

《中国水能及电气化》

水利水电工程建设工法约稿（征稿）函

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

水利工程优秀质量管理小组成果约稿（征稿）函

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

单位：《中国水能及电气化》杂志社有限公司

联系地址：北京市西城区南滨河路 27 号 贵都国际中心 B 座 1119 室 邮政编码：100055

联系人：张洁 电话：010-63305281 投稿须知网址：<http://zgsm.cweun.org/tgxz.php>

〔期刊基本参数〕 CN 11-5543/TK*2005*m*A4*70*zh*P*¥16.00*15200*13*2022-9

中国水能及电气化

CHINA WATER POWER & ELECTRIFICATION

2022 年第 9 期（总第 210 期）

中华人民共和国水利部主管

ISSN 1673-8241 CN 11-5543/TK
中华人民共和国水利部 主管

中国水能 及电气化

CHINA WATER POWER
& ELECTRIFICATION



ISSN 1673-8241



9 771673 824224

2022. 9
月刊 总第 210 期

《水利建设与管理》

征集水利工程标准化管理 相关稿件的启事

2022年3月24日，水利部印发《关于推进水利工程标准化管理的指导意见》等文件，加快推进水利工程标准化管理工作。《水利建设与管理》作为水利建设与管理领域的行业期刊，积极担负宣传引导、经验交流、知识积累的职责，刊发与此工作有关的指导文件、标准规范、典型案例、探讨研究等稿件。

欢迎科研机构、高等院校，尤其是水利工程管理单位和主管部门的管理、技术和研究工作者就水利工程标准化管理相关的成功经验、典型做法、问题与对策、思考与探讨等方面撰稿。稿件须为原创，字数在3500～4500字之间，文章须观点明确、用语规范、有理有据，能够结合实际、有资料支撑，其他要求详见网站投稿须知。

符合要求的稿件一律免费刊发，欢迎投稿。

投稿网址：<http://www.sljsygl.com/home/login>

投稿须知网址：<http://www.sljsygl.com/Home/Tgxz>

咨询电话：010-63305239

联系人：张雪虎

智慧水利和数字孪生专栏征稿函

水利部高度重视智慧水利建设，把推进智慧水利建设作为推动新阶段水利高质量发展的六大实施路径之一。《“十四五”数字孪生流域建设总体方案》顺利通过审查，标志着数字孪生流域建设进入全面实施阶段。为促进智慧水利建设成果的转化和应用，加快建设数字孪生流域，提升国家水安全保障能力，推广数字孪生技术和智慧水利先行先试经验，决定在《水资源开发与管理》期刊设置“智慧水利和数字孪生”专栏。现面向全国征集相关内容稿件，要求如下：

可围绕智慧水利体系的理论及技术研究、数字孪生流域建设、“2+N”水利智能业务应用体系构建、水利网络安全体系、智慧水利保障体系优化等内容撰写。

水利风景区建设与管理专栏征稿函

为总结交流水利风景区建设与管理工作经验，推动新阶段水利风景区高质量发展，宣传水利风景区发展成效、成功经验和模式，拟在《水资源开发与管理》期刊继续征集“水利风景区建设与管理”专栏稿件。现面向全国征稿（约稿），要求如下：

可围绕以下方面重点论述：1. 基于新发展理念，水利风景区的建设与管理、景区规划设计。2. 水利风景资源保护与开发、景区监督管理经验等。3. 高质量水利风景区典型案例建设经验、景区智慧管理推行情况、品牌建设经验与成效等。4. 其余内容可根据各自景区的实际探讨景区水文景观、地文景观、天象景观、生物景观、工程景观、文化景观及其组合的开发设计；水环境、水土保持和生态环境保护的具体措施；水利风景区的基础设施、服务设施、游乐设施和环境容量的规划建设；景区资源、安全、卫生和服务管理的经验交流等酌情添加。5. 文章内可添加高清景观图片，优质图片将登于杂志封面。

一、征稿要求

来稿按照学术论文的写作规范，应有两百字左右的摘要和三至五个关键词，正文部分有引言和结语，要求文章主题明确、数据可靠、逻辑清晰、行文规范，字数不少于4000字，严禁学术不端。

二、杂志背景情况

《水资源开发与管理》，国际标准连续出版物号 ISSN 2096-0131，国内统一刊号 CN10-1326/TV，由中国水利工程协会主管、主办，是公开发行的学术期刊。

三、投稿方式

登录杂志社官网：<http://www.sljsygl.com>，选择“《水资源开发与管理》在线投审稿系统”在线投稿。来稿择优录用，优先排期，免费刊登。

四、联系方式

联系人：杨燕 季雪威 电话：010-63305216/63305233

地址：北京市西城区南滨河路27号院贵都国际中心B座1119室 邮编：100055

2022 9

总第 210 期 月刊

中国水能及电气化

- ◆《中国核心期刊(遴选)数据库》收录期刊
- ◆《中文科技期刊数据库》收录期刊
- ◆《中国期刊全文数据库》收录期刊
- ◆万方数据-数字化期刊群收录期刊

主 管 中华人民共和国水利部

主 办 水利部水电局
中国水利工程协会
中国大坝工程学会
四川省地方电力局

主 编 安中仁

编辑部主任 牟 佳

责任编辑 侯博丹

编辑出版 《中国水能及电气化》杂志社有限公司

通信地址 北京市西城区南滨河路 27 号
贵都国际中心 B 座 1119 室

邮政编码 100055

联系电话 010-63305281 (发行)
010-63305250 (投稿)
010-63305209 (广告)

网 址 <http://zgsgn.cweun.org>

电子信箱 wateree6346@163.com

中国标准连续出版物号 ISSN 1673-8241
CN 11-5543/TK

广告经营许可证 京西市监广登字 20170040 号

出版日期 每月 15 日

印刷装订 北京博海升彩色印刷有限公司

邮发代号 80-495

定 价 16.00 元



中国水利工程协会官方微信公众号
二维码, 欢迎扫描加关注, 随时检索
协会会刊论文发表情况。

目 录

施工技术

- 1 淮安二站 1 号机组大修关键施工技术研究
左佳佳 王予匀 张 雪
- 5 导流洞出口非静水条件下高水深水下混凝土封堵施工技术
徐同良 殷 瑞
- 11 BIM 技术在引江济淮工程施工中的应用
俞元洪 余朝伟 徐亚飞
- 16 特大桥边跨结合梁步履式顶推施工技术 赵 越
- 21 基坑水平可调节拱形装配式钢支撑施工技术研究与应用
龚 华

科学研究

- 26 沙沟水库丙乳砂浆加固工程质量控制要点初探 郝恩烽
- 29 岷江犍为航电枢纽工程 GIS 安装及试验要点 杨 杰
- 35 泽城西安水电站面板混凝土优化配比研究
张建国 邢立文 赵 璐
- 42 湾子寨水库坝体廊道堆石混凝土一体化浇筑分析
张绍平 李锡均 安锡光
- 46 仕阳水库精准调度措施探析 王德明 王新昌 赵新昌

运行管理

- 50 小型水库拱坝安全鉴定勘察问题分析 王晨浩 陈建辉

经验交流

- 57 潜孔锤钻孔技术在营岔调蓄水池工程中的应用
隗永龙 刘光林 李 旭
- 61 BIM 技术体系在沙特国王港 EPC 项目中的应用
谢 豪 王雅娟

Construction Technology

- ## Scientific Research

- ## Operation Management

- ## Engineering Design

- | | | |
|-------|-----|-----|
| 王凤翔 | 王东胜 | 王丽平 |
| 王福岭 | 卢平 | 邝明勇 |
| 冯顺新 | 吉生元 | 毕振令 |
| 回士光 | 刘启华 | 刘改元 |
| 刘肃 | 刘德有 | 许德志 |
| 孙道成 | 李铭芳 | 吴克昭 |
| 吴新黔 | 邱小庄 | 张从银 |
| 张忠孝 | 张桂龙 | 张翾 |
| 陈洪(女) | 陈德亮 | 禹雪中 |
| 夏海霞 | 徐祥利 | 唐山松 |
| 黄文宝 | 阎有勇 | 隋欣 |
| 葛捍东 | 程夏蕾 | 傅云光 |
| 鲁锡海 | 廖文根 | 樊新中 |
| 潘晓光 | | |

施工技术

淮安二站 1 号机组大修关键施工技术
技术研究

左佳佳 王予匀 张 雪

(江苏省灌溉总渠管理处, 江苏 淮安 223001)

【摘 要】 淮安二站 1 号机组自 2012 年加固改造后, 经过近 10 年的运行, 出现了振动较大、叶轮外壳渗水、转子绝缘偏低、叶片调节机构渗油等现象。文章基于对上述问题的大修, 介绍了机组拆解、检修、安装、调整过程中一些关键施工技术, 并对比了大修前后机组部分参数, 通过大修优化了机组性能, 为今后大中型泵站检修提供了实践经验。

【关键词】 机组大修; 施工技术; 关键环节

中图分类号: TV675

文献标识码: B

文章编号: 1673-8241 (2022) 09-001-04

Research on Key Construction Technology of Unit 1 Overhaul in
Huai'an No. 2 Station

ZUO Jiajia, WANG Yuyun, ZHANG Xue

(Jiangsu General Irrigation Canal Management Office, Huai'an 223001, China)

Abstract: Huai'an No. 2 Station Unit 1 suffers from large vibration, water seepage in the impeller shell, low insulation of rotor, oil seepage from the blade regulating mechanism and other phenomena through operation for nearly 10 years after reinforcement renovation in 2012. Some key construction technologies during unit dismantling, overhauling, installation and adjustment are introduced based on the overhaul aiming at the above-mentioned problems. Some parameters of the unit before and after overhaul are compared. Unit performance is optimized through overhaul, thereby providing practice experience for overhaul in large and medium-sized pumping stations in the future.

Key words: unit overhaul; construction technology; key links

1 工程概况

江苏省淮安抽水二站兴建于 1975 年 1 月, 1978

年 12 月竣工。2010 年 10 月开始加固改造, 2012 年 12 月通过机组试运行验收, 2015 年 12 月通过完工验收。目前, 装有亚洲最大的立式轴流泵机组 2 台套,

收稿日期: 2022-06-14

作者简介: 左佳佳 (1990—), 男, 本科, 工程师, 主要从事水利工程管理工作。

配套 TL5000-64 同步电动机, 单机容量 5000kW, 电机转速 93.8r/min, 总装机容量 10000kW, 主水泵型号为 4500ZLQ60-4.89, 叶轮直径 4.5m, 供水设计扬程 3.90m, 排涝设计扬程 4.89m, 设计流量 120m³/s。

2 1 号机组存在的问题分析

主机泵大修是对机组设备进行全面解体、检查、分析、处理, 并更换橡胶密封条等易损件, 修补叶片等磨损件, 同时对机组的摆度、水平、中心、高层、间隙(电机空气、水导、叶片)等进行重新优化调整, 使机组达到原先设计要求, 恢复各项运行性能指标, 消除长期运行过程中安全隐患, 达到较好的运行工况, 从而延长机组使用寿命, 为工程发挥重大效益奠定基础。

主机泵检修周期通常为 3~6 年, 3000~20000 运行台时。本次 1 号机组大修, 从 2021 年 9 月开始实施, 自 2012 年加固改造以来, 已安全运行 9 年有余, 超过了 20000 台时, 无论从运行年限还是台时, 都达到了大修期限。随着运行台时的增加, 1 号主机组出现的振动较大、叶轮外壳渗水、转子绝缘偏低、叶片调节机构渗油、测温计显示不准等问题日渐增多, 需要进行大修以解决这些问题。

3 大修过程中关键环节控制

主机大修主要分为前期准备、解体、检修和安装调整四个阶段, 拆机和检修阶段的部分工作在场地和人力等条件许可的情况下可以穿插安排。安装调整阶段严格遵循厂家设计、检修规范的相关标准要求, 才能使检修达到预期的目的与效果。

3.1 前期准备阶段

机组大修前期准备阶段主要进行工种分类, 历年运行资料、技术参数查询等。1 号机组大修分组进行, 设有安全技术组、机械维修组、电气维修组、质量检验组、起重技术组。各组分工明确, 严格操作规范、持证上岗, 保证了大修的有序组织。资料主要是电机及水泵的相关图纸、加固改造时期的安装记录、运行过程中检修记录、历年的预防性电气试验数据

等。在前期准备阶段, 将进水口两扇检修门放下, 并进行闸门堵漏, 除廊道中 2 台排水泵外, 又临时架设了 3 台离心泵, 确保了廊道排水安全。

3.2 机组解体

机组解体总体按照先外再内、先部件再零件的原则进行^[1]。为方便后期安装、提高工作效率, 在部件拆卸前做好位置记号、设备零部件编号等, 同时做好对间隙、固定部件的垂直同轴度、转动轴线的摆度、水平、磨损量等原始数据的记录、检查、分析。拆装过程中, 面临机组零部件较大、部分螺丝锈蚀严重、作业空间窄小、液压套筒扳手无法摆放等诸多问题, 在使用除锈剂、润滑油浸泡后, 使用重型专用扳手或扳手套上接长杆, 系上拉绳, 配备一定数量的人力, 共同转动抗棒, 拆卸螺丝。在松动联轴器上与电机连接、下与叶轮头连接的螺栓时, 使用专用扳手配合手拉葫芦, 并用大锤敲打的方法, 此方法有效且省力。

3.3 主要部件检查及维修

3.3.1 机组轴承返厂加工

1 号机解体后测量发现, 主轴轴颈存在偏磨^[2], 并有锈蚀现象, 单边最大磨损 0.9mm, 填料、水导处轴颈磨损、锈蚀明显, 需要回厂维修。进厂后检测发现, 主轴的同心度和弯折度符合要求, 导轴承和主轴密封处轴径处的轴套需要更新, 因此采用堆焊不锈钢 3Cr13, 根据原图纸技术与材料要求对轴颈进行重新堆焊、加工, 经测量, 加工后的平均厚度都不低于 10mm, 精度不低于 h7。

水泵导轴承由于长时间的运行, 存在老化、偏磨、间隙过大等现象, 因此对其进行回厂重新处理加工, 厂家根据图纸要求, 设计好模具, 采用 ZG230-500+耐油橡胶整体浇铸在铸钢的轴瓦衬上, 轴瓦采用分半式, 并用螺钉固定在不锈钢制成的轴承体上, 轴承体用螺钉固定在导叶体内。

3.3.2 定子转子检修及处理

1 号机组转子由厂家技术人员现场处理, 对 64 组磁极分别编号, 通过断开磁极分批对其绝缘性进行测量, 经过测量分析发现 33 号磁极电阻值过低, 只

有 $11.5\text{M}\Omega$ ，而滑环绝缘仅有 $0.6\text{M}\Omega$ 。为了消除温湿度等外界条件的影响，利用不同时间重新复测，电阻值数据并无变化。此时对转子利用清洗剂喷淋，并对滑环进行分解，用焊机加热转子绕组，在不同时间段测量 33 号磁极绝缘电阻，其值在 $11.5 \sim 29.2\text{M}\Omega$ 之间波动，绝缘性能仍然达不到预期。后将 33 号磁极从转子上拆卸下来进行清洁保养，用焊机进行单独加热，加热后检测此时 33 号磁极绝缘电阻值为 $700 + \text{M}\Omega$ ，趁热对 33 号磁极喷绝缘漆，同时对整个转子磁极进行绝缘红漆覆盖。通过分检磁极、清理磁极、回装磁极焊接接头、喷漆处理等程序，使电机转子绝缘由 $10.5 + \text{M}\Omega$ 提升至 $60 + \text{M}\Omega$ ，滑环绝缘由 $0.6 + \text{M}\Omega$ 提升至 ∞ 。定子由电气班组除尘后，使用清洗剂进行清理，在此期间使用励磁进行干燥，累计干燥 48h，干燥期间由专人负责值班，每 2h 切断励磁进行绝缘测试，测试结果显示绝缘性能优良。

3.3.3 叶片汽蚀处理

转轮室拆解完成，待大轴吊出后，利用叶轮支架将叶片拉出，对相关部件进行检查，利用软尺测量汽蚀的相对位置，利用深度尺测量深度，转轮室、大部分叶片汽蚀甚微，只需对表面采用细砂轮打磨，风铲铲削等方法进行处理，对叶片汽蚀表面严重的点，采用堆焊后进行打磨，工艺质量符合要求，叶片型与原来保持一致。

3.3.4 主要部件耐压试验

主要对调节机构以及定子空水冷却器等进行耐压测试^[3]。其中，接力器使用 46 号汽轮机油，试验压力为 5MPa ，30min 后无渗漏、无“冒汗”现象。空水冷却器试压两次，在检修阶段与安装阶段各试压一次，使用清水，检测压力为 0.3MPa ，30min 无渗漏现象。

3.3.5 电机上、下导轴瓦及推力瓦处理

翻阅运行记录，1 号机组在近 10 年运行过程中，导瓦、推力瓦温度保持在合理范围内。将推力瓦拆下后发现八块瓦表面以及推力头镜板表面都有一圆形划伤面，经过分析，可能因为液压减载装置压力油中含

有硬度较高的杂质进入瓦表面，造成瓦面的破损，因此需定期更换减载装置油泵滤芯。经过检查，瓦面、镜板表面不存在较大的气孔，无须补焊，只需研刮。推力瓦研刮时，把镜板垫在有橡胶板的工作台上，准备好刮刀、油石、白布、酒精、研磨膏等工具材料。导瓦研刮时，将推力头横放在专用工作台上，用白布揩净导轴瓦与推力头轴颈，用汽油洗净油污，在推力头根部用麻绳围绕三圈，使研磨固定在一定范围内，进行导瓦研刮。被研磨过的镜板表面、推力头和滑转子轴径表面，均涂一层机油，外加塑料纸保护。

3.4 机组组装

经过拆卸、清理、保养、部件加工等后，机组进行组装。组装总体按照先固定再转动、先水泵再电机的顺序进行，在确保施工质量、安全等前提下，也可穿插进行。总装过程中结合前期的记号以及编号，使机组复装后保持原配合状态^[4]。经过近 10 年的运行，密封垫等已老化，1 号机组在安装过程中，更换了电机与水泵所有的橡皮、垫片、纸板、石棉，拼接或者胶装参数正确，以便与原状配合，降低渗漏的可能。安装过程中，着重对以下工作进行了把关。

3.4.1 固定部分高程复核，同轴度、水平调整

经过复核，定子、上机架、导叶体等固定部分的高程满足设计要求，定子存在一定的同轴度偏差，水平满足要求。1 号机组定子采用的上下分半形式，无须松动基础垫脚螺栓，需拆卸上部连接螺栓，在东西南北四个方位架设百分表，使用千斤顶强迫定子上机座位移，以调整同轴度符合要求。

3.4.2 机组轴线摆度测量及调整

电机轴线摆度的测量，主要是检查镜板与轴线的不垂直度，把摆度的方位、大小和数值测量后，通过刮削绝缘垫，使各部分摆度符合安装质量要求。在调整机组总轴线摆度时，通过刮削绝缘垫以及结合在联轴器法兰面加垫紫铜片来调整^[5]。在拆机过程中，详细记录分析了镜板水平、上下导瓦、水导处摆度，经过长期的运行，数值已不满足规范要求。1 号机组在安装过程中，架设东西南北四块临时瓦架，安装导瓦

后, 开动液压减载装置, 再用少量人工盘车, 测量并调整转动轴线水平、摆度、中心, 使下导处相对摆度满足 0.03mm/m , 水导处满足 0.05mm/m 。

3.4.3 主轴定中心

为使主轴旋转中心与机组固定部分重合, 首先要测出主轴的位置, 再用移轴的方法使轴与孔达到同心。1 号机组定中心使用百分表测量并调整, 即在泵水导处轴颈上, 安装上定制的分半式抱箍, 在其上面固定百分表, 并表头紧贴在轴窝面上, 测量并调整至符合要求。

3.4.4 机组主要部件安装及间隙调整

在空气间隙重新校核合格后, 根据测量计算出来的摆度值, 得出各块导瓦的调整间隙^[6], 根据设计要求, 上导瓦单边间隙在 $0.11 \sim 0.15\text{mm}$, 下导瓦双边间隙在 $0.22 \sim 0.30\text{mm}$ 。

将导瓦调整抱紧后, 安装水泵导轴承。把轴承吊入合拢再放下, 调整定位, 因为橡胶有弹性, 间隙测量时一般采用顶轴法测量, 要求单面间隙 $0.50 \sim 0.60\text{mm}$ 符合要求, 并通过盘车轻重合适再紧固螺钉, 打定位销, 装水箱部件。

拆掉所有的抱轴千斤顶, 安装叶轮外壳, 采用自制的竹塞尺, 涂白粉, 自下而上插入叶片间隙部位, 配合外径千分尺测量间隙值。调整水泵叶片角度为 0° , 对进水、中部、出水边与叶轮外壳的间隙进行测量并调整。一般叶片下部比上部间隙大 $5\% \sim 15\%$ 较为合适, 叶片与动力外圈间隙偏差不超过平均间隙的 $\pm 20\%$ 。

3.4.5 调节机构受油器的安装与调整

受油器的安装在水泵、电机全部安装调整结束后进行, 调节机构受油器安装在电机顶端。在叶片处于

0° 位置时, 通过调整绝缘垫厚度进行受油器底座高程复核, 并调整底座与操作油管的不同轴度偏差不大于 0.05mm/m , 通过增减紫铜片, 调整底座的水平, 水平偏差不大于 0.04mm/m 。此次大修更换了调节机构浮动环、浮动套、轴承、密封套、密封件等部件, 更换后调节机构灵活, 无渗漏等现象。

3.4.6 测温电阻更换工作

1 号机组在上油缸设置了油缸测温计 1 套、推力瓦测温计 8 套、导瓦测温计 2 套, 下油缸设置油温测温计 1 套、导瓦测温计 2 套, 均采用铂热电阻测量, 此次大修全部进行了更换。为防止通过测温线发生接线现象, 测温计与轴瓦应用绝缘接头, 并在导线处套耐油塑料管或绝缘布带, 对地绝缘不低于 $0.3\text{M}\Omega$ 。在安装过程中, 注意每根测温线在油缸内部沿壁用线夹固定, 尽量使线不处于悬空状态, 以免电机运行过程中造成测温线路的损坏。安装调试后, 经过测试, 所有温度显示偏差在 2°C 内, 符合要求。

3.4.7 电气试验

在机组安装完成后, 由维修中心专业队伍开展了电气试验, 所有的测试项目均符合规范要求, 并对数据与历年数据进行了比较, 绕组绝缘性能等得到了明显的提高, 所有项目都具备开机条件。

4 大修后效果分析

2022 年 1 月 21 日, 组织了 1 号机组试运行, 运行过程中轴瓦与油缸的温度、电气参数、机组振动、噪声等符合要求, 无异常, 安全稳定运行 8h 。选取环境温度、上下游水位差相近的两组机组大修前后部分数据进行了对比分析, 结果见表 1。

表 1 大修前后部分数据对比

项 目	上导瓦 1/ $^\circ\text{C}$	上导瓦 2/ $^\circ\text{C}$	下导瓦/ $^\circ\text{C}$	推力瓦 1/ $^\circ\text{C}$	推力瓦 2/ $^\circ\text{C}$	定子温度/ $^\circ\text{C}$	水泵层噪声/ dB	振动值 (叶轮外壳 径向速度) $/(\text{mm/s})$	叶片角度/ $(^\circ)$
大修前	29	28	30	39	36	38	91.4	1.6	-5
大修后	26	26	22	31	32	54	82	0.6	-6

通过数据分析, 得知轴瓦、定子温度、机组噪声、振动值等得到了有效的降低, 达到了机组大修

的目的。

(下转第 15 页)

导流洞出口非静水条件下高水深水下 混凝土封堵施工技术

徐同良¹ 殷 瑞²

- (1. 东平湖管理局梁山黄河河务局, 山东 济宁 272000;
2. 山东润泰水利工程有限公司, 山东 泰安 271000)

【摘 要】 为了解决导流洞出口非静水条件下高水深水下混凝土施工诸多难题, 工程实践中总结出了有效方法: 采用防浪丁坝、分体式模板箱体、水下混凝土防漏浆装置、水下混凝土导管浇筑等施工工艺进行导流洞出口封堵, 模板箱体与导流洞边缘部位采用水下混凝土模板专用防漏浆装置, 通过高强度的柔性橡胶织物使模板面与导流洞翼墙之间的缝隙密闭, 保证混凝土的密实度; 采用卷扬机控制扁担梁调整模板箱体位置。通过工程应用, 效果较好, 具有较好的推广应用前景。

【关键词】 水下混凝土; 防浪丁坝; 模板箱体; 防漏浆; 扁担梁

中图分类号: TV544

文献标识码: B

文章编号: 1673-8241 (2022) 09-005-06

Construction Technology of Underwater Concrete Plugging in High Water Depth under the Condition of Non-Static Water at the Outlet of Diversion Tunnel

XU Tongliang¹, YIN Rui²

- (1. Dongping Lake Management Bureau Liangshan Yellow River Affairs Bureau, Jining 272000, China;
2. Shandong Runtai Water Conservancy Engineering Co., Ltd., Tai'an 271000, China)

Abstract: In order to effectively solve many problems of underwater concrete construction in high water depth under the condition of non-static water at the outlet of diversion tunnel, effective methods have been summed up in engineering practice: the outlet of diversion tunnel is blocked by the construction technologies such as wave-proof spur dike, split formwork box, underwater concrete slurry-proof device, underwater concrete conduit pouring, etc. The special slurry-proof device for underwater concrete formwork is used at the edge of formwork box and diversion tunnel, and the gap between formwork surface and wing wall of diversion tunnel is sealed by high-strength flexible rubber fabric to ensure the compactness of concrete. The winch is used to control the shoulder pole beam to adjust the position of the formwork box. Through engineering application, the effect is good, and it has a good prospect of popularization and application.

Key words: underwater concrete; wave-proof spur dike; formwork box; slurry-proof; shoulder pole beam

收稿日期: 2022-01-02

作者简介: 徐同良 (1984—), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事水利水电工程建设与管理工作。

随着大型水电站工程的建设,导流洞下闸封堵安全快速施工技术得到进一步的改进和提高,目前,导流洞出口封堵大都采用传统土石围堰,需进行大量的土石方运输、填筑,且防渗性能差。土石围堰填筑工程量大,施工工期长,在布置大型料场的同时需要配备大量土石方挖装设备。导流洞过流产生的水流冲击和回流旋涡极大,为典型非静水条件下的高水深围堰施工。在动水环境中大量的土石方倾倒入河中,被水流冲击,填筑效率低且易造成河道淤积。土石围堰防渗采用的高质量黏土就近开采难度较大,外运成本较高,而采用低质量黏土的防渗效果差,背水面渗水量大,增加了导流洞内抽排水的难度和施工安全性。导流洞封堵急需一种快速、安全、便捷、环保的新工艺。

通过不断研究和探索,经过多次试验和工程应用,总结出导流洞非静水条件下高水深水下混凝土施工技术,有效解决了施工环境复杂、场地狭窄、交通运输困难,保证建筑物干地施工难度大等诸多难题。

1 施工工艺原理

a. 设置防浪丁坝,利用钢筋石笼、大型混凝土块、石块等大体积填筑材料的自身稳定性,减小外界水流冲击和涡流等对水下混凝土模板的冲击,同时由于丁坝的透水性,能够自动平衡丁坝内外水位差。

b. 采用分体式钢模板箱体,分块分段加工上下游模板,模板之间采用螺栓定位后满焊连接,上下游模板之间设置连接钢管及型钢使之成为整体。模板在安装过程中由吊车及卷扬机运输至水面以上,采用卷扬机控制扁担梁调整模板箱体位置,由下部向上部逐块安装,逐渐下放至水面以下。

c. 模板箱体与导流洞边缘部位采用水下混凝土模板专用防漏浆装置,通过有一定强度的柔性橡胶织物装置,使模板面与导流洞翼墙之间的缝隙密闭,保证了混凝土的密实度。

d. 在水下混凝土整体模板上部搭设排架及提升设备,采用自密实混凝土导管水下浇筑技术,导管出

口始终位于自密实混凝土浇筑层顶部以下,依靠自重向四周散开,直至浇筑至水面以上,浇筑完成后,模板箱体与水下混凝土形成整体挡水结构。

2 施工工艺流程及操作要点

2.1 施工工艺流程

施工工艺流程见图1。

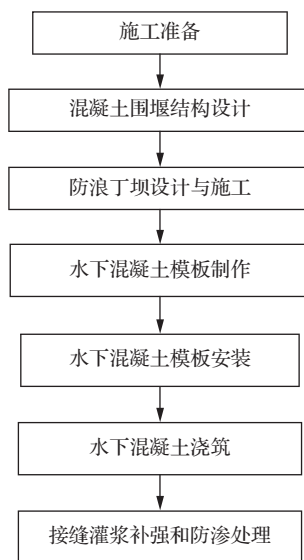


图1 施工工艺流程

2.2 操作要点

2.2.1 施工准备

a. 调查导流洞出口水下混凝土部位施工条件、场地环境、进出场道路,规划场地临时建筑物布置。

b. 测量导流洞出口水上部分地形地貌。

c. 查探导流洞出口部位水下环境,包括水下地形条件、底部沉积物、施工区域水深、水流速度、涌浪高度等(见图2)。

d. 根据现场吊装设备要求,平整导流洞出口两侧范围内场地,准备好施工用风水电。

2.2.2 自密实混凝土配合比设计

a. 根据混凝土配合比设计原则,确定自密实混凝土的粗细骨料、级配、水灰比等基本参数。

b. 设计水下混凝土配合比,通过试验确定混凝土流动性、初凝时间、级配等性能参数。

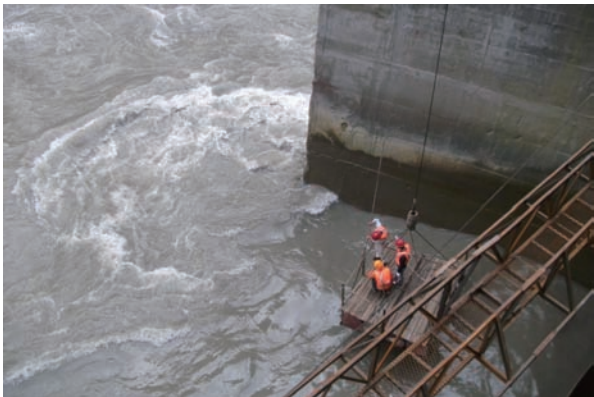


图2 施工区域地形、水情调查

c. 通过混凝土配合比试验，确定 C25 自密实水下混凝土配合比为：水泥：粉煤灰：砂：碎石：外加剂：水 = 319：43：822：1046：2.90：170，水胶比为 0.47。

2.2.3 混凝土围堰结构设计

a. 按照导流洞临时建筑物封堵期间的防洪标准，在导流洞出口交通桥附近布置混凝土围堰，满足通道及模板安装、混凝土浇筑平台等施工需要。

b. 导流洞出口混凝土围堰采用重力式结构，水下部分布置为垂直结构，混凝土围堰结构满足抗倾覆和抗滑稳定要求。

2.2.4 防浪丁坝设计与施工

a. 丁坝布置于下游围堰迎水面靠河侧，坝顶宽度为 10m，满足填筑机械及自卸车辆双向通行要求。

b. 丁坝两侧边坡设计坡比 1：1.3，坝体上下游两侧 10m 范围填筑铅丝石笼，中部填筑大块石及石碴，顶部填筑 50cm 的碎石，满足车辆通行要求（见图 3）。



图3 防浪丁坝填筑施工

2.2.5 水下混凝土模板制作

a. 根据现场实地测量尺寸，分段分层制作钢模板，中间分块部位采用标准组合钢模板，导流洞出口左右岸侧模板采用异形模板，其制作难度大，较大的体形不仅需分段制作，还要将完整断面进行分割制作，但分段不能太小，否则多块拼装会降低精度和整体的刚度，也不能太大，以免移动、安装、拆卸、周转不便。

b. 采用 $\phi 28 \times 3\text{mm}$ 钢管作为纵横围檩，将组合钢模连成整体，为防止模板漏浆，模板块与之间应加双面胶或海绵条，紧贴两岸侧模板边缘设置高强度的柔性橡胶织物（见图 4、图 5），底部采用高强度砂浆找平，模板安装前涂刷脱模剂。

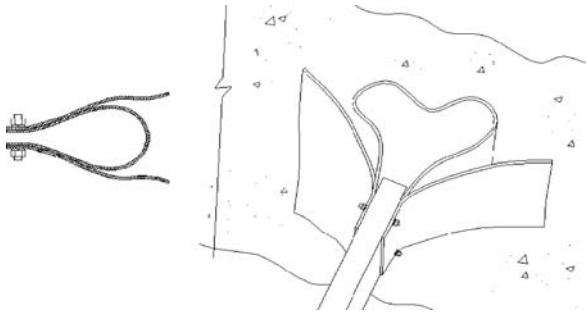


图4 水下混凝土模板专用防漏浆装置示意图



图5 水下混凝土模板专用防漏浆装置

c. 两块钢模板之间及模板各分层之间的连接采用螺栓导向，满焊连接。在单层两块模板之间的纵向接缝两端横竖向骨架上焊接 2 对螺栓定位钢板，在吊装各块模板就位后，立即穿入螺栓将其固定，对钢桁架骨架和表面钢板接缝位置进行满焊，并将螺栓连接

位置一并焊接。

d. 模板上下游连接分为垂直于模板方向的对称连接和斜拉的非对称连接。采用 $\phi 28$ 螺纹钢焊接加固，使钢管连接形成整体。

e. 单层上下游模板吊装就位后，钢管两端螺栓孔与桁架上的连接板采用螺栓快速定位，然后，由下

而上逐层将钢管与钢桁架之间的连接点及斜向连接全部满焊。单层模板上下游连接完成后，由吊车下放入水下，采用卷扬机控制扁担梁调整模板箱体位置，上层模板安装完成后，继续进行上层模板之间的连接件安装，直至模板安装全部完成（见图6）。

