

广告

欢迎订阅！ 欢迎投稿！ 欢迎刊登广告！

## 《中国水能及电气化》征订启事

(月刊, ISSN 1673-8241  
CN 11-5543/TK)

主管单位：水利部

主办单位：中国水利工程协会、中国大坝工程学会等

编辑出版单位：《中国水能及电气化》杂志社有限公司

主要栏目设置：本期特稿、农村水电、绿色小水电、施工技术、建设管理、运行管理、水电站技术、科学研究及工程设计等。

本刊大 16 开全彩印刷，全年 12 期，每期定价 16 元，全年订价 192 元，每月 25 日出刊。

国内邮发代号：82-495

当地邮局或联系本社订阅，电话：010-63305220

投稿邮箱：wateree6346@163.com

投稿咨询电话：010-63305281

刊登广告电话：010-63305258

汇款账户户名：《中国水能及电气化》杂志社有限公司

开户行：工行北京八角支行

账 号：0200013419200043183

[ 期刊基本参数 ] CN 11-5543/TK\*2005\*m\*A4\*70\*zh\*P\*¥16.00\*15200\*13\*2022-12

中国水能及电气化

CHINA WATER POWER & ELECTRIFICATION

2022年第12期(总第213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

12

2022.12  
月刊 总第213期



欢迎订阅! 欢迎投稿! 欢迎刊登广告!

## 《水利建设与管理》征订启事

(月刊, ISSN 2097-0528  
CN 11-4446/TV)

主管单位: 中国水利工程协会

主办单位: 中国水利工程协会

编辑出版单位: 《水利建设与管理》杂志社有限公司

主要栏目设置: 本期特稿、172 项节水供水重大水利工程专题、建设管理、运行管理、科研设计、工程施工、水力学、水文泥沙、水环境与生态、水利信息化等。

本刊大 16 开全彩印刷, 全年 12 期, 每期定价 20 元, 全年订价 240 元, 每月 23 日出刊。

国内邮发代号: 2-781

国外发行代号: M03713

当地邮局或联系本社订阅, 电话: 010-63305220

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

投稿咨询电话: 010-63305239

刊登广告电话: 010-63305258

汇款账户户名: 《水利建设与管理》杂志社有限公司

开户行: 工行北京广安门支行营业部

账 号: 0200001919200186803

欢迎订阅! 欢迎投稿! 欢迎刊登广告!

## 《水资源开发与管理》征订启事

(月刊, ISSN 2096-0131  
CN 10-1326/TV)

主管单位: 中国水利工程协会

主办单位: 中国水利工程协会

编辑出版单位: 《水利建设与管理》杂志社有限公司

主要栏目设置: 本期特稿、黄河流域生态保护和高质量发展、节水专栏、水资源管理、水生态保护、水文、智慧水利、河湖长制专栏、防洪减灾、水市场、水利风景区建设与发展、水文化、经验交流等。

本刊大 16 开全彩印刷, 全年 12 期, 每期定价 20 元, 全年订价 240 元, 每月 25 日出刊。

国内邮发代号: 82-389

国外发行代号: M09525

当地邮局或联系本社订阅, 电话: 010-63305220

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

投稿咨询电话: 010-63305233

刊登广告电话: 010-63305258

汇款账户户名: 《水利建设与管理》杂志社有限公司

开户行: 工行北京广安门支行营业部

账 号: 0200001919200186803

2022 12 月刊  
总第 213 期

## 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://zgse.cweun.org>

电子信箱 [wateree6346@163.com](mailto: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

### 水电站技术与研究

- 水电站下泄流量的测算方法选择研究  
欧传奇 赵 越 楚士冀
- 水电站大坝智能安防管控平台设计及分析  
曾作朋
- 水电站一体化排水系统研究与实践  
黄万虎 沈顺云 刘开泰

### 施工技术

- 深埋长隧洞不良地质塌方段衬砌跟进开挖同时施工技术  
杨井国 张维欢
- WPU 灌浆技术在新河闸工程裂缝处理中的应用  
文永林 边 蕾 赵亚涛
- BIM 技术在地铁车站结构设计中的应用分析  
赵凌露
- 深基坑降水施工技术及时应急处置  
郝中州 苏茂荣 陈志军

### 科学研究

- 大藤峡水利枢纽工程筑岛水下爆破方案设计与应用  
陈佳培 任 磊 何 倩
- 水下帷幕灌浆水面作业平台设计与应用研究  
胡小梅 程国栋 陈崇德
- 生物聚合物加筋土堤坝稳定性评估的实验研究  
刘景青 李 蔚
- 水泥掺量对膨胀土抗剪强度的改性影响  
孙 超

### 经验交流

- 关于四色安全风险空间分布图绘制的思考与实践  
王海燕 白建峰
- 生产安全事故应急预案编制和演练中常见问题辨析  
马建新 王 伟 赵松鹏

### 68 《中国水能及电气化》2022 年总目次

Contents

Hydropower Station Technology and Research

- 1 Study on the Selection of Calculating Method of Hydropower Station Discharge  
OU Chuanqi, ZHAO Yue, CHU Shiji
- 7 Design and Analysis of Intelligent Security Management and Control Platform for Hydropower Station Dams  
ZENG Zuopeng
- 11 Research and Practice of Integrated Drainage System of Hydropower Station  
HUANG Wanhu, SHEN Shunyun, LIU Kaitai

Construction Technology

- 15 Simultaneous Construction Technology of Lining Follow-up Excavation in Unfavorable Geological Collapse Section of Deep-Buried Long Tunnel  
YANG Jingguo, ZHANG Weihuan
- 20 Application of WPU Grouting Technology in Crack Treatment of Xinhe Gate Project  
WEN Yonglin, BIAN Lei, ZHAO Yatao
- 24 Application Analysis of BIM Technology in Subway Station Structure Design  
ZHAO Linglu
- 28 Dewatering Construction Technology and Emergency Treatment of Deep Foundation Pit  
HAO Zhongzhou, SU Maorong, CHEN Zhijun

Scientific Research

- 33 Design and Application of Underwater Blasting Scheme for Zhudao in Datengxia Water Conservancy Project  
CHEN Jiapei, REN Lei, HE Qian
- 41 Design and Application Research of Surface Operation Platform in Underwater Curtain Grouting  
HU Xiaomei, CHENG Guodong, CHEN Chongde
- 46 Experimental Study on Stability Assessment of Biopolymer Reinforced Earth Dam  
LIU Jingqing, LI Wei
- 54 Effect of Cement Content on Shear Strength Modification of Expansive Soil  
SUN Chao

Engineering Design

- 59 Thought and Practice on the Drawing of Four-Color Spatial Distribution Map for Safety Risk  
WANG Haiyan, BAI Jianfeng
- 64 Analysis of Common Problems in the Preparation and Drill of Emergency Plan for Production Safety Accidents  
MA Jianxin, WANG Wei, ZHAO Songpeng
- 68 General List 2022

编委会

名誉主任

胡四一

副主任

邢援越陈大勇贾金生

陈生水刘恒陈荣仲

裘江海

秘书长

夏海霞廖文根

编委会成员(按姓氏笔画排列)

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

## 水电站技术与研究

# 水电站下泄流量的测算方法选择研究

欧传奇 赵 越 楚士冀

(国际小水电中心, 浙江 杭州 310002)

**【摘 要】** 优化选取适宜的测算方法获取水电站下泄流量数据, 以判断生态流量泄放满足情况, 是预防水电站下游河道减脱水的主要手段。文章基于水量平衡原理, 给出了不同情况下坝式和引水式水电站下泄流量测算方法, 并根据资料的可获取性、计算精度要求等进行了比较研究。研究表明, 水电站关联水库调节性能、可利用测流水文站的位置、支流汇入情况对水电站下泄流量测算精度及难易程度影响较大, 并据此提出了不同开发方式水电站下泄流量测算方法建议。

**【关键词】** 水电站; 下泄流量; 测算方法

中图分类号: TV72

文献标识码: B

文章编号: 1673-8241 (2022) 12-001-06

## Study on the Selection of Calculating Method of Hydropower Station Discharge

OU Chuanqi, ZHAO Yue, CHU Shiji

(International Center on Small Hydropower, Hangzhou 310002, China)

**Abstract:** Optimal selection of appropriate calculating methods to obtain discharge data from hydropower stations to judge the satisfaction of ecological discharge is the main means to prevent the reduction of dehydration in downstream channels of hydropower stations. Based on the principle of water balance, this paper proposes the calculating method of discharge under dam type hydropower station and diversion type hydropower station under different conditions, and makes a comparative study according to the data availability and calculation accuracy requirements. The results show that the regulating performance of the associated reservoir of hydropower station, the location of the available flow measuring hydrological station, and the inflow of tributaries have a great influence on the accuracy and difficulty of calculating hydropower station discharge. Accordingly, some suggestions on calculating hydropower station discharge with different development methods are proposed.

**Key words:** hydropower station; discharge; calculating method

收稿日期: 2022-09-08

基金项目: 国家重点研发计划“政府间国际科技创新合作”重点专项项目(2018YFE0128500)

作者简介: 欧传奇(1982—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事水电站(泵站)水力学、水电绿色发展技术研究工作。



随着社会发展和人民生活水平的提高,水电站下游河道减脱水现象越来越受关注<sup>[1]</sup>。长江经济带、黄河流域等区域小水电清理整改,也将保障水电站生态流量泄放作为重要内容。水电站按规定下泄流量是预防水电站下游河道减脱水的主要手段和先决条件。《中华人民共和国环境影响评价法》(2003年9月1日)颁布施行后,虽多数水电站陆续明确了生态流量泄放要求,但因未强制要求安装下泄流量监测设施,无法判断下泄流量的实际执行情况。由于下泄流量会对水电站(特别是引水式和混合式水电站)经济效益产生直接影响<sup>[2-4]</sup>,水电站业主实际执行不到位的现象比较普遍。如何在尽可能减少投入的前提下,通过科学的测算方法获取水电站下泄流量,以此判断其下泄流量是否满足要求,为行业生态流量监管做好技术支撑成为亟待解决的问题。

水电站下泄流量测算方法,部分学者<sup>[5-9]</sup>作了相关研究,但这些成果或局限于具体站点,或局限于特定的开发方式,或对资料的可获取性及计算误差未做分析,没有全面考虑到各种可能的情况,缺乏系统性。本文基于水量平衡原理,根据资料可获取性、计算精度要求等,提出不同开发方式水电站下泄流量测算方法建议。其中水电站下泄流量系指水电站下泄至河道内的流量,只要该处流量泄放满足要求,则在下游区间不增加河道外需水要求时,其余影响河段的需水要求也能够满足。

## 1 坝式水电站下泄流量测算方法

### 1.1 下泄流量测算方法

坝式水电站通常可分为坝后式和河床式,其取水与退水关系见图1。忽略渗流与蒸发影响,可确定如下测算方法:

**a. 测算方法 I。**当上游水库入库流量(上游有水文测站)和瞬时水库水位(对水库水位实施准确的实时监测)可测量时,水电站下泄流量可按下式计算:

$$Q_2 = Q_1 - Q_v \quad (1)$$

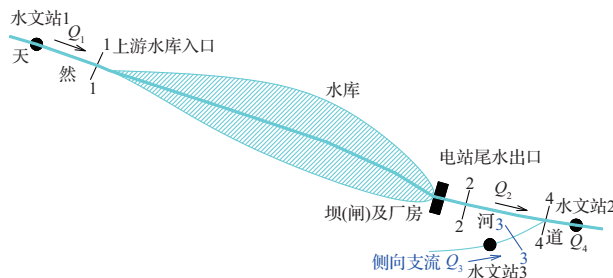


图1 坝式水电站下泄流量计算示意图

其中

$$Q_v = S \frac{\Delta Z}{\Delta t} \quad (2)$$

式中  $Q_2$ ——水电站下泄流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;

$Q_1$ ——上游水库入库流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;

$Q_v$ ——水库瞬时调节流量,即单位时长水库库容增加量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;

$S$ ——上游水库相应瞬时水位下水面面积,即库容对水位的变化率,可通过水库库容曲线获取,  $\text{m}^2$ ;

$Z$ ——上游水库瞬时水位,  $\text{m}$ ;

$t$ ——时间,  $\text{s}$ 。

对于国内数量占97%以上的小型水电站而言,多数几乎没有调节库容,水库瞬时调节流量为零,此时式(1)可简化为

$$Q_2 = Q_1 \quad (3)$$

该式体现了无调节坝式水电站来多少泄多少的发电泄流特性,此时无须实施生态流量监测。

**b. 测算方法 II。**当发电尾水口下游附近有水文站测流数据时,水电站下泄流量可按下式计算:

$$Q_2 = Q_4 - Q_3 \quad (4)$$

式中  $Q_4$ ——电站发电尾水口下游侧经支流汇流后的流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;

$Q_3$ ——电站发电尾水口下游侧区间汇流和侧向补给的流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;

其他符号意义同前。

若发电尾水出口至下游侧水文站无区间汇流和侧向补给,式(4)可简化为

$$Q_2 = Q_4 \quad (5)$$

此时, 电站泄流数据可直接取对应水文站测流数据。

c. 测算方法Ⅲ。当上下游均无测流数据时, 水电站下泄流量可根据发电量资料及其他泄流设施实测流量资料, 按下式计算:

$$Q_2 = Q_T + Q_D \quad (6)$$

式中  $Q_T$ ——水电站发电流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;

$Q_D$ ——通过溢流坝或坝址处其他泄流设施下泄的流量;

其他符号意义同前。

通常, 坝式水电站不设专用泄流设施, 在下游河道容易减水的枯水期时段, 通过溢流坝等设施下泄的流量为零, 水电站下泄流量等于其发电流量, 即

$$Q_2 = Q_T \quad (7)$$

该式表明, 坝式水电站的下泄流量与发电流量为正关联, 且直接相关。只要水电站能够持续稳定发电 (例如设置有基荷机组), 下游河道需水要求即可得到保障。

## 1.2 测算方法的比选

### 1.2.1 资料的可获取性

测算方法Ⅰ与测算方法Ⅱ均需水文站测流资料, 适用于上游或下游有合适水文站并有准确测量数据的情况, 且测算方法Ⅰ对于有调节水库的电站, 还涉及实时水位数据和水库库容曲线, 测算方法Ⅱ对于有侧向补给的, 还涉及侧向补给的测流数据。小水电站绝大多数位于山区中小河流上, 水文测站较少, 数据获取难度较大。两种方法的优劣需根据水文测站的位置、有无调节水库、下游测站前有无汇流来定。对于测算方法Ⅲ, 在未设置专用泄流设施情况下, 对于溢流坝存在溢流的丰水期, 下游包括生态流量在内的需水量一般容易满足, 而在容易造成下游河道减脱水的枯水季节, 通过溢流坝等设施下泄的流量通常为零, 水电站下泄流量等于发电流量, 计算只需发电量数据和机组工作参数, 数据获取几乎没有障碍; 若设置专用泄流设施, 则根据滤定后的设施流量特性, 其泄流

数据也容易准确获取。由此可见, 从资料可获取的角度考虑, 测算方法Ⅲ是最优方案。

### 1.2.2 测算误差考量

测算误差取决于原始参数测量误差与算法误差, 原始参数测量误差受制于仪器设备, 而算法误差则取决于算法的优劣。影响算法精度的因素很多<sup>[10]</sup>, 按照误差传递理论<sup>[11]</sup>并记长度  $l$  测量的绝对误差为  $\varepsilon(l)$ , 相对误差为  $\varepsilon_r(l)$ ,  $\varepsilon_r(l) = \varepsilon(l)/l$ , 则水位测量相对误差为  $\varepsilon_r(l)$ , 水位变幅、水域面积、流速测量相对误差为  $2\varepsilon_r(l)$ , 水量测量相对误差为  $3\varepsilon_r(l)$ , 流量测量 (流速  $\times$  过流面积) 相对误差为  $4\varepsilon_r(l)$ , 则式 (2) 相应误差计算式为

$$\varepsilon_r(Q_V) = \varepsilon_r\left(\frac{S\Delta Z}{\Delta t}\right) = \varepsilon_r(S) + \varepsilon_r(\Delta Z) = 4\varepsilon_r(l) \quad (8)$$

该式表明, 水库瞬时调节流量相对误差为水域面积、水位变幅的测量相对误差之和。则测算方法Ⅰ中式 (1)、式 (3) 的误差计算式分别为

$$\varepsilon_r(Q_2) = \frac{Q_1}{Q_2}\varepsilon_r(Q_1) + \frac{Q_V}{Q_2}\varepsilon_r(Q_V) = \left(1 + \frac{2Q_V}{Q_2}\right)4\varepsilon_r(l) \quad (9)$$

$$\varepsilon_r(Q_2) = \varepsilon_r(Q_1) = 4\varepsilon_r(l) \quad (10)$$

测算方法Ⅱ中式 (4)、式 (5) 的误差计算式分别为

$$\varepsilon_r(Q_2) = \frac{Q_4}{Q_2}\varepsilon_r(Q_4) + \frac{Q_3}{Q_2}\varepsilon_r(Q_3) = \left(1 + \frac{2Q_3}{Q_2}\right)4\varepsilon_r(l) \quad (11)$$

$$\varepsilon_r(Q_2) = 4\varepsilon_r(l) \quad (12)$$

测算方法Ⅲ中式 (6)、式 (7) 的误差计算式分别为

$$\begin{aligned} \varepsilon_r(Q_2) &= \frac{Q_T}{Q_2}\varepsilon_r(Q_T) + \frac{Q_D}{Q_2}\varepsilon_r(Q_D) \\ &= \frac{Q_T}{Q_2}\varepsilon_r(Q_T) + \frac{Q_D}{Q_2}4\varepsilon_r(l) \end{aligned} \quad (13)$$

$$\varepsilon_r(Q_2) = \varepsilon_r(Q_T) \quad (14)$$

若发电流量采用发电量计算 (文献 [1] 修订前版本: SL 752—2017), 则计算误差与机组类型种数、

机组台数及其额定参数等因素有关，可大致按下式估算：

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_r(Q_T) &= \varepsilon_r(W_d) + \varepsilon_r(H) + \varepsilon_r(\eta_m) = k \cdot 4\varepsilon_r(l) \\ \varepsilon_r(Q_2) &= \left[1 + \frac{(k-1)Q_T}{Q_2}\right]4\varepsilon_r(l) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

式中  $W_d$ ——电站逐日发电量统计值，kW·h；  
 $H$ ——机组发电水头，m；  
 $\eta_m$ ——机组综合效率；  
 $k$ ——估算系数，直接仪器测流（含水位测量计算的）， $k=1$ ，其余情况  $k>1$ 。

若发电流量采用常规流量测算方法，则

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_r(Q_T) &= 4\varepsilon_r(l) \\ \varepsilon_r(Q_2) &= \frac{Q_T + Q_D}{Q_2}4\varepsilon_r(l) = 4\varepsilon_r(l) \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

忽略同类物理量测量相对误差差异（采用相同方法和仪器），可估算各相关测算方法误差（见表1）。

**a.** 对于相关数据（水位或流量）均通过水文站等直接测量（包括涉及的机组流量），测量数据与下泄流量之间没有调节水库和区间汇流影响的，下泄流量测量相对误差稳定，测量结果可信。

**b.** 直接测量的数据有调节水库干扰的，水库调节流量越大，相对误差越大。计水库调节流量与下泄流量比值为  $r_1$ ，则相对误差同比将增加  $2r_1$ 。

**c.** 直接测量的数据有区间汇流影响的，区间汇流流量越大，相对误差越大。计区间汇流流量与下泄流量比值为  $r_2$ ，则相对误差同比将增加  $2r_2$ 。通常区间汇流一般缺少水文站测流资料，多是根据同一流域及邻近区域水文气象的相似性<sup>[12]</sup>，按集雨面积来换算，误差难以控制。

**d.** 通过机组发电量测算下泄流量的，相对误差与电站逐日发电量统计值、机组发电水头、机组综合效率等参数测量精度有关，当存在其他形式补充泄流时，还与机组发电流量占比有关，相对误差随机组发电流量占比增加而增加，总体上相对误差要远高于采用直接测量的方法，为此修订后《绿色小水电评价标准》<sup>[1]</sup>不再采信机组发电量测算下泄流量。鉴于水电站可能存在机组特性差异、发电出力变化及过程间断等情况，在条件允许的情况下，宜进行测流以提高数据精度。常见的测流方法包括流速仪法、超声波法和蜗壳压差法<sup>[8]</sup>。测流方法及技术要求可参照现行技术标准<sup>[13]</sup>。

表1 坝式水电站下泄流量测算方法误差分析

测算方法	流量计算公式编号	流量计算公式相对误差公式及公式编号	误差估计	备 注
方法 I	(1)	$\varepsilon_r(Q_2) = \left(1 + \frac{2Q_v}{Q_2}\right)4\varepsilon_r(l)$ (9)	$> 4\varepsilon_r(l)$	有调节水库，与水库调蓄程度有关，水库调节流量越大，相对误差越大
	(2)			
	(3)	$\varepsilon_r(Q_2) = 4\varepsilon_r(l)$ (10)	$4\varepsilon_r(l)$	径流式电站，相对误差稳定
方法 II	(4)	$\varepsilon_r(Q_2) = \left(1 + \frac{2Q_3}{Q_2}\right)4\varepsilon_r(l)$ (11)	$> 4\varepsilon_r(l)$	下游测流断面前有支流汇入，与支流流量占比有关，支流汇入流量占比越大，相对误差越大
	(5)			
	(6)	$\varepsilon_r(Q_2) = 4\varepsilon_r(l)$ (12)	$4\varepsilon_r(l)$	下游测流断面前无支流汇入，相对误差稳定
方法 III	(6)	$\varepsilon_r(Q_2) = \left[1 + \frac{(k-1)Q_T}{Q_2}\right]4\varepsilon_r(l)$ (15)	$> 4\varepsilon_r(l)$	坝下存在发电以外的其他泄流，与机组发电参数测量精度、机组流量占比有关，相对误差随机组流量增加而增加
	(7)	$\varepsilon_r(Q_2) = k \cdot 4\varepsilon_r(l)$ (15)	$> 4\varepsilon_r(l)$	坝下不存在发电以外的其他泄流，与机组发电参数测量精度有关，误差不稳定
		$\varepsilon_r(Q_2) = 4\varepsilon_r(l)$ (16)	$4\varepsilon_r(l)$	坝下不存在发电以外的其他泄流，机组流量等直接测量的，相对误差稳定

注 对于估算系数  $k$ ，直接仪器测流（含水位测量计算）的， $k=1$ ，采用发电量推算等其余情况  $k>1$ 。



综上所述,坝式水电站测流方法精度及难易程度与关联水库调节性能、可利用测流水文站的位置、支流汇入情况等因素有关。无调节水库或上游有测流水文站的,宜采用测算方法Ⅰ中式(3)进行测算;下游有测流水文站,且测流断面前无支流汇入时,宜采用测算方法Ⅱ中式(5)进行测算;当缺水文站测流数据时,需采用测算方法Ⅲ中式(6)、式(7)结合直接测流的方法进行流量测算,或直接就关注的坝(闸)下断面进行测流。其余测算误差不稳定或较大的,仅适宜作为估算方法。

## 2 引水式水电站下泄流量测算方法

### 2.1 下泄流量测算方法

引水式水电站有无水库的纯引水式和有水库的坝引水式(混合式)两种,其取水退水关系见图2。忽略渗流蒸发影响,可确定如下测算方法:

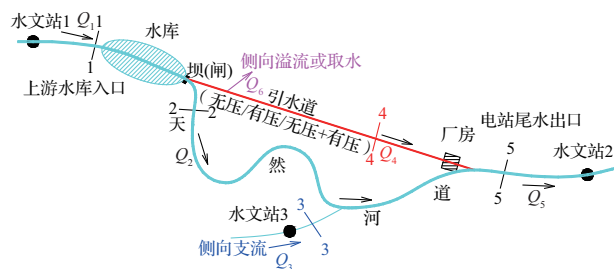


图2 引水式水电站下泄流量计算示意图

a. 测算方法Ⅳ。当已知上游水库入库流量(上游有水文测站)和瞬时水库水位(对水库水位有实时监测)时,水电站下泄流量可按下式计算:

$$Q_2 = Q_1 - Q_v - Q_4 - Q_6 \quad (17)$$

式中  $Q_4$ ——水电站发电流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;

$Q_6$ ——侧向溢流或区间取水的流量(例如按照我国有关法律应首先满足的城乡居民生活用水等),  $\text{m}^3/\text{s}$ ;

其他符号意义同前。

通常,在容易造成下游河道减水的时段,侧向溢流为零,且可不考虑区间取水流量(依法优先保障河道外用水后造成的下泄流量不足一般不纳入正常考

核),此时式(17)可简化为

$$Q_2 = Q_1 - Q_v - Q_4 \quad (18)$$

当水电站几乎没有调节库容时(纯引水式),水库瞬时调节流量为零,式(18)可进一步简化为

$$Q_2 = Q_1 - Q_4 \quad (19)$$

该式表明,引水式水电站其下泄流量与发电流量线性负关联,与坝式水电站相反。因此,引水式水电站发电越多,厂坝间河段的流量保障越弱,减脱水可能性越大。

b. 测算方法Ⅴ。当发电尾水口下游附近有水文站测流数据时,水电站下泄流量可按下式计算:

$$Q_2 = Q_5 - Q_4 - Q_3 \quad (20)$$

式中  $Q_3$ ——电站厂坝间汇流和侧向补给的流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ 。

$Q_5$ ——电站尾水出口下游侧与厂坝间河道汇流后的河道断面流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;

其他符号意义同前。

若电站厂坝间无汇流和侧向补给时,式(19)可简写为

$$Q_2 = Q_5 - Q_4 \quad (21)$$

### 2.2 测算方法的比选

从资料可获取的角度看:除均需获取发电流量数据外,与坝式类似,测算方法Ⅳ与测算方法Ⅴ均需水文站测流资料,适用于上游或下游有合适水文站并有准确测量数据的情况,且测算方法Ⅳ对于有调节水库的电站,还涉及实时水位数据和水库库容曲线,测算方法Ⅴ对于有侧向补给的,还涉及侧向补给的测流数据,数据获取难度较大。两种方法的优劣需根据水文站测站的位置、有无调节水库、下游测站前有无汇流来定。

从计算精度来看,测算方法Ⅳ中式(16)~式(18)的误差计算式分别为

$$\varepsilon_r(Q_2) = \left[ 1 + \frac{2Q_v + (k+1)Q_T + 2Q_6}{Q_2} \right] 4\varepsilon_r(l) \quad (22)$$

$$\varepsilon_r(Q_2) = \left[ 1 + \frac{2Q_v + (k+1)Q_T}{Q_2} \right] 4\varepsilon_r(l) \quad (23)$$

$$\varepsilon_r(Q_2) = \left[1 + \frac{(k+1)Q_T}{Q_2}\right]4\varepsilon_r(l) \quad (24)$$

则测算方法 V 中式 (19) ~ 式 (20) 的误差计算式分别为

$$\varepsilon_r(Q_2) = \left[1 + \frac{(k+1)Q_T + 2Q_3}{Q_2}\right]4\varepsilon_r(l) \quad (25)$$

$$\varepsilon_r(Q_2) = \left[1 + \frac{(k+1)Q_T}{Q_2}\right]4\varepsilon_r(l) \quad (26)$$

类似地, 忽略同类物理量测量相对误差差异 (采用相同方法和仪器), 则可估算各相关测算方法误差 (见表 2)。由此可见:

a. 引水式水电站测流可能受调节水库、机组流量、侧向溢流或区间取水等多种因素影响, 这些流量值占比越大, 相对误差就越大。

b. 各种测流方法均与机组发电流量有关, 下泄

流量相对误差取决于机组流量获取方式。采用发电量推算时, 受此影响相对误差较大; 采用仪器直接测流的方式时, 相对误差稳定。

综上分析, 与坝式水电站类似, 引水式水电站测流方法精度及难易程度仍主要受关联水库调节性能、可利用测流水文站的位置、支流汇入、区间取水等因素影响。当上游有测流水文站时, 有调节的宜采用测算方法 IV 中式 (18) 进行测算, 无调节的宜采用测算方法 IV 中式 (19) 进行测算; 当下游有测流水文站时, 测流断面前有支流汇入的宜采用测算方法 V 中式 (19) 进行测算, 测流断面前无支流汇入时, 宜采用测算方法 V 中式 (20) 进行测算。为保障测算精度, 发电流量宜采用仪器直接测量, 否则应直接就关注的坝 (闸) 下断面进行测流。

表 2 引水式水电站下泄流量测算方法误差分析

测算方法	流量计算公式编号	流量计算公式相对误差公式及公式编号	误差估计	备 注
方法 IV	(17)	$\varepsilon_r(Q_2) = \left[1 + \frac{2Q_V + (k+1)Q_T + 2Q_6}{Q_2}\right]4\varepsilon_r(l) \quad (22)$	$> 4\varepsilon_r(l)$	下泄流量受调节水库、机组流量、侧向溢流或区间取水等多种因素影响, 这些流量占比越大, 相对误差越大
	(18)	$\varepsilon_r(Q_2) = \left[1 + \frac{2Q_V + (k+1)Q_T}{Q_2}\right]4\varepsilon_r(l) \quad (23)$	$> 4\varepsilon_r(l)$	下泄流量受调节水库、机组流量等多种因素影响, 这些流量占比越大, 相对误差越大
	(19)	$\varepsilon_r(Q_2) = \left[1 + \frac{(k+1)Q_T}{Q_2}\right]4\varepsilon_r(l) \quad (24)$	$\geq 4\varepsilon_r(l)$	下泄流量相对误差与机组流量获取方式有关, 采用发电量推算时, 相对误差较大; 采用仪器直接测流的方式时, 相对误差稳定
方法 V	(20)	$\varepsilon_r(Q_2) = \left[1 + \frac{(k+1)Q_T + 2Q_3}{Q_2}\right]4\varepsilon_r(l) \quad (25)$	$> 4\varepsilon_r(l)$	下泄流量受调节水库、区间支流汇入流量等多种因素影响, 这些流量占比越大, 相对误差越大
	(21)	$\varepsilon_r(Q_2) = \left[1 + \frac{(k+1)Q_T}{Q_2}\right]4\varepsilon_r(l) \quad (26)$	$\geq 4\varepsilon_r(l)$	下泄流量相对误差与机组流量获取方式有关, 采用发电量推算时, 相对误差较大; 采用仪器直接测流的方式时, 相对误差稳定

注 对于估算系数  $k$ , 直接仪器测流 (含水位测量计算) 的,  $k=1$ , 采用发电量推算等其余情况  $k>1$ 。

### 3 结 论

本文基于水量平衡原理, 对广为关注的水电站下泄流量的测算方法进行研究。研究表明, 在直接测流不便的情况下, 需要综合水电站开发方式、上下游水文站测流数据可获取性, 以及不同测算方法的误差控

制要求来确定最佳算法。间接计算方法中, 涉及水库调节、支流汇入、侧向溢流、区间取水、机组发电流量的, 均会不同程度地影响计算精度, 需要根据文中推荐公式进行比较计算, 因地制宜, 选择测量难度小、经济性好、误差较小的方案。当前, 国家正大力推进绿色小水电建设, 文中相关算法 (下转第 10 页)

DOI: 10.16617/j.cnki.11-5543/TK. 2022.12.02

# 水电站大坝智能安防管控平台设计及分析

曾作朋

(中国水电顾问集团桃源开发有限公司, 湖南 常德 415000)

**【摘要】** 随着5G网络、大数据和人工智能算法技术的发展应用,在水电站大坝区域建设智能安防管控平台对保障电站的安全稳定运行及公共财产安全至关重要。文章以桃源水电站大坝为例,设计了一套适用于该区域的智能安防管控平台,介绍了该平台的建设目标和结构组成,并从重要区域侵入监测、车辆识别、人员行为监测和门禁系统联动几个方面出发,分析了该平台的功能和优势。

**【关键词】** 水电站大坝;视频监控;智能安防管控平台

中图分类号: TV737

文献标识码: B

文章编号: 1673-8241 (2022) 12-007-04

## Design and Analysis of Intelligent Security Management and Control Platform for Hydropower Station Dams

ZENG Zuopeng

(Taoyuan Development Co., Ltd., China Hydropower Engineering Consultants Group Co., Ltd., Changde 415000, China)

**Abstract:** With the development and application of 5G network, big data and artificial intelligence algorithm technology, the construction of intelligent security management and control platform in hydropower station dam area is of great importance to ensure the safe and stable operation of power stations and the safety of public property. Taking Taoyuan Hydropower Station dam as an example, this paper designs a set of intelligent security management and control platform suitable for this area, introduces the construction objectives and structure of the platform, and analyzes the functions and advantages of the platform from several aspects of intrusion monitoring in important areas, vehicle identification, personnel behavior monitoring and access control system linkage.

