制小夹角岩层变形及开裂。
- b. 严格控制支护滞后开挖掌子面的距离和时间。随机支护紧跟开挖面,系统支护滞后开挖 15m 以内,3~5 天完成锚杆支护,1 个月内完成锚索支护。锚杆角度随岩层走向进行调整,尽量垂直岩层面,有利于发挥锚杆抗拉效果,控制岩层法向卸荷松弛程度。
- c. 依据数值计算成果调整小夹角部位的支护参数。原设计系统支护参数包括 $\phi 32, L=6\text{m}/9\text{m}@1.5\text{m}\times 1.5\text{m}$ 的系统锚杆(6m 为普通锚杆,9m 为张拉力 50kN 的张拉锚杆,交错布置);岩锚梁以上设 2 排系统锚索,岩锚梁以下至高程 789.70m 间布置 $T=2000\text{kN}$, $L=20\sim 25\text{m}@4.5\text{m}\times 4.5\text{m}$ 系统锚索;下游边墙布置 $T=2000\text{kN}@4.5\text{m}\times 4.5\text{m}$ 对穿锚索。针对小夹角部位调整后的支护设计见图 9。

3.4 动态反馈分析方面

- a. 重视现场监测数据,开挖前在厂房周边的排水廊道中提前埋设监测仪器,形成永久监测系统,根据监测数据指导现场施工。一旦发现数据异常,立即停止开挖,进行支护施工。
- b. 建立安全监测管理体系,分级管理围岩变形异常情况。监测单位以简报形式通知参建各方,快速反应。

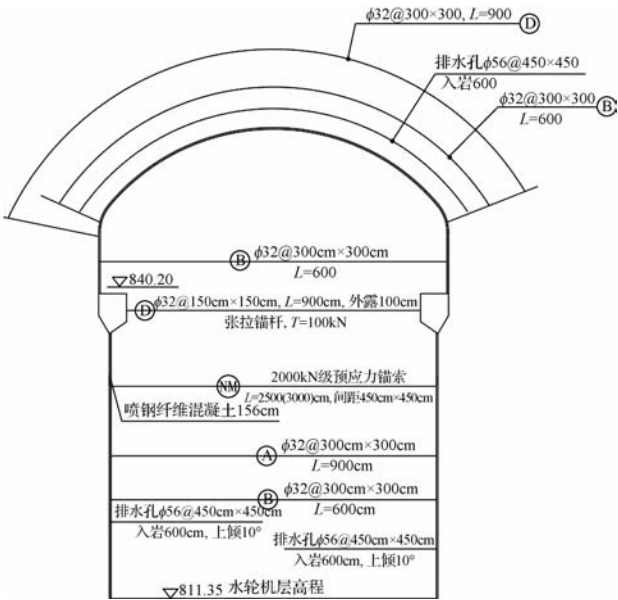


图 9 主厂房设计支护剖面图

- c. 利用数值计算对支护参数进行优化。利用离散元软件对小夹角洞段支护进行复核,并对比分析了几种优化后的支护方案,具体计算工况见表 3。

表 3 小 夹 角 洞 段 支 护 方 案 比 选 计 算 工 况

方案	岩层走向与洞轴线夹角	支 护 情 况	备 注
1	10°	无支护	不同支护措施
2	10°	系统支护	
3	10°	系统支护 + 新增张拉锚杆	
4	10°	系统支护 + 新增张拉锚杆 + 预应力锚索	



续表

方案	岩层走向与洞轴线夹角	支护情况	备注
5	0°	无支护	不同岩层产状
6	0°	系统支护	
7	20°	无支护	
8	20°	系统支护	

计算结果汇总如下:

小夹角层面对围岩稳定的影响。夹角为 10°时,方案 1~4 开挖完成后围岩最大变形指标见表 4。相比无支护,系统支护围岩变形最大降低 25%,结构面滑动变形降低 42%,张开变形降低 72%。

岩层走向与洞轴线夹角为 0°、10°、20°时的边墙最大位移见表 5。相比无支护条件下的围岩变形,系统支护条件下分别降低了 27%、22%、16%。

小夹角层面对围岩塑性区的影响。夹角为 10°时方案 1~4 开挖完成后围岩塑性区指标见表 6。相比无支护,系统支护后塑性区深度分别下降 14%、25%、9%。

表 4 夹角为 10°时方案 1~4 的计算结果对比

项 目	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
顶拱最大变形/mm	29.9	27.1	26.9	26.5
上游边墙最大变形/mm	43.0	35.4	35.4	35.2
下游边墙最大变形/mm	53.2	40.1	39.9	39.7
层面最大滑动位移/mm	23.8	13.8	13.5	13.5
层面最大张开位移/mm	10.9	3.1	2.5	2.5

表 5 不同夹角对围岩变形的影响

方 案 项 目	夹角 0°	夹角 10°	夹角 20°
无支护边墙最大位移/mm	59.4	53.2	45.7
系统支护边墙最大位移/mm	43.6	41.5	38.5

表 6 夹角为 10°时方案 1~4 开挖完成后围岩塑性区指标

方 案 项 目	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
顶拱最大塑性区深度/m	7.0	6.0	6.0	5.5
上游边墙最大塑性区深度/m	12.0	9.0	9.0	9.0
下游边墙最大塑性区深度/m	22.0	20.0	20.0	20.0

依据数值计算成果,确定右岸主厂房小夹角洞段加固方案如下:

锚杆调整。系统锚杆调整为 $T = 50\text{kN}$, $\phi 32 @ 1.5\text{m} \times 1.5\text{m}$, $L = 9\text{m}$ 张拉锚杆,其中顶拱部位范围为起拱线以上 9m。

锚索调整。上游拱座高程 843.79m、840.79m 两排水平端头锚索以及下游拱座高程 840.79m 一排水平对穿锚索调整为上仰 20°,锚索间排距调整为 $3.0\text{m} \times 4.5\text{m}$ 。

4 小夹角洞段围岩稳定的实际效果验证

4.1 围岩位移监测及支护结构受力分析

沿右岸主厂房中心线依次布置了 8 个系统监测断面。其中位于小夹角部位的监测断面有 7~11 号机组及副安装场等 6 个部位,主要的监测成果见表 9。

表 9 小夹角洞段围岩监测统计

主厂房	部 位	多点位移计/mm	锚杆应力计/MPa	锚索测力计/kN
右岸主厂房	7 号机组	-0.02 ~ 64.95	-15.56 ~ 197.67	1737.9 ~ 2462.9
	8 号机组	-1.2 ~ 32.16	61.12 ~ 127.06	1537.2 ~ 2694.4
	9 号机组	-0.14 ~ 43.88	5.96 ~ 137.97	1413.5 ~ 3252.9
	10 号机组	-0.79 ~ 66.76	-6.82 ~ 137.97	1435.4 ~ 2784.9
	11 号机组	0.53 ~ 15.72	15.82 ~ 49.23	1751.3 ~ 2366.5
	副安装场	-0.18 ~ 25.72	-13.51 ~ 13.49	1717.0 ~ 2409.9
	后期新增	-0.79 ~ 66.76	-17.48 ~ 383.16	1185.4 ~ 2366.2

2015 年底右岸主厂房已经基本开挖完成,监测数据显示小夹角部位的围岩位移与支护受力已基本收敛,累积值在允许范围内,表明围岩当前基本稳定,所采取的控制措施效果明显(见图 10)。

4.2 围岩损伤松弛程度分析

右岸主厂房小夹角洞段围岩松弛深度物探检测成果见表 10。小夹角洞段围岩当前松弛深度整体在 1.4~4.0m,随着开挖的进行松弛深度没有明显增加,证明当前工程措施能有效控制围岩损伤松弛的发育。通过采取锚杆和锚索、控制开挖高度和最大单响药量、及时支护、加强动态反馈分析等措施,小夹角部位的边墙变形得到了很好的控制。2016 年 9 月,右岸主厂房已开挖完成,位移监测数据以及围岩松弛深度数据证明了上述措施的合理性和有效性。

5 结 语

a. 小夹角部位围岩破坏的机理主要为:受产状与开挖临空面组合影响,薄层岩体应力重分布,易产生顺层滑移和弯折内鼓等形式的破坏,并且破坏有向岩体内部逐渐扩展的趋势。

b. 数值计算结果显示,随岩层与洞轴线夹角减小,围岩位移与塑性区深度明显变大,系统支护能够显著削弱岩体结构面对围岩变形的影响,减小围岩塑性区深度;岩层与洞轴线夹角越小,锚杆和锚索的受力越

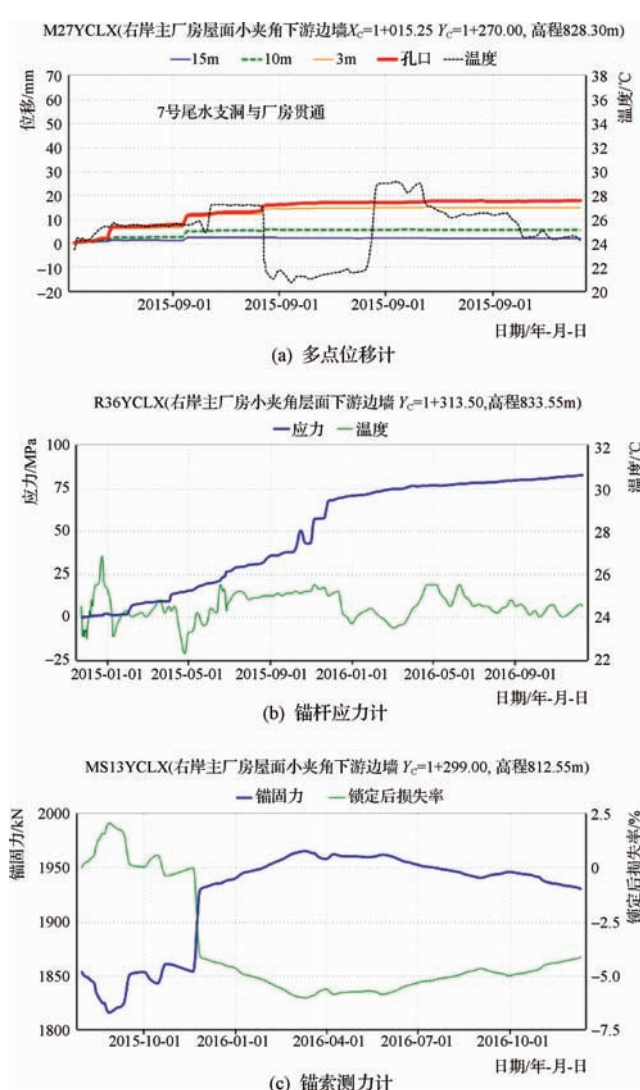


图 10 小夹角洞段典型监测断面监测成果

表 10 小 夹 角 洞 段 围 岩 松 弛 深 度 统 计

部 位		第一次检测		第二次检测		第三次检测		抽检第三次检测		第四次检测		第五次检测	
		松弛深度/m	检测日期	松弛深度/m	检测日期	松弛深度/m	检测日期	松弛深度/m	检测日期	松弛深度/m	检测日期	松弛深度/m	检测日期
右岸	上游 1 + 171	1	2014-05-10	1.8	2015-03-30	2	2015-06-12			2.4	2015-12-26	2.4	2016-01-06
	上游 1 + 246	1.4	2014-05-27	1.6	2015-03-30	1.8	2015-06-12	1.8	2015-08-27	1.8	2015-12-26	1.8	2016-01-06
	上游 1 + 282	2.2	2014-05-18	2.6	2015-03-30	3.6	2015-06-12	3.8	2015-08-27	灌浆封孔			
	下游 1 + 171	1.2	2014-07-03	1.8	2015-03-25	2	2015-06-11			2.8	2015-12-26	3	2016-01-06
	下游 1 + 209	1.4	2014-05-17	2.2	2015-03-25	2.2	2015-06-11			2.2	2015-12-26	2.2	2016-01-06
	下游 1 + 246	2.4	2014-05-17	3	2015-03-25	3.8	2015-06-12			4	2015-12-26	4	2016-01-04
	下游 1 + 282	1.8	2014-05-17	2.4	2015-03-25	3.2	2015-06-12			3.2	2015-12-26	3.4	2016-01-04

大,系统支护能够有效控制围岩变形,锚杆、锚索加密可显著降低小夹角层面的张开变形量。

c. 根据陡倾小夹角层状岩体的破坏机理及数值计算结果采取相关设计和施工控制措施,特别是加密

锚杆和锚索、控制开挖高度和最大单响药量、及时支护、加强动态反馈分析等措施,小夹角部位的边墙变形得到了很好的控制。2016年9月,右岸主厂房已开挖完成,位移监测数据以及围岩松弛深度数据证明了上述措施的合理性和有效性。◆

参考文献

- [1] 钮新强,石伯勋,翁永红.金沙江乌东德水电站引水发电建筑物工程招标设计报告[R].武汉:长江勘测规划设计研究有限责任公司,2012.
- [2] 王团乐.金沙江乌东德水电站施工地质简报[R].禄劝:长江设计公司乌东德水电站设计代表处,2013.
- [3] 水电水利规划设计总院.水力发电工程地质勘察规范:GB 50487—2008[S].北京:中国计划出版社,2008.
- [4] 丁秀丽,董志宏,卢波,等.陡倾角沉积岩地层中大型地下厂房开挖围岩变形失稳特征和反馈分析[J].岩石力学与工程学报,2008,27(10):2019-2026.
- [5] 卢波,王继敏,丁秀丽,等.锦屏一级水电站地下厂房围岩

开裂变形机制研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(12):2429-2441.

- [6] 张顶立,王悦汉,曲天智.夹层对层状岩体稳定性的影响分析[J].岩石力学与工程学报,2000,19(2):140-144.
- [7] 江权,冯夏庭,周辉,等.层间错动带的强度参数取值探讨[J].岩土力学,2011,32(11):3379-3386.
- [8] 张晓春,缪协兴.层状岩体中洞室围岩层裂及破坏的数值模拟研究[J].岩石力学与工程学报,2002,21(11):1645-1650.
- [9] 秦二涛.深埋层状岩体地下洞室稳定性及支护技术研究[D].湖南:中南大学,2012.
- [10] 张传庆,周辉,冯夏庭.基于破坏接近度的岩土工程稳定性评价[J].岩土力学,2007,28(5):888-894.
- [11] 王刚,蒋宇静,李术才.大型地下洞室群施工期快速反馈分析实用方法[J].山东大学学报(工学版),2011,41(4):133-136,142.
- [12] 蔡德文,王伟凯,陈晓鹏.西南地区超大型地下洞室群施工期快速监测分析评价体系研究[J].岩石力学与工程学报,2014(11):2341-2350.

(上接第18页)期有效运行的目标。为多泥沙、大洪量、短历时的河流排沙引水提供了新的解决思路。通过本次模型试验,对直线式沉沙槽布置方案提出如下结论和建议:

a. 经过造床平衡后洪水过程线及典型洪水流量试验验证,正确使用闸门运行方式,可保证进水闸不进沙。

b. 下游冲沙槽矩形段排沙顺畅,几乎没有泥沙积滞堆积现象,表明设计的纵坡尺寸合理,但闸后渐变段存在泥沙淤积,需依靠闸门部分开启排出闸门后方积堵的泥沙。

c. 泄洪槽后齿墙抛填铅丝笼,防冲效果明显好于抛石,但应加大、加深防护范围。

d. 枢纽遇设计及校核洪水时,由于上游河道坡度大,流速增大,主流偏向左侧岸,造成冲沙槽水位壅高进一步加剧,建议加高闸墩及上游冲沙槽高度。◆

参考文献

- [1] 赵经华,侍克斌,顾佳俊.呼图壁河青年渠首工程整体水工模型试验研究[J].人民长江,2009,40(13):43-44,68.
- [2] 潘志钢.太平沟水库水文特性探析[J].水资源开发与管

理,2018(1):65-68.

- [3] 苏晓玉,赵雪萍,李磊.前坪水库溢洪道单体水工模型试验研究及分析[J].水利建设与管理,2018,38(2):30-32.
- [4] 吴默溪,鲁俊,负元璐.黄河小北干流放淤试验工程泥沙处置效果分析[J].泥沙研究,2019,44(4):18-24.
- [5] 窦秋菊,肖浩波,谭文蓉.金汉拉扎水电站首部枢纽设计[J].水利水电快报,2014,35(12):25-26.
- [6] 杜跃亭,叶龙,宋炳忠.侧槽式溢洪道水力特性模型试验研究[J].水利建设与管理,2020,40(3):40-44.
- [7] 王文山.山口反调节水库泥沙监测资料分析[J].水资源开发与管理,2019(2):54-56.
- [8] 孙益松,叶柏阳,周松松.某水电站泄洪闸消力池水力特性模型试验与数值仿真分析研究[J].水利技术监督,2020(5):28-33.
- [9] 朱熠明,严军,陆琴.桃江取水口处布置纵向底流槽对泥沙淤积的影响[J].水资源开发与管理,2020(2):71-76.
- [10] 杜金威,王均星,张文传,等.阳升观水库台阶式溢洪道水工模型试验研究[J].中国农村水利水电,2018(4):83-86.
- [11] 潘世虎,潘源.水工模型试验对泵闸结构的优化与改进[J].水利规划与设计,2020(1):59-63.

高海拔峡谷地区过高坝长鱼道快速施工技术研究

刘朝建 拓孝金 刘 惠

(水电九局西藏建设工程有限公司, 西藏 拉萨 850000)

【摘 要】 为实现高海拔峡谷地区过高坝长鱼道的安全快速施工,通过对鱼道布置及结构形式优化、采用钢管混凝土柱群精确安装及调平等技术措施,减小鱼道施工难度,提高钢管安装效率。同时,在施工过程中对预制梁吊装固定、池室导/隔板安装方法等进行创新,运用低温季节保温覆盖、边坡双重安全防护等手段,实现了鱼道快速施工,不断创新施工工艺、优化设计结构、优化施工方案是实现高海拔峡谷地区过高坝长鱼道安全快速施工的关键。

【关键词】 高海拔;峡谷地区;鱼道;过高坝;施工

中图分类号: TV512

文献标志码: B

文章编号: 2097-0528(2022)02-027-08

Study on fast construction technology of over-high dam long fishway in high altitude canyon area

LIU Chaojian, ZHE Xiaojin, LIU Hui

(Tibet Construction Engineering Co., Ltd., of Sinohydro Bureau 9, Lhasa 850000, China)

Abstract: The difficulty of fishway construction is reduced, and the efficiency of steel pipe installation is improved by optimizing the fishway layout and structure form, adopting precise installation of steel pipe concrete column clusters, leveling and other technical measures in order to realize the safe and rapid construction of over-high dam long fishway in high altitude canyon area. Meanwhile, the precast beam hoisting fixation, pool room guidance/diaphragm installation method are innovated in the process of construction. Low temperature season insulation coverage, slope double safety protection and other measures are adopted to construct the fishway quickly. The construction technology is constantly innovated, the design structure is optimized, and the construction scheme is optimized, It's the key to realizing safe and quick construction of over-high dam long fishway in high altitude canyon area.

Keywords: high altitude; canyon area; fishway; over-high dam; construction

随着近年西藏地区基础设施及清洁能源建设加快,高海拔峡谷地区建设的水电工程逐渐增多,水电站鱼道作为鱼类洄游的主要通道,受水电站大坝坝高以及地形的影响,高海拔峡谷地区的鱼道往往具有池室

坡度缓、线路长、盘折段多、环境气候条件恶劣、施工布置条件差等特点。大古水电站是国家支持西藏经济发展的重点项目,也是目前西藏在建最大水电站。水电站拥有目前世界海拔最高、落差最大的鱼道,也是在全

收稿日期: 2021-01-17

作者简介: 刘朝建(1990—),男,本科,工程师,从事水利水电工程项目施工技术与管理工。

国范围内首次大量采用预制装配技术的鱼道,鱼道在右岸边坡水平距离 120m 范围内盘折上升高度近 40m。由于鱼道作为电站的附属建筑物,与电站主体标段还存在上下交叉作业及施工布置干扰大的问题。如何在施工场地布置有限、相邻标段施工干扰大的情况下合理布置施工设备以及优化施工方案,是确保高海拔峡谷地区过高坝鱼道快速、安全施工的关键,也是本文研究的重点。

1 工程概述

西藏大古水电站位于西藏自治区山南地区雅鲁藏布江干流藏木峡谷河段上,是雅鲁藏布江中游水电 8 级开发方案中的第 2 级,电站枢纽建筑物由挡水建筑物、泄洪消能建筑物、引水发电系统、升压站及鱼道等组成。鱼道布置在大古水电站坝址右岸,鱼道总长 3471.22m,为竖缝式鱼道。主要由 4 个鱼道进口、2 个鱼道出口、总长度超过 3km 的鱼道池室以及观测房、启闭机房等组成。鱼道标准底坡约为 2.76%,标准池室净长度 2.05m,休息池净长度 5m,标准运行水深 0.5~1.5m,竖缝宽度 0.3m,标准池室净深度 2m,鱼道设计流速 1.1~1.17m/s,鱼道主要过鱼季节和兼顾过鱼季节分别为 3—7 月和 2 月、8 月。

大古水电站位于青藏高原气候区,基本特性为气温低、空气稀薄、大气干燥、太阳辐射异常强烈,蒸发量大,昼夜温差大,坡面冰冻。多年平均气温 9.3℃,极端最高、最低气温分别为 32.5℃和 -16.6℃,多年平均降水量 527.4mm,多年平均蒸发量为 2084.1mm,多年平均相对湿度为 51%,多年平均气压为 685.5hPa,多年平均风速为 1.6m/s,历年最大定时风速为 19.0m/s,多年平均日照时数为 2605.7h,历年最大冻土深度为 19cm。大古水电站鱼道布置见图 1。

2 工程重点难点分析及解决方案介绍

a. 鱼道线路长,右岸河谷地形狭窄,与电站主体标段施工干扰大,总体施工布置条件差。

鱼道 4 个进口均位于厂房尾水渠及大坝中导墙部位,与大坝标消力池及坝前制浆站、厂房标尾水渠及尾

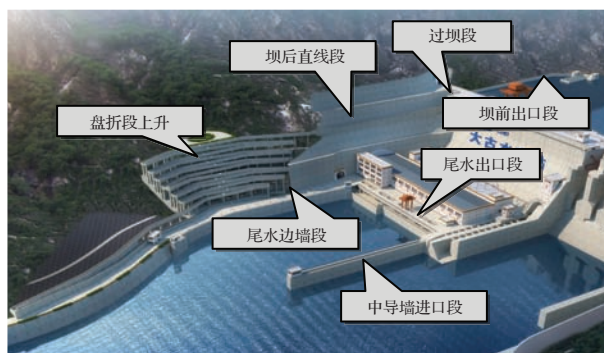


图 1 大古水电站右岸全鱼道三维效果布置图

水平台的施工干扰极大。鱼道盘折上升段边坡地形陡峭、大型钢管混凝土柱群布置集中,布置设备的位置可利用范围小。在施工设备布置时需统筹规划,对各段施工顺序合理安排,在满足施工需要的同时减小干扰、增大覆盖面积。

b. 鱼道坝后直线段与厂房安装间、大坝右岸挡水坝段存在高边坡上下交叉作业,安全隐患大。

鱼道坝后直线段与下方大坝及厂房标段施工作业面最大垂直高度达到 47.5m,与上方现场指挥部会议室最大高度达到 21m。施工过程中高边坡上下交叉作业安全隐患突出,若无法解决上下交叉作业的安全隐患问题,则鱼道在施工过程中易受主体标段施工进度影响导致部分作业面停工。为此,需研制一套高边坡上下交叉作业安全防护体系,从根本上解决交叉作业带来的安全隐患问题,加快施工进度。

c. 鱼道盘折上升段钢管混凝土柱群及预制梁吊装存在相互施工干扰,柱基础条带及钢管柱布置高度大、数量多,预制梁吊装高度大、冬季吊装施工难度大。

鱼道右岸边坡地形陡峭,大型钢管混凝土柱群布置集中,由于鱼道盘折段采取钢管混凝土柱群+上部预制装配池室的布置形式,条带基础垂直最大高度达 56.96m。盘折段底部钢管混凝土柱群由 114 根直径 1300mm 的钢管混凝土柱组成,钢管混凝土柱群中平均柱高 16.2m,其中最大柱高达 30.6m。鱼道盘折上升段预制梁共 258 榀,根据进度计划,预制梁吊装高峰期均在冬季,边坡冬季结冰严重;另外,预制件吊装高度高,吊装临时固定困难,施工难度和安全隐患大。在施

工过程中需做好盘折段大型钢管混凝土柱群及预制梁吊装的施工组织,通过设计方案优化及柱群、预制梁吊装的施工工艺改进等技术措施加快施工进度。

d. 预制导/隔板与池室边墙采用插槽式连接,效率低,传统的导/隔板单块吊装方式占用起重设备时间长。

本项目全鱼道导/隔板均为预制件,根据设计图纸,鱼道池室线路总长 3471.22m,其中布置导/隔板共计 1339 套。根据招标设计图纸,导/隔板与鱼道池室现浇段边墙、预制段边墙(预制梁)均采用插槽式连接,由于数量众多,导/隔板插槽模板制作及后期吊装设备占用时间长,对施工进度极为不利。为此采取对预制导/隔板与池室边墙的连接方式进行改进创新,取消边墙部位插槽,降低施工难度;同时研发一种预制导/隔板安装移动装置,加快导/隔板安装施工进度。

3 施工设备布置调整

原投标阶段,考虑到鱼道盘折段为关键线路,在布置施工设备时仅在边坡盘折段布置 2 台 M900 塔机(一台移动式、一台固定式),其余部位均布置 50t 履带吊进行施工。其中盘折段固定式塔机通过 3 次安拆、移动式塔机通过 1 次安拆实现对盘折段的全覆盖。另外,由于受相邻标段作业面移交滞后、施工作业面交叉干扰影响,鱼道各段开工时间较投标均有不同程度滞

后,在实施过程中结合现场实际情况对鱼道原投标设备布置进行了调整。

3.1 鱼道盘折上升段

在施工过程中,结合现场边坡地形实际情况,为避免塔机与原始边坡相撞,将原布置的 2 台 M900 塔机调整布置为 1 台 QTZ900 固定式塔机和一台 QTZ1200 移动式塔机,并结合边坡实测地形,将塔机的高度由原投标阶段的 65m 调整至 80m。并将原投标方案中固定式塔机安拆 3 次优化为安拆 2 次,移动式塔机拆除采用临时租赁大型汽车吊进行拆除。同时,考虑到移动式塔机无法再继续加高和受地形影响导致的吊重范围衰减,对于塔机吊装能力以外的预制梁后期采用预制一半、现浇一半的方式进行施工。

3.2 鱼道坝后直线段及坝前出口段

鱼道坝后直线段布置于电站右岸边坡 3451m 高程平台下方,受现场指挥部会议室以及大坝标高位水池影响,存在一段长度约 50m 的设备布置盲区。另外,坝前出口段与大坝标布置的右岸制浆站存在施工干扰,施工工期受上游围堰拆除时间制约影响,原投标方案在该部位布置的 50t 履带吊无法满足现场需求。为此,在鱼道坝后直线段布置一台 C5013 塔机,在坝前出口段布置一台 C7015 塔机,用于上述两部位的钢筋、模板等施工材料吊运。鱼道施工塔机布置见图 2。

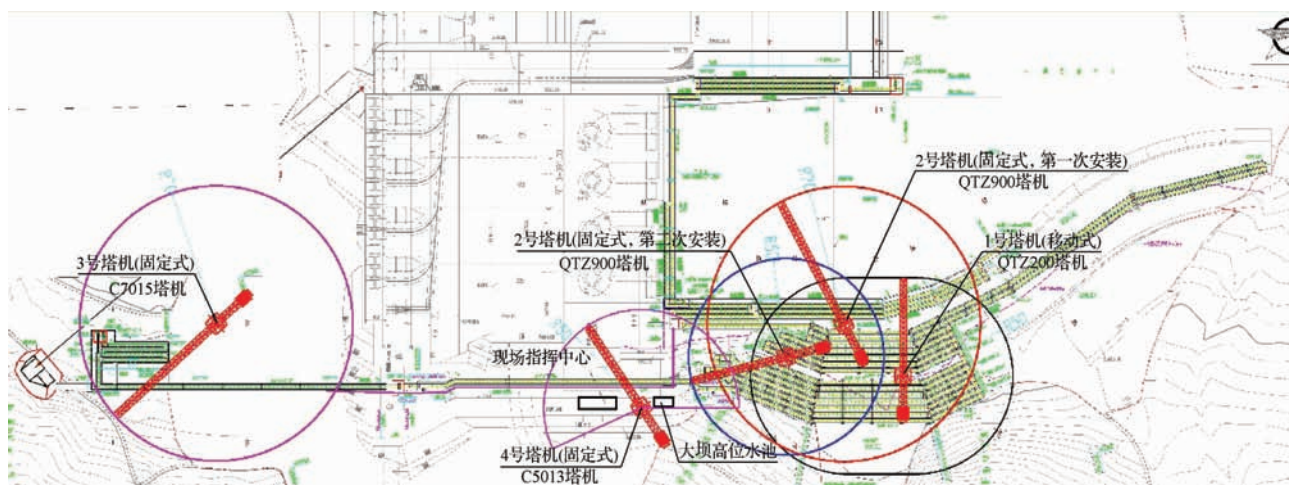


图 2 鱼道施工塔机平面布置



3.3 其他部位

鱼道中导墙及尾水出口段受大坝标、厂房标已有建筑物及已布置的设备干扰,两部位池室高度高,在施工过程中主要优先选择机动灵活的汽车吊、50t履带吊作为主要施工设备。

4 鱼道结构优化布置

4.1 鱼道盘折段柱基础开挖优化及施工顺序优化

在施工过程中通过设计优化对柱基础开挖方案进行调整,将原柱基础开挖台阶全部优化,在设置长锚杆的基础上增加锚筋桩进行深层支护,以保证柱基础稳定。同时为减少边坡支护排架搭设工程量,边坡深层支护与条带基础混凝土浇筑同步进行,即支护一段、浇筑一段。另外根据移动式塔机安装的部位,以钢管柱

群 3387.5m 高程为中心,将条带基础分部位施工,每个部位按照先低后高顺序进行钢管混凝土柱施工。

4.2 鱼道坝后直线段基础开挖优化

根据原招标图纸,鱼道坝后直线段需在右岸约 70° 的边坡上开挖齿槽,该部位与下方厂房标安装间、厂坝交通洞等存在交叉作业。若采用爆破开挖则对厂房土建及机组安装、大坝浇筑均会产生较大干扰。为此,在施工过程将原边坡齿槽全部取消,利用开挖边坡残留的马道基础增设边坡预应力锚杆、锚筋桩等进行深层支护,并对原开挖基础面以人工将喷射混凝土凿除。鱼道结构混凝土分为基础混凝土及池室混凝土两部分,下部基础按照岩壁梁的形式进行配筋,上部池室按照常规水槽进行配筋。鱼道坝后直线段基础优化及结构调整见图 3。

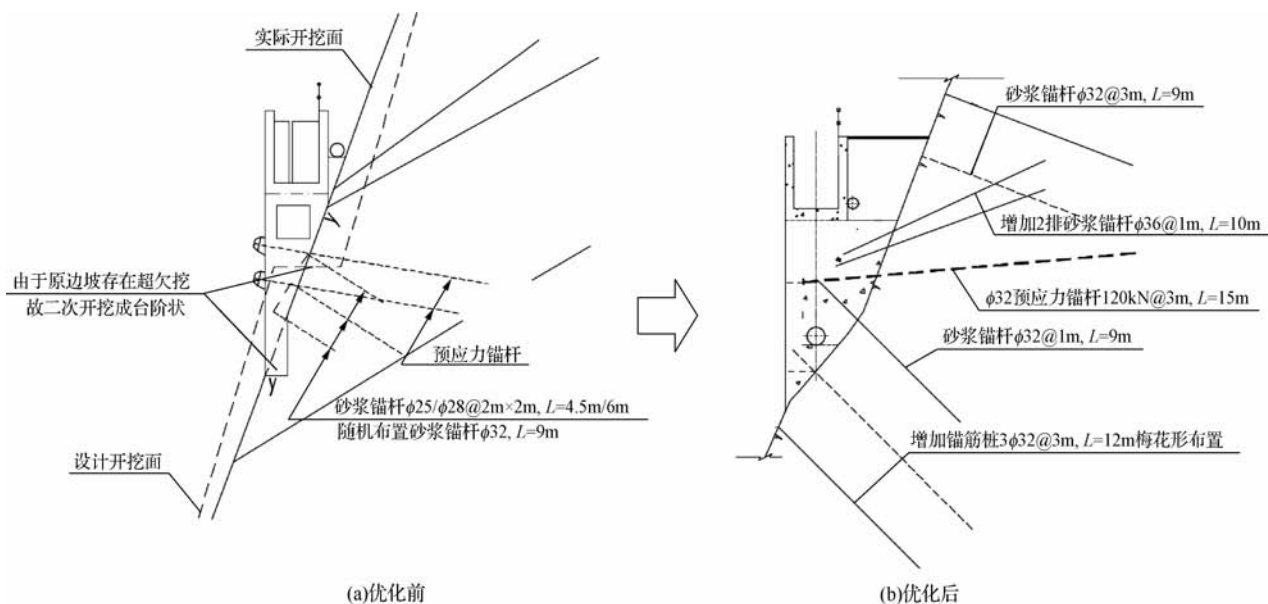


图3 鱼道坝后直线段基础优化及结构调整示意图

4.3 鱼道尾水出口段结构型式优化

根据原招标图纸,鱼道尾水出口段由下部墩柱 + 上部池室的结构型式组成,但在施工过程中,厂房标尾水渠作业面移交时间较合同滞后 5 个月,造成该部位施工工期极为紧张。考虑到墩柱及上部池室高度均较高,为加快施工进度,通过设计优化,充分发挥钢管混凝土柱 + 装配式预制梁的快速施工优势,将墩柱调整为钢管混凝土柱 + 外包混凝土的施工形式,即在施工