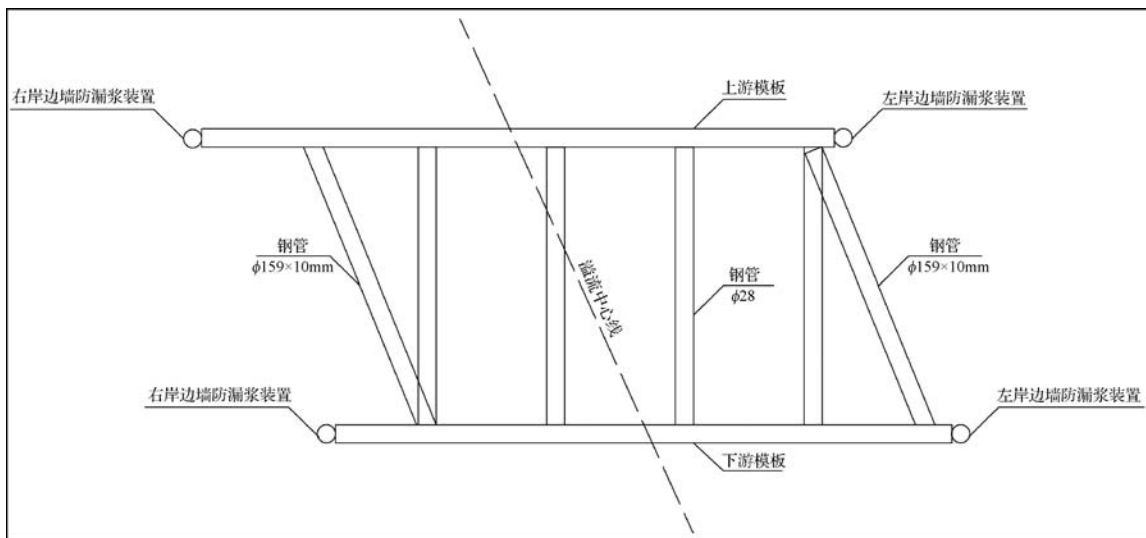


图6 上下游模板安装结构

2.2.6 水下混凝土模板安装

a. 模板安装施工平台搭设。在导流洞出口位置，设置横跨左右岸的钢桁架施工平台，宽度为1.2~1.5m，高度为0.5~0.8m，用于材料运输、吊车支设等，施工平台上下游两侧分别设置扁担梁、卷扬机、缆索，用于精确安装钢模板箱体。

b. 基础面探测及清理。人工深潜进行基础面探测，潜水作业配备专业的潜水服、氮氧混合气供配系统、潜水钟、减压舱、电源、应急救援等设备（见图7）。采用气升提升方式清理基础面淤泥，将压缩空气通过管道通向吸泥管底部，压缩空气在吸泥管中上升形成真空，底部淤泥被吸入管道，并形成比重小于1的“空气+泥浆”混合物，混合物通过管道排出。气升式清淤装置由柴油空压机、吸泥管、排泥管、空压管及浮筒等组成。柴油空压机布置在施工平台上，清淤吸泥管等设备布置在一个较小的浮箱上，浮箱与水面平台连接，实现漂浮移动。



图7 潜水员探摸调查基础面情况

c. 模板安装。模板安装前精确测量泄流中心线位置，作为模板安装的定位基点。模板安装的顺序如下（见图8~图10）：

上下游第一层模板在导流洞出口上部交通桥面进行螺栓定位及接缝满焊组装成整片，采用汽车吊吊运至钢栈桥，由卷扬机固定悬吊于水面以上。施工人员在模板内焊接走道，安装上下游模板连接钢管，利用该钢管使钢筋加密形成工作平台。

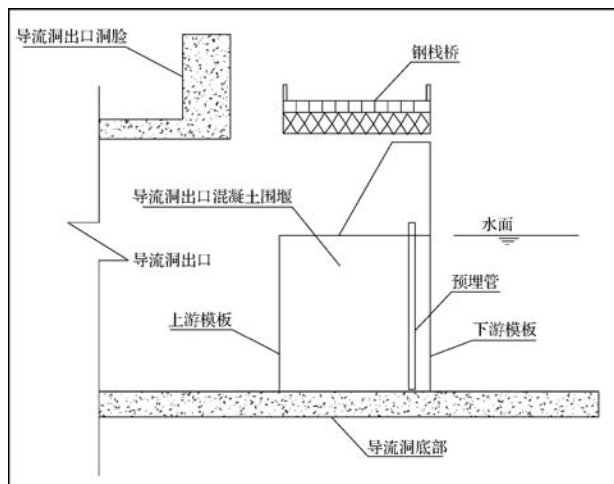


图8 水下混凝土模板布置示意图



图9 模板箱体拼装及运输施工场景



图10 模板箱体下水施工场景

第二层上下游模板在导流洞上部交通桥面组装成整体，采用汽车吊吊运至第一层模板上部，并与其焊接固定，利用两岸锚点固定在模板上口，然后安装第二层上下游模板之间的连接钢管，并焊接钢筋形成安装平台。

第一、二层模板连接为整体后，采用卷扬机固定在桥下，并利用扁担梁下放至第二层露出1.5m。第三层及第四层模板安装与第二层模板安装工序相同。所有模板安装完成后，采用卷扬机控制扁担梁调整模板位置，将模板箱体下放至预定位置。

2.2.7 水下混凝土浇筑

a. 操作排架的搭设。利用浇筑平台搭设操作排架，排架采用碗扣式万能脚手架，搭设高度与导管提升高度相同，以满足浇筑过程中导管分段提升使用要求（见图11）。



图11 操作排架搭设

b. 水下混凝土浇筑。水下混凝土浇筑采用升管法（见图12、图13），浇筑时，设置多套导管浇筑系统，相隔间距5~6m，导管顶部设置有贮料漏斗，由手动葫芦吊起，导管采用 $\phi 219$ 钢管，导管长度根据

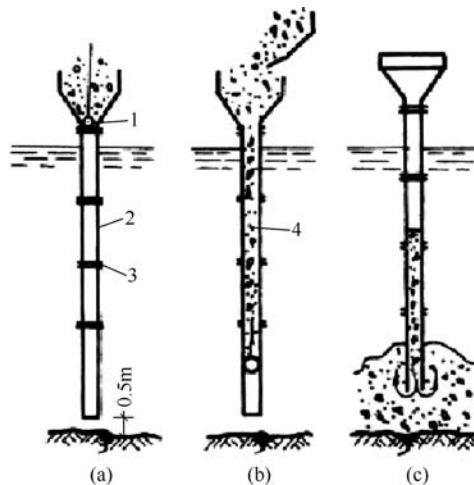


图12 水下混凝土浇筑施工示意图

浇筑水深和混凝土压力要求布置,布置的导管长度为15m。



图13 水下混凝土浇筑施工场景

c. 水下混凝土接触灌浆补强和防渗处理。根据提前预埋的灌浆管进行钻孔灌浆,灌浆前先将围堰上下游水位抽排至同一高程,满足水压的平压要求,然后采用分序灌浆方式进行灌浆。对水下混凝土补强,提高防渗性能。

3 工程应用

a. 云南省玉溪市峨山县新街河水库工程出口混凝土围堰单项工程,施工导流洞下闸封堵工程,顺利下闸后由大坝导流底孔泄流,实现了水电站发电工期目标,施工期在左右两岸布置两条导流洞临时导流,导流隧洞长度分别为413.8m、422.6m,出口部位平均宽度15m,水深12m。导流洞上方通过架设临时钢桥满足通行要求。左导流洞下闸后,右导流洞单洞过流产生的水流冲击和回流旋涡极大,采用水下混凝土围堰施工工艺,有效解决了非静水条件下的高水深围堰施工难题。

b. 山东省枣庄市山亭区紫草峪水库除险加固工程放水洞出口混凝土围堰单项工程,东放水洞总长628.1m,出口混凝土围堰布置于左岸放水洞扩散段,

出口位于钢栈桥下方。出口混凝土围堰为重力式,围堰高度14.8m,堰底宽度10.2m,堰顶宽度2.0m。围堰轴线基本与现钢栈桥轴线平行。采用在导流洞出口设置水下混凝土围堰的工艺,避免了传统土石围堰施工的诸多问题。

4 结 语

通过采用非静水条件下高水深水下混凝土施工技术,有效避免了土石围堰施工造成的河道土石淤积,改善了河道底部水流流态。较传统土石围堰,水下混凝土围堰结构稳定,防渗性能好,有效保证了导流洞洞内施工人员的安全作业环境,降低了安全风险,对同类水电站导流洞封堵施工具有较好的借鉴意义。▲

参考文献

- [1] 温永向,周伟,唐军务.新浇水下不分散混凝土抗冲刷性能研究[J].水利水电技术,2021,52(7):200-211.
- [2] 张宇,张兵.集装箱码头桩基工程水下混凝土的施工技术[J].珠江水运,2021(3):107-108.
- [3] 李奔.港航工程混凝土施工技术措施[J].黑龙江交通科技,2020,43(11):239-240.
- [4] 单辉.纤维混凝土在水闸中的应用研究[J].水利建设与管理,2020,40(7):19-23.
- [5] 郭维维.玄武岩纤维对水工混凝土抗冲刷性能影响研究[J].水利建设与管理,2019,39(4):28-31.
- [6] 王柱,钱袖钢.湄洲湾石门澳工程围堤龙口合龙施工工艺[J].水利建设与管理,2019,39(4):40-44,35.
- [7] 甘维忠,胡磊,蒋红灵.长臂反铲浇筑大体积混凝土施工工法[J].水利建设与管理,2018,38(12):72-76.
- [8] 黄伟,刘兴胜,祁英明.水电站导流洞封堵闸门下闸准备关键技术探讨[J].水电站机电技术,2020(8):49-52,67.
- [9] 刘其森,于洋.苗尾水电站导流洞出口洞内水下混凝土围堰技术[J].人民黄河,2020(42):183-184,186.
- [10] 张春生,杨道坡,董京艳.东庄水利枢纽工程导流洞布置设计[J].人民黄河,2018(40):100-103.

BIM 技术在引江济淮工程施工中的应用

俞元洪 余朝伟 徐亚飞

(浙江省围海建设集团股份有限公司, 浙江 宁波 315000)

【摘要】 引江济淮工程是国务院确定的 172 项节水供水重大水利工程的标志性工程之一, 项目包含渠道土石方开挖及边坡防护、新建连通渠及控制闸、弃渣场水土保持等工作内容。该工程地质较差, 以膨胀土、崩解岩为主, 遇水易软化, 为了确保项目按时、保质、安全完成, 并达到高效、节约的目的, 引入了 BIM 技术, 在项目进度、质量、安全等方面进行了应用。

【关键词】 BIM; 三维动画; 信息集成; 引江济淮

中图分类号: TV222.1

文献标识码: B

文章编号: 1673-8241 (2022) 09-011-05

Application of BIM Technology during Construction of Yangtze River to Huai River Water Diversion Project

YU Yuanhong, YU Chaowei, XU Yafei

(Zhejiang Weihai Construction Group Co., LTD., Ningbo 315000, China)

Abstract: Yangtze River to Huai River Water Diversion Project belongs to one of 172 major water conservancy projects determined by The State Council. The project includes earthwork excavation and slope protection, new connected channels and control sluice, soil and water conservation in spoil area, etc. The engineering geology is poor, which mainly includes expansive soil and disintegrating rock, which is easy to soften with water. BIM technology is introduced and applied in the project schedule, quality, safety, etc. in order to ensure the timely, high-quality and safe completion of the project, and achieve the purpose of efficiency and saving.

Key words: BIM; 3D animation; information integration; water diversion from Yangtze River to Huai River

引江济淮工程江淮沟通段施工 J007-2 标段地质条件较差, 以膨胀土、崩解岩为主, 遇水易软化, 如何快速施工减少膨胀土和崩解岩遇水软化带来的滑坡风险是本工程施工成败的关键, 为了确保项目按时、保质、安全完成, 并达到高效、节约的目的, 在江淮沟通段施工 J007-2 标段项目管理中应用了 BIM 技术。

1 项目概况

引江济淮工程是国务院确定的 172 项节水供水重大水利工程的标志性工程之一, 是一项跨流域、跨省的重大战略性水资源配置和综合利用工程, 以城乡供水和发展航运为主, 结合灌溉补水, 同时对巢湖及淮

收稿日期: 2022-04-24

作者简介: 俞元洪 (1972—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 主要从事水利、港航、市政等工程技术管理工作。

河的水生态环境起到改善作用。引江济淮工程作为一项大型调水工程，连通长江、淮河两大水系，从长江的下游上段引水，向淮河的中游地区补水，引水流量 $300\text{m}^3/\text{s}$ ，入淮流量 $280\text{m}^3/\text{s}$ 。

引江济淮工程输水干线长度为 723km，自南向北划分为引江济巢、江淮沟通、江水北送三段。其中江淮沟通段施工 J007-2 标段总长 2.40km，项目包含渠道土石方开挖及边坡防护、新建连通渠及控制闸、弃渣场水土保持等工作内容。渠道设计底宽 60m，渠道坡口最宽处 357m，渠道最大开挖深度 46m，为引江济淮开挖深度之最，渠道土石方开挖总工程量为 1800 万 m^3 ；边坡共分 8 级，每 6m 高度设置一个平台，共设置 7 个平台；岩质边坡坡比 1:2，土质边坡坡比 1:3；项目总工期为四年。

2 BIM 技术的特点

BIM (Building Information Modeling) 技术，是一种利用数字信息进行工程设计、施工、运行管理的方法，根据数字地形、施工设计图纸，创建工程技术参数模型，集成工程项目的相关信息。该技术支持工程管理的各个环节，在工程建设过程中不断补充完善相关信息，为工程设计、施工、运行管理单位提供协同工作的基础，可以在工程建设整个过程中起到提高工作效率、缩短建设工期、节约工程成本的作用^[1]。通过 BIM 技术，能直观展示施工中的难题并进行有效的分析，提高工程施工管理水平。BIM 技术在施工应用方面，主要有以下特点。

2.1 可视性——施工技术交底可视化

BIM 技术利用 3D 图像构建模型，基于 BIM 模型，可以将抽象的二维图纸以虚拟仿真漫游动画形式展现出来，例如施工图纸中，个别构配件的信息在图纸上只由线条表达，但其实体形状需要施工作业人员自行想象，对于简单的构配件没有什么困难，对复杂的造型难以思考全面，BIM 通过可视化的三维形式使构筑物清晰展示出来，设计的建筑物具有“所见即所得”的效果，实现施工技术交底在可视化状态下进

行，使施工作业人员能够充分理解设计意图，同时方便技术人员了解工程项目中存在的难点，为施工方案进行更好的沟通、讨论与决策创造条件，从而提高施工管理水平。

2.2 模拟性——施工方案模拟及优化

与传统二维设计不同的是，在 BIM 技术的支撑下，可进行施工方案模拟。根据制定的工程施工组织设计方案，以及项目实施计划中的工序安排及时间安排，再根据项目的结构特征构建施工模型，从而实现建筑物的模拟施工，管理人员能够掌握施工过程中存在的问题及难点，并对施工方案进行优化，及时弥补方案中的不足，为施工方案决策提供有效参考。

2.3 协调性——信息的集成与共享

在工程管理中，建设单位、设计单位、施工单位都在做着相互协调和配合的工作。工程项目实施过程中遇到了问题，就要组织人员开协调会议商量问题的原因及解决方案，传统的现场协调会议是问题出现后再来解决，BIM 技术的协调性服务能够帮助我们提前处理这种问题。例如引江济淮 J007-2 标河渠工程施工范围内存在两座桥梁，桥梁设计与河渠施工设计图纸各自绘制，存在河渠工程管护道路与桥梁衔接问题，这就是施工过程中常遇到的碰撞问题。BIM 技术的建筑模型可以在前期对各种碰撞问题进行协调，生成协调数据，反馈于实际施工管理工作中。

3 BIM 技术在工程施工中的应用

本项目采用 BIM 技术，构建虚拟施工、施工过程控制以及成本控制的模型，实现 5D 模拟（三维 + 时间 + 费用）下的施工模型构建，保证了模型的可持续性与一致性，将虚拟施工的各方面与各阶段都集成于 BIM 模型中。

3.1 BIM 三维动画在工程施工中的应用

3.1.1 工程展示中的应用

可视化的 BIM 三维动画不仅可以用来汇报和展示，更重要的是，项目建设过程中的沟通、讨论、决策都在可视化的状态下进行，本项目对实体建立 BIM

三维动画（见图1），主河渠建模形成可视化漫游，视觉影像非常直观，得到各界主管部门一致认可。

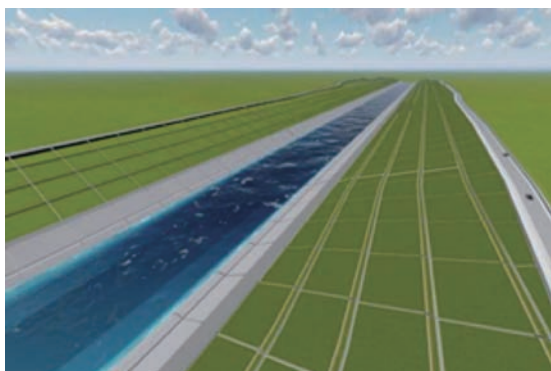


图1 BIM用于引江济淮工程展示

3.1.2 临时设施方案评审中的应用

项目驻地临时设施建设按照标化要求，生活办公用房采用徽派结构，并进行景观园林设计；由于建设方案需要通过评审认可，而且时间紧，项目驻地临时设施设计通过BIM建模实施，各种平立面图都以3D立体模型、BIM三维动画的形式产出，BIM建立的3D立体模型即为设计结果，根据模型形成的漫游动画，直观地体现项目驻地各部分（见图2），项目驻地方案一次性通过评审；而且建设工程中根据模型指导施工，避免了不良地质的影响，项目驻地在规定的时间内顺利完成。



图2 BIM用于临时设施方案评审

3.1.3 技术交底中的应用

BIM技术可以将复杂的施工工艺通过三维动画演示出来，可直观地反映各工序之间的顺序及空间碰撞

关系，在编制施工方案时起到辅助作用，并且在施工管理及技术交底中采用BIM三维动画形式（见图3），使管理人员及工人更直观地认识施工工艺及施工要点。在本项目中形成BIM三维动画的施工方法有“崩解岩渠道开挖六位一体施工工法”“复杂地基引水箱涵混凝土行走式内模施工工法”“格构梁式混凝土面板成套机械施工工法”“崩解岩渠道边坡锚杆施工工法”，这些施工方法均已被评为部级施工工法。

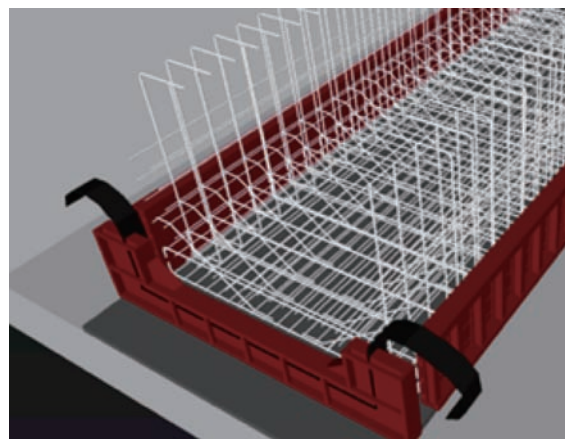


图3 BIM用于箱涵钢筋施工技术交底

3.1.4 工程验收中的应用

每个单位工程完工时，将工程施工情况形成BIM三维动画，首先通过BIM三维动画模拟进行工程介绍，再结合施工过程的施工顺序将整体工程在模型中拆分，附加各个工序施工时间、施工工艺、施工要点、质量验收等情况，并添加施工过程中的影像资料，通过BIM三维动画展示一个详细的施工过程。在小蜀山分干渠连通渠工程验收过程中，通过BIM动画展示，直观形象清晰地展示了整个单位工程的施工过程，得到验收单位的一致肯定，单位工程顺利通过验收。

3.2 BIM模型在工程施工中的应用

3.2.1 BIM模型在造价管理中的应用

BIM建模可以清晰、直观地展示工程结构，技术人员通过BIM模型可以充分理解设计意图，同时可以将项目的各个工作内容、工艺流程等进行可视化展示、协调、模拟，并以CAD图纸导出。在本项目施

工过程中,由于下渠道与坡面、坡顶管护道路(根据地形高程修建)与坡面属于三维交叉,二维平面CAD无法准确反映交叉部位的细部结构,无法准确计算工程量,通过BIM三维建模直观反映出交叉部位结构形态,并准确地计算出工程量,为严格控制工程造价提供可靠依据。另外,将BIM技术应用于造价中,各阶段、各分项内容的组成及工艺流程一目了然,可准确计算不同阶段所需的材料量、劳动力和机械,提高工程造价及内部成本测算的准确性。

3.2.2 BIM模型在工程施工进度管理中的应用

工程项目施工进度管理最终目标是确保工程按期完成,这就要求在工程建设过程中进行动态控制和纠正偏差,以保证实际施工进度符合计划进度管理的目标。将BIM技术应用于工程项目进度管理中,项目工程实际进度和各阶段形象面貌可以清晰、直观地展示在BIM三维动画模型中,将计划进度与实际施工情况进行可视化对比,项目进度对比一目了然,当实际施工情况与计划进度不同时,及时调整存在差异的地方,从而提高工程项目施工进度控制的能力^[2]。

本项目的主河渠土石方开挖施工前,先搭建土石方工程BIM模型,辅助计算各阶段开挖工程量,然后通过土石方开挖工序建模,结合排水、场内道路等各种工况条件,综合考虑各种施工影响因素,模拟施工顺序、土石方开挖设备数量及产量,为施工组织安排提供辅助。施工过程中,技术人员在BIM软件平台上,进行进度计划与实际进度的可视化动态模拟对比,供项目进度管理时参考。

3.2.3 BIM模型在安全监测中的应用

在主河渠土石方开挖施工过程中,利用BIM技术的多维可视化、施工模拟的优势,通过在软件中建立安全监测模型,实现工程施工过程的边坡安全动态化监测。本项目河道开挖最深处达46m,为保障河渠边坡稳定,需要实时动态掌握其稳定性。为此共布置6个测管点位,每周进行观测并对数据进行分析,采用BIM安全监测模型将数据进行处理、绘制动态图表,实现数据的可视化及动态模拟边坡变形的走向。

利用BIM安全监测模型,将工程施工的实时监测数据传导给BIM模型上的警示系统,当河渠周围地表沉降、地下水位、土体水平位移监测数值超过预警值时,BIM模型上的警示系统判别边坡的危险等级,预测边坡下一步可能出现的变形,同时发出警示,项目部根据警示采取相应的措施,调整施工方案,避免不良地质带来的滑坡风险^[3],确保了土石方开挖施工时的边坡安全。

3.3 BIM信息集成在工程施工中的应用

BIM工程管理的核心是将施工过程中的质量信息、安全信息录入BIM软件中,并将所有报表、图纸、材料使用情况、现场检测情况随时上传,使BIM模型的构件中具有质量、安全等信息,此外还附加了二维码识别图纸的功能,方便现场人员利用终端设备查找档案。信息有四部分,包括时间信息、坐标信息、记录信息和处理信息。

3.3.1 工程材料信息的集成与共享

在基于BIM的材料管理中,由材料员将材料管理的全过程信息进行记录,包括各项材料的合格证、质量保证书、出厂检测报告等信息,并与构件部位进行关联。质检人员可以通过BIM开展材料信息的审核工作,并将抽样送检的材料部位在模型中进行标注,使材料管理信息更准确、具有可追溯性。

3.3.2 工程质量信息的集成与共享

将BIM模型与现场实际施工情况相对比,将现场检查得到的相关信息关联到BIM模型,详细记录现场检查内容,便于统计与日后复查。通过BIM软件系统,报验申请方将相关数据输入系统后可自动生成报验申请表,BIM软件系统平台上可设置相应责任者审核、签认实时短信提醒,审核后及时签认。该模式下,可实现标准化、流程化信息的录入与流转,提高报验审核信息流转效率。BIM软件系统的质量管理流程见图4。

3.3.3 工程地质信息的集成与共享

本项目主河渠均为岩土混合边坡,其上部为膨胀土、下部为崩解岩,地质较差。河渠开挖深度较大,

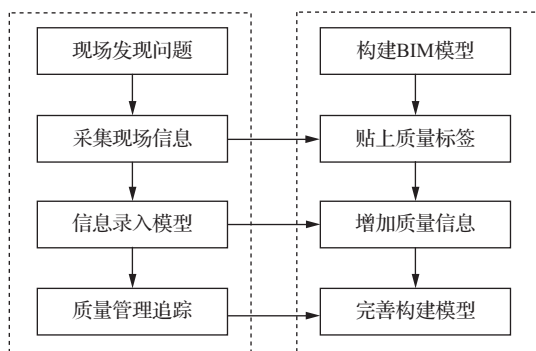


图4 质量管理流程

不良地质分布范围广。随着工程的不断推进,从现场开挖揭露的岩质边坡来看,左岸地质岩层产状多为顺坡向缓倾角,且岩层地质裂隙、层面及泥岩夹层较多,边坡渗水点较多,揭露后呈现的地质情况对边坡稳定极为不利。边坡施工完成后,边坡的地质情况及渗水都会被覆盖,为了建立长期的工程地质档案,施工开挖揭露以后,项目部对地质岩层产状及渗水情况全部记录并附加在BIM模型之中。在施工过程中,由于不良地质、不利的水文条件等共同作用,局部区域出现滑动倾向,设计单位对局部不良地质采取加固处理。通过施工期的BIM多维安全监测模型以及BIM不良地质信息的三维图形展示,需加固处理的部位清晰可见,从而将同一不良地质问题一次性得到解决。

3.3.4 工程成本相关信息的集成与共享

BIM技术有着强大的建模、三维动画、动态数据处理以及计算能力,借助BIM技术能够有效地控制工程项目成本。在施工前,通过BIM技术建立三维模

型数据库,BIM模型中关联项目施工劳动力需求计划、机械设备的需求计划、主要材料的需求计划;在施工中,对使用的建筑材料、施工人员及施工设备的数据进行搜集,将搜集到的与成本相关的所有信息关联到BIM模型。BIM技术分析过程中经数字化模拟对施工过程中存在的材料、劳动力与设备的无效损耗和浪费等进行分析,提出相应的改进措施,通过BIM软件系统分析评估所提出的优化措施对项目施工作出合理的调整,以降低工程项目的施工成本^[4]。

4 结 语

BIM技术在项目的施工阶段有着非常重要的作用,使用BIM技术指导施工,能够提前发现项目存在的问题及难点,对控制施工进度、确保施工质量及安全、优化人材机的无效损耗以及不良地质的安全监测等起到很好的指导作用;虽然目前我国BIM技术应用仍处于初级阶段,但未来BIM技术将成为工程施工中一个不可或缺的一环,随着BIM技术的不断进步以及推广使用,将为工程建设带来新的管理提升。▲

参考文献

- [1] 李德,宾洪祥,黄桂林. 水利水电工程BIM应用价值与企业推广思考[J]. 水利水电技术,2016(8):40-43.
- [2] 陆珏. BIM技术结合WEB系统在基坑监测中的应用[D]. 武汉:武汉科技大学,2016.
- [3] 沈雯. 基于BIM技术的施工阶段成本控制管理[J]. 居舍,2018(35):124.
- [4] 李,2014(8):37-38.
- [2] 姚猛,曹金山. 芦新河泵站水泵机组首次大修施工的思考[J]. 水利建设与管理,2015(1):52-54.
- [3] 郭晓翠,李磊,张东霞. 南水北调台儿庄泵站机组大修实施浅析[J]. 山东水利,2020(2):7-9.
- [4] 华烨,胡世军,倪鸣峰. 浅谈大中型泵站主机泵大修要点[J]. 江苏水利,2019(4):66-69.
- [5] 仇宝云,魏强林. 大型立式泵机组用同步电机两个高差的安装控制[J]. 大电机技术,1999(6):36-43.
- [6] 马清坡,孙远波,朱艳,等. 浅谈南水北调睢宁二站工程主机泵安装监理质量控制[J]. 中国科技纵横,2016(3):125-126.

(上接第4页)

5 结 语

淮安二站通过1号机组大修,解决了设备在长期运行过程中的缺陷,运行工况得到较好的改善,保证了设备的完好,确保了工程发挥最大效益。同时,此次施工中关键环节的控制,为今后类似泵站机组大修提供了借鉴,可以大大提高工作效率,也为大修质量提供了保障。▲

参考文献

- [1] 杨邗,蒋建章. 立式轴流泵机组大修的质量控制[J]. 中国水

特大桥边跨结合梁步履式顶推施工技术

赵 越

(中铁十八局集团有限公司, 天津 300222)

【摘 要】 顶推法是桥梁工程中一项重要的梁部施工方法, 以其机械化程度高, 占地面积小, 操作集中在施工平台完成, 避免大量使用脚手架节约资金和时间等优点, 在施工中得到广泛应用。文章结合青石岩特大桥的施工实践, 针对桥梁步履式顶推施工技术质量控制要点进行了分析, 可为类似工程提供参考。

【关键词】 钢混结合梁; 步履式顶推; 质量控制

中图分类号: U445.4

文献标识码: B

文章编号: 1673-8241 (2022) 09-016-05

Construction Technology of Walking-pedrail Incremental Launching of Grand Bridge Side-span Combined Beam

ZHAO Yue

(China Railway 18th Bureau Group Co., Ltd., Tianjin 300222, China)

Abstract: Incremental launching method is an important beam construction method in bridge projects. It is widely applied in construction due to its advantages of high mechanization degree, small occupied area, centralized operation on the construction platform, avoidance of excessive scaffolding to save money and time, etc. Quality control key points of bridge walking-pedrail incremental launching construction technology are analyzed based on the construction practice of Qingshiyan Grand Bridge, thereby providing reference for similar projects.

Key words: steel-concrete combined beam; walking-pedrail incremental launching; quality control

1 工程概况

青石岩特大桥位于重庆市石柱县, 在两座隧道之间跨越长江, 桥上设车站, 为四线特大桥, 桥上线路间距均为 5m。桥梁全长 1024.20m, 小里程侧边跨为 7×41 m 连续钢混结合梁、大里程侧边跨为 5×41 m 连续钢混结合梁, 主跨为 14×37.2 m 连续钢箱梁。连续钢混结合梁布设于钢箱梁两侧边跨, 大里程侧结合

梁长度 205m, 小里程侧结合梁长度 287m。边跨钢混结合梁按照横向往右两幅布置, 每幅钢箱梁分为边箱、中横梁, 各部分之间为焊接, 两幅之间在桥中心间隙为 100mm, 总宽度为 23m。

2 总体施工方案及重难点

钢混结合梁构件在钢结构加工厂加工制造, 用汽车运输至现场。边跨钢混结合梁采用顶推方案施工,

收稿日期: 2021-12-16

作者简介: 赵越 (1986—), 男, 本科, 工程师, 主要从事路桥施工技术及经济管理工作。

小里程侧钢混结合梁从0号桥台向跨中方向顶推，大里程侧钢混结合梁从13号桥台向跨中方向顶推。在大、小里程侧13号台~12号墩、0号台~1号墩之间分别搭设临时支墩组成顶推平台，完成钢混结合梁的拼接和涂装继而进行顶推作业施工。施工现场设置专门的存梁区及起吊区，利用门式起重机完成卸料及吊装工作。

边跨结合梁步履式顶推施工难点主要有三个方面：一是本工程在墩身最大高度近110m的高墩作业，属高位顶推，水平顶推、竖向顶升及落梁的同步性控制难

度大；二是桥梁两端连接隧道，过渡段路基短小，不具备梁部组拼条件，需在墩上设置拼装场地、顶推平台；三是大里程侧落梁高度较高，落梁风险性大。

3 顶推施工工艺流程

边跨钢混结合梁采用多点步履式顶推，安装顺序为先顶推大里程侧钢梁，再顶推小里程侧钢梁^[1]。左右幅步履设备相互倒用，即顶推左幅一次后，把步履设置转移到右幅上顶推一次，完成后再转移回左幅，步履设置在左右幅相互使用。具体工艺流程见图1。

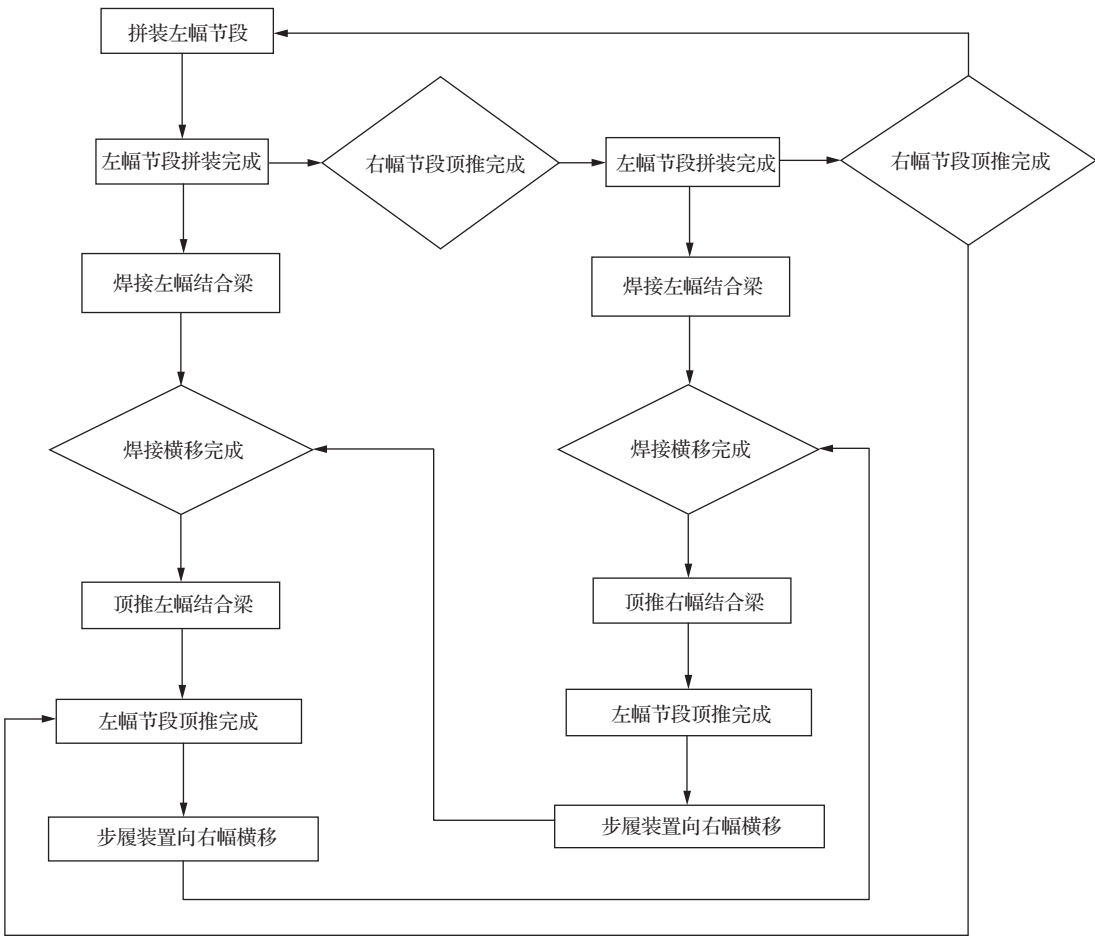


图1 顶推工艺流程

由于大里程侧和小里程侧施工工艺基本相同，在此重点介绍大里程侧施工工艺，小里程侧不再具体赘述。大里程侧连续钢混结合梁有5跨，墩号为8~13号，每跨41m。拼装施工平台在跨中已安装在钢梁上面，顶推平台在8~13号主墩上（见图2）。