**Key words:** hydropower station dam; video surveillance; intelligent security management and control platform

水电站大坝安防管控平台,一般为具备视频监控、周界防护、身份识别等功能的安防系统。这类安防系统虽在一定程度上能够满足水电站大坝的安防需求,但其智能分析能力有限,只能用于现场的实时画

面监测和历史追溯,无法完整地实现坝区内的视频入侵报警、人员安全行为分析、活动轨迹跟踪等功能,且由于现场监视画面多、无效信息量大,值班人员难以及时兼顾所有区域。此外,现有安防系统后台分

收稿日期: 2022-09-01

作者简介: 曾作朋 (1981—), 男, 本科, 高级工程师, 从事水电站设备检修、维护管理工作。



散,一旦发生紧急状况,依靠人工执行安防预案不但无法确保对事件的及时响应,还可能导致资源浪费和安全隐患。

根据《电力设施治安风险等级和安全防范要求》(GA 1089—2013)等规范要求,水电站大坝的安防管控平台需要具备智能分析、自动辨别风险功能并具有执行应急预案的辅助手段<sup>[1]</sup>。随着5G网络的普及与应用,基于水电站大坝,应用大数据和人工智能算法技术构建智能安防管控平台,对保障电站安全稳定运行及公共财产安全具有重要意义<sup>[2]</sup>。因此,本文以桃源水电站为例,设计一套适用于该电站大坝的智能安防管控平台,并对平台中的关键技术进行分析。

## 1 水电站大坝智能安防平台建设目标

桃源水电站大坝区域具有地理位置特殊、人员复杂、社会车辆进出多等特点,大坝的安全防护工作十分典型。

### 1.1 安防子系统统一管理和控制

智能安防管控平台应能实现将分散的安防子系统整合至平台进行统一管理和控制,并用相同的软件界面和环境条件进行监视;方便各部门管理人员实现对大坝保护系统的报警处理、日常运行管理、突发事件处置等业务的统一管控<sup>[3]</sup>。

### 1.2 区域安全状态自动评估

根据水电站大坝的安防管理流程和应急处理措施,智能安防管控平台应能对突发事件分级分类并进行预案化处理。针对不同突发事件匹配对应的事件级别与处置流程,缩短处置时间,提高响应效率。同时,平台应根据视频监控系统数据对当前安防情况进行自动处理分析,对安防情况进行在线判断,并过滤无效信息,对敏感区域、敏感人车、敏感事件提前预判报警。

### 1.3 数据多地联动与共享

水电站大坝智能安防管控平台应能实现采集、转译各子系统的数据内容,建立对应系统的服务程序,接受网络上所有授权用户的服务请求,实现数据信息

共享。另外,通过应用互联网及云技术,建立智能安防管控平台,进而实现多地远程通信互动及数据共享,并通过软硬件数据安全控制机制,严格控制数据访问,保障数据安全。

## 2 水电站大坝智能安防平台结构

本文针对桃源水电站大坝区域设计的智能安防管控平台主要由智能监控系统、高速网络系统和综合管理分析系统组成,整个平台具有系统分级管控清晰、安全状态分析处理及时和数据存储共享可靠等优点,符合水电站大坝智能安防管控平台的建设目标(见图1)。



图1 桃源水电站大坝智能安防管控平台结构

### 2.1 智能监控系统

智能监控系统由前端监控系统和后端存储系统共同组成。监控人员能够在监控中心实时查看和调取视频监控信息,实现对大坝各个区域安全状态的监测。同时智能监控系统中配置有较高可靠性的数据存储设备,以此作为大坝安全监控体系记录、事件回溯功能的载体<sup>[4]</sup>。

a. 前端监控系统。桃源水电站大坝现有的前端监控系统相对落后,在建设智能安防管控平台的过程中,首先需要考虑将监控设备更换为现代化的智能监控摄像头,并覆盖大坝所有区域。更换的智能监控摄像头需实现云台控制、枪球联动、3D缩放定位、自动复位、自动巡航等基本控制功能;能自动对相机虚焦、场景变更、音频异常等情况作出响应,及时通过指定方式提示或报警;结合AI技术,自动进行越界侦测、区域入侵侦测、人员聚集侦测<sup>[5,6]</sup>。

为了保证前端监控系统设备的安全稳定运行,水电站大坝应采用现场巡检与远程维护相结合的运维方式。大坝工作人员采用定时巡检方式实地检测设备工

作异常状况,包括清晰度异常、亮度异常、偏色、噪声干扰、场景变更、画面冻结、信号丢失、云台失控等,及时检测系统的故障并报警通知,提高视频监控系统有效性。另外,通过平台软件能够对前端监控设备进行校时、重新启动、修改参数、软件升级、远程维护等。设备提供远程访问功能,运维人员不必到达设备现场,就可修改设备各项参数,提高设备维护效率。

**b. 后端存储系统。**后端存储系统的安全可靠性直接影响水电站大坝智能安防管控平台的运行效果。因此,智能监控系统的后端存储系统应采用分布式存储和集中管理相结合的工作模式,在各个区域分别建设视频监控数据存储系统,同时在大坝工作站处建设集中存储系统,存储的数据还应支持数据上传云功能。

按照水电站大坝安全管理要求和安全预防体系分级要求,后端存储系统以树状图的形式将监控设备归到不同安全等级的分组列表中,允许通过列表项查找监控设备并播放录像,允许用户将特别关注的监控设备加入收藏夹以便快速访问,自动为录像捕捉到的人员、车辆、入侵限制区、状态变更、报警等事件创建时间线索引,允许用户通过索引快进到发生事件时的录像位置。

## 2.2 高速网络系统

由于水电站大坝视频监控点多且环境复杂,因此智能安防管控平台需要更可靠、更稳定、更迅捷的传输网络。在大坝网络建设过程中,要保证办公网、工控网、监控网三网独立,因此,高速网络系统采用5G网络和万兆光纤环网相结合的方式,并与办公网、工控网之间实现物理隔绝<sup>[7]</sup>。由于视频解码器需要大带宽,故网络传输采用链路聚合技术,从而提高矿山监控网络的可靠性,进而增加矿山网络线路的冗余功能。同时,高速网络系统采用相互独立的三层网络结构,以消除视频监控数据传输过程中出现的图像延迟、卡顿等现象,实现前端与后端之间视频监控数据的传输<sup>[8]</sup>。

## 2.3 综合管理分析系统

综合管理分析系统由监控中心、视频管理工作站和平台管理服务器共同组成。监控中心直接与智能监控系统相连,使智能安防管控平台能实时查看和调取视频监控信息;视频管理工作站在系统中承担着集中存储数据的功能,并能对当前安防情况进行自动处理分析和在线判断,并过滤无效信息,对敏感区域、敏感人车、敏感事件提前预判报警;平台管理服务器控制着整个智能安防管控平台的资源管理、性能维护和监控配置等过程,对于平台管理人员监控处理器、硬盘驱动器、内存等系统关键部件的使用情况和性能表现至关重要。

基于综合管理分析系统,桃源水电站大坝的智能安防管控平台不仅可以实现前端监控点位视频监控信息实时查看、回溯、侦测等功能,还可以应用大数据和人工智能算法技术实现重要区域侵入监测、车辆识别、人员行为监测和门禁系统联动等功能。

**a. 重要区域侵入监测。**在大坝重要区域安全警戒线或者安全门前安装智能监控设备,结合AI技术,自动进行越界侦测、区域入侵侦测、人员聚集侦测。当监控设备侦测到人员或者车辆进入风险预警区时,区域内安装的灯光系统与广播系统会向侵入者发出声光提示;当监控设备侦测到人员或者车辆进入风险管控区时,综合管理分析系统向安全监控人员发出声光报警,安全监控人员根据报警信息及时查看报警区域实时状况,从而避免安全事故发生<sup>[9]</sup>。

**b. 车辆识别。**综合管理分析系统利用智能监控设备自动捕捉拍摄画面中的车辆,并提取车辆特征,自动辨识车辆超速、车辆违停、车辆起火等异常情况。同时,配合大坝车辆管理守则,设立车辆驾驶积分制。当出现违规情况时,综合管理分析系统自动记录违规车辆车牌号并给予扣分处罚,当积分清零时,须对违规司机进行安全警示教育。

**c. 人员行为监测。**实时监控大坝人员安全防护装备的佩戴情况。同时,配合大坝人员管理守则,设立人员安全管理积分制。当出现违规情况时,综合管

理分析系统通过人脸识别自动记录违规人员并给予扣分处罚,当积分清零时,须对违规人员进行安全警示教育。另外,在“新冠疫情”的大背景下,还需实时监控大坝人员的体温、健康码、口罩等情况。综合管理分析系统对异常人员进行标记,并向安全监控人员发出声光报警,安全监控人员可根据报警信息及时查看报警区域的实时状况<sup>[10]</sup>。

**d. 门禁系统联动。**采用人脸识别门禁系统,与大坝智能安防管控平台进行联动,为用户提供简单易用的用户授权界面、门禁控制界面、记录查询及导出界面。综合管理分析系统能自动在后台从设备上提取相关记录数据,当发生紧急情况时,接受大坝智能安防管控平台的指令,执行对应应急预案。

### 3 结 语

本文针对桃源水电站大坝区域,设计了一种由智能监控系统、高速网络系统和综合管理分析系统组成的智能安防管控平台。该平台利用 5G 网络、大数据分析和人工智能算法技术,能实现重要区域侵入监测、车辆识别、人员行为监测和门禁系统联动等功能,有利于对水电站大坝安全的智能化管控。该平台具备高可靠性、高精准度和高防护性,不仅对保障桃源电站的安全稳定运行、县城的公共财产安全具有重

要意义,可以推广至其他电站的相似区域甚至整个电力行业。▲

### 参考文献

- [1] 全国安全防范报警系统标准化技术委员会. GA 1089—2013, 电力设施治安风险等级和安全防范要求[S]. 北京:中华人民共和国公安部,2013.
- [2] 常亮. 信息网络环境下智能安防报警系统设计[J]. 计算机测量与控制,2017,25(7):302-305.
- [3] 孟艳. 智能安防综合管理平台的设计[J]. 数字技术与应用,2022,40(4):137-139.
- [4] 陶蕾蕾. AI 赋能,智慧安防助力烟草企业管理[J]. 智能建筑,2020,11(1):31-34.
- [5] 黄蓉,宋志强. 中高档社区智能安防系统方案设计与研究[J]. 机电产品开发与创新,2022,35(1):63-64.
- [6] 郑洪燕. 大数据在安防智能管控平台应用的探索研究[J]. 中国安全防范技术与应用,2020,1(1):51-53.
- [7] 熊海朋,陈洋洋,陈春玮. 基于卷积神经网络的场景图像文本定位研究[J]. 电子科技,2018,31(1):50-53.
- [8] 张菁. 站台端头入侵报警系统在高铁站的应用[J]. 科技视界,2019,1(1):206-208.
- [9] 王海超,张超,王孟枢,等. 输电线路巡检智能立体安防系统研究[J]. 电工技术,2020,1(13):57-59.
- [10] 朱庆淦,钟桂凤. 基于大数据技术下校园智能安防系统的应用研究[J]. 电脑知识与技术,2022,18(2):38-39.
- [6] 王增海. 水电站发电流量计算方法探讨[J]. 人民黄河,2012,34(8):117-119.
- [7] 黄清涛,李华书,宋全勇. 水电站枢纽出库流量模型研究[J]. 水电与新能源,2012,100(1):45-47.
- [8] 孙中颖. 小型水电站水轮机流量的测量方法[J]. 科技向导,2013(13):188.
- [9] 李香丽,叶坤. 试算法在计算发电流量及绘制 NHQ 曲线中的应用[J]. 科技创新与应用,2015,(36):38-39.
- [10] 夏守筠. 小山水库入库流量计算误差产生原因分析[J]. 吉林电力,2004,175(6):35-37.
- [11] 李庆扬,王能超,易大义. 数值分析[M]. 5 版. 北京:清华大学出版社,2008.
- [12] 水利部水利水电规划设计总院. 水利水电工程水文计算规范:SL/T 278—2020[S]. 北京:中国水利水电出版社,2020.
- [13] 水利部农村水电及电气化发展局. 小型水电站现场效率试验规程:SL 555—2012[S]. 北京:中国水利水电出版社,2012.



# 水电站一体化排水系统研究与实践

黄万虎 沈顺云 刘开泰

(华能甘肃水电开发有限公司, 甘肃 兰州 730070)

**【摘要】** 水电站排水系统在水电站生产运行中起着至关重要的作用, 如果排水系统出现故障, 极易造成水淹厂房事故。通过对喜儿沟水电站检修排水系统与渗漏排水系统进行一体化研究, 提升了检修排水系统渗漏排水功能和水泵性能, 加快了排水速度, 提升了排水效率, 提高了排水系统的安全可靠性, 有效解决了因排水系统故障造成的水淹厂房问题。水电站一体化排水系统研究, 为水电站排水系统安全稳定运行拓展了思路, 可在同类型水电站中普遍推广应用。

**【关键词】** 水电站; 排水系统; 优化设计; 安全运行

中图分类号: TV73

文献标识码: B

文章编号: 1673-8241 (2022) 12-011-04

## Research and Practice of Integrated Drainage System of Hydropower Station

HUANG Wanhu, SHEN Shunyun, LIU Kaitai

(Huaneng Gansu Hydropower Development Co., Ltd., Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** The drainage system of hydropower station plays a very important role in the production and operation of hydropower station. If the drainage system fails, it is easy to cause the accident of flooded powerhouse. This paper conducts integrated study on the maintenance drainage system and leakage drainage system of Xi'ergou Hydropower Station, improves the leakage drainage function and pump performance of the maintenance drainage system, speeds up the drainage speed, improves the drainage efficiency, improves the safety and reliability of the drainage system, and effectively solves the problem of flooded powerhouse caused by the drainage system failure. The research on the integrated drainage system of hydropower station has expanded the idea for the safe and stable operation of the drainage system of hydropower station, and can be widely applied in the same type of hydropower station.

**Key words:** hydropower station; drainage system; optimization design; safe operation

### 1 概述

白龙江喜儿沟水电站位于甘肃省舟曲县境内的白龙江干流上游, 电站为径流式水电站, 额定水头 57.8m, 设计引用流量  $141\text{m}^3/\text{s}$ , 电站装有 3 台混流

式机组, 总装机容量 72MW, 年设计发电量 2.85 亿  $\text{kW}\cdot\text{h}$ , 年设计利用小时  $3955\text{h}^{[1]}$ 。

### 2 喜儿沟水电站排水系统设计特点

喜儿沟水电站厂房内排水系统分为渗漏排水系统

收稿日期: 2022-08-25

作者简介: 黄万虎 (1976—), 男, 教授级高级工程师, 主要从事水利水电工程施工及水电站生产运行管理工作。

与检修排水系统,两个系统相对独立。喜儿沟水电站设计渗漏排水泵安装于电站蝶阀层,蝶阀层高程为1463.70m,渗漏集水井顶部与蝶阀层层面齐平,集水井深5.4m,底部高程为1458.30m,为厂房最低处。检修泵安装于检修泵坑内,安装高程1462.50m,低于蝶阀层1.2m。

### 2.1 渗漏排水系统

厂房渗漏排水系统采用集水井集中排水方式,集水井容积为 $66\text{m}^3$ 。渗漏排水系统主要任务是抽排渗漏集水井集水,渗漏集水井水源主要来自机坑自流排水、厂房渗漏水、水轮机顶盖漏水、空压机冷却水等。厂房渗漏排水系统主要由2台300JC130-12 $\times$ 3型长轴深井泵与控制柜组成。2台长轴深井泵各用1根DN150排水管,经球阀、逆止阀、示流器后汇至DN250排水母管,排水至尾水。厂房渗漏排水主要特点是高程较低,不能靠自流排至尾水,所以设有集水井,把渗漏水集中起来,用水泵抽出<sup>[2]</sup>。

### 2.2 检修排水系统

机组检修排水系统在机组检修时排出蜗壳及尾水流道集水。机组检修排水系统主要由2台100ZW40-30型离心泵、1台QDX3-22-0.75S潜水排污泵及泵控阀、控制柜等组成。检修排水系统设1根DN300检修排水母管,2台检修泵进水管并排安装在机组检修排水母管上,2台检修泵各用1根DN100的排水管,尾水流道集水排至DN300检修排水母管后,分别经DN100排水管、逆止阀、闸阀、示流器后通过检修泵出口后经逆止阀、闸阀排至电站下游尾水。

## 3 设计排水系统存在的不足

### 3.1 渗漏排水系统

喜儿沟电站所处白龙江河段水流多年平均含沙量为 $0.625\text{kg}/\text{m}^3$ ,汛期最大含沙量达 $9.25\text{kg}/\text{m}^3$ ,水流中所含泥沙成分颗粒小,容易随水流进入机组运行过流部件,经过长时间运行后,机组过流部件发生不同程度磨损,厂内渗漏水量较设计值增大较多,致使水泵启动频繁<sup>[3]</sup>,渗漏排水泵长时间运行,经常出现发热故障。长轴深井泵运行时间长发热后泵轴与橡胶衬

套磨损严重,渗漏泵滋水严重,抽排水效率降低,实际抽排水量大大小于设计抽排水量。渗漏排水井底部水平,没有设计集水井清淤设施,运行一段时间造成集水井淤积后,集水井集水容积减小,水位上升速度加快,渗漏排水泵频繁启动。

鉴于以上原因,实际渗漏水量增大,2台水泵采取1台工作、1台备用运行方式已不能满足现场实际需要,由于偶然异常来水或水泵故障,多次发生水淹集水井事故,严重威胁厂房运行安全。

### 3.2 检修排水系统

喜儿沟水电站检修泵安装于1462.50m高程,低于渗漏集水井顶面1463.70m高程1.2m,由于检修泵安装高程较低,渗漏排水井发生溢水问题后,势必淹没检修排水泵,存在较大安全隐患。

原有检修泵每台每小时排水量约为 $80\text{m}^3$ ,单台机组蜗壳及尾水流道集水量约为 $330\text{m}^3$ ,机组检修时2台检修泵同时启动抽排单台机组蜗壳及尾水流道集水时间约为2.1h。机组尾水门封水主要靠尾水与尾水流道水位压差挤压尾水门达到止水封水的效果,抽排水速度越快,尾水门封水效果越好。由于检修排水泵设计抽水容量富余量较小,若出现尾水门封水效果不佳、蝶阀渗水等问题,会发生检修泵抽排水时间超过检修泵允许连续工作时间,水泵发热,被迫停止排水作业,抽排水耗时长,影响机组正常检修工期。

原有检修排水系统为独立排水系统,仅在机组检修时使用,经统计,检修泵每年累计使用时间基本不超过80h,其他时间均处于备用状态,设备利用率非常低。另外,蝶阀层较为潮湿,水泵长时间不启用,容易发生水泵电机受潮、绝缘降低等问题。

## 4 一体化排水系统研究与实践

水电站运行过程中,排水系统虽然比较简单,但却非常重要,若排水不畅,轻则水淹水泵电机,重则可能导致水淹厂房<sup>[4]</sup>,为确保电站安全,防止发生水淹厂房等重大事故,排水系统的设计就显得尤为重要<sup>[5]</sup>。喜儿沟水电站一体化排水系统研究实践,是在综合考虑厂房排水系统实际情况的前提下,满足技术先进、经济合理、运行可靠要求<sup>[6]</sup>,消除排水系统存

在的隐患，杜绝因排水系统缺陷引起的水淹厂房事故的发生。

#### 4.1 方案设计

喜儿沟水电站渗漏排水系统与检修排水系统一体化研究，使得检修排水系统具备渗漏排水功能，进一步增强渗漏排水系统的可靠性，确保汛期机组稳定运行，消除水淹厂房隐患。

根据电站现场设备实际布置情况，通过厂房排水系统优化设计，对原有检修泵进行改造，置换两台水泵，在每台检修泵进水口处安装一个三通阀，一头接入检修排水系统，一头接入渗漏排水系统，另一头接入检修泵，在三通阀各进水口安装逆止阀、球阀及示流计，通过手动启动进行检修排水系统与渗漏排水系统切换操作。机组检修时，关闭渗漏排水系统阀门，打开检修排水系统阀门，作为检修排水泵使用；机组不检修时，关闭检修排水系统阀门，打开渗漏排水系统阀门，作为渗漏排水泵使用。

加大检修排水泵功率和扬程，提高水泵每小时抽排水能力，缩短机组检修时检修泵抽排水时间，提高

检修工作效率；提高检修泵安装高程，将检修泵由原安装高程为 1462.50m 提高至 1463.70m，提高 1.2m，降低水淹检修泵的风险。

#### 4.2 水泵选型

一体化水泵的型号选择必须满足排水功率、吸程、扬程、排水量等方面要求。

原设计水泵功率 15kW，吸程 5m，扬程 30m，排水量  $80\text{m}^3/\text{h}$ 。经综合比较，一体化水泵选用自吸式无堵塞水泵，型号为 ZWII100-100-45，功率 22kW，自吸高度 8m，扬程 45m，排水量  $100\text{m}^3/\text{h}$ ，转速 2900r/min。

一体化水泵安装高程 1463.70m，渗漏排水井底部高程为 1458.30m，深度 5.4m，自吸式无堵塞泵吸程为 8m，满足吸程要求；检修排水及渗漏排水均排至厂房尾水，较原设计水泵，一体化泵扬程增加 15m，考虑管道内水头损失，扬程满足要求；水泵功率增加，水泵排水量由  $80\text{m}^3/\text{h}$  增加至  $100\text{m}^3/\text{h}$ ，并选用高转速水泵，排水能力大大增加。渗漏、检修一体化排水系统结构见图 1。

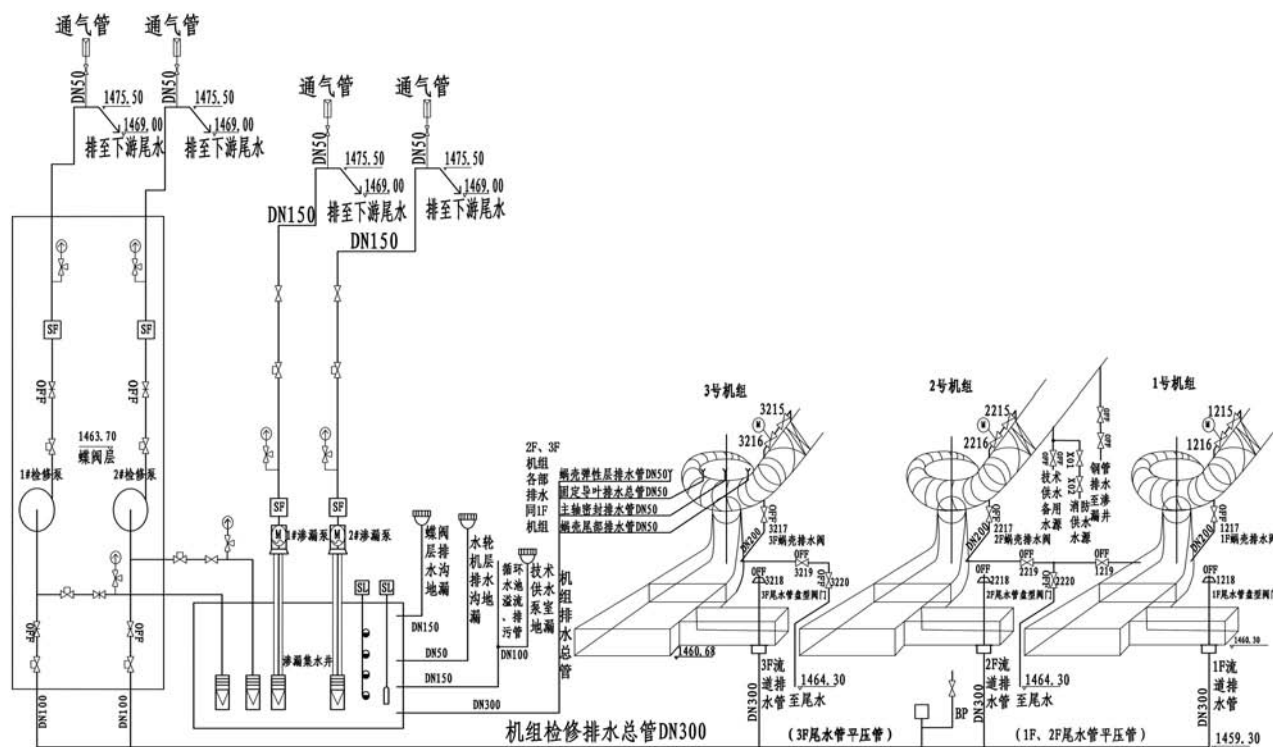


图 1 渗漏、检修一体化排水系统结构



### 4.3 一体化水泵改造实施

将原有 2 台检修泵拆除, 更换为 2 台 ZWIII100-100-45 型自吸式无堵塞水泵, 安装于 1463.7m 高程。在原检修泵两根进水管上再增加两条 DN100 进水管线, 每条进水管设置闸阀 1 台, 用于渗漏排水系统与检修排水系统之间切换。焊接长约 16m 水平 DN100 管线延伸至渗漏集水井, 因水平管线过长, 为防止逆流, 在靠近渗漏集水井的位置安装逆止阀, 逆止阀选用橡胶瓣式阀, 该阀采用全流面积式设计, 具有水头损失小, 不易堆积杂物, 维修简单等特性。一体化水泵改造施工工期 3 天。

喜儿沟水电站一体化水泵改造工期短, 施工难度小, 改造费用低。经统计, 一体化水泵改造共计成本为 95520 元, 经济节约。渗漏、检修一体化排水系统改造实施成本统计见表 1。

表 1 一体化水泵改造实施成本统计

序号	项 目	单位	数量	单价/元	合价/元
1	水 泵	台	2	21500	43000
2	逆止阀	个	2	1600	3200
3	闸 阀	个	2	1700	3400
4	示流器	个	4	1350	5400
5	软启动器	个	2	2800	5600
6	无缝钢管	米	40	130	5200
7	90°弯头	个	4	230	920
8	底 阀	个	2	1600	3200
9	RMM2-400 塑料外壳式断路器	套	2	3500	7000
10	无线水位报警器	套	1	3600	3600
11	安装调试	项	1	15000	15000
	合 计				95520

### 5 实施效果评价

水泵改造前, 非汛期单台机组运行时, 渗漏排水系统排水总量约为  $40\text{m}^3/\text{h}$ , 需要单台渗漏排水泵运行 0.4h, 休息 1h; 汛期渗漏水量大, 泥沙含量也随之加大, 3 台机组运行时, 总排水量约为  $160\text{m}^3/\text{h}$ , 需要 2 台渗漏排水泵运行 0.8h, 休息 0.25h, 运行时

间较长水泵发热, 容易造成水泵故障或水泵电机线圈烧损。一体化排水系统实施后, 将新增排水泵切换至渗漏排水系统运行时, 全厂渗漏排水泵由 2 台增加为 4 台, 4 台水泵互为备用, 非汛期单台机组运行时, 单台渗漏排水泵运行 0.35h, 休息 0.9h; 汛期, 3 台机组运行时, 可同时启动 3 台渗漏排水泵, 1 台渗漏排水泵作为备用泵, 根据情况随时进行切换运行, 3 台渗漏排水泵运行 0.6h, 休息 0.35h, 增长渗漏排水泵备用休息时间, 消除了水泵频繁启动的隐患, 延长渗漏排水泵使用寿命, 提高了渗漏排水系统的安全可靠性。

机组检修时, 原 2 台检修排水泵抽排单台机组蜗壳及尾水流道约  $330\text{m}^3$  集水量约需 2.1h, 一体化排水系统实施后, 检修排水系统抽排单台机组蜗壳及尾水流道集水约需要 1.6h, 减少排水时间 0.5h, 有效提升了检修排水效率。

机组检修后, 水泵性能、抽排水效率大大提高, 在机组检修时, 抽排水速度加快, 尾水与尾水流道水位压差增长速度加快, 机组尾水门封水速度加快, 可以有效解决尾水门部分密封不严少量渗水造成的封水效果不佳的问题。检修泵由原安装高程 1462.50m 提高至 1463.70m 后, 经过 2 年多的运行, 没有发生过水淹水泵事件, 水淹检修泵的风险大大降低。原检修泵坑长 3.5m、宽 3.1m、深 1.2m, 容积  $13\text{m}^3$ , 检修泵安装位置改变后, 原检修泵坑可作为集水井使用, 在发生渗漏排水井溢水等事件后, 可在检修泵坑临时架设排水泵, 为厂房应急处置创造了便利条件。

### 6 结 语

喜儿沟水电站排水系统一体化实践研究, 将检修排水系统改造后, 实现了检修排水系统兼做渗漏排水系统的功能, 增加了备用渗漏排水泵数量, 减小了渗漏泵启动频繁和故障现象, 提高了渗漏排水系统的安全可靠性; 水泵功率、扬程增大后, 检修排水时间大大缩短。水泵运行 2 年来, 安全可靠, 达到了预期效果, 证明一体化排水系统设计的合理性。

水电站水淹厂房损失大、危害程度高, 水电站管理及运行人员须时刻高度重视水电站 (下转第 23 页)

## 施工技术

深埋长隧洞不良地质塌方段衬砌跟进  
开挖同时施工技术

杨井国 张维欢

(中国水利水电第十一工程局有限公司, 河南 郑州 450001)

**【摘要】** 为解决深埋长隧洞不良地质段施工过程中施工周期长、不良地质条件下开挖工作面裸露时间长易发生坍塌事故的问题, 文章采取不良地质段隧洞衬砌跟进开挖同时施工的方法, 及时对不良地质段采用混凝土衬砌支护措施, 提高了施工效率, 减少了安全隐患, 保证了工程质量, 可为类似隧洞工程施工提供参考。

**【关键词】** 深埋长隧洞; 不良地质段; 跟进施工

中图分类号: TV672+.1

文献标识码: B

文章编号: 1673-8241 (2022) 12-015-05

Simultaneous Construction Technology of Lining Follow-up Excavation in  
Unfavorable Geological Collapse Section of Deep-Buried Long Tunnel

YANG Jingguo, ZHANG Weihuan

(Sinohydro Bureau 11 Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of collapse accident in the construction process of unfavorable geological section of deep-buried tunnel caused by long construction period and long exposed time of excavation working face under unfavorable geological conditions, in this paper, the technology of lining follow-up excavation in unfavorable geological section is adopted to timely adopt concrete lining support measures for unfavorable geological section, which improves the construction efficiency, reduces the hidden danger of safety, and ensures the quality of the project, which can provide reference for the construction of similar tunnel projects.

**Key words:** deep-buried long tunnel; unfavorable geological section; follow-up construction

隧洞施工工序由开挖支护、通风排烟、出渣和衬砌等组成, 开挖和衬砌是控制整体工期的最关键工序, 一般采用顺序作业的施工模式, 即在隧洞全部开

挖完成后再进行衬砌。该方法的优点是开挖与衬砌单独施工, 不存在交叉干扰; 缺点是开挖与衬砌施工时间不重合, 工期漫长, 且遭遇不良地质段时长时间在

收稿日期: 2022-08-27

作者简介: 杨井国 (1987—), 男, 本科, 高级工程师, 从事水利水电施工技术管理工作。

一次钢拱架支护状态下，有坍塌风险。因此，如何通过采取一定的技术措施，在不良地质段开挖之后随即进行衬砌混凝土浇筑，保证工程安全，显得尤为重要。

为解决该问题，目前一般是在长隧洞中间合适位置增加施工支洞，增加施工工作面，将一个长隧洞分成若干段，第一段开挖完成后，进行第二段开挖的同时，可以同时进行第一段的衬砌。但增加施工支洞的方法适用于浅埋或高山峡谷地形，若遇到深埋或较平坦的地形条件，增加的施工支洞距离过长，经济上不合理。

1 工程概况

新疆阿勒泰输水隧洞工程设计断面为马蹄形，采用钻爆法施工，隧洞开挖半径 8.9m，隧洞全长 7100m，无施工隧洞，隧洞进口和出口单端开挖各 3550m。隧洞埋深约 80 ~ 115m，岩石岩性为黑云母斜

长片麻岩，岩石强度在 35 ~ 100MPa 之间，石英含量约为 25% ~ 35%。

在本工程出口 K0 + 1421.2 ~ K0 + 1673.2 等洞段开挖过程中遭遇不同程度的挤压破碎带，岩石整体十分破碎，最大塌方深度为 8 ~ 15m，塌方段均经过了超前小导管、超前管棚、空腔混凝土回填等一次支护处理。但若继续向前全部开挖完成后再进行衬砌，塌方段恐存在二次塌方的风险，造成工程事故。因此需在继续向前开挖过程中，对塌方段进行永久混凝土衬砌加固，保证施工安全。

2 衬砌跟进开挖同时施工的主要难点

在开挖与衬砌同时施工过程中，施工机械设备繁多，隧洞开挖一般需采用钻爆台车、支护台车、装载机、自卸汽车、锚杆钻机、湿喷机等设备，混凝土衬砌需采用钢筋台车、混凝土钢模衬砌台车、混凝土泵车、混凝土罐车等设备（见图 1）。

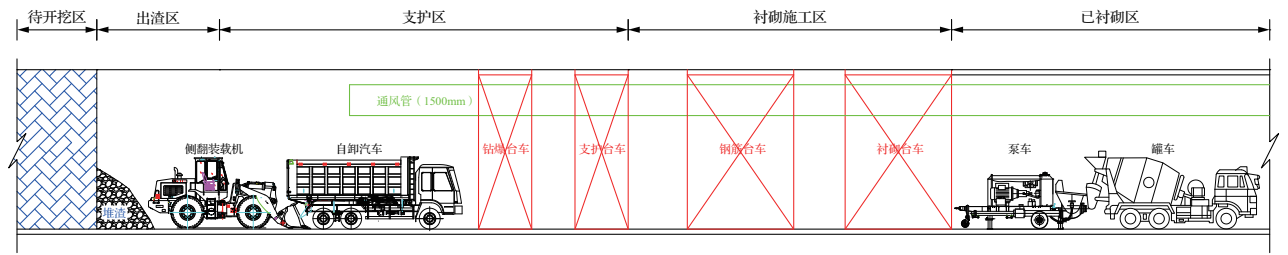


图 1 开挖与衬砌同时施工工艺示意图

2.1 隧洞开挖与隧洞底板混凝土施工的干扰问题

隧洞开挖工序一般为超前支护（如果有）、钻孔、装药、爆破、通风排烟、出渣、初期支护等；隧洞底板混凝土工序一般为清基（石渣清理、高压水冲

洗）、钢筋制安、模板安装、衬砌钢模台车就位、混凝土泵车及罐车就位、混凝土浇筑、混凝土养护等（见表 1、表 2）。

表 1 隧洞开挖支护作业工序时间

时间/h 部位 \ 工序	测量放线	超前支护	钻孔	装药爆破	通风散烟	安全处理	围岩支护	出渣	清底	合计
Ⅱ类围岩洞段	0.5	0	4	1	0.5	0.5	0	5	0.5	12
Ⅲ类围岩洞段	0.5	0	4	1	0.5	0.5	1	5	0.5	13
Ⅳ类围岩洞段	0.5	2	4	1	0.5	1.5	2	4	0.5	16



表 2 隧洞衬砌作业工序时间

时间/h 部 位 \ 工 序	清基	钢筋安装	模板安装	台车就位 + 封堵头板	混凝土浇筑	待强	合计
混凝土施工	12	6	6	6	10	36	76

根据隧洞形状不同、超挖尺寸不同、岩石结构岩性不同，隧洞开挖过程中，一般会对刚开挖过的底板铺垫厚度 50 ~ 150cm 不等的石渣，形成一条较平整的隧洞出渣道路。而底板混凝土浇筑要求将底板的碎石、浮渣全部清理并用高压风或者高压水冲洗干净，如果底板混凝土作业面正在进行清基工作，而前方开挖工作面需要出渣，则会形成一方停工等待另一方作业完成的状态。

开挖作业面的爆破石渣需运输至洞外的弃渣场进行堆放，在没有施工支洞的情况下，受限于隧洞施工通道唯一的不利条件，前方的开挖出渣车辆必然要经过后方的混凝土衬砌工作面。如果后方正在施工底板混凝土，则出渣车辆就不能通行，如果出渣与底板混凝土浇筑需错开时间分别施工，则会大大降低工程整体的施工效率，这就形成了前方出渣与后方混凝土施工相互干扰制约的局面。

2.2 隧洞开挖与边顶拱混凝土衬砌施工的干扰问题

出渣车辆需穿越通过边顶拱钢模台车，因此必须合理设计钢模台车内部尺寸，保证出渣车辆能穿越钢

模台车内部。

隧洞开挖钻爆法施工一般采用钻孔爆破的工法，YT28 手风钻需要采用高压风、水，高压供风一般是将空压机组布置在洞外，通过高压钢管将高压风输送到隧洞内的开挖掌子面，供水一般是在洞外布置 50 ~ 100m<sup>3</sup> 不等的水池，再通过供水钢管将水输送到开挖掌子面。

爆破后的通风排烟需要将通风机布置在洞口，再布置直径 1.2 ~ 1.5m 不等的通风管延伸至距离开挖工作面 30m 左右的距离，将爆破后的有害气体排出洞外。

另外，隧洞开挖掌子面时，需要将动力电缆、照明电缆等从洞口的变压器位置一路铺设至开挖掌子面。

上述开挖作业面的高压风管、供水管、通风管、照明电缆、动力电缆等管线一般布置在隧洞侧壁上（见图 2、图 3），在开挖与衬砌同时施工的情况下，如何合理地将上述管线穿越混凝土边顶拱衬砌台车，且在隧洞边顶拱衬砌台车需要移动的行进状态下如何尽量少地干扰或者碰撞到这些管线，是开挖与衬砌同时施工的一个难题。