过程中先施工钢管混凝土柱,待钢管柱到顶后进行上部池室和墩柱外包混凝土施工。另外,为节约池室跨墩柱时的施工时间,上部池室采取预制 + 现浇的方式施工,即池室边墙底部采用预制梁跨越墩柱,然后采用免拆钢模板作为池室底板模板,待底板浇筑完成后再进行预制梁上部池室边墙施工。鱼道尾水出口段结构型式调整前后对比见图 4。

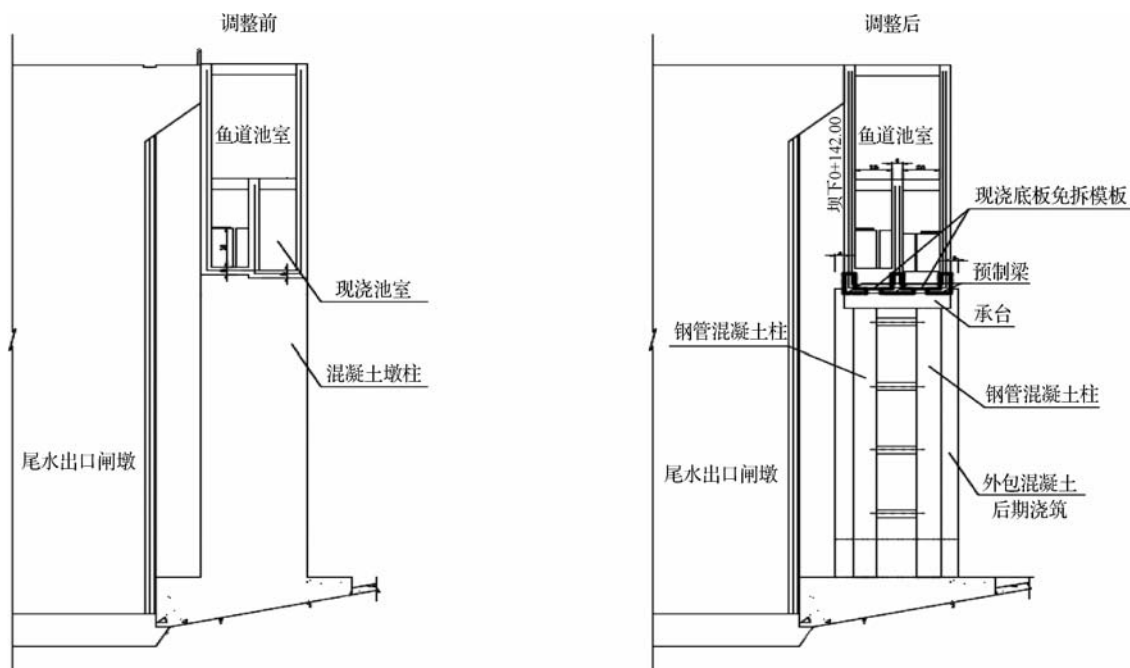


图4 鱼道尾水出口段结构型式调整示意

4.4 预制导/隔板与池室边墙连接形式优化

前期导/隔板安装与池室边墙均采用插槽式连接,由于导隔板数量众多,预留槽模板安装及加固较为困难。为加快施工进度,通过设计优化,将预制导/隔板与池室边墙连接形式由插槽式调整为埋件焊接的方式。将原池室预制梁边墙部位的凹槽取消,保留底板插槽,在边墙导/隔板位置竖向埋设扁钢作为后期在导/隔板安装时的边墙固定件。鱼道现浇段导/隔板固定方式调整见图5。

5 长鱼道过坝快速施工关键技术

5.1 大型钢管混凝土柱群快速施工技术

根据鱼道施工进度计划,鱼道右岸边坡盘折上升段为整个鱼道的关键线路,受边坡地形影响,该部位采取在鱼道盘折上升段底部设置大型钢管混凝土柱群+上部预制装配池室的结构布置。由于条带基础及钢管混凝土柱群高度均较高,空间上布置密集,施工难度大。

a. 钢管安装快速施工技术。将每节钢管柱标准长度由原投标阶段的3m一节调整为6m一节,钢管柱坡口、内衬管等均在生产钢管时一并加工,现场直接简

单打磨即可施焊,可加快施工进度。

b. 钢管高空安装精确对中、调平技术。在施工过程中对钢管柱安装的方式进行创新,通过在钢管柱四周设置调节螺杆代替千斤顶顶升进行对接精确调平。并通过增设钢管柱垂直校准对中设备,利用垂直激光发射器+中部对中器+钢管柱管口顶部型钢对中架进行垂直度校正。

c. 承台浇筑快速施工技术。在钢管柱承台下方埋设工字钢作为支撑平台,并在上部搭设满堂脚手架进行顶部承台混凝土浇筑,承台底部模板采用不拆除的定型钢模板进行施工。型钢模板设计时将中部钢管圆环预留,厂家统一加工生产,模板运至现场后仅需人工组装即可。

5.2 鱼道预制梁吊装施工关键技术

根据设计图纸,鱼道盘折上升段预制梁共258榀,吊装工期共2.5个月,平均每天吊装强度为3.4榀。由于鱼道装配式预制梁为L形,受梁重心影响,在施工过程中若采用钢丝绳绕圈吊装,预制梁就位时间长,施工效率低。另外,由于预制梁规格数量众多,在吊装前需从各环节做好吊装准备,以加快吊装进度。

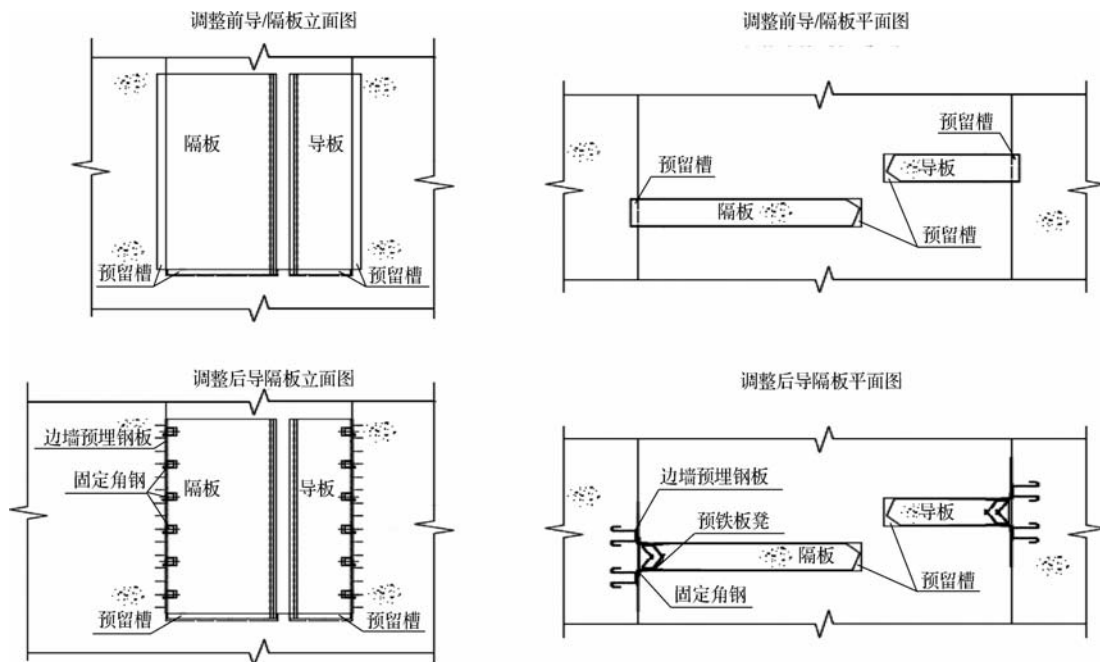


图5 鱼道现浇段导/隔板固定方式调整示意图

a. 预制梁吊装准备。鱼道预制梁规格数量众多,非标准段长预制梁占总预制梁数量的62.8%,且每一榀非标准段长的预制梁长度均不一致,若规划不合理,将在吊装过程中存在“找梁”的情况。为加快预制梁吊装施工进度,预制梁吊装选择白天高温时段,柱群其他施工所需的材料选择低温时段进行吊运。另外,在预制梁制作时充分做好预制梁堆放场分区规划,将标准段长的预制梁分左、右放置在同一区域,在堆放时中部设置吊装通道,所有预制梁均做好编号、龄期等标记。同时在吊装前做好吊装天气预报,并对吊运钢丝绳、护脚钢垫板等进行检查,满足吊装条件后再进行吊装。

b. 预制梁吊装、固定技术。受L形梁重心影响,在施工过程中若采用钢丝绳绕圈吊装,预制梁就位时间长。为此,预制件制作时在预制梁顶部牛腿以下部位梁长1/3处设置有 $\phi 120$ 吊装孔,吊装时在孔内穿 $\phi 110$ 钢棒,钢丝绳通过钢棒两头的插销固定,确保了起吊后的预制梁基本垂直。同时,在预制梁吊装就位后将支座部位预埋的底部钢垫板与预制梁端部的钢垫板临时焊接,在池室的两榀梁吊装就位后利用吊装孔安装对撑杆,将预制梁相互锁紧,在梁底板浇筑完成后对支座部位的垫板焊接点采用砂轮机割除,并拆除吊装孔部位的对撑杆。

5.3 鱼道过高坝深槽薄壁隔墙施工及预制导/隔板安装关键技术

由于鱼道池室为盘折结构,在中导墙段、尾水出口段、尾水边墙段、坝前出口段等部位相邻池室间均设置40cm厚的薄壁隔墙,其中鱼道中导墙段池室最大深度达到22m,薄壁隔墙最大高度达到17.8m,施工过程中高薄壁隔墙浇筑易产生变形。另外,鱼道预制导/隔板数量多,由于池室高度大,在安装时采用传统的安装方式占用的吊装设备时间长,施工效率低。

a. 深槽薄壁隔墙模板安装加固技术。根据设计图纸,鱼道池室净宽度仅2m,空间狭窄,只能采用木模板进行施工,由于模板安装工作量大,采用传统的木模施工工艺存在施工效率低、进度慢等问题。为加快施工进度,在施工过程中对木模板背楞进行改进,将传统的木方背楞更改为方钢背楞,并焊接形成整体,木模板采用自攻螺丝固定在方钢骨架上。方钢背楞加工时,为减小单块重量,模板采用多种型号,施工过程中根据起重设备吊装能力灵活进行不同型号间的模板组合,实现模板的快速安装、拆除。墙体中部拉筋采用爬锥螺栓的形式进行加固,减少拉筋焊接量,加快施工进度。模板加固示意图及实物见图6。

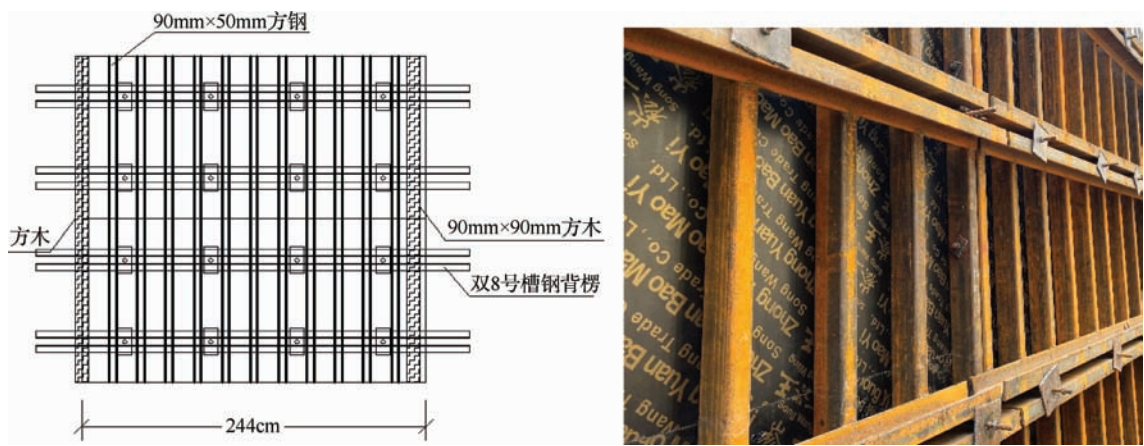


图 6 模板加固示意图及实物

b. 预制导/隔板安装。鱼道导/隔板最大高度为 4.35m,单块重量为 2.4t,由于导/隔板数量较多,在施工过程中导/隔板需逐块吊装,占用起重设备时间长,施工效率较低。为此,采取在鱼道池室顶部布置一台可自由移动的导/隔板安装台车,首先利用起重设备集

中将导/隔板全部吊入需安装的池室内堆放,然后利用安装台车将所需要安装的导/隔板逐块吊运至指定安装部位,减少设备占用时间,提高导/隔板安装施工效率。导/隔板安装移动台车示意图及现场情况见图 7。

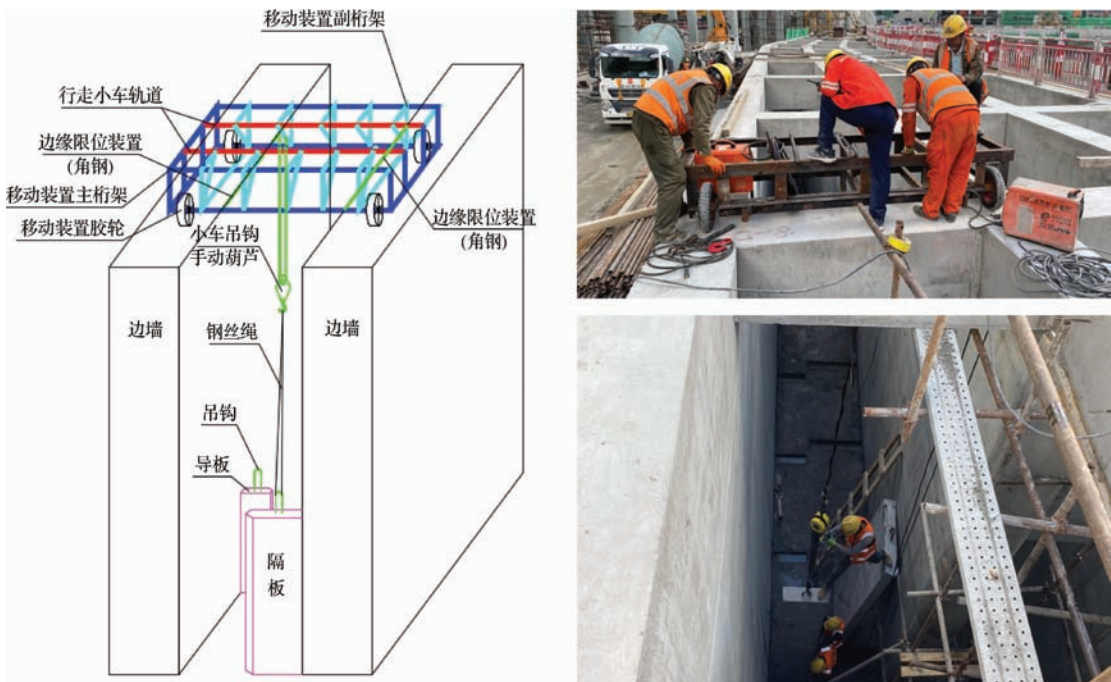


图 7 导/隔板安装移动台车示意图及现场情况

5.4 低温季节混凝土浇筑保温关键技术

根据进度计划,鱼道低温季节施工的部位主要为池室隔墙、边墙、底板等部位,由于本工程位于高海拔地区,低温季节气候具有大风、干燥、环境温度低的特点,在低温季节施工过程中需严格做好各项保温措施。

低温季节混凝土浇筑保温措施主要是采用蓄热法施工。针对鱼道浇筑仓小体积的特点,采取在浇筑仓搭设暖棚的方式进行施工,即采用脚手架管搭设暖棚骨架,内部放置暖风机,外部采用三防布/刀刮布进行包裹,模板外侧同时粘贴 3cm 橡塑海绵进行保温。混



凝土浇筑选择白天高温时段进行,采用泵送混凝土从暖棚顶部下料,浇筑完成后采用塑料薄膜+3cm 橡塑海绵进行覆盖保温。

5.5 过高坝长鱼道安全施工关键技术

受工程结构布置影响,鱼道施工面临高处作业、交叉作业、超重件吊装作业、冬季吊装施工以及高海拔缺氧等多项安全问题。在施工过程中通过技术管理措施对过高坝长鱼道进行安全管理,确保长鱼道施工安全、快速。

a. 安全隔离技术措施。对于鱼道与其他标段高空交叉作业的部位,采用被动防护网+柔性材料防护的双重安全隔离措施。被动防护网内侧柔性材料防护层由木模板、橡塑海绵组成,在底部设置竹跳板防护层对孔洞封闭。并在木模板外侧设置脚手架管网,通过水平横杆与内侧边坡锚杆进行连接。另外在高边坡施工区域两端固定钢丝绳,作业期间用于悬挂安全带、安

全绳,供人员来回无障碍移动。针对钢管混凝土柱群则采取圆盘式脚手架围绕钢管柱四周进行搭设,脚手架底部、中部、上部四周紧贴钢管柱增设横杆。

b. 吊装作业安全技术措施。专职安全员负责日常安全监督管理,在吊装前对起重机械、钢丝绳等吊具进行检查,严格按照起重机安全操作规程作业,确保起重设备使用的合规、合法性,保证其运行安全。每月定期对所有起重设备进行全面的检查,同时安装吊装防碰撞系统、夜间警示系统(灯带)和监控值守系统,专人指挥吊装作业,实现全面的吊装安全管理。

6 技术经济分析

通过对高海拔峡谷地区过高坝长鱼道快速施工技术研究,对原投标阶段的设备布置和施工技术方案进行优化,优化前后技术经济分析对比见表1。

表1 高海拔峡谷地区过高坝长鱼道施工方案优化前后投资对比

编号	项 目	原 方 案	金额/万元	调 整 后 方 案	金额/万元
1	设备优化布置	2台 M900 塔机(一台固定式、一台移动式,其中固定式安拆3次)、2台 50t 履带吊	140	1台 QTZ900 塔机和1台 QTZ1200 塔机(一台固定式、一台移动式,其中固定式安拆2次)、1台 C7015 塔机、1台 C5013 塔机、1台 50t 履带吊	171
2	结构优化布置	盘折段柱基础开挖优化	17	取消柱基础开挖,边坡采取浅层支护+深层支护	60
3	基础开挖优化	坝后直线段基础开挖优化	99	取消边坡槽挖,深层支护+边坡喷射混凝土凿除	152
4	结构形式优化	尾水出口墩柱结构形式优化	849	钢管混凝土柱+外包混凝土+预制梁+现浇池室,施工工期3个月	1107
5	导隔板固定方式优化	边墙插槽+底板插槽连接	28	边墙预埋扁钢焊接+底板插槽连接	73
6	快速施工技术	钢管混凝土柱群快速施工技术	612	钢管柱6m/节进行施工,钢管柱承台采用型钢支撑+免拆模板	405
7	快速施工技术	预制梁快速吊装技术	33	吊装孔吊装、承台垫板焊接固定	8
8	快速施工技术	深槽薄壁隔墙施工技术	85	新型方钢背架+木模板+爬锥拉筋加固	68
9	快速施工技术	预制导/隔板安装施工技术	49	安装台车逐块安装,起重设备只需将导隔板吊运至池室内特定部位	14
10	管理成本	原合同主体施工工期12个月,项目管理成本147万/月	1764	快速施工技术运用后合同主体施工工期缩短至10个月	1470
11	合 计		3676		3528

(下转第59页)

碾压式土石坝施工质量评定影响因素探究

张有文 陈金辉

(红河州水利水电工程建设质量与安全监督站,云南 蒙自 661100)

【摘要】 为客观、真实、全面评价碾压式土石坝施工质量,根据工程实体的质量检测数据、影响施工质量的“人、材、机、法、环”五个要素、大坝安全鉴定结论、大坝实体工程质量评定及水库验收后大坝安全监测数据分析成果,综合分析评价碾压式土石坝的施工质量,得出可靠的施工质量评价结论。评定方法符合水利行业建设管理相关文件、规程及规范的要求,评定结论可靠性高,有利于解决检测与施工之间的矛盾,提高工程施工效率,可在工程建设中探索推广使用。

【关键词】 碾压式土石坝;施工质量评定;影响因素;探究

中图分类号: TV512

文献标志码: A

文章编号: 2097-0528(2022)02-035-07

Study on factors influencing construction quality evaluation of roller compacted earth-rock dam

ZHANG Youwen, CHEN Jinhui

(Honghe Water Conservancy and Hydropower Engineering Construction Quality and Safety Supervision Station, Mengzi 661100, China)

Abstract: The construction quality of roller compacted earth-rock dams is comprehensively analyzed and evaluated for objective, authentic and comprehensive evaluation of roller compacted earth-rockfill dam construction quality from the engineering entity quality test data, five elements affecting the construction quality “people, material, machine, method and ring”, dam safety appraisal conclusion, dam entity engineering quality evaluation and dam safety monitoring data analysis results after reservoir acceptance. Reliable construction quality evaluation conclusion is obtained. The evaluation method conforms to the requirements of relevant documents, regulations and specifications of water conservancy industry construction management. The evaluation conclusion has high reliability, which is conducive to solving the contradiction between detection and construction, and improving the efficiency of engineering construction, which can be explored and popularized in engineering construction.

Keywords: roller compacted earth-rock dam; construction quality evaluation; influencing factors; exploration

收稿日期: 2021-03-27

作者简介: 张有文(1969—),男,本科,高级工程师,主要从事水利水电工程建设管理及质量监督工作。



水库拦河坝施工质量,是决定水库安全和能否正常发挥工程效益的关键因素,竣工验收过程中有关工程质量的结论性意见,是在工程质量监督报告有关质量评价的基础上得出的,而施工质量检验与评定结论是水利工程验收的主要依据之一。水利工程施工质量按单元进行控制,在进行质量检验评定时,单元(工序)是最小的质量控制单位和日常质量考核基本单位,验收评定的依据则主要是工程实体的各种检测数据。以土料填筑为例,一个单元工程施工质量评定主要针对结合面处理、卸料及铺填、土料压实、接缝处理4个工序,控制项目主要是工程实体和施工参数,如果每个工序都进行检测,势必增加工程费用;另一方面,针对实体的检测取样频次为反滤料 $200 \sim 500\text{m}^3$ 或每层取样一次,坝壳料 $5000 \sim 10000\text{m}^3$ 取样一次,防渗体黏性土 $100 \sim 200\text{m}^3$ 取样1次,边角夯实部位每层2~3次,对填筑方量大的工程,虽然检测数量较多,但由于是抽样,所以也还是存在检测数据不能真实反映工程实际情况的现象。本文以阿白冲水库拦河坝为实例进行探讨,从工程参建各方质量行为、工程实体质量、坝体变形、渗流观测数据、影响施工质量的“人、材、机、法、环”因素等方面展开评价,并与规范要求的质量评定方法进行对比,从而寻求建立一种实时质量控制体系,加强或简化传统质量检验、评定方法,更全面地实施施工质量控制,对水利工程施工具有重要意义。

1 工程实例

1.1 工程概况

石屏县阿白冲水库是以农业灌溉为主的中型水库,水库坝址以上控制径流面积 140.8km^2 ,多年平均径流量 2775.2万m^3 ,水库总库容 1538万m^3 ,灌溉面积 2.91万亩 ,总供水量 1718.8万m^3 。阿白冲水库工程由引水工程、枢纽工程和灌溉工程三部分组成,枢纽工程由拦河坝、溢洪道、输水(导流)隧洞组成,拦河坝为黏土心墙坝,最大坝高 89.4m ,主要建筑物大坝为2级,其他枢纽工程等别为Ⅲ等;水库枢纽工程设计洪水标准为50年一遇;校核洪水标准为1000年一遇;工程

区地震动峰值加速度为 $0.3g$,相应地震基本烈度为Ⅷ度,地震反应谱特征周期为 0.4s 。

1.2 拦河坝设计特征参数

拦河坝为黏土心墙风化料坝,坝顶高程 1567.00m ,坝顶宽 10m ,长 256.5m ,最大坝高 89m 。坝顶上游设 0.9m 高混凝土防护栏,坝顶下游侧设混凝土路缘石,坝顶为地砖路面。

黏土心墙顶宽 4.0m ,顶部高程 1566.00m ,底部高程 1477.60m ,心墙最大高度 88.4m ,上下游边坡均为 $1:0.2$,最大底宽 39.36m 。心墙上游侧与风化料相接处设置厚 3m 的混合反滤层,心墙下游侧与风化料相接处设置各厚 2m 的二级反滤层。坝体上游为三级坡,从上至下分别为 $1:2.5$ 、 $1:2.75$ 、 $1:3.00$;高程 1542.00m 设置 2.5m 马道,高程 1518.00m 结合度汛抬头坝布设,设置 6.0m 马道,上游铺筑黏土料防渗;下游为四级坝坡,从上至下为 $1:2.0$ 、 $1:2.25$ 、 $1:2.75$ 、 $1:1.5$,高程 1537.00m 、 1507.00m 设置 2.5m 马道,高程 1480.00m 设置 3.0m 马道,高程 1480.00m 以下为排水接体。详细尺寸见图1。

1.3 质量检测情况

针对坝体填筑,施工单位自检风化料共取样1235组,反滤料取样224组,心墙料取样2755组,室内渗透取样446组,现场渗透检测446组,加上监理平行检测及建设单位抽检,取样组数达11246组,考虑不同检测参数,总检测数达16578组。其中对施工影响最大的是防渗心墙在现场渗透检测,根据规范规定,若采用双环法检测,最快也需 24h 以上,严重影响坝体填筑的施工进度,检测与施工的矛盾突出。为解决这一问题,前期经过对比,确定单环法与室内渗透存在一定的关联性,即只要现场单环法检测渗透系数小于 $1 \times 10^{-5}\text{cm/s}$,则室内渗透的检测结果也能达到小于 $1 \times 10^{-5}\text{cm/s}$ 的要求,所以对心墙渗透检测方法进行了调整,以室内渗透检测结果作为主要的质量评定指标,现场则用较快捷的单环法作为辅助,只要单环法检测满足要求,即进入下一层的填筑施工。

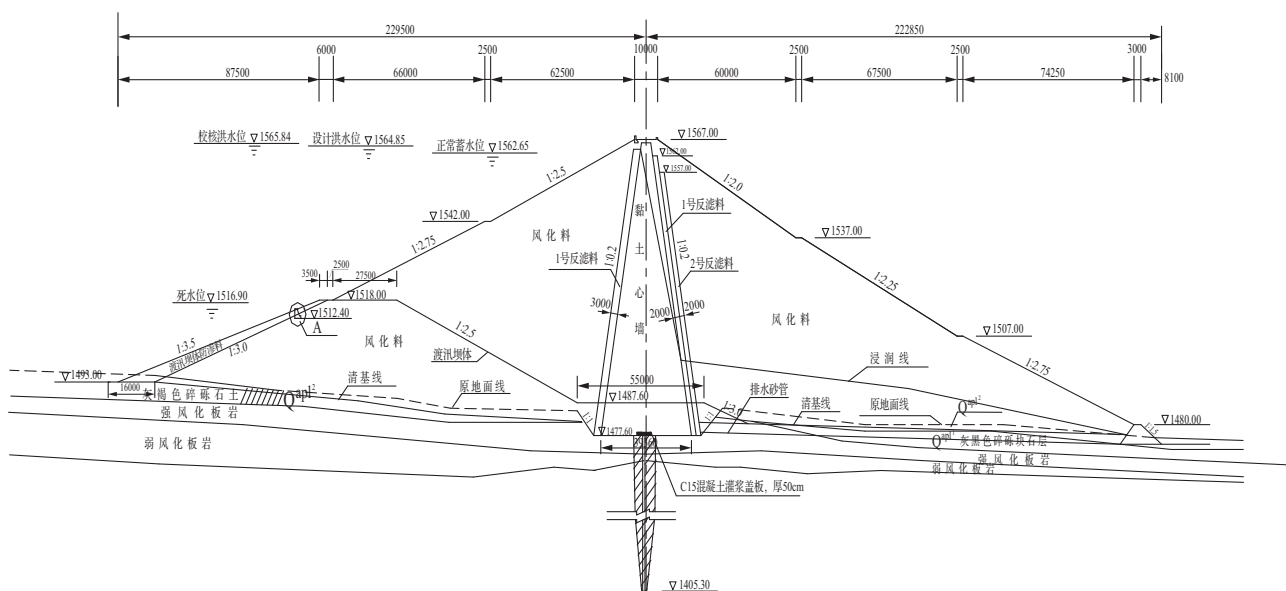


图1 坝体标准横断面图(尺寸单位:mm)

2 参建各方质量行为因素评价

2.1 质量体系因素

2.1.1 项目法人

项目法人为石屏县阿白冲水库工程建设管理局, 管理局下设办公室、征地组、工程科、财务科、质检科、安全保卫科六个科室, 人员配置 18 人, 其中专业技术人员 11 人, 各科室人员已就位并按各自职责开展工作。管理局明确了各科室责任, 各科室根据实际情况作出具体分工。项目法人的内设计机构、人员数量、主要人员资格、职称及建设管理职能符合相关要求。

工程建设管理局在工程建设中, 相关人员常驻工地, 负责管理工程日常事务, 工作过程中基本能按既定制度执行, 基本能按时审核各建设工序质量, 督促施工单位填写施工记录及质量评定资料, 与设计、监理、施工三方团结协作, 能有效地履行建设单位的质量管理职责。

2.1.2 设计单位

工程设计单位具有水利行业设计乙级资质, 同时具有勘察及测绘乙级、工程造价咨询乙级、水土保持方案编制乙级等多项勘察设计资质, 通过了 ISO9001: 2000 质量体系认证, 设计质量保证体系健全, 各项规

章制度完善。

设计项目负责人为高级工程师、注册土木工程师(水工结构), 地质设计代表为高级职称, 且勘察设计经验丰富。成立设计代表组具体负责施工期间设计事务, 根据施工进度要求, 分别指派水工、地质、测量、金结等专业人员住现场负责各专业事宜。设计单位参与工程勘察设计技术人员 28 人, 其中中级、高级职称人数 18 人, 设计单位组织了工程技术交底, 对现场出现的一般设计问题, 由设计代表现场解决, 并按统一格式发出修改通知, 对重大设计变更, 由设计单位编制设计方案, 并报项目批准单位审查批准后实施。设计代表现场服务到位, 能及时解决设计相关问题。设计人员结构合理, 专业齐全, 能够保证设计质量。设计单位资质、从业人员资格符合相关规范制度的要求。

2.1.3 监理单位

监理单位具有水利工程施工监理甲级资质、水土保持工程施工监理丙级资质。监理公司成立了石屏县阿白冲水库工程监理部, 设置水工、地质、施工、金属结构、测量、合同管理、信息管理等专业工程师参与施工监理工作。监理部设总监 1 名, 总监代表 1 名, 监理工程师 5 人, 监理员 4 名。总监理工程师、总监代表为高级工程师, 其他专业监理工程师均具有中级及以上职