4 设备布置

本工程为多纵腹板箱梁，1幅箱梁横桥向为4条腹板，设置4个步履装置。采用双幅同时施工共用液压泵方式，步履顶推设备布置在结合梁的纵腹板正下



图2 顶推现场布置和过程控制情况

方,每个墩下有8台步履顶推设备,2台液压泵站。根据顶推进度,分阶段在各主墩上安装步履式顶推设备。

步履式顶推系统主要由BL400步履顶推装置、液压泵站、液压控制系统三大部分构成。BL400步履式顶推装置由1台40t长行程顶推千斤顶、1台200t竖向千斤顶和1台20t纠偏千斤顶组成。整套系统采用一套控制系统网络式组网控制方式,形成单幅1控16泵32顶的配置。第1次拼装时,拼装导梁及2节钢梁,设备布置在2号、3号、4号、6号、7号临时墩;顶推1节后,留出足够空间拼装第2节;当第1节钢梁顶推上11号主墩时,取消3号、7号临时墩步履设备。循环拼装顶推,8号、9号、10号、11号主墩均匀投入步履设备。大里程侧投入步履设备共有7个墩,每个墩单幅投入设备4套,单幅设备投入28套步履式顶推设备,7台液压泵站,步履装置左右幅间相互倒用。

根据桥梁纵向线型,步履设备安装在支座上,各墩垫石及支座总高度有所不同,为此,步履设备顶面增加钢板调整到与顶推平面相同高度^[2]。垫石预留40mm的环氧砂浆层,根据垫石及支座高度,以7号墩顶推高程为基准,即将垫石、支座高度536mm+步履设备顶高度310mm之和846mm定为顶推高程(其他各墩垫石、支座高度见表1),其他墩在步履设备上增加钢板调整到846mm。钢梁的梁底座板(N10)底面为最低面,其他无座板梁底面增加钢板,调平到座板底面。根据下翼缘板与座板厚度,可以得到调平

最大厚度为40mm。

表1 大里程侧垫石、支座高度

墩号	8号	9号	10号	11号	12号	13号
支座/mm	335	330	330	330	330	200
垫石高度,不含环氧砂浆层/mm	201	190	190	190	190	336
总高	536	520	520	520	520	536

5 结合梁顶推施工

5.1 步履设备工作步骤

竖向千斤顶下降脱离钢梁,钢梁落至步履装置→步履装置顶推一个行程→竖向千斤顶起顶,钢梁与步履装置分离→步履装置行程回倒→竖向千斤顶下降脱离钢梁,钢梁落至步履装置。

5.2 顶推施工平台搭设

拼装场地设置在12~13号墩之间,此处原始地面较为陡峭,支撑基础打桩处理,并布置钢管支架和顶推平台,龙门吊轨道设置在贝雷架上方,且轨道顶面不得高于地面^[3]。场地设置进出运梁通道,并铺设混凝土硬化层。另外在11~12号墩之间设置2组顶推平台,并与最近的永久墩固结,防止倾倒。

5.3 安装步履装置

顶推临时墩共5个,临时墩平面、正立面设备布置见图3、图4,分别是2号、3号、4号、6号、7号临时墩(见图3)。平台上安装步履设备的两组H型钢间,用两组10号工字钢连接,作为步履设备的平移轨道。在步履设备的前后用限位板挡住,防止步履设备随意移动(见图4)^[4]。

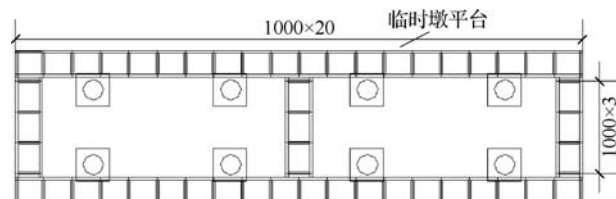


图3 临时墩平面

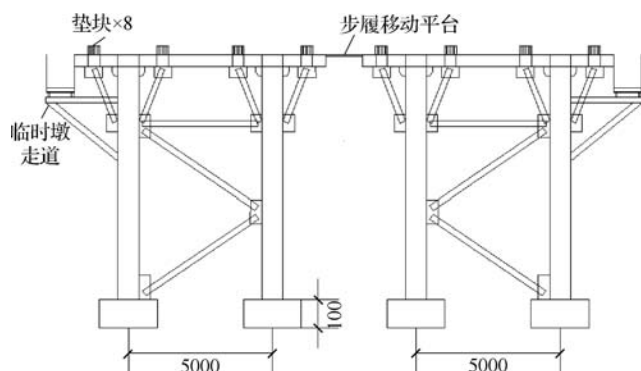


图4 临时墩正立面设备布置

5.4 拼装导梁及第1段

根据规范要求及本工程跨径布置情况，导梁长度设计为25m，导梁与钢梁连接部位局部加强。顶推导梁现场布置见图5。



图5 钢导梁现场布置

利用60t龙门吊吊装钢混结合梁节段1的箱体(见图6)，吊至平台1和平台2上定位，调整位置并固结。利用龙门吊安装钢导梁，钢导梁与节段1箱体端头焊接，对主要焊缝进行超声波无损检测，保证顶

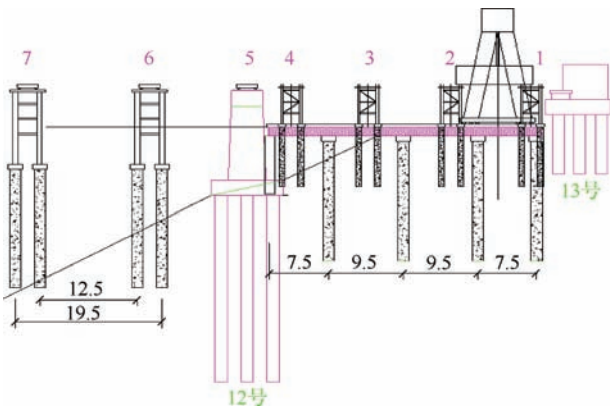


图6 钢混结合梁节段1吊装(单位:m)

推施工安全。

将节段1和钢导梁顶推至设计位置(见图7)，钢导梁顶推至6号支撑墩，并拆除支架2，以满足后续结合梁箱体吊装作业。

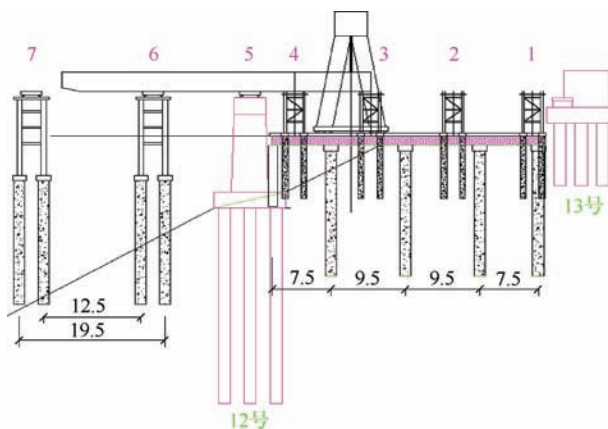


图7 钢混结合梁节段1顶推(单位:m)

5.5 节段2吊装及顶推节段2

利用龙门吊吊装节段2，节段2调至位置后进行线形精确调整，完成节段1与节段2之间的环缝焊接、无损检测及高强螺栓施拧工作，对接缝部位补涂装。将节段1、节段2顶推至指定位置，钢导梁顶推至11号墩柱。其余钢混结合梁节段吊装、顶推重复上述施工步骤进行。

5.6 拆除钢导梁及顶推平台

利用缆索吊机完成钢导梁的拆除工作，利用汽车吊完成顶推平台的拆除工作，对钢导梁与梁端焊接部位进行打磨和涂层补涂装工作。

5.7 迎墩措施

当导梁悬臂端最长时挠度最大，因此当导梁鼻梁即将到达临时墩后端一侧垫梁时，要提前拆除垫梁垫块，继续向前顶推几个行程^[5]。当导梁鼻梁前端到达步履顶推器时，将顶升高度由原来的50mm升高到150mm，使导梁直线段底部高于迎墩处步履顶推器滑箱(见图8)。如果导梁仍然无法顺利上墩，可以利用设置在导梁鼻梁上的迎墩千斤顶辅助上墩。

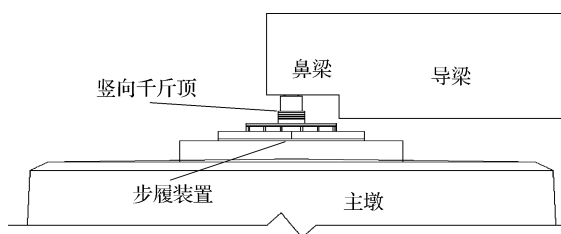


图8 导梁迎墩布置

5.8 落梁及支座安装

顶推完成后，竖向千斤顶将箱梁顶空，拆除步履装置，安装支座，分步骤逐步将钢箱梁下落到支座上并与支座连接固定。当落梁过程中发生横线偏移时，通过在支座及垫块之间设置摩擦副后，提前设置千斤

顶及时纠偏^[6]。通过同步顶升控制系统监控整个落梁过程，确保落梁过程安全可控，单次落梁高度控制在50mm以内。

5.9 施工最不利工况计算

结合梁主要为槽梁，和导梁安装在一起，拼装一段，顶推到位后再拼装，再顶推，通过分析确定当导梁即将落到13号墩时还未落到位时，槽梁的悬臂端最长，在导梁重力作用下工况最不利^[7]。

通过模型计算最大应力位置在支点位置，应力为34.7MPa，满足规范规定的强度要求（见图9）；最大挠度发生在节间跨中位置，极限挠度值6.76mm，满足规范规定的刚度要求。

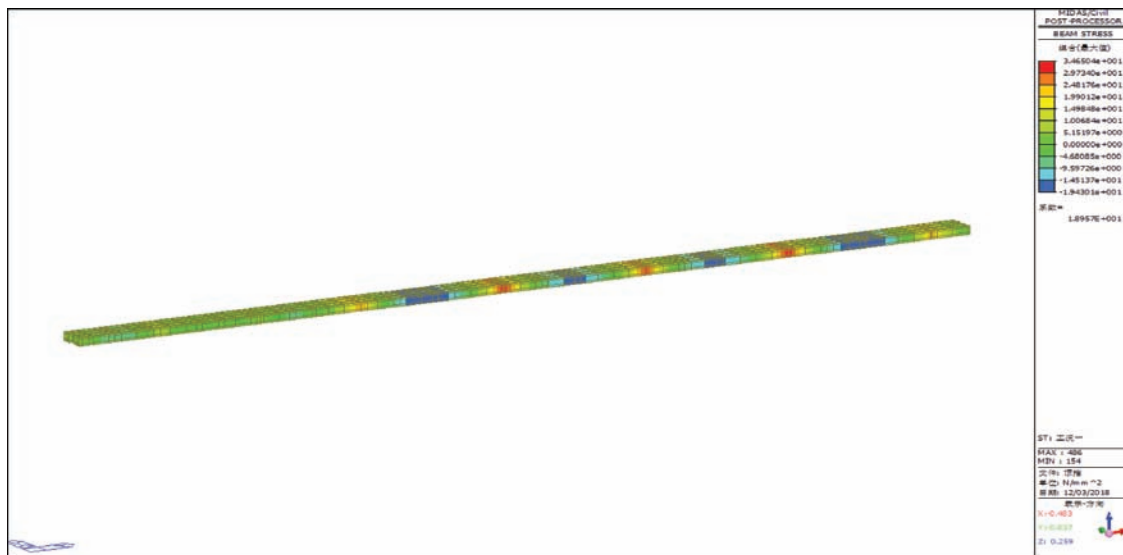


图9 结合梁吊装梁段应力分析

6 线性监控和质量控制

线性监控测量主要是监控安装过程中钢混结合梁的线形，依据监控测量小组提出的要求进行点位布置，采用极坐标法测量，分析测量数据，即时调整钢梁的线形，使其符合设计和规范要求^[8]。

影响结合梁安装测量精度的因素主要有四个方面：一是构件加工制造误差；二是构件拼装误差；三是现场测量误差；四是外界环境因素影响，如安装现场气温、日照强度和方向、风力大小等。必须采取措

施将这些影响因素消除或者减弱。从每一块板单元加工制造到梁段的组装焊接，严格误差控制确保累积误差在设计要求范围内；预拼过程中及时消除拼装误差，发现问题及时调整改进；为避免测量误差，不同测量人员用满足精度要求的仪器在相同控制点上至少测量两次；对外界环境的影响，应加强在各种不同环境情况下钢桁拱的线形和挠度观测，找出规律，指导后续构件安装。

7 结语

综上所述，青石岩特大桥两边连（下转第41页）

基坑水平可调节拱形装配式钢支撑 施工技术研究与应用

龚 华

(安徽水安建设集团股份有限公司, 安徽 合肥 230601)

【摘 要】 临近既有建筑物的水环境综合治理项目深基坑工程施工, 传统支护工艺通常采用钢筋混凝土水平支撑的方式, 在安装和拆除过程中存在工期长、造价高、污染环境、限制基坑土体开挖、变形量及位移无法再次控制、支撑体系无法再次利用等问题。文章以南淝河中游重点排口初雨污染控制工程为例, 开展了科技创新活动, 对边长为 30~200m、开挖深度小于 25m 的大跨度基坑支护工程进行研究, 采用水平可调节拱形装配式钢支撑技术, 为主体结构施工创造较大空间, 实现了安全、高效、绿色环保和节能减排的目标, 降低了施工成本。

【关键词】 可调节; 拱形; 装配式

中图分类号: TU473

文献标识码: B

文章编号: 1673-8241 (2022) 09-021-05

Research and Application of Construction Technology of Prefabricated Steel Support with Horizontal Adjustable Arch in Foundation Pit

GONG Hua

(Anhui Shui'an Construction Group Co., Ltd., Hefei 230601, China)

Abstract: The traditional support technology usually adopts the horizontal support of reinforced concrete in the construction of deep foundation pit for water environment comprehensive treatment project near existing building. In the process of installation and demolition, there are some problems, such as long construction duration, high cost, environmental pollution, limiting excavation of foundation pit, uncontrollable deformation and displacement, and unusable original support system. Taking the Key Outlet Initial Rain Pollution Control Project at middle reaches of Nanfei River constructed by Anhui Shui'an Construction Group Co., Ltd. as the example, this paper carries out scientific and technological innovation activities and studies the large-span foundation pit support projects with side length of 30 ~ 200 m and excavation depth of less than 25 m. The technology of prefabricated steel support with horizontal adjustable arch is adopted, which creates bigger space for the main structure construction, achieves the goals of safety, high efficiency, green and environmental protection, energy conservation and emission reduction and reduces the construction costs.

Key words: adjustable; arched; fabricated

收稿日期: 2022-04-12

作者简介: 龚华 (1979—), 男, 本科, 高级工程师, 从事施工管理工作。

临近既有建筑物的水环境综合治理项目深基坑工程施工,其传统支护工艺通常采用钢筋混凝土水平支撑方式,在安装和拆除过程中存在工期长、造价高、污染环境、限制基坑土方开挖、变形量及位移无法再次控制、支撑体系无法再次利用等问题。

1 工程概况

南淝河中游重点排口初雨污染控制工程,为目前合肥市极为重要的河道治理项目,该项目中调蓄基坑开挖深度为 14.70m,最大为 16.70m,基坑周边长度为 350m,总开挖面积为 6875m²。

2 工艺原理

对拱形水平杆件上布设的钢绞线施加预应力,通过围檩传递于围护结构,约束基坑变形,并根据监测数据动态调节支撑系统预应力。拆撑过程中,通过设置素混凝土换撑带及支撑,限制支撑变形,解决了传统转换支撑带来的结构防水难题,确保了基坑安全施工(见图 1)。

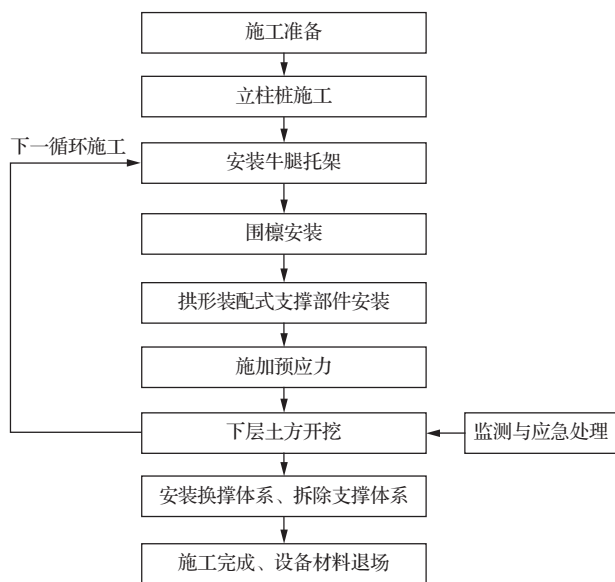


图 1 工艺流程

3 施工方法

3.1 施工准备

根据施工顺序进行构件吊装,分别进行构件摆放与管理。分析现场地质、水文等条件,执行设计方案

要求,落实基坑围护结构部分的施工。

3.2 立柱桩施工

灌注桩灌注至设计标高后,立即用液压振动锤振动将立柱送至设计标高,立柱插入最迟在混凝土灌注结束后半小时内完成;型钢插入过程中,如果地下有障碍物,极易造成隔离桩出现偏移的情况,应及时拔出型钢,在障碍物清理工作结束后,才能进行回填施工;再次进行放样、插桩作业。

由专业技术人员按照设计方案进行立柱腹板方向设置,在现场使用一段长 2.35m 的白色型钢定位线标记翼板,型钢插入的环节,翼板与白色定位线紧密贴合,达到施工精度的要求。

3.3 安装牛腿托架

牛腿焊接前,将连接部位上的混凝土保护层清理干净,裸露出灌注桩主筋 2~3 根后进行钢板的连接,再焊接牛腿。焊接完毕的牛腿应达到牢固、稳定的标准,不会有歪斜或者焊接缺陷等问题,并保证偏差控制在设计方案内。

3.4 围檩、托架安装拼装

3.4.1 围檩安装

围檩安装中,应根据“先长后短,减少接头数”的工艺要求进行安装施工;围檩随着支撑安装顺序逐一吊装作业,人工联合吊机的方式将围檩安装到牛腿支架上,并在焊接后检查是否存在松动等问题,如果发生松动,应及时补焊。

通过埋入螺栓的方式进行冠梁的连接,围檩与地脚螺栓进行稳定连接,使用套筒旋转连接;在围檩内侧放置垫片,每米数量控制在 4 个以上。

螺栓紧固连接分两次进行,第一次初拧,扭矩为标准值的 50%~70%,第二次终拧到设计标准,且偏差控制在 $\pm 10\%$ 以内。

3.4.2 托架安装

托架安装后,水平方向偏差控制在 $\pm 5\text{mm}$ 以内;加强垂直度的控制,如果立柱桩存在偏差严重的情况,拖座利用加垫钢板的方式达到垂直的标准;立柱与拖座螺栓连接方向是相同的。

预应力施加作业前，组织专业技术人员进行各个部位的检查，保证托架与各个结构的连接达到牢固、稳定的标准，达到连接效果的要求。通过连接控制，预应力支撑结构刚度性能合格。

3.5 拱形装配式支撑部件安装

装配式支撑部件安装工艺为：拱形梁→角撑→对撑→传力件。

3.5.1 拱形梁安装

拱形梁以设计方案为基础，进行结构试拼作业，螺栓连接效果合格。拱形梁预拼工作结束后，整体结构吊升到支撑牛腿上，并组织两人使用牵引绳进行牵引作业，支撑结构符合稳定性标准；钢绞线直接安装到拱形梁部位上，按设计方案进行锚具安装。拱形梁稳定连接，并应用张拉器将其拉到平直度要求（见图2）。

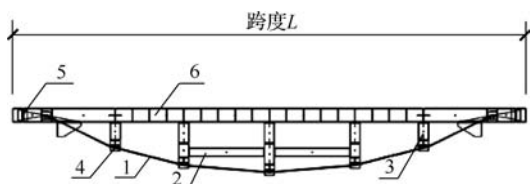


图2 拱形梁安装

1-下弦钢绞线；2-连杆；3-直腹杆；4-桥架；5-锚固端；6-上弦梁

3.5.2 角撑安装

角撑安装工作开始前，应进行预拼检查，支撑结构的整体性合格，且位置精度合格，中心线偏差不超过2cm，符合要求后，才能开始整体吊装。角撑预拼环节，应用螺栓进行千斤顶稳定连接，并留有足够的余量，以满足正常施工的要求。

3.5.3 对撑安装

如果现场空间比较充足，可以先在地面进行对撑预拼，平面达到平直度的要求，两侧支撑结构部件的偏心差不超过 $\pm 2\text{mm}$ ；对撑就位安装到规定部位上，选择四点吊装作业，并将吊点设置在距离端部0.2L位置上；对撑两侧安装完成后，位置偏差不超过20mm，并且不超过总长度的1/600；对撑挠曲度在整体的1/1000以下；相邻对撑的水平轴线偏差不超过30mm，并且与钢围檩夹角都达到设计要求，不会因

为偏心而发生失稳的问题；对撑连接严格控制，各个部件的位置精度合格，避免出现偏心的问题。

3.5.4 传力件安装

预应力施加前，应按照设计方案要求进行传力件安装。

3.6 施加预应力

3.6.1 预应力施加顺序

预应力施加顺序见图3。

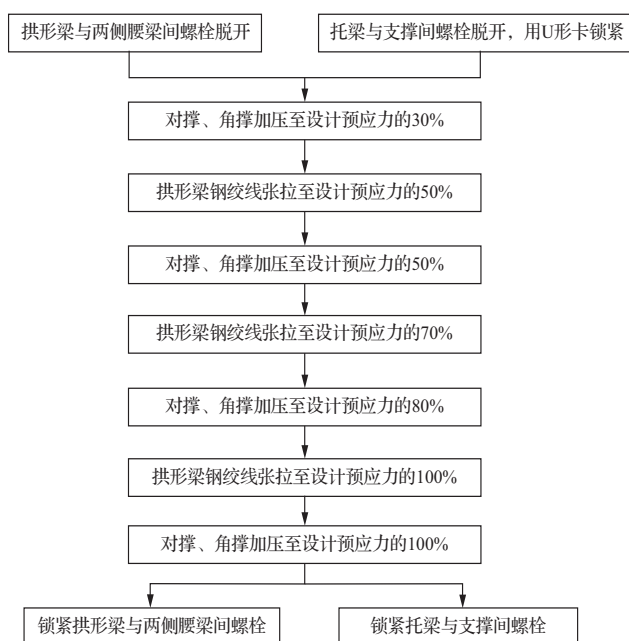


图3 预应力施加顺序

3.6.2 对撑、角撑施加预应力

用液压千斤顶在对撑、角撑加压部位施加预应力顶紧，施加完毕后用钢垫板支撑，保持施加预应力的状态；千斤顶、油表在使用前，应进行标定处理，还要记录各项技术参数。

3.6.3 拱形梁施加预应力

钢绞线张拉前，应做好各个部位的检查，符合要求才能投入施工；钢绞线张拉按照施工顺序进行，从小到大逐一张拉施工。首先应张拉到设计要求的50%、80%，符合稳定性要求后再逐步加载到100%。张拉荷载保持15min，锚头没有位移情况后锁定；张拉钢绞线的环节，应加强伸长率、预应力等检测和控制，做好施工环节记录工作，并存档。

3.7 下层土方分层开挖

每个部分的张拉施工结束后，施加预应力，根据工艺方案先进行张拉施工，再进行土方开挖施工，避免发生失稳的问题。开挖至下一层支撑安装标高处，循环施工装配式支撑部件的拼接以及预应力施加。

3.8 监测与应急处理

3.8.1 监测

监测内容如下：对撑、角撑轴力；钢绞线张拉力；腰梁应力；挡土结构、坑外土体水平位移；立柱竖向位移。

安装自动连续监测系统，进行水平支撑结构应力监测；对撑、角撑轴力监测中，测点的设置极为重要，一般都要布置在支撑轴力比较大或者主要承载结构部分，以得出最精确的参数，如此才能了解是否满足运行的要求；拱形梁钢绞线拉力监测中，一般都要设置在中间部位上；每一道支撑结构的监测数量，至少应该为支撑拱形梁钢绞线总数量的2%，并且不能少于3个；对于拉力监测，使用磁通量传感器进行；腰梁应力监测极为重要，通常将其设置在拱形梁的腰梁上，应使用具备自动测量和记录功能的测斜仪；对撑、钢绞线拉力、腰梁应力等应符合承载性能的要求，或者按照材料规定强度的80%作为设计预警参数数值进行设计。

3.8.2 应急处理

对撑、角撑缓慢地在坑内移动，并且逐步接近预警值，然后将其布置在一个角撑或者对撑结构上，并应用千斤顶进行调节，保持形变达到稳定性，并确定轴力参数；调节环节，应逐步增大压力，实时反馈变形的监测结果和变化趋势，以调整加载速率和加载量。

拱形梁向坑内水平位移接近或达到报警值，对于拱形梁钢绞线施加预应力，如果发现不合格应进行补张拉施工；对于备用钢绞线来说，则采用逐一张拉的施工方式，张拉时随时监测变形量，达到变形稳定状态后，立即终止张拉；腰梁轴向应力在临近报警值的位置上，需要在钢腰梁的部位上，直接灌入速凝、微膨胀的混凝土材料；对撑或角撑施加的应力即将达到

预警参数时，应先在对撑、角撑端部位置的挡土结构处堆土反压，并通过适当地增加对撑或者角撑的数量，以减小作用力；螺栓连接出现断裂时，如果断裂的部位有较多螺栓孔，在该位置上应增加螺栓数量，也可以采取焊接方式连接；当螺栓无法增加时，可在剪断处加焊钢板连接。

3.9 安装换撑体系、拆除支撑体系

3.9.1 换撑顺序

换撑顺序为：主体结构底板施工→浇筑素混凝土换撑带→拆除底层拱形梁装配式支撑→安装斜抛撑→主体结构板墙施工→浇筑中间层传力带→拆除上层支撑。

3.9.2 浇筑素混凝土换撑带

主体结构底板施工中，按照设计方案的要求，在底板与围护结构浇筑混凝土，在结构达到强度要求后，应将底部拱形梁支撑拆除。

3.9.3 浇筑中间层传力带

主体结构底板施工完毕后，利用底板上设置的混凝土牛腿安装斜支撑，斜支撑顶部位于结构外墙内侧；考虑斜支撑与建筑物支撑架交叉，板墙进行钢筋制安时，在板墙钢筋中预埋支撑钢板，用临时排架支撑斜撑，保证板墙钢筋不受斜支撑自重影响整体偏移；板墙模板安设后，斜支撑与板墙一起成型，待板墙混凝土强度达到设计要求后，拆除斜支撑临时支撑。

板墙混凝土强度满足拆模要求后，拆除中间层传力带处外模板，在外墙和围护结构之间浇筑传力带钢筋混凝土。

3.10 设备材料退场

随着工程不同阶段施工任务的完成，由远及近将分散和距离较远工作面上的机械设备向项目营地或较大的存放场地集中；小型机械、实验室设备、零配件等分类包装，统一存放。

4 质量控制

支撑结构在施工中，每个工序按照要求进行，加强各个工序质量检查。检验环节，每项指标进行检测控制，各项指标都应符合设计方案的要求。

4.1 钢支撑部件下料质量控制

H 型钢材质应超过 Q345B 钢, 其他结构部件用不低于 Q235B 钢材制作; 钢绞线选择使用高于 1860 级的高强度低松弛无黏结钢绞线; 预应力钢绞线在施工中, 应用夹片锚具, 其材质应超过合金钢; 螺栓连接应选择高强度螺栓, 强度等级不低于 10.9 级。

4.2 现场拼装的质量保证措施

拼装工作开始前, 施工人员要对设计方案有足够的了解, 执行工艺方案的要求, 并对各个部件进行全面检查, 保证外观、规格、数量、材质等全都合格, 达到标准要求后才能继续施工。

焊接开始前, 应对焊接周边部位进行清理处理, 保证焊接周边 30 ~ 50mm 范围内没有任何锈蚀、毛刺、污垢等, 确保焊接质量合格。

板材、型材拼接焊接, 应在各个部件组装前完成; 各个部件制作结束后, 经检查符合要求, 才能开始整体拼装施工。加强构件检测和控制, 对隐蔽部件, 先焊接、涂装, 经过质量检测全部合格后, 才能继续进行装配施工。

4.3 支撑体系的保护

按照设计要求切实落实方案中拱形梁、对撑以及角撑的斜拉固定措施, 验收合格方可进行下道工序。预应力筋下料应采用砂轮机切断, 不得使用氧气、乙炔切割和电焊切断。拱形梁桥架与钢绞线接触部位加工成墩柱形式。

(上接第 28 页) 压实抹平, 第 2 层用铁抹子压实抹光。抹压要注意边沿压实, 不要来回多次抹压, 以免压实的边沿又被带起, 形成缝隙; 反复抹压也会影响浆体中聚合物膜的质量。

6 结 语

丙乳砂浆加固处理部位经过 1 年运行后, 组织有关技术人员专项检查, 表面未发现缝隙, 敲击没有脱鼓声, 表面平整, 与完工验收时无任何变化。实践证明: 丙乳砂浆具有良好的物理力学性能, 对水工混凝土工程进行加固处理, 技术切实可行, 质量有保证; 既适合薄层修复, 又能潮湿面施工, 工艺简单, 环保无毒, 安全可靠, 优势明显。较好地解决了水工混凝土

5 工程实施效果

为有效控制深基坑的变形, 保证施工安全, 在施工过程中对调蓄池基坑支护采用水平可调节拱形装配式钢支撑施工工法, 避免出现深层土体发生较大位移变化的情况, 基坑连续性开挖施工中, 深层土体位移速度会不断降低, 可以有效控制变形发展, 提高结构整体性与稳定性。各类钢构件可重复使用, 施工成本较传统混凝土支撑降低了 23.5%, 同时保证了施工质量, 取得了良好的经济及社会效益。

6 技术创新点

采用预应力水平拱形可调节桁架组合式钢支撑体系, 增强了水平支撑作用, 减小了基坑变形, 提高了基坑整体稳定性。采用多功能监测警报系统, 根据监测数据调节支撑系统预应力, 保障了支撑体系的有效性和安全性。显著降低了支撑体系对基坑施工空间的影响, 提高了基坑施工效率。

7 结 语

基坑变形是重要问题, 而提高结构刚度与强度是确保基坑性能的关键。与传统的混凝土支撑、钢支撑相比, 应用可调节拱形装配式钢支撑形式, 应用远程监测系统可以随时掌握变形数据, 从而有效而精确地监测基坑位移, 实时监测基坑的变形, 准确可靠, 具有良好的社会效益。▲

土老损剥蚀等质量问题, 效果显著。▲

参考文献

- [1] 乔生祥, 黄华平. 水工混凝土缺陷检测和处理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1997.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 工程结构加固材料安全性鉴定技术规范: GB 50728—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 工业建筑防腐蚀设计标准: GB 50046—2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [4] 董永全, 王昌慈, 马德福. 丙乳砂浆在豆腐窝分洪闸大坝加固中的应用[J]. 水利建设与管理, 1997, 17(5): 30-31.
- [5] 陈爱民, 秦维升, 陈玉红. 丙乳砂浆在跋山水库老闸墩头处理中的应用[J]. 治淮, 2001(12): 23-24.
- [6] 程利, 王鑫, 赵雄燕. 功能化丙烯酸酯乳液的研究与应用[J]. 应用化工, 2019, 48(8): 1954-1958.

科学研究

沙沟水库丙乳砂浆加固工程质量 控制要点初探

郝恩峰

(山东省沂水县沙沟水库管理中心, 山东 沂水 276400)

【摘要】 沙沟水库运行多年来, 溢洪道防冲槽底板混凝土表面冻融、剥蚀, 闸墩侧墙混凝土局部老损, 闸墩头水位经常变动区域混凝土碳化, 石子外露。文章提出了丙乳砂浆加固技术方案, 阐述了加固处理过程中主要施工技术及其质量控制要点。结果表明: 该技术施工便捷, 环保无毒, 安全可靠。

【关键词】 丙乳砂浆; 施工技术; 质量控制

中图分类号: TV432

文献标识码: B

文章编号: 1673-8241 (2022) 09-026-03

Preliminary Study on Quality Control Keys of Acrylic Emulsion Mortar Reinforcement Project in Shagou Reservoir

HAO Enfeng

(Shandong Yishui County Shagou Reservoir Management Center, Yishui 276400, China)

Abstract: Shagou Reservoir has been operated for many years. The concrete surface of spillway anti-scour trench bottom board suffers from freeze-thaw and denudation. The concrete of gate pier side wall has been damaged locally. The regional concrete of the gate pier head has been carbonized and the stone has been exposed due to frequent change of the water level. The reinforcement technical scheme of acrylic emulsion mortar is proposed in the paper. Main construction technology and quality control keys during reinforcement treatment are described. The results show that the technology is simple, convenient in construction, environment-friendly, non-toxic, safe and reliable.