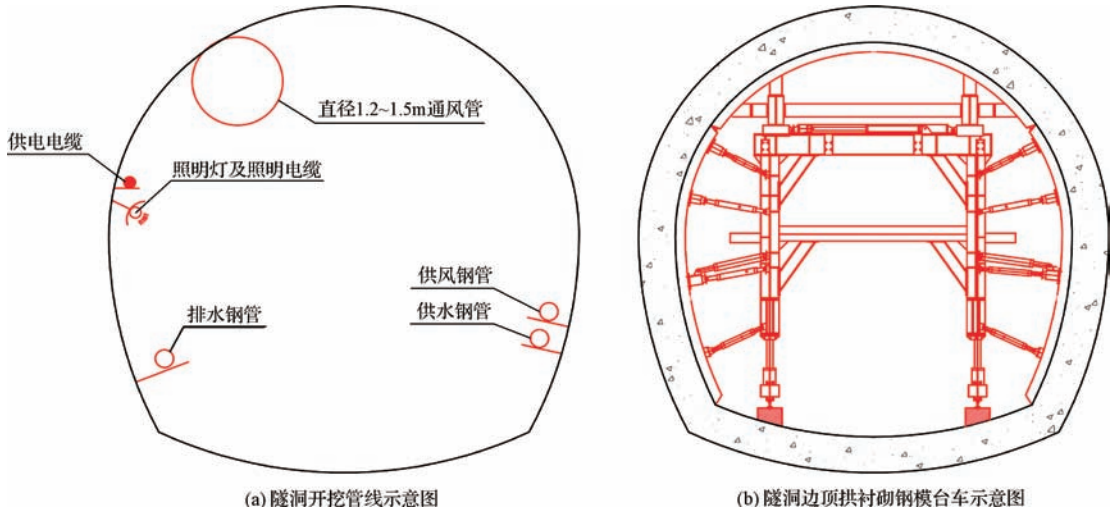


图 2 隧洞开挖管线及边顶拱钢模台车示意图

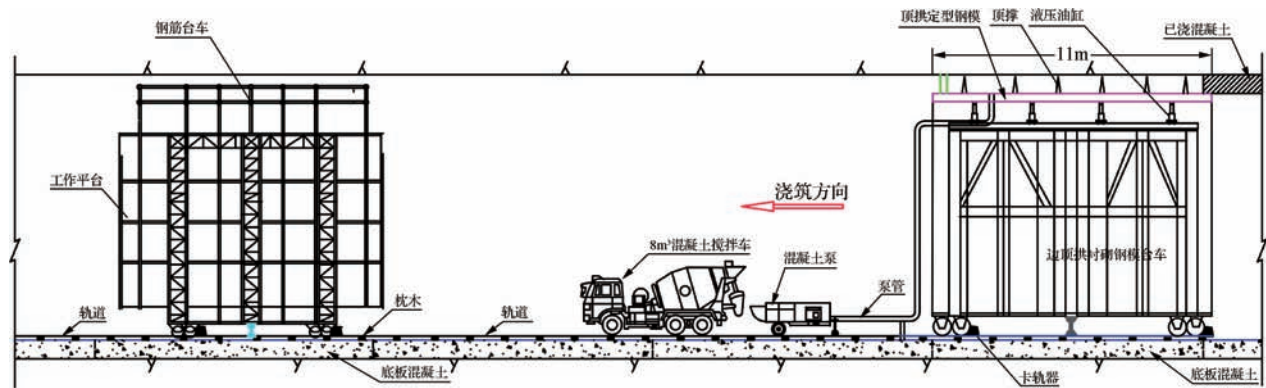


图3 隧洞边顶拱钢模台车施工示意图

### 3 隧洞开挖与底板混凝土施工干扰的解决措施

#### 3.1 底板混凝土施工采取钢栈桥

底板混凝土施工采取钢栈桥，桥下进行清基、钢筋绑扎、混凝土浇筑，桥上可通行出渣车辆。在隧洞开挖过程中，若需要进行底板混凝土施工，可在底板清基、钢筋制安、浇筑、待强养护施工时，在底板混凝土作业面上架设可移动式的自行式钢栈桥。

自行式钢栈桥是为进行隧洞底部混凝土施工而开发的施工机械，具有以下特点：可在钢栈桥下进行混凝土施工，可让车辆通过栈桥，实现早封闭、早成环的施工要求。钢栈桥长度根据一段底板仓号尺寸加工制造，一般需比仓号长度长2m左右。钢栈桥结构需牢固稳定，能承受自卸汽车的重量。

先超3~5个仓号进行隧洞底部开挖，清渣、扎钢筋等衬砌准备作业；架设栈桥（通过栈桥横移和前移），放下栈桥前后引桥；进行另一侧隧洞底部开挖，清渣、扎钢筋等衬砌准备作业；浇筑底部混凝土；在新浇筑的混凝土强度达到脱模要求后，进行脱模行走台车。如此循环进行作业，即可进行不影响隧洞开挖的底部混凝土衬砌。

#### 3.2 采取先边顶拱后底板的施工方式

对于交通隧洞，若无过水要求，可采取先边顶拱跟进开挖施工，底板混凝土待隧洞开挖完成后进行衬砌后施工的方法。该方法能极大缩短隧洞整体工期，

隧洞开挖一般月进尺在80~120m，边顶拱衬砌月进尺一般为120~150m，采用该方法隧洞开挖完成，边顶拱衬砌也可完成，只需进行底板衬砌，底板衬砌的施工速度远远大于边顶拱衬砌速度，底板衬砌月进尺一般可达到350~400m。对于1km长的隧洞，若采用传统方法开挖完成后再衬砌，施工时间约为1.5年，采用先边顶拱后底板的施工方式1年内即可完成，提升施工效率约50%。

但该方法仅适用于不过水的交通隧洞，施工缝的预留部位应注意不能在应力集中处，且需做好施工缝的凿毛处理，可在施工缝处架设一道橡胶止水带及膨胀止水条，以防止山体渗水沿施工缝处漏水。

#### 3.3 合理安排隧洞出渣和混凝土浇筑的时间

制定施工计划时，合理安排隧洞出渣和混凝土浇筑时间，尽量将该两个工序时间错开，比如将混凝土浇筑安排在白天，隧洞出渣安排在夜间，可以有效减少冲突。

### 4 隧洞开挖与边顶拱混凝土施工干扰的解决措施

#### 4.1 优化隧洞开挖管线系统

将10kV高压电缆进洞，在衬砌钢模台车与开挖工作面之间每相距500m布置一个尺寸5m×5m×10m（宽×高×长）的错车洞，在洞内布置10/0.4kV变压器，并在洞内设置照明电缆，减少一道照明电缆对钢模台车的穿越。

在隧洞开挖过程中，出现渗水时需要布置一趟排水钢管把洞内渗水引排到洞外，隧洞开挖需要把洞口水池里的水通过供水钢管将水引至开挖钻孔掌子面。对于贫水洞段，由于前期地质水文勘探过程中已确认无涌水风险，隧洞渗水量较小，可以进行供水管路优化，只采用一道钢管，同时兼具排水管、供水管的作用，不仅缩短了供水的距离，还将一部分排水工程量作为供水量，减少了排水量。方案为在隧洞一侧布置积水沟和三级沉淀池，主要是增加了利用集水坑进行水的储存和沉淀，将供水管与排水管结合，只用一套管路，兼具排水与供水的作用，同时给开挖面钻孔供水、同时将多余的水外排（见图4）。

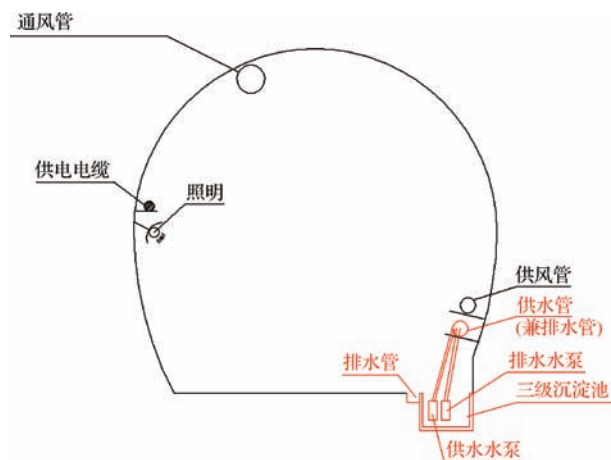


图4 隧洞供水与排水管线优化示意图

#### 4.2 采取保护管套装固定的方式穿越管线

供水钢管、高压电缆的穿越及固定保护措施：钢模台车设计时，在钢模台车侧壁位置设计供水、供风的固定管道，将该两道管道固定到衬砌钢模台车上，该管道与前后方的管道采用软管进行柔性连接，高压电缆穿越钢模台车的部位设置保护措施，确保前方开挖工作面正常施工。

通风排烟管道的穿越及固定保护措施：进行钢模台车结构设计时，在台车内部预留通风设施空间。为保证通风畅通，防止通风管被破坏，把通风管吊挂于

拱顶上，并高于洞内行走机械的高度，吊挂风管的缆索要拉平、拉紧；锚杆要打牢、矫直；风管上的吊环间距要设置均匀，做到无一缺损和无一漏挂。风筒与风机连接处采用30m长铁皮变径导风筒与软式风筒连接；在工作面风筒末端也增加一节10m长铁皮风筒，防止爆破时破坏风筒；风筒经过衬砌地段时，在风筒外设铁皮筒保护，确保管路畅通。

#### 4.3 设计穿越式钢模台车

穿越式钢模台车的结构设计需满足两方面的要求，一是要确保各类机械设备如出渣车、反铲、混凝土罐车等自由地在钢模台车内部穿行，根据机械尺寸需确保钢模台车门架内部有宽3.7m、高4m的尺寸；二是需满足浇筑混凝土时钢模台车的强度、刚度、稳定性的要求。

### 5 结 语

在本工程隧洞出口挤压破碎不良地质塌方段施工过程中，对塌方段进行一次支护处理后，采用先施工边顶拱后施工底板、优化开挖管线布置等技术措施，解决了衬砌与开挖同时施工过程中的交叉干扰问题，进行了衬砌跟进开挖施工，对隧洞一次支护塌方段进行了加固，既保证了隧洞工程施工安全，又为后续混凝土衬砌施工节省了工期，可为隧洞工程类似问题提供参考。▲

#### 参考文献

- [1] 李勇. 青山水库输水工程石膏岩洞段支护衬砌设计方案优化研究[J]. 中国水能及电气化, 2019(10): 36-39.
- [2] 冯璐. 浅埋隧洞穿越不良地质段技术方案优化研究[J]. 水利建设与管理, 2020(2): 57-61.
- [3] 吴高明. 吉牛水电站引水隧洞开挖与混凝土衬砌平行作业施工技术[J]. 四川水力发电, 2014(1): 27-29.
- [4] 胡莉萍. 隧洞开挖与混凝土衬砌交叉作业施工方法[J]. 水电与新能源, 2013(2): 15-16.



DOI: 10.16617/j.cnki.11-5543/TK. 2022.12.05

# WPU 灌浆技术在新河闸工程裂缝处理中的应用

文永林 边 蕾 赵亚涛

(北京金河水务建设集团有限公司, 北京 101100)

**【摘 要】** 通州区凉水河(马驹桥闸—入北运河口段)治理工程施工项目新河闸工程在闸墩混凝土拆模期间产生纵向裂缝,经超声波单面平测法检测分析,其裂缝均为温度裂缝。为消除裂缝对混凝土结构的影响,通过综合比较,决定采用 WPU(水溶性聚氨酯材料)化学灌浆法对裂缝进行修补,并对灌浆效果进行无损检测分析评价。结果表明,WPU 化学灌浆液在裂缝中填充饱满,混凝土黏结牢固,达到预期效果,可为类似工程项目提供参考。

**【关键词】** 聚氨酯;裂缝;化学灌浆

中图分类号:TV543

文献标识码:B

文章编号:1673-8241(2022)12-020-04

## Application of WPU Grouting Technology in Crack Treatment of Xinhe Gate Project

WEN Yonglin, BIAN Lei, ZHAO Yatao

(Beijing Golden River Water Resources &amp; Hydropower Construction Group Co., Ltd., Beijing 101100, China)

**Abstract:** The longitudinal cracks of Xinhe Gate Project in Tongzhou Liangshui River Treatment Project (Maju Bridge Gate to the Entrance Section of North Canal) occurs during the removal of the concrete mold of the gate pier and the cracks are all temperature cracks after detection and analysis by the single-plane detecting method of ultrasonic wave. In order to eliminate the effect of cracks on concrete structure, through comprehensive comparison, it is decided to use WPU (water-soluble polyurethane material) chemical grouting method to repair cracks, and to conduct non-destructive detecting analysis and evaluation of grouting effect. The results show that the WPU chemical grouting fluid is filled full in the cracks and the concrete is firmly bonded, which achieves the expected effect and can provide a reference for similar projects.

**Key words:** polyurethane; crack; chemical grouting

### 1 工程概况

新河闸位于凉水河桩号 49+605 处,主要由闸

室、河道两岸翼墙及上下游连接段组成,其中上游连接段由护底和铺盖两部分组成,下游连接段由消力池、海漫、防冲槽等组成。新河闸为 11 孔闸,每孔

收稿日期:2022-07-15

作者简介:文永林(1992—),男,本科,工程师,主要从事水利水电工程施工技术管理工作。

净宽 10m，高 5m，总净宽为 110m，由中间三孔一联闸底板，其余两孔一联闸底板组成，6 个中墩，中墩宽 1.0m，4 个缝墩，缝墩宽为 1.6m，2 个边墩，边墩上宽 1.0m，下宽 1.5m，闸墩总高为 8.1m，闸底板高程为 17.5m。新河闸总宽为 124.4m。新河闸工程所用的都是商品混凝土，混凝土等级为 C30F150W4，混凝土水胶比为 0.43（见表 1）。

表 1 混凝土施工用量配合比 单位：kg/m<sup>3</sup>

水	水泥	砂	石	粉煤灰	矿粉	外加剂
170	281	754	1041	55	59	9.9

新河闸闸墩混凝土拆模 2 天后，在闸墩和翼墙墙身等处开始出现裂缝。发现混凝土裂缝后，委托第三方检测单位以 2 天一次频率，对新河闸闸墩混凝土采用超声波单面平测法连续检测了 5 次，检测出 5 条混凝土裂缝，均为温度裂缝。每条裂缝宽度检测 5 点，深度检测 3 点。裂缝平均长度分别为 3.3m、2.8m、2.6m、3.4m、3.0m，平均缝深分别为 82.0mm、87.3 mm、94.7mm、71.0mm、90.0mm，平均缝宽分别为 0.26mm、0.14mm、0.12mm、0.18mm、0.13mm。

2 裂缝产生的原因分析

通过观察和第三方检测，裂缝仅在接近表层的区域内出现，表层以下结构仍保持完好，这是由于混凝土结构在硬化阶段表层与里层温差较大，使混凝土表层产生的拉应力大于早期抗拉强度引起的温度裂缝。另外，裂缝多为靠近底板的竖向裂缝，是由于先期浇筑的钢筋混凝土底板使后期浇筑的墙体混凝土在水化过程中产生较大的约束应力引起的。

3 材料指标

WPU 又名水溶性聚氨酯材料，是一种合成的高分子注浆成型堵漏处理的建筑材料，该建筑材料遇水发生物理化学反应产生弹性胶状固结体，有很好的止水效果（见表 2）。

表 2 WPU 灌浆料技术性能指标

序号	项 目	单 位	性 能 指 标 控 制
1	外 观		均匀液体，无杂质、不分层
2	密 度	g/cm <sup>3</sup>	≥1.00
3	黏度（20℃）	MPa·s	≤1000
4	不挥发物含量	%	≥75
5	凝胶时间	s	≤150
6	遇水膨胀倍率	%	≥20
7	包水性（10 倍水）	MPa	≤200
8	发泡率	%	≥350

4 施工设备

WPU 化学灌浆处理混凝土裂缝主要采用钻孔、注浆两种施工设备。钻孔设备一般为电锤，注浆设备一般为微型电动高压注浆机（型号 BL-512）（见图 1、图 2）。



图 1 电锤



图 2 微型电动高压注浆机

5 施工工艺

施工工艺流程为：裂缝测量→钻孔埋嘴→洗缝→封缝→灌浆→表面处理→灌浆质量检测。

5.1 裂缝测量

首先采用盒尺测量裂缝长度，再采用裂缝宽度检

测仪（见图3）、裂缝深度测试仪（见图4）分别测定裂缝的宽度与深度，并做好记录，最后根据测定的尺寸计算理论灌浆量。



图3 裂缝宽度检测仪



图4 裂缝深度测试仪

## 5.2 钻孔埋嘴

采用电锤钻斜孔，直径14mm，钻孔角度小于 $45^\circ$ ，在裂缝两侧交错布置，钻孔中心距离裂缝中心约20cm。左侧布置斜浅孔，穿缝位置为缝深的 $1/3$ 处，穿缝长度5~10cm。右侧布置斜深孔，穿缝位置为缝深的 $2/3$ 处，穿缝长度5~10cm。清理钻孔内的灰尘后，立即安装灌浆嘴或止水针头，通过专用内六角扳手拧紧，使灌浆嘴与钻孔之间无空隙，以防漏浆（见图5、图6）。

## 5.3 洗缝与封缝

用高压清洗机或微型电动注浆泵向混凝土灌浆嘴内加入洁净水流，观察流点状况，并把缝内灰尘冲洗清除干净。

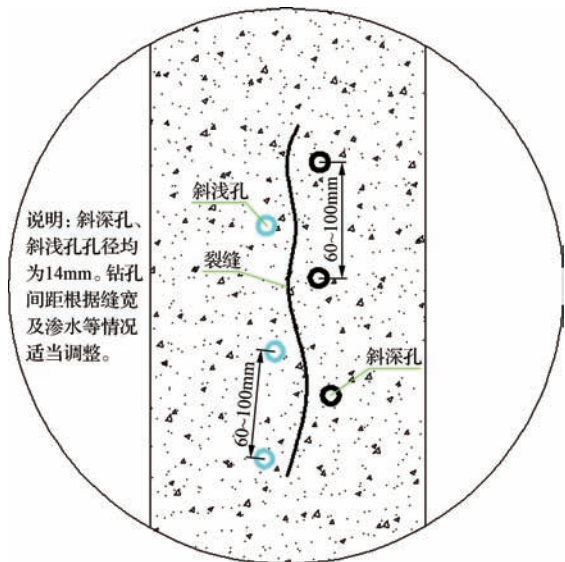


图5 裂缝化灌平面布孔

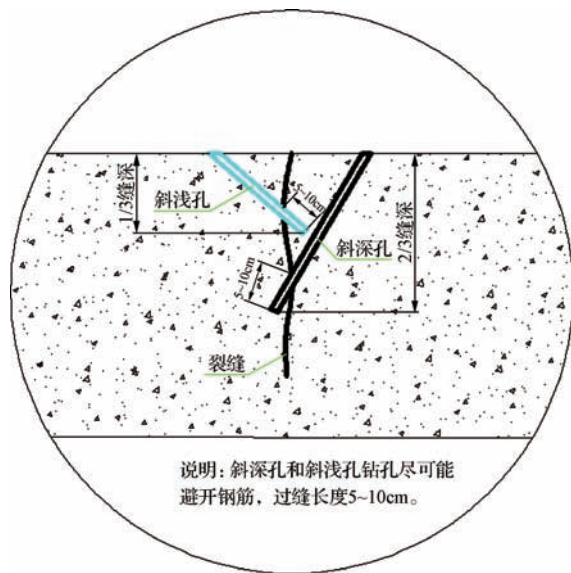


图6 裂缝化灌剖面钻孔

首先将洗缝时出现渗水的裂缝表面圈出来，待干燥后，再用环氧腻子刮涂封缝，封缝宽度3~4cm，目的是确保灌浆过程中裂缝不漏浆。

## 5.4 灌浆

灌浆设备选择微型电动高压注浆机（型号BL-512），灌浆压力0.1~0.3MPa，灌浆从下而上依次进行。在灌浆过程中，灌浆压力先选择较小压力，再逐渐提高，直至灌浆结束。

灌浆结束标准：①相邻孔出浆后，再保持压力灌



浆 3~5min, 即结束本孔灌浆, 改灌相邻孔; ⑥最后一个孔灌浆结束标准以不吸浆为原则, 若出现吸浆率小于 0.01L/min 情况, 再保持压力灌浆不少于 10min 后, 可停止灌浆。灌浆过程中计量准确, 并做好详细记录。

## 5.5 表面处理

灌浆结束稳固后, 去除灌浆嘴, 采用聚合物水泥砂浆填补抹平, 采用角磨机将裂缝表面打磨平整。待裂缝表面打磨平整后, 进行表面防碳化处理。

## 5.6 灌浆质量检测

灌浆质量检验, 主要采用目测及无损检测方法。

目测: 在裂缝灌浆完成 7 天后, 通过肉眼观察、锤击等方法检测每一条裂缝, 裂缝缝面浆液充填应密实、饱满, 若锤击声音清脆, 无气泡、孔洞, 即可证实工程灌浆质量基本合格。

对质量要求较高的混凝土裂缝处理, 还应进行无损检测。常用的无损检测方法有频测法、单孔声波法、跨孔声波法及孔内电视(摄像)法等。

## 6 结 语

WPU 浆液遇水后自行扩散、乳化、发泡, 并迅速形成不渗漏的弹性胶状固结体, 具有优异的延伸性、耐低温性、防渗漏性与止水性能。并且由于 WPU 浆液的膨胀性好, 包水量大, 具有优异的亲水性和可灌性, 形成的胶结体在水里浸渍后对人体无毒、无害, 无环

境污染, 可用于各类建筑与地下混凝土结构施工中的缝隙、伸缩缝、施工缝、结构裂缝的堵漏处理密封, 水利水电施工中的坝体注浆, 引水隧洞裂缝堵漏、防渗处理, 以及坝体混凝土裂缝的防渗补强。

通过 WPU 化学灌浆方法的精选、监测数据收集和大数据分析、化学注浆成型方法的调整与实施等技术手段, 成功实现了对新河闸闸墩混凝土裂缝的化学灌浆, 有效保证了闸墩混凝土的结构安全和使用寿命, 为化学灌浆法在水利设施混凝土裂缝修复工作中的应用积累了经验。▲

## 参考文献

- [1] 董宠杰. 化学灌浆法在南水北调工程混凝土渠道倒虹吸管身裂缝处理中的应用[J]. 陕西水利, 2019(10): 130-132.
- [2] 王飞熊, 李天宇. 电站进水口底板混凝土裂缝化学灌浆技术[J]. 云南水力发电, 2020(4): 74-77.
- [3] 龚武. 化学灌浆技术在水电站工程中的应用[J]. 价值工程, 2020(33): 131-133.
- [4] 董功海, 于洪梅. 单组分水溶性聚氨酯灌浆材料在钢管桩围堰施工中的应用[J]. 江苏交通科技, 2014(4): 28-29.
- [5] 王新强. 水库工程隧洞常见裂缝与处理策略浅议[J]. 建筑工程技术与设计, 2018(28): 2411-2411.
- [6] 卞奕, 郭小国, 张静文. 浅谈建筑工程中大体积混凝土的裂缝产生及预防措施[J]. 建材发展导向(下), 2018(4): 22-24.
- [7] 王健. 污水处理厂构筑物抗渗防裂技术比选与分析[D]. 北京: 北京工业大学, 2018.

(上接第 14 页) 水淹厂房面临的风险因素。通过对排水系统一体化研究实践, 有效解决了因渗漏集水井排水不及时造成的水淹厂房问题, 为水电站安全稳定运行发挥了积极作用, 可在同类型水电站中普遍推广应用。

一体化排水系统设计时, 没有考虑水泵自动化控制系统, 水泵运行只能在现地进行手动操作, 后期可进一步改进, 实现在上位机远程控制功能。在一体化排水系统运行过程中, 因一体化水泵至集水井进水口管路长约 16m, 在进行渗漏排水时, 管道受水锤影响, 存在轻微振动。后续需对管路进行固定, 减少管路振动, 保证水泵运行平稳。▲

## 参考文献

- [1] 吴来群, 王进学, 王社亮, 等. 白龙江喜儿沟水电站工程可行性研究报告[R]. 西安: 中国水电顾问集团西北勘测设计研究院, 2011.
- [2] 叶亮. 水电站渗漏排水系统的升级改造[J]. 科技创新与应用, 2020(6): 2.
- [3] 刘福坤, 胡瑞林, 陈朝禄. 龚嘴水电站厂房渗漏排水系统改造[J]. 四川水力发电, 1999, 18(4): 5.
- [4] 梁吟曦. PLC 控制水电站渗漏集水井排水系统的设计[J]. 企业导报, 2012(24): 2.
- [5] 李天智, 张英. 溪洛渡水电站厂房排水系统设计及经验借鉴[J]. 水电站机电技术, 2013.
- [6] 旦增平措. 水电站渗漏排水和检修排水合并问题探讨[J]. 中国科技信息, 2014(23): 1.

DOI: 10.16617/j.cnki.11-5543/TK. 2022.12.06

# BIM 技术在地铁车站结构设计中的应用分析

赵凌露

(中电建铁路建设投资集团有限公司, 北京 100160)

**【摘要】** 信息技术的快速发展, 为各行业数字化转型创造了良好的条件。如何运用信息化手段提高企业的经营管理水平, 实现精细化管控成了越来越多行业重点关注的话题。随着施工企业对信息化技术要求的不断提升, BIM 技术也快速发展起来, 该项技术能够以建筑施工项目各生命周期的业务信息数据为基础建立数字化模型, 最终以直观形象的可视化模型展现出来, 为企业信息化、数字化提供有价值的数据, 强化企业的综合管控能力。近年来, BIM 技术在城市轨道交通工程领域的应用范围也在逐渐拓展, 可将其应用于地铁工程建设中, 能够保障地铁设计水平和设计效果, 满足实际施工需求。文章立足于 BIM 技术对地铁车站结构设计的重要性, 围绕该项技术的具体应用进行探讨。

**【关键词】** BIM 技术; 地铁车站; 结构设计

中图分类号: V231.4

文献标识码: B

文章编号: 1673-8241 (2022) 12-024-04

## Application Analysis of BIM Technology in Subway Station Structure Design

ZHAO Linglu

(Powerchina Railway Construction Investment Group Co., Ltd., Beijing 100160, China)

**Abstract:** The rapid development of information technology has created favorable conditions for the digital transformation of various industries. How to use informatization means to improve the management level of enterprises and to achieve fine management and control has become the key focus topic of more and more industries. With the continuous improvement of construction enterprises' requirements for informatization technology, BIM technology develops rapidly, which can establish a digital model based on the business information data of each life cycle of construction projects, and finally display it in an intuitive visual model, providing valuable data for the informatization and digitalization of enterprises, and strengthening the comprehensive management and control ability of enterprises. In recent years, the application scope of BIM technology in the field of urban rail transit engineering is also gradually expanding. It can be applied in the construction of subway engineering, which can guarantee the design level and design effect of subway and meet the actual construction needs. Based on the importance of BIM technology to the structural design of subway stations, this paper discusses the specific application of this technology.

**Key words:** BIM technology; subway station; structure design

收稿日期: 2022-09-23

作者简介: 赵凌露 (1987—), 女, 本科, 工程师, 主要从事施工建设及信息化管理工作。

随着我国经济不断发展,城市人口也在逐渐增加,城市交通需求越来越大,在国家低碳环保等政策下,城市轨道交通工程的建设规模迅速扩大。然而,由于地铁工程具有建设周期长、投资规模大以及技术要求高等特点,在建设中对各参建方的管理水平要求非常高,建设难度也相对较大。本文提出了利用 BIM 技术实现地铁工程项目管理信息化的思路,对 BIM 技术在地铁车站结构设计中的应用进行探讨。

## 1 BIM 技术概述

BIM 技术应用是指建筑信息模型,是对建设工程实体与功能特点通过数字化的方式进行呈现。BIM 技术的应用是对建设项目过程中的各项业务信息进行收集并通过可视化的方式进行展现的过程。应用 BIM 是目前建筑行业信息化发展的趋势,通过 BIM 可以形成设计、施工、运营一整套建筑施工项目的全过程管理,BIM 技术可应用于整个建设项目中,形成统一的管理体系,有助于实现对施工项目全生命周期的管理。从而,应用 BIM 技术能够使项目精益管理落地,并形成各业务间协同工作,使项目生产各要素更有效的配合,实现资源的最大化及合理利用。

## 2 BIM 技术对于地铁车站结构设计的重要性

### 2.1 能够实现可视化操作

基于 BIM 技术建立三维建模软件,能够在三维平面上形成地铁车站建筑模型,使整个建筑结构以更加直观的方式显现出来,以此来达到强化图形结构内部设计质量的目的,从而将地铁车站结构设计效果更加突显出来。

### 2.2 能够提升地铁车站置线设计效率

具体开展地铁车站装线排线作业的过程中,由于布线具有多样性和复杂性特点,经常会面临设计不合理以及施工过程中存在碰撞、冲突的问题。而 BIM 技术的应用,有利于制定出切实可行的结构线路设计方案,做好线路的碰撞检查工作,以便及时发现其中存在的问题,从而达到降低施工过程中的失误,提升地

铁车站结构置线设计效率的目的。

### 2.3 有利于进行施工模拟

传统建筑施工主要是在人的作用下进行的,因此,很容易受到人工经验的影响而造成施工损失,而 BIM 建筑模拟技术的应用,通过事先在 BIM 平台进行建造模拟,有利于各专业人员明确结构形式以及工艺流程,提前找出可能存在于施工过程中的问题,避免由于专业交叉而对施工作业产生不利影响,尽可能减少后期拆改概率,严格管控地铁工程建设中的风险<sup>[1]</sup>。

## 3 BIM 技术在地铁车站结构设计中的主要应用

### 3.1 在地铁车站建设准备阶段中的应用

由大多数地铁出入口往往设计在客流量较大的区域这一特点,可知地铁线路直接影响着该区域的经济水平,因此,合理设置地铁车站位置非常关键。应用 BIM 技术的强大数据建模功能,可建成地铁三维人流数据模型,科学分析地铁出站口或进站口的具体位置,进一步提升城市资源利用效率。每一个城市都有一定规模的地下建设空间,在建设地铁或者其他公共设施前,需要结合空间和地质情况合理设计,否则会造成路面塌陷问题。而 BIM 技术的应用,可结合该区域可承受的建设参数,综合分析预计建设的地铁站模型面积,最终确定地铁站的建造规模以及建造位置<sup>[2]</sup>。由此可见,在地铁车站建设的准备阶段,应用 BIM 技术能够将地铁车站的建设和当地经济结合起来,以此带动区域经济的发展。此外,借助 BIM 技术还能够将城市地上地下资源整合起来,确保资源效用的充分发挥。

### 3.2 在地铁车站设计阶段中的应用

地铁车站的设计,除了包含对地铁线路的设计外,还涵盖了对地铁车站协调性、照明以及排水等各方面内容的设计。围绕 BIM 技术的整体建模分析功能,能够使地铁工程设计更加科学合理。



### 3.3 三维可视化交底

随着经济发展水平的快速提升,地铁车站建设已经从交通线发展成了地下交通网,对于大规模以及复杂车站的设计,传统二维设计方案显然已经无法满足实际要求,此时,BIM 技术的三维可视化优势便凸显出来。通过在系统软件中输入各项参数,能够得到多种类型的差异化构件,从而将地铁车站的数字信息以更加直观的形式展现出来,对整个施工过程实现可视化模拟。这种三维技术主要使用精细化模型、虚拟漫游技术以及施工工艺仿真手段,彻底突破了传统模式,避免了由于交底不明确而造成的材料浪费以及窝工等问题<sup>[4]</sup>。

### 3.4 管线及设施的碰撞检查

BIM 技术的三维可视化特点明显,将其应用于地铁结构设计中,能够及时对管线碰撞以及设施碰撞进行检查,具有优化管线布设方案,尽可能减少施工误差的作用,能够避免返工现象的出现。技术人员可根据三维关系优化布设方案,使用施工模拟措施来达到强化工程项目建设质量的目的。

### 3.5 提前设定预留孔洞

施工单位不重视预留孔洞作业是工程项目建设过程中的常见问题,对于这类问题,如果在结束施工作业后再发现问题,显然为时已晚。要想提升孔洞预留的合理性和准确性,就需要将 BIM 技术应用于设计环节。BIM 三维模型中能够将每个预留孔洞的信息显示出来,然后据此做好管线走向优化以及预埋件布置的设计工作,最终将预留孔洞和预埋件的布置图纸输出,并且提取出预埋件和预留孔洞的位置、形状以及大小等相关信息,为施工下料提供便利。通过全方位开展预留孔洞和预埋件的检查工作,能够尽可能避免质量隐患和工期风险的存在,进一步提高工作效率,确保开孔的准确性。

### 3.6 大型设备运输路径检查

通常情况下,地铁车站中的大型设备在施工阶段是陆续进入现场的,因此,往往存在着机械设备出现

碰撞的风险,所以,做好大型设备运输路径的规划工作,能够实现对工程进度和成本的有效管控。基于 BIM 技术的建筑模型,通过使用二维运输路径平面图,可动态化模拟设备的安装以及检修路径,以便能够及时找出路径中的碰撞冲突,提前制定科学合理的路径设计方案。由此可见,在设备进场前,BIM 技术的应用能够有效避免管线设备的二次安装,为后期设备的安装、运输奠定良好的基础<sup>[5]</sup>。

## 4 BIM 技术在地铁车站结构设计中的具体应用

本文以地下 4 层双柱地铁车站为例对 BIM 技术的可视化设计展开探讨,由于受到周边环境以及工程地质的影响,本站使用地下 4 层双柱明挖车站(带物业),2 个风亭组、2 个物业出入口、无障碍电梯和安全出入口都使用了顶出的方法,车站基坑的长度和深度分别约为 160m、40m。其中,地下 1 层是物业,地下 2 层是站厅,地下 3 层和 4 层分别是设备层和站台层。本站内部空间复杂、建设规模大,使用传统二维设计方法显然很难满足设计需求。因此,需要基于 Revit 软件使用 BIM 技术,开展地铁车站的三维可视化设计,建立完善的车站主体结构、内部楼扶梯以及风亭组等建筑结构的三维模型。

### 4.1 可视化设计

BIM 技术的应用能够将建筑设计方案以更加直观的方式精准地展现在工程师面前,建筑设计师能够在三维模型中分析设计体量、建筑功能布局以及建筑结构模型等,在 BIM 技术的协助下,运用三维漫游技术在建筑模型上确定结构设计方案,设计建筑结构构件尺寸,以便能够很好地解决结构方案和建筑设计中存在的适配性问题。基于 BIM 技术的三维可视化设计,能够在短期内获取设计方案,保障设计质量,提升设计效率。图 1 所示为地铁车站结构三维模型。

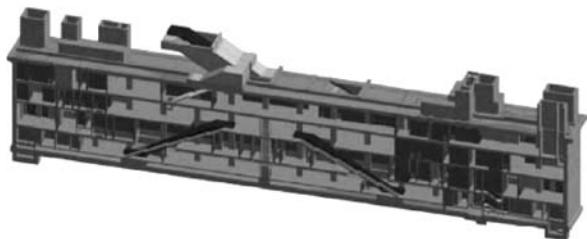


图1 地铁车站结构三维模型

#### 4.2 配筋施工图设计

当前,大多数地铁车站结构配筋施工图都是以手动绘制钢筋的方法完成的,不仅工作量大,而且过程烦琐、自动化程度低,致使施工图的可行性不高。通常情况下,地铁车站与地上结构存在着很大的差异,具体体现在结构梁、板以及柱的尺寸较大,而且含钢量也相对较大。因此,面对有限的地下空间,为确保柱能够满足抗震要求,需要使用复合箍筋来达到提升柱子轴压比的作用。通过运用 Revit 软件对地铁车站