称且参加过多项水利工程监理工作。监理部制定了监理规划及监理实施细则,根据监理规范要求,采用现场记录、发布文件、旁站监理、巡视检查、平行检测等方法进行监理,平行检测结论与施工单位自检、项目法人委托检测结果基本一致。工程实施过程中实行旁站、巡视、跟班监理,每完成一道工序都及时检查、验收、签质量合格卡,尽量缩短循环周期,加快施工进度,监理工作基本按监理规划及监理实施细则进行,监理人员满足工程建设需要。现场监理机构的组建、监理工作程序、方法和制度以及监理单位的资质、从业人员资格基本符合相关规范制度的要求。

2.1.4 施工单位

拦河坝工程施工单位具有水利水电工程施工总承包壹级资质。施工单位成立了工程项目部,项目部由15人组成,项目经理、技术负责人均为高级职称且持有一级建造师执业资格证书,其他技术人员、管理人员持有相关执业资格证书。施工单位进驻工地后,指派熟悉生产程序和施工工艺、有较娴熟施工组织能力和管理技巧且具有国家项目经理资质的项目经理。项目经理部下设质量监控管理部,选派了具有中级以上职称的工程技术人员为质量管理负责人。项目部制定了质量目标、相应管理制度及质量保证制度,在施工中,施工单位基本能按相关制度运行。施工单位项目管理人员能够保证工程质量符合规范要求。施工项目部的质量行为以及施工单位的资质、从业人员及其质量行为资格符合相关规范制度要求。

2.1.5 检测单位

质量检测单位具有岩土工程、混凝土工程、金属结构、机械电气和量测共5个类别资质,其中岩土工程、混凝土工程、金属结构、量测为甲级,工程开工前组建现场试验室,工作人员4人,其中高级职称1人,初级职称3人,4人均持有水利水电工程质检上岗证。检测人员胜任施工质量检测工作。质量检测人员的行为以及质量检测单位资质、人员资格符合相关规范制度要求。

2.1.6 参建单位质量行为评价

参建各方均成立了现场管理机构,制定了质量管理制度,质量管理人员基本能按要求到位履职,质量检查、控制、验收符合规范要求,质量体系运行正常。阿白冲水库拦河坝工程参建各方质量行为符合水利行业建设管理相关文件、规程及规范的要求,不存在影响施工质量的因素。

2.2 材料因素

拦河坝为黏土心墙风化料坝,筑坝的主要材料有黏土(心墙)、风化石(坝壳)、反滤料等。拦河坝工程施工使用的心墙黏土为含碎块、砾石的高液限黏土,取样试验,主要物理力学指标:粘粒含量为46%~74%,渗透系数小于 $A \times 10^{-6} \text{ cm/s}$,天然含水率为25.8%~35.8%,与最优含水率(23.7%~37%)接近,内摩擦角 φ 为 20° ,黏聚力 C 为45.38kPa。与相关规范规定要求对比,除黏粒含量偏高较大外,其余指标均可满足要求。其质量满足要求,储量48.15万 m^3 ,是设计用量24.66万 m^3 的1.95倍多。

坝壳料场位于坝址下游右岸山坡,距坝址1.0~1.5km,为板岩夹砂岩强-弱风化石,料场在昆阳群美党组(Pt_1)薄层状粉砂质、泥质板岩夹粉砂岩的强、弱风化层。取样试验值:含泥量(黏、粉粒)5.7%~7.8%,内摩擦角 $35.2^\circ \sim 36.2^\circ$,渗透系数大于 $A \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ 。储量1225万 m^3 ,是设计用量226.5万 m^3 的5.4倍;石料取自邑他得石料场,为岩质坚硬的石灰岩,质量较好,储量1020万 m^3 ,现有公路相通,运距24km;砂料采用邑他得石料场块石加工机制砂,储量丰富,质量满足设计要求。

2.3 施工机械因素

坝体黏土心墙、坝壳料、反滤层等主要施工机械如下:CAT330、320挖掘机1台(心墙料场),ZL50装载机1台,推土机1台(都在钱堤,1台进占作业,1台备用),自卸汽车8辆,自行式压路机1台(CA-25),自行式凸块碾型号为YZ32D2,2台32t自行式压路机,拖式振动碾型号为YZTY-22,推土机型号为TY-220,自卸汽

车 20t、4.5t 各 1 辆。拦河坝施工机械满足工程施工要求。

2.4 施工方法的因素

2.4.1 防渗心墙填筑

防渗心墙黏土料开采采用 1 台 ZL50 装载机配合 1 台 330 挖掘机开采,开采方式为立面垂直开采。铺土厚度 30cm;碾压机械为自行式凸块碾(YZ32D2),振压 8 遍,液压传动,激振力 590kN;填筑控制指标如下:设计干密度不小于 $1.45\text{t}/\text{m}^3$,内摩擦角为 20.0° ,黏聚力 20kPa,压实度不小于 99%,渗透系数不大于 $1 \times 10^{-5}\text{cm}/\text{s}$,含水率按该层最优含水率的 $+3\% \sim -2\%$ 控制。心墙黏土料填筑施工流程为:填筑面处理、洒结合水→两端接触面处理、刷泥浆→挖运黏土料上坝→进占法卸料→推土机散料按要求的铺土厚度整平→自行式压路机碾压 8 遍→电动夯和人工进行边角处理→质量检查及取样试验→层面处理和质量斑点处理→隐蔽验收及质量评定。

2.4.2 上、下游坝壳料填筑

铺土 60cm,碾压四个双遍,进占法铺料;填筑控制指标:内摩擦角不小于 28.40° ,黏聚力不小于 33kPa,干密度不小于 $1.85\text{g}/\text{cm}^3$,渗透系数不小于 $5.2 \times 10^{-3}\text{cm}/\text{s}$;风化料开采时,应严格控制全强风化层的含量,以保证其填筑质量;坝壳料填筑施工工艺流程为:仓面洒水润湿→自卸汽车进占法上料→推土机铺土找平→32t 自行式压路机碾压→边角处理→质检取样并作出质检结论→隐蔽验收签证并作出质量评定。

2.4.3 上、下游反滤料填筑

自卸汽车从堆料场运来反滤料后,人工拉线填筑。填筑工艺流程为:下覆层顶面的清理→测量定位上口线并拉线→填筑反滤料→反滤料填筑底脚线收整、清理→层顶面清理整形→平碾压实反滤料→质检取样并作出质检结论→隐蔽验收签证和质量评定。相对密度不小于 0.75,小于 0.075mm 的颗粒含量不大于 5%,级配符合设计要求。

2.4.4 施工方法评价

整个坝体填筑过程中,施工按监理批准的施工组

织开展,从每一道工序、每一个控制项目入手,严格执行规范要求,认真开展检测评定,施工方法满足规范要求。

2.5 施工环境的因素

工程区气象条件如下:多年平均气温 18°C ,极端最高气温 34.5°C ,极端最低气温 -2.4°C ,多年平均日照时数 2233.2h,多年平均相对湿度 75%,多年平均最大风速 $13.6\text{m}/\text{s}$,多年平均降雨量 925.2mm,多年平均蒸发量 1963.9mm。

拦河坝工程于 2010 年 8 月 1 日开工。2014 年 9 月 25 日,拦河坝工程全部施工内容完成。拦河坝施工期间未出现极端天气,雨季心墙用黏土含水量高,暂停施工,雨季后恢复施工,不存在影响施工质量极端气候,施工环境无制约因素。

2.6 施工质量风险管控

所有工程施工质量影响因素都会造成质量风险,总结以往的工作经验,影响质量的客观因素往往是可控的,真正造成质量问题的最大影响要素是人,大坝填筑施工使用的黏土料、风化料、反滤料、石料等质量靠人进行管控,施工机械靠人进行操作,施工方案由管理人员编制、具体施工靠工人实施,不利施工环境靠人干预解决,质量检测时取样是否具有代表性,与检测员的经验密切相关等。所以,阿白冲水库大坝施工对于施工风险的管控除了常规因素外,主要是加强了对参建各方技术人员的控制,包括对管理人员、施工人员,特别是施工人员施工过程中操作不规范、不科学行为进行及时纠正和管控。为降低质量风险,对施工人员进行质量标准化培训,对参建各方主要管理人员进行合同管理,保证设计、监理、施工、检测单位主要管理人员常驻工地时间,及时解决施工中出现的各种问题,充分发挥人对质量的正向影响。通过管住关键少数,有效避开各种不利因素,降低施工风险,保证工程施工质量。

3 拦河坝实体质量评价

工程项目划分由建设单位组织监理、设计、施工单位共同完成,划分方案上报质量监督机构审核确认。



拦河坝单位工程划分为16个分部工程,1066个单元工程。参加评定的单元工程共1066个,经评定单元工程质量全部合格,其中优良单元工程735个,单元工程优良率68.9%。经核备,16个分部工程质量全部合格,其中优良分部工程4个,分部工程优良率25%。拦河坝单位工程共核备分部工程16个,其中填筑类分部工程共9个,质量全部合格。质量评定统计结果见表1。

表1 质量评定统计结果

序号	分部工程名称	单元工程个数	优良单元工程个数	上报等级	核备等级
1	右岸滑坡体处理	15	10	合格	合格
2	大坝基础开挖	10	3	合格	合格
3	坝基及坝肩防渗	87	77	优良	合格
4	防渗心墙	149	113	合格	合格
5	渡汛坝体防渗料填筑	44	18	合格	合格
6	渡汛坝体填筑	81	32	合格	合格
7	上游坝壳料填筑	148	111	优良	优良
8	下游坝壳料填筑	189	138	优良	合格
9	上游反滤料填筑	85	70	优良	优良
10	下游1号反滤料填筑	84	68	优良	优良
11	下游2号反滤料填筑	80	66	优良	优良
12	坝脚排水棱体	21	5	合格	合格
13	上游坝面护坡	33	6	合格	合格
14	下游坝面护坡	25	13	合格	合格
15	坝顶	5	2	合格	合格
16	大坝观测设施	10	3	合格	合格
	合计	1066	735		

拦河坝单位工程外观符合相关规范的要求,外观质量评定为合格,施工中未发生过质量事故,施工质量检验与评定资料齐全,工程试运行正常,拦河坝单位工程施工质量符合相关规范的要求,工程实体质量评定为合格。

4 拦河坝蓄水安全鉴定结论

2015年委托安全鉴定机构对石屏县阿白冲水库工程进行蓄水安全鉴定,结论如下:④枢纽工程设计布置合理,工程等别、建筑物级别、地震动参数等选择符合有关规范要求;⑤水库正常蓄水位1562.65m,设计

洪水位1564.85m,校核洪水位1565.84m,大坝设计坝顶高程1567.00m,大坝黏土心墙顶高程1566.00m,高于正常蓄水位3.35m,高于校核洪水位0.16m。大坝坝顶安全超高满足规范要求;⑥大坝材料分区合理,防渗黏土料填筑压实度选择满足规范要求;心墙填筑渗透系数为小于 1×10^{-5} cm/s,满足规范及设计要求;对反滤料及过渡料进行的颗粒级配设计,满足土料与反滤料、反滤料与过渡料层间保护关系;反滤料、风化石料按相对密度控制,基本满足规范要求;⑦坝基开挖根据开挖揭露的地质情况,加深截水槽开挖,使截水槽基础置于强风化中部相对较完整板岩;坝体上游挖出有软弱的粉质黏土层,基础置于具有一定强度、变形较小的碎石土、漂卵石及块石层上;坝体下游清除全部碎石土、漂卵石及块石层,置于强风化板岩上;⑧坝基采用帷幕灌浆防渗,帷幕线沿坝轴线向左右两岸延伸,左岸至正常蓄水位与相对隔水层顶板交点;右岸防渗边界长度90m,帷幕线长419.7m,底界进入相对不透水层以下3~5m;经帷幕灌浆试验,确定灌浆孔排距,坝基防渗帷幕设计满足规范要求;⑨大坝坝体渗流分析、坝坡稳定计算结果满足规范要求;并进行了静力和动力分析,抗滑稳定安全系数满足规范要求。

5 施工期及运行期监测情况评价

阿白冲水库于2016年5月下闸试蓄水,2016年5月24日库水位1517.6m,2016年9月21日水位1550.05m,库容905.6万 m^3 。2017年7月21日最低水位1520.40m,库容211.8万 m^3 ,8月6日水位1536.61m,库容519.万 m^3 。

2013年6月19日,安装测压管581.2m,渗压计35支,大坝安装水平固定测斜仪30支、垂直固定测斜仪14支、位错计4支、心墙沉降管90m,完成坝体表面工作基点、校核基点和水平、垂直位移标点32个。

2011年2月10日至2020年12月30日包括施工期、蓄水期、运行期,监测数据如下:大坝上游戕台WY1-1~WY1-5沉陷位移桩最大位移量-5.9cm(WY1-3),最大沉陷量+9.3cm(WY1-3)。大坝坝顶WY2-1~WY2-7沉陷位移桩最大位移量-4.4cm

(WY2-3),最大沉陷量+8.6cm(WY2-3)。大坝下游戕台 WY3-1 ~ WY3-5 沉陷位移桩最大位移量+2.5cm(WY3-3),最大沉陷量+3.7cm(WY3-3)。大坝下游戕台 WY4-1 ~ WY4-5 沉陷位移桩最大位移量+3.3cm(WY4-4),最大沉陷量+1.6cm(WY4-3)。大坝下游反滤体顶 WY5-1 ~ WY5-4 沉陷位移桩最大位移量+3.1cm(WY5-3),最大沉陷量+0.5cm(WY5-3)。大坝下游坝脚三角堰量水高度0~40cm,堰顶高程1874.62m。观测最大渗漏量 $0.018\text{m}^3/\text{s}$ 、最小渗漏量 $0.007\text{m}^3/\text{s}$ 。

监测数据整理符合相关规范的要求,监测结果满足设计要求,总体工程运行情况良好。

6 结 语

阿白冲水库大坝填筑施工质量控制采用了实时监控体系,从质量体系、原材料、施工机械、施工方法、气候条件等方面入手,抓住“人”这个关键因素,有效规避施工风险,在保证工程料源稳定、质量控制程序符合规定、施工机械满足要求、施工参数符合规定及施工环境满足要求的前提下,对部分检测方法进行了优化,简化了耗时长检测环节,极大地提高了施工效率。质量评定时结合以上因素及工程实体检测数据进行综合判断,其可靠性优于单纯靠检测数据评定的方法。

水利工程施工条件复杂,施工质量影响因素多,质监部门难以在短时间内细致检查所有指标。阿白冲水库拦河坝工程填筑施工从控制参建各方质量行为开始,从“人、材、机、法、环”五个方面进行综合控制,结

合规范要求的检测数据进行综合质量评定,评定方法符合水利行业建设管理相关文件、规程及规范的要求,评定结论可靠性高,有利于解决检测与施工之间的矛盾,工程施工效率得到极大提高,可在工程建设中探索推广使用。◆

参考文献

- [1] 陈涛,李镇阳.混凝土施工质量评定系统软件设计及应用[J].水利建设与管理,2020,40(2):5-11,4.
- [2] 余春勇,张可,杨圣涛.碾压混凝土坝施工质量风险评价研究[J].水利经济,2018,36(3):45-49.
- [3] 余宗文.中小型水利水电工程施工风险管理分析[J].科技创新与应用,2017(29):132,134.
- [4] 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.
- [5] 刘志威.浆砌石重力坝坝体砌筑工程质量监督要点分析[J].水利建设与管理,2020,40(3):71-74.
- [6] 张岩.浅析土石坝工程的施工及质量控制[J].农业科技与信息,2020(1):123-124.
- [7] 于莉丽.水利水电工程中的土石坝施工技术研究[J].中国科技纵横,2020(23):92-93.
- [8] 贺喜,孙彤,宋志国.QC小组活动在提高施工质量中的运用[J].水资源开发与管理,2017(7):78-82.
- [9] 陈江豪.探析碾压土石坝施工工艺与质量控制[J].珠江水运,2020(9):3-4.
- [10] 李院生.土石坝设计施工技术研究与应用[J].水利技术监督,2020(1):3-5.
- [11] 郭建军,张同慧.土石坝工程土工试验检测技术综述[J].四川水利,2020,41(4):53-56,59.
- [12] 陆林广.高性能大型低扬程泵装置优化水力设计[M].北京:中国水利水电出版社,2013.
- [13] 中华人民共和国水利部.水泵模型及装置模型试验验收试验规程 SL 140—2006[S].北京:中国水利水电出版社,2007.
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.旋转电机定额和性能:GB 755—2008[S].北京:中国标准出版社,2008.
- [15] 郑源,刘君,周大庆,等.大型轴流泵装置模型试验的压力脉动[J].排灌机械工程学报,2010,28(1):51-55.
- [7] 徐磊,陆林广,陈伟,等.邳州站竖井式贯流泵装置模型试验研究[J].灌溉排水学报,2012,31(2):120-123.
- [8] 戴景,戴启璠.南水北调东线淮安二站泵装置模型试验研究[J].人民长江,2016,47(12):95-98,103.
- [9] 盛喆.基于多智能体的泵站多机组优化调度系统研究[J].水资源开发与管理,2019(10):61-67.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.泵站设计规范:GB 50265—2010[S].北京:中国计划出版社,2011.

(上接第13页)



城市地铁近距离下穿大型输水管道 防护技术

闫梦华^{1,2}

- (1. 辽宁润中供水有限责任公司, 辽宁 沈阳 110166;
2. 沈阳安腾物业服务有限公司, 辽宁 沈阳 110179)

【摘要】 城市地铁近距离下穿在线运行的大型 PCCP 输水管道时,为保证输水管道不间断地安全稳定运行,设计要求允许沉降量小,施工风险控制难度大。沈阳地铁十号线隧道穿越大伙房水库输水工程大型 PCCP 管道施工中采用支托结构与管棚支护防护技术,结合自动化监测系统联控应用,在防护施工和地铁隧道施工过程中输水管道产生位移及沉降变化时,联控系统及时调整设备,并通过定向注浆进行纠偏,取得了良好的效果,输水管道差异沉降值接近于零。

【关键词】 下穿;大型 PCCP 管;支托结构;管棚支护;自动化监测

中图分类号: TV52

文献标志码: B

文章编号: 2097-0528(2022)02-042-06

Protection technology for to penetrate large water pipeline in urban subway at short distance

YAN Menghua^{1,2}

- (1. Liaoning Runzhong Water Supply Co., Ltd., Shenyang 110166, China;
2. Shenyang Anteng Property Service Co., Ltd., Shenyang 110179, China)

Abstract: It is required in the design that the allowable settlement is small, and it is difficult to control the construction risk in order to ensure the uninterrupted safe and stable operation of the water pipeline when online operating large PCCP water pipelines are penetrated in the urban subway at short distance. The bracket structure and pipe shed support protection technology are adopted in large PCCP pipe construction when Shenyang subway line 10 tunnel crosses the water conveyance project of Dahuofang Reservoir. Joint-control application of automated monitoring system is combined. When the water pipeline produces displacement and settlement changes during protection construction and subway tunnel construction, the equipment can be adjusted timely by the joint control system. The deviation is corrected through directional grouting with excellent effect. The differential settlement value of the water pipeline is close to zero.

Keywords: downward penetration; large PCCP pipe; support structure; pipe shed support; automated monitoring

1 工程概况

沈阳地铁十号线是沈阳地铁线网“双 L”线中的一

条线路,一期工程全长约 30.8km,全部为地下线隧道,2013 年 3 月 22 日开工建设,2020 年 4 月 29 日正式运营。

收稿日期: 2021-02-19

作者简介: 闫梦华(1979—),女,本科,助理工程师,主要从事工程档案管理、工程技术管理等相关工作。

桑林子车辆段出入线隧道(简称出入线隧道)与大伙房水库输水工程大型输水管道(简称输水管道)交叉。大伙房水库输水工程是向辽宁省抚顺、沈阳、辽阳、鞍山、营口、盘锦、大连等七城市输水的一项大型区域性水资源配置工程,输水工程的供水量占该区域总供水量的50%以上,受益人口超过1400万,输水总量约为327万 m^3/d 。

2 工程地质

根据钻探揭示,出入线隧道位于冲洪积扇中部,沉积的地层颗粒粗,分布连续,上覆黏性土层。出入线隧道范围内的地下水赋存于砾砂、圆砾等土层中,按埋藏条件划分,属第四系孔隙潜水。交叉段出入线结构覆土深度为6~12m,主要穿越地层为粉质黏土、中粗砂、砾砂、圆砾。中粗砂、砾砂、圆砾层中含有丰富地下水,施工中容易产生塌方、地基沉陷,容易引起输水管道沉降、位移等。

3 交叉穿越工程的主要风险源分析

3.1 输水管道概况

出入线隧道下穿两根正在运行的输水管道,输水管道内径3.2m,外径3.8m,水平中心距15m,覆土约3.6m,材质为预应力钢筋混凝土承插管(即PCCP管),分节长度为5.0m,设计水压力为0.6MPa。

3.2 出入线与既有输水管线相对位置关系

平面关系见图1:出入线隧道与输水管道平面投影斜交,左线隧道与输水管道成 53° 交角,下穿输水管道斜长23.7m,右线隧道与输水管道成 57° 交角,下穿输水管道斜长22.8m。

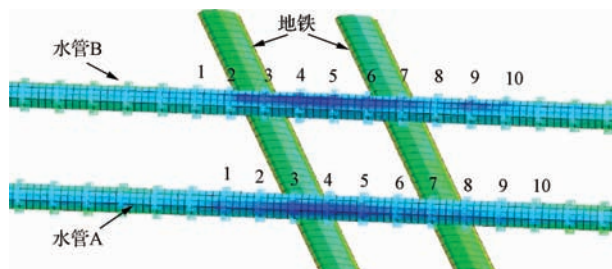


图1 出入线与输水管线相对位置关系

纵断面关系:出入线隧道右线与既有输水管道B、

A交点处竖向净距3.54m、3.32m,出入线隧道左线与既有输水管道B、A交点处竖向净距3.09m、2.18m。

该工程为一级风险工程。

3.3 输水管道承插口最大允许变位

出入线隧道采用盾构机施工穿越两根输水管道,穿越处输水管道额定工作压力0.6MPa,管道为 $2 \times \text{DN}3200$ PCCP管,单节长度5m,管道承插接口采用F型双胶圈密封,接口允许最大转角 0.25° ,考虑管道沉降及敷设管道时的施工误差,按系数0.8折减,接口处的最大允许差异沉降为

$$\Delta l = L \sin \alpha \cdot k / 2$$

式中: Δl 为允许最大沉降量,mm; L 为单节管道长度,mm; α 为接口允许最大转角, $(^\circ)$; k 为折减系数,取0.8。

本工程中, $\Delta l = 5000 \times \sin 0.25^\circ \times 0.8 / 2 = 8.7\text{mm}$ 。即盾构下穿输水管道的接口差异沉降控制指标不得大于8.7mm。

4 难点分析

由于输水管道内压力大(0.6MPa),输水管道日供水高达327万 m^3 ,如果此处输水管道爆管,以最快的速度关闭最近阀门,管道内也有大约10万 m^3 水喷射而出,将淹没附近居民区及工厂等相关设施,并影响下游城市及1400万人的吃水安全,将造成巨额损失以及严重的社会影响。同时,如果输水管线爆管漏水淹没地铁隧道,将造成无法估量的损失和社会影响。

地铁隧道盾构施工前,需要对正常运行的输水管道实施防护,比选防护方案,研究确定可行的防护措施。既要考虑防护措施的设计合理性,又要有应对既有大型输水管道差异沉降变形或位移的控制措施等。

在防护工程和地铁隧道盾构施工中,需对输水管道设计并实施及时准确有效的监测方案。对既有大型输水管道的变形或位移监测,从施工前至施工完成后一段时间,需要实时连续监测,并需要自动报警提示。

5 防护技术研究与应用

5.1 支托结构研究与应用

为了解决地铁隧道施工过程中输水管线周围土层

松动,造成输水管线下降的问题,设计一种地铁出入线盾构法下穿输水管线支托结构,见图2,支托结构包括工作坑、管棚、固定梁和桩支座。在两条输水管道外侧设置顶进井1号工作坑、2号工作坑,输水管道中间为接收井3号工作坑,工作坑作为管棚施工的操作空间。

工作坑底设置钢筋混凝土钻孔灌注桩,作为桩支柱,分别从1号工作坑、2号工作坑向3号工作坑顶进密排钢管作为支护管棚,管棚两端与钻孔灌注桩顶端设置钢筋混凝土固定梁。支托结构就像桥梁,管棚上方支撑输水管道,地铁隧道在管棚下方通过。

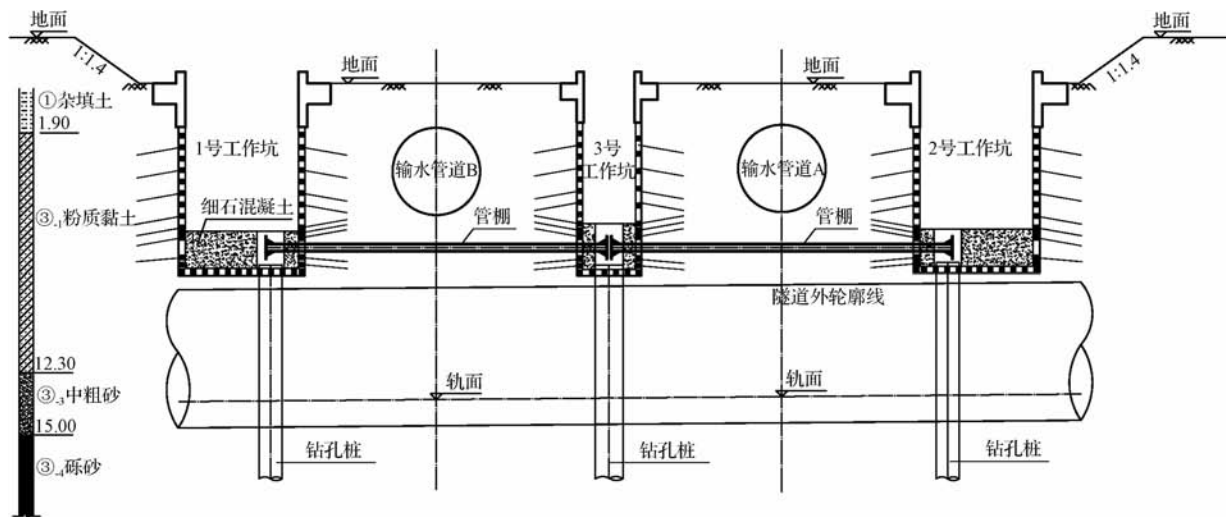


图2 地铁出入线盾构法下穿输水管线支托结构

5.1.1 支托结构钻孔灌注桩设计

在工作坑竖井内打设钻孔灌注桩作为底部托梁基础。根据工作坑布置位置以及承载输水管道的分布力计算,钻孔灌注桩设为摩擦桩。其中,1号工作井、2号工作井分别设置5根,桩径1000mm,桩长25m,端承摩擦桩 $f_{ak}=4500\text{kN}$;3号工作井设置6根,桩径1200mm,桩长25m,端承摩擦桩 $f_{ak}=8300\text{kN}$,共计16根。

5.1.2 工作竖井圈梁设计

工作井采用倒挂井壁法施作,在施作工作井前,先在地表进行竖井圈梁施工,竖井圈梁尺寸为1400mm×900mm,采用C35钢筋混凝土。

5.1.3 工作井施工

工作井采用倒挂井壁法成井,跳孔施工,竖井尺寸为6m×5.5m(1号井、2号井)和4m×2.8m(3号井),跳挖井间土体,形成整体工作井布置形式。

工作井开挖采用挖机作业,每开挖完成一榀立即进行井壁竖向锚管打设。井壁锚管采用 $\phi 32 \times 3.25\text{mm}$ 小导管,长2.0m,横向0.5m,梅花形布置,非加密区竖向间距为2榀格栅一打,水平倾角 10° ;加密

区竖向间距为每榀一打,水平倾角 5° ;锚管打设完毕后初喷C25混凝土。初喷混凝土凝固后在井壁挂 $\phi 7.5 @ 150\text{mm} \times 150\text{mm}$ 单层钢筋网片,架设钢筋格栅,喷射C25速凝混凝土;竖井四角加设I20b工字钢斜撑,竖向每榀格栅架设一道。

重复上述步骤,直至井底并封底。最后开挖井间土体,步骤同上,形成整体工作井。整体工作井施工完毕后,在中隔壁上开挖门洞,以便进行桩顶连续梁的施工。

竖井施工至设计标高后,进行壁板钢筋格栅的安装,并浇筑C25混凝土。

5.1.4 桩顶连续梁施工

密排管棚及管内注浆。地面袖阀管布孔完毕后开始施工桩顶连续梁,连续梁尺寸有1200mm×2000mm、12000mm×2500mm两种规格。桩顶连续梁采用C35钢筋混凝土现浇。连续梁混凝土强度达到80%后方可回填基坑。

5.2 管棚支护防护设计

为保证出入线双隧道盾构穿越在线运行的两根输水管道安全稳定,有效控制盾构施工引起的输水管道

沉降及位移变化在允许范围内,在输水管道与区间隧道中间架设 $\phi 299@350\text{mm}$ 的密排钢制管棚作支护,管棚两端采用钢筋混凝土灌注桩作支撑,桩顶架设钢筋混凝土连续梁作为管棚的固端支撑座。

管棚在输水管道下方与地铁盾构之间施作,距离输水管道底部 $1.0\sim 1.7\text{m}$ 。

为保证支护效果和施工质量,将管棚支护结构优化为锁扣管棚支护结构,即将钢管两侧按一定参数通长焊接角铁形成扣槽轨道,相邻钢管沿轨道施工顶进并形成扣接,多根钢管的排列扣接成为幕墙,使支护钢

管成为整体并封闭相邻钢管之间的缝隙,隔水挡土。见图 3、图 4。

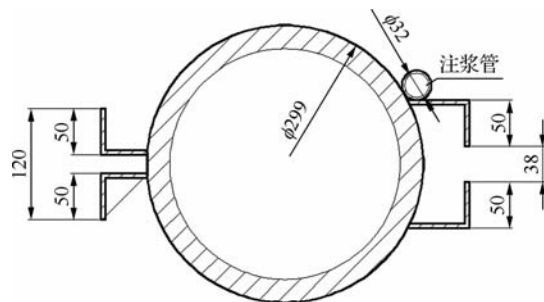


图 3 锁扣管棚结构 (单位:mm)

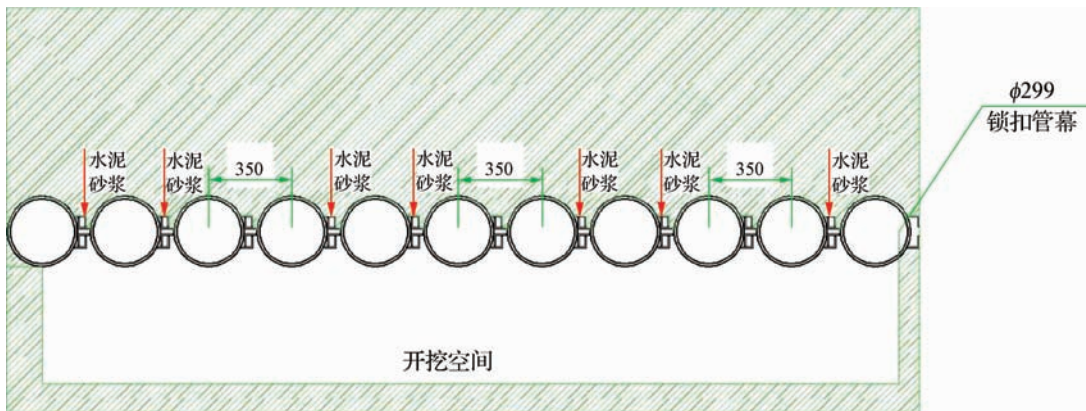


图 4 管棚支护横截面图 (单位:mm)

5.3 自动化监测系统的研究与应用

5.3.1 自动化监测系统的设计研究

针对工作坑开挖、管棚加固、盾构下穿及隧道周围注浆施工对输水管道产生的影响,设计安装自动化变形监测系统,用以观察沉降位移情况,及时掌握各工序可能对既有输水管道结构的影响,确保既有输水管线的安全。

在基坑开挖影响范围内,布置地表监测点,每 5m 一个监测断面,且与管线上方地表测点处于同一直线布置。沿输水管道 A、B 方向 65m 内(每节管 5m),在每节管道接头处左右布设 2 个,两根输水管共 52 个管顶沉降监测点;在地铁隧道组装管片每节管中间处布设管顶上方地表监测点 16 个。自动化监测项目监测点汇总见表 1。