Key words: acrylic emulsion mortar; construction technology; quality control

1 工程概况

沂水县沙沟水库位于淮河流域沭河干流上游, 1958年10月动工兴建, 1959年11月建成蓄水。水

库总库容1.04亿 m^3 , 兴利库容0.46亿 m^3 , 流域面积163 km^2 ; 是一座以防洪为主结合水力发电、城乡供水、淡水养殖、观光旅游等综合利用的大(2)型水库。水库枢纽工程主要包括大坝、溢洪道、放水

收稿日期: 2022-06-07

作者简介: 郝恩峰(1994—), 男, 本科, 助理工程师, 主要从事水利工程建设与管理工作。

洞、电站等。溢洪道位于大坝南段丘陵鞍部，设溢洪闸 3 孔，每孔净宽 10.0m；放水洞位于大坝桩号 0 + 430 处，主要由进水段、洞身段、竖井组成，洞身为 1.4m × 1.4m 钢筋混凝土方涵，水电站设在放水洞出口处。水库枢纽工程于 2002 年进行了除险加固，经过多年来的运行，溢洪道防冲槽底板混凝土表面冻融、剥蚀，闸墩侧墙混凝土局部老损，闸墩头水位经常变动区域混凝土碳化，石子外露。放水洞进水段与洞身段混凝土由于当时施工时形成的蜂窝麻面、模板漏浆处理欠缺，出现裂缝、表面剥蚀，钢筋锈蚀等。不仅制约结构使用寿命，且严重影响水库行洪安全^[1]。通过全面排查，综合研判，对钢筋混凝土存在老损、剥蚀等质量问题采用丙乳砂浆技术措施进行全面加固修复处理。

2 加固方案设计

根据工程实际，设计采用丙乳砂浆加固技术措施。丙乳砂浆是丙烯酸酯共聚乳液改性的聚合物水泥砂浆。其凝结体的物理力学性能与其配合比、水泥等级、砂率及施工工艺有较大关系。为了探讨和检验其物理性能指标，施工单位委托具备资质的专业试验室对原材料进行主要性能指标试验及配合比的确定。在建设、监理单位相关人员见证下，现场制取试件，经监理单位对试验结果确认后具体实施加固方案。

3 丙乳砂浆配合比试验

3.1 配合比试验确定

根据现场环境及施工工艺要求，通过试验确定丙乳砂浆重量配合比为水泥：丙乳：石英砂：水 = 100：36：165：15。

试验选用某厂家生产的丙烯酸酯共聚乳液。其外观为乳白色，无沉淀的乳液固体含量 41.0%，pH 值为 9.0，密度为 1.06g/cm³。水泥为当地水泥厂生产的 P·O42.5 普通硅酸盐水泥。水库附近产石英砂，粒径小于 2.5mm，经过筛处理使用。搅拌等生产用水从水库抽取。试配丙乳砂浆试件成型后，按照规范要求^[2]，试验基本物理力学性能。

3.2 基本指标试验结果

3.2.1 抗压强度

试验结果见表 1。

表 1 丙乳砂浆试件抗压强度统计

试块编号		28 天抗压强度/MPa	
组编号	块编号	单块强度	组平均值
I	I -1	50.8	51.3
	I -2	51.4	
	I -3	51.7	
II	II -1	50.6	50.5
	II -2	50.2	
	II -3	50.7	
III	III -1	49.7	50.4
	III -2	50.2	
	III -3	51.3	

3.2.2 黏结强度

黏结强度是加固修复旧混凝土结构的主要指标之一。试验结果见表 2。

表 2 丙乳砂浆与普通水泥砂浆黏结强度对照

对照组编号	普通水泥砂浆/MPa	丙乳砂浆/MPa
1	1.35	5.8
2	1.39	5.2
3	1.42	5.7

3.2.3 抗冻性

试件为 100mm × 100mm × 400mm 的柱体，3 个为 1 组。试验经 300 次快速冻融循环，其动弹模量达到 92.3%（见表 3）。

表 3 丙乳砂浆抗冻性试验统计

冻融次数	相对动弹模量/%	冻融次数	相对动弹模量/%
0	100	200	96.0
30	98.7	225	95.8
100	96.5	275	94.9
150	96.3	300	92.3

3.2.4 抗渗性

试验表明：当渗透压力达到 1.5MPa 时，恒压 12h 试件无渗水现象，丙乳砂浆试件的透水压力大于 1.5MPa。

将丙乳砂浆试件烘干至恒重后浸泡于水中, 3 天后称重吸水率为 1.0%。试验结果表明, 由于丙乳聚合物的分子在水泥颗粒及骨料表面形成聚合物膜, 聚合颗粒填充砂浆孔隙, 使砂浆固结体内空隙减小, 结合力增强, 提高了砂浆的密实度, 改良了丙乳砂浆的各项性能, 使丙乳砂浆的抗渗、抗冻性能增强。

本次加固工程所采用的丙乳砂浆物理力学性能满足设计及规范要求^[3]。

4 施工技术

4.1 施工前的准备

4.1.1 基面处理

根据工程实际状况, 由建设、监理对混凝土缺陷部位用记号笔圈定, 根据缺陷程度划分成片区; 然后利用手持电镐结合人工的方式剔除缺陷混凝土。凿除时, 要求露出坚硬新鲜混凝土面, 每片加固修复面除局部坑洼外做到凿除深度均匀平整。

现场监理人员验收。重点查看凿除缺陷混凝土的范围, 记号线内外是否有松动混凝土片; 凿除深度是否平整均匀, 坚硬新鲜混凝土面是否全部露出。若钢筋锈蚀应局部深凿, 单独处理。

监理人员确认后, 用高压水枪冲洗, 个别部位人工用钢丝刷清理, 确保清理效果。

4.1.2 丙乳砂浆的配制

根据试验确定配合比拌制丙乳砂浆。将水泥与砂子按比例人工拌和均匀后, 倒入丙乳和水搅拌均匀待用。一次拌和量不宜太多, 以免拌和不均或者造成浪费, 拌制好的砂浆要在 45min 内用完。

4.2 施工技术要点

4.2.1 喷(抹)丙乳砂浆

基面处理经验收合格后, 对基面凿除的沟槽及坑洼处, 涂刷 1 遍丙乳净浆(水泥: 丙乳 = 1: 0.8), 然后用丙乳砂浆分层找平, 养护 12 天后才能喷(抹)丙乳砂浆^[4]。

溢洪道防冲槽底板修补区原有施工缝原位置保留, 无施工缝处在修补区边沿剔除一道宽 8.0cm、深 4.0cm 的嵌边齿槽。其他加固修补区域不另外增加施

工缝和嵌边齿槽。

溢洪道防冲槽底板、闸墩头加固修复区域采用高压喷射丙乳砂浆的方法, 闸墩侧墙、放水洞进水段与洞身段采用人工抹浆的方法。喷(抹)丙乳砂浆前, 在待喷(抹)混凝土全部基面上均匀涂刷一层较薄的丙乳净浆。丙乳砂浆固结前, 人工用金属压板均匀地抹压修饰一遍, 对喷(抹)未到位或不平整的部位一并处理, 确保闸墩等外露表面光滑平整, 确保外观质量。

4.2.2 滚涂丙乳净浆及养护

丙乳砂浆表面固结后, 用装饰涂料滚子在表面均匀滚涂一层较薄的丙乳净浆。

最后滚涂的丙乳净浆不仅对丙乳砂浆加强保护, 增加外观质量, 同时封闭丙乳砂浆中的水分, 起到了养护作用^[5]。丙乳净浆固结后, 喷水湿润, 覆盖塑料薄膜, 既起到养护作用, 又能保护成品; 之后, 不需另外洒水养护。

5 质量控制关键点及其建议

丙乳(丙烯酸酯共聚乳液)选购应当严把质量关。近年来, 因丙烯酸酯乳液具有优异特性, 对其功能化改性的研究开发和应用得到了迅速发展, 市场品种繁多, 名称相似, 用途不同^[6]。使用前必须由专业试验室试验并确定配合比。

做好相关人员的施工技术和施工安全交底工作。施工人员要熟知施工要点、操作程序及注意事项。过程简单, 操作必须细心。

缺陷混凝土面剔除清理后的基面要全面彻底、干净。对抗洼、露筋及边缘处, 必须经现场监理验收。对形成的坑洼用丙乳砂浆分多次找补, 每次抹浆厚度不大于 2.0cm。确保每一片区喷(抹)浆范围内厚度均匀。

涂刷丙乳净浆时, 工作基面要饱和湿润, 丙乳净浆未硬化前喷(抹)丙乳砂浆, 保证黏结力。

喷射丙乳砂浆时分两次进行。第 1 层喷射厚度 2.5cm 左右, 初凝后清理表面浮尘, 然后喷射第 2 层, 喷射厚度 2.0cm 左右。

丙乳砂浆抹压第 1 层时用木抹子(下转第 25 页)

DOI: 10.16617/j.cnki.11-5543/TK. 2022.09.07

岷江犍为航电枢纽工程 GIS 安装及 试验要点

杨 杰

(中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 乐山 614400)

【摘 要】 GIS (Gas Insulated Switchgear) 设备是一种充装高绝缘性能 SF_6 气体的绝缘金属封闭组合电器, 该设备具有可靠性高、占地面积小、使用寿命长、运行维护工作量小等特点。GIS 的制造安装技术目前已经成熟, 但由于设备布置、安装环境、投运方式等不同, 在安装及试验方法选择上略有差别。文章结合岷江犍为航电枢纽工程现场实际, 总结了 GIS 安装中的关键步骤和工序, 对设备投运前的工频耐压试验方法进行了详细说明, 可供类似工程参考。

【关键词】 GIS; 安装; 试验

中图分类号: TM595

文献标识码: B

文章编号: 1673-8241 (2022) 09-029-06

Key Points of GIS Installation and Testing of Qianwei Navigation-power Junction Project in Minjiang River

YANG Jie

(Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd., Leshan 614400, China)

Abstract: GIS (Gas Insulated Switchgear) equipment belongs to an insulated metal enclosed combined electrical apparatus filled with SF_6 gas with high insulation performance. It has the advantages of high reliability, less occupied land, longer lifetime and less operation and maintenance workload, etc. The manufacturing and installation technology of GIS is mature at present. However, the installation and test methods are slightly selected differently due to difference in equipment layout, installation environment, operation mode, etc. Key steps and procedures in GIS installation are summarized in the paper based on the actual situation of Qianwei Navigation-power Junction Project in Minjiang River. The power frequency withstand-voltage test method before the equipment operation is described in details, thereby providing reference for similar projects.

Key words: GIS; installation; testing

1 概 述

岷江犍为航电枢纽工程共安装 9 台灯泡贯流式水

轮发电机组, 单机容量为 55.6MW, 总装机容量 500MW。本工程 220kV 开关站布置在下游副厂房 349.80m 高程 GIS 室内, 在副厂房 337.80m 高程布置

收稿日期: 2022-06-15

作者简介: 杨杰 (1992—), 男, 本科, 助理工程师, 主要从事水电站机电设备安装工作。

5 台升压变压器，5 台变压器呈一字形露天敞开式布置，变压器高压侧通过油气套管连接 GIS 母线引出至 220kV 开关站。220kV 开关站装设 GIS 设备，接线方式为双母线接线，采用户内 GIS 布置，架空出线，出线侧电容式电压互感器、避雷器敞开式布置。GIS 设备共 10 个间隔，分别为 1~5 号主变进线间隔，两个

母联间隔，一个母线设备间隔，两个出线间隔（见图 1）。220kV GIS 设备主要由断路器（GCB）、隔离开关（GL）、接地开关（ES）、快速接地开关（FES）、电流互感器（CT）、电压互感器（PT）、避雷器（LA）、主母线及分支母线等组成（见图 2）。

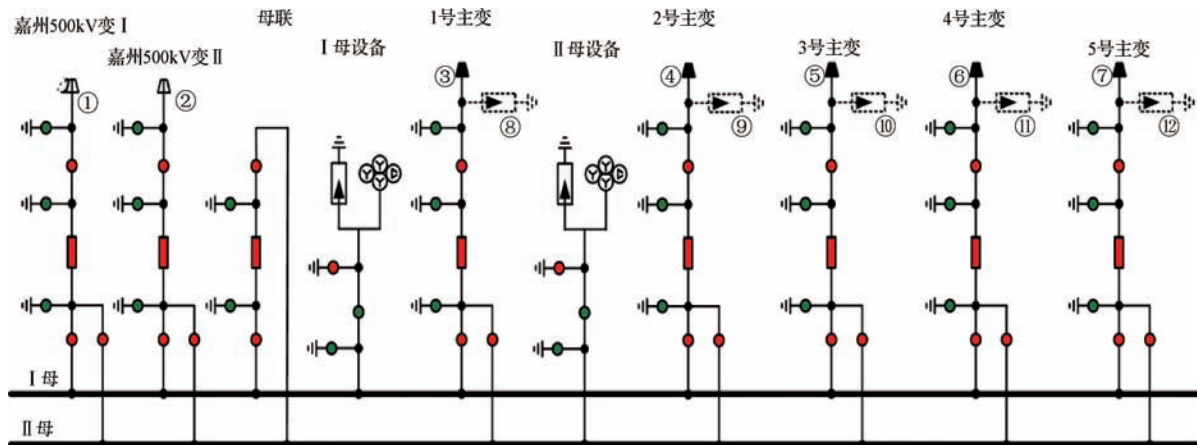


图 1 220kV 设备主接线

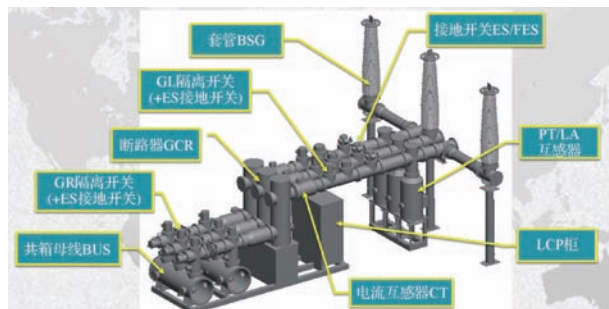


图 2 GIS 设备总体结构示意图

2 主要安装要点

GIS 设备是一种精密产品，对 GIS 安装的环境管理非常重要。安装现场土建工作应已全部完成，安装作业区域内地面干净，无土建及其他施工交叉作业，孔洞及门窗做好封堵措施。设备安装前应对应作业区进行灰尘和湿度测量，测量时应分早、中、晚各测量一次，确认数据是否在允许范围内，并记录其结果。

2.1 防护措施

服装：安装连接作业之前，接触内部部件的操作人员应穿防尘服装。

专用工具：主电路安装必须用洁净的专用工具进行，安装过程必须将它们与其他安装部位安装工具分开使用。

局部防尘措施：使用透明塑料制作大小合适的工作室对暴露的连接部件进行包裹。

户外安装防雨防潮：使用棚布搭建密封防雨棚。

2.2 基础检查

首先洁净基础平面，除去基础型钢上粘连的异物。清洁完成后检查基础型钢，接地的位置、尺寸、端部、形状等。测量基础型钢的水平高度，确认最高高度和最低高度的差是否在 5mm 以内并记录其结果。水平高度差应按照如下要求控制：同一间隔内， $a, b, c < 3\text{mm}$ ，且 $a + b < 3\text{mm}$ ；不同间隔内， $a, b, c < 5\text{mm}$ ，且 $a + c < 5\text{mm}$ （见图 3）。测量位置应取在各基础型钢间隔之间的中心线附近，并记录各测量位置。

2.3 安装顺序

按照基础图用墨盒画出基础的中心线及间隔、母线中心线。根据配置图选定第一个间隔进行就位，即最先就位安装的间隔（基准间隔），一般选择中间间

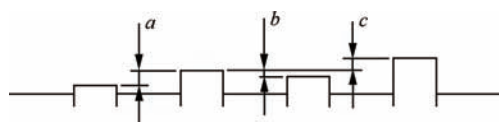


图3 水平高度差示意图

隔,由中间间隔向两侧安装以减小累积误差,本工程选择1号主变间隔作为首个就位间隔。

第一个就位间隔基础比其他间隔基础要高,一般高2mm,否则应调整垫铁高度,位置确认后,对间隔底座临时焊接固定。

2.4 设备吊装

GIS室内设备吊装采用GIS室内12.5t电动葫芦通过GIS室吊物孔从运输车上吊装至室内,室外设备及母线采用50t汽车式起重机吊装至安装平台。GIS设备必须采用专用尼龙吊带进行吊装。

2.5 间隔本体安装

按照地基确定的母线中心线(X 轴)和间隔中心线(Y 轴)调整间隔位置,使间隔底架上的 X 轴与基础上的 X 轴画线对齐,使间隔底架上的 Y 轴与基础上的 Y 轴画线对齐。根据图纸要求将间隔本体吊运至标注在地基上的具体位置。再调整每台间隔的 X 轴、 Y 轴方向,通过线锤校验中心线把间隔本体移到规定的位置。安装完成后,分别测量间隔筒体左右两边中心水平线上两个端点距标准水平面的高度,通过插入调整垫片调整到图纸要求距离。

2.6 母线对接

设备就位后从基准间隔向两侧进行主母线对接工作,将准备对接的间隔(定为甲间隔)移至距离基准间隔1m左右的位置(为减少开关移动中的摩擦力,可在基础型钢上表面涂覆适量润滑油)。在母线筒法兰面中心悬挂线锤(以正上方螺孔中心为准),调整母线筒轴向中心与地面画线 X 轴贴合,要求两条母线中心分别与 $X1$ 和 $X2$ 轴重合。检查基准间隔母线筒法兰密封面,应无锈蚀、划伤,检查筒内壁,应无水珠等凝露,检查内部导体,应无锈蚀、划伤且固定良好。按照图纸要求选择合适的导体(按出厂时在导体包装上做的标记找到属于本筒内的三相导体及接触

座),将导体及接触座用无毛纸蘸酒精清洁干净后,按图纸要求和顺序装配到母线筒内。装配完毕后,为确保内部件装配的正确性,必须按ABC点分段测试导体接触电阻,判定是否正常(见图4)。

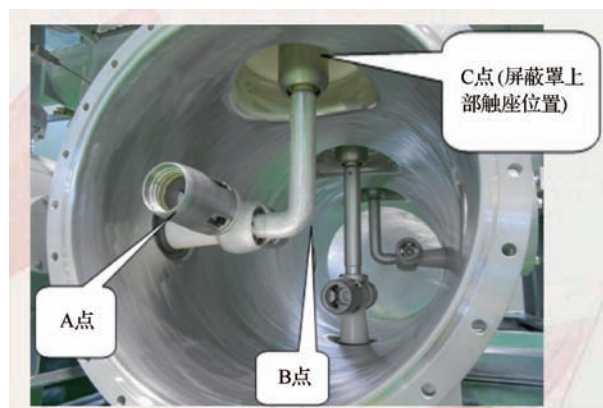


图4 测试点

清理准备对接安装的间隔(甲间隔)及安装内部导体,测量甲间隔电阻。基准间隔和甲间隔清理完毕后,用防尘罩保护。根据图纸找出两间隔之间的母线导体。检查甲间隔母线筒两端的法兰一对水平螺孔距离底架下平面的高度 H 是否一致,如不一致需要首先将此高度 H 通过调整母线支座处垫片调整至相同且与图纸标注尺寸相符。双母线结构的需测量两条母线筒的中心距,要与图纸要求一致,调整间隔保持母线筒轴向中心线分别与 $X1$ 和 $X2$ 轴重合。

按吊点所示位置在基准间隔和甲间隔底架上安装两副夹具,夹具相距一定距离安装于底架的两端,并水平挂好两副3t的手拉葫芦,将手拉葫芦收紧,对于距离较远的其余间隔,手拉葫芦可挂在焊接于底架侧面的吊装孔上。

按照图纸要求挑选合适长度的导电杆,除去外包装,检查表面,应光滑无运输磕碰及划伤。将导体表面清擦干净后入袋防尘备用。按要求在甲间隔的待对接母线筒法兰面密封槽中装配好密封圈并涂覆密封胶。

将挑选好的3根(双母线为6根)导电杆,使用支撑工装使其保持水平状态,在插入接触座的一端表面均匀涂抹一层导电膏,先将中间一相导体插入基准间隔触座装配内,再将离接触面最远的一相导体插

入,最后将剩余一相导体插入甲间隔接触座,导体插入到底后再向外拔出约 10mm。可用薄透明塑料膜将待接口进行临时性保护,塑料膜沿待对接法兰圆形围绕,将密封面和导电杆围裹在内部。

通过慢速收紧手拉葫芦拖动甲间隔沿 X 轴向基准间隔靠拢,两副手拉葫芦的收紧速度尽量保持相等,速度低于 10mm/s 从而保证甲间隔不倾斜沿 X 轴移动。在甲间隔移动到两对接面距离达到 150mm 时,停止拖动甲间隔,通过撬棍、千斤顶等调整甲间隔母线筒轴线与地面画线 X 轴(双母线还有 X1 轴)重合。

用水平仪检查待对接的甲间隔母线法兰高度与基准间隔的是否相等,略有差别的可在甲间隔底架下加垫片调整至相同高度。安排专人穿戴防护服、束发帽和手套后进入甲间隔母线筒内,将筒内三相导电杆向甲间隔方向拔出约 60mm 插入待对接的触座装配内,务必保证本侧导电杆能够完全插入导向套内,同时保证导电杆另一端不能与导向套脱离。将绝缘支撑工装从母线筒内取出,注意不要刮蹭密封面及内部件。

开始收紧手拉葫芦继续拖动甲间隔,速度保持在 5mm/s 以下。筒内人员注意随时通过轻微转动三相导电杆确认在接下来的对接过程中不会出现别劲顶死现象,一旦发现有别劲或顶死现象应立即停止移动甲间隔。

拖动甲间隔至对接面间距缩小到 10mm 时停止移动,目测检查两对接面螺孔是否一一对正,应先将法兰两水平及下半圈的螺栓装配就位。继续拖动甲间隔将对接面合拢,先用扳手将水平中部两处螺栓稍微收紧从而使法兰面贴合住,然后再装配上半圈螺栓,用力矩扳手对角依次紧固。

2.7 油气套管连接

安装前确保油气套管气室气体排空,拆除油气套管封装盖板,检查密封面及罐体内部有无划痕、磕碰等缺陷并清理干净。根据图纸选择相应的电联结,连接用的密封圈、标准件和导体,并对以上部件清理干净。待现场施工对油气套管内部装配到位后,先安装电联结,壳体安装密封圈后进行对接。待主变压器及

间隔本体耐压试验结束,确定油气套管气室气体排空后,拆解油气套管上侧四通盖板并清理密封面,然后拆卸四通上侧屏蔽罩,安装四通与油气套管连接的导体,恢复屏蔽罩安装(沉头螺钉需涂抹螺纹紧固胶,按力矩要求进行紧固,去除紧固时产生的尖角毛刺)。清理油气套管内腔,封装四通盖板。

2.8 电压互感器与避雷器安装

电压互感器安装及与母线连接参考母线和间隔本体安装。由于避雷器上侧没有隔离断口或可拆卸导体,需在 GIS 整体进行完耐压试验后才能安装。

2.9 气体作业

用厂家提供的 SF₆ 气体回收充气装置按制造厂划分的气室逐一进行干燥处理。根据气室容积大小抽真空处理时间一般在 6~24h 左右,用厂家供货的真空表检测,一般抽到真空度低于 100Pa 以下,然后停机检查气室的严密性,检查气室焊缝、连接法兰、盖板、防爆膜和箱体的泄漏情况,观察是否有泄漏,各气室的泄漏情况必须符合产品的技术规定。

真空干燥处理在主体设备安装后进行,作业程序为:抽真空→充 SF₆ 气体→气体回收→抽真空→充 SF₆ 气体。由于本工程户外安装母线较长,施工中应安装完成一组就进行一组回路电阻的测量,并进行抽真空和充 SF₆ 气体工作,防止导体内部进入潮气。

3 主回路工频耐压试验

本工程为新建项目,机组及发电电压配电装置、主变压器等安装和投运皆分阶段进行,首批机组具备发电条件时 GIS 应能投入运行,即 GIS 室内所有间隔、两段主母线、出线侧所有设备应已安装完成。根据工程总体进度规划,5 台主变压器安装投运顺序为:2 号主变→3 号主变→4 号主变→5 号主变→1 号主变。首批机组投运前 2 号、3 号主变已安装调试完成,2 号、3 号主变高压侧相对应的 GIS 分支母线已安装完成,剩余 1 号、4 号、5 号主变高压侧对应的 GIS 分支母线未安装完成,在现场常规性试验项目完成后进行的工频耐压试验是本工程的难点。

受主变压器安装影响, GIS 交流耐压试验分两期进行: 第一期为除 1 号主变、4 号主变、5 号主变高压侧分支母线及对应间隔部分开关刀闸外的全部 GIS 设备; 第二期为 1 号主变、4 号主变、5 号主变高压侧分支母线及对应间隔部分开关刀闸。

根据系统主接线图 (见图 1), GIS 送出线路间隔为空气套管 (①、②), GIS 与主变连接处为油气套管 (③、④、⑤、⑥、⑦), 主变高压侧避雷器为 GIS 内罐式避雷器 (⑧、⑨、⑩、⑪、⑫, 与 GIS 主导体之间无可用于断开的隔离刀闸)。

3.1 一期试验

根据系统主接线图 (见图 1), 试验前, 提前拆除 GIS 送出线路间隔空气套管 (①、②) 的引流线, 并拉开至距离套管顶部大于 3m 的绝缘安全距离。提前拆除 GIS 与 2 号主变、3 号主变连接的油气套管 (④、⑤) 上方的插接导体, 断开 GIS 主导体与主变

的连接, 并在断口处做好均压屏蔽措施。交流耐压试验前, 2 号主变、3 号主变高压侧罐式避雷器不进行安装, 待耐压试验通过后再安装。确认所有 GIS 气室充合格的 SF_6 , 气体压力为额定压力, 常规试验完成, 结果合格 (气体微水测试合格, GIS 气室均密封完好无泄漏, 回路电阻合格)。所有的电流互感器二次端子全部短接接地, 所有的电压互感器二次端子必须开路且二次线圈单端接地。分合开关刀闸, 切换至试验状态位置: 合上 GIS 带电范围内所有断路器; 合上 GIS 带电范围内所有隔离刀闸; 拉开 GIS 带电范围内所有接地刀闸; 对应 1 号主变、4 号主变、5 号主变间隔, 断开间隔内断路器, 合上间隔内主变侧接地刀闸 (母线 PT 及避雷器参与第一阶段老练试验, 之后退出并接地)。具体带电范围及开关刀闸状态见图 5。图 5 中, 虚线框表示本次不带电范围, 其余部分均为带电范围。

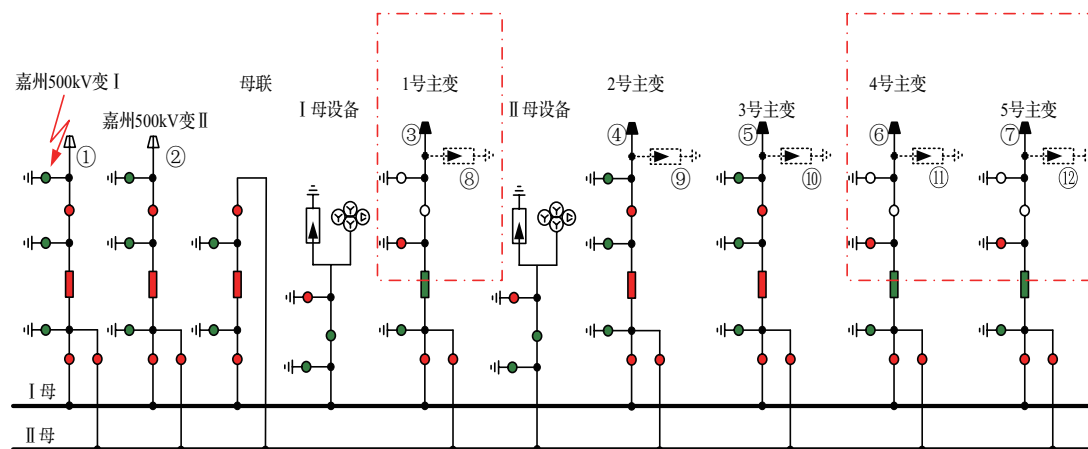


图 5 220kV GIS 设备耐压范围及开关刀闸状态示意图 (一期试验)

在 GIS 一相空气套管处 (①或②) 施加试验电压 (另外两相进行可靠接地); 零起升压进行第一阶段老练试验; 在第一阶段老练试验结束后, 退出母线 PT 及避雷器并接地, 继续升高电压进行第二阶段的老练试验; 第二阶段的老练试验完成后, 迅速均匀地将电压升到耐压值进行耐压试验; 试验最后 1min, 迅速将电压降为零, 在励磁变高压侧挂上接地线, 进行换相操作。待所有间隔通过交流耐压试验后, 再安装主变高压侧罐式避雷器。重复上述状态, 对避雷器

进行带运行电压试验。

3.2 二期试验

试验前, 提前拆除 GIS 与 1 号主变、4 号主变、5 号主变连接的油气套管 (③、⑥、⑦) 上方的插接导体, 断开 GIS 主导体与主变的连接, 并在断口处做好均压屏蔽措施。交流耐压试验前, 1 号主变、4 号主变、5 号主变高压侧罐式避雷器不进行安装, 待耐压试验通过后再安装。因二期试验前 GIS 设备 (除 1 号、4 号、5 号主变高压侧母线) 已带电运行, 因此

需提前在 1 号主变、4 号主变、5 号主变高压侧油气套管断口处安装临时试验套管，用于 GIS 耐压试验电压施加点（见图 6）。



图 6 现场临时试验套管安装

确认所有 GIS 气室充合格的 SF_6 ，气体压力为额定压力，常规试验完成，结果合格（气体微水测试合格，GIS 气室均密封完好无泄漏，回路电阻合格）。被试范围内所有的电流互感器二次端子全部短接接地，所有的电压互感器二次端子必须开路且二次线圈单端接地。分合开关刀闸，切换至试验状态位置：对应 1 号主变、4 号主变、5 号主变间隔，断开间隔内断路器，合上间隔内主变侧隔离刀闸，断开间隔内母线侧隔离刀闸，合上间隔内母线侧接地刀闸，断开间隔内主变侧接地刀闸。具体带电范围及开关刀闸状态见图 7。图 7 中，虚线框表示本次带电范围，其余部分均为一期投运设备。

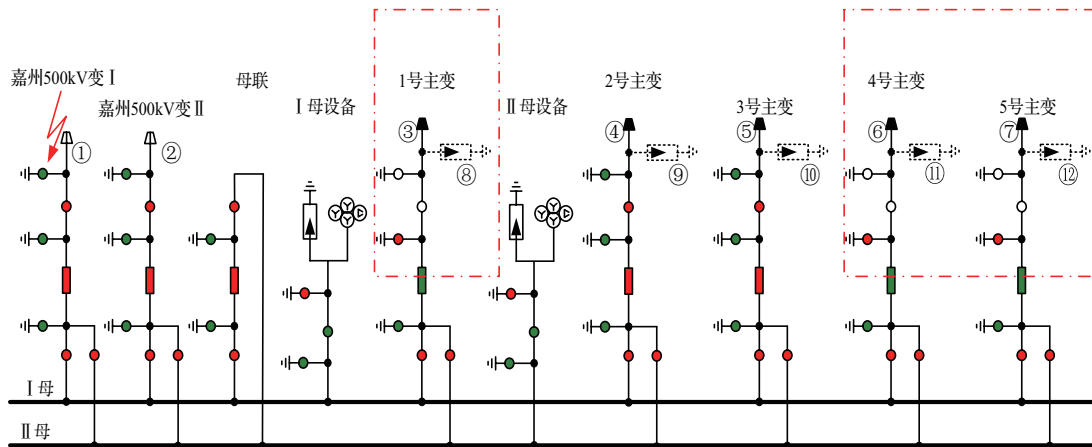


图 7 220kV GIS 设备耐压范围及开关刀闸状态示意图（二期试验）

在 1 号主变、4 号主变、5 号主变间隔其中一相的临时试验套管处施加试验电压；零起升压进行第一阶段老练试验；在第一阶段老练试验结束后，继续升高电压进行第二阶段的老练试验；第二阶段的老练试验完成后，迅速均匀地将电压升到耐压值进行耐压试验；试验最后 1min，迅速将电压降为零，在励磁变高压侧挂上接地线，进行换相操作。待所有间隔通过交流耐压试验后，再安装主变高压侧罐式避雷器。重复上述状态，对避雷器进行带运行电压试验。

4 结 语

岷江犍为航电枢纽工程 GIS 安装具有间隔数量多、户外母线线路长、试验难度大等特点，户外安装

受天气影响较大，设备安装及投运分阶段进行增加了试验难度。本工程所采用的工频耐压试验方法经多方论证满足试验需求，但耐压过程存在盲区。主变压器高压侧油气套管至断口处（试验前拆除插接导体部位）的这段导体无法参与工频耐压试验，该段运行电压为相电压 145kV，对该段采取的耐压方法为在主变压器进行长时感应耐压试验时带该段一起进行试验，试验施加的最高电压为 247kV，高于该段导体运行电压，试验通过后可保证设备投运安全。▲

参考文献

- [1] 白宇涛. GIS 设备安装质量控制要点[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(3): 3.
- [2] 沈方超, 龚欢. 观音岩水电站 500kV GIS 设备安装过程质量控制[J]. 山东工业技术, 2016(10): 195-196.

泽城西安水电站面板混凝土优化配比研究

张建国¹ 邢立文² 赵璐³

- (1. 临汾市洪洞县水利局, 山西 临汾 041600;
2. 山西省水利水电科学研究院, 山西 太原 030000;
3. 四川大学水利水电学院, 四川 成都 610065)

【摘要】 泽城西安水电站是一座位于海河流域清漳河干流上的大型水电站, 为了优化水电站面板混凝土配合比, 文章设置了 21 个配合比方案进行优选, 选取混凝土拌和性能 (二级指标包括坍落度、含气量、表观密度)、混凝土力学性能 (二级指标包括立方抗压、劈裂抗拉)、混凝土耐久性 (二级指标包括相对渗透系数、相对动弹性模量)、混凝土经济性为面板混凝土优化配比的主要评价指标构建层次分析法获得权重, 基于试验数据构建逐步回归模型解算混凝土最优配合比, 以期面板混凝土坝施工建设提供一定理论指导。

【关键词】 混凝土配比; 层次分析法; 逐步回归模型

中图分类号: TV431

文献标识码: B

文章编号: 1673-8241 (2022) 09-035-07

Study on Proportion Optimization Design of Face Slab Concrete of Zecheng Xi'an Hydropower Station

ZHANG Jianguo¹, XING Liwen², ZHAO Lu³

- (1. Linfen Hongdong Water Resources Bureau, Linfen 041600, China;
2. Shanxi Water Resources and Hydropower Research Institute, Taiyuan 030000, China;
3. College of Water Resources and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Zecheng Xi'an Hydropower Station is a large hydropower station located on the main stream of Qingzhang River in Haihe River Basin. 21 mix proportion schemes are set up in this paper in order to optimize the mix proportion of face slab concrete of the hydropower station. The mix performance of concrete (secondary indexes including slump, air content and apparent density), mechanical properties of concrete (secondary indexes including cube compressive strength and splitting tensile strength), durability of concrete (secondary indexes including relative permeability coefficient and relative dynamic elastic modulus) and economy of concrete are selected as the main evaluation indexes for optimal mix proportion of face slab concrete to construct the analytic hierarchy process (AHP) and obtain weight. A stepwise regression model is constructed to calculate the optimal concrete mix proportion based on the experimental data, in order to provide certain theoretical guidance for the construction of concrete face slab dam.