进行配筋结构设计,可对基本构件梁、板、柱以及墙进行配筋。其中,断面配筋能够使地铁车站结构配筋中的梁、柱的纵筋以及箍筋设置满足标准要求。板的配筋可通过配筋中的面积筋快速完成配置工作。图2和图3分别为柱配筋横断面示意图与板梁配筋断面示意图。

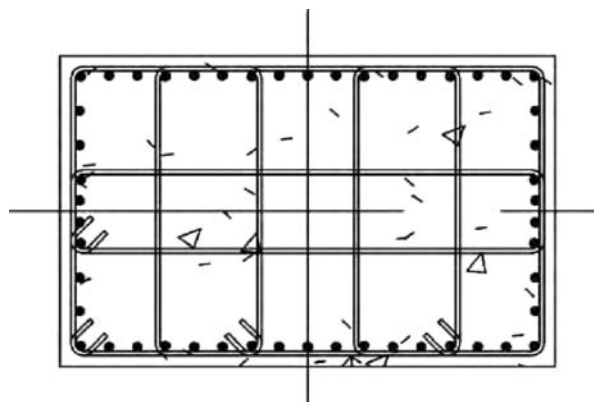


图2 柱配筋横断面

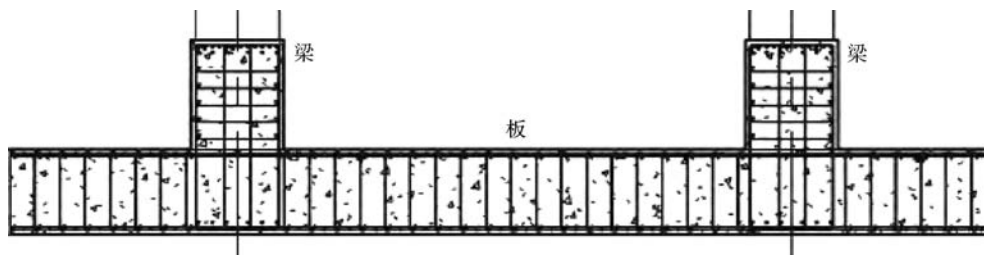


图3 板梁配筋断面

BIM 技术 Revit 软件配筋功能能够为地铁车站结构配筋提供便利,能够使梁、柱、板、墙的配筋满足工程项目的实际需求。基于 BIM 技术的地铁车站配筋施工图设计可直接进行三维实体布筋,以剖面方式生成二维配筋图,并使二维配筋和三维配筋实现联动,保障最终的配筋效果。

#### 4.3 工程量统计

在地铁工程建设速度逐渐加快的时代背景下,地铁工程项目的建设规模也在逐渐扩大,大规模4层站以及交通综合体也逐步得到了全面推广应用。近年来,地铁车站建设工期长、投资消耗大等特点,对工程造价提出了更高的要求,工程量计算难度随之增加,传统工程量计算方法显然已很难满足实际工作需要。使

用 BIM 技术可快速生成钢筋以及混凝土明细表,结合结构柱、结构基础、结构桁架以及结构钢筋等进行分析,便能快速自动统计工程量,确保各项数据资源得到充分应用,保障工程量统计结果的精准性<sup>[6]</sup>。

#### 4.4 应用效果分析

将 BIM 技术应用于地铁车站结构设计中,能够在地铁工程建设中确保组织管理工作的科学性和有效性。将 BIM 技术和其他各项信息技术融合起来,具有简化工序流程的作用,比如,借助建筑结构的信息分布功能,能够进一步提升地铁设计方案的合理性。此外,将 BIM 技术科学应用于地铁车站结构设计中,能够加大人才队伍的建设力度,培养出具备良好设计水平以及熟练应用 BIM 技术的综合型人(下转第 32 页)

# 深基坑降水施工技术及应急处置

郝中州<sup>1</sup> 苏茂荣<sup>1</sup> 陈志军<sup>2</sup>

- (1. 河南黄河河务局, 河南 郑州 450002;  
2. 河南华北水利水电勘察设计院有限公司, 河南 郑州 450003)

**【摘要】** 大中型泵站基坑开挖往往面临着地下水位高、地质条件差、边坡支护难等问题。文章结合土司港泵站工程深基坑开挖, 针对中等透水砂层地质条件地下水降水问题, 根据地形地质、水文条件、开挖边界等资料, 提出深井管井降水方案。针对壤土夹砂互层结构, 采用深井完整井, 将滤管置于完全砂层中, 其抽水能力强, 降水效果较好。针对基坑出现的渗水涌水情况, 采用在基坑中部补打降水井措施, 进一步降低地下水位, 有效解决了涌水问题。

**【关键词】** 深基坑; 管井降水; 地下水位; 应急处置

中图分类号: TV675

文献标识码: B

文章编号: 1673-8241 (2022) 12-028-05

## Dewatering Construction Technology and Emergency Treatment of Deep Foundation Pit

HAO Zhongzhou<sup>1</sup>, SU Maorong<sup>1</sup>, CHEN Zhijun<sup>2</sup>

- (1. Henan Yellow River Bureau, Zhengzhou 450002, China;  
2. Henan North China Water Conservancy and Hydropower Survey and Design Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China)

**Abstract:** The excavation of the foundation pit of large and medium-sized pump stations is often faced with problems such as high ground water level, poor geological condition and difficult slope support. Based on the deep foundation pit excavation of the pump station project of Tusi Port, this paper proposes a deep tube well dewatering scheme according to the topographic geology, hydrologic conditions, excavation boundary and other data, aiming at the groundwater dewatering problem in the geological condition of medium permeable sand layer. In view of the interlayer structure of loam with sand, the deep complete well is adopted, and the filter pipe is placed in the complete sand layer, which has strong pumping capacity and good dewatering effect. In view of the seepage and water gushing in the foundation pit, the measure of replenishing the dewatering well in the middle of the foundation pit is adopted to further reduce the groundwater level and effectively solve the water gushing problem.

**Key words:** deep foundation pit; tube well dewatering; groundwater level; emergency treatment

收稿日期: 2022-10-08

作者简介: 郝中州 (1964—), 男, 高级经济师, 从事引黄供水工程建设、运行管理工作。



## 1 概述

对于大中型泵站工程,往往涉及深基坑开挖问题。在水源比较丰富的地区,地下水位较高,深基坑开挖会面临着管涌<sup>[1]</sup>、流沙、边坡失稳、建筑物沉降<sup>[2]</sup>等工程问题,这也是深基坑施工的难点。目前,针对深基坑开挖和地下水处理,已有较多的工程经验和科学研究。针对渗透性弱的地层,可采用悬挂式止水帷幕<sup>[3]</sup>来降低基坑地下水位;对于渗透性强的砂卵石层,可采用封闭式防渗墙<sup>[4]</sup>来保证基坑干地施工;更多的工程通常采用管井降水<sup>[5]</sup>、轻型井点降水配合截水沟<sup>[6]</sup>的方法来降低地下水位,该方法已在汉江取水泵站<sup>[7]</sup>、大垸子泵站<sup>[8]</sup>、引江济汉工程<sup>[9]</sup>等诸多水利工程中得到了成功的应用。因此,针对不同区域的地质、水文环境,应结合工程施工特点选择科学合理的施工方法。对于大型泵站工程施工,深基坑开挖尤为重要,本文结合黄冈市土司港泵站工程,针对深厚砂层地质条件,对深基坑开挖采用的管井降水施工技术进行了详细阐述,并结合工程现场遇到的问题提出应急处理方案,为同类工程施工提供经验。

## 2 工程概况

土司港泵站工程位于黄冈市高新区长河出口处,与巴水衔接,泵站设计排涝能力  $170\text{m}^3/\text{s}$ ,工程等级为 II 等,主要建筑物等级为 2 级。泵站自上游至下游分别为进水渠、拦污栅桥、进水前池、主泵房、出水压力箱涵、出口防洪闸、出口消力池和出水渠。主泵房基坑建基面开挖最低高程 4.7m,前池开挖高程 7.5m,进水池开挖高程 10.1m,拦污栅桥开挖高程 9.7m。主泵房、安装间、副厂房宽度 106m,基坑开挖宽度 120m。

地质资料显示,拟建主泵房工程区范围土层变化较大,在主泵房轴线横剖面处,地层由上至下依次为:淤泥质土层、黏土层(底部高程 9.7m)、粉细砂层(底部高程 -4m)、中粗砂层(底部高程 -10.3m)、砂岩层。其中,粉细砂层局部夹壤土透镜体,高程 0.0m 以下为完整砂层。上部不透水层为

黏土层,底部不透水层为砂岩,粉细砂层为承压水层。主泵房基坑地层以第四系砂性土为主,具有中等透水性,深厚砂层地下水为承压水,与外江水密切联系,主要以长江水补给为主。砂层具有中等透水性,渗透系数为  $3.12 \times 10^{-3}\text{cm/s}$ 。

## 3 基坑降水设计及施工

主泵房基坑开挖最低高程为 4.7m,进水池开挖高程 7.7m,基坑穿透不透水层(黏土层底部高程 9.7m)并深入砂层。下部砂层由外江补水,受长江水位影响较大,施工期地下水位约为 16m,主泵房基坑受地下水影响较大,必须采取降水措施。由于基坑面积较大( $126\text{m} \times 130\text{m}$ ),下部砂层为中等透水,降水措施主要采用深管井降水,需要将地下水位降至基坑最低点以下 0.5m。基坑降水主要从基坑涌水量、单井出水能力以及降水井布置等方面进行设计。

### 3.1 基坑涌水量

主泵房基坑任一点地下水降深要求至少低于建基面 0.5m。主泵房基坑开挖宽度 126m,由于基坑面积较大,为保证基坑中心位置地下水位不高于 4.2m,地下水水力坡降线按 1:10 计算,管井水位至少降至 -2.1m。管井布置在主泵房基坑两侧,深度到达地下岩层(-10.0m 高程),管井降水典型横断面见图 1。基坑开挖时,穿过不透水层(黏土层),并深入透水层(砂层),根据《建筑基坑支护技术规范》(JGJ 120—2012),基坑涌水量可采用承压水-潜水完整井公式进行计算:

$$Q = \pi k \frac{(2H - M)M - h^2}{\ln(1 + R/r_0)}$$

式中  $Q$ ——基坑涌水量,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;

$k$ ——渗透系数,  $\text{m/d}$ ;

$H$ ——承压含水层初始水头,  $\text{m}$ ;

$M$ ——承压含水层深度,  $\text{m}$ ;

$h$ ——基坑中心水头高度,  $\text{m}$ ;

$R$ ——抽水影响半径,  $\text{m}$ ,对于细砂中砂,  $R$  经验取值范围为 80 ~ 150m;

$r_0$ ——基坑等效半径,  $\text{m}$ 。

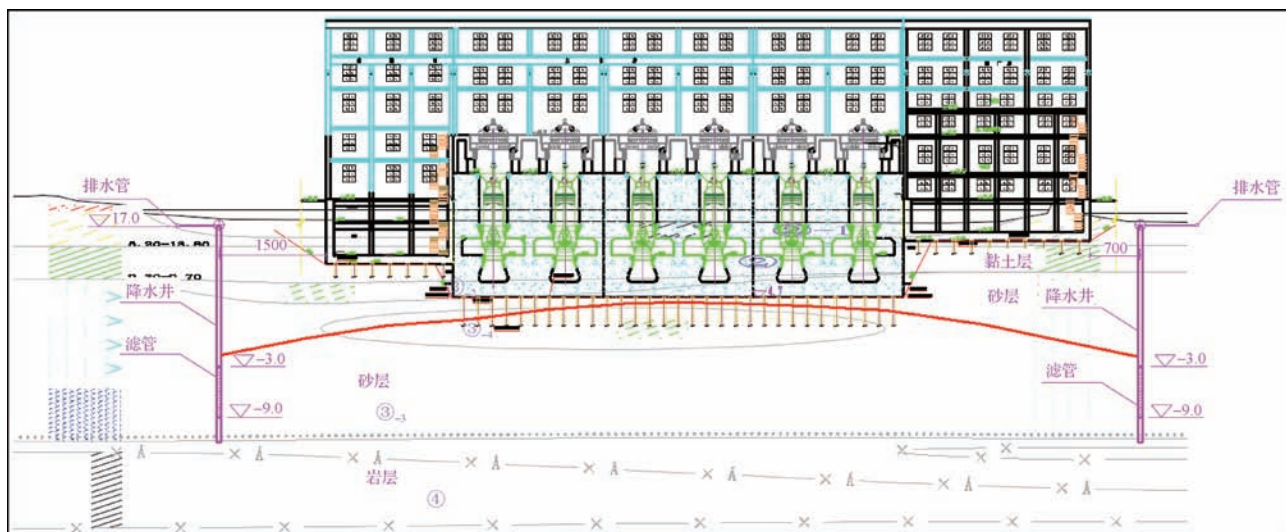


图1 主泵房基坑管井降水典型断面

代入计算, 基坑涌水量为  $Q = 3806 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

### 3.2 单井出水

降水井采用深井管井, 管井的单井出水能力按下式计算:

$$q_0 = 120\pi r_s l \sqrt{k}$$

式中  $q_0$ ——单井出水量,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;

$r_s$ ——管井滤管半径, m;

$l$ ——管井滤管器实际工作长度, m。

经计算, 单井出水能力为  $q_0 = 285 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

为保证管井正常抽水, 单井出水能力  $q_0$  要大于单井设计出水量  $q$ , 取 1.2 的系数, 则

$$q = q_0/1.2$$

经计算, 单井设计出水量  $q = 237 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

### 3.3 降水井布置

降水井数量根据基坑涌水量和单井设计出水能力计算:

$$n = \lambda Q/q$$

式中,  $\lambda$  为调整系数, 二级基坑取 1.1。

经计算  $n = 17.7$ , 取 18。对于承压水降水井, 应设置备用井, 数量为 20%, 取 4~6 口。故主泵房基坑降水井取 22~24 口, 其中常用井 18 口, 备用井 4~6 口。

根据工程经验, 基坑开挖深度大于 8m 时, 管井

井点布置间距应为 15~20m, 间距过大, 现场降水效果不理想。主泵房基坑开挖最低高程 4.7m, 开挖深度大于 8m, 间距取 15m, 对于拦污栅和进水渠, 基坑开挖深度小于 8m, 间距可适当加大, 取 20~30m。主泵房基坑管井降水井位布置见图 2。

由于基坑下部砂层和壤土层互层结构, 为保证抽水效果, 降水井滤管段布置在完全砂层段。降水井采用完整井, 开挖深度 16.0m, 底部高程 -10m, 滤管段 6m, 滤管高程 -3~-9m。滤管直径 28cm, 降水井直径 60cm。

### 3.4 基坑降水施工

本工程管井降水施工工序为: 施工准备→测量放线→钻机就位钻孔、泥浆护壁→成孔→下管(滤管)→回填滤料→黏土封口→洗井→安装水泵→排水→降水井正常工作→降水完毕拔井管→封井。

**a. 准备工作。**开挖泥浆池, 制备泥浆; 划定基坑开挖线, 管井定位测量。

**b. 钻机造孔。**钻机定位至井点, 调整角度, 就位钻孔; 井身直径不得小于设计井径, 顶角偏斜不得超过  $1^\circ$ ; 钻进时使用泥浆护壁技术, 泥浆比重 1.3; 钻井进尺到达设计深度后进行清孔, 采用清水洗孔, 直至清水排水。

**c. 井管安装。**清孔后进行检查, 下置滤管和井

管，井管应直立于井口中心，上端口应保持水平，井管顶端应高出地面 0.3m 以上；管井周边的填砾滤料

不应含土和杂质，选用硅质砾石；颗粒的磨圆度应较好，不使用棱角碎石。

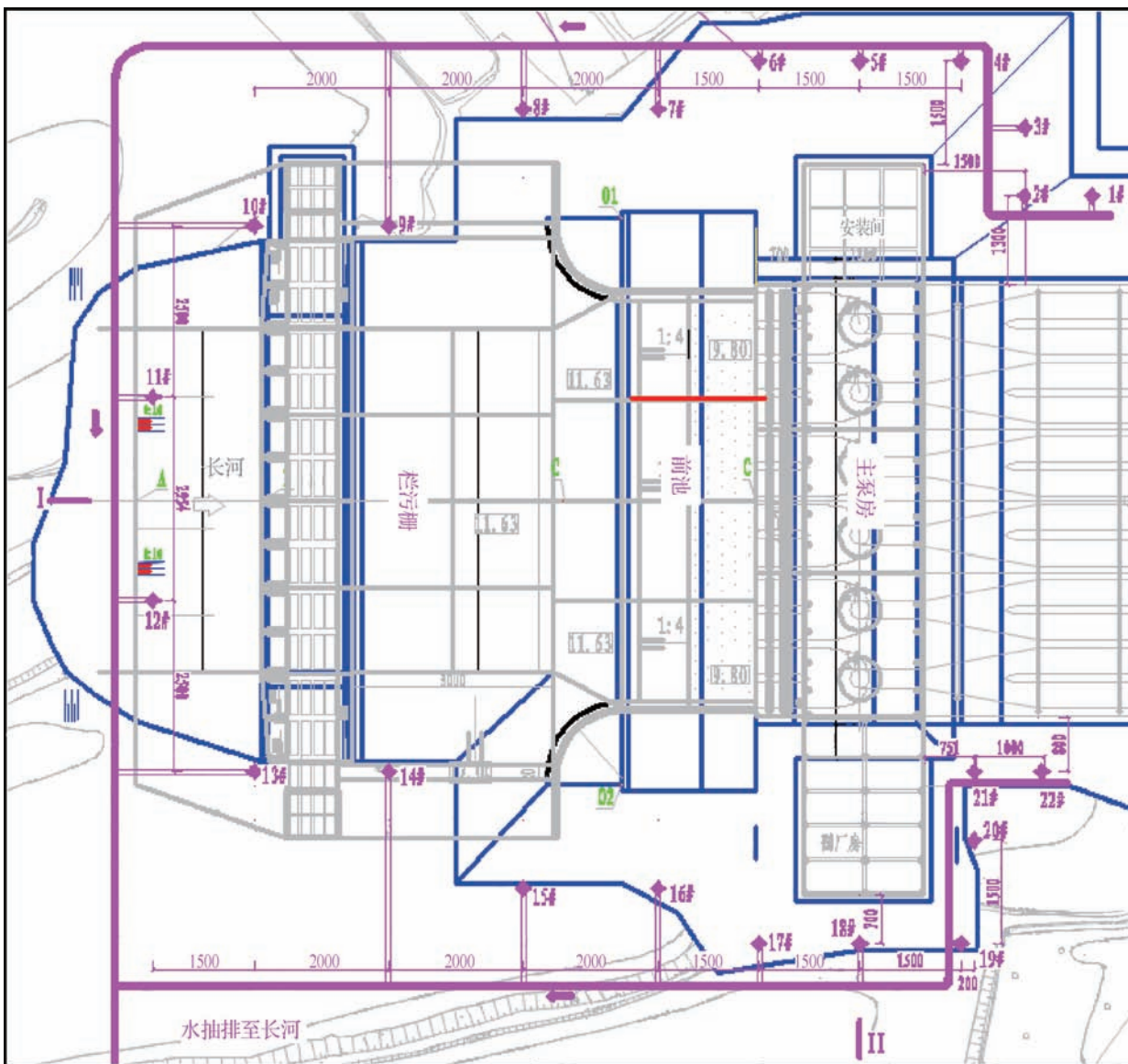


图2 主泵房基坑管井降水布置

**d. 洗井与清理。**填充滤料后，及时洗井，将污泥泵放入井底，将井孔内泥浆排出，排空后将水泵停止，待井内水位自然恢复到井深的 1/2 时开启水泵排空，用泥浆泵如此反复 2~3 次，直到流出清水为止，确保滤管及滤料滤水畅通，采用潜水泵抽水。

#### 4 基坑涌水应急处置

本工程设计降水管井 22 ~ 24 口，施工现场根据

地形条件在基坑外围布置管井 22 口。基坑降水效果明显,管井水位和地下水位均持续下降。在施工过程中,基坑开挖至 6~7m 时,出现渗水涌水现象,周边管井在加大抽排能力后,管井水位长时间维持在 2m 左右,基坑地下水位难以继续降低,渗水涌水问题突出。根据工程经验,超过设计抽排能力后,管井水位长时间维持高位,可能是透水层渗透系数比设计值偏大,导致设计抽排能力不足。



现场开挖地层资料显示,基坑下部多为中粗砂层,少范围为壤土夹砂,基坑下部透水层渗透系数远远超过设计取值。在更换大功率水泵后,基坑仍然出现渗水涌水现象。为保证基坑顺利开挖至设计高程,在进水前池(开挖高程 7.5m)增加一排共 4 口降水井,在主基坑中部抽水,从而将主泵房基坑地下水位顺利降至 4.2m 以下。基坑两侧设集水坑,底部高程 2.0m,用以汇集基坑渗水,保证基坑干地施工环境。新增管井在封堵时,由于地下水位较高,停止抽水时有水从井口涌水,按照常规“以砂还砂,以土还土”的原则,难以用泥球进行封堵。对前池新增 4 口井,采用混凝土进行封堵,并与前池底板浇筑成一体,从而保证不出现底板渗透问题。

## 5 结 论

本文结合土司港泵站工程深基坑开挖,针对中等透水砂层地质条件地下水降水问题,采用深管井降水方案,抽水效果好,有效降低了地下水位。针对壤土夹砂互层结构,采用完整井并将滤管布置在下部完全砂层中,提高了管井出水能力。管井设计抽排能力与渗透系数有很大关系,并会影响最终降水水位。针对

基坑出现的渗水涌水情况,采用在基坑中部补打降水井,有效解决了地下水位难以降至设计要求的问题,可为类似深基坑工程的应急处置提供参考。▲

## 参考文献

- [1] 张培龙,吴水根,陈伟.深基坑突发管涌事故的抢险施工技术[J].建筑施工,2013,35(6):467-469.
- [2] 施成华,彭立敏.基坑开挖及降水引起的地表沉降预测[J].土木工程学报,2006(5):117-121.
- [3] 冯晓腊,谢武军,卢智强,等.悬挂式止水帷幕对基坑降水的影响[J].土工基础,2006(4):33-36.
- [4] 张家发,范士凯,陶宏亮,等.建筑基坑防渗墙渗流控制效果研究[J].长江科学院院报,2016,33(6):58-64,69.
- [5] 定培中,肖利,李威,等.深厚透水性地层中大型深基坑降水方案设计探讨[J].长江科学院院报,2012,29(2):46-50.
- [6] 肖文瑶.北京新机场深基坑井点降水施工技术[J].河南科技,2021,40(31):98-100.
- [7] 余伟,刘万浩,朱全敏.汉江取水泵站深基坑开挖施工降水技术探讨[J].水利建设与管,2018,38(3):23-25.
- [8] 向明.大院子泵站基坑深井降水方案及实施[J].河南水利与南水北调,2021,50(8):93-94.
- [9] 郭祥初,李秀荣.深井降水技术在引江济汉工程中的应用[J].水利建设与管理,2014,34(5):1-4.

(上接第 27 页)才,能够确保各专业之间实现有序衔接,不仅能节约时间成本和人力成本,还能够提高设计效率,实现对地铁工程项目的精细化管控。

## 5 结 语

综合而言,随着我国地铁工程项目建设工作的逐步推进,怎样利用科学合理的方式保障地铁工程项目设计方案的质量,是今后研究人员需要积极探究的方向。纵观当前我国 BIM 技术的应用现状,从整体上而言仍然停留在起步阶段,但是,随着 BIM 技术的不断升级以及全面推广应用,相信越来越多的先进技术将会应运而生,并取得良好的应用成效。在 BIM 技术等现代化技术方法的辅助下,强化地铁车站结构建设质量,保障建设效率已经成了城市轨道交通工程设计以

及施工中的重要内容,并且为交通事业的进一步发展奠定良好的基础。▲

## 参考文献

- [1] 彭拔.分析地铁车站结构设计中 BIM 技术的应用[J].建材与装饰,2020(4):290-291.
- [2] 胡琳,任柯,李健. BIM 技术在地铁车站结构设计中的运用[J].建材与装饰,2019(32):252-253.
- [3] 王玮. BIM 技术在地铁车站结构设计中的应用研究[J].建材与装饰,2019(7):259-260.
- [4] 刘燕,周捷. BIM 技术在地铁车站结构设计中的应用研究[J].中国新技术新产品,2019(2):26-27.
- [5] 李潇. BIM 技术在地铁车站结构设计中的应用[J].建设科技,2018(2):84.
- [6] 罗楠.浅谈 BIM 技术在地铁车站结构设计中的应用[J].建材与装饰,2017(52):75-76.



## 科学研究

# 大藤峡水利枢纽工程筑岛水下爆破方案设计与应用

陈佳培 任 磊 何 倩

(南京市水利建筑工程有限公司, 江苏 南京 210000)

**【摘 要】** 大藤峡船闸下引航道口门区航下3+248.28下游左、右岸开挖边坡不进行支护,无围堰保护,需进行水下爆破施工。根据现场实际情况,下游引航道口门区航下3+248.28~航下3+861.25段常年位于水下,优先采用石渣料筑岛回填至27.00m高程,形成钻爆施工平台,并充分利用枯水期完成钻爆施工,爆渣采用长臂反铲或抓斗式挖泥船进行挖除。船闸口门区航下3+248.28~航下3+861.25段历时10.3个月顺利完成水下开挖,为大藤峡水利枢纽按期通航奠定了坚实基础。大藤峡船闸工程已运行一年多,过往船舶均安全通行,实践证明该筑岛水下爆破设计方案行之有效,可为类似工程施工提供借鉴经验。

**【关键词】** 水下爆破;填渣钻爆;预裂爆破;筑岛回填;爆破网络

中图分类号: TV61

文献标识码: B

文章编号: 1673-8241 (2022) 12-033-08

## Design and Application of Underwater Blasting Scheme for Zhudao in Datengxia Water Conservancy Project

CHEN Jiawei, REN Lei, HE Qian

(Nanjing Water Conservancy Construction Engineering Co., Ltd., Nanjing 210000, China)

**Abstract:** There is no support and cofferdam protection for the slope excavation on the left and right banks of the downstream of 3+248.28 in the lower approach entrance area of the channel of Datengxia lock, and underwater blasting construction is required. According to the actual situation of the site, section 3+248.28 ~ 3+861.25 of the entrance area of the downstream approach channel is always under water. Therefore, it is preferred to backfill the island with rock ballast to 27 meter elevation to form a drilling and blasting construction platform, and make full use of the dry water period to complete the drilling and blasting. The blasting ballast is excavated by long-arm back shovel or grab dredger. The underwater excavation of the section 3+248.28 ~ 3+861.25 at the entrance area of the lock has been successfully completed within 10.3 months, laying a solid foundation for the scheduled navigation of Datengxia Water Conservancy Project. The Datengxia lock project has been in operation for more than one year, and all passing ships can pass safely. The practice has proved that the underwater blasting design scheme is effective and can be used as a reference for the construction of similar projects.

收稿日期: 2022-07-28

作者简介: 陈佳培 (1993—), 男, 本科, 工程师, 主要从事水利水电施工工作。

**Key words:** underwater blasting; drilling and blasting with filled slag; presplitting blasting; island backfill; blasting network

近年来,随着水利行业的不断发展,原来水深条件不足的航道均需浚深。在水中、水底或水下固体介质内进行的爆破施工称之为水下爆破。水下爆破是水利工程爆破的一个重要组成部分,已广泛应用于水利水电、航道疏浚、水下挤淤筑堤、围堰爆破拆除等工程领域。

## 1 工程概况

大藤峡水利枢纽工程位于珠江流域西江水系的黔江河段末端,枢纽工程任务为防洪、航运、发电、补水压咸、灌溉等综合利用。水库正常蓄水位 61.00m,汛限水位 47.60m,死水位 47.60m,总库容 34.79 亿  $\text{m}^3$ ,总装机容量 1600MW,为 I 等大(1)型工程。

下游引航道口门区桩号为航下 2+190~航下 3+861.25,尾部为转弯段,轴线处转弯半径为 1400m。其中航下 2+190~航下 2+711 段设计开挖底高程为 15.35m,航下 2+711~航下 3+861.25 段设计开挖底高程为 16.65m,两段以 1:4 的斜坡相接。口门区左侧开挖边坡设 2 级马道,马道高程分别为 25m、35m,宽度均为 3m。

下引航道口门区航下 2+190~航下 3+248.28 段左右岸开挖边坡需采用雷诺护垫或混凝土护坡进行防护,在围堰保护下形成干地施工;航下 3+248.28 下游左右岸开挖边坡不进行支护,无围堰保护,需进行水下爆破施工。

## 2 工程地质条件

下游引航道口门区航下 3+248.28~航下 3+861.25 段在黔江岩滩和河床通过,地形略有起伏,地面高程一般为 15~25m。开挖区覆盖层零星分布,主要为砂砾石,下部基岩为郁江阶下段的灰岩,岩溶发育。

## 3 水位气象条件

### 3.1 气象

黔江流域地处我国低纬度地带,属亚热带季风气候区,夏季高温湿热,暴雨频繁,秋季常受台风入侵影响,冬季严寒天气很少。

坝址附近多年平均年降水量 1702.9mm,多集中于 4—8 月,约占总量的 70%;多年平均相对湿度 80%;坝址附近的桂平站多年平均风速 1.2m/s,最大风速 12m/s,相应风向为 SSW。

本工程位于亚热带季风气候区,气温在零度以下天数仅为 2~8 天,河道无结冰流凌情况。

### 3.2 洪水

西江流域洪水由暴雨形成,较大洪水一般每年的 4 月开始,至 10 月结束,5—9 月是暴雨洪水的多发季节,尤以 6—8 月最多,特大暴雨洪水主要发生在 6、7 两月。施工时洪水考虑龙滩水库的调节(见表 1)。

表 1 施工分期设计洪水成果

分 期	指定频率设计值/( $\text{m}^3/\text{s}$ )						
	$P=1\%$	$P=2\%$	$P=5\%$	$P=10\%$	$P=20\%$	$P=33.3\%$	$P=50\%$
3 月 1—31 日		10960	9890	6720	4120	3350	2710
4 月 1—30 日	19100	16400	12900	10330	7820	6220	4790
5 月 1—31 日	28100	25200	21400	18400	15300	12900	10820
6 月 1 日—7 月 31 日(汛期)	48800	44900	39300	35100	30100		22800
8 月 1 日—9 月 30 日(汛期)	39300	34500	30000	26000	21600	17500	13900
10 月 1—31 日	20400	16300	11200	7710	4870	3360	2660
11 月 1—30 日	9040	7810	6200	5030	3910	3160	2590
12 月 1 日—次年 2 月底	8680	7410	5780	4610	3520	2790	2310

注 表中主汛期、后汛期流量为经龙滩调蓄后坝址处流量;其他各期流量为龙—武区间流量加龙滩水电站下泄流量  $1100\text{m}^3/\text{s}$ 。

### 3.3 周边环境

根据现场实际情况，下游引航道口门区周边环境复杂，爆破有害效应控制要求严格，主要情况如下：

该段被爆区，距业主一期管理营地最近距离约 120m，距下游砂石加工系统最近距离约 210m，同时，左岸岸坡脚处有混凝土挡墙、排水渠等建筑物，坡顶有变压器房等临时设施，左岸坡顶高程为 44.50m，该段钻爆平台高程为 26.50m，高差为 18m，主河道还有航行船只。

## 4 爆破设计方案

### 4.1 爆破工程等级

下引航道口门区爆破为水下钻爆爆破，一次爆破药量控制在 5 ~ 10t。根据《爆破安全规程》（GB 6722—2014）规定，水下钻孔爆破一次用炸药量为  $1 \leq Q < 10t$  时，爆破工程等级为 B 级。为此，本工程爆破工程等级为 B 级。

### 4.2 爆破总体施工程序

船闸下出口门区石方开挖采用填渣钻爆作业法进行。根据现场实际情况，下游引航道口门区水位常年处于 25.00m 以上，为保证施工安全，填渣平台需高出水面 1 ~ 2m，平台顶部高程暂定为 27.00m，回填范围需全面覆盖设计开挖范围，左岸超填出设计开口外 2 ~ 3m，右岸超填出设计开口外 3 ~ 4m，以满足边坡预裂爆破钻孔及安全需要。

石方梯段爆破及边坡预裂爆破分别采用 CM351 钻机及 QZJ-100B 潜孔钻跟管一次性钻孔到位，人工装药，分段分区进行爆破。石方钻爆施工利用枯水期进行，汛期不施工；石方挖运可全年施工，枯水期采用长臂反铲及常规反铲挖装，汛期视工期情况不施工或采用抓斗式挖泥船配驳船进行装运。

### 4.3 爆破分区

根据设计施工图纸，下游引航道口门区航下 3 + 248.28 ~ 航下 3 + 398.28 段底宽（高程 16.65m）约 100m，筑岛平台顶（高程 26.50m）宽度约 115m。优

先顺航槽中心线掏槽形成临空面，左右顺水流方向按约 150m 将被爆区划分为 4 个施工段，考虑各施工段横向宽度，将各施工段按 10m 左右进行横向分区，分为 5 ~ 6 作业区，各作业区被爆面积约  $150m \times 10m = 1500m^2$ 。现场根据岩面线出露情况，可适当调整被爆区规模，确保一次爆破药量不超过 10t。

### 4.4 爆破器材选择

炸药：梯段爆破采用  $\phi 90$  2 号岩石乳化炸药，预裂爆破采用  $\phi 32$  2 号岩石乳化炸药。爆速、爆力应适当提高，炸药密度适当加大（以综合密度大于  $1.1 g/cm^3$  为佳）。

起爆：采用数码电子雷管起爆网络，导爆索入孔。

导爆索：采用特制高抗水导爆索。

### 4.5 钻孔器材选择

梯段爆破钻孔采用 CM351 钻机进行，预裂爆破钻孔采用 QZJ-100B 潜孔钻进行，钻机使用前均需改装为跟管钻机。钻头采用偏心钻头，梯段爆破跟管钢套筒直径 146mm，壁厚 5mm，跟管内 PVC 套管壁厚大于 5mm，内径 120mm；预裂爆破跟管钢套筒直径 89mm，壁厚 5mm，跟管套管采用 80mm PVC 管。跟管拔管采用液压拔管机进行。

### 4.6 布孔形式

根据上述分区规划，各作业区梯段爆破为多排孔，采用梅花形布孔形式。边坡预裂爆破采用一字形布孔方式。

考虑先爆区进行爆破作业时，会将相邻的后爆区域岩体破坏，影响后爆区域钻爆施工作业，现场可根据实际情况，必要时在各作业区分界线处布置一排预裂孔，该预裂孔布置形式与边坡预裂孔一致，为一字形布置。

### 4.7 爆破参数

下游引航道口门区航下 3 + 248.28 ~ 航下 3 + 861.25 段水下爆破施工包括先锋槽抽槽爆破、梯段爆破及边坡预裂爆破。根据《新编爆破工程实用手

册》、相关规程规范及类似工程经验，主要爆破参数如下。

#### 4.7.1 先锋槽抽槽爆破

规划先顺航槽中心线抽槽形成临空面，先锋槽采用楔形掏槽方式，采用 CM351 钻机进行钻孔，枯水期岩面外露水面部位可直接钻孔爆破，水面以下部分先填渣，再跟管钻孔爆破（见表 1、图 1）。