在管顶沉降、管线上方地表沉降监测项目中,初选方案一采用瑞士徕卡 MS50 全站仪,测角精度为 $1''$,测

表 1 自动化监测项目、监测点汇总

序号	监测项目	数量	测点布置
1	管顶沉降、差异沉降、水平位移	52 个	隧道边线与管线相交 65m 范围内,每 5m 一节管,在每节管道接头处左右布设 2 个,两道管线 26 节
2	管线上方地表监测	16 个	隧道中线与管线相交 40m 范围内,每 5m 一个测点,出入线两道管线共布设 16 个点

边精度为 $1.0\text{mm}+2.0\text{ppm}$;方案二采用瑞士徕卡 TM50 自动全站仪,测角精度为 $0.5''$,测边精度为 $0.6\text{mm}+1\text{ppm}$ 。经过比选,根据测量精度要求,选择瑞士徕卡 TM50 自动全站仪作为数据采集的仪器,配以自动化监测软件,定时启动仪器进行自动化数据采集,采用无线网络进行数据传输。采集的数据经软件处理后,生成变形监测报表。

自动化监测系统是基于测量机器人的有合作目标

(照准棱镜)的变形监测系统,自动监测系统的组成见图5。

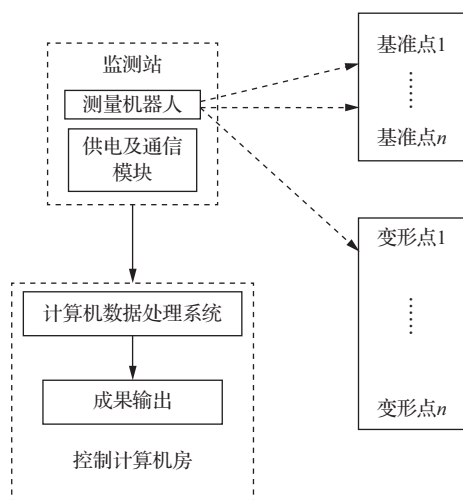


图5 全站仪自动监测系统组成

5.3.2 管线自动化监测系统结构

测量机器人自动变形监测系统硬件从空间分布上划分,主要有布设于监测区域内的监测设备和布设于办公室的远程控制设备。监测区域内测量机器人、基准点和监测点棱镜构成监测系统的主体,基准点布设于变形区域之外的稳固不动处,作为系统形变的参照基准,监测点按设计布设在管线上方,测量机器人即测站点既可布设于变形区域外也可设于变形区内,其他设备如无线远程电源开关、温度气压传感器、无线路由和工控机等都布设在控制箱内。办公室是系统远程控制及数据处理的交互中心,需运行远程控制及后处理系统的计算机和接入 Internet 网络的有线或无线路由等软、硬件。自动化监测系统硬件结构见图6。

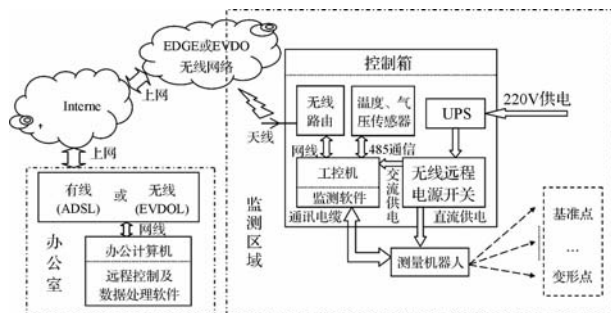


图6 自动化监测系统硬件结构

管线自动化监测软件系统具有以下优点:

a. 系统使用灵活多样。系统远程数据传输,基于 Internet 网络,可在办公室计算机与现场监测仪器之间实现实时交互控制,可定期通过 E-mail 自动向数据处理软件发送数据。

b. 观测方案的优化。软件可根据需要调整每个监测点的个性化观测方案,如每个测点的测回数,小视场开关、遮挡等待时间等都可以分别设置。

c. 实时大气折光模型改正。根据获取的大量温度、气压数据,建立大气折光改正模型,提高系统高程精度。

d. 测站三维坐标的实时动态解算,提高测量数据的精度

5.3.3 自动化监测点的施工方法研究

输水管道布点前先进行管道开挖探测,选择半抱箍+刚性连接杆的方式,管道开挖至管顶顶部后,预留300mm人工清理管线表面泥土,用水泥砂浆加108胶将事先加工的1000mm×30mm×3mm的扁钢弯成与管道外径相同的弧度,扁钢上焊接连接杆固定在管道上,连接杆长度根据现场开挖管线覆土厚度确定,用PVCφ50套管对连接杆进行保护,以减少连接杆与土体的摩擦力,套管内回填细砂,连接杆顶端焊接70mm×30mm×30mm角铁,三角铁侧面钻φ8孔固定小棱镜,所有反射棱镜均采用52mm直径的反射棱镜,点位埋设后对管线进行土体回填,回填后确保点位高于地面100mm,管线上方地表监测点埋设方式与管线竖向、水平位移监测点埋设方式相同,见图7。

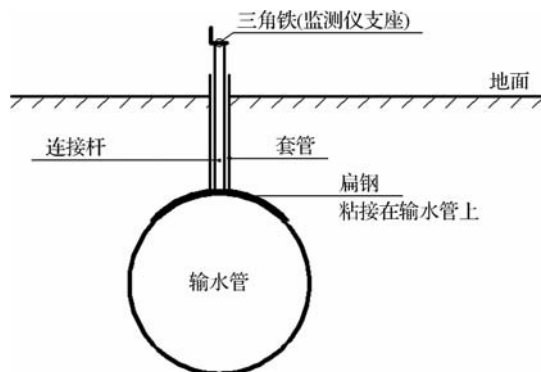


图7 管顶沉降、水平位移及管线上方地表自动化监测点标志

6 自动化变形累计量分析

沈阳地铁十号线桑林子车辆段出入线隧道盾构区间下穿大伙房输水管线段施工工期为2018年7月至2019年3月下旬。经过近10个月的自动化监测,2019年3月18日累计变形量为最终的测量成果。

6.1 地表的累计变形分析

根据监测数据绘制地表 X 方向累计变形量,由图8可以看出, X 向变形最大量为3.54mm,可见管线上方地表监测值都在控制范围内,并且未达到预警值。

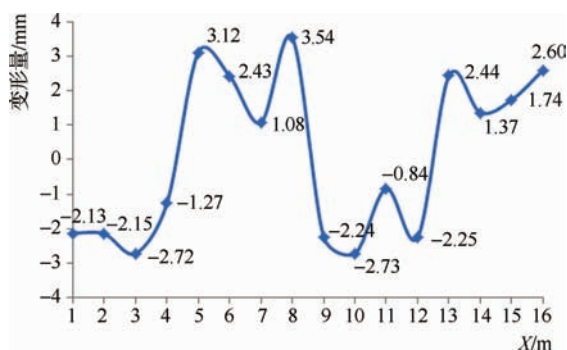


图8 地表 X 方向累计变形量

6.2 输水管线的累计变形分析

根据监测数据绘图,A管线的管顶水平位移和管顶沉降情况见图9,可以看出, X 向变形最大量为3.99mm,可见管线水平位移和管顶沉降都在控制范围内,并且未达到预警值。

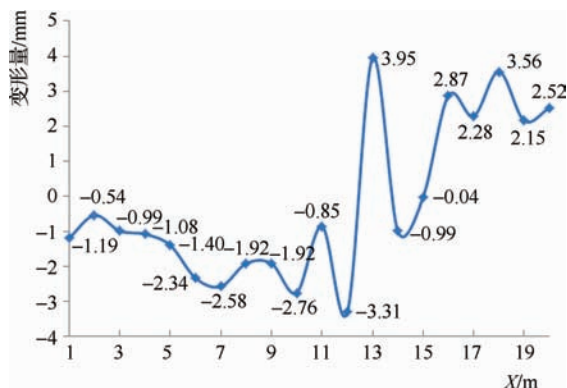


图9 管线A线管顶 X 方向累计变形量

B管线的管顶水平位移和管顶沉降情况见图10,可以看出, X 向变形最大量为4.3mm,可见管线水平位移和管顶沉降都在控制范围内,并且未达到预警值。

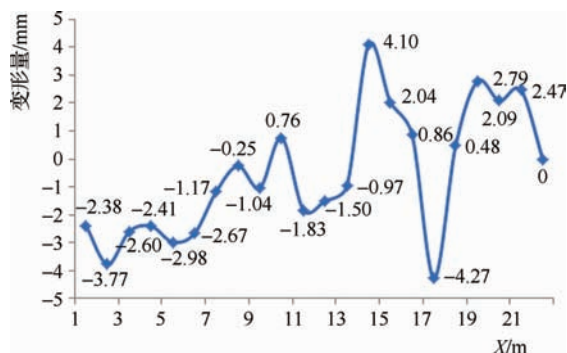


图10 管线B线管顶 X 方向累计变形量

6.3 管顶沉降不均匀性分析

为掌握经过工作坑开挖、管棚加固、盾构下穿管线等工序后的不均匀沉降情况,对A、B管线的变形数据进行整合分析,得出差异变形量,见图11、图12。由图可知两条管线的差异沉降都在0.5mm以内,小于控制值8.7mm,未超出控制范围,沉降均匀,管线和基础不易被破坏。

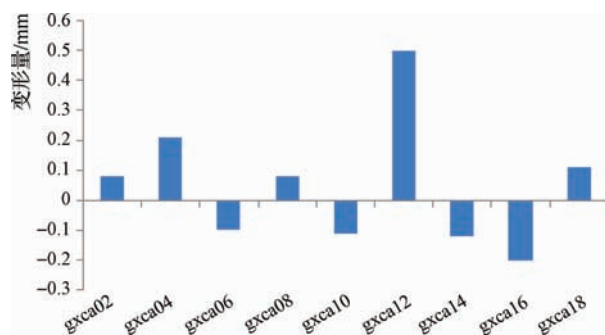


图11 A管线管顶差异沉降情况

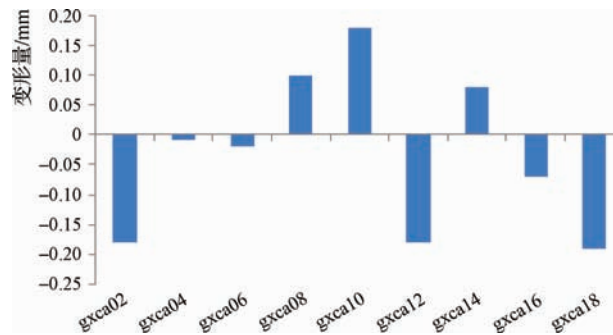


图12 B管线管顶差异沉降情况

7 结语

沈阳地铁十号线城市地铁近距离下穿既有输水管道(大伙房水库输水工程大型PCCP输水管道)在国内尚属首例,支托结构管棚支护防护(下转第70页)



涵洞钢内模移动台车的设计与应用效果

南晓飞¹ 程士华²

(1. 濮阳黄河河务局, 河南 濮阳 457000;
2. 鄄城县随官屯镇人民政府, 山东 菏泽 274704)

【摘要】 为确保范县彭楼闸改扩建工程(渠首段)2021年汛前具备落闸挡水条件和黄河大堤回填要求,采用“三个台车”的思维理念,以“模拟台车”为框架、“数字台车”数据为支撑,在以往施工经验的基础上自行设计可移动涵洞钢内模“实体台车”。通过实践应用,体现出该技术具有先进性、安全性、可操作性、质量可靠性等优势,能有效缩短工程工期、降低工程造价。“三个台车”技术在范县彭楼闸改扩建工程(渠首段)工程的成功经验可供类似工程参考。

【关键词】 模拟台车;数字台车;实体台车;对比分析;应用效果

中图分类号: TV53

文献标志码: A

文章编号: 2097-0528(2022)02-048-07

Design and Application Effect of Mobile Trolley for Culvert Steel Internal Form

NAN Xiaofei¹, CHENG Shihua²

(1. Puyang Yellow River Bureau, Puyang 457000, China;
2. Suiguantun Town People's Government of Yuncheng County, Heze 274704, China)

Abstract: 'Three-trolley' concepts are adopted in the project in order to ensure sluice falling and water retaining conditions in Penglou sluice reconstruction and extension Project (canal head section) before the flood season of 2021 and backfilling requirement of the Yellow River levee. 'Analog trolley' is adopted as the framework. 'Digital trolley' data is adopted as the support. The mobile culvert steel internal form 'entity trolley' is self-designed on the basis of previous construction experience. The practical application shows that the technology is advanced, safe, practicable, quality-reliable, etc. It can effectively shorten the project period and reduce the project cost. The successful experience of "three-trolley" technology in Penglou Sluice Reconstruction and Extension Project (canal head section) in Fan County can be used as a reference for similar projects.

Keywords: analog trolley; digital trolley; entity trolley; comparative analysis; application effect

1 工程概况

随着黄河小浪底调水调沙,黄河下游河道持续下切,原彭楼灌区渠首处河道下切约2.8m,造成彭楼引

黄闸过流能力严重不足、闸前渠道淤积严重,故对原彭楼闸进行改扩建。范县彭楼改扩建工程设计灌溉面积233.54万亩,工程等别为I等,工程规模为特大型。改扩建工程渠首段的主要建设内容为彭楼渠首闸、渠

收稿日期: 2021-04-07

作者简介: 南晓飞(1968—),男,本科,高级工程师,主要从事水利工程建设与管理工作。

首段引渠和彭楼穿堤闸,其中渠首闸工程位于彭楼险工 27~28 坝之间,闸轴线与工程连坝轴线夹角成 60° ,闸室后接一联 5 孔的 6 节钢筋混凝土箱形涵洞($6 \text{ 节} \times 10 \text{ m}$);穿堤闸工程位于黄河北岸大堤桩号 106+600 处,闸轴线与黄河大堤垂直,闸室后接一联 5 孔的钢筋混凝土箱形涵洞($14 \text{ 节} \times 10 \text{ m}$)。

2 方案思路

2.1 缘由

范县彭楼改扩建工程的渠首闸和穿堤闸的结构基本相同,两闸闸室出口的每节涵洞段的净宽和净高结构尺寸均为 $3 \text{ m} \times 3.5 \text{ m}$,顶板、底板、边墙和中隔墙的厚度均为 0.6 m ,每节长均为 10 m ,为一联 5 孔;不同之处只是节数不同,渠首闸涵洞共 6 节,穿堤闸涵洞共 14 节。

针对涵洞结构的共同点,相关技术人员借鉴以往的施工经验,认为可采用满足涵洞结构、同一钢结构尺寸的钢内模台车进行施工,台车不但要保证钢内模的可移动性,还要保证钢内模的整体性、强度和刚度等要求。应用这一方法,能有效降低施工成本,全面压缩施工工期。

2.2 方案确定

根据渠首闸和穿堤闸涵洞段断面、结构型式的一致性,理论上确定采用“三个台车”方案:①依据图纸设计的结构尺寸通过 3D 软件在电脑中绘制出台车模型,设计出可升降、可固定、可行走的“模拟台车”;②对预设的“模拟台车”设计出不同规格型号的待拼装模板尺寸图纸,并计算出钢内模台车的混凝土荷载、移动荷载、强度、刚度、拉杆、支撑等数据,构建“数字台车”;③在模拟台车和数字台车基础上工厂制作、加工、现场试拼、安装和运行“实体台车”。

3 移动台车设计

3.1 模拟台车

通过 3D 软件绘制出完全符合施工设计图纸结构以及断面尺寸的立体台车,为台车的模板设计提供基本理论数据,见图 1~图 3。

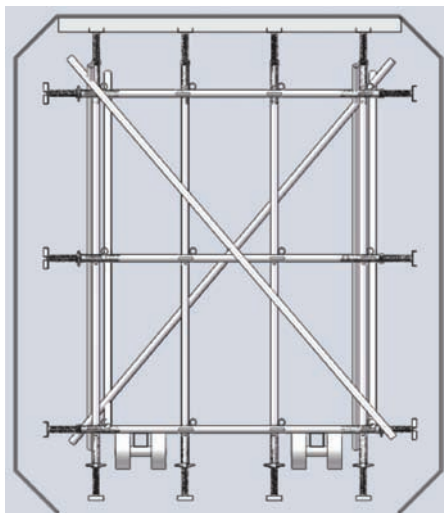


图 1 台车横断面

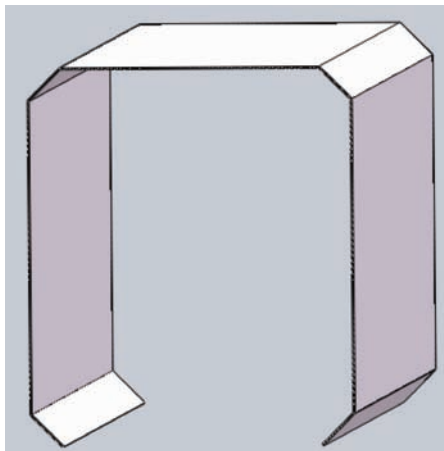


图 2 模板断面

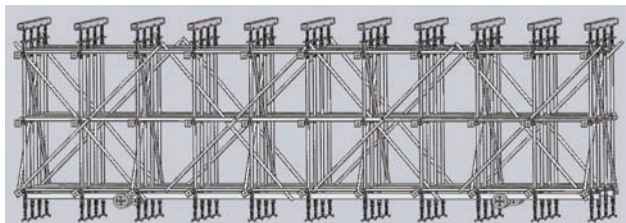


图 3 支撑纵断面

3.2 数字台车

两闸涵洞段过水的断面尺寸为 $3 \text{ m} \times 3.5 \text{ m}$,每节长度为 10 m ,为一联 5 孔的结构型式,其中渠首段共计 6 节,穿堤闸共计 14 节,为确保 2021 年汛前具备下闸挡水条件,合理计算成本和效益,计划渠首闸使用一套“一联 5 孔”的定型钢内模移动台车,穿堤闸使用两套



“一联5孔”的定型钢内模移动台车。在确定模拟台车方案理论基础前提下设计指导施工的模板设计图纸。

3.2.1 钢模板设计

根据单节涵洞断面厚度、长度和宽度,为保证钢内模的强度和刚度,确定钢模板的板厚为5mm。

a. 顶模板设计。顶板设计采用纵向两排各7块1.2m×1.5m的钢模板并用螺栓进行拼接。

b. 侧模板设计。侧板设计采用组合钢模板,钢模板规格有1.2m×1.5m、0.2m×1.5m,纵向均为7块,同样用螺栓进行拼接。

c. 倒角模板设计。根据施工图纸要求,涵洞洞身4个角为135°倒角,故台车纵向两侧采用工厂加工组合式倒角钢模板与顶板、侧板连接,倒角组合钢模为0.35m×1.5m、0.1m×1.5m,各为7块纵向布置,用螺栓进行拼接。

3.2.2 支撑设计

a. 钢管支撑。为提高台车的强度、刚度和稳定性,台车钢内模的支撑至关重要,设计采用 $\phi 50$ 壁厚为3mm的钢管支撑。横断面竖向设4排钢管,横向设3排钢管,左右和上下侧净宽度为0.6m;纵断面横向支撑采用3排钢管,纵向采用15排钢管布置;台车内侧横断面和纵断面方向各设置剪刀撑4组进行加强加固。

b. 升降顶丝设计及连接。台车由钢模板拼装为整体形式,在使用钢管进行“硬”支撑的前提下仍需要可松可紧的“软”支撑,“软”支撑设计为高强螺杆可旋转顶丝,在台车内部中每道纵横钢管的两端均设置顶丝,见图4。

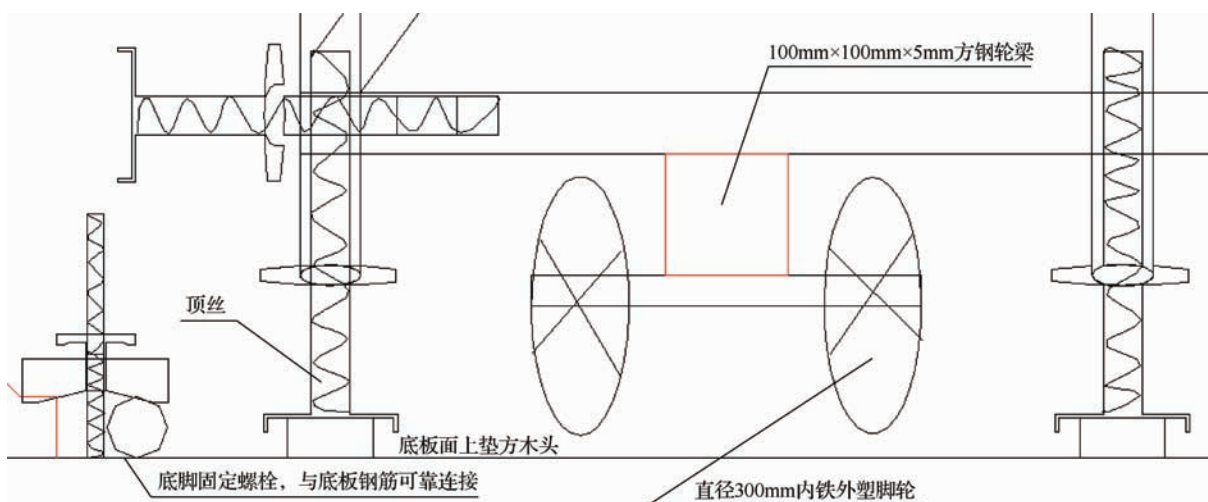


图4 顶丝连接图

顶丝作用为:①可使台车顶模的高程有可控制性的调整支撑;②为使钢管间保持整体和垂直度可微调紧固;③可抬起行走用的滚动脚轮;④作为台车的主要荷载支撑。

c. 椎体和拉杆。为保证台车侧面与涵洞洞身混凝土墙体外侧钢模板的强度和稳定,不至于在浇筑混凝土时“跑模、涨模”,使用一般的对位螺杆满足不了厚度为0.6m的混凝土的侧压力,故采用高强螺杆与椎体连接、双钢管配合压板进行固定和对拉,见图5。

3.2.3 移动设计

钢内模台车设计初衷是快捷、高效、降成本,为达到这一目标,当涵洞顶的混凝土强度达到75%以上时,能把台车轻松地成型的混凝土涵洞中移动到下一节待施工的涵洞位置处,首先要保证能脱模和移动。

a. 滚动轮。整体台车脱模后需要行走到下节涵洞作为内模进行混凝土浇筑,台车的移动有轨道式、电动式、液压式、滚动式等方式,从低成本思路考虑,台车设计采用 $\phi 300$ 滚动式内铁外塑双脚轮行走方式。

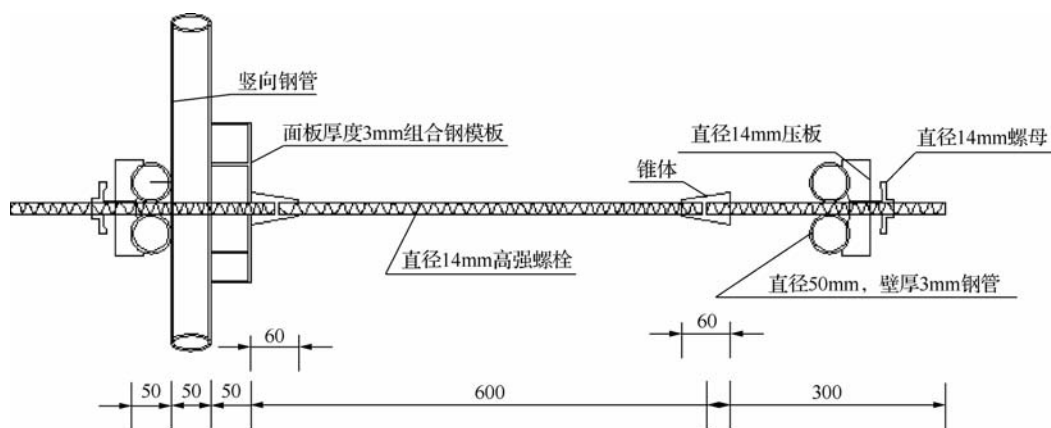


图5 模板拉杆细部图(单位:mm)

b. 轮梁设计。当滚动轮行走时,轮梁承担着台车及内部所有钢管重量的作用,故轮梁设计为两根通长

为9m的100mm×100mm×5mm方管焊接到双脚轮中轴上,见图6。

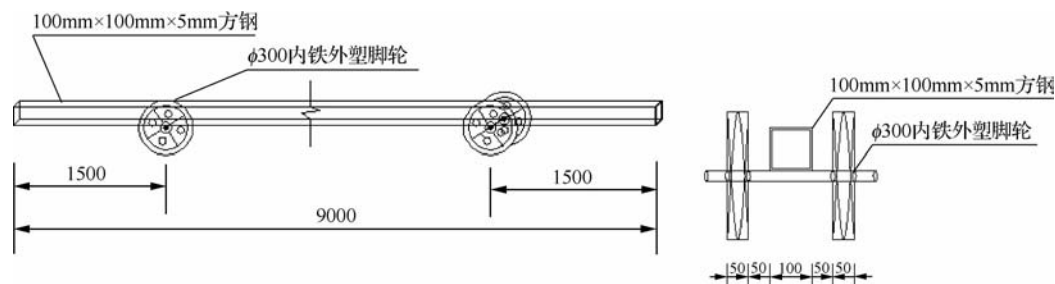


图6 轮梁纵横断面(单位:mm)

3.2.4 承载力验算

涵洞台车的钢模板分为顶模和左右侧边模,台车的荷载主要有混凝土荷载、模板及其支架自重荷载、钢筋和埋件的荷载、工作人员及浇筑设备工具荷载、振动混凝土的荷载、活荷载等,这些荷载主要通过顶模传递到台车内部各钢管支架后由混凝土底板承载;边模主要受侧压力的荷载,侧压力与浇筑混凝土的高度密切相关。

a. 台车边模侧压力验算。涵洞两侧模板的固定主要依靠高强度的螺杆(模板拉杆)紧固内外侧钢管进行。

对侧墙在混凝土浇筑时对钢模板的最大侧压力进行计算,参照《建筑手册设计概念脚本过程》中“现浇混凝土结构模板的设计”、《水闸施工规范》(SL 27—2014)和《混凝土泵送施工技术规程》(JGJ/T 10—2011),计算公式为

$$F_0 = 0.22\gamma t_0 \beta_1 \beta_2 \sqrt{v} \quad (1)$$

式中: F_0 为浇筑混凝土时侧压力,kN/m²; γ 为混凝土的重度,kN/m³; t_0 为新浇混凝土的初凝时间,h;当缺乏试验资料时,可采用 $t_0 = 200/(T + 15)$ 计算; T 为混凝土的温度,℃; β_1 为外加剂影响系数,不加外加剂时取1.0,掺有缓凝作用的外加剂时取1.2; β_2 为混凝土坍落度影响修正系数,当坍落度小于3cm时取0.85,当坍落度为5~9cm时取1.0,当坍落度为11~15cm时取1.15; v 为混凝土的浇筑速度,m/h。

通过分析计算可知,涵洞侧墙的侧压力满足设计值,同时台车侧模混凝土的浇筑高度仅为3.5m,侧压力受力较小,只要拉杆刚度和锚固件的质量可靠,基本可对冲台车的侧压力影响。

b. 台车顶模压力验算。在涵洞顶混凝土浇筑时混凝土的自重、顶板钢筋的重量及可变荷载等靠台车模板支撑,模板的整体强度即有顶板和内支撑的钢管



来承受,以保证模板在工作时有可靠的稳定性。

台车模板沿水流方向看是个长方体,涵洞是一联5孔的结构型式,即一套涵洞模板由5台台车组合而成,这里只对其中一孔的单个台车进行受力分析。模板顶混凝土厚度为0.6m,台车的顶模为10m×2.5m,通过前述“钢管支撑”的设计是加密布置,其力学模型以顶部长1.5m、宽2.5m这部分模板进行分析和强度校核,其受力简图见图7。

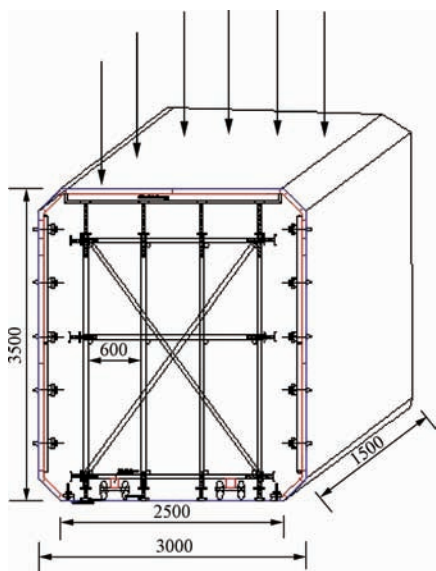


图7 台车顶模板受力简图(单位:mm)

利用有限元理论进行分析,有限元分析是通过电算进行的,这里按一根梁进行分析,简化后梁单元力学模型按简支梁处理,因为两边有钢管立柱支撑。通过分析计算可知,整个模板的强度和刚度是足够的。

4 实体台车和施工过程控制

4.1 移动台车行走基面

在台车拼装前首先对“一联5孔”涵洞的基础进行全面施工,基础是台车行走,上部结构、回填土方承载的基面。本工程的基础是C30混凝土,基面的质量和平整度是台车能否顺利行走的前提,另外,基础质量也是整个涵洞高程控制的标尺,是混凝土质量的必控项。

4.2 移动台车的拼装

台车的拼装按施工放线和钢筋绑扎、侧板安装、钢

轮及轮梁安装、钢管支撑搭设、顶板安装、整体定位和校正等顺序进行。

4.2.1 施工放线和钢筋绑扎

施工放线不但是整个工程的关键也是对台车设计尺寸是否精确的考量,模板为浇筑钢筋混凝土提供可靠成型的工具,侧模安装前需进行钢筋的安装和验收。

4.2.2 侧板安装

在侧板安装前先在加工厂进行试拼装,试拼满足台车设计要求后分三组(每组3m)吊入基础面再分组拼装。

4.2.3 钢轮及轮梁的安装

为保证台车的整体移动,行走的钢轮和轮梁的质量必须可靠,钢轮为 $\phi 300$ 内铁外塑双脚轮,轮梁为100mm×100mm×5mm、长10m的方钢,一条轮梁带两组钢轮,一孔涵洞的台车共有两条轮梁。

4.2.4 台车内支撑

台车的钢管内支撑采用 $\phi 50$ 、壁厚为3mm的钢管,为满堂红钢管脚手架,设置纵、横向剪刀撑若干。

4.2.5 顶模的安装

顶模是涵洞上部混凝土主要受力面板,拼装的稳固、平整可减少下部钢管支撑的调整幅度,也可使顶模均衡承载永久荷载、活荷载等,对提高洞顶混凝土质量起到重要作用。

4.2.6 高强螺杆与顶丝

对待行走的台车只有松开所有固定螺杆和顶丝才能使台车移动,故固定螺杆和顶丝是整个台车模板“缩径”、顶固和升降的关键所在,螺杆和顶丝不但能紧固(松懈)架杆、模板,保证台车模板的整体性,还起到升降台车的作用,底部的顶丝在浇筑混凝土时旋升钢轮,使钢轮悬空不受力,当需要移动台车时,可松降顶丝使钢轮着地,利于行走。

4.2.7 台车的移动

涵洞的侧墙和顶板混凝土浇筑完成后,待混凝土强度达到75%时,可推动台车至下节涵洞位置处作为整体内模继续循环使用,见图8。



图8 台车移出

5 应用效果

台车的使用重在早规划、早设计,循环使用是降成本、提效益的关键,整体可移动性是赶工期的重点。

本工程从设计、定制、试拼、安装、运行都做了充足的准备,渠首闸工程6节涵洞、穿堤闸工程14节涵洞,结构型式和断面尺寸一致,共20节涵洞,为赶工期、降成本共制作移动台车3套,每套台车(一联5孔)材料费用为35万元,3套台车的制作成本约105万元。

5.1 运行对比

渠首闸和穿堤闸工程闸室出口段为渐变涵洞段,该渐变段的结构型式与涵洞段尺寸有所不同,故只能作为单节进行单独组装,为赶工期,施工过程中又增加两套单节钢模板为非移动式钢内模(简称固定台车)。

移动台车与固定台车的主要区别在于所使用的人工费和拼装时间的不同,固定台车所用材料与移动台车基本相同,只是缺少移动装置,这里按一套移动台车的材料成本进行对比分析。初期移动台车的安装与固定台车安装所用人工和时间大致相同,后期的移动台车就体现出完全不同的工作效率和运行成本。

5.1.1 固定台车施工

固定台车也为“一联5孔”的结构型式,经测算,固定台车从模板拼装、内模钢管安装、顶丝调整、结构尺寸校核到具备验收和浇筑混凝土条件等用时25天,需要20人完成,材料费为35万元。

5.1.2 移动台车施工

对渠首闸和穿堤闸三套台车的运行进行测算,每套移动台车从已浇筑混凝土涵洞内推到下节待施工的涵洞中,安装、固定、调试完成约2天,只需10人即可

完成,材料费为35万元。

5.2 成本分析

5.2.1 人工成本

a. 固定台车用工。如果采用上述固定台车施工的方式,人工20人,用时25天,为便于对比分析,暂按18节涵洞施工考虑,合计用工450个工日,人工工资300元/天,人工成本12.5万元。

b. 移动台车用工。从上面的测算分析可知,每套台车拆、安、调的工序完成用工10人,渠首闸和穿堤闸共20节涵洞,除初期安装的前2节(渠首闸和穿堤闸各1节)外,使用台车施工的共18节,每套台车用时10天,合计用工180个工日,人工工资300元/天,人工成本5.4万元。

5.2.2 工期成本

a. 固定台车钢模板安装完成约25天,按18节涵洞、3套钢模板计算,工期为150天,约5个月才能完成所有涵洞模板的安装工作,从合同计划工期完成和黄河防汛角度分析是不可行的。

b. 一套移动台车安装完成仅需2天即可完成,同样按18节涵洞、3套台车计算,12天即可完成移动台车的安装工作,较固定台车模板安装缩短工期138天。

5.3 效益分析

本工程在涵洞工程施工阶段共用150余人,人工成本为4.5万元/天,间接成本(管理费用、生活费、电费、租赁费、机械费等)约1万元/天,平均综合成本5.5万元/天。按上述分析,固定台车的工期成本为 $150 \times 5.5 = 825$ 万元,移动台车的工期成本为 $12 \times 5.5 = 66$ 万元,按工期缩短138天计算,工期成本可减少759万元,总成本减少795万元,见表1。

6 结语

移动台车以“模拟台车”内的钢模板、支撑、顶丝、拉杆、滚动胶轮等立体结构为基础,设计出各个组合模板的尺寸、支撑方式、顶丝等组件的大样图尺寸,形成能指导施工的“数字台车”,以“数字台车”为依托对“实体台车”进行拼装组合、架设、安装。本工程采用



表1 效益分析

	材 料 成 本			人工成本/ 万元	工期/天	工期成本(间接成本)/ 万元	总成本/ 万元
	制作固定成本/ 万元	扣件损耗率/%	材料总成本/ 万元				
固定台车	105	30	136.5	12.5	150	825	974
移动台车	105	2	107.1	5.4	12	66	178.5
工 期	—	—	—	—	-138	—	—
节约成本	—	—	—	—	—	-759	-795.5

“三个台车”理念组织施工,起到了降成本、增效益、缩短工期的作用,具有安全、高效、低成本、混凝土浇筑后内外质量有保证等特点,有广阔的推广应用价值和前景。

工程所用的移动台车目前的模板拼装、加固、支撑和台车移动主要以人工操作为主,以机械为辅助,自动化程度偏低,随着混凝土施工技术的不断成熟,运用现代科技手段将形成更为完善、先进,自动化程度更高的“移动台车”。◆

参考文献

- [1] 邓满林. 变截面隧道衬砌台车设计与使用[J]. 山西建筑, 2008,34(1):343-344.
- [2] 李春雷,李长锁. 桁架及顶丝工艺在工程中的应用[J]. 中国水运(下半月),2017,17(2):215-217.
- [3] 吐尔洪·马合木提,廖若川. 水工隧洞斜井混凝土钢模台车衬砌施工工法[J]. 水利建设与管理,2019,39(11):67-70,36.