Key words: concrete mix proportion; analytic hierarchy process; stepwise regression model

收稿日期: 2022-07-18

作者简介: 张建国 (1981—), 男, 本科, 工程师, 主要从事水利建设与管理工作。

混凝土面板堆石坝因其造价低、结构简单、施工方便等优点在世界范围内有着较为广泛的应用。作为面板堆石坝的主要防渗结构，混凝土面板如若挤压破坏将会导致灾难性的后果。而混凝土面板堆石坝普遍面临高水压和防渗问题，因此优化混凝土配合比，提高混凝土面板的抗裂性能、抗渗性、耐久性和抗冻性具有重大实践意义。大量研究表明，可以通过提高混凝土的抗拉强度和极限抗拉值提高混凝土板的抗裂性，通过优化配比和适当添加外加剂也可以提高混凝土板的早期抗裂性和耐久性^[1]。

山西省泽城西安水电站是一座以发电为主（总装机容量为 13000kW）的大型水利枢纽工程，兼顾防洪、养殖及生活供水等功能。该水电站控制着 3230km² 的流域，位于海河流域的青张河上。其中枢纽工程包括挡水坝、溢洪道、引水隧洞、导流隧洞和水电站等水工建筑物。其中，主体挡水坝为混凝土面

板堆石坝，最大坝高 51.6m^[2]。

为满足工程要求，本文针对该面板混凝土坝所选混凝土，以拌和性能（坍落度、含气量、表观密度）、力学性能（立方抗压、劈裂抗拉）、耐久性（相对渗透系数、相对动弹性模量）、经济性为试验因素，采用层次分析体系和多因子及平方项逐步回归模型对面板混凝土配合比优选展开试验研究，使得工程建设者能够清晰、客观、科学地了解各混凝土配比方案的优劣程度，保证面板混凝土在达到应有的抗压、抗拉强度及抗裂、抗渗、抗冻性能的基础上，兼具良好的现场施工性能。

1 试验方法

1.1 配合比设计

本文对泽城西安水电站施工现场的混凝土设计了 21 组配合比（P1 ~ P21），具体的配合比见表 1。

表 1 面板混凝土配合比设计参数

配比 编号	配比/%						单方混凝土材料用量/(kg/m ³)								
	水胶比	减水剂	引气剂	粉煤灰	防裂剂	砂率 X ₆	水	水泥	粉煤灰	砂子	石 子		外加剂		
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅						5 ~ 20mm	20 ~ 40mm	减水剂	引气剂	防裂剂
P1	42	1.34	0	20.40	0	35.70	132.60	265.20	66.30	710.94	593.64	725.22	4.14	0	0
P2	36	1.34	0.08	20.40	0	34.68	132.60	200.94	75.48	667.08	583.44	712.98	4.73	0	0
P3	31	1.34	0.11	20.40	0	33.66	132.60	353.94	88.74	627.30	573.24	700.74	5.53	0	0
P4	36	1.28	0.12	25.50	0	34.68	137.70	294.78	97.92	652.80	570.18	696.66	5.11	0	0
P5	36	1.28	0.12	15.30	0	34.68	137.70	334.56	59.16	651.78	569.16	695.64	5.11	0	0
P6	31	1.28	0.14	25.50	0	33.66	137.70	344.76	115.26	591.60	600.78	600.78	5.97	0.01	0
P7	46	1.22	0.14	25.50	0	36.72	137.70	229.50	76.50	706.86	628.32	628.32	3.98	0	0
P8	36	1.22	0.14	25.50	0	34.68	142.80	306.00	102.00	623.22	604.86	604.86	5.51	0.01	0
P9	41	1.22	0.13	20.40	0	35.70	142.80	285.60	71.40	666.06	618.12	618.12	4.82	0	0
P10	36	1.17	0.15	15.30	0	34.68	142.80	346.80	61.20	626.28	607.92	607.92	5.10	0.01	0
P11	36	1.17	0.15	20.40	0	34.68	142.80	326.40	81.60	636.48	617.10	617.10	5.10	0.01	0
P12	31	1.17	0.31	15.30	0	33.66	147.90	419.22	74.46	595.68	604.86	604.86	6.16	0.01	0
P13	46	1.12	0.31	20.40	0	36.72	147.90	263.16	65.28	705.84	627.30	627.30	4.11	0.01	0
P14	36	1.12	0.61	20.40	0	34.68	137.70	315.18	78.54	636.48	618.12	618.12	4.92	0.02	0
P15	36	1.12	0.71	20.40	0	34.68	137.70	315.18	78.54	633.42	614.04	614.04	4.92	0.03	0
P16	46	1.07	1.12	15.30	5.10	37.74	137.70	229.50	45.90	734.40	625.26	625.26	3.83	0.03	30.60
P17	41	1.07	1.12	15.30	10.20	36.72	137.70	258.06	52.02	699.72	622.20	622.20	4.30	0.38	34.68
P18	36	1.07	1.12	15.30	15.30	35.70	137.70	294.78	59.16	665.04	618.12	618.12	4.92	0.04	39.78
P19	39	1.02	1.22	15.30	5.10	35.70	137.70	279.48	54.06	663.00	615.06	615.06	4.53	0.04	28.56
P20	39	1.02	1.22	15.30	10.20	35.70	137.70	271.32	54.06	664.02	617.10	617.10	4.53	0.04	36.72
P21	39	1.02	1.22	15.30	15.30	35.70	137.70	264.18	54.06	665.04	618.12	618.12	4.53	0.04	43.86

1.2 检测指标及方法

1.2.1 经济性

经济性见表 2。

1.2.2 拌和性能

测定指标为坍落度、含气量、表观密度，测定标准为《混凝土质量控制标准》（GB 50164—2011）。

表 2 试验材料规格及价格

材料名称	水	水 泥	粉煤灰	砂 子	石 子		外 加 剂		
							减水剂	引气剂	防裂剂
规格	—	P. 042. 5	一级	中砂	5 ~ 20mm	20 ~ 40mm	DH3G 型	DH9 型	VF 型
单价/(元/吨)	2. 297	0. 236	0. 056	0. 289	0. 068	0. 068	13. 09	12. 17	20. 48

1.2.3 力学性能

测定指标为立方抗压和劈裂抗拉，其测定标准为《普通混凝土力学性能试验方法标准》（GB 50081—2019）。

法标准》（GB/T 50082—2009）和《水工混凝土试验规程》（DL/T 5150—2017）。

1.2.4 耐久性

测定指标为相对渗透系数和相对动弹性模量，其测定标准为《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方

2.1 混凝土性能试验结果

面板混凝土配比方案的试验结果见表 3。

2 结果与分析

表 3 混凝土性能试验测定结果

配比 编号	拌 和 性 能			力 学 性 能		耐 久 性		经济性/元
	坍落度/cm	含气量/%	表观密度/ (kg/m ³)	立方抗压/MPa	劈裂抗拉/MPa	相对渗透系数/ (cm/s)	相对动弹性 模量/%	
P1	3. 67	3. 26	2493. 90	45. 59	2. 60	2. 73	80. 07	686. 32
P2	3. 37	2. 55	2511. 24	52. 53	2. 89	1. 91	77. 01	665. 48
P3	3. 47	1. 43	2476. 56	57. 43	3. 23	1. 08	80. 78	697. 65
P4	2. 24	2. 45	2451. 06	48. 76	2. 65	3. 76	77. 01	697. 15
P5	2. 65	2. 65	2375. 58	53. 14	3. 81	0. 96	77. 01	703. 55
P6	3. 88	2. 24	2419. 44	55. 28	2. 76	2. 94	84. 56	697. 95
P7	4. 59	3. 26	2407. 20	43. 15	3. 69	6. 16	65. 18	681. 95
P8	6. 43	1. 53	2435. 76	48. 76	2. 25	4. 50	64. 46	703. 01
P9	1. 84	1. 84	2412. 30	44. 37	1. 97	4. 05	80. 07	702. 28
P10	8. 36	4. 18	2370. 48	52. 63	4. 64	2. 55	74. 87	706. 17
P11	3. 57	1. 12	2421. 48	51. 71	2. 22	4. 09	78. 49	706. 90
P12	7. 14	3. 47	2444. 94	58. 34	4. 41	1. 73	88. 84	737. 98
P13	5. 71	2. 55	2437. 80	42. 02	2. 71	6. 77	99. 96	711. 41
P14	2. 86	1. 02	2404. 14	49. 88	3. 09	5. 13	93. 84	691. 64
P15	7. 34	1. 02	2686. 68	50. 49	3. 41	5. 14	99. 04	690. 25
P16	8. 06	4. 79	2429. 64	35. 29	0. 74	6. 46	66. 30	1282. 92
P17	8. 77	4. 08	2394. 96	38. 56	1. 10	5. 62	96. 49	1368. 80
P18	5. 30	3. 47	2431. 68	39. 98	1. 38	4. 79	95. 98	1470. 15
P19	3. 26	4. 08	2392. 92	48. 76	3. 95	6. 59	95. 37	1241. 77
P20	5. 92	5. 30	2997. 78	41. 92	3. 15	6. 59	84. 97	1399. 62
P21	7. 75	5. 10	3106. 92	37. 94	2. 98	6. 59	81. 40	1537. 67

2.2 面板混凝土配合比优选

本文根据面板混凝土的功能需求、面板堆石坝施工条件和面板堆石坝工程造价等主要因素选定混凝土拌和性能、力学性能、耐久性、经济性为配合比方案具体的评价优选准则，构建层次分析体系对泽城西安水电站面板混凝土的备选配合比方案进行分析和优选。

2.2.1 层次分析法

层次分析法是一种将复杂的多目标优选决策问题分解组成递阶层次结构的综合分析方法。该方法既可以用于定性和定量相结合的决策分析和方案比较，也

可以用于确定指标权重。由于该方法的客观性，已成功运用于科学研究、工程实践中，是一种具体可靠的多目标优化决策方法。本文基于混凝土性能指标构建配合比优选层次分析体系的具体步骤如下。

2.2.2 建立层次评价体系的递阶层次结构

本文以综合评价指标体系为主体框架，将混凝土的各项性能分成4个层次，最高层为决策目标O；中间层分别为一级准则层A和二级准则层B，即表示混凝土具体性能指标；最下层为混凝土配比方案层P。根据上述原则，泽城西安面板堆石坝混凝土性能的简化递阶层次结构见图1。

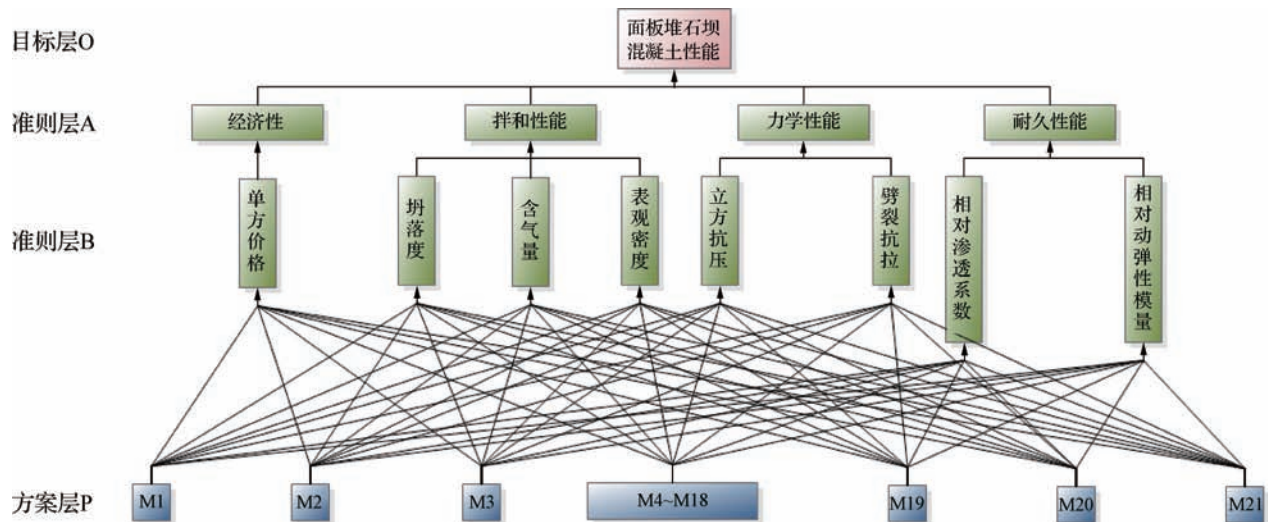


图1 综合评价递阶层次结构

2.2.3 构造层次评价体系的判断矩阵

判断矩阵是用以表达各准则层中各影响因素（指标）之间相互重要性程度的定量指标，面板混凝土各性能指标间的相对重要性程度参照表4判定。

表4 层次评价指标比率标度

比率标度 W_i	定义
9	指标甲较指标乙“极端”有意义
7	指标甲较指标乙“强烈”有意义
5	指标甲较指标乙“稍微”有意义
3	指标甲较指标乙“明显”有意义
1	指标甲与指标乙“同样”有意义
1/3	指标甲较指标乙“明显”无意义

续表

比率标度 W_i	定义
1/5	指标甲较指标乙“稍微”无意义
1/7	指标甲较指标乙“强烈”无意义
1/9	指标甲较指标乙“极端”无意义
2、4、6、8、1/2、1/4、1/6、1/8	上述两相邻标度之间

由图1可知，混凝土性能准则层A对目标层O的判断矩阵见表5。

2.2.4 层次评价体系的评价指标单排序

层次评价体系的评价指标单排序即依托判断矩阵来计算各单一评价指标相对于决策目标的重要程度的

表 5 准则层 A 对上一层次目标层 O 的判断矩阵

面板混凝土性能指标	混凝土拌和性能	混凝土力学性能	混凝土耐久性能	混凝土经济性	比率标度 W_i
混凝土拌和性能	1	1/3	1/4	3	0.121
混凝土力学性能	7	1	5	8	0.732
混凝土耐久性能	3	1/5	1	3	0.210
混凝土经济性	1/3	1/6	1/3	1	0.086

注 CR=0.0712; $\lambda_{\max}=5.318$ 。

次序,其最大特征根及特征向量的计算过程如下:

a. 计算判断矩阵的每一行评价指标的标准值 a_{ij} 的连乘积,具体计算公式如下:

$$M_i = \prod_{j=1}^m a_{ij} \quad (1)$$

b. 计算上述连乘积的 m 次方根,即

$$\bar{W}_i = \sqrt[m]{M_i} \quad (2)$$

c. 对向量 $\bar{W} = (W_1, W_2 \cdots, W_i \cdots, W_m)$ 进行标准化,即令

$$W_i = \frac{\bar{W}_i}{\sum_{i=1}^m \bar{W}_i} \quad (3)$$

得 $W = (W_1, W_2 \cdots, W_i \cdots, W_m)$ 即为所求之特征向量,其中 $W_1, W_2 \cdots, W_i \cdots, W_m$ 即为面板混凝土各性能指标的权重值。

表 6 平均随机一致性指标 RI

m	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.591	0.934	1.182	1.315	1.399	1.497	1.532

f. 一致性比率 CR。当 $CR < 0.1$ 时表示符合一致性要求。一致性比率 CR 的具体计算方法如下:

$$CR = \frac{C}{R} \quad (6)$$

g. 判断矩阵指标层一致性检验及权重值。拌和性能权重见表 7。

表 7 拌和性能判断矩阵指标层一致性检验及权重值

拌和性能	坍落度	含气量	表观密度	比率标度 W_i
坍落度	1	2	4	0.561
含气量	1/4	1	1/3	0.131
表观密度	1/2	3	1	0.335

注 CR=0.0081; $\lambda_{\max}=3.0183$ 。

d. 计算最大特征值 λ_{\max} , 计算公式如下:

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^m \frac{(AW)_i}{mW_i} \quad (4)$$

式中 A ——混凝土评价指标判断矩阵方阵;

W ——其特征向量;

$(AW)_i$ ——方阵 A 与向量 W 两者合成矩阵中的第 i 个值。

e. 一致性检验。

一致性指标:

$$RI = \frac{\lambda_{\max} - m}{m - 1} \quad (5)$$

一致性指标 RI 由已知矩阵阶数 m 的平均随机计算得到 (见表 6)。

力学性能权重见表 8。

表 8 力学性能判断矩阵指标层一致性检验及权重值

力学性能	立方抗压	劈裂抗拉	比率标度 W_i
立方抗压	1	4	0.750
劈裂抗拉	1/4	1	0.250

注 CR=0.0000; $\lambda_{\max}=2.0000$ 。

耐久性能权重见表 9。

表 9 耐久性能判断矩阵指标层一致性检验及权重值

耐久性能	相对渗透系数	相对动弹性模量	比率标度 W_i
相对渗透系数	1	3	0.666
相对动弹性模量	1/3	1	0.333

注 CR=0.0000; $\lambda_{\max}=2.0000$ 。

最终权重。层次总排序即为计算某级层次上所有指标对上一级目标层指标的权重分配情况（见表10）。

表10 混凝土性能指标最终权重

准则层	指标及其权重							
准则层A中指标对决策目标的权重	拌和性能0.112			力学性能0.652		耐久性能0.191		经济性0.075
准则层B中指标对决策目标的权重	坍落度 0.612	含气量 0.214	表观密度 0.421	立方抗压 0.799	劈裂抗拉 0.152	相对渗透系数 0.792	相对动弹性模量0.231	—

2.3 混凝土性能逐步回归模型

本文在泽城西安水电站面板混凝土性能检测结果和混凝土配合方案的层次评价基础上对混凝土综合性能采用多因子及平方项逐步回归模型进行拟合：

$$Y = b_0 + \sum_{j=1}^p b_j x_j + \sum_{j=1}^p b_{jj} x_j^2$$

式中 Y ——综合性能值；

x_j ——线性变换后的单性能指标值；

b_j ——逐步回归模型的一次项系数；

b_{jj} ——逐步回归模型的二次项系数；

p ——单性能指标的个数；

j ——性能指标的序号。

根据多因子及平方项逐步回归模型的原理，以混凝土性能为因变量（ Y ）、混凝土性能指标（ $X_1 \sim X_6$ ）为自变量进行二元二次多项式回归拟合，得出相应的8个混凝土性能指标回归拟合模型。

a. 坍落度：

$$Y_1 = 0.58 - 1.96X_1 - 1.83X_2 + 1.27X_3 - 2.38X_4 - 4.35X_5 + 2.90X_6 + 0.25X_1^2 + 1.86X_2^2 - 0.93X_3^2 + 2.27X_4^2 + 3.72X_5^2 - 0.31X_6^2 \quad (7)$$

b. 含气量：

$$Y_2 = 0.86 + 0.62X_1 + 0.40X_2 - 1.79X_3 - 1.77X_4 - 1.25X_5 - 0.62X_6 + 0.08X_1^2 - 0.59X_2^2 + 1.90X_3^2 + 1.25X_4^2 + 1.13X_5^2 + 0.18X_6^2 \quad (8)$$

c. 表观密度：

$$Y_3 = 0.14 + 1.45X_1 - 0.12X_2 - 0.73X_3 + 0.20X_4 - 3.07X_5 - 2.14X_6 + 0.11X_1^2 + 0.13X_2^2 + 1.59X_3^2 - 0.13X_4^2 + 3.48X_5^2 \quad (9)$$

d. 立方抗压：

$$Y_4 = 1.05 + 0.51X_1 + 0.02X_2 - 0.28X_3 - 0.22X_4 + 0.80X_5 - 1.83X_6 - 0.04X_1^2 - 0.09X_2^2 + 0.33X_3^2 + 0.09X_4^2 - 1.30X_5^2 + 0.55X_6^2 \quad (10)$$

e. 劈裂抗拉：

$$Y_5 = 1.14 - 0.43X_1 - 0.30X_2 - 1.30X_3 - 1.66X_4 - 3.22X_5 + 1.31X_1^2 + 0.12X_2^2 + 2.66X_3^2 + 1.33X_4^2 + 1.49X_5^2 - 1.37X_6^2 \quad (11)$$

f. 相对渗透系数：

$$Y_6 = -0.15 + 1.51X_1 - 0.35X_2 + 0.83X_3 + 0.56X_4 + 1.00X_5 - 0.85X_6 - 0.17X_1^2 + 0.05X_2^2 - 1.07X_3^2 + 0.10X_4^2 - 0.59X_5^2 - 0.23X_6^2 \quad (12)$$

g. 相对动弹性模量：

$$Y_7 = 0.14 - 2.99X_1 + 0.58X_2 + 2.34X_3 + 1.06X_4 + 1.92X_5 + 3.56X_6 + 2.14X_1^2 - 0.64X_2^2 - 2.10X_3^2 - 1.26X_4^2 - 1.82X_5^2 - 3.37X_6^2 \quad (13)$$

h. 经济性（单价）：

$$Y_8 = 0.03 - 0.67X_1 - 0.031X_2 + 0.23X_3 - 0.02X_4 + 1.22X_5 + 0.84X_6 + 0.51X_1^2 + 0.04X_2^2 - 0.31X_3^2 + 0.03X_4^2 - 0.12X_5^2 - 0.86X_6^2 \quad (14)$$

2.4 混凝土配合比优选

根据层次分析法确定的混凝土各项性能指标的权重值和上述8个混凝土性能回归拟合模型，可得混凝土综合性能指标回归拟合模型：

$$Y = 0.55Y_1 + 0.12Y_2 + 0.32Y_3 + 0.83Y_4 + 0.16Y_5 + 0.80Y_6 + 0.20Y_7 = 0.55 - 0.08X_1 - 0.17X_2 + 0.16X_3 - 0.28X_4 + 0.05X_5 - 0.22X_6 + 0.38X_1^2 + 0.07X_2^2 + 0.03X_3^2 + 0.28X_4^2 - 0.22X_5^2 - 0.43X_6^2 \quad (15)$$

本模型拟合度及显著性检验采用联合假设检验 (F 检验), 经计算 $F = 62.27 > F_{0.05}(5, 3) = 9.01$, $p = 0.0163 < 0.05$, 说明该模型对于面板混凝土综合性能指数和各单项性能之间的拟合有效, 而各单项指标与综合性能指数的复相关系数 $R^2 = 0.9857$, 逐步回归方程回归达到极显著水平, 也印证了模型性能很好。

经解算混凝土性能逐步回归模型可知, 混凝土性能模型最优解为: $X_1 = 0.53$, $X_2 = 0.83$, $X_3 = 0.96$, $X_4 = 0.96$, $X_5 = 0.43$, $X_6 = 0.51$ 。反标准化可得混凝土最优配比方案为: 水胶比 = 38.4%, 减水剂 = 1.25%, 引气剂 = 1.15%, 粉煤灰 = 15.1%, 防裂剂 = 9.14%, 砂率 = 35.2%。

将混凝土性能逐步回归模型最优解带入式 (7) ~ 式 (14) 可得最优配比方案时的面板混凝土经济性 = 1188.92 元; 混凝土坍落度 = 7.08cm; 混凝土含气量 = 4.80%; 混凝土表观密度 = 2701.83kg/m³; 混凝土立方抗压 = 58.62MPa; 混凝土劈裂抗拉 = 3.41MPa; 混凝土相对渗透系数 = 1.79cm/s; 混凝土相对动弹性模量 = 64.51%。

3 结 论

a. 本文提出的模型拟合度高, 逐步回归方程可达到极显著水平, 采用层次分析法结合逐步回归模型

来优选混凝土配合比的方法是可靠性的。层次分析法将研究目标放在层次的顶端, 其次是准则和子准则。决策选择在层次结构的最后一层设置, 并在层次结构的每一层进行两两比较以进行排序。层次分析法的理论依赖于三个主要的原则命名分解, 比较判断和综合。第一条原则分解的建议是层次结构和多面性在此步骤中, 问题分解为更直接的层次结构。比较判断的第二个原则是建立一个矩阵来执行每个元素与下一个元素的两两比较更高的水平。

b. 泽城西安水电站面板混凝土的最优配比为: 水胶比 = 38.4%, 减水剂 = 1.25%, 引气剂 = 1.15%, 粉煤灰 = 15.1%, 防裂剂 = 9.14%, 砂率 = 35.2%; 此配比下混凝土性能为: 混凝土经济性 = 1188.92 元, 混凝土坍落度 = 7.08cm, 混凝土含气量 = 4.80%, 混凝土表观密度 = 2701.83kg/m³, 混凝土立方抗压 = 58.62MPa, 混凝土劈裂抗拉 3.41MPa, 混凝土相对渗透系数 = 1.79cm/s, 混凝土相对动弹性模量 = 64.51%。▲

参考文献

- [1] 赵继成, 李海昌, 王洪正. 基于防裂技术的面板混凝土配合比设计研究[J]. 人民长江, 2012, 43(16): 49-51.
- [2] 宋建庆. 泽城西安混凝土面板坝三维非线性应力变形研究[J]. 水利水电技术, 2011, 42(3): 31-34.
- [3] 程与技术, 2021(4): 42-45.
- [4] 张永刚. 预应力混凝土连续箱梁顶推施工控制技术研究[J]. 铁道勘察, 2019(2): 37-41, 46.
- [5] 王峰. 大跨度六线简支钢箱叠拱桥顶推施工关键技术[J]. 世界桥梁, 2021(2): 43-49.
- [6] 朱庆庆, 张何, 任伟. 复杂线形钢混组合梁顶推施工技术[J]. 筑路机械与施工机械化, 2020(11): 26-29.
- [7] 袁全. 大跨度桥梁竖曲线顶推施工控制技术研究[J]. 铁道建筑技术, 2019(9): 73-77.
- [8] 严定钰. 预应力混凝土连续梁桥顶推施工过程仿真分析[J]. 石家庄铁路职业技术学院学报, 2021(3): 21-25.
- [9] 冀伟, 邵天彦. 多跨连续梁桥顶推施工双导梁的优化分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2021(7): 1289-1298.
- [1] 何文生. 特大桥钢箱梁节段拼装顶推施工关键技术[J]. 建筑施工, 2019(1): 142-144.
- [2] 李二伟. 多箱室连续箱梁顶推施工落梁技术[J]. 国防交通工

(上接第 20 页) 接隧道, 不具备梁部组拼条件, 通过现场分析, 确定采用在墩上设置顶推平台, 边跨结合梁左右幅设备相互倒用的多点步履式顶推施工方案。通过采取对方案科学论证、设备选型及合理布置、顶推过程施工管理及最不利工况计算等措施, 不但施工安全得到保证, 结合梁安装结构性和线性也均符合要求, 确保了施工质量。▲

参考文献

湾子寨水库坝体廊道堆石混凝土 一体化浇筑分析

张绍平¹ 李锡均² 安锡光¹

- (1. 云南能投缘达建设集团有限公司, 云南 昆明 650101;
2. 云南省水利水电勘测设计研究院, 云南 昆明 650021)

【摘要】 堆石混凝土技术是将堆石直接入仓, 然后浇筑高自密实性能混凝土, 填充到堆石的空隙中, 形成低水化热的大体积混凝土。文章以湾子寨水库廊道施工为例, 阐述了堆石一体化浇筑施工方法及质量控制要点, 分析了此法施工效果。结果表明: 若场地不受限制, 且具备提前预制廊道的条件下, 一体化堆石混凝土浇筑施工, 无须立外侧模板, 工期相对缩短, 大大节约了投资, 保护了环境, 在水利工程建设项目中值得推广。

【关键词】 堆石混凝土; 一体化浇筑; 应用; 坝体廊道; 施工工法

中图分类号: TV640.3

文献标识码: B

文章编号: 1673-8241 (2022) 09-042-04

Analysis on Integrated Placement of Rockfill and Concrete in the Dam Tunnel of Wanzizhai Reservoir

ZHANG Shaoping¹, LI Xijun², AN Xiguang¹

- (1. Yunnan YEIG Yuanda Group Co., Ltd., Kunming 650101, China;
2. Yunnan Provincial Water Conservancy and Hydroelectric Survey Design and Research Institute, Kunming 650021, China)

Abstract: The technology of rockfill concrete is to directly put rockfill into the warehouse, and then pour concrete with high self-compacting performance, fill into the gap of rockfill, forming mass concrete structure with low hydration heat. Taking the tunnel construction of Wanzizhai Reservoir as an example, this paper expounds the construction method and key points of quality control of integrated rockfill placement, and analyzes the construction effect of this method. The results show that if the site is not restricted and prefabricated tunnel is available, the integrated rockfill concrete placement construction without vertical outer formwork can shorten the construction period, save investment greatly, and protect the environment, which is worthy of promotion in water conservancy construction projects.

Key words: rockfill concrete; integrated placement; application; dam tunnel; construction method

收稿日期: 2022-06-02

作者简介: 张绍平 (1976—), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事水利水电工程技术施工与管理工作。

1 概 述

1.1 堆石混凝土 (RFC) 技术定义

堆石混凝土 (RFC) 技术是将堆石直接入仓, 然后浇筑高自密实性能混凝土 (HSCC), 利用其高流动性, 填充到堆石的空隙中, 形成完整、密实、低水化热的大体积混凝土。

1.2 国内工程应用概况

新中国成立以来, 全国已建成堆石混凝土坝 83 座, 在建堆石混凝土坝 37 座。随着堆石混凝土筑坝技术的不断完善, 堆石混凝土坝迎来了建设高峰期。目前, 77m 坝高的溪源水库堆石混凝土高坝已建成。另外, 90m 坝高的松林水库、96m 坝高的清溪水库、102m 坝高的周源水库等百米级堆石混凝土高坝正处在建设之中。

2 工程概况

湾子寨水库位于云南省文山州文山市平坝镇新街乡湾子寨村, 水库由混凝土坝、溢流表孔、消能防冲等建筑物组成, 堆石自密实混凝土重力坝轴线长 157.0m, 最大坝高 44m, 共分为 7 个坝段。1~3 号坝段为左岸非溢流坝段, 4 号坝段为溢流坝段, 5~7 号坝段为右岸非溢流坝段, 坝段长度在 22~25m 之间, 坝顶高程 1816.00m。输水工程由主干管道、右干管道、左干管道、平坝管道、支管、调节池、闸阀室 (坑) 组成, 输水线路全长 18.3km, 总库容 152.6 万 m^3 。湾子寨水库是帮助解决平坝镇、新街乡周围人畜饮水的综合性 IV 等小 (1) 型水库工程。

3 堆石混凝土应用情况

水库廊道工程建设过程中, 将堆石、混凝土浇筑两项重点工序合并施工, 应用堆石混凝土一体化浇筑, 取得了显著效果。

廊道施工时, 首先在底板及部分侧边墙布置钢筋, 预埋排水沟模板后再浇筑高自密实性能混凝土底板。然后在侧边墙、顶拱绑扎钢筋并支立模板, 最后在同一高程范围内, 按 1.5~2m 层高同步上升速度

(见图 1~图 5), 浇筑高自密实性能堆石混凝土。整体浇筑过程中, 在廊道周边预留 30~50cm 区域不堆石。



图 1 底板及部分侧边墙钢筋布置



图 2 高自密实性能混凝土浇筑



图 3 底板人工辅助抹面/底板浇筑成型



图4 侧边墙、顶拱钢筋绑扎及模板支立



图5 堆石混凝土层高同步上升（廊道形成）

4 施工流程及操作要点

4.1 施工流程

堆石混凝土坝廊道一体化浇筑施工流程分为底部钢筋布置、底板浇筑等六个环节（见图6）。

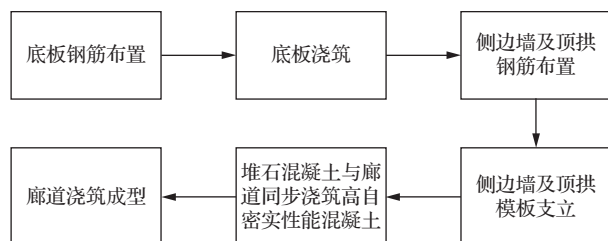


图6 施工流程

4.2 实施操作要点

4.2.1 底板钢筋布置

浇筑斜坡廊道时，其底板需按图纸设计要求完

成台阶及斜坡；浇筑水平廊道时，需人工辅助抹面；堆石混凝土仓内浇筑底板时，可直接在设计高程处布置受力钢筋，并用架力筋固定受力钢筋准确位置（见图7）。



图7 底板钢筋布置和底板处堆石

4.2.2 底板处堆石及浇筑

底板钢筋底部可铺设块石料，两侧堆石时，堆石与钢筋应保持50cm间距（见图7）。

进行斜坡廊道一体化浇筑时，未设外侧模板，需分段、分层浇筑，且在浇筑底板部位时，避免下料点冲击底板浇筑部位，浇筑点应保持与底板距离不小于50cm；平层廊道底板浇筑时，需在高自密实性能混凝土初凝前进行抹面处理，一般控制在浇筑后6~8h内处理完成（见图8）。



图8 底板浇筑

4.2.3 侧边墙及顶拱处堆石

侧边墙堆石应与钢筋保持50cm距离，顶拱处不予堆石，若顶拱高程距离同层仓面顶部不小于50cm，可在廊道两侧预先堆高块石，待顶拱浇筑上升50cm后再将堆石适当抛入侧边墙（见图9、图10）。



图9 侧边墙及顶拱处堆石 (一)



图10 侧边墙及顶拱处堆石 (二)

4.2.4 侧边墙及顶拱处浇筑

浇筑时,混凝土最大自由落下高度不宜超过3m,混凝土浇筑点应均匀布置,间距宜为3~5m。每个浇筑点浇满后方可移动至下一浇筑点。堆石混凝土收仓时,除达到结构物设计顶面外,高自密实性能混凝土浇筑宜使适量块石高出浇筑面50~150mm(见图11~图13)。



图11 侧边墙浇筑 (一)

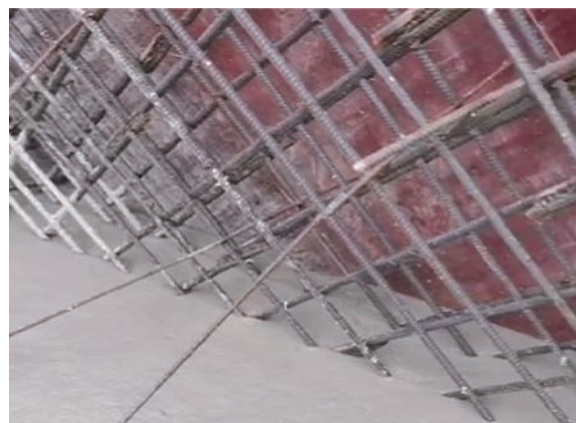


图12 侧边墙浇筑 (二)



图13 顶拱浇筑成型混凝土

5 质量控制

5.1 材料质量控制

对高自密实性能混凝土原材料、配合比、生产和施工各主要环节及硬化后的堆石混凝土质量均应及时进行检查,以加强质量过程控制。浇筑前,需检测高自密实性能混凝土性能指标,不合格混凝土严禁浇筑入仓。

5.2 钢筋与模板报验

钢筋工程完毕后,需尽快向监理单位提交报验申请单,专业监理工程师到现场审核确认后,方可进入下道模板工程工序,模板工程报验后尽快进行混凝土浇筑施工。

5.3 浇筑环节质量控制

廊道边缘堆石过程中,需安排专人指挥,块石与灌浆廊道距离,应控制在30~50cm,(下转第60页)

DOI: 10.16617/j.cnki.11-5543/TK.2022.09.10

仕阳水库精准调度措施探析

王德明 王新昌 赵新昌

(莒县仕阳水库管理服务中心, 山东 日照 276526)

【摘要】 水库作为蓄水兴利和防洪减灾的重要水利工程, 其兴利和防洪调度技术具有广泛性和深入性。文章以莒县仕阳水库调度实际工作为例, 分析了水库调度精准化控制问题, 探讨了小流量、分阶段、预调腾出库容迎汛等防汛防洪调度方式, 以期对优化水库调度提供一种新思路, 为发挥水库经营效益, 提高安全管理水平提供参考。

【关键词】 水库调度; 精准化; 兴利与防洪调度

中图分类号: TV697.1

文献标识码: B

文章编号: 1673-8241 (2022) 09-046-04

Analysis on Precise Scheduling Measures of Shiyang Reservoir

WANG Deming, WANG Xinchang, ZHAO Xinchang

(Juxian Shiyang Reservoir Management Service Center, Rizhao 276526, China)

Abstract: As an important water conservancy project for water storage and beneficial use, flood control and disaster reduction, the technology of reservoir for beneficial use and flood control scheduling is extensive and deep. Taking the practical scheduling work of Juxian Shiyang Reservoir as an example, this paper analyzes the reservoir scheduling precision control problem, discusses flood control scheduling modes such as small flow rate, staged method, preset spare capacity for flood control in order to provide a new approach for optimizing reservoir scheduling, and provide a reference for developing benefits of reservoir operation and improving the level of safety management.