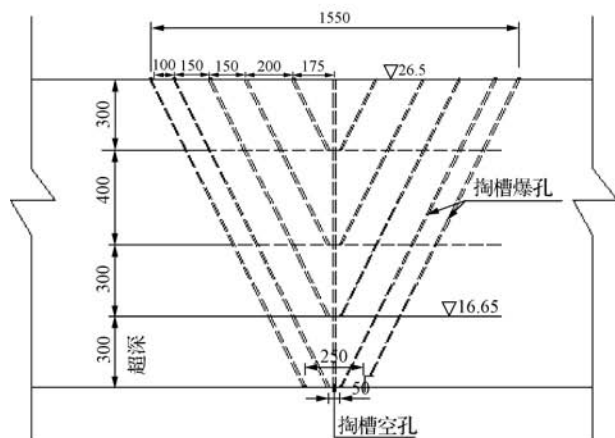
#### 4.7.2 梯段爆破参数

梯段爆破采用填渣作业法，钻孔采用改装的 CM351 钻机跟管钻进，主要爆破参数如下：

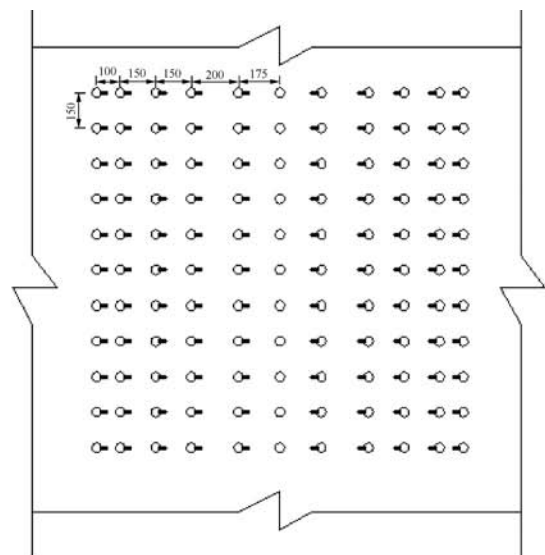
梯段高度： $H = 26.5 - 16.65 = 9.85\text{m}$ ，其中填渣厚度 1~6m，本次计算取梯段高度为 9m。

表 2 先锋槽开挖爆破参数

序号	参 数	指 标	备 注
1	梯段高度	10m	$H = 26.5 - 16.65 = 9.85\text{m}$
2	钻孔直径	115mm/150mm	常规钻孔/跟管钻孔
3	孔 斜	1:0.5 ( $63.4^\circ$ )	
4	超 深	3.0m	
5	孔 距	1.5m	
6	排 距	1.0~1.5m	
7	堵塞长度	1.0~2.0m	不含填渣厚度
8	单 耗	$1.2 \sim 1.5\text{kg}/\text{m}^3$	根据生产性爆破试验调整
9	装药结构	间隔不耦合	
10	起爆方案	排间微差起爆	左右对称起爆



(a) 先锋槽开挖爆破设计剖面



(b) 先锋槽开挖爆破设计平面

图 1 先锋槽开挖爆破设计（单位：cm）

底板抵抗线： $W = 2.5\text{m}$ 。

孔距： $a = 2\text{m}$ （见图 2）。

排距： $b = 1.5\text{m}$ 。

孔斜：为便于施工，本工程梯段爆破采用垂直孔。局部陡坎位置处，为减少填渣工程量，可采用扇形钻孔方式；先锋槽周边梯段爆破钻孔采用扇形钻孔将钻孔角度逐步调整至垂直钻孔（见图 5）。

超深： $h = 2 \sim 3\text{m}$ 。

孔深： $L = H + h = 12 \sim 13\text{m}$ （见图 3）。

炸药单耗： $q = 1.1 \sim 1.3\text{kg}/\text{m}^3$ ，根据生产性爆破试验进行调整。

单孔装药量： $Q = qawH = (1.1 \sim 1.3) \times 2.0 \times 1.5 \times 9.0 = 29.7 \sim 35.1\text{kg}$ ，现场实际单孔装药应根据钻孔揭露岩面线高程确定实际梯段高度，以此进行计算，并根据单卷药卷重量（3kg）进行调整。

堵塞长度  $L_2 \geq 5.0\text{m}$ ，其中原始地面线以下 1.0~2.0m，填渣体厚度全部计入堵塞长度。

装药结构：采用连续装药方式，将导爆索及炸药连续绑在竹片上，装入炮孔内，堵塞段采用粗砂、钻孔岩粉堵塞，严禁用块石等块状物体堵塞。

起爆方式：采用电子雷管起爆。

爆破最大单响药量： $Q \leq 300\text{kg}$ 。



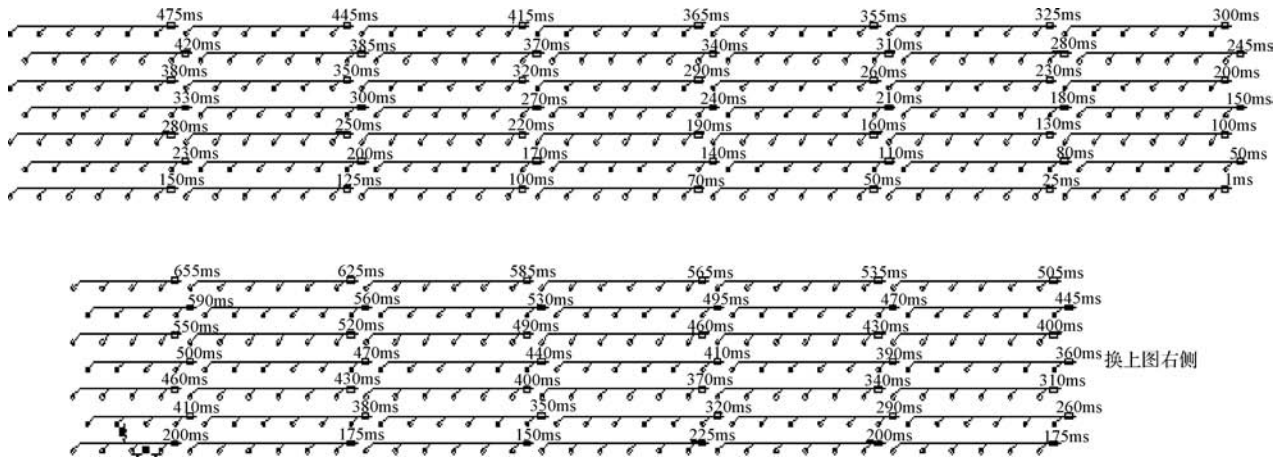


图2 梯段爆破钻孔平面布置

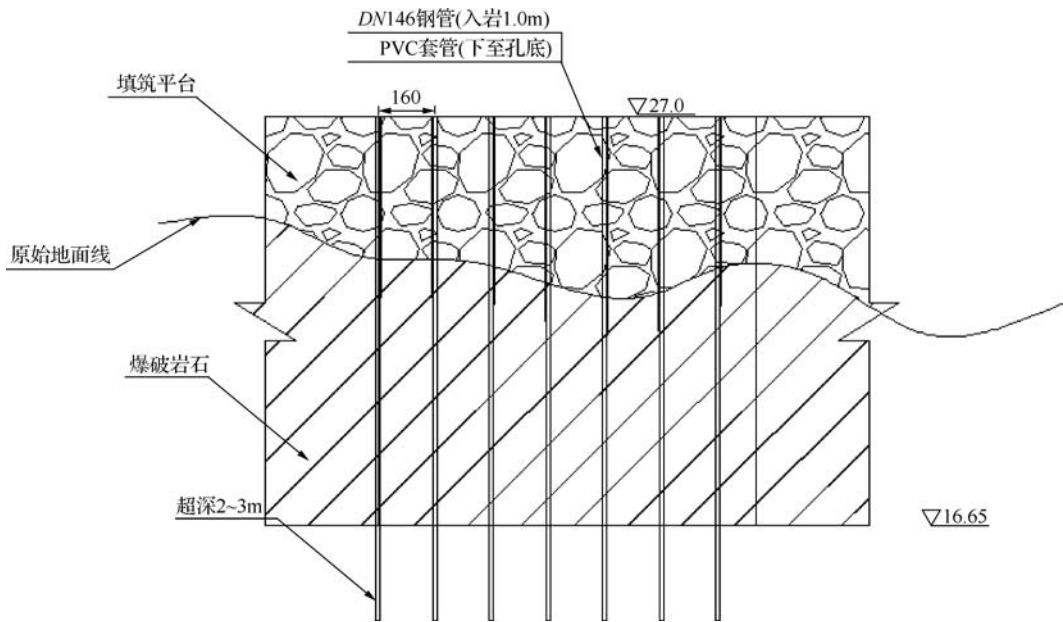


图3 梯段爆破钻孔剖面 (尺寸单位: cm)

4.7.3 边坡预裂爆破参数

边坡预裂爆破采用改装的 QZJ-100B 潜孔钻跟管钻孔, 主要爆破参数如下:

孔径: 90mm。

孔距:  $a = 80 \sim 90\text{cm}$  (见图 3)。

孔深: 为填渣平台顶高程至航槽设计开挖底高程间坡面斜长与超深总和, 预裂爆破钻孔超深取 2.0m, 则  $L = 16.0\text{m}$ , 其中上部部分孔段为填渣平台钻孔, 不装药。故本次预裂爆破设计孔深取 14.0m, 现场根据实际钻孔情况进行调整 (见图 4)。

线装药密度:  $q = 400 \sim 500\text{g/m}$ 。

单孔装药量:  $Q = qL = (0.4 \sim 0.5) \times 14 = 5.6 \sim 7.0\text{kg}$ , 具体根据实际钻孔情况进行调整。

堵塞长度: 原始地面线以下堵塞 1 ~ 2m, 填渣体段全部堵塞。

装药结构: 采用间隔不耦合装药方式, 将导爆索及炸药绑在竹片上装入炮孔中, 堵塞段用砂子、钻孔岩粉堵塞。

起爆方式: 用电子雷管起爆。

爆破最大一段起爆药量:  $Q \leq 50\text{kg}$ 。

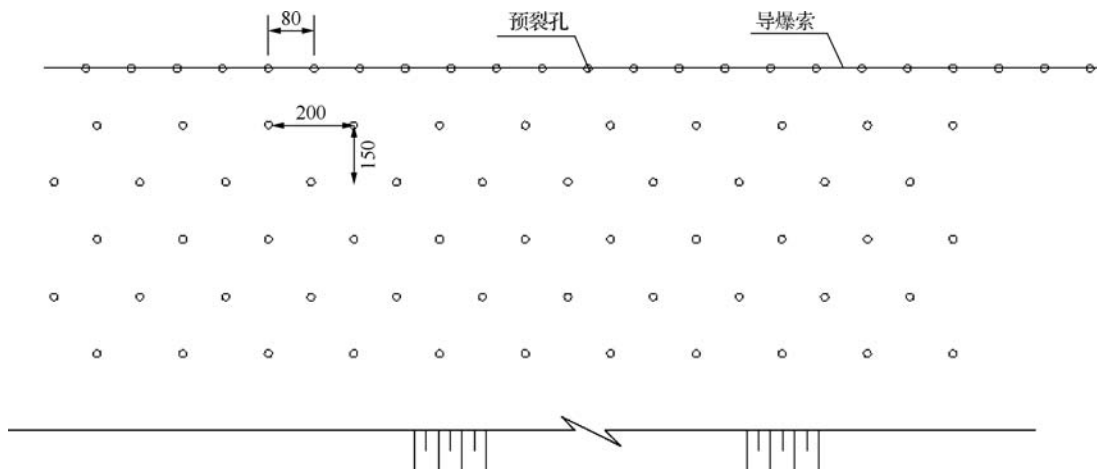


图4 预裂爆破钻孔平面布置 (单位: cm)

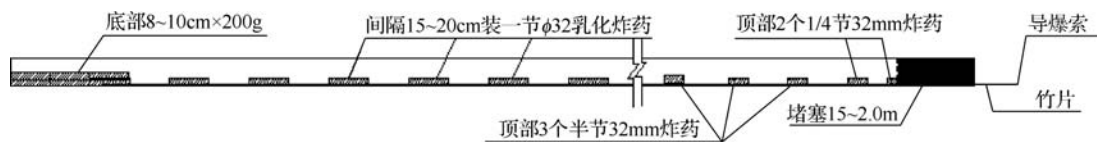


图5 预裂爆破装药结构示意图

## 4.8 爆破网络设计

### 4.8.1 爆破网络选择

采用数码电子雷管爆破起爆网路。主爆破孔最大一段起爆药量  $Q \leq 300\text{kg}$ , 采取 6 孔一响 (具体可根据单孔装药量进行调整)。预裂爆破孔最大一段起爆药量  $Q \leq 50\text{kg}$ , 采取 7 孔一响 (具体可根据单孔装药量进行调整)。

### 4.8.2 起爆顺序

预裂爆破在主爆孔施工前单独进行爆破; 梯段爆破从临空面起采用排间微差起爆。

### 4.8.3 网络结构布置

梯段爆破孔采用数码电子雷管起爆网络, 同排孔微差间隔时间为 20 ~ 30ms, 排间微差间隔时间为 30 ~ 60ms。

## 5 爆破效应及防控措施

### 5.1 飞石安全距离

根据《水电水利工程爆破施工技术规范》(DL/T 5135—2013), 水下爆破飞石安全距离可按式计算:

$$L = 200 \frac{Q^{\frac{1}{4}}}{nh - 2}$$

式中  $L$ ——安全距离, m;

$h$ ——水深, 取 8.0m;

$n$ ——系数, 与地形、地质条件有关, 一般为 1.0 ~ 1.3, 本次计算取 1.0;

$Q$ ——最大一段起爆药量, 取 300kg。

带入计算得  $L = 138.7\text{m}$ 。

同时, 根据《爆破安全规程》(GB 6722—2014) 表 10 (爆破个别飞散物对人员的安全距离) 规定: 深孔台阶梯段爆破最小安全允许距离“按设计, 但不大于 200m”。

防控措施: ①最小警戒范围半径按 200m 控制, 设置警戒并在爆破前清场; ②采用炮被或砂袋对被爆区域进行覆盖防护; ③对非填渣作业区域, 爆破钻孔前需将表面冲积卵石清理干净。

### 5.2 爆破振动安全允许距离

根据《爆破安全规程》(GB 6722—2014), 爆破振动安全允许距离, 可按式计算:

$$R = (K/V)^{1/a} Q^{1/3}$$

式中  $R$ ——爆破振动安全允许距离, m;  
 $Q$ ——最大一段起爆药量, 取 300kg;  
 $V$ ——保护对象所在地质点振动安全允许速度,  
 业主营地多为砖砌房, 取  $V = 2.0\text{cm/s}$ ;  
 同时, 被爆区左岸坡脚有混凝土挡土墙,  
 按 3~7 天龄期选取  $V = 5.0\text{cm/s}$ , 7~28  
 天龄期选取  $V = 10.0\text{cm/s}$ ;  
 $K$ ——系数取决于爆破地震的传播条件(地  
 形)和所通过介质的性质(地质条件),  
 取值 200;  
 $a$ ——衰减指数, 主要反映爆破地震波随装药  
 量和距离的变化而变化, 取值 1.6。

带入计算得  $R = 119\text{m}$ 、 $R = 67.2\text{m}$  及  $R = 43.5\text{m}$ 。

根据现场实际情况, 爆区周边主要建筑物均位于  
 该值范围外, 爆破振动对周边环境的影响不大。

混凝土挡墙大部分距离被爆区约 50m, 混凝土  
 挡墙龄期超过 7 天后, 爆破振动可满足要求, 且根据  
 现场实际情况, 挡墙混凝土主要在 2018 年 4 月 30 日  
 前施工, 该时间段主要进行先锋槽爆破施工, 为满足  
 振动要求, 2018 年 4 月 30 日前, 爆破最大一段起爆  
 药量按  $Q \leq 120\text{kg}$  控制。

防控措施: ④爆破施工期间, 定期对周边保护对  
 象采取宏观调查方式进行爆破安全监测, 必要时采用  
 NUBOX-6016 型智能振动监测仪进行振动监测, 并根  
 据监测结果, 及时调整最大一段起爆药量; ⑤合理安  
 排混凝土挡墙施工时段, 保证大规模爆破前混凝土挡  
 墙龄期超过 7 天。

### 5.3 水中冲击波安全允许距离

根据《爆破安全规程》(GB 6722—2014), 在水  
 深不大于 30m 的水域内进行水下爆破, 水中冲击波  
 的安全允许距离, 应遵守下列规定:

附近人员: 本工程最大一段起爆药量  $Q \leq 300\text{kg}$ ,  
 根据《爆破安全规程》(GB 6722—2014) 表 6 (对人  
 员的水中冲击波安全允许距离) 规定, 钻孔装药情况  
 下人员游泳的安全允许距离为 1100m, 人员潜水的安

全允许距离为 1400m。

附近客船: 1500m。

施工船舶: 木船 250m, 铁船 150m。

非施工船舶: 按  $R = K_0 \sqrt[3]{Q}$  计算 (式中:  $R$  为水  
 中冲击波的最小安全距离, m;  $Q$  为最大一段起爆药  
 量, kg;  $K_0$  为系数, 钻孔爆破时木船取 25, 铁船取  
 15)。带入计算得: 木船 167.5m, 铁船 100.5m; 同  
 时参照《爆破安全规程》(GB 6722—2014) 表 7 (对  
 施工船舶的水中冲击波安全允许距离) 有关规定, 取  
 木船 250m, 铁船 150m。

防控措施: 以爆破区为中心, 1500m 范围内禁止  
 人员游泳、潜水以及划船; 下游卸料码头施工船舶均  
 为铁船, 最小距离约 210m, 满足水中冲击波安全允  
 许距离要求, 爆破水中冲击波不会对其造成影响。

### 5.4 爆破涌浪计算及防控

水下爆破施工时, 爆岩落水会产生涌浪, 涌浪上  
 岸会影响傍岸建筑物安全。根据《新编爆破工程实用  
 手册》, 涌浪高度可参照下式计算:

$$\Delta H = 0.45 \frac{\lambda T \frac{L}{B}}{h^{\frac{2}{3}} R}$$

式中  $\lambda$ ——抛体前沿宽, 取 150m;

$T$ ——抛体厚, 取 15m;

$L$ ——抛体滑距, 取 10m;

$B$ ——抛堆水面宽, 取 170m;

$h$ ——水深, 取 10.0m;

$R$ ——距离, 取 200m。

带入计算得  $\Delta H = 0.143\text{m}$ , 即涌浪到达对岸时,  
 涌浪高度仅为 14.3cm, 对岸边建筑物基本无影响。  
 必要时, 可在需保护对象周边水面布设防浪竹排, 并  
 连接固定。

### 5.5 爆破噪声控制

尽量提高炸药爆炸能量的利用率, 减少形成空气  
 冲击波的能量, 从而最大限度地降低空气冲击波的强  
 度; 合理确定爆破参数, 选择合理的微差网络和微差  
 间隔时间, 保证岩石能充分松动; 保证堵塞长度和堵

塞质量,以防止高压气体从炮孔中冲出,避免因采用过小的堵塞长度而产生冲天炮;杜绝裸露药包爆破。

### 5.6 爆破粉尘控制

本工程为水下爆破,不易产生大量粉尘,可不采取专门措施处理。对于钻孔粉尘,可在钻机上安装捕尘器进行控制。

## 6 爆破警戒方案

### 6.1 爆破警戒点设置

本工程爆破警戒点暂定设置五个:一是业主营地出入口处;二是爆破区下游左岸进场公路 300m 处;三是爆破区上游左岸进场公路 300m 处;四是爆破区外侧河左岸下游岸边 2000m,警戒河内船舶、河内人员;五是爆破区外侧河左岸上游岸边 2000m,警戒河内船舶、河内人员。

另外,爆破前对附近人员的告知、清场工作由项目部统一安排。

### 6.2 现场爆破公告及警戒信号

在现场合适位置布设爆破公告牌,公告牌应包含爆破地点、爆破时间、警戒范围及爆破信号等规定。根据现场实际情况及相关协调指示,船闸爆破施工爆破时间规定如下:中午 12:10—12:30,下午 18:10—18:30。

#### 6.2.1 由点警报器发出警戒信号

第一次三响(电警报器)为预警信号,该信号发出后爆破作业点周围 300m 开始实施警戒,人员、设备、机械撤至安全区,对附近村庄进行疏散、清场。

第二次二响为起爆信号,在确认爆破安全区内已达安全要求,无妨碍安全的人、机、物,具备起爆条件时发出。

第三次一响为解除警戒信号,爆破结束后,经爆

破技术人员检查现场,无盲炮、瞎炮、无危险状态时发出。

#### 6.2.2 爆破警戒其他主要规定

爆破前半小时警戒人员进入警戒区域,实施警戒、告知、清场等作业;各警戒点及起爆点之间用无线对讲机联系;警戒完毕后,由爆破指挥中心的生产经理下达起爆命令。

## 7 结 语

下游引航道口门区航下 3 + 248.28 ~ 航下 3 + 861.25 段水下爆破开挖于 2018 年 3 月 15 日开始施工,2020 年 1 月 31 日完成施工,汛期不施工。筑岛平台回填工程量 11.0 万 m<sup>3</sup>,平均强度 5.5 万 m<sup>3</sup>/月;口门区爆区总面积约为 6.5 万 m<sup>2</sup>,单孔钻孔深度约 12.0m,受水位涨落影响,梯段爆破钻孔平均强度约 3.8 万 m/月,预裂爆破钻孔平均强度约 3429m/月,长臂反铲平均挖装强度约 5.5 万 m<sup>3</sup>/月。船闸口门区筑岛水下爆破总体效果良好,爆破施工进度满足船闸工程总体工期进度安排。工程实践表明,该筑岛水下爆破设计方案具有较强可行性,可为后续类似工程提供相关借鉴经验。▲

## 参考文献

- [1] 冯叔瑜,马乃耀.现代海港建设与水下爆破[J].力学与实践,1979(1):71-74,64.
- [2] 杨光煦.水下工程爆破[M].北京:海洋出版社,1992.
- [3] 柴修伟.水下炮孔爆破水中冲击波传播特性[D].武汉:武汉理工大学,2009.
- [4] 山西省水利勘测设计院.漳泽水库进水口水下爆破经验介绍[J].水利水电技术,1964(12):25-28,50.
- [5] 汪旭光.中国典型爆破工程与技术[M].北京:冶金工业出版社,2006.
- [6] 刘万忠.大峡导流明渠进口处挡水岩坎爆破拆除设计与施工[J].工程爆破.1996,2(4):65-69.



DOI: 10.16617/j.cnki.11-5543/TK. 2022.12.09

# 水下帷幕灌浆水面作业平台设计与应用研究

胡小梅 程国栋 陈崇德

(湖北省漳河工程管理局, 湖北 荆门 448156)

**【摘要】** 西北口水库帷幕灌浆工程开孔高程位于水下, 且具有高水头、大水深、水面作业等特点。文章针对水面作业平台的基本要求、结构形式、安装方法、平台固定以及平台抗风缆强度验算等进行了设计研究, 对水面作业平台施工的主要内容、各专项施工方案、检查与监测等进行了应用研究。实践结果表明, 水面作业平台安全、牢固, 各项检查与观测值均在设计允许范围内, 满足了水下帷幕灌浆工程的施工需要。

**【关键词】** 水下帷幕灌浆; 水面作业平台; 设计与应用; 西北口水库

中图分类号: TV543.5

文献标识码: B

文章编号: 1673-8241 (2022) 12-041-05

## Design and Application Research of Surface Operation Platform in Underwater Curtain Grouting

HU Xiaomei, CHENG Guodong, CHEN Chongde

(Zhanghe Engineering Administration Bureau of Hubei Province, Jingmen 448156, China)

**Abstract:** The perforated height of curtain grouting project of Xibeikou Reservoir is located in the underwater with the characteristics of high head, large water depth and surface operation. In this paper, the basic requirements, structure type, installation method, platform fixation and checking calculation of cable strength for wind resistance of the surface operation platform are designed and studied, and the main content, various special construction schemes, inspection and monitoring of the construction of the surface operation platform are studied. The practical results show that the surface operation platform is safe and firm, and the inspection and observation values are within the allowable range of the design, which meets the construction needs of underwater curtain grouting project.

**Key words:** underwater curtain grouting; surface operation platform; design and application; Xibeikou Reservoir

### 1 概述

西北口水库位于湖北省宜昌市夷陵区境内, 系长

江北岸一级支流黄柏河流域梯级开发的骨干工程。水库总库容 1.96 亿  $\text{m}^3$ , 其中兴利库容 1.55 亿  $\text{m}^3$ , 西北口水库是以灌溉为主, 兼有防洪、发电、养殖、城

收稿日期: 2022-07-26

作者简介: 胡小梅 (1981—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事水利水电工程建设管理工作。

镇供水、拦沙等综合效益的大(2)型水利工程。

根据设计文件,趾板 K1~K4 段帷幕灌浆开孔高程在 240.60~301.50m 之间,低于施工期库水位(水位控制在 305.00m)以下 3.5~64.4m(含覆盖层)。因此,满足水下钻孔灌浆施工要求,在趾板 K1~K4 段应搭设水面作业平台进行水下帷幕灌浆施工。水面作业平台长 162m,宽 5m,平台上将承受静荷载及施工动荷载,并在上面进行超百米孔深的钻孔灌浆作业,所以必须保证水面作业平台的可行性、安全性和稳定性。

## 2 水下帷幕灌浆水面作业平台设计研究

### 2.1 水面作业平台的基本要求

荷载要求:荷载主要是浮桥自重、钻孔灌浆设备及钻孔作业产生的冲击力和施工人员荷载,此外还应考虑风浪影响因素等。根据设计,钻孔设备平均按 10m 间距分布,每台钻机及其配套材料重量按 3.5t 计算。

结构要求:平台应架设简单、速度快,结构牢固、稳定。

定位要求:定位准确,并具有较强的抗风浪及在一定范围内适应水位变化能力。

水位要求:施工期要求水库水位降到 305m 以下,但不得低于 304m。且在施工过程中库水位每天涨落不得超过  $\pm 0.5\text{m}$ 。根据水位要求,施工期拟定在当年 11 月—次年 4 月之间<sup>[1]</sup>。

水平位移调节要求:为了保证开孔孔位偏差满足设计要求,平台水平位移可灵活调节,当水平位移超过  $\pm 10\text{cm}$  时,通过松(紧)限位钢缆进行调节;当水平位移不超过  $\pm 10\text{cm}$  时,通过调整钻机位置进行调节<sup>[2]</sup>。

### 2.2 水面平台结构形式

水面平台单个浮船的主尺寸:长 4.0m,宽 3.0m,高 1.25m。

浮船采用 6mm 厚钢板焊接而成,作为浮体。浮船每 2 个组成 1 对,并垂直于帷幕灌浆轴线对称布

置,中间预留 1.0m 间隙作为钻孔时钻具上下及孔口管安装空间。每对浮船沿作业平台轴线方向间距 9m,共 19 对浮船,总长度 162m。

两对浮船的甲板上,左右设桁架兼做栏杆,每个片体由 3 件标准 321 型贝雷片组成(长度为 3m/节,高度 1.5m)。在甲板上设桁架的固定装置及斜支撑。左右桁架间用 22a 工字钢作为横梁,工字钢与桁架间用横梁夹具连接,必要时焊接加固。在工字钢横梁上设纵向骨架(8 号槽钢),纵向骨架与横梁间用螺栓连接。纵向骨架上铺设 50mm 的木板(见图 1、图 2)。

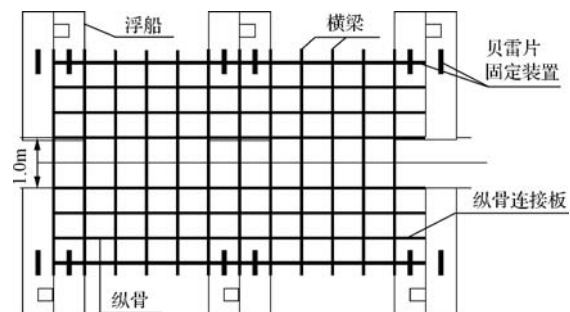


图1 平台基本结构

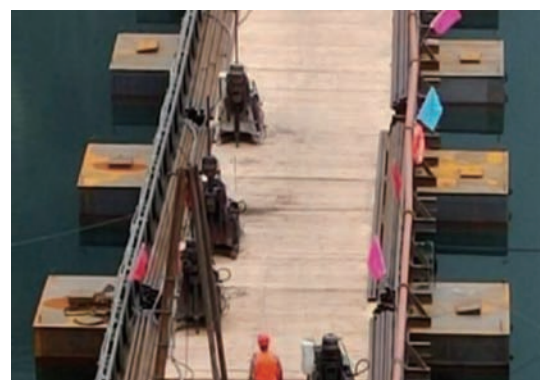


图2 平台基本结构实际情况

水面作业平台分为 3 段,其中, K1~K2 段长 54.95m,由 6 个浮船组和 19 节贝雷桥组成; K2~K3 段长 35.58m,由 4 个浮船组和 12 节贝雷桥组成; K3~K4 段长 73.69m,由 9 个浮船组和 23 节贝雷桥组成(见图 3)。

### 2.3 水面作业平台重量及吃水计算

计算水面作业平台重量及吃水深度见表 1,如因特殊情况,出现局部荷载集中,可能存在浮箱组提供

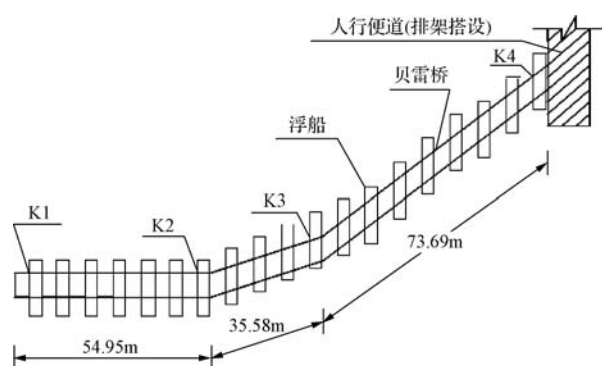


图3 水面作业平台搭设示意图

的浮力无法满足局部承载要求的情况。考虑在两个浮箱组之间预留钢套环，钢套环采用 $\phi 130$ 钢管，钢套环长50cm，浮力不足时将橡胶气囊直接置入钢套筒内，并对气囊进行充气，以增加浮体整体承载力。单个气囊可提供的最大浮力为10.5t。

表1 水上作业平台重量及吃水深度计算

序号	荷载项目	单位	数量	单件重量/t	重量小计/t
1	水面平台自重	套	1	206.7	206.7
2	平台所有设备自重	套	16	3.5	56.0
3	施工人员	人	50	0.076	3.8
4	冲击荷载		4	6.0	24.0
5	储备浮力				40.0
	荷载合计				330.5
浮船每厘米排水量/t					4.454
浮船平均吃水深/m					0.74

## 2.4 水面平台安装方法

水面平台安装在靠岸边的水面上进行。第一步：用25t吊车将浮体逐个吊到水面，并用绳索临时拴在岸边设置的固定物上。第二步：移动浮体，利用挂钩、钢绳等将两个浮体按尺寸要求连接在一起。第三步：将贝雷片、横梁等构件吊到浮体上，逐节进行组装。沿帷幕灌浆轴线垂直布置的两个对称钢浮体之间预留1m间隙（施工过程中该预留缝宽度可根据实际情况调整）。调整浮体对位后用螺栓与贝雷片固定牢固，最后铺设纵梁和桥面板。

直线段定位后，再进行平台转角处的连接，具体

方法是：根据需要转角的长度和角度，用贝雷片改装成折弯形式，再通过销孔与相邻直线段连接，对平台轴线校正确认无误后利用10号工字钢焊接加固。

## 2.5 平台固定方法

在溢洪道导墙区域用架子管等材料组成限位支撑架，限制平台向下游端移动。同时限位架与平台之间采用柔性连接，保证水上作业平台在库水位上涨或下降时具备在设定范围内进行升降的条件<sup>[3]</sup>。安装方法：首先采用20a槽钢将 $\phi 110$ 钢管与限位架焊接在一起，钢管长度30~50cm；内部活动钢管为一根长1.6~1.8m的 $\phi 89$ 钢管，采用 $\phi 200$ mm高强度法兰盘焊接于钢管两端，钢管外露15cm；采用20A槽钢将 $\phi 89$ 钢管两端与水上平台进行连接（见图4）。

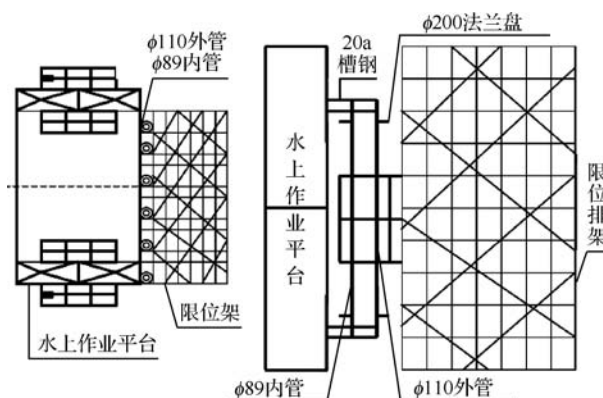


图4 限位架与水上作业平台柔性连接示意图

为避免孔口管及水上平台受到水位升降、水流冲击的影响发生偏移，当拔出套管后，在孔口管外部套入一根长1.5~2m的 $\phi 110$ 钢管作为导向管，并用 $\phi 28$ 钢筋将导向管与水上平台固定在一起（见图5）。

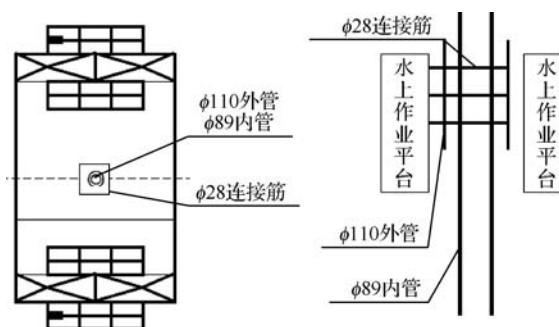


图5 孔口管与水上作业平台柔性连接示意图

在平台下游端距离岸边较近处用  $\phi 50$  钢管或 10 号工字钢设置刚性支撑杆，将平台与岸边刚性连接，使其不能沿水平方向移动<sup>[4]</sup>。考虑到施工期间水位会有一定的波动范围，连接支撑杆应能上下活动（见图 6）。

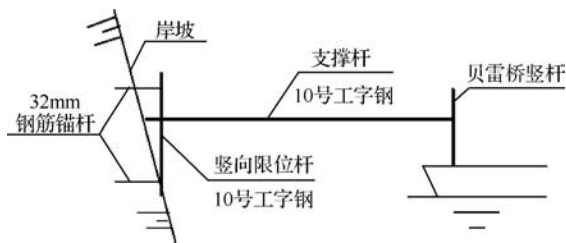


图 6 刚性连接固定示意图

平台与岸边距离较远的部位采用大致对称布置的“八”字形钢丝绳（ $d = 10 \sim 11\text{mm}$ ）抗风缆与岸边及另一个平台进行固定。抗风缆的一端与钢浮箱组或贝雷桥固定，另一端与岸上锚杆固定。抗风缆的长度和松紧度可通过其上的绞盘或手拉葫芦调整，以保证定位精度和适应水位涨落变化。为防止施工过程中发生位移，应经常性用仪器进行检查，并随时纠正。