- [4] 顾耀民,于海伟,田建林. 提高针梁式台车小断面隧洞衬砌质量[J]. 水资源开发与管理,2017(6):72-78.
- [5] 徐志刚. 向莆铁路平成关隧道自行液压衬砌模板台车的计算[J]. 中国高新技术企业,2011(7):60-63.
- [6] 陈卫东,陈卫国,郭中文. 组合式对拉止水螺杆在水利工程中的应用[J]. 水利建设与管理,2018,38(2):6-10.
- [7] 郭洪林,覃南,宋翔. 长距离大型引水隧洞双台车连续衬砌施工技术[J]. 水利建设与管理,2019,39(9):48-53,27.
- [8] 赵付安,贺振通. 隧道衬砌模板台车的结构有限元分析[J]. 山西建筑,2008,34(11):344-345.
- [9] 王立国,蒋友福,向玉章. 组合钢模板全圆断面隧洞衬砌施工技术[J]. 水利建设与管理,2020,40(7):35-39.
- [10] 彭志海,余庆,鞠林林. 双孔圆形隧洞针梁式钢模台车联合衬砌工法[J]. 水利建设与管理,2017,37(7):75-78,80.
- [11] 陈鹰. 青岛胶州湾隧道超大断面变截面隧道二次衬砌台车结构受力分析[C]//中国土木工程学会第十五届年会暨隧道及地下工程分会第十七届年会论文集. 2012:249-257.

(上接第65页) 风险,坝体渗流特性一般。◆

参考文献

- [1] 何金平,施玉群,卢秋生. 古田溪四级大坝坝基扬压水位异常成因分析[J]. 水电自动化与大坝监测,2010,34(2):45-48.
- [2] 冯耀奇,赵铁斌. 土石坝渗流计算模型的建立及应用研究[J]. 水利建设与管理,2007,27(1):25-26,24.
- [3] 石宁. 南沟水库大坝防渗漏洞和跌窝除险方案探析[J]. 水资源开发与管理,2016(6):24-26.
- [4] 吴云星,周贵宝,谷艳昌,等. 基于LMBP神经网络的土石坝渗流压力预测[J]. 人民黄河,2017,39(8):90-94,148.

- [5] 孙松,陈美娟,陈星辰. 洪泽湖大堤52K+080断面渗流观测资料分析[J]. 水利建设与管理,2020,40(2):80-84.
- [6] 独敏. 基于ABAQUS土坡降雨入渗应力应变及稳定性研究[J]. 水资源开发与管理,2017(10):39-43.
- [7] 张庆,姜鹏. 有限元渗流分析法在顶管穿堤施工质量控制中的应用[J]. 水利建设与管理,2020,40(12):43-47.
- [8] 刘玉峰,黄勇,李忠辉,等. 吉利河水库大坝渗流观测资料分析[J]. 水利水运工程学报,2004(3):75-78.
- [9] 徐伙明,江超,张国栋,等. 大隆水利枢纽大坝渗流观测资料分析[J]. 大坝与安全,2012(6):52-55.
- [10] 蔡铁力. 双里水库大坝渗流及变形发展规律分析[J]. 水利建设与管理,2018,38(7):72-75.

混凝土冷却水管布置形式优化分析

任喜平 李虎子 焦 雄

(陕西引汉济渭工程建设有限公司, 陕西 西安 710024)

【摘 要】 碾压混凝土大坝温控的主要措施是采用敷设冷却水管通水冷却降低温度应力,通过冷却水管与碾压混凝土之间的热传递,逐渐降低大坝混凝土整体温度。本文通过调整冷却水管的敷设间距,分析碾压混凝土的温控效果,采用三维有限元模拟施工过程坝体岸坡坝段混凝土的温度变化进行详细的计算分析。结果显示:在坝体岸坡坝段施工中合理选择碾压混凝土大坝冷却水管的布置形式,能够有效降低坝体混凝土内部的温度,控制温度应力可以有效预防大坝产生裂缝。

【关键词】 碾压混凝土;冷却水管;温度应力;防裂

中图分类号: TV544+.921

文献标志码: A

文章编号: 2097-0528(2022)02-055-05

Optimization analysis of concrete cooling water pipe layout form

REN Xiping, LI Huzi, JIAO Xiong

(Shaanxi Hanjiang-to-Weihe River Water Transfer Project Engineering Construction Co., Ltd., Xi'an 710024, China)

Abstract: The main measure of RCC dam temperature control refers that the temperature stress is reduced by laying cooling water pipe and feeding water for cooling. The overall temperature of dam concrete is gradually reduced through the heat transfer between cooling water pipes and RCC. The temperature control effect of RCC is analyzed by adjusting the laying spacing of cooling water pipes in the paper. The temperature change of concrete in the dam bank slope section during construction is simulated for detailed calculation and analysis by using 3D finite element. The results show that reasonable selection of cooling water pipe layout form of RCC dam can effectively reduce the internal temperature of concrete of the dam body during the construction of dam bank slope section construction. The temperature stress can be controlled for effectively preventing the crack of the dam.

Keywords: RCC; cooling water pipe; temperature stress; crack prevention

在大体积混凝土工程建设发展过程中,对常态混凝土施工过程中的温控方案、防裂措施的研究较多,各种措施在工程建设中得到广泛应用,敷设水管通入制冷水降温的措施在各类型的常态混凝土坝体工程建设

中得到普遍采用。而碾压混凝土大坝具有节约水泥、施工快、强度高等优点,在水利工程建设中被广泛应用。由已建碾压混凝土大坝的案例可知,因其施工工序和混凝土配合比的特殊性,混凝土的抗剪和早期抗

收稿日期: 2021-04-12

基金项目: 陕西省水利科技项目——碾压混凝土大坝温控防裂与施工质量控制系統研究(2012-30);陕西省水利科技项目——引汉济渭工程三河口碾压混凝土拱坝施工过程可视化仿真与优化研究(2016slkj-5)

作者简介: 任喜平(1984—),男,硕士,高级工程师,从事水利水电工程建设管理工作。



拉强度都较小,在施工期由于混凝土自身的温度应力导致坝体出现裂缝的现象较多,尤其对于坝体一些关键部位产生的裂缝,对大坝的施工过程和使用功能产生了很大影响,还会影响到坝体下一阶段施工安排,对后期大坝的安全和稳定运行带来严重的隐患。所以,在碾压混凝土大坝施工过程中采取合理的温控措施十分必要,通过对现场施工实践过程的不断总结,通过有限元法仿真模拟,在碾压混凝土施工过程中参考常态混凝土温控措施,经过取长补短合理的应用,碾压混凝土施工过程选用通水冷却的温控措施可达到相应要求。

1 工程概况

引汉济渭的三河口水利枢纽是调水工程的调节中枢,具有自流供水、可逆机组抽水储备水、发电等综合效益和功能,大坝为大(2)型碾压混凝土双曲拱坝,河床坝段的坝体原设计高度 145m,在现场实际施工中根据坝基开挖过程揭露的地质情况抬高 3.5m,实际最大坝高 141.5m,坝体顶部弧长 369m,河床段坝体坝基 37m,其余坝段均为岸坡段坝体,工程大坝主体、消力塘及导流洞封堵等大体积混凝土总量约为 11419m^3 ,其中碾压混凝土约为 9360m^3 。三河口碾压混凝土大坝总平面布置见图 1。



图 1 三河口大坝总平面布置图

2 有限元计算方法

在混凝土坝仿真分析中,温度是基本作用荷载,坝体温度变化是一个热传递问题,用有限元法求解有下面几个优点:①容易适应不规则边界;②在温度梯度大的地方,可局部加密网格;③容易与计算应力的有限单元法程序配套,将温度场、应力场和徐变变形三者统一

在一个程序计算中。仿真应力计算中需考虑混凝土温度、徐变、水压、自重、自生体积变形和干缩变形等的作用。

本文选用在大型有限元软件 ANSYS 上进行深层二次开发的“高坝结构施工期至运行期全过程温度场、温度应力场三维有限元仿真分析软件”,根据本工程特点选用、增加、修改不同的功能模块,缩短仿真分析周期,为施工期温度监测及反馈分析提供了快捷的技术支持。温度场仿真分析的核心技术是通水冷却的等效负热源系数法和冷却水管的精细模拟,它既能等效地考虑通水冷却的作用、减小模型规模、提高仿真分析的效率,又能考虑不同部位混凝土的冷却效果。应力场仿真分析模块能考虑混凝土力学性能参数随龄期的变化、混凝土徐变、混凝土的自生体积变形等因素的影响,有多种混凝土本构模型可供选用,如弹性模型、弹塑性模型、损伤模型、断裂力学模型等。

对于不同施工方案和温控方案,通过改变相应参数,如不同混凝土胶凝材料水化热性能、浇筑层厚度、间歇天数、冷却水管间距、冷却时间、冷却水管的热力学参数等来实现,同时实现计算过程中中间结果输出的可视化,分析校核计算结果的合理性,实现高坝温度应力仿真分析这一复杂过程的自动化和智能化。

3 冷却水管的温控有限元分析

3.1 计算模型

三河口水利枢纽大坝的大部分坝体为岸坡坝段,河床坝段长度较小,本文在有限元模拟仿真计算过程中选取岸坡坝段作为坝体冷却水管布置分析的典型坝段,混凝土、坝基围岩、冷却水管等采用 8 节点实体单元建立三维有限元仿真空间模型,模拟过程共划分 53350 个单元。岸坡坝段计算网格剖分见图 2,混凝土材料分区见图 3。

3.2 计算工况

结合三河口水利枢纽坝址区气温资料及混凝土生产的预冷方案,大坝混凝土坝体进行仿真模拟计算的浇筑温度见表 1。

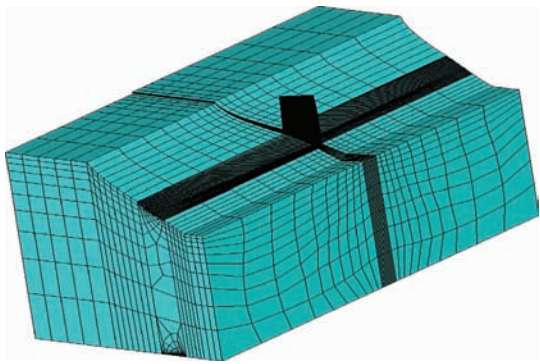


图2 岸坡坝段计算网格剖分图

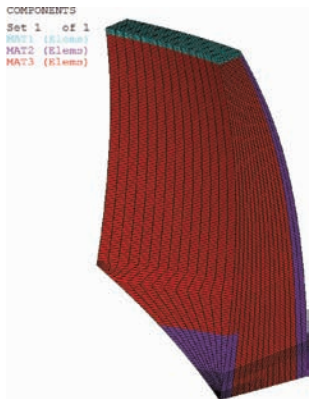


图3 混凝土材料分区

表1 用于计算的混凝土浇筑温度

月 份	12、2	1	3、11	4—10
浇筑温度/℃	8	5	11	16

表2 岸坡坝段施工温控计算方案

方案	浇筑层厚/ m	开浇月份	间歇期/ d	水管间距/m (水平×垂直)	通水水温/ ℃
1	3	4	10	不通水	
2	3	4	10	1.5×3.0	10
3	3	4	10	1.5×2.0	10
4	3	4	10	1.5×1.5	10

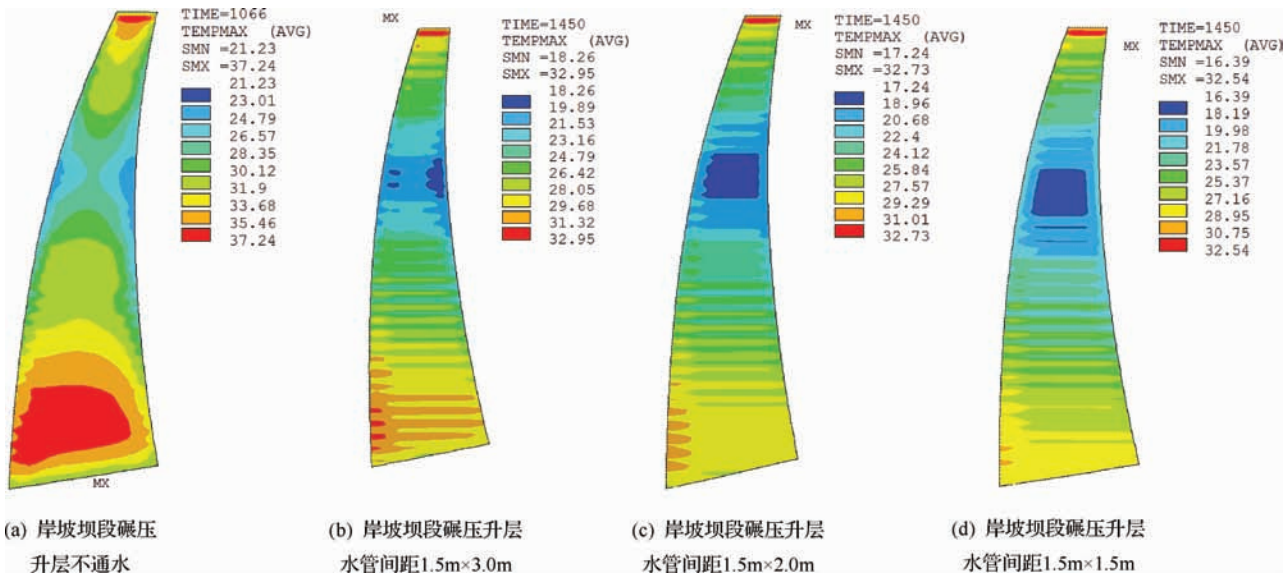


图4 岸坡坝段混凝土最大温度云图

根据现场施工进度计划安排坝体岸坡混凝土坝段在4月开始浇筑,大坝河床坝段的基础垫层、坝顶浇筑2.0m厚的常态混凝土,大坝碾压混凝土在浇筑过程中采用每层厚3m的浇筑方式,每个碾压层浇筑的间歇时间为10天。混凝土的生产11月至次年3月采用自然拌和,4—10月采用制冷水和骨料预冷拌和,坝体混凝土内部铺设冷却水管通过制冷水进行降温冷却,布置的水管间距由1.5m×3.0m逐渐加密至1.5m×1.5m,制冷水的通水时间根据坝体温度测量的数据和气候条件设为15~20天,冷却水管的通水流量为1.5m³/h,大坝常态混凝土区域采用C₂₈25常态混凝土,碾压混凝土区域采用C₉₀25,大坝岸坡坝段施工温控计算方案见表2,不同方案岸坡段混凝土的最大温度云图见图4。



方案1不通水,由计算结果可知:坝体岸坡的基础约束区坝段防渗层的最大温度介于 $31.83 \sim 37.23^{\circ}\text{C}$ 之间,坝体内层的三级配区域混凝土最大温度介于 $31.16 \sim 37.25^{\circ}\text{C}$ 之间,都不能达到设计要求的最大温度 26°C ;坝体基础弱约束区防渗层最大温度介于 $31.9 \sim 32.62^{\circ}\text{C}$ 之间,坝体内层三级配区域混凝土最大温度介于 $31.97 \sim 32.66^{\circ}\text{C}$ 之间,都不能达到设计要求的最大温度 28°C 。岸坡坝段的混凝土浇筑施工进入脱离约束区阶段后,坝体碾压混凝土施工过程中的浇筑温度、最大温度随月份不同不断变化。总体可以看出,岸坡坝段混凝土在施工过程中的最大温度除1月外都达不到设计要求。只有通过敷设的冷却水管进行通水冷却降温,混凝土最大温度才能够达到设计要求,但也无法达到总进度要求规定的时间内接缝灌浆施工 $12 \sim 15^{\circ}\text{C}$ 的温度要求,在现场实际施工过程温控方案不可行。

方案2布置间距 $1.5\text{m} \times 3.0\text{m}$ 冷却水管,由计算结果可知:坝体岸坡的基础约束区坝段防渗层和坝体内层三级配区域混凝土的最大温度各介于 $28.5 \sim 31.84^{\circ}\text{C}$ 和 $27.33 \sim 31.02^{\circ}\text{C}$ 之间,都不能达到设计要求的最大温度 26°C ;坝体基础弱约束区的上游面防渗层最大温度介于 $28.44 \sim 28.89^{\circ}\text{C}$ 之间,不能达到设计要求的最大温度 28°C ,坝体内层三级配区域的混凝土最大温度介于 $27.59 \sim 28.04^{\circ}\text{C}$ 之间,接近设计要求的最大温度 28°C ,脱离约束区混凝土大温度施工过程能够满足各阶段的温度要求。

方案3布置间距 $1.5\text{m} \times 2.0\text{m}$ 冷却水管,由计算结果可知:坝体岸坡段基础约束区上游侧防渗面和内部三级配区域的最大温度各介于 $27.47 \sim 30.54^{\circ}\text{C}$ 和 $26.45 \sim 29.82^{\circ}\text{C}$ 之间,都不能达到设计要求的最大温度 26°C ;坝体基础弱约束区上游侧的防渗面和内部三级配最大温度各介于 $27.42 \sim 27.82^{\circ}\text{C}$ 和 $26.62 \sim 27.01^{\circ}\text{C}$ 之间,都能达到设计要求的最大温度 28°C 。坝体岸坡坝段敷设间距 $1.5\text{m} \times 2.0\text{m}$ 冷却水管后,脱离约束区域的坝体混凝土最大温度逐渐减小,能够达到施工过程中各阶段的温度要求。

方案4布置间距 $1.5\text{m} \times 1.5\text{m}$ 冷却水管,坝体岸坡段基础约束区上游侧防渗面和内部三级配区域的最大温度各介于 $25.72 \sim 26.8^{\circ}\text{C}$ 和 $24.75 \sim 26.45^{\circ}\text{C}$ 之间,最大温度略高于设计要求的 26°C ,但在冷却水管加密敷设至 $1.0\text{m} \times 1.5\text{m}$ 后,混凝土的最高温度能够满足要求;坝体基础弱约束区上游侧的防渗面和内部三级配区域的最大温度介于 $26.61 \sim 26.97^{\circ}\text{C}$ 和 $25.84 \sim 26.19^{\circ}\text{C}$ 之间,都能达到设计要求的最大温度 28°C 。布置间距 $1.5\text{m} \times 1.5\text{m}$ 水管后,脱离约束区域的坝体混凝土最大温度变小,满足施工过程中各阶段的温度要求,富裕度进一步增大。

综上所述,碾压混凝土拱坝浇筑过程埋设的制冷水管从 $1.5\text{m} \times 3.0\text{m}$ 逐渐加密至 $1.5\text{m} \times 1.5\text{m}$ 后,坝体岸坡段碾压混凝土按照 3m 升层浇筑过程中基础约束区上游侧防渗面和内部三级配区域混凝土最大温度略有超标现象,但当该区域坝体混凝土内部冷却水管加密至 $1.0\text{m} \times 1.5\text{m}$ 后,经复核计算混凝土最大温度完全满足设计要求;岸坡坝段脱离约束区随着坝体内布置的冷却水管逐步加密,混凝土的最大温度超越程度不断缩小,当埋设的制冷水管逐步加密到间距 $1.5\text{m} \times 1.5\text{m}$ 时,浇筑混凝土的最大温度完全达到设计要求。

4 结 语

本文采用三维有限元仿真模拟的方法,计算分析了秦岭南北气候分界区域特殊地带碾压混凝土拱坝浇筑过程埋设的制冷水管从 $1.5\text{m} \times 3.0\text{m}$ 逐渐加密至 $1.5\text{m} \times 1.5\text{m}$ 过程中坝体内各区域的最大温度值,从计算分析结果可以看出,大坝混凝土浇筑过程中岸坡坝段的约束区和非约束区混凝土内部分别布置间距 $1.0\text{m} \times 1.5\text{m}$ 和 $1.5\text{m} \times 1.5\text{m}$ 的冷却水管通水冷却时,完全能使坝体混凝土最大温度满足设计要求,但在通水冷却降温过程中,要做好大坝内部温度的监测工作,根据实际情况适当减少通水时间,以便节省成本。坝内冷却水管的各项参数对坝体碾压混凝土温度有着较大的影响,引汉济渭三河口大坝大体积碾压混凝土浇

筑过程选择更为合理的冷却方案,能够有效地提高经济效益,节省成本。三河口水利枢纽位于秦岭腹地南北气候分界地带,当地的气候反复无常、温度变化幅度较大,对三河口大坝碾压混凝土冷却水管的分析研究,可为该地区类似工程碾压混凝土冷却方案设计起到一定参考作用。◆

参考文献

- [1] 江尧,刘文佳,梅明荣. 基于 ANSYS Workbench 的混凝土冷却水管优化[J]. 扬州大学学报(自然科学版),2017,20(3):75-78.
- [2] 朱大勇. 白莲崖碾压混凝土拱坝施工的温控措施[J]. 安徽水利水电职业技术学院学报,2011,11(3):53-55.
- [3] 刘宏. 小河流护坡植草混凝土性能影响因素研究[J]. 水资源开发与管理,2017(11):74-78.
- [4] 李行星,李维炳. 拱坝混凝土自生体积变形试验研究[J]. 水利建设与管理,2015,35(8):28-32.

- [5] 王树和,许平,朱伯芳. 龙滩大坝温控方案的有限元仿真分析[J]. 水利水电技术,1999,30(12):22-24.
- [6] 王家辉,王文武,宋立元. 基于水管冷却技术的重力坝施工温控方案仿真优化[J]. 水利规划与设计,2019(6):106-111.
- [7] 李焕焕,郝龙,惠建伟,等. 邕宁闸坝混凝土施工温控方案研究[J]. 水资源与水工程学报,2021,32(2):158-165,172.
- [8] 孙春艳. 大型深基坑开挖对周边防汛管线的影响分析及控制措施初探[J]. 水资源开发与管理,2019(6):74-79,54.
- [9] 於阳宝. 相公庙水库大坝温控方案研究[J]. 工程与建设,2019,33(4):629-631.
- [10] 饶明,欧阳步云. 灰色模糊综合评价模型在混凝土坝温控方案优选中的应用[J]. 水电能源科学,2016,34(3):77-79.
- [11] 刘心庭,刘中峡,王从锋. 深溪沟水电站厂房坝段温控方案研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2010,32(4):20-24.

(上接第34页)

由表1可以看出,高海拔峡谷地区过高坝长鱼道快速施工技术,虽在结构优化以及快速施工措施上投资费用有所增加,但是由于主体完工工期提前,节约了标段的项目管理成本,总体投资较原投标阶段节约了 $3676 - 3528 = 148$ 万元。

7 结 语

高海拔峡谷地区过高坝鱼道具有池室坡度缓、线路长、盘折段多、环境气候条件恶劣的特点,在目前水电行业内暂无可借鉴的类似工程施工经验。通过对施工设备合理布置、优化施工顺序、优化设计结构、创新施工工艺及制定各项安全防护措施,减少了鱼道与电站相邻标段的施工干扰,实现了高海拔峡谷地区过高坝鱼道快速、安全施工,可为后续类似工程提供经验。◆

参考文献

- [1] 武文斌. 藏木水电站一期鱼道工程施工技术研究[J]. 四川建材,2017,43(10):149-150,160.
- [2] 高兴和,陈浩,王津. 通江河口长槽多隔仓双向鱼道结构研究与应用[J]. 水利规划与设计,2020(11):131-136.

- [3] 王鹏. 新疆某多层盘折槽式鱼道水流流态分析[J]. 西北水电,2019(3):42-45.
- [4] 龚玉峰,张茂林,樊仕宝. 金龟河小流域综合整治策略研究[J]. 水资源开发与管理,2020(11):1-8.
- [5] 王然. 鱼道规划设计研究进展[J]. 水利建设与管理,2012(5):11-13,47.
- [6] 郭洪有. 大截面长距离预制装配式渡槽快速施工技术在廖坊灌区二期工程中的应用[J]. 水利建设与管理,2020,40(5):72-75,84.
- [7] 中国葛洲坝集团第一工程有限公司. 洄游式生态鱼道及施工方法:CN202110465602.4[P]. 2021-07-20.
- [8] 路莅枫,田红伟. 微弯分汊河段枢纽增建鱼道水流条件数值模型试验[J]. 水运工程,2019(2):101-106.
- [9] 梁振森. 渡槽施工中缆索吊装技术应用研究[J]. 水资源开发与管理,2016(5):60-62,66.
- [10] 韦志远,孙兴伟,张德强,等. 西藏 DG 水电站鱼道工程地质勘察及方案比选[J]. 水电与新能源,2019,33(12):21-24,65.
- [11] 罗扬,徐锦皓,王晓远. 预制装配式技术在鱼道建设中的应用[J]. 浙江水利水电学院学报,2017,29(6):43-46.
- [12] 侯璐,王海胜,王棋. 枕头坝一级水电站鱼道设计及施工关键技术[J]. 四川水力发电,2015,34(6):107-110,135.



王英水库大坝坝体渗流监测资料分析

张峰¹ 唐威¹ 姜丽萍²

(1. 湖北省水利厅,湖北 武汉 430071;
2. 湖北省王英水库管理局,湖北 黄石 435236)

【摘要】 本文对2006—2016年王英水库大坝坝体测压管渗压水位数据进行整理,采用过程线、特征值、相关性、防渗性、渗透特性、统计模型等方法综合分析,结果表明:坝体各测压管实测渗压水位精度一般,变化规律基本符合心墙土坝坝体渗流的一般规律。但防渗心墙削减水头的比率呈下降趋势,坝体心墙渗透坡降允许值较小,在高水位运行时存在破坏风险,坝体渗流特性一般。

【关键词】 王英水库;渗流监测;资料分析;测压管

中图分类号:TV697.2

文献标志码:A

文章编号:2097-0528(2022)02-060-06

Analysis of seepage monitoring data of Wangying Reservoir Dam

ZHANG Feng¹, TANG Wei¹, JIANG Liping²

(1. Hubei Water Resources Department, Wuhan 430071, China;
2. Hubei Wangying Reservoir Administration, Huangshi 435236, China)

Abstract: The osmotic pressure water level data of piezometric tube of Wangying Reservoir Dam from 2006 to 2016 is sorted in the paper. The process line, characteristic value, relevance, seepage control, seepage features, statistic model and other methods are comprehensively analyzed. The results show that the actually measured osmotic pressure water level precision by all piezometric tubes in the dam is general. The variation law is basically in line with the general rule of core wall dam seepage. However, the ratio of water head reduction of the anti-seepage core wall is decreasing, the allowable seepage slope reduction of the dam core wall is small, there is a risk of damage in high water level operation, and the seepage characteristics of the dam are general.