Key words: reservoir scheduling; precision; beneficial use and flood control scheduling

水库具有防洪、供水、灌溉、发电、养殖、改善环境等功能。如何因地制宜做好水库防洪与兴利调度是水库运行管理的关键, 也是新时代经济社会发展的必然要求。近几年, 山东省日照市莒县仕阳水库立足自身工程实际, 探索精准化管理和精准化调度方式, 采用小流量、分阶段、预调腾出库容迎汛等防汛防洪

措施, 既利用小流量放水发电发挥了发电效益, 又能够实现较长时间向下游输送生态补源用水, 改善了下游受益区的水生态质量, 更重要的是, 有效腾出了大汛来临前的水库库容, 使得水库纳蓄水能力和防洪调节能力得到增强, 调度效果非常理想。

收稿日期: 2022-06-23

作者简介: 王德明 (1971—), 男, 本科, 高级工程师, 从事水利工程管理工作。

1 仕阳水库基本情况

1.1 工程基本情况

仕阳水库总库容 1.36 亿 m^3 ，兴利库容 0.6987 亿 m^3 ，水库设计洪水标准 100 年一遇，校核洪水标准 5000 年一遇，坝后水电站 4 台机组总装机 1140kW，设计多年平均发电量 200 万 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。仕阳水库是一座以防洪、灌溉、生态和城市供水为主，结合发电、渔业养殖等综合利用的多年调节大（2）型水库。水库承担着下游 30 万人、24.5 万亩耕地以及许多重要交通基础设施的安全保障任务。

1.2 流域水文和洪水特点

莒县仕阳水库控制流域面积 281km^2 ，其中山区占 70%，丘陵占 20%，平原占 10%，较大支流有 4 条，干流平均坡度 3‰；流域多年平均降水量 781.60mm。多年平均径流量 0.90 亿 m^3 （见表 1）；流域内暴雨面上分布不均，降水量年内分布季节性强，主要集中在汛期 7—9 月，汛期降水量占年降水量的 83%，降水量年际变化大；洪水过程呈陡涨陡落型。这些洪水特点，要求水库必须具有更加准确精细的兴利与防洪调度措施，才能够充分发挥水库工程经济效益，保障工程安全运行。

表 1 莒县仕阳水库历年逐月平均来水量

单位：万 m^3

月 份	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月
来水量	104	99	98	124	228	590
月 份	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
来水量	2339	2171	951	304	229	112

2 仕阳水库功能转变及供水情况分析

莒县仕阳水库传统功能是以防洪和灌溉为主，兼有发电和渔业养殖等综合利用功能。随着新时期社会进步与发展，水库工程功能发生了变化：一是随着下游工农业经济的迅速发展，防洪功能更加突出；二是灌区农业结构从以水稻、小麦等粮食作物为主，转变为以花木、蔬菜大棚等多种经济作物为主，原有的大

水漫灌式灌溉功能基本丧失，转为高效节水式、点需求式灌溉；三是增加了河道生态用水和城市供水功能。这些变化造成了实际用水远远小于原来灌溉用水量，使得年度内可放水量减小，造成水库汛前蓄水位偏高，从而加大了防洪压力。同时，用水时段和用水特性发生了变化，传统的农业灌溉主要在 7、8 两月，占到兴利库容的一半左右，而目前，这两个月已经没有用水需求，而年前的 12 月和当年的 1—5 月需要生态补水，用水特性是流量小、持续时间长，以保持河道良好观感和生态。这些特点就需要对水库进行精准化调度，才既能照顾好用水的方方面面，充分发挥水库兴利效益，又能确保防洪安全。

3 水库调度现状存在的主要问题

3.1 灌溉水量减少导致汛前水库蓄水偏高

如上所述，由于灌区农业产业结构调整，原来传统的小麦冬灌、春灌及水稻的泡田、插秧、灌浆等大用水量逐渐减少，导致水库灌溉用水量减少，近 3 年中，灌溉用水量已接近为零。无用水需求，导致汛前库水位偏高。

水库汛期调度运用计划是从保障水库工程安全出发制定的宏观调控计划，侧重点是超过汛限水位启动溢洪闸溢洪，保证大坝安全。仅按汛期调度运用计划执行防洪调度，一方面造成水利资源浪费，对具有发电功能的水库来说，至少损失了发电经济效益；另一方面使汛前水位偏高，当遇大暴雨洪水时，往往更易造成下泄流量偏大，形成人为洪峰，给下游造成防洪压力。而兴利调度计划往往以保障各单位用水需求为内容，确定的是用水量的安排和保障计划，缺乏对来水和用水进行深度融合的考虑，达不到充分兴利的目的。

3.2 河道生态流量对水库调度提出了新要求

新时期环境治理和水生态维护日趋重要，对供水单位提出了新要求。河道内保持生态流量是绿水青山的根本需要，水库长期以明流形式泄放流量，在提升河道水生态质量的同时，能否做到既能不间断泄放生

态流量，又能利用生态流量放水发电充分兴利，同时在汛前预腾库容，增大水库蓄纳水能力、防洪能力，成为水库调度必须要考虑的问题。

4 水库调度精准化控制适用条件

水库调度是指运用水库调蓄能力，在保证工程安全的前提下，根据水库承担任务的主次，按照综合利用水资源的原则进行调度，达到防洪、兴利的目的。水库调度精准化控制主要是指以防洪为主，兼具灌溉、发电、养殖等功能的综合利用多年调节大中型水库，在批复的汛期调度运用方案和兴利调度计划之下，更好地进行兴利与防洪调度，使水库防洪、经济、生态、社会效益最大化。调度精准化控制主要适用于区域降雨季节性强、汛期时段划分明显、水库具备多年可靠水文资料的大中型水库。

5 水库调度精准化控制措施探析

5.1 兴利与防洪时段分期调度控制

从表1可以看出，年前11月至当年5月，水库来水较少，下游河道天然径流基本能够维持区域生态环境需求；年前的12月和当年的1—4月来水稀少，下游呈现长期断流的干旱状态，属于需要生态补源时间段；7—9月来水占全年来水量的78%，而本时间段一般无供水需求（即使有供水需求也可以通过考虑用来水解决）。因此根据此类情况，年前11月至当年6月重点是兴利调度，通过充分兴利调度降低水库蓄水位，保障后续汛期水库更能充分发挥调蓄能力；而7—10月重点是防洪调度，需紧盯天气变化和来水预报情况，严格控制水库按照汛期控制运用方案调度。因此，6月底至7月初这个时间段就成了兴利调度和防洪调度阶段划分的节点，确定这个时间节点的（仕阳水库以7月1日为时间参考点）水库蓄水状态，就是水库调度精准化分期控制的主要内容。分期节点要根据水库具体的水文特性确定，每年的节点还要根据国家防总或省防总公布的年度宏观汛情预报进行适当修正。

具体调度过程中，兴利调度宜遵循水库蓄水量“前高后低”的原则，尽量延长水库高水位运行时间，这样既能够提高渔业生产效益，又能够增强库区的生态环境。实际操作中，5月以前，仅做到放水满足基本兴利要求，6月份开始要在满足兴利需求放水的基础上，利用发电放水预腾库容，使水库水位达到7月1日计划控制蓄水量。在防洪调度阶段，水库蓄水遵循“由低到高”的原则，进入主汛期，要密切注意天气变化，结合水文预报、中长期天气预报，适时利用电站调节，保持水库蓄水量由低到高逐渐增加，直至汛末达到兴利要求，遇强降雨洪水，应弃则弃，确保按照汛期调度计划执行。根据中短期天气预报和水文预报，预测汛后水库水位不超过汛中限制水位，不调洪；预测汛后水库水位超过汛中限制水位，提前利用电站发电放水调洪，仍不能保证库水位低于限制水位时，尽早开启溢洪闸，首选小流量泄洪，并及时拦蓄尾水。

5.2 兴利与防洪调度蓄水量控制

水库汛期控制运用方案只是着重强调了汛中限制水位、防洪高水位、允许超蓄水位（汛末蓄水位）和下游河道各级安全泄量等指标的控制，在保证工程安全的前提下，保证汛末蓄水达到兴利库容要求。由于历年汛情的复杂性，不可能实现逐一把这些指标和期间对应起来，往往产生一定水资源浪费或者汛末不能蓄满库的现象。但从水库历年来水和调度情况分析，每个水库也都有各自的来、出水规律。兴利与防洪调度蓄水量控制就是利用这种规律，可确定一个既能满足兴利，又能满足防洪界点的水库蓄水量，作为精准化调度控制参数。

界点蓄水量的确定方法：7月1日为仕阳水库时间节点，水库蓄水量为控制兴利与防洪调度的蓄水量界点值，这个界点值至少要满足三个要求：一是满足防洪要求，即7月1日水库蓄水量低于汛中限制水位相应蓄水量；二是满足兴利要求，7—9月来水占全年的78%，为满足兴利需要，考虑75%的年来水保证率，那么设计年7—9月的来水量为 $78\% \times 75\% =$

58.5%的全年来水量,设计7月1日蓄水量加上58.5%的全年来水量(历年7—9月平均来水量之和)再减去7—9月用水量的值不低于汛末允许蓄水量(兴利库容+死库容);三是统计历年有弃水年份的7月1日水库蓄水量,求得弃水年历年7月1日水库平均蓄水量,做到设计年7月1日水库蓄水量不大于弃水年历年7月1日水库平均蓄水量。通过上述三方面的整合推求,就可确定一个蓄水量数值作为兴利与防洪调度控制的蓄水量参数。以此确定仕阳水库7—9月电站调节能力为100万m³/d,确定设计年7月1日水库蓄水量为死库容+50%的兴利库容。

5.3 兴利与防洪调度流量控制

兴利调度流量控制,以满足兴利目标为主,结合河道生态维护需要(延长下游河道明流时间),宜选择小流量长时间输送,同时还要满足电站运行管理的需要。仕阳水库把年前12月和当年1—6月分成四个供水时期,每个供水时期10—15天,放水流量宜满足电站2台以上机组运行需要,一般放水流量6~8m³/s,至7月初基本能够达到防洪要求的蓄水量目标。

防洪调度流量控制,宏观上以汛期控制运用方案制定的调度原则进行,然后遵循以下原则进行调度控制:一是防洪调度宜早不宜迟原则,提前调度可以实现下泄流量较小;二是坚持首先考虑利用发电调洪再考虑溢洪闸泄洪的原则,这样能够实现渔业资源损失的减免和发电效益;三是错峰原则,考虑区间洪水叠加对于下游防洪影响;四是先小后大原则,能够控制在子河行洪的尽量不超子河,能够控制在河槽行洪的尽量不超河槽(按照安全泄量等级逐级控制调度),遇非常洪水,也要根据具体洪水预报充分利用水库调节能力逐级确定下泄流量,确保工程和下游全面安全。

6 精准调度效果分析

水库蓄洪水总量是年初蓄水量与当年来水量总和,而兴利水利用率主要包含发电用水量与蓄洪水总量的相关内容。仕阳水库采用精准调度措施,最大化利用了水资源,保证了水库工程功能的充分发挥。从截取的近年仕阳水库调度运用情况表(见表2)中分析发电用水量、兴利水利用率、最大溢洪闸泄量,可以看出年度水库调度水平,已达到优化调度最理想状态。

表2 莒县仕阳水库调度运用情况(部分)

年份	年初蓄水量/ 万m ³	年来水量/ 万m ³	蓄洪水总量/ 万m ³	7月初蓄水量/ 万m ³	发电用水量/ 万m ³	溢洪闸弃水量/ 万m ³	兴利水利用率/%	最大下泄流量/(m ³ /s)
2016	6159	5322	11481	1915	4279	0	100	0
2017	5755	3899	9654	3314	2896	0	100	0
2018	6758	11289	18047	4673	6920	4315	76.1	252
2019	6812	5727	12539	3234	6682	681	94.6	48
2020	5176	11156	16332	3284	5399	3732	77.1	120
2021	7201	6515	13836	3733	6520	195	98.6	33

7 结 语

多年来,仕阳水库坚持科学精准调度控制,取得了一定的经济效益和社会效益。但每个水库地理环境、流域特性等千变万化,每年的气候、降水也复杂多变,不存在两个相同的水库工程,也不存在两个相同的水文年。因此,本文探讨的水库优化精准调度的思路和

方法,不一定每座水库都适用。每座水库只有因地制宜、与时俱进地分析、研究适合自身水库的年度调度控制方式、方略,才能做好水库运行调度工作。▲

参考文献

程春田,李登峰. 水库防洪调度模糊迭代方法及应用[J]. 水利学报, 1999(8):16-20.

运行管理

小型水库拱坝安全鉴定勘察问题分析

王晨浩 陈建辉

(中水北方勘测设计研究有限责任公司, 天津 300222)

【摘要】 为保障小型拱坝水库的安全运行, 保证农田灌溉和农村安全饮水, 提升我国小型病险水库除险加固的勘察质量和水平, 文章列举了3座小型拱坝安全鉴定勘察情况, 揭露了小型水利工程建设过程和运行过程中存在的不同程度的安全隐患。文章总结了小型拱坝勘察的实践经验, 预测了拱坝运行中可能存在的问题, 展望了安全鉴定、除险加固勘察发展趋势与方向, 可为水库除险加固和运行管护工作提供一定的借鉴。

【关键词】 小型拱坝; 安全鉴定; 除险加固; 勘察

中图分类号: TV642.4

文献标识码: B

文章编号: 1673-8241 (2022) 09-050-07

Analysis on Safety Appraisal Investigation Problem of Small Reservoir Arch Dam

WANG Chenhao, CHEN Jianhui

(Zhongshui North Engineering Research Co., Ltd., Tianjin 300222, China)

Abstract: The safety investigation and survey condition of 3 small arch dams are adopted as examples in the paper in order to guarantee safe operation of the small arch dam reservoir, farmland irrigation and rural security drinking water, and promote the survey quality and level of risk removal and reinforcement in dilapidated small reservoirs in China, thereby revealing safety hidden danger of different degrees during construction and operation of small water conservancy project construction. The unique and rare practical experience of small arch dam survey is summarized in the paper. The possible problems in the operation of arch dams are predicted. The development trend and direction of safety appraisal and safety reinforcement survey are outlooked, thereby providing certain reference for reservoir risk removal reinforcement and operation management work.

Key words: small arch dam; safety appraisal; risk removal and reinforcement; investigation

1 概述

截至2021年底,我国现有各类水库9.8万多座,

其中,小型水库9.4万多座。这些小型水库在为当地群众生产生活提供水源保障的同时,也是水旱灾害防御、农田灌溉和农村安全饮水的重要水利基础设施。

收稿日期: 2022-04-15

作者简介: 王晨浩(1989—),男,本科,工程师,主要从事水利水电工程地质勘察、地质灾害方面工作。

绝大多数小型水库修建于 1950—1970 年间，由当地投工投劳兴建而成。小型水库普遍存在工程标准低、建设质量差、老化失修严重等问题，且经过数年运行，小型水库存在不同程度的安全隐患。1998 年以来，中央和地方不断加大投入力度，开展病险水库除险加固。截至 2020 年底，对超过 6.9 万座小型病险水库进行了除险加固，切实保障了水库安全，有效发挥了水库防洪、供水、灌溉等综合效益^[1]。

按照“十四五”期间水库除险加固和运行管护的总体要求，到 2022 年底前，完成小型水库除险加固项目遗留问题处理；完成对已到安全鉴定期限的水库安全鉴定任务；对乡镇村组分散管理的小型水库，实行政府购买服务、“以大带小”等专业化管护模式。到 2025 年底前，完成现有病险水库除险加固和每年安全鉴定后新增的病险水库除险加固，确保水库安全运行；完善雨水情测报、安全监测设施，健全水库运行管护长效机制^[2-3]。

水库安全是关系社会公共安全的一项系统工程，保障众多小型水库安全则是重点之一。本文结合此历年小型水库大坝安全鉴定、除险加固工作经验，以浙江省 3 座典型小型拱坝水库安全鉴定勘察实例为切入点，总结小型拱坝勘察实践经验，为进一步保障小型拱坝水库的安全运行，提升我国小型病险水库除险加固的勘察质量和水平提供借鉴。

2 小型拱坝水库特征

2.1 拱坝类型

拱坝是一种建筑在峡谷中的拦水坝，做成水平拱形，凸边面向上游，两端紧贴着峡谷壁。在平面上向上游弯曲，呈曲线形，能把一部分水平荷载传给两岸的岩体，是一个空间壳体结构^[4-6]。

根据拱弧半径和拱中心角的不同，可划分为单曲拱坝、双曲拱坝。结合工程实际，现状多为双曲拱坝（本文中的 3 座典型小型拱坝坝型均为双曲拱坝），见图 1、图 2。

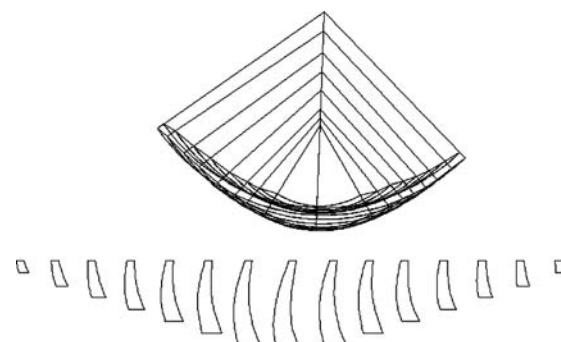


图 1 铁场水库双曲拱坝示意图



图 2 铁场水库双曲拱坝

2.2 小型拱坝水库特征

小型水库相比大、中型水库来说，往往具有建设年代较早，设计标准偏低，使用功能单一，控制运用简单，结构型式固定，施工质量不明，规模大小不一，效益千差万别的特点。

小型拱坝监测设施往往落后于大、中型拱坝，缺少扬压力、漏水量、坝体拱座变形、坝体接缝、坝基及坝体的应力、应变等一系列的观测管理设备^[7]，往往维修养护不及时，存在“重建轻管”“以建代管”的现象。

小型水库为当地群众生产生活提供水源保障，是水旱灾害防御、农田灌溉和农村安全饮水的重要水利基础设施，水库安全是关系到社会公共安全，小型水库大坝安全鉴定、除险加固^[8]也是“十四五”期间对水库运行管护总体要求的重要内容。

3 甘溪水库拱坝安全鉴定勘察分析

3.1 工程概况

甘溪水库（见图 3、图 4）位于临安区，坐落于天目溪支流丰陵溪上，坝址以上集雨面积 19.60km²，

是一座兼顾防洪、灌溉、发电等综合利用的小（1）型水库，工程等别为Ⅳ等，坝高 41m，坝型为混凝土双曲拱坝，水库总库容 236.29 万 m³，常水位库容 196.85 万 m³。

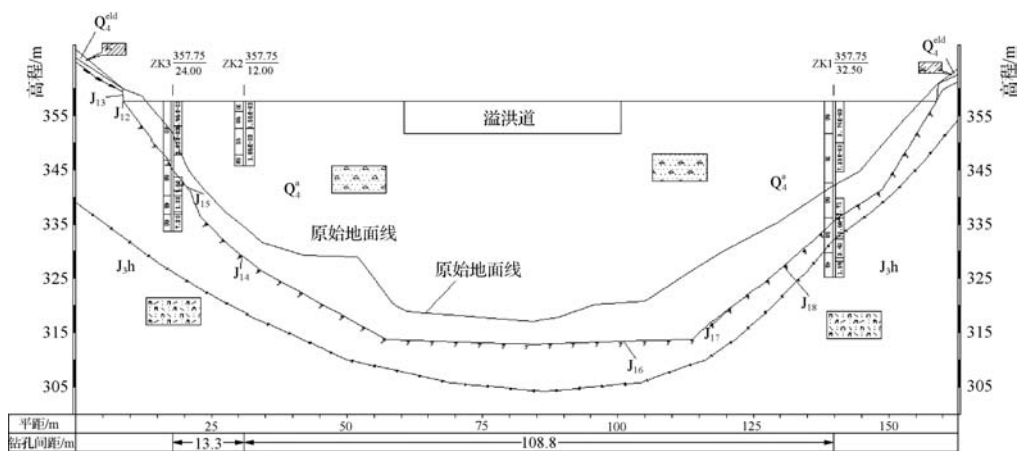


图 3 甘溪水库双曲拱坝轴线剖面

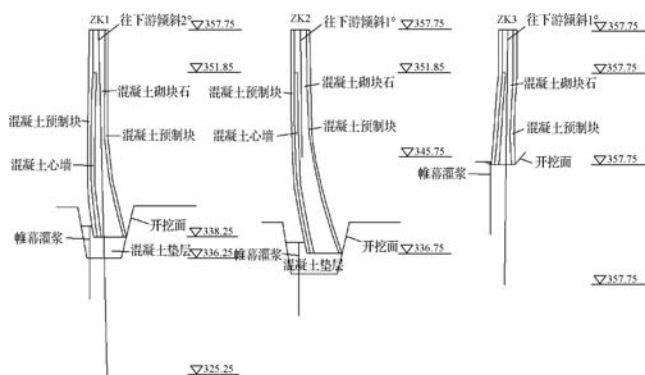


图 4 甘溪水库双曲拱坝横剖面

拱坝始建于 20 世纪 80 年代初期，1998 年曾对大坝迎水坡进行喷浆处理，后经过几十年的运行，在坝体及坝基不同部位出现了渗漏，渗漏量随季节及库水位高低发生变化，并有逐年加大趋势，致使拱坝存在安全隐患，后经过安全鉴定，于 2019 年底完成除险加固工作。

3.2 坝体安全鉴定评价

甘溪水库的坝体主要由两侧混凝土预制块、混凝土心墙和混凝土砌块石组成，下部有混凝土垫层和帷幕灌浆。水库拱坝坝体单薄，坝体易受外界环境的影

响，从而引发裂缝、漏水等问题。

坝体喷浆前渗漏严重，库内水面（高程 345.0m）以上上游坝面未见明显裂缝，迎水坡中上部为混凝土面板，下游坝面局部有轻微裂缝及渗水现象，主要分布于下游坝面下部。

混凝土单轴饱和抗压强度为 30.5 ~ 65.0MPa，基本满足原设计要求。坝体块石料粒径较大，为 20.0 ~ 50.0cm，级配差，混凝土胶结差，局部有空洞现象，埋石占整体混凝土的 33% ~ 38%，块石表面有风化锈着现象，坝体混凝土浇筑质量较差。

坝体见多处漏水点，左、右坝肩有明显的喷水现象，且喷水位置呈带状分布，主要位于坝体表面预制块结合部。根据坝体钻孔注水试验，坝体混凝土不起防渗作用，左坝肩主要渗漏位置为坝顶以下 8.0m 内，右坝肩渗漏位置主要为坝顶以下 7.0m 和 12.0m 处。上游坝面上部未设置混凝土面板，钻进过程中上部漏水严重，存在坝体渗漏问题。

3.3 坝基安全鉴定评价

大坝坝基下伏基岩为侏罗系上统黄尖组（J₃h）

熔结凝灰岩，灰绿色，块状构造，等粒结构，新鲜岩石致密、坚硬。

左坝肩及左坝段下伏揭露基岩较为完整，裂隙发育较少，岩体以微风化为主。基岩透水率 $q = 1.32 \sim 7.62\text{Lu}$ ，属弱透水性，坝基存在渗漏问题，建议采取相应措施，完善防渗体系。

右坝肩及右坝段下伏揭露基岩较为破碎，裂隙较多，倾角多为 45° 左右，岩石以弱风化为主，含锈染。基岩透水率 $q = 1.59 \sim 3.40\text{Lu}$ ，属弱透水性，但现场有渗漏现象，存在渗透问题。

两坝肩岩体以弱风化、微风化岩石为主，不存在

坝肩顺层滑动的裂隙面，不存在坝肩抗滑稳定问题。

4 天竺水库拱坝安全鉴定勘察分析

4.1 工程概况

天竺水库（见图 5、图 6）位于舟山市普陀山北部，是一座为普陀山旅游区供水的小（2）型水库。水库大坝上游为佛顶山，下游临海。库区山坡林木茂盛，水库集水面积 0.56km^2 （其中自身 0.35km^2 ，引水 0.21km^2 ），最大坝高 27m ，坝顶弧长 148.5m ，正常蓄水位 32.0m ，相应库容 19.2万 m^3 ，总库容 20.4万 m^3 。

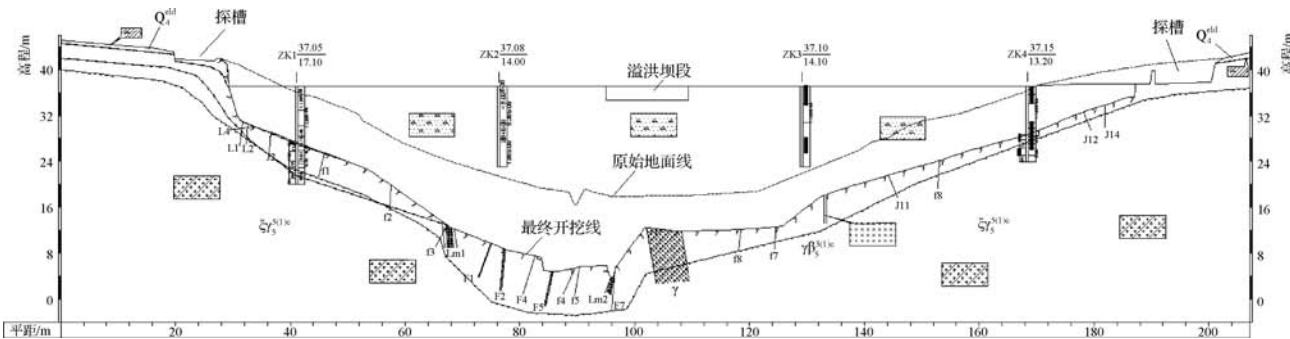


图 5 天竺水库双曲拱坝轴线剖面

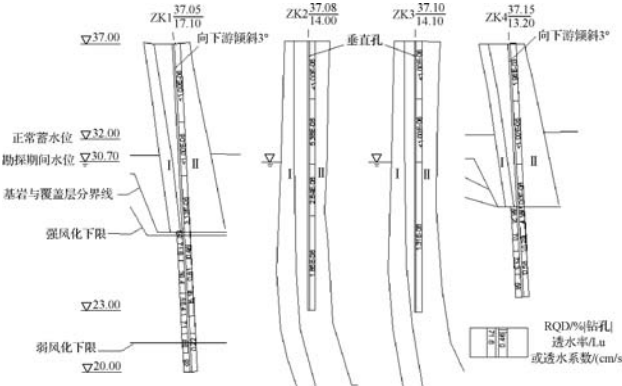


图 6 天竺水库双曲拱坝横剖面

大坝于 1984 年 11 月开工，于 1987 年 4 月竣工，水库防洪要求已达到 200 年一遇，已运行 20 余年。坝型为混凝土双曲拱坝，坝顶宽为 2m ，宽高比为 0.129 ，属薄拱坝。水工建筑物主要由溢流坝段、非溢流坝段、涵管及泵站等组成。

4.2 坝体安全鉴定评价

在右坝肩距坝顶 $1.4 \sim 2.0\text{m}$ 的施工分缝处混凝土坝身向上游有漏水现象，高水位时两坝肩距坝顶 2.0m 的施工分缝处混凝土坝身向下游局部有漏水现象，建议进行处理。大坝坝体伸缩缝处，高水位时有少量渗漏，此现象已多年存在，未见增大。

大坝坝型为混凝土双曲拱坝，坝体由 I 层混凝土和 II 层埋石混凝土组成，坝体防渗系统主要由 I 层混凝土组成。II 层埋石混凝土一般呈极微透水—微透水，满足原设计防渗要求，仅右坝肩顶部局部属中等透水，局部有振捣不实现象，建议进行处理。

坝体埋石混凝土，岩芯完整，浇筑时，振捣较实，防渗性较好。混凝土饱和抗压强度为 $35.2 \sim 68.2\text{MPa}$ ，平均 44.7MPa ，基本满足原设计要求。

4.3 坝基安全鉴定评价

大坝坝基已开挖至基岩，下伏Ⅲ层基岩一般为钾长花岗岩 ($\xi\gamma_5^{3(1)d}$)，局部可见细粒花岗岩 ($\xi\gamma_5^{3(1)d}$)、辉长辉绿岩 ($\gamma\beta_5^{3(1)a}$) 及蚀变软弱带。

大坝坝基下伏基岩透水率一般为 0.20 ~ 0.81Lu，属微透水，左坝肩 11.2 ~ 15.2m 处透水率为 5.18Lu，大于 5.0Lu，为弱透水，建议进行处理。I 层混凝土和Ⅲ层基岩接触段透水率为 0.48 ~ 4.16Lu，属微透水—弱透水，基本满足抗渗要求。

在坝址区未见规模较大断裂，小断层和构造裂隙较为发育。③坝基坑内有断层 7 条 ($F_1 \sim F_7$)，除 F_7 断层位于左坝肩外，其余均集中在河床坝基；④坝基坑内有小错动 8 条 ($f_1 \sim f_8$)，均基本顺河向，为高倾角断裂构造，一般宽仅 5cm，局部宽度为 20cm，一般有构造碎裂岩、糜棱岩充填，这些小错动一般在嵌槽底显著变窄或趋于尖灭；⑤坝基内有节理密集带 2 处： L_{m1} 密集带宽 2.0 ~ 3.0m，主要由一组节理密集而成，节理产状：355°，NE \angle 85°，间距 3.0 ~ 5.0cm； L_{m2} 位于河床坝基 F_6 断层之上盘，带宽 1.0 ~ 2.0m，主要由一组张扭性节理密集而成，节理产状：318°，SW \angle 77°，间距 5.0 ~ 20.0cm；⑥坝基内构造节理普遍发育 ($J_1 \sim J_{13}$)，以高倾闭合节理为主，也见有一些张开裂隙 ($L_1 \sim L_{11}$)，一般宽 2 ~ 10mm，有风化、岩屑充填或无充填，其中 L_5 、 L_6 、 L_7 、 L_9 、 L_{10} 和 L_{11} 为缓倾裂隙，倾角 6° ~ 25°。

根据现有资料及现场调查，主要工程地质问题在施工阶段已经做了相应的处理。

a. 抗滑稳定问题处理措施。两坝肩均有缓倾角夹泥裂隙，尤其在实测高程 33m 以上较为发育，呈成组出现，间距 0.5 ~ 1.0m。两坝肩勘探竖井查明，在实测高程 32m 以下缓倾角裂隙减弱以至消失，岩体趋于完整，呈弱风化。坝基已经过开挖深处理，改善了稳定条件。

b. 基础嵌槽开挖与处理。左坝肩基础岩石经过开挖后达到弱风化中下部，性质较差的蚀变软弱带已

经过开挖深处理，顺河向的小错动 f_1 、 f_2 、 f_3 和张开裂隙 L_1 、 L_2 及节理密集带 L_{m1} 等开挖刻槽凿深 0.5m 以上，并用砂浆勾缝及混凝土回填捣实。右坝肩基础岩石经过开挖后较新鲜完整，达到弱风化下部，其中，“拱 1”附近缓倾裂隙 L_{11} 、侧向陡倾节理 J_{12} 和 J_{13} 以及后缘 F_7 断层等结构面组成的不稳定体，已经挖除。河床坝基右侧岩石经开挖后较新鲜完整，达到弱风化下部，左侧断层构造较发育，已经用混凝土塞做了专门性处理。

c. 重力墩基础开挖与处理。左右重力墩基础已经挖除了强风化层和缓倾角夹泥裂隙带，置于较为新鲜完整的弱风化下部岩体上。其中，左重力墩已开挖至实测高程 32.0m，右重力墩已开挖至实测高程 32.5m，开挖后边坡为 1:0.5。

d. 坝基渗漏与渗透稳定处理。左侧河床坝基由于顺河向断裂发育集中，成为严重渗漏通道。开挖深 10.0m 以下，对断层 F_5 、 F_6 在靠近迎水坡面处分别加挖防渗井处理。其中 F_5 防渗井实际挖深 1.9m，井长 2.5m，宽 1.0m，开挖后宽度为 20cm， F_6 防渗井挖深 2.05m，井长 1.5m，宽 0.6m，开挖后断层近乎尖灭。随后对两防渗井进行砂浆勾缝，并用混凝土回填。其余断层和小错动也做了刻槽凿深处理。

因此不存在坝肩及坝基抗滑稳定问题。

5 铁场水库拱坝安全鉴定勘察分析

5.1 工程概况

铁场水库（见图 7、图 8）位于浙江省苍南县，水库集雨面积 4.52km²，水库正常蓄水位以下库容为 115 万 m³，总库容 143 万 m³。挡水建筑物大坝为变中心角变半径浆砌石双曲拱坝，为 4 级建筑物，拱坝坝高 28.5m，坝顶高程为 98.5m，坝顶外弧长 199.2m，中心角为 99°，坝顶宽 2.5m，坝底高程为 70.0m，坝底厚 7.5m，宽高比 0.263，弧高比 4.18。水库是一座以防洪、供水为主，结合灌溉、发电的小（1）型水库。