## 2.6 抗风缆强度验算

水上平台运行中主要受到风浪的影响，相对来说，风荷载对平台的影响要比波浪大。至于波浪对平台的影响大小计算比较困难，一般可通过适当加大安全系数来解决<sup>[5]</sup>。

横向风力计算公式为

$$P_w = WA \quad (1)$$

式中  $P_w$ ——桥梁结构所承受的横向风力，N；

$W$ ——横向风压，Pa；

$A$ ——桥梁结构的有效迎风面积， $\text{m}^2$ 。

横向风压计算公式为

$$W = K_1 K_2 K_3 K_4 W_0 \quad (2)$$

式中  $W_0$ ——基本风压，Pa；

$K_1$ ——设计风速频率换算系数；

$K_2$ ——风载体型系数；

$K_3$ ——风压高度变化系数；

$K_4$ ——地形、地理条件系数。

$W_0$  按 6 级风考虑，其值为 76 ~ 124，此处取中间值为 100； $K_1$  对于大、中桥梁采用 1.0，其他桥梁采用 0.85，此处取 0.85； $K_2$  查表得 0.9； $K_3$  查表得 0.62； $K_4$  取 1。

按式（1）、式（2）计算：按每 30m 左右长桥段设置两对抗风缆考虑，则浮体与上部结构部分的有效迎风面积  $A = 22.5\text{m}^2$ ，故横向风力  $P_w$  为 1067N。

查表  $\phi 10$  钢丝绳破断力为 52200N，因而即使考虑波浪因素，其强度完全可以满足要求。

## 3 水下帷幕灌浆水面作业平台应用研究

### 3.1 应用水面平台作业的主要内容

水底趾板范围清淤、钻孔定位、水下辅助钻灌（开孔、灌浆塞安装等）、水下孔口管安装辅助、水下孔口管固定、水下抬动装置安装、水下孔口管割除、水下清理等。

### 3.2 编制水面作业平台应用各专项施工方案

编制水下帷幕灌浆安全专项施工方案，内容包括施工平面布置、施工要求及技术保证条件、施工计划（包括边界条件、施工与设备及材料计划等）、施工工艺技术（包括钻孔与灌浆技术参数、施工工艺流程、施工方法、质量检查与验收等）、施工安全保证措施（包括组织机构、人员职责、安全保证体系、安全生产检查制度、水下作业安全保障措施等）、水质安全保护措施、技术保证措施（包括钻杆的断折防止处理措施、遇溶蚀渗漏处理措施、趾板抬动控制措施等）<sup>[6]</sup>。

编制应急预案，内容包括危险事件的处置措施，临边作业落水处置措施，机械运转伤人处置措施，施工用电触电伤人处置措施，潜水作业放漂、供气中断、绞缠、溺水处置措施，灌浆施工中漏油造成的水污染处置措施等<sup>[7]</sup>。

编制危险源辨识及控制措施。

### 3.3 检查监测与应用情况

浮箱密闭性检查：定人、定时检查每个浮箱是否



出现浸水或渗水现象,一旦出现浸漏情况立即采取相应措施处理。在整个施工期间,浮箱密闭性较好,无浸水、漏水现象<sup>[8]</sup>。

浮箱吃水深度观测:水面作业平台浮箱设计吃水深度一般为 0.75m,最大吃水深度 1.0m。检查结果表明,浮箱吃水深度在 0.51~0.73m 之间,均小于设计吃水深度。

水平位移监测:在大坝设置前视与后视点,在平台设置 5 处监测点,采用 GPS 及全站仪三角网法定期监测施工过程中浮船的位移情况,结果表明,垂直和水平位移变化值在设计范围之内。

水位观测:专人定时观测,控制库水位变化在 304~305m 之间。

附属结构(主要有支撑架、钢丝绳、焊接点、栏杆等)检查监测:定时观测,施工期间其附属结构完整无损、支撑牢固<sup>[9]</sup>,满足了水下帷幕灌浆工程的施工需要。

设备检查:对水面作业平台的所有设备进行经常性检查、维护,确保施工安全。

所有检查观测项目均安排专人,按规定时间、规定程序、规定项目进行检查观测,并记录在规定的检查观测表中。施工单位和监理部有关人员签字确认<sup>[10]</sup>。

所有检查监测资料当时检查记录,当时统计分析,当时评价水面作业平台运行情况,其结果报送监理等有关单位备查。

## 4 结 语

西北口水库水下帷幕灌浆水面作业平台从施工准备到平台加工、组装、定位及平台验收等历时 2 个月,平台应用从试验研究到水下帷幕灌浆施工任务完

成历时 5 个月。实践证明,水下帷幕灌浆水面作业平台在承受施工设备、人员、材料及平台自重的同时,承受了施工过程中各类动荷载;水面作业平台在竖直方向一定范围内随水位上下浮动,在水平面确保相对位置不变;在随帷幕灌浆轴线布置存在拐点的情况下,不遮挡孔位,可一次进行水下钻孔施工,为顺利完成西北口水库水下帷幕灌浆的施工任务做出了贡献。▲

## 参考文献

- [1] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程施工安全管理导则:SL 721—2015[S]. 北京:中国水利水电出版社,2015.
- [2] 中华人民共和国水利部. 水利水电建设工程安全设施验收导则:SL 765—2018[S]. 北京:中国水利水电出版社,2018.
- [3] 王琦凯,王知晓,陈崇德. 关门岩水库大坝软岩基础渗漏处理技术研究[J]. 水利建设与管理,2021,41(3):54-58.
- [4] 中华人民共和国水利部. 水利工程质量检测技术规程:SL 734—2016[S]. 北京:中国水利水电出版社,2016.
- [5] 程琨,胡小梅,李德等. 引江济汉工程施工风险控制与管理[J]. 人民长江,2016,47(2):56-58,66.
- [6] 张正勇,石永刚. 阿尔塔什深厚覆盖层高面板堆石坝防渗体系布置及关键施工技术[J]. 水利建设与管理,2021,41(1):1-6.
- [7] 林祥志. 舟山市引水工程海底管道垂向稳定性控制措施研究[J]. 中国水能及电气化,2018(4):1-3,7.
- [8] 黄泽均,熊志. 平砂砾层地基深层水泥土搅拌桩防渗墙施工技术及应用[J]. 中国水能及电气化,2021(3):21-26.
- [9] 钟久安,李乔斌,何非凡. 深水条件下水下帷幕灌浆施工方法研究[C]. //2017 年全国锚固与注浆技术学术研讨会论文集. 施工技术编辑部会议论文集. 2017:260-263.
- [10] 王雍,钟久安,袁永定,等. 深水条件下水下帷幕灌浆钻孔定位方法研究[J]. 云南水力发电,2016(5):31-33.
- [11] 张红霞,刘剑,陈崇德. 永圣渡槽组合止水安装施工工法研究[J]. 中国水能及电气化,2022(5):12-16.

DOI: 10.16617/j.cnki.11-5543/TK.2022.12.10

# 生物聚合物加筋土堤坝稳定性评估的 试验研究

刘景青<sup>1</sup> 李 蔚<sup>2</sup>

(1. 涝坡水利服务中心, 山东 莒南 276600;

2. 临沂市水文中心, 山东 临沂 276037)

**【摘 要】** 水泥和其他类似的化合物已被用于防止洪水期间的堤坝决口, 为提高堤坝的耐久性和环保性, 采用了一种新型环保材料生物聚合物制作堤坝模型, 并进行了水工模型试验, 评估新堤坝的可靠性和稳定性, 并应用图像分析来计算堤坝斜坡的破坏范围。文章根据试验结果, 比较了土堤与拟建堤坝之间的破口特征, 并根据不同厚度的新型物质来评价堤体的稳定性。本研究的最终目的是通过在一系列水工试验中验证新物质在堤坝破坏因素方面的性能和有效性, 得出最佳条件。

**【关键词】** 生物聚合物; 堤坝; 溢出; 稳定性评估

中图分类号: TV41

文献标识码: B

文章编号: 1673-8241 (2022) 12-046-08

## Experimental Study on Stability Assessment of Biopolymer Reinforced Earth Dam

LIU Jingqing<sup>1</sup>, LI Wei<sup>2</sup>

(1. Laopo Water Conservancy Service Center, Junan 276600, China;

2. Linyi Hydrology Center, Linyi 276037, China)

**Abstract:** Cement and other similar compounds have been used to prevent dam breaches during floods. In order to improve the durability and environmental protection of the dam, biopolymer, a kind of new environmental protection material is used to make the dam model. A hydraulic model test is carried out to evaluate the reliability and stability of the dam, and image analysis is applied to calculate the failure range of dam slope. According to the experimental results, the breach characteristics of both the earth dam and the proposed dam are compared, and the stability of the dam is evaluated according to the new material with different thicknesses. The ultimate purpose of this paper is to verify the performance and effectiveness of the new material in terms of the failure factors of the dam through a series of hydraulic experiments, and to obtain the best conditions.

**Key words:** biopolymer; dam; overflow; stability assessment

收稿日期: 2022-07-06

作者简介: 刘景青 (1979—), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事水利工程建设管理工作。

河堤不仅保护低洼地区免受洪水侵袭，而且也是连接土地和河流的重要纽带<sup>[1]</sup>。全球气候变化和城市进化进程增加了超过设计泄洪量的异常洪水发生率，河道堤坝更容易受到洪水破坏<sup>[2]</sup>。近年来，由于各种原因，防洪功能日益恶化的老防洪堤因多种原因被破坏，造成巨大的生命财产损失。许多发达国家都制定了防洪堤的设计标准，并正在开发技术，以实现防洪堤的高强度。荷兰提高了堤防洪水响应的设计频率，并实施了由 Deltares（一个大型水资源和社会基础设施综合管理技术研究所）领导的国家技术发展计划，以改善其现有堤防的性能，保护它们免受侵蚀、洪水和管涌的影响。为了减少和预测堤坝破坏造成的洪水破坏，需要进行多种条件下的水力试验。堤防的稳定性也需要根据加固方法和加固材料进行评估，以减少堤防溃决后的破坏<sup>[6]</sup>。

为研究建立和实施有效的对策，防止洪涝对堤防的侵蚀，本研究利用生物聚合物（一种环保岩土工程材料）进行了基于试验的研究，开发出了一种新的生物聚合物。这项研究的创新之处在于这种新物质被应用于堤防的建设。预计，该生物聚合物不仅能改善土壤，还能改善堤坝的耐久性和环境友好性。未来将通过进一步的试验，确定溢流、渗流、管涌等各因素下的新工艺优化方法，并将其应用于实际规模的试验。

## 1 堤防破坏主因

洪水发生时堤防破坏的主要原因有三种：溢流、侵蚀和不稳定的水体状况<sup>[3]</sup>。当洪水径流超过河道的输送量时，或者当输送量因砂子、土壤或碎屑而减少时，就会发生溢流；当陡峭的河流斜坡或弯道中过大的流速和剪切应力冲刷堤坝斜坡或底部时，就会发生侵蚀。堤体的失稳包括坝体的管涌，是由填筑材料不良或坝体渗漏引起的；堤坝破裂也发生在跨河结构的倒塌或使用与堤坝不同的材料的结构的界面处。根据有关报告，溢水占中国堤坝破坏形式的 40%<sup>[4]</sup>。

## 2 水力模型试验

### 2.1 试验设置

为进行试验研究，建造一个高 1m，宽 3m，长度为 5m，坡度为 1:2 的中型堤坝，堤坝上游命名为 A1 通道，下游命名为 A3 通道（见图 1）。水力试验的目的是使用新研发的物质，对比分析土堤和拟建堤坝之间的漫顶决口期间堤坝的行为，并根据应用新型物质的厚度验证对堤坝决口的阻滞效果。



图 1 试验通道示意图 (A3)

为分析溢流对堤坝边坡的破坏情况，在试验通道上安装了图像测量系统，在堤坝破坏部位的前方和两侧分别安装了 5 台 GoPro 摄像机和 1 台摄像机。对整个试验过程进行了不同角度的实时拍摄，以分析边坡的表面冲刷和破坏部分。使用一架无人机拍摄堤坝决堤的过程。

### 2.2 试验方法

由于几项初步试验已经阐明，土质堤坝在溢流过程中经常会在堤顶与坡面之间的界面上发生初始破坏，因此，该区域被确定为溢流破坏的易损区，并被确定为新开发物质的覆盖区域。

根据土壤分类体系，试验所用砂为均匀级配良好的砂（SW）（见图 2）。通过使用这种易开裂的砂，生物聚合物与最脆弱的材料混合的性能表现更加明显，并加速诱导溢流决口横截面的形成。由于试验所

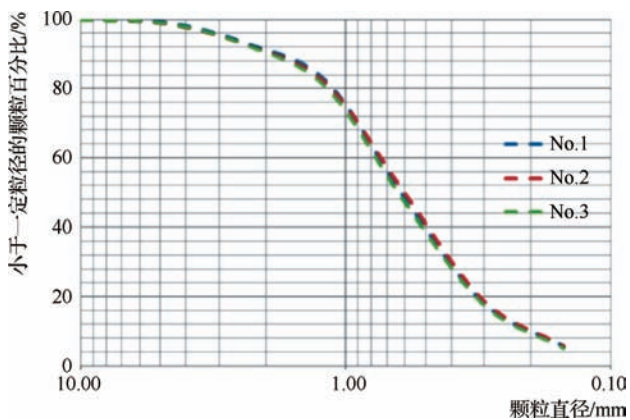


图2 粒径分布

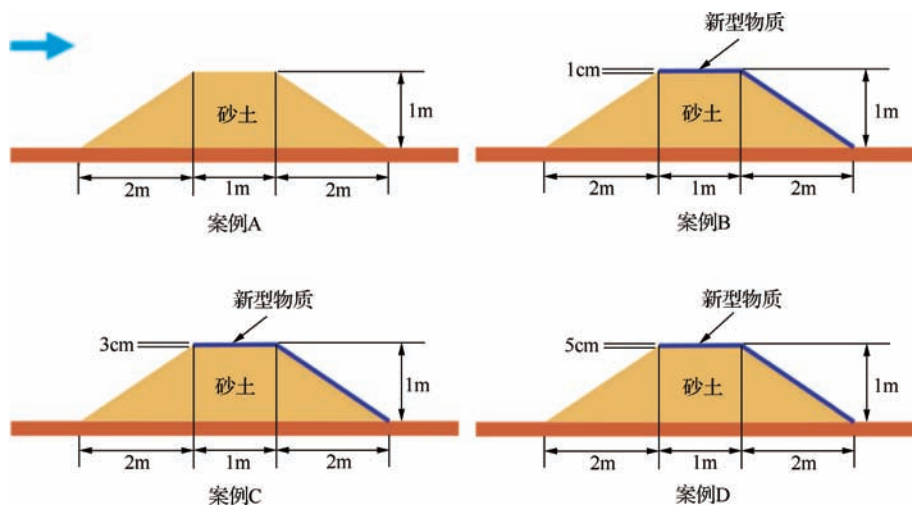


图3 试验条件

本文试验研究采用的堤身构造过程如下所述。首先,使用挖掘机 ( $0.2\text{m}^3$ ),从3m的高度抛下砂子,用于建造堤基。通过反复将20cm厚的砂土相互叠置碾压,建造堤坝。修建土堤后,通过用水稀释粉末生物聚合物制备生物聚合物溶液,然后将制备的溶液与砂土混合,然后将混合新物质涂抹在堤顶和斜坡上(见图4)。以此可比较土堤和使用新物质的拟建堤坝之间的破坏机制。

在下游通道进行试验时,一般允许流量向下游流动。但本试验在上游通道以  $3\text{m}^3/\text{s}$  的速度让流量向下游流动,然后逐渐增加位于下游端流出池的水位,使水回流,在下游通道产生溢流。这个设置是为了解决一个问题,即在通过下游河道约600m后,流量到达

用砂粒每次都有变化,因此进行了3次粒径分布试验,以验证每次试验的一致性。

本研究所用新型物质制作配比:1克生物聚合物:10克水:50克砂子。此外,通过应用不同厚度的新物质(如1cm、3cm、5cm)来验证拟议堤坝的性能(见图3)。通过改变新物质的厚度,可以量化随着时间的推移对缺口的延迟效应。

安装堤坝模型的下游端需要相当长的时间。此外,由于实际决堤淹没内陆地区并不会造成河流流量的急剧减少,因此将该条件通过引入出流池来表示,出流池可以储存比上游河道更大的流量。堤内面在水位上升过程中保持稳定,直至超过堤顶。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 新物质使用过程中堤坝的破坏过程

通过对比两种类型堤防的破坏过程,直观分析新物质的作用效果。以往的研究根据坡面溢水和破坏类型将土质堤坝破坏过程分为几个阶段。在初始阶段,堤顶发生溢流,下游边坡受到侵蚀,形成小规模的溢流通道。随着时间的推移,溢流在下游坡面形成阶梯





图4 使用生物聚合物覆盖试验堤坝过程示意图

(a) 生物聚合物和水混合；(b) 生物聚合物溶液和土壤混合；(c) ~ (e) 创建一个堤坝模型；(f) 用新物质覆盖

状水流。因此，裂缝宽度增加，溢流量增加，最终形成裂缝。

土质堤防的试验也表明，初始溢流会引起堤顶和边坡的侵蚀。即初始水流在堤防坡面上形成了一个主要的水流通道，从而导致侵蚀。水流的不断流动和流速的增大加剧了径流侵蚀，形成了沟槽侵蚀。最终，随着溢流量的增加，堤顶完全坍塌，形成深溃面，在强剪应力作用下形成最大溃口宽度。在拟采用新物质的堤防中，最初的溢流导致覆盖部分出现裂缝；随着

水渗入裂缝，导致保护层脱落或膨胀。这似乎是因为新物质没有完全固结，或者生物土壤在溢流中溶解。因此，新物质需要通过进一步的试验来改进。由于堤顶上的溢流阻力产生了强烈的垂向水流，导致坡底局部冲刷，形成垂向冲刷（见图5）。如果能同时比较两类堤防的破坏机理，就能更好地识别出两者破坏过程的差异。但由于土质堤防的突破时间比拟建堤防短得多，因此将突破过程在不考虑时间的情况下，分为不同阶段。

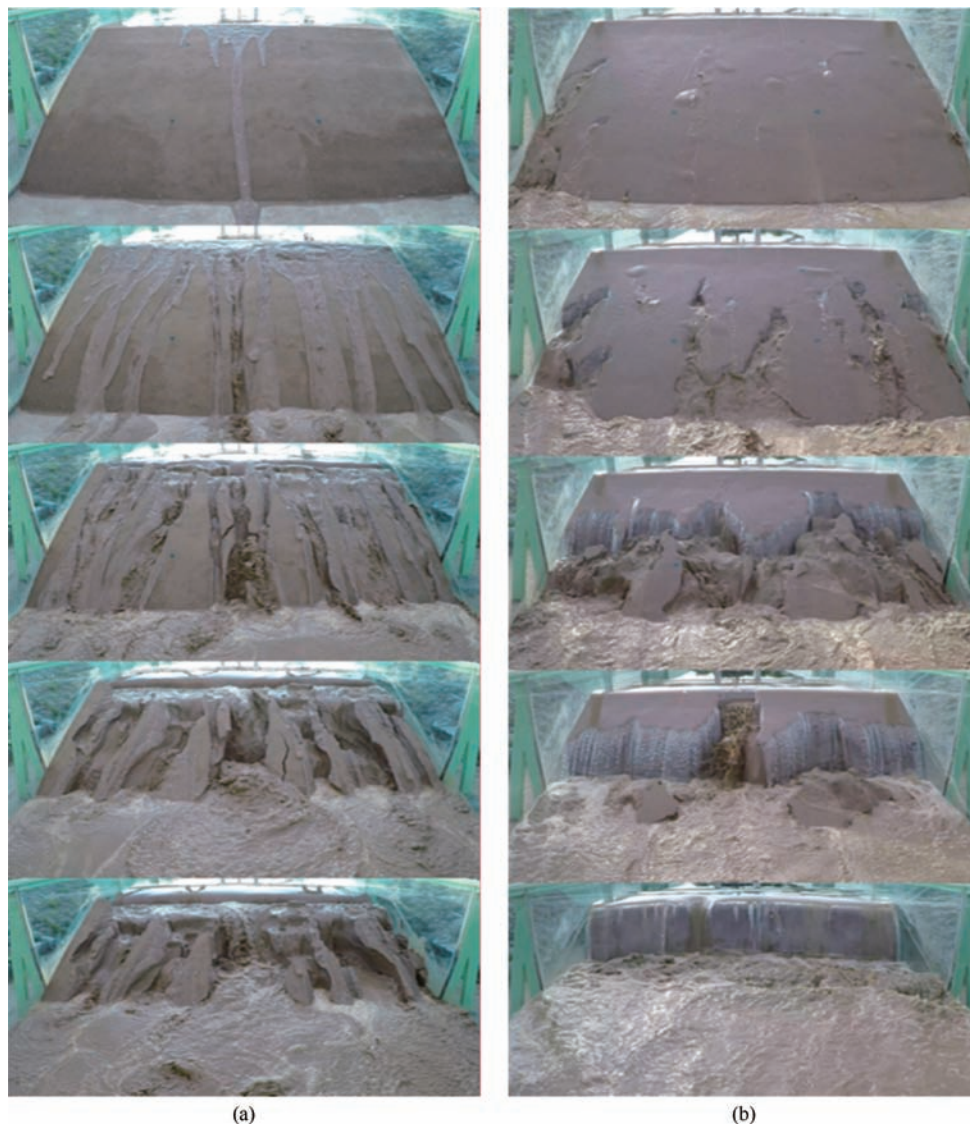


图5 普通堤坝与新物质覆盖堤坝破坏过程对比示意图  
(a) 普通土质堤坝的破坏模式；(b) 被新物质覆盖的堤坝破坏模式

采用新物质的防洪堤与土质防洪堤表现出完全不同的破坏模式。虽然径流在一定时间后增加，堤防的每个部分都被破坏，但与土质堤防不同的是，在溢流的初始阶段，没有出现任何对堤防的侵蚀，而是从堤趾开始的逐渐侵蚀。随着时间的推移，侵蚀面积有明显减少的趋势。通过施加不同厚度的新物质，观察到漫顶决口发现，主要区别仅在于破坏的体积，整个破坏模式是相似的。由于这种新物质可以通过延缓堤坝破坏来减少洪峰径流，因此它 will 有效减少低洼地区的洪水破坏或防止突然坍塌造成的二次破坏。

### 3.2 堤面破坏率的计算

对图像测量系统拍摄的试验图像进行编辑和分析，以验证随时间变化的缺口规模。由于基于图像的分析很容易产生溢出破坏引起的土壤径流的不确定性或错误计算，因此，选取了堤坝边坡破坏的横断面图像进行定量分析。为了进行定量分析，采集了堤防边坡随时间变化的图像，进行校准，然后进行数字化，以确定破坏的范围（见图6）。

基于像素分析，使用图形软件对目标区域进行研



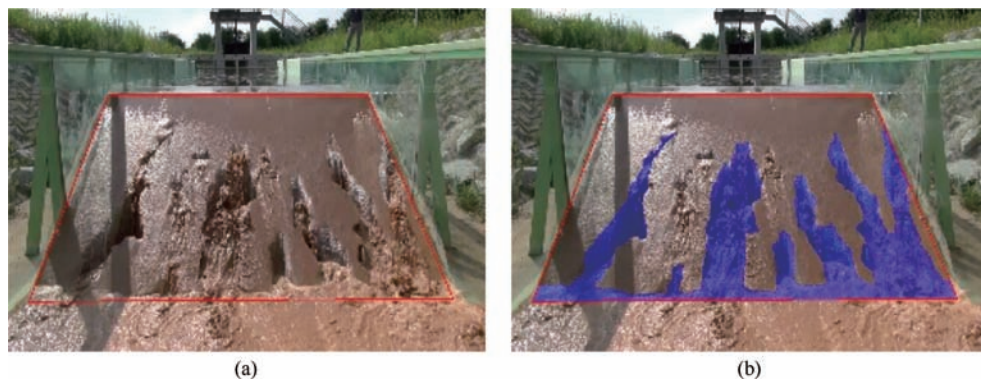


图6 数字化方法确定破坏范围示意图

(a) 图像校准; (b) 破坏范围的数字化显示

究。以此方法计算堤面破坏的规模和比率。值得注意的是,在某些试验条件下,出现过度破坏的原因是压实不均匀。为了获得稳定的结果,在每种条件下进行了两次试验。最终将像素转化为侵蚀面积作为物理单位,与堤坡相对应的像素总数为105000。当破坏开始时,每30s计算一次损失的面积。刚发生溢出时,假设破坏率为0%。当表面破坏率超过90%时,即使在相同条件下重复试验,结果也往往不一致或数据不稳

定。因此,任何超过90%的破坏率都被视为完全破坏,并被排除在分析范围之外。

至于面积随时间减少的趋势(见图7),土堤(案例1、2)在发生溢流同时,面积急剧减少。150s后,面积减少90%以上,表明完全破坏。案例3中,如果涂抹了1cm厚的新物质,则在溢出发生后,该区域保持60s。90s后,面积逐渐减小,然后急剧减小,直到150s。另一个1cm厚的新物质案例(案例4)显

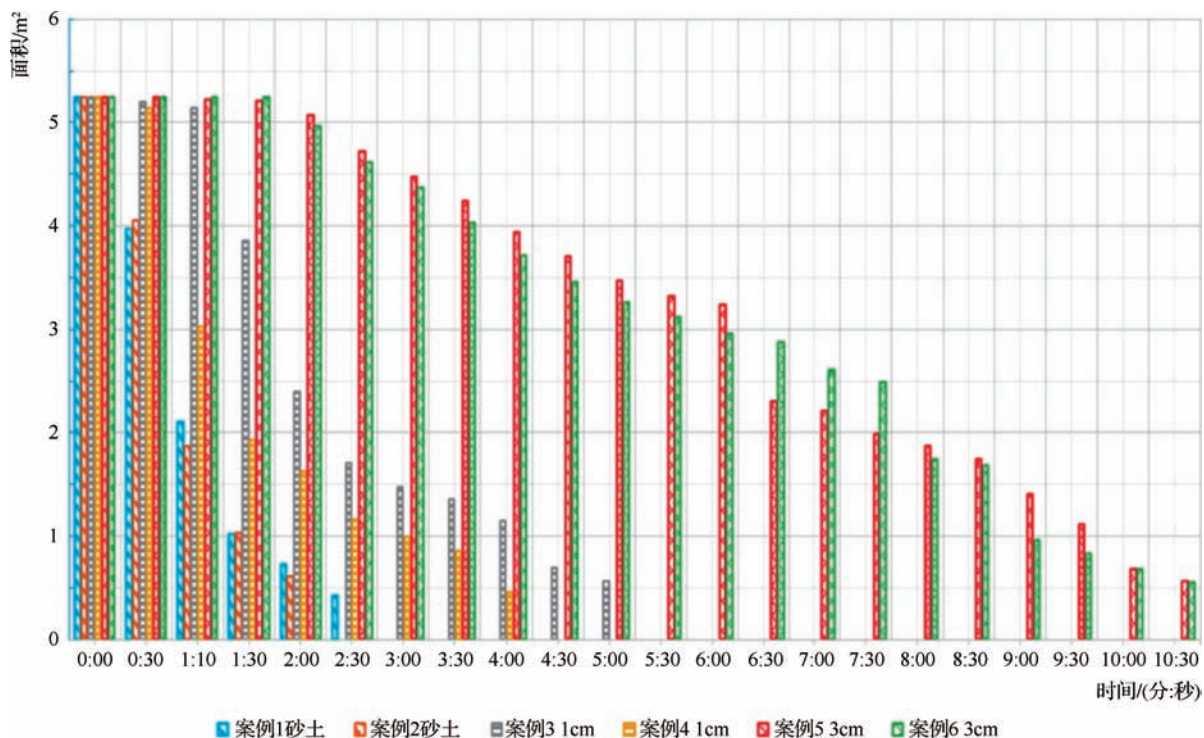


图7 试验案例的面积减少随时间推移的变化情况

示,溢流初始阶段,破坏面积减小,与案例3趋势不同。这表明,新材料制造过程中产生的裂纹百分比极大地影响了初始破裂率。随着时间的推移,误差趋于减小。与案例1~4相比,3cm厚(案例5、6)在发生溢流后的一段时间内保持相同的面积。总的来说,随着时间的推移,面积有逐渐减少的趋势。

然而,当使用5cm厚的新物质时,裂口被过度延迟,堤趾开始被溢出的水淹没。即回水效应影响了厚度为5cm的试验,无法分析堤坝的性能。因此,本案例被排除在外(见图8)。如上所述,本研究的试验

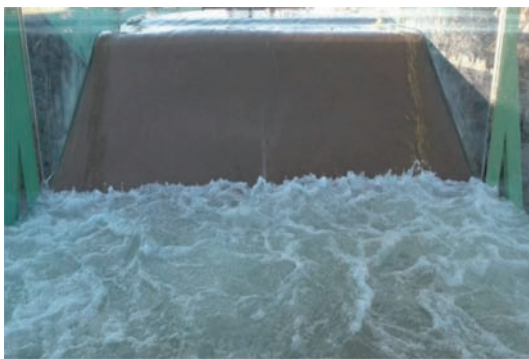


图8 新材料厚度5cm情况下的回水情况

装置反过来诱导水流从下游端流向上游端。因此,在堤坝被破坏之前,溢出的水回到了下游端。为了评估采用厚度超过5cm的新物质的堤坝的性能,需要对试验渠道进行相应修改。

图9显示了堤坝表面随时间的破坏率。由于发生溢流,土堤(案例1、2)的破坏率在30s时为23%~24%,60s时为60%~64%,90s时为80%~81%,120s及之后为86%~92%。除初始溢流阶段外,含有1cm新物质的堤坝(案例3、4)的破坏率在120s时为54%~69%,150s时为67%~78%,180s时为72%~81%,210s时为74%~84%,240s及之后为78%~91%。另一个含有3cm新物质的堤坝(案例5、6)在120s前的破坏率为5%或更低,最晚在390s时达到50%的破坏率。该堤坝在630s前逐渐破坏,之后破坏率超过90%,表明完全破坏。当使用1cm和3cm厚的新物质时,根据上述破坏率计算,总破坏时间分别为300s和630s。这些结果表明,采用新材料可以延迟2~4.2倍的土堤破坏时间。

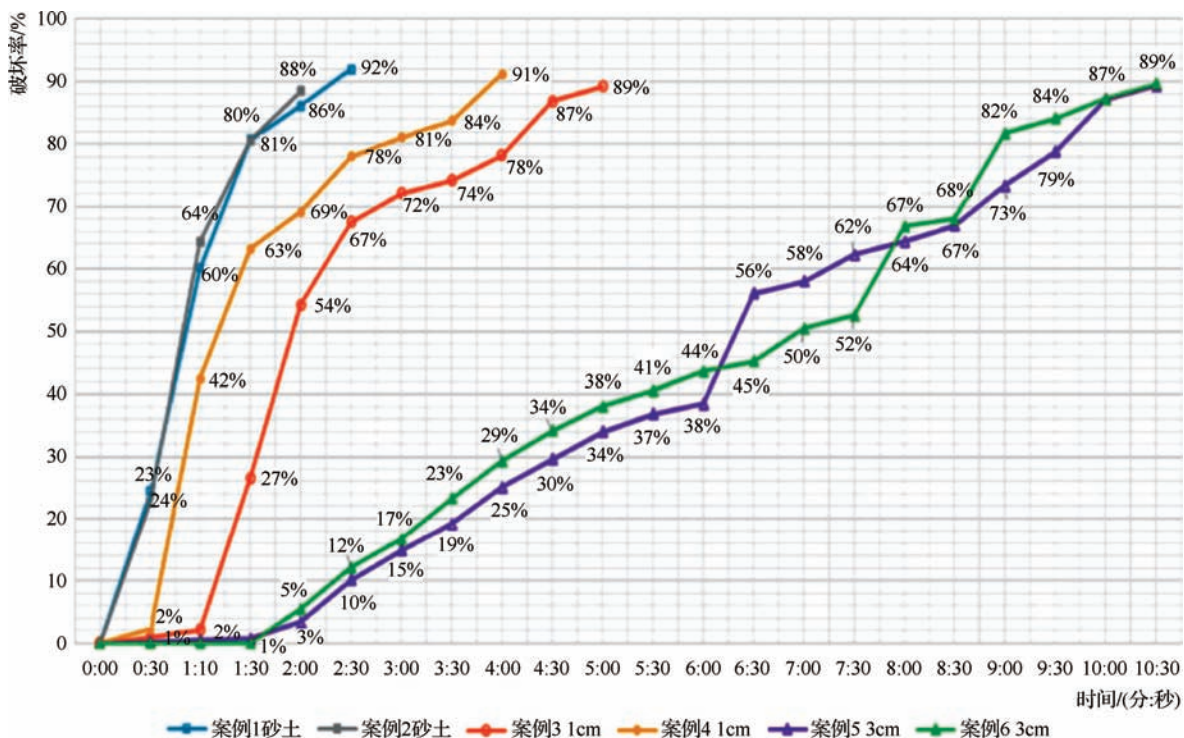


图9 试验案例随时间推移的破坏率变化



在诸如堤坝决口之类的灾难性情况下，特别强调快速的初始响应和应急恢复。本研究进行的试验表明，土堤的初始破坏发展速度惊人，而带有新物质的堤防受初始溢流的影响较小，并且在一定时间内延缓了破坏。尽管不能从根本上防止堤坝决堤造成损害，但本研究结果表明，通过适当的主动应对措施可以显著减少损害。

## 4 结 论

本研究通过建造一个中型堤防模型，进行了堤防破坏试验。使用各种成像设备对比分析溢流堤的破坏机理。此外，采用基于像素的图像分析方法计算堤防边坡上的破坏规模随时间的变化情况。通过这种方式，验证了使用新物质覆盖堤坝的性能。研究结果表明：新物质的堤坝表现出与土堤完全不同的破坏机制，土堤在堤顶和斜坡之间的界面处几乎与溢流发生时同时发生塌陷，相反，带有新物质的堤坝由于堤趾的逐渐向后侵蚀而形成了裂口，此外，当施加不同厚度的新物质后再观察溢流破裂时，则仅随着时间的推移塌陷量出现差异，整体破坏模式相似；在不同溢流条件下的破坏率方面，应用新物质时，计算总破坏时间分别为 300 和 630s，可以延缓土堤的 2~4.2 倍堤防破坏时间，尤其是新物质覆盖的堤坝受初期溢流的

影响比土堤要小得多，而且破坏被明显延缓了一段时间。

本研究尚存在一些不足有待改善，需要进一步研究修改当前的试验通道，以分析新物质厚度为 5cm 的堤坝的性能。还需要进行 PIV 分析以得出更精确的结果并验证流入速度与堤坝决口之间的相关性。此外，由于天然河流通常有植被，其堤坝的侵蚀和破裂机制可能与本研究中考虑的土堤坝有显著不同。反映这一事实的适当方法似乎对于提高研究结果可靠性是必要的。▲

## 参考文献

- [1] 邹福建,张楚,李洋洋,等.河堤与塌岸岩土工程特性与稳定性分析研究[J].水利技术监督,2020(6):304-307.
- [2] 王建林.山区河堤损坏机理研究——以云南永平银江大河为例[J].人民长江,2016(S2):68-71.
- [3] 黄野,何鹏,陈伟,等.砂石禁采下岷江金马河温江河段河堤水毁原因分析[J].人民长江,2021,52(S1):12-16.
- [4] 董柏良,夏军强,周美蓉.考虑较大边坡影响的漫顶溢流过程模拟[J].武汉大学学报(工学版),2019,52(4):290-296.
- [5] 刘昉,周世佳,戚园春,等.凌汛期堤防漫顶溃口破坏规律断面模型试验 I:黏性土堤[J].水资源与水工程学报,2021,32(4):132-141.
- [6] 张盛行,汤雷,贾宇,等.复合相变材料性能调配及在应急堵漏中的应用[J].建筑材料学报,2020,23(6):1496-1503.
- [7] (上接第 58 页)
- [8] 刘特洪.工程建设中膨胀土问题[M].北京:中国建筑工业出版社,1997.
- [9] 郑建龙,杨和平.公路膨胀土工程[M].北京:北京人民交通出版社,2009.
- [10] 赵春吉.水泥改性强膨胀土的试验及改性机理研究[D].大连:大连理工大学,2014.
- [11] 刘光彬,李敦仁,罗安民.加筋土柔性支护在膨胀土边坡支护工程中的应用及验算[J].西部交通科技,2020(9):54-57.
- [12] OKYAY U S,DIAS D. Use of lime and cement treated soils as pile supported load transfer platform[J]. Engineering geology, 2010, 114(1-2):34-44.
- [13] 陈品章,杨海浪,胡波,等.基于植被恢复的水泥改性膨胀土换填土复合改良试验研究[J].长江科学院院报,2022,39(5):112-118.
- [14] HOLTZ W G, GIBBS J J. Engineering properties of expansive clays[J]. Transactions of the American society of civil engineers, 1956, 121(1):2814.