Keywords: Wangying Reservoir; seepage monitoring; data analysis; piezometric tube

王英水库位于湖北省黄石市阳新县境内富河支流三溪河上,集雨面积287.7km²,总库容6.23亿m³,是一座以防洪、灌溉为主,兼有灭螺、发电、养殖等综合利用的大(2)型水利工程。王英大坝为黏土心墙代料组合坝,坝长225.0m、坝顶宽8.0m,最大坝高53.6m,坝顶高程75.00m,正常蓄水位70.00m。大坝坝基出露

志留系上统茅山群长石石英砂岩夹泥质砂岩,多为弱风化状态,心墙填土为含5%碎石的黏土,局部碎石含量为20%,代料为碎石土,碎石含量约60%。

王英水库枢纽工程建成至今,先后完成了3次除险加固,其中第3次加固对王英大坝心墙采用充填灌浆;坝基、左右坝肩和F₁断层采用帷幕灌浆处理,但实

收稿日期:2021-03-25

作者简介:张峰(1984—),男,本科,高级工程师,主要从事水库大坝安全监测和防汛抢险方面的研究。

际运行中发现部分监测数据变化异常。为了解王英大坝渗流状况,结合 2006—2016 年的测压管监测数据(2017 年之后,大部分测点有损坏,数据不全),探索心墙土坝坝体渗压水位变化规律,揭示渗流安全隐患,为王英水库第 4 次除险加固提供监测数据支撑。

1 渗流原型观测布置

王英水库设有巡视检查、坝体表面变形监测、渗流

监测及环境量监测等设施,无渗流量监测设施。渗流监测多年来共安装了 31 根测压管,主要采用电测水位计人工观测。本次主要对位于桩号 0+060、0+120、0+130 等 3 个重点坝体监测断面附近 15 根测压管进行分析,各断面测压管分别布置在监测大坝心墙前、心墙内、心墙后、下游一级平台、下游二级平台处,用于监测坝体浸润线、心墙防渗效果、代料的排水效果等情况,测压管平面布置及典型断面见图 1、图 2。

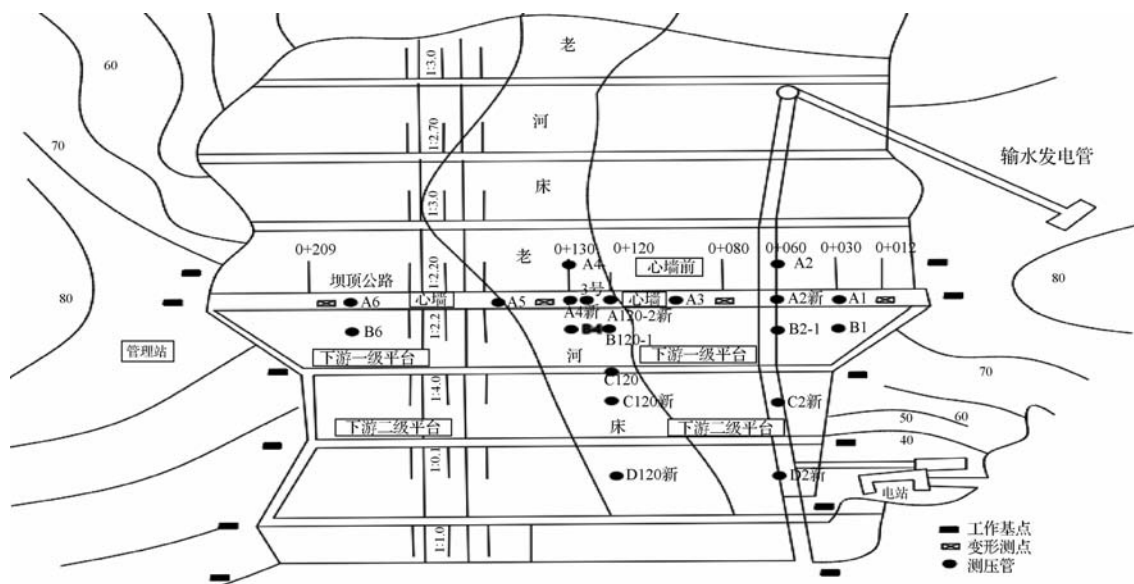


图 1 王英水库大坝测压管平面布置图

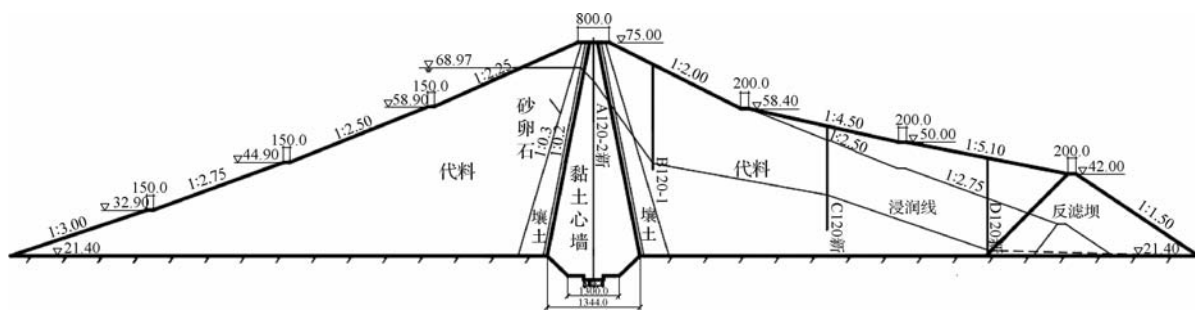


图 2 王英水库大坝 0+120 断面图布置图

2 坝体渗流监测资料分析

2.1 过程线分析

王英大坝 2006—2016 年期间各监测横断面测压管实测渗压水位与库水位的对比过程线见图 3~图 5。

由图 3~图 5 可知:位于防渗心墙上游侧的测压管

A2 和 A4 实测水位较高,与库水位较接近,变化过程与库水位基本一致。各监测断面心墙后测压管水位明显低于上游水位,反映坝体防渗心墙防渗效果较好,消弱水头作用明显,且越往下游,测压管实测渗压水位越低,坝体渗流未见异常。上述规律符合心墙土坝横断面渗流压力的基本规律。

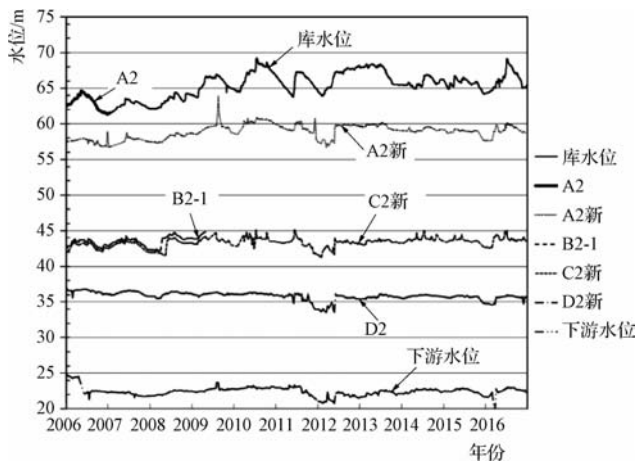


图3 坝体0+060断面测压管水位变化过程线

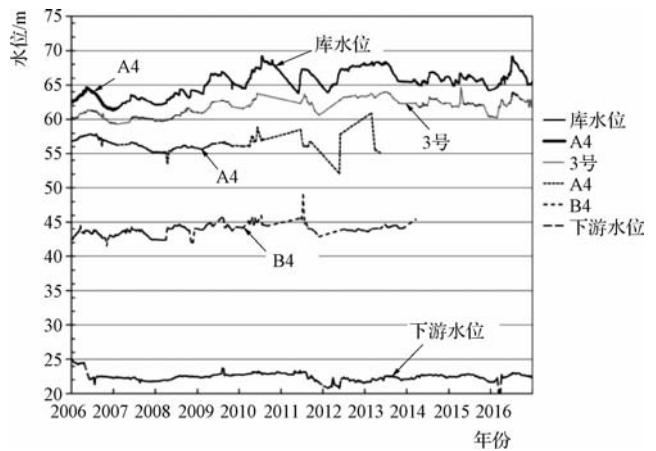


图5 坝体0+130断面测压管水位变化过程线

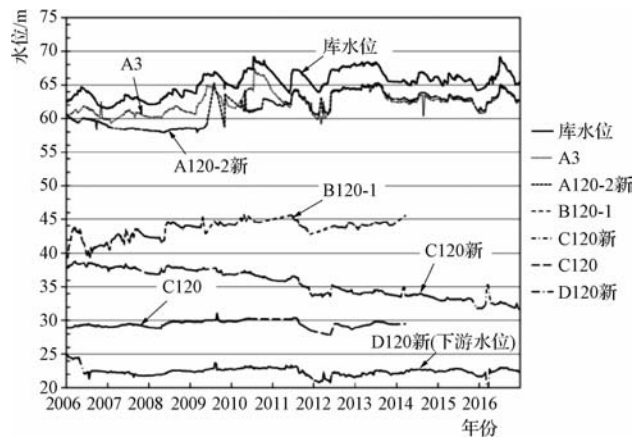


图4 坝体0+120断面测压管水位变化过程线

2.2 特征值分析

王英水库大坝各测压管2006—2016年实测渗压水位特征值统计情况见表1。

由表1可知:各监测断面上的各测压管实测最高渗压水位均表现为从上游向下游逐渐减小,各监测横断面防渗心墙后的测压管实测最大渗压水位在44.76~45.64m,总变幅在2.63~6.33m,低于上游水位最大年变幅7.76m,较防渗心墙上游测的测压管有所下降,说明坝体防渗心墙效果较好。不同监测横断面上对应位置的测压管,实测最高渗压水位、总变幅特征值分别

表1 各测压管实测渗压水位特征值统计表(2006—2016年)

部 位	测 点	最高渗压水位		最低渗压水位		多年变幅/m	多年平均值/m
		数 值/m	对应日期	数 值/m	对应日期		
0+060	A2	64.57	2006-05-14	61.32	2006-12-30	3.25	62.97
	A2 新	63.80	2009-08-20	56.7	2007-01-11	7.10	59.04
	B2-1	44.76	2009-04-22	42.13	2008-03-12	2.63	43.47
	C2 新	45.18	2011-06-15	37.28	2012-02-01	3.99	43.48
	D2 新	37.10	2006-01-02	27.34	2012-03-18	3.60	35.79
0+120	A3	67.35	2010-07-24	59.22	2012/3/5	8.13	62.85
	A120-2 新	65.22	2009-07-31	57.87	2008-05-19	7.35	62.09
	B120-1	45.64	2010-04-22	39.31	2006-01-12	6.33	43.07
	C120 新	38.77	2006-03-20	31.67	2016-12-22	7.10	35.36
	C120	31.06	2009-08-28	27.82	2012-05-25	3.24	29.44
	D120 新	25.02	2006-01-02	19.66	2016-03-25	5.36	22.47
0+130	A4	64.58	2006-05/14	61.34	2006-12-30	3.24	62.97
	3 号	64.54	2015-04-17	59.24	2007-02-01	5.30	61.82
	A4	60.89	2013-02-27	52.04	2012-05-25	8.85	56.38
	B4	45.96	2010-07-14	41.53	2006-11-05	4.43	43.77

较为接近,差异不大,表明各监测横断面渗流特性基本一致,符合心墙土坝横断面渗流的基本特点,未见异常。

2.3 相关性分析

王英水库大坝各测压管渗压水位与上、下游水位的相关系数见表2。

表2 王英水库大坝测压管渗压水位与上、下游水位相关性统计

部 位	测 点	上游水位 相关系数 R	下游水位 相关系数 r	部 位	测 点	上游水位 相关系数 R	下游水位 相关系数 r
0 + 060	A2	0.99	0.38	0 + 120	A3	0.86	0.27
	A2 新	0.75	0.24		A120-2 新	0.70	0.63
	B2-1	0.56	0.17		B120-1	0.37	0.46
	C2 新	0.30	0.17		C120 新	0.34	0.93
	D2 新	0.01	0.05		C120	0.24	0.09
0 + 130	A4	0.99	0.34		D120 新	0.01	—
	3 号	0.92	0.55				
	A4	0.05	0.03				
	B4	0.32	0.21				

由表2可知:位于防渗心墙上游侧的测压管 A2、A4 实测渗压水位与上游库水位之间的相关系数均较大,说明渗压水位受上游水位影响十分明显,与过程线分析结论基本一致;位于防渗心墙内的测压管实测渗压水位与库水位有一定相关性;位于防渗心墙后的测压管,实测渗压水位与上游水位之间的相关系数均很小,说明上游水位对防渗心墙后的坝体渗流影响较小,且存在一定的滞后效应,或测压管存在不同程度的淤堵;坝体测压管渗压水位与下游水位之间相关性均很

小,但 A120-2 新、C120 新测压管渗压水位与下游水位相关性强,但其与下游水位距离较远,经分析可能是降雨等因素影响所致。

2.4 防渗性分析

根据实测值统计 2006—2016 年防渗心墙处测点与心墙后测压渗压水位差占上下游水位差的比率,分析防渗心墙特性。现根据断面的测压管观测资料,取每年测值的平均值对防渗心墙前后水位差进行分析,见表3。

表3 王英水库大坝心墙前后测压管部位水位差占上下游水位差比率统计

时 间	测压管部位水位差占上下游水位差比率			时 间	测压管部位水位差占上下游水位差比率		
	0 + 060	0 + 120	0 + 130		0 + 060	0 + 120	0 + 130
2006 年	0.51	0.40	0.50	2012 年	0.52	0.31	0.41
2007 年	0.48	0.37	0.46	2013 年	0.53	0.34	0.51
2008 年	0.49	0.35	0.48	2014 年	0.51	—	0.47
2009 年	0.51	0.33	0.49	2015 年	0.51	—	—
2010 年	0.53	0.32	0.50	2016 年	0.51	—	—
2011 年	0.52	0.32	0.49				

由表3可知:0 + 060 和 0 + 130 断面防渗心墙削减水头的比率为 0.41 ~ 0.50,0 + 120 断面防渗心墙削减水头的比率从之前的 40% 降至 31% 左右,呈下降趋势,无收敛迹象。该断面的防渗心墙存在纵、横向及垂

直向裂缝的可能,造成心墙消减水头的能力减弱。

2.5 渗透特性分析

根据王英水库大坝埋设的测压管布置及实测资料,按式(1)计算各测压管位置之间的渗透坡降。



$$J_{i,i+1} = \frac{h_{i+1} - h_i}{L_{i,i+1}} \quad (1)$$

式中: h_i 和 h_{i+1} 分别为测压管 i 和测压管 $i+1$ 的实测

渗压水位, m; $L_{i,i+1}$ 为测压管 i 和测压管 $i+1$ 之间的距离, m; $J_{i,i+1}$ 为测压管 i 和测压管 $i+1$ 之间的渗透坡降。

各断面渗透坡降特征值统计见表4。

表4 王英水库大坝坝体渗透坡降特征值

断面	计算部位	渗透坡降					
		最大值	对应时间	最小值	对应时间	变幅	平均值
0+060	A2—A2 新	0.45	2006-07-14	0.17	2006-12-30	0.28	0.36
	A2 新—B2-1	1.06	2006-12-30	0.89	2006-07-14	0.17	0.96
	B2-1—C2 新	0.06	2008-05-19	0.004	2006-01-02	0.05	0.01
	C2 新—D2 新	0.21	2011-06-07	0.11	2006-01-02	0.10	0.17
0+120	A3—B120-1	1.52	2010-07-24	1.10	2008-06-15	0.42	1.25
	B120-1—C120 新	0.19	2014-03-21	0.01	2006-07-29	0.18	0.10
	C120 新—C120	0.55	2006-03-01	0.24	2014-03-21	0.31	0.44
	C120—D120 新	0.19	2009-08-28	0.09	2006-01-02	0.10	0.16
0+130	A4—A4	0.46	2006-05-14	0.33	2006-10-24	0.13	0.39
	A4—B4	1.13	2013-02-27	0.48	2011-07-12	0.65	0.84

根据《王英水库枢纽除险加固工程初步设计报告》,大坝心墙允许渗透坡降 $[J] = 1.5$, 坝体坝壳料允许渗透坡降 $[J] = 0.20$ 。由于心墙后无实测渗压水位监测资料,采用心墙处测压管与心墙后第一根测压管渗压水位试算,三个断面心墙最大渗透坡降分别为 1.06、1.52、1.13,均未超过坝体黏土心墙允许渗透坡降值。防渗心墙后,渗透坡降最大值为 0.06~0.55,平均渗透坡降在 0.01~0.44,部分超过允许值,但由于大坝下游有排水棱体保护,目前大坝河床段没有发生渗透破坏现象。但实际心墙处渗透坡降值约为平均值的 1~2 倍,则各断面处心墙渗透坡降值介于心墙填土允许比降与临界比降之间,心墙虽未出现渗透破坏,但存在一定的安全隐患,心墙渗透特性一般。

2.6 统计模型分析

土石坝浸润线的测压管水位的实测资料表明,土坝渗流的变化主要受上游水位 H_u , 下游水位 H_d 、坝址降雨 R , 坝体及坝基温度 T 以及时效 θ 等因素变化的影响。渗流统计模型一般表达式见式(2):

$$\hat{y} = \hat{y}_{Hu} + \hat{y}_{Hd} + \hat{y}_R + \hat{y}_T + \hat{y}_\theta \quad (2)$$

式中: \hat{y} 为渗流效应量的统计估计值(拟合值); \hat{y}_{Hu} 为渗流的上游水位分量; \hat{y}_{Hd} 为渗流的下游水位分量; \hat{y}_R

为渗流的坝址降雨分量; \hat{y}_T 为渗流的温度分量; \hat{y}_θ 为渗流的时效分量。

因王英水库大坝下游水位测值不连续,无温度测值,因此式中 \hat{y}_{Hd} 、 \hat{y}_T 的不考虑。

本次对王英水库大坝监测成果相对连续的 6 根测压管建立统计模型,建模时段为 2006—2016 年;考虑到水位对坝体渗流的滞后效应,水位因子取 5 个,分别为观测日当天、前期 1 天、前期 2~4 天、前期 5~15 天、前期 16~30 天水位平均值;考虑到降雨对坝体渗流的滞后效应,降雨因子分别为观测日当天、前期 1 天、前期 2~4 天、前期 5~8 天坝址降雨量的累计值。其中, $t_1 = (t - t_0)/365 = (\text{观测日序值} - \text{基准日序值})/365$ 。基准日期取 2006 年 1 月 1 日为首测日期。

在建立监测统计模型时,可根据具体情况预置一个或多个时效因子参与回归分析,见式(3):

$$I_1 = t_1, I_2 = \ln(t_1 + 1), I_3 = 1 - e^{-t_1}, I_4 = t_1/(t_1 + 1), \\ I_5 = t_1^2, I_6 = 1/(1 + e^{-t_1}) \quad (3)$$

因此,时效分量的构成形式可表示为式(4):

$$\hat{y}_\theta = d_0 + \sum_{i=1}^s d_i I_i \quad (4)$$

式中: s 为时效因子个数,视具体情况而定; d_i 为回归系数。

显著性水平取 $\alpha = 0.05$ 。在建模之前,先对监测效应量进行真伪性分析,对各监测测量加以鉴别并剔除了明显的粗差,选择监测成果相对连续的 6 根测压

管建立统计模型,大坝渗压水位统计模型方程组成见表 5,大坝渗压水位统计模型拟合情况及各分量比重见表 6。

表 5 王英水库大坝渗压水位统计模型方程组成(建模时间:2006—2016 年)

测点编号	因子表达式各测压管统计模型回归系数
A2	$Y = 24.164 - 0.358864X_1 + 0.01736X_5 + 5.236472X_6 + 0.353856X_7 + 0.121101X_{10}$
C2 新	$Y = 36.0588 + 1.260612X_6 + 0.088013X_7 + 0.009104X_{19} + 0.027474X_{20} + 0.009172X_{21} + 0.011107X_{22} + 0.0159X_{23}$
D2 新	$Y = 21.5156 + 5.05129X_1 - 23.6098X_2 + 22.995742X_4 - 0.147947X_5 + 0.180825X_8$
A120-2 新	$Y = 14.6068 + 1.096657X_1 - 31.453666X_2 + 202.245681X_3 - 101.777532X_4 + 0.295103X_7 + 0.059558X_{13} + 0.213872X_{15} + 0.096652X_{18}$
C120 新	$Y = 672.5903 - 174.28017X_1 + 1090.100527X_2 - 2003.005337X_3 + 92.866763X_4 + 4.810485X_5 - 1031.197172X_6 - 1.055579X_7 + 1.2857X_{18} - 0.114559X_{23}$
D120 新	$Y = -1.8274 + 0.114059X_1 - 12.029948X_3 + 14.198441X_6 + 0.393263X_9 + 0.144114X_{12} - 0.528982X_{14} + 0.012176X_{20} + 0.025428X_{21} + 0.023477X_{22} + 0.054341X_{23} + 0.02363X_{24}$

表 6 王英水库大坝渗压水位统计模型拟合情况及各分量比重(建模时间:2006—2016 年)

测点	复相关系数 R	剩余标准差 S	拟合时段渗压水位及各分量变幅							
			实测值/ m	拟合值/ m	水位分量/ m	降雨分量/ m	时效分量/ m	水位分量 比重/%	降雨分量 比重/%	时效分量 比重/%
A2	0.442	0.895	7.1	3.875	3.427	0	0.972	78	0	22
C2 新	0.664	0.548	7.9	3.295	0.677	2.374	0.472	19.2	67.3	13.3
D2 新	0.402	0.742	9.34	1.417	1.374	0	1.533	47.2	0	52.7
A120-2 新	0.945	0.762	7.35	7.347	2.272	2.541	3.356	27.8	31.1	41
C120 新	0.643	3.098	27.8	14.192	8.128	2.578	9.37	27.9	8.8	32.2
D120 新	0.616	0.423	4.02	1.598	3.742	2.356	0.463	35.3	22.2	4.3

由表 6 可知:6 根测压管的统计模型中,4 根统计模型的复相关系数 R 超过 0.6,但数值均不大,模型质量不高,只能基本反映坝体渗压水位的变化情况;另两根测压管统计模型复相关系数 R 仅 0.4 左右,模型质量较差,反映测压管渗压水位测值精度较差。上游水位分量所占比重为 19.2%~35.3%,比重不大,且比较接近;从上游水位入选因子情况来看,测压管渗压水位与上游水位之间存在较明显的滞后效应。降雨分量所占比重差异较大。C2 新测压管降雨分量比重为 67.3%;其他断面坝体渗压计降雨分量比重较接近,从降雨入选因子情况来看,测压管渗压水位与降雨之间存在较明显的滞后效应。时效分量所占比重的差别也较大,为 4.3%~32.3%;从时效分量的过程线来看,测

值基本已趋于稳定,结合测值过程线分析,未见异常。由于测值序列较短,且缺乏气温、下游水位连续资料,还难以判断其发展趋势,从目前成果看测值基本稳定。

3 结 语

通过上述分析,王英水库大坝坝体各测压管实测渗压水位精度一般,渗压水位基本为自上游至下游逐渐降低,心墙后各测压管渗压水位不高,实测渗压水位与上游水位之间的相关系数均较小,变化规律基本符合心墙土坝坝体渗流的一般规律。防渗心墙削减水头的比率呈下降趋势,无收敛迹象,说明防渗心墙存在纵、横向及垂直向裂缝的可能。坝体心墙渗透坡降允许值较小,在高水位运行时存在破坏 (下转第 54 页)

移动 APP 在灌区管理中的应用

张 波 罗朝林

(珠江水利委员会珠江水利科学研究院, 广东 广州 510610)

【摘 要】 为提升灌区现代化管理水平,解决传统管理存在的空间和时间限制等问题,研发了一套基于 H5 + 技术的灌区管理移动 APP。管理人员可随时随地查询灌区各监测站点的实时信息,便于灌区巡检及现场维护、查询用水申请及批复情况,并远程控制灌溉设备开关,实现灌区运维精细化管理,提高了工作效率,具有较高的可推广性。

【关键词】 移动互联网技术;HTML5;移动 APP;巡检;精细化管理

中图分类号: [TV93]

文献标志码: B

文章编号: 2097-0528(2022)02-066-05

Application of mobile APP in irrigation district management

ZHANG Bo, LUO Chaolin

(Pearl River Water Resources Research Institute of Pearl River Water Resources Commission, Guangzhou 510610, China)

Abstract: A set of mobile APP for irrigation district management based on H5 + technology is developed in order to improve the modern management level of irrigation districts and solve the problems of space and time limitation in traditional management. The management personnel can query the real-time information of monitoring stations in the irrigation district anytime and anywhere, which is convenient for inspection and on-site maintenance of the irrigation districts, inquiry of water application and approval status, and remote control of irrigation equipment switch, thereby realizing fine management of the operation and maintenance of the irrigation districts, and improving the work efficiency with high extensibility.

Keywords: mobile Internet technology; HTML5; mobile APP; inspection; fine management

灌区在我国农业发展过程中起着举足轻重的作用,是农业发展的重要保障。作为重要的水利工程,需要利用移动互联网技术对灌区运行管理进行全过程管控,以提升工程建设管理水平及运行效率^[1-4]。姚宝永等^[5]利用互联网技术+移动设备搭建安监智能管理平台,为水利工程建设安全管理提供了安全、可靠的现代化移动安监机制;邵红艳等^[6]设计和开发的大中型灌区智慧巡检平台,利用移动互联网技术实现安全巡查

管理,全面提升了灌区的管理水平。王东利^[7]设计的巡检移动 APP 在水利工程日常巡检、险情上报、水政巡查、白蚁防治等实际工作中得到了良好的应用。

目前,针对灌区管理的移动 APP 业务功能主要聚焦于日常巡检、险情上报等方面,功能较为单一,用户较为关注的监测站点实时信息查询、历史信息统计、远程灌溉等功能尚未完善^[8-9]。因此,需结合灌区管理单位的日常工作需求设计一款功能完善、扩展性强的灌

收稿日期: 2021-04-15

作者简介: 张波(1986—),男,硕士,工程师,主要从事水利信息化、自动化研究。

区管理 APP。该 APP 采用了当前流行的 H5 + 技术^[10-12],开发便捷且维护简单,实现了灌区管理人员在任何时间、任何地点快速了解灌区运行情况、实时信息查询及远程灌区控制等功能,摆脱了时间和空间的束缚,增强了业务部门间协同办公意识,提高了办公效率。

1 设计原则

灌区管理 APP 研发以满足灌区管理单位日常工作需要为目标,系统设计需要遵循以下几项原则:

a. 先进性:灌区管理 APP 设计应充分利用当前先进、成熟、应用广泛的技术,系统设计既考虑实用有效,又确保运维及升级便捷性。

b. 实用性:灌区管理 APP 设计应以灌区管理单位的工作内容及业务需求为出发点,按照需求对系统框架、功能模块及业务流程进行合理设计。同时,确保 APP 具有良好的扩展性,便于个性化功能接入。

c. 灵活性:灌区管理 APP 采用模块化的设计思路,将重复使用的功能封装成独立的功能模块,方便不同功能模块间的调用,提升开发效率,降低维护难度。

d. 丰富性:灌区管理 APP 设计应充分考虑不同管理单位间的管理需求,功能设计需要建立在充分调研的基础上。

2 功能设计

灌区管理 APP 是以灌区管理信息系统 Web 端系统为基础,结合业务需求定制开发的具有便携性、特色性、针对性等特点的移动端系统。灌区管理 APP 通过数据接口(API)的方式从灌区管理信息系统获取数据资源服务,确保 APP 端与 Web 端系统数据源的一致性。灌区管理 APP 的主要包括电子地图、实时监控、用水管理、灌区巡检、运行维护以及远程灌溉等模块,其功能结构见图 1。

2.1 电子地图

电子地图采用 GIS 地图作为底图,包括基础地理图、遥感影像图和地形图,并在地图上叠加水利工程站点,可实现查看实时水情、流速、流量等信息的功能。

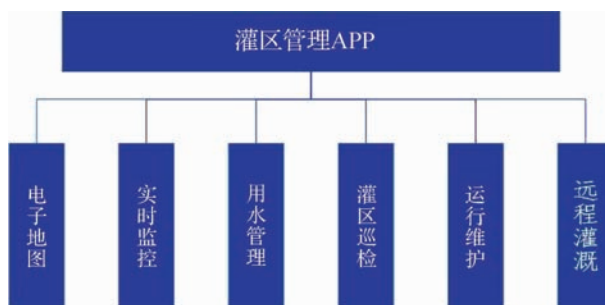


图 1 灌区管理 APP 功能结构

地图载入时,系统将水雨情站点都标注在地图上,对站点超限的水雨情信息设置高亮显示;通过电子地图功能,用户可以直观了解灌区干渠、支渠的分布情况,灌区各类监测站点的位置信息及各站点实时采集的水位、流量等信息。灌区管理 APP 还提供导航功能,方便维护人员规划运维路线。

2.2 实时监控

实时监控模块以列表的形式显示灌区内各类监测站点实时信息,包括水位、流速、流量、图像、墒情、视频等信息。通过灌区管理 APP 可以查看每一个站点的历史信息,包括历史图片、历史水位、流量及水量信息。历史图片以轮播图的方式展示,历史水位、流量及水量信息,以图表的形式展示。用户还可以通过系统提供的查询工具查看任意时间段内的历史信息。

2.3 用水管理

用水管理功能模块主要是对灌区各用水单位的用水申请进行管理。用水申请单位负责人可通过灌区管理 APP 或者灌区管理信息系统提交用水申请。申请提交后,灌区管理单位可通过该 APP 及时了解用水申请的批复情况以及用水通知,方便用水申请单位提前做好灌溉准备,最大限度提升用水效率,节约水资源。

2.4 灌区巡检

灌区巡检功能模块主要是针对灌区日常巡检进行管理,该功能可记录巡检人员的巡检时间、巡检路径等信息并实时将巡检人员的巡检轨迹实时上传至灌区管理系统中^[13-14],方便灌区管理单位统计巡检工作的完成情况。若巡检人员在巡检过程中发现问题,可通过灌区管理 APP 进行问题上报,方便管理单位及时了解

信息并安排维护人员前往现场开展维护工作。

2.5 运行维护

运行维护功能模块以列表方式展示灌区每一项运行维护任务的完成情况。灌区管理单位将巡检人员在巡检过程中发现的问题,通过灌区管理信息系统下发给运维人员,运维人员登录灌区管理 APP 查看运维任务清单,并在规定时间内前往现场开展运维工作,工作完成后及时将现场处理结果通过该 APP 反馈至灌区管理系统中,灌区管理单位工作人员通过信息系统查看运维工作完成情况。

2.6 远程灌溉

当前,部分灌区管理单位响应节水灌溉号召积极推进精准灌溉工作,以实现农业灌溉用水总量控制,提高水资源利用效率的目标,在灌区田间配置基于物联网的农业痕量灌溉系统^[15]。灌区管理 APP 中接入了痕量灌溉系统中的实时监测数据,用户通过 APP 实时查看土壤墒情、田间管网流量及压力、农作物生长状态并结合田间农作物需水情况,利用 APP 远程灌溉功能直接对农业痕量灌溉系统中布设在田间的电磁阀进行开关操作,实现了高效、节水灌溉的目标。

3 关键技术

灌区管理 APP 基于以下关键技术,满足不同手机平台(IOS、Android)的使用需求。

3.1 H5 + 移动 APP

H5 + 是 html5 plus 的缩写,即基于 html5 的增强扩展。H5 + APP 是一个跨 IOS、Android 的混合开发 APP 解决方案。它基于 webview 渲染,封装了大量原生能力给 JS API,并通过 JS 直接调用手机的原生能力,实现与原生 APP 同样强大的性能。

3.2 uni-APP 前端开发框架

灌区管理 APP 开发采用当前流行的 uni-APP 开发框架,开发完成后可同时发布到 Android、IOS 以及各种小程序等平台。使用该平台具有开发成本低、易维护、生态丰富、性能体验优秀等特点,尤其是 APP 端支持原生渲染,可以支持更流畅的用户体验。

3.3 数据库管理技术

部分灌区位于偏远地区,移动网络尚未覆盖,运维或巡检人员无法实时将现场数据及时上传,利用 SQLite 数据库将用户运维或巡检数据暂存在手机中,网络恢复后进行数据上传。

3.4 移动 GIS 技术

移动 GIS 技术具有如下特点^[16]:①移动性,借助无线通信技术,实现了与 GIS 服务端的救援交互;②可定位性,通过 GPS 定位技术,实现基于位置的服务;③动态性,能够根据使用条件的变化,选用实时在线模式、离线模式、混合模式等三种不同模式完成与服务端的数据同步。

灌区管理 APP 以地理应用服务和空间数据为支撑,以移动端为应用工具,结合 GPS 定位技术可实现对灌区渠系及监测站点分布情况、采集信息、巡检实时轨迹及历史轨迹等空间信息在地图上的展现。

4 灌区管理 APP 应用

灌区管理 APP 使用 DCloud(数字天堂)推出一款集成开发环境 HbuilderX 完成 APP 开发、测试及安装程序打包等工作。APP 中展示的各类数据及对数据的增、删、改、查等操作是通过 APP 发送 HTTP 请求,调用部署在服务器上各类数据接口实现的。灌区管理 APP 总体结构见图 2。

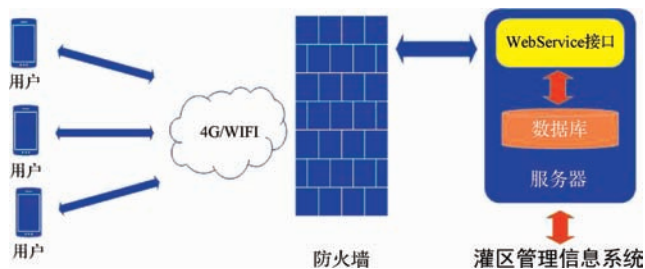


图2 灌区管理 APP 总体结构

目前,灌区管理 APP 已在恩平锦江灌区管理处、广州流溪河灌区管理中心等单位进行应用,且用户黏度较高,部分功能模块见图 3~图 6。利用灌区管理 APP 改变了灌区管理单位原来固有的工作模式,实现了移动办公,极大提高了用户工作效率,用户反馈使用效果良好。



图3 灌区电子地图



图5 巡检功能



图4 实时监控



图6 远程灌溉功能



5 结 语

灌区信息化是灌区可持续发展的基础,也是农业可持续发展的根本保障。充分利用移动互联网技术结合灌区管理单位的业务需求,开发通用性的灌区管理 APP 是灌区管理信息化可持续发展的必然趋势。灌区管理 APP 在设计时不仅要充分考虑灌区管理单位间的通用业务,还应根据不同单位的业务需求,定制开发个性化功能,力求功能满足灌区日常管理的全部业务要求。随着移动互联网的不断发展,小程序以其免安装、下载更新简易等特点得到广泛应用,未来可设计开发一款灌区管理小程序,为灌区管理单位提供更加便捷的应用服务。◆

参考文献

- [1] 边玉国,李积军,郭志成.大型灌区信息化系统总体方案设计[J].水利规划与设计,2018(7):15-18.
- [2] 崔静.智能灌区信息化解决方案[J].新疆农机化,2019(5):30-32.
- [3] 吴雁林.现代节水背景下的钓鱼台灌区改造[J].水资源开发与管理,2018(8):78-80.
- [4] 高升.浅谈大中型灌区现代化改造的总体思路[J].治淮,2021(1):60-61.
- [5] 姚宝永,王海东.“互联网+移动安监智能管理系统”在水

(上接第47页)技术在出入线隧道下穿输水管道中的应用,接合穿越工程施工中采用自动化监测与智能联控的应用,保证了管棚入土位置与出土位置均在设计要求范围内;与联合注浆接合,在输水管道出现位移及沉降变化时及时定向注浆进行纠偏,施工开始至完工后1年内的监测数据显示,实际最大差异位移及沉降变化值为0.5mm,远远小于设计要求的8.7mm,保证了输水管道的沉降变化符合设计要求,从而保证了输水管道的运行安全。◆

参考文献

- [1] 王留超.管棚支护在城市地铁下穿大型输水管道中的应用[J].水利建设与管理,2020,40(11):21-25.
- [2] 张家瑞,王晓鹏.大型输水钢管下穿兰新客专方案研究[J].铁道建筑,2020,60(3):44-46.
- [3] 胡颖姝.大伙房水库输水工程自动化监控系统设计与实现[J].水资源

利水电建设工程安全管理工作中的应用[J].水利建设与管理,2017,37(8):77-79,15.