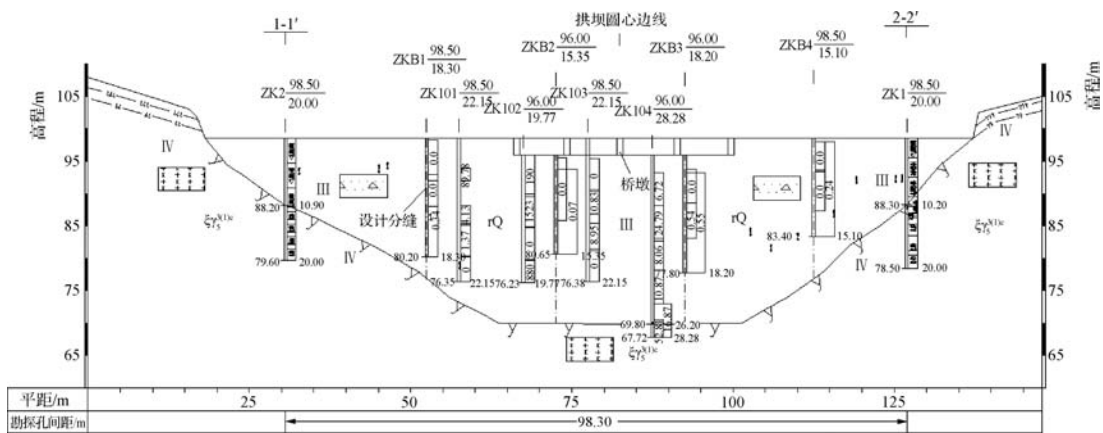


图7 铁场水库双曲拱坝轴线剖面

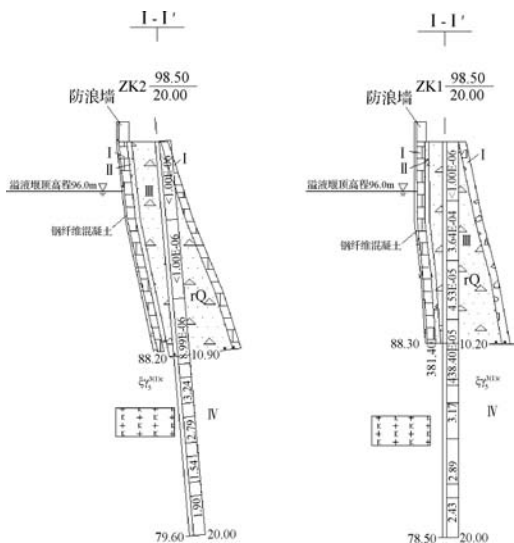


图8 铁场水库双曲拱坝横剖面

水库于1997年10月开工，在坝基开挖中，对坝轴线作了适当调整，大坝整体向上游平移了6m，大坝于1999年上半年基本建成。大坝在试运行过程中，发现存在裂缝和漏水，并且下游坝面出现较大面积的白色游离钙析出物。2002年1月对大坝进行取芯鉴定，并对大坝的坝型和应力状态进行复核计算和相关分析，4月完成对大坝封拱灌浆的施工。

5.2 坝体安全鉴定评价

大坝坝型为浆砌石双曲拱坝，坝体填筑材料由Ⅰ层浆砌条石、Ⅱ层C20混凝土，Ⅲ层C15埋石混凝土组成。

坝体填筑质量：大坝坝体填筑材料由Ⅰ层浆砌条

石、Ⅱ层C20混凝土，Ⅲ层C15埋石混凝土组成。Ⅰ层浆砌条石砌筑紧密；Ⅱ层C20混凝土胶结好；Ⅲ层C15埋石混凝土振捣较密实，混凝土胶结一般，局部存在因振捣不实而形成的空洞及竖向缝隙，空洞及缝隙发育不大，且不具贯通性。

坝体防渗质量：坝体Ⅲ层C15埋石混凝土属微透水—弱透水，仅钻孔ZK1孔深5.10m处属中等透水，Ⅲ层属微透水—中等透水，局部属强透水。

大坝防渗体系由Ⅱ层C20混凝土及防渗帷幕组成，考虑Ⅱ层混凝土的厚度及功能，历次勘察均未进行钻探。坝踵处未发现明显渗水现象，钻孔实测稳定水位均位于基岩面处，分析Ⅱ层C20混凝土防渗墙整体防渗效果良好。

大坝坝体下游背水坡坡面存在多处渗水点。推测施工缝存在渗漏问题，通过Ⅲ层渗出坝体，致使背水坡出现渗水点，也不排除个别渗水为降水渗入Ⅲ层埋石混凝土，形成渗水点。

5.3 坝基安全鉴定评价

大坝坝基已开挖至微风化基岩，基岩为燕山晚期第三次侵入的钾长花岗岩（ $\xi\gamma_5^{3(1)}c$ ）。Ⅲ层C15埋石混凝土与Ⅳ层坝基基岩接触带属微透水—弱透水。混凝土与基岩接触段胶结较好，局部接触段基岩节理较发育，透水率较大。根据本次勘察，微风化基岩属弱透水，不存在坝基渗漏及绕坝渗漏问题。

两坝肩节理多闭合,无充填,陡倾角,延伸短。坝体施工时已对较不利结构面进行施工处理。不存在坝基抗滑稳定问题。

6 小型拱坝水库安全鉴定勘察总结

a. 小型拱坝水库往往因修建年代早,存在工程标准偏低、建设质量偏差、老化失修严重等问题,存在不同程度的安全隐患,其安全鉴定勘察中需通过询问走访建年代背景、基础资料,补充工程地质测绘等方式,进行复核基础地质条件,复核稳定计算等工作。

b. 小型拱坝坝体薄,多由混凝土、埋石混凝土、浆砌条石等建筑材料组成,受制于修建年代,往往会出现建筑材料老化、局部脱空、振捣不实等现象,致使防渗效果变差。与此同时,坝体施工多分缝处理,运行多年后,分缝间止水受热胀冷缩影响,出现分缝间渗水、喷水等安全隐患,但往往不涉及坝体结构安全。坝体勘察期间应尽可能在充分研究设计坝体结构后布置相应的勘察工作,勘察期间需要时刻保护坝体结构,尤其是坝体防渗结构。

c. 小型拱坝坝基往往坐落于地质条件相对较好的地段,其安全鉴定勘察中需对坝基工程地质条件进行复核测绘工作,并结合前期竣工资料或对施工负责人、参与者进行的走访问询,对现状坝基及坝肩渗透稳定、抗滑稳定等进行复核。同时,拱坝坝体运行多年,勘察期间需对坝基工程地质条件进行复核,尤其是坝基及坝肩岩体风化程度、裂隙发育程度、坝基与岩体透水性等变化。

7 现状分析与展望

a. 小型拱坝安全隐患往往突出体现为坝体渗水、坝基坝肩抗滑性差等问题,因拱坝坝体单薄,各类问题往往比较直观显示在坝体背水坡面、坝肩镇墩附近。小型拱坝水库的管理需尽可能多安排安全巡视稽查,各类台账数据需保存完整,随时为水库安全鉴定、除险加固勘察做准备。

b. 常见拱坝大都以双曲拱坝为主,坝体往往较薄弯曲,勘察常用手段中,钻探往往以直线钻进为主,无法做到沿坝体曲线钻进,从而无法准确获得整个坝体的数据,与此同时,物探检测在单薄、陡峭场下的效果往往也差强人意。希望不久的将来会涌现出更多的勘察方法、设备以满足拱坝的安全鉴定、除险加固勘察要求。

c. 小型拱坝坝体本身在防渗、抗滑等方面起着至关重要的作用,在坝体老化、年久失修的情况下,往往需要定期进行安全鉴定或除险加固工作。每次安全鉴定、除险加固勘察中,都应尽可能少地扰动拱坝坝体,应尽量防止勘察期间因钻探、压水试验等工作对坝体造成不可逆的损伤,导致形成新的安全隐患,勘察完成后要严格控制破坏部分的修复工作。

d. 大数据和人工智能在当代发展迅速,近年来这两个领域的研究相互交叉促进,产生了很多新的方法和应用技术。小型拱坝安全监测手段应与时俱进,融入更多新的监测设施和方法,如智能传感器、数据采集系统、综合自动化系统、视频图像监控、人工与智能相结合的新型安全报警体系等,不断开拓进取,确保拱坝安全。▲

参考文献

- [1] 熊岩. 小型病险水库除险加固设计常见问题分析[J]. 水利技术监督, 2020(3): 30-34.
- [2] 王晨浩, 章健. 某混凝土面板堆石坝安全监测现状分析[J]. 低温建筑技术, 2016, 38(9): 120-123.
- [3] 赵志仁, 徐锐. 国内外大坝安全监测技术发展现状与展望[J]. 电力系统自动化杂志社, 2010, 34(5): 52-57.
- [4] 中华人民共和国水利部. 混凝土拱坝设计规范: SL 282—2018[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2018.
- [5] 湛海, 王铂. 小型拱坝抗滑稳定及坝体应力分析[J]. 萍乡高等专科学校学报, 2007(6): 51-55.
- [6] 陈昌平. 二滩水电站拱坝坝基岩体工程条件[J]. 水电站设计, 1998(3): 67-71.
- [7] 中华人民共和国水利部. 混凝土坝安全监测技术规范: SL 601—2013[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- [8] 中华人民共和国水利部. 中小型水利水电工程地质勘察规范: SL 55—2005[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.

经验交流

潜孔锤钻孔技术在营岔调蓄水池工程中的应用

隗永龙 刘光林 李 旭

(北京金河水务建设集团有限公司, 北京 102206)

【摘 要】 营岔调蓄水池工程是北京 2022 年冬奥会和冬残奥会张家口赛区的重要组成部分。工程特点是蓄水池开挖深度大, 地下水位高, 根据地质勘察情况, 蓄水池开挖前进行了降水施工, 保证了开挖及防渗体系的顺利实施。文章介绍了 2022 年冬奥会和冬残奥会张家口赛区营岔调蓄水池工程中潜孔锤钻孔降水井施工的具体方法及应用参数。

【关键词】 冬奥会; 潜孔锤; 应用

中图分类号: TV213.9, P634.5 文献标识码: B 文章编号: 1673-8241 (2022) 09-057-04

Application of Drilling Technology with Dth Hammer in Yingcha Regulating Reservoir Project

WEI Yonglong, LIU Guanglin, LI Xu

(Beijing Jinhe Water Construction Group Co., Ltd., Beijing 102206, China)

Abstract: Yingcha Reservoir Project is an important part of Beijing 2022 Winter Olympic and Paralympic Zhangjiakou Division Area project. The project is characterized by large reservoir excavation depth and high underground water level. Precipitation construction is carried out before the excavation of the reservoir to ensure smooth implementation of excavation and anti-seepage system according to the geological survey condition. The concrete construction method and application parameters of the dewatering well of DTH hammer drilling in Yingcha Reservoir Project of Zhangjiakou Division during 2022 Olympic and Paralympic Winter Games.

Key words: Winter Olympics; DTH hammer; application

张家口赛区营岔调蓄水池工程范围内, 地质情况复杂, 地下水位高, 施工现场部署紧凑, 水电供应困难, 且工期十分紧张。由于工程需要进行降水作业,

依据上述条件, 采用了潜孔锤成孔的方式进行降水井施工。潜孔锤根据传动方式的不同, 可分为气动和液压两种类型。本工程所采用的气动潜孔锤是利用钻杆

收稿日期: 2022-05-30

作者简介: 隗永龙 (1989—), 男, 本科, 工程师, 主要从事水利工程建设管理工作。

的旋转力,在潜孔锤的撞击力与破坏围岩的钻头共同作用下完成钻进,将滤水钢管同步埋设安装的施工方法^[1]。此工艺适用于多种复杂地质的钻进施工,而且相比其他钻进方法,钻进效率明显提高。

1 工程概况

1.1 工程概述

张家口赛区营岔调蓄水池工程是2022年冬奥会和冬残奥会崇礼赛区建设工程的重要组成部分,工程主要由蓄水池、沉沙池、泵站、净化池等组成。需要建造6座蓄水池,提供冬季滑雪场造雪用水,其中一个大蓄水池,蓄水容量约20万 m^3 ,最大开挖深度19m,同时兼顾场区景观效果即“澄福砚”景观;另外5个蓄水池蓄水容量一共约5万 m^3 ,最大开挖深度12m。边坡的运用条件属于正常运用条件^[2]。受地质条件和地下水位影响,采用潜孔锤进行降水井施工,以提高施工速度和成孔率。本工程共完成降水井施工134眼,总米数2680m。

1.2 地质及地下水情况

工程位于崇礼区东南部的古杨树村西侧的低中山区太子城河上。场地复杂性和地基复杂性均为二级。场区分布的岩石主要为卵石和不同风化程度的花岗岩。大蓄水池土层厚度约8.5m,小蓄水池平均土层厚度约6m,土层以砂砾为主,土层以下均为岩石。稳定的地下水位为0.50~9.90m,松散岩土类型的孔隙水是地下水的的核心类型。水在土体、岩石缝隙中的渗流,一方面会引起水量损失或基坑积水,影响工程效果和速度,另一方面将引起土体变形,降低稳定条件^[3],因此需要降低地下水位。

1.3 社会环境

蓄水池为冬奥会和冬残奥会造雪的必要工程,工程进度直接影响造雪和测试赛的时间。而且本工程开工时间较晚,大蓄水池及1号、2号小蓄水池还要提前蓄水,工程量很大,工期十分紧张。降低地下水位是开挖工作的必要条件,因此,选取合理的施工工艺缩短降水工期十分必要。

2 施工工艺原理

潜孔锤采用风动潜孔锤,降水井钻进和滤水钢管安装同步进行。利用SL600型钻机的回转力和潜孔锤的冲击力共同形成动力,进行土层和岩石的破碎,利用空压机提供的风能将碎渣吹出孔外。

空压机为潜孔锤提供动力以产生冲击能量,传递给专用钻头形成冲击力,钻机带动钻杆形成旋转力,与冲击力共同作用,破碎岩石完成钻进。由冲击装置排出的压缩气体作为洗井介质,把通过潜孔锤冲击、回转破碎的碎石和粉末吹出孔外从而实现在土体、岩体成孔。

钻孔时,利用偏心钻的冲击力带动钢管与钻孔同时推进,钻出的岩屑吹送至孔外,降水井达到要求深度后,把内钻杆与偏心扩孔钻头反转,将扩孔钎头收进中心位置后,从滤水钢管内拔出。

3 潜孔锤钻孔施工技术

为保证降水达到预期效果,在基坑周边环向布置管井,构成封闭降水体系,井中布置自动化水泵,并使用水泵将地下水抽出,以实现阻截蓄水池基坑外围地下水进入基坑的目的,同时也能满足降低地下水位的要求。

根据设计深度及相关参数,确定降水井井距为15m,降水井深为20m,施工时根据降水效果增加了降水井^[4]。井管采用 $\phi 273$ 桥式滤水钢制管道,排水总管为直径400mm的PVC管,并根据现场排水口情况,沿降水井周围布设,排水管按照一定的坡度布置。为减少资源浪费,抽取的地下水用于钢筋混凝土养护、防尘、冲厕、清洗工地车辆等;蓄水池防渗结构完工后,将地下水排入湖中蓄集,作为造雪水源。

3.1 施工工艺

施工机械设备进场后要提前做好机械设备进场检验登记并存档,检验合格的机械设备可投入使用。表层杂草清理干净后,将设备基础平整夯实,局部淤泥要进行开挖换填,以确保钻进过程中设备的稳定。

通过计算,降水井的布置间距顶为15m,局部位

置按照实际需求进行加密。北侧沿建设范围线以外 5m 进行布置,其他方向沿现状基底线范围环形布置,根据设计单位提供的测量控制点以及现场布置条件,利用 GPS 测放所有井位及标高^[5],测量完毕后在确定好的降水井位置标记清楚。

钻孔前要进行测试试验。试验中应确保提供压力平稳的空气源,试验时用专用击锤,锤头下铺垫一块厚硬木板,试验过程中轴压的确定,要以冲击器不脱离锤头,锤头不脱离硬木为准^[6]。钻孔施工采用 SL600 型钻机配置气动潜孔锤成孔,局部水量较大的位置增加降水井深度。降水井井管采用 273 型桥式滤水钢管。井孔外形应保持圆正,方向垂直,且降水井深与设计井深之间的最大偏差不得大于 300mm。潜孔锤

钻进时,用钻头将过滤水的钢管下入井中,用过滤水的钢管固定孔壁。

降水井滤水钢管下入后立即填入直径为 3~7mm 干净砂卵石作为滤土材料,滤料中的杂质含量要小于 3%。滤料填筑时,应由人工用铲子沿井孔的四周缓慢均匀填入。在滤料填筑完毕之后,要对降水井进行清洗,清洗利用水泵抽出,抽停循环,直到抽出的水清澈为止。降水井底沉淀应不大于 0.3m。

每眼降水井内安装一台潜水泵作为排水设备。潜水泵采用专用绳索吊放入降水井内。经过试验检测水泵能够正常运转,管路无渗水漏水现象后进行水泵排水。施工流程见图 1。

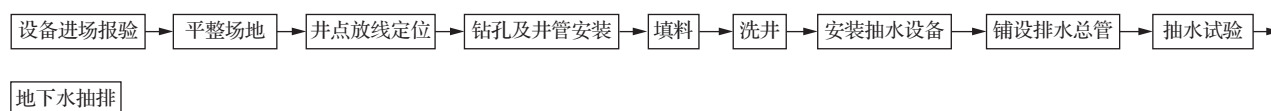


图 1 施工流程

3.2 注意事项

在利用潜孔锤进行降水井钻进及下管施工过程中,钻杆的余量应该适宜,钻杆连接安装时,锤头要与降水井井底留有 0.5m 的安全距离;在安装下一段钻杆之后,必须在钻进前供气;在本轮钻进结束时,应该吹孔底部 2min,以清除沉积在底部的碎片。

4 设备参数及工作效率

4.1 设备选择与效率

根据工程需要选择设备(见表 1),钻进成孔和滤水钢管焊接、铺设同时进行。建设范围内上层覆土约 2m,土层以下为 4~5m 砂砾料层,下层均为中风化花岗岩,平均成活速度为 7m/h。

表 1 设备及参数

序号	设备名称	设备型号	主要参数	设备数量
1	钻机	正远 SL600 型		6 台
2	空气压缩设备	柳工 CS450A-MD 型	驱动功率 450kW	6 台
3	水泵	Q3-40/2-1.1	功率 1.1kW, 扬程 40m, 流量 3m ³ /h	200 台
4	气动冲击器	TH220	配备专用钻头, 直径 308mm	6 套
5	电焊机	ZX7-315N	工作电压 21.2~32.6V, 额定焊接电流 315A, 额定输入容量 12kVA	6 台

4.2 技术参数

4.2.1 风量

风量^[7]的大小影响钻进过程中降水井内碎渣的排出,会对施工速度造成影响。风量通过以下公式确定: $Q = VS$ 。式中, Q 为所提供的风量, m³/min; V 为排渣上返风速, m/min; S 为滤水钢管与井壁空隙

面积, m²。排渣风速设定为 1100m/min,降水井直径约 0.3m,风量 13.4m³/min。

4.2.2 风压

风压的大小直接决定了钻进速度,根据钻机型号和潜孔锤参数,本工程选用的风压为 1.7MPa。供风装置的压力表、安全保护阀、调压设备等要齐全灵

敏,并且经过检验和标定^[8]。

4.2.3 钻机转速

潜孔锤跟管钻进的施工方法要求低转速,控制在50转/min以下。

5 技术特点

该技术适用于各种地质,钻进效率高;对于岩石地质的钻进施工更为有利且降低了材料损耗和施工成本,对于土质或不稳定地层跟管钻进省去了下管的步骤,避免了塌孔造成的工期影响^[9];对钻孔底部的快速冲击,保证了钻孔的垂直度,也降低了孔壁岩石坍塌,设备布置灵活,操作简单,对于现场条件要求低。

根据风动潜孔锤跟管钻进施工工艺特点,钻进过程中不需要护壁泥浆,利用压缩空气作为动力把沉渣排出,避免了环境污染,在松散地质及不稳定地层钻孔时,有利于成孔。

6 结 语

气动潜孔锤钻进方法适用于多种地质,在硬质岩层中潜孔锤钻进更为有利。在潜孔锤装置的破碎作用下,坚硬的岩石层被破碎成为小块,利用高压空气吹出井外,施工效率明显提升^[10]。在施工过程中发现,气动潜孔锤在岩石、漂砾层等钻进难度大的地质中应用效果明显。

(上接第45页)以便于后续廊道工程施工。

6 特点分析

6.1 保证了工程质量

采用高自密实性能混凝土进行一体化浇筑,可避免人工振捣不密实带来的质量隐患。采用一体化浇筑不存在常规分区浇筑的混凝土缝面,提高了坝体内部整体性,减少了坝体分缝问题。

6.2 节约人力及材料投入

堆石混凝土坝廊道材料为密实混凝土材料,浇筑过程中无须进行振捣,减少了人工投入;廊道包管部位不再需要支立模板单独浇筑,节约了模板,从而减少了工人支模、校模、拆模工作量,简化了施工工序。

张家口赛区营岔调蓄水池工程对工期和质量的要求极为严格,在工期无法满足建设要求的情况下,通过此工艺,大大加快了施工进度,使工程提前完工。▲

参考文献

- [1] 石永泉.潜孔锤钻进技术[M].成都:西南交通大学出版社,2012:1.
- [2] 中华人民共和国水利部.水利水电工程边坡设计规范:SL 386—2007[S].北京:中国水利水电出版社,2007:6.
- [3] 刘松玉.土力学[M].北京:中国建筑工业出版社,2020:62.
- [4] 水利电力部水利水电建设总局.水利水电工程施工组织设计手册,第二卷技术部分[M].北京:中国水利水电出版社,1990:67.
- [5] 中华人民共和国水利部.水利水电工程施工测量规范:SL 52—2015[S].北京:中国水利水电出版社,2015:17.
- [6] 中华人民共和国工业和信息化部.建筑施工机械与设备桩基基础施工用气动潜孔锤:JB/T 13205—2017[S].北京:机械工业出版社,2017:10.
- [7] 安民,尹晋忠,张许平,等.潜孔锤钻进技术在施工中的应用[J].山西水利.2002(5):49-50.
- [8] 中华人民共和国水利部.水利水电工程施工安全防护设施技术规范:SL 714—2015[S].北京:中国水利水电出版社,2015:23.
- [9] 刘伟,苏波,邓树密.气动潜孔锤配合长螺旋钻机在复杂地层桩基施工中的应用[J].四川水力发电.2016,35(6):89-90.
- [10] 楼日新.复杂地层潜孔锤跟管钻进技术研究[D].四川:成都理工大学,2007.

7 结 论

坝体廊道在场地不受限制,且具备提前预制廊道的条件下,建议采用一体化浇筑施工,不仅施工质量有保障,而且经济效益明显,具有广阔的应用空间。▲

参考文献

- [1] 李悦,郭奇,杨玉红.自密实混凝土的配制原理[J].商品混凝土.2007(1):29-31.
- [2] 朱献忠.堆石混凝土砌体施工质量控制研究及实践[J].道路工程.2013(23):67-70.
- [3] 徐小蓉,金峰,周虎,等.堆石混凝土筑坝技术发展与创新综述[J].三峡大学学报(自然科学版),2022(2):1-11.

(下转第70页)

DOI:10.16617/j.cnki.11-5543/TK. 2022.09.13

BIM 技术体系在沙特国王港 EPC 项目中的应用

谢 豪 王雅娟

(中国电建集团山东电力建设有限公司, 山东 济南 250000)

【摘 要】 为高效促进项目执行,沙特国王港 EPC 项目策划设计、施工全过程应用 BIM 技术。在设计阶段探索了全专业基于 BIM 的正向设计流程,形成了一套行之有效的协同机制;在施工阶段通过 BIM 典型应用,形成了“以设计管理为引领,BIM 技术为支撑,工期管理为主线”的管理模式。通过 BIM 技术的应用,有效解决了设计、施工碰撞问题,直接三维出图提高了工作效率,增强了各方联动,4D 模拟节约了时间成本,确保了项目的按期移交,实现了项目增值,获得了较好的管理和设计经验。

【关键词】 BIM; 正向设计; 工作流; 施工应用

中图分类号:TV222.1

文献标识码:B

文章编号:1673-8241(2022)09-061-10

Application of BIM Technology System in EPC Project of King Port, Saudi Arabia

XIE Hao, WANG Yajuan

(SEPCO Electric Power Construction Co., Ltd., Jinan 250000, China)

Abstract: BIM technology is applied during the whole process of EPC project planning, design and construction of King Port of Saudi Arabia in order to efficiently promote project execution. The whole professional BIM-based forward design process is explored in the design stage. A set of effective collaborative mechanism is formed. The management mode of “regarding design management as the guide, BIM technology as the support and schedule management as the main line” has been formed through typical application of BIM in the construction stage. Through the application of BIM technology, the problem of collision between design and construction is effectively solved, the direct 3D drawing improves the work efficiency, enhances the interaction of all parties, and 4D simulation saves time cost, thereby ensures the timely handover of the project, realizes the added value of the project, and gaining better management and design experience and benefits.

Key words: BIM; forward design; workflow; construction application

BIM (Building Information Modeling) 是将基于 3D 模型的信息技术应用于设计、施工、运维的过程,自

2000 年以来逐步发展成熟。目前已被广泛用于各类工程项目当中,依托 BIM 技术实现项目可视化管理,

收稿日期:2021-11-15

作者简介:谢豪(1989—),男,硕士,工程师,主要从事 BIM 技术应用及管理工作。

改变各相关方依靠二维图纸进行项目建设和运营管理的工作方式,项目管理逐渐从粗放型、松散型管理向精细化、标准化、高科技化管理转型^[1]。

基于 BIM 技术进行设计并直接从模型输出图纸可交付的方式被称为“正向设计”,目前全过程的正向设计在执行过程中均会面对一定的困难,本文介绍了从策划阶段到设计、施工阶段项目执行工作流程,以及施工阶段的典型应用,较好的将正向设计及 BIM 技术融入到了项目的管理体系中^[2]。

1 项目背景

1.1 项目简介

国王港项目位于沙特东部阿拉伯湾沿岸。国王港项目南北跨度 4.5km,东西跨度 2.5km,总占地面积约 11km²,建成后将成为全球规模最大的“超级船厂”。根据项目要求,国王港项目将使用 BIM 技术对项目的设计、采购和施工进行指导和服务。

1.2 BIM 在项目中的应用难点

a. 工期短、体量大。国王港项目设计周期一年,施工周期 44 个月,28000 余份设计交付物均使用美国、欧洲、沙特及阿美公司的规范标准;工程 BIM 设计模型量、工作量大,包括 1400 个专业模型,总容量超过 50GB,设计阶段构件数量达到 400 万。

b. 标准要求高。根据业主 EIR (Employer Information Requirements) 对 BIM 要求及项目执行需求,模型 LOD、LOI、COBie 均有明确要求,BIM 翻模方式不仅会产生大量专业设计师的重复劳动,并且不能实时有效地解决工程问题,只有正向设计才能真正为项目保驾护航。

c. 施工协调困难。国王港项目全球分包参与,分包单位多,设计主体位于阿联酋迪拜,采购国际化程度高,共有沙特、中国、美国、英国、韩国等众多国家的 500 多家国际一流供应商,施工现场在沙特达曼,协调难度大。因此需要建立良好的协调机制以此提高工作效率。

为了克服以上技术难题,项目交由世界知名国际

工程公司 Jacobs 进行设计及建模;并组建了以 SEPCO 总包方主导的,包括设计院 (Jacobs)、水电三局、水电五局、SEPCO 的 BIM 团队,以及编制了一系列 BIM 从设计到交付的手册、执行策略等管理体系文件,通过在此项目中实践、印证,最终形成了完整的工程的 BIM 正向设计体系^[3-4]。

2 BIM 应用标准及执行策略

2.1 BIM 执行方案

本项目 BIM 采用的标准体系为英标,应用模式参照 PAS-1192-2。为了更好地执行 BIM 及促进 BIM 技术为项目服务,在项目策划及执行过程中,项目部 BIM 团队编制了一系列程序文件指导项目执行 (见表 1)。同时协同各部门确定好相关工作流的具体操作流程

表 1 程序文件清单

序号	程 序 文 件	主 要 内 容
1	Jacobs PROJECT DESIGN BIM MANUAL	建模手册;对建模过程进行了相关规定,例如坐标系统、项目样板、命名规则等
2	BIM EXECUTION PLAN	BIM 执行策略 (BEP);对项目 BIM 整体执行进行了说明,例如软硬件要求、模型审核要求、模型交付物 MPDT (Master Production Delivery Plan)、碰撞检测矩阵及相关工作流,包括模型审核、碰撞检测、正向工作流等
3	4D BIM EXECUTION PLAN	4DBIM 执行策略;说明了 4D 工作流程,包括构建参数与 P6 计划如何关联
4	BIM EXECUTION PLAN_ CONSTRUCITON	施工阶段 BIM 执行策略;对施工阶段 BIM 应用进行了说明
5	SEPCO_BIM_Content_ Creation_Manual_Type	厂家项目、族模型建模手册;对厂家建模过程进行了规定,例如参数添加、命名规则、交付物、模型检查表等
6	Model Check List-Overall Rev 03	模型检查清单;详细规定了项目 BIM 团队对模型应检查的内容
7	4D Process-Synchro/ Navisworks Manual	4D 建模手册;详细说明了 4D 软件设置过程和应注意事项

续表

序号	程 序 文 件	主 要 内 容
8	BIM COBie STRATEGY DOCUMENT	设计和施工阶段 COBie 执行策略;对资产运维表 COBie 参数的设置和提交进行了详细说明和规定,包括设计阶段、施工阶段应该填写的参数,及 COBie 插件在 Revit 中如何进行设置

程以便项目各方顺利开展 BIM 应用相关工作,其中最主要的是明确了 BIM 整体工作流程,涉及项目的各个相关方包括业主、运营方、设计院、总包方等的职责见图 1。

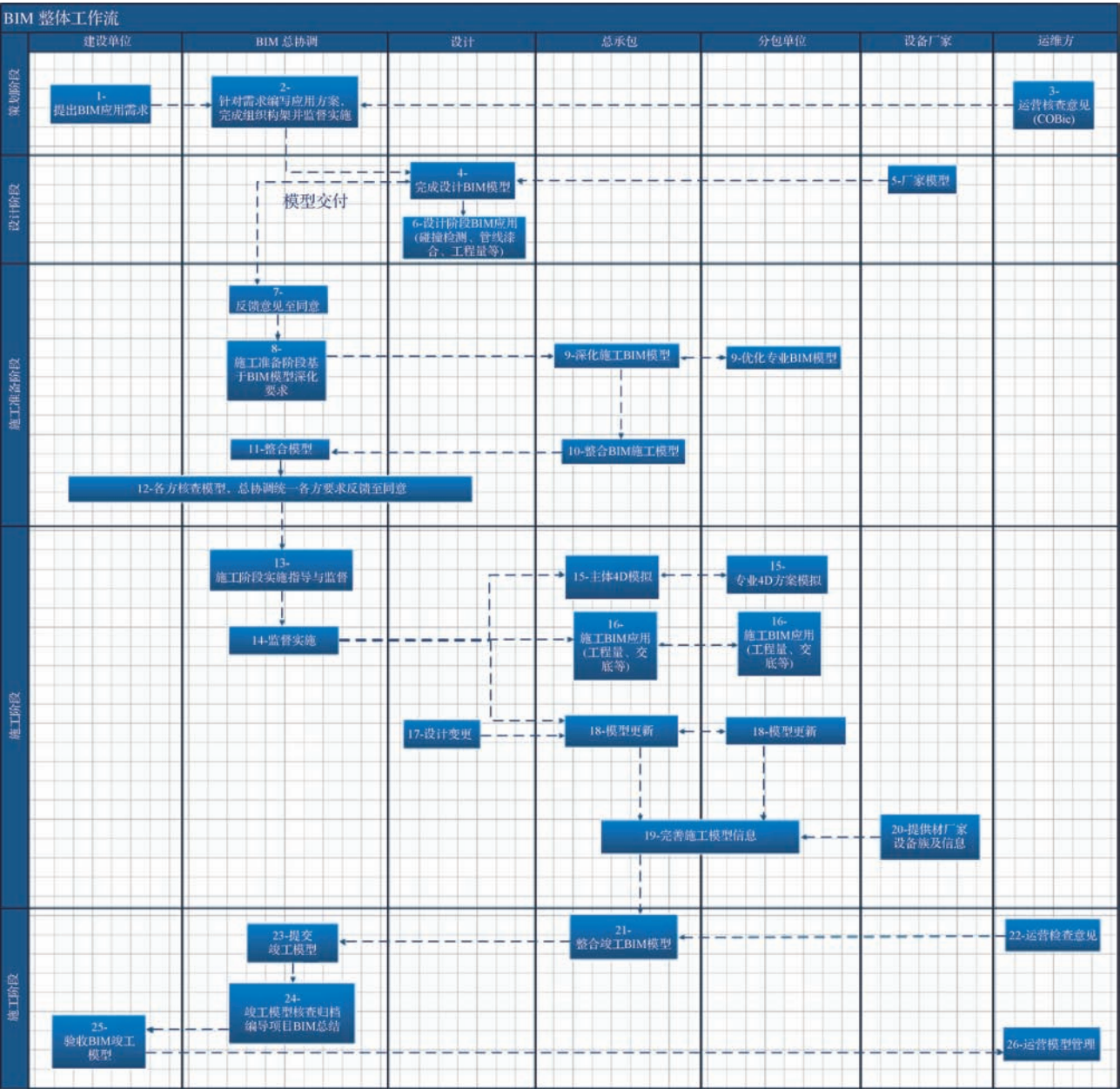


图 1 项目整体 BIM 工作流程

2.2 通用数据环境

由于项目体量较大、涉及项目相关方较多,及考虑不同产品在各个方面的优势和弊端,项目决定设计团队内部采用 ProjectWise、项目层级使用 Aconex 为 CDE (Common Data Environment) 通用数据环境(见表 2)。设计协同通过 ProjectWise 进行,所有 Revit 模

表 2 项目 CDE 通用数据环境

项目内部 Oracle Aconex	设计团队内部 Bentley ProjectWise
工作流审批	设计资料管理
模型审核与共享	模型创建与协同平台
项目文件管理	设计内部文档协作平台
供应商文件管理	
数据交换和信息共享	

型存储在 ProjectWise 服务器中,BIM 工程师与设计师都通过 ProjectWise 协同完成模型设计工作。在项目层,将通过 Aconex 进行协同,包括模型提交、文件图纸审批、供应商资料审批等。

3 BIM 设计阶段应用流程及典型应用

3.1 设计阶段 workflow

在 BIM 设计过程中,按照项目策划阶段编制的建模手册进行正向设计三维建模协同工作,根据 BEP 进行相应的 BIM 过程管理和协同工作,整体 workflow 见图 2,设计过程中的模型检查、碰撞检查、管线综合等工作流见图 3。