DOI: 10.16617/j.cnki.11-5543/TK. 2022.12.11

# 水泥掺量对膨胀土抗剪强度的改性影响

孙 超

(中国水电基础局有限公司, 天津 301700)

**【摘 要】** 膨胀土由于其遇水胀缩的特性, 对建筑工程的安全性及稳定性造成威胁。目前, 采用物理、化学、生物等方法对膨胀土进行处理可以提升其强度及稳定性。文章通过选取 M32.5 级水泥, 对南水北调中线一期引江济汉工程渠道地区膨胀土样本进行改性, 将改性后的土样抗剪强度与未改性的重塑土样进行对比, 探究 M32.5 级水泥对于重塑土样的改性机理, 并为工程建设提供理论依据及应用建议。

**【关键词】** 膨胀土; 抗剪强度; 水泥掺量; 改性

中图分类号: TV42

文献标识码: B

文章编号: 1673-8241 (2022) 12-054-05

## Effect of Cement Content on Shear Strength Modification of Expansive Soil

SUN Chao

(Sinohydro Foundation Engineering Co., Ltd., Tianjin 301700, China)

**Abstract:** Expansive soil is a threat to the safety and stability of construction projects due to its expansion and contraction in water. At present, physical, the treatment of expansive soil through chemical, biological and other methods can improve its strength and stability. In this paper, M32.5 grade cement is selected to modify the expansive soil sample of Yangtze River to Hanjiang River Water Diversion Project of the Middle Route of South to North Water Diversion Project. The shear strength of the modified soil sample is compared with that of the unmodified remolded soil sample to explore the modification mechanism of M32.5 grade cement for the remolded soil sample, which can provide theoretical basis and application suggestions for project construction.

**Key words:** expansive soil; shear strength; cement content; modification

膨胀土是一种具有失水收缩、遇水膨胀等工程特性的高塑性黏土<sup>[1]</sup>, 其广泛分布于六大洲 40 多个国家和地区, 在我国 20 多个省、市、自治区如安徽省<sup>[2-3]</sup>、湖北省<sup>[4]</sup>及干旱、半干旱地区均有分布<sup>[5]</sup>。膨胀土主要由蒙脱石、高岭石和伊利石等组成, 而蒙脱石是引发膨胀土工程问题的主要成因。据 20 世纪

80 年代美国学者统计, 截至 1986 年在美国因膨胀土问题造成的损失达 70 亿美元, 大于其他自然灾害损失的总和<sup>[5]</sup>。我国从 20 世纪 50 年代修建成渝铁路开始, 膨胀土被国内学者广为研究, 其工程性质差的成因源于其强胀缩性、裂隙性和超固结性等特性。我国南水北调中线工程也涉及膨胀土地区, 其造成的建筑

收稿日期: 2022-09-21

作者简介: 孙超 (1982—), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事水利工程施工管理工作。

物、构筑物破坏类型复杂，且具有反复胀缩、强度降低特性和潜在性危险<sup>[6-7]</sup>。

## 1 膨胀土改性方法

在膨胀土地区进行工程建设时，通常采用物理、化学和生物等方法对膨胀土进行相应处理以降低或消除膨胀土的胀缩性，使处理后的土体拥有较小变形、较高强度和稳定性，以此来达到施工条件和要求。

物理方法主要有换填法、机械法、隔水法。对于工程量不大的基础工程，可采用换填法；强夯法等机械法主要通过机械夯实提升膨胀土体干密度，减少含水率来提升膨胀土强度；隔水法以设置地下连续墙或土体格栅的形式来增强土体的摩阻力和咬合力，达到抑制土体胀缩的目的<sup>[8-9]</sup>。

化学方法主要是通过掺加有机或无机化学材料，使其与土体中物质发生化学反应以减少膨胀土胀缩，常用的无机化学材料有水泥、粉煤灰、生石灰、熟石灰和水玻璃等<sup>[10]</sup>；常用的有机化学材料有丙烯酸盐等。其广泛用于铁路路基加固，加固边坡支护、桩基础支撑荷载传递平台等工程<sup>[11-12]</sup>。

常用的生物方法有土工织物改性法和植物改性法，用以达到护坡和防止滑坡的目的<sup>[13]</sup>。

## 2 材料与方法

本文中试验土样取自南水北调中线一期引江济汉工程渠道地区，其重塑土样在 25% 配水率下的基础物理特性见表 1。选取 M32.5 级水泥对重塑土样进行改性后，测量其抗剪强度并与未经改性的土样对比，探究 M32.5 级水泥对于重塑土样的改性效果及其改性机理。

表 1 原状重塑土在 25% 配水率下的基础物理性质

密度 $\rho$ / ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	液限 $\omega_L$	塑限 $\omega_P$	塑性指数 $I_P$	黏聚力 $c$ / kPa	内摩擦角 $\varphi$ / ( $^\circ$ )	性 质
1890	63.5%	20.8%	42.7	10.5	5.6	强膨胀土

试验步骤如下：首先，将原状土样放入 DHG-

9240A 型电热恒温鼓风干燥箱烘干，用粉碎机粉碎并研磨后，用筛子筛选出粒径小于等于 0.3mm 的膨胀土颗粒，分别混合占土样总质量 5%、9%、11%、13% 的 M32.5 级水泥，配成质量为 600g、25% 配水率（水与混合土粉末质量之比为 1:4）的水泥改性土样。其中，膨胀土粉末用托盘去皮称量，M32.5 级水泥用玻璃板去皮称量，配水用喷雾瓶去皮称量。在制作完样本后，立即进行直剪试验。先用凡士林涂抹环刀内壁，再用环刀取出直径 61.8mm、高 20mm 的样本，将环刀里的土样两面各放一片滤纸和一块透水石，缓慢将土样压入 ZJ 型应变控制式直剪仪的剪切盒中，随后，分别在直剪仪的砝码盘上添加相应质量的砝码，在土样上方施加大小分别为 50kPa、100kPa 和 200kPa 的垂直压力  $\sigma$ ，然后转动手轮，以 0.8mm/min 的剪切速度对土样进行直剪，观察应变圈上的百分表转动，当其出现峰值时，记录下读数  $R$ ，此时，认为土样被剪坏，但依旧进行剪切直至剪切位移达到 4mm 时停止。若剪切位移在 4mm 内未出现峰值，则剪切至剪切位移 6mm 时停止，若剪切位移在 4~6mm 间出现峰值，则记录峰值时百分表读数  $R$ ；若剪切位移在 4~6mm 间仍未出现峰值，记录下剪切位移为 6mm 时的百分表读数  $R$ 。其他平行试验的土样放入保鲜袋中密封，放入 SHBY-60B 型恒温恒湿养护机中养护，养护条件为恒温 15℃、湿度为 98%，在养护时间为 1d、3d、7d、28d 后以上述相同的试验方法剪切试样并记录数据。最后土样的剪切强度由式（1）算得，其中， $\tau_i$  为土样的抗剪强度， $K$  为应变圈系数，本文中取 1.534， $R$  为每组剪切试验百分表读数。

$$\tau_i = KR \quad (1)$$

## 3 试验结果与机理分析

### 3.1 养护时间对改性土抗剪强度的影响

图 1 展示的是 5%~13% 水泥掺量改性后的膨胀土土样在 50kPa、100kPa、200kPa 垂直压力下的抗剪强度，由图可知抗剪强度与垂直压力基本成线性关

系, 满足库仑定律。在 0d 养护时间下, 5% ~ 13% 水泥掺量的改性土的抗剪强度变化范围分别为 27.61 ~ 55.22kPa、33.75 ~ 70.59kPa、35.28 ~ 73.63kPa 和 35.28 ~ 72.10kPa。而在经过 28d 养护后, 5% ~ 13% 水泥掺量的改性土的抗剪强度变化范围分别为

98.18 ~ 187.15kPa、144.20 ~ 248.51kPa、164.14 ~ 266.92kPa 和 182.55 ~ 286.86kPa, 改性效果显著, 提升幅度约为养护前的 4 倍, 同一水泥掺量改性土的抗剪强度随着养护时间的增加而增大。

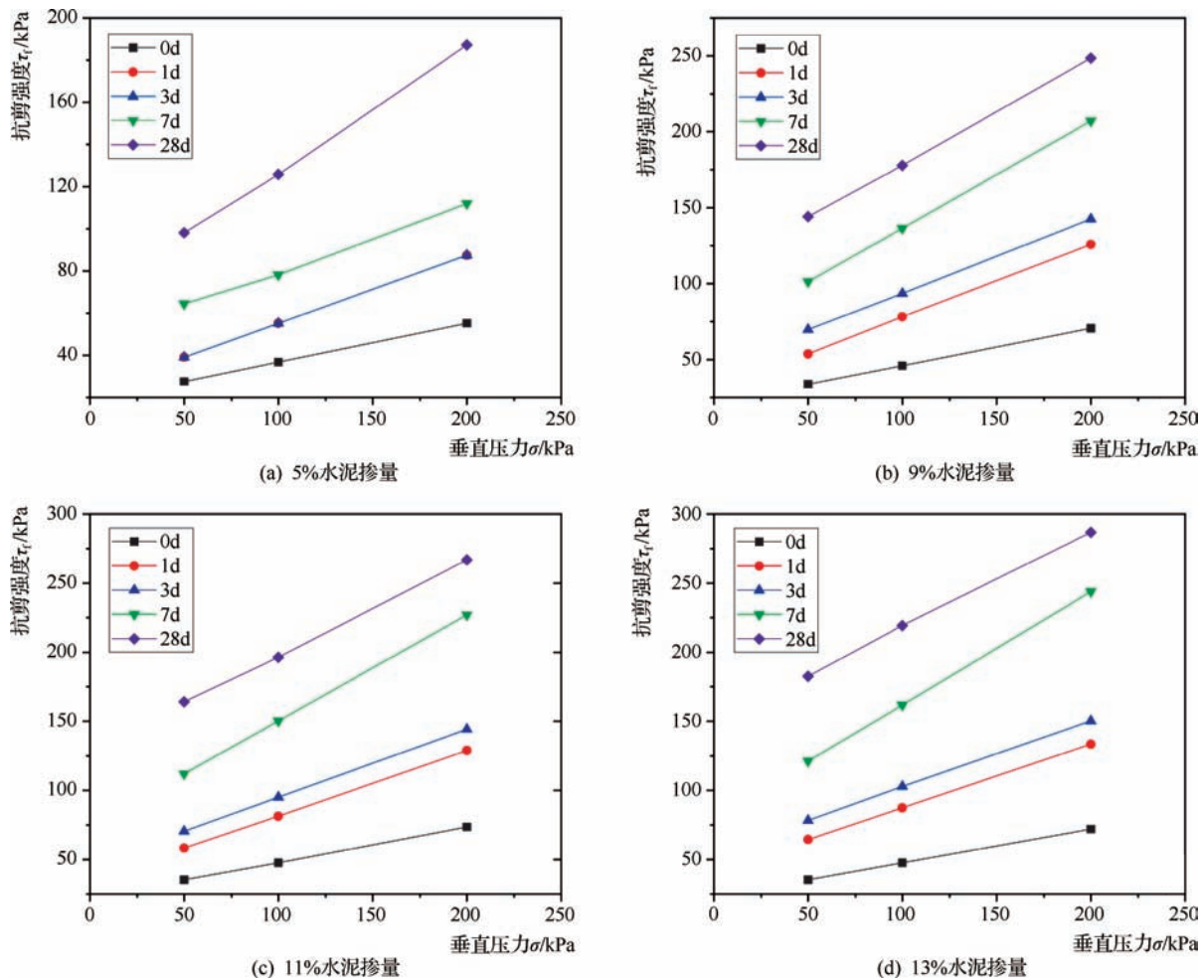


图 1 不同水泥掺量改性土在不同垂直压力下抗剪强度曲线

图 2 展示的是 5% ~ 13% 水泥掺量改性后的膨胀土土样在不同养护时间内的抗剪强度, 强度提升最快的养护时间段为 0 ~ 1d, 提升最慢的养护时间段为 7 ~ 28d, 即养护前期抗剪强度提升快, 养护后期抗剪强度提升较慢。养护 7d 后的抗剪强度已能达到养护 28d 后抗剪强度的 50% 以上, 表明水泥的改性作用主要是由于水泥的水化作用产生凝胶体, 起到连接土颗粒从而增加强度的作用。

### 3.2 水泥掺量对改性土抗剪强度的影响

图 3 为养护 28d 后不同水泥掺量改性土与未改性重塑土的抗剪强度比较, 由图 3 可知, 水泥改性土在养护 28d 后, 相同垂直压力条件下, 5% 水泥掺量改性土与未改性重塑土相比, 抗剪强度有了显著的提升; 随着掺量的增大, 水泥改性土的抗剪强度仍有提升, 但提升幅度不断减少。总体来说, 水泥掺量越大, 水泥改性土的抗剪强度越高, 相对于未改性重塑土改性效果越好。



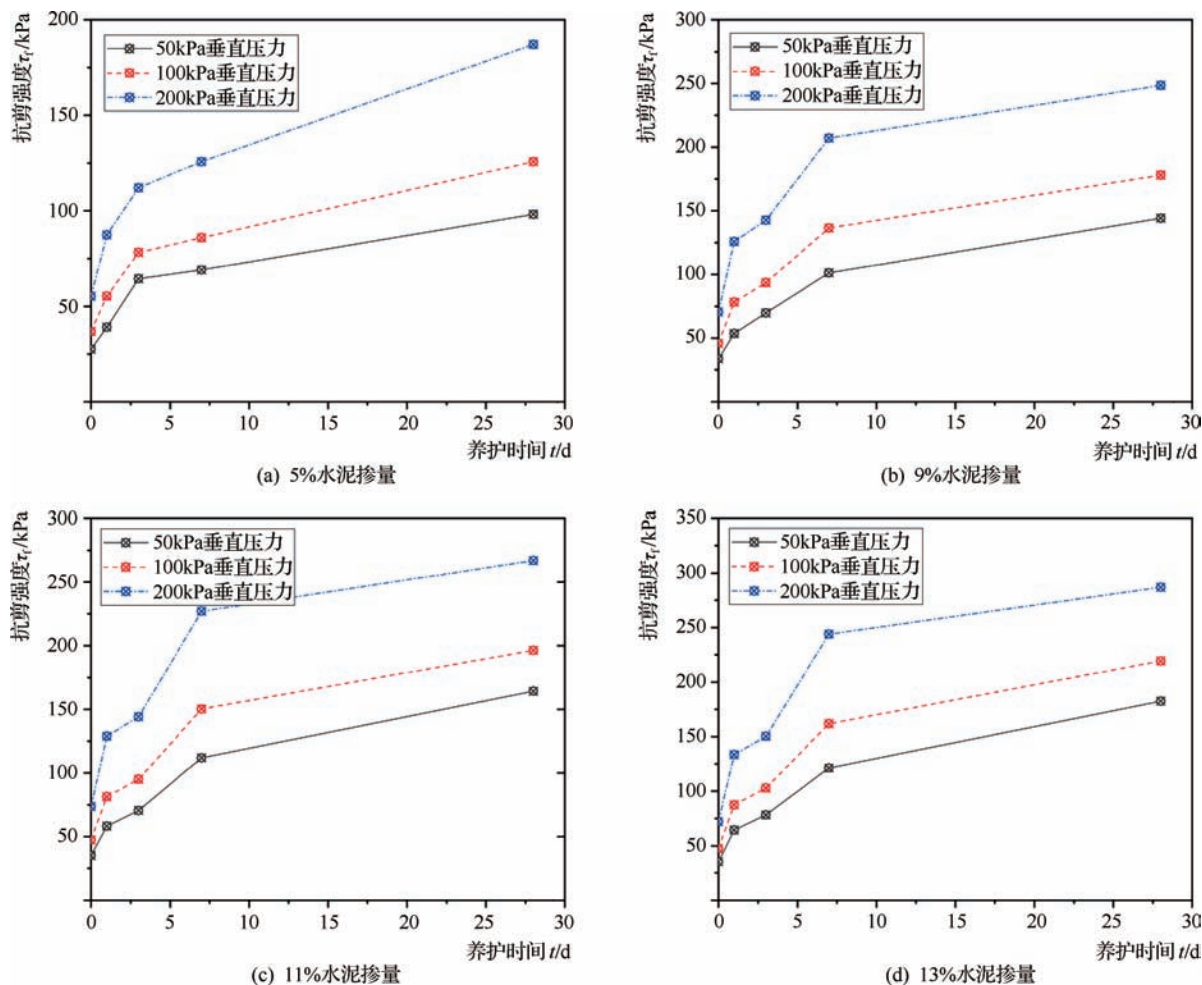


图2 不同水泥掺量改性土在不同养护时间下抗剪强度曲线

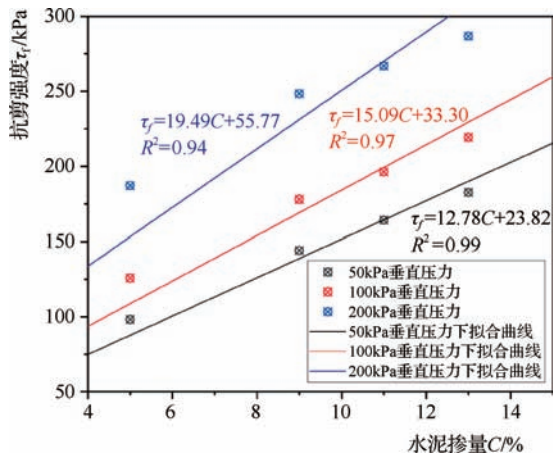


图3 养护28d后不同水泥掺量改性土与未改性重塑土抗剪强度比较

图4揭示了抗剪强度与水泥掺量的关系，相同垂直压力条件下，随着水泥掺量的增大，抗剪强度逐渐增大，成近似线性关系，根据图中数据点拟合出图中

曲线，为其他水泥掺量改性后的膨胀土提供了剪切强度的预测范围。此外，随着垂直压力的增大，曲线斜率越大，意味着在相对较高的垂直压力情况下，水泥掺量对改性膨胀土的抗剪强度影响越大。

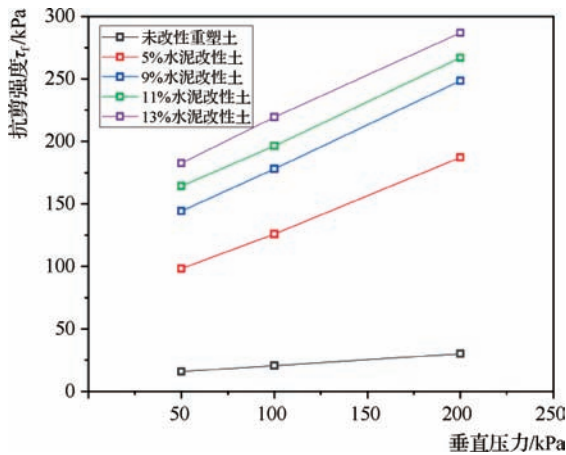


图4 抗剪强度与水泥掺量的关系

### 3.3 改性机理

应用库仑定律,即公式(2),其中 $c$ 是黏聚力, $\varphi$ 是内摩擦角,黏聚力为抗剪强度—垂直压力曲线在 $y$ 轴上的截距,内摩擦角为抗剪强度—垂直压力曲线的斜率,根据图1可计算出养护28d后的改性土样的黏聚力和内摩擦角,见表2。对比未经改性的重塑土样,黏聚力由10.5kPa提升至68.5~147.8kPa,约提升7~15倍,这是由于水泥水化作用后产生的凝胶体附着在土颗粒间,经过水泥养护后的硬化,对土颗粒产生巨大的胶结作用;此外,内摩擦角由 $5.6^\circ$ 提升至 $30.7^\circ \sim 34.8^\circ$ ,约提升6倍,一方面,是由于养护后

硬化的水泥增加了颗粒间的粗糙程度,另一方面,是由于水泥在水化过程中消耗土样中自由水及黏土颗粒中的结合水,减弱了水分在颗粒间的润滑作用。同时,测得改性后土样的塑限、液限计算得到的塑性指数,塑限由20.8%大幅提升至40.5%~43.6%,而液限由63.5%小幅下降至44.6%~57.3%,见表2,说明水泥改性主要对土样塑限影响较大;根据Holtz&Gibbs提出的膨胀土分类标准<sup>[14]</sup>,改性后的膨胀土类型为弱膨胀土,改性效果明显。

$$\tau_f = c + \sigma \tan \varphi \quad (2)$$

表2 养护28d后的水泥改性土样的基础物理性质

土 样	液限 $\omega_L$	塑限 $\omega_p$	塑性指数 $I_p$	黏聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	性 质
5%水泥改性土	57.3%	40.5%	16.8	68.5	30.7	弱膨胀土
9%水泥改性土	54.9%	43.6%	11.3	109.4	34.8	弱膨胀土
11%水泥改性土	55.5%	42.3%	13.2	129.9	34.4	弱膨胀土
13%水泥改性土	54.6%	42.7%	11.9	147.8	34.8	弱膨胀土

## 4 结 论

膨胀土由于其遇水胀缩的特性,易造成建筑工程的安全事故。本文选取南水北调中线一期引江济汉工程渠道地区的膨胀土样,通过对M32.5水泥掺量分别为5%~13%的改性土样与未经改性的重塑土样直剪试验对比发现,同一水泥掺量下的改性土其抗剪强度随着养护时间的增加而增大,养护前期抗剪强度提升快,养护后期抗剪强度提升较慢;此外,水泥掺量越大,水泥改性土的抗剪强度越高,相对于未改性重塑土改性效果越好,且垂直压力越大,水泥掺量对改性膨胀土的抗剪强度影响越大。水泥改性膨胀土的机理主要是水泥的水化作用能产生起到胶结作用的凝胶体,且该凝胶体经养护后硬化增加了土颗粒间的粗糙程度,此外,水化作用还消耗土体中自由水及黏土颗粒中的结合水,减少了水分在颗粒间起到的润滑作用,从而提升膨胀土的抗剪强度。本文为引江济汉工

程提供膨胀土改性方案可行性的理论依据,同时,具体施工过程中采用的水泥型号及掺量需综合考虑经济及环境因素进行调整。▲

### 参考文献

- [1] 鲍捷,申春妮,方祥位,等.膨胀土地基改良方法研究进展[J].粉煤灰综合利用,2019(5):98-104.
- [2] 任宇哲,孙祥,吴照学,等.基于不同含水量下膨胀土的压缩试验探究[J].南方农业,2017,11(14):114-118.
- [3] 潘国林,吴泊人,李郑.安徽省膨胀土分布及工程地质特征研究[J].地质灾害与环境保护,2012,23(2):54-59.
- [4] 邹维列,谢鹏,马其天,等.废弃轮胎橡胶颗粒改性膨胀土的试验研究[J].四川大学学报(工程科学版),2011,43(3):44-48.
- [5] 张伟利.化学法改良膨胀土的试验研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2014.
- [6] 张文峰.南水北调中线工程膨胀土渠段边坡变形研究[J].人民黄河,2019,41(7):131-135.
- [7] 程德虎,孙一清,杜智浩.南水北调中线工程渠堤变形安全监控指标研究[J].水利信息化,2019(2):19-23.

(下转第53页)

## 经验交流

关于四色安全风险空间分布图绘制的  
思考与实践王海燕<sup>1</sup> 白建峰<sup>2</sup>

(1. 中国水利工程协会, 北京 100055;  
2. 河南省水利水电工程质量安全中心, 河南 郑州 450003)

**【摘要】** 四色安全风险空间分布图具有以多种方式表达工程现场安全风险的独特功能, 但如何绘制分布图既没有相关标准, 也没有文件规定, 在具体的实施过程中, 存在绘制要素不统一、风险因素显示不全面等问题。文章从“为什么”绘制四色安全风险空间分布图入手, 从“如何绘”“绘什么”“怎么绘”三个方面进行分析, 并结合具体工程进行实践, 对规范绘制四色安全风险空间分布图有很强的借鉴意义。

**【关键词】** 安全风险; 空间分布图; 绘制

中图分类号: X922.2

文献标识码: B

文章编号: 1673-8241(2022)12-059-05

Thought and Practice on the Drawing of Four-Color Spatial Distribution  
Map for Safety RiskWANG Haiyan<sup>1</sup>, BAI Jianfeng<sup>2</sup>

(1. China Water Engineering Association, Beijing 100055, China;  
2. Henan Provincial Water Conservancy and Hydropower Engineering Quality and Safety Center,  
Zhengzhou 450003, China)

**Abstract:** Four-color spatial distribution map for safety risk has the unique function of expressing the safety risk of the project site in a variety of ways. However, there is neither relevant standard nor documented regulation on how to draw the distribution map. In the specific implementation process, there are some problems such as non-uniform drawing elements and incomplete display of risk factors. This paper starts with the “why” of drawing the four-color safety risk spatial distribution map, analyzes it from the three aspects of “how to draw”, “what to draw” and “how to draw”. Combined with the practice of specific projects, it has strong reference significance for the standard drawing of the four-color safety risk spatial distribution map.

**Key words:** safety risk; spatial distribution map; drawing

收稿日期: 2022-05-29

作者简介: 王海燕(1983—), 女, 本科, 工程师, 主要从事水利行业教育培训工作。

《水利部关于开展水利安全风险分级管控的指导意见》(水监督〔2018〕323号)中,明确提出水利生产经营单位要依据危险源类型和风险等级绘制“红橙黄蓝”四色安全风险空间分布图。但如何绘制分布图既没有相关标准,也没有文件规定,在具体的实施过程中,存在绘制要素不统一,风险因素显示不全面等问题,达不到安全风险空间分布“一目了然”的效果。

存在以上问题,客观上是分布图缺乏绘制标准,但主观上还是对绘制分布图的目的和意义认识不到位。因此,必须要弄清楚“为什么”要绘制分布图,围绕“为什么”,开展“如何绘”“绘什么”“怎么绘”的研究。

## 1 弄清“为什么”,把握好绘制的目的和意义

开展水利安全风险分级管控的总体目标是提升水利安全风险防控能力,科学防范和有效遏制水利生产安全事故<sup>[1]</sup>,所以任何一项具体工作都必须服务于这一总体目标。分布图具有以多种方式表达工程现场安全风险的独特功能,把工程现场危险源、应急资源、事故影响区域及重要目标的位置标示在图中,“作战态势”一目了然,“主攻”“助攻”方向明确,“排兵布阵”运筹帷幄。

一是有利于对风险的总体把控,提升水利安全风险防控能力。在危险源辨识和风险评价的基础上,通过分布图的形式,把文字、表格的内容以可视化和立体化的形式表现出来,形象更加直观。针对安全风险的特点,通过隔离危险源、采取技术手段、实施个体防护、设置监控设施和安全警示标志等措施,达到监测、规避、降低和控制风险的目的<sup>[1]</sup>,实现分级管控。

二是有利于提高事故预防的能力,科学防范水利生产安全事故。风险是客观存在的,但风险又是可以预防的。分布图在展现安全风险的同时,对每一类型、每一岗位不同等级的安全风险管控措施从组织、制度、技术、应急等方面进行明确,可以提高不同岗位人员的安全预防意识和能力,确保安全风险始终处于受控状态。

三是有利于强化应急管理,有效遏制水利生产安全事故影响。分布图既是安全风险“展示图”,也是生产安全事故应急管理的“作战图”。通过分布图,实现及时准确协调各项应急资源,指挥应急行动,提升应急反应能力和效率。

## 2 围绕“如何绘”,把握好绘制的原则和要求

一幅标准的分布图,可以同时用于风险告知、安全交底、应急培训。在绘制分布图时,要坚持标准统一、职责匹配、便于管理、动态调整、统筹高效、信息扩容原则。

一是标准统一原则,与现行规范要求相一致。绘制分布图要参考《水利水电工程制图标准》《疏散平面图设计原理与要求》等规定,规范有关图形、图例使用,增强分布图的通用性。

二是职责匹配原则,与各参建单位职能相一致。项目法人围绕重大风险和属于重大危险源的一般风险绘制分布图,勘察单位依据地质勘察活动和勘察结果绘制分布图,设计单位对涉及施工安全的重点部位、“四新”工程及设计活动绘制分布图;监理单位根据所监理对象按区域、部位或作业单元绘制分布图,重点监控较大及以上安全风险;施工单位根据作业内容、作业环境、作业特点分区域、部位或作业单元全面绘制分布图,实现分级管控。

三是便于管理原则,与工程施工活动和布局相结合。工程现场一般是多作业面、多类型项目同时施工,安全风险所涉及的人员也不尽相同,有必要以区、段、面为基础划分作业单元。作业单元划分时宜根据主要建筑物、部位(场所),或应急资源分布,做到大小适中、便于分类、易于管理,实现人员、设备、风险的权、责、利一致性。

四是动态调整原则,与施工组织设计相协调。施工组织设计作为指导施工全过程各项活动的纲领性文件,是施工技术与施工项目管理有机结合的产物,决定着工程现场风险的数量和等级,必须根据施工的不同



节点和不同状态,及时动态开展危险源辨识和风险评价,调整分布图。

五是统筹高效原则,与应急管理相结合。安全风险管控既是风险管控,也是应急管理。分布图中有必要纳入工程周边的政府、公安、消防等应急力量,医院、学校、工厂、人员聚焦地等重要目标,以及道路、河流、疏散逃生紧急集合点等主要信息,做到日常防控与应急救援相结合。

六是信息扩容原则,与信息化智能化相衔接。信息化智能化已经是当前工程建设管理的有力辅助手段,也是智慧水利的重要组成部分。将分布图中有关信息尽可能全面地纳入信息化智能化管理平台,可以实时动态调整相关数据,也可以最大程度满足相关人员对分布图的识别需求。

### 3 着眼“绘什么”,明确绘制的基本要素和内容

图的特点是:有一定的数学法则,有特定的图式符号,有规定的着色,有规定的文字数字注记,经过一定的制图综合。分布图是图的一种,具有图的属性。

一是图幅。图纸的幅面宜采用基本幅面,也可采用加长幅面<sup>[2]</sup>。分布图宜在施工总平面图、枢纽总平面图、建筑物布置图基础上绘制,尽量保持图幅一致。

二是方向图标。宜位于图的右上角,一定要和图形位置保持一致。

三是图中图形与实物相应要素的线性尺寸之比。其大小取决于图示的详细程度以及预期设置位置,大型设施不应小于 1:250,中小型设施不应小于 1:100<sup>[3]</sup>,确保满足绘制需要。宜位于分布图的正下方或右下角,表示形式可以是线段式、文字式或数字式。

四是图例。图例有地图语言的功能,是地图上各种符号和颜色所代表内容与指标的说明,用图时作为必不可少的阅读指南,应符合完备性和一致性的原则。一般位于分布图的中下部。

五是标注和文字说明。通过标注和文字说明,减

少图纸的读取难度。对重大危险源和较大风险的防控措施进行标注,一般通过引线从图标中引出。

六是作业单元内危险源与风险清单。可以位于分布图的左上角,视图幅大小可将重大风险和较大风险清单放入分布图中,保持清单与分布图内容一致。

七是图名、会签栏。既能便于图纸管理,同时强化绘制责任。一般位于分布图的右下角(见图1)。

图 名			
绘制单位			
负责人		制图人	
审核人		辨识人	
比例尺		绘制时间	

图1 会签栏样式

八是应急资源调查。应急资源相对分散,受图幅限制,不能按比例绘制,宜以略图的形式进行绘制,主要明确与工程建设现场的位置关系、距离关系、联系方式等。

## 4 立足“怎么绘”,规范绘制的步骤与实践

### 4.1 绘制分布图步骤

绘制分布图宜在危险源辨识与风险评价之后进行,其主要步骤见图2。

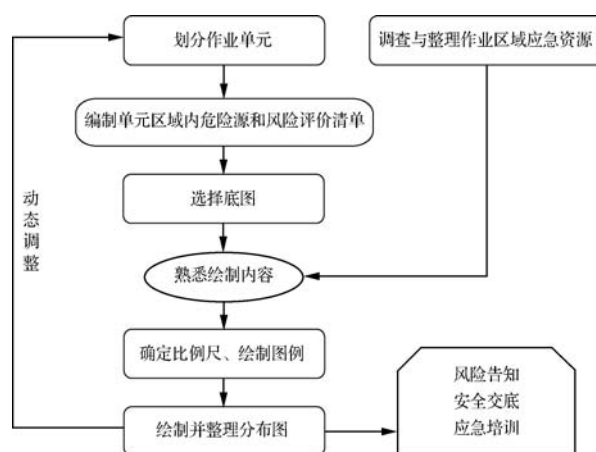


图2 绘图步骤

### 4.2 绘制分布图的实践

以河南省贾鲁河综合治理工程为例,结合施工5标危险源辨识和风险评价结果绘制分布图。

a. 划分作业单元。施工 5 标主要建设内容为：新建堤防 26.3km、加固堤防 73.1km、河道疏浚 50.4km、护岸 10.6km、护坡 28.6km，排水闸 33 座、拦河闸 1 座、分洪堰 1 座、桥梁 10 座，涉及郑州市中牟县和开封市尉氏县、祥符区，工程共分 17 个作业区域，见图 3。

b. 编制单元区域内危险源和风险评价清单，同时开展单元区域内应急资源调查。

贾鲁河综合治理工程后曹闸危险源辨识与风险分级管控清单见图 4。



图 3 作业单元划分示例

危险源辨识										安全风险评价				管控要求				
序号	危险源类别	危险源项目	危险源名称	危险源部位	特性描述	判定方法	级别	主要危害因素或危险事件	可能导致事故类型	作业条件风险性评价 (D=L×E×C)				风险等级	标示颜色	管控措施（包括工程技术措施、管理措施、个体防护措施、应急处置措施）	管控主体	
										L	E	C	D				管控层级	责任部门（人）
1	施工作业类	降排水工程	降水井	主体建筑物周边	共38眼降水井，深50m，直径0.5m	LEC	一般	防护缺失	淹溺	3	6	3	54	低风险	编制可行性方案，严格按照方案开展降排水作业；降排水期间加强观测，加强安全教育培训；设置警戒范围和警示标牌	公司级	业主/监理/项目经理	
2	机械设备类	钢筋工程	钢筋吊装	钢筋加工、左右岸翼墙及闸室段、消力池段	采用塔式起重机，单件起吊重量在10kN以下的起重吊装作业；交叉作业	LEC	一般	设备、配件缺陷；安全装置失效；违反“十不吊”；人员在吊装物正下方作业、走动或停留	高处坠落、机械伤害	6	6	7	252	较大风险				
3	施工作业类	钢筋工程	钢筋焊接	钢筋加工、左右岸翼墙及闸室段、消力池段	焊接防护不到位	LEC	一般	焊条高温伤人，乙炔瓶、氧气瓶未按规定摆放，现场堆积易燃易爆物品、焊接强光伤眼	火灾、灼烫、爆炸	3	6	7	126	一般风险	氧气瓶、乙炔瓶满足安全距离，设置乙炔瓶防倾倒及防晒措施；配备防护眼镜等防护用品；现场配备消防设施	岗位级/班组级	班组长	
4	施工作业类	模板工程	模板安装	左右岸翼墙及闸室段	搭设高度5m及以上	直接判定	重大	操作平台不合格、临边防护不到位；拼装墙模板时，下层模板未固定牢固即安装上层模板；高处作业未正确佩戴安全带	物体打击、高处坠落	直接判定				重大风险				
																严格按照专项施工方案施工；指定责任人进行安全管控，加强施工人员安全教育，加强安全检查；张贴警示标志；正确佩戴劳动防护用品	班组级/劳务公司	劳务公司负责人