- [6] 邵红艳,韩茜丹,张仁贡.大中型灌区智慧巡检系统的设计和应用[J].水电站机电技术,2017,40(8):78-79.
- [7] 王东利.基于移动APP的水利工程日常巡检平台应用及研究[J].内蒙古水利,2020(8):73-74.
- [8] 刘晓俊.基于GIS的灌区计量与水管理系统研究[J].水资源开发与管理,2017(5):66-69.
- [9] 张波,陈武奋,江显群.智慧灌区建设中的关键技术应用[J].水利建设与管理,2020,40(9):72-76.
- [10] 谭晖涛,孙洁,谢赞福,等.基于mui和H5+混合应用的菜篮子APP设计和实现[J].信息通信,2020(5):98-101.
- [11] 索惠霞.基于信息化技术的水利现代化思路研究[J].水资源开发与管理,2017(10):78-81.
- [12] 高欢凯.浅谈移动APP在水利工程巡查及养护管理中的设计与实现[J].地下水,2018,40(6):221-222.
- [13] 成荣亮,马福恒,俞扬峰,等.基于Android平台的灌区智能巡检系统研发[J].中国水利,2019(20):62-64.
- [14] 江显群,陈武奋,叶廷东,等.基于物联网的农业痕量灌溉系统[J].自动化与信息工程,2019,40(1):21-24,29.
- [15] 刘燕.水资源信息化应用与实践研究[J].水资源开发与管理,2016(5):1-3.
- [16] 姜智宇,刘双双,董丽娜,等.基于Android的智慧城管网格管理APP设计与实现[J].智能城市,2020,6(16):9-11.

开发与管理,2016(5):57-59.

- [4] 董志山.大型输水管道过河涌的设计要点[J].中国给水排水,2005,21(12):65-68.
- [5] 张露凝,樊博,李建利,等.激光跟踪仪在同轴度与同轴度检测中的应用——基于大型输水管道设备[J].工业技术创新,2020,7(3):108-112.
- [6] 吕锐.奇台县农村饮水改造工程输配水管网设计分析[J].水资源开发与管理,2018(5):18-20,7.
- [7] 左坤.观音阁水库输水隧洞方案选取及输水系统安全措施探讨[J].水资源开发与管理,2016(5):35-37.
- [8] 何琛.明挖衡重式顶进技术在上穿地铁河道施工中的应用[J].水利建设与管理,2018,38(11):16-20,15.
- [9] 宋晓宇,刘涛,梁青槐.盾构下穿地铁13号线清河高架桥地表沉降监测[J].铁道建筑,2011(6):65-67,98.
- [10] 张奇.输水隧洞盾构穿越轨道交通结构安全稳定分析研究[D].北京:清华大学,2015.

江苏省无资料山丘区产汇流计算方法与模型构建研究

华 晨¹ 费国松¹ 潘 茹²

(1. 江苏省水文水资源勘测局常州分局, 江苏 常州 213022;

2. 常州市水资源服务中心, 江苏 常州 213022)

【摘 要】 江苏省部分山丘区受客观自然条件限制, 缺乏水文观测设施和实测数据, 洪水预报中传统的参数移植方法, 受预报人员经验性和主观性影响较大, 预报精度不能满足需求。因此需要研究一种对水文资料依赖性小的计算方法, 构建无资料山丘区产汇流模型, 解决无资料地区水文分析计算难题。本文通过选取典型区域分析洪水类型构成和时空分布特征, 确定产汇流模式, 基于地貌单位瞬时线方法确定流域地形地貌特征与流域水文响应间的对应关系, 进而建立无资料山丘区产汇流计算模型。通过对实测洪水和模型模拟计算成果进行对比, 证明该模型模拟效果良好, 可供类似无水文观测资料地区借鉴。

【关键词】 无资料地区; 产汇流模型; 单位瞬时线法; 水文观测

中图分类号: [TV11]

文献标志码: B

文章编号: 2097-0528(2022)02-071-08

Study on calculation method and model construction of runoff yield and concentration in hilly regions without data in Jiangsu Province

HUA Chen¹, FEI Guosong¹, PAN Ru²

(1. Jiangsu Hydrology and Water Resources Survey Bureau Changzhou Branch, Changzhou 213022, China;

2. Changzhou Water Resources Service Center, Changzhou 213022, China)

Abstract: Some hilly regions in Jiangsu Province are limited by objective natural conditions. They are lack of hydrological observation facilities and measured data. The traditional parameter transplantation method in flood prediction is greatly affected by the experience and subjectivity of forecasters. The prediction accuracy can not meet the needs. Therefore, a calculation method with less dependence on hydrological data is studied to build a model of runoff yield and concentration in hilly areas without data so as to solve the problem of hydrological analysis and calculation in areas without data. The flood type composition as well as temporal and spatial distribution characteristics are analyzed by selecting typical regions in the paper. The runoff yield and concentration modes are determined. The corresponding relationship between the topographic and geomorphic features of the basin and the hydrological response of the basin is determined based on the geomorphic unit instantaneous line method. The runoff yield and concentration calculation model in hilly regions without data is established accordingly. The comparison between the measured flood and the model simulation calculation results shows that the model

收稿日期: 2021-04-07

基金论文: 2016 年江苏省水利科技项目——江苏省水文资料匮乏山丘区的产汇流模型研制(2016012)

作者简介: 华晨(1985—), 男, 本科, 工程师, 主要从事水文水资源相关研究。



has good simulation effect, which can be used for reference in similar areas without hydrological observation data.

Keywords: regions without data; runoff yield and concentration model; unit instantaneous line method; hydrological observation

江苏省山丘区受暴雨影响易形成峰高量大的地表径流,受下游平原区江水顶托、潮水倒灌等因素影响,洪水不易消退,因此是洪涝灾害多发区。受历史和客观因素制约,江苏省山丘区水文监测基础设施相对落后,水文资料缺乏,传统的流域水文模型较难应用;地貌单位线理论考虑了一定的物理机制,较少对实测资料的依赖,因此开展基于地貌单位线理论的无资料地区产汇流模型研究。

根据江苏省地理特征,山丘区主要分布于太湖湖西区、秦淮河地区、盱眙、仪征、六合山区和赣榆滨海山区。本次研究从流域产汇流特性方面考虑,兼顾流域面积大小、坡度急缓以及地区位置,确定苏南洛阳河和中田舍流域、苏北花果山和二涧流域为实验测区。其中,洛阳河流域为太湖湖西区较大流域代表,其特征为暴雨强度大、持续时间长,叠加台风易产生大灾害,洪峰流量大;中田舍流域为湖西宜溧丘陵山区小流域代表,其特征为地貌复杂,短时雨强大,洪水陡涨缓落;花果山流域为苏北较大流域代表,其特征为地势起伏大,支沟排布复杂,雨量相对一般,但历史极值极大,洪水陡涨缓落;二涧流域为苏北锦屏山脉余脉独流入海小流域代表,地势起伏大,雨量较小,洪水陡涨缓落。

1 区域概况

江苏省是全国地势最低平的省份,全省山丘区总面积 1.51 万 km^2 , 占全省总面积的 14.7%, 山势低缓。多年来受客观因素制约,苏南山丘区水文测站相对稀少,主要在大型水库和流域性河道上布设流量监测站点,中型水库上布设水位监测站点;苏北山丘区水文测站稀少,尤其缺少流量监测站点,历史上只有特设的个别径流实验站具有短期水文监测资料,无法反映近几十年河道下垫面变化客观情况,是典型的水文资料匮乏区。其中,苏南山丘区为亚热带季风气候,夏季高温高湿雨量集中,梅雨季常叠加台风暴雨产生强降水;苏

北山丘区为暖温带季风气候,受东南季风影响较大,降雨年内和年际分配不均。

2 代表性流域产流方式论证

2.1 洛阳河流域

洛阳河全长 30.16 km, 流域面积 148.6 km^2 , 干流比降 10.51‰, 流域内有中型、小(1)型水库各 1 座。流域共有国家基本站 4 处,长历时暴雨(24h)有 30 年以上系列降雨资料,水文资料代表性、可靠性和一致性均较高。洛阳河流域多年平均降雨量 1071.7 mm, 多年平均年径流系数 0.71, 降雨年际及年内变化较大,一般梅雨季发生在 6—7 月份,台风雨主要发生在 8—9 月份。流域内多山丘区,植被情况良好,降雨后山洪直泻,河水涨势猛、洪峰流量大。

采用 1980—1987 年 8 年 9 次洪水和 2002—2007 年 6 场洪水实测资料,与时段降水资料和逐日蒸发资料对洛阳河流域的降雨径流关系进行分析,对该流域的产汇流方式进行论证。洛阳河流域内地下水埋深较浅,包气带土层不厚,植被覆盖情况较好,表层土壤疏松,因而土壤的下渗率大,一般雨强的降雨不易超渗。在包气带影响土层的蓄水量未达田间持水量时,降雨全部填充土层,蓄满后降雨全部形成径流,因此流域具备蓄满产流特征。流域 $(P + P_a) - R$ 关系见图 1, 典型流量过程见图 2, 明显表现出陡涨缓落的流量过程,说明流量过程中地下及壤中径流所占比例较大,符合蓄满产流特性。

2.2 中田舍流域

中田舍河全长 25 km, 流域面积约 42 km^2 , 干流河道比降为 6.38‰。流域有雨量监测站和水土保持监测站各 1 处,降水量系列为 1960 年至今,水位系列为 2006 年至今,流量系列为 2013 年至今。中田舍流域多年平均降水量为 1284.1 mm, 多年平均年径流系数

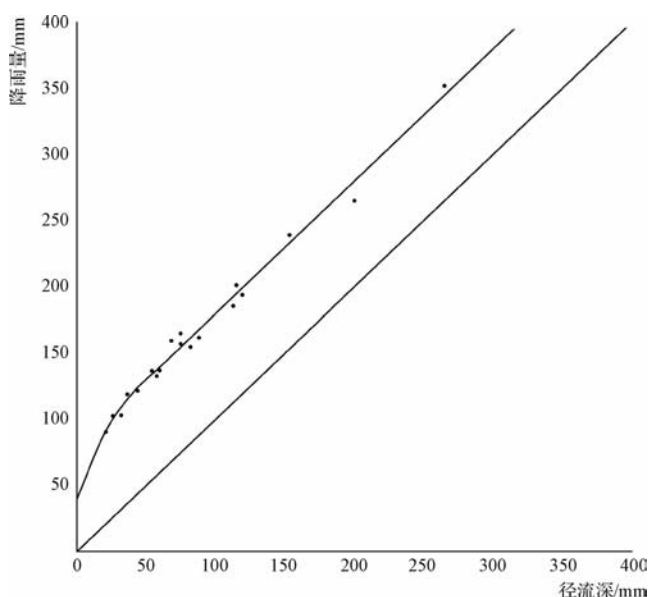


图1 洛阳河流域降雨径流关系

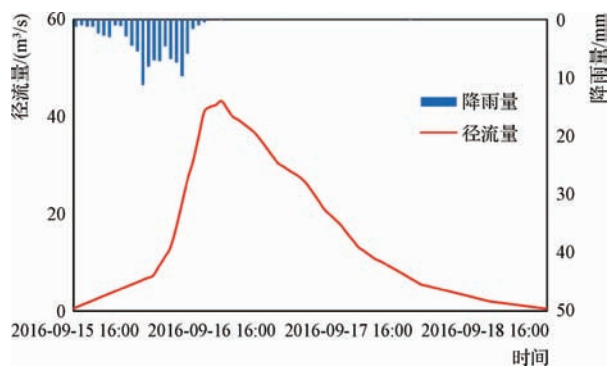


图2 洛阳河流域 160915 降雨洪水流量过程

0.73,降水量年际及年内变化较大,5—9月降水量占全年降水量的60%以上,暴雨主要集中在6—7月梅雨季。流域内地势起伏较大,地貌类型复杂多变,主要为丘间谷地和河谷阶地,土壤类型相对单一,植被覆盖度良好。

根据2016年实测资料,对中田舍流域进行了降雨产流关系计算,全部场次的径流系数均大于0.4,其 $(P+P_a)-R$ 关系见图3,表现出明显的蓄满产流特性。点绘流域代表性洪水流量过程线(见图4),其洪水过程仍表现出陡涨缓落的态势,洪水过程线不对称系数较高。

2.3 花果山流域

花果山流域内共8条涧沟汇集于大村水库,干流

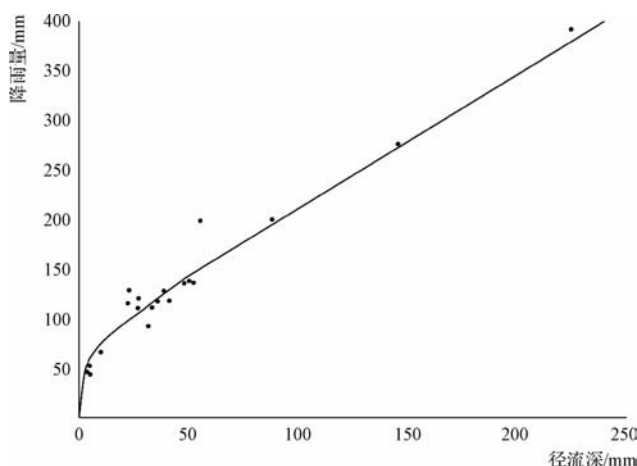


图3 中田舍流域降雨径流关系

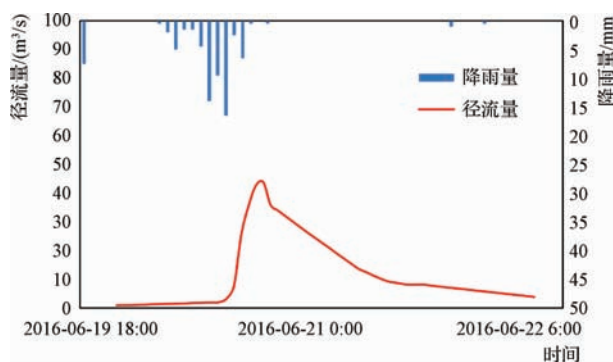


图4 中田舍流域 160619 降雨洪水流量过程

河长3.19km,平均比降52.2‰,水库溢洪道为流域出口,流入花果山截洪沟经排淡河大板桥闸入黄海,流域面积10.47km²。流域内地势起伏较大,东、南、北三面环山,西侧低洼。流域内土壤类型相对单一,土层较薄,植被发育良好,覆盖度较高。

流域内有4个水文监测站点,多年平均降水量899.6mm,多年平均径流深282.7mm,多年平均径流系数0.314。测区最大1h、6h、24h降水量的统计偏差系数 $C_s = 3.5C_v$,离差系数 C_v 分别为0.50、0.59、0.60。花果山流域 $P+P_a-R$ 关系见图5,其降雨径流关系基本符合蓄满产流模式。点绘流域代表性洪水流量过程线(见图6),其洪水过程表现出陡涨缓落的态势,洪水过程线的不对称系数较高。

2.4 二涧流域

二涧流域面积1.54km²,流域内地势起伏较大。托山涧沟为二涧流域出口河流,长度4.0km,干流比降

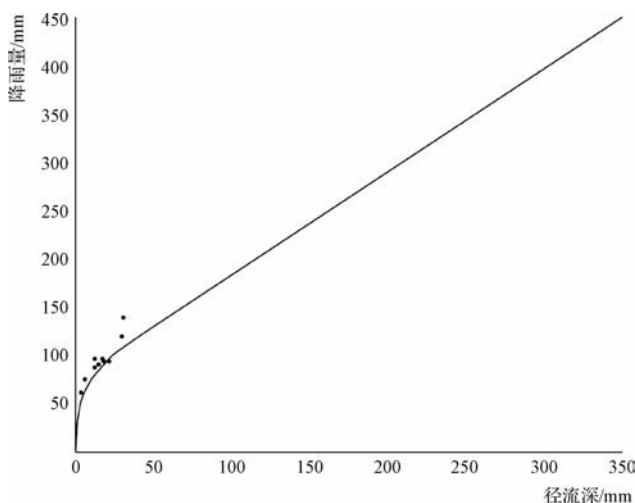


图5 花果山流域降雨径流关系

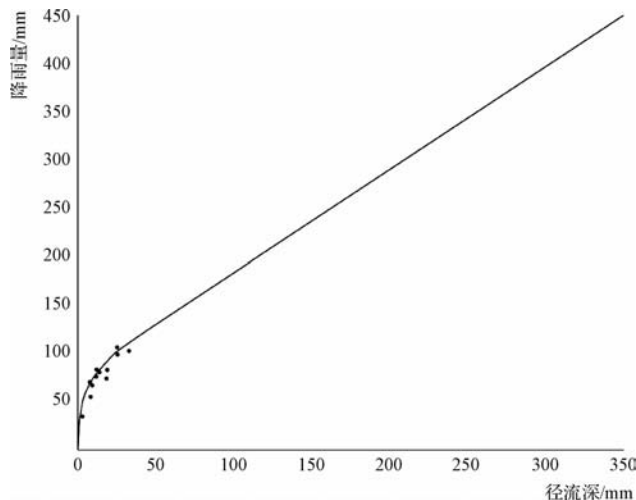


图7 二涧流域降雨径流关系

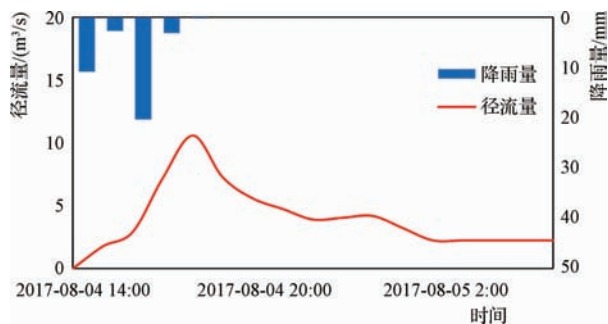


图6 花果山流域 170804 降雨洪水流量过程

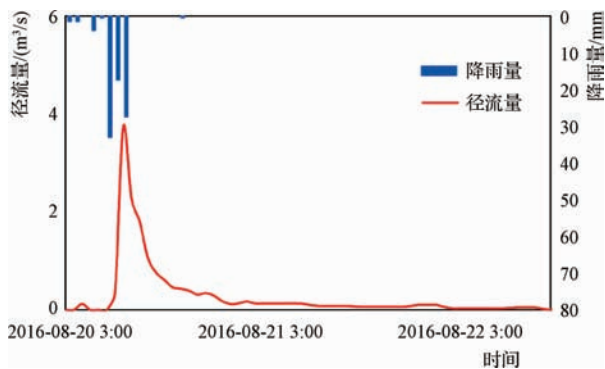


图8 二涧流域 160820 降雨洪水流量过程

99.8%,流入西盐河、大浦河、新沐河后经三洋港闸入黄海;二涧水库为流域出口控制水库,总库容 48.19 万 m^3 ,溢洪道无闸门控制自由溢洪。流域内为土石山区,土壤类型单一,土质疏松,土层较薄。植被生长良好,覆盖度较高。流域内设有 3 个水文监测站点,多年平均降水量 899.6mm,多年平均径流深 282.7mm,多年平均径流系数 0.314。测区最大 1h、6h、24h 的偏差系数 $C_s=3.5C_v$,离差系数 C_v 分别为 0.50、0.58、0.60。流域 $(P+P_a)-R$ 关系见图 7,其降雨径流关系基本符合蓄满产流模式。点绘流域代表性洪水流量过程线(见图 8),其洪水过程表现出陡涨缓落的态势,洪水过程线的不对称系数较高。

2.5 产流机制分析

为简化计算模式、更贴近流域实际,在建立区域产汇流模型前,进行产流机制分析。

从流量过程线分析,超渗产流洪水过程中没有或基本没有地下径流,而其在蓄满产流中占比较大。在微观层面上,地面、地下径流自汇流开始至最终通过出口断面,流量微团所通过介质不同,以及路径的随机性,导致流量整体在过程线上,常体现出线型特征差异。流量过程线较为对称(即过程线不对称系数较小),多对应超渗产流,流量过程线呈现陡涨缓落的不对称形状(即过程线不对称系数较大),多对应蓄满产流。

从气候、下垫面特征分析,若流域常年干旱,则其土壤饱和度通常较低,在降雨过程中,土壤很难蓄满,无法形成地下径流,地面径流通常为超渗产流;若流域为湿润地区,则其土壤饱和度常较高,容易蓄满后产流。下垫面特征一般包括土壤组成、结构、力学特性、植被覆盖度和组成特征等因素,若土壤特征具备以下

一项或几项,则可能为超渗产流,反之则为蓄满产流,如土壤由细小颗粒组成、土体密实、地面植被系数、地下水埋深较大等。通过气候或下垫面特征分析产流方式应结合流量过程综合判定。

综上,上述4个代表性流域均属蓄满产流模式,据此构建产流计算模型。

3 产汇流计算方法

根据代表性流域特征,产汇流计算主要考虑蓄满产流的计算原理、方法和基于地貌瞬时单位线的汇流计算方法。

3.1 产流计算

原始的蓄满产流基本设定为在土壤饱和前,降雨均补充土壤,此时产流为0;在土壤饱和后,降雨直接产流,此时蓄满产流模型的产流量计算式为

$$R = PE + W - WM \quad (1)$$

式中: R 为产流,mm; P 为降雨,mm; PE 为扣除雨期蒸发后的降雨量,mm; W 为土壤含水量,mm; WM 为流域平均蓄水量,mm。

但根据实际观测,在某场次降雨后或过程中,即使流域内土壤尚未饱和,通常也可观测到径流,多是由于流域内土壤饱和情况的空间分布不均匀,导致即使全流域土壤尚未完全饱和,但部分区域先蓄满先产流。这种土壤缺水量的不均匀空间分布,一般用流域蓄水量曲线来表示。假定流域内各地点包气带蓄水量

值为 WM' ($0 \leq WM' \leq WMM$, WMM 为流域各地点包气带蓄水容量的最大值), a 为包气带蓄水量小于等于 WM' 的面积 f 与全流域面积 F 之比($0 \leq a \leq 1$),则蓄水量曲线可以近似描述为 $a = 1 - \left(1 - \frac{WM'}{WMM}\right)^b$,其中 $b \geq 0$ 为蓄水量分布不均匀常数,0表示均匀分布。则计算得流域平均蓄水量为 $WM = \frac{WMM}{1+b}$ 。

通常在降雨前,土壤已保有一定水分,根据修正后的蓄满产流理论,其空间分布对产流情况有较大影响。基于统计原理分析,假定流域中有 a_0 (面积比)面积土壤已饱和,即有 a_0 面积的区域上降雨直接产流,在 $1-a_0$ 面积的区域上降雨将继续下渗,可知 a_0 按下式计算:

$$a_0 = WMM \left[1 - \left(1 - \frac{W}{WMM} \right)^{\frac{1}{1+b}} \right] \quad (2)$$

同样地,对扣除降雨期间蒸发后的雨量 PE 、产流量 R 取微分 dPE 、 dR ,可以得到:径流系数 $= \frac{dR}{dPE} \Big|_{dPE=0} = a_0 = \text{产流面积比}$ 。

综上建立产流方程,在初始土湿 W 条件下,降雨量 PE 的产流量计算如下。

a. 当 $a + PE \leq WMM$ 时,即全流域蓄满前

$$R = PE + W - WM + WM \left(1 - \frac{PE + a}{WMM} \right)^{b+1} \quad (3)$$

b. 当 $a + PE > WMM$ 时,即全流域蓄满后, $R = PE + W - WM$ 。其对应的降雨径流相关见图9。

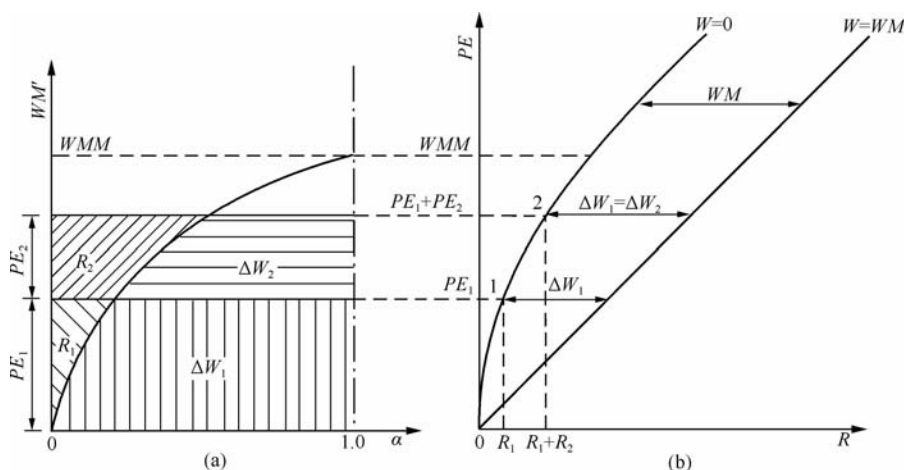


图9 蓄水量曲线转换为降雨径流关系示意图



3.2 基于地貌单元线的汇流计算

汇流计算首先确定河流等级,根据斯特拉勒分级法,定义1级河流自河源出发,当两条河流汇合时,若该两条河流为同级,则汇流后河流增加1级;若该两条河流为不同级,则汇流后河流取其中较高级别。对某河流水系来说,其河数、平均河长及流域面积均随着河流级别的增加呈几何级数变化,可用下式计算。

$$R_B = \frac{N_{i-1}}{N_i} = C, \quad R_L = \frac{\bar{L}_{i-1}}{\bar{L}_i} = C, \quad R_A = \frac{\bar{A}_{i-1}}{\bar{A}_i} = C \quad (4)$$

式中: $i = 1, 2, 3, \dots, \omega$; $N_i, \bar{L}_i, \bar{A}_i$ 分别为第 i 级河流的数目、平均长度和对第 i 级河流径流有贡献的流域面积平均值; C 为常数; ω 为河流水系中的最高级; R_B, R_L, R_A 为河流的分叉比、河长比、面积比。

根据 GIUH (即地貌瞬时单位线) 理论的基本设定,流域上某瞬时注入且分布均匀的净雨量为 I_0 , 各水质点降落到流域上各地的概率相同。以 T_B^i 表示第 i 个水质点自降落到流域某地至其流出流域的时间,则对于任意时刻 t ,若 $T_B^i > t$, 则该水质点留存在流域中,即其参与汇入了 t 时刻的流域水量 $W(t)$, 即

$$W(t) = \frac{I_0}{n} \sum_{i=1}^n I_{(t, \infty)}(T_B^i) \quad (5)$$

式中, $I_{(t, \infty)}(T_B^i)$ 为指示函数, $T_B^i > t$ 时取值为 1, 否则为 0。由于 n 事实上为无穷大,根据大数定律,有 $W(t) = I_0[1 - F_B(t)]$ 。根据水量平衡方程,如流域仅在 0 时刻有净雨量瞬时注入,则 $Q(t) = I_0 f_B(t), u(t) = \frac{Q(t)}{I_0} = f_B(t)$ 。说明此时流域瞬时单位线与水质点停留时间的概率密度函数 $f_B(t)$ 是等价的。

假定降雨瞬时且空间均匀地降落在全流域,此时 $f_B(t) = \sum_{r \in T} p(r) \{f_{x_1} f_{x_2} \dots f_{x_i}(t)\}$, 式中 $f_{x_i}(t)$ 为水质点在每个状态停留时间 $T_{x_i}(t)$ 的概率密度函数。对于初始概率, $\pi_{r_i} = \frac{A_2}{A_i} \left[\bar{A}_i - \sum_{j=1}^{i-1} \bar{A}_j \frac{N_j p_{\omega, \omega_j}}{N_i} \right]$, 式中 A_i 为排入 i

级河流的流域面积, A_Ω 为流域总面积;对于转移概率,

$$p_{\omega, \omega_j} = \frac{2N_j}{N_i} \delta_{i+1, j} + (N_i - 2N_j) \frac{E[j, \Omega]}{N_i \sum_{k=j}^{\Omega} E[k, \Omega]} \quad (i < j) \quad (6)$$

$$E[i, \Omega] = N_i \prod_{a=2}^i \frac{N_{a-1} - 1}{2N_a - 1} \quad (i = 2, 3, \dots, \Omega) \quad (7)$$

式中: N_i 为 i 级河流总数; $E[i, \Omega]$ 为 Ω 级河流水系中第 i 级河流的内链数; $\delta_{i+1, j} \in (1, 0)$, 当且仅当 $i+1 = j$ 时为 1。

采用伽马函数替代,得到 GIUH 计算公式如下

$$\begin{aligned} GIUH(t) &= \left(\frac{t}{k} \right)^{a-1} \frac{e^{-\frac{t}{k}}}{k\gamma(a)} \\ a &= 3.29 \left(\frac{R_B}{R_A} \right)^{0.78} R_L^{0.07} \\ k &= 0.70 \left(\frac{R_A}{R_B R_L} \right)^{0.48} \frac{L_\Omega}{v} \\ v &= \exp \left\{ 0.755 \left(\frac{A}{L_\Omega^2} \right)^{-0.139} \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

式中: $\gamma(a)$ 为 a 的伽马函数; L_Ω 为最高级河流长度; v 为流域上水质点的平均汇流速度。

综合 3.1 和 3.2 结论,利用流域地形资料分别获取所需的地形地貌参数后,可推求得到流域地貌瞬时单位线。

4 山丘区产汇流模型应用

经论证,本项目 4 个代表性流域均适用蓄满产流模式,因此根据第 3 节结论,以蓄满产流结合地貌瞬时单位线的方法构建山丘区产汇流模型,基于实测降雨径流过程进行产流参数确定,基于流域数字高程模型提取地形地貌参数(本次为 1:10000 DEM 资料),确定地貌瞬时单位线。将其分别应用到 4 个代表性流域的 17 场实测历史洪水中得到模拟结果,由于篇幅所限,部分场次洪水过程模拟与实测径流对比见图 10 ~ 图 13,各代表性流域的场次洪水计算结果对比统计见表 1。