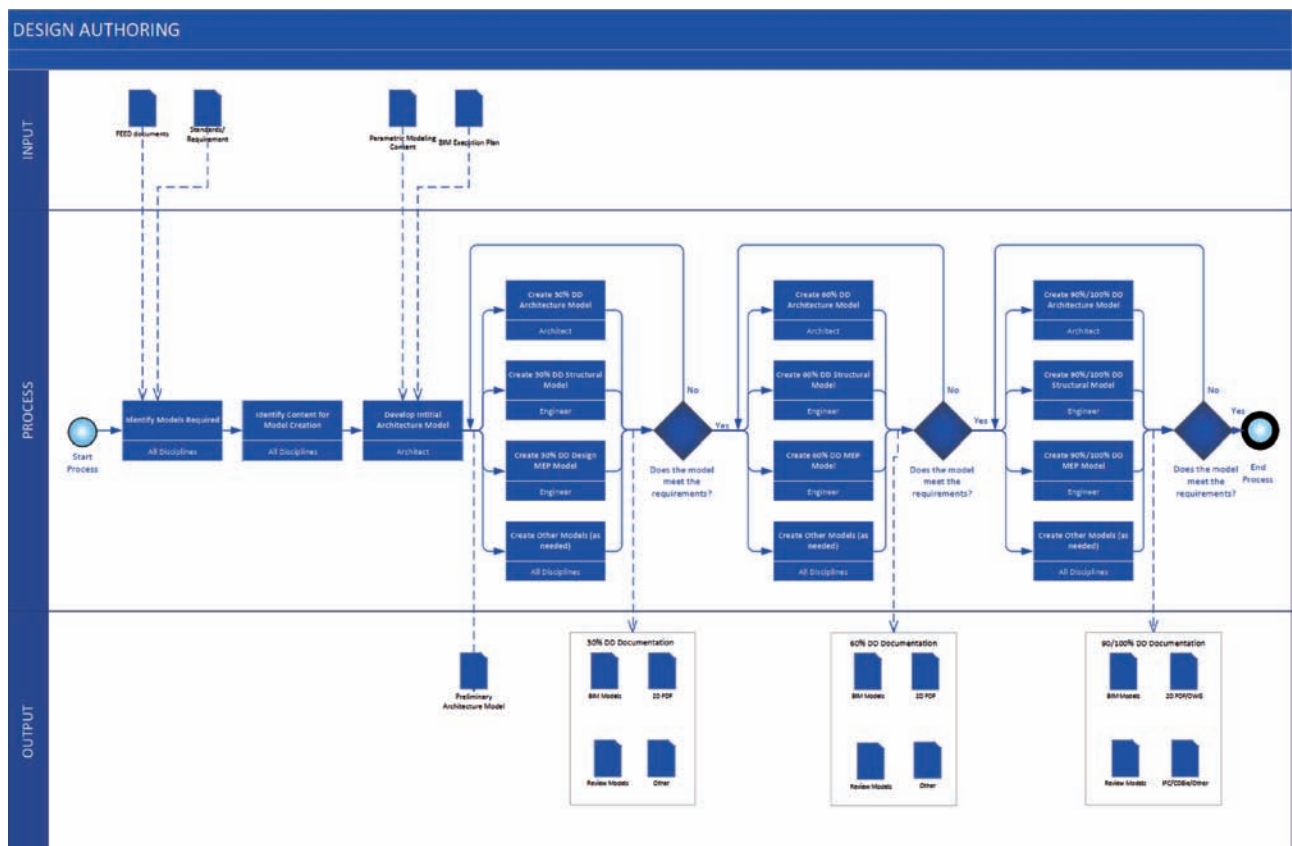


图 2 设计阶段 workflow

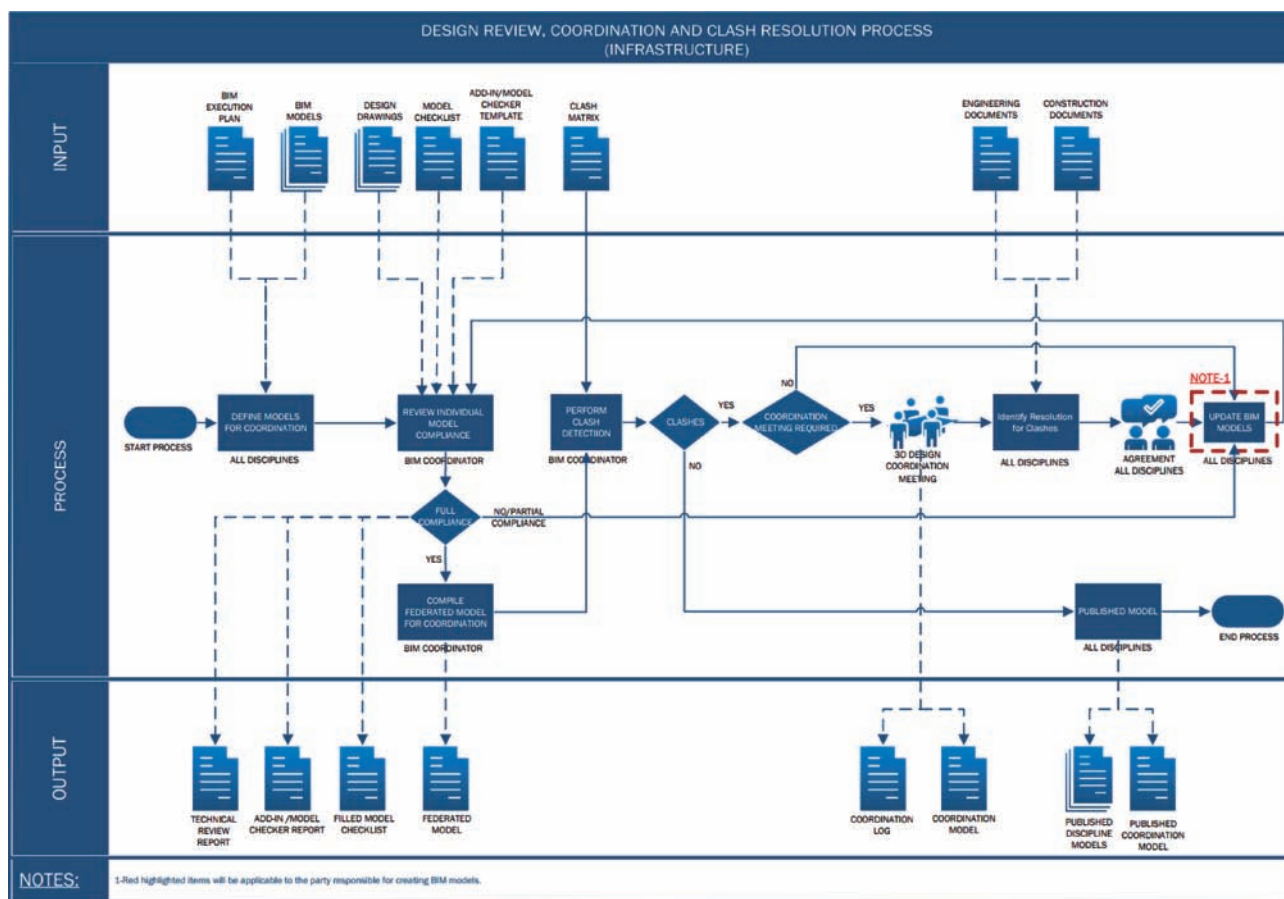


图3 模型检测协同 workflow

3.2 BIM 出图

根据 BEP 中的碰撞检测 workflow,在设计各阶段各专业完成模型设计后将进行各个专业之间的交叉碰撞检测,包含软碰撞和硬碰撞检测。完成碰撞检查后,根据 workflow 定义各个专业的碰撞问题并由 BIM 协调员检查后分配给相应专业工程师,专业工程师之间相互协调,最终解决碰撞问题,见图 3。

经过模型审核、碰撞检测及专业协调后,根据在策划阶段策划的正向设计 workflow,在 BEP 中策划符合设计院制图要求的图框、标识、注释等样式,并设定为出图模板,在出图阶段 BIM 模型可快速生成二维及三维图纸,见图 4。由于模型真实反映了节点设计情况,对于复杂节点,通过二维与三维图纸的对照,非设计人员

可以理解管廊的设计意图,有利于图纸审核与设计交底。同时,图纸与模型实时同步修改,大大地提高了设计变更效率。

4 施工阶段 BIM 应用

4.1 施工阶段 BIM 策划

施工阶段 BIM 实施需在传统施工流程基础上进行 BIM 施工流程再造,建立基于 BIM 的协作化实施模式,使施工过程运转流畅,从而提高施工效率和水平,保障工程质量。施工阶段 BIM 实施流程主要包括组织策划、模型审核(碰撞检测)、施工模型变更深化、施工过程模拟优化、现场施工应用(例如工程量应用、AR 应用、漫游展示等)和成果交付等步骤,见图 5。

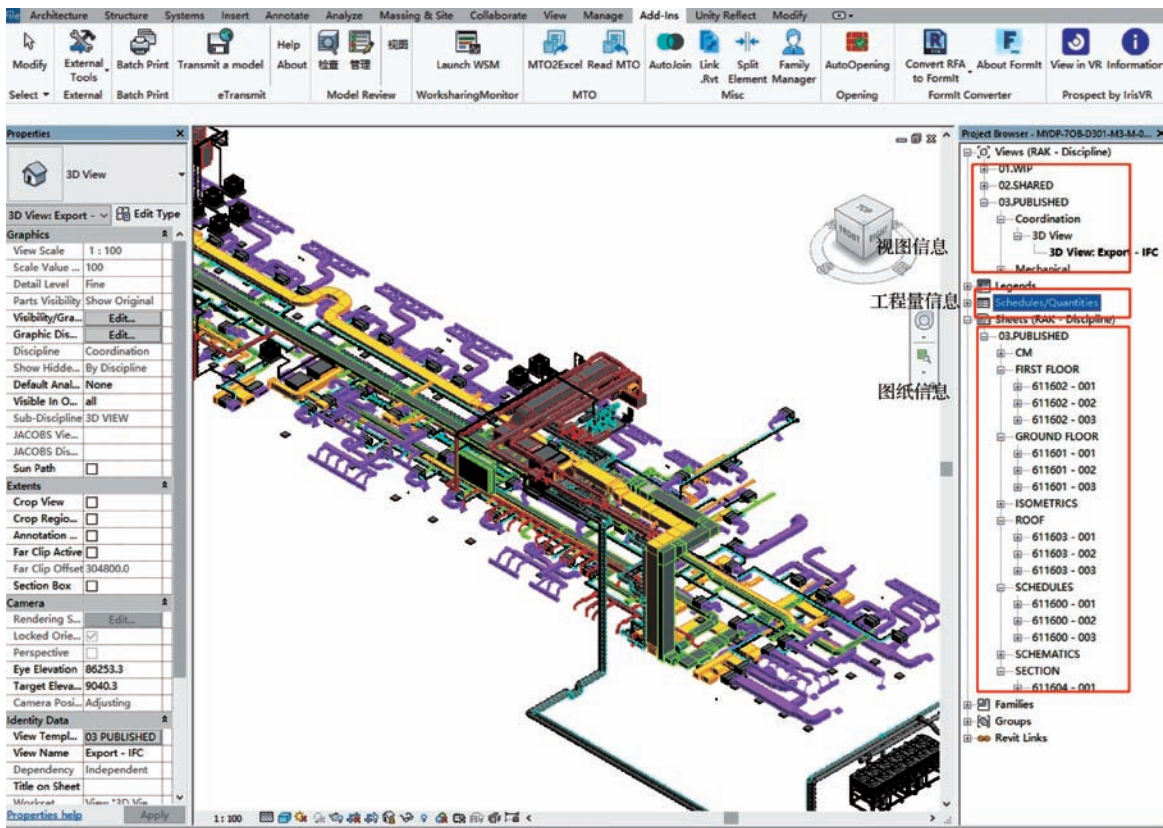


图4 Revit模型在图纸信息

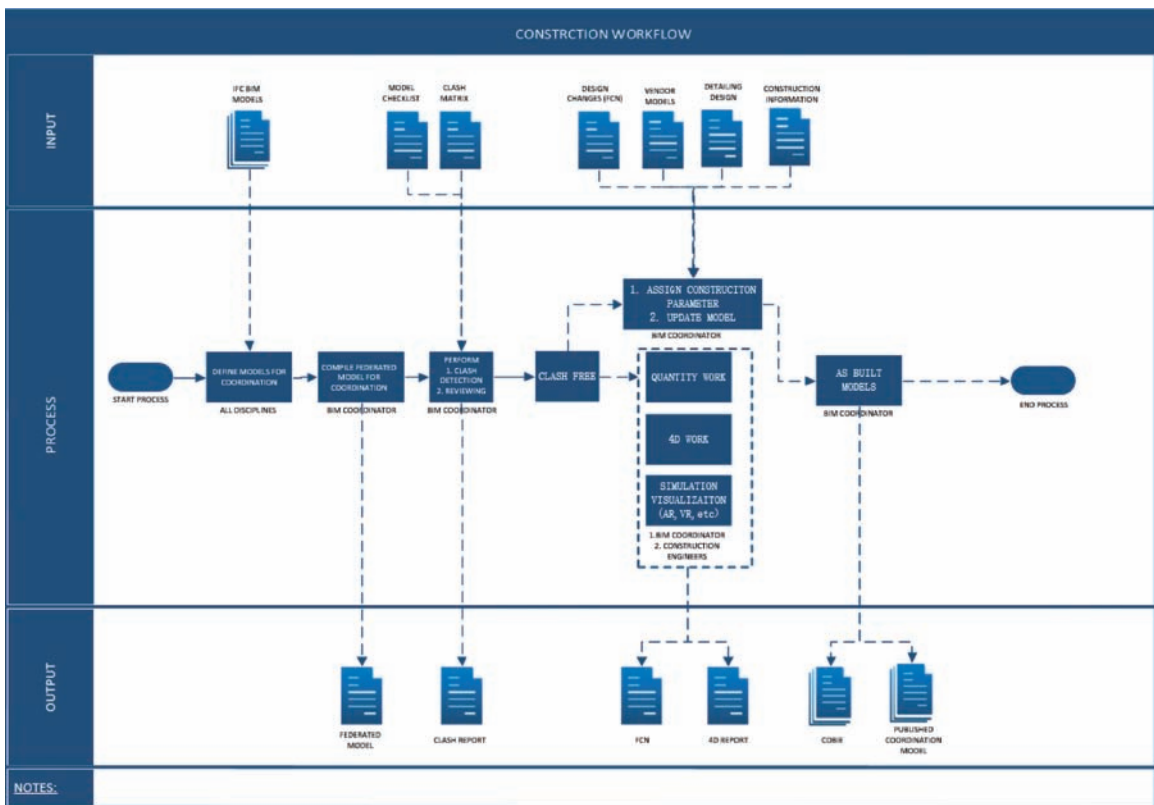


图5 施工阶段 BIM 工作流程

在施工阶段,项目总包方对 BIM 在施工阶段的应用进行了策划^[5-7],并细化为两级目标。I 级目标为较成熟也较易于实现 BIM 的应用,并以此内容为切入点策划 II 级目标的实现,由于 II 级目标涉及内容多、投

入大或者面对技术挑战,因此作为本项目的应用研究点。在执行过程中根据项目的执行情况,会进行适当调整和增减,详细目标见表 3;并对应用过程中的典型应用进行了详细说明。

表 3 施工阶段 BIM 策划应用点

序号	应 用 点	应 用 成 果 或 目 标
1	平面策划(I)	施工平面部署是施工组织设计的重要组成部分,通过三维可视化模型,将更直观、更便捷地考虑施工机械部署(如塔吊车站位与周围建筑在空间的关系)、道路规划(运输模拟)、临建部署、材料堆场规划等
2	工程算量管理应用(I)	通过二次开发,利用插件快速导出工程量,提高工作效率
3	施工技术交底应用(I)	充分利用 BIM 的可视化特点,设计、施工人员利用 BIM 的 3D 模型进行技术交底,对拟建的工程具有更加直观的了解
4	施工进度管理应用(I)	在 Synchro Pro 4D 模拟软件中进行施工模拟,提前发现问题解决问题,并对计划进行验证校核
5	漫游展示及动画输出(I)	利用 Navisworks 和 Lumion 的漫游功能,可以使项目各相关方“身临其境”经历项目的建造,了解项目的施工建造全过程,实现“所视即所得”,实现快速、高效的协同管理
6	碰撞检测及管线综合应用(I)	项目团队会在收到设计交付的 BIM 模型后再次对各专业模型交叉进行碰撞检测,提前发现并解决遗留的碰撞问题,避免少数由于设计疏漏产生的问题传递到施工现场,从而降低解决问题的成本
7	施工深化及模型出图应用(I)	现场在本项目施工过程中通过提交 FCN(Field Clarification Note)进行澄清。首先,将变更输入 BIM 模型,采用 BIM 技术进行技术复核,进行相关的专业碰撞检测。最后在变更确认后,在 BIM 模型中做同步更新,进而辅助施工管理
8	交通模拟(II)	采用 Infracore 中的交通仿真功能对临时道路进行仿真,通过对车辆体积、车辆数量、车辆形状、仿真时间等进行设置,对交叉施工时的复杂道路交叉口进行交通组织模拟及交通疏导等,提高协同和沟通效率,实现绿色建造,文明施工 ^[8]
9	与智慧化工地平台对接(II)	通过与智慧平台及公司 BIM 一体化平台(目前正在建设中)对接,实现质量、安全、成本等的应用
10	VR 应用(II)	通过两种方式展示:第一种直接导入项目模型,实现动态展示;第二种,结合 Lumion 导出 360 全景图,并进行渲染,添加人物、树木、车辆等场景,进行更加真实的静态展示 ^[9]
11	二维码应用(II)	将 3D 模型、漫游视频等生成二维码,特别是隐蔽性工程,例如地下管网、墙体预埋件等,张贴在现场各建筑物,查看相应的模型及对此操作

4.2 4D 施工模拟

本项目采用 Synchro Pro 4D 软件作为施工模拟软件,施工模拟工作流程见图 6,对每一个单体都开展 4D 施工模拟工作,4D 施工模拟一方面通过进度模拟发现不符合实际工序的部位并形成 4D 报告,将发给项目控制部计划编制部门用于项目计划的升级,在本项目中由于 4D 技术的引入,使控制部编制的计划更加符合实

际,更加可以准确指导现场施工;另一方面 4D 施工模拟或特殊施工方案的 4D 施工模拟将帮助相关工程师和施工团队更好地理解施工方案的实施过程与执行过程中的一些关键细节^[10-12]。图 7 为实际进度与计划进度对比情况,其中左侧为计划进度模拟,右侧为实际进度模拟,通过演示对比能够直观地显示出滞后的作业。

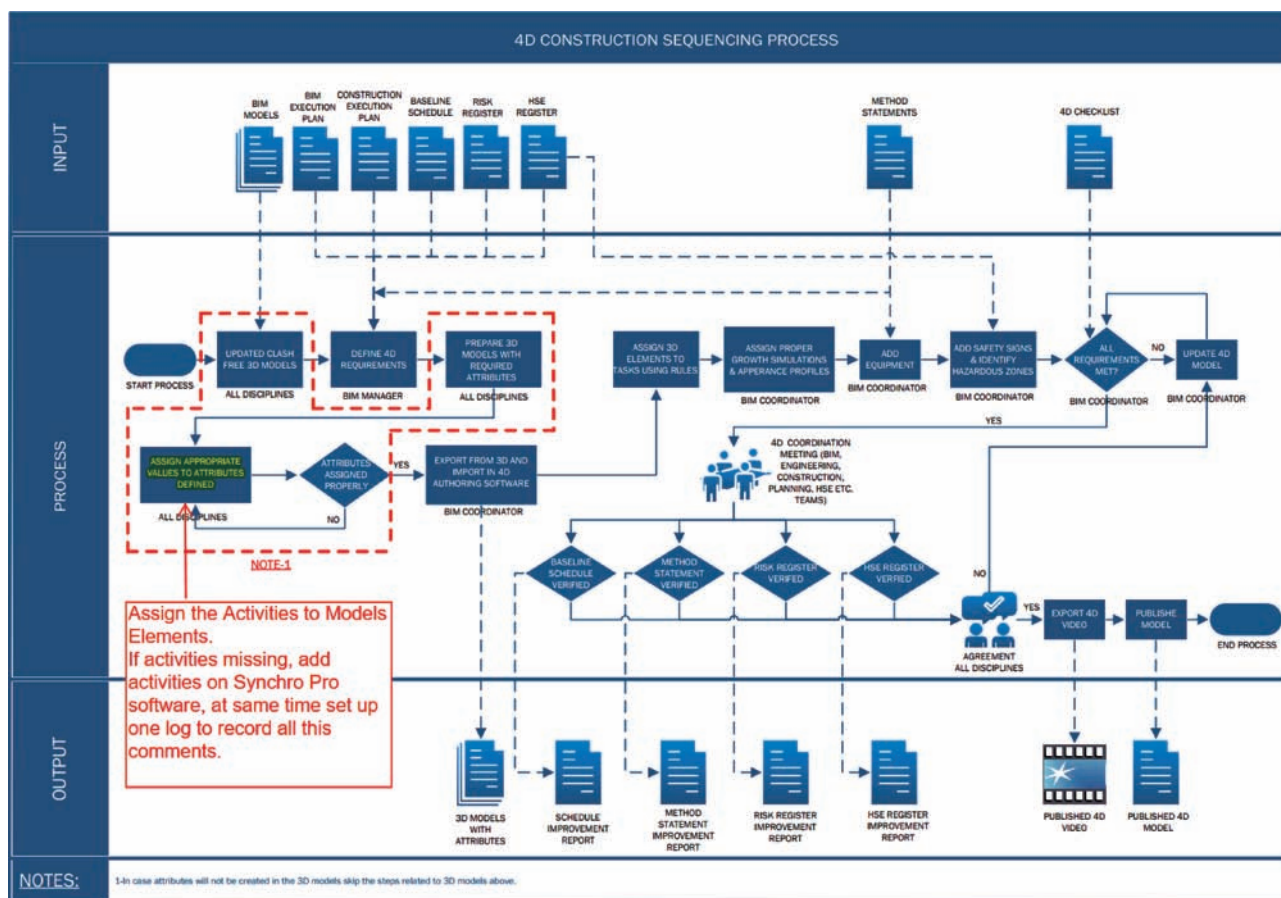


图 6 4D 施工模型 workflow

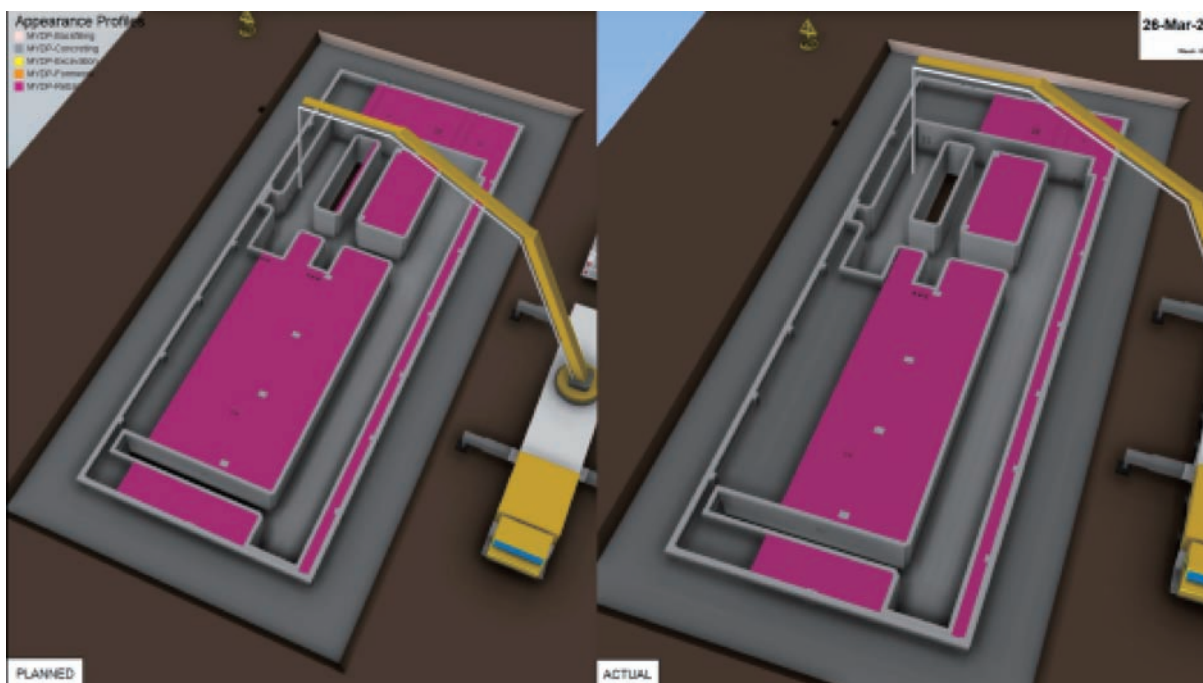


图 7 计划与实际 4D 模型对比 (主变电站 4D 模拟)

4.3 工程量提取

项目 BIM 团队结合相应软件的 API 接口开发了专门用于工程量提取的插件工具(已经申请了专利,专利号为 2020SR0941796),以便于更快速高效地对工程量信息进行提取和更新。原本整个项目的 1300 多个模

型的工程量提取工作需要十几名工程师至少工作两周才能完成,开发模型数据提取插件后此工作由一到两名工程师在三天内即可完成,极大提升了 BIM 团队的工作效率。通过 Revit 软件编写的插件运行界面见图 8。

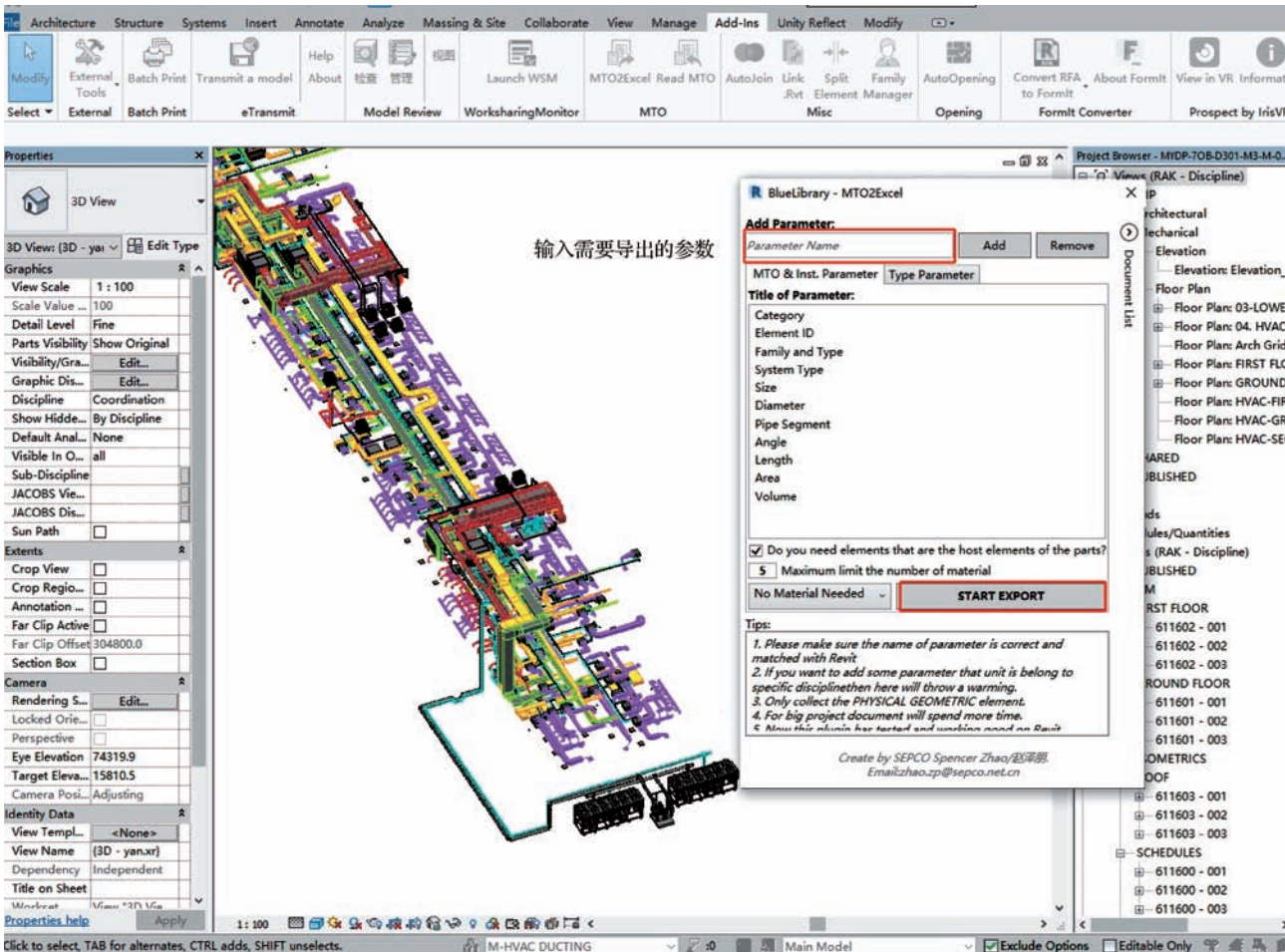


图 8 模型提取插件运行界面

项目 BIM 团队组织专人负责模型工程量数据提取和更新,图 9 为 BIM 团队提取后发布的工程量数据表,其他专业工程师直接通过网页浏览器 Power BI 即可访问,其中可对不同专业、单体、区域、标段等字段进行智能化归类汇总,相应工程师即点即得。

5 结 论

文章重点说明了项目执行过程中各个阶段的工作流,通过设计阶段的正向设计有效避免了图模不一致

的问题,通过碰撞检测、三维管线综合有效解决了设计阶段的问题,避免设计问题遗漏至施工阶段影响施工进度;通过施工阶段的 BIM 技术辅助施工,例如 4D 施工模型、工程量管理、施工深化,实现了项目的精细化管理。探索出了一条将 BIM 技术融入项目管理的思路,为后续项目 BIM 执行提供了较好的管理和设计经验与价值。▲

Element Name	PKG 4	PKG 5	PKG 6	总计
Pipe Types: 1CGOU	2,393.67	22,050.43	2,845.79	27,289.89
Pipe Types: 1CGOU NIPPLE TBE X TOE 75 MM LG		1.00	0.62	1.62
Pipe Types: 1SDOP	5,062.91	59,553.84	9,711.62	74,328.37
Pipe Types: 1SDOP NIPPLE POE X TOE 75 MM LG		4.26	0.56	4.82
Pipe Types: ABS	90.01	391.08	1,158.39	1,639.48
Pipe Types: ABS-SCH40	3,689.26	3,722.01	3,943.02	11,354.29
Pipe Types: BI_Sched40	850.71		1,907.82	2,758.53
Pipe Types: BI-SCH40	27.88	5.75	30.23	63.86
Pipe Types: BLACK STEEL PIPE ASTM.53 GRADE A SCHED40			1,410.35	1,410.35
Pipe Types: BlackSteel	562.92	2.95	10,660.24	11,226.11
Pipe Types: BlackSteelPipe_ASTM.53_Grade_A_SCH40	1,954.36		497.02	2,451.38
Pipe Types: CarbonSteel-SCH40	95.13			95.13
Pipe Types: Chilled_Water_Return	2,015.31	1,499.56		3,514.87
Pipe Types: Chilled_Water_Supply	1,960.93	2,408.67		4,369.60
Pipe Types: CHWF_SCH40	1,573.27			1,573.27
Pipe Types: cPVC	14,972.47	26,839.31	34,544.41	76,356.19
Pipe Types: cPVC_UG	80.18	40.59	80.53	201.30
Pipe Types: cPVC-SCH40	2,625.18	1,802.42	4,660.97	9,088.57
Pipe Types: cPVC-SCH40_UG			23.05	23.05
Pipe Types: CS-SCH_STD		374.39		374.39
Pipe Types: CS-SCH_XS		2.50		2.50
Pipe Types: CS-SCH10		589.48	1,017.12	1,606.60
Pipe Types: CS-SCH20	8,820.72	15,596.53	8,533.50	32,950.75
Pipe Types: CS-SCH40	7,218.79	3,138.97	7,952.94	18,310.70
Pipe Types: CU_Soldered				
Pipe Types: Default	291.32			291.32
Pipe Types: DWV	1,294.33	14,203.27		15,497.60
Pipe Types: Fire_Water	24,058.64	45,336.81		69,395.45
Pipe Types: Fire_Water 1	2,287.17	2,707.13		4,994.30
Pipe Types: Fire_Water 2	10.77	11.04		21.81
Pipe Types: Galvanized_Iron	1.45			1.45
Pipe Types: GRE	14.21	42.40		56.61
总计	211,157.49	384,429.11	32	

QUANTITY RESULT - Pipe - Length m

VIEW FILTER

图9 项目工程量信息在线查询页面

参考文献

- [1] 陆泽荣,刘占省. BIM 技术概论[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2018.
- [2] 杨远丰. 全面 BIM 正向设计的关键技术与要点[C]. 第八届 BIM 技术国际交流会—工程项目全生命周期协同应用创新发展,深圳,2021.
- [3] 饶洋,赵成宇,周宏韬,等. 科威特国际机场新航站楼 EPC 项目 BIM 应用体系[J]. 土木建筑工程信息技术,2021,13(5):49-57.
- [4] 李文春. 探讨 BIM 技术在水利水电工程建设中的应用[J]. 水利建设与管理,2018(10):37-40.
- [5] 焦向军. 港珠澳澳门口岸管理区项目施工 BIM 应用与实践[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2018.
- [6] 林旭,王丽,郭瑞. BIM 技术在水利 EPC 总承包项目中应用初探[J]. 水利建设与管理,2020(8):51-57.
- [7] 严慈玉,王景芸. BIM 技术在水利水电工程施工安全管理中的应用分析[J]. 水利建设与管理,2020(4):41-43.
- [8] 王梓昭,孙彦卓. InRoads 在搭建大范围地理模型中的应用[J]. 道路工程,2018,160(4):88-89.
- [9] 张学辉,王丽洋,杨菲. BIM 与 VR 技术在酒店装饰工程中的应用研究[C]. 第七届 BIM 技术国际交流会暨新产品展览会“智慧建造与建筑工业化创新发展”,广州,2020.
- [10] 柳茂. BIM 技术在 4D 施工进度模拟的运用[J]. 信息记录材料,2018,19(6):29-31.
- [11] 龚昭进,曹颜,谢豪. 4D 模拟软件在国际港口工程施工管理中的应用[J]. 水利水电施工,2020(5):74-78.
- [12] 潘义为,林建宏. 严寒地区水利工程抗裂混凝土配合比试验研究[J]. 东北水利水电,2022(3):51-53.
- [13] 陈露. 机制砂对自防水混凝土性能影响的研究[J]. 中国建筑防水,2022(3):8-11.
- [14] 程芳园. 堤坝护坡混凝土施工技术研究[J]. 建设与施工,2022(3):42-43.
- [15] 李泽鹏,何建新. 土石坝心墙沥青混凝土原材料选用问题的探讨[J]. 水电能源科学,2022(3):91-94.
- [16] 褚选选,任树朋. 浅谈混凝土在堤防工程中的应用[J]. 商品混凝土,2013(5):92,94.