图 4 危险源辨识与风险管控清单绘制示例

单元区域内应急资源调查结果见图 5。

c. 底图选择。结合设计图纸绘制情况，选取“后曹闸总平面布置图”为底图（见图 6）。

序号	名称	电话	距离	到达现场时间
1	尉氏县人民政府	27993141	27.5km	33min
2	尉氏县公安局	110	29km	37min
3	尉氏县消防大队	119	30km	38min
4	尉氏县人民医院	120	30km	36min

图 5 应急资源调查结果绘制示例

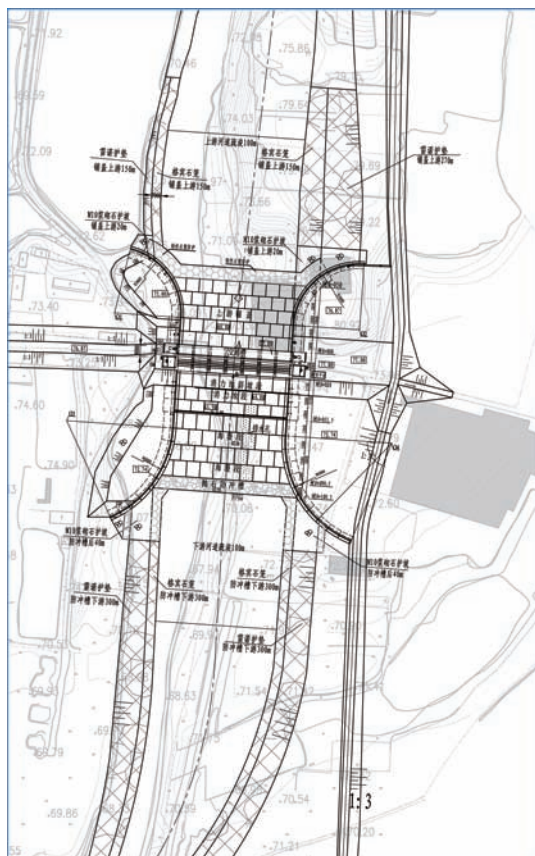


图6 底图选择示例

d. 熟悉绘制内容。后曹闸共划分 10 个作业区

域，分别是钢筋加工厂（2 个）、木模加工厂、闸室段、消力池段、海漫段、上游左翼连接段、上游右翼连接段、下游左翼连接段、下游右翼连接段。根据危险源和风险评价清单，后曹闸共有危险源 15 个，其中重大危险源 3 个，一般危险源 12 个；重大风险 3 个，较大风险 1 个，一般风险 6 个，低风险 5 个。重大风险、较大风险主要集中在钢筋加工区域、木模加工区域、钢筋吊装区域和闸室段模板安装作业区域。

e. 确定比例尺、图例。根据后曹闸总平面布置图绘制原则，比例尺选取 1:500；根据危险源辨识和应急资源调查结果，图例共设 10 种，见图 7。



图7 图例绘制示例

f. 绘制、整理。分步骤将绘制分布图中的各个要素，并进行整理，添加信息化识别码（二维码或条形码），形成后曹闸安全风险四色分布图（见图 8）。

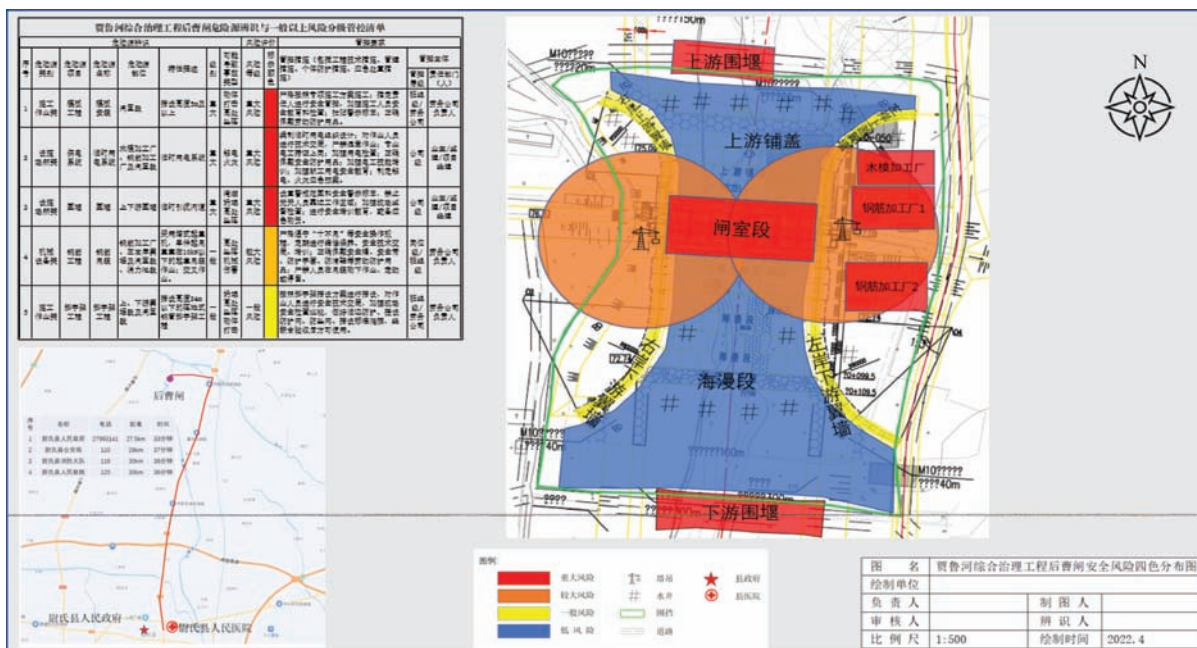


图8 安全风险四色分布图示例



DOI: 10.16617/j.cnki.11-5543/TK.2022.12.13

# 生产安全事故应急预案编制和演练中 常见问题辨析

马建新 王 伟 赵松鹏

(广西右江水利开发有限责任公司, 广西 南宁 530029)

**【摘 要】** 文章针对水利生产经营单位在生产安全事故应急预案编制和演练工作中存在的一些常见问题, 依据有关法律法规和标准规范, 从厘清概念出发, 阐述了应急预案的种类、内容和演练注意事项。文中内容可供水利生产经营单位在实际工作中参考应用。

**【关键词】** 生产安全事故; 预案编制; 应急演练; 问题辨析

中图分类号: TV513

文献标识码: B

文章编号: 1673-8241 (2022) 12-064-04

## Analysis of Common Problems in the Preparation and Drill of Emergency Plan for Production Safety Accidents

MA Jianxin, WANG Wei, ZHAO Songpeng

(Guangxi Youjiang Water Resources Development Co., Ltd., Nanning 530029, China)

**Abstract:** Aiming at some common problems in the preparation and drill of emergency plan for production safety accidents in water conservancy production and operation units, this paper expounds the types and contents of the emergency plan as well as the precautions of drill according to relevant laws and regulations, standards and norms, starting from clarifying the concept. The content of this paper can be used for reference in the actual work of water conservancy production and management units.

**Key words:** production safety accident; preparation of plan; emergency drill; problem analysis

2016年,水利部出台《安全生产事故综合应急预案(试行)》,2021年进行了修订,要求各流域机构和省级水行政主管部门进一步加强水利安全生产事故应急预案编制、修订和演练,全面做好应急管理工作。在水利系统基层实际工作中,经常会遇到有关概

念不清晰、应急预案种类未掌握、应急预案编制不完善、应急演练不到位等问题。笔者结合近期有关流域机构直属单位应急预案审查和水利部水利安全生产标准化应急演练成果评审工作,将这些常见问题作以剖析,以助力推动相关工作。

收稿日期: 2022-10-26

作者简介: 马建新(1972—),男,硕士,高级工程师,主要从事水利工程建设与管理、安全生产管理工作。



## 1 厘清有关概念

a. 关于生产安全事故。按照《突发事件应对法》，突发事件分为四类，分别是自然灾害、事故灾难、公共卫生事件和社会安全事件。事故灾难就是常讲的生产安全事故。我们经常发现，有的单位将防洪、防疫、反恐等内容纳入到生产安全事故应急预案，这是违背生产安全事故定义的。生产安全事故是在生产经营过程中突然发生的，是可以通过防范手段避免发生但没能避免的，所以它是责任事故。自然灾害是由于超标准洪水、地质灾害、暴风等不可抗因素造成的，属于非责任灾难。公共卫生事件是公共环境卫生紧密相关的人为事件，如松花江油气泄漏、新冠疫情非法传播等。社会安全事件属治安事件，例如恐怖主义事件就是典型的社会安全事件。以上三类事件不应纳入生产安全事故范畴。生产安全事故应急预案应单列。需要说明的是，生产安全事故，意思是在生产过程中发生的安全事故，一般不写为安全生产事故，因为安全生产是目标，若安全生产时仍发生事故有些矛盾。但在有其他词语一起组成词组时，有时也不予区分。

b. 关于防汛抢险的性质。有人认为防汛抢险是处置生产安全事故，管涌、散浸处理是生产安全事故应急处置。水利部水利安全生产标准化应急演练上报成果共有 585 项，其中防汛抢险占 20%，黄委所属单位犹多，从侧面印证了这个看法具有普遍性。其实这是一种误解。在超标准洪水下的防汛抢险是应对自然灾害。在标准洪水下发生溃坝、决口属于生产安全事故，因其是应该防住而没防住的。如果讲管涌、散浸处理是生产安全事故应急处置，那么前提应是标准洪水下发生了生产安全事故，应是溃坝、决口的大事件。管涌、散浸等虽然危险且急迫，但它仍属于正常的运维工作。

c. 关于自然灾害引发的生产安全事故。这个概念中既含有自然灾害，又含有生产安全事故。举例来

说，超标准洪水发生的溃坝、决口，是不是自然灾害引发的生产安全事故？从上面分析我们知道，超标准洪水是自然灾害，在此条件下发生的事件不是生产安全事故。那么什么是自然灾害引发的生产安全事故呢？这里同样有一个可防而未防或未防住的条件。生产安全事故一定是人为因素，且存在于生产经营过程中。例如，2009 年 7 月 11 日，湖南浏阳市杨家滩水电站股东邓幼兴组织包括自己在内的五人抢修小组，对电站引水隧洞距进口约 350m 处的塌方进行修复。下午四时半至五时半左右，水库流域出现短时强降雨，水库水位迅速上涨并淹没了引水隧洞。由于没有做好应对暴雨的准备，也没有安排专人监护，在隧洞内的 5 名施工人员对外面突然变化的恶劣天气毫不知情，未及时逃离施工现场，全部淹溺死亡。此事故被收入水利生产安全事故案例集。这是一起典型的因自然灾害引发的生产安全事故，要件齐全，一是防范不力，二是在生产过程中发生。近年来，山东曾经发生因暴雨导致河堤决口引发的煤矿被淹事故，此事故也被定性为因自然灾害引发的生产安全事故。

## 2 识别有关制度标准

以下法律法规制度和标准规范供参考：

《中华人民共和国安全生产法》（中华人民共和国主席令第 88 号）（2021 年版）；《中华人民共和国突发事件应对法》（中华人民共和国主席令〔2007〕第 69 号）；《生产安全事故应急条例》（国务院令第 708 号）；《生产安全事故应急预案管理办法》（应急管理部令第 2 号）；《突发事件应急预案管理办法》（国办发〔2013〕101 号）；《水利部生产安全事故应急预案》（水监督〔2021〕391 号）；《生产经营单位生产安全事故应急预案编制导则》（GB/T 29639—2020）；《生产经营单位生产安全事故应急预案评审指南（试行）》（安监总厅应急〔2009〕73 号）；关于印发《生产经营单位生产安全事故应急预案备案申请表》和《生产经营单位生产安全事故应急预案备

案登记表》的通知（应指信息〔2009〕6号）；《安全生产应急管理人员培训大纲及考核规范》（AQ/T 9008—2012）；《国务院应急管理办公室关于印发突发事件应急演练指南的通知》（应急办函〔2009〕62号）；《生产安全事故应急演练基本规范》（AQ/T 9007—2019）；《生产安全事故应急演练评估规范》（AQ/T 9009—2015）；《生产经营单位生产安全事故应急预案评估指南》（AQ/T 9011—2019）；《安全与韧性应急管理能力评估指南》（GB/T 40151—2021）；《应急物资分类及编码》（GB/T 38565—2020）。

其中，《生产安全事故应急条例》（国务院令708号）规定了职责和要求，《生产经营单位生产安全事故应急预案编制导则》（GB/T 29639—2020）是处在核心位置的标准，开展应急演练需根据《生产安全事故应急演练基本规范》（AQ/T 9007—2019），应注意后者是修订过的。

### 3 掌握应急预案种类

《水利部生产安全事故应急预案》（水监督〔2021〕391号）是国家水行政主管部门的综合应急预案。目前，行政主管部门应急预案如何编制是没有规范的。当前，一些水利企事业单位按照《水利部生产安全事故应急预案》来编制单位综合应急预案是有问题的。实际上，更多的非行政职能单位应按《生产经营单位生产安全事故应急预案编制导则》（GB/T 29639—2020）来编制。

《生产经营单位生产安全事故应急预案编制导则》（GB/T 29639—2020）规定，生产经营单位应急预案分为综合应急预案、专项应急预案和现场处置方案。三者的区别和联系如下：

综合应急预案是综合性工作方案，是总纲；专项应急预案是为应对某一种或者多种类型生产安全事故，或者针对重要生产设施、重大危险源、重大活动防止生产安全事故而制定的专项工作方案；现场处置方案是根据不同生产安全事故类型，针对具体场所、

装置或者设施所制定的应急处置措施。事故风险单一、危险性小的生产经营单位，可只编制现场处置方案。

2018年，水利部印发《水利部关于开展水利安全风险分级管控的指导意见》（水监督〔2018〕323号），要求对风险等级为重大的一般危险源和重大危险源实现“一案一案”。这里的“案”，是指专项应急预案，按照《生产经营单位生产安全事故应急预案编制导则》（GB/T 29639—2020）对专项应急预案的要求编写，主要包括适用范围、组织机构职责、响应启动、处置措施和应急保障。专项应急预案与综合应急预案中的应急组织机构、响应程序相近时，可不编写专项应急预案，并入综合应急预案。

现场处置方案是具体方案，内容包括事故风险描述、应急工作职责、应急处置和注意事项，体现自救互救、信息报告和先期处置的特点，比如说有何危害，往哪里逃离，采用什么方式救火等。

### 4 解决应急预案编制常见问题

《生产经营单位生产安全事故应急预案评审指南（试行）》中提出，应急预案应当具备7个性质，即合法性、完整性、针对性、实用性、科学性、操作性和衔接性。分析《生产经营单位生产安全事故应急预案编制导则》（GB/T 29639—2020），一个好的应急预案应是风险评估和应急资源调查全面、预案体系设计有针对性、应急组织体系合理、应急响应程序和措施科学、应急保障措施可行、预案衔接性好的预案。结合笔者的水利生产经营单位评审经验，梳理出如下常见问题：

a. 单位性质为水利生产经营单位（如某水文水资源局等），但未按照或参照《生产经营单位生产安全事故应急预案编制导则》（GB/T 29639—2020）编写预案，内容与导则出入较大：风险评估中未对工作人员的工作区域、地点进行统计分析；应急资源调查不足、不具体；预案体系设计简单，未列出专项应急

预案、现场处置方案体系表；应急组织体系中，应急领导小组主要职责未体现预防为主、平战结合原则；领导小组未下设功能组；响应启动中未明确指挥交接关系；应急指挥部及指挥部办公室未在预案中明确，而是临时成立；预案衔接性不够，未与地方政府或上级单位预案相衔接。

b. 在综合应急预案编写时对信息报告与预警和响应启动之间的关系理解有误。接信息报告后应组织处置与研判，够条件的启动响应（主要是明确响应启动的程序和方式），不够条件的启动预警，并根据事态发展进行调整。预警不是响应启动的前置环节，可理解为并列的或时机未到。对于信息报告中的信息接报，应按要求处理信息以及向上级和外部单位等报告等，不应仅仅上报内部领导。

c. 综合应急预案中的应急响应级别不是内部规定。实际上，应急响应的级别以属地政府决策宣布为准。因此，在应急处置中表述如“当事态出现急剧恶化的特殊险情并超出响应级别，无法得到有效控制时，及时报请上级和属地应急救援指挥机构启动更高级别的应急响应实施救援”是无效的。应明确以政府应急响应级别为准，配合做好应急处置工作。

d. 表述自然灾害事故专项应急预案，这个提法是错误的，应为自然灾害引发的生产安全事故专项应急预案。

上面列出的问题比较常见，应引起高度关注，在编制和修订应急预案时加以更正。

## 5 做好应急演练工作

我们经常会遇到应急预案似乎编制较完善，但是真正遇到事故时不知所措的情况。因此，平时的应急演练工作尤为重要。

《国务院应急管理办公室关于印发突发事件应急

演练指南的通知》讲明了应急演练的目的是检验预案、完善准备、锻炼队伍、磨合机制。《生产安全事故应急演练基本规范》《生产安全事故应急演练评估规范》《生产经营单位生产安全事故应急预案评估指南》等规范对如何开展应急演练和如何评估应急演练作了详细的规定，可供实施时参考。

这里仅从制度层面，提示各单位应急演练的次数。《生产安全事故应急条例》规定：“县级以上地方人民政府以及县级以上人民政府负有安全生产监督管理职责的部门，乡、镇人民政府以及街道办事处等地方人民政府派出机关，应当至少每2年组织1次生产安全事故应急救援预案演练。”

《生产安全事故应急预案管理办法》第三十三条规定：“生产经营单位应当制定本单位的应急预案演练计划，根据本单位的事故风险特点，每年至少组织一次综合应急预案演练或者专项应急预案演练，每半年至少组织一次现场处置方案演练。”“易燃易爆物品、危险化学品等危险物品的生产、经营、储存、运输单位，矿山、金属冶炼、城市轨道交通运营、建筑施工单位，以及宾馆、商场、娱乐场所、旅游景区等人员密集场所经营单位，应当至少每半年组织一次生产安全事故应急预案演练，并将演练情况报送所在地县级以上地方人民政府负有安全生产监督管理职责的部门。”“县级以上地方人民政府负有安全生产监督管理职责的部门应当对本行政区域内前款规定的重点生产经营单位的生产安全事故应急救援预案演练进行抽查；发现演练不符合要求的，应当责令限期改正。”

水利生产经营单位应当不断加深对应急管理工作的认识和理解，持续完善预案体系，依法开展应急演练，做到遇事不乱、处置有序，减少损失。▲

## 《中国水能及电气化》2022 年总目次

## 2022 年第 1 期

## 本期特稿

- 1 在 2022 年全国水利工作会议上的讲话  
水利部党组书记、部长 李国英

## 建设管理

- 14 水利企业发展低碳经济的战略管理创新探讨 吴则稳

## 施工技术

- 17 抛石平堵龙口合龙施工关键技术分析 黄 伟  
21 聚能水压爆破技术在渝黔高速扩能项目应用分析 崔长贵

## 水电站技术

- 27 双江口水电站地下厂房岩锚梁高地应力处理与施工  
李培丰 刘宁博 郑锐浩

## 工程设计

- 34 深大基坑地下水控制设计合理性分析 蔡东明  
40 阿克苏水库 35kV 变电站电气一次设计分析 许 笛

## 经验交流

- 43 南水北调长沟泵站盘柜及线缆整理探索与实践 彭 坤 杜 威 许 桃  
49 基于抽水蓄能多重价值的储能市场盈利模式分析 张柏林 崔 剑 吴国栋 李福利  
55 浅析生态治河新技术在丰台河西河道的应用 韩 伟 杨通信  
61 永定河涿州廊坊段生态补水水量分析 张 钊 杨瑞坤 孙 博  
65 核磁共振技术在水利行业的应用前景展望

## 水利大讲堂

- 70 水利工程项目划分术语及定义

## 2022 年第 2 期

## 本期特稿

- 1 2022 年水资源管理工作要点

## 建设管理

- 2 浅谈 GIS 信息技术在农村小型水利工程建管中应注意的问题 程会娟 张恒瑞 刘社教  
6 海外风电项目 EPC 报价风险分析 胡 萍 华志强  
9 浅析“四不两直”方式在水利工程建设监督检查中的工作程序 李增明

## 施工技术

- 12 山区特长富水隧道防水治水施工技术 庄炳鑫  
19 碾压混凝土坝体强渗漏灌浆处理关键技术 周尚玉 汤国辉

## 水电站技术

- 24 小水电微网控制器研发与应用 陈志峰 沈 娜 张紫凡  
29 ENT-16H 高油压调浆装置在前进水电站中的应用 谢 勇

## 工程设计

- 33 北塔山风景区 100MW 风电项目电气设计 甘天文  
37 CNCCBIM OPENROADS 在辽干防洪提升堤防工程三维设计里的应用 胡荣欣

## 科学研究

- 41 碳化对沿海水闸工程的影响及长期服役性能研究 商志清 陆风华 周阜军  
45 防腐阻锈和防腐涂料技术在甘肃省昌马大型灌区改造项目中的研究与应用 吴学广  
50 花坝水库坝基开挖岩体质量超声波检测分析 宰维东 孟祥利 白 恺

## 经验交流

- 55 塔里木河荒漠化地区水化学特性及其对胡杨林生长的影响 王梦如  
59 田头寨水库大坝坝基地质条件探查及其防渗处理 赵 静 郑培溪  
65 五里坡土石坝薄防渗墙组合防渗技术应用 张 琪 侯超新 赵晓天

## 水利大讲堂

- 69 我国七大水系

## 2022 年第 3 期

## 本期特稿

- 1 2022 年农村水利水电工作要点

## 施工技术

- 4 基于 3D 扫描技术的混凝土表面磨损测量 李博涵  
10 引洮供水二期工程总干渠 23 号隧洞施工方案研究 刘峻嘉 吴建东

## 水电站技术

- 15 水电站边坡稳定性及桩基托梁结构优化分析 郭 翔 李安琪 徐 剑  
21 集控小水电站智能合闸研究

## 工程设计

- 25 PKPM 在水利工程框架结构设计中的应用 糜凯华 於文欢 毕树根  
32 活动坝水电站增效扩容改造设计方案探讨 张 健 张 岩

## 科学研究

- 36 水泥基材料重碳酸型腐蚀机理试验研究 潘义为 杨 林  
42 密云水库调蓄工程多级泵站峰谷运行情况研究 王鑫鑫 郝鸿晨 褚霄杨  
46 增量配电网发展现状综述及发展趋势研究 韩 刚 周昭志 郝楠楠  
51 新疆和田地区水安全保障布局研究 马苏文  
56 基于监测数据的顶山输水隧洞工程运行性态分析 王庆勇 段颖骥 魏 波

## 经验交流

- 61 大型潜水电流泵维修养护方案探讨 李 毅 邹 鑫 黄国生  
65 河口地区规划新区水安全保障存在的主要问题及对策初探 和宛琳

## 水利大讲堂

- 70 水电站供水系统的分类和作用

## 2022 年第 4 期

## 本期特稿

- 1 水利部运行管理司负责同志解读《关于推进水利工程标准化管理的指导意见》

## 运行管理

- 5 水库（水闸）工程运行危险源辨识与风险评价的应用方法与技术 龙 艺 张元军 胡兴富  
10 提升水闸自动化监控系统本质安全水平的途径 李 胜  
14 基于漳泽水库渗流观测资料的大坝运行状况评价 宋 倩

## 施工技术

- 20 超深基坑圆形结构钢模板施工技术 朱 威  
24 崩解岩保护层精准开挖施工技术 洪后兵 朱海亚  
27 北辰特大桥 72 号墩巨型双臂钢围堰深水施工技术研究 朱传奇



## 水电站技术

- 34 基于水电机组盘车的摆度测量及调整系统研究  
钟象新 乔志远 谭小平

## 科学研究

- 38 柔性喷层在锚喷支护输水隧洞工程中的应用研究 李淑贤  
42 水电站河道冲刷破坏水下多波束测深检测分析 华朝锋  
48 不同工况下库区大型岩质滑坡稳定性分析  
倪明 保守林 郝超  
54 南水北调工程安全监测自动化系统人工比测方法研究  
边超 王璐璐  
58 小水电站生态流量泄放对发电影响分析及补偿机制探讨  
何先进 邵晓辉

## 经验交流

- 62 对国家标准 GB/T 50082—2009 抗硫酸盐侵蚀试验方法的探讨  
潘义为 李守通 张振洲  
66 BIM 技术在建筑电气设计中的应用分析 徐寒电

## 水利大讲堂

- 69 堤防工程作业要求大全

## 2022 年第 5 期

## 施工技术

- 1 输元河黑臭水体河段河道清淤处理方案分析 何先进  
6 基于 BIM 的水利隧道综合施工数字化建造技术 张瑞申  
12 永圣渡槽组合止水安装施工工法研究  
张红霞 刘剑 陈崇德  
17 丙烯酸盐灌注与表面聚脲封堵工艺在南水北调工程中的应用  
杨林 刘存辉 闫翠秋

## 科学研究

- 21 密云水库调蓄工程泵站技术供水系统改造研究  
王鑫鑫 王超飞 褚霄杨  
25 牛都水电站狭窄河谷拱坝泄洪消能建筑体型优化试验研究  
申洪波  
32 铜川市水库清淤扩容技术可行性研究浅析 由灿 鄧登成  
37 引绰济辽工程平原区土壤对 PCCP 管道腐蚀性评价研究  
于明鑫 武学毅 邵杨  
43 多水库条件下中泥河设计洪水组合分析 陈玮 李凯

## 运行管理

- 50 比例式减压阀在山区农村供水中的有效应用 王旭峰  
53 云计算 SaaS 模式在安全监测平台建设中的应用探索  
边超 贺虎 易广军  
59 仕阳水库电站升级改造后管理人员“四个转变”岗位创新成效分析  
王德明 李召阳

## 经验交流

- 62 “纳米胶”在黄坛口电站闸墩防碳化处理中的应用  
据海荣 朱银秋 李彦波  
67 聚羧酸高性能减水剂中氯离子含量测定方法对比分析 张玉东

## 2022 年第 6 期

## 本期特稿

- 1 水利工程标准化管理评价办法

## 水电站技术与研究

- 3 乌江渡水电站多波束联合水下机器人无损检测分析 华朝锋  
8 垣曲抽水蓄能电站碱性骨料料源比选的研究 付斌 景鹏云  
15 临泽县水电站增效扩容改造技术研究 李开月  
20 关于雁栖泵站主电机启动过程中电压暂降情况分析 陈永波

## 施工技术

- 26 袖阀管注浆法在杂填土地层基础加固中的应用  
罗跃文 高春羽 高春雷

- 31 沙沟水库丙乳砂浆加固技术要点初探 郝恩烽  
34 基于自平衡法的红河水渡槽桩基竖向抗压静载监测研究  
王建锋

- 40 两河口水电站雾化区边坡综合治理措施 刘玉兴

## 科学研究

- 45 混凝土中骨料碱性抑制效能试验研究 潘义为 徐爽  
49 水利堤防工程安全预防体系模型的建立和应用  
陈钟 周星宇 陆泳君

## 运行管理

- 56 山美电站实行“无人值守”前期准备工作分析 陈晓明  
59 右安门橡胶坝坝袋检测与安全评价 桂彬 李萌 乌溪

## 经验交流

- 64 水资源精细化管理对策及技术思路 李国强  
67 内河航道下穿管线普查方法可行性分析 张旭

## 2022 年第 7 期

## 水电站技术与研究

- 1 严寒区水电站混凝土拱坝渗流初蓄—运行期监测成果分析  
李秀文 赵向波 王建  
7 布料机与皮带机在电站进水口混凝土施工中的应用  
李培丰 赵斌  
12 淮安抽水一站供水系统改造分析 武春辉 朱淮明 仲子夜

## 施工技术

- 15 南水北调中线工程白河倒虹吸防洪加固工程分期围堰施工方案和降排水设计实践 向德林 瞿行亮  
21 海塘堤脚除险加固施工技术研究 宫宝军 詹杨杰  
26 TRD 工法在洞庭湖区堤防工程中的适用性研究  
宾斌 王导勇 冯志兵  
34 喀斯特地区旋挖钻孔桩施工技术和质量控制 刘信芳

## 科学与研究

- 39 富水水库大坝变形监测与安全性分析  
张峰 付洁 陈国元  
47 防渗墙补强加固技术在赵山渡引水工程的应用  
张伟 李渭清 刘孔英  
52 自动化系统在北运河甘棠船闸建设工程中的应用  
要倩雅 姚永宽 隗强

## 建设与管理

- 60 浅析基于价值导向的玉龙水电站建设期资金管理 王辨喜

## 水利大讲堂

- 67 水利通信工程项目划分与示例

## 2022 年第 8 期

## 本期特稿

- 1 水利部修订印发《水利标准化工作管理办法》

## 科学研究

- 6 交流特高压油浸式套管电容介损测量方法 张泽宇  
11 后湖排水站 110kV 变电站轴流风机控制系统升级改造研究  
付强  
15 三浙高速灵卢段山体滑坡稳定性评价及治理措施研究 袁安森  
20 杭州八堡泵站工程软岩地基嵌岩桩入岩判定的研究与实践  
刘倩 李健民 许明显  
24 双层地质结构堤基对堤防崩岸的影响分析 赵道双 叶根苗  
30 隧洞超前地质预报实施模式探讨 李俊伟

## 施工技术

- 34 浅谈水利隧洞倒虹吸衔接段开挖方法 温正策 张友录  
41 大体积混凝土结构温控防裂技术研究与应用 宫宝军 华建飞  
46 夯扩挤密碎石桩在排涝泵站地基处理中的应用  
赵亚涛 蒋真真 王潇

## 建设与管理

- 51 山东省重点水利工程建设质量与安全监督检查政府购买服务工作实践 刘淑萍 田志芳 张斌  
55 基于双重预防体系建设的宁波市水利工程安全生产信息化研究 贺立霞 毛凯兵 徐燕  
60 南水北调中线工程现地管理中安全风险辨识及管控实践 向德林 瞿行亮

## 质量管理 QC 小组活动专题

- 65 提高混凝土灌溉渠道施工一次验收合格率 宫晓东 胡光敏 刘建伟

## 简 讯

- 70 水利部召开水利基础设施建设进展和成效新闻发布会

## 2022 年第 9 期

## 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

- 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

## 2022 年第 10 期

## 水电站技术与研究

- 1 水电站混流式机组随动自调整主轴密封应用研究 黄万虎 沈顺云 张续光

## 施工技术

- 5 大型泵站主机组垂直同心测量新技术研发 江如春 庄伟栋 邱晓侨  
10 辽西北供水二期工程柴河供水施工三标 1-9 号支洞控制段地面塌陷处理 刘 欢  
16 绳索取芯技术在活动性断裂带中的应用研究 李鹏伟

## 科学研究

- 22 三相短路电流计算程序在水利工程中的应用 薛 媛  
27 白莲崖大坝渗透压力监测分析 李君廷  
36 采用透水排桩对河道影响的数值模拟分析 刘恒博  
44 浅谈大型分洪工程 EPC 总承包优势 项宏敏 张友录  
47 东庄水利枢纽工程智慧工地建设探析 王 普

## 工程设计

- 52 水库闸门泄洪远程控制系统设计 郎 涛

- 58 大口径顶管穿越不明地质高速公路的设计探究 张新宇

## 经验交流

- 62 风力发电基础冬季全过程温度控制 张 庚 郭延芳  
68 浅谈水利水电工程最高投标限价编制的重点及方法 王勤学 李卓玉

## 2022 年第 11 期

## 施工技术

- 1 高地下水渠段增设排水系统在南水北调中线工程中的应用 向德林  
6 非典型曲面竖井贯流泵进出水流道新型施工技术研发 周阜军 商志清 何 琴  
13 BIM 技术在沙河水库除险加固工程中的应用 陈小云  
22 工作井内衬混凝土模板工程施工技术研究 马天彪

## 科学研究

- 29 浅析龚嘴水电厂机组、主变及线路电压互感器技改选型与配置 周 翔  
34 软土、淤泥、塘处理技术研究与应用 陈佳培 任 磊 何 倩  
40 小型水库雨水工情标准化自动测报系统研发与实践 丁言梅 赖冬英 宋 锤  
49 高安水库溢洪道场地软弱土体固化改良设计方案试验研究 邹福华  
56 水工隧洞交叉洞段布置及其施工控制探析 许方安 王丽丽 陈国勋

## 水电站技术与研究

- 61 巴塘水电站大坝堆石料碾压试验成果研究 冯加栋

## 经验交流

- 67 采购招标过程中评审基准价的选择和适用性分析 徐 丰

## 2022 年第 12 期

## 水电站技术与研究

- 1 水电站下泄流量的测算方法选择研究 欧传奇 赵 越 楚士冀  
7 水电站大坝智能安防管控平台设计及分析 曾作朋  
11 水电站一体化排水系统研究与实践 黄万虎 沈顺云 刘开泰

## 施工技术

- 15 深埋长隧洞不良地质塌方段衬砌跟进开挖同时施工技术 杨井国 张维欢  
20 WPU 灌浆技术在新河闸工程裂缝处理中的应用 文永林 边 蕾 赵亚涛  
24 BIM 技术在地铁车站结构设计中的应用分析 赵凌霄  
28 深基坑降水施工技术及时应急处置 郝中州 苏茂荣 陈志军

## 科学研究

- 33 大藤峡水利枢纽工程筑岛水下爆破方案设计与应用 陈佳培 任 磊 何 倩  
41 水下帷幕灌浆水面作业平台设计与应用研究 胡小梅 程国栋 陈崇德  
46 生物聚合物加筋土堤坝稳定性评估的实验研究 刘景青 李 蔚  
54 水泥掺量对膨胀土抗剪强度的改性影响 孙 超

## 经验交流

- 59 关于四色安全风险空间分布图绘制的思考与实践 王海燕 白建峰  
64 生产安全事故应急预案编制和演练中常见问题辨析 马建新 王 伟 赵松鹏  
68 《中国水能及电气化》2022 年总目次