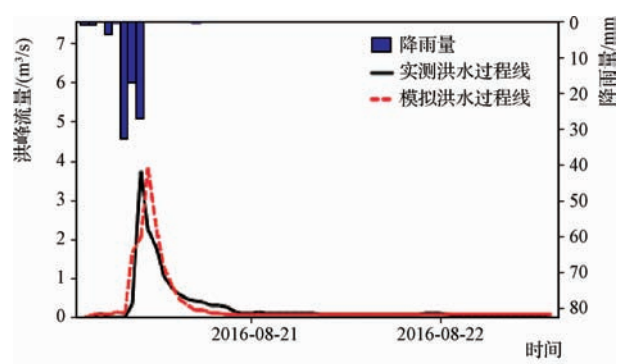


图 10 洛阳河流域 160820 洪水过程模拟对比

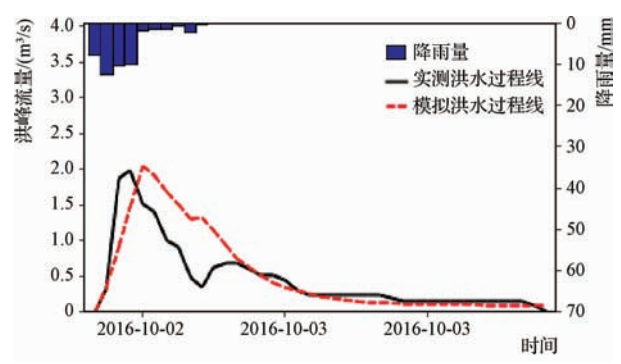


图 12 花果山流域 161002 洪水过程模拟对比

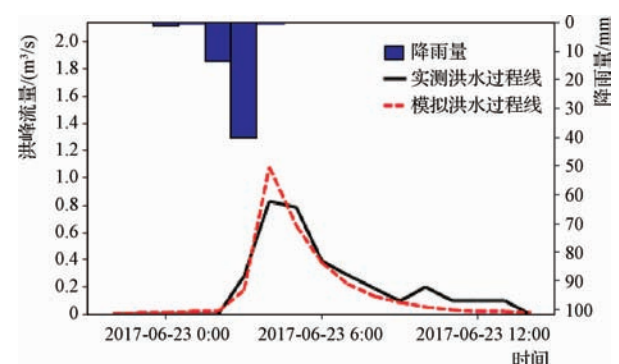


图 11 中田舍流域 170623 洪水过程模拟对比

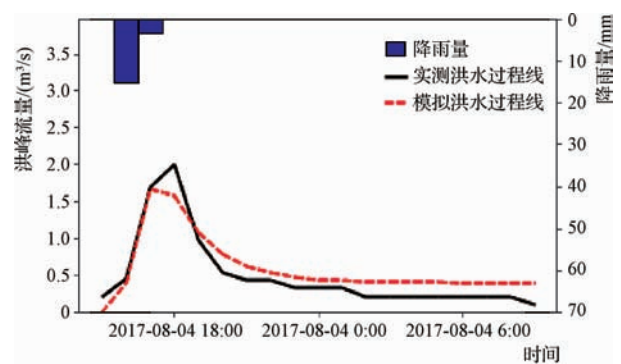


图 13 二涧流域 170804 洪水过程模拟对比

表 1 场洪水实测与计算成果对比统计

洪 号	降雨量/ mm	径流深 (实测)/mm	径流深 (计算)/mm	径流深计算 误差/%	洪峰(实测)/ (m³/s)	洪峰(计算)/ (m³/s)	洪峰计算 误差/%	洪峰计算 时差/h	确定性 系数
洛阳河流域									
160701	388.8	379.2	384.8	1.5	162.0	150.0	-7.0	-4	0.818
160820	99.2	36.4	32.2	-18.9	43.0	42.0	-2.0	-5	0.656
170610	210.6	140.5	140.9	0	196.0	197.0	0.0	-3	0.909
170702	33.0	22.8	25.3	10.7	31.0	36.0	13.0	-5	0.820
170809	30.7	28.8	26.8	-6.8	37.0	34.0	-7.0	0	0.712
170923	215.5	151.8	150.4	-0.9	194.0	192.0	-1.0	0	0.862
平 均	163.0	126.6	126.7	0.1	110.5	108.5	-1.8	-3	0.796
中田舍流域									
160619	74.0	58.5	57.1	-2.5	44.0	45.0	3.0	0	0.955
160626	182.0	111.9	120.8	7.9	64.0	60.0	-6.6	1	0.908
170623	57.8	7.0	8.0	-1.1	1.1	0.8	29.8	0	0.871
平 均	104.6	59.1	62.0	4.8	36.4	35.3	-3.0	1	0.913
花果山流域									
161002	30.5	7.5	6.6	0.8	2.0	3.0	2.6	1	0.489
170804	37.1	30.1	24.7	5.4	10.9	10.6	2.8	0	0.759
170819	37.8	17.0	14.6	2.4	5.7	5.5	5.0	0	0.761
平 均	35.1	18.2	15.3	-15.9	6.2	6.0	-3.4	0	0.670

续表

洪 号	降雨量/ mm	径流深 (实测)/mm	径流深 (计算)/mm	径流深计算 误差/%	洪峰(实测)/ (m ³ /s)	洪峰(计算)/ (m ³ /s)	洪峰计算 误差/%	洪峰计算 时差/h	确定性 系数
二洞流域									
160820	86.0	39.8	38.2	1.6	3.8	3.7	2.1	1	0.649
170623	329.0	299.0	306.1	2.3	48.0	64.0	-18.0	1	0.911
170715	52.8	37.1	42.8	-5.8	2.1	1.9	13.9	0	0.903
170804	29.3	26.9	22.3	4.6	1.7	2.0	-16.0	-1	0.847
170910	47.5	27.3	27.0	0.3	1.6	1.4	14.4	-1	0.752
平 均	108.9	86.0	87.3	1.5	11.4	14.6	27.6	0	0.812

5 结 语

本研究通过在江苏省选取具有代表性的山丘地区,通过实测数据论证产流方式,按照无水文资料的预设条件,采用蓄满产流的计算原理、方法和基于地貌瞬时单位线的汇流计算方法,构建山丘区产汇流计算模型。通过对4个代表性流域共17场洪水实测资料和模型模拟计算进行对比检验,通过对比降雨量峰值和洪水过程线峰值,可以得出区域产汇流特征;通过对比实测和模拟洪水过程线的峰值,可以得出产汇流过程中模拟与实测洪峰历时的差异;通过对比实测和模拟洪水过程线的线型,可以验证模型对产汇流和过流过程模拟的拟合程度,结果证明产汇流模型过程模拟效果良好。对今后该模型在全省无资料山丘区产汇流推广进行了充分论证,为类似无资料或资料匮乏地区洪水分析计算提供了重要方法。

本项目尚存在值得继续研究和改进的方面:①产流阶段采用的是基于蓄满产流的新安江模型,所使用参数均以《江苏省水文手册》为基础,通过监测到的少数场次洪水进行率定和修正,因此该模型在全省或更广泛地区推广中,应当根据应用地实测资料进行调参,保证模型适用性;②随着时间推移,一些涉水工程建设或其他人为活动会导致流域地形地貌特性改变,为确保洪水模拟准确,在模型应用时应当尽可能地采用最

新的地形数据;③该模型在4个代表性流域完成了检验,但流域规模均较小,模型在大尺度流域的应用尚需进一步检验。◆

参考文献

- [1] 纪小敏,陈颖冰,谢海文,等. 江苏省无资料山丘区洛阳河流域径流模拟方法探讨[J]. 水文,2018,38(3):57-61.
- [2] 邱文怡,朱永军,湛忠宇. 新安江产流和 TANK 汇流耦合模型在南方湿润地区的应用[J]. 人民珠江,2021,42(2):19-24.
- [3] 朱勇,陆泳舟,王世昭,等. 无资料地区设计洪水计算方法应用研究[J]. 水利规划与设计,2021(3):34-37.
- [4] 张鹏举,赵国荣. 疏勒河流域昌马水库坝址处水沙关系特性研究[J]. 水利建设与管理,2018,38(4):30-34,26.
- [5] 苏冬阳,胡婧娟. 城市道路径流雨水初雨量特征分析和计算方法[J]. 水资源开发与管理,2019(2):42-46.
- [6] 王健,孟庆玲. 小流域汇流计算的动态单位线法[J]. 水利建设与管理,2003(3):77-79.
- [7] 聂大鹏. 简化的推理公式在辽宁省无资料地区小流域设计洪水计算中的应用研究[J]. 水利规划与设计,2020,5(5):44-48,57.
- [8] 成丽婷. 结合实测降雨资料推求无资料地区洪水方法研究[J]. 山西水利科技,2019(1):64-66,83.
- [9] 岳杨. 面向 EMD 分解的人类活动影响区径流重构新方法应用研究[J]. 水资源开发与管理,2020(10):1-7.
- [10] 程明伟,王永立. 桃花园河径流规律分析[J]. 水资源开发与管理,2017(9):55-58,68.

柳河上游水沙特性及河道断面变化特征分析

巩士群

(辽宁省阜新水文局, 辽宁 阜新 123000)

【摘要】 河道冲淤变化与流域来沙状况密不可分, 本文研究以柳河中段彰武水文站数据为切入点, 对该站1980—2018年所测数据进行数学分析。结合典型断面套绘图, 利用一元线性回归预测和滑动平均等方法, 总结出了柳河上游多年来水沙变化特征, 即: 径流量缓慢提升, 含沙、输沙量降幅显著。“十三五”以来, 柳河上游水土保持取得阶段性成果, 趋势线预测该流域沙量有连续下降的态势, 加大治理力度是“十四五”时期重要工作。

【关键词】 柳河流域; 水沙特性; 输沙量; 降雨量; 断面套绘

中图分类号: TV123

文献标志码: A

文章编号: 2097-0528(2022)02-079-06

Analysis on the characteristics of water sediment characteristics in the upper reaches of Liuhe River and variation of river channel section

GONG Shiqun

(Liaoning Fuxin Hydrographic Bureau, Fuxin 123000, China)

Abstract: The change of river channel erosion and siltation is closely related to the sediment inflow in the river basin. The study is started with the data from Zhangwu Hydrological Station in the middle part of Liuhe River. The data measured at the station from 1980 to 2018 is mathematically analyzed. The characteristics of runoff and sediment change in the upper reaches of Liuhe River in recent years are summarized based on the mapping of typical sections according to the methods of unary linear regression prediction, moving average, etc. The characteristics include the follows: the runoff is increased slowly, the sediment content and sediment transportation are decreased significantly. Soil and water conservation in the upper reaches of Liuhe River has achieved periodic achievements since the 13th Five-Year Plan, and the trend line predicts that the sediment amount in the basin is continuously declined. The control efforts should be strengthened as an important work in the 14th Five-year Plan.

Keywords: Liuhe River Basin; water sediment characteristics; sediment transportation; rainfall; cross section drawing

柳河是辽河的重要支流之一, 柳河流域多年泥沙淤积、洪水频发, 生态平衡遭到严重破坏。对柳河流域进行水沙特性分析和研究有助于维护河流生态稳定,

保护河流水资源。已有不少学者对柳河的径流和水沙变化等进行了研究并得出了重要结论^[1]。安秉锋^[2]通过分析辽河支流水沙特性关系后指出柳河是辽河一级

收稿日期: 2021-04-13

作者简介: 巩士群(1991—), 男, 本科, 工程师, 主要从事水文水资源勘测工作。



支流中贡献输沙量最多的一条。已有研究表明,河流泥沙特性变化多与该流域气候条件、人类活动和植被状况密切相关^[3]。孙颖^[4]运用 RVA 法和分离气候变化法分析了柳河彰武县段泥沙和水文变化情况,认为流域泥沙与水文变化具有相似特征,其原因为流域泥沙变化在很大程度上取决于水土保持工程建设强度。张志玲等^[5]对柳河流域径流、泥沙要素从 20 世纪中叶到 21 世纪初的年内分配及年际变化进行时变过程分析,并研究径流量与泥沙输沙量的相关系数及关联度,结果表明,柳河流域径流量年内及年际分配都很不均匀,且有随时间发展更不均匀的现象。张铁楠^[6]通过对柳河流域六个水文站多年径流泥沙观测资料分析后发现柳河流域生态建设很大程度上减少了河流输沙量以及河道径流泥沙量,使得该流域生态环境得到改善,水土流失减少。王晓鹏^[7]认为柳河彰武县段泥沙与水文变化有相同特征,并指出水土保持工程强度决定着柳河输沙量变化。通过研究文献与实地调研后发现,柳河上游多年水土流失严重的主要原因还是流域森林覆盖率极低,荒山秃岭,耕地有机质含量不足,

固沙能力差等。为更细致分析柳河流域泥沙特性与河道断面变化情况,此次选择柳河中上游为研究区,其中,径流数据源自辽宁省河库管理服务中心统计资料和辽宁省水资源公报,含、输沙量图和套绘断面图均根据彰武水文站历年所测数据绘制。上述数据、图表真实可靠,有较好的代表性和可研性。

1 研究区域

本次将彰武水文站以上作为研究主要区域,测验河段包括彰武县水文站在内的柳河中上游河段,河段总长度 2km,测验河段顺直,河道两岸为已修建的道堤防,河道断面呈矩形状。彰武站以北流域属于平原区,区域含水层厚,一般厚度在 100m 左右,最厚达到了 200m,含水层包含细砂各类粉细砂层水土流失比较严重。彰武水文站体量大、集水面积广,总集水面积达到 85km²,是柳河流域最早设立的水文站之一,自 1934 年 6 月设站以来就担任起柳河流域水量标志站和控制站的重任,是该流域水量调度和防汛抗旱的重要设施。彰武站区间情况见图 1。

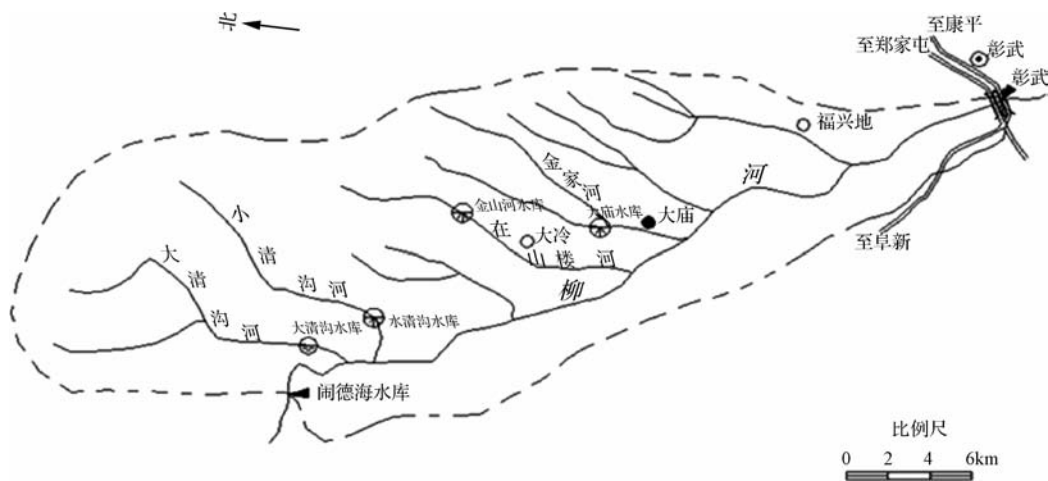


图 1 彰武站区位图

2 研究方法

2.1 一元线性回归预测法

线性回归预测法是利用数理统计的方法建立坐标轴的相对关系来预测一种客观现象的趋势,现引入 Y_t 为因变量, X_t 为自变量,建立 t 期自变量 X_t 和因变量

Y_t 之间的关系:

$$Y_t = a + bx_t \quad (1)$$

式中: x_t 为自变量关于 t 的函数(本文则表示为年份); Y_t 为以 t 为函数的自变量 X 的函数值(文中表示径流量、输沙量和含沙量); a 、 b 分别为一元线性回归方程的参数,在本文中表示各量(径流量、输沙量、含沙量)

的起始值和斜率,在这里斜率可以表示因变量的变化程度,若 $b \geq 0$,则表示因变量和自变量年份之间呈正相关,否则为负相关,根据参数的正负变化可总结出某现象长期以来存在的规律。

2.2 滑动平均法

滑动平均法是通过增减新旧数据的方法来计算移动平均值,通过这种方法可以有效消除偶然因素,从而更清楚了解事物发展的规律,根据这种规律还能延伸出该现象后续的走向和趋势^[8]。根据原理,对已有数据进整理。假设收集的数据个数为 $2K$,对这些数值求取平均值,后再对 Y_i (新序列)求解,在平均值影响下,他们的随机变化情况较平均前有所降低,此时让 X 呈现出一定变化,增强其光滑性。新序列 Y_i 用下式表示:

$$Y_i = \frac{1}{2K+1} \sum_{i=-K}^K X_i + 1 \quad (2)$$

现令 K 等于5,则 Y_6 、 Y_7 可以表示为

$$Y_6 = \frac{1}{11}(Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4 + Y_5 + Y_6 + Y_7 + Y_8 + Y_9 + Y_{10} + Y_{11})$$

$$Y_7 = \frac{1}{11}(Y_2 + Y_3 + Y_4 + Y_5 + Y_6 + Y_7 + Y_8 + Y_9 + Y_{10} + Y_{11} + Y_{12})$$

3 结果分析

3.1 1980—2018 年测站上游水沙特性分析

彰武站位于柳河中游,河水暴涨暴落,基本遵循涨冲落淤的规律,河床经过多年河水输沙后上淤严重。观察水位流量关系曲线发现,柳河水流不固定,涨冲落淤,基本上为一次洪水一条线,重合的机会几乎没有^[9-10]。1980—2018 年测站径流量变化见图 2,由于径流量曲线图起伏较大,采用滑动平均法适当消除过大的起伏,可以得出历年柳河径流量的一般规律。由图 2 可知,多年以来柳河中上游流域径流量波动较大,2009 年径流量降低到接近阈值,1980—2009 年曲线变动较为平缓,但平均径流量在 4000 万 m^3 上下波动,说明这 30 年间柳河流域水量变化并不显著。彰武站径流量线性回归趋势方程为 $Y = 63.277X + 3043.8$,可以看到趋势线方程斜率为正值,由此可以推断出近年来以彰武站为中心的柳河中上游年平均径流量呈显著上升趋势。据水文站资料统计,彰武站多年径流量平均值为 4952.78 万 m^3 ,多年径流最大值达 16000 万 m^3 ,最小值接近 0,出现年份分别为 2017 年和 2009 年。显然 2017 年径流量高居 16000 万 m^3 不具备参考意义,通过图像分析计算出趋势线拟合程度指标值 $R^2 = 0.517$,拟合程度超过 0.5,表明趋势线具备良好参考性,上述预测合理。

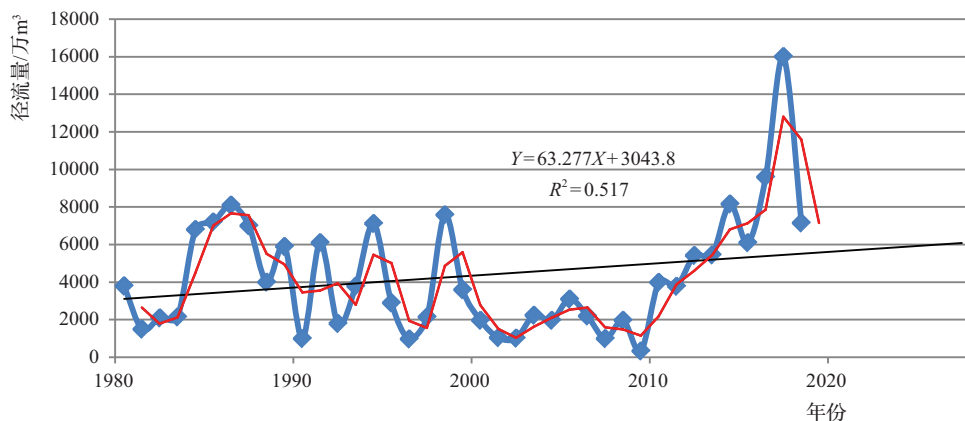


图 2 彰武站 1980—2018 年径流量

柳河的河流含沙量一直受各界关注,该河流含沙程度与黄河属同一级别,有东北地区第二黄河之称。

柳河河水含沙量大,河道泥沙淤积严重,有调查称 20 世纪中叶到 21 世纪初多年平均年排入辽河的沙量达



780.8 万 t。根据 1980—2018 年彰武站含沙量和输沙量绘制的曲线见图 3、图 4。对比输沙量趋势图和含沙量趋势图可知,1980—2018 年柳河上游沙量呈显著减少趋势,其中输沙量趋势方程为: $Y = -30.208X + 1113.2$,输沙量以每年超过 30 万 t 的速度递减。输沙

量图以 1996 年为界,1996 年以前,波动较大,1996 年以后波动趋于平稳。含沙量曲线图变化趋势与输沙量趋势相似,趋势方程为 $Y = -0.548X + 21.735$,总体表现为下降趋势,降幅大于输沙量,可以推测出 2020 年以后该河流含沙量将稳定在 $0 \sim 5\text{kg/m}^3$ 。

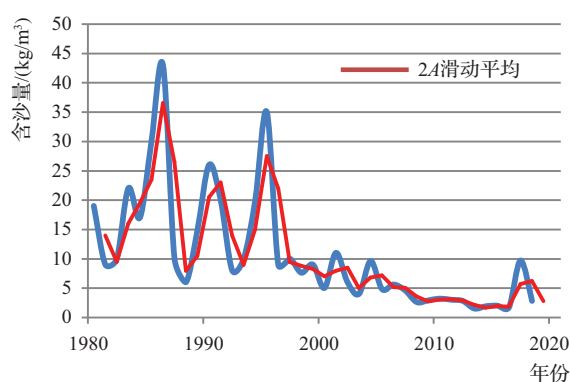
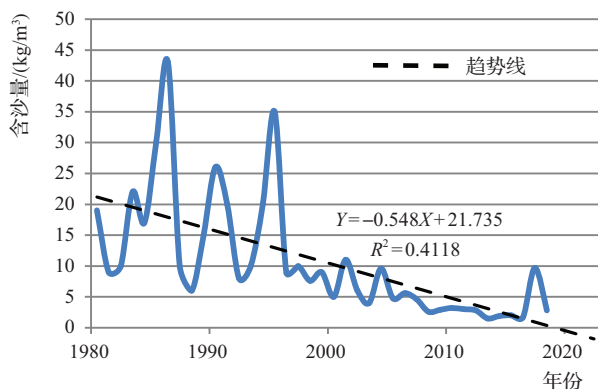


图3 彰武站历年年含沙量变化过程图

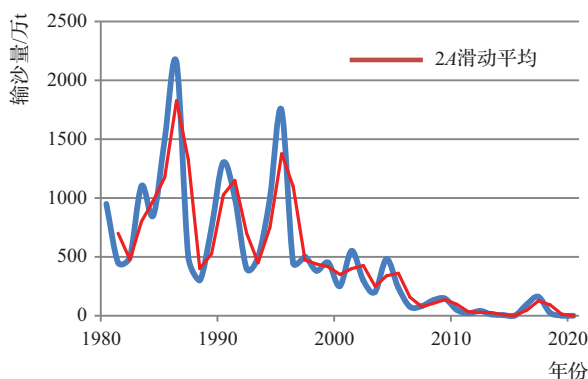
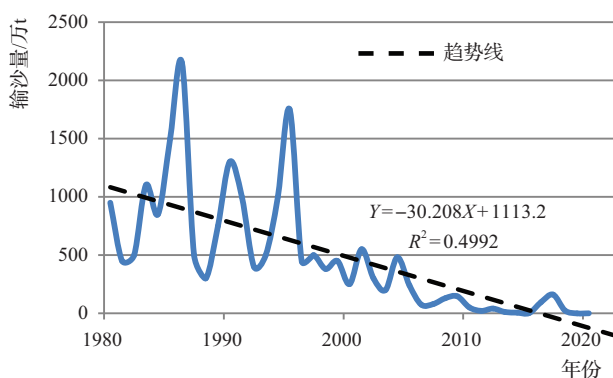


图4 彰武站历年年输沙量变化过程图

分析图 2 所示 1980—2018 年年际径流量曲线图可知,2000 年以后径流量曲线图趋势与 2000 年以前恰好相反,由此选择 2000 年以来径流量和输沙量数据进行分析。结合径流量分布将 2000 年以来年份分别按照丰水代表年、平水代表年和枯水代表年作区分,区分结果见表 1。通过对上述典型年分析得出 $2000\text{m}^3/\text{s}$ 流量控制天数在三类典型年中都占比较大,丰水年占比高达全年的 78.9%,即使枯水年也达到全年的 54.8%。由此将 $2000\text{m}^3/\text{s}$ 流量作为中水标准值。同样地,含沙量控制天数占比最大的是 2.0kg/m^3 ,占比达到全年的 75%,具备良好参考性。

表1 流量与含沙量天数统计 单位:天

项 目	年 份		丰 水 年		平 水 年		枯 水 年	
	2012	2018	2008	2011	2003	2016		
流 量	600m ³ /s 以下	100	77	124	107	162	166	
	600 ~ 2000m ³ /s	219	203	242	258	203	200	
	2000m ³ /s 以上	47	85	0	0	0	0	
含 沙 量	小于 0.05kg/m ³	91	91	91	105	89	144	
	0.05 ~ 2.0kg/m ³	256	229	260	254	239	207	
	大于 2.0kg/m ³	19	45	15	6	37	15	

依据上述分析可知虽然柳河上游流域径流量呈逐年增加,但是输沙量和含沙量却表现出显著的年度降低趋势,说明柳河多年来含沙量的降低主要是水保措

施的影响,流域降雨是次要因素。趋势线与流量、2000年以来柳河上游含沙量天数统计分析表则进一步印证了柳河流域泥沙控制和水土保持措施的有益成效,柳河上游日均径流量将持续稳定在 $2000\text{m}^3/\text{s}$ 的水平,而小于 $2.0\text{kg}/\text{m}^3$ 含沙量的天数会持续增多。

3.2 河道断面变化分析

彰武水文站不同年份实测大断面套绘见图 5。2000—2015 年汛前河道处于微淤状态。虽然 2005 年、2013 年、2017 年三年发生较大洪水但是洪水冲刷过后河道快速淤积基本处于逐渐淤积状态。自 2000 年汛前开始到 2019 年,河道处于淤积状态,累计断面平均淤积 0.80m 。柳河大堤渠化后,河道断面左岸基本固

定,冲淤变化不大,主河道冲淤基本处于平衡状态;2017 年汛期,柳河上游发生了 $467\text{m}^3/\text{s}$ 的较大洪水,经过洪水冲刷,最大冲刷深度 0.40m ,经过洪水后断面淤积基本没有明显变化。综上所述,柳河彰武段大水年份冲刷,小水年份淤积,长期看基本处于动态平衡逐渐淤积状态。彰武水文站河道断面虽然多年经历冲刷和淤积,但是总体来说断面形状基本保持不变,河道宽度并未发生显著性改变,平面横向宽度没有摆动现象。

从大断面套绘图可以看出,2012 年汛期前后到 2018 年汛期前后洪水过程基本都小于 $1000\text{m}^3/\text{s}$,近些年彰武站所测河段均没有任何采砂活动和大型工程建设和大型工程建设活动,通过套绘发现该断面基本保持

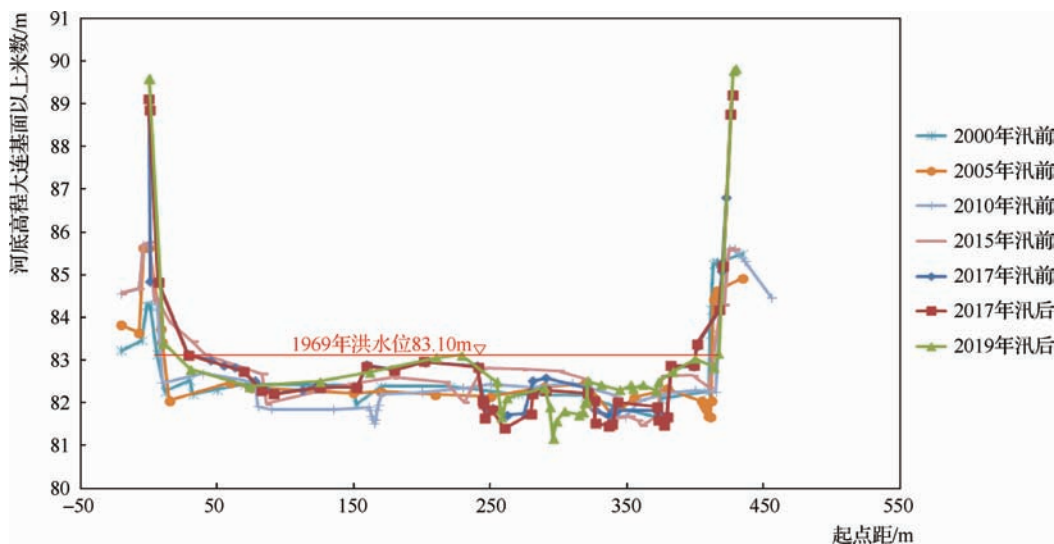


图 5 彰武水文站不同年份大断面套绘图

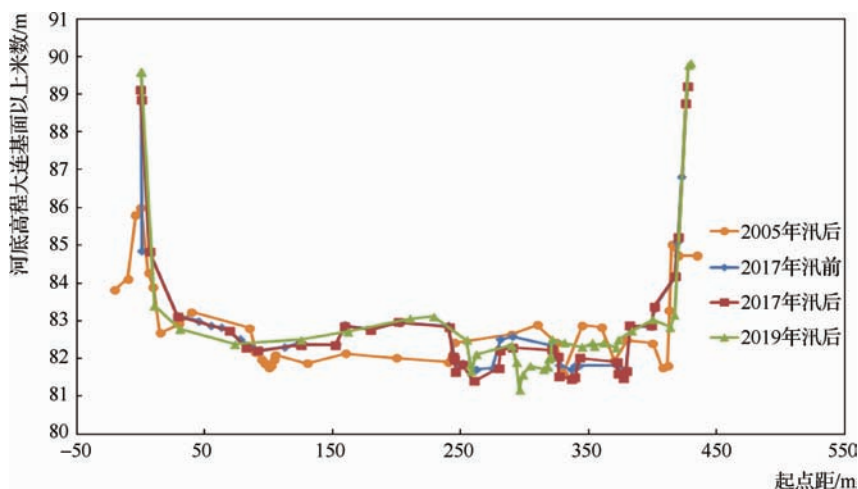


图 6 彰武站 2015—2019 年汛后大断面套绘图



稳定,河道虽有冲淤变化,但基本保持平衡。2015年汛后柳河大堤两岸修建防洪墙,柳河大桥进行为期3年的翻修,两岸堤防出现明显变化,河底浅滩处由于修建施工便道平均提高0.70m,主河道250~310m出现便道经常冲毁现象,河底高程变化不定,最大变幅1.72m。彰武站2015—2019年汛后大断面套绘图见图6。

4 结 语

本文结合彰武站不同年份断面套绘图和1980—2018年测站关于柳河上游含沙量和输沙量的数据对柳河上游水沙特性作了分析和预测,分析结果如下:

a. 柳河自水土保持和河流治理措施实施以来,上游流域河流含沙量显著降低。工作开展后,柳河输入辽河的沙量从1988年之前的均值780.8万t降至327.6万t。

b. 以1996年为界,柳河上游流域输沙量、含沙量波动逐渐趋于平滑,输沙量和含沙量变化曲线与径流量曲线走向相反。自2000年以来,柳河上游流域虽然径流增加,但河流含沙量和输沙量却平滑降低。

c. 柳河彰武段大水年份冲刷,小水年份淤积,长期看基本处于动态平衡逐渐淤积状态。彰武水文站河道断面虽然多年经历冲刷和淤积,但是总体来说断面形状基本保持不变,河道宽度并未发生显著性改变,平面横向宽度没有摆动现象。

最新测量数据显示,2019年至2020年底,自柳河排入辽河的沙量依然处在较低值,最新数据结果与上文所述相一致,分析结果证实了“十三五”以来柳河上

游水土保持工作的显著效果,现正值“十四五”开局时期,各级水利(水保)部门应当扎实巩固治理经验,同时加大柳河上游生态保护红线内水土流失治理力度,依法有效强化人为水土流失监管,科学推进水土流失综合治理,提升水土保持监测评价水平。◆

参考文献

- [1] 张旭东,朱莉莉,张治昊. 黄河下游河道整治现状与面临的新问题[J]. 水利建设与管理,2017,37(11):77-79,107.
- [2] 安秉锋. 辽河支流泥沙特性关系分析[J]. 水土保持应用技术,2017(3):48-49.
- [3] 张阳. 太子河水沙多年变化规律及驱动因素分析[J]. 水利技术监督,2020(5):109-113.
- [4] 孙颖. 柳河水沙过程对水土保持治理的响应研究[J]. 黑龙江水利科技,2020,48(10):49-51,168.
- [5] 张志玲,范昊明,郭成久,等. 柳河流域径流、泥沙时变过程研究[J]. 水土保持研究,2008,15(1):229-231.
- [6] 张铁楠. 柳河流域生态建设对河流水沙变化的影响[J]. 水利规划与设计,2010(6):25-26,46.
- [7] 王晓鹏. 基于决策树技术的闹德海水库入库沙量预报[J]. 水资源开发与管理,2021(1):52-56.
- [8] 储维刃,王普庆,程士华. 阿拉尔市拟建拦河闸前河道冲淤变化试验研究[J]. 水利建设与管理,2020,40(12):22-26.
- [9] 杜尚泽,马跃峰,张晓松,等. 创作新时代的黄河大合唱——记习近平总书记考察调研并主持召开黄河流域生态保护和高质量发展座谈会[J]. 水利建设与管理,2019,39(10):3-5.
- [10] 张鹏举,赵国荣. 疏勒河流域昌马水库坝址处水沙关系特性研究[J]. 水利建设与管理,2018,38(4):30-34,